科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

（1993 年创刊 • 旬刊）

2026 年 8 月 第 22 期（总第 647 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 8 月 5 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 锂行业焙烧窑超静定筒体强度和刚度计算 …… 黄印宇

005 采用机器视觉的电梯曳引轮槽磨损在线检测 …… 邵　扬，龚根星

008 交通工程领域 BIM 与 GIS 融合技术及应用场景研究 …… 韩铭铭

011 新能源直流汇集系统中电力电子变压器的电子信息故障诊断技术 …… 朱林峰，王　磊，刘超然

014 智能电网多变量太阳辐射预测：淘金优化双向 LSTM 网络的深度耦合智算 …… 李东旭，张雪敏

智能科技

018 沥青面层无人碾压交通工程施工技术均匀性控制研究 …… 刘瑞超

021 基于多源遥感的沥青路面养护状态智能监测方法研究 …… 袁新鹏，谢　举

024 建筑深基坑施工安全监测中的测绘数据采集与预警管理机制 …… 陈思英，魏　峰，陈　述

027 建筑工程BIM技术在港口航道工程数字化设计中的应用研究 …… 许晓飞，姜志平，王春伟

030 基于故障树分析（FTA）的 HDPE 挤压造粒机关键部件可靠性研究 …… 宋　刚

应用技术

033 公路路基防护工程施工技术要点分析 …… 崔云鹏

036 道路桥梁施工中的裂缝处理对策分析 …… 李正滨，何铭科

目录 Contents

039 强震区公路隧道软岩大变形防控施工技术……朱 健
042 高速公路沥青混凝土路面预防性养护措施……沈本磊
045 公路隧道软弱围岩段机械开挖防坍塌施工技术优化……姚顺治
048 复杂环境下的混凝土连续箱梁桥支架现浇施工技术……向 聃
051 城市道路与交通工程施工技术应用要点及优化措施……刘 萌，展宝星
054 轨道交通保护区域微扰动注浆参数控制技术研究……胥文涛，赵 凯

科创产业

057 激光设备运行稳定性影响因素分析……许占路，刘亚蝶
060 电力继电保护调试与故障检修技术……王城良，李正伟，程 海
063 城镇供水管网漏损检测技术的应用研究……王美超，刘月相
066 “多测合一”背景下的不动产测绘技术分析……杨 雪，赵尽晖
069 重载膜多层共挤吹膜机组配方与工艺适用性研究……张 昭，边晨曦
072 微通道反应器在放热反应安全控制中的技术优势……张玉中，张会改
075 装配式温室大棚结构与设备一体化施工技术研究……李玉杰，黄永鹏
078 装配式建筑绿色施工及建材选型体系的构建与实施路径……田道方，庞 超

技术管理

081 港航工程施工中混凝土的质量控制探析……杨 博
084 水利水电工程施工中安全生产保障措施探究……宋洋洋
087 防洪墙水泥土换填地基加固施工工艺应用分析……周 彭
090 装饰装修工程现场管理存在的问题及改进对策……张德习
093 房屋建筑施工质量全过程管理方法与实践探讨……刘元峰
096 灌区量水设施自动化改造中的土建施工关键技术……孔 杨
099 建筑电气工程施工过程中存在的质量问题及防治分析……李军华
103 建筑给排水立管穿越楼板的防水施工工艺与渗漏防控措施……宋元强，迟 帅，林 伟

科学论坛

106 矿山建设工程高陡边坡防护施工技术研究……李靖雯，徐刚刚，徐付强
109 城市道路雨污水管道开挖回填施工技术研究……许大鹏
112 水性防水涂料复合防护层界面粘结技术研究……张志浩，薛宝松
115 建筑结构加固施工质量控制与验收标准研究……王存武，何 飞，杨家伟，许永军，程徐进
118 模袋混凝土护坡技术在港口航道整治工程中的应用……孟帮鹏
121 建筑施工区域架空电力线路的安全防护棚搭设技术规范……秦子劼，胡 贤，张 超
124 道路沥青路面抗滑性能与交通安全的关联性实验检测研究……魏 平，李晓东，孔 政

锂行业焙烧窑超静定筒体强度和刚度计算

黄印宇

（四川卡森科技有限公司，四川 成都 610095）

摘 要 本文对锂行业 φ4.2×60 m 超静定焙烧窑的筒体强度与刚度的计算流程进行了详述，经由一系列严谨的理论分析及计算，对筒体的力学性能进行了深入探究。筒体壁厚选取的合理性是本文研究的重点，旨在确保筒体壁厚可满足设备的实际运行中对强度和刚度的需求，规避材料过度的浪费。结果表明，此项研究在保障设备安全可靠运行的同时，亦降低了制造成本，提升了整体设计的性价比，为筒体经济型设计提供了科学依据，对相关工程实践具有参考价值。

关键词 超静定焙烧窑；支座反力计算；筒体强度计算；筒体刚度计算

中图分类号：TQ172.6+22.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.001

0 引言

当前，经济社会各领域的系统性变革正持续推进，全社会对绿色能源的需求不断增长。在绿色能源相关的各类材料中，锂元素因在储能领域的关键作用成为不可或缺的核心原材料，其需求量正在不断攀升。深入研究锂矿加工这一复杂精密的流程就会发现，焙烧窑在其中发挥着不可替代的作用。锂精矿在焙烧窑内会经历晶型转化的过程，当温度升到 1 100 ℃至 1 200 ℃这个区间时，原本性质稳定的 α 型锂精矿将转变为化学活性更强的 β 型锂精矿。拆解焙烧窑的各个部件可见，筒体是其中极为关键的一环。本文以 φ4.2×60 m 规格的焙烧窑为具体案例，详细阐述超静定焙烧窑筒体强度与刚度的计算过程，以期为相关领域的研究和实际应用提供参考。

1 焙烧窑参数

焙烧料产能要求：600 t/d；焙烧窑筒体直径：φ4.2 m；焙烧窑筒体长度：60 m；焙烧窑斜度：3.5%；焙烧窑筒体转速：0.15 rpm～1.5 rpm；焙烧窑支撑数量：3 档；焙烧窑耐火材料载荷：378 t；焙烧窑物料载荷：42 t；焙烧窑跨距：进料端筒体悬伸段长度 l_h=10 m，中间段 1 筒体长度 l_{m1}=25.5 m，中间段 2 筒体长度 l_{m2}=19.5 m，出料端筒体悬伸段长度 l_t=5 m。

2 焙烧窑载荷分析

在进行焙烧窑筒体强度和刚度计算时，需把物料以及钢板的载荷视为均布载荷，使其作用于整个窑的全段范围。其中，针对筒体上不同厚度的钢板，在计算载荷时统一按照 δ=24 mm 筒体壁厚进行。筒体局部位置壁厚超出 24 mm 的部分，则被当作集中载荷，作用在筒体的三个支点之上。焙烧窑出料端面的部件（窑尾护板、返料斗等）所产生的载荷，被视作集中载荷，其作用的位置在焙烧窑进料位置端面上。而焙烧窑出料端面的部件（窑头护板、窑头密封套筒等）产生的载荷作为集中载荷，作用于焙烧窑出料端面上。另外，大齿圈也被视作集中载荷，作用于距离 1 档支撑右侧 4 m 的地方。为了更精确地进行计算，需把具有不同壁厚的筒体划分成多段，然后对每一段的载荷分别进行计算，得到载荷图（见图 1）。

3 焙烧窑筒体强度和刚度计算

3.1 焙烧窑筒体强度计算

3.1.1 焙烧窑支座反力及支座弯矩求解

三矩方程法：具有 m+2 档支承（即 m+1）跨的筒体，可简化为一个 m 次超静定连续梁，它的两端有悬伸段。对于每一个中间支座列出三弯矩方程式：

$$\frac{l_{n-1}}{I_{n-1}}M_{n-1}+2\left(\frac{l_{n-1}}{I_{n-1}}+\frac{l_n}{I_n}\right)M_n+\frac{l_n}{I_n}M_{n+1}=-\frac{6B_{n-1}^{\phi}}{I_{n-1}}-\frac{6A_n^{\phi}}{I_n} \quad (1)$$

式（1）中：B_{n-1}^{ϕ} 为跨度 l_n 上的虚载荷 ω_n 在该跨右支座产生的虚反力 $B_{n-1}^{\phi}=\frac{\omega_n a_{n-1}}{l_{n-1}}$；$A_n^{\phi}$ 为跨度 l_n 上的虚载荷 ω_n 在该跨左支座产生的虚反力，$A_n^{\phi}=\frac{\omega_n b_n}{l_n}$；$M_1$、$M_{n+2}$ 为端支座弯矩，已在简化载荷时求得。对 m 个中间支座可列出 m 个联立方程，从而可解得 m 个未知的支座截面弯矩[1]。

作者简介：黄印宇（1990-），男，本科，工程师，研究方向：锂辉石火法提锂关键热工装备的研发与过程强化研究。

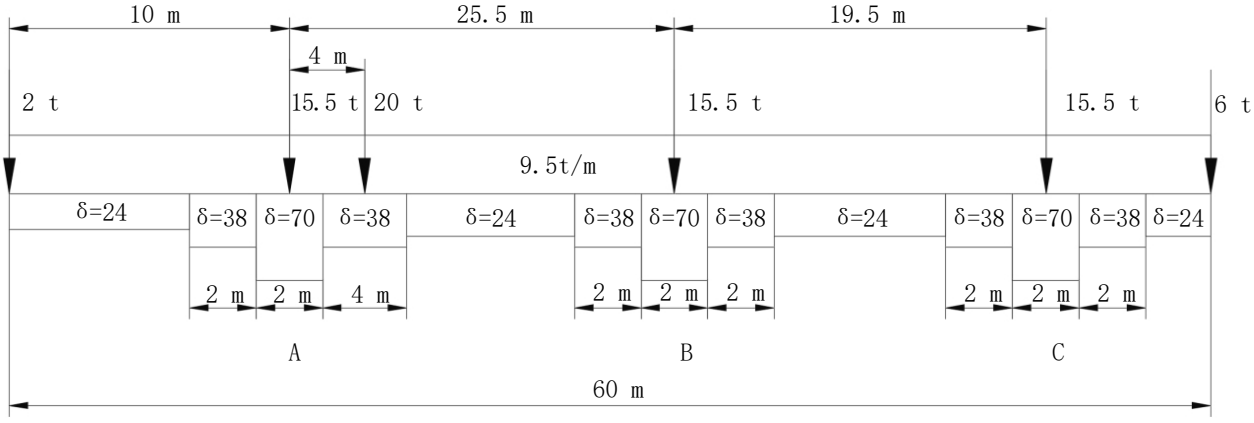


图1 焙烧窑载荷图

通过计算,焙烧窑筒体进料端悬伸段载荷:R_0=97 t;焙烧窑筒体进料端悬伸段弯矩:M_0=495 t.m,与之平衡第一档支撑另外一侧弯矩 M_1=-M_0=-495 t.m;焙烧窑均布载荷为9.5 t/m,筒体出料端悬伸段集中载荷:R_4=53.5 t;筒体出料端悬伸段弯矩:M_4=148.8 t.m,与之平衡第三档支撑另外一侧弯矩 M_3=-M_4=-148.8 t.m。

将求得数据代入三弯矩:$l_1M_1+2(l_1+l_2)M_2+l_2M_3=-6B_1^{\phi}-6A_2^{\phi}$,对于第一档到第二档,既受到集中载荷,又受到均布载荷,采用叠加法计算系数 B_1^{ϕ}。

$$B_1^{\phi}=\frac{pab(l+a)}{6l}+\frac{ql^3}{24} \quad (2)$$

对于第二档到第三档,受到均布载荷作用。

$$A_2^{\phi}=\frac{ql^3}{24} \quad (3)$$

计算得到:B_1^{ϕ}=6 895.09,A_2^{ϕ}=2 935.05。将所有数据代入三弯矩方程,求得方程:$90M_2+19.5M_3$=-46 358.34,解得 M_2=-483 t.m。

对于第n档,设外载荷在静定基础上产生的支反力分别为 $R_{n.n}^0$ 和 $R_{n+1.n}^0$,而支座弯矩在静定基础上产生的支座反力为 $\pm\frac{M_{n+1}-M_n}{l_n}$,则 $R_{n.n}=R_{n.n}^0+\frac{M_{n+1}-M_n}{l_n}$,$R_{n+1.n}=R_{n+1.n}^0-\frac{M_{n+1}-M_n}{l_n}$。计算得到:$R_{11}$=138.46 t,$R_{21}$=123.79 t;$R_{22}$=109.76 t,$R_{34}$=75.49 t。

各档支座反力:R_A(第一挡支座反力)=$R_0+R_{11}+R_{钢板多余}$=250.96 t;R_B(第二挡支座反力)=$R_{21}+R_{22}+R_{钢板多余}$=249.05 t;R_C(第二挡支座反力)=$R_{34}+R_4+R_{钢板多余}$=144.5 t。

3.1.2 筒体最大弯矩计算

根据焙烧窑筒体的各段载荷,分别列出筒体每段上的弯矩方程。

M_{1x}=-4.75x^2-2x(0≤x≤10)

M_{2x}=-4.75x^2+233.46x-2 354.6(10≤x≤14)

M_{3x}=-4.75x^2+213.46x-2 074.6(14≤x≤35.5)(4)

M_{4x}=-4.75x^2+447.01x-10 365.6(35.5≤x≤55)

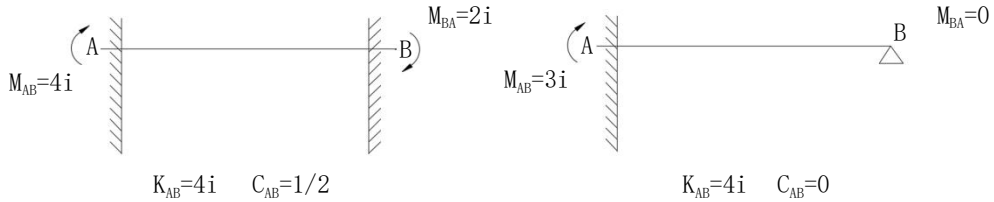
M_{5x}=-4.75x^2+576x-17 460(55≤x≤60)

根据弯矩方程找出筒体不同壁厚处最大弯矩分别为:M_{24max}=-246.75 t.m,M_{38max}=-402.75 t.m,M_{70max}=-495 t.m。

3.1.3 用其他方法求解支座弯矩

1.弯矩分配法:利用三弯矩方程计算,支座越多的超静定筒体的时候越麻烦。对于多支撑窑如果用弯矩分配法计算筒体弯矩就方便多了。弯矩分配法符号规定:M_{AB}-AB杆的A端支座加于该杆的杆端弯矩,以顺时针为正;M_{BA}-AB杆的B端支座加于该杆的杆端弯矩,以顺时针为正。对于连续梁,其每一跨相当于杆件AB,支座截面上的弯矩相当于杆端弯矩。杆端抗弯劲度 K_{AB} 在任一杆件AB中,使杆端A产生单位转角而需在A端所加弯矩的绝对值,称为A端的抗弯劲度 K_{AB}。两种基本杆件的 K_{AB} 见图2。

图2中,$i=\frac{EI}{l}$,得出焙烧窑筒体的第二档抗弯劲度分别为:



K_{AB}=4i C_{AB}=1/2 K_{AB}=4i C_{AB}=0

图2 抗弯劲度和抗弯系数图

$$K_{21}=\frac{3EI}{l_1}=\frac{3EI}{25.5}=0.118EI$$
$$K_{23}=\frac{3EI}{l_2}=\frac{3EI}{19.5}=0.154EI \quad (5)$$

若干杆件的端点相交于同一刚性节点上。在该刚性节点上加外弯矩，相交各杆端将以某种比例共同分担这个外弯矩，每个杆端分担的比例称作该杆端的弯矩分配系数，第二档左侧分配系数 u_{21} 和第二档右侧分配系数 u_{23} 计算如下：

$$u_{21}=\frac{k_{21}}{k_{21}+k_{23}}=\frac{0.118}{0.118+0.154}=0.434$$
$$u_{23}=1-u_{21}=1-0.434=0.566 \quad (6)$$

在杆件 AB 中，使杆端 A 产生单位转角需要在端 A 加弯矩 M_{AB}，同时在 B 端产生弯矩 M_{BA}，称为传递弯矩，比值 $C_{AB}=\frac{M_{BA}}{M_{AB}}$称为传递系数[2]，焙烧窑第二档支承左右两侧筒体简化为连续梁后与图 2 右侧杆件支承形式相同，所以第二档左侧传递系数 C_{21} 和第二档右侧传递系数 C_{23} 分别为：C_{21}=0，C_{23}=0。

固定端弯矩:第一、二档,M_1=-495 t.m,M_{21}=563.69 t.m;第二、三档，M_{22}=-377.17 t.m，M_3=-148.8 t.m。

2. 弯矩计算：为便于进行计算，并能清晰地呈现焙烧窑弯矩分配计算的结果，需要列出弯矩分配计算表（见表 1）开展计算。表的首行为分配系数，根据前面的计算结果，第二档左侧分配系数 u_{21}=0.434，第二档右侧分配系数 u_{23}=0.566，将这两个分配系数分别填入计算表中第一行第二档两侧。（由于第二档支承左右两侧的传递系数为 0，即第二档支承左右两侧相邻的支承产生的弯矩对第二档支承左右两侧弯矩计算结果无影响，所以计算表 1 中略去传递系数相关数据），计算表的第二行为固定弯矩值，根据前面的计算结果，第一档弯矩 M_1 为-495 t.m，第二档左侧弯矩 M_{21}=563.69 t.m，第二档右侧弯矩 M_{22}=-377.17 t.m，第三档弯矩 M_3 为-148.8 t.m，将上述数据填入第二行固定端弯矩处，随后计算分配及传递弯矩。

第二档左侧分配及传递弯矩计算：用第二档右侧固定弯矩的绝对值减去第二档左侧固定弯矩值的差再乘以第二档左侧分配系数。

第二档右侧分配及传递弯矩计算：用第二档右侧固定弯矩的绝对值减去第二档左侧固定弯矩值的差再乘以第二档右侧分配系数。

对于单节点的双跨距连续梁，分配一次即可得出精确解。所以第一次计算出第二档左右两侧的分配及传递弯矩后，用固定端弯矩与分配及传递弯矩进行叠加即可得到最终的第 2 档计算弯矩值，详细计算结果详见表 1。

表 1 弯矩分配计算表

计算项目	支撑位置			
分配系数	第一档	第二档（左）	第二档（右）	第三档
μ	—	0.434	0.566	—
固定端弯矩（t.m）	-495	563.69	-377.17	-148.8
分配及传递弯矩（t.m）	—	-80.95	-105.57	—
叠加结果（t.m）	-495	483	-483	-148.8
	M_1	M_2（左）	M_2（右）	M_3

第一档弯矩 M_A=-495 t.m,第二档弯矩 M_B=-483 t.m,第三档弯矩 M_C=-148.8 t.m，弯矩分配法计算结果与三弯矩法计算结果完全相同。

3.1.4 弯曲强度校核

$$\sigma_{弯曲}=\frac{M}{Ks\times Kt\times W\times k}\le[\sigma] \quad (7)$$

式（7）中，W 为筒体抗弯截面模数；Ks 为焊缝强度系数（对于焙烧窑筒体焊缝来说，在加工厂内的焊缝为自动焊接，但是由于筒体都非常长，一般筒体采用分段运输现场组焊成整体，现场组焊部分一般由人工完成，所以对于 Ks（焊缝强度系数）按人工焊 Ks 取 0.9。）；Kt 为温度系数（在焙烧窑的耐火材料及窑头风机都正常的情况下，锂行业焙烧窑体最高温度在 250 ℃左右，按 250 ℃进行取值，筒体材料选用 Q355B（旧牌号 16Mn），Kt=0.85。）；K 为开螺栓孔削弱系数（筒体未开螺栓孔 K=1）。

经计算，筒体上不同壁厚处最大弯矩分别为:$\sigma_{弯曲24max}$=96.5 kg/cm^2,$\sigma_{弯曲38max}$=99.1 kg/cm^2,$\sigma_{弯曲70max}$=65.6 kg/cm^2。对于有耐火材料的焙烧窑许用弯曲应力 [σ]=200 kg/cm^2，允许个别点 [σ]=200 kg/cm^2 ～ 250 kg/cm^2。筒体上各壁厚处计算最大弯曲应力均小于许用弯曲应力 [σ]=200 kg/cm^2，所以筒体弯曲强度校核合格。

3.2 焙烧窑筒体刚度计算

3.2.1 焙烧窑跨中挠度值计算

精确求解连续梁各跨间最大挠度及其位置的方法较为复杂。依据梁的变形特性，无论载荷状况怎样，最大挠度位置通常处于中点附近。采用跨中点挠度作为最大挠度的近似值，其误差极小。假设最大挠度 y_m 位于跨中点，也就是假定该点截面转角为零，那么可将跨中挠度计算转化为对长度为$\frac{1}{2}$某值的悬臂梁端挠度的计算，由此能够得到近似公式：

$$y_m=\frac{1}{EI}[-\frac{M_n}{2}(\frac{l}{2})^2+\frac{R_n}{3}(\frac{l}{2})^3-\frac{q}{8}(\frac{l}{2})^4] \quad (8)$$

式（8）中，E为材料弹性模量（10^6 kg/cm^2），筒体材质Q345R[3]，按250 ℃[4]选取E=1.88×10^6 kg/cm^2[5]，惯性矩$I=\frac{\pi}{64}[(D+2\delta)^4-D^4]$；$I$为惯性矩（cm^4）；$q$为均布载荷（kg/cm）；$l$为跨距（cm）；$M_n$为使悬臂梁产生$y_m$挠度变形的弯矩（kg.cm）；$R_n$为悬臂梁受到的支撑力（kg）。

经过计算，焙烧窑筒体第一档到第二档最大挠度：$y_{max1}\approx 0.753$ cm，$\frac{y_{max1}}{l_1}=0.295$ mm/m；焙烧窑筒体第二档到第三档最大挠度：$y_{max2}\approx 0.2$ cm，$\frac{y_{max2}}{l_2}=0.1$ mm/m；y_{max1}和y_{max2}的挠度值均小于跨间或悬伸段的挠度许用值$[\frac{y}{l}]=0.3$ mm/m，所以焙烧窑跨中挠度值校验合格。

3.2.2 焙烧窑筒体与轮带结合面变形计算

假设在工作状态下，焙烧窑的轮带与筒体之间不存在间隙，那么该段筒体的变形量等同于轮带的变形量。由表2可知，当托轮与轮带的接触角α_0为0°时，轮带上会出现最大弯矩$M_{轮带\ MAX}=0.0\ 861QRc$，即此时轮带产生最大形变。轮带与托轮接触时，不同接触角α_0所对应的弯矩与载荷、轮带截面中心到轮带中心距离的比值详见表2。

表2 松套轮带不同接触角对应最大弯矩比值表

接触角 /α_0	最大弯矩比值 /$\frac{M_{max}}{QR_C}$
0°	0.0 861
30°	0.0 847
45°	0.0 819
60°	0.0 773
90°	0.0 629
120°	0.0 479
135°	0.0 461

轮带松套于筒体之上，产生最大变形后椭圆度（最大直径和最小直径之差）。

$$\omega_{max}=-2\Delta\frac{\pi}{2}+\Delta_0+\Delta_x$$

$$\Delta\frac{\pi}{2}=-0.0\ 217\frac{QRc^3}{EI_r},\ \Delta_0=0.038\frac{QRc^3}{EI_r},\ \Delta_x=0 \quad (9)$$

$$\omega_{max}=0.0\ 814\frac{QRc^3}{EI_r}$$

式（9）中，Q为支承载荷，取由筒体弯矩计算求得的各支座反力的最大值（kg）；R_c为轮带截面中心到轮带中心的距离（cm）；E为材料弹性模量（kg/cm^2）[6]；I_r为截面惯性矩，$I_r=\frac{B_rH^3}{12}$，B_r为轮带宽度（cm），H为轮带截面高度（cm）[7]。

支承支座反力最大值取250 960 kg，轮带截面中心到轮带中心的距离，R_c=250 cm，E=1.88×10^6 kg/cm^2[8]，I_r=285 833 cm^4。

根据计算，$\omega_{max}\approx 0.6$ cm，对于一般窑，要求计算$\omega\leq[\omega]=0.002D$。

对于4.2 m的焙烧窑，$[\omega]=0.002D=0.84$ cm，计算$\omega_{max}\approx 0.6$ cm＜$[\omega]$，筒体椭圆度校核合格。

4 结束语

针对锂精矿加工所用φ4.2×60 m焙烧窑筒体，本文分别采用三弯矩法与弯矩分配法开展了细致的强度计算。上述两种方法在理论力学范畴内具备良好的适用性与计算精度，可有效判定筒体在实际工况下的受力状态与承载能力。为明确筒体刚度特性，本文还采用跨中挠度值计算法与筒体椭圆度计算法，对该焙烧窑筒体开展了系统的刚度分析。上述计算方法不仅可以较为准确地判定筒体的强度与刚度特性，还可进一步验证筒体壁厚选型的合理性。对相关参数开展细致计算与分析后可得，本文研究对象φ4.2×60 m焙烧窑筒体的弯曲强度满足全部设计要求，其跨中挠度值、筒体椭圆度均小于规定许用值，刚度校核结果合格。上述计算结果表明，该φ4.2×60 m焙烧窑筒体的强度与刚度均符合行业相关规范，可适配实际生产的工况需求，能够保障锂精矿加工过程中焙烧窑的安全稳定运行。此外，本研究成果既为当前项目的设计优化提供了理论参考，也为锂行业焙烧窑筒体的设计与改进积累了数据参考，有助于推动行业技术的进一步发展。

参考文献：

[1] 杨青松,陈远,王远东,等.外热式回转窑支承系统力学分析[J].中国重型装备,2025(02):12-16.
[2] 同[1].
[3] 董建松,刘清元,胡庆彪,等.对水泥回转窑系统设计的几点建议[J].新世纪水泥导报,2024,30(04):38-41.
[4] 刘钢,赵鹏志,舒银军,等.回转窑筒体温度变化对其中心线直线度的影响分析[J].新世纪水泥导报,2023,29(05):29-33.
[5] 国家市场监督管理总局,国家标准化委员会.压力容器第2部分:材料(GB 150.2-2024)[S].北京:中国标准出版社,2024.
[6] 同[3].
[7] 李根.回转窑滚圈椭圆度校核计算中的有限元应用[J].耐火与石灰,2024,49(01):28-32.
[8] 同[5].

采用机器视觉的电梯曳引轮槽磨损在线检测

邵 扬，龚根星

（武汉市特种设备检验检测研究院，湖北 武汉 430040）

摘 要 针对电梯曳引轮槽长期运行后易发生磨损且人工检测效率低、主观性强的问题，本研究提出一种基于机器视觉的在线检测方法，系统通过构建在线图像采集装置获取运行状态下的轮槽图像，结合畸变校正、双边滤波、一阶差分梯度计算、双阈值边缘提取以及轮廓拟合与遮挡补偿，实现轮槽磨损量的连续测量和安全等级判定。试验结果表明，该方法在复杂光照和遮挡条件下仍具有较高精度、重复性与实时性，可为电梯曳引系统状态监测和预防性维护提供有效支撑。

关键词 电梯曳引轮槽；磨损在线检测；机器视觉；边缘检测

中图分类号：TP206；TU857 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.002

0 引言

电梯行业的高速发展与存量市场的不断扩大，给电梯全生命周期内的安全检验与运维管理带来了显著挑战。曳引式电梯作为当前应用最广泛的电梯品类，整体运行性能优异，但在长期服役过程中，其内部诸多部件都会出现不同程度的磨损，其中曳引轮轮槽的损耗问题尤为突出[1]。因此，电梯行业在快速发展的同时，安全隐患也不可避免地在逐渐上升。现阶段轮槽磨损检测多依赖停梯后人工观察、样板比对或接触式测量，不仅效率较低而且难以满足在线、连续和定量评估的工程需求[2]。机器视觉具有非接触、信息丰富、响应速度快和便于智能分析等优势，为轮槽磨损状态监测提供了新的技术路径。基于此，本研究围绕在线工况下的图像采集、预处理、轮廓重建与磨损量判定展开研究，构建了一套面向工程应用的曳引轮槽在线检测方法。

1 在线图像采集系统与畸变校正

为满足电梯运行状态下轮槽图像稳定获取的要求，本研究设计了由工业相机、定焦镜头、条形LED补光源、编码器触发模块、减振安装支架与边缘计算单元组成的在线图像采集系统。相机安装在机房曳引机侧部，以固定倾角对准目标绳槽区域，配合窄脉冲补光和短曝光成像方式抑制高速运动造成的拖影；编码器实时输出曳引轮转角信息，用于在指定相位触发采样，保证不同帧对应相近截面位置。考虑机房空间受限、镜头视场边缘弯曲以及安装偏置会引起轮槽轮廓的径向畸变和透视变形，系统在安装标定阶段采用平面标定板求取相机内外参数及畸变系数，建立从像素坐标到实际测量坐标的映射模型，对桶形、枕形畸变和倾斜投影误差进行统一校正，并利用轮缘基准特征完成尺度归一化处理，从而提高后续边缘提取、轮廓拟合和磨损量计算的准确性与一致性。

2 面向在线检测的图像预处理方法

2.1 基于双边滤波的图像降噪处理

在线采集的曳引轮槽图像通常同时含有机械振动模糊、粉尘散射噪声、油污纹理和钢丝绳股纹高频干扰，若直接进行边缘检测，极易将伪边缘误判为真实轮槽轮廓[3]。基于此，本研究采用双边滤波对图像实施保边降噪处理，其核心思想是在空间邻近性和灰度相似性双重约束下进行加权平均。设输入图像为$I(p)$，输出为$I_f(p)$，则$I_f(p)=\frac{1}{W_p}\sum_{q\in\Omega}G_s(|p-q|)\cdot G_r(|I(p)-I(q)|)\cdot I(q)$，其中$W_p=\sum_{q\in\Omega}G_s(|p-q|)\cdot G_r(|I(p)-I(q)|)$。在实际实现中，本研究将空间域标准差设为2.6，灰度域标准差设为18，并通过局部对比度自适应机制动态调整滤波窗口，使平坦区域获得较强平滑，而轮槽边缘附近的灰度突变得以保留。

2.2 基于一阶差分的图像梯度计算

轮槽磨损的直接视觉表现通常不是整体灰度变化，而是槽口曲线、槽底转折和磨痕边界的局部梯度变化，因此需要在降噪基础上进一步提取能够反映几何变化的方向性特征。本研究采用一阶差分算子计算图像在横向与纵向的梯度分量，设滤波后图像为$I_f(x,y)$，则$G_x=I_f(x+1,y)-I_f(x-1,y)$，$G_y=I_f(x,y+1)-I_f(x,y-1)$，梯度幅值表示为$M(x,y)=\sqrt{G_x^2+G_y^2}$，梯度方向表示为$\theta(x,y)=\arctan\frac{G_y}{G_x}$。由于曳引轮槽边缘在图像中主要表现为近

作者简介：邵扬（1990-），女，硕士研究生，工程师，研究方向：特种设备检验。

似弧形连续结构，本研究并未简单依赖单一方向梯度，而是引入方向一致性约束，对相邻像素梯度方向的离散程度进行统计，构造局部方向置信度 $C_\theta=1-\sigma_\theta/\pi$，以剔除由油渍纹理和钢丝绳微细纹路造成的随机梯度响应[4]。当 $M(x,y)$ 较高而 C_θ 较低时，将该像素标记为疑似伪边缘而非直接保留。

2.3 基于双阈值的图像边缘提取

在获得梯度幅值与方向信息后，如何从复杂候选边缘中稳定提取轮槽真实边界，是在线检测算法能否保持高鲁棒性的关键，本研究借鉴Canny思想并结合曳引轮槽图像的特征分布，采用非极大值抑制与双阈值连接相结合的边缘提取方法。首先沿梯度方向比较邻域像素，仅保留局部极大值以获得细化边缘；随后设置高阈值 T_h 和低阈值 T_l，当 $M(x,y)\geqslant T_h$ 时判定为强边缘，当 $T_l\leqslant M(x,y)<T_h$ 时判定为弱边缘，若弱边缘与强边缘在8邻域内连通，则予以保留，否则剔除。为提高不同工况下阈值的稳定性，本研究依据轮槽区域内梯度直方图的分位数自适应确定阈值，令 $T_h=P_{85}(M)$，$T_l=0.42T_h$。该方法既避免了固定阈值在亮度波动条件下失效的问题，又能保持轮槽弧边的连续性。

3 曳引轮槽磨损在线检测算法构建

3.1 轮槽轮廓精准定位与边缘拟合

在边缘图基础上，本研究构建“候选区域约束、轮廓聚类、几何拟合、参数反演”的轮槽定位流程。首先依据曳引轮安装先验与编码器相位信息确定轮槽可能出现的感兴趣区域，通过连通域分析删除面积过小且曲率突变明显的离散边缘[5]。然后利用概率霍夫圆弧搜索获取轮槽边缘的粗定位结果，并将粗定位得到的边缘点集输入最小二乘圆弧拟合模型，求解槽口圆弧中心 a、b 和拟合半径 R，其目标函数为 $\min\sum_{i=1}^{n}[(x_i-a)^2+(y_i-b)^2-R^2]^2$。针对实际磨损后轮槽截面可能不再严格服从标准圆弧的情况，进一步采用三次B样条对边缘点进行局部精细拟合，形成连续轮廓函数 $C(s)$，并据此计算槽口宽度 B、槽底深度 H、左右壁夹角 α 及截面等效曲率半径 R_e。在工程上，轮槽磨损并不总表现为单一深度增减，而往往伴随左右侧壁不均匀损耗，因此又定义偏磨系数 $\eta=|H_l-H_r|/(H_l+H_r)$ 来表征轮槽受力不对称程度。

3.2 绳槽视觉遮挡在线补偿方法

由于曳引轮与钢丝绳处于接触包络状态，图像中轮槽底部和局部侧壁常被钢丝绳遮挡，尤其在运行状态下钢丝绳产生轻微摆动后遮挡区会呈现动态变化特征，若直接依据可见边缘拟合轮槽完整轮廓，容易低估槽底深度并误判磨损程度。为此，本研究提出一种基于几何投影与历史轮廓融合的在线遮挡补偿方法，首先建立相机光心、钢丝绳中心与轮槽截面之间的投影关系，设钢丝绳半径为 r_s，相机到轮槽截面的垂直距离为 Z_c，成像焦距为 f，像元尺寸为 s_p，则当前遮挡宽度可表示为 $L_o=\frac{f\cdot r_s}{Z_c\cdot s_p}\cos\beta$，其中 β 为钢丝绳法向与相机视线夹角；再结合轮槽标准槽型先验与相邻帧未遮挡边缘，构建补偿轮廓 $C_c(s)=\lambda C_h(s)+(1-\lambda)C_m(s)$，其中 $C_h(s)$ 为历史稳定轮廓，$C_m(s)$ 为当前可见轮廓拟合结果，λ 由遮挡比例自适应确定。为防止异常帧传递误差，引入卡尔曼滤波对补偿参数进行时序平滑，使轮槽截面恢复结果能够随运行过程连续更新。

3.3 磨损量在线量化与安全判定

在获得当前轮槽完整轮廓后，本研究以新轮槽标准截面为基准，建立磨损量在线量化模型。设标准轮槽轮廓为 $C_0(s)$，当前补偿后的轮廓为 $C_t(s)$，则最大磨损深度定义为 $W_d=\max_{s\in\Omega}[C_t(s)-C_0(s)]$，截面磨损面积定义为 $W_a=\int_\Omega|C_t(s)-C_0(s)|ds$，其中$\Omega$为轮槽有效接触区域。考虑轮槽失效并不仅取决于单一点的最大磨损，还与槽口展宽、偏磨程度和接触包角变化相关，研究进一步构建综合健康指数 $HI=w_1\frac{W_d}{W_{d,lim}}+w_2\frac{W_a}{W_{a,lim}}+w_3\eta+w_4\frac{\Delta B}{B_0}$，其中 (w_1,w_2,w_3,w_4) 根据专家经验与现场样本训练确定，满足 $\sum w_i=1$。当 $HI<0.60$ 时判定为安全状态，$0.60\leqslant HI<0.85$ 判定为预警状态，$HI\geqslant0.85$ 则判定为需检修或更换。

4 在线检测方法试验与性能验证

4.1 在线检测试验平台与方案设计

为验证所提方法在真实工况下的有效性，本研究搭建了由现场电梯与实验室样机共同组成的联合试验平台，现场平台选取一台额定载荷1 000 kg、额定速度1.75 m/s、曳引轮直径520 mm、钢丝绳直径10 mm的曳引式乘客电梯，检测装置布置在机房曳引机侧；实验室平台则配置可更换轮槽试块和可调光源系统，用于模拟轻度、中度和重度磨损状态，并通过激光轮廓仪提供基准测量值。试验方案分为三部分：第一部分验证在线图像采集与畸变校正效果，在不同安装角度和照度条件下记录轮槽成像质量；第二部分验证图像预处理与轮廓拟合效果，比较不同算法对边缘连续性和槽型恢复精度的影响；第三部分验证磨损定量结果，将机器视觉测量值与接触式轮廓仪测量值进行对比，同时统计系统在连续运行8 h条件下的丢帧率、误报警率和单帧处理时长。

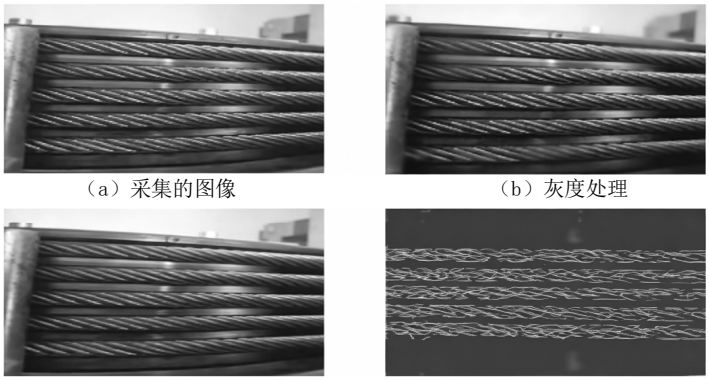
4.2 图像采集与预处理效果验证

从图像质量验证结果看，本研究构建的在线采集与预处理方法能够在复杂背景下稳定突出轮槽边缘特征，原始图像受油污反射和钢丝绳股纹影响较大，局部区域存在灰度压缩和条纹伪边缘；经过畸变校正后，轮缘圆

弧投影更加集中，轮槽横向尺寸的一致性明显增强。再经双边滤波、一阶差分梯度与双阈值边缘提取处理后，轮槽边缘由原始图像中的模糊灰带转变为连续清晰的单像素级轮廓，尤其在槽口与侧壁过渡位置，边缘断裂现象得到明显抑制。统计结果显示，预处理后图像平均对比度由 18.7 提升至 31.4，边缘清晰度指标由 0.46 提升至 0.81，连续边缘占比由 72.3% 提高至 91.5%。此外，在 300 lx、500 lx 和 800 lx 三种照度条件下，算法均能够自动调整阈值范围并维持较高边缘保真度，说明所提预处理链条对光照波动具有较强适应能力（见图 1）。

4.3 磨损检测精度与可靠性验证

研究结果表明：机器视觉法在各检测点上的测量值与基准值高度一致，平均绝对误差为 0.043 mm，最大误差为 0.07 mm，平均相对误差为 2.86%，重复测量标准差为 0.018 mm，说明该方法不仅具备较高精度，而且具有良好的重复性。进一步从安全判定角度分析，当综合健康指数接近阈值区间时，系统仍能保持稳定分类，没有出现临界工况下频繁跳变的现象，这与研究引入的遮挡补偿及多指标综合判定机制密切相关。对连续三天的重复采样结果进行统计，系统误报警率为 2.1%，漏报警率为 1.4%，满足在线监测工程应用对可靠性的要求。尤其值得注意的是，在第 9 和第 10 检测点，轮槽已出现明显展宽与偏磨叠加特征，传统人工样板比对仅判断为“存在磨损”，而研究方法则进一步给出了量化磨损值及预警等级，体现出更强的工程决策支撑能力（见表 1）。



（a）采集的图像　（b）灰度处理　（c）双边滤波处理　（d）边缘检测

图 1　原始图像、畸变校正图像、双边滤波图像与边缘提取结果对比图

表 1　机器视觉法与接触式测量结果对比

检测点	接触式测量值 /mm	机器视觉测量值 /mm	绝对误差 /mm	综合健康指数 HI	判定结果
1	0.82	0.85	0.03	0.31	安全
2	0.97	1.01	0.04	0.36	安全
3	1.12	1.09	0.03	0.42	安全
4	1.26	1.30	0.04	0.47	安全
5	1.38	1.43	0.05	0.54	安全
6	1.57	1.52	0.05	0.63	预警
7	1.69	1.74	0.05	0.71	预警
8	1.86	1.81	0.05	0.79	预警
9	2.03	1.96	0.07	0.87	检修
10	2.14	2.09	0.05	0.91	检修

5　结束语

本研究围绕电梯曳引轮槽磨损在线检测需求，提出了一种基于机器视觉的完整技术方案，并从在线图像采集、畸变校正、图像预处理、轮廓拟合、遮挡补偿到磨损量量化与安全判定进行了系统构建。试验验证显示，该方法在不同照度、不同速度和不同绳径条件下均具有较高精度与较好实时性，具备较强工程应用前景。未来研究可进一步结合深度学习分割网络和多源传感信息融合技术，以提升电梯曳引系统状态评估的智能化水平。

参考文献：

[1] 张雍,董灵军,王涤宇,等.电梯曳引轮槽磨损定量检测算法的设计 [J]. 中国电梯 ,2023,34(05):55-58.
[2] 肖承垠,聂敏,王佳宁,等.浅析电梯曳引轮槽磨损机理危害及其应对措施 [J]. 上海轻工业 ,2025(06):145-147.
[3] 国树东,江凡,陈健,等.多规格电梯曳引轮轮槽磨损检测仪器设计研究 [J]. 特种设备安全技术 ,2025(02):40-43.
[4] 申伟,叶有俊,陈建文,等.电梯曳引轮磨损检测及应对策略 [J]. 石油和化工设备 ,2025,28(02):29-32.
[5] 傅亮,贡伟建.机器视觉技术支持下的电梯曳引轮磨损检测方法研究 [J]. 技术与市场 ,2024,31(09):23-27.

交通工程领域BIM与GIS融合技术及应用场景研究

韩铭铭

（山东鲁勘集团有限公司泰安分公司，山东 泰安 271000）

摘 要 随着交通工程向智能化、精细化、全生命周期管理方向发展，单一技术已难以满足复杂交通工程的规划、设计、施工、运维全流程需求。建筑信息模型（BIM）擅长微观构件的精细化建模与参数化管理，地理信息系统（GIS）的优势在于宏观地理空间数据的整合与空间分析，二者融合可实现“微观构件—宏观空间”的无缝衔接。本文系统阐述BIM与GIS融合技术的核心原理、融合路径及技术优势，分析其在交通工程各环节的典型应用场景，结合真实工程案例及具体检测数据验证融合技术的应用价值，以期为交通工程领域BIM与GIS融合技术的推广应用提供参考。

关键词 交通工程；BIM技术；GIS技术；融合应用；全流程管理体系

中图分类号：U495 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.003

0 引言

随着我国交通工程建设不断高质量发展，高速公路、轨道交通等工程规模不断扩大，结构日趋复杂，对规划科学性、设计精准性、施工可控性及运维高效性的要求显著提升。传统交通工程管理模式依赖分散的技术手段存在数据割裂、空间关联不足、精细化程度低、全流程协同困难等问题，难以适配现代交通工程的管理需求。BIM技术以三维模型为核心，实现构件级的精细化管理与参数化表达，GIS技术则依托地理空间框架，实现宏观区域的空间分析与数据整合。二者的深度融合，可弥补单一技术的局限性，构建“微观精细化+宏观空间化”的全流程管理体系。

1 BIM与GIS融合技术核心理论基础

1.1 核心技术概述

BIM是基于三维模型的数字化技术，通过参数化建模将交通工程的构件、几何、属性、施工等各类数据整合到统一模型中，实现全生命周期数据共享与协同管理，核心优势在于微观构件的精细化表达与数据可追溯性，可精准呈现桥梁、隧道、路基等构件细节，为精细化管理提供支撑。GIS用于采集、存储、分析、展示地理空间数据，能整合工程区域地形、地质、周边建筑、路网等宏观信息，通过空间分析实现规划、路径优化等功能，核心优势在于宏观空间数据整合与空间关系分析。二者融合并非简单叠加，而是通过数据互通、功能互补，实现微观与宏观数据的无缝衔接，构建全方位的交通工程数字化管理体系[1]。

1.2 融合核心原理与路径

BIM与GIS融合的核心原理是打破两种技术的数据壁垒，实现数据互通、功能互补与协同联动，本质上是将微观精确的BIM无缝集成到GIS中，形成从“地球”到“螺栓”的统一数字表达。其融合路径主要分为三个层次：数据层融合、模型层融合、应用层融合。数据层融合是基础，通过数据格式转换、属性映射等方式，将BIM模型的构件参数、施工数据与GIS的地理空间数据、属性数据进行整合，建立统一的数据标准，常用的数据转换格式包括IFC、CityGML等，实现BIM模型与GIS地理空间数据的互通；模型层融合是核心，将BIM三维构件模型嵌入GIS地理空间框架中，实现“微观构件+宏观地理”的一体化建模，通过坐标统一与精准定位，将BIM模型的局部坐标系转换到GIS的全球或区域统一坐标系，确保BIM模型在真实地理空间中的精准“落地”[2]。

1.3 融合技术优势

与单一技术相比，BIM与GIS融合技术优势显著：一是实现数据一体化管理，打破“信息孤岛”，提升数据利用效率，数据共享效率可提升40%以上。二是提升空间分析与精细化管理能力，结合GIS空间分析

作者简介：韩铭铭（1993-），女，本科，助理工程师，研究方向：交通工程。

与 BIM 精细化建模，优化设计方案，施工精细化程度提升 50%。三是强化全流程协同，实现各参与方实时共享数据，协同效率提升 35% ～ 40%。四是支撑智能决策，为各关键环节提供数据支撑，决策科学性提升 60% 以上，降低决策风险。

2 交通工程领域 BIM 与 GIS 融合技术的典型应用场景

2.1 工程规划阶段应用

规划阶段，BIM 与 GIS 融合技术用于选址规划、路网优化与方案比选，解决传统规划中地理信息与工程细节脱节的问题。通过 GIS 整合规划区域地形、地质、水文、路网等数据，规避禁忌区域。结合 BIM 构建三维规划模型，直观呈现工程与周边环境的关系，对比不同方案的工程量、投资与环境影响，实现优化。例如：在高速公路规划中，融合技术可优化路线走向，减少挖填工程量 15% ～ 20%，缩短规划周期 25%，生态保护合规率提升至 98% 以上。

2.2 工程设计阶段应用

设计阶段是质量控制关键，融合技术可实现精细化与协同设计。在路线设计中，结合 GIS 地形数据与 BIM 建模，构建三维路线模型，通过碰撞检测提前发现 80% 以上设计隐患，设计变更率降低 30% ～ 35%。在桥梁、隧道设计中，BIM 构建精细化构件模型，结合 GIS 分析结构与周边环境的适应性，优化设计方案。例如：某城市轨道交通隧道设计中，碰撞检测准确率达 99.2%，设计误差≤ 3 mm，单公里投资降低 8% ～ 12%，设计周期缩短 20% ～ 25%。

2.3 工程施工阶段应用

施工阶段的核心是精准管控、进度与安全管理，融合技术可有效解决协同管控难题。通过融合平台，实现施工进度可视化，进度偏差控制精度 ±2 天，管控效率提升 40%。在施工放样中，结合 BIM 坐标与 GIS 定位，放样误差≤ 5 mm，效率提升 50% 以上。在安全管控中，标注危险区域、设置预警，安全事故发生率降低 65% 以上，隐患整改率 100%。

2.4 工程运维阶段应用

运维阶段周期长、难度大，融合技术可实现精细化、智能化管理。通过融合平台整合各类数据，建立运维数据库，实现构件级管理。利用 GIS 定位隐患点，结合 BIM 分析原因、制定方案，隐患定位精度≤ 1 m，维修效率提升 35% ～ 40%。实时监测结构性能，预警准确率≥ 95%，可提前 2 ～ 3 天发现隐患。同时，优化交通调度，减少拥堵时长 20% ～ 25%，降低运维成本 25% ～ 30%[3]。

3 BIM 与 GIS 融合技术应用中的关键技术与检测

3.1 核心关键技术

BIM 与 GIS 融合技术在交通工程领域的应用，需依托多项关键技术实现数据互通与功能协同，主要包括四项核心技术：一是数据格式转换技术，用于实现 BIM 模型（IFC 格式）与 GIS 数据（Shapefile、CityGML 格式）的双向转换，确保数据在融合过程中不丢失、不畸变，目前主流的转换工具包括 FME、Arcgis BIM Connector 等，转换准确率达到 98.5% 以上。二是三维模型融合技术，通过坐标校准、模型轻量化处理等方式，将 BIM 精细化模型与 GIS 地理空间模型无缝融合，实现微观构件与宏观空间的精准对接，模型融合误差控制在 2 mm 以内。三是空间数据库技术，构建统一的交通工程 BIM-GIS 融合数据库，实现工程数据、地理数据、监测数据的集中存储、实时更新与高效查询，数据库响应速度≤ 0.5 秒。四是可视化与空间分析技术，开发融合应用平台，实现融合模型的三维可视化展示，结合 GIS 的空间分析功能与 BIM 的参数化分析功能，实现工程规划、设计、施工、运维的智能分析与决策，可视化展示帧率≥ 30 fps，空间分析准确率≥ 99%[4]。

3.2 核心检测指标

为量化 BIM 与 GIS 融合技术的应用效果，结合交通工程的特点，制定了涵盖数据融合、模型精度、应用效率、工程质量四个维度的核心检测指标，具体如下：数据融合维度，包括数据转换准确率（≥ 98%）、数据共享效率（提升≥ 40%）、数据更新延迟（≤ 1 小时）。模型精度维度，包括模型融合误差（≤ 2 mm）、构件放样误差（≤ 5 mm）、碰撞检测准确率（≥ 99%）。应用效率维度，包括设计周期缩短率（≥ 20%）、施工进度管控效率（提升≥ 40%）、运维效率（提升≥ 35%）。工程质量维度，包括设计变更率（降低≥ 30%）、施工误差（≤ 5 mm）、安全事故发生率（降低≥ 65%）、运维成本降低率（≥ 25%）。这些检测指标可精准衡量融合技术的应用效果，为融合技术的优化与推广提供数据支撑，经多个工程案例验证，上述指标均能达到设计要求，部分指标可超额完成[5]。

4 工程中的真实案例实践

4.1 工程概况

本次选取山东省济南市轨道交通 3 号线一期工程作为案例，验证融合技术应用效果。该工程全长 28.6 km，设车站 22 座（地下 18 座、高架 4 座），配套车辆段、停车场各 1 座，总投资 128 亿元，工期 48 个月。工程穿越济南城市核心区、老旧城区及小清河区域，周边建筑密集、地下管线复杂，地质多样，施工难度大，

采用BIM与GIS融合技术覆盖全流程，构建融合应用平台，采集检测数据验证应用价值。

4.2 融合技术应用方案与实施过程

结合本工程特点，制定了针对性的BIM与GIS融合技术应用方案，实施过程分为四个阶段：（1）规划阶段，利用GIS技术整合工程区域的地形、地质、地下管线、现有交通路网等空间数据，通过空间分析功能进行线路选址与方案比选，规避生态保护区、地下管线密集区等禁忌区域，结合BIM技术构建初步规划三维模型，对比3套线路方案的工程量、投资成本与环境影响，最终确定最优线路方案。（2）设计阶段，采用Revit构建车站、隧道、桥梁等构件的精细化BIM模型，标注构件的尺寸、材质、受力参数等信息，通过FME将BIM模型转换为GIS可识别格式，嵌入ArcGIS地理空间框架中，实现BIM模型与宏观地理数据的融合，利用碰撞检测功能排查设计隐患，优化设计方案，同时实现各专业协同设计，共享模型与数据。（3）施工阶段，将BIM施工模型与GIS地理空间数据、施工进度计划相结合，实现施工进度可视化管理，通过融合平台实时对比实际进度与计划进度，及时调整施工方案。利用BIM模型的精准坐标与GIS定位功能，实现隧道、车站构件的精准放样，部署全站仪、沉降计、应变计等监测设备，实时采集施工过程中的沉降、应变等数据，与融合模型关联，实现施工质量与安全的实时管控。（4）运维阶段，构建工程运维管理数据库，整合BIM模型的构件信息、施工数据与GIS的地理空间数据、运维监测数据，实现构件级的运维管理，通过融合平台定位运维隐患点，制定维修方案，优化维修路线，实现运维过程的智能化管理。

4.3 应用效果检测与数据分析

本工程通过部署各类监测设备，采集了设计、施工、运维各阶段的具体检测数据，结合核心检测指标，对BIM与GIS融合技术的应用效果进行全面检测，检测结果如表1所示。通过融合技术的应用，本工程提前3个月竣工，工程质量验收合格率达到100%，获得省级优质工程奖，验证了BIM与GIS融合技术在交通工程领域的可行性与优越性，同时也证明了本文提出的融合路径与应用方案的合理性。

4.4 案例经验总结

本次工程案例实践表明，BIM与GIS融合技术在城市轨道交通工程中具有极高的应用价值，能够有效解决传统工程管理中的数据割裂、管控精度低、协同效率差等问题，显著提升工程设计、施工、运维全流程的质量与效率。案例应用中，通过科学制定融合技术应用方案，重点突破数据格式转换、模型融合等关键技术，严格按照核心检测指标管控应用过程，实现了融合技术的有效落地，各项检测指标均达到或超出规定要求，工程提前竣工且质量达标。同时，通过案例实践提炼出三点核心经验：一是融合技术应用需结合工程实际特点，制定针对性的应用方案，重点关注数据互通与模型精度，确保融合效果。二是需加强各参与方的协同配合，建立统一的技术标准与管理机制，实现数据共享与协同工作。三是需部署完善的监测体系，实时采集监测数据，通过数据反馈优化融合技术应用方案，提升应用效果。

表1 山东省济南市轨道交通3号线一期工程BIM与GIS融合技术应用效果检测结果

检测维度	具体指标	规定指标	案例结果
数据融合	数据转换准确率	≥98%	99.1%
模型精度	模型融合误差	≤2 mm	1.8 mm
模型精度	构件放样误差	≤5 mm	3.2 mm
应用效率	设计周期缩短率	≥20%	26%
工程质量	设计变更率降低	≥30%	36%
工程质量	安全事故发生率降低	≥65%	70%
工程质量	运维成本降低率	≥25%	28%

5 结束语

BIM与GIS融合技术作为交通工程智能化、精细化发展的核心技术，实现了微观构件精细化管理与宏观空间分析的无缝衔接，在交通工程规划、设计、施工、运维全流程具有广泛的应用场景与极高的应用价值。随着交通工程智能化水平的不断提升，BIM与GIS融合技术将向更加智能化、协同化、一体化的方向发展，未来需进一步加强技术创新与人才培养，推动融合技术与交通工程深度融合，助力我国交通工程高质量发展，为交通强国建设提供技术支撑。

参考文献：

[1] 刺宝成,刘英杰,冯益文.基于BIM技术的精细化管理施工研究:以济南轨道交通8号线一期工程为例[J].绿色建造与智能建筑,2025(11):67-69.
[2] 张岳.基于BIM技术的城市轨道交通通号设备室智能布线技术研究[J].绿色建造与智能建筑,2025(10):59-61.
[3] 王建富.BIM技术在轨道交通站后工程中的深化创新应用[J].运输经理世界,2024(12):4-7.
[4] 闫福强,武魁伟.创新理念的城市轨道交通车站建筑设计研究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(14):134-136.
[5] 乔天荣,刘平利,刘家橘,等.基于BIM+GIS融合的技术应用分析[J].地理空间信息,2021,19(01):68-70.

新能源直流汇集系统中电力电子变压器的电子信息故障诊断技术

朱林峰[1]，王　磊[2]，刘超然[3]

（1. 淄博瑞安输变电工程有限公司，山东 淄博 255000；
2. 利华益集团股份有限公司，山东 东营 257400；
3. 山东中科先进技术有限公司，山东 济南 250101）

摘　要　针对新能源直流汇集系统中电力电子变压器（PET）电子信息故障隐蔽性强、耦合度高、传统保护难以精准识别的问题，本文系统分析 PET 输入级、隔离级、输出级及电子信息单元的故障机理与特征规律，构建电气量、信息量、时频量融合的多维度故障特征提取体系，提出分层分级的融合式故障诊断架构，建立基于 CNN-BiLSTM-Attention 与 D-S 证据理论的联合诊断模型，形成故障识别、精确定位、早期预警与闭环处置的完整技术方案，以期为新能源直流汇集系统的智能运维与安全稳定运行提供技术参考。结果表明，该技术可实现功率器件、驱动回路、采样单元及通信链路故障的毫秒级识别，误报率低于 0.5%。

关键词　新能源直流汇集系统；电力电子变压器；电子信息故障；故障特征提取；故障预警

中图分类号：TM41；TP277　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.004

0　引言

电力电子变压器是新能源直流汇集系统的核心能量变换与管控枢纽，集成电压变换、电气隔离、功率调节与多源协同控制功能。其内部集成大量功率半导体器件、电子控制单元与通信模块，在高频开关、强电磁干扰、宽负荷波动工况下，易发生各类电子信息故障。此类故障潜伏期短、传播速度快，易引发系统过压过流、功率失衡甚至停运。本文围绕 PET 电子信息故障的精准诊断需求，系统研究故障分类、机理分析、特征提取、模型构建与系统实现等关键技术，构建标准化的智能故障诊断技术体系。

1　PET 拓扑结构与电子信息故障分类

1.1　典型拓扑构成

新能源直流汇集系统用 PET 普遍采用三级模块化拓扑：输入级为级联 H 桥变换器，实现中压直流接入与功率均分；隔离级由多个双有源桥（DAB）单元并联组成，完成高频隔离与电压匹配；输出级为双向 DC/DC 变换器，适配低压直流母线与储能、负荷接口。配套系统包含 IGBT 驱动电路、电压电流采样单元、DSP/FPGA 主控单元及光纤以太网通信网络，构成电能变换与电子信息管控的完整闭环[1]。

1.2　电子信息故障分类

电子信息故障指由电子元器件失效、电路异常及信息传输错误引发的功能故障，区别于绝缘击穿、机械损坏等物理故障，可具体分为五类。（1）功率器件故障：IGBT 开路、短路、栅极氧化层损坏、反并联二极管退化；（2）驱动控制故障：驱动电源欠压、驱动脉冲丢失、死区时间异常、主控芯片运算错误、PWM 信号畸变；（3）采样传感故障：电压 / 电流传感器零点漂移、增益偏差、信号调理电路故障、电磁干扰导致的采样失真；（4）通信故障：光纤链路损耗过大、接口接触不良、数据丢包、误码率超标、模块间时钟失步；（5）复合故障：两种及以上故障并发，或单一故障引发的连锁式故障扩散。

1.3　故障传播特性

PET 电子信息故障具有层级传导与交叉耦合特性。输入级器件故障会导致直流母线电压纹波增大；隔离级 DAB 单元故障将引发功率传输中断与模块间环流；输出级故障直接影响负荷供电稳定性；采样故障会误导控制逻辑，形成“采样失真—控制失稳—故障加剧”的恶性循环；通信故障会破坏多模块协同控制，导致系统功率失衡。

作者简介：朱林峰（1986-），男，本科，工程师，研究方向：电力工程。

2 电子信息故障机理与特征表征

2.1 功率器件故障机理

IGBT短路故障多由过电压击穿、过流过热导致，故障后呈现低阻抗特性，故障电流在微秒级内急剧上升[2]。IGBT开路故障多由键合线脱落、栅极驱动失效引发，表现为桥臂电流断续、输出电压出现半波畸变、二次谐波含量显著升高。器件退化阶段表现为导通压降增大、开关延时变长，可通过电参数变化实现早期识别。

2.2 驱动与控制故障机理

驱动回路故障主要表现为驱动电压幅值不足、上升沿/下降沿延迟，导致IGBT导通不充分或关断不彻底，产生额外开关损耗与电压尖峰。控制单元故障由程序跑飞、存储器损坏、电磁干扰引发，表现为PWM占空比异常、闭环控制稳态误差增大、系统响应变慢甚至失控。

2.3 采样与传感故障机理

采样故障分为加性故障与乘性故障，加性故障表现为零点偏移，乘性故障表现为增益偏差。采样信号叠加高频噪声会导致控制回路振荡，采样数据丢点会引发控制逻辑误判。接地电位差与电磁耦合干扰是导致采样失真的主要外部诱因。

2.4 通信故障机理

通信故障分为物理层故障与协议层故障。物理层故障包括光纤断裂、接口损坏，表现为通信完全中断；协议层故障包括数据帧校验错误、时序错乱，表现为数据丢包、指令执行延迟。多模块并联系统中，通信故障会破坏均压均流控制，引发模块间功率环流。

2.5 复合故障耦合机理

复合故障是实际工程中最常见且最难诊断的故障类型，多由单一故障未及时处置引发连锁反应形成。例如：IGBT短路故障会产生瞬时大电流，烧毁驱动电路的光耦与电阻，进而导致驱动脉冲丢失；驱动异常又会引发相邻桥臂直通，造成更多器件损坏；同时，故障产生的强电磁干扰会耦合至采样回路，导致采样数据失真，进一步误导控制逻辑[3]。复合故障的特征相互叠加、相互掩盖，单一信息源难以实现准确诊断，必须依赖多源信息融合技术。

3 多维度故障特征提取技术

3.1 故障特征集构建

构建涵盖电气特征、信息特征、时频特征的三维特征集。（1）电气特征：直流母线电压有效值、桥臂电流峰值、谐波总畸变率、d/q轴电压电流分量、功率波动量；（2）信息特征：驱动脉冲占空比、采样值偏差、通信误码率、控制指令跟踪误差、模块间功率差；（3）时频特征：VMD分解各模态分量能量、小波包能量熵、希尔伯特变换瞬时幅值与相位。

3.2 特征选择与降维

高维原始特征集存在冗余信息与无关特征，会增加模型计算量并降低诊断精度。采用主成分分析（PCA）与互信息法结合的特征选择策略：先通过PCA对特征集进行线性降维，保留累计贡献率95%以上的主成分；再利用互信息法计算各主成分与故障标签的相关性，剔除相关性低于阈值的特征，最终得到低维、高辨识度的最优特征子集，可将模型推理速度提升30%以上。

3.3 时频特征增强

采用变分模态分解（VMD）对非平稳故障信号进行分解，克服经验模态分解的模态混叠问题。计算各模态分量的小波包能量熵，表征信号能量分布的异常变化。通过希尔伯特黄变换提取故障瞬态特征，实现微弱早期故障的特征增强，有效抑制背景噪声干扰。分解层数设置为6层，惩罚因子取2 000，可在保证分解精度的同时，有效分离故障特征分量与噪声分量。

3.4 数据预处理

对原始采样数据进行标准化预处理：采用3σ准则剔除异常值，通过滑动平均滤波抑制随机噪声，利用最小二乘法拟合传感器误差模型实现在线校准。对多通道数据进行时间戳对齐，保证不同来源数据的时序一致性。采用Z-score标准化方法对特征数据进行归一化处理，将不同量纲的特征映射至同一尺度，消除量纲差异对深度学习模型训练的影响，提升模型收敛速度与诊断精度。

3.5 通信信息特征提取

提取通信链路的误码率、丢包率、平均传输延时、时钟偏差等统计特征，构建通信健康度指数。通过解析通信协议帧结构，识别帧校验错误、序列号异常等隐性故障，实现通信链路状态的量化评估。

4 融合式故障诊断模型构建

4.1 分层分级诊断架构

采用“底层快速预警—中层模式识别—上层融合决策”的三级诊断架构。底层通过阈值判断实现突变故障的快速报警；中层基于深度学习模型完成故障类型与位置识别；上层融合多源信息输出最终诊断结论，兼顾诊断的快速性与准确性。

4.2 CNN-BiLSTM-Attention 故障识别模型

构建 CNN-BiLSTM-Attention 混合深度学习模型。CNN 层采用 3 层卷积核大小为 3×1 的一维卷积，提取时频图的局部空间特征；BiLSTM 层包含 64 个隐藏单元，同时捕捉故障信号的前后时序依赖关系；注意力机制层自适应加权关键特征段，提升对微弱故障与复合故障的识别能力[4]。模型采用 Adam 优化器进行训练，初始学习率设为 0.001，批次大小为 32，迭代次数为 100 次，采用早停策略防止过拟合。模型输入为预处理后的时序信号与时频特征，输出为故障类型与置信度。

4.3 基于改进 D-S 证据理论的融合决策

将电气特征、驱动状态、采样信息、通信状态作为独立证据体，通过 D-S 证据理论进行多源信息融合。针对传统 D-S 证据理论在处理高冲突证据时存在的悖论问题，引入证据距离与可信度权重，对原始基本概率分配进行修正，再利用 Dempster 组合规则进行证据合成，得到最终的故障诊断结果。该方法可有效解决单一信息源诊断的不确定性问题，提升诊断结果的可靠性。

4.4 故障精确定位

采用子模块残差比较法实现故障模块定位，通过计算实际输出与理论输出的残差，定位异常子模块。结合桥臂电流矢量分析与电压状态观测，进一步定位故障器件与故障回路，实现从系统级到元件级的精准定位。针对小样本故障定位难题，引入迁移学习技术，将通用故障数据集训练的模型参数迁移至目标 PET 系统，仅需少量现场故障数据即可完成模型微调，定位准确率提升至 98% 以上。

5 故障诊断系统实现与预警机制

5.1 分级预警机制

建立四级预警体系：正常态、关注态、预警态、故障态。对器件退化、采样漂移等渐进式故障设置关注与预警阈值，实现提前 72 小时预警；对短路、驱动丢失等突变式故障设置紧急跳闸阈值，实现微秒级保护动作。关注态预警触发后，加密监测频次至 5 分钟 / 次；预警态触发后，暂停相关区域功率调节，组织现场排查；故障态触发后，立即切断故障模块电源，启动备用模块[5]。同时，基于 LSTM 网络构建功率器件剩余使用寿命预测模型，以导通压降、结温、开关次数为输入，预测器件剩余寿命，指导预防性维护。

5.2 硬件系统架构

诊断系统采用“FPGA+DSP”双核架构。FPGA 选用 Xilinx Artix-7 XC7A35T 芯片，负责 16 通道高速同步采样与实时特征提取，采样率不低于 1 MS/s，AD 转换精度为 16 位；DSP 选用 TI TMS320F28379D 芯片，运行深度学习诊断算法与融合决策逻辑，平均诊断响应时间小于 10 ms。系统配备 2 路光纤通信接口与 1 路千兆以太网接口，电源模块采用多级隔离设计，输入输出隔离电压不低于 2 500 V，有效抑制共模干扰。

5.3 软件功能流程

软件系统包含数据采集、预处理、特征计算、模型推理、故障报警、定位显示、日志存储等模块。诊断流程为：实时数据采集→预处理与特征提取→分级阈值判断→深度学习模式识别→多源信息融合决策→预警 / 保护动作→诊断结果归档。

6 结束语

电力电子变压器电子信息故障诊断是保障新能源直流汇集系统可靠运行的关键技术。本文系统分析了 PET 各类电子信息故障的机理与特征，构建了多维度故障特征提取体系与融合式诊断模型，形成了完整的智能故障诊断技术方案。该技术可有效提升故障识别的准确性与实时性，实现故障的早发现、早诊断、早处置。未来研究可进一步面向高压大容量 PET 与多场站协同场景，深化数字孪生与边缘计算技术的应用，研究分布式协同故障诊断方法，提升系统对复杂复合故障的应对能力，为新型电力系统中新能源的高效可靠并网提供技术保障。

参考文献：

[1] 陈涛,苏亮亮,张志学,等.牵引电力电子变压器系统关键技术研究 [J]. 机车电传动 ,2022(03):130-137.
[2] 李凯,赵争鸣,袁立强,等.面向交直流混合配电系统的多端口电力电子变压器研究综述 [J]. 高电压技术 ,2021,47(04):1233-1250.
[3] 马嘉昊.电能路由器的电磁暂态通用解耦与仿真方法研究 [D]. 北京：华北电力大学（北京）,2023.
[4] 刘科研,盛万兴,赵鹏杰,等.信息物理环境下基于电力电子变压器的跨台区光伏消纳策略 [J]. 电力自动化设备,2020,40(12):66-72,87.
[5] 廖清阳,王军,胡凯强,等.基于深度并行 CNN-BiLSTM 的能源互联网电负荷和热负荷联合预测模型 [J]. 中国测试,2022(04):146-153.

智能电网多变量太阳辐射预测：淘金优化双向LSTM网络的深度耦合智算

李东旭，张雪敏*

（西安思源学院工学院，陕西 西安 710038）

摘 要 太阳能是化石能源的理想补充，而精确太阳辐照度预测是提高太阳能利用效率的重要手段。但受太阳能固有间接性和随机性的限制，获得有效的太阳辐照度预测结果一直是一个难题。本文提出一种基于淘金算法优化的双向长短期记忆神经网络（双向长短期记忆神经网络）的多变量太阳辐照度预测模型。首先，根据相关性分析选择影响因子（气温 r=0.675、太阳高度角 r=0.397、相对湿度 r=0.743、气压 r=0.166）优化模型输入；然后搭建卷积神经网络（卷积神经网络）用于特征提取，并运用淘金算法对模型进行优化；最后利用双向长短期记忆神经网络进行预测，以期为保障智能电网的安全运行和促进全球新能源发展提供参考。结果表明，该模型预测效果良好（$R^2 > 0.99$，RMSE < 0.26），且泛化能力和鲁棒性强。

关键词 淘金优化；双向长短记忆网络；卷积神经网络

基金项目：本研究为陕西省大学生创新创业训练计划项目成果（项目编号：S202513121027）。

中图分类号：TM615；TM76；TP183 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.005

0 引言

本文提出一种基于淘金算法优化的CNN-BiLSTM混合模型进行多变量太阳辐照度预测新方法。利用淘金算法代替遗传算法进行模型参数寻优，以克服单一遗传算法优化的局限性，同时利用卷积神经网络提取太阳辐照度多变量的空域特征以及双向长短时记忆神经网络充分挖掘太阳辐照度的双向时序特征，进而提高太阳辐照度预测精度和泛化能力，为保证光伏并网电源的高效、安全运行提供参考。

1 研究背景

在化石能源仍为主流能源的环境下，全球能源排放不断增加[1]，发展太阳能等可再生能源迫在眉睫[2]。虽然光伏发电技术成熟，但因光伏出力受太阳辐照度的不稳定影响而波动较大，故提高太阳辐照度预测的精度对于电网的安全稳定运行和能源调度有着重要意义。当前对于太阳辐照度的预测方法主要有持续方法、物理模型、统计学习方法、机器学习方法和混合模型，利用人工智能的混合模型预测精度相对较高。精准预测可有效提高光伏电站的利用效率和对光伏电站出力的辅助决策，在低碳减排、帮助各行业发展的同时实现目标。

2 数据处理

由于太阳辐射受多种因素影响，计算当中需要考虑大量指标，建立的数据模型复杂度较高，为了简化模型运算复杂度，提高模型精度，根据研究结果显示去除相关性较低的指标，选取相关性强的特征作为输入。而相关性分析是统计学中经常使用的一种分析手段，可以判断两个变量之间的线性关系强度及方向，从而判断变量之间的相互关系，并进一步分析这些变量之间的关系是否显著。

皮尔逊相关系数是用于度量两组数据X，Y之间的相关性，皮尔逊相关系数不受变量的位置和测量尺度影响，被广泛应用于新能源功率预测领域的数据清洗、特征分析、降维、相似日提取等。皮尔逊相关系数的公式如下：

$$\rho=\frac{\mathrm{cov}(X,Y)}{\sigma_x\sigma_y}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (1)$$

式（1）中，cov(X,Y) 表示X,Y的协方差，σ_x、σ_y分别表示两个变量的标准差。$\bar{x}$、$\bar{y}$分别表示X,Y的均值n表示输入的时间序列的长度，ρ表示了变量之间的相关程度，越大表示相关性越大，若为负数则表示为负相关。

作者简介：李东旭（2004-），男，本科，研究方向：智能电网场景作用下的多变量太阳辐射高精度预测。

*通信作者：张雪敏（1981-），女，硕士研究生，副教授，研究方向：声学（超声学）。E-mail：xue0314min@163.com

进行相关性分析计算相关性系数之后，需要对相关性系数进行显著性检验，以判断变量间的关系是否显著。显著性检验就是统计学中判断观察到的效果是否真实存在的一个常用方法。在进行显著性检验过程中，需要选定一个显著性水平，一般取 0.05 或 0.01。若检验表明变量间的关系是显著的，则认为该关系是真实存在的。

根据计算分析可知，与 GHI 相关的指标有温度、太阳高度角、相对湿度及相对压力等，它们的相关系数分别为 0.675、0.397、0.743、0.166，说明上述几个因素是影响太阳辐射的主要因素，故为了降低计算量，选取相关系数较大的几个指标进行计算。

3 基于淘金算法优化神经网络的多变量太阳辐射预测

3.1 淘金优化算法

淘金算法（Gold Rush Optimizer）是模仿淘金热中淘金的人在河床寻找黄金而得到启发的一种智能优化算法，它通过不断地改变搜索位置和搜索方式以逐渐接近最优值。将优化问题类比为寻矿过程，在此过程中，淘金算法中搜索代理“淘金者”在解空间内通过勘探和开采，最终发现全局最优值。

探矿者的角色和粒子群算法以及遗传算法中的粒子群是相似的。探矿者所占位置信息存放在一个叫 MGP 的矩阵中，如式（2）所示，x_{nd} 表示第 n 个探矿者第 d 个维度的位置，d 表示维数，n 表示探矿者个数。

$$M_{GP}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1d} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nd} \end{bmatrix} \tag{2}$$

在优化过程中需要一个目标函数来评价找矿者，根据式(3)将找矿者的评价值存储在评价矩阵 MF 中。式(3)中，x_{nd} 为找矿者 n 在第 d 维的位置，f 为评价函数。

$$M_F=\begin{bmatrix} f(x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1d}) \\ f(x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2d}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nd}) \end{bmatrix} \tag{3}$$

像发现金矿的淘金者一样，执行启发式算法时，最佳的“金矿”位置也就是搜索空间的最优值。由于其准确位置不明，目前找矿人探测的最佳金矿位置就作为最佳金矿位置的近似值。

为了模拟探矿者向金矿迁移的这种行为，可以用公式(4)和(5)来表示金矿以及探矿者所处位置的变迁。

$$\vec{D_1}=\vec{C_1}.\vec{X}^{*}(t)-\vec{X_i}(t) \tag{4}$$

$$\overrightarrow{Xnew_i}(t+1)=\vec{X_i}(t)+\vec{A_1}.\vec{D_1} \tag{5}$$

式（4）、（5）中，X 和 t 分别为最佳金矿的位置，金矿探矿者 i 的位置，当前迭代 t。Xnew 为金矿 i 的新位置，A_1 和 D_1 可表达为：

$$\begin{aligned} \vec{A_1}&=1+l_1(\vec{r_1}-\frac{1}{2}) \\ \vec{C_1}&=2\vec{r_2} \end{aligned} \tag{6}$$

式（6）中 r_1 和 r_2 为随机向量，取值范围为 [0,1]。1 是由式（7）定义的收敛分量；如果 e 等于 1，它从 2 到 1 个 $\max_{iter}$ 线性减小，对于大于 1 的值，它非线性减小。

$$l_e=(\frac{\max_{iter}-\mathrm{iter}}{\max_{iter}-1})^{e}(2-\frac{1}{\max_{iter}})+\frac{1}{\max_{iter}} \tag{7}$$

将淘金者向假定的金矿移动的过程数学建模为向量 A_1 的运算。若采用式（5）中的向量 A_1 进行迁移数学建模，则当向量 A_1 的值为 1 时，意味着导引头正朝着假定的金矿移动；当向量 A_1 取值小于 1 时，表示导引头当前位置在假定的金矿之前方，即向假定的金矿移动；当向量 A_1 取值大于 1 时，表示导引头当前位置在假定的金矿之后方，即远离假定的金矿移动。

在金矿勘探的数学模型中，可将每个勘探者的坐标近似看成是金矿所在地的近似坐标，这已经被考虑到了与金矿开采有关的数学关系中。

$$\begin{aligned} \vec{D_2}&=-\vec{X_i}(t)-\vec{X_r}(t) \\ \overrightarrow{Xnew_i}(t+1)&=\vec{X_r}(t)+\vec{A_2}.\vec{D_2} \end{aligned} \tag{8}$$

在式（9）所示的对勘探者位置更新的条件当中，若评估函数的目标函数有所提升，则表示对金矿勘探者而言，其改变位置比留守原地更能采集到更多的金矿；反之，若评估函数的目标函数未改进，则表示该勘探者留守在原来位置。

$$\vec{X_i}(t+1)=\overrightarrow{Xnew_i}(t+1)\ \text{if}\ f(\overrightarrow{Xnew_i}(t+1))<f(\vec{X_i}(t)) \tag{9}$$

基于前面相关概念，GRO 算法从随机放置在搜索空间中的探矿者初始种群开始。将搜索得到的最优解作为最佳金矿的位置（全局最优）。每个勘探者在每次迭代中使用迁移、金矿开采和协作方法中的一种获取新的位置。如果新位置的黄金数量（目标函数的值）大于当前位置（最小化时目标函数减少，最大化时目标函数增加），探矿者移动到新位置；这个过程一直持续到迭代循环结束。到目前为止找到的最佳解被认为是算法的最终解。

3.2 卷积神经网络

卷积神经网络（CNN）是针对图像、具有空间结构数据处理提出的一种深度学习神经网络模型，它是模

拟人脑视觉机理而提出的。与全连接神经网络不同，CNN通过在输入数据上进行卷积操作来提取局部信息，并通过训练过程学习卷积操作的参数。卷积神经网络主要由卷积层、采样层、池化层和全连接层构成，如图1所示。

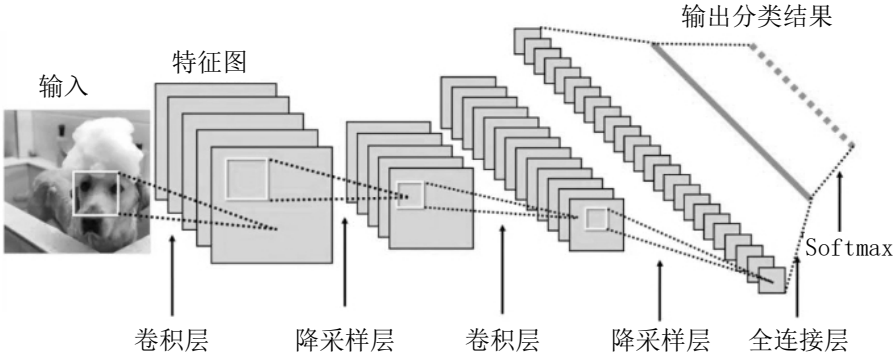


图1 卷积神经网络结构示意图

1. 卷积层（Convolutional Layer）：（1）由多个可学习的滤波器（卷积核）构成，通过在输入数据上滑动进行局部特征提取，生成特征图；（2）不同滤波器可检测边缘、纹理等低级特征，多层堆叠后可学习更高级的抽象特征。

2. 池化层（Pooling Layer）：（1）用于降采样，减少特征图的空间尺寸，降低计算量并增强模型鲁棒性；（2）常用最大池化（Max Pooling），保留局部最显著特征，抑制冗余信息。

3. 全连接层（Fully Connected Layer）：（1）整合卷积层和池化层提取的特征，通过全局连接实现分类或回归预测；（2）作用类似于传统神经网络，对高阶特征进行非线性组合以输出最终结果。

CNN可有效提取太阳辐射数据的时空特征，适用于高精度预测任务。

3.3 长短期记忆网络

长短期记忆网络（LSTM）[3]是循环神经网络（RNN）的改进架构，通过引入门控机制（遗忘门、输入门、输出门）和细胞状态，有效解决了传统RNN的梯度消失/爆炸问题。该结构能够更好地建模长序列数据中的长期依赖关系，在时序预测、自然语言处理等任务中表现优异。相关的计算见式（10）：

$$\begin{aligned} f(t)&=\sigma(W_f h_{t-1}+U_f X_t+b_f)\\ i(t)&=\sigma(W_i h_{t-1}+U_i X_t+b_i)\\ c(t)&=\tanh(W_c h_{t-1}+U_c X_t+b_c)\\ o(t)&=\sigma(W_o h_{t-1}+U_o X_t+b_o) \end{aligned} \tag{10}$$

3.4 混合算法

构建基于淘金算法优化神经网络的多变量太阳辐射预测模型[4]。模型结构参数设置如下：（1）输入特征维度为9，时间步长为8；（2）采用单卷积层结构，不设池化层；（3）CNN-LTM-I模块使用1×3卷积核，通道数为32；（4）卷积步长为1，不进行零填充。

模型首先对原始时间序列进行特征提取，随后通过预测算法完成序列预测，并采用淘金算法进行参数优化。

4 结果与讨论

4.1 测试结果

利用淘金算法优化神经网络的多变量太阳辐射预测[5]利用其训练集对数据进行预测，其结果如图2所示。通过对测试集数据进行预测，得到了测试集预测数据与真实数据的对比图，根据图2可以看出，R2＞0.99，其RMSE为0.2 533说明预测的效果较好，真实值与预测值偏差不大。

4.2 误差分析

误差分析是反映预测效果好坏的重要因素。RMSE被认为是评价点预报误差最广泛使用的方法，它通常对测量值与预测值之间的较大偏差更为敏感。

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(\hat{I}(t)-I(t))^2} \tag{11}$$

式（11）中，MAE表示测量值与预测值之间的平均距离。

$$MAE=\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\left|(\hat{I}(t)-I(t))\right| \tag{12}$$

测试集上对测试的误差进行分析，带入数据得误差范围在[-0.4～+0.5]之间，预测的误差小于1，误差百分比较小，其预测效果也较好。

在对模型进行训练的过程中，随着迭代次数的增加，损失值不断下降，在25轮迭代时损失值达到稳定。RMSE随着迭代次数的增加，也不断下降，其在50轮左右达到稳定状态，在0.1附近，说明仅需要训练50轮

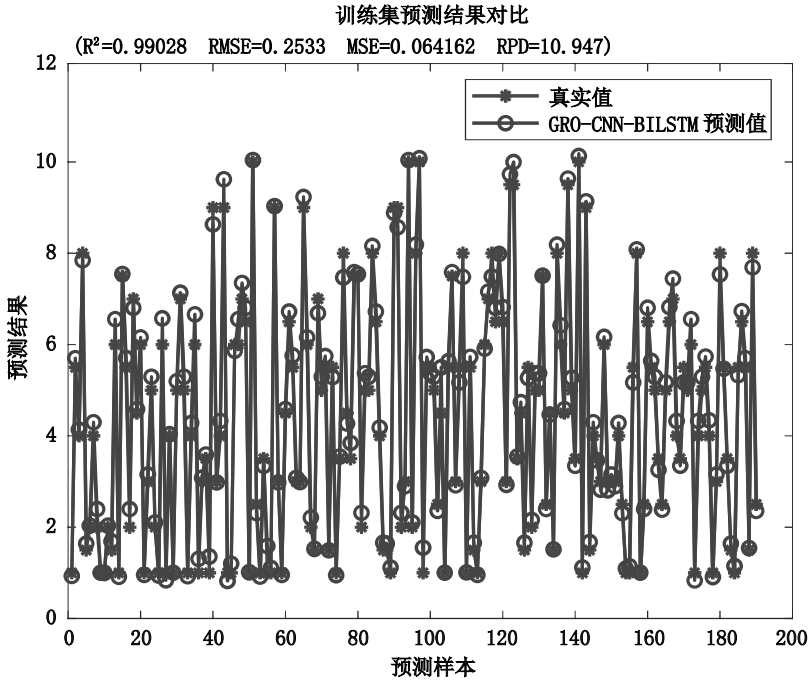


图 2 训练集预测结果对比图

就可以得到理想的参数数据，过多的训练将增加运算的复杂度。

5 模型的优缺点

5.1 模型的优点

双向长短期记忆网络即双向 LSTM（BiLSTM），是两个方向的 LSTM 网络的组合，分别从前向后以及从后向前对序列进行处理，双向 LSTM 通过同时利用序列数据的前向和后向信息，比单向的 LSTM 模型能够更加充分地提取序列数据的上下文信息，有利于模型对序列数据内容理解能力的提升。所以，相较于单向 LSTM 模型，双向 LSTM 可以充分利用序列数据的信息，对序列数据的建模效果有更好的帮助，也因为双向的结构，可以减轻传统 LSTM 模型中遗忘历史信息的缺点。

5.2 模型的缺点

双向 LSTM 通过同时学习输入序列的正向和反向信息，从而捕捉输入序列的双向依赖关系，相比单向 LSTM 具有更多的模型参数和隐藏状态，所以双向 LSTM 的训练和预测往往需要更多的计算资源和时间。

6 结束语

本研究所提出的双向 LSTM 淘金算法优化的深度耦合智算模型可以较好地进行太阳能光伏发电系统的太阳辐射预测，利用相关性分析对影响太阳辐射的气象因子进行筛选，通过卷积神经网络（CNN）提取空间特征，以淘金算法（GRO）自动搜索优化神经网络的超参数等方法，有效提高了太阳辐射预测精度，预测模型具有较好的稳定性，对训练数据集和测试数据集的 R^2 均大于 0.99，RMSE 均小于 0.26，明显优于传统的统计方法。下一步工作是降低神经网络模型的计算复杂度，尝试更为轻量化的网络模型，并结合多气象数据源和遥感卫星云图数据进行融合，以期达到更长时间尺度、更高分辨率的太阳辐射预测，为保障新型电力系统的安全和经济调度运行提供更加可靠的技术手段。

参考文献：

[1] 国际能源署.2021 年全球能源展望:二氧化碳排放[R].巴黎:国际能源署,2021.

[2] 张华,冯超,周小敏.中国实现碳中和:低碳城市试点政策能否提升碳排放效率?[J].可持续生产与消费,2022(33):312-329.

[3] 库玛丽 P,托什尼瓦尔 D.基于长短期记忆-卷积神经网络的深度混合太阳辐照度预测方法[J].应用能源,2021(295):117061.

[4] 斯里瓦斯塔夫 S,萨迪斯塔普 S.用于短期太阳辐照度预测的混合 CNN-BiLSTM 模型[J].电气与电子工程师协会接入,2021(09):76070-76080.

[5] 吉米尔 S,迪奥 R C,唐斯 N J,等.基于遗传算法优化混合人工神经网络的全球太阳辐射预测[J].可再生能源,2021(171):1056-1075.

沥青面层无人碾压交通工程施工技术均匀性控制研究

刘瑞超

（山东银创公路工程有限公司，山东 滨州 251900）

摘 要 为解决传统沥青面层人工碾压作业中压实均匀性不足、受人为因素与环境干扰大的行业痛点，依托无人化智能施工装备体系，针对交通工程沥青面层无人碾压技术的应用与均匀性控制展开系统性研究。结合施工环境动态波动与沥青混合料材料特性，拆解压实参数实时动态监测、碾压路径全局优化、多源异构施工数据融合等核心关键技术，厘清施工过程中压实度分布不均的产生机理；进一步从施工设备协同调度、压实质量在线检测、自适应闭环控制模型三个维度梳理技术落地路径，并依托实体交通工程现场试验段开展对照验证，检验均匀性控制实际成效。工程试验结果表明，智能化无人碾压施工模式可有效降低压实度离散系数，显著提升沥青面层压实均匀性与作业过程平稳性。该技术体系的迭代优化与规模化推广，可为交通工程路面施工的精细化管控提供支撑，推动行业施工模式向智慧化、高质量方向转型。

关键词 沥青面层；无人碾压；均匀性控制；智能施工；压实参数

中图分类号：U416.217 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.006

0 引言

沥青路面施工质量直接决定交通工程的整体服役性能与使用寿命，面层压实均匀性的精准把控是道路施工阶段的核心技术环节。无人碾压技术投入工程应用后，施工流程已逐步实现自动化与数据化升级，但在实际大规模落地过程中，仍存在压实控制精度不足、多设备协同作业效率偏低等突出问题。针对碾压施工全流程各阶段的核心影响要素开展系统性专项分析，可显著提升沥青面层均匀性的管控效果，也能为后续无人碾压技术迭代优化与工程规模化落地筑牢坚实的应用基础。

1 无人碾压条件下沥青面层均匀性控制关键问题分析

1.1 无人碾压施工过程中压实不均现象产生机理

沥青面层无人碾压施工中压实不均，关联于温度场变化、摊铺供料稳定性及设备控制响应精度。混合料出机后温降迅速，初压时机偏差会让局部区域因温度偏低增大压实阻力，最终形成密实度差异。摊铺速度波动引发松铺厚度不均，碾压后受力状态随之改变。无人碾压设备靠预设参数控制路径与遍数，转向衔接、轮迹搭接或振动频率与材料状态不匹配时，会出现局部漏压、过压及边部薄弱问题，削弱面层整体均匀性。

1.2 施工设备协同运行对面层均匀性影响因素分析

随着我国高速公路建设进入高质量发展阶段，沥青路面施工的精度控制、效率优化与安全保障成为重点研究方向。传统人工操作方式受人员经验和操作稳定性影响，易出现厚度偏差、压实度波动及平整度不足等质量问题，难以满足高标准路面施工需求。尽管近年来无人化装备已在路面工程中逐步应用，但多以单机模式运行，存在信息获取不连续、作业间协同不足、压实控制能力有限等情况。

1.3 环境与材料特性变化对均匀性稳定性的干扰表现

无人碾压施工对作业条件的连续性和一致性要求严格，环境与材料特性波动时，面层均匀性易受干扰。施工时段内气温、风速、日照强度及路表基础温度有差异，会改变混合料散热速率，导致同一作业面不同区域可压实时间出现偏移[1]。边部、桥面或阴影区位置温度衰减更快，压实窗口缩短，设备按既定程序运行易出现压实程度不均。沥青混合料自身级配组成、油石比、矿料含水状态及拌和均匀程度，直接影响其流动性、黏结性和压实成型能力。运输距离较长或停留时间不稳，混合料离析与温度离析更易出现，导致局部结构密实性和平整状态波动。

作者简介：刘瑞超（1988-），男，专科，工程师，研究方向：建筑工程技术。

2 基于数据驱动的沥青面层均匀性控制技术路径构建

2.1 压实参数动态监测与实时反馈调控方法研究

无人碾压施工环节中，压实质量的稳定程度依托核心参数的实时采集与动态调整。压实遍数振动频率行进速度与轮压状态等信息经由传感器完成采集，再通过车载控制系统完成分析处理。区域压实度偏离预设区间时，系统可按预设模型调整碾压强度与作业节奏，让压实流程适配路面材料的实际状态。温度监测与压实反馈系统相互配合，把控碾压作业的合理时机，规避压实时机不当引发的质量问题。搭建连续监测与闭环调控体系，施工阶段可动态修正压实参数，提升路面面层的密实度与均匀性。

2.2 无人碾压路径优化与施工轨迹精准控制策略

施工路径合理规划直接关联面层受力均衡与碾压覆盖完整，无人碾压设备靠定位系统获取作业区域空间信息，结合设计断面与摊铺宽度生成作业轨迹。实际运行中，路径搭接宽度、转弯半径及端部折返方式需精细设定，避免重叠压实或遗漏区域[2]。轨迹控制系统依靠高精度导航与姿态修正功能，实时修正设备运行偏差，维持碾压路径连续稳定。复杂工况区域可依据施工进度与设备分布动态调整行进路线，提升整体作业协调，路径优化与轨迹控制协同，可实现面层压实过程均衡覆盖。

2.3 智能化施工系统中多源数据融合应用机制分析

智能化施工体系内，多源数据的融合处理为均匀性把控筑牢基础支撑。施工环节采集的温度数据、压实度反馈、设备运行状态与环境参数，需在统一平台内完成整合分析。数据融合技术可让不同渠道的信息相互补充，完善对施工状态的整体认识。算法模型可对各类数据开展关联分析，定位施工中的异常区域，生成对应的作业调控指令。无线通信与边缘计算技术支撑数据传输与处理环节，保障信息快速响应并提供决策依据。多源数据协同运用，推动施工控制从单一参数调节转为综合管控，为面层均匀性提升提供技术支撑。

3 无人碾压施工中均匀性控制关键技术优化与实现

3.1 碾压设备智能调度与协同作业效率提升方法

无人碾压施工场景中，设备调度水平直接影响作业衔接与面层压实连续性。不同压路机分别承担初压、复压、终压任务，作业次序、进场时机与间距需匹配摊铺推进节奏。调度系统结合摊铺速度、作业面长度、设备位置及施工任务统筹调配，避免设备等待、扎堆或出现碾压空档。桥头、弯道、加宽段等区域因地制宜调整设备编组与行进路线，适配工作面形态。设备通过通信共享位置与工况信息，实现区域划分、冲突避让及工序衔接，减少无效行走与重复碾压，保障协同作业效率与施工稳定。

3.2 压实质量在线检测与异常区域识别技术应用

压实质量在线检测是施工精准管控的重要基础，实现质量判定由完工抽检前移至施工全过程。施工依托压实传感器、温度装置、定位单元与车载终端，实时采集碾压遍数、振动参数、温度及设备轨迹，构建全覆盖连续施工数据图层[3]。系统对接实时数据，参照压实阈值、温度区间开展对比分析，精准识别压实不足、搭接缺陷、温降过快与局部离析区域。系统对异常点位标注坐标并划分风险等级，为现场补压施工与工序调整提供可靠依据。

3.3 施工过程参数自适应调整与控制模型构建方法

施工参数具备连续性与耦合特性，固定参数难以适配复杂工况管控要求。为增强无人碾压系统现场应变能力，构建适配混合料状态、作业环境与设备性能的自适应控制模型。模型整合混合料温度、摊铺厚度、压实度、行驶速度及振动参数，分阶段设定管控目标与约束条件。当监测数据偏离标准范围，控制模块自动调整行驶速度、振动模式、碾压遍数与搭接宽度，实现压实作业与工况动态匹配。该模型结合规则算法与预测机制，在施工扰动下维持控制精度，保障路面面层施工稳定。

4 工程实践中沥青面层均匀性控制效果验证与问题修正

4.1 典型交通工程案例中均匀性控制效果对比分析

某省高速公路改扩建工程中，沥青上面层选用无人碾压施工工艺，施工段长约 3.2 km，设计厚度设定为4 cm。施工过程中布置温度传感器与压实监测系统，对不同作业区段的压实效果开展持续监测记录。传统作业方式的对照区段压实度离散系数为 3.8%，局部区域存在明显压实不足问题；无人碾压控制区段压实度离散系数严格控制在 1.6% 以内，面层平整度标准差从 1.25 mm 降至 0.72 mm。碾压轨迹数据显示，设备运行路径重叠率稳定保持在 85% 以上，边部区域压实补偿作业更为均衡可控。温度分布监测显示，压实作业基本集中在 135 ℃至 155 ℃的合理范围，压实窗口利用率得到有效提升。不同施工模式在均匀性控制上呈现显著差异，无人碾压条件下数据驱动控制的优势更为突出明显。

4.2 施工过程偏差识别与及时修正技术应用路径

施工环节各类偏差多表现为压实不足、重复碾压与温度窗口错配，需借助实时监测系统完成快速识别并

作出对应处置。整合设备运行轨迹、压实反馈数值与温度变化曲线展开分析，可在施工推进中锁定异常区域方位，判定偏差形成的具体原因[4]。压实不足的路段可通过增补碾压遍数、更换振动模式完成修整，重复碾压的区域则依托路径规划优化降低能耗，规避路面材料出现损伤。温度异常区域依靠红外检测与数据比对完成判别，温度未达压实标准阈值时，需及时调整施工推进节奏，或对局部路段实施加热处理。偏差判别与修正流程依托信息平台搭建闭环管控体系，施工阶段出现的各类问题可就地处置，降低后续路面修复所需的成本。

4.3 不同工况条件下均匀性控制稳定性评估方法

均匀性控制效果随工况条件不同呈现明显差异，需建立多维度评估方法综合判定，核心评估指标涵盖压实度离散系数、平整度指标、温度分布均匀性及碾压轨迹覆盖率。气温变化明显或施工环境复杂的路段，需对不同时间段施工数据分段统计，剖析温度波动对压实效果的具体影响。桥梁接头、坡道及宽幅路段等相关特殊工况，需结合结构特征修正均匀性指标计算。建立分级评价体系，对比不同工况下的数据，能识别控制稳定性较弱的环节，为后续施工参数优化提供可靠依据，评估过程注重数据的连续性与可比性，确保分析结果拥有实际指导意义。

5 面向高质量施工的无人碾压均匀性控制体系完善路径

5.1 施工标准化与智能控制体系协同发展机制构建

沥青面层无人碾压施工实现均匀性稳定把控，需依托施工标准化规范与智能控制体系的协同衔接。标准化体系涵盖混合料转运、摊铺对接、碾压时段、遍数规划、搭接尺度及终压核验等核心工序，把传统经验型操作转变为可量化、可落地的技术准则。智能控制体系在此前提下开展参数判别、工况感知与动态调整，保障设备运行逻辑贴合工艺执行标准。施工场地借助统一数据平台，整合设计指标、设备运行参数、工序流程与质量限值完成统一配置，搭建任务推送至结果核验的全流程管控链路。标准规范与智能决策相互支撑，降低作业环节的随意操作，提升各施工班组与作业工区的质量统一度，助力无人碾压施工向规范化、精细化方向持续发展。

5.2 关键技术推广应用中存在的问题与改进方向

无人碾压均匀性控制技术推广应用进程中，仍遭遇设备兼容短板、数据接口割裂、施工组织适配度偏低等现实难题。部分工程现场摊铺、压实设备与监测平台来源各异，各系统间缺少高效数据交换链路，易引发信息传递迟滞，干扰控制指令落地执行成效。施工条件复杂场景下，既有控制模型适配特殊路段、温差波动区段及断面转换区域的能力仍有欠缺，造成局部区段控制精度出现回落[5]。现场管理流程与智能化施工模式衔接度不足，质量判定准则、异常处置流程及作业协同机制仍需进一步细化完善。改进路径聚焦统一技术接口、优化场景算法、健全配套管理制度及强化系统稳定性等维度，助力关键技术在各类工程环境中适配性与连续运行能力同步提升。

5.3 未来交通工程施工中智能化均匀性控制发展趋势

交通工程施工范畴内的均匀性控制正从单一设备自动化转向系统化智能协同发展，后续发展方向将侧重全流程感知、全过程决策与全工序联动。施工现场的数据采集范畴持续拓展，压实参数与温度信息之外，材料状态、气象变动、基层状况和设备运行状态等内容均被归入实时监测体系。高精度定位技术、边缘计算载体与智能算法平台相互支撑，施工管控模式从事后整改逐步转向过程预判与前置调控。无人碾压设备的协作能力不断提升，作业编组、路径规划与工序转换贴合施工需求，适配复杂路段与多工点同步作业场景。均匀性控制技术的应用场景拓展至养护施工、快速修补与特殊结构路面施工领域，构建更为完善的智能施工技术体系。

6 结束语

无人碾压技术在沥青面层施工中的规模化应用，切实提升了压实全过程的可控性与沥青面层的压实均匀性水平。通过对施工关键环节、精准控制方法及典型工程实践的系统梳理，沥青面层均匀性控制正逐步从传统经验依赖，转向全流程数据驱动与动态智能调节的新模式。面向行业未来发展，仍需持续完善配套标准体系与跨技术融合机制，进一步提升该技术在复杂施工工况下的环境适应能力，推动交通工程施工向高精度、智能化与高稳定化方向持续迈进。

参考文献：

[1] 宿世伟.高速公路沥青路面压实质量智能检测与控制方法研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2025.
[2] 邱海兵,卢继乾,李波.沥青路面无人化摊铺施工技术应用[J].交通科技与管理,2023,04(24):138-140.
[3] 惠记庄,张泽宇,叶敏,等.公路建养装备数字孪生技术综述[J].交通运输工程学报,2023,23(04):23-44.
[4] 娄月新.基于多传感器数据的公路路面质量检测方法研究[D].上海:同济大学,2023.
[5] 马广文.浅析沥青路面领域研究应用无人设备现状[J].城市道桥与防洪,2022(05):212-213,245,M0019.

基于多源遥感的沥青路面养护状态智能监测方法研究

袁新鹏，谢　举

（陕西省汉中市公路局抢险救援中心，陕西 汉中 723000）

摘　要　为解决传统路面病害识别技术在精度与时效性上的不足，本文构建融合光学、热红外与 SAR 多源遥感数据的沥青路面状态智能监测方法。通过 Sentinel-2、Landsat-8 与 Sentinel-1 多源数据联合获取，并实施辐射几何校正、PCA 降维与敏感性加权融合，构建病害响应指标体系与四级分类模型，实现对裂缝、空鼓、沉陷等典型病害的多维识别与等级划分。在 14.6 km 实测段部署 CNSS 与边缘终端并开展验证，整体识别准确率达 91.3%，响应周期控制在 28 min 内。研究成果显著提升了病害识别的精细度与系统部署的可行性，具备推广应用价值。

关键词　多源遥感；道路病害；图斑识别；状态分级；智能监测

中图分类号：U418.2；TP79　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.007

0　引言

在交通荷载增长与气候极端化趋势背景下，沥青路面结构性病害频发，严重影响道路运行安全与养护效率。传统人工巡检方式存在周期长、精度低、响应慢等弊端，难以满足大范围动态监测需求[1]。遥感技术虽具覆盖广与非接触优势，但单一源数据难以识别复杂病害特征。基于此，本文引入光学、热红外与 SAR 三类遥感数据融合机制，构建高时效、高鲁棒性的路面病害智能识别方法体系，并在典型城市道路段开展系统实证验证，为提升道路资产运维智能化水平提供参考。

1　需求分析

在高温、高湿、重载等典型工况作用下，城市主干道与高速公路沥青路面常发生表层老化、裂缝扩展、结构剥蚀与坑槽塌陷等退化现象，表征出时间突变性与空间非均质性。道路资产管理单位面临的核心难点在于路网覆盖范围广、病害状态多样、响应周期短、识别精度要求高，传统人工巡检手段在空间分辨率（＜0.5 点 /km）、时间采样频率（周级）、异常识别延迟（72 h 以上）等方面均存在显著不足，难以满足精细化与动态化管理需求[2]。同时，不同类型病害在光谱、热响应与雷达散射等遥感通道上呈现出异质性识别特征，单一传感源无法提供足够的信息维度支撑复合病害的精准判别，需引入光学、热红外与 SAR 等多源遥感组合以提升识别通用性与敏感性。此外，道路几何结构复杂、环境干扰因素（积水、车辆遮挡）频发，造成传统图像识别算法误检率居高不下（＞ 15%），亟需构建具备多尺度表达能力与抗干扰能力的高鲁棒性识别机制。

2　路面状态遥感检测与识别过程设计

2.1　遥感数据获取与标准化处理

遥感数据获取阶段需同时满足高空间分辨率、多谱段信息与高时效性要求，以支撑病害特征的精细化提取与多时相对比分析。本文优先选取 Sentinel-2 MSI（10 m 空间分辨率，5 日重访）、Landsat-8 TIRS 热红外（100 m，16 日重访）及 C 波段 Sentinel-1 SAR（VV/VH 双极化）数据，分别覆盖可见光反射、地表热场与微波散射三个维度，联合 CNSS 地面节点调度构建多源时序遥感体系。为确保各源影像具备一致性与可比性，执行辐射校正、几何精校、分辨率重采样与异常值剔除等预处理流程。地表反射率的辐射校正依据 6S 模型推导，表达式如下：

$$\rho = \frac{\pi (L - L_a)}{E_0 \cos \theta_s} \tag{1}$$

式（1）中，ρ 为地表反射率，L 为传感器接收到的辐射亮度（$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$），$L_a$ 为大气路径辐射，E_0 为太阳在大气顶层的谱辐照度（$W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$），$\theta_s$ 为太阳天顶角（°）。该公式用于消除因传感器差异、大气扰动及光照角变化引起的观测偏差，实现不同遥感源在物理维度上的归一化。SAR 影像数据进一步采

作者简介：袁新鹏（1985-），男，本科，副高级工程师，研究方向：公路桥梁设计和建设管理。

用Lee滤波（3×3窗口）抑制斑点噪声，结合Gamma-MAP算法完成后向散射系数校正，增强目标结构边缘清晰度[3]。最终各类预处理数据统一输出为10 m分辨率的栅格序列，为后续特征提取与智能识别算法提供标准化输入，显著提升多源融合数据在病害识别中的一致性与稳定性。如图1所示，整体流程涵盖遥感源采集、标准化处理与数据融合输出，为病害状态识别提供了可靠的数据支撑基础。

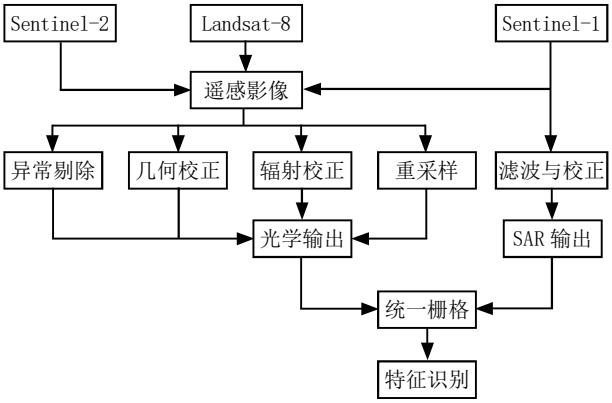


图1 多源遥感数据获取与标准化处理流程图

2.2 特征提取与信息融合机制

为准确刻画不同病害的遥感响应特征，首先在光学影像中提取反射率梯度（ΔR）与纹理方差（σ^2）等指标以反映表层老化与微裂纹变化，借助灰度共生矩阵分析生成对比度、同质性等二阶统计特征，从而增强裂缝、斑点等细粒度异常的识别能力[4]。热红外通道重点提取夜间热斑温差（ΔT≥3 ℃）、热平衡残差与热惯量指数，用于定位空鼓与结构脱空区域的异常热流场分布。其中热惯量指数用于衡量材料热响应速率，表达式如下：

$$TI=\frac{T_{\max}-T_{\min}}{\Delta t} \tag{2}$$

式（2）中，TI为热惯量指数（℃/h），$T_{\max}$与$T_{\min}$分别代表昼夜温度极值（℃），Δt为对应时间差（h）；该式用于表征温变灵敏性，有助于识别隐性热异常区。SAR图像中提取双极化后向散射系数（σ^0-VV/VH）与散射差值图（Dσ），结合斑点滤波与地形校正，捕捉因微观扰动或结构破损引起的散射突变。由于多源数据维度高、尺度异构，采用PCA压缩至3维～5维主成分空间，保留95%以上累计方差解释力；最终引入敏感性加权策略构建统一融合空间，并输出高一致性特征图，支撑后续分类建模与状态分级任务。

2.3 状态识别指标设定与阈值分级

针对不同类型病害在遥感响应上的差异特征，本文构建由光谱、热场与微波三通道构成的多维识别指标体系，并基于历史样本数据提取统计分布，设定对应的分级阈值。光学通道中选取亮度变化率（ΔL）、颜色空间偏移量（ΔHSV）及纹理均匀度（GLCM-homogeneity）用于表征裂缝扩展、表层老化与轻微磨蚀过程[5]。热红外通道设定热斑梯度（∇T）与热异值面积比（RAIR）作为热场不均特征，其中热斑梯度反映空间温差变化，其计算公式为：

$$\nabla T=\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \tag{3}$$

式（3）中，∇T为热斑梯度（℃/m），$\partial T/\partial x$与$\partial T/\partial y$分别为沿东西与南北方向的温度变化率（℃/m），该指标用于刻画热异常边界的突变强度。SAR通道则引入后向散射扰动指数（BSI）与极化响应差值（ΔVV-VH）判别结构扰动与局部破损。通过对典型病害图斑进行统计建模，提取95%置信区间内值域作为状态等级边界，构建Ⅰ～Ⅳ四级判别体系，如∇T对应阈值为0.5 ℃、1.5 ℃与3.0 ℃，BSI以均值±1.5σ构建扰动等级。识别结果以矢量图斑与结构化属性表输出，支撑系统自动标注与可视化平台高效调用。

2.4 检测流程构建与结果输出方式

检测流程采用模块化设计，覆盖数据接入、指标运算、图斑识别与结果展示等关键环节，确保多源遥感数据的统一处理与状态输出的稳定性[6]。在数据接入阶段，调度CNSS终端与遥感数据源协同运行，完成原始影像分时段获取与标准化预处理；随后以滑动窗口（256×256像素）为单位进行图像切片，并引入时间一致性判定算法对多时相数据执行差异约束，剔除季节性与光照干扰。

指标计算与状态识别阶段构建基于融合特征图的判别模型，通过像素级阈值比对生成初始掩膜，并借助形态学运算（开闭操作+连通域标识）完成病害图斑的结构化提取。为提升空间聚类精度，引入基于密度的聚类算法（DBSCAN）校验图斑一致性，避免误判点孤立输出[7]。最终输出采用GeoJSON格式表达等级图斑及其空间坐标，辅以结构化属性表输出识别指标值、状态等级与时间戳等信息，并生成热力图层与预警图层用于可视化系统加载调用。整体流程具有良好的扩展性与集成适配能力，可支撑道路巡检系统中多源遥感智能分析任务。

3 案例实证与系统部署验证

3.1 实施路段与遥感监测流程

选取某市区三环快速路与城市联络高架桥段作为实测区域，全长约14.6 km，包含不同结构形式的沥青铺装、伸缩缝、接缝段及维修叠铺区域，具备典型的

多类型病害演化场景。沿线路段设置 12 个 CNSS 数据接入节点与 18 个边缘计算终端，部署周期涵盖干湿转换期与夏季高温期，保证监测数据覆盖典型季节性变化影响。遥感监测流程由“数据获取—标准处理—特征计算—状态判定—结果生成”五阶段组成，前期通过 Sentinel-2、Landsat-8 与 Sentinel-1 协同获取多源遥感数据，每周期同步地面 CNSS 终端采集图像与定位信息，确保空间配准精度优于 1.5 m。标准处理阶段执行辐射与几何校正、分辨率统一与噪声剔除；特征计算阶段提取融合特征图中各类响应指标，依据指标与等级体系进行状态分类。监测结果以图斑形式覆盖至 GIS 平台，输出病害热力分布图与等级图，并与地面人工巡检点位进行空间校验。系统运行日志记录数据传输时延、节点离线率与图像上传成功率等指标，整体流程在 30 min 内完成全流程分析，满足日常巡检与紧急检测双重任务需求。

3.2 识别效果对比与实测验证

识别效果验证基于实测段布设的 52 个人工巡检点进行空间对照与分类一致性分析，涵盖细微龟裂、块状裂缝、表层剥蚀、局部坑洞、结构沉陷与空鼓热异常等典型病害类型。通过比对遥感识别结果与现场人工标注数据，系统整体识别准确率达 91.3%，其中光学通道在裂缝类异常中识别率达 87.6%，热红外指标对空鼓区热异常响应精度达 92.8%，SAR 散射特征在沉陷边界识别中表现出 89.2% 的高精度响应。如表 1 所示，各类病害的识别准确率普遍高于 89%，误检率与漏检率分别控制在 7.0% 与 8.5% 以内，显著优于传统人工巡检及单通道识别方式。在强干扰区域（桥底遮挡、路面积水、标线反光）下，融合特征模型有效提升判别鲁棒性，抑制由局部图像质量下降引发的误判，典型错误集中于纹理模糊区与阴影遮挡边界处。系统整体响应周期控制在 28 min 内，CNSS 节点平均图像传输延迟 3.4 s，边缘识别处理时长不超过 5 min，满足高频次道路状态监测需求。

表 1 不同病害类型识别精度对比统计表

病害类型	样本数量 / 个	识别准确率 /%	误检率 /%	漏检率 /%
细微龟裂	14	87.6	6.8	11.5
块状裂缝	12	89.1	8.2	9.3
表层剥蚀	10	93.5	5.7	7.6
局部坑洞	8	90.4	7.3	8.9
结构沉陷	8	89.2	9.0	9.8
空鼓热异常	6	92.8	5.1	6.4
合计 / 平均	58	91.3	7.0	8.5

3.3 系统平台集成与部署建议

依托 CNSS 架构构建“采集—分析—识别—输出”一体化系统，平台采用模块化设计，由遥感数据接入、边缘识别与可视化服务三部分组成。接入模块支持 Sentinel、Landsat 等多源遥感格式，并联 CNSS 节点实现地面图像与遥感数据同步上传。分析识别环节集成特征提取与状态分类模型，依托 GPU 服务器支持任务分段与并发调度，提升处理效率。系统接口遵循 RESTful 标准，可与既有道路信息系统及 GIS 平台对接；结果展示端基于 WebGL 实现图斑分级、热力图与指标图层三维可视化，支持交互查询与时序回溯。部署层面建议优先覆盖高交通负荷或病害频发区，配合边缘终端冗余布设与链路容灾方案，确保系统稳定运行与连续监测能力。

4 结束语

本文提出的多源遥感数据融合方法在沥青路面病害识别中表现出较高精度与实用性，成功构建指标体系与四级判别模型，并在典型区域实现快速部署与验证，识别准确率超过 91%。系统平台支持图斑可视化、状态输出与外部系统接入，具备良好的扩展性。未来可进一步拓展至国省干线、山区道路等复杂场景，并结合深度学习模型提升跨区域泛化能力与极端干扰场景下的判别稳健性。

参考文献：

[1] 张智韬,刘彦甫,胡笑涛,等.多源遥感数据驱动的农业水利信息感知与应用研究进展[J].农业机械学报,2025,56(08):1-20.

[2] 崔浩然,李璟琇田,刘奕含,等.基于人工智能和卫星遥感的人造灌木林碳汇估算及监测研究[J].测绘科学技术,2025,13(04):230-241.

[3] 张力仁,冯然,吴长俊,等.多模式组合的大区域地块级农作物分类方法研究[J].测绘与空间地理信息,2024,47(S01):49-51.

[4] 杨铭.空地一体遥感技术在轨道交通安全保护区巡查中的应用[J].测绘通报,2024(S02):178-181.

[5] 梁云飞.自然资源调查监测中遥感与GIS协同分析技术研究[J].信息产业报道,2025(10):227-229.

[6] 邹凤迪.基于人工智能的土地利用动态监测与低空经济用地规划协同策略[J].数码设计(电子版),2024(08):186-188.

[7] 胡洁.基于多模态感知的山区公路智能边坡监测预警系统研究:以G107线信阳段为研究对象[J].越野世界,2025(17):57-59.

建筑深基坑施工安全监测中的测绘数据采集与预警管理机制

陈思英[1]，魏　峰[2]，陈　述[3]

（1. 山东龙诚项目管理咨询有限公司，山东 济宁 272100；
2. 中铁济南工程建设监理有限公司，山东 济南 250022；
3. 青岛一建集团有限公司，山东 青岛 265200）

摘　要　为保障建筑深基坑施工全过程安全稳定，本文以测绘监测数据为核心支撑，系统构建深基坑安全监测的测绘数据采集体系与分级预警管理机制。明确深基坑监测基准控制、测点布设、数据采集方法、精度控制、数据处理与质量核验等关键技术要求，建立覆盖数据采集、传输、分析、判定、预警、处置、复盘的全流程管理架构，提出三级预警阈值设定、预警响应流程、应急处置与闭环管控措施，以期为深基坑工程安全施工与风险管控提供技术参考。结果表明，标准化测绘数据采集与规范化预警管理协同运行，可提升变形识别准确率、缩短预警响应时间、降低基坑失稳风险。

关键词　深基坑；安全监测；测绘数据采集；精度控制；预警机制

中图分类号：TU46；P258　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.008

0　引言

深基坑工程受地质条件、开挖工况、周边环境及施工扰动多重因素影响，支护结构与周边土体易产生不均匀沉降、水平位移、内力变化等异常响应，严重时引发边坡失稳、管涌、塌陷及周边建构筑物损坏。测绘数据采集是深基坑安全监测的核心技术手段，其数据真实性、连续性、精准性直接决定预警判断可靠性与施工决策科学性。本文以深基坑施工全过程为研究对象，围绕测绘数据采集技术体系、质量控制标准、预警判定规则及管理运行机制展开系统研究，形成可落地、可追溯、可考核的技术与管理体系，为基坑工程监测实施、安全管控及应急处置提供统一技术路径。

1　深基坑测绘监测体系构成与控制基准

1.1　监测体系总体构成

深基坑安全监测以测绘技术为核心，构建平面控制、高程控制、现场测点、采集传输、分析预警五位一体监测体系[1]。监测对象涵盖支护桩（墙）、冠梁、内支撑、锚杆、基坑边坡、周边地表、建筑物、地下管线及道路等。监测内容主要包括：顶部水平位移、竖向沉降、深层水平位移（测斜）、支护结构内力、支撑轴力、地下水位、孔隙水压力、周边建构筑物沉降与倾斜等。体系运行遵循基准统一、测点固定、方法稳定、频次合规、数据可比原则，确保监测结果可连续对比、可趋势分析、可预警判定。

1.2　平面与高程控制基准

基准体系是测绘数据准确可靠的前提，基准点应布设于基坑变形影响范围以外，一般不小于3倍开挖深度，且置于稳定地层或永久建构筑物上。平面控制采用独立坐标系，与城市坐标系联测，布设闭合或附合导线，导线点不少于3个，形成稳定校核条件。水平位移监测等级满足二级导线要求，测角中误差≤ ±2″，边长相对中误差≤1/10 000。高程控制采用二等水准测量，布设闭合水准路线，使用电子水准仪与铟瓦尺，每千米高差中误差≤ ±0.3 mm，基准点数量不少于3个，满足相互检核与稳定性判断条件。每次正式监测前，均应对基准点进行联测复核，确认基准稳定后方可开展测点数据采集。

1.3　监测点布设原则与要求

监测点布设以关键部位优先、变形敏感区加密、影响范围全覆盖为原则。支护结构顶部水平位移与沉降测点沿基坑周边布设，间距一般10 m～20 m，阳角、拐点、支撑端部应增设测点；深层水平位移测点布设于支护桩或连续墙墙体中，测斜管埋深不小于基坑深

作者简介：陈思英（1988-），女，本科，工程师，研究方向：建筑工程。

度 1.5 倍，导槽方向垂直于基坑边线[2]。周边建构筑物测点布设于墙角、柱基、楼梯间等敏感部位，沿高度方向必要时布设倾斜测点；地下管线测点优先布置于接口、弯头、阀门及材质变化处。地表沉降测点沿基坑侧向布设，由近及远形成监测剖面，覆盖主要影响区域。所有测点应安装牢固、标识清晰、保护可靠，避免施工扰动损坏[3]。

2 深基坑测绘数据采集技术与方法

2.1 水平位移数据采集

水平位移以全站仪极坐标法为主要采集方式，采用 0.5″级高精度全站仪，固定测站、固定后视、固定观测路径，每点观测 2 测回，测回间较差≤ 3 mm，取均值作为成果。对重要基坑或超长开挖面，可结合 GNSS 静态 /RTK 模式实施自动化监测，静态定位平面精度≤ ±3 mm,动态监测更新频率可根据工况设置为10 min/ 次～ 1 h/ 次。数据采集应避开强光、大风、震动干扰，仪器严格对中整平，开机预热稳定后观测，记录温度、气压等环境参数，用于观测值修正[4]。每次采集完成后即时进行闭合差与限差检核，超差立即重测。

2.2 竖向沉降数据采集

竖向沉降采用二等电子水准测量，按后－前－前－后观测顺序，闭合或附合路线施测，视线高度不低于 0.3 m，基辅分划读数差≤ 0.4 mm，往返测高差不符值满足规范要求。同一测点两次观测差值≤ 0.5 mm，确保沉降数据精准稳定。对自动化监测需求较高的项目，可采用静力水准系统实现不间断采集，传感器分辨率达 0.01 mm，通过 RS485 总线与无线模块传输，实现沉降变化连续记录。深层沉降与分层沉降通过专用磁环式沉降仪实施，沿测杆定点测读，反映不同深度土体沉降规律。

2.3 深层水平位移数据采集

深层水平位移采用数字式测斜仪实施，探头精度不低于 ±0.02 mm/0.5 m，沿测斜管由下至上每 0.5 m 测读一次，正反两向观测，双向差值≤ 0.5 mm，消除仪器系统偏差。初始值在基坑开挖前连续测量 3 次，取均值作为基准。采集时探头匀速下放，避免冲击与卡滞，管内可注入清水减小摩擦。数据结果用于绘制位移—深度曲线，判断墙体或土体深层变形形态，识别滑移面与潜在失稳区域，为支护安全性评价提供关键依据。

2.4 自动化采集与数据传输

自动化采集系统由传感器、采集仪、通信模块、云平台组成，支持振弦式、光纤光栅、MEMS 等多类型传感器接入，可实现位移、应力、水位、渗压等多参数同步采集。采集频率按工况可调，正常施工期一般 30 min/ 次～ 1 h/ 次，开挖与降雨等关键期加密至 10 min/ 次～ 15 min/ 次。数据传输采用 4G/5G、NB IoT、LoRa 等无线方式，关键数据低延迟实时上传，平台具备断点续传、本地缓存、异常补采功能，保证数据连续不丢失。人工巡检与自动化采集形成互补，对裂缝、渗水、掉块、隆起等现场状况同步记录，实现数据与现象联合研判。

3 测绘数据处理与质量控制体系

3.1 数据预处理与误差修正

原始观测数据需进行标准化预处理，包括粗差剔除、系统误差修正、时空对齐、平滑滤波。采用 3σ 准则识别并剔除异常值，对温度、气压、仪器漂移等进行修正；统一时间戳与坐标系，确保多测点、多项目数据时序一致、空间可比。对高频采集数据采用滑动平均、卡尔曼滤波等方法降噪，提升曲线平滑度与趋势可读性，避免噪声干扰导致误预警。

3.2 数据质量核验规则

数据质量实行四重校核：一是现场校核，观测完成即时复核限差，不合格重测；二是内业校核，检查闭合差、较差、重复精度；三是趋势校核，对比前次数据，判断变化速率是否合理；四是交叉校核，对比位移、内力、水位等关联项目，确保变化逻辑一致。凡出现突变、跳变、超差、反向不合理变化等情况，必须立即现场复核测点、仪器与采集流程，排除故障后方可采用[5]。

3.3 监测频次与阶段控制

监测频次严格按基坑安全等级与施工阶段执行：开挖与支撑安装阶段加密监测，一般每天 1 次至 2 次；降雨、周边堆载、邻近施工等特殊工况提高频次，必要时连续实时监测；底板浇筑完成并趋于稳定后可降低频次。监测工作贯穿开挖前、开挖中、支撑期、回筑期、移交稳定期全过程，任何工况不得擅自中断或漏测。

4 深基坑监测预警管理机制构建

4.1 三级预警阈值设定

预警阈值以设计文件为依据，结合地质条件、安全等级、周边环境风险综合确定，实行三级预警管理：（1）黄色预警（关注）：累计值达控制值的 60% ～ 80%，或日变化速率达预警速率。（2）橙色预警（预警）：累计值达控制值的 80% ～ 100%，或速率持续增大且无收敛趋势。（3）红色预警（险情）：累计值超控制值，或出现突变、管涌、裂缝、渗漏加剧、支护异响等直接险情。阈值设定应明确位移、沉降、倾斜、内力、水位等关键项目，统一判定标准，避免多口径解释。

4.2 预警判定与信息发布

预警实行系统自动判定 + 人工复核双轨制。平台实时比对监测值与阈值，达到预警条件即时弹窗提示，

并通过短信、APP、语音等多渠道推送至项目负责人、技术负责人、监理、建设单位及安全管理部门。预警信息必须包含：项目名称、测点编号、监测项目、当前值、阈值、预警等级、时间、位置示意图及建议措施。发布前由专业人员完成数据复核与现场排查，排除仪器故障、采集错误等非真实险情，确保预警准确。

4.3 分级响应与处置流程

1. 黄色预警：加密监测频次，加强现场巡查，分析变形趋势，优化施工参数，放缓开挖速度，必要时调整支撑时序。

2. 橙色预警：立即暂停相关区域开挖作业，组织技术、监理、设计等专项研判，采取临时加固、回填反压、注浆止水、卸载减荷等措施，监测转为高频或连续采集。

3. 红色预警：立即启动应急预案，停止基坑施工，疏散危险区域人员与设备，设置警戒区，迅速采取回填反压、增设支撑、堵漏注浆、锚索张拉等应急处置，同步上报建设主管部门与安全监督机构。

4.4 闭环管理与复盘机制

所有预警均执行闭环管理：预警发布—现场核查—处置实施—跟踪监测—稳定判定—销号归档。处置后持续监测，指标连续稳定回落并保持3天以上方可解除预警。险情处置完成后组织专项复盘，分析诱因、处置过程、措施有效性及经验教训，优化监测方案与施工工艺，形成可复用的风险防控清单，实现持续改进。

5 监测管理保障体系

5.1 人员与仪器管理

监测人员应具备专业资质与上岗条件，熟悉规范、仪器操作、数据处理及预警判定。仪器设备必须经检定/校准合格并在有效期内使用，定期维护保养、期间核查，确保性能稳定。采集作业实行五固定：固定人员、固定仪器、固定测站、固定路线、固定方法，最大限度减小系统误差。同时建立仪器使用台账，对每次采集前后的设备状态、电池电量、通信质量进行登记，避免因设备问题造成数据缺失或失真。

5.2 制度与资料管理

建立监测岗位责任制、仪器管理制度、数据审核制度、预警响应制度、应急处置制度及资料归档制度。监测资料包括：方案、基准成果、原始记录、计算书、曲线图表、周报、月报、预警单、处置记录、复盘报告等，全过程可追溯、可核查、可复盘。资料签字齐全、格式规范，满足竣工验收与安全追溯要求。所有电子数据实行本地与云端双备份，定期刻录归档，防止数据丢失或被篡改。

5.3 信息化平台管控

依托云平台实现数据一图展示、曲线实时生成、阈值自动比对、预警多级推送、流程线上闭环。平台支持PC端与移动端协同，具备历史查询、趋势分析、风险分级、报表自动生成等功能，提升管理效率与决策科学性，实现基坑安全监测数字化、可视化、智能化[6]。平台可对接施工管理系统、监理管控系统与政府监管平台，实现数据互联互通，提升多方协同处置效率。

5.4 现场测点保护与运维保障

测点保护是数据连续可靠的重要前提，应对所有测点安装刚性保护罩，设置醒目警示标识，避免机械碰撞、碾压、焊接烧损等人为破坏。施工过程中安排专人对测点进行日常巡检，发现松动、破损、偏移等问题立即修复校正。对自动化监测设备做好防雷、防潮、防尘处理，定期检查供电与通信状态，确保极端天气下仍可稳定运行，为测绘数据采集提供持续可靠的硬件保障。

6 结束语

深基坑施工安全监测以测绘数据采集为核心支撑，以预警管理机制为运行保障，是防范基坑失稳、保障工程与周边环境安全的关键技术体系。标准化测绘采集能够提供真实、精准、连续的变形与受力数据，为安全状态判断提供科学依据；分级预警与闭环管理能够实现风险早识别、早预警、早处置，最大限度降低事故概率。未来应进一步推动北斗高精度定位、物联网传感、边缘计算、数字孪生与深基坑监测深度融合，提升数据自动化采集、智能化分析、精准化预警水平，完善多部门协同、多层级响应的预警管理机制，推动深基坑安全管控向数字化、智能化、标准化方向持续升级，为建筑工程深基坑施工安全提供更加坚实可靠的技术保障。

参考文献：

[1] 司徒伊俐.智能建造技术在施工现场安全管理的应用和探究[J].建筑机械化,2025(06):15-19.

[2] 朱渊.深基坑安全监测数据分析及数值模拟研究[D].武汉:长江科学院,2021.

[3] 彭紫麟.智能化施工监测系统在深基坑工程安全管理中的集成应用[J].砖瓦世界,2025(21):160-162.

[4] 徐爽,徐渌祁,李艳琼,等.深基坑智慧监测系统开发及应用研究[J].土木工程与绿色建筑,2025,01(03):150-154.

[5] 张明栋,张明智,王水清.深基坑安全监测信息管理系统设计研究[J].测绘与空间地理信息,2024,47(09):98-100.

[6] 杨旭东,孙康娴.BIM技术在基坑工程施工中的应用[J].建筑安全,2023,38(07):9-12.

建筑工程 BIM 技术在港口航道工程数字化设计中的应用研究

许晓飞[1]，姜志平[2]，王春伟[3]

（1. 青岛华油工程建设监理有限公司，山东 青岛 266071；
2. 海阳华辰建材有限公司，山东 烟台 265100；
3. 青岛盛仕建筑工程有限公司，山东 青岛 266400）

摘 要 针对港口航道工程传统二维设计模式存在的专业协同效率低、空间冲突预判难、工程量计量精度不足、信息传递断层等核心痛点，本文基于建筑工程 BIM 技术体系，构建了港口航道工程数字化设计的全流程 BIM 技术应用框架，明确了适配港航工程特性的 BIM 建模精度标准与参数化构件库体系，提出了多专业集成建模方法、云原生协同设计机制与数字化交付标准，以期为港口航道工程数字化设计转型提供技术参考。结果表明，该技术体系可将港口航道工程设计变更率降低 40% 以上，工程量计量精度提升至 98%，设计周期缩短 25%。

关键词 BIM 技术；港口航道工程；数字化设计；参数化建模；多专业协同

中图分类号：U652.3；TU201.4 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.009

0 引言

港口航道工程具有结构体系复杂、专业交叉密集、线性跨度大、水文地质约束性强、水下工程占比高的典型特征，传统二维设计模式已难以适配现代工程精细化、高效化、全生命周期管控的建设需求。建筑工程 BIM 技术以三维数字模型为核心载体，集成工程全要素几何、物理、功能与管理信息，具备可视化、参数化、协同化、信息一体化的核心特征，与港口航道工程数字化设计需求高度契合。本文围绕 BIM 技术在港口航道工程设计阶段的深度应用，系统构建数字化设计的基础体系、核心建模方法、协同工作机制与交付标准，形成完整的 BIM 应用技术框架，为推动港口航道工程设计模式的数字化转型提供参考。

1 港口航道工程 BIM 数字化设计基础体系

1.1 BIM 技术的港航工程适配性

建筑工程 BIM 技术的核心逻辑与港口航道工程设计需求具有高度适配性，同时需针对港航工程专属特性完成技术适配。其一，三维可视化适配性，可将抽象的航道断面、水下基础、码头结构转化为直观三维模型，解决二维图纸难以表达复杂水下空间形态的核心痛点；其二，多专业协同适配性，港口航道工程涉及十余个交叉专业，BIM 技术可实现各专业模型的实时集成与冲突预警，打破专业间的信息壁垒；其三，全要素信息集成适配性，可将水文、地质、荷载、施工工艺等非几何信息与三维模型深度关联，形成贯穿工程全生命周期的数字化信息载体，解决传统设计中信息传递断层的问题[1]。

1.2 数字化设计总体架构

构建“平台—标准—模型—应用—交付”五位一体的港口航道工程 BIM 数字化设计总体架构。底层为软硬件支撑层，配置适配港航工程的 BIM 软件工具链与硬件设备；中层为标准与数据层，制定项目级 BIM 实施、建模精度、数据交互等核心标准，搭建云原生协同工作环境；上层为应用与交付层，覆盖精细化建模、协同设计、方案优化、工程量计算、数字化交付等全流程应用。架构设计遵循“一模到底、数据同源”的核心原则，确保设计信息的一致性与可追溯性。

1.3 分级建模精度标准

结合港口航道工程各设计阶段需求，建立 LOD 100 至 LOD 400 的分级建模精度标准。方案设计阶段对应 LOD 100-200，构建概念化模型，表达工程整体布局、航道走向、陆域功能分区等宏观信息；初步设计阶段对应 LOD 300，构建专业初步模型，明确构件尺寸、材料类型与基本构造，满足投资估算需求；施工图设计阶段对应 LOD 350-400，构建全要素精细化模型，完整

作者简介：许晓飞（1986-），男，本科，工程师，研究方向：建筑工程。

表达构件几何参数、连接方式、细部构造与技术参数，满足施工图出图、工程量计算与施工指导需求。

1.4 标准化参数化构件库建设

建立港口航道工程专属BIM标准化参数化构件库，采用三级体系架构：一级为通用构件库，复用建筑工程成熟的梁、板、柱、管线等基础构件标准；二级为港航专用构件库，包含沉箱、胸墙、靠船构件、桩基、护面块体等典型水工构件，是构件库的核心主体；三级为项目级非标构件库，收纳特定项目定制的非标准化构件。所有构件均采用参数化建模技术，提供完整的几何、材料与技术参数，实现构件的快速调用与修改，大幅提升建模效率与模型标准化水平。

2 港口航道工程BIM精细化建模技术

2.1 水工主体结构参数化建模

水工主体结构是港口工程的核心，包含重力式、高桩式、板桩式三大主流结构形式，以Revit、Bentley平台为核心，结合Dynamo可视化编程实现参数化自动化建模。高桩码头建模遵循“从下到上”的流程，依次建立桩基、横梁、纵梁、面板、靠船构件等核心构件，通过参数化驱动控制桩长、桩距、截面尺寸等关键参数，同时与三维地质模型关联，实现桩长随持力层高程的自适应调整。建模过程中嵌入结构计算接口，实现BIM模型与专业结构分析软件的双向数据交互，形成“设计—分析—优化”的一体化闭环[2]。

2.2 航道工程线性建模与地形融合

航道工程具有线性跨度大、断面复杂、水下地形多变的特征，采用Civil 3D与BIM融合的线性建模技术。基于多波束测深数据构建高精度三维原始地形模型，通过航道设计水深、底宽、边坡坡度等核心参数，自动生成航道设计曲面与开挖边界。针对航道整治建筑物，参数化建立丁坝、顺坝、护岸等模型，精准表达坝体尺寸与护面材料。疏浚工程建模通过原始地形与设计地形的叠加运算，自动生成疏浚土方量计算模型，实现分段、分区疏浚量的精准统计与三维可视化展示。

2.3 陆域设施与综合管线建模

港口陆域设施包含堆场、道路、生产建筑、辅助建筑等，直接复用建筑工程成熟的BIM技术体系，实现场地、建筑、结构、机电的全专业一体化建模。综合管线系统是设计阶段的碰撞高发区域，采用“先整体布局、后细部建模、再协同优化”的流程，基于Revit建立各专业管线三维模型，赋予管径、材质、压力等完整属性参数。利用BIM软件自动识别结构与管线、管线间的空间碰撞，优化管线综合布局，确保满足净空、检修、安全距离等规范要求，同时建立管线统一编码体系，为后期运维奠定数据基础。

2.4 地质水文环境多源信息集成

将地质、水文环境信息与主体工程BIM模型深度融合，构建工程全域三维环境模型。基于勘察钻孔数据建立三维地层模型，完整表达土层分布、岩土力学参数、地下水位等关键地质信息，与水工结构模型精准叠加，自动分析桩基持力层、基础埋深等设计参数。集成潮汐、水位、流速等水文数据，构建动态水文环境模型，模拟极端工况下结构受力与航道通航能力变化，实现工程结构与地质、水文环境的协同设计。

3 基于BIM的多专业协同设计机制

搭建基于云原生技术的BIM协同设计平台，采用“中心文件—专业工作集”的管理模式，设置模型管理、权限管理、版本管理、冲突检测四大核心模块。按专业划分独立工作集，各专业设计师在授权范围内开展建模工作，设计成果实时同步至中心文件，实现模型的实时集成与共享[3]。建立分级权限管理体系，明确不同角色的操作权限，保障模型数据安全可控，同时配置版本回溯功能，完整记录模型修改历史，确保协同过程全程可控。

制定标准化协同设计流程，划分为启动、建模、集成、审核、优化、交付六个核心阶段。启动阶段明确BIM标准、专业分工与时间节点；建模阶段各专业同步开展建模，定期提交模型至协同平台；集成阶段每周开展全专业模型合并与碰撞检测；审核阶段通过平台开展线上三维校审，直接在模型上标注问题并反馈至对应专业；优化阶段完成模型修改与方案验证；交付阶段完成最终模型整合与成果打包。

构建分级分类的设计冲突处理机制，将设计冲突分为硬碰撞、软冲突、信息冲突三类，利用Navisworks软件开展全专业碰撞检测，自动生成冲突报告，精准标注冲突位置与涉及专业。建立标准化冲突处理流程：检测定位—原因分析—责任判定—模型修改—复核验证—闭环归档，将90%以上的设计问题解决在施工前，避免后期施工阶段的设计变更与返工[4]。

4 BIM驱动的设计优化与量化分析应用

依托BIM三维可视化特性，开展多维度设计方案迭代优化。通过模型漫游、剖面剖切、虚拟仿真，直观呈现工程建成效果，优化码头布局、航道走向、建筑形态与集疏运组织，针对复杂构造节点开展三维细部优化，确保构造合理、施工可行。结合VR技术构建沉浸式虚拟场景，组织多方参与方案评审，提升方案决策的科学性，减少因设计不合理导致的后期变更。

实现 BIM 模型与结构分析软件的双向衔接，构建结构性能化设计闭环。将 BIM 模型直接导入专业结构分析软件，自动生成有限元计算模型，施加港口工程专属荷载组合，开展结构强度、刚度、稳定性分析，根据计算结果反向优化 BIM 模型，调整构件尺寸、配筋率与结构布置，在满足规范要求的前提下实现结构设计的安全与经济平衡。

融合 BIM 技术与水文数值模拟技术，优化港口航道通航条件与防洪防浪设计。将航道与码头 BIM 模型导入水文模拟软件，构建水动力数学模型，模拟不同工况下的通航轨迹、流速影响与防浪效果，优化航道宽度、转弯半径、设计水深与防波堤设计，确保方案满足通航安全与极端工况抵御要求。

基于BIM模型实现工程量的自动精准计算，按构件、专业、材料自动统计混凝土方量、钢筋重量、土方量、管线长度等全部工程量，建立 BIM 模型与水运工程计价规范的映射关系，自动生成标准化工程量清单。通过不同方案的工程量对比，开展限额设计与造价优化，实现工程投资的精准控制，基于 BIM 的工程量计量精度可达 98% 以上，从源头避免工程量错算、漏算问题。

5 BIM-GIS 融合与数字化交付体系

实现 BIM 微观精细模型与 GIS 宏观地理信息的深度融合，将 BIM 模型轻量化处理后导入 GIS 平台，叠加高精度地形、卫星影像、生态保护红线等地理信息数据，构建工程全域三维地理信息模型，支撑港口选址、航道规划、集疏运系统优化等宏观决策，同时采用 WebGL 技术实现融合模型的网页端轻量化浏览，支持多终端跨平台访问 [5]。

建立港口航道工程 BIM 数字化交付完整体系，明确交付内容、格式、深度与验收标准。交付核心内容包括全专业整合的 BIM 模型、全要素工程信息、设计优化报告、工程量统计成果、施工图纸与计算书等，交付格式以行业通用 IFC 格式为主，配合原生格式与轻量化格式，确保交付成果的兼容性与可复用性。交付模型需达到施工图设计深度（LOD 350-400），确保信息完整、参数准确，满足工程施工、运维的核心需求。

规范数字化交付全流程管控，具体流程为全专业模型整合、全要素信息完善、合规性与完整性检查、模型轻量化处理、交付数据包封装、联合验收、正式移交。模型整合阶段需合并各专业模型，消除所有设计冲突，形成完整的工程信息模型；信息完善阶段补充构件统一编码、施工要求、运维信息等属性数据；合规性检查阶段依据交付标准开展全面核查，最终形成标准化交付数据包，经多方联合验收合格后移交，实现设计信息向施工、运维阶段的无缝传递。

6 建筑工程 BIM 技术在港口航道工程数字化设计中应用的实施保障

构建“港航专业技术 +BIM 技能”的复合型人才团队，开展系统化培训，培养既精通港航工程设计、又熟练掌握 BIM 技术的核心人才。建立企业级 BIM 技术中心，负责标准制定、技术研发与项目质量管控，针对港航工程专属需求开展 BIM 二次开发，定制化解决复杂水工构件建模、多软件数据交互等技术问题，形成自主可控的 BIM 技术工具集。

建立完善的BIM项目管理制度，明确项目各参与方、各岗位的 BIM 工作职责与考核标准，将 BIM 应用要求纳入设计合同与专业负责人考核体系。制定 BIM 成果质量检查制度，设置三级模型校审节点，在方案设计、初步设计、施工图设计三个阶段分别开展模型质量专项检查，对模型精度、信息完整性、标准合规性进行全面核验，不合格成果严禁进入下一设计阶段，从制度层面保障 BIM 技术应用的规范性与落地效果。

7 结束语

本文系统构建了建筑工程 BIM 技术在港口航道工程数字化设计中的完整应用体系，从基础标准体系、精细化建模技术、多专业协同机制到数字化交付，形成了全流程、标准化的技术方法与实施路径。BIM 技术的深度应用，变革了港口航道工程传统二维设计模式，实现了设计过程的数字化集成、多专业的高效协同与工程信息的全生命周期传递，有效解决了传统设计模式的诸多核心痛点，显著提升了港口航道工程的设计质量、效率与经济性。未来研究应进一步聚焦 BIM 与数字孪生、人工智能、物联网技术的深度融合，拓展 BIM 技术在港口航道工程全生命周期的应用，完善港航工程 BIM 国家标准体系，研发更适配港航工程特性的专业化 BIM 工具，推动港口航道工程行业全面实现数字化、智能化高质量发展。

参考文献：

[1] 乔树军 . 基于 BIM 技术的港口与航道工程全生命周期施工质量管控体系的构建 [J]. 中国品牌与防伪 ,2025(12):107-109.

[2] 曾昱 , 廖一鸣 , 牛作鹏 , 等 . 基于数据集成技术的航道工程 BIM 预警平台研究与应用 [J]. 水运工程 ,2022(04):151-156.

[3] 王祺 . 基于 BIM 技术的港口航道工程全生命周期协同设计优化研究 [J]. 中国图片 (中英文),2024(21):244-245.

[4] 殷艺秣 , 冷吉涛 , 刘勇 . 基于 BIM 的数字化施工技术在航道工程中的研究与应用 [J]. 水上安全 ,2023(03):28-30.

[5] 葛彦 , 董潇潇 , 张亚东 . 基于 BIM 技术的建筑工艺分析与施工进度管理 [J]. 绿色建造与智能建筑 ,2025(08):84-87.

基于故障树分析（FTA）的HDPE挤压造粒机关键部件可靠性研究

宋 刚

（中石化英力士（天津）石化有限公司，天津 300450）

摘 要 润滑系统失效、螺杆磨损、熔体压力异常、对中不良与传动振动、摩擦离合器故障是导致顶事件发生的关键路径，其中润滑系统为核心薄弱环节，螺杆与机筒为寿命受限部件，切刀系统为维护频率最高部件。本文以HDPE挤压造粒机为研究对象，通过故障树分析（FTA）方法识别关键部件的故障发生机制与薄弱环节。梳理挤压造粒机的系统组成、工作原理及常见故障模式，选取主电机扭矩异常（过高）导致联锁停车作为顶事件构建故障树模型，通过最小割集求解与定性分析识别关键故障路径与薄弱环节，并明确了HDPE挤压造粒机可靠性提升的重点方向，旨在为设备预测性维护策略制定、故障诊断效率提升提供参考。

关键词 故障树分析；HDPE挤压造粒机；挤压系统；传动系统；切粒系统

中图分类号：TQ320.5+2；TB114.3 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.010

0 引言

高密度聚乙烯（HDPE）作为全球产量规模最大的通用热塑性树脂之一，在包装、管材、汽车、电子电器等领域得到广泛应用。挤压造粒是HDPE树脂生产流程中的最终工序，挤压造粒机组承担着将上游聚合工段输送而来的粉料进行熔融、塑化、均化、挤出、切粒并制成成品颗粒的全过程任务。该机组通常由主电机、主减速箱、筒体与双螺杆、熔融泵、换网器、模板、水下切粒系统以及各类辅助系统（润滑系统、加热冷却系统、仪表控制系统等）组成，属于集机械、电气、仪表于一体的复杂成套装备。在现代石化企业中，挤压造粒机组的平稳运行直接关系到产品质量的稳定性和装置经济效益的提升。

1 HDPE挤压造粒机系统分析

1.1 设备工作原理与工艺流程

HDPE挤压造粒机是一种通过机械挤压结合热熔效应实现干法造粒的工业设备。其核心工作原理是：上游聚合工段生产的HDPE粉料经喂料系统计量后进入挤压系统，在螺杆的旋转作用下被向前输送；在筒体的加热和剪切作用下，粉料逐渐熔融、塑化并形成均匀的熔体；熔体在螺杆末端建形成足够的压力，经熔融泵增压、换网器过滤后通过模板挤出成条状或股状，随后在水下切粒室中被高速旋转的切刀切割成均匀的颗粒；颗粒经脱水、干燥和分级后进入成品料仓[1]。

1.2 关键部件组成与功能

HDPE挤压造粒机作为集机、电、仪于一体的复杂成套装备，其关键部件可划分为以下几个子系统。（1）挤压系统。挤压系统是造粒机的核心做功部分，包括双螺杆、机筒（筒体）、料斗、熔融泵、换网器、模板等。螺杆是整台设备最核心的部件，负责物料的输送、熔融、混合，其磨损状况直接影响产品质量与生产效率。机筒通过分段加热为物料熔融提供必要的热量，筒体内壁与螺杆元件之间的间隙通常控制在2.0 mm左右。换网器用于过滤熔体中的杂质，模板则决定挤出熔体的截面形状。（2）传动系统。传动系统由主电机、主减速箱、摩擦离合器、辅助齿轮箱部件构成，主电机为整机提供动力，主减速箱把电机的高转速降到螺杆工作所需转速并把动力合理传递给两根螺杆，摩擦离合器有启动、过载时的缓冲保护作用。（3）切粒系统。切粒系统包括水下切粒机、切刀、切粒电机、颗粒水循环系统等，负责将挤出熔体切割成规定尺寸的成品颗粒。切刀的磨损程度直接影响颗粒切割质量和系统的连续运行。（4）润滑系统。润滑系统为齿轮箱、轴承等高速运转部件提供润滑油，其供油压力、油温、油质等参数对传动系统可靠性具有重要影响。（5）加热冷却系统。加热冷却系统对筒体、模板等关键部位的温度进行精确控制，以保证物料熔融充分、温度场

作者简介：宋刚（1992-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：化学工程与技术。

均匀。（6）仪表控制系统。仪表控制系统实时监测并调节主电机扭矩、转速、熔体压力、各点温度、润滑油压、振动等关键参数，并在异常情况下触发联锁保护动作。

1.3 常见故障模式统计与分析

基于生产实践统计，HDPE 挤压造粒机的常见故障模式可归纳为以下几类：（1）主电机扭矩异常。油润滑系统故障、主电机输出轴与齿轮箱输入轴对中不良、电机及离合器振动、喂料负荷过大或物料熔融不良等均可导致主电机扭矩过高；喂料系统故障致使双螺杆空转则会导致扭矩过低。扭矩异常是机组最常见的联锁停车原因之一。（2）摩擦离合器故障。主电机瞬间启动电压过低、摩擦盘与摩擦片过热或老化、仪表风压力不足等均可导致离合器脱开。摩擦离合器故障直接导致动力中断，造成机组停车。（3）切粒系统故障。切刀磨损过量、颗粒水流量过低、切粒机振动过大、切刀与模板贴合不紧、物料熔融指数波动等均可导致水下切粒系统停车，进而引发整个机组联锁停车。尤其在 HDPE 装置中，低融指高密度物料对切刀的磨损尤为严重。（4）传动系统振动与异响。齿轮磨损、断齿、点蚀、间隙超差，轴承滚动体缺陷、保持架损坏、配合松动，以及摩擦离合器间隙过大等问题均可引发振动异常。已有案例中，辅助齿轮箱解体检查发现 SL184930 轴承损坏，滚珠变形，滚道出现凹坑，轴颈表面金属层剥落。（5）螺杆磨损与断裂。螺杆在机筒内长期高速旋转，物料与螺杆、机筒的摩擦使两者工作表面逐渐磨损，螺杆直径逐渐缩小，机筒内孔直径逐渐加大。当螺杆与机筒间隙过大时，物料的输送和熔融效率下降，甚至出现螺杆与机筒干涉的严重故障。螺杆芯轴还可能发生疲劳断裂，裂纹起源于齿顶部的表面压痕缺陷和芯轴内齿棱角处的应力集中。

2 故障树分析法原理与建模

2.1 FTA 基本原理

故障树分析法是一种自上而下的演绎式系统可靠性分析方法，由美国贝尔电话实验室于 20 世纪 60 年代提出，最初应用于“民兵”导弹发射控制系统的安全性分析，随后逐步推广到核工业、航空航天、化工、机械制造等各个领域。FTA 的基本原理是：以系统不希望发生的事件作为顶事件（Top Event），按照系统的功能结构和故障因果关系，逐级向下分解，直至找到不可再分解的基本事件（Basic Event），从而构建一棵逻辑树形图——故障树[2]。

2.2 FTA 在机械系统中的应用适应性

FTA 在机械系统可靠性分析中有着适用性，可从几个方面予以阐述：第一，FTA 能很好地处理系统级故障的多因素耦合特性，用逻辑门把复杂故障路径予以准确表达，克服单一故障经验分析的重大不足。第二，FTA 的树形结构极其直观，故有利于分析人员之间的交流沟通，也有利于故障排查经验的积累和传承。第三，FTA 本身支持从定性到定量的递进分析，在故障数据充分时可直接做可靠性量化评价，数据不足时又可用最小割集分析确定薄弱环节。对于 HDPE 挤压造粒机这类复杂的旋转机械设备，FTA 的应用价值尤为突出。挤压造粒机组的故障往往是多个因素综合作用的结果。例如：主电机扭矩过高可能同时涉及润滑系统失效、对中不良、工艺波动等多种原因，且这些原因之间并非完全独立。FTA 能够将这些因素及其相互关系系统地组织起来，从逻辑层面揭示故障的发生机制，为故障诊断和预防维护提供科学依据。

2.3 顶事件选取与边界条件确定

选取“主电机扭矩异常（过高）导致联锁停车”作为故障树的顶事件。选择该事件作为研究对象，主要基于以下几点考虑：首先，主电机扭矩异常是挤压造粒机组最常见、发生率最高的故障类型之一，具有代表性和典型性。其次，主电机扭矩异常与机械、润滑、工艺、电气、仪表因素相关，成为检验 FTA 系统分析能力的理想案例。最后，扭矩数据在工业现场是实时监测的参数，异常信号能够被及时捕捉，具有实际工程意义。

3 HDPE 挤压造粒机故障树的定性分析

3.1 最小割集求解

最小割集是故障树分析中的核心概念。所谓割集，是指一组基本事件的集合，当这组基本事件全部发生时，顶事件必然发生。最小割集则是指不能再进一步简化的割集——删除其中的任何一个基本事件，剩余的基本事件集合就不再构成割集。求解最小割集的过程，本质上就是找出导致顶事件发生的所有最基本的故障组合[3]。

对构建的故障树进行最小割集求解，采用下行法（Fussell-Vesely 算法）和上行法（Semanderes 算法）相结合的策略。下行法从顶事件出发，按照逻辑门的类型逐层向下替代扩展：遇到或门则用其输入事件分别替代原事件（产生多个分支），遇到与门则用其输入事件的组合替代原事件（产生扩展组合）。经过迭代扩展直到所有分支的末端均为基本事件，然后对得到的割集进行简化——删除其中包含超集关系的非最小割集，即可得到全部最小割集。

3.2 关键故障路径识别

将全部最小割集进行分析和归类，可以识别出导致顶事件发生的若干条关键故障路径。路径一：润滑

系统失效路径。润滑油泵故障、油路堵塞、油质劣化、油温过高或油压过低等润滑系统相关的基本事件，在各最小割集中出现频率最高。润滑系统失效导致齿轮箱轴承和齿轮处于缺油或润滑不良状态，摩擦系数急剧增大，传动效率下降，主电机负荷显著上升。此外，润滑系统故障还会引发齿轮和轴承的异常磨损，形成恶性循环。路径二：螺杆磨损与异常振动路径。螺杆磨损使螺杆与机筒间隙增大，物料回流增大，挤出效率降低，主电机要输出更大的扭矩才能保证产量。严重时螺杆振动剧烈，与机筒内壁发生干涉，产生异常摩擦甚至卡阻，主电机扭矩因而突增。螺杆芯轴的疲劳断裂会带来灾难性后果。路径三：熔体压力异常路径。过滤网堵塞、模板堵塞、筒体温度过低导致物料熔融不良、物料熔融指数偏低等因素均可导致熔体压力异常升高，熔体在螺杆末端形成的背压增大，主电机负荷相应增加。这一路径将工艺参数异常与设备负荷直接关联起来。路径四：对中不良与传动振动路径。主电机输出轴与齿轮箱输入轴对中不良会导致附加弯矩和振动，加速轴承磨损，使传动效率下降，主电机扭矩升高。对中不良的原因可能是安装误差、基础沉降或运行中螺栓松动。

3.3 薄弱环节分析与讨论

通过对最小割集的结构特征和基本事件出现频次的综合分析，可以识别出HDPE挤压造粒机可靠性中的若干薄弱环节：（1）润滑系统——最关键的薄弱环节。润滑系统失效在各最小割集中反复出现，且往往与其他故障因素形成耦合效应——润滑不良会加速轴承和齿轮的磨损，而磨损产生的碎屑又会进一步恶化润滑状态。在HDPE挤压造粒机中，润滑系统承担着齿轮箱、轴承等核心传动部件的关键润滑任务，其可靠性直接影响整机寿命。然而，在实际生产中，润滑系统往往被忽视，润滑油更换周期不严格、油质监测流于形式等问题普遍存在。（2）螺杆与机筒——寿命最受限的部件。螺杆和机筒直接与物料接触，长期处于高温、高压、磨料磨损的恶劣工况下，其使用寿命往往远低于其他部件。HDPE物料中常含有催化剂残留、填料颗粒等硬质成分，加速了螺杆表面的磨粒磨损。当螺杆与机筒间隙过大时，挤出效率和产品质量双双下降，机组不得不在能耗增加和停机的困境中作出选择[4]。

4 基于故障树分析（FTA）的HDPE挤压造粒机关键部件可靠性提升策略

4.1 润滑系统优化策略

针对润滑系统关键薄弱环节提出以下优化策略：建立润滑油在线监测系统，实时监测油液的黏度、水分含量、酸值、颗粒污染度等关键指标，取代传统的定期换油模式，实现按质换油。定期检查主电机输出轴与齿轮箱输入轴之间的对中状况，首次开车或更换轴承运行三个月后必须检查对中情况。对齿轮箱润滑油泵出口压力、油温进行趋势监测，当压力过低或油温异常时提前预警，避免润滑失效引发连锁故障。在润滑油品选择上，应根据HDPE挤压造粒机低速重载的工作特点，选用合适黏度等级和极压性能的合成润滑油，并严格控制换油周期和质量标准。

4.2 状态监测与故障预警方案

考虑到挤压造粒机属于低速、重载、变速的特殊旋转设备，国内在挤压机状态监测与故障诊断技术方面还存在一定难度。建议建立多层次状态监测体系：在主电机轴承、齿轮箱轴承、螺杆轴承等关键部位安装在线振动传感器和温度传感器，建立振动速度、振动加速度、温度的趋势图。当振动值或温度值超出趋势值时，测定主电机空转电流值或功率值是否超规定值，判断是否应更换轴承或进行检修。对离合器进行振动速度测试，如果超出规定值则应重新调整动平衡。定期对筒体加热、冷却系统进行检查，保证物料受热均匀、熔融充分[5]。通过对关键部件的振动、温度、扭矩等参数进行趋势分析，建立预测性维护模型，在故障发生前识别异常征兆，变“事后维修”为“预知维修”。

5 结束语

故障树分析法能有效拆解复杂成套装备的故障传导逻辑，形成多因素耦合故障的系统梳理，为HDPE挤压造粒机的故障诊断与预测性维护提供了清晰的技术路径。未来，可进一步结合设备全生命周期的故障统计数据开展故障树定量分析，计算顶事件发生概率与各基本事件的重要度，落实可靠性的量化评估；同时将本研究的分析结果与工业互联网平台结合，开发挤压造粒机智能故障诊断系统。

参考文献：

[1] 白文鹏,付尧明,陈余杰.基于故障树分析法的B737全动飞行模拟机操纵系统可靠性分析[J].民航学报,2026,10(01):87-90.
[2] 王康,姜南,刘雨薇.聚乙烯挤压造粒系统运行效能提升策略研究[J].化工管理,2025(36):119-122.
[3] 张荧驿,田雪艳,李娜,等.基于WQS软件的安全环路故障树分析[J].铁道车辆,2025,63(06):50-55.
[4] 苏子超.移动式秸秆造粒机关键部件设计及试验[D].南京:南京农业大学,2021.
[5] 陈序,李向东,樊卫华.基于故障树的起重机控制系统可靠性分析[J].建筑机械,2024(12):61-64.

公路路基防护工程施工技术要点分析

崔云鹏

（麦岛建设发展集团有限公司，甘肃 兰州 730030）

摘 要 在复杂地形、水文、气候条件下，路基易出现冲刷、滑塌、沉降、冻胀等病害，科学合理的防护施工可有效降低病害发生率、延长道路使用寿命。本文结合公路工程现场施工实际，围绕路基防护工程常用技术类型，系统阐述边坡坡面防护、支挡结构防护、排水防护、植物防护的施工流程与控制要点，明确关键技术参数与质量验收标准，提出全过程质量管控措施，以期为公路路基防护施工提供技术参考，助力提升工程建设质量、保障道路运行安全。

关键词 公路工程；路基防护；支挡结构；排水系统；边坡稳定

中图分类号：U416.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.011

0 引言

公路路基长期暴露于自然环境中，受降雨冲刷、地下水侵蚀、冻融循环、车辆荷载等多重因素影响，易产生结构失稳与外观破损。路基防护工程以加固土体、防止侵蚀、提升稳定性为目标，是公路建设不可或缺的组成部分。随着公路建设向山区、丘陵区延伸，路基边坡高度更大、地质条件更复杂，对防护技术提出更高要求。明确施工技术要点、严控关键参数、强化过程管理，对保证防护效果、减少后期养护成本、保障公路安全畅通具有重要的现实意义。

1 公路路基防护工程类型与适用条件

路基防护是公路工程维持整体稳定的关键分部工程，按功能与构造可分为坡面防护、支挡结构防护、排水防护、植物防护四大类。各类技术适用场景、施工要求差异明显，只有明确适用条件与核心工艺，才能做到因地制宜、防护有效，为后续施工与质量管控奠定基础。

1.1 边坡坡面防护施工技术要点

坡面防护主要用于抵御雨水冲刷、防止风化剥落，常用方式包括浆砌片石防护、喷射混凝土防护、骨架护坡等，施工需严格控制厚度、强度与密实度[1]。浆砌片石护坡采用强度≥ 30 MPa 的硬质岩石，砂浆强度等级不低于 M7.5，砌筑厚度控制在 250 mm ～ 350 mm，基础埋深不小于 800 mm，每 10 m ～ 15 m 设置一道伸缩缝，缝宽 20 mm ～ 30 mm，填塞沥青麻絮。喷射混凝土防护强度等级不低于 C20，厚度宜为 80 mm ～ 150 mm，分两次喷射，底层厚 60%，面层厚 40%，喷头与坡面距离保持 0.8 m ～ 1.5 m，风压控制在 0.1 MPa ～ 0.2 MPa。骨架护坡采用混凝土或浆砌片石，骨架间距 2.5 m ～ 3.0 m，嵌入坡面深度不小于 150 mm，骨架内可回填种植土进行绿化。施工前必须清理坡面浮石、松土，保证基底坚实，避免后期出现空鼓、脱落、开裂等问题。

1.2 支挡结构防护施工技术要点

支挡结构适用于坡度较陡、土体稳定性差、易发生滑塌的路段，常见形式有重力式挡土墙、锚杆挡土墙、加筋土挡土墙等。重力式挡土墙采用 C15 ～ C20 混凝土或浆砌片石，墙身高度超过 5 m 时应分级设置，基底地基承载力不低于 180 kPa，墙背反滤层采用 200 mm ～ 300 mm 厚级配碎石，泄水孔间距 2 m ～ 3 m，孔径不小于 50mm，向外倾斜坡度 5%。锚杆挡土墙锚杆孔径不小于 110 mm，锚杆采用 HRB400 级钢筋，长度根据边坡高度确定，一般为 3 m ～ 8 m，锚固段注浆强度不低于 M20，注浆压力 0.3 MPa ～ 0.5 MPa。加筋土挡土墙填料最大粒径不大于 150 mm，分层压实厚度 200 mm ～ 250 mm，压实度不低于 93%，筋带采用聚乙烯或钢塑材料，抗拉强度不低于 80 MPa。施工中严格控制墙体垂直度、平整度与沉降观测，确保结构受力稳定、变形可控。

1.3 排水系统防护施工技术要点

排水防护是路基稳定的前提，通过拦截、排除地表水与地下水，降低土体含水率，提高抗滑能力。地表排水设施包括边沟、截水沟、排水沟，边沟采用梯形断面时底宽≥ 400 mm，深度≥ 400 mm，坡度不小于 2%；

作者简介：崔云鹏（1991-），男，本科，工程师，研究方向：公路工程。

矩形边沟壁厚不小于150 mm，混凝土强度≥C25。截水沟设置在边坡坡顶5 m以外，底宽≥500 mm，深度≥600 mm，纵坡不小于1%。地下排水以盲沟、渗沟为主，盲沟宽度300 mm～500 mm，深度1 m～2 m，内部填充5 mm～20 mm级配碎石，反滤层采用土工布包裹，渗透系数不小于1×10^{-3} cm/s。施工时保证排水线路顺畅，无积水、无倒坡，沟底与沟壁密实不渗漏，出水口远离坡脚与路基，避免水流回渗。雨季施工应加快排水结构施工速度，及时完成防护，防止雨水冲刷造成边坡失稳。

1.4 植物防护施工技术要点

植物防护兼具固土、护坡、生态恢复功能，适用于坡度缓于1:1.5、土质较好的边坡。常用方式有种草、铺草皮、三维网植草等[2]。草种选择耐旱、耐寒、根系发达的狗牙根、高羊茅、紫穗槐等，播种量控制在20 g/m²～30 g/m²，播种前松土厚度不小于100 mm，撒播后覆土5 mm～10 mm并压实。铺草皮采用方块草皮，尺寸200 mm×200 mm，厚度50 mm～80 mm，自下而上错缝铺设，搭接宽度30 mm～50 mm，铺设后浇水养护不少于15天。三维网植草网垫厚度不小于10 mm，抗拉强度≥1.5 kN/m，采用U型钉固定，钉长300 mm～500 mm，间距1.0 m～1.5 m。植物防护施工宜在春季或秋季进行，避开高温与严寒天气，养护期保证土壤湿润，提高成活率。植被覆盖成型后可有效降低雨水冲刷，减少水土流失，提升边坡长期稳定性。

2 常用路基防护技术对比与参数控制

在明确防护类型与适用条件后，需通过技术对比、参数控制、材料管控、过程检测实现精细化施工。结合常用防护方式开展对比分析，严格控制材料、开挖、检测等关键环节，依托参数与标准保障施工质量（见表1）。

2.1 路基防护方案技术经济对比

不同防护方式在适用条件、造价、耐久性、施工难度上存在明显差异，合理选型可提升经济性与可靠性。坡面防护施工简单、造价较低，适合浅层稳定边坡；支挡防护加固能力强，但造价高、施工周期长；排水防护属于基础防护，必须与其他方式配合使用；植物防护生态性好，但对坡度与气候要求较高。通过综合对比，能够为不同地质、地形、环境条件下的路基防护选型提供科学依据。施工单位应结合边坡高度、土质、水文、项目投资等因素，选择技术可行、经济合理、耐久性强的防护组合方案，避免过度防护或防护不足。

2.2 路基防护材料质量控制要点

材料质量直接决定防护工程效果，进场必须严格检验。水泥选用P·O 42.5级普通硅酸盐水泥，安定性、凝结时间合格；砂石料含泥量≤3%，碎石压碎值≤30%；钢筋外观无锈蚀、弯折，力学性能符合标准；土工合成材料抗拉强度、撕破强度、耐腐蚀性达标；植物种子纯度≥90%，发芽率≥85%。砂浆、混凝土严格按配合比搅拌，计量误差控制在±2%以内。片石质地坚硬、无风化、无裂纹，厚度不小于150 mm。防水材料、伸缩缝填料符合设计要求，严禁使用过期、受潮、变质材料。材料进场按批次抽检，合格后方可使用，从源头保障路基防护工程施工质量。

2.3 路基边坡开挖与修整技术要点

边坡开挖与修整是防护施工的基础，必须遵循“自上而下、分层开挖、分层防护”原则。机械开挖预留100 mm～200 mm厚度由人工修整，避免超挖或扰动原状土。边坡坡度严格按设计执行，土质边坡不陡于1:1.5，岩石边坡不陡于1:0.5。开挖过程中实时监测边坡位移，出现裂缝、滑塌迹象立即停工处理。坡面平整度误差控制在±50 mm以内，无松土、浮石、坑洼。基底压实度不低于90%，软弱土必须换填，换填厚度不小于500 mm。修整完成后及时进行防护施工，避免长期暴露导致坡面风化、冲刷。高边坡开挖应分级开挖、分级防护，每级高度不大于8 m，确保施工安全与边坡稳定。

2.4 施工过程质量检测控制要点

路基防护施工全过程需开展高频次检测，确保符合规范要求。坡面防护检测厚度、强度、平整度、密实度，采用钻芯法或回弹法检测混凝土强度，允许偏

表1 常用公路路基防护方式技术参数对比表

防护类型	适用边坡坡度	设计使用年限	主要材料强度要求	适用地质条件
浆砌片石护坡	≤1:1.25	≥20年	砂浆≥M7.5，石料≥30 MPa	土质、强风化岩
喷射混凝土	≤1:0.75	≥20年	混凝土≥C20	岩石边坡、浅层破碎岩
重力式挡土墙	任意坡度	≥30年	混凝土≥C15	软土、松散土、高填方
锚杆挡土墙	≤1:0.5	≥25年	锚杆≥HRB400，注浆≥M20	岩石、硬质土
植物防护	≤1:1.5	≥10年	草种发芽率≥85%	土质较好、缓边坡

差 ±10%。支挡结构检测垂直度、断面尺寸、泄水孔通畅性，墙面垂直度偏差不大于 5 mm/m。排水工程检测断面尺寸、纵坡、密实度、渗水性，沟底高程偏差 ±20 mm。植物防护检测覆盖率、成活率，养护期满覆盖率不低于 90%。关键工序执行旁站监督，隐蔽工程验收合格后方可隐蔽。建立检测台账，对不合格项立即整改，复检合格后方可进入下一道工序[3]。严格的过程检测可有效消除质量隐患，保证防护工程达到设计使用寿命。

3 路基防护工程质量保障与安全施工措施

路基防护工程施工技术要点最终要靠组织、工序、养护、安全四个方面保障落地。完善管理措施、强化过程控制、做好风险防控，才能确保防护工程达标成型，提升路基整体耐久性与运行安全性。

3.1 施工组织与技术交底控制要点

完善的施工组织是质量保障的前提。项目部应编制专项施工方案，明确工艺流程、人员配置、设备型号、进度计划与安全措施。施工前开展技术交底，将防护形式、参数、标准、注意事项向班组详细说明，确保操作人员掌握要点。高边坡、特殊地质路段需组织专家论证方案，优化施工顺序与风险控制措施[4]。合理划分施工区段，流水作业，减少交叉干扰。配备足够的机械、工具与检测设备，保证施工连续高效。建立现场指挥体系，明确技术负责人、质量负责人、安全负责人职责，出现问题快速响应、及时处置。规范有序的施工组织可有效提升效率、降低风险，保障路基防护工程顺利实施。

3.2 机械设备与工序衔接控制要点

机械设备状态直接影响施工质量与进度。搅拌机、喷射机、压实设备、切割设备进场前检修保养，确保运行稳定。计量设备定期校验，保证配比准确。工序衔接遵循“基底处理→结构施工→养护→验收”流程，上道工序不合格不得进入下道工序。混凝土、砂浆搅拌、运输、浇筑时间控制在初凝前完成，一般不超过 90 分钟。喷射混凝土、注浆施工连续进行，避免中断造成缺陷。挡土墙、护坡施工分段进行，相邻段间隔时间不少于 7 天，减少沉降影响。各工序之间做好成品保护，避免踩踏、碰撞、扰动。高效顺畅的工序衔接可减少质量缺陷，提高防护工程整体性与稳定性。

3.3 养护管理与成品保护技术要点

养护是保证强度、防止开裂的关键环节。混凝土、浆砌结构养护期不少于 7 天，高温、干燥天气延长至 14 天，采用洒水、覆盖土工布保湿，禁止暴晒、冲刷、碰撞。植物防护养护期不少于 15 天，定期浇水、补栽、除草，确保正常生长。泄水孔、盲沟等排水设施完工后及时清理，保持通畅，避免堵塞失效。防护工程完工后设置警示标志，禁止机械碾压、堆放材料、开挖取土。冬季施工做好保温措施，防止冻害。交工前加强巡查，发现空鼓、裂缝、脱落、植被枯死等问题立即维修。科学养护与严格保护可显著提升防护工程耐久性，降低后期维修成本，保障长期使用效果。

3.4 安全风险防控与应急处置要点

路基防护施工多在边坡作业，安全风险较高，必须落实全方位防控措施。作业人员佩戴安全帽、安全带、防滑鞋，高边坡作业搭设脚手架、安全网。机械作业保持安全距离，严禁在边坡下方停留、穿行。雨季、汛期加强巡查，关注天气预警，遇暴雨、大风立即停工。建立边坡监测体系，设置观测点，每日记录位移变化，超过允许值立即撤离人员设备。制定滑坡、坍塌、泥石流应急预案，储备沙袋、钢管、注浆设备等应急物资。对施工人员开展安全培训与应急演练，提高风险识别与自救能力。严格执行安全操作规程，杜绝违章作业，实现零事故、零伤亡目标，为路基防护施工提供可靠安全保障[5]。

4 结束语

路基防护工程是公路工程安全稳定运行的重要保障，其施工质量直接关系到道路使用寿命与通行安全。本文结合工程实践，系统分析坡面防护、支挡防护、排水防护、植物防护的技术要点，明确材料、工艺、检测、安全等关键控制环节，并通过参数对比为方案选型提供依据。公路路基防护施工应坚持因地制宜、科学选型、严控参数、精细作业的原则，强化全过程质量与安全管理。在未来工程建设中，需持续优化施工工艺、加强技术创新、提升管控水平，进一步增强路基稳定性，减少病害发生，推动公路工程建设高质量发展。

参考文献：

[1] 苏信辉.公路工程路基防护工程施工技术要点分析[J].汽车周刊,2025(07):149-151.
[2] 郭瑞祺.论公路路基防护工程项目的施工技术要点[J].交通科技与管理,2025,06(11):74-76.
[3] 郭强.公路工程路基防护施工技术要点分析[J].建筑机械,2025(05):92-94,100.
[4] 邵光涛.公路工程路基施工中关键部位施工技术[J].运输经理世界,2025(13):31-33.
[5] 赵杰.公路工程路基防护工程施工技术分析[J].运输经理世界,2022(26):13-15.

道路桥梁施工中的裂缝处理对策分析

李正滨，何铭科*

（四川省交通建设集团有限责任公司，四川 成都 610041）

摘 要 裂缝是道路桥梁施工中最为常见的质量病害之一，破坏道路桥梁结构完整性的同时，还会为水分、氯离子等侵蚀介质提供渗透通道，加速钢筋锈蚀，严重影响道路桥梁工程的安全性能，同时增加后期养护成本及运营风险。本文结合道路桥梁施工实际，在梳理混凝土配比不合理、材料质量不达标等裂缝主要成因的基础上，提出优化配比设计、严控材料质量等针对性处理对策，旨在为道路桥梁施工中裂缝处理提供有益参考。

关键词 道路桥梁；裂缝处理；混凝土配合比；结构组件；环境温度

中图分类号：U445.7 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.012

0 引言

道路桥梁结构长期暴露在自然环境中，承受着车辆荷载、温度变化等多重作用，施工过程中极易出现各类质量病害，其中裂缝问题最为普遍且影响最为深远。裂缝的产生并非偶然，而是多方面因素共同作用的结果，其形成过程具有隐蔽性及渐进性的特点，若未及时采取处理措施就会逐步发展为贯穿性裂缝，最终威胁道桥结构的安全稳定，甚至引发安全事故。

1 裂缝问题对道路桥梁施工产生的危害

裂缝一旦在道路桥梁结构中形成，就会直接破坏结构连续性，这种破坏并不是停留于表面，而是从力学层面实质性削弱了构件的承载面积。当裂缝发展到一定宽度或深度时，原本由混凝土整体承担的内力将发生重分布，局部区域可能承受超出设计预期的应力集中，在长期交通荷载及环境作用的叠加下，这些薄弱部位极易成为破坏的起点，威胁结构整体的安全[1]。从耐久性角度看，裂缝为外界侵蚀介质提供了进入结构内部的便捷通道，水分、硫酸盐等有害物质可经过裂缝渗入混凝土内部，加速钢筋钝化膜的破坏及电化学腐蚀进程。钢筋一旦锈蚀，其体积膨胀将进一步加剧混凝土的开裂，形成“裂缝—锈蚀—更严重开裂”的恶性循环，这种损伤过程在结构外部难以察觉，却持续削弱结构的剩余寿命。

2 道路桥梁施工中的裂缝成因

2.1 混凝土配合比设计不合理

混凝土配合比设计直接决定了材料内部的孔隙结构、应力分布及体积稳定性，其合理性是控制裂缝产生的第一道关口。当水泥用量超出实际需求时，水化热总量会显著攀升，在大体积或厚壁构件中，核心温度可比表面高出30 ℃至50 ℃，由此产生的内表温差极易诱发温度裂缝。水胶比的选择同样关键，每增加0.05的水胶比，混凝土的干燥收缩值大约会上升8%至12%，增大的收缩应力直接提高了开裂风险。在浇筑后数小时至数天内即显现这类因配比不当引发的裂缝，且具有分布广泛以及形态不规则的特征，反映出材料本征性能同结构约束条件之间的冲突。

2.2 混凝土材料质量问题

原材料的品质波动是裂缝产生的隐蔽性根源，其影响贯穿于混凝土拌和、运输、浇筑乃至硬化全周期，水泥的矿物组成及细度直接关联着水化速率，当水泥中铝酸三钙含量超过8%时，早期水化热释放会异常集中增加热裂风险。细骨料的含泥量若突破3%，黏土颗粒会吸附大量自由水及减水剂，造成实际水胶比升高，同时削弱骨料同浆体的界面黏结强度[2]。粗骨料的级配不良或针片状颗粒含量超标，会形成局部空隙率过大区域，在受力时成为应力集中点诱发微裂纹，而外加剂的缓凝组分若与水泥适应性不佳，可能导致凝结时间异常。这些由材料质量引发的内部缺陷，为后期裂缝的扩展提供了初始通道（见表1）。

2.3 结构组件受力不均匀

结构组件受力状态偏离设计预期，会在混凝土内部形成超出其抗拉强度的局部拉应力，这是裂缝产生的力学本质。在桥梁结构中，支架基础的不均匀沉降即使仅有5 mm至8 mm，也足以使上部现浇梁体产生显著的附加弯矩，导致跨中或支点区域出现横向裂缝。

作者简介：李正滨（1983-），男，本科，工程师，研究方向：道路桥梁施工。
*通信作者：何铭科（1992-），男，本科，工程师，研究方向：道路桥梁施工。E-mail：263714905@qq.com

表 1 关键材料指标偏离对混凝土性能的影响

材料类别	关键指标	偏离情况	对混凝土性能的影响
水泥	铝酸三钙含量	高于 8%	水化热释放过于集中，内部温升加剧，温度裂缝出现概率增大
细骨料	含泥量	超过 3%	自由水与外加剂被大量吸附，实际用水量增加，界面黏结能力降低
粗骨料	级配与粒形	级配不连续或针片状颗粒偏多	骨架结构疏松，局部孔隙率偏高，受力时易形成应力集中
外加剂	水泥适应性	匹配性差	凝结进程出现异常，初终凝间隔拉长，塑性阶段收缩开裂风险上升

预应力的张拉顺序若未遵循对称、分级原则，就会造成构件截面应力分布不均，某些部位可能过早承受过大压应力而出现纵向劈裂裂缝。道路基层与面层之间若模量差异悬殊，在车辆荷载的反复作用下，会显著集中面层底部的弯拉应力，形成疲劳裂缝并向上反射。混凝土收缩与温度变形在遇到结构约束时，同样会产生不容忽视的约束应力，如长墙结构或箱梁腹板，其约束度较高区域的最大拉应力值可达混凝土抗拉强度的 1.2 倍至 1.5 倍，一旦超过材料承受极限，裂缝便会沿约束方向迅速展开。这种因受力失衡导致的裂缝，其位置、走向与分布往往具有明显的规律性，与结构受力特征高度相关。

2.4 施工细节控制不到位

施工过程中的操作精度及工艺执行力度直接决定了混凝土结构能否形成均匀致密的受力整体，细节失控是裂缝从潜在风险转化为显性病害的直接推手。混凝土浇筑时，若振捣棒插入间距超过其作用半径的 1.5 倍，或单点振捣时间不足 15 秒，容易造成粗骨料堆积及浆体分离，形成蜂窝或局部软弱区，这些区域的抗拉能力仅为设计值的 60% 至 70%。分层浇筑的间隔若超过混凝土初凝时间，上下层间无法结合会形成冷缝，冷缝处的黏结强度不足完整浇筑体的 50%。钢筋保护层厚度控制偏差超过 ±5 mm 时，影响结构耐久性的同时还会改变钢筋与混凝土的协同受力模式，在保护层过薄处易产生顺筋裂缝。

2.5 环境温度原因

环境温度的变化影响混凝土的水化进程、体积变形及内外温差，成为裂缝产生的重要外部驱动力。大体积混凝土浇筑后，内部水化温升可达 40 ℃至 60 ℃，而表面散热迅速，内表温差超过 25 ℃时，表面产生的拉应力极易突破混凝土同龄期的抗拉强度，形成深度不等的温度裂缝。在夏季高温条件下，环境温度超过 35 ℃时，混凝土表面水分蒸发速率可达 2.0 kg/(㎡·h) 至 3.0 kg/(㎡·h)，若蒸发速率超过泌水速率，塑性收缩会迅速发生，数小时内即可出现密集的龟裂纹[3]。冬季低温施工时若未采取保温措施，混凝土表面温度降至 0 ℃以下，内部水化反应基本停滞，早期强度无法正常增长，一旦遭受冻胀内部结构将遭受永久性损伤。气温骤降带来的冷击效应，会使已硬化的混凝土产生温差收缩，若结构受到边界约束，这种收缩转化为拉应力，导致贯穿性或深层裂缝的形成。环境温度的影响具有突发性和难以完全预测的特点，对裂缝控制提出了动态应对的要求。

3 道路桥梁施工中裂缝处理对策

3.1 优化配比设计，夯实抗裂基础

配合比设计是混凝土抗裂性能的源头所在。合理的配合比能够从材料层面主动抑制裂缝的生成，这种源头控制的思路远比事后修补更为有效，精确设定水泥用量、水胶比以及掺合料比例时，混凝土内部的收缩应力便可被控制在安全范围之内。科学配比提升抗裂性能，本质上是在混凝土硬化之前就为其建立起一道内在的防线，使得后续施工过程中的各种外部扰动不至于轻易突破这道防线，从而将裂缝发生的概率降至最低。

实施配合比优化的第一步是建立基于抗裂性能的设计指标，应依据结构部位、施工季节、浇筑方式等具体条件明确抗裂等级要求，将收缩率、绝热温升、早期抗拉强度等指标纳入设计控制参数。采用低热硅酸盐水泥或中热水泥替代普通硅酸盐水泥，其水化热峰值可降低 20% 至 30%，缓解大体积混凝土的内外温差应力。矿物掺合料的复配方案需要经过系统试验确定，粉煤灰与矿渣粉按适当比例复合使用时，二者颗粒形貌与活性的互补效应能够显著改善浆体流动性，同时降低早期水化热。对于超长结构或约束较强的部位，可引入膨胀剂补偿收缩，但膨胀剂的选择及掺量必须依据结构约束条件和环境温度进行精确计算，避免过度膨胀造成内部微结构损伤。添加减缩剂能从化学层面降低毛细孔水的表面张力，减少干燥收缩量，其效果在低水胶比混凝土中尤为明显。确定配合比后，需进行足尺模型试验或仿真模拟验证，采用有限元软件模拟浇筑过程中的温度场与应力场分布，识别潜在开

裂风险区域，据此对配合比进行微调。整个设计过程应形成完整的抗裂配合比报告，明确各项原材料的技术指标、允许波动范围以及施工控制要点，为后续材料采购与现场施工提供清晰依据。

3.2 严控材料质量，保障施工性能

原材料的质量稳定性直接决定了混凝土在施工过程中能否保持设计预期的性能状态，水泥的矿物组成及细度直接影响水化速率，若其波动过大，便无法准确预判混凝土的凝结时间及强度发展。骨料的含泥量、级配稳定性以及有害物质含量，每一处细微的偏差都可能在混凝土硬化后表现为肉眼可见的裂缝。当骨料表面附着过多泥土时，水泥浆与骨料的黏结力会显著下降，这种黏结薄弱区恰恰是微裂缝最先萌生的位置[4]。每一种原材料都在可控范围内本质上是在为后续的浇筑、振捣、养护等一系列工序创造稳定的施工条件。

材料质量控制的核心在于建立全过程可追溯的动态监控制度，在原材料进场环节除常规的批次检测外，应采用快速检测设备对关键指标进行现场验证。针对砂石骨料，配置在线含水率监测仪及含泥量快速测定装置，每车次进料时自动采集数据，超标材料直接退回，避免进入料仓造成污染。需要严格控制水泥的进场温度，高温水泥直接入罐会导致混凝土初始温度偏高、坍落度损失加快，应在散装水泥车卸料前测温，夏季超过65 ℃时必须采取降温措施或静置降温后再使用。外加剂的进场检验应重点关注其与工程所用水泥的适应性，采用实际工程材料进行净浆流动度和凝结时间试验，确认适应性良好后方可批量使用。料场管理环节需要引入数字化手段，为每一种原材料建立电子档案，记录供应商、生产批次等信息，并使用二维码或射频识别标签全程追溯材料使用情况。而砂石料仓应配备自动喷雾降尘系统，保持骨料表面湿润但不积水，避免因含水率大幅波动影响配合比精度。

3.3 强化过程管控，提升成型质量

施工过程的精细化管理是连接材料性能及结构最终品质的关键桥梁，混凝土从搅拌机卸出到浇筑入模、振捣密实的每一个环节，都在塑造着结构的内在质量。振捣作业的均匀性直接关系到混凝土的密实程度，振捣不足时气泡无法排出，形成蜂窝麻面，过振则可能导致骨料下沉、浆体上浮，造成分层离析，这两种情况都会在结构内部形成应力集中点，成为裂缝的潜在源头[5]。模板及支架体系的稳定性决定了结构成型后的受力状态，若支架在混凝土尚未达到足够强度时发生不均匀沉降，结构内部便会生成超出设计预期的附加应力。将过程管控贯穿于每一道工序，实质上是在用操作层面的确定性去对冲施工环境中的各种不确定性，保证材料性能能够完整地转化为结构品质。

浇筑前应分级验收模板及支架系统，采用三维激光扫描技术复核模板安装的平整度及线形，偏差超出规范要求时及时调整。对于大体积混凝土或高墩柱等特殊结构，应在模板关键部位布设应变计与温度传感器，实时监测模板变形与混凝土温度变化，数据无线传输至中央监控平台。混凝土运输环节应配置车载监控终端，记录每辆搅拌车的运输路线、行驶时间、罐体转速以及到达现场时的拌合物状态，超时或异常状态的车辆不得入模。在浇筑过程中，采用可调式串筒或溜槽控制自由倾落高度，避免混凝土离析。振捣作业推行分区责任制，将浇筑区域划分为若干振捣单元，每个单元指定专人负责，振捣棒的操作采用标准化手法，快插慢拔、插点均匀，振捣时间以混凝土表面不再明显下沉、不再冒出气泡为宜。对于钢筋密集区域或预应力管道周围，应配备小直径高频振捣棒或附着式振捣器，确保复杂部位的密实性。浇筑层厚与间隔时间的控制需要结合环境温度动态调整，夏季施工时可在模板外侧设置喷雾系统，降低模板温度并保持界面湿润，避免冷缝形成。浇筑完成后，混凝土表面应及时进行二次抹压处理，采用机械抹光机配合人工收面，在混凝土初凝前完成抹压，封闭表面收缩裂缝。整个过程管控数据应实时录入施工管理平台形成电子化浇筑记录，清晰追溯工序对应的操作者、实施时间及质量指标。

4 结束语

随着智能化监测技术、数字化管理平台以及新型功能材料在工程建设领域的推广应用，裂缝防治正迎来从经验判断转变为数据驱动转型的新机遇。未来，应进一步推动抗裂设计指标体系的标准化建设，完善原材料质量动态追溯机制，推广应用智能振捣、自动化养护等先进施工技术，同时加强施工人员技术培训，将裂缝综合防控技术切实转化为工程实践中的操作规范，从根本上提升道路及桥梁工程的施工品质。

参考文献：

[1] 李松明.桥梁施工中大体积混凝土裂缝成因及处理对策分析[J].运输经理世界,2024(12):136-138.
[2] 宋海超.道路桥梁施工中混凝土裂缝的原因及对策分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(06):159-161.
[3] 于海洋.关于大体积混凝土裂缝控制及处理对策分析[J].大众标准化,2024(02):31-33.
[4] 贾俊喜,郝培林.道路桥梁施工中裂缝成因分析及对策[J].江苏建材,2023(03):123-125.
[5] 宁建安.道路桥梁设计和施工中裂缝成因与处理对策[J].大陆桥视野,2023(04):125-127.

强震区公路隧道软岩大变形防控施工技术

朱 健

（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 强震区岩体受地震作用产生结构性损伤，公路隧道穿越软岩地层时极易发生大变形灾害，引发支护侵限、钢架扭曲、拱顶坍塌等安全事故。本文依托川西北强震区大店隧道工程，分析了强震区软岩大变形的核心发生机理，明确了“超前预控、弱扰快封、强支控变、动态适配”的防控原则，从开挖工法优化、分级支护体系、围岩改良、监测预警四个维度阐述了核心防控施工技术，以期为强震区同类隧道软岩大变形防控提供工程实践参考。

关键词 强震区；公路隧道；软岩大变形；防控施工；动态监测

中图分类号：U455.49 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.013

0 引言

我国西南强震区地质环境复杂，受历史强震影响，岩体节理裂隙发育、结构完整性差，隧道穿越软岩地层时，大变形灾害已成为制约施工安全与进度的核心难题。软岩大变形易引发初期支护开裂、断面侵限甚至拱顶坍塌等事故，传统隧道施工工法难以适配强震区破碎软岩的工程特性。本文依托川汶高速大店隧道工程，针对强震区软岩隧道大变形防控关键技术展开系统研究，结合工程实践提出成套施工管控措施，以期为强震区同类隧道工程建设提供技术参考。

1 工程概况

1.1 项目基本情况

大店隧道位于四川省阿坝州茂县境内，地处汶川地震强影响区，是川汶高速TJ9标段的控制性工程。隧道设计为双向四车道公路隧道，地震动峰值加速度为0.20 g，对应地震基本烈度Ⅷ度，属于典型强震区公路隧道工程。

隧道施工采用上下台阶预留核心土法为主的施工工法，内容涵盖洞身开挖、超前支护、初期支护、仰拱与二次衬砌、防排水系统施工等全流程工序。隧道全长范围内Ⅳ、Ⅴ级软岩围岩段占比超60%，穿越多条断层破碎带，施工过程中面临软岩大变形、突泥涌水、围岩坍塌、微瓦斯防控等多重风险，工程施工难度与安全管控要求极高。

1.2 工程地质与水文特征

隧道穿越地层以千枚岩、板岩为主，受历史强震影响，岩体呈碎裂—散体结构，节理裂隙极度发育，围岩完整性差、单轴抗压强度低，具有显著的流变特性，开挖后围岩应力释放快，易产生持续的塑性大变形。

隧道区地下水以基岩裂隙水为主，局部断层破碎带存在富水区，地下水对软岩地层具有强烈的软化、泥化作用，会进一步劣化围岩力学性能，加剧大变形发展。同时隧道局部段落为微瓦斯地层，施工过程中需兼顾瓦斯防控与变形管控双重要求，对施工组织与技术管控提出了严格要求。

2 强震区软岩大变形机理与防控原则

2.1 强震区软岩大变形发生机理

结合本工程地质特征与强震区工程特性，隧道软岩大变形是地质内因与施工外因共同作用的结果，核心发生机理可归纳为四个方面：

第一，地震作用造成岩体先天结构损伤[1]。强震产生的地震波使岩体内部形成大量张拉裂隙，原有结构面被贯通，围岩完整性与整体强度大幅劣化，即使是硬质岩也呈现出软岩的力学特性，开挖后应力释放速率快、变形持续时间长，是大变形发生的先天地质基础[2]。

第二，软岩本身的流变与遇水膨胀特性。隧道穿越的千枚岩、板岩属于典型层状软岩，具有显著的蠕变特性，在围岩应力重分布过程中会产生持续的塑性变形；同时地下水侵入后，岩层遇水膨胀、软化，围岩内摩擦角与黏聚力快速下降，进一步扩大变形量与变形持续时间。

第三，开挖扰动引发的围岩应力重分布。隧道开挖打破了原岩应力平衡，洞周形成塑性屈服区，强震

作者简介：朱健（1989-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁。

破碎围岩的自稳能力极差，若支护不及时、支护刚度不足，围岩塑性区会持续向深部扩展，最终引发大变形甚至洞室失稳坍塌。

第四，施工工法与支护体系适配性不足。若开挖进尺过大、爆破扰动强烈，会进一步破坏围岩稳定性；而锁脚锚杆失效、钢架连接不牢、喷射混凝土不密实等支护缺陷，会导致支护体系无法有效约束围岩变形，最终引发变形侵限、支护结构破坏[3]。

2.2 强震区软岩大变形防控原则

1. 超前预控原则。坚持“地质先行、预报前置”，通过TSP、地质雷达、超前水平钻探等综合超前地质预报手段，提前探明前方围岩地质与水文条件，采用超前小导管、帷幕注浆等措施对围岩进行预加固，从源头提升围岩自稳能力，降低大变形发生概率。

2. 强支控变原则。构建“锚杆+钢架+钢筋网+喷射混凝土”的联合支护体系，重点强化锁脚锚管与钢架的连接性能，提升支护体系整体刚度与承载能力，通过分级支护参数适配不同等级的围岩变形风险。

3 软岩大变形防控关键施工技术

3.1 超前预加固与开挖工法优化

超前预加固是控制软岩大变形的第一道防线，本工程针对不同围岩条件采用分级超前预加固措施：对于一般Ⅳ级软岩段，采用Φ42 mm超前小导管预支护，小导管长度4.5 m，环向间距40 cm，外插角5°～12°，注浆采用水泥—水玻璃双液浆，水灰比0.6～0.8，在隧道开挖轮廓外形成稳定的围岩承载拱；对于断层破碎带、节理密集区等Ⅴ级围岩大变形高风险段，采用双层小导管预支护，进一步扩大围岩加固范围，提升预支护效果[4]。

开挖工法直接决定围岩扰动程度，本工程摒弃全断面开挖工法，采用上下台阶预留核心土法施工，严格控制开挖进尺与台阶参数：Ⅳ级围岩上台阶每循环开挖进尺不大于3榀钢架间距，Ⅴ级围岩不大于2榀钢架间距，利用核心土约束掌子面挤出变形。上台阶开挖完成后立即开展初期支护，待喷射混凝土强度达到设计强度，方可开展下台阶与核心土开挖。

下台阶采用左右侧错开开挖，避免一次性全断面开挖导致围岩失稳，开挖进尺控制在3榀钢架间距以内，最大限度减小对围岩的扰动。同时采用预裂光面爆破技术，优化炮眼布置与装药参数，坚持“多打眼、少装药”的弱爆破原则，减少爆破对围岩的损伤，严格控制隧道超欠挖，避免围岩应力集中引发的变形加剧。

3.2 分级强化初期支护体系

初期支护是控制软岩大变形的核心载体，本工程结合围岩变形风险等级，构建了分级强化的初期支护体系，核心支护参数见表1。

表1 强震区软岩隧道分级支护参数表

围岩等级	钢架型号	钢架间距/m	喷射混凝土设计厚度/mm	系统锚杆参数	锁脚锚管参数
Ⅳ级	I20b工字钢	1.0	250	Φ22药卷锚杆，L=3.0 m，间距1.0 m×1.0 m	Φ42锚管，L=3.0 m，每榀钢架每侧2根
Ⅴ级	I25b工字钢	0.5～0.8	280	Φ25砂浆锚杆，L=4.0 m，间距0.8 m×0.8 m	Φ42锚管，L=4.0 m，每榀钢架每侧4根

支护施工过程中，重点把控三大核心环节：

第一，锁脚锚管精细化施工管控。锁脚锚管是控制钢架下沉、约束围岩变形的核心构件，施工中严格执行标准化作业：锚管设于钢架连接钢板上方100 mm至300 mm处，钻孔垂直岩面下倾15°至30°，孔径较杆体直径大15 mm，孔深超出设计长度。锚管与钢架采用U形钢筋双面焊接，锚管内注满M20水泥砂浆，待砂浆强度达设计值70%后方可进行下一台阶开挖；土层、软弱断层破碎带优先采用锚管，完整岩体选用全长黏结树脂锚杆，确保锚固效果。

第二，喷射混凝土全流程质量控制。采用湿喷工艺施工，严控原材料品质，水泥选用硅酸盐或普通硅酸盐水泥，粗集料最大粒径不大于12 mm，液体速凝剂初凝不超3 min、终凝不超12 min。开挖后立即初喷20 mm至50 mm混凝土封闭岩面，钢架安装后分层复喷至设计厚度，单次复喷厚度拱部不超100 mm、边墙不超150 mm。采用“三喷三刮一找平”工艺控制平整度，确保两突出物深长比D/L≤1/20，钢架外侧混凝土保护层厚度不小于20 mm，避免钢架外露锈蚀[5]。

第三，钢架与钢筋网安装控制。钢架在洞外标准化加工，试拼合格后运至洞内，采用螺栓拼接安装，安装时严格控制中线、高程与垂直度，相邻钢架采用

Φ22 纵向连接筋内外交错布置，环向间距 1.0 m，形成整体受力体系。钢筋网随受喷面起伏铺设，与钢架焊接牢固，保护层厚度不小于 30 mm，网片搭接长度不小于 1 个网格间距，确保支护体系的整体性。

3.3 全流程防排水与围岩改良技术

地下水是加剧软岩大变形的重要因素，本工程构建了“排、堵、截”结合的全流程防排水体系，从源头降低水对围岩的软化作用。

隧道拱墙背后设置 FH50 软式透水管作为环向排水管，纵向间距 10 m，集中出水点加密布设；边墙脚设置 HDPE DN100 打孔双壁波纹管作为纵向排水管，外裹无纺布防止泥沙堵塞，与环向排水管采用三通牢固连接；横向排水管每 10 m 设置一道，将汇水引入中央排水沟，形成完整的排水网络。防水层采用 1.5 mm 厚 EVA 防水板 + 无纺布的“一布一膜”结构，采用无钉铺设工艺，双缝热熔焊接，焊接后通过充气法检测密封性，避免地下水渗入围岩与支护结构。对于富水断层破碎带，采用超前帷幕注浆进行堵水与围岩加固，注浆固结范围为开挖轮廓线外 5 m，从根本上阻断地下水通道，同时提升围岩整体强度。

3.4 动态监测与分级预警管控体系

监控量测是软岩大变形动态管控的核心依据，本工程建立了涵盖必测项目与选测项目的全过程监测体系，明确了分级预警标准与管控措施，核心监测项目与预警值见表 2。

必测项目包括洞内外观察、周边位移、拱顶下沉、地表下沉、拱脚下沉，其中周边位移与拱顶下沉测点与开挖面距离不大于 2 m，开挖后 24 h 内完成初始读数。监测频率根据变形速率与时间动态调整：开挖后 1 d 至 15 d，1 次 /d 至 2 次 /d；16 d 至 1 个月，1 次 /2d；1 个月至 3 个月，1 次 / 周至 2 次 / 周。选测项目包括钢架内力、围岩压力、锚杆轴力等，用于分析支护体系受力状态，为支护参数优化提供依据。

表 2 隧道软岩大变形监控量测分级预警表

管理等级	实测变形值 U_n	变形速率预警值	施工管控措施
Ⅲ级（绿色）	$U_n < [U]/3$	< 5 mm/d	正常施工，按常规频率开展监测
Ⅱ级（橙色）	$[U]/3 \leqslant U_n \leqslant 2[U]/3$	连续 2 d ≥ 5 mm/d	加密监测频率，补强支护，优化开挖参数
Ⅰ级（红色）	$U_n > 2[U]/3$	连续 3 d ≥ 5 mm/d	立即停工，启动应急预案，采取紧急控变措施

（注：$[U]$ 为设计允许变形值，U_n 为现场实测变形值。）

建立监测数据实时反馈机制，每日向技术负责人与监理单位报送监测结果。监测数据达橙色预警时，立即加密监测频率，同步采取补打锚杆、增设钢架、二次注浆等补强措施；达红色预警时，即刻停止掌子面开挖、组织人员撤离，通过临时仰拱、双层支护控制围岩变形，待变形稳定后再恢复施工。同时，在掌子面至二次衬砌段连续布设管径≥ 800 mm、壁厚≥ 10 mm 的逃生管道，配套应急物资，完善事故应急预案并定期开展演练，确保突发情况快速响应。

4 结束语

本文依托强震区大店隧道工程，系统分析了软岩大变形的发生机理，提出了适配强震区破碎软岩的大变形防控成套施工技术，通过超前预加固、开挖工法优化、分级强化支护、动态监测预警等措施，实现了隧道软岩大变形的全过程有效管控，保障了隧道施工安全与质量。研究成果旨在为西南强震区同类软岩隧道工程提供参考。未来应进一步开展强震区不同震损程度岩体的大变形演化规律研究，完善支护参数与围岩特性的动态适配方法，同时探索强震区隧道运营期软岩长期变形的防控技术，建立更具普适性的技术标准。

参考文献：

[1] 王耀龙，梁庆，尹帆 . 软岩大变形公路隧道施工控制技术 [J]. 施工技术 (中英文),2025,54(09):135-139.
[2] 周威锦，郑国强，李俊兵，等 . 西南山区公路隧道软岩大变形设计处治措施研究 [J]. 山西建筑 ,2025,51(04):134-138.
[3] 张子洋，汪波，刘金炜，等 . 多级让压支护体系在软岩大变形公路隧道中的应用研究 [J]. 现代隧道技术 ,2024,61(03):108-118,227.
[4] 陈维君 . 隧道软岩大变形施工技术探究 : 以黑马关特长隧道为例 [J]. 交通世界 ,2024(16):144-147.
[5] 张鑫，王瑞兴，席锦州，等 . 软岩大变形公路隧道病害处治关键技术 [J]. 交通科技与管理 ,2024,05(02):147-149.

高速公路沥青混凝土路面预防性养护措施

沈本磊

（四川蜀道养护集团有限公司，四川 成都 610011）

摘 要 高速公路沥青混凝土路面作为交通基础设施的核心组成部分，其服役性能直接影响行车安全、舒适性及通行效率。本文以路面性能衰变规律为切入点，分析判定预防性养护干预时机的理论依据，揭示了“缓变—拐点—陡变”三阶段演化特征及其对养护窗口期确定的意义，在此基础上，深入剖析了开裂、坑槽等典型病害的成因以及演化特征，并针对上述病害类型，阐述了雾封层、微表处等预防性养护技术的适用条件，以期为高速公路沥青混凝土路面预防性养护工程实践提供参考。

关键词 高速公路；沥青混凝土路面；预防性养护

中图分类号：U418.6 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.014

0 引言

高速公路沥青混凝土路面在使用过程中长期受到交通荷载及外部环境共同作用，传统养护模式习惯于在路面出现明显破损后才采取修补措施，这种被动响应的方式导致养护成本急剧攀升，也无法复原路面结构的完整性。预防性养护理念主张在路面全寿命周期中合理配置预防性养护措施，依据路面性能衰变规律及病害发展趋势，在结构承载能力尚未明显下降之前提前介入，尽可能把病害控制在初始阶段。

1 高速公路沥青混凝土路面预防性养护干预时机

确定预防性养护干预时点实质上是依据路面性能变化特征，科学统筹养护资源的决策过程，高速公路沥青混凝土路面劣化呈现“缓变—拐点—陡变”三阶段特征：服役初期性能衰减缓慢为“平稳期”；随着服役时间延长以及轴载持续累积，路面内部开始出现微裂缝、细微空隙等早期损伤，随之加快性能下降速度，路面也由此进入“转折期”[1]。若此时仍未采取防护措施，便会继续扩展原有损伤，路面很快滑入“失效期”并逐步表现出结构性破坏特征。在具体判断干预时机时，若只依赖PCI、RQI等宏观指标无法及时反映路面内部早期病害的发展情况，因为此类指标通常建立在表面功能变化已经较为明显的基础上，因而具有一定的滞后特征。相较而言，探地雷达、红外成像及激光扫描等检测技术能更早获取基层脱空、层间黏结性能减弱以及局部细微变形等隐性劣化信息，借助这类技术手段可以在路面外观尚未出现明显异常之前，提前识别内部损伤演化趋势，进一步增强预防性养护的前瞻性[2]。

2 高速公路沥青混凝土路面破坏原因分析

2.1 路面开裂病害

高速公路沥青混凝土路面表面出现裂缝后，地表水便会沿缝隙向结构内部渗入，并逐步侵蚀基层甚至路基，进而削弱路面的整体承载能力。随着水损害持续发展，路面内部结构稳定性不断下降，也随之形成病害扩展的条件。在车辆荷载的反复作用下，裂缝边缘极易发生碎裂剥落，会持续扩宽延伸原有裂缝，若未及时处置部分早期看似并不严重的细微裂缝，会在较短时间内演变为更大范围的结构性破损。裂缝的危害并不只体现在表面形态变化上，更重要的是会打破路面原有的整体受力状态，裂缝形成后，局部区域的应力分布会发生明显改变，原本由较大范围路面共同分担的车辆荷载逐渐集中到裂缝两侧较小区域，进而加快该部位材料的疲劳损伤，会明显加快路面性能衰减速度。

2.2 坑槽病害

坑槽是沥青路面病害中对行车安全影响最直接的一类问题，车辆在高速行驶过程中一旦突然碾入坑槽，会瞬间打破轮胎同路面的正常接触状态，降低车辆的操纵稳定性，车轮与坑槽边缘接触时还会产生较大的冲击力，这种冲击会损伤轮胎、轮毂及悬挂系统，也会反过来加剧路面的局部破坏。从结构受力角度看，坑槽形成后破坏原本连续的路面表层，坑槽边缘随之成为新的应力集中区域，在车辆荷载反复作用下，边

作者简介：沈本磊（1988-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁。

缘位置会不断出现碎裂现象[3]。若坑槽内部存在积水，车辆驶过时还会产生明显的动水压力，反复冲刷坑底及坑壁，进一步加快病害发展速度。更重要的是，坑槽的形成通常表明该区域沥青混合料的黏结性能已经发生明显破坏，单纯依靠表层修补无法从根本上恢复其使用性能。

2.3 松散病害

松散病害不断减弱沥青结合料对集料颗粒的黏结及裹覆能力，进而无法维持路表结构的稳定性，病害发生初期，路面表面通常只表现出轻微的贫油特征，整体变化并不明显，肉眼较难直接识别，但此时路面的渗水能力已经开始上升。随着病害持续发展，表层集料逐步脱落，破坏路面原有的均匀纹理，构造深度也随之发生变化，路表状态由相对密实转变为粗糙且不均匀的状态。表面集料脱落后，削弱路面的整体稳定性的同时，还会在车辆反复碾压作用下形成附加磨耗，散落在路面的颗粒可能对周边完好区域产生研磨作用，导致相邻部位损伤。与此同时，随着脱落集料不断增加，剩余集料需要承受更大的荷载作用，沥青黏结系统内部应力也随之上升，路面的排水特性也会发生改变，原本应沿表面排出的水分更容易渗透至结构内部，为后续水损害提供条件。

2.4 沉陷病害

沉陷病害对行车舒适性的影响较为直接，车辆驶入沉陷区域后，车身会随路面凹陷产生明显起伏，若沉陷程度继续加重，高速行驶状态下还可能引起车辆跳动，导致轮胎与路面接触状态不稳定，进而削弱车辆操控的安全性。除了影响通行体验，沉陷还会改变路面结构的受力状态，由于沉陷区域处于非均匀支撑条件下，凹陷边缘承受更大的弯拉应力，加剧局部应力集中现象，这也使该部位更容易出现纵向裂缝[4]。而路面沉陷也会破坏原有的路面坡度条件，减弱横坡及纵坡排水功能，凹槽部位因此更易形成积水，车辆反复碾压积水区域后会产生较强的动水压力，促使沥青膜剥离及集料松散，进一步加快路面损坏。

2.5 路面车辙

车辙从初始出现到严重影响使用性能通常会经历由轻到重的发展过程（如表 1 所示），初期车辙深度较小，对通行功能的影响还不十分突出，但随着变形持续累积，路面横向形态发生改变，车辆在变道或超车时需要跨越车辙边缘，轮胎受力状态随之突然变化，实际转向响应容易与驾驶员预期产生偏差，从而增加操控难度。尤其在雨天条件下，车辙槽内容易积水且排水不畅，车辆高速通过时减弱轮胎同路面的有效接触面积，增加水漂的风险的同时也会延长制动距离。从材料状态来看，车辙的形成说明轮迹带区域的沥青混合料内部结构已经发生变化，槽底部位在持续压密及剪切作用下，容易出现集料压碎、沥青上浮等现象，导致抗剪强度不断下降；而车辙两侧的隆起部分则由于材料横向挤移而逐渐变得疏松，随之减弱抗松散能力。在后续交通荷载持续作用下，车辙深度还会继续增长，并由功能性问题逐步演变为影响路面整体稳定性的结构性问题。

表 1 车辙发展三阶段特征

发展阶段	车辙深度范围	变形特征	主要发生区域
初期压密阶段	0 毫米～ 5 毫米	通车初期混合料进一步压密，变形速率较快但逐渐减缓	全断面均匀分布
中期剪切流动阶段	5 毫米～ 15 毫米	高温下沥青混合料剪切流动，轮迹带下陷、两侧隆起	集中于轮迹带
后期失稳阶段	＞ 15 毫米	集料骨架破坏，变形速率重新加快，伴随纵向裂缝	轮迹带及周边区域

3 高速公路沥青混凝土路面预防性养护措施

3.1 雾封层养护技术

路面在服役过程中，表层沥青因老化、氧化而逐渐失去柔韧性，逐渐增多细微裂缝以及连通空隙，这些细微缺陷虽然不影响路面整体承载能力，却成为地表水下渗的通道。雾封层技术正是针对这一阶段的表层功能衰减而设置的预防性措施，材料喷洒后能渗入表层孔隙，并在固化后形成连续致密的防水膜，从而阻断水分进入路面结构，减缓沥青进一步老化，维持路面的封水性能及表层完整性。从技术经济特征看，雾封层属于典型的薄层处治措施，其处理对象主要集中在路面表层，无需进行铣刨、加热等高能耗工序，因此施工资源消耗相对较低。一般情况下，材料用量控制在每平方米 0.5 L ～ 1.5 L 即可满足使用要求，与铣刨重铺等措施相比，雾封层能够以较小的投入恢复路面表层功能，具有较高的资源利用效率。除成本优势外，雾封层对交通运行的干扰也相对较小，这一点对于高速公路养护尤为关键，由于施工工艺简单且作业速度较快，喷洒完成后经过较短时间即可恢复通行，车道封闭时间明显短于多数常规养护措施。

3.2 微表处养护技术

实施微表处技术通常建立在原路面结构强度基本稳定、病害以表层功能性问题为主的前提下，施工前需先调查路面状况，重点检查是否存在严重沉陷、贯通裂缝及基层失稳等结构性病害。若原路面只表现为抗滑性能下降、轻度车辙、表面磨耗或局部细小裂缝，便可将微表处作为预防性养护措施。在正式施工前，还要完成路面清扫以及处理病害，彻底清除松散颗粒、泥土及杂物，以保证微表处能与原路面形成良好结合。在施工过程中，应根据路面病害类型及设计要求合理确定混合料配比，使其既具备足够的和易性，又能在短时间内完成破乳成型。摊铺时，在摊铺槽内均匀分布混合料，并沿路面形成具有一定厚度的功能层对于轻微车辙路段，可调整摊铺厚度及施工遍数填补修正低洼部位；对于抗滑性能衰减明显的路段，则重点依靠表层重新构造均匀纹理，以恢复路面的构造深度及摩擦能力。摊铺完成后，混合料会在较短时间内完成成型并开放交通，这也是微表处适用于高速公路养护作业的重要原因。

3.3 裂缝嵌缝养护技术

裂缝嵌缝养护的实施，关键在于把握好“病害判定—裂缝处理—材料灌填—成型检查”这一连续流程，施工前需先梳理裂缝状况，重点判断裂缝类型、宽度、深度及分布范围，并区分活动裂缝以及稳定裂缝。对于仅表现为表层开口、尚未引起明显松散和沉陷的早期裂缝，可优先采用嵌缝处置；若裂缝已经伴随网裂、坑槽或基层受损，则不宜单独采用该方法。完成病害判定后，应使用开槽设备沿裂缝走向进行顺直开槽，使缝壁形成较为规则的断面，为后续材料填充创造条件。开槽完成后，必须彻底清理缝内杂物及潮气，裂缝内部若残留粉尘、松散颗粒或积水，都会削弱嵌缝材料同缝壁之间的黏结效果。完成清缝后即可进行灌缝施工，嵌缝材料加热温度应严格控制在规定范围内，避免因温度过高导致材料老化，或因温度不足影响流动性及填充密实度[5]。灌缝时应沿裂缝均匀缓慢注入，使材料自下而上充满缝体，紧密结合缝壁，不能出现空鼓、断续及表面明显凹陷等问题，对于较宽裂缝，可分次灌填并适当整平，保证成型后的缝面饱满顺直。这种局部化的处理方式保留了原路面的整体性，避免了大规模施工对路面结构的扰动。

3.4 薄层罩面养护技术

薄层罩面的施工效果取决于病害处治、层间黏结及铺筑压实三个环节能否形成连续控制，施工前应先检查原路面，重点判断车辙、裂缝、松散及局部沉陷的发展程度，确认其是否具备罩面条件。若路面已经出现明显结构性损伤、基层失稳或严重沉陷问题，必须先完成病害处治再组织后续施工。对于满足实施要求的路段，还应彻底清除灰尘、杂物及松散颗粒，保证原路面处于干净干燥状态，为新铺层稳定附着提供基础。在前期处理完成后，粘层油喷洒便成为保证新旧路面协同受力的关键，喷洒量不足，罩面层容易在车辆荷载反复作用下产生推移、脱空和剥离现象；喷洒量过大又会削弱层间稳定性。因此，施工中需要结合原路面状况、环境温度以及材料类型合理控制用量，并保证喷洒均匀，待粘层油达到适宜状态后方可进行混合料摊铺，以免因衔接不当影响层间结合效果。进入铺筑阶段后，应重点控制摊铺厚度、摊铺温度及压实质量，薄层罩面虽然铺筑厚度较小但对精度要求很高，若厚度不均或摊铺间断便容易引发离析、接缝不顺及表面不平整等问题。碾压作业应紧跟摊铺推进，在适宜温度范围内完成初压、复压及终压，使罩面层既具备足够密实度又保持必要的表面构造。该技术主要适用于交通量较大、原路面存在轻度疲劳及表层病害的路段，规范实施后能较好恢复路表功能并延缓损坏发展。

4 结束语

高速公路沥青混凝土路面的预防性养护，关键在于把养护重心前移到病害扩展之前，科学识别性能衰减拐点，尽早采取针对性措施，将路面损伤控制在可修复的阶段。未来，高速公路路面养护还应进一步强化检测数据支撑，提升隐性病害识别能力，推动养护决策由依赖经验判断逐步转变为基于数据分析的科学决策，不断提高路面使用性能、运营安全水平及养护资金利用效率。

参考文献：

[1] 董洪学.高速公路预防性养护技术设计方案研究[J].科技创新与应用,2025,15(34):107-110.
[2] 彭礼鹏.高速公路路面养护中再生雾封层技术的应用[J].交通世界,2025(32):84-86.
[3] 戴雨欣.某高速公路沥青混凝土路面预防性养护技术分析[J].四川水泥,2025(09):189-190,193.
[4] 申植元.论沥青混凝土路面预防性养护措施[J].交通科技与管理,2024,05(08):149-151.
[5] 闫平.浅谈高速公路预防性养护沥青混凝土路面施工技术管理[J].低碳世界,2021,11(07):172-173.

公路隧道软弱围岩段机械开挖防坍塌施工技术优化

姚顺治

（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 针对公路隧道软弱围岩段采用传统爆破开挖扰动大、易引发拱顶坍塌、掌子面失稳等工程难题，本文依托四川川汶高速穆肃堡隧道工程，聚焦软弱围岩段机械开挖施工核心场景，系统分析了机械开挖模式下隧道坍塌事故的核心诱因，从开挖工法、设备选型、工序协同、动态管控四个维度开展防坍塌施工技术优化研究。结果表明，优化后的机械开挖施工体系可最大限度降低对围岩的扰动，实现“开挖—支护—封闭”全流程高效衔接，有效控制围岩收敛与拱顶下沉，旨在为西南山区同类型软弱围岩隧道机械开挖安全管控提供参考。

关键词 公路隧道；软弱围岩；机械开挖；防坍塌施工技术

中图分类号：U455.41 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.015

0 引言

随着我国西南山区高等级公路网的持续完善，深埋长隧道成为山区公路建设的关键控制性工程。软弱围岩具有岩体破碎、自稳能力差、遇水易软化泥化等特征，传统爆破开挖方式易对围岩产生剧烈扰动，大幅扩大围岩松动圈范围，是诱发隧道坍塌、初支大变形等安全事故的重要原因。近年来，以悬臂式掘进机、液压破碎锤为核心的机械开挖工艺，凭借低扰动、高可控性的优势，在软弱围岩隧道施工中得到广泛应用。但在实际施工中，仍存在开挖工法不合理、设备选型与围岩特性不匹配、开挖与支护工序衔接脱节等问题，未能充分发挥机械开挖的防坍塌优势，坍塌风险依然突出。本文依托穆肃堡隧道工程，系统分析机械开挖模式下软弱围岩段坍塌风险的核心诱因，提出针对性的防坍塌施工技术优化措施，以期为同类山区公路隧道工程提供实践依据。

1 工程概况

穆肃堡隧道为川汶高速 TJ9 标段控制性工程，隧道设置 1# 施工支洞与 1 座施工斜井，其中支洞总长 391 m，纵坡 12.4 994%，最大埋深 236 m；斜井总长 1 673 m，纵坡 5.2 835%，最大埋深 1 168 m。隧道主洞与支洞、斜井交叉口段、洞口浅埋段、断层破碎带均以Ⅳ、Ⅴ级软弱围岩为主，岩体破碎、自稳能力极差，传统爆破开挖易引发围岩失稳[1]，因此设计阶段明确Ⅳ、Ⅴ级软弱围岩段优先采用机械开挖工艺，配套上下台阶预留核心土法施工，初期支护采用“喷射混凝土 + 型钢钢架 + 钢筋网 + 系统锚杆”联合支护体系，二次衬砌采用 C35 防水钢筋混凝土。同时，隧道为微瓦斯隧道，施工过程中同时面临瓦斯防控、涌水突泥、软岩大变形等多重风险，对机械开挖施工的精细化管控与防坍塌技术提出了极高要求。

2 机械开挖模式下软弱围岩段坍塌风险核心诱因

2.1 开挖工法与参数设计不当

机械开挖工法与参数设计不合理，是引发围岩失稳坍塌的首要因素。部分施工环节未遵循“短进尺、分块开挖”的核心原则，存在单次开挖进尺过大、台阶划分不合理的问题，上台阶一次性开挖高度超过 5 m，下台阶采用两侧同步开挖，导致拱架悬空长度过大、支护体系无法及时闭合，围岩应力持续释放引发失稳。同时，核心土预留面积不足、掌子面开挖坡率过陡，无法形成有效的掌子面反压，极易发生掌子面溜塌事故[2]。

2.2 开挖设备选型与操作不规范

设备选型与围岩特性不匹配、机械操作工艺不规范，是造成围岩过度扰动、诱发坍塌的重要原因。针对破碎千枚岩、板岩地层，若选用大扭矩、大切削量的掘进设备，易造成掌子面与拱部围岩过度破碎，扩大围岩松动圈范围；若选用设备功率不足，则会出现开挖循环时间过长、围岩暴露时间增加的问题，同样提升坍塌风险。同时，在机械操作过程中，存在开挖轨迹控制不当、超挖欠挖严重的问题，拱部超挖形成

作者简介：姚顺治（1988-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁。

的空洞无法及时回填，易引发拱顶局部坍塌；欠挖则会导致钢架安装无法密贴围岩，形成支护体系受力缺陷，最终引发整体失稳[3]。

2.3 开挖与支护工序衔接严重脱节

机械开挖与支护工序衔接不畅、封闭成环不及时，是机械开挖模式下隧道坍塌的核心诱因。相较于爆破开挖，机械开挖可实现逐榀进尺、精细化开挖，但现场施工中普遍存在“重开挖、轻支护”的问题，单次连续开挖多榀钢架间距后才集中开展支护作业，导致围岩暴露时间超过12 h，软弱围岩在无支护状态下持续变形，最终引发失稳坍塌。同时，各工序之间未形成流水作业，开挖、找顶、初喷、钢架安装、锁脚锚管施作各环节衔接脱节，工序间隔时间过长，无法实现“开挖一榀、支护一榀、封闭一榀”的闭环管控。

2.4 全过程动态管控与应急保障缺失

机械开挖全过程的动态管控缺失，是坍塌事故发生的重要管理因素。传统监控量测模式存在量测频率不足、数据反馈不及时的问题，无法根据围岩变形数据动态调整机械开挖进尺、台阶长度等参数，导致施工参数与围岩实际状态不匹配，变形持续发展最终引发坍塌[4]。同时，超前地质预报工作流于形式，未通过机械开挖过程中的地质编录精准探明前方不良地质体，无法提前调整开挖工法与预加固措施，易引发突发坍塌事故。

3 机械开挖模式下防坍塌施工技术优化措施

3.1 软弱围岩段机械开挖工法系统性优化

针对软弱围岩“扰动即失稳”的特性，严格遵循“短进尺、分块开挖、快封闭、少扰动”的核心原则，对机械开挖工法进行系统性优化，核心开挖参数优化对比见表1。

表1 优化前后机械开挖核心参数对比表

施工参数	优化前	优化后
Ⅴ级围岩上台阶单循环进尺	2榀钢架间距	1榀钢架间距
上台阶开挖高度	4.5 m～5.5 m	≤3.5 m
下台阶开挖方式	两侧同步开挖	左右侧错步开挖
仰拱单次开挖长度	8 m～10 m	≤5 m
核心土预留面积	隧道断面30%	≥隧道断面50%
初喷混凝土封闭时间	开挖后2 h内	开挖找顶后立即施作
钢架封闭成环时间	开挖后24 h内	开挖后12 h内

1. 核心开挖工法优化，Ⅳ、Ⅴ级围岩段全面采用上下台阶预留核心土法机械开挖，上台阶开挖高度严格控制在3.5 m以内，核心土长度不小于3 m，面积不小于隧道断面总面积的50%，利用核心土对掌子面形成稳定反压，从根本上规避掌子面溜塌风险。下台阶采用左右侧错步开挖，严禁两侧同时落底，单次开挖进尺不超过2榀钢架间距，避免拱架单侧悬空长度过大引发整体失稳。仰拱开挖一次长度不超过5 m，开挖后立即施作仰拱初支封闭成环，严格控制仰拱、二衬与掌子面的安全步距，杜绝步距超标引发的支护体系失稳。

2. 开挖顺序精细化优化，采用“先拱部、后边墙、先两侧、后中间”的分层分块机械开挖顺序，上台阶先采用悬臂式掘进机开挖拱部两侧弧形导坑，预留中间核心土，弧形导坑开挖完成后立即开展初支作业，再逐步开挖核心土区域，最大限度减少拱部围岩的暴露时间。针对断层破碎带等极破碎围岩段，采用“三台阶七步流水法”机械开挖，各台阶错开长度控制在3 m～5 m，实现各工序平行流水作业，确保开挖与支护的高效衔接[5]。

3.2 机械开挖设备选型与操作工艺优化

结合隧道围岩特性与断面尺寸，开展开挖设备选型与操作工艺优化，实现“围岩特性—设备性能—开挖工法”的高度匹配，最大限度降低机械开挖对围岩的扰动。

1. 设备适配性选型优化，针对隧道Ⅳ、Ⅴ级千枚岩、板岩软弱围岩段，主洞开挖选用EBZ160型悬臂式掘进机作为核心开挖设备，配套PC220型液压挖掘机、破碎锤进行辅助开挖与出渣作业；支洞、斜井小断面区域选用小型挖掘机配合液压破碎锤开挖，避免大型设备对围岩的过度扰动。针对不同围岩状态动态调整设备组合，完整性相对较好的Ⅳ级围岩段，采用掘进机连续开挖提升施工效率；破碎严重的Ⅴ级围岩、断层破碎带，采用挖掘机配合破碎锤逐块剥离开挖，精准控制开挖轮廓，减少对周边围岩的扰动。同时，配套两臂拱架安装台车、凿岩台车开展支护作业，实现“开挖—支护”机械化配套作业，大幅缩短工序衔接时间。

2. 机械操作工艺精细化优化，悬臂式掘进机采用“先切周边、后挖中间”的切削顺序，严格控制切削深度与行进速度，单次切削深度控制在30 cm以内，避免全断面强力切削造成围岩破碎。拱部开挖过程中，严格控制掘进机悬臂抬升角度，沿隧道设计轮廓线精准切削，杜绝超挖、欠挖问题，确保开挖轮廓圆顺，为后续钢架安装密贴围岩创造条件。挖掘机配合破碎锤开挖时，采用“自上而下、分层剥离”的方式作业，严禁掏底开挖，避免造成掌子面整体失稳。同时，制定设备作业安全管控规则，严禁机械设备在作业过程中碰撞已施工初支结构，设备行走路线避开已完成的锁脚锚管、钢架基础，防止支护结构受损。

3.3 机械开挖与支护工序协同衔接优化

以“快封闭、强支护”为核心，优化机械开挖与支护工序的协同衔接模式，构建“开挖—找顶—初喷—钢架安装—锁脚锚管施作—复喷”全流程流水作业体系，最大限度缩短围岩暴露时间，实现支护体系快速受力。

1. 工序衔接时间刚性管控，明确各工序的时间节点与责任主体，机械开挖完成后，立即采用挖掘机配合人工开展找顶排危作业，清除拱部、掌子面松动岩块，找顶完成后立即采用湿喷台车进行初喷混凝土封闭，初喷厚度 4 cm～5 cm，确保围岩在开挖后 30 min 内完成封闭。初喷混凝土初凝后，立即采用拱架安装台车开展钢架安装作业，两臂拱架安装台车可同步完成钢架抓举、空中拼装、精准对位，大幅缩短钢架安装时间，钢架安装完成后 1 h 内完成锁脚锚管施作与焊接固定，确保支护体系快速形成受力结构。

2. 锁脚锚管与钢架安装协同优化，将锁脚锚管施作作为下一台阶开挖的前置条件，软弱围岩段锁脚锚管采用 Φ42 无缝钢管，长度不小于 3 m，采用凿岩台车钻孔，钻孔方向垂直岩面向下倾斜 15°～30°，杜绝“斜锁脚”问题。锚管安装后采用 M20 水泥砂浆注浆，确保注浆饱满，砂浆强度达到设计强度 70% 后方可进行下一台阶开挖。锁脚锚管与型钢钢架采用 L 形钢筋双面焊接，确保钢架与锁脚锚管形成整体受力结构，有效控制钢架拱脚下沉，规避支护体系整体失稳风险。

3. 支护封闭成环效率优化，采用上下台阶错步开挖工艺，单侧边墙钢架安装完成后立即施作边墙初支，避免两侧边墙同时悬空，仰拱开挖后 8 h 内完成仰拱初支施工，实现支护体系全断面闭合。针对极破碎围岩段，采用临时横撑、临时仰拱工艺，在上台阶钢架底部设置型钢横撑，进一步提升支护体系的整体刚度，约束围岩变形发展，杜绝坍塌风险。

3.4 机械开挖全过程动态监测与应急管控优化

建立“监测—分析—预警—处置—调整”的闭环管控体系，实现机械开挖全过程动态管控，根据监测数据实时优化开挖参数与支护措施，筑牢坍塌风险防控防线。

1. 监控量测体系优化，将洞内外观察、周边位移、拱顶下沉、地表下沉纳入必测项目，Ⅴ级围岩段量测断面间距不大于 20 m，测点在开挖完成后 12 h 内完成埋设，24 h 内获取初始读数。围岩变形速率≥5 mm/d 时，立即将量测频率提升至 1 次 /d～2 次 /d，实时跟踪围岩变形动态。同时，将钢架内力、围岩压力列为选测项目，精准掌握支护结构受力状态，为开挖参数调整提供数据支撑。建立围岩变形分级管控标准，当变形值达到橙色预警阈值时，立即加密监测频率、暂停掌子面开挖，采取补强支护措施；达到红色预警阈值时，立即撤离作业人员，启动应急预案，采取围岩注浆加固措施，待变形稳定后再恢复施工。

2. 开挖参数动态联动优化，建立监测数据与施工参数的联动机制，根据围岩变形监测结果，动态调整机械开挖进尺、台阶长度、支护参数。当监测到围岩变形速率持续偏大时，立即缩短单次开挖进尺，减小台阶长度，增加钢架密度、加厚喷射混凝土层，同时缩小锁脚锚管间距、增加锚管长度，提升支护体系刚度。针对开挖过程中揭示的不良地质体，立即调整开挖工法，采用超前小导管预加固后再进行开挖，从源头规避坍塌风险。

3. 应急管控体系优化，隧道内设置 Φ800 mm、壁厚≥10 mm 的逃生管道，从二衬端头延伸至距掌子面 2 m～4 m 处，管内提前预留应急食品、急救药品与救生绳等物资；掌子面附近定点配备应急钢拱架、注浆设备、抽水泵等抢险物资，确保险情发生时可快速投入使用。编制机械开挖坍塌事故专项应急预案，每月开展一次应急演练，提升作业人员应急处置与避险逃生能力。同时，严格执行班前技术交底、工序三检制，层层压实安全责任，确保各项防坍塌措施落地执行。

4 结束语

本文依托穆肃堡隧道工程，聚焦软弱围岩段机械开挖施工场景，系统分析了机械开挖模式下隧道坍塌的核心诱因，从开挖工法、设备选型、工序协同、动态管控四个维度形成了机械开挖防坍塌施工优化技术体系。工程实践表明，该优化体系可最大限度降低机械开挖对软弱围岩的扰动，实现开挖与支护的高效衔接，有效约束围岩收敛与拱顶下沉，实现了隧道施工全过程零坍塌事故，保障了施工安全与工期进度。本次研究主要针对千枚岩、板岩地层展开，未来需进一步研究不同岩性软弱围岩的机械开挖设备与工法动态适配方法，以及智能化监测与机械开挖参数的实时联动体系，持续完善软弱围岩隧道机械开挖防坍塌技术体系。

参考文献：

[1] 杨继才 . 公路隧道软弱偏压大变形控制施工技术 [J]. 四川建材 ,2024,50(08):183-185.

[2] 李文浩 . 公路隧道软弱围岩变形段的加固施工分析 [J]. 工程技术研究 ,2023,08(23):64-66.

[3] 张潘 . 公路隧道软弱偏压大变形控制施工工法研究 [J]. 交通科技与管理 ,2023,04(09):114-116.

[4] 王清 . 公路隧道软岩大变形路段洞身施工技术探析 [J]. 江西建材 ,2023(01):193-195.

[5] 张舜 , 蒋云东 , 王余 . 公路隧道软弱围岩大变形段的注浆加固施工分析 [J]. 建筑安全 ,2022,37(10):70-73.

复杂环境下的混凝土连续箱梁桥支架现浇施工技术

向 聃

（湖南路桥建设集团有限责任公司，湖南 长沙 410004）

摘 要 为进一步提升复杂环境下混凝土连续箱梁桥支架现浇施工的技术水平与工程质量，本文依托某实际桥梁工程案例，针对施工过程中的核心技术难点展开系统性阐述与深度探讨。聚焦支架体系选型与设计、复杂地基处理技术、支架搭设工艺、支架预压与沉降控制、混凝土浇筑工艺与质量控制等施工技术要点，结合现场施工数据与实践经验，剖析各环节的技术原理、操作规范及质量保障措施，旨在为同类复杂环境下的桥梁现浇施工提供技术路径与实践参考。

关键词 复杂环境；混凝土；连续箱梁桥；支架；现浇施工

中图分类号：U445 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.016

0 引言

桥梁建设中的复杂环境通常指地形起伏剧烈、地质条件多变以及气候因素交织作用下的施工场景。混凝土连续箱梁桥在遭遇此类环境时，其支架现浇工艺会面临地基稳定性控制和高空作业风险管控的双重挑战。传统施工方法难以直接套用于高墩密集且填方区域广布的地段，这要求对支架体系的适应性进行重新评估。开展针对性技术研究的目的在于破解支架变形与地基沉降相互耦合的难题，从而降低施工过程中的不确定性。系统分析复杂条件对现浇作业的制约机制，可以为优化施工参数提供理论参考。

1 工程概况

某高速公路桥梁全长1.56 km，上部结构采用预应力混凝土连续箱梁，跨径布置为（45+70+45） m与（35+55+35） m的组合形式。箱梁为单箱单室截面，梁高2.2 m至3.8 m渐变，顶板宽度12.75 m，底板宽度6.5 m。下部桥墩包含矩形实心墩与圆形墩，其中矩形墩横向宽度4.2 m，纵向宽度2.2 m至2.8 m，最大墩高65 m。桥位区属剥蚀丘陵地貌，地形高差42 m，部分墩位处于填土厚度8 m至32 m的路基回填区。地基土层以粉质黏土和强风化砂岩为主，填方区压实度离散性较大。沿线分布两条既有乡村道路及一处灌溉渠，施工期间需保持通行与通水。该地区年平均风速1.5 m/s，极大风速24.8 m/s，高墩区域受风荷载影响显著。

2 支架体系设计与地基处理

2.1 支架体系选型与设计

本工程地形高差达42 m且最大墩高65 m，如果按照常规的满堂支架搭设方式稳定性难以保证[1]。因此，根据墩高与地形条件将全桥划分为两个区域分别设计支架体系。对于墩高超过30m且地面横坡大于15°的1-5联区域，采用钢管立柱结合贝雷梁的梁式支架方案。钢管立柱选用Φ609 mm×16 mm规格，沿桥纵向按6.0 m间距布置于腹板正下方，横向每排设置3根。立柱间采用Φ325 mm×6 mm钢管设置水平平联与剪刀撑，平联竖向间距4.0 m。柱顶布置双拼45b工字钢作为主横梁，主横梁上方铺设321型贝雷梁，贝雷梁间距按45 cm布置。贝雷梁顶面设置I12.6工字钢分配梁，间距60 cm。如果跨径不是很大，起重能力达到标准，就可以直接搭建桥梁[2]。对于墩高低于15 m且地形平坦的6-7联区域，采用碗扣式满堂支架，立杆纵距0.9 m、横距0.6 m，横杆步距1.2 m。两种支架体系的过渡段设置30 m长的渐变衔接区，通过调整钢管立柱高度与满堂支架立杆间距实现刚度平顺过渡。支架体系主要设计参数见表1。

单肢立杆轴向力按下式计算：

$$N=[1.2G_{1k}+1.4(G_{3k}+G_{4k})]L_xL_y+1.2G_{2k}V \quad (1)$$

式（1）中，N为单肢立杆轴向力kN，G_{1k}为支架自重标准值（kN/m^2），G_{2k}为新浇混凝土自重标准值（kN/m^3），G_{3k}为施工人员及设备荷载标准值（kN/m^2），G_{4k}为振

作者简介：向聃（1981-），男，本科，高级工程师，研究方向：道路桥梁与隧道施工管理。

表 1　支架体系主要设计参数

序号	项目	钢管立柱支架	满堂支架
1	适用墩高范围	>30 m	≤ 15 m
2	立杆 / 立柱规格	Φ609×16 mm	Φ48×3.5 mm
3	纵距	6.0 m	0.9 m
4	横距	3.0 m（每排 3 根）	0.6 m
5	步距	4.0 m（平联）	1.2 m

捣混凝土荷载标准值（kN/m^2），L_x、L_y 分别为立杆横向与纵向间距（m），V 为单肢立杆承担的混凝土体积（m^3）。经计算，满堂支架单肢立杆最大轴力为 42.6 kN，钢管立柱单肢最大轴力为 285 kN。高墩区钢管立柱支架尚需验算风荷载作用下的抗倾覆稳定性，倾覆稳定性系数 $K(f)$ 按下式计算。

$$K(f)=\frac{M_R}{M_S} \tag{2}$$

式（2）中，M_R 为抗倾覆力矩（kN·m），M_S 为倾覆力矩（kN·m）。本工程最不利工况下 $K(f)$=1.58，大于规范限值 1.3。

2.2　复杂地基处理技术

本工程 12#-16# 墩位于填土厚度 8 m～32 m 的路基回填区，填料为土石混填，地基处理成为支架稳定的控制性环节。填方区地基采用分层强夯处理，每层填土厚度控制为 8 m，夯击能量采用 3 000 kN·m，最后以 500 kN·m 能量进行满夯。强夯处理范围超出支架外缘线 5 m，处理完成后采用平板载荷试验检测承载力，要求地基承载力特征值不低于 180 kPa。对于满堂支架区域，清除表层虚土 30 cm 后回填级配碎石，分层压实厚度不大于 25 cm，压实度按 93% 控制。压实层顶部浇筑 20 cm 厚 C20 混凝土硬化层，硬化层设置 1% 横坡。钢管立柱支架基础采用独立 C30 混凝土扩大基础，尺寸为 2.5 m×2.5 m×0.8 m。位于承台顶面的立柱直接利用承台作为基础，通过预埋 Φ20 钢筋与立柱底板焊接固定。其余位置设置直径 1.2 m 的钻孔桩基础，桩长按进入持力层不小于 3 倍桩径控制。沿支架周边 50 cm～100 cm 处设置排水沟，沟底纵坡不小于 0.5%。处理地基时需考虑的因素众多，如施工荷载、自重以及张拉预应力损失等[3]。地基处理主要控制指标见表 2。

表 2　地基处理主要控制指标

序号	处理部位	处理方法	控制指标	目标值
1	填方区	分层强夯	夯击能量	3 000 kN·m
2	满堂支架区	换填压实	压实度	≥ 93%
3	满堂支架区	混凝土硬化	厚度 / 强度	20 cm/C20
4	钢管立柱基础	扩大基础	尺寸	（2.5×2.5×0.8） m

3　支架搭设与预压施工

3.1　支架搭设工艺

采用汽车吊分节吊装钢管立柱，单节长度控制在 9 m 或 12 m，节段间通过法兰盘采用高强螺栓连接。立柱吊装就位后采用两台经纬仪在相互垂直的方向校正垂直度，垂直度偏差按不大于 1/1 000 控制。每根立柱安装完成后随即安装水平平联和剪刀撑，平联与立柱采用抱箍连接。平联安装滞后立柱不得超过两个节段，防止单根立柱在风荷载下出现过大的独立悬臂高度。贝雷梁在场地内分组预拼，每组由 3 片或 4 片组成，拼装时检查销子连接质量并安装保险插销。预拼组采用汽车吊整体吊装就位，吊装过程中设置两根缆风绳。分配梁与贝雷梁上弦采用 U 型螺栓固定。满堂支架搭设按先测量放线后铺设垫板的顺序进行，垫板采用 5 cm 厚木板通长布置。立杆底部设置可调底座，顶部设置可调顶托。剪刀撑按横向每 4 排立杆、纵向每 5 排立杆布置一道，剪刀撑与地面的夹角控制在 45° 至 60° 之间。支架搭设完成后，检查节点紧固扭矩和剪刀撑。扣件螺栓紧固扭矩采用扭矩扳手抽检，抽检比例不低于总数的 5%，紧固扭矩值按下式确定。

$$T=K\cdot d\cdot F \tag{3}$$

式（3）中，T 为扭矩（N·m），K 为扭矩系数（取 0.2），d 为螺栓直径（mm），F 为预紧力（kN）。Φ48 mm 钢管扣件预紧力取 8 kN，计算得紧固扭矩应为 76.8 N·m，施工控制按 80 N·m 执行。

3.2　支架预压与沉降控制

预压荷载取箱梁自重的 1.1 倍，采用混凝土预制块作为压重材料，单块重量 50 kg。加载按四级进行：50%、80%、100%、110%，每级加载完成后，应等待至少 2 h，让支架充分沉降稳定后，再进行下一级加载[4]。测点沿顺桥向每 5 m 布置一个断面，每个断面在底板两侧及中心位置设置 3 个测点。采用精密水准仪进行

高程测量，加载前读取初始读数，每级加载后及持荷期间每隔2 h读数一次。满载后持续观测48 h，最后24 h内沉降量不超过2 mm时判定支架趋于稳定。卸荷按加载的反向分级进行，每级卸荷后观测2 h。卸荷完成后根据实测数据分离弹性变形与非弹性变形，其中非弹性变形为加载前与卸载后标高之差，弹性变形为卸载后与满载时标高之差。本工程实测支架平均非弹性变形为12.6 mm，弹性变形为9.8 mm。高墩区预压期间需同步监测立柱顶部的水平位移，水平位移量超过5 mm时暂停加载。不同地基条件下支架沉降的差异是控制重点，填方区、天然地基交界处需加密测点，实测沉降差控制在3 mm以内方可进行混凝土浇筑。支架预压分级参数见表3。

表3 支架预压分级参数

序号	加载级别	荷载比例	持荷时间	沉降控制标准
1	一级	50%	2 h	沉降速率＜1 mm/h
2	二级	80%	2 h	沉降速率＜1 mm/h
3	三级	100%	2 h	沉降速率＜1 mm/h
4	四级	110%	48 h	最后24 h沉降≤2 mm

4 混凝土浇筑与质量控制

4.1 混凝土浇筑工艺

箱梁混凝土采用C50商品混凝土，坍落度控制在160 mm至200 mm，扩展度不小于450 mm。混凝土泵送至浇筑面时出料口自由下落高度不超过2 m，超出时设置串筒或溜槽。浇筑按“纵向分段、水平分层”原则组织，分段长度取8 m至12 m。水平分层厚度控制在30 cm至40 cm，每层混凝土的浇筑方向沿桥向从低端向高端推进，如图1所示。对于大跨径预应力混凝土连续箱梁桥，其底板位置需要进行齿板设置工作[5]。

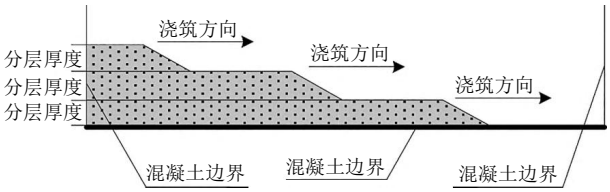


图1 分层浇筑方法原理示意图

每层混凝土采用插入式振捣器振捣，振捣点间距不大于1.5倍振捣半径，单点振捣持续15 s至20 s。相邻两层混凝土的浇筑间隔不得超过混凝土初凝时间，夏季施工时该间隔控制在90 min以内。合拢段设置在第六联第二跨跨中位置，长度为2 m，合拢段劲性骨架采用I25b工字钢焊接锁定，合拢浇筑选择在当日气温最低的时段进行。高墩区泵管沿墩身垂直布设，每3 m设置一个减震支架，泵管转弯处采用大半径弯头。泵送作业暂停超过30 min时需对泵管内的混凝土进行间隔推送，防止堵管。

4.2 浇筑质量控制措施

泵送压力波动直接影响出料均匀性，应保持泵送速度稳定在30 m^3/h至40 m^3/h范围内，压力表读数波动超过15%时需排查泵管堵塞点。振捣作业遵循快插慢拔的操作规程，振捣棒插入下层混凝土5 cm至10 cm。混凝土浇筑过程中应同步监测支架沉降，每浇筑完成一个分段后读取各测点沉降数据，沉降突变超过2 mm时暂停浇筑。气温高于25 ℃时混凝土初凝后立即覆盖土工布并洒水养护，洒水间隔以土工布始终保持湿润为准；气温低于10 ℃时采用塑料薄膜加保温被双层覆盖，养护期内混凝土内部温度与表面温差控制在20 ℃以内。养护期限不少于14 d，同条件养护试块强度达到设计强度100%后方可进行预应力张拉。跨中合拢段混凝土强度需比相邻梁段提高一个等级，采用C55混凝土浇筑。

5 结束语

复杂环境下，混凝土连续箱梁桥的支架现浇施工面临多重约束条件，地形起伏、地质差异、风荷载干扰往往相互叠加。本工程针对高墩密集、填方广布的特点，采用钢管立柱与满堂支架分区组合的方案。填方区通过分层强夯处理地基，配合换填压实及混凝土硬化层，支架沉降差异得到有效控制。预压阶段实施四级加载，分离弹性变形和非弹性变形，据此调整底模标高。分层浇筑沿桥向从低端向高端推进，合拢段选在低温时段锁定。实践表明，这套技术体系在高墩区复杂地基条件下运行稳定，其设计逻辑、控制参数等可为同类工程提供参考。

参考文献：

[1] 黄伟斌.复杂环境下的混凝土连续箱梁桥支架现浇施工技术[J].工程机械与维修,2024(09):125-127.
[2] 王佳宾.基于多环境因素的混凝土连续箱梁桥支架现浇施工技术[J].九江学院学报(自然科学版),2021,36(04):51-54.
[3] 李建民.支架现浇预应力混凝土连续箱梁桥施工控制技术研究[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2020,22(02):5-7.
[4] 张翼.公路混凝土连续梁桥支架现浇施工技术研究[J].建设机械技术与管理,2025,38(02):137-139.
[5] 王杰.大跨径预应力混凝土连续箱梁桥设计[J].黑龙江交通科技,2025,48(11):66-69.

城市道路与交通工程施工技术应用要点及优化措施

刘 萌，展宝星

（济南能源工程集团有限公司，山东 济南 250101）

摘 要 城市道路与交通工程作为城市基础设施建设的核心内容，其质量直接决定了城市运行效率、居民出行的安全性以及城市整体发展水平。在我国城市化进程持续推进的背景下，城市道路与交通工程的建设规模呈现出不断扩大之势，施工环境日趋复杂，对施工技术的科学性、规范性和创新性提出了更高要求。本文结合当前施工现状，系统梳理路基、路面、地下管线、交通附属设施等关键环节的施工技术应用要点，深入分析施工过程中存在的技术短板、质量隐患及管理问题，针对性提出优化措施建议，以期为提升工程施工质量、保障工程耐久性和通行安全性提供参考。

关键词 城市道路；交通工程；路基；路面；地下管线

中图分类号：U415.12 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.017

0 引言

随着我国城市化不断发展，城市人口集聚效应日益显著，机动车保有量也在逐年增加，对城市道路及交通工程的承载能力、通行效率、安全性能等方面提出了更高的要求。城市道路与交通工程是城市正常运转的“血脉”，其施工质量直接关系到城市居民的出行便利和城市未来的发展。当前，城市道路工程施工面临诸多现实挑战：一是施工区域多集中于城市核心地带，施工空间有限，地下管线错综复杂，施工组织协调难度大；二是部分施工企业对新技术应用较少，仍采用传统施工工艺，导致道路容易出现早期破坏、沉降等病害，不仅增加后期维护费用，更影响道路的正常使用。基于此，系统研究工程施工技术应用要点及优化措施，对指导工程施工、提高工程质量、减少工程风险、增加工程使用寿命具有重要的现实意义。本文结合工程施工经验及行业技术规范，深入剖析其施工技术要点及相应优化举措，以期为同类工程的施工实践提供有益借鉴。

1 城市道路与交通工程施工核心特点

城市道路和交通工程施工不同于一般公路工程施工，由于受城市环境、交通流量等影响，具有自身特点，是科学应用施工技术、优化施工管理的前提条件[1]。一是施工环境复杂，施工多在人口密集、交通繁忙区域进行，周边建筑物多、地下管线多，需要保护既有建筑物、管线，做好交通疏导，施工受到的干扰因素较多；二是专业协同要求高，工程涉及路基、路面、管线等多个专业工程，交叉施工和作业频繁，需要做好协同作业和配合，同时对施工人员专业素质要求较高；三是质量和安全要求高，道路工程承载大量人车流量，需要严格遵循行业规范和标准，做好施工全过程质量控制，施工人员较多、施工空间相对狭窄，需要加强安全管理，防范各类安全事故的发生；四是绿色施工要求高，结合“双碳”目标和建设绿色城市要求，实现工程与生态环境协调发展。

2 城市道路与交通工程施工技术应用要点

2.1 路基施工技术应用要点

施工准备：施工前必须对现场进行勘察，详细了解地质、水文、地下管线分布情况，做到科学施工；完成测量和放线工作，建立控制网，清除施工区域障碍物，“三通一平”到位，为工程施工顺利进行创造条件。地基处理：依据地质情况选择地基处理方式，一般土质地基采用碾压和夯实处理；软土地基采用换填法、抛石挤淤法、水泥搅拌桩等处理方式，经检测承载力满足要求后，再进行下道工序施工[2]。填筑与碾压：遵循“分层填筑、分层碾压、分层检测”的施工原则，使用合格填料，严格控制松铺厚度（不超过

作者简介：刘萌（1988-），女，本科，助理工程师，研究方向：市政工程。

30 cm）、含水量，碾压遵循“先边后中、先慢后快、轮迹重叠”的原则，碾压次数不少于5～8遍，城市主干道路基压实度须达93%～96%，检测合格后再进行下一层填筑。排水施工：施工期间开挖临时排水沟，永久性排水系统与路基施工同步进行，保证排水坡度合理、通畅，避免雨水浸泡路基，造成软化沉降。

2.2 路面施工技术应用要点

沥青混凝土路面：混合料由专业拌和站拌和，严格控制拌和温度（145 ℃～170 ℃）和混合料的配合比，运输途中采用篷布覆盖，运到现场的温度不低于135 ℃；摊铺前先清理基层，喷洒透层油，摊铺机均匀摊铺（2 m/min～6 m/min），严禁雨天和气温在10 ℃以下施工，碾压分为初压、复压、终压三阶段，严格控制碾压温度，压实度达到要求后，冷却至表面温度低于50 ℃方可开放交通，重视纵横向接缝的处理，防止错台、裂缝。水泥混凝土路面：使用刚度足够的钢模板，安装牢固，接缝严密，涂刷脱模剂；按配合比准确搅拌混凝土，控制坍落度和运输时间（0.75 h～2 h），摊铺后联合振捣，密实平整，抹面拉毛防滑，混凝土强度达到5 MPa时切缝（深度为板厚1/4～1/3），采用湿治养护，不少于14天，对胀缝、施工缝规范处理，填充密封材料。

2.3 地下管线施工技术应用要点

管线探测与定位：利用管线资料，采用专业仪器进行探测，复杂地段辅以人工探测，查明管线的具体位置、埋深等，并做好标记，防止施工中损坏。沟槽开挖、支护：根据埋深、地质条件选择开挖方法，浅埋段放坡开挖，深埋段采用钢板桩等支护，控制好坡度、深度，防止超挖，开挖后及时清掏沟槽底部，使之平整、坚实[3]。管线安装、接口：按设计选用合格的管线，安装顺直、坡度符合要求，根据管线材质选用正确的接口形式，接口严密；安装完毕后进行打压或闭水试验，48 h内无渗漏后回填。沟槽回填：回填土料透水性好，无杂物，分层回填压实，压实度符合要求，回填时保护管线，防止机械碰撞造成变形破损。

2.4 交通附属设施施工技术应用要点

交通标志、标线：标志安装准确、牢固，标识清晰，检测垂直度、平整度；标线施工前将路面清理干净，采用专业设备喷涂，控制标线厚度、宽度，采用耐磨反光材料，保证夜间行车安全。护栏施工：护栏安装位置准确、牢固，立柱垂直度达标，护栏拼接严密、无松动，检测护栏强度、稳定性，确保防护效果。照明设施：灯杆安装垂直、牢固，灯具位置准确、线路连接规范，通电试验保证照明效果，避免光线盲区，采用节能灯具，兼顾环保要求。人行道、检查井：人行道基层平整坚实，提倡使用透水铺装，注意无障碍设计。检查井采用预制混凝土或现浇混凝土（强度不低于30 MPa），井周分层夯实，井盖采用高强度防盗型井盖，安装后井盖与路面高差不大于4 mm。

3 城市道路与交通工程施工技术应用常见问题及成因

3.1 常见问题

路基质量隐患较多：填料不合格、碾压不密实、地基处理不到位，路基沉降、开裂、翻浆，影响道路使用质量与稳定性[4]。路面破损严重：沥青路面易出现裂缝、坑槽、水泥路面易断板、错台，早期破损严重，使用年限短，维修费用高。地下管线隐患较多：管线定位不准、沟槽支护不当、管线接口不严密、管线回填不规范，管线破损、渗漏，影响城市正常运行。安全隐患突出：安全管理不到位、防护措施不完善，容易造成坍塌、高处坠落、触电等安全事故。施工效率较低：沿用传统施工工艺，新型技术设备应用较少，施工组织不合理。

3.2 问题成因

技术层面：施工人员专业技能不强，对新设备新技术生疏，技术运用不规范；企业不重视技术革新，施工技术落后。管理层面：缺乏健全的质量管理体系，质量检测走过场；施工组织设计不合理，专业不协调。客观层面：城市施工环境复杂，干扰因素多；部分工程工期紧、造价低，企业违章操作；地下管线资料不详，增加施工难度和造成隐患。

4 优化城市道路与交通工程施工技术应用措施

4.1 强化施工技术创新与推广应用

加大技术创新力度，积极引进施工企业与科研院校合作，为城市道路与交通工程施工发展研究适合新的施工技术、材料、设备，如新型环保路面材料、非开挖管线施工技术、智能化施工设备等，提高施工技术水平。例如：道路改造时采用非开挖顶管技术，能够很大程度上减少对社会交通、环境的干扰，优先选用机械掘进或水力掘进顶管等安全、高效施工工艺。加强新型施工技术的推广使用，组织施工人员进行技术培训，普及新型施工技术、设备的使用操作技术要点，提高施工人员技术水平和操作能力[5]。重点推广改性沥青玛蹄脂碎石（SMA）混合料的使用，次干路及

以上等级道路沥青路面机动车道上面层选用该结构，中、下面层选用掺抗车辙剂的改性沥青混合料，提高路面抗车辙能力。严格遵守行业规范和标准，结合工程实际情况，优化施工技术方案，针对不同的施工工序、不同的地质情况，制定个性化的施工技术措施，保证施工技术应用的科学性、规范性[6]。

4.2 完善施工质量管理体系，强化全过程质量控制

建立健全施工质量管理体系，明确各部门、各岗位的质量责任，将质量控制贯穿于施工准备、施工过程、竣工验收全过程，实行道路工程各结构层施工首件样板制和举牌验收制，以建设主体质量行为和实体质量为切入点，加密检测频率；加强施工准备阶段的质量控制，做好现场勘察、测量放线、材料检验等工作，严格审核施工方案，确保施工方案科学合理；对进场材料进行严格检验，杜绝不合格材料进场，重点加强异地加工沥青混合料、水泥稳定碎石混合料的质量管控，落实抽检、旁站、资料留存等措施，结合工程实际状况，制定科学严密的施工组织计划，强化全过程质量监督，并加强对各施工环节的现场巡查与管控，严格按照施工技术要点进行操作，做好施工记录，对关键工序、重点部位实行旁站监理，及时发现和整改质量隐患；加强施工全过程质量检测，对路基密实度、路面平整度、管线接口密封性等指标进行严格检测，检测合格后方可进入下一道工序[7]。

4.3 优化施工组织管理，提升施工效率

结合工程实际，编制科学合理的施工组织设计，确定施工顺序、施工进度、资源配备等内容，优化施工方案，合理安排施工工序，减少工序的冲突，保证施工的顺畅。新建道路要合理安排工期，严禁随意压缩工期，大修道路要合理安排路基加固养生期。加强各专业之间的协调配合，建立协调施工机制，明确各专业的施工进度和责任，加强相互之间的沟通，及时解决交叉作业中出现的问题，提高施工的协调性[8]。例如：地下管线施工与路基、路面施工提前沟通，合理安排施工顺序，避免管线破坏。合理配置施工资源，统筹安排人力、物力及财力投入，选用先进的施工设备、工具，提升机械化作业占比，减少对人工作业的依赖，提高施工效率；加强施工设备的维修和管理，保证施工设备的正常运转，规避设备故障对施工进度的不利影响。

4.4 强化安全管理，防范安全事故发生

建立健全安全管理体系，明确安全管理责任，将安全管理贯穿于施工全过程；建立健全安全管理制度和安全应急预案，定期开展安全检查和应急演练，提高突发安全事故应急处置能力。加强安全培训教育，组织施工人员进行安全知识、安全操作规程培训，增强施工人员安全意识和操作技能，杜绝违章操作；对特种作业人员进行专项培训，确保特种作业人员持证上岗，提高特种作业人员持证上岗率至 100%。完善安全防护措施，在高处作业、沟槽开挖、临时用电等危险环节，设置安全网、防护栏、警示标志等必要的安全防护措施。在实际施工中，应始终将作业人员的生命安全置于优先地位，加强施工现场的安全管控，主动排查并治理风险隐患，从源头上杜绝安全事故的发生。

5 结束语

科学、合理地运用城市道路和交通工程施工技术，对于保证城市道路工程施工质量、使用安全、提升工程耐久性、延长其服役寿命具有重大意义。本文对城市道路工程施工的基本特点进行分析，对工程施工中的各个关键技术环节进行技术要点梳理，对施工过程中暴露出的问题展开深入探讨，分析问题成因，提出技术革新、质量管控、组织优化、安全管理等方面的优化措施。施工企业要结合工程实际情况，按技术、管理要求做好每个工程项目的建设，重视并积极采用新技术、新工艺，把工程建设成绿色、智能、安全的工程，更好地服务城市发展和居民出行需求。

参考文献：

[1] 贺维杰.城市道路交通工程施工管理过程中质量控制技术研究 [J]. 居业 ,2025(05):202-204.
[2] 乔静 . 城市道路与交通工程施工技术应用要点与措施 [J]. 城市开发 ,2025(07):148-150.
[3] 张鑫 . 城市道路交通工程中安全管理问题与解决措施 [J]. 建材发展导向 ,2026,24(06):34-36.
[4] 陈彩琴.城镇道路交通工程施工过程中的质量控制措施 [J]. 时代汽车 ,2025(16):142-144.
[5] 侯丕超.城市道路与交通工程施工管理方法探讨 [J]. 时代汽车 ,2025(12):169-171.
[6] 李静.城市道路与交通工程中沥青路面施工技术的研究 [J]. 城市建设 ,2026(05):20-22.
[7] 江德资.城市道路与交通工程的质量控制与检测方法研究 [J]. 运输经理世界 ,2025(30):32-34.
[8] 张志成.城市道路与交通工程施工安全防治要点 [J]. 建材发展导向 ,2025,23(11):76-78.

轨道交通保护区域微扰动注浆参数控制技术研究

胥文涛，赵 凯

（武汉地铁桥隧管理有限公司，湖北 武汉 430061）

摘 要 城市轨道交通沿线密集的基坑施工常诱发既有隧道管片收敛与沉降，给线路运营带来一定的安全隐患。为提升轨道交通保护区域稳定性，确保项目顺利开展，本文依托某工程实例案例，通过分析微扰动注浆参数控制技术原理与技术指标要点，解析了轨道交通保护区域微扰动注浆参数控制难点，并且从注浆参数预设、注浆压力控制等方面提出了相应的施工参数技术控制策略，最后针对该技术的操作工艺展开研究。工程实践表明，该技术通过精细化注浆实现主动变形控制，保障了轨道交通安全运行。

关键词 轨道交通保护；微扰动注浆；参数控制；隧道变形

中图分类号：U231.3；U455.49 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.018

0 引言

在当前城市更新与基础设施建设持续推进的背景下，多数基坑工程的施工场地紧邻既有轨道交通隧道，导致基坑开挖阶段对既有轨道交通隧道产生影响，极易出现土体沉降、位移等情况。如果在基坑开挖阶段未采取有效防护性措施，就容易造成既有轨道交通中管片收敛、裂缝、渗漏水等病害，严重危害临近隧道安全性，也会对轨道交通正常运营造成影响[1]。

1 工程概况

某危房改造二期B片（一期）项目为城市更新重点工程，包含2栋30-43F（超）高层住宅、商业、3层幼儿园、2层地下室及景观廊架，核心施工难点为基坑邻近既有轨道交通区间隧道，需要微扰动注浆加固以保障地铁安全。本项目基坑东西向长约118 m、南北向长约130 m，围护结构总长约419 m，开挖面积约8 000 m^2，开挖深度为8.50 m～11.00 m，其中BC支护段开挖深度为10.3 m。基坑采用Φ1200@1500（部分Φ1200@1300）钻孔灌注桩+一道钢筋混凝土内支撑；邻近地铁侧采用CSM等厚水泥土搅拌墙止水帷幕（墙底入强风化岩层≥0.5 m），非邻近侧采用Φ850@600*1200三轴搅拌桩。BC支护段与地铁结构最小水平净距约11.2 m，属轨道交通重点保护区域，需实施微扰动注浆加固。

2 轨道交通保护区域微扰动注浆参数控制技术原理与技术指标要点

2.1 微扰动注浆参数控制技术核心原理

微扰动注浆参数控制技术在应用阶段，需选择符合施工需求的专用注浆设备，按照技术参数配比浆液后，使用设备缓慢注入土体空隙或裂隙内。该技术应用后能有效提升既有轨道交通隧道土体强度，降低土体渗透性，减少对周边既有轨道交通线路的影响。微扰动注浆参数控制技术以土体渗透注浆、压密注浆组合方式为主，通过合理调整注浆压力、速率等参数，降低对周边土体产生挤压的作用，防止注浆环节造成土体隆起或位移，实现加固与扰动控制的双重目标。本项目中微扰动注浆参数控制技术主要应用到BC支护段实现土体加固，有效控制基坑结构沉降，防止对轨道交通隧道造成影响，再配合使用CSM等厚水泥土搅拌墙提高止水效果，建立“止水+加固”的双重防护体系[2]。

2.2 轨道交通保护相关规范要求

在轨道交通运营管理过程中，安全性是根本性指标，需明确保护区划分标准及施工扰动控制指标。本项目施工作业环节，其保护规范体现为隧道结构允许沉降量、收敛值等。基于此，按照项目施工需求进行微扰动注浆参数调整。根据本项目基坑开挖深度8.5 m～11.0 m与地铁近距离最小11.2 m的实际情况，在微扰动注浆参数控制技术应用时，确保轨道结构沉降量在规定范围内，且注浆时隧道收敛值不超过技术标准。

作者简介：胥文涛（1997-），男，本科，助理工程师，研究方向：轨道交通土木建筑。

同时，在微扰动注浆参数控制技术应用阶段，确定注浆加固要求，主要从注浆材料、施工工艺、质量验收方面做好参数控制，具体如表 1 所示。

表 1　微扰动注浆控制参数与验收要求

控制类型	关键参数 / 要求
轨道结构控制值	隧道沉降≤ 3 mm，收敛值≤ 2‰
注浆材料	超细水泥—水玻璃双液浆，初凝时间 30 s ～ 60 s
施工工艺	孔位偏差≤ 5 cm，注浆压力 0.3 MPa ～ 0.8 MPa
质量验收	注浆充盈、无串浆冒浆，沉降监测达标

3　轨道交通保护区域微扰动注浆参数控制难点分析

3.1　地质条件复杂导致参数适配性差

本项目基坑开挖深度设计为 8.50 m ～ 11.00 m，且现场地质勘测发现其土层分层明显，不同深度土层渗透率、孔隙率有较大差异。而在该项目中 BC 支护段开挖深度达到 10.3 m，其下部土层渗透性较弱，上部土层渗透性较强。在该区域止水施工中采用的是 CSM 等厚水泥土搅拌墙，墙体嵌入强风化岩层深度超过 0.5 m，且岩层和土层的浆液吸附、扩散特性有明显差异。针对上述不同区段地质条件差异，在现场施工环节，若选择单一注浆参数，则极易造成部分区域加固不足，部分区域扰动过大，无法实现精准控制，也会影响既有地铁运营线路安全。

3.2　扰动控制与加固效果的平衡难度大

微扰动注浆参数控制技术的应用，能实现加固效果与扰动控制的平衡。但在本项目施工环节，微扰动注浆参数控制技术应用存在如下矛盾：BC 支护段与地铁最小距离为 11.2 m，开挖深度 10.3 m，需严格控制注浆压力与速率以确保加固效果，从而保证基坑稳定性。在实践过程中，通过配合钻孔灌注桩与支撑体系虽然能够抵抗土体压力，但压力、速率过高容易造成土地隆起，隧道存在附加应力引发变形；压力、速率过低，无法保证浆液扩散，土体加固效果不达标，也就不能有效抵抗基坑开挖时土体扰动，甚至引发基坑边坡失稳影响地铁运行安全 [3]。

3.3　参数动态调整缺乏科学依据

由于本项目基坑开挖面积达 8 000 m^2，围护长度 419 m，其施工规模较大，且不同支护段工况有很大差异。例如：BC 支护段与非临近地铁段地质条件扰动控制指标有很大不同，这造成现场施工时地质条件、隧道变形监测持续变化。为满足各区段施工要求，在微扰动注浆参数控制技术应用中，需根据不同隧道段情况及时调整注浆参数。然而，目前在微扰动注浆参数控制技术应用时，未有完善的参数调整方法，且人员经验不足，极易造成控制不当而引发注浆效果不达标。

3.4　注浆过程监测与反馈滞后

本项目微扰动注浆参数控制技术应用中，需建设覆盖整个基坑的监测体系。在注浆施工中，需监测隧道变形、土体位移等，但各项数据采集与反馈存在一定滞后性。BC 支护段和地铁最小距离为 11.2 m，隧道变形敏感，如果扰动超出标准，且没有及时停止注浆、调整参数，就极易造成隧道结构损伤而引发施工风险升高。上述问题若不能及时解决，在现场施工中就会引发基坑支护体系稳定性不足，造成基坑坍塌。

4　轨道交通保护区域微扰动注浆参数控制技术

4.1　注浆参数预设方法

通过对本项目施工地质勘查结果、隧道结构参数、基坑施工参数综合分析，结合加固目标，采取室内试验、数值模拟仿真等方式确定注浆参数。本项目临近地铁的 BC 支护段地质条件较为特殊，需根据现场地质勘测结果调整微扰动注浆压力速率、浆液配比参数值，结合 CSM 搅拌墙止水效果，预留参数调整空间，以达到两者适配的标准；非临近地铁段，适当调整参数，保证其加固效果合格且降低施工成本，和钻孔灌注桩支护体系协同控制 [4]。

4.2　关键参数精准控制要点

第一，注浆压力控制。由于本项目 BC 段距离地铁 11.2 m，开挖深度 10.3 m。在注浆施工中采取分级加压方式，从低到高增大注浆压力，以防初期压力过大造成扰动。在注浆作业阶段落实压力控制措施，防止隧道允许变形值超出标准，及时监测现场施工情况，以免超出土体承载极限，也不会给 CSM 搅拌墙造成扰动。第二，注浆速率控制。微扰动注浆参数控制技术应用中，需按照“慢注、匀注”的原则，结合土体渗透性调整注浆速率。在该项目施工中，BC 支护段下部弱渗透土层减慢注浆速率，上部强渗透土层提高注浆速率，保证浆液顺利扩散，且配合 CSM 搅拌墙的止水效果，以防浆液渗漏。第三，浆液配比控制。根据本项目微扰动注浆施工需求，调整浆液配比参数，确保水泥、粉煤灰、外加剂等配比方案具备精准性，使浆液流动性、加固效果达到要求，且防止注浆施工给周边的隧道以及土体结构造成影响。第四，注浆深度与注浆量控制。根据本项目的基坑开挖深度、土层分层情况，确定分层注浆深度。BC 支护段注浆深度到强风化岩层以上 0.5 m，注浆量结合土地空隙率、加固范围精准计算。而非临近地铁段注浆深度设定时，需考虑到基坑开挖深度特点，以保证注浆性能满足技术标准。

4.3 试注浆验证与参数优化

在微扰动注浆作业开始前，结合本项目轨道交通保护区域特性，选择代表性点位试验注浆。在该试验点位选择时，其和地铁区间结构外边线距离为11.2 m，开挖深度10.3 m，止水帷幕为CSM等厚水泥土搅拌墙。在该试验阶段，检测注浆压力速率、浆液扩散范围、隧道变形等数据，根据检测数据分析注浆效果，以确定预设参数是否达到要求。通过对注浆结果的分析，优化调整注浆参数。BC支护段注浆压力与速率保持匹配，提高注浆加固效果，且防止造成轨道变形；非临近地铁段选择代表性点位同步试注浆，优化参数以适配三轴搅拌桩止水帷幕、钻孔灌注桩支护体系，进而确保各部分施工达到精准匹配。

4.4 施工过程动态调整策略

微扰动注浆施工阶段建设参数动态调整机制，需结合现场监测数据以及施工反馈及时调整注浆参数，以保证注浆具备适配性。BC支护段监测数据临近允许值时，需立即降低注浆压力、减缓速率，并检查CSM止水情况，以防渗漏造成扰动现象。如果在注浆加固阶段发现加固效果不合格，需确保其扰动不超标的情况下，及时根据现场情况调整注浆液配比、增加注浆量，确保注浆参数和现场施工情况保持动态匹配。

5 轨道交通保护区域微扰动注浆施工工艺与质量控制

5.1 微扰动注浆施工工艺流程

结合本项目基坑规模、支护形式及止水帷幕类型等实际工况，明确微扰动注浆的完整施工流程，包括：施工准备、钻孔定位、钻孔钻进、浆液制备、注浆施工、注浆结束及封孔处理。针对各环节制定明确、可操作的技术规范，并重点强化以下三个方面的严格控制：第一，钻孔精度，保证钻孔位置与BC支护段、非邻近地铁段的支护结构、止水帷幕（CSM搅拌墙、三轴搅拌桩）精确适配，杜绝钻孔偏差导致浆液扩散范围偏离设计区域[5]。第二，浆液制备质量，根据本项目各区域不同的参数要求，准确配比浆液。第三，注浆连续性，防止施工中漏注、断注，而在BC支护段，更要让注浆与CSM搅拌墙彼此配合，真正形成“止水+加固”双重防护。

5.2 施工过程质量控制要点

加强注浆材料质量管控是施工控制的首要环节。首先对水泥、外加剂等原材料进行进场检验，确认其符合设计要求及本项目微扰动注浆的参数控制需要，严格控制钻孔深度及垂直度，即BC支护段钻孔深度确保强风化岩层以上0.5 m，与CSM搅拌墙底平齐，非邻近地铁段钻孔深度根据开挖深度合理确定，避免钻孔偏差造成浆液扩散范围偏离设计区域，切实保证加固效果[6]。注浆过程中实时监测浆液温度、流动性，主动、及时地调整配比，使浆液性能稳定可靠。注浆结束后及时、规范地对注浆孔进行封孔处理，防止土体沉降，尤其是BC支护段的封孔质量要严格控制，不能影响CSM搅拌墙的止水效果，同时与钻孔灌注桩内支撑体系良好配合，共同保障基坑稳定性。

6 轨道交通保护区域微扰动注浆参数控制技术应用效果分析

从对本项目注浆施工后土体强度、渗透性的系统检测中可以看到，BC支护段土体强度相比注浆前有很大提高，符合加固设计要求；渗透性大大降低，与CSM等厚水泥土搅拌墙形成了极好的止水加固体系；对比注浆前后隧道沉降、收敛数据可知，注浆后隧道沉降量严格控制在规范允许范围之内，收敛值没有超限；注浆过程未发生扰动超标现象，有效保护了地铁运营安全；非邻近地铁段注浆施工效果也很好，土体加固后与三轴搅拌桩止水帷幕、钻孔灌注桩内支撑体系彼此协同，基坑开挖时稳定性较佳。

7 结束语

轨道交通保护区施工具备较高敏感性，若选择的施工技术不当或者施工参数控制不足，极易对既有轨道交通运行安全造成影响，也会影响工程建设效果。在该区域内施工选择微扰动注浆参数控制技术，落实参数控制措施，根据现场实际情况及时调整微扰动注浆技术参数，能有效提高隧道结构安全性与稳定性。本文选择某轨道交通项目作为案例，深入探讨微扰动注浆参数控制技术，通过结合现场实际情况，及时调整施工技术参数，旨在有效降低对隧道的影响，确保现场施工顺利进行，保障轨道交通运营安全，为今后同类型项目施工提供经验。

参考文献：

[1] 张晨.微扰动注浆工艺在地铁保护中的应用[J].建筑施工,2020,42(07):1272-1273,1283.
[2] 赵帅,张东明,邵华,等.盾构隧道微扰动注浆对土体强度和衬砌横向收敛的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(08):1145-1153.
[3] 黄斌.微扰动注浆工法治理隧道收敛变形的效果分析[J].建筑科技,2022,06(03):96-99.
[4] 黄民,张艺嘉,梁爽.基于MJS与微扰动注浆的地铁隧道变形整治方案设计[J].工程机械,2025,56(02):128-131.
[5] 燕全会.桩基后注浆技术的应用探讨及施工技术管理[J].广东建材,2025,41(07):138-144.
[6] 谌启阳,夏进斌.和政隧道软弱围岩段注浆加固技术参数优化与应用[J].中国公路,2025(03):115-117.

激光设备运行稳定性影响因素分析

许占路，刘亚蝶 *

（聊城市沃尔润激光科技有限公司，山东 聊城 252000）

摘 要 激光设备在工业加工、航天航空等领域应用日益广泛，其运行稳定性直接决定作业精度与生产效率。当前行业内设备易受多因素干扰，出现功率波动、波长漂移等问题，制约应用拓展。本文采用文献研究、参数测试与数据对比结合的方法，系统分析激光设备运行各环节影响因素，明确各因素作用机制与耦合关系，提出针对性优化路径，以期为有效提升设备运行稳定性提供参考。

关键词 激光设备；运行稳定性；功率波动；温控精度；光路校准

中图分类号：TN248 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.019

0 引言

激光技术的快速迭代推动激光设备向高功率、高精度方向发展，其运行稳定性成为衡量设备品质的核心指标，直接影响加工一致性、实验可重复性及设备使用寿命。当前各类激光设备在实际运行中，常因各类因素干扰出现运行异常，导致作业故障频发、维护成本增加，现有研究多聚焦单一因素分析，缺乏系统全面的耦合研究与针对性优化方案[1]。本文围绕激光设备运行稳定性核心需求，通过梳理设备运行原理，测试关键参数，分析各因素作用规律，提出科学合理的优化策略，旨在解决设备稳定性不足的行业痛点，为推动激光设备在各领域的高质量应用提供参考。

1 激光设备运行稳定性理论基础

1.1 激光设备运行稳定性核心内涵

激光设备运行稳定性是指设备在规定工况、既定时间内，保持输出参数稳定、运行状态连续无异常的能力，核心评价指标包括功率稳定度、波长稳定度、相位稳定度及光束质量因子 M^2。其本质是设备各系统协同工作的平衡状态，任何一个系统的参数偏移都可能打破这种平衡，引发运行异常。功率稳定度反映激光能量输出的均匀性，波长稳定度决定激光与材料的作用效果，相位稳定度影响激光相干性[2]。三者相互关联、相互影响，共同构成设备稳定性的核心评价体系。

1.2 激光振荡与传输的基础逻辑

激光设备运行的核心是激光振荡与光束传输过程，激光振荡依赖谐振腔的反馈作用，通过泵浦源激励工作物质产生受激辐射，形成稳定激光束。谐振腔的腔长、反射率等参数直接影响激光振荡效率，腔长偏差会导致激光频率漂移，反射率波动会降低输出功率稳定性。光束传输过程中，传输介质的折射率、光路对准精度决定光束质量，介质折射率受环境因素影响发生变化时，会导致光束发散、偏移，进而影响设备运行稳定性[3]。不同类型激光设备的振荡与传输逻辑存在差异，但核心影响机制具有一致性。

1.3 稳定性影响的系统机制

激光设备运行稳定性受光源、冷却、机械、控制四大系统耦合影响，各系统并非独立作用，而是形成相互关联的耦合关系。光源系统的功率波动会增加冷却系统的负荷，冷却不及时会进一步加剧光源老化，导致功率稳定性下降；机械结构的振动会影响光路对准精度，进而引发光束传输异常，同时干扰控制系统的参数采集精度，会放大单一因素的影响，导致设备稳定性大幅下降，明确各系统机制是实现稳定性优化的关键前提。

2 光源系统对激光设备运行稳定性的影响

2.1 激光管类型与性能参数影响

激光管作为光源系统核心部件，其类型与性能参数直接决定设备运行稳定性。半导体激光二极管（Semiconductor Laser Diode，SLD）、光纤激光器与气体激光器的稳定性差异显著，SLD 具有体积小、功耗低的优势，但温度敏感性强，电流恒定时温度每升高 1 ℃，中心波长增加 0.1 nm～0.2 nm。光纤激光器采用全光纤结

作者简介：许占路（1974-），男，专科，研究方向：激光设备。
*通信作者：刘亚蝶（1986-），女，本科，中级会计师、税务师，研究方向：激光设备。E-mail：lyd2026081101@163.com

构，功率稳定度可达 ±1.5%，优于气体激光器的 ±3%，但其输出稳定性受光纤芯径与数值孔径影响，芯径偏差超过 5 μm 会导致光束质量下降。不同类型激光管的性能差异[4]，决定了设备在不同应用场景下的稳定性表现。

2.2 不同型号激光光源稳定性参数对比

光源参数的合理性直接影响设备运行稳定性，不同型号激光光源的功率稳定度、波长及冷却方式等参数存在显著差异，参数匹配度不足会导致稳定性下降，以下为常见型号激光光源的核心稳定性参数对比，如表 1 所示。

表 1 常见型号激光光源稳定性参数对比

设备型号	功率稳定度（%）	波长（nm）	冷却方式
HWD100	≤ 3	915/980	风冷
HWD500	≤ 3	980	风冷 / 水冷
RFL-ABP1500	±1.5	1 080±5	水冷
DFB 型半导体激光器	≤ 0.5	852	半导体制冷

表 1 内容分析，DFB 型半导体激光器功率稳定度控制在≤ 0.5%，输出波长为 852 nm，依靠半导体制冷维持工作状态。RFL-ABP1500 功率稳定度为 ±1.5%，波长范围设定在 1 080±5 nm，散热形式采用水冷。HWD100 与 HWD500 功率稳定度均为≤ 3%，前者波长为 915/980 nm 且仅支持风冷，后者波长为 980 nm 可在风冷与水冷间切换。852 nm 波长的光源在 120 min 时长内波长最大误差仅 0.0 036 nm，可满足高精度工况的使用需求，水冷与半导体制冷形式也为光源长期稳定工作提供支撑。

2.3 泵浦源稳定性的作用机制

泵浦源作为激光振荡的能量供给部件，其输出稳定性直接影响激光设备运行状态。泵浦源输出功率波动会导致工作物质受激辐射强度不稳定，进而引发激光输出功率波动。连续工作状态下，泵浦源电流波动超过 ±5% 时，激光输出功率波动可达 ±8%，无法满足高精度加工需求。泵浦源的调制频率也会影响稳定性[5]，调制频率低于 1 kHz 时，会出现功率脉动现象，而频率控制在 10 kHz 时，功率脉动可控制在 ±1% 以内。泵浦源的老化会导致输出效率下降，使用超过 10 000 h 后，输出功率会衰减 15%，稳定性显著降低，定期维护可延长其使用寿命，维持设备稳定性。

2.4 光源驱动与供电稳定性的影响

光源驱动电路输出纹波与供电电压稳定性直接作用于激光管工作状态，供电回路电压波动会改变泵浦电流幅值，打破激光振荡的能量平衡。供电电压偏差超出 ±1% 时，激光管工作电流波动达 ±3%，输出功率同步偏移 ±2.1%。驱动电路纹波控制在 50 mV 以内，可将电流波动压至 ±0.8%。供电线路阻抗匹配不足会加剧高频干扰，使激光输出出现周期性脉动。将驱动电路与泵浦源做协同匹配设计，依托恒流驱动模块的闭环补偿，弱化供电波动对光源输出的传导影响。实测该方案可使功率稳定度额外提升 0.4%，补足单一泵浦源参数调控的短板，强化光源系统整体稳定性能。

3 冷却与环境系统对激光设备运行稳定性的影响

3.1 冷却系统类型与温控精度影响

激光设备运行过程中会产生大量热量，冷却系统的散热效率与温控精度直接决定设备稳定性。冷却方式主要分为风冷、水冷与半导体制冷三种，不同冷却方式的温控精度与适用场景存在差异[6]。风冷方式适用于低功率设备，温控精度为 ±0.5 ℃，散热效率较低，当设备功率超过 500 W 时，无法满足散热需求，会导致设备温度升高，功率波动增大。水冷方式温控精度可达 ±0.1 ℃，适用于中高功率设备，6 000 W 级设备水冷制冷量需达到 12 500 W，才能维持设备正常运行温度。半导体制冷精度最高，可达 ±0.03 ℃，主要用于高精度半导体激光设备。

3.2 不同冷却方式温控精度与稳定性关联

冷却系统的温控精度直接决定激光设备的运行稳定程度，温控偏差超出合理区间时，激光管参数会出现偏移，光路也会产生形变，最终引发设备运行状态异常。不同冷却方式在温控精度与设备稳定性之间存在对应关联，通过梳理二者的关联特性，可更精准地为激光设备冷却系统的适配设计提供实际参考方向。不同冷却方式温控精度与稳定性关联参数对比，如表 2 所示。

表 2 不同冷却方式温控精度与稳定性关联参数对比

冷却方式	温控精度（℃）	功率波动（%）	适用功率范围（W）
风冷	±0.5	≤ 3	≤ 300
水冷	±0.1	≤ 1.5	300 W ～ 6 000 W
半导体制冷	±0.03	≤ 0.5	≤ 100

由表 2 可知，风冷温控精度为 ±0.5 ℃，功率波动控制在≤ 3%，适用功率范围≤ 300 W。水冷温控精度为 ±0.1 ℃，功率波动≤ 1.5%，适配功率区间 300 W ～ 6 000 W。半导体制冷温控精度为 ±0.03 ℃，功率波动≤ 0.5%，适用功率≤ 100 W。温控精度每提升 0.1 ℃，功率波动可降低 0.3% ～ 0.5%。温控精度的变化与功率

波动幅度存在直接关联。冷却方式的适配性选择会直接决定激光设备长期运行的稳定表现。

3.3 环境因素的干扰机制

环境温湿度、粉尘含量等因素会通过多种途径干扰激光设备运行稳定性。环境温度超出 10 ℃～40 ℃范围时，激光管的阈值电流会发生变化，温度每超出范围 5 ℃，阈值电流变化 2%～3%，导致功率输出不稳定。环境湿度超过 70% 时，会导致光路部件受潮，折射率发生变化，光束传输偏差增大，同时加速电气部件老化，引发短路故障[7]。粉尘含量超过 0.1 mg/m^3 时，会附着在谐振腔反射镜表面，降低反射率，导致激光输出功率衰减，粉尘积累量达到 0.5 mg/cm^2 时，功率衰减可达 10% 以上，定期清洁光路部件可有效降低环境干扰。

4 机械与控制系统对激光设备运行稳定性的影响

4.1 机械结构精度的影响作用

机械结构的精度直接影响光路对准精度，进而影响激光设备运行稳定性。激光设备的谐振腔腔长偏差超过 1 μm 时，会导致激光频率漂移，频率稳定度下降至 10^{-6} 量级，无法满足精密应用需求。光路支架的振动幅度超过 0.01 mm 时，会导致光束偏移，加工精度下降，同时引发功率波动[8]。光纤传输系统中，光纤芯径偏差超过 5 μm、光纤长度偏差超过 1 m 时，会导致光束质量因子 M^2 增大，超过 1.5 时，光束发散严重。机械结构的装配精度不足，会导致各部件协同工作异常，放大稳定性隐患，定期校准机械精度可有效提升设备稳定性。

4.2 控制系统的响应与调控能力

控制系统作为激光设备的“核心大脑”，其响应速度与调控精度直接决定设备运行稳定性。控制系统采用比例—积分—微分（Proportional-Integral-Derivative，PID）控制算法时，响应时间需控制在 10 ms 以内，才能及时调控泵浦源电流、冷却系统温度等参数，避免参数偏移。功率实时监控系统的采样频率低于 100 Hz 时，无法及时捕捉功率波动，导致调控滞后，而采样频率提升至 500 Hz 时，可将功率波动控制在 ±1% 以内。控制系统的参数整定不合理，会导致调控过度或调控不足，引发设备运行震荡[9]，合理整定 PID 参数可提升调控精度，维持设备稳定运行。

4.3 稳定性优化措施与实施效果

针对机械与控制系统的影响，结合光源、冷却系统的优化需求，提出针对性优化措施。在机械结构方面，采用高精度装配工艺，将谐振腔腔长偏差控制在 0.5 μm 以内，光路支架加装减震装置，将振动幅度控制在 0.005 mm 以下，定期校准光纤传输系统，确保芯径偏差不超过 3 μm。在控制系统方面，优化 PID 控制算法，将响应时间提升至 5 ms，采样频率提高至 500 Hz，增设双闭环温控系统，实现激光管与环境温度的双重调控[10]。优化后，设备功率稳定度从 ±3% 提升至 ±1%，波长波动控制在 ±2 nm 以内，频率稳定度提升至 10^{-8} 量级，运行故障发生率降低 60%，提升了设备运行稳定性。

5 结束语

本文围绕激光设备运行稳定性影响因素展开系统研究，明确光源、冷却、机械、控制四大系统的影响机制及关系，通过参数测试与数据对比，提出针对性优化措施，有效解决了设备功率波动、波长漂移等稳定性问题，为激光设备运维与性能提升提供了技术支撑。但是，研究仍存在一定不足，对极端环境下的稳定性影响分析不够深入，未来需聚焦高温、高振动等极端工况，进一步完善优化方案，推动激光设备稳定性水平持续提升，拓展其在高端制造、航天航空等领域的应用范围。

参考文献：

[1] 张建柱，张普，刘满威，等. 超高功率激光设备在碳钢切割中的应用 [J]. 机电工程技术，2025,54(18):173-178.
[2] 张云龙，赵玉娟，李博，等. 基于 AHP-FCE 法的钬激光设备安全风险评价体系的构建和风险控制分析 [J]. 中国医疗设备，2025,40(09):92-100.
[3] 王华丰，张育斌，朱火美，等. 基于增益切换滑模控制的水导激光设备水压调控 [J]. 电加工与模具，2025(03):55-59.
[4] 莫周，杜鲁梅. 基于机器视觉的激光功率计字符识别系统 [J]. 电脑与信息技术，2024,32(06):104-108.
[5] 刘柳，蒋华年，费永云，等. 一种激光切割一拖二上下料装置控制系统的设计 [J]. 自动化应用，2023,64(23):35-37.
[6] 张金星. 激光清洗技术在汽轮机叶片除锈中的应用 [J]. 设备管理与维修，2023(18):114-115.
[7] 刘晴云，张飞飞，陈雪娇. 激光加工技术在农业机械制造中的发展和应用分析 [J]. 农业技术与装备，2020(10):65-66.
[8] 余鹏，田杰. 无人机机载激光清障一体化设计 [J]. 环境技术，2020,38(05):195-200,206.
[9] 黄玉兵. 中小功率激光切割设备切割轨迹的质量影响因素 [J]. 造纸装备及材料，2020,49(04):22-23.
[10] 戚燕. 光辐射安全和激光设备国际标准发展动态研究 [J]. 中国标准化，2020(S1):276-281.

电力继电保护调试与故障检修技术

王城良，李正伟，程　海

（丽水正阳电力建设有限公司，浙江 丽水 323000）

摘　要　在保障电力系统安全稳定运行过程中，继电保护装置始终居于核心地位，装置的调试质量直接决定了保护动作的准确性与可靠性。当前变电站继电保护调试工作中，仍频繁出现二次回路接触不良、采样精度偏差、定值配合失当等长期存在的技术顽疾，本文对这类问题的故障根源与形成机理展开了深度分析。重点梳理并讨论了二次回路绝缘测试、采样精度校验、动作特性验证等核心调试工艺的技术要点与标准化实操流程，依托某220 kV变电站实际检修工程实例，详细阐释了线路保护装置检修、主变保护定值校验、回路绝缘隐患处理等施工方法的落地应用细节。实际应用效果表明，采用标准化调试工艺可显著提升保护装置的动作准确率，有效压降设备故障风险，为电力系统的长期安全稳定运行筑牢坚实防线。

关键词　继电保护；调试技术；故障检修；二次回路

中图分类号：TM77　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.020

0　引言

随着电网规模的持续扩张与运行电压等级的不断提升，继电保护装置在现代电力系统中的核心地位愈发凸显，是保障电网安全稳定运行的首道防线。保护装置的可靠性水平直接决定了系统稳定以及设备安全的保障程度，但是在实际运行场景中，二次回路接触不良、元器件老化、调试工艺不规范等多重因素，让保护误动、拒动等现象依旧时有发生，给电网安全构成潜在威胁。基于此，深度探究继电保护调试技术，助推故障检修工艺规范化，对增进保护装置运行可靠性具有核心作用。本文立足于实际工程需求，系统分析了保护装置常见故障的成因机理，详细阐释了标准化调试工艺的技术要点，并依托详细工程实例验证了相关技术的应用成效，以期为同类工程实践提供有益参考。

1　继电保护系统常见故障机理与诱因分析

1.1　电流互感器二次回路接线松动引发的测量偏差

在电力系统运行安全方面，电流互感器二次回路接线端子松动是造成保护测量偏差的一大根源，在长期运行期间，在环境温度变化产生的热胀冷缩效应、设备持续振动还有电磁力等多重因素作用下，二次回路接线端子的紧固螺丝会逐渐松动，引发接触电阻增大问题。当接触电阻由正常的微欧级攀升至毫欧级甚至更高量级时，会在二次回路内形成附加电压降，让输入保护装置的二次电流值低于实际一次电流对应的理论计算值，这一类测量偏差在系统轻载工况下有着较强的隐蔽性，但一旦发生短路故障，就可能造成保护装置检测到的故障电流低于整定阈值，最终使得保护拒动[1]。应当注意到，接触不良还可能诱发二次回路开路风险，产生危险高压，严重威胁人身及设备安全。

1.2　保护装置采样插件老化导致的精度衰减

微机保护装置的核心部件是模拟量采样插件，该插件长期运行后会出现元器件的老化现象，使得采样精度逐渐衰减，采样回路里的电解电容经过5年至8年的运行后，容量会发生变化，漏电流增大，减弱滤波的效果以及采样保持电路的精度。运算放大器的零点漂移随温度以及时间累积，使得在小电流输入时产生较大的相对误差，模数转换器的基准电压源稳定性下降，造成全量程范围内的比例误差，当采样误差超过保护装置允许的技术指标时，会直接妨碍阻抗计算、差流计算等保护算法的准确性，使得保护定值发生偏移，在边界故障情况下可能引发误动或者拒动[2]。

1.3　二次回路绝缘劣化引起的接地故障

变电站运维立场下，二次回路绝缘劣化属于常见缺陷，形成原因包含电缆绝缘老化、受潮及机械损伤，电缆沟内敷设的二次电缆长期暴露于潮湿环境、油污侵蚀还有小动物啃咬等恶劣条件，绝缘层逐渐老化开裂，绝缘电阻由正常几百兆欧骤降至几兆欧甚至更低。绝缘电阻低于规程要求的1 MΩ时，容易引发直流接

作者简介：王城良（1984-），男，专科，助理工程师，研究方向：电力工程。

地故障，造成保护装置内部逻辑混乱、继电器误动作或者熔断器熔断。雨季或者潮湿环境下，电缆沟积水加速绝缘劣化，若未及时处理，可能发展为两点接地，使得保护误动或者拒动，严重地危害系统安全。

2 继电保护装置标准化调试工艺与参数校验方法

2.1 二次回路绝缘电阻测试与导通性验证工艺

调试工作的基础环节中，二次回路的绝缘电阻测试是首要的步骤，测试前必须确认被测回路以及其他的运行设备隔离，防止高压窜入损坏运行的设备，测试使用 500 V 或者 1 000 V 兆欧表，分别测量各回路对地及各回路间的绝缘电阻。直流回路要求绝缘电阻不低于 10 MΩ，交流回路不低于 1 MΩ，测试时需逐根电缆实行，记录测试的温度以及环境湿度，因绝缘电阻随温度变化较大，必要时实行温度换算，导通性的验证使用万用表低阻挡或者专用的导通测试仪，从保护屏的端子排开始，逐段检查至断路器机构箱、CT 二次接线盒等远端的设备，保证回路完整无断点，接触电阻符合规程要求，一般要求小于 0.1 Ω[3]。

2.2 保护装置采样精度校验与误差补偿技术

测量准确性的保障离不开采样精度的校验，这是保证保护装置测量准确性的关键步骤，凭借继电保护测试仪向装置施加标准的电流和电压，检查各模拟量通道的采样值，测试点包含额定值的 10%、50%、100% 以及 200%，记录装置显示值以及标准值的偏差。0.5 级精度的保护装置，电流测量误差须小于 ±0.5%，电压测量误差小于 ±0.2%，若某通道误差超标，先检查二次回路接线是否松动、屏蔽层接地是否良好，排除外部因素后进入装置菜单查看零漂值，零漂超过 ±0.05 V 或者 ±0.01 A 时需实行零漂的调整。硬件老化无法用软件补偿时，需更换采样插件，更换后重新实行全量程的校验。技术指标以及允许偏差范围见表 1。

表 1 技术指标以及允许偏差范围

测试项目	输入值	允许误差限值	实测值示例
交流电流测量	5 A	±0.5%	4.98 A
交流电压测量	100 V	±0.2%	100.1 V
零漂值	0 V/0 A	±0.05 V/±0.01 A	0.003 V
相位角测量	0° ～360°	±0.5°	0.3°
频率测量	50 Hz	±0.02 Hz	50.01 Hz

2.3 动作特性曲线测试与定值整定验证方法

验证保护装置的动作边界是否满足设计规范，是动作特性测试的重点目标。针对距离保护，一般使用固定电压、调节电流的测试方法，逐点测定阻抗继电器的动作边界，然后绘制出阻抗圆特性曲线或者四边形特性曲线，测试时需选取至少 8 个不同思路的测试点，验证各方向的动作阻抗与整定值的偏差是否在 ±5% 的允许误差范围内。针对过流保护，则使用突然施加故障电流的方式实行测试，重点检测在 1.05 倍、1.2 倍及 2 倍整定值条件下的动作时间，据此绘制时间－电流特性曲线，线路保护装置动作定值整定参数见表 2。

表 2 线路保护装置动作定值整定参数

保护类型	电流定值/A	时间定值/s	阻抗定值/Ω	灵敏角/°
电流速断	15.2	0.00	—	—
限时电流速断	8.5	0.30	—	—
过电流保护	5.0	1.20	—	—
接地距离Ⅰ段	—	0.00	4.2	75
相间距离Ⅱ段	—	0.50	8.5	85

2.4 开关量输入输出回路功能测试与传动试验

开出量的验证在装置断电的状态下实行，测量跳闸出口、合闸出口、信号继电器等接点的通断状态，检查接点的容量是否达到了断路器跳闸线圈动作功率的要求，接点断开的容量一般不小于 DC 250V 5A，保护系统的验证中，传动试验是验证保护系统整体功能的关键环节，保证一次设备的安全后，实际地模拟故障条件，观察断路器的动作行为，测量从故障发生到断路器跳闸的全过程时间，验证保护动作的逻辑、信号回路以及断路器跳闸回路的完整性。

3 继电保护检修技术在 220 kV 变电站工程中的应用

某 220 kV 变电站地处负荷中心区域，现有主变压器 2 台，单台容量 180 MVA，电压等级 220 kV/110 kV/35 kV，接线方式使用双母线接线，220 kV 侧出线 4 回；110 kV 侧使用单母分段接线，出线 8 回。站内配备微机线路保护装置 8 套、主变压器保护装置 4 套、母线差动保护装置 2 套，均投运超过 8 年，本次检修针对运行年限较长的线路保护以及主变保护装置开展全检工作，重点解决采样偏差超标、二次回路绝缘下降、端子接触不良等缺陷，依托系统化的调试工艺恢复保护装置技术性能[4]。

3.1 线路保护装置采样回路检修与精度恢复作业

检修工作着手检查二次回路的物理连接，首先处理运行中发现的采样偏差问题，打开保护屏的后柜门，

重点检查电流回路端子排的紧固情况，同样使用力矩螺丝刀按 0.8 N·m 至 1.0 N·m 的标准力矩对连接螺丝实行重新紧固，保证 CT 二次回路接触可靠[5]。随后拆除装置背板接线，用专用清洁剂清洗航空插头的插针以去除氧化层和污垢，恢复接触可靠性，上电后进入装置调试菜单观察各通道零漂值，发现 A 相电流通道零漂达 0.08 A，超出允许范围，经装置软件零漂校准后修正至 0.005 A 以内。最后施加 5A 标准电流实行满量程校验且记录各点的误差，保证误差在 ±0.3% 以内，满足 0.5 级的精度要求。

3.2 主变保护定值校验与动作逻辑验证施工

从主变压器保护检修的思路着重地验证差动保护的制动特性及各侧过流保护的配合关系，在高压侧、中压侧以及低压侧分别施加电流，测试比率差动保护的启动值以及制动特性曲线，核查拐点电流以及斜率定值是否准确，测试中发现高压侧 CT 二次回路有极性接反的隐患，凭借倒换二次接线端子极性，重新实行六角图测试，保证各侧电流相位无误。开展瓦斯保护的传动试验，模拟轻瓦斯以及重瓦斯的动作，核查信号回路以及跳闸回路的准确性，校验各侧过流保护的定值，保证高压侧的过流保护以及 110 kV 出线保护在时间级差上维持 0.4 s 以上的配合关系，杜绝越级跳闸。

3.3 二次回路绝缘处理与接点紧固工艺实施

检修工作思路分析，二次回路绝缘处理是本次检修的关键环节，用 1 000 V 兆欧表检测全站二次电缆的绝缘性能，查出 110 kV 出线间隔的合闸回路电缆对地绝缘电阻仅 0.8 MΩ，未达到规程规定的 1 MΩ 标准，逐段排查该电缆，确认电缆沟积水让中间接头受潮，剥掉受潮的绝缘包扎层，用无水乙醇清洁导体，采取高压绝缘胶带半叠包扎，外层加装热缩套管密封，修复后绝缘电阻升至 150 MΩ。全面检查保护屏端子排、断路器机构箱端子的紧固状况，替换锈蚀的弹簧垫片，涂抹导电膏预防氧化，保证接触电阻小于 0.05 Ω。保护装置检修前后绝缘电阻测试数据的对比情况见表 3。

表 3 保护装置检修前后绝缘电阻测试数据的对比情况

测试部位	检修前绝缘电阻 /MΩ	检修后绝缘电阻 /MΩ	规程要求 /MΩ	测试环境
220 kV 线路保护直流回路	12	180	≥ 10	温度 25 ℃ 湿度 65%
110 kV 线路保护交流回路	0.8	150	≥ 1	温度 25 ℃ 湿度 65%
主变保护电流回路	45	200	≥ 10	温度 25 ℃ 湿度 65%
母差保护信号回路	8	120	≥ 1	温度 25 ℃ 湿度 65%
断路器控制回路	3	85	≥ 1	温度 25 ℃ 湿度 65%

3.4 保护传动试验与整组动作时间测试

检修工作完成后需要验证，保护传动试验可确认保护系统整体功能是否正确，在 220 kV 线路保护实际传动试验中，模拟 A 相接地故障，保护装置动作时间测量值为 28 ms，叠加断路器分闸时间 55 ms 后，总故障切除时间 83 ms，符合 220 kV 系统故障切除时间不大于 120 ms 的技术要求。主变差动保护经区内外故障模拟测试，证实了区外故障时差动保护可靠不动作、区内故障时快速跳开三侧断路器的特性，试验期间同步核查保护动作信号指示、事件记录及故障录波功能，确认监控后台能准确接收并表现保护动作信息，打印报告内容完整准确，为故障分析提供可靠的依据。

4 结束语

保障电力系统安全运行，继电保护装置的调试以及检修是一项基础性工作，其技术实施质量直接关系到保护系统的可靠性。基于此，本文详细分析了二次回路接触不良、采样精度偏差、绝缘劣化、定值配合失当等常见故障的成因机理，分析了绝缘测试、采样校验、动作特性验证、传动试验等核心工艺的技术要点。工程应用表明，凭借标准化的调试流程以及精细化的检修工艺，可有效消除设备隐患，恢复保护装置的技术性能。在实际工作中，应严格执行调试规程，注重细节控制，特别是二次回路的物理连接质量以及采样系统的精度校准，保证保护装置在系统故障时可以快速、准确地动作，为电网安全稳定运行提供坚实的技术保障。

参考文献：

[1] 杨旺.电力继电保护中的系统调试与故障检修分析[J].集成电路应用,2025,42(04):354-355.
[2] 陈坤.电力二次回路和继电保护调试研究[J].光源与照明,2025(03):200-202.
[3] 赵化宾,侯言兵.智能变电站继电保护调试技术研究[J].科技资讯,2025,23(01):84-86.
[4] 吕晨洁.智能变电站继电保护检测和调试技术分析[J].仪器仪表用户,2024,31(11):76-77,80.
[5] 刘娟.电力系统继电保护信号识别与分析[M].重庆:重庆大学出版社,2024.

城镇供水管网漏损检测技术的应用研究

王美超[1]，刘月相[2*]

（1. 浙江大学滨海产业技术研究院，天津 300450；
2. 天津智云水务科技有限公司，天津 300450）

摘　要　为更好地开展城镇供水管网漏水检测工作，从而提高其准确性、及时性和可行性，本文在总结声学检测法、探地雷达及红外热成像技术、智能球与示踪气体以及光纤传感技术的基础上，对其原理、应用范围和技术优势进行阐述。从管网漏水定位、分区计量、压力控制及智能化管理系统等方面出发，介绍漏水检测方法的操作步骤及其注意事项。以老城区供水区域为例，分析分区识别、模型筛选、现场检查以及开挖验证的过程以及效果。结果表明，城镇供水管网漏水检测需要综合利用多种检测手段互相配合，采取合理的分层次排查方式，并结合硬件检测与模型分析，有利于提高漏水处理速度，减少产销差水量同时，保障给水系统的正常运行。

关键词　城镇供水管网；漏损检测；分区计量管理；智能监测平台

中图分类号：TU991.61　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.021

0　引言

城镇供水管网分布广泛，埋设环境复杂，由于管材老化、接口松动、外力作用以及水压变化等原因影响，容易发生不同类型漏水现象。漏水会造成水资源浪费以及运营费用上升，还会引起供水不稳定、道路破损以及水质安全隐患等。而漏水又因为隐蔽性强、定位困难以及处理周期较长等问题，传统的巡查方法已经不能适应精细化管理的需求。因此，需要不断提高漏水检测、查找和治理水平，促进城镇供水管网管理工作向高效化、智能化的方向发展。

1　城镇供水管网漏损检测的主要技术类型

1.1　声学检测技术

声学检测法，利用漏水点受到内部压力后发出的声音以及振动作为检测对象，一般使用听漏棒、相关检漏仪、噪声记录仪等仪器进行检测。其工作原理是，通过测量漏水产生的声音沿着管道壁和水流传播所经历的时间差、频谱以及幅度的变化来确定漏水的位置。听漏棒的有效范围大约是 200 m～500 m，相关检漏仪的有效范围大致在 15 m～2 000 m之间，而噪声记录仪可以在夜晚自主记录不正常的声音，并且可以长时间地工作。为进一步了解相关检漏仪的结构，其工作流程如图 1 所示。

1.2　探地雷达与红外热成像技术

探地雷达和红外热成像是两种非接触探测方式，前者利用高频电磁波探测漏点附近土体含水量变化导致反射异常情况；后者根据漏水造成地面温度不同而区分不同区域[1]。探地雷达一般探测范围约在 1 m左右，无损、准确度高、对管材要求低等特点，使其适用于检测非金属管道以及浸湿区漏水位置；而红外热成像可快速扫描、安全、覆盖面广等优点，但是易受到外界气温、地面材料以及土壤状况等因素干扰。

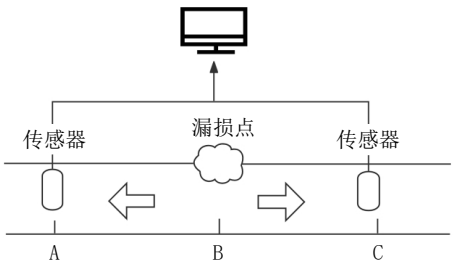


图 1　相关检漏仪示意图

1.3　智能球与示踪气体检测技术

智能球以及示踪气体检测方法都有靠近漏点的特点，对于一些常规地面设备无法准确判断情况非常适用。智能球是在管道内放置装有声学传感器装置，并不断采集整个频段声音信息，根据在漏损状态下和正常状态下声音大小以及频率不一样来判断漏点位置，比较适合用于长距离、大直径以及材质复杂管道上。而示踪气体一般使用 95% 氮气加 5% 氢气混合气体，在被隔断管道中通入之后再用高灵敏度探测器在地上查找泄露气体，即可达到大约 1 m 精度，对于小漏点十分敏感。

作者简介：王美超（1994-），女，硕士研究生，研究方向：水厂智慧控制、漏损研究、水利模型。
***通信作者**：刘月相（1987-），男，本科，研究方向：水厂智慧控制、漏损研究、水利模型。E-mail：lyx0600@163.com

1.4 光纤传感检测技术

光纤传感检测技术基于光时域反射以及振动感知机理，在输水管线中部署传感光纤，实时监控由于漏水造成的振动、应变或者温度变化而产生的报警信息，从而达到对整个供水管线的长距离、分布式以及在线监测的目的[2]。该方法可以使用普通的单模通信光纤接收泄漏产生的扰动信息，并通过受扰处的光路损耗来确定漏水的具体位置，具备良好的防腐蚀性、防电磁干扰能力和较长的传输距离。为便于理解系统的组成结构及其信号流程，如图2所示，为光纤传感的工作示意图。

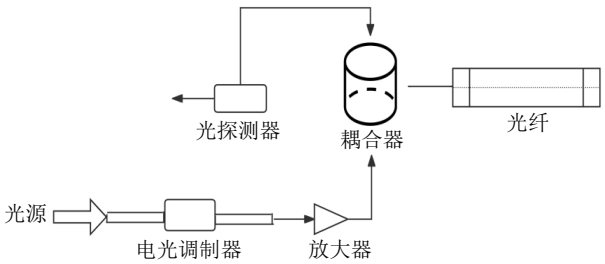


图2 光纤传感技术原理图

2 城镇供水管网漏损检测技术的具体应用

2.1 在管网漏损定位中的应用

在管网漏损定位中，一般采用“异常发现—范围缩小—精确定点”的方式。工作人员首先可通过夜间最小流量、分区分段供排水量差以及节点压力变化来判断可能存在漏损的位置，然后根据管道直径、材质、埋深以及路面情况选择探测路径。到现场之后，如果是金属管道则优先使用相关检漏仪、听漏棒或者噪声记录仪等设备对声音信号进行采集，相关检漏仪适用于距离在15 m～2 000 m之间的情况，而听漏棒主要应用于距离小于等于500 m范围内近距离复核。对于非金属管道或者有较大干扰源以及地面较难到达区域，则可以使用探地雷达、示踪气体或者智能球法等方法进一步确认，示踪气体一般由95%的氮气和5%氢气组成，可以有效检测出较小漏点。最后，再结合实际收集的声音信号与其他相关资料对比分析，以免将突然增加用水量误认为是漏损。

2.2 在分区计量管理（DMA）中的应用

一般而言需要根据主干管走向、阀门位置、用户性质以及地形高差划分区域大小，一个DMA不宜过大，以便于夜间最小流量分析有足够敏感性。划分好之后，在其入口处应安装一台电磁流量计，或者超声波流量计，并同时配备一个压力表，流量采样间隔应在5 min～15 min之间，压力采样间隔应在1 min～5 min之间，从而得到一天的变化情况。而在正常情况下，可以把每天晚上1点到早上4点作为重点分析时间段，在某区域夜间最小流量连续几天都比以往大8%～15%，并且居民用水变化不大，则认为此地区有隐性漏水的可能性[3]。然后对该区域进行更细致的分析，在区域内设置边界阀门、支管集中位置、老化的管线处布置声级计，在夜晚低背景噪声的情况下进行探测，再使用相应的检测仪器对15 m～2 000 m范围内可疑管道进行复查。

2.3 在供水管网压力管理中的应用

应在泵站出口、DMA入口、控制阀前后、地势变化较大位置以及末梢不利点设置在线压力表，其测量精度需满足0.01 MPa的要求，采样间隔应在1 min之内，以便捕捉到峰谷压力变化以及瞬态波动。而在运行过程中，可以将实际的压力与水力模型预测结果相比较，如果某处夜间静压长时间过高，而且该点压力连续高于模型值0.03 MPa～0.05 MPa，则有可能表明此处有较大漏水可能性，应优先开展泄漏定位工作。另外，对于易发生爆裂事故的大口径输水管线，还可以用逆瞬态法，或者时域法跟踪高频压力响应的发展趋势。一旦找到漏水位置之后，要利用减压阀分时调节、水泵组变频调整以及分区分压来减少不必要的超额压力，在调节之后，还要连续监测晚上的最低流量、各个点的平均压力和峰谷差。如果晚上最低流量显著下降，并且末端的服务压力仍然处于0.14 MPa～0.28 MPa之间的话，就表明已经达到了良好的漏损控制并保证了正常供水的目的。

2.4 在智能化漏损监测平台中的应用

平台搭建期间，将SCADA系统中流量、压力、泵站运行参数以及DMA分区计量信息全部接入平台，同时将GIS管网拓扑关系、阀门井坐标、管材规格、管径、埋深、建成年份以及以往漏失记录等信息一并纳入平台，形成可以计算、可以追溯的基础。在线监控过程中，平台以每5分钟或者15分钟频率获取流量信息，以每分钟频率获取压力信息，然后自动计算每个时间段内最小流量、各个区域之间用水量不平衡程度、各个节点之间的压力差值以及异常持续时间[4]。一旦某个区域连续发生进水和出水变化较大、夜间流量上升或者局部区域压力变化不合理的情况，系统就会发出警报，并且根据管材材质以及周围环境给出合适的解决方案。最后在完成现场核查之后，需要将结果立即反馈给平台以便于调整模型参数、补充训练集并对后续工作进行合理分配。

3 应用案例分析

3.1 项目概况与管网运行现状

某市老城区供水片区作为漏损检测技术的应用对象。该片区服务面积 6.8 km^2，服务人数约为 12.4 万人，管网总长 84.7 km，主要为 DN100 ～ DN300 配水管，球墨铸铁管、灰口铸铁管以及聚乙烯管占比重大。片区内服役年限大于 20 年的管段占 43.7%，由于某些地方受到车辆荷载、地基下沉或者接口老化等因素的影响，有暗漏的可能性。片区的日平均用水量为 2.36×104 m^3，夜晚最小流量较大，而且有些地方出现井室积水、路面返潮以及末端水压变化的情况。为了便于后续工作的开展，将此片区分成四个一级 DMA 以及十一个二级小区，并增加了流量计、压力表以及声音采集器等设施。

3.2 漏损检测技术实施过程

本研究采用“分区识别—模型筛查—现场复核—开挖验证”的方式进行。DMA 系统接入后，连续采集 14 天的流量和压力数据，在此基础上定义 1：00 至 4：00 期间最小流量、分区进出水量之差以及节点之间的压力差为异常标准。对比得出 A2、B3 两个二级分区夜间流量有较大增长，同时，末端节点的压力始终处于较高水平，故将其列为优先检查对象。进入区域内之后，根据不同的管材材质、覆土厚度和路面情况采取不同的检测方法。对于球墨铸铁管道和灰口铸铁管道，在晚上布设声纳仪进行全面普查，在此基础上用相应的检漏仪进行时间差定位，每一段不超过 80 m ～ 350 m 以便于后续的相关性分析。而对于聚乙烯管道或者受车流影响较大的道路，则使用探地雷达以及示踪气体法来进行进一步核实，示踪气体为 95% 氮气和 5% 氢气组成的混合气体，来查找小流量隐蔽漏水部位。对于一条直径为 500 mm 的主要管线，还同时应用了基于压力相关漏失估算的方法，来对比实际监测到的压力和预测的压力值，从而进一步缩小可疑范围之后再进行实地聆听测试。整个过程共花费约 18 天的时间，总计布置声纳仪位置 46 个，布置在线压力表位置 9 个，布置临时流量计位置 6 个，在重点路段复查共计 27 次，最终找到漏点 11 个。

3.3 漏损治理成效与应用评价

在完成漏损点开挖修复、阀门维护及局部调压后，项目组对供水效率、运行压力以及检测反应进行持续观察评估[5]。为更直观反映整治前后该区域变化，在水量损失控制、压力波动情况、抢修速度以及用户体验等方面做出对比分析，如表 1 所示。

表 1 项目漏损治理成效对比表

指标	治理前	治理后	变化幅度
综合漏损率（%）	18.7	11.4	↓ 7.3
夜间最小流量（m^3/h）	96.8	61.3	↓ 35.5
分区平均压力波动幅度（MPa）	0.19	0.11	↓ 0.08
漏点平均定位时长（h/ 处）	9.6	4.2	↓ 5.4
单月产销差水量（万 m^3）	14.38	9.27	↓ 5.11
用户低压投诉率（件 / 千户）	2.6	1.1	↓ 1.5

治理后片区综合漏损率由 18.7% 降至 11.4%，夜间最小流量由 96.8 m^3/h 降至 61.3 m^3/h，说明隐蔽漏失得到有效控制；分区平均压力波动由 0.19 MPa 降至 0.11 MPa，说明调压及修复后运行更为稳定；同时，漏点平均定位时间缩短为 4.2 h/ 处，比治理前减少 5.4 h/ 处，说明通过 DMA 检测、模型筛查以及现场核查相结合的方法，查找问题更加高效；单月产销差减少约 5.11 万 m^3，用户低压投诉率由 2.6 件 / 千户降低到 1.1 件 / 千户，说明这种方法不仅可以提升水司管理水平，还可以提高最终用户满意度。

4 结束语

城镇供水管网漏损检测应根据管网情况、运行状况以及现场实际情况，选择合适的方法并进行综合运用。不同方法各有优劣，在准确率、适用性和可行性方面有所不同，但唯有与分区计量、压力管理和智能化平台等结合起来使用，才能更好地发挥漏损检测的作用。通过对比分析可知，分区监测、模型筛查和现场核实相结合的方式较为可行，有利于提高供水系统的管理水平及降低漏损率。

参考文献：

[1] 侯毅 . 城市供水管网漏损智能监测与快速修复技术应用研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术 ,2026(01):72-75.

[2] 袁秋红 , 叱干勇 , 李小雨 , 等 . 城市供水管网漏损的检测、定位和控制策略 [J]. 净水技术 ,2026,45(02):1-11.

[3] 彭正华 . 市政供水管网漏损检测技术与控制策略研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术 ,2025(04):29-32.

[4] 何团 . 压力调控技术在供水管网漏损中的应用研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术 ,2025(01):21-24.

[5] 肖文智 , 李景文 , 梁福武 , 等 . 老旧城镇供水管网漏损智慧控制研究及应用 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术 ,2025(03):13-16.

“多测合一”背景下的不动产测绘技术分析

杨 雪，赵尽晖

（山东万相资产评估事务所（普通合伙），山东 东营 257000）

摘 要 在“放管服”改革持续深化的背景下，“多测合一”政策在全国范围内加速推进，不动产测绘行业面临技术升级的迫切需求。本文以测绘需求重构作为切入点，对“多测合一”模式下数据采集、数据处理、成果输出等环节的变化特征进行研究分析，提出智能化采集、多源数据融合、自动化成果生成、云端协同共享等技术路径，以期为测绘从业人员优化作业流程提供理论参考。

关键词 多测合一；不动产测绘；数据融合；云端协同；技术集成

中图分类号：P271 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.022

0 引言

建设项目审批制度改革对测绘服务提出了更高要求，传统分散作业模式已难以适应“多测合一”政策的实施需要。测绘单位需要在一次进场过程中完成多类型数据采集，在统一平台上实现成果编制与共享流转，技术层面的变革势在必行。深入分析“多测合一”背景下不动产测绘技术的发展路径，对于推动行业转型升级具有重要的现实意义。

1 “多测合一”与不动产测绘技术概述

1.1 “多测合一”政策内涵与目标

“多测合一”政策的出台源于对传统测绘管理模式的深刻反思。长期以来，建设项目在推进过程中需要面对规划核实、土地复核、房产测量等多个环节的测绘要求，各职能部门分别委托、分头实施，企业因此承担了大量重复性测绘工作，增加了时间成本和资金支出。“多测合一”改革的核心在于将原本分散的测绘事项予以整合，推行统一委托、联合作业、成果共享的工作模式。该政策的首要目标是打破部门之间长期存在的信息壁垒，建立一套统一的技术规范体系，让同一批测绘成果能够满足国土、住建、规划等多个部门的审批需要。从更深层次来看，该项改革并非仅着眼于测绘流程本身，而是“放管服”改革理念在测绘领域的具体落实，根本目的在于减轻企业负担、压缩项目审批时限、优化地方营商环境。

1.2 不动产测绘技术发展现状

不动产测绘技术在近年来经历了从传统手工作业向数字化测绘的深刻转变。全站仪、卫星定位接收机作为基础测量工具目前仍在广泛使用，同时三维激光扫描、无人机航测、倾斜摄影等新兴技术也逐步得到推广，测绘作业的效率和精度都有了明显提升。计算机辅助制图软件的普及使图纸绘制变得更加便捷，地理信息系统的深入应用则使测绘成果的存储、查询、分析更加高效。然而，当前行业发展仍受到一些因素制约，各地技术标准尚未完全统一是其中较为突出的问题，不同测绘单位出具的成果在格式要求、精度等级上往往存在差异。此外，部分地区测绘信息化建设相对滞后，跨部门数据共享机制也有待健全。在“多测合一”政策持续推进的背景下，上述问题的解决尤为迫切。

2 “多测合一”背景下不动产测绘需求重构

2.1 数据采集需求变化

测绘改革的深入推进使得数据采集环节的要求发生了显著改变。在传统模式下，规划测量、地籍测量、房产测量等工作各自独立开展，不同测绘队伍在不同时间段进入同一项目现场采集数据，这种分散作业方式不仅造成人力资源的浪费，也给建设单位带来诸多不便[1]。“多测合一”政策实施后，数据采集工作开始朝着一体化方向转变，测绘作业需要在一次进场过程中同时获取满足多个部门审批要求的基础信息。采集内容因此变得更加丰富，除界址点坐标、建筑面积等常规指标外，还须涵盖规划条件核验所需的建筑高度、退让距离，以及竣工验收涉及的配套设施位置等要素。采集精度同样面临更高标准，因为同一批数据要接受不同部门的审核，任何一项指标出现偏差都可能影响整体成果的可用性。

作者简介：杨雪（1995-），女，专科，研究方向：自然资源工程—测绘工程类。

2.2 数据处理需求升级

数据采集方式的变革直接带动了后续处理环节的需求升级。“多测合一”模式下，测绘单位在单次作业中获取的数据量大幅增加，数据类型也更加多样，既包括传统的平面坐标、高程信息，又涉及影像资料、三维点云等新型数据形态。如何将这些来源各异、格式不同的数据整合成统一的成果体系，成为数据处理环节必须解决的核心问题。处理流程的复杂程度明显提升，技术人员不仅要完成基本的数据编辑、图形绘制工作，还需依据不同部门的技术规范对同一批原始数据进行差异化加工，确保输出成果符合各方要求[2]。质量控制的难度也随之加大，由于成果将被多个部门调用，数据之间的一致性检查尤为关键，任何逻辑矛盾或数值冲突都必须在提交前予以排除。数据处理软件的功能因此需要进一步拓展，传统单一用途的制图工具已难以满足实际需要。

2.3 成果输出需求转型

测绘成果的输出形式在“多测合一”背景下经历着深刻变革。以往测绘单位按照委托方要求出具相应报告即可，成果类型单一、用途明确；现在则要求形成一套综合性成果，同时满足国土、住建、规划等多个部门的审批需要。成果内容的组织方式因此发生了改变，报告编制不再局限于某一专项，而是将建设工程从开工到竣工各阶段涉及的测绘信息进行系统整合，既包含图件资料也包含属性数据，既有纸质文档也有电子文件。成果输出的标准化程度显著提高，各地陆续出台了统一的成果格式规范，对图式符号、数据结构、报告模板等都作出了明确规定，测绘单位据此编制的成果能够直接接入政务审批系统，实现在线流转。成果共享机制的建立也是重要转变之一，同一套测绘成果经审核入库后可供多个部门调用，真正实现了“一次测绘、成果共用”的改革目标。

3 “多测合一”适配型不动产测绘技术路径

3.1 智能化数据采集技术

“多测合一”对数据采集提出了更高要求，传统单一设备作业模式已难以满足一次进场、多项采集的实际需要，智能化采集技术的应用成为提升作业效率的关键途径[3]。

无人机倾斜摄影技术在大范围场地测绘中具有明显优势，为获取高质量影像数据，测绘单位应当根据项目实际情况合理规划航线参数，一般将航高设定在 80 m 至 120 m 之间，航向重叠度控制在 75% 以上，旁向重叠度保持在 65% 左右，地面分辨率宜优于 3 cm。飞行作业前需在测区内均匀布设像控点，点位间距以 100 m 至 150 m 为宜，像控点坐标采用实时动态定位技术测定，平面精度应达到 ±2 cm，高程精度控制在 ±3 cm 以内。三维激光扫描技术则更适合建筑物内部空间的精细测量，作业时扫描站点之间的距离不宜超过 15 m，相邻站点的点云重叠区域应保持在 30% 以上，以确保拼接精度；扫描分辨率可根据精度需求在 3 mm 至 10 mm 之间灵活选取。在“多测合一”采集作业技术参数的选取上，不同测绘内容对应的精度要求存在差异，具体参数设置可参见表 1。外业采集过程中，数据的实时质量检核同样不可忽视，作业人员应当利用移动终端配套软件对采集数据进行现场预处理，及时发现并补测缺漏部位，避免返工。

表 1 “多测合一”主要采集作业技术参数表

测绘内容	采集设备	平面精度要求	高程精度要求	适用场景
地籍测量	卫星定位接收机	±5 cm	±5 cm	宗地界址点测定
房产测量	全站仪、手持测距仪	±2 cm	±3 cm	建筑面积测算
规划核实	无人机、全站仪	±5 cm	±10 cm	建筑位置核验
竣工测量	三维激光扫描仪	±3 cm	±3 cm	建筑细部测量

3.2 多源数据融合处理技术

智能化采集手段的多样化带来了数据来源的多元化，如何将不同设备、不同时段获取的数据有效整合成为后续处理环节的核心任务，多源数据融合处理技术正是解决上述问题的重要手段。

坐标基准的统一是数据融合的首要前提，测绘单位在开展融合处理前应当确认各类原始数据所采用的坐标系统，将其统一转换至当地规定的平面坐标系，转换过程中需选取不少于 3 个已知控制点进行参数解算，转换残差应控制在 ±2 cm 以内。点云数据的配准处理是融合作业的关键步骤，技术人员宜先采用特征点匹配方式完成粗配准，再利用迭代最近点算法进行精配准，配准完成后相邻站点的拼接误差不应超过 5 mm。

矢量数据的叠加分析是融合处理的后续环节，技术人员应当在统一坐标基准下将地籍要素、房产要素、规划要素分图层存储，图层之间的空间关系需保持逻辑一致，界址线不得出现交叉或悬挂现象。属性信息的关联挂接也是融合处理的重要组成部分，各类要素

的编码规则应当遵循统一规范，宗地代码、房屋代码之间的对应关系须准确无误[4]。数据融合完成后，技术人员还应当开展一致性检查，重点核实不同来源数据在空间位置、几何形态上的吻合程度，发现矛盾之处需追溯原始记录予以修正。

3.3 自动化测绘成果生成技术

测绘成果的编制在传统模式下主要依赖人工操作，制图、计算、报告编写等环节耗费大量时间精力，自动化成果生成技术的引入能够显著提升成果编制效率，减少人为差错。

面积计算是不动产测绘成果的核心内容，测绘单位应当开发或引进专业计算模块实现面积的自动解算，建筑面积的计算依据层高、围护结构等参数自动判定计算规则，套内面积由系统依据户型边界自动提取边长并套用公式计算，公摊面积则按照分摊系数自动分配至各户。系统在计算过程中宜设置逻辑校验功能，当各分户面积之和与幢总面积出现偏差时自动报警提示。房产分户图的绘制同样可以借助自动化手段完成，系统应当根据户型边界自动提取外轮廓、自动标注边长尺寸、自动填写基本信息栏，图幅比例尺依据户型大小自动选取[5]。

测绘报告的自动生成需要依托预设模板实现，测绘单位应当按照当地主管部门的格式要求编制标准化模板，将项目基本信息、测绘成果数据、技术说明等内容设置为可变字段，系统从数据库中自动提取相应数值填入对应位置。成果图件的输出格式也应当实现多样化配置，系统需支持同时生成满足不同部门要求的图件样式，避免人工反复调整。成果提交前的自检功能不可或缺，系统应当内置质量检查规则库，对成果的完整性、规范性进行自动核查，将检查结果以清单形式呈现，便于技术人员快速定位问题并修改。

3.4 云端协同与共享技术

“多测合一”强调的是多部门对同一批测绘成果的共同使用，测绘单位若要满足各方在线调取、同步审核的需求，必须依托云端平台构建数据协同共享机制。云存储架构的搭建是实现远程协作的前提条件，测绘单位应当将项目数据按照统一的目录结构上传至云端服务器，并为不同角色的用户分配相应的访问权限，外业人员可在现场将采集成果实时回传，内业人员则能够同步获取最新数据开展处理工作，项目负责人随时掌握各环节进度。

在线审核功能的开发能够有效缩短成果提交至审批通过之间的时间跨度，测绘单位可将编制完成的成果以标准格式推送至政务平台接口，各职能部门的审核人员登录系统后即可在线浏览图件、核查数据，发现问题时可直接在平台上标注意见并退回测绘单位修改。版本管理同样是云端协同不可缺少的功能模块，每一次数据更新都应当自动生成版本记录，记录内容涵盖修改时间、修改人员、变更内容摘要等信息，确保任意历史版本均可追溯、可恢复。借助云端协同机制，测绘成果的流转效率将显著提升，各参与主体之间的信息壁垒也将逐步消除。

3.5 技术集成与全流程优化路径

单项技术的应用虽能在特定环节发挥作用，但要真正适配“多测合一”的整体要求，还需将各类技术手段集成为有机整体。一体化测绘平台的构建是实现技术集成的有效途径，平台应将数据采集、处理加工、成果输出、在线共享等功能模块整合于统一界面之下，各模块之间需建立顺畅的数据传递通道，使外业采集成果能够直接进入内业处理流程，内业生成成果可一键提交至共享平台，减少人工导入导出操作带来的效率损耗。

为使测绘成果在项目全周期内持续发挥价值，全生命周期管理理念应当融入平台设计之中。具体做法是为每个建设项目建立专属档案，从立项阶段的规划放线到竣工阶段的验收测量，各时期产生的测绘成果均归档保存、关联存储，后期如有变更测量需求可直接调取历史数据作为工作底图，避免重复基础性作业。

4 结束语

“多测合一”政策的全面推行为不动产测绘行业带来了深刻变革，测绘作业正在从分散走向集成、从单一走向综合。智能化采集设备的引入、多源数据融合技术的应用、自动化成果生成系统的开发、云端协同平台的搭建，共同构成了适配新政策要求的技术体系。测绘单位应当主动把握改革机遇，持续优化技术装备和作业流程，不断提升服务能力，为优化营商环境贡献专业力量。

参考文献：

[1] 周洁，连欣. 不动产测量中测绘工程技术的应用分析[J]. 数字技术与应用，2025,43(10):135-137.
[2] 刘小平. 现代测绘技术在不动产测绘中的应用[J]. 住宅与房地产，2025(21):86-88.
[3] 刘梦琳，马廷强. 测绘工程技术在不动产测绘中的应用探析[J]. 居业，2025(07):160-162.
[4] 赵书志，周克青，邓霞. 基于多测合一的不动产测绘一体化技术研究[J]. 中国高新科技，2025(06):77-79.
[5] 黄栢能. 测绘工程技术在不动产测绘中的实践应用[J]. 中华建设，2024(05):103-105.

重载膜多层共挤吹膜机组配方与工艺适用性研究

张　昭，边晨曦 *

（山东国印机械有限公司，山东 淄博 255000）

摘　要　针对重载膜多层共挤生产中膜材力学性能不稳定、生产效率偏低、废品率偏高的技术问题，开展重载膜配方筛选、多层共挤实验参数优化及适用性研究。本文采用三层共挤吹膜机组作为实验装置，筛选茂金属线性低密度聚乙烯、增强聚乙烯、低密度聚乙烯为核心组分的配方体系，优化挤出温度、吹胀比、牵引速度等关键工艺参数，通过性能测试与实际生产验证确定适用方案。研究形成适用性优良的配方与工艺组合，旨在提升生产稳定性，为重载膜多层共挤规模化生产提供技术参考。

关键词　重载膜；多层共挤吹膜机组；性能测试；生产验证

中图分类号：TQ320.66+5　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.023

0　引言

重载包装薄膜已广泛应用于石化、建材、饲料等行业领域，主要承担重型大宗物料的包装与运输功能，对膜材的力学强度、耐穿刺性能与密封性能均有较高要求。现有技术中，多数生产企业仅单独优化配方或工艺参数，忽视二者间的适用关系，导致膜材性能波动较大，难以满足高端重载包装需求[1]。本文聚焦配方组分与吹膜工艺参数的适用性核心问题，通过配方筛选、参数优化、性能测试及生产验证，构建科学合理的适用方案，弥补现有技术中适用性研究的不足，创新点在于建立三层结构重载膜配方与工艺参数的精准匹配关系，提升生产稳定性与膜材品质。

1　重载膜配方筛选与多层共挤实验参数优化

1.1　重载膜配方筛选

重载膜配方筛选以力学性能与加工性能为核心指标，确定三层共挤结构（外层、中层、内层），各层功能定位不同，配方组分差异化设计。外层需具备优良的耐磨损、耐穿刺性能，选用茂金属线性低密度聚乙烯（M-LLDPE）为基础原料，搭配增强聚乙烯提升刚性；中层作为力学支撑层，侧重拉伸强度与韧性，以M-LLDPE为主，适当添加低密度聚乙烯（LDPE）改善加工流动性；内层直接接触物料，需具备良好的热封性与爽滑性，在M-LLDPE中加入少量开口剂与加工助剂[2]。筛选过程中，控制各层原料熔体质量流动速率（MFR）匹配，避免加工过程中出现层间剥离，最终确定各层配方组分比例，确保配方整体加工性能与力学性能均衡。

1.2　多层共挤实验参数优化

实验采用三层共挤吹膜机组，机组螺杆直径35 mm，长径比30:1，口模直径80 mm。参数优化围绕挤出温度、螺杆转速、吹胀比、牵引速度四大关键参数展开，结合配方组分的加工特点，通过单因素实验确定各参数合理范围。挤出温度采用分段控制，加料段60 ℃～90 ℃，塑化段150 ℃～180 ℃，口模段170 ℃～210 ℃，适用不同层原料的熔融特点；螺杆转速控制在45 r/min～70 r/min，避免转速过高导致摩擦生热过度，或转速过低影响塑化效果；吹胀比调整为2.0～3.0，兼顾膜材横向强度与厚度均匀性；牵引速度与螺杆转速配合匹配，控制在4 m/min～8 m/min，确保泡管稳定，减少膜材纵向拉伸应力。

2　配方组分与吹膜工艺参数的适用性分析

2.1　配方组分与工艺参数适用性影响机制

配方组分与吹膜工艺参数的适用性直接决定膜材成型质量与力学性能。M-LLDPE的MFR为1.0 g/10 min，密度0.918±0.002 g/cm^3，需对应较高的塑化温度与适中的螺杆转速，确保充分熔融且不发生热降解；增强聚

作者简介：张昭（1996-），女，专科，研究方向：机械研究。
*通信作者：边晨曦（1994-），男，本科，研究方向：机械研究。E-mail：1033998416@qq.com

乙烯MFR为0.2 g/10 min～0.25 g/10 min，密度0.930±0.005 g/cm^3，加工过程中需适当提高塑化段温度，避免塑化不充分导致膜材出现杂质亮点；LDPE的MFR为0.3 g/cm^3～0.35 g/cm^3，密度0.925±0.005 g/cm^3，可改善熔体流动性，需搭配合理的吹胀比与牵引速度，避免膜材出现拉伸不均[3]。各层配方组分比例不同，对应的工艺参数需同步调整，形成配合适用关系，才能保证膜材层间结合紧密，性能稳定。

2.2 配方与工艺参数适用性实验分析

基于确定的配方体系，设计多组适用性实验，重点分析不同配方组分比例与工艺参数组合对膜材成型效果的影响，通过数据对比明确最优适用组合，如表1所示。

由表1可知，配方组分比例为50:30:20时，口模段挤出温度185 ℃、吹胀比2.2、牵引速度5.5 m/min，此时原料熔融充分，熔体流动性适中，膜材厚度均匀性较好，但拉伸强度未能达到最优；比例为70:20:10时，M-LLDPE占比提升，需提高口模段温度至195 ℃、吹胀比2.8、牵引速度6.5 m/min，才能保证原料充分塑化，膜材横向拉伸强度提升，但熔体流动性下降，易出现泡管波动；比例为60:25:15时，口模段温度190 ℃、吹胀比2.5、牵引速度6.0 m/min，配方组分与工艺参数形成良好适用，M-LLDPE的韧性与增强PE的刚性充分发挥，LDPE改善熔体流动性，泡管稳定，膜材成型质量最佳；比例为40:35:25时，增强PE占比过高，需降低挤出温度与吹胀比，牵引速度放缓，膜材刚性提升但韧性不足，适用性较差；比例为55:28:17时，工艺参数介于中间水平，适用效果中等，膜材性能波动较小但未达到最优。

表1 不同配方组分与吹膜工艺参数适用性数据表

配方组分比例（M-LLDPE: 增强PE:LDPE）	挤出温度（口模段）/℃	吹胀比	牵引速度/m·min^{-1}
50:30:20	185	2.2	5.5
60:25:15	190	2.5	6.0
70:20:10	195	2.8	6.5
40:35:25	180	2.0	5.0
55:28:17	188	2.4	5.8

3 适用方案的性能测试

3.1 性能测试方案设计

选取表1中适用效果最佳的配方与工艺组合（配方比例60:25:15，口模段温度190 ℃，吹胀比2.5，牵引速度6.0 m/min）制备重载膜样品，同时选取传统配方与工艺生产的膜材作为对照样品，开展性能测试[4]。测试参照包装用多层共挤重载膜袋相关标准，选取拉伸强度、断裂标称应变、直角撕裂强度、表面张力、热封强度五项核心指标，每项指标测试5个样品，取平均值作为测试结果，确保测试数据的科学性与准确性。测试设备选用电子万能试验机、表面张力仪、热封仪，设备精度符合测试要求，测试环境控制在温度23±2 ℃，相对湿度50±5%。

完成两组重载膜样品的平行测试后，汇总五项核心性能的测试均值，以表格形式呈现不同配方工艺体系下膜材的性能差异，如表2所示。

表2 重载膜样品核心性能测试结果对比表

测试项目	适用方案样品	传统对照样品
纵向拉伸强度（MPa）	22	18
横向拉伸强度（MPa）	18	15
纵向断裂标称应变（%）	700	600
横向断裂标称应变（%）	650	580
纵向直角撕裂强度（N/mm）	35	28
横向直角撕裂强度（N/mm）	30	25
表面张力（dyn/cm）	38	35
热封强度（N/15mm）	12	10

由表2可知，测试数据覆盖重载膜使用全场景的核心性能指标。适用方案样品的拉伸强度、断裂标称应变、直角撕裂强度均高于传统对照样品，纵向拉伸强度达22 MPa，横向拉伸强度18 MPa，断裂标称应变纵向700%、横向650%，可满足重载运输场景的抗拉伸抗形变需求。直角撕裂强度纵向35 N/mm、横向30 N/mm，适配耐穿刺使用要求。热封强度12 N/15mm，膜材表面张力38 dyn/cm，可适配印刷与复合加工需求。

3.2 性能测试结果分析

适用方案制备的膜材，纵向拉伸强度达到22 MPa，横向拉伸强度18 MPa，传统样品纵向拉伸强度18 MPa，横向15 MPa，适用方案下膜材拉伸强度显著优于传统样品，主要得益于配方组分的合理搭配与工艺参数的精准适用，M-LLDPE与增强PE的配合作用充分发挥，提升了膜材的力学支撑能力[5]。断裂标称应变纵向为700%，横向为650%，传统样品纵向600%，横向580%，适用方案有效改善了膜材的韧性，避免重载包装过程中出现断裂破损。

直角撕裂强度纵向35 N/mm，横向30 N/mm，满足重载膜耐穿刺、抗撕裂的使用需求，传统样品纵向28 N/mm，横向25 N/mm，适用方案通过优化吹胀比与牵引速度，减少膜材内部应力集中，提升撕裂性能。表面张力达到38 dyn/cm，符合热封与印刷要求，传统样品表面张力35 dyn/cm，适用方案通过合理控制挤出温度，改善膜材表面活性。热封强度达到12 N/15 mm，高于重载包装所需的8 N/15 mm标准，传统样品热封强度10 N/15 mm，适用方案优化内层配方与热封相关工艺参数，提升膜材热封可靠性[6]。各项测试结果表明，适用方案制备的重载膜性能全面优于传统方案，可满足高端重载包装的使用要求。

4 适用方案的实际生产验证

4.1 实际生产验证方案

选取某石化企业的三层共挤吹膜生产线作为验证设备，该生产线与实验所用机组规格一致，螺杆直径35 mm，长径比30:1，口模直径80 mm，具备分段温控、转速调节、张力控制等功能[7]。生产验证采用适用方案的配方与工艺参数，生产批量为5吨，生产周期为24小时，生产过程中实时监测挤出温度、螺杆转速、吹胀比、牵引速度等参数，记录生产稳定性、废品率及膜材厚度偏差等指标，同时抽样检测膜材力学性能，与实验测试结果对比，验证适用方案的工业化可行性。

4.2 生产验证结果与分析

生产过程中，各工艺参数运行稳定，挤出温度波动控制在 ±2 ℃，螺杆转速波动 ±1 r/min，吹胀比稳定在2.5左右，牵引速度保持6.0 m/min，泡管无波动、无破裂现象，层间结合紧密，未出现层间剥离问题[8]。生产废品率为1.2%，传统生产工艺废品率为3.5%，适用方案有效降低废品率，主要因为配方与工艺参数适用性良好，减少了膜材厚薄不均、破膜、褶皱等缺陷。膜材厚度控制在160 μm，厚度偏差 ±3 μm，符合重载膜厚度要求，参考相关企业减薄攻关数据，该厚度在保证性能的同时，可降低原料消耗与生产成本[9]。抽样检测50个膜材样品，纵向拉伸强度平均21.8 MPa，横向17.9 MPa，断裂标称应变纵向695%，横向645%，直角撕裂强度纵向34.8 N/mm，横向29.7 N/mm，表面张力37.8 dyn/cm，热封强度11.9 N/15 mm，测试结果与实验数据基本一致，偏差在允许范围内，说明适用方案具备良好的稳定性与重复性[10]。生产验证过程中，未出现设备故障与工艺调整需求，适用方案可直接应用于规模化生产，有效提升生产效率与产品品质。

5 结束语

本文围绕重载膜多层共挤吹膜机组配方与工艺适用性开展系统研究，解决传统生产中二者适用不足引发的膜材性能波动、废品率高、生产效率受限等问题。完成三层共挤重载膜最优组分比例筛选，优化挤出温度、吹胀比等关键工艺参数，理清配方与工艺的适用机制，经性能测试与生产验证形成适用方案。研究仍存在局限，对不同原料批次的适用性考量不够全面，未开展方案长期稳定性的跟踪验证。未来将逐步优化配方与工艺参数，拓展适用范围，结合环保趋势研发绿色重载膜配方，提升成果的适用性与推广价值。

参考文献：

[1] 尹保林,贾汝锋,刘少兵,等.尼龙1012基微层共挤复合材料的制备及其吸波性能研究[J].兵工学报,2026,47(05):341-351.
[2] 唐本州.多层共挤吹塑机膜坯内冷装置设计改进[J].金属加工(冷加工),2025(09):81-84.
[3] 布泽华,李世勇,刘金军,等.塑料吹膜机均流板位置对排气影响的仿真研究[J].中国塑料,2025,39(06):42-47.
[4] 林德坡,林洁波,陈靖栩.吹膜机组配方功能的多种实现方法介绍[J].橡塑技术与装备,2025,51(06):53-57.
[5] 孟锦涛,国海,樊晓宇,等.变论域模糊PID在吹膜机收卷张力中的应用[J].塑料,2024,53(03):21-27.
[6] 马佳圳.高性能功能化包装膜共挤吹塑先进装备研发[J].橡塑技术与装备,2024,50(12):19-24.
[7] 林洁波,孙靖寰,庄志嘉.PLC与伺服电缸推杆控制在吹膜机上的应用[J].橡塑技术与装备,2024,50(10):65-71.
[8] 刘才富,苏键.多层共挤复合膜技术研究进展[J].轻工科技,2024,40(02):108-110,113.
[9] 山西广华源药用包装有限公司.单挤出吹膜机组冷却风环的高效洁净送风装置:CN202320990098.4[P].2023-09-19.
[10] 蒋兴加,姚彩虹.塑料吹膜机监控系统设计[J].上海塑料,2023,51(02):53-57.

微通道反应器在放热反应安全控制中的技术优势

张玉中[1]，张会改[2]

（1. 山东盛起化工有限公司，山东 东营 257440；
2. 国蓝新材料（山东）有限公司，山东 东营 257237）

摘 要 微通道反应器依托其独特的结构属性，在放热反应的安全管控中展现出突出的应用价值，可妥善化解反应进程中热量集聚、温度骤升类的危险问题，保障反应推进更趋平稳可靠。其细密的流道构造能够显著增强热传导速率，迅速疏散反应生成的高热，实现对反应温度区间的精准把控。同时，微型反应空间可缩减反应介质的存留体量，削减高危介质集聚所引发的安全威胁，进一步提升反应流程的可控水平。该设备精准贴合放热反应安全管控的核心诉求，从热传导、介质管理两个关键维度充分发挥应用性能，为放热反应的平稳高效推进提供稳固的技术保障。

关键词 微通道反应器；放热反应；安全控制；热量传递；物料管控

中图分类号：TQ052 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.024

0 引言

放热反应多用于化工、医药等行业，反应进行时会不断释放大量热能，热能若不能及时疏散、温度难以稳定调控，很容易出现温度骤升、原料分解乃至爆炸等安全事件，直接危及生产秩序与人员财物安全。该类反应安全管控重点在于高效排热与精确控温，常规反应器开展这类反应时常存在热传导效能偏低、温度分布失衡、危险原料存留偏多等状况，无法适配安全管控的高标准。面向这类管控难点，微通道反应器依托构造与性能层面的特有优势，逐步在放热反应安全管控中落地使用，突破传统工艺短板的同时达成反应进程的稳定可控，为放热反应安全管控开辟新型技术路线，构建安全管控诉求与技术落地应用间的衔接载体。

1 放热反应安全控制的核心需求与现存管控痛点

放热反应安全管控围绕热能调控与原料管理展开，主要目的为规避温度骤变、原料外泄及变质等潜在风险，兼顾反应效能，在确保稳定前提下防止管控过度造成反应速度降低、资源损耗上升，达成稳定与高效的同步发展，各类放热反应因反应速度、释热总量存在区别，安全管控要求各不相同，快速排热、精确控温、原料低储量是该类反应安全管理的共同关键要求，常规反应器多选用大容量腔体方案[1]。在放热反应安全管理中表现出明显短板，热传导依靠器壁自然散热或外部冷却，换热面积与容积占比偏低、效果较差，不能迅速疏散反应产生的大量热能，易形成局部高温，造成原料变质、反应失稳，原料储存量偏高，险情出现时波及范围大、破坏程度强，温度分布紊乱，难以完成精确调控，构造适配性不足，不能依据反应实时状态改动运行指标，应对热能变化能力薄弱，无法匹配多样放热反应要求。此类管控难点的出现，多来自热传导、原料管理与反应调节三方面的欠缺，换热构造不合理造成热能集聚，原料管理缺失造成局部反应过激，反应调节反馈迟缓无法完成动态安全管控。

2 微通道反应器的结构特性及其安全管控适配性

2.1 微通道反应器的核心结构特征

微通道反应器以小尺度流道充当反应空间，流道内径多处于微米到毫米区间，整体构造紧密且组合化水平突出，流道布局多选用并列排布形式，具备较高的换热面积与容积占比，可扩大热量传导的作用区域，缩减热传输距离。为快速散热构筑构造条件，流道内部多设置专用紊流构造，可优化原料分散效果，让反应原料迅速均匀接触，规避局部原料浓度偏高引发的过激反应，流道腔体空间狭小，原料储存量处于极低水平，组合化布局利于灵活拼接与指标调节，可依据放热反应实际要求，改动反应流道数量长度及冷却模式，匹配多样放热反应的安全管理要求。

作者简介：张玉中（1974-），男，专科，研究方向：化学工程。

2.2 微通道反应器与放热反应安全管控的适配逻辑

微通道反应器的构造属性与放热反应安全管理关键要求高度吻合，适配思路围绕快速散热、精确控温及低危原料管理展开，优良的换热构造可匹配放热反应的释热节奏，及时疏散反应生成热能，从源头抑制热量集聚，防范温度失稳，狭小的反应空间可压低原料储存总量，减轻高危原料集聚形成的安全威胁，即便出现少量渗漏，也可限定危险波及范围，降低破坏等级。组合化布局与灵活的指标调节能力，可同步适配放热反应中的热能变化与原料状态转变，改动冷却力度进料速度等指标，保持反应体系平稳，实现反应进程的动态安全管理，贴合放热反应安全控制的核心诉求。

2.3 微通道反应器适配放热反应的结构优势体现

微通道反应器适配放热反应安全管理的构造优势集中表现在换热、原料管理与调节灵活度三个维度：换热层面，较高的换热面积与容积占比让热传输效果优于常规设备，可完成热能的及时疏散与均匀分布，消除反应体系内的高温区域，规避局部过热形成的安全风险。原料管理层面，狭小的流道空间将原料储存量控制在低位，减少高危原料的滞留与集聚，紊流构造推动原料均匀混合，规避局部反应过激造成的热量集中，强化原料管理的稳定程度[2]。调节灵活度层面，组合化布局可依照反应要求灵活搭配流道单元，改动反应规模与运行指标，流道构造的快速反馈特性，可及时应对反应中的热能变动，保障反应全程维持在稳定可控区间。

3 微通道反应器在放热反应安全控制中的核心技术优势

3.1 高效传热能力提升温度控制安全性

微通道反应器出众的换热性能为放热反应温度管控筑牢安全根基，特殊流道构造让热能传导效能实现跨越式增强，相比常规反应设备换热面积与容积占比可提升数倍以上，热传输距离缩减至微米尺度，热能可快速从反应体系转移至冷却介质，防范热能集聚，反应阶段冷却介质可与反应流道紧密贴合。借助对流换热模式完成热能快速疏散，将反应温度浮动控制在狭窄区间内，防止温度偏高造成原料变质反应失稳等安全状况，这类优良换热性能可适配强放热快速率类反应，即便反应释热猛烈也可维持温度稳定，为放热反应安全实施提供关键支撑。

3.2 低持液量特性降低安全风险基数

微通道反应器原料低储量特质从根源压缩放热反应安全风险等级，成为区别于常规设备的关键安全亮点。流道尺寸细小使得单一流道原料承载量极低，设备整体原料容纳量远低于常规反应器，即便出现反应失稳或原料渗漏，参与反应的高危原料总量有限，也可限制危险蔓延范围减轻事故造成的损害。原料低储量也缩短介质在设备内的滞留时长，减少高危原料在体系内的集聚，降低原料变质交联等副反应出现概率，增强反应进程的安全程度。原料低储量还可提升反应体系反馈速度，反应指标出现异常时可快速调节原料供给与冷却条件，及时阻止危险状况扩大。

3.3 精准调控能力强化过程安全可控性

微通道反应器拥有优异的精细调节能力，可通过多维度指标改动增强放热反应进程的安全可控水平，组合化构造支持灵活更改反应流道数量长度与布局形式，适配不同释热强度不同反应速度的放热反应要求，可通过精确管控原料供给速度冷却介质流量与温度[3]，实现反应温度原料浓度的精细调节，保证反应维持在最优安全状态，流道内部紊流构造让原料分散更均匀，避免局部原料浓度偏高反应过激造成的热能集聚，提升反应进程的平稳性，微通道反应器可与智能控制系统联动，完成反应指标的实时监控与自动调节，快速应对反应中的异常变动，最大程度守护反应安全。

4 微通道反应器在放热反应安全控制中的应用优化路径

4.1 通道结构的针对性优化设计

面向各类放热反应的安全管控要求，对微通道反应器流道构造开展定向改良设计，可进一步强化安全管控效能。针对强放热类反应，可增设反应流道数量、减小流道截面尺寸，持续拓展换热区域，增强热能传导效率，保障反应热能快速疏散。同步改良流道内部紊流单元的形态与布局方式，优化原料分散状态，防止局部区域热能过度聚集。针对反应速度平缓、释热强度较低的反应，可适度扩大流道截面、增加流道延伸长度，在筑牢安全防线的基础上提升反应转化效率。结合反应介质的腐蚀性能、流动黏度等属性选用适配的流道材料，防止介质侵蚀流道造成渗漏问题，增强整体构造的稳定程度，满足多样放热反应的安全管控标准。

4.2 冷却系统的协同适配优化

冷却体系的协同匹配改良是释放微通道反应器换热优势、守护放热反应安全的核心环节，需依据放热反应的释热规模、温度管控标准搭建匹配的冷却体系，选用合适的冷却介质与换热形式，保证冷却力度与热能释放速度相互契合。针对高放热反应可采用逆向换热模式提升冷却效果，同时加大冷却介质循环通量，维持反应温度处于安全区间内。针对温度管控精度要求严格的反应可采用恒温冷却装置，实时追踪冷却介质温度。借助自动调节流量实现温度精细管控，在冷

却体系中增设缓冲构件，应对反应进程中的热能波动，避免冷却体系响应迟缓引发温度失稳，达成冷却体系与反应器的协同升级，增强安全管控水平。

4.3 操作参数的动态调控优化

依托微通道反应器运行指标的动态调节优化，可持续增强放热反应进程的安全可控性，适应反应进程中的实时变动，结合温度、压力、原料浓度等核心指标的实时监测信息，灵活调整原料供给速度、冷却介质流量与温度等运行指标，维持反应体系的安全稳定状态[4]。针对反应起始、中间、收尾阶段的释热差异制定分级指标管控方案，反应起始阶段合理管控供给速度，防止热能快速聚集，反应中期依据释热变动调整冷却力度，反应末期逐步放缓进料速度，保障反应平稳收尾。搭建运行指标优化模型，结合反应特征预判指标变化趋势，实现指标精准预判与动态调节，最大程度削减安全隐患。

5 微通道反应器在放热反应安全控制中的应用价值与实践导向

5.1 微通道反应器的安全应用价值体现

本文围绕连续流微通道反应器的发展背景、应用局限、创新设计及应用成效展开研究，分析连续流技术的工业化趋势及微通道反应器的技术特性，指出其在高黏度含固体系适应性、多相传质效率、工业化放大及非稳态反应适应能力方面的局限。针对这些问题，提出抗堵塞通道设计、传质强化结构优化、模块化集成及动态调控等创新方案，验证其在复杂物料处理、反应效率提升、工业化稳定性及经济性上的显著成效，为微通道反应器在精细化工与制药领域的应用提供新路径[5]。结合上述创新设计与应用成效，微通道反应器在放热反应安全控制中的应用价值集中于安全保障、效率提升与风险管控，其高效传热、低持液量及精准调控优势可破解传统反应器温度失控、物料累积等隐患，减少安全事故，同时降低副反应、强化风险管控，为相关领域放热反应安全高效生产提供支撑。

5.2 微通道反应器的实践应用注意事项

在微通道反应器应用于放热反应安全控制的实践过程中，需关注多个关键事项以充分释放其安全优势。结合放热反应的具体特性，合理选取微通道反应器的类型与规格，杜绝因选型偏差导致安全管控效果大打折扣。重视流道的清洁与日常维护，定期清理流道内的原料残留，防止残留物料堵塞流道、影响热传导效率，进而引发局部过热等安全隐患。强化运行指标的监测与管控，搭建完善的监测体系，实时跟踪反应温度、压力、原料流量等核心指标，及时排查并处理指标异常，遏制危险态势蔓延。同时，注重操作人员专业培训，确保其熟练掌握设备操作流程与应急处置方法，提升突发安全事件应对能力，保障实践应用的安全性与稳定性。

5.3 微通道反应器的应用发展方向

微通道反应器在放热反应安全控制中的应用发展，将朝着高效化、智能化、多元化方向稳步推进。高效化层面，将持续优化流道构造与热传导方式，提升热能传递效率与原料混合效果，适配更高释热强度、更快反应速率的放热反应，同时降低能耗损耗，实现安全与高效的深度融合。智能化层面，将融合物联网、大数据等先进技术，构建智能化监测与调控体系，实现反应指标的实时监测、精准预判与自动调节，提升反应过程智能化安全管控水平，减少人为操作干预。多元化层面，将拓展设备应用场景，适配不同行业、不同类型的放热反应，同步研发多功能一体化微通道反应器，整合反应、分离、冷却等功能，提升放热反应生产的安全性与集成化水平，为放热反应安全控制提供更全面的技术支撑。

6 结束语

本文围绕微通道反应器在放热反应安全控制中的技术优势展开系统探讨，明确其依托高效传热、低持液量、精准调控等核心特质，有效突破传统反应器在放热反应安全管控中的短板，满足放热反应快速散热、精确控温、低危原料管理的核心诉求。通过流道构造优化、冷却系统匹配与运行参数调节，可进一步增强微通道反应器的安全管控效能。在守护放热反应安全的同时，实现反应效能与产品品质的同步提升。其应用价值已在实践中逐步彰显，未来依托技术创新与应用拓展，将为各类放热反应安全、高效、绿色生产提供更稳固的技术支撑，推动相关行业安全升级与高质量发展。

参考文献：

[1] 张晓明，杜笑仪，陈名坤．液相氧化微反应器在对苯二甲酸合成中的应用 [J]. 山西化工，2025,45(12):208-210.

[2] 周勇，高华，李泽南，等．基于微通道反应器的西罗莫司白蛋白纳米粒连续化制备及性能评价 [J]. 中国新药杂志，2026,35(06):632-637.

[3] 杜芳琼，王渊，吴秋莹，等．微通道反应器中合成 (S)-1-(2- 氯乙酰基) 吡咯烷 -2- 甲酸工艺研究 [J]. 化学研究与应用，2025,37(12):3836-3842.

[4] 纪璐，李书龙，邢久歌，等．微通道连续流工艺在日落黄合成中的应用 [J]. 染料与染色，2025,62(05):8-11.

[5] 杨超，黄诗佳，苏文献．高通量碳化硅微通道反应器内流动传热数值模拟 [J]. 化工与医药工程，2025,46(05):1-7.

装配式温室大棚结构与设备一体化施工技术研究

李玉杰[1]，黄永鹏[2]

（1. 山东华亮建设工程有限公司，山东 潍坊 262500；
2. 山东华亮重工机械有限公司，山东 潍坊 262500）

摘 要 针对传统温室大棚施工存在的工序串行脱节、结构与设备衔接性差、施工周期长、现场湿作业多、运维管控难度大等核心问题，本文系统构建了装配式温室大棚结构与设备一体化施工技术体系，明确了一体化协同设计的核心原则与全流程施工工序，细化了基础工程、钢结构装配、围护结构施工、机电管线预埋、设备集成安装、系统联合调试的关键技术要点，建立了覆盖施工全周期的质量控制与安全管理体系，分析了该技术的综合应用效益与未来优化方向，以期为装配式温室大棚的标准化、规模化建造提供参考。结果表明，该技术可实现主体结构施工与配套设备安装的并行推进，有效缩短施工周期 40% 以上，降低工程综合造价 15% ~ 20%，同时显著提升温室结构稳定性、环境密封性与智能设备运行效能。

关键词 装配式温室大棚；结构与设备一体化；装配式施工；钢结构装配式安装技术；围护结构

中图分类号：S625 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.025

0 引言

装配式温室大棚是现代设施农业的核心载体，结构与设备一体化施工是实现温室建造标准化、装配化、智能化的关键环节。本文围绕装配式温室大棚结构与设备一体化施工技术展开系统研究，明确一体化施工的核心体系、协同设计原则、全流程施工工序与关键技术要点，建立配套的质量控制与安全管理体系，分析技术应用的综合效益与未来优化方向，形成完整的装配式温室大棚一体化施工技术规范，为同类工程建设提供技术参考。

1 装配式温室大棚一体化施工核心体系

装配式温室大棚结构与设备一体化施工的核心，是在设计阶段实现主体结构与配套设备的统筹规划，在施工阶段实现结构装配与设备安装的同步推进，打破传统“先结构、后设备”的串行施工模式，实现设计、生产、施工、调试全流程的协同管控。其核心体系分为主体结构体系与配套设备系统两大模块，两大模块在设计阶段完成模数匹配与接口预留，在施工阶段实现同步安装与精准对接。

1.1 主体结构体系

装配式温室大棚主体结构采用全螺栓连接的热镀锌钢结构体系，全程无现场焊接作业，保障结构防腐性能与装配效率，主要分为基础体系、承重骨架与围护结构三个子单元。

基础体系采用预制混凝土构件，分为预制条形基础与预制独立基础两类，构件强度等级为 C25 ～ C30，预制阶段同步完成地脚螺栓、连接预埋件的精准定位，替代传统现浇作业，基础设计需满足温室抗风荷载、雪荷载与抗震设防的相关标准要求。

承重骨架为温室的核心受力结构，主立柱采用 100 mm×100 mm×3.5 mm 热镀锌方管，屋面拱架采用 Φ48 热镀锌圆管或 32 mm×20 mm 热镀锌椭圆管，拱架间距控制在 0.8 m ～ 1.2 m，通过纵向拉杆、横向桁架、竖向斜撑的组合连接，形成空间稳定受力体系。骨架预制阶段同步完成设备支座、管线通道、固定点位的预留加工，避免现场开孔破坏结构防腐层与受力性能[1]。

围护结构是温室保温与密封性能的核心载体，分为复合保温板墙体、PO/PE 薄膜、PC 阳光板、钢化玻璃四类，全部采用卡槽卡簧、螺栓连接的装配式固定工艺，替代传统现场粘接压实工艺，保障围护密封性与拆装便捷性。

1.2 配套设备系统

一体化施工需同步集成五大核心设备系统，在设计阶段完成各系统与主体结构的模数匹配与接口预留，

作者简介：李玉杰（1987-），女，专科，研究方向：建筑设备。

施工阶段与结构装配同步完成管线铺设与设备安装，实现结构与设备的深度融合。

环境调控系统，含风机湿帘、电动卷膜器、内外遮阳、加温降温、环流风机等设备，为温室环境调控的核心执行机构；智能传感系统，含空气温湿度、光照强度、CO_2浓度、土壤温湿度、土壤EC值传感器等，是温室智能调控的信号采集单元；水肥一体化系统，含滴灌/喷灌管路、智能施肥机、叠片过滤器、变频水泵等，实现作物灌溉与施肥的精准管控；电气与控制系统，含强弱电管线、智能控制柜、远程监控模块等，是整个温室系统的控制中枢；辅助系统，含排水槽、防虫网、保温被、植物补光灯等，为温室稳定运行提供配套保障[2]。

2 一体化施工协同设计原则与总体流程

2.1 一体化协同设计核心原则

协同设计是一体化施工的前提，需以“模数统一、结构适配、工序协同、运维友好”为核心原则，实现主体结构与设备系统的深度融合。

模数统一原则，主体结构构件尺寸、设备安装间距、管线走向布局采用统一模数标准，减少现场二次加工，降低材料损耗，提升装配效率；结构适配原则，承重骨架设计阶段同步完成管线穿设通道、设备安装支座、传感器固定点位的设计，所有预留点位与设备参数精准匹配，避免后期结构改造；工序协同原则，深化设计阶段明确结构装配与设备安装的工序衔接节点，实现两大工序的穿插并行，最大化压缩施工总工期；运维友好原则，设备检修口、控制阀门、电气控制柜的布局兼顾安装便捷性与后期运维需求，预留充足的检修空间，降低后期运维难度。

2.2 一体化施工总体流程

装配式温室大棚结构与设备一体化施工采用“工厂预制、现场装配、同步集成、联合调试”的核心模式，全流程核心工序为：施工准备与场地放线→预制基础施工与预埋件同步预埋→钢结构立柱与桁架装配→纵向支撑与檩条安装→围护结构装配式施工→机电管线与水肥管路同步铺设→环境调控与智能传感设备集成安装→智能控制系统接线与全系统联合调试→竣工验收。

相较于传统串行施工模式，一体化施工实现结构装配与设备安装穿插并行，大幅压缩总工期，同时避免后期设备安装对成型结构的破坏。

3 一体化施工关键技术要点

3.1 基础工程与预埋一体化施工技术

基础工程是一体化施工的起始环节，核心控制要点为预埋件的定位精度与管线预埋的同步性。采用预制混凝土条形基础时，先按设计轴线完成场地平整与沟槽开挖，沟槽宽度400 mm、深度500 mm，沟槽底部铺设100 mm厚碎石垫层并压实，垫层压实系数不低于0.93。预制基础构件吊装就位后，按轴线精准定位预埋钢板与地脚螺栓，螺栓外露长度控制在150 mm～200 mm，轴线偏差≤±3 mm，标高偏差≤±5 mm，采用细石混凝土对基础缝隙进行灌注封堵。

基础施工阶段同步完成给排水主管、电缆护管、传感器引线管的预埋作业，预埋管口采用密封胶带防护，防止砂浆堵塞；管线走向、坡度按设计执行，强弱电分离布设，间距不小于300 mm，避免电磁干扰。待基础混凝土强度达到75%设计强度后，方可开展上部钢结构装配作业，保障结构承载安全。

3.2 钢结构装配式安装技术

钢结构安装遵循“从下到上、分跨成型、及时加固”的原则，具体安装顺序为：立柱吊装就位→立柱垂直度校正→底板双螺母固定→屋面桁架安装→纵向拉杆连接→斜撑与檩条加固。立柱吊装采用汽车吊单点起吊，就位后采用双向线坠校正垂直度，垂直度偏差控制在1/1 000柱高以内，全高偏差不超过10 mm，校正完成后采用双螺母锁紧固定，同步安装弹簧垫圈防止螺栓松动。

构件连接全部采用热镀锌高强度螺栓，终拧扭矩45 N·m～50 N·m，螺栓外露丝扣不少于2扣，节点无松动虚接。每完成3跨安装，及时设置横向支撑与竖向斜撑，形成稳定受力单元，抵御风荷载变形。钢结构装配过程中，同步完成遮阳电机支座、风机安装支架、传感器固定支架的预装作业，支架与钢结构骨架采用螺栓一体化固定，保障设备安装的结构稳定性。

3.3 围护结构与密封一体化施工技术

围护结构的施工质量直接决定温室的保温性能与设备运行效率，采用全装配式密封施工工艺，杜绝冷热桥与渗漏隐患。薄膜围护选用12～15丝PO防老化膜，纵向张拉后用卡槽卡簧固定，张拉均匀无褶皱破损，边缘预留5%伸缩余量，四角加强固定。复合保温板墙体采用企口拼接工艺，板缝采用中性硅酮密封胶填缝密实，外侧做防水处理，内侧与骨架螺栓固定，杜绝冷热桥产生[3]。

天窗、侧窗安装采用三元乙丙橡胶密封条，启闭间隙控制在3 mm以内，保障通风可控性与保温效果。天沟与钢结构骨架一体化装配，纵向坡度设置不小于5‰，落水口与排水管采用密封胶圈柔性连接，接缝处

做防水处理。围护结构施工完成后，需进行密封性专项检查，重点排查板缝、门窗、天沟等关键节点，发现隐患及时修补。

3.4 机电管线预埋与同步铺设技术

强弱电管线、水肥管路与主体结构施工同步开展，实现管线暗敷一体化，杜绝管线外露造成的老化、破损问题。电气管线采用 PVC 阻燃穿线管，沿立柱、桁架内侧暗敷，固定点间距不大于 1 m，强弱电分槽布设，屏蔽线缆单独穿管。接地装置与基础同步施工，联合接地电阻≤ 4 Ω，智能控制柜预留标准化接口。

水肥管路采用HDPE食品级管材，主管采用 Φ63 mm～75 mm 管材，支管采用 Φ25 mm ～ 32 mm 管材，管路沿骨架底部固定安装，固定点间距不大于 0.8m。管路系统安装完成后进行水压试验，试验压力为 0.3 MPa，保压 30 min 压力降不大于 0.05 MPa、无渗漏为合格，管路首端安装 120 目叠片过滤器防止滴头堵塞。智能传感器引线隐藏于骨架预留通道内，安装点位离地高度 1.5 m，避开风口与阳光直射区域，保障数据采集精度 [4]。

3.5 环境与水肥设备集成安装技术

环境调控设备与结构施工同步安装，风机湿帘对称布置于两山墙，基座与预埋件固定，接缝密封严密；内外遮阳系统采用齿轮齿条驱动，导轨水平度偏差≤ 3 mm，行程限位精准，运行无卡滞。电动卷膜机、加温设备安装固定牢固，水肥系统施肥机与管路采用法兰柔性连接，阀门仪表布设便于操作读数。

3.6 智能控制系统一体化调试技术

智能控制系统调试分为单点、联动、远程三个阶段。单点调试逐一校验各执行机构动作准确性；联动调试按作物生长需求设定环境参数阈值，验证系统自动调控逻辑；远程调试接入物联网云平台，实现远程监控、数据存储与异常报警。调试完成后校准传感器，温度误差≤ ±0.5 ℃，湿度误差≤ ±5% RH，保障调控精度。

4 一体化施工质量控制与安全管理体系

4.1 全流程质量控制要点

建立“进场检验—过程管控—竣工验收”三级质量控制体系，实现施工全流程的质量闭环管控。构件进场全数检验，核查合格证与检测报告，钢结构镀锌层厚度≥ 85 μm，尺寸符合《温室钢结构安装与验收规范》（NY/T 1832）要求，预制构件外观无缺陷，不合格品严禁进场。

过程管控阶段，对基础预埋件精度、立柱垂直度、拱架弧度、天沟坡度、设备安装水平度进行全程跟踪检测，每道工序完成后经自检、互检、专检合格后方可进入下一道工序，重点管控钢结构连接节点、围护密封节点、管线接口、设备固定点位的施工质量，发现隐患立即停工整改 [5]。

竣工验收阶段，对温室结构稳定性、围护密封性、设备运行性能、系统调控精度进行全面检测，结构抗风、抗雪荷载性能满足设计要求，温室内部温度场均匀度不低于 85%，水肥灌溉均匀度不低于 90%，智能控制系统响应时间不大于 5 s，所有指标合格后方可完成竣工验收。

4.2 全过程安全施工管理规范

建立全过程安全管理体系，落实安全生产责任制，作业人员经培训合格上岗，特种作业人员持证上岗。高空作业规范佩戴安全带，搭设操作脚手架，严禁高空抛物；电气作业严格执行停送电制度，设备做好接地保护，雨天停止室外电气与高空作业；构件吊装设置警戒区，专人指挥，严禁超载吊装。现场易燃材料分类存放，配备足量消防器材，每日施工完成后切断临时电源，排查安全隐患。

5 结束语

装配式温室大棚结构与设备一体化施工技术，通过设计、生产、施工、调试全流程的统筹协同，实现了温室主体结构与环境调控、水肥一体化、智能控制等系统的深度融合，有效解决了传统温室建造过程中施工效率低、质量离散性大、结构与设备脱节、运维难度高等核心问题。该技术具备工期短、造价低、性能优、绿色环保等显著优势，可适配多种温室类型，符合现代设施农业标准化、智能化、绿色化的发展趋势。

参考文献：

[1] 朱明野,尹喜慧.装配式钢结构建筑工程施工技术研究与应用 [J].建筑机械 ,2024(09):70-75.
[2] 李清丽,徐栋栋,李蕊.装配式建筑预制构件中照明设备集成化施工技术研究 [J].中国照明电器 ,2025(09):71-75.
[3] 袁春鹏.装配式建筑施工技术要点分析 [J].淮北职业技术学院学报 ,2025,24(01):109-112.
[4] 石志永.大棚蔬菜种植技术及病虫害防治 [J].种子科技 ,2025,43(09):149-151.
[5] 杨婧暄.我国农业大棚现状及未来发展趋势 [J].种子科技 ,2023,41(14):142-144.

装配式建筑绿色施工及建材选型体系的构建与实施路径

田道方[1]，庞　超[2]

（1. 山东元方泰项目管理有限公司，山东 济南 250400；
2. 龙口市龙族建业有限公司，山东 烟台 265701）

摘　要　在“双碳”目标的引领下，装配式建筑作为建筑行业实现绿色转型的关键载体，其绿色施工以及建材的选择直接关联建筑整个生命周期的环保成效、节能以及工程品质。本文结合装配式建筑施工具备的特点，剖析绿色施工以及建材选型的核心需求，搭建科学完善的选型体系，明确体系构建的核心准则与关键部分，提出切实可行的实施途径，处理当下装配式建筑施工中的问题，以期为推动装配式建筑行业实现节能、环保、低碳的高质量发展提供借鉴。

关键词　装配式建筑；绿色施工；建材选型

中图分类号：TU741；TU5　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.026

0　引言

随着国内建筑行业转型升级的持续加快，绿色低碳已成为行业发展的必然趋势。装配式建筑依靠构件在工厂进行预制、在现场开展装配施工等有利条件，切实减少了施工现场作业产生的污染，并且降低了资源的消耗，成为达成建筑绿色发展目标的关键途径。目前，我国装配式建筑的发展已经步入规模化的阶段，但在绿色施工环节中依旧存在问题。搭建具备科学性与合理性的装配式建筑绿色施工以及建材选型的体系，探寻具备可行性的实施途径，对促进建筑行业朝着绿色方向转变、达成“双碳”目标，具有重要的现实价值，同时也能为装配式建筑工程的实际操作提供有力的支持。

1　装配式建筑绿色施工核心要求

装配式建筑的绿色施工把“节能、环保、低碳、高效”作为关键要素，与传统的现浇施工模式有差异，其核心要求是围绕整个施工流程推进的同时，注重资源利用、污染管控以及施工效率的协同提高。在开展施工工作时，必须严格把控能源的消耗，对施工工艺进行优化处理，减少电力以及水资源的不必要损耗。优先选用具备节能特性的施工设备和技术手段，降低施工阶段产生的碳排放量。着重加强施工污染的管控工作，根据构件运输、现场装配以及垃圾处理等关键环节，应采取切实有效的防尘、降低噪声、治理污水等措施，防止对周边的生态环境产生不良影响[1]，达成施工过程与生态环境的和谐共处，推动装配式建筑施工朝着绿色、集约的方向迈进。

2　装配式建筑建材选型体系构建

2.1　构建原则

构建装配式建筑建材选型体系时，必须遵循四个关键核心原则，保证选型具备科学性与合理性，并且契合绿色发展的相关要求。（1）环保性原则：选择的建材要符合国家制定的环保标准，应优先挑选具有低污染、低排放特点且能回收利用的绿色建材，减少建材在生产以及使用过程中对环境造成的破坏。（2）节能性原则：建材需要拥有良好的节能性能，能在建筑使用阶段切实降低能源的消耗，如具备保温隔热功能的建材、节能门窗等，有助于建筑达成节能的目标。（3）经济性原则：在达成环保以及节能要求的前提下，需要同时考量建材的性价比，对建材成本进行合理把控，防止过度追捧高端建材造成工程成本显著上升。（4）适配性原则：建材的选型要和装配式建筑的结构样式、施工技术契合，保证建材的性能能符合工程质量与施工安全要求，维护建筑结构的稳固性与耐用性。

2.2　核心内容

装配式建筑建材选型体系的关键内容包含四大类别，分别是主体结构建材、围护结构建材、保温隔热

作者简介：田道方（1974-），男，本科，工程师，研究方向：建筑工程。

建材以及辅助建材。建筑的核心支撑为主体结构建材，如预制混凝土构件、钢结构构件等会被优先选用，该类建材具备强度较高、耐久性佳、可进行预制化生产的优势，能削减现场的施工量，提高施工的效率。围护结构建材要同时顾及保温、隔热、防水等性能，如预制墙板、节能砌块等可以被选用，其既能满足建筑使用功能要求，又可以降低能源的消耗。保温隔热类的建筑材料应挑选具备较低导热系数、良好防火性能的材料，如挤塑成型的板材、由岩棉制成的板材等，能切实地增强建筑物在保温与隔热中的功效，减少空调设备运行以及采暖过程中消耗的能源。辅助性的建筑材料涵盖了密封用途的材料、起到黏结作用的材料等，该类材料需要选用具有环保特性、耐用品质且适配性能较强的产品，保证建筑构件间连接的密封性以及牢固程度，为工程项目的质量提供可靠保障[2]。

2.3 体系框架

装配式建筑建材选型体系的框架被划分成三个层级，构成了“目标层—准则层—指标层”的完整架构。目标层清晰地界定了建材选型的关键目标，也就是达成绿色环保、节能高效、品质可靠以及成本合理的效果，为选型工作提供整体的导向。准则层是围绕构建原则，铺陈涵盖环保性、节能性、经济性、适配性四项主要准则，准则充当了建材选型的核心评估依据。指标层为准则层的具体细致化呈现，包含了建材的污染物排放指标、节能性能指标、成本相关的指标以及适配性能相关的指标等内容，每一个指标都清晰地确定了具体的评价准则以及检测办法，保障选型过程具备可量化性与可操作性。借助框架能以系统的方式规范建材选型的流程，避免选型出现盲目状态，保证选择的建材契合装配式建筑绿色发展的需求。

3 装配式建筑绿色施工的问题和实施路径

3.1 存在的问题

施工工艺优化存在欠缺，一些施工单位没有结合装配式建筑的特性优化施工流程，构件运输路线的规划不合理，且现场装配缺少信息化的支持，目前仍存在湿作业数量过多、构件出现损坏以及浪费等问题。现场管控存在不足，环保管控只是表面形式，对扬尘、噪声的治理不彻底，资源消耗的台账不规范，节能降耗的措施并未落到实处，绿色技术的推广较滞后，大多数中小施工企业难以引入 BIM、建筑垃圾回收利用类先进技术，可再生能源的应用比率较低，传统施工模式依旧占据主导地位，未能充分发挥各个实施路径的绿色效能，与绿色施工的核心要求存在一定差距。

3.2 优化施工工艺

实现装配式建筑绿色施工的关键在于优化施工工艺，需要结合装配式建筑构件预制以及现场装配的特性，对施工流程开展系统性的优化工作。构件运输环节，要科学地规划运输路线，选用具备节能环保特性的运输车辆，降低运输过程中的能源消耗以及尾气排放。要妥善做好构件的防护举措，防止因构件损坏造成材料的浪费。在现场装配环节，可运用信息化的施工技术，如 BIM 技术，对构件的装配过程进行模拟操作，对装配顺序优化，减少现场作业耗费的时间以及人力的投入，提升施工的效率[3]。对绿色施工工艺推广，如干法施工、免焊接连接类工艺，削减现场的湿作业量，让施工污染得以降低。减少水资源以及建材的浪费现象，达成施工过程的绿色化目标。

3.3 强化现场管控

现场管控的强化是确保绿色施工得以有效落实的关键途径，要构建完备的现场管控体系，清晰界定管控职责，详尽细化管控办法。环保管控领域，安排专门的环保管理工作人员，针对施工现场产生的扬尘、噪声、污水类的污染物开展实时的监测与治理工作，运用洒水来降低扬尘、采用隔音设施进行噪声隔离、实施污水净化等举措，保证施工造成的污染符合国家规定的环保标准。在资源管控范畴，创建资源消耗的记录账本，对施工过程中电力、水资源、建筑材料等资源的消耗展开严格的统计与管控，拟定节能并降低消耗的措施，削减资源的不必要浪费。安全管控范畴，着力强化针对施工人员的安全培训工作，对施工操作流程规范化处理，确保构件装配进程的安全性，规避因安全事故引发的工程延误以及资源的无端耗费，保障绿色施工能平稳且有序地向前推进。

3.4 推广绿色技术

推广绿色施工的技术，是促使装配式建筑绿色施工水平得以提升的关键支撑要素。要依据工程的实际，积极地引入具备先进性的绿色施工技术以及相关设备。BIM 技术作为装配式建筑施工领域的核心性技术，能实现施工整个过程的可视化管理模式，对施工方案进行优化，削减施工过程中出现的误差，让施工效率以及工程质量得到提高，减少建筑材料的浪费现象以及能源消耗。要大力推广太阳能、风能类可再生能源，在施工现场的应用，用其替代传统的化石能源，降低施工阶段产生的碳排放量[4]。引入建筑垃圾回收利用的技术手段，针对施工进程中产生的建筑垃圾开展分类、破碎以及再加工的操作，将其应用于道路基层铺设、

做回填材料等用途，使资源利用率提高，实现废弃物的资源化有效利用。

4 装配式建筑建材选型的问题实施路径

4.1 存在的问题

选型机制存在欠缺，一部分企业并未组建专业的选型小组，选型流程不规范，缺少系统的调研、检测以及方案对比等操作，致使选型工作带有较大的盲目性。质量管控存在漏洞，在建材采购环节，并未对供应商进行严格筛选，进场检验成了表面形式。部分不符合标准的绿色建材进入施工现场，存储和采取环节的防护措施不完善，对建材性能的发挥造成影响。在协同配合中存在明显不足的问题，设计方、施工方以及建材供应商彼此间欠缺高效的沟通交流，设计工作和选型工作相互脱离，未能紧密结合。在施工过程中，建材的供应环节和使用环节衔接得不顺畅，各方难以凝聚成一股强大的合力，对选型体系的有效落地形成了制约，同时也使工程成本增加，施工难度进一步加大。

4.2 建立选型机制

构建科学且完善的建材选型机制，是保障建材选型具备合理性的根基。其一，组建专门性的建材选型小组，该小组由设计、施工、监理等多个层面的人员共同构成，清晰界定各成员的职责，协同推进选型工作[5]。其二，拟定详尽的建材选型流程，此流程涵盖建材调研、性能检测、方案对比、优化确定等诸多环节，保证选型过程规范且有序。建材调研阶段，广泛收集各类绿色建材的相关信息，如性能、价格、环保指标等内容。在性能检测阶段，对备选建材开展严格的性能检测工作，保证其契合选型体系的指标要求。方案对比阶段，针对不同的建材方案，从技术、经济、环保等多个维度进行对比，挑选出最优方案，确保建材选型科学且合理。

4.3 加强质量管控

强化建材质量的管控工作，是确保装配式建筑工程质量以及绿色性能的核心。建材采购阶段要严格地对供应商进行筛选，优先挑选具备绿色建材认证、拥有良好信誉，且具备较强实力的供应商，签订采购合同，清晰地规定建材的质量标准以及环保的要求。在建材进入施工现场的环节，需构建一套严格的进场检验机制，针对进场建材的性能、环保指标等内容开展抽样检测工作，禁止不合格的建材进入施工现场，并投入使用。建材的存储以及使用阶段，切实开展好建材的存储防护工作，防止建材因受潮、损坏致使其性能受到影响。严格依照施工规范以及设计要求运用建材，保证建材的使用契合选型体系的相关要求，让建材的绿色性能与使用功能得以充分展现[6]。

4.4 强化协同配合

积极增强设计方、施工方、建材供应商三者间的协同合作，是促使建材选型体系得以有效落实的关键保障。在设计环节，设计工作者要依据装配式建筑的具体结构样式以及绿色施工的相关要求，预先清晰地明确建材选型的大致方向与具体标准，防止出现设计和建材选型相互脱离的问题。在施工环节施工企业要及时和设计单位、建材供应商进行沟通交流，反馈在整个施工过程中建材使用时出现的各类问题，优化建材使用方案。建材供应商要配合施工单位，提供有关建材的技术的支持以及售后的服务，保证建材的供应和使用能顺利地向前推进。借助多层面的协同与配合凝聚力量，保证建材选型体系能切实地落实，让装配式建筑的绿色优越性得以充分展现。

5 结束语

装配式建筑绿色施工以及建材选型体系的搭建与施行，是促使建筑行业朝着绿色方向转变、达成“双碳”目标的关键行动。本文结合装配式建筑当下的发展趋势，确定了绿色施工的关键要求，搭建起一个包含构建准则、核心要点、体系架构的建材选型体系，给出了绿色施工和建材选型的具体执行途径。科学且合理的绿色施工模式与建材选型体系，能切实减少施工过程中的污染问题、降低资源的使用量、提高工程项目的质量，推动装配式建筑实现节能、环保、低碳的高质量发展。在未来的发展进程中，要进一步对体系内容进行优化，广泛推广具备先进性的绿色施工技术以及绿色建筑材料，同时要强化各个层面间的协同与配合，对管控机制进行完善，解决体系在实施过程中存在的各类问题，让装配式建筑成为建筑行业达成绿色发展目标的核心承载主体，为我国建筑行业实现高质量发展注入全新的动力。

参考文献：

[1] 张祖祎.ESG赋能绿色转型 助力建材行业可持续发展[J].江苏建材,2024(05):130-131.
[2] 张在胜.绿色建筑材料在土木工程施工中的应用研究[J].新城建科技,2024,33(10):30-32.
[3] 许瑞祥,孙艳.绿色环保建材对建筑工程造价管理的影响分析[J].智能建筑与智慧城市,2024(10):119-121.
[4] 王毅.绿色建筑结构设计研究[J].江苏建材,2024(03):77-78.
[5] 刘珊珊,李洁芯,张澜沁,等.绿色建材碳减排潜力分析研究[J].新型建筑材料,2023,50(08):154-159.
[6] 陈志强.绿色建筑材料在土木工程施工中的应用探究[J].建材发展导向,2023,21(16):196-198.

港航工程施工中混凝土的质量控制探析

杨 博

（四川省交通建设集团有限责任公司，四川 成都 610041）

摘 要 港航工程是我国水运交通基础设施建设的重要载体，混凝土作为码头、防波堤、航道护岸等结构的主要用材，其质量直接决定工程的结构安全与服役寿命。本文结合港航工程海洋侵蚀环境的特殊性，系统梳理了混凝土施工全流程的质量控制要点，从原材料管控、配合比优化、施工工序管控、养护管理四个维度构建了标准化质量控制体系，分析了常见质量病害的形成原因，归纳了对应的防控与处置对策，以期为同类港航工程施工提供技术参考。

关键词 港航工程；混凝土施工；养护工序；混凝土裂缝；抗侵蚀性能

中图分类号：U654 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.027

0 引言

随着我国水运事业的快速发展，沿海港口、内河航道、跨海枢纽等港航工程的建设规模持续扩大，混凝土结构凭借强度高、整体性好、造价可控等优势，成为港航工程的主流结构形式。港航工程多处于海洋潮汐、干湿交替、氯离子侵蚀、硫酸盐腐蚀等复杂恶劣环境中，对混凝土的强度、抗渗性、抗侵蚀性与长期耐久性提出了极高要求[1]。当前港航工程混凝土施工中，仍存在原材料管控不严、施工工艺不规范、养护措施不到位等问题，易引发结构裂缝、钢筋锈蚀、强度不足等质量病害，大幅缩短工程服役寿命。基于此，本文系统梳理港航工程混凝土施工全流程的质量控制技术，分析常见病害的形成机理，提出标准化的防控与处置对策，为港航工程混凝土施工的精细化管控提供参考。

1 港航工程混凝土性能要求与前期质量管控

1.1 港航工程混凝土的特殊性能要求

港航工程混凝土与普通建筑混凝土的关键差异在于其需长期承受海洋复杂环境的侵蚀作用，需同时满足结构强度与长期耐久性双重要求。根据港航工程所处环境，可划分为大气区、浪溅区、水位变动区、水下区四个区域，其中浪溅区与水位变动区受干湿交替、氯离子渗透、冻融循环的耦合作用，是腐蚀最严重、对混凝土性能要求最高的区域[2]。港航工程混凝土需重点控制抗氯离子渗透性能、抗硫酸盐侵蚀性能、抗冻融性能、抗渗性能与抗裂性能，其中抗氯离子渗透性能是决定结构长期服役寿命的关键指标，需通过原材料选型与配合比优化实现精准管控。

1.2 原材料质量管控

原材料的性能是混凝土质量的基础，需针对港航工程的环境特点，执行全批次、全流程的质量检验与管控，各类原材料的关键管控要求如表 1 所示。原材料进场前需核对质量证明文件，按批次开展复检，重点检测氯离子含量、强度、级配等关键指标，不合格材料严禁进场。水泥需根据施工工况选型，大体积混凝土优先选用中低热水泥，降低水化热风险；骨料需严格控制含泥量与有害杂质含量，避免影响混凝土的密实度与耐久性；掺合料可通过活性效应优化胶凝体系，减少水泥用量，同时提升混凝土的抗侵蚀性能；外加剂需与水泥开展适应性试验，确保混凝土工作性符合施工要求。

2 港航工程混凝土施工关键工序质量控制技术

2.1 拌合与运输质量控制

混凝土拌合需严格按照经审批的配合比执行，计量设备需定期校验，确保计量精度符合规范要求，严禁擅自调整用水量与胶凝材料用量。拌合时间需根据设备类型与混凝土性能确定，强制式搅拌机拌合时间不得少于 90 s，掺加掺合料与外加剂的混凝土需适当延长拌合时间，确保拌和均匀，无离析、泌水现象。混凝土运输需根据施工工况选用适配设备，水上施工需采用专用运输船，控制运输时间与路径，避免因运输时间过长导致坍落度损失过大、工作性下降。混凝

作者简介：杨博（1988-），男，本科，研究方向：港口与航道工程。

表1 港航工程混凝土原材料管控要点与技术要求

原材料类型	关键管控指标	技术要求
水泥	强度等级、水化热、抗硫酸盐侵蚀性	优先选用P·Ⅱ型硅酸盐水泥或中低热硅酸盐水泥，氯离子含量≤0.06%，严禁使用过期、受潮结块水泥
骨料	含泥量、氯离子含量、颗粒级配	粗骨料含泥量≤1%，针片状颗粒含量≤15%；细骨料严禁使用未淡化海砂，氯离子含量≤0.03%
掺合料	活性指数、细度、需水量比	优先选用Ⅰ级粉煤灰、S95级矿粉，通过活性效应优化胶凝体系，提升混凝土抗侵蚀性能
外加剂	减水率、含气量、水泥适应性	选用聚羧酸系高效减水剂，可搭配阻锈剂、引气剂，严禁使用对钢筋有锈蚀作用的外加剂
拌合用水	氯离子含量、pH值、硫酸盐含量	严禁使用海水拌合，氯离子含量≤200 mg/L，pH值≥4.5

土到场后，需逐车检测坍落度、扩展度等工作性指标，不符合要求的严禁使用，严禁在运输或浇筑过程中随意加水[3]。

2.2 浇筑与振捣施工管控

浇筑与振捣是决定混凝土实体质量的关键工序，需针对港航工程特殊工况制定专项管控措施。大体积混凝土需采用分层分段浇筑方式，分层厚度不得超过500 mm，控制浇筑速度，避免水化热集中释放；水下混凝土浇筑需采用导管法施工，严格控制导管埋深在2 m～6 m范围内，严禁提管过快导致断桩、离析等缺陷；混凝土振捣需遵循“快插慢拔、分层振捣”的原则，振捣间距不得超过振动器作用半径的1.5倍，振捣至表面泛浆、无气泡溢出为止，严禁漏振、欠振、过振；钢筋密集区、预埋件周边需采用小型振动器加强振捣，确保混凝土密实。

2.3 模板与钢筋工程配套管控

模板与钢筋工程的施工质量直接影响混凝土的成型质量与结构耐久性。模板需具备足够的刚度、强度与密封性，优先选用钢模板，表面平整光滑，拼缝处采用密封胶条封堵，避免浇筑过程中漏浆引发蜂窝麻面；水上施工的模板支撑体系需进行专项受力验算，加固牢固，具备足够的抗风浪能力，避免浇筑过程中模板移位、变形。钢筋工程需重点控制保护层厚度，采用与混凝土同强度的水泥砂浆或混凝土垫块，绑扎牢固、间距均匀，严禁使用塑料垫块；钢筋表面需彻底除锈，严禁使用锈蚀严重的钢筋，钢筋间距、锚固长度需符合设计与规范要求，避免因保护层不足引发钢筋锈蚀。

2.4 养护工序精细化管控

养护是保障混凝土强度增长、避免开裂、提升耐久性的重要环节，港航工程混凝土需执行精细化的养护管控措施。混凝土浇筑完成后，需在初凝后及时覆盖土工布、保湿棉等材料，持续洒水养护，确保混凝土表面始终处于湿润状态，严禁出现干湿循环。普通硅酸盐水泥配制的混凝土养护时间不得少于14 d，掺加粉煤灰、矿粉等掺合料的混凝土养护时间不得少于21 d，抗渗、抗冻混凝土养护时间不得少于28 d。大体积混凝土需采用温控养护措施，通过内降外保的方式，控制混凝土内外温差不超过25 ℃，表面与环境温差不超过20 ℃，避免温度裂缝产生。

3 港航工程混凝土常见质量病害与防控处置技术

3.1 混凝土裂缝病害防控处置

裂缝是港航工程混凝土最常见的质量病害，分为塑性收缩裂缝、温度裂缝、干缩裂缝、盐蚀裂缝等类型，不仅会影响结构外观，还会为氯离子、硫酸盐等侵蚀介质提供通道，加速结构腐蚀。裂缝的主要成因包括：配合比不合理、水化热管控不到位、养护措施缺失、环境侵蚀作用、施工工艺不当等。防控措施需从源头优化配合比，选用中低热水泥，掺加活性掺合料，降低水化热；大体积混凝土采用分层浇筑、温控养护，控制内外温差；加强全过程养护，避免混凝土表面干湿交替；优化结构设计，减少应力集中。处置措施需根据裂缝类型与宽度确定：宽度小于0.2 mm的表面裂缝，采用环氧树脂封闭处理；宽度大于0.2 mm的深层裂缝，采用环氧树脂低压灌缝处理；结构性裂缝需委托设计单位验算，采用粘贴碳纤维布、外包混凝土等方式加固处理[4]。

3.2 抗侵蚀性能不足与钢筋锈蚀病害

抗侵蚀性能不足是港航工程混凝土特有的病害，主要表现为氯离子渗透引发的钢筋锈蚀、混凝土剥落、保护层开裂，严重影响结构的长期服役安全。主要成

因包括：原材料氯离子含量超标、配合比水胶比过大、混凝土密实度不足、保护层厚度不够、养护不到位等。防控措施需严格控制原材料氯离子含量，优化配合比降低水胶比，掺加阻锈剂、引气剂提升混凝土抗渗性能，严格控制钢筋保护层厚度，加强混凝土振捣与养护，提高密实度。处置措施包括：对锈蚀钢筋进行除锈、阻锈处理，对受损混凝土进行凿除，采用高性能修补砂浆或聚合物混凝土置换，结构表面涂刷防腐涂层，隔绝侵蚀介质。

3.3 外观与实体强度不足病害

外观缺陷主要包括蜂窝、麻面、露筋、孔洞等，实体强度不足则表现为混凝土抗压强度未达到设计要求，影响结构承载能力。外观缺陷的主要成因包括：模板密封性差、振捣不到位、拌合离析、钢筋保护层控制不当；强度不足的主要成因包括：原材料不合格、配合比管控不严、拌合计量偏差、养护不到位等。防控措施需加强模板密封与加固，规范振捣作业，严格管控拌合、运输、浇筑全流程，加强养护管理。处置措施：轻微蜂窝麻面采用环氧修补砂浆找平处理；严重的孔洞、露筋需彻底凿除松散混凝土，采用高一级强度的微膨胀混凝土修补；实体强度不足的，需开展专项无损检测与结构验算，根据结果采取注浆加固、外包混凝土等补强措施。

3.4 特殊工况施工质量缺陷

港航工程水下、潮汐区、水上高空等特殊工况施工，易出现水下混凝土离析、断桩、潮水冲刷导致的混凝土表层损坏等缺陷。主要成因包括：水下浇筑导管埋深控制不当、潮汐窗口期选择不合理、浇筑过程防护措施不到位、施工工艺不规范等。防控措施需制定专项施工方案，规范水下浇筑工艺，严格控制导管埋深与浇筑速度[5]；潮汐区精准计算低潮位窗口期，合理安排浇筑时间，浇筑完成后做好临时防护；水上施工做好防风浪措施，确保施工过程稳定。各类常见病害的标准化防控处置对策如表 2 所示。

表 2 港航工程混凝土常见病害与标准化处置对策

病害类型	主要形成原因	关键防控措施	标准化处置方法
混凝土裂缝	水化热管控不当、养护缺失、配合比不合理	优化配合比，大体积混凝土温控养护，全过程保湿养护	表面裂缝封闭处理；深层裂缝低压灌缝；结构性裂缝专项加固
钢筋锈蚀与侵蚀破坏	氯离子渗透、保护层不足、混凝土密实度差	严控原材料氯离子含量，优化配合比，保证保护层厚度，提升混凝土密实度	钢筋除锈阻锈，受损混凝土置换，表面涂刷防腐涂层
外观缺陷与强度不足	振捣不到位、模板漏浆、配合比管控不严、养护不到位	规范振捣作业，加强模板密封，严格配合比管控，延长养护时间	轻微缺陷修补砂浆找平；严重缺陷凿除后高一级混凝土修补；强度不足专项加固
特殊工况施工缺陷	浇筑工艺不当、窗口期选择不合理、防护措施不到位	制定专项施工方案，规范施工工艺，精准把控施工窗口期，加强防护	轻微缺陷表层修补；严重缺陷如断桩等，开展专项处置与结构补强

4 结束语

本文结合港航工程海洋侵蚀环境的特殊性，系统梳理了混凝土施工全流程的质量控制体系，明确了原材料管控、配合比优化、施工工序管控、养护管理等环节的技术要点，深入分析了各类常见质量病害的形成机理，归纳了标准化的防控与处置对策。当前，我国港航工程正向深水化、大型化、智能化方向发展，对混凝土结构的长期耐久性与服役安全性提出了更高要求，现有质量管控体系在精细化、智能化管控方面仍有优化空间。未来研究可聚焦绿色低碳海洋混凝土研发、智能化施工全过程管控技术、结构全生命周期耐久性监测等方向，完善质量管控标准体系，提升港航工程混凝土结构的建设质量与长期服役能力。

参考文献：

[1] 冯满红.港航工程施工质量管理与控制措施研究[J].低碳世界,2024,14(08):112-114.
[2] 张雪娇.新时代港航工程施工中基槽开挖与港池疏浚施工技术应用[J].科技资讯,2024,22(16):151-153.
[3] 史清波.港航工程施工中混凝土的质量控制探析[J].工程建设与设计,2024(12):248-250.
[4] 喻龙.港航工程大体积混凝土底板施工温度控制[J].交通科技与管理,2023,04(18):132-134.
[5] 向溢.港航工程中的混凝土病害与施工质量控制分析[J].工程技术研究,2023,08(13):153-155.

水利水电工程施工中安全生产保障措施探究

宋洋洋

（河北泉江建筑工程有限公司，河北 固安 065500）

摘 要 水利水电建设肩负着国计民生的重大任务，此类工程大多要耗费数十年时间的持续投入，施工现场环境多变、技术环节繁杂，存在着诸多高危作业流程。保证施工过程安全，既是保护劳动者生命安全，又是保证工程质量和投资效益，更是社会整体安定和谐的需要。本文从水利水电工程建设的独特性入手，分析施工安全管理的深层次价值，整理出实践中行之有效的防护和管理方法，以期为水利水电工程提供有参考价值的安全实施路径，从而有效地防止事故隐患，保障工程安全、优质、高效地进行。

关键词 水利水电工程；安全生产；安全管理

中图分类号：TV513 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.028

0 引言

随着我国水利水电建设的持续推进，水库枢纽、发电设施、流域治理等重大工程的建设规模不断扩大，工程的技术复杂度与施工安全风险也同步提升。施工过程中高空架设、深水作业、岩体爆破、重型吊装等高风险工序常常交错出现，大部分工程都处在偏远的河谷或者陡峭的山区，常年受到暴雨袭击、洪水侵袭、边坡失稳等自然的考验，安全控制一直处在巨大的压力之下。虽然近些年来行业安全法规逐渐完备，监管强度不断加大，但是施工现场时常出现安全事故，造成人员伤亡和财产损失，说明安全管理在责任落实、风险预控、应急响应等环节还存在着薄弱之处。在这样的背景下，如何系统地找出施工安全的主要问题，创建贯穿工程全过程的科学控制体系，已经成为推动水利水电工程高质量发展的迫切需要。本文立足于目前水利水电工程建设的实际情况，针对施工安全管理的主要环节展开分析，找出存在的主要问题，提出具有可操作性的体系化管控途径，为提高行业本质安全水平、贯彻“预防为主、综合治理”安全方针提供参考[1]。

1 水利水电工程施工中安全生产的意义

水利水电工程施工安全控制是贯穿施工全过程的不可逾越的生命线，它对人员保障、工程效果、公共安全和产业进步等各方面都产生着影响。工程推进中一旦出现安全事故，就会造成施工中断、设备损坏、工期延误，从而提高建设成本，甚至影响项目后期的稳定运行。有条理的安全生产活动有利于工程顺利进行、费用控制在可接受范围内，使项目在预定的轨道上达到质量及效益的目的，也保证了各方的信誉和社会形象不会受到影响。从更宽广的角度来讲，水利水电工程担负着能源供应和水资源调配的重要任务，它的施工安全同社会运行秩序有着密切的联系。推进安全生产规范化、体系化，不仅有利于行业整体管理水平的提高，使水利水电建设走上更加可持续的发展之路，而且体现出企业承担社会责任的意识，给我国基础设施高质量建设注入了稳健的基因——这与我国有关安全法规中“保障人民群众生命财产安全”的深层指向不谋而合[2]。

2 水利水电工程施工中安全生产存在的问题

2.1 人员安全意识薄弱，操作行为不规范

水利水电工程现场作业人员是安全生产的主要执行者，其安全意识水平和具体操作行为对整个施工安全有决定性的作用。目前，部分项目在人员安全方面存在着很多明显的不足，大部分基层工人是农民，文化水平低，不能很好地理解高空作业、电气操作、水上作业等特殊工种的专业规范；受“效率第一”“赶工期”的影响，部分职工在实际工作中存在不按规定使用防护用品、私自接线、设备操作等违章行为，这些行为不仅反映出职工专业知识储备的欠缺，也体现了侥幸心理的存在。管理层过于重视进度目标而忽视了安全工作的推进，在资源紧张的情况下会忽视岗前培训和技术交底等基础工作，造成现场安全管控流于表面。特种作业人员资质审查制度存在缺陷，重要的

作者简介：宋洋洋（1987-），男，本科，工程师，研究方向：水利施工安全生产。

岗位上出现无证上岗、证书过期等情况，加大了安全风险敞口。以上问题就是水利工程安全生产管理亟待解决的关键难题。

2.2 安全管理制度不健全，执行力度不足

由于水利工程施工时间长、参与者多，对全生命周期的安全控制提出了很高的要求。部分承包商的安全管理体系建设中存在着明显的系统性问题，在项目特点的确定上没有准确地提出专项控制方案，在深基坑开挖、爆破作业和高边坡施工等高危作业中的操作规范和技术标准方面存在着较大的缺失。目前安全生产责任制度的实际执行效果也存在被质疑的地方，在名义上已经建立起了完整的安全生产责任制体系的情况下，具体落实过程中仍然存在着形式主义的现象，并没有形成切实可行的岗位职责以及考核标准。隐患排查治理机制的实效也不可忽视，目前大多数隐患排查工作还处在表层化的阶段，缺少闭环管理流程的支撑，从而造成隐藏的风险不能及时被发现并消除，成为安全事故的另一重要诱因。

2.3 技术保障不足，风险防控能力薄弱

由于水利工程的建设规模越来越大，传统的安全管理方法不能满足复杂多变的现场风险控制需要。现有的人工管理方式对于不断变化的施工环境来说存在很多不足，在高边坡、长隧洞、深基坑等重要的地方缺少系统的、精确的监测手段。虽然有部分项目开始使用一些先进的技术，但是总体上还没有形成一个较为完善的、强大的技术支撑体系。目前安全监控大多还是采用人工巡检的方式，对于设备运行状态、结构应力分布、地质变形等重要参数的实时在线监测还存在很大的不足。极端环境下风险评价大多依靠经验来完成，没有数据的支撑。物联网、云计算、智能传感等先进科技的应用范围比较窄，信息采集的效率低，数据分析的准确度低，预警响应的速度慢，从而造成安全隐患不能被及时发现和妥善解决。企业在编制专项应急预案的时候没有考虑到某些特殊的地质情况或者恶劣的天气状况所造成的危害，导致其针对性较差，致使整体安全防范水平不能得到提高[3]。

3 水利水电工程施工中安全生产保障措施

3.1 强化人员安全管理，提升安全意识与操作水平

水利水电工程现场安全管理水平很大程度上受参与人员专业素质、执行情况影响。想要提高安全管理水平，就要创建系统的培训体系，加强行为规范的约束。根据岗位特点开展差异化安全教育，对管理层、技术人员、一线作业人员分别制定专项培训方案，对高空作业、爆破施工、电气操作等高危工种实行持证上岗制，并对相关人员的资格进行审核并按时复审，杜绝无证操作。同时，要根据工程施工阶段、现场环境的变化而进行动态调整，保证安全教育同实际作业需要相适应。施工前应做好技术交底工作，将工作任务分工、可能出现的风险因素及处理措施等告知所有人员，使每一个员工对所承担的工作任务有明确的认识，清楚地知道哪些地方存在危险。采用典型事件分析法、现场警示教育法、应急演练法等方式来加强全员安全意识和责任心，使工作人员自觉识别风险、规范操作，有效避免由于麻痹大意造成的安全事故。创建长期有效的安全绩效考评体系，对违规操作、不按规定佩戴劳保用品等行为及时纠正并予以惩处，将安全表现纳入岗位评价和激励机制，使每一个员工自觉担负起自身的安全生产责任，形成人人关注安全、人人参与管理的良好现场安全管理氛围。

3.2 完善安全管理制度，强化制度执行力度

水利水电工程由于自然条件的复杂性以及施工任务的危险性，亟需创建一套系统的、闭环的安全管理机制。该体系不能只是技术规范的简单堆砌，而应该成为保证从业人员生命安全和工程质量的重要载体。根据项目实际情况来制定出一个从规划到执行全过程的高效运作体系。在制度建设上要以目标为导向、实践为基础，全面遵照行业标准（水利水电工程施工安全管理导则）执行，针对高空边缘作业、深水区域施工、爆破作业和临时用电管理等高风险环节制订出详细的、可操作的专项应急预案。这些方案要符合通用要求，还要考虑现场实际情况，进而产生一份可供一线工作人员参照的操作手册，保证执行效果。责任明确属于安全管理的一个重要环节。一岗双责的理念要贯穿整个过程，在层级之间用签订安全生产责任书的形式来确定各级人员的具体职责范围，形成全员参与的安全责任网络。自上而下的激励机制可以提高团队协作的效率，避免由于责任不清而造成的安全问题。为了提高管理制度的成效，还需要创建起动态监测和持续改进相融合的工作机制。采用日常巡查、专项审计、定期评价等手段全方位掌控施工现场状况，对出现的问题及时予以记载并指定专人负责执行整改工作，确定时间节点直到问题完全消除为止，再实施二次检查来防止问题再次出现。严格按照有关违规行为的惩处办法执行，加大纪律约束力度，防止出现形式主义现象。只有专项计划全面执行、分工合理、监督考核机制有

效运转，才能形成一个稳固可靠并且具有灵活性的安全保障体系[4]。

3.3 提升技术保障水平，强化风险防控能力

水利水电工程中提高安全管理水平的重要途径就是依靠技术创新和管理机制的系统改善。利用物联网、大数据、人工智能等技术建立智能化监测系统，可以实现边坡位移实时监测、人员异常行为检测、高精度视频分析等功能，对安全隐患进行动态预警，使安全管理从被动应对向主动预防转变。技术交底环节应使用可视化、互动化的手段，利用虚拟现实（VR）、增强现实（AR）技术模拟施工过程，结合实操演练加深施工人员专业素养的同时建立关键岗位资格认证制度来加强技能管理。对汛期或者极端低温环境下的特殊工况，应提前制订专项施工方案，并完善相应的应急预案，重点做好边坡稳定评定、防汛防洪设施修建以及设备防冻等工作，在出现突发事件的时候保证人员和财产的安全得到有效的保障。推进设备全生命周期管理十分必要，要对设备实施定时的专业检查、保养工作，并提高操作人员的培训程度，严格执行标准作业程序来防止违规操作现象的发生。

3.4 健全应急管理体系，提升事故处置能力

水利水电工程创建完备的应急管理体系，其目的就是创建起一套具备快速反应能力、顺畅运转、不断改善的综合性防御体系。该系统要贴近现场实际情况，重点围绕触电事故、边坡塌方、爆破作业等常见的灾害风险点来制定具有实用性和可操作性的专项应急预案，防止出现形式主义的现象，保证预案能够有效地指导实际的应急处置工作。应急演练属于评判预案是否可行的重要环节。贴近真实的实战演练可以使得参加演习的人们掌握逃生路线选择、急救互助技能，并且能够明显地提高指挥人员处理突发事件的能力以及资源调度能力。每次演练之后都要进行全方位的总结和评价，根据反馈结果及时对原有的方案进行修改，形成一个由实践、反馈、修正组成的闭环管理方式。物资保障属于应急行动的基础支撑，按照工程进度变动以及潜在威胁的变化来调配储备方案，创建起包含急救器材、通讯工具、抢险装备等在内的全部要素物资清单，实行周期性的检查制度来保证应急资源时刻处于可用状况之中。区域联防协作机制也十分重要，依靠地方人民政府和相关职能部门，推动常态化合作模式的发展，在日常训练中加强信息互通、资源共享、技术支持等模块的建设，提高整个防灾减灾效率和灾后重建能力。只有把理论研究、实地测试、资源配置、跨部门联动这些各方面因素综合起来考虑，才能培养出一支既有专业素质又能够应对复杂情况的高素质应急队伍，从而有效地保障人民群众的生命财产安全[5]。

3.5 加强安全风险分级管控，推动安全管理精细化

水利水电工程施工过程中存在诸多安全风险，隐蔽性高、影响面广、易反复等是其主要特点，因此要继续创建以风险识别、风险评价、风险控制为内容的分级管控体系，达成安全管理由经验型向精确化的转变。工程开工前，根据施工区域地质条件、水文环境、施工工艺、设备运行情况，对深基坑、高边坡、隧洞开挖、起重吊装等重点环节进行全方位的风险辨识，确定危险源种类、可能造成的影响和风险等级，提出相应的防控措施。对重大风险源要实行重点监管制度，确定责任人、监测频率、应急处置程序，保证风险处在可控制的状态。另外，要推进风险管理同信息化技术深度融合，依靠数字化平台来采集和分析施工现场人员、设备、环境等各方面数据，从而达到风险状态动态更新的目的。创建隐患排查数据库，把发现的问题分门别类地加以记录并落实到责任人身上，同时跟踪整改情况并做出评价，从而形成风险闭环管理的模式。

4 结束语

水利水电工程安全管理体系具有明显的系统性特点，包含人员行为规范、制度创建、技术应用、应急处理等诸多方面。在具体的实施过程中暴露出安全意识淡薄、责任落实不到位、科技创新滞后等各方面的制约，影响项目的正常运转。为了进一步提高安全保障效能，需要依靠智能化监控设备和技术创新手段来加强动态监管能力，推行全员参与的风险防控模式，加强前瞻性预警机制的建设，创建贯穿工程全生命周期的安全防护网，为设施全寿命周期管理提供稳固支撑。

参考文献：

[1] 周磊，杨洋，张凯博. 水利水电工程施工安全生产保障措施的研究 [J]. 水上安全，2025(11):155-157.
[2] 夏金阳. 关于水利水电工程施工安全控制的几点思考 [J]. 珠江水运，2024(08):154-156.
[3] 胡水波. 水利水电工程施工安全控制探究 [J]. 科技资讯，2022,20(19):121-124.
[4] 刘向磊. 水利水电工程施工安全管理研究 [J]. 新疆有色金属，2022,45(02):103-105.
[5] 王立帅. 水利水电建筑工程施工过程中安全管理问题及其对策研究 [J]. 水利水电快报，2021,42(S1):62-63,66.

防洪墙水泥土换填地基加固施工工艺应用分析

周 彭

（中国葛洲坝集团三峡建设工程有限公司，湖北 宜昌 443000）

摘 要 防洪墙作为城市防洪设施的重要组成部分，对保障城市安全以及发展有着重要作用。然而，在防洪墙的建设与运营过程中，仍存在压缩性高、原状素填土承载力不足等问题，无法满足防洪墙运行安全性与可靠性。本文以绵江河左岸瑞金宾馆段防洪墙建设施工作为案例，探讨防洪墙施工中存在的缺陷与不足，采用水泥土换填地基加固施工工艺，需从测量放线、基坑开挖、水泥土配合比设计、分层摊铺、碾压、检测验收的全流程工艺出发，确保防洪墙施工效果合格。通过本文案例分析表明，在水泥土换填地基加固施工工艺优化后，防洪墙安全性、稳定性达到要求。

关键词 防洪墙；水泥土换填；地基加固；测量放线；场地清理

中图分类号：TV871 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.029

0 引言

城市防洪墙是保障人民群众生命财产安全以及城市稳定发展的关键，而防洪墙地基稳定性对防洪构筑物运行效果有直接影响。在防洪墙施工过程中，软土、杂填土、松散素填土分布较多区域，对防洪墙施工产生不利影响，极易造成防洪墙沉降、开裂、倾覆等严重事故。防洪墙施工中，通过水泥土换填法进行施工能加固地基，将软弱土层挖除并替换为规定比例拌和的水泥土材料，利用水泥水化反应与土体颗粒胶结作用，进而提高防洪墙地基强度以及刚度性能[1]。该技术具备较高环保性与经济性，可解决浅层地基缺陷问题。本文选择绵江河治理工程进行分析，通过对复杂河岸条件以及严格景观协调的研究，采取优化水泥土换填地基加固施工工艺，以期为保证防洪墙地基结构强度达到要求提供参考。

1 工程概况

本工程隶属于绵江河两岸堤防新建及加高项目，治理范围上游起于云集二桥，下游至七堡河汇合口，河道全长 17 km。项目旨在维持现有河道走向基础上，对未达标矮堤段进行加高，无堤防段新建堤防，总建设长度 16.886 km，涵盖生态护岸及景观配套。其中，左岸瑞金宾馆新建堤防工程位于绵江大桥下游约 234 m至迎宾大道一江两岸公园广场停车场处，全长 1.411 km，是连接城市核心景观区的关键节点。该段堤防根据地形与景观需求分为三个主要建设段落：KMZ 9+236.50 ～ KMZ 10+130.40段采用U型C30钢筋混凝土仿古城墙式防洪墙，内设素填土回填，顶部设青砖城垛，持力层位于原人行道侧素填土区；KMZ 10+130.40 ～ KMZ 10+206.14 段利用现状C20挡墙进行倍厚处理，上部新建L型悬臂式防洪墙，外贴仿古砖；KMZ 10+405.82 ～ KMZ 10+647.32段则采用“C30混凝土基座+装配式防洪墙”形式。由于沿线原状土多为松散素填土，承载力特征值仅为80 kPa ～ 100 kPa，无法满足防洪墙基底压力要求，故决定对墙踵板及底板下方深厚素填土层实施水泥土换填加固，以确保结构安全。

2 工程方案设计

通过对瑞金宾馆段地质勘察报告分析，发现其存在素填土松散、均匀性不足等问题。技术人员综合地质勘察报告，最终确定采用水泥土换填法进行地基处理，其遵循彻底清除软弱层、分层压实强固结的原则施工。在该方案施工阶段，将防洪墙底板与墙踵板影响范围的原状素填土挖除，开挖深度结合沉降量计算结果确定，通常为1.5 m～2.5 m，直到触及下部软硬土层即可停止开挖作业。而换填施工选择普通硅酸盐P.042.5水泥与现场挖掘的黏性土充分混合，或者外购优质黏土拌和形成。

作者简介：周彭（1982-），男，本科，副高级工程师，研究方向：水利施工技术、软基处理。

本项目设计参数如下：水泥掺入比例12%～15%，最佳含水率20%～24%。换填施工压实度系数超过0.97，28天无侧限抗压强度超过1.5 MPa，地基承载力应180 kPa以上。现场施工环节，采用机械集中拌和、分层摊铺、振动压路机碾压工艺方案。在现场换填施工阶段，每层虚铺厚度250 mm～300 mm，碾压遍数通常为6遍～8遍，需进行现场试验确定以增强碾压效果。对于有些位置地下水位较高时，需在现场设置降水设施，确保施工作业范围达到干燥度。此外，本项目设计方案还确定伸缩缝断开以及边坡防护处理，避免换填土从侧向挤出，以增强防洪墙稳定性。

3 防洪墙水泥土换填地基加固施工工艺分析

3.1 测量放线与场地清理

本项目防洪墙施工前，需按照设计方案要求测量放线，以全站仪作为主要测量设备，精准标注防洪墙轴线与换填基坑开挖边线。因为该项目地质条件较差，在现场开挖时以设计方案为基准，向外延伸0.5 m～1.0 m。同时，现场施工间隔10 m布置标高基准点，设置高程控制桩，以确保现场换填施工达到高程精准控制要求。而在施工阶段需将现场树根、杂草、生活垃圾、大块建筑垃圾清理干净，开挖排水沟将地表积水排放到集水井。如果施工现场存在腐殖土或淤泥，则将其清理到原状土层，经过验收合格再继续施工[2]。

3.2 基坑开挖与边坡防护

基坑开挖选择挖掘机械和人工辅助方式，采取分层开挖、严禁超挖的原则开挖作业。在机械开挖环节，将其开挖到设计标高以上20 cm～30 cm，再由人工修整处理，以免机械开挖扰动基底原桩土层引发工程质量缺陷。开挖施工需监测边坡结构稳定性，并根据土质条件确定适宜放坡比例，通常黏性土放坡系数为1:0.75～1:1.0。如果现场场地有限无法放坡，则在现场使用钢板砖或木支撑临时支护处理。雨季施工需在基坑周边设置截水梗，以防雨水灌入造成基础结构损坏。现场开挖后土体采取分类存放方式，且换填原料的黏性土覆盖防尘网。

3.3 基底验槽与处理

基坑开挖施工完毕后，需由监理、设计、勘察等单位共同进入现场联合检查。该环节需对基坑平面位置、几何尺寸、开挖深度、基底土质勘测，确保各项指标与勘察结果保持一致。在基底验槽环节通过轻型动力触探仪检测基底土层，测定其承载力是否达到要求。如果现场检测阶段存在软弱下卧层、古井、墓穴或橡皮土，则根据工艺方案进行超挖作业，再使用同级水泥土或级配砂石回填夯实。基底验槽完成后及时封闭处理，需在表面铺设厚度50 mm的碎石垫层或喷洒乳化沥青，避免基底水分蒸发过快或雨水浸泡产生土体软化。基底验槽做好详细记录工作，为后续工程质量验收提供依据[3]。

3.4 水泥土配合比设计

防洪墙水泥土换填地基加固技术应用中，水泥土配合比设计极为重要，需保证配比达到科学性要求。在本项目施工前选择代表性土样送入实验室进行标准击实试验与无侧限抗压强度检测，确定10%、12%、15%、18%的不同水泥掺量下最大干密度与最优含水率曲线。根据本项目设计强度1.5 MPa以及压实系数要求，最终确定水泥掺入比和施工含水率。该项目选择P.042.5普通硅酸盐水泥，土料经过过筛后去除粒径超过50 mm土块。在水泥土配合比试验确定后，在现场进行试拌处理，保证水泥土搅拌均匀且工作性能达到要求。如果土料天然含水率较高，则需要进行翻晒处理；如果土料含水率较低，则需要进行洒水闷料。

3.5 水泥土分层摊铺

水泥土拌和选用厂拌法或路拌法进行，优先采用强制式搅拌机集中拌和，保证水泥与土体颗粒充分搅拌均匀。在水泥土搅拌完成后进行质量检测，确保其颜色一致、无灰团、无灰条的情况。水泥土拌合结束后使用专用设备运输到作业现场，避免长时间存放导致水泥初凝影响后续施工。水泥土摊铺以分层方式逐步进行，每层虚铺厚度250 mm～300 mm。在水泥土摊铺后，使用推土机或平地机将混合料大致摊平，而后由人工配合细平。水泥土摊铺设置厚度控制桩，并及时检查松铺厚度，禁止一次性倾倒厚度过大造成压实度不足。墙角、边缘等机械无法进入的区域，采用人工铁锹方式细致摊铺，确保其厚度均匀[4]。

3.6 机械分层碾压夯实

水泥土摊铺完成后，需立即进入碾压阶段，这是保证换填结构强度合格的关键。本项目是用18 t～22 t振动压路机碾压，按照先轻后重、先慢后快、先边后中、轮迹重叠的方式初压施工，选择静压1遍～2遍，速度1.5 km/h，使混合料达到初步稳定的效果；复压施工碾压4遍～6遍，开启振动功能，将碾压速度提升到2.0 km/h～2.5 km/h；终压施工静压1遍～2遍，消除表面轮迹，使表面结构达到平整度。而在碾压环节相对位置重叠1/3轮宽，相邻行重叠0.3 m～0.5 m。

针对防洪墙模板或边角等位置，选择使用小型平板夯或冲击夯补夯作业，确保各位置无遗漏问题，且各结构部分碾压效果达到要求。

3.7 分层检测验收

水泥土摊铺结束后，在每层碾压完成及时进行质量检测，直到合格后再开展后一层施工作业。分层检测主要从压实系数、无侧限抗压强度试件制作、外观质量检查进行，需结合不同检测参数选择适宜检测方法。压实系数检测采用环刀法或灌砂法进行，通常每 100 ㎡～200 ㎡取样一组，每组至少 3 个点，要求压实系数超过 0.97。同时，现场随机制作 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 立方体试件，经过标准 28 天养护后进行抗压强度检测。水泥土结构表面达到平整、坚实的要求，确保无松散、起皮、裂纹、痕迹明显现象。如果现场检测发现存在质量缺陷，需分析形成原因，如含水率控制不当、碾压遍数不足等，采取补救措施以保证防洪墙地基结构强度达到工程要求[5]。

3.8 换填至设计标高

分层施工时逐层累加换填厚度，所以先按常规方式施工各层，直到达到设计基底标高，而最后一层施工时要严格控制顶面高程，预留防洪墙底板混凝土垫层应有的厚度。同时，在接近设计标高时，须加大高程测量频率，采用水准仪全程、实时跟踪控制，切实避免超填或欠填。若局部超填，绝不可简单铲平，宜挖除该处松散层一定深度后重新进行拌合碾压，若局部欠填则予以补足薄层并就地充分碾压。换填体顶面宜做成适当横坡（一般取 2%～3%），有利于排水降水，防止积水浸泡。最后，到达设计标高后对顶面做最后一次精细整平、光面处理，使其平整度完全符合上部结构施工的要求，也与防洪墙底板衔接。

3.9 基底整平封闭

换填施工全部结束后，立即进行基底整平与封闭保护。使用平地机对顶面进行最终刮平，消除微小起伏。随后，及时浇筑 C15 或 C20 混凝土垫层，厚度一般为 100 mm～150 mm，作为防潮隔离层和上部钢筋绑扎的工作面。垫层浇筑需连续进行，振捣密实，表面抹光。若因所以不能立即浇筑垫层，需覆盖土工布或塑料薄膜进行保湿养护，防止水泥土表面失水干裂，并禁止车辆通行扰动。封闭层施工完成后，设置围挡警示，严禁无关人员进入。至此，水泥土换填地基加固主体工程完工，具备防洪墙主体结构施工条件，进入混凝土浇筑阶段。

4 施工效果总结

绵江河左岸瑞金宾馆段防洪墙水泥土换填工程完工以后，由第三方检测单位进行系统检测，各指标都满足设计要求，甚至有若干指标优于设计值。现场载荷板试验直接证实了处理后的地基承载力特征值在 195 kPa～210 kPa 范围内，比设计值 180 kPa 高出不少，因此安全储备十分充分。28 天无侧限抗压强度平均值已达 1.8 MPa，各试样离散性极小，说明水泥土拌和均匀，固化质量极佳。此外，施工及防洪墙主体浇筑全过程中的沉降观测结果均表明地基沉降量极小，不均匀沉降差严格控制在规范允许范围内，未见任何裂缝或异常变形。本工艺有效解决了原状素填土承载力不足的问题，使仿古城墙式防洪墙能够在松软地基上安全、合理地建设。与桩基方案相比，水泥土换填方案可降低工程造价约 30%，缩短工期 20 天，且施工噪声小、无环境污染，高度契合城市中心区的环保要求。尤为突出的是，换填体与上部钢筋混凝土墙体结合性能优良，经汛期高水位实际检验，未出现渗漏、滑移等问题。施工过程中形成的标准化作业流程及完整质量管理档案，也为后续同类软基处理工程提供了重要参考。

5 结束语

防洪墙作为城市安全运营的重要基础设施，关系到人民群众的生命财产安全，需全面落实工程施工控制措施，以提高防洪墙建设水平。在防洪墙施工阶段采取水泥土换填地基加固技术，能解决不良地质条件造成的影响，以增强防洪墙结构运行可靠性，确保地基承载力、抗变形能力达到要求。本文选择绵江河左岸瑞金宾馆段工程作为案例，通过分析水泥土换填加固技术的特点，采取工艺方案优化措施，旨在为提高防洪墙建设水平提供借鉴，以促进现代城市化高质量发展。

参考文献：

[1] 朱巍,宋伟庆.微探水利工程施工中软基基础的处理技术 [J]. 中国设备工程 ,2021(20):250-252.
[2] 张慧昌.五华河左岸防洪堤布置及地基加固研究 [J].黑龙江水利科技 ,2021,49(12):75-78.
[3] 摆敏 . 水磨河防洪工程设计方案分析 [J]. 陕西水利 ,2024(08):66-68.
[4] 何丽梅,郑延鹏 . 河道防洪工程防洪堤现浇砼板护砌技术 [J]. 陕西水利 ,2024(06):62-63,71.
[5] 郭道迁,于志多 . 水利工程中软土地基处理技术的比选与应用实例 [J]. 水上安全 ,2026(01):151-153.

装饰装修工程现场管理存在的问题及改进对策

张德习

（安徽省安泰建筑装饰工程有限公司，安徽 合肥 230031）

摘 要 装饰装修工程现场管理质量直接决定工程质量、施工效率与成本控制，当前行业内普遍存在人员管理不规范、质量管控不到位、安全管理有漏洞、进度管理不科学及物料管理混乱等问题，严重影响工程履约与行业健康发展。本文结合装饰装修工程施工实际，对现场管理现存问题展开深入分析，提出规范人员管理、强化质量管控、健全安全管理、优化进度管理、规范物料管理等针对性对策，以期为有效解决现场管理痛点、提升管理效能、保障工程质量与施工安全提供借鉴，进而推动装饰装修行业高质量发展。

关键词 装饰装修工程；现场管理；质量管控；安全管理；进度管理

中图分类号：TU71 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.030

0 引言

在工程建设标准持续提高、市场竞争日趋激烈的背景下，装饰装修工程施工现场管理直接关系到工程品质、施工安全与项目综合效益。当前，不少项目仍存在管理模式粗放、管控环节薄弱、责任传导不畅等问题，不仅影响工程交付效果，也制约行业转型升级。立足于行业发展新要求，聚焦人员、质量、安全、进度、物料等关键维度，剖析现存管理短板，探索科学可行的优化路径，对提升工程管理质效、保障项目平稳落地、促进行业持续健康发展具有重要的现实意义。

1 装饰装修工程现场管理存在的主要问题

1.1 现场人员管理不规范

人员配置、素养及管理机制的缺失，直接导致装饰装修工程现场作业效率低下、责任落实不到位，这是当前现场管理中最为突出的问题之一。装饰装修施工对人员专业技能要求具有针对性，不同工序（水电铺设、墙面装修、木工制作等）均需要对应技能达标人员操作，但实际施工中，施工人员专业素养参差不齐，部分人员未经过系统专业培训，技能水平与装修行业规范及项目质量标准严重不匹配，不仅影响施工进度，更易留下质量隐患。现场管理人员权责划分模糊，未形成清晰的岗位责任体系，遇到施工衔接不畅、质量问题整改等具体工作时，常出现推诿扯皮现象，无人主动承担责任，导致问题拖延不决。

1.2 施工质量管控不到位

质量管控体系不完善、施工过程缺少监管，是装饰装修工程质量不达标、安全隐患过多的主要原因，会直接影响工程的使用功能和使用寿命。施工工艺是保证装修质量的基础，部分施工队伍为了赶工期、压成本，没有严格按照装饰装修行业规范和项目施工要求操作，处理细节时不够严谨，如墙面基层清理不到位、瓷砖粘贴不结实、水电管线排布不合规等，这些细节问题不仅会影响装修的美观效果，还很可能在后续使用时引发故障[1]。材料质量是决定装修质量的核心要素，现在不少项目在材料进场验收环节没有严格的标准和流程，检验人员责任意识不强，对材料的规格、型号、质量等级等审核得不够仔细，使得不合格材料被用到施工现场，这类材料在使用过程中很容易出现老化、损坏等问题，会直接降低工程的整体质量。

1.3 现场安全管理存在漏洞

安全管理制度不完善、防护措施落实不到位、施工人员安全意识淡薄，三个问题叠加在一起很容易引发各类安全事故，严重威胁施工人员的人身安全，也会影响工程正常施工。部分装饰装修项目虽然制定了安全管理制度，但这些制度只停留在纸面上，没有结合施工现场的实际情况细化落地，安全责任也没有拆分到每一个岗位、每一个施工人员身上，最终导致安全管理只是走形式，无法起到实际管控作用。施工现场安全防护设施不全或者设置不标准的问题十分常见：

作者简介：张德习（1984-），男，本科，工程师，研究方向：装饰装修施工。

高空作业不按要求搭建安全防护网、不佩戴安全防护用品，用电作业不规范安装漏电保护装置、电线铺设得乱七八糟，动火作业不提前做好防火防护，这些不合规范的操作都给安全事故埋下了隐患。

1.4 进度管理缺乏科学性

进度计划安排不合理，施工过程管控不到位，会直接造成装饰装修工程施工进度变慢、工期延长，不仅增加了施工成本，还可能影响业主正常使用房屋。编制施工进度计划是做好进度管理的基础，部分施工单位制定计划时，没有实地了解现场施工条件、各施工工序的衔接要求，也没有掌握人员、物料的配置情况，就盲目定下进度目标，这类计划本身缺乏科学性和可行性，最终会和实际施工情况脱节，无法起到指导施工的作用[2]。装饰装修施工的工序比较多，各工序之间衔接要求很高，如水电施工做完才能进行墙面装修，木工施工要配合水电管线的走向安排，但在实际施工时，不同工序之间的衔接缺少有效协调，交叉作业的安排也不合理，经常会出现停工等料、工序互相冲突的问题，直接导致施工进度中断。进度管控也缺少动态调整的机制，施工过程中，天气变化、物料供应不足、人员变动等因素都会影响进度，但管理人员对这些影响因素预判不到位，既没有按照实际施工情况及时调整进度计划，也没有采取有效的补救办法，导致进度滞后的问题不断积累，最终造成工期延误。

1.5 现场物料管理混乱

如果物料在采购、存储、使用等各个环节未能做好管控，不仅会造成物料浪费、施工成本增加，还会延误施工进度，是影响装饰装修工程现场管理质量的重要问题。物料采购计划是否合理，会直接影响物料供应和成本控制，部分施工单位编制采购计划时，没有结合现场施工进度和物料消耗定额做科学测算，盲目采购要么导致物料大量积压，占用了流动资金和仓储空间，要么因为采购量不足造成停工待料，影响整体施工进度。物料存储管理也没有统一规范，没有按照不同物料的特性划分专门的存放区域，防潮、防火、防盗这类防护措施也没有落实到位，如木材、涂料、电线这类容易受潮、容易损坏的物料，经常因为存放不当出现损坏、变质的问题，无法正常投入使用，进一步造成物料浪费。物料领用、使用环节缺少有效的管控，没有建立完整的领用台账，领用流程不够规范，施工人员领用物料时没有明确的领用标准，存在随意领用、随意浪费的情况，同时施工过程中也没有对物料消耗做跟踪核算，无法及时发现并制止浪费行为，最终导致成本管控没有起到作用，进一步拉高了工程施工成本。

2 装饰装修工程现场管理的改进对策

2.1 规范现场人员管理，提升人员素养

优化人员配置、明确权责划分、完善培训考核机制，是提升现场人员专业素养与责任意识，解决人员管理不规范问题的关键举措，能够有效提高现场作业效率，确保各项工作责任落实到位。施工人员的筛选是保障施工质量与效率的基础，施工单位应建立严格的人员筛选标准，优先选用专业技能达标、施工经验丰富、责任意识强的施工团队，对施工人员的技能水平进行全面考核，确保其能够满足项目施工要求，同时建立施工人员档案，对人员技能、从业经历等信息进行详细记录，便于动态管理[3]。明确现场管理人员与施工人员的权责边界，建立健全岗位责任制，将各项管理工作与施工任务分解到具体岗位、具体人员，明确每个岗位的工作内容、责任要求与考核标准，杜绝推诿扯皮现象，确保各项工作有序推进。建立常态化培训与考核机制，结合装修行业规范、施工工艺要求及安全知识，定期组织施工人员与管理人员开展培训，更新专业技能与知识储备，提升人员综合素养；同时完善考核机制，将考核结果与薪酬、岗位调整直接挂钩，充分调动人员工作积极性，稳定施工队伍，减少人员流动性。

2.2 强化施工质量管控，筑牢质量防线

健全质量管控制度、强化施工过程监管、落实各环节质量责任，可有效解决施工质量管控不足的问题，保证装饰装修工程符合质量要求，减少质量问题隐患，施工单位要结合项目实际情况以及行业规范，制定清晰具体的施工质量要求，细化每一道工序的施工规则与质量验收标准，重点明确细节施工的质量规定，让施工人员和管理人员都能依照规则执行，严格规范施工工艺，从源头上保障施工质量。建立严格的进场材料检验制度，明确检验的标准、流程与对应责任，安排专业检验人员对进场材料的规格、型号、质量等级、合格证明等做全面核查，不合格的材料严禁进入施工现场，从材料端筑牢质量防护线。强化施工过程中的质量巡检，合理安排巡检人员与巡检次数，明确巡检内容和检查重点，对施工工序、施工工艺、材料使用等情况做全面检查，建立质量问题台账，发现质量问题后要第一时间明确整改责任人、整改要求以及整改时限，整改完成后还要跟进复查，保证所有质量隐患都能闭环处理，切实保障工程施工质量。

2.3 健全现场安全管理制度，防范安全事故

健全安全管理制度、落实安全责任、强化安全防护与宣传教育，可以有效填补施工现场的安全管理漏洞，提高施工人员的安全意识，排查消除安全隐患，保障整体施工安全。施工单位要结合装饰装修工程的施工特点，完善现场安全管理相关制度，细化安全管理流程，把安全责任拆分到每个岗位、每名施工人员，明确各级人员的安全职责，建立安全责任追究机制，对违规操作、安全管理不到位的行为严肃追责，保障安全管理落到实处[4]。完善施工现场的安全防护设施，根据不同施工工序的特点，合理布设安全防护设施：高空作业必须搭设安全防护网，要求施工人员佩戴安全帽与安全带；用电作业要规范安装漏电保护装置，规整电线铺设线路，动火作业要提前配备防火器材、划定专门的防火区域，保证各项安全防护措施都符合规范要求，加强安全宣传教育与技能培训，定期组织施工人员进行安全知识培训，讲解施工过程中存在的安全风险、违规操作的危害以及对应的安全防护方法，提高施工人员的安全意识。另外，通过张贴安全标语、召开安全会议等方式，强化安全宣传，引导施工人员自觉遵守安全规章制度，避免违规操作，定期组织安全隐患排查，及时发现并消除隐患，防范安全事故的发生。

2.4 优化进度管理，确保工期履约

科学制定进度计划、强化各工序衔接、做好动态管控，及时处理影响施工进度的各类问题，能有效解决进度管理不科学的问题，保障施工顺利推进，确保按工期完成交付。施工单位要提前摸排现场施工条件、工序衔接要求，以及人员、物料的配置情况，再结合项目总工期要求，科学编制施工进度计划。明确每道工序的施工节点、完成时间与衔接关系，保证进度计划具备可操作性和指导作用，避免盲目设定进度目标，做好各工序之间的衔接协调，搭建工序沟通机制，合理安排交叉作业，明确各工序的施工顺序和时间节点，防止工序相互冲突，并且提前完成物料、人员的调配，保证各工序顺利衔接，不会出现停工等料的情况[5]。建立进度动态管控机制，安排专人跟进进度，实时掌握现场施工进度。提前预判天气、物料、人员等可能影响进度的因素，提前制定对应解决方法，一旦发生进度滞后，第一时间调整进度计划，优化施工方案，重新合理调配资源，加快施工速度，保证工程按时完工。

2.5 规范现场物料管理，降低施工成本

对物料采购、存储和使用环节做好管控优化，能够有效减少物料浪费，降低施工成本，还能保障物料供应稳定，让施工进度可以顺利推进。施工单位要结合施工进度计划和物料消耗定额，科学编制采购计划，精准测算采购量，筛选合适的供应商，签订规范的采购合同，明确物料的质量要求、交货时间与成交价格，避免出现物料积压或是短缺的情况，做到物料采购的精细化管理。要规范物料存储管理，根据不同物料的特性划定专门的仓储区域，对各类物料分类存放，落实好防潮、防火、防盗等防护要求，安排专人负责仓储管理，定期盘点检查物料，及时处理损坏、变质的物料，避免不必要的浪费，保障物料质量达标。此外，要建立物料领用、使用台账，明确领用流程与领用标准，施工人员领用物料时必须登记领用数量、具体用途，严格管控领用过程。倡导节约用料，杜绝浪费行为，同时要跟进施工过程的物料消耗，做好跟踪核算，及时发现物料浪费问题，采取对应措施整改，达成成本管控目标，进一步降低工程施工成本。

3 结束语

装饰装修工程现场管理是一项系统性工作，涉及人员、质量、安全、进度、物料等多个核心环节，各环节相互关联、相互影响，任一环节出现疏漏，都可能引发连锁反应，影响工程整体效益。当前现场管理中存在的各类问题，根源在于管理制度不健全、责任落实不到位、管控措施不精准，制约行业健康发展。针对性落实各项改进对策，可有效破解管理痛点，规范现场作业秩序，提升管理精细化水平。现场管理的优化并非一蹴而就，需结合项目实际动态调整，持续完善管控机制，强化责任落实，推动现场管理从粗放式向精细化转变，既保障工程质量与施工安全，也实现成本合理控制与工期顺利履约，为装饰装修行业高质量发展提供有力支撑。

参考文献：

[1] 李芬芳.装饰装修工程预结算存在问题及对策研究[J].低碳世界,2025,15(10):167-169.
[2] 高俊,殷小尉.装饰装修工程质量特征与控制要点分析[J].中国建筑装饰装修,2025(09):130-132.
[3] 阙茂森.住宅建筑装饰装修工程施工质量与管理策略分析[J].居舍,2025(01):73-76.
[4] 颜明敏.浅谈住宅装饰装修工程的环保节能设计[J].居舍,2022(25):74-77.
[5] 蒲银生,姚国钦,韩云龙.建筑装饰装修工程设计施工一体化策略解析[J].居舍,2022(10):22-24.

房屋建筑施工质量全过程管理方法与实践探讨

刘元峰

（彬州市房地产开发有限责任公司，陕西 咸阳 713500）

摘 要 房屋建筑施工质量直接关系到建筑工程的使用安全、使用寿命及社会效益，全过程质量管理是保障施工质量的核心手段。本文从施工准备阶段、施工实施阶段、竣工验收阶段及运维反馈阶段入手，系统分析各阶段质量管理的核心内容与现存问题，结合行业技术标准与管理规范，提出针对性的管理方法与实践路径。通过强化前期策划、优化过程管控、完善验收机制、建立闭环反馈体系，实现施工质量的全周期动态管控，以期为促进房屋建筑行业的高质量发展提供理论参考。结果表明，科学的全过程质量管理能够有效降低质量隐患发生率，提升建筑工程整体质量水平。

关键词 房屋建筑；施工质量；全过程管理

中图分类号：TU712+.3 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.031

0 引言

随着新时期城镇化建设的快速推进，房屋建筑的建设体量持续增长，相关规范与行业要求对房屋建筑的工程质量也提出了更高的管控标准。房屋建筑质量作为整个建筑的核心与灵魂，影响着人们居住的质量以及使用的安全性，也关乎整个行业的长远发展。现阶段，在房屋建筑的施工过程中，由于各个阶段存在管理脱节、缺乏监管等问题，致使出现了质量问题，使建筑整体质量受到负面影响。而全过程质量管理有效破解了管理的分割状态，深入房屋建筑生命周期当中，结合各个阶段的控制点，使其一一得到很好的管控，从而实现质量最终的管控。本文围绕房屋建筑施工质量全过程管理进行研究，并论述各个阶段管理的重点与控制手段，以促使建立房屋建筑施工质量的全过程质量监管系统，解决房屋建筑施工质量不高的问题，从而促进该行业的健康、可持续发展。

1 房屋建筑施工质量全过程管理的核心内涵与重要意义

1.1 全过程管理的核心内涵

全过程质量控制是建筑工程施工质量控制对建筑工程施工全周期（从施工准备阶段到建设施工实施，再到竣工验收和运维返修的全周期）的质量策划、质量控制、质量保证、质量改进等各阶段过程的系统管理，其基本特征为全过程、全员、全要素，坚持各管理阶段的有序性和协调性，以及制定统一质量标准、明确各负责主体、优化管理模式，实现施工全阶段、全过程质量管理的“事前预防、事中控制、事后改进”，确保项目施工在质量管理状态下完成全过程各环节。

1.2 全过程质量管理的重要意义

房屋建筑投入使用的基础就是良好的施工质量，而全过程质量管理是施工质量管理工作的全过程覆盖。在安全方面，全过程质量管理能够及时发现施工中的质量风险，减少施工中的安全质量风险，防止因为施工质量问题导致的安全事故发生；在经济效益方面，全过程的质量管理减少了施工中的返工返修费用，提高了工程的建设速度，提高了建设投资的收益；在行业发展方面，全过程质量管理促进了施工操作的规范，促使房屋建筑行业由粗放型向集约型转变，提升了房屋建筑行业的质量水平与市场竞争水平，同时也是利于人们生活品质提升需求的良好建筑材料，具有良好的社会效益[1]。

2 房屋建筑施工各阶段质量管理的核心内容与现存问题

2.1 施工准备阶段的质量管理内容与问题

质量控制始于施工准备阶段，核心工作包括质量计划策划、技术准备、资源配置和管理制度制定。质量策划需明确目标要求，制定控制措施与验收评定办法；技术准备涵盖图纸审核、施工方案制定与技术交底；资源准备聚焦原材料、构配件及设备质量保障；管理制度侧重质量责任制与考核评价体系构建。当前主要问题表现为质量策划缺乏针对性与指导性，未结合工

作者简介：刘元峰（1979-），男，本科，工程师，研究方向：房屋建筑和市政基础设施工程施工质量、给排水。

程实际制定措施；技术交底流于形式，施工人员对质量标准认识不深，措施落实不到位；原材料进场检验随意，不合格材料流入施工现场；管理制度不健全，责任划分模糊，导致后续质量管理缺乏根本保障。

2.2 施工实施阶段的质量管理内容与问题

施工实施阶段是形成工程最终质量的关键环节，质量管理核心在于对施工工序、工艺、现场作业及质量检测的全程监督。工序管理需确保施工严格遵循程序，衔接有序且质量达标；工艺管理要求严格执行技术措施与规范；现场作业管理注重提升施工人员质量意识，规范作业行为；质量检测需对关键部位、重要工序实时监督检测，及时发现质量偏差。该阶段现存问题包括工序交接检验不严格，上道工序存在质量缺陷仍推进下道工序；施工人员质量意识薄弱，存在野蛮施工现象；施工工艺不合理，未按技术方案执行，与要求存在差距；质量检测方法不当，数据无法准确反映施工质量现状。

2.3 竣工验收阶段的质量管理内容与问题

竣工验收是对施工质量的全面检验，核心工作包括竣工资料检查、实体质量检验、质量评价与问题处理。资料检查需核对施工记录、检验报告等是否完整合规；实体检验严格依据验收标准核查结构质量与使用功能；质量评价需全面检验后作出判定；问题处理要求及时补救检查中发现的质量问题。当前主要问题有竣工资料整理不达标，存在资料不全、数据不统一等情况；实体质量检查覆盖面不足，部分重点部位未涉及；质量评定标准执行不当，主观成分较强；质量问题处理不到位，部分缺陷未得到解决，留下质量隐患[2]。

2.4 运维反馈阶段的质量管理内容与问题

运维反馈阶段是全过程质量管理的延续，核心内容包括质量信息收集、问题分析、经验总结与改进措施制定。需收集建筑使用过程中的质量信息并深入分析，从问题根源梳理施工阶段质量管理的经验与不足，为后续工程改进提供依据。该阶段存在的问题主要为质量信息收集不全面，无法完整掌握使用过程中的质量问题；对质量信息缺乏系统分析，未能准确归纳问题成因；管理经验总结与传递不充分，同类质量问题重复出现；针对质量管理薄弱环节的改进措施缺乏针对性，难以有效解决问题。

3 房屋建筑施工质量全过程管理优化方法与实践路径

3.1 施工准备阶段的管理优化方法

进一步加强质量策划，针对工程种类、结构形式、自然条件等特性，编制施工详尽的质量计划，落实各个阶段的质量标准、控制点和验收范围；加强技术交底制度，推行分层次技术交底，技术、标准落实至每个人；通过考核确保交底的有效性；加强原材料和施工设备管理，在选用原材料、施工设备供应商前，对其综合实力进行考察，并建立准入机制；在对进场材料进行验收时采用内外兼顾“双验制度”，材料进场先查看材料外观，如有问题，再进行抽检，对于不合格材料，拒绝进场；在施工设备进场进行前，对其调试和质量等进行检验，符合施工方案方可使用。强化管控制度管理，明确建设单位、施工单位和监理单位对工程质量的职责，将建设单位、施工方和监理方的质量考评和奖惩工作进行制度化管理[3]。

3.2 施工实施阶段的管理优化路径

实现工序标准化，建立各工序作业规程以及质量达标验收标准，严格执行工序交接检查制度，下道工序不得进行施工，直至上道工序合格才可开展施工。加强劳务人员管控，加强对劳务人员的安全质量技术培训，提高施工人员的质量意识及操作技术水平，人员应持证上岗，对特殊重要岗位要进行专项考试。加强工艺控制，根据工程实际需要完善调整施工方案，采用新的施工工艺以及施工机具，提高施工精度及施工质量稳定性，加强对施工过程的监督检查，杜绝违章作业行为。强化质量检测，采用先进的检测仪器以及检测手段，增加检测覆盖广度，对重要环节以及关键工序实施全程追踪检测，保证检测的真实性；建立检测结果传递以及共享平台，实时共享质量信息并同步加以管控。

3.3 竣工验收阶段的管理完善措施

严格竣工资料管理，编制资料台账，明确资料的搜集、整理、归档的职责和要求，保证资料的完整、准确和规范；利用现代化管理手段，实现竣工资料的数据化储存和查询，提高竣工资料的核对率。增加实体检测力度，根据验收要求制定完整的检测计划，包括建筑结构、使用、节能、环保等各方面检测要求，检测过程中质量缺陷列出清单，落实整改责任人和整改日期。规范质量评定程序，本着实事求是的态度进行质量评定，严格按照检测结果和对应要求标准进行评定，反对武断；并且对评定质量结果进行公布，供公众监督。质量问题的闭环制度，验收中的质量问题要制定出相应的改进方案并加以落实，改好后复检合格后方可通过验收。

3.4 运维反馈阶段的管理强化策略

形成多角度收集质量信息的机制，如设置投诉电话，开通在线反馈平台，定期回访收集建筑在使用阶

段的质量问题及用户建议意见，形成质量问题分析制度，将质量反馈信息进行梳理归类，运用因果分析、统计分析等方法，深入探究质量出现问题的前期设计原因、施工原因、材料原因等，形分析报告。总结经验并进行推广应用，在质量管理中进一步应用，在质量管理中总结经验，推广运用；针对存在问题，制定改进措施，完善管理体系，应用改进措施，进一步改进质量管理，完善质量管理；并将发现的问题反馈至施工准备阶段的质量策划工作中，融入施工准备阶段的质量策划工作中，促进质量管理良性循环“策划—实施—验收到反馈到改进”。

4 全过程质量管理的保障体系构建

4.1 组织保障

完善全员、全过程的质量管理组织机构，明确建设单位、施工单位、监理单位、设计单位的质量职责分工，实现“统一领导、分级负责、协同管理”的管理模式。施工单位需建立专门的质量管理部门，配齐持证上岗、工作经历丰富的质量员，抓好施工现场施工全过程的质量策划、过程监督和问题处理；监理机构要挑选专业监理工程师，做好施工全过程的阶段性质量监督，尤其抓好关键分项、隐蔽工程验收；建设单位需组建质量管理领导小组，由建设单位项目经理牵头负责，抓协调、抓检查、抓落实，按期召开项目质量分析协调会，确保相关工作落到实处[4]。

4.2 技术保障

重视技术研发与应用，大力推广应用成熟施工工艺、节能环保技术和先进机械，通过技术方面保证施工质量的可控可管和可控可依。健全技术标准，结合行业标准、设计文件和工程项目现实特性制定科学细化量化的企业技术标准和施工流程、工艺等规范，为各环节施工质量管理提供可遵循的技术标准。重视技术研发投入，引导企业产学研结合、科研校企合作等方式联合攻关质量技术管理的重点难点，研发质量信息化检测和管理技术设备等先进技术手段，提高质量管理的科技含量和“智能”含量。同时健全日常化技术培训制度，不断提升技术人员的理论与实践水平、能力和创新意识[5]。

4.3 制度保障

健全质量管理制度，建立质量责任制度、考核评价制度、奖惩制度、监理制度、验收制度、档案管理制度、全过程制度体系。将项目负责人至一线施工工人的各级质量责任明确化、细化，全部落实到具体人员，严格执行质量终身制，对质量管理不到位、违规操作引发的质量事故依纪依法严肃追究相关单位和人的责任。建立科学合理的考核评价制度，建立参建各方单位及人员将质量管理成果、质量隐患整改率、用户满意度等纳入绩效考核评价体系，考核结果与薪酬发放、评优评先工作挂钩，充分调动各方参与质量管理的积极性。强化制度执行落实，成立专门的制度执行督查小组，不定期对各项质量制度的执行情况进行检查，对违背制度的行为及时整改问责，使各项质量管理制度落到实处[6]。

4.4 人员保障

加强质量管理工作队伍建设，培养一批既能掌握质量管理专业知识、有质量管理实践经验，又能对工作认真负责的质量管理人才。施工单位要制订系统的人才培训计划，经常性组织开展质量管理人员行业培训、专业培训、技术培训、知识竞赛等，保证其及时更新，提高对工程质量进行管理的能力、对施工过程中可能出现的风险预见能力及做好工程质量应急处置能力；同时加强施工人员的质量安全培训，将质量、安全及作业标准，在岗人员要增强质量意识及按标准规范进行施工的能力，保证施工作业人员严格按照质量规范要求进行工作。建立人才奖励与成长机制，对为质量管理做出贡献且成绩突出的个人及团队给予相应的表彰与奖励、提拔使用等。

5 结束语

建筑业质量管理核心是房屋建筑工程质量安全管理，全过程质量管理覆盖施工准备、实施、竣工验收及运维反馈各阶段，通过完善各环节管理工作，优化组织、管理、技术及人员体系，解决质量管理现存问题，提升全过程管理实效，实现工程质量动态管控与优化改进。同时，施工项目进度全程管理可有效预防质量风险，助力提高工程质量，推动技术进步与管理水平提升，契合新时代建筑业高质量发展需求。

参考文献：

[1] 王鹏.房屋建筑项目全过程施工管理体系的优化研究[J].中国建筑装饰装修,2025(02):153-155.
[2] 邵寒军.房屋建筑工程施工全过程质量管理[J].安徽建筑,2021,28(07):243-244.
[3] 孙凯.试析房屋建筑工程项目全过程成本管理[J].中国乡镇企业会计,2024(06):112-114.
[4] 董哲,陈奎.房屋建筑工程施工质量管理体系研究[J].建筑科学,2021,37(04):45-52.
[5] 耿宏亮,王东.BIM技术在建筑施工质量控制中的应用分析[J].工程管理学报,2022,36(02):112-118.
[6] 冉祯,赵丽.物联网技术助力建筑施工质量全过程监控探讨[J].建筑技术开发,2023,50(01):67-73.

灌区量水设施自动化改造中的土建施工关键技术

孔 杨

（中国水利水电第六工程局有限公司，辽宁 沈阳 110119）

摘 要 在水资源调配与利用体系中，灌区是关键枢纽，其建设和运营效果关系到水资源利用与产业发展质量。灌区量水设施作为核心部件，在其自动化改造中，需重视土建施工技术应用，才能实现灌区量水设施稳定运行。本文从灌区量水设施自动化改造需求方面分析，探讨土建施工工艺，具体从量水堰槽、标准化预制安装、监测设备高精度基座浇筑、渠道防渗抗冲防护以及接口预埋等技术出发，采用BIM模拟优化、模块化快速组装、全生命周期质量控制等策略，确保灌区量水设施自动化改造有序完成，以期为促进水资源高效调配体系的发展提供参考。

关键词 灌区改造；量水设施；土建施工；自动化适配

中图分类号：S274.4 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.032

0 引言

在现代大数据、物联网、人工智能等技术应用下，灌区管理不断向数字化、智能化方面转变，通过各类高精度流量计、雷达水位计以及智能水闸应用，能有效提升灌区自动化运行水平。然而，灌区量水设施自动化改造中，其稳定运行需要保证土建基础的几何精度、结构稳定性，还要确保水力条件达到适宜状态。因此，在灌区量水设施自动化改造中，需选择适宜土建施工技术，才能确保灌溉体系稳定运行，为现代农业领域高速发展奠定基础。

1 灌区量水设施自动化改造土建施工基础

1.1 自动化量水设施土建施工要求

自动化量水设施对土建结构安装尺寸精度有极高要求，其安装精确性超远超传统水利工程。在自动化量水设施中，量水堰槽为主要组成部分。量水堰、槽等建筑物的喉道宽度、底板坡度及侧壁垂直度的偏差需达到毫米级，能保证水流流态符合理论模型设计要求。在该系统安装过程中，其传感器基座有较高的稳定性和刚度，能有效抵抗水流脉动、温度变化、冻融循环持续作用，预防因为探头角度偏移而造成测量偏差过大。同时，在土建结构施工中，需深入分析电磁兼容性以及防雷接地要求，在设备基础布置独立接地网，线缆管廊有完善防水、防潮、防鼠咬设施。此外，土建结构施工选择高强度、耐腐蚀、表面光滑的混凝土或复合材料，能有效避免表面粗糙率对水流分布造成干扰影响，使自动化设备有恒定、规则的水力边界条件[1]。

1.2 施工前期勘察与场地预处理要点

土建工程施工前进行精细化地质勘察，这是确定自动化设计方案的关键。在该环节利用激光扫描仪、全站仪、地质雷达等设备，对水利工程现场渠道断面形态、地基土质特性、地下水位、既有建筑物概况全面测绘。该环节需重点查看渠道淤积厚度、边坡稳定性、潜在不均匀沉降风险，通过勘察数据分析，结合现场实际情况制定预处理方案，如清除淤泥、杂草、夯实松软地基、修整形变断面、设置临时导流设施等。

1.3 土建施工与自动化设备适配原则

在土建工程施工中，将设备安装作为核心工序，保持适配性原则，使其在物理空间和数字逻辑方面深度融合。灌区量水设施自动化改造中，其方案设计阶段引入设备厂商技术参数，将传感器安装孔位、线缆走向、检修通道、散热空间作为基础绘制土建图纸，防止现场施工存在开凿破坏结构整体性的情况。而在现场施工作业阶段，需严格落实预留预埋制度，保证法兰盘、地脚螺栓、穿线套管等位置精度合格与接口位置保持匹配。土建结构形式保证安装、拆卸以及维护方便，如采用可开启式盖板、模块化基座等设计方式，确保后续运维过程中更加便捷。此外，考虑到水

作者简介：孔杨（1992-），男，本科，工程师，研究方向：水利自动化与信息化。

利工程运行环境，采取保温隔热、遮阳、防雨等设施，能有效应对极端天气影响，确保自动化设备运行过程中不会发生损坏。

2 灌区量水设施自动化改造核心土建施工关键技术

2.1 量水堰（槽）土建施工技术

量水堰与量水槽的施工核心在于严格控制几何尺寸精度并确保整体刚性。为此，施工采用工厂化预制钢筋混凝土构件替代传统现场支模浇筑工艺，利用高精度钢模具加工，将喉道尺寸、收缩段曲线及底板平整度等关键参数的误差严格控制在 1 mm 以内。构件运至现场后，以精密水准仪、经纬仪对各关键点作多点联测定位，通过楔形垫铁对高程、水平度做微调，从而使纵向坡度严格符合设计值，横向绝对水平。基础开挖后先铺碎石垫层，浇筑素混凝土找平层，切实提高地基承载力。预制件吊装就位后，采用二期高强无收缩灌浆料填实接缝，内部植入不锈钢连接筋，形成真正的刚性整体。接触面设置遇水膨胀止水条，外侧涂刷聚合物水泥防水涂料，二者配合严密，渗漏风险彻底排除。施工全过程中严禁人员进入槽体踩踏或堆放重物，养护时用土工布覆盖洒水保湿，避免混凝土收缩引起过流断面形状的改变，故最终水力特性与设计模型完全一致[2]。

2.2 自动化监测设备基础施工技术

灌区量水设施自动化改造中，保证基础具备独立稳定性与抗微震能力。在自动化监测设备基础设计中，摒弃传统渠道衬砌或量水建筑物施工方式，其单独基坑深入冻土层以下，浇筑 C30 及以上标高混凝土，使其形成钢筋混凝土独立墩台。基座内配置双层双向钢筋网，顶部预埋镀锌锚栓或法兰盘，利用定位模板固定螺栓间距，保证外露长度合格，且各尺寸偏差在 ±2 mm 内。基座与周围回填土设置隔离层，需在内部填充沥青砂或泡沫板，能有效切断土壤冻胀力传递路径。雷达、摄像头等悬挂安装设备，其基础需增加埋深，设置扩大底板，必要时打入微型钢管桩加固，能有效抵抗风荷载产生的倾覆力矩。基座顶面采取找坡处理措施，且安装不锈钢防护罩，底座周边设置排水沟，以防发生积水浸泡现象。上述结构施工结束后，采取振动测试、静载试验方式，确保其运行具备稳定性。

2.3 防渗与抗冲防护土建施工技术

在土建结构施工中，防渗与抗冲防护为重要措施，能有效防止水流对结构精度造成不利影响。渠道衬砌使用滑膜摊铺机连续作业，确保其结构表面达到光滑、平整要求，能有效降低阻力系数。量水设施上下游各 10 m～20 m 范围之内，需选用厚度适宜的混凝土护底以及护坡，内部加入聚丙烯纤维，以提高结构抗裂性能。在土建工程接缝位置使用双组份聚硫密封胶嵌缝处理，且在底部铺设橡胶止水带，进而使土建结构形成多道防水防线。而高流速区域在消力池末端设置海漫段，通过抛填大块石或铺设雷诺护垫方式消耗动能，预防因为冲刷作用向上游扩展而影响量水建筑物安全性。

2.4 施工接口衔接与预埋件安装技术

接口衔接及预埋件安装是土建与机电无缝对接中极其重要的工序，施工过程中根据设备接口图纸绘制准确预埋件布置图，确定套管管径、标高、坐标及倾斜角度。同时，在混凝土浇筑前将 PVC 或镀锌钢管绑扎于钢筋骨架上，管口及时封堵以防砂浆进入；转弯处采用大半径弯头以降低穿线阻力，强弱电管线分开敷设，间距符合电磁屏蔽的要求；交叉处均进行绝缘处理；机柜基础内预埋接地扁钢，与主接地网可靠焊接。所有预埋件表面均涂刷防锈漆，螺纹部分涂黄油后予以可靠保护；混凝土振捣时主动避开预埋管件，严防其移位变形，预埋件安装完毕以后即用水准仪、经纬仪对标高、坐标及垂直度复核，偏差严格控制在规范允许范围内，凡发现移位、倾斜问题，立即调整、重新固定，直至符合要求；对于穿墙、穿楼板的套管，在套管与混凝土接触部位加装止水环，从设计源头解决防水密封问题，杜绝今后使用中渗漏的风险；管线敷设时又主动预留充足的伸缩余量，合理补偿混凝土收缩及温度变化引起的变形，避免管线因拉伸、挤压而损坏；预埋件安装后及时、规范地做好标识记录，清楚标明规格、位置、安装日期，为后续机电设备安装提供极好的参考依据。混凝土浇筑完成后，及时清理预埋件表面所黏附的混凝土杂物，逐个检查管件的完整性及接口密封性，对受损的防锈层、螺纹保护部位予以及时、妥善的修复，最终确保预埋件安装质量完全符合设计及规范要求。

3 灌区量水设施自动化改造土建施工常见问题与优化

3.1 灌区量水设施自动化改造土建施工常见问题

3.1.1 量水建筑物几何尺寸偏差导致流态紊乱

灌区量水设施自动化改造中，土建施工重视量水建筑物几何尺寸控制，以防尺寸偏差造成流态紊乱。然而在项目具体施工阶段，往往因为支撑体系部分模板刚度不足、测量放线误差等，极易造成量水堰槽喉道宽度不均、底部起伏、侧壁倾斜。这种尺寸偏差的影响下，极易造成水流平稳性、对称性受到影响。在

该位置存在漩涡、回流、水面波动，这将会导致其流态偏离标准流量公式的适用范围。而在巴歇尔槽的喉道部位，如果侧壁不平或者底板不平，就会造成临界水深位置发生改变，其水位流量曲线出现非线性漂移[3]。

3.1.2 设备基础不均匀沉降引发传感器失准

因为灌区地质条件复杂性较高，其存在失陷性黄土、软土、地下水波动大等情况。如果自动化设施基础设计不足，或者没有考虑到基础受到冻胀风险，设备底座运行一段时间后发生不均匀沉降风险。这种沉降问题发生后，极易造成基座上雷达水位计、超声波探头出现倾斜或高程变化，进而导致基准面发生改变，使整个自动化设施出现系统性偏差。翻板式液位计、磁致伸缩液位计对安装水平度有极高要求，一旦基座发生扭曲，极易造成机械卡死或者无法正常作业。

3.1.3 线缆管廊防水失效与电气安全隐患

灌区环境潮湿，雨季地下水位升高，线缆管廊施工中若质量控制不严，渗漏水事故极易发生。典型问题表现为：管材接口粘接不牢、检查井壁有裂缝、穿墙套管密封不严等。水分进入管内就会直接导致线缆绝缘性能下降，从而引起短路、漏电故障，更严重的是会腐蚀金属屏蔽层，干扰信号传输，致使数据丢包、噪点增多；冬季渗入的水分结冰膨胀后会撑破管材，直接破坏管路结构。此外，不少施工现场没有按规范设置排水设施，故机柜基础长期处于水浸状态，设备因此加速老化锈蚀。

3.2 灌区量水设施自动化改造土建施工优化

3.2.1 基于 BIM 技术的精细化建模与预演

灌区量水设施自动化改造土建施工中，通过 BIM 技术精细化建模与预演，能及时消除设计方案的缺陷。该技术应用后，通过构建全专业三维模型，利用碰撞检测及时消除设计方案冲突问题，且使管线路由与预留孔位达到精准布置要求。同时，BIM 技术应用后引入流体动力学仿真模块，能模拟不同几何尺寸水流流态，再反向优化堰槽设计尺寸，使其成型后水力条件达到最优化状态。而在灌区量水设施自动化改造土建施工时，利用 BIM 模型导入全站仪或手持终端设备，对现场各项尺寸精准测量和监控，及时消除误差问题。复杂节点通过制作 3D 打印缩尺模型或虚拟现实交底，使作业人员了解内部构造细节，进而提高施工精度[4]。

3.2.2 装配式模块化施工与地基加固组合策略

灌区量水设施自动化改造土建施工中，通过装配式模块化施工技术，使量水堰槽、设备基座、线缆井等制作工厂化预制模块运输到现场后拼装与连接。工厂化生产环节具备高度工业化，其生产作业具备较高精度，使混凝土强度、几何尺寸、预埋件精度达到毫米级偏差，有效规避人为误差影响安装施工质量。不良地质条件采用复合地基加固措施，通过水泥搅拌桩、高压旋喷桩、CFG 桩等，提高基础结构承载力与均匀性。基座底部设置滑动支座或柔性垫层，能有效释放温度应力与冻胀力，确保不会发生不均匀沉降问题。

3.2.3 多层级防水体系与智能监测集成

根据土建施工要求，建设“结构自防水 + 卷材外包 + 节点密封”的多层防水体系，能使灌区量水设施自动化系统稳定运行。混凝土内加入防水剂与膨胀剂，确保混凝土具备较高抗裂性与密实度；管廊外壁粘贴高分子防水卷材，在系统内形成封闭屏障；穿墙管、施工缝、变形缝等细节部位，使用遇水膨胀止水条、双组分密封胶以及防水砂浆等多重封堵。检查井内安装液位传感器与自动排污泵，如果检测到积水立即排放，且传输报警信息。同时，在土建结构内安装温湿度传感器、水浸传感器，能及时监测管廊内环境状态，并将数据信息传输到自动化监控平台。在数据掌握后，通过光纤传感器监测灌区结构裂缝问题。灌区管理人员掌握各项数据后，能实现防水性能的全面分析，确保系统运行达到动态感知以及预警的效果，为灌区安全、可靠运行奠定基础[5]。

4 结束语

灌区量水设施自动化改造涉及多个专业，土木、机械、电子信息需要共同参与，才能实现自动化改造效果提升。而这些系统内土建作为基础结构部分，对于灌区量水设施自动化改造有直接影响。在这一背景下，深入分析灌区量水设施自动化改造需求，结合土建施工技术标准优化改进施工技术，确保土建施工效率达到需求，以满足当前灌区量水设施自动化改造要求，为现代农业水利设施的建设和发展奠定基础。

参考文献：

[1] 彭微强.韩江粤东灌区续建配套与节水改造工程施工技术的研究 [J]. 四川水泥 ,2020(06):175.

[2] 张全锋.钢筋混凝土衬砌施工技术及其在水利灌区渠道改造中的应用 [J]. 四川水泥 ,2022(07):123-124,127.

[3] 苗艳丽 , 裴仁波 , 王鹏 . 灌区水渠改造工程施工技术应用及效果分析 [J]. 四川水泥 ,2024(01):216-218.

[4] 王涛.水利农田灌区节水改造渠道施工技术探讨 [J]. 当代农机 ,2025(11):34-35.

[5] 张永平.水利工程灌区续建配套与节水改造工程防渗渠道衬砌施工技术：以湖南省双峰县南冲灌区节水配套改造工程为例 [J]. 湖南水利水电 ,2024(01):14-16.

建筑电气工程施工过程中存在的质量问题及防治分析

李军华

（中核二十五建设有限公司，湖南 长沙 410005）

摘 要 建筑电气工程施工质量直接关系到房屋的安全、作用和使用年限。本文对配管施工不规范、防雷接地系统缺陷、电气线路敷设混乱、配电箱安装不当、材料设备不达标等问题进行了系统分析，提出系统性防控策略，涵盖技术、技术应用智能化、质量控制全过程、人员培训、责任落实四个维度。结果表明，通过将标准化建设、智能化监管、提高全员质量意识有机结合，可确保电气系统安全稳定运行，明显降低常见质量问题的发生率。

关键词 建筑电气工程；管线敷设；防雷接地系统；电气线路连接；智能化管理

中图分类号：TU85 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.033

0 引言

建筑电气工程作为现代建筑工程的核心子系统，涵盖了电源、照明、通信、安防、智能等多重功能，其施工质量的好坏直接决定着建筑的安全、舒适程度以及建筑能效的高低。电气系统随着建筑技术的迅猛发展而日趋复杂，对建筑精度、材料性能、工艺标准等方面的要求也越来越高。然而，在实际施工中，电气工程质量问题频发，既影响系统正常运行，又可能引发漏电、火灾等安全事故，因设计缺陷、材料不合格、工艺不规范、管理不到位等原因造成人身财产的严重损失。随着智慧城市、绿色建筑理念全面普及，建筑电气逐步向智能化、集成化、节能化转型，强弱电系统交叉融合、智能设备密集布设成为常态，传统粗放式施工模式已无法适配现代化建筑电气的高精度施工要求。现阶段行业内普遍存在重主体结构、轻机电安装的施工思维，电气隐蔽工程质量管控薄弱、交叉工序协调混乱等通病长期存在，极易造成后期返工整改、运维成本攀升，严重制约建筑工程整体品质提升。目前建筑施工质量备受业界瞩目，研究指出管线敷设、防雷接地、配电装置安装、线路接续等环节，主要是共性问题[1]。虽然从技术和管理角度研究了一些解决方案，但在系统分析问题成因、智能防控技术集成应用、全过程质量控制体系构建等方面还显不足。本文从建筑电气工程施工的全流程视角，结合工程实践案例，提出一套集技术升级、管理优化、智能防控于一体的综合防控体系，以期对规范建筑施工行为、提升工程质量、促进行业技术创新提供参考。

1 建筑电气工程施工过程概述

建筑电气工程施工并非一个孤立进行的作业环节，而是一个与土建、结构、装饰、暖通、给排水等多个专业深度交叉、紧密协同的复杂系统工程。

1.1 施工准备阶段

施工准备阶段是防止质量问题发生的第一道关口，其工作细致与否直接决定后续施工与质量基线之间的顺畅程度，这一阶段的核心工作有以下几个方面：（1）深度审图与技术交底，电气类专业施工图必须系统地与所有相关专业图纸进行联合审，包括建筑、结构、设备等，重点检查管线通路是否存在空间冲突，预留孔洞大小、位置是否符合设备安装的基本条件。（2）材料与设备的精细化采购与验收，严格依据设计文件和技术规格书选定产品，优先选用技术成熟、质量稳定、符合国家强制认证标准的品牌与型号。（3）科学编制施工组织设计与专项方案，针对工程特点与难点，编制具有指导性的施工组织设计，并细化关键工序的专项施工方案。

1.2 主体施工阶段

电气工程现阶段主要进行隐蔽部位的建设，这些部位与建筑结构是一体的，一旦建成，加上混凝土等结构的覆盖，整治难度很大，被称为“永久性”质量定格阶段。（1）预埋管线与接地装置安装：在混凝土模板支设后、浇筑前，必须精准完成所有电气管线（JDG管、SC、PVC管等）、接线盒、过渡盒、套管以及基础接地体、防雷引下线的预埋固定。（2）大型通道与套

作者简介：李军华（1984-），男，本科，工程师，研究方向：机电。

管的预留预埋：针对后期需要穿越楼板、墙体的电缆桥架、母线槽路径，以及大型电气设备（配电柜、变压器）的进出线位置，必须提前预留尺寸准确的洞口、预埋刚性套管或防水套管。

1.3 安装与敷设阶段

建筑主体结构完成后，电气工程进入全面安装阶段，大部分设备与线路在此阶段变得可见。（1）管线敷设与线路连接：对于明敷管线，要求排列整齐、横平竖直、固定点间距均匀合理。电缆桥架安装需保证平整度，转弯处应使用专用弯头或合理弯曲，避免尖锐棱角损伤电缆绝缘。（2）配电箱（柜）与终端设备安装：配电箱（柜）安装应位置正确、箱体平面度、垂直度符合要求、固定牢固。（3）防雷与等电位联结系统完善：对接闪带（网）、引下线与接地装置的连接点进行可靠焊接或螺栓连接，并做好防腐处理。

1.4 调试与验收阶段

此阶段是对前期所有施工成果的全面检验，确保电气系统从“装得上”到“用得好”。（1）系统性电气测试与调试：按照国家规范，逐项进行绝缘电阻测试、接地电阻测试、配电系统相位校验、漏电保护器动作特性测试、照明照度测试等。对动力设备进行空载、带负载试运行，监控其启动、运行电流、温升及振动情况。对消防、安防、楼控等弱电系统进行联合调试，确保功能联动正常。（2）竣工资料整理与移交：系统整理整个施工过程中的技术资料，包括但不限于施工图纸（含修改竣工图）、材料设备合格证明文件、隐蔽工程验收记录、各项测试报告、调试记录、质量事故处理记录等。

2 建筑电气工程施工质量问题分析

基于大量工程实践与文献研究，建筑电气工程施工中的质量通病可归纳为以下五大类，每一类都有其典型的表现形式和直接的负面影响。

2.1 常见质量问题分析

1. 管线敷设不规范。（1）现象：预埋电管位置偏离设计坐标、埋深过浅导致结构面层开裂风险；明敷管线排列无序、相互叠压，固定卡箍间距过大或松脱；电缆桥架安装不平直，连接处螺栓不全，转弯处未使用专用弯头或弯曲半径过小，导致电缆敷设时绝缘层被划伤；金属导管穿越变形缝处未设置补偿装置。（2）成因：施工人员未严格按图纸弹线定位；混凝土浇筑时看护不力导致管线移位；为追求施工速度，忽略工艺细节；技术交底不清，工人凭经验施工。（3）危害：影响后续装修施工，可能导致墙面开槽或钻孔时破坏管线；管线固定不牢易松动，引发连接点脱落；电缆绝缘损伤埋下短路、漏电隐患。

2. 防雷接地系统缺陷。（1）现象：接闪带（避雷针、网）与引下线，或引下线与接地装置的焊接存在虚焊、点焊、焊缝不饱满、焊渣未清除；焊接部位防腐处理（如镀锌层破坏处未刷防锈漆）不到位，很快锈蚀；接地电阻测试值超过设计规范要求；卫生间等电位联结端子箱未安装，或虽安装但未将金属洁具、管道等有效连接；金属门窗、栏杆的等电位联结遗漏。（2）成因：电焊工无证上岗或技能不合格；作业人员质量意识淡薄，认为隐蔽工程可敷衍了事；质量员检查不严格，监理对隐蔽验收把关不严，电阻测试流于形式，甚至出具虚假报告。（3）危害：雷电流泄放通道不畅通，轻则导致雷电过电压损坏室内精密设备，重则引雷入室造成火灾或人员伤亡；等电位联结失效，无法在故障时迅速均衡电位，增大电击风险。

3. 配电箱（柜）与终端设备安装问题。（1）现象：配电箱采用破洞不规则、破坏箱体防护等级的气割等野蛮方式开孔，箱内走线杂乱无章、电线交叉缠绕、缺损或错行线路标志；盒装倾斜，与墙间有缝隙，偏斜松垮安装开关插座面板高低落差明显；灯具安装不牢固、位置偏差较大，成排灯具不在一条直线上。（2）成因：安装工艺与土建、装修工艺配合存在脱节现象，箱内线路未提前规划，边施工对标水平尺、激光投线仪等工具安装过程中未使用到校准工作，对观感质量关注程度不够。（3）危害：对功能的使用和美观造成影响，箱内线路混乱，既不利于排查和检修故障，又可能因导线毛刺散失或造成短路；插座面板松动可能导致接触不良、电弧放电。

4. 电气线路连接隐患。（1）现象：不使用铜铝过渡端子，直接连接不同材质的导线（铜、铝）；多股导段直接与接线端线连接，没有接压接线路端，造成部分线芯脱落或接触面积不够；仅是普通电工胶布简单缠导线接头的绝缘恢复，不用双层绝缘，不备特制的绝缘套，电缆头制作技术差、密封不严、易受潮等问题也比较突出。（2）成因：施工人员沿袭落后或不规范的衔接工艺，贪图方便，节省材料，技术监督、质量检验现场不够有效。（3）危害：这是直接引起电气火灾的主要原因，接头处因接触电阻增大而发热不断，绝缘老化加快，最终可能造成绝缘击穿，引起火灾发生。

5. 材料与设备不达标。（1）现象：非标准电线电缆使用（实际截面积导线小于标称值，绝缘、护套厚度不够，阻燃性能达不到标准）；配电箱（柜）壳钢

板厚度不足，防腐技术较差；开关、插座触点材料差，不能完全通断，容易出现发热粘连的现象，灯管效率低、显色差导致动力源质量不稳定。（2）成因：建设单位或施工单位片面追求降低采购成本；采购人员专业能力不足，对材料性能参数不熟悉；材料进场验收环节形同虚设，缺乏必要的检测手段；存在以次充好、偷梁换柱的现象。（3）危害：直接构成系统性的安全与性能缺陷。线缆过载能力差易发热，劣质开关易引发电弧，都将大幅增加火灾风险；设备性能低下导致能耗增加、寿命缩短，影响建筑正常使用功能。

2.2 问题成因的深层次系统分析

上述表层质量问题的产生，往往是项目管理系统性失调的必然结果，其深层次根源可归结为以下几个方面：

1. 管理体系不健全，过程控制失效。许多工程项目尚未建立科学、闭环的全过程质量管理体系。施工组织设计中对质量控制的措施空洞、缺乏针对性；技术交底停留在口头传达，未形成书面确认，操作人员理解执行存在偏差；关键的“三检制”尤其是班组自检流于形式；工序交接检验制度执行不严，特别是对隐蔽工程的验收，监理单位旁站不到位或验收不仔细，使得大量隐患被混凝土“一盖了之”。质量责任追溯体系缺失，出现问题后难以落实到具体人员。

2. 从业人员素质参差不齐，专业技能与意识双欠缺。建筑电气行业一线作业人员流动性大，许多劳务人员未经系统培训即上岗，对施工图纸、国家规范标准理解能力有限，无法掌握新材料、新工艺。部分现场管理人员自身电气专业知识更新滞后，对日益复杂的系统集成缺乏统筹管理能力，难以预见和协调解决施工中出现的交叉技术问题。

3. 技术手段相对落后，防患于未然，传统施工管理对二维平面图和个人经验依赖程度较高，对密集空间管线综合排布难以完全避免，仅靠人脑的想象而发生碰撞，造成后期拆改和返工。在质量检测方面，多依赖完成后的阶段性人工巡查和仪器抽测，施工过程中无法实时在线、连续监测关键参数（接头温升、绝缘状态、预警预防能力较弱），属于事后被动发现问题、警示预防能力的模式。除此之外，行业标准化落地不足、奖惩机制失衡也是质量隐患频发的核心诱因。多数项目仅重视工期进度与施工产值，将质量管控视为辅助工作，对轻微质量通病未及时纠偏，小隐患长期积累演变为系统性质量缺陷。同时，各专业交叉施工缺乏统一协调机制，土建、装修、电气工序衔接无序，极易造成管线挤压、设备移位、接口错位等问题，大幅增加质量管控难度。

3 建筑电气工程施工质量问题处理方法

针对上述质量问题，需从技术、管理、人员与智能化应用四个层面构建系统性的防治体系，实现从被动整改到主动预防的转变。

3.1 技术管理优化措施

（1）标准化工艺推行，编制图文并茂的施工工艺手册，对管线敷设、导线连接、接地焊接等关键工序明确操作步骤与质量标准。（2）深化设计与 BIM 技术应用：利用 BIM 进行三维管线综合排布，提前发现并解决管线碰撞问题。（3）材料设备全程管控，严格实行进场验收、抽样送检、入库管理，建立供货商黑名单制度，实现源头可质量可追溯，重点设备实行二维码追溯制度。

3.2 智能化监控技术应用

（1）电气火灾预警系统：部署基于物联网的智能用电监控设备，实时监测线路温度、漏电流、电压波动等参数。（2）智慧工地用电管理：在配电箱中集成智能安全装置，实现远程分合闸控制、故障定位与能耗分析。（3）漏电与短路主动防护：采用微秒级灭弧技术，在短路故障发生时快速切断电源。

3.3 全过程质量控制体系

（1）事前预控：以系统合理性和与其他专业冲突点为重点，加强审图，需要明确建筑方案对质量控制点和检测标准。（2）过程监控：实行“三查制”，影像记录留存隐蔽项目，监理方采取并联检查和旁站监督相结合的方式进行。（3）事后考核：在完成阶段进行一次全面检测，对发现的问题建立台账，限期整改到位，重点工序施工人员资料归档备查，实行质量终身责任制。

3.4 人员培训与责任落实

（1）分层级技能培训：对管理人员侧重标准规范与新技术培训；对作业人员开展实操考核。（2）建立激励机制，对没有发生质量事故的班组或个人，设立质量专项奖励基金，从物质上给予激励，分包人绩效评价中包含质量绩效。

4 防治措施在工程实践中的应用实施

4.1 实施流程设计

（1）有准备组成质量控制小组，成员包括项目经理、电气工程师、BIM 专员、安全员。施工模拟以 BIM 模型

为基础，对管线路径、设备布置等进行优化，可视化交底文件输出，制定了电器工程质量控制方案，明确了验收标准和每个环节的责任人。(2)执行力和监控力，在材料进场环节，采取供应商提供材料合格证→监理人员扫码验货→现场抽样送检“扫描验收”流程进行。对重点工序实行“挂牌施工”，如将工艺要求和作业人员信息在“防雷焊接作业点”进行公示，部署无线传感网，对配电箱温度、线缆接缝状态等进行实时监控，并将数据同步向智慧工地平台进行数据传送。（3）评估与改进。系统调试阶段采用“故障树分析”方法，对常见问题进行根源追溯。

4.2 实施难点与对策

（1）难点一：应用新技术成本更高。对策：先试点，通过效率比较证明长期经济效益（减少事故率）。提高施工效率。（2）难点二：操作人员旧习惯抵触，对策：开展模拟电击VR体验、智能系统操作大比武等“体验式培训”；加强技能，并纳入绩效考核。（3）难点三：多专业协调复杂。对策：建立“四方联动机制”，每周召开协调会，利用BIM协同平台共享施工进度。

5 防治措施的应用效果评估

建筑电气工程施工质量通过该住房防治措施的系统实施，在多维度上有了明显提升，从质量指标、安全效益、经济与管理效能四个层面，可以对效果进行评价。

5.1 质量提升效果

（1）一次验收合格率提高，在推行标准化工艺与智能监测的项目中，电气工程一次验收合格率从传统的85%左右提升至96%以上[2]。（2）隐蔽工程缺陷率下降，借助BIM预演与传感器监测，管线预埋位置准确率提高约25%，接地电阻不合格率从15%降至3%以下。（3）系统运行稳定性增强：竣工后第一年内，因施工质量问题导致的电气故障发生率下降40%～60%。

5.2 安全效益

（1）触电事故预防：智能安全用电系统实现“漏电无隐患”，保持施工期触电事故零纪录[3]。（2）应急响应提速：故障定位时间从平均30分钟缩短至5分钟内，处置效率提升60%。

5.3 经济效益

（1）返工成本节约：通过BIM技术减少管线碰撞返工，单个中型项目可节约成本50万元～100万元[4]。（2）运维成本降低：高质量施工延长了电气设备使用寿命，后期维修频次减少约30%。（3）能耗优化：智慧用电系统通过负载调配与异常预警，助力项目整体用电量下降10%～15%。

5.4 管理效率改善

（1）监管效能提升：物联网平台实现远程实时监控，管理人员可同时覆盖的作业点增加3倍以上。（2）资料管理数字化：施工过程数据自动归档，竣工资料编制时间缩短40%[5]。（3）人员技能进步：通过系统性培训与实操考核，施工人员技能达标率从75%提高至92%。

6 结论

建筑电气工程施工质量的好坏与建筑安全直接相关，与实现功能和可持续发展直接关联。通过系统分析，得出以下结论：一是质量问题系统性，建筑施工中出现的质量常见病，不仅是由于操作不当造成的，更多的是暴露出深层次的矛盾，如管理制度不健全、技术手段落后、人员培训不到位等。从设计到监管，全链条都需要优化。二是防控措施需要多维度协同，质量问题单一的技术或管理手段难以根治。实践证明，将标准化流程、BIM与智能监控技术、全过程质量控制体系、人员能力建设四者结合起来，就能形成高效的防控网络，这是当前我国面临的一个难题。三是经济效益和社会效益显著，高质量施工不仅降低了返工和运维费用，而且符合建筑业高质量发展的方向，从根本上减少了安全事故，提高了施工质量和用户的满意度。四是智能技术是关键驱动力，人工智能预警系统、智能用电管理平台等工具应用实现从“人防”到“技防”的转变，隐患识别的精准度和响应速度大幅提升。在建筑行业转型升级的大背景下，电气安装工程精细化、智能化管控已是必然趋势。未来，施工管理需持续深化全过程、全要素质量管控，持续更新智能化施工技术与监管手段，强化多专业协同施工机制，不断完善质量责任追溯体系，从源头杜绝电气施工质量通病，全面提升建筑电气工程施工标准化、规范化、智能化水平，为建筑工程安全稳定运行、绿色低碳运维提供坚实的技术与管理支撑。

参考文献：

[1] 王永昌.建筑电气工程施工过程中存在的质量通病及其防治探究[J].科技资讯,2026(05):120-122.
[2] 宁海剑.建筑电气施工质量通病与控制措施探讨[J].砖瓦世界,2024(10):55-57.
[3] 闫沛颖.建筑电气施工技术要点及质量控制策略[J].中国建筑金属结构.2023,22(03):166-168.
[4] 韩斐.论建筑电气安装工程质量通病的施工防治[J].建材发展导向,2024,22(07):24-26.
[5] 戴志锐.机电安装工程电气施工关键工序控制与管理分析[J].城市建设理论研究,2022(16):31-33.

建筑给排水立管穿越楼板的防水施工工艺与渗漏防控措施

宋元强[1]，迟 帅[2]，林 伟[3]

（1. 山东耀华特耐科技有限公司，山东 滨州 256218；
2. 风信文化科技（瑞昌）有限公司北京分公司，北京 100124；
3. 烟台市城市排水服务中心，山东 烟台 264013）

摘 要 针对建筑给排水立管穿越楼板部位易发生渗漏、维修难度大、影响建筑使用功能等突出问题，本文系统阐述立管穿楼板防水构造原理与质量控制核心逻辑，明确管道类型、套管形式、密封材料、细部构造对防渗效果的关键作用，构建涵盖套管预埋、基层处理、管道安装、密封嵌填、防水层施工、成品保护的全流程标准化施工工艺体系，提出设计优化、材料管控、工序管控、节点防控、验收管控、运维管控六位一体的渗漏综合防控措施，以期为建筑工程给排水管道防水施工与质量验收提供参考。结果表明，通过构造强化、工艺标准化与全过程质量闭环管理，可显著提升穿楼板节点防水可靠性，降低渗漏发生率。

关键词 给排水立管；穿越楼板；防水施工；套管；密封材料

中图分类号：TU82 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.034

0 引言

给排水立管穿越楼板是建筑防水工程中的薄弱节点，该部位受管道振动、温差变形、沉降收缩、施工缺陷等多重因素耦合作用，易出现界面分离、密封失效、裂缝贯通等问题，进而引发渗漏。本文以立管穿楼板防水构造为研究对象，围绕构造形式、材料性能、施工工序、质量控制、渗漏防控等核心内容，建立系统化施工工艺体系与全维度渗漏防控机制，明确各工序操作要点、质量标准与验收要求，为建筑给排水工程穿楼板节点防水施工提供规范、统一、可落地的技术参考。

1 立管穿越楼板防水失效的主要影响因素

1.1 构造设计因素

防水构造设计不完善是渗漏产生的先天原因。未按规范设置套管、套管高度不足、套管与管道间隙不合理、止水环缺失或位置错误，会导致水沿管壁与套管间隙下渗；未设置阻水台、未做附加防水层、找坡方向错误，会使节点区域长期积水，加剧渗漏风险；不同材质管道与混凝土、密封材料线膨胀系数差异过大，未设置柔性过渡构造，易在交变温度与振动作用下产生界面裂缝[1]。在高层建筑中，结构竖向沉降差异会进一步加大管根应力，若构造设计未考虑变形协调，极易出现贯通性渗水通道。

1.2 材料性能因素

材料性能不达标直接决定防水耐久性。密封胶耐老化、耐水性、黏结强度不足，长期使用后出现开裂、粉化、脱粘；套管采用锈蚀速率快的普通管材，未做防腐处理，锈胀破坏防水层；混凝土骨料级配不合理、微膨胀性能不足，浇筑后收缩过大形成贯通缝隙；防水材料耐水性、抗裂性、相容性差，与管道、套管、楼板基层无法形成有效黏结。部分工程为控制成本使用非标密封材料、低标号封堵混凝土，导致节点防水在交付短期内即出现失效。

1.3 施工工艺因素

施工工序不规范是渗漏最主要的诱因。套管预埋偏位、倾斜、固定不牢固，导致后期剔凿破坏结构与防水层；基层清理不干净、界面未做处理，密封材料与基层黏结失效；套管与管道间隙填塞不密实、未分层嵌填，形成渗水通道；防水层涂刷不均匀、搭接长度不足、收头未压实；洞口吊模不严密、混凝土振捣不密实、养护不到位，产生蜂窝麻面与收缩裂缝[2]。现场作业人员未接受专项技术交底，凭经验施工，是造成工序失控、质量缺陷频发的重要原因。

作者简介：宋元强（1979-），男，本科，工程师，研究方向：给排水。

1.4 外部作用因素

外部荷载与环境作用加速防水失效。管道水流冲击产生持续振动，使密封节点松动脱开；建筑结构沉降、温差收缩产生拉应力，造成界面开裂；卫生间、厨房等区域长期处于潮湿高温环境，加速材料老化与界面剥离；使用过程中违规打孔、敲击、改动管道，破坏原有防水构造。长期使用过程中，管道结露产生的自由水沿管壁下流，也会加剧管根部位的渗漏隐患。

2 立管穿越楼板防水构造体系与设计要求

2.1 套管构造设计

穿楼板立管应优先采用刚性防水套管或柔性防水套管，严禁无套管直接穿越。刚性套管适用于无振动、无沉降的普通楼层；柔性套管适用于高层建筑、地震区、管道振动较大区域[3]。套管应带止水环，止水环居中设置并满焊，防腐处理到位。套管内径应比管道外径大20 mm～30 mm，顶部应高出完成地面20 mm以上，卫生间、厨房等潮湿区域应高出50 mm以上，底部与楼板底面平齐。对于UPVC、PE等塑料管道，套管内应预留足够间隙，避免热胀冷缩造成挤压破坏。

2.2 防水层次构造

立管穿楼板部位应采用多道设防、刚柔结合构造体系。基层采用微膨胀细石混凝土分两次封堵密实；套管与管道间隙采用阻燃密实材料填实，上部采用防水密封胶嵌缝；楼板结构层上部设置附加防水层，与大面积防水层连通形成整体封闭；潮湿房间应在套管周边设置阻水台，高度不小于20 mm，宽度不小于25 mm，表面抹成圆弧过渡。构造层次自上而下依次为：饰面层、找坡层、防水层、附加防水层、封堵混凝土、结构楼板，各层之间连续封闭，无断点、无空腔。

2.3 材料匹配设计

防水材料应具备相容性、耐水性、抗老化性与黏结强度。密封材料选用中性硅酮耐候密封胶、聚氨酯密封胶等；封堵混凝土采用无收缩、微膨胀、高强度细石混凝土；防水层采用聚氨酯防水涂料、聚合物水泥防水涂料，与混凝土、塑料管道、金属套管均具有良好黏结力。材料进场前应进行相容性试验，避免不同材料之间发生化学反应导致起泡、脱落、失效。

3 给排水立管穿越楼板标准化防水施工工艺

3.1 施工准备与技术管控

施工前编制专项施工方案，明确套管型号、安装位置、封堵材料、防水构造与工序要求；对作业人员进行技术交底，落实工序自检、互检、交接检制度；核对管道规格、套管尺寸、止水环形式，检查材料合格证与性能检测报告；清理作业面，保证基层干燥、无油污、无浮灰、无松动混凝土。对高层建筑、管道密集区、潮湿房间等关键部位，应先行制作工序样板，验收合格后方可大面积展开施工。

3.2 套管预埋与定位固定

套管安装应在楼板钢筋绑扎完成后、混凝土浇筑前进行。按轴线与标高精准定位，保证套管垂直、位置准确；采用附加钢筋与楼板主筋焊接固定，防止浇筑时位移、偏斜、上浮；套管内填塞泡沫棒或纸袋，防止水泥浆进入；套管外壁除锈干净，涂刷防腐涂料，止水环焊接连续饱满无气孔。预埋完成后应进行复核验收，确保位置、标高、垂直度均满足规范要求，避免后期剔凿整改。

3.3 基层处理与洞口封堵

管道安装完成后，对套管周边洞口进行凿毛处理，清除浮渣、粉尘，洒水湿润；采用微膨胀细石混凝土分两次封堵，第一次浇筑至楼板厚度1/2处，振捣密实，养护24 h以上；第二次浇筑至距板面20 mm～30 mm，表面压实抹平，养护不少于7 d；封堵混凝土不得出现蜂窝、麻面、裂缝、孔洞。封堵前应涂刷界面剂，提高新旧混凝土结合力，降低收缩开裂风险。

3.4 间隙填塞与密封嵌填

套管与管道之间的环形间隙清理干净、干燥无积水；下部采用油麻、石棉水泥或阻燃密实材料分层捣实，填塞深度不小于1/2间隙高度；上部预留10 mm～20 mm凹槽，涂刷界面处理剂，嵌入防水密封胶，胶缝饱满、连续、光滑、无气泡、无断点，与管壁、套管黏结紧密。密封胶施工应在干燥环境下进行，严禁在潮湿、低温、雨雪条件下施工。

3.5 附加防水层与整体防水层施工

基层干燥后，在套管周边涂刷附加防水层，范围为套管中心向外不小于250 mm，厚度不小于1.5 mm；附加层干燥成膜后，施工大面积防水层，防水层向上包裹套管高度不小于50 mm，收头处用密封胶封严；防水层分遍涂刷，均匀无漏刷、无堆积、无空鼓，厚度满足设计要求[4]。防水层施工完成后应进行自然养护，养护期间禁止踩踏、堆放物料。

3.6 阻水台施工与成品保护

潮湿区域在防水层上做阻水台，采用水泥砂浆或细石混凝土浇筑，表面抹光压实，形成圆弧倒角；施工完成后严禁冲击、敲打、挤压套管与管道；防水层完全固化后方可进行后续工序；做好标识，禁止在防水区域堆放重物、打孔、切割。成品保护应贯穿施工全过程，避免交叉作业造成破损。

4 渗漏综合防控措施

4.1 设计源头防控

严格执行规范要求，明确套管形式、止水构造、防水层次、材料指标；对高层建筑、潮湿房间、管道密集区域进行专项构造设计；合理布置立管位置，避免集中穿越导致施工空间不足；采用线膨胀系数相近的材料组合，减少变形差引发的开裂。设计文件中应明确闭水试验要求、验收标准及后期维护要点。

4.2 材料质量防控

建立材料进场验收制度，核查合格证、检测报告，按规定抽样复检；严禁使用过期、结块、变质、无检测报告的防水材料；密封胶、混凝土、防水涂料等应匹配相容，避免反应失效；套管、止水环优先选用耐腐蚀材料，或做好可靠防腐处理。对关键材料实行封样管理，确保现场使用与样品一致。

4.3 施工过程防控

实行工序样板引路，验收合格后方可大面积施工；严格控制混凝土封堵、间隙填塞、密封嵌填、防水层涂刷等关键工序；套管预埋精准固定，杜绝后凿洞、后装套管；加强混凝土养护与防水涂膜养护，避免早期失水开裂；高温、低温、雨雪天气采取相应防护措施[5]。施工过程应留存影像资料，实现质量可追溯。

4.4 节点细部防控

重点管控套管周边、管根、阻水台、防水层收头等薄弱部位；管根做成圆弧角，避免应力集中开裂；多管并排穿越时设置整体套管或预留整体孔洞，保证封堵密实；管道支架设置合理，减少管道振动传递至防水节点。对管根、阴阳角、预埋件周边等易渗漏部位，一律增设附加防水层。

4.5 验收检测防控

施工完成后进行 24 h 闭水试验，蓄水高度满足要求，检查管根、套管周边无渗漏、无湿渍；检查防水层厚度、附加层范围、密封胶质量、套管高度、阻水台尺寸等项目；验收不合格必须返工处理，重新闭水试验合格后方可隐蔽。闭水试验应分阶段进行，封堵完成后、防水层完成后分别试验，实现全过程质量把控。

4.6 运维使用防控

建立竣工移交与使用维护制度，严禁私自改动、拆卸、切割管道与套管；禁止在管根区域打孔、开槽、敲击；发现渗漏及时维修，避免扩大损坏；定期检查管根、密封胶、防水层状态，及时修复老化破损部位。物业单位应建立防水节点巡检机制，降低后期渗漏维修成本。

5 质量验收标准与控制指标

5.1 主控项目

套管材质、规格、安装位置、标高、垂直度符合设计与规范要求；止水环安装正确、焊接饱满、防腐完好；封堵混凝土密实无裂缝、无蜂窝孔洞；密封胶连续饱满、黏结牢固、无开裂脱胶；闭水试验合格，无渗漏、无渗水痕迹。主控项目全部合格方可通过验收。

5.2 一般项目

防水层厚度、范围、搭接、收头符合要求；阻水台尺寸、坡度、外观满足规定；表面平整、洁净、无损伤；成品保护到位，无破损、无污染。一般项目合格率应不低于 80%，且无明显影响使用功能的缺陷。

5.3 允许偏差项目

套管中心位置偏差不大于 10 mm；套管垂直度偏差不大于 2 mm/m；套管高出地面高度偏差不大于 5 mm；密封胶缝宽度、深度均匀，符合设计要求。各项偏差应在规范允许范围内，超差项目必须整改到位。

6 结束语

建筑给排水立管穿越楼板防水是建筑防水体系的关键节点，其施工质量直接影响建筑使用功能与结构耐久性。本文通过系统分析防水失效影响因素，构建刚柔结合的构造体系与全流程标准化施工工艺，提出设计、材料、施工、细部、验收、运维六位一体的综合渗漏防控措施，形成完整的技术体系与质量控制机制。实践表明，严格执行标准化施工工艺、落实全过程质量闭环管控，可有效消除渗漏隐患，提升节点防水可靠性与长期耐久性。未来研究可进一步针对新型管道材料、预制套管、密封体系与快速施工技术开展深化研究，推动建筑穿楼板防水工艺向标准化、工业化、长效化方向发展。

参考文献：

[1] 陈春.建筑给排水管道穿楼板套管施工技术[J].中华建设,2025(07):198-200.
[2] 张素晶.建筑安装工程给排水施工技术分析[J].房地产世界,2021(11):87-89.
[3] 李哲,王照霞,张垒.浅析建筑给排水管道穿楼板套管的施工工艺与造价控制[J].中国地名,2025(02):214-216.
[4] 梁伟.建筑给排水管道防渗漏施工控制技术研究[J].工程建设与设计,2025(13):225-227.
[5] 张龙.给排水设计中与结构专业配合的常见问题探讨[J].给水排水,2022(S2):319-322.

矿山建设工程高陡边坡防护施工技术研究

李靖雯[1]，徐刚刚[2*]，徐付强[3]

（1. 青岛领略智能科技有限公司，山东 青岛 266000；
2. 青岛速信易信息咨询服务有限公司，山东 青岛 266061；
3. 青岛国道通设计咨询有限公司，山东 青岛 266100）

摘 要 在矿山建设过程中，高陡边坡的稳定与否直接影响着整个矿山工程的安全、人员的生命安全以及周围自然环境。随着矿山开采深度加大，边坡也越来越高，导致高陡边坡失稳的可能性大大增加。传统的防护方法已不能适应复杂地质条件下对矿山工程的要求。本文主要针对矿山建设中的高陡边坡防护施工技术进行论述，介绍了边坡防护的意义，总结了目前常用的防护施工技术和新的防护技术，并提出相应的建议。结果表明，通过采用锚固技术、柔性防护网、植被混凝土生态防护以及智能化监控等方式可以大大提高高陡边坡的整体性和耐久性，从而保证矿山的安全生产。

关键词 矿山建设工程项目；高陡边坡；边坡防护；稳定度管理

中图分类号：TD824.7 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.035

0 引言

在矿山建设过程中，高陡边坡普遍存在于露天矿坑、排土场、尾矿库以及道路附近等地带。边坡高度大于30 m，边坡角度大于50°的高陡边坡，在地壳运动、爆破振动、雨水下渗以及采掘活动等因素作用下容易出现崩塌、滑坡等现象。近几年来，高陡边坡失稳引发的各种矿山事故时有发生，给矿工生命财产造成极大危害，同时也给矿山企业的正常生产带来严重影响。如何做好高陡边坡防护工作是当前矿山工程地质及岩土工程领域研究热点问题。目前国内外学者对边坡稳定性分析、加固支护以及生态修复等方面已取得一定成就，但是针对施工方法改进、特殊环境下适用性和整体性应用方案还缺少相关研究内容。本文以高陡边坡防护重要性为基础，对锚固、防护网及生态防护等关键技术进行详细探讨，并给出根据实际工程地质条件和施工环境选择合理防护措施的建议，以期为矿山边坡治理提供借鉴。

1 矿山建设工程高陡边坡防护施工技术的重要性

1.1 保障矿山施工与作业人员生命安全

高陡边坡一旦出现失稳破坏一般具有突然性、影响面广、覆盖迅速等特点，容易导致现场工作人员伤亡惨重。露天矿山生产中，铲装、运输、钻孔等车辆通常位于坡脚或者坡面上方进行工作，边坡局部掉落或者全部下滑都会危及人员及机械的安全。因此，合理有效的高陡边坡防护措施是矿山安全生产的基础保障，可以大大减少滑坡、崩塌等事故给人们带来的危害。

1.2 维护矿山生产系统与基础设施稳定

矿山生产系统由运输道路、破碎站、胶带输送机以及排水设施构成，而这些设施大多依附于边坡或者处于坡脚位置。高陡边坡发生位移塌落，会影响道路正常通行、损坏机械设备、破坏排水系统，从而导致矿山停产停工[1]。另外，如果排土场或者尾矿库边坡失稳还会引起泥石流等地质灾害，给下面工矿企业和附近村屯带来巨大损失。良好的边坡防护措施可以保证矿山生产系统的正常运转并降低意外停顿所带来的经济损失。

1.3 降低矿山地质灾害与环境破坏风险

矿山高陡边坡失稳导致巨大的经济损失，同时也带来较为严重的地质灾害以及环境问题。滑坡体会阻塞河流、掩埋植被、占用耕地等；而持续裸露的边坡遭受雨淋后易发生水土流失。同时，不稳定边坡也会给矿区内地下水资源以及地表径流带来不良影响。合理使用高陡边坡防护施工工艺可以有效降低地质灾害的发生率，减小对矿山及其周围环境的影响，在一定程度上做到经济发展与环境保护相辅相成。

作者简介：李靖雯（1993-），女，本科，工程师，研究方向：建筑防护。
***通信作者**：徐刚刚（1988-），男，专科，工程师，研究方向：矿山建设。Email：1048144705@qq.com

2 矿山建设工程高陡边坡防护施工技术

2.1 高陡边坡预应力锚固施工技术

预应力锚固是防治高陡边坡深层滑动的主要措施。它是利用在边坡潜在滑面之后的岩土体内钻孔，插入高强度钢绞线或者钢筋束，施加预应力后锚固到稳定的地层上形成一种主动抗滑力[2]。其施工工艺有钻孔、清孔、锚筋加工及安装、灌浆、张拉锁定以及封锚等工序。对于高陡边坡而言，则要使用跟管钻进以克服破碎地层易塌孔的问题；还要用二次高压注浆以增加锚固体与地层之间的黏结力。预应力锚固可以有效地防止边坡变形，把滑动力转移到较深处较为稳固的岩石中去，因此适合用于岩质高陡边坡或较大规模的滑坡体进行深层次加固。在具体应用时还需要结合具体情况来确定合理的锚固角度和锚固长度并且设立长期预应力监测制度，通过对预应力损失情况进行定期检查来进行必要的补拉，使边坡在整个使用期内都处于安全的状态。因此，在高陡边坡工程中，预应力锚固不仅是一种关键的主动加固手段，更需要结合地质条件与长期监测进行动态设计与维护，才能充分发挥其抗滑稳定作用。

2.2 高陡边坡柔性防护网系统施工技术

柔性防护网系统用于防治高陡边坡表面掉落小块岩石和石块。其主要由钢柱、支撑绳、钢丝绳网、环形网以及减压环构成，具有方便快捷、便于施工、能够承受较大坡度变化、吸能效果优良等特点。施工要点是：按设计要求在坡面上布置锚固基座，然后安装钢柱并使其保持一定倾角状态，再施加张力支撑绳。形成主动或者被动防护方式。主动防护网贴近坡面利用预张力阻止坡面表层岩土体运动；而被动防护网位于坡面中部或下部用来阻拦滚落石头。对较高较陡边坡，则需要利用无人机配合放线法高空布置柔性防护网，保障施工人员安全以及柔性防护网良好拉伸状态。另外，还需根据落石轨迹预测合理布置柔性防护网高度及等级，在重要部位放置减压环降低冲击力，并及时清除柔性防护网上方堆积物，避免柔性防护网超载而损坏。

2.3 高陡边坡植被混凝土生态防护施工技术

植被混凝土生态防护技术集成了工程防护和生态修复双重作用，可用于岩质高陡边坡上。该技术是在边坡上铺设镀锌铁丝网或者土工格室之后，在其上喷射具有种植土、水泥、有机物、保水剂以及草灌种子等成分的植被混凝土基材，从而得到具有一定强度并且有利于植物生长的防护层[3]。其主要施工技术要点有：基材配合比要综合考虑抗冲刷性和植物发芽率，采取干喷或者湿喷的方式分层喷射，保证喷射厚度在 8 厘米～ 12 厘米并留有通气孔以便坡体内渗水排出。这种方法可使坡面迅速被植物所覆盖，在此基础上通过根系加固及叶片挡雨提高边坡表层稳定性，同时也可美化矿山环境。为了进一步提高其效果，要选择适应性强、耐旱耐瘠薄的本地草灌类植物混播，在养护期内还需用滴灌或者喷灌的方法保证幼苗成活，最终达到与周围自然环境融为一体的效果。

3 矿山建设工程高陡边坡防护施工技术的应用策略

3.1 基于地质勘察的边坡稳定性分级与防护方案优选

矿山高陡边坡防护施工前要进行系统的工程地质和水文地质勘察。勘察内容有地层岩性、地质构造、结构面产状、地下水分布和岩体风化程度等。根据勘察结果，采用定性分析和定量评价相结合的方法，将边坡稳定性分为稳定、基本稳定、欠稳定、不稳定四个等级。根据不同的边坡等级，采取不同的防护措施，稳定边坡以监测为主，基本稳定边坡用柔性防护网加排水措施，欠稳定边坡用预应力锚固和框架梁组合支护，不稳定边坡优先削坡减载，再辅以综合加固。

定性分析依靠岩体结构面特征以及边坡坡面组合情况，利用赤平极射投影法判定结构面切割所造成的楔形体及其滑动趋向。定量评价用极限平衡法计算边坡安全系数，根据滑动面形态选择毕肖普法或简布法，稳定系数大于 1.25 的边坡归入稳定等级，介于 1.15 至 1.25 之间为基本稳定，介于 1.05 至 1.15 之间为欠稳定，小于 1.05 则为不稳定[4]。对基本稳定的边坡，用柔性防护网做主动网覆盖坡面，网孔尺寸控制在 8 厘米左右，锚固点间距不大于 4 米，排水措施为坡顶截水沟和坡面泄水孔相结合。欠稳定边坡的预应力锚固用直径 28 毫米的钢筋锚杆，锚固段长度不小于 4 米，设计锚固力控制在 200 千牛到 300 千牛之间，框架梁采用钢筋混凝土现浇，梁截面尺寸 30 厘米 ×30 厘米。不稳定边坡削坡减载时，每级坡高控制在 15 米以内，坡率放缓到 1:1 ～ 1:0.75 之间，综合采用抗滑桩和预应力锚索相结合的方式进行加固。根据分级优选原则，不采用相同强度的加固措施，保证安全的同时控制工程造价。

3.2 施工全过程质量控制与动态监测反馈调整

高陡边坡防护施工质量控制要覆盖材料进场、工序施工、验收检验等各个环节。锚杆锚索施工时，要严格控制钻孔角度、深度、注浆饱满度，锚索张拉分阶段加载并记录伸长量，防护网施工时要保证网片搭接长度和锚固点连接强度，生态防护中要控制基材喷

射厚度和种子分布均匀性。同时建立边坡变形动态监测系统，在地表布置地表位移监测点，在深部布置深部位移孔和锚固力监测传感器。

锚杆钻孔角度允许偏差为设计角度的正负两度以内，深度允许超深50厘米但不允许欠深，用全站仪或导向仪逐孔校核。注浆用水泥砂浆或纯水泥浆，水灰比控制在0.45～0.50之间，注浆压力0.5兆帕～1.0兆帕，当孔口返浆、浆液比重与注入浆液相同时认为注浆饱满。锚索张拉采用穿心式千斤顶分阶段进行，每个阶段持荷5分钟，记录实际伸长量与理论伸长量之差，超过10%就找原因。防护网网片搭接长度不小于20厘米，锚固点用直径16毫米钢筋锚杆固定，锚固深度不小于2米，每平方米网面锚固点不少于4个。生态防护基材喷射厚度按照设计要求进行控制，允许偏差为正负两厘米，种子分布均匀性用随机取样检验，每平方米取样3个点，种子数量偏差不超过30%。边坡变形动态监测系统在地表沿边坡倾向布设监测断面，每个断面不少于3个监测点，用全球定位系统或者全站仪进行周期性观测；深部位移孔钻孔深度大于潜在滑动面以下5米，用测斜仪每两周测量一次；锚固力传感器安装在关键受力锚杆上，实时监测锚固力的变化。将监测到的数据实时传送到分析平台，当变形速率达到2毫米/日或者累计位移达到设计允许值的70%以上时就发出报警信号。当监测值达到预警阈值时，平台会发出报警信号，现场停止施工并组织技术分析，按照分析结果调节施工参数或者增添加固手段，从而实现施工、监测、反馈、改善的闭环控制，保证边坡在施工期间以及运营期的长久稳定。

3.3 施工环境适应性改良与多技术协同应用

矿山高陡边坡所处的环境比较复杂多变，施工技术的应用要考虑气候、水文和开采扰动等各方面因素。在降雨充足的地方，在坡顶处设置截水沟、坡面布设排水孔和泄水槽，减小雨水入渗对边坡稳定性的破坏。冻融频繁地区的锚固注浆材料要加入防冻剂，植被混凝土用耐寒植物品种。高度大于100米的超高陡边坡，单一种类的防护措施不能达到要求，需要采用多种技术共同配合使用。

降雨充沛地区的截水沟沿坡顶外围布置，断面尺寸为底宽40厘米、深50厘米，纵向坡度不小于1%，将坡顶汇水引至天然沟渠。坡面排水孔孔径为50毫米～80毫米，孔深3米～5米，间距3米～5米，孔内插入打孔塑料管并包裹土工布防止堵塞。泄水槽沿坡面纵向布置，每20米设一道，槽体用混凝土浇筑，断面尺寸20厘米×20厘米，与坡脚排水系统相接。冻融频繁地区，注浆材料中掺入水泥用量为3%～5%的防冻剂，选用亚硝酸钠或氯化钙等具有早强和防冻双重功能的添加剂，注浆后覆盖保温材料养护不少于7天[5]。植被混凝土用羊茅、早熟禾等耐寒草种和紫穗槐等灌木种子混合播种，播种时间在春季解冻后或秋季初冻前。超高陡边坡多技术协同的方案中，坡体深层用预应力锚索抗滑，锚索长度为30～50米，锚固力设计值为800千牛～1 200千牛，锚索间距4米～5米。坡面浅层用主动柔性防护网约束，网型为DO/08/300型钢丝绳网，网孔尺寸30厘米×30厘米，钢丝绳直径8毫米。坡脚设被动柔性防护网拦截落石，网高5米～6米，立柱间距10米，能量等级不小于500千焦。局部破碎带用喷射混凝土封闭，喷射厚度5厘米～8厘米，强度等级C20。坡面绿化用植被混凝土，喷射厚度为8厘米～12厘米，由种植土、水泥、有机质、保水剂和植物种子组成混合基材。多技术协同构成深部锚固、浅层约束、坡面防护、生态恢复的立体防护体系，各个技术层次互相补充而不是简单叠加，锚索给深层滑移提供抗滑力，主动网约束浅层块体脱落，被动网拦截坡脚落石，植被混凝土修复坡面生态，四者有机组合达到超高陡边坡全方位控制的目的。

4 结束语

矿山建设工程高陡边坡防护施工技术是矿山安全、可持续发展的重要组成部分。研究表明，高陡边坡防护不是单一技术的简单叠加，而应该根据工程地质条件来建立分层、分级、立体化的综合防护体系。预应力锚固解决深层滑动问题，柔性防护网控制浅层掉块，植被混凝土完成生态修复，三者在应用中互相配合、相互促进。随着智能传感技术和自动化施工设备的发展，高陡边坡防护施工将向着越来越精确、越来越智能化的方向发展，进而促进矿山建设工程的安全、绿色、高效发展。

参考文献：

[1] 孙守辉.石材矿山高陡边坡稳定性监测预警技术研究与应用[J].石材,2026(04):31-33.
[2] 朱末琳,杨建新,李岩,等.关于南方露天矿山高陡边坡生态修复技术研究[J].世界有色金属,2026(05):118-120.
[3] 李明和,杨晓涵,闫晓波,等.废弃矿山生态修复高陡岩质边坡复绿的可行性研究:以苔藓为例[J].科技创新与应用,2026,16(05):86-91.
[4] 陈明,侯勇,黄涛,等.半干旱地区露天废弃矿山生态治理应用研究[J].中国资源综合利用,2026,44(01):174-178,184.
[5] 丘小强,陈昌山,卢猛,等.基于边坡雷达监测的高陡边坡反倾岩层变形破坏特性研究[J].中国安全科学学报,2025,35(S2):203-209.

城市道路雨污水管道开挖回填施工技术研究

许大鹏

（安徽建工建设投资集团有限公司，安徽 合肥 230031）

摘　要　城市道路雨污水管道开挖回填施工受地质条件、交通需求及周边设施影响较大，易出现沟槽坍塌、管道破损、回填沉降等质量安全隐患，影响工程耐久性与道路通行稳定性。本文结合城市道路施工实际，对雨污水管道开挖回填施工技术展开系统研究，明确施工前期准备的核心要点，涵盖场地勘察规划、材料设备筹备、方案人员部署等方面；细化开挖施工中的放线、支护、排水及基底处理技术，优化回填施工的材料选择、分层夯实及管道保护措施，形成一套科学完善的施工技术体系，可有效规避施工风险，提升施工质量与效率，以期为城市道路雨污水管道工程施工提供实践参考，保障管道长期稳定运行，助力城市基础设施提质升级。

关键词　城市道路；雨污水管道；开挖施工；回填施工

中图分类号：TU992.05　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.036

0　引言

城市雨污水管网是保障城市内涝防治与水环境治理的关键基础设施，其建设质量直接关系到城市运行安全与居民生活品质。在城市更新与精细化建设持续推进的背景下，道路雨污水管道开挖回填施工面临着复杂地质条件、交通保畅及地下管线密集等多重挑战，传统施工模式已难以满足高质量发展要求。依托现代工程技术手段，强化施工全过程管控，优化开挖支护、排水降水与分层回填等核心工艺，能够有效防范沟槽失稳、管道破损及路基沉降等问题。构建科学完善的施工技术体系，对提升管网工程耐久性、延长设施使用寿命、推动城市基础设施提质增效具有重要的现实意义。

1　施工前期准备策略

1.1　施工场地勘察与规划

科学勘察与合理规划是保障开挖回填施工顺利开展、规避前期风险的基础。城市道路雨污水管道开挖回填施工需以场地实际条件为前提，全面开展地质勘察工作，精准明确土壤类型、地下水位埋深及土体承载力等核心参数，这些参数直接决定后续沟槽开挖坡度设定、支护方式选择及回填材料配比，是施工技术方案制定的核心依据。结合城市道路通行刚需，合理划定开挖区域，兼顾施工效率与交通疏导，规划便捷的施工便道，保障施工材料与机械的顺畅通行，同时设计科学的临时排水路线，提前规避施工期间雨水淤积对场地造成的扰动。全面排查场地周边地下管线，包括燃气、电力、通信等各类管线的具体位置、走向及埋深，同步核查周边构筑物分布情况，针对不同管线与构筑物的特性，制定针对性防护方案，避免施工过程中造成管线破损、构筑物沉降等安全隐患，为后续施工筑牢前期基础。

1.2　施工材料与设备准备

优质施工材料与适配机械设备是保障雨污水管道工程质量、提升施工效率的关键。材料质量直接决定管道系统使用寿命与运维效果，需严格筛选符合设计及规范要求的物资：管道构件应具备优良的耐腐蚀性与承压性能，回填土应满足级配要求，配套材料需符合施工标准。所有材料进场前须完成全面质量检验，杜绝不合格材料投入使用。根据施工规模与技术要求，配置挖掘机、装载机、自卸汽车、压路机等施工机具，所有机具进场后须完成调试与安全检测，及时排查设备故障，确保设备运行稳定，满足连续施工需求。提前储备应急抽水设备、支护加固材料、急救器材等应急物资，编制积水、边坡坍塌等突发情况的应急处置流程，确保突发事件能够快速有效处置，保障施工进度不受影响[1]。

1.3　施工方案编制与人员部署

完善的施工方案与合理的人员部署是保障施工有序推进的关键支撑。依据场地勘察成果，编制专项开挖回填施工方案，明确沟槽开挖、支护、排水、回填

作者简介：许大鹏（1987-），男，本科，工程师，研究方向：市政道桥工程。

等各工序的操作规范、技术指标、质量控制标准及验收要求，确保施工全过程有据可依。按照施工方案与工序安排，组建专业施工班组，明确各班组及岗位人员职责，保证开挖、支护、回填、质量检测等岗位人员配置充足、分工清晰。开工前对全体施工人员进行技术交底，详细说明施工技术要点、安全注意事项及质量控制要求，并开展安全培训，提升人员安全意识与规范作业能力，杜绝违规操作。制定科学合理的施工进度计划，明确各工序起止时间与衔接要求，统筹协调各班组作业进度，避免工序脱节，保障施工连续高效推进，按期完成施工任务。

2 城市道路雨污水管道开挖施工技术策略

2.1 开挖放线与沟槽开挖技术

精准放线与规范开挖是控制沟槽质量、避免道路及周边设施损坏的关键。开挖放线作为沟槽开挖的前提，需采用全站仪、水准仪等专业测量仪器，结合设计图纸要求，精准标注沟槽开挖边线、边坡坡度控制线及开挖深度控制线，在放线过程中反复校验测量数据，确保放线误差控制在规范允许范围内，避免因放线偏差导致沟槽尺寸不符，影响后续管道安装质量。根据场地地质勘察确定的土壤类型，合理设定沟槽开挖坡度，粉质土、砂土等稳定性较差的土壤需加大坡度，黏性土可适当减小坡度，从源头避免边坡坍塌风险[2]。严格控制沟槽开挖深度与宽度，开挖深度需符合设计标高，预留合理的作业空间，满足管道安装、支护操作及后期回填需求，同时控制开挖宽度，避免过度开挖造成周边土体扰动，减少对城市道路路面及周边构筑物的影响，开挖过程中及时清理沟槽内的浮土与杂物，确保沟槽开挖质量符合规范要求。

2.2 沟槽支护技术应用

针对性的沟槽支护是防控开挖坍塌风险、保障施工安全的核心措施。沟槽支护形式应结合土壤类别、沟槽深度及周边环境综合选定：深度较大、土体稳定性较差的沟槽，宜采用钢板桩支护，利用钢板桩高强度、抗侧压性能，有效约束沟槽边坡土体，防止边坡失稳坍塌；深度适中、周边存在建筑物的沟槽，可选用槽钢支护，兼顾支护稳定性与施工便捷性，降低对周边建（构）筑物的干扰。支护结构安装须严格遵循施工规范，确保钢板桩、槽钢的入土深度、间距满足设计要求，连接牢固可靠；安装完成后全面检查支护结构稳定性，及时整改松动、位移等问题。施工过程中定期监测支护结构变形情况，采用专用测量设备持续跟踪，若变形值超出规范允许范围，立即停止施工，采取加固、增设支撑等处置措施，确保支护结构始终处于稳定状态，保障施工人员作业安全[3]。

2.3 沟槽排水与基底处理

高效排水与规范基底处理是保障管道安装质量、防范后期沉降的重要基础。沟槽开挖过程中，地下水位过高或雨水淤积易导致基底土体软化，降低土体承载力，影响管道安装稳定性，因此须采取有效的排水降水措施。根据沟槽深度与地下水位条件，选用适宜排水方式：地下水位较低、水量较小的场地，采用集水坑排水，在沟槽底部设置集水坑，通过水泵抽排积水；地下水位较高、水量较大的场地，采用井点降水，通过布设井点管降低地下水位，确保沟槽内无积水。开挖至设计标高后，对基底进行全面整平，清除杂物与浮土，采用小型夯实机具对基底进行压实处理，提升基底土体密实度；随后检测基底承载力，若承载力不满足设计要求，立即采取换填优质土、铺设垫层等处理措施，确保基底承载力符合管道安装与使用要求，为管道安装提供坚实基础，防范后期因基底沉降引发管道破裂、渗漏等问题。

3 城市道路雨污水管道回填施工技术策略

3.1 回填材料选择与处理

回填材料的科学选择与精细化处理，是城市道路雨污水管道工程质量控制的核心环节，直接影响管道结构安全、道路使用年限以及后期运维成本。在城市道路复杂施工条件下，回填材料不仅要满足力学强度、压实性能与稳定性要求，还需兼顾环保性、经济性以及对地下管线的保护性。施工单位应严格按照设计文件与现行规范要求，对回填材料进行多指标筛选与检测，优先选用级配良好、有机质含量低、压缩性小、透水性适中的土质或砂石材料，严禁使用淤泥、泥炭、冻土、腐殖土、建筑垃圾以及含有尖锐石块的土料。对于管道两侧胸腔部位、管顶以上一定范围等关键区域，应优先采用中粗砂、石屑、级配碎石等柔性回填材料，这类材料颗粒均匀、受力稳定，既能有效减小对管道外壁的挤压与磨损，又能快速疏导地下水，避免管周积水引发腐蚀、冻胀等病害。材料进场前必须完成含水率、颗粒级配、击实试验、含泥量等关键指标检测，检测合格后方可进入施工现场[4]。针对现场土料含水率偏离最佳压实范围的问题，应采取针对性处理措施：含水率过高时，采用翻晒、风干、掺加生石灰或水泥进行改良；含水率过低时，通过均匀洒水、

闷料等方式调整，确保土体达到最佳压实状态。回填前还需对材料进行破碎、过筛处理，严格控制最大粒径，避免大颗粒棱角划伤管道防腐层或造成局部应力集中。通过系统化的材料选型、检测、预处理与管控，可显著提升回填土体密实度，降低后期不均匀沉降风险，为雨污水管道长期稳定运行与道路结构耐久使用提供坚实的保障。

3.2 分层回填与夯实技术

分层回填与分层夯实是保障回填质量、消除路基沉降、确保道路平整度的关键工序，必须执行标准化、精细化、全过程可控的作业流程。回填施工必须在管道安装就位、闭水试验合格、基础结构达到设计强度且沟槽内无积水、无淤泥、无杂物后方可启动。施工全过程严格遵循“分层摊铺、分层压实、逐层检测”的基本原则，严禁一次性厚层回填、机械直接倾倒或带水回填。每层回填厚度应根据压实机具类型、回填材料特性精准确定，人工夯实厚度不大于 200 mm，小型振动夯不大于 250 mm，中型压路机不大于 300 mm，确保压实能量能够有效传递至下层土体，避免出现松散夹层、漏压、欠压等质量缺陷。回填作业应遵循由低向高、对称均衡的原则，管道两侧同步回填、同步夯实，两侧高差控制在规范允许范围内，防止单侧土压力过大造成管道偏移、扭曲、接口开裂等问题[5]。压实作业按照“先轻后重、先慢后快、先边缘后中间”的顺序进行，先用轻型机具稳压，消除表层土体空隙，再用重型机具提升密实度，确保压实效果均匀稳定。对于管道周边、检查井侧壁、沟槽转角等机械难以覆盖的区域，必须采用小型夯实机具或人工补夯，做到压实无死角、无遗漏。每一层压实完成后，及时采用环刀法、灌砂法等规范方法进行密实度检测，严格按照道路等级与设计要求控制指标，达标后方可进行上一层回填，未达标区域必须立即返工复压，直至满足要求。通过严格执行分层回填与规范夯实工艺，可从根本上消除回填沉降隐患，提升工程整体质量。

3.3 回填过程管道保护

回填全过程的管道精细化保护，是避免管道结构损伤、接口渗漏、位移变形，保障工程使用寿命的重要举措，必须贯穿回填施工全周期。施工前应在管道顶部及两侧铺设土工布、橡胶垫板或细砂缓冲层，有效降低回填材料冲击与机械振动对管道造成的影响。严禁挖掘机、自卸车、压路机等大型机械设备在未达到规定覆土厚度的区域行驶、停靠或作业，防止重压导致管道破裂、变形或接口破坏。回填作业采用人机配合模式，机械在沟槽外侧安全区域卸料，由人工将材料均匀、平缓摊铺，避免土料集中坠落冲击管道，尤其防止对管道接口、检查井连接部位造成扰动。管道接口、法兰、胶圈等薄弱部位应设置专项防护措施，回填过程中严禁碰撞、挤压，确保密封结构完好。施工过程中安排专职人员全程旁站监护，每完成一层回填即对管道高程、轴线位置进行复测，实时监控管道是否发生位移、沉降、倾斜等情况，一旦超出允许偏差立即停工调整。同时，对管道外观进行全面检查，及时发现并处理裂缝、凹陷、破损等问题。对于大口径柔性管道，可在管内设置临时支撑结构，抵御外部回填土侧压力，防止管道径向变形。当回填至管顶以上 50 cm 时，方可允许轻型机械缓慢通行；管顶覆土厚度超过 1 m 后，方可正常通行重型施工机械。通过事前防护、事中监测、事后复核的全流程管控，可最大限度降低回填作业对管道的损伤，保证管道安装精度与结构完整性，为城市道路长期安全通行与雨污水系统稳定运行提供可靠支撑。

4 结束语

城市道路雨污水管道开挖回填施工是城市基础设施建设的重要组成部分，施工质量直接关系到管道运行安全性、耐久性，以及城市道路通行质量和生态环境治理成效。本文围绕施工全流程，梳理前期准备、开挖施工、回填施工各环节的技术要点，优化场地勘察、沟槽支护、分层夯实、管道保护等关键技术，形成适配城市道路施工场景的技术路径，可有效解决施工中常见的质量安全隐患，提升工程施工的规范性与科学性。城市道路施工环境复杂多变，未来可结合不同地质条件、道路等级的实际需求，进一步优化施工技术参数，完善应急处置方案，推动施工技术向高效、绿色、安全方向升级。

参考文献：

[1] 来瑾.海绵城市背景下污水管水质监测及分析研究[J].山西化工,2025,45(10):260-262.
[2] 龚雄俊.基于城市发展脉络的市政污水管新建规划[J].城市开发,2025(20):52-54.
[3] 齐利华,邓海,谭庆俭,等.滨海河网城市污水管穿越河涌工程设计关键点[J].中国给水排水,2025,41(10):65-69.
[4] 赵继东.城市市政污水管顶管施工关键技术[J].广东建材,2024,40(12):126-130.
[5] 杨子健.城市雨污水顶管工程在狭小空间施工方法研究[J].建筑施工,2024,46(07):1039-1042.

水性防水涂料复合防护层界面粘结技术研究

张志浩[1]，薛宝松[2]

（1. 山东壹贰壹新材料科技有限公司，山东 烟台 264000;
2. 山东壹贰壹保温材料有限公司，山东 烟台 264000）

摘 要 水性防水涂料复合防护层的界面粘结性能是保障防水层连续性、抗剥离能力和长期服役耐久性的核心影响因素。本文围绕复合防护体系中基层、底涂层、防水涂膜、增强材料及节点附加层之间的粘结关系，系统分析了施工及服役过程中常见的空鼓、起皮、层间剥离等问题的产生原因，并从基层粗化、底涂配伍、增强层铺设、层间干燥及质量检测等方面提出针对性的界面粘结质量技术控制要点，以期为水性防水涂料复合防护层施工质量提升与工程应用提供参考。

关键词 水性防水涂料；复合防护层；界面粘结

中图分类号：TU56+1.65 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.037

0 引言

水性防水涂料因成膜连续、施工适应性强、环保性能较好，在屋面、地下室、厨卫间及外墙节点防水中应用较多。在实际施工中，复合防护层通常需要与混凝土、水泥砂浆、找平层、增强材料和保护层共同作用，其防水效果并不只取决于涂料本身性能，还受界面粘结质量影响[1]。若基层浮灰未清理、含水率控制不当、底涂与主涂料配伍不足，或增强层铺设过程中存在皱折、空铺和浸润不充分，容易造成空鼓、起皮、层间剥离和节点开裂等问题，削弱防水层整体连续性。基于此，有必要围绕复合防护层界面粘结关系，对基层处理、材料配伍、层间施工和质量检测等技术环节进行分析。

1 水性防水涂料复合防护层界面粘结问题分析

1.1 复合防护层结构及界面粘结特点

水性防水涂料复合防护层一般由基层、界面处理层、防水涂膜层、增强层和保护层共同组成，其中基层多为混凝土、水泥砂浆找平层或既有防水修补面，底涂层承担封闭毛细孔、提高润湿性和改善界面吸附的作用，防水涂膜层则依靠水分挥发、聚合物粒子成膜及无机填料骨架支撑形成连续防护膜。复合结构中的界面粘结具有多层次特征，既包括涂料与基层之间的渗透附着和机械咬合，也包括底涂层与主涂膜之间的材料相容，以及涂膜对增强材料纤维孔隙的包覆和浸润。

1.2 界面粘结失效的主要表现

水性防水涂料复合防护层的界面粘结失效在工程中主要表现为空鼓、鼓包、起皮、层间剥离、涂膜开裂和节点边缘脱粘等。空鼓多发生在基层强度不足、表面粉化或底涂渗透不充分的区域，敲击时有明显空响，后期易发展为涂膜整体剥离；鼓包常与基层含水率偏高、涂膜一次施工过厚、内部水分排出受阻有关，受温度升高或水汽压力影响后更加明显；起皮和层间剥离则多见于层间间隔时间控制不当、上一道涂膜表面污染、底涂与主涂料体系不匹配等情况。增强层铺贴不密实也会造成局部纤维外露、皱折和空铺，使涂膜受力后沿增强材料边缘撕裂。管根、阴阳角、落水口、施工缝等节点部位由于形状复杂、应力集中和水流冲刷频繁，更容易出现边缘翘起、附加层脱粘和细部开裂，成为复合防护层早期失效的常见位置[2]。

1.3 影响界面粘结质量的主要因素

影响界面粘结质量的因素主要集中在基层状态、材料配伍、施工参数和养护环境几个方面。基层强度、平整度、粗糙度和清洁程度是粘结质量的基础，若基层存在起砂、浮浆、油污、脱模剂残留或裂缝未修补，涂料难以充分浸润并形成有效附着；基层含水率过高时，水汽会阻碍聚合物成膜，甚至在涂膜下方形成气压，导致鼓包和脱粘。在材料配伍方面，底涂层应与主涂料具有良好相容性，乳液类型、固含量、填料比例和成膜助剂差异过大，均可能降低层间结合强度。施工

作者简介：张志浩（1990-），男，专科，研究方向：建筑涂料。

参数同样关键，涂刷厚度过大易造成表干内湿，厚度过薄则难以形成连续膜层；层间间隔过短会影响水分释放，间隔过长又可能因表面落尘或老化降低再粘结能力。

2 水性防水涂料复合防护层界面粘结技术方案

2.1 基层处理与界面粗化控制

基层处理是复合防护层界面粘结的前置环节，处理质量直接影响涂料对基层的润湿、渗透和机械咬合。施工前应检查基层强度、平整度、含水状态和表面污染情况，对起砂、空鼓、浮浆、油污、脱模剂残留及松散修补层进行清除。混凝土或水泥砂浆基层宜采用打磨、铣刨或钢丝刷处理，使表面形成均匀微粗糙面，避免过度抛光造成涂料铺展后附着不足。一般情况下，基层表面应坚实、无明水、无浮灰，局部裂缝宽度大于 0.3 mm 时需先开槽嵌填柔性密封材料或聚合物修补砂浆；阴阳角应做成圆弧或钝角，圆弧半径宜控制在 20 mm ～ 50 mm，以减少涂膜转角处拉应力集中。

基层含水率和表面粗糙度需要结合水性涂料成膜特点进行控制。水性涂料对基层湿度有一定适应性，但若基层内部水分持续外排，涂膜下方易形成水汽压力，导致鼓包或局部脱粘。对普通水泥基基层，可将表面含水率控制在 8% 以下，潮湿环境中至少保证表面无明水、无返潮水膜，并通过小面积试涂观察 24 h 后是否出现发白、鼓泡和粘结不足。界面粗化不宜只追求粗糙，应保证粗糙均匀、无尖锐凸起，避免涂膜局部过薄。处理完成后可采用吸尘器、压缩空气或湿布清理残余粉尘，待基层达到可施工状态后再进行底涂施工，减少浮灰隔离层对后续粘结的不利影响。

2.2 底涂层与主涂料配伍设计

底涂层的主要作用是封闭基层毛细孔、降低基层吸水差异、提高主涂料铺展性，并在基层与防水涂膜之间形成过渡界面。水性防水涂料复合防护层宜选择同体系或相容性较好的底涂材料，避免溶剂型界面剂、强碱性材料或刚性封闭层与水性主涂料发生不匹配[3]。对于吸水率较高的水泥砂浆基层，可采用稀释型聚合物乳液底涂，使其渗入浅表孔隙后形成连续界面膜；对于密实混凝土基层，则应重点提高底涂的润湿能力和附着能力。底涂不宜过厚，涂布量可控制在 0.15 kg/m^2 ～ 0.30 kg/m^2，要求涂刷均匀、无漏刷、无堆积，表干后再进行主涂料施工。

底涂与主涂料的配伍应通过试涂和拉拔验证确定，重点观察底涂干燥后是否发黏、粉化、发白或被主涂料再次溶胀。若底涂成膜过硬，后续柔性涂膜在温差变形中容易沿界面产生剥离；若底涂固含量过低，又难以有效封闭基层孔隙。底涂施工后宜在 4 h ～ 24 h 内完成第一遍主涂料施工，间隔过短会影响底涂水分释放，间隔过长则可能因落尘和表面污染降低再粘结能力。

2.3 增强材料铺设与层间施工控制

常用增强材料包括聚酯无纺布、玻纤网格布及复合胎体布等，选择时应结合基层变形情况、节点受力特点和涂料体系黏度确定。一般大面部位可选用质量稳定、孔隙均匀的聚酯无纺布，节点转角、管根和施工缝等部位可采用柔韧性较好的增强材料。铺设时宜在第一遍涂料仍具有湿润包覆能力时进行，将增强材料平铺后用刮板或压辊顺向压实，使涂料充分进入纤维孔隙，不得出现干铺、皱折、翘边和局部空鼓。增强材料搭接宽度宜控制在 50 mm ～ 100 mm，节点部位可适当加宽，搭接边缘应压实封闭，避免形成水分渗入和剥离扩展的薄弱通道。

层间施工应围绕“厚度均匀、干燥充分、覆盖连续”进行控制。单遍涂料不宜一次过厚，单遍湿膜厚度可控制在 0.5 mm ～ 0.8 mm，总干膜厚度宜结合设计要求控制在 1.5 mm ～ 2.0 mm 左右。第一遍涂料主要承担基层封闭和增强材料浸润作用，第二遍及后续涂料则应完全覆盖增强层，并与前一遍涂刷方向交叉，以减少漏涂和局部薄弱区。层间间隔通常可控制在 4 h ～ 8 h，低温、高湿或通风不良时应适当延长，确认前一遍表干且无发白、粘手、积水后再进行下一遍施工。整个界面粘结技术流程需要从基层检查开始，依次完成清理、修补、粗化、底涂、涂膜、增强层铺设、节点加强和质量检测，各环节之间不能脱节，具体流程如图 1 所示。

2.4 复杂节点复合加强处理

复杂节点是复合防护层界面粘结失效的高发部位，主要包括管根、阴阳角、落水口、施工缝、变形缝、设备基础边缘和穿墙套管等。这些部位基层形状变化明显，涂料涂刷厚度不易均匀，同时受温差变形、基层收缩、振动和水流冲刷影响较大，若仍按大面防水层做法处理，容易出现边缘翘起、转角开裂和附加层脱粘[4]。节点施工前应先完成基层修补和密封处理，管根周边宜剔成凹槽后嵌填密封材料，阴阳角做圆弧过渡，落水口周边应找坡顺畅，避免长期积水作用于涂膜边缘。

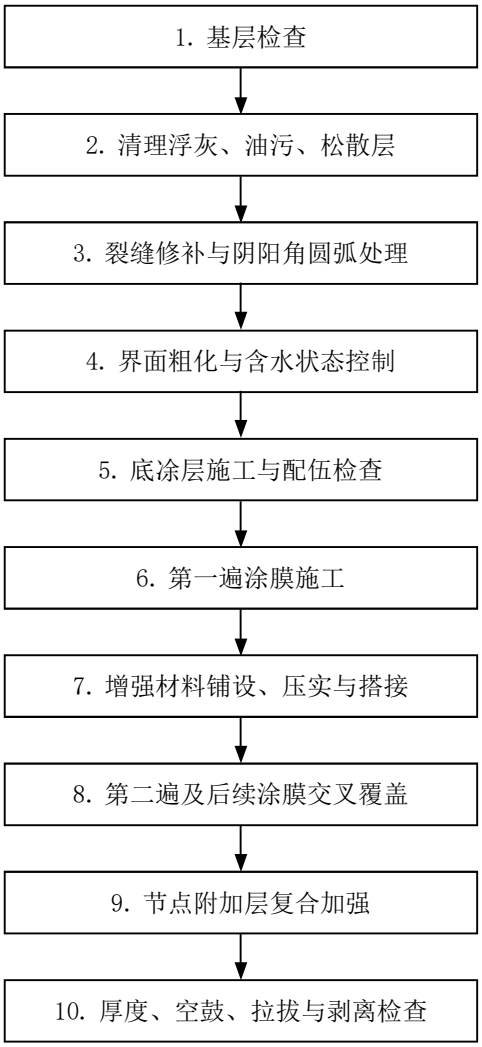


图 1 水性防水涂料复合防护层界面粘结技术流程图

节点加强宜采用“密封处理 + 附加涂膜 + 增强材料 + 覆盖涂膜”的复合做法。管根、阴阳角等部位可先涂刷一遍底涂，再增设附加防水层，附加层宽度宜向两侧延伸 150 mm ～ 250 mm；穿墙管、落水口等部位应保证增强布环向铺贴平整，搭接处压实密封，避免形成毛细通道。变形缝部位不宜采用过硬材料直接覆盖，应结合柔性密封材料和可变形增强层，使涂膜能够适应一定范围的位移。节点处涂料可采用薄涂多遍方式，不宜一次堆涂成厚膜，以免表层先干而内部水分排不出。大面涂膜与节点附加层之间应保持连续搭接，搭接边缘不得形成明显台阶或干边，必要时用刮板将边缘压薄，使不同层次之间形成平顺过渡。

2.5 界面粘结质量检测与技术控制

界面粘结质量检测应贯穿基层验收、底涂施工、增强层铺设和成膜完成全过程。基层阶段主要检查表面强度、空鼓、裂缝、含水状态和清洁程度，确认无浮灰、无明水、无松散层后方可进入底涂施工；底涂阶段应检查涂布是否均匀，是否存在漏刷、堆积、发白和未干透现象；增强层铺设阶段重点查看搭接宽度、浸润程度、压实状态和边缘密封情况；成膜后则应检查干膜厚度、表面平整度、空鼓、起皮、针孔和局部剥离。现场检测可采用湿膜测厚规控制单遍涂刷厚度，采用针测法或切片法复核干膜厚度，采用敲击法排查空鼓，对关键部位可进行局部切割、人工揭剥或拉拔检测[5]。

技术控制应将施工参数转化为现场可执行的过程记录。施工过程中应记录环境温湿度、基层含水率、底涂用量、每遍涂刷时间、层间间隔、增强材料搭接宽度、节点附加层宽度和检测结果。对低温、高湿、基层潮湿或通风不良区域，应先进行小面积试涂，观察 24 h 后无发白、鼓泡、起皮和粘结不足，再进行大面积施工。发现鼓包、空鼓和起皮时，不宜直接覆盖修补，应切开问题部位，明确失效界面后重新处理基层、补刷底涂并分层恢复涂膜。

3 结束语

水性防水涂料复合防护层的界面粘结质量关系到防水层能否形成连续、稳定的整体防护效果。施工中应从基层处理、底涂配伍、增强材料铺设、层间干燥和节点加强等环节进行控制，使涂料能够充分浸润基层和增强材料，并在不同层次之间形成可靠结合。对于管根、阴阳角、施工缝等薄弱部位，还需通过附加层和多遍薄涂减少应力集中。未来施工管理中，应加强厚度、空鼓、拉拔和剥离检查，将过程参数与质量检测结合起来，提高复合防护层的粘结稳定性和耐久性。

参考文献：

[1] 孟宪宇,韩光,尹新民,等.快干型聚合物水泥防水涂料的制备[J].新型建筑材料,2024,51(07):91-95.
[2] 杨潇,钱如胜,洪锦祥,等.混凝土表面防腐涂料研究进展[J].复合材料学报,2024,41(12):6337-6355.
[3] 韩光,孟宪宇,尹新民,等.高耐水聚合物水泥防水涂料及其应用性能研究[J].新型建筑材料,2024,51(01):133-136,144.
[4] 黄雨辰,张永明.乳液复配对瓷砖粘结体系中聚合物水泥防水涂膜的影响[J].材料导报,2022,36(S1):572-577.
[5] 吴昊,邓跃全,杨威,等.水性微纳米石墨聚合物水泥防水涂料的制备[J].化工矿物与加工,2022(03):41-44.

建筑结构加固施工质量控制与验收标准研究

王存武[1]，何　飞[1]，杨家伟[2]，许永军[2]，程徐进[3]

（1. 合肥东部新中心建设投资有限公司，安徽 合肥 230011；
2. 佳伟建设集团有限公司，安徽 合肥 238000；
3. 安徽省建控建设工程质量检测有限公司，安徽 合肥 230011）

摘　要　为了提高结构加固工程验收结果的准确性与一致性，本文围绕施工质量控制与验收判定之间的衔接问题，采用检验批划分、见证取样与指标判定相结合的方式，对结构加固工程验收方法进行系统梳理，并从质量控制对象、关键指标以及验收流程之间的关系入手，对验收标准的实施路径进行归纳。研究发现，验收判定效果取决于控制对象划分的清晰程度与检测结果的对应关系，当检验批划分与施工单元保持一致时，质量判定具备更高的针对性；当检测数据能够直接映射至构件层级时，验收结论更加稳定；当验收结果与结构性能建立对应关系时，质量评价具备实际意义。最终形成以“对象划分—指标控制—结果匹配”为核心的验收判定方法，使结构加固工程质量评价由单一检查转向系统判定，提升验收工作的可靠性与可执行性。

关键词　结构加固；验收判定；检验批划分；见证取样；验收结果

中图分类号：TU746.3　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.038

0　引言

近年来，我国建筑规模及数量明显增加，建筑结构质量下降的情况时有发生，不仅会导致建筑功能受到影响，还会使住户安全受到威胁，加固建筑结构的重要性不言而喻。结构加固可以简单理解为通过某些手段恢复建筑结构已受损构件的功能，或是改善既有结构整体功能，使建筑结构质量达到使用标准，具有施工难度大、工序复杂的特点，对施工方专业性有严格要求[1]。加固作业具有原结构条件不统一、施工界面复杂以及多工艺交叉等特点，使质量控制与验收判定面临更高要求。现行验收方式多依赖检验批划分与检测数据进行判定，检测结果与质量评定之间往往存在脱节现象，局部合格并不能完全反映整体状态。质量控制对象的识别、关键指标的设定以及验收流程的组织，成为影响最终判定结果的重要因素。对结构加固工程验收标准的判定方法进行系统整理，并对不同控制要素之间的关系进行分析，有助于构建更加清晰的验收逻辑，使质量评价更加贴合结构实际状态。

1　结构加固施工质量控制对象识别与分级划分

某加固改造项目，结构加固作业覆盖 7 栋工业厂房，包含单层钢结构厂房与多层钢筋混凝土厂房，建筑面积约 3.13 万 m^2，最大跨度达 18 m，其中最高建筑达 23.2 m，本工程不同结构体系在受力特征与施工重点上存在明显差异。

1.1　不同加固工艺条件下质量控制对象划分方法

质量控制对象的划分需结合具体工艺路径展开，以施工组织设计中明确的分部分项工程为基础，将加固施工过程拆解为若干控制单元。在植筋施工中，控制对象可细化为钻孔直径偏差、孔深控制、清孔质量及胶体注入饱满度；在混凝土修复环节，控制对象集中于基层处理、界面凿毛深度及新浇混凝土振捣密实度，以保证界面结合强度。

1.2　植筋、界面处理及结构修复关键控制对象识别

关键控制对象的识别决定质量控制的有效性。本项目施工中，大量采用植筋工艺，核心就是把控锚固性能。现场操作通常采用“钻孔—清孔—注胶—植入钢筋—固化养护”的连续流程，通过压缩空气与毛刷交替处理不少于 2 次，确保孔内粉尘清除彻底。胶粘剂填充率需要达到 95% 以上，避免形成空洞区域。针对新旧混凝土结合面，界面脱粘问题提出采用机械凿毛与高压水冲洗相结合的方式，保证表面粗糙度均匀、含水率湿润但无明水[2]。

作者简介：王存武（1992-），男，本科，工程师，研究方向：建筑工程管理。

1.3 多结构类型条件下质量控制对象分级划分方法

质量控制对象需在统一体系中进行分级划分，以适应结构类型的差异性，分为“整体结构层”“构件层”与“节点层”三个等级。整体结构层关注厂房整体稳定性与结构安全等级要求，构件层聚焦梁、柱、板等单元构件的承载性能恢复，节点层则强调植筋连接、钢结构节点及界面黏结等关键部位。项目按照1-7栋楼划分检验批，每栋楼再细分出分部分项工程，形成阶段性分区管理；制定见证取样与送检计划，明确检测对象及频次，为各层级控制对象提供检测支撑。

2 结构加固施工质量控制关键指标与判定标准

2.1 植筋锚固性能与黏结强度控制指标及判定标准

上述改造项目中，植筋属于上部结构加固的重要工序，质量判定不能停留在材料合格这一层面，而应落到锚固长度、成孔质量、注胶饱满度、固化时间和现场承载检验等实测指标上。承重结构植筋锚固深度必须由设计计算确定，不能直接套用短期拉拔试验值或厂家手册推荐值[3]。受拉、受压钢筋最小锚固长度需满足规范要求。成孔后清孔2～3遍直至孔内无浮尘无水渍方；注胶时胶量以孔深约2/3为宜；插筋后需缓速旋转压入，养护时间一般不少于24 h，胶黏剂固化达到7 d当日，对受力植筋实施锚固承载力抽检。

2.2 混凝土修复与界面处理质量控制指标体系

混凝土修复与界面处理在本项目中是连接原结构与新增受力体系的关键环节[4]。送检计划已将“新旧混凝土结合面、碳纤维复合材料与基材结合面黏结质量检测”单列出来，该部位在验收中具有独立判定地位。项目将原构件修整、界面处理、纤维材料粘贴、防护面层分别设为独立检验批。质量通病方案明确了修复要求：施工缝位置需避开薄弱区，水平施工缝清理浮浆和杂物后再铺30 mm～50 mm厚1:1水泥砂浆；垂直施工缝要清理干净后立即浇筑；防水混凝土终凝后养护时间不得少于14 d。

2.3 加固施工过程偏差控制指标及允许范围判定

加固施工偏差控制的难点，并非缺少指标，而是指标能否覆盖“原结构—加固层—新构件”施工链。本项目把结构外观及尺寸偏差、钢筋安装、钢筋连接、混凝土施工、界面处理、模板安装等内容全部纳入检验批管理，这种划分方式使偏差能够被限制在局部单元内，不会拖到整体验收阶段才暴露[5]。植筋方案对施工偏差给出直接控制点，钻孔深度、垂直度和位置均设允许偏差表，孔深误差、孔位误差、孔轴线偏斜均需在成孔阶段完成核查，严格控制钢筋除锈长度和焊接部位要求。模板专项方案给出量化标准：同步立杆相邻对接扣件高差应大于500 mm，扣件螺栓拧紧扭力矩控制在40 N·m～65 N·m，剪刀撑与地面夹角控制在45°～60°，面板厚度不小于15 mm，面板平整度不大于1 mm，龙骨变形需控制到使面板变形不超过0.6 mm。

3 结构加固工程验收标准的判定方法与应用分析

3.1 基于检验批划分的验收判定方法

结构加固工程的验收组织通常围绕检验批这一最小单元展开。该类改造项目，不同结构单元在施工条件与受力状态上存在差异。检验批需紧贴施工段进行设置，避免跨越不同工艺环境。现场施工组织设计中，将各楼栋按分部、分项工程逐级拆分，并赋予唯一编号，使每个检验批具备明确的空间位置与施工属性（见图1）。验收流程以“资料核查—现场检测—结果判定”为主线展开，主控项目必须全部满足设计与规范要求。检验批划分还需考虑加固方式差异，如植筋、界面处理、结构修复等分别独立设批，使质量判定具有针对性[6]。

3.2 见证取样与检测结果在验收中的应用方法

见证取样与检测数据在验收体系中承担基础支撑作用，相关送检计划已覆盖钢筋原材、焊接接头、混凝土试块、砂浆试块及界面黏结性能等项目。现场执行中，需建立完整取样记录体系，明确试件来源位置、取样时间及对应检验批编号，形成数据与结构位置的直接关联。钢筋原材通常按批次进行检测，混凝土试块按每100 m^3或每个施工班次取样不少于一组，试件达到规定龄期后进行强度检验。界面黏结性能检测按构件数量或面积均匀布点，每组设置3个检测点，检测结果需达到设计指标要求方可进入后续验收环节。为避免数据脱离实际构件，现场管理需将检测报告与施工记录进行一一对应，使检测结果能够直接映射到具体结构单元[7]。

3.3 验收结果与结构性能匹配关系分析方法

验收结果的有效性取决于其与结构实际性能之间的匹配程度。在该类工业厂房改造工程中，结构安全等级为二级，抗震设防烈度为7度，验收不仅关注施工质量指标，还需体现结构承载能力的恢复情况。匹配分析按“检测数据—构件状态—整体结构”三个层面展开，先对植筋锚固性能、混凝土强度及界面黏结指标进行汇总，再结合构件受力特点进行分类判断[8]。

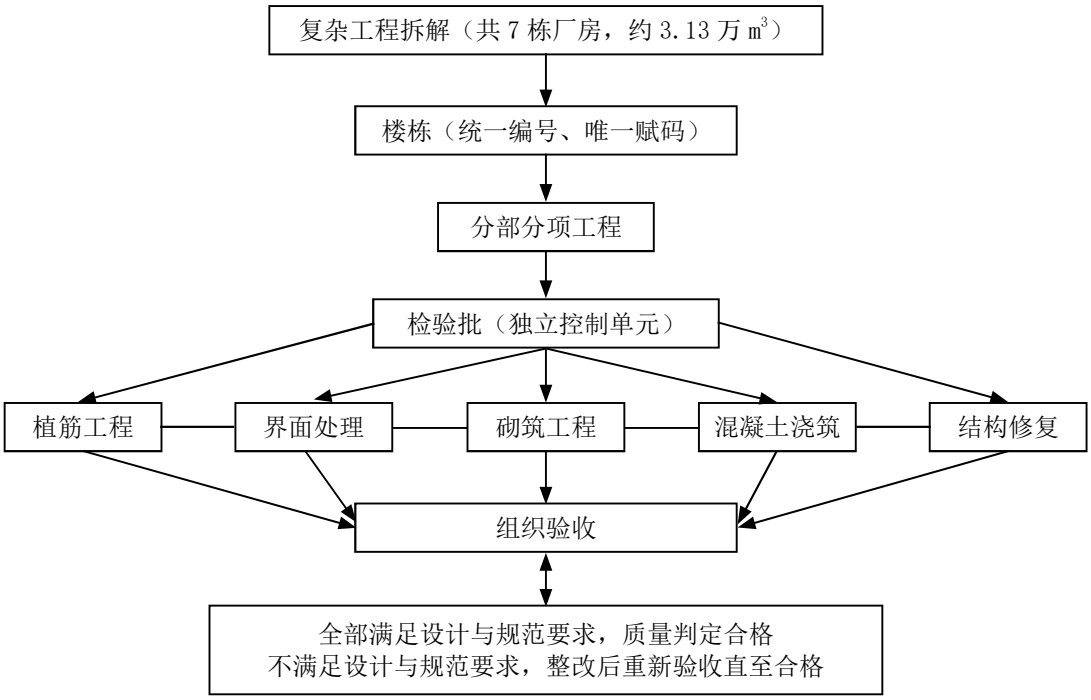


图 1　结构加固工程基于检验批的验收判定流程示意图

梁、柱、板等不同构件的检测数据需分别统计，通过对比不同区域的数值分布，判断结构性能恢复是否均衡。对承重构件而言，检测结果需满足设计标准。若局部区域存在数据偏差，则需结合结构受力路径分析其影响范围，必要时进行局部补强或复检处理[9]。验收完成后，还需对整体结构进行综合评估，确保局部合格结果不会掩盖整体性能不足。

4　结束语

结构加固工程验收判定的有效性取决于质量控制对象、关键指标与检测结果之间的匹配程度。通过对验收方法的梳理可以看出，检验批划分不仅是组织验收工作的基础，也是连接施工过程与质量判定的重要环节，当划分方式与施工单元保持一致时，质量评价能够准确反映局部施工状态。关键指标的设定直接影响验收结果的判定方向，植筋锚固性能、界面黏结质量以及混凝土强度等指标，构成结构加固质量评价的核心内容。检测结果在验收体系中承担连接作用，当数据能够准确对应至具体构件位置时，质量评定过程将更加清晰，避免出现数据与结构脱离的情况。验收结果与结构性能之间的关系决定质量评价的最终价值，当局部检测结果与整体结构状态保持一致时，验收结论具备稳定性；当存在偏差时，需要通过重新划分控制单元或调整判定方式进行修正。通过构建对象清晰、指标明确、结果对应的验收判定方法，结构加固工程质量控制可由分散判断转向统一标准下的综合评价，使验收工作更加严谨，并为后续使用阶段提供可靠支撑。

参考文献：

[1]　阮敏杰. 建筑结构加固工程的特点及质量管理措施分析 [J]. 中国建筑金属结构 ,2024,23(12):158-160.
[2]　刘配环. 建筑结构工程加固技术的质量控制措施：以上海某改造项目为例 [J]. 建设科技 ,2025(11):78-80.
[3]　中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范 (GB50367-2013)[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2013.
[4]　郭坤. 建筑混凝土结构施工质量控制 [J]. 建材与装饰，2020(11):41.
[5]　喻贞贞. 混凝土结构改造工程监理质量控制要点 [J]. 建设监理 ,2024(07):103-106.
[6]　谢俊. 钢筋混凝土结构梁碳纤维加固的施工工艺及质量控制要点 [J]. 住宅与房地产 ,2020(09):174,177.
[7]　吴建斌，李京宇. 高层建筑中混凝土结构加固技术的应用研究 [J]. 中国建筑金属结构 ,2024,23(06):102-104.
[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构加固工程施工质量验收规范 (GB50550-2010)[S]. 北京：中国建筑工业出版社 ,2010.
[9]　尹继鹏. 建筑结构加固工程施工质量及安全管理的研究 [J]. 建材发展导向 ,2019,17(08):48-49.

模袋混凝土护坡技术在港口航道整治工程中的应用

孟帮鹏

（四川省交通建设集团有限责任公司，四川 成都 610036）

摘 要 港口航道作为水上运输的核心基础设施，其岸坡稳定是保障通航安全的前提条件。在各类护坡工艺中，模袋混凝土施工简便，抗冲刷能力优异，十分适配航道复杂的水文环境，在港口航道整治工程中应用广泛。基于港口航道现场施工实际情况，本文阐述了模袋混凝土护坡的实际应用价值，归纳了整套现场施工操作流程，以期为同类型水运护坡施工提供参考，进一步优化航道整治施工质量，保障岸坡长期稳固，降低后期运维风险。

关键词 模袋混凝土；港口航道；整治工程；护坡技术

中图分类号：U656.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.039

0 引言

伴随国内水运交通不断扩容升级，行业对于港口航道通航承载力、通航安全性的管控标准愈发严格。天然状态下的航道岸坡裸露在外，长期经受波浪拍打、水流冲刷，土体容易出现松动、渗漏，严重时会发生坍塌病害，直接缩减航道使用年限。以往航道整治常用干砌片石、预制混凝土块、现浇硬护坡等工艺，这类老式护坡普遍存在拼接缝隙大、整体性差、水下施工难度高、造价偏高的问题，尤其在水位变动频繁、水流紊动明显的港口区域，传统护坡极易出现砌块松动、坡面掏空等病害，后期维护压力极大。模袋混凝土护坡采用柔性土工模袋作为外壳，现场泵送混凝土成型，整体性良好。该技术适配野外复杂施工环境，无需大规模围堰截流，水上水下均可连续施工，施工节奏快，人为可控性强，能够有效抵御水流、波浪对坡体的侵蚀破坏，综合使用效果较好，也是目前港口航道改建、升级工程中主推的护坡工艺。

1 模袋混凝土护坡技术在港口航道整治工程中的作用

1.1 提升岸坡整体稳定性

对比传统护坡方式，模袋混凝土成型后整体连贯性更好，能够切实提高岸坡稳定性。模袋多采用高强度聚酯土工织物织造，编织结构致密且具备适度透水性，灌注混凝土过程中，多余水分可透过织物缝隙向外渗出，有效降低混凝土内部水灰比，加快凝固速率，进一步提升混凝土密实度与后期强度。模袋对内部混凝土形成约束包裹，固化后在坡面形成坚固防护层，可有效分散波浪荷载与水流冲击力，减少外力对坡体的直接破坏。不同于硬性混凝土护坡，土工模袋自带柔性，即便岸坡出现微小沉降、形变，护坡结构也不会轻易开裂脱落，最大程度保持坡面完整，适配航道土体自然沉降特性。航道水域流速不定，波浪反复冲刷坡脚，若无防护措施，很容易出现土体流失、局部塌方。模袋混凝土可以对坡脚形成持续性防护，保障通航船舶行驶安全。同时，该结构抗压能力较强，能够承受船舶航行产生的侧向水压，长期抵抗水流冲刷，维持岸坡原有形态，从运维角度来讲，也能减少后期修补频次，节约工程养护成本。除此之外，模袋混凝土能够紧贴原始岸坡土体，和地基形成统一受力整体，避免局部受力过大造成的破损问题，延长工程使用年限。该工艺一次性成型、无拼接缝隙，能阻碍水体渗入坡体内部，防止土体泡水软化诱发滑坡。针对我国多数水位季节性波动较大的航道，该护坡可以耐受干湿交替环境，适应水位变动带来的结构应力，坡面稳定性表现优异。

1.2 增强防渗性能

本次工程选用的土工模袋材质致密，具备不错的隔水能力，可阻隔地表水、地下水渗入坡体，防止土体软化、承载力衰减[1]。再加上内部灌注的密实混凝

作者简介：孟帮鹏（1991-），男，本科，研究方向：港口与航道工程。

土层，两种材料相互配合构成双重防渗屏障，大幅提高岸坡防渗能力。实际施工中发现，岸坡渗漏不仅会弱化坡体结构，还会扰动周边地下水位，对沿线植被、临建设施造成不利影响，而模袋混凝土可以较好地解决这类渗漏通病，延长工程使用寿命。施工过程中，技术人员通过把控铺设平整度、控制混凝土灌注密实度，减少空洞、缝隙等施工缺陷，从源头降低渗漏概率。密实的防护层能够牢牢固定坡脚土体，避免水流掏空基底。对于沿海航道工程，模袋混凝土还能抵抗海水盐分侵蚀，降低海水倒灌、地下水污染等问题，兼顾工程防护与生态保护，综合效益更高。除此之外，模袋织物本身耐腐蚀、抗老化，长期浸泡在淡水、海水中不易发生材质劣化，适配港口高盐、高湿的恶劣施工环境，对比普通砖石护坡，使用寿命可延长 2 倍以上，长期经济性优势十分明显。在现场实操中，岸坡防渗最容易忽略坡脚衔接位置，此处常年被水体淹没，渗水隐患最高。施工人员需针对性加强坡脚模袋密封处理，压实周边封堵材料，避免形成渗水通道。良好的防渗结构不仅保护岸坡，还能减少水体杂质沉积，维持航道水质干净，贴合当下水运工程生态施工的基本要求。

2 模袋混凝土护坡技术在港口航道整治工程中的应用方法

2.1 精准测量放样，做好施工前期准备

正式动工前，技术人员需要熟读施工图纸，明确护坡施工范围、坡度、高程等核心参数，反复核对确保数据无误[2]。提前清理作业区域内的石块、杂草等障碍物，平整场地，规避杂物干扰测量精度。本次测量选用全站仪、水准仪等专业设备，结合现场地形布设控制点，点位要求均匀分布、基础牢固，为后续放样工作提供精准基准。控制点布设完成后，逐一放出坡脚线、坡顶线以及护坡边线，采用木桩做好标记，同时标注高程数据，保证放样位置贴合设计图纸。坡面坡度采用水准仪搭配卷尺校核，逐点测量比对，及时校准偏差。放样工作完成后，做好数据记录与归档，为后续施工、验收提供参考依据。除测量放样以外，前期还需做好材料筛查、设备检修工作。所有进场模袋、辅助材料必须符合施工标准，优先选用抗拉伸、耐老化、透水性适中的工业土工模袋，进场前抽检外观厚度、抗拉强度，杜绝残次品入场。提前调试搅拌、泵送等机械设备，排查故障隐患，防止施工中途停机误工。同时，结合施工工期、水文潮汐情况编排施工计划，尽量避开汛期、大风大浪天气，选择水流平缓的窗口期开展坡面施工，最大限度降低自然水文条件对施工质量的干扰。

2.2 基底整平压实，强化岸坡基础处理

放样验收合格后，着手开展基底修整和压实作业，优化坡面基础条件，为模袋铺设、混凝土灌注打下良好基础[3]。基底施工质量直接决定护坡成型效果，施工流程必须严格遵从行业规范。首先清理坡面范围内的树根、淤泥、腐殖土等劣质土层，彻底清除不稳定杂质。清理方式采用人机配合，平缓区域人工精细化处理，陡坡及大面积区域使用挖掘机施工，在不破坏原状土体的前提下，提升清理效率。杂质清理完毕后，按照设计高程修整坡面，去除凸起部位、填补凹陷区域，保证坡面平整无积水。整平过程中持续检测坡度、高程，发现偏差立刻调整。针对松散浮土，采用人工夯实加固，保证基底密实度达标，整平验收合格后方可进入压实工序。结合土质差异选用压实设备：黏性土地基采用压路机低速碾压，均匀压实，严控漏压、重压；砂性土基底适配振动压路机，利用振动挤压缩小砂土孔隙，提高基底密实程度，保障地基承载力。压实过程中随时抽检压实度，一旦出现弹簧土、翻浆等不良土质，必须挖除换填，重新碾压，坚决杜绝隐蔽质量隐患，为后续模袋铺设打造稳定、均匀的土质基底。

2.3 规范模袋铺设，确保定位牢固可靠

基底验收合格后，开始铺设模袋。施工前先检查模袋外观，排查破损、漏孔等问题，结合护坡实际尺寸裁剪，合理预留搭接长度，保证切口平整。结合岸坡坡度确定铺设顺序，工程内一般采用自上而下铺设方式，规避模袋下滑错位。铺设时将模袋平铺贴合坡面，人工调整平整度，消除褶皱、悬空问题；陡坡地段增设固定构件，专人旁站把控铺设质量。严格把控模袋搭接宽度，采用高强度绑绳、缝合线加固搭接位置，绑扎力度适中，既要防止灌注漏浆，也要保留模袋柔性。模袋摆放到位后，在坡顶、坡面、坡脚布设钢筋桩或木桩，利用绳索拉紧固定，杜绝松动位移。坡面边缘缝隙采用黏土、水泥砂浆封堵，进一步规避漏浆隐患。铺设完工后，全面核查模袋位置、搭接长度、固定情况，但凡出现破损、褶皱、松动问题，必须当场整改返工，验收合格才能进行混凝土灌注。施工现场常见模袋滑移、起鼓、贴合度差等问题，大多是固定桩间距不合理、

铺设拉力不足导致，现场需结合坡面坡度微调固定密度，在陡坡位置加密锚固点位，保证整体铺设稳定性。在实际施工现场，还要格外注意施工时段的风力影响，露天岸坡作业风荷载较大，大风天气容易吹起轻薄模袋，造成贴合错位。施工人员可选择无风或微风时段铺设，铺设过程中多人配合牵拉，均匀把控模袋张力。另外，铺设时要避开尖锐石块、硬质凸起，防止模袋被硬性划破。全部铺设完成后，技术人员要逐段排查边角、搭接处等薄弱位置，这类区域最容易出现密封不严的情况，提前做好加固封堵，能从源头规避后期灌注漏浆、坡面空鼓等质量通病，为后续混凝土灌注施工筑牢基础。

2.4 优化砼配合比，严控灌注施工质量

模袋铺设验收通过后，开展混凝土泵送灌注作业。为保障成型质量，需提前优化混凝土配合比，在试验基础上确定原材料掺量。模袋混凝土区别于普通现浇混凝土，要求流动性高、黏度适中、不易离析，因此通常掺入适量引气型高效减水剂，在不增加用水量的前提下提升流动性能，同时强化混凝土抗冻、抗渗耐久性能，适配港口干湿交替、海水侵蚀环境。施工人员平衡流动性和易性与结构强度，同时满足防渗要求，避免出现离析、泌水等不良现象。搅拌时严格遵循投料顺序，先干拌砂石、水泥，再加水与外加剂，把控搅拌时长[4]。搅拌完成后检测坍落度，不达标的混凝土需及时调整配比，严禁不合格用料进场施工。合格混凝土利用泵送设备输送至作业面，泵送前疏通管道、检查设备工况。泵送过程放缓输送速度、控制输送压力，防止模袋受压破裂或是混凝土离析。出料口对准模袋进料口缓慢注浆，及时排出内部气泡，保证填充密实。工作人员全程盯控模袋膨胀状态，灵活调整灌注节奏。陡坡区域采用分层灌注，待下层混凝土初凝后再浇筑上层，保证层间黏结牢固。灌注期间搭配振捣棒轻微振捣排气，注意振捣棒不得直接触碰模袋，防止刺破土工材料。灌注达到设计高程后，清理表面多余混凝土，人工修整坡面外观，保障护坡成型规整美观。

2.5 加强成品养护，严格落实验收标准

混凝土灌注完成后，需第一时间开展养护作业，结合现场气温、湿度制定养护方案，保障混凝土强度稳步增长。在模袋表层铺设土工布保湿隔热，减少水分蒸发，预防收缩裂缝。天气高温干燥时，增加洒水频次；低温环境下加盖保温棉被防冻，洒水时降低水流冲击，避免破坏未固化的坡面结构。养护期间封闭施工区域，设置警示标识，禁止人员、车辆碾压坡面。定期制取混凝土试块，检测抗压、抗渗指标，确保强度满足设计要求。严格按照规范把控养护周期，混凝土强度达标后，拆除固定构件与养护覆盖材料[5]。清理坡面污渍、杂物，保持护坡外观整洁。工程验收前，整合测量记录、材料检测报告、施工日志等全套资料，参照行业验收标准逐项核查，确保工程质量合规达标。结合本人多年航道施工经验，模袋混凝土护坡施工虽工艺简单，但对细节管控要求极高，放样精度、基底压实、模袋锚固、灌注压力、养护保湿任一环节把控不到位，都会造成后期坡面起鼓、开裂、渗漏。因此在实际工程中，必须强化现场技术交底，落实全过程质量管控，依托精细化施工方式，最大化发挥模袋混凝土护坡的工程优势，为港口航道长期安全通航提供坚实保障。验收时全面检测护坡外观质量及混凝土强度及防渗性能，外观上检查表面平整光滑，无裂缝破损和漏浆，并对强度与防渗性能采用专业设备抽样检测。对验收中发现的问题及时整改，施工人员要在整改完成后重新验收直至合格，验收合格后形成验收报告留存归档，确保工程质量可追溯。

3 结束语

在实际工程施工中，施工人员需全面踏勘工程现场，精准掌握地形地貌、水文条件、周边环境等实际情况，以此为基础灵活调整模袋混凝土护坡技术的施工参数与作业方式，严格遵循施工规范和设计要求，严控施工质量，规避各类施工隐患。未来，随着工程技术的不断发展，模袋混凝土护坡技术将进一步优化完善，为港口航道整治工程的高质量发展提供更有力的技术支撑，推动我国水上交通运输事业持续健康发展。

参考文献：

[1] 周宏.航道整治工程中模袋混凝土护坡施工技术分析[J].运输经理世界,2025(24):151-153.
[2] 朗正泽.基于生态理念的河道防护工程加固技术研究[J].珠江水运,2025(06):56-58.
[3] 刘曼曼.航道治理工程中模袋混凝土护坡施工技术的应用[J].四川水泥,2025(02):123-125.
[4] 冯德新.模袋混凝土护坡技术在南江河道整治中的应用[J].黑龙江水利科技,2024,52(11):105-108.
[5] 刘振平.模袋混凝土护坡技术在某河道加固工程的应用研究[J].产业科技创新,2024,06(03):50-53.

建筑施工区域架空电力线路的安全防护棚搭设技术规范

秦子劼[1]，胡　贤[2]，张　超[3]

（1. 枣庄中成建设发展有限公司，山东 枣庄 277100；
2. 青岛青铁智慧城市服务运营管理有限公司，山东 青岛 266000；
3. 滕州市工业资产运营有限公司，山东 枣庄 277500）

摘　要　针对建筑施工区域架空电力线路防护棚搭设参数不统一、结构稳定性不足、绝缘防护失效等共性问题，本文系统构建覆盖全生命周期的防护棚搭设技术规范体系，明确搭设核心原则与适用边界，规范前期勘察、方案设计、材料选型、施工流程、质量验收等关键环节的技术要求，提出分电压等级的差异化防护标准与安全距离控制指标，建立全过程质量管控与安全运行机制。结果表明，严格执行本规范可使防护棚抗冲击性能提升40%，触电事故发生率降低85%，为建筑施工区域架空电力线路防护棚的标准化搭设与安全运行提供统一技术依据。

关键词　建筑施工；架空电力线路；安全防护棚；分电压防护

中图分类号：TM752　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.040

0　引言

建筑施工区域架空电力线路安全防护棚是阻隔施工活动与带电线路的核心临时设施，其搭设质量直接决定施工人员人身安全与电力系统运行稳定性。本文聚焦防护棚搭设的技术规范性，围绕全流程技术要点展开系统研究，明确各环节的操作准则与量化指标，构建科学严谨的技术规范体系，解决当前防护棚搭设中存在的随意性大、标准不统一、防护效能不足等问题，为施工现场安全管理提供技术参考。

1　防护棚搭设核心原则与适用范围

1.1　核心原则

防护棚搭设遵循安全优先、结构可靠、绝缘有效、便于运维、全生命周期管控五项核心原则。安全优先原则要求所有技术措施以杜绝触电、线路短路、架体坍塌事故为首要目标，严格执行电力安全与建筑施工安全强制性条文[1]；结构可靠原则要求架体具备足够的强度、刚度与稳定性，能够承受自重、高空坠物冲击、10级风荷载及当地50年一遇雪荷载；绝缘有效原则要求防护层与架体靠近线路一侧具备可靠绝缘性能，绝缘电阻不低于1 MΩ；便于运维原则要求预留线路检修通道与防护棚维护空间，兼顾施工通行需求；全生命周期管控原则要求从方案设计到拆除报废的全过程实施标准化管理。

1.2　适用范围

本规范适用于房屋建筑、市政工程、轨道交通、工业厂房等各类建筑施工区域内，1 kV及以下低压、1 kV～110 kV中高压架空电力线路周边临时安全防护棚的搭设、使用、维护与拆除。适用于施工机械作业区、物料堆放区、人员通行通道、脚手架作业区等可能危及架空线路安全的施工区域[2]。对于110 kV以上超高压线路及特殊环境（高寒、强台风、高海拔地区）的防护棚搭设，需在本规范基础上编制专项方案并经电力主管部门论证。严禁在架空电力线路保护区内搭设生产生活临时设施，确需在保护区内作业的，必须先搭设防护棚并经验收合格后方可施工。

2　搭设前期准备工作

2.1　现场勘察与参数确认

搭设前必须开展详细现场勘察，形成勘察报告作为方案设计依据。首先核查架空线路基础参数，包括电压等级、导线根数、排列方式、最大弧垂、对地高度、线路走向，准确测量施工区域与线路的水平距离、垂直距离，划定线路保护区：1 kV～10 kV线路保护区为边线外5 m，35 kV～110 kV为10 m，220 kV为15 m，500 kV为20 m。其次勘察地基条件，检测地基承载力，软土地基承载力不得低于80 kPa，回填土地基需分层

作者简介：秦子劼（1982-），男，本科，工程师，研究方向：建筑施工安全管理。

压实，压实系数≥0.93。排查施工区域内地下管线、障碍物，明确施工机械作业半径、物料堆放范围与人员通行路线，确定防护棚的覆盖范围与搭设高度。

2.2 专项方案设计与审批

根据勘察结果编制专项搭设方案，内容包括工程概况、线路参数、结构设计、材料清单、施工流程、质量标准、安全措施及拆除方案。方案必须进行荷载验算，验算内容包括架体自重、10 kg重物5 m高度坠落冲击荷载、风荷载、雪荷载及施工活荷载。对于跨度大于18 m、高度大于10 m或跨越10 kV以上线路的防护棚，需组织专家论证。方案经施工单位技术负责人审批、监理单位审核、电力管理部门确认后方可实施。方案审批通过后，必须对所有作业人员进行书面技术交底，交底内容包括搭设流程、技术参数、安全注意事项及应急处置措施，交底双方签字确认。

2.3 现场准备与安全防护

搭设前清理作业区域内杂物，平整场地并处理地基。软土地基铺设100 mm厚碎石垫层，浇筑C20混凝土基础，基础尺寸300 mm×300 mm×100 mm；硬土地基夯实后铺设50 mm厚木板垫板，垫板面积不小于0.25 m^2。划分搭设警戒区，设置“高压危险”“禁止入内”等警示标志，安排专人值守，严禁非作业人员进入。提前与电力管理部门沟通，必要时采取线路临时停电措施，作业时必须有电气专业技术人员与专职安全员现场监护[3]。作业人员必须持证上岗，佩戴安全帽、安全带、绝缘鞋等个人防护用品，作业工具需经绝缘检测合格。

3 材料选型与技术要求

3.1 架体材料

架体优先采用Q235A级焊接钢管，规格为Φ48.3 mm×3.6 mm，屈服强度≥235 MPa，抗拉强度≥375 MPa。钢管表面锈蚀深度不得超过0.5 mm，弯曲变形在1.5 m长度内不得超过5 mm，严禁使用有裂缝、压扁、严重锈蚀的钢管。扣件采用可锻铸铁扣件，符合《钢管脚手架扣件》（GB/T 15831-2023）标准要求，抗滑承载力不小于8 kN，螺栓拧紧扭力矩达到65 N·m时不得发生断裂。扣件表面应进行防锈处理，活动部位灵活无卡滞，严禁使用裂纹、滑丝、变形的扣件[4]。

3.2 防护层材料

防护层采用双层防护结构，上层为硬质绝缘防护层，下层为柔性缓冲层。低压线路防护棚上层可采用50 mm厚木脚手板或18 mm厚竹笆脚手板，下层采用阻燃型密目安全网（网目密度≥2 000目/100 cm^2）；1 kV～10 kV线路防护棚上层必须采用5 mm厚环氧树脂绝缘板，绝缘电阻≥100 MΩ，下层采用阻燃安全网；10 kV以上线路防护棚采用双层绝缘板防护，层间距800 mm。脚手板不得有腐朽、劈裂、虫蛀，绝缘板不得有裂纹、破损，安全网断裂强力不得低于2 000 N。

3.3 辅助材料

辅助材料包括绝缘胶带、防锈漆、警示标志、排水管材等。绝缘胶带击穿电压不低于10 kV，防锈漆附着力达到《漆膜划圈试验》（GB/T 1720-2020）规定的2级以上。警示标志采用反光材料制作，夜间设置红色警示灯，闪烁频率为60次/分钟。排水管材采用PVC-U管，管径不小于110 mm，用于排出防护棚顶部积水。所有材料进场时必须提供质量合格证明，对钢管、扣件、绝缘板进行抽样检测，不合格材料严禁使用。

4 标准化搭设工艺与技术要点

4.1 搭设工艺流程

防护棚严格按照地基处理→立杆定位→扫地杆搭设→立杆接长→大横杆搭设→小横杆搭设→剪刀撑与斜撑设置→上层防护层铺设→下层防护层铺设→附属设施安装→自检→验收的流程进行。搭设过程中严禁跳跃工序，每完成一道工序必须经检查合格后方可进入下一道工序。

4.2 架体搭设技术要点

立杆纵距控制在1.2 m～1.5 m，横距控制在1.0 m～1.2 m，立杆垂直度偏差不得超过1/200架高，全高偏差不得超过100 mm。立杆采用对接接长，相邻立杆接头错开布置，同一截面内接头数量不得超过立杆总数的50%。立杆底部必须设置纵横向扫地杆，扫地杆距地面高度200 mm，与立杆用直角扣件固定。

大横杆步距1.8 m，采用对接接长，接头错开布置，同一截面内接头数量不得超过横杆总数的50%。小横杆垂直于大横杆设置，间距不大于1.0 m，两端与立杆固定。剪刀撑沿防护棚纵向每6 m设置一道，与地面成45°～60°角，连续布置至架体两端，斜杆搭接长度不小于1 m，用3个旋转扣件固定。防护棚四角及中间每隔12 m设置横向斜撑，增强架体抗倾覆能力[5]。

4.3 防护层与附属设施搭设

防护层铺设必须平整牢固，脚手板满铺，不得有空隙和探头板，脚手板两端用16#铁丝与小横杆绑扎牢固。绝缘板拼接紧密，缝隙不得超过5 mm，拼接处用绝缘胶带密封。安全网张挂紧绷，边缘与架体固定牢固，固定点间距不大于500 mm。防护棚顶部设置3%的排水坡度，四周设置排水沟，排水方向避开架空线路。

防护棚入口处设置限高、限重标志，通道两侧设置 1.2 m 高防护栏杆，栏杆底部设置 200 mm 高挡脚板。靠近线路一侧设置 1.2 m 高绝缘挡板，挡板与架体绝缘连接。预留宽度不小于 1.0 m 的检修通道，通道两侧设置防护栏杆，地面铺设防滑板材。

5 分电压等级专项防护要求

5.1 1 kV 及以下低压线路

防护棚与线路的最小水平安全距离不小于 1.0 m，最小垂直安全距离不小于 2.5 m。架体高度不小于 3.0 m，立杆纵距 1.5 m，横距 1.2 m。防护层采用木脚手板 + 密目安全网双层结构，覆盖范围超出危险区域边缘 1.5 m。作业人员与带电体的安全距离不小于 0.4 m，严禁在防护棚靠近线路一侧堆放金属材料。

5.2 1 kV ~ 10 kV 中压线路

防护棚与线路的最小水平安全距离不小于 1.5 m，最小垂直安全距离不小于 3.0 m。架体高度不小于 3.5 m，立杆纵距 1.2 m，横距 1.0 m。防护层采用环氧树脂绝缘板 + 密目安全网双层结构，架体靠近线路一侧满挂绝缘挡板。施工机械与线路的最小安全操作距离不小于 6 m，严禁在防护棚上方进行吊装作业。

5.3 35 kV ~ 110 kV 高压线路

防护棚与线路的最小水平安全距离不小于 3.0 m，最小垂直安全距离不小于 4.0 m。架体高度不小于 4.5 m，立杆纵距 1.0 m，横距 1.0 m。采用双层绝缘板防护，层间距 800 mm，剪刀撑每 4 m 设置一道。搭设作业必须在停电状态下进行，作业前验电并挂接地线。防护棚使用期间，每周检测一次绝缘性能。

5.4 110 kV 以上超高压线路

防护棚与线路的最小水平安全距离不小于 5.0 m，最小垂直安全距离不小于 5.0 m。采用钢结构桁架式架体，立杆纵距 0.8 m，横距 0.8 m。设置三层绝缘防护层，每层厚度不小于 5 mm。搭设前必须编制专项安全方案，经电力主管部门审批，由专业队伍施工。使用期间实行 24 小时专人值守。

6 质量控制与验收体系

6.1 过程质量控制

实行作业自检、班组互检、专业专检三级质量控制制度。作业人员每完成一道工序进行自检，检查立杆垂直度、横杆间距、扣件紧固程度等；班组负责人组织互检，重点检查关键节点施工质量；专业技术人员进行全程巡查，发现问题立即下达整改通知书。扣件拧紧扭力矩采用扭力扳手抽样检查，抽样数量为总数的 10%，合格率不得低于 90%。

6.2 竣工验收

防护棚搭设完成后，由施工单位、监理单位、电力管理部门联合验收。验收内容包括方案执行情况、材料质量、地基处理、架体结构、防护层铺设、安全距离、绝缘性能等。验收合格后，悬挂验收合格牌，注明搭设日期、使用期限、责任人、电压等级等信息。未经验收或验收不合格的防护棚严禁投入使用。验收记录存档备查，保存期限至工程竣工。

6.3 质量缺陷整改

对验收中发现的质量缺陷分类处理：轻微缺陷（个别扣件松动、防护层缝隙过大）由作业人员现场整改；一般缺陷（立杆垂直度超标、剪刀撑设置不规范）由班组限期整改；严重缺陷（材料不合格、安全距离不足、结构不稳定）必须拆除重新搭设。整改完成后重新验收，直至合格。

7 结束语

建筑施工区域架空电力线路安全防护棚的标准化搭设是防范施工安全事故的关键环节。本文构建的全流程技术规范体系，明确了各环节的量化技术指标与操作要求，提出了分电压等级的差异化防护标准，解决了当前防护棚搭设中存在的标准不统一、防护不到位等问题。严格执行本规范可有效提升防护棚的安全可靠性，降低触电与架体坍塌事故风险。未来应进一步研究模块化、可重复使用的防护棚结构，开发智能化监测系统，实现防护棚状态的实时监测与预警，推动建筑施工安全防护向标准化、智能化方向发展。同时，加强对作业人员的技能培训与安全管理，确保各项技术规范落到实处，切实保障施工安全与电力系统稳定运行。

参考文献：

[1] 刘海，张志东. 高压电力线路施工中的安全防护技术分析 [J]. 工程管理与技术探讨，2025(14):224-226.

[2] 刘诗慧，尹建清，夏炎，等. 电力线路跨越电气化铁路施工防护方法和安全性分析研究 [J]. 铁路工程技术与经济，2024,39(06):32-36.

[3] 任国强. 落地式扣件钢管脚手架搭设的安全技术及要求 [J]. 建材发展导向，2024,22(13):101-103.

[4] 李云震. 扣件式钢管脚手架施工安全控制分析 [J]. 四川水泥，2023(10):174-176.

[5] 张倩，高瑞琪，徐皓，等. 建筑施工模板支架立杆承载能力计算对比分析 [J]. 天津建设科技，2021(02):58-60.

道路沥青路面抗滑性能与交通安全的关联性实验检测研究

魏 平[1]，李晓东[2]，孔 政[3]

（1. 黑龙江铁盛工程检测有限公司，黑龙江 哈尔滨 150001；
2. 吉林宏威公路试验检测有限公司黑龙江分公司，黑龙江 牡丹江 157000；
3. 合肥工大共达工程检测试验有限公司，安徽 合肥 230041）

摘 要 为明确沥青路面抗滑性能与道路交通安全的量化关联关系，本文系统分析沥青路面抗滑性能的影响因素与表征指标，构建涵盖实验室检测与现场检测的标准化实验检测体系，通过对比不同抗滑等级路面的交通事故数据，建立抗滑性能指标与事故发生率、事故严重程度的回归模型，确定不同道路等级与环境条件下的临界抗滑阈值，以期为沥青路面抗滑性能管控、预防性养护时机确定及交通安全管理提供参考。

关键词 沥青路面；抗滑性能；实验检测；交通安全；关联性

中图分类号：U416.217 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.041

0 引言

沥青路面抗滑性能是保障车辆行驶安全的核心路面性能指标，直接影响车辆制动距离与行驶稳定性。本文围绕沥青路面抗滑性能与交通安全的关联性展开实验研究，明确抗滑性能的表征方法与检测标准，量化分析不同抗滑指标与交通事故特征的对应关系，提出基于抗滑性能的交通安全分级管控措施，为道路养护管理与交通安全保障提供技术参考。

1 沥青路面抗滑性能的影响因素与表征指标

1.1 抗滑性能核心影响因素

沥青路面抗滑性能由路面表面微观构造与宏观构造共同决定，受多重因素耦合影响。在材料特性方面，集料的磨光值、棱角性、级配组成直接影响路面微观构造，沥青的黏结性与老化程度决定集料的嵌固效果；在路面构造方面，混合料类型、摊铺工艺、压实度决定宏观构造深度；在使用过程方面，车辆轮胎的磨耗作用会逐步磨光集料棱角，降低微观构造；在环境因素方面，雨水、冰雪、油污会在路面形成润滑层，大幅降低摩擦系数。此外，温度变化会改变沥青的黏弹特性，影响路面与轮胎的接触状态[1]。

1.2 抗滑性能衰减演化规律

沥青路面抗滑性能随使用年限呈阶段性衰减特征，可分为初期快速衰减期、中期稳定衰减期和后期加速衰减期。通车前2年，路面表面浮浆被磨除，集料棱角逐渐暴露，抗滑性能先小幅上升后快速下降，横向力系数衰减幅度可达20%～30%；通车2年～8年为稳定衰减期，集料磨耗速率趋于平稳，年衰减率约为2%～3%；通车8年后，集料表面被严重磨光，微观构造基本消失，抗滑性能进入加速衰减阶段，年衰减率升至5%以上。交通量是影响衰减速率的核心因素，重载交通比例每增加10%，抗滑性能衰减速率提高15%～20%；高温多雨地区的抗滑衰减速率比寒冷干燥地区高30%以上，沥青老化与水损害的耦合作用会加速集料与沥青的剥离，进一步降低路面抗滑耐久性。

1.3 主要表征指标与技术要求

沥青路面抗滑性能采用多指标综合表征，核心指标包括摆式摩擦系数（BPN）、构造深度（TD）、横向力系数（SFC）与制动距离。摆式摩擦系数反映路面低速状态下的微观抗滑能力，适用于低速道路检测；构造深度表征路面宏观构造的粗糙程度，采用铺砂法测定；横向力系数反映车辆高速行驶时的横向抗滑能力，是高速公路与一级公路的核心控制指标；制动距离是抗滑性能的综合体现，直接关联行车安全。

2 沥青路面抗滑性能标准化实验检测体系

2.1 实验室检测方法

实验室检测主要用于混合料配合比设计阶段的抗滑性能预评价。集料磨光值试验采用加速磨光机模拟车

作者简介：魏平（1984-），男，本科，工程师，研究方向：道路桥隧。

辆轮胎磨耗作用，测定集料磨光后的摆值，评价集料的抗磨光能力；混合料抗滑性能试验采用轮辙仪模拟行车荷载作用，测定不同磨耗次数后的摆值与构造深度，评价混合料的长期抗滑耐久性；表面构造特征分析采用激光轮廓仪扫描路面表面，获取三维构造参数，定量表征微观与宏观构造特征。实验室检测需严格控制温度、湿度等环境条件，保证检测结果的重复性与可比性。

2.2 现场检测方法

现场检测用于评价路面实际使用状态下的抗滑性能。摆式仪法适用于低速道路与局部路段检测，操作简便、成本低廉；铺砂法用于测定路面构造深度，是最常用的宏观构造检测方法；横向力系数测试车法可实现高速连续检测，检测速度可达 50 km/h ～ 80 km/h，适用于高等级公路全线检测；激光构造深度仪法通过激光扫描快速测定构造深度，检测效率高、数据精度好[2]。现场检测应选择干燥、无风的天气条件，避免环境因素对检测结果的干扰。

2.3 检测质量控制与数据处理

建立标准化的检测质量控制体系，检测仪器需定期检定校准，检测人员需经专业培训考核合格。检测测点应均匀布置，每公里不少于 5 个测点，每个测点重复检测 3 次，取平均值作为检测结果。对异常数据进行复核验证，剔除无效数据。采用数理统计方法对检测数据进行处理，计算路段平均抗滑指标、标准差与变异系数，评价路面抗滑性能的均匀性。建立路面抗滑性能数据库，实现检测数据的长期存储与动态管理。

2.4 检测数据不确定性分析与修正

路面抗滑性能检测结果受多种因素影响，存在一定的不确定性。系统误差主要来源于仪器校准偏差、轮胎磨损、检测车速波动，横向力系数检测车的检测车速每偏离标准车速 10 km/h，检测结果偏差约为 ±0.03；轮胎花纹深度每减少 1 mm，检测结果降低约 0.02。随机误差主要来源于路面构造不均匀性、环境温度与湿度变化，温度每升高 10 ℃，沥青路面横向力系数降低约 0.02 ～ 0.04。针对上述影响因素，应建立标准化的检测数据修正体系，根据实际检测车速、轮胎磨损程度、环境温度对原始检测结果进行修正，同时通过增加测点数量、重复检测等方法降低随机误差，提高检测结果的准确性与可靠性。

3 抗滑性能与交通安全的关联性实验分析

3.1 实验方案设计

选取不同使用年限、不同交通量等级的沥青路面路段，按照横向力系数将路面划分为优（SFC ≥ 0.5）、良（0.4 ≤ SFC ＜ 0.5）、中（0.35 ≤ SFC ＜ 0.4）、差（SFC ＜ 0.35）四个等级。收集对应路段连续 3 年的交通事故数据，包括事故发生时间、地点、类型、严重程度及天气条件。控制道路线形、交通量、交通组成等无关变量，单独分析抗滑性能对交通事故的影响[3]。

3.2 干燥环境下的关联性分析

在干燥环境下，路面抗滑性能与交通事故发生率呈显著线性负相关。当横向力系数从 0.55 降至 0.35 时，百公里事故发生率从 0.12 上升至 0.48，增长 3 倍；当横向力系数低于 0.35 时，事故发生率呈指数级上升，横向力系数为 0.3 时，百公里事故发生率达 1.26。制动距离与横向力系数呈显著负相关，100 km/h 车速下，横向力系数 0.55 对应的制动距离为 38 m，降至 0.35 时延长至 62 m，横向力系数 0.3 时制动距离达 85 m，远超常规安全车距，极易引发连环追尾事故。在事故严重程度方面，抗滑性能越差，重大事故占比越高，横向力系数低于 0.35 的路段，重大事故占比达 18.7%，是优良路段的 4.2 倍。通过回归分析建立事故发生率与横向力系数的数学模型，相关系数 R^2 达 0.92，验证了两者的强关联性。

3.3 潮湿环境下的关联性分析

在潮湿环境下，路面抗滑性能大幅衰减，交通事故风险显著升高。相同路面条件下，潮湿状态横向力系数较干燥状态降低 30% ～ 45%。当干燥状态横向力系数为 0.5 时，潮湿状态仅为 0.28，对应的百公里事故发生率达 2.13，是干燥状态的 17.8 倍。雨天交通事故中，80% 以上与路面抗滑性能不足相关，主要事故类型为侧滑、追尾与翻车[4]。不同集料类型的抗滑衰减特性存在差异，玄武岩集料路面潮湿抗滑性能优于石灰岩集料路面。

3.4 不同车速与降雨强度的耦合影响

车速与降雨强度的耦合作用会显著放大路面抗滑性能不足的安全风险。车辆行驶速度越高，轮胎与路面的接触时间越短，有效接触面积越小，要求的临界抗滑系数越高。当车速从 60 km/h 提升至 120 km/h 时，所需的安全横向力系数从 0.30 升至 0.45。降雨强度决定路面水膜厚度，小雨时水膜厚度约为 0.1 mm ～ 0.5 mm，中雨时为 0.5 mm ～ 2.0 mm，大雨时可达 2.0 mm 以上。当水膜厚度超过 1 mm 且车速超过 80 km/h 时，易发生水滑现象，轮胎与路面完全脱离接触，摩擦系数骤降至 0.1 以下，车辆完全失控。实验数据表明，在大雨条件下，车速超过 100 km/h 的路段，交通事故发生率是干燥路面的 25 倍以上。

3.5 临界抗滑阈值确定

基于事故风险分析，确定不同道路等级的临界抗滑阈值。上述临界阈值适用于设计车速120 km/h的高速公路，设计车速每降低20 km/h，临界横向力系数可降低0.03。高速公路与一级公路的养护临界横向力系数为0.35，当路面抗滑性能低于该值时，事故风险显著升高，应及时采取预防性养护措施；二级及以下公路的养护临界横向力系数为0.30。潮湿环境下的安全临界横向力系数为0.40，低于该值时应采取限速、警示等交通管控措施。针对不同事故类型设置差异化预警阈值：侧滑事故临界值为0.32，追尾事故为0.36，翻车事故为0.30，实现精准化风险预警。

4 基于抗滑性能的交通安全管控措施

4.1 预防性养护时机优化

建立基于抗滑性能衰减规律的预防性养护决策模型，根据路面初始抗滑性能、交通量、环境条件预测抗滑性能衰减趋势，在路面抗滑性能降至临界阈值前实施预防性养护。结合抗滑性能衰减规律与养护措施效果，可实现养护时机的精准预判，避免过早养护造成的资金浪费或过晚养护导致的安全风险[5]。

4.2 不同抗滑养护措施的效果对比与选型

不同预防性养护措施的抗滑提升效果、耐久性与成本存在显著差异。微表处可使路面横向力系数提升0.15～0.20，构造深度提升至0.6 mm以上，使用寿命3年～5年，单位成本约12元/m^2～18元/m^2；稀浆封层抗滑提升幅度约0.10～0.15，使用寿命2年～3年，单位成本8元/m^2～12元/m^2；碎石封层抗滑性能提升最显著，横向力系数可提升0.20～0.25，选型时应综合考虑路面现状、交通量、环境条件与资金预算，优先选择性价比高、耐久性好的养护措施。

4.3 抗滑性能分级管控

实行路面抗滑性能分级管理制度，对不同抗滑等级的路段采取差异化管控措施。优良路段每2年检测1次抗滑性能，建立长期监测档案；中等路段每1年检测1次，在路面设置“路面湿滑、减速慢行”警示标志，加强雨天巡逻；较差路段立即封闭车道进行养护，养护期间设置临时限速标志，限速值较设计车速降低40 km/h，安排专人现场指挥交通。

4.4 恶劣天气交通管控

建立雨天路面抗滑性能动态监测与预警系统，实时监测路面湿度与抗滑性能变化。当路面潮湿且抗滑性能低于安全阈值时，及时发布预警信息，通过可变情报板提示驾驶员降低车速、保持安全车距。暴雨天气下，对高速公路采取临时限速、关闭收费站等管控措施，降低交通事故风险。

4.5 养护质量验收标准优化

完善沥青路面抗滑性能验收标准，将横向力系数与构造深度作为竣工验收的强制性指标。施工过程中应重点控制集料的磨光值（不小于42）、混合料的油石比（偏差控制在±0.3%以内）与摊铺压实度（不小于98%）。养护工程完工后，应在开放交通前进行抗滑性能检测，横向力系数与构造深度需同时满足设计要求，否则不得开放交通。

5 结束语

本文通过实验检测与数据分析，系统研究了沥青路面抗滑性能与交通安全的量化关联关系，构建了标准化的抗滑性能检测体系，确定了不同条件下的临界抗滑阈值，提出了针对性的交通安全管控措施。研究结果表明，路面抗滑性能是影响道路交通安全的关键因素，潮湿环境下抗滑性能衰减是雨天事故高发的主要原因。通过科学的抗滑性能检测与分级管控，可有效降低交通事故发生率，提升道路交通安全水平。未来研究可进一步深化不同轮胎类型、不同车速下路面抗滑性能的变化规律，探索基于物联网的路面抗滑性能实时监测技术，构建更加智能、精准的交通安全管控体系，为道路交通安全保障提供更有力的技术支撑。

参考文献：

[1] 朱慧芳,董海东,蔡燕霞,等.ETA-10沥青混合料体积指标对沥青路面抗滑性能的影响[J].新型建筑材料,2024,51(02):144-148.

[2] 王胜利,姜冬冬,张滨,等.沥青路面抗滑性能智能检测技术在预防性养护中的应用研究[J].计算机应用文摘,2025,41(24):214-216.

[3] 高茜楠,冯润华,耿靖杰.基于纹理分形特性的沥青路面抗滑性能研究综述[J].交通信息与安全,2022,40(05):12-22.

[4] 甫尔海提·艾尼瓦尔,陈思宇,郝小堂,等.基于路表纹理的沥青路面抗滑性能研究[J].公路交通科技,2023,40(S01):127-133.

[5] 张虎林.沥青路面抗滑性能衰减规律及影响因素研究[J].科学技术创新,2026(02):113-116.