# 科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

（1993 年创刊 · 旬刊）

2026 年 9 月 第 26 期（总第 651 期）

**主管**：云南省科学技术协会

**主办**：云南奥秘画报社有限公司



**编辑委员会**：（按姓氏笔画为序）

马成勋　卢　骏　刘　杨　李　鹏

杨　璐　张　乐　陈贵楚　陈　洋

莫德姣　夏文龙　韩梦泽　蔡　鹏

**总编**：万江心

**编辑部主任**：张琳玲

**编辑**：周　罂　官慧琪



**出版**：云南奥秘画报社有限公司

**地址**：云南省昆明市护国路 26 号

**邮编**：650021

**编辑部电话**：0871-64113353　64102865

**电子邮箱**：khgsblzz@163.com

**网址**：http://www.khbl.net

**国际标准连续出版物号**：ISSN 2097-3365

**国内统一连续出版物号**：CN 53-1103/N

**印刷单位**：云南金伦云印实业股份有限公司

**发行单位**：中国邮政集团有限公司云南省分公司

**邮发代号**：64-72

**出版日期**：2026 年 9 月 15 日

**定价**：人民币 15 元



**版权声明**：

稿件凡经本刊采用，如作者无版权特殊声明，即视作该文署名作者同意将该文章著作权中的汇编权、印刷版和电子版（包括光盘版和网络版等）的复制权、发行权、翻译权、信息网络传播权的专有使用权授予《科海故事博览》编辑部，同时授权《科海故事博览》编辑部独家代理许可第三方使用上述权利。未经本刊许可，任何单位或个人不得再授权他人以任何形式汇编、转载、出版该文章的任何部分。


# 目录 Contents

## 科技博览


001　市政道路路基工程施工工艺分析 …… 乙从彦

004　深海平台机电设备腐蚀防护技术优化 …… 孙　臣

007　复杂地质条件下岩土工程勘察方法的优化分析 …… 苏东钰

010　水利水电施工过程中边坡开挖支护技术的应用探究 …… 张　萌

013　重载高速路段 SMA 改性沥青路面压实工艺优化及质量管控 …… 王家鹏

016　分布式光伏接入对配电网电能质量的影响及优化策略研究 …… 王鸿洋


## 智能科技


019　数控加工技术助力机械制造精度提升研究 …… 吴洪汝，吴洪昌

022　充换电一体站配电系统智能运维技术研究 …… 胡闪伞，李　明，徐　婷，徐永辉

025　智能化技术在配网急抢修管理中的应用与实践 …… 奇少华，白建平

028　人工智能在机械制造及其自动化中的应用研究 …… 张勃晟，吴晓梅，苏长磊，孙路广

031　人工智能在高速公路机电系统维护维修中的应用 …… 李建奚

034　数字技术赋能建筑工程技术升级的创新模式探析 …… 李国磊，朱　涛

037　建筑深基坑工程施工变形监测与安全预警模式分析 …… 李　欢


## 应用技术


040　公路填筑路基施工技术要点探究 …… 王海青

# 目录 Contents

043 市政道路软基处理施工技术应用要点 ..... 赵绍云
046 道路桥梁现场施工技术与应用对策研究 ..... 黄厚超
049 基于预应力技术的高速公路桥梁施工研究 ..... 蒋小波
052 喷锚加固技术在道路边坡工程施工中的应用 ..... 程　城
055 模块化施工技术在市政路桥快速施工中的应用 ..... 蔡　庆
058 高填方公路路基沉降控制施工技术及优化方式 ..... 晋潇圣
061 山区公路工程大型机械设备安全管控与现场调度优化 ..... 王　有

## 科创产业

064 数字孪生技术在黄河工程管理中的应用探索 ..... 李生宇，高　颖
067 智慧工地技术在建筑工程施工管理中的应用探索 ..... 代汉田
070 机电智能巡检系统在高速公路机电管理中的应用 ..... 张鹏程
073 “双碳”驱动下纯电机械在路桥施工中的应用效益分析 ..... 易　硕
076 电力市场化改革下营业电费回收风险识别与防控体系构建 ..... 王菊荷，朱永峰，师浩琼
079 节能降排型智能热风拉幅定型机总体设计及关键技术分析 ..... 李家全
082 输送带纵向撕裂实时检测系统的研究与应用——以华能福州电厂 C9EF 输煤带为例 ..... 徐令博，陈珊峰，姜亚波

## 技术管理

085 配网工程施工质量管控策略研究 ..... 樊沁和，李重阳
088 液压千斤顶焊接结构加工变形控制技术 ..... 何勇明
091 新形势下建筑工程现场管理提升路径研究 ..... 漆学发
094 水利工程施工质量管理与技术保障体系探讨 ..... 徐　路，李春娇，王　郡
097 建筑工程施工中混凝土裂缝修复技术要点探讨 ..... 丁　飞，孙华磊，王　静，刁权宗
100 高速公路桥梁桩基施工安全管理与废水处理技术 ..... 袁倩茹
103 市政蒸汽管道安装全流程施工技术与质量管控策略 ..... 朱建峰

## 科学论坛

106 公路桥梁病害预防性养护技术探析 ..... 刘　刚
109 温拌超薄磨耗层在公路养护中的应用 ..... 张如斌
112 公路沥青路面预防性养护技术应用分析 ..... 扎西本
115 微表处技术在公路预防性养护施工中的应用 ..... 王双得
118 液压千斤顶缸体数控加工工艺及夹具设计 ..... 程宝祥
121 水电站汛期水位精准调控与风险规避路径探索 ..... 芦金鑫
124 地下空间建筑火灾烟气控制与排烟系统优化分析 ..... 曲　涛

# 市政道路路基工程施工工艺分析

乙从彦

（安徽南黎建设工程有限公司，安徽 淮北 235000）

**摘 要** 为解决日益凸显的市政道路路基施工痛点，规避传统施工工艺与现代化工程质量要求脱节问题，全方位提升路基工程施工质效，本文系统总结了市政道路路基工程施工核心要求，进一步明确现代化路基施工工艺优化的核心方向，并结合工程案例的施工实践与检测数据，深入探究适配多元复杂工况的路基施工工艺优化路径，以期为市政道路路基施工工艺提升提供可借鉴的实践样本。

**关键词** 市政道路；路基工程施工；承载能力；路基开挖；路基填筑

**中图分类号**：U416.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.001

## 0 引言

市政道路关系到城市运转效率与整体市容形象，路基作为支撑道路结构的“地下基石”，其施工工艺水平决定了道路的使用性能与服役年限。当前城市化进程持续提速，市政路基施工面临的约束条件也愈发复杂。在地下管线交错、软基分布不均、周边敏感区域管控要求严格等多重现实因素叠加下，工程落地的技术管控难度正不断攀升。因此，要切实保障市政道路路基的成品质量，从源头规避后期沉降、开裂等常见病害，就必须以筑牢全流程施工质量防线为核心主线，对路基工程施工工艺开展系统性优化研究。

## 1 市政道路路基工程施工核心要求

明确的核心要求是施工规范落地执行的必要前提。结合当前服役需要，市政道路路基施工需严格贯彻因地制宜、全程管控原则，确保交付工程质量达标[1]。市政道路路基工程施工核心要求集中体现在以下方面：

其一，承载能力达标。无论是路基顶面弯沉值，抑或是压实度均需与标准一致（详情见表 1），确保能长期承载高负荷车辆与环境荷载。

表 1 市政道路路基施工核心指标对照表

| 指标类型 | 路床顶面以下深度 | 质量控制标准 |
|---|---|---|
| 压实度 | 0 mm～800 mm | ≥ 95% |
| | 800 mm～1 500 mm | ≥ 93% |
| 强度指标 | 0 mm～300 mm | ≥ 8.0% |
| | 300 mm～800 mm | ≥ 5.0% |
| | 800 mm～1 500 mm | ≥ 4.0% |

其二，稳定性佳。要严格避免受地质条件、施工工艺不当等客观因素影响引发的质量通病问题，减少路基稳定性问题，降低路基强度问题发生概率。

其三，兼容性适配。要做好路面结构铺设、地下管线预埋等工序的统筹兼顾，减少施工干扰，避免施工进度处于不可控状态。

## 2 市政道路路基工程全流程施工工艺有效性提升路径

### 2.1 工程概况

某在建市政道路工程全长 6.2 km，配套人行道、非机动车道等，路基工程占比高达 35%，属于项目核心分项。案例工程地处城市建成区，四周居民区、商业设施密集，施工环境较为敏感。此外，工程特殊路段 K1+300～K1+800 段还存在范围较大的软土地基，此区域地下水位明显较高且软土层多以淤泥质黏土以及粉质黏土为主，天然含水量普遍介于 40%～45% 区间，压缩系数、抗剪强度分别是 1.1 $MPa^{-1}$、16 kPa 渗透性极差。如若忽视对其处理，极易诱发路基失稳及不均匀沉降等问题，甚至还会造成路面破损。

### 2.2 施工难点总结

案例工程路基施工推进环节面临的作业难点主要表现在以下方面：

其一，软土地基处理难度大，需介入高效处理工艺，才能够合理应对软土层强度低、压缩性高特征，从技术层面规避施工完毕后的沉降风险。

其二，施工环境受限，四周敏感点众多，要尽可能避免对现有居民的生活造成干扰。同时，施工区域

作者简介：乙从彦（1978-），男，本科，高级工程师，研究方向：土木工程。

极可能涉及现役地下管线，如给排水、燃气交叉分布，若未能提前开展管线探测、标识，在施工推进环节就极易造成管线破损，进一步加剧施工作业难度。

其三，质量管控要求严格，需高质量满足路基施工技术规范要求，做好压实度、弯沉值等多项细节指标的统筹兼顾。

### 2.3 路基工程全流程施工工艺与要点

针对上述施工难点，为切实强化施工工艺实用性，工程计划严格依据“施工准备→填料处理→路基开挖与填筑→路基排水→验收”循序渐进的操作逻辑推进施工，凭借一体式施工操作部署，为高质量交付路基工程奠定良好基础。

1. 施工准备工艺。作为路基施工必要前提，施工准备直接影响施工质效。第一步，将重点放在测量放样工艺应用上，以保障路基轴线高程以及边坡坡度精准为实践导向，统一采用GPS+全站仪双驱动测量模式，为后续施工有序推进奠定精准定位基础。具体工艺推进环节，以20 m为间距，全段每20 m设一组中心桩，同时在其两侧布设边桩，作对称分布处理，确保全面覆盖路基施工范围。全部准备完毕后，预先采用GPS系统进行定位放线，确定各桩位大致坐标与高程，再应用全站仪，实现精准复核，对偏差进行调整，确保轴线偏差＜5 cm，高程偏差＜3 cm。第二步，高度重视材料与设备的准备。以填料准备为例，择优选用粉质黏土、级配碎石，并在相应材料进场前进行试验，进一步核验其天然含水量、液限、塑限等，一旦发现不合格填料，立即作退场处理，严禁不合规材料用于路基填筑[2]。

2. 路基开挖与填筑是路基施工阶段的核心工艺环节，是决定路基整体承载性能、结构稳定性的基础工序，在从源头把控路基成型质量、规避后期不均匀沉降等病害方面，有着无可替代的核心作用。

针对路基开挖，为保障开挖工作能够更具针对性，案例工程结合实际地质条件，统一采用专业机械，以横向分层全断面施工技术介入，完成具体开挖工作，从而有效避免不可逆的路段塌陷事故发生。同时，还要求在推进开挖至距离标高30 cm后，强化问题前置处理，提前对碾压沉落厚度作预留处置，并严格将预留厚度设置为5 cm。通过合理预留沉降量，最大程度抵消碾压工序产生的压实下沉量。后续路基成型后，无论是标高、压实度，抑或是平整度均与设计规范要求高度一致，切实提升长期使用性能。

针对路基填筑，严格遵循水平分层、纵向分段填筑原则，优化施工工艺布置。全生命周期工艺推进要点如下：

第一步，执行分层填筑工作，严格控制单层填筑厚度，确保其介于20 cm～25 cm区间，而后分段推进填筑工作，并在全部填筑后及时执行压实作业，从技术层面出发规避填料含水量过度流失问题。考虑到案例工程所涉及的路段十分复杂，既包括直线路段，又包括平曲线路段，项目因地制宜制定了差异化压实工艺。针对直线路段，统一采用由两侧到中心方式，实现碾压推进。针对平曲线路段，则转换思路，采用由内侧路肩向外侧路肩推进的作业方式。除此之外，为切实保证层间结合密实度更佳，在相邻填筑区段间，预留规格统一，均为1.5 m的搭接宽度，并严格要求此区域利用台阶式衔接法，切实增强整体性，最大程度减少后期不均匀沉降出现概率。

第二步，摊铺环节统一采用装载机初摊和平地机精铺联合工艺，预先借助装载机完成大致摊铺处理，再借助平地机精准整平，从根本上保障施工全域范围内填料均匀，不会出现局部凹陷问题。直至摊铺完毕后，抓住检测黄金期，快速检测松铺厚度，进一步核验偏差是否＜±2 cm，一旦发现平均偏差大于此阈值，立即反应，及时进行纠错处理，确保施工一次成型[3]。

第三步，执行压实工序，严格按照“轻压→中压→重压”循序渐进的施工逻辑推进压实工作。即预先借助18 t光轮压路机，依据2 km/h的工作时速，执行大范围速度初压。全部压实完毕后，再使用更高功率，如22 t振动压路机，依据3 km/h速度进行2遍全范围无死角中压；最后，再依据同等速率，完成重压。通过循环工作，快速消除漏压、欠压隐患。压实完毕后，案例工程将工作重点放在压实度检测上，严格依据表2检测标准进行判断分析。此时，如果最终的工作指标数值与标准一致，可有序推进下一步工作，若与标准不一致，则及时进行二次补救，为最终压实度呈现更优质的结果奠定良好基础。

表2 路基压实度实践标准

| 填挖类别 | 路床顶面下方深度 | 压实度 |
|---|---|---|
| 上路床 | 0 m～0.3 m | 95% |
| 下路床 | 0.3 m～0.8 m | 95% |
| 上路堤 | 0.8 m～1.5 m | 94% |
| 下路堤 | ＞1.5 m | 92% |

3. 路基排水工艺。基于价值分析视角，路基排水在保护路基强度、防止水损害问题发生等方面有着不

可替代的价值。鉴于此，为切实保障路基稳定性，案例工程路基排水具体实践环节，从地下水排放、地面表层积水排水等多维度入手，优化一体式排水施工逻辑。

一方面，高度关注地下排水系统的建设，通过系统化、标准化铺设地下排水设施，为地下水能够提供更为畅通的排出路径。具体实践环节，结合案例工程地质条件以及降雨特征，考虑到七八月份降雨十分集中，短时雨量较大，地下水位极易快速抬升。一旦处理不当，将会使得路基土体饱水软化问题不可控发生。为此，在综合分析水文条件后，案例工程计划优先采用带渗水管的渗沟，将其作为核心地下排水结构，沿着路基方向，以 5 m 为间距横向布设引排通道，进而保障能够快速拦截并疏排浅层地下水，避免因地下水长期浸润的影响，而致使路基填料失效，无法扎实保障路基整体强度。具体的排水层构造以及渗透路径设计详见图 1。

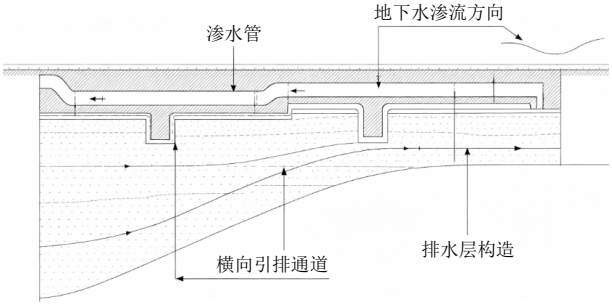


图 1 路基地下排水结构示例

另一方面，同步式推进路面以及地表的排水系统完善，以快速且及时的排除降雨径流以及地面积水为工作主线，从技术层面出发，尽可能减少雨水堆积对路基结构的侵蚀。实践环节，严格沿着路基边坡外侧，布置梯形截水沟及边沟，并严格对沟底纵坡进行控制，确保其不小于 2‰。后续雨水能够依据自然坡度，快速汇入就近排水管网，最大程度降低积水对路基成品的侵蚀。与此同时，针对局部地下管线较为密集的关键部位，则转换工作思路，借助防渗垫层增设或排水阀门布设优化等手段，多措并举，进一步优化防渗漏能力，最大程度减少因水侵蚀而产生的具体损害，真正做到路基使用安全性以及耐久性的同步式提升 [4]。

4. 路基整形与验收工艺。作为交付前最后一道工序，路基整形与路基验收，二者共同构成了路基工程质量闭环。为能够给路基结构施工提供合格且优质的下承层，要做好路基整形与验收两项工作的齐抓共管。

针对路基整形施工，要在填筑压实以及排水系统全部施工完毕后，立即落实整体整形工作，充分借助平地机，对其顶面进行精细化刮平，并严格依据设计坡度与纵坡线形完成修整，快速消除局部坑洼以及波浪等问题 [5]。与此同时，在整形推进期间还要同步对路基表面浮土以及杂物进行清除，避免因杂物过度残留，影响路面结构层的黏结效果，为后续水稳层沥青面层的施工提供高强度作业基面。

针对验收工作，则要大力执行施工自检 + 监理复检 + 第三方专业机构抽检等多位一体质量核验体系，确保验收结果真实可靠。需注意的是，无论是何主体开展验收，均需要扎实保障验收内容广泛涵盖几何尺寸、压实质量、整体稳定性以及排水效能等核心板块，即：切实保障几何尺寸验收环节中线偏差控制＜ ±20 mm，高程偏差＜ ±15 mm。压实质量验收环节，无论是压实度，还是弯沉值，都与设计要求高度一致。整体稳定性验收环节，要求不存在任何沉陷、翻浆现象，台阶搭接等关键部位密实。排水系统验收环节，现役排水构筑物通畅性佳。直至验收符合标准，完成交付工作，并落实成品保护，以便整条市政道路工程后期长期稳定服役。

## 3 结束语

路基施工是决定整个市政道路工程成品质量的核心环节，也是检验工程整体管控能力的关键试金石。本文以实际项目为研究案例，针对性梳理形成了成套施工工艺管控措施，通过对施工准备、路基开挖与填筑、路基排水、路基整形与验收等核心工序的协同管控，有效保障路基施工全过程平稳有序推进。未来，随着市政道路路基施工面临的地质条件日趋复杂、质量管控标准持续升级，可聚焦提升施工工艺的智能化水平，通过数字技术与施工场景的深度融合，全面强化施工过程的标准化与规范化，为市政路基施工行业的高质量可持续发展提供专业支撑。

## 参考文献：

[1] 魏雨珊 . 市政道路路基压实度检测与控制技术研究 [J]. 全面腐蚀控制 ,2026,40(02):365-367.
[2] 王玉美 . 复杂地形条件下市政道路路基加固施工方案与工艺 [J]. 工程技术研究 ,2026,11(02):99-101.
[3] 高志明 . 针对市政道路路基设计施工要点分析 [J]. 建设机械技术与管理 ,2025,38(06):167-169.
[4] 王旭龙 . 基于建筑渣土的市政道路路基工程建设研究 [J]. 中国建筑金属结构 ,2025,24(19):51-53.
[5] 张莉莉 . 市政道路路基工程施工质量控制措施 [J]. 建材发展导向 ,2025,23(14):19-21.

# 深海平台机电设备腐蚀防护技术优化

孙 臣

（中海油能源发展装备技术有限公司，天津 300450）

**摘 要** 深海平台机电设备长期服役于高盐高压极端海洋环境，腐蚀失效是诱发设备故障、缩短服役寿命的核心诱因。为提升设备腐蚀防护效能与运营经济性，本文研究优化设计复合涂层防护、智能阴极保护、微生物腐蚀抑制三大技术体系，经实验室加速试验与现场挂片验证，优化后防护体系腐蚀速率降幅超95%，全生命周期成本显著下降，具备良好的工程应用前景。

**关键词** 深海平台；机电设备；腐蚀防护技术；复合涂层防护技术；阴极保护系统

**中图分类号**：TE988 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.002

## 0 引言

深海油气与矿产资源开发是我国能源安全战略核心组成，深海平台是深海资源开发关键枢纽装备，机电系统运行稳定性直接决定平台安全生产能力。深海极端服役环境下，机电设备腐蚀失效风险持续升高，现有防护技术多基于浅海工况研发，难以适配深海高压低氧复杂环境，制约平台运营安全性与经济性。因此，开展腐蚀防护技术优化研究，对保障深海装备长效服役具有关键工程价值。

## 1 深海平台机电设备腐蚀现状与防护痛点分析

### 1.1 深海平台机电设备腐蚀环境特征与失效案例

深海平台机电设备长期服役于高盐高湿高压交变载荷极端环境，腐蚀失效是设备故障与寿命缩短的首要诱因。深海环境腐蚀驱动力随水深增加呈现非线性强化特征，不同水深区间环境参数直接决定腐蚀类型与失效速率，具体参数见表1。

机电设备腐蚀失效集中在动力传动系统、液压控制系统、电气仪表系统三大核心模块。动力传动系统齿轮箱、传动轴等部件，因海水渗透与润滑介质劣化，易诱发缝隙腐蚀与疲劳腐蚀，失效占比38%。液压控制系统阀体、管路接头等精密部件，以点蚀与电偶腐蚀为主要失效形式，失效占比32%。电气仪表系统接线端子、传感器壳体等部件，在潮湿盐雾环境中易发生电化学腐蚀，导致信号中断与设备失控，失效占比30%。国内近5a深海平台运维统计数据表明，机电设备因腐蚀导致非计划停机时长占总停机时长42%，单次腐蚀故障维修成本较常规故障高2.7倍，直接影响平台运营安全性与经济性[1]。

### 1.2 现有腐蚀防护技术的局限性分析

目前，深海平台机电设备应用腐蚀防护技术以有机涂层防护、牺牲阳极阴极保护、缓蚀剂添加为主，各类技术在深海极端环境下均存在明显性能短板，具体性能与局限性统计见表2。

现有防护技术突出短板集中于三大关键层面。环境适配性不足，常规防护技术多基于浅海环境研发，在深海高压低温低流速环境下，防护性能出现大幅衰减，涂层阻抗模值较浅海环境降幅超65%，阴极保护效率降幅超40%。协同防护能力缺失，现有技术多为单一体系独立应用，涂层与阴极保护之间存在电偶效应匹配失衡问题，易加速涂层剥离与阳极消耗，无法形成全周期协同防护效果。智能化管控能力不足，现有防

表1 深海不同水深环境腐蚀关键参数

| 水深区间/m | 环境温度/℃ | 海水盐度/‰ | 溶解氧含量/mg·L$^{-1}$ | 海水流速/m·s$^{-1}$ | 静水压力/MPa |
|---|---|---|---|---|---|
| 0～200 | 18～25 | 32～34 | 6～8 | 0.5～1.5 | 0～2 |
| 200～1 000 | 4～18 | 34～35 | 2～6 | 0.2～0.8 | 2～10 |
| 1 000～3 000 | 2～4 | 34.5～35 | 1～2 | 0.1～0.3 | 10～30 |
| 3 000～6 000 | 1～2 | 34.6～35 | 0.5～1 | 0.05～0.15 | 30～60 |

作者简介：孙臣（1978-），男，本科，技术员，研究方向：海油发展。

表 2 现有主流腐蚀防护技术性能与局限性统计

| 技术类型 | 常规防护年限 /a | 深海环境适用等级 | 年平均失效概率 /% | 主要局限性 |
|---|---|---|---|---|
| 溶剂型有机涂层 | 3 ～ 5 | B 级 | 32 | 耐高压性能不足，易发生针孔与剥离，破损后无自修复能力 |
| 牺牲阳极阴极保护 | 8 ～ 12 | A 级 | 18 | 输出电流不可调，深海低氧环境下效率衰减快，无法适配局部腐蚀防护需求 |
| 液相缓蚀剂 | 1 ～ 2 | C 级 | 47 | 易被海水冲刷流失，环境友好性差，无法实现长效防护 |
| 热喷涂金属镀层 | 5 ～ 8 | B 级 | 26 | 孔隙率高，与基体结合力不足，交变载荷下易开裂失效 |

护系统无法实时监测腐蚀状态与防护效果，无法针对局部腐蚀风险进行动态调整，只能通过定期停机检修进行维护，存在严重滞后性与被动性。

## 2 深海平台机电设备腐蚀防护技术优化方案设计

### 2.1 复合涂层防护技术的改进与应用

为突破常规有机涂层性能瓶颈，搭建改性环氧树脂为基体、功能化纳米填料与自修复微胶囊为关键组分的复合涂层体系。基体改性环节，选用有机硅改性环氧树脂，提升涂层耐高低温性能与耐水解稳定性，降低涂层高压环境渗透率。功能填料环节，引入表面改性石墨烯纳米片与玻璃鳞片，构建多层级物理阻隔结构，延长腐蚀介质渗透路径，石墨烯片径控制在 5 μm～10 μm，添加量控制在 0.5% ～ 1.0%，玻璃鳞片厚度控制在 5 μm～8 μm，添加量控制在 15% ～ 20%，在保证涂层阻隔性能同时，避免因填料过量导致涂层脆性增加。自修复功能设计环节，引入双壁型聚脲醛微胶囊，囊芯包含修复剂与固化剂，微胶囊粒径控制在 20 μm～50 μm，添加量控制在 3% ～ 5%，当涂层出现机械破损或微裂纹时，微胶囊发生破裂释放修复剂，在破损区域快速固化形成致密防护层，完成涂层损伤原位自修复[2]。此外，在涂层体系中引入电位缓冲剂，优化涂层与阴极保护系统电位匹配性，避免阴极剥离现象发生，形成涂层防护与阴极保护协同效应。针对机电设备不同部件服役环境，设计差异化涂层配套体系，动力传动系统转动部件采用耐磨型复合涂层，液压控制系统精密部件采用低孔隙率超薄复合涂层，电气仪表系统部件采用绝缘型耐盐雾复合涂层，完成全设备精准化防护。

### 2.2 阴极保护系统的智能化升级

为解决常规牺牲阳极阴极保护体系局限性，搭建辅助阳极驱动的外加电流智能阴极保护系统，完成防护参数实时监测与动态调控。系统硬件设计环节，采用高稳定性氧化物辅助阳极，阳极材料以钌铱钛氧化物为核心，优化阳极催化活性与使用寿命，在深海环境下阳极消耗率低于 10 $mg \cdot A^{-1} \cdot a^{-1}$，使用寿命可达 20a 以上。参比电极采用全固态银氯化银参比电极，提升电位监测精度与稳定性，电位测量误差控制在 ±5 mV 以内，可在深海高压环境下长期稳定运行。系统控制环节，搭载边缘计算单元的智能控制模块，结合安装在设备关键部位的腐蚀传感器、电位传感器、温度传感器，实时采集设备腐蚀状态与环境参数，通过预设控制算法，动态调整外加电流输出大小与分布范围，将设备保护电位稳定在 -0.85 V ～ -1.05 V 最优区间，避免过保护导致氢脆风险与欠保护导致腐蚀失效。针对机电设备复杂结构，采用分布式阳极布置方案，在管路接头、阀体、齿轮箱等易发生局部腐蚀部位，设置微型辅助阳极，完成局部区域精准防护，解决常规阴极保护系统存在的电位分布不均问题。

### 2.3 微生物腐蚀抑制技术的创新

为破解深海微生物腐蚀防控难题，开发依托群体感应抑制原理的绿色微生物腐蚀防控技术，替代传统广谱杀菌剂。深海环境内，硫酸盐还原菌是诱发机电设备微生物腐蚀的优势致腐菌种，该菌种通过生物膜形成与代谢活动，加速基体金属电化学腐蚀进程。群体感应为微生物调控生物膜形成与代谢活性的关键机制，通过抑制微生物群体感应系统，可在不杀灭微生物前提下，抑制生物膜形成与腐蚀代谢活性，避免微生物产生耐药性，同时降低对海洋生态环境影响。以海洋天然卤代呋喃酮作为先导骨架，引入氟、氯等卤素及磺酸基、羧基等极性锚定基团修饰分子，维持其构象在深海高压、低温、高盐环境中稳定，同时强化对硫酸盐还原菌群体感应受体识别选择性。修饰后抑制剂能够竞争性结合细菌信号受体蛋白，阻断酰基高丝氨酸内酯类信号传导，由此抑制胞外多糖分泌与生物膜形成，生物膜抑制率达到百分之九十以上，对桡

足类、浮游藻类等非靶标生物无急性或慢性毒性反应，环境相容性优良。

在应用层面，选用介孔二氧化硅或金属有机框架等多孔纳米载体包埋抑制剂，载药量高且孔径可调，促使抑制剂由涂层内部朝界面缓慢扩散。将载药纳米粒子嵌入环氧树脂—聚氨酯复合涂层，并复配咪唑啉类缓蚀剂，组成梯度释放结构。外涂层先行释放缓蚀剂以抑制初期腐蚀，纳米载体随涂层微孔逐步溶出抑制剂，维持界面群体感应抑制浓度。调节载体壳层交联密度与涂层交联网络，释放周期可延长至五年以上。此防护层在深海装备表面形成稳定抑菌屏障，持续减少硫酸盐还原菌附着与生物膜累积，降低微生物腐蚀风险[3]。

## 3 深海平台机电设备腐蚀防护技术优化效果评估与应用前景

### 3.1 实验室加速腐蚀试验结果分析

为验证优化后防护技术防护性能，在实验室环境下开展加速腐蚀试验，试验环境模拟3 000 m水深深海工况，试验周期3 000 h，对比不同防护体系腐蚀防护性能，具体试验结果见表3。

表3 不同防护体系加速腐蚀试验性能参数

| 防护体系类型 | 腐蚀速率 /mm·a$^{-1}$ | 涂层附着力 /MPa | 10 Hz下阻抗模值 /Ω·cm$^2$ | 破损自修复时间/h |
|---|---|---|---|---|
| 传统环氧涂层 | 0.082 | 3.2 | $1.2\times10^6$ | 无自修复能力 |
| 优化复合涂层 | 0.006 | 8.7 | $1.8\times10^{10}$ | 12 |
| 优化复合涂层+智能阴极保护 | 0.002 | 9.1 | $2.3\times10^{10}$ | 8 |
| 优化复合涂层+智能阴极保护+微生物抑制剂 | 0.0 008 | 9.3 | $2.7\times10^{10}$ | 8 |

加速腐蚀试验结果表明，优化后复合涂层体系较传统环氧涂层，腐蚀速率降幅92.7%，涂层附着力提升171.9%，阻抗模值提升4个数量级，具备优异物理阻隔性能与自修复能力。复合涂层与智能阴极保护系统结合后，腐蚀速率同步下降66.7%，涂层与阴极保护之间形成良好协同防护效应，可抑制涂层破损区域腐蚀扩展。引入微生物腐蚀抑制技术后，防护体系综合性能持续提升，在模拟硫酸盐还原菌污染环境中，腐蚀速率较未添加抑制剂体系下降60%，可抑制微生物腐蚀发生。此外，优化后防护体系在高压交变载荷循环试验中，未出现涂层开裂与剥离现象，具备优异耐机械损伤性能与环境适配性[4]。

### 3.2 现场挂片试验数据验证

于南海某3 000 m水深作业深海平台开展现场挂片试验，试验周期12个月，挂片材质选用平台机电设备常用316L不锈钢与42CrMo合金钢，分别设置传统防护体系、优化综合防护体系两组平行试验样本。试验结果表明，316L不锈钢样本中，传统防护体系平均腐蚀速率0.024 mm·a$^{-1}$，优化综合防护体系平均腐蚀速率0.0 012 mm·a$^{-1}$，腐蚀速率降幅95%。42CrMo合金钢样本中，传统防护体系平均腐蚀速率0.058 mm·a$^{-1}$，优化综合防护体系平均腐蚀速率0.0 021 mm·a$^{-1}$，腐蚀速率降幅96.4%。挂片表面形貌分析表明，传统防护体系样本表面出现明显点蚀与缝隙腐蚀，最大点蚀深度达0.12 mm，而优化综合防护体系样本表面平整光滑，无明显腐蚀痕迹，涂层完整性保持率达99%以上。现场试验结果与实验室加速腐蚀试验结果保持一致，验证优化防护技术在实际深海环境中的有效性与稳定性[5]。

## 4 结束语

本文针对深海平台机电设备腐蚀防护关键瓶颈，完成复合涂层防护技术改进、阴极保护系统智能化升级与微生物腐蚀抑制技术创新，构建多维度协同防护体系。经实验室加速腐蚀试验与现场挂片验证，优化后防护体系防护性能与全生命周期经济性均明显优于传统方案。未来将进一步优化多技术协同适配机制，开展全尺度工程应用验证，推动该技术体系在深海装备领域落地应用。

## 参考文献：

[1] 孟凡帝,高浩东,刘莉,等.适用于深海压力-流体耦合环境的玄武岩有机防腐涂层的制备及性能研究[J].中国腐蚀与防护学报,2023,43(04):704-712.

[2] 胡清泉.深海环境下海洋石油化工水下生产设备的腐蚀防护技术研究[J].福建化工,2025(07):105-107.

[3] 吴俊升,胡科峰,董超芳,等.深海极端环境下钛合金腐蚀科学问题评述[J].科技导报,2025(17):77-84.

[4] 龙秋雨,杨名亮,王茜茜,等.深海静水压力下有机涂层失效机制与防腐策略研究进展[J].材料开发与应用,2025(04):55-67.

[5] 项琦峰,赵阳,张涛,等.模拟浅海及深海环境中阴极极化对10CrNi5MoV钢氢脆敏感性的影响[J].中国腐蚀与防护学报,2025,45(06):1599-1609.

# 复杂地质条件下岩土工程勘察方法的优化分析

苏东钰

（广东省岩土勘测设计研究有限公司，广东 广州 510665）

**摘 要** 随着我国基础设施建设向山区、岩溶区、滨海区等复杂地质区域延伸，岩土工程勘察作为工程设计与施工的核心前提，其精度与效率直接决定工程安全、造价及工期。在复杂地质条件下，传统勘察方法存在针对性不足、数据精度低、效率低下等问题，难以满足工程建设的高标准需求。本文结合复杂地质条件的核心特征，分析当前岩土工程勘察方法的应用现状与现存问题，提出针对性的优化策略，以期为同类复杂地质条件下的岩土工程勘察工作提供理论参考。

**关键词** 复杂地质条件；岩土工程勘察；勘察精度；钻探；物探勘察

**中图分类号**：P642 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.003

## 0 引言

岩土工程勘察是工程建设的基础性工作，核心任务是通过科学的勘察手段，查明场地的岩土体性质、地质构造、水文地质条件及不良地质现象，为工程设计、施工方案制定及安全防控提供精准的地质数据支撑。近年来，我国工程建设规模不断扩大，勘察区域逐渐延伸至地形复杂、地质构造多样的区域，此类复杂地质条件具有岩土体非均质性强、隐伏地质体多、不良地质作用突出、水文地质条件复杂等特点，给岩土工程勘察工作带来了极大的挑战。因此，优化岩土工程勘察方法，提升勘察精度与效率，实现勘察资源的合理配置，成为当前岩土工程领域亟待解决的重要课题。

## 1 复杂地质条件下岩土工程勘察难点

### 1.1 隐伏地质体识别难度大

复杂地质区域内的溶洞、断层破碎带、地下暗河等隐伏地质体，无法通过地表观察直接识别，常规勘察方法难以精准捕捉其分布范围、规模及形态，易形成勘察盲区，导致勘察成果存在偏差。例如：岩溶区域的隐伏溶洞若未被探明，可能导致桩基施工时出现卡钻、塌孔，甚至引发工程事故。

### 1.2 岩土体参数测试精度低

在复杂地质环境中，岩土体本身有着明显的非均质性与各向异性，同一区域、同一深度的岩土体参数差异较大，而且取样过程易受到外界影响。常规原位测试方法在测试软土、硬岩等特殊地层时，存在着精准度不足的问题，无法准确体现岩土体的真实力学性质。此外，部分勘察方法存在局限，如标准贯入试验（SPT）取得的土样受影响程度高，不适用进阶试验[1]；而静力触探试验（CPT）虽然可以得到连续的监测数据，但是在坚硬岩层中的使用效果并不理想。

### 1.3 勘察方法针对性不足

传统勘察大多采用“一刀切”的方式，未结合复杂地质条件的具体类型、特征制定针对性的勘察方案，导致使用的勘察方法和实际地质需求难以匹配。例如：在岩溶区域还只运用单一钻探方式，未能结合物探法实施全面探测；在软土区域未调整取样及测试方法，最终造成采集的数据出现偏差。

### 1.4 勘察效率与成本矛盾突出

复杂地质条件下的勘察工作量较大，难度较大，如果采用常规的勘察方法需要增加钻孔数量，延长工期，从而大大提高工程造价；如果为了提高效率而减少测量工作量，就会导致测量的准确性下降，造成工程安全隐患。另外，在城市人口密集区和陡峭山区等复杂施工场地，由于施工场地的限制和恶劣的施工环境，施工效率和成本之间的矛盾更加突出。

## 2 复杂地质条件下岩土工程常用勘察方法

目前，在进行岩土工程勘察时，一般采用钻探、地球物理勘察、现场测试和实验室测试等4种勘察手段，在复杂的地质情况下，各种勘察手段都有各自的优势和不足。

钻探是岩土工程勘察中最基本、最普遍的一种方法，主要利用钻机对岩土体进行钻孔取样，以直观的

作者简介：苏东钰（1987-），女，本科，助理工程师，研究方向：岩土工程勘察方法。

方式了解地层的分布、岩土体的性质和地质构造。但在地质条件复杂地区，常规钻井技术存在明显的不足之处，如在喀斯特地区，钻进过程中容易遇到溶洞和突水，造成塌孔和卡钻；在软土区钻孔容易出现缩孔现象，严重影响采样质量；在超深方块岩区，普通钻井很难形成有效的钻孔，取芯效率低，甚至根本无法取芯。

物探勘察是利用岩土体的物理性质，通过专业设备探测地下地质信息，具有效率高、成本低、覆盖范围广等优势，常用方法包括地震勘察、电法勘察、地质雷达等[2]。在复杂地质条件下，物探勘察可用于识别隐伏地质体，但存在成果多解性强的问题，若缺乏钻探验证，易导致解释偏差。

原位测试是在现场直接对岩土体进行测试，获取岩土体的力学性质、渗透性等参数，常用方法包括标准贯入试验（SPT）、静力触探试验（CPT）、载荷试验等。SPT作为国际通用的原位测试方法，具有标准化程度高、成本低、操作简便的优势，可获取锤击数（n值）及扰动土样，用于估算岩土体承载力、密实度等参数，但在软土、极硬岩地层中精度较低，且土样扰动大，不适用于高级试验。CPT为静态贯入试验，可实时获取探头贯入阻力、侧壁摩擦力等连续数据，精度高、效率高，适用于软土、粒状土层，但在坚硬岩层中难以贯入，适用性受限。

室内测试是通过对钻孔采集的岩石和土壤试样的物理、力学性能等的测试和分析，为地质调查结果的分析提供依据。然而，在地质条件复杂的地区，由于岩土体取样时的扰动和室内测试不能完全模拟现场的地质环境等原因，使得测试结果与实际情况存在一定的偏差，不能有效反映岩土体的特性。

## 3 当前复杂条件下岩土工程勘察中存在的问题

### 3.1 勘察方法单一，缺乏综合应用

目前，我国大部分勘察工程还处于单井勘察阶段，未与物探、现场测试等手段相结合，使勘察数据不够全面，精度不高。例如：在喀斯特地区，单靠钻井很难对喀斯特地区的溶洞分布情况进行全面的勘察；断层破碎带地区，在不进行地震探测的情况下，不能精确确定断层走向和破碎程度。由于单一勘察方法的限制，对复杂地质体的勘察结果很难充分反映其实际情况。

### 3.2 勘察方案缺乏针对性，个性化不足

在勘察前没有充分调查和分析现场地质情况，盲目地采用常规的勘察方法，没有针对复杂地质体的特点，优化勘察方法和布置测点。例如：在软土区采样方式不合理，造成土壤样品受到较大的扰动；由于没有采取有针对性的钻孔技术，造成了超深方块状地层的成孔难度大，效率低。

### 3.3 数据处理与分析水平落后

在复杂的地质条件下，勘察工作所获得的钻探、地球物理、现场测试等各种数据量大且分散，而目前大部分勘察工程的数据处理还停留在传统的数据处理阶段，缺少多源数据集成和数据分析的能力，很难从数据中发掘出地质特征，从而影响了勘察成果的科学性和准确性[3]。同时，由于缺乏对数字勘察技术的充分利用，没有实现勘测数据的采集、处理和分析等全过程的智能化，使得勘察效率和数据质量都受到了一定的影响。

### 3.4 勘察人员专业素养不足

复杂地质勘察对勘察人员的专业素质和实践经验都有较高要求，要求其能够正确识别地质特征，科学选择勘察方法，精准分析勘察资料等。然而，目前一些勘察人员缺少在复杂地质环境下的勘察经验，不能很好地运用新技术和新设备，在遇到各种突发情况时，很难及时处理，从而影响了勘察的顺利进行和勘察成果的质量。

## 4 复杂地质条件下岩土工程勘察方法的优化策略

### 4.1 优化勘察方案，提升针对性与科学性

勘察方案作为指导工作的核心，应遵循“调查、设计、施工”的思路，根据现场的复杂地质条件，针对不同的工程特点，设计出不同的勘察方案。首先，在工程勘察之前，对工程进行充分的地质调查，通过对区域地质数据、遥感影像数据、无人机图像数据的采集，并结合实地考察，对工程的地质结构、岩土体的分布、地质不良现象、水文地质状况等进行了解，对工程地质单元进行划分，确定工程勘察的重点和难点。其次，依据地质条件复杂程度，优化勘察点的布局和勘察深度。对岩溶和断层破碎带的重点地段，要加大测点密度，增加探测深度，保证对隐伏地质体的全面覆盖；在岩土性质不均匀地区，可适当减少勘察点数量，并对勘察深度进行合理控制，以达到勘察效率与勘察成本之间的平衡；同时，以“面控线、线控点”相结合的勘察体系为基础，结合地质灾害危险程度进行划分，对高风险地区进行加密，对低危险地区进行简化。最后，对各种勘察方法的适用范围和技术要求进行分析，并根据勘察目的对勘察方法进行合理的组合。例如：在岩溶地区，采用“地球物理+钻井”相结合的方法，利用高密度电法和地质雷达法等地球物理方法对岩溶和溶蚀裂隙进行圈定，然后利用钻井法对圈定的岩溶和溶蚀裂隙进行验证，得到精确的地质

资料；在软土地区，采用“钻孔 + 现场试验 + 室内测试”相结合的方法，既可优化取样过程，又可降低取样过程中的扰动程度，同时现场试验和室内试验可以互相印证，提高参数测试的准确性[4]。

### 4.2 优化勘察手段，提升精度与效率

1. 优化钻探勘察方法。针对复杂地质条件，如岩溶、软土、超深填方等，对钻进技术及设备选型进行优化：在岩溶地区，应用金刚石钻进技术，降低钻进过程中的塌孔和卡钻，提高取芯效率；软土区采用泥浆保护钻进法，避免缩径现象的发生；薄壁取样器取样，减小对土样的扰动；在超深填方区，可应用“水泥浆预固壁 + 全套管后送”法，并与接力钻井相结合，提高钻井效率和取芯率。

2. 优化地球物理勘察方法。针对地球物理勘察结果的多解性，可将多种地球物理勘察方法融合应用和钻井验证相结合，以提高地球物理勘察结果的精度。例如：在断层破碎带，地震与电法相结合，利用地震波层析成像技术确定岩石破裂、破碎带的范围，利用高密度电法确定地下水的活动性，二者互为补充、相互印证；利用地质雷达和电法相结合的方法，对浅部隐伏矿体进行探测，提高探测精度；同时，为了降低人工辨识的误差，采用人工智能的方法，实现地球物理资料的自动辨识和反演的优化。

3. 优化现场实验和实验室实验。在软黏土地区，通过将 CPT 和十字板剪切试验相结合，获得软黏土的抗剪强度和压缩模量等力学参数；硬岩区为提高参数测试的精度，可采用重动力触探方法。同时，优化室内试验方案，采用低扰动条件下的先进试验方法，模拟现场地质环境，降低试验误差；将原位测试和室内试验数据相融合，展开对比分析，相互验证，提升参数的可靠性[5]。例如：将 SPT 测得的锤击数与室内试验数据相结合，可以准确估算出岩石与土壤的承载能力，从而提高岩土工程勘察的实际应用价值。

### 4.3 优化数据处理，提升成果科学性

针对复杂地质条件下勘察数据量大且离散的特点，通过对数据处理方法进行优化，能有效提高勘察结果的科学性。首先，要建立数据采集和整理的标准化程序，对各种勘察数据的采集方法和记录要求进行规范，保证勘察数据的准确性和完整性；利用数字化勘察系统，实现外业定位、勘察记录、岩芯摄影、数据上传的全过程无纸作业，降低人工记录的误差，提高勘察效率[6]。其次，采用多源数据融合的方法，将钻井、地球物理、原位测试和室内试验等多种数据相结合，建立起能反映地下岩体分布、形态和岩土体参数变化规律的三维地质模型，从而实现对隐伏矿体的快速、准确识别，并对地层界面进行精细划分，为地下工程的设计提供直观、精确的地质基础。最后，智能化数据处理软件对勘察资料进行统计、回归等分析，从资料中挖掘出地质规律，剔除不合理数据，提高数据的可信度。同时，根据实际工程经验对勘察数据进行合理的修正，保证勘察结果的准确性。

### 4.4 提升人员素养，强化专业能力

定期组织勘察从业人员进行复杂地质条件识别、勘察新技术、新设备操作、数据处理等方面的知识培训，并邀请业内专家授课，交流勘察复杂地质情况的实际操作经验，提高从业人员的理论和业务水平。重点开展 SPT、CPT、多源数据融合和三维地质模型等新技术的应用培训。同时，通过组织勘察人员参加地质条件复杂的工程勘察，使其具备一定的实际工作经验和处理突发事件的能力；鼓励勘察工作者深入现场，根据现场地质条件对勘察方法和方案进行优化，提高实际问题解决能力。建立工程勘察质量评价体系，明确工程勘察人员的岗位职责，加强工程勘察的全过程监控和管理，保证工程勘察工作的规范有序进行。严格审核勘察数据的真实性和准确性，消除数据造假现象，保证勘察质量。

## 5 结束语

复杂地质条件下的岩土工程勘察，存在着难以识别隐伏体、测量精度低、测量方法针对性差、效率和成本之间的矛盾等一系列难题，直接影响着勘察的质量和施工安全性。通过优化岩土工程勘察方法，可以有效解决岩土工程勘察中遇到的复杂问题，提高岩土工程勘察的精度和效率，从而为安全高效绿色施工提供强有力的技术支持。

## 参考文献：

[1] 薛荣，李建丽，吴昊. 复杂地质条件岩土工程勘察工作及相关技术介绍 [J]. 石材，2023(10):100-102.
[2] 武宜. 岩土工程勘察技术在复杂地形地质条件下的应用实践 [J]. 中华建设，2023(09):160-162.
[3] 夏岩. 岩土工程勘察技术在复杂地形地质条件下的应用分析 [J]. 中国金属通报，2023(08):201-203.
[4] 杨疆东. 复杂地质条件下岩土工程勘察方法与实践应用研究 [J]. 建筑工程与管理，2024,06(12):160-162.
[5] 冯克佳. 复杂地质条件下岩土勘察工程常用技术及注意事项 [J]. 四川建材，2025,51(06):66-68,98.
[6] 陈秀江. 复杂地质条件下岩土工程勘察技术的应用 [J]. 中国金属报，2024(22):167-169.

# 水利水电施工过程中边坡开挖支护技术的应用探究

张 萌

（湖北浩川水利水电工程有限公司，湖北 武汉 442000）

**摘 要** 在水利水电工程中，边坡失稳、滑坡及坍塌等灾害频发，直接威胁施工安全与工程长期运行。边坡开挖支护技术的科学应用，涉及地质条件判识、开挖工艺控制、支护体系选型及全过程安全管理等多个环节，还关系到工期、成本与生态环境保护的协调统一。本文深入探讨边坡开挖支护的技术概述、主要流程及应用要点，系统梳理技术交底、测量放线、洞室竖井开挖及地质勘查、工艺规范、支护优选、安全管控等关键内容，以期为同类工程提供有益的参考，以促进水利水电工程边坡施工质量与安全水平的整体提升。

**关键词** 水利水电施工；边坡开挖；支护技术

**中图分类号**：TV551.4 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.004

## 0 引言

随着水利工程建设的持续推进，我国水利水电施工领域经过数十年的工程实践与技术沉淀，已形成体系完备、经过大规模工程验证的成熟技术工法体系。其中，边坡开挖支护技术是至关重要的一环，它在水利水电施工中发挥着核心作用，为工程的前期筹备与后期安全保障提供了强有力的支撑[1]。该技术可结合现场具体地质条件，匹配对应的支护措施，有效提升边坡的稳定性与承载能力，确保工程质量满足设计规范要求。因此，深入探索水利水电施工过程中边坡开挖支护技术的标准化应用路径，对防范边坡失稳风险、保障工程建设全周期安全具有重要的现实指导价值。

## 1 边坡开挖支护技术概述

边坡开挖支护技术是水利水电工程施工中的关键环节，直接关系到工程边坡的稳定性、施工安全及后续建筑物的长期运行安全。在水利水电工程中，边坡通常具有高度大、坡度陡、地质条件复杂等特点，且常伴随裂隙发育、软弱夹层或地下水活动等不利因素，若开挖后不及时进行有效支护，极易引发边坡失稳、滑坡甚至坍塌等灾害[2]。边坡开挖支护技术主要包括开挖与支护两大工序：开挖根据岩土性质采用机械开挖、钻爆开挖或两者结合的方式，按照设计坡比和台阶分层进行；支护则紧随开挖作业，依据地质条件和边坡等级采取系统锚杆、预应力锚索、挂网喷射混凝土、格构梁、抗滑桩等单一或组合支护形式。开挖与支护需紧密衔接，遵循“边开挖、边支护、逐层稳定”的原则，确保边坡在施工期及运行期始终保持设计要求的稳定状态。边坡开挖支护技术的合理应用，能够保障施工作业人员与设备的安全，还可有效控制边坡变形、防止水土流失，为水利水电工程的顺利实施奠定坚实的基础。

## 2 边坡开挖在水利水电工程施工中的主要流程

### 2.1 技术交底

技术交底是边坡开挖施工前的基础性管理环节，其目的是使所有参与人员明确设计意图、技术标准、安全要求及质量控制要点。交底工作由项目技术负责人主持，面向现场管理人员、班组长及关键岗位操作人员。交底内容涵盖边坡设计参数（坡比、台阶高度、马道宽度）、开挖顺序、爆破或机械开挖方式、支护跟进时机、排水系统布置以及应急预案。同时，重点强调地质条件中的软弱夹层、断层破碎带等不良地质段的专项处理措施。交底过程中辅以图纸、三维模型或现场标识，确保信息直观易懂[3]。参加人员需签字确认，形成书面交底记录。对于关键工序或特殊地层，还需进行分阶段、分层级的二次交底，确保技术指令逐级传递、理解无歧义，为后续施工建立统一的技术行为准则。

作者简介：张萌（1994-），男，本科，工程师，研究方向：水利水电施工及工程管理。

### 2.2 测量放线

测量放线是边坡开挖的空间定位与几何控制环节，直接决定边坡轮廓线的准确性与开挖体的形态精度。施工前，依据设计图纸在实地布设平面与高程控制网，控制点设置在开挖影响区之外且稳固可靠的位置。采用全站仪或 GNSS 设备，按照设计坐标将边坡开口线、各级坡脚线、马道位置及排水沟中线精确放样到地面，并用木桩、钢钉或喷漆作出明显标记。对于高陡边坡，还需沿坡面每隔一定距离加密放样点，便于分层开挖时拉线控制坡比[4]。在开挖过程中，随着台阶下降，每开挖一层即对新的坡脚线和马道边线进行复测放样，同时测量已开挖坡面的实际高程与坡比，与设计值比对后及时反馈给现场调整。所有放样及复核数据均记录归档，作为工程量计量和验收的依据。测量放线的精度直接决定了边坡成型质量及后续支护结构的安装条件。

### 2.3 洞室和竖井开挖

洞室和竖井开挖是水利水电工程边坡区域常见的配套或交叉作业内容，其施工流程需在边坡开挖形成的作业面上有序展开。开挖前，首先完成洞室口或竖井井口的锁口支护，设置截水沟和防护栏杆，防止地表水流入及坠落风险。洞室开挖一般采用钻爆法或机械破碎法，按照“短进尺、弱爆破、强支护”的原则进行。每循环进尺控制在合理范围内，爆破后立即进行通风排烟、找顶清危，随后按设计要求施作系统锚杆、挂网及喷射混凝土。竖井开挖可采用反井钻机导井法或全断面正井法，导井贯通后再进行扩挖。扩挖过程中从上部向下分层爆破，渣料通过导井溜至下部出渣通道运出。洞室与竖井相交部位需加强锁口支护，避免应力集中引发塌方[5]。开挖过程中实时监测围岩变形与支护结构受力，发现异常时立即停工并采取补强措施。全部开挖完成后，进行断面尺寸验收和地质素描，为后续衬砌或锚固施工提供依据。

## 3 水利水电施工过程中边坡开挖支护技术的应用

### 3.1 做好前期地质勘查，科学制定施工方案

地质条件是边坡稳定性的决定性因素，前期勘查的深度与精度直接关系到开挖支护方案的针对性与可靠性。通过系统的地质测绘、钻探、物探及室内试验，查明边坡岩土体结构、软弱夹层分布、地下水赋存状态及可能的不利结构面组合，能为边坡分级、坡比确定、支护选型及施工顺序提供科学依据。

施工前成立专项地质勘察小组，收集区域地质资料并开展现场调查。在边坡设计范围内按网格布设勘探线，每条勘探线上布置若干钻孔，钻孔深度超过边坡底部设计高程以下不少于一个台阶高度。钻孔过程中进行全程取芯，岩芯摆放整齐并拍照记录，由地质工程师现场鉴定岩性、结构面产状及风化程度。对于疑似软弱夹层或断层破碎带，专门取出原状样送实验室测试抗剪强度、膨胀性及崩解特性。在钻探基础上，沿边坡走向布置多条探槽或探坑，揭露浅层地质结构，辅助判断优势节理组的倾向与倾角。地下水位观测与压水试验同步进行，查明含水层位置及渗透系数[6]。所有勘察成果汇总后编制地质纵剖面图与横剖面图，标出各分区的地质分区界限及潜在滑移面。方案制定阶段，依据地质成果将边坡划分为若干稳定等级区段，分别设计坡比、马道宽度及支护强度。对于存在顺层结构面或断层交汇处的区段，单独编制加强支护方案，并在施工组织设计中明确开挖顺序与支护跟进的时间间隔。方案经专家评审通过后，方可进入现场实施。

### 3.2 规范边坡开挖工艺，保障施工整体质量

开挖工艺是边坡成型的直接手段，其规范性决定了坡面平整度、超欠挖控制程度及原始地层的扰动程度。规范开挖要求严格遵循自上而下、分层分段的原则，依据岩土类别合理选用机械开挖、控制爆破或静态破碎等方式，避免过度爆破或超挖造成坡面松动、裂隙扩展。同时，开挖与支护必须紧密衔接，严禁一次性挖至坡底再回头支护，以确保边坡在施工期始终处于可控稳定状态。

开挖作业严格按照设计坡比自上而下分层进行，每层高度根据机械能力和支护作业空间确定为合理数值。每层开挖前，测量人员将开口线、坡脚线及马道边线精确放样，并沿坡面每隔一定距离设置坡比控制桩，拉线作为挖机司机或钻爆人员的视觉参照。对于土质或强风化岩坡面，采用液压挖掘机直接分层削坡，每层开挖后人工配合修坡，清除浮石和松土，使坡面平整度满足验收标准。对于中硬以上岩质边坡，采用控制爆破技术。爆破前进行爆破试验，确定单位耗药量、孔距、排距及起爆方式，将爆破振动速度控制在安全允许范围内。每层爆破出渣后，立即组织人员对坡面进行检查，清除危石，对局部超挖部位用同级混凝土或浆砌石嵌补找平。开挖过程中同步完成坡顶截水沟和坡面排水孔施工，防止雨水冲刷。每完成两到三层台阶后，测量复测坡面实际轮廓线，与设计值比对，

超欠挖超过规范要求的部位及时返工处理，确保成型质量一次达标。

### 3.3 优选支护施工技术，强化边坡稳固性能

支护技术是维持边坡长期稳定的关键措施，其选型与施工质量直接决定边坡的抗滑能力与抗变形性能。优选支护技术需根据边坡高度、地质条件、稳定性计算结果及施工环境，综合比选锚杆、锚索、喷混凝土、格构梁、抗滑桩等单一或组合形式。支护施工应做到及时跟进、参数准确、锚固可靠、面层密实，使支护结构与岩土体协同受力，形成整体的抗滑体系[7]。

根据地质勘察和稳定性分析结果，将边坡按区段分别设计支护方案。对于整体稳定性较好但存在浅层风化的边坡，采用系统锚杆配挂网喷射混凝土支护。锚杆按设计间距呈梅花形布置，钻孔采用锚杆钻机，孔径、孔深严格控制，钻孔完成后用高压风清孔，插入锚杆并注入水泥砂浆，注浆压力与浆液配比按照试验确定，保证锚固段饱满。挂网钢筋网片与锚杆端部焊接牢固，网片搭接宽度满足要求。喷射混凝土采用湿喷工艺，分层喷射至设计厚度，每层间隔时间以混凝土终凝为度，喷层表面平整无干斑。对于高陡边坡或存在深层潜在滑移面的区段，采用预应力锚索进行深层加固。锚索钻孔采用跟管钻进工艺防止塌孔，成孔后下入钢绞线束，锚固段注浆待凝后安装锚墩进行张拉，张拉力按分级加载、稳压持荷方式进行，锁定后封锚保护。对于坡脚或地质极差部位，增设抗滑桩或混凝土挡墙。抗滑桩施工采用人工挖孔或机械成孔，孔内钢筋笼整体吊装，混凝土连续浇筑振捣密实。所有支护工序均留存影像资料和检测报告，锚杆拉拔试验、锚索张拉记录、喷混凝土厚度及强度检测结果全部归档，确保支护质量可追溯。

### 3.4 落实全程安全管控，规避施工风险隐患

边坡开挖支护作业环境复杂、动态变化快，潜在风险包括高处坠落、坍塌、落石、爆破伤害及机械伤害等。全程安全管控要求建立覆盖施工前、施工中及应急响应的系统化安全管理体系，重点强化危险源辨识、过程监测预警、个人防护及应急演练。只有将安全管控嵌入每一道工序、每一个班次，才能有效规避风险隐患，保障作业人员生命安全和工程顺利进行。

施工前编制专项安全施工方案，经监理及业主审批后组织全员安全技术交底。在边坡顶部及作业区域外围设置硬质围挡和警示标志，严禁无关人员进入。每级台阶开挖完成后，沿坡顶边缘搭设高度不低于1.2米的临时防护栏杆，并悬挂安全网。对于高边坡作业面，设置多条上下爬梯通道，通道两侧设扶手和防滑踏板，保证人员紧急撤离畅通。爆破作业严格执行火工品领用退库制度，爆破前对爆破警戒区进行全面清场，起爆前鸣笛三次确认无人后起爆，爆破后等待足够时间由爆破员进入检查处理哑炮。开挖与支护交叉作业时，设置隔离层或错开作业时段，防止落石伤人。现场配备专职安全员，每日开工前检查坡面有无裂缝、掉块及支护结构变形情况，发现异常立即停工并报告。在边坡关键部位安装位移监测点，使用全站仪或自动化监测系统定期测量地表位移和深层位移，数据实时上传，设置预警阈值，一旦超限自动报警并启动预案。雨季施工时加强排水系统检查，备足防汛物资，雨后复工前全面排查边坡稳定状态。定期组织高处坠落、塌方及爆破事故应急演练，储备急救药品和通信设备，确保突发事件时能快速响应。所有安全检查和监测记录形成台账，做到隐患不消除不作业、措施不落实不施工。

## 4 结束语

本文详细梳理了技术交底、测量放线、洞室及竖井开挖等主要流程，并从地质勘查、工艺规范、支护优选及全程安全管控四个维度提出了具体应用措施，形成了覆盖施工全过程的标准化操作框架，旨在有效降低边坡失稳风险，提高开挖成型质量与支护结构的可靠性，为保障水利水电工程边坡安全及顺利实施提供技术参考。

## 参考文献：

[1] 徐贺，张尉，范永顺. 水利水电施工过程中边坡开挖支护技术的运用[J]. 门窗，2024(02):220-222.
[2] 杨德海. 水利水电施工过程中边坡开挖支护技术的运用[J]. 数码设计（电子版），2023(09):314-316.
[3] 杨庆红. 水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用[J]. 价值工程，2025,44(22):134-137.
[4] 谢丹. 水利水电施工过程中边坡开挖支护技术施工技术研究[J]. 环球人文地理，2022(15):278-280.
[5] 周辉. 水利水电施工项目中的边坡开挖支护技术应用[J]. 大众科学，2026,47(04):171-173.
[6] 逄建波. 水利水电施工工程中运用边坡开挖支护技术对策探析[J]. 科技创新导报，2020,17(07):26-27.
[7] 陈森，秦烨，王拓. 水利水电施工工程中边坡开挖支护技术探析[J]. 建材与装饰，2017,13(35):294.

# 重载高速路段 SMA 改性沥青路面压实工艺优化及质量管控

王家鹏

（四川省交通建设集团有限责任公司，四川 成都 610036）

**摘 要** 重载高速公路具有轴载大、渠化交通显著、重载车辆占比高的特点，对路面抗车辙、抗剪切、抗疲劳性能提出了严格要求。SMA 改性沥青路面凭借骨架密实结构的性能优势，在重载高速路段得到广泛应用，但压实工艺不当易引发路面早期病害，严重缩短使用寿命。本文梳理 SMA 改性沥青路面压实现存工艺问题，系统优化压实设备组合、温度控制、作业参数与特殊部位处理工艺，构建全链条质量管控体系，以期为同类重载高速工程施工提供参考。

**关键词** 重载高速公路；SMA 改性沥青路面；压实工艺；质量管控

**中图分类号**：U416.217 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.005

## 0 引言

随着我国货运物流行业的快速发展，重载高速公路的交通荷载持续提升，大轴载、高频率的渠化交通，极易引发路面车辙、松散、开裂等早期病害，严重影响道路运营安全与使用寿命。SMA 改性沥青路面具备优异的抗变形、抗滑、耐久性能，是重载高速路面的首选结构形式，而压实质量是决定路面长期性能的关键环节。当前多数工程仍沿用通用压实工艺，未针对重载需求开展专项优化。因此，开展重载高速路段 SMA 改性沥青路面压实工艺优化研究，构建全链条质量管控体系，对保障路面使用寿命、降低养护成本、提升道路运营安全具有重要的价值。

## 1 重载高速路段 SMA 改性沥青路面压实现存问题

当前多数重载高速 SMA 路面施工中，压实工艺仍存在明显的适配性缺陷，无法满足重载交通的长期性能要求。（1）设备组合选型不合理，盲目沿用普通沥青路面的压实设备组合，违规使用轮胎压路机进行复压，导致玛蹄脂上浮、路面构造深度不足，部分工程选用的压路机吨位、振频振幅不匹配 SMA 混合料特性，无法形成稳定的骨架嵌挤结构[1]；（2）压实温度控制粗放，未针对改性沥青特性与现场环境温度优化压实温度区间，普遍存在初压温度偏低、终压结束温度超标等问题，错过最佳压实窗口，导致压实度不足、空隙率超标[2]；（3）特殊部位压实工艺缺失，纵横向接缝、边角部位未制定专项压实方案，常规压实工艺无法保证薄弱部位的压实质量，成为路面结构的短板，在重载交通作用下快速出现病害。

## 2 重载高速路段 SMA 改性沥青路面压实工艺优化

### 2.1 压实设备选型与组合工艺优化

设备选型与组合是压实工艺优化的基础，需严格适配 SMA 改性沥青混合料的结构特性，严禁使用轮胎压路机进行主压实作业，避免沥青玛蹄脂上浮。针对重载高速路段的压实要求，优化形成“双钢轮振动压路机为主、小型压实设备为辅”的全流程设备组合方案，明确各压实阶段的设备选型与功能定位。

初压阶段选用 13 t 级双钢轮振动压路机，具备高频低幅振动功能，主要作用是稳定混合料，避免摊铺后混合料推移、开裂，为复压创造条件；复压阶段选用 14 t ～ 16 t 级双钢轮高频振动压路机，是保证压实度的关键环节，需具备 35 Hz ～ 50 Hz 的可调高频振动功能，实现粗集料骨架的有效嵌挤，同时避免集料破碎[3]；终压阶段选用 11 t ～ 13 t 级双钢轮压路机，以静压模式作业，主要作用是消除轮迹，保证路面平整度；针对纵横向接缝、桥头搭板、边角等大型设备无法压实的部位，配套选用 2 t ～ 3 t 级小型振动压路机与振动夯板，开展补充压实，消除压实薄弱点。优化后的设备组合可实现各压实阶段的功能互补，既保证了主压实段的压实度与骨架稳定性，又解决了薄弱部位的压实不足问题。

作者简介：王家鹏（1990-），男，本科，助理工程师，研究方向：道路与桥梁。

### 2.2 压实温度区间与作业段长度优化

压实温度是决定SMA改性沥青混合料压实效果的关键因素，针对重载高速路段的高标准要求，结合SBS改性沥青的黏度—温度特性，优化压实全流程的温度控制区间，同时结合现场环境温度、风速优化摊铺作业段长度，确保在最佳压实窗口内完成全部压实作业。

优化后的温度控制标准为：混合料摊铺温度不低于170 ℃，初压起始温度不低于160 ℃，复压作业温度控制在140 ℃～160 ℃之间，终压结束温度不低于110 ℃，相较于普通沥青路面，各阶段温度阈值提升10 ℃～15 ℃，有效拓宽了有效压实窗口。作业段长度采用动态优化方式，结合环境温度、风速、摊铺速度实时调整：在环境温度≥25 ℃、无风条件下，单次摊铺作业段长度控制在40 m～50 m；在环境温度15 ℃～25 ℃、微风条件下，作业段长度控制在25 m～35 m；环境温度10 ℃～15 ℃、风速≥3级时，作业段长度控制在15 m～25 m；环境温度低于10 ℃时，严禁开展SMA改性沥青路面摊铺压实作业[4]。通过温度与作业段长度的协同优化，可确保全部压实作业在混合料最佳黏度区间内完成，避免低温压实导致的压实度不足问题。

### 2.3 压实作业参数精细化优化

针对重载高速路段对压实度、空隙率的严格要求，对压实速度、振动参数、压实遍数开展精细化优化，形成标准化的作业参数体系，避免经验操作导致的欠压或过压问题，优化前后的作业参数对比如表1所示。

表1 重载高速SMA改性沥青路面压实工艺优化前后作业参数对比

| 压实阶段 | 控制指标 | 优化前通用参数 | 优化后专项参数 |
|---|---|---|---|
| 初压 | 作业速度（km/h） | 3～4 | 2～3 |
| | 振动参数 | 低频高幅，振频20 Hz～30 Hz，振幅0.8 mm～1.2 mm | 高频低幅，振频35 Hz～45 Hz，振幅0.3 mm～0.6 mm |
| | 压实遍数 | 1遍 | 1遍～2遍（前进振动、后退静压） |
| 复压 | 作业速度（km/h） | 4～5 | 3～4 |
| | 振动参数 | 中频中幅，振频30 Hz～35 Hz，振幅0.6 mm～1.0 mm | 高频低幅，振频40 Hz～50 Hz，振幅0.4 mm～0.8 mm |
| | 压实遍数 | 2遍～3遍 | 3遍～4遍（全幅振动压实） |
| 终压 | 作业速度（km/h） | 5～6 | 3～5 |
| | 作业模式 | 振动压实 | 静压 |
| | 压实遍数 | 1遍 | 1遍～2遍，至轮迹完全消除 |

优化后的作业参数以“高频低幅”为基本原则，高频振动可保证粗集料骨架的有效嵌挤，低幅振动可避免集料破碎，同时严格控制压实速度与遍数，确保压实度达标且空隙率稳定在3.5%～4.5%的最优区间内。在现场施工中，需安排专人全程监控作业参数，严禁随意调整速度、振动参数与压实遍数，保证工艺执行的一致性。

### 2.4 特殊部位与接缝压实工艺优化

纵横向接缝、桥头搭板、匝道出入口等部位，是重载高速渠化交通的集中作用区，也是路面压实的薄弱环节，针对此类部位制定专项压实优化方案，消除路面结构短板。

横向接缝采用平接缝工艺，摊铺前用切割机垂直切除端部厚度不足、温度过低的混合料，清理切面并涂刷粘层油，摊铺时调整摊铺机熨平板高度，保证接缝处摊铺厚度与平整度达标；压实作业先采用双钢轮压路机开展横向跨缝压实，压路机90%轮宽位于已压实路面，10%轮宽位于新铺混合料，逐步横向推移至全幅压实，再转为纵向常规压实，确保接缝处压实度与平整度符合要求。纵向接缝采用热接缝工艺，两台同型号摊铺机梯队作业，前后间距控制在10 m～20 m，摊铺幅宽重叠5 cm～10 cm，压实作业先跨缝碾压，压路机轮宽1/2位于先铺路面、1/2位于新铺路面，再分别对两幅路面开展全幅压实，避免出现接缝压实不足的问题。针对桥头搭板、路缘石边角等大型设备无法压实的部位，采用小型振动压路机与振动夯板开展分层补充压实，确保边角部位压实度不低于主路面标准。

## 3 重载高速路段SMA改性沥青路面压实质量管控体系构建

### 3.1 原材料进场源头质量管控

1.严格控制原材料技术指标，粗集料选用耐磨、坚硬的玄武岩碎石，压碎值≤26%，针片状含量≤15%，与改

性沥青的黏附性≥ 5 级，保证骨架嵌挤稳定性；SBS 改性沥青的软化点≥ 60 ℃，60 ℃动力黏度≥ 20 000 Pa • s，延度（5 ℃）≥ 20 cm，保证混合料的压实窗口与黏结性能；矿粉选用石灰岩磨细矿粉，亲水系数≤ 1，无团粒结块；木质素纤维掺量严格控制在混合料总质量的 0.3% ～ 0.4%，保证沥青玛蹄脂的稳定性 [5]。

2. 建立进场检验制度，每批次原材料进场时，必须查验出厂合格证与检验报告，同时现场取样开展第三方复检，复检不合格的原材料严禁进场，严禁不合格原材料流入施工环节。

3. 建立原材料溯源台账，详细记录每批次原材料的产地、规格、进场时间、检验结果、使用部位，实现原材料全流程可追溯。

### 3.2 施工过程全流程动态质量管控

施工过程动态管控是保障压实工艺落地的关键环节，针对摊铺、压实全流程建立“实时监测、动态调整、全程记录”的管控机制。一是摊铺过程管控，严格控制摊铺速度在 2 m/min ～ 3 m/min，保持匀速、连续摊铺，严禁频繁停机、变速，保证摊铺混合料的温度均匀性与厚度一致性，现场安排专人监测摊铺温度，摊铺温度低于 170 ℃的混合料严禁使用。二是压实过程实时管控，现场配备专职质量管理员与红外测温仪，全程监测各压实阶段的混合料温度，严禁在规定温度区间外开展压实作业；全程监控压实设备组合、作业速度、振动参数、压实遍数，确保严格执行优化后的工艺参数，每作业段的压实过程全程录像归档。三是压实质量快速检测，采用无核密度仪在压实完成后立即开展现场压实度与空隙率快速检测，每 20 m 检测一个断面，每个断面检测 3 个点，若检测结果不达标，立即在混合料温度降至终压温度前补充压实，若出现过压迹象，立即分析原因调整工艺参数，实现压实质量的动态管控与及时调整。

### 3.3 重载路段专项质量验收管控

针对重载高速路段的严格使用要求，制定高于行业规范的专项验收标准，开展分层、分批次的质量验收，未通过验收的作业段严禁进入下一道工序。专项验收分为过程验收与竣工验收两个阶段，过程验收针对每个作业段的压实度、空隙率、平整度、渗水系数开展检测，竣工验收针对全路段的路面性能开展全面检测。

专项验收采用“施工单位自检—监理单位复检—第三方检测机构抽检”的三级验收制度，自检、复检、抽检的合格率必须达到 100%，针对接缝、桥头搭板等薄弱部位，检测频率提升一倍，确保全路段压实质量均匀、达标。

### 3.4 质量追溯与问题闭环管控

建立压实质量全流程追溯体系与问题闭环管控机制，实现施工全过程可追溯、质量问题全闭环。首先，构建全流程质量追溯台账，详细记录每个作业段的原材料批次、混合料配合比、摊铺温度、压实设备参数、压实温度、压实遍数、检测数据、作业人员、监理人员等信息，配套归档施工过程影像资料，实现每个作业段的压实质量全流程可追溯。其次，建立质量问题闭环处置机制，针对自检、复检、抽检中发现的质量问题，立即下达整改通知，组织技术人员分析问题成因，制定专项整改方案，明确整改时限与责任人；整改完成后，重新开展检测验收，验收合格后方可闭环，严禁不合格部位隐瞒不报或擅自进入下一道工序。最后，建立质量责任终身制，明确施工、监理、检测各环节的质量责任人，将压实质量与责任人的绩效、资质挂钩，强化各环节人员的质量责任意识，确保管控体系落地执行。

## 4 结束语

本文针对重载高速路段 SMA 改性沥青路面的工程特性与压实难点，系统梳理了现有压实工艺的适配性缺陷，从设备组合、温度控制、作业参数、特殊部位处理四个维度完成了压实工艺的全面优化，构建了覆盖源头管控、过程管控、专项验收、追溯闭环的全链条质量管控体系。研究成果可有效解决 SMA 路面压实不足、空隙率超标、薄弱部位病害频发的问题，保障重载交通下路面的长期性能。未来可结合智能压实技术，实现压实参数的实时动态调整，进一步提升路面压实质量的稳定性与均匀性。

## 参考文献：

[1] 宋鹏云 . 高速公路大空隙排水沥青路面施工质量控制研究 [J]. 工程建设与设计 ,2026(01):196-198.
[2] 金魁 . 高速公路沥青路面摊铺工艺优化与质量控制 [J]. 工程机械与维修 ,2026(01):137-139.
[3] 张志远 . 高速公路沥青路面 3D 智能摊铺与压实质量控制技术研究 [J]. 全面腐蚀控制 ,2025,39(11):303-305.
[4] 孙得治 . 高速公路沥青混合料路面的施工质量控制 [J]. 价值工程 ,2025,44(13):157-160.
[5] 周鹏飞 . 高速公路沥青混凝土路面冬季施工质量控制措施 [J]. 工程机械与维修 ,2026(01):101-103.

# 分布式光伏接入对配电网电能质量的影响及优化策略研究

王鸿洋

（江苏深瑞汇阳能源科技有限公司，江苏 南京 211100）

**摘 要** 分布式光伏大量接入配电网后，电压偏差、电压波动、谐波畸变以及三相不平衡问题突出。本文结合现场运行数据，分析了光伏出力与电网结构不匹配、逆变器控制策略不足等内在因素，提出逆变器无功电压控制、无功补偿与储能协同配置、并网管理与配电网改造等优化措施。结果表明，技术手段与管理机制协同作用，能够有效改善电能质量，为配电网安全稳定运行提供参考。

**关键词** 分布式光伏；配电网；电能质量；电压偏差；谐波

**中图分类号**：TM727.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.006

## 0 引言

分布式光伏发电符合环保、节能要求，具备就地消纳、线损低的优势，在场景适配性上优于远距离输电的传统集中式发电模式，因此在全球范围内得到快速发展。国外（德国、澳大利亚等）已形成较为成熟的高渗透率分布式光伏并网管理体系，当前研究重点聚焦分布式逆变器快速电压支撑与用户侧储能的协同调控；国内近年来分布式光伏装机容量激增，但存量中低压配电网多按单向用电潮流规划设计，高比例分布式光伏接入后，反向潮流引发的末端电压越限、谐波畸变、电压波动等电能质量问题日益突出。现有多数研究多集中于SVG单独补偿、调压装置改造等单一技术措施，尚未形成覆盖设备参数优化、配电网运行调控、并网准入管理的全链条系统优化策略。基于此，本文结合配电网实际运行特征，分析各类电能质量问题的影响机理并提出工程可落地的实用优化策略。

## 1 分布式光伏接入对配电网电能质量的影响

### 1.1 电压偏差与电压越限问题

分布式光伏沿馈线多点接入后，配网由单向辐射网络变为含多处功率注入的有源网络，并网点及上游节点的电压不再沿潮流单调下降，而在光伏出力大于本地负荷时出现反向功率驱动的附加压升。线路压升幅值取决于反向功率大小与线路等效阻抗的乘积，架空线单位阻抗多在0.2 Ω/km～0.4 Ω/km量级、且R/X比普遍偏高，馈线较长、导线截面偏小的农网或城郊台区更容易在大发时段把末端电压顶到临界区。按《电能质量 供电电压偏差》（GB/T 12325-2008）的控制要求，20 kV及以下三相供电电压偏差限值为±7%，对应10 kV侧不宜越过10.7 kV，220 V用户侧上限为235 V；但实际运行中，午间光伏出力峰值时末端低压母线常抬升至242 V～248 V区间，越过+7%限值却未必立刻触发逆变器过压脱网阈值[1]。

### 1.2 电压波动与闪变

分布式光伏的出力特性与光照强度呈强耦合关系。在多云天气下，云层的快速移动会导致光伏阵列接收的辐照度发生秒级剧烈变动，进而引起输出功率的陡升陡降。这种功率的随机波动注入配电网后，由于线路和变压器均存在等效阻抗，流经阻抗的功率变化会直接转化为节点电压的波动，其波动幅度与线路阻抗及功率变化率成正比。在实际运行中，当同一并网点光伏出力在1分钟内变化率达到装机容量的20%左右时，对应的公共连接点电压波动幅度通常维持在2%～4%区间。虽然单次波动未超出《电能质量 供电电压偏差》（GB/T 12325-2008）的电压偏差限值，但其频率极高。

### 1.3 谐波畸变与三相不平衡

分布式光伏经逆变器并网，脉宽调制换流过程必然向电网回注谐波电流，其频谱特征集中在开关频率及其边带，低次成分则以3、5、7次为主。单台设备出厂虽能满足《电能质量 公用电网谐波》（GB/T 14549—93）对谐波电流的限值要求，但同一台区多台逆变器并

作者简介：王鸿洋（1998-），男，本科，助理工程师，研究方向：分布式光伏并网技术。

列运行时，各支路谐波电流在公共连接点叠加，若相位接近便产生算术累加而非均方根随机抵消，结果是午间大发时段台区总谐波畸变率较无光时段抬升约 0.8% ～ 1.5%，极端工况逼近 5% 的电压 THD 限值，表现为变压器与线路附加损耗增大、并联补偿电容器运行温升异常。三相不平衡问题更为典型。低压户用光伏大量采用单相（220 V）并网，而自然负荷侧三相分配本就不匀，光伏容量又按屋顶可用面积零散落点，很难做到 A/B/C 三相严格对等，导致并网点三相电流幅值与相位差持续偏离对称运行状态 [2]。

## 2 电能质量问题的形成机理与影响因素

### 2.1 光伏出力特性与电网结构不匹配

配电网的建设逻辑一直是“按负荷选截面、按辐射流向定保护”——功率从变电站母线下行，电压沿馈线自然跌落，调压仅需依靠主变有载分接头（OLTC）的阶梯式干预即可满足需求。这套逻辑隐含了一个前提：潮流始终是单向的，且负荷变化具有可预期、可平滑预测的特性。然而，光伏接入后，这一前提在一天中的部分时段被彻底打破。

光伏出力跟辐照走，中午峰值往往落在 10:00—14:00，偏偏这段时间对多数配网来说是轻载窗口；春秋季晴天尤甚，光伏大发而居民负荷被空调 / 采暖季节性压下去，形成典型的“源荷倒挂”，并非过剩的精力本身可怕，可怕的是过剩的电力必须在本地电网中找到消纳途径，于是沿最短阻抗路径反向灌回上级母线。问题在于辐射状网架对双向潮流先天缺工具：线路上既无中间电压支撑点，分接头调节又是有级、慢速、全局联动的——主变挡位动一次管整条母线所有馈线，却压不住某条长馈线末端被光伏顶起来的那个局部高点。

### 2.2 逆变器控制策略的局限性

当前广泛使用的组串式逆变器在电能质量主动支撑方面存在明显短板。大部分逆变器出厂默认采用恒功率因数控制模式，功率因数通常整定在 0.98 ～ 1.0 之间，控制目标聚焦最大化有功输出，未将电压调节纳入主控环节。当并网点电压上升至 1.05 倍额定电压以上时，常规逆变器缺乏电压下垂（Q（U））或有功功率降额（P（U））等主动响应机制，无法在毫秒级时间内自动吸收感性无功或削减有功出力。此外，逆变器之间的协调控制也是现实难题。同一台区或同一条馈线上往往安装有多个品牌、多种规格的逆变器，各设备遵循不同的通信协议，缺乏统一的规约转换和时钟同步机制，无法形成协同响应。当电压波动发生时，各逆变器依照各自的保护逻辑独立动作，有的提前进入限功率状态，有的延迟发出无功，有的甚至因孤岛保护触发而脱网 [3]。

本文技术创新点：（1）提出“逆变器—储能—SVG”多设备云边协同控制架构，解决传统单设备调节的滞后性问题；（2）设计基于 Modbus/MQTT 协议的自适应通信机制，实现异构逆变器毫秒级协同；（3）构建“承载力评估—分级并网—动态改造”的全流程管理体系，填补现有规范空白。

## 3 分布式光伏接入电能质量优化策略

技术方案说明：本章提出基于“云 - 边 - 端”协同的控制架构（见图 1）。系统由配电云主站、配电台区（DTU）、光伏并网断路器、逆变器、UPQC 监测设备

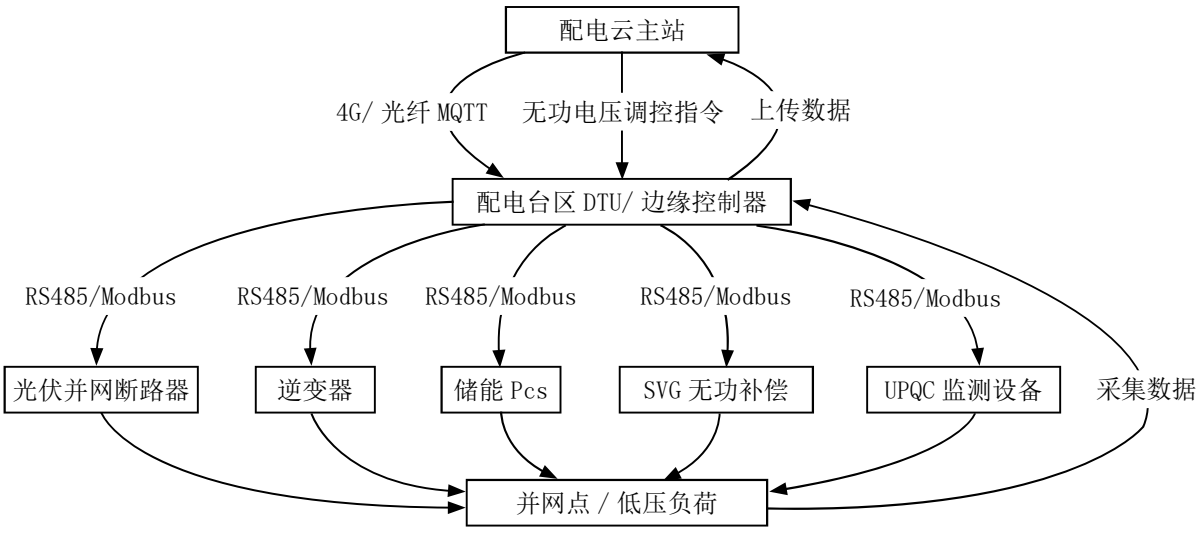


图 1 逆变器无功电压协同控制系统架构图

及储能设备构成，通过RS485总线采集数据，经由4G/光纤上传至云端，实现毫秒级无功电压调控。

### 3.1 逆变器无功电压控制与参数优化

在不增加额外设备投入的前提下，优化逆变器的控制策略是成本最低且见效较快的技术路径。现代光伏逆变器具备30%～44%额定容量的无功调节能力，可实现有功无功解耦控制。将控制模式由恒功率因数调整为电压下垂或恒电压控制，可使逆变器在电压升高时自动吸收感性无功。电压下垂采用Q(U)特性曲线，超阈值后无功随电压偏差线性增加，下垂系数整定为2%～5%，响应时间控制在100毫秒以内。

对于电压调节死区的设置，通常取额定电压的±1%至±2%，以避免逆变器在电压小幅波动时频繁动作。此外，对于晚间或阴天等光伏不出力的时段，逆变器理论上仍可运行在静止无功发生器模式，从电网吸收少量有功维持自身损耗后，利用剩余容量输出连续可调的感性或容性无功，动态响应时间可控制在50毫秒左右。

### 3.2 无功补偿装置与储能系统协同配置

对于光伏渗透率较高且逆变器调压能力不足以解决问题的台区，需要加装动态无功补偿装置或分布式储能系统。静止无功发生器（SVG）采用全控型电力电子器件，响应时间可控制在10毫秒至20毫秒之间，输出电流连续可调且不受系统电压跌落的影响。与机械投切电容器相比，SVG不存在分级调节和投切涌流问题，稳态调节精度可达1%以内。从经济性角度考虑，可优先选择在光伏接入密集的配电变压器低压侧配置集中式SVG，补偿容量可按台区光伏总装机的20%至30%进行估算。对于光伏总装机300千瓦的台区，SVG基础容量宜选取60千乏～90千乏，常规取75千乏；若预留20%裕度以应对光伏进一步增容，则最终额定容量宜按90千乏～100千乏选取。

储能系统解决电压问题有自身优势。储能变流器（PCS）具备四象限运行能力，无功输出范围大致在额定功率的±40%～±60%之间。更关键的是，储能能把光伏超出负荷需求的那部分有功吸收掉，从源头上消除反向潮流带来的电压抬升。在电压主动支撑策略上，储能系统通常采用下垂控制与恒压控制结合的办法，当并网点电压超过设定值后，储能按额定功率的20%～50%快速充电，响应延迟一般能控制在100毫秒以内[4]。

### 3.3 光伏并网管理与配电网适应性改造

技术措施需要与管理措施相结合才能形成完整解决方案。在光伏并网管理方面，应建立分级分类的并网准入机制。对于接入10 kV及以上电压等级的光伏电站，应要求其配置电能质量在线监测装置，采样率不低于每周波256点，并具备远程调度能力，接收主站指令响应时间不大于5秒。对于380 V及以下接入的分布式光伏，应在并网协议中明确逆变器功能要求：无功可调范围不小于额定容量30%，电压下垂控制死区不大于±3 V，低电压穿越能力满足《光伏发电站接入电力系统技术规定》（GB/T 19964-2024）规定。同时，供电企业应建立电能质量跟踪评估机制，每季度至少检测一次，检测点设在配变低压侧及光伏并网点，当电压偏差超过7%或谐波总畸变率超过4%时，限15个工作日内整改。配电网适应性改造是解决电能质量问题的长远之策。对于光伏资源丰富且消纳能力不足的区域，应对辐射状线路进行分段联络改造，每2个～3个分段设一台联络开关，形成环网结构，联络线路载流量不低于分段线路额定电流的1.3倍[5]。

## 4 结束语

分布式光伏带来的电能质量问题，本质上是源荷错位与配电网结构刚性共同作用的结果，加上逆变器主动支撑弱、多设备协调缺失，放大了扰动。本文提出的逆变器无功控制、SVG与储能协同、分级并网管理与配网改造等措施，从设备、系统和管理层面形成了闭环。未来，随着光伏渗透率继续提升，配电网面临的挑战将更加复杂。逆变器技术会向虚拟同步机方向迭代，台区储能和柔性互联装置成本下降后将得到更广泛应用，基于云边协同的在线预警系统也将逐步完善，推动配电网从被动适应走向主动调节。

## 参考文献：

[1] 许超.分布式电源接入对配电网电能质量的影响[J].灯与照明,2026,50(02):184-186.
[2] 马龙,周敏.分布式光伏系统接入对配电网电能质量的影响分析[J].科技创新与生产力,2025,46(06):104-107.
[3] 王刚.分布式光伏接入对配电网电能质量的影响[J].光源与照明,2025(03):163-165.
[4] 夏禹尧.分布式光伏电源对配电网的电能质量的影响[C]//中国电力设备管理协会.全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(二).2024.
[5] 李晔.分布式光伏发电接入对配电网电能质量的影响分析[J].大众用电,2024,39(03):35-36.

# 数控加工技术助力机械制造精度提升研究

吴洪汝，吴洪昌

（山东一润机械有限公司，山东 聊城 252000）

**摘 要** 数控加工技术作为现代机械制造领域的核心支撑技术，凭借数字化控制、精准化执行与系统化协同的独特优势，从加工过程管控、工艺优化升级、误差动态补偿等多维度为机械制造精度提升提供有力保障。本文聚焦数控加工技术与机械制造精度的深度关联，系统阐释数控技术赋能精度提升的核心要义，从程序控制、反馈调节、技术融合、工艺协同等层面剖析具体实现路径，探讨数控系统、加工装备与工艺设计的协同作用机制，旨在为机械制造行业通过技术创新实现精度升级提供理论参考，进而推动行业向精细化、高质量发展转型。

**关键词** 数控加工技术；机械制造；精度提升；协同机制

**中图分类号**：TH161 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.007

## 0 引言

现代机械制造行业竞争的核心越来越集中到产品精度和质量上，高精度零部件的稳定生产成了衡量企业核心竞争力的重要指标，也是高端装备制造、精密仪器研发等领域突破瓶颈的基础。数控加工技术冲破了传统机械加工依靠人工操作的束缚，用数字化程序指令准确掌控机床运动轨迹、切削参数和加工节奏，把机械制造由经验推动变成技术引领。集成的伺服控制、智能监测、误差补偿等功能可以有效地克服由于人为操作偏差、环境干扰等造成的加工精度问题，从设计到成品的整个过程都能得到精度的控制。系统研究数控加工技术促进机械制造精度提高的内在机理和实践途径，对于推进机械制造行业提质增效、冲破技术壁垒有着十分重要的现实意义，也给行业回应高质量发展需求提供了技术支撑。

## 1 数控加工技术助力机械制造精度提升要义

### 1.1 数控加工技术的精度保障核心属性

数控加工技术的主要特点就是用数字化、标准化的方式实现加工过程的精确控制，它把设计图纸变成精密的程序指令，让机床执行切削、成型等加工动作，每一个环节的参数都可以被准确地设定并保持稳定[1]。该种技术模式冲破了传统加工中操作者技能水平，经验判断对于精度的限制，使加工过程中的进给速度、切削深度、主轴转速等关键要素一直保持一致。数控加工技术依靠数字化程序对加工全过程实施精确的控制，把进给速度、切削深度、主轴转速等重要工艺参数加以标准化设定并恒定执行，完全摆脱了传统加工模式中依靠操作者的技能熟练程度，经验判断以及人为操作稳定性所存在的局限，有效地避免了由于操作者操作时力度忽大忽小、定位不准、节奏不稳等造成的各种问题，从根本上消除了加工过程中随机误差和系统误差，解决了传统加工中离散性误差大的问题。稳定的可靠性技术特性给机械制造精度提供了基础性且稳定的保证，使得高精度、一致性加工成果成为常态，成为现代高精度机械制造不可缺少的重要支撑力量。

### 1.2 精度提升的全链条技术协同逻辑

数控加工技术对于机械制造精度的提高并不是单一环节的改善，它是在设计、编程、加工、检测等各个环节中互相配合、共同起作用的。在设计阶段，采用数字化建模技术可以准确地表现零部件结构的每一个细节，给后面的加工提供准确的依据[2]；编程时利用仿真模拟来改善加工路径，提前避开可能产生的精度偏差；加工时伺服驱动系统与数控系统同步工作，保证刀具的运动轨迹同设计需求保持一致；检测时依靠高精度在线监测技术，在加工区域布设各种传感器，持续收集零部件尺寸偏差、形位公差、表面粗糙度等主要精度数据，由数控系统迅速加以剖析并立刻传递到加工执行单元，从而创建“检测—分析—反馈—调整”的闭环管控体系，保证偏差马上被纠正。设计、编程、加工、检测等各个环节并不是孤立地进行，而是依靠

作者简介：吴洪汝（1985-），男，本科，研究方向：机械制造。

数字化技术进行深度的协同工作，数据互通、流程衔接、目标统一，一起形成了覆盖全过程的完整精度保证体系，使机械制造精度在每一个环节上都能得到准确的控制和不断的加强，从而达到稳定的、可靠的高精度输出。

### 1.3 技术赋能精度提升的价值本质

数控加工技术促进机械制造精度提高的价值本质，就是依靠技术创新促使制造模式发生转变，使机械制造由“粗放型”向“精细化”发展。高精度的加工结果不但可以提高机械产品装配的契合度、运行的稳定性和使用寿命，而且可以给高端装备制造、精密仪器生产等提供重要的支撑，打破国外的技术垄断和壁垒[3]。与此同时，数控加工技术促使机械制造精度得到提高，进而使得产品质量全方位提升，零部件装配匹配度、运行稳定性、使用寿命等各方面均有所改善，凭借更加可靠的产品性能赢得市场认可，从而提升企业的核心竞争力以及市场话语权。精度和质量的双方面提升，并不是单一的企业自身发展所导致的，而是由于产业协同效应使上下游产业链质量得到改善，从而推动整个机械制造行业向高质量、高效率、高附加值方向转变。该过程很好地体现出技术进步与产业升级相融合的情形，给制造业的数字化、智能化转型提供了强劲而持久的核心动力，促使行业在全球竞争中占有有利位置。

## 2 数控加工技术助力机械制造精度提升的实现路径

### 2.1 程序化精准控制：筑牢加工精度基础

数控加工技术把加工工艺参数、运动轨迹等作为标准的程序指令，从而对加工过程加以精确的控制[4]。在实际加工中，程序一旦设定，机床就会按照指令进行各项操作，不会在人工操作时出现定位偏差、力度不均、节奏波动等状况。对复杂的曲面、深孔、薄壁等难加工件进行精确编程，可以改善刀具轨迹，减小切削过程中出现的振动和变形情况，保证所加工零件尺寸精度和轮廓精度满足设计要求。程序化控制模式将标准化指令当作核心，精确地限定加工全过程的工艺参数和运动轨迹，不但可以保证单次加工的尺寸公差、轮廓精度完全符合设计要求，而且可以有效地避免批量生产时由于人工操作的个体差异、环境变化等因素造成的加工质量问题，使每一件零部件的加工质量保持一致。无论是简单的结构件大批量生产，还是复杂的零部件大规模加工，都可以得到稳定的、一致的精度输出，彻底解决了传统加工中批量产品的精度不一致问题，为机械制造行业的高精度、规模化生产打下了坚实而可靠的工程技术基础。

### 2.2 闭环反馈与误差补偿：动态优化精度表现

高精度数控加工设备一般都配有闭环控制系统，闭环控制系统依靠传感器随时获取加工过程中位置、位移、温度等重要信息，并将这些信息同预先设定的理论值加以比较[5]。一旦出现偏差，系统就会立即发出一个调整命令给机床，使机床的运动参数得到及时的修正。根据加工过程中存在的刀具磨损、热变形、工装弹性变形等常见的误差源，数控系统可以事先设定补偿算法来预测误差的趋势，并且有针对性地做出相应的调整，从而有效地控制各种干扰因素对精度的影响。依靠嵌入式传感系统和数控算法的紧密联系，在毫秒级的时间内就可以准确地感觉到温度的变化、刀具的磨损、位移的偏差等细微的波动，并且可以和理论基准进行实时比较，瞬间完成微量参数的自动修正和误差抵消。它主动把所有的潜在干扰因素包含在内，最大程度地消除不稳定因素对加工质量的影响，使每一个切削都高度受控、每一道工序都精确对标，从而保证加工过程一直处在高精度、高平稳的控制之中，极大地提高了机械制造精度的稳定性和可靠性。

### 2.3 多技术融合应用：突破高精度加工瓶颈

数控加工技术不是孤立存在的，它同仿真技术、在线检测技术、智能管控技术等许多领域技术深度整合，共同推进机械制造精度改善。利用仿真技术可以在加工之前模拟出整个加工过程，预测可能存在的精度问题，并对工艺方案进行优化，从而减少试切次数和误差风险；在线检测技术可以实时获得零部件精度数据，给闭环补偿提供准确的数据支持，大数据分析技术可以挖掘出精度影响因素的内在规律，为工艺改进提供支持；智能管控技术是数控加工体系的重要支撑，它把物联网传感设备、实时数据传输模块、智能调控系统集成起来，从而达到对加工环境以及设备运行状况实施全方位、立体化监测并加以动态调节的目的。在加工环境上，通过分布在车间的温湿度传感器、振动传感器、粉尘检测仪等设备，不断采集环境温湿度波动、外界振动干扰、空气质量变化等重要数据，一旦超过设定的阈值，就会立即启动恒温恒湿调节、减震降噪等干预措施，形成稳定的可控加工环境，在设备状态上，对机床主轴、伺服系统、刀具系统等主要部件的运行参数实施实时采集和分析，准确预知设

备磨损、故障隐患等潜在问题，及时发出预警并执行维护保养或者参数调整程序，保证设备一直处在最好的工作状态之中。全方位的实时监测以及智能调节，从根本上杜绝了由于环境温湿度改变、设备出现故障、外界干扰等因素给加工精度带来的不良影响[6]。

### 2.4 工艺与装备协同优化：全面提升综合精度

数控加工技术对于提高机械制造精度来说，不能只依靠工艺设计，还要依靠加工设备的协同改进。从工艺设计上来说，根据零部件材料特性、结构形式和精度要求来选择切削刀具、确定加工余量、规划加工顺序，可以有效地减少切削力、切削热对零部件精度的影响，防止加工变形；从装备配置上说，高精度数控机床、伺服驱动系统、精密夹具等装备的协同配合，可以提高定位精度、重复定位精度，给加工精度提供硬件支持。同时，根据数控加工技术的优势，技术人员对切削速度、进给量、切削深度等主要工艺参数进行细致的调整，并且按照加工装备的性能特点实施有针对性的优化调整，使得工艺方案同装备能力之间存在良好的契合度。在此过程中，依照零部件材质特性及结构状况来调节工艺参数组合，借助校准机床精度，升级伺服系统反应速度，改善夹具定位精确度等手段加强装备性能，使工艺规划的科学性同装备运作的精确性有机融合起来。双向优化和协同适配可以有效地解决工艺和装备不匹配造成的精度损耗问题，使尺寸精度得到精准控制、形状精度得到规范成型、位置精度得到严格对齐、表面质量得到细致均匀，从多个方面同步提高加工精度，全面提升机械制造的综合精度水平，为高精度产品的生产提供有力的支撑。

### 2.5 数字化建模与仿真：前置把控精度风险

数字化建模与仿真技术属于数控加工的重要前置步骤，对提高加工精度起到重要的作用。三维数字化建模可以准确地再现零部件的几何形状和装配关系，给加工编程提供准确的数据支持，防止因为图纸理解有误造成的精度问题；加工仿真可以模拟刀具运动轨迹、切削过程中受力变形等状况，清楚地表现出干涉、过切等问题，从而提前改进加工路径和工艺参数。前置性模拟和预判依靠的是数字化建模与仿真技术，把零部件的三维结构、刀具运动轨迹以及切削受力状况全部呈现到虚拟环境里，经由全方位的动态推演，清楚地显示加工时会引发的干涉、过切或者变形等风险趋向。技术人员在正式加工之前，就可以根据仿真结果对编程路径、工艺参数和刀具选择做精细的调整和优化，从源头上消除隐患，保证每一个加工指令都是科学合理的[7]。该过程不但可以有效地规避由于操作失误造成的精度风险，而且可以大大减少试切过程中所消耗的材料和时间，避免反复调试造成的资源浪费，大大提高正式加工阶段的效率和准确性，为机械制造精度的最终实现打下了坚实的基础。

## 3 结束语

数控加工技术凭借数字化、精准化、系统化的明显优势，成为推动机械制造精度提高的主要动力，它依靠程序化控制、闭环反馈、多技术融合、工艺装备协同等方式，对机械制造全过程实施精确控制。从本质上讲，数控加工技术提高精度是技术层面的突破，也是制造理念和模式的升级，给机械制造业高质量发展奠定了基础。随着科技的发展，数控加工技术将会越来越精密、越来越智能、越来越高效，与人工智能、大数据、物联网等技术的深度融合，会进一步扩大精度提高的空间，给高端装备制造、精密仪器研发等领域的创新提供新的可能。未来，机械制造行业要不断加强数控加工技术的应用和研究，依靠科技创新和实践探索，不断改善精度提高途径，推进行业向更高质量、更高水平发展，给制造业强国创建提供强劲动力。

## 参考文献：

[1] 蒋伟锋.数控加工技术在机械加工制造中的应用[J].中国设备工程,2025(16):246-248.
[2] 乔立龙.数控加工技术在汽车机械模具加工制造中的应用[J].汽车知识,2025,25(08):125-127.
[3] 王迪.数控机械设备高精度加工误差补偿技术及应用研究[C]//江西省工程师联合会.第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(三).温岭市文昌数控机床设备有限公司,2025.
[4] 陈慧.汽车机械模具加工制造中数控加工技术的应用探析[J].石河子科技,2024(05):46-47.
[5] 陈静.简析机械模具制造中数控加工技术的应用[J].农业技术与装备,2024(03):8-10.
[6] 于萍.数控加工技术在机械模具加工制造中的应用[J].现代农机,2021(04):120-121.
[7] 骆志强.探究数控加工技术在机械模具制造中的运用[J].信息记录材料,2021,22(04):124-125.

# 充换电一体站配电系统智能运维技术研究

胡闪伞，李　明，徐　婷，徐永辉

（中国石化销售股份有限公司湖北鄂州石油分公司，湖北 鄂州 436000）

**摘　要**　随着新能源汽车产业的快速迭代和“双碳”战略的深入推进，传统加油站向“油、电、气、氢”多能融合的充换电一体站转型已成为行业发展的必然趋势。配电系统作为充换电一体站的核心能源供给枢纽，其运行稳定性、可靠性直接决定站内各类设施的正常运转和服务质量，智能运维技术的应用则是破解传统运维模式痛点、提升配电系统管理效能的关键路径。本文主要研究配电系统智能运维相关技术，分析各环节技术要点、应用路径及实施效果，以期为充换电一体站配电系统的高效、安全、智能运维提供理论参考。

**关键词**　充换电一体站；配电系统；智能运维；油罐区防渗改造技术；多油品智能加油机

**中图分类号**：TM727.3　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.008

## 0　引言

当前，全球能源结构正加速向清洁化、低碳化转型，在我国“双碳”目标的推动下，新能源汽车渗透率持续攀升。传统加油站作为能源供应网络的重要节点，单一的燃油供应模式已无法满足市场多元化需求，向充换电一体站转型，实现“油、电、气、氢”多能协同供应，成为加油站行业转型升级的核心方向。充换电一体站整合了传统燃油加注、电动汽车充电、电池更换、LNG加气、加氢等多种服务功能，其配电系统相较于传统加油站更为复杂，不仅需要为传统加油机、便利店等设施供电，还需满足充电桩、换电站、光伏发电系统等新能源设施的高负荷、波动性用电需求[1]。在此背景下，开展充换电一体站配电系统智能运维技术研究，通过标准化规划设计、新能源配套升级、智慧化技术赋能，构建高效、安全、智能的运维体系具有重要的现实意义。

## 1　加油站规划设计与标准化建设

### 1.1　场地规划与功能布局优化

充换电一体站的场地规划需结合地理位置、交通流量、周边能源需求等因素，科学划分功能区域，实现燃油加注区、充电区、换电区、LNG加气区、加氢区、辅助功能区（便利店、办公区、设备房）的合理布局，既要满足各类设施的安全间距要求，又要提升车辆通行效率和服务便捷性[2]。

场地规划的核心要点是实现“分区明确、动线合理、安全高效”，避免不同类型车辆交叉干扰，同时为配电系统设备（配电箱、变压器、电缆沟等）预留合理的安装空间，确保设备运维便捷。在车道布局设计中，需结合车辆通行流量，优化入口、出口及内部车道宽度，设置专用的充电、换电、加气车道，减少车辆拥堵。以鄂州三江服务区充换电一体站为例，该站点原有车道布局存在交叉干扰严重、通行效率低下等问题，通过科学优化车道布局，增设专用充电车道和换电通道，合理划分燃油车与新能源车辆通行区域，实施后车辆通行效率提升达33%，有效减少了车辆滞留时间，同时为配电系统的负荷均衡分配提供了良好条件。

### 1.2　油罐区防渗改造技术

油罐区作为充换电一体站的核心危险区域，其防渗性能直接关系到土壤、地下水环境安全，同时也影响配电系统的安全运行。

结合天津石化罐区防渗改造实践经验，充换电一体站油罐区防渗改造应坚持“源头预防、全程管控”的原则，采用“双层罐+防渗层+泄漏监测”的三重防渗体系，实现油罐区渗漏风险的全方位防控。具体改造技术要点如下：一是采用双层储油罐，内层为耐油、耐腐蚀的钢制油罐，外层为玻璃钢或高密度聚乙烯材质，两层之间设置间隙监测装置，能够实时监测油罐渗漏情况，一旦发生渗漏，可及时发出预警信号，避免渗漏范围扩大；二是在油罐基础及周边铺设防渗层，采用高密度聚乙烯防渗膜、膨润土防水毯等材料，构建完整的防渗屏障，防止渗漏油品渗入土壤和地下水；三是安装智能泄漏监测系统，与配电系统智能运维平

作者简介：胡闪伞（1980-），男，专科，助理工程师，研究方向：加能站工程发展与建设。

台联动，实时采集渗漏监测数据，当监测到渗漏信号时，立即触发预警，并自动切断相关区域电源，防止电火花引发安全事故，同时通知运维人员及时处置。

### 1.3 多油品智能加油机选型配置

智能加油机的选型应具备以下核心特点：一是具备多油品兼容功能，可同时供应多种标号的汽油、柴油，满足不同车辆的加油需求；二是具备智能化控制功能，支持远程监控、自动计量、故障自诊断等功能，能够实时采集加油数据（加油量、金额、时间等），并上传至配电系统智能运维平台，实现加油设备与配电系统的联动管控[3]；三是具备节能降耗特性，采用高效节能电机，降低设备运行能耗，减少配电系统的负荷损耗；四是具备安全防护功能，配备防爆、防泄漏、防静电装置，与油罐区防渗系统、配电系统安全防护体系协同，确保运行安全。

### 1.4 新能源设施协同设计

充换电一体站的核心转型方向是实现多能源协同供应，充电桩、LNG 加气站、加氢站等新能源设施的协同设计，需与配电系统规划紧密结合，确保新能源设施的用电、用气需求得到满足，同时实现各类设施的高效协同运行，提升整个站点的能源利用效率。首先，充电桩的协同设计需根据站点新能源汽车通行流量，合理确定充电桩的数量、功率及安装位置，优先选择快充桩与慢充桩搭配配置，满足不同车辆的充电需求[4]。充电桩的供电线路需与配电系统专用回路连接，配备独立的保护装置和计量设备，实时监测充电桩的用电负荷、充电状态，实现与配电系统智能运维平台的联动管控。其次，LNG 加气站与加氢站的协同设计，需严格遵循 GB50156-2021 标准要求，明确与配电系统、其他设施的安全间距，采用防爆、防静电、防泄漏的设计方案。LNG 加气站的压缩机、加气机等设备的用电需求需纳入配电系统规划，配备专用的供电回路，确保设备运行稳定。

## 2 新能源转型配套工程

### 2.1 电力负荷计算专项研究

在电力负荷计算的过程中，应将充换电一体站的功能布局、运营特征作为主要参考，并明确其设施配置的特点，将“负荷统计法 + 系数修正法”作为主要手段，促使计算结果与站点的实际用电需求相一致。从负荷计算的层面分析，该领域需提升对充电桩、换电站等大功率负荷的关注度，了解具体影响，此类负荷启动的过程中，较大的冲击电流随之出现，那么配电系统电压可能会上升或下降，导致其他设备的运行呈现异常状态。所以，应从大功率负荷入手，遵循单独计算的原则，合理确定负荷系数。

### 2.2 配电系统设计优化

配电系统架构设计采用“总配电室 + 分区域配电箱”的分级供电模式，总配电室设置主变压器、总配电柜、储能设备等核心设备，负责整个站点的电力分配和负荷调控[5]；从分区域配电箱的角度分析，划分的过程中将功能区域作为依据，分别为燃油加注区、充电区、换电区、LNG 加气区、加氢区、辅助功能区供电，按照不同区域采取针对性的管控措施，避免排查故障的过程中难度较大；配电系统需配备应急电源，确保突发停电时，核心设施能够正常运行。同时，在配电设备选型方面，需充分考虑到负荷特点，并针对智能运维需求展开多角度分析，将可靠程度明显、节能性强、智能化的设备作为首选。主变压器也要在原有基础上进行调整，以节能型干式变压器为重点，该设备不会引起明显的损耗和噪声，在充换电一体站的复杂环境中表现出较强的适应性；配电柜选用智能型配电柜，除了可以远程监控之外，也涵盖了负荷监测、故障自诊断等关键性模块，可以对配电设备不同环节的运行数据有明确的认识。

### 2.3 传统加油站屋面光伏发电兼容性改造

屋面光伏发电兼容性改造的前期工作是现场踏勘与条件评估，重点考察加油站屋面的结构形式、面积、朝向、坡度及承载能力，评估周边环境对光照的影响，排查高大建筑物、树木等遮挡物，同时梳理现有电气系统配置，了解变压器容量、低压配电系统结构等参数，为改造方案设计提供依据[6]。此外，还需进行技术可行性评估，由专业结构工程师验算屋面承载能力，确保能够承载光伏组件、支架及相关设备的重量，必要时需采取加固措施；评估现有配电设施是否满足光伏系统接入要求，确保逆变器输出能够平稳汇入低压电网。

屋面结构改造是兼容性改造的核心环节，需结合原有屋面结构特点，采用“加固 + 防腐”的改造方案，确保屋面能够承受光伏发电系统的重量，同时防止屋面渗漏。

## 3 智慧化升级与智能运维技术应用

### 3.1 数字化运营平台研发与应用

数字化运营平台是充换电一体站配电系统智能运维的核心载体，需整合各类智能化技术和监测数据，

实现“数据采集、实时监测、故障预警、远程控制、智能分析”的一体化管理，为运维人员提供全面、精准、高效的运维支撑。平台研发需严格遵循《智慧加油站建设规范》（Q/SH 0590-2020）标准要求，确保平台的兼容性、可靠性和安全性，同时结合充换电一体站的运营需求，优化平台功能设计。首先，数据采集与整合模块，公司将各类传感器、智能监测设备作为操作重点，采取精准部署的措施，在各个阶段完成配电系统相关数据的采集和分析，明确加油机、充电桩等设备运行的过程中有无某方面数据异常，将其能耗指标作为关注的因素之一，将数据的集中整合工作提上日程，保障管理的规范性，为智能运维提供数据支撑[7]。其次，实时监测模块，公司需集中较多注意力在可视化界面中，将配电系统运行的正常与否充分呈现，还需展示出不同类型设施运行状态，运维人员能够对设备整体运行有清晰的认识，秉持着发现异常、处理异常的原则。最后，在故障预警模块方面，公司从大数据分析技术的角度出发，并规范化采用人工智能算法，动态化、精准化研究采集到的运行数据，知晓存在的故障点和引起原因，在预警信号的提示下，运维人员在现场介入科学、有效的干预措施。

### 3.2 关键智能化技术集成应用

数字化运营平台的高效运行，离不开各类关键智能化技术的集成应用。通过在站点各个区域部署AI摄像头，实时采集现场视频数据，利用人工智能算法，对视频画面进行实时分析，识别烟雾、火焰等异常情况，一旦发现火灾隐患，立即触发预警信号，并自动联动配电系统，切断相关区域电源，防止火灾扩散，同时通知运维人员和消防部门及时处置[8]。误差精度±0.1%的电子价签系统，是提升站点服务质量和智能化水平的重要支撑，同时与配电系统智能运维平台联动，实现价格数据的实时同步和能耗统计。电子价签系统采用无线通信技术，实时更新燃油、充电、加气等服务价格，误差精度控制在±0.1%以内，确保价格信息的准确性和实时性。结合Ostrakon-VL-8B技术应用经验，可通过API接口将电子价签系统与平台对接，自动校验屏幕价与实物价一致性，进一步提升价格准确性[9]。

### 3.3 加油机物联网监测系统部署

加油机物联网监测系统的部署是一项重要措施，公司需高度重视现有加油机的功能、优势，充分考虑到其智能化程度，在实践中融入“改造+新增”的方式，为加油机配备物联网模块、传感器等设备。监测系统表现出一定复杂性，除了能够精准监测加油机运行是否处在正常范围内之外，也可以做好能耗监测、故障诊断等工作。完成传感器的部署后，解决了之前采集加油机运行参数难度大的问题，并在各个阶段将加油机的用电负荷数据于规定时间内录入在数字化运营平台，使其与配电系统的运行数据相融合，结合系统的运行情况和工作目标展开联动分析[10]。此外，在故障诊断方面，物联网监测系统依旧彰显出较大价值，主要将采集到的运行数据作为重点，通过大数据分析和人工智能算法，了解加油机出现故障的位置和严重程度，在第一时间预警，使运维人员凭借自身专业能力、经验、技术设备完成可靠的处理。

## 4 结束语

充换电一体站配电系统智能运维是其高质量运营的关键。研究结果表明，科学的规划标准化建设、完善的新能源转型配套工程及深度智慧化升级，是提升配电系统稳定性、效率的核心路径。未来，随着新能源产业发展，配电系统智能运维将向更精准、协同、规范、绿色的方向发展，后续将聚焦故障精准预测、储能协同运维等方向深化研究，为新能源基础设施发展提供支撑。

## 参考文献：

[1] 余冰,刘勇,马良.电动汽车充换放储一体站选址定容双层规划模型及算法[J].运筹与管理,2025,34(07):24-31.
[2] 徐斌,王傲,王小明,等.储充换一体站协同多综合能源楼宇的低碳经济调度[J].电力系统保护与控制,2024,52(20):119-130.
[3] 朱兰,张贺.含EV充换储一体站的交直流混合配电网优化运行[J].上海电力大学学报,2024,40(02):115-123,149.
[4] 邓申玮,韦钢,朱兰,等.基于区间理论含充换储一体站的主动配电网供电能力评估[J].智慧电力,2022,50(04):59-65,95.
[5] 何晨可,朱继忠,刘云,等.计及碳减排的电动汽车充换储一体站与主动配电网协调规划[J].电工技术学报,2022,37(01):92-111.
[6] 曾梦隆,韦钢,朱兰,等.交直流配电网中电动汽车充换储一体站规划[J].电力系统自动化,2021,45(18):52-60.
[7] 胡珏,韦钢,袁洪涛,等.电动汽车充换储一体站的建模[J].电力建设,2020,41(06):44-51.
[8] 陈宏.融合AI与大数据的高低压柜电力监控系统智能运维路径研究[J].中国宽带,2026,22(05):143-145.
[9] 闫鹏飞,桂文标,郑天昆,等.基于多源大数据的机电设备智能运维平台设计[J].模具制造,2026,26(04):183-185,188.
[10] 贾发,杨成秀.电气设备智能运维平台构建与状态评估[J].灯与照明,2026,50(02):211-213.

# 智能化技术在配网急抢修管理中的应用与实践

奇少华，白建平

（鄂尔多斯市供电公司伊金霍洛旗供电分公司，内蒙古 鄂尔多斯 017200）

**摘 要** 配网急抢修管理面临故障感知滞后、调度决策低效与现场安全管控薄弱等系统性问题，严重制约供电服务质量的提升。本文针对上述痛点，构建了涵盖感知层、平台层、应用层与管理层的四层智能化技术体系，通过部署智能故障感知系统、抢修资源智能调度平台、现场智能辅助系统与数据融合决策平台，实现对配网急抢修全流程的智能化管控。结果表明，智能故障感知技术将故障定位时间从数十分钟压缩至几分钟，区段定位准确率稳定在较高水平；智能调度平台显著缩短派工决策时间，有效降低多点并发故障场景下的资源错配率；现场智能辅助系统实现安全管控的全程嵌入，安全违章发现率大幅提升。

**关键词** 配网急抢修；智能故障感知；资源智能调度；现场安全管控；数据融合决策

**中图分类号**：TM727.2；TM769 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.009

## 0 引言

配网急抢修是保障供电可靠性的关键业务环节，其响应效率直接影响用户停电时长与电网运维水平。然而，传统管理模式长期依赖人工感知与经验决策，在故障定位、资源调度与现场管控三个维度均存在显著短板：配网末端监测覆盖不足导致故障发现严重滞后，调度决策缺乏实时数据支撑导致资源错配频发，现场作业信息回传不畅导致安全风险难以有效管控。

## 1 配网急抢修管理的现实困境与智能化需求

### 1.1 配网急抢修管理的业务特征与流程分析

配网急抢修是电力系统运维体系中响应时效要求最高、现场环境最为复杂的业务环节。其核心业务链条涵盖故障受理、研判派工、资源调配、现场处置与恢复送电五个阶段，各阶段之间存在强时序依赖关系，任一环节的延误均会向后传导并放大整体响应时间。从业务特征来看，配网急抢修具有三个显著属性：其一，故障发生的时空随机性强，极端天气、设备老化、外力破坏等诱因叠加，使故障分布呈现高度离散化特征，难以预判；其二，抢修任务的紧迫性与资源约束之间存在结构性张力，抢修队伍、车辆、备品备件的有限性与故障并发时的需求峰值之间的矛盾尤为突出；其三，现场作业环境的不确定性高，带电作业、有限空间操作、恶劣气候条件等因素交织，对作业人员的安全管控提出了严格要求。

### 1.2 传统管理模式下的核心痛点与瓶颈

传统配网急抢修管理模式在信息获取、决策支撑与资源协同三个维度均存在深层次缺陷[1]。在故障感知层面，配网末端监测覆盖率不足，大量故障依赖用户投诉触发，被动响应机制导致故障发现时间滞后，停电范围在无主动感知能力的情况下难以快速圈定，研判人员只能依据经验推断故障区段，误判率较高。在调度决策层面，抢修资源的实时状态缺乏可视化手段，调度人员无法掌握各班组的精确位置、任务负荷与技能匹配情况，派工决策主要依赖经验判断，在多点并发故障场景下极易出现资源错配与重复调度问题，整体调度效率低下。

## 2 面向配网急抢修的智能化技术体系构建

### 2.1 智能化技术体系的总体架构设计

针对配网急抢修管理在感知、决策、执行与管理四个层面的能力缺口，智能化技术体系的架构设计遵循纵向贯通、横向协同的基本原则，构建涵盖感知层、平台层、应用层与管理层的四层递进式体系。感知层以配网末端智能传感网络为基础，整合量测终端、故障指示器、无人机巡检等多元感知手段，形成覆盖主

作者简介：奇少华（1988-），男，本科，助理工程师，研究方向：配电线路施工安装。

干线路与末端分支的立体化监测网络，为上层应用提供连续、可信的实时数据流。平台层承担多源异构数据的汇聚、清洗与融合处理，依托电力物联网与边缘计算架构，实现海量数据的低延迟处理与跨系统互联互通，打破调度自动化系统、生产管理系统与地理信息系统之间的数据壁垒。应用层在统一数据的基础上，分别部署故障智能感知、资源智能调度、现场智能辅助三类核心应用模块，各模块之间通过标准化接口实现状态共享与协同联动[2]。

### 2.2 故障智能感知与精准定位技术

故障智能感知与精准定位是压缩抢修响应时间的首要技术环节[3]。在感知手段上，沿配网馈线分层部署智能故障指示器与微型同步相量测量单元，以毫秒级采样频率持续采集电流、电压波形数据，通过边缘计算节点对暂态特征进行实时提取，在故障发生后数秒内完成初步区段判断，将故障信息主动上报至调度平台，从根本上改变依赖用户投诉的被动感知模式。在定位算法上，将行波测距原理与阻抗法相结合，针对配网分支多、负荷波动大的特点，引入自适应阈值机制对测距结果进行动态校正，有效抑制分布式电源接入引起的测距误差；对于单相接地等高阻故障，采用基于暂态零序电流特征的模式识别方法，提升弱故障信号的检测灵敏度。在信息融合层面，将量测数据与配网拓扑模型、历史故障档案相结合，构建故障概率热力图，对高风险区段实施差异化监测密度配置，使感知资源向故障高发节点集中。

### 2.3 抢修资源智能调度与优化技术

抢修资源的智能调度以实时状态感知为前提，以多目标优化为核心，以动态重调度为保障，构建覆盖任务分配、路径规划与资源平衡的完整调度决策链。在状态感知层面，通过车载终端与移动作业终端实时回传抢修班组的地理位置、任务状态与技能资质信息，结合备品备件库存管理系统的实时数据，在调度平台上形成抢修资源的动态全景视图，消除调度人员的信息盲区。在任务分配层面，建立以抢修响应时间最短、资源利用率最优为双目标的数学规划模型，综合考量班组与故障点之间的行驶时间、班组技能与故障类型的匹配度、当前任务负荷与剩余工时等多维约束，采用改进遗传算法对派工方案进行全局寻优，在秒级时间内生成最优派工建议并推送至调度人员。在路径规划层面，融合实时交通数据与电网地理信息，为抢修车辆动态规划最优行驶路径，并在路况突变时触发路径重算，确保抢修队伍以最短时间抵达现场。

## 3 智能化技术在配网急抢修管理中的应用实践

### 3.1 智能故障感知系统的部署与应用效果

智能故障感知系统的工程部署以配网馈线的故障高发区段为优先对象，按照主干线路全覆盖、分支线路重点覆盖的原则分阶段推进传感终端的安装工作。在硬件部署层面，沿10千伏馈线每隔适当距离安装一套集成电流互感器、故障指示器与无线通信模块的复合型智能终端，终端采用太阳能与蓄电池联合供电方式，确保在极端天气导致市电中断时仍能维持正常工作；在变电站出线侧加装高精度行波采集装置，与馈线终端协同构成双重定位验证机制。在软件层面，边缘计算节点部署轻量化故障特征提取算法，对采集到的暂态波形进行本地预处理，仅将特征向量而非原始波形上传至主站，大幅降低通信带宽占用。系统投运后，故障主动感知率显著提升，调度中心在故障发生后数分钟内即可收到系统自动推送的故障区段判断结果与定位坐标，无需等待用户投诉触发，故障研判时间较传统模式大幅压缩。在实际运行中，系统对永久性故障的区段定位准确率稳定在较高水平，对瞬时性故障的识别与自动重合闸配合也显著减少了不必要的人工出动，整体抢修响应效率得到实质性改善。

### 3.2 抢修资源智能调度平台的构建与运行验证

抢修资源智能调度平台以配网生产管理系统与调度自动化系统为数据源，通过标准化接口实现双向数据交互，在此基础上集成车辆定位、人员管理与仓储管理三类子系统，构建统一的资源状态感知底座。平台的核心功能模块包括实时资源地图、智能派工引擎与任务跟踪看板三个部分。实时资源地图以地理信息系统为底图，将所有抢修班组的实时位置、当前任务状态与可用时间窗口以图形化方式呈现，调度人员可在同一界面内完成故障位置与资源分布的空间关系研判。智能派工引擎在接收到故障工单后，自动从资源地图中筛选满足技能要求的可用班组，依据多目标优化模型计算各候选方案的综合评分，在界面上以排序列表形式呈现推荐方案及其决策依据，调度人员可一键确认或手动调整后下发工单。任务跟踪看板实时显示所有在途工单的处置进度，当现场反馈的实际情况与预估工时出现显著偏差时，系统自动触发重调度评估，必要时向调度人员推送资源补充建议。平台运行

验证结果表明，在多点并发故障场景下，智能调度方案的资源利用率与人工调度相比有明显提升，平均派工决策时间大幅缩短，抢修队伍的无效行驶里程显著减少[4]。

### 3.3 现场智能辅助系统的实施与安全管控成效

现场智能辅助系统是以移动智能终端为主，佩戴式安全监测设备是必须的，在现场用人机结合的方式进行智能作业的工作模式。系统运行时，根据不同的故障种类事先制定了标准的智能作业包，每一个作业包里都有设备参数查询、作业步骤引导、安全风险提示、工器具清单这四个部分，抢修人员接到任务后可以直接从终端上下载对应的作业包，在现场按照步骤一步步进行，每一步都必须经过确认之后才能结束，系统会把每个步骤所花费的时间以及操作人员的信息全部记入电子作业记录中。就作业人员的心率、体表温度、运动加速度等做连续监测，把作业环境温度湿度、气体浓度检测信息一起输入系统，得到对个体安全状态的总体评价模型，当检测到人员进入带电范围内的安全界限或者出现生理指标出现异常情况时，终端就会发出振动和声光告警信号，将告警消息传送到调度中心的安全监控席上。作业人员完成重要的安全措施之前和之后都要拍照留存现场照片，后台会自动对比照片中标示的安全工器具使用情况（接地线、遮蔽用具等），发现有违规的会及时发出整改通知。系统实施之后，现场安全违章行为的发现率明显提高，作业过程中的安全控制由原来的依靠班组长现场监督变为系统的全程嵌入式控制，安全管理的可靠性和一致性都有了实质性的提高。

### 3.4 数据融合决策平台的集成应用与管理提升

数据融合决策平台属于智能化技术体系的“心脏”，它把配网急抢修过程中的各个子系统所产出的数据集中整合起来，进而搭建出一个统一的分析架构，以此达到对整个配网急抢修进程全盘掌控的目的。在集成应用上，平台采用消息总线的方式来达到各个子系统之间实时的数据同步，任何一个子系统的状态改变都会在毫秒级的时间内被平台的全局视图反映出来，保证管理人员看到的就是目前的真实情况[5]。根据态势感知的观点，平台把停电用户数量、故障历时、重要用户受侵袭状况、抢修推进进程等关键数据纳入动态态势大屏之中，管理者可以及时知晓全市所有应急处理任务大致状况，当出现超常的请求以及具有较高危险级别的地方的时候，应当加以留意并且及时展开主动干涉。平台根据之前采集到的各类信息构建了抢修时间预测模型，从不同种类的故障、现场情况、资源配置情况出发来估计出需要多长时间才能把电恢复过来，并给用户服务中心主动发出供电前通知内容提供依据。从管理提升的角度来讲，平台会定时产生包含响应及时率、资源利用效能、安全指标以及用户满意程度在内的全部绩效报表，并且通过于诸多指标展开横向比对和纵向走向剖析来发现管理上的薄弱环节以及需改进之处，从而给班组绩效考评和资源配置改善提供客观的数据支撑，促使配网急抢修管理能在数据引领的不断更新进程中实现螺旋式上升。

## 4 结束语

本文根据配网急抢修管理智能化转型的需求，提出了一种从纵向上贯通、横向上协同的四种层次的智能化技术体系。依靠智能故障感知、资源优化调度、现场智能辅助、数据融合决策这四个方面的协同使用，可以很好地解决传统模式下人工决策造成的问题，如信息孤岛、人工干预造成的效果不能及时反映到实际中来等问题，并使故障响应更快、效率更高、安全更加可控。从工程实践上看，该方案的结构较完善，操作性较强，并且可以进行扩展使用。各个模块间相互配合，从而达到抢修流程的闭环式管理。随着人工智能、数字孪生、5G 通信技术不断进步，配网急抢修管理将从原来的故障响应型维修转变成故障预测型维修和无人现场作业，在这种情况下，电网运维模式就会发生从“以被动应对为主”变为“主动防范”的巨大转变。

## 参考文献：

[1] 胡海彬,郑耀河,林明佳,等.配网抢修智慧指挥全流程管控系统设计 [J]. 电气技术与经济,2025(02):268-271.
[2] 徐振扬,马岩.基于GIS的配网抢修指挥关键技术的研究 [J]. 仪器仪表用户,2025,32(01):53-55.
[3] 王蓉蓉,马静.挖掘多维数据价值实现配网抢修智能化 [J]. 中国电力企业管理,2024(35):62-63.
[4] 孙华杰.基于多源信息融合的配网抢修建模与优化研究 [D]. 济南：山东大学,2019.
[5] 任桂田,王钢,李晓永.互联网＋模式下电力配网抢修指挥新体系研究 [J]. 资源节约与环保,2016(11):96,100.

# 人工智能在机械制造及其自动化中的应用研究

张勃晟，吴晓梅，苏长磊，孙路广
（山东丰科智能装备有限公司，山东 济南 250400）

**摘 要** 机械制造自动化在复杂加工环境下面临状态感知不足、参数调整滞后与系统协同弱化等问题。本文围绕刀具磨损预测这一关键控制变量，采用数据采集、特征建模与算法嵌入相结合的方法，分析人工智能在加工控制、质量识别、故障预测和智能排产中的应用过程。结果表明，人工智能能够改善加工稳定性，减少异常停机，优化生产节拍，并推动机械制造环节与自动化系统形成闭环协同。

**关键词** 人工智能；机械制造；自动化系统；刀具磨损预测；智能排产
**中图分类号**：TH16；TP18 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.010

## 0 引言

机械制造业正由规模化生产向高精度、多批次、柔性化生产转变，传统自动化系统依赖固定程序与人工经验，在复杂工况下容易出现响应迟缓、质量波动和资源配置失衡。刀具磨损、设备状态、加工参数与排产逻辑之间存在连续耦合关系，单一控制手段难以覆盖全过程变化。人工智能技术介入后，生产数据获得建模价值，控制系统具备状态识别和动态修正能力，为机械制造自动化升级提供了新的技术支点。

## 1 基于刀具磨损预测的智能控制嵌入路径

刀具磨损处于加工精度、设备负载与生产节拍的交汇位置，是人工智能嵌入机械制造自动化系统的适宜切口。在数控加工中，振动信号、主轴电流、切削力与温度变化可反映刀具状态，算法模型对多源数据进行特征提取后，形成磨损趋势预测结果。预测结果进入控制层后，系统依据磨损程度修正切削速度、进给量和换刀时机，使控制指令由固定程序执行转向状态反馈驱动[1]。

## 2 人工智能在机械制造环节中的具体应用模式

### 2.1 加工参数自适应调节

加工参数自适应调节以切削速度、进给量和主轴转速为核心变量。系统连续采集主轴电流、振动幅值、刀具温升与表面粗糙度数据，经特征提取后识别切削负载，并匹配相应参数组。加工中常以切削速度公式作为基础约束：

$$v_c=\frac{\pi Dn}{1000} \tag{1}$$

式（1）中，$v_c$ 表示切削速度，D 表示刀具直径，n 表示主轴转速。模型在限定 $v_c$ 上下阈值的条件下，结合材料硬度、刀具磨损等级和加工余量修正 n 值，并同步调整进给量。若主轴电流持续高于额定区间，算法降低进给速度并压缩单次切削深度；若振动信号在稳定频段内波动较小，系统维持当前参数并继续采集样本。参数更新并非单次替换，而是依据实时数据形成小幅滚动修正，使加工指令贴合当前负载状态。

### 2.2 视觉质量在线识别

视觉质量在线识别以工件表面图像、边缘轮廓和尺寸偏差为输入，将工业相机布置在加工出口、装配检测位或机械手抓取末端，采集图像后完成灰度校正、噪声滤除与区域分割[2]。图像进入卷积神经网络后，模型对裂纹、毛刺、划伤、崩边等缺陷区域进行定位，并将识别结果映射到工件坐标系。缺陷判定常引入交并比指标约束检测框精度：

$$IoU=\frac{Area(Bp\cap Bg)}{Area(Bp\cup Bg)} \tag{2}$$

式（2）中，$B_p$ 为模型预测框，$B_g$ 为人工标注框。当 IoU 达到设定阈值时，系统判定缺陷定位结果满足检测要求。尺寸识别环节则依据像素坐标与实际尺寸之间的标定关系展开换算，常用相机内外参数矩阵建立空间映射：

$$s\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=K\begin{bmatrix}R & T\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\\1\end{bmatrix} \tag{3}$$

式（3）中，(u,v) 为图像像素坐标，(X,Y,Z) 为工件空间坐标，K 为相机内参矩阵，R 与 T 分别表示旋转

作者简介：张勃晟（1983-），男，专科，研究方向：机电一体化、智能制造。

矩阵和平移向量。模型输出缺陷类别、位置坐标和尺寸偏差后，检测结果直接写入质量数据库，并与加工批次、刀具编号、主轴转速等参数绑定。

### 2.3 设备故障趋势预测

加工参数的实时修正与视觉质量的在线识别，为设备状态分析提供了连续数据来源。设备故障趋势预测以主轴振动、轴承温度、电机电流和刀具负载为输入，将加工过程中的异常波动转化为可计算的状态特征。系统在采样端设置固定时间窗，对振动信号进行频域分解，提取均方根值、峭度和频谱峰值等特征，常用均方根表征振动能量水平：

$$X_{RMS}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i^2} \tag{4}$$

式（4）中，$x_i$ 为采样点振动幅值，N 为时间窗内采样点数量。若 $X_{RMS}$ 连续偏离设备基准区间，模型将其与温度升高、负载变化进行联合判断。故障趋势识别常采用剩余寿命预测模型，将多维状态特征输入时间序列网络，输出设备剩余可运行周期：

$$RUL_t=f(x_t,x_{t-1},\cdots,x_{t-k};\theta) \tag{5}$$

式（5）中，$RUL_t$ 表示 $t$ 时刻预测剩余寿命，$x_t$ 为当前状态特征向量，$k$ 为历史窗口长度，$\theta$ 为模型参数。模型输出结果进入维护管理模块后，与设备编号、加工批次、刀具状态和工艺参数同步绑定[3]。若轴承温升与振动峰值在同一时间窗内呈持续上升趋势，系统生成故障等级标签，并将维护节点嵌入生产计划，避免设备状态判断与现场排产脱节。

## 3 由制造环节智能化到自动化系统重构

### 3.1 智能排产模型嵌入

加工参数、质量识别与设备状态预测完成单环节数据积累后，自动化系统需将状态变量纳入生产计划，智能排产模型由此进入调度层。以轴类零件加工任务为例，同批订单包含粗车、精车、铣键槽和磨削等工序，设备能力相近，但刀具磨损等级、主轴负载与任务队列存在差异。模型接收订单交期、工序时长、设备空闲时间和刀具状态数据，将刀具磨损等级 w 设为约束变量，限制高磨损刀具承担高精度精车任务。方案生成时，系统综合工序匹配度、换刀时间和等待时间分配任务。若某台数控车床空闲但刀具接近预警阈值，模型将粗加工任务分配至该设备，并将精车任务转至刀具状态稳定的机床。排产结果进入 MES 后，设备端按任务序列调用加工程序。

### 3.2 跨系统数据整合

智能排产模型嵌入后，设备状态、订单进度与质量信息需要在 MES、ERP 和数控系统之间保持一致，跨系统数据整合由此成为自动化重构的关键环节。生产现场采集端记录主轴转速、进给量、刀具磨损等级和工件检测结果，MES 接收设备实时状态并更新工序进度，ERP 同步订单交期、物料库存和外协周期。数据整合过程中，以工单编号、设备编号、刀具编号和批次号作为关联字段，避免质量数据与生产任务脱节。系统常以综合状态指数描述设备对当前任务的适配程度：

$$S_i=\alpha L_i+\beta Q_i+\gamma T_i+\delta M_i \tag{6}$$

式（6）中，$S_i$ 表示第 $i$ 台设备的综合状态指数，$L_i$ 为负载水平，$Q_i$ 为质量稳定系数，$T_i$ 为刀具状态值，$M_i$ 为物料齐套率，$\alpha$，$\beta$，$\gamma$，$\delta$ 为权重系数。若某批零件的视觉检测结果出现尺寸偏差，质量数据会绑定批次号回写至 MES，并同步关联对应刀具与设备状态；ERP 端则据此校正完工数量与后续物料需求。

### 3.3 全流程自适应优化

跨系统数据整合后，自动化系统获得订单、设备、质量与物料的统一数据入口，全流程自适应优化由单项控制转向联动修正。以轴类零件批量加工为例，系统在 MES 中接收精车工序排产结果后，同步读取刀具磨损等级、视觉检测偏差和物料齐套率。若某台设备对应批次连续出现外圆尺寸偏差，模型会调取该设备近期主轴负载、进给量和刀具状态记录，将异常来源限定在参数漂移、刀具磨损或夹具定位误差范围内[4]。确认刀具状态接近预警区间时，系统调整后续工序任务顺序，安排低精度粗加工任务承接当前设备负载，并将高精度任务转移至状态稳定设备。质量检测端继续采集下一批次尺寸数据，调度层据此更新设备适配度，控制层同步修正进给量与换刀节点。

## 4 人工智能在机械制造自动化中的应用研究

### 4.1 研究对象概述

前述自适应优化依赖稳定的数据链条与现场执行条件，因而应用研究选取某中型机械加工企业的轴类零件数控生产线作为对象。该产线配置数控车床、加工中心、在线检测工位和 MES 系统，具备数据采集基础，但原有排产仍以人工经验为主，刀具磨损记录与质量检测数据分散存储。轴类零件加工批量稳定、工序衔接清晰，对尺寸一致性和刀具状态敏感，适宜用于观察人工智能在加工控制、质量反馈与调度协同中的嵌入过程。

### 4.2 智能嵌入实施过程

应用过程以“数据分散”向“状态联动”的变化为主线展开。产线原有记录多停留在设备台账、刀具更换表和质检报表中，信息之间缺少稳定对应关系；

改造中以工单编号为主线，将设备编号、刀具编号、加工程序号、检测批次号纳入同一数据表，单件产品从上料、加工到检测的状态轨迹由此形成。现场采集端不改变机床原有控制结构，仅在主轴电流、振动传感、刀具寿命计数和在线测量端口处增加数据读取节点，使控制系统保持原有运行边界，算法模块在旁路状态下完成识别与反馈。

刀具磨损数据的处理方式由“定时更换”转为“等级标记”。系统依据主轴电流波动、振动均方根值和累计加工时长生成刀具状态标签，将刀具划分为正常、关注、预警三个等级。处于关注等级时，模型不直接触发换刀，而是将该状态传递给排产模块，限制其承接高精度精车任务；进入预警等级后，系统生成换刀提示，并暂停后续同类型高负载任务分配。该设置避免算法越过现场工艺约束，也保留操作人员对异常情况的确认环节。

质量数据的流向由“检后留档”转为“检后回写”。在线检测工位完成外圆尺寸、端面跳动和表面划痕识别后，结果不再单独存储，而是回写至对应工单、设备和刀具记录。若同一刀具连续关联尺寸偏差，模型将其识别为状态异常信号，并把该标签送入下一轮参数修正。排产端随之读取设备负载、刀具等级和质量标签，调整任务队列[5]。

### 4.3 运行效果分析

运行效果分析采用改造前后三个月同口径数据进行对照，指标覆盖刀具异常停机、尺寸偏差反馈、排产方式、质量追溯和任务等待状态。人工智能模块嵌入后，刀具状态由人工台账记录转为模型分级标记，检测数据由质检端单独留存转为工单回写，排产端能够同步读取设备负载、刀具等级和批次质量标签。为直观呈现人工智能模块嵌入前后数控生产线运行状态的变化，围绕刀具管理、质量反馈、排产协同与工序衔接等指标进行对照，具体情况见表1。

表1显示，人工智能嵌入后的变化并非单一指标改善，而是刀具管理、质量反馈与排产逻辑之间形成联动。刀具异常停机次数下降，说明磨损预测模型对现场换刀节点具有参考价值；尺寸偏差数据回写工单后，质量异常能够与设备和刀具记录建立对应关系；排产方式由人工经验安排转向状态约束分配，使高精度工序与设备实际状态更加匹配。该结果表明，人工智能在机械制造自动化中的应用重点不在于替代原有系统，而在于重组数据流向与控制反馈关系。

表1 人工智能嵌入前后数控生产线运行状态对比

| 指标类别 | 改造前状态 | 改造后状态 | 变化表现 |
|---|---|---|---|
| 刀具异常停机 | 月均约6次 | 月均约3次 | 预警等级触发换刀提示 |
| 尺寸偏差反馈 | 检后人工登记 | 检测数据回写工单 | 偏差数据关联设备与刀具 |
| 排产方式 | 按空闲设备人工安排 | 结合设备负载与刀具等级分配 | 高精度任务避开预警刀具 |
| 质量追溯 | 依赖质检报表查找 | 批次、刀具、设备同步绑定 | 异常来源定位路径缩短 |
| 任务等待状态 | 局部工序偶发积压 | 队列随状态标签调整 | 工序衔接稳定性增强 |

## 5 结束语

人工智能在机械制造及其自动化中的应用，关键在于将加工数据、质量数据与设备状态转化为可参与控制和调度的运行依据。以刀具磨损预测为切入点，智能模块能够嵌入数控加工、视觉检测、故障预测和排产管理等环节，使制造过程由单点控制逐步转向状态联动。应用研究表明，人工智能并非脱离现场工艺的独立技术，而是依附于数据采集、模型判断和系统反馈形成协同机制。未来应用仍需围绕数据标准、接口兼容和模型更新周期展开优化，以增强机械制造自动化系统的稳定性与适应能力。

## 参考文献：

[1] 谢允红，徐思琦，肖汝梦. 智能制造中机械设计制造自动化应用研究[J]. 模具制造，2026,26(03):189-191,194.
[2] 王辉，李志强，王克文. 自动化石油机械制造技术分析[J]. 中国设备工程，2026(05):177-179.
[3] 唐伟尤. 人工智能在机械自动化领域的应用[J]. 造纸装备及材料，2026,55(01):47-49.
[4] 林庆旭. 人工智能在机械设计制造及自动化中的运用分析[J]. 现代制造技术与装备，2025,61(12):183-185.
[5] 吴玉金. 机械制造自动化技术特点与发展趋势[C]// 广西网络安全和信息化联合会. 第十四届工程技术管理与数字化转型学术交流会论文集(下册). 云南冶金昆明重工有限公司，2025.

# 人工智能在高速公路机电系统维护维修中的应用

李聿奚

（四川营达高速公路有限公司，四川 达州 635000）

**摘 要** 在高速公路机电系统的维护维修工作正加速向智能化方向发展的背景下，本文以人工智能技术赋能运维为主线，围绕预测性维护与维修决策两大核心环节展开研究。在预测性维护层面，重点阐述设备运行状态智能监测、故障趋势预测等核心应用场景。在维修决策层面，深入分析维修方案智能生成与运维资源智能调度的实现路径。工程实践表明，人工智能技术的应用可进一步增强系统运行可靠性，提升维修资源配置精准度，为高速公路机电系统的高质量运维提供有力支撑。

**关键词** 人工智能；高速公路机电系统；维护维修

**中图分类号**：U418.7；TP18 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.011

## 0 引言

根据《中国高速公路智能化行业发展趋势与投资规划建议报告 2024-2030 年》，全国高速公路通车里程已达 19.3 万千米，稳居全球第一，机电系统设备保有量持续攀升，全国超 4 000 千米公路已完成智能化改造，改造覆盖率稳步提升。在此背景下，行业可进一步融合人工智能技术，对振动、温度等多源运行数据开展关联分析，实现机电设备健康状态的实时动态评估。

## 1 高速公路机电系统维护维修概述

高速公路机电系统维护维修涵盖沿线及隧道内监控等机电设施的定期检测、故障诊断、预防性养护以及应急抢修，是最大程度保障设备正常运行的系统性工程。该系统主要有监控系统、通信系统等六大板块：（1）监控系统，负责交通流信息采集，实现路网运行状态实时感知；（2）通信系统，为各子系统提供数据传输通道，保障信息交互畅通；（3）收费系统，承担通行费征收与数据清算，维持运营秩序；（4）供配电系统，为全线设备提供电力保障，保证不间断运行；（5）照明系统，满足主线及隧道内的行车视觉需求；（6）隧道机电系统则集成通风、消防及紧急呼叫功能，应对特殊工况下的安全需求。根据交通运输部发布《数字交通“十四五”发展规划》，将智慧高速与基础设施数字化列为重点发展方向，为高速公路机电系统运维模式的智能化转型划定清晰蓝图。

## 2 人工智能在机电系统预测性维护中的应用

### 2.1 预测性维护的核心目标

预测性维护的核心目标是持续监测设备运行状态，提前识别潜在故障并优化维护计划，实现运维资源合理调配以及提升设备的可靠性。人工智能技术在其中发挥关键作用，利用深度学习、机器学习及多源数据融合方法，能够对振动、温度等监测信号进行高维特征提取，量化设备退化趋势并揭示隐性故障规律。预测性维护旨在将传统基于时间或使用周期的被动维护模式转化为主动决策模式，让运维策略能够依据设备实际状态动态调整。核心目标还有降低计划外停机风险、延长设备剩余使用寿命及提高系统冗余，并借助数据驱动模型提供可解释性决策支持。人工智能赋能下的预测性维护不但聚焦故障预测，还强调多维性能指标的同步监控、运行模式自适应分析以及异常事件的提前预警。

### 2.2 人工智能在高速公路机电系统维护中的技术基础

1. 设备运行状态智能监测。设备运行状态的智能监测依托合理的传感器布设，精准采集振动幅值、温度梯度等关键参数，从而保证运维数据能够真实反映高速公路现场工况，并提高后续人工智能预测分析的准确性，同时提前识别设备异常征兆，为精准维护提供决策依据。监测盲区减少之后，状态评估就有了可

作者简介：李聿奚（1995-），男，本科，助理工程师，研究方向：高速公路机电管理。

靠的数据基础，高速公路运维决策得以从被动应对转向主动干预，维护策略由定期检修向预测性维护转变。同时，人工智能监测体系带来的价值不止于此，还能降低人工巡检频次并提升数据采集的连续性，进而提高高速公路全线设备的感知覆盖密度，为维护资源配置优化提供数据支撑[1]。在技术部署过程中，需要勘选监测点，合理布置振动传感器在轴承座径向与轴向位置、温度传感器在绕组端部及散热通道间距、电流互感器在进线柜的接线相序，并依照通信协议完成测点配置，保证数据采集的规范性。系统上电后，边缘单元按设定频率同步采集信号，振动采样率不低于2 560 Hz，温流采样间隔1秒。数据经放大、滤波及A/D转换后上传边缘节点。特征提取阶段，振动信号经傅里叶变换得频谱、包络谱提取调制边带，温度数据按窗口计算均值判别温升，电流数据经小波去噪提取基波。

2. 机电设备故障趋势预测。机电设备故障趋势预测环节利用有效的特征提取，量化推演高速公路机电设备健康度衰减速率。基于推演结果，人工智能系统在故障发生前能够准确判定维护介入的最佳时间窗口，从而将高速公路维护响应的触发节点置于主动干预阶段。这一时序前移有效压缩设备从异常萌生到功能丧失之间的处置真空期，进而显著降低突发性停机的实际发生概率。趋势研判前置后，高速公路维修计划编排便有了量化依据，养护资源得以从事后调度转向事前部署。同时，人工智能预测能力还能延长关键部件在役周期，并压缩非计划停机时长。在技术实现层面，需先完成历史数据清洗，逐一校核振动烈度等特征参量的时序完整性，按设备类型与故障模式建立标准化退化样本库。特征工程从时域频域与时频域三个维度展开。时域提取均方根值峰值因子以及峭度指标，频域计算边带能量比和谐波畸变率，时频域通过小波包分解获取各频带能量熵。人工智能模型构建会针对不同退化特性选择差异化架构[2]。针对轴承类部件采用卷积神经网络提取频谱特征并通过长短时记忆网络捕捉时序依赖，经双支路融合后输出退化曲线。针对电子类器件采用门控循环单元网络对缓变参数建模，以此预测失效时间节点，为维护决策提供量化支撑。

3. 机电系统整体运行健康度动态评估。机电系统整体运行健康度动态评估，为高速公路维护管理掌控系统级运行态势提供依据，并为维护资源的宏观科学配置奠定基础。健全的指标体系与合理的人工智能评估模型能够量化监控、通信、收费、供配电及隧道机电各子系统间的相互影响。整体健康度量化后，全线设备维护优先级便有了统一标尺，维护计划从分散处置转向统筹编排，同时支撑高速公路路网级维护策略滚动优化。在人工智能评估模型构建层面，指标赋权采用层次分析法与熵权法结合的组合赋权策略，前者依据专家经验确定相对重要性标度，后者基于数据离散程度修正客观权重，二者融合得综合权重。进入系统级聚合阶段，采用加权求和模型自底向上逐层计算，由单指标健康分值与权重得单设备健康度，再聚合得子系统健康指数，最终综合各子系统指数与关联系数生成高速公路全线整体健康度评分。子系统关联系数反映故障跨系统传导强度——监控与通信系统关联系数取0.8以上，照明系统则低于0.2。评估结果按评分区间划分健康、关注、预警三级，以绿黄橙三色标识推送高速公路维护管理中心，提供宏观态势到微观指标的穿透式决策支持。

## 3 人工智能在维修决策中的应用

### 3.1 维修决策的智能化转型需求

维修决策的智能化转型，意味着高速公路机电系统运维从“发现故障再安排”向“预判需求早调度”演进，决策依据由经验主导向数据驱动转变，设备获得恰逢其时的维修介入，同步提升可用率与高速公路路网通行保障能力[3]。人工智能的引入让故障诊断结论直接关联维修策略生成，备件需求自动推算，多工种协同维修效率持续改善。设备健康度评估结果是启动维修决策的首要输入，健康指数降至关注阈值时人工智能系统自动生成预维修工单，维修类型按劣化紧迫程度划分为计划性保养、预见性更换及应急抢修三级。以高速公路通信系统交换机为例，光模块接收功率较出厂值衰减超3 dBm时纳入计划保养，衰减达6 dBm时建议预见更换。从时机优化视角审视，维修决策介入应在功能尚处正常区间、性能指标已显退化迹象时择机执行。高速公路收费车道栏杆机电机启动电流较基线上升20%即为最佳维修窗口，既可规避突发停摆，又能将通行影响降至最低。维修方案生成综合故障类型、备件库存、维修窗口及人员技能四维约束，人工智能知识图谱将历史案例与设备手册关联匹配最优维修处置方案。涉及高速公路行车安全的维修任务需同步编制交通组织方案并报调度中心审批。

### 3.2 人工智能在高速公路机电系统维修中的技术基础

1. 故障类型智能诊断。故障类型智能诊断环节，决定了高速公路维修决策能否精准锁定故障根因，以及后续维修方案生成与资源调度的准确程度。特征辨识清晰加上人工智能推理链路完整，就能区分机械磨损、电气老化等不同故障类型，因此可以控制误判率。

故障类型明确之后，高速公路维修策略的匹配便有了可靠依据，处置方向得以从模糊排查转向精准定位。同时，人工智能诊断还能缩短高速公路机电设备故障平均维修时长，并降低对高技能人才的维修经验依赖。在技术实现层面，故障特征库的构建需先完成故障类型的映射标注，将振动信号异常等征兆与对应故障类型建立映射关系。特征库按高速公路设备类别分层组织，监控设备涵盖视频丢失、图像卡顿等典型故障模式，通信设备主要有光功率衰减等常见问题，收费设备纳入栏杆不抬杆等高频故障类型。人工智能诊断推理采用贝叶斯网络构建故障树与症状的因果关联模型，网络节点表示故障原因，有向边表示因果传导概率。进入诊断执行阶段，人工智能系统接收前端监测模块输出的异常特征参量，沿贝叶斯网络自底向上逐层推理，计算各候选故障类型的后验概率并排序输出。以高速公路收费车道栏杆机不抬杆为例，可能原因涉及电机卡滞、控制器死机、地感线圈失效三类，其先验概率分别基于历史维修统计数据设定，条件概率则反映各故障类型触发特定征兆的似然程度。诊断结论同步推送至高速公路维修策略生成模块。

2. 维修方案智能生成。维修方案智能生成环节，决定了诊断结论能否转化为可执行的现场作业指导，以及高速公路机电设备维修质量与效率的最终水准。方案要素齐备加上人工智能工艺匹配精准，就能明确维修步骤等，作业盲区随之受控。方案标准化之后，高速公路不同班组执行同一任务的作业一致性便有了可靠保障，维修质量会从依赖个人经验转向依托规范流程。同时，人工智能智能生成能力带来的价值不止于此，还能压缩方案编制时长并优化备件领用精准度，进而缩短高速公路机电设备离线时间[4]。具体而言，维修知识库的结构化构建，将设备技术手册、历史维修工单记录及检修规程中的文本信息抽取为故障类型、维修工序、备件清单、工具列表及注意事项五类实体，并建立实体间的关联关系。知识库按高速公路设备类型分层存储，每类设备对应一套标准化维修工序模板。进入方案生成阶段，人工智能系统接收故障诊断模块输出的故障类型与置信度，在知识库中检索匹配度最高的维修工序模板，经规则引擎校验后生成初步方案。这里需要指出，维修工序模板的匹配精度并非仅由关键词重合度决定，而是受故障描述的语义完整性与知识库覆盖度共同影响。以高速公路通信系统交换机光模块更换为例，若仅匹配“光功率异常”这一表层现象，维修方案可能遗漏光纤端面清洁这一前置步骤，而引入诊断置信度与故障根因的关联约束后，工序完整性可由 75% 提升至 95% 以上。因此，将人工智能语义匹配与逻辑约束相结合，可视为维修方案精度与生成效率的优化平衡点。

3. 运维资源智能调度。人工智能调度算法合理加上约束建模完整，就能统筹高速公路维修工单优先级、班组技能匹配等多元要素，维修资源闲置随之受控[5]。调度指令下达后，各要素协同效率便有了可靠保障，高速公路运维响应从被动应对转向主动统筹。同时，人工智能智能调度还能压缩维修车辆空驶里程，降低单次维修综合成本。高速公路运维人员先完成资源台账数字化纳管，将维修班组技能标签、维修车辆实时定位、备件库存余量及工具分布统一接入人工智能调度平台。调度建模采用多目标优化框架，目标函数兼顾维修响应时效与调度成本，约束覆盖资质匹配。人工智能系统接收维修资源需求清单后，采用改进遗传算法搜索近似最优派工序列。这里需要指出，维修派工序列优化效果并非仅由算法收敛速度决定，而是受编码方式影响。以高速公路跨路段维修调度为例，若仅以距离最近为准则，高技能维修班组可能被低难度任务占用；引入技能匹配度加权后，紧急维修工单响应时长可由 45 分钟压缩至 28 分钟以内。因此，将时效性与维修资源稀缺度统一纳入目标函数，可视为人工智能调度效率与维修资源效益的优化平衡点。调度结果推送至高速公路维修班组终端，维修执行进度实时回传形成闭环。

## 4 结束语

人工智能技术为高速公路机电系统维护维修提供了智能决策的全新技术路径，助力运维管理向数据驱动方向持续演进。未来，将进一步研发自适应决策模型，提高系统在复杂工况下的泛化能力，同时开展不同路网规模与设备类型的适配研究，推动智能决策技术在高速公路行业的规模化落地，为交通基础设施数字化运维提供技术参考。

## 参考文献：

[1] 陈志勇.人工智能技术在高速公路机电系统维护维修中的应用研究[J].智能制造研究与应用,2025,01(01):25-27.
[2] 钱国森.高速公路机电系统智能化升级的关键技术研究[J].汽车周刊,2025(08):219-221.
[3] 蒋锦泉.高速公路机电系统智能化升级研究[J].通讯世界,2025,32(04):109-111.
[4] 沈于腾.智能箱在高速公路机电系统智慧运维中的应用[J].中国交通信息化,2024(09):141-143.
[5] 郑星.人工智能在高速公路机电系统维护维修中的应用[J].运输经理世界,2024(16):150-152.

# 数字技术赋能建筑工程技术升级的创新模式探析

李国磊[1]，朱 涛[2]

（1. 惠民县建设工程质量安全服务中心，山东 滨州 251700；
2. 惠民县城市建设服务中心，山东 滨州 251700）

**摘 要** 在新质生产力培育背景下，建筑业正迎来由粗放式建设向精细、智能建造的重要变革。数字技术作为关键推动力量，有效冲破了建筑业原有发展桎梏，全面优化提升了建筑工程技术水平。本文系统梳理了数字化技术助力建筑工程技术升级的主要创新形式，深入剖析了当前转型过程中面临的突出问题，并提出了针对性的改善路径与对策建议，旨在为建筑工程领域加速实现数字化转型提供理论参考。

**关键词** 数字技术；建筑工程技术；BIM技术；物联网；大数据

**中图分类号**：TU17；TU-0 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.012

## 0 引言

随着新质生产力的不断培育，建筑行业正处于从粗放型建造向精细化、智能化转型升级的关键阶段。传统工程建设生产率低、质量参差不齐、资源消耗严重等问题无法满足当下社会对建筑品质和可持续性发展的需求，数字技术作为工程革新的核心动力，逐渐打破了建筑业原有的桎梏，并为建筑工程技术发展提供了机遇与可能。

在建筑工程项目中，数字技术的应用范围越来越广，已经渗透到工程设计、施工以及运行等各个方面的具体环节。数字技术的应用为建筑工程带来了先进的数据采集、处理和传输方法，在建筑工程中采用数字技术能够促进相关技术水平的进步，降低建设成本并且提升工程建设的质量与效率。因此，数字技术促进了建筑工程技术全方位的升级，并针对数字技术如何促进建筑工程技术升级模式创新进行分析。研究发现，当前在数字技术应用过程中还存在问题，进而提出了优化途径，以期能够为促进建筑工程数字化发展提供有效借鉴[1]。

## 1 数字技术赋能建筑工程技术发展的主要创新形式

### 1.1 以BIM技术为主导的全生命周期协同升级模式

BIM技术作为建筑工程数字化的主要载体，解决了传统工程设计、施工和运维等各阶段相互独立的问题，能够使设计、施工和运维各阶段在技术和数据方面实现融合统一，是数字技术带动建筑工程技术发展的重要模式。

该模式以BIM模型为基础，集成了建筑工程中各阶段的几何信息、技术参数、进度和成本等信息，构建统一的数字化模型并实现其技术的协同优化。在设计过程中，采用BIM三维建模方法对建筑、结构以及机电等多个专业进行协同设计，在设计之前找出冲突及问题点并进行提前处理与优化方案，提高精度及效率。例如：上海金港智悦湾项目利用国产BIM软件PKPM-BIM建模，并通过Rhino实现参数化集成，控制好建筑外立面细节，提高了质量。在施工过程中，将BIM模型结合相应的施工进度计划和现场监测信息，可实现可视化管理、精准化施工，提高工艺和流程，减少返工浪费，如芜湖数字经济产业园项目基于BIM的多专业的模型协同与碰撞检查共发现了图纸上问题288个，有效提高了施工率。最后，在运维阶段利用BIM模型结合物联网技术和大数据技术，实现建筑设施设备的智能监测和预警以及准确定位与维护，延长了使用寿命并降低了运行成本。

### 1.2 基于物联网的施工过程智能管控模式

利用各种传感器、射频识别设备和移动终端等对建筑施工过程中的人、机、料、法、环等因素进行实时感知与数据采集分析，是推进建筑施工技术进步及提高建筑施工现场管理水平的重要模式[2]。

作者简介：李国磊（1984-），男，本科，工程师，研究方向：建设工程。

此模式依托物联网感知网络将现场各项技术指标实时传送并上传至云平台，以实现算法分析和对工程的智能调控和预警。在施工安全技术方面，通过在现场布置智能监控设备、人员定位设备、安全防护设备等来实时检测施工者的操作、机器运行情况及施工环境状况，如基坑沉降度监测、脚手架变形监测以及扬尘监测等，并在出现违规行为时及时警报以提升安全管理的准确性和时效性。就质量技术而言，通过运用传感器实时采集混凝土浇筑、绑扎钢筋、钢结构安装等工序的技术参数，并对比标准技术参数从而能够发现施工质量问题，提高施工工艺，保证其质量。在提高效率方面，可以运用物联网技术完成对施工现场机械进行智能调配、对物料精准化管理，降低人力成本与材料损耗，进而实现效率提升的目的。

### 1.3 大数据与人工智能驱动的技术优化升级模式

大数据与人工智能的应用，克服了以往基于经验的工程技术的不足，通过数据挖掘和智能算法的应用使建筑工程技术优化与创新更加精准化，并成为建筑工程技术智能化的核心动力。

该模式利用建筑工程在全生命周期中涉及的大量设计数据、施工数据、运维数据、环境数据等，运用大数据分析的方法挖掘出数据背后蕴含的规律及问题，再应用人工智能算法技术进行自动优化和智能决策。在设计阶段可以运用人工智能算法针对已有历史设计数据对建筑结构设计以及能耗设计等加以优化，使得设计更加科学合理和经济实用。例如：采用机器学习算法，通过大量的建筑设计案例自动生成最优的设计方案，并结合能耗模拟优化建筑采光、通风设计实现绿色建筑设计。在施工阶段，通过对施工过程产生的各项数据进行大数据分析，进一步优化工程进度计划和资源分配方案，并预测出现施工过程中存在的风险，提前制定应对措施，如基于多模态数据融合方法，综合结构监测和视频图像等多元数据，实现施工安全风险前置识别与分级告警。在建筑运行阶段，利用大数据以及人工智能技术分析运行中的建筑设施设备的运作情况，预测设备故障并优化维护策略，提升运维技术智能化。

### 1.4 数字孪生辅助的全过程仿真更新方法

数字孪生技术利用创建的建筑工程虚拟映射，通过数字孪生模型为建筑工程提供集成化的建筑信息建模（BIM）、物联网、大数据、人工智能等多种数字技术的工程仿真模拟与实时监测控制全过程应用解决方案，在工程设计中利用数字孪生模型实现全场景建筑设计方案模拟仿真，模拟建筑结构性能、能耗、使用等效果，发现并修正建筑结构设计缺陷，优化建筑技术设计方案。例如：文化公园双子山项目建立了监测风险总控数字孪生系统，实现了项目实时监测与风险监控。在建筑施工中，通过数字孪生模型实时反映施工现场情况，模拟建筑施工过程中的各种状况，对建筑工程施工技术及工艺进行优化改进，解决施工中的技术难点。例如：通过大跨度桁架吊装施工过程的模拟分析和优化方案确定，保证安全准确吊装。在运维阶段，数字孪生模型对建筑物设施和设备情况进行实时监控，并通过模拟各种故障场景，对维护方案进行优化完善，完成运维技术精确智能升级。

该模式的核心贡献在于构建“虚拟仿真—物理执行—数据采集—持续改进”的闭环机制，促使建筑施工技术从“经验指导”向“数据指导、仿真指导”转变，有效提高了建筑施工技术的精准性、有效性。

## 2 数字技术赋能建筑工程技术发展提升存在的问题

### 2.1 数字技术和建筑工程技术融合深度不够

部分企业只是将数字技术停留在简单应用层，如进行BIM建模、基本智能监控等，在数字技术与建筑工程核心技术（结构设计技术、施工工艺技术、运维技术等）融合上还远远不足，部分企业仅仅将数字技术作为“助手”，没有很好地挖掘数据要素的作用，使数字技术发挥的作用不能有效放大，从而实现建筑工程技术上的质变[3]。

### 2.2 数字技术应用基础设施不健全

完善的基础设施是数字化技术推动建筑工程技术升级发展的基础，如高速网络、数据存储设施、智能监测设备、协作平台等。而现阶段部分建筑企业（尤其是中小型企业）受资金投入与技术实力所限，存在基础设施投入不足的情况，主要表现在网络覆盖不全面、数据储存能力不强和智能设备储备不足等方面。同时，由于建筑施工现场复杂环境的影响，部分施工区域无法确保网络的稳定性与连续性，使得物联网设备传输的数据存在一定的滞后性，对数字化技术及时地发挥作用造成不利影响，并难以实现建筑工程的智能化管控和协同优化。

### 2.3 专业人才严重缺乏，人才结构不合理

从业人员整体数字化素养偏低，建筑技术人才对数字技术缺乏应用能力、数字技术人才对建筑工程不熟悉，造成相关领域的复合型人才存在较大缺口。同时，人才培养体系欠缺，高校及企业未对复合型人才

进行相应的人才培养，能满足行业数字化转型需求的人才结构不够完善，不合理的人才结构问题逐步显现，严重阻碍了通过发展数字技术以推动建筑工程技术发展的步伐。

### 2.4 标准不统一、数据共享机制缺乏

数字技术在工程建筑中缺乏统一的标准规范，BIM模型标准、数据采集标准、数据交换标准及技术应用标准不一致，各企业与项目工程之间存在技术标准差异问题，阻碍了不同数据之间的交互共享，限制了协同升级模式的发展。同时，数据资源共享机制不完善，各主体之间存在信息壁垒问题，设计数据、施工数据以及运维数据无法衔接传递，不利于发挥数字化赋能的全周期作用，制约了升级效果的全面发挥。

## 3 优化数字技术促进建筑工程技术发展的措施

### 3.1 加强数字技术与建筑工程技术的结合

转变观念，把数字技术作为促进建筑工程技术进步的重要动力，实现数字技术与建筑工程全周期核心关键技术深度融合[4]。一方面，重视设计、施工和运维等关键环节，促进BIM、物联网、大数据、人工智能等数字技术与结构设计、施工工艺、运维管理等核心关键技术的融合发展，提升技术流程、增强技术水平。例如：BIM技术和绿色建筑设计技术融合应用实现精准优化建筑物能耗水平，人工智能技术和建筑施工工艺融合应用完成智能化自动化施工。另一方面，促进不同数字技术之间的相互融合应用，使“BIM+物联网+大数据+人工智能”形成统一整体，避免信息孤岛现象的发生，实现各种数据之间的流动和有效利用。

### 3.2 数字技术应用的基础设施完善

投资建设数字基础设施，形成适应数字技术运用的基础设施。政府要加大政策及资金扶持的力度，鼓励建筑企业尤其是中小型企业加大对数字基础设施的投资与应用，完成高速网络、数据存储设备以及智能监控设施等数字基础设施的完善。与此同时，还要改善施工现场中的网络状况，实现对施工现场5G网络全覆盖，保证现场施工中传输数据的质量。创建统一的信息协同平台，使各个工程环节中的数据和技术资源都能够共享和整合在一起，保证各工程主体及各个环节之间的实时信息协同，为数字技术赋能建筑工程的技术发展做准备。

### 3.3 加大复合型人才的培养，改善人才结构

完善复合型人才培养机制，缓解人才缺乏，调整人才结构。改变高校专业设置，在数字技术和建筑工程技术之间建立融合的新型专业，并培养出既具备建筑工程知识，又精通数字技术知识的复合型人才。同时，加大企业对已有从业人员的培训力度，提供专门的BIM、物联网以及大数据等有关数字技术的培训教育，增强从业人员的数字化素养和技术水平。另外，引进人才。引进数字技术的专业人才到建筑领域中来，促进人才结构调整和转变。并且建立完善人才激励机制，激发人才创新活力，鼓励大家参与到数字技术的应用及发展研究当中[5]。

### 3.4 健全标准体系，完善数据共享机制

政府应组织制定统一的数字技术应用标准，如BIM模型标准、数据采集标准、数据交换标准、技术应用标准等，规范化建筑工程领域内数字化技术的运用，并且不同企业之间以及企业与工程项目之间的数字技术模型、数据可以得到很好的共享、交互。建立良好的数据共享机制，消除各个主体间的数据壁垒，实现设计阶段、施工阶段以及运营阶段之间建筑数据的有效共享。完善适应智能建造发展的工程质量监督模式、安全管理机制等相关机制，保障数字化技术应用的规范化及标准化发展，为数字化技术赋能建筑工程的技术革新提供有力的机制支持。

## 4 结束语

数字技术为建筑工程的技术升级提供了前所未有的机遇，利用以BIM技术为核心的建筑工程全生命周期的协同升级模式、基于物联网的施工过程智能化控制模式等，有效地实现建筑工程全寿命周期的技术协同升级、智能管控升级。但现阶段数字技术在赋能建筑工程技术升级方面还面临着数字技术融合程度不够高、基础建设不完善等问题。通过加大数字技术与建筑工程的深度融入融合、完善基础设施的建设、做好复合型人才培养都能有效缓解当前问题，并助力推动建筑工程行业的数字化转型和发展。

**参考文献：**

[1] 侯文鹏.数字技术支持建筑工程造价预结算审查与成本控制策略探究[J].新发现,2025(12):70-72.
[2] 陈斌.数字技术在建筑工程管理工作中的应用探究[J].房地产世界,2024(20):140-142.
[3] 陈凯.建筑设计中的数字手段与虚拟现实技术[J].地产,2019(20):59-60.
[4] 王景.用数字技术为建筑企业赋能升级[J].中国建设信息化,2018(12):13-15.
[5] 宋佩佩.数字化背景下建筑工程造价管理创新措施研究[J].房地产世界,2024(17):86-88.

# 建筑深基坑工程施工变形监测与安全预警模式分析

李 欢

（衡宇建设集团有限公司合肥分公司，安徽 合肥 231200）

**摘 要** 在深基坑工程施工过程中，变形监测与安全预警是防范坍塌、次生灾害的关键环节，直接关系到工程施工安全与周边环境稳定。针对当前深基坑监测指标选取不全面、方法适配性不足，以及安全预警阈值不合理、响应不及时等问题，结合深基坑工程特性与地质条件，对施工变形监测策略、安全预警模式及实施保障措施展开系统研究。确定覆盖边坡位移、支护应力等核心监测指标，优化自动化与传统监测结合的方法，建立规范的数据管理体系；构建分级预警阈值，完善闭环预警机制与智能化预警系统；从组织、技术、风险联动三方面搭建实施保障体系，实现深基坑变形精准监测与安全高效预警，旨在为深基坑工程施工安全管控提供实践参考，保障工程顺利推进。

**关键词** 深基坑；变形监测；安全预警；施工安全；智能化管控

**中图分类号**：TU433 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.013

## 0 引言

当前，建筑工程向深、大、难方向发展，深基坑施工环境愈发复杂，地质不确定性、周边环境敏感性显著提升，坍塌、滑移等安全风险防控压力持续增大。变形监测与安全预警作为基坑安全管控的核心手段，直接决定工程整体安全与周边设施稳定。传统监测模式存在指标单一、预警滞后、联动不足等问题，难以适配现代工程精细化、智能化管理要求。立足于工程建设安全新形势，结合智能化技术发展趋势，系统研究深基坑变形监测体系与分级预警模式，完善全过程实施保障，对提升风险防控能力、减少安全事故、保障工程有序推进具有重要现实意义。

## 1 建筑深基坑施工变形监测策略

### 1.1 变形监测核心指标确定

科学选取核心监测指标是确保监测数据有效性、支撑安全预警的基础，需结合工程特性全覆盖关键风险点。基坑边坡位移与沉降是监测工作的核心必测指标，直接反映基坑整体稳定性，其数据变化能直观呈现基坑边坡是否存在滑移、坍塌等安全隐患，为判断基坑施工安全状态提供最基础、最关键的依据。支护结构应力、周边建（构）筑物沉降及地下水位变化指标需同步纳入监测范围。支护结构作为基坑抗变形、抗坍塌的核心承载构件，其应力变化直接关系到支护体系的承载能力，一旦应力超出设计阈值，极易引发支护结构破坏；周边建（构）筑物沉降监测可有效防范基坑变形对周边既有建筑造成的开裂、倾斜等损害，避免引发次生安全事故；地下水位变化会直接影响基坑周边土体的抗剪强度与承载力，水位骤升骤降易导致土体软化、管涌等问题，进而威胁基坑安全。结合基坑深度、地质条件补充特殊监测指标，能进一步提升监测工作的针对性与全面性，如深厚软土地区需补充土体分层沉降监测，岩质基坑需增加岩体裂隙开合度监测，高水位基坑需强化孔隙水压力监测[1]。

### 1.2 变形监测方法优化选取

优化多种监测方法的搭配，做到监测数据精准、高效、实时采集，同时兼顾实用性和经济性，深基坑变形监测应该优先选用自动化监测技术，与传统人工监测相比，自动化监测可以做到连续、实时采集数据，能有效减少人工操作带来的人为误差，还能大幅提高数据采集效率，可以实时捕捉基坑变形的细微变化，及时发现潜在的安全隐患，尤其适合基坑深度大、施工周期长、变形风险高的工程。传统监测方法可以作为补充，和自动化监测技术互相验证、形成互补，在复杂地质条件下，如地形复杂、遮挡较多的区域，自

作者简介：李欢（1989-），男，本科，工程师，研究方向：建筑工程施工。

动化监测设备容易受干扰，出现数据偏差，这时可以用水准测量、钢尺量测这类传统方法进行复核，利用两种方法得到的数据做对比分析，剔除异常数据，保障监测数据的可靠性。监测的频率需要根据施工进度动态调整，在基坑开挖、支护结构施工这类关键施工阶段，基坑变形速度快、安全风险高，要适当加大监测力度、缩短监测间隔，保证可以及时捕捉变形的变化趋势。

### 1.3 监测数据管理与质量控制

建立规范的数据管理与质量控制体系，以此保证监测数据真实、完整、可用，为安全预警提供可靠支撑。搭建统一的数据管理平台，把所有监测指标的采集数据统一录入平台，做到数据集中存储、分类整理和快速查询，平台需要具备数据分类归档、趋势分析、异常提醒等功能，可以把不同监测点位、不同监测指标的数据，按照施工阶段、时间节点进行分类管理，方便工作人员快速调出所需数据，分析基坑变形的变化规律，同时建立完善的数据校验与异常排查机制，对采集到的监测数据做实时校验，利用数据合理性分析、逻辑校验等方法，及时筛除设备故障、操作失误带来的无效数据，对存在偏差的数据及时修正，保证每一组监测数据都真实有效。明确数据归档的标准，对监测过程中的原始数据、校验记录、分析报告等做规范归档，理清归档流程、存储期限与查阅权限，保证监测数据可追溯。

## 2 建筑深基坑安全预警模式构建策略

### 2.1 预警指标阈值设定

科学设定预警阈值是安全预警的核心，需结合工程实际、地质条件与规范要求，实现分级预警。预警阈值的设定需以相关行业规范与技术标准为基础，结合基坑规模、地质特性等工程实际情况进行精准确定，不同规模、不同地质条件的基坑，其变形承受能力存在差异，阈值设定需避免“一刀切”，如软土地区基坑的位移阈值应低于岩质基坑，深层基坑的沉降阈值需严于浅层基坑，确保阈值设定符合工程实际需求[2]。结合历史工程案例与施工风险评估，对基础预警阈值进行动态调整，通过分析同类基坑工程的监测数据与安全事故案例，总结不同施工阶段的变形规律与风险点，结合本次工程的施工方案、风险评估结果，实时调整阈值参数，适配施工全过程的变形变化需求，避免因阈值固定不变导致预警滞后或误报。设定一般、较重、严重三级预警阈值，明确不同阈值对应的风险等级与判断标准，一般预警阈值对应基坑轻微变形，需加强监测频次；较重预警阈值对应基坑变形接近临界状态，需启动初步处置措施。

### 2.2 预警机制优化设计

搭建高效闭环的预警机制，保证预警信息能快速传递、及时响应，避免安全风险进一步扩大，设置自动触发预警的机制，把监测得到的数据和预警阈值做实时对比，一旦监测数据超出对应阈值，系统就会自动发出预警，不需要人工操作，能减少人为原因造成的延误，保证预警能第一时间发出，给处理风险争取足够时间。理清预警信息的传递流程，明确建设、施工、监测、监理等各责任主体的信息接收渠道和对应职责，保证预警能精准快速地送到每一位相关负责人和现场施工人员手中，避免因为信息传递不通顺、责任划分不清晰，导致预警响应不及时。优化预警响应流程，针对不同的预警等级制定清晰的处理办法：一般预警时，重点增加监测频率，密切关注变形的发展趋势；较重预警时，立刻暂停相关施工工序，安排技术人员分析变形原因，采取加固支护等应对措施，严重预警时，马上启动应急预案，组织现场人员撤离，进行应急处理。另外，还要搭建预警反馈机制，跟踪监测处置措施的实施效果，根据变形变化调整处置方案，形成“预警—处置—反馈”的完整闭环管理，保证安全风险能得到有效管控。

### 2.3 预警系统搭建与优化

搭建智能化预警系统，整合监测数据与预警功能，提高安全预警的智能化水平与响应效率，这套系统需要做到监测数据采集、分析、预警功能的一体化运作，把自动化监测设备采集的实时数据同步接入系统，由系统自动完成数据整理、分析与比对，不需要人工重复操作，大幅提高预警工作效率，还能保证数据传递及时且准确，做到监测数据与预警信号同步联动。优化系统界面设计时遵循简洁、直观、易用的原则，简化操作流程，将核心监测数据、预警等级、处置建议等关键信息清晰呈现，保证现场施工人员和管理人员能快速掌握预警信息与处置要求，不用经过专业技术培训就能熟练操作，提高系统的实用性，强化系统的稳定性与兼容性，让系统适配不同类型的监测设备与施工场景，保证系统能长期稳定运行，避免设备兼容问题、环境干扰引发系统故障，影响预警工作进行[3]。另外，还要定期对系统进行维护与升级，优化系统算法，提高数据分析的精准度与预警响应速度，及时修复系统漏洞，保证系统始终处于最佳运行状态，为深基坑安全预警提供可靠的技术支撑。

## 3 深基坑监测与安全预警实施保障策略

### 3.1 组织管理体系完善

建立健全组织管理体系，明确责任分工，为监测与预警工作的有序开展提供组织保障。成立深基坑监

测与安全预警专项管理小组，由建设单位牵头，整合施工、监测、监理等各方力量，明确各方单位的职责分工，建设单位负责统筹协调、资金保障与监督管理，施工单位负责现场监测配合、预警响应与应急处置，监测单位负责监测数据采集、分析与预警信号发出，监理单位负责全程监督监测与预警工作的落实情况，避免因责任划分不清晰导致工作推诿、落实不到位[4]。建立常态化沟通机制，定期召开专项工作会议，同步施工进度、监测数据与预警信息，针对监测过程中发现的问题、预警响应过程中的难点进行集中研讨，形成解决方案，确保监测工作、预警工作与施工进度同频衔接，避免出现工作脱节。加强人员培训，针对监测人员开展专业技能培训，提升其监测设备操作、数据采集与分析的能力，确保监测数据的精准性；针对施工人员与管理人员开展安全预警知识培训，提升其对预警信号的识别能力与应急处置能力，确保预警信息发出后能快速响应、科学处置，全方位提升组织管理效能，保障监测与预警工作落地见效。

### 3.2 技术保障体系构建

强化技术支撑，促进监测与预警技术更新，提高工作的科学性与可靠性，引入无人机监测、光纤传感监测等先进新型监测预警技术，这类技术具备监测范围广、精度高、抗干扰能力强的特点，可以有效补足传统监测技术的短板，提高数据采集和分析的精准程度，尤其适合复杂深基坑工程的监测需要。建立技术交底与技术复核制度，在监测与预警工作开始前，要组织技术人员做完整的技术交底，明确监测点位、监测指标、监测方法、预警阈值等主要要求，保证工作人员准确掌握作业标准；在监测过程中，定期进行技术复核，全面检查监测设备校准状态、数据采集操作规范度、预警信号准确性，及时发现并修正技术问题，确保监测与预警工作符合行业规范和工程要求[5]。加强技术研发与创新工作，结合复杂深基坑工程的施工特点与监测需求，和科研机构合作进行技术研发，优化监测方法与预警算法，研发适配复杂场景的监测设备与预警系统，打破现有技术瓶颈，提高监测与预警技术的适配能力，促进深基坑监测与安全预警技术持续升级，为工程安全提供更有力的技术支撑。

### 3.3 风险防控联动机制建立

搭建监测、预警和风险处置的联动机制，做到风险早发现、早预警、早处置。将施工进度和监测预警工作联动起来，按照施工进度计划明确不同施工阶段的监测重点与预警要求，在基坑开挖、支护施工、降水施工这类高风险施工环节，加大监测强度、增加监测次数，提前预判风险点，保证可以及时捕捉基坑的异常变形，发出预警信号，防止风险进一步扩大。搭建预警处置的联动机制，明确预警信号发出后，各相关责任方的处置职责与响应时间要求，施工单位要在规定时间内启动处置方案，监测单位要持续跟踪变形的变化情况，监理单位要全程监督处置过程，保证处置措施科学、及时、有效，形成监测、预警、处置的无缝衔接，同时加强和周边环境管理部门的联动，提前向相关部门报备深基坑施工计划与监测预警方案，定期共享监测数据与预警信息；针对基坑变形可能影响周边道路、地下管线和公共设施的情况，共同制定防控方案，建立应急联动机制，一旦出现风险隐患，立刻协同进行处置，避免基坑变形引发周边公共安全事故，做到全方位、全流程的风险防控。

## 4 结束语

建筑深基坑施工变形监测与安全预警是一项系统性、全过程的工作，需兼顾监测的精准性、预警的及时性与保障的全面性。本文围绕深基坑变形监测核心要点、安全预警模式构建及实施保障，结合工程实际需求与地质特点，优化监测指标与方法，完善预警阈值与机制，搭建全方位的保障体系，有效解决监测数据可靠性不足、预警响应滞后等实际难题，形成一套科学可行的深基坑安全管控方案。深基坑工程地质条件复杂、施工风险多变，未来可结合新型监测技术的应用，进一步优化预警算法与处置流程，提升安全管控的智能化水平。本次研究成果可直接应用于各类深基坑工程实践，为同类工程的变形监测与安全预警工作提供借鉴，推动深基坑施工安全管理水平持续提升。

## 参考文献：

[1] 李祖春，戎祥. 建筑工程施工中深基坑支护技术的创新与应用 [J]. 智慧中国 ,2025(09):68-69.
[2] 白永龙. 深基坑支护施工技术在建筑工程施工中的运用 [J]. 大众标准化 ,2025(08):137-139.
[3] 谢晓东. 建筑工程施工中深基坑支护施工技术 [J]. 四川建材 ,2025,51(02):159-161,173.
[4] 陈燕坤. 高层住宅建筑深基坑支护工程施工技术要点分析 [J]. 中华民居 ,2024,17(08):172-174.
[5] 张文伟 . 建筑工程中深基坑支护的施工技术管理探究 [J]. 建材发展导向 ,2024,22(20):130-132.

# 公路填筑路基施工技术要点探究

王海青

（阿坝交投工程项目管理有限责任公司，四川 阿坝 623000）

**摘 要** 在公路工程高质量建设的背景下，路基填筑作为公路主体施工的重要环节，直接影响着道路承载能力。本文梳理公路填筑路基的工程特点，分析基底预处理、填料筛选改良及排水布设等施工技术要点，并提出优选摊铺平整设备、严控填料含水比率及规范分层填筑厚度等措施，旨在从多方面优化施工工艺，提高路基整体密实度，为保障公路工程长期安全运行提供参考。

**关键词** 公路工程；路基填筑；路基基底预处理；路基排水系统；路基压实成型控制技术

**中图分类号**：U416.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.014

## 0 引言

伴随交通强国建设战略的持续推进，依据《公路路基施工技术规范》（JTG/T3610-2019）的行业标准指引，国内公路工程建设正逐步进入高质量发展阶段。路网建设逐步向山区等复杂地貌拓展，多变地质及水文条件提高路基填筑施工管控难度。路基是公路的承重主体，探究其填筑施工技术要点，有助于实现精细化管理，优化工艺标准及现场管控，继而提高施工质量，对推动公路工程稳定发展具有一定的现实价值。

## 1 公路填筑路基特点

在路基填筑施工中，受填料特性差异、压实工艺不规范、现场管控不到位等因素影响，容易出现路基不均匀沉降、边坡滑塌、压实度不达标等问题，不仅增加后期维修成本，还可能引发交通安全隐患。公路填筑路基，是由土石填料堆积压实形成的带状承重结构，用于支撑路面，并传递行车荷载，其整体性能决定着公路的通行稳定性。该结构具备整体受力特征，结合均匀布设的结构层传递车辆荷载及环境外力，整体稳定性优于局部性能，任何区域的缺陷都会制约路基的整体承载状态。路基采用分层填筑工艺，逐层摊铺填料，并碾压密实，各结构层厚度与密实度相互制约，层间结合状态会影响路基受力传导效果。另外，填筑路基密切联系环境状况，长期暴露于自然环境中时，温湿度波动等外部条件会诱发路基结构变形，继而削弱其稳定性[1]。

## 2 公路填筑路基施工技术要点分析

### 2.1 路基基底预处理施工技术

基底承载力需对应路基荷载传递要求，采用静力触探方式，检测全域范围，基底承载力数值稳定＞1.2×路基设计应力，以防基底受力不均引发结构形变。同时，需清除全域的基底表层杂物及腐殖土层，清除深度控制在30 cm～50 cm区间，消除软性夹层对填筑层的干扰。基底压实作业，应遵循全域均质管控标准，基底压实度参数≥90%，基底压实沉降差控制在≤2 mm的区间。施工期间，可依据基底压实强度计算公式把控施工精度，公式为：

$$P=\rho gh \tag{1}$$

式（1）中，$P$为基底压实承载强度，$\rho$为基底土体压实密度，$g$为重力加速度，$h$为基底压实厚度。处理基底后，需维持表层平整均匀，没有凹凸偏差，表层倾斜度误差＜1%，保证后续填料摊铺压实的贴合度。

### 2.2 填筑填料筛选与改良技术

筛选填料，以粒径级配及塑性特征为双控指标，粗粒土最大粒径宜控制在层厚2/3以内，即≤200 mm，细粒土液限＜50%，且塑性指数＜26。采用筛分法，测定粒径分布，不均匀系数Cu≥5、曲率系数Cc=1-3时，级配良好。填料改良围绕含水率调节及粗粒掺配两个方向，高液限黏土天然含水率超出最优含水率±3%范围时，掺入3%～5%生石灰进行改性，闷料24 h～48 h，降低液限至＜40%。砂性土黏结力不足时，按照质量比5%～10%掺入黏土，提高内聚力。采用烘干法，测定填料含水率，施工含水率允许偏差为最优含水率的-2%～+1%。改良后填料的加州承载比（CBR）应≥8%，压实度达≥96%时的含水率波动区间，限定为最优含水率的±2%。填料级配修正公式为：

$$P=\frac{d_{max}-d}{d_{max}-d_{min}}\times 100\% \tag{2}$$

式（2）中，$P$为小于某粒径的土粒质量百分率，$d$为

作者简介：王海青（1987-），男，专科，研究方向：道路与桥梁施工。

筛孔尺寸，$d_{max}$ 为控制最大粒径，$d_{min}$ 为控制最小粒径。凭借调整粗、细料掺配比例，使级配曲线呈现平滑 S 形，以防平台段。掺配过程中，使用装载机及筛分机联合作业，筛分去除超粒径料后，按照计算比例分层堆放，机械翻拌 3 遍以上，保证混合料均匀，变异系数＜ 5%。

### 2.3 路基排水系统布设施工技术

路基排水系统布设时，应该遵循分层分区管控原则，针对路基填筑体内部及外部区域，实施差异化技术管控。布设地下排水结构，基底盲沟埋设坡度控制在 0.3% ～ 0.5%，保障地下水自然流通排出。盲沟内部，填充硬质透水集料粒径 20 mm ～ 40 mm，集料孔隙率 35% ～ 40%，保障透水导水性能达标。路基横向排水结构，需控制布设间距，常规路段横向排水设施布设间距≤ 40 m，低洼潮湿路段间距≤ 25 m，保证快速下排路面积水。边坡排水结构，要控制泄水孔孔径 =100 mm，孔位垂直偏差≤ 5 mm，泄水孔纵向排布高度差≤ 30 cm。排水结构连接路基填筑层的位置，需设置防渗隔离层，隔离层厚度 8 mm ～ 12 mm，阻断外部渗水渗入路基填筑土体 [2]。

### 2.4 路基压实成型控制技术

压实成型依据振动能量输入实现填料颗粒重排、孔隙压缩，核心为激振参数匹配填料力学响应。振动压路机激振频率 28 Hz ～ 32 Hz，依靠共振错动粗细颗粒、减小层间摩擦，形成骨料嵌锁结构。分层区分振幅：下层初压 1.8 mm ～ 2.0 mm 高振幅，粗颗粒排布成型骨架；表层终压 0.8 mm ～ 1.0 mm 低振幅，避免颗粒破碎与结构损伤。碾压速度 2.5 km/h ～ 4.0 km/h，每层碾压≥ 6 遍，末两遍沉降差≤ 2 mm。填料含水率偏差控制在最佳值 ±2%，黏性土取正向偏差、砂性土取负向偏差，每 2 000 $m^2$ 取样测含水率，超标雾化补水静置 30 min 后压实。分层双控压实度：细粒土每 1 000 $m^2$ 两点灌砂法测干密度，路床 0 cm ～ 80 cm 压实度≥ 97%，其余部位≥ 96%；粒径＞ 40 mm 粗粒土采用沉降观测，连续三遍沉降≤ 1 mm 判定合格。

### 2.5 衔接部位精细化填筑技术

依据原状土体模量，确定台阶开挖几何参数，内倾台阶宽度≥ 1.2 m，高度控制在 0.6 m ～ 0.8 m，台阶面内倾坡度取值 2% ～ 4%。相邻填筑层及台阶形成的模量渐变过渡要求压缩模量差值≤ 15 MPa。填料细粒化改性及压实阈值联动控制，衔接区填料最大粒径≤层厚 2/3，且≤ 10 cm，细粒含量调整成 8% ～ 12%。压实度标准，较一般路段提高 2%，按≥ 98% 控制，对应 K30 检测值≥ 130 MPa/m。静压及振动压实切换阈值，设定在填料厚度达到 0.9 m 时自动执行。利用应力连续系数，评价压实能量传递连续性，相邻碾压带重叠宽度取值 40 cm ～ 50 cm，压实遍数差值≤ 2 遍。衔接面垂直方向应力连续系数计算公式为：

$$K_c=\frac{E_2}{E_1}\cdot\frac{h_1}{h_2}\le 1.15 \quad (3)$$

式（3）中，$E_1$ 及 $E_2$ 分别为相邻填筑层压缩模量（MPa），$h_1$ 及 $h_2$ 为对应层厚（m）。当 $K_c$ ＞ 1.15 时，表明层间刚度超标，要调整填料级配。借助强夯方式补强，按 3 m×3 m 网格布设点位，单点夯击能取值 600 kN·m ～ 800 kN·m，每点位夯击 5 次～ 7 次，消除竖向应力空洞 [3]。

## 3 路基填筑关键施工保障措施

### 3.1 优选摊铺平整设备，提升填料均质程度

路基填筑施工的摊铺平整效果影响着填料分布均匀性及层间结合情况，是保障路基压实度的基础环节。采用标准化摊铺设备施工，可以按照分层填筑要求，控制摊铺厚度及作业质量，改善填料颗粒分布，提高填筑层整体均匀性，为路基成型质量提供保障。

省级干线公路改扩建路基施工，按《公路路基施工技术规范》（JTG/T 3610-2019）标准配置大型全自动智能摊铺机。设备搭载智能厚度控制系统及自动找平装置，按分层填筑规范与设计参数，设定摊铺速度 2.5 km/h ～ 4.0 km/h、预设摊铺厚度，实现匀速自动化摊铺，规避人工偏差，控制表层倾斜度误差≤ 1%。施工中设备摊平填料、打散结块，杜绝 200 mm 以上粗颗粒与细料空洞，控制填料不均匀系数≥ 5、曲率系数 1 ～ 3，保证级配均匀。通过设备微调适配常规段与过渡段施工，精细化摊铺保障整体平整度。摊铺后填筑层平整均匀、无凹凸堆积，提升路基均质度。碾压后层间压缩模量差值≤ 15 MPa，均衡路基受力，控制压实沉降差≤ 2 mm，消除沉降隐患，满足高质量施工要求。

### 3.2 严控填料含水比率，增强压实密实效果

土料在不同含水率下，压实性能各有差异。含水率偏离最优含水率后，土体摩擦力及黏聚力发生变化。含水率过低时，颗粒间润滑不足，摩擦阻力增大，压实过程中颗粒移动受限，密实度下降。含水率过高时，孔隙水压力增大，颗粒间有效应力降低，碾压时容易出现“弹簧土”现象。处于最优含水率时，颗粒表面形成适当水膜，碾压后，颗粒能够重新排列，并填充孔隙，干密度高 [4]。

某高速公路 K23+200-K28+600 路段路基填筑施工，填料为沿线取土场低液限黏土，经室内击实试验确定最优含水率 14.6%、最大干密度 1.91 g/$cm^3$。取土场填料天然含水率波动较大，区间为 11.2% ～ 17.8%。现场

采用烘干法，每2 000 $m^3$填料检测一次含水率。低含水率填料采用洒水车雾状补水，按每立方米填料加水25 kg～35 kg控制，补水后路拌机翻拌两遍，静置30 min以保证水分均匀。高含水率填料采用翻松晾晒工艺，推土机摊铺30 cm厚松铺层，旋耕机每日翻耕3次～4次、晾晒12 h，将含水率控制在15.5%以内。碾压前选取5个点位复测含水率，严格控制在13.6%～15.1%。压实后采用灌砂法检测，填料压实度均超96%，88%检测点压实度超97%。工后沉降量远低于设计允许值，精准的含水率控制可有效提升路基压实效果与长期稳定性。

### 3.3 规范分层填筑厚度，保障受力均匀传递

路基由多层叠加组成，单层厚度超出规范＞10%时，碾压无法穿透，形成表层密实，且内部疏松的夹层缺陷。厚度达不到规范值时，会增加15%～20%的成本，影响层间受力连续性。控制分层厚度，可保证每层密实度均匀，层间压缩模量差≤15 MPa，减少应力集中引发的变形，提高路基稳定性[5]。

因此，省级干线公路改扩建工程遵循现行路基施工规范，组织分层填筑作业，采用分区差异化厚度管控模式，搭配全程复测校验工艺，规避超厚填筑、薄层施工带来的各类质量缺陷，保障路基填筑层受力均匀连续。工程施工管控指标，严格对标行业标准执行（见表1）。

表1 路基分层填筑施工核心参数

| 检测项目 | 控制指标 |
|---|---|
| 线路总长 | 18.6 km |
| 不均匀系数Cu | 5.2～6.0 |
| 曲率系数Cc | 1.8～2.5 |
| 路床填筑厚度及偏差 | 20 cm（±1 cm） |
| 路堤填筑厚度及偏差 | 30 cm（±2 cm） |
| 碾压频率 | 28 Hz～32 Hz |
| 路床压实度 | ≥97% |
| 路堤压实度 | ≥96% |
| 压缩模量差值 | ≤15 MPa |
| 应力连续系数Kc | ≤1.15 |
| 碾压沉降差 | ≤2 mm |
| 三遍碾压沉降量 | ≤1 mm |
| K30地基系数 | 120 MPa/m～135 MPa/m |

路床区域控制摊铺厚度20 cm，偏差控制在±1 cm。路堤区域，按照30 cm厚度施工，误差控制在±2 cm。选用符合级配要求的填料，控制不均匀系数及曲率系数在标准范围内，保证颗粒配合状态。完成摊铺后，采用28 Hz～32 Hz碾压设备作业，并依据层厚，调整碾压参数，分层压实至规定压实度。在施工过程中，监测沉降差及地基系数，控制层间指标变化，保证按照参数要求完成各工序。

### 3.4 加密压实质量检测，预防局部沉降变形

路基填筑压实成型后，不易再调整，若局部压实不足，后期会发展为沉降。常规点位检测覆盖范围有限，常遗漏局部问题。加密检测可以更细致地反映施工质量情况。在施工过程中，结合不同区域标准，布设检测点，并增加检测频次，重点检查压实度及沉降差等指标，发现不达标位置及时处理，使路基各部位压实状态更加均匀，减少局部沉降风险。

高速公路新建工程路基施工，结合高速路基重载、沉降控制标准高、施工工况复杂的特点，搭建全域加密压实检测体系。项目主线填筑段落6.7 km，包含高填方、土石混填、桥涵过渡段，填筑厚度差异大，常规抽检无法全覆盖质量控制点。施工根据填筑层级与结构重要性分级加密检测，路床0 cm～80 cm核心承重区域，检测频次由每1 000 $m^2$两处提升至每500 $m^2$两处，重点排查碾压交接区、高填方分层区域及土石掺配过渡带。高填方路基每层碾压后检测压实度与沉降差，杜绝内部压实不足。桥涵过渡段增设K30地基系数检测，核算应力连续系数，保障刚度平稳过渡。现场根据填料类型采用沉降观测法检测。该检测模式消除施工盲区，全线路基各项指标均达标。通车后路基受力均匀、结构稳定，有效保障路基填筑施工质量。

## 4 结束语

科学规范的路基填筑施工技术，是保障公路工程长期稳定运营的核心基础支撑。把控路基各施工环节技术要点，实施精细化填筑工艺，可以提高路基密实度，减少路基沉降隐患。同时，结合现场地质条件及填料特性，合理调整施工方案，依据现场检测数据，修正施工参数，从源头规避边坡滑移及压实不足等常见病害。未来，路基施工应继续贴合行业规范，不断优化设备配置及质量管控模式，使公路路基填筑施工朝着标准化方向发展。

## 参考文献：

[1] 杨光洪.高速公路路基填筑施工技术要点分析[J].运输经理世界,2026(07):49-51.
[2] 何博.高速公路路基填筑施工技术要点[J].山东交通科技,2025(S1):28-30.
[3] 吕艳宇.公路路基土石方施工技术要点分析[J].交通世界,2024(27):83-85,89.
[4] 周裕朋.高速公路填筑路基施工技术要点探究[J].交通科技与管理,2024,05(16):153-155.
[5] 叶宇翔.公路填石路基施工技术要点分析[J].黑龙江交通科技,2024,47(08):59-63.

# 市政道路软基处理施工技术应用要点

赵绍云

（四川三江交通建设工程有限公司，四川 宜宾 644000）

**摘 要** 随着城市建设进程加快，市政道路建设范围持续向城郊延伸，滨湖临河路段普遍存在软土地层难题，此类地基土质松软、承载能力偏弱，极易引发路基不均匀沉降、路面变形开裂等病害，严重影响道路使用寿命与通行安全。传统粗放式地基处理方式难以满足现代道路建设标准，也无法适配城区复杂施工环境。本文结合市政道路工程施工实际，归纳软土地基固有特质，对比多种主流软基处理工艺适用条件，细致梳理各类技术现场实操流程与管控细则，明确全流程施工应用要点，以期为提升软基加固整体成效、保障市政道路路基结构稳定提供参考。

**关键词** 市政道路；软基处理；地基加固；换填垫层处理；水泥搅拌桩加固

**中图分类号**：U416.1 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.015

## 0 引言

新型城镇化建设进程持续加快，城市内部路网改造、新建市政道路工程项目数量持续增多。城市临水区域、旧城区回填区域分布大量软土地基，这类土体含水量高、固结性能差，在车辆荷载与自然环境作用下极易出现形变问题，直接影响道路通行舒适度与结构稳固性[1]。当前各类软基处理施工技术种类繁多，部分施工现场存在工艺选用不合理、实操流程不规范等情况，致使地基处理达不到设计标准。因此，系统梳理不同软基处理技术的现场施工规范与实操细节，对规范市政道路施工现场作业、提升路基施工整体品质具有实际意义。

## 1 市政道路软土地基的基本特征

市政道路工程施工中遇到的软土地基，大多由淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土以及粉质软黏土组成，集中分布在河道沿岸、低洼积水地带以及城市老旧回填区域。从物理属性来看，软土普遍具备天然含水率偏高、土体孔隙占比大、土体压缩形变能力强等特点，自然状态下土体结构松散，自身承载能力远达不到市政道路路基施工设计要求[2]。

从工程施工角度分析，软土地基固结沉降周期较长，完成路基填筑之后，后期仍会出现持续性缓慢沉降。多数项目将施工重心放在软基加固作业环节，加固施工完成之后未布设完善的沉降观测点位，观测频次不足，无法及时掌握地基沉降变化规律，容易出现路基填筑施工与地基固结进度不匹配的情况。同时，城区市政道路施工场地空间有限，地下给排水管线、通信管线排布密集，软基处理施工不仅要满足地基加固需求，还要规避对地下既有管线造成破坏，相较于野外公路软基施工，市政道路软基施工约束条件更多，施工难度也相对更高。此外，城市范围内软基土层厚度分布不均匀，同一道路路段之内土层软硬程度差异较大，进一步增加统一施工管控难度。

## 2 市政道路常用软基处理施工技术及适用范围

### 2.1 换填垫层处理技术

换填垫层技术属于市政道路浅层软基处理常用手段，施工原理较为简单，将路基范围内存在的软弱土层全部开挖清除，选用强度高、稳定性好、透水性佳的碎石、砂砾、灰土等优质填料分层回填至开挖区域，逐层碾压夯实形成稳固垫层结构，以此提升浅层地基整体承载能力[3]。

该技术整体施工流程简便，施工机械设备投入少，施工工期较短，现场操作难度偏低，在城市支路、小区配套道路等小型市政道路项目中应用较为广泛。整体施工受外界环境影响较小，雨季也可有序开展施工作业，仅适用于软土层厚度控制在3 m以内的浅层软土地基，若软土厚度过大，采用此种方式会大幅增加土方开挖与回填工程量，提升整体施工成本。

### 2.2 水泥搅拌桩加固技术

水泥搅拌桩技术依靠专用搅拌施工设备，将水泥固化剂与原位软土进行强制搅拌融合，利用水泥与土体之间发生的物理化学反应，形成整体性强、硬度较

作者简介：赵绍云（1984-），男，本科，研究方向：工程项目管理。

高的柱状固结体，多根桩体相互配合共同承担上部路基荷载，以此实现深层软土加固效果。

按照施工工艺划分可分为湿法搅拌与干法搅拌两种形式，湿法适用于含水率偏高的淤泥质软土，干法更适配含水率偏低的粉质软土。该技术施工占地面积小，施工过程中不会产生大量土方外运作业，施工噪声低，十分契合城市城区密闭施工环境，不会对周边居民日常出行与生活造成较大影响，多用于软土层厚度处于3 m～15 m区间的市政主干道软基治理工程。

### 2.3 真空预压加固技术

真空预压技术依托密封膜将软土地基施工区域进行密闭处理，借助真空抽气设备持续抽取密闭空间内部空气，形成负压环境，利用大气压力促使软土内部水分快速从预设排水通道排出，加快软土固结沉降速度，在短时间内完成软土地基压缩密实处理。

此种加固方式无需堆放大量配重物料，现场施工场地占用面积小，整体加固均匀性较好，适合大面积连片分布的深厚淤泥质软基路段。但该技术施工周期相对偏长，对施工现场密封施工质量要求严格，若密封层出现破损漏气情况，会直接大幅降低整体加固成效，多用于城市新区大范围市政路网软基统一治理项目。

### 2.4 堆载预压联合排水固结技术

堆载预压联合排水固结技术是在软基内部竖向布设塑料排水板，搭建完整地下水排出通道，再在地基表层堆放土方、砂石等重物施加固定压力，双重作用之下加速软土内部水分排出，缩短土体固结成型时长，有效降低地基后期自然沉降幅度。

该技术加固效果稳定可靠，施工成本适中，对各类深厚软土都具备良好适配性，不过施工工期较长，前期堆载物料堆放需要充足开阔场地，在城区老旧道路改扩建项目中使用受限，更多应用于城市近郊新建主干道、大型市政配套道路等场地开阔的工程项目之中。

如表1所示，清晰汇总各类常用软基处理技术各项适用条件与施工特点。

表1 市政道路主流软基处理技术适用条件对照表

| 施工技术类型 | 适配软土厚度 | 适宜土质类别 | 现场场地要求 | 整体施工工期 | 施工噪声影响 |
|---|---|---|---|---|---|
| 换填垫层技术 | 3 m以内浅层软基 | 杂填土、软弱素土 | 无严格场地限制 | 工期短 | 噪声小 |
| 水泥搅拌桩技术 | 3 m～15 m中层软基 | 淤泥质土、粉质软土 | 中小型施工空间即可 | 工期适中 | 中等噪声 |
| 真空预压技术 | 15 m以上深厚软基 | 高含水率淤泥软土 | 场地平整连片 | 工期偏长 | 噪声偏低 |
| 堆载预压固结技术 | 10 m以上深厚软基 | 各类均质软土 | 需开阔堆料场地 | 工期较长 | 噪声较小 |

## 3 市政道路软基处理施工全流程应用要点

### 3.1 施工前期勘察规划与方案布设要点

正式开展软基处理施工之前，必须完成精细化地质勘察作业，应依照市政道路线路走向合理布设勘察钻孔点位，直线路段均匀布设点位，在道路交叉口、线路转弯处、地质变化区段加密勘察点位，精准获取沿线土层分布深度、土体含水率、土体压缩系数、地基承载力等多项核心地质参数。

结合勘察所得地质数据，应联合设计单位、监理单位共同研讨确定最优软基处理方案，严格区分机动车道、非机动车道、人行道不同路段的地基加固标准，主干道行车荷载大，需选用加固强度更高的施工工艺，辅助道路可适当简化处理流程。同时，应提前梳理施工区域内部地下管线走向、埋设深度，在施工方案中标注管线防护范围，划定机械作业禁止触碰区域，从前期规划层面规避施工破坏管线的问题[4]。

除此之外，还应结合项目施工工期要求、当地季节气候特点调整施工排布计划，多雨地区应提前规划排水疏导设施，避开强降雨天气开展大面积软基加固作业，为现场有序施工做好前期铺垫。

### 3.2 不同软基处理工艺现场实操施工要点

采用换填垫层工艺施工时，首先精准划定开挖边线与开挖深度，避免超挖扰动下层原状土体，开挖完成之后及时清理基坑底部淤泥与杂物，保证基底整洁平整。进场回填物料必须提前完成筛分处理，严控填料粒径与含泥量，杜绝使用风化严重、杂质过多的劣质填料。回填作业遵循分层填筑、分层碾压原则，严格把控每一层填筑厚度，碾压施工依照先两侧后中间、先静压后振压的顺序作业，确保垫层整体压实度均匀统一。

运用水泥搅拌桩开展施工时，提前完成施工现场平整处理，精准测放桩体布设点位，做好清晰标记，桩机就位之后调整机身保持垂直状态，严控桩身垂直度偏差。施工过程中严格依照设计配比调配水泥浆体，把控浆液泵送速度与钻机下沉、提升速度，保证土体与固化剂搅拌均匀。成桩完成之后做好桩体成品保护

工作，避免重型机械碾压未凝固桩体，同时统一记录每根桩体施工时长、水泥用量等基础施工数据。

实施真空预压施工阶段，重点把控密封膜铺设质量，膜体拼接位置做好黏结密封处理，杜绝出现缝隙漏洞，排水板布设保持垂直均匀，严格控制布设间距与插入深度。真空负压抽取作业循序渐进提升压力数值，不可一次性加压过大，定时监测膜下真空度数值，发现数值异常及时排查漏气点位并快速修补，保障负压固结作业持续稳定推进。

### 3.3 施工现场质量过程管控实施要点

首先，落实进场原材料质量抽检制度，水泥、砂石、排水板、密封膜等所有施工用材进场时，必须核验产品合格证明，现场随机抽取试样送至检测机构完成性能检测，检测结果达不到施工标准的材料一律禁止投入施工现场使用，从物料源头把控施工基础质量。

其次，强化现场施工参数动态管控，安排专职现场管理人员全程旁站监督施工作业，实时核对现场施工参数是否与设计文件保持一致，发现填筑厚度超标、搅拌速度异常、桩位偏移等违规作业行为第一时间叫停整改。针对雨季施工场景，提前在施工区域周边开挖临时排水沟，及时排走场地积水，防止雨水浸泡软化已经处理完成的地基土层。

最后，做好各道施工工序交接验收工作，上一道软基处理工序施工完成之后，必须经过质量验收合格，方可进入下一道施工环节，未通过验收的施工区段严禁开展后续路基填筑施工，层层把控整体施工质量。

### 3.4 施工完成后沉降监测与后续衔接施工要点

软基加固施工全部结束之后，按照道路施工规范在全线不同施工区段布设沉降观测点位，重点在软土厚度较大路段、道路交叉口等关键位置加密观测点，固定观测频次，定时记录地基沉降数值，整理形成完整沉降观测数据台账。

通过长期观测数据研判地基固结稳定状态，当地基沉降速率逐步趋于平稳之后，再有序开展上部路基填筑、路面结构层铺设等后续施工作业，杜绝在地基尚未稳定阶段开展重型填筑施工，防止再次引发地基不均匀形变[5]。

对于沉降数值超出合理范围的施工路段，及时联合技术人员分析问题产生原因，采取增补加固措施进行补救处理。日常做好已完工软基区段防护工作，禁止大型重载车辆随意通行碾压，减少外力扰动对固结地基造成的不利影响，保障软基处理施工成效能够长久维持。如表 2 所示，明确市政道路软基处理施工核心质量控制指标与管控标准。

表 2 软基处理施工关键质量控制指标统计表

| 施工工艺类型 | 重点控制指标 | 允许施工偏差 | 日常检测频次 |
|---|---|---|---|
| 换填垫层 | 分层填筑厚度、垫层压实度 | 厚度偏差 ±5 cm，压实度达标 | 每层施工完成后全数检测 |
| 水泥搅拌桩 | 桩位偏差、桩身垂直度、水泥掺量 | 桩位偏差≤ 5 cm，垂直度≤ 1% | 逐桩记录，每日抽样检测 |
| 真空预压 | 排水板间距、膜下真空度 | 间距偏差 ±10 cm，真空度达标 | 全天定时监测记录 |
| 堆载预压 | 堆载高度、固结沉降量 | 堆载高度 ±8 cm | 每三日完成一次数据观测 |

## 4 结束语

本文结合市政道路工程建设实际，分析城市区域软土地基独有的土体特性，总结现阶段软基处理施工过程中普遍存在的各类问题，对比四类常用软基处理工艺的适用场景与施工特征，从前期勘察规划、现场实操作业、过程质量监管以及后期沉降监测多个层面，细化梳理完整的施工应用要点。市政道路软基治理没有统一固定施工模式，现场唯有结合实地地质条件、施工环境合理选定工艺，严格落实各项施工管控标准，才能切实提升地基加固质量。未来工程建设中，还需结合智能监测设备优化沉降管控方式，持续优化软基施工实操流程，进一步提升市政道路地基施工整体稳定性。

## 参考文献：

[1] 朱翔,张灿君.市政道路工程中沉降段路基路面的施工技术[J].大众标准化,2022(21):56-58.
[2] 王两季.软基处理技术在市政公路施工中的应用实践[J].江西建材,2022(01):186-188.
[3] 王成.市政道路软土地基处理技术与应用研究[J].工程建设与设计,2024(06):206-208.
[4] 聂新星.市政道路工程施工中软土地基处理技术分析[J].散装水泥,2022(02):160-162.
[5] 李坤培.软基加固技术在市政道路施工中的实践[J].建筑技术开发,2022,49(20):134-136.

# 道路桥梁现场施工技术与应用对策研究

黄厚超

（安徽开源路桥有限责任公司，安徽 合肥 230088）

**摘 要** 道路桥梁工程作为交通运输网络中的关键构成部分，其建设质量对于区域经济发展和群众出行安全而言意义极为重大。当前，道路桥梁现场施工存在着排水系统设计缺乏合理性、过渡段衔接不够紧密、混凝土材料性能不够稳定、铺装层耐久性有所不足、钢筋防腐措施落实不到位等诸多方面的问题。本文针对这些问题，从排水、过渡段、混凝土、铺装连锁块、钢筋等方面提出施工技术的优化对策，涵盖完善排水系统设计、加强过渡段施工控制、优化混凝土施工工艺、改进铺装连锁块施工方法、强化钢筋施工管理等，旨在为有效提升道路桥梁工程质量提供参考。

**关键词** 道路桥梁；现场施工技术；排水；过渡段；混凝土裂缝

**中图分类号**：U445 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.016

## 0 引言

道路桥梁是交通运输网络的重要基础构成，其建设质量直接影响区域经济发展，也与人民群众的出行安全紧密相关。近年来，我国基础设施建设规模持续扩大，道路桥梁工程项目数量不断增多，这对施工技术和管理水平提出了更高标准。现场施工环节是决定工程质量的关键时期，涉及多个专业工种协同实施作业，技术复杂程度较高。在施工过程中，若无法严格把控各环节工艺参数，就容易出现各类质量问题。特别是在复杂地形条件下开展施工时，对相关技术要求更为严格。现有施工过程中暴露出的问题主要聚焦排水系统设计不够合理、不同结构部位衔接不够紧密、混凝土材料性能不够稳定、铺装层耐久性相对不足以及钢筋防腐措施落实不到位等方面。这些问题不但增加了后期维护成本，还可能引发安全隐患。针对上述实际情况，有必要对相关施工技术开展系统梳理与优化工作。

## 1 道路桥梁工程施工特点分析

道路桥梁工程具备结构类型丰富、施工工艺繁杂的特性，其涵盖土石方开挖、基础处理、主体结构浇筑、路面铺设等众多工序。不同类型的道路桥梁在施工进程中需采用不同的技术方案，如预应力混凝土梁桥需进行严格的张拉控制，钢箱梁桥则着重关注焊接质量和节点构造。施工现场一般处于露天环境，受天气条件的影响较为显著，高温、低温、降雨等自然环境因素均会对施工进度和质量产生影响。施工人员流动性较大，技术水平存在参差不齐的状况，对操作规程的执行程度存在差异。材料供应环节涉及多家供应商，需确保材料质量稳定可靠。施工过程中各专业队伍交叉作业的现象较为普遍，协调难度较大。地下管线分布状况复杂，可能会遇到未标注的构筑物或管线。地基承载力检测结果会对基础施工方案的选择产生影响。结构物跨越河流或山谷时需要采取特殊的安全防护措施。这些特点决定了施工管理必须具备针对性，技术措施需依据实际情况进行灵活调整。

## 2 道路桥梁中现场施工技术应用存在的不足

### 2.1 排水问题

施工现场排水系统的设计通常不够完善，进而致使雨水或地下水出现积聚情况，部分工程在基坑周边没有按照规定设置排水沟，在雨季时便出现大面积积水现象。临时排水设施布置的位置不够合理，难以有效引导水流排出至指定区域，排水坡度的计算存在偏差，致使水流速度过慢或者流速过快冲刷土体，排水管道材质的选择并不恰当，容易发生破损与堵塞问题。暴雨期间原有排水能力不足，无法及时排除大量的降水。排水系统的检查维护不够及时，杂物的堆积降低了排水效率，地下水位监测数据有所缺失，无法准确判断是否需要采取额外的降排措施[1]。排水口与市政管网连接处密封不够严密，存在渗漏的风险，排水设备配置的数量不足，在高峰期无法满足用水需求。

作者简介：黄厚超（1992-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁工程。

### 2.2 过渡段问题

不同结构型式交接处的过渡段施工存在显著缺陷，路基与桥梁台背回填区域压实度难以契合设计要求，沉降速率呈现不一致状况，搭板与梁端接缝处防水层连续性遭破坏，易形成渗水通道。过渡段填料选用存在不当之处，缺乏级配控制且颗粒组成不均匀。压实机械碾压遍数不足，分层厚度超出规定范围，沉降观测点布置密度不够，无法全面反映变形情况，填挖交界部位处理措施不完善，新旧结合面未实施有效加固，桥头跳车现象时有发生，影响行车舒适性与安全性。地质条件变化地段未按规范加强过渡段结构设计，模板安装精度差，致使外观质量出现瑕疵。

### 2.3 混凝土裂缝问题

混凝土结构裂缝的成因具有复杂性，其表现形式呈现出多样化特征。因温度应力引发开裂的现象相对较为常见，在夏季高温时段进行混凝土浇筑后，若养护工作不到位则容易形成温差裂缝。收缩裂缝主要是由于水分蒸发速度过快，且未能及时进行覆盖保湿措施。荷载作用下产生的受力裂缝大多出现在集中受力的部位，设计方面或者施工过程中存在的误差会加剧这一状况。基础不均匀沉降会导致上部结构承受额外的应力，进而引发开裂情况。振捣工作不实会形成蜂窝麻面，从而削弱构件的承载能力。骨料含泥量超过标准，会对水泥浆体的黏结效果产生影响。掺合料比例失调，会改变混凝土的工作性能。养护期的长度不足，会使混凝土早期强度发展不充分。模板拆除时间过早，会使混凝土在未达到足够强度时就承受自重和外力[2]。

### 2.4 铺装层松散

路面铺装层质量不佳具体体现为集料脱落以及松散坑槽等现象，混合料拌和时间不足会致使沥青与集料裹覆不均匀，进而造成黏结力下降，摊铺温度控制不严格会使热量损失过大，从而影响压实效果，压实设备吨位不合适则无法达到设计密实度要求，基层平整度差会使铺装层厚度不均，进而造成受力分布失衡，纵横向接缝处理粗糙会出现离析掉粒情况，开放交通前冷却时间不足会使车轮碾磨导致表面破损，排水不畅会导致积水渗透侵蚀底层结构，重载车辆频繁通过会加速面层疲劳损伤，材料质量波动大会使含油量和含水率不稳定。

### 2.5 钢筋锈蚀

钢筋因防腐保护措施不足而引发锈蚀问题，施工现场存放方式不当，致使钢筋长期暴露于潮湿环境中，进而失去防锈涂层，加工制作过程中对钢筋表面造成划伤，破坏了保护层的完整性。绑扎固定时所使用铁丝材质不合格，加速了电化学腐蚀，导致钢筋受损，混凝土保护层厚度小于设计规范值，不足以隔离外界侵蚀介质，钢筋间距偏小，使得混凝土填充不密实而存在空隙。氯离子污染源于海水或融雪剂，穿透保护层后接触到钢筋本体，碳化作用使混凝土碱性降低，导致钝化膜失效。缝隙积水且空气流通不畅，形成局部腐蚀电池，焊缝附近热影响区组织变化，导致电化学性质改变，检测手段滞后，未能及时发现隐蔽部位的锈蚀迹象[3]。此外，锈蚀产物体积膨胀挤压周围混凝土，使其开裂剥落，降低了钢筋有效截面，削弱了结构抗拉能力，最终影响整体承载力，危及结构安全。

## 3 道路桥梁中现场施工技术应用的优化对策

### 3.1 排水施工技术

排水系统设计方案需全面且充分地调研现场地形地貌特征，以此确定合理的地表径流路径与排放方向，排水沟的线形应保持平顺，其底部需设置必要的坡度和纵坡，从而保障水流能够顺畅流动，沟底要铺设碎石垫层并加设土工布过滤层，用以防止泥沙造成淤堵，纵向需每隔适当距离设置集水井，以便汇集支沟来水并统一输送至主排水渠，排水管道应选用耐腐蚀且耐磨损的材质，接口部位要做好密封处理以避免渗漏，泵站选型要考虑极端天气条件下的最大流量需求。同时，配备备用电源以确保在突发情况下能够正常运行，需定期清理排水设施内的沉积物和垃圾，从而保持通水断面尺寸不变。另外，要建立水位监测系统，实时掌握地下水位的变化情况并及时调整抽排强度。排水出口处要设置消能池，以减缓水流速度并减轻对下游河道的冲刷破坏，排水系统运行期间要安排专人值守，一旦发现异常需立即排查原因并采取整改措施。

### 3.2 过渡段施工技术

过渡段施工时需先进行精确测量放样工作，以此确定准确的搭接范围以及边界线。路基与桥台交界处要进行预压填筑，且需持续一段时间，待沉降稳定之后再开展上部施工。台背回填应优先选用透水性良好的砾石类材料，按照分层厚度不超过 30 厘米的标准进行摊铺作业。每层填料需采用冲击夯配合压路机联合压实，经检测压实度满足规范要求后才可进行下一层的施工。搭板底部要预埋止水钢板，在接缝处涂刷环氧树脂防水涂料，从而形成连续封闭层。钢筋骨架需焊接牢固，其锚固长度要符合设计图纸的标准要求。

混凝土浇筑之前要湿润基层表面，并撒布界面剂以增强结合力。振动棒插入深度要适中，确保各部位混凝土都能得到充分振捣密实。养护期内要禁止车辆通行，洒水频率需要保持每天四次以上直至达到规定龄期。沉降观测点要布置成网格状，且埋设稳固以便于长期监测[4]。

### 3.3 混凝土施工技术

在混凝土配合比设计阶段需充分考量现场环境的温湿度条件，并且适当调整外加剂的掺量以改善工作性能，搅拌站的计量装置应定期进行校验，从而保证原材料的称量准确无误。在运输途中要保持搅拌机处于低速旋转状态，以此防止出现离析泌水现象，混凝土到场后要检验坍落度是否符合浇筑要求，不符合要求者不得使用，浇筑前需清理模板内部的杂物，并涂刷脱模剂。这样便于拆模且不会影响混凝土的表面质量。分层浇筑的厚度应控制在50厘米以内，上下层的间隔时间不能超过初凝时间，插入式振捣器要垂直插入，其移动间距不应大于振动半径的一倍半，边角部位需用小型振捣棒进行补充振捣，以避免出现空洞疏松的情况，二次抹面的时机应选择在混凝土初凝后进行，从而消除早期塑性收缩裂缝，夏季施工时应添加冰屑来降低温度，冬季施工时需添加防冻剂并保持棚内温度不低于五摄氏度。养护应采用覆盖塑料薄膜加土工布的方式来保温保湿，持续时间不少于一周。

### 3.4 铺装连锁块施工技术

在进行连锁块铺筑之前，需对路基表面进行清扫，以确保路基表面不存在泥土、油污等附着物。铺设砂垫层时要保证其厚度一致，在完成找平处理之后再开展连锁块的排列组合工作。通过定位弹线的方式来标出纵横基准线，以此辅助工人能够正确放置每一块砖的位置。在相邻块之间需留置3毫米的缝隙，用于填充嵌缝料，从而提高整体稳定性。其次，在边角区域进行切割成型时，必须使用专用切割机，以此保证切口整齐平滑，铺筑完成初期，要使用橡皮锤轻轻敲击，对标高和平整度进行调整，嵌缝料要选用强度高且耐磨性强的品种，将其填入饱满并压实密实[5]。在雨后或者干燥季节，要及时补灌缺失的嵌缝料，防止嵌缝料出现松散流失的情况。最后，要定期检查连锁块是否存在松动位移的情况，若发现问题区域需及时重新摊铺并紧固，重型机械不得在未硬化完成的路段上直接进行行驶作业，在季节性施工时，要注意温度变化所引起的伸缩缝变形补偿问题。

### 3.5 钢筋施工技术

钢筋进场时需先仔细查验质保书以及相关的检验报告，以此确认其规格型号与设计要求相符，堆放场地应搭建防雨棚，同时对地面进行硬化处理，避免钢筋直接接触土壤。加工车间内要设置专用的调直除锈设备，以保证钢筋表面清洁且无污染，下料尺寸需严格按照配料单来执行，误差不得超过±1厘米。弯曲成型的角度和弯钩长度要符合抗震构造要求，焊接操作者必须持证上岗，焊条的烘焙与使用需按照规定程序进行处理，绑扎钢丝的直径不得小于2毫米，丝头弯折方向应错开以避免突出，保护层垫块采用高强度砂浆预制，每平方米的数量不少于四个。另外，电渣压力焊接头在外观检查合格后需取样进行拉伸试验，预留孔洞的位置应避开钢筋密集区域，必要时需增设附加钢筋进行补强，吊装作业时应采用多点平衡起重的方式，防止钢筋出现扭曲变形。

## 4 结束语

道路桥梁现场施工技术与工程整体质量及长期使用性能密切相关，所以必须高度重视各个环节的技术管控工作。通过系统梳理现有技术存在的不足并制定具有针对性的优化方案，能够有效解决施工过程中所出现的质量问题。排水系统、过渡段衔接、混凝土浇筑、铺装层铺设以及钢筋防护这五个方面的技术改进，为提升工程品质提供了具体的实施路径。实施这些措施时需要注意各环节之间的协同配合，以此确保技术标准能够统一执行。施工管理人员应当加强对新工艺和新技术的学习与掌握，从而不断提高自身的业务水平。施工单位要建立完善的质量管理体系，强化过程监督检查机制。只有将各项技术细节切实落实到位，才能保证道路桥梁工程达到预期的质量标准，进而为社会经济发展提供可靠的基础设施保障。

## 参考文献：

[1] 尹雨，曲洪涛.道路桥梁现场施工技术与应用对策研究[J].汽车周刊，2026(03):204-206.
[2] 张利明.道路桥梁工程现场施工管理难点及解决策略分析[J].运输经理世界，2025(35):88-90.
[3] 万昌华.市政道路桥梁现场施工技术的应用与管理[J].中国科技纵横，2025(20):124-126.
[4] 朱勇.道路桥梁工程现场施工管理难点和应对策略分析[J].城市建设理论研究(电子版)，2025(18):133-135.
[5] 李艺.基于道路桥梁混凝土现场施工的检测技术[J].水泥，2025(03):83-85.

# 基于预应力技术的高速公路桥梁施工研究

蒋小波

（四川公路桥梁建设集团有限公司，四川 成都 610093）

**摘　要**　随着我国高速公路网络建设持续推进，桥梁工程建设规模及技术复杂度显著提升，预应力技术凭借其在改善结构受力、提升桥梁承载能力与耐久性方面的独特优势，已成为现代桥梁工程的关键技术。本文围绕预应力技术在高速公路桥梁施工中的应用展开研究，并提出现浇连续箱梁预应力张拉施工控制、预制 T 梁后张法施工工艺、悬臂浇筑桥梁竖向预应力安装技术及高速公路匝道桥预应力孔道定位控制技术，旨在为提高桥梁整体的施工质量、延长其使用寿命提供实践参考，进而促进高速路桥梁工程高质量发展。

**关键词**　预应力技术；高速公路；桥梁施工

**中图分类号**：U445.57　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.017

## 0　引言

近年来，高速公路桥梁工程建设规模不断扩大，施工环境也呈现出更加复杂的发展趋势，对结构安全及长期稳定性提出了更高要求。高速公路桥梁工程有着较强的综合性，其施工过程涉及多种工艺及技术环节。预应力技术在桥梁施工中的应用，能够改善结构受力性能，提高工程整体质量及运行安全性。然而，从当前实际情况来看，该技术在具体应用过程中仍存在一定提升空间，尚难以完全满足复杂工程条件下的施工需求，因此有必要对其应用进行进一步分析研究。

## 1　预应力技术概述

预应力技术是在混凝土结构承载之前，或承载过程中施加一定的预压应力，使构件内部产生和外荷载方向相反的应力状态，继而改善结构受力性能的一种施工方法[1]。在高速公路桥梁工程中，这项技术主要是凭借张拉高强度的钢筋或钢绞线，让混凝土在受力前预先处于受压状态，以此抵消或减弱外荷载作用下产生的拉应力，减少裂缝出现的可能，提高结构的整体刚度及承载能力。预应力技术一般分为先张法和后张法两种施工形式，分别适用于不同的结构类型及施工条件（如表 1 所示）。采用这项技术，可提高桥梁构件的抗裂能力、耐久性能及使用年限，同时有助于控制结构变形、改善受力分布。

## 2　高速公路桥梁施工中预应力技术的应用要点

### 2.1　预应力施工前期准备工作

在高速公路桥梁预应力施工开始前，要全面核对设计图纸、施工方案及技术参数，保证张拉力、控制应力及钢绞线规格等都符合工程要求。施工材料方面，

表 1　先张法和后张法区别

| 项目 | 先张法 | 后张法 |
|---|---|---|
| 张拉时机 | 混凝土浇筑前张拉预应力筋 | 混凝土浇筑后张拉预应力筋 |
| 是否需要台座 | 需要坚固的张拉台座 | 不需要固定台座，可在现场施工 |
| 锚具使用 | 不需要永久性锚具（仅临时夹具） | 需要永久性锚具，锚具留在构件中 |
| 适用构件类型 | 多用于中小型构件（空心板梁） | 多用于大型构件（T 梁、箱梁），尤其适合曲线预应力布置 |
| 施工灵活性 | 工序较简单，但受限于台座长度，不够灵活 | 施工更灵活，适用于现场拼装和复杂结构 |
| 成本与效率 | 成本较低，适合工厂化批量生产 | 成本较高，但适应性强，适合现场施工 |
| 预应力筋回缩方式 | 依靠预应力筋与混凝土之间的黏结力实现回缩 | 依靠锚具固定，直接传递预应力 |
| 施工步骤 | 张拉→浇筑混凝土→放松预应力筋 | 浇筑混凝土→穿束→张拉、锚固→孔道压浆 |

作者简介：蒋小波（1997-），男，本科，助理工程师，研究方向：公路与桥梁。

应重点检查高强度钢绞线、锚具及波纹管的质量性能。其中钢绞线的抗拉强度一般≥1 860 MPa，以保证结构受力的安全。同时，对张拉设备进行标定和校验，误差要控制在±2%。施工现场还需完成孔道定位及模板安装，并对混凝土配合比进行试验调整，水胶比通常控制在0.35～0.45之间，以提高结构的密实性[2]。

### 2.2 预应力张拉施工技术控制

预应力张拉是桥梁施工中对结构受力性能影响较大的工序，必须严格控制施工过程的规范程度和操作精度[3]。张拉前，需对千斤顶、油泵及压力表做统一标定，保证张拉力误差控制在±2%以内。张拉过程中应按分级加载的原则进行，一般按设计张拉力的20%、40%、60%、80%、100%逐级施加，防止应力突变对构件造成损伤。同时，要实时记录伸长值，实际伸长量及理论值的偏差宜控制在±6%范围内。张拉顺序应按设计要求对称进行，以减少结构偏心受力。张拉完成后要及时锚固锁定，并进行复核检测，保障预应力施加均匀稳定，从而保障桥梁结构的整体安全及长期使用性能。

### 2.3 混凝土压浆施工质量管理

预应力孔道压浆施工的质量，是影响后张法预应力构件结构完整程度及使用寿命的重要环节。压浆前，需严格控制浆液配合比，水泥浆的水胶比一般控制在0.26～0.30之间，并掺入适量的减水剂及膨胀剂，以提高抗离析能力。压浆施工应在张拉完成后24 h内进行，以减少孔道锈蚀的风险。压浆时要采用连续注浆的方式，注浆压力通常控制在0.5 MPa～0.7 MPa，保障浆液能填满孔道并把内部空气排出。压浆结束后需进行稳压保压处理，稳压时间≥2 min，以增强密实效果。同时，应对压浆的饱满度进行检测，防止出现空洞或不密实的现象，继而提高桥梁结构的防护能力及使用寿命[4]。

### 2.4 混凝土浇筑施工工艺应用

混凝土浇筑是预应力桥梁结构成型的基础工序，施工质量的好坏会直接影响后续张拉和整个结构的受力性能[5]。施工时，要严格控制混凝土配合比及坍落度，坍落度一般控制在120 mm～160 mm之间，这样才能保证混凝土有足够的流动性，也便于振捣密实。浇筑应遵循分层、分段及连续作业的方式进行，每层厚度宜控制在30 cm～50 cm，并配合振捣设备充分振实，防止出现蜂窝、麻面等质量问题。同时，要合理控制浇筑速度及温度条件，混凝土入模温度宜控制在5 ℃～30 ℃范围内，以减少温度裂缝的出现。在预应力孔道及钢筋密集的部位，应加强局部振捣和检查，保障结构内部的紧实均匀。

## 3 高速公路桥梁施工中预应力技术的应用

### 3.1 现浇连续箱梁预应力张拉施工控制

在现浇连续箱梁施工过程中，预应力张拉控制关系着桥梁结构的受力稳定性。在施工阶段需严格控制张拉顺序等参数。施工前，应结合设计要求检测钢绞线、锚具及张拉设备。其中，钢绞线抗拉强度标准值通常为1 860 MPa，弹性模量宜控制在1.95 MPa×105 MPa左右。千斤顶及压力表应按规范完成配套标定，标定误差需控制在±2%，以保障张拉数据准确。对于跨径30 m以上的连续箱梁，通常采用双控张拉方式，即同时控制张拉应力及理论伸长值，避免单一控制方式造成应力施加不足或超张拉现象。

张拉施工时，应按“对称、分级、均匀”的原则进行操作。一般先进行腹板束张拉，再进行顶板束和底板束施工，以减少结构局部应力集中。分级张拉通常按设计控制应力的20%、40%、60%、80%、100%逐步加载，每级加载完成后需稳定持荷2 min～3 min，观察钢束及锚具状态是否正常。对于长束预应力施工，钢束长度＞60 m时，宜采用两端同步张拉工艺，以降低孔道摩阻损失。在施工过程中，还应重点控制实际伸长值与理论伸长值之间的偏差，通常要求偏差控制在±6%。当偏差超过规范要求时，必须暂停施工并查明原因，防止因钢束滑移或孔道堵塞影响结构受力性能。在现浇连续箱梁施工后期，还需加强张拉后的结构线形及应力监测。梁体挠度控制通常采用全站仪及位移监测设备联合测量，跨中挠度偏差宜控制在设计值±5 mm。

### 3.2 预制T梁后张法预应力施工工艺

预制T梁后张法施工是高速公路桥梁工程中的常用工艺，有着施工效率高、结构受力性能稳定等特点，广泛应用于20 m、30 m及40 m跨径桥梁结构中。后张法施工主要是在混凝土达到设计强度后，再对预应力钢束进行张拉，使梁体内部形成稳定的预压应力状态。在施工过程中，需重点控制孔道成型、钢束穿设等工序，以保证预制T梁结构的整体质量及耐久性能。

在梁体预制阶段，应先做好波纹管孔道安装及定位工作。波纹管一般采用金属波纹管或高密度塑料波纹管，安装时需按照设计坐标进行固定，孔道定位偏差通常≤5 mm。对于30 m以上的大跨径T梁，可每隔0.5 m设置一道定位钢筋，以防止浇筑过程中孔道上浮或偏移。混凝土浇筑时，应加强锚固区及波纹管周边

振捣，振捣时间一般控制在 20 s ～ 30 s，防止出现漏振、蜂窝及孔洞现象。梁体混凝土强度达到设计强度的 90% 以上后，方可进行预应力张拉施工。常用混凝土强度等级多为 C50 及以上，其弹性模量通常不低于 3.45 MPa×104 MPa，以满足后张法施工的受力要求。张拉时宜采用两端同步张拉工艺，并按“初张拉—分级张拉—持荷锚固”的顺序进行。张拉完成后，应及时进行孔道压浆施工。压浆宜采用真空辅助压浆工艺，真空度控制在 -0.06 MPa ～ -0.08 MPa 之间，压浆压力控制在 0.5 MPa ～ 0.7 MPa 范围内。浆液水胶比一般为 0.26 ～ 0.30，并掺加适量膨胀剂及减水剂，以提高浆体流动性及密实性。

### 3.3 悬臂浇筑桥梁竖向预应力安装技术

竖向预应力主要布置于桥梁腹板区域，凭借施加竖向压应力，提高箱梁抗剪能力及腹板整体刚度，减少主梁在长期荷载作用下出现裂缝及变形的问题。在悬臂浇筑施工过程中，由于节段数量较多、结构线形变化明显，若竖向预应力安装偏差过大，容易导致预应力损失增加，甚至影响桥梁整体受力性能。因此，需全过程技术控制竖向预应力筋定位、安装及张拉过程。

施工前，应结合桥梁节段长度及腹板尺寸，精确放样定位竖向预应力筋。通常采用 Φ25 mm 或 Φ32 mm 高强精轧螺纹钢筋作为竖向预应力材料，其抗拉强度标准值一般≥ 930 MPa。安装时，应在腹板内部设置定位钢筋网及固定支架，支架间距宜控制在 0.8 m ～ 1.0 m 之间，以保证竖向预应力筋安装稳定。对于箱梁腹板厚度较小区域，竖向筋中心偏差需控制在 ±5 mm，避免因安装偏位造成局部受力不均。悬臂节段施工时，每个节段长度一般为 3 m ～ 5 m，施工过程中需同步复核竖向预应力孔道位置，确保和设计坐标一致。

混凝土浇筑阶段，应加强腹板区域振捣质量控制，振捣时间宜控制在 20 s ～ 25 s 之间，避免出现漏振及孔洞问题。梁段混凝土强度达到设计强度 90% 以上后，方可进行竖向预应力张拉施工。在施工过程中，应严格控制张拉伸长值及锚固应力变化，实际伸长量与理论值偏差宜控制在 ±6% 范围内。对于高墩大跨桥梁，为减少悬臂端不平衡荷载影响，竖向预应力张拉通常采用左右对称施工方式，并控制相邻节段高差不超过 10 mm。竖向预应力施工完成后，还需检查锚固区及腹板裂缝情况。锚固端混凝土局部压应力较大，应增设钢筋加密区或局部加强钢板，提高锚固区域抗裂能力。

### 3.4 高速公路匝道桥预应力孔道定位控制技术

高速公路匝道桥曲线半径小、纵横坡变化大及桥梁线形复杂，预应力孔道往往呈空间曲线布置形式，施工难度明显高于普通直线桥梁。若孔道定位控制不准确，容易出现波纹管偏移、钢束穿束困难及张拉摩阻损失增大等问题。因此，在高速公路匝道桥施工过程中，需全过程技术控制预应力孔道测量放样等环节，以保证孔道线形满足设计要求。

施工前，应依据桥梁平曲线、超高及纵坡参数建立三维坐标控制体系，并利用全站仪进行精确放样。对于曲线半径小于 300 m 的匝道桥，孔道中心定位偏差通常需控制在 ±3 mm。孔道安装时，多采用金属波纹管配合定位钢筋网固定的方式进行施工。波纹管连接处通常采用套管密封工艺，接头长度宜为 200 mm ～ 300 mm，并利用胶带进行缠绕封闭，防止混凝土浆液渗入孔道内部造成堵塞。混凝土浇筑阶段是预应力孔道最容易发生偏移的时期。由于匝道桥箱梁断面变化较多，浇筑时应采用分层、对称及连续施工方式，每层浇筑厚度宜控制在 30 cm ～ 40 cm 之间，以减小混凝土侧压力对波纹管的影响。振捣过程中，应避免振捣棒直接接触波纹管，振捣点间距一般控制在 30 cm 左右，单点振捣时间控制在 20 s 左右，防止因过振导致孔道位移。在后续预应力张拉施工中，匝道桥曲线孔道容易产生较大的摩阻损失，因此多采用两端同步张拉工艺进行施工。

## 4 结束语

高速公路桥梁施工对结构安全性及耐久性能有着较高要求，合理应用预应力技术，能改善桥梁受力状态，提高结构整体稳定性。在施工过程中，应结合不同桥梁结构特点，科学控制张拉等重要环节，减少施工误差。未来，伴随桥梁工程向大跨径、复杂化方向发展，预应力施工技术也需不断优化完善，以提升高速公路桥梁工程建设的高质量发展。

## 参考文献：

[1] 周梁.高速公路桥梁施工中预应力技术的应用[J].汽车画刊,2025(09):119-121.
[2] 宋吉伟.山区高速公路桥梁施工中预应力技术的应用研究[J].建筑机械,2025(08):338-340,345.
[3] 李永斌.预应力技术在高速公路桥梁施工中的应用[J].汽车画刊,2025(03):86-88.
[4] 包国军.基于预应力技术的高速公路桥梁施工[J].工程机械与维修,2023(04):87-89.
[5] 李帅.预应力技术在高速公路桥梁施工中的应用[J].工程建设与设计,2023(10):198-200.

# 喷锚加固技术在道路边坡工程施工中的应用

程 城

（四川雅西高速公路有限责任公司，四川 成都 610041）

**摘 要** 在道路工程施工中，喷锚加固技术因具有协同受力、施工灵活等特点，已成为道路边坡加固支护最常用的工艺，锚杆、钢筋网以及喷射混凝土等构件互相配合提高边坡的整体稳定性。本文从锚杆悬吊、组合梁拱效应、混凝土面层约束以及注浆填充黏结四个角度分析支护原理，明确该技术适合应用的场景，并结合道路边坡的施工梳理施工准备、修整边坡等全流程施工工艺及质量控制要点，以期为同类道路边坡支护工程施工提供参考。

**关键词** 喷锚加固技术；道路边坡工程；喷射混凝土

**中图分类号**：U416.1+4 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.018

## 0 引言

随着我国交通基础设施建设不断向山区、丘陵地带延伸，道路工程建设中高陡路堑边坡、破碎岩土边坡的数量大幅增加，边坡属于道路工程的附属结构，其稳定性直接影响道路施工安全及后续通行保障。传统的边坡支护方法存在施工量大、对场地适配性差等不足，喷锚加固技术属于复合型柔性支护工艺，能适配不同类型边坡的加固要求，目前已经广泛应用于道路边坡新建施工、病害加固以及应急抢险工程中。

## 1 喷锚加固技术工作原理

### 1.1 工作原理

喷锚加固技术的工作原理，从力学角度可以分成四个主要方面：第一，锚杆的悬吊作用，边坡内部有明显的软弱结构面或者潜在滑动面，装上长度、密度都足够的锚杆能把锚固段稳稳固定在滑动面下面的稳定岩土层里，自由段则会穿过潜在滑动体[1]。滑动体往下滑的力会通过锚杆的拉拔抗力传到稳定地层里，将不稳定的部分“悬吊”在稳定的基岩上；第二，组合梁（拱）效应，针对层状岩体或者破碎岩体按系统布置好的锚杆能把原本各自分开的岩层、岩块串成一整个整体，锚杆施加的预应力使岩层之间产生挤压力形成有一定厚度的组合梁或者承载拱结构，这种组合结构的抗弯刚度及抗剪能力比单个岩层要大很多；第三，喷射混凝土的面层约束作用，喷射混凝土覆盖在边坡表面和里面的钢筋网一起组成柔性防护面层，这个面层可以直接把坡面封住，避免雨水冲刷、风化剥落还有浅层掉块的问题，同时面层会给坡面岩土体加上一定的侧向约束力，限制坡体出现横向变形问题；第四，注浆的填充及黏结作用，锚杆装好之后进行压力注浆来固定锚杆，此过程中注浆浆液会在压力作用下顺着岩土体的裂隙、孔隙扩散开，将空隙填满并将破碎岩块重新胶结在一起，注浆完成后锚杆和周围的岩土体之间会形成牢固的黏结体增强锚杆的抗拔承载力。

### 1.2 适用场景

喷锚加固技术虽然优点很多，但不能适配所有类型的道路边坡，结合长期以来的工程实际应用，喷锚加固技术的适用场景主要可以分成以下几类：

1. 岩质边坡，针对岩浆岩、沉积岩以及变质岩这类硬质岩边坡，喷锚加固能收获不错的效果。当岩体存在不利结构面组合但岩块本身强度还能满足要求时，依靠锚杆的串联作用以及注浆的填充作用能优化岩体结构。

2. 具备一定自稳能力的土质边坡。喷锚加固同样适用于黏性土、粉土以及碎石土等类型的边坡，这类土体能在一定高度范围内保持直立或陡坡状态，在施工过程中形成临时自稳坡面，为钻孔、注浆等作业创造有利条件。对于纯砂土、松散填土等自稳能力很差的土体，单独使用喷锚技术很容易出现塌孔、流砂等问题，需要配合管棚、超前小导管或降水措施使用。

3. 加固既有边坡及应急抢险，对于已经出现局部滑塌、落石等失稳预兆的边坡，喷锚加固可以快速施工在短时间内提供支护力，因为施工设备轻便不需要进行大规模土石方工程，尤其适合山区公路上边坡的抢修作业。

作者简介：程城（1993-），男，本科，助理工程师，研究方向：道路与桥梁工程。

4. 施工场地受限、不宜动用大型设备的路段，比如紧邻已有建筑物、高压线塔或是重要管线的边坡，无法进行大规模开挖和重型机械施工，喷锚加固依靠所用机型小、作业灵活的特点成为首选。

## 2 道路边坡工程中喷锚加固施工工艺流程

### 2.1 施工准备

施工前，项目技术负责人应组织有关人员认真熟悉设计图纸、地质勘察报告及周边环境资料，明确边坡支护的范围、锚杆类型等关键技术参数[2]。在此基础上编制专项施工方案，专项方案需经监理单位审批，对于危险性较大的分部分项工程还应组织专家论证。完成方案审批后，对所有参建人员进行技术交底及安全技术交底，使操作工人明确锚杆钻孔角度、注浆压力等操作要点及潜在风险。材料准备应严格遵循“先检验后使用”的原则，锚杆杆体通常采用 HRB400 级及以上热轧带肋钢筋，其直径、长度根据设计确定，进场后应核验质量证明文件并按批次进行力学性能检验。注浆材料一般采用 42.5 级普通硅酸盐水泥，砂采用中细砂且含泥量不得大于 3%。速凝剂、早强剂等外加剂应与水泥进行相容性试验。钢筋网片可采用预制焊接网或现场绑扎，网格间距偏差应控制在 ±10 mm 以内，所有材料应存放于防雨、防潮的场地，机具准备应根据工艺要求合理配置，并在施工前应试运转所有设备。

### 2.2 修整边坡

修整边坡应在边坡开挖到预定位置后立即进行，避免坡面长时间暴露导致风化加剧或局部坍塌，采用测量仪器按设计坡率放出坡顶线、坡脚线及每级边坡的平台位置，并用石灰线或明显标志标出[3]。对于分级开挖的边坡，每开挖一级即修整一级，严禁一次开挖到基底再进行大面积修整以免造成边坡失稳。施工方法以机械配合人工为主，岩质边坡使用挖掘机或液压破碎锤将突出的大块岩石初步剥离，然后由人工用风镐或撬棍清除坡面上松动、破碎的岩块，剔除倒坡或反坡部分。对于土质边坡，挖掘机按照设计坡率进行粗修，预留 3 cm～5 cm 厚度由人工进行精细修整以保证坡面平顺。在修整过程中，应及时清理坡面上的树根、草皮、垃圾等杂物。

### 2.3 钻孔施工

钻孔施工应严格按照设计图纸进行，并注意控制孔位、孔径、孔深及倾斜角度等核心参数（如表 1 所示）。采用全站仪或经纬仪，根据设计图纸中锚杆的平面布置图在修整好的坡面上准确标定每个锚孔的位置，锚孔通常按正方形或梅花形布置，间距一般为 1.5 m～2.5 m。孔位放样后应用红色油漆或铁钉作永久标记，孔位偏差应控制在 ±50 mm 以内，超过偏差者应重新标定。钻孔设备的选择应根据岩土条件确定，硬质岩层应采用大功率风动潜孔锤钻机；软岩或土质边坡可采用旋转式钻孔机或螺旋钻机；破碎地层宜采用跟管钻进工艺以防止塌孔。

表 1 钻孔施工核心参数控制一览表

| 质量控制项目 | 质量要求及检查方法 |
|---|---|
| 孔位 | 按设计图纸放样，允许偏差 ±50 mm；采用全站仪或尺量检查 |
| 孔径 | 一般比锚杆直径大 20 mm～30 mm，常用 Φ70 mm～Φ130 mm；用卡尺或孔径检测仪检查 |
| 孔深 | 不应小于设计长度，且超深不小于 500 mm；用测绳或专用量具检查 |
| 钻孔倾角 | 符合设计角度（一般为下倾 10°～25°），允许偏差 ±2°；用量角器或钻孔测斜仪检查 |
| 孔内清洁度 | 成孔后应用高压风或水清孔，孔内无岩粉、泥屑及积水；观察及检查清孔返出物 |

钻进过程中应注意以下事项：第一，保持钻机平台稳定，防止钻进中机身晃动导致孔位偏移；第二，对于易塌孔的松散地层，可采用泥浆护壁或套管跟进方式，严禁长期空钻；第三，当遇到大粒径块石、孤石或旧基础等障碍物导致无法按设计方向钻进时，应征得设计单位同意后适当调整孔位或角度，不得擅自废除锚孔；第四，记录钻进过程中岩土性质变化及卡钻、掉钻等异常情况，作为判断锚固段持力层是否满足要求的依据。

### 2.4 安装锚杆及注浆

锚杆杆体的制作应在加工场集中进行，按照设计长度下料，杆体长度应比孔深短 300 mm～500 mm，以便于安装并留出注浆管空间。对于全长黏结型锚杆，沿杆体轴线方向每隔 1.5～2.0m 应设置一个对中支架，对中支架可采用 Φ6～Φ8 钢筋弯制焊接于主筋上，其外径略小于钻孔直径，形成均匀的保护层厚度。对于预应力锚杆，还需在自由段做防腐隔离处理，杆体端部宜留出 100 mm～150 mm 以焊接锚头及钢筋网[4]。安装锚杆前应再次检查钻孔是否通畅、有无坍孔，土

质边坡及易塌孔地层安装应清孔后立即进行，人工或借助小型机械将锚杆缓慢推送入孔，禁止重锤敲击强行打入以免破坏孔壁或导致杆体弯曲。当杆体推送受阻时应退出后重新清孔或扩孔，不得强行砸入。

注浆材料及配合比：一般采用水泥砂浆或纯水泥浆，水泥强度等级不低于42.5级，水灰比控制在0.4～0.5之间或灰砂比1:0.5～1:1，可掺入适量减水剂或微膨胀剂以提高注浆密实度。注浆工艺要求采用压力注浆，注浆管应随锚杆一起送入孔底或单独插入距孔底200 mm～300 mm处。注浆时先开泵再慢慢拔出注浆管，始终保持注浆管出口位于浆液面以下，采用“孔底注浆、带压返浆”的方式，当孔口出现连续均匀的浆液流出且流量大于进浆量时暂停注浆，待3 min～5 min后进行二次补浆直至孔口完全饱满。

### 2.5 铺设钢筋网

钢筋网通常采用HPB300或HRB400级钢筋，直径一般为Φ6～Φ10，网格尺寸多为150 mm×150 mm、200 mm×200 mm或250 mm×250 mm，网格尺寸过大面层刚度不足；过密影响喷射混凝土穿透性能并增加成本。铺设前应检查坡面是否平整，清除凸起的岩石或土块，网片应沿坡面自上而下或自下而上依次展开。钢筋网应与坡面保持一定的保护层距离，通常要求钢筋网与坡面的净距不小于5 cm，以便喷射混凝土能够完全包裹钢筋并形成有效的黏结。具体做法是：在锚杆端部焊横向短钢筋，或设置混凝土垫块，将网片托离坡面。对于边坡转角处、坡顶边缘、坡脚及变形缝等部位应进行加强处理，坡顶处钢筋网应向外翻边延伸不少于1.0 m，并锚入坡顶地层中防止坡面顶部脱开。

### 2.6 喷射混凝土施工

喷射混凝土的原材料及配合比应符合设计要求。一般使用强度等级为C20～C30的混凝土，水泥采用42.5级普通硅酸盐水泥；细骨料采用中粗砂，细度模数2.5～3.2；粗骨料最大粒径不应大于15 mm，卵石或碎石均可。水灰比控制在0.4～0.45之间，坍落度宜控制在80 mm～120 mm。速凝剂的掺量应经试验确定，一般为水泥质量的3%～6%，要求初凝时间不大于5 min，终凝时间不大于10 min[5]。喷射作业应分段、分片、自下而上的顺序进行，分段长度一般不超过6 m，分片宽度2 m～3 m。自下而上的顺序可以使先喷的混凝土形成“台阶”，承托后喷的混凝土减少因自重导致的脱落和下垂。一次喷射厚度不宜过大，通常为50 mm～80 mm，设计厚度超过80 mm的喷层应分两层或三层喷射，每层间隔时间为前一层混凝土终凝后。喷射过程中应随时观察混凝土的回弹情况、密实度及表面状态，如发现混凝土干斑或流淌应及时调整水量。在钢筋网部位，应特别注意使混凝土能够充分包裹钢筋背面，避免出现“空壳”或“阴影”现象，必要时可调整喷射角度或适当加密喷射遍数，边坡内的排水管、伸缩缝等部位应采取遮挡措施，防止混凝土堵塞。

### 2.7 养护防护

喷射混凝土终凝后应立即开始养护，由于混凝土喷层厚度较薄水分蒸发迅速，若不及时养护极易产生塑性收缩裂缝和干缩裂缝，影响外观的同时会降低面层的封闭性能。养护方法可采用以下方式之一或组合：（1）覆盖土工布或草帘，并洒水保持湿润；（2）喷涂养护剂，在混凝土表面形成连续保水薄膜；（3）铺设塑料薄膜，配合定期洒水。养护用水应清洁，pH值不小于6。养护频率以保证混凝土表面始终处于湿润状态为度，一般白天每隔2小时～4小时洒水一次，夜间至少一次。养护持续时间不应少于7天，对于重要工程或寒冷地区、大风干燥气候条件下，应延长至14天。养护期间，应在坡脚设置围挡或警示带，严禁人员踩踏坡面，不得在坡面上堆放材料或设备，避免产生冲击荷载。

## 3 结束语

喷锚加固技术区别于单一支护工艺，依托多重协同作用从根本上改善道路边坡岩土体的力学性能，解决边坡风化、浅层剥落等稳定性问题，是适配现代复杂道路边坡工程的优质支护技术。现阶段，喷锚加固技术已成为道路边坡支护工程的主流工艺，随着交通工程建设标准的不断提升，未来还需持续优化施工工艺，进一步提升喷锚支护技术的长期稳定性，为道路工程安全建设提供保障。

## 参考文献：

[1] 李颖.喷锚技术在高边坡加固施工中的应用[J].江苏建材,2025(02):112-114.
[2] 王亚军.山地公路边坡防护锚喷支护技术[J].工程建设与设计,2024(06):136-138.
[3] 王建.喷锚加固技术在公路边坡工程中的应用研究[J].工程技术研究,2024,09(02):73-75.
[4] 刘绘强.锚喷技术在边坡支护中的应用[J].石材,2023(08):128-130.
[5] 高海鹏.锚喷支护技术在高速公路边坡防护工程中的应用[J].居舍,2021(20):31-32.

# 模块化施工技术在市政路桥快速施工中的应用

蔡 庆

（衡宇建设集团有限公司合肥分公司，安徽 合肥 231200）

**摘 要** 市政路桥快速施工需在有限工期内兼顾质量、环保与交通管控，传统现浇模式存在效率低下、质量波动、污染严重等痛点，难以适配需求。本文结合市政路桥工程实际，对模块化施工技术的应用基础、核心策略及实践路径展开研究，明确模块化施工标准化、预制化、装配化的核心特征与应用前提，从构件设计优化、工厂预制管控、现场装配高效施工三个维度完善应用策略，结合市政道路与桥梁工程实践梳理实施要点，针对实践中的常见问题提出应对方案，以期为市政路桥快速施工提供技术参考，进而实现施工效率、工程质量与绿色环保的协同提升。

**关键词** 模块化施工；市政路桥；快速施工；预制构件；现场装配

**中图分类号**：U445 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.019

## 0 引言

当前城市更新与市政基础设施建设持续提速，市政路桥工程对工期管控、交通疏导、绿色施工提出更高要求。传统现场浇筑模式周期长、干扰大、质量可控性不足，难以适配现代化城建发展节奏。模块化施工以工厂预制、现场装配为核心路径，契合快速建造、精益管控、低碳环保的行业导向，成为破解市政路桥施工矛盾的重要技术手段。本文立足于工程实践，系统分析模块化施工的应用逻辑与实施要点，优化设计、生产、装配全流程体系，解决实际应用中的关键问题，助力市政路桥工程实现高效推进、质量可靠与绿色低碳协同发展。

## 1 模块化施工技术在市政路桥快速施工中的应用基础

### 1.1 市政路桥快速施工的核心需求与痛点

市政路桥施工的核心诉求是在有限时间内完成工程建设，同时兼顾工程质量达标与周边环境管控，传统现浇施工模式在此过程中暴露的短板日益突出。城市市政路桥作为交通枢纽，施工期间需最大限度降低对城市交通的影响，保通压力直接决定施工工期的严格性，多数市政路桥工程需在规定时限内完成，避免长期占道引发交通拥堵。市政路桥施工多处于城市建成区，周边居民聚居、地下管线密布，施工过程中的噪声、扬尘污染需严格控制，地下管线的保护的要求也大幅提升施工复杂度。传统现浇施工以现场作业为主，受天气、人员操作水平影响较大，不仅施工效率低下，还易出现构件尺寸偏差、强度不足等质量波动问题，无法适配快速施工的核心需求。

### 1.2 模块化施工技术的核心特征与适配性

模块化施工技术以标准化、预制化、装配化为核心特点，和市政路桥快速施工的各类需求高度契合，给解决传统施工的不足提供了可行方向。标准化是模块化施工的基础，制定统一的构件设计、生产以及验收标准，能保证所有预制构件的尺寸、规格、强度保持一致，从源头减小现场施工的误差，减少构件不匹配带来的返工，为快速施工打好基础。预制化将市政路桥施工中的大部分构件生产工序转移到专业工厂，摆脱了现场施工受自然环境的限制，工厂里的专业设备加标准化流程能大幅提高构件生产效率，同时减少现场作业量，避免现场施工中多工序交叉干扰的问题。装配化把重点放在现场施工环节，利用专用吊装设备把工厂预制好的构件精准拼接安装，不需要现场浇筑、养护这类耗时间的工序，能明显提高现场施工效率，有效缩短施工工期[1]。模块化施工的拆分灵活性还进一步提高了它的适配性，可以根据市政道路、桥梁不同的结构类型、工程规模，灵活拆分构件模块，既可以适配小型市政道路的简易结构，也能满足大型桥梁复杂构

作者简介：蔡庆（1985-），男，本科，工程师，研究方向：市政路桥工程施工。

件的施工要求，完全适配市政路桥施工的多样化场景。

### 1.3 模块化施工在市政路桥工程中的应用前提

模块化施工在市政路桥工程中的应用，需提前梳理清楚各类适用条件，明确应用的前提，才能给整个施工流程推进打下扎实基础。市政路桥工程的规模和结构类型直接决定了模块化施工的适用范围：小型市政支路结构比较简单，可以采用整体式模块设计；大型桥梁、主干道结构复杂，需要结合结构受力特点拆分成小型模块，避免模块尺寸太大提高运输和吊装的难度，也避免模块太小导致连接节点太多，拖慢施工效率。排查现场条件是进行模块化施工的重要前提，施工场地的面积直接决定吊装设备的摆放位置和构件堆放空间，需要提前规划出合理的施工场地布局，运输路线的宽度、坡度、转弯半径要满足预制构件的运输要求，尤其是大型桥梁构件体积大、重量高，需提前检查运输路线的通行能力，必要时对路线做临时加固，保证构件运输安全。

## 2 模块化施工技术在市政路桥快速施工中的核心应用策略

### 2.1 市政路桥模块化构件的设计与优化策略

科学的模块化构件设计是实现市政路桥快速施工的首要前提，设计过程中需统筹兼顾适配性、经济性与可施工性，避免设计不合理导致施工效率下降或成本增加。构件拆分需紧密结合市政路桥的结构特点，充分考虑结构受力合理性，拆分过大易导致运输、吊装困难，拆分过细则会增加连接节点数量，延长现场装配时间，需根据构件的受力情况、安装位置，确定合理的拆分尺寸与模块数量[2]。构件连接方式的优化直接影响现场装配效率与结构稳定性，应摒弃复杂的连接工艺，采用简洁、高效且连接强度达标的连接方式，简化现场装配流程，减少现场焊接、浇筑等耗时工序，同时提升连接部位的稳定性，避免后期出现质量隐患。标准化设计理念需全面融入构件设计全过程，通过统一构件的规格、尺寸与连接方式，减少构件类型，降低工厂生产的模具成本与原材料消耗，同时便于现场装配时的构件匹配，提升施工效率。

### 2.2 模块化构件的工厂预制与质量管控策略

工厂预制是模块化施工的主要环节，标准化管控的主要目标是保障构件质量，给现场快速装配提供可靠支撑，同时提高构件生产效率，保证构件可以按时供应。工厂要搭建标准化的预制生产线，依照构件的设计要求，配备专业生产设备与技术人员，规范构件生产的每一道工序，从原材料加工、钢筋绑扎、混凝土浇筑到构件成型，都制定明确的操作规范，减少人工操作带来的误差，提高构件生产效率和质量的一致性。原材料进场检验是质量管控的第一道关卡，要对钢筋、混凝土、外加剂等原材料的规格、强度、性能做严格检测，不合格的原材料绝对不能进场使用，从源头保证构件质量，过程质量监测需要覆盖整个构件生产过程，利用专业检测设备对构件的尺寸、强度、外观质量做实时监测，及时发现生产过程中的质量问题并完成整改，避免不合格构件流出工厂，信息化技术可以做到构件生产全流程追溯，利用录入构件生产信息、检测数据，搭建完善的追溯体系，方便后续进行质量核查和问题溯源[3]。优化构件养护工艺可以有效缩短养护周期，使用蒸汽养护、覆膜养护等高效养护方法，在保证构件强度符合要求的前提下，减少养护时间，保证构件按时出厂，满足现场施工的进度要求。

### 2.3 现场模块化装配的高效施工策略

现场模块化装配是市政路桥快速施工的关键环节，核心是优化装配流程、合理配置资源，提高装配效率，同时保证装配质量与施工安全。施工开始前，要制定科学的现场装配方案，结合工程结构特点与现场实际条件，明确构件的装配顺序、吊装顺序和各工序的节点要求，细化每个环节的施工流程，避免因工序衔接不畅造成施工延误，吊装设备和施工人员的调配是否合理直接影响装配效率，相关方需要根据构件的尺寸、重量，选用匹配的吊装设备，合理安排吊装时间与吊装路线，避免设备闲置或作业冲突，同时要配齐专业施工人员，明确各岗位人员的职责，加强人员培训，提高操作熟练度，保证装配作业高效推进，现场装配的质量管控要聚焦主要环节，重点检查构件连接部位的质量，保证连接牢固、尺寸精准，避免出现连接松动、偏差过大等问题，保障工程结构安全。信息化技术可以辅助现场施工管控，利用BIM技术可视化展示装配流程，实时监测构件安装位置与施工进度，及时发现装配过程里的问题并做出调整，做到施工进度的实时管控，保证现场装配工作按计划推进，提高整体施工效率。

## 3 模块化施工技术在市政路桥快速施工中的实践路径

### 3.1 市政道路工程中的模块化施工实践

市政道路工程具有结构相对简洁、施工区域分散、交通影响要求高的特点，模块化施工需结合这些特点

针对性落地，着力解决道路施工效率与质量难题。针对市政道路的路基、路面、人行道等不同结构，设计适配的模块化构件，路基模块采用预制混凝土块或装配式基层构件，路面模块选用预制沥青混凝土板或混凝土面板，人行道模块采用预制透水砖或装配式道板，实现不同结构部位的模块化预制与装配[4]。现场装配流程需进一步优化，采用分段施工模式，合理划分施工区域，减少道路围挡范围，缩短单段施工工期，最大限度降低对城市交通的影响，避免长期占道引发的交通拥堵。质量验收环节需强化标准化管控，针对不同类型的模块化构件，制定明确的质量验收标准，重点检查构件的尺寸偏差、连接质量与强度达标情况，确保装配后的道路平整度、承载力符合市政道路使用标准，同时兼顾道路的排水、防滑等使用功能，实现施工效率与工程质量的双重提升。

### 3.2 市政桥梁工程中的模块化施工实践

市政桥梁工程结构复杂、施工难度大、安全要求高，模块化施工需要结合桥梁的结构特点，调整并完善施工流程，让快速施工和结构安全结合得更好。施工围绕桥梁墩柱、盖梁、箱梁等主要受力构件，推广工厂预制、现场拼接的施工方式，这些核心构件可以在工厂内精准制作完成，避免现场浇筑受环境影响出现质量不稳定的问题，同时能减少现场高空作业，降低施工的安全风险。桥梁施工最突出的难点在于高空拼接和构件运输，需要合理安排吊装方案，选择匹配的高空吊装设备，确定吊装路线和吊装顺序，安排专业指挥人员，保证构件在高空拼接时精准、安全；针对大型箱梁这类重量大、体积大的构件，要调整运输方案，使用专用运输设备，提前规划好运输路线，保证构件能顺利运到施工现场，连接部位的质量把控是桥梁模块化施工的关键，需要加强墩柱与盖梁、盖梁与箱梁等连接处的紧固处理，使用高强度连接材料，严格把控连接精度，保障桥梁结构稳定、耐用，避免桥梁投入使用后出现结构安全隐患[5]。

### 3.3 模块化施工实践中的问题与应对措施

模块化施工应用在市政路桥工程的实际过程中，很容易受各类因素影响出现问题，梳理常见问题并制定对应的解决办法，是保障施工顺利推进、达成快速施工目标的重要支撑，构件运输阶段出现损坏是实际施工中很常见的问题，主要是运输过程颠簸、相互碰撞以及包装防护不到位导致的，对应的处理措施要覆盖整个运输流程，优化构件的包装方案，用缓冲材料把构件的边角、容易受损的部位包裹防护起来，选择行驶平稳、承重能力强的运输车辆，合理安排运输路线，避开颠簸路段，同时做好运输过程的实时管控，安排专人跟车，及时处理运输中的突发状况，降低构件损坏的概率。现场装配衔接不顺，大多是设计、生产、施工三方沟通不够、工序衔接要求不清晰导致的，需要完善各方协调机制，建立定期开沟通会的制度，及时同步设计变更、构件生产进度、现场施工进展，把工序衔接的节点拆分得更细致，明确每个环节的完成时间和责任方，避免出现工序脱节的情况。质量管控的薄弱环节主要集中在构件连接位置和现场装配精度，需要强化全流程的质量检测：构件出厂前要严格检查连接接口的尺寸，现场装配过程中要随时监测装配精度，用专业检测设备排查质量隐患，同时还要优化管控方式，细化质量管控流程，明确每个岗位的质量管控责任，保证质量问题能尽早发现、尽早整改。

## 4 结束语

模块化施工技术适配市政路桥快速施工的核心诉求，有效弥补了传统现浇施工的诸多短板，在提升施工效率、保障工程质量、减少环境影响等方面发挥着重要作用。通过构件设计优化、工厂标准化预制与现场高效装配的协同推进，该技术已在市政道路、桥梁工程中实现有效落地，验证了其适配性与实用性。实践中仍需关注构件运输、工序衔接、质量管控等关键环节，持续优化应对措施，完善协同机制。未来可结合信息化技术深化应用，进一步提升模块化施工的智能化水平，为市政路桥工程高质量、高效率建设提供更有力的技术支撑，推动市政基础设施建设提质增效。

## 参考文献：

[1] 何安宁，宋娇. 市政钢混组合梁桥设计与施工关键技术研究 [J]. 工程建设与设计，2026(05):98-101.
[2] 谢鑫，逄淑升. 市政工程供热建设研究及展望 [J]. 暖通空调，2025,55(S1):6-9.
[3] 肖俊杰. 城市化进程中市政路桥施工技术的创新与发展 [J]. 居业，2024(11):16-18.
[4] 刘锡辉. 市政景观设计中施工技术创新应用研究 [J]. 现代工程科技，2024,03(21):87-89.
[5] 李明明. 模块化装配式的房屋建筑体系施工技术研究 [J]. 佛山陶瓷，2024,34(12):142-144.

# 高填方公路路基沉降控制施工技术及优化方式

晋潇圣

（四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司，四川 成都 610200）

**摘 要** 高填方路基是山区公路建设中应用广泛的结构形式，受地形地质条件、施工工艺等多重因素影响，路基沉降尤其是不均匀沉降已成为制约公路运营安全的突出问题。传统施工技术存在压实均匀性差、沉降控制精度低等不足，易引发路面开裂、桥头跳车、边坡失稳等病害。本文系统剖析高填方路基沉降的形成机理与主要成因，梳理地基处理、分层填筑、压实管控、排水固结等核心施工技术，从材料改良、工艺迭代、动态反馈、边坡加固四个方面提出针对性优化方案，旨在为同类山区高填方工程提供技术参考。

**关键词** 高填方路基；沉降控制；地基处理；分层填筑；动态监测

**中图分类号**：U416.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.020

## 0 引言

随着我国西部山区交通基础设施建设的全面推进，高填方路基因地形适应性强、造价相对可控，在峡谷、洼地等复杂地貌区域得到大规模应用。高填方路基填方高度普遍超过20 m，部分路段可达60 m～80 m，其沉降变形具有持续周期长、影响范围广、治理难度大的特点。若沉降控制不当，会导致路面纵向开裂、桥头跳车加剧、排水系统失效等问题，严重影响公路的行车舒适性与使用寿命[1]。现有施工技术多沿用平原地区的成熟经验，未充分考虑山区软弱地基分布广、地形起伏大、气候条件复杂的特点，导致部分工程出现工后沉降超标的情况。因此，深入研究高填方公路路基沉降控制施工技术及优化方式，对保障山区公路建设质量、降低全生命周期运营成本具有重要的工程实践意义。

## 1 高填方路基工程特点与沉降成因分析

### 1.1 高填方路基工程特点

高填方路基主要分布在我国西南、西北山区，具有鲜明的工程特征。一是填方高度大、自重荷载强，路基底部承受的附加应力可达数百千帕，易引发地基与路堤的双重压缩变形。二是沉降持续周期长，工后沉降通常需要3年～5年才能基本稳定，深厚软弱地基段的沉降周期可延长至10年以上。三是地质条件复杂多变，高填方路基多跨越沟谷与坡地[2]，地基常分布有淤泥质土、泥炭土、松散碎石土等不良土层，承载力低、压缩性高，易产生不均匀沉降。四是施工干扰因素多，山区施工场地狭小、运输条件差，且受雨季、冬季等气候影响显著，施工连续性难以保障，易导致路基压实质量波动。

### 1.2 路基沉降主要成因

高填方路基沉降由地基沉降与路堤本体沉降两部分组成，其中地基沉降占总沉降量的60%～70%[3]，是沉降控制的重点。地基沉降主要源于天然地基的固结压缩，在上覆路堤荷载作用下，软弱土层中的孔隙水缓慢排出，土体颗粒重新排列，产生长期的固结变形。若地基处理不彻底，软弱土层的固结过程会持续多年，导致工后沉降超标。

路堤本体沉降主要由填料压缩变形与施工压实不足引起。填料级配不良、含水率偏离最佳值，会导致压实后土体孔隙率过高，在自重与车辆荷载长期作用下产生压缩变形。此外，水的侵蚀作用是加剧沉降的重要因素，地表水渗入路堤会降低填料强度，地下水升降会引起地基土软化，进一步扩大路基的不均匀沉降。地形起伏变化、填料分布不均、施工缝处理不当，也会导致路基各部位沉降差异，引发纵向或横向裂缝。

## 2 高填方路基沉降控制关键施工技术

### 2.1 地基处理技术

地基处理是从源头控制路基沉降的首要环节，需根据地基土层性质与厚度选择适配的技术方案。对于浅层软弱地基（厚度小于3 m），采用换填垫层法，将软弱土层全部挖除，换填级配良好的碎石、砂砾等透水性材料，分层压实至93%以上的压实度，可快速提高地基承载力。对于碎石土、砂土等非黏性土地基，采用强夯法，利用1 000 kN·m～3 000 kN·m能级

作者简介：晋潇圣（1990-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁工程。

的重锤冲击地基，使土体密实度显著提升，夯点间距控制在 3 m～5 m，夯击遍数根据现场试夯确定。

对于淤泥质土、粉质黏土等黏性土地基，采用水泥搅拌桩复合地基，通过深层搅拌将水泥与土体混合，形成水泥土桩体，与桩间土共同承担荷载，桩径 500 mm～600 mm，桩长穿透软弱土层。对于深厚软弱地基（厚度大于 10 m），采用 CFG 桩复合地基，桩体强度高、承载力大，可有效减小地基总沉降量，桩径 400 mm～500 mm，桩间距 1.5 m～2.5 m，桩顶设置碎石垫层形成应力扩散层[4]。

### 2.2 分层填筑施工技术

高填方路基填筑严格遵循“水平分层、由低到高、分段填筑”的原则，按照横断面全宽分成水平层次逐层向上填筑。每层铺层厚度根据压实机械性能确定，细粒土不超过 30 cm，粗粒土不超过 40 cm。对于原地面坡度大于 1:5 的路段，先将原地面挖成宽度不小于 2 m 的台阶，台阶顶面做成 2%～4% 的向内倾斜坡度，防止填筑体沿原地面滑动。

填料选择优先采用级配良好的碎石、砾石、砂类土等透水性材料，严禁使用淤泥、腐殖土、冻土及有机质含量超过 5% 的土。在土石混填路基中，石料最大粒径不得超过铺层厚度的 2/3，且均匀分布，避免出现大块石料集中的情况。填石路基采用分层填筑分层碾压工艺，倾填高度不超过 6 m，倾填后进行补夯，确保石料之间嵌挤紧密。

### 2.3 压实质量控制技术

压实属于高原路基施工过程中保证结构强度、抵抗冻融破坏、控制工后沉降的关键工序，压实质量的好坏直接影响到路基长期稳定和安全运行。高原地区低温干燥、冻融循环频繁的环境特点，使填料压实特性与平原地区有很大差别，压实不足容易造成路基不均匀沉降、冻胀隆起等病害，所以要根据填料种类精确选择压实机械和施工参数。细粒土填料用 18 t 光轮压路机和 22 t 振动压路机组合碾压，粗粒土及土石混填路基用 25 t 以上重型振动压路机，填石路基用 30 t 以上冲击式压路机补充碾压。所有压实参数均要经过现场试验段的确定，结合高原环境对平原地区的通用参数进行修正，一般振动压路机行驶速度控制在 2 km/h～3 km/h，静压 1 遍、弱振 2 遍、强振 1 遍～2 遍、终压 1 遍，松铺厚度根据填料类型控制在 30 cm～50 cm，碾压按照先轻后重、先慢后快、先边后中的原则进行，防止漏压、过压和填料推移[5]。

压实质量检测应采用多种方法相结合的方式，对全断面、多频次进行质量控制。细粒土路基以灌砂法为主，环刀法做对比检验；粗粒土和填石路基用灌水法加沉降差法检测，保证检测结果可以真实反映路基的压实情况。常规路段每 200 m 压实层检测 4 个点，桥台台背、涵洞两侧、路基与隧道衔接处、路基边缘等薄弱部位检测频率要加密到每 50 m 设 4 个点。对压实度达不到要求的地段要立即进行补压，补压后仍达不到要求的应将不合格填料挖除，重新填筑。施工期间对填料含水率进行实时检测，保证填料在最佳含水率 ±1% 范围内，含水率过高时用翻晒法降低含水率，含水率过低时均匀洒水并充分拌合；环境温度低于 0 ℃时不得洒水作业，也不得碾压含有冻块的填料，已受冻的压实层应全部清除后再施工。

### 2.4 排水固结技术

排水固结技术是高原软土地基和冻融敏感地基处理的主要技术，依靠建立竖向和水平相结合的立体排水体系，加快地基孔隙水和季节性融冰水的排出速度，缩短地基固结时间，明显减小工后沉降和不均匀沉降的风险。高原地区降雨集中、季节性冻土融化容易造成地基含水率突然上升、承载力急剧降低，因此地表排水系统必须在路基填筑前全部完成，在路基坡顶 5 m 外设置梯形截水沟拦截山坡汇水，路基两侧设置矩形排水沟和边沟，沟底铺设防渗土工膜阻断水下渗通道，在低洼地段增设急流槽和集水井，将地表水迅速排到路基范围外，防止雨水长时间浸泡地基造成软化变形。地下排水一般采用塑料排水板或袋装砂井做竖向排水体，配合堆载预压形成完整的排水固结系统。

塑料排水板采用正方形布置，间距为 1.2 m～1.8 m，打设深度要穿过整个软弱土层并进入下卧硬土层不少于 0.5 m，顶部铺设 30 cm 厚的级配良好的中粗砂垫层作为水平排水通道，砂垫层内铺设双向土工格栅增强整体稳定性。堆载预压严格按照分级加载的原则进行，每级荷载的加载速度按照实时沉降和孔隙水压力监测数据实时调整，当连续 7 d 地基沉降速率小于 8 mm/d、孔隙水压力消散率达到 70% 以上时，才可以施加下一级荷载，总预压时间不得少于 6 个月。对于工期紧张的高海拔路段，可以采用真空预压联合堆载预压技术，将真空度保持在 80 kPa 以上，可以将固结周期缩短 30% 左右，同时也可以有效地控制地基侧向变形。

## 3 高填方路基沉降控制施工技术优化方式

### 3.1 填筑材料与配合比优化

通过材料改良与级配优化，可显著提升填料的强度与抗变形能力。对于级配不良的填料，掺入 15%～20% 的碎石进行级配调整，使其满足规范要求的级配范围。对于软弱黏性土填料，采用石灰、水泥等无机结合料进行改良，不同改良方式的性能对比如表 1 所示。

表 1　不同改良方式下填料物理力学性能对比

| 改良方式 | 最大干密度 g/cm³ | 最佳含水率（%） | CBR 值（%） | 压缩模量（MPa） | 适用场景 |
|---|---|---|---|---|---|
| 原黏性土 | 1.72 | 16.5 | 3.2 | 4.2 | 低填方非软弱地基 |
| 5% 石灰改良 | 1.78 | 17.2 | 6.8 | 5.8 | 一般软弱地基 |
| 5% 水泥改良 | 1.86 | 15.8 | 7.0 | 6.9 | 高填方软弱地基 |
| 3% 水泥 +2% 石灰改良 | 1.83 | 16.3 | 7.5 | 7.2 | 深厚软弱地基 |

试验结果表明，5% 水泥改良后填料的 CBR 值提高 120%，压缩模量提高 65%，可有效减小路堤压缩沉降。施工中通过室内试验确定最佳配合比，现场严格控制改良材料的掺量与拌合均匀性。

### 3.2　分层填筑工艺优化

将传统 30 cm 铺层厚度优化为 20 cm ～ 25 cm 薄层碾压，可提高压实机械的有效作用深度，使路基各层压实度更加均匀。对于填石路基，采用 40 cm 分层厚度替代传统 60 cm 厚度，配合重型振动压路机碾压 6 遍～ 8 遍，使石料孔隙率控制在 20% 以内。

在地形起伏路段，采用台阶法精细化施工，台阶高度与铺层厚度一致，每层填筑前清理台阶顶面浮土，确保新旧填筑体结合紧密。路基填筑至设计标高后，采用冲击碾压技术进行整体补强，冲击碾压 20 遍～ 25 遍，行驶速度 10 km/h ～ 12 km/h，可进一步减小路基的工后沉降量。

### 3.3　动态监测与反馈优化

建立覆盖施工全过程的动态监测体系，根据监测数据实时调整施工参数，实现沉降的精细化管控。监测项目包括地表沉降、分层沉降、水平位移与孔隙水压力，各项目的布设要求与预警值如表 2 所示。

当监测数据超过预警值时，立即停止填筑，分析原因并采取加固措施，待沉降稳定后再恢复施工。通过监测数据反馈，动态调整填筑速率、加载分级与预压时间，确保路基沉降控制在设计允许范围内。

表 2　高填方路基施工监测项目与预警值

| 监测项目 | 布设位置 | 监测频率 | 预警阈值 |
|---|---|---|---|
| 地表沉降 | 路基中心、路肩、坡脚 | 施工期 1 次 /d，预压期 1 次 /3d | 日沉降＞ 15 mm，累计沉降＞设计值 80% |
| 分层沉降 | 路基中心，穿透软弱土层 | 施工期 1 次 /d，预压期 1 次 /7d | 分层沉降差＞ 5 mm/m |
| 水平位移 | 坡脚外侧 2 m 处 | 施工期 1 次 /d，预压期 1 次 /3d | 日水平位移＞ 5 mm |
| 孔隙水压力 | 地基软弱土层内 | 施工期 1 次 /d，预压期 1 次 /7d | 孔隙水压力系数＞ 0.6 |

### 3.4　边坡防护与加固优化

边坡稳定影响路基整体沉降，采取防护加加固的综合措施提高边坡抗变形能力。高度小于 20 m 的边坡用浆砌片石骨架植草防护，防止雨水冲刷；高度大于 20 m 的高边坡用锚杆框架梁防护，锚杆长度 3 m～ 5 m，间距 2 m～ 3 m，框架内植草绿化。

路堤分层填筑时铺设双向拉伸土工格栅，格栅抗拉强度不小于 80 kN/m，层间距 0.5 m～ 1 m，可以提高路堤整体性，减小不均匀沉降。对有滑动风险的边坡进行钢筋混凝土抗滑桩加固，桩截面为 1.5 m×2 m，桩长 15 m～ 20 m，间距 5 m～ 6 m，保证边坡长期稳定。

## 4　结束语

本文针对高填方公路路基沉降控制的技术难点，系统分析了地基固结与路堤压缩的沉降形成机理，梳理了地基处理、填筑压实、排水固结等关键施工技术，提出了材料改良、薄层碾压、动态监测、边坡加固的综合优化方案。工程实践表明，优化后的技术体系可有效控制路基工后沉降与不均匀沉降，提升路基整体稳定性。未来可结合 BIM 技术与物联网智能监测系统，实现高填方路基施工的数字化建模与实时预警，进一步提高沉降控制的智能化水平，为山区高等级公路建设提供更完善的技术支撑。

## 参考文献：

[1]　梁汉华 .CFG 桩复合地基在高填方路基加固中的应用 [J]. 工程建设与设计 ,2024(19):45-47.
[2]　王建恒 . 砂桩与 CFG 桩复合地基在软土路基中的应用对比研究 [J]. 西部探矿工程 ,2025,37(08):8-10.
[3]　唐璇勋 .CFG 桩复合地基在软土路基中的施工工艺与应用分析 [J]. 辽宁省交通高等专科学校学报 ,2025,27(06):16-20.
[4]　武洁 , 赵金科 . 智能压实度检测设备在公路路基施工质量控制中的实践 [J]. 消费电子 ,2025(16):239-241.
[5]　周明 . 复杂条件下湿陷性黄土路基不均匀沉降控制关键技术研究 [J]. 工程建设与设计 ,2023(21):48-50.

# 山区公路工程大型机械设备安全管控与现场调度优化

王 有

（四川路航建设工程有限责任公司，四川 成都 610041）

**摘 要** 山区公路工程因地形起伏剧烈、地质条件复杂等特殊因素，导致大型机械设备安全管控难度大且现场调度效率低，成为影响工程质量及施工安全的关键瓶颈。本文结合山区公路施工的独特工况，分析大型机械设备管理面临的特殊挑战；从人员、设备及环境三个核心维度提出可操作的安全管控优化措施；从设备选型配置、智能调度算法以及多机协同作业三个层面制定针对性的现场调度优化策略，以期为山区公路工程大型机械设备的安全管理及高效调度提供参考。

**关键词** 山区公路工程；大型机械设备；安全管控

**中图分类号**：U415.5 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.021

## 0 引言

随着我国交通基础设施建设延伸至山区公路工程的建设规模不断扩大，大型机械设备作为施工核心装备，其安全运行及高效调度直接关系到工程施工的顺利推进、人员财产安全及项目综合效益。与平原地区公路工程相比，山区公路施工环境具有地形切割强烈、地质条件破碎、作业面分散且高差悬殊的特征，加之局部小气候灾害频发，偏远工点通信不畅，导致大型机械设备在行驶、作业及调度过程中面临诸多安全隐患，传统的安全管控模式及调度方法已无法适配山区施工的复杂需求。

## 1 山区公路工程大型机械设备管理面临的特殊挑战

山区同平原地区公路施工环境存在显著差异，特殊的地形气候及施工组织条件，使大型机械设备管理面临管控难题，具体体现在四个方面：一是地形条件严苛，设备损耗加剧，山区公路施工无规整作业场地，多依托山脊或者半山腰开辟施工便道，道路纵坡普遍大于 10%，设备转弯半径、通行空间受限严重。大型机械设备长期在高坡度、小曲率的线形条件下行驶作业，发动机持续高负荷运转，大幅提升制动系统、变速箱等核心部件损耗速率。二是作业点位分散，调度效率低下，山区公路线路跨度大且作业面碎片化特征突出，桥梁墩台、隧道洞口、路基填筑等施工点位相互分离，相邻作业点直线距离较短但实际通行路径高差较大，设备转场绕行距离远、耗时久，设备无效转场时长远超有效作业时长。三是气候工况多变，山区峡谷地形易形成局部小气候，同一施工标段不同工点气象条件存在显著差异，整体气象预报无法精准适配单个工点工况，管理人员不能精准预判现场通行及作业条件。四是交叉作业复杂，山区公路施工多采用多工序并行、多设备交叉作业模式，传统依赖人工经验的调度方式易出现设备等待闲置、作业路径交叉干扰等问题，严重影响整体施工效率[1]。

## 2 山区公路工程大型机械设备安全管控优化措施

### 2.1 强化人员管控，提升施工安全意识

人员管控的真正价值在于将安全意识的模糊状态转变为可预判的稳定特征，操作者对风险的理解深度决定机械运行时的人为差错概率，山区复杂的地形及多变的工况不断考验着每个参与者的即时判断能力，此时高度警觉的内心状态就是最可靠的第一道防线。定期对操作人员进行培训，增强其操作技能和安全意识，确保其能够熟练掌握设备的操作方法和应急处理措施[2]。

为系统提升山区公路施工安全水平，建立常态化岗前风险防控机制，推行每日开工 5 分钟岗位风险自述制度，要求设备操作人员结合当日作业内容、施工地形及气候条件精准辨识作业过程中的典型安全风险。同时，落实班组安全监督机制，各班组设置安全行为

作者简介：王有（1997-），男，本科，助理工程师，研究方向：物资设备管理。

观测记录台账，由班组人员轮流履职全程记录作业过程中的不规范操作、违规行为及潜在风险。每周组织设备实操模拟推演，依托现场实体设备开展空载实训，重点强化紧急制动、避险避障等核心应急科目训练，提升操作人员突发工况下的应急处置能力。在此基础上完善正向激励档案管理制度，推行安全可视化激励机制，表彰连续30天无违规操作、无安全隐患的操作人员，统一归档留存所有人员安全作业记录、培训记录及考核记录，为后续同类工程设备人员安全管理提供数据支撑。

### 2.2 强化设备管控，消除设备安全隐患

若设备管控缺失，那些隐藏在结构内部的疲劳裂纹及磨损积累便会悄然逼近临界点，在山区公路工程中，大型机械长期处于高负载以及剧烈振动的工况之下，零部件的性能衰退速度快于常规环境，因此任何微小隐患都可能迅速演变为严重故障。一台经过严格状态评估的设备，其各子系统之间的协同配合更加顺畅，大幅降低突发性停机的风险。消除设备安全隐患不仅是避免机械本身损坏，更是防止因设备突然失灵而引发周边人员的连锁伤害。

每台大型机械设备都应建立独立运行档案，档案内包含每日开机前的油位、水位以及胎压三项实测数据记录表。设备操作手在启动机器后必须完成1分钟空转听音检查，重点辨别发动机、液压泵及传动轴三个部位的异响特征。每周对全部设备进行一次制动系统专项测试，测试时在山路坡道位置设置标准制动距离参照桩，测量实际滑移长度并与出厂参数比对。每月开展一次结构件焊缝巡检，使用强光手电配合放大镜逐一检查动臂根部、转台连接处等六个关键受力点。雨季来临前开展设备专项维保，彻底清理底盘泥浆结块、散热器碎石堵塞物，保障设备散热稳定。同时，推行油品定期化验机制，为挖掘机、装载机等核心设备配备专用取样工具，设备每运行200小时抽取液压油、发动机油样本送检，检测油品黏度、金属颗粒含量等关键指标，精准判断设备内部磨损状态。落实每日安防设施巡检制度，每日黄昏前全面检查设备灯光、鸣笛及警示装置，保障夜间、雾天低能见度工况下的警示功能完好。

### 2.3 强化环境管控，降低环境因素风险

山区特有的地形起伏与多变气候会形成规律性的危险组合：降雨会提升边坡失稳的发生概率，浓雾会大幅压缩驾驶员的有效观察距离，低温会导致液压介质流动迟缓，每一类环境要素都在暗中重新划定作业的安全边界。管控环境风险的核心意义，就在于将这些看似不可抗拒的外部条件，转化为可提前识别、主动规避的已知变量[3]。在整合地质信息与气象数据后，风险触发的前兆特征将变得清晰可辨，施工活动也将因此获得更大的安全宽容度。

实施施工区域风险分级管控，依据作业区域地形坡度划分风险等级：坡度＞25°区域划定为红色高风险区，15°～25°区域划定为黄色中风险区，其余区域为蓝色低风险区。严格落实高风险作业管控要求，设备进入红色高风险区作业前，必须精准测定地面倾斜角度详细记录于施工日志。建立现场动态气象监测机制，各作业点位布设简易气象观测设备，配置风速仪、雨量筒等设施，每2小时采集气象数据实时掌握现场工况变化，当现场风速达到6级及以上时，立即暂停所有起重作业及高空拆模作业，杜绝恶劣气象条件下违规施工。另外，强化雨季及特殊路段管控，雨季安排专人重点排查路面塌陷、暗穴、落石堆积等隐患，确认通行安全后方可放行设备。在落石高发路段设置移动式双层防护棚架，设备通行时安排专人坡面瞭望，防范落石冲击风险。各作业区域配套安装声光报警装置，联动边坡地质监测设备，当监测到边坡位移异常、存在坍塌风险时，自动触发撤离预警，要求操作人员30秒内完成设备熄火、人员撤离，全面保障施工安全。

## 3 山区公路工程大型机械设备现场调度优化策略

### 3.1 精准选型及动态配置：因地制宜匹配设备

一台设备在山区公路工程中的适用性随着地形曲率、路基宽度等空间参数的变化而动态波动，精准选型的价值在于将设备自身的性能边界最优贴合工点的实际需求，避免出现大材小用或“小马拉大车”的资源错配现象。当挖掘机的斗容、臂长匹配开挖断面的土石方量时，每一铲斗的满载率会稳定在高位区间，空驶行程被压缩到最低限度。动态配置则进一步解决设备数量同作业面进度之间的张力问题，因为不同工序对机械能力的需求曲线存在明显波峰。

首先依据施工图纸标注的平曲线半径及最大纵坡数据提前编制设备选型对照表，对照表按坡度分档：坡度小于12%的路段选用标准型轮式装载机；坡度介于12%～25%的路段限定使用履带式挖掘机；坡度超过25%的路段仅允许配备带有辅助制动器的低重心机型。每日收工后，现场调度员须复核次日作业面的实际地形变化，若某区域昨夜发生塌方或改道则重新核对设备选型对照表并更新次日的机型安排。为保证操作手随时掌握当前工况，每台设备驾驶室内应张贴一

张当前工点的地形参数卡，卡上标明该位置的路面倾斜角、转弯半径限值及最小通过宽度三项数据。当设备转场至下一个工点时，调度员必须再次确认新工点的地形参数与原设备是否兼容，发现不兼容立即调换为匹配的机型。每周还需汇总一次设备与工点的匹配记录，标记出曾出现匹配错误的组合，并将这些组合列入下一周的选型复查清单。此外，各工点之间设置一台备用轮式牵引车，专门用于拖拽因选型不当而陷入泥泞或爬坡失败的小型设备，同时该牵引车也作为动态配置的资源缓冲。

### 3.2 算法驱动智能调度：多目标协同优化决策

山区公路工程中同时存在工期、成本等多个相互牵制的调度目标，人为经验只能优先满足其中一两个而牺牲其余指标。算法驱动调度的核心价值在于将冲突目标转化为可计算的权重分配问题，一个精心设计的调度算法能同时处理设备数量约束、运输路径限制等十几类变量[4]，而人的大脑无法在同一时刻容纳如此复杂的信息网络。多目标协同优化的意义还体现在应对突发状况时的快速重调度能力上，当某台设备发生故障或某段道路临时中断时，算法可以在数秒内重新生成一套可行的替代方案。

搭建离线智能调度系统，系统录入设备位置、剩余能耗、计划作业时长等基础数据形成多维度调度数据库，每日开工前，调度人员将当日施工任务、工期要求等参数录入系统，设置多目标优化权重：工期权重 40%、能耗权重 35%、设备磨损权重 25%，通过算法自动测算生成设备任务分配方案，明确单台设备作业顺序、通行路径以及作业起止时间，达到量化精准调度。针对设备故障、道路封闭、天气突变等突发情况建立突发工况快速重调度模式，现场人员实时反馈工况变化，调度人员更新系统参数，算法可在 60 秒内重新生成最优调度方案并落地执行，降低突发工况对施工进度的影响。在此基础上落实调度效果动态校核，每日收工后对比算法调度计划及实际施工进度，若连续三日偏差率超过 5%，应及时优化调整算法权重参数及约束条件，持续提升智能调度方案的适配性。

### 3.3 多机协同及流水作业：模块化衔接提效率

单台设备的作业效率再高，若与其他机械之间存在频繁的等待或干涉，依然难以提升整体工效，多机协同的核心价值是将挖、装不同功能的设备整合成一个同步运转的作业群，使每台机械的起止时间精确咬合其他机械的节拍[5]。进一步推广流水作业，便可将长距离的施工路段分解为多个标准化的模块，每个模块内部完成固定顺序的作业内容，设备按照统一方向依次推进，减少设备之间的交叉干扰及倒车避让，整个作业群呈现出类似生产线的连续流动特征。

将整条施工路段按照每 50 m 划分为一个标准作业模块，模块边界用地面喷漆标示清楚，每个模块内固定安排三台设备形成作业单元，挖掘机位于模块起始端负责装料，装载机位于模块中段负责平整，压路机位于模块末端负责压实。三台设备之间的作业间距保持在 15 m～20 m 范围内，间距过近时挖掘机短暂停机等待，间距过远时装载机提速跟进。作业单元整体从低桩号向高桩号方向逐模块推进，前一个模块的压路机完成压实作业后，后一个模块的挖掘机才开始进入该模块的装料工序。每个模块入口处设置一块作业状态牌，牌上标注当前模块内正在运行的设备编号以及预计离开该模块的时间。当一台设备完成本模块任务后移至下一模块时，操作手鸣笛一声提示后方设备可以补位。每日作业过程中严禁任何设备超越前方模块的分界标线，避免不同模块之间的设备发生路径交叉。收工后检查各模块衔接处的过渡段是否平整，不平整处列入次日第一个模块的复压任务。

## 4 结束语

山区公路工程中大型机械设备的安全与调度问题，本质上是将通用机械置于极端环境中重新适配的过程。安全管控侧重于抵御外部风险对设备及人员的冲击，现场调度则着眼于内部资源的优化配置，安全管控为调度提供稳定可靠的设备状态基础，调度优化反过来减少设备因拥堵或空转而产生的非必要磨损。未来，随着 5G 专网、边缘计算融合机载传感器，大型机械设备将具备实时感知地形变化及自身状态的能力，将安全及调度统一嵌入同一套自适应控制逻辑中，真正实现“人控与机控互补、避险与增效并行”的山区施工新模式。

## 参考文献：

[1] 杨志龙.工程建设中大型机械设备协同与进度优化[J].南方金属,2026(01):62-64,67.
[2] 刘德华,张登科.建筑工程施工项目中大型机械设备优化策略研究[J].建设机械技术与管理,2025,38(06):49-51.
[3] 徐淑娟.建筑工程大型机械设备的管控措施[J].建筑机械,2024(08):65-68.
[4] 满莉莉.大型机械设备安全管理问题与对策研究[J].造纸装备及材料,2023,52(07):27-29.
[5] 张寅,李斌,杨冬.基于物联网技术的大型机械设备智能管理系统开发[J].中国仪器仪表,2023(02):53-58.

# 数字孪生技术在黄河工程管理中的应用探索

李生宇，高　颖

（濮阳黄河河务局第一黄河河务局，河南 濮阳 457100）

**摘　要**　针对黄河工程管理存在的数据碎片化、管控手段滞后、调度决策依赖经验等现实问题，为推进黄河工程管理数字化智能化转型，在梳理黄河现有工程体系、运行管控现状基础上，结合流域水库、堤防工程及调水调沙、应急管控实际业务数据，剖析当前数字孪生黄河建设在立体感知、泥沙仿真、业务智能适配方面现存短板。构建包含感知、数据、仿真、业务应用的数字孪生应用架构，建立标准化数据底板，引入多源数据融合、洪水演进、水沙调控多目标协同仿真模型。以数字孪生小浪底水利枢纽为实例开展验证。结果表明：该架构能够有效提升水位、泥沙、流量监测精度，缩短调度方案编制与险情处置时间，降低运维人工成本，可显著强化工程安全防控、水沙联合调度能力，为“智慧治黄”提供技术支撑。

**关键词**　数字孪生；黄河工程管理；数据底板；仿真模型

**中图分类号**：TV698　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.022

## 0　引言

当前，水利部黄河水利委员会（以下简称“黄委”）已初步构建全流域贯通、全领域覆盖、全链条联动的数字孪生黄河体系，正式印发《2026年数字孪生黄河体系建设工作要点》，明确以“需求牵引、应用至上，数智赋能、提升能力”为原则，统筹数字孪生流域、水网、工程协同建设，系统推进7个方面34项重点工作。目前数字孪生技术在黄河工程管理中的应用仍处于深化迭代阶段，在“天空地水工”一体化监测感知精度、黄河泥沙机理仿真模型成熟度、全业务场景智能适配覆盖度等方面仍有持续优化空间。

## 1　数字孪生技术与黄河工程管理相关理论基础

### 1.1　数字孪生技术核心概念与技术架构

数字孪生技术是指以数字化手段构建与物理实体在几何形状、物理属性、运行状态上高度一致的虚拟模型，通过物联网感知、数据融合、仿真推演等技术，实现虚拟模型与物理实体的实时同步、动态交互，进而实现对物理实体的监测、诊断、预测和优化控制的一种新型技术理念[1]。数字孪生的技术架构可分为四层，各层协同联动、层层支撑，构成完整的技术体系。其中，感知层作为数据采集入口，主要通过物联网设备、传感器、无人机等手段，采集物理实体的几何参数、运行状态、环境参数等多源数据，是数字孪生实现虚实同步的基础；数据层负责对采集到的多源异构数据进行清洗、融合、存储和管理，构建标准化的数据资源体系，为上层应用提供高质量的数据支撑[2]。

### 1.2　黄河工程管理范畴与核心业务需求

随着黄河流域生态保护和高质量发展重大战略的推进，水资源优化配置、生态保护修复也成为核心业务需求，需要统筹协调生活、生产、生态用水，改善流域生态环境[3]。除核心业务需求外，黄河工程管理还存在精细化、智能化管控的迫切需求。当前，黄河工程管理涉及海量数据，包括工程设计数据、监测数据、运行数据、环境数据等，传统管理模式难以实现数据的高效整合和深度利用，导致管理决策存在滞后性和主观性。

## 2　黄河工程管理现状及存在问题

### 2.1　黄河水利工程建设管理现状

近年来，随着黄河流域生态保护和高质量发展战略的落地实施，黄河水利工程建设投入持续加大，工程建设规模不断扩大，已形成覆盖防洪、供水、水沙调控的完善工程体系。截至2026年9月，黄河流域已建成各类水库3 100余座，其中大型水库30座、中型水库170余座，总库容突破890亿立方米；龙羊峡、刘家峡、东庄、小浪底等骨干枢纽，加上正在推进建设的古贤水利枢纽，共同构成了当前国内规模最大的

作者简介：李生宇（1995-），男，本科，助理工程师，研究方向：水利工程。

流域水沙调控工程集群。下游临黄堤防总长度达 1 371 千米，2025 年 8 月通过竣工验收的黄河下游防洪工程，完成了 820 千米堤防加固改造，两岸标准化堤防建成规模超 800 千米，整体达标率提升至 90% 以上，工程抗洪稳定性和控导河势能力实现质的跃升[4]。

### 2.2 黄河工程运行管控现状

黄河工程运行管控已初步构建起黄委统筹、各省区河务局落实具体工作的全流域统筹、分级负责管理体系，重点开展防洪调度、水资源调度、安全监测等业务，调度工作中黄委强化“四预”能力建设，研发水沙调控多目标协同模型，实现干支流骨干水库联合调度；截至 2026 年 9 月，自 2002 年实施调水调沙以来黄河已连续 24 年开展调水调沙工作，累计输沙入海超 36.9 亿吨，下游主槽平均下切 3.1 米，最小过流能力稳定恢复至 5 000 立方米每秒左右，2025 年小浪底水库库区淤积量为 0.914 亿立方米，下游河道维持全线冲刷态势，2026 年 9 月 12 日黄委启动年度黄河上中游重点水库联合排沙调度，统筹龙羊峡、刘家峡等 8 座骨干水库，预计总排沙量超 1 亿吨[5]；应急处置层面，河南河务局研发的智能石头监测系统在河南境内黄河 14 处重点工程、171 道坝岸布设 2 232 枚智能监测点位，可全天候采集根石位移、倾斜状态数据，2024 年汛期调水调沙期间该系统提前数小时发出根石位移告警，成功处置多起工程潜在险情，推动黄河防汛由被动抢险向主动防御转变，在 2024 年应急抗旱调度中，面对流域高温少雨旱情，黄委及时启动干旱防御Ⅳ级应急响应，调度小浪底、三门峡等下游控制性水库加大下泄流量，保障河南、山东沿黄灌区用水，2024-2025 年度黄河干流向流域及相关地区供水超 223 亿立方米，来水偏枯条件下取得“见旱不见灾”的抗旱成效。

## 3 数字孪生技术在黄河工程管理中的应用架构设计

### 3.1 总体架构设计原则

目前，黄河工程已建成各类监测设备 1 800 余台（套），覆盖全流域的 118 个基本水文站，关键水文要素实现自动化监测；流域内已部署多类遥感、无人机监测装备，河南河段重点工程布设 2 232 枚“智能石头”监测点位，共同构成“天空地水工”一体化立体感知网络。后续架构设计需全面兼容现有存量设备与业务系统，严格对接黄委已发布的河防工程统一编码规则与数据汇聚共享机制，统一全流域数据接口标准，实现不同来源、不同格式监测数据的兼容互通，为数字孪生黄河体系提供高保真的基础算据支撑[6]。

### 3.2 数据底板体系构建

数据底板体系的核心是多源数据融合与标准化处理，通过清洗、转换、去冗余解决异构性，形成统一标准与格式。建立数据更新机制：监测数据实时更新（不低于 15 分钟），工程基础数据每年更新 1 次，确保时效性与准确性，支撑数字孪生模型与物理实体实时同步，为“四预”业务提供数据保障。

$$X_{ture}=\frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2+\sigma_j^2}X_i+\frac{\sigma_j^2}{\sigma_i^2+\sigma_j^2}X_j \tag{1}$$

式（1）为基于贝叶斯三角帽法的多源降水数据融合公式，用于黄河流域降水监测数据的融合处理。式中 $X_{ture}$ 为融合后的降水真值，$X_i$、$X_j$ 为不同来源的降水观测数据，$\sigma_i^2$、$\sigma_j^2$ 分别为两类观测数据的误差方差，通过该公式可提升降水数据的精度，适用于黄河源区等无资料地区的数据融合。

$$S(i)=S(i-1)+S\times RAND() \tag{2}$$

式（2）用于描述黄河工程监测数据中粒子属性的动态变化，适用于数据底板中动态监测数据的实时更新模拟。式中，$S(i)$ 为第 i 时刻粒子的属性值（水位、流量相关粒子属性），$S(i-1)$ 为第 i-1 时刻的粒子属性值，$RAND()$ 是在 (-1.0,1.0) 上的随机分布函数，用于模拟自然界中水位、流量等数据的随机性变化。

### 3.3 多维仿真模型体系搭建

多维仿真模型体系是数字孪生应用的核心支撑，通过几何、物理、业务模型复刻并动态模拟黄河工程，支撑监测、调度优化与险情推演。结合黄河工程特点，分层构建为基础层、核心层、应用层，各层协同联动，实现全生命周期仿真，贴合智慧水利建模要求。

$$\min F_{11}=\omega_1\sum_{i=1}^{N}\frac{V_{maxi}-V_{1i}}{V_{Di}}+\omega_2\sum_{l=1}^{L}\sum_{t=1}^{T}\frac{Q_{l,t}-Q_{Bl}}{Q_{Bl}} \tag{3}$$

式（3）为黄河水沙调控多目标协同模型中的防洪风险最小目标函数，用于仿真模型中防洪调度的优化计算。式中，$\min F_{11}$ 为防洪风险最小目标值，$N$ 为水库总数，$L$ 为河段总数，$\omega_1$、$\omega_2$ 分别为水库和河道防洪安全权重，$V_{maxi}$、$V_{1i}$、$V_{Di}$ 分别为第 $i$ 水库最高水位、初始水位和设计洪水位对应的库容，$Q_{l,t}$、$Q_{Bl}$ 分别为第 l 河段第 t 时刻流量和设防流量。

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=0 \tag{4}$$

式（4）为圣维南方程组中的连续方程，用于黄河下游洪水演进的仿真模拟是多维仿真模型中洪水演进模拟的核心公式。式中，$Q$ 为河道流量，$x$ 为河道纵向坐标，$A$ 为河道过水面积，$t$ 为时间。

## 4 案例分析

### 4.1 典型黄河工程数字孪生项目概况

本文以小浪底水利枢纽为典型案例，以虚实联动、智能管控为目标，适配前文数字孪生架构，覆盖主体工程、库区及下游河段，服务水沙调控、防洪调度、安全监测三大业务。整合周边12个水文站、36个雨量点、280余台物联网设备，涵盖水位、流量、泥沙、坝体应力、库区淤积等18类核心数据，采用多源数据融合公式处理。

### 4.2 应用成效

数字孪生小浪底水利枢纽工程落地运行以来，严格对照前文设计的数字孪生应用架构，在监测精度、调度效率、安全防控、运维成本等方面均取得了显著成效（见表1）。

由表1各项指标对比可知，数字孪生技术落地小浪底水利枢纽后，工程全链条管理效能得到系统性改善。在监测管控层面，依托构建的数据底板与多源数据融合算法，水位监测精度提升77.8%，流量、泥沙在线监测率分别提升63.5%、153.9%，隐患识别响应时间由3.1小时压缩至12分钟，解决了传统模式下多源监测数据孤岛、泥沙与河道监测覆盖不足、堤防根石等隐蔽隐患发现滞后的突出问题，与河南河务局布设的2 232处根石智能监测点位形成业务联动，实现堤防工程状态全天候感知。

表1 数字孪生技术应用成效

| 评价类别 | 具体评价指标 | 实施前（传统管控模式） | 实施后（数字孪生管控模式） | 提升幅度 |
|---|---|---|---|---|
| 监测管控类 | 水位监测精度 | ±0.18 m | ±0.04 m | 77.8% |
| | 流量在线监测率 | 57.6% | 94.2% | 63.5% |
| | 泥沙在线监测率 | 34.7% | 88.1% | 153.9% |
| | 隐患识别响应时间 | 3.1 h | 12 min | 93.5% |
| 调度优化类 | 调水调沙方案优化时间 | 14 h | 2.0 h | 85.7% |
| | 洪水调度决策准确率 | 74.2% | 93.6% | 26.1% |
| | 库区淤积预测准确率 | 68.5% | 90.4% | 32.0% |
| 安全防控类 | 险情预警准确率 | 77.4% | 94.9% | 22.6% |
| | 应急处置响应时间 | 52 min | 16 min | 69.2% |
| | 坝体安全稳定达标率 | 88.3% | 97.2% | 10.1% |
| 运维管理类 | 运维人工成本 | 920万元/年 | 370万元/年 | 59.8% |
| | 设备故障率 | 9.3% | 2.6% | 72.0% |

## 5 结束语

本文围绕数字孪生在黄河工程管理中的应用展开系统探索，明确了数字孪生技术与黄河工程管理需求的高度适配性，针对黄河工程管理中数据碎片化、管控滞后化、决策经验化等突出痛点，设计了遵循实用性、兼容性、精准性与安全性原则，涵盖数据底板、多维仿真模型的数字孪生应用架构，明确了多源数据融合、水沙调控仿真、洪水演进模拟等关键技术路径，以期为促进数字孪生技术在黄河工程管理中的应用提供参考。

**参考文献：**

[1] 于海泓，许志辉，陈峰．数字孪生黄河数据治理管理研究与实践[J]．人民黄河，2025,47(08):5-9.
[2] 朱煜，雷天朝．数字孪生技术在黄河河南段工程管理中的实践探索[J]．信息与电脑，2025,37(20):95-97.
[3] 陈亮．遥感技术在数字孪生黄河建设中的应用与展望[C]// 完善水治理体制机制法治体系 深入推进新阶段水利高质量发展论文集．2025.
[4] 付希义，田亮，张庆萍，等．数字孪生技术在水利工程运行维护管理中的应用[J]．水利水电快报，2024,45(S2):104-107.
[5] 徐文浩．数字孪生技术在调水工程建设与管理中的应用研究[J]．工程技术研究，2025,10(06):124-126.
[6] 林思群，姜雨薇，陈瑚容．数字孪生技术在智慧水利建设中的应用探究[J]．中文科技期刊数据库（引文版）工程技术，2024(01):79-82.

# 智慧工地技术在建筑工程施工管理中的应用探索

代汉田

（安徽循投工程项目管理有限公司，安徽 阜阳 236300）

**摘 要** 在建筑工程施工管理中，安全防控不足、质量管控不细、进度衔接不畅、成本控制粗放等问题突出，制约工程管理效能与项目整体效益提升。本文聚焦智慧工地技术在施工管理中的实践应用，结合其核心应用场景，系统探索技术在安全、质量、进度、成本管理中的具体落地形式，梳理技术应用的实施策略，明确优化方向，以期为建筑工程施工管理数字化、智能化转型提供实践参考，助力提升施工管理精细化水平，降低安全与质量风险，保障工程按期交付，实现项目经济效益与社会效益的双重提升。

**关键词** 智慧工地；建筑工程；施工管理；智能化应用；管理效能

**中图分类号**：TU71 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.023

## 0 引言

建筑行业正处于数字化转型与高质量发展的关键阶段，传统施工管理模式在安全防控、质量管控、进度协同与成本控制等方面的短板日益凸显，难以适配现代工程建设的精细化、智能化发展要求。智慧工地技术以物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术为支撑，深度赋能施工现场全要素、全流程管理，成为破解行业发展瓶颈、提升工程管理效能的核心抓手。本文立足于建筑工程施工管理现实需求，系统剖析智慧工地技术在核心管理场景中的应用路径，探究实践落地策略与未来优化方向，旨在为施工企业推进数字化转型、强化全过程管控能力提供理论参考与实践指引，助力建筑行业实现安全、高效、绿色、可持续发展。

## 1 智慧工地技术在施工管理中的核心应用场景

### 1.1 施工安全管理中的智慧应用

智慧技术通过全方位、智能化的防控手段，构建起覆盖施工全场景、全环节的安全防控体系，从被动应对安全事故转变为主动预防，有效降低施工安全风险，保障施工人员生命财产安全。智能视频监控系统依托高清摄像头与智能分析算法，对施工现场的关键区域、危险工序进行 24 小时不间断监测，可自动识别违规操作行为并立即发出声光预警，同时将预警信息推送至管理人员终端，便于及时制止违规操作、消除安全隐患。安全防护装备智能监测通过在安全帽、安全带等防护装备上嵌入智能芯片，实时监测装备的佩戴状态与使用情况，对未按规定佩戴防护装备的人员进行提醒，确保施工人员防护到位，从源头减少安全事故发生。隐患排查智能化借助移动终端与云端平台，实现隐患排查、上报、整改、复查的全流程闭环管理，管理人员可实时记录隐患详情、明确整改责任人与整改期限，全程跟踪整改进度，确保隐患整改到位，避免隐患积累引发安全事故。

### 1.2 施工质量管控中的智慧应用

智慧技术贯穿施工质量管控的整个流程，借助准确的数据收集、智能的工序核对与可追溯的质量管控，实现施工质量的细节化管理，明显提升工程品质达标比例，杜绝质量风险遗留。施工工序智能核对依赖人工智能与视觉识别技术，对模板安装、钢筋绑扎、混凝土浇筑等核心工序展开自动核对，准确对比施工实际情况与规范要求的差别，防止因人为疏忽引发的质量风险遗漏，保证各工序达到施工规范。核心工序数据即时收集借助各类传感器与检测装置，准确捕捉混凝土强度、钢筋间距、管线位置等核心参数，即时传送至管理平台，方便管理人员即时把握施工质量状况，及时察觉参数偏差并调整施工工艺，保证施工质量符合设计标准[1]。质量问题智能追溯借助建立完善的质量数据档案，将施工各环节的质量信息、检测结果、

作者简介：代汉田（1984-），男，本科，工程师，研究方向：建筑工程。

责任人员等数据逐一记录，一旦发生质量问题，可迅速追溯问题源头，明确责任主体，制定针对性的整改路径，防止同类质量问题再次发生。

### 1.3 施工进度管理中的智慧应用

智慧技术借助数字化与动态化的管控方式，做到对施工进度的准确掌握和灵活变动，有力处理传统进度管理中计划同实际脱节、偏差发觉不够及时等难题，确保工程按时完成，进度计划数字化建模将施工总进度计划、分部分项工程进度计划转成数字化模型，清晰界定各工序的时间点、衔接联系和责任分配，直观展示施工进度整体情况，方便管理人员全面规划、妥当安排施工任务，实时进度数据比较分析借助收集施工各环节的实际进度数据，与数字化进度计划开展即时比对，精确找出进度偏差的具体环节和原因，给进度变动给出数据支持，避免偏差扩大引发工期拖延。智能调度变动结合实时进度偏差与施工现场状况，对施工人员、设备、材料加以动态调度，优化工序衔接节奏，合理缩短关键工序工期，填补进度滞后差距，确保施工进度一直贴合计划需要，保障工程按时交付。

### 1.4 施工成本管理中的智慧应用

智慧技术借助对资源使用情况的精细监测、对成本变化的动态计算以及对成本构成的科学分析，实现施工成本的细化管理，能够有效削减工程运作成本，增强项目经济收益。资源消耗的实时监测过程借助物联网手段，对施工过程中涉及的钢材、水泥、砂石等关键材料，以及水电、燃油等能源使用情况开展实时采集，准确了解资源消耗的总量和变化节奏，快速发现资源的不合理使用现象并采取相应管理手段，减少非必要的资源浪费，降低材料和能源方面的开支。成本数据的动态核算依靠云平台与大数据技术，实时汇总施工过程中人工、材料、设备、管理等各项成本数据，实现成本的动态计算与实时刷新，方便管理人员及时把握成本变动情况，精确控制成本支出，防止成本超出预算。智能成本分析借助对成本数据的深入挖掘，分析成本组成与变动趋势，找出成本管理里的薄弱位置，改进成本控制办法，合理削减各项成本支出，实现施工成本的精确管理与效益最佳化。

## 2 智慧工地技术应用的实施策略

### 2.1 构建完善的智慧工地技术应用体系

科学规划智慧工地技术应用架构，构建完善、可行的技术应用体系，是确保智慧技术与施工管理深度融合、发挥实效的前提，可有效避免技术应用与实际需求脱节、应用碎片化等问题。结合建筑工程的规模、类型、施工特点与管理需求，精准选型适配的智慧技术，优先选择成熟度高、实用性强、可扩展性好的技术与设备，避免盲目追求技术先进而忽视实际应用价值，确保技术应用能够切实解决施工管理中的实际问题[2]。搭建统一的智慧管理平台，整合物联网、大数据、人工智能、BIM等各类技术资源，实现数据互联互通、信息共享共用，打破各技术模块各自为政的局面，形成协同发力的技术应用格局。明确技术应用的实施流程与责任分工，细化各环节的实施步骤、时间节点与责任主体，确保技术应用从规划、部署、调试到运行的全流程有序推进，同时建立健全技术应用的考核机制，保障技术应用落地见效。

### 2.2 强化人才队伍建设与技术培训

培养一支专业的智慧工地技术应用人才队伍，提升相关人员的技术素养和实际操作能力，成为推动智慧工地技术高效应用的核心支撑，能够有效应对技术应用当中“不会用、用不好”的难题。面向施工管理人员、技术人员以及一线施工人员，组织分层分类的智慧技术专项培训，重点讲解智慧设备的操作方式、智慧管理平台的使用步骤、技术应用的关键要点和需要注意的地方，增强各类人员的技术操作能力和应用水准，保证他们能够熟练借助智慧技术开展施工管理和现场作业[3]。加强复合型技术人才的引进工作，重点引进那些既掌握建筑施工管理知识，又了解物联网、大数据、BIM等智慧技术的复合型人才，弥补当前人才队伍的专业短板，提升人才队伍的整体素质。建立并完善人才激励机制，把智慧技术应用成效与个人绩效、职称评定等内容联系起来，对在技术应用过程中表现优异、成果明显的人员给予表扬和奖励，调动各类人员学习、应用智慧技术的积极性和主动性。

### 2.3 建立健全技术应用保障机制

完善的技术应用保障机制，可以给智慧工地技术持续稳定应用带来有力支撑，有效应对技术应用里碰到的各种难题，确保技术应用长期产生实际效果。制定完善的智慧工地技术应用标准同规范，明确技术应用的步骤、要求还有评价标准，规范技术应用的各个层面，避免技术应用出现随意性同不规范情况，确保技术应用符合行业规范同工程实际需要。建立专业的技术运维机制，组建专门的运维队伍，负责智慧设备同管理平台的日常维护、故障排查同升级优化，及时处理技术应用中出现设备故障、系统卡顿、数据异常等状况，保障技术应用具备连续性、稳定性。增加智

慧工地技术应用的资金投入，合理分配资金用于技术引进、设备采购、平台搭建、人才培训同运维升级，确保技术应用拥有足够资金保障，同时提升资金使用效率，避免资金出现浪费现象，推动智慧工地技术持续升级与深度应用。

## 3 智慧工地技术应用的优化方向

### 3.1 推动技术融合升级，提升应用效能

深化各类智慧技术的协同融合，推动技术迭代升级，破解当前技术应用中存在的融合不足、效能不高的瓶颈，进一步提升施工管理的智能化水平，充分发挥智慧技术的应用价值。推动物联网、BIM、人工智能等核心技术的深度融合，打破技术模块之间的壁垒，实现数据共享、功能互补，让感知数据通过 BIM 模型直观呈现，人工智能算法依托海量感知数据优化决策，形成“感知—分析—决策—执行”的闭环体系，提升技术应用的协同性与实效性[4]。优化技术算法与模型，结合施工管理的实际需求，对数据分析、智能识别、调度优化等算法进行迭代升级，提升数据处理的效率与精准度，让智能决策更贴合工程实际，有效解决技术应用中精准度不足、响应滞后等问题。结合 5G 技术的高速率、低延迟、广连接特性，优化数据传输体系，提升施工场景中实时数据的传输效率与稳定性，打破数据传输的时空限制，为高空作业、远程协同等场景的智慧应用提供有力支撑。

### 3.2 完善应用场景拓展，覆盖全流程管理

突破眼下智慧技术运用主要聚集在施工环节的局面，扩大应用场景涵盖面，达成建筑工程施工管理整个链条的智能化全面覆盖，让智慧技术贯穿工程建设的完整流程，提高整体管理效率，把智慧技术扩展到施工前期策划与后期运维环节，前期策划环节借助 BIM 模型与大数据分析，优化场地规划、施工方案设计和资源配置，提升策划的科学性与可行性；后期运维环节借助物联网与人工智能技术，对建筑设施进行实时监测、故障预警和智能维护，延长建筑使用年限，减少运维开支[5]。扩大绿色施工智慧管控场景，结合低碳施工需求，借助智慧技术监测施工流程里的扬尘、噪声、污水排放等环保指标，实时调整施工工艺，采取针对性管控手段，减轻施工对周边环境带来的影响，帮助绿色建筑发展，针对高层建筑、地下工程、装配式建筑等特殊工程场景，结合其施工特点和管理难点，定制化开发智慧应用方案，解决特殊场景下的管理痛点，提高特殊工程施工管理的智能化程度。

### 3.3 加强行业协同，推动标准统一

推动行业中各个主体一起行动起来，完善智慧工地技术应用的标准体系，打破行业中存在的技术障碍和标准不统一的情况，促进智慧工地走向规范化和规模化，提升整个行业的智能化程度。加强建筑施工企业、科技公司、科研院所之间的技术沟通和协作，搭建起技术共享的平台，让大家能够分享智慧技术应用的心得、技术成果和解决办法，推动技术创新和实际应用，一起解决行业中技术应用遇到的普遍难题。推动在行业层面制定出统一的智慧工地技术应用标准和数据规范，明确技术选择、设备接口、数据格式、应用流程等方面的统一要求，避免不同企业、不同项目因为采用不同标准而造成数据不能互通、设备无法兼容等问题，实现行业内部资源和数据的共享共用。建立行业共享平台，整合行业内的技术资源、人才资源、数据资源和实际应用案例，为企业提供技术咨询、人才培训、方案参考等服务，推动智慧工地技术在行业中得到广泛使用，促进建筑行业向数字化、智能化方向转变。

## 4 结束语

智慧工地技术为建筑工程施工管理转型提供了全新路径，其在安全、质量、进度、成本管理中的多元应用，有效破解了传统施工管理的诸多痛点，推动施工管理从粗放式向精细化、智能化转变。当前，智慧工地技术应用已取得初步成效，但在技术融合、场景覆盖、行业标准等方面仍有提升空间。未来，需持续聚焦施工管理实际需求，推动技术协同升级，拓展全流程应用场景，完善行业标准体系，强化人才支撑与保障机制。随着技术的不断迭代与应用的持续深化，智慧工地技术将进一步融入建筑工程全生命周期管理，助力建筑行业实现高质量发展，为工程管理效能提升与行业数字化转型注入持久动力。

## 参考文献：

[1] 高玉甲，姚志超．建筑工程施工安全保障措施研究 [J]. 中国建筑金属结构，2025,24(16):136-138.
[2] 石欢荣．基于智慧工地技术的建筑工程施工路径探究 [J]. 科技资讯，2025,23(12):162-164.
[3] 王瀚斌，肖贞养，王骥，等．数字化技术在建筑工程施工精细化管理中的应用 [J]. 城市建筑，2025,22(04):213-215.
[4] 陈建宝．智慧工地技术在建筑工程施工中的应用与优化 [J]. 房地产世界，2024(12):134-136.
[5] 文萌．数字化管理手段在建筑工程施工中的有效应用 [J]. 科技经济市场，2023(05):27-29.

# 机电智能巡检系统在高速公路机电管理中的应用

张鹏程

（四川营达高速公路有限公司，四川 达州 635000）

**摘 要** 随着高速公路机电设备规模持续扩大，应用机电智能巡检系统成为提升运维管理水平的重要手段。基于此，本文从技术和管理两个层面提出“构建云边协同中台，打破孤岛数据壁垒”“数据驱动预防养护，分析规律提前预警”“部署立体感知终端，采集全域设备状态”“加强调度统筹管理，提升作业处置时效”四项应用策略，旨在为提高公路运维效率提供参考，进而提高智慧高速机电系统的智能化运维水平。

**关键词** 机电智能巡检；高速公路；机电管理

**中图分类号**：U418.7 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.024

## 0 引言

高速公路机电系统包含视频监控、数据通信、供配电照明等多个功能模块，设备种类繁杂且运行环境复杂，传统的人工巡检模式难以满足全面的运维要求。近年来，人工智能等技术的快速发展，助力机电智能巡检系统逐渐应用在高速公路运营管理领域。该系统凭借自动化采集等功能，为机电管理提供了新的技术手段。然而，如何系统部署和应用智能巡检系统，使其真正发挥效能，仍是需要研究的问题，因此有必要结合工程实践，探讨机电智能巡检系统的应用策略，以保障路网运行安全畅通。

## 1 机电智能巡检系统在高速公路机电管理中的价值

### 1.1 提升运维效率

机电智能巡检系统凭借自动化手段，能够大幅提升高速公路机电运维的效率[1]。传统人工巡检模式下，维护人员需前往现场逐台检查设备，单次巡检耗时较长，且受限于人力配置。智能巡检系统部署后，可在极短时间内监测收费门架、工控机、摄像机等核心设备状态。同时，系统支持远程操控功能，对于设备死机及参数配置错误等常见故障，运维人员无需赶赴现场，直接利用远程重启或调整即可在数分钟内恢复设备运行，从而显著降低设备宕机对收费通行和行车安全的影响。

### 1.2 实现故障预警与预防

智能巡检系统凭借对设备运行参数的毫秒级实时监测和连续跟踪，能够在故障萌芽阶段精准捕捉异常信号。当工控机温度持续升高、通信丢包率异常波动、硬盘读写错误率上升或供电电压不稳等情况出现时，系统可自动触发多级预警，并根据预设规则将预警信息推送至相应责任人，提醒维护人员在设备完全失效前提前介入检查处置。这种预防性机制能有效保障机电系统的连续稳定运行，从而显著提升运维工作的安全性，使设备管理从事后处置转向事前掌控，为高速公路机电系统的长效稳定运行奠定了坚实的基础[2]。

### 1.3 弥补人工巡检短板

高速公路机电设备分布范围广且点位分散，智能巡检系统凭借自动化手段可有效弥补传统人工巡检方式的局限。机电智能巡检系统可实现对隧道深处等人工巡检难度较大的区域进行无人化巡查，能够显著拓展设备监测的覆盖范围。其次，智能巡检具备高度一致的检测标准，能够7×24小时不间断运行，大幅提升巡检频次以及时效性，使设备状态感知从间断性抽样升级为连续性监测。此外，智能巡检系统能自动记录每一次巡检数据，形成完整的设备运行档案，可为后续分析和追溯提供可靠依据[3]。因此，有机结合智能巡检和人工巡检，既能发挥了技术的精准高效优势，又可保留人工处置复杂问题的灵活性，形成协同高效的运维新格局。

### 1.4 数据驱动决策支持

机电智能巡检系统在持续运行过程中，能够积累大量设备状态数据、故障记录和维修工单信息，为运维管理决策提供坚实的数据基础。同时，凭借对数据

作者简介：张鹏程（1996-），男，本科，助理工程师，研究方向：高速公路机电维护。

进行统计分析，管理者可清晰掌握各类设备的运行规律、故障分布和性能衰减趋势，并自动生成设备健康评估报告，识别出故障频发的高风险区域，为制定年度保养计划和大中修方案提供量化依据。此外，系统记录的维修响应时长、故障处理效率等指标，可用于评估维护团队和第三方服务商的工作质量，推动运维服务的持续优化。因此，数据驱动的决策模式可使机电管理更科学精准，从而显著提升管理水平和资源利用效率[4]。

### 1.5 降低长期运营成本

自动化巡检能够替代大量重复性的人工现场巡查工作，使维护人员得以从繁重的日常巡检任务中释放，将人力资源集中于高价值的维修工作，可有效降低人力成本投入。同时，实现远程操控功能，使得大量常见故障无需派车前往现场即可完成处置，大幅减少了车辆使用里程，降低了车辆运维及差旅费用。此外，预防性预警机制可将故障消除在萌芽阶段，避免了设备严重损坏带来的高额更换成本。全流程数字化管理也能替代纸质台账和人工报表，减少相应的行政资源消耗[5]。因此，从全生命周期视角来看，智能巡检系统的投入成本凭借人力节约、车辆节支、设备延寿等多方面效益，可在较短时间内收回，形成可持续的低成本运维模式。

## 2 机电智能巡检系统在高速公路机电管理中的应用策略

### 2.1 构建云边协同中台，打破孤岛数据壁垒

高速公路机电系统包含收费、监控、通信、照明、通风等多个业务子系统，各系统独立运行且数据格式各异，形成了典型的“信息孤岛”现象，严重制约巡检数据的融合分析及统一调度。构建云边协同中台是解决这一问题的重要途径，该中台采用云计算配合边缘计算的架构，边缘侧部署于各收费站或隧道管理所，负责数据实时采集及预处理，云端承担全局数据的汇聚存储和智能分析。凭借云边协同，可实现全路网机电设备状态的统一接入、统一管理及统一呈现，为智能巡检系统高效运行奠定数据基础。

在具体实践操作上，首先需标准化接入各业务子系统数据。针对收费系统、监控系统、通信系统等不同来源的数据，制定统一的数据接口规范及数据交换标准，采用工业网关或边缘采集终端将各类协议转换为标准格式。对于不具备接口条件的老旧设备，可用加装智能传感器的方式获取其运行参数。其次，搭建边缘计算节点，部署于各站点机房，承担数据清洗、聚合和实时分析的任务，对设备状态进行毫秒级监测，发现异常后立即在本地触发预警，无需等待云端响应。同时，构建云端数据中台，汇聚全路网边缘节点上传的数据，建立统一设备台账及运行数据库，采用数据湖技术存储海量时序数据，支持跨路段及跨系统的综合分析。此外，采用安全隔离技术实现收费内网和办公外网的数据摆渡，利用单向光闸或二维码摆渡装置，确保核心收费网络安全隔离的同时，实现设备状态数据对外共享。凭借上述实践，可打破各子系统之间的数据壁垒，形成“一张图看全貌、一个平台管全局”的集中管控能力，为智能巡检系统的规模化应用提供坚实的数据支撑。

### 2.2 数据驱动预防养护，分析规律提前预警

机电设备的健康状态多呈现渐进式的变化规律，从参数轻微异常到性能显著下降再到功能完全失效，往往经历较长的时间。传统运维模式难以捕捉这一变化过程中的早期信号，而数据驱动的预防养护策略，正是基于对设备运行数据的持续追踪和深度分析，在故障发生前识别出异常趋势并触发预警，从而实现从“事后维修”向“事前养护”的跨越。该策略的重点在于建立设备健康评估模型，凭借挖掘历史数据，掌握各类设备正常运行的特征参数范围及性能衰减规律，进而比对判断实时监测数据，提前发现潜在风险。

在具体的操作上，需建立设备运行基准库，并对每类设备在正常工况下长期采集统计参数，主要是工控机CPU使用率及温度，继而形成动态更新的健康基线。在此基础上，构建多级预警指标体系，依据参数偏离正常基线的程度设置不同预警等级，轻微偏离触发三级预警提示，关注但不用立即处置；中度偏离触发二级预警，建议纳入近期的检修计划；若严重偏离触发一级预警，应尽快安排现场排查。同时，部署时序数据分析引擎，预测设备参数的长期变化情况，并用机器学习算法识别出参数缓慢漂移的特点。如果工控机温度在过去的三十天内不断地上升，即便当前值仍在正常的范围内，系统也要提前预测未来可能达到阈值的时间点并发出预警。此外，建立预警信息的分发及处置机制也十分重要，依据预警等级及设备重要性自动将信息推送至相应的责任人，三级预警推送给收费站日常巡检人员，二级预警推送至机电维护站，一级预警同步推送至公司管理部门及维护团队。此外，要构建预警处置环节，记录复盘每一条预警的触发原因、处置过程及处置结果，定期分析预警准确率及漏报率，且不断优化预警模型的参数设置和算法策略。凭借上述实践，能够主动掌控设备管理，继而提升机电系统的运行可靠性。

### 2.3 部署立体感知终端，采集全域设备状态

高速公路机电设备分布范围十分广，且运行环境较复杂，单一的感知方法不能满足多方面的状态采集需求。部署立体感知终端指的是面对不同的设备类型、应用场景以及监测的需求，综合运用多种感知技术，形成层次分明且协同互补的全域采集网络。该策略在于依据设备的重要性，以及环境特点去合理配置感知资源，既能保证设备的实时监测精度，又能兼备大规模部署的经济程度。

在具体实践上，首先可针对收费系统核心设备部署软件定义的高频巡检终端，利用自动化脚本对收费工控机、门架服务器等进行每三分钟一次的状态轮询，采集CPU负载、内存占用、硬盘空间、进程状态等重要指标。其次，为隧道通风、照明、供电等环境敏感设备加装物联网传感器，以毫秒级采样频率获取环境参数及电气参数。对于通信链路质量，应部署探针设备持续监测各节点间的网络延迟、丢包率及带宽利用率，形成全路网通信质量拓扑图。针对桥梁、高边坡等结构物上的外场设备，采用低功耗广域网技术部署无线传感器节点，凭借太阳能供电及无线回传方式长期监测设备振动、倾斜、锈蚀等机械状态。最后，引入工业机器人及无人机作为移动感知终端，在隧道、机房等封闭空间内部署轨道式巡检机器人，按照预设路径自动完成设备外观检查及红外测温。在特大桥及长隧道区域部署无人机智能机巢，支持远程起飞及自动巡航，对人工难以到达的高位摄像机、情报板、气象检测器等设备进行高清图像采集及状态核查。各类感知终端采集的数据凭借边缘网关统一汇聚，按照标准化格式上传至云边协同中台，可以形成覆盖全路网、贯穿全系统的设备状态感知网络，为智能巡检的各项应用提供实时准确的数据支撑。

### 2.4 加强调度统筹管理，提升作业处置时效

机电运维作业涉及多个管理层级、多方维护力量以及大量现场工单，科学的调度管理直接决定了故障处置的响应速度及资源利用效率。加强调度统筹管理是指以智能巡检系统为支撑，建立集中化的运维调度中心，对全路网机电设备的故障告警、维修派单、人员调配、备件供应等环节进行统一协调和动态优化。该策略的重点在于利用数据融合及智能算法，实现“故障精准定位、人员就近匹配、资源按需配置”，从而显著减少发现故障到处置完成的全流程时间。

在操作中，首先要建立集中的运维调度平台，并接入全路网机电设备的各种数据，形成一个覆盖各路段及各种设备的全局视图。调度平台要具有自动派单功能，当系统检测到设备存在故障或触发预警后，可依据故障信息，结合维护人员的实时位置及当前任务负载，利用智能算法分析出最合适的派单方案，把工单自动分到最合适的人员手中。其次，应构建分级的响应机制。对于普通的故障，可安排常规的维护人员在规定时间内去现场处理，对于重要设备故障或影响通行的紧急事件，要启动升级流程，同时通知技术专家介入这一事件，必要时应调配最近的资源进行跨区域的支援。在备件管理方面，可建立基于历史数据的备件库，把常用备件分级储备在收费站及维护站，特殊备件集中存放在区域中心。调度平台可实时查看各站点的备件库存状态，当维修人员确认要更换备件时，系统会选择距离最近的备件存放点并生成一份领用单。最后，还应部署移动端作业应用，维护人员可手持终端接收工单、查看故障详情等各种故障信息，这样管理人员可在调度平台实时查看工单的执行进度，并对超时没有处理的工单自动发出催办提醒。凭借上述的实践，能够精准投放运维资源，继而提升机电故障处置的规范化水平。

## 3 结束语

部署并应用机电智能巡检系统，能够推动高速公路机电管理从原来的人工分散方式转向智能化。云边协同、数据驱动、立体感知以及调度统筹等策略相互配合，可为机电运维的数字化转型提供一套较为系统的操作方式。未来，相关企业可进一步融入大数据分析以及人工智能技术，大幅提高运维管理的效率，为智慧高速建设打下更加坚实的机电保障基础。

## 参考文献：

[1] 马英臣.高速公路机电设备智能管理要点分析[J].汽车周刊,2026(02):58-59,239.
[2] 李忠.智能巡检机器人在高速公路机电系统运维中的关键技术探析[J].中国交通信息化,2025(S2):129-130,140.
[3] 许树鑫.智能管理技术在高速公路机电设备管理中的应用[J].安装,2025(12):54-56.
[4] 冯智.机电智能巡检系统在高速公路机电管理中的应用研究[C]//河南省豫商经济文化交流协会.2025中国建筑经济研讨会科技与管理分论坛论文集.朔州高速公路管理有限公司,2025.
[5] 贾扬.智能管理技术在高速公路机电设备管理中的应用[J].流体测量与控制,2025,06(01):69-72.

# “双碳”驱动下纯电机械在路桥施工中的应用效益分析

易 硕

（四川公路桥梁建设集团有限公司公路三分公司，四川 成都 610200）

**摘 要** 为推动路桥施工领域绿色转型、助力“双碳”目标落地，本文聚焦纯电动工程机械在该领域的应用价值，通过剖析纯电动工程机械的技术特性与路桥施工场景的适配性，从核心施工环节、政策驱动、技术迭代、市场需求四个方面分析应用前景，进而从环境、经济、社会层面评估应用效益，并提出风险应对策略，以期为路桥施工领域绿色发展提供理论参考。结果表明，纯电动工程机械较传统燃油机型能减少 $CO_2$ 排放且改善作业环境，应用前景广阔。

**关键词** 纯电动工程机械；路桥施工；场景适配；技术参数对比

**中图分类号**：U415.5 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.025

## 0 引言

路桥工程属于基础设施建设的主要部分，施工过程中所表现出的高耗能、高排放特性，已经成为行业绿色转型的主要障碍。传统的燃油工程机械占路桥施工总能耗的 65% 以上，尾气排放和高噪声都会对环境造成污染，还会对施工人员的职业健康产生危害。随着“双碳”目标的推进以及动力电池技术的进步，纯电动工程机械凭借零排放、低噪声、高效率的优势逐渐进入了路桥施工当中[1]。目前，纯电动工程机械在路桥施工上还处在试验阶段，有技术适用性问题，初期投入高，充电设施短缺等状况。本文对纯电动工程机械的技术特点和路桥施工场景的匹配逻辑进行梳理，分析纯电动工程机械应用前景的驱动因素，评价环境、经济和社会效益，提出风险应对措施，以确定纯电动工程机械的应用价值，促进工程机械行业由“粗放式燃油作业”向“精细化电动作业”的转变，为基础设施建设高质量发展提供参考。

## 1 纯电动工程机械的技术特性与路桥施工适配性

纯电动工程机械的核心竞争力源于其技术体系与路桥施工场景的深度匹配，需从技术构成、场景适配、参数对比三方面展开分析，明确其替代传统燃油机型的可行性。

### 1.1 技术核心构成适配路桥施工重载与续航需求

纯电动工程机械以“三电系统”为核心，针对性解决路桥施工关键需求。动力电池多采用磷酸铁锂体系，能量密度达 180 Wh/kg～220 Wh/kg，支持 1C 快充，单台 15 吨级电动压路机配备 200 kWh 电池组时[2]，可满足 8 小时连续压实作业；永磁同步电机效率达 92%～96%，扭矩响应时间＜0.5 秒，更适应路基开挖、路面压实的变负载工况；电控系统集成智能功率分配算法，可根据施工场景动态调整动力输出，确保作业精度，如电动摊铺机行驶速度控制精度优于燃油机型。

### 1.2 场景适配覆盖路桥施工全环节需求

路桥施工涵盖路基、路面、桥梁、附属设施四大环节，纯电动工程机械可通过技术调整适配不同场景。在路基工程中，电动挖掘机、装载机电机峰值扭矩较同级别燃油机高 15%～20%，可满足单日土方作业量需求；在路面工程中，电动摊铺机、压路机凭借电机恒转速控制特性，提升摊铺平整度与压实度精度；在桥梁施工中，电动起重机、泵车电控系统可实现吊臂起降速度精准调节，避免构件晃动；在附属设施安装中，电动叉车体型灵活，适配路桥沿线狭窄作业空间[3]。

### 1.3 技术参数对比凸显纯电动机型核心优势

以路桥施工常用机型为例，纯电动机型与传统燃油机型核心参数差异显著。在环保性上，纯电动机型实现零尾气排放，作业噪声较燃油机降低 15 dB～20 dB，满足居民区噪声标准；在经济性上，纯电动机型作业能耗成本较燃油机降低 70%～80%；在维护性上，纯电动机型无发动机、变速箱等易损部件，维护周期延长，年维护费用显著节省；在效率上，纯电动机型启动速

作者简介：易硕（1996-），男，本科，助理工程师，研究方向：路桥施工机械设备。

度快，单日有效作业时长增加，可缩短项目工期。

## 2 纯电动工程机械在路桥施工中的应用前景分析

纯电动工程机械在路桥施工中的应用前景受场景需求、政策驱动、技术迭代、市场导向共同支撑，呈现“多维度发力、规模化推进”的趋势，各维度通过功能适配、政策保障、技术突破与需求牵引形成协同效应，推动其从技术可行向实践普及跨越。

### 2.1 核心施工环节应用场景从试点到普及

当前纯电动工程机械已在路桥施工核心环节实现试点应用，未来将逐步扩大覆盖范围并深化应用深度。在路基工程中，电动挖掘机、装载机凭借驱动电机峰值扭矩优势，可适应短途高频的土方开挖与转运作业，其扭矩响应速度快于传统燃油机，能应对硬土层等复杂地质条件下的重载需求，同时无怠速能耗特性可降低等待间隙的能源浪费，提升单日作业能效；在路面工程中，电动摊铺机与压路机联合作业成为技术趋势，电机恒转速控制特性可减少摊铺速度波动，进而提升路面平整度合格率，电动压路机的无级调节振动频率功能，能适配不同材料（沥青、水稳层）的压实需求，减少返工成本；在桥梁施工中，电动起重机的零尾气排放特性适配深基坑、隧道等密闭空间作业，避免燃油尾气积聚对作业人员健康的影响，其精准的电控系统可降低吊臂晃动幅度，提升构件安装安全性；在附属设施安装中，电动叉车已实现规模化应用，其体型灵活、转弯半径小的优势适配路桥沿线狭窄作业空间，能高效完成护栏、路灯等小型构件的转运，且无尾气污染可保护周边绿化环境，进一步拓展应用场景[4]。

### 2.2 政策驱动助力应用潜力释放与红利落地

国家与地方政策为纯电动工程机械在路桥施工中的应用提供多层次、全方位的强力支撑，形成政策红利闭环。在国家层面，将路桥施工领域列为工程机械电动化重点应用场景，设定更高的电动化率目标以推动基础设施绿色转型；《纯电动工程机械通用技术条件》从电池安全、充电接口（统一直流快充标准）、环境适应性（低温、高温工况性能）等维度规范技术要求，降低企业应用的技术门槛与兼容风险。在地方层面，多省份针对路桥施工用纯电动工程机械推出差异化购置补贴政策，通常按机型吨位分档，重载机型补贴比例更高，部分地区还将补贴与项目类型挂钩，对市政、高速等重点路桥项目给予额外支持；同时，多地对路桥项目配套充电站建设提供资金补贴，按充电功率、覆盖范围分级补助，鼓励施工企业与电网企业合作完善补能设施。一线城市进一步强化政策约束，将施工环节碳排放纳入路桥项目审批核心指标，要求不断提高新建项目纯电动工程机械使用比例，未达标项目不予通过环评审批，通过“正向激励+反向约束”倒逼施工企业加速设备电动化更新。

### 2.3 技术迭代推动应用前景拓展与瓶颈突破

动力电池、智能网联、充电技术不断更新，不断打破纯电动工程机械在路桥施工上的应用障碍，扩大了它的适用范围和作业能力。动力电池方面固态电池技术研究加快，能量密度比传统磷酸铁锂电池高一倍以上，循环寿命达到5 000次以上，快充时间缩短到15分钟～30分钟，可以完全解决重载机型的续航问题；对于寒冷地区路桥施工，电池包集成PTC加热系统和高效的保温层，在低温环境下快速提高电池温度，保证放电效率大于85%，满足东北、西北等地区冬季施工的要求。智能网联，纯电动工程机械与BIM系统、无人施工技术深度融合，依靠高精度传感器和边缘计算模块，可以完成施工参数的自动调节，无需人工干预，依靠5G网络可以实现设备运行数据的实时传送以及远程监控，管理人员可以在后台了解机械的工作状况，及时调配作业资源，无人化作业模式既可以提高施工速度，又可以缩减人工成本和安全问题。移动充电车已经实现了规模化应用，单次储能容量可以满足多台重载机械补能的需求，支持现场快速部署；光伏+储能充电站利用清洁能源发电和储能相结合的方式，可以实现偏远路桥项目能源自给，减少对电网的依赖，两种充电方案互相补充，解决了各种场景下的补能问题，为纯电动工程机械的广泛使用打下了基础。

### 2.4 市场需求导向促进应用前景释放与闭环形成

施工企业、业主方、社会公众的多层次需求形成合力，推动纯电动工程机械市场扩容，构建“需求—应用—反馈”的良性闭环。在施工企业层面，纯电动机型全生命周期成本优势显著，虽购置成本高于燃油机，但运营阶段能耗成本降低70%～80%，维护成本节省75%以上，叠加政策补贴，成本回收周期可缩短至3年～4年，长期经济效益突出，尤其对大型路桥企业而言，规模化应用可显著提升利润空间与市场竞争力。在业主方层面，绿色路桥项目已成为行业主流，业主将纯电动工程机械应用比例纳入项目评价体系，在招投标中赋予其较高权重，部分PPP项目甚至将“零碳排放施工”作为核心要求，纯电动工程机械成为企业中标关键，推动施工企业主动更新设备以抢占市场份额。在社会层面，民众对施工环境的要求持续提升，纯电动机械的低噪声特性可减少对周边居民区、学校、医院的干扰，零尾气排放能改善区域空气质量，两类优势共同降低项目扰民投诉量，减少因投诉导致的施

工中断，提升项目推进效率，同时助力施工企业树立绿色品牌形象，增强社会认可度，进一步激发市场对纯电动工程机械的需求。

## 3 纯电动工程机械在路桥施工中的应用效益评估

从环境、经济、社会三维度评估纯电动工程机械的应用效益，同时分析潜在风险并提出应对策略，确保效益最大化[5]。

### 3.1 环境效益体现为减排降污与资源节约

纯电动工程机械的环境效益主要是从减排、降噪、节能三个方面体现出来。在减排上，燃油机型比纯电动机械少 $CO_2$、NOx、颗粒物排放，如果全国路桥施工领域推广 50% 的纯电动机械，每年可以减排 $CO_2$ 超过 500 万吨；在降噪上，作业区周边的噪声明显降低，符合建筑施工场界环境噪声排放标准，夜间施工噪声达标率提高；在节能上，纯电动机械的电能可以来自清洁能源，实现施工环节的零碳排放，减少对化石能源的依赖。

### 3.2 经济效益凸显全生命周期成本优势

纯电动工程机械的经济效益要从购置、运营、维护、政策红利四个方面综合来计算。从购置成本上来说，纯电动机型要高过燃油机，不过可以凭借政策补贴来削减压力；从运行成本来说，纯电动机型每小时能耗成本比起燃油机低得多，每年作业能省下不少费用；从维护成本来说，纯电动机型缺少发动机方面的维护需求，年维护费明显降低；从政策红利来说，除了购置补贴之外，部分地方还会提供低息贷款、碳排放交易收益等综合测算，得出全生命周期成本比燃油机低 15% ～ 20%。

### 3.3 社会效益助力作业环境改善与产业升级

纯电动工程机械的社会效益表现在职业健康、产业升级、双碳助力这三个方面。职业健康上无尾气排放、低噪音降低施工人员的呼吸道疾病、听力损伤的风险，提高人员满意度；产业升级上促进上下游产业链发展、创造就业机会，推动路桥施工领域绿色装备、智能施工新模式的发展，为国家实现“双碳”目标贡献力量。

### 3.4 潜在效益风险识别与针对性应对策略

纯电动工程机械在路桥施工中的应用还存在着三个主要的风险，要根据行业实际状况和技术更新特点提出相应的对策，从而达到效益稳步提高的目的。一是初期投资风险，纯电动机型购置成本比燃油机型高 30% ～ 50%，中小企业资金周转压力大，单纯依靠自有资金无法满足设备更新需求，可以采用融资租赁加分期付款的方式，租赁公司支付设备购置费用，企业按季度支付租金，到期可以续租或者低价买断，对接地方政策性银行申请低息贷款，降低融资成本，减轻资金压力。二是充电设施风险，偏远路桥项目电网覆盖不足，固定充电站建设成本高，单站服务半径小，容易造成补能不及时的情况，需要施工企业、电网公司、新能源企业三方合作共建移动充电车和固定充电站的互补网络，固定充电站覆盖核心施工区域，移动充电车按照作业需求动态调度（24 小时内响应），充电车上还装有储能模块，单次补能可以满足 3 台～ 4 台重载机械 2 小时作业的需求，解决应急补能问题。三是低温适应性风险，严寒地区（-20 ℃以下）电池活性降低，续航能力下降 20% ～ 30%，影响单日作业时间，可采取技术改善和作业改变两种办法来应对，技术上给电池包装上 PTC 加热系统和聚氨酯保温层，在低温环境里自动开启加热功能，保持电池温度在 5 ℃～ 10 ℃之间，保证放电效率，作业上调整施工时序，把高能耗作业安排在日间高温时段，低温时段做低能耗的构件转运和设备保养，保证整个作业进度不受影响。

## 4 结束语

纯电动工程机械在路桥施工中的应用，是“双碳”目标下行业绿色转型的必然选择，技术特性与路桥施工场景的适配性已经得到试点验证，应用前景受到政策、技术、市场等各方面的驱动，环境、经济、社会效益明显。虽然目前还存在着初期投入大、充电设施短缺等问题，但是通过融资租赁、共建充电网络、技术改进等手段可以加以解决，随着固态电池、智能网联技术的发展，将由“试点应用”迈向“规模化普及”。未来，纯电动工程机械在路桥施工中要依靠技术、政策、市场三者之间的相互配合来实现。从技术上加强电池能量密度、低温适应性研究；从政策上完善补贴、标准体系，降低应用门槛；从市场角度培育绿色施工理念，形成需求闭环。相信经过各方面努力，纯电动工程机械会将路桥施工领域带入“零碳、高效、安全”的新阶段，给基础设施建设高质量发展提供新动能。

## 参考文献：

[1] 张玉香.电动工程机械的现状及展望[J].内燃机与配件,2023(10):107-109.
[2] 王福军,张松,王昌儒,等.某纯电动工程机械变速器振动噪声分析[J].汽车实用技术,2023,48(08):91-96.
[3] 夏子航.大力发展洁净绿色工程机械[N].上海证券报,2023-03-10(004).
[4] 王大宇,张梅青.推进工程机械电动化促进行业绿色高质量发展[J].建筑机械,2022(06):19-21.
[5] 王武双,李杰,陈效,等.配电带电作业和停电检修配合的研究与应用[J].电工技术,2021(03):69-72,76.

# 电力市场化改革下营业电费回收风险识别与防控体系构建

王菊荷，朱永峰，师浩琼

（国网渭源县供电公司，甘肃 定西 748200）

**摘 要** 随着我国电力市场化改革的不断深入，电力交易主体日趋多元，交易方式趋于市场化，电价机制也变得更为灵活，传统的电力营业电费回收管理模式已经无法满足当前的需要，各种新型电费回收风险不断出现并具有复杂性、隐蔽性和连锁性的特点，严重阻碍了电力企业的资金周转速度和经营稳定性，影响了电力市场的健康发展。为了系统地解决市场化改革所带来的电费回收管理难题，筑牢电力企业经营风控防线，本文对市场化背景下的电费回收风险进行精准识别，构建全方位、多层次、常态化的风险防控体系框架，形成以风险识别、预警、管控、复盘的全流程管理机制，以期为相关人员提供参考。

**关键词** 电力市场化改革；电费回收；营业电费；回收风险

**中图分类号**：F426.61 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.026

## 0 引言

电费回收是电力企业生产经营的末端关键环节，它与企业的现金流安全、资产质量和可持续经营能力息息相关，在市场化改革的冲击和重塑之下，原来的依靠固定电价、固定用户、统一结算的电费回收管理体系已经不能适应新的市场环境了。相比传统的电力运营模式而言，在市场化环境中，电费的回收过程包含的主体更多，交易链条也更长，结算规则更加灵活，信用约束更为松散，各种风险隐患在电费的核算、结算、催收以及归档等各个环节都会存在。因此，精准定位电力市场化改革下营业电费回收的各种风险点，按照科学规范的原则建立系统的防控体系，就成为电力企业适应市场化转型、防范经营风险、筑牢发展根基的关键任务。

## 1 电力市场化改革下营业电费回收风险识别与防控体系构建原则

### 1.1 市场化适配与全流程管控原则

在新的电力市场体系中，电价形成机制脱离了以往政府统一核定的固定模式，转而依靠市场供需关系、电力交易品种、用户用电属性、峰谷时段差别等诸多要素来形成动态浮动的价格体系，无论是电力批发交易还是零售交易，交易主体、合作方式、结算周期都表现出高度灵活、动态可变的特点，相比于传统的标准化电力运营体系，市场化环境下的电费回收风险产生场景、外在表现形式和风险传导路径都有了本质上的改变[1]。因此，风险识别和防控体系的建立不能采用传统的、一刀切、标准化的旧有风控模式，而应该精准对接市场化各种电力交易流程，涵盖零售用户购电交易、大用户直接交易、售电公司批量交易、增量配电交易等多种市场化交易场景，根据不同的交易模式规则差异、合作主体差异、结算方式差异，制定分层、分类、差异化的风险识别标准和精准防控策略，使风控体系完全适应市场化电力交易的运行规律。这种差异化防控思路的核心在于，将市场交易规则的内在逻辑转化为风险管理的内在尺度，使每一类交易场景都能获得与其风险特征相匹配的防控资源分配，从而实现风控效率与市场活力之间的动态平衡。与此同时，电费回收风险具有很强的全链条传导性，不是单一结算节点的独立风险问题，而是涉及市场主体准入、商业合作签约、实时电量计量、市场化电费核算、电子账单推送、用户费用清缴、逾期问题处置、信用档案留存等所有业务环节，任何一个业务环节的管控疏漏、流程缺失、审核不到位，都会造成连锁式的电费回收风险，从小额欠费逐渐发展成大额欠费、坏账损失。因此，体系构建要严格遵循全流程管控的原则，彻底打破传统电力企业分段式、碎片化、权责割裂的电费管理壁垒，把智能化风险识别、前置化风险预警、精

作者简介：王菊荷（1992-），女，本科，工程师，研究方向：电力营销。

细化风险防控、常态化监督复盘等核心机制深入电费回收的全过程当中，创建事前精准预判、事中动态管控、事后闭环复盘的全链条风险管理模式，保证市场化改革背景之下潜藏的各种隐性、显性电费回收风险被全方位地捕捉、标准化地控制、精准地处置，从业务流程源头上堵住风险漏洞，筑牢电费回收安全防线。

### 1.2 风险导向与动态迭代优化原则

在改革推进过程中，旧的市场化风险隐患会随着制度的完善逐渐消失，新的交易模式、新的市场主体的出现又会产生新的电费回收风险，这就需要电力企业建立电费回收风险识别和防控体系的时候，始终坚持风险导向和动态迭代优化的原则，保证风控体系的长效适应性[2]。风险导向原则是市场化风控体系的核心立足点，彻底摒弃了传统电力管理中重流程、轻风险、重形式、轻实效的粗放式管理模式，全程以市场化场景下电费回收的各种风险隐患为核心，聚焦改革带来的市场主体信用层级分化、电力交易规则复杂化、现货电价实时波动、结算模式多元化、跨主体交易链条延长等一系列重大改变，深入剖析各种风险产生的原因、发展过程、传播途径以及给企业经营带来的实际危害，有针对性地建立适合市场化场景的风险识别指标体系、分级防控机制、分类处置方案，使整个风控体系具有很强的问题针对性和实践落地性，可以精准解决电力市场化转型期间电费回收风控滞后、管控失效、处置被动等主要问题。风险导向原则的价值不仅体现在对既有问题的精准回应上，更在于它赋予风控体系以主动出击的能力，使企业能够从被动的风险应对转向主动的风险预判与前置干预。动态迭代优化原则就防控体系的建设定位而言，它不是一成不变的固定模式，而是适应市场发展的一种动态化管理系统。随着电力市场化改革不断深入，市场交易形式、用户用电行为、主体经营方式等都会不断变化，随之而来的电费回收风险特征也会随之改变，这就要求企业要时刻关注电力市场的改革进程，及时分析电力市场的总体运行状况，准确把握市场主体交易行为的变化规律，根据不同的发展阶段电费回收风险的新特点、新趋势、新隐患，不断更新风险识别维度、优化风险防控措施、完善全流程管控流程。

## 2 电力市场化改革下营业电费回收风险识别与防控体系构建

### 2.1 电力市场化改革下营业电费回收多维度风险识别

依托电力市场化改革形成的新的行业格局，结合营业电费回收全业务链条的运行逻辑，摒弃传统单一化、表面化的风险排查模式，从市场主体、市场化交易、企业内部管理这三个主要方面，对电费回收风险展开全方位、深层次、系统性的识别研判，全面涵盖市场化场景下隐蔽性强、复杂度高、传导性强的各种电费回收风险隐患，准确找到各种风险的本质特点和形成原因。从市场主体角度出发，市场化改革彻底放开售电市场准入门槛，打破传统的电网企业独家垄断售电的行业局面，众多民营售电企业、专业交易机构、新型能源服务商等市场主体不断进入电力行业，终端电力用户也获得了充分的市场自主选择权，可以根据自身的用电需求自由选择合作的售电主体[3]。市场准入放宽使行业主体数量迅速增加，但是也造成市场主体资质实力参差不齐、信用水平两极分化、经营稳定性存在较大差异的行业现状。部分中小规模售电主体成立时间短、资本实力弱、市场运作经验少，抗风险能力差，在电价变动、市场行情变化时容易出现经营亏损、资金周转困难等情况，造成电费拖欠、逾期缴纳等问题，也存在一些市场主体信用履约意识薄弱，故意拖延缴费、规避费用结算、恶意拖欠电费等不良行为，从而产生主体信用类电费回收风险。目前，电力市场包含现货交易、中长期合约交易、辅助服务交易、增量配电交易等多种交易类型，不同交易品类的电价核算规则、电量统计标准、结算时间节点都存在着较大的差别，很容易造成交易合同条款不清、市场化电价核算有误、电量数据核对不准、跨主体结算衔接不畅等问题，从而引发交易结算类电费回收风险。中长期电力交易周期跨度大、资金结算滞后明显，现货交易电价波动剧烈、交易结算频率高，这样的交易特点容易造成市场主体出现资金调配不到位、逾期欠费的情况，从而加大电费回收的风险发生概率。

### 2.2 电力市场化改革下营业电费回收风险防控体系框架搭建

从电力企业市场化经营实际出发，构建以风险预警、过程管控、应急处置三个主要模块为主要内容的立体化、全闭环、常态化电费回收风险防控体系框架，全方位、全过程、全方位地管控市场化电费回收风险，彻底解决传统风控体系碎片化、滞后化、被动化的管理问题。风险预警模块是整个防控体系的前置核心和第一道防线，以风险前置预判、早期干预为管控思维，根据市场化各种电费回收风险的不同特点，结合多场景运行规律来创建电力市场化交易规则相适应的智能化风险预警指标体系。该指标体系包含市场主体信用等级、历史交易履约记录、市场化电价波动幅度、电费结算周期进度、用户常态化缴费行为、主体经营变

动情况等主要研判要素，把多维市场数据、用户数据、交易数据融合起来创建7×24小时动态监测和智能研判体系，不断对各种市场主体的交易行为、履约状况、经营情况展开追踪分析，可以准确察觉出潜在的欠费、短时逾期、长久坏账、主体失信等种种风险信号，依照风险等级来划分预警层次，立刻发出风控处置提示，从而从源头上明显削减各类风险出现的可能性及其蔓延范围。过程管控模块是电力交易合作签约、实时电量计量、市场化电费精确核算、电子账单分级分发、用户费用按时缴纳全过程的管理控制，属于常态化、精细化、标准化的管控[4]。针对市场化电力交易品类繁杂、主体众多、规则各异的特征，该模块采取分类分级管控模式，对中长期合约交易、现货交易、零售交易等各类别交易活动分别制订专属管控流程，对交易合同条款审核、市场主体入驻资质核查、市场化电价精确对接、电量数据相互核对等关键前置工作予以规范。

### 2.3 电力市场化改革下营业电费回收防控体系运行保障

完善的运行保障机制是市场化电费回收风险防控体系稳定落地、高效运转、持续迭代的保障，为全面适应电力市场化改革不断深化的发展节奏，保证风控体系各项机制、流程、策略落地见效，真正发挥风险防控效果，需要从制度、技术、人员、信用四个方面建立全方位、多层次、长效化的运行保障体系，全方位筑牢防控体系落地运行的基础。从制度保障的角度来说，电力企业要随着国家电力市场化改革政策的更新而更新，按照行业最新的交易规则、监管标准和合规要求，结合企业自身的市场化经营情况，对适配市场化场景的电费回收管理制度、风险分级管控细则、电力交易合同管理规范、欠费处置管理办法等各项规章制度进行系统的修订和完善[5]。通过制度化建设，明确企业各个业务部门、各个岗位人员在风险识别、预警推送、过程控制、应急处置、复盘改进等各个环节的具体职责和权限，统一市场化电费回收全流程操作标准、审核规范、处置流程，彻底解决传统管理中权责不清、流程混乱、标准不一的问题，建立权责分明、流程规范、管控到位、追责有据的制度化管理体系，为防控体系常态化、规范化运行提供有力的制度保障和合规依据[6]。从技术保障的角度来说，以数字化、智能化能源转型的大势为背景，依靠大数据、人工智能、云计算等先进技术创建起一体化市场化电费风控智能管理平台，冲破企业内部交易数据、用户数据、缴费数据、信用数据信息壁垒，实现各类核心数据的整合归集、互联互通和共享分析。就人员保障而言，根据电力市场化改革之后新的交易规则、风险形态和风控要求，创建常态化、系统化、专业化的全员培训和能力提升机制。从信用保障角度出发，依靠全国电力行业信用体系建设平台，创建起市场主体专属的信用档案，全面搜集各类售电企业、电力用户电费履约状况、以往欠费记录、风险控制成果、违规违约行为等信用信息，塑造起完备的市场主体信用分级评定体系。根据信用评价结果实行差异化监管和服务，对优质信用主体给予政策便利、流程优化等激励措施，对失信主体实行行业公示、业务限制、联合惩戒等约束措施，用强有力的信用约束来规范各种市场主体的缴费履约行为，从市场环境层面源头压降电费回收风险，保证市场化电费回收风险防控体系长效、稳定、高效运行[7]。

## 3 结束语

电费回收风险管控是电力企业市场化经营的关键风控部分，它直接影响到企业的经营安全以及电力市场平稳有序的发展，创建契合市场化改革的风险识别和防控体系，成为电力企业冲破传统管理障碍、消除新型经营风险、加强市场化核心竞争力的必然之路。以电力市场化改革为背景，从电费回收风险防控体系市场化适配、全流程管控、风险导向、动态迭代四个方面入手，从多个角度对市场化场景下电费回收风险进行全面识别，搭建集预警、管控、应急为一体的防控体系框架，并且配套完善的体系运行保障机制，形成了一套完整的市场化电费回收风控管理体系。

## 参考文献：

[1] 夏天鹏,安宁,苏媛,等.电费回收风险管理综述[J].自动化应用,2025,66(24):85-89.
[2] 李欣蒲,姜舒靓.供应链协同视角下重点行业电费回收风险预警机制研究[J].中国招标,2025(S2):213-215.
[3] 李涛,薛建,吴丽娜,等.电力营销中电费回收风险及应对策略[J].电力设备管理,2025(20):289-291.
[4] 赵雪仪,胡绮文.基于电费回收风险防范的客户信用评价体系构建策略[J].电工技术,2024(S2):363-365.
[5] 薛峪峰,罗红郊,马晓琴.基于电力用户信用评价模型的电费回收风险管控应用[J].微型电脑应用,2023,39(10):188-191,204.
[6] 胡颖.电网企业电费回收效率评价探究[J].中国电子商情,2025,31(24):22-24.
[7] 谭聪.电力市场环境下供电企业电费回收质效提升策略研究[J].中国电子商情,2025,31(23):34-36.

# 节能降排型智能热风拉幅定型机总体设计及关键技术分析

李家全

（山东泰达仁信机械装备有限公司，山东 德州 253000）

**摘 要** 本文对节能降排型智能化热风拉幅定型机总体设计及关键技术进行系统论述。在总体设计层面上，确定以高能效和低排放为主线的设计目标和原则，搭建集成化智能系统架构。关键节能技术主要集中在烘房结构及高效保温、智能多温区精准供热、废气余热深度回收及梯级利用三个主要方向，在结构、控制、能源管理维度上达到节能降耗的目的。在模块实现部分提出一种基于数字孪生的工艺参数自适应优化系统，通过虚拟映射和实时反馈增强工艺精度和稳定性；同时，设计多级余热回收和能源梯级利用系统，以最大限度地提高热能利用率。研究结果表明，将以上技术和模块有机地结合在一起，可以显著减少智能定型机单位产品能耗和废气排放，从而为纺织印染行业的发展提供一套高效和智能的系统、装备解决方案，促进产业的可持续发展。

**关键词** 节能降排型智能热风；拉幅定型机；烘房结构；智能多温区；废气余热深度回收

**中图分类号**：TS193.3 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.027

## 0 引言

热风拉幅定型作为纺织品后整理过程中的关键步骤，能耗大、废气排放量多等问题始终困扰着印染行业绿色发展。在“双碳”战略不断深入发展的背景下，开发具有高效生产和节能环保双重特点的智能装备已成为业界的迫切要求。传统定型机一般存在热能利用效率不高、温控精度不到位、余热浪费等诸多问题，很难适应现阶段节能减排和智能化升级发展的需要[1]。为此，本文系统阐述一种节能降排型智能热风拉幅定型机的创新设计，涉及从整机系统架构顶层设计到烘房保温、精准供热、余热回收等核心节能技术突破，进一步探索基于数字孪生智能优化和多级能源梯级利用的先进模块实现方式，旨在通过技术集成和系统创新为新一代智能绿色定型装备的研发提供理论依据和技术参考，助推印染行业降本增效和低碳转型。

## 1 节能降排型智能热风拉幅定型机总体设计

### 1.1 设计目标与原则

设计节能降排型智能热风拉幅定型机，其主要目的就是达到高能效和低排放协同最优，以此为基础进行集成智能化控制，增强工艺精度和生产稳定性。在设计中遵循系统性、经济性、前瞻性三个原则[2]。系统性原则强调把装置看作是能源输入、转换、使用、回收、排放的有机整体，并在全局上对热能流动路径进行优化，而不是对单一部件进行孤立的改善，确保各子系统（供热、循环、排废、回收等）之间的高效耦合与协同运行。经济性原则需要综合考虑设备制造成本、运行维护费用、投资回报周期等因素，在保证高性能的条件下优选出具有较高性价比的物料和技术方案，如使用效率较高但造价适中的复合保温材料等，使其在长时间运行过程中达到最佳节能和经济效益。前瞻性原则强调，在设计过程中应充分考虑到未来智能制造和绿色制造的发展方向，预留设备的数据接口和功能扩展空间，以支持与工厂级能源管理系统（EMS）或制造执行系统（MES）的无缝对接，并兼容未来可能的清洁能源（生物质能、绿电供热等）接入方案，确保设备的技术生命周期与行业升级步伐相匹配[3]。

### 1.2 整机系统架构

智能热风拉幅定型机整机系统架构设计为分层分布式，包括物理设备层、智能控制层、云端 / 厂级管理层三层组成，“感知—分析—决策—执行”闭环。所述物理设备层为执行主体，由进布及对中装置，若干独立可控智能温区烘房、链条、针板拉幅机构、循环风机、高效换热器组组成、废气收集及多级净化—回收系统和出布冷却装置[4]。每一个关键部件都整合高精度传感器如分布式热电偶、红外测温仪、风压风速传感器、废气成分和流量传感器，组成一个全方位

作者简介：李家全（1969-），男，专科，工程师，研究方向：经济管理。

数据感知网络。智能控制层构成这一架构的核心部分，由高速可编程逻辑控制器（PLC）或工业计算机（IPC）作为主要控制单元，负责实时接收物理层的数据，并执行先进的控制算法。这一层具体由多个关键模块组成：多温区独立闭环控制温控模块在“比例—积分—微分”（PID）或者更高级别的前馈—反馈算法的基础上实现各烘房分区温度毫秒级的精准调节；风量风压平衡控制模块保证烘箱内部气流场的均匀和平稳，避免出现局部温度过高或者风量不足的情况。云端/厂级管理层再通过工业以太网或者5G等通信方式接入智能控制层，对数据进行远程监控、存储、深度分析。在这个层次上，部署基于数字孪生技术的高级优化工具，进行能源效率的分析和优化建议，并与企业资源计划（ERP）系统进行集成，从而实现订单和生产计划的智能排程。

## 2 节能降排型智能热风拉幅定型机关键节能技术

### 2.1 烘房结构与高效保温技术

烘房是热风拉幅定型机中最核心的耗能单元之一，烘房结构设计和保温性能的好坏直接决定着热能损失程度。节能降排型的设计是先优化烘房结构，利用模块化和分段式的设计思想将长烘房分割成若干相互独立密闭腔室（温区），在相邻腔室间布置迷宫式密封或者气幕密封等高效热风隔离装置，来防止高温区的热量无序地向低温区或者外部传播，为随后多温区精准控制提供条件。在保温技术上，摈弃传统保温棉的单一填充方式，而采用复合高效保温体系。烘房壁板是一种“三明治”式结构：内外层是强度高、耐腐蚀彩钢板、不锈钢板，中间层充填既有低导热系数，又有高热稳定性新型纳米微孔硅酸钙或者气凝胶复合材料。这类材料具有极低的导热系数（可低于0.020 W/（m·K）），能显著减少壁板的传导热损失。同时，在烘房门、观察窗、穿布缝隙这几个重点热泄漏点上，设计并使用多层高温硅胶密封条和陶瓷纤维绳进行密封，并设置自动压紧机构以保证装置工作过程中可靠的动态密封[5]。

### 2.2 智能多温区精准供热技术

传统的定型机往往是集中供热，分区域进行粗略调节，造成温度控制响应缓慢、超调量较大、各区温度不均匀等问题，容易造成能源浪费及织物品质的波动。智能多温区精准供热技术的目的就是解决这一难题。本技术在烘房每个独立温区都配置一组独立，反应迅速的加热和循环单元。供热源一般为高效天然气直燃加热器、导热油间接换热管、电加热器等，各热源均装有高精度比例调节阀或者调功器以接收中央控制器发出的命令。核心在于智能温控算法，系统不仅采集每个温区出风口的温度作为主反馈，还通过布置在烘房内多点（尤其是靠近织物处）的温度传感器获取温度场分布信息，构成多变量输入。控制器采用模糊PID、模型预测控制（MPC）等先进算法，能够根据织物种类、克重、含水率、实时车速（由编码器反馈）的变化，前馈补偿热量需求，并快速抑制因进出布、门开启等扰动引起的温度波动，实现各温区设定温度的快速、精确（控温精度可达 ±1 ℃）与稳定跟踪[6]。

### 2.3 废气余热深度回收与梯级利用技术

定型机排出的废气温度高(通常可达140 ℃～180 ℃)、湿度大，且含有纤维屑、油剂及少量VOCs，直接排放不仅是巨大的热能浪费，也加重环境热污染和尾气处理负荷。废气余热的深度回收和梯级利用技术，是装置达到“降排”效果的关键环节。该技术对废气进行高效净化预处理，通常采用多级过滤（旋风分离、袋式过滤等）去除大部分颗粒物和纤维尘，为后续的换热回收创造清洁条件。深度回收其核心是使用高效的气-气或气-液换热器。针对高温高湿废气的特性，优先选用耐腐蚀、防结垢、传热效率高的换热器类型，如全热交换器（可以实现显热与潜热的同步回收）、不锈钢板式换热器或热管换热器。通过换热把废气的热转移到新鲜空气（补风）或者工艺用水。梯级利用则体现系统思维的节能策略：首先，将回收的最高品位热量（最高温区的尾气）用于预热进入高温烘房的新鲜补风，这是最直接高效的利用方式；其次，利用中温品位余热预热进中低温烘房补风或加热过程洗涤用水；最后，对经多级回收还剩余温度的废气或者冷却水低品位热量，可以考虑在车间供暖或者预热锅炉给水时使用。整个余热回收系统集成了智能控制，依据烘房排风温度、补风需求及换热器两侧温差，对废气引风机及补风送风机频率进行动态调整，及换热旁通阀开度最大限度地提高回收效率，同时确保烘房内负压平稳，不会影响过程排湿。经过研究发现，一个精心设计的深度余热回收系统能够从废气中回收热能的50%～70%，从而使整个设备的能源消耗减少15%～25%，同时大幅降低废气排烟温度，减少后续尾气处理（热力氧化）的能耗负荷，实现节能与降排的双重效益[7]。

## 3 节能降排型智能热风拉幅定型机模块实现

### 3.1 基于数字孪生的工艺参数自适应优化

为使工艺参数由“精确控制”向“智能优化”飞跃，该设计介绍一种基于数字孪生工艺参数自适应优化模块的方法。数字孪生作为虚拟空间内物理设备全生命周期的动态镜像，融合设备几何模型、物理特性、控制逻辑、实时运行数据等信息。在这个模块里，建立热风拉幅定型机的高保真多物理场仿真模型，该模型是通过有限元分析（FEA）和计算流体动力学（CFD）

方法来实现的，准确地描述烘房内部温度场、气流场的分布规律以及它们与织物传热传质之间的相互影响[8]。该仿真模型与物理实体通过物联网平台保持实时数据同步，物理实体上的传感器数据（温度、风速、张力、能耗）持续驱动和校准虚拟模型，使其状态与真实世界保持一致。在此基础上，嵌入智能优化算法（遗传算法、粒子群算法、深度学习模型等）。当生产任务下达（规定织物的品种、幅宽、目标克重、手感要求等），优化算法在数字孪生体中进行海量的虚拟工艺试验。它能够以能耗最低、品质指标最优（缩水率、纬斜、手感评分等）或综合成本最低为目标函数，自动寻优出一组最佳的工艺参数组合，包括每个温区的设定温度、机器的运行车速、超喂率、循环风量。该优化方案是通过手动确认或者直接下发给物理设备控制系统实施。在执行过程中，数字孪生体持续比对预测结果与实际生产数据（由在线质量检测设备进行反馈），并利用机器学习技术不断修正和完善其内部模型，实现自我进化[9]。

### 3.2 多级余热回收与能源梯级利用系统

作为关键节能技术在具体项目中的实施，多级余热回收及能源梯级利用系统属于高度集成化物理模块。系统将多类型换热设备串联或者并联设置于硬件中，构成逻辑严密的余热回收“流水线”。典型的配置可能包括：第一级，在高温废气出口紧邻处安装高效气-气板式换热器（或热管换热器），采用最高温废气对送入高温烘房新鲜补风进行预热，是最高效回收环节。第二次，经第一层次换热降温的尾气进入一喷淋式气-液换热器或者热泵驱动升级回收装置进一步抽取其中温热量，以对过程热水箱或者清洗液进行加热，热泵在这里可以起到“热量搬运工”作用，把低品位热提升到可以利用的中温。第三级，对最终排出的低温废气（气温已下降到露点左右），可采用冷凝式换热器、回收其冷凝潜热，同时冷凝下来的水分和部分油剂也便于集中处理。另外，烘房循环热风系统自身得到优化，对一些气温比较高但还可以直接使用的内部循环风做合理的重新配置，以减少新鲜热风补充。在控制系统中，模块安装有独立能源管理控制器并与主机控制系统进行通信。它对每个换热节点前、后的温度、压力、流量等参数进行实时监控，并计算出实时回收热量及系统总能效。控制器根据主机运行状态（车速、各个温区的温度设置等）、室外新风温度、热水需求等，动态调整各换热器旁通阀、风机频率及泵启停智能决策出最佳热量分配及回收路径同时满足工艺要求，避免回收环节间互相干扰或者因“回收过度”而增加风机能耗[10]。

## 4 结束语

本文以节能降排型热风拉幅智能定型机为研究对象，对其总体设计、关键技术、具体模块的实现等方面作较为全面的探讨。通过高效保温结构、智能多温区控制、废气余热深度回收核心技术的应用，从根源上提高装置热能利用效率和工艺适应性。进一步引入数字孪生技术自适应优化工艺参数，将多级余热回收和梯级利用系统相结合，建立智能控制至能源闭环管理一体化节能系统。结果表明，该设计不但显著减少了装置运行时的能耗和热污染排放，而且以智能化的方式增强了生产稳定性和产品品质。

## 参考文献：

[1] 周振环.拉幅定形机电气控制系统改进方案简介[J].国际纺织导报,2023,51(06):16-19.
[2] 李智,梁芳,栗岱欣,等.拉幅定形机主体结构的演变及扩展应用[J].染整技术,2023,45(12):36-40.
[3] 凡雄波.医用纱布拉幅定型机浆边装置的浆料输送结构:CN202320663515.4[P].仙桃市佳凌医用材料用品有限公司,2023-07-18.
[4] 李凡.拉幅定型机出布区造型设计与研究[D].天津:天津工业大学,2023.
[5] 盖佳,梁莉萍.远信工业:拉幅定型机技术创新跑出“加速度”[J].中国纺织,2022(Z4):30-31.
[6] 潘永高,陈露军,王新江,等.节能型数控热风拉幅定型机[EB/OL].浙江永利通印染机械有限公司,2022-06-16. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MXvIvFkaDQyi8S-iOCGnkbH5m-oQ7jicqAaWEo1Uw2xxiYVnbXpth9oR_kii6Rd6o98KGcejtlw_scfaAqyc6iu3Vg1QWGtwxhZLLUSInUY21BtJNf291Mj1rkKYwa2XxBiqSUg_9AAIbFQvc8moT4WC4d91GO0X9SsjKQEberkTTnfC2PT-HQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
[7] 司朝兵.拉幅定形机保温板热性能Creo Simulste仿真分析[J].染整技术,2022,44(02):25-28.
[8] 刘化杰,纤维纱的拉幅定型机[DB/OL].安徽双盈纺织有限公司,2022-12-14. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=hmNf6PfbaBsq2yJQPh0XNPGvP2pfBSB0Rc7WjsB6yCd0CPizFNf6wsr6qXyHjXBam20wbLdE46eY_eJQC5tjI1fM3hY7ghDAtpg6Dj9e6S7ITodBOt5Haq6-j63thOCQSmpb6HDy_HqbNeC6yIeiu2e_cNUaJ92aSwoUZY3Tup_GDpixc3ycNw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
[9] 王传伟.热风拉幅定型机控制系统软件及上位机程序设计[D].广州:广东工业大学,2020.
[10] 黄建平.热风拉幅定型机电气系统及控制策略设计[D].广州:广东工业大学,2020.

# 输送带纵向撕裂实时检测系统的研究与应用

## ——以华能福州电厂C9EF输煤带为例

徐令博，陈珊峰，姜亚波

（华能（福建）能源开发有限公司福州分公司，福建 福州 350200）

**摘 要** 输送带作为矿山、化工、火电厂等领域散料输送的关键输送设备，其纵向撕裂容易引发紧急非停、物料泄漏、设备损伤等严重影响安全稳定生产的风险，但是现有检测技术无法完美适配当前复杂的工况，亟待对现有检测技术进行全方位升级。本文以华能福州电厂C9EF皮带为实验对象，研发了一套基于可见光识别、红外感应、激光分析、超声探测等多功能集成的输送带纵向撕裂分析系统。这套系统主要是通过多种传感器协同，实时检测输送带的表面状态，凭借RFID技术对撕裂部位的精准定位，旨在实现从异物摩擦预警到撕裂叠带精准检测的全流程覆盖。

**关键词** 纵向撕裂；可见光；红外光；激光；超声波

**中图分类号**：TH222 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.028

## 0 引言

输送带纵向撕裂的演变有着明显的阶段性特征，对应也能检测到不同的信号。在初期异物摩擦阶段，异物在与输送带接触后，会产生温度明显升高的特征；再往后是表面微损伤阶段，在连续摩擦和应力作用下，输送带表面会出现细微划痕、裂缝或者局部鼓包这类微缺陷；紧接着是贯穿撕裂阶段，微缺陷会进一步发展成贯穿性撕裂，输送带出现彻底破坏；最后是叠带阶段，在物料重力和皮带拉力的共同作用下，撕裂后的输送带边缘很容易发生折叠、堆叠，带宽出现明显变化[1]。根据这些输送带纵向撕裂演化阶段的不同信号特征，本文以华能福州电厂C9EF皮带为实验对象，设计了一套多传感器协同的检测方案，能在每个阶段捕捉到最关键的信号。借助不同类型的传感器数据相互验证与互补，旨在共同实现从输送带局部温升到撕裂叠带的全流程实时监控。

## 1 输送系统现状与问题分析

### 1.1 研究背景

在矿山、电站这类工业场景中，输送带都是比较重要的输送设备，它的运行稳定性直接关系到生产效率和安全。各类散料运输事故中，纵向撕裂是最严重的一种，大多是尖锐异物穿刺或者物料卡塞摩擦引发的，导致皮带破损、散料泄漏甚至关键设备故障，进而造成高额的维护成本和停机损失。华能（福建）能源发展有限公司福州分公司的煤炭运输系统中，有多条长宽规格各异的输送带，其中C9EF输煤带是输煤系统的核心环节，其工作条件特别复杂——带长800 m、宽1.2 m，双向运行速度能达到2.5 m/s，沿线5个落煤点受力不均匀，主体还穿过了地下廊道，有着高湿度、低光照、高粉尘以及明显振动的特点，对检测系统的适应性要求非常严格。就当前现状，一方面传统的人工检测响应太慢，另一方面现有的红外热检测又适应不了这种复杂情况，精度和可靠性都不高，所以研究开发适配这种复杂场景的全程检测与预防系统，对保障电厂输煤系统安全稳定运行来说，确实有很大必要。

### 1.2 国内外研究现状

长期以来，国内外学者都在输送带纵向撕裂检测方面做了不少研究，初期的研究主要集中在接触式检测方法上，靠检测钢丝绳芯的破裂和压力变化来判断缺陷，这种方法只能检测已经发生的严重撕裂，无法做早期预警，而且适应性还差，很容易受输送带振动的干扰。近些年，机器视觉、超声波、激光这类非接触式检测技术成了研究热点，其中机器视觉技术因为有着非接触、检测范围广的优点，在工业检测领域使用频率较高[2]。在输送带检测中，可见光视觉会收集输送带的表面图像，再用图像处理算法找出输送带的缺陷，但很容易受光照和环境粉尘的影响；红外线视

作者简介：徐令博（1984-），男，本科，工程师，研究方向：设备故障诊断与预测性检修。

觉则是靠检测输送带的温度变化，识别出物体摩擦发热这类异常工况，以此实现早期预警；超声波技术凭着强渗透性的优势，能用来检测输送带的内部缺陷和叠带缺陷；激光技术则可以通过激光条纹变形分析，高精度检测输送带表面的微损伤。目前，有一些研究尝试把激光和视觉检测这类不同的传感器技术融合到一起，但目前的研究在多传感器协同工作的策略，还有多维数据深度融合的算法方面还比较薄弱，无法满足实时预防检测的需求。

## 2 系统硬件平台设计

### 2.1 双目分离式采集单元

考虑到可见光和红外线成像原理的巨大差别，采用了双目分离的设计，既能避免两者相互干扰，还能优化各自的防护性能。针对可见光收集的部分，选择低照度、高帧率的工业相机，就是为了适应地下廊道里变化不定的光线，对应的防护窗用的是高透光率的平面光学玻璃，耐磨性和抗冲击性都很不错；针对红外线收集部分，根据红外热成像的特定波长要求，定制了镀钻型碳膜的锗玻璃窗，这种材料不仅能保证红外波的高透过率，还有着出色的抗刮擦能力；针对煤粉黏附的问题，两组摄像头都集成在独立的自动刮板装置上，靠耐磨橡胶刮板来定期清洁。另外，为了解决红外相机发热影响测量精度的问题，还设计了独立的循环风冷散热通道，保证它长期工作时的热稳定性，整个收集单元都装在多自由度可调节的支架上，方便现场调节的时候和检测区域精准对齐。

### 2.2 皮带状态监测单元

叠带故障一般发生在输送带纵向撕裂最严重的阶段，对检测可靠性要求挺高的，所以为了保证叠带检测的可靠性，摒弃了单一传感器的方案，而是给输送带状态监测单元用了超声波加冗余视觉的设计：一方面是超声波测距模块，在皮带两侧对称装一对高频超声波传感器，实时测皮带边缘到传感器的距离，再把横向距离的总和转换成固定的机械结构尺寸，实时动态计算皮带的物理带宽；另一方面是视觉检测模块，在皮带正下方装了一个高清摄像头，实时捕捉输送带带面的图像。这两种检测方式会相互校验，要是其中一个传感器组检测到带宽变化，会结合另一个传感器组的数据做最终判定，这样就能避免单个传感器故障导致的误报和漏报，保证报警的准确性和可靠性。

### 2.3 精准测速定位单元

如何在高速运转的长距离输送带上快速找到故障点，一直是现场维护人员头疼的难题。本研究采用植入式 RFID 技术，把特制的无源 RFID 标签按固定间距均匀埋进皮带内部，还在带面下方的固定位置装了 RFID 读写器板。当皮带运转的时候，读写器能实时读取经过它下方的标签 ID，这样就能确定读写器位置和皮带上这个点的对应关系，实现米级的绝对位置定位。要是检测到撕裂异常，系统会立刻抓住这个时刻 RFID 读写器获取的标签信息当位置基准，通过速度积分算出撕裂点相对于读写器的精确距离，还会在人机界面上动态显示撕裂点的移动轨迹，停机后就能根据记录的坐标直接去现场处理，把故障排查的时间从几小时缩短到几分钟[3]。

### 2.4 数据管控服务平台配置

为了高效处理多路高清视频流和传感器数据流，在云端部署了强大的 GPU 计算集群和海量存储，用来运行复杂的深度学习模型。配套的工业级嵌入式边缘计算主机，具备超强的实时数据处理能力，主要负责图像预处理、传感器数据校准、简单决策判断这些任务，既能减少数据传输量，还能提升系统动作的实时性。边缘计算主机和中心服务器之间通过光纤高速网络保持连接，能实现数据的实时交互和协同工作。我们所用的工业光纤环网连接具备极强的抗干扰和独立运算能力，就算出现了单点故障，整个通信链路也能保持畅通；而且，光纤有着传输速率高、传输距离远这些优势，适合工业复杂环境下的大数据传输。边缘计算主机、中心服务器、各个传感器采集单元以及监控终端这些都通过星型交换机连接，形成独立的局域网，不会和其他工业网络互相干扰。

## 3 系统数据处理与算法设计

### 3.1 图像预处理与增强

现在视觉检测技术面临的最大难题是粉尘大、亮度低、潮湿的现场环境，为此开发了一套组合式的图像预处理流程。在处理图像模糊的阶段，用生成对抗网络的去模糊算法和自适应直方图来对摄像头采集的图像进行预处理，生成对抗网络框架能通过生成器和识别器的对抗训练将模糊的图像有效地恢复成比较清晰的图像，自适应直方图会将图像的局部灰度分布对比度进行增强，两者配合着用能明显提升图像质量，给后续的图像内容分析打下基础[4]。在提取激光条纹中心线的环节，按顺序做自适应阈值分割、Canny 边缘检测、骨架提取和最小二乘拟合，得到一组精度比较高的激光中心线，并且通过计算分析中心线的曲率和实际偏移量，就能够准确识别出输送带表面出现的各类缺陷。在红外热图像处理过程中，用多点校准方法建立了灰度和温度的映射关系，实现了温度场的量化[5]。这套流程通过多种类的图像处理和特征分析，搭建了从

图像增强、重要信息提取到异常检测的完整技术路径，能有效提升工业场景里视觉检测的鲁棒性和准确性。

### 3.2 输送带撕裂检测与识别算法

为了能准确识别不同阶段、不同类型的故障，设计了一套基于深度学习的多阶段、多特征融合网络。在纵向撕裂预防阶段，搭建了一个基于红外图像时序分析的温升预警模型，要是检测到连续异常模式的特征，就会触发早期预警，同时记录异常位置和温变轨迹；在早期微损阶段，采用多模态特征融合的策略，这个策略由两个并行的特征提取分支组成：一个分支接收激光条纹图像，通过卷积层提取中心线的几何变形特征，另一个分支接收对应区域的可见光图像，通过预训练的算法提取丰富的表面纹理特征，这样就能高精度分类微损伤、明显撕裂和正常状态；在撕裂严重后果和叠带阶段，部署了基于超声波测距和摄像头视觉边缘识别的融合检测算法，超声模块通过实时测距来计算物理带宽，视觉模块通过边缘检测和霍夫变换从仰视图像里提取视觉带宽，要是带宽突变值超过了考虑正常振动误差的设定阈值，就判定为叠带故障，同时结合输送带的运行速度和位置信息进行紧急停机，确保在严重后果刚发生的时候就能可靠报警，防止事故扩大。

### 3.3 系统软件平台与联动逻辑实现

为了让复杂的检测算法得以综合运用，开发了一套功能清晰的模块化系统管控平台——输送带纵向撕裂分析系统。这个平台以模块化上位机软件为核心，能实现从异常感知到执行响应的闭环控制和精准运维。上位机软件平台用了模块化架构设计，包括实时监控、历史回放和报警管理等核心功能模块：实时监控模块能同时展示可见光、红外、激光条纹的实时视频流；历史回放模块可以回放所有关联的传感器数据和视频片段，还会以动画形式展示事故发生时撕裂点的移动轨迹；在报警管理模块中，根据不同故障的严重程度定义了三级联动策略：预警三级只会触发声光报警并在画面提示，停机二级（输送带微损撕裂）和停机一级（输送带贯穿撕裂、叠带）会触发系统急停同时进行声光报警；系统还会记录所有预警和报警事件的类型、时间、位置还有处置状态，提供查询、统计和导出功能，方便运行检修人员分析输送带的运行规律和寿命情况。

## 4 系统测试、验证与工程应用分析

在系统正式投用前，以华能福州电厂的输煤系统C9EF皮带的作为试验平台，进行了一个月的实地模拟测试，测试内容包括早期温升异常的预警联动、微损的预警联动、贯穿撕裂和叠带的急停联动。测试的时候，模拟了几种真实的故障场景：在备用输送带不同位置放了不同尺寸、不同形状的尖锐异物来模拟异物穿刺，还在备用旧皮带上人工制作从浅表划痕到完全贯穿的不同程度撕裂口。经过多轮测试结果表明，系统各个模块协同工作正常，联动逻辑准确可靠，很少出现联动失效或者误联动的情况。2025年9月，系统正式在C9EF皮带上投入试运行，截至目前，持续运行了至少3个月，全程记录了系统的运行数据和故障处理情况。试点运行的结果显示，系统在实际工业环境中运行稳定，未出现设备故障或者性能下降的情况，误报率和漏报率都控制在工业允许的范围内，比传统检测系统低很多；试运行期间，系统成功检测并预警了多起早期温升异常和微损故障，避免了撕裂事故发生；在出现的两起轻微撕裂事故中，系统及时触发了急停，减少了经济损失。现场运行人员反馈系统操作简单、维护成本低，实用性能很不错。

## 5 结束语

本文立足于解决华能福州电厂C9EF皮带在复杂工况下的纵向撕裂问题，成功研发了一套可见光、红外光、激光、超声波及RFID定位技术的多传感器协同的输送带纵向撕裂分析系统，并且在C9EF皮带实地成功应用。该系统的核心技术已经申请了“一种基于多模态感知的输送带纵向撕裂的实时监测系统”等8项专利，这些专利成果为系统的产业化推广提供了知识产权保障。经过实验模拟测试和现场试点的持续验证，该系统的稳定性是完全经得起考验的，能适配复杂工业环境，满足实时检测和预防的需求，已经具备了工程应用的条件。

## 参考文献：

[1] 徐猛,刘正英.皮带机输送带撕裂产生的原因分析及预防[J].科技风,2025(05):163-165.
[2] 王磊.带式输送机皮带防撕裂装置设计的探究[J].机械管理开发,2020,35(08):213-214,219.
[3] 方崇全.基于无源RFID技术的输送带撕裂检测系统设计及应用[J].煤矿机械,2019,40(03):115-117.
[4] 孟晓娟,张月琴,郝晓丽,等.多分类深度卷积生成对抗网络的皮带撕裂检测[J].计算机工程与应用,2021,57(16):269-275.
[5] 张铙,孙宇,林清河,等.基于自适应阈值Canny边缘检测的Shi-Tomasi角点检测方法[J].东北大学学报(自然科学版),2025,46(10):36-43.

# 配网工程施工质量管控策略研究

樊沁和，李重阳

（国网陕西省电力有限公司佳县供电分公司，陕西 榆林 719000）

**摘 要** 配网工程作为电力系统终端供电的核心基础设施，其施工质量决定电网供电稳定性、安全性，是保障工农业生产以及居民生活可靠用电的关键支撑。现阶段，新型电力系统建设持续推进，配网架构日趋复杂、施工工艺标准不断升级，传统粗放式、经验化的质量管控模式已无法适配现代化配网建设需求。本文立足于配网工程施工全生命周期，从技术视角梳理施工质量管控的痛点，围绕不同维度提出专业化、精细化的质量管控策略，旨在提升配网工程施工工艺精度与质量稳定性，为配网工程高质量建设、电网安全稳定运行提供技术参考。

**关键词** 配网工程；施工质量管控；智能化技术

**中图分类号**：TM727.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.029

## 0 引言

施工质量是配网工程运维提质、降本增效的基础，施工阶段的工艺缺陷、技术偏差以及工序不规范问题会在电网长期运行中逐步放大，引发线路发热、设备故障、绝缘击穿等安全隐患，大幅提升后期运维成本，降低供电可靠性。当前，国内配网工程施工质量管控仍存在诸多问题。基于此，本文结合配网施工核心技术要点，摒弃传统管理层面的粗放管控模式，以技术赋能为核心，构建全流程、精细化的施工质量管控体系，旨在攻克配网施工质量管控难点，助力配网工程建设质量标准化发展。

## 1 配网工程施工质量管控原则

1. 技术标准化原则。每一道施工工序、工艺操作以及质量检测必须遵循国家及行业配网施工技术规范、设备安装技术标准和工程设计技术参数，统一施工工艺流程、统一质量判定标准，从源头上避免经验化施工、差异化操作，实现全项目施工技术标准化落地[1]。

2. 全过程技术管控原则。摒弃事后验收的被动管控模式，将技术管控前置、贯穿全程，从施工前期技术交底、材料设备技术核验到施工过程工序工艺管控、实时技术监测，再到竣工阶段精准检测、技术复盘，实现全流程技术管控，规避质量缺陷。

3. 智能化提质增效原则。应用物联网、人工智能以及大数据等新型电力技术替代人工管控手段，搭建全过程智能监测与数据分析平台，实现施工环节参数自动采集、异常风险智能预警，增强施工过程监测精度、质量检测效率，处理好人工管控盲区多、精度低、滞后性强等突出问题，依托数据溯源与智能研判优化管控流程，减少人为操作误差，以达到质量管控的动态化、实时化、精细化管理目标[2]。

## 2 当前配网工程施工质量技术管控问题

### 2.1 施工前期技术筹备精细化不足

1. 技术交底通常流于形式，内容只包括基础施工流程，没有针对项目地形、设备型号以及新型工艺进行专项技术交底，施工人员对于精细化工艺参数、禁忌操作和技术偏差阈值等环节的掌握比较笼统，致使现场施工工艺不统一、参数偏差超标。

2. 原材料与施工机具技术核验不到位，对绝缘子、配电柜以及接地材料等主材的电气参数、机械性能检测过于浅显，仅进行了外观核验，却并未重视电气性能、耐压等级等技术指标核查；施工全站仪、测距仪等机具未定期精度校准，使基础测量、参数调试数据存在系统性偏差，为后续施工质量埋下隐患。

### 2.2 施工工序工艺技术管控精度偏低

1. 在基础施工环节，杆塔基础基坑开挖尺寸、埋深以及坡度控制精度较低，混凝土浇筑配比、振捣和养护工艺不规范，引发基础沉降、杆塔倾斜等问题，主要原因是未落实机械化精准施工标准，人工操作偏差过大。在线路施工环节，电缆敷设存在弯曲半径不达标、拖拽磨损等技术层面的问题，架空线路弧垂、线间距、交叉跨越距离参数控制偏差超标，使压接工

作者简介：樊沁和（1998-），男，本科，助理工程师，研究方向：配网工程建设。

艺不规范，压接位置、压力值达不到技术要求，极易出现线路接触电阻过大、发热老化等隐患[3]。

2. 在设备安装环节，配电柜、变压器安装水平度以及垂直度偏差超出规范阈值，设备接线工艺混乱，二次接线屏蔽层接地不规范，阻碍着设备信号传输稳定性。在隐蔽工程施工中，接地体敷设深度、防腐处理工艺不合理，接地电阻参数超标，雷雨天气下无法泄放电流，引发设备击穿故障。

### 2.3 智能化技术管控应用程度较低

1. 施工过程动态监测技术缺失，传统人工巡检存在盲区、滞后性，不能持续性监测施工工艺参数、环境参数的动态变化，对于隐蔽工序、高空作业工序的质量隐患无法第一时间进行识别。

2. 质量检测技术相对传统，大部分使用人工抽样检测手段，检测覆盖面窄、数据误差大，一些微小工艺缺陷、参数偏差不能尽快被发现。

3. 数字化溯源体系不够健全，施工过程工艺数据、检测数据和整改数据未实现数字化留存，缺少统一的技术数据管理平台，做不到对施工质量展开全流程技术溯源，出现质量问题后很难定位技术缺陷根源。

## 3 配网工程施工质量精细化技术管控策略

### 3.1 强化施工前期全维度技术筹备管控

1. 落实专项化技术交底机制，摒弃通用化交底模式，围绕项目施工地形、气候环境以及施工工艺、重难点工序，编制专项技术交底文件，确定不同工序的工艺参数标准、偏差阈值及质量管控要点，针对装配式施工、电缆接头制作和智能设备调试等重要工序实施一对一专项技术交底，保证每一个施工、管控人员都可掌握技术标准。

2. 构建原材料与施工机具双重技术核验体系。针对电缆、绝缘子、开关设备和接地钢材等主材建立全参数技术检测机制，除外观检查外主要检测绝缘性能、耐压等级和导电性能等相关技术参数，全方位落实材料进场技术复检制度，所有主材参数必须契合设计及行业技术要求，杜绝参数不达标材料进场施工。针对全站仪、接地电阻测试仪以及压接设备等施工及检测机具，建立定期精度校准台账，施工前完成校准调试，保证机具测量、施工精度达到技术要求，从设备层面杜绝施工数据偏差[4]。

3. 优化专项施工技术方案编制，针对高空作业、隐蔽工程以及复杂地形施工等特殊场景，编制专项施工技术方案，明确精细化工艺管控流程、参数控制标准和风险防控技术，事先预判施工中可能发生的技术偏差问题，采取预控方案，进而为现场标准化施工带来技术依据。

### 3.2 细化核心施工工序工艺技术管控标准

1. 针对配网工程基础、线路、设备安装等关键工序，采取刚性化的工艺技术管控标准，保证每一道工序、每一项操作均有技术标准可依，真正避免粗放化施工。在基础施工环节推广机械化精准施工技术，采用机械开挖替代人工开挖，把控基坑尺寸、埋深和坡度参数；贯彻落实混凝土配比标准化技术要求，把控搅拌、浇筑以及振捣、养护全流程工艺，控制混凝土密实度、强度参数，杜绝基础裂缝、沉降等质量缺陷，保障杆塔基础稳定性。

2. 在线路施工环节落实电缆敷设精细化工艺标准，规范电缆弯曲半径、敷设张力以及层间间距技术参数，全程采取防护手段以防止电缆绝缘层磨损、挤压变形；架空线路施工中精准测量仪器控制弧垂、线间距和交叉跨越距离，确保参数偏差控制在规范允许范围内；导线压接采用专用压接机具，把控压接顺序、压力和位置，控制接触电阻参数，杜绝虚压、漏压现象，保障线路电气连接稳定性。

3. 在设备安装环节，推行设备安装精准调平调直技术，控制配电柜、变压器的水平度、垂直度偏差，确保设备安装稳固；规范一二次接线工艺，统一接线布局、线芯处理、紧固标准，严控接线间隙、相序精度，落实二次接线屏蔽层标准化接地工艺，保障设备电气性能与信号传输稳定性。在隐蔽工程施工中，严格规范接地体敷设深度、间距、焊接长度技术标准，焊接后及时做好防腐防锈技术处理，施工完成后第一时间检测接地电阻参数，确保完全符合电网安全运行技术标准，杜绝隐蔽工程质量隐患。同时，推行工序技术自检、互检、专检三级制度，上道工序技术参数不达标、工艺不规范，严禁进入下道工序，实现工序质量闭环管控[5]。

### 3.3 依托智能技术构建数字化质量管控体系

1. 推行BIM全流程技术应用，在施工前期构建项目三维BIM模型，还原施工现场、设备布局和线路走向，基于模型开展施工工艺模拟、参数校核以及工序优化，事先排查施工碰撞、参数偏差等技术问题；施工中应用BIM模型开展可视化技术交底、实时工艺比对，实现施工过程精准对标，最大限度增强施工的标准化程度。

2. 部署施工现场智能监测体系，在施工点位布设

智能传感器，持续性采集施工环境温湿度、施工机具运行参数和结构应力等各项数据情况，借助大数据平台分析数据变化，如果发生参数超标、工艺偏差问题，系统就会自动预警并对质量问题进行动态识别、及时整改。引入 AI 视觉识别技术，对施工现场工艺操作、工序规范性进行不间断地监控，识别不规范施工操作、工艺缺陷，替代人工完成全天候质量监督，真正意义上消除管控盲区。

3. 推广无人机智能巡检与检测技术，针对高空线路、偏远施工点位和大范围施工区域，依托无人机搭载高清摄像、高精度检测设备，完成线路敷设、杆塔安装、设备布局等工序的质量检测，检测精度与覆盖范围远超人工巡检。搭建施工质量数字化溯源平台，将施工工艺参数、检测数据、整改记录、验收数据全部数字化留存，建立单工程全周期技术数据台账，实现施工质量问题可溯源、工艺数据可复盘、质量责任可定位，构建数字化、智能化的长效管控机制。

### 3.4 规范竣工验收阶段技术管控流程

1. 制定标准化竣工技术验收清单，梳理每一道施工工序的关键技术参数、工艺要求和检测项目，包括外观工艺、几何尺寸以及安全参数、隐蔽工程质量等全维度内容，明确各项目检测方法、精度标准，保证验收工作实现标准化、无遗漏。

2. 展开精细化、全覆盖技术检测，摒弃以往的抽样检测模式，对电气参数进行检测，聚焦绝缘电阻、接地电阻和设备耐压性能等一系列技术指标，采用高精度检测设备替代简易检测工具，最大限度增强检测数据的精准度。针对隐蔽工程、关键工序进行专项复核检测，确保隐性质量隐患彻底清零；验收中同步完成技术数据对比分析，将具体施工参数与设计标准、行业规范逐一比对，以此识别出任何一项技术偏差问题[6]。

3. 建立验收问题技术整改闭环与复盘机制，针对验收发现的工艺缺陷、参数超标问题，基于技术标准制定专项整改方案，明确整改工艺、参数要求以及整改时限，整改完成后再次精准复检，确保问题彻底闭环。项目验收完成后再进行全流程技术复盘，梳理施工全过程技术偏差类型、成因和管控短板并整合成技术改进报告，为后续环节的同类项目施工质量管控优化带来技术支撑。

### 3.5 构建常态化施工技术赋能与培训体系

1. 建立分层分类技术培训体系，针对一线施工人员进行新型施工工艺、标准化操作流程、精细化参数控制以及智能施工设备操作等实操技术培训，结合现场实操演练、工艺对标教学，增强人员标准化施工水平；针对现场质量管控人员进行技术标准解读、质量缺陷识别以及参数检测研判等专业培训，提升技术管控与问题处置能力。

2. 落实新工艺、新技术常态化宣讲机制，针对装配式施工、智能设备安装和数字化管控等行业前沿工艺与技术，按时展专项培训，保证所有人员适配现代化配网施工技术要求。建立技术考核准入制度，每一位施工、管控人员必须通过对应岗位技术考核，持证上岗并作业，未达标人员严禁参与现场施工与质量管控工作。除此之外，组建专项技术攻坚小组，针对施工中的复杂技术问题、新型质量隐患进行技术研判与工艺优化，进一步增强现场技术管控水平，进而形成一套完善的“培训—实操—考核—优化”的长效技术赋能体系。

## 4 结束语

配网工程施工质量是电网安全稳定运行、供电服务提质增效的基础，在新型电力系统建设背景下，传统粗放式、经验化的质量管控模式已无法适配现代化配网建设发展需求。随着电力智能化、数字化技术的持续迭代，配网工程施工质量管控将进一步向智慧化、无人化、精准化转型，通过持续深化新技术、新工艺的落地应用，不断优化技术管控体系，实现配网工程建设质量的持续提升，为电网安全、稳定、高效运行提供坚实的技术保障，并助力电力行业高质量发展。

## 参考文献：

[1] 杨筱文 . 电力配网架空线路工程施工技术及造价控制 [J]. 中国招标 ,2025(S2):108-109.
[2] 孙超 . 电力配网工程造价精益化管理与控制研究 [J]. 价值工程 ,2025,44(31):7-10.
[3] 董秀娟 , 谢东航 . 多措并举全力推进配网工程施工转型 [J]. 农电管理 ,2025(10):61-62.
[4] 王梦瑶 , 虞荻 , 庄兴科 , 等 . 智能化技术在配网工程施工中的应用研究 [J]. 全面腐蚀控制 ,2025,39(08):250-252.
[5] 赵荣娟 , 余游乐 , 杨晓军 . 基于人工智能技术的电力配网工程施工安全管理技术研究 [C]// 江西省汽车工程学会 , 江西省工程师联合会 . 工程技术与新能源经济学术研讨会论文集 ( 二 ). 重庆足下科技有限公司 , 山西华创睿驰科技有限公司 ,2025.
[6] 张日益 .10kV 配网工程施工管理及质量控制研究 [J]. 电气技术与经济 ,2023(08):204-206.

# 液压千斤顶焊接结构加工变形控制技术

何勇明

（富阳通力机械制造有限公司，浙江 杭州 311407）

**摘 要** 液压千斤顶在运行过程中需承受较大载荷，这一工况直接关系到设备的结构稳定性以及使用寿命。而液压千斤顶焊接结构作为重要组成部分，需选择适宜焊接结构形式，分析焊接结构运行中潜在变形因素，通过焊接材料选择、焊接工艺优化、工装夹具设计、焊接后矫正等多样化措施，确保液压千斤顶加工精度合格，以满足工业生产需求。针对液压千斤顶焊接结构加工来说，需在加工生产中选择适宜工艺优化与精准工装定位措施，避免焊接出现严重变形，能有效提升焊接结构质量以及稳定性。

**关键词** 液压千斤顶；焊接结构；加工变形；变形控制；焊接工艺

**中图分类号**：TH137.51 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.030

## 0 引言

液压千斤顶作为工业生产中的重要辅助设施，其操作简单、结构紧凑、承载能力强，是目前机械维修、建筑施工、矿山开采、交通运输等多个领域的重要工具。而液压千斤顶焊接结构作为其核心组成部分，作用是连接缸体、法兰、底座、活塞等部件。因此，焊接结构质量关系到液压运行可靠性与稳定性。当前国内对于机械焊接结构方面研究逐步深入，然而对液压千斤顶结构研究却稍显不足，其具备受力复杂、结构紧凑、精度要求高等特点，造成焊接结构变形控制不到位，无法满足液压千斤顶高精度加工要求。因此，深入研究液压千斤顶焊接结构加工要求，落实变形控制措施，旨在确保焊接结构加工质量合格，延长千斤顶使用寿命。

## 1 液压千斤顶焊接结构及焊接变形类型

### 1.1 主要焊接结构

液压千顶焊接结构是主要受力部分，其功能主要为如下三个类别：一是缸体连接结构，其作用是缸体与两端法兰环向焊接、缸体与油孔接头焊接，保证压力稳定传输，且密封性达到要求；二是底座支撑结构，其主要为底座与缸体焊接、底座与加强筋焊接，作用是保证千斤顶运行过程中具备稳定性；三是活塞连接结构，包含活塞杆与活塞焊接、活塞与密封底座焊接，其作用是满足活塞往复运动，且密封性达到要求[1]。

### 1.2 焊接变形主要类型

通过对液压千斤顶焊接结构分析，考虑到加工特点和工艺方案，其变形主要为如下几个方面：一是收缩变形：焊接接头位置存在纵向收缩与横向收缩变形，纵向一般指的是焊接长度方向收缩变形，横向则是垂直于焊缝长度的收缩，这些都会造成焊缝结构严重变形。二是弯曲变形：千斤顶焊接结构弯曲变形，一般出现在细长形焊接结构或不对称焊接结构上，这主要是因为焊接时温度分布不均匀，造成焊缝两侧出现弯曲现象。三是扭曲变形：焊接结构扭曲变形，一般是在多焊缝或不规则焊缝位置，这是因为多条焊缝焊接时存在相互影响而引发扭曲。四是角变形：角焊缝通常出现在角接或者对接焊接位置，这是因为焊接部位存在温度分布不均匀、收缩量差异，引发焊接结构角度的变形。

## 2 液压千斤顶焊接结构加工变形的影响因素

### 2.1 焊接材料因素

液压千斤顶在焊接过程中，焊接部位材质、规格与性能方面对变形有较大影响。一方面，焊接材料和基体金属热膨胀系数差异大，造成焊接过程中出现受热膨胀现象，且焊接热量过大造成变形越严重。例如：45# 钢所选择的焊条热膨胀系数远远超过基体钢材，其焊接环节收缩量明显大于基体金属，这导致焊接结构变形问题更加严重；另一方面，焊接材料规格选择不同引发变形较大，如焊条直径过大、焊材含碳量过高，其焊接过程中出现区域过热现象，引发焊接结构收缩变形；焊材韧性不足，造成在冷却过程中应力集中，引发焊接结构发生局部变形[2]。

### 2.2 焊接工艺因素

液压千斤顶焊接结构在开展焊接前，需选择适宜焊接工艺，其主要包含焊接方法、焊接参数、焊接顺序、

作者简介：何勇明（1983-），男，专科，研究方向：机电制造。

焊接热输入等方面，再进行焊接工艺验证，以保证焊接强度达到要求。而在焊接作业开始前需选择焊接方法，这样能将焊接热输入控制在规定范围内。特别是手工电弧焊，保证焊接具备均匀性，预防受热不均引发部件变形。而二氧化碳气体保护焊焊接速度较快，热输入也比较均匀，将其应用在液压千斤顶焊接结构施工中，具备较高效率和变形控制水平。在液压千斤顶焊接结构参数选择阶段，需从电流、电压、速度等方面进行，确保各项参数保持适宜设置，才能有效降低焊接热量，使焊缝位置无焊接缺陷，防止二次补焊引发变形量增大[3]。

### 2.3 工装夹具因素

液压千斤顶焊接结构在加工时，工装夹具定位精度、夹紧力、夹紧方式对焊接精度存在直接影响。如果工装夹具稳定性不足或者偏差过大，极易造成焊接过程中稳定性不足引发焊接变形。此外，工装夹具夹紧力不足的情况下，在焊接过程中受到热量影响，导致焊接结构热胀冷缩变形问题严重。此外，工装夹具的定位基准选择不合理，会直接影响焊接结构的装配精度与尺寸一致性。若定位基准未与焊接结构的设计基准重合，易产生基准不重合误差。工装夹具的夹紧方式不当，同样会加剧焊接变形，如采用单点夹紧时，夹紧力集中作用于单一部位，会使工件受力不均，焊接过程中热量分布失衡，引发局部变形；而多点夹紧时，若各夹紧点力度不一致，会导致工件产生附加应力，冷却后形成永久性变形。

## 3 液压千斤顶焊接结构加工变形控制技术

### 3.1 焊接材料的优化选择与控制

液压千斤顶焊接结构在加工前，需根据千斤顶结构材质选择适宜焊接材料，确保焊接材料和基体金属保持匹配，能有效减少热膨胀系数，以达到变形控制的目的。一是焊接材料选择考虑到基体金属特性，如 45# 钢使用 J507 低氢型焊条，两者热膨胀系数较为接近，在焊接过程中能有效降低膨胀量；20CrMnTi 合金钢使用 H08CrMnSiA 焊丝，配合二氧化碳气体保护焊，确保焊缝金属和基体金属强度相近，以防发生严重变形；二是对焊接材料进行质量检测，保证焊接材料的直径符合焊缝尺寸要求，且在焊材投入使用前烘干处理，去除焊材表面水分，以防水分影响导致焊接变形；三是确保焊材化学成分达到要求，选择含碳量适中、韧性较好的焊材，以防存在应力集中现象[4]。

### 3.2 焊接工艺的优化设计

#### 3.2.1 焊接方法的选择

结合液压千斤顶焊接结构的特点，优先选用二氧化碳气体保护焊，该方法焊接效率高、热输入均匀、焊缝成形好，变形量比手工电弧焊小 30% 以上。对于缸体与法兰的环向焊接、活塞杆与活塞的焊接等关键部位，采用熔化极二氧化碳气体保护焊，焊接电流控制在 180 A ～ 220 A，焊接电压 22 V ～ 26 V，焊接速度 8 mm/s ～ 12 mm/s，确保焊缝成形均匀，热输入适中；对于底座与加强筋的角接焊接等次要部位，可采用手工电弧焊，控制焊接电流 120 A ～ 150 A，焊接电压 20 V ～ 24 V，焊接速度 6 mm/s ～ 10 mm/s，兼顾加工效率和变形控制。

#### 3.2.2 焊接参数的优化

液压千斤顶焊接结构在加工时，需结合焊接材料、焊接厚度、焊接方法进行焊接参数优化，从而达到降低焊接结构变形的目的。一是确定电流与电压，如果电流过大、电压过高，极易造成焊接过程中热输入量过大而引发焊接结构变形。通常来说，45# 缸铁与厚度 10 mm 法兰在焊接时，二氧化碳气体保护焊焊接电流 190 A ～ 210 A、电压 23 V ～ 25 V；二是严格控制焊接速度，如果焊接速度过快造成焊缝金属未焊透引发焊接缺陷，导致焊接结构变形加剧；三是多层多道焊接操作不当引发变形，如焊接结构厚度为 8 mm，通常采取分层焊接方式，每层厚度 3 mm ～ 4 mm，若各层之间未能及时进行热量释放造成结构变形[5]。

#### 3.2.3 焊接顺序的规范

液压千斤顶焊接结构确定适宜焊接顺序，能有效降低热量输入速度，防止出现焊接变形，需遵循如下原则确定焊接顺序：一是对称焊接，对于对称结构，如缸体与法兰的环向焊接，采用对称分段焊接，将焊缝分为 4 段～ 6 段，从对称位置开始焊接，逐步向中间推进，使焊缝收缩均匀，减少角变形和收缩变形；二是分散焊接，对于多焊缝结构，如底座与多个加强筋的焊接，避免集中焊接，采用分散焊接方式，先焊接对称位置的加强筋，再焊接中间位置的加强筋，使热量均匀分布，减少扭曲变形；三是先短后长，先焊接短焊缝，再焊接长焊缝，短焊缝收缩量小，可减少对长焊缝的影响，避免长焊缝因收缩不均引发弯曲变形；四是先内后外，先焊接内部焊缝，再焊接外部焊缝。

### 3.3 专用工装夹具的设计与应用

通过对液压千斤顶焊接结构特点分析，选择适宜的工装夹具，确保夹具定位精度、夹紧力、夹紧结构合理性达到焊接施工需求。缸体与法兰焊接采用“定位芯轴 + 环形压板”方式，定位芯轴和缸体保持配合，且定位精度偏差不超过 0.01 mm。环形压板和法兰表面紧密接触，确保螺栓夹紧力达到 3 kN ～ 5 kN，使其两者连接达到紧密度，防止装夹力过大造成工件变形；

夹具采用HT200灰铸铁制造，焊接过程中不会发生吸热变形，能使工装夹具具备较高稳定性以及耐热性；底座与缸体焊接使用“定位平台+侧向夹紧机构”的夹具，确保定位平台精加工平面度偏差为0.02 mm/m内，使得工装夹具底座达到稳定性；侧向夹紧机构使用液压夹紧方式，液压夹紧力达到精准度，以防存在严重偏移现象。而在夹具设计过程中，需在结构上布置导热槽，以确保在焊接过程中热量能及时散出；活塞杆与活塞焊接选用“顶尖定位+轴向夹紧”方式，其夹紧装置使用莫氏4号顶尖定位活塞杆两端中心孔，确保活塞杆同轴度达到要求；轴向夹紧机构使活塞与活塞杆保持紧密配合，夹紧力控制为2 kN～3 kN，以防在夹紧过程中引发活塞变形。夹具安装后使用隔热材料进行包裹，防止热量传递造成夹具变形。

## 4 变形控制技术实践验证

### 4.1 验证方案

试验材料选用45#钢无缝钢管（缸体）、45#钢法兰、HT200底座，焊接方法采用二氧化碳气体保护焊，优化后工艺采用本文提出的材料选择、参数优化、工装夹具、预处理与矫正等控制技术；传统工艺采用常规手工电弧焊，未采用专用工装夹具和参数优化。加工完成后，采用百分表、游标卡尺、投影仪等设备，检测焊接结构的收缩变形量、弯曲变形量、角变形量，以及关键尺寸精度（缸体与法兰的同轴度、法兰平面与缸体轴线的垂直度），对比两种工艺的检测结果。

### 4.2 验证结果

验证结果表明，采用本文提出的变形控制技术后，焊接结构的变形量显著降低，各项指标均满足设计要求，具体如表1所示。

实践验证表明，本文提出的液压千斤顶焊接结构加工变形控制技术合理可行，能够有效控制焊接变形，提升焊接质量和加工效率，满足批量生产需求。

## 5 结论

本文通过对液压千顶焊接结构特性进行分析，研究了焊接变形的类型、影响因素，并且提出适宜焊接变形控制措施，得出以下结论：（1）液压千斤顶焊接结构变形形式较多，其变形发生原因是热输入不均匀、材料匹配性差、工装定位不准等，极易造成焊接结构变形超出规范标准。（2）根据液压千斤顶焊接结构材料、焊接工艺、工装夹具、结构设计、焊接环境等因素，确定适宜焊接方式，保证液压千斤顶焊接结构加工质量达到要求。（3）在液压千斤顶焊接结构加工时，通过材料选择、工艺优化、焊前预处理、焊后矫正、环境控制等多样化策略，使焊接结构变形控制在规定范围内，提高液压千斤顶加工精度，以满足当前工业生产需求。

表1 焊接结构变形梁比较

| 焊接件类型 | 检测指标 | 传统工艺 | 优化后工艺 |
|---|---|---|---|
| 缸体与法兰焊接件 | 纵向收缩变形量 | 0.15 mm～0.20 mm | 0.03 mm～0.05 mm |
| | 横向收缩变形量 | 0.12 mm～0.18 mm | 0.02 mm～0.04 mm |
| | 角变形量 | 0.08 mm/m～0.12 mm/m | 0.02 mm/m～0.03 mm/m |
| 底座与缸体焊接件 | 弯曲变形量 | 0.10 mm～0.15 mm | 0.02 mm～0.04 mm |
| | 扭曲变形量 | 0.08 mm～0.10 mm | 0.01 mm～0.02 mm |
| 关键尺寸精度 | 缸体与法兰同轴度 | 未明确 | ≤0.03 mm（要求≤0.05 mm） |
| | 法兰与缸体轴线垂直度 | 未明确 | ≤0.02 mm/m（要求≤0.03 mm/m） |
| 工艺指标 | 焊接缺陷发生率 | 8% | 1% |
| | 焊接效率提升 | — | 40% |
| | 生产成本降低 | — | 25% |

**参考文献：**

[1] 孙晓华,李奎,樊永斌.液压支架千斤顶接头QPQ技术的应用研究[J].煤矿机械,2020,41(12):141-142.
[2] 郑德卓,吕琛,张学武,等.示范快堆钢拱顶焊接拼装变形质量控制研究[J].中国核电,2021,14(06):823-830.
[3] 麻磊.矿用液压支架顶梁焊接变形分析及控制措施[J].中国高新科技,2025(12):25-27.
[4] 王德印,凡乃峰,印文才,等.液压支架千斤顶附件的焊接工艺研究[J].电焊机,2021,51(07):89-92,117-118.
[5] 霍雷,任有路.基于焊接变形控制的筒体结构及焊接工艺优化[J].金属加工(热加工),2024(02):30-33.

# 新形势下建筑工程现场管理提升路径研究

漆学发

（安徽金寨经济开发区管理委员会，安徽 六安 237300）

**摘 要** 新形势下建筑工程现场管理呈现绿色化、智能化、多元化特征，行业政策监管趋严，多参与方协同需求提升，但当前现场管理在制度、人员、流程、技术等方面仍存在明显不足，制约管理效能提升。本文结合建筑工程现场管理实际，分析新形势下其核心特征、现存问题及产生诱因，遵循合规性与规范性、协同性与精细化、智能化与绿色化原则，从完善制度体系、强化队伍建设、推动技术赋能三个维度提出针对性提升路径，以期为建筑工程现场管理转型升级提供实践参考，助力提升工程质量、安全管控水平与综合效益，适配行业高质量发展需求。

**关键词** 建筑工程现场管理；智能管控；绿色施工；智能化技术

**中图分类号**：TU71 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.031

## 0 引言

建筑业转型升级步伐持续加快，行业高质量发展导向持续深化，施工现场作为工程建设实施的核心载体，其管理质量直接决定项目安全底线、建造品质与综合运营效益。当下环保管控标准持续收紧、智能建造技术加速普及，多方主体交叉作业模式愈发普遍，传统粗放式现场管理模式逐渐难以适配全新行业发展环境。工程建设领域监管体系不断完善，绿色施工、合规管控、精细治理成为行业常态化发展要求，各类新型施工工艺与数字化手段的落地应用，也对现场综合管理能力提出全新考验。立足于行业发展全新背景，直面现场管理运行中的现实短板，探索科学可行的管理升级方案，补齐管理体系与实操环节短板，能够为建筑行业稳定健康发展筑牢基层管理根基。

## 1 新形势下建筑工程现场管理的核心特征与现存问题

### 1.1 新形势下建筑工程现场管理的核心特征

新形势下建筑工程现场管理呈现多元化、精细化、智能化趋势，对管理模式提出更高要求。绿色建筑理念已深度融入现场管理全流程，不再是单纯的施工后环保处理，而是从施工方案设计、材料选用到施工过程管控、竣工后环保验收的全链条渗透，环保管控标准不断细化，对扬尘、噪声、污水等污染物的排放限值进一步收紧，倒逼现场管理模式向绿色化转型。新型建筑技术的广泛应用推动现场管理向智能化升级，BIM技术、物联网、大数据等手段打破传统现场管理的信息壁垒，实现施工环节的实时监测、精准调控，智能化管理需求从可选变为必需。当前建筑工程规模不断扩大，业态呈现多元化发展态势，住宅、商业综合体、工业厂房等不同类型工程的现场管理需求差异显著，多专业交叉作业、多参与方协同的场景日益普遍，现场协调的复杂度和难度大幅提升。同时，行业政策监管日趋严格，从工程质量、安全生产到环保合规、用工管理，监管范围不断扩大、监管力度持续强化，合规管理已成为现场管理的核心诉求，直接关系到工程顺利推进和项目整体效益。

### 1.2 建筑工程现场管理现存核心问题

现阶段建筑工程施工现场管理在制度体系、人员素养、施工流程、技术应用等层面均存在明显短板，制约了施工现场管理综合效能的提升。其一，管理制度体系不完善。现行管理制度适配性不足，难以契合行业新形势下的施工管理要求，部分制度条款界定宽泛，实操指导性较弱；同时权责划分模糊，管理条款存在内容重叠与监管盲区，各岗位及工程参与方权责边界不清，工程问题出现后易产生推诿扯皮现象，致使管理制度流于形式，无法落地执行。其二，管理人员综合专业素养偏低。部分管理人员固化传统管理思维，未掌握绿色施工、智能建造等现代化管理理念与技术手段，现代化管控能力不足，难以适配复杂施工场景的管控标准。其三，施工流程管控规范化程度不足。施工前期规划精准度欠缺，施工阶段各工序衔接不畅，

作者简介：漆学发（1975-），男，本科，工程师，研究方向：工程管理。

质量、安全、进度三大管控目标协同性较差，普遍存在重进度、轻质量安全，或重质量、轻施工效率的管控失衡问题。其四，现代化技术应用深度不足。多数工程项目仅配置基础智能化设备，未实现智能技术与现场管理流程的深度融合，工程数据整合利用率偏低，智能化管理流于表面，未能充分发挥技术赋能作用，管控精准度与管理效率难以有效提升[1]。

### 1.3 现存问题产生的核心诱因

建筑工程现场管理各类问题的产生，是管理理念、运行机制、资源配置、多方协同等多重因素共同作用的结果，需深挖内在根源进行系统性分析。第一，管理理念滞后固化。部分工程项目管理人员固守传统施工管控思维，将现场管理简单等同于施工过程监督，忽视绿色化、智能化行业转型的发展趋势，对新形势下施工现场多元化、综合性的管理需求认知不足，导致管理方向与行业发展趋势脱节。第二，激励约束运行机制不健全。现有考核体系侧重工程进度与施工质量指标，对现场精细化管理、施工合规性、绿色施工等管控维度考核权重偏低；同时激励措施吸引力不足、惩戒约束力度偏弱，无法充分调动工作人员参与现场管理的主观能动性，难以构建全员协同管控的管理格局。第三，行业资源配置投入不足。部分建筑企业为压缩运营成本，缩减智能化管控设备、绿色环保施工设施的资金投入，且未建立完善的人才培养体系，专业管理人才、技术人才储备缺口较大，无法为智能施工、绿色施工等新型管理工作提供专业人才支撑。第四，多方协同管理机制缺失。建设、施工、监理、设计等工程参与主体工作相对独立，存在信息传递滞后、沟通衔接不畅等问题；未搭建统一的协同管理平台，各参与方协同权责划分不明确，造成施工现场管理衔接断层，工程矛盾与施工问题无法及时高效处置。

## 2 新形势下建筑工程现场管理提升的核心原则

### 2.1 合规性与规范性原则

以政策法规为导向，规范现场管理全流程，保障工程合规有序推进。建筑工程现场管理必须严格遵循《建筑法》《建设工程质量管理条例》《安全生产法》等行业法律法规及现行行业标准，将合规要求融入现场管理的每一个环节，规范施工组织、工序操作、安全防护、环保管控等各类施工行为，杜绝违规施工、违法操作等现象[2]。完善现场管理合规审查机制，建立事前审查、事中管控、事后复盘的全流程合规管理体系，事前对施工方案、管理制度进行合规性审核，排查潜在合规风险；事中加强现场巡查，及时纠正违规行为；事后对合规管理成效进行复盘，总结经验、优化流程，防范各类合规风险发生。强化流程管控，明确现场施工各环节的操作标准和管理要求，细化质量验收、安全检查、环保监测等流程，确保质量管控符合验收标准、安全管控达到防护要求、环保管控满足排放规范，实现现场管理全流程有章可循、有规可依，保障工程建设合法合规、有序推进。

### 2.2 协同性与精细化原则

强化各个参与方、各个环节的配合，用精细化管理提高现场管理的效果，建筑工程现场管理牵扯建设、施工、监理、设计、材料供应商等多个参与方，需要把各方的权责划分清楚，建立高效配合的管理机制，加强各方沟通对接，打破信息壁垒，做到资源共享、优势互补，提高协同管理效率，避免配合不畅引发工期延误、留下质量隐患等问题。精细化管理要求打破传统粗放的管理方式，把现场管理流程拆解得更细致，围绕施工工序、材料管理、人员管控、安全防护等关键环节进行工作，明确每个环节的管理标准、责任主体和完成时间，做到全过程精细化管控[3]。另外，还要重视细节管理，从施工材料进场检验、施工工序规范操作，到现场环境卫生、安全隐患排查等细节入手，杜绝粗放管理带来的资源浪费、质量缺陷等问题，通过精细化管控优化资源配置，提高工程整体质量，降低管理成本，促进现场管理效能持续提高。

### 2.3 智能化与绿色化原则

利用智能化技术、落实绿色发展理念，促进现场管理完成转型升级，智能化技术能给现场管理提供高效支持，引入BIM技术做到施工全流程可视化管理，可以精准把控施工进度、施工质量以及各类安全隐患；使用物联网技术对现场的施工设备、施工人员、建筑材料进行实时监测，做到数据实时采集、分析以及预警，利用大数据技术整合现场管理的各类数据，给管理决策提供科学依据，完善现场管控模式，提高管理的精准度与效率。绿色化理念是当前建筑工程现场管理的必然要求，落实绿色施工理念，加强现场环境保护管控，规范扬尘、噪声、污水等各类污染物的收集与处理，使用环保型施工工艺和设备，降低施工对周边环境的影响。促进技术创新与管理创新深度融合，将智能化技术和绿色施工要求结合，优化施工方案，推广节能、环保、高效的施工技术与材料，做到绿色施工与智能化管理协同推进，让现场管理向绿色化、智能化方向

转型，达成工程建设和环境保护协同发展的目标。

## 3 新形势下建筑工程现场管理提升具体路径

### 3.1 完善制度体系，强化权责落实

通过健全制度、明确权责，为现场管理提供坚实保障，确保管理落地见效。结合新形势下建筑工程现场管理的绿色化、智能化、合规化需求，修订完善现场管理各项规章制度，摒弃滞后于行业发展的条款，细化管理标准和操作流程，增强制度的可操作性和针对性，形成覆盖质量、安全、环保、人员、材料等全方面的制度体系[4]。明确各岗位、各参与方的管理权责，按照“权责对等、分工明确”的原则，划分管理边界，避免权责交叉或空白，明确每个岗位的工作职责、工作标准和考核要求，让管理人员清楚自身职责，做到事事有人管、件件有着落。建立制度执行监督机制，成立专门的监督小组，加强对制度执行情况的现场巡查和定期检查，及时发现和纠正制度执行过程中的偏差，强化考核问责，将制度执行情况与绩效考核、评优评先直接挂钩，对违反制度、落实不到位的行为严肃处理，确保制度刚性执行，真正发挥制度在现场管理中的规范和保障作用。

### 3.2 强化队伍建设，提升专业能力

打造一支专业高效、具备现代化管理能力的团队，夯实现场管理的人才基础。组织针对性培训，结合现场管理的新形势、新要求制定系统培训方案，内容重点覆盖绿色施工理念、智能化管理技术、行业法律法规、现场管控技巧等，邀请行业专家、资深管理人员授课，提高管理人员的专业技能、安全意识和智能化管理能力，帮助管理人员转变传统管理思维，适配现代化现场管理的要求，建立完善的人才引进机制，明确人才引进标准，重点吸纳有丰富现场管理经验、掌握智能化技术、熟悉绿色施工要求的专业人才，优化管理队伍结构，补齐专业人才缺口[5]。完善激励考核体系，制定科学合理的考核评价指标，覆盖专业能力、工作成效、合规管理、绿色环保等多个维度，打破“平均主义”，把考核结果和薪酬待遇、职位晋升直接绑定，充分激发管理人员的工作积极性与责任心，鼓励管理人员主动学习、积极创新，提高自身专业能力，促进现场管理水平提高。

### 3.3 推动技术赋能，优化管控模式

将智能化技术与绿色理念结合起来，优化现场管控流程，提高管理综合效能。引入 BIM、物联网、大数据等智能化技术，搭建一体化现场管理平台，做到现场施工全过程的可视化、信息化管控，利用 BIM 技术进行施工模拟，优化施工方案，减少施工冲突；通过物联网设备实时采集施工人员、设备、材料等各类数据，做到对施工进度、质量、安全的实时监测和预警，及时排查安全隐患、处理质量缺陷，利用大数据技术分析现场管理数据，挖掘数据背后的规律，给管理决策给出科学支撑，优化资源配置，提高管理效率，落实绿色施工理念，把环保要求融入现场管控的全部过程，规范扬尘、噪声、污水等污染物的管控措施，安装扬尘监测设备、噪声治理设备，搭建污水回收利用系统，减少污染物排放，推广节能技术与环保材料，替换传统高耗能、高污染的施工材料和工艺，降低能源消耗和环境影响。搭建协同管理平台，整合建设、施工、监理等多方资源，做到信息实时共享、沟通高效顺畅，优化现场协调流程，减少协同成本，提高现场协调效率，促进现场管理方式向智能化、绿色化、协同化转型，全面提高现场管理综合效能。

## 4 结束语

建筑工程现场管理是工程建设质量、安全与效益的核心保障，直接关系到行业高质量发展大局。新形势下，绿色化转型、智能化升级与合规化管控已成为现场管理的必然趋势，传统管理模式已难以适配行业发展新要求，解决现存管理痛点、优化提升管理水平刻不容缓。本文围绕现场管理的核心痛点与提升原则提出的各项路径，贴合行业实际与实践需求，可有效破解制度落地难、人员素养不足、技术应用不深入等问题。未来，建筑工程现场管理需持续跟进行业政策与技术发展，不断优化管理模式、完善协同机制，推动绿色化、智能化、精细化管理深度融合，持续提升管理效能，为建筑行业高质量发展注入持久动力。

## 参考文献：

[1] 邓艳玉 . 装配式建筑工程现场管理的难点解析与优化 [J]. 建设科技 ,2025(24):22-25.
[2] 林恩 . 建筑工程现场施工管理影响因素及解决措施 [J]. 散装水泥 ,2024(02):196-198.
[3] 黄韦杰 . 基于甲方角度的建筑工程现场管理 [J]. 住宅与房地产 ,2024(09):112-114.
[4] 陈兆升 , 樊怀亮 , 吴婧 .BIM 技术在建筑工程现场管理中的应用 [J]. 工程技术研究 ,2022,07(23):134-136.
[5] 胡君鹏 . 浅谈如何提升建筑工程现场管理水平与优化施工技术 [J]. 房地产世界 ,2022(13):118-120.

# 水利工程施工质量管理与技术保障体系探讨

徐 路，李春娇，王 郡

（达州市水利工程建设运行有限责任公司，四川 达州 635000）

**摘 要** 水利工程施工阶段受地基条件、水文扰动及多工序交叉影响，质量偏差往往在隐蔽环节逐步累积，并在结构成型后集中显现。本文基于质量形成机理，对施工质量管理与技术保障的协同路径展开分析，结合地基加固、混凝土浇筑、防渗构造及机电安装等关键作业，对施工过程中参数约束、工艺衔接与检测反馈之间的作用关系进行梳理，并引入过程监测与数据校核手段，使质量判定由离散检验转向连续识别。工程应用表明，关键工序执行稳定、监测数据持续参与控制时，结构缺陷趋于收敛，施工过程更具可控性。

**关键词** 水利工程；地基处理；混凝土施工；技术保障体系；过程监测

**中图分类号**：TV512 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.032

## 0 引言

水利工程施工具有作业面分散、结构类型复杂及环境条件变化频繁等特征，质量状态往往在连续工序作用下逐步形成，而非由单一环节决定。现场实践表明，材料检验、工艺执行与过程记录之间若缺乏有效衔接，检测结果难以参与施工调整，局部偏差易在后续环节放大，进而影响结构稳定，工期约束与多专业交叉作业并行存在，使施工过程更依赖参数控制与动态校核，伴随工程管理方式不断更新，质量控制逐步由经验判断转向数据支撑，技术手段与管理机制之间的联动关系愈发受到业界关注。

## 1 水利工程施工质量管理的核心技术

### 1.1 地基处理与基础稳定控制技术

基础条件直接影响结构受力与渗流路径，持力层识别偏差或夹层处理不足，易引发不均匀沉降与渗流发展，施工准备阶段通常依托勘察资料与现场揭露结果对处理范围进行修正，使加固措施与实际地层相匹配[1]。在灌浆加固过程中，浆液水灰比、注浆压力与扩散半径之间形成约束关系，压力偏离设定区间时，浆液易沿弱面外逸或填充不足，现场多以压力—流量曲线作为判定依据，对吸浆量异常区段实施补孔或分序调整，使防渗结构保持连续，加固完成后沉降观测与原位测试数据结合分析，用于判定基础承载与变形特征，结果直接影响上部结构施工安排。

### 1.2 混凝土施工质量控制关键技术

水工混凝土体量较大，内部温度与环境条件之间存在差异，温差应力易诱发裂缝，配合比设计阶段常引入低水化热材料与矿物掺合料，以控制温升速率并延缓峰值出现；施工过程中分层厚度、浇筑间歇与振捣时长构成核心参数，振捣不足会形成孔隙，振捣过度易引起离析，现场结合坍落度变化对施工状态进行修正，使密实度保持稳定，大体积结构施工时入仓温度一般控制在18 ℃～25 ℃区间，并配合覆盖与分区浇筑方式减缓温差发展；养护阶段对强度增长具有持续影响，湿养护时间与温控条件共同作用，裂缝观测结果作为调整依据，使结构状态逐步趋于稳定。

### 1.3 防渗与结构完整性控制技术

防渗体系直接关系到工程长期运行安全，局部缺陷易演化为渗流集中区，基层平整度与密实度影响材料铺设效果，若存在起伏或松散区域，应力集中将削弱整体稳定性[2]。施工阶段以土工膜焊接、防渗墙连续性及帷幕灌浆完整性为控制重点，搭接宽度与焊缝质量需保持稳定，焊接完成后，现场多借助真空检测或电火花检测进行校核，对异常区段实施修复处理；结构评价依托渗流观测与变形监测数据进行综合判定，当渗流量或水头分布出现波动时，施工记录被用于追溯对应工序，使问题定位更具针对性。

### 1.4 金属结构与机电安装精度控制技术

闸门及启闭设备运行性能与安装精度直接相关，预埋件偏差在后续安装中易被放大，施工阶段依托测量复核对埋件位置进行校正，为安装提供基准；构件安装过程中，同轴度与垂直度为关键控制指标，吊装定位后需进行复测，使结构连接保持一致；焊接完成后采用无损检测手段对焊缝质量进行评估，并结合防

作者简介：徐路（1986-），女，本科，助理工程师，研究方向：水利工程管理。

腐处理延缓性能衰减；设备调试阶段以启闭试验与荷载运行作为检验手段，运行阻力与响应状态反映安装质量，若监测结果偏离控制范围，则回溯安装环节进行调整，使设备运行保持稳定。

## 2 水利工程施工质量管理技术保障体系的构建

### 2.1 全过程质量管理控制机制构建

水利工程质量形成具有连续性特征，设计参数、施工执行与检测结果在工程推进过程中不断叠加，任一环节偏差均可能被放大。项目实施初期，施工组织设计通常将关键工序与质量控制要求同步分解，地基处理、混凝土浇筑及防渗施工等环节被嵌入进度节点，使质量约束与施工节奏形成对应关系。进入现场实施阶段，工序控制逐渐转向动态校核，报验流程与旁站记录共同构成基础管理单元，实测数据不再仅用于结果判定，而参与施工状态修正，比如在混凝土施工中，入仓温度、分层厚度与振捣时长形成联动关系，一旦温差或密实度偏离控制区间，施工组织会调整浇筑节奏或养护条件，使偏差在早期得到收敛[3]。工程收尾阶段，质量评定侧重全过程数据一致性，隐蔽工程记录、检测报告及影像资料形成交叉验证关系，单项指标合格已难以支撑整体判断，结构性能与施工过程匹配程度成为评价重点，该控制模式使质量管理由节点检查转入连续约束，过程信息在不同阶段形成闭合反馈。

### 2.2 标准化与精细化施工管理体系

施工质量稳定依赖操作层面的可控程度，标准体系需转化为具体执行单元，现场通常将施工流程拆解为若干控制环节，并以工序卡或作业指导书形式落实至班组，使操作人员能够明确控制参数与允许偏差范围，避免执行尺度随作业人员变化而产生波动，在此基础上典型工序的关键控制参数被归纳为统一指标体系，形成直观约束条件，如表 1 所示。

参数约束使不同工序在执行过程中具备统一参照，压实度与含水率之间保持匹配关系，混凝土坍落度与振捣时间形成联动条件，结构安装精度则依托测量复核进行校正，实测数据在施工过程中持续累积，并在班组间进行横向比对，使质量差异能够被及时识别，样板段作为补充手段，将抽象指标转化为实体参照，在防渗施工及设备安装中应用较多，现场作业据此调整工艺参数，使施工状态趋于稳定。

### 2.3 信息化与数字化质量监测体系

数字化手段进入水利施工现场后，质量管理的关注点已由“记录是否完整”逐步转向“数据能否参与判断”，沉降、位移、温度、渗压及应力等监测项目一旦接入统一平台，现场管理便不再依赖滞后的纸面汇总，而能依据变化趋势进行预警。大体积混凝土温控是这一体系中较常见的场景，结构表层与内部温差通常需保持在合理范围内，否则温度裂缝风险会明显增大。温度监测与渗流监测之外，数字化质量体系还体现在测量成果、试验数据、影像资料和整改记录的统一归集，多源数据进入同一平台后，问题追溯路径更加清晰。例如：防渗墙某区段渗压值异常，管理人员可直接调取该段施工时段、班组记录、材料批次和检测报告，判断问题源自工艺执行、材料离散还是局部地层变化，此类方式减少了重复核查，提高了质量判断的针对性。对于渗流控制部位，工程实践中常以渗透系数 $k$ 作为重要评价指标，依据达西定律，其基本表达式为：

$$Q=kAi \tag{1}$$

式（1）中，$Q$ 为渗流量，$A$ 为过水断面面积，$i$ 为水力坡降，施工完成后，若监测所得渗流量与设计控制目标偏离较大，通常需要回溯防渗结构完整性及灌浆效果，而不是单纯以局部补漏代替系统分析。

### 2.4 质量责任与协同管理机制优化

质量责任体系的价值，在于让每一项施工行为都能找到对应主体、对应记录和对应复核节点，水利工

表 1 典型施工工序关键控制参数

| 工序类别 | 控制参数 | 单位 | 控制范围 / 要求 | 工程作用 |
|---|---|---|---|---|
| 土方填筑 | 压实度 K | — | ≥ 0.95 | 控制坝体密实性 |
| 土方填筑 | 含水率 | % | 最优含水率 ±2% | 保证压实效果 |
| 混凝土施工 | 入仓温度 | ℃ | 18 ～ 25 | 降低温差应力 |
| 混凝土施工 | 坍落度 | mm | 120 ～ 180 | 保证和易性 |
| 防渗施工 | 搭接宽度 | cm | ≥ 10 | 防止渗流通道 |
| 灌浆施工 | 注浆压力 | MPa | 0.3 ～ 0.8（分级） | 控制扩散范围 |
| 金属结构 | 安装偏差 | mm | ≤ 5 | 保证运行精度 |

程参建单位多，单靠笼统分工难以覆盖复杂工序，因而现场更倾向于建立“岗位—工序—数据—结果”相互对应的责任链；施工单位承担自检、互检和复检职责，监理单位负责关键节点核查，设计单位参与技术交底、设计变更和复杂问题处理，检测单位则以独立数据支撑质量判断，责任边界一旦明确，问题定位和整改闭合会更高效[4]。协同机制优化并不只是增加会议频次，而是强化信息一致性，施工记录、监测数据、试验成果与设计要求若无法互相印证，责任划分再明确也难以形成有效控制，目前较实用的做法是借助线上审批和资料同步机制，将报验、签认、整改与复核纳入同一链条，使质量信息在参建各方之间保持同步更新，这样形成的技术保障体系，兼具执行深度与追溯能力，更符合水利工程施工质量管理的实际需求。

## 3 工程实例分析

### 3.1 工程概况

选取某地区水库除险加固工程作为分析对象，工程兼具灌溉与防洪功能，坝体为黏土心墙土坝，运行时间较长后防渗体系局部失效，坝基渗流路径呈非均匀分布，局部渗漏逐渐加剧。加固范围涵盖坝基帷幕灌浆、防渗结构补强及坝体整形处理，基础处理成为控制重点，现场地层以粉质黏土夹砂层为主，透水夹层分布不连续，渗流条件复杂，处理目标在于形成连续防渗带并降低整体渗透能力，施工阶段受水位波动与作业面受限影响，基础与上部结构需交叉推进，对施工组织与过程控制提出更高要求。

### 3.2 质量管理与技术保障体系应用实践

坝基处理采用帷幕灌浆技术，施工过程中结合钻孔揭露资料对地层结构进行修正，并对孔距进行局部调整，使防渗帷幕连续性得到增强，注浆以压力—流量变化作为控制依据，浆液扩散状态依托实时记录进行判定，当吸浆量出现异常波动时，对应区段实施补孔加密，使填充范围趋于稳定。加固完成后开展渗透性能检测，结果表明坝基渗透系数控制在$5\times10^{-6}$ cm/s以内，相较原状条件明显收敛，渗流通道得到有效切断，该结果反映出，帷幕灌浆效果与参数控制精度及现场调整能力密切相关，单一工艺难以保证稳定效果。施工管理依托过程控制展开，灌浆记录、检测数据与施工日志形成统一资料链，质量判断不再依赖单点检测，而是结合注浆曲线与施工状态进行综合分析，局部异常能够在施工阶段完成修正，使质量问题不再向后续结构累积。

### 3.3 应用效果与经验启示

工程实施后，坝基渗透性能趋于稳定，防渗体系连续性得到增强，运行初期未出现异常渗流，为直观反映加固前后变化情况，对关键指标进行对比分析，如表2所示。

表2 工程加固前后关键指标对比

| 指标 | 加固前 | 加固后 | 变化特征 |
|---|---|---|---|
| 渗透系数 | $\geqslant 10^{-4}$ cm/s | $\leqslant 5\times10^{-6}$ cm/s | 明显收敛 |
| 渗流状态 | 局部集中 | 均匀分布 | 渗流路径改善 |
| 结构稳定性 | 存在沉降差异 | 基本稳定 | 稳定性增强 |

对比结果显示，坝基渗透系数由高渗状态收敛至设计控制范围内，渗流路径由局部集中转为均匀分布，结构稳定性同步改善，施工阶段注浆参数变化能够反映地层响应特征，使不同区段形成差异化处理条件，避免统一控制尺度下的效果波动，该运行方式在复杂地基条件下具备良好适应性，有助于维持加固效果的均匀性[5]。施工记录与监测数据持续参与现场判断时，质量状态更易保持稳定，该经验适用于渗流条件复杂及地层差异明显的除险加固工程。

## 4 结束语

在水利工程中，施工质量的稳定并非单项技术即可支撑，其形成过程更依赖参数约束、工序衔接与过程数据之间的协同作用，基础处理、防渗构造与结构施工在连续推进中逐步建立受控状态，偏差在动态校核中得到收敛，结构性能由离散波动转向整体稳定。工程实践表明，监测数据与施工记录一旦进入决策环节，现场调整具备针对性，质量风险不再后移累积，进而推动建造方式向精细控制与持续修正转变。

## 参考文献：

[1] 郑侃，李波．水利工程施工阶段的监理质量控制措施[J]．大众标准化，2025(24):16-18.
[2] 吴育松．水利水电工程金属结构安装施工质量控制对策探析[J]．现代工程科技，2025,04(24):189-192.
[3] 蔡清发．水利水电设备工程施工质量控制要点分析[J]．中国设备工程，2025(23):258-260.
[4] 刘跟路．水利工程施工中质量控制与安全管理研究[J]．水上安全，2025(21):176-178.
[5] 乌云格日勒．水利工程施工中的质量控制与安全管理研究[J]．内蒙古水利，2025(10):112-113.

# 建筑工程施工中混凝土裂缝修复技术要点探讨

丁　飞[1]，孙华磊[2*]，王　静[3]，刁权宗[4]

（1. 山东科建质量检测评价技术有限公司，山东 威海 264200；
2. 山东省城乡发展集团有限公司，山东 济南 250014；
3. 陕西青华建设工程有限公司，陕西 西安 710116；
4. 山东薛诚项目管理有限公司，山东 枣庄 277000）

**摘　要**　混凝土裂缝是建筑工程施工中普遍存在的质量通病，其形成与材料特性、施工工艺、环境因素等诸多因素密切相关。若修复不及时或修复方式不当，裂缝会持续侵蚀建筑结构的整体性与耐久性，进而引发严重的安全隐患。裂缝修复技术的适配性直接决定修复效果与结构长期稳定性，但当前的修复实践中仍存在类型识别不清、材料选择随意、工艺控制粗糙等问题，导致裂缝修复后反复出现，不能达到长效防控的目的。根据建筑工程施工实际情况，准确找到裂缝类型及成因，完善修复材料选取标准与施工工艺规范，建立健全修复过程管控与长期监测机制，同时借助专利导航梳理核心技术布局与风险防控要点。通过以上举措，可以促使裂缝修补和预防互相促进，从根源上解决结构安全问题，全面提升建筑工程施工质量及耐久性。

**关键词**　建筑工程；混凝土裂缝；修复技术；过程控制；专利导航

**中图分类号**：TU755.7　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.033

## 0　引言

混凝土是建筑工程主要的结构材料，由于自身具有脆性，施工过程中受到各种扰动的影响，很容易产生裂缝缺陷，高海拔、严寒等特殊环境更严重。裂缝的形成不是单一因素造成的，是由材料内部应力失衡、施工工艺缺陷、环境侵蚀这三个因素共同造成的，细微裂缝如果不及时处理，在温度变化、荷载的作用下会慢慢扩大，破坏混凝土结构的防渗性、承载力，严重时危及建筑的整体安全。目前，大部分裂缝修复技术只停留在表面处理上，没有对裂缝成因进行系统的分析，修复方案针对性差，修复后缺少长期监测工作，造成裂缝频繁复发，存在许多安全隐患，核心修复技术的专利布局分散、侵权风险和技术壁垒防控不力等问题也限制了该类技术的规范化应用。

## 1　建筑工程施工中混凝土裂缝修复技术要点

### 1.1　裂缝类型识别与成因分析

裂缝类型准确识别是科学选择修复技术的前提，不同种类的裂缝成因、发展走向、给结构带来的危害程度大相径庭，随意修补只会加重结构的损伤。裂缝识别要冲破传统外观观察的束缚，联系结构受力特性以及施工记录，把表面裂缝，深层裂缝，贯穿裂缝区分开来，表面裂缝大多由表面收缩引发，深度较浅并且不会影响结构承载能力，深层裂缝已经深入结构内部，会削弱结构的整体性，贯穿裂缝直接破坏结构的防渗性和稳定性，应当首先处理[1]。成因分析要从材料、施工、环境三个方面入手，材料方面多由于配合比不合理、骨料级配失衡造成收缩不均，施工方面多由于浇筑振捣不密实、养护不及时引起，环境方面多由于温度骤变、湿度波动造成温度应力和干缩应力，严寒地区尤为明显，新浇筑混凝土中水分快速结冰膨胀很容易造成裂缝。应力失衡是裂缝产生的主要原因，混凝土硬化时水化热和环境温度差造成内外应力不协调，应力大于材料抗拉强度时就会产生裂缝，如果不能及时控制，裂缝会不断扩展。

### 1.2　表面修复材料选择与施工工艺

表面修复适合于浅层裂缝，材料选择要兼顾黏结性、抗裂性、耐久性，应选用与混凝土基材相容性好、收缩率低的修复材料，摒弃单一材料的传统做法。材料选择要根据裂缝宽度、环境条件来定：窄缝用聚合物水泥浆，黏结强度大、施工方便；宽缝用柔性修补

作者简介：丁飞（1989-），男，专科，助理工程师，研究方向：建筑工程。
*通信作者：孙华磊（1981-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：结构优化设计。E-mail：158066775@qq.com

材料，能适应混凝土结构的微小变形，防止修复层与基材剥离。施工工艺要遵照规范的流程控制，应该先清除裂缝表面的松散杂物和浮灰，用水冲洗干净后晾干，防止杂质影响黏结效果[2]。修复材料涂抹应分层进行：第一层为底涂，保证与基材紧密结合；第二层及以上分层涂抹到与结构表面齐平，涂抹过程中要排除气泡，防止出现空鼓现象。施工完毕后应及时养护，严格控制环境温度和湿度，防止修复层收缩产生新的裂缝；寒冷地区要搭建保温暖棚，保持恒温养护，保证修复材料充分硬化。

### 1.3 压力注浆技术的应用参数与控制

压力注浆技术适合于深层裂缝和贯穿裂缝，其原理就是用高压把注浆材料注入裂缝，填满缝隙，并使注浆材料与混凝土基材一起成为一个整体，从而提高结构的整体性和防渗性。注浆材料应具有良好的流动性、黏结性，优先选用水泥基注浆材料，掺入少量外加剂以改善流动性，保证细小缝隙也能被充分填充；防水要求高的地方，应选用环氧类注浆材料来提高防渗效果[3]。应用参数控制是保证注浆效果的重要手段，注浆压力要根据裂缝深度和宽度来调节，压力过高容易造成混凝土结构二次损伤，压力过低不能保证注浆材料充分渗透。注浆过程要采用分段注浆的方式，从裂缝低端向高端逐步推进，每段注浆完成后保持一定的压力一段时间，保证材料充分扩散；注浆完成后对注浆孔进行封堵，防止材料流失。施工期间要不断检测注浆压力及注浆量的变动情况，若出现压力突然增大或者注浆量明显异常时，就要立刻停止注浆并查找堵塞的缘由，防止因注浆不够而影响修复成果。

### 1.4 结构加固与裂缝长期监测方法

裂缝修补完毕后，要依照结构受力情况采取相应的加固手段，避免裂缝再次扩大，加固方案要根据裂缝所在位置及结构承载要求来确定，常用办法有粘贴碳纤维布、增设钢筋等。粘贴碳纤维布加固时要保证布面和混凝土表面紧密贴合，均匀涂刷专用黏结剂并排除气泡，保证加固效果；增设钢筋时，在裂缝两侧钻孔植入钢筋并与原有结构钢筋连接，提高结构抗拉能力[4]。长期监测是保证修复效果持续有效的重要保证，监测系统要包含裂缝宽度、长度以及结构应力的变化等指标，依靠智能传感网络来完成数据的实时采集，创建起远程集中监控的形式，从而达成数据的实时传输和分析。监测过程中要设定预警阈值，裂缝宽度或者应力变化超过阈值的时候，就立刻发出预警，并且执行相应的处理办法，从而及时消除隐患。监测数据要定时汇总分析，预估裂缝发展走向，给后期维修和改建赋予支撑，防止裂缝再发生危及结构安全。

## 2 建筑工程施工中混凝土裂缝预防与过程控制策略

### 2.1 混凝土配合比优化与收缩调控

裂缝预防的关键是控制混凝土收缩，配合比优化是主要的技术手段，应该摒弃传统只重视强度而忽视收缩性能的设计误区，合理搭配胶凝材料、骨料和外加剂。优化时要合理控制胶凝材料用量来减少水化热，选用级配好的骨料提高混凝土密实度、降低收缩率，掺入适量的膨胀剂、缓凝剂来补偿收缩、延缓水化热释放速率。收缩控制要贯穿于材料制备的全过程，严格控制骨料含水率及搅拌时间，保证混凝土搅拌均匀，防止由于搅拌不均造成收缩失衡。搅拌完成后及时浇筑，防止混凝土长时间停放造成和易性变差，引发浇筑困难和收缩裂缝，同时控制混凝土出机温度，高温时要采取降温措施，减小温度应力造成的裂缝风险[5]。

### 2.2 温度应力控制与养护工艺改进

温度应力是导致混凝土裂缝的最主要原因，高海拔严寒地区温度变化幅度大、内外温差明显，应力失衡的风险就越大。温度应力控制要从浇筑温度和养护温度两个方面着手，浇筑前要控制混凝土原材料温度，防止骨料、水泥温度偏高；浇筑时要实时监测混凝土温度，防止浇筑温度过高或者过低。养护工艺要摒弃粗放式管理方式，根据不同的环境条件制定相应的养护方案，在高温时采取遮阳、洒水等降温措施来保持混凝土表面湿润，在严寒季节搭建全封闭保温暖棚，内部用蒸汽供暖保持恒温，在混凝土内部预埋通水管，循环通入温水以平衡内外温差，防止因热胀冷缩引起开裂。养护时间要符合规定要求，保证混凝土强度不断增大，减少收缩裂缝出现的可能性。

### 2.3 施工缝设置与浇筑顺序管理

施工缝设置不合理、浇筑顺序混乱都会造成混凝土结合不好、产生裂缝。施工缝应设在结构受力较小的地方，不得设在梁、柱等核心受力构件上，设置时应留设衔接钢筋，保证后浇混凝土与原结构紧密连接。浇筑顺序应符合分层浇筑、连续推进的要求，防止分层过厚造成振捣不密实，同时控制浇筑速度，保证下层混凝土初凝前完成上层浇筑，防止施工缝间隙过大。浇筑时需加强振捣控制，使用插入式振捣器保证振捣均匀，防止漏振和过振，漏振会造成混凝土密实度不够，过振会使骨料下沉、水泥浆上浮，都会引起收缩裂缝。振捣完成后应及时进行表面抹平，减少表面收缩裂缝的产生。

### 2.4 预应力施加时机与裂缝抑制效果

预应力技术是抑制混凝土裂缝的有效方法之一，施加时机对裂缝抑制效果起决定性作用。施加过早，混凝土强度不够容易造成结构损伤；施加过晚，不能有效地抵消收缩应力和荷载应力。施加时机要根据混凝土强度发展情况来确定，待混凝土强度达到设计强度规定比例后方可施加预应力，施加过程中要控制预应力值，防止超量施加造成结构开裂，施加完成后要及时锚固，保证预应力稳定有效。预应力施加之后可以有效地抵消混凝土收缩所引起的拉应力，进而抑制裂缝的产生和扩展，对于大跨度结构以及重载结构来说特别适合。施加过程中要实时监测混凝土应力的变化，根据监测数据动态调整预应力值，保证裂缝抑制的效果，做好预应力锚固部位的防护工作，防止锚固失效造成预应力损耗。

## 3 专利导航视角下混凝土裂缝修复核心技术布局及风险防控

### 3.1 核心专利识别与技术态势分析方法

核心专利识别要依靠专利导航工具，对混凝土裂缝修复相关领域的专利数据展开全面检索，主要集中在智能监测、新型修复材料、自动化施工这些核心技术方面，利用引文网络分析以及主路径分析来找出具有技术引领作用并且具备市场影响力的中心专利。技术态势分析要联系专利申请和授权情况，整理出核心技术的发展脉络，找出技术热点和空白之处，着重剖析智能监测系统，新型注浆材料这些领域的技术发展趋向。分析方法不能局限于传统的专利数量对比，而应该从专利的质量和技术关联性出发，挖掘出专利中的隐性技术关联，预测技术的发展方向，给相关企业的核心技术研发指明方向，防止由于盲目研发造成资源浪费。

### 3.2 企业专利布局密度与关键技术覆盖度

专利布局密度要根据企业的技术实力和市场需要来统筹考虑，以混凝土裂缝修复相关核心技术领域为重点，合理安排专利布局的数量和节奏，不能因为布局过于密集而造成资源浪费，也不能因为布局稀疏而造成技术壁垒缺失。关键技术覆盖度要求在核心技术方向上进行全方位的专利布局，主要针对智能监测、自动化注浆、材料配方改进等技术领域展开系统性的布局，创建起完备的专利保护体系。布局要遵照技术生命周期的规律，对于新兴技术领域先期开展布局工作，抢占技术制高点，对已有的成熟技术领域改进专利组合，巩固技术优势，而且还要按照区域产业布局来调整专利区域的分布情况，从而提高专利布局的针对性与有效性。

### 3.3 竞争对手专利壁垒与侵权风险图谱

竞争对手专利壁垒分析要依靠专利导航工具，对混凝土裂缝修复相关领域竞争对手的专利布局展开全面检索，整理出其专利保护范围和技术壁垒分布状况，找出竞争对手专利布局的重点领域和薄弱环节。侵权风险图谱的创建要联系企业自身的技术方案和对手的专利，找出可能的侵权风险点，评判风险的高低以及影响的范围，进而针对高风险部分制订相应的规避措施。风险图谱要以可视化的形式表现出来，清楚地显示出竞争对手的专利壁垒分布状况以及自身的潜在侵权风险点，使企业可以迅速判断出风险的态势，避免专利侵权纠纷的发生，并且给企业的技术研发、专利布局提供依据，从而突破竞争对手的专利壁垒。

## 4 结束语

建筑工程施工中混凝土裂缝修复技术的核心在于准确修复和长效防控，从根本上消除结构安全隐患，提高建筑工程质量和耐久性。精准识别裂缝类型及成因、改善修复材料的选择和施工工艺、建立结构加固及长期监测体系，这些方面是提高修复效果的重要途径，把过程控制同预防措施结合起来，可以从源头上减少裂缝出现的概率。从专利导航的角度来说，要依靠专利导航工具系统来识别核心专利和技术的发展趋势，不断改善专利布局，有效地规避侵权风险，促进技术研发和专利保护的协同发展。

## 参考文献：

[1] 腾翔.建筑工程大体积混凝土裂缝与温度控制技术[J].四川水泥,2026(03):110-111,114.

[2] 苏伟,张建美,杨家兴,等.建筑工程中混凝土裂缝控制与修复处理技术应用[J].中国建筑金属结构,2026,25(06):40-42.

[3] 曾利.建筑工程混凝土结构施工技术要点及裂缝控制措施研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2026(02):66-69.

[4] 亢哲,田少庚,王丽珍.建筑工程大体积混凝土裂缝控制技术分析[J].中国科技期刊数据库 工业B,2026(01):52-55.

[5] 余伟强.混凝土裂缝防治技术在建筑工程中的实践与解决方案[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2026(03):98-101.

# 高速公路桥梁桩基施工安全管理与废水处理技术

袁倩茹

（四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司，四川 成都 610200）

**摘 要** 高速公路桥梁桩基是桥梁结构的主要承重基础，其施工安全管控与现场废水处理直接关系到桥梁工程建设质量与沿线生态环境保护。本文结合高速公路桥梁桩基施工特点，系统分析桩基施工过程中的主要安全风险源，构建了覆盖施工全流程的安全管理体系与分级管控措施，同时针对桩基施工废水的污染特征，研究适配的废水处理技术与现场应用要点，旨在为高速公路桥梁桩基施工安全管控与生态环境保护提供技术参考。

**关键词** 高速公路；桥梁桩基；施工安全管理；废水处理技术

**中图分类号**：U445.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.034

## 0 引言

高速公路桥梁桩基施工多处于山区、河谷等复杂地形，具有施工场地受限、地质条件复杂、高空作业与深基坑作业多、交叉施工频繁的特点，安全风险防控难度显著高于常规土建工程。同时，桩基施工过程中产生的大量泥浆废水，若处置不当会造成周边水体、土壤污染，违背公路工程绿色施工的发展要求。当前部分项目存在安全管理体系不健全、废水处理工艺简单、环保措施落实不到位等问题。因此，本文系统研究高速公路桥梁桩基施工安全管理体系与废水处理关键技术，对保障桥梁工程施工安全、保护沿线生态环境具有重要的意义。

## 1 高速公路桥梁桩基施工风险识别

### 1.1 施工主要安全风险识别

结合高速公路桥梁桩基施工工序与作业特点，可将主要安全风险分为五大类，也是安全管理的重点管控对象。坍塌风险是桩基施工最主要的安全风险[1]，包括桩基成孔过程中的孔壁坍塌、基坑坍塌，多因地质条件复杂、泥浆护壁参数不当、空孔时间过长、周边荷载过大导致，易造成人员掩埋、设备损毁等群死群伤事故。起重伤害是桩基施工高频发的事故类型，钢筋笼吊装、钻机安拆过程中，因吊装设备故障、吊点设置不当、违章作业、信号指挥失误，易发生钢筋笼坠落、设备倾覆事故[2]。

施工现场临时用电线路多、作业环境潮湿，若线路敷设不规范、接地保护不到位、设备绝缘破损，易引发触电事故，雨季施工时该风险会显著提升。桩孔口临边防护不到位、作业人员违章操作，易造成人员高处坠落事故；钻孔作业、钢筋笼焊接过程中，工具、材料坠落易引发物体打击事故。钻机、电焊机、振捣器等设备操作过程中，违章作业、安全防护装置缺失，还易造成人员机械卷入、挤压等机械伤害。

### 1.2 施工主要环境影响识别

桩基施工对周边生态环境的影响，主要来自施工废水与固体废弃物，其中桩基施工废水是最主要的污染源。桩基施工废水主要来自钻孔泥浆循环系统、混凝土浇筑养护、场地冲洗等环节，其中钻孔泥浆废水占总废水量的80%以上。废水中含有大量悬浮物、泥沙，悬浮物浓度最高可达20 000 mg/L以上，同时含有一定量的石油类、COD污染物，pH值呈弱碱性。

若废水未经处理直接排放，会造成周边河道、水体悬浮物超标，导致水体浑浊、水生生物栖息地破坏；废水渗入土壤会造成土壤盐碱化、板结，影响土壤肥力与植被生长；若施工区域临近饮用水源保护区、生态敏感区，废水直排会威胁饮用水源安全，破坏区域生态平衡，甚至引发环保违法事件。

## 2 高速公路桥梁桩基施工安全管理体系与管控措施

### 2.1 施工安全管理体系构建

建立以项目经理为第一责任人的安全生产管理体系，形成“责任全覆盖、管理全流程、管控全要素”的安全管理框架，是防范安全事故的根本保障。项目需明确项目经理、技术负责人、专职安全员、施工班

作者简介：袁倩茹（1994-），女，本科，工程师，研究方向：公路工程安全管理。

组长、作业人员的安全生产职责，签订安全生产责任书，将安全责任落实到具体岗位与个人，做到“一岗双责、失职追责”，同时设置专职安全管理部门，按规定配齐注册安全工程师、专职安全员，负责施工现场日常安全管理工作[3]。

在此基础上建立健全安全生产教育培训、安全技术交底、危大工程专项管理、安全检查与隐患排查治理、安全生产奖惩、应急管理等系列制度，实现安全管理有章可循、有规可依，杜绝安全管理形式化。同时，严格按公路工程规定足额提取安全生产费用，专项用于安全防护设施、安全教育培训、应急物资配备、隐患整改等方面，建立安全生产费用使用台账，确保专款专用，严禁挪作他用。

### 2.2 施工前安全管控措施

施工前的前置管控是消除安全隐患、防范事故的第一道防线。开工前需针对桩基工程编制专项施工方案，对岩溶地区桩基施工、深水桩基施工、大直径超长桩基施工等危大工程，编制专项施工方案并组织专家论证，明确施工工艺、安全保障措施、应急处置方案，方案未经审批严禁开工。施工前需详细核查地质勘察资料，对复杂地质段进行补勘，明确各桩位的地层分布、不良地质情况，为施工方案优化提供依据。

开工前需对所有作业人员进行分级安全技术交底，交底内容涵盖施工工艺、安全风险、操作规程、应急处置措施，交底到每一位作业人员，签字确认后上岗。对进场作业人员开展三级安全教育培训，考核不合格人员严禁上岗作业，起重工、电工、焊工等特种作业人员必须 100% 持证上岗。钻机、吊车、电焊机等机械设备进场时，需进行验收与性能检测，核查设备合格证、检验报告，特种设备需经法定机构检验合格，验收合格后方可使用。同时完成施工现场临建设施布设，施工场地平整硬化，合理布置泥浆池、材料堆放区、作业区，设置封闭围挡；桩孔周边设置 1.2 m 高标准化临边防护栏杆与 18 cm 高踢脚板，闲置桩孔设置封闭盖板；作业区设置安全警示标识，临时用电严格执行“三级配电、二级保护”，落实一机一闸一漏一箱制度。

### 2.3 施工过程动态安全管控措施

施工过程的动态管控是安全管理的关键环节，需建立常态化隐患排查治理机制，实现风险的动态管控与闭环处置。项目需建立日常巡查、周检查、月综合检查的隐患排查机制，专职安全员每日对施工现场进行全覆盖巡查，重点排查钻孔作业、吊装作业、临时用电、临边防护等环节的安全隐患，对排查出的隐患建立台账，实行“定人、定时间、定措施”的闭环整改，整改完成后复核验收，未整改到位的严禁继续施工。

针对高危作业需落实专项管控要求，起重吊装作业设置警戒区域，安排持证专职信号司索工指挥，严禁超载吊装，6 级及以上大风天气严禁吊装作业；钻孔作业过程中，实时监测孔壁稳定情况，动态调整泥浆比重与黏度，防止塌孔，成孔后 48 h 内完成混凝土浇筑，空孔期间设置封闭防护；有限空间作业严格执行“先通风、再检测、后作业”的原则，作业前检测孔内有毒有害气体浓度，作业过程中持续通风，安排专人监护。同时需根据施工进度、地质条件变化、天气情况，动态调整施工方案与安全管控措施，雨季施工重点排查边坡稳定、排水系统，增设防汛设施，降低地下水位，防止塌孔；冬季施工做好防冻、防滑措施，及时清理作业面积冰积雪；夜间施工配备充足的照明设施，避免疲劳作业。

### 2.4 应急管理体系建设

完善的应急管理体系是应对突发事故、减少事故损失的关键保障，需覆盖应急预案、应急物资、应急演练、应急处置全流程。项目需结合桩基施工特点，编制坍塌、起重伤害、触电、高处坠落等生产安全事故专项应急预案，以及突发环境事件应急预案，明确应急组织机构、职责分工、处置程序、应急物资保障，应急预案报监理、建设单位备案。

施工现场需配备充足的应急物资，包括急救药品、担架、挖掘机、吊车、抽水泵、正压式呼吸器、消防器材、应急照明等，建立应急物资台账，定期检查补充，确保应急物资完好有效；同时组建专职应急救援队伍，定期开展应急培训，提升应急处置能力。开工后定期组织开展坍塌、触电、起重伤害等事故应急演练，检验应急预案的可行性与应急队伍的处置能力，针对演练暴露的问题优化应急预案；发生安全事故时，立即启动应急预案，组织人员疏散、抢险救援，同时按规定上报建设、监理单位与行业主管部门，严禁瞒报、迟报、谎报事故。

## 3 高速公路桥梁桩基施工废水处理技术

### 3.1 桩基施工废水水质特征与处理标准

高速公路桥梁桩基施工废水主要分为钻孔泥浆废水、混凝土养护废水、场地冲洗废水三类，核心污染特征为高悬浮物、低可生化性，废水中悬浮物（SS）浓度可达 20 000 mg/L 以上，同时含有一定量的石油类、COD、氨氮，pH 值在 8 ～ 11 之间，呈弱碱性，废水处理的关键难点为高浓度悬浮物的去除与泥浆固液分离[4]。

桩基施工废水处理需严格遵循《污水综合排放标准》（GB 8978-1996）与项目所在地的地方排放标准。若废水排入地表水体，需满足一级排放标准，即 SS ≤ 70 mg/L、

COD≤100 mg/L、石油类≤5 mg/L、pH值6～9；若废水回用于场地洒水、泥浆制备，需满足回用水水质要求，SS≤150 mg/L；若施工区域临近饮用水源保护区、生态红线区，需执行更严格的排放标准，严禁废水排入敏感水体。

### 3.2 桩基施工废水主要处理技术

结合桩基施工废水高悬浮物、低可生化性的特征，常用处理技术以物理化学法为主，主要为泥浆固液分离，现场需根据废水量、水质特征、场地条件、环保要求选用适配的处理工艺。

自然沉淀法是最基础的处理工艺，通过三级沉淀池实现废水的自然沉降分离，废水先进入一级沉淀池进行粗沉淀，去除大颗粒泥沙，再进入二级、三级沉淀池进行细沉淀，添加混凝剂可提升沉淀效果。该工艺操作简单、处理成本低，适用于施工场地充足、废水量小的项目，但处理效率低，对细颗粒悬浮物去除效果差，单独使用难以满足排放标准。

混凝沉淀法是桩基施工废水最常用的处理工艺，在沉淀池中投加聚合氯化铝（PAC）混凝剂、聚丙烯酰胺（PAM）絮凝剂，使废水中的细小悬浮颗粒脱稳、凝聚，形成大颗粒絮体后快速沉降，SS去除率可达95%以上，出水水质稳定，适配绝大多数高速公路桥梁桩基施工项目。在此基础上，可搭配机械脱水工艺，采用泥浆分离器、板框压滤机等设备，对废泥浆进行机械脱水，实现固液快速分离，滤液进入沉淀池进一步处理后回用，泥饼外运合规处置，该工艺处理效率高，占地面积小，SS去除率可达99%，适用于废水量大、高浓度泥浆废水、场地受限的大型桥梁桩基工程。对于线路长、工点分散、环保要求高的项目，可采用集成化的桩基废水一体化处理设备，集成了混凝、沉淀、过滤、污泥脱水等功能，废水进入设备后，经加药混凝、斜管沉淀、多介质过滤等工序处理后，可直接达标排放或回用，设备可移动、安装便捷，处理效率高。

### 3.3 废水处理现场应用措施

根据桩基施工规模、废水量设计适配的废水处理系统，沉淀池、泥浆池采用防渗混凝土浇筑，底部与侧壁做防水防渗处理，渗透系数不大于$10^{-7}$ cm/s，避免废水渗漏污染土壤与地下水；施工区域设置截水沟、排水沟，实现雨污分流，避免雨水进入废水处理系统增加处理负荷，同时设置应急事故池，容积不小于单日最大废水量，防止废水泄漏。

在废水处理过程中，需根据废水水质变化动态调整混凝剂、絮凝剂投加量，定期监测出水水质，确保出水指标满足排放标准或回用水要求；沉淀池内的底泥定期清理，采用板框压滤机脱水处理，泥饼含水率控制在60%以下，运至合规的弃土场处置，严禁随意丢弃。处理后的上清液优先回用于泥浆制备、场地洒水降尘、混凝土养护、车辆冲洗，最大限度提高废水回用率，减少新鲜水取用与废水外排，实现水资源的循环利用，尤其在缺水地区的高速公路项目，可大幅降低施工用水成本，实现绿色施工[5]。

### 3.4 桩基施工绿色环保优化措施

推广使用旋挖钻成孔工艺，替代传统冲击钻、回旋钻，旋挖钻施工泥浆用量仅为传统工艺的1/10，可大幅降低废泥浆产生量与废水处理负荷；采用可重复使用的钢护筒、封闭式泥浆循环系统，实现泥浆的循环利用，减少废泥浆产生量。桩基施工产生的废弃泥浆经脱水干化后，可用于路基回填、场地平整，经改性处理后可作为路基填料，实现固废的资源化利用，减少弃土占用土地，降低工程弃渣处置成本。施工区域临近生态敏感区、水源保护区时，采用全封闭泥浆循环系统，严禁在河道、滩涂区域设置泥浆池、沉淀池；施工过程中配备应急物资，制定突发环境事件应急预案，防止废水泄漏污染敏感水体，保护沿线生态环境。

## 4 结束语

本文结合高速公路桥梁桩基施工的工程特点，系统分析了施工过程中的主要安全风险与生态环境影响，构建了覆盖施工全流程的安全管理体系，提出了分等级的安全风险管控措施与应急管理方案，同时针对桩基施工废水的污染特征，对比分析了各类废水处理技术的适用场景与应用要点，明确了现场应用管控要求。结果表明，健全的安全管理体系与适配的废水处理技术，可有效防范桩基施工安全事故，降低施工对周边生态环境的影响。未来可进一步推动智能化安全监测技术与绿色废水处理工艺的融合应用，助力高速公路桥梁工程平安百年品质工程与绿色公路建设。

## 参考文献：

[1] 刘冠宁.公路桥梁施工安全控制技术与安全管理研究[J].交通世界,2023(08):234-236.
[2] 王博,荣海生,王杰.高速公路桥梁下穿高压线路施工安全关键技术研究[J].建筑安全,2024,39(02):15-18.
[3] 杨建.基于山区陡坡地段公路桥梁桩基施工的安全隐患控制[J].广东交通职业技术学院学报,2023,22(02):67-70.
[4] 吕国平.旋挖钻机在铁路桥梁桩基施工中的应用[J].中国设备工程,2024(07):89-91.
[5] 刘家民,伍潘,张原嘉,等.高速公路施工废水特征及处理对策[J].工程建设与设计,2023(12):78-81.

# 市政蒸汽管道安装全流程施工技术与质量管控策略

朱建峰

（江苏圣泰能网科技有限公司，江苏 南京 211100）

**摘 要** 市政蒸汽管道作为工业园区 / 城市集中供热系统的核心组成部分，承担着工业生产与居民生活用热输送的重要职能，其安装施工质量直接关系到供热系统的安全稳定运行、能源利用效率及城市公共安全。当前，市政蒸汽管道安装施工面临工况复杂、技术要求高、质量管控难度大等问题，易出现管道泄漏、防腐失效、保温效果不佳等质量隐患。本文结合市政蒸汽管道安装施工实际，系统梳理施工前期准备工作，详细阐述全流程施工技术要点，重点分析质量管控体系构建与全阶段管控策略，以期为市政蒸汽管道安装施工提供技术参考，进而推动市政供热工程高质量发展。

**关键词** 市政蒸汽管道安装；测量放线；管道基础；防腐保温

**中图分类号**：TU995.3 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.035

## 0 引言

随着我国城市化进程加快，工业园区及城市热能需求持续增长，市政蒸汽管网作为集中供热系统的关键输送载体，其施工管控与后期运行安全至关重要。目前，部分市政蒸汽管道安装施工过程中存在技术使用不当、质量管理松懈等情况，在运行时发生泄漏、腐蚀、保温层损坏等问题，不但影响供暖效果，而且有可能引起事故造成损失。因此，对市政蒸汽管道安装全过程进行施工技术和质量控制的研究，制定合理的有效的质量管理制度并实施全过程的质量管理，是保证市政蒸汽管道的安全可靠运行以及提高城市集中供热水平的重要举措。本文针对市政蒸汽管道安装施工技术和质量控制方法进行了详细的分析总结，以期为相关从业人员提供参考。

## 1 市政蒸汽管道安装施工前期准备

市政蒸汽管道安装施工前期准备主要包含技术、物资、现场、人员四大核心环节，是保障工程有序推进、严控施工质量的重要基础。在技术方面，需结合现场勘查核对图纸实况，及时处理设计偏差，编制专项施工方案并完成全员技术交底。在物资方面，严格核查管道、阀门等主材资质与质量，检修调试各类施工设备，规范存放辅助材料并做好防护。在现场方面，清理平整施工场地，布设安全警示设施，排查保护地下管线，合理地规划作业与临时功能区域。在人员方面，配齐各类持证岗位人员，开展岗前技术、质量与安全培训，明确岗位职责，健全协作机制，为标准化施工筑牢基础[1]。

## 2 市政蒸汽管道安装全流程施工技术要点

### 2.1 测量放线与沟槽开挖技术

测量放线是管道铺设的基础，在测量时要用到RDK、全站仪、水准仪等精密仪器，按照图纸上所标示出的管线中心线以及高程控制点精确地进行放样工作，在其间距内埋设里程桩、高程桩标记重要数据信息。沟槽开挖采取“分层开挖、分层支护”的方法，在土质及地下水位的基础上决定边坡和支撑形式防止塌方，在开挖的过程中及时校正高程和平整度，直到达到设计要求的高度之后再将沟底杂物清除并夯实平整，以满足后续的基础作业需求[2]。

### 2.2 管道基础施工技术

管道基础直接决定蒸汽管道的稳定性与使用寿命，地埋管道与架空管道需采用完全不同的基础做法，具体施工技术如下：

1. 地埋管道基础。地埋蒸汽管道在沟槽内施工，沟槽底部必须先铺设 C15 混凝土垫层，厚度按设计要求为 100 mm，振捣密实并养护达标。管道安装就位并检验合格后，先回填细砂至地埋管管顶以上 200 mm，

作者简介：朱建峰（1986-），男，本科，工程师，研究方向：机电设备安装。

确保管道保护层完整；砂层以上再按规范分层回填土方，逐层夯实至设计标高与密实度要求。

2. 架空管道基础。架空蒸汽管道依托园区综合管廊或独立土建支墩承载。土建支墩必须严格按照设计图纸施工：混凝土浇筑前，完成基坑尺寸复核、钢筋验收（按需送检）、模板验收等工序；浇筑过程同步留置混凝土试块；浇筑完成后按规范养护；支墩周边土方回填需分层夯实，密实度满足设计要求。

### 2.3 管道吊装与敷设技术

编制专项吊装方案；选择适合管材重量的吊装机具，在起吊前对管体进行外观检查，清理管内杂物；有专人指挥控制起吊速度及高度，使管道平稳地放置到基础上并调整至设计中心线和标高。铺设过程中注意相邻两管轴线偏移量以及标高差不超过规范要求，保证管道坡度达到设计规定值。

### 2.4 管道接口施工技术（核心环节）

接口施工影响管道密封性和防泄漏，一般市政蒸汽管道使用焊接接口。焊前对接口表面除锈、除油、去除氧化物并且打磨干净，根据管材选用对应焊材以及焊接工艺，严格控制电流、电压以及行走速度，保证焊缝满而不夹渣、无气孔、无裂纹。焊后需对所有焊缝进行无损探伤检测，合格后方可开展后续工序。架空蒸汽管道的焊口，焊接完成后一般不做额外防腐处理；地埋蒸汽管道则需区分芯管与外套管：芯管焊口焊接完成后不做防腐处理，而外套管焊口焊接完成后，必须严格按照设计及规范要求实施防腐施工，确保地埋段整体防腐体系的完整性与耐久性。

### 2.5 阀门与附件安装技术

阀门、补偿器、疏水阀等附属件对整个系统的安全性和调节性能有较大影响，在安装时要核对其型号规格以及检查其质量和密封性，阀门的安装应按照流体方向与管道轴线平行的原则进行紧固螺栓以确保良好的密封效果；补偿器安装要注意方向性，架空管道旋转补偿器，需确保补偿器旋转端口水平面与管道位移方向平行；地埋管采用的波纹管补偿器，需确保补偿器与区域段芯管的同轴度；疏水阀的安装要注意方向性问题，在安装完毕之后要及时调整使其达到最佳的工作状态。

### 2.6 管道防腐与保温施工技术

对于高温高湿环境下工作设备应做好防腐及保温措施，在防腐之前需将管道表面除尽锈迹以及油污等杂质，除锈到一定等级后再进行涂刷油漆，使防腐涂层达到要求厚度；保温采用耐高温材料进行缠绕或者涂抹的方式铺设，使得保温层紧贴无空隙，外面再加上一层防护壳体保护以防破坏造成损失，防止出现热桥现象以及热量散失问题。

### 2.7 沟槽回填技术

接口、防腐、保温等工序检验合格后进行回填，先清除沟槽内垃圾和积水。采用符合要求的原土或者级配砂石作为回填材料，不得混入碎石以及杂质类物质，分层回填并且每层厚度不超过规定值，使用小型压路机或者打夯机压实，回填至设计标高之后清理场地、整理作业面。

### 2.8 管道吹扫与压力试验技术

管道吹扫与压力试验是检验蒸汽管道安装质量、保障投运安全的关键工序，需严格遵循“先压力试验、后管道吹扫”的原则实施。

压力试验以洁净水为介质，试验前需完成支架安装与焊缝验收，对安全阀、仪表等进行隔离或拆除并记录，同步做好管道临时加固与无关系统隔离。试验时环境温度不宜低于 5 ℃，升压过程缓慢可控，达到试验压力后稳压 10 min，降至设计压力再停压 30 min，以压力稳定、无渗漏、无变形为合格；试验中严禁带压处理缺陷，整改后需重新试验，结束后及时拆除临时设施、合规排放介质。

管道吹扫采用蒸汽吹洗，吹洗前先缓慢暖管并恒温 1 h，同步疏水、检查管道热伸长及附件状态；吹洗时划定安全区域，蒸汽压力不超过操作压力的 75%，按 2 次～3 次、每次间隔 20 min ～ 30 min 的标准反复吹洗，直至排出蒸汽洁净无杂物，确保管道清洁度达标。

## 3 市政蒸汽管道安装质量管控策略

市政蒸汽管道安装质量管控需坚持“预防为主、过程把控、验收闭环”的原则，建立完善的质量管控体系，落实事前、事中、事后全阶段管控措施，确保施工质量符合设计要求与行业规范（见表 1）。

### 3.1 质量管控体系建立

建立“企业主体、监理监管、施工单位实施、全员参与”的质量管理机制，理顺各方质量责任关系，建立健全的质量管理制度、控制程序及奖惩办法。施工单位组建专门的质量管理小组，设专职质检人员开展施工全过程的质量检验工作；监理单位切实做好监督工作，在整个施工过程中进行全方位的监控，及时发现质量问题并要求施工单位立即改正；落实一线作业人员的质量责任，把质量管理的各项规定贯彻到每

表 1　市政蒸汽管道核心施工环节质量管控要点

| 施工环节 | 核心管控要点 | 验收标准 | 常见隐患及应对 |
| --- | --- | --- | --- |
| 管道接口焊接 | 清理接口杂物、选用匹配焊条，控制焊接参数，焊后无损检测 | 焊缝饱满均匀，无夹渣、气孔、裂纹，无损检测合格 | 焊缝缺陷；及时返修缺陷部位，重新检测至合格 |
| 防腐与保温 | 管道除锈达标，涂料涂刷均匀，保温层密实无空隙，设置保护层 | 除锈等级符合规范，涂层厚度达标，保温效果满足设计要求 | 防腐失效、保温层破损；补涂防腐涂料，修复保温层并加固保护层 |
| 管道吹扫与压力试验 | 先按规范完成分段压力试验，实时监测压力变化；试验合格后再分段吹扫至管道内无杂物 | 管道畅通无杂物，试验无泄漏、无变形，压力稳定达标 | 管道泄漏；排查接口密封处，整改后重新进行压力试验 |
| 沟槽回填 | 选用合格回填土，分层夯实，控制回填厚度与密实度 | 回填土无杂物，密实度达标，管道无沉降 | 管道沉降；返工回填，重新夯实至密实度要求 |

一个工作岗位上、每一道工序中去，营造出“人人重视质量、人人关注质量”的浓厚氛围。

### 3.2　事前质量控制（预防为主）

事前质量控制主要是为了防止出现质量问题，做好各项施工前工作。一是把好材料质量关，在材料进场时对其进行严格检查，杜绝不合格材料进入工地；二是做好技术交底及岗前培训，使工人了解掌握所做工程的技术要求以及操作规程；三是做好施工组织设计与专项施工方案，合理安排施工工艺流程，发现施工中可能存在的问题并及时采取防范措施；四是对使用的机械设备进行检测维修保养，使其处于良好状态，以防止由于机械故障而导致工程质量下降[3]。

### 3.3　事中质量管控（过程把控）

事中质量管理是质量管理的重点，在施工过程中要实时监控，及时发现问题并纠正。一是做好各个施工环节的质量检查工作，尤其要做好测量放线、管道接口、防腐保温、压力试验等重要部位的检查记录，一旦发现问题立即停工整改直至达到标准后再继续施工；二是严格遵守施工规程及质量要求，正确操作，杜绝违章作业；三是强化现场监理力度，监理人员必须在场跟踪监控，对工程质量进行动态检测，保证工程合格率；四是建立健全质量隐患排查制度，经常性地组织排查，把问题消灭在萌芽状态[4]。

### 3.4　事后质量管控（验收闭环）

事后质量控制主要是验收闭环，保证施工质量达到设计标准，做到质量管理闭环。一是依据验收标准对工程进行验收，分为分项工程验收、分部工程验收及单位工程验收，在此期间要检查施工单位的工程质量和技术资料等内容，验收合格之后出具验收报告；二是针对在验收时发现的问题及时落实整改责任以及整改时限，监督施工单位整改到位并再次核查直至整改完成，形成完整的验收闭环；三是健全工程技术文件，收集整理施工图纸、技术交底记录、材料检测报告、施工日志、验收报告等相关资料妥善保存，供以后管道维修保养参考[5]。

## 4　结束语

市政蒸汽管道安装施工工艺繁杂、质量标准高，施工质量直接影响城市集中供热系统安全平稳运行以及城市公共安全。本文基于工程实践，对施工前期准备工作进行总结归纳，从测量放线到管道基础再到接口施工、防腐保温等一系列工序的技术要点进行了详细介绍，并建立了一套较为完善的质量控制体系，提出了事前、事中、事后全方位的控制措施及常见问题处理方法，在实际施工过程中要严格按照规程规范和设计图纸的要求来组织施工，加强技术和质量管理，做好各工序间的配合衔接工作，发现质量问题要及时整改到位，保证市政蒸汽管道安装施工质量。未来要不断改进和完善施工技术与质量管理体系，提高工人技术水平，促进市政蒸汽管道安装工程建设优质高效地开展，为城市的集中供热事业保驾护航。

## 参考文献：

[1]　张道友，牛跃群. 蒸汽管道施工中现场焊接技术应用要点 [J].2025(11):121-124.

[2]　陈和烨. 翔安区集中供热管道工作机理与安装施工技术研究 [J]. 中国建筑金属结构 ,2025,24(20):73-75.

[3]　史振中 . 蒸汽管道泄漏识别技术研究 [J]. 上海节能 ,2025(02):242-247.

[4]　任泳舟 . 蒸汽管道支吊架检修技术对机组安全的影响 [J]. 电力系统装备 ,2025(09):93-95.

[5]　李伟，王立辉. 蒸汽发生器传热管胀接典型缺陷分析及控制 [J]. 化工设备与管道 ,2026,63(01):12-16.

# 公路桥梁病害预防性养护技术探析

刘 刚

（四川宁西高速公路建设开发有限公司，四川 西昌 615000）

**摘 要** 公路桥梁作为交通路网的关键枢纽，长期受车辆荷载、自然气候、地质条件等多重因素叠加影响，服役期间易出现桥面破损、结构裂缝、支座老化、墩台风化沉降等病害。本文从桥梁病害类型及成因、全周期施工与养护防控、信息化绿色低碳技术及新材料应用、标准化养护流程构建四个方面展开研究，梳理各类病害产生诱因，明确施工前期预防与后期病害处治管控要点，探究智能监测、绿色工艺及新型材料的实践路径，构建可复制推广的标准化养护体系，以期为公路桥梁病害防控、延缓结构老化、延长服役年限提供技术参考。

**关键词** 公路桥梁；桥梁病害；预防性养护；标准化流程

**中图分类号**：U418.4；U445.7 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.036

## 0 引言

公路桥梁是区域交通运输体系的重要组成部分，支撑着干线公路、城乡路网的互联互通。随着通车年限不断增加、交通流量持续攀升，外加雨雪冻融、温差变化、雨水冲刷等自然环境侵蚀，多数公路桥梁陆续出现不同程度的结构病害。传统养护模式普遍存在重抢修、轻预防的短板，往往在病害扩大、结构受损后才开展维修作业，既增加工程投入，也埋下道路安全隐患。因此，从病害成因、全周期防控、新技术新材料、标准化流程多维度系统开展探索，对优化桥梁运维模式、降低全生命周期投入、保障路网安全畅通具有现实意义。

## 1 公路桥梁常见病害类型及成因分析

### 1.1 公路桥梁常见病害类型

#### 1.1.1 桥面系常见病害

桥面系是直接承担车辆通行荷载的表层结构，常年暴露在外，受外界环境与行车作用最为直接，也是整座桥梁病害发生频次最高的部位。桥面铺装层易出现网状细碎裂纹、纵向及横向贯通裂缝，长期车辆碾压还会形成局部坑槽、车辙凹陷等病害，不仅影响行车平稳性，还会造成路面积水滞留[1]。桥梁伸缩缝长期受温度伸缩、车辆冲击作用，极易出现橡胶密封条老化硬化、止水带脱落破损，同时碎石泥沙容易嵌入缝隙造成堵塞变形，失去正常伸缩功能。桥面排水口若日常清理不及时，极易出现淤积堵塞，雨水无法快速排走便沿铺装缝隙向下渗透，持续侵蚀下层梁板结构与钢筋构件，加速内部材料老化锈蚀，诱发更多结构性隐患。

#### 1.1.2 上部梁板结构常见病害

上部梁板作为公路桥梁主要跨径承重构件，以钢筋混凝土箱梁、T梁、空心板梁应用最为广泛。在长期弯剪荷载作用与自然老化影响下，梁板表层容易出现风化起皮、混凝土剥落、蜂窝麻面等表观缺陷。随着服役年限增加，受荷载应力、温度变形影响，梁板会产生受力裂缝与非受力裂缝，裂缝逐步延伸扩张后，水汽极易渗入内部引发钢筋外露、氧化锈蚀[2]。同时多片梁板之间的铰接部位容易出现松动、错位与变形，破坏梁板协同受力状态，造成整体结构整体性下降，受力分配失衡，进一步加速结构病害的发展蔓延。

#### 1.1.3 下部墩及基础常见病害

下部墩台与基础是桥梁整体承重的根基，承受上部结构传递的恒荷载与活荷载，同时长期受到周边土体压力、地下水渗透、雨水冲刷及冻融破坏。墩台表面容易出现竖向拉伸裂缝、网状收缩裂缝，混凝土表层碳化剥落现象普遍，严重时会出现墩身轻微倾斜、位移变形。地基部分受雨季雨水冲刷、地下水位升降渗透影响，土体容易出现软化流失，进而引发基础不均匀沉降、局部土体掏空等隐患。这类病害隐蔽性较强，初期不易被发现，一旦持续发展，会直接破坏桥梁竖向受力体系，威胁整座桥梁的结构稳定。

#### 1.1.4 附属设施常见病害

桥梁附属设施包含支座、防撞护栏、桥头搭板、边坡防护等配套构件，虽不直接承担主要承重任务，但对结构缓冲、行车安全、整体防护起到关键作用。板式橡胶支座长期受压老化，易出现开裂、变形、硬化失效；钢制支座则容易出现锈蚀、卡滞，无法正常

作者简介：刘刚（1990-），男，本科，工程师，研究方向：高速公路投资建设管理。

适应桥梁伸缩位移。桥梁护栏、防撞设施受车辆剐蹭、自然风化影响，常出现破损变形、构件脱落等问题。桥头搭板因路基沉降容易产生错台、下沉，造成桥头跳车；桥梁两侧边坡防护结构也易出现开裂坍塌、植被脱落等情况[3]。此类病害虽不会直接造成主体结构损毁，但会降低行车舒适度，弱化安全防护能力，还容易诱发次生连锁病害。

### 1.2 桥梁病害主要成因分析

一是外部荷载与自然环境因素。长期交通重载、车辆反复冲击会加剧梁板结构疲劳损伤，诱发结构性裂缝；雨雪冻融、昼夜温差、紫外线照射、雨水下渗会破坏混凝土表层结构，加速材料老化碳化，造成钢筋锈蚀、铺装破损。二是施工建设工艺因素。桥梁施工阶段混凝土配比不合理、振捣不密实、养护不到位，易产生蜂窝麻面、内部空隙；钢筋保护层厚度不足、伸缩缝与支座安装精度偏差，会埋下后期病害隐患。三是材料自身性能因素。选用的沥青、橡胶支座、混凝土外加剂等材料耐候性、抗冻性不达标，长期服役后易出现老化、开裂、变形，丧失原有防护与承载功能。四是后期运维管理因素。日常巡检不到位、轻微隐患未及时处置，任由小病发展为大病；养护手段单一、处置工艺不规范，进一步加快桥梁病害发展速度。

## 2 公路桥梁全周期病害防控管控要点

### 2.1 施工建设阶段前期病害预防注意事项

施工阶段是从源头规避桥梁后期病害的关键环节，需严格把控原材料、施工工艺、构造安装全过程。第一，严控原材料进场质量，对桥面铺装沥青、钢筋、水泥、支座、伸缩缝等主材开展抽检复检，杜绝劣质、耐候性不达标材料投入使用，从材质根源降低老化破损概率。第二，规范混凝土浇筑与养护工艺，梁板、墩台浇筑做到分层振捣密实，严控水胶比与坍落度；完工后按规范开展保湿养护，避免因养护缺失产生收缩裂缝、表层剥落。第三，精准把控关键构造安装精度，严格控制伸缩缝间隙、板式橡胶支座平整度与受力均匀度，避免安装偏差造成后期卡滞、不均匀受力；做好桥面排水坡、泄水孔布设，保障雨水快速排导，减少积水下渗[4]。第四，强化隐蔽工程施工管控，对桩基、承台、梁板铰接部位等隐蔽工序实行全过程旁站验收，留存施工影像与检测资料，杜绝隐蔽工程施工遗留质量隐患。

### 2.2 运营后期养护与病害处治注意事项

桥梁投入运营后，以常态化养护为基础，针对已出现的轻微病害开展科学处治，遏制病害蔓延扩大。日常养护中定期清理桥面杂物、疏通排水口与伸缩缝缝隙，防止泥沙淤积造成积水滞留、伸缩缝功能失效；对支座、护栏、边坡防护等附属设施定期清洁防腐，延缓构件老化锈蚀。病害处治遵循“轻微病害及时预防性处置、中度病害专项加固修复、重度病害科学补强整治”原则。针对桥面细微裂缝及时灌缝密封，阻断雨水渗透；对梁板、墩台早期裂缝采用表面封闭、压力注浆工艺处置；对老化失效的支座、破损伸缩缝适时更换，避免病害牵连主体结构。同时严格把控养护施工工艺，杜绝粗放维修造成二次结构损伤。

## 3 信息化监控监测、绿色低碳技术及新型养护材料应用

### 3.1 信息化智能监控监测手段运用

传统桥梁运维长期依赖人工现场巡检，受人员视野、作业范围和巡查频次限制，不仅工作效率偏低，还存在高空梁底、墩柱内侧等诸多巡检盲区，仅能依靠肉眼发现表面显性病害，无法实时掌握桥梁内部应力、沉降等隐蔽结构变化。依托现代物联网技术搭建智能监测体系，在桥梁梁板、墩台基础、支座伸缩缝等关键点位，布设应力应变传感器、静态沉降仪、裂缝自动采集终端等感知设备，全天候不间断捕捉结构应力变化、墩身沉降位移、裂缝延展宽度等核心数据。所有监测数据实时接入桥梁智慧运维平台，借助大数据算法开展趋势分析，能够精准研判病害演化规律，对潜在结构隐患提前发出预警信号，彻底打破以往事后抢修的被动模式，转向提前预判、主动干预的养护模式。同时，搭配无人机航拍与三维激光扫描技术，对桥梁高空构件、桥下隐蔽区域进行全方位立体扫描，快速采集结构表观病害信息，精准识别细微裂缝、表层风化、构件破损等缺陷[5]。

### 3.2 绿色低碳预防性养护技术推广

践行交通工程绿色低碳发展理念，优先采用低扰动、微创化养护工艺。推广薄层微表处、稀浆封层等表层养护技术，无需大面积破除原有结构，减少建筑垃圾排放与交通阻断时间；应用废旧沥青再生、集料循环利用技术，将废旧路面材料加工后重新用于桥面修补、基层填筑，实现资源循环利用。选用水性防腐涂料、无机环保灌浆材料、无挥发密封胶等环保建材，替代传统高污染化工材料，降低养护施工对周边生态环境的影响，实现养护作业低碳环保。

### 3.3 新型养护材料在桥梁运维中的运用

传统桥梁养护材料普遍存在耐候性不足、温差适应性差、耐久年限短等短板，长期使用易出现开裂脱落、

防护失效等问题。随着路桥养护技术不断升级，各类高性能新型材料逐步替代传统建材，凭借更强的适配性、稳定性与防护性能，广泛应用于桥梁裂缝修补、结构加固、构件防护等各个环节，成为提升病害处置质量、延长桥梁服役周期的重要支撑。

在裂缝封闭与结构修复领域，改性沥青灌缝胶、高弹性密封材料应用效果突出，这类材料适配区域昼夜温差与冻融环境，低温环境不易脆裂，高温条件不会流淌变形，能够紧密贴合各类细微及贯通裂缝，有效阻断雨水、水汽向结构内部渗透。碳纤维布、高强聚合物砂浆等补强材料自重轻便，不会额外增加桥梁荷载，且抗拉强度、耐腐蚀性能优异，可精准用于梁板、墩台表层破损与结构性裂缝加固，修复后能有效约束裂缝延展，恢复结构整体受力性能。

在附属构件与结构表层防护方面，耐寒耐老化改性橡胶支座经过配方优化，抗压形变、适应伸缩能力更强，可有效规避传统支座硬化、开裂、卡滞等通病。配套防腐耐磨涂层、无机防护涂料可涂刷于墩台、梁板外露表面，形成致密防护膜，抵御紫外线风化、雨水碳化及沿海盐雾侵蚀。新型养护材料的规模化应用，大幅降低桥梁病害返修频次，改变以往反复修补的粗放养护模式，推动桥梁运维向长效化、耐久化方向发展。

## 4 建立公路桥梁可复制、可推广的标准化养护流程

### 4.1 建立标准化巡检排查流程

标准化巡检是桥梁养护管理的前置基础，需统一行业巡检作业规范，明确固定巡查频次、重点排查点位与病害记录标准。针对桥面、梁板、墩台、支座、伸缩缝等关键部位制定统一排查清单，细化表观病害、结构隐患、附属设施缺陷的识别标准。同步规范病害等级划分依据，按照影响程度完成分级界定，建立统一电子化运维台账，实现病害信息分类登记、实时更新。推行人工常规巡检与智能设备航拍、传感监测相结合的模式，统一信息填报格式与影像留存要求，打破不同区县、不同路段巡检标准不统一的问题，形成可直接参照执行的巡检范式，为后续养护方案制定提供精准、规范的基础数据支撑。

### 4.2 制定分级病害标准化处置流程

依据桥梁病害危害程度，划分轻微、中度、重度三个等级，配套建立分级标准化处置体系。针对表层细微裂缝、局部小范围破损等轻微病害，制定微创封补、表层防护的常规作业流程；对结构性裂缝、支座老化等中度病害，统一加固工艺、材料选型与施工步骤；涉及基础沉降、墩身位移等重度隐患，实行专项设计、专业施工、专项验收的管控模式。明确不同等级病害对应的施工工序、材料规格、质量验收指标，杜绝现场凭经验随意处置的粗放模式，做到同类病害工艺统一、标准统一、验收统一，大幅减少养护作业个体差异，形成可复制的病害处置作业模板。

### 4.3 搭建运维管理范式与动态优化推广机制

明确交通主管、养护单位、监理及检测机构各方管理职责，固化养护方案审批、现场组织施工、完工质量验收、全过程资料归档的闭环管理流程，形成固定可照搬的运维管理范式。将成熟的标准化养护流程在区域公路路网内全面普及推广，作为日常养护作业统一遵循依据。同时兼顾地域差异化特征，结合山区、平原、沿海、高寒地区气候环境与桥梁结构特点，持续微调流程细则，适配不同工况下的养护需求。通过常态化应用、阶段性复盘、动态修订完善，让标准化养护流程兼具通用性与适配性，真正实现可复制、可落地、可长期常态化运行。

## 5 结束语

公路桥梁病害防控是一项长期性、系统性工程，既要把控施工阶段源头质量，也要做好运营阶段常态化养护。本文从病害类型及成因、全周期施工预防与后期处治、信息化绿色低碳及新材料应用、标准化养护流程构建四个层面系统梳理公路桥梁各类病害特征与诱发因素，明确施工前期源头防控与运营后期病害养护的管控重点，阐述智能监测、绿色工艺、新型材料在桥梁养护中的应用价值，搭建了可复制、可推广的标准化预防性养护流程。未来，随着智能传感、大数据、新型建材技术的持续迭代，桥梁预防性养护将进一步向智能化预判、微创化施工、绿色化运维、标准化管理方向深化，通过多维度举措协同发力，持续提升公路桥梁结构安全性与服役耐久性，保障区域交通路网长期安全畅通。

## 参考文献

[1] 马建.国省干线公路桥梁病害养护及应对措施研究[J].汽车周刊,2026(06):58-60.
[2] 冯彦章.高速公路桥梁病害检测及策略探究[J].工程建设与设计,2026(06):80-82.
[3] 贾令.基于常规定期检查的公路桥梁病害成因分析及养护策略[J].运输经理世界,2026(08):133-135.
[4] 陈文渊,许一豪.公路桥梁质量检测中新型试验检测技术的应用[J].运输经理世界,2025(29):102-104.
[5] 莫小冠.混凝土公路桥梁病害诊断和处理策略[J].工程技术研究,2025,10(19):16-18.

# 温拌超薄磨耗层在公路养护中的应用

张如斌

（青海省茶卡公路段，青海 海西 817101）

**摘　要**　温拌超薄磨耗层把温拌沥青的低温施工优势与超薄罩面的表面修复功能结合起来，适合用于结构基本完好而抗滑、防水、平整等功能下降的沥青路面养护。本文从技术定位、材料结构和施工控制三个方面分析温拌超薄磨耗层的应用要点。结果表明，该技术的应用成效并非单纯由铺筑厚度决定，而是更多依赖于原路面病害精准诊断、混合料级配与油石比优化设计、层间黏结强度保障，以及现场施工温度窗口的严格管控。在科学规划与规范施工的前提下，温拌超薄磨耗层能够在较短交通封闭时间内恢复路表服务性能，并兼顾节能减排和养护精细化要求。

**关键词**　温拌技术；超薄磨耗层；公路养护；预防性养护；沥青路面

**中图分类号**：U418.6　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.037

## 0　引言

近年来，我国公路养护的重点逐渐从“建得多”转向“管得好、用得久”。不少沥青路面虽然结构尚未失稳，但抗滑不足、细小裂缝、轻度松散、雨天渗水等问题已开始影响行车安全和舒适性[1]。此时若大面积铣刨重铺，成本高、扰民大；若继续拖延，又可能使小病害演变成大修工程。温拌超薄磨耗层正适合这类“表面性能下降、结构基础尚好”的路段。它以较薄铺层恢复抗滑、防水和平整功能，又借助温拌技术降低施工温度、减少烟气和能耗，便于在交通压力较大的路段快速组织施工。对养护管理而言，这项技术的意义不只是铺一层新面层，更在于把握合适时机，用较小干预延缓路面衰退，体现预防性养护和精细化管理的价值。

## 1　温拌超薄磨耗层技术定位与养护适用性

### 1.1　技术内涵与应用定位

温拌超薄磨耗层并不是把普通沥青混合料简单摊薄后铺上去，而是一套围绕旧路面表面功能恢复形成的薄层养护办法。温拌技术主要解决低温条件下沥青流动性、裹附性和压实性的矛盾，使混合料在较低温度下仍能完成拌和、运输、摊铺和碾压；超薄磨耗层则更强调抗滑、防水、耐磨和改善行驶感受，不能把它当成补强基层或提高承载力的结构层。一般来说，铺筑厚度小于 25 mm 的沥青罩面可划入超薄罩面范围，但实际厚度还应根据旧路面状况、交通荷载、气候环境和材料类型综合确定。从养护定位看，它介于预防性养护和功能性修复之间，适合在路面结构尚未明显破坏、表面性能已经下降时及时介入。在工程应用中，真正重要的不是把磨耗层做得多薄、施工做得多快，而是这层薄薄的磨耗层能否同原路面牢固结合，能否经得起车辆反复碾压、雨水侵蚀和季节温差的考验。因此，应把它看成由旧路诊断、材料设计、黏层控制和现场施工共同支撑的系统工程。

### 1.2　适用路况与使用边界

温拌超薄磨耗层宜用在结构基础尚稳、病害主要停留在表面的沥青路面。例如：抗滑下降、构造深度不足、轻微裂缝、局部松散、雨天渗水或行车噪声增大等路段，尤其适合交通量大、封闭时间受限的高速公路、一级公路及普通干线公路。应用前不能只凭路面外观判断，还应查清裂缝、车辙、沉陷等病害的层位和成因。若基层已松散，存在严重车辙、翻浆、结构性裂缝或桥面脱空，直接加铺超薄层往往只是“盖住问题”，后期容易出现反射裂缝、推移和剥落。重载车多、长坡、急弯及高温多雨路段，还应重点考虑剪切稳定性和水损害风险。施工前应先完成裂缝封闭、局部铣刨回补、排水疏通和界面清理，再决定是否采用该技术[2]。

### 1.3　养护价值与应用思路

温拌超薄磨耗层的养护价值首先体现在对路面使用功能的及时修复。许多路段尚未出现结构性损坏，

作者简介：张如斌（1990-），男，本科，工程师，研究方向：道路工程。

却已在雨天抗滑、表面排水、行车噪声和舒适性上暴露问题。此时采用该技术，可借助优质集料形成新的纹理，改善轮胎与路面的接触条件；同时通过薄层封闭细小裂缝和孔隙，减少水分继续下渗。温拌施工降低了拌和与摊铺温度，现场烟气少、能耗低，对夜间施工和快速放行更为有利。它的效益不能只按铺筑单价衡量，还应把交通封闭时间、车辆延误和后续养护压力一并考虑。在实际应用中，应把检测结果、交通组成、气候特点和病害发展趋势结合起来，选择合适路段、合适时机实施，使有限的养护资金发挥更长久的作用，也让路面在小修中保持稳定服务，状态更可控。

## 2 温拌超薄磨耗层材料组成与结构功能

### 2.1 原材料选择

超薄磨耗层厚度小，直接承受车轮磨耗和气候作用，材料波动会比普通面层更快反映到路表质量上。结合料宜选用黏附性、弹性恢复和高温稳定性较好的改性沥青，可根据气候、交通量和施工温度选用SBS改性沥青、高黏改性沥青、橡胶改性沥青或温拌复合改性沥青。温拌剂不能只被理解为降温材料，还要考察其与沥青的相容性、对抗水损害的影响以及长期老化后的性能保持，必要时应通过对比试验确认降温后不牺牲关键路用指标。集料应坚硬、耐磨、洁净并具有良好棱角性，粗集料重点控制压碎值、磨耗值、针片状含量和黏附性，细集料与矿粉则要保证级配稳定、含泥量低、无结团。材料进场后应分批检测，料源变化时应重新校核关键指标，不能因为工程属于养护项目就降低把关标准。对于开级配或间断级配混合料，可结合需要掺加纤维、抗剥落剂或增强材料，以提高沥青膜稳定性和抗飞散能力。现场还应重视集料含水率和堆放管理，潮湿料、污染料一旦进入生产线，温拌体系的低温优势反而会被质量风险抵消。

### 2.2 配合比设计与性能目标

温拌超薄磨耗层可采用AC-8、AC-10、SMA-8、SMA-10、开级配或专用超薄磨耗层级配，不同类型应服务于不同养护目标。密级配混合料密水性较好，适合以防渗、平整和耐久为重点的路段；SMA类骨架密实结构抗磨耗和抗车辙能力较强，更适用于重载交通；开级配混合料有利于排水、降噪和保持宏观构造，但对结合料黏度、抗飞散性能和后期孔隙堵塞更敏感。配合比设计不宜停留在马歇尔指标合格层面，还应同步验证高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、构造深度、渗水系数、抗飞散性和可压实性。油石比的确定尤其要谨慎，偏低会导致裹附不足和早期松散，偏高又可能引起泛油和抗滑下降。试验室设计还应模拟温拌条件下的拌和、短期老化和压实过程，必要时通过车辙、冻融劈裂、肯塔堡飞散等试验进行复核[3]。由于铺层薄、降温快，室内确定的拌和温度、压实温度和开放交通温度必须与运输距离、摊铺速度、碾压能力相匹配，否则现场容易出现压实不足、离析、麻面和早期掉粒。

### 2.3 层间黏结与结构协同

层间黏结是超薄磨耗层能否耐久的关键。新铺层厚度有限，自身没有太多受力缓冲空间，只有与旧路面形成整体，才能抵抗车辆剪切和温度变化带来的破坏。施工中应根据旧路面类型、铣刨纹理、桥面或水泥混凝土板面状况，选择改性乳化沥青、高黏黏层油或同步喷洒黏结材料，并通过试验段确定合理洒布量。洒布不足会导致脱层、边部松散和推移，洒布过量则可能产生泛油、打滑或混合料稳定性下降。下承层处理同样不可省略，浮尘、泥土、油污、松散颗粒和潮湿表面都会削弱黏结效果；裂缝、坑槽、沉陷和严重车辙也应提前处治。桥面和隧道路段还应关注排水、防水和界面清洁，避免水分长期滞留在层间。对于旧路面微裂缝较多但结构尚稳的路段，可把裂缝封闭、局部找补和黏层设计作为同一工序考虑，而不应相互割裂。工程中有些早期失败，并不是混合料配方本身不好，而是旧路面清理、黏层破乳和局部补强没有做到位。超薄磨耗层要做到“薄而稳、薄而黏、薄而耐久”，首先要把新旧结构之间的接触面处理好，并把界面质量作为现场验收的重点之一。

## 3 温拌超薄磨耗层施工实施与质量控制

### 3.1 施工前调查与方案设计

施工前调查应比普通罩面更细，因为超薄磨耗层没有能力替旧路面承担结构问题。调查内容宜包括PCI、RQI、RDI、SRI等路况指标，构造深度、摩擦系数或摆值、渗水系数、车辙深度、裂缝类型、既有养护历史、交通量和重载比例。高速公路还应分方向、分车道评价，行车道、超车道和应急车道的病害往往并不相同。方案设计时要回答三个问题：旧路面是否适合采用该技术，采用何种材料体系和厚度，施工期间如何组织交通。抗滑衰减为主的路段，应把集料耐磨性和表面构造作为重点；渗水、松散为主的路段，应突出密水性、黏结层和压实控制；夜间低温、山区运输距离长或隧道群施工路段，则要重点核算温拌体系、保温措施和碾压时间。设计文件还应明确病害预处理范围、黏层材料、交通导改方式和应急预案，避免施工现场临时决定关键参数。若设计阶段把细节留空，现场再补救，

薄层施工的主动权就会明显下降。试验段不宜流于形式，应通过它确定摊铺厚度、机械组合、松铺系数、碾压遍数和开放交通条件[4]。只有把路况、材料、设备和交通组织放在同一张施工图里，养护效果才不会停留在试验段的好看数据上。

### 3.2 拌和运输与摊铺控制

拌和阶段应严格控制矿料加热温度、沥青温度、温拌剂掺量和拌和时间。温拌虽然允许降低施工温度，却不意味着可以放松温度管理；温度过高会加快沥青老化，温度过低又会影响裹附和压实。生产过程中应及时抽检级配、油石比和出料温度，发现冷料仓波动、筛网破损、矿粉供应异常或混合料花白、结团、离析时，应立即调整。运输车辆要清洁并覆盖保温，长距离运输和现场等待会显著增加温度损失，雨水与尘土也会破坏混合料质量。摊铺前应确认下承层干燥洁净、黏层已达到可摊铺状态，摊铺机熨平板应预热充分，速度保持连续均匀。接缝位置宜避开轮迹带，新旧幅搭接处应控制顺直和平顺，边缘不得出现虚铺和亏料。施工人员还应随时观察料温、厚度和表面纹理，发现异常尽量在摊铺和初压阶段解决。由于铺层很薄，厚度波动、人工找补、停机接缝和局部离析都会被放大到最终路表上，现场管理必须做到少停顿、少扰动、少返工。

### 3.3 碾压成型与开放交通

碾压应紧跟摊铺进行，这是温拌超薄磨耗层最紧的时间窗口。压路机组合、碾压遍数和作业距离应以试验段为依据，一般宜采用双钢轮压路机静压或低幅振压，避免强振造成骨料破碎、表面推移或泛浆。初压、复压和终压应衔接顺畅，边部、接缝、桥头和匝道曲线段要重点控制，发现轮迹、麻面或局部松散应在有效温度范围内处理。碾压作业还应避免急停、急转和在新铺层上长时间停留，防止形成难以修复的压痕。开放交通不能只按经验时间确定，而应结合路表温度、压实状态、黏层稳定情况和外观质量综合判断，必要时可采取分段放行。开放过早，车辆荷载可能造成推移和轮迹；开放过晚，又会削弱该技术快速养护的优势。对于半幅施工或分车道施工路段，交通恢复前还应检查标线临时衔接、锥桶撤除和接缝安全，防止养护质量问题转化为运行安全问题。夜间施工还应考虑露水、低温和交通恢复压力，雨天、路面潮湿或大风降温明显时不宜勉强作业。

### 3.4 质量检测与后评价

质量控制应贯穿材料进场、混合料生产、现场施工和运营初期。施工中应检测混合料温度、级配、油石比、铺筑厚度、平整度、压实度、构造深度、渗水系数和摩擦系数，同时检查黏层洒布均匀性、接缝顺直度、边部压实和外观缺陷。重要路段可增加取芯、层间剪切强度或拉拔强度检测，以判断新旧路面是否真正结合。铺筑后还应在开放交通初期、雨季后和运营一定周期内进行跟踪观测，重点看抗滑衰减、渗水变化、裂缝反射、掉粒和车辙发展。对检测结果不能只做合格与否的简单判断，还应分析指标变化原因，找出材料、施工或原路面条件中的薄弱环节。后评价的意义不只是给单个项目验收，更是把经验转化为下一次设计参数。若能把不同路段的材料类型、施工温度、交通荷载、气候条件和使用年限进行归档比较，就能逐步看清本地区最适合的技术组合，也能避免同一种方案在不同路况下机械套用。对于养护管理单位而言，温拌超薄磨耗层应纳入路况数据库和寿命预测体系，通过“检测—设计—施工—评价”的闭环，逐步形成适合本地区气候、交通和材料条件的应用模式[5]。

## 4 结束语

温拌超薄磨耗层适用于结构基础尚好、表面功能已经衰减的沥青路面，能够以较小厚度改善抗滑、防水、平整和行驶舒适性，并减少高温施工带来的能耗、烟气和交通干扰。它的成败不在“薄”本身，而在诊断是否准确、材料是否匹配、层间是否黏牢、温度窗口是否抓住。温拌超薄磨耗层技术应用中，应减少凭经验套方案的做法，加强试验段验证、运营期跟踪和区域参数积累，使其真正成为精细化、绿色化和全寿命周期养护中的稳定技术，为公路表面功能长期保持提供更可靠、更可持续的技术选择。

## 参考文献：

[1] 回毅.温拌超薄磨耗层技术在公路养护中的应用[J].华东公路,2023(01):19-21.
[2] 高坤.温拌超薄磨耗层施工技术在高速公路养护中的应用[J].科技资讯,2023,21(11):91-94.
[3] 梁雪峰.温拌超薄磨耗层施工技术在高速公路养护中的应用[J].交通世界,2024(11):111-113.
[4] 李运华,李珍,原华.基于Novachip超薄磨耗层的高速公路沥青路面养护技术应用研究[J].公路工程,2019,44(05):156-161.
[5] 陶伦.超薄沥青磨耗层技术在高速公路养护中的应用[J].运输经理世界,2024(35):139-141.

# 公路沥青路面预防性养护技术应用分析

扎西本

（青海省达日公路段，青海 果洛 814200）

**摘 要** 公路沥青路面在长期服役过程中，受交通荷载、温湿变化、紫外老化和水分侵入等因素影响，容易出现裂缝、松散、渗水、车辙和抗滑能力下降等早期病害。预防性养护的核心价值在于将路面病害处治节点前置，在路面结构尚处于完好状态时，通过裂缝封闭、封层、微表处及薄层罩面等针对性措施，有效延缓路用性能衰减进程。本文从适用边界界定、技术方案选型与施工过程管控三个维度展开系统分析，提出预防性养护应严格以检测数据为决策依据，以病害机理研判为实施前提，以全寿命周期效益最大化为核心目标，旨在对推动公路养护模式从“被动修补”向“主动保值”的根本性转变有所裨益。

**关键词** 公路工程；沥青路面；预防性养护；微表处；裂缝处治技术

**中图分类号**：U418.6 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.038

## 0 引言

沥青路面施工快、行车舒适，是公路建设中最常见的路面形式之一。但道路一旦投入使用，便长期承受车轮碾压、雨水冲刷、温度变化和日晒老化等作用，表层性能会在不知不觉中下降[1]。许多病害起初并不显眼，可能只是几条细裂缝、局部松散或抗滑能力减弱，若此时忽视，水分便会沿薄弱部位进入结构层，最终诱发坑槽、龟裂和沉陷。等到问题明显后再修，往往费用更高，封路时间更长，也难以彻底恢复原有性能。预防性养护的价值正在于把工作做在前面，在路面结构尚未受损时，通过封缝、封层、微表处等措施延缓老化、阻断水害、改善使用功能。它不是盲目地提前施工，而是依据检测结果和现场经验，抓住合适时机，对关键路段进行有针对性的维护，从而让有限养护资金发挥更长久的效益。

## 1 公路沥青路面预防性养护的技术基础

### 1.1 预防性养护的内涵与适用边界

预防性养护并不是某一种单独工艺，而是一种提前介入的养护理念。它适合用于路面结构仍较完整、基层承载力没有明显下降、病害主要停留在表面或浅层的路段。例如：轻微裂缝、表层老化、局部松散、渗水增大、抗滑性能减弱以及轻度车辙等，都可以通过较小规模的处治加以控制。若路面已经出现大面积沉陷、严重龟裂、基层松散或承载力不足，再采用雾封层、稀浆封层、微表处等措施，往往只能暂时改善外观，难以解决根本问题，甚至可能掩盖病害、延误大中修时机。因此，预防性养护必须明确边界，它重在“早防”和“保养”，而不是承担结构性修复任务。实际工作中，可将其理解为“治早、治小、治表、护基”：在病害刚出现时及时封水、防裂，避免小问题向深层扩展；通过恢复路表防水、抗滑和平整功能，延缓路面性能衰减。对于长大纵坡、桥隧连接段、排水不畅、重载车辆频繁通行等易损路段，更应加强巡查和优先安排处治[2]。这样才能把有限养护资金用在关键位置，真正发挥预防性养护的效益。

### 1.2 早期病害机理与处治思路

沥青路面的早期病害多半不是单一原因造成的。裂缝有时源于低温收缩，有时与车辆反复碾压、沥青老化或基层反射有关；表面松散、麻面，则常见于油膜变薄、集料黏附力减弱、施工压实不足的路段；车辙往往在夏季高温和重载交通共同作用下发展更快；抗滑能力下降，则与集料磨光、纹理被磨平以及路面污染有关。现场处治时，不能只看病害外形相似就套用同一种办法。细小裂缝应先清理、干燥，再及时灌缝封水，避免雨水顺裂隙进入基层；轻微老化、渗水增大的路面，可采用雾封层、还原剂封层或稀浆封层恢复表面封闭性；对结构尚好但抗滑不足的路段，可选用碎石封层、微表处或超薄磨耗层重建纹理；轻度车辙则宜结合精铣刨、车辙填补和薄层罩面处理。总之，

作者简介：扎西本（1989-），男，本科，工程师，研究方向：道路工程。

预防性养护不是看哪项技术更新，而是要把病因看准，把措施真正用在合适位置和时段上。

### 1.3 检测评价与养护决策基础

预防性养护能否取得实效，关键在于路况判断是否准确。现场不能只凭几处裂缝下结论，更不能按固定年限安排。养护前应结合路面损坏状况、平整度、车辙深度、抗滑性能、弯沉值、渗水系数等指标，对路面当前状态作出综合评价。其中，结构强度和水损害情况需要核查，因为一旦基层已经松散或承载力明显下降，再好的表面处治也只能维持短期效果。实际工作中，还应重视检测数据的连续变化。同一路段今天看起来问题不大，但如果近两年裂缝扩展快、雨后渗水明显、抗滑指标持续降低，就说明路面已进入加速衰减阶段，应及早列入养护计划。相反，对结构稳定、交通压力较小、性能变化平缓的路段，则不宜盲目施工，以免造成浪费。决策时可按交通量、路面结构、排水条件、气候环境和病害特征划分养护单元，把桥头、长坡、弯道、阴湿路段和重载集中路段作为重点观察对象。检测结果还应与历年维修记录、事故资料和现场巡查相互印证，不能让数据停留在报表里。只有把仪器检测、人工判断和使用实际结合起来，养护方案才会更贴近现场，预防性养护才能真正做到该早则早、该缓则缓、该治则治。

## 2 公路沥青路面主要预防性养护技术

### 2.1 裂缝处治技术

裂缝是沥青路面早期最容易被发现的病害，也是雨水进入面层、基层的重要通道。裂缝处治做得及时，后续坑槽、松散和水损害就能少发生一些。对于宽度较小、缝壁完整的纵横向裂缝，可直接清缝后采用热沥青、改性密封胶或专用灌缝料封闭；对于裂缝较宽、边缘破碎或伴有反射特征的部位，则应先开槽整形，清除泥砂和松散料，待缝内干燥后再灌入弹性较好、黏结力强的材料，必要时配合贴缝带或局部铣刨修补。施工中最怕图快省事，灰尘未清净、水分未烘干、材料温度不稳定，都会使灌缝层很快脱落或下陷。一般来说，多雨地区宜把裂缝封闭安排在雨季前，先把水挡住；寒冷地区则要重视材料的低温延展性，避免冬季收缩后再次开裂。灌缝完成后还要观察表面是否平顺，材料不宜明显高出路面，以免车辆碾压后形成凸带或污染轮胎。若一个路段连续裂缝密集出现，就不能只按普通表面裂缝处理，还应检查基层、排水和旧缝反射情况，找准原因后再确定后续方案。这样处理，才算把小裂缝真正管住、管稳、管久。

### 2.2 雾封层、稀浆封层与微表处技术

雾封层适合用于路面老化刚刚显露、病害还不严重的阶段。例如：表面颜色发灰、细料轻微松动、孔隙变大，但平整度和结构强度基本正常时，可通过喷洒乳化沥青或再生类材料，使其渗入表层细微空隙，补充老化后不足的沥青膜，从而起到封水、抑制松散和延缓老化的作用。这类工艺施工快、干扰小，但并非用量越多越好，若喷洒过厚，容易造成表面发黏、泛油，甚至削弱抗滑性能，所以现场必须结合原路面吸收能力和气温条件控制洒布量。稀浆封层主要由乳化沥青、集料、矿粉、水和外加剂组成，适用于轻微麻面、细小裂缝、表层松散及水密性不足的路段。它的作用重点在于重新封闭表面，而不是提高承载力，因此施工前应先处理明显裂缝、坑槽和局部松散，避免新封层很快被旧病害带坏。微表处可看作稀浆封层的强化形式，多采用聚合物改性乳化沥青，对集料级配、洁净度、拌和稳定性和摊铺均匀性要求更高，成型后耐磨性、抗水损害和抗车辙能力也更好。对于高速公路、重载交通路段或轻度车辙位置，可采用微表处罩面或分层填补方式改善路况[3]。在实际施工中，应先铺试验段，根据天气、湿度、路面粗糙程度和开放交通时间调整配合比。若摊铺中出现拖痕、离析、厚薄不匀，或未成型便放行车辆，都会影响后期效果。

### 2.3 碎石封层、纤维封层与薄层罩面技术

碎石封层适合用在结构稳定、表面出现老化、渗水或抗滑不足的路段。其施工流程为先均匀洒布沥青结合料，再撒布洁净度高、规格一致的碎石骨料，经碾压后形成一层粗糙的保护层，既能阻水，也能增加轮胎与路面的摩擦。但这项工艺看似简单，现场控制却很讲究。结合料洒少了，碎石裹附不足，车辆一跑就容易松动飞散；洒多了，又会泛油、打滑，给行车安全留下隐患。因此，施工前应结合旧路表面纹理、气温、交通量和材料性能确定用量，施工中还要及时检查撒布均匀性和碾压效果。纤维封层是在封层中加入纤维材料，使沥青结合料形成更稳定的网状支撑，对细裂缝较多、温差变化明显或重载车辆反复作用的路段更有优势。薄层罩面和超薄磨耗层则更偏重于恢复行车舒适性和平整度，适用于承载力尚可但表面功能下降的旧路。施工前不能省略病害预处理，裂缝、坑槽、松散和局部沉陷都应先修好，黏层油也要洒布到位，否则新铺层难以与旧路牢固结合。对交通繁忙路段，还应同步统筹排水优化、标线恢复、噪声控制和交通导改四项工作，既要抢抓施工工期，也要严守

工程质量，同时从源头减少日后反复维修带来的各类隐患。

## 3 公路沥青路面预防性养护的实施管理

### 3.1 养护时机与方案比选

预防性养护真正难把握的地方，往往不在工艺本身，而在于介入的时机。做得太早，路面还没有明显衰减，投入容易显得仓促；拖得太久，裂缝进水、基层受损，原本简单的处治就会变成被动修补。因此，养护时机应放在路面结构尚稳定、表面病害刚开始集中、平整度和抗滑性能出现下降趋势的时候。方案选择也要从现场出发，不能只按造价高低排队。轻微老化、渗水不重的路段，可优先考虑雾封层、灌缝等简便措施；松散、麻面和抗滑不足较明显时，可选稀浆封层、微表处或碎石封层；交通量大、重载多且功能衰减较快的干线公路，则宜采用耐磨、抗车辙能力更好的微表处或薄层罩面。多雨、背阴、排水不畅路段，还应把清沟、疏水和裂缝封闭与表面处治一并安排。实际比选时，不能只算当年工程费，还要把封闭交通造成的影响、预期延寿年限、后续维修频率和行车安全改善纳入同一张综合账里。一次合适的预防性养护，未必最省钱，却应当最合适，它能让小病害止于表层，把大修时间向后推，也让有限资金用在路面最需要照看的阶段[4]。同时，也要兼顾沿线居民出行和施工季节安排。

### 3.2 施工过程质量控制

预防性养护多是浅层处治，施工前应先把路面清扫干净，油污、浮尘、松散颗粒和积水都不能留下。裂缝、坑槽、局部松散、沉陷等病害也要提前处理，不能指望一道封层把问题盖住。材料进场后，应重点检查乳化沥青、改性沥青、集料、矿粉、纤维和外加剂的质量，尤其要看集料是否洁净、级配是否稳定、针片状含量和磨耗指标是否符合要求。在施工过程中，洒布量、摊铺速度、厚度、压实遍数、成型时间和开放交通时间都要有人盯控，不能只凭经验大致掌握。稀浆封层、微表处等工艺对天气很敏感，遇到降雨、低温或路面潮湿时，应及时调整作业安排。交通组织也不能马虎，标志、限速、导改和封闭范围设置到位，既保护施工质量，也保障现场人员和过往车辆安全。

### 3.3 后评估与档案管理

预防性养护不能只看完工时路面是否平整、颜色是否一致，还要看它能不能经得起后续交通和天气的检验。因此，工程结束后应及时开展效果复查，对封层完整性、裂缝复发、抗滑性能、渗水情况和平整度变化进行记录，并在雨季、冬季或交通高峰后安排跟踪观察。许多问题在验收当天并不明显，经过一段时间行车碾压后，材料脱落、边缘起皮、车辙回弹等现象才会显现出来，这些情况都应纳入评价范围。后评估的意义，不只是给某一次施工下结论，更在于为下一轮养护提供依据。比如同一类路段反复出现早期松散，就应回头检查集料、乳化沥青、配合比和开放交通时间；某些阴湿路段封层效果不好，也要考虑排水设施是否同步处理。档案管理同样不能流于形式，应把路段位置、病害照片、检测指标、处治工艺、材料来源、施工天气、质量抽检和后期变化完整保存下来。基层养护人员最了解道路的脾气，哪些地方年年开裂、哪些路段雨后易坏，都应在档案中留下清楚记录。这样形成的资料，比单纯验收表更有实际价值，也更贴近一线养护需要。只有把现场经验和检测数据积累起来，预防性养护才能从一次性工程变成持续改进的管理工作[5]。

## 4 结束语

公路沥青路面预防性养护的核心并非追求路面外观的全新状态，而是在病害初现阶段就及时管控风险。裂缝封闭、雾封层、稀浆封层、微表处、碎石封层、纤维封层、薄层罩面等技术，各有其适用场景，也各有应用边界。在实际养护作业中，应减少经验化决策，强化检测数据支撑与现场工况研判，统筹兼顾路况现状、交通流量、排水条件、区域气候与资金效益多重维度。唯有精细化管控施工全过程、跟进后期养护效果、充分活用养护档案，早期病害处治才能真正延长路面使用寿命，降低反复修补频次，使公路长期维持安全、平稳、舒适的服务水平，也让有限的养护资金投向关键环节，获得更多综合效益。

## 参考文献：

[1] 孙明，杨雷．公路沥青路面预防性养护技术分析[J]．中国科技投资，2024(06):124-126.
[2] 韩博，迟凤霞，王洋洋，等．浙江省普通干线公路预防性养护技术应用效果分析与技术比选[J]．公路，2021,66(04):327-333.
[3] 潘娟峰．公路养护中的沥青路面预防性养护技术应用[J]．运输经理世界，2024(12):142-144.
[4] 赵小勇．沥青路面预防性养护技术在公路养护中的应用[J]．科技资讯，2022,20(14):85-87.
[5] 张娇．探究公路养护中的沥青路面预防性养护技术应用[J]．华东公路，2022(04):69-70.

# 微表处技术在公路预防性养护施工中的应用

王双得

（青海省班玛公路段，青海 果洛 814300）

**摘 要** 微表处技术以聚合物改性乳化沥青、级配集料、填料、水和外加剂为主要材料，可在旧沥青路面表层形成薄层功能罩面。微表处技术施工快、干扰小，能改善抗滑、防水和耐磨性能，是公路预防性养护中的常用工艺。本文从微表处技术的功能定位、适用场景边界、施工过程控制及质量风险防控四个维度展开分析，明确指出该技术的应用成效并非单一因素决定，而是高度依赖前期路况精准诊断、病害预处理彻底性、混合料配合比优化设计，以及开放交通时机的科学管控。结果表明，唯有将微表处技术纳入“现状调查—方案设计—规范施工—跟踪评价”的全流程闭环管理体系，才能最大化发挥其延缓路面性能衰减、降低全寿命周期养护成本、保障行车安全的综合效益。

**关键词** 微表处技术；公路工程；预防性养护；沥青路面；病害预处治

**中图分类号**：U418.6 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.039

## 0 引言

公路通车运营后，路面性能并非突发式骤降，而是在反复行车荷载、雨水入渗、温差交变与材料自然老化的长期耦合作用下，逐步显现各类早期损伤。细微裂缝、表面麻面、集料松散、路面泛油与抗滑性能衰减等初期病害，表观危害看似有限，却往往是后续结构性病害快速扩展的起始诱因。若养护跟不上，雨水会沿缝隙进入结构层，表层缺陷也可能发展为坑槽、网裂和深层破坏，届时再大修，不仅费用高，交通组织更被动[1]。因此，预防性养护的价值在于趁路面尚有较好承载能力时及时干预。微表处属于冷拌冷铺薄层处治技术，施工快、封闭时间短，能恢复抗滑、防水和耐磨性能，适合结构完好但表面功能下降的沥青路面。需要注意的是，微表处不是简单“盖一层”，其效果取决于选路是否准确、病害是否先治、配合比是否合理以及现场控制是否到位。基于此，本文结合预防性养护实践，对微表处技术的应用要点进行分析，以期为相关工程实践提供参考。

## 1 微表处技术的养护定位与适用条件

### 1.1 技术构成与成型特点

微表处技术是在稀浆封层基础上发展起来的薄层养护工艺，主要材料为聚合物改性乳化沥青、级配集料、矿粉、水和少量外加剂。施工时，材料由专用摊铺车同步计量、连续拌和，并随拌随铺，不需加热，因而作业速度快，对通行和周边环境影响较小。其成型过程并非简单覆盖旧路面，而是乳化沥青在集料表面完成裹覆后，随着破乳、脱水逐步形成黏结强度，使集料与原路面结合为一层连续的功能罩面。这层薄层能够封闭细小孔隙，改善表面纹理，提高抗滑、耐磨和防水能力。微表处虽厚度不大，却很考验材料质量和现场控制。集料应洁净、坚硬、有棱角，级配要稳定；乳化沥青既要有良好黏附性，也要有合适的破乳速度。矿粉和外加剂用量不多，却会影响稠度、可施工时间和早期成型[2]。在实际应用中，它更适合处治麻面、轻微松散、表层老化、渗水和抗滑不足等早期病害。若路面已出现严重网裂、沉陷或基层损坏，只靠这一薄层很难解决问题，应先采取结构性修复措施才稳妥。

### 1.2 预防性养护中的功能定位

预防性养护的关键是在路面还没有“伤筋动骨”时把隐患拦住。微表处正适合用于这一时段：旧路结构仍有足够承载力，但面层已出现老化、轻微松散、渗水、麻面或抗滑不足等迹象。通过铺筑一层薄而连续的功能层，它可以封闭细小孔隙，阻断雨水继续下渗，重建表面纹理，提高车辆行驶的摩擦安全性。对雨季易积水、行车磨耗明显或表层材料开始松动的路段，及时采用微表处，往往能把小病害控制在初期，避免其向坑槽、网裂和结构损坏发展。当然，微表处不是万能修补手段，更不是把问题暂时遮住。若基层已松散、承载能力下降，薄层罩面难以长期奏效。因此，应用

作者简介：王双得（1989-），男，本科，工程师，研究方向：道路工程。

时应以路况检测和现场判断为基础，把它作为主动养护措施纳入年度计划，选准时机、选准路段，才能体现延寿、降本和保安全的价值，也能让后续养护安排更从容、更有章法，减少被动性。

### 1.3 适用边界与选路原则

微表处适合用在路面结构尚稳定、病害主要集中在表层的路段。例如：轻微裂缝、麻面、浅层松散、抗滑不足以及不太严重的车辙，都可以考虑采用这一工艺。选路时不能只看路面“旧不旧”，还要结合检测结果和现场踏勘，明确承载能力、裂缝密度、车辙深度、渗水情况和排水条件。对一般表面病害，可直接实施单层微表处；对轻度车辙，应先做车辙填补，再进行罩面；对局部坑槽、沉陷和裂缝集中的位置，则要先修补，待路面状态稳定后再施工。若基层已经松散，或出现严重网裂、深层水损害和大面积沉陷，微表处就不宜作为主要处治措施，应采用铣刨重铺、结构补强等方法。长坡、急弯、重载车多和潮湿阴冷路段，对黏结性、耐磨性和抗剪能力要求更高，必要时应采用增强型方案。选路准，微表处才能发挥作用；选路不当，再好的材料也难以保证耐久。

## 2 微表处技术在预防性养护施工中的关键应用

### 2.1 路况调查与方案设计

微表处能否适用，核心前提是原路面的基础工况是否满足技术要求。因此，施工前必须把原路面调查工作做深做细，绝不能仅凭远观路面色泽、近看表面破损就仓促判定。现场需严格按照现行养护技术规范，重点核查裂缝的宽度与走向、车辙深度、麻面松散范围、路面平整度、抗滑性能、渗水系数及排水通畅性，同时结合路段交通量、重载车占比和历年养护历史记录，完成全维度综合研判，最终确定微表处的适配性。对高速公路和一级公路，还应利用检测车数据进行分段分析，避免把不同病害混在一起处理。调查时更要追问病害成因。有些裂缝只是表层老化引起，适合通过微表处封闭和改善；有些裂缝却与基层疲劳、排水不良有关，若不先处理结构问题，铺上薄层也难以耐久。方案设计应按路段特点区别安排：抗滑不足的路段，应优先控制集料质量和表面纹理；渗水明显的路段，应把裂缝处治和封水效果放在前面；车辙路段则要明确填补方式、摊铺厚度和施工顺序[3]。桥头、隧道口、长下坡等位置，还应适当提高黏结、耐磨和抗滑要求，使设计方案真正贴合现场。

### 2.2 病害预处治与作业准备

病害预处治是微表处施工前最容易被忽视、却最影响成败的环节。施工前应沿线细查裂缝、坑槽、松散、油污和旧标线残留情况，做到先治病害、再铺罩面。裂缝处理要结合宽度和活动程度选择灌缝、贴缝或开槽灌缝，不能简单一灌了事；坑槽、沉陷和松散部位应切边成形，清除松动材料后分层填补压实，保证旧路面具备可靠承托条件。对浮尘、泥土、油渍和 松散颗粒，应采用清扫、吹扫或冲洗等方式彻底处理，冲洗后还要留足干燥时间，避免水分影响乳化沥青黏结。作业准备也要细致，检查井、伸缩缝、排水口、路缘石和标线边缘应提前遮挡或标识，减少污染和错缝。交通量大的路段可分幅、分车道或夜间施工，但应考虑夜间低温高湿对破乳和养生的不利影响。正式施工前宜设置试验段，检验拌和状态、摊铺厚度、接缝质量、破乳时间和开放交通条件，发现材料批次、天气或路面吸附性变化时，应及时调整施工参数。

### 2.3 材料选择与配合比控制

微表处对材料十分挑剔。改性乳化沥青应破乳稳定、黏附性好，并能适应当地气候和交通条件；重载多、夏季温度高的路段，宜选用性能更稳定的聚合物改性乳化沥青。集料则要坚硬、洁净、有棱角，不能夹泥、带粉，压碎值、磨耗值和磨光值都应满足要求。尤其是抗滑要求较高的路段，集料后期抗磨光能力不能忽视。级配控制是配合比设计的关键。级配过粗，表面容易露白、离析，封水效果也会打折；级配过细，摊铺后又可能发黏、泛油，影响抗滑。填料、水和外加剂的用量也要结合天气、集料含水率和现场摊铺状态灵活调整，使混合料既能顺利摊开，又不流淌、不结团、不提前破乳。现场常会遇到风大、日照强或原路面吸水快等情况，这些细节也会改变混合料的工作时间。配合比不能只靠经验拍定，应通过拌和、稠度、黏聚力、湿轮磨耗和负荷轮黏砂等试验综合确定。正式施工后，还要持续核查设备计量和材料消耗，发现油量、水量或集料级配波动，应及时修正，避免小偏差影响整段成型质量。

### 2.4 摊铺施工与开放交通控制

微表处摊铺不是把混合料摊平即可，现场节奏和细部处理往往决定最终效果。施工前应先完成封闭交通、清扫路面和边线控制，并重新核对摊铺车计量系统，确保乳化沥青、集料、矿粉、水和外加剂供给稳定。开始摊铺后，拌和箱内材料应保持均匀，摊铺槽料位也要相对平稳，不能一会儿满料、一会儿亏料。操作人员要根据原路面干湿程度、气温、湿度和破乳速度调整行进速度。走得太快，容易漏铺、拉毛和厚度不足；走得太慢，混合料可能在槽内提前破乳，反而影响平顺。桥头、弯道、长坡及局部不平处，应适当放慢观察，

及时调节刮板和人工补边。纵缝宜避开轮迹带，搭接以不露底、不起棱为准；横缝可用垫纸、切齐和端部整平等办法处理，使前后段过渡自然。井盖、伸缩缝、排水口和路缘石附近要提前遮挡，摊铺后随即清理余料，避免形成污染和硬边。开放交通更不能凭经验草率决定。微表处早期强度要经过破乳、脱水和黏聚力增长，遇到低温、高湿、夜间或雨后施工，养生时间应适当延长[4]。只有确认表面稳定、车轮不带料、压过后不留明显痕迹，再结合试验段情况放行，才能减少早期损伤。当天还应安排专人记录温湿度、用料和放行时间等，便于后续检查，也为质量追溯留存必要依据。

## 3 微表处技术在公路预防性养护施工中的应用效果、质量风险与优化方向

### 3.1 应用效果分析

微表处技术用在适宜路段后，效果通常先体现在路表状态的改善上。摊铺成型后，原有麻面、轻微松散和表层老化现象会得到一定修复，路面纹理更加均匀，行车摩擦条件有所提高，雨天行驶安全性也随之增强。同时，微表处技术能够封闭部分细小孔隙和浅表缺陷，减少雨水继续向下渗入，对延缓水损害发展有积极作用。对于早期性能下降但结构尚好的路段，这种“及时补护”比等到病害扩大后再大修更经济，也更利于保持道路通行能力。需要注意的是，微表处技术的作用重点并不是彻底消除所有病害，而是延缓路面性能衰减。施工完成后，不能只看表面是否平整、美观，还应结合抗滑、渗水、裂缝反射、局部剥落和车辙变化等指标进行跟踪。通过后期检测结果反向分析选路、材料和施工参数，才能不断提高应用效果，使微表处技术真正服务于预防性养护全过程。

### 3.2 常见质量风险及防治

微表处层虽薄，但施工稍有疏忽，问题很快就会反映到路面上。常见缺陷主要有脱皮、剥落、泛油、离析、车轮带料、接缝不顺和早期轮迹等。脱皮、剥落多半与旧路面清理不到位、表面潮湿、集料含泥量偏大或乳化沥青黏附性不足有关，因此施工前不能只做表面清扫，还要把浮尘、松散颗粒和油污处理干净，雨后路面未干时不宜急于施工。泛油一般出现在油石比偏大、级配偏细或高温重载路段，应通过试验段及时校正油量和矿料级配。离析往往不是单一原因造成的，集料波动、拌和不均、摊铺槽料位不稳都可能诱发，现场应加强设备标定和过程巡查。车轮带料、早期轮迹多数是开放交通过早造成的，不能只看表面是否成型，还要结合破乳、脱水和黏聚力情况判断。接缝和边缘处理也不能忽视，纵缝搭接、横缝收头和人工修边都要细致。总体来看，微表处质量控制重在过程，材料进场、拌和摊铺、养生开放和成型检测都要逐项把关，避免小问题演变成大面积返工。

### 3.3 技术优化方向

微表处技术后续应用不宜只停留在常规做法上，还应结合路段实际不断改进。首先，材料选择要更有针对性。对重载车辆多、夏季高温明显、长下坡或潮湿路段，可采用高黏改性乳化沥青、纤维增强材料等，提高薄层抗剪、抗磨耗和抗水损害能力，避免“一种配方用到底”。其次，施工管理要更加精细。微表处层厚较薄，油石比、水量、摊铺速度和破乳时间稍有波动，都可能影响成型效果。因此，施工中应加强设备计量校核，记录气温、湿度、材料用量和开放交通时间，为质量追溯提供依据。再次，养护决策要把握好时机。路面病害过重时，单靠微表处难以持久；路况过好时提前实施，又会造成养护资源浪费[5]。应结合检测数据、交通量和病害发展趋势，选择最合适的处治窗口。最后，还可将微表处与裂缝封闭、局部修补、雾封层等工艺配合使用，使其在绿色、经济和长效养护中发挥更稳定的作用。

## 4 结束语

微表处技术适用于结构状况良好而表面功能开始衰减的沥青路面，是公路预防性养护中较为成熟、经济和高效的施工方法。其实效不只取决于材料性能，更取决于路况判断、病害预处治、配合比、摊铺控制和开放交通管理。实践中应避免把微表处技术简单理解为“薄铺一层”，而要把它放在路况检测、方案设计、现场施工和后期跟踪的完整链条中使用。只有坚持因路制宜、过程管控和持续评价，微表处技术才能真正发挥抗滑、防水、延寿和降本作用，为公路长期安全运营提供支撑。

## 参考文献：

[1] 张丽萍.微表处技术在高速公路沥青路面养护施工中的应用[J].运输经理世界,2021(36):152-154.
[2] 王亮.微表处在高速公路路面预防性养护中的应用[J].运输经理世界,2021(06):123-124.
[3] 任兴荣.微表处技术在高速公路沥青路面养护中的应用[J].工程建设与设计,2022(07):116-118.
[4] 田永红.微表处技术在高速公路沥青路面养护施工中的应用[J].工程机械与维修,2025(09):91-93.
[5] 成浩一.高速公路路面微表处养护施工技术[J].人民交通,2024(03):144-146.

# 液压千斤顶缸体数控加工工艺及夹具设计

程宝祥

（富阳通力机械制造有限公司，浙江 杭州 311407）

**摘 要** 液压千斤顶作为工业生产中重要的起重设备之一，其缸体作为主要承载结构部件，对于千斤顶承载能力、密封性能方面有更高要求。而千斤顶缸体结构具备内壁精度要求高、形位公差严格、加工难度大增等特点，若选择传统工艺方案，则无法保证液压千斤顶缸体加工精度与效率。本文从液压千斤顶缸体数控加工工艺以及夹具设计出发，结合数控加工工艺技术特点，根据液压千斤顶缸体加工需求，制定合适的数控加工工艺以及夹具设计方案，旨在为降低误差、确保液压千斤顶缸体加工精度合格提供参考，进而满足工业生产使用需求。

**关键词** 液压千斤顶；缸体；数控加工工艺；夹具设计；精度控制

**中图分类号**：TH137.51 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.040

## 0 引言

数控加工技术作为现代工业生产中的重要技术之一，具备自动化程度高、加工精度高、生产效率高等特点，已经成为机械生产加工的主流技术。当前，很多学者对于液压零件的数控加工工艺以及夹具设计展开研究，然而对液压千斤顶缸体方面研究投入力度不足，造成加工工艺缺陷、夹具设计不到位，对缸体加工精确性产生不利影响。因此，深入研究液压千斤顶缸体数控加工以及夹具设计方案，能有效提升液压千斤顶缸体加工质量，降低生产成本，促进液压千斤顶产业升级。

## 1 液压千斤顶缸体结构与加工技术要求

### 1.1 缸体结构分析

液压千斤顶缸体为圆柱形结构，其使用45#优质碳素结构钢作为生产原材料。液压千斤顶缸体包含缸体本体、内壁通孔、两端法兰、油孔、螺纹孔等，按设计方案确定缸体本体外径120 mm、内径100 mm、长度350 mm、两端法兰厚度20 mm，法兰上分布6个M12螺栓孔，其作用是缸体和其他结构部件稳定连接。同时，缸体内壁设置活塞配合装置，确保缸体加工尺寸符合、表面光洁度达到要求。在缸体侧面开出直径Φ10 mm的油孔，其作用是液压油进出，确保油孔加工位置精度合格，以满足缸体密封性要求[1]。

### 1.2 加工技术要求

根据液压千斤顶缸体工作要求和装配需求，按目前国家标准确定如下加工技术要求：（1）尺寸精度：缸体内孔直径尺寸公差为H7（Φ100H7），圆度公差0.01 mm内，圆柱度公差0.02 mm内；缸体外径尺寸公差为h8（Φ120h8）；两端法兰厚度尺寸公差为±0.05 mm。（2）形位公差：缸体内孔轴线与法兰平面的垂直度公差0.02 mm/m内；两端法兰平面的平行度公差0.03 mm内；油孔轴线与内孔轴线的垂直度公差0.02 mm内，油孔与内孔连通处无毛刺、无台阶。（3）表面粗糙度：缸体内壁表面粗糙度Ra≤0.8 μm，缸体外径及法兰平面表面粗糙度Ra≤1.6 μm，螺纹孔表面粗糙度Ra≤3.2 μm。（4）材料性能：45#钢经调质处理后，硬度达到HB220-250，能满足结构强度、耐磨性、韧性标准。

## 2 液压千斤顶缸体数控加工工艺设计

### 2.1 加工基准选择

液压千斤顶缸体在加工时，其定位基准对加工精度有直接影响，在缸体加工基准设定时，按照统一基准原则确定缸体两端中心孔为定位基准。缸体加工时先加工钢铁两端端面，钻出中心孔，将中心孔作为定位基准，使用顶尖装置装夹后，再按照设计图纸加工缸体内孔、外孔、法兰等。在缸体中心孔加工时，落实质量控制措施，确保中心孔圆度偏差在0.01 mm以下，两端中心孔同轴度偏差0.005 mm以内，防止中心孔偏差对后续缸体加工产生轴线偏移。

### 2.2 加工工艺路线设计

结合缸体加工要求和工艺原则，设计数控加工工艺路线如下：（1）原材料准备。根据液压千斤顶缸体加工要求，选择45#优质碳素钢制作的无缝钢管作为材

作者简介：程宝祥（1980-），男，专科，研究方向：机电制造。

料，规格为 Φ130×15×400 mm，展开原材料质量检测。（2）毛坯预处理。无缝钢管质量检测合格后，按照加热温度 850 ℃～ 880 ℃进行调质处理，保温 2 h 进行油冷处理，使其调质后钢管硬度达到 HB220-250；对钢管校直处理时，毛坯直线度偏差为 0.03 mm/m 以内，防止毛坯弯曲影响缸体加工精度[2]。（3）粗加工。通过数控车床进行粗加工，以两端中心孔为基准顶尖装夹。在该环节先进行两端端面粗车，确保两端端面与轴线保持垂直；而后粗车缸体外径，预留 2 mm 左右加工余量；粗膛内孔留 1.5 mm 加工余量；粗车两端法兰预留 0.8 mm 加工余量。在对缸体粗加工时，需做好各工序加工余量控制，以提高加工效率，且保证后续加工精度符合要求。（4）半精加工。由数控车床对缸体进行半精加工，将两端中心孔作为定位基准装夹。缸体外径半精加工预留 0.5 mm 余量，半精镗内孔预留 0.3 mm 加工余量，半精车法兰预留 0.3 mm 加工余量，油孔钻进预留 0.2 mm 加工余量。半精加工作业需调整切削用量，禁止切削过热导致工件变形。（5）精加工。在液压千斤顶缸体精加工时，采用数控车床和数控铣床配合方式完成。在该环节先将工件放置在数控车床上，按照两端中心孔作为定位基准，经镗内孔确保内孔尺寸公差、圆度、圆柱度符合要求，且表面的粗糙度偏差在 0.8 μm 以内；精车缸体外径与法兰确保其尺寸精度和形位公差满足要求，表面粗糙度在 1.6 μm 以下。在数控铣床中，以缸体两端端面和内孔作为定位基准，需在法兰上钻住 6 个 M12 螺栓孔并攻丝，确保螺栓孔定位精度与粗糙度达到要求；油孔精镗确保其与内孔具备垂直度与连通性，再将连通位置的毛刺去除。

### 2.3 数控加工参数优化

液压千斤顶缸体数控加工中，其加工尺寸选择对加工精度、加工效率、刀具寿命有直接影响。在数控加工参数优化中，需结合液压千斤顶缸体设计方案、使用需求以及材料，对各工序进行加工参数设定。（1）粗加工参数。缸体粗加工应将大部分余量去除，进而提高后续加工质量，此时选择硬质合金刀具为主，按照如下参数加工。切削速度 v=80 m/min ～ 100 m/min，进给量 f=0.2 mm/r ～ 0.3 mm/r，背吃刀量 ap=3 mm ～ 5 mm。粗镗内孔以分段方式进行，每段加工长度为 50 mm，防止加工长度过高，因为刀具振动影响加工精度。（2）半精加工参数。半精加工作用是进行粗加工后误差修正，保证精加工有序开展，此时采用硬质合金刀具为主，按如下参数加工。切削速度 v=100 m/min ～ 120 m/min，进给量 f=0.15 mm/r ～ 0.2 mm/r，背吃刀量 ap=0.8 mm ～ 1.2 mm。半精镗内孔使用浮动镗刀能有效降低加工振动，以保证各位置加工精度合格。（3）精加工参数。精加工目的是保证液压千斤顶缸体加工精度与表面粗糙度合格，选择金刚石刀具按如下参数进行。切削速度 v=150 m/min ～ 180 m/min，进给量 f=0.08 mm/r ～ 0.1 mm/r，背吃刀量 ap=0.1 mm ～ 0.3 mm。精镗内孔采用恒线速度切削作业方式，确保加工尺寸和粗糙度达到标准。而对于缸体外径、法兰平面采用高速切削方式，有效降低切削热量对工件影响[3]。

## 3 液压千斤顶缸体数控加工夹具设计

### 3.1 夹具总体结构设计

液压千斤顶缸体在加工时，夹具设计极为重要，其按如下几个结构确定设计方案。（1）底座。底座使用 HT200 灰铸铁制造，底座底部表面和数控机床使用 T 型螺栓连接，确保夹具运行具备稳定性。同时，底座加工精度达到要求，使后续安装作业精度合格。（2）定位板。夹具定位板安装在底座上部，上平面加工定位平面，定位平面和底座下表面平行，定位平面上安装两个定位销。定位销采取对称布置方式，和缸体法兰使用螺纹孔连接，使其圆柱定位精度达到要求[4]。（3）顶尖。选择莫氏 4 号顶尖，将其固定在车床的主轴与尾座上，并和缸体的两端中心孔保持配合，确保缸体的轴线定位精度达到要求，使液压千斤顶缸体同轴度满足标准。顶尖头部需进行淬火处理，使其具备较高耐磨性。（4）夹紧机构。夹紧机构使用液压夹紧方式，其包含液压缸、夹紧块、导向杆等组成，需确保各结构部件夹紧强度达到要求，且夹紧力均匀、操作方便、夹紧可靠，便于缸体的装夹和拆除，还不会造成缸体结构损坏。

### 3.2 关键部件设计

（1）定位销设计。缸体夹具设计定位销为重要紧固部件，其选择 40Cr 钢制造，采取调质、淬火等处理，使其硬度达到 HRC55-60，确保定位销有较高耐磨性与强度。定位销使 Φ11.8 mm 直径，与缸体使用 M12 螺栓孔过度配合，以保证定位精度达到要求。定位销长度设计为 30 mm，其插入螺纹孔长度为 20 mm，确保定位具备稳定性。定位销设置圆弧过渡方式，以便顺利插入螺纹孔内，且防止造成螺纹孔内壁损坏[5]。（2）夹紧块设计。夹紧块使用 20CrMnTi 钢制造，采取渗碳淬火处理方式硬度达到 HRC60-65，其耐磨性、韧性达到要求。夹紧块内部设置半径 60 mm 的弧形凹槽，确保夹紧块和缸体外径保持紧密配合，使其夹紧紧固性达到标准，且防止夹紧过程中造成缸体变形。夹紧块

表面加工防滑螺纹，使其具备较高耐摩擦性。（3）液压夹紧机构设计。液压夹紧机构选择CDA2B50-50，液压缸液压力10 MPa，行程50 mm，确保在缸体加工过程中提供足够夹紧力。液压缸缸体安装在底座侧面，活塞杆利用联轴器和导向杆连接。导向杆和夹紧块保持固定连接；液压缸进油口，使用油管与数控机床液压系统连接，确保液压缸能稳定伸缩，按照加工需求进行夹紧与松开。为确保夹紧力具备稳定性，液压系统内部制有溢流阀，按要求调整夹紧力，使其夹紧力为5 kN～8 kN，以防夹紧力过大造成缸体结构变形。

### 3.3 夹具装配与调试

在夹具设计过程中，需按照“先基准后部件、先内部后外部”的顺序逐步进行。在夹具装配过程中，需先将定位板安装在底座上，表面采用螺栓固定方式，调整定位板水平度确保定位平面和底座平面保持平行状态。而后将定位销穿入定位孔内，采取过盈配合方式，确保定位销安装精准度。最后进行导向套安装，使其安装在定位板导向槽内，使导向杆插入导向套内，与夹紧块连接确保顶尖和定位销轴线保持配合。此外，在夹具装配过程中，需重点控制各部件的配合间隙与安装精度，避免因装配偏差影响后续使用效果。定位板安装固定后，需借助水平仪反复校验，确保水平度误差控制在允许范围内，若出现倾斜需及时调整螺栓松紧度，防止定位平面偏移导致工件定位不准。定位销与定位孔的过盈配合需把控力度，避免过盈量过大造成定位孔变形，或过盈量不足导致定位销松动，影响定位稳定性。导向套安装时，需确保其与定位板导向槽贴合紧密，无松动、卡顿现象，同时保证导向杆与导向套的配合间隙均匀，插入后能灵活移动且无偏移，确保夹紧块运动顺畅，进而保障顶尖与定位销轴线精准对齐。在装配过程中，需对各连接部位进行逐一检查，查看螺栓、定位销等紧固件是否安装到位，有无松动、脱落隐患，对易磨损部位可提前涂抹润滑脂，减少后续使用中的摩擦损耗。另外，装配完成后需进行初步调试，手动操作夹紧机构，检查夹紧力是否均匀、定位是否可靠，观察各部件运动是否协调，若发现卡顿、偏移等问题，需及时拆解调整

## 4 加工工艺与夹具设计验证

为检验液压千斤顶缸体数控加工工艺与夹具设计是否合理，本文选择10件45#钢无缝钢管毛坯试验。按照设计方案要求的加工工艺和夹具批量加工，加工完成后对各项参数检测，见表1。

表1 夹具检测

| 检测项目 | 具体检测数据 | 是否满足要求 |
|---|---|---|
| 尺寸精度 | 内孔H7、圆度0.008 mm～0.01 mm、圆柱度0.015 mm～0.02 mm、外径h8、法兰厚度 ±0.05 mm | 是 |
| 形位公差 | 垂直度0.015 mm/m～0.02 mm/m、平行度0.025 mm～0.03 mm、油孔垂直度0.015 mm～0.02 mm | 是 |
| 表面粗糙度 | 内壁Ra0.6 μm～0.8 μm、外径及法兰Ra1.2 μm～1.6 μm、螺纹孔Ra2.8 μm～3.2 μm | 是 |
| 加工效率 | 单件加工时间1.2 h（传统2.5 h），效率提升52% | 是 |

通过对表1检测结果进行分析，本文所设计的数控加工工艺与专用夹具满足液压千斤顶缸体加工需求，使缸体加工具备精准度，且夹具准确可靠、操作便捷，能满足批量化生产作业要求。

## 5 结束语

现代数控加工工艺不断发展，对于液压千斤顶缸体加工效率和精度提升有积极作用，能促进工业生产效率提高。未来，液压千斤顶缸体加工需不断根据实际情况进行工艺参数调整，使缸体加工时切削速度、进给量满足加工要求。同时，针对液压千斤顶加工需求设计智能化夹具、改进夹具结构，使其满足自动夹紧、定位、拆卸的多样化功能，以促进缸体加工自动化水平提升。

## 参考文献：

[1] 刘映泉.立式油压千斤顶油缸装卸夹具的设计[J].金属加工(冷加工),2019(06):61-65.
[2] 夏军.工装用液压夹具设计方案[J].科技创新与应用,2022,12(22):100-103.
[3] 王炉,毛孟娜,程相榜,等.基于工业机器人的千斤顶柔性装配系统设计[J].煤矿机械,2023,44(06):13-15.
[4] 邹函滔.驱动桥千斤顶支座成形工艺优化及模具设计[J].汽车工艺师,2022(04):28-30.
[5] 梁涛,郭世滔,谢诗,等.解决现有夹片更换效率低的新型提升千斤顶设计[J].中国高新科技,2024(09):17-19.

# 水电站汛期水位精准调控与风险规避路径探索

芦金鑫

（中国水利水电第十一工程局安装分局，河南 郑州 450001）

**摘 要** 随着极端气候事件的频繁发生，水电站汛期水位调控正面临着洪峰剧烈涨落，调度复杂化和运行风险加大的考验。本文以水电站汛期水位准确调控技术为研究对象，从大数据洪水预报、人工智能智能调度、数字化风险预警以及“云－边－端”协同控制技术等方面系统地论述其应用优化路径；从历史水文数据、实时监测数据及洪峰预测模型等方面进行综合分析可知，智能预测与调度技术对于提高水位预测精度、减少调度响应时间、降低下游洪峰风险等表现出了显著成效。有关研究及典型工程应用结果表明，上述技术能够在一定程度上提高防洪安全性及发电效率。研究结果旨在为水电站汛期智慧化管理和风险规避提供技术借鉴。

**关键词** 汛期水位调控；大数据洪水预报；人工智能调度；数字化风险预警

**中图分类号**：TV697.1+3 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.041

## 0 引言

随着全球气候变化的加剧，我国水电站流域极端暴雨和洪峰频繁发生等问题越来越突出，对水库调度、防洪安全和发电运行造成了极大的压力。传统的调度模式以历史经验为主，人工操作为辅，具有预测精度不高、调度响应落后、风险联动性较差的特点，易诱发水位超限、设备负荷过大、下游洪涝风险等一系列问题。近年来，信息化和智能化技术不断发展，为水电站汛期水位的准确调节和控制提供了一种全新的解决路径[1]。通过运用大数据、人工智能、数字孪生以及“云－边－端”协同控制技术等技术，可以实现来水过程实时监控，洪峰动态预报和多目标调度优化。同时，数字化的风险预警平台能够快速地识别并应对水位异常，设备故障以及下游洪水风险等风险，从而为调度决策的制定提供科学依据。本文着重探讨汛期水位精准调控过程中关键技术的运用与优化策略，以期为水电站的高效、安全和智慧化发展提供借鉴。

## 1 汛期水位精准调控关键技术体系

### 1.1 水文监测与实时数据采集技术

汛期水位的精准调控，首先有赖于高精度的水文监测和实时数据采集技术。当前大型水电站普遍运用“雨量站加雷达测雨加卫星遥感等”的联合监测模式，以实现对流域内降雨、水位和流量的实时感知[2]。以三峡工程为例，它已经建成了涵盖长江上游流域水雨情自动测报系统并连接了 600 多个各种水文和雨量监测站点，能够实现流域水情信息的实时获取和远程传输。据公开信息显示，三峡工程已经形成了以北斗高精度定位，物联网通信以及智能感知技术为核心，能够毫米级动态监测坝体、边坡以及库区运行状况的安全监控系统。在数字化调度平台的支持下，调度中心可实时接收流域内洪峰、水位以及来水过程等信息，从而为汛期防洪调度以及水位精准控制等工作提供可靠数据支持。

### 1.2 数字孪生与洪水动态预测技术

数字孪生技术是通过建立虚拟水库和真实流域之间的同步映射模型来动态模拟洪水的演进过程。目前一些大型水电站已经搭建了三维数字孪生平台来滚动预报未来 6 h～24 h 内的洪水过程。研究表明，结合 LSTM 神经网络算法后，洪水预测模型在部分流域中的预报精度相比传统模型有所提高，洪峰到达时间误差也得到一定程度缩小[3]。以白鹤滩水电站为例，其在汛期调度中应用数字孪生与智能预报技术，对库水位进行动态优化控制，从而降低了超汛限运行风险，提高了防洪调度的安全性与精细化水平。

### 1.3 多目标联合调度智能决策技术

多目标联合调度技术解决了防洪、发电与生态泄流三者间的配合。传统的人工调度通常会出现响应滞后等问题，基于遗传算法和动态规划相结合的智能调度系统能够实现秒级计算和自动决策。以金沙江梯级

作者简介：芦金鑫（1988-），男，专科，助理工程师，研究方向：水电站运行。

水电站群为研究对象，发现联合调度平台能够同时处理超过10万组的运行参数，从而使调度效率提高了超过35%，同时弃水率也减少了大约12%[4]。此外，该智能决策系统能够依据实时的来水数据自动调整泄洪策略，从而在汛期将发电的小时数增加大约8%，并能将下游的洪峰流量减少15%～20%，这大大增强了水库的整体运营效果。

## 2 水电站汛期运行风险识别与影响分析

### 2.1 极端暴雨条件下超标准洪水风险

在全球气候变化的大环境下，流域内极端暴雨事件有增加的趋势，这给水电站的防洪调度工作带来了更大的挑战。据《中国气候变化蓝皮书(2024)》资料显示，1961—2023年间中国极端强降水事件整体呈上升态势，长江流域局部地区短时强降雨发生频率显著增加。在2020年长江流域遭遇了大规模的流域性洪水灾害，其中三峡水库的最大入库洪峰达到了75 000 $m^3/s$，这是自水库建成以来的最大洪峰流量[5]。当入库流量大于水库最大泄洪能力时，易出现超汛限水位现象，其关系式为：

$$Qin > Qmax \tag{1}$$

以三峡工程为例，其防洪标准按“千年一遇洪水设计、万年一遇洪水校核”建设。在2020年汛期，三峡水库通过拦洪削峰，累计拦蓄洪水超过180亿$m^3$，最大削峰率约34%，有效减轻了长江中下游防洪压力，但也表明在极端洪水条件下，水库调度和坝体安全运行面临较大挑战。

### 2.2 调度偏差引发的水位失控风险

在汛期调度过程中，若洪水预测误差较大或调度响应滞后，容易造成水位失控风险。水库水位变化可表示为：

$$\Delta V=(Q_{in}-Q_{out})\times t \tag{2}$$

式(2)中，$\Delta V$为库容变化量，$Q_{in}$为入库流量，$Q_{out}$为下泄流量。当预测偏差超过10%时，可能导致泄洪不足或弃水增加。研究表明，部分水电站传统人工调度响应时间约为30 min，而洪峰演进速度可达每小时上涨0.5 m～1.2 m，容易造成短时超限运行，增加大坝结构受力风险。

### 2.3 设备故障与通信异常风险

洪水期高负荷工作时闸门、电源和通信系统发生故障的可能性显著增大。根据相关数据分析，大约有35%的汛期调控异常与设备出现故障有直接关联，其中超过20%的情况是由于闸门的启闭功能失效导致的。闸门泄流能力计算公式为：

$$Q=\mu bh\sqrt{2gh} \tag{3}$$

式(3)中，$Q$为泄流量，$\mu$为流量系数，$b$为闸门宽度，$h$为水头高度。当通信延迟超过5 s时，远程控制系统可能无法及时执行泄洪指令，导致水位调节滞后。有的水电站极端天气情况下通信中断时间一度超过15 min，极大地影响了汛期的安全运行。

### 2.4 下游区域泄洪安全风险

水电站在泄洪时，如果下泄流量过大或者调度不均，易给下游河道和城镇带来洪涝威胁。河道安全流量通常满足：

$$Q=AV \tag{4}$$

式(4)中，$Q$为过流量，$A$为过水断面面积，$V$为流速。当泄洪流量超过河道安全承载能力时，下游低洼区域易发生漫堤风险。研究显示，部分中小河流安全行洪能力不足5 000 $m^3/s$，而大型水电站单次泄洪流量可达到8 000 $m^3/s$～12 000 $m^3/s$，洪峰叠加后可能使下游水位上涨2 m～3 m，对居民区、桥梁及生态系统造成较大影响。

## 3 汛期水位精准调控技术优化路径

### 3.1 大数据驱动的洪水预报模型优化

汛期水位调控期间，大数据技术可显著提升洪水预报精准性和时效性。当前大型水电站一般都与雨量站、水文站、遥感卫星以及气象雷达多源数据进行连接，单日数据处理的规模可达5 TB～8 TB之间。通过构建历史洪水数据库，结合深度学习算法可以实现洪峰流量，洪峰到时和洪水演进过程等信息的动态预报。研究数据显示，采用大数据洪水模型后，洪峰预测准确率由传统方法的78%提高至92%以上，预测提前时间由6 h提升至24 h，洪峰流量误差控制在5%以内。同时，大数据分析也可实现对流域来水趋势的自动识别，从而为水库提前泄洪、库容调节等提供可靠的依据，并有效减少了汛期超标运行的风险。

### 3.2 人工智能算法在调度中的应用

人工智能算法可以对汛期水位进行快速分析和智能决策，明显提高调度效率。目前，一些大型流域已经运用了强化学习、遗传算法和神经网络等先进技术来构建智能调度平台，该平台能够同步分析超过10万组的运行参数，并根据实时的来水数据来自动优化泄洪方案。与传统的人工调度方式相比，AI系统在20 min～30 min内完成一轮调度分析，并能在1 min内完成洪水模拟和调度决策，从而使效率提高了超过40%。实践

证明，经过智能调度水库的弃水率减少了大约 10%，汛期的发电量增加了大约 8%，而下游的洪峰减少了 15% ～ 20%。另外，AI 系统可根据天气变化对调度策略进行实时订正，增强极端暴雨情况下运行的稳定性。表 1 重点比较了传统调度和 AI 智能调度响应速度，预测精度和发电效益等指标，反映智能化技术优化效果。

表 1　汛期智能调度技术应用效果对比

| 调度方式 | 调度响应时间 | 洪峰预测准确率 | 弃水率变化 | 发电效率提升 |
|---|---|---|---|---|
| 传统人工调度 | 20 min ～ 30 min | 78% | 较高 | 基础水平 |
| AI 智能调度 | ≤ 1 min | 92% 以上 | 下降约 10% | 提高约 8% |

### 3.3　数字化风险预警平台建设

数字化风险预警平台对提高汛期运行安全具有重要的技术支撑作用。该平台通过整合坝体变形监测、水位监测、渗流压力监测和视频感知系统等技术实现了风险隐患实时辨识。目前，部分智慧水电站已部署超过 2 000 个在线传感器，监测数据刷新频率达到 1 min 以内。该系统能够利用智能识别技术自动处理异常数据，并能在 30 s 之内发布预警信息，与传统的人工巡查相比，其效率提升了大约 60%。同时，数字化平台对超汛限水位、设备异常及坝体渗流等风险的识别准确率可达到95%以上，有效降低了突发事故发生概率，调度人员能更准确、更直观地进行风险决策。

### 3.4　云平台与边缘计算协同控制技术

云平台和边缘计算协同技术可以增强汛期调控系统数据处理能力和现场响应速度。云平台承担着洪水模型运算，海量数据存储与远程调度分析等功能，边缘计算终端承担着对现场设备的快速反应与实时控制功能。利用“云－边－端”的合作框架，系统的总体响应时间从传统模式的 10 s 减少到不超过 1 s，同时通信的稳定性也增加了大约 35%。现在一些智慧水电站已经达到了超过 90% 的自动化控制水平，能够实时监控闸门的开启和关闭、水位的调整以及设备的运行状态。另外，当网络出现异常时，边缘终端仍然能够维持本地独立工作，从而有效地保证了调控系统在极端天气情况下的连续性和安全性，增强了汛期工作的可靠程度。表 2 重点反映了数字化预警、云平台和边缘计算在汛期精准调控过程中的操作指标和实际使用效果，能够直观地反映出智慧水电站的建设程度。

表 2　数字化调控与风险预警系统运行指标

| 技术系统 | 核心功能 | 关键指标 | 应用效果 |
|---|---|---|---|
| 数字化预警平台 | 风险实时识别 | 预警准确率 95% 以上 | 险情识别效率提高 60% |
| 云平台调控系统 | 数据分析与远程调度 | 数据处理量 5 TB/ 日～ 8 TB/ 日 | 提高调度协同能力 |
| 边缘计算终端 | 现场实时控制 | 响应时间≤ 1 s | 提升运行稳定性 |
| 智慧监测系统 | 水位与坝体监测 | 数据刷新≤ 1 min | 实现全天候监测 |

## 4　结束语

水电站汛期水位精准调控对确保防洪安全，提高发电效益具有重要意义。研究结果表明：采用大数据驱动洪水预报，人工智能智能调度，数字化风险预警和“云－边－端”协同控制技术可以显著提升水位预测精度与调度效率，减少响应时间、减少超汛限运行及下游洪峰的风险。例如：洪峰预测的准确性可以超过 92%，调度响应时间可以缩短到 1 min 以内，下游洪峰流量可以减少 15% ～ 20%，弃水率可以降低 10%，发电效率可以提高大约 8%。在未来的工作中要进一步强化多源数据整合，AI 算法优化和智慧水电站系统建设等工作，促进水电站汛期运行朝着数字化和智能化方向发展、自动化与高可靠性的发展全面提高了汛期防洪安全与综合运行效益。

## 参考文献：

[1]　舒卫民,杨卫星,严方家,等.径流变化下的溪洛渡梯级-三峡梯级水库群适应性调控 [J]. 武汉大学学报 ( 理学版 ),2025,71(01):134-142.

[2]　胡昊,马鑫,徐杨,等.基于权重修正和 DRSN-LSTM 模型的向家坝下游水位多时间尺度预测 [J]. 水利水电技术 ( 中英文 ),2022,53(07):46-57.

[3]　杨欣怡,邝录章,肖杨.基于气象预报的水电站汛期运行水位控制应用 [J]. 湖南水利水电 ,2022(06):113-115.

[4]　张验科,武文龙,王远坤,等.汛期水风光多能互补动态调度模型研究 [J]. 人民长江 ,2024,55(09):35-43.

[5]　曹扬.中小型水电站汛期水位动态控制效益探究 [J]. 山西水利 ,2025,41(04):13-15,27.

# 地下空间建筑火灾烟气控制与排烟系统优化分析

曲 涛

（吉林市消防救援支队，吉林省 吉林市 132000）

**摘 要** 地下空间建筑火灾时烟气扩散速度快、温度高、可视性差，易造成人员伤亡和财产损失。本文围绕地下空间建筑火灾烟气控制与排烟系统进行研究，分析了现有排烟技术存在的烟气流动梯度失衡、风口布置紊乱、局部烟气滞留、风压匹配不足及导流阻隔能力薄弱等问题，并提出优化技术要点，包括精准控制烟气流动梯度、科学布置排烟风口、消除局部烟气滞留、动态调控风压及增强导流阻隔性能。结果表明，优化排烟系统能够提升火灾应急排烟效率和人员疏散安全性，为地下空间建筑火灾防控提供技术支持。

**关键词** 地下空间建筑；火灾；烟气控制；排烟系统；烟气流动梯度

**中图分类号**：TU998.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.042

## 0 引言

地下空间建筑普遍存在通风条件差、人员密度高、环境高度封闭的特征，一旦发生火灾，热烟气会在浮力效应作用下快速扩散，迅速形成高温、高毒的危险环境，直接威胁人员疏散安全与建筑结构安全。传统排烟系统普遍存在设计适配性不足、烟气流动控制精度差、局部区域烟气滞留严重等缺陷，直接导致火灾应急排烟效率偏低，进一步压缩了人员安全疏散的可用时间。随着我国建筑消防安全标准持续升级，地下空间排烟系统优化已成为火灾安全保障的核心技术环节，需系统分析地下空间火灾烟气的流动扩散特性，针对性排查现有排烟系统的技术短板，提出科学可行的系统优化方案，最终实现高效控烟排烟、保障人员安全疏散的核心目标。

## 1 火灾烟气控制与排烟系统优化的重要性

地下空间建筑火灾烟气控制及排烟系统的改善，对于保证人员疏散的安全以及建筑的安全性起着至关重要的作用。火灾烟气温度高、有毒有害物质多、视线不清、火势蔓延快，在密闭空间里会把烟气堆积起来、倒流、部分处被堵住而产生滞留，给疏散和灭火带来困难。改善排烟系统的运行状态之后，可以对烟气流动线路以及流速做出精确掌控，进而形成稳定分布的烟气层，并且缩减了烟气滞留区域，增加了排烟速度，减缓了高温烟气给建筑结构带来的热负荷影响，削减了火灾所造成的损失。同时，根据排烟风口的设置方式、排烟风压的控制、导流阻隔等手段来达到烟气在空间内有序流动的目的，保证各个地方烟气的排出时间窗口。由于地下空间建筑功能越来越复杂，使用密度也越来越大，所以火灾排烟系统的改善就成为提高建筑安全性的一种技术途径，也是保证人员生命安全的一个关键方法，同时也是支持消防救援工作的一项重要措施。

## 2 地下空间建筑排烟系统现存技术问题

### 2.1 烟气流动管控梯度失衡

地下空间建筑火灾烟气流动有着很多的复杂性、非线性特点，这是由建筑物的布局方式、通风情况、火源所在的位置以及燃烧强度等多种因素共同造成的，烟气层流动表现为不平衡的状态。烟气流动控制梯度失衡指的是各个区域的烟气流速相差太大、烟气层厚度不一样、局部上升速度异常等，从而造成某些地方的烟气迅速堆积起来，其他地方的烟气却排出过快，破坏了烟气层的稳定状况。梯度失衡会使得排烟系统整体排放效率下降，还会产生高温烟气滞留区，加大人员疏散困难程度和可视性下降的区域。同时，烟气流动梯度不均会使得局部风机的负荷不均衡，造成风压分布不均，进而降低排烟系统的能效以及反应速度，增大设备的运行压力[1]。

### 2.2 排烟风口气流排布紊乱

地下空间建筑排烟系统设计时，排烟风口气流排布紊乱的现象比较普遍，主要表现在风口数量分布不

作者简介：曲涛（1985-），男，本科，助理工程师，研究方向：火灾防控。

均、风口方向不合理、风口之间互相影响严重等各方面。风口气流排布不整齐，烟气排放路线不规则，产生局部回流、气流冲突等状况，烟气不能按照预期的方向顺利地排出，增大了系统控制的难度。风口排布乱序会使烟气层不稳定，造成局部烟气层厚度不同，高温、有毒烟气在疏散通道和作业空间里待的时间延长，从而减缓人员撤离的速度，提高安全防范的工作难度。风口气流紊乱还会造成风机负荷分布不均匀，有些风机风压过高或者过低，对整个排烟系统的能效和可靠性都会产生影响。

### 2.3 局部区域烟气滞留堆积

地下空间建筑中的局部区域烟气滞留堆积现象十分普遍，它的产生原因主要是由于建筑结构繁杂、通风盲区较多、风口分布不均、排烟风压不协调等原因所造成的。烟气滞留堆积会使得局部区域的温度以及有毒气体的浓度骤增，从而极大地影响到人员的疏散以及消防救援是否可行。滞留的烟气会降低排烟系统的效能，还会造成烟气回流以及烟层高度的变化，破坏了整个烟气的流动规律。同时，局部滞留烟气会增大火灾中热负荷集中的地方，加快建筑局部受热变形的速度，增大火灾的损害程度。滞留堆积引起通道内的烟雾浓度骤升，致使能见度降低、视线不清，人看不清疏散路线，烟气的吸入对人体伤害更大[2]。

### 2.4 排烟风压调控匹配度低

排烟风压调节不匹配是地下空间建筑排烟系统中普遍存在的一种技术问题，它表现为风机所输出的风压不能和烟气流量、风口的数量以及管道的阻力保持一种动态平衡的状态。风压不匹配造成一些地方的排烟能力不好，另外一些地方则出现气流扰动，造成烟气层被破坏，产生烟气回流或者局部滞留等情况频繁发生。风压调节不合理会造成风机耗电大、设备损坏，排烟系统运行不稳定。低匹配度风压也会造成排烟控制的误差，不能随火灾的发展情况做出相应的调整，进而使排烟效率不能达到最优状态，提高应急管理的工作难度。

## 3 地下空间建筑排烟系统优化技术要点

### 3.1 精准把控烟气流动梯度

烟气流动梯度控制是地下空间建筑排烟系统优化的关键部分，它的目的是使烟气层的高度均匀，流速稳定并且可以控制。通过模拟某地下综合交通枢纽 B 区地下负一层车库中央的火源实验结果，得出了以下结论：火源在负一层车库中央，燃烧功率为 2.5 MW，烟气温度上升速率达到8 ℃/s，烟层初始高度约为1.2 m。通过 CFD 模拟可知，在没有对烟气进行优化的情况下，烟气上升梯度分布不均匀，局部烟层高度存在波动情况，有的地方达到0.4 m，但大部分区域烟气流速为1.8 m/s，只有少量区域达到 0.6 m/s 以下。采用增加多个温度、烟雾检测装置的方式进行智能控制，使风机的排烟量得到优化，从而达到调节排烟口出风速度的目的，使烟层高度波动范围控制在正负 0.05 m 之内，并且保持在 0.9 m～1.1 m 之间。表 1 给出了该区域烟气流动梯度优化前后的一些重要参数对比，从中可以看出梯度的均匀性以及排烟效率都有了较大的提高[3]。

表 1 烟气流动梯度优化参数表

| 参数 | 优化前 | 优化后 |
|---|---|---|
| 烟层高度波动 | 1.2 m～1.6 m | 1.25 m～1.30 m |
| 区域烟气流速 | 0.6 m/s～1.8 m/s | 0.9 m/s～1.1 m/s |
| 滞留烟气体积 | 18 $m^3$ | 4 $m^3$ |
| 烟气排出时间 | 320 s | 210 s |

案例分析表明，在控制好烟气流动梯度的情况下可以提高排烟效率，还可以有效地抑制烟气倒流、局部滞留等现象，对人员疏散安全及火灾应急救援能力的提升有较大的影响，说明梯度控制对于复杂地下空间内排烟系统的优化有非常重要的作用。

### 3.2 科学排布排烟风口位置

排烟风口的布置直接关系到烟气排出的速度和稳定性。以某地下商业区 C 区为研究对象，负二层总面积约 4 200 $m^2$，初步排烟口按 50 $m^2$ 配置一个风口，排烟口高度距地面 2.2 m。根据火灾模拟的结果可知，在风口分布比较均匀的情况下，烟气流动受到阻碍的部分有 27%，而这些部位的烟气停留时间超过了 300 s，烟层厚度达到了 1.8 m。采用 CFD 模拟和流体动力学分析方法，将风口间距从原来的 35 $m^2$ 一个改为现在的 40 $m^2$ 一个，风口高度由原来的2.8 m改为现在的2.5 m，出风角度由原来的 35° 改为现在的 15° 以适应烟气流向，使烟气排放路径最短化。表 2 为优化前后的风口排布和烟气排放效率对比，可以看出烟气滞留明显下降，排烟时间缩短了约 35%。

表 2 排烟风口布置优化参数表

| 参数 | 优化前 | 优化后 |
|---|---|---|
| 风口间距 | 50 $m^2$/ 个 | 40 $m^2$/ 个 |
| 风口高度 | 2.2 m | 2.5 m |
| 风口出风角度 | 0° | 15° |
| 区域烟气滞留时间 | 300 s | 195 s |

从上述案例中可以得出结论，合理设置风口位置能较好地改善烟气的流向，减小烟气的排放路线，提高排烟效果，同时也能降低排烟系统的负荷波动[4]。

### 3.3 消除局部区域烟气滞留

地下空间建筑火灾中，局部区域烟气滞留会使得排烟系统效率降低、疏散安全受到限制，形成的原因有空间结构复杂、通风盲区多、风口布置不合理、排烟风压匹配不足。烟气滞留造成局部温度、有毒气体浓度快速上升，增大了人员吸入烟气的健康危险，还会破坏烟气层稳定，造成排烟流动路线紊乱，产生烟气回流、多向扩散。选取某地下地铁站负一层为研究对象，火源在站台中央，火灾功率为1.8 MW，初始烟层高度为1.1 m，局部滞留烟气体积为12 $m^3$，经过对排烟风机联动控制以及辅助风机的调节，可以在90 s内将滞留的烟气全部排走，并且保持烟层高度在1.25 m左右，流速大致稳定在1.0 m/s～1.15 m/s之间。根据以上分析可知，在优化时将辅助风机的风压调节为0.15 kPa，使烟气尽可能地沿最短路径排出主排烟口，消除通道死角，使得局部滞留的体积由原来的12 $m^3$减少到现在的2 $m^3$，局部温度最高值由原来的55 ℃下降到现在的42 ℃，达到更好的疏散通道可视性，也提高了整体排烟系统的应急及可靠性。该种优化策略说明，通过准确地调整排烟风机联动、风压控制以及通道引导设施，可有效地避免地下空间局部烟气滞留的问题，使烟气能够充分地进行流通，给人员的疏散和火灾控制提供了技术支持，而且还给复杂结构地下建筑排烟系统改进提供了可行的办法。

### 3.4 动态调控排烟风压数值

地下空间建筑火灾排烟过程中，排烟风压应随烟气量、风口数及空间阻力的变化而变化，不能出现局部滞留或者风压过高扰动烟气流动的情况。以某地下综合管廊负二层为例，火源在中段，火灾功率为2.2 MW，初始排烟风压为0.5 kPa，局部存在烟气流速小于0.6 m/s的现象，造成局部滞留以及烟气倒流。通过风机智能控制以及烟气温度、烟层高度、流速传感器等配合来达到调整排烟风压的目的，调整范围为0.65 kPa～0.72 kPa，使得风机的出风压力和烟气流量同时改变。优化之后，区域烟气排出时间从原来的280s缩短到了现在的190 s，烟层高度维持在1.28 m～1.32 m之间，滞留烟气体积从原来的15 $m^3$减少到现在的3 $m^3$，排烟效率提高了大约35%。采用风压动态调节的方法，防止出现过高造成烟气扰动、回流的情况发生，保证烟气按照设计要求的方向排出，提高排烟系统应急响应速度以及综合可靠性的体现，从而发挥出动态风压调节在地下空间火灾状态下进行烟气均匀排烟方面所起的作用。

### 3.5 增强烟气导流阻隔性能

地下空间建筑火灾排烟时，如果烟气导流阻隔能力不够，就会使烟气自由扩散、局部滞留和流向乱糟糟的状况出现，从而降低排烟系统的功效并且加大了疏散风险。选取地下商业综合体负二层作为研究对象，火源点在中庭内，初始的烟气导流阻隔设施仅占据了总面积的40%，致使中庭交汇处的烟层高达1.9 m，流速只有0.5 m/s，并且滞留的烟气体积达到了10 $m^3$。在原有防烟设施的基础上增设防烟隔断、导流板和分区排烟系统，导流板倾角为10度到15度，局部风机风压调节为0.12 kPa，使烟气向主排烟口流动。经改进的滞留气体为1.5 $m^3$，烟层厚度在1.25 m～1.3 m之间，流速1 m/s到1.15 m/s，排烟通道畅通无阻，烟气连续，均匀排烟符合控制要求，可为地下空间人员疏散、火灾防制提供可靠保障，说明改进后地下建筑的复杂地方也采用导流、阻隔方式是可行的[5]。

## 4 结束语

改善地下空间建筑火灾烟气控制和排烟系统，对于保障人员疏散安全以及保证建筑物结构安全起到非常重要的作用。精确控制烟气流场分布，合理的排烟口位置能够避免局部滞留区的产生，改变风压的大小并且加大导流阻挡等方法都能够提高排烟效率及系统的应急反应速度，对火灾应急管理工作有着一定的技术支持作用。未来可以使用智能监测技术、数字孪生技术和人工智能优化算法三者融合的方式控制排烟系统、改善排烟效果，在复杂的地下空间建筑火灾防护方面加强智能化和安全性。

## 参考文献：

[1] 刘杨.地下空间建筑防火封堵技术的可靠性与耐久性研究[J].工程建设与设计,2026(03):77-80.
[2] 尹广超.大型地下空间建筑消防设计的分析研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(11):77-79.
[3] 刘志亮.地下建筑空间火灾事故的灭火救援措施[J].今日消防,2025,10(01):74-76.
[4] 刘亮森.关于地下建筑火灾扑救的几点思考[J].今日消防,2024,09(07):10-12.
[5] 倪裕翔.地下空间建筑火灾事故的灭火救援对策研究[J].今日消防,2023,08(10):48-50.