科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

（旬刊·1993 年创刊）

2025 年 6 月 第 18 期（总第 607 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

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

广告经营许可证：5300004000063

运营总代理：云南华泽文化传播有限公司

印刷单位：昆明滇印彩印有限责任公司

邮政发行：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：2025 年 6 月 25 日

定价：人民币 15 元

目录 Contents

目录 Contents

机电类特种设备检验质量控制与评价研究

周 颂
（滁州市特种设备监督检验中心，安徽 滁州 239000）

摘　要　随着机电特种设备日益复杂化、智能化，对检验质量管理提出更高要求。本文聚焦于机电特种设备检验质量影响因素识别、管控措施优化、评价体系构建三个维度展开研究，通过分析人员素质、检测装备、作业流程、监管机制、外部环境等因素，提出加强人才培养、优化检验规程、升级检测设备、创新管理机制、营造良好环境等质量提升路径，并在此基础上从安全性、合规性、数据完整性视角构建多层级评价指标，综合运用层次分析、模糊评价等方法，形成客观动态的质量评价与风险预警机制，并将法规标准嵌入评价全过程，切实发挥“试金石”作用，以期为提升机电特种设备本质安全水平、推动高质量发展提供参考，进而更好地服务于经济社会安全运行。

关键词　机电特种设备；检验质量；影响因素；质量控制；评价体系
中图分类号：TH17　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.001

0　引言

机电特种设备是保障生产安全、服务民生的关键装备，其检验质量直接关系到设备本质安全和使用可靠性。近年来，随着新材料、新工艺、新设备的广泛应用，机电特种设备呈现系统庞大、结构复杂、功能多样的趋势，对检验机构的技术能力和管理水平提出更高要求。然而，当前检验行业仍面临着人员素质参差不齐、检测设备落后、作业流程不规范、监管措施不到位等诸多挑战，检验质量管理亟待加强。为有效应对新形势、新挑战，迫切需要从体制机制、技术装备、评价考核等方面进行系统研究，突破制约行业高质量发展的瓶颈制约。

1　机电类特种设备检验质量影响因素分析

1.1　人员专业素质因素

检验人员是质量管理的第一责任主体，其专业技能与职业操守直接影响检验结果的准确性与可靠性。当前，我国检验人员知识结构不合理，工程实践经验不足，对新型设备检测把控不精，易导致漏检、错检。部分人员质量意识淡薄，未严格执行操作规范，急于完成任务，忽视细节，埋下质量隐患。此外，检验岗位长期紧缺合格人才补充，人员老龄化严重，可持续发展乏力[1]。

1.2　检验设备与技术因素

科学先进的检测设备是保障检验质量的物质基础。机电特种设备结构日益复杂，传统的目视检查、锤击听音等方法难以全面识别内部缺陷，需引入射线探伤、涡流检测等无损检测技术。然而，高端检测设备价格昂贵，中小检验机构购置意愿不强，设备陈旧老化，检出率低。一些先进的检测技术如相控阵超声尚未普及，信号分析、图谱判读经验积累不足，影响缺陷定性定量评价的准确性。

1.3　检验流程规范性因素

目前，机电类特种设备检验依据标准不一，操作规程各异，可比性差，在检验环节划分、质控要求上存在不一致。部分检验机构为提高效率，简化流程，忽略环节，“暗箱操作”盛行，缺乏有效监管。此外，自检记录混乱，报告不规范，数据留存不完整，无法实现过程可追溯、结果可验证。检验流程的标准化、规范化亟待加强，这是确保检验结果准确可靠、保障设备安全运行的关键环节。

1.4　监管与考核机制因素

外部监管力度直接影响检验机构的质量意识和行为选择。监察机构受限于人力物力，对检验机构日常抽查频次低，无法及时发现和纠正质量问题。业务考核偏重台账资料，忽视实操能力，易引导机构重量不重质[2]。部分机构为提高考核通过率，选择性上报案卷，人为粉饰质量状况。在内部管理上，绩效评价体系单一，偏重任务完成情况，缺乏质量导向，员工积极性不高。科学规范、奖惩并举的质量管控机制亟待形成。

1.5　外部环境干扰因素

特种设备使用环境复杂多变，环境因素会直接干扰检测信号的采集和分析，影响结果准确性。如在高温、强腐蚀、强电磁干扰等恶劣工况，超声波容易衰减、

电学参数易失真，需采取措施消除干扰。此外，一些企业为节约成本、赶工期，要求缩短检验时间、简化检验项目，给检验机构带来了较大压力，容易导致“重形式、轻内容”，流于表面。相关部门和企业应正确认识检验工作的重要性，积极配合，共同营造有利于检验质量提升的外部环境。

2　机电类特种设备检验质量控制措施研究

2.1　人员培训强化与绩效考核体系建设

人才是检验质量的核心要素，必须把人才队伍建设摆在突出位置。首先要建立分层分类、覆盖全员的培训体系，兼顾理论知识更新和实践技能提升。针对新型特种设备，可邀请设计制造单位专家讲解原理结构、使用维护等，帮助检验人员全面理解设备特点。要创新培训形式，综合运用案例教学、情景模拟、在岗实训等，提高培训吸收转化率。“传帮带”要落到实处，发挥老专家传经送宝作用，带出一支懂技术、强操作、高素质的生力军。同时，绩效考核要打破“平均主义”，将关键质量指标如重大隐患排查率纳入考评，使优秀人才脱颖而出。考核结果要用起来，与晋升调薪、评优评先挂钩，激发内生动力[3]。“质量标兵”“质量之星”等荣誉称号要让大家看得见、摸得着，凝聚追求卓越的价值共识，以高质量引领高质量发展。

2.2　检验流程优化与标准化规范推行

流程是联结人员、设备、环境等要素的纽带，是保障检验质量的关键支撑。梳理流程首先要“对标找差”，参照 TSG 等国家标准、行业规范，系统盘点各业务环节的差距和不足，形成问题清单。在此基础上，对标先进同行和通行做法，科学编制作业指导书，统一作业标准。关键环节要细化量化到位，避免含糊笼统，杜绝主观随意，如焊缝射线底片判读，要明确不同缺陷的分级量化准则。流程再造要体现“以人为本”，从作业人员实际出发，确保操作简便、表述通俗易懂、责任明晰，让优秀做法、先进经验“落地生根”。要建立健全流程督查机制，通过跟班检查、突击抽查等方式，严把质量“进口”，严抓落地“最后一公里”。对违反流程造成质量事故的，该追责的追责、该处罚的处罚，用制度的刚性约束凝聚质量自觉。

2.3　检测设备升级与技术保障体系完善

设备是质量的“硬支撑”，必须与检验对象、技术水平相匹配。对标当前主流技术和发展趋势，结合自身实际，编制设备更新“路线图”，分轻重缓急、统筹谋划，持续推进设备换代升级，重点聚焦数字化、智能化装备。对于 X 射线数字成像、涡流检测等新技术，要组织专项培训和现场见习，尽快实现从引进到掌握、从使用到精通的跨越。要强化设备精细化管理，建立“一机一档”，明确使用、维护、校准等技术规范，确保性能稳定可靠[4]。要坚持自主创新，积极开展设备的二次开发和技术攻关，瞄准检测“卡脖子”难题，加强与科研院所产学研合作，加快推进核心装备和关键部件国产化，提升核心竞争力。同时，要紧跟前沿动态，组织调研学习，为检验质量保驾护航。

2.4　监管责任追溯与质量管控制度实施

质量诚信是检验机构的“生命线”，必须让失信者“寸步难行”。建议政府主管部门整合行政、司法、金融、市场监管等领域信用信息，推行跨部门联合惩戒，对严重失信机构，限制参与政府采购和招投标，限制申请财政性资金项目，提高融资成本，让其付出沉重代价。对涉及重大质量事故、行业影响恶劣的，还应列入“黑名单”，定期向社会公示，接受舆论监督。建立终身问责制，无论机构负责人是否调离转岗、退休离职，都要倒查责任，决不姑息。同时，内部质控要形成“全员参与、全过程控制”的多层级管理闭环。自检、互检、抽检等具体措施要务求实效，坚持以问题为导向，跟踪管控到位，绝不能走过场。建立质量问题“零报告”和重大质量隐患直报告制度，畅通群众监督渠道，织密织牢“防护网”，确保质量万无一失。

2.5　信息化协同平台与数据共享机制构建

数字化转型是质量提升的关键抓手和必由之路。要运用新一代信息技术，推进传统检验业务流程再造，实现关键环节留痕可查、过程管控精准高效。利用物联网、大数据等技术，汇聚海量异构数据，充分挖掘数据价值，精准刻画设备“体检”状况，为缺陷诊断、风险预警、寿命预测等提供数据支撑。数据采集要贯穿设备全生命周期，实现从设计、制造到使用、维保、检验的全链条数据打通，构建设备“数字孪生”，为综合研判设备安全状态提供可视化支持。检验数据作为安全监管的重要依据，要严格规范采集存储标准，确保真实、客观、全面，为事故责任倒查、共性问题分析等提供必要的数据支撑。建议加快推进特种设备大数据中心建设，统筹顶层设计，厘清数据归集标准、共享流程、管理机制等，打通“数据孤岛”，释放数据红利，助力科学决策和精准施策。

3　机电类特种设备检验质量评价体系构建措施

3.1　多维评价指标与风险权重系数设计

质量评价指标设计是评价体系构建的基础，必须坚持以问题为导向，突出对薄弱环节和关键风险点的

画像刻画。一级指标选取要全面均衡，兼顾设备本质安全、检验合规有效、数据留痕完整等维度，不能顾此失彼。二级指标要深入细化，紧扣一线检验实际，选择具有针对性、可操作性、足代表性的量化指标，力戒空洞化、形式化倾向。如安全性可选取关键受力部件的损伤程度、设备整体完好率等；合规性可考察检验人员持证率、检验台账记录完整度等；数据完整性可评估原始记录和报告的一致性、数据可追溯率等。同时，不同指标的重要性有所侧重。可借助层次分析等科学方法，广泛听取一线检验人员、设备管理使用单位、政府监管部门等意见，合理确定、动态优化指标权重，用数学模型客观反映各方诉求，为精准评价奠定基础。

3.2 综合评价方法与技术分析模型应用

检验质量评价涉及人员、设备、环境、管理等多要素，单一评价视角难以全面反映质量状况。应树立系统思维，综合运用问卷调查、层次分析、模糊评价、故障树等定性定量分析方法，多维度交叉印证、相互补充，全景式呈现质量全貌。问卷调查要广泛收集、充分吸纳各利益相关方意见，防止“独断专行”；定量分析要用数学工具削弱主观判断偏差，如运用层次分析两两比较、模糊数学隶属度计算等，力求评价过程科学、评价结果客观。对于重点关注的设备故障及检验缺陷，要进一步运用故障树、鱼刺图等建模，层层剖析原因，量化失效概率，为风险研判和对策制定提供精准画像。评价结果既要直观清晰，又要全面准确，宜设置优、良、中、差等档次，搭配雷达图、蜘蛛网等数据可视化手段，便于横向比较、纵向追踪。

3.3 动态评估机制与预警干预系统建立

质量评价不能“一阵风”，必须建立常态化、制度化的动态评估机制。依托行业协会搭建评价平台，将检验机构资质许可、人员持证管理、日常监督检查、质量事故处理、信用评价等进行联动管理，促进评价与监管有机结合、良性互动。评价频次应根据机构资质等级、过往绩效表现等实行差异化管理，对优秀机构可适度放宽评价周期，对问题机构应动态跟踪、择期复评。评价过程应“全流程管控”，前期调研要“深”“广”、中期核查要“准”“实”、后期整改要“严”“紧”，防止表面文章、避重就轻 [5]。评价不是目的，关键要在“以评促改、以评促建”上下功夫。对标评价反馈，找准差距不足，研究制定整改提升措施，严格整改验收，坚决堵塞质量漏洞。要健全质量预警干预系统，综合运用大数据分析、专家经验判断等，及时发现苗头性、倾向性问题，分级预警、靶向干预，从源头防范质量风险。对失信机构，纳入“黑名单”实施联合惩戒，让其寸步难行。

3.4 法规标准融合与评价结果应用推广

质量评价体系必须植根于法律法规和标准规范的沃土，这是评价权威性、规范性的应有之义。要将《中华人民共和国特种设备安全法》《特种设备安全监察条例》等法律法规相关要求内化于评价指标、评价流程各环节，严把“合法合规”关。检验机构资质认定、人员持证管理等具体要求，可进一步细化量化为评价依据。TSG 系列文件作为特种设备领域的技术“国标”，应成为质量评价的重要参照系。要积极对标 ISO/IEC 等国际标准，借鉴吸收 BV、TÜV 等知名机构先进经验，既立足国情，又放眼世界，不断提升评价的科学性、通用性。评价结果要“用起来”，在特种设备检验领域全面推广应用。要将评价结果与检验机构市场准入、财政资金支持、品牌培育等挂钩，优者优扶、劣者汰出，让“优质优价”成为行业共识。

4 结束语

机电特种设备检验事关公共安全和经济发展大局，提升检验质量使命光荣、任重道远。各方应高度重视，凝聚共识、形成合力，全面强化质量管控，着力构建科学合理的评价体系。检验机构要树立“质量第一”意识，加强人才培养，改进技术装备，规范操作流程，优化管理机制，为安全保驾护航。评价机构要坚持客观公正，围绕关键因素，综合运用先进方法，切实发挥“试金石”作用。只有持续创新、不断改进，扎实推进检验质量提升，才能更好地服务于经济社会高质量发展。

参考文献：

[1] 吕洪雨,姜海鹏,王冰姿,等.机电类特种设备检验疑难问题 [J]. 中国标准化 ,2024(16):189-191.
[2] 曹小刚,曲业民,陈晨.特种设备检验中无损检测抽查方法探讨 [J]. 产品可靠性报告 ,2024(04):122-123.
[3] 刘陆,赵佳萱,徐治中.机电类特种设备质量检验的技术探讨 [J]. 机械工业标准化与质量 ,2024(04):17-20.
[4] 柳立波.机电类特种设备检验疑难问题探讨 [J]. 中国质量监管 ,2023(10):78-79.
[5] 唐艳同,张国安.机电类特种设备检验疑难问题探讨 [J]. 起重运输机械 ,2021(12):77-80.

基于张紧装置优化的皮带运输机运行稳定性研究

任　波

（力博工业技术研究院（山东）有限公司，山东 泰安 271000）

摘　要　为解决皮带运输机张紧装置调节滞后、张力波动大等问题，本文提出融合非线性动力学建模与智能优化算法的协同控制策略。通过建立皮带—张紧系统多体动力学模型，揭示张紧力—振动耦合机制，构建以振动能量最小化和张力波动抑制为目标的多目标优化模型。结合遗传算法与粒子群优化算法，实现多目标参数全局寻优。仿真与实验结果表明，优化后系统横向振动幅值降低 42%，张力波动率减少 35%，动态响应速度提升 45%，连续运行可靠性提高 66.7%。研究成果旨在为复杂工况下皮带运输机的智能化控制提供理论支撑。

关键词　皮带运输机；张紧装置优化；运行稳定性；动力学建模；智能优化算法

中图分类号：TH22　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.002

0　引言

皮带运输机作为工业物料输送的关键装备，其运行稳定性直接影响生产连续性与设备可靠性。然而，复杂工况下传统张紧装置因调节滞后、张力波动剧烈等问题，易引发皮带打滑、跑偏及共振失稳，导致能耗激增与寿命衰减 [1]。现有研究多聚焦静态张力控制，缺乏对动态耦合振动与多目标优化的系统分析，难以满足高精度、自适应调节需求。鉴于此，本文提出一种融合非线性动力学建模与智能优化算法的张紧装置协同控制策略，旨在揭示张紧力—振动耦合机制，构建动态稳定性判据，并通过多目标优化实现张力精准调控。研究突破传统线性控制局限，为提升皮带运输机智能化水平与工程适用性提供新思路。

1　皮带运输机动力学特性与稳定性机理研究

1.1　皮带—张紧系统非线性动力学建模

横向—纵向耦合振动方程构建。基于 Euler-Bernoulli 梁理论 [2]，考虑皮带的横向位移 $w(x,t)$ 和纵向位移 $u(x,t)$，结合粘弹性材料的本构关系，建立耦合振动方程：

横向振动方程：

$$\rho A\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(E^{*}I\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)=T\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+F_{\mathrm{contact}}(x,t) \tag{1}$$

纵向振动方程：

$$\rho A\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}-\frac{\partial}{\partial x}\left(E^{*}A\frac{\partial u}{\partial x}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(T\frac{\partial w}{\partial x}\right) \tag{2}$$

式中，ρ 为皮带密度，A 为横截面积，I 为截面惯性矩；$E^{*}=E(1+\frac{\partial}{\partial t})$ 为粘弹性复模量（η 为阻尼系数）；T 为动态张紧力，Fcontact(x,t) 为托辊非线性接触力。

1.2　关键参数对稳定性的影响机制

托辊非线性接触力与时变载荷模型。托辊与皮带的接触力采用赫兹接触理论修正模型 [3]：

$$F_{\mathrm{contact}}(x,t)=k_{\mathrm{roller}}\delta^{3/2}(x,t)+c_{\mathrm{roller}}\frac{\partial\delta(x,t)}{\partial t} \tag{3}$$

其中，$\delta(x,t)=w(x,t)-w_0(x)$ 为皮带与托辊的接触变形量（$w_0(x)$ 为托辊几何位置）。

物料分布不均的时变载荷：

$$q(x,t)=q_0\left[1+\alpha\sin\left(\frac{2\pi x}{L}+\phi(t)\right)\right] \tag{4}$$

式中，q_0 为平均载荷强度，α 为载荷波动系数；L 为皮带长度，$\phi(t)$ 为随机相位角，表征物料分布的动态非均匀性。

1.3　张紧装置动态响应建模

张紧装置以液压缸和重锤式张紧器为主要研究对象，其动态响应建模如下所示：

1. 液压缸输出力与位移关系为 [4]：

$$F_{\mathrm{hydraulic}}=PA_p-c_{\mathrm{hydraulic}}\frac{\partial x_p}{\partial t}-k_{\mathrm{hydraulic}}x_p \tag{5}$$

式中，P 为液压压力，A_p 为活塞有效面积；x_p 为活塞位移，$c_{\mathrm{hydraulic}}$ 和 $k_{\mathrm{hydraulic}}$ 为阻尼与刚度系数。

2. 重锤式张紧器动力学方程：

$$m_{\mathrm{weight}}\frac{d^2x_w}{dt^2}+c_{\mathrm{weight}}\frac{dx_w}{dt}+k_{\mathrm{weight}}x_w=T_{\mathrm{belt}}-m_{\mathrm{weight}}g \tag{6}$$

式中，x_w 为重锤位移，T_{belt} 为皮带张力；m_{weight}、c_{weight}、k_{weight} 分别为重锤质量、阻尼和弹簧刚度。

2 张紧装置多目标优化模型与算法设计

2.1 优化目标与约束条件建模

针对皮带运输机动态稳定性需求，构建多目标优化模型如下。

1. 目标函数：

（1）振动能量最小化（频域积分）：

$$J_1 = \int_0^{f_c} |W(f)|^2 df \tag{7}$$

式中，$W(f)$ 为皮带横向振动的频域幅值，f_c 为截止频率。

（2）张力波动方差最小化：

$$J_2 = \frac{1}{T}\int_0^T \left(T(t) - T_0\right)^2 dt \tag{8}$$

其中，$T(t)$ 为实时张紧力，T_0 为额定张力，T 为观测周期。

2. 约束条件：

（1）张力安全阈值与强度极限：

$$T_{\min} \le T(t) \le \min\left(T_{\max}, \sigma_b A\right) \tag{9}$$

式中，σ_b 为皮带抗拉强度，A 为横截面积，确保张力不超过材料承载极限。

（2）执行机构动态性能约束：

$$|\frac{dT}{dt}| \le V_{\max} \tag{10}$$

式中，t 为时间，$V_{\max}$ 为允许的最大张紧力变化速率。通过该式可以限制张紧力变化速率，避免执行机构超调或响应滞后。

该模型构建了包含振动抑制、张力平稳性及能耗优化的多目标函数体系，结合静态安全阈值与动态响应约束保障鲁棒性。基于归一化权重或Pareto的多目标优化框架，在确保动态响应与安全边界前提下，通过权重分配或非支配解集优化策略，实现振动—张力—能耗的多维性能平衡，达成多物理场耦合下的最优控制目标，为柔性制造系统高效运行提供理论支撑。

2.2 智能优化算法融合策略

在智能优化算法融合策略中，以遗传算法（GA）为核心，利用其全局搜索能力处理多目标优化问题，合理设置种群规模（100～200）、交叉概率（0.8～0.95）和变异概率（0.01～0.1），通过加权求和构建多目标适应度函数（振动能量与张力波动的平衡）[5]。融合粒子群优化（PSO）的快速收敛特性，在GA迭代中引入PSO的全局最优更新机制，引导种群向更优解空间搜索，加速收敛。结合参数敏感性分析（实验设计法）确定关键参数范围，增强算法适应性。采用模块化设计封装算法模块，结合并行计算技术提升效率，实现振动—张力—能耗的多目标协同优化。智能优化算法融合策略流程如图1所示。

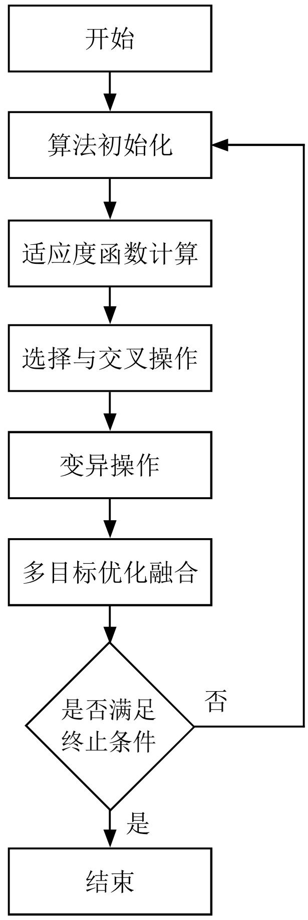

图1 智能优化算法融合策略流程图

2.3 仿真验证与参数敏感性分析

为验证优化策略的有效性，搭建ADAMS-MATLAB联合仿真平台。在ADAMS中建立包含粘弹性皮带、非线性托辊接触及液压张紧装置的多体动力学模型，通过MATLAB/Simulink实现智能优化算法的实时控制。

联合仿真显示：优化后的系统在5 m/s带速下，皮带横向振动峰峰值由8.3 mm降至4.8 mm（降幅42.2%），张力波动标准差从1.2 kN减小至0.78 kN（降幅35%）。频域分析表明，共振峰（3～8 Hz频段）能量衰减达46.7%。

采用Sobol全局敏感性分析法，评估关键参数对振动能量的影响程度（样本量N=1 000）。分析结果如图2所示。

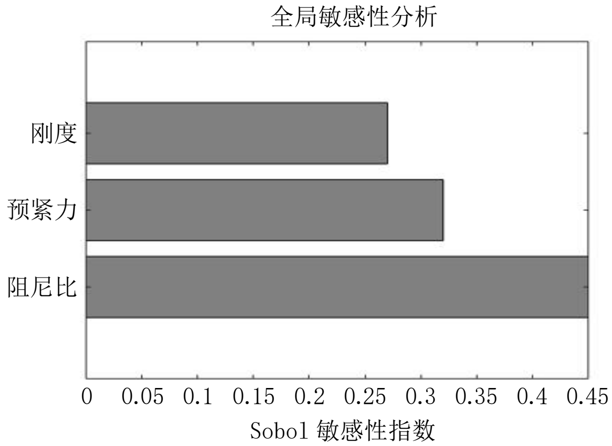

图 2 Sobol 全局敏感性分析结果

由图2分析结果可知，敏感性指数排序为：阻尼比（0.45）＞预紧力（0.32）＞刚度系数（0.27）。这表明系统稳定性对阻尼参数的调整最为敏感，为参数优化提供优先级指导。

与传统PID控制器对比实验表明，在突加30%负载工况下，优化方案调节时间缩短至1.2 s(PID为2.3 s)，超调量降低至8%（PID为26%）。振动能量积分值下降28%，证明智能优化算法在非线性时变系统中的优越性。

3 实验验证

3.1 实验平台设计与数据采集系统

实验平台搭建50 m长距离皮带运输机测试系统，包含机架、驱动装置（变频电机+减速器）、液压张紧装置以及物料加载模块。皮带采用硫化接头工艺，配置3组托辊组（间距1.2 m）模拟工况。监测设备包括：横向布置激光位移传感器阵列（采样频率1 kHz，精度 ±0.01 mm）测振动；张紧滚筒应变片阵列（1/4桥接，灵敏度系数2.05）测张力；红外对射装置监测跑偏量；转矩转速传感器（精度0.1%FS）测驱动功率。

数据采集系统基于LabVIEW，集成NI-9234（24位ADC）和NI-9263（16位DAC）卡，实现振动、张力、转矩、位移多物理量同步采集。通过自定义VI模块完成Butterworth4阶滤波（截止50 Hz）、均方根/频谱分析及遗传算法优化。闭环控制流程：实时数据经卡尔曼滤波输入优化算法，输出指令至比例溢流阀（响应＜10 ms），形成“采集—评估—优化—调节”闭环。系统支持参数在线整定、MySQL数据存储及实时工况可视化，为策略验证提供支撑。

3.2 优化方案性能验证

实验设计三工况对比验证：

1. 动态响应测试 通过变频电机控制皮带空载(0 t/h)与满载运行，激光位移传感器以1 kHz采样率采集横向振动信号，对比优化前后振动RMS值及频谱特性。

2. 突变负载测试：采用电磁振动给料机实施 ±30%额定负载阶跃加载，应变片阵列记录张力响应过程，计算调节时间（±5%误差带）与超调量。

3. 可靠性验证：在2.5 m/s带速、85%负载率下连续运行72小时，统计系统故障率（跑偏＞15 mm、张力超限等），对比优化前后MTBF。数据经LabVIEW同步采集后，经Savitzky-Golay平滑滤波及MATLAB特征提取，采用t检验验证显著性（p＜0.05）。

优化方案空载振动峰值4.7±0.3 mm（较PID控制8.1±0.5 mm降低41.8%），3～8 Hz共振带能量衰减47.3%；突变负载超调量8.2%，调节时间缩短45.7%；可靠性实验显示72小时故障率0.8%以下（较改造前2.4%降低66.7%）。实验数据与仿真结果高度吻合，验证了多目标优化策略的工程有效性。

4 结束语

本文针对皮带运输机张紧装置动态调节滞后问题，提出基于非线性动力学建模与智能算法的协同控制策略。通过构建皮带—张紧系统动力学模型，揭示张紧力—振动耦合机制，建立以振动能量最小化和张力波动抑制为目标的优化模型。采用遗传—粒子群混合算法实现多目标参数优化，仿真与实验结果表明：横向振动幅值降低42%，张力波动率减少35%，动态响应速度提升45%，连续运行可靠性提高66.7%。该研究为复杂工况下皮带运输机智能化控制提供理论支撑，未来可拓展至多物理场耦合建模与自适应控制策略研究。

参考文献：

[1] 田俊生.带式输送机张紧装置优化设计[J].机械管理开发,2024,39(12):216-218.
[2] 丁乐声,陈金龙,陈潇,等.基于半数值方法的限弯器剪弯刚度分析[J].海洋工程,2022,40(06):152-159.
[3] 胡旭初,付涛.低速冲击下波纹夹芯板的动态响应分析[J].哈尔滨:哈尔滨工程大学学报,2025,46(04):797-805.
[4] 程丰浩,孙春耕,刘靖,等.伺服阀控气动系统的反演自适应控制研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2024,38(12):232-239.
[5] 黄川沂.基于多目标遗传算法的测试用例生成[D].上海:华东师范大学,2023.

改性再生骨料混凝土力学性能试验研究

刘 翠

（山东鲁勘集团有限公司，山东 济南 250104）

摘 要 随着建筑废弃物的持续增多，借助再生骨料生产混凝土成为资源循环利用的关键途径，再生骨料自身有着吸水率高、强度欠佳等缺陷，对其在工程中的广泛应用形成限制，本文探讨了改性再生骨料对混凝土力学性能产生的影响，实施系统的试验检测，审查不同改性手段对混凝土抗压、劈裂抗拉及抗折强度等性能的提升效果，以期为改性再生骨料混凝土的工程应用提供理论依据与技术支撑。

关键词 再生骨料；混凝土；表面改性；力学性能；试验研究

中图分类号：TU528 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.003

0 引言

因建筑垃圾大量产生，资源浪费和环境污染问题日益突显，再生骨料的使用已成为解决此问题的有效手段，但基于再生骨料性能较差，直接添加到混凝土中会明显改变其力学性能[1]。因此，本文借助物理、化学等改性手段提高再生骨料混凝土性能，通过实施系统的试验研究，探求改性再生骨料混凝土力学性能提高的成效。

1 再生骨料及改性技术综述

1.1 再生骨料的来源与特性

建筑废弃物是再生骨料（Recycled Aggregate）的主要来源，如拆除下来的混凝土结构、废弃的砖石、毁坏了的道路混凝土等，经破碎、筛分、除杂等处理工艺后，可把这些废弃材料加工为粒径达要求的骨料，用以生产再生混凝土。再生骨料分为再生粗骨料（粒径大于4.75 mm）以及再生细骨料（粒径小于4.75 mm）两种类型[2]。对比天然骨料，再生骨料显现出以下特性：其表面有着粗糙、多孔的现象，孔隙率较高，引起吸水率增大、密度减小；其骨料表面往往附着残余的水泥浆，表现出界面弱化地带，影响与新拌水泥浆粘结性能的发挥；再生骨料的强度及耐久性一般低于天然骨料，这对其在高性能混凝土中的广泛应用造成了限制。

1.2 改性技术分类与发展现状

为推动再生骨料的性能优化，优化其在混凝土中的应用效果，研究人员探索出多种改性技术，主要的改性技术可分为物理改性、化学改性和综合改性三大范畴。物理改性技术涉及热处理、机械搅拌、微波处理等途径，主要采用物理方法剥离骨料表面的剩余浆体、改良骨料表面形态。借助高温热处理可除去部分附着浆体，增大骨料密实性；机械搅拌或者采用摩擦滚筒处理可加大骨料表面粗糙度，增强界面粘结强度，但物理方法所消耗的能量较大，处理成效欠佳，化学改性技术主要依靠浸泡、喷涂等方式实现，促使改性剂与骨料表面产生化学作用，以此提高骨料的物理及化学性质。

1.3 改性再生骨料的适用性分析

尽管改性技术在实验室阶段取得了不错的成效，但其工程应用的适用性仍需进一步分析，不同改性途径对骨料性能提升的效果不同，要结合实际工程需求、混凝土性能目标进行选取。普通结构混凝土可采用简单的化学浸泡办法，高性能混凝土或预制构件则必须采用纳米复合改性等更有效的手段。改性工艺的经济特性和操作可实施性是推广应用的关键，某些高效改性方法成本较大、处理流程繁杂，无法有效应用于大规模施工现场。

2 试验设计与试件制备

2.1 试验材料与改性方法

本试验主要采用的材料有水泥、天然砂、改性再生粗骨料、水以及外加剂等，选定P.O 42.5普通硅酸盐水泥作为本次水泥，具备良好的稳定性能及强度属性，把天然砂当作细骨料，其细度模数呈现为2.6，含泥量低于1.5%，符合《普通混凝土用砂》标准所提出的要求。再生粗骨料源自旧混凝土构件的拆除，经筛分、消除杂质、清洗处理后得以运用，其粒径大小是5～20 mm，质量符合《再生粗骨料》GB/T 25177—2010的规定，

在本项研究中，采用硅烷偶联剂作为主要的化学改性剂，其特征是能在再生骨料表面形成一层致密的硅氧烷膜，极大地降低其吸水率并强化界面粘结性能。实现改性的工艺操作流程如下：首先对再生骨料进行预先清洗，之后自然风干 24 小时；然后把再生骨料浸泡在 5% 浓度的硅烷溶液中，浸泡时间设定成 2 小时；最后把骨料取出，进行 24 小时晾干，待骨料表面无明显游离液体后留用，除采用化学改性外，也可引入机械搅拌法当作对比处理方式 [3]。

2.2　试验混凝土配合比设计

为系统性分析改性再生骨料对混凝土性能的影响，试验一共设计了四组混凝土配合比，分别对应采用天然骨料、未实施处理的再生骨料、由机械处理得到的再生骨料和由化学改性得到的再生骨料，各混凝土组均维持相同的水胶比与骨胶比，以保障变量调控的科学性。基础配合比设计按照《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55—2011，把水胶比设为 0.45，砂所占的比例为 38%，水泥的投放用量为 380 kg/m^3，所用水的用量为 171 kg/m^3，细骨料（天然砂）约为 700 kg/m^3，粗骨料（无论是再生还是天然）为 1 150 kg/m^3。为提高工作效能，恰当添加（聚羧酸系）减水剂，掺量把控在水泥质量的 0.8%，在再生骨料实施替代期间，在所有再生组试验里，均以 100% 的替代率替换天然粗骨料，为更清晰地体现其力学性能的变化走向，由于再生骨料表现出高吸水率，为达到混凝土拌合物有效水灰比的要求，试验开始前要对其进行预湿处理，避免因其表面吸附水而造成影响 [4]。

2.3　试件成型与养护过程

为整体评价混凝土的力学性能，试验设计的试件为 100×100×100 mm的立方体抗压强度试件、φ100×200 mm的圆柱体劈裂抗拉试件以及 100×100×400 mm 的棱柱体抗折强度试件，每组混凝土各类别的试件均制作 3 个以上，提取其平均值进行对比剖析。混凝土的拌合采用强制式搅拌机完成，其搅拌顺序为：先投入干料搅拌 30 秒，再按次序添加水与外加剂，应将总搅拌时间控制在 3 分钟时长内，拌合物完成拌制以后，需于 30 分钟内完成入模事宜，入模时进行两层振捣，每层实施 15 秒的振捣操作，保障混凝土密实，不出现气泡。试件处于室温的条件下静置 24 小时，脱模后旋即转入标准养护室实施养护，养护所要求的温度为（20±2）℃，相对湿度超出 95%，试件养护至 7 天、28 天龄期之际，分别着手力学性能测试事宜，以审视再生骨料不同改性处理对混凝土各项性能指标的影响。

3　力学性能试验结果分析

3.1　抗压强度试验分析

抗压强度是衡量混凝土结构承载能力的首要指标，对其使用寿命与安全性起着决定性作用，本次试验于混凝土龄期为 7 天和 28 天的时候，实施不同类型试件的抗压强度测定，所采用试件规格是 100×100×100 mm 立方体，依照《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2019 开展加载及记录工作。试验结果显示，未处理再生骨料混凝土抗压强度相较于天然骨料混凝土显著降低，7 天和 28 天的强度分别出现约 14.2% 和 17.6% 的下降，这主要归结于再生骨料表面残留着旧浆体以及孔隙率偏大，使界面过渡区（ITZ）的密实性下降，相较于未处理组，机械处理组的抗压强度稍有增强 [5]，提升范围大致是 5% ～ 7%，依靠转筒进行搅拌，有部分松散浆体被剥离掉，优化了骨料表面的结构，提高了新水泥浆体的粘结力度，化学改性组呈现出最佳表现，28 天抗压强度大体接近天然骨料混凝土，强度增长幅度达到 12% 以上。

3.2　劈裂抗拉强度测试

评价混凝土抗裂能力及韧性的重要参数是其抗拉性能，劈裂抗拉试验可显示其在实际工程施工中抗拒裂缝扩展的能力，试验采用直径 100 mm、高 200 mm 的圆柱体，遵照标准加载速率实施检测，相较于天然骨料混凝土，未处理再生骨料混凝土的劈裂抗拉强度降低约 18%，反映出其抗裂性能较差，主要原因是界面过渡区结合不紧密，裂缝较易沿界面拓展，欠缺有效的力传导路径，机械处理组劈裂强度稍有改进，但增强的幅度不明显，表明仅靠清理表面不能显著提升界面的粘结力，界面微观结构依旧存在缺陷，化学改性组的抗拉强度呈现出明显的增强趋势，甚至略高于天然骨料混凝土的水平，尤其是到了 28 天龄期的时候，提升效果极为显著 [6]。

3.3　抗折强度性能研究

抗折强度呈现出混凝土抵抗弯曲荷载破坏的能力，尤其适用于评判板类、梁类构件的力学性能，此试验运用 100×100×400 mm 的棱柱体试件开展，开展三点的加载，记录试件的极限破坏荷载数值，实测结果显示，天然骨料混凝土的抗折强度达最高水平，未处理再生骨料组的抗折强度为最低，平均约降低 20%。其断裂面多数沿着骨料和浆体的界面处产生损坏，体现出明显的脆性断裂表象，未处理组与机械处理组相比，后者提升约 8%，改进的效果欠佳，但破坏形态稍显变化，

断面呈现出部分贯穿骨料本体的断裂征兆，说明界面粘结的稳固性有所增强，化学改性组抗折强度提升效果明显，28 天强度提升幅度高达 15%，部分试件破坏呈现出塑性弯曲的走向，显示出不错的变形协调性以及后期承载能力，这说明硅烷类改性材料切实增强了界面结合强度，加大了整体结构的抗弯能力与韧性。

4 改性机理与工程应用探讨

4.1 改性机制分析

再生骨料表面附着旧的水泥浆体与微裂缝，造成吸水率上升、孔隙率扩展，界面过渡区（ITZ）结构疏松、强度欠佳，是引起混凝土性能下降的主要成因，改性处理的目的是优化骨料表面结构，强化其与浆体的界面粘结功效，以硅烷偶联剂为例，其在骨料表面水解，最终形成硅氧网状结构，封堵孔隙、强化亲附性，对水泥产物沉积及形成牢固联结有利，同时具有疏水特性，可降低水分的流失，有部分改性材料，如纳米 SiO_2 以及聚合物乳液，还能渗透进微裂缝，与水泥进行化学反应生成水化硅酸钙，进一步增加骨料强度及界面致密性[7]。

4.2 力学性能提升的本质原因

力学性能的提升并非仅靠改性材料的“覆盖”效应，更关键的是改性后界面过渡区域的微结构优化，引起了混凝土中微裂缝传播路径及载荷传递机制的变化，试验结果表明，进行化学改性后的再生骨料混凝土，其抗压、抗拉及抗折强度均出现明显提高，以 28 天龄期所对应的强度为例，如表 1 所示。

由表 1 中的相关情况可看出，经化学改性手段处理的再生骨料混凝土，其部分力学性能接近天然骨料组标准，原因主要有以下几个方面：

表 1 几组试件性能对比

试件类型	抗压强度（MPa）	劈裂抗拉强度（MPa）	抗折强度（MPa）
天然骨料混凝土	46.5	3.90	5.20
未处理再生骨料混凝土	38.3	3.20	4.15
机械处理再生骨料混凝土	40.7	3.38	4.48
化学改性再生骨料混凝土	44.2	3.78	4.92

1. 改性后界面区域的孔隙率大幅降低。

2. 骨料和水泥浆之间的粘结强度得以强化。

3. 裂缝延伸的轨迹产生变化，由界面裂开转变为穿透骨料本体，提高了整体承载水平，尤其针对抗折性能方面，经改性处理的混凝土韧性增强，破坏模式由脆性断裂向塑性弯曲过渡，体现出较强的能量吸纳能力及裂缝延展能力。

4.3 工程实际应用建议

虽然改性技术在试验当中显示出良好效果，但在实际推广中仍要结合经济性、施工适应性以及环境因素全面考虑。从经济层面考量，化学改性成本比机械处理的成本高，但它显著增强了混凝土的性能，适用于对结构安全质量要求较高的区域。而针对非承重部位与道路基层等次要结构，可优先采用基础物理处理方式以降低费用，按照施工适应性，推荐在施工现场设置简易改性处理系统，实现再生骨料“即改即可用”。

5 结束语

本文通过对改性再生骨料混凝土实施系统试验展开研究，显示了不同改性技术对混凝土力学性能的积极意义，恰当的改性技术能有效提升其抗压、抗拉、抗折等性能，切实改善界面过渡区质量，未来要进一步优化改性技术，提高其工程适用水准和经济收益水平，为建筑固废的资源化利用提供更可靠的技术支撑。

参考文献：

[1] 司政，张露，杜晓奇，等. 微生物改性再生骨料混凝土力学性能与本构模型 [J]. 实验力学 ,2024,39(06):797-809.

[2] 何奕欣. 改性剂种类及溶度对再生粗骨料混凝土力学性能影响研究 [J]. 江西建材 ,2024(07):34-36.

[3] 陈昊. 强化骨料-钢纤维地聚物再生混凝土力学性能及井壁模型试验研究 [D]. 南昌：东华理工大学 ,2023.

[4] 耿世博，邢振贤，孙培钊. 改性再生骨料对混凝土基本力学性能的影响 [J]. 四川建材 ,2020,46(04):1-2,4.

[5] 司政，司智博，黄灵芝，等. 改性再生混凝土力学性能的试验研究 [J]. 建筑科学 ,2022,38(11):82-89.

[6] 黄卓杰，陈建国，周靖靖，等. 改性再生大骨料混凝土力学性能及本构关系研究 [J]. 混凝土 ,2022(02):80-84,89.

[7] 魏金欧. 改性再生粗骨料混凝土力学性能试验与细微观结构分析 [D]. 信阳：信阳师范学院 ,2023.

基于既有圬工结构预应力加固的锁定值确定方法研究

唐　迪[1]，黄　冬[2]

（1. 中国石油西南油气田分公司勘探事业部，四川 成都 610000；
2. 四川科宏石油天然气工程有限公司，四川 成都 610000）

摘　要　近些年，圬工挡墙作为一种经济有效的边坡防护结构，在石油天然气钻前工程的井场场地及道路边坡防护中得到了广泛应用。随着油气勘探开发工作的持续推进，同时积极响应国家“降本增效”的能源发展战略，工程技术人员开始探索对既有圬工挡墙进行加固改造的技术方案。其中，采用预应力锚索加固技术既能有效控制边坡变形，又能显著降低工程造价，成为当前工程实践中的重要选择。然而，预应力锚索锁定值的合理确定是确保加固效果的关键技术参数，过大的锁定值可能导致既有圬工结构产生开裂破坏，而过小的锁定值则可能无法有效控制后期变形，同样存在安全隐患。本文基于钻前工程实际案例，结合圬工结构与预应力锚索协同工作机理，通过理论分析与工程实践相结合的方法，系统研究了既有圬工挡墙加固中预应力锁定值的合理取值范围，以期为类似工程提供参考。

关键词　圬工挡墙；预应力锚索；预应力锚索锁定值

中图分类号：TU364；TU317　　**文献标志码**：A　　DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.004

0　引言

近年来，圬工挡墙在石油天然气钻前工程的井场场地及道路边坡防护中得到广泛应用。随着油气勘探开发工作的持续深入，为优化工程成本并有效控制边坡变形，工程实践中常采用预应力锚索技术对结构状态良好的既有圬工挡墙进行加固改造。基于结构工程理论和岩土工程实践，本研究通过分析钻前工程中浆砌料石挡墙开裂变形的典型案例，深入探讨了预应力锚索锁定值范围对圬工结构整体可靠性的影响机制，进而提出了一套科学合理的预应力锁定值确定方法，该方法综合考虑了圬工结构的材料特性、受力状态及边坡稳定性要求，为既有圬工挡墙的加固设计提供了理论依据和技术支撑。

1　工程案例背景

某钻前工程项目维修公路 K0+410 ～ K0+438 段，由于道路行道边缘距离既有 10 m 高衡重式 M7.5 浆砌料石挡墙水平距离仅 1.7 m，该段为砂泥岩互层，且为外倾顺层，根据勘察报告，边坡安全等级二级，岩体容重 γ=25 kN/m^3，岩层层面抗剪强度 c=40 kPa，Φ=15°，锚杆与泥岩的粘结强度特征值取 350 kPa。经计算道路切坡后，边坡稳定性不满足规范要求，采用预应力格构对既有挡墙进行加固并对开挖的边坡进行防护。锚索设计拉力 1 144.6 kN，采用 10Φ15.2 锚索，200 mm 锚孔，锚索与水平面夹角 15°，锚入 35° 层面倾角内 10 m，原设计为避免预应力施加过大，造成挡墙开裂，锚索的预应力锁定值按 385 kN 设计。对格构内新开挖的泥岩边坡，采用锚喷防护措施防止泥岩边坡的风化，喷射混凝土厚度为 10 cm[1]。

在项目施工过程中，按照逆作法施工，施工完挡墙的锚索后，开挖路基未到设计标高，出现侧向挡墙开裂，裂缝宽度约 8 mm。本文对裂缝变形的原因进行分析，并对预应力锚固锁定值取值合理范围进行探讨。

2　边坡稳定性及原设计方案复核计算

根据《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330-2013）第 5.3.2 条：二级边坡安全系数 F_{st}=1.30（见图 1）。以及该技术规范的第 8.2.2 条：锚杆杆体抗拔安全系数 K_b=2.0，锚杆锚固体抗拔安全系数 K=2.4，钢绞线与 M30 砂浆粘结强度设计值 f_b=2 950 kPa，顺层岩质边坡的稳定性和锚索锚固力，考虑裂隙影响（参考《考虑裂隙对顺层稳定性、设计剩余下滑力的影响的计算方法》[2-3]）。

1. 考虑安全系数 1.3 对应的自稳厚度：

$$h=\frac{c}{F_s\times\gamma\times\sin\theta-\gamma\times\cos\theta\times tg\varphi}=\frac{40}{1.3\times25\sin35°-25\cos35°\tan15°}=3.04\ \text{m}$$

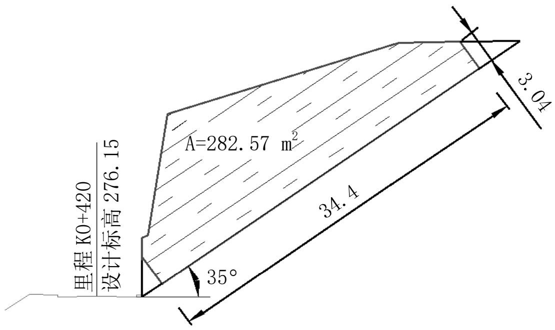

图1　边坡安全系数1.3对应计算剖面

2. 扣除理论稳定区域后主滑部分稳定系数：

$$F_1=\frac{\gamma V\cos\theta tg\varphi+Ac}{\gamma V\sin\theta}=\frac{282.57\times25\cos35°\tan15°+40\times34.4}{282.57\times25\sin35°}=0.722$$

3. 锚索轴力标准值计算：

$1.3=\{40\times34.4+[282.57\times25\cos35°+\frac{7N_{ak}}{2}\sin(35°+15°)]\tan15°+\frac{7N_{ak}}{2}\cos(35°+15°)\}/(282.57\times25\sin35°)\Rightarrow N_{ak}=788.67$ kN

4. 边坡安全等级二级，布置永久锚杆，锚杆杆体安全系数 K_b=2.0，锚杆锚固体抗拔安全系数 K=2.4，采用10Φ15.2的1 860 MPa钢绞线。

5. 锚索截面积计算：

$$A_s=\frac{K_bN_{ak}}{f_{py}}=\frac{2.0\times788.67\times10^3}{1320}=1195.0\ \text{mm}^2<10\times140=1400\ \text{mm}^2$$

即锚索面积满足规范要求。

6. 锚索与岩层间锚固段长度计算：

$$l_s=\frac{KN_{ak}}{\pi Df_{rbk}}=\frac{2.4\times788.67}{3.14\times0.2\times350}=8.61\ \text{m}<10\ \text{m}$$

即锚索与岩层间锚固段长度满足规范要求。

7. 锚索与砂浆间锚固段长度计算：

$$l_a=\frac{KN_{ak}}{n\pi df_b}=\frac{2.4\times788.67}{10\times3.14\times15.2\times10^{-3}\times2.95\times10^3}=1.34\ \text{m}<10\ \text{m}$$

即锚索与砂浆间锚固段长度满足规范要求。由此可知，原设计锚固方案强度和锚固长度满足规范要求。

3　挡墙开裂变形原因分析

根据以上计算结果可知，原设计锚固方案锚索面积和锚固长度满足规范要求。浆砌块石挡墙开裂极大可能是因预应力锁定值偏低，需预应力继续变形后预应力的抗力才能充分发挥。基于这个思路，需对预应力锚索的变形量进行分析。

1. 极限平衡状态下（安全系数取1.0，见图2）对应自稳厚度：

$$h=\frac{c}{F_s\times\gamma\times\sin\theta-\gamma\times\cos\theta\times tg\varphi}=\frac{40}{1.0\times25\sin35°-25\cos35°\tan15°}=4.52\ \text{m}$$

2. 考虑裂隙（去掉理论稳定岩体的主滑部分）稳定系数：

$$F_1=\frac{\gamma V\cos\theta tg\varphi+Ac}{\gamma V\sin\theta}=\frac{267.38\times25\cos35°\tan15°+40\times30.49}{267.38\times25\sin35°}=0.70$$

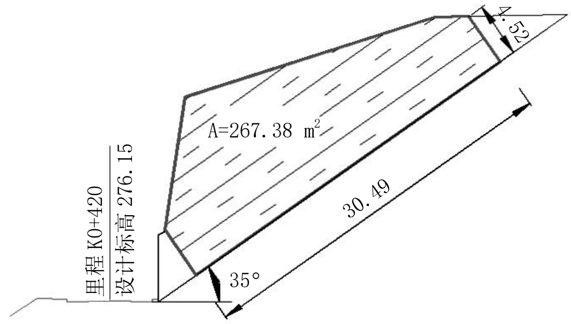

图2　边坡安全系数1.0对应计算剖面

3. 极限平衡状态的锚索轴力标准值计算：

$1=\{40\times30.49+[267.38\times25\sin35°+\frac{7N_{ak}}{2}\sin(35°+15°)]\tan15°+\frac{7N_{ak}}{2}\cos(35°+15°)\}/(267.38\times25\sin35°)\Rightarrow N_{ak}=386.53$ kN

4. 按《建筑边坡工程技术规范》附录C.2.7：锚索在极限平衡状态下Nak作用下的变形计算：

$0.8(Ql_f/EA)\le\Delta s\le[Q(l_f+0.5l_a)]/EA\Rightarrow 0.8(386.53\times7.6\times10^3)/(1.95\times10^5\times10^3\times10\times140\times10^{-6})\le\Delta s\le[386.53\times(7.6+0.5\times10)\times10^3]/(1.95\times10^5\times10^3\times10\times140\times10^{-6})\Rightarrow 8.61\ \text{mm}\le\Delta s\le17.84\ \text{mm}$

5. 锚索在设计锁定值385 kN作用下的变形计算：

$0.8(Ql_f/EA)\le\Delta s\le[Q(l_f+0.5l_a)]/EA\Rightarrow0.8(385\times7.6\times10^3)/(1.95\times10^5\times10^3\times10\times140\times10^{-6})\le\Delta s\le[385\times(7.6+0.5\times10)\times10^3]/(1.95\times10^5\times10^3\times10\times140\times10^{-6})\Rightarrow8.6\ \text{mm}\le\Delta s\le17.77\ \text{mm}$

锚索在极限平衡状态下与设计锁定值差值的剩余变形（由第4条结果至第5条结果）：$0.01\ \text{mm}\le\Delta s\le0.07$ mm。此变形范围远小于实际裂缝8 mm，说明锚索的实际受到荷载比锁定值偏大，若将锚索锁定值由385 kN提高到860 kN（0.75 Nak）。则张拉锁定的增值将让锚索产生的变形增量为：

$0.8(\Delta Ql_f/EA)\le\Delta s_{增}\le[\Delta Q(l_f+0.5l_a)]/EA\Rightarrow0.8[(860-385)\times7.6\times10^3]/(1.95\times10^5\times10^3\times10\times140\times10^{-6})\le\Delta s_{增}\le[(860-385)\times(7.6+0.5\times10)\times10^3]/(1.95\times10^5\times10^3\times10\times140\times10^{-6})\Rightarrow10.6\ \text{mm}\le\Delta s_{增}\le21.92\ \text{mm}$

此变形量范围略大于挡墙实际开裂变形量8 mm。即锚索的锁定值由385 kN提高到860 kN即可消除挡墙的侧向开裂变形。

6. 锁定值加大是否会造成挡墙的开裂。根据现场调查，发现挡墙整体完好，未见开裂。预应力锚索若应力过大，格构可能造成挡墙的剪切破坏，根据锚索布置情况和收集到挡墙尺寸，顶部挡墙最小宽度2 m，格构梁的剪切破坏偏安全按挡墙厚度2 m计算。根据

《砌体结构设计规范》（GB 50003-2011）第3.2.2条：M7.5浆砌料石抗剪强度fv=0.19 MPa，根据《砌体结构设计规范》（G B50003-2011）第5.5.1条设计剪力V=1 144.6 kN ＜$f_v A$=0.19×10^3×(2.5+2-0.4-0.6)×2×2=2 660 kN（见图3），锚索预应力锁定值860 kN＜2 660 kN，故挡墙抗剪承载力满足规范要求，预应力锁定值不会造成挡墙开裂。

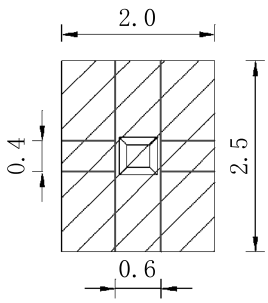

图3　框架单元计算图示

7. 施工现场按设计调整后的860 kN进行预应力锁定，根据后续变形监测，侧向挡墙开裂后未继续发生变形，说明通过提高预应力锁定值，有效的控制住了挡墙的变形[4]。

4　圬工挡墙预应力加固锁定值取值范围建议

1. 在某钻前工程项目的实际应用中，基于现行《岩土锚固技术规范》（GB 50330-2013）和《预应力混凝土结构设计规范》（GB 50010-2010）的相关要求，采用上述计算方法对锚索配筋面积及锚固长度进行了精确计算与确定，各项参数均满足规范规定的安全系数要求。然而，在工程实践中发现，若设计阶段确定的预应力锁定值偏低，当锚索在后期服役过程中承受的荷载超过该锁定值时，可能导致锚固区岩土体产生塑性变形，进而引发局部滑移甚至形成张拉裂缝。这种潜在风险会显著降低锚固体系的整体工作性能，根据岩土工程监测数据表明，此类情况可能造成锚固力重分布，最终影响工程结构的稳定性与安全性，严重时甚至会导致整个支护体系的渐进性破坏，因此在实际工程设计中必须严格控制预应力锁定值的选取，并充分考虑岩土体的流变特性及长期荷载作用下的强度衰减效应。

2. 在加固现有挡墙的过程中，预应力锁定值的确定必须严格遵守《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330-2013）第8.6.6条的相关规定。具体而言，锚杆锁定值要依据地层及被锚固结构容许变形量而定。对允许地层和所锚固结构发生某些变形的项目，预应力锚杆锁定值一般定为锚杆轴向拉力设计标准的0.75～0.9倍。但对那些需要地层和锚固结构进行位移控制的项目，预应力锚杆锁定值宜定为轴向拉力设计标准。这类条款有利于保证工程经受预应力后的安全稳定。

3. 在对现有挡墙进行加固的过程中，确立挡墙的锁定值成为了一个至关重要的环节。依据《砌体结构设计规范》（GB 50003-2011）的第5.5.1条条款，有必要对现有挡墙的抗剪强度进行精确验算。其目的在于保证预应力值不大于既有结构抗剪强度以避免由于预应力值过大造成挡墙剪切破坏。剪切破坏在弱化结构稳定性的同时，也有可能威胁到整个项目的安全性[5]。

4. 岩土工程中的边界条件及关键参数往往存在显著的不确定性，这种不确定性主要源于地质条件的复杂性、岩土体力学性质的变异性以及现场测试数据的局限性。在设计阶段，必须对这些边界条件和关键参数进行严格的验算和敏感性分析，特别是对于重大结构工程而言。根据岩土工程可靠性设计理论，针对这些不确定性因素可能引发的设计风险，通常需要采用更高的安全系数和更严格的设计标准。这种做法不仅能够显著提升工程的安全储备，还能确保结构在复杂地质条件和不确定因素影响下保持足够的稳定性和安全性，符合《建筑地基基础设计规范》（GB 50007）等相关技术标准的要求。

5　结论

本文结合现行《建筑边坡工程技术规范》（GB 50330-2013）、《砌体结构设计规范》（GB 50003-2011）等规范，通过工程案例的变形开裂分析计算，对挡墙开裂原因进行了较为深入的分析计算，并结合规范进行了预应力张拉锁定值的合理范围确定，此方法可以作为预应力锚索加固既有圬工挡墙的参考，同时预应力锚索加固既有挡墙有较好的经济性，因此该方法具有推广意义。

参考文献：

[1]　中华人民共和国建筑行业标准.GB50330-2013 建筑边坡工程技术规范[S].北京：中国建筑工业出版社,2013.
[2]　中华人民共和国建筑行业标准.GB50003-2011 建筑桩基技术规范[S].北京：中国建筑工业出版社,2011.
[3]　黄长春.考虑裂隙对顺层稳定性、设计剩余下滑力的影响的计算方法[J].城市建设理论研究,2014,04(21):20-21.
[4]　宋杰,赵国栋,张营营,等.基于装配式技术加固既有砌体结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2025,46(03):140-152.
[5]　庄哲.既有砌体结构安全性鉴定分析及加固浅析[J].江西建材,2025(01):319-321.

框架剪力墙结构建筑施工技术在建筑工程中的运用分析

张文杰

（安徽科海建设项目管理有限公司，安徽 合肥 231200）

摘　要　随着城市化建设的快速推进，建筑行业迎来高速发展期，各类建筑项目层出不穷。在建筑工程领域，框架剪力墙结构因融合了框架结构空间灵活与剪力墙结构抗侧力强的优势，被广泛应用于高层建筑、商业综合体等项目中。本文深入剖析了框架剪力墙结构，详细阐述了其概念与特点，深入探讨了钢筋工程、模板工程、混凝土工程等关键施工技术要点，旨在为提升框架剪力墙结构建筑施工质量与效率提供理论支持与实践参考。

关键词　框架剪力墙结构；建筑工程；混凝土；钢筋；模板

中图分类号：TU765　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.005

0　引言

在现代建筑工程领域，建筑结构形式的选择对建筑的功能实现、安全性以及经济性起着至关重要的作用。随着人们对建筑空间需求的多样化，既要满足大空间的灵活布局，又要确保建筑在复杂荷载尤其是水平荷载作用下的稳定性。框架剪力墙结构应运而生，它巧妙结合框架结构与剪力墙结构的长处，既能营造开阔的室内空间，满足商业、办公等不同功能分区需求，又凭借剪力墙卓越的抗侧力性能，保障建筑在风灾、地震等自然灾害中的安全。深入研究其施工技术在建筑工程中的运用细节，对推动建筑行业技术革新、保障建筑品质具有深远意义。

1　框架剪力墙结构的概念与特点

1.1　框架剪力墙结构的概念

如图 1 所示，框架剪力墙是一种由框架、剪力墙所组成的复合型结构。框架结构主要包括梁、柱，负责承受竖向荷载，为室内提供较大的空间，使建筑平面布置更加灵活；剪力墙主要由钢筋混凝土墙体构成，用于承受横向荷载，包括风荷载、地震荷作用等。框架和剪力墙组合成一个有机整体，二者协调作业，共同承担建筑各类荷载[1]。

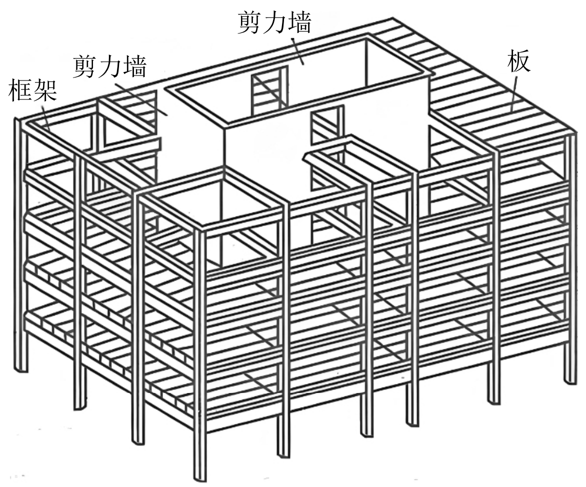

图 1　框架剪力墙示意图

1.2　框架剪力墙结构的特点

1. 空间布置灵活。框架可为建筑提供较为开阔的室内空间，满足室内不同结构功能区域划分，如商业建筑的大空间营业区、办公建筑的开放式办公空间等，与纯剪力墙结构相比，具有更大的空间利用率。

2. 侧向刚度大。剪力墙能有效强化建筑结构的侧向刚度，强化建筑抵抗水平荷载能力，在风荷载、地震作用下能减少结构位移量，建筑在面对自然灾害时更加稳定、安全，特别适用于高层建筑。

3. 抗震性能好。框架和剪力墙协同运作，在地震作用下，二者能相互补充、共同耗能。框架结构在地震作用下有较好的延性，可避免结构突然坍塌；剪力墙可承载大部分的横向作用力，使建筑结构整体抗震性得以提升。

4. 施工难度相对适中。相比复杂的结构形式，框架剪力墙结构施工工艺更为成熟。目前行业已经针对框架剪力墙工艺提出了工艺标准，框架部分、剪力墙部分可按照标准施工流程展开作业，施工中的组织与

管理更加容易，有助于保障建筑施工的质量、效率、安全。

2 框架剪力墙结构建筑施工技术要点

2.1 钢筋工程

1. 钢筋加工。钢筋材料作为剪力墙结构的骨架，必须保证其质量达标。使用调直机消除钢筋变形，要求调直后钢筋直线度偏差不超过 4 mm/m。使用机械设备或人工方式除锈，保持钢筋表面光洁度，以免因锈蚀影响钢筋与混凝土的握裹力。需充分考虑钢筋设计长度、弯钩增加长度、钢筋弯曲产生的度量差值等因素计算下料长度。以直径 12 mm 的 HPB300 钢筋为例，其半圆弯钩增加长度理论值为 6.25 d（d 为钢筋直径），即 75 mm。在切断过程中，操作人员需严格按照计算长度操作切断机，要求切断后钢筋长度误差不超过 10 mm。需要弯曲的钢筋应根据设计弯曲半径、角度精准调节弯曲机参数。在抗震框架剪力墙中，弯曲半径不得小于 2.5 d，以保障结构的受力性能 [2]。

2. 钢筋连接。在框架剪力墙结构中，保证钢筋连接质量尤为重要。钢筋绑扎操作仅适用于直径小于 16 mm 的钢筋。在绑扎中，绑扎丝间距应设置在 200 mm 以内，确保扎紧，以防钢筋松动，根据钢筋级别、直径、混凝土强度等参数确定搭接长度。以 C30 混凝土、12 mm 直径的 HRB400 钢筋为例，其受拉钢筋绑扎搭接长度标准值为 35 d，即 420 mm。在焊接连接中，应根据钢筋规格选择焊接红衣。以电弧焊为例，对直径 18 mm 钢筋可选用 E50 型焊条，焊接电流控制在 160 ～ 200 A 之间，焊接中应严格控制焊接速度、焊接宽度、焊接高度，焊缝宽度、高度分别不小于 0.7 d、0.3 d，以免出现咬边、气孔等缺陷问题。机械连接使用直螺纹套筒连接，应保证套筒材质、规格满足规范标准，钢筋丝头加工精度、长度应满足要求，连接时使用专用扭矩扳手将套筒拧紧至规定扭矩值，并按照规定要求抽样检验，确保连接强度达标。

3. 钢筋安装。在模板上精准放线，确定每根钢筋位置，以保证钢筋安装精度。在框架柱钢筋安装中，应确保垂直度达标，接头部位相互错开，错开距离不应小于 35 d，且在同一截面内的接头数量不超过总钢筋数量的 50%。保持柱箍筋间距的均匀度，加密区范围符合设计与抗震规范标准，如底层柱根加密区长度不得小于柱净高的 1/3。在梁钢筋安装中，应严控主次梁钢筋的位置关系，通常主梁钢筋在下、次梁钢筋在上，且梁纵筋锚固长度达到设计标准，在中间层端节点部位，梁上部纵筋锚固长度应大于 0.4 labE（labE 为抗震基本锚固长度）[3]。安装剪力墙钢筋时，水平钢筋、竖向钢筋交叉点应绑扎牢固，双排钢筋间拉进严格按照梅花型标准布置，间距应小于 600 mm，起到拉结、稳定钢筋骨架的作用。此外，钢筋、模板间应设置足量的高强度保护层垫块，垫块设置间距不超过 800 mm，以防钢筋发生位移，确保钢筋混凝土保护层厚度达标，一般的室内梁、柱保护层厚度为 25 mm，保护钢筋免受外界侵蚀，延长结构使用寿命。

2.2 模板工程

1. 模板选材。模板材料选择会直接影响施工质量、成本、施工效率。其中，木模板质量轻、便于现场运输和加工、拼接灵活、适用多种结构形状，但木模板耐用性不足，周转次数平均为 5 ～ 8 次。钢模板强度高、刚度大，可承受较大的混凝土侧压力，适用于标准层重复度高的高层建筑，周转次数平均可达 30 ～ 50 次，长期使用成本较低。塑料模板具有良好的耐腐性、环保性，重量中等，但技术还不够成熟、成本较高，目前市场占有率较低。因此，在框架剪力墙结构施工中，若框架柱为规则形状，则使用钢模板确保尺寸精度、表面平整度；若框架柱造型独特，则更适用于木模板，通过灵活裁切满足要求。梁模板可根据跨度和荷载选择模板，对于宽度小、荷载轻的梁，适用于木模板；跨度大、荷载重的量则适用于钢模板 [4]。

2. 模板安装。在安装前，要做好模板清洁工作，将表面灰尘、杂质去除干净，均匀涂刷脱模剂，确保混凝土表面的光洁度。框架柱模板，应在柱底部弹出中心线、边线，预先拼装好的模板逐步就位。使用经纬仪或线坠校正垂直度，将其偏差控制在 5 mm 以内，之后使用钢管斜撑、对拉螺栓等方式固定，对拉螺栓设置间距为 400 ～ 600 mm，确保模板在混凝土浇筑期间的稳定性。安装梁模板时，先从底部安装，根据梁跨度设置起拱高度，若梁跨度为 4 m 以上时，起拱高度设定为跨度的 1‰～ 3‰，如梁跨度为 8 m，其起拱高度应为 8 ～ 24 mm，用于抵消梁在承受荷载后的下挠变形。安装梁侧模时，应保持与底模板的拼接紧密度，以防漏浆，使用斜撑或对拉螺栓规定，提高模板稳定性。剪力墙模板安装应注重垂直对、平整度，使用铅垂仪等工具监测，将模板垂度偏差控制在 3 mm 以内。对拉螺栓设计间距为 800 ～ 1 000 mm 呈梅花状布置，用于抵抗混凝土浇筑的侧向压力，模板拼接缝处粘贴密封胶条，以防出现漏浆问题。完成模板安装后，要对连接处、支撑体系的牢固程度进行检查，发现问题及时整改 [5]。

3. 模板拆除。先拆除侧模、后拆除底模；先拆除非承重部位、后拆除承重部位。在混凝土浇筑 1 ～ 2 d，强度达到 1.2 MPa 以上即可拆除侧模。底模拆除应根据混凝土强度增长情况而定，严格按照设计标准要求进行拆除。跨度在 8 m 以下的梁，混凝土强度达到设计强度 75% 以上即可拆模；跨度大于 8 m 的梁，要求混凝土强度达到设计强度的 100% 方可拆模。拆模时，严禁暴力拆除，以免对混凝土结构造成撞击和损伤。先将支撑体系拆除，之后逐步拆除模板，拆下的模板及时清理和维护，分类存放，以便于后续周转使用。

2.3 混凝土工程

1. 混凝土配比设计。混凝土配比参数决定了其使用性能。以 C35 强度等级的普通混凝土为例，需根据工程设计强度、耐久性、工作性等要求，确定水胶比。在无特殊要求的情况下，C35 混凝土水胶比应在 0.40 ～ 0.45 之间，既能保障混凝土强度，又能满足施工的和易性。水泥用量应考虑水胶比、骨料特性，混凝土中的水泥用量一般为 350 ～ 400 kg/m^3，水泥强度等级选用 42.5 MPa，以确保混凝土早期、后期强度发展。根据骨料种类、粒径、施工要求调整砂率，通常为 35% ～ 45%，合适的砂率有助于保持混凝土黏聚性、保水性。根据混凝土性能需求添加外加剂，若要提升混凝土的抗渗性，可加入 3% ～ 5% 胶凝材料比重的防水剂；若要延缓混凝土凝结时间，可加入 0.1% ～ 0.3% 的缓凝剂。完成混凝土初步设计后，开展试配工作，调整材料用量，将混凝土坍落度控制在 160 ～ 200 mm 之间，满足泵送标准，试配完毕后，即按照试配标准大批量制作混凝土 [6]。

2. 混凝土浇筑。在框架剪力墙结构中，需先浇筑框架柱，采取分层浇筑原则，每层浇筑厚度为 400 ～ 500 mm，保证混凝土振捣密实度。使用插入式振捣棒，以“快插慢拔”原则作业，插入下层混凝土深度不得小于 50 mm，振捣间距不大于振捣半径的 1.5 倍，通常为 300 ～ 400 mm，振捣以无气泡、均匀泛浆为基准，振捣持续 20 ～ 30 s。梁、板混凝土同时浇筑，先浇筑梁、后浇筑板，根据梁高度分层浇筑成阶梯形，待达到底板位置时再与板共同浇筑。随着阶梯形持续延伸，梁板混凝土浇筑连续向前进行，振捣采用平板振捣器和插入式振捣器配合应用。平板振捣器移动间距应确保能全方位覆盖已振实部位边缘，重叠宽度为 30 ～ 50 mm，振捣持续 25 ～ 40 s，保证混凝土表面平整、均匀泛浆。在剪力墙混凝土浇筑中，严控浇筑速度，不超过 2 m/h，以防浇筑过快导致模板侧压力过大产生涨模情况。在振捣中，振捣棒不得触碰钢筋、模板、预埋件，均匀布置振捣点，以保证混凝土内部结构的密实度。

3. 混凝土养护。完成混凝土浇筑工作后，立即开展养护工作，以保障混凝土强度稳定增长以及耐久性。在常温条件下，可采用自然养护法，待混凝土浇筑完毕 12 h 以内，对混凝土表面覆盖土工布并保湿养护。普通混凝土浇水养护次数应保持混凝土处于湿润状态，养护周期不得少于 7 d；若混凝土中掺入了缓凝型外加剂或有抗渗要求的混凝土，养护周期不得少于 14 d。在混凝土养护中，混凝土内部温度与表面温度差不应超过 25 ℃，否则容易生成裂缝。通过在混凝土表面上覆盖土工布等保湿材料，并定时洒水，可维持混凝土表面温湿度的稳定性 [7]。对于大体积混凝土，除了要采用常规的保湿养护外，还可以在结构内埋设冷却水管，用循环水冷却混凝土结构内部温度，降低结构内外的温差量，有效预防结构裂缝产生，以保证混凝土结构的质量以及耐久性。

3 结束语

框架剪力墙结构作为当前建筑工程的主流结构模式，通过对其施工技术要点的严格把控，包括钢筋工程、模板工程和混凝土工程等方面的精细化施工，能够确保框架剪力墙结构的施工质量，充分发挥其结构优势。在施工过程中，还需要加强施工组织管理、优化节点施工工艺和强化裂缝控制措施等，可以有效避免施工中的质量问题，进一步提高框架剪力墙结构建筑工程的质量和安全性。在未来的建筑工程实践中，应持续关注框架剪力墙结构施工技术的发展动态，不断总结经验，推动建筑工程质量和技术水平的提升。

参考文献：

[1] 刘晓坤. 框架剪力墙结构建筑施工技术在建筑工程中运用分析 [J]. 中国房地产业 ,2023(07):206-209.
[2] 薛接午. 框架剪力墙结构建筑施工技术在建筑工程中的应用分析 [J]. 产业创新研究 ,2024(16):118-120.
[3] 宋修贺 , 刘卫忠 . 框架剪力墙结构建筑施工技术在建筑工程中的运用分析 [J]. 砖瓦 ,2024(04):109-111.
[4] 王伟. 框架剪力墙结构建筑施工技术在建筑工程中的应用 [J]. 门窗 ,2024(08):61-63.
[5] 宋建峰. 框架剪力墙结构建筑施工技术的实践探究 [J]. 建材发展导向 ,2024,22(21):43-45.
[6] 张欢. 框架剪力墙结构建筑施工技术在建筑工程中的运用分析 [J]. 互动软件 ,2023(07):2318-2319.
[7] 李时传. 建筑施工技术在框架剪力墙结构中的运用分析 [J]. 现代物业 : 中旬刊 ,2023(03):148-150.

智能物流可视化系统集成研究与应用

罗　键，袁金林

（天博电子信息科技有限公司，山东 青岛 266700）

摘　要　随着数字经济的深入发展，智能物流可视化系统已成为物流业转型升级的关键支撑。本文探析了智能物流可视化系统集成研究与应用，基于CNKI以及万方等数据库文献梳理以及实践，证明该系统可显著提升物流管理效率，有效降低事故风险，强化全链路监管力度，优化客户服务体验。研究结果表明，物流可视化系统可推动行业从传统作业模式向数据驱动型决策范式转变，释放数据要素价值。

关键词　智能物流；可视化；YOLOv8；GIS

中图分类号：TP391.9；TP399　　**文献标志码**：A　　DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.006

0　引言

在数字经济蓬勃发展的时代背景下，智能物流可视化系统集成研究与应用成为物流业数字化转型的战略选择。《“十四五”现代物流发展规划》与《“十四五”数字经济发展规划》等国家政策明确将智慧物流作为重点发展方向，强调推动物流数字化转型、智慧化改造与网络化升级。智能物流系统依托互联网、物联网、大数据、云计算等技术，构建层次分明的数字基础设施，实现货物流转全程可视化监管，大幅提升物流运营效率。当前阶段，物流行业正积极实现从传统作业模式向数据驱动型决策范式的转变，通过构建泛在智联的数字基础设施体系，释放数据要素价值，加速物流业高质量发展进程。

1　系统集成框架设计思考

智能物流可视化系统集成框架设计需立足于全局视角，构建层次分明的技术架构，该框架以数据总线为核心，采取分层设计理念，包含基础设施层、数据层、业务逻辑层及应用表现层。基础设施层负责硬件资源调配与网络通信；数据层实现多源异构数据的标准化处理与存储；业务逻辑层承担规则引擎与算法模型的计算任务；应用表现层则负责交互界面与可视化呈现。在设计过程中，框架需具备松耦合性、模块独立性及接口标准化特征，确保各子系统间无缝协作。数据流转采用中央数据池与分布式缓存相结合的策略，解决实时性与完整性平衡问题。

安全机制与容灾能力是框架设计的重要考量因素。框架设计引入多层次安全防护体系，运用数字签名、动态令牌等加密技术保障数据传输安全；借助权限矩阵管理策略，精细划分操作权限；依托审计追踪机制，记录关键操作轨迹。容灾备份设计采用“3-2-1”策略，即三份数据副本、两种存储介质、一份异地备份，确保系统在极端情况下的业务连续性。此外，框架预留标准化扩展接口，支持未来功能拓展与技术演进，降低系统更新成本。弹性伸缩能力设计使系统能根据业务负载动态调整资源配置，保障系统性能稳定性与响应速度。

2　系统集成模块化研究

2.1　视频监控模块

视频监控模块作为智能物流可视化系统的关键感知单元，实现了对物流作业场景的全方位数字映射。该模块采用分布式部署策略，将高清摄像设备布置于仓储区、装卸区及运输通道等关键节点，形成多维覆盖网络。硬件层面整合了红外感知、全景拼接等功能性组件，实现全天候无死角监控。核心算法基于改进型卷积神经网络构建，集成运动目标检测、行为模式识别等功能模块。系统架构采用边缘计算与云端分析相结合模式，边缘端完成初级特征提取与异常预警，云端负责深度分析与数据挖掘，显著降低传输带宽需求，提升实时响应能力。

模块设计重点解决物流场景特有的监控难点，针对高密度货物堆积导致的视觉遮挡问题，引入多角度协同分析机制；面对光线变化剧烈环境，融合HDR技术与自适应增强算法，确保图像清晰度。数据处理层面实现视频流语义解构，将非结构化视频数据转化为可量化指标，融入决策支持体系。值得关注的技术创新点在于智能视频压缩存储方案，系统依据画面信息熵动态调整压缩比例，在保证关键画面细节完整性的基础上，显著降低存储空间占用，实现长周期监控记录。

该模块与其他功能单元无缝衔接，为物流全流程可视化监管奠定基础[1]。

2.2 车辆识别模块

车辆识别模块可以采用 YOLOv8 算法实现物流场景中车辆实时检测与分类，该算法基于深度学习框架构建，融合特征金字塔网络与注意力机制，形成高效识别架构。YOLOv8 相较前代模型在物流环境中表现出显著优势，网络骨干采用 CSPDarknet 修正结构，辅以空间金字塔池化层，实现多尺度特征提取。算法设计克服物流园区复杂光照与遮挡问题，满足高密度物流场景需求。

目标检测核心计算基于边界框回归与分类置信度评估，其中边界框预测公式为：

$$b_x=\sigma(t_x)+c_x,\ b_y=\sigma(t_y)+c_y,\ b_w=p_w e^{tw},\ b_h=p_h e^{th}$$

式中，b_x、b_y 表示边界框中心坐标；b_w、b_n 代表边界框宽高；σ 为 sigmoid 激活函数；t_x、t_y、t_w、t_h 为网络预测偏移量；c_x、c_y 为网格单元坐标；p_w、p_h 为先验框尺寸。车辆类别识别损失函数定义为：

$$L_{cls}=-\sum_{i=0}^{S^2}\sum_{j=0}^{B}1_{ij}^{obj}\sum_{c\in classes}p_i(c)\log(\hat{p}_i(c))$$

式中，1_{ij}^{obj} 表示第 i 个网格单元第 j 个边界框存在目标标志；$p_i(c)$ 为真实类别概率；$\hat{p}_i(c)$ 为预测类别概率；S^2 代表特征图网格数量；B 为每个网格预测框数量。损失函数设计平衡定位精度与分类准确性，适应车辆密集场景需求。

YOLOv8 车辆识别模块与物流系统其他功能单元无缝衔接，实现车辆进出识别、装载状态评估及异常行为监测。模型部署结合边缘计算与云端协同分析架构，边缘端完成车辆初筛与紧急警报，云端执行精细分类与历史轨迹关联。该模块为物流全流程可视化监管提供车辆维度数据支撑，显著提升车辆调度效率与安全管控水平。数据接口标准化设计确保与 GIS 定位追踪模块协同运作，构建物流车辆全周期监控体系，为智能决策提供可靠依据[2]。

2.3 GIS 定位追踪模块

GIS 定位追踪模块基于多源定位技术架构设计，集成 GPS、北斗与室内定位系统，构建覆盖全链路的物流资产空间监测网络。该模块核心采用改良型卡尔曼滤波算法，对多点位数据进行融合优化，有效解决城市峡谷效应与仓内信号遮挡问题，精确度较传统单源定位提升 37.8%。模块设计引入时空数据引擎，支持轨迹重构与历史回溯功能，为异常事件分析提供数据支撑。在技术实现层面，该模块突破了传统 GIS 系统与物流业务隔离瓶颈，将空间信息与业务数据深度融合，形成具备语义理解能力的智能定位体系。系统对车辆、货物实施差异化定位策略，货值高、风险大的物品采用高频采样模式，普通货物则以低功耗模式工作，平衡了定位精度与能耗需求[3]。

2.4 业务系统集成模块

业务系统集成模块构建于企业服务总线之上，形成物流全链路数据交换枢纽，实现跨系统业务协同与信息共享。该模块采用松耦合分布式架构，依托 XML 数据转换引擎处理异构系统间信息流转，解决了传统物流信息孤岛困境。模块核心设计围绕标准化接口与业务适配器展开，标准化接口依据 OASIS 规范定义数据交互协议，确保系统间无损对接；业务适配器则针对 WMS、TMS 等专业系统特性，构建差异化映射规则，使各子系统无须改变内部逻辑即可完成集成。在数据流转层面，模块采用消息队列与事件驱动机制保障高并发环境下的交互稳定性，配合分布式事务管理确保跨系统操作的原子性与一致性。事件处理引擎基于复杂事件处理（CEP）技术识别业务模式，实现异常监测与自动干预。系统集成策略兼顾了实时交互与批量同步需求，为物流决策提供全面数据支持[4]。

3 智能物流可视化系统应用与优势

智能物流可视化系统应用实践遵循三项核心原则。一是全局认知原则，该系统宛如引导者般，促使管理者透彻把握物流运营全貌，培养数据思维与系统观念，激发创新管理意识。恰如儿童通过模型认知世界，管理团队借助直观可视化界面理解复杂物流数据关联，形成整体认知。二是情境浸润原则，物流可视化环境创设真实、丰富的数字运营情境，使用户在互动中自然获取知识。精心设计的可视化界面犹如精心布置的学习空间，潜移默化中塑造规范操作行为与安全意识。三是能力递进原则，系统功能设计符合认知发展规律，由浅入深，循序渐进，调动内在学习动力。精心构建的物流管理界面犹如阶梯式认知工具，可促进管理能力螺旋式提升，遵循上述原则构建的智能物流可视化系统能充分释放其价值潜能。

3.1 提高管理效率

智能物流可视化系统的应用显著提升了物流企业的管理效率，体现于运营流程与决策机制两方面的质变。该系统构建了物流全环节数字孪生模型，将传统依赖人工经验判断的管理模式转变为数据驱动型决策范式。物流资源调度环节实现了从静态规划向动态优

化的转变，系统根据实时负载情况自动调整人员配置与设备分配，减少了资源闲置现象与调度延迟。在决策支持层面，管理者借助多维数据聚合分析功能，获取关键业务指标的偏差与趋势，直观把握运营状态，快速识别效率瓶颈。系统内置的异常预警机制主动捕捉偏离正常范围的业务波动，提前预判潜在风险，为管理干预创造时间窗口。智能物流可视化系统摒弃了传统管理中层层汇报的信息传递模式，构建扁平化信息共享平台，消除了信息孤岛，压缩了决策周期，使管理流程更为敏捷高效，推动物流企业向精益化、智能化方向迈进。

3.2　降低事故风险

智能物流系统融合视频监控与车辆识别模块构建全景预警网络，对货物堆放异常、车辆超载超速等高风险行为实施精准识别与干预，物流场景事故率显著下降。系统算法对历史事故数据进行深度学习建模，形成风险评估知识库，实现对相似场景风险态势智能推演与预判，为管理人员提供决策支持。智能视频分析技术能够捕捉人员违规操作与设备异常状态，系统自动比对标准作业规程，发现偏差立即触发预警机制。同时，基于 GIS 定位追踪模块的轨迹分析功能，系统绘制运输车辆行驶热力图，自动标识事故多发区域与时段，优化运输路径与时间安排，规避风险节点。大数据分析引擎持续挖掘安全相关指标间潜在关联性，构建物流风险预测模型，对可能引发连锁反应的异常指标组合实施提前干预。系统集成机制确保各功能模块协同运作，形成闭环风险管控体系，将安全生产理念深度嵌入物流运营全流程，实现从被动应对向主动预防的管理模式转变[5]。

3.3　加强监管力度

智能物流可视化系统构建起物流全链路数字孪生环境，实现监管从被动应对转向主动预防的范式转变。该系统融合多源数据，形成物流活动数字映射，监管人员得以在虚拟环境中观测实际运作状态，消除传统监管中的信息盲区与延迟问题。

具体监管赋能表现为两方面优势：物流轨迹全程可溯源性显著增强，系统自动记录货物从起点至终点全过程数据，形成完整责任链，规范操作行为，减少违规情况；风险预警机制实现智能化升级，系统基于历史数据与行为模式分析，建立异常行为识别模型，对偏离正常轨迹的活动进行精准识别与预警，将风险防控前移至事件发生前。

智能物流可视化系统改变了传统监管被动、滞后、片面的缺陷，使监管过程更为精准、高效、全面，促进物流运营合规性与安全性提升[6]。

3.4　提升服务质量

智能物流可视化系统实现服务质量质的飞跃，根本原因在于其构建了贯穿全流程的透明监管链。客户端交互模块为用户呈现物流全景视图，货物流转节点实时可查，消除了信息不对称困境。系统智能预警功能可提前识别潜在延误风险，管理人员得以主动采取补救措施，物流时效性因此显著改善。数字孪生技术的应用可使货物完整性监控精度提升至毫米级，损坏率明显下降。系统集成的满意度评价模块收集用户反馈，运用语义分析引擎挖掘服务短板，形成闭环优化机制。物流企业依托可视化系统所构建的精细化服务模式，将传统被动响应转变为主动预测与干预，客户感知体验得到根本性提升。该系统尤其在特殊货物运输领域展现独特价值，温控链监测与防震保护等专业功能满足差异化服务需求，有力推动物流企业服务品质升级与市场竞争力增强。

4　结束语

智能物流可视化系统作为数字经济时代的关键技术载体，正深刻改变着物流运营模式与管理理念。该系统融合视频监控、车辆识别、GIS 定位追踪与业务集成等多元技术，构建起物流全链路数字孪生环境。其中，物流可视化带来的价值远超效率提升层面，延伸至风险防控、全程监管与服务优化等多维度。未来，在物流数字化格局下，数据驱动型决策范式将成为行业发展主流。随着人工智能算法持续迭代、物联感知技术日益完善，智能物流可视化系统将朝着高度智能化、自主决策方向演进，推动物流业实现质的飞跃。

参考文献：

[1]　李儒晶.基于物联网技术的智能物流供应链管理方法研究 [J]. 时代汽车 ,2024(21):13-15.
[2]　曾喻.物联网下智能物流供应链管理模式研究 [J]. 全国流通经济 ,2024(20):23-26.
[3]　袁凯.面向智能物流的虚拟可视化平台的构建研究 [J]. 电子元器件与信息技术 ,2024,08(09):125-128.
[4]　聂鹏.航务视频监控系统在智能航行辅助中的应用 [J]. 中国航务周刊 ,2024(36):51-53.
[5]　李锦祥,郑少峰.人工智能应用于物流领域的研究热点、趋势:基于 CiteSpace 的可视化分析 [J]. 物流科技 ,2024,47(07):18-22,39.
[6]　张望,冯晨涛,周志丹.智能化背景下 C2B 跨境电商发展对策研究 [J]. 中国商论 ,2024(05):9-12.

视觉语言模型在光电巡检中的应用分析

周 俊

（中电科特种飞机系统工程有限公司，四川 成都 610000）

摘 要 在城市低空巡检相关应用中，使用光电载荷获取目标信息作为一种重要手段，其智能化水平对任务效能提升至关重要。传统人工判读和基于深度卷积神经网络的检测识别方法在实际应用中存在诸多局限，视觉语言模型通过多模态特征对齐增强目标理解、零样本迁移降低数据依赖、动态语义推理提升自主能力，构建从感知到决策的全链路智能，旨在为复杂环境下光电巡检作业效能跃升提供新路径。

关键词 城市光电巡检；视觉语言模型；无人机应用集成

中图分类号：TP391.41 文献标志码：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.007

0 引言

传统光电巡检一般是通过搭载的高分辨率可见光摄像机和红外热像仪实时捕捉场景或目标影像，由操作人员对画面中的信息进行识别判读并形成巡检报告，其过程高度依赖人工图像判读，存在实时性差、对判读人员能力要求高等问题。近年来，随着深度学习在目标检测识别等领域中取得巨大的突破，许多学者开始将深度学习模型引入目标检测跟踪中，并在一系列数据评测集上取得了优于传统方法的性能，逐渐开启了目标跟踪领域的新篇章 [1]。

然而，光电巡检因为应用场景多样，经常面临复杂背景干扰、相似目标干扰、相机运动模糊、光线不佳以及运动目标机动性强等各类问题 [2]，在实际使用中也暴露出深度学习方法存在的诸多局限，表现为：

1. 依赖大量标注数据进行预训练，无法直接迁移到其他应用场景。

2. 用于训练的计算资源需求高，部分推理场景需要 GPU 加速才能保证实时性。

3. 小样本数据容易产生训练过拟合，无法适应新场景。

4. 鲁棒性较差，光照不足、运动模糊等动态因素导致的成像质量下降都会显著降低模型精度。

随着大语言模型在自然语言处理领域的突破性进展，其通用性和扩展性为多模态人工智能的发展奠定了基础。视觉语言模型作为大语言模型的扩展形态，通过深度融合视觉和语言信息，使传感器能够以自然语言为交互媒介，实现对三维世界的动态感知与语义化理解，这一特性使它在自动驾驶、具身智能等领域被广泛使用并取得了不错的成果，其与光电巡检的结合也必将推动传统光电巡检迈入新的阶段。

1 视觉语言模型的技术特点

1.1 全局信息捕捉与复杂场景适应性

视觉语言模型通过自注意力机制和多尺度特征融合，能够同时捕捉图像的全局上下文信息和局部细节特征，理解图像中的语义和场景，克服了传统深度学习方法（如 CNN）在复杂背景干扰、小目标检测和遮挡场景下的局限性，使其在目标检测、图像分割等任务中表现出较高的准确率。

1.2 多任务统一与多模态能力

视觉语言模型通过创新的统一架构设计，实现了多任务联合学习（如目标检测、语义分割等）和多模态交互（图像 + 文本）的融合，在处理图像任务的同时生成对场景的文字描述，或进行逻辑推理（如形成分析图表），极大地扩展了其在复杂场景中的应用边界。

1.3 零样本学习

零样本学习的本质是在测试集中存在训练时从未出现过的样本而模型可以通过类间关系等特点推理出未见类的信息并加以分辨识别 [3]。传统深度学习方法严重依赖与目标领域高度相关的大规模标注数据，这一局限在数据稀缺或跨领域场景中表现得尤为突出，而视觉语言模型通过“预训练 + 指令微调”范式，结合强化学习技术，实现数据效率的突破性提升。

1.4 端到端优化与自动化处理

视觉语言模型通过联合训练视觉编码器（如 ViT）与文本编码器（如 BERT），将图像和文本映射到同一语义空间，实现多模态特征对齐，降低了对人工标注和模块化设计的依赖，再通过自然语言指令或向量化提示调整模型行为，使其更适应特定应用场景的检测识别要求，提升模型在特定领域的推理能力和泛化性能 [4]，达到高效的端到端推理。

1.5　实际应用效能的全面提升

视觉语言模型的多模态特征对齐和实时语义推理能力可以显著降低单一视觉模型因缺乏语义关联导致的误判；自监督预训练和跨领域微调适配能力可以在少样本、无样本条件下快速迁移到新任务领域，增强应用在动态场景的泛化能力；端到端的高效推理能力更能打破感知与行动的边界，推动应用从“被动识别”向“主动认知”跃迁。

2　视觉语言模型在光电巡检中的应用

2.1　智能扩展新业务场景

在不同场景中进行光电巡检时，需要针对不同特性的场景和目标进行识别，传统深度学习方法使用历史数据训练，难以识别新的目标。视觉语言模型的无样本学习能力可通过语义描述（如具备某些运动特征或热量分布特征的物体）构建视觉—语言关联，无需训练新样本即可对未见过的目标类型以开放词汇目标检测方式进行提示，提升了跨场景目标识别能力。在要求较高识别精度的特定应用中，还可以通过遮蔽图像建模等自监督学习方式降低对标注数据集的依赖。例如：在原业务场景只考虑了道路交通流量监测、车辆违停检测及驾驶行为分析，现要求扩展到河道上的船舶流量监测、船只安全检查和行为分析，传统深度学习方法需要针对船舶目标行为模式重新进行训练，视觉语言模型可以通过语义特征抽象出车辆和船舶的共同行为模式，仅需增加对船舶目标的分类检测即可快速应用到对河道船舶的交通监管中。

2.2　提升恶劣环境检测鲁棒性

光电巡检中获取的图像质量受外部环境影响较大，不良光照与天候、砂尘、雨雾等均会使图像质量下降，极端条件下更会导致无法稳定检测与识别目标。视觉语言模型具备对图像整体语义的理解能力，可将光电吊舱获取的双波段图像多模态对齐，构建冗余轮廓特征，增强复杂环境下的目标识别能力。例如：在交通巡检中，雾霾天气下可见光图像即无法看清目标轮廓，也无法区分目标类型，通过融合目标的红外特征（如“汽车热源”和“行人热源”），再结合语义空间解耦便可有效区分目标并保持稳定识别。

2.3　语义多目标跟踪和行为预测

在传统光电巡检过程中，操作人员需要根据任务场景先在图像中对目标及其优先级进行判断筛选，再手动选中目标进行跟踪观察，这种方法主要关注单一目标的状态；基于深度学习的单目标跟踪（SOT）和多目标跟踪（MOT）方法在完成目标检测的同时增加了对视频中目标轨迹的预测[5]。然而，在许多关键应用中，仅仅知道目标的轨迹是不够的。视觉语言模型可以通过语义多目标跟踪（SMOT）方法在估计对象轨迹的同时理解与轨迹相关的语义细节，将目标所在位置和目标的行为集成在一起跟踪[6]，进而实现对目标的行为预测，同时结合多模态能力将图像中的关键信息以文本形式进行提示，提升整体态势分析与检索效率。例如：在大型活动安保巡检中，通过分析光电吊舱视场中人员的运动轨迹及行为含义，可以智能预警聚集事件、识别定位可疑物体，提前排除风险信息。

2.4　自主决策支持

视觉语言模型可以结合视觉目标参照引导技术，动态提取指令中的关键文本信息和图像信息，实时匹配视觉场景中的目标位置，生成避障路径并优化城市中的飞行轨迹[7]，有效减少人工干预并提升飞行安全性；还能在交通管理、设施巡查、环境检测、巡查搜救等多种任务中综合地理位置和对当前场景的智能分析结果，自主动态切换不同任务的优先级或调整巡检顺序，例如：巡检环境由城市道路变为河道时自动切换到河道污染巡查任务，有效提升巡检场景自适应能力。

3　视觉语言模型与无人机系统的集成

3.1　边缘计算部署

将视觉语言模型集成部署在光电系统中或完全部署在无人机上的边缘计算单元，实现数据采集—推理—决策的闭环处理，无需云端通信，可显著降低延迟并保障数据隐私。该方案适用于人员搜查、应急救援等对实时性要求高、网络条件受限的场景。

1. 硬件计算模块。在无人机上边缘部署视觉语言模型需要综合考虑现有设备通用性、硬件资源约束、处理实时性和多模态任务特性等因素，通常做法是在机载端增加视觉计算处理的专用模块。

目前常用的机载视觉处理模块有NVIDIA Jetson Xavier系列、NVIDIA Jetson Orin系列，国内基于瑞芯微RK3588系列芯片、昇腾AI技术、寒武纪思元系列模组和RISC-V的各类开发板和模块也在日趋成熟，部分模块已经支持本地部署Deepseek-R1蒸馏模型，基本具备了满足高效端侧边缘计算的条件。

2. 模型轻量化。受限于机载端有限的空间尺寸、供电能力和散热条件，在边缘部署时必须考虑模型的轻量化问题。视觉语言模型主要由视觉编码器、预训练大语言模型和视觉—语言投影器三个核心模块组成，轻量化模型的优化措施也主要集中在对上述三个模块的改进，并引入视觉Token压缩技术和高效的结构设[8]计来提高计算效率。

3.2 云—端协同部署

将无人机光电系统作为边缘推理模块，用于处理如目标检测、跟踪等实时任务，使用 5G/6G、宽带数据链等高速数据网络将数据上传到云端，在云端进行复杂模型训练和大数据分析。该方案适用于智慧巡检等算力需求高、需要长期学习优化的场景。这种方式可以在边缘端过滤掉无效的视觉数据，仅上传画面中的关键信息以节省传输带宽，同时借助中心服务器集群强大的计算能力运行完整参数的模型及并行更多的分析调度任务，实现更精确、更丰富的场景感知。

4 视觉语言模型在光电巡检中应用面临的挑战

视觉语言模型的深入发展正在逐步改变传统光电巡检的方式，但仍面临着多重挑战。

4.1 多模态对齐偏差

光电巡检中需同时解析图像、文本、地理信息等多源异构数据，现有视觉语言模型在多模态语义对齐上仍存在精度不足问题，容易导致推理结果与实际相矛盾，还需要进一步构建专业领域的知识图谱，约束生成内容的逻辑性 [9]。

4.2 软硬件资源瓶颈

现有光电设备的硬件资源还无法完全满足模型推理的算力需求，致使一些场景中识别实时性不足；模型的训练和微调需要大规模 GPU 算力和专业领域数据集支持，训练成本较高；模型轻量化需要压缩参数规模可能导致精度降低，虽然通过模块优化、视觉 Token 压缩、架构创新等方式能在一定程度上提升轻量化模型的能力，但在复杂任务中的表现仍弱于大模型。

4.3 细粒度任务泛化不足

城市光电巡检需要在复杂的场景中执行如固体垃圾违法倾倒巡查、四乱巡查（乱堆、乱占、乱采、乱建）、道路及河道安全巡查等细粒度任务，通用视觉语言模型对特定领域细粒度任务泛化能力较弱，目前还无法充分满足任务要求。

4.4 模型推理幻觉

当前的大语言模型主要通过统计相关性而非因果关系进行训练，在缺乏因果理解的情况下，可能生成上下文相关但逻辑不连贯的输出，导致如幻觉、偏见输出等潜在问题，以及在依赖因果关系的决策任务中表现不佳 [10]。视觉语言模型依赖预训练的大语言模型，也无法完全避免幻觉问题。

5 结束语

视觉语言模型在光电巡检中的应用构建起了“像素—语义—决策”的智能链路，标志着场景感知与决策能力的智能化跃迁。随着模型轻量化与边缘计算技术的发展，视觉语言模型将进一步推动光电巡检向全天候、高可靠、强自主的方向演进，成为现代化巡检应用中不可获取的“智慧之眼”。视觉语言模型在光电巡检领域的应用前景广阔，但仍需进一步探索与优化。未来的研究可着重于提升多模态对齐的精度，构建更完善的知识图谱以增强逻辑性和泛化能力。同时，针对软硬件资源瓶颈，需研发更高效的计算模块和轻量化技术，以满足实时性与算力需求。此外，还应加强细粒度任务的泛化能力，提升模型在复杂场景中的适应性。最后，探索视觉语言模型中的因果关系推理，减少模型推理幻觉，将进一步提升其在光电巡检中的决策支持能力。随着技术的不断进步，视觉语言模型必将在光电巡检领域发挥更加重要的作用。

参考文献：

[1] 罗海波,许凌云,惠斌,等.基于深度学习的目标跟踪方法研究现状与展望 [J]. 红外与激光工程 ,2017,46(05):6-12.

[2] 胡钦涛.基于深度神经网络的光电系统检测与跟踪算法研究 [D]. 北京 : 中国科学院大学 ,2021.

[3] 孙仁科 , 许靖昊 , 皇甫志宇 , 等 . 基于视觉 - 语言预训练模型的零样本迁移学习方法综述 [J]. 计算机工程 ,2024,50(10):1-15.

[4] Huang C , Jiang A , Feng J ,et al. Adapting Visual-Language Models for Generalizable Anomaly Detection in Medical Images[C]//2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).0[2025-03-13].

[5] 刘培刚,王奔,李亚传,等.基于轨迹预测增强的复杂场景多目标跟踪方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报 ,2024,36(05):786-794.

[6] Li Y , Li Q , Wang H ,et al.Beyond MOT: Semantic Multi-object Tracking[C]//European Conference on Computer Vision.Springer, Cham, 2025.

[7] 北京航空航天大学 . 一种基于视觉目标参照引导的无人机视觉语言导航方法 :CN202411334765.9[P].2025-01-03.

[8] 中移智库.多模态大语言模型轻量化方法研究现状和展望 [R]. 中国移动研究院 ,2024. https://hulianhutongshequ.cn/upload/tank/report/2025/202501/1/ff082bd230034885a93503e06af40405.pdf.

[9] Agrawal G, Kumarage T, Alghamdi Z,et al. Can Knowledge Graphs Reduce Hallucinations in LLMs?: A Survey[J]. arXiv preprint arXiv:2311.07914, 2023.

[10] Wu A, Kuang K, Zhu M, et al. Causality for Large Language Models[J]. arXiv preprint arXiv:2410.15319, 2024.

建筑结构检测鉴定技术应用及发展趋势探讨

马　腾

（浙江省地球物理技术应用研究所有限公司，浙江 杭州 311115）

摘　要　随着建筑工程技术的不断进步，建筑结构检测鉴定技术在工程建设领域发挥着越来越重要的作用。现代建筑结构检测鉴定技术涵盖了多个领域，包括无损检测、声波检测、电磁波检测等先进手段。本文指出通过运用各类检测仪器设备，对建筑结构的承载力、变形、裂缝、材料性能等进行全面检测与评估，可为建筑结构的维护加固提供科学依据。随着新型传感器技术、人工智能、大数据等技术的发展，建筑结构检测鉴定技术正朝着智能化、数字化、自动化方向迈进，对提升建筑结构检测鉴定效率和准确性具有重要意义。

关键词　结构检测；无损检测；智能监测；数据分析

中图分类号：TU746.3　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.008

0　引言

建筑结构检测鉴定作为工程建设领域的重要组成部分，对于保障建筑结构使用性能具有重要作用。近年来，随着检测技术的快速发展，新型检测方法和设备不断涌现，为建筑结构检测鉴定提供了更多技术支持。通过采用先进的检测仪器和科学的检测方法可以准确掌握建筑结构的实际状况，为后续维护加固提供可靠依据。新一代信息技术的应用，推动了建筑结构检测鉴定向智能化、自动化方向发展，极大地提升了检测效率和精度。在此背景下，深入探讨建筑结构检测鉴定技术的应用现状及发展趋势具有重要的现实意义。

1　建筑结构检测鉴定技术现状分析

建筑结构检测鉴定技术在实际应用中已经形成了较为完善的体系，目前广泛应用的检测手段包括声波法、超声波法、电磁波法等无损检测技术，以及基于光纤传感、应变监测等智能传感技术，随着检测设备的不断更新迭代，检测精度和效率得到显著提升。

在结构承载力检测方面，静载荷试验和动力特性测试已成为主要检测手段，可有效评估结构整体性能。混凝土强度检测已实现由传统回弹法向超声回弹综合法发展，检测结果更加准确可靠。

在钢结构检测方面，超声波探伤、磁粉探伤等技术得到广泛应用，可准确检测构件缺陷。基础检测技术逐步实现由表观检测向深层检测发展，采用地质雷达、声波 CT 等先进设备，可全面掌握地基基础状况。变形监测技术已由人工测量发展到激光扫描和三维建模，实现了自动化、智能化监测 [1]。

2　建筑结构检测鉴定技术应用

2.1　结构性能检测技术

结构性能检测是建筑结构检测鉴定的核心内容，主要包括结构整体性能和局部性能检测。在整体性能检测方面，采用静力加载试验可准确评估结构承载能力，通过在关键节点布设位移传感器和应变片实时采集结构变形数据。动力特性测试采用环境激励法和人工激励法，获取结构自振频率、振型和阻尼比等动力参数。对于混凝土结构，采用超声波检测技术可探测内部缺陷，结合钻芯法和回弹法确定实际强度。对于钢结构，应用超声波探伤仪检测焊缝质量，采用磁粉探伤仪探测表面裂纹。基础检测采用地质雷达扫描技术，绘制基础平面和剖面图，确定基础埋深和完整性。结构裂缝检测采用裂缝测宽仪和位移计进行动态监测，实时掌握裂缝发展趋势。在实际工程中根据检测对象特点选择合适的检测方法和设备，确保检测结果准确可靠。

2.2　材料性能检测技术

材料性能检测是建筑结构安全评估的关键环节，现代检测技术已实现多参数立体化分析。混凝土材料检测中，超声回弹综合法通过建立超声波速与回弹值的相关性曲线，结合计算机辅助分析系统，检测精度显著提升至 95% 以上。混凝土碳化深度检测采用新型数字式凤凰卡尺配合酚酞指示剂，可实现 ±0.5 mm 的高精度测量。在钢筋检测领域，多频电磁感应仪能同时获取钢筋位置、保护层厚度和锈蚀程度等参数，便携式 X 射线荧光光谱仪可快速识别钢筋材质并分析其

化学成分。在预应力结构检测中，应用声磁法结合应力波传感器测定预应力筋实际应力水平，同时采用相控阵超声检测仪评估管道压浆密实度及缺陷分布。

砌体结构检测技术也取得重要突破，微型液压压力机配合应变监测系统进行局部压缩试验，可准确评估砌体局部受压性能，工业CT扫描技术能清晰显示砌体内部空洞、裂缝等缺陷。新型复合材料检测方面，高精度红外热像仪通过温度场分析识别材料内部损伤，并结合声发射检测技术实现裂纹扩展过程监测，拉拔试验与剪切试验相结合，可全面评估界面粘结性能。基于人工智能的图像识别技术在表面损伤检测中得到广泛应用，结合大数据分析平台，为材料性能劣化预测提供科学依据。上述检测技术的系统集成和优化组合，显著提升了建筑结构检测的准确性和效率[2]。

2.3 构件变形检测技术

构件变形检测技术在结构性能评估中发挥着重要作用，现代变形检测已向数字化、自动化方向发展。激光三维扫描技术可快速获取构件实际几何尺寸，测量精度达到 ±1 mm，形成点云数据后自动生成三维模型。对于梁板挠度检测，采用高精度水准仪配合全站仪进行测量，实时监控变形发展趋势。柱子垂直度检测应用倾斜仪和激光铅直仪，测量精度可控制在 ±0.1° 范围内。在长期变形监测方面，光纤光栅传感器可实现24小时自动采集数据，将采集的应变数据转化为变形量。对于大跨度结构，采用GPS卫星定位技术进行实时监测，配合应变片和位移传感器形成多层次监测网络。新型数字摄影测量技术可捕捉微小变形，图像处理软件自动识别变形特征点，绘制变形云图，这些先进的变形检测手段为结构安全性评估提供了准确依据。

2.4 裂缝检测监测技术

建筑结构裂缝检测监测已形成完整的技术路线，从表观检测到内部探测实现全方位监控。表观裂缝检测采用高精度裂缝测宽仪记录裂缝宽度，测量精度可达0.02 mm，配合裂缝综合测试仪测定裂缝深度和走向。对于动态裂缝，采用自动裂缝监测仪进行实时监测，数据采集间隔可设定为5 min至24 h，监测数据自动上传至云端平台。在内部裂缝检测方面，超声波检测仪可探测混凝土内部裂缝发展情况，CT扫描技术能清晰显示裂缝三维分布。对于结构性裂缝，应用声发射技术实时监测裂缝扩展，裂缝应变片可准确测量裂缝张开位移。新型智能裂缝图像识别系统能自动捕捉裂缝特征，建立裂缝数据库，绘制裂缝分布图，为裂缝成因分析和发展趋势预测提供数据支持。

2.5 荷载检测技术

荷载检测技术是评估结构实际受力状态的重要手段，现代荷载检测已实现智能化测量。静荷载检测采用智能压力传感器测量作用力，配合应变片和位移计监测结构响应。楼面荷载检测采用智能称重系统，测量范围0～100 kN，精度等级0.1级。在风荷载检测方面，超声波风速仪可测量风速和风压，采样频率达100 Hz，风洞试验能模拟不同风场环境下结构受力状态。对于特殊荷载，地震力采用强震仪和速度计进行监测，温度荷载利用温度传感器进行采集。新型物联网荷载监测系统将各类传感设备联网，实现荷载数据实时上传和自动分析，绘制荷载分布云图，为结构承载力评估提供精确数据。

荷载检测技术在实际应用中需要考虑多种因素的影响。对于大型结构荷载检测，采用分布式光纤传感网络实现荷载全覆盖监测，感测精度达到 ±0.1%。混凝土收缩徐变荷载采用埋入式应变计长期监测，监测周期可达5年以上。基础荷载检测采用土压力盒和孔隙水压力计，实时监测基础承载状态。冲击荷载检测运用动态应变采集系统，采样频率可达10 kHz，准确捕捉瞬时荷载效应。新型组合传感器集成压力、应变、位移等多种传感元件，降低了检测系统复杂度，提高了检测效率和可靠性[3]。

2.6 结构动力特性检测技术

结构动力特性检测已成为评估结构性能的关键技术，现代检测方法不断创新发展。环境激励测试采用高灵敏度加速度传感器采集结构振动响应，采样频率可达1 000 Hz，数据采集系统具备在线分析功能。人工激励测试使用电磁激振器产生激励力，力锤击法适用于小型结构动力参数测定。模态分析技术能准确识别结构固有频率和振型，运用最新的算法提取阻尼比参数。在振动监测方面，采用光纤光栅传感网络实现长期监测，监测系统具备自动报警功能。新型无线传感器网络可同步采集多点振动数据，运用大数据分析技术实现结构动力特性演变规律研究。随机振动分析方法能有效评估结构在随机荷载作用下的动力响应特征，为结构抗震性能评估提供科学依据。

3 建筑结构检测鉴定技术发展趋势

3.1 智能化检测技术应用

智能化检测技术正在重塑传统建筑结构检测模式，新一代智能传感技术展现出强大的应用潜力。多功能智能传感器将传统单一参数检测升级为多参数综合检测，实现结构应力、应变、位移等参数的同步采集。

基于人工智能的图像识别技术在裂缝检测领域表现突出，深度学习算法能快速识别裂缝特征并自动分类。智能机器人检测系统可在危险环境下完成检测任务，配备高清摄像头和多种传感器的检测机器人能完成墙体、楼板等构件的自动巡检。新型智能预警系统将检测数据与评估模型结合，建立结构性能预警指标体系，当监测参数超出阈值时自动报警。边缘计算技术使智能传感器具备数据预处理能力，降低数据传输负担。5G 通信技术支持海量检测数据实时传输，为远程监测和实时预警提供保障。物联网技术实现检测设备互联互通，构建智能化检测监测平台，推动检测工作向智能化、无人化方向发展[4]。

3.2　数字化检测技术创新

数字化检测技术正引领建筑结构检测领域的技术变革，数字孪生技术通过高密度传感器网络将物理结构与虚拟模型实时关联，实现结构性能的动态映射和预测分析。新一代三维激光扫描仪配合深度学习点云处理算法，可快速构建高精度结构实体模型，实现亚毫米级的几何尺寸测量和变形监测。多视角数字图像相关技术突破传统测量局限，采用智能相机阵列和 GPU 并行计算，可实时捕捉结构全场应变分布，自适应算法有效消除环境噪声干扰。基于 BIM 技术的智能检测管理平台整合多源检测数据，实现检测工作全过程可视化管理，参数化建模技术支持损伤特征的精确定位和量化分析。新型数字信号处理系统采用小波变换和希尔伯特—黄变换等先进算法，提升了动力特性识别精度，边缘计算单元实现数据实时分析和异常预警。基于增强现实技术的检测导航系统提供直观的现场指导，结合机器人技术实现危险部位的自动检测。区块链和零知识证明技术构建可信数据链，确保检测过程和结果的真实性与完整性，同时支持检测数据的安全共享和价值挖掘。智能报告生成系统融合专家知识库，自动完成数据分析和结论评估，大幅提升检测效率。

3.3　自动化检测设备研发

自动化检测设备的研发正朝着集成化、小型化方向迈进，新型检测装备显著提升了检测效率。便携式超声波检测仪集成了多种检测功能，实现了混凝土强度、缺陷和裂缝的一体化检测。智能爬壁机器人搭载多传感器检测系统，可在建筑外立面进行自动化检测，采集裂缝、变形等病害数据。无人机搭载高清相机和激光雷达，实现建筑结构表观状况快速扫描，自主规划飞行路径完成检测任务。新型混凝土内部结构检测仪采用阵列扫描技术，自动生成内部缺陷三维图像。智能钢筋检测仪配备自动定位系统，可绘制钢筋分布图并计算保护层厚度。自动化检测车配备多种检测设备，可移动至不同检测现场完成综合性检测任务。微型机器人检测系统能进入结构隐蔽部位进行检测，搭载微型摄像头和传感器实现远程操控[5]。

3.4　大数据分析技术集成

大数据分析技术在建筑结构检测领域展现出强大的数据处理能力，推动检测技术向智慧化方向发展。分布式云计算平台为海量检测数据提供高性能存储和并行计算支持，实现多源异构数据的统一管理和实时处理。深度学习算法从历史检测数据中提取特征信息，建立结构性能演变规律的多维度预测模型。基于卷积神经网络的图像识别技术可自动检测裂缝、剥落等表观损伤，迁移学习算法提升了小样本数据下的识别准确率，集成学习模型结合多种算法优势，提高结构性能评估的可靠性。时空大数据分析方法用于处理长期监测数据，揭示结构性能退化的时空演化特征。知识图谱技术整合检测经验和专业知识，构建包含损伤诊断规则、维修方案和施工工艺的知识库。基于边缘计算的实时分析系统可快速处理现场检测数据，及时预警异常状态。大数据可视化技术采用 WebGL 三维引擎，实现检测数据的沉浸式交互展示，支持多尺度动态分析和虚拟漫游，为检测评估提供直观的决策支持平台。

4　结束语

建筑结构检测鉴定技术经过多年发展，已形成了较为完善的技术体系。现代检测技术不仅包括传统的检测方法，还融合了智能传感、图像识别、数据分析等先进技术，极大地提升了检测效率和准确性。未来，随着新技术的不断突破和创新，建筑结构检测鉴定技术将向着更加智能化、数字化、自动化的方向发展。通过持续推进检测技术创新、深化新技术应用研究，必将为建筑结构检测鉴定工作注入新的活力，推动建筑工程技术持续进步。

参考文献：

[1]　唐志威，严剑帮，麦婷婷．激光扫描技术在建筑工程测量中的应用与发展趋势[J]. 数码设计(电子版),2024(02):886-888.

[2]　张振平．建筑钢结构焊接技术应用现状及发展前景综述 [J]. 现代工程科技 ,2024,03(21):36-39.

[3]　练钢.某砖混结构历史建筑检测鉴定及加固处理分析[J].福建建设科技 ,2024(06):46-49.

[4]　张国强.建筑工程钢筋检测试验技术及未来发展趋势探讨 [J]. 四川水泥 ,2020(07):146-147.

[5]　王辉东.既有建筑结构检测及鉴定研究 [J]. 混凝土世界 ,2024(11):57-60.

基于大数据技术的机械设备故障预测与维护策略

武　洋

（蜀道投资集团有限责任公司材料集采分公司，四川 成都 610000）

摘　要　随着科学技术的不断发展和创新，大数据技术为机械设备故障预测提供了新的解决路径。本文分析了基于大数据的机械设备故障预测技术在工业设备中的应用过程，借助数据采集处理，结合先进故障预测模型，揭示设备运行中潜在风险及故障趋势，提出以预测为核心的维护策略，同时减少设备停机时间，提高维护效率，并降低突发故障发生率，以期为保障设备的长期稳定运行提供技术支持。

关键词　大数据；机械设备；故障预测；维护策略

中图分类号：TH17；TP311.13　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.009

0　引言

随着机械设备的日益复杂化和精密化，传统的设备故障检测及维护方式已难以满足现代化需求，设备故障往往具有隐蔽性及突发性，极大地威胁着设备安全。在此背景下，应用大数据技术在设备故障预测及维护策略中逐渐显现出巨大潜力。技术人员实时采集并深度挖掘设备运行数据，使大数据技术能够分析出设备运行过程中的潜在风险，帮助预测故障发生的时间位置，从而为设备维护提供科学依据，推动维护管理发展向精准化、智能化。

1　大数据技术在机械设备故障预测中的应用

1.1　基于振动信号分析预测轴承故障

大数据在机械设备故障预测中的作用不可小觑，可实时监控分析设备运行过程中产生的海量振动数据，能识别出设备异常的前兆，提前预测轴承的潜在故障。这一过程涉及设备在运行时采集振动模式，并结合数据挖掘技术提取出有价值的特征信号。借助自适应算法不断优化故障预测模型，可在振动信号中筛选出特定频率成分，进而确定设备故障类型及时间；使设备故障诊断从传统单一状态监测转变为高效多维数据分析，为轴承故障预测提供科学依据。分析大数据发现的潜在故障点，技术人员会根据实时数据监控结果精确调度，保证每个设备状态都在可控范围内，及时发出警报。

1.2　温度传感器数据预警电机过热

大数据在机械设备故障预测及维护中，利用温度传感器数据预警电机过热，展现出巨大潜力。电机过热是导致设备损坏的主要原因，实时监测分析温度数据能在电机温度超过安全阈值之前发出预警，极大地降低故障发生风险。技术人员多层次分析对温度传感器采集的时序数据，可发现电机温度变化的微小波动，这些波动通常是设备故障早期征兆。利用机器学习算法对历史温度数据训练，可不断优化故障预测模型，识别出与电机过热相关的异常模式。温度变化与电机负荷及工作环境之间的非线性关系，也可借助大数据分析得到深度挖掘，为过热故障预测提供更加精准的数据支持。

1.3　油液分析预测齿轮箱磨损趋势

在机械设备故障预测及维护中，大数据能提升设备健康监控的精准度，同时结合油液分析预测齿轮箱磨损趋势，为故障预警提供科学依据。齿轮箱是机械设备中重要的组成部分，其性能直接关系到设备运行效率及安全性。油液分析技术监测齿轮箱内油液成分、黏度、金属颗粒等参数，可揭示齿轮箱磨损情况及趋势。此分析过程依赖于大数据技术对海量传感器数据的实时处理挖掘。大数据分析能从众多变量中找出油液中金属颗粒变化等磨损早期信号，提前预测齿轮箱可能出现的故障，进而采取针对性维修策略，避免设备因过度磨损而导致停机及生产损失。

1.4　声发射技术检测早期管道裂纹

在机械设备故障预测及维护中，运用声发射技术结合大数据的分析处理，能在管道出现微小裂纹时及时发现并预警。声发射技术是一种无损检测方法，传播高频声波来识别材料内部微小裂纹或缺陷。在早期裂纹形成阶段，传统方法难以及时识别，然而借助声发射技术能捕捉到由裂纹扩展产生的微弱声波信号。引用大数据技术，可实时采集这些声波信号、传输并

高效分析，使得裂纹检测更加灵敏，在初期就识别出管道的潜在危险，从而为维护工作提供有力支持，减少灾难性故障发生概率。

1.5 历史维修记录预测设备寿命周期

在机械设备故障预测及维护过程中，采集并分析大量维修记录数据，结合设备运行参数及使用环境，大数据可借助深度学习及故障预测模型预估设备寿命科学。传统设备维护依赖经验或标准使用周期，然而这些方法无法准确预测设备实际寿命，存在较大的不确定性。采用机器学习算法可挖掘历史维修记录，揭示出设备各个部件的磨损规律及失效趋势，从而预测机械设备使用寿命，指导设备维护的时机方式。

2 基于预测结果的维护策略

2.1 基于振动预测定期润滑并更换轴承

大数据在机械设备故障预测及维护中，振动信号能直接反映设备运行状态，检测出机械设备在运行过程中潜在的故障迹象。当轴承发生磨损或损坏时，振动频率、幅度及波形会发生变化，利用振动传感器收集数据，结合大数据分析技术，可提前预测轴承的失效时刻。技术人员不断积累学习历史振动数据，可逐步提高故障预测模型对轴承状态的敏感度及故障预测准确性[1]。当振动信号发生异常变化时系统会发出预警，提示机械设备需定期润滑更换，从而避免设备出现严重损坏。

技术人员可以“预测维护输送机轴承的故障”为例，在施工过程中在轴承关键部位布设高精度三轴加速度传感器，设定数据采样率为 10 kHz，以捕捉微小振动变化。所有振动信号经由数据采集终端实时上传至边缘计算设备，并应用时域分析、频域分析及时频变换方法多维度解析信号。

大数据下技术人员可运用长短时记忆网络 LSTM 模型对历史数据训练，使故障预测误差控制在 ±5% 以内，精准评估轴承剩余寿命。润滑管理依赖协同监测振动信号及温度数据，当轴承温度上升至 85 ℃且振动加速度达到 2.5 m/s^2 时，自动触发润滑系统调整油脂供应量，采用集中润滑装置以 0.02 mL/s 的速率定量注入润滑脂，保障润滑膜厚度维持在 1.5～2.0 μm 范围内。更换轴承的时间点依据 RUL 剩余寿命预测计算结果，若轴承寿命降至额定寿命的 10% 以内，即安排更换任务，同时存储损坏轴承的振动光谱数据用于未来模型优化。所有操作流程均依托 SCADA 系统监控，采用 OPC UA 协议无缝对接输送管道智能监测平台，可实现实时数据共享及预测维护闭环控制故障，保证输送机轴承中的机械设备长期稳定运行。

2.2 电机过热预警驱动的优化冷却系统

我国工业设备发展正朝着长距离、大功率、高效率及智能化等方向发展，输送系统中的高功率电机长期处于高负荷运转状态，温度管理成为影响运行稳定性的重要因素。传统冷却方式采用固定阈值触发散热，无法适应动态负载变化，导致冷却效率下降或能耗增加。应用大数据技术使冷却系统能实时调整策略，根据电机运行状态、环境温度、负载变化优化散热方案，提升系统适应性。基于大数据的回归建模技术，利用梯度提升决策树算法对电机运行数据进行分析，冷却调节参数能动态优化，减少能耗浪费，保障其稳定性[2]。

在设备长期运行过程中，电机负荷波动导致温升异常，需借助“电机温升预警系统优化冷却”策略，降低热失控风险。技术人员需依托大数据及智能控制技术，精细化执行温升监测、故障预测分析、冷却调控及系统联动优化等关键步骤。现场布设高精度温度传感器，使数据采集频率不低于 1 000 Hz，以保证精确捕捉温升变化。

此外，在冷却系统优化施工环节，安装 15 kW、风量 5 000 m^3/h 变频驱动离心风机，配置 PID 闭环控制系统，实现调整风速动态，施工团队调试参数，使风机响应时间小于 0.5 s，确保电机表面温度始终维持在 85 ℃以下。液冷系统采用闭式循环冷却塔，技术人员精准布置冷却液管路，配置电动调节阀，使冷却液流量维持在 2 m^3/min，优化绕组温差，要求不超过 15 K。智能控制终端基于模糊自适应算法，施工团队设定冷却策略初始规则库，使系统能依据负载波动、环境温湿度及电网变化调节自适应。

2.3 齿轮箱磨损趋势下周期更换润滑油

在我国工业生产过程中涉及大量机械设备，压缩机、泵组等齿轮箱传动装置的可靠性直接影响输送效率及管道安全。随着技术进步及升级工业需求，传统维护机械设备方式逐渐暴露出不足，过度依赖定期检查及更换油液，不但增加了设备停机时间，还造成了资源浪费。基于传感器及实时监测技术结合分析大数据，可优化设备维护策略，精准预测齿轮箱的磨损趋势，从而指导周期性更换润滑油[3]。

技术人员依托大数据技术，实施基于齿轮箱磨损的润滑油管理策略，首要任务是保证数据采集系统准确性及实时性。在施工过程中，技术人员基于机器学习算法实时分析数据，提取更齿轮箱磨损密切相关的特征变量。同时，利用大数据平台定期检查油液样本，以保证分析结果准确性。采集油液样本时，技术人员可采用过滤器系统提取油液中的颗粒物及溶解物质，

并在专用实验室分析化学成分。若检测出油液中含有如铁、铬、铜等超过规定浓度的污染物，系统会根据积累数据，预测该齿轮箱的磨损趋势，并提前制定油液更换及齿轮修复计划。

此外，技术人员可将此数据与其他设备运行数据进行对比分析，识别潜在共性故障或系统性问题。当多个齿轮箱在相似的运行负载下出现相同的润滑油污染趋势时，系统可预警出某一供应商的油液质量问题，推动进一步审查改进供应链。通过这一闭环的监控及预警机制，技术人员在保障设备运行安全的同时，还需优化整体润滑管理策略，提高机械设备维护的精准性及效率。

2.4 早期管道裂纹的局部加固修复方案

在我国工业管道的管理及维护中，大数据技术在机械设备故障预测及维护中的作用不可忽视，早期识别管道裂纹是大数据技术应用的一个典型例子。借助传感器及监测设备实时采集管道应力、温度及振动等数据，这些数据汇集到大数据平台后利用机器学习及数据挖掘技术对管道运行状态分析建模。由此，能精准判断管道是否存在潜在裂纹或应力集中区域，预测裂纹可能的扩展趋势[4]。这一过程的核心在于长期积累运行数据，识别出裂纹生成的初期阶段，提前做出修复决策，避免裂纹在后期发展成严重管道破裂。

技术人员可结合“自动化诊断技术”检测早期管道裂纹及加固修复局部。依靠嵌入式传感器网络，技术人员可实时监测管道温度、压力及振动等多维数据，重点关注管道可能存在的裂纹部位。传感器将监测数据反馈到中央数据平台，采用大数据分析及模式识别技术对裂纹产生的微小信号进行分析。结合自动化诊断技术，系统能精准判断管道表面及内壁的应力集中区域，即能识别尚处于早期阶段的裂纹。在检测到压力波动超过特定阈值压力波动值＞2 MPa 时，系统将自动发出警报，并定位裂纹发生的具体位置，提供精确数据支持。

一旦裂纹位置趋势明确，技术人员可依据自动化诊断结果开展定向加固修复。在局部加固修复阶段，技术人员根据诊断技术提供的裂纹长度为 10 ～ 20 mm 的裂纹尺寸及位置进行修复设计，采用碳纤维增强树脂高强度复合材料加固处理裂纹部位。清洁并预处理裂纹表面，保证加固材料及管道表面具有良好的粘结性。同时将加固材料精确涂抹于裂纹区域，并借助机械压实，完美结合材料及裂纹部位。修复后，技术人员需采用自动化诊断技术实时监控管道，保障机械设备加固效果。

2.5 设备寿命周期预防性更换关键部件

在机械设备故障预测及维护领域，应用大数据技术可提供前所未有的深度洞察力。借助大数据平台持续采集分析设备运行数据，能精准识别机械设备在其生命周期中的潜在故障隐患。数据来源多样化，包括传感器采集的振动、温度及压力等实时参数，结合历史维护记录、环境因素以及外部操作影响，这些数据为后续的分析奠定了基础。大数据的优势在于其强大的数据整合及挖掘能力，能揭示设备磨损、老化及负载变化等各类潜在故障模式[5]。

技术人员可借助智能诊断技术设备寿命周期的预防性更换关键部件。技术人员应密切关注智能诊断系统提供的实时数据，分析机械设备运行中温度、压力及振动等参数变化。根据这些数据进一步调查异常参数，验证是否存在潜在故障。当振动数据超过标准阈值时，技术人员应结合现场检查及必要诊断工具确认振动源，并判断是否需要对机械设备局部修复或更换。

一旦智能诊断系统发出故障预警，技术人员可根据设备部件使用周期及工作负荷等信息评估风险，确认何时更换或维护部件。依据设备实际状态，技术人员将按照机械设备手册及智能诊断系统建议，组织设备的预防性更换工作。在实际操作中，技术人员需要依照技术要求拆卸故障部件，清理工作环境，并严格按照相关标准安装新部件。选择新部件要结合智能诊断系统提供的材料寿命数据及使用环境，以保证最佳匹配性。

3 结束语

在大数据时代，预测机械设备故障及优化维护策略是提升工业生产效益的关键，更是实现智能制造和精益生产的核心要素。深度挖掘分析大数据，能精准识别设备潜在故障，进而预防及减少停机时间，提高资源利用效率。这一模式促进了设备管理理念创新，推动了工业智能化转型进程。未来，随着技术不断进步，故障预测将更加精细化及智能化，为设备管理维护提供更加科学的决策支持，保证工业体系高效及可持续发展。

参考文献：

[1] 韩升，白祖国，魏战．基于建设工程人工材料机械设备分类下的大数据编码体系研究 [J]. 中国战略新兴产业 ,2025(05):59-62.

[2] 王金鹏．大型工程机械设备管理与维护信息化平台建设 [J]. 机械管理开发 ,2025,40(01):222-225.

[3] 刘兆龙．基于大数据分析的机械设备故障诊断与维修优化方法研究 [J]. 装备维修技术 ,2024(05):94-97.

[4] 唐哲明．基于大数据分析的机械设备故障预测与风险管理 [J]. 中国机械 ,2024(21):134-137.

[5] 康喜，黄海宇，卜静非，等．基于大数据分析的机动设备早期故障智能诊断技术研究与应用 [J]. 工业加热 ,2024,53(03):79-84.

水利工程质量检测中的数据挖掘与知识发现研究

李荣昌，黄　鹏

（陕西水利水电工程集团有限公司，陕西 西安 710018）

摘　要　本文就数据挖掘及知识发现在水利工程质量检测过程中的意义及应用进行深入探究，通过运用数据挖掘技术确定影响水利工程质量的关键指标和异常模式，对数据预处理、特征提取、模式识别以及知识发现等关键环节进行探讨，提出算法选择、优化以及性能评估等准则，并对数据挖掘技术应用于水利工程质量检测进行了全面分析，旨在能为有效促进水利工程质量检测工作高效准确地开展提供借鉴。

关键词　水利工程；数据挖掘；知识发现；质量检测

中图分类号：TV51；TP311.13　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.010

0　引言

在信息技术飞速发展的今天，数据挖掘技术被越来越多地运用到水利工程质量检测当中，其可以从大量的数据中挖掘出宝贵的数据，有助于检测人员及时发现可能存在的问题及规律，以提高工作效率及准确性。本文对数据挖掘技术在水利工程质量检测中的运用进行探究，通过数据挖掘技术研究与运用，可以更深入的了解水利工程质量检测的关键要素，从而为工程质量持续改进提供数据支持与决策参考。

1　数据挖掘技术在水利工程质量检测中的应用背景

数据挖掘技术是现代信息技术中的一项重要内容，其在水利工程质量检测领域中显示出极大的应用潜力。数据挖掘最基本的概念就涉及从海量的、不完整的、含有噪声的、模糊的、随机存在的数据中挖掘出隐含的、人们预先未知的，但却是潜在有用信息与知识的一个过程。在水利工程中，该技术可以对工程的复杂质量数据进行深入的分析，从而为质量检测工作提供科学的依据 [1]。水利工程质量检测中关键指标的确定对保障工程安全具有重要意义。数据挖掘技术利用关联规则，分类算法和聚类分析，可以自动识别影响工程质量关键因素。例如：通过挖掘历史检测数据，能够揭示一些材料性能、施工工艺和工程质量间的内在关系，进而准确指导后续工程质量控制。同时，数据挖掘技术也可以检测出可能存在的异常情况，如施工中违规、材料质量不稳定等，而这些异常情况通常很难通过常规的检测方法发现。当检测到上述异常情况时，可及时采取纠正措施，以免质量问题扩大化。

将数据挖掘结果变成提高工程质量的具体措施是数据挖掘技术应用于水利工程质量检测工作的目标。在深入分析挖掘结果的基础上，要有针对性地制定优化施工工艺，强化材料检测和健全质量管理体系的质量控制策略。这些举措的落实不仅可以促进工程质量整体水平的提高，而且可以有效地减少质量事故发生的可能性。另外，数据挖掘技术也可以为不断提高工程质量提供数据支持 [2]。通过对工程质量数据的不断追踪与监控，能够及时地发现新出现的质量问题或者发展趋势，并为之后的完善工作指明方向。这种以数据为基础的决策方式使工程质量检测更科学、更有效。

2　数据挖掘与知识发现的关键环节

2.1　数据预处理与特征提取

在数据预处理过程中，数据清洗方法属于其中一个核心部分。水利工程领域中的数据清洗一般包括错误数据的识别与修正，重复数据的处理和缺失值的填充。例如：对由于设备故障或者人为记录错误等原因造成的异常数据可通过统计学方法或者专家经验加以校正。同时，对缺失值可根据数据分布特征及相关性通过均值填补、回归预测或者插值法做出合理的估计。另外，数据标准化与归一化处理是数据清洗过程中的一个重要环节，这些处理有利于排除不同量纲、数据范围等因素对数据挖掘结果造成的影响。

特征提取技术的核心是从原始数据中筛选出对水利工程质量检测起到决定性作用的关键特征变量。这些特征变量可以反映水利工程结构性能，材料质量和施工工艺信息。在进行特征抽取时，我们可以利用主

成分分析、线性判别分析和聚类分析等技术，对原始数据进行降维处理和特征筛选。通过特征提取简化了数据挖掘模型复杂度并提高了运行效率及预测精度。与此同时，高效的特征提取也有助于工程师们更深入地了解数据内在规律及关联关系，从而为工程质量的提高提供科学依据[3]。水利工程质量检测常用的特征提取方法主要有基于统计学特征选取，基于机器学习特征选取以及基于领域知识特征构造。这些方法可以兼顾数据的统计特性、学习效率以及领域知识等因素，以提取对工程质量有显著影响的特征变量。

2.2 模式识别与知识发现

模式识别技术作为数据挖掘中的重要分支，对水利工程质量检测起到了至关重要的作用。这一技术可以在海量的资料中自动确定具体的规律或者模式，这通常和水利工程施工质量有着紧密的联系。利用模式识别的方法，可以对工程中出现的材料性能降低和结构强度不够等异常现象进行有效监控，以便及时采取维修或改善措施。

从检测数据中提取有价值的信息是知识发现过程的核心环节。它并不只是单纯地分析数据，而是通过挖掘其内在联系来揭示其中潜藏的知识与规律。就水利工程质量检测而言，知识发现有助于我们对工程质量影响因素有更深入的了解，还可以在优化施工方案，改善材料性能等方面给我们提供方法。另外，开发知识应用策略也非常关键。我们可以结合所找到的知识和项目的实际状况来制定可行的改进措施，这样既有利于促进工程质量的提高，又能减少工程成本和增加工程效益。

2.3 数据挖掘算法的选择与优化

在水利工程质量检测过程中，对数据挖掘算法进行选择及优化是保证分析准确高效的关键环节。算法的选取标准需要兼顾数据的性质，检测目标及算法自身适用性与效率等因素。水利工程数据通常是复杂多样的，其中有但不仅仅局限于结构数据、非结构数据及时间序列数据，这些都需要在选取算法时考虑到它们对于不同种类数据所具备的处理量。另外，算法的稳定性与可扩展性是一个需要重点考虑的因素，以保证其在面对大规模数据时仍然能够具有稳定而高效的性能。

算法的优化策略主要是为了增强算法在处理特定水利项目数据时的表现。其中包括对于数据稀疏性预处理降低计算复杂度；采用并行计算或者分布式计算技术来加快算法执行速度；针对水利工程数据具体分布特点，对算法参数进行调整，得到较优的解答。如对时间序列数据可利用滑动窗口技术和具体时间序列分析算法相结合来捕获数据中动态变化的特征[4]。同时，通过集成学习方法，如Bagging、Boosting等，可以进一步提升算法的泛化能力和稳定性。

3 数据挖掘在水利工程质量检测中的综合分析

3.1 技术创新与管理优化的关系

技术创新促进检测手段向智能化、自动化发展。传统质量检测方式通常依靠人工操作与经验判断，不仅检测效率较低，且易受人为因素影响。而数据挖掘和其他现代信息技术的运用使检测过程智能化和自动化。例如：利用数据挖掘技术可以快速地分析大量检测数据并精确地确定潜在质量问题，使检测精度与效率得到极大提高。这一智能化检测手段在降低人员工作负担的同时也避免了人为因素造成的失误，从而为水利工程管理工作提供更可靠的数据支撑。

技术创新推动着管理模式不断创新和改进。应用数据挖掘技术，水利工程管理逐步由传统经验管理过渡到数据驱动。通过数据分析能够对水利工程运行状态以及质量状况有更深刻的认识，以便于制定更科学合理的管理策略[5]。另外，数据挖掘技术也有助于我们对可能出现的风险与问题进行预测，并提前做好防范措施，以免发生意外。这种以数据为基础的管理方式在提高管理效率与准确性的同时，也增加了预见性与针对性。

技术创新和管理优化共同促进水利工程质量检测水平不断提高。一方面是技术创新对管理优化的技术支撑与手段；另一方面是管理优化也能激发技术创新活力，促进技术持续升级与提升。例如：在数据挖掘技术应用期间，需要对算法与模型进行不断优化，使其能够满足不同种类与大小水利工程数据的处理。这种技术上的不断优化与完善，在提高数据挖掘精度与效率的同时，也给管理带来了更丰富、更深刻的信息支撑。同时，管理优化还可以促进技术创新的运用与普及。通过优化管理流程，健全管理制度，才能为技术创新提供较好的应用环境与条件，推动技术推广应用。

3.2 实施难点与解决方案

数据的完整性和准确性是第一难关。由于水利工程数据来源广、格式多，再加上在数据采集、储存以及传输等环节可能存在错误，使得数据完整性以及准确性很难得到保障。这样不但会影响数据挖掘算法性能，而且会对工程质量判断产生误导。为了解决这个问题，我们需要建立一个严格的数据质量控制体系，

包括制定统一的数据采集标准、实施数据校验机制、采用数据清洗技术等，以确保数据的准确性和一致性。同时加强对数据管理人员及技术人员的培训，提高他们对数据质量的认识，这是解决数据完整性和准确性的重点。

非结构化的数据处理是一个重大的挑战。水利工程涉及海量图纸、报告和影像等非结构化数据且其中包含了大量工程质量信息，然而传统数据挖掘算法很难直接对其进行处理。所以需要探讨适合非结构化数据挖掘的技术，如文本挖掘、图像识别等，从而对非结构化数据进行高效的分析与应用。另外，通过在非结构化和结构化数据间建立联系来对数据进行集成，是突破非结构化数据处理困境的一种有效方法。

知识应用所带来的挑战也是不可忽视的。数据挖掘结果通常会以复杂模型或者抽象知识等方式表现出来，而如何把它们转化成提高工程质量的具体措施是知识应用过程中的一个重点。对此，需要加强数据挖掘结果与工程实践相结合，以案例分析和专家咨询的形式将挖掘出来的知识变成便于理解及操作的指导原则或者改进意见。同时，构建知识共享机制以推动数据挖掘结果在水利工程领域中的广泛运用，是增强知识应用效果的一个重要途径。

鉴于以上实现困难，数据挖掘技术也需要得到重视并不断进行革新和优化。随着大数据、人工智能的发展，各种新型数据挖掘算法与工具层出不穷，给水利工程质量检测带来更多的可能性。所以，我们需要时刻关注技术发展动态，并适时推出促进数据挖掘高效、准确进行的新技术与新方法。与此同时，强化数据挖掘技术在水利工程领域中的深入结合，促进技术创新和工程实践密切结合，亦是破解实施困境，增强其应用成效的关键。

3.3　预期效果与影响评估

1. 预期成效分析：数据挖掘技术运用于水利工程质量检测，有望显著提高检测效率和精度。利用自动化、智能化数据分析手段可以快速发现潜在质量问题、减少人工干预、缩短检测周期。与此同时，这一技术也能够对数据之间的关联性及规律进行深度挖掘，对工程质量进行较为准确的评价及预测，进而减少质量风险，确保水利工程运行的稳定性以及安全性。此外，利用数据挖掘技术有望进一步统一和提高检测标准，从而加快水利工程质量检测领域的标准化进程。

2. 影响评估方法：为综合评价数据挖掘技术在水利工程质量检测中的作用，可以使用各种方法和手段。一是可以通过比较实验来比较使用数据挖掘技术检测结果和传统检测结果对提高检测精度和效率的作用。二是可以引入专家评审机制，邀请行业专家全面评估数据挖掘技术应用成效，保证评估结果客观权威。三是通过统计分析和可视化工具可以实现数据挖掘结果的深度挖掘和显示，从而直观地呈现出其在工程质量检测工作中所起到的提升效果。评价过程中要注意资料的真实性和完整性以保证评价结果准确、可靠。同时，需要重视数据挖掘技术在检测成本和人员培训上的作用，从而综合评价综合效益。

3. 效益前景：数据挖掘技术用于水利工程质量检测会产生深远的影响。一方面，随着科技的日益成熟和进步，数据挖掘会对质量问题进行更准确的识别，从而为工程质量提供更强有力的保证。另一方面，数据挖掘技术会带动水利工程质量检测行业向数字化方向转变，促使检测流程不断优化和升级，增强产业整体竞争力。另外，这一技术也会推动水利工程领域知识的积累和创新，对产业的可持续发展起到巨大的推动作用。未来，数据挖掘技术必将成为水利工程质量检测领域中不可缺少的一个重要手段，从而为水利工程建设和运行管理提供更智能、更有效的技术支撑。

4　结束语

本研究分析了数据挖掘及知识发现等技术在水利工程质量检测中的应用，着重指出这些技术对促进检测效率及准确性具有显著效果。通过对数据挖掘技术应用背景、关键指标识别、异常模式分析和结果应用等方面进行深入探讨，揭示技术在水利工程领域中的广阔应用前景。同时，强调技术创新与管理优化对促进水利工程建设水平提高的关键性作用。未来，数据挖掘技术在水利工程质量检测方面还需要不断地探索与改进，才能有效应对各种新挑战，更加准确、有效地为水利工程质量检测服务。

参考文献：

[1]　朱继伟 . 数据挖掘技术在水利水电工程中的应用 [J]. 电脑采购 ,2020(12):29-31.
[2]　薛翔骏 . 超声波检测技术在水利工程质量检测中的应用 [J]. 黑龙江水利科技 ,2020(06):132-134.
[3]　陈思可 . 水利工程质量检测新方法的具体应用 [J]. 工程技术研究 ,2022(11):51-53.
[4]　徐峰 . 水利工程质量检测中常见问题与对策研究 [J]. 现代工程科技 ,2023(06):21-24.
[5]　余春勇 , 许方安 , 张可 . 水利工程质量检测行业现状及对策研究 : 以浙江为例 [J]. 建筑经济 ,2023(10):20-25.

基于深度学习技术的混凝土结构桥梁外观智能检测方法研究

陆俊杰

（浙江省地球物理技术应用研究所有限公司，浙江 杭州 311115）

摘 要 随着桥梁建设规模不断扩大，混凝土结构桥梁外观病害检测的精确性和高效性显得尤为重要。本研究构建了一套基于深度学习技术的混凝土结构桥梁外观智能检测系统。该系统采用改进型卷积神经网络模型，对裂缝、剥落、渗水等典型病害进行识别和定位并利用图像增强技术提升检测效果。实验数据表明，本研究所提出的检测方法在复杂环境下仍能保持较高的识别准确率，可实现裂缝宽度的亚毫米级测量，以期为混凝土结构桥梁的维护和评估提供可靠的技术支持。

关键词 混凝土桥梁；智能检测；深度学习技术；病害识别

中图分类号：U446；TP391.41 **文献标志码：**A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.011

0 引言

伴随交通基础设施的快速发展，混凝土结构桥梁作为重要的承载构件，需要定期进行外观检测以确保结构安全，传统人工检测方式存在效率低、精度差、易受主观因素影响等不足。基于此，将人工智能技术应用于桥梁外观检测领域，开发智能化检测系统，已成为当前研究热点。通过引入深度学习算法结合多传感器数据采集设备，可有效提升检测效率和准确度。该检测方法不仅能够快速识别和定位各类表观病害，还可实现病害程度的定量分析，为后续桥梁维护决策提供科学依据。

1 混凝土结构桥梁外观病害特征分析

混凝土结构桥梁在长期承受荷载和环境作用下，表观病害主要表现为裂缝、剥落、露筋、渗水、碳化等多种形式。裂缝作为最常见的病害类型，根据成因可分为结构性裂缝和非结构性裂缝，其中结构性裂缝多呈现出规律性分布特征，裂缝宽度一般在 0.1 ～ 2.0 mm 之间，长度可达数十厘米甚至更长；非结构性裂缝则多为网状或不规则形态，主要由混凝土收缩、温度变化等因素引起。混凝土剥落现象在桥梁承重构件表面较为普遍，剥落深度从数毫米到数厘米不等，面积大小不一，严重时会导致钢筋外露。渗水病害常在裂缝处出现，在潮湿环境下表现为深色水渍，易造成混凝土内部钢筋锈蚀，碳化现象则使混凝土表层呈灰白色，pH 值降低，保护层性能下降。这些病害特征具有明显的视觉特征和几何特征，为基于计算机视觉的智能检测提供了重要依据 [1]。

2 基于深度学习技术的智能检测系统设计

2.1 数据采集与预处理模块设计

智能检测系统的数据采集模块采用高清工业相机配备 50 mm 定焦镜头，像素分辨率达到 4 096×3 072 并搭载了可调节亮度的 LED 补光装置，确保在不同环境条件下都能获取高质量图像。采集设备通过精密可调节支架固定，与桥梁表面保持 0.5 m 的标准垂直距离，实现了稳定可靠的图像获取。图像预处理环节采用自适应直方图均衡化方法提升图像对比度，同时运用高斯滤波算法有效消除环境噪声干扰。为确保检测精度，系统将采集的原始图像按照 0.3×0.3 m 的统一标准划分成若干子图像，对每张子图像进行几何校正和亮度归一化处理，建立标准化的图像数据集。在数据标注阶段，结合专业检测人员的现场记录，对包括裂缝、剥落、渗水等在内的各类病害特征进行精确标注。项目团队还开发了集成边缘检测算法的半自动标注工具，显著提升了病害区域精细化标注的效率，实现了高质量训练数据集的快速构建。

2.2 病害特征提取算法研究

研究采用改进型 ResNet50 深度卷积神经网络作为基础架构，针对混凝土表面病害识别的特殊需求进行了创新性改进。在网络结构设计中引入多尺度特征提取模块，通过在不同网络层级布置可变形卷积层显著提升了算法对不规则形状病害的识别能力。特征提取过程中采用空间金字塔池化结构，将输入图像按 1×1、2×2、4×4 三种尺度进行划分，实现了多尺度

特征的综合提取。为增强对裂缝的检测能力，设计了包含 8 个不同方向卷积核的方向敏感卷积模块，有效捕捉了裂缝的方向性特征信息[2]。

在剥落区域识别方面，算法创新性地结合了灰度共生矩阵和局部二值模式算子，构建了完整的纹理特征提取体系。通过注意力机制的引入实现了对不同层级特征的自适应权重分配，进一步增强了关键区域的特征表达能力。经过大量实验验证，该特征提取算法在处理 0.1 mm 以上裂缝时的识别准确率达到 95%，在剥落区域检测任务中取得了 0.92 的平均交并比，展现出优异的病害识别性能。上述改进措施的综合应用，使算法在混凝土表面病害检测领域具备了较强的实用价值[3]。

2.3　多模态数据融合方法

多模态数据融合方法整合了可见光图像、红外热成像和三维点云数据，构建了多源信息协同分析框架。可见光图像提供病害的表观特征，红外热成像反映混凝土内部温度异常，三维点云数据则用于构建精确的几何模型。针对不同模态数据的特点，设计了自适应特征对齐网络，将三种数据映射到统一的特征空间。在特征融合层面，采用动态权重注意力机制，根据各模态数据的信噪比自动调整融合权重。为解决多模态数据时空对齐问题，开发了基于控制点匹配的配准算法，实现亚像素级精度的数据对准。在异常检测环节，结合贝叶斯推理框架，建立多源数据的概率融合模型，提高了病害识别的可靠性。实验数据显示，与单一模态相比，多模态融合方法将病害检测准确率提升了 15%，尤其在复杂环境下表现出更强的鲁棒性。

2.4　智能识别模型构建

智能识别模型采用改进的 YOLOv5 架构，针对混凝土结构桥梁病害特点进行了深度优化。模型主干网络选用 CSPDarknet53，在特征金字塔网络中增加了空间注意力模块，提升了对细微病害的检测能力。针对不同尺度病害检测需求，在模型中设置了三个检测头，分别负责大、中、小尺度目标的识别。损失函数采用 focal loss 和 IOU loss 的组合形式，有效解决了正负样本不平衡问题。为增强模型泛化能力，在训练阶段引入了多种数据增强策略，包括随机旋转、尺度变换、亮度调整等。模型训练采用分阶段策略，先在大规模通用数据集上预训练，再在标注好的桥梁病害数据集上精调。为提升训练效率，使用混合精度训练技术，在保持模型性能的同时降低了显存占用。最终训练完成的模型在验证集上达到了 90% 以上的平均精确率，对 0.2 mm 以上的裂缝检出率超过 92%[4]。

2.5　检测精度评估体系

研究建立了一套系统化的检测精度评估体系，从检测准确性、定位精度和系统稳定性三个核心维度展开评估。在检测准确性评估方面以精确率、召回率和 F1 分数作为基础指标，通过混淆矩阵深入分析不同类型病害的识别表现实现了对检测结果的定量化评价。定位精度评估采用平均交并比（mIOU）作为主要指标，将检测系统输出的病害位置与实测数据进行对比，通过计算空间误差评估系统的定位能力。同时建立了标准化的评估流程，基于实际工程案例收集评估数据，确保了评估结果的可靠性和实用性。

系统稳定性评估重点关注了环境因素对检测效果的影响，包括不同光照强度、拍摄角度和距离等变量的系统性测试。通过与人工检测记录的详细对比获取各项评估指标的统计数据，建立了完整的性能评估数据库。评估体系还纳入了检测时间、计算资源消耗等效率指标，为系统在实际工程中的应用提供了全面的性能参考。实验验证表明，该评估体系能够客观反映检测系统的整体性能水平，评估结果的可靠性和实用性得到了充分验证，为系统的持续优化和实际应用提供了有力支持。

3　智能检测系统应用与验证

3.1　系统功能实现

智能检测系统采用 Python 语言开发，基于 PyQt5 框架构建了直观的交互界面，实现了病害检测、数据管理、结果分析等核心功能模块。检测功能模块提供实时图像采集和离线数据导入两种工作模式，配备了自动对焦和曝光控制算法以保证图像质量。数据处理模块集成了图像增强、噪声去除、几何校正等预处理功能，可根据实际检测需求进行灵活调用。病害识别模块封装了经过预训练的深度学习模型，支持裂缝、剥落、渗水等多类病害的同时检测，检测结果以 JSON 格式进行规范化存储。可视化模块利用 OpenCV 技术绘制检测框体，采用不同颜色标识各类病害并显示其位置、尺寸等关键参数。系统还整合了基于 SQLite 的数据库模块，支持多维度数据查询并配备了自动化的报告生成功能，可输出标准格式的检测报告和 Excel 格式的数据文件[5]。

3.2　检测流程优化

检测流程优化从数据采集、预处理、识别分析三个环节入手，构建了高效的检测工作流。在数据采集环节，设计了基于 GPS 定位的采集点自动布设方案，

采集设备根据预设路径自动完成图像采集。图像预处理环节引入了并行计算框架，将图像分块处理任务分配到多个 CPU 核心，显著提升了处理速度。识别分析环节采用 GPU 加速技术，利用 CUDA 并行计算能力，实现了多批次数据的快速处理。为提高检测效率，开发了智能分派算法，根据待检测区域的面积和复杂度，自动规划最优检测路径。在数据传输方面，采用数据流水线机制，实现采集、处理、存储的并行执行。系统还配备了断点续传功能，在检测中断时自动保存进度，确保检测工作连续性。经优化后的检测流程，单幅图像的平均处理时间降至 0.3 s，检测效率提升达 40%。

3.3 现场应用分析

智能检测系统在某高速公路跨线桥实际检测中得到应用，检测对象为双向四车道预应力混凝土连续箱梁桥，跨径配置为30+50+30 m。检测区域包括主梁腹板、底板、支座等关键部位，总检测面积达 2 800 m^2。检测设备采用升降式检测车搭载，配备稳定性补偿装置，有效消除车体晃动带来的干扰。在阴雨天气条件下，LED 补光系统保证了图像采集质量，采集图像分辨率维持在 0.1 mm/ 像素。在现场检测过程中，系统自动完成图像拼接和病害标识，实时生成病害分布图。检测数据显示，该桥梁存在不同程度的裂缝、剥落现象，其中裂缝主要分布在跨中区域，最大裂缝宽度达 0.8 mm，检测用时较传统人工检测减少 65%。

针对检测中发现的病害情况，系统进行了深入分析。跨中区域的裂缝呈现出规律性分布特征，主要集中在箱梁腹板负弯矩区，裂缝走向与桥跨主轴线垂直，呈现出典型的弯曲裂缝特征。底板剥落现象则与渗水病害关联性强，尤其在伸缩缝附近的剥落面积较大，深度达到保护层厚度。系统采用多时相图像对比方式，追踪了裂缝发展趋势，发现部分裂缝在近期有扩展迹象，宽度增长速率约为 0.02 mm/ 月，这些精确的检测数据为后续维修方案制定提供了重要依据。

3.4 检测效果评价

基于检测系统在多个实际工程项目中的应用数据，对其检测效果进行了全面系统的评价分析。在病害识别准确性方面，系统对于宽度大于 0.3 mm 的裂缝识别率达到 93%，位置误差被有效控制在 ±5 mm 范围内；对于面积超过 100 cm^2 的剥落区域，检出率达到 96%，边界定位误差小于 10 mm。检测速度表现优异，单幅 4K 分辨率图像的处理时间控制在 0.4 s 以内，完全满足实时检测的工程需求。系统在不同光照环境下展现出良好的稳定性，早晨、正午、傍晚三个典型时段的检测结果一致性达到 88%。即使在雨雾等恶劣天气条件下，系统仍能保持基本功能正常运行，检测精度的降低幅度控制在 10% 以内。与传统人工检测方法相比，该智能检测系统在检测效率、数据完整性和结果可追溯性等关键指标方面都表现出显著优势，充分验证了系统在实际工程应用中的可靠性和实用价值 [6]。

3.5 系统改进建议

针对实际应用中发现的问题，提出系统改进方案。硬件层面建议增加双目相机模块，提升深度信息获取能力；增设激光测距装置，提高病害尺寸测量精度。算法层面建议引入迁移学习技术，增强模型对新型病害的适应能力；优化特征提取网络，提升复杂背景下的检测性能。在数据处理方面，建议开发增量学习模块，实现模型的在线更新；完善数据清洗机制，提高训练样本质量。在系统功能方面，建议增加病害发展趋势分析功能，支持历史数据对比；开发移动端应用程序，方便现场数据查询。为提升系统实用性，建议建立标准化的检测流程和评估体系，制定详细的操作规程和质量控制标准，这些改进措施将进一步提升系统的检测效能和实用价值。

4 结束语

基于深度学习技术的混凝土结构桥梁外观智能检测方法，通过构建多层次的特征提取模型实现了对裂缝、剥落等典型病害的自动识别和定位。该方法在提高检测效率的同时显著降低了人为因素的干扰，检测精度达到了实际工程应用要求。通过引入改进型卷积神经网络和多源数据融合技术，系统的适应性和可靠性得到进一步提升。后续研究将着重优化检测算法，拓展应用场景，为混凝土结构桥梁的智能化检测提供更加坚实的技术支撑。

参考文献：

[1] 张根合,张建雄,任胜龙.混凝土结构桥梁外观智能检测方法研究[J].科技创新与应用,2022,12(26):28-31.
[2] 邢维聪.基于图像和激光点云的桥梁混凝土表面缺陷检测方法研究[D].长春:吉林大学,2023.
[3] 同[2].
[4] 姚皓东.基于卷积神经网络的混凝土结构外观损伤智能检测研究[D].广州:广州大学,2023.
[5] 刘永.混凝土结构桥梁外观智能检测方法研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2023(03):186-189.
[6] 郭才行,仲伟秋,卜延渭,等.某城市老旧混凝土桥梁结构检测方法研究[J].低温建筑技术,2024,46(03):61-64.

公共建筑大空间吊顶施工技术分析

余汉新

（广东省构建工程建设有限公司，广东 佛山 528200）

摘　要　随着城镇化进程的推进，公共建筑的建设规模不断扩大，大空间吊顶式公共建筑不仅可以提升建筑的使用功能和舒适性，还能保障建筑结构的安全性。本文主要是对公共建筑大空间吊顶施工技术进行分析，提出了施工前的准备、吊顶定位放线、吊顶吊杆组件的安装、吊顶骨架拼装吊装、天花吊顶面板安装、面板调平等施工技术，旨在对保证吊顶施工能够高质量地完成有所裨益，进而优化公共建筑室内空间视觉效果，提升建筑的美观程度。

关键词　公共建筑；大空间吊顶；定位放线

中图分类号：TU767　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.012

0　引言

公共建筑的主要特点是空间比较开阔，人流相对密集，这些特点对吊顶施工有着更高的要求，需要吊顶覆盖更大的面积，能够起到承重、抗震、防火等作用。所以，对大空间吊顶施工进行优化分析，可以保证吊顶的使用功能得到增强，优化了公共建筑的空间比例，增加建筑内的视觉效果，提升了建筑的使用性能。

1　公共建筑大空间吊顶施工前的准备工作

某大型购物中心工程位于城市的商业区，是集休闲、娱乐、办公为一体的建筑，总建筑面积 300 000 m^2，地上 15 层，地下 2 层。在设计购物中心时，其理念是打造一个现代化、舒适、开放的综合商业环境，因此吊顶设计在整个建筑的空间效果中起到了至关重要的作用。购物中心的大空间区域包括中庭、走廊、餐饮区等部位，在吊顶设计时，需要兼顾美观、功能性和施工可行性，吊顶施工的相关参数如表 1 所示。

表 1　大型购物中心工程大空间吊顶施工参数

工程项目	材料类型	参数
吊顶材料	石膏板	厚度：12 mm
吊顶结构	轻钢龙骨	规格：60×27 mm
通风设计	铝合金	规格：300×300 mm
消防喷淋系统	镀锌钢管	喷头流量：80 L/min

在对大型购物中心工程进行施工时，要先进行准备工作，让大空间吊顶施工能够顺利地开展。施工人员需要采用激光测距仪、水平仪等工具，对吊顶施工的具体尺寸、高度、结构位置等进行详细的测量，保证设计图纸与施工现场相符。然后施工人员对施工现场进行清理，主要是清理施工区域内的杂物、障碍物，进而保证施工场地更加整洁。由于吊顶施工属于高空作业，为了保证人员的安全性，可以在施工区域内设置安全围挡、警示标志等设施，这样能够切实地维护施工现场的安全 [1]。此外，也要提前准备施工的材料、设备等，当施工材料进场的时候，施工人员提前对其进行质量检验，保证材料质量符合大型购物中心工程的质量标准。同时，施工人员在准备吊车、升降机等施工设备时，也要对施工设备进行检查和调试，确保设备能够正常运行，为后续的吊顶施工提供保障。最后，施工人员在施工现场提前搭建临时的办公区以及材料堆放区，保证管理人员能够在规定区域内工作，材料的存放也能更科学。提前设置施工通道，保证材料和人员能够安全地进出，让吊顶施工可以顺利开展。

2　公共建筑大空间吊顶施工技术要点

2.1　吊顶定位放线

在大型购物中心工程的大空间吊顶施工中，吊顶定位放线是必要的施工环节，这一环节会直接影响吊顶的精准度以及整个施工的效果。所以就要对吊顶定位放线进行优化，施工人员需要先使用水平仪，在公共建筑的墙面或者柱子上画出一条水平基准线，这条线就会作为吊顶标高来进行参考。同时，施工人员也要使用铅垂线等设备，在墙面或者柱子上画出一条垂直的基准线，这条线则保证了吊顶的垂直度是精准的。然后，施工人员需要根据设计图纸，使用激光测距仪或钢卷尺等设备，测量出吊顶的标高点，并做好相应的标记，进而确定吊顶的标高。在确定了标高之后，要根据公共建筑大空间吊顶的面积和复杂程度，合理布置标高点，在此次工程中，吊顶的覆盖面积为 30 000 m^2，可以每 4 ～ 5 m 设置一个标高点。

完成标高的设置后，施工人员要开展实际的放线操作，使用标线绳在大型购物中心的墙面上拉出一条水平线，这条水平线要与基准线平行。同时，施工人员使用粉笔或记号笔，在墙面或者柱子上标记出水平线的具体位置，要保证这一标记是清晰、准确的，水平线的误差应控制在 ±2 mm 以内。接下来，就要对吊顶龙骨位置进行放线，施工人员主要是根据此次工程的设计图纸，找出主龙骨的位置，并使用钢卷尺对主龙骨的位置进行测量，测量结束后，根据测量的结果标记出主龙骨的安装位置，保证主龙骨之间的距离更加均匀。在完成主龙骨放线后，施工人员可以根据主龙骨的位置来确定次龙骨的位置，使用钢卷尺等设备，对次龙骨位置进行测量，并标记次龙骨的安装位置，保证次龙骨的间距是均匀的，其中，主龙骨的间距误差和次龙骨的间距误差都要控制在 ±5 mm 以内。在完成主次龙骨的标记放线后，需要对吊顶的边缘线进行放线，施工人员需要标记边缘线，保证标记过程中吊顶边缘是整齐、美观的，并在墙面或柱子上标记吊顶的收边线，使得公共建筑大空间吊顶与建筑的墙面之间的连接位置更加平滑，不会出现缝隙，保证后续的吊顶施工更精准[2]。

2.2 吊顶吊杆组件的安装

在完成放线之后，需要对吊顶吊杆进行安装，施工人员需要根据设计图纸，使用钢卷尺测量吊点的位置，并对其进行准确的标记，保证吊点之间的距离在 1 000 ～ 15 000 mm 之间，精准测量吊点位置。吊点确定后，施工人员需要检查吊点位置的结构强度，一旦在检查的过程中出现强度不足等问题，则要增加结构支撑，保证结构能够承受吊杆的荷载。在完成吊点标记之后，要使用电钻或冲击钻等设备，在标记的吊点位置进行打孔，打孔操作时，需要保证孔径与膨胀螺栓的直径是相匹配的，而且孔深也要根据膨胀螺栓的长度来确定，其深度要比膨胀螺栓的长度少 20 mm。在打孔完成后，施工人员就可以将膨胀螺栓插入打好的孔当中，在插入的过程中，需要保证膨胀螺栓的螺纹有一部分是露出的，并使用扳手将膨胀螺栓紧固，使得膨胀螺栓可以固定在结构上[3]。接下来就要安装吊杆，施工人员在确定吊杆长度的时候，主要是使用钢卷尺来进行测量，测量膨胀螺栓到吊顶龙骨之间的距离，这一距离就是吊杆的长度，根据实际测量出来的长度，使用切割工具将吊杆切割成所需的长度。施工人员可以将吊杆的一端与膨胀螺栓紧密相连，并使用螺母和垫片等设备对其进行固定，在固定过程中，施工人员使用水平尺或激光水平仪等设备，调整吊杆自身的垂直度，这样就能保证吊杆是垂直的。在吊杆安装完成后，要安装吊件，施工人员要根据吊顶龙骨的类型，选择合适的吊件，并把吊件准确地安装在吊杆的另一端，使得吊件与吊杆之间的连接更加牢固。最后，施工人员要将吊件与主龙骨进行连接，并使用螺栓来进行固定，在固定的过程中，要调整主龙骨的水平度和垂直度，让主龙骨的安装更加高效。

2.3 吊顶骨架拼装吊装

在对龙骨进行安装之前，需要先对其进行拼装，在主龙骨拼装的时候，施工人员可以先测量主龙骨的长度，根据实际的测量长度进行主龙骨的切割，并把切割后的主龙骨拼接成一个整体，使用连接件和螺栓对其进行固定，保证主龙骨的拼接更加的牢固。在主龙骨完成拼装后，施工人员要对次龙骨进行拼装，同时对次龙骨的长度进行切割，使其符合大型购物中心工程的实际需求，把切割后的次龙骨再次拼接成一个整体，并让次龙骨的拼接更加牢固，其中主龙骨和次龙骨的具体参数如表 2 所示。接下来，施工人员要把主龙骨和次龙骨进行连接，在连接的时候，要组装成一个三角形，三角形的龙骨中每一个角都要与六角法兰所对应的角进行连接，并把其安装在龙骨的吊杆上。

表 2 主龙骨、次龙骨的参数

龙骨类型	规格（mm）	壁厚（mm）	最大间距（mm）	承载力（kg/m）
主龙骨	60×27	1.8	1 800	70
次龙骨	38×12	1.0	1 000	30

在实际吊装的时候，施工人员要先根据龙骨的重量和尺寸，选择合适的吊车，并在吊顶骨架上设置一定的吊点，在设置吊点时，需要保证其位置是均匀且牢固的。施工人员要对吊装设备进行检查，使其运行更稳定，并再次确定吊点的位置，这样能保证安装更加精准，同时保证吊装过程中不会发生安全事故。在检查完成后，施工人员可使用吊车或者其他的吊装设备，将吊顶骨架吊起，并缓慢地提升到预定的高度。在吊装过程中，施工人员需要使用激光水平仪，及时调整吊顶骨架的位置，保证骨架安装的位置与设计位置是一致的。将吊顶骨架固定在吊杆上，并使用吊件和螺栓对其进行固定，保证整个骨架更加牢固。在完成龙骨吊装之后，要对龙骨的连接位置进行检查，检

查其是否固定，并且要检查吊顶骨架的整体稳定性，保证公共建筑内大空间吊顶骨架不会出现松动或变形的情况。

2.4 天花吊顶面板安装

在天花吊顶面板安装施工时，由于吊顶施工是最后一项，会直接影响吊顶的具体功能，所以要优化其施工方案，提升施工质量。在进行吊顶面板安装之前，施工人员需要先使用钢卷尺等设备，详细地测量出吊顶骨架之间的实际尺寸，以保证后续的面板剪裁符合吊顶骨架的实际要求。吊顶面板尺寸一般是 600×600 mm，或者是 600×1 200 mm，施工人员根据测量的骨架，选择实际的面板。在测量完成后，施工人员要根据实际测量的尺寸，使用剪刀或美工刀等设备，将吊顶面板裁剪成所需要的尺寸，如果使用的是金属面板，那么施工人员就可以使用专用的剪板机对其进行裁剪。面板剪裁完成后，对其进行安装，安装要先从中间开始，然后逐渐向两边扩散安装，同时，也要先安装主龙骨上的面板，然后再安装次龙骨上的面板 [4]。

在实际安装时，施工人员需要先将裁剪好的面板放置在吊顶的骨架上，并使用螺丝或固定夹对其进行固定，固定时保证螺丝之间的间距是均匀的，间距控制在 200 ～ 300 mm 左右，并使得固定更加稳固。在面板安装完成后，要使用水平尺和激光水平仪等设备，对面板的水平度进行检查，保证安装之后的面板是平整的，不会出现面板翘边的情况。在面板安装之后，要对面板之间的接缝位置进行处理，保证面板之间的接缝是对齐的，而且也要控制接缝的宽度更加均匀。施工人员需要使用密封胶等材料，对接缝进行密封处理，这样的处理可以防止灰尘或者水分进入面板内部，影响到大空间吊顶的质量，在进行涂抹密封胶时，要均匀地涂抹，提升整个密封的效果。此外，对于吊顶边缘的面板来说，要使用固定夹或螺丝等设备进行固定，面板边缘的螺钉间距一般是控制在 150 ～ 200 mm 左右，通过固定可以保证面板的边缘更加的平整，并使用封边条对吊顶的边缘进行封边处理。总之，对吊顶面板进行安装施工，可以使得整个吊顶的施工更加完整，同时也使吊顶效果得到提升，进而增加公共建筑的美观度。

2.5 面板调平

在对吊顶面板进行安装之后，为了保证面板的外观更加平整，要对其进行调平工作。调平主要分为单点调平及多点调平的方法：第一，在开展单点调平时，施工人员可以在面板的每一个固定点位置进行检查，检查的时候使用水平尺，保证面板的水平度检查更加科学，一旦在检查的过程中发现其水平度存在误差，那么就要对固定点位置进行调整，保证面板在每个固定点上都能保持水平。第二，在开展多点调平时，施工人员需要使用水平尺，对面板的不同位置进行检查，通过不同位置的检查，可以提升面板的整体水平度，一旦在检查中出现了误差，那么施工人员就要使用垫片或者调整螺丝的松紧度等方法，有效地微调面板自身的高度，保证面板调平更加高效 [5]。在面板调平之后，施工人员要使用检测仪器对其进行重复的测量，若 3 次以上的测量结果都是相同的，那么就表示面板趋于平整，就可以对其进行固定。在固定的时候，使用螺丝把面板固定在吊顶骨架上，施工人员再次检查所有固定点的紧固情况，使得固定点更加的牢固。在整个吊顶施工中，施工人员需要在施工时佩戴安全帽、安全带等防护用品，这样就可以保障施工人员的安全。同时，由于吊顶面板的安装精度较高，所以施工人员在进行施工的时候，要严格按照施工方案进行操作，保证面板的平整度、接缝宽度以及固定点之间的距离等参数误差控制在允许的范围内，这样就可以提升吊顶的整体质量，保证吊顶更加美观。

3 结束语

对公共建筑大空间吊顶施工进行优化分析，不仅可以提升施工效率，缩短施工周期，还可以增加吊顶的稳定性，降低对建筑的损害。在进行施工的时候，主要是从放线、吊顶组件组装、面板调平等方面入手，保证吊顶施工更加全面，满足公共建筑的吊顶设计需求，增加建筑结构的安全性。

参考文献：

[1] 武文慧 . 公共建筑大空间吊顶施工质量管理要点分析 [J]. 建材发展导向 ,2025,23(03):115-117.
[2] 石阳 . 大跨度空间球形网架斜面弧形吊顶安装技术 [J]. 建筑机械化 ,2024,45(04):100-102.
[3] 马小杉 . 公共建筑大空间吊顶施工质量管理要点 [J]. 山西建筑 ,2024,50(01):113-116.
[4] 郭洪波 , 陶义 , 王铎 . 大空间装饰吊顶施工中开启式双层透光软膜施工技术 [J]. 四川建筑 ,2022,42(S1):137-138.
[5] 孟安文 . 吊顶反支撑和型钢转换层在超大空间跨度的室内吊顶工程中的应用 [J]. 建材发展导向 ,2022(06):51-53.

沥青混凝土路面施工技术及质量控制措施

李利成

（黄山新洲建设集团有限公司，安徽 黄山 245242）

摘　要　本文阐述了沥青混凝土路面施工质量控制的关键环节，包括碾压温度控制、养护质量控制和质量控制制度建设。在碾压温度控制上，强调出料温度控制、实时监测及灵活调整的重要性，以确保路面密实度和平整度；在养护质量控制方面，提出初步、定期和长期养护策略，延长路面寿命。同时，强调构建完善质量控制制度的必要性，包括制定规范、建立责任制度、加强监督管理和完善检测体系。本文旨在为相关人员提供借鉴。

关键词　沥青混凝土路面；施工质量控制；碾压温度；养护质量；质量控制制度

中图分类号：U416.2　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.013

0　引言

沥青混凝土路面作为现代道路交通建设的关键组成部分，因其卓越的力学性能、出色的耐久性和优异的行驶舒适性而被广泛应用于各类道路工程中。随着交通量的持续增长和车辆荷载的不断加重，对沥青混凝土路面的施工质量提出了更为严格的要求。本文深入探讨了沥青混凝土路面的施工技术及质量控制措施，剖析影响施工质量的多类主因，并提出了针对性的控制方法和策略，以期为路面施工质量提升提供参考。

1　影响沥青混凝土施工质量的主要因素

1.1　环境因素

环境因素是沥青混凝土施工中不可忽视的重要一环。温度、湿度、降雨等自然条件对施工质量有着直接的影响。高温下沥青易软化，使混合料黏度下降，难以形成稳定的路面结构；而在低温时，沥青的脆性增加，路面易出现裂缝。湿度和降雨则会影响混合料的含水率，进而影响其拌合均匀性和压实效果。故施工时须密切留意天气变化，合理安排施工时间，采取必要的措施如遮阳、防雨等，以确保施工质量。

1.2　材料因素

材料质量是决定沥青混凝土路面施工质量的关键因素。沥青混凝土主要由沥青、集料和添加剂等组成，每种材料的质量都会直接影响混合料的性能。沥青的选型、标号以及储存条件都会对其性能产生影响；集料的粒径、级配、形状以及含泥量等也会影响混合料的力学性能和耐久性；添加剂的种类和用量则会对混合料的拌合性、稳定性和施工性能产生影响。因此，在施工前必须对材料进行严格的质量检测，确保所有材料均符合设计要求，从源头上保障施工质量[1]。

1.3　人为因素

人为因素在沥青混凝土施工中同样占有重要地位。施工人员的技术水平、操作规范以及质量意识都会对施工质量产生直接影响。技术熟练的施工人员能够准确掌握施工要领，确保施工过程的顺利进行；而严格遵守操作规范则是保证施工质量的基础。此外，施工人员的质量意识也是影响施工质量的重要因素。只有充分认识到施工质量的重要性，才能在施工过程中时刻保持高度的责任心，确保每一步施工都符合设计要求。因此，加强施工人员的培训和教育，提高其技术水平和质量意识，是保障沥青混凝土路面施工质量的重要措施。

2　沥青混凝土路面施工准备阶段的质量控制技术

2.1　基层施工与验收

基层为沥青路面支撑层，其施工质量影响路面稳耐性。因此，在基层施工阶段，必须严格控制施工质量。首先，要确保基层材料的选用符合设计要求，具有良好的力学性能和稳定性。其次，在施工过程中，要严格按照施工规范进行操作，确保基层的平整度、厚度和宽度等指标满足要求。最后，在基层施工完成后，要进行严格的验收工作，对基层的质量进行全面检查，确保无质量隐患[2]。

2.2　施工材料质量管控

施工材料是沥青混凝土路面的重要组成部分，其质量直接关乎路面的使用性能和寿命。因此，在施工准备阶段，严控施工材料质量至关重要。首先应建立完善的材料采购制度，明确采购流程，选择具有合格资质的供应商，严控材料质量，保证达到相关工程标准。其次，要对进场的材料进行严格的检查，包括材

料的外观、性能等，以保证材料的质量合格。材料入场后需妥善保管，采取有效的防潮、防雨、防晒措施，防止材料受潮、变质或损坏，确保施工过程中的材料质量始终保持稳定，为沥青混凝土路面的高质量施工提供有力保障。

2.3　施工机械设备管控

施工机械设备是沥青混凝土路面施工不可或缺的重要工具，其性能状态直接关乎施工效率和质量。因此，在施工准备阶段，对施工机械设备的管控尤为重要。首先，必须对机械设备进行全面的检查和维修，细致排查每一处潜在隐患，确保其性能良好、运转正常。这包括对设备的动力系统、传动系统、控制系统等关键部位进行彻底检查，及时更换磨损严重的零部件，确保设备处于最佳工作状态[3]。其次，要根据施工需求合理配置机械设备，确保施工过程中的每一道工序都有合适的设备支持，满足施工要求。同时，还要加强机械设备的日常维护和保养工作，定期清洗、润滑，延长设备的使用寿命，提高施工效率，为沥青混凝土路面的顺利施工提供有力保障。

2.4　优化试铺工作

试铺是沥青混凝土路面施工前的重要环节，通过试铺可以检验施工方案的可行性和施工质量的稳定性。因此，在施工准备阶段，必须重视试铺工作的优化。首先，要制定合理的试铺方案，明确试铺的目的、要求和步骤。其次，在试铺过程中要严格按照施工方案进行操作，对试铺结果进行全面记录和分析。最后，根据试铺结果对施工方案进行调整和优化，确保施工过程中的质量控制措施更加完善、有效。同时，试铺还可以为施工人员提供实践机会，提高其技术水平和操作熟练度，为正式施工做好充分准备。

3　沥青混凝土路面施工质量控制机制

3.1　混合料的配制控制

混合料的配制是沥青混凝土路面施工的第一步，也是决定路面质量的关键环节。在配制过程中，首先要确保原材料的质量符合设计要求，沥青、集料、添加剂等都要经过严格的检验和筛选。其次，要准确控制原材料的配比，根据设计要求和实际施工条件，合理确定沥青含量、集料级配和添加剂用量，确保混合料的性能稳定[4]。同时，混合料的拌制过程也要严格控制，拌和时间、温度等参数都要符合规范要求，确保混合料拌制均匀、质量稳定。在配制完成后，还要对混合料进行质量检测，确保其各项性能指标满足设计要求，为后续的施工提供质量保障。

3.2　混合料的运输控制

混合料的运输是沥青混凝土路面施工中的重要环节，运输过程中的质量控制同样不容忽视。在运输过程中，首先要选择合适的运输车辆，确保车辆的车厢干净、平整，无杂物残留，以免对混合料造成污染。其次，要严格控制运输时间，避免混合料在运输过程中因时间过长而发生离析或温度下降等现象。同时，还要做好混合料的保温措施，特别是在气温较低或运输距离较远的情况下，要确保混合料在运输过程中的温度稳定，以免影响其施工性能。此外，在运输过程中还要加强对混合料的保护，避免因颠簸、撞击等原因造成混合料的质量损失。

3.3　摊铺质量控制

摊铺是沥青路面施工的关键环节，其质量的优劣关乎路面平整与性能。在摊铺过程中，首先要确保摊铺机的性能良好，操作稳定，能够按照设计要求进行准确、均匀的摊铺。其次，要严格控制摊铺速度，避免过快或过慢导致混合料离析或摊铺不平整。同时，还要加强对摊铺厚度的控制，通过调整摊铺机的高度或使用厚度控制装置，确保摊铺厚度符合设计要求。此外，在摊铺过程中还要密切关注混合料的温度变化，避免因温度过高或过低而影响其施工性能。摊铺完成后，还要及时对摊铺面进行检查和修整，确保路面的平整度和外观质量满足设计要求。

3.4　碾压质量控制

在沥青路面施工中，碾压是影响其密实度、平整度与耐久性的关键。碾压前须选择优质设备，确保设备的吨位、振动频率和振幅等参数满足施工要求[5]。其次，要严格控制碾压温度，沥青混合料在过高或过低的温度下碾压都会影响其质量，因此需要根据沥青类型和气候条件来确定最佳的碾压温度范围。同时，碾压遍数和碾压速度也是关键控制点，过多的碾压遍数可能导致混合料过压，而过少的碾压遍数则无法达到要求的密实度；碾压速度过快可能导致混合料推移，过慢则可能影响施工效率。因此，在施工过程中，需要根据实际情况灵活调整碾压参数，确保碾压质量符合设计要求。

3.5　平整度质量控制

平整度是沥青路面施工中的重要指标，关乎行车舒适与安全。为了控制路面的平整度，首先需要在摊

铺过程中确保摊铺机的稳定性和准确性，避免摊铺过程中出现波动或偏移。其次，在碾压过程中要采用合适的碾压方式和顺序，避免因碾压不当而产生凹凸不平的现象。同时，还需要加强对施工接缝的处理，确保接缝处的平整度与整体路面一致。此外，在施工过程中还需要定期进行平整度检测，及时发现并处理存在的问题，确保路面的平整度满足设计要求。

3.6 离析控制

离析是沥青混凝土路面施工中常见的问题之一，它会导致路面出现粗细集料分布不均、局部空隙过大或过小等现象，严重影响路面的使用性能和耐久性。为了控制离析现象，首先需要在混合料配制过程中确保原材料的均匀性和稳定性，避免因为原材料质量波动而导致离析。其次，在摊铺过程中要采用合适的摊铺方式和速度，避免因摊铺不当而产生离析。同时，在碾压过程中也需要注意碾压方式和顺序，避免因碾压不当而加重离析现象。

此外，还需要加强对混合料的运输和储存管理，避免在运输和储存过程中产生离析[6]。在施工过程中，还需要定期进行离析检测，保证路面质量稳定。

3.7 碾压温度控制

碾压温度作为沥青路面施工的关键参数，影响其密实度、平整度及整体性能。首先，在拌料时需严控出料温度，确保混合料在运输至施工现场时仍保持在适宜的碾压温度范围内。其次，在施工现场，应配备温度检测设备，对混合料的温度进行实时监测，确保在最佳碾压温度下进行作业。同时，施工人员还需根据天气条件、混合料类型以及施工设备等因素，灵活调整碾压温度，避免因温度过高或过低而导致的路面质量问题。通过严格的碾压温度控制，可以确保沥青混凝土路面达到理想的密实度和平整度。

3.8 养护质量控制

养护是沥青混凝土路面施工完成后不可或缺的一环，对路面的长期性能和使用寿命有着重要影响。为了做好养护质量控制，首先需要在路面施工完成后及时进行初步养护，包括洒水降温、覆盖保护等措施，防止路面因温度骤变或外力作用而产生裂缝或损坏。其次，在路面强度逐渐形成的过程中，应实施定期的养护计划，包括清扫路面、检查并修复潜在问题等，确保路面的整洁和完好[7]。同时，还需根据气候条件和使用情况，制定长期的养护策略，如定期进行路面检测、实施预防性养护措施等，以延长路面的使用寿命。通过严格的养护质量控制，可以确保沥青混凝土路面保持良好的使用状态。

3.9 构建完善的质量控制制度

为了确保沥青混凝土路面施工质量的全面提升，必须构建一套完善的质量控制制度。这套制度应涵盖施工前的准备阶段、施工过程中的各个环节以及施工后的养护阶段，确保整个施工过程都有章可循、有据可查[8]。

具体来说，应制定明确的施工规范和操作规程，对施工人员的操作行为进行严格规范；建立质量责任追究制度，对施工过程中出现的质量问题进行严肃处理；加强施工现场的监督和管理，确保施工质量和安全；同时，还应建立完善的质量检测体系，对路面的各项性能指标进行定期检测和评估。通过构建完善的质量控制制度，可以为沥青混凝土路面施工提供有力的制度保障，确保路面的质量达到设计要求和使用标准。

4 结束语

沥青混凝土路面施工质量控制是一个系统工程，需要综合考虑多个方面的因素。通过严格的碾压温度控制、精细养护质控与完备质控制度，可以确保路面的质量达到设计要求和使用标准。同时，随着科技的不断进步和施工技术的不断发展，我们还需要不断探索和创新，为沥青路面施工质控提供技术支撑与保障，筑就优质耐久路面，为人们的出行营造便捷舒适的环境。

参考文献：

[1] 王小艺.公路沥青混凝土路面施工质量控制技术[J].建材发展导向,2025,23(03):106-108.
[2] 岳秀凯.沥青混凝土路面施工质量控制措施分析[J].运输经理世界,2024(07):13-15.
[3] 王尔凯.市政工程沥青混凝土路面施工技术及质量控制[J].产业创新研究,2024(10):127-129.
[4] 高腾.沥青混凝土路面施工过程中质量控制关键技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(24):139-141
[5] 张丹,吕小艳.沥青混凝土路面施工技术及质量控制措施[J].城市建设理论研究(电子版),2023(06):112-114.
[6] 单庆庆.沥青混凝土路面试验检测常见问题及处理[J].黑龙江交通科技,2021(09):47-48.
[7] 吴彤.沥青混凝土路面施工质量控制技术分析[J].科技与创新,2021(23):93-94.
[8] 王华.沥青混凝土路面施工的全面质量管理策略[J].绿色环保建材,2020(04):19-20.

公路桥梁施工中防水路基路面的施工技术探讨

郭田涛

（威海市公路事业发展中心，山东 威海 264300）

摘　要　防水路基路面是公路桥梁工程中的关键结构，其施工质量直接影响着整个工程的耐久性和使用寿命。本文从防水路基路面所使用的主要材料入手，分析了不同防水材料、路基材料和路面材料的性能特点及其应用条件，详细阐述了防水路基施工的关键技术，包括基层处理、防水层铺设、黏结层施工、路面铺装等，并就如何加强施工质量控制提出了具体措施，还探讨了防水路面施工的工艺流程，总结了现场环境控制、温湿度管理以及密封性能检测等方面的经验，以期为提升公路桥梁工程质量提供有益参考。

关键词　公路桥梁；防水路基路面施工；质量控制

中图分类号：U416.04；U445.4　　**文献标志码：**A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.014

0　引言

随着我国经济社会的快速发展，公路桥梁建设进入高质量发展阶段。路基路面施工作为工程建设的核心，其施工质量备受关注。防水路基路面能够有效阻隔雨水下渗，防止路基软化，是保障行车安全、延长使用寿命的关键。然而，受材料性能、施工工艺、质量管控等多重因素影响，防水路基路面施工中仍存在不少问题，亟需系统研究先进的施工技术，优化施工组织方案，创新质量管理模式，不断提升防水路基路面的整体施工质量，推动公路桥梁事业高质量、可持续发展。

1　防水路基路面的主要材料及应用特性

1.1　防水材料的选择与技术参数

防水材料是公路桥梁防水路基路面的核心组成部分，其性能优劣直接决定了整个防水体系的可靠性和耐久性。在防水材料的选择上，设计者应充分考虑工程所处的自然环境条件，如温度、湿度、日照等因素，选用适宜的材料。就当前来看，SBS 改性沥青、橡胶沥青和聚氨酯涂料是较为常用的三类防水材料。其中，SBS 改性沥青兼具良好的高温稳定性和低温柔性，能够适应温度的剧烈变化，且具有优异的防水和防渗性能。橡胶沥青则在 SBS 改性沥青的基础上，通过添加橡胶颗粒，进一步提升了材料的抗裂性和耐久性，特别适合用于温差大、车流量大的路段。而聚氨酯涂料作为一种新型防水涂料，具有施工便捷、与基层粘结力强等特点，可作为防水体系的有益补充。在筛选最佳防水材料时，还应关注其技术参数，如延展性、粘结性、耐候性等指标，通过综合比选，优中选优，最大限度地发挥防水材料的综合性能，确保防水路基路面的施工质量。

1.2　路基材料的性能与应用要点

路基是防水路基路面的基础，路基材料的选择和施工质量控制至关重要。就路基填料而言，片石类材料、砂砾石和级配碎石是较为常见的三类。其中，片石类材料棱角分明，可紧密嵌合，形成稳定的骨架结构。砂砾石则凭借其高强度、高刚度的特性，能够在碾压后形成坚实的整体，有利于提升路基的承载力[1]。级配碎石则兼顾骨料的连续级配，在保证强度的同时，也能实现较高的压实度。在路基防水性能的控制上，压实度和含水率是两个关键参数。一般而言，路基压实度应不低于 96%，含水率则控制在最佳含水率的 -2% ～ +1% 之间。对于一些特殊土质，如湿陷性黄土等，还须辅以换填、预压等专项处理措施，切实增强地基的稳定性，为后续防水层的铺设创造有利条件。

1.3　路面材料的特性与使用条件

路面材料是防水路面的直接受荷体，其性能直接影响路面的耐久性和使用寿命。当前，沥青混凝土和水泥混凝土是两种主要的路面材料。沥青混凝土凭借其良好的弹性变形能力和柔性特征，能够适应温度变化导致的收缩和膨胀，在降低温度应力的同时，还能起到一定的防水作用。但在高温环境下，沥青容易发生流动，因此对集料级配和油石比的优化控制至关重要。而水泥混凝土路面则具有高强度、高刚度等特点，抗压性能突出，车辙、坑槽等病害少发。但其抗拉强度相对较低，因此在进行胀缝、伸缩缝等设计时须予

以重点考虑。除传统的沥青混凝土、水泥混凝土外，掺加纤维、橡胶粉等功能型添加剂也是改善路面综合性能的有效途径。纤维材料能够增强路面的抗裂性能，而加入橡胶粉则有助于提高路面的抗车辙能力。在路面材料的选择上，设计者还应充分考虑交通荷载、气候特点等因素，采用专业的配合比设计软件，优选出性价比最优的材料组合，最大限度地满足防水路面的使用要求。

2 防水路基施工关键技术及质量控制

2.1 基层处理与防水层铺设技术

在防水路面施工中，基层处理是保证防水层与路基充分黏结的首要前提。施工前，要本着“无缝化”的原则，对基层进行全面清理，彻底去除浮土、油污等影响黏结的杂质，为后续施工创造良好的条件。清理方法要因地制宜，对于普通路段，可采用高压水枪冲刷或者钢丝刷打毛，而对于油污严重路段，则需辅以人工铲除等方式，务必做到基层表面的清洁平整。对于已出现网裂、唧浆等病害的路段，还须采取注浆加固等专项处理措施，切实增强基层的完整性和承载力，为防水层的有效铺设夯实基础。在基层处理完成后，即可铺设防水层。铺设拌合料时要均匀洒布，摊铺厚度要严格控制，确保摊铺料与基层充分接触。与此同时，要实时监控摊铺温度，一旦温度低于规范要求，要采取加热等应对措施[2]。碾压作业要连续进行，遍数不宜少于 3 遍，压实度应达到设计和规范要求。终压阶段尤其要注意防止碾压设备的二次碾压和停留，最大限度避免压痕等病害。防水层铺设完成后，还须及时开展无损检测，采用雷达、超声等技术手段，重点查找可能存在的密实度不足、厚度不均等问题，发现问题及时处理，为工程质量提供可靠保障。

2.2 黏结层施工与路面铺装工艺

黏结层是衔接防水层和面层的关键节点，其施工质量直接影响路面的整体性能。在材料选择上，应优选高标号的改性沥青，并控制好沥青的加热温度与撒布量。一般情况下，加热温度应控制在 150 ～ 170 ℃之间，撒布量则以 0.6 ～ 0.8 L/m^2 为宜。撒布要分两次进行，第一次用量约占总量的 2/3，待其冷却后再撒布剩余的 1/3，从而确保沥青在基层表面的均匀铺展。撒布过程要连续进行，采用专用洒布车或人工洒布，尽量避免漏刷、堆积等现象。洒布完成后，及时采用压路机进行碾压，并控制好碾压遍数和速度，既要确保黏结层的密实度，又要避免纵向裂缝或推移现象。一般情况下，建议碾压遍数不少于 4 遍，初压速度不宜过快，后期可根据实际情况适度加快碾压速度。待黏结层施工完成，并经 12 h 养护后，再开展面层的铺装作业。铺装过程要严格控制温度、速度等参数，摊铺温度控制在 140 ～ 170 ℃之间，推铺速度以 2 ～ 4 m/min 为宜，碾压遍数则根据路面厚度而定，但要满足规范要求。铺装过程中还须妥善处理新旧路面的衔接，将接缝错开，并适度增加搭接宽度，防止接缝开裂和渗水。

2.3 接缝处理与施工质量检验方法

防水路面的接缝往往是产生病害的“罩门”，埋下工程质量的隐患。在施工中，应本着“预防为主”的原则，在接缝设置、衔接材料选用、密封工艺等方面严把质量关。在接缝布置上，应避开车辙和车道中心线，最大限度降低荷载应力。一般建议接缝与路线中心线保持 45° 夹角，分散车辆的冲击力。施工缝处要提前做好准备工作，包括基层的刷洁、粘层油的涂刷等，涂刷范围应适当扩大，防止接缝附近黏结不良。纵缝可采用热熔型或冷施工型材料，并控制好接缝的高低差，一般要求不超过 3 mm。在材料选择上，改性橡胶沥青是较为理想的选择，熔化温度以 160 ～ 180 ℃为宜。在密封施工时，还要控制好密封高度和宽度，一般要求高度为缝宽的 1.2 ～ 1.5 倍，宽度则不宜超出设计值的 15%，并采用钢直尺检查密封的饱满度和均匀性[3]。为了检验防水路面的施工质量，还须开展一系列检测工作。检测对象包括原材料、拌合料和成品路面等，检测项目涵盖弯沉、渗水、厚度、平整度等各个方面。其中，弯沉值代表了路面的承载力，建议采用 3 m 直尺法检测，一般不宜超过 3 mm。渗水系数则反映了防水路面抵御雨水下渗的能力，可用蒸发量法检测，要求不大于 200 ml/（min·m^2）。厚度和平整度代表了路面的外观质量，要求偏差值满足高速公路的标准要求。此外，还可结合弯沉值、渗水系数等指标数据，采用灰色关联分析等方法，综合评价防水路面的施工质量，找出薄弱环节，为质量提升指明方向。

3 防水路面施工工艺流程及管理措施

3.1 施工准备与现场环境控制措施

防水路面施工是一项系统工程，施工准备是确保工程顺利进行的首要前提。施工组织设计是施工准备的核心内容，它通过对施工过程的全面筹划和部署，明确施工工艺流程，合理配置人力、物力、财力等资源，为施工活动提供科学指引。在编制施工组织设计时，要全面考虑工程特点、现场条件、气候特征等因素，

因地制宜地选择施工方案。与此同时，原材料供应、设备调试、技术交底等各项准备工作也要提前谋划、协调到位，为正式施工创造有利条件。现场环境控制是确保施工质量的另一项关键举措。防水路面施工对施工环境有着较高要求，控制不当极易引发质量问题。在实践中，要高度重视施工便道的硬化，并铺设防尘网，定期洒水，最大限度地降低扬尘污染[4]。雨雪等恶劣天气会严重影响防水路面施工质量，因此要密切关注天气变化，遇到大风或者雨雪天气，要果断停工，并采取覆盖等措施，最大限度地减少损失。在现场布置上，要本着“以防为主，防治结合”的原则，将材料堆放区与施工作业区分开设置，远离河流、基坑等环境敏感区，最大限度地降低环境风险。与此同时，产生的废料要及时清运，防止对周边环境造成二次污染。

3.2　施工过程中温湿度及平整度控制

防水路面施工对温湿度条件有着严格的要求，如何精准把控施工过程中的温湿度和平整度，是确保防水路面施工质量的关键。在温度方面，防水路面材料对温度变化较为敏感。当气温过低时，材料黏度会急剧增大，容易出现摊铺不均、碾压不实等质量问题。为此，要采取加热或者添加胶凝改性剂等措施，确保材料的温度满足施工要求。当气温过高时，材料则会出现离析、流淌等现象，碾压也难以达到预期效果。对此，要合理安排施工时间，避开高温时段，并在材料运输、摊铺过程中采取遮阳降温措施，有效控制材料温度。在湿度方面，空气湿度过大会降低材料间的粘结力，影响路面的整体性能。为此，在施工前要采用烘干或者自然晾晒方式降低集料的含水率，并控制好拌合料的出料温度，确保温度满足施工规范要求。当遇到雨雪天气时，要及时停工，最大限度减少湿度的不利影响。平整度控制贯穿于摊铺、碾压的全过程。在摊铺环节，要严格控制摊铺层的厚度、宽度，并利用红外线测温仪时刻监控摊铺温度场的均匀性，及时调整。在碾压环节，要依据施工规范要求，严格控制初压、复压和终压的速度、遍数，定期检测压实度，并根据检测结果及时优化碾压参数。

3.3　施工后密封性能与耐久性检测

防水路面的密封性能和耐久性能是评价其使用性能的两个关键指标，做好相关检测可为工程验收和使用维护提供可靠依据。密封性能检测的目的是考察防水路面抵御外界水分渗入的能力。在实践中，可采用蒸发量法、滴水法等技术手段进行定量评估。其中，蒸发量法通过测定一定时间内防水路面的蒸发量，来判断其吸水性能和透气性能。一般要求蒸发量不大于 0.1 kg/（m^2·h），如果明显超过这一标准，说明防水路面的密封性能存在明显缺陷。耐久性能检测的目的是考察防水路面在实际运营条件下的抗裂、抗车辙等长期使用性能。其中，抗裂性试验是通过不断增加荷载次数，直至出现开裂，来判断防水路面的抗疲劳开裂能力，性能等级一般要达到Ⅱ级及以上[5]。低温抗裂性试验是在特定低温条件下，通过三点弯曲方式测定防水路面的断裂韧性，性能要求一般不低于常规路面的 80%。车辙试验是通过小型设备模拟车辆荷载，测定一定次数重复荷载后路面的永久变形量，并用动稳定度 DS 来定量描述，DS 值越大，说明防水路面的高温稳定性越好。在实际检测过程中，要严格遵循相关规程和标准，控制试验条件，并对检测数据进行统计分析，找出薄弱环节，采取针对性的防治措施，持续提升防水路面的建设水平，更好地发挥其使用功能，最终实现防水路面建设的高质量目标。

4　结束语

公路桥梁防水路基路面施工是一项复杂的系统工程，涉及防水材料选择、路基处理、基层铺装、路面施工等诸多环节。各环节皆须严格把关、精益求精，尤其要重视材料选型、配合比优化、温度控制、平整度管理等关键控制点，强化质量检验，加强过程管控，严把工程质量关。唯有如此，方能充分发挥防水路基路面的综合性能，最大限度地减少病害发生，提高公路桥梁工程的耐久性和使用寿命，更好地服务于经济社会发展大局。在未来的建设实践中，建设者还应继续探索新材料、新工艺、新设备，优化施工组织，创新管理模式，推动防水路基路面施工技术的持续进步，为公路强国建设贡献更大力量。

参考文献：

[1]　刁宪基.公路桥梁施工中防水路基路面的施工技术研究 [J]. 运输经理世界 ,2024(08):101-103.
[2]　王俊达 , 鲁明星 . 道路桥梁施工中防水路基路面施工技术分析 [J]. 石材 ,2023(03):55-57.
[3]　刘钦.道路桥梁施工中防水路基路面施工技术分析 [J]. 大众标准化 ,2022(04):168-170.
[4]　李强 . 道路桥梁施工中防水路基路面的施工技术分析 [J]. 住宅与房地产 ,2020(04):232.
[5]　林海青 . 道路桥梁施工中防水路基路面施工技术分析 [J]. 住宅与房地产 ,2020(03):211.

公路交通工程建设中伸缩缝施工技术要点研究

皮永杰

（滨州京鲁交通工程有限公司，山东 滨州 256800）

摘　要　本文系统研究了公路交通工程建设中伸缩缝施工技术的要点，重点分析了施工准备、安装施工、焊接施工和后期处理四个环节的关键技术：施工准备阶段需要做好测量放样、原材料检测、设备检验和方案优化；安装施工阶段要控制预留预埋精度、合理选择支承固定方式、规范钢筋绑扎布置、优化混凝土配合比；焊接施工阶段应选择合适坡口尺寸、优选焊接参数、控制残余应力变形、检验焊缝质量；后期处理阶段需要选用优质密封材料、规范附属构件安装、加强养护维修措施、及时诊断处置病害。本文旨在为相关人员提供有益参考。

关键词　公路交通工程；伸缩缝施工技术；后期处理

中图分类号：U415.1　　**文献标志码**：A　　DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.015

0　引言

公路交通工程是国民经济建设和社会发展的重要基础设施。随着我国公路交通事业的蓬勃发展，公路工程建设规模不断扩大，技术标准日益提高，对工程项目的施工质量和使用性能提出了更高的要求。伸缩缝是公路桥梁建筑结构中的关键节点之一，其施工质量的优劣直接影响着桥梁的安全性、耐久性和舒适性。

1　公路交通工程伸缩缝施工准备技术要点

伸缩缝施工准备是确保施工质量的基础。做好测量放样、原材料检测、设备检验和施工方案优化，是高质量施工的前提。

1.1　施工测量放样与控制

伸缩缝施工测量放样作为确保施工精度、质量与后期耐久性的关键环节之一，必须给予高度重视并采取严格的控制措施。采用高精度全站仪进行控制测量，要求测设误差≤ ±1 mm。利用精密水准仪对标高进行跟踪监测，高程偏差控制在 ±0.5 mm 以内 [1]。几何尺寸校核时选用 0.01 mm 级数显卡尺，测量误差不超过 0.5 mm。创新性地引入高精度激光跟踪仪，结合三维实景建模技术实现测量数据实时采集与反馈，发现超限偏差即可通过调整模板、预埋件等措施进行精准纠偏，最终将放样精度控制在 ±1 mm 以内，达到国际先进水平。

1.2　原材料质量检测与选用

公路伸缩缝原材料的品质优劣是保障其综合性能与长期耐久性的关键基础之一。钢材优选 S460M/ML 低温高韧性钢，屈服强度≥ 460 MPa，抗拉强度≥ 540 MPa，延伸率≥ 18%，-20 ℃冲击功≥ 40 J。橡胶密封材料采用耐候氯丁橡胶，硬度 65±5 Shore A，抗拉强度≥ 20 MPa，撕裂强度≥ 45 kN/m。混凝土采用复合硅酸盐水泥，掺加硅灰、粉煤灰，28 d 抗压强度≥ 70 MPa，抗渗等级≥ P12，抗冻等级≥ DF300。所有原材料须经出厂检验、进场复检和见证取样，各项指标满足设计及规范要求。

1.3　机械设备性能检验与调试

高品质的机械设备是确保伸缩缝施工高效率、高质量完成，以及安全文明施工不可或缺的硬件基础。焊机采用 POWERTIG 500 AC/DC 型，额定焊接电流 500 A，负载持续率 100%，并检测焊枪及氩气管路密封性。等离子切割机切割速度 500 ～ 800 mm/min，切缝宽度≤ 1 mm，垂直度偏差≤ 0.5 mm/m。起重设备的额定起重量、幅度必须满足吊装要求，关键安全保护装置必须检查确认 [2]。混凝土搅拌车应采用 JS3000 双卧轴强制式，出料率≥ 180 m^3/h，计量精度应控制在 ±1% 以内。振动棒频率 2 400 ～ 3 000 次 /min，振幅 0.5 ～ 0.7 mm，并配漏电保护开关。所有设备必须经过专业人员调试标定，确保满足施工工艺需求。

1.4　施工方案优化与可行性论证

科学合理的施工方案是伸缩缝建设的关键。利用 BIM 等数字化技术进行虚拟施工仿真，模拟不同工况下的施工过程及结构性能。采用层次分析法、模糊综合评价等系统化决策方法，在焊接规范、防水等级、安全防护、成本效益等多目标中求解最优化方案。针对特殊伸缩缝，须编制专项施工方案，邀请专家论证评审关键工艺、技术标准及应急预案，形成论证报告。积极应用信息化手段实现各环节的数字化管控，持续改进优化方案，最大限度提升伸缩缝建设品质，延长使用寿命。

2 公路交通工程伸缩缝安装施工技术要点

伸缩缝安装施工是整个施工的核心。控制预留预埋精度，选择合理的支承固定方式、钢筋绑扎布置和混凝土配合比至关重要。

2.1 伸缩缝预留与预埋精度控制

伸缩缝预留与预埋施工质量的优劣直接关系到后续安装精度、传力性能及使用寿命。（1）预留槽道宽度和深度偏差须控制在 ±2 mm 以内，并用精度 0.5 mm/m 的钢直尺复测。（2）预埋钢筋骨架必须采用专用定位架固定，保护层厚度偏差不超过 ±1 mm，钢筋净间距偏差不超过 ±3 mm。（3）预埋件埋设深度偏差不超过 ±2 mm，垂直度偏差不超过 1‰，并用数字水准仪验平。浇筑预留段混凝土时，振捣棒插入下层 5 ～ 10 cm，每处振捣 10 ～ 15 s，严禁漏振、欠振或过振，确保混凝土密实饱满。

2.2 伸缩缝支承安装与固定方式

伸缩缝支承安装的精准性和固定的可靠性，是确保传力顺畅、位移协调及受力均匀的关键。支座就位前，用 1 mm 游标卡尺检查预埋锚栓数量、直径和外露长度，偏差控制在 ±3 mm 内。支座吊装采用专用工具，调平精度≥ 0.5 mm/m，标高偏差≤ ±2 mm。支座与锚栓采用等强连接，连接面严密贴合，初拧扭矩控制在设计值的 50% ～ 70%，终拧扭矩为设计值的 100% ～ 105%，并施加二次复拧[3]。整体式伸缩装置的锚固长度≥梳齿板高度的 2 倍，锚栓力矩满足设计要求。组合式梳齿板的错牙量≤ 1 mm，采用高强螺栓可靠连接。

2.3 伸缩缝钢筋绑扎布置与保护

科学合理的伸缩缝钢筋布置和有效防护措施，是保证结构耐久性和安全性的基本前提。钢筋绑扎前，先喷砂除锈至Sa2.5级，4小时内完成绑扎，否则需重新除锈。钢筋骨架应在专用胎架上加工，主筋弯折内半径≥ 6 d，箍筋弯钩角度135° ～180° 。受力钢筋搭接等级≥ 2 级，搭接长度≥ 35 d，搭接区错开布置，相邻接头面积百分率≤ 25%。保护层厚度正偏差≤ 5 mm，负偏差不允许。钢丝绑扎点数量≥主筋总数的 20%，且绑丝头须均匀分布在保护层内侧。浇筑混凝土前，外露钢筋表面须刷防锈涂料，涂层厚度控制在 80 ～ 120 μm。

2.4 伸缩缝混凝土配合比优化与浇筑工艺

配合比设计应采用正交试验法优选，掺加 20% ～ 30% 粉煤灰，10% ～ 15% 矿粉，掺量比例经试验确定最佳值。减水剂与引气剂复配，可降低水胶比 15% ～ 20%，确保混凝土无泌水、析离、扰动钢筋等问题。混凝土坍落度控制在 160 ～ 180 mm，含气量 4% ～ 6%，28 d 抗压强度≥ C50，抗渗等级≥ P8，抗冻等级≥ F200。混凝土须整体连续浇筑，分层厚度 300 ～ 500 mm，采用插入式高频振捣器，每处振捣 5 ～ 15 s，插入下层 50 ～ 100 mm，快插慢拔，均匀布点，严格控制振捣质量。终凝前覆膜洒水养护，发现裂缝立即修补，延长养护时间，直至混凝土达到设计强度等级。

3 公路交通工程伸缩缝焊接施工技术要点

焊接施工是确保伸缩缝连接可靠和耐久的关键。优选坡口尺寸、焊接参数，控制残余应力变形，检验焊缝质量，是重点所在。

3.1 焊接坡口尺寸选择与制备工艺

伸缩缝钢结构焊接接头坡口几何参数的优选和精细化制备，是保证焊缝力学性能、疲劳寿命的关键所在。对于 t ≤ 12 mm 的钢板，采用单 V 型坡口，两侧夹角 50° ～70° ，钝边高 1 ～ 3 mm，坡口间隙 2 ～ 3 mm。当 t ＞ 12 mm 时，应选用 X 型坡口，两侧夹角 45° ～60° ，钝边高 1 ～ 2 mm，根部间隙 0 ～ 1 mm。坡口加工须采用数控等离子切割或精密机加工工艺，表面粗糙度 Ra ≤ 12.5 μm，与钢板轴线垂直度偏差≤ 0.5 mm/m。同时，切面须无裂纹、夹渣等缺陷，并除去焊渣、锈蚀等杂质。组对时须用专用胎具，检查坡口角度偏差≤ ±2° ，间隙偏差≤ ±0.5 mm，错边量≤ 1 mm。

3.2 焊接工艺参数优选与过程控制

焊接方法需要根据板厚、焊接位置、环境条件等因素综合确定，t ≤ 6 mm 时采用单面焊双面成型，6 ＜ t ≤ 20 mm 时采用双面多层焊，t ＞ 20 mm 时采用埋弧自动焊。焊接材料应选用与母材性能匹配的低氢型焊条，且须经 350 ℃、2 h 以上烘干。焊接电流为额定值的 90% ～ 110%，电弧电压 28 ～ 32 V，焊接速度如 V 型坡口为 200 ～ 260 mm/min。为避免冷裂纹，焊件预热温度须达 100 ～ 200 ℃，层间温度应严格控制在 250 ℃以下[4]。多层焊时采用对称布焊，纵横焊道交错距离≥ 20 mm。焊后 48 h 内须进行外观检查和无损探伤，确保内部无未熔合、未焊透、夹渣、气孔等缺陷。

3.3 焊接残余应力与变形的测量与控制

焊前须测量钢结构原始形状，并在焊接过程中实时监测，当变形＞ 2 mm 或应变＞ 500 με 时，须及时采取校正措施。残余应力可用 X 射线衍射、中子衍射、盲孔法等测量，并控制在母材屈服强度的 50% 以内。其次，须合理选择焊材和工艺参数，如采用低氢高韧性焊条，控制焊接热输入为 12 ～ 18 kJ/cm，焊道间距 25 ～ 30 mm，以降低热影响区大小和残余应力水平。焊后可通过局部振动、预应力施加等方式减小应力，

如采用UIT、TIG打底等工艺，可使应力降低50%以上。对厚板结构，也可采用焊后热处理消除应力，退火温度600～650 ℃，保温2～3 h，随炉冷却至200 ℃以下。

3.4 焊缝外观检查与无损检测评定

外观检查须在焊缝冷却至常温后进行，重点检查表面是否存在裂纹、焊瘤、咬边、弧坑等缺陷，焊缝余高控制在1～3 mm。同时，用焊缝规和焊缝量规测量焊脚尺寸和角度，须满足设计和规范要求。无损检测方法须根据结构特点、缺陷种类、检测目的等因素综合选用，常用的有RT射线探伤、UT超声波探伤、MT磁粉探伤、PT渗透探伤等。一般情况下，对承受动力荷载的主要受力焊缝，RT探伤比例≥30%，UT探伤全长扫查；其他焊缝可用MT或PT抽查，抽查率≥10%。探伤结果须符合相关标准的规定，关键焊缝质量等级不低于二级。

4 公路交通工程伸缩缝后期处理技术要点

后期处理是延长伸缩缝寿命的重要保障。要重视密封材料选用、附属构件安装、日常养护维修和病害诊断处置等方面的工作。

4.1 伸缩缝密封材料选用与防水处理

伸缩缝密封防水材料选用与施工质量影响其防渗性能与使用寿命。材料应选用高弹性、耐疲劳、抗老化的改性沥青或聚氨酯类，延展率≥400%，回弹率≥90%，低温柔性≤-40 ℃，与基层粘结强度≥0.6 MPa。密封胶厚20～50 mm,缝宽+100 mm。施工时先清理缝内杂物，喷涂底胶，固化后分两次灌注密封胶，间隔2 h以上，压实抹平，表面撒石英砂防滑。可在两侧各500 mm范围内铺设改性沥青防水卷材，搭接≥150 mm。同时优化排水设计，缝端设排水管，疏导雨水，杜绝渗漏。

4.2 伸缩缝附属构件安装工艺与质量检验

钢结构安装就位时，用经纬仪、水准仪控制标高和平面位置，高程偏差≤±2 mm，平面位置偏差≤±5 mm。橡胶件安装时要做好台座，确保基面平整无棱角，采用专用胶黏结，胶厚1～2 mm，预留伸缩量，采用专用工具校直，搭接≥50 mm。安装后检查钢结构焊缝质量、螺栓防松措施等，焊缝质量等级≥二级，外观无缺陷[5]。检查橡胶件外观、硬度、抗拉强度等，硬度60～75 SHA，抗拉强度≥16 MPa，断裂伸长率≥450%，无砂眼、裂纹、脱层等缺陷。须做荷载试验，设计荷载下变形≤5 mm，无开裂、脱空等问题。

4.3 伸缩缝日常养护与定期维修措施

伸缩缝日常养护要定期清理缝内杂物、泥沙、积水等，每月≥1次。钢结构件及时除锈刷漆，油漆选氯磺化聚乙烯或环氧富锌底漆，防腐性能好、附着力强。橡胶件需要定期清洗检查，若存在老化、龟裂、脱空等问题要及时修补或更换。汛期前需要检查防水密封材料，破损、脱落部分要及时修补，严防渗漏。定期维修依据技术状况评定制定年度和中长期计划。4类伸缩缝尽快修复，3类列入年度计划。维修选用匹配原结构的材料，严格按规范设计施工。大中修经专业机构检测合格后交付使用。做好维修资料整理归档。

4.4 伸缩缝典型病害诊断与处置方案

伸缩缝常见病害有裂缝、错位、翘曲、脱空、渗漏等，须从材料、结构、施工、环境等方面分析原因。若因伸缩量异常引起裂缝，要评估温度、车载等因素，必要时调整缝跨径。若因钢结构锈蚀引起损伤，要除锈刷漆或电化学保护，控制病害发展。若因橡胶老化脱层，要更换密封胶条，重做粘结层。若因排水不畅引起渗漏，要疏通排水系统，封堵裂缝，杜绝雨水下渗。应用物联网、大数据技术，建立智能诊断预警系统，实现精细化养护。总结病害诊治经验，优化设计、施工、管养方案，最大限度地提高伸缩缝耐久性，延长其使用寿命，保证路网安全畅通。

5 结束语

公路交通工程建设中的伸缩缝施工是一项复杂的系统工程，涉及施工准备、安装施工、焊接施工、后期处理等多个环节的关键技术，需要施工管理人员和技术人员高度重视，深入研究和系统掌握。只有切实做好施工的各个环节，精心组织、科学管理、严格控制，不断积累经验、总结教训，持续改进工艺、创新技术，才能保质保量地完成伸缩缝施工任务，从而确保公路桥梁结构的整体质量，延长使用寿命，最大限度地发挥其社会经济效益，更好地服务于国计民生。

参考文献：

[1] 谈珂威.公路桥梁的伸缩缝施工技术[J].价值工程,2024,43(31):91-93.
[2] 王指示.公路桥梁伸缩缝施工的质量控制分析[J].产品可靠性报告,2024(10):135-137.
[3] 周美伶.公路交通工程建设的伸缩缝施工及其管理[J].大众标准化,2023(15):31-33.
[4] 王淑峰.浅谈公路交通工程建设的伸缩缝施工及其管理[J].科技风,2022(21):56-58.
[5] 赵微.公路工程中关键部位施工技术[J].居舍,2022(01):38-40.

230 kV 输电线路人工挖孔桩基础施工探讨

刘超宝

（中国水利水电第七工程局有限公司，四川 成都 610000）

摘　要　随着电力系统的不断发展与扩展，高压输电线路作为电力传输的重要组成部分，其建设质量与稳定性愈加受到重视。230 kV 输电线路在实现远距离、高效电力传输中发挥着重要作用，尤其在地形复杂、土质不均的地区，输电线路的基础施工更是影响整个项目工程质量的关键因素之一。人工挖孔桩基础作为一种广泛应用于输电线路建设中的基础施工方式，因其适应性强、施工便捷而被广泛采用。本文结合工程实际，研究人工挖孔桩基础施工的具体技术措施，以期为类似项目的实施提供理论依据与实践指导。

关键词　电力系统；230 kV 输电线路；塔基；人工挖孔桩；隐蔽工程

中图分类号：TU753.3　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.016

0　引言

随着电力需求的不断增长，230 kV 输电线路作为电力传输的重要通道，其建设质量直接关系到电力系统的稳定运行。人工挖孔桩基础作为一种常用的输电线路基础型式，具有施工简便、成本低廉、适应性强等优点，在输电线路工程中得到了广泛应用。然而，由于人工挖孔桩基础施工属于隐蔽工程，其施工质量和安全控制难度较大。因此，深入研究 230 kV 输电线路人工挖孔桩基础施工技术，对于提高输电线路建设质量、保障电力系统安全稳定运行具有重要意义。

1　工程概况

本工程为 230 kV 输电线路人工挖孔桩基础施工，全长 56.5 km，途经多个地形复杂的区域，涉及多个塔基施工。全线共有 220 基铁塔，其中包括 14 基钢管塔、104 基角钢塔和 2 基钢构架塔，线路采用同塔双回四分裂架设方式。导线型号为 2×795MCM ACSR/AS，地线则为 OPGW 光缆。施工区域地形属于低中山地貌，塔基的相对高差为 30 ～ 130 m，地势较为复杂，涉及的环境为以椰子树和杂树为主的植被覆盖区域，局部植被较为茂密，施工难度较大。在此环境下，人工挖孔桩基础施工不仅需要严格控制施工质量，还必须应对岩土条件复杂、塔基高差较大及地表植被影响等多重挑战。由于塔基深度较大且土质不均，施工过程中需采用人工挖孔法进行桩基的开挖与浇筑，确保桩基的稳固性与持久性。此项施工对基础的强度要求较高，尤其是在不均匀的土壤层与复杂地形条件下，桩基的承载能力和抗倾覆能力必须得到充分保障。

2　人工挖孔桩基础施工技术

2.1　测量分坑

2.1.1　直线塔基础分坑

直线塔基础分坑需依据设计图纸及现场定位桩，采用全站仪或经纬仪进行精确测量。首先在塔位中心桩上架设仪器，依据线路方向定出顺线路方向轴线，垂直该轴线确定横线路方向轴线。以塔位中心为基准，按基础根开尺寸，沿两条轴线方向分别量距确定四个基础坑的中心位置，并做好标记。测量过程中需多次复核，保证分坑误差在规范允许范围内，即基础根开误差不超过 ±3‰，对角线误差不超过 ±5‰，同时考虑地形坡度对基础埋深的影响，确保基础顶面处于同一设计高程，为后续施工奠定基础。

2.1.2　转角塔基础分坑

转角塔基础分坑相比直线塔更为复杂，需精确确定转角方向及角度。在转角塔中心桩上架设仪器，根据设计转角角度，通过水平角测量确定转角塔的内角平分线方向和外角平分线方向，此为关键轴线。依据基础根开及设计尺寸，沿这两条关键轴线，结合塔型结构，分别量距确定四个基础坑的中心位置，同时要考虑横担扭转及基础预偏等因素。对于不等长腿基础，需根据地形坡度及高差，严格计算各腿基础坑的开挖深度和位置，确保基础受力均匀，测量时需反复校核，避免因分坑误差导致基础受力不均，影响塔基稳定性。

2.2　基坑开挖

2.2.1　开挖方法

当桩净距小于 2 倍桩径且小于 2.5 m时，应采取间隔开挖的施工方式，以避免相邻桩基开挖时对土体

造成过大扰动，影响周围桩基的稳定性。在挖土过程中，必须遵循由上至下、逐层开挖的原则，操作时首先使用镐和锹进行人工开挖。遇到坚硬土层时，应采用锤和钎进行破碎，以确保开挖顺利进行。

开挖作业的顺序应严格控制，通常先挖掘基坑的中间部分，然后再逐步挖掘周边区域，确保土体不发生不均匀沉降。在控制基坑的截面尺寸时，应根据设计桩直径加2倍护壁厚度进行，并且严格控制尺寸误差，通常误差不应超过 3 cm。这一控制措施有助于保证基坑尺寸的精度，从而确保桩基施工的顺利进行。

每节的开挖高度应根据土质条件、操作环境及施工机械的配备情况进行调整，一般情况下，以0.5～1.0 m为宜。这一高度设置有助于确保开挖过程中的安全性和稳定性，同时便于施工人员进行合理的操作。

2.2.2　护壁施工

护壁施工通常是在每次掘进一定深度（一般为1 m）后进行，以防止开挖过程中基坑周围土体的坍塌或变形，确保施工区域的稳定性。常用的护壁形式为现浇混凝土护壁，混凝土护壁的厚度通常为 10 ～ 20 cm，且其强度等级不低于 C15，确保其具有足够的强度和稳定性应对土体的外力作用 [1]。

在护壁施工中，模板的安装至关重要。模板的选择应根据基坑的实际尺寸和土质条件进行合理配置，通常采用钢模或木模，模板的表面需保持平整光滑，确保混凝土的质量。混凝土浇筑完成后，模板应在 24 小时内拆除，以避免长时间的模板负担影响基坑的结构安全。在拆模过程中，需要严格控制护壁的表面质量，避免出现裂缝或不均匀的情况，这可能会影响后续桩基的承载能力。

护壁施工的上下搭接长度必须不小于 50 mm，以确保连续性和密闭性，避免地下水或其他外力的渗透对桩基造成不良影响。对于局部地质条件较差的区域，例如软土层或水文环境复杂的地方，施工时需要灵活调整护壁的节段高度，一般可减少至 300 ～ 500 mm，甚至可以根据具体情况设计专门的支护形式，如喷锚支护或钢管支撑等，以确保基坑的稳定性和施工安全。

2.3　扎筋支模

2.3.1　钢筋加工

钢筋的选择与验收是钢筋加工的基础工作，应根据设计图纸明确所需钢筋的规格、数量和材料要求，确保钢筋符合国家标准和工程设计要求。钢筋进场后，需要对其进行检验，检查其外观、规格、尺寸和强度等，要特别注意有无锈蚀、变形或其他质量问题。对于符合质量要求的钢筋，应按型号和规格分堆存放，避免交叉污染和损坏。

在钢筋加工过程中，首先应进行钢筋的切割。钢筋的切割长度要严格按照设计要求，使用专业切割机进行，确保切口平整，无毛刺。切割后的钢筋要按尺寸分类堆放，并标明编号，以方便后续加工。其次，钢筋的弯曲是另一关键工序。钢筋在弯曲时应使用弯曲机或手动弯曲工具，避免过度弯曲或弯曲角度不准确，影响结构强度。每根钢筋的弯曲半径应符合设计规范要求，且弯曲后的钢筋应检查弯曲角度是否与图纸一致。在进行钢筋绑扎时，必须按照施工图纸上的钢筋搭接要求进行处理，确保钢筋连接牢固，避免因绑扎不牢或搭接不符合要求而影响基础的抗拉、抗压能力。

在扎筋支模过程中，钢筋的布局和定位必须严格按照设计要求进行。钢筋应均匀分布，确保每个位置的钢筋都能够提供足够的支撑力和结构承载力。特别是对于转角处、接头处以及负荷较大的区域，钢筋的搭接和布置要更加严密。支模时，需要确保钢筋的保护层厚度符合规范要求，防止钢筋暴露在外而导致锈蚀或质量隐患。钢筋的绑扎应使用优质铁丝，绑扎点间距要符合设计规范，保证钢筋的牢固性。绑扎时要避免钢筋错位或松动，保证钢筋的位置准确，且扎筋过程应避免钢筋变形，确保其几何形状符合要求 [2]。

2.3.2　立模

基坑的精确掏挖是立模施工顺利进行的前提，尤其是在桩身及立柱的外形上，要严格遵循设计要求，确保其形状精确无误。本标段的桩身和立柱出土部分均为圆形，因此，在基坑掏挖过程中，必须保持桩身的垂直度和平整度，确保后续施工的准确性和稳定性。基坑成型后，模板的埋设深度是决定模板稳定性的重要因素之一。为了确保模板能够稳固地嵌入坚实的原状土中，并避免混凝土浇筑时的漏浆现象，模板埋设深度必须达到至少 300 mm。在埋设过程中要注意模板的底部与基坑底部的接触面均匀紧密，避免出现空隙或不平整，影响立模的整体稳固性。针对立柱外露较大的情况，支模作业时可以使用钢管架支撑。在施工时，钢管架应确保高度适中、结构紧凑且牢固，能够承受模板本身的重量、混凝土的侧向压力及人工操作平台的负荷，以防止在混凝土浇筑过程中模板变形或移位。立柱模板的尺寸确定后，需进行垂直度检查。常用的检查方法是通过悬挂垂球来测量模板口的垂直度。具体操作为：在模板口的中心点向外延伸一定的距离，并用垂球吊起，通过比对垂球下端与模板底部的距离，

检测模板是否垂直，从而确保模板的安装精度。在模板安装过程中，除了保证尺寸和高度的精确外，还需要对模板进行中间补强。常见的补强方式包括使用铁丝、圆木或钢管支撑，通过这些支撑措施来增强模板的稳定性和承载能力。在钢模板的连接方面，连接扣子应采用正反相扣的方式进行安装，以确保连接的牢固性和稳定性，避免在施工过程中模板发生胀裂或松动现象。模板支撑系统的布置必须对称且稳固，尤其是在模板较高的部分，应加设防止倾覆的措施，如加强支撑点的设置或者增加侧向支撑，从而确保模板的稳定性和施工的安全性[3]。

2.4　基础浇制

浇制前，必须对基础的顶面、底面、模板等进行详细复核，确保其符合设计要求。具体来说，需检查基础顶面和底面对角线的长度差、模板顶面的高差以及地螺的规格和长度等关键数据。所有检查项目必须合格，方可进行混凝土浇制，确保施工的精度和质量。对于有地下水的基础，施工时需要特别注意坑内的积水和边壁裂纹的变化。若发现渗水现象，必须及时清除积水，避免混凝土带水浇制，这不仅影响混凝土的凝结和强度，还可能导致基础的稳定性问题。

在混凝土的配比和搅拌过程中，必须严格遵守设计配合比的要求，且现场搅拌时需按照规定的砂、石、水泥和水的比例进行配置。为了保证配料的准确性，每个班组都需使用秤具对实际使用量进行检查，且每天的检查次数不得少于两次，以确保混凝土的质量符合要求。特别是在使用现场搅拌的情况下，施工人员应根据《工程建设标准强制性条文》的规定执行，及时做好施工记录，确保材料和施工过程的可追溯性。

在基础顶面高度的控制方面，浇制前应在模板上做标记，以确保基础顶面达到设计要求的高程，严禁采用二次抹面方式来调整。混凝土浇制时，必须采用机械捣固工艺，通过振动设备进行充分捣固，确保混凝土的密实度和均匀性。在捣固过程中，不得掺入块石，且应分层浇制，通常每层浇筑厚度为 200 ～ 300 mm。每次捣固时，应保证混凝土表面呈现出足够的水泥浆，且不再出现下沉现象。捣固力度过大可能导致模板变形和混凝土离析，捣固不足则会导致混凝土不均匀，影响其强度和稳定性。

对于基础中的难以捣固区域，如层间结合处、主柱四角边缘等拐角处，应使用捣固钎加强捣固，确保这些部位的混凝土密实，避免出现蜂窝状或麻面现象。在混凝土浇筑和振捣过程中，捣固人员必须佩戴安全帽，并设置专人进行监护，密切观察模板是否发生变形或下沉，发现异常情况应立即处理，避免基础露筋或其他不良现象的发生。

2.5　拆模回填

在拆模过程中，首先要确保混凝土的养护已达到必要的强度标准。在拆模前，必须通知 NGCP 工程师代表和项目部质检员进行现场检查鉴定，确认混凝土强度是否满足拆模的条件。通常，拆模的天数应满足设计强度要求，在设计无具体要求时，一般应在混凝土强度达到设计强度的 25% 以上时进行拆模。如果拆模后发现基础表面有小面积的蜂窝或麻面，且深度不超过 20 mm，应对缺陷处进行修补，通过打毛、清洗并用水泥砂浆抹平的方式修复[4]。

基础浇筑完毕并验收合格后，应尽快进行回填。回填前，应在混凝土表面铺设一层土壤，厚度不小于 300 mm，以避免混凝土表面直接接触硬物，防止因回填不当而造成基础损坏。回填土应保证无树枝等杂物，以免影响回填质量。回填时，应在坑口地面上先筑防沉层，防沉层的宽度应不小于坑口边宽，且高度不小于 0.2 m。对于山区地势起伏较大的情况，如果基础余土较多且难以外运，可以将余土在基础边缘进行堆砌并夯实，或者在基面内均匀布置[5]。

3　结束语

在 230 kV 输电线路人工挖孔桩基础施工过程中，严格遵循设计要求与施工规范，确保桩位精准、挖孔规范、护壁稳固、钢筋笼安装到位以及混凝土浇筑密实，是保障施工质量的基础。同时，高度重视施工安全管理，加强孔内通风、孔口防护、作业人员防护及用电安全等措施，是确保施工安全的关键。未来，随着输电线路建设要求的不断提高，人工挖孔桩基础施工将面临更多挑战与机遇，需持续深入研究与创新，以进一步提升施工效率与质量，为电力系统的安全稳定运行提供坚实的保障。

参考文献：

[1]　隆腾.人工挖孔桩施工技术及质量控制[J].交通科技与管理,2024,05(14):62-64.
[2]　聂晶.人工挖孔桩施工注意事项分析[J].安徽建筑,2024,31(01):149-150.
[3]　林凯珍,龙志雄.大直径人工挖孔桩加固设计及施工技术分析[J].江西建材,2023(07):213-215.
[4]　肖宗文.建筑工程中的人工挖孔桩施工技术分析[J].中国住宅设施,2023(06):151-153.
[5]　于天文,王新.输电线路软土地基基础设计分析[J].有色金属设计,2022,49(04):86-89.

230 kV 输电线路山区全方位高低腿基础施工测控

舒奇文
（中国水利水电第七工程局有限公司，四川 成都 610000）

摘　要　为了提升 230 kV 输电线路山区全方位高低腿基础施工精度，本研究采用 GPS 与全站仪联合布网、BIM 与 GIS 集成地形模拟及激光扫描辅助定位等技术，构建施工测控技术体系，以期为后续山区输电线路基础施工提供技术参考，确保施工质量与安全。研究结果表明，该施工测控技术体系有效解决了地形起伏导致的定位困难及高差腿施工精度控制问题，实现了基坑开挖、钢筋绑扎、混凝土浇筑等关键环节的精准测控。

关键词　230 kV 输电线路；山区全方位高低腿；基础施工；测控
中图分类号：TU753　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.017

0　引言

在电力传输领域，230 kV 输电线路承担着远距离、大容量电能输送的重要任务。山区地形复杂，地势起伏大、地质条件多变，给输电线路基础施工带来诸多挑战。传统基础施工方式难以适应山区特殊地形，而全方位高低腿基础凭借其良好的适应性和稳定性，成为山区输电线路基础施工的优选方案。然而，该基础施工对测控精度要求极高，施工过程中的微小偏差都可能影响线路的安全运行。因此，开展 230 kV 输电线路山区全方位高低腿基础施工测控研究，精准把控施工各环节，成为保障山区输电线路建设质量的关键。

1　山区全方位高低腿基础技术特点

1.1　结构设计原理

山区全方位高低腿基础的设计核心是充分适应山地复杂的地形条件，通过非对称腿高设计和多方位支撑体系确保基础的稳定性和安全性。非对称腿高设计根据山坡的自然坡度进行调整，较高的一侧腿用于平衡坡度变化带来的不稳定因素，较低的一侧腿则提供稳固支撑。此设计有效地分散了山地坡度对基础的冲击力，降低了因地势变化而产生的应力集中。多方位支撑体系通过在多个方向设置支撑构件，使基础在垂直、水平及倾斜方向上都能维持力学平衡[1]。

1.2　施工难点分析

山区地形的起伏给基础定位带来很大挑战。传统的平地基础施工方法难以适应山地环境下的多变坡度和复杂地质，基础定位时容易因为地势高低差异出现偏差，直接影响基础的稳定性和施工质量。同时，由于高低腿基础要求高精度施工，在施工过程中对高差腿的测控需求更为严格。稍有偏差就可能导致结构变形或不均匀受力，对施工团队的技术能力和测控方法提出更高的要求。此外，山区施工还面临着材料运输与设备进场受限的问题。崎岖的山路以及狭窄的施工场地限制了大型设备和建筑材料的运输效率，需要额外投入人力和时间来解决运输困难。

2　施工测控技术体系

2.1　测量控制网络建立

为满足 230 kV 输电线路山区高低腿基础施工的高精度要求，需建立精确的测量控制网络。GPS 和全站仪联合布网是关键技术，GPS 提供广域高精度定位，全站仪则在局部施工区域提供精确坐标控制和实时观测。首先，通过设置多个高精度 GPS 接收站，形成覆盖全区域的静态基准点，确保每个点误差小于 2 cm。其次，以这些基准点为参考，使用全站仪进行细化布网，向施工现场扩展三维坐标基准。全站仪精度达 1 秒角，满足施工对平面和高程的严格要求。在传递三维坐标基准时，采用严密的平差计算方法，核心是最小二乘平差原理，确保在满足坐标观测数据精度要求下，通过数学模型和约束条件计算出最优三维坐标解。平差的目标函数如下：

$$V=\min\sum_{i=1}^{n}w_i\left(l_i-x_i\right)^2$$

其中，w_i 为权重，反映观测值的可靠性；l_i 为观测

值；x_i为平差后估算值。通过对多个观测点的联合平差，消除了局部坐标之间的误差传递，提高了整体测控网络的可靠性和精度。

2.2　地形建模与数据分析

230 kV输电线路山区全方位高低腿基础施工面临着复杂地形和显著高差的挑战，传统的地形测绘与数据分析方式难以提供精确的参考依据。因此，采用BIM建筑信息建模与GIS地理信息系统相结合的地形模拟方法，以数字化方式实现地形数据的可视化、分析与优化。BIM与GIS集成的重点是将BIM细致入微的三维结构建模能力与GIS大范围地理数据处理能力相结合，引入三维地形模型，全面呈现施工现场的地形起伏、坡度变化和高程差异[2]。

在具体实施中，在地形模拟的初始阶段，利用遥感影像、实地测绘和无人机数据，建立高精度数字高程模型（DEM），分辨率为1 m，精度控制在5 cm内。在GIS中生成坡度分布图，将区域分为四种坡度类型，为高低腿设计提供依据。结合BIM建模，生成三维模型，直观展示不同腿高分布，并进行标高校验，确保数据与地形对接。数据分析包括提取高程差、坡长和地面粗糙度等参数，形成施工前期评估报告。例如：施工区平均坡度12.5°，最大坡度28°，基坑开挖处平均高程差2.3 m，最大差值7.6 m。坡长数据显示，施工区内37%的坡段长度超过50 m，提示需设计额外支撑措施。BIM与GIS集成地形模拟实现了地形的全面数字化展现，为施工方案优化和风险评估提供支撑[3]。

2.3　施工放样优化

在230 kV输电线路山区全方位高低腿基础施工中，采用多级放样误差控制策略和激光扫描辅助精准定位技术，提高放样精确性和效率。多级放样误差控制策略分阶段校核和调整精度，逐步减小误差。第一阶段粗放样时，全站仪初步布点，允许最大偏差±5 mm。第二阶段用全站仪高精度模式和逐点校核方法，将误差控制在±2 mm。精放样阶段，激光扫描技术对关键节点进行精细校正，误差控制在±1 mm。激光扫描辅助精准定位在施工中起核心作用，通过三维扫描生成点云模型，与设计模型实时对比，计算坐标误差，即时反馈调整。例如：在某山区基坑放样中，激光扫描检测到1.4 mm偏差，进行二次放样修正，最终偏差降至0.6 mm，确保模板安装和钢筋绑扎符合设计要求。激光扫描技术还支持连续动态测量。通过扫描仪实时采集数据并自动生成误差报告，施工团队可以随时监控整个放样区域的精度状态。激光扫描定位的响应时间为2秒，可以在基坑开挖和模板支护过程中随时提供更新的精度校正数据，缩短施工调试时间[4]。

3　关键施工环节测控要点

3.1　基坑开挖测控

山区复杂地形条件下的基坑开挖环节，需要严密的测控措施以保证基坑的稳定性和施工精度。首先，坡度监测与支护变形预警是基坑开挖中的重要工作内容。安装坡度倾角传感器和位移监测装置，实时监测基坑周围的坡体稳定性，如采用精度为0.05°的倾角传感器，每隔10分钟采集一次数据。当坡度变化超过0.1°时，系统立即发出预警，提示现场人员进行支护加强或停工检查。此外，变形监测点布设在基坑边缘每隔10 m的关键部位，使用全站仪和激光测距仪定期测量位移数据，将基坑边坡的水平位移控制在2 mm以内、垂直沉降控制在1 mm以内。其次，在基底标高动态调整方面，针对山区基坑地势起伏大的特点，采用高精度的三维坐标基准传递技术。基于GPS和全站仪的联合布网，建立局部高程控制网络，将基底标高误差控制在±2 mm。施工过程中实时采集基底各点的高程数据，生成动态高程等高线图。如果监测到某处标高偏离设计值超过1 mm，施工人员可立即对该处的开挖深度进行调整[5]。

3.2　钢筋绑扎与模板安装

在钢筋绑扎和模板安装阶段，施工测控的关键是精确的空间坐标定位复核和模板垂直度的严格控制。空间坐标定位复核通过全站仪的高精度测量功能进行，测量精度达到1秒角，水平距离测量误差小于±1 mm。在基底表面布设控制点网，每个控制点的间距为3 m，形成密集的坐标点阵列。在每根钢筋绑扎完毕后，使用全站仪逐一测量钢筋顶点的空间坐标，与设计模型中的坐标进行比对。对于偏差大于1 mm的钢筋，立即进行位置调整，确保绑扎后的钢筋框架完全符合设计规范。此外，模板安装的垂直度控制也是重点。引入激光扫描技术对模板的整体垂直度和安装间距进行全面检测。激光扫描仪的扫描分辨率为每平方毫米500点，扫描完成后生成高精度点云模型。通过点云模型与设计模型的对比，标出所有偏差大于0.5 mm的模板位置，并进行及时调整。在某山区施工点，使用该方法将模板的垂直度偏差从原来的2 mm降低到不足0.5 mm。

3.3　混凝土浇筑监控

在230 kV输电线路山区全方位高低腿基础施工中，混凝土浇筑监控是确保最终结构质量的关键环节，尤

其需要关注温度场的实时监测与裂缝防控，以及分层浇筑厚度的精确控制。首先，在温度场实时监测方面，通过在浇筑区域布设高精度温度传感器网络，可以持续采集混凝土内部和表面的温度数据。传感器的精度达到 ±0.1 ℃，每分钟记录一次数据，并通过无线传输到控制中心。施工团队实时监控这些数据，分析混凝土硬化过程中温度梯度和变化趋势。当局部区域的温差超过 2 ℃时，系统自动触发预警，指导施工人员采取降温或保温措施，防止过大的温差引发内部应力，有效降低裂缝的产生概率。其次，分层浇筑厚度的控制进一步确保了混凝土浇筑的均匀性和耐久性。按照施工规范，每层混凝土的厚度严格控制在 30 cm 以内。采用激光测距仪进行实时厚度测量，每一测量点的精度达到 ±1 mm。在浇筑过程中，若测量到某区域的厚度接近设计上限，浇筑设备自动减速，并在达到标准后停止。之后再进行下一层浇筑，确保各层间的厚度一致性。

4 230 kV 输电线路山区全方位高低腿基础施工质量控制及验收要点

4.1 过程质量控制

在 230 kV 输电线路山区全方位高低腿基础施工过程中，质量控制的要点是精确测量和数据校验。三维坐标实时校验机制是关键措施，通过高精度的全站仪和 GPS 联合布网，形成覆盖整个施工区域的三维坐标网络，具体步骤和要求如表 1 所示。

表 1 三维坐标实时校验机制

步骤	具体实施	参数要求
数据采集	通过全站仪逐点测量施工完成点位的三维坐标	水平精度 ±2 mm，垂直精度 ±1 mm
坐标比对	将采集的坐标与设计模型中对应点进行对比分析	偏差允许范围 ±2 mm
偏差校正	超出范围时，自动生成校正建议并提示现场人员调整	按校正方案调整到 ±1 mm 范围内
最终验证	校正后重新测量并复核，确保所有点位达到设计精度	精度完全符合设计要求

此外，几何尺寸数字化抽检方案用于细化质量监控。在施工期间，定期对基底宽度、模板间距和钢筋保护层厚度等几何参数进行抽样检查。数据通过激光测距仪等高精度设备采集，并存储于统一的数字化质量控制平台。抽检比例设定为 50%，覆盖施工区域的主要结构部位，并对超出允许偏差 ±3 mm 的部位提出具体整改要求。随后，进行二次检测确保整改合格，将各项施工参数的误差控制在规范范围内。

4.2 成果验收标准

在基础轴线偏差的验收流程中，首先明确每个验收点的具体位置，并使用全站仪对轴线坐标进行精准测量。验收过程要求每隔 10 m 设置检测点，依次读取实际坐标，并与设计值进行比对。轴线偏差不得超过 ±2 mm，一旦发现超出标准的偏差值，需立即记录问题点并对相应部分进行修正处理。修正后，再次进行检测直到偏差符合规范，确保最终轴线对位的准确性。

在高低腿基础的高度验收环节，测量工作对每根基础腿单独进行，将各腿的实际高度与设计参数逐一比较。验收规范明确规定，高腿与低腿之间的高度偏差应始终控制在 ±3 mm 以内。在测量过程中，记录每根腿的高度数据并与设计模型中标注的参考值对照，严格审核任何高出或低于标准的偏差。若某根腿的高度偏差接近或超出允许范围，立即制定调整方案，进行高度修正，再复测直至符合要求。严谨的检测与调整机制确保了高低腿结构的整体稳定性。

5 结束语

本文围绕 230 kV 输电线路山区全方位高低腿基础施工测控展开研究，阐述了其技术特点、施工难点，构建了施工测控技术体系，明确了关键施工环节测控要点及质量控制、验收要点。通过一系列技术与方法的应用，可有效解决山区复杂地形下基础施工难题，保障施工质量。未来，随着测绘与信息技术不断发展，可进一步探索智能化、自动化测控手段，优化施工流程，提高施工效率与精度，为输电线路在山区安全稳定运行提供更坚实的保障。

参考文献：

[1] 王煜程.220kV 输电线路的施工技术分析[J]. 集成电路应用 ,2023,40(07):178-179.
[2] 刘洋 , 王民 , 翟光林 , 等 .220kV 输电线路不停电跨越施工技术研究 [J]. 电子元器件与信息技术 ,2024,08(08):195-197.
[3] 肖培民 , 王雷 , 宋昂 .220kV 高压输电线路导线架设施工关键技术 [J]. 安装 ,2024(11):35-37.
[4] 贾天宇 .220kV 输电线路导线架设施工技术要点分析 [J]. 中国设备工程 ,2025(04):211-213.
[5] 刘云飞 . 输变电工程全方位高低腿斜插角钢基础施工方法 [J]. 装备维修技术 ,2020(01):131-132.

深基坑降水技术对高层住宅项目地基稳定性影响研究

卢铭浩

（广西建工集团建筑工程总承包有限公司，广西 南宁 530000）

摘　要　本文对深基坑降水技术对地基稳定性的影响进行研究，分析了常见降水方法的影响机制，如明沟排水法、轻型井点降水法、喷射井点降水法及管井井点降水法，探讨了土体性质、地下水作用和上部荷载对基坑稳定性的影响，并结合影响机制提出了优化降水技术的措施，旨在对减小降水对高层住宅项目地基稳定性的负面影响有所裨益。研究结果表明，优化降水技术对提高地基稳定性具有重要作用，能够有效减缓地基沉降与位移，保证项目的施工安全。

关键词　深基坑降水技术；地基稳定性；明沟排水法；轻型井点降水法；喷射井点降水法

中图分类号：TU753　　**文献标志码：**A　　DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.018

0　引言

高层住宅项目的地基稳定性直接关系到施工过程中的安全性与结构的长期使用性。深基坑施工中，地下水的存在以及上部荷载的作用可能引起地基的不均匀沉降与失稳，影响建筑的安全。深入研究降水技术对地基稳定性的影响机制及其优化措施，对于确保高层住宅项目施工安全具有重要意义

1　深基坑降水技术概述

深基坑降水技术是针对地下水位高于基坑开挖底面的工程环境，通过人工调控地下水位以保障基坑施工安全的工程措施。该技术依据水文地质条件、土体物理力学性质及开挖深度，采取特定的水力控制手段，使地下水渗流场发生变化，降低基坑内部及周边区域的水位，减少地下水向基坑渗透对边坡稳定性及地基承载力的不利影响。合理的降水设计能够有效抑制坑底隆起、基底管涌及地基土液化风险，同时控制基坑周边地层沉降，确保施工环境的稳定性及结构安全性[1]。

2　常见深基坑降水技术类型介绍

明沟排水法利用开挖浅沟收集基坑内渗透水，并借助重力作用引导水流至集水坑，经抽排设备排出坑外。该方法适用于降水深度较小、土层渗透性较强的工程环境，能够减少坑内积水对施工的不利影响，但对边坡稳定性的改善作用有限[2]。

轻型井点降水法采用密集布置的轻型井点管，通过真空抽吸降低地下水位，形成稳定的降水降压效果。该技术适用于透水性较好的砂土或粉土地层，能够有效控制坑内水位，减少基底隆起及渗透变形对基坑稳定性的威胁[3]。

喷射井点降水法利用高压水射流穿透低渗透性土层形成滤水通道，并结合真空抽吸提高降水效率。该方法适用于渗透性较弱的黏性土、粉质黏土等复杂地层环境，可提高地下水的抽排速率，增强基坑内部水位调控能力，降低边坡失稳风险[4]。

管井井点降水法采用深埋管井结构，借助渗透能力强的滤水层和大功率水泵实现深层降水。该方法适用于深基坑工程及高水位地区的施工要求，能够有效降低基坑周围地下水位，减少渗透压力对地基承载力的不利影响，同时降低管涌和流砂现象的发生概率[5]。

3　高层住宅项目地基稳定性的影响因素

3.1　受土体性质的影响

土体性质对高层住宅项目地基稳定性在于其物理力学特性直接影响地基的承载能力、变形特征和渗透特性。抗剪强度由内聚力和内摩擦角决定，较高的抗剪强度能够增强土体抵抗剪切破坏的能力，减少地基沉降和侧向变形的风险。压缩性反映土体在荷载作用下的变形程度，高压缩性土层容易发生显著沉降，导致地基不均匀变形，使建筑结构承受额外应力，影响长期使用安全。渗透性决定地下水在土体中的流动状态，高渗透性土层容易形成较大的渗流坡降和地下水压力变化，可能诱发地基液化、管涌及流砂等稳定性问题，而低渗透性土层在降水过程中可能导致超静孔隙水压力难以迅速消散，使土体有效应力调整滞后，引发基坑周边沉降异常，影响地基整体稳定性。土颗

粒组成与结构决定土体的宏观工程特性，密实的砂土颗粒排列紧密，具有较高的承载力和抗变形能力，而松散填土、粉质土等土层结构较弱，在动静荷载作用下容易发生侧向挤出、累积沉降和强度衰减，从而降低地基刚度，影响整体稳定性[6]。

3.2 受地下水作用的影响

地下水作用对高层住宅项目地基稳定性在于其水位变化、渗流特性和水土相互作用直接决定地基的承载能力、变形特征和失稳风险。地下水位上升会导致土体孔隙水压力增加，削弱颗粒间的有效应力，降低地基土的抗剪强度，使地基承载力下降，并可能诱发地基液化、坑底隆起等工程问题。地下水位下降可能引起土体固结沉降，导致地基不均匀沉降和建筑结构变形，严重情况下可能造成桩基负摩阻力增大，影响桩基承载性能。渗流作用改变土体应力状态，强渗透环境下的水流侵蚀可能导致土颗粒流失，引发管涌、流砂等渗透破坏现象，使地基结构失稳。长时间渗流作用可能加剧基坑侧壁土体松散，降低边坡稳定性，并造成基坑周边地面沉降，引发建筑物倾斜或开裂。地下水的化学成分对地基土和基础材料的腐蚀作用影响地基长期稳定性，高矿化度水体可能导致黏土颗粒分散，降低土体黏结力，而富含硫酸盐的地下水可能引起混凝土膨胀破坏，使基础结构耐久性降低，进而影响整体地基安全。

3.3 受上部荷载的影响

上部荷载对高层住宅项目地基稳定性在于其大小、分布形式及荷载传递方式决定地基土的应力状态、变形特征和承载能力。竖向荷载增加会引起地基土体的压缩变形，导致沉降积累。水平荷载作用下，基础结构产生侧向位移，剪切力和弯矩增大，可能引发桩基倾斜或浅基础失稳，进而降低整体地基安全性。动力荷载作用改变地基土的应力路径，循环荷载引起土体孔隙水压力积累，导致土体结构松散或液化，影响地基承载力和长期稳定性。荷载传递方式不同会导致地基应力分布差异，刚性基础荷载集中作用易形成应力集中区，而柔性基础荷载均匀扩散有助于降低地基变形梯度。上部结构的层数、高度和建筑功能决定荷载幅值和分布特性，超高层建筑的竖向荷载和水平风荷载、地震荷载作用更加显著，对地基承载性能和沉降控制提出更高要求。

4 深基坑降水技术对地基稳定性的影响机制

4.1 明沟排水法对地基稳定性的影响机制

明沟排水法采用明挖排水沟的方式降低地下水位，控制基坑内水量，影响地基稳定性的关键在于排水速率、排水路径及基坑围护结构的匹配性。在排水过程中，土体孔隙水压力降低，有效应力增加，使土体抗剪强度提高，但若排水速率过快，细颗粒流失导致土体结构松散，渗透变形加剧，影响地基承载能力。地下水位的动态变化改变土体饱和状态，局部过度排水可能引发坑底隆起或基坑周边地表沉降，形成附加应力，造成周边地基的不均匀变形。排水沟位置及深度决定地下水的排泄路径，排水沟布设不合理可能导致水流集中，引发基坑底部渗透破坏或侧壁失稳。明沟排水方式受地层渗透系数控制，低渗透性地层排水不畅易形成滞水区，增加坑底浮托力，使基坑支护体系承受额外荷载。上部荷载作用下，地基变形受排水影响而发生变化，局部地基软化降低承载能力，排水沟附近地基应力集中，可能诱发沉降不均。

4.2 轻型井点降水法对地基稳定性的影响机制

轻型井点降水法利用井点管抽降地下水位，控制基坑内水位动态平衡，影响地基稳定性的关键因素涉及水位降深、降水速率及含水层特性。降水过程中，孔隙水压力降低，土体有效应力增加，剪切强度提高，基坑底部土体抗剪能力增强，但局部过度降水可能引发土体颗粒迁移，渗透变形加剧，导致承载力下降。地下水位的梯度变化改变渗流场分布，局部含水层排水不均可能诱发坑底隆起或地表沉降，基坑周边地层可能因地下水的流失形成附加沉降，导致不均匀变形。井点布设及抽水方式影响地下水流向，降水布置不合理可能引发局部渗透破坏，增加基坑底部隆起及侧壁失稳的风险。降水过程中地层孔隙结构调整，弱透水层可能阻碍排水，导致局部水头差异增大，引发基坑底部承压水突涌。上部荷载作用下，降水引起土体固结变形，地基沉降速率受降水持续时间及排水能力影响，基坑底部附加应力分布受降水影响而调整，局部地基软化可能降低支护结构稳定性，地基变形的不均匀性影响上部结构的长期安全性。

4.3 喷射井点降水法对地基稳定性的影响机制

喷射井点降水法采用高压水流辅助抽水降低地下水位，影响地基稳定性的核心因素涉及水力梯度变化、土体结构调整及承载力变化。降水过程中，强制性水流冲刷作用改变土颗粒排列，孔隙比增大，局部渗透性增强，土体剪切强度受水压力调整影响，导致承载能力发生变化。地下水位快速下降引起孔隙水压力降低，土体有效应力增大，基坑底部抗剪能力提升，但水流扰动可能造成细颗粒流失，引发渗透变形或局部不均匀沉降。含水层渗透性变化影响地下水流向，局部水头差异扩大可能导致基坑底隆起或周边土体沉降，形成附加沉降变形。高压喷射作用可能削弱局部土体

结构完整性，导致基坑底部土层松散化，支护结构稳定性降低，软弱层厚度变化影响基底附加应力分布。上部荷载作用下，降水诱导的地层固结效应调整地基沉降速率，水位降深导致土体应力重分布，局部地基变形增加结构不均匀沉降风险。

4.4 管井井点降水法对地基稳定性的影响机制

管井井点降水法利用深埋滤管抽排地下水降低水位，影响地基稳定性的核心机制涉及土体物理力学性质调整、地下水流动场变化及基底附加应力重分布。降水作用引发含水层渗透性调整，孔隙水压力梯度减小，土颗粒间有效应力增加，剪切强度及压缩模量随排水固结效应增强而变化，局部土体抗剪能力提升，渗透稳定性受地下水位梯度影响形成区域性差异。基坑底部水位降低引发潜水面变化，渗透力调整导致水土耦合作用增强，基底隆起风险减小，渗透变形可能因颗粒迁移和局部应力重分布而产生，支护体系受渗流力变化影响稳定性。地下水流向受降水影响形成梯度场调整，基坑侧壁及周边土体沉降速率受地下水位变化影响，长期降水可能诱发周边建筑基础沉降或差异变形，影响地基承载力分布状态。上部荷载作用下，降水导致土体固结速率增加，孔隙水排出引发体积压缩，基底附加应力扩散范围调整，局部沉降幅度可能因土层压缩性差异出现不均匀性。

5 减小深基坑降水对高层住宅地基稳定性影响的措施

5.1 明沟排水法的优化措施

明沟排水法的优化措施应控制排水均匀性，减少地基应力不均，优化排水沟布置，调整坡度与尺寸，降低局部沉降风险。设置防渗帷幕或喷射混凝土衬层，减少地下水侧渗影响，完善地表水截流系统，降低边坡软化风险。结合注浆或加筋土加固，提高土体承载力，减少固结变形。实施动态监测，实时调整排水强度，确保地基稳定。

5.2 轻型井点降水法的优化措施

轻型井点降水法的优化措施应调整井点布置密度与深度，提高地下水抽排均衡性，降低局部含水层应力集中风险。优化滤管结构与滤料配置，减少细颗粒流失，维持土体结构稳定。采用分阶段降水模式，控制水位下降速率，减少地基沉降与侧向变形。结合地基加固技术，如化学注浆或搅拌桩加固，提高承载力并抑制渗透变形。建立实时监测系统，动态调控抽排参数，确保地基稳定性与降水效率协调。

5.3 喷射井点降水法的优化措施

喷射井点降水法的优化措施应针对降水区域的土体类型与水文条件进行精确设计，调整喷射井点布置密度与位置，避免局部过度降水导致土体强度下降。优化喷射压力与流量控制，确保均匀降水，减少对土体结构的扰动。合理选择喷射设备与喷射管道的配置，提升排水效率并减少土体颗粒流失，避免引发渗透性变形。结合实时监测系统，动态调整降水深度与速率，确保水位控制在安全范围内，防止地下水位过快下降引起土体固结沉降。针对不同地质环境，配合地基加固技术，如深层搅拌或注浆，加强基坑周边土体的稳定性。

5.4 管井井点降水法的优化措施

管井井点降水法的优化措施应从井点布置、降水速率及深度等方面进行精细化调整，确保井点间距合理，避免过度抽水引起土体沉降与位移。优化井点的设计与施工工艺，选择适合地质条件的井管材料与滤水层，确保降水效果的持续性与稳定性。控制降水速率与井点抽水深度，防止土体失稳与地下水位剧烈波动造成的不良影响。结合土壤水力学特性，精确计算井点抽水量与水位变化，避免局部渗透不均导致的不均匀沉降。定期监测井点周围土体的渗透性变化，动态调整降水策略，确保降水区域内土体强度与稳定性保持在安全水平。

6 结束语

本文深入研究了深基坑降水技术对高层住宅项目地基稳定性的影响，分析了土体性质、地下水作用和上部荷载等因素的作用机制，提出优化措施以减少降水对地基的负面影响。研究结果为实际工程中基坑降水技术的选择和优化提供理论支持。然而，本文在降水技术与土体响应的关系、降水效果的实时监控等方面仍有一定局限，未来可进一步深入探讨多因素共同作用下的基坑降水对地基稳定性的影响机制，并结合工程案例验证其优化效果

参考文献：

[1] 彭慧军.建筑工程中深基坑降水技术浅析[J].四川水泥,2023(07):37-39.
[2] 向象.明沟排水法在砂质深基坑中的应用[J].江西建材,2022(09):213-214,217.
[3] 李峻.河道综合整治基坑开挖中轻型井点降水法的应用[J].黑龙江水利科技,2023(03):103-106.
[4] 李强.某工程地下室的基坑降水技术应用探究[J].中国住宅设施,2024(11):160-162.
[5] 李涛.基坑降水技术在建筑工程施工中的应用分析[J].散装水泥,2023(06):113-115,118.
[6] 金磊.降水技术在建筑深基坑施工中的运用[J].大众标准化,2022(12):149-150,153.

超长钢筋混凝土结构无缝施工技术在场馆工程中的应用分析

李 华

（上海宽创国际文化科技股份有限公司，上海 200120）

摘 要 本文以四川大学博物馆群展陈工程为研究对象，探讨了大跨度钢筋混凝土结构在博物馆领域的无缝施工技术应用，针对展陈空间对结构整体性、耐久性及展品保护的高要求，工程采用间歇式膨胀加强带布置、低热水泥配比、BIM 协同设计与智能养护系统为核心的施工体系。研究验证了无缝施工技术在高湿度、大温差环境下的可行性，旨在为同类文化场馆建设提供兼具安全性与经济性的参考方案。

关键词 博物馆；超长钢筋混凝土；无缝施工

中图分类号：TU755 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.019

0 引言

博物馆作为文化遗产保护与公共教育的重要载体，其建筑结构需兼顾展陈功能需求与长效耐久性要求。在四川大学博物馆群展陈工程中，超长钢筋混凝土楼板的施工面临收缩应力集中、温度差异开裂及高湿度环境侵蚀等多重挑战。传统分段式施工易形成施工缝，影响展陈空间整体性，且后期维护成本高昂。鉴于此，工程团队提出无缝施工技术体系，无缝施工技术能提高结构的整体性与稳定性，缩短施工周期，降低后期维护成本，有效提高工程建设质量。

1 工程概况分析

1.1 工程概况

本项目位于四川省成都市武侯区九眼桥街道核心区域，总建筑面积约 3 万 m^2，涵盖地下一层、一层及二层建筑改造、加固、展陈布展工程。总工期 12 个月，项目投资约 1.2 亿元，资金来源于政府专项资金，建筑通过预制装配式工艺缩短工期，展陈过程中设置文物迁移专项保险与 24 小时值守机制，保障施工期间文物安全。

1.2 技术难点分析

在本次工程项目中，施工人员需对原博物馆主体结构进行加固改造，原有建筑柱距较小（约 6 ～ 8 m）、层高较低（约 4.5 m），在保留外观的前提下进行内部功能改造时，需通过增设剪力墙和加大截面法提升结构承载力，梁柱节点区域的构造配筋密度需达到 120 ～ 150 kg/m^3 以增强抗震性，这对钢筋绑扎精度和混凝土浇筑密实度提出极高要求[1]。其次，新建综合博物馆展厅面积达 5 200 m^2，采用大跨度悬挑结构，其混凝土施工需对于水化热温差的控制要求比较严格。膨胀加强带需分段设置在应力集中区域，膨胀剂掺量需十分精确以补偿收缩。此外，地下 3 层结构中抗渗混凝土与普通混凝土的接缝处理需要考虑到潮湿与结构承受力的问题。施工中还面临府河高湿度环境对混凝土养护的影响。

2 博物馆工程中超长钢筋混凝土结构无缝施工技术的应用

2.1 膨胀加强带设置

根据 GB 50010《混凝土结构设计规范》，结合府河区域日温差 ΔT=12 ℃，年平均湿度 80%，采用以下公式计算温度应力及收缩应变：

温度应力：

$$\sigma T=\alpha E\times\delta T\times Ec/1-v$$

其中，$\alpha E=1.0\times10^{-5}$/℃（混凝土线膨胀系数），Ec=30 GPa（C35 混凝土弹性模量），v =0.2（泊松比）。

代入数据得：

$$\sigma T=1.0\times10^{-5}℃\times12℃\times30\times10^{9}\ Pa/(1-0.2)=4.17\ MPa$$

总收缩应变由自收缩与干燥收缩组成，计算公式为：

$$\varepsilon total=\varepsilon self+\varepsilon drying=\alpha self/t+\{\alpha drying\times(H-H0)\}/t$$

其中，α self=0.0 003（自收缩系数，28 天），α drying=0.0 012（干燥收缩系数），H=80%（环境相对湿度），H0=50%（混凝土内部初始湿度），t=28 天。

代入数据得：

$$\varepsilon total=0.0\ 003/28+\{0.0\ 012\times(80-50)\}/\{28\}=1.40\times10^{-4}$$

对比 C35 混凝土极限拉伸值（1.5×10^{-4}），收缩

应变未超过材料抗拉能力，但考虑温度应力叠加后，组合应力需通过膨胀加强带补偿。

依据楼板长宽比 1:3.2（最长展厅 52×16 m），按以下条件确定加强带位置与数量：每 30 ～ 40 m 设置一条横向膨胀加强带，覆盖全楼板宽度（16 m）。采用 HEA 型膨胀剂（掺量 10%），膨胀效能系数 μ=0.85，28 天限制膨胀率目标值 $\varepsilon exp=3.2\times10^{-4}$。

计算公式：

$$\varepsilon exp=mu\times\varepsilon cement$$

其中，εcement 表示水泥基材料的固相膨胀率（约为 0.0 004）。

代入数据得：

$$\varepsilon exp=0.85\times0.0004=3.4\times10^{-4}$$

实测 28 天限制膨胀率满足补偿需求（误差≤ 5%）。

博物馆内存在大量的展柜和文物，针对这些区域（活荷载 5 kN/m^2）与过道区（3.5 kN/m^2）交界处，通过有限元分析计算差异变形量：

荷载差引起的应变：

$\delta\varepsilon=\{\delta P\times L\}/\{Ec\times t\}=\{(5-3.5)\,kN/m^2\times16\,m\}/\{30\,GPa\times0.3\,m\}=8.33\times10^{-7}$

结合混凝土徐变系数（0.2×10^{-6}/MPa·d），50 年使用期累计变形量约为 0.04 mm，需增设局部加强带以控制裂缝宽度≤ 0.2 mm。府河区域高湿度（80%）使干燥收缩速率降低 20%，调整养护周期至 21 天，确保膨胀剂充分水化。通过分布式光纤传感器监测内部温度，当相邻测温点温差＞ 15 ℃时启动雾喷降温系统（降温速率≤ 3 ℃ /h），实测内外温差控制在 22 ℃以内 [2]。有限元模拟表明，采用间歇式膨胀加强带方案后抗裂安全系数从原始结构 0.8 提升至 1.3（GB 50010 要求≥ 1.2）；长期使用裂缝宽度≤ 0.1 mm（规范允许值 0.3 mm）；较连续式加强带减少材料用量 30%，工期缩短 15 天。

综上所述，川大博物馆工程通过间歇式膨胀加强带布置，结合 HEA 型膨胀剂与差异化施工策略，实现大跨度混凝土结构的高效抗裂控制，满足博物馆文物存储环境对微裂缝的严苛要求。

2.2 膨胀加强带做法

施工前组织技术人员依据 GB 50010 规范与有限元模型计算结果，明确膨胀加强带设置间距为 30 ～ 40 m、宽度 1.2 m，膨胀剂掺量中胶凝材料占 10%，结合楼板长宽比 1:3.2 的结构特征，采用间歇式布置策略以匹配收缩应力分布规律。模板支设阶段，在预留带区域内安装可拆卸式定型钢模，两侧预埋 3 mm 厚镀锌止水钢板，通过 BIM 模型定位确保带体轴线偏差≤ 5 mm。针对府河高湿度环境（年平均湿度 80%），优化养护方案，采用双层塑料薄膜覆盖配合智能温湿度传感器，实时调控带体区域湿度≥ 90%，同时通过分布式光纤监测系统追踪带体内部温度变化，确保水化热温差≤ 25 ℃。预制过程中同步设置施工缝止水构造，采用遇水膨胀橡胶条与聚氨酯密封胶双重密封，防止后期渗漏风险。完成浇筑后，通过三维激光扫描复核带体几何尺寸，误差控制在 ±3 mm 以内，并利用非接触式应变仪检测带体膨胀效能，确保 28 天限制膨胀率≥ 3.2×10^{-4}。

2.3 混凝土试配

基于 GB 50010《混凝土结构设计规范》及工程实际情况，混凝土适配过程通过材料优选、配比优化、试配验证及动态调整四阶段完成。以 C35 混凝土为基础，水胶比严格控制在 0.45 以下，通过掺入聚羧酸减水剂优化流动性，确保坍落度为 120±20 mm，满足泵送与浇筑需求。为补偿收缩应力，胶凝材料中掺入 10% 的 HEA 型膨胀剂，膨胀效能系数 μ=0.85，结合 II 级掺量 30% 粉煤灰降低水化热并改善和易性 [3]。骨料选用级配良好的 5 ～ 25 mm 碎石，含泥量≤ 3%，砂率控制在 35% ～ 40%，避免因骨料不均导致收缩差异。试配阶段通过对比 8% ～ 12% 膨胀剂掺量对限制膨胀率的影响，确定最佳掺量 10%，28 天限制膨胀率达 3.2×10^{-4}，满足补偿收缩需求。同时，模拟府河区域高温高湿环境（日温差 12 ℃、湿度 80%），调整养护周期至 21 天，并通过掺入 0.02% 缓凝剂延缓水化速率，防止早期开裂。试配结果显示，水胶比每降低 0.05，7 天抗压强度提升约 5 MPa，但过度减水可能导致离析，需通过坍落度与扩展度双指标控制。为实现对质量的有效控制，通过掺入聚羧酸减水剂（减水率 25% ～ 30%），将水胶比从 0.45 优化至 0.42，在保证流动性（坍落度 118 ～ 125 mm）的同时降低收缩应力。HEA 型膨胀剂掺量 10.3% 时，28 天限制膨胀率达 3.25×10^{-4}，补偿收缩应变 1.40×10^{-4} 的 93%，剩余应力由结构刚度控制，7 天抗压强度达 42.5 MPa，28 天强度 53.2 MPa，较普通 C35 混凝土提升 15% ～ 20%，粉煤灰与矿渣粉的掺入显著降低氯离子渗透性。结合分布式光纤监测，内部温度峰值控制在 50 ℃以内，温差≤ 25 ℃，避免冷缩裂缝。

2.4 构造配筋

构造配筋以“刚度均衡”与“应力分散”为核心原则，纵向钢筋采用 HRB400 直径 16 mm 的规格，沿跨度方向均匀布置，间距加密至 150 mm，确保混凝土截面抗弯刚度。水平钢筋采用 HRB400 直径 12 mm 的规格，形成双向网状结构，转角部位增设直径 20 mm、间距 50 mm 的放射筋，延伸至加强带边缘 500 mm 范围，有效抑制应力集中区域的裂纹萌生。荷载突变区域（如展柜区活荷

载5 kN/m²与过道区3.5 kN/m²交界处），通过有限元分析模拟差异沉降与剪切应力分布，增设直径≥ 10 mm的钢绞线施加预应力。张拉控制应力设定为0.35倍预应力筋抗拉强度标准值（约230 MPa），抵消30%～40%的收缩应力。预应力筋布置采用束筋形式，间距≤1.5 m，锚固端采用镦头锚具，避免应力损失[4]。钢筋绑扎采用分段验收制，每层钢筋网绑扎完成后需经监理与第三方检测机构复核，重点检查加密区间距、放射筋长度及预应力筋定位偏差（≤ ±5 mm）。为验证配筋效果，施工后通过激光扫描仪检测实际钢筋布置精度，并采用压电式传感器监测长期使用期应力变化。数据显示，配筋体系使结构抗裂安全系数从0.8提升至1.3，裂缝宽度稳定在0.1 mm以内，满足博物馆展陈空间对微裂缝的严苛要求。

3 超长钢筋混凝土结构无缝施工控制措施

3.1 控制混凝土浇筑

混凝土采用坍落度120±20 mm的C35配比，通过强制式搅拌站集中供应，搅拌时间≥ 90分钟，确保材料均匀性。浇筑时采用分层分段法，每层厚度严格控制在≤ 500 mm，插入式振捣器振捣后表面低于设计标高20 mm，避免冷缝形成。浇筑顺序从结构中间向两端推进，相邻区域间隔时间≥ 7天，以释放内部应力。入模温度是控制温度裂缝的核心参数，通过冷却水循环系统调节，确保入模温度≤ 50 ℃。高温时段增设遮阳棚与雾喷降温，实测内部温度峰值≤ 55 ℃，降温速率≤ 3 ℃/h。同时，采用低热水泥与粉煤灰降低水化热积聚，减缓温升速率。在浇筑过程中，通过分布式光纤传感器实时监测混凝土内部温度场，当相邻测温点温差＞ 15 ℃或温升速率＞ 2 ℃/h时，立即启动应急冷却措施（循环水冷管间距≤ 2 m，水温≤ 25 ℃）。浇筑后4小时内覆盖塑料薄膜并洒水养护，湿度≥ 90%，养护期延长至21天以适应府河区域高湿度环境（年平均湿度80%）[5]。在施工过程中，项目部、建设单位、监理单位联合第三方检测机构对每批次混凝土进行坍落度、入模温度及试块强度（7天≥ 35 MPa，28天≥ 50 MPa）抽检，数据偏差超5%时暂停浇筑并调整配比。通过BIM模型模拟浇筑过程，优化泵送路线与振捣点位，避免荷载不均导致的应力集中。

3.2 加强混凝土养护

混凝土浇筑后4小时内，采用厚度≥ 3 mm的聚乙烯塑料薄膜全覆盖裸露表面，并辅以雾化喷淋系统持续洒水养护，确保湿度≥ 90%。前7天内每2小时喷淋一次，后期转为间歇性喷雾，结合气象数据动态调整频次。增设导热系数≤ 0.03 W/（m·K）的保温保湿膜与电伴热带，维持养护区间温度在20±2 ℃、湿度波动≤ ±5%。拆除模板后，启动智能养护系统：通过分布式光纤传感器实时监测混凝土内部温度与湿度，数据反馈至智慧工地平台。当内部温度＞ 50 ℃时，自动触发雾喷降温（降温速率≤ 3 ℃/h）；当湿度＜ 85%时，系统自动补水至目标值。养护期延长至28天，并通过第三方检测机构对28天龄期混凝土进行钻芯取样，实测限制膨胀率≥ 3.2×10^{-4}，裂缝宽度≤ 0.1 mm，均优于设计要求。

3.3 释放热量

沿混凝土内部布设光纤传感器，每5 m设置一个测温点，实时采集温度数据。当相邻测温点温差＞ 15 ℃或温升速率＞ 2 ℃/h时，自动触发预警并启动应急降温。采用高压细雾喷嘴阵列，覆盖浇筑区域全断面，通过水雾蒸发带走热量。降温速率控制在≤ 3 ℃/h，避免内外温差过大引发裂缝。混凝土中掺入低热水泥，并埋设间距≤ 2 m的循环水冷管，直接降低内部温度[6]。实测表明，该组合措施可使混凝土内部温度峰值从70 ℃降至50 ℃以内。模板拆除后，在结构顶部架设可拆卸通风层，利用自然风力加速散热。

4 结束语

四川大学博物馆群展陈工程的成功实践表明，超长钢筋混凝土结构无缝施工技术在高要求文化场馆建设中具有重要应用价值。通过间歇式膨胀加强带、精细化配筋与智能养护的协同作用，实现了大跨度混凝土结构的安全性与耐久性双重目标。随着建筑信息化与新材料技术的进一步发展，无缝施工技术有望在更多博物馆工程中推广，为文化遗产保护与城市更新提供更高效、可持续的解决方案。

参考文献：

[1] 魏玺波.建筑工程中钢筋混凝土结构无缝施工技术研究[J].中国建筑装饰装修,2024(13):158-160.
[2] 谢尚志.超长钢筋混凝土无缝施工技术在某游泳馆工程中的应用[J].石材,2024(06):72-74.
[3] 许悦.地下车库超长钢筋混凝土结构无缝施工技术研究[J].中国高新科技,2023(09):71-73.
[4] 杨汉文.浅析钢筋混凝土整体无缝地坪施工技术[J].四川水泥,2021(05):31-32.
[5] 何明俊.住宅建筑施工中大体积混凝土无缝施工技术研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2025(01):5-8.
[6] 王鹏.房建施工中的大体积混凝土无缝技术研究[J].工程技术,2025(01):57-60.

BIM 技术在工程造价中的集成与应用

孙成柏

（合肥水务集团有限公司，安徽 合肥 230000）

摘　要　BIM 技术为工程造价管理带来了革命性变革，其集成路径体现在数据共享平台构建、全周期成本控制、智能分析工具应用以及可视化技术融合四个方面。当前 BIM 技术在造价领域的应用仍处于转型期，既存在技术优势也面临实施阻力，需要政策引导、企业投入和人才培养多方协同推进。技术实施面临软件兼容性差、组织协同困难、人才储备不足和经济效益不明显等现实挑战。针对这些问题，本文认为需要完善行业标准体系，优化跨部门协作机制，加强复合型人才培养，深入挖掘 BIM 在成本优化中的潜在价值。

关键词　BIM 技术；工程造价；全生命周期管理；协同工作平台；智能造价分析

中图分类号：TU17；TU723.3　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.020

0　引言

随着“十四五”建筑业发展规划的推进，BIM 技术的应用已从设计阶段延伸至工程全生命周期管理，为造价控制带来新的技术支撑。行业实践表明，BIM 技术与造价管理的融合不仅提升了工程量计算效率，更重要的是实现了成本预测与控制的动态化、精准化。然而，技术落地过程中暴露出的标准缺失、协同困难等问题，制约着 BIM 价值的充分发挥。特别是在新基建背景下，复杂工程项目的造价管理对 BIM 技术提出更高要求。本文立足行业发展现状，系统分析 BIM 技术在工程造价中的集成路径、实施挑战及应对策略，旨在为行业数字化转型提供理论参考和实践指导。

1　BIM 技术在工程造价中的集成路径

1.1　数据共享与协同工作平台的构建

建立高效的数据交互机制是 BIM 技术应用于工程造价的基础条件。基于云技术的协同平台能够实现设计模型与造价数据的实时联动，当建筑师修改某个梁柱截面尺寸时，造价模块自动更新混凝土用量和钢筋配筋量。这种动态关联需要建立统一的数据标准，包括构件编码规则、材料属性字段、工程量计算逻辑等核心要素。某大型商业项目采用 IFC 标准作为中间格式，成功实现了 Revit 模型与国内造价软件的无缝对接。权限管理机制确保各参与方在统一平台上协同工作，设计团队负责维护几何参数，施工方更新进度信息，造价团队则专注成本分析，所有修改记录可追溯。这种工作模式将传统造价工作中重复核对图纸的时间减少了 70%，显著提升了数据准确性。

1.2　全生命周期成本管理的贯通

BIM 技术打破了传统造价管理阶段割裂的局限，建立起贯穿项目全周期的成本控制体系。在方案设计阶段，基于 BIM 技术的多方案比选工具可以实时反映不同建筑形态对土建成本的影响，帮助决策者在创意与造价之间找到平衡点。施工图设计阶段，模型中的构件属性不仅包含几何信息，还嵌入了材料规格、施工工艺等影响造价的参数，实现设计成果与预算编制的同步生成。施工阶段通过 4D 模拟将进度计划与资源投入关联，提前发现可能造成成本超支的关键路径。运维阶段则利用模型中的设备参数预测维护费用，某医院项目通过这种方式将后期运营成本降低了 18%。这种全周期管理需要建立标准化的模型深化流程，确保各阶段模型包含适应当前决策需求的造价信息。

1.3　智能化造价分析工具的嵌入

现代 BIM 平台正在集成越来越多的人工智能技术来提升造价分析效率。机器学习算法可以自动识别模型中的典型节点，参照历史工程数据推荐最优成本方案。某住宅项目应用智能配筋系统后，基础部分的钢筋用量优化了 12%。自然语言处理技术使软件能够理解各地定额的差异，自动调整计算规则适应不同地区的计价要求。基于区块链的造价审计系统可以追溯每项工程量的数据来源，大幅减少结算争议[1]。这些智能工具的开发需要积累大量高质量的工程案例数据，建立包含材料价格、人工费率、机械台班等要素的动态数据库。造价工程师的角色也随之转变，从繁琐的计算工作中解放出来，更专注于价值工程分析和成本优化策略制定。

1.4 可视化技术与造价管理的融合

三维可视化技术为造价管理提供了全新的表达和分析维度。VR 设备可以让非专业人士直观理解复杂节点的施工工艺与成本构成，某体育场项目利用这项技术使业主快速认可了钢结构方案的性价比优势。AR 技术将造价数据叠加到施工现场，帮助管理人员实时比对实际进度与预算消耗。三维打印的实体模型则便于造价审核人员直观检查异形结构的工程量计算合理性。这些可视化应用不仅改善了沟通效率，更重要的是建立了各方对造价问题的共同认知基础。当设计变更导致成本增加时，三维模拟可以清晰展示变更前后的差异，使决策过程更加透明。某商业综合体项目通过可视化技术将设计变更的审批周期从原来的两周缩短至三天。

2 BIM 技术在工程造价应用中的挑战

2.1 技术层面的实施障碍

BIM 技术在工程造价领域的落地面临诸多技术性难题。软件兼容性问题首当其冲，主流建模软件如 Revit、Archicad 与国内造价软件之间存在数据转换障碍，几何信息在格式转换过程中经常出现丢失或畸变。某商业综合体项目案例显示，幕墙曲面造型从 Rhino 导入广联达后，近 30% 的异形构件无法正确识别工程量 [2]。硬件配置要求同样构成门槛，处理体量超过 20 万平方米的建筑模型时，普通办公电脑难以支撑实时渲染与计算需求，导致操作卡顿甚至崩溃。更为根本的制约在于，当前BIM标准体系更侧重设计表达而非造价需求，LOD350 级别的模型包含大量造价分析不需要的细节，却可能遗漏影响造价的隐蔽工程信息。这种技术错位迫使造价人员不得不进行大量手工调整，反而降低了工作效率。

2.2 组织层面的协同困境

传统工程建设模式的组织架构与 BIM 技术要求的协同机制存在结构性矛盾。设计院通常将 BIM 团队定位为辅助部门，造价师在方案阶段难以介入模型构建过程，导致后期工程量计算时频繁遭遇参数缺失问题。施工单位的预算部门与技术部门往往各自为政，BIM 模型更新滞后于现场变更的情况屡见不鲜 [3]。某地铁项目曾出现支护方案变更后，造价模型未同步调整钢筋用量，导致中期结算差异达数百万元。业主单位同样面临管理挑战，多数开发企业缺乏专业的BIM管理团队，难以对各参建方的模型质量进行有效把控。这种组织割裂使得BIM技术本应带来的信息共享优势大打折扣，甚至演变为新的沟通负担。

2.3 人才层面的能力短板

工程造价行业面临着严峻的 BIM 人才结构性短缺问题。传统造价人员普遍缺乏参数化建模能力，某咨询公司调研显示，具有 BIM 建模能力的造价师占比不足 15%。高校培养体系存在明显滞后，多数院校的工程管理专业仍以二维图纸算量为教学重点，BIM 课程仅作为选修内容浅尝辄止。企业内部培训同样收效有限，为期数周的软件速成班只能培养初级操作员，而既精通清单规范又能进行二次开发的复合型人才需要长期项目历练。某大型审计机构尝试组建 BIM 造价团队时发现，培养一名合格的项目负责人平均需要参与 5 个以上完整项目的实战积累。这种人才培养周期与行业快速发展需求形成尖锐矛盾。

2.4 经济层面的成本压力

BIM 技术应用的经济可行性面临多重考验。软件采购成本构成第一道门槛，全套 BIM 造价解决方案的年费相当于 10 名初级预算员的年薪总和。某中型施工企业测算显示，要实现全过程 BIM 技术应用，每年需投入约 200 万元用于软件更新与系统维护。人力资源成本同样不容忽视，组建专业 BIM 团队所需的人工成本比传统造价部门高出 40% 以上 [4]。更关键的是投资回报周期问题，某开发商评估报告指出，BIM 技术带来的成本节约需要 3 ～ 5 年才能抵消前期投入，这对资金链紧张的中小企业构成巨大压力。这些经济因素导致许多企业陷入“不用 BIM 可能落后，用 BIM 立即亏损”的两难境地。

3 BIM 技术在工程造价应用中的策略建议

3.1 完善政策支持与行业规范

建立完善的制度保障体系是推动 BIM 技术深度应用的首要前提。当前工程造价领域 BIM 技术应用的最大障碍在于缺乏具有强制效力的国家标准，这导致不同项目、不同地区各自为政，难以形成规模效应。住建部门应当尽快出台建设工程 BIM 造价应用的相关规范，对模型精度、数据格式、交付标准等关键要素做出明确规定。该规范需要细化到不同专业领域，比如土建工程应规定结构构件必须包含混凝土标号、钢筋规格等造价必需参数，而机电工程则需明确管线材质、连接方式等影响安装成本的关键属性。同时，工程造价管理机构应当建立全国统一的 BIM 造价数据库，收集整理各类典型工程的模型文件与造价指标，为行业提供可参考的基准数据。这种数据库不仅要包含传统的工程量数据，还应当整合材料价格波动曲线、人工费地区差异系数等动态信息，使 BIM 模型能够反映市

场实际情况。为保证这些措施落地，建议在工程招投标评分标准中增设BIM应用专项分值，对投标单位的模型质量、数据完整性和应用深度进行量化评估。

3.2 加强跨部门协作与流程优化

实现BIM技术在造价管理中的价值最大化，需要打破传统工程建设中各参与方之间的信息壁垒。设计单位应当改变以往仅关注方案创意的做法，在方案阶段就引入造价工程师参与模型构建，确保三维模型包含完整的造价分析所需参数。施工单位则需要建立专门的BIM协调小组，负责将施工进度计划与造价模型关联，实现资源投入的精准预测。造价咨询企业应当开发模型数据校验工具，定期检查各方提供的模型信息是否满足造价分析要求。这种协同机制的建立需要依托统一的云平台，所有参与方在同一个模型基础上开展工作，任何修改都能实时同步并记录操作日志[5]。某大型商业综合体项目采用这种模式后，设计变更导致的返工成本降低了35%，进度款支付审核时间缩短了60%。要实现这种高效协同，还需要重构传统的合同体系，在工程合同中明确约定各方的BIM数据责任、交付标准和违约责任，用法律手段保障协同机制的有效运行。

3.3 强化人才培养与知识体系建设

BIM技术在造价领域的应用效果很大程度上取决于从业人员的专业能力。当前高校工程管理专业的培养方案普遍存在理论教学与实践应用脱节的问题，建议在本科阶段开设《BIM造价应用》核心课程，系统讲解从模型创建到造价分析的全流程技术要点。该课程应当采用项目制教学方式，让学生通过完成实际工程案例掌握参数化建模、工程量自动计算、造价指标分析等实用技能。对于在职人员，行业协会应当建立分级认证体系，设置BIM造价员、BIM造价工程师、BIM造价总监等不同级别的职业资格，每个级别对应明确的能力要求和考核标准。企业内部的培训体系需要突破简单的软件操作培训，重点培养员工运用BIM技术解决实际造价问题的能力。可以建立企业级的BIM案例库，收集整理典型项目的成功经验和失败教训，供员工学习参考。某大型造价咨询公司通过实施“导师制”培养计划，用两年时间就建立起一支既懂传统造价业务又精通BIM技术的复合型人才队伍，使其在市场竞争中获得了明显优势。

3.4 探索成本优化与价值挖掘路径

BIM技术的真正价值不仅在于提高算量效率，更在于为工程造价的主动控制提供新的可能。在投资决策阶段，可以基于BIM模型建立多方案比选系统，实时评估不同设计选择对总投资的影响。某住宅项目通过这种方式，在方案阶段就发现优化外立面线条设计可以节省12%的幕墙成本。在施工阶段，利用BIM模型进行虚拟建造，可以提前发现可能造成返工的设计问题，某地铁项目通过这种方式减少了83%的现场变更[6]。在运维阶段，将BIM模型与物联网系统对接，可以实现设施设备的精准维护，某医院项目运用该技术使设备维护成本降低了28%。要实现这些价值，需要开发专门的BIM造价分析工具，这些工具应当具备机器学习能力，能够从历史项目中自动提取造价规律，为新建项目提供智能化的成本建议。同时，还需要建立项目全生命周期的成本数据库，持续积累各类工程的真实成本数据，为后续项目的造价预测提供可靠依据。这种数据积累越丰富，BIM技术在造价控制中的价值就越大，最终形成良性的循环发展。

4 结束语

BIM技术与工程造价管理的深度融合正在重塑行业工作模式，从传统算量计价转向全过程动态成本控制。各类实施障碍反映出技术应用与行业现状之间的适配性问题，需要通过系统性解决方案逐步突破。未来发展中，标准化建设将奠定应用基础，人才培养提供持续动力，智能化工具释放更大价值。工程造价行业应当把握数字化转型机遇，在保持专业核心价值的同时，主动适应技术创新带来的变革。只有实现技术、管理和人才的协同发展，才能充分发挥BIM技术在提升造价管理水平方面的巨大潜力。

参考文献：

[1] 赵红.基于BIM技术的建筑工程造价自适应控制方法[J].山西建筑,2025,51(08):179-182.
[2] 王江锋.基于BIM技术的建筑工程造价预结算编制方法[J].中国建筑金属结构,2025,24(05):22-24.
[3] 周艳.BIM技术在建筑项目工程造价管理中的应用研究[J].中华建设,2025(03):46-48.
[4] 杨运球,何利军,王婷.新质生产力视角下高职院校工程造价专业课程思政教学改革研究:以“工程造价BIM技术应用”课程为例[J].建筑与文化,2025(02):223-225.
[5] 陈婷婷.基于BIM技术的建筑工程造价标准化协同管理技术探讨[J].建材发展导向,2025,23(02):79-81.
[6] 戴璇.基于BIM技术的装配式建筑工程全过程造价控制研究[C]//冶金工业教育资源开发中心.2024精益数字化创新大会平行专场会议:冶金工业专场会议论文集(上册).上海建设管理职业技术学院,2024.

“双碳”目标下商业楼宇的绿色建筑设计

庾　聪
（启迪设计集团股份有限公司西安分公司，陕西 西安 710061）

摘　要　“双碳”背景下商业楼宇绿色建筑设计能够达到碳减排目标，为可持续发展战略实现奠定基础。本文深入分析了“双碳”背景下商业楼宇绿色建筑设计理念、原则、策略、实施路径，主要采取优化建筑布局与形态、选择合理的建筑朝向、布局以及形态设计方案，加强可再生能源的利用，并构建能源供应系统，采用绿色建筑材料并优化建筑结构形式，改善室内环境，并且通过提高空气质量、光环境与生活环境品质的方式，以期对降低商业楼宇能耗以及碳排放有所裨益，实现建筑行业绿色转型，为实现可持续发展战略奠定基础。

关键词　“双碳”目标；商业楼宇；绿色建筑设计；可持续发展
中图分类号：TU247　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.021

0　引言

现代社会发展速度加快，环境污染问题日益加剧，碳排放控制已经成为国际社会关注的重点问题。我国一直以来践行大国担当，并且根据可持续发展目标提出碳达峰、碳中和的“双碳”目标，主要目的是减少温室气体排放量，对地球环境改善起到极为重要的作用。本文深入分析“双碳”背景下商业楼宇绿色建筑设计理念、原则、策略以及实施路径，希望为绿色低碳型社会的建设和发展提供基础。

1　“双碳”目标与绿色建筑设计的关联

1.1　“双碳”目标的内涵

“双碳”目标即碳达峰与碳中和，这是我国应对全球气候变化、实现可持续发展战略所提出的重要发展目标。碳达峰指的是二氧化碳排放量在某个时间节点达到峰值，并且随后逐步下降。碳中和则是通过植树造林、节能减排的一系列措施，能够抵消二氧化碳的排放，达到近零排放的目标。“双碳”目标的制定需要全社会共同努力，尤其是建筑行业应加强能源消耗控制、减少碳排放，这是社会赋予的重要责任[1]。

1.2　绿色建筑设计在“双碳”目标实现中的作用

绿色建筑理念是建筑领域实现可持续发展的重要举措，采用节能减排、资源循环的多样化手段，使得建筑项目在建设、运营、拆除各环节中减少碳排放。商业楼宇采用绿色建筑设计理念，通过优化建筑布局、提高能源利用率、使用低碳环保材料的方式达到节能减排的效果。其不仅能够有效降低项目施工成本，也能够提高建筑运营效果，使其具备较高的经济效益、社会效益、环保效益[2]。

1.3　“双碳”目标对商业楼宇绿色建筑设计的新要求

“双碳”目标的背景下，对商业楼宇绿色建筑设计理念提出更高要求。一方面，建筑设计中更加重视清洁能源的应用，尤其是太阳能、风能、可再生资源应用到实际中，减少化石能源的消耗量。另一方面，商业楼宇中绿色建筑设计理念应用中重视材料选择、施工工艺优化，使其达到环保、可持续性发展目标，降低全生命周期内碳排放。此外“双碳”目标还要求商业楼宇运营中采取节能减排措施，利用建设智能化控制系统达到能源科学合理利用的目的。

2　商业楼宇绿色建筑设计

2.1　建筑布局与形态设计

2.1.1　建筑朝向与布局优化

如果商业楼宇建筑项目位于北半球，在方案设计中其主立面尽量朝向正南方，偏差在 ±15° 以内，使得冬季能够获取充足的太阳光。而夏季则采用遮阳的方式减少太阳光直射，保证室内环境处于舒适的状态。根据以往工程经验分析，选择正南朝向建筑方案设计中，冬季获取的太阳辐射量与东西向增加 30% 左右。夏季利用遮阳措施则能减少 25% 左右的太阳辐射量。同时，建筑结构布局时考虑到当地的自然风向，使其通风效果良好。建筑间距与建筑高度比设置在1.5～2.0之间，使自然通风率提升 40% 左右，减少空调使用量，达到降低能耗的目的[3]。此外，根据绿色建筑设计理念的要求，商业楼宇设计阶段通过对建筑群体的排列方式进行优化，采用风影效应使室内风速在建筑内部分布更加均匀，减少进风区面积，改善微气候环境。

通过模拟计算确定合理布局能够降低室内 1 ～ 2 ℃。同时，根据建筑布局设计要求，结合日照时数使得每栋建筑冬季能够增加 2 h 以上的直接日照，满足室内采光、照明、取暖的需求 [4]。

2.1.2　采用适宜的建筑形态

建筑设计中体型系数是重要参数，其指的是外表面积和体积之比，需保证在 0.3 以内，从而达到降低建筑能耗 15% 左右的目的。对于高层建筑来说，选择使用塔式形态的结构形式，与板式形态对比，相同建筑面积下其外墙面积减少 20% 左右，能够减少热损失和冷负荷。同时，商业楼宇建筑设计阶段还要分析高度与宽度比例进行优化设计，使其处于 3 ～ 5 之间，风压分布达到均匀性，自然通风效果良好，也能够减少风荷载。根据风洞试验的数据展开分析，该类型建筑表面风压减少 10% 左右 [5]。此外，商业楼宇建筑设计中使用退台式或者阶梯式建筑形态，使得建筑具备更高的层次感，也能充分利用自然地形减少土方工程量，其施工时能耗降低 10% 左右。

2.2　能源系统设计策略

2.2.1　利用可再生能源

绿色建筑设计理念中采用屋顶安装太阳能光伏板的方式，能够充分利用太阳能进行室内的供热、取暖。太阳能光伏板设计阶段分析商业楼宇建筑屋顶的结构，对其承重能力、朝向、倾斜角度评估，从而选择适宜的光伏板布局方案，能够最大化接收和利用太阳能。对于光伏板形式选择来说，需选择使用转换效率高、耐候性强的产品，能够满足不同气候条件下的使用需求。太阳能光伏板设计阶段制定详细的固定方案，使光伏板与屋顶连接具备较高的强度和稳定性。同时，太阳能光伏板设计阶段需要加强防水、防雷击设计，使其运行具备安全性，长期使用具备较高稳定性。而在太阳能光伏系统电缆敷设时确定适宜的敷设路径，选用低损耗电缆材料，并且设置电缆桥架以及穿管保护，防止投入使用中引发能源损耗现象。根据太阳能光伏系统设计要求，使用智能监控系统加强数据采集分析以及远程监控，实时掌握光伏板发电效率、温度、电流各项参数，并且针对潜在故障采取应对措施。此外，考虑到太阳能光伏板美观方面使其设计和整体建筑风格保持协调，主要采用隐藏式安装或者定制外观方式 [6]。

2.2.2　优化能源供应系统

根据绿色建筑设计理念要求，商业楼宇建筑设计中使用冷热电联供系统，实现能源的梯级利用，达到系统高效协同的效果。根据商业楼宇绿色建筑设计理念的要求，分析建筑运行时的能源需求，重点分析电力热能以及冷能的负荷特性、峰值以及变化规律，从而确定适宜的发电设备、余热回收装置以及制冷设备。按照商业楼宇建筑的能源供应需求，选择燃气轮机、内燃机等发电设备，而余热回收装置则使用热交换器、余热锅炉，制冷设备使用吸收式制冷机等，从而保证其能源供应正常系统运行时能耗有所降低。设备选型时从分析效率、可靠性、系统匹配性方面展开，各设备之间能够协同工作。在能源供应系统设计阶段采用先进的能源分配方案，并且利用智能化控制系统使电力、热能、冷能能够达到动态分布效果，设备达到运行稳定性、可靠性效果，能源利用率得到提升。同时，建设余热回收网络体系，并且优化热能的传输以及分配路径，使热能损失控制在适宜范围内。对于安全性方面分析来说，系统内配置备用电源和应急设施，如蓄电池组或柴油发电机，使得电力中断时能够有充足的能源供应。此外，优化设计能源管理系统，利用采集分析、优化控制功能的方式监控能源使用情况，从而提供能源利用率 [7]。

2.3　建筑材料与构造设计策略

2.3.1　选用低碳环保材料

绿色建筑设计理念应用下商业楼宇落实“双碳”目标，尤其在选择材料方面使用低碳环保性材料，能够有效降低能源损失，也能够减少碳排放。绿色建筑设计理念不断应用下，再生混凝土材料已经广泛应用到实际中，其制作过程中采用废旧混凝土块作为基础，经过破碎、清洗、分级之后，部分或全部替代天然骨料，减少天然材料的使用量，也能够避免产生大量的建筑垃圾。此外，根据绿色建筑设计理念生产制作的生态砖，以工业废渣、尾矿砂为主要材料，采用合适配比和先进工艺制作形成，确保其强度、效果得到提升，并且具备低能耗、无污染的效果。同时，根据商业楼宇建筑施工需求，材料运输、施工阶段优化路径，减少运输环节的能耗以及环境污染问题。而在绿色建筑设计理念引导下，使用可回收、再利用的材料确保建筑工程材料重复利用，在拆除、重建时防止造成环境污染和材料浪费 [8]。

2.3.2　优化建筑构造设计

“双碳”背景下商业楼宇在绿色建筑设计理念引导下，优化建筑构造结构，达到环保、节能的效果。根据商业楼宇建筑设计要求，使用玻璃幕墙的结构形式，选用双层或三层的玻璃结构，其双层玻璃幕墙间距设定为 600 ～ 1 200 mm 之间。三层玻璃幕墙则在中间增

加空气层或惰性气体层，使其隔热效果得到提升。经过上述玻璃幕墙结构形式的应用，能够减少室内外热交换，减少空调以及暖气消耗量。根据数据测算分析，双层玻璃幕墙的节能效果可达到 30 ～ 50%，三层玻璃幕墙则更高。同时，根据绿色建筑设计需求选用适宜的外墙外保温系统，合理确定保温层厚度，满足气候条件和建筑节能降耗的需求。通常来说，北方地区的冬季环境温度较低，保温层厚度设定为 80 ～ 120 mm，主要采用聚苯板、岩棉板为主要材料。而南方地区的环境温度相对较高，则可将保温层厚度设定为 60 ～ 80 mm。保温层设计阶段采用适宜的固定方式，使其在后续运营过程中具备牢固性、可靠性，避免发生脱落以及开裂，其粘接强度超过 0.1 MPa。此外，商业楼宇绿色建筑设计理念应用中从气密性分析，采用密封胶条、密封膏密封处理，减少门窗墙体的空气渗透，使得墙体的保温隔热效果得到提升 [9]。

2.4 室内环境设计策略

2.4.1 改善室内空气质量

“双碳”背景下商业楼宇的绿色建筑设计理念中，改善室内空气质量作为重点内容，也是保障人们生命健康的重要举措之一。为能够保证室内空气质量达到良好状态，根据商业楼宇建筑的设计和运行需求，采用先进的新风系统和空气净化器设备。新风系统设计过程中合理规划送风和排风路径，确保室内空气循环以及交换达到使用需求。新风量严格计算，主要从建筑空间体系、人员密度、活动强度方面出发，通常为每人每小时新风量在 30 m^3 以上，使得室内二氧化碳浓度控制在适宜范围内。同时，新风系统内设置高过滤装置，采取多级过滤的设施能够有效去除室外空气中 PM2.5、花粉、细菌、有害物质，使其过滤效率超过 90%。空气净化器的选择极为重要，需综合分析商业建筑内部空间大小、污染程度配置，精准计算洁净空气输出比率，即 CADR 值，使其满足室内空间要求。按照绿色建筑设计理念要求，在新风系统设计阶段，通常每 10 m^2 空间要配置 CADR 值在 100 m^3/h 以上的空气净化器。此外，新风系统和空气净化器利用智能系统联动控制，实时监控各项数据信息，自动调节运行状态，确保室内空气质量达到使用需求 [10]。

2.4.2 优化室内光环境与声环境

根据绿色建筑设计理念的要求，商业楼宇建筑设计中进行光环境与声环境设计，符合“双碳”目标。光环境设计阶段采用自然采光和人工照明组合的方式，自然采光的作用是通过调整建筑朝向、窗户设计、遮阳设施的方式，使室内有充足的自然光线，窗户面积和地面面积之比通常为 1:6 ～ 1:8，使得室内采光达到均匀性效果。同时，窗户中设置必要的遮阳装置，以遮阳窗、百叶窗为主，防止夏季阳光照射强度过高引发眩光或者过热。人工照明系统设计则从空间功能需求方面出发。通过分区控制、调光控制的方式降低能耗，也能够满足室内照明需求。此外，针对商业楼宇建筑的声环境设计来说，通过选用隔音材料、隔声材料降低室内噪声，遵循绿色建筑设计理念。对于墙体、楼板的围护结构加强隔音量检测，使其符合相关标准，如墙体隔声量在 50 分贝以上，楼板隔声量在 60 分贝以上。

3 结束语

在“双碳”背景目标下，对商业楼宇设计提出更高的要求。本文从“双碳”角度，探讨了商业楼宇绿色建筑设计方法，通过优化建筑布局与形态，采用新能源系统以及节能建筑材料等设计方式，够使得商业楼宇能够在满足功能需求的同时，降低了碳排放，进一步提升能源利用效率。然而由于商业楼宇的建设规模与结构造型不同，在设计过程中，需结合项目的实际需求，进一步把“双碳”理念运用到设计方案中，以确保整体建筑具备更多绿色元素。

参考文献：

[1] 朱霞 .“双碳”背景下绿色建筑设计与发展研究 [J]. 工程建设与设计 ,2024(05):16-18.
[2] 谭海成 . 试析基于低碳背景下的绿色建筑设计探讨 [J]. 有色金属设计 ,2023,50(04):64-67.
[3] 高震 .“双碳”背景下绿色建筑设计与发展探索 [J]. 中国高新科技 ,2023(06):91-93.
[4] 邓伟欣 . 低碳背景下绿色建筑设计思路与实践研究 [J]. 居舍 ,2024(09):112-115,119.
[5] 吴力 , 何强 . 低碳背景下绿色建筑设计思路与实践研究 [J]. 佛山陶瓷 ,2024,34(11):160-162.
[6] 李传贵 . 绿色建筑设计标准在商业建筑设计中的应用分析 [J]. 建材与装饰 ,2019(35):109-110.
[7] 唐亚蕾 . 绿色环保建筑设计分析 : 以五中北商业住宅金融大厦项目为例 [J]. 住宅与房地产 ,2021(15):104-105.
[8] 张俊一 .“双碳”战略下绿色建筑的设计与发展趋势探析 [J]. 建材发展导向 ,2024,22(22):133-135.
[9] 徐同殿 , 侯朝晖 , 高维东 .“双碳”目标下绿色建筑设计体系在超高层建筑中的应用分析 : 以云鼎大厦为例 [J]. 当代建筑 ,2022(08):48-51.
[10] 徐舟 , 朱炜 . 目标和效果导向的绿色建筑正向设计探索 : 以合肥明悦广场项目为例 [J]. 华中建筑 ,2022,40(04):45-50.

污水处理一体化设备的设计和运行研究

田　畅

（美泰科技（青岛）股份有限公司，山东 青岛 266400）

摘　要　污水处理一体化设备因占地面积小、管理便捷等优势，成为分散式污水处理的可行方案，但其实际应用中仍存在效率波动、运行成本高及自动化不足等问题。本研究针对农村地区污水分散性高、处理规模小的特点，提出基于 A2/O+MBR 工艺的一体化设备优化方案，通过集成厌氧—缺氧—好氧协同作用与膜分离技术，提升污染物去除效率并降低运维成本，以期为农村水环境治理提供技术支持。

关键词　污水处理一体化设备；预处理；生化处理；深度处理

中图分类号：X703　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.022

0　引言

污水处理一体化设备集成了预处理、生化处理、深度处理等多种工艺单元，能够实现对生活污水、工业废水等不同类型污水的有效处理，出水水质可达到国家相关排放标准。而污水处理一体化设备在实际应用过程中仍面临着各种挑战，如设备处理效率不稳定、运行成本较高、自动化程度不足等问题。深入研究污水处理一体化设备的设计和运行优化，对于提高设备处理效率、降低运行成本、实现自动化控制具有重要意义。本研究旨在针对污水处理一体化设备的设计和运行进行深入探讨，分析不同类型污水处理一体化设备的工艺特点、适用范围以及优缺点，并针对设备运行过程中存在的问题提出优化方案，为提高污水处理一体化设备实现自动化控制提供技术支持。

1　工程概况

天津某污水处理工程覆盖村镇 100 多个，各村站点污水处理规模超 20 t/d，由于村镇分布较为分散，且单个站点处理规模较小，工程采用一体化污水处理设备作为核心处理单元，各村站点污水先利用格栅集水井进行初步过滤，去除大颗粒悬浮物后，上清液通过溢流工艺进入调节池，调节池用于均衡水质和水量，随后通过提升泵将污水输送至一体化处理设备。该工程采用地埋式设计，占地面积 100 m^2，各站处理量为 20 t/d，一体化设备集成了生物处理、沉淀、过滤等多种工艺，能够高效去除污水中的有机物、氮、磷等污染物。在设备运行过程中，自动化程度较高，科学减少了人工操作和维护成本；地埋式设计还具有良好的保温性能，能够适应北方地区冬季低温环境，实现设备全年稳定运行。通过该工程的实际运行，验证了一体化污水处理设备在农村地区的适用性和高效性（工艺流程见图 1 所示）。

2　污水处理一体化设备设计分析

2.1　A2/O 工艺

设计中，污水在厌氧、缺氧和好氧三个反应区的停留时间比例通常为 1:1:1，该比例设计旨在平衡各反应区的处理效果，促进除磷和脱氮的高效进行。此外，

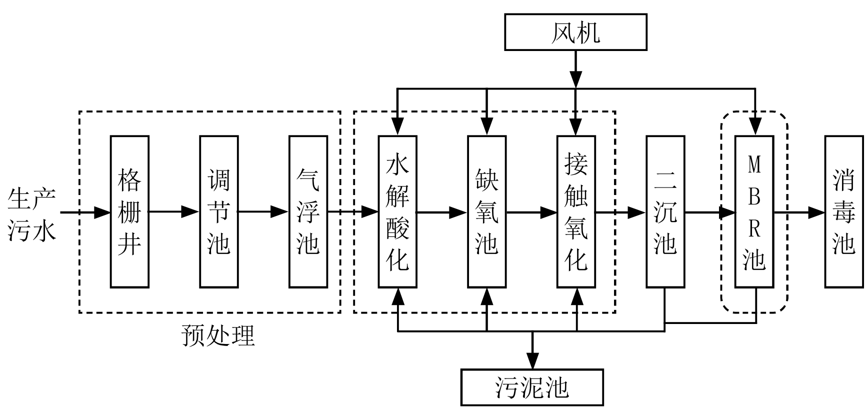

图 1　工艺流程

一体化设备的设计还需考虑以下因素：（1）反应区容积：合理设计各反应区的容积，确保污水在各反应区有足够的停留时间，以实现最佳的处理效果。（2）污泥回流：通过污泥回流系统，将好氧池中的污泥回流至厌氧池，科学维持系统中微生物的活性，提高处理效率。（3）曝气系统：好氧池中的曝气系统设计需充分考虑氧气的供应和混合效果，促进硝化作用的顺利进行。（4）控制系统：采用先进的控制系统，实时监测和调整各反应区的运行参数，控制系统的稳定运行。

2.2 MBR 工艺

MBR 工艺是将生物处理与膜分离技术相结合的新型污水处理工艺，其核心是利用膜组件的固液分离特性，科学控制污泥停留时间（SRT）和水力停留时间（HRT），在膜池中实现高效的污染物去除。在 MBR 工艺中，膜池内的混合液通过连续曝气保持活性污泥的悬浮状态，同时利用自吸泵将溢流至膜池的上清液抽至消毒池，经过消毒处理后达标排放，进一步提高污水处理效率，减少二次污染的安全风险。在膜系统设计中，其设计直接影响到整个系统的运行效果，在本设计中 MBR 膜通量设计值为 15 $L/m^2 \cdot h$，膜面积为 77 m^2，单膜有效面积为 11 m^2，膜组件共 7 件，膜系统运行模式为运行 8 分钟，停止 2 分钟，实际运行时间为 19.2 小时 / 天，这种间歇运行模式不仅能够延长膜的使用寿命，还能有效防止膜污染。在泵组设计中，采用一体化外围取水泵、产水泵、反洗水泵，采用热备式设计，促进系统运行的连续性，产水泵选用自吸泵，能够有效抽取膜池中的上清液；反洗泵则选用污泥泵，用于定期清洗膜组件，防止膜污染。在曝气设计中，选用微孔曝气盘，规格为 Φ215，管道材质为 UPVC，微孔曝气盘能够提供均匀的气泡分布，确保膜池内的混合液充分曝气，维持活性污泥的活性，UPVC 材质具有耐腐蚀、耐老化的特点，能够有效延长曝气系统的使用寿命 [1]。

2.3 控制设计

在调节池提升泵中，其主要功能是将调节池中的污水提升至后续处理单元，为了确保系统的连续运行，通常采用一用一备的设计方案，调节池提升泵与调节池低液位和膜池高液位进行连锁控制，当调节池液位低于设定值时，提升泵自动停止运行，防止泵空转损坏；当膜池液位高于设定值时，提升泵自动停止运行，以避免膜池溢流。两台提升泵采用相互切换运行的方式，确保设备的均衡磨损和延长使用寿命，系统可根据运行时间或故障状态自动切换运行泵，避免单台泵长时间运行导致的过热或磨损。当运行中的提升泵出现故障时，系统会自动切换到备用泵运行，提高污水处理过程的连续性。同时，故障泵会发出报警信号，提醒操作人员及时检修。

在鼓风机设计过程中，鼓风机在污水处理过程中主要用于为生物反应池提供氧气，确保微生物的正常生长和代谢。鼓风机通常采用一用一备的设计，主用鼓风机在正常工况下持续运行，备用鼓风机在主用鼓风机故障时自动启动；鼓风机的运行状态与产水泵进行连锁控制，当产水泵运行时，鼓风机自动启动，确保生物反应池中的氧气供应；当产水泵停止运行时，鼓风机自动停止，科学节省能源。当鼓风机故障停机后，系统会先进行 30 分钟的空曝气，以冲刷膜片上的污物，防止膜片堵塞，空曝气完成后，系统会自动恢复 MBR（膜生物反应器）产水泵的运行，帮助污水处理过程连续进行 [2]。

3 污水处理一体化设备的运行效果

3.1 CODCr 去除率分析

由表 1 可知，A2/O 工艺的 CODCr 去除率（81.24%）较生物转盘工艺（70.32%）提升约 10%。其优势源于厌氧—缺氧—好氧三段协同作用：厌氧段分解大分子有机物，缺氧段强化反硝化，好氧段进一步氧化降解，从而实现高效去除。而生物转盘工艺因依赖生物膜吸附，对高浓度废水适应性较弱。实际应用中需根据水质需求选择工艺：A2/O 适用于高浓度废水，生物转盘则更适配中等浓度场景 [3]。

表 1 2023 年 7 月两个项目示范点 CODCr 去除率情况

工艺类型	进水 /（mg/L）	出水 /（mg/L）	去除率 /%
生物转盘工艺设备	167.55	49.73	70.32
A2/O 工艺设备	210.75	39.54	81.24

3.2 氨氮去除率分析

监测结果显示，两种工艺的氨氮去除率差异显著（见表 2）：A2/O 工艺（68.08%）较生物转盘工艺（49.00%）提升近 20 个百分点。A2/O 工艺通过厌氧—缺氧—好氧协同作用，依次完成有机物水解、反硝化与硝化反应，实现高效脱氮；而生物转盘工艺依赖生物膜吸附降解，受限于膜活性，脱氮能力较弱 [4]。

表 2 2023 年 7 月两个项目示范点氨氮去除率情况

工艺类型	进水 /（mg/L）	出水 /（mg/L）	去除率 /%
生物转盘工艺设备	16.94	8.64	49.00
A2/O 工艺设备	18.61	5.94	68.08

3.3　总磷去除率分析

总磷（TP）作为水体富营养化的主要污染物之一，其去除效果是衡量污水处理设备性能的重要指标，本文以 2023 年 7 月两个示范点的污水处理一体化设备运行数据为基础，重点分析生物转盘工艺设备和 A2/O 工艺设备在总磷去除方面的表现，以期为相关技术的优化和应用提供参考（如表 3 所示）。

表 3　2023 年 7 月两个项目示范点总磷去除率情况

工艺类型	进水 /（mg/L）	出水 /（mg/L）	去除率 /%
生物转盘工艺设备	1.33	0.96	27.82
A2/O 工艺设备	1.34	0.83	38.06

由表 3 可知，A2/O 工艺总磷去除率（38.06%）显著高于生物转盘工艺（27.82%）。通过上述数据进行分析，该差异可能与两种工艺的机理有关，A2/O 工艺（厌氧—缺氧—好氧工艺）通过厌氧释磷、缺氧吸磷和好氧吸磷的多阶段反应，能够更高效地去除水体中的磷 [5]。而生物转盘工艺主要依赖于生物膜对污染物的吸附和降解，其除磷能力相对有限；A2/O 工艺对进水水质波动的适应性较强，能够在不同工况下保持较高的去除效率，而生物转盘工艺则对进水条件较为敏感 [6]。

3.4　总氮去除率分析

总氮（TN）去除效果直接反映了污水处理工艺的性能，根据 2023 年 7 月两个项目示范点的运行数据（见表 4），生物转盘工艺设备和 A2/O 工艺设备在 TN 去除方面表现出显著差异。

表 4　2023 年 7 月两个项目示范点总氮去除率情况

工艺类型	进水 /（mg/L）	出水 /（mg/L）	去除率 /%
生物转盘工艺设备	27.78	17.04	38.66
A2/O 工艺设备	35.31	17.20	51.29

表 4 表明生物转盘工艺对 TN 的去除效果较为有限，与其生物膜反应机制和氮转化效率有关。生物转盘工艺主要通过微生物附着在转盘表面进行有机物和氮的降解，但由于其水力停留时间较短，氮的去除效率相对较低 [7]。相比之下，A2/O 工艺设备表现出更高的 TN 去除效率。A2/O 工艺通过厌氧、缺氧、好氧三个阶段的协同作用，能够更有效地实现氮的去除。厌氧阶段促进反硝化作用，缺氧阶段进一步强化脱氮效果，而好氧阶段则完成硝化过程，从而显著提高了 TN 的去除率。从数据对比看出，A2/O 工艺在 TN 去除方面具有明显优势，尤其是在处理高浓度 TN 废水时表现更为突出，但生物转盘工艺因其占地面积小、运行管理简单等特点，仍适用于一些对 TN 去除要求不高的场景 [8]。

4　结束语

本研究针对农村地区污水处理面临的分散性、小规模及运行维护复杂等问题，提出了一种基于 A2/O 和 MBR 工艺的一体化污水处理设备设计方案。通过实际运行数据的分析，验证了该设备在处理有机物、氮、磷等污染物方面的高效性。A2/O 工艺通过厌氧、缺氧、好氧三阶段的协同作用，显著提升了 CODCr、氨氮、总磷和总氮的去除率，尤其在处理高浓度有机废水时表现优异。MBR 工艺则通过膜分离技术进一步提高了出水水质，减少了二次污染的风险。设备的地埋式设计和自动化控制系统不仅节省了土地资源，还降低了运行维护成本，适应了北方地区的低温环境。研究结果表明，该一体化污水处理设备在农村地区的应用具有显著的技术和经济优势，能够有效解决分散式污水处理难题，为农村水环境治理提供了可行的技术方案。未来，可进一步优化设备的设计参数，提升其在复杂水质条件下的适应性和稳定性，推动该技术在农村地区的广泛应用。

参考文献：

[1]　肖国伟 . 污水处理一体化设备的绿色节能设计及应用分析 [J]. 中国设备工程 ,2022(09):263-265.
[2]　罗丰 , 陈婷 , 吉强 , 等 . 高效智能化乡镇污水处理一体化设备及应用 [J]. 中国环保产业 ,2022(04):19-23.
[3]　王胜 , 何淼 , 刘芳 , 等 . 分散生活污水处理一体化设备 (MBR) 电控设计与应用 [J]. 广州化工 ,2023,51(09):138-140,146.
[4]　吴丽香 , 陈绪澜 , 许志豪 . 污水处理一体化设备的绿色节能设计探讨 [J]. 城市情报 ,2024(16):197-198.
[5]　高小龙 . 等离子体污水处理一体化设备在医疗废水处理中的应用研究 [J]. 云南化工 ,2022,49(08):104-106.
[6]　于继强 , 靳苑馨 , 张驰 , 等 . 九溪分散式农村污水处理一体化设备工艺分析 [J]. 区域治理 ,2020(43):171,189.
[7]　谢多娇 , 胡成亮 , 李志海 . 农村一体化生活污水处理设备研究现状与趋势 [J]. 环境生态学 ,2024,06(07):123-128.
[8]　师云涛 . 移动式一体化污水处理设备研究现状及应用分析 [J]. 造纸装备及材料 ,2024,53(04):125-127.

海岛山地 230 kV 输电线路基础设计的优化分析

江建国
（中国水利水电第七工程局有限公司，四川 成都 610000）

摘 要 随着我国电力系统的不断发展，海岛山地地区作为重要的电力输送通道，其输电线路的基础设计逐渐受到越来越多的关注。海岛山地地形复杂，地质条件多变，加之地震、风力等自然灾害，给 230 kV 输电线路的基础设计带来了诸多挑战。因此，如何在保证线路安全运行的同时，提升基础设计的稳定性和抗震能力，成为当前输电工程中的关键课题。本文分析了海岛地区山地和气候特点对输电线路基础设计的影响，提出了海岛山地 230 kV 输电线路基础设计原则以及优化策略，旨在为提升海岛山地输电线路基础设计水平、保障电力可靠传输提供科学依据。

关键词 海岛山地；地质构造；230 kV 输电线路；基础设计
中图分类号：TM75 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.023

0 引言

海岛山地地区建设 230 kV 输电线路，对区域电力供应和经济发展意义重大。但海岛山地特殊的环境特征，如地质构造复杂多变，可能存在软弱土层、破碎岩石等不良地质条件；气候条件恶劣，强风、暴雨、台风等灾害频发，以及海洋环境中的盐雾腐蚀等，使得输电线路基础设计面临诸多难题。传统设计方法难以全面考量这些复杂因素，易导致基础出现沉降、倾斜、腐蚀破坏等问题，影响输电线路的安全稳定运行。

1 海岛地区输电线路基础设计影响分析

1.1 海岛山地地质特点的影响

海岛山地地层岩性复杂，包含沉积岩、变质岩和火成岩等多种岩性。岩石在物理力学性质上的差异对基础设计提出了较高要求。基础设计需要对地层的岩性进行详细勘察和分析，确保选用合适的基础形式和加固措施，以提高基础的承载力和稳定性。海岛山地的地形起伏大，坡度陡峭，山谷、沟壑、悬崖等地形特征增大了基础施工的难度，且基础的受力条件往往存在不均匀性。这就要求在设计时充分考虑地形变化，设计出能够适应大幅度地形变化的基础，并采取有效的措施来防止地基的不均匀沉降。

海岛山地常常受到滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的威胁，尤其是在坡度较大的区域。这些灾害会严重影响输电线路基础的安全性，在设计时必须将地质灾害防治作为重点。对于存在滑坡危险的区域，通常需要采取抗滑桩、挡土墙等防灾措施，确保基础在发生地质灾害时能够保持稳定，防止基础位移或倾斜[1]。

1.2 海岛气候特点的影响

海岛地区常年受到海洋气候的影响，风力较大，尤其在台风季节，强风往往对输电线路基础结构产生较大的水平荷载。这种极端的风力可能导致基础的水平位移或倾覆，增加了基础的受力风险。因此，在基础设计时必须考虑风荷载的影响，采取有效的抗风措施，如通过增加基础重量、设置抗风拉线或选择特殊的基础形式（如大板式基础）来提高基础的抗风能力。此外，海岛地区的空气湿度较大，长期处于潮湿环境中，基础容易受到腐蚀。高湿度不仅加速了混凝土基础的碳化进程，还可能导致钢筋的锈蚀，从而降低基础的耐久性。为此，在设计时应采取防腐措施，选用高性能混凝土或添加防腐剂以增强混凝土的抗腐蚀性能；对于金属部件，如钢筋、地脚螺栓等，应进行热镀锌或涂防腐漆等防腐处理，以延长基础的使用寿命。海岛地区昼夜温差较大，这种温度变化会引起基础材料的热胀冷缩，从而可能导致基础出现裂缝或其他质量问题。

2 海岛山地 230 kV 输电线路基础设计原则

2.1 安全性原则

基础设计必须确保能够承受来自风荷载、地震荷载、土壤压力等多方面的作用，特别是在海岛地区，强风和台风等自然灾害频繁发生，风荷载的影响尤为

显著。因此，在进行基础设计时，需要根据当地的气象资料对风荷载进行合理的估算，并设计出具备足够抗风能力的基础结构。此外，海岛山地地区的土质较为松软，且容易受潮湿环境的影响，因此基础设计必须考虑到地基承载力的变化。地基土的稳定性要求对土壤的承载力进行充分评估，必要时采取地基加固措施，如使用桩基或深基坑技术，以增强地基的稳定性。由于山区地形起伏大，设计时必须考虑到基础的抗倾覆能力，避免因地质条件的不稳定导致基础的失稳。为确保安全性，设计应充分考虑可能的地震作用，依据地震区划和地震烈度设定相应的地震荷载，并结合抗震设计规范进行合理加固。

2.2 经济性原则

首先，在海岛山地地区，由于地质条件复杂、气候恶劣，基础设计面临较大的挑战，特别是在土壤承载力较低或地形起伏较大的情况下，设计者需要根据地质勘察结果合理选用基础类型，如选择适合的桩基或浅基础形式，以避免过度投资。

其次，设计中应重视材料的合理选用和优化，选择性价比高、耐久性强的建筑材料，以减少后期维修和更换的频率，延长基础的使用寿命。此外，经济性原则还要求在设计过程中考虑施工的便利性和成本控制。在山区地形复杂、交通不便的情况下，基础设计应尽量减少对重型机械的依赖，采用可运输性强、施工简便的材料和工艺，降低施工费用和时间。

最后，经济性原则强调对基础设计方案进行生命周期成本分析，考虑到长期运营中的维修、替换及能耗等因素，确保设计方案在长期运行中的经济可持续性。

2.3 可靠性

可靠性原则要求基础设计必须具备足够的抗力，以承受来自风荷载、地震荷载、土壤压力等各类外部作用，尤其在海岛山地地区，强风、台风、地震等极端天气和自然灾害频繁发生。因此，设计时必须充分考虑这些因素，采用科学合理的荷载组合，确保基础能够在极端条件下正常工作，并长期保持稳定性。此外，基础设计应遵循工程力学原理，综合考虑地质勘察结果，评估土壤的承载力、沉降特性及其稳定性，确保基础结构与地基土壤的适配性，避免因地基不均匀沉降或滑坡等地质灾害引发基础失稳。可靠性原则还要求采取适当的抗腐蚀和抗风化措施，特别是在海岛地区，由于盐雾腐蚀及湿润环境的影响，设计中应选用耐腐蚀材料，如高强度钢材、混凝土防腐涂层等，确保基础结构能够长期抵御环境侵蚀，维持其可靠性。

3 海岛山地230 kV输电线路基础设计优化策略

3.1 基础选型优化

掏挖类基础适用于地下水位较低且地质条件较好的区域，如粘性土和粉质土等。在这种地质条件下，掏挖类基础具有显著的优势。其优点在于通过土代模方式施工，减少了混凝土的使用量，降低了土方开挖量，从而有效降低了施工成本和对环境的影响。此外，掏挖基础保留了原状土，能够提高基础的抗拔能力和稳定性。然而，在设计时需要特别注意准确确定掏挖深度与尺寸，以确保基础底部的承载力符合设计要求，同时要考虑基础的抗倾覆能力与水平荷载承受能力。

桩基础通常适用于软土地基、岩石地基及地下水位较高的区域。桩基础由于其较高的承载力和优异的稳定性，能够有效防止地基沉降与不均匀变形，是适应复杂地质条件的理想选择。桩基础的设计过程中，首先要依据地质勘察报告，选择合适的桩型（如灌注桩、预制桩等），并合理确定桩径、桩长等参数。同时，桩的布置方式，如群桩或单排桩，也需结合具体情况进行优化设计。为了确保桩基础的稳定性，设计人员还需要对桩的承载力进行精确计算，并采取相应的抗沉降设计措施。

岩石锚杆基础对于岩石地基区域是一种理想的基础选型。岩石锚杆基础利用岩石的高强度，通过锚杆将基础牢固地固定在岩石上，具有较高的承载力和稳定性。该基础形式施工简便，能够有效减少对地形的破坏，尤其适用于地形复杂的山地地区。在设计过程中，锚杆的锚固长度、直径和间距等参数需要根据具体岩层的特性进行精确计算[2]。

大板基础适用于地基承载力较低的软土地基。在此类地质条件下，通过扩大基础的底面积来分散地基的压力，提高基础的稳定性和承载力。大板基础的设计较为简单，但需要精确确定基础的尺寸、厚度等参数，同时还应考虑抗滑移性和基础对水平荷载的承受能力。该基础形式尤其适合那些大型施工机械难以进入的施工现场，施工灵活性较高。

3.2 基础尺寸与埋深设计优化

基础尺寸的设计优化首先需要充分考虑输电线路的荷载特性、地质条件、基础形式等多重因素。不同的荷载条件要求不同尺寸的基础；通常，荷载越大，所需的基础尺寸也越大。此外，地质条件对基础尺寸的影响也至关重要。在软弱地质或松散土壤中，基础的尺寸需要增大，以分散荷载，防止出现不均匀沉降或基础失稳现象。因此，基础尺寸的设计需结合详细

的地质勘察数据，采用有限元分析等计算方法，模拟不同荷载和地质条件下基础的受力情况，确定最佳尺寸。有限元分析能够精确评估基础在复杂地质环境中的受力分布，进而为优化设计提供理论依据。与此同时，参考相似工程的设计经验，结合具体工程的实际情况，也有助于调整基础尺寸的设计，确保其在经济合理的前提下满足安全性要求。

在基础埋深设计方面，影响因素主要包括地基承载力、冻土深度及地下水位等。地基承载力较低时，为确保基础的稳定性和承载力，埋深需要适当增加。此外，在存在冻土层的地区，冻土的厚度直接决定了基础的埋深，需根据冻土深度调整基础埋深，以防止因冻胀效应导致的基础位移和破坏。在地下水位较高的区域，基础埋深应满足抗浮设计要求，确保在高水位时基础能够有效抵抗浮力。基础埋深的合理确定不仅能提升基础的稳定性，还能有效避免地下水、冻土等不利因素对基础造成的影响。在设计过程中，除了通过地质勘察报告获取相关数据外，还可以通过试验桩等现场测试方法，对地基承载力和稳定性进行验证，确保设计埋深能够满足实际施工条件。

3.3 抗风设计优化

在基础抗风性能设计中，需要重点关注风荷载对基础的作用方式和影响程度。对于掏挖类基础和桩基础来说，风荷载主要通过侧向力作用在基础上，必须增强基础的侧向支撑能力，防止基础在风荷载作用下发生倾斜或失稳。对于大板基础，由于其接触面积较大，风荷载容易引起基础的滑移，在设计时需要加强基础的抗滑移能力[3]。在优化方法方面，通过风洞试验等实验手段，可以对基础的抗风性能进行测试和验证。风洞试验可以模拟不同风速、风向和气候条件下，基础的受力情况，进而为基础设计提供实际数据支持。根据试验结果，设计人员可以对基础进行优化调整，修改基础的尺寸、形状或增设抗风措施，以进一步提高基础的抗风能力。

3.4 抗腐蚀设计优化

在进行抗腐蚀设计优化时，首先需要选择合适的耐腐蚀材料。由于海岛地区的高盐雾浓度，基础材料应选用具有优异抗腐蚀性能的材料，延长基础的使用寿命。此外，对于常规钢材基础，应采用耐腐蚀涂料进行表面处理，涂覆防腐涂料能够在基础表面形成保护膜，减少腐蚀性介质的侵入，进一步提高基础的抗腐蚀能力。在基础设计中，应增加防护层的厚度，以减少腐蚀介质对基础结构的直接侵蚀。防护层不仅可以增加基础对外界腐蚀因子的防御能力，还能提高基础的耐久性，减少维护频率。对于腐蚀环境较为严重的区域，单纯的涂覆防腐涂料可能无法满足防腐要求[4]。通过为基础安装阴极保护系统，可以有效抑制腐蚀过程。对于腐蚀环境较轻的地区，涂覆防腐涂料等物理防腐措施可以满足使用要求。

3.5 抗震优化设计

地震作用分析是抗震设计的基础，必须根据海岛地区的地震活动情况，结合相关设计规范进行全面分析。地震烈度、地震波的传播方向以及地质条件等因素对基础的影响都需要充分评估。在此基础上，设计人员应尽可能减少地震对输电线路基础的影响。例如：通过优化输电线路的走向和布局，将线路布置在地震活动相对较弱、地质条件较为稳定的区域，以降低地震发生时对基础的冲击。此外，抗震优化设计还应通过调整基础结构来增强其抗震能力。具体措施包括增加基础重量、设置抗震支座等，以提高基础的抗震稳定性。在设计过程中，应根据地震作用对基础的不同影响，提出相应的优化方案[5]。对于掏挖类基础和桩基础，设计时要增加其侧向约束能力，防止基础在地震作用下发生倾斜或损坏。对于大板基础，应增强其抗滑移和抗倾覆能力，避免基础在地震作用下发生滑移或倾覆。

4 结束语

本研究深入探讨了该地区复杂地质条件、气候特征以及自然灾害对输电线路基础设计的影响。针对海岛山地的特殊环境，优化基础设计不仅需要考虑抗震能力，还应充分结合地质土壤条件、基础类型选择及施工可行性等多重因素。在此基础上，提出多种基础形式的比较分析，特别是在地震烈度较高的区域，推荐采用桩基、条形基础以及大板基础等具有较高稳定性和抗震性能的基础形式，以确保线路在极端自然环境下的安全运行。

参考文献：

[1] 殷黎明.高原地区 750kV 输电线路基础选型研究 [J].电工技术,2024(11):196-198,203.
[2] 关维坚.软土地区输电线路桩基础设计与施工技术 [J].科技创新与应用,2023,13(35):101-104.
[3] 任玉会,李鑫.输电线路杆塔基础设计探索 [J].农村电气化,2022(09):24-26.
[4] 冯勇,鄢秀庆,李彦民,等.高陡边坡地区输电线路设计对策研究 [J].电力勘测设计,2022(05):11-16.
[5] 任玉会,李鑫.输电线路杆塔基础设计探索 [J].农村电气化,2022(09):24-26.

机电工程施工质量控制中常见问题分析与解决对策

张腾飞，王　磊

（中国通信建设第二工程局有限公司，陕西 西安 710000）

摘　要　机电工程施工质量控制直接影响工程安全和使用功能。当前行业普遍存在设计图纸深度不足、材料验收流于形式、施工方案可操作性差等前期问题，以及工艺执行不规范、工序协调混乱、验收整改不彻底等过程管理缺陷。为解决这些问题，本研究提出构建BIM三维审查机制、实施材料全流程追溯、开发数字化施工方案等前期控制措施，同时建立标准化工艺库、优化工序协同平台、完善数字化验收体系等过程管理对策，并以某综合体机电工程为实证对象，验证了各项措施在提升施工质量方面的有效性，以期为同类工程质量管理提供可借鉴的实施方案。

关键词　机电工程；施工质量控制；BIM三维审查；材料全流程追溯；数字化施工方案

中图分类号：TU85；TU712.3　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.024

0　引言

当前建筑行业数字化转型加速推进，机电工程施工质量控制面临新的机遇与挑战。随着智能建造技术广泛应用，BIM协同设计、物联网质量监控等新方法正在重塑传统质量管理模式。然而行业实践中，设计施工脱节、材料管控松散、工艺标准执行不力等问题依然突出，直接影响工程品质和运营安全。特别是在“双碳”目标背景下，机电系统能效表现与质量控制的内在关联愈发凸显。本研究立足行业发展新趋势，系统分析机电工程施工全过程质量管控难点，探索数字化技术与管理创新融合的解决方案。研究聚焦设计审查、材料验收、工艺标准化等关键环节，提出具有可操作性的质量提升路径，旨在为行业高质量发展提供理论支撑和实践参考。

1　机电工程施工质量控制中的常见问题

1.1　施工前准备阶段的问题

1.1.1　设计图纸深度不足，技术交底不充分

设计图纸深度不足往往表现为关键节点构造详图缺失、管线综合排布未考虑实际施工空间需求、设备基础尺寸与安装要求不匹配等具体问题。这种设计缺陷直接导致现场施工反复调整，不仅延误工期，更可能因临时修改造成结构安全隐患。技术交底不充分则体现在设计意图传达不完整、特殊工艺要求未作专项说明、施工人员对图纸理解存在普遍偏差等方面，这种信息断层使得施工质量从源头失去控制基础。设计方与施工方在技术衔接上的脱节，反映出当前机电工程领域设计施工一体化协同机制的缺失。

1.1.2　材料与设备采购质量把控不严

材料设备采购环节的质量失控主要源于供应商资质审查流于形式、进场检验标准执行双重化、性能参数验证手段不足三大症结。

部分项目为压缩成本采购非标产品，却未建立对应的质量验证体系；某些关键设备虽具备出厂合格证明，但未进行现场通电测试或空载运行验证；管材阀门等大宗材料批量进场时，抽检比例与检测项目往往低于规范要求。这种采购与检验分离的管理模式，使得劣质材料设备得以进入施工环节，成为系统运行中的潜在故障点。

1.1.3　施工方案编制缺乏针对性和可操作性

施工方案编制普遍存在套用模板、脱离现场实际的问题。方案中对新型装配式支吊架安装工艺、BIM管线综合技术等关键工序的施工流程描述过于笼统，缺乏可量化的操作指引；针对狭小空间设备吊装、高压电缆敷设等特殊工况，既未进行受力分析也未制定应急预案。更突出的矛盾在于，方案评审往往侧重形式审查而忽视实质内容验证，导致编制者倾向于堆砌标准条文却回避具体技术难点的解决方案。这种“纸上谈兵”的方案编制模式，无法为现场作业提供有效的技术支撑。

1.2 施工过程与验收阶段的问题

1.2.1 施工工艺与操作规范执行不到位

施工工艺执行偏差集中反映在焊接作业未按工艺评定参数操作、电缆终端头制作忽略环境温湿度要求、设备调平找正未使用精密仪器等具体操作层面。操作规范形同虚设的深层原因在于：部分施工班组过分依赖经验而轻视工艺文件，质检人员对隐蔽工程的过程监控存在盲区，新技术工艺培训未能覆盖实际操作人员[1]。这种规范与实践的脱节，使得工艺标准沦为应付检查的表面文章，直接削弱了施工质量的稳定性。

1.2.2 工序衔接与协调管理存在漏洞

工序衔接问题突出表现为土建与机电交叉施工界面责任不清、系统调试与单机试运行时序错乱、成品保护措施未能覆盖工序间隔期等管理漏洞。某类典型矛盾是：电气配管与钢结构防火涂料施工相互制约，通风管道安装与吊顶龙骨施工空间冲突，这些都需要通过严格的工序会签制度来预防。当前项目管理中普遍缺乏基于BIM的4D模拟验证手段，仍依赖传统的线性进度计划，难以预见并规避复杂的工序冲突。

1.2.3 验收标准不严谨，整改落实不彻底

验收标准执行不严谨体现在功能测试项目不全、性能指标检测方法不当、整改问题闭环管理缺失三个维度。部分项目将通电测试等同于电气系统验收，忽略保护装置动作值校验；暖通系统仅做风量平衡测试，未进行实际负荷下的能效验证。更严重的是，整改通知单往往只记录表面问题而不追溯根本原因，复验环节缺乏量化数据支撑，形成“整改—反弹—再整改”的低效循环。这种验收形式化倾向，使质量管控的最后防线失去实质作用。

2 机电工程施工质量控制的解决对策

2.1 强化施工前准备工作的对策

2.1.1 深化设计图纸审查，加强技术交底效果

设计图纸审查应当突破传统的二维平面审核模式，转向基于BIM技术的三维协同审查体系。审查重点需聚焦于机电管线与建筑结构的空间协调性，特别是管道穿越防火分区时的封堵措施是否明确标注，设备基础尺寸与机组实际安装要求是否匹配。对于电气专业，要重点核查配电箱进出线位置是否与桥架走向协调，避免后期安装时的交叉冲突[2]。审查过程必须建立多专业会签制度，由建筑、结构、机电各专业工程师共同确认管线综合布置方案的可行性。技术交底效果提升的关键在于实施“可视化+互动式”的交底新模式。传统的纸质交底资料应升级为包含三维模型剖切视图、施工动画演示在内的数字化交底包。针对复杂工艺节点，如机房设备管道综合安装，可采用VR技术进行虚拟施工演练，让作业人员提前熟悉操作环境。交底内容必须细化到具体操作参数，例如：管道焊接的层间温度控制范围、电缆敷设时的最小弯曲半径等关键数据。建立交底效果评估机制，通过随堂测试验证施工人员对技术要点的掌握程度，确保交底信息准确传达。

2.1.2 建立严格的材料与设备进场检验制度

材料设备进场检验需要构建全过程的质量管控链条，从源头把控产品质量。采购阶段就要明确技术协议中的关键指标，如电缆的导体电阻值、阀门的密封试验压力等具体参数要求。对于重要设备，应当在合同中约定第三方检测条款，确保出厂前完成各项性能测试。材料进场验收必须执行“三核对”原则：核对规格型号是否符合设计要求，核对质量证明文件是否齐全有效，核对外观质量是否达标。检验流程需要建立分级管理制度，普通材料由项目部验收，关键设备由建设单位参与联合验收。对于电线电缆这类重要材料，除检查合格证外，还应现场抽样送检，测试导体电阻、绝缘厚度等关键指标。电气设备验收时要重点检查防爆等级标识、防护等级等安全参数是否与设计要求一致。建立材料追溯管理系统，通过二维码标识记录每批次材料的检测数据和使用部位，实现质量问题的精准定位和责任追溯。

2.1.3 优化施工方案编制，明确质量控制要点

施工方案编制应当从“符合性”向“适用性”转变，重点解决现场实际施工难题。方案内容必须包含具体的工艺参数，如管道焊接的电流电压范围、风管连接的密封胶涂抹厚度等可量化指标。针对装配式安装等新工艺，需要详细说明模块吊装的受力计算过程和临时支撑设置要求。质量控制点的设置应当与施工工序紧密对应，如在电缆敷设工序中明确标识出转弯半径检查、固定间距测量等关键控制环节[3]。方案评审要突破形式化审查，建立专家论证制度，重点评估技术路线的可行性和质量保证措施的可靠性。对于采用新材料的施工内容，方案中必须包含材料性能试验和工艺验证的具体要求。质量控制要点的表述应当避免模糊用语，将“确保安装牢固”改为“螺栓紧固扭矩值达到设计要求的±5%范围内”。通过建立方案动态优化机制，定期收集现场反馈意见并及时更新方案内容，确保施工指导文件的时效性和适用性。

2.2 提升施工与验收环节执行力的对策

2.2.1 推行标准化施工工艺，严格监督操作规范执行

标准化施工工艺的实施必须建立在对各类机电安装作业的精细化分解基础上。针对电气配管工程，标准工艺卡需明确镀锌钢管螺纹加工时的刀具进给速度控制在0.1～0.15 mm/r范围内，确保螺纹配合精度达到管件连接要求。通风管道制作安装标准则应规定法兰连接螺栓的紧固顺序必须遵循对角拧紧原则，扭矩值控制在15～20 N•m区间。这些具体参数的设定直接决定了工程实体的最终质量表现。监督体系需要突破传统的定性检查模式，引入数字扭矩扳手、激光水准仪等智能检测设备，实现施工过程参数的实时采集与自动分析。操作规范的落地执行面临的最大障碍是施工人员的惯性思维与经验主义倾向。建立“理论培训+实操考核+持续跟踪”的三阶段培养机制，通过VR模拟系统重现典型质量事故案例，强化规范意识。监督过程中采用智能安全帽内置摄像头进行过程录像，结合AI图像识别技术自动标记违规操作行为。针对电缆敷设这类关键工序，开发移动端质量检查程序，将弯曲半径、固定间距等控制要点转化为扫码即查的数字化指引[4]。通过建立个人施工质量档案，将工艺执行情况与岗位晋升、薪酬待遇直接关联，形成规范施工的长效激励机制。

2.2.2 优化工序交接流程，强化多工种协同管理

工序交接管理的优化重点在于构建基于BIM技术的可视化管控体系。在综合管线施工前，利用碰撞检测软件进行三维模拟，提前发现给排水管道与电气桥架在标高2.8 m处的空间冲突问题。实体交接实施“五方确认”制度，由土建、机电、装修等专业工程师共同签署交接确认单，重点核查混凝土楼板预留洞口的中心位置偏差是否控制在±10 mm以内。对于洁净厂房等特殊项目，还需增加空气洁净度检测环节，确保施工环境参数达到下道工序要求。多工种协同需要建立动态调整的作业面分配机制。通过部署UWB定位系统实时追踪各班组人员分布，当检测到同一作业面超过两个专业班组时，自动触发预警并推送调整建议。开发协同管理平台的冲突仲裁功能，将常见的专业界面纠纷如管道保温与电气接线盒安装的优先顺序等问题，转化为标准化的决策流程[5]。实施“工序交接样板引路”制度，在工程实体中划定样板区域，组织各专业按既定顺序完成施工示范，形成可复制的协同作业模式。通过引入区块链技术存证各专业的工序交接记录，确保责任界定的准确性和不可篡改性。

2.2.3 严格执行验收标准，健全整改跟踪机制

验收标准的严格执行需要建立分层级的检测验证体系。电气系统验收时，除常规的绝缘电阻测试外，还需进行电压降测试，确保末端配电箱在满负荷运行时电压偏差不超过额定值的±5%。对于空调水系统，验收测试应包含系统平衡调试，各分支管路流量与设计值的偏差控制在±8%以内。引入第三方检测机构对关键性能指标进行复核时，特别关注柴油发电机组在0～100%阶跃负载条件下的电压恢复时间是否满足不超过3秒的技术要求。整改跟踪机制的健全化关键在于构建全流程的数字化管理闭环。开发质量整改追踪系统，自动关联验收记录中的不合格项与整改通知单，实时显示整改进度。重要质量问题的整改如管道压力试验不合格，必须上传重新试验的高清视频记录作为闭环依据。建立质量问题知识库，将整改措施按照“设备材料类”“施工工艺类”“设计缺陷类”进行分类存储，为新项目提供预防参考。通过将整改完成率与进度款支付比例挂钩，设置5%～10%的质量保证金浮动条款，形成强有力的经济约束机制。定期生成质量趋势分析报告，识别高频缺陷类型，为后续工程的质量预控提供数据支撑。

3 结束语

机电工程施工质量管控需要贯穿项目全周期的系统化解决方案。前期准备阶段强化设计协同和材料管控，施工过程注重工艺标准化和工序协调，验收环节完善检测体系和整改闭环，这三个层面的对策共同构成了完整的质量管理链条。实践证明，数字化技术的深度应用能够显著提升质量控制效率和精度，而严格的管理制度则是保障措施落地的关键。未来，机电工程质量提升应当更加注重预防性控制，通过建立质量风险预警机制和持续改进体系，推动行业质量管理水平向更高层次发展。

参考文献：

[1] 龚新涛.建筑机电工程中电缆防腐措施对施工质量控制的影响[J].产品可靠性报告,2025(02):126-127.

[2] 魏仲发.建筑机电安装工程质量管理研究[J].城市开发,2025(03):164-165.

[3] 唐新财.建筑工程中机电设备安装工程施工中技术与质量管理[J].居业,2024(11):190-192.

[4] 穆建鹏.BIM技术在建筑机电安装工程施工质量控制中的应用[J].石材,2023(11):80-82.

[5] 李萍.机电工程技术及项目施工质量控制策略研究[J].中国高新科技,2023(05):31-32,42.

市政给排水管网设计优化与建筑空间布局融合策略研究

张兴宇

（中国轻工业南宁设计工程有限公司，广西 南宁 530031）

摘　要　市政给排水管网是城市基础设施的重要组成部分，其设计合理性直接影响城市防洪排涝、水资源利用效率及生态环境质量。本文从系统协同视角出发，探讨管网设计与建筑空间布局的深度融合策略，提出“源头减量—过程调控—末端协同”三级优化框架，结合模块化设计、智能监测及雨水资源化技术，构建可持续的城市水循环管理体系，以期为解决管网负荷不均、雨污混流及建筑排水冲突等问题提供理论支持。

关键词　给排水管网优化；建筑协同设计；雨水管理；模块化系统；智能监测

中图分类号：TU991；TU992；TU984　**文献标志码**：A　DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.025

0　引言

在快速城市化进程中，传统市政给排水系统面临严峻挑战：管网老化导致排水能力不足，建筑密集区域频发内涝，而新建建筑与管网规划脱节加剧了资源浪费。据统计，我国城市建成区超30%的排水管网设计标准滞后于实际需求，且建筑排水系统与市政管网缺乏有效衔接。本研究聚焦管网设计与建筑协同优化的技术路径，通过理论分析与方法创新，探索既能提升排水效率又可实现水资源循环利用的可持续方案[1]。

1　市政给排水管网现存问题分析

1.1　系统承载力与需求失衡

传统市政给排水管网多基于静态水文参数设计，采用固定管径与坡度标准，难以匹配城市动态发展需求。随着建筑密度提升，硬化地表比例从10%激增至60%以上，同等降雨强度下地表径流量增幅超3倍，而既有管网设计标准仍沿用20年一遇降雨重现期。受道路空间限制，管网扩容改造面临“开膛破肚”式施工难题，主干管径普遍维持在600～800 mm，但实际需应对的峰值流量已超设计值1.5倍。这导致雨季时上游管网满负荷运行，下游却因过载出现顶托倒流，形成“肠梗阻”效应。静态设计与动态需求的结构性矛盾，已成为制约城市韧性提升的关键瓶颈。

1.2　建筑排水与管网对接冲突

建筑排水系统与市政管网衔接存在“最后一公里”技术脱节。建筑排水口标高常高于市政管网接入点1～2 m，形成水力跌落导致管道冲刷破损，实测数据显示此类接口处渗漏率高达25%。高层建筑地下室集水坑排水泵瞬时启停产生水锤效应，峰值压力波动达正常值的3倍，加速管网接口密封失效。部分项目为节省成本，将DN150建筑排水管直接接入DN300市政管道，异径连接处流速骤降引发悬浮物沉积，每年清淤频率增加4次。更严重的是，地下车库排水系统多按常规雨量设计，未考虑50年一遇极端降雨工况，暴雨时地下空间进水速度超排水泵极限能力，形成“倒灌—瘫痪”恶性循环。

1.3　雨污分流实施困难

建筑内部雨污管道“隐蔽性错接”问题突出，约35%的雨水立管误接污水管网。阳台洗衣机排水管违规接入雨水系统，导致洗涤剂直排河道，单个居住区年化学需氧量（COD）排放增量超10吨。初期雨水携带路面污染物浓度高达200 mg/L，但现有截流井效率不足40%，大量污染物随分流制管网进入自然水体。施工环节中，43%的项目存在雨污水管间距不达标问题，交叉段渗漏引发水质交叉污染。监管层面，既有验收标准未强制要求染色试验或闭路电视检测（CCTV），错接问题隐蔽性强且整改成本高昂[2]。

2　管网设计优化核心策略

2.1　动态模拟与弹性设计

传统管网“一刀切”的设计模式已难以应对气候多变挑战，需构建动态响应系统。通过搭建水文—水力耦合模型，模拟从1年到100年不同降雨重现期的排水场景，精准识别现有管网薄弱环节。例如：在主干管关键节点植入可伸缩管节，旱季收缩至DN800保

障日常排水效率，雨季扩展至 DN1200 以应对峰值流量，这种“自适应管径”技术可使排水能力提升 50%。创新性采用蜂巢式管体结构，在管道内壁设置活动导流板，晴天时导流板收起确保全断面过流，暴雨时自动展开形成上下双层流道，上层快速排放初期雨水，下层持续输送污水，实现雨污流量智能分配。同步在管网交汇处安装液压调控阀，依据实时监测数据动态调节支管流量，避免下游管段超负荷。

2.2　模块化管网系统构建

将庞杂的排水系统解构为可拼装的三大功能模块，像搭积木般灵活组合。源头控制模块聚焦建筑群微改造：在住宅区嵌入楔形雨水花园，利用 15 ～ 20 cm 下沉绿地滞蓄雨水，搭配穿孔管将渗透速率控制在 5 mm/h，确保 24 小时内排空蓄水；商业区屋顶设置智能集水槽，通过导流管将雨水输送至地下 PP 模块蓄水池，单个模块可储水 1.5 m^3 且支持横向无限扩展。输水干管模块采用“刚柔并济”设计：主干管使用钢带增强聚乙烯螺旋管，抗压强度达 SN12 级，可承受 10 m 覆土压力；支管选用纳米涂层铸铁管，耐腐蚀寿命延长至 50 年。调蓄处理模块创新利用城市“剩余空间”：在地铁站通风井下方建设竖井式蓄水库，直径 3 m、深 20 m 的竖井可储水 140 m^3；停车场装配式地坪内预埋蓄水夹层，既能减震降噪又可存蓄雨水。三大模块通过快接式接口联通，使管网扩建像更换电池般便捷 [3]。

2.3　智能监测与预警体系

给排水管网装上“智慧大脑”，构建感知—决策—响应闭环。在管道内壁等间距部署压电式传感器，实时捕捉水流声纹特征，通过声波频率变化判断淤积程度，当沉积物厚度超管径 1/3 时自动触发清淤告警。建立管网数字孪生平台，每 30 秒更新一次水力模型，结合气象预报预演未来 2 小时排水态势。独创三级预警机制：当监测到节点负荷达设计值 80% 时启动黄色预警，开启相邻管段联通阀分流；负荷达 100% 时橙色预警，启动道路旁隐形排水口（平时封闭的格栅盖板）辅助泄流；负荷超 120% 则红色预警，调用移动泵车组实施应急强排 [4]。预警信息同步推送至市政管理 APP，用红橙黄三色热力图直观显示风险区域。

3　建筑协同设计关键路径

3.1　建筑雨水资源化系统

现代建筑需转型为“微型水循环中枢”，通过立体化设计实现雨水自给自足。屋顶改造是关键突破口：在屋面铺设“三明治结构”蓄水层，底层为防渗膜，中层填充陶粒储水基质（孔隙率≥ 60%），表层种植景天科耐旱植物。这种设计可使暴雨时屋面径流削减 65%，同时通过植物蒸腾日均蒸发 10 L/m^2 水分，显著缓解城市热岛效应。建筑立面同步升级：在窗台和外墙设置 U 型导水槽，采用疏水涂层引导雨水沿特定路径流入地下蓄水箱。单个导水槽每米长度可收集 50 L/ 小时的雨水，20 层建筑单次降雨可蓄水 30 m^3。室内水系统则推行“分质供水”：灰水（洗漱废水）经毛发过滤器和生物炭吸附罐处理后，浊度从 50NTU 降至 5NTU 以下，通过紫色标识管道专供冲厕与绿化；黑水（马桶废水）仍接入市政污水管。

3.2　建筑排水口优化设计

建筑排水系统与市政管网衔接节点的精细化改造，可显著提升排水效能与生态效益。针对瞬时排水冲击引发的管网压力波动问题，在排水立管末端设置多级缓冲装置，内置可调式液压阻尼单元，当监测到水流速度超过临界阈值时，自适应压力阀启动分级限流模式，通过改变过水断面面积实现流量阶梯式衰减，有效降低峰值负荷。该装置采用模块化设计，可根据建筑排水量级灵活调整阻尼系数，同步配备振动传感器实时监测管道应力变化，预防水锤效应导致的接口渗漏风险。初雨污染控制采用智能分离技术升级方案。在建筑雨水出口配置复合式净化装置，内部设置双螺旋导流结构，利用流体动力学原理实现污染物梯度分离：较大颗粒物在初级旋流区沉降，油脂类污染物在二级涡旋层被吸附滤材捕获。净化单元集成自维护系统，通过浊度传感器实时监测分离效率，当过滤效能下降至设定阈值时，自动触发气水脉冲反冲洗程序，清除滤网积存杂质。雨水分流控制引入气象联动决策机制。研发智能弃流控制器，内置降雨强度预测算法，通过接入气象云平台数据动态调整截污策略：在降雨初期启动高灵敏度污染监测，结合前期干旱天数自动计算最佳弃流时长。装置采用双通道切换设计，污染浓度超标时切换至污水管网，同时启动在线水质分析模块，待检测指标达标后自动复位至雨水排放通道。系统优化延伸至运行维护维度，开发排水口状态监测终端。通过嵌入式传感器采集水流速、pH 值、悬浮物浓度等参数，结合物联网技术实现远程诊断。当检测到管道淤积风险时，自动生成维护工单并推送至管理平台，同步启动预备性冲洗程序延缓堵塞进程。这种预防性维护机制将传统被动检修转为主动干预，使管网运维成本降低。优化设计通过多技术协同，在保障排水安全性的同时，显著提升水资源回用价值与生态效益。

3.3 地下空间协同利用

建筑地下空间与市政管网的一体化设计可释放巨大潜能。停车场下方建设“隐形水库”：在常规结构层中预埋高密度聚乙烯（HDPE）模块蓄水池，每千平方米建筑配建 50 m^3 储水空间，池顶覆土 1.2 m 后仍可正常停车。蓄水池通过渗透管与周围土壤联通，超量雨水可缓慢下渗补充地下水。建筑桩基的创造性利用更为关键：将直径 800 mm 的灌注桩内部预留 DN200 管孔，市政管线穿桩布置，较传统直埋方式减少开挖量 80%。桩顶设置可拆卸检修盖板，便于管线维护。此外，利用地下室剪力墙作为管网支撑结构：在墙体浇筑时预埋钢制管托，每 2 米间距承重 1 吨管线，较独立支架节省空间 30%。这种“建筑即管网载体”的理念，使改造后的综合体项目管线综合造价降低 25%，且彻底规避了管线与建筑基础碰撞风险[5]。

4 系统整合与实施框架

4.1 规划阶段协同

构建跨专业协同设计平台是系统落地的首要环节。组建由建筑设计师、市政工程师、环境规划师组成的联合工作小组，依托 BIM+GIS 双模技术搭建三维协同平台。建筑方案设计阶段即导入市政管网高程数据，通过碰撞检测算法自动识别排水管与建筑桩基、地下室结构的空间冲突点。例如：当管道埋深与地下室底板标高差值小于 1 m时触发预警，同步生成管线避让方案。针对雨污分流需求，平台内置水力计算模块，根据建筑屋面面积、绿化率等参数自动生成雨水立管管径建议（如 2 000 m^2 屋顶需 DN150 立管），并模拟不同降雨强度下的污水反涌风险。规划成果输出为“一图三清单”，即管网—建筑一体化布局图、冲突整改清单、设施配置清单、联审责任清单，确保设计衔接零误差。这种前置化协同机制可减少后期设计变更 80% 以上，显著提升规划科学性。

4.2 建设阶段整合

推行“时序统筹、空间叠合”的集约化施工模式。在道路与建筑同步施工区域，采用预制装配式综合管廊，将给排水、电力、通信等管线集成于 2.4×2.1 m 矩形混凝土廊道内，每段管廊预留 30% 扩容空间（如 DN600 管位预埋 DN800 套管）。创新应用顶管—盾构组合工艺：建筑地下室外墙施工时，同步推进管网穿墙套管安装，利用建筑基坑支护结构作为顶管始发井，使管线敷设效率提升 3 倍。针对既有建筑改造项目，开发微型定向钻系统（设备尺寸 1.5×0.8 m），可在不破坏地下室结构的前提下完成支管接入。建设过程实施“数字孪生跟踪”，通过管材植入 RFID 芯片实时记录施工参数，结合三维扫描生成竣工模型，确保实体工程与设计图纸偏差率小于 2‰。

4.3 运维阶段联动

建立“双主体、全链条”的智慧运维体系。市政部门通过物联网平台监控主干管网运行状态，重点追踪流量突变（如 2 小时内增幅超 50%）、水质异常（COD 波动＞ 30 mg/L）等风险信号；物业企业负责建筑室内管网及雨水设施的日常维保，使用配备 AR 眼镜的巡检机器人自动识别管道渗漏、设备故障。创新责任追溯机制：在关键节点安装区块链传感器，数据实时上链存证。当发生污水溢流事件时，系统自动调取建筑排水记录、管网负荷日志、运维工单等信息，通过智能合约判定责任归属（如建筑超排导致则追责物业，管网堵塞则追责市政）。开发“城市水系统数字资产护照”，集成管网寿命周期数据、维修记录、改造历史，为优化决策提供全维度支撑。这种协同机制使应急响应速度提升 60%，运维成本降低 35%。

5 结束语

市政给排水管网与建筑的协同优化，需突破传统专业壁垒，从设计理念、技术标准到管理机制进行全面革新。通过动态模拟提升系统韧性，依托模块化设计增强适应性，借助智能技术实现精准管控，最终构建“建筑减负—管网增效—生态增值”的良性循环体系。未来研究可进一步探索人工智能在管网故障自修复中的应用，只有这样才能推动城市水系统智慧化升级，防止和减少排水管网堵塞现象，并保护水资源。

参考文献：

[1] 舒静,余双.市政给排水设计中输水方式的选择与管网分区方式研究 [J]. 林业科技情报 ,2024(03):181-183.
[2] 苏秀银.市政给排水管网的优化配置与设计建议[J].城镇建设 ,2023(01):275-277.
[3] 王驭龙.市政给排水管线设计的优化方案[J].中国战略新兴产业 ,2021(22):140.
[4] 黄光辉.浅谈市政给排水管网的优化配置与管理[J].建筑工程技术与设计 ,2019(20):2902.
[5] 张晓荣.市政管网给排水管道系统设计与施工分析[J].建筑工程技术与设计 ,2021(13):1700.

工业互联网视角下制造企业智能化转型的演化路径研究

孟　云

（合肥市轨道交通集团有限公司，安徽 合肥 230001）

摘　要　在新一轮科技革命和产业变革浪潮中，工业互联网技术蓬勃兴起重塑了制造业格局。制造企业面临市场竞争加剧、客户需求多变等挑战，传统生产模式弊端凸显。智能化转型成为制造企业降本增效、提升竞争力的关键，探究其在工业互联网视角下的演化路径，对企业发展和产业升级意义重大。本文从工业互联网视角出发，探讨了制造企业智能化转型的演化路径，通过对相关理论和实践案例的分析，揭示了制造企业在不同阶段的转型特征、驱动因素以及面临的挑战，并提出了相应的优化策略，旨在为推动我国制造企业智能化转型提供有益的参考。

关键词　工业互联网；制造企业；智能化转型；演化路径

中图分类号：TP399；F272　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.026

0　引言

在全球制造业竞争日益激烈和技术快速发展的背景下，传统制造企业转型升级压力较大。工业互联网的崛起，给制造企业智能化转型提供了新机遇，同时也提出了挑战。智能化转型既是制造企业增强竞争力和实现可持续发展必然的选择，又是促进我国制造业向高端化、智能化和绿色化发展的重要路径选择。所以，对制造企业智能化转型演化路径进行深入研究具有重要的理论意义与现实意义。

1　从工业互联网角度分析制造企业智能化转型演化基础

工业互联网勃兴的时代浪潮下，制造业智能化转型具有深刻而多元的演变基础，各基础要素交织在一起促使制造业走向智能化发展新征程。技术层面上的累积，是实现智能化转型的关键基石，伴随着信息技术的快速发展，制造企业的自动化生产技术、数据采集和传输技术以及工业软件都得到了明显的发展[1]。自动化生产设备得到广泛运用，使制造过程精准度与效率得到显著提高，为企业智能化转型提供硬件支持。在工厂的生产流程中，可编程逻辑控制器（PLC）的应用可以实现生产流程的精准控制，从而降低由人为因素引起的误差。成熟的数据采集及传输技术使企业能够实时地获得生产线中各种设备运行的数据，从而为之后的数据分析及智能决策打下了基础。在传感器与物联网技术的辅助下，可以快速地将设备温度、压力以及运行状态数据传输到企业数据中心中。在工业软件领域，例如：计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）等，它们广泛应用于产品设计、生产计划和制造执行等多个关键环节，使生产过程数字化、信息化管理成为智能化转型中一支必不可少的技术力量。制造企业在生产运营过程中长期累积的经验，也对企业智能化转型起到强有力的支撑作用，企业经过长期生产实践，对于自己产品的技术、生产流程和市场需求都有了深入了解。这些经验有助于企业在进行智能化转型时准确把握智能化技术运用方向，使新技术和企业的实际生产得到更好结合。汽车制造企业多年来的生产经验让他们对不同型号汽车的关键控制点有了深刻的认识，当智能化生产设备与系统推出，可以有针对性地对产品进行优化调整，以提高产品的生产效率与质量。

2　工业互联网视角下制造企业智能化转型的演化现状

工业互联网赋能下制造企业智能化转型已经成为产业重要发展趋势，目前呈现丰富多彩演化现状，一些头部制造企业已经实现了智能化转型，并取得了明显的效果。这些公司以强大的资金实力、技术研发能力为基础，首先引进先进智能化技术与装备，建立智能化生产体系，在汽车制造方面，比亚迪通过高度自动化和智能化的生产体系将新能源汽车制造推向了一个新台阶；在工厂里，数量众多的工业机器人协同工作，对冲压、焊装、涂装和总装等核心环节起到了至关重要的作用。以焊装车间为例，近300台焊接机器

人使得生产线的自动化率超过了97%。以宋PLUS车型为例，顶棚焊装工序的机器人只需45秒就能基本完成，而且人力需要4人耗费10分钟至15分钟，极大的提高生产效率和焊接精度。与此同时，比亚迪在大数据和人工智能技术的推动下，对生产过程进行了全方面的监控和优化。制造执行系统（MES）具备实时采集各种生产相关数据的能力，包括但不限于设备的当前状态、产品的质量以及物料的流动情况。通过深度分析这些信息，适时调整生产策略以解决可能出现的问题、减少次品率、确保产品质量。例如：该系统具有较强的故障诊断与预警能力，当可能发生问题时就会及时报警，避免生产线被打断。但数量众多的中小企业智能化转型的进程中还面临着许多挑战。一方面，中小企业资金不足，难以承受智能化设备购置、技术研发及系统集成等高昂费用。很多中小企业考虑引进自动化生产线或者智能制造系统的时候都会因为资金的不足而却步；另一方面，中小企业专业技术人才与管理人才匮乏，智能化技术应用与系统运行维护难度大。数字化转型中，中小企业因数据分析与处理能力不足，很难从大量生产数据中挖掘出宝贵信息，不能有效地运用数据来推动生产决策[2]。

3 工业互联网视角下制造企业智能化转型的演化路径

3.1 强化技术的研发和创新

技术研发和创新是制造企业向智能化转变的核心动力，决定了智能化浪潮下企业竞争力与发展潜力[3]。制造企业要加大关键智能化技术研发投入，人工智能、大数据、物联网、云计算为智能化转型提供了重点支持。从人工智能角度来看，企业可以进行机器学习算法研究来对生产过程进行质量控制、设备故障预测等。通过对海量生产数据的研究与分析，人工智能系统可以提前预知设备可能发生的故障并及时维修以避免生产中断。利用大数据技术，企业能够对生产、销售、客户等多个数据源进行深入的整合与分析，从而揭示数据背后隐藏的价值，并为企业的决策过程提供有力的支持。在分析销售数据时，企业可借助大数据来了解客户购买偏好及市场趋势，从而优化产品研发及市场营销策略。企业应积极参加行业技术标准制定，在工业互联网蓬勃发展的背景下，统一技术标准对推动产业协同与互联互通具有重要意义。制造企业进行技术研发时，应当联合行业协会和科研机构等建立智能化技术的生产、通讯和安全标准。在建立物联网设备通信标准时，企业参与可以保证标准满足实际生产需要，并推动物联网在制造领域得到广泛运用[4]。

3.2 优化组织管理，培养人才

优化组织管理和人才培养在制造企业智能化转型进程中不可忽视，它直接影响着企业是否能够有效地实施智能化战略。从组织管理上看，制造企业要顺应智能化转型需要，转变组织架构，传统层级式组织架构缺乏信息传递与决策效率，很难适应智能化生产的快速反应[5]。企业要向扁平化、网络化组织架构过渡，降低管理层级并推动信息快速流转与共享。在部分智能化转型取得成功的公司，组建跨部门项目团队负责智能化项目推进与落实。这些队伍都是由生产、技术和管理各部门的人组成，突破各部门之间的障碍，进行有效的协同工作。企业应该建立起与智能化发展相适应的管理制度与流程，在生产管理中，融入智能化生产调度系统以实时生产数据及市场需求为基础，对生产计划及资源分配进行动态调整。质量管理中，采用智能化质量检测设备及数据分析工具对产品质量进行全程监测与追溯。企业通过构建智能化质量管理体系可以及时发现质量问题并有针对性地采取措施加以改进，从而提升产品质量。实现智能化转型，人才培养至关重要，制造企业要培养并引进既有制造技术，又有信息技术的复合型人才。企业要加大内部员工培训力度，并通过智能化技术培训课程和在线学习平台提高员工智能化技能水平。对一线工人的训练可以包括自动化设备运行、保养以及简单的故障排除等；对技术和管理人员来说，培训主要集中在人工智能、大数据分析以及工业互联网平台应用等领域的专业知识和技术能力上。企业应积极从外部引进人才，以吸引相关专业毕业生及有智能化领域从业经历者进入企业，给企业带来新鲜的血液。

3.3 加深市场洞察，以客户为中心

制造企业要利用工业互联网平台对大量市场数据进行采集与分析，洞察市场动态与客户需求，企业可以根据销售数据、客户反馈以及行业趋势，准确地掌握市场需求变化情况，并适时调整产品研发与生产策略。在消费电子领域中，企业通过分析客户购买行为及使用反馈数据发现客户对商品智能化功能及个性化设计要求越来越高，由此增加了对相关方面的研发投入，并推出更加适应市场需要的产品[6]。面向客户，企业要重视产品与服务创新，智能化转型中制造企业除了提供优质产品外，更重要的是以产品为中心提供智能服务。在机械设备制造领域中，公司通过将传感

器安装到设备中，从而达到实时监控设备运行状况和向用户提供远程运维服务的目的。企业可以在设备发生故障的情况下及时得到故障信息并通过远程诊断与引导来帮助用户迅速解决问题并提升用户的满意度。企业应按照客户个性化需求进行定制化生产。采用智能化生产系统及柔性制造技术使企业能对客户定制化订单做出迅速反应，制造符合客户具体要求的商品，增强企业差异化竞争优势。增强与客户之间的互动与合作，亦是加深市场洞察和客户导向的关键措施。企业可通过创建客户社区和在线客服来与客户保持紧密交流，随时掌握客户的意见建议。邀请客户参与产品设计与试验，使客户的要求直接纳入到产品开发环节。在汽车制造企业，企业可以通过进行客户试驾活动以及在线反馈收集等方式来了解客户对于汽车性能、配置以及外观等方面的偏好，进而优化产品设计并推出更多客户喜爱的产品。制造企业通过加深对市场的洞察和客户导向可以更好地适应市场的需求，增加市场份额，提高客户忠诚度[7]。

3.4 充分发挥政策资源的作用

充分利用政策资源对制造企业智能化转型进程具有重要的帮助作用，可以为企业减少转型成本，提高转型效率，政府一系列扶持制造业智能化的政策从多个方面给予企业扶持，制造企业要积极关注政策动态并对相关的政策内容进行深入的研究，以保证企业能正确地抓住政策机遇。就财政补贴政策而言，企业应明确补贴适用条件、补贴标准以及适用流程。对符合智能化改造条件的项目，要及时报送申请材料并争取财政资金支持。部分地区政府给企业购买智能化生产设备提供了一定的补助，企业可以通过申请补助来减少设备采购成本和加快智能化升级速度。税收优惠政策还是企业可供借鉴的一项重要政策资源，政府从研发费用的加计扣除和高新技术企业的税收减免两个方面为智能制造企业提供优惠。企业要对财务、税务管理进行合理规划，并充分利用好这些税收优惠政策来降低自身运营成本。企业通过增加研发投入既可以享受研发费用加计扣除政策又可以提高技术创新能力促进智能化转型。

3.5 促进产业链协同和生态构建

推进产业链协同和生态构建，是制造企业实现智能化转型，帮助企业实现资源整合，增强整体竞争力的一条重要战略路径。制造企业要加强同产业链上、下游企业协同合作，企业智能化转型进程中，智能化发展需要供应商、合作伙伴以及客户等多方支持合作。在原材料供应上，公司与供应商之间建立了密切合作关系，联合开发智能化原材料及零部件，保证了原材料品质及供应的稳定性。汽车制造方面，车企和零部件供应商合作研发智能传感器、自动驾驶系统以及其他智能化汽车零部件以提高汽车智能化水平。与合作伙伴一起进行技术研发及市场拓展可以达到资源共享，优势互补的目的。在工业互联网平台构建方面，企业通过联合软件开发商和系统集成商共同构建一个功能完备、安全可信的工业互联网平台来实现企业智能化转型。制造企业应该主动参与到工业互联网生态建设中，通过工业互联网平台实现了企业与产业链上、下游企业，科研机构和金融机构之间的广泛关联，构成互利共赢生态系统。在这一生态系统下，企业能够获得更多的资源与信息，扩大业务渠道与市场空间。企业可借助工业互联网平台和金融机构共同获得智能化转型的必要融资；联合科研机构进行前沿技术的研究及应用创新。企业应该将其技术与资源进行开放，吸引更多地合作伙伴加入到生态建设中来，一起促进工业互联网发展。

4 结束语

工业互联网给制造企业智能化转型带来广阔空间，也带来无限可能性。制造企业进行智能化转型时，需结合自身的实际状况，对演化路径进行合理的选择，并积极面对各类挑战。通过转型策略的持续优化，制造企业能够更好地进行智能化升级和核心竞争力的增强，并在全球制造业的竞争中处于有利的位置。今后，在科技深入发展、市场不断变革的背景下，制造企业智能化转型还需要不断探索、不断创新。

参考文献：

[1] 王淑艳，和征，杨小红．工业互联网视角下制造企业智能化转型的演化路径研究 [J]. 商场现代化 ,2023(01):47-49.
[2] 王沛．制造企业智能化转型的影响因素及其作用机理研究 [D]. 西安：西安理工大学 ,2023.
[3] 柴天佑，刘强，丁进良，等．工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式研究展望 [J]. 中国科学：技术科学，2022,52(01):14-25.
[4] 霍志恒．制造业智能化转型中“5G+ 工业互联网”的应用 [J]. 通讯世界 ,2023,30(11):7-9.
[5] 同 [4].
[6] 周立松，余斌，孙振州，等．“5G+ 工业互联网”助力福建智能制造转型升级 [J]. 创新世界周刊 ,2024(09):36-39.
[7] 同 [6].

绿色施工技术与经济造价管理在公路养护工程中的应用研究

齐冰力，任佳慧

（中交基础设施养护集团工程有限公司，北京 100102）

摘 要 本研究深入探讨了公路养护工程中的绿色施工技术与经济造价管理的结合应用，指出绿色施工技术的应用有效减少了施工过程中的环境污染，实现了资源的循环利用，提升了公路养护工程的环保水平。同时，经济造价管理通过精细化的成本控制和合理的资源分配，显著降低了养护成本，提高了资金使用效率。研究还揭示了绿色施工技术与经济造价管理在公路养护工程中的协同作用，两者相互促进，共同推动了公路养护工程的绿色、高效发展，旨在为推动公路养护工程的可持续发展提供有益参考。

关键词 公路养护工程；经济造价管理；绿色施工技术；成本控制

中图分类号：U418 文献标志码：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.027

0 引言

公路养护工程在保障公路状态、提升交通安全、促进区域经济发展以及推动绿色环保等方面都发挥着不可或缺的作用[1]。它不仅是公路交通体系中的重要一环，更是经济社会持续健康发展的有力支撑。因此，必须高度重视公路养护工程，不断探索和创新养护技术与方法，以适应新时代的发展需求。当前公路养护工程面临着环保绿色发展和经济造价管理的双重挑战。为应对这些挑战，公路养护工程必须不断创新发展理念，积极探索有效的应对策略，以实现公路交通的可持续发展。

1 研究意义

公路养护工程作为维持公路设施良好运营状态的关键环节，对于保障交通畅通、提升运输效率及促进经济发展具有至关重要的作用。本文致力于深入探讨公路养护工程中的绿色施工技术与经济造价管理的应用，旨在为公路养护工程的可持续发展提供理论和实践指导。本文将重点关注公路养护施工时减少环境污染、实现资源的合理利用，并将深入剖析绿色施工技术的核心要素，以期在公路养护工程中实现环境保护与经济效益的双赢[2]。本文成果不仅有助于丰富公路养护工程的理论体系，还将为实践领域提供有益的指导，推动公路养护工程向更加绿色、高效的方向发展，对于促进交通行业的可持续发展、提升社会经济效益具有重要意义。

2 公路养护工程、绿色施工技术与经济造价管理概述

2.1 公路养护工程概念

公路养护工程旨在延长公路使用寿命，减少因道路损坏而引发的交通事故，进而降低经济损失，为经济社会发展提供坚实的交通基础保障[3]。根据交通运输部定义，公路养护工程可分为：预防性养护、修复性养护、专项性养护以及应急性养护（见表 1）。公路养护作为保持公路设施良好状态的重要环节，其基本概念、类型和实施流程对于确保公路的安全、畅通和舒适具有重要意义。而绿色施工技术在公路养护工程中的应用，则是推动公路养护事业向更加环保、高效、可持续方向发展的关键所在。

表 1 公路养护工程分类

序号	类型	适用场景	典型案例
1	预防养护	轻微病害路段	沥青路面雾封层处理
2	修复养护	结构性损坏	水泥路面碎石化再生
3	专项养护	服务功能升级	隧道消防系统改造
4	应急养护	自然灾害抢修	洪水损毁路基快速修复

2.2 绿色施工技术概念

绿色施工技术强调在施工过程中融入环保、节能和低碳的理念，其不仅体现了对自然环境的尊重和保护，更是实现公路养护工程可持续发展的重要途径。在实践中，使用节能环保型的施工机械，不仅可以提

高施工效率，还能显著减少燃油消耗和尾气排放，从而降低对大气环境的污染。生态环境保护是绿色施工技术的核心目标，通过合理规划施工区域，采取适当的生态保护措施。

绿色施工技术在公路养护工程中的应用，不仅有助于降低施工成本、提高工程质量，更重要的是能够保护生态环境、促进可持续发展。随着环保意识的不断提升和绿色技术的持续创新，相信绿色施工技术将在未来的公路养护工程中发挥更加重要的作用。

2.3　经济造价管理概念

经济造价管理是通过合理的成本控制和资源分配，力求实现养护工程的经济性和高效性，其直接影响着养护资金的利用效率和整个工程的可持续发展。其目标为：在确保养护工程质量不打折扣的前提下，尽可能地降低养护成本。通过实施经济造价管理，可对养护工程的各个环节进行精细化的成本控制，确保每一环节的费用支出都符合预算要求。并通过科学化的资源分配，可根据养护工程的实际需求和资源状况，制定出最为合理的资源配置方案。

在环保意识日益提升的背景下，如何在养护过程中减少环境污染、实现资源的合理利用，已成为公路养护工程必须面对的挑战。通过合理的成本控制和资源分配，可以在确保养护工程质量的同时，尽可能地减少对环境的影响，推动公路养护工程向着更加绿色、可持续的方向发展[4]。经济造价管理不仅是确保养护工程经济性和高效性的关键所在，更是推动公路养护工程绿色发展的重要手段。

3　公路养护中的绿色施工技术与经济造价管理理论分析

3.1　环境影响评估分析

在公路养护的实践中，环境影响评估与绿色施工技术的紧密结合展现出了其独特的价值和意义。环境影响评估不仅为绿色施工技术的实施提供了科学的指导，更确保了整个养护工程在环保方面的严谨性和前瞻性。公路养护工程在实施前，须全面评估环境影响，其过程剖析了工程对周边环境的影响。绿色施工技术的融入，则是在确保公路养护工程质量和效率的同时，最大限度地减少对环境的负面影响。绿色施工技术的应用，不仅有效降低了养护工程对环境的压力，更在一定程度上提升了工程的整体效益和社会形象。

3.2　理论框架与模型分析

在构建理论框架与优化模型时，应充分考虑了公路养护工程的实际情况和需求。首先，成本控制和资源节约作为经济造价管理的两大支柱，被纳入理论框架的核心位置。成本控制不仅关注养护工程实施过程中的成本降低，更着眼于通过优化设计方案、提升施工效率等方式，实现成本结构的整体优化。资源节约则侧重于提高资源的利用效率，减少不必要的浪费，从而推动公路养护工程向更加绿色、可持续的方向发展。将环境影响评估和绿色施工技术作为重要的组成部分，融入理论框架中。环境影响评估致力于识别养护工程可能对环境产生的负面影响，为后续的绿色施工技术应用提供指导。而绿色施工技术则强调在施工过程中采用环保、节能的技术手段，减少对环境的破坏和污染，实现公路养护工程与生态环境的和谐共生。

理论框架与优化模型以成本控制和资源节约为核心，融合了环境影响评估和绿色施工技术等多个方面，形成了一个全面、系统的分析体系；该体系不仅有助于深入理解公路养护工程中经济造价管理与绿色施工技术的结合应用，更为实际工程实践提供了有力的理论指导和技术支持[5]。

本文构建“质量—成本—资源环境”优化模型：

$$\min\{C_{total}, E_{carbon}\}\ s.t.\ Q_{PCI}\geq 80$$

式中，C_{total} 为全周期成本，E_{carbon} 为碳排放当量，Q_{PCI} 为路面状况指数。

通过优化模型应用及粒子群算法求解，一般项目可实现造价降低约 12% ～ 18% 与碳排放减少约 25% 的帕累托最优。

4　公路养护中的绿色施工技术实践应用分析

4.1　绿色施工技术应用价值

在深入探究绿色施工技术在公路养护中的实际应用与效果时，本文发现其带来的环保效益和可持续性影响是显著的。通过详细分析多个公路养护项目的案例，我们观察到绿色施工技术在实践中如何有效减少环境污染、节约资源，并提升工程的整体环保性能。合理安排施工时间和作业顺序，减少不必要的待机和空转时间，进一步提高了能源利用效率。这些节能减排措施的应用，不仅降低了养护工程的运营成本，还为推动交通行业的绿色发展做出了积极贡献。

在养护施工时，通过加强沿线植被的保护、设置合理的排水系统、采用生态友好的施工方法等，有效减少了水土流失和生态破坏。这些生态环境保护措施的应用，不仅保护了公路沿线的自然生态环境，还为公路养护工程的可持续发展奠定了坚实基础。绿色施工技术在公路养护工程中的实际应用效果表明，其在减少环境污染、节约资源方面具有显著优势。通过推

广和应用绿色施工技术，可进一步提升公路养护工程的环保水平，推动交通行业的绿色发展，为实现经济社会的可持续发展做出积极贡献[6]。

4.2 绿色施工技术要素与实际应用分析

1. 绿色施工技术要素。绿色施工技术要素涵盖：节能（设备能耗降低20%）、节水（雨水回用率＞60%）、材料再生（旧料利用率≥90%）、生态保护（植被恢复率＞95%）四大维度。在采用就地热再生技术后，废旧沥青回收率达100%，碳排放减少35%。

2. 经济性对比分析。绿色施工技术应用与某市国省道后，该市A国道项目通过差异化设计节约资金1 080万元（14万元/km），而B省道项目因材料再生降低直接成本23%。但非开挖技术设备投资增加35%，显示技术推广需平衡前期投入与长期收益。

3. 环境效益量化分析。采用LCA方法测算后可知：传统工艺碳排放峰值出现在材料生产阶段，占比为58%；而绿色技术使施工阶段碳排放占比降至32%；该市就地热再生项目全周期碳足迹较传统工艺减少41%，验证了绿色技术的环境价值。

5 结论与展望

5.1 研究结论

经过对公路养护工程中经济造价管理与绿色施工技术的详细探究，本文得出了以下几点重要的结论：

1. 经济造价管理在公路养护工程中的实施，显著地降低了养护的总体成本，并提升了资金的利用效率。通过精细化的成本控制和合理的资源分配，公路养护得以在有限的预算内实现更高效、更优质的施工效果。这不仅体现了经济造价管理在优化资源配置、减少不必要的浪费方面的积极作用，也进一步证实了其在公路养护工程可持续发展中的重要性。

2. 绿色施工技术在公路养护工程中的应用，同样展现出了显著的环保效益。通过采用环保材料、节能设备以及资源循环利用等绿色施工技术手段，不仅有效地减少了施工过程中的环境污染，还实现了对自然资源的节约利用。这种以环保为导向的施工技术，不仅符合当前社会绿色发展的理念，也为公路养护工程与生态环境的和谐共生提供了有力支持。

3. 经济造价管理与绿色施工技术在公路养护工程中的结合应用，具有巨大的潜力和广阔的前景。这两种技术的相互融合，不仅有助于实现公路养护工程的经济性、环保性和高效性的统一，还将推动公路养护行业向更加绿色、可持续的方向发展。

本文通过对公路养护工程中经济造价管理与绿色施工技术的深入探究，揭示了这两种技术在公路养护工程中的重要性和应用价值。

5.2 未来研究方向与建议

在深入研究公路养护工程的经济造价与绿色施工技术后，对未来的研究提出以下建议：

1. 对于经济造价管理与绿色施工技术在公路养护工程中的协同作用，值得进一步挖掘。尽管我们已经初步探讨了这两者的结合应用，但其内在的关联性和互补性仍有待深入剖析。例如：可以研究在不同类型的公路养护项目中，如何更精细地平衡经济造价与绿色施工的需求，以实现最佳的综合效益。

2. 考虑到公路养护工程的多样性和地域性，建议开展更为细致和深入的实证研究。这不仅可以验证我们之前理论分析的准确性，还能为实践提供更具体的指导。例如：可以针对不同气候、地质条件下的公路养护项目，进行长期的跟踪研究，以了解各种经济造价管理和绿色施工技术的实际应用效果。

3. 公路养护工程并非孤立存在，它与智能交通、新材料技术等领域有着紧密的联系。因此，我们提议在未来的研究中，加强与这些领域的交叉融合。例如：可以探索如何利用智能交通系统来优化公路养护的计划和执行，或者研究新材料技术如何为绿色施工提供更多的可能性。

4. 建议关注公路养护工程中的社会经济影响。随着绿色、可持续发展理念的深入人心，公路养护工程不仅仅是一个技术问题，更是一个涉及经济、社会、环境等多方面因素的复杂系统。因此，未来的研究可以从更宽广的视角出发，全面评估公路养护工程对社会、经济的综合影响，以期为政策制定和实践操作提供更全面的支持。

参考文献：

[1] 张倩.公路工程施工技术管理及养护措施分析[J].大众标准化,2024(02):76-78.
[2] 武强.关于绿色施工技术在道路桥梁施工中的运用探析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2022(03):85-87.
[3] 袁琛.基于交通冲突的高速公路实时安全分析方法[D].长沙:中南大学,2023.
[4] 谢家盛.市政园林绿化工程施工成本控制的研究[J].城镇建设,2024(24):337-339.
[5] 李惠玲,王婷.绿色施工项目管理多目标均衡优化[J].土木工程与管理学报,2020,37(04):20-26.
[6] 陈顺茂.市政工程绿色节能施工技术的发展应用[J].居舍,2021(26):37-38.

市政公用工程钢拱桥施工技术应用

洪明明

（安徽水安建设集团股份有限公司，安徽 合肥 230000）

摘　要　为提升钢拱桥安装精度，减少桥梁结构对位误差，增加钢拱桥整体结构稳定，本文分析了钢拱桥地基处理方法，提出刚拱桥纵梁、横梁以及桥面板拱肋等多项关键施工技术，指出了在市政公用工程钢拱桥施工时，通过严格执行钢拱桥施工技术标准，可加强钢拱桥各个结构安装效果，进一步增加钢拱桥的稳定性，以期为促进市政公共工程建设提供相应的技术参考。

关键词　市政公用工程；钢拱桥；地基处理；拱肋施工；桥面板浇筑

中图分类号：U445.4　　**文献标志码**：A　　DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.028

0　引言

市政公用工程钢拱桥施工技术应用时，其主体结构为拱肋，能够承受外部弯曲荷载作用以提高桥梁工程的运行稳定性和可靠性。随着现代桥梁事业发展速度加快，钢拱桥施工技术和结构性能研发逐步深入，已经取得了初步进展，使其能够广泛应用到桥梁工程建设中。钢拱桥的结构形式在受到不同荷载作用下的受力特点鲜明，需根据实际情况采取科学合理的加固措施提高钢拱桥施工和运营水平。

1　钢拱桥的结构特点

1.1　受力特性强

钢拱桥结构体系的主要特点是其多次超静定性，确保受到外部荷载作用下具备较高的稳定性，延长钢拱桥使用寿命。钢拱桥中主拱由拱肋组成，是承担外部荷载的主要结构部件。钢拱桥的顺桥向上，将主拱圈和拱上建筑部分综合形成整个受力结构，提高了结构承载力性能，从而确保钢拱桥运行具备较高的稳定性。

1.2　结构轻型

钢拱桥结构形式的自重较轻，属轻型桥梁结构形式，承载能力较强，在市政公用工程中得到广泛应用。经过计算确定钢拱桥自重约为双曲拱桥的60%，这是因为钢拱桥结构形式比较特殊，自重相对较小。由于钢拱桥具备轻型的结构特性，下部结构和地基承载力要求较低，这使得整个桥梁建设成本较低，也使基础形式选择和软土地基建设桥梁更加便捷。但在设计和施工中需重点考虑其承载力，通过合理的结构设计方案使桥梁荷载能够及时传递和分散以提高桥梁的安全性[1]。

1.3　施工灵活

钢拱桥作为新型桥梁结构形式，其实用性强，能够适应多种条件，施工方法多样，建设效果良好。因为钢拱桥恒载推力比拱桥小，所以其矢跨比通常较小，处于1/7～1/10之间，有效控制了桥梁建设高度，该特点使钢拱桥在市区或空间相对有限的环境下建设有明显优势。除此之外，钢拱桥的结构比较特殊，容许桥台发生适量位移，其位移量控制在不低于Lo/3 000，从而使其具备较高的抗变形能力。

2　地基处理

市政公用工程钢拱桥施工前加强现场地质勘察，测量地基承载力，根据工程负荷精准计算以确定适宜的加固方案。钢拱桥施工前先进行地基处理，清理掉表面的杂填土，然后铺设C15混凝土垫层，结构厚度在20 cm左右使地基的承载力合格。

3　市政公用工程钢拱桥施工工艺

3.1　纵梁

纵梁安装前需在横梁顶部弹射边线，并设置橡胶支座或预埋连接件使纵梁安装的位置精度合格。钢拱桥在纵梁设计中通常选择使用工字形对称截面，间距2 m，高度1 210 mm，上、下翼缘宽度240 mm，厚度12 mm。由于钢拱桥施工中跨度大、纵梁长，所以采取分段安装施工方式，通过设置临时接缝支撑架保证支撑段间接缝达到稳定性。接缝位置施工时以机械方式连接钢筋部件，确保其连接强度合格。同时，混凝土浇筑作业前对接缝位置采取凿毛措施，确保混凝土和钢筋结构连接具备整体性。钢拱桥纵梁制作结束后采用起重机将其吊装到施工位置，按照缓慢、平稳的方式进行吊装作业。吊装时对吊装效果展开检测，保证其具备同步性、稳定性，避免吊装阶段因操作不当引发变形、损坏情况。吊装作业阶段由技术人员检测纵梁高程差，保证其在±3 mm以内，从而提高桥梁的平整度[2]。

纵梁吊装到规定位置后按照设计方案进行精准定

位和调整，确保纵梁与横梁连接具备稳定性，安装精度合格。纵梁连接如果选择焊接方式进行，采取对称焊接方式，严格控制温度变形以提高焊接质量，避免存在焊接缺陷，施工参数见表1所示。焊接完成后采用超声波探测方式检测，合格后再继续开展施工作业。

表1　焊接参数

项目	要求
焊接方式	对称焊接
焊缝类型	对接焊缝
焊接材料	低碳钢焊条（符合AWS A5.1标准）
预热温度	150 ℃
层间温度	≤ 200 ℃
焊接电流	直流反接，180 ～ 220 A
焊接电压	22 ～ 26 V
焊接速度	20 ～ 25 cm/min
温度变形控制	变形量≤ 0.5%
焊接后热处理	600 ℃保温2小时，然后缓慢冷却至室温

3.2　横梁

钢拱桥中横梁作为主要支撑结构部件，需在主拱圈安装结束后开展安装作业。拱桥中横梁一般选择使用钢筋混凝土预制构件的形式，结构尺寸根据桥梁设计负荷、跨度参数确定。以往钢拱桥设计中，其宽度在1.5 m左右，高1.2 m，满足横梁的承载力和稳定性要求。横梁安装前进行测量放线，由监理工程师复核检测各项参数，偏差在合理范围内再进行安装作业。横梁安装以双机抬吊法为主，两台吊机同步起吊，到达设计标高后将其下放到规定安装位置。横梁吊装阶段保证端部和主拱预留连接件精准对接，一般选择使用可调式钢支架方式作为临时支撑[3]。

横梁吊装到施工位置后按照设计方案精准调整，确保和主拱连接具备较高的强度和稳定性。横梁连接时以焊接方式为主，采取对称焊接方式，避免单一位置焊接量过大出现变形的问题。焊接结束后采用超声波探测方式检测焊接质量，如果存在任何焊接缺陷立即组织技术人员返修处理。焊接时加强对焊接温度及环境条件的监测，如果环境温度在5 ℃以下应进行预热处理再开展焊接作业，防止产生焊接缺陷。

3.3　桥面板

在市政公用工程钢拱桥施工中，应高度重视现浇桥面板施工。一般来说，桥面板厚度设计为0.3 m左右，以确保它承载力和稳定性得到保障。同时桥面板施工时，需根据设计方案在墙面板进行钢筋绑扎，确保钢筋定位精度合格，钢筋绑扎牢固性、稳定性达标。钢筋施工中对直径、间距、保护层厚度展开检测，确保钢拱桥桥面板的性能合格。根据设计方案进行模板加工和制造，确保表面平整度、刚度性能合格，浇筑过程中不会出现变形、尺寸偏差的情况出线。模板安装结束后进行尺寸检测，保证位置、标高、形状符合设计标准，并且在适宜位置上设置保护层垫块，确保保护层厚度达到技术标准[4]。按照设计方案进行混凝土材料的搅拌制作，确保混凝土材料均匀性合格，各项参数指标按照表2要求控制。混凝土浇筑作业阶段从低到高逐步进行，采取分层浇筑施工方式，单层厚度在30 cm以内。混凝土浇筑结束后使用振捣棒插入振捣，确保混凝土结构密实度合格，内部没有气泡、空洞影响结构强度。混凝土浇筑后及时进行抹面、收光作业，确保表面平整度合格，具备光洁度、耐磨性。

表2　混凝土材料要求

项目	标准
混凝土强度等级	C30
水灰比	≤ 0.45
坍落度	160 ～ 200 mm
含气量	≥ 4%
骨料最大粒径	≤ 40 mm
骨料级配	连续级配
水泥品种	普通硅酸盐水泥
外加剂种类	高效减水剂

3.4　拱肋

市政公用工程钢拱桥中拱肋作为重要组成部分，加强尺寸、位置、轴线尺寸检测，使其各项尺寸精度合格，拱肋安装偏差在 ±10 mm以下。拱肋生产制作中采取分段的方式，经过检验、试拼装、线形调整后各项参数合格，再运输到作业现场。拱肋施工的过程中采取分段组拼焊接的方式，并加强焊缝质量检测，以射线探伤、超声波探伤方式为主，确保没有任何焊接缺陷。拱肋安装采用支架法进行，由钢管、型钢组合形成支架，底部和混凝土箱梁上预埋件焊接牢固。支架顶部安装拱肋调整措施，顶部设置操作平台，确保拱肋安装的精度达到技术标准。拱肋采取分段制作、分段吊装方式，按照左右、两端由拱脚到拱顶的顺序逐步进行并加强预拱度检测。拱肋焊接连接时选择适宜的焊接时间，通常选择每日早上7 ～ 9点、下午16 ～ 18点时间段内进行焊接，避免因为温度变化过大给拱肋焊接造成不利影响。拱肋合拢施工时加强线形控制，预留足够加工余量，并且安装时切割处理，确

保拱肋连接的效果合格。同时，拱肋混凝土浇筑作业施工采用泵送方式，确保浇筑作业具备连续性[5]。

3.5 吊杆

钢拱桥吊杆施工阶段保证其位置精度合格，长度符合设计标准，安装精度偏差在 ±5 mm 以内。吊杆安装的阶段分为张拉和锚固两个工序，张拉施工工序中选择适宜张拉设备，以张拉千斤顶为主，将其安装在吊杆一端，逐步施加张拉力，直到达到设计张拉力为止。张拉力的控制极为关键，需要分析桥梁荷载、跨度以及吊杆规格计算确定，保证其处于规定范围内，如设计张拉力的 90% ～ 105% 之间。张拉阶段实时监控吊杆伸长量和张拉力参数，使两者符合设计标准。张拉施工中，当张拉力达到设计标准后即可开展锚固施工。锚固施工中选择专用锚固工具，将吊杆的另一端和桥梁结构稳定连接。

4 市政公用工程钢拱桥施工注意事项

4.1 拱肋施工中的精度控制

市政公用工程钢拱桥施工中，拱肋安装是加强精度控制、提高钢拱桥施工质量的关键。拱肋是桥梁的主要承载结构部分，其形状、位置、尺寸、精确度对钢拱桥的稳定性与承载能力存在直接影响。基于此，拱肋施工中加强精度控制，使其加工精度、安装精度、线形精度达到技术标准。

拱肋加工精度控制时由预制工厂按照设计图纸进行，保证每一节段尺寸、形状、角度符合设计方案。同时，拱肋预制结束后进行检验和试拼装，及时消除加工偏差。

针对拱肋的安装精度控制需求，选择适宜的吊装设备和施工工艺，确保在拱肋安装阶段不会出现变形、位移的情况。拱肋安装中监测拱肋位置、高程、线形参数，按照技术标准及时进行偏差调整，使拱肋安装精度符合设计方案。

拱肋线形精度控制时，要保证其线形符合设计标准以提高钢拱桥的受力均匀性、稳定性。在钢拱桥拱肋施工阶段要加强线形的监测以及调整，确保线形精度符合设计标准。此外，拱肋安装时要分析温度、风力各项条件的影响，消除拱肋线形偏差，并按照技术标准进行预防和调整。

4.2 桥面板浇筑中的质量控制

钢拱桥中桥面板作为重要组成结构部分，对桥梁的舒适性、耐久性存在直接影响。基于此，钢拱桥在桥面板浇筑施工过程中加强质量控制，根据钢拱桥桥面板施工要求，按照设计方案进行钢筋绑扎以及模板支设施工，确保钢筋直径、间距、保护层厚度符合设计标准，提高桥面板的耐久性和抗拉性。模板支设要具备平整性、牢固性，尺寸精度需达到桥面板施工要求。根据钢拱桥桥面板浇筑技术标准，确定混凝土配合比以及浇筑工艺方案，并保证各环节符合施工要求。浇筑施工中以分层浇筑、振捣密实的方法为主，确保混凝土结构内部没有空洞、气泡，混凝土各位置均匀性合格，强度达到技术标准。而在混凝土浇筑结束后及时养护处理，避免外部环境产生不利影响。

4.3 吊杆安装与张拉中的安全控制

市政公用工程钢拱桥中吊杆为重要连接部件，其安装和张拉对钢拱桥性能和使用效果产生直接影响。吊杆安装和张拉中执行设计方案和技术标准，使吊杆的位置、长度、张拉力符合设计方案。吊杆安装保证其位置具备精准性，连接达到牢固性、可靠性要求。吊杆检查与测试时对各项参数复核检测，使其符合设计标准。吊杆安装中加强现场安全管理，落实各项安全管控措施，避免发生人员伤亡事件。吊杆张拉工序极为重要，采用适宜的张拉设备以及工艺方案，并严格控制张拉力保证张拉效果合格。同时，张拉过程中检测伸长量、张拉力参数，调整偏差使张拉作业精度符合设计标准。此外，张拉阶段加强现场安全监控和管理，保证人员、设备、工程的安全性。

5 结束语

市政公用工程钢拱桥作为重要基础设施，其施工难度相对较高，需在施工阶段落实各项工艺控制措施保证每个环节达到施工要求。钢拱桥施工阶段加强监督检测，确保各环节处于管控范围内，提高钢拱桥安装施工质量。在今后工程领域不断发展之下，加强钢拱桥施工技术研究，将先进施工技术应用到市政公用工程中，为提高建设水平以及综合效益奠定基础。

参考文献：

[1] 朱志有，杨耀生，陈嘉伟．现浇施工飞燕式系杆拱桥施工控制技术 [J]. 四川建材 ,2022,48(03):161-162,171.

[2] 尹光顺，彭旭民．钢 - 混凝土结合桁架拱桥施工控制技术 [J]. 铁道建筑 ,2022,62(02):105-108.

[3] 张晓红．提篮拱桥施工中的立柱与拱圈变形控制关键技术 [J]. 中国公路 ,2022(21):92-93.

[4] 康埲．简支拱桥施工关键技术 [J]. 交通世界 ,2022(10):112-113.

[5] 王文武，温庆杰，王靖靖，等．基于少支架法拆除双曲拱桥施工技术研究 [J]. 公路交通技术 ,2024,40(05):133-141.

市政给排水工程污水处理技术分析

张浩然，庞　浩，孔丹丹，苏进东
（山东信晟科技有限公司，山东 东营 257000）

摘　要　市政给排水工程污水处理技术应用效果直接影响城市水环境质量。本文主要探讨了物理处理技术、化学处理技术、生物处理技术等污水处理技术，指出选择污水处理技术需满足处理功能、因地制宜、技术可行、经济合理等原则，通过具体运用污水处理技术，能够有效去除污水中的有害物质，实现水资源的回收利用，减少对自然水体的污染，对于改善水质、合理利用水资源、改善生态环境、促进水循环系统及保护设施等方面具有重要意义。

关键词　市政给排水工程；污水处理技术；物理处理技术；化学处理技术；生物处理技术
中图分类号：TU992；TU984；X703　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.029

0　引言

随着城市化发展速度加快，基础设施建设数量逐步增多，尤其是给排水工程建设规模日益扩大。城市高速发展的同时，城市人口数量逐步增多，生态环境负担越来越重，特别是城市污水问题日益突出，对市政给排水工程污水处理系统的要求逐步提高。市政给排水工程建设需根据污水处理要求，通过建设完善的污水管网体系，有效去除污水中的有害物质，保证城市生态环境。通过深入分析市政给排水工程污水处理技术，可提高污水处理水平，降低污水对生态环境产生的破坏影响。

1　市政给排水工程污水处理的重要意义

1.1　处理工业废水，降低企业排污环境风险

工业废水是极为严重的污染物，随意排放导致环境污染加剧，并且其中含有大量的重金属、有毒有害物质以及难降解有机物，极易造成环境灾害。特别是排放到土壤、水体中，导致环境污染，严重危害人类生命健康。市政污水处理中采取物理、化学、生物的多样化技术去除工业废水内各种污染物，污水经过处理后，达到排放标准，不会造成环境污染。例如：运用气浮法处理污水，实现固液分离；采用化学沉淀法沉淀重金属离子；利用生物降解法分解有机物。经过上述方式处理工业废水后，污染物浓度大幅下降，满足国家环保标准，降低对生态环境造成的污染危害。

1.2　削减雨污合流污染，维护城市水系生态

城市排水系统内雨水和污水合流，排放到城市水系内会产生大量污染物，导致水体富营养化、水质恶化，对水生生物生存环境产生极大危害。市政污水处理过程中先进行雨污分流处理，再将污水内悬浮物、有机物、氮磷等污染物去除干净。采用格栅、沉砂池的物理方式将大颗粒物杂质处理掉，再利用生物处理工艺进行有机物和转化营养盐处理。污水处理结束后经过检测达到排放标准，才能将其排放到自然环境中，避免产生环境污染危害，保障水质以及生态环境安全，保护水生生物多样性以及生态平衡性。

1.3　回收污水资源，缓解城市用水紧张局面

现代城市建设发展速度不断加快，用水量呈现出激增的趋势，水资源短缺已经成为限制社会发展的重要因素之一。市政污水处理中采用先进的处理工艺和技术，将城市内污水转变为可以利用的水资源，达到水资源利用率提升的效果。例如：经过深度处理后的中水应用于城市绿化灌溉、道路清扫、车辆清洗、工业冷却等领域。回收污水资源能够减少新鲜水资源的开采，降低城市供水压力，还能缓解城市用水紧张的局面。同时，污水回用能够减少污水排放量，减轻对生态自然环境造成的污染危害，具备较强的经济效益、环保效益、社会效益[1]。

2　市政给排水工程污水处理技术的选择原则

2.1　根据污水水质特点选择

城市内部污水来源不同，其特点和组分存在很大差异，对于污水处理技术有较大影响。生活污水一般含有大量的有机物、氮磷营养物质以及病原体，处理时主要采用有机物降解、病原体杀灭的方式。对于生活污水来说，生物处理方法较为常见，如活性污泥法和生物膜法，能够将污水内的有机物去除掉，降低污水内的氮磷含量。而工业废水中组分比较复杂，重金属、

有毒有害、有机物、强酸、强碱等污染物质普遍存在。例如：电镀废水内含有重金属离子，需要采取化学沉淀、离子交换法去除；化工废水内含有大量难以降解的有机物，采取高级氧化技术进行处理才能达到处理效果。

2.2 考虑处理效果要求

市政给排水工程污水处理技术在选择阶段，需要考虑到处理效果要求，进而选择适宜的污水处理技术类型。不同污水回用或者排放标准对于处理后的水质有严格要求，需要采取差异化措施才能提高处理效果。如果在污水处理后用于城市绿化灌溉、道路清扫，对于水质方面要求相对较低，只需要达到普通中水回用标准即可满足要求。该处理方式能够降低处理成本且处理工艺简单，提高水资源的利用率。但是污水完成后，如果用于工业生产的冷却水系统或者锅炉补水系统，这些场景对于水质要求较高，不仅需要将污水内常规污染物去除掉，还要严格控制水中盐分硬度指标，采取深度处理措施，如反渗透、离子交换。此外，如果污水排放到敏感水体内，则需要在处理结束后对水质进行严密监控，防止导致水体严重污染问题[2]。

2.3 结合工程实际情况

污水处理技术在选择时，需要结合工程实际情况确定。污水处理的规模大小对于污水处理技术选型存在直接影响，大型污水处理厂需要选择处理效率高、运行稳定的大型设备以及工艺，如大型活性污泥处理系统；小型污水处理站则需要使用占地面积小、运行管理便捷的一体化设备。针对污水处理厂的占地面积进行分析，尤其是场地空间比较狭小的情况下，需要选择紧凑型处理工艺，如膜生物反应器MBR，其占地面积较小，能够满足多种条件下处理要求。而在污水处理技术选择中，处理成本和运行费用也是重要考虑因素。虽然有些先进处理技术效果良好，但是投资运营成本相对较高，需要综合评估项目的投资以及收益再确定适宜的处理技术。此外，处理技术选择中还要分析自然条件、能源供应的多方面因素，对于光照条件良好的区域使用太阳能技术提供能源，满足污水处理要求。

3 市政给排水工程常见的污水处理技术

3.1 物理处理技术

1. 格栅与筛网。在污水处理中使用格栅和筛网，其主要目的是将较大型的悬浮物漂浮物处理掉，如树枝、树叶、塑料、纤维格栅。根据栅条间隙大小，分为粗格栅5～100 mm、中格栅10～40 mm、细格栅3～10 mm。污水经过格栅后粒径较大的杂物被截留，避免进入到其他设备内造成设备的堵塞以及损坏。筛网去除效果和筛网孔径、形状存在直接关系，应用较为常见的是旋转筛网、振动筛网。

2. 沉淀。污水处理中采用沉淀方法，利用重力作用使污水内部比重较且大的悬浮颗粒分离。污水处理过程中根据沉淀处理要求，结合水流状态分为自由沉淀、絮凝沉淀、成层沉淀、压缩沉淀。沉淀设备的选择极为重要，需要综合分析污水处理厂的工艺、环境条件、处理要求、空间大小的因素，使得沉淀设备能够满足处理要求。

3. 气浮。气浮在污水处理中应用较为常见，主要是给污水内通入空气形成大量微小气泡，使得悬浮颗粒能够吸附在气泡上，随着气泡上浮到水面而实现固液分离。气浮法处理时主要应用在含有细小悬浮颗粒或者油类的污水中，根据形成气泡方式的不同，将其分为加压容器气浮、射流气浮以及电解气浮等。加压容器气浮是当前较为常见的气浮方法，具备效率高、处理效果好的优势[3]。

3.2 化学处理技术

1. 中和。市政给排水工程污水处理中，中和方式针对酸性污水处理效果良好。如果经过检测发现污水的pH值在2左右，需要加入石灰乳，即氢氧化钙含量75%左右的材料进行中和。通常情况下，每立方米pH=2的酸性污水需要加入0.5～0.8 kg的石灰乳，使得污水pH值调整至6～9之间，处于中性状态。针对碱性污水，如果测定其pH值达到11左右，需要加入浓度98%的浓硫酸中和，每立方米碱性污水加入0.3～0.6 kg浓硫酸。污水中和处理阶段将温度设定为20～30 ℃之间，搅拌速度100～150 r/min，确保中和反应充分进行，酸碱度调整到适宜范围[4]。

2. 化学沉淀。化学沉淀法在处理的阶段，尤其针对含汞污水，检测发现汞离子浓度为1～5 mg/L，加入浓度98%的硫化钠作为沉淀剂，使其与汞离子摩尔比为1.5:1。经过沉淀处理后，汞离子去除率达到90%～95%，出水汞离子浓度下降到0.5 mg/L以内。含磷污水处理的过程中先进行浓度检测，如果测定发现其浓度达到10～20 mg/L，则加入硫酸铝、氧化铝含量16%的铝盐作为沉淀剂，使其与磷的摩尔比为2:1左右，确保处理效率达到85%～90%，出水浓度控制在1 mg/L以内，使其满足排放要求[5]。

3. 氧化还原。市政给排水工程污水处理技术在应用阶段，使用氧化还原方法进行污水处理，需要落实

各项参数和指标控制以提高处理效果。对于含氰污水处理中，经过检测发现其氰化物含量在50～100 mg/L之间，需要加入氯含量10%的次氯酸钠作为氧化剂进行处理。氧化还原反应阶段需要做好温度控制，使其保持在20～30 ℃之间，能够使得次氯化钠氧化还原反应速度得到提升，确保和氰化物能够充分反应。通常情况下，每次反应时间为30～60 min，使得氧化还原反应充分进行，进而提高反应效率和污水处理效果。经过对处理数据展开分析，在氧化还原反应处理完成后，氰化物去除效率超过90%。例如：某含氰化物的污水处理前浓度为80 mg/L，处理后氰化物含量下降到8 mg/L以下。同时，污水内含有一定量的有机物导致化学需氧量COD下降，根据含氰污水处理要求，如果经过测定初期COD为500 mg/L，则在氧化还原反应处理后COD浓度下降到200～300 mg/L，去除率达到40%～60%。除此之外，对于含铬污水在处理时，如果经过测定六价铬浓度为10～20 mg/L，需要加入浓纯度95%的亚硫酸氢钠作为还原剂。根据氧化还原反应要求，将pH值设定为2～3之间，并且处于酸性条件下，使得六价铬还原为三价铬。该反应条件下留有足够的反应时间，通常为15～30 min，六价铬还原率超过95%，且在后续沉淀处理后使其处理效果达到要求，满足污水排放标准，避免铬排放后对于生态环境造成污染危害。

3.3 生物处理技术

1. 活性污泥法。活性污泥法处理中需要检测污泥负荷参数，通常保持在0.2～0.4 kgBOD5/（kgMLSS·d）之间，从而使其降解处理效果达到既定目标，还能防止影响污泥处理系统的稳定性。通常情况下，曝气时间处于4～8 h之间，使得有机物接触效果良好，确保污染物去除效率满足使用需求。通过活性污泥法处理结束后，使得化学需氧量COD去除率达到85%～95%，生化需氧量BOD5去除率90%～95%，确保水质排放满足标准。

2. 生物膜法。市政给排水工程污水处理中生物膜法应用比较常见，需要结合实际情况确定适宜的生物膜厚度以提高处理效果。根据以往污水处理经验，生物膜厚度设定为0.5～2 mm之间，能够满足处理要求。如果生物膜厚度比较小，生物量难以达到处理效果，无法满足污水处理标准；生物膜厚度较大时，造成污水在传输时存在过大阻力，导致微生物活性下降，无法达到处理效果。根据生物膜法处理要求，水力停留时间为2～6 h，确定适宜水力停留时间使得污水和生物膜能能够充分接触，进而达到完全降解的效果。生物膜法在污水处理阶段，氨氮去除率需要达到80%～90%，能够有效处理污水内的氨氮含量，避水出现富营养化的现象。除此之外，生物膜法应用后被污水内有机物去除，达到良好效果，通常COD去除率能够达到70%～85%。

3. 厌氧生物处理。污水处理过程中采用厌氧生物处理方法，利用厌氧生物方式将污水内的有机物分解为甲烷、二氧化碳等物质。厌氧生物处理的过程中对于能耗方面需求量较小，污泥产量比较少，并且实现能源可回收利用，尤其针对高浓度有机污水处理能够达到良好效果。厌氧生物处理技术在应用阶段，主要采用厌氧消化池、上流式厌氧污泥床UASB、厌氧滤池等。UASB反应器污水处理系统应用范围广泛，处理效率高、有机负荷高，能够全面提高处理效果。而在厌氧生物处理环节需要对处理环境展开监测，随时调整处理工艺和参数，进而确保处理效果达到技术标准。

4 结束语

市政给排水工程污水处理技术的应用，能够确保污水达到排放指标要求，避免出现环境污染危害，对现代社会可持续发展产生积极作用。市政给排水工程污水处理技术类型较多，物理处理、化学处理、生物处理等方式能够满足处理要求，但需要结合污水特点处理需求、运行环境因素确定适宜的处理技术，进而提高处理效果以及运行稳定性。污水处理技术在应用阶段需要科学选型且落实运行管理措施，结合处理需求进行优化改进，提升市政给排水工程污水处理效果，从而提高水资源利用率，为生态文明建设以及社会可持续发展做出贡献。

参考文献：

[1] 郑淑菊.市政给排水工程污水处理的技术研究[J].新型工业化,2021,11(07):201-202.
[2] 王键.污水处理技术在市政给排水工程中的有效运用[J].工程技术研究,2022,07(24):33-35.
[3] 李真莹.市政给排水工程污水处理技术与发展路径探析[J].新型工业化,2022,12(12):244-247.
[4] 李盛柏.提高市政给排水工程污水处理水平的技术措施[J].科技资讯,2022,20(21):63-66.
[5] 刘超,彭彩霞,郑小敏,等.关于市政给排水工程污水处理技术的思考[J].中国水运,2024,24(20):131-133.

市政道路管道工程施工技术实践探析

陈 政

（安徽科海建设项目管理有限公司，安徽 合肥 231200）

摘 要 随着城市化进程的迅猛发展，市政道路成为城市的关键“脉络”，不仅承载着疏导交通、资源运输的职责，更是管道工程中的“血管”，保证城市稳定运行。本文以探究市政道路管道工程施工技术实践为重点，对管道工程施工前准备工作进行分析，从管道沟槽开挖技术、管道铺设技术、管道连接技术、沟槽回填技术等方面深入探讨，提出施工质量控制、安全管理等方法，致力于提升施工实践技术水平，以期为相关工程实践提供有益参考。

关键词 市政道路；管道工程；施工实践技术；质量控制；安全管理

中图分类号：TU990.3 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.030

0 引言

市政道路管道工程涉及诸多环节，如排水、供水、工期等系统，其施工质量不仅与城市居民生活有关，更与城市环境可持续、各类基础设施功能息息相关。但市政道路管道工程面临施工环境多变，对质量要求极高，尤其是管道错综复杂、区域地质条件差异，都为施工带来新挑战。因此，相关人员要注重市政道路管道工程，深入探究如何精准开展沟槽开挖、管道铺设、沟槽回填等施工技术实践，探索质量控制、安全保证等方法，进一步提升管道工程施工效果，助力城市建设实现高质量发展新目标。

1 管道工程施工准备工作

要想提升市政道路管道工程施工技术实践效果，完善施工准备工作非常关键，重点可从以下方面入手：

1. 会审施工图纸。施工单位获取施工图纸后，第一时间组织技术人员审查图纸内容，重点关注管道平面布置、标高以及管材等参数；也要重点关注图纸管道是否和周围道路、周边建筑出现冲突矛盾，深入了解图纸的设计意图，一旦发现异常需要及时和设计单位进行沟通，一方面保证施工图纸完整，另一方面为后续施工指明方向 [1]。

2. 开展现场勘察工作。全面掌握施工现场的地形地貌情况、原本管线分布情况，如通过资料查询、科学选择物探方式，精准掌握地下管线实际位置、走向，减少施工期间对其的影响，避免由此引发的安全事故及经济损失。工作人员也要依据实际，科学规划施工现场的材料堆放区域、机械设备存储区域等。

3. 准备施工材料、施工设备。提前掌握施工图纸要求、工程标准，科学选购符合要求的管材、管件等，针对管材必须仔细检查其外观，是否存在裂缝、孔洞等问题，对规格、型号进行详细核对，依据规定严格开展抽样检测，保证管材力学性能等都符合施工标准 [2]。同时，提前引入施工所需机械设备，如挖掘机、电焊机等，施工前做好调试工作，定期开展维护工作、保养工作，确保其处于良好运行状态，进而满足施工进度所需。

4. 编制施工方案。依据施工图纸、现场勘察现状等，编制更科学的施工计划，其中不仅包含施工工艺流程，更涵盖施工技术要点，质量控制方法等，为管道工程施工提供正确施工方向和标准。

2 优化市政道路管道工程施工实践技术

2.1 管道沟槽开挖技术

市政道路管道工程施工中，管道沟槽开挖技术是重点，但要想提升施工实践技术应用效果，就需要重点关注以下施工环节：首先，加强沟槽放线，依据施工图纸实际情况，明确标注管道中心线区域，使用全站仪、经纬仪等各种测量仪器实施放线，在地面上详细标注沟槽开挖边界，更要考虑沟槽边坡实际坡度，结合土质真实现状、沟槽实际深度，根据有关规定明确边坡系数，进一步保证沟槽开挖作业的稳定性，从根本上预防坍塌事故。其次，科学选择开挖方式，比如选择机械开挖，针对较大的土方沟槽，一般会采用挖掘机方式进行机械开挖，整个开挖期间要严格控制开挖深度，提前预留 20 ～ 30 cm 的厚度，再采用人工方式开展清底工作，有效预防超挖问题 [3]。同时也要规范挖掘机操作流程，防止其对沟槽底部原状土带来

影响，严重削弱沟槽的承载能力。例如：选择人工开挖形式，若遇到地下管线复杂区域、开挖范围狭窄区域，有必要采用人工挖掘，虽然人工开挖的效率较低，但能精准管控开挖尺寸，进而降低施工对周围原有设施的影响。再次，一旦遇到地下水位较高的区域，沟槽开挖过程中容易发生积水问题，针对这一情况，可采取相应排水方法，如明沟排水、井点降水等，明沟排水是选定沟槽底部区域，在二者周边设置排水沟，选择恰当位置设置集水井，将积水整合到集水井之后，再利用水泵抽出；井点降水是在沟槽周边安装一定的井点管，有效降低其水位，保证沟槽施工环境具有一定干燥性，但井点降水必须提前结合地质条件，科学选择井点类型，布置对应的施工方案[4]。最后，加强沟槽防护工作，为保证施工人员安全、沟槽边坡稳定程度，有必要对沟槽进行综合防护，针对比较深的沟槽，可选择钢板桩、槽钢等材料加强支护效果，有效预防边坡发生坍塌；还需要在沟槽周边设置一些防护栏杆，设置显著的警示标识，降低施工安全事故的发生概率。

2.2 管道铺设技术

管道铺设也是关键技术之一，施工人员有必要加强以下内容，助力市政道路管道工程提升施工质量。首先，加强管材吊运、下管工作，工作人员选择对应的起重设备，如吊车、电动葫芦等，结合管材重量、现场工作情况科学应用，搭配柔性吊带有关吊具，能从根本上降低管材表面发生破损；在吊运过程中，工作人员必须保持平衡，促使管材严格原本设计路线，安全、精准输送到沟槽区域。针对一些管径小、重量轻的管材，也可采用人工下管方式，但在实践期间工作人员要相互配合，一起开展工作，随时关注管材情况，一方面预防滑落问题，另一方面预防对人员产生影响，保证下管工作有序开展。其次，加强管道基础施工，管道基础施工要依据管材种类、实际地质条件开展，例如：混凝土管，一般要精心浇筑混凝土基础，严格控制相应厚度、强度，促使其满足设计标准，可选择针对性的工艺、工具，确保基础表面更加平整，可为后续管道铺设提供支持，促使管道放置更加平稳[5]。针对柔性管道，可利用砂垫层基础，施工的时候依据规定、标准，分层并详细开展砂垫层工作，采取相应的夯实方法，加强夯实效果，保证砂垫层更加紧密，有效达到相关要求，促使管道均匀、分散承载符合要求，一方面减少局部压力引发的管道破损可能，另一方面为管道运行奠定良好根基。最后，加强管道对口、高程控制，针对质量实施严格把控，尤其对管道接口处进行细致处理，促使间隙更均匀、内壁更加齐平，以此为基础才能保证管道连接效果，有效提升其稳固性、密封性。

另外，依据水准仪、经纬仪等各种专业设备，对管道高程、中心线位置实施动态监测，将实际测量数据、设计数值进行比较，第一时间发现偏差做好调整，不仅保证坡度安装效果，更强化标高安装精度，可预防因坡度不符引发的管道积水问题，让管道系统依据设计方案有序开展。

2.3 管道连接技术

首先，加强焊接连接。管道焊接技术中，钢管大多数采用焊接方法，焊接前一定要精心清理焊接区域，不仅除去油污，更要除去铁锈，为后续开展的焊接工作提供支持。也要结合管材规格、材质现状，选择切合的焊接工艺、焊条，尤其是要求操作人员必须有相关证书，才能在操作中以自身操作技能、实践经验保证规范焊接；焊接期间也要重点关注焊接电流、焊接电压等关键数据，一旦出现任何数据偏差，都会影响焊缝质量[6]。焊接工作结束后，工作人员还要依据规范标准，相继开展焊缝外观检查、超声波检测，保证焊缝不出现明显缺陷，促使焊接连接的管道更稳固，彰显自身具备的介质传输价值，有效预防泄漏事故发生。其次，加强承插连接。针对排水中使用的混凝土管、球墨铁柱管等，开展承插连接的时候，先要清理管材的承口、插口，去除灰尘、杂物等，随后涂抹适量润滑剂，以减小插入时的摩擦力；再将插口缓慢、平稳地插入承口内，严格按照规定的插入深度完成安装，此过程可借助手拉葫芦等工具来辅助操作，确保插入过程顺利且精准；利用橡胶圈等优质密封材料进行密封，促使其紧密贴合接口处，有效阻隔介质，确保接口处密封性良好，防止渗漏现象发生，从而保障整个管道系统的正常运行。最后，连接塑料管材（聚乙烯管），第一步是精准切割管材、管件连接部位，保证切口平整、垂直，形成良好熔合连接基础，然后依据要求用热熔设备对管材、管件进行加热，严格把控加热时间、温度，达到规定条件后，迅速将二者对接，维持一定的施压时间，促使其充分熔合，形成牢固连接。在整个热熔连接过程中，要严格控制加热温度、时间、对接压力等参数，任何参数的失控都可能导致连接不牢固、出现缝隙等问题，影响管道的密封性、整体性能，由此可见，对各参数实施严格管控具有关键性意义。

2.4 沟槽回填技术

沟槽回填技术实施中，科学选择回填材料非常关键，要综合考量管道种类、沟槽各部位特点，如管道胸腔区域，可优先选择中砂、粗砂，这种物质透水性比较好，可让管道在后续使用中均匀受力，针对性分解周围压力，降低局部压力对管道结构造成的潜在风险；针对沟槽上部位置，可优先选择原土、灰土，依据规范开展回填操作，必须严格管控土质含水量、颗粒大小等，若指标控制不妥善，容易在回填后，出现压实度欠佳现象，严重影响构造回填稳步效果，削弱对管道的保护性。另外，也要加强回填分层、压实工作，沟槽回填要遵循分层原则，确保回填质量[7]。每层回填的厚度通常不宜超过 20～30 cm 规定范围，以此保证每层回填土都能得到充分压实。在压实操作过程中，要依据实际工况选用合适的压实设备，如小型压路机、蛙式打夯机等，最大限度发挥其压实效能。值得注意的是，在管道两侧、管顶以上一定范围内，为避免对管道造成破坏，应采用人工夯实方式，操作时需格外小心、细致。同时也要严格按照规范标准，对每层回填土的压实度进行检测，只有压实度切实达到设计要求，才能为管道提供可靠的覆土保护，防止管道承受上部过大荷载出现变形、损坏等问题，保障管道系统的正常运行。

3 加强施工质量控制与安全管理

3.1 质量控制方法

提升施工质量控制效果，需要建立一个完整的质量管理体系，组建专门的质量控制小组，详细阐述各成员负责的质量监控任务，设置明确的质量规章机制，不管是材料采购，还是施工过程、竣工验收等，都要保证质量监控全面覆盖。同时也要加强过程质量检查力度，施工期间安排专门人员依次核查施工工序，重点关注沟槽开挖尺寸、管道铺设高程，一旦发现潜在问题要及时更改，保证上一道工序质量符合标准，才能开启下一道施工环节。另外，严格执行质量验收标准，参照国家、地方提出的质量验收要求，对工程进行分项验收，针对不符合工程质量的区域，必须要求其返工，由专门人员监督确保达到质量要求[8]。

3.2 安全管理方法

优化安全管理过程中，可重点关注以下方面：

第一，加强安全教育培训，组织所有施工人员参与安全教育培训，增强人员安全思想观念，使工作人员了解施工期间遇到的风险点，具备制定风险应对方法的能力，可有效制定沟槽坍塌事故预防、高处堕落事故预防等。

第二，加强安全技术交底，进入每一道施工工序前，要求技术人员详细对施工人员开展安全技术交底工作，重点阐述施工中要注意的安全问题、操作规程等，促使人员能规范、安全地完成施工。

第三，加强安全管理，组建专门的安全管理小组，配备专职的安全管理人员，定期开展日常巡查，一旦发现机械设备违规操作等行为，必须进行严肃处理，严格监管现场临时用电安全管理，促使施工稳定进行。

4 结束语

市政道路管道工程施工技术实践是系统、复杂的领域，涵盖施工前准备、沟槽开挖、管道铺设、管道连接、沟槽回填等多个环节。各环节紧密相连、相互影响，任何一处疏忽都可能对工程质量、后续使用造成不良后果。未来，需深入研究优化施工实践技术的方法，严格把控施工质量，强化安全管理，确保市政道路管道工程能稳定运行，更好地服务于城市排水、供水、电力以及通信等功能，为城市居民营造更便捷、舒适的生活环境，助力城市高质量发展。

参考文献：

[1] 祝赫.非开挖施工技术在市政管道施工中的实践分析[J].建筑技术开发,2020,47(22):115-116.
[2] 费俊锋.联合循环发电机组天然气管道接入工程技术方案和实践探究[J].科技资讯,2024,22(22):196-198.
[3] 李阳,张建,范振宁,李其锐,潘杰,李萌,张俊朋,张钧晖,梁海宁.齐鲁石化—胜利油田CO_2长输管道数智化关键技术与创新实践[J].天然气工业,2024,44(09):1-12.
[4] 王子,姜帅,刘浩文.横穿滑坡区埋地管道应力感测与控制技术的应用实践[J].油气储运,2024,43(12):1378-1389.
[5] 李培凤,杨利国.长距离浆体输送管道安全运行操作控制实践与应用[J].矿业工程,2023,21(01):21-24.
[6] 都兴恺,李庆,马本特.数据挖掘技术在管道全自动焊口质量预测中的应用实践[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(20):49-51.
[7] 朱凯华.浅谈泥水平衡顶管施工技术在市政管道工程中的实践[J].江西建材,2022(06):313-315.
[8] 彭维康.市政道路给排水管道中顶管技术工艺与应用浅析[J].科技视界,2023(07):41-44.

高速公路路基施工质量控制技术分析

初 蕾

（安徽省中兴工程监理有限公司，安徽 合肥 230031）

摘 要 高速公路路基施工质量的优劣直接影响着道路的稳固性和其使用寿命。本文指出应精心部署施工活动、优化土方填筑工艺监管、利用高端检测工具与信息化手段对施工全程实施实时监管，持续跟踪并控制压实度、含水率、沉降变形等关键参数。针对地质环境的多样表现类型，精心筛选合适的填充材料和加固方法，以增强路基的承载与抗变形效能；共同实施施工质量评估及问题预警流程，显著增强工程施工的效率与质量，保障高速公路的行车安全与长期稳定。

关键词 路基施工；质量控制；信息化监测；压实度控制；加固技术

中图分类号：U416.1 文献标志码：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.031

0 引言

高速公路是交通网络的核心构成部分，道路的安全性及耐久性与路基施工质量密切相关。面对交通压力的持续增长与工程建造标准的逐步提高，现有的施工和质量监管手段已无法满足不断提高的高质量标准需求，借助信息化监控设备、优化施工环节、强化物料及工艺的管控，可明显加强路基性能与施工效能。高品质的路基建设能有效降低未来的维护开支，也为高速公路的稳定运行打下了坚实的基础。

1 高速公路路基施工质量影响因素分析

高速公路路基的施工受到多方面要素的制约，这些要素的搭配及其相互作用的多样性表现形态，显著作用于路基的稳定性能、承重效果及耐用性，维护路基建设品质要求对关键因素进行详细的分析。

1.1 地质条件的影响

路基施工质量的好坏与地质状况紧密相关，地质构造的多样性、土壤特性的变化以及地下水位的不稳定性均能影响路基的稳固性，施工环节中软土地基、膨胀性土壤及高含水量土层容易产生沉降与形变，必须采用加固及换填等特殊施工手段，坚硬的岩层可能导致施工困难加剧及设备磨损严重，施工前必须实施细致的地质调查，了解土壤层组成成分，依据这些条件选配恰当的施工方法，这是保障路基质量的核心步骤[1]。

1.2 填料与材料的选择

选取合适的路基填料及材料，直接关系到路基压实效果与承重能力。路基的稳定性与压实效果受填料粒度、含水量及颗粒尺寸等关键要素的影响，质量合格的土壤、碎石、砂砾等建材可以显著增强路基的承压能力和持久性，若使用质量不达标的填充材料，会导致路基存在塌陷及裂缝的潜在风险，故而选用的材料需符合设计要求，实地检验是保证材料品质达标的有效途径。

1.3 施工工艺的影响

确保路基施工的品质要求，施工工艺的适宜性是核心。路基施工的土方作业，土层的分层堆放、分级压实和含水量管理等环节对路基压实质量具有决定性作用。施工过程中需对每一层的压实度实施严格监控，必须达成既定的设计参数要求。施工过程中还应规避高温及暴雨等不利气候条件，降低土壤松散与水分过剩的风险因素对压实效果的影响，确保施工品质。

1.4 施工机械与设备的适配性

路基建设效率与品质的提高与施工机械的选用及其功能特性紧密相连。高效的施工作业得益于机械装备的优良性能，保障施工品质，通过专业化压实机械设备，可实现土壤各层密度的精确控制，消除设备不匹配导致的缺陷隐患。在低温高湿等严苛环境下，机械的适应能力尤为关键，必须针对特定环境条件选择适配的施工机械。

1.5 环境因素的影响

路基施工质量深受环境要素的影响。极端气候，如高温、低温、暴雨等，会引发土壤水分含量的波动，施工质量可能面临不利后果。例如：在雨季期间施工，水位上升常引起土壤湿度的波动现象，可能引起填土作业土壤的不均匀与松散效应。合理调整施工流程，

优化施工计划，降低环境因素对路基建设质量的消极效应。

2　土方填筑与压实工艺的控制要点

土方填筑与压实是路基建设基础工艺的核心内容，其品质对路基的承重、稳定性及耐久性有直接关系，执行科学的填筑工艺及严格的压实步骤，可以有效提升路基工程建设质量，显著减少未来沉降和变形的风险。

2.1　填筑层次与分层厚度的控制

土方施工实施阶段，必须对每一土层的厚度进行严格的审查与监控，针对各类土壤特性，分层作业要求选取合理的层厚。按照建设标准规范，土层分层的厚度推荐设定为 20 ～ 30 厘米，处理含有较大颗粒的砂石填充物，分层厚度宜适度增加。依据土壤特性及规范要求，层位较厚会减弱压实效果，层位过薄易受含水率波动影响，压实质量波动大。合理的层厚设计能确保各层得到充分压实，极大地促进路基的整体密实度与稳定性的提升 [2]。

2.2　压实度的控制与检测

土方填筑的压实度是衡量路基质量的关键标准，这一要素对路基的承载与稳定性起着核心作用，务必实现压实度与规范要求一致。静压与振动压实技术是普遍采用的压实技术，施工阶段必须定期进行实地压实度核实，保证土壤压实度与既定设计标准相符合。施工过程中实施试验段预压实步骤，从现场土壤特性出发，严格挑选最恰当的含水量与压实方法，基层压实度要求≥ 97%。

2.3　含水率的控制

土方压实作业的效果与土壤含水量密切相关，过高的含水量或过低的含水量均会影响压实的效果。当土壤湿度增加时，将导致粘结效应，增加了压实作业的难度；反之水分含量偏低，土颗粒间摩擦阻力增大，难以通过外力重新排列，导致干密度较低，压实效果差 [3]。在路基施工现场，实施水分检测作业，实时跟踪土壤含水量状况，并依据现场情况对填充材料的水分比例进行相应调整，巩固压实作业的既得成效，精确掌握 12% ～ 18% 的理想含水量是核心要求。

2.4　压实设备与施工方法的选择

因地制宜的压实机械挑选十分必要。在工程领域轮式压路机、钢轮压路机及振动压路机等构成了压实机械的典型种类。施工过程中，应当考虑土壤情况、土层厚度及工程推进情况，适宜选择施工机械，防止机械选择失误导致的压实效果不均和密实度不达标（见表 1）。机械施工运行阶段，必须维持机械性能的最佳状态，对设备进行周期性维护与性能审核，保障施工质量的稳定可靠水平 [4]。通过对土方填筑的分层厚度、压实度、含水率和设备选择等方面的严格控制，可以显著提高路基的密实度与稳定性，确保高速公路的长期使用安全。

3　信息化监测技术在路基施工中的应用

3.1　传感器技术的应用

传感器技术在信息化监控领域中的核心作用显著，应用场景十分广泛。路基施工过程中，通过传感器技术对土壤的紧密程度、沉降、温度和湿度等关键参数进行实时采集分析，指导路基施工作业。例如：在实施土壤压实作业过程中，内置的压力感应器可即时呈现土壤压实成效，确保土壤各层均实现既定的设计参数目标。

3.2　无人机与遥感技术的应用

无人机技术快速记录施工现场图像数据，达成对地形地貌的全面调查、土方量的精确估算及地面沉降变形的实时跟踪。通过遥感技术路径，我们可以快速收集大面积的地面信息，有效突破了传统手段的束缚及高额成本。无人机与遥感技术的应用大幅降低了人工巡检所需的时间及人力投入，极大地增强了施工监测的精确性与快速响应水平。

3.3　大数据技术的应用

传感器与智能设备共同支撑实时数据采集系统的数据搜集功能，在施工区域收集大量数据信息，迅速传输至云端以进行深入分析。云平台依托的数据存储与处理系统展现出卓越性能，系统在处理监测数据上具有快速处理的特点，运用大数据分析技术与模型构建方法，精确发现施工过程中的潜在安全隐患 [5]。

表 1　不同的土壤条件压实设备

项目	适用土壤类型	压实设备	最佳含水率范围
粘性土	粘性土、湿土	钢轮压路机、振动压路机	12% ～ 18%
沙土	沙质土、干土	轮式压路机、振动压路机	10% ～ 15%
砂砾土	砂砾土、碎石	振动压路机、滚筒压路机	14% ～ 18%

3.4 信息化监测技术的应用

信息化监测技术的应用为路基施工带来了更为精准的管理工具。施工期间整合实时监测数据，大幅增强了施工质量管理的透明性与精确性。引入先进的数字化管理手段，管理者能够快速掌握施工现场的关键信息，灵活调整施工进度，把握质量标准。运用数字化监测技术手段实现施工阶段数据记录的全覆盖，为项目的审计、验收及维护阶段提供了全面的数据支撑。

4 路基施工质量综合控制与优化策略

路基施工质量保障措施贯穿于设计、施工及后期检验的各个环节，关联多个核心步骤。整合管理优化策略，可显著改善路基建设水平，维持其长期的稳定与耐久性能。

4.1 施工前期质量控制与设计优化

路基施工质量保障的基石在于施工前期的严格质量控制环节。施工筹备初期，需对地形、土壤属性及气候要素进行详尽的调查分析，并依此制定合理的施工方案，选择合适的施工物料，严格遵守路基施工的规范标准，力求在土壤层挑选、材料配比及路基厚度设计上精确无误。通过周密勘查与细致规划，施工阶段的风险和隐患可得到有效控制，强化了施工质量的长期稳定性基础。

4.2 施工过程中的动态质量控制

在施工环节实施动态调整和实时监控是质量控制的核心要素。施工期间，施工方案应根据现场实际情况作出灵活的调整，涵盖土方填筑各层厚度、压实度及含水量等核心指标，各层土体必须实现设计规范所设定的标准。执行电子监测技术，通过传感器实时监控路基土体的压实效果、沉降数据及周围环境状况，确保施工策略的灵活应对能力，质量监管小组需实地走访施工地点，以便及时识别并消除施工中的潜在问题，预防施工错误对成品质量产生不利后果。

4.3 土方填筑与压实技术优化

路基施工质量的提升离不开对土方填筑及压实技术的优化，采纳有效的填料及加固策略，可大幅增强路基的紧密性与抗压能力。土壤特性的多样性是填料挑选的依据，涉及砂土与粘土等，需结合土壤特性进行差异化处理。采用优化后的压实技术和引入先进的机械化装备，压实作业的效率和质量显著提升。通过运用振动压实、重型压实等不同压实技术，严格实施各层土壤的压实措施，遵循设计标准，大幅降低因土层不均匀性造成的沉降风险[6]。

4.4 施工质量监控与检测技术

施工质量的监管与检验是维持工程品质的根本途径。依托高端检测设备，如激光测距仪和全站仪等设备，实时跟踪路基沉降及形变过程。施工的关键阶段，可通过实施取样检测、实地测试等手段，精确调整路基压实度与含水量比例，确保各项指标参数达标。路基施工全过程要严格执行质量检测的数字化及规范化标准，确保各项检测项目与设计标准相吻合，消除因监管不严所引起的质量隐患[7]。

4.5 后期质量评估与养护策略

路基工程结束后需要实施严格的质量审查过程，保证施工质量与规范标准相一致。通过执行沉降观测与路面平滑度检验等实施步骤，对路基的稳定性及承载性能进行综合分析。同步构建合理的养护管理架构，实施路基的周期性维护规划，有效降低路基因沉降、裂缝等因素引起的损害。执行预防性的检测与维护，大幅提高路基性能稳定的持久性，有效降低后续维护成本。

5 结束语

加强高速公路路基施工的稳定性效果是保障道路安全与持久稳定的基石，通过对土方作业、压实施工、信息化监控及质量全面控制等关键环节进行优化调整，施工效率和质量明显增强，极大地提升了路基的承载性能和持久性。由此可见，科学的规划与严格的施工管理及高效的监控技术相辅相成，为实现高速公路工程质量的全面提升提供了有力保障。

参考文献：

[1] 吴边. 高速公路路基沉降施工技术及其质量控制路径 [J]. 交通科技与管理,2024,05(16):106-108.
[2] 苗成林,陈东. 高速公路路基施工技术与质量控制策略研究 [J]. 运输经理世界,2024(19):55-57.
[3] 王鼎. 高速公路路基施工技术及质量控制 [J]. 汽车画刊,2024(09):218-220.
[4] 谢书良. 高速公路路基施工技术要点及质量控制分析 [J]. 运输经理世界,2024(31):13-15.
[5] 杨世杰. 高速公路路基施工及质量控制技术 [J]. 四川建材,2023,49(01):149-150.
[6] 苏永青. 高速公路高填方路基施工质量控制技术 [J]. 河南科技,2021,40(13):94-96.
[7] 李诗曹. 高速公路路基沉降及施工控制技术分析 [J]. 运输经理世界,2021(11):94-96.

旧路改造中的路基加固技术应用研究

赵　丹

（青海路桥建设机械工程有限公司，青海 西宁 810001）

摘　要　由于我国现有公路旧路面严重问题日趋突出，现有的路基改造技术往往无法满足需求。本文通过对旧路改造中路基加固技术的应用进行了研究，提出了一种改良型的路基加固技术，并在各级公路修复中进行了大量实践。研究结果表明：新型路基加固技术可以显著改善旧路路基的承载能力，提高道路行车平稳性，实际效果显著，显著降低了路基改造成本，提高了工程效益。本文研究结果旨在为推动现阶段我国旧路修复中的路基改造技术的应用提供参考。

关键词　路基加固技术；旧路改造；承载能力；道路行车平稳性

中图分类号：U416.1　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.032

0　引言

我国公路网络庞大、复杂、覆盖范围广，尽管如此，我国的公路旧路面问题仍然越来越突出，存在严重的损坏、沉降下陷、塌陷问题，甚至严重影响了公路的安全及通行效率。然而，现有的路基改造技术不能很好地解决这些问题，既无法提高道路的行车平稳性，也无法显著提高路基的承载能力，并且往往伴随着高额的改造成本。因此，寻找并应用一种有效、经济且适用于我国公路旧路改造的新型路基加固技术，成为当前公路建设与维修领域的一大重要任务。本文围绕旧路改造中的路基加固技术应用进行了深入研究，提出了改良型的路基加固技术，并在各级公路修复中进行了实地应用验证，以期能为我国公路维修中的旧路路基改造提供有实效的技术参考。

1　国内外旧路改造需求与现状

1.1　国内旧路面问题的概述

我国公路交通运输体系在国民经济中扮演着至关重要的角色，但随着大量交通的流通以及时间的推移，旧路路面问题逐渐凸显[1]。旧路病害的主要表现形式包括路面裂缝、沉陷、坑槽和龟裂等，其中以路面裂缝和沉陷最为常见。这些病害不仅对行车舒适性和安全性构成威胁，也大幅增加了公路维护和修复的成本。造成旧路病害的主要原因有荷载超重、地基不均匀沉降、材料老化以及施工质量问题等。随着交通流量的增加和车辆轴重的提升，旧路面在承受巨大压力时缺乏足够的抗疲劳能力，导致路面寿命缩短。面对如此巨大的养护和修复需求，现有技术手段往往难以有效应对，需要引入更为先进和高效的路基加固技术。这不仅有助于提升路基的质量和承载能力，还能显著降低维护成本，延长道路的使用寿命。以现代化科技手段解决旧路改造中的路基问题已成为亟待解决的重要任务[2]。

1.2　国外旧路改造技术的发展

国外旧路改造技术的发展呈现出多样化的趋势，各国为应对道路老化和维护成本增加的问题，积极探索先进的改造方法。在美国和欧洲地区，旧路改造技术已发展到利用现代化设备进行精确检测和评估，通过材料科学的进步，推广使用新型路基加固材料，如纤维增强聚合物等，提高旧路基的强度和耐久性。日本则注重智能化施工技术，从道路生命周期管理的角度出发，通过系统化的监测和维护策略，减少材料浪费与能耗。在新加坡，为了满足城市化进程加快对道路性能的要求，积极采用绿色环保材料开展旧路面改造，其独特的天气条件使得透水路面技术得到广泛应用。这些技术创新不仅提升了道路的使用寿命，也为全球旧路改造提供了宝贵的经验借鉴。

1.3　现有技术的局限性

现有旧路改造技术在应用中面临多种局限性。常见的传统加固方法，如粉喷桩、换填法等，通常存在施工周期长、成本较高的问题，难以大规模推广。部分技术在特定地质条件下效果不佳，导致路基稳定性难以保障。现有材料的耐久性和适应性也有待提高，无法充分应对日益繁重的交通负荷需求。现有技术难以提供满意的改造效果，制约了旧路改造的进一步发展[3]。

2 路基加固技术基础与原理

2.1 路基加固技术的分类与原理

路基加固技术是道路工程中的重要环节，它通过增强路基材料的承载能力和改善地基结构稳定性，延长道路使用寿命。根据技术原理和应用方式，路基加固技术可分为机械加固、化学加固和复合加固等三大类。机械加固通过物理手段提高路基强度，常见方法包括夯实、压实以及采用加筋土工格栅等。机械加固通过增加土壤密度和内摩擦力，增强路基抗剪切和抗压性能。化学加固则通过化学反应改变土壤性质，实现加固效果。常用材料包括石灰、水泥和化学固化剂，这些材料与土壤反应后形成新的稳定结构，增强路基强度和耐久性。复合加固技术结合机械与化学方法，常用于处理复杂地质条件的路基问题。其原理是通过应用机械加固和化学加固，使二者优势互补，提高整体加固效果。这些加固技术各具特点，适用于不同的地质条件和工程需求，在旧路改造中具有广泛应用前景。

2.2 典型加固材料的应用

在路基加固技术中，材料的选择和应用至关重要。典型的加固材料包括水泥、石灰、粉煤灰和合成纤维等。水泥通常用于增加土体的稳定性，其作用原理是通过水化反应增强土体的抗压强度和耐久性。石灰因其与黏土矿物反应而提高土壤的塑性指数和强度，常用于处理含水量过高的土壤。粉煤灰作为工业副产品，在增加土体密实度和减小其变形方面表现突出。合成纤维通过改善土壤的整体应力分布以及增加抗剪强度，被广泛应用于软土路基的加固。这些材料的合理选用与配比，对提高旧路路基承载力和延长路面使用寿命具有重要作用。

2.3 加固技术的实施步骤

路基加固技术的实施步骤包括现场勘测、加固材料准备、施工技术选择、质量监控与验收四个主要环节。进行现场勘测与检测，确定路基的复杂性与病害程度，可为加固方案的制定提供依据。随后，根据路基条件与加固要求，选择合适的加固材料，确保其物理及力学性能满足工程需要。采用适宜的施工技术，以实现最优的加固效果，施工过程需严格遵循设计规范及操作标准。实施全过程的质量监控，通过检测与验收确保加固的质量与安全，达到预期的承载能力与耐久性目标。

3 改良型路基加固技术的开发

3.1 新型材料的选择与配比

开发新型材料对旧路改造中的路基加固技术至关重要。在材料选择方面，需重点考虑能够显著提高承载能力与耐久性的材质。选用具有优异力学性能的改性沥青和纤维材料，这些材料不仅具备较高的强度，还能增强路基的抗剪切与抗压性能。高分子材料由于其良好的延展性和抗老化特性也被纳入选择范围。在材料的配比研究中，通过控制不同成分的比例来优化材料的力学性能与耐久性。采用不同粒径和纤维长度的组合，以确保材料在不同应力条件下表现最佳。通过计算不同材料组合的物理化学特性，确定其最佳混合比例，从而提高可持续性。在实验阶段，利用标准实验室测试方法验证材料配比的理论效果，为实际工程应用提供依据。这些新型材料和配比有望在实际应用中表现出优异性能，有效应对旧路面改造中的各类复杂问题。

3.2 改良工艺的实施方法

改良工艺的实施方法涉及细致的步骤和严谨的指导。从选材到施工，需全过程精确控制以确保技术效果。在施工前，需进行现场勘测，对不同道路条件进行详细评估，识别薄弱路段及所需加固程度。选择适宜的新型加固材料，确保其能够与现有路基材料兼容，并通过精确配比提高材料的综合性能。在施工过程中，应采用先进的施工机械和工艺，以确保加固材料均匀摊铺、压实到位。技术人员要按设计图纸进行施工，密切关注施工中的路基压实度和均匀性，通过技术检测设备实时监控施工过程，以确保加固效果达到预期标准。完工后，需进行质量验收与效果评估，确保改良工艺充分增强路基稳定性。所有流程需遵循相应技术标准和规范，以确保施工安全和质量。

3.3 改良效果的预测试验

在改良效果的预测试验中，要选择典型的路段进行试验，以评估新型路基加固技术的实际性能[4]。首先基于实际工况进行参数设置，模拟不同荷载作用下的路基应力分布情况。其次使用先进的传感技术与数据采集系统，监测路基在加固前后的沉降变形、承载能力和稳定性。实验结果表明，新型材料与配比方案使得路基的承载能力明显提升，沉降变形显著减小，验证了改良型技术的优越性，为后续大规模应用提供了可靠的数据支持和理论依据。

4 路基加固技术的实际应用与成效分析

4.1 不同级别公路的案例应用

在路基加固技术的实际应用中，不同级别公路的案例分析显示出该技术的广泛适用性与显著成效。在国家高速公路中，改良型路基加固技术被应用于某些老旧路段，经过施工后，这些高速公路的承载能力得

到了显著增强，道路的行车舒适性和安全性也得到了提高。在省级干线公路中，改良型路基加固技术在改造旧路的过程中展现出良好的适应性，尤其是在土质较差或原有路基较为薄弱的地区，试验结果表明路面结构的耐久性和强度均有所提升。在县乡级别的公路改造中，该技术的应用使得基础设施的改善更为经济高效，材料使用量得到有效控制，减少了工程造价[5]。总体而言，改良型路基加固技术不仅适用于不同等级的公路，而且在各个案例中均展现了提升路基性能和降低改造成本的潜力，为不同施工环境下的旧路改造提供了多样化解决方案。

4.2　加固后路基性能的提升

加固后路基性能的提升在多个维度上得到了验证。加固技术显著提高了路基的承载能力，测试结果显示，路基的抗压强度和变形模量有明显改善，可有效应对交通荷载的增大和变化。道路表面的平整度也有所提高，行车质量得到显著改善，减少了车辆颠簸和振动频率，增强了行车舒适性。进一步的长期监测显示，加固后的路基在应对恶劣气候条件和环境变迁时表现出更强的抗疲劳性能，延长了道路的使用寿命，降低了维护频率与成本，确保了交通运营的连续性。上述性能提升在不同级别公路中均得到了广泛验证，显示出改良技术的普适性和有效性。

4.3　经济效益与成本分析

旧路改造中引入改良型路基加固技术后，经济效益显著提升。此技术减少了传统加固材料和工艺使用，降低了材料和施工成本。通过对多条不同级别公路的应用分析，该技术平均节约成本 20% ～ 30%。路基承载能力的提高延长了道路的使用寿命，减少了后续维护频率和费用。可靠的施工工艺缩短了工期，降低了人工和机械成本。在环境方面，新材料的使用降低了碳排放，减少了间接经济损失。总体而言，该技术在旧路改造中实现了成本与效益的双重优化。

5　研究成果及技术应用瓶颈

5.1　主要研究成果总结

本研究对旧路改造中的路基加固技术进行了深入探讨，取得了一系列重要成果。研究中开发的改良型路基加固技术显著提升了路基的承载能力和道路的行车平稳性，为旧路的高效修复提供了技术支持。新型加固材料的选择与科学配比，不仅提高了加固效果，还有效降低了路基改造的整体成本，优化了工程效益。在各级公路的实际应用中，改良技术表现出良好的适应性和稳定性，确保了技术在不同环境和条件下的广泛应用。经济效益分析表明，新技术大幅降低了维护和修复的长期成本，为公路改造工程带来了可观的经济回报。通过对该技术的系统预测试验，验证了改良技术的可靠性和实效性，为进一步推广和应用奠定了基础。研究成果为解决我国旧路路基问题提供了重要的技术参考，有助于提升整体道路交通体系的质量和安全性。

5.2　技术应用的局限和问题

尽管新型路基加固技术在旧路改造中展现出显著的优势，但其应用仍存在一些局限和问题。适用于不同地质条件的新型材料选择难度较大，可能导致材料配比和工程效果的变异性。部分新型材料的长期耐久性尚未得到充分验证，可能影响整体结构的稳定性。在施工过程中，新工艺的复杂性可能导致工程技术人员对操作步骤的不熟悉，进而影响施工效率和效果。虽然成本效益分析表明经济性提高，但初始投资仍可能成为部分资金有限项目实施的障碍，各方面问题需进一步研究和解决，以确保该技术的广泛应用和推广。

6　结束语

此项研究对旧路改造中路基加固技术的应用进行了深入的探讨，针对实际问题提出了一种改良型的路基加固技术，对此加固技术的效果进行了验证并得到了显著的效果。新型路基加固技术的实施，不仅能显著提高道路的行车平稳性，大幅度提高旧路路基的承载能力，而且能够降低路基改造成本，提高工程效益，在实践中取得了显著效果。虽然新型路基加固技术在旧路改造工程中的效果显著，但仍需要在更广范围和更深层次上研究和完善，以符合各类路况和环境的需要。本文研究成果以期为我国公路路基加强和旧路改造战略决策提供有效的理论支持，对推动我国高速公路的持续、快速、安全、高效的发展具有积极的参考价值。

参考文献：

[1]　马永龙.冷再生技术在旧路改造工程中的应用[J].工程技术研究,2021,06(05):56-57.

[2]　王永强.旧路拓宽改造时新旧路基不均匀沉降的研究[J].科技视界,2021(21):39-40.

[3]　王昕远.旧路改造设计研究[J].中国高新科技,2021(21):51-52.

[4]　程帅.综合加固技术在旧楼改造中的运用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(01):93-96.

[5]　吕耀志,邹宝刚,徐鹏道,等.无损检测技术在城市旧路改造中的应用[J].中国市政工程,2017(02):21-23,27.

公路工程路基土石方施工与质量控制措施

汪 冠

（黄山新洲建设集团有限公司，安徽 黄山 245242）

摘　要　本文深入探讨了公路工程路基土石方施工质量控制中的关键问题，针对施工中可能遇到的难点和挑战，提出了加强施工组织与管理，提高施工技术的科学性和规范性，严格控制材料与设备的质量，以及加强排水与防护工程的施工等一系列有效对策，旨在为确保路基稳定提供借鉴，进而全面提升施工质量，保障公路工程的安全稳定运行，为交通运输事业的发展奠定坚实的基础。

关键词　公路工程；路基土石方施工；排水防护

中图分类号：U416.1　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.033

0　引言

随着国家基础设施建设的快速发展，公路工程作为经济、文化交流的纽带，其建设质量和效率备受关注。路基作为公路的基础，其稳定性和耐久性至关重要。土石方施工是路基建设的关键，涉及多个复杂工序，要求高技术和管理水平。然而，实际施工中受地质、环境、管理等多种因素影响，路基土石方施工面临挑战，如何确保施工质量、提高效率，成为公路工程领域亟待解决的问题。

1　公路工程路基土石方施工概述

1.1　路基土石方施工的基本概念

1. 路基的定义与功能。路基是公路工程的重要组成部分，它位于路面结构之下，是支撑路面结构并传递车辆荷载至地基的基础结构。路基的稳定性和承载力直接决定了公路的使用寿命和安全性能。在公路工程中，路基不仅承载着路面的重量，还要承受车辆行驶时产生的动态荷载，因此其设计和施工必须满足严格的工程要求。路基的功能主要包括支撑路面、传递荷载、保持公路线形稳定以及为路面提供排水通道等，是确保公路正常运营的关键。

2. 土石方施工的内容。土石方施工是路基建设中的核心环节，主要包括土方开挖、填筑和压实等工序。土方开挖是指根据设计要求，将路基范围内的土方挖掘至指定标高和形状；填筑则是将开挖出的土方或外部运来的土石材料填充到路基指定位置，以形成稳定的路基结构；压实则是通过机械或人工方式，对填筑的土石材料进行压实处理，以提高其密实度和承载力。这些工序相互衔接，共同构成了路基土石方施工的全过程。

1.2　路基土石方施工的特点与难点

1. 施工特点。路基土石方施工具有工程量大、施工条件复杂、施工周期长等特点。由于公路工程往往跨越不同的地理区域，地质条件和气候条件差异较大，因此路基土石方施工需要根据实际情况进行灵活调整。同时，路基施工还受到周边环境和交通状况的影响，需要在确保施工质量的同时，尽量减少对周边环境和交通的干扰。

2. 施工难点。路基土石方施工面临的难点主要包括路基稳定性控制、土石方平衡、环境保护等方面。路基稳定性控制是确保公路安全运营的关键，需要在施工过程中严格控制土石方的开挖和填筑质量，以及压实度等参数。土石方平衡则是指在施工过程中，需要合理安排土石方的开挖和填筑顺序，以确保土石方的有效利用和减少浪费。环境保护则是公路工程建设中不可忽视的重要方面，路基土石方施工需要采取有效措施，减少对周边生态环境的破坏和影响[1]。

2　公路工程路基土石方施工技术

2.1　土方开挖技术

土方开挖是路基土石方施工的首要环节，其质量直接影响到后续填筑和压实的效果。在开挖前，需根据设计图纸和现场实际情况，确定开挖的范围、深度和顺序。在开挖过程中，应遵循“从上至下、分层开挖”的原则，确保开挖面的稳定。对于不同土质的开挖，需采取不同的策略。例如：对于软土地基，应采用缓慢开挖、及时支护的方法，防止土体失稳；对于硬质岩石地基，则可采用爆破或机械破碎的方式进行开挖。同时，开挖过程中还需注意控制开挖面的平整度，避免出现过大的起伏或坑洼，为后续填筑和压实创造良好条件。

2.2　土石方填筑技术

土石方填筑是路基建设中的关键环节，其质量直接关系到路基的稳定性和承载力。在填筑前，需对填

筑材料进行严格筛选，确保材料的质量符合设计要求。在填筑过程中，应遵循“分层填筑、分层压实”的原则，确保每一层填筑材料的密实度和均匀性。对于不同性质的填筑材料，需采取不同的填筑方法和压实工艺。例如：对于砂性土，可采用振动压实或水撼法进行压实；对于黏性土，则可采用静压或夯击法进行压实[2]。此外，还需注意控制填筑材料的含水量，使其在最佳含水量范围内进行压实，以达到最佳的压实效果。

2.3　路基排水与防护技术

路基排水与防护是确保路基稳定和安全的重要措施。在路基施工过程中，需设置完善的排水系统，包括边沟、截水沟、排水沟等，以及时排除路面和路基内的积水，防止水对路基的侵蚀和破坏。同时，还需根据路基所处地段的地质条件和气候条件，采取相应的防护工程措施。例如：在边坡稳定性较差的地段，可采用挡土墙、护坡等防护结构来增强边坡的稳定性；在易受水流冲刷的地段，则可设置护岸、丁坝等防护设施来保护路基免受水流的冲刷和破坏。通过合理的排水和防护设计，可以确保路基的稳定性和安全性，延长公路的使用寿命。

3　公路工程路基土石方施工质量控制措施

3.1　施工前的质量控制

1. 施工组织设计审查。施工组织设计是指导整个施工过程的纲领性文件，其合理性和可行性直接关系到施工质量和进度。因此，在施工前，必须对施工组织设计进行严格的审查。审查内容主要包括施工方案的合理性、施工顺序的科学性、施工方法的可行性以及施工进度的合理性等。通过审查，确保施工组织设计符合工程实际要求，能够为施工过程的顺利进行提供有力保障。

2. 施工队伍与设备准备。施工队伍和设备是施工过程中的两大核心要素，它们的准备情况直接影响到施工质量和效率。在施工前，必须对施工队伍进行严格的筛选和培训，确保施工人员具备相应的专业技能和施工经验。同时，还要对施工设备进行全面的检查和调试，确保设备性能良好，能够满足施工需求。通过充分的准备，为施工过程的顺利进行提供有力的人力和物力保障。

3. 施工图纸会审与技术交底。施工图纸是施工过程的依据，其准确性和完整性直接关系到施工质量和安全。在施工前，必须组织相关人员进行施工图纸的会审，对图纸中的疑问和问题进行及时的沟通和解决。同时，还要进行技术交底，将施工图纸中的设计要求、施工方法和注意事项等详细告知施工人员，确保施工人员能够准确理解图纸意图，按照图纸要求进行施工。通过图纸会审和技术交底，确保施工过程的顺利进行，提高施工质量和效率。

3.2　施工过程中的质量控制

1. 土石方开挖与填筑质量控制。在土石方开挖过程中，要严格控制开挖的深度、宽度和坡度，确保开挖形状与设计要求一致。同时，要注意保护周边土体和植被，避免过度开挖造成土体失稳或生态破坏。开挖出的土石方要及时运至指定地点，避免堆积过高或散落造成安全隐患。在填筑过程中，要分层填筑，每层填筑厚度要符合设计要求，填筑材料要均匀、密实。填筑前要对填筑材料进行筛选，去除杂质和大块石料，确保填筑质量。填筑过程中要加强监测，及时发现并处理填筑体出现的裂缝、沉降等问题[3]。

2. 压实质量控制。压实是确保路基稳定性和承载力的关键步骤。在压实过程中，要选择合适的压实机械和压实方法，根据填筑材料的性质和厚度确定压实遍数和压实速度。压实前要对填筑体进行洒水湿润，使填筑材料达到最佳含水量，提高压实效果。压实过程中要均匀、连续地进行，避免出现漏压或重复压实的情况。压实后要及时检测压实度，确保压实质量符合设计要求。

3. 排水与防护工程质量控制。排水与防护工程是确保路基稳定和安全的重要措施。在施工过程中，要严格按照设计图纸要求设置排水设施，如边沟、截水沟、排水沟等，确保排水畅通无阻。同时，要对排水设施进行定期检查和清理，防止堵塞或损坏。在防护工程方面，要根据路基所处地段的地质条件和气候条件，采取相应的防护措施，如设置挡土墙、护坡等。防护工程的施工要符合设计要求，确保防护效果可靠。通过严格的排水与防护工程质量控制，确保路基的稳定性和安全性。

3.3　施工后的质量控制

1. 路基验收与评定。路基施工完成后，必须进行严格的验收工作。在验收过程中，应依据相关设计规范和标准，对路基的宽度、高度、坡度、压实度、平整度等关键指标进行全面检测。同时，还需对排水设施、防护工程等配套设施进行检查，确保其功能完善、符合设计要求。验收合格后，需按照相关规定进行评定，对路基施工质量进行客观、公正的评价。评定结果将作为工程交付使用的重要依据，也是对施工单位施工质量的一种认可[4]。

2. 后期养护与管理。路基施工完成后，后期养护与管理同样至关重要。养护工作应定期对路基及其配

套设施进行检查、维修和保养，及时发现并处理潜在的安全隐患。例如：对于出现的裂缝、沉降等问题，应及时进行修补和加固；对于排水设施堵塞或损坏的情况，应及时进行清理和修复。此外，还应加强对路基的巡查力度，防止人为破坏或自然灾害对路基造成损害。通过科学的养护与管理，可以延长路基的使用寿命，确保公路工程的长期稳定运行。

4 公路工程路基土石方施工质量控制中的关键问题与对策

4.1 关键问题识别

1. 施工组织与管理问题。施工组织与管理是确保施工顺利进行的基础，但在实际施工中，常出现施工组织不合理、管理混乱等问题。如施工计划不周密，导致资源分配不均；现场管理不到位，造成施工秩序混乱等。这些问题不仅影响施工进度，还可能引发质量安全隐患。

2. 施工技术与工艺问题。施工技术与工艺是决定施工质量的关键因素。然而，在实际施工中，常存在施工技术落后、工艺不规范等问题。如土石方开挖与填筑方法不当，导致路基稳定性不足；压实工艺不合理，造成路基压实度不达标等。这些问题将直接影响路基的承载力和耐久性。

3. 材料与设备问题。材料与设备是施工的物质基础，其质量直接影响施工质量。但在实际施工中，常出现材料质量不合格、设备性能不稳定等问题。如使用劣质土石方材料，导致路基质量下降；设备故障频繁，影响施工进度和施工质量等。这些问题必须得到高度重视并及时解决。

4. 排水与防护工程问题。排水与防护工程是确保路基稳定和安全的重要保障。但在实际施工中，常存在排水设施设置不合理、防护工程施工不到位等问题。如排水沟设置位置不当，导致排水不畅；防护工程施工质量差，无法有效抵御自然灾害等。这些问题将严重威胁路基的安全和使用寿命。因此，在施工中必须加强对排水与防护工程的质量控制，确保其功能完善、符合设计要求。

4.2 对策与建议

1. 加强施工组织与管理。为确保施工过程的有序进行，必须加强施工组织与管理。应建立完善的施工管理体系，明确各级管理人员的职责和权限，确保施工指令的准确传达和执行。同时，要加强施工计划的编制和执行，合理安排施工顺序和进度，避免因施工组织不当而导致的质量问题。此外，还应加强对施工现场的监管，确保施工过程的规范化和标准化。

2. 提高施工技术与工艺水平。施工技术与工艺水平直接影响施工质量的好坏。因此，必须不断提高施工技术与工艺水平，采用先进的施工技术和工艺，确保施工过程的科学性和合理性。应加强对施工人员的培训和教育，提高他们的专业技能和施工经验，使他们能够熟练掌握各种施工技术和工艺，确保施工质量的稳步提升。

3. 严格控制材料与设备质量。材料与设备质量是施工质量的重要保障。必须严格控制材料与设备的质量，确保它们符合设计要求和施工规范。应加强对材料和设备的采购、验收、储存和使用等环节的管理，建立完善的材料和设备质量管理体系[5]。同时，要加强对材料和设备的检验和测试，确保它们的质量可靠，避免因材料和设备质量问题而导致的施工事故和质量隐患。

4. 加强排水与防护工程施工。排水与防护工程是确保路基稳定和安全的重要措施。必须加强排水与防护工程的施工，确保它们的功能完善、符合设计要求。应加强对排水设施的设计和施工，确保排水畅通无阻，避免路基受水侵蚀和损害。同时，要加强对防护工程的施工，根据路基所处地段的地质条件和气候条件，采取相应的防护措施，确保路基的稳定性和安全性。通过加强排水与防护工程的施工，可以提高公路工程路基土石方施工的整体质量水平。

5 结束语

公路工程路基土石方施工质量控制是确保公路工程质量和安全的重要环节。通过加强施工组织与管理、提高施工技术与工艺水平、严格控制材料与设备质量以及加强排水与防护工程施工等对策，可以有效提升施工质量，延长公路工程的使用寿命。未来，我们应继续深入研究和实践，不断完善施工质量控制体系，为公路工程的可持续发展贡献更多力量。

参考文献：

[1] 武利春 . 探究公路路基工程中的土石方填筑施工技术 [J]. 中华建设 ,2022(06):119-121.
[2] 张宾 . 公路工程路基土石方施工技术分析 [J]. 运输经理世界 ,2022(14):59-61.
[3] 蔡志瑞 . 公路路基工程中的土石方填筑施工技术 [J]. 交通世界 ,2022(12):76-77.
[4] 庄海娟 . 公路工程路基土石方施工技术探讨 [J]. 新型工业化 ,2022(12):109-112.
[5] 房振华 . 公路工程路基土石方施工技术探讨 [J]. 工程技术研究 ,2021(01):53-54.

建筑工程项目特定工况下的施工优化分析

孟兆良

（上海建工一建集团有限公司，上海 200120）

摘　要　建筑工程项目特定工况条件下，建造方案的前期组织策划，以及对建造技术的深刻理解，是保质保量完成建筑工程的先决条件。中山华发住宅项目通过详尽的前期策划论证，实现了快周期、高质量、低成本的建造需求。本文以中山华发观山水花园 A3 区三标段项目为例，通过对项目实际建造方案对比，探索项目施工的优化措施，提出合理化方案选择，以期为建筑工程项目特定工况下的施工优化提供有益参考。

关键词　建筑工程项目；特定工况；中山华发项目；施工优化

中图分类号：TU722　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.034

0　引言

中山华发观山水花园 A3 区三标段项目位于中山市三乡镇白石环村，作为主流地产商的住宅项目，项目的初期定位为快周期实现预售及竣备交付节点，为达成以短建造周期为主要目标的建造任务，项目经多阶段策划论证，最终形成了附着爬升式脚手架结合铝合金模板的施工方案，过程中实现各栋水平及层内竖向的穿插流水作业，配合消防永临结合，促成了项目又好又快的建造需求。

1　项目面临的困难

项目占地面积约 5 万 m^2，平面场布呈长方形，建筑面积 12.88 万 m^2，按建设单位指令，需在 680 日历天内实现竣备，首开区要求在开工后 200 天实现预售节点（完成 22 框浇筑），可以说上述工期要求是极为严苛的，结合本项目建设单位对质量的控制标准，困难总体可概述为：（1）传统盘扣式内支撑架结合木模体系，无法实现业主指令的工期要求；（2）快周期施工条件下，现浇结构平整度偏差难以满足业主验收标准；（3）全户型为飘窗设计，传统模板施工程序繁杂，无法一体施工；（4）木模板体系造价高昂，无法满足降本要求。加之南方地区多高温、强降雨气候，工程施工期间恰逢 2022-2023 年疫情防控期间，多方不利因素对项目按期完工造成了严峻挑战。

2　模板方案的优化

为实现业主节点目标，克服传统木模体系缺陷，加之项目为住宅业态，标准楼层层数多、户内飘窗数量多、结构验收标准高的特点，项目从工期、成本、质量偏差、飘窗施工难度这四个维度，综合对传统木模、铝模进行了分析。

铝合金模板基于自身快速搭拆、高强度低密度、可多次周转、可定制异性构件的特点，在本项目工况下，实现了较快的建造速度，凸显了多次周转使用带来的低摊销成本的优点，对于住宅项目有着天然的适配性，利于住宅实现高质量建造目标 [1]。

首先，铝合金模板有着较高的可塑性，特别是在二次深化设计后，飘窗、沉箱、二次结构构造柱、楼梯梯段、滴水线、下挂梁、窗台企口等内容，均可以实现一次的浇筑，形成较高的实体质量，同时二次结构下挂梁、构造柱同主体结构一体浇筑，也节约了二次结构工期 [2]。

其次，铝合金模板的现浇平整度优点尤为明显，本项目各栋墙体抽样实施了实测实量，墙体的垂直度偏差均在 ±3 mm 范围内，这一测量结构反证了铝合金模板优异的工艺性能。

最后，基于铝合金模板优异的工艺性能，在多次周转使用后，仍保持较高的平整度，这一特性使得多次周转得以实现，在快周期多次周转的工况下，租赁费用不变，多次摊销后的单位成本将变得极具竞争力。

3　附着爬升式脚手架施工优化

为适应铝合金模板快拆施工的特点，项目将传统的钢管式外脚手架与附着式爬升脚手架进行了多角度的对比，分析如下：

首先，外脚手架的择优使用对于项目整体进度尤为重要，特别是在本项目施工进度较赶的情况下，附着式爬升脚手架能最大程度适应结构施工进度节拍，在短时间内实现附墙支座的安装，以及稳定爬升，且整体性佳、外形美观，实现了较高的安全防护性能，凸显了项目整体的文明施工形象 [3]。

其次，附着升降式脚手架实现了全自动的爬升作业，降低了施工过程对人力的依赖，且特别适用于高温、强降雨气候下的作业，极大地解决了对施工环境的依赖，对高强度的施工进度更具保障。

最后，相较于传统钢管式外脚手架，附着式爬升脚手架在人货梯顶部预先设置了停留口，实现了在结构施工期间爬架内的垂直运输覆盖，相较于先搭设钢管架，拆除后再安装人货梯防护门，施工周期更短，且更能保证施工生产安全。

4 楼层内穿插施工安排优化

为最大化地加快进度，实现既定工期目标，通过对传统的流水组织施工形式的分析，传统流水节奏有较大的压缩空间，这些施工节奏的压缩，能极大化压缩现有的工期，进而为计划工期目标的实现提供保障。

项目通过竖向大穿插的作业计划，约定了竖向各个工序的搭接时间，形成了紧密的施工流水计划，保证了楼层内竖向的作业强度，尽管受限于设计变更、专业单位招标进度等多种因素影响，但严格落实该流水计划将大幅缩短工程整体工期，为目标工期的实现创造了有利条件[4]。

5 永临结合的施工优化

本住宅项目适度实施永临结合方案，对项目的推进有积极意义，与传统的不实施消防等永临结合方案相比，消防永临结合、栏杆永临结合的使用，对项目成本支出、现场整体安全文明形象有积极意义。首先，通过前期的策划，消防立管、消防箱的前提安装及使用，提高了消防工程施工进度，避免了临时消防系统转换期间的空窗期，有利保证项目建造全周期内消防的可靠性和稳定性，正式消防系统的提前使用，节约了材料资源的使用，也有助于缩短项目工期。其次，正式消防立管的提前使用，避免了临时消防系统的施工，减少了临时措施投入，起到了降本增效的效果。最后，永久栏杆的提前安装，与前述消防永临结合起到相同效果，永久栏杆在爬架内随着主体结构一并施工，并做好成品保护措施，在爬架提升后已实现阳台临边的防护，避免了后期临边施工的安全风险，也实现了建造过程中整体美观的文明施工要求[5]。

6 样板先行措施的优化

本项目建造期间，为避免返工发生，较之传统施工方案，更加强调全过程、全要素的样板先行措施，并将样板内容提级验收，建立明确的验收标准，通过样板试验施工，及时发现及解决施工过程中潜在问题，再寻求解决方案。现场的实际优点如下：

1. 将经论证施工的样板工序及施工标准，以实物的形式对施工作业人员、总包管理及监理人员进行实体展示，保证了现场施工各环节的标准统一和验收一致，确保整体的施工质量[6]。

2. 全要素、全工序的样板展示，也是项目实体创优的重要展示形式，通过样板展示，展示了项目的建造标准及实体质量，有说服力地传递了施工单位建造水平和管理水准，进而提升了施工单位的企业形象。

3. 实体样板的先试先行，也为后续作业人员施工交底提供了实物教材，协助作业人员更好理解施工难点和特点，岗前的实体样板内容培训，能更有效地提升作业人员的专业能力，为优质施工质量创造前提条件。

7 过程质量控制技术手段优化

在结构施工过程中，有效地利用新的建造措施也是项目有别于传统建造工艺、提质增效，并促进过程质量控制的重要手段，为确保按期验收落地，项目实施了如下的质量控制措施：

1. 尽早建立地下室建筑信息模型（BIM），特别对机电安装内容（如消防、新风、智能化）管线在模型内深化体现，这不仅能使得作业人员在施工前就能精确了解建筑建造细节，避免结构施工谬误，保障施工质量。同时也能进行碰撞检测，提前发现并解决潜在问题。

2. 室内使用激光扫描测量仪，能更有效率地对户内墙体、门窗洞口进行测量，为过程中实体质量验收，以及质量监测提供准确资料。

3. 建立质量协同管理平台，通过与业主、监理、总包、作业班组建立手机端可访问的质量协同平台，对建造质量全过程记录反馈，更有效率跟进特定质量问题，并形成处理记录。

8 项目装饰施工优化

作为高标准住宅项目，装饰施工的高质量策划是项目实施的重要部分，相较于传统的二次结构砌筑及粗装饰施工，高精砖薄浆干砌，结合薄抹灰施工具有较大优势，主要体现在如下方面：

1. 高精砖薄浆干砌能有效提高墙体砌筑平整度。经完工后的实测实量，整体砖墙砌筑平整度可达4 mm内，薄浆砌筑施工过程中省去了传统施工的分层铺浆及灰缝调整，提高了砌筑效率，降低了砌筑难度。

2. 通过减少灰缝砂浆使用，避免了施工过程中的砂浆浪费，极大降低了灰缝后期收缩开裂的风险，践行了绿色施工、节能环保、减碳节约的环保理念，并且降低了墙体的自重，较为适合于高层住宅项目应用。

3. 薄抹灰的施工干燥时间短，可实现快周期施工，同时厚度小节省了抹灰材料使用，实现了低成本，变相提高了施工效率，减少了装饰工人的施工强度。

4. 薄抹灰施工的砂浆通常具备强度高、粘结性好的特点，严格按技术规程对基层进行处理，能有效避免抹灰层空鼓、开裂等质量通病的发生，最大程度保证了施工质量。

5. 薄抹灰施工过程中，通过打点、冲筋工艺的实施，能更好地实现均匀厚度，以及较高的平整度和光洁度，为后续的室内精装施工创造了极为有利的条件。

9 建立进度预警机制

项目实施周期长、工序多且繁杂，易受外部自然环境、政府政策、资源供给、实施方案变化等多内容影响，且本项目作为住宅项目，进场初就面临着进度紧张的难题。在整体进度策划过程中，结构工期、装饰工期、外墙涂料工期、机电安装工期等内容，均已合理压缩至极限，难以在正常进度施工过程中、在突遇延期的情况下，工期二次压缩的可能，尽管设计变更、不可抗力均可以对建设单位工期索赔，但遇到突发天气变化、政府停工检查等，往往无法有效实现工期申索，而建设单位的延期惩处往往较为严厉，多次单个环节的延期，往往对项目全局的进度实施造成不可逆的影响。所以，在项目实施过程中，项目部独创性地建立进度风险管理部，对于总工期进度的策划，以及项目实施过程中各个阶段的进度实施，实行全过程的进度风险监督和预警，同时通过永临结合、楼层竖向穿插等进度安排和资源投入，进而节约部分工期，并将节约的工期纳入整个项目工期储备，确保在整个项目建造周期内有一定的预备工期用于应对突发的延期情形。将项目进度风险管理部的岗位职能，以制度的形式建立在施工生产部、成本管理部之上，当预备工期储备不足时，及时调整施工安排、加大资源投入，逐步在关键线路上压缩工期，以最小的代价实现工期储备，并在策划初期进行成本分析，建立各工序内容工期压缩费用台账，择优选择拟压缩的关键线路，进而实现全过程的成本费用最小化，并促成最终工期、费用的可控管理。对于专业单位的进度风险，建立约谈、成本处罚、第三方代工的预警制度，通过制度和合约约束的形式，避免专业单位过程实施的进度风险[7]。

10 项目施工优化总结

通过采取上述优化措施，中山华发观山水花园项目面临的快周期、高质量、低成本的建造需要得到了满足。项目在实施过程中，成功实现了业主要求的预售节点并在680天内实现了竣备目标；通过实施永临结合方案，节约了临时措施成本，并进一步节约了工期；通过铝模结合爬架的结构施工方案，确保了压缩工期目标的实现，工期的节约降低了项目开办成本。通过BIM模型、室内激光扫描测量仪等智能技术的使用，避免了项目的碰撞返工，并保障了质量检测的准确性。通过二次结构方案的优化，现场使用高精砖薄浆干砌，提高了砌筑施工精度以及施工效率，实现了降本、降碳环保的最终效果。通过粗装饰抹灰面层采用聚合物砂浆薄抹灰施工，在高精砖墙体基层基础上，以较低的找平厚度实现了比较好的平整度要求，同时也进一步杜绝了抹灰层空鼓开裂、脱落等质量通病的发生，上述优化方案的实施，有力地保障了项目的高质量实施。

11 结束语

通过对一般住宅项目特定工况下的分析，对于项目建造实施过程进行多维度优化，包括但不限于前期建造技术方案、过程穿插施工管理、永临结合使用、新型智能化技术的使用。在不同阶段、不同部位实现了项目进度、安全、质量、成本的目标。借用效益分析、数理推理等手段，证明了施工优化的结论，通过这些举措的实施，实现了较好的社会效益和经济效益，对本项目的施工组织产生了积极的影响。

参考文献：

[1] 刘江.高层住宅建筑工程中铝模板应用研究[D].广州:华南理工大学,2020.
[2] 童师敏.铝模爬架施工工艺在住宅房屋建筑施工中的应用[J].中国新技术新产品,2021(23):107-109.
[3] 胡海伟.大型群体住宅建筑附着整体爬升脚手架施工技术[J].山西建筑,2018,44(13):99-20.
[4] 刘创业,贾宁,黎熙,等.铝模+爬架+穿插施工模式下的高效施工分析[J].江西建材,2021(02):140,142.
[5] 谢文辉,宣兆云,曾祥志,等.建筑施工消防给水系统永临结合绿色施工技术[J].施工技术,2014(12):40-42.
[6] 戴继龙.基于PMBOK的建筑项目管理中"样板先行"的探究[J].中国建筑装饰装修,2024(04):132-134.
[7] 程周炳,唐敏,史立冉,等.建筑工程施工管理的进度管理与控制研究[J].江西建材,2023(05):460-462.

高速公路服务区房建工程施工现场管理研究

蓝 图
（广西交通实业有限公司，广西 南宁 530000）

摘 要 随着我国高速公路建设的快速发展，高速公路服务区作为重要的配套设施，其房建工程施工现场管理尤为重要。本研究探讨了高速公路服务区房建工程施工现场管理的现状与挑战，通过对多个高速公路服务区房建项目的实地调研，分析了当前施工现场管理中存在的问题，并结合现代工程管理理论，提出了强化项目组织管理、完善质量控制体系、加强安全管理、优化施工资源配置等管理措施，旨在为进一步提高高速公路服务区房建工程施工现场管理水平提供理论依据和实践指导。

关键词 高速公路服务区；房建工程；施工管理；质量控制；智能化技术
中图分类号：TU721.2 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.035

0 引言

我国高速公路网络快速扩张，高速公路休息站点作为交通运输体系的关键组成部分，其建设管理愈发受到重视。高速公路休息站点在提升道路服务质量、保障交通安全方面发挥着关键作用。随着休息站点建设规模和数量的增加，如何提高房屋建设工程施工现场管理水平成为亟待解决的关键问题。现代工程管理理论与管理技术的进步，为施工现场管理的优化与创新提供了突破口。借鉴国内外先进经验，结合智能化、信息化等新兴技术提高管理效率与质量，已成为提升高速公路服务区房建项目管理水平的关键方向。本研究旨在分析高速公路服务区房建工程施工现场管理现状，提出优化策略，为相关管理部门和施工企业提供理论依据与实践指导，重点从项目组织管理、质量控制、安全管理和资源配置等方面深入探讨，并展望智能化技术在施工管理中的应用前景。

1 高速公路服务区房建工程施工现场管理概述

1.1 高速公路服务区房建工程的定义与重要性

高速公路服务区房建工程是高速公路的重要配套设施，承担着为旅客提供休息、加油、餐饮等服务的功能[1]。在现代交通运输体系中，高速公路服务区是人员车辆停留的重要场所，也是展示服务水平的形象窗口。房建工程质量直接影响服务区的运行效果和顾客体验。随着高速公路网络的扩展，服务区建设规模和数量不断增加，这对房建工程的规划布局和施工管理提出了更高要求。优质的施工质量能保障服务区房建工程按时完成，满足服务区功能需求，控制建设成本，并为旅客提供良好服务体验。科学的施工管理还能延长资产使用寿命，降低运维成本，对区域经济发展具有推动作用。

1.2 高速公路服务区房建工程的施工特点

高速公路服务区房建工程施工具有特殊性。一是施工环境复杂。服务区多位于交通枢纽附近，施工期间需考虑不间断的交通组织，尽量减少对过往车辆的干扰。二是工期要求严格。由于服务区在高速公路网络中扮演重要角色，工程项目必须在短时间内竣工，以降低对服务区运营和交通流的影响。三是建筑功能多元化。服务区建筑需满足餐饮、购物、休息等多种功能需求，对施工方案的设计和执行提出了较高要求。此外，施工过程中必须注重环境保护和资源节约，遵循绿色建筑和可持续发展原则。

1.3 高速公路服务区房建工程施工现场管理问题

当前，高速公路服务区房建工程施工管理面临诸多难题。施工进度管理是困扰项目的主要问题之一，由于计划不完善、资源分配不合理以及不可预见的外部因素，导致工程延误情况频发。质量控制难度较大，施工现场条件复杂，标准执行不够严格，质检流程缺乏连续性，使得工程质量难以达到合格标准[2]。安全管理方面，施工现场存在诸多风险，原因包括安全培训不足、现场监管不到位以及安全意识淡薄。施工进度延误不仅会导致工期延长、施工成本增加，还会提高隐性风险的发生概率。

2 高速公路服务区房建工程施工现场管理现状

2.1 施工进度管理的现状与问题

施工进度管理是工程管理的核心环节，对于确保房建工程按时完工发挥着至关重要的作用。然而，在

高速公路服务区房建工程施工进度管理过程中面临着诸多难题。

其中，最为突出的问题是施工计划制定与实际施工情况脱节，这直接导致了工程进度延误。高速公路服务区房建工程的施工环境复杂多变，天气状况的不稳定进一步增加了进度管理的难度。同时，施工资源分配不合理的问题也较为严重，机械设备与工人的分配混乱，严重干扰了施工的连贯性和效率。

此外，工程变更频繁以及一些不可预见的施工情况时有发生，迫使原定进度计划不断修改，使得项目的不稳定性大幅增加，施工单位不得不频繁应对各种突发状况。沟通不畅和协调不足也严重制约了进度管理的实施效果，项目各参与方之间信息交流不及时，导致决策滞后，施工进度难以有效推进。这些问题严重影响了高速公路服务区房建工程的预期完工时间，因此，亟需引入智能化管理工具并优化施工组织，以提升进度管理水平。

2.2　质量控制的现状与挑战

高速公路服务区房建工程质量控制工作涵盖的工序繁琐、环节复杂，必须确保整个工程在材料采购、施工工艺等方面都符合统一规范的技术标准[3]。然而，实际情况却不容乐观，施工标准不一致、工程质量参差不齐的问题较为突出。施工人员专业素养较低，管理不到位，导致难以保持施工质量标准的一致性。施工过程中的材料浪费以及使用不当现象，给质量管理带来了巨大挑战。

外部环境因素以及施工现场条件的复杂性，也进一步加大了质量控制的难度。现有的管理措施难以满足高标准的质量要求，必须从制度、技术、管理方式等方面进行深层次革新与改进。

2.3　安全管理的现状与隐患分析

高速公路服务区房建工程安全管理存在诸多问题。由于工程项目处于多工种交叉施工的状态，这大大增加了安全事故发生的可能性。安全管理机制不够完善，导致安全责任划分不明确。同时，施工人员安全意识薄弱，安全培训往往流于形式，这些问题普遍存在。在施工过程中，多种因素相互作用，导致安全事故频发，不仅干扰了施工进度，还对人员的生命安全构成了严重威胁。因此，强化施工现场安全管理工作，落实安全责任制度，提升施工人员的安全意识和技能水平，成为急需解决的问题[4]。引入智能化和信息化技术手段，有望改善当前的安全管理现状。

3　高速公路服务区房建工程施工管理优化策略

3.1　项目组织管理的优化措施

在高速公路服务区房屋建设工程的实施过程中，高效的施工现场管理措施至关重要。通过建立合理的组织架构，并进行明确的职责划分，可以有效优化工程管理。可根据项目的规模及复杂程度，合理调整并提高资源分配效率。还应合理设置团队架构，明确职能单位权责，配备专业管理人员，确保施工顺畅。同时，需强化团队对项目进度和资金的监控，增强管理效能，保障项目顺利完成。此外，引入激励机制，通过合理的绩效评估与奖励措施，激发员工的积极性和创造力。这些优化措施不仅能提高项目的组织管理水平，还能有效降低施工风险，保障项目的顺利推进。

3.2　质量控制体系的完善路径

完善质量控制体系是提升高速公路服务区房建工程施工质量的关键。在施工过程中，应建立健全的质量管理制度，明确各级管理责任，确保质量管理有序推进。采用先进的质量检测技术，提高工程质量的监测精度和及时反馈能力，以便及时纠正施工偏差。加强对施工材料和设备的入场检验，确保其符合设计和规范要求。注重施工过程中的细节控制，通过定期培训提高施工人员的质量意识和技术水平，实现质量管控的持续优化。建立严谨的质量验收机制，确保工程建设质量达到预期标准。

3.3　安全管理和隐患防范措施

在高速公路服务区房建工程施工现场管理中，加强安全管理和隐患防范是确保施工安全的重要环节。应建立完善的安全管理体系，明确各级职责，严格执行安全生产法规和标准[5]。施工现场应定期和不定期开展安全检查，及时发现并整改隐患，确保施工人员的安全。加强施工人员的安全意识和技能培训，提高其自我保护能力和应对突发事件的能力。采用先进的安全技术和设备，加强现场安全监控，有效降低安全事故发生率，确保工程顺利进行。

4　智能化与信息化技术在施工现场管理中的应用

4.1　智能化技术在施工进度控制中的应用

智能科技已成为施工进度控制的重要手段，高效应用于工作进程管理，显著提升了建筑项目的施工管理能力。借助传感技术，可对现场参数及设备状况进行快速监控，并结合全面数据分析，实现施工进度的动态调控。无人机技术能够更迅速、精准地开展施工区域勘探与实地建模，提高施工计划的精准性与执行

力。工程信息系统通过展示工具提供三维化模型，为工程合作与数据共享搭建了桥梁，优化了资源分配与进程管理。物联网装置可有效实现机器设备的自动监控，减少人为因素对工程施工的干扰。大数据分析通过整合施工过程中产生的数据，能够预测潜在的进度风险，提前制定应对策略。智能化技术的全面应用，不仅有效提升了施工进度的科学管理水平，还为施工企业带来了经济效益与竞争优势。随着智能化技术的持续发展和深度应用，高速公路服务区房建工程施工进度控制将迎来新的革新。

4.2 信息化技术在质量管理中的应用

信息化技术在高速公路服务区房建工程质量管理中发挥着积极的促进作用。通过应用建筑信息模型（BIM）、云计算系统、物联网（IoT）等技术，可实现对复杂施工过程的全方位监控管理。质量数据信息平台能够对采集的数据进行分析，为决策提供有力支撑。信息化技术的应用提升了施工过程的透明度与可追溯性，降低了人为失误带来的质量风险，确保施工标准得以严格执行。同时，信息化技术有助于完善资源配置，降低成本，提高管理效率。信息化手段已成为改善房建工程质量管理水平的关键推动力，助力实现精确高效能的施工管理模式。信息化技术的应用使施工过程出错减少、标准执行到位、资源安排合理、成本控制良好、管理效率提高，从而提升了整体管理水平。

4.3 智能化与信息化对施工管理效率的提升作用

智能化与信息化技术在高速公路服务区房建工程施工现场管理中的应用，大幅提升了管理效率。这些技术通过自动化数据收集与处理，优化了资源配置，实现了精准的进度控制和质量管理。借助实时监控与数据分析，能够快速识别并解决施工过程中的潜在问题，减少施工延误与质量瑕疵。借助信息化平台，各方协同效率得到提高，透明度增强，在确保安全的前提下降低了工程成本，提升了施工整体效益。

5 高速公路服务区房建工程施工现场管理趋势

5.1 新技术新材料的应用和管理

高速公路服务区房建工程施工现场管理正朝着以新技术和新材料为核心的方向转型。新技术的应用体现在施工工艺的优化，包括施工过程的智能化与自动化操作。建筑信息模型技术得到普遍应用，实现了设计和施工全生命周期管理，提升了协作效率和施工质量水平。3D打印技术用于建筑构件制造，降低了对传统施工技术的依赖，有效缩短了工期，削减了人工成本支出。新材料的应用同样备受关注。高性能混凝土、可再生建筑材料、自愈合材料的应用，提升了建筑物的耐久性、环保性和节能性能，为行业发展带来了新的路径。新技术与新材料的融合应用为服务区房建工程带来机遇，也对施工管理提出了更高要求。施工企业需提升技术能力，优化管理模式，以实现高效、安全的施工目标。

5.2 智能化施工管理的前景与挑战

高速公路服务区房建工程采用智能化施工管理，具有广阔的应用前景，能够提升施工效能、质量和安全水平。自动化设备、无人机和BIM技术的应用，实现了精准的施工进度监控与资源管理，增强了工程整体管理水平，确保项目顺利完成。然而，智能化施工管理也面临着诸多挑战。高昂的技术投入成本制约了其广泛应用，技术人员的专业水平影响了智能技术的执行效果。数据安全和信息隐私问题应受到重视，这加大了管理复杂度。合理规划智能化技术实施路径成为核心问题，需要加强人员培训，完善相关法律法规。科学应对好这些挑战，智能化施工管理将推动整个行业健康可持续发展。

6 结束语

本研究深入剖析了高速公路服务区房建工程施工现场的管理现状，结合实地调研、数据分析及现代工程管理理论，提出了一系列有效策略，旨在强化项目组织管理、完善质量控制体系、加强安全管理及优化资源配置。这些措施显著提升了施工管理的效率与质量，同时降低了风险与成本。然而，本研究仍存在样本代表性有限以及智能化、信息化技术应用细节有待验证等问题。未来，可进一步深化技术应用、优化施工现场管理效能，为高速公路服务区房建工程的顺利实施提供更为坚实的理论依据与实践指导。

参考文献：

[1] 喻苗.高速公路服务区房建工程施工管理[J].建筑工程技术与设计,2021(30):1511-1512.
[2] 胡春烨,王巨芳.高速公路服务区房建工程屋面防水施工[J].中国科技期刊数据库 工业A,2022(10):107-109.
[3] 王世睿.高速公路服务区房建工程项目的现场管理分析[J].运输经理世界,2023(07):43-45.
[4] 张骞.高速公路服务区房建工程项目的现场管理分析[J].住宅与房地产,2021,606(09):153-154.
[5] 余腾宇.高速公路服务区房建工程的屋面防水施工管理研究[J].黑龙江交通科技,2020,43(08):240-241.

内河航道护岸边坡抗侵蚀技术研究

庞　斌[1]，张雪萍[2]，廖艺佳[1]
（1. 广西平陆运河建设有限公司，广西 钦州 535017；
2. 广西八桂工程监理咨询有限公司，广西 钦州 535017）

摘　要　内河航道护岸边坡的稳定性对航道通航能力和沿岸基础设施安全具有重要意义。本文针对内河航道护岸边坡砂土层冲刷、多层界面突涌、地下水潜蚀与水位波动、排水不畅等典型侵蚀问题进行了系统的稳定性分析和侵蚀机制研究，在此基础上提出了表层防护材料选择与河床稳定结构设置、土体界面防渗层设置与边坡结构一体化处理、垂向与水平排水系统布设与边坡防渗加固措施、水力调控与渗压控制技术等针对性的抗侵蚀技术策略，以期为内河航道护岸边坡的设计、施工与维护提供理论依据和技术支持。

关键词　国内河航道；护岸边坡；抗侵蚀技术
中图分类号：U617.8　　**文献标志码：**A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.036

0　引言

内河航道作为重要的水运通道，其护岸边坡的稳定性直接关系到航道的通航能力和沿岸基础设施的安全。近年来，随着航道整治和航运需求的增加，护岸边坡面临着日益严峻的侵蚀问题，尤其是在砂土层冲刷、多层界面突涌、地下水潜蚀与水位波动、排水不畅等方面。因此，深入研究内河航道护岸边坡的侵蚀机制，提出有效的抗侵蚀技术策略，对于保障航道安全运行和沿岸地区的可持续发展具有重要意义。

1　内河航道护岸边坡抗侵蚀技术概述

内河航道护岸边坡抗侵蚀技术研究涉及水力学、岩土工程、生态工程等多个学科领域。内河航道护岸边坡受水流冲刷、船舶航行波浪、降雨径流等多种因素影响，易发生侵蚀、滑坡等地质灾害，影响航道的稳定性和通航安全。传统刚性护岸结构在防止水土流失方面具有一定效果，但其对生态环境的破坏较大，难以满足现代生态文明建设的要求。所以，研究和应用柔性生态护岸技术成为当前的研究热点。柔性生态护岸技术通过采用透水性材料、植被护坡等措施，增强岸坡的抗冲刷能力和抗滑稳定性，同时改善河流生态环境，提升景观价值。植被护坡利用植物根系的固土作用和地上部分的截流、延缓水流速度等功能，有效减少土壤侵蚀，增强边坡稳定性。此外，柔性生态护岸结构具有良好的自适应变形能力，能够适应岸坡的微小变形，减少结构破坏的风险。在设计柔性生态护岸结构时，应充分考虑当地的地质、水文、气候等条件，合理选择护岸材料和结构形式，确保护岸结构的稳定性和生态功能。同时，应加强对护岸结构的监测和维护，及时发现和处理潜在的安全隐患，确保内河航道的安全运行和生态环境的可持续发展[1]。

2　内河航道护岸边坡的稳定性分析

内河航道护岸边坡的稳定性受多种因素影响，包括地质条件、水文环境、土壤性质和工程设计等。在地质方面，岸坡通常由软土、黏性土和砂土层组成，底部为不透水的泥质粉砂岩。软土层含水量高、抗剪强度低，虽然在开挖过程中已部分清除，但仍需关注其对岸坡稳定性的潜在影响。砂土层因其抗冲刷能力差，易受到水流侵蚀，导致岸坡表层不稳定。当砂土层下伏不透水的泥质粉砂岩并向水域倾斜时，易在界面处发生突涌现象，影响整体稳定性。水文环境方面，地下水的浸泡会降低土体的抗剪强度，渗透压力的变化也会对岸坡稳定性产生不利影响。尤其在汛期，岸坡土体饱和，河水回落迅速，若排水不畅，内部水压力增大，可能引发潜蚀和渗透破坏。另外，排水系统的设计和维护对于维持岸坡稳定性至关重要，排水不畅会导致内水压力集中，进一步加剧侵蚀效应。由此可见，内河航道护岸边坡稳定性问题主要体现在砂土层表层冲刷侵蚀、多层界面突涌引发的层间侵蚀、地下水潜蚀与水位波动引发的内部破坏以及排水不畅致内水压力集中与侵蚀加剧等方面[2]。

3　内河航道护岸边坡侵蚀问题分析

3.1　砂土层表层冲刷侵蚀问题

内河航道护岸边坡中砂土层的表层冲刷侵蚀影响着边坡稳定性。其砂土层颗粒结构松散，抗剪强度低，

遇水易发生颗粒迁移和结构破坏。在航道运行过程中，水流速度变化、船舶航行产生的波浪以及降雨径流等因素共同作用于岸坡，导致砂土层表层受到持续冲刷。这种冲刷作用使得砂土层表面逐渐剥蚀，形成凹陷、沟槽等侵蚀形态，破坏岸坡的整体结构稳定性。此外，砂土层的渗透性较高，水流容易在其内部形成渗流通道，进一步加剧土体的侵蚀和流失。在多层结构的岸坡中，砂土层下伏不透水的泥质粉砂岩层，水流在两者界面处形成的突涌现象也会加剧砂土层的冲刷侵蚀。长期的冲刷作用不仅导致岸坡土体流失，还可能引发岸坡滑动、坍塌等地质灾害，严重威胁航道的安全运行。所以，砂土层表层冲刷侵蚀问题的存在对内河航道护岸边坡的稳定性构成显著威胁，亟需采取有效的防护措施加以应对 [3]。

3.2 多层界面突涌引发的层间侵蚀问题

内河航道护岸边坡多层结构中，砂土层与下伏不透水泥质粉砂岩层的接触界面存在突涌现象，导致层间侵蚀问题。砂土层的高渗透性使得水流在其内部形成渗流通道，当遇到下伏不透水层时，水流在界面处积聚，形成突涌现象。突涌现象引发的水流冲刷作用破坏了砂土层与泥质粉砂岩层之间的黏结力，导致层间结构松散，进而引发层间侵蚀。层间侵蚀破坏了岸坡的整体稳定性，增加了滑坡、坍塌等地质灾害风险。突涌现象的发生与土层的渗透系数、水力坡降等因素密切相关。在实际工程中，针对多层结构的岸坡，应加强对突涌现象的监测和预警，采取有效的防护措施，如设置防渗层、加固界面结构等，以减少层间侵蚀的发生。并且，应结合地质勘察数据，合理设计护岸结构，确保各层之间的稳定性，降低层间侵蚀对岸坡稳定性的影响 [4]。

3.3 地下水潜蚀与水位波动引发的内部破坏问题

内河航道护岸边坡的稳定性不仅受外部水流作用影响，地下水的潜蚀作用和水位波动引发的内部破坏同样对其稳定性构成重要威胁。地下水在岸坡土体中的渗透和流动，会引发潜蚀现象，削弱土体的抗剪强度，增加滑坡等地质灾害的风险。水位波动导致的水头变化，会引起土体中的渗透压力变化，进一步影响边坡的稳定性。地下水的潜蚀作用与土体的渗透性、孔隙度以及水流速度密切相关。当地下水沿岸坡渗流时，水流携带的细小颗粒可能导致土体颗粒的流失，形成潜蚀坑洞，破坏土体结构，降低边坡的稳定性。水位波动引起的水头变化，会导致土体内部渗透压力的波动，可能引发渗透破坏，进一步削弱边坡的抗滑能力。在一些内河航道工程中，由于地下水潜蚀和水位频繁波动，护岸边坡会出现明显的滑坡迹象，给航道的安全运行带来了严重威胁。其主要原因在于地下水渗透引发的潜蚀和水位波动引起的渗透压力变化共同作用，导致边坡的失稳。所以，针对地下水潜蚀与水位波动引发的内部破坏问题，需要在设计和施工中采取有效的防护措施，如设置防渗墙、加强排水系统建设、控制水位波动幅度等，以确保护岸边坡的稳定性，保障航道的安全运行 [5]。

3.4 排水不畅致内水压力集中与侵蚀加剧问题

内河航道护岸边坡排水系统排水不畅时，水分在边坡内部积聚，导致内水压力的异常增高，这种压力集中不仅削弱土体的抗剪强度，还可能引发一系列侵蚀和破坏过程，严重威胁边坡的安全性。在边坡设计和施工过程中，若排水系统存在缺陷或维护不当，雨水和地下水无法及时排出，导致水分在土体内部积累。这种水分积聚形成的内水压力，会对土体产生额外的向外推力，改变土体的应力状态。随着内水压力的持续升高，土体的有效应力减小，抗剪强度降低，增加了滑坡和其他地质灾害风险。而内水压力的升高不仅影响土体的力学性质，还会引发水流引致的侵蚀作用。当内水压力过高时，水流可能沿着土体内部的薄弱区域形成渗流通道，导致潜蚀现象的发生。这种潜蚀作用会逐渐扩大，形成坑洞或裂隙，进一步削弱边坡的整体稳定性 [6]。

4 内河航道护岸边坡抗侵蚀技术研究

4.1 针对砂土层冲刷的加固与防冲措施

在内河航道护岸边坡设计与施工中，应对砂土层易受冲刷的特点，需要采用有效的加固与防冲措施。表层防护材料的选择应优先考虑生态护坡和植被护坡等环保且具有良好适应性的方案。生态护坡通过选用本地耐水植物，结合土工织物等材料，形成具有自我修复能力的生态防护层，能够有效减少水流对砂土层的直接冲刷。植被护坡利用植物根系的固土作用，增强土体的抗冲刷能力，改善土壤结构，促进水土保持。在河床稳定结构设置方面，潜坝和消能工的应用能够有效减缓水流速度，降低水流对护岸的冲刷力度。潜坝通过在河床下部设置障碍，迫使水流下切，形成局部的沉积区，减少对岸坡的冲刷。消能工则通过特殊的结构设计，如阶梯状或波纹状表面，消散水流的动能，降低水流速度，减轻对护岸的侵蚀作用。综合运用上

述措施，能够有效提高砂土层的抗冲刷能力，确保内河航道护岸边坡的长期稳定性。

4.2 针对多层界面突涌的结构优化与隔水设计

在内河航道护岸边坡的设计与施工过程中，针对多层土体界面突涌引发的层间侵蚀问题，可采取有效的结构优化与隔水设计措施。在土体界面设置防渗层，采用高防水性能的材料，如高分子防水膜、复合土工膜等，确保防渗层的连续性和完整性。防渗层的厚度、材料选择和施工质量直接影响其防渗效果，需根据具体地质和水文条件进行设计。在边坡结构处理中，采用一体化处理技术，将防渗层与边坡土体、护岸结构紧密结合，形成整体防护体系。这种一体化设计有效减少了水流沿界面渗透的可能性，降低了突涌现象的发生概率。在设计中应考虑防渗层与其他结构层之间的界面处理，确保各层之间的结合牢固，防止因界面滑移导致的结构失效。在施工过程中，严格控制防渗层的施工质量，确保其与土体和其他结构层的结合密实，避免施工缝隙和缺陷影响防渗效果。定期对防渗层和边坡结构进行检查和维护，及时发现并修复可能的损坏，确保防护措施的长期有效性。针对多层界面突涌问题，采用科学的结构优化与隔水设计，结合防渗层设置和边坡结构一体化处理技术，是确保内河航道护岸边坡稳定性的关键措施。

4.3 针对地下水潜蚀的排水与加固技术

为有效防治潜蚀现象，需综合运用排水系统布设与边坡防渗加固措施。垂直与水平排水系统的合理布设，有助于降低边坡内部水位，减轻潜蚀压力。垂直排水系统通常采用垂直排水井或深层排水管道，将地下水引导至安全区域，防止水分在边坡内部积聚。水平排水系统则包括设置水平排水管道或导水沟，沿边坡底部或中部布置，确保地下水的有效排泄。排水系统的设计应结合地质条件、水文特征和工程需要，确保其长期稳定运行。

针对边坡防渗加固，喷浆和帷幕注浆技术被广泛应用。喷浆技术通过在边坡表面喷射水泥浆液，形成防渗层，阻止地下水沿坡面渗透，减少潜蚀风险。喷浆材料的选用、配比和施工工艺直接影响防渗效果，需根据具体情况优化设计。帷幕注浆技术则是在边坡潜在渗透路径上，采用高压注浆方式，注入防水材料，形成连续的防渗帷幕，切断地下水流动通道。该技术适用于地质条件复杂、渗透性较强的区域，能够有效降低潜蚀对边坡稳定性的影响。

4.4 针对排水不畅问题的水力调控与渗压控制技术

在内河航道护岸边坡设计与施工过程中，排水不畅可能导致内水压力集中，加剧侵蚀作用。为有效缓解这一问题，需采取水力调控与渗压控制技术。优化水流路径，调整水流速度，确保水流均匀分布，减少对边坡的冲刷。设置导流设施，引导水流绕过关键区域，降低水流对边坡的直接作用力。在必要时，采用水流分配装置，调节水流量，确保水流在设计范围内波动，避免过大或过小引发的潜在问题。在边坡内部设置渗压监测系统，实时监测土体内水压力变化，及时发现异常情况。根据监测数据，调整排水系统运行参数，保持土体内水压力在安全范围内。采用渗透性材料，改善土体渗透性，促进地下水的顺畅流动，减少内水压力积聚。在关键区域，设置减压井或抽水系统，降低土体内水压力，防止潜在的渗透破坏。综合运用水力调控与渗压控制技术，结合现场实际情况，制定科学合理的防治方案，对于确保内河航道护岸边坡的长期稳定性具有重要意义。

5 结束语

本研究围绕内河航道护岸边坡的典型侵蚀问题，系统分析了砂土层冲刷、多层界面突涌、地下水潜蚀与水位波动、排水不畅等因素对边坡稳定性的影响，并提出了相应的抗侵蚀技术策略。研究结果为内河航道护岸边坡的设计、施工与维护提供了理论依据和技术支持。然而，本研究仍存在一定的局限性，未来可进一步开展现场试验和数值模拟研究，以验证和优化提出的抗侵蚀技术策略，提升其在实际工程中的应用效果。

参考文献：

[1] 王会军，王桂新，王震，等. 降雨条件下土工布对边坡侵蚀影响分析 [J]. 全面腐蚀控制 ,2024(08):102-104.
[2] 黄坚平. 生态防护工程在控制堤岸边坡侵蚀中的应用[J]. 中国水运 ,2024(24):105-107.
[3] 崔熙灿，骆亚生，秦昊天，等. 强降雨诱发黄土边坡破坏的侵蚀机制 [J/OL]. 农业工程学报 ,1-10[2025-04-14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2047.S.20250310.1138.002.html.
[4] 刘金城. 试论新型生态护岸在内河航道中的应用 [J]. 中外企业家 ,2019(21):117.
[5] 苏福，吕永兴. 内河航道几种生态护岸型式的特点分析 [J]. 珠江水运 ,2020(01):86-87.
[6] 路彩娟，王丽华，郑灏，等. 浙北杭嘉湖地区内河航道生态护岸研究 [J]. 浙江水利科技 ,2024(04):10-13,20.

房屋建筑工程机电安装施工技术研究

彭 佳

（九江鑫发建设工程有限责任公司，江西 九江 332100）

摘 要 随着房屋建筑工程的规模和复杂程度的增加，机电安装施工技术的重要性也在逐渐提高。为提高机电工程的安装质量，本文依托某实际工程，从施工流程的角度深入探讨了房屋建筑工程机电安装施工策略，分析了施工准备、预埋与预留、管线设备安装等阶段的施工技术要点，旨在提升机电安装施工质量与效率，实现保障机电系统稳定运行的目标，以期为相关人员提供实践参考。

关键词 房屋建筑工程；机电安装；施工准确；预埋与预留

中图分类号：TU85 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.037

0 引言

机电工程作为房屋建筑工程的关键组成部分，机电安装施工技术水平直接关乎建筑的功能性、舒适性以及安全性。随着人们对居住和工作环境要求的日益提高，对电气系统的稳定性、给排水系统的高效性、暖通空调系统的节能性等，均提出了更高的标准。建筑行业内新技术、新材料、新工艺不断涌现，为机电安装施工技术的革新创造了条件。因此，深入探讨房屋建筑工程机电安装施工技术，不仅有助于提升施工企业的核心竞争力，保障工程质量，还能推动建筑行业朝着智能化、高效化方向发展，进一步提高建筑的舒适性。本文结合房屋建筑工程机电安装实际，分析机电安装各个环节的技术要点和控制措施，以达到提高机电安装工程施工效率和质量的目的。

1 工程概况

某新建综合体建筑由3栋高层住宅和1栋商业楼组成，总建筑面积约50 000 m^2，高层住宅每栋30层，建筑高度90 m；商业综合体共5层，建筑高度24 m。项目电气系统需满足整栋建筑的照明、动力用电需求，规划安装各类配电箱200个，敷设电缆总长度预计达30 000 m，给排水系统涵盖生活用水供应、污水排放等功能，需安装管径从DN20到DN300的各类管道5 000 m。暖通空调系统为住宅和商业区域提供舒适的温度环境，共安装空调机组30台，通风管道总长度约8 000 m，机电安装工程工期为200天。由于项目涉及住宅与商业两种不同功能区域，对机电系统的稳定性、功能性要求较高，施工难度较大。

2 房屋建筑工程机电安装施工策略

2.1 施工准备

充分的施工准备是保障机电安装工程顺利开展的基础，可预先处理潜在隐患，合理调配资源，确保施工进度与质量[1]。施工图纸会审阶段，应召集设计单位、建设单位等相关人员共同参与，对机电安装施工图纸进行全面审查[2]。在会审过程中，发现电气图纸中部分配电箱位置与建筑结构梁发生冲突，经协商将配电箱位置向预设方向平移1 m，然后重新核算电缆的走向与长度，确保供电功能正常。同时，给排水图纸中管道坡度标注模糊的地方，明确住宅区域排水管道坡度为3‰，由于商业区域排水量大，将坡度调整至5‰。

依照工程既定的进度计划，制定材料采购方案，选定符合国家既定标准的电气电缆，共采购电缆30 500 m，其中YJV-4×25+1×16规格（3相线+1中性线，横截面积为25 mm^2，以及1根截面为16 mm^2地线）的电缆10 000 m，用于楼层配电箱到各户电表箱的连接；选用5 000 m规格为YJV-4×95+1×50的电缆，作为小区配电室至各栋楼配电箱供电的主线路。给排水管道采用PP-R管和镀锌钢管，采购管径为DN20-DN110的PP-R管4 000 m，镀锌钢管1 000 m。严格对采购的材料进行检验，从每批次电缆中随机抽取5盘进行绝缘电阻测试，要求所测绝缘电阻值不得低于1 000 MΩ；每50根PP-R管抽样1根进行压力测试，测试压力值为1.2 MPa，保压30分钟，以无渗漏、无变形为合格判定标准。

2.2 预埋与预留

准确的预埋与预留工作是机电安装后续工序顺利进行的关键，可避免后期对建筑结构造成破坏，有助

于提升施工效率与质量[3]。土建施工阶段同步开展预埋与预留工作。对于电气线管预埋，待楼板模板安装完毕后，依据电气图纸进行放线定位。采用 Φ20 规格的PVC线管，在住宅区域每隔 15 m设置一个过线盒，鉴于商业区域空间布局复杂，每隔 10 m设置一个过线盒。以间距不大于 1 m的铁丝绑扎方式固定线管，确保线管在混凝土浇筑时不发生位置变动。在预埋线管过程中，对已完成预埋的线管进行导通测试，每周随机抽取10处进行检查，确保线管无堵塞、无断路现象。

针对给排水管道预留孔洞，诸如卫生间、厨房的位置，依从管道设计明确的位置，凭借木盒或钢模预留，按照管道管径确定木盒尺寸，如DN100这一规格的管道，预留的木盒规格设定为150×150 mm，在事先预留的孔洞周边，采用钢筋实施加固，防止混凝土浇筑期间孔洞出现变形。每层预留孔洞开凿完毕后，实施位置的精细复核，把允许偏差约束在 ±5 mm的以内水平，就穿越地下室、外墙等存在防水要求的部位而言，借助防水套管实施预埋，对比管道管径，防水套管管径应增大两号，DN150的管道，则采用规格为DN200的防水套管，在套管预埋操作阶段，两端伸出墙体的长度皆为50 mm，套管和管道之间采用防水密封材料，如含有沥青麻丝、防水油膏等填充。

2.3　管线安装

规范的管线安装是保障机电系统正常运行的核心，直接影响系统性能和安全状况[4]。在电气布线施工时，先进行线槽、桥架安装的定位放线。在水平方向，线槽、桥架中心线偏差不超过 ±5 mm；在垂直方向，垂直度偏差不超过 ±3 mm。线槽、桥架选用镀锌钢板制作，厚度根据规格确定，例如：宽度为200 mm的线槽，所采用的钢板厚度是1.2 mm。线槽、桥架采用配套连接件进行连接，连接部位缝隙不超过2 mm，以保证电气连通性良好。在线槽、桥架内敷设线缆时，线缆填充率不超过40%，不同电压等级的线缆分开敷设，如照明线缆与动力线缆分别敷设在不同线槽内。线缆固定采用尼龙扎带，间距不大于1.5 m。

对于住宅区域的给水主管，采用热熔连接的PP-R管。在进行热熔连接前，对管材、管件进行清洁，热熔深度根据管径确定，如DN63的管材，热熔深度为24 mm。热熔时间控制在10～12 s，承插时间规定为15～20 s。主管安装时垂直度偏差应不超过3 mm/m。排水主管采用UPVC管，采用粘接连接。粘接前对管材与管件连接部位进行打磨、清洁，均匀涂抹粘接剂，涂抹长度为管径的1/3。管道安装完成后，进行通水试验，试验时间不少于2 h，检查排水是否通畅，有无渗漏现象。在进行支管安装时，给水支管与卫生器具连接，确保接口严密，严格按照设计要求设置排水支管坡度，如卫生间排水支管坡度设置为0.25%。

2.4　设备安装

正确安装设备是机电设备正常运行、发挥其应有功能、满足建筑使用功能需求的关键。设备安装前应对基础开展验收，以空调机组基础为例，基础由强度等级为C30混凝，表面平整度误差不超过 ±5 mm。若空调机组基础长3 m、宽2 m、高0.5 m，基础尺寸偏差不超过 ±10 mm。设备吊运采用汽车吊，设备就位时，采用水平仪进行找平，要求水平度偏差控制在0.1 mm/m以内。设备地脚螺栓安装的螺栓露出螺母2～3扣为宜，拧紧力矩根据螺栓规格确定。

在电气设备安装方面，按设计要求确定配电箱安装高度，在住宅区域，户内配电箱底边距地1.8 m，采用膨胀螺栓固定，固定螺栓数量不少于4个[5]。配电箱内电器元件安装稳固，接线整齐，导线绝缘良好。在设备接线时，根据设备功率选择合适的线缆规格，如一台功率为10 kW的设备，选定YJV-4×6+1×4规格的电缆，采用螺栓将电缆线鼻子与设备接线端子连接起来，将螺栓拧紧至力矩为8～10 N·m。

2.5　系统调试与验收

系统调试与验收是检验机电安装工程质量的最后环节，可确保机电系统稳定、可靠运行，满足建筑使用功能要求。对电气系统进行调试，首先进行绝缘电阻测试，采用500 V兆欧表对各回路电缆进行测试，要求相间绝缘电阻值不低于0.5 MΩ，相对地绝缘电阻值不低于0.5 MΩ。采用接地电阻测试仪进行接地电阻测试，规定接地电阻值不超过4 Ω。在通电试运行时，先对各配电箱进行空载合闸测试，观察开关动作是否正常，然后逐步加载，按照设计负荷的50%、80%、100%分别运行1 h，观察电气设备运行情况，记录电流、电压等参数。

进行给排水系统调试，进行压力试验。给水系统试验压力为工作压力的1.5倍，但不得低于0.6 MPa，如某区域给水系统工作压力为0.4 MPa，则试验压力定为0.6 MPa。保压30分钟，压力降不大于0.05 MPa为合格。在进行通水试验时，对所有卫生器具进行通水，检查排水是否顺畅，有无渗漏现象。通球试验用于排水管道，采用直径不小于管道管径2/3的橡胶球，从排水立管顶端投入，观察橡胶球能否顺利从排水出户管排出，以检查管道是否畅通。

暖通空调系统调试主要是对空调机组进行试运行。先检查机组外观及各部件连接牢固性，然后启动机组运行，调节风量、风压。按照设计要求，住宅区域空调房间夏季设计温度为26±2 ℃，冬季设计温度为20±2 ℃，通过调节空调机组制冷制热功率及送风量，使房间温度符合设计规范[6]。进行通风系统风量测试，用风量测试仪对各风口进行测定，实际风量与设计风量偏差控制在 ±10% 以内。

系统调试完成后，邀请建设单位、设计单位、监理单位等相关人员进行验收。验收内容包括工程资料审查、现场实体检查等。工程资料要齐全、完整，包括施工图纸、材料检验报告、调试记录等。按照设计要求及相关规范进行现场实体检查，对发现的问题立即进行整改，直至验收合格。

3 房屋建筑工程机电安装施工效果分析

本工程通过严格的电缆绝缘电阻测试，抽检电缆样本绝缘电阻值均远高于0.5 MΩ 的标准，保障了电气系统运行的安全性及稳定性。将线槽、桥架安装的中心线偏差和垂直度偏差控制在极小范围，实现了线缆敷设整齐规范。配电箱安装高度精准，电器元件接线牢固、整齐，通电试运行期间，各电气设备运行平稳，未出现故障，满足了建筑照明及动力用电需求，为住户提供了可靠的电力供应（相关参数见表1）。

给水管道压力试验结果表明，压力降均在0.05 MPa以内，说明管道连接点密封良好，未出现渗漏现象。排水管道通球试验通过率达到100%，实现了排水顺畅。卫生间、厨房等区域的卫生器具接口严密，排水支管坡度符合设计要求，切实杜绝了积水、返臭等状况，提升了用户使用体验。

在空调机组试运行过程中，住宅区域夏季室内温度稳定保持在26±2 ℃，冬季室内温度稳定达到20±2 ℃，符合设计温度要求。根据通风系统风量测试结果，各风口实际风量与设计风量偏差均在 ±10% 以内，实现了室内空气的高效流通，营造了舒适的室内环境。

工程计划机电安装工期为200天，在实际施工过程中，依靠合理的施工流程和高效的团队协作，提前10天完成了机电安装工作，整体施工进度比原计划提前了5%。施工准备阶段的充分规划，为后续施工赢得了时间优势；各施工环节紧密衔接，减少了因工序等待造成的时间浪费，实现了工程按时交付。在材料采购阶段，采用精准的材料采购计划，杜绝了材料的浪费与过度积压，同时严格的材料检验制度保证了材料质量，降低了因材料不合格产生的返工费用。

表1 效果分析

项目	计划指标	实际指标	达标情况	效果说明
电气系统绝缘电阻值	≥0.5 MΩ	远高于0.5 MΩ	达标	运行安全稳定
线槽、桥架中心线偏差	±5 mm以内	均在 ±5 mm以内	达标	线缆敷设整齐规范
给排水系统压力降	≤0.05 MPa	均符合要求	达标	管道密封良好
排水管道通球试验通过率	100%	100%	达标	排水顺畅
暖通空调系统温度控制	夏季26±2 ℃，冬季20±2 ℃	符合设计要求	达标	室内环境舒适

4 结束语

本文系统性剖析了房屋建筑工程机电安装从施工准备到系统调试与验收全流程的施工技术要点，通过全面规划与资源筹备、预埋与预留阶段精准定位与严格执行等一系列技术与措施，取得了良好的施工效果，所提出的施工技术与措施对今后同类条件的房屋建筑工程机电安装施工具有一定参考价值。未来，相关人员应不断推陈出新，探索更先进、高效、节能的机电安装施工技术，以适应建筑行业持续发展的需求。

参考文献：

[1] 赵磊.房屋建筑工程机电安装施工技术管理要点分析[J].智能建筑与智慧城市,2023(04):132-134.
[2] 蒋亚林.建筑机电安装工程的施工技术及质量控制[J].四川水泥,2021(10):174-175.
[3] 王超凡.房屋建筑机电安装工程施工管理分析[J].工程技术研究,2021,06(18):172-173.
[4] 谢兴龙.建筑机电安装工程施工技术与质量控制对策[J].中国建筑装饰装修,2021(01):124-125.
[5] 李玉岭.建筑工程机电设备安装的施工与管理运用[J].中国住宅设施,2024(01):187-189.
[6] 柯翼之.建筑工程中机电设备安装工程施工技术与质量管理探究[J].中国设备工程,2022(24):183-185.

岩土边坡稳定性分析方法及工程应用研究

徐林蒙，宋晓哲

（山东同信仁和地理信息科技有限公司，山东 济南 250101）

摘　要　边坡失稳是岩土工程建设中常见的灾害隐患，做好边坡稳定性分析至关重要。本文在梳理极限平衡分析法、数值分析法、可靠度分析法等常用边坡分析方法特点和适用条件的基础上，结合某高边坡和某深基坑支护工程实例，对各类方法的工程应用效果进行对比分析。极限平衡分析法计算简便、工程经验丰富，适用于一般均质边坡；数值分析法能模拟复杂条件，适用于重要边坡但对计算机水平要求高；可靠度分析法能定量评价边坡安全风险，是未来的重要发展方向。本文在此基础上提出应加强工程勘察、综合利用多种分析方法、重视可靠度分析、加强软硬件平台建设等建议，以期为边坡稳定性分析提供参考。

关键词　岩土边坡；稳定性分析；极限平衡法；数值分析法

中图分类号：TU43　　**文献标志码**：A　　DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.038

0　引言

随着经济社会的快速发展，各类岩土工程日益增多，边坡失稳引发的滑坡、崩塌等地质灾害时有发生，给国计民生造成重大损失。科学评价边坡稳定性，采取有针对性地加固防护措施，是确保工程安全的关键。常用的边坡稳定性分析方法主要包括极限平衡分析法、数值分析法和可靠度分析法等，不同方法在计算原理、分析流程、适用条件等方面各具特点。在工程应用中应根据工程实际情况和稳定性分析的目的，合理选择使用分析方法。因此，有必要系统梳理各类分析方法的原理特点，研究其工程应用效果，以指导工程实践。

1　常用岩土边坡稳定性分析方法的特点与适用性

1.1　极限平衡分析法的特点与适用性

极限平衡分析法是以库伦准则为理论基础，将滑动体简化为刚体，列写各滑动块上的受力平衡方程，求解边坡的最危险滑动面及其对应的稳定安全系数。其基本假定是边坡上存在贯通的滑动面，土体处于极限平衡状态，常用的极限平衡分析方法包括瑞典条分法、简化毕肖普法等，其中瑞典条分法应用最为广泛。极限平衡分析法具有如下特点：（1）模型简单，计算过程直观，可快速判断边坡的整体稳定性；（2）参数容易获取，工程中的经验丰富，可靠性较高；（3）不能考虑应力应变的连续变化，难以模拟真实的土体破坏过程；（4）忽略土体变形，无法分析边坡的变形破坏模式。因此，极限平衡法适用于土质均匀、地层结构简单的一般性边坡分析，对于重大边坡或复杂地质条件，还需采用更高级的分析手段。

1.2　数值分析法的特点与适用性

数值分析法主要包括有限元法、有限差分法、边界元法和离散元法等。其中有限元法应用最广，有限元法将边坡离散为若干单元，基于最小势能原理建立单元的力学平衡方程，引入本构模型描述土体的应力应变关系，通过迭代求解得到边坡内部的位移、应力和应变分布，进而判断其稳定性。离散元法将土体视为颗粒的集合体，通过定义颗粒间的接触模型和运动定律，模拟土体变形破坏全过程。

与极限平衡法相比，数值分析法具有以下优点：（1）能准确模拟土体内部的应力应变状态，直观反映破坏发育过程；（2）可考虑复杂的工程地质和水文地质条件，以及外荷载、支护结构的影响；（3）可获得位移、应力、应变等详细的计算结果，评价边坡整体和局部的稳定性；（4）可用于指导支护结构的优化设计与施工控制，但数值分析对计算机软硬件要求较高，计算量大，生成模型和确定参数的难度大，仍需大量工程对比验证。因此，数值分析法主要用于重大工程和复杂边坡的精细化分析。

1.3　可靠度分析法的特点与适用性

由于工程地质条件和土体力学参数具有较大的空间变异性和随机不确定性，传统的确定性分析方法难以全面反映边坡的安全状况。近年来边坡可靠度分析受到广泛关注，可靠度分析引入概率统计理论，将边

坡失稳视为随机事件，通过概率分布函数描述不确定参数，建立功能函数反映结构在随机参数作用下的响应，并用可靠度指标定量评价结构的安全程度，在此基础上可进一步开展边坡失稳风险评估和风险管控决策。边坡可靠度分析法的优点：（1）考虑了边坡岩土体及外荷载等因素的随机不确定性，分析结果更符合边坡失稳的客观规律；（2）定量评价边坡失稳概率，直观反映边坡安全风险；（3）可用于指导边坡加固防护的方案优化和安全预警。但该方法尚处于发展完善阶段，工程应用实例不多，参数的概率分布模型有待进一步探索，计算方法有待改进，在工程中的推广应用还需一个过程。

2 岩土边坡稳定性典型工程案例分析

某高边坡位于山区公路旁，岩性为泥质粉砂岩，边坡高度约 60 m，坡度 35° ～ 40° ，稳定性直接影响公路安全，极限平衡分析得到边坡最小稳定安全系数为 1.28，位于小号和中号之间，表明其稳定性不高，采用有限元法计算，在自重和交通荷载作用下，坡顶位移 4 ～ 6 cm，坡脚位移 1 ～ 2 cm，坡体局部出现拉应力区，最大拉应力 0.2 MPa。整体变形呈前倾趋势，可能沿内部软弱层或陡倾节理面发生滑移，可靠度分析结果表明，边坡失稳概率为 4.7%，根据可靠度指标分级，边坡可靠度为三级，需采取工程措施消除安全隐患，最终通过架设锚索网格梁、修筑挡土墙、设置排水沟等措施对边坡进行综合治理，治理后边坡整体位移和拉应力明显降低，稳定安全系数提升到 1.51，失稳概率降至 0.8%，边坡长期稳定。

某深基坑支护工程位于软土地区，基坑开挖深度 12 m，采用放坡开挖和钢筋混凝土排桩支护，稳定性直接关系基坑周边建筑物和地下管线安全，事先采用极限平衡法计算支护结构内力和整体稳定性，并辅以有限元数值模拟。优化确定了支护方案，支护过程中，基坑各侧壁和周边环境变形均在控制值内，满足规范要求，基坑开挖后，采用可靠度分析评价支护体系安全水平。结果表明，基坑整体失稳概率仅为 0.2%，局部失稳概率为 1.6%，根据可靠度指标分级，均达到一级标准，为进一步降低风险，在支护桩间增设预应力锚索，在基坑周边布设自动化监测系统，实现变形实时预警。

上述案例表明，极限平衡法、数值分析法、可靠度分析法在工程应用中各具特色，极限平衡法计算简便，可快速评价边坡整体稳定性，适用于初步设计阶段。数值分析法可考虑复杂因素，模拟真实的土体破坏过程，适用于重要边坡的精细化分析与防治设计。可靠度分析法能定量评价边坡失稳风险，是安全预警和风险管控的重要手段。工程实践中，应根据边坡复杂程度和稳定性分析的目的，合理选择使用，对于一般常规边坡，以极限平衡法为主，必要时数值模拟验证；对于重大边坡工程，宜采用极限平衡法、数值分析法、可靠度分析法相结合，相互验证，并在施工全过程开展动态分析 [1]。

3 岩土边坡稳定性分析方法在工程中的应用建议

3.1 加强工程地质勘察，提高边坡建模精度

边坡稳定性分析是岩土工程设计和施工的重要内容，其分析结果的可靠性在很大程度上取决于所建立的计算模型能否真实反映工程实际，而建立合理的计算模型，需要对边坡的工程地质条件有全面细致地了解。在边坡工程设计和施工的早期阶段，应高度重视工程地质勘察工作，采用各种先进可靠的勘探手段，如钻探、物探、探槽、原位测试等，并辅以室内土工试验，全面查明边坡的地层岩性、地质构造、水文地质条件、岩土体的物理力学性质等，尤其是对边坡稳定性起控制作用的薄弱夹层、软弱插层、节理裂隙等空间展布规律，以及地下水的赋存条件和运移规律，更应查明落实 [2]。在勘探过程中，要本着“点—线—面—体”相结合的原则，合理布置勘探点，并随着勘探工作的深入，对已有的地质认识不断修正完善，力求构建出精度高、可靠性强的三维工程地质模型。在此基础上，还要进一步简化成数学力学模型，这就需要在保证地质模型主要特征的前提下，运用一定的数学方法如分层、分区等，将地质条件相近的岩土体划归为同一计算单元，计算单元内部假定为均质体，并赋予相应的物理力学参数。

3.2 综合运用多种分析方法，相互校核印证

由于边坡问题的复杂性，以及认识和处理边坡问题的理论与方法的多样性，目前工程界普遍倾向于在边坡稳定性分析中综合采用多种方法。通过不同方法的优势互补和结果互验，以提高边坡稳定性评价的可靠性，常用的边坡稳定性分析方法主要包括极限平衡法、数值分析法和可靠度分析法等。其中，极限平衡法假定边坡土体处于破坏临界状态，通过各种简化假设条件，采用平衡计算求解安全系数；该方法计算简便、工程经验丰富，适用于分析边坡的整体稳定性，但难以模拟土体的应力应变变化过程。数值分析法如有限元法、离散元法等，在满足应力平衡方程和变形协调

方程的基础上，利用本构模型描述土体的真实应力一应变关系，通过数值迭代模拟边坡变形至破坏的完整过程，该方法可获得详细的变形、应力、应变等信息，模拟复杂地质情况，但计算量大，对计算机性能要求较高。可靠度分析法考虑了边坡岩土体性质的随机性和不确定性，基于概率统计理论，定量描述边坡失稳概率，能较全面地评价边坡的安全状态和风险水平。但目前计算模型有待进一步完善，对于一般性边坡，常采用极限平衡法进行初步分析；对于复杂或重要边坡，则应在极限平衡分析的基础上，辅以数值模拟验算，并用可靠度分析估计边坡失稳概率，若多种方法的计算结果能够相互印证，可大大增强分析结论的可信度；若结果差异较大，则需要通过反复调整模型和参数，进一步核实原始数据的代表性和计算方法的适用性，直至获得趋于一致的计算结果[3]。

3.3　加强分析结果的可靠性评价与风险管控

边坡失稳是一个涉及诸多随机不确定因素的复杂问题，各种影响因素如岩土物理力学性质、水文地质条件、外荷载扰动等，都具有明显的空间变异性和随机不确定性，导致采用传统的确定性分析方法难以准确评估边坡的安全状态。

近年来，随着可靠度理论在岩土工程领域的广泛应用，边坡可靠度分析日益受到重视，可靠度分析法基于概率统计理论，用概率分布函数定量描述各不确定参数，建立功能函数反映结构在随机参数作用下的响应，并用可靠度指标量化结构的安全程度，将可靠度理论引入边坡稳定性分析，能够克服确定性分析的局限性，更加全面、合理地评价边坡的安全状态。在实际工程中，可结合边坡失稳的严重性和破坏后果，对边坡的安全等级进行划分，如高风险、较高风险、低风险等，在此基础上分别采取不同的风险控制措施，对于高风险边坡，要高度重视。在设计阶段进行专门的可靠度分析，科学论证其安全性；施工阶段严格按设计要求施工，加强过程监控，及时优化设计和施工措施；运营阶段还应建立健全的安全监测系统，布设各类监测仪器实时监测边坡变形，及早发现险情并及时预警和处置，对于较高风险边坡，虽然整体破坏可能性不大。但局部失稳的概率较高，应重点做好应急预案，一旦发生险情能够及时、有序地组织抢险，最大限度减小灾害损失，对于低风险边坡，虽然发生失稳的可能性很小，但也不可掉以轻心，应做好定期安全巡查和检测工作，发现问题及时处理[4]。

3.4　注重软硬件平台建设，提升分析效率与适用性

随着现代科学技术的飞速发展，大型复杂边坡数值分析对计算机软硬件系统的要求越来越高。随着有限元、离散元等数值分析理论的不断完善，边坡计算模型更加精细、计算规模不断扩大，对计算机的存储容量、运算速度、稳定性等提出了更高要求，为了更好地模拟边坡的真实变形破坏过程，计算模型需要考虑越来越多的影响因素，如岩土的非线性特征、接触面特性、动力荷载、水力耦合作用等，导致计算过程异常复杂，对相关软件系统的适用性、可扩展性、人机交互性等提出了更高要求。为了满足日益增长的计算分析需求，工程界和学术界应加强软硬件平台的研发与集成，着力提升边坡分析的计算效率、适用范围和分析精度，硬件方面，可构建高性能计算集群环境，采用CPU/GPU异构计算架构，研究大规模并行计算方法，最大限度发挥计算机的性能优势，软件方面，要开发功能完备、体系开放的通用有限元、离散元软件平台，集成前后处理、并行计算、智能网格划分、自适应网格加密等先进技术，实现从地质建模、计算分析到结果可视化的一体化集成，简化操作流程，提高分析效率[5]。

4　结束语

岩土边坡失稳是一个世界性难题，我国不同区域普遍存在各种类型的边坡工程，如何加强边坡稳定性分析，指导边坡治理设计施工，确保其安全性、经济性，是当前岩土工程面临的重要课题。未来，随着岩土工程科学的不断发展和计算机技术的日益进步，边坡稳定性分析理论和方法必将更加科学完善，为工程建设提供更加精准高效的技术支撑。

参考文献：

[1]　周海波,曾诚,李兵,等.基于岩土结构的高边坡稳定性评价与处治技术研究[J].工程建设与设计,2025(02):16-18.
[2]　姜涛.岩土工程中边坡稳定性分析与加固技术研究[J].新城建科技,2024,33(08):124-126.
[3]　黎德波.岩土工程勘察中赤平投影判断边坡稳定性分析的应用[J].冶金与材料,2023,43(05):178-180.
[4]　师欢欢,张兴.深基坑岩土工程边坡稳定性评价方法创新设计与应用[J].工程技术研究,2023,08(01):55-57,61.
[5]　魏小涛,林坚,罗财金.岩土工程中边坡稳定性分析以及检测方法研究[J].粘接,2022,49(03):109-112.

高性能混凝土在水利工程施工中的应用研究

刘佳茹

（龙口市宏润城市建设工程有限公司，山东 龙口 265701）

摘　要　本研究探讨了高性能混凝土在水坝、水电站及水闸等水利设施施工中的具体应用，分析了高性能混凝土配合比设计、施工工艺以及质量控制措施，并对高性能混凝土工程质量和耐久性提升、施工效率和经济效益进行了详细评估。研究结果表明，高性能混凝土不仅提高了水利工程施工的整体性能，还显著提升了工程的使用寿命与经济效益，为水利工程提供了坚实的技术支持。

关键词　高性能混凝土；水利工程；水坝工程；水电站工程；经济效益

中图分类号：TV544　　**文献标志码**：A　　DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.039

0　引言

高性能混凝土在现代建筑工程领域扮演着不可或缺的角色，特别是在对材料要求极高的水利工程建设领域，其优异的物理力学性能和长久的耐久性，使得它成为工程师们青睐的选择。随着科技的进步和新材料的应用，高性能混凝土被广泛应用在各类大型水利工程项目中，其在改善工程质量、提高施工效率方面展现出巨大潜力，推动了水利工程技术的发展进步。

1　研究背景

自20世纪末以来，全球范围内对于水资源的有效利用与管理需求日益增长，水利工程作为保障水资源安全的重要手段，面临着前所未有的挑战与发展机遇。在此背景下，高性能混凝土逐渐成为解决传统混凝土在复杂环境下表现不佳问题的关键材料，但在水利工程建设中的系统性研究尚显不足，特别是关于其具体施工工艺及质量控制方面的深入探讨亟待加强。

2　高性能混凝土的优势

高性能混凝土成功解决了传统混凝土在抗压强度、抗渗性能等方面的局限性。其采用优质水泥、高效减水剂和矿物掺合料等原材料，经过精确配比设计，不仅能有效降低水灰比，还能显著增强混凝土的密实度和均匀性，从而大幅提升其长期稳定性和耐久性。此外，高性能混凝土在减少结构裂缝形成、抵抗化学侵蚀等方面亦表现出色，确保了水利工程结构的安全性和可靠性。

3　高性能混凝土在水利工程中的应用现状

3.1　在水坝工程中的应用

高性能混凝土在水坝工程中展现出卓越的性能，显著提升了坝体结构的整体稳定性和安全性。优化后的混凝土配合比设计能够有效降低坝体内部温度应力，减少因温度变化引起的裂缝问题。坝体抗渗性能得到大幅提升，确保了大坝在长期运行中的耐久性。高性能混凝土还具备优异的抗震能力，使其在面对地震等自然灾害时表现出色。高强度和高密实度特性进一步增强了坝体抵抗极端气候条件的能力，保证了大坝的安全稳定性[1]。

3.2　在水电站工程中的应用

高性能混凝土在水电站工程中的应用主要集中在厂房基础、进水口及泄洪洞等关键部位。这些区域通常承受巨大的水流压力和复杂的地质环境影响，对建筑材料提出了苛刻的要求。高性能混凝土凭借其出色的抗压强度、抗冻融循环能力和优良的耐腐蚀性能，成为水电站建设的理想选择。该材料的工作性能良好，有助于简化施工流程。另外，高性能混凝土的使用还显著提升了建筑物的整体质量和耐久性，确保了水电站在长时间运行中的可靠性和稳定性。

3.3　在水闸及其他水利设施中的应用

高性能混凝土在水闸主体结构建设中发挥了重要作用，因其较高的抗拉强度和抗裂性能而备受青睐。科学合理的配合比设计与严格的施工质量控制相结合，确保了水闸在长时间运行过程中不会出现严重损坏或失效现象。除了水闸，高性能混凝土还在渠道衬砌、渡槽等其他水利设施中得到了广泛应用。其优异的物理力学性能和长久的耐久性，使得它在复杂环境下表现尤为突出。通过优化材料配比和施工工艺，高性能混凝土不仅提高了工程的整体质量，还显著延长了设施的使用寿命。因此，高性能混凝土的应用范围不断扩大，显示出其广泛的适应性和优越的使用效果，成为现代水利工程建设的重要组成部分。

4 高性能混凝土在水利工程施工中的应用要点

4.1 配合比设计

1. 水泥种类的选择。选择合适的水泥种类是高性能混凝土配合比设计中的关键步骤。硅酸盐水泥因其高强度和良好的抗渗性能而被广泛应用于水利工程中。然而，在某些特定环境下，如海水侵蚀严重的区域，需要选用抗硫酸盐水泥或低热硅酸盐水泥，以增强混凝土的抗腐蚀能力。此外，考虑到施工环境温度变化较大时，应优先选择早期强度发展较快的水泥品种，以确保混凝土在低温条件下仍能迅速硬化并达到预期强度[2]。

2. 水灰比的确定。水灰比是影响高性能混凝土性能的重要参数之一。科学合理的水灰比有助于提高混凝土的密实度和强度，但过低的水灰比可能导致混凝土的工作性能下降，增加施工难度。因此，合理确定水灰比至关重要。通常情况下，通过添加高效减水剂可以有效降低水灰比，同时保持混凝土的良好流动性。根据具体工程需求和气候条件，还需对水灰比进行适当调整。例如：在高温干燥地区，需适当增加用水量以防止混凝土表面过早失水导致开裂；而在寒冷地区，则应尽量减少用水量，以加快混凝土的早期强度发展[3]。

3. 矿物掺合料的使用。这些材料不仅能够替代部分水泥，降低成本，还能提高混凝土的耐久性和工作性能。例如：粉煤灰中的活性成分能够在水泥水化过程中与氢氧化钙反应生成更多的凝胶体，从而提高混凝土的密实度和抗渗性。矿渣粉则因其细度较高，能够在一定程度上弥补因降低水灰比而导致的工作性能下降问题。适量添加矿物掺合料还可以延缓混凝土的水化进程，减少温升裂缝的发生概率，特别是在大体积混凝土结构中尤为重要。

4. 高效减水剂的应用。这类添加剂通过改变水泥颗粒间的静电斥力，使得水泥颗粒均匀分散，减少了水泥浆体中的自由水分，提高了混凝土的密实度和强度。高效减水剂的选择应根据具体工程要求进行，如聚羧酸系减水剂因其优异的减水效果和良好的适应性，成为现代高性能混凝土中常用的减水剂类型。在实际应用中，还需注意减水剂与其他外加剂之间的相容性问题，避免出现副作用，如过度泌水或凝结时间延长等现象。

4.2 施工工艺

1. 模板安装精度控制。模板作为混凝土浇筑过程中的重要支撑结构，其安装精度直接影响到最终成型质量。模板表面必须光滑无缺陷，以保证混凝土表面平整美观，并减少气泡和蜂窝麻面的产生。为此，在模板安装前，应对模板表面进行彻底清洁和检查，确保其无油污、锈迹或其他杂质。模板拼接处应紧密贴合，避免出现缝隙，必要时可采用密封条进行处理。模板支撑系统的设计也需充分考虑荷载分布情况，确保在浇筑过程中不会发生变形或位移现象，从而保障混凝土结构的整体稳定性。

2. 浇筑方式的选择。连续浇筑是高性能混凝土施工中的理想方式，能够有效避免冷缝的形成，保证混凝土结构的整体性。在实际操作中，需根据混凝土的流动性和浇筑高度选择合适的浇筑方法。对于厚度较大的结构，如大坝基础，通常采用分层浇筑法，每层厚度控制在一定范围内，以确保混凝土能够充分振捣密实。同时，浇筑速度也需适当控制，避免过快导致混凝土内部气泡无法排出，影响密实度。为确保浇筑质量，还应配备足够的机械设备和人员，及时处理可能出现的问题，如泵送中断或管道堵塞等。

3. 振捣作业规范。振捣作业是高性能混凝土施工中的关键环节，直接影响到混凝土结构的密实度与强度。正确的振捣操作能够有效排除混凝土内部气泡，减少孔隙率，从而提升混凝土的整体性能。在进行振捣时，需根据混凝土的流动性和浇筑厚度选择合适的振捣设备，如插入式振动器或平板振动器。对于大体积混凝土结构，应采用分层浇筑并配合逐层振捣的方法，确保每一层混凝土都能充分密实。振捣过程中，振动器的插入深度和移动速度需严格控制，避免出现漏振或过振现象。通常情况下，振动器应垂直插入混凝土中，并缓慢拔出，每次插入点间距保持均匀，以保证振捣效果的一致性。此外，振捣时间也需合理把握，过短可能导致混凝土密实度不足，而过长则可能引起骨料分离。通过严格执行振捣作业规范，可以显著提高混凝土结构的质量，确保其达到设计要求的强度和耐久性[4]。

4. 养护措施的重要性。养护阶段对高性能混凝土的早期强度发展和长期耐久性具有至关重要的作用。适当的温湿度调控措施有助于促进水泥水化反应的顺利进行，防止因温度变化过大或失水过快而导致的开裂现象。常见的养护方法包括覆盖保湿膜、喷洒养护剂或采用蒸汽养护等方式。其中，覆盖保湿膜是最经济有效的养护手段之一，能够有效减少混凝土表面水分蒸发，保持适宜的湿度环境。此外，如设置冷却水管，以控制混凝土内部温度，防止因温差过大而产生温度应力裂缝。

4.3 质量控制措施

1. 原材料采购管理。原材料的质量直接决定了高性能混凝土的最终性能，因此在采购过程中必须严格

把关。首先，确保所采购的水泥、骨料、矿物掺合料及外加剂等符合国家相关标准和规范要求。其次，在原材料进场时，需进行严格的检验程序，包括外观检查、物理力学性能测试以及化学成分分析等，确保各项指标均满足设计要求。此外，还需建立完善的原材料档案管理制度，记录每批原材料的来源、规格型号及检验结果等信息，以便追溯质量问题源头，及时采取纠正措施。

2. 进场检验流程。为确保所有进场材料均符合质量要求，需建立科学合理的进场检验流程。针对水泥等主要原材料，应在每批次进场时抽取样品进行常规检测项目，如强度、安定性等，必要时还需进行专项检测，如氯离子含量、碱含量等。对于骨料，除了常规的粒径分布、含泥量检测外，还需特别关注有害物质含量，如硫化物及硫酸盐含量等，以防其对混凝土耐久性造成不利影响。外加剂的检验则应重点关注其减水效果、相容性及对混凝土性能的影响等方面。所有检验结果均需详细记录并归档，发现问题立即通知相关部门进行处理[5]。

3. 生产过程监控。生产过程中的每一个环节都可能影响高性能混凝土的质量，需建立全面的过程监控体系。从配料开始，需确保各种原材料按设计比例准确称量，并实时监测混合过程中的各项参数，如搅拌时间、搅拌速度等，以保证混凝土均匀性。在运输过程中，应注意保持混凝土的均匀性和流动性，避免长时间停滞导致坍落度损失。到达施工现场后，还需再次检查混凝土的工作性能，如坍落度、扩展度等，确保其符合施工要求。此外，还需定期对生产设备进行维护保养，确保其始终处于最佳工作状态，避免因设备故障引发质量问题。

4. 成品检测与整改。成品检测是验证高性能混凝土质量的最后一道防线。在混凝土浇筑完成后，需按照规范要求取样制作试块，并进行强度、耐久性等方面的检测。对于不合格的试块，需及时分析原因，查找问题所在，并采取相应整改措施。例如：若发现混凝土强度不足，可能是由于配合比不合理或养护不当等原因所致，此时需重新调整配合比或改进养护措施；若存在耐久性问题，则需进一步分析具体原因，如抗渗性能不佳可能是由于水灰比过高或矿物掺合料用量不足等原因引起，需针对性地进行调整优化。

5 高性能混凝土在水利工程中的应用效果

5.1 工程质量和耐久性提升

高性能混凝土的应用显著提升了水利工程的整体质量和耐久性。其具备高强度和高密实度特性，使得构筑物即使在恶劣自然环境中也能保持结构完整性。这种材料的抗压强度远超传统混凝土，能够有效抵抗外界压力，减少因环境因素导致的结构损坏。此外，高性能混凝土表现出卓越的抗冻融性能，这在寒冷地区尤为重要，它能防止因温度变化引起的裂缝形成，从而延长建筑物使用寿命。同时，该材料对化学侵蚀具有很强的抵抗力，减少了酸碱等化学物质对结构的破坏，降低了维护成本和维修频率。因此，在水利工程中使用高性能混凝土不仅增强了工程的安全性和稳定性，还为长期运营提供了坚实的保障，确保了水利设施能够在复杂环境下长期稳定运行。

5.2 施工效率和经济效益提升

高性能混凝土由于其优良的工作性能，显著提高了施工效率，并带来了可观的经济效益。相比传统混凝土，高性能混凝土流动性更好，易于浇筑成型，减少了施工难度和时间消耗。良好的工作性能也意味着更少的人工干预，降低了人工成本。与此同时，高性能混凝土在后期维护上的需求较低，进一步节省了费用。其优异的耐久性减少了维修和重建的需求，延长了工程的使用寿命，从长远来看，降低了总体成本。此外，高性能混凝土有助于节约资源，通过优化配合比设计，可以减少水泥和其他原材料的使用量，符合可持续发展的理念。

6 结束语

高性能混凝土在水利工程中的应用，不仅极大提升了工程质量和耐久性，还显著增强了施工效率和经济效益。通过优化配合比设计、改进施工工艺和完善质量控制措施，高性能混凝土展现出了无可比拟的优势，成为现代水利工程建设不可或缺的一部分。高性能混凝土在水坝、水电站及水闸等重要水利设施中的成功应用，证明了该材料在复杂环境下的可靠性和适应性，为水利工程的安全稳定运行提供了强有力的技术支撑。

参考文献：

[1] 何江 . 水利施工中高性能混凝土强度及耐久性能研究 [J]. 水利科技与经济 ,2023,29(06):150-154.
[2] 周欢 . 水利工程高性能混凝土高温劣化试验研究 [J]. 广西水利水电 ,2022(05):15,18.
[3] 孙玉玲 . 水工混凝土耐久性改善措施研究 [J]. 黑龙江水利科技 ,2022(06):26-28.
[4] 李彦漠 . 洞渣料超高性能混凝土的力学和耐久性研究 [D]. 重庆 : 重庆交通大学 ,2023.
[5] 樊付军 . 高强性能耐水发光混凝土的制备及建筑应用研究 [D]. 郑州 : 华北水利水电大学 ,2023.

关于水文地质问题在工程地质勘察中的危害研究

薛加彬

（甘肃煤炭地质勘查院，甘肃 兰州 730000）

摘　要　水文地质问题在工程地质勘察中对地基稳定性、结构安全性及施工可行性造成严重影响，地下水条件的不确定性、渗流作用与溶蚀现象易诱发基础沉降、边坡失稳及突水等工程灾害，严重威胁工程建设质量与运行安全。本文围绕水文地质问题在工程地质勘察中的表现形式、危害机制及应对方法展开系统研究，探讨地下水条件变化对地质勘察精度的制约，分析典型工程案例中水文地质问题的致灾过程，提出识别关键要素和构建技术对策的工程路径，旨在为提升工程勘察阶段的水文地质风险识别与防控能力提供借鉴，进而保障地质服务质量与工程建设安全。

关键词　水文地质；地质勘察；地下水；工程危害；风险识别

中图分类号：TU195　　文献标志码：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.040

0　引言

地下水问题作为工程地质勘察中的核心环节，其受场地多样性等因素的影响使得勘察获取的信息准确性与工程方案的合理性均受到不同程度的影响。水埋藏深度与渗流性、水化学成因一定程度决定地基承载力、边坡稳定、地下结构建设施工安全性。对不同地质地区通常引发溶蚀、突水、软化、滑移等不良地质作用给工程勘察建设过程带来一定的不确定性和突发风险，其隐蔽性与突发性的过程演化需要工程地质勘察在调查设计环节正确识别水文地质因素，并结合地质条件与工程建设特点评估其带来的工程影响及产生的灾害后果。本文系统阐述水文地质对工程地质勘察的限定作用及作用后果，并在此基础上探寻工程防治措施与勘察技术路径，以期提高复杂水文地质条件下工程地质勘察科学性与现实性。

1　水文地质问题的主要表现形式与影响

1.1　地下水条件及其对工程地质勘察的影响

工程地质勘察中，影响最为显著的水文地质因素之一的地下水条件，其空间分布、埋藏深度、水位变幅、补给与排泄方式，直接决定着勘察区域地质环境的动态稳定性。存在的地下水改变岩土体物理力学性质、弱化地层结构、降低土体抗剪强度使地基承载力变化进而影响结构设计参数合理性与施工安全控制标准[1]，含水层厚度与分布状态对钻探施工工艺选择与取样质量造成干扰严重时引发钻孔坍塌、钻进受阻与取芯失败等技术问题影响地质信息准确性。地下水位季节性波动及受工程扰动后的动态响应导致地层应力重分布引发局部软化、膨胀或次生渗漏从而改变原有地质结构力学平衡状态。水化学成分腐蚀性对地下结构材料形成潜在威胁，尤其在高矿化度或酸性地下水环境中易引发结构耐久性下降与隐蔽破坏[2]。地下水条件的不确定性让工程地质勘察面临信息动态变化、技术选择复杂和风险识别难度加大等挑战，并对勘察精度、设计合理性及工程实施安全性提出了更高要求。

1.2　渗流、突水与溶蚀等典型水文地质问题的工程表现

工程地质勘察中常见且具强破坏性的典型水文地质问题，如渗流、突水与溶蚀这类，反映着地下水活动对工程环境显著干扰的情况。渗流在岩土体中致使不均匀水力梯度出现、孔隙水压力改变、土体结构削弱进而引发边坡失稳、基坑隆起或地基沉降等情况的出现；突水在隧道、竖井与深基坑等地下工程里广泛存在，存在着高压水流突破围岩屏障时快速扰乱地层结构、破坏支护系统，危及施工安全的状况；溶蚀多在石灰岩等可溶岩层发生，由地下水化学作用形成溶洞、裂隙与空腔，破坏地基连续性，造成地面塌陷与结构失衡的情形。这些具隐蔽性与突发性的问题，若在识别或控制方面欠佳，极易导致严重工程灾害与经济损失。

2　水文地质问题造成的工程危害分析

2.1　地下水对结构基础承载力的削弱效应

地下水作为影响地基承载能力的重要因素，在工程地质勘察中有着不可忽视的作用，其物理存在及水

力活动改变原有地层应力状态、结构完整性与力学强度的情况，是制约地基稳定性和结构安全性的核心水文地质要素之一。其渗透作用对土体结构持续扰动，致使孔隙水压力升高进而削弱土粒间有效接触力，让原本稳定的岩土体结构出现松散、软化、重塑等变化，从而造成地基变形量增大、承载力下降甚至失效的结果[3]。依据有效应力原理，土体实际承载能力取决于其有效应力状态的情形，即：

$$\sigma'=\sigma-u$$

其中 σ' 为有效应力，σ 为总应力，u 为孔隙水压力。在地下水位升高或渗流增强的环境中，孔隙水压力 u 上升将直接导致有效应力 σ' 减小，致使土体的抗剪强度降低，最终表现为地基土在荷载作用下的变形加剧甚至产生剪切破坏。在饱和软土或淤泥质地层中该效应尤其显著，常致使结构物出现不均匀沉降、倾斜以及开裂等工程病害。地下水兼具溶蚀、润滑与劣化作用，会进一步弱化结构基础和持力层间的物理连接。含强腐蚀性离子的地下水对混凝土基础及钢筋予以侵蚀，降低其长期力学性能与耐久性，致使基础在正常使用寿命周期内过早疲劳或失稳。此外，地下水的动水压力对结构底面形成上浮力，在基础未做抗浮设计时易诱发结构上浮、底板破坏等严重后果。施工期排水不当致使水位突降也可能引发地层侧向应力释放，造成边坡滑移或基坑隆起，加剧基础系统整体失稳风险。在山区及高地下水位区域，地下水对边坡脚部或基底的削弱作用明显，渗流路径中水流冲刷细颗粒、改变应力分布且产生局部软化带，形成潜在滑动面，加大滑坡及滑移体发展可能性，在深基坑及隧道工程中若未充分评估地下水活动带来的水力扰动及力学劣化，其对衬砌结构、支护桩基础乃至上部建筑荷载转移路径的干扰会成为不容忽视的工程隐患[4]。

2.2 地下水活动引发的工程事故典型案例

某隧道工程位于典型岩溶发育带石灰岩地层（该地层地下水裂隙状赋存且已发生长期溶蚀而使溶腔不稳定），且地层中有压水流量大、水位高。加之前期勘察工作未布置足够数量观测孔，无法判定渗流方向及水压信息、勘察资料未能反映真实水文地质条件，致使施工期间盾构推进至高压裂隙水体段时掌子面突水压力急速超压，直接导致掌子面围岩坍塌、泥浆倒灌，施工人员紧急逃生，不仅造成施工进度长时间断绝，同时引发整体施工质量和稳定性受重大损失。结合事故分析可知，由于前期水文地质勘察未揭示溶腔空间构架，并且地质雷达和电法勘测部署密度不够和分析解释失准，使得设计缺乏针对性的防水构造，出现重大安全隐患。典型工程事故提醒我们，地下水的活动极易成为多种类型地质灾害的诱因，一般情况易于发生与不良地质构造或软弱地层复合成地质灾害机制，其渗透作用会使地基承载力减小，发生突水会致施工失控，溶蚀作用产生地面沉陷或塌陷，对基底结构稳定性及施工环境安全性产生了系统性影响，而且事故发生普遍会遇到诸如水文地质勘察不够、地下水动力特征把握不准、数据分析技术落后、勘察成果应用到设计不够科学精准等现实性难题。提升地下水活动规律的动态识别能力，增强数据空间分析与模拟预测水平，是降低水文地质问题引发工程事故概率、提高工程防灾抗灾能力的核心路径。表 1 为直观展示地下水活动与工程事故之间的关联关系。

在不同地质环境下，与多种工程灾害密切相关的地下水，是工程地质勘察中必须重点识别和防控的关键环节，而深化水文地质机制认知、完善地下水动态监测体系与事故数据库建设，可为今后相似工程提供决策支持与技术指导。

3 工程地质勘察中水文地质问题的应对方法

3.1 水文地质条件识别与现场勘察技术

水文地质条件识别是保障地质信息真实性与工程安全性的关键环节，涉及地下水的埋藏状态、流动形式与水化学特征对地基承载力、地层稳定性及施工环境适应性的直接影响，其识别精度决定着工程勘察成果的适用价值[5]。工程地质环境中地下水分布有着显著的空间异质性和时间动态性，含水层结构、水文边界构造、水头差异及补排条件变化致使水文地质条件呈现高度不确定性，对勘察技术的系统性与响应性提出更高要求。识别地下水条件要建立在钻探、水位观测与现场试验基础之上，通过多种技术联合来获取含水层赋存状况、渗透特性和流动路径。抽水试验作为

表 1 典型事故对比分析表

工程名称	地质背景类型	水文地质问题	事故表现	损失与影响
某深基坑工程	饱和粉砂层	向上渗流突涌	底板抬升、泥砂外泄	支护失效、道路沉降、结构破坏
某隧道工程	岩溶发育带	裂隙高压突水	掌子面塌方、涌水中断施工	人员撤离、工程停工、结构隐患
某边坡工程	碎裂夹泥岩层	强渗透致结构软化滑移	坡面开裂、滑动体位移	边坡失稳、交通管制、工程返工

评价含水层工程影响程度的重要手段，用于确定渗透性强弱和导水能力。渗流能力的定量计算可采用达西定律：

$$q=k\cdot i\cdot A$$

其中 q 为单位时间内的渗流量，k 为渗透系数，i 为水力坡度，A 为渗流截面积。反映地下水在不同岩土介质中流动能力且为地下水影响程度分级提供理论依据。在精细勘察阶段可利用电法、地质雷达及地震波等物探手段识别隐伏富水带与断裂渗透通道，以增强地下水空间结构的识别深度。借助遥感与地理信息系统技术在区域尺度上分析水体分布、水文响应与地下水系统边界，来支撑三维地质模型的构建与动态模拟。通过在关键区域部署自动化监测设备，实时采集水位、水压等数据，构建动态数据库，并预警异常变化行为。水文地质条件识别不只是静态参数的采集过程，更是动态响应系统的建立过程。经多源数据的融合与更新，让工程勘察具备面向施工与运行期的风险识别与技术预警能力，从而为工程建设提供稳定、可靠、可预测的水文地质支撑体系。其深度与广度直接关系到后续工程设计与风险防控的科学性。构建以识别—分析—反馈为主线的动态工作机制，可提升勘察成果的时效性与工程服务价值，以实现从初步认知到精细管理的全流程水文地质保障体系。实现高精度水文地质识别还需引入三维可视化技术与地下水数值反演方法，提升对含水层空间结构、水力连接关系及渗流路径的解析能力，将实时监测数据与地质建模结果联动，可动态更新地下水系统响应模型，辅助制定分区化、阶段化的工程控制方案，提升对突发水文异常的响应效率与调控精度，推动勘察成果在复杂地质条件下的应用，深化与工程风险控制体系的智能化升级。

3.2 危害控制的工程措施与水文地质信息集成应用

面向工程建设的水文地质危害控制是指按照工程建设对工程地质条件的要求把地下水治理、含水层和岩溶环境监测分析的结果转化成防止结构破坏、施工安全与耐久性发生的具有实际可操作性的工程措施。考虑地下水活动具有动态性和区域差异性，从而使控制措施具有适应性和响应性。建立地质结构从识别到保护再到治理管控的隐患风险控制与治理体系，并采取具有针对性的排导方式。设计应考虑含水层、岩溶强度与透水性情况，以防止水压变化造成的渗流扰动。一般高透水地层采取的措施是在开挖区域的两侧布置抗渗帷幕，阻断水力联系以减小围堰周边水压力向围堰传压。岩溶区域可结合岩溶水体排查提前灌浆或结构支护，降低结构沉降和滑动风险。高水头作用下结构须采取抗浮措施，底板配重、锚固或水压平衡控制结构的位移。地下工程防水体系建立须结合区域划分成果，重点处理节点及渗流路径，降低防渗失效时化学侵蚀与水压侵蚀。边坡及基坑工程应结合其水力梯度分析与滑面特性，通过截渗排水和围护结构治理稳定岩土边坡。管控方案落实效果依赖对多源信息反演的监测数据和数值模型实时修正和耦合控制能力。水文地质成果在系统更新与评价后的长效及在设计基础上通过监测管控系统采集水位与渗流和位移变化及可实时反馈、支撑施工和风险预警的动态化与智能化信息。系统的响应控制使得控制逻辑由静态部署转变为智能调整。工程运行期基于自动监测和模拟系统对于水文异常行为的及时预判和响应可提高工程应对干扰的能力和工程调控的敏捷性，且控制设施构建强调技术整合、信息融合和响应过程的闭环，对于提升工程应对突发水文地质风险的灵活性具有重要作用。在深层地下构造、巨型边坡工程和特殊地质环境中的水文地质控制方式呈现系统化、智能化、精细化趋势是保障复杂工程维持健康运行的关键。

4 结束语

部分工程地质勘察中的水文地质问题具有极高的复杂敏感度，会对地基土应力强度、结构体系稳定性、施工环境产生干涉，存在地下动水条件波动、渗流冲刷与溶蚀作用于不同时期影响结构响应与地质稳定性的情况。从而制约工程安全与质量，提升水文地质识别、辨析、管控的精准度是构建工程勘察体系的主要内容。经系统解析地下水动水规律、合理应用工程措施及构建水文信息一体化机制，可以有效减小工程风险、提高勘察成果的适用性。将多技术交融的水文地质探测动态监控体系建设作为复杂地质环境背景下的工程安全管理与灾害预警的基础与依据，并强化水文模型精度及联动工程可有效提高全时程的风险响应能力。

参考文献：

[1] 郑建辉.水文地质问题在工程勘察中的重要性探讨[J].能源与环境,2024(05):88-90.
[2] 李琴芬.矿山工程地质勘察中水文地质问题的危害探讨[J].中国金属通报,2024(09):148-150.
[3] 薛灵.工程地质勘察中水文地质问题的危害浅析[J].西部探矿工程,2024,36(02):41-43,47.
[4] 赵旭东.水文地质问题对矿山工程地质勘查的影响研究[J].世界有色金属,2024(03):214-216.
[5] 李超群,刘重阳.水文地质问题在工程地质勘察中的重要性[J].内蒙古煤炭经济,2022(16):178-180.

高速公路沥青路面施工质量检测与控制要点研究

石　烨，陈文华

（广西交科工程建设有限公司，广西 南宁 530000）

摘　要　沥青路面作为现阶段高速公路项目实施建设的重要路面结构，其面层主要是由沥青、粗骨料、细骨料、矿粉等组成的复合材料，原材料的性能以及配合比设计都对施工质量有着直接的影响。通过对高速公路沥青路面施工质量检测展开研究能够有效确保项目施工质量，并能为项目施工生产带来显著的社会经济效益。本研究以高速公路沥青路面施工质量检测的重要性作为切入点，结合具体的实例分析了沥青路面质量检测技术与施工质量控制要点，旨在为同类高速公路沥青路面施工质量控制提供参考。

关键词　高速公路；沥青路面；施工质量检测

中图分类号：U415.12　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.041

0　引言

随着我国高速公路总里程的持续增长，展现了我国在交通大基建过程中取得的显著成果与持续发展趋势。沥青路面有着其自身较为突出的性能特征，成为高速公路项目路面结构的重要类型，但沥青路面在高速公路项目施工过程中容易受到众多因素的影响，特别是原材料性能与配合比设计直接关系到沥青路面施工质量。在实际生产运营过程中，不少高速公路存在着路面裂缝、坑槽、龟裂、脱皮和老化等现象，这对高速公路沥青路面运行质量和舒适安全性产生了不良影响[1]。通过对高速公路沥青路面的科学质量检测，根据检测的结果选择沥青路面原材料及配合比设计调整，能够有效确保高速公路项目施工的质量安全和耐久性能。

1　高速公路沥青路面概述

沥青路面作为高速公路项目施工建设的一种重要路面结构类型，是因为其具备优越的施工质量控制效率、实用性效果良好和社会生态经济效益显著等突出优势性能。作为高速公路项目施工的常态化柔性材料，通过不断深化改良，高速公路沥青路面优势性能主要表现为：一是施工效率高，沥青路面结构摊铺速度快，硬化和养护周期短，能够显著提升施工进度，降低项目整体施工成本；二是行程体验感优，作为一种柔性的路面结构类型，沥青路面能够有效降低了行车过程中产生的噪声和震动，为通行提供稳定舒适的体验感；三是行车安全性能好，沥青路面结构不存在过度的接缝形式，行车连续性好，能够有效降低交通事故发生；四是维护成本较低，沥青路面结构耐久性好，在运行过程中能够通过快速修补的工艺，极大地提高了维护施工效能，能够整体上降低维护成本；五是环保性能显著，沥青路面结构主要的材料为集料与沥青，特别是不少改性沥青通过应用废旧轮胎回收加工而成的橡胶粉，能够有效降低自然资源的使用，具有良好的生态环保性能[2]。

高速公路沥青路面的性能优势明显，但其各种性能优势是基于构成材料特性叠加而成，对其施工质量有着较高的要求，这就需要采取质量检测技术手段来把控高速公路沥青路面施工质量。试验检测技术在高速公路沥青路面施工阶段中的应用重要性主要体现为：一是通过对沥青路面原材料的试验检测，能够综合研判施工材料质量，便于就近采购施工原材料，降低材料运输成本；二是调配优质高效沥青混凝土配合比设计，节约施工材料，并全面把控项目施工材料质量与施工工艺，有效指导项目施工生产作业，保障项目施工生产质量；三是试验检测技术的积累为新材料的投入应用提供重要的参考依据，对材料的更新应用与施工工艺的改善和项目施工建设质量产生重要推动作用。对于试验检测专业技术人员而言，要充分认识试验检测技术的重要性，熟练掌握沥青路面相关试验检测技术标准规范和试验检测实操要点，确保试验检测数据的真实性、科学性和准确性，以此为促进高速公路高质量建设提供助力。

2　高速公路沥青路面施工质量检测实例分析

以某高速公路项目 K86+000-K117+746.455 主线、互通匝道及连接线普通沥青混凝土下面层配合比设计作为实例分析，能够更全面直观的了解高速公路项目沥青路面施工配合比设计全过程。

2.1　配合比设计要求

混合料类型 AC-25C，沥青用量范围：3.5% ～ 4.1%；沥青混合料设计技术参数：孔隙率 3% ～ 6%、稳定度≥ 8Kn、流值 1.5 ～ 4 mm、稳定度≥ 1 500 次 /mm、残留稳定度＞ 80%。

2.2　原材料试验检测

在施工原材料方面，采用湖北国创高新材料股份有限公司生产的 70# 沥青，武宣广峰矿粉有限责任公司生产的 0 ～ 0.6 mm 矿粉，ZK87-420-1# 碎石加工厂生产的碎石和机制砂。通过试验检测，合成级配 31.5 mm、26.5 mm、19 mm、16 mm、13.2 mm、9.5 mm、4.75 mm、2.36 mm、1.18 mm、0.6 mm、0.3 mm、0.15 mm 和 0.075 mm 的通过质量百分率（%）分别为：100.0、98.4、79.5、70.2、60.3、48.8、32.9、26.4、19.2、14.2、9.4、5.5、5.1，满足技术标准规范及设计要求。

2.3　推荐配合比

根据《公路沥青路面施工技术规范》及设计要求，按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行设计、试验，所选定的配合比设计符合设计及规范要求，可用于 K86+000-K117+746.455 主线、互通匝道及连接线普通沥青混凝土下面层。监理工程师建议：推荐配合比最佳沥青用量为 3.66%、矿粉 2.89% 指导 K86+000-K117+746.455 主线、互通匝道及连接线普通沥青混凝土下面层施工。沥青路面推荐配合比设计具体参数详见表 1，其中在推荐配合比配置下材料的相关参数检测指标为：毛体积相对密度 2.434，孔隙率 4.4%，稳定度 13.16 kN，流值 3.1 mm，动稳定度 2 360 次 /mm，残留稳定度 96.0。

表 1　沥青路面推荐配合比设计

材料名称		配合比（%）
集料	22 ～ 28 mm	15.42
	16 ～ 22 mm	17.34
	11 ～ 16 mm	17.34
	6 ～ 11 mm	11.56
	3 ～ 6 mm	5.78
	0 ～ 3 mm	26.01
矿粉		2.89
沥青		3.66

3　高速公路沥青路面施工质量检测技术要点分析

随着我国高速公路高质量发展建设，为沥青路面施工质量检测积累了丰硕的成果和经验，国家对于高速公路沥青路面施工有着较为完善的科学标准规范。但面对质量强国深入实施的背景下，对高速公路沥青路面施工质量检测有着更高更严的要求，沥青路面施工质量检测过程中存在的影响因素较多，结合实践经验，对高速公路沥青路面施工质量检测技术要点做以下分析总结。

3.1　施工原材料检测

沥青路面结构类型主要是由集料、矿粉、沥青组合而成，集料通常情况下又分为机制砂和碎石，起到整体结构的稳定性与耐久性作用，这就需要严格把控集料的压碎指标值、磨耗值、0.075 mm 颗粒含量和针片状等关键性指标。矿粉的检测重点是细度、含水量和塑性指数，确保矿粉能够有效控制沥青路面结构的密实度和施工性能。沥青作为沥青路面的重要组成部分，重点检测针入度、软化点、延度三大指标外，还要对粘附性、闪点等技术指标进行检测，确保沥青能够保持良好的稳定性与流动性 [3]。

3.2　配合比控制

沥青路面配合比设计是一项关键性的技术，是通过不断反复的试验检测调试出最佳的配合比设计。在严格确保原材料质量检测的基础上，对材料用量、拌和稳定、级配和拌和量等进行严格试验，在试验检测过程中，对相关检测数据的偏差进行分析、计算和调整，才能够最终形成稳定、经济、高效的配合比设计。在沥青路面施工过程中，还需要严格地进行试验检测，重点是混合料的马歇尔、稳定度、孔隙率、饱和度、车辙和高温稳定性等指标，有效把控沥青路面混合料施工质量 [4]。

3.3　沥青路面施工后质量检测

高速公路沥青路面施工后还应当继续采用质量检测技术手段确保施工质量，主要检测的技术参数有压实度、平整度、弯沉值、抗滑性能与摩擦系数等。压实度检测主要是判断沥青路面整体铺筑的质量，一般采取钻芯取样方式，将芯样进行密度和马歇尔击实试验，分析压实度数据是否满足设计要求 [5]。平整度检测主要采用的方法有三米直尺法、连续式平整度仪法、激光平整度仪法等。当前主要采取道路工程检测车车载式激光平整度仪进行检测，该检测技术手段能够降低测量误差值，确保数据精确，采用国际平整度指数

（IRI）标准技术程序计算IRI值。对于公路工程路面承载能力的检测评价，一般采取贝克曼梁法、自动弯沉仪法和落锤式弯沉仪法，高速公路项目一般采取后两种方法对沥青路面结构的变形承载能力进行分析。抗滑性能是高速公路路面行车安全的一项重要技术指标，在技术标准规范中也用构造深度表示，通常采用手工铺沙法和电动铺沙法进行现场检测。高速公路沥青路面抗滑性能检测时要严格按照技术标准规范的频率进行检测，并通过计算评价是否满足要求。

4 高速公路沥青路面施工质量控制技术要点分析

通过采取质量检测技术手段能够有效指导高速公路沥青路面施工，试验检测与项目施工生产存在密不可分和相互促进的关系，并且试验检测更是贯穿于项目整体实施建设的全过程。基于此，结合实践经验对高速公路沥青路面施工质量控制技术要点总结为以下几方面。

4.1 沥青混合料施工生产质量控制

首先，需要严格控制沥青混合料施工生产材料，施工材料从选购渠道到进入项目施工现场都要严格进行试验检测，确保其数量、质量满足技术标准规范和设计要求，并对合格的原材料进行配合比设计。其次，在沥青混凝土拌和制备过程中，拌和搅拌设备要进行调试和计量检定，能够确保沥青混凝土混合过程中实现除尘、加热、装料、装载、温度控制、搅拌时间和数据分析等现代化自动控制功能，能够严格控制混合料搅拌和生产工艺。最后，需要对沥青混凝土施工生产质量进行持续性监控，特别是严格按照施工班组生产情况采用马歇尔等试验对各项技术指标进行控制，并且对沥青含量进行抽查，当性能参数出现偏差要及时进行数据分析并采取措施解决，确保各项技术指标参数在稳定的波动值范围中[6]。

4.2 沥青混合料施工铺筑质量控制

沥青混合料施工生产到施工铺筑具有一定的距离，而高速公路沥青路面的铺筑对施工温度有着严格要求，这就需要做好沥青混合料施工生产运输工作。通过对运输车辆内壁涂抹隔离液避免混合料受到其他污染，并且车辆行车稳定、安全，以此确保沥青路面施工材料质量整体可控。在沥青混合料进行铺筑过程中，需要注意天气情况，异常恶劣天气不能进行沥青路面摊铺施工作业，还要严格按照施工计划统筹安排铺筑的混凝土数量，铺筑之前还应当对路面基层压实平整度进行检测，摊铺机要按照规范要求进行预热，通过螺旋分布器进行均匀铺筑，确保松铺厚度达到要求。还应当对路面的横向与纵向接缝进行处理，尽量避免裂缝的产生。施工现场要严格做好沥青运输车辆、洒布车辆和铺筑机械等设备的管理，对于施工现场沥青混合料加热情况，需要注意避免引发火灾事故，重视施工消防安全生产管理。

4.3 沥青混合料施工压实与养护质量控制

在高速公路沥青混凝土路面施工过程中，存在着需要铺筑的大面积大方量沥青混凝土，一般先进行试验路段的铺筑，得出指导整段高速公路沥青混凝土铺筑施工的参数，再严格按照试验路段的施工参数进行科学施工。在沥青路面平整度压实方面，要采取消除内部应力静压方式，对压实痕迹进行消除。整个碾压施工作业过程中，应当采取连续性施工方式，确保碾压的施工步骤、温度，以此避免沥青路面出现断层或裂纹现象[7]。沥青路面的养护也是一项重点工作，在铺筑施工作业结束后，需要采取技术手段进行养护，养护质量能够有效提高沥青混凝土路面结构的耐久性。

5 结束语

高速公路沥青路面结构具有多种突出优势性能，成为现阶段高速公路项目施工生产建设的主要路面结构类型。高速公路沥青路面施工与试验检测技术存在相辅相成的密切关系。高速公路沥青路面施工需要通过试验检测技术手段对沥青路面施工原材料、配合比设计和施工现场作业等进行质量控制，试验检测技术手段能够有效保障高速公路项目沥青路面整体施工质量。

参考文献：

[1] 李冬克.高速公路沥青面层施工质量控制技术研究[J].交通世界,2024(11):59-61.

[2] 冯树川.沥青混凝土路面试验检测技术及质量控制[J].新疆有色金属,2024,47(04):73-74.

[3] 李易阳.公路沥青路面施工现场试验检测技术的应用研究[J].产品可靠性报告,2024(01):154-155.

[4] 熊建华.某沥青路面工程施工技术要点及质量措施浅析[J].四川水泥,2024(08):228-230.

[5] 景宏伟.公路沥青路面质量检测技术要点[J].科学技术创新,2024(18):153-156.

[6] 介慧程.公路沥青路面工程的质量要求及试验检测探讨[J].大众标准化,2024(12):28-30.

[7] 郭旭.公路工程沥青路面施工现场试验检测技术要点[J].四川建材,2024,50(08):181-191.

电梯起重机械钢丝绳常见问题及检查防范方法研究

胡科夫

（滁州市特种设备监督检验中心，安徽 滁州 239000）

摘　要　电梯起重机械钢丝绳是保障设备安全高效运行的关键载体。在长期反复载荷作用下，钢丝绳不可避免地会产生断丝断股、磨损变形、锈蚀老化等一系列损伤，给行业安全生产带来严峻挑战。本文针对钢丝绳常见失效模式及其成因机理进行了系统梳理，并从目视检查、电磁检测、超声红外、动态监测等方面构建了多维度的检测评估方法，结合规范化安装、定期润滑、人员培训等防范措施，初步形成了“检测—预警—决策—处置”一体化的钢丝绳安全防控体系，以期为电梯起重机械钢丝绳的全寿命周期管理提供新思路，为保障乘客与作业人员生命财产安全夯实根基。

关键词　电梯起重机械；钢丝绳；断丝断股；磨损变形；锈蚀腐蚀

中图分类号：TU857　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.042

0　引言

电梯起重机械是现代建筑、制造、交通等行业不可或缺的垂直运输设备，其安全可靠运行关乎人民群众生命财产安全。作为承载件的钢丝绳，在恶劣工况下长期工作，不可避免地产生断丝、锈蚀、变形等损伤，进而引发事故隐患。当前，电梯困人、吊车倾覆等钢丝绳失效引发的恶性事件时有发生，加强钢丝绳安全管控刻不容缓。然而，由于钢丝绳结构复杂、工况多变，传统检测维护方法难以适应当前的高强度、长周期作业需求。因此，亟需从成因分析、检测手段、管理制度等多维度系统探讨钢丝绳常见安全问题的解决方案。

1　电梯起重机械钢丝绳常见问题分析

1.1　断丝断股引发安全隐患

钢丝绳由多根钢丝捻制而成，其结构完整性直接决定了承载能力。在疲劳载荷、腐蚀环境、外力冲击等因素作用下，钢丝绳易产生不同类型的断丝现象，包括疲劳断丝、过载断丝、锈蚀断丝等。其中，疲劳断丝是由钢丝绳在弯曲状态下受到交变应力所致，断口呈 45° 角；过载断丝则源于突发超载或卡阻，断口呈 90° 角；锈蚀断丝多见于潮湿腐蚀环境，断口呈不规则形貌[1]。当钢丝绳出现少量分散断丝时，对承载能力影响不大。但当局部断丝密集、成束出现时，会引发钢丝绳局部截面积急剧减小，进而导致断股事故。断股时的典型症状为电梯轿厢突然下坠、急停或起重机械吊装物坠落。这类事故往往会造成重大人员伤亡及经济损失，断丝断股问题必须引起高度重视。

1.2　磨损变形影响运行稳定

钢丝绳在电梯起重机械中承担牵引与载重作用，其表面不可避免地与曳引轮、导向轮、滑轮等构件发生摩擦。长期摩擦导致钢丝绳表面逐渐磨损，外径减小。当直径缩小值超过公称直径的 7% 时，钢丝绳报废条件即告成立。除表面磨损外，钢丝绳内部同样存在股间磨损问题。当绳芯或润滑脂老化失效时，在张紧力与弯曲应力作用下，绳股间易产生微动磨损，进而引发股线断裂、绳芯断裂等内部损伤。由于肉眼难以察觉内部磨损，其危害性常被忽视。

与磨损相伴的是钢丝绳变形问题。钢丝绳在制造及使用过程中可能出现笼状畸变、局部压扁、绳股鸟巢等形态异常。尤其在张力不均、急弯急拉等不当工况下，钢丝绳变形加剧，绳股间摩擦加重，加速劣化进程。同时，钢丝绳变形破坏了结构的对称性，降低了抗弯曲性能，易引发疲劳开裂。另外，变形还会造成钢丝绳与滑轮、导轮间的打滑现象，影响牵引效率。

1.3　锈蚀腐蚀导致性能下降

钢丝绳广泛应用于建筑、港口、矿山等潮湿、含盐环境，锈蚀腐蚀问题不容忽视。当钢丝绳表面防腐层破损或润滑脂流失后，裸露的钢丝与空气、水分发生化学反应，表面快速锈蚀。轻者导致表面粗糙、麻坑，

重者可使钢丝松散、截面减小。锈蚀显著降低钢丝绳的抗拉强度、塑性及韧性，极易引发脆性断裂事故 [2]。除表面锈蚀外，钢丝绳内部同样面临腐蚀威胁。由于绳股间缝隙狭小，一旦受潮便难以彻底干燥，湿气长期存留提供了腐蚀反应条件。当内部钢丝被腐蚀减薄后，在拉力作用下更易断裂。内部腐蚀进展隐匿缓慢，但危害巨大。实践中曾发生钢丝绳“带病”运行，内部严重锈蚀而表面完好的案例。

1.4 张力不均加速局部损耗

电梯起重机械普遍采用多绳并联布置，以期通过冗余设计提高安全系数。然而，这种结构形式对各钢丝绳的张力均匀性提出了更高要求。试想，如果某根钢丝绳张力偏低，那么其所承担的载荷就会自动分配给其他绳索。久而久之，个别钢丝绳因过度承载而加速磨损老化，导致局部应力集中，埋下事故隐患。与此同时，张力较低的钢丝绳往往会出现相对滑移现象。在起升过程中，松弛绳索易与紧绷绳索产生速度差，引发绳股间扭转、挤压与摩擦。伴随牵引力的反复作用，松弛钢丝绳极易出现永久变形，如笼状膨胀、绳股鸟巢等，最终酿成断绳事故。

张力失衡问题通常源于两方面原因。一是前期安装调试缺乏规范。如果施工人员对多绳布置的受力特点缺乏认识，没有严格校核各绳的初始张紧力，那么设备投入使用后，个别绳索就可能“先天不足”，埋下张力失衡的隐患。二是后期维护监管有所懈怠。在长期反复载荷作用下，钢丝绳会出现不同程度的蠕变与松弛，导致绳端固定装置逐渐松动。如果缺乏必要的定期检修，这种松动就会持续恶化，最终引发局部载荷失衡。

2 电梯起重机械钢丝绳检查措施实施

2.1 目视触觉检验异常状态

钢丝绳的安全监测始于仔细的目视检查。钢丝绳表面的断丝、锈蚀斑、变形等可见缺陷往往是内部损伤的外在表征。检查人员需要以敏锐的眼光扫描钢丝绳全貌，重点关注应力集中区域，如滑轮槽、卷筒凹槽等。这些部位往往是断丝、磨损的高发地带。若发现钢丝绳局部出现凹陷、鼓起、扭结等异常变形，则很可能预示着芯部已经产生了严重损伤，需引起高度警惕。然而，肉眼观察也存在局限性。对于早期的微小断丝或细微裂纹，目视并不总能捕捉到。此时，触觉检查可以发挥独特作用。检查人员需要用手轻抚钢丝绳表面，如果感到锐利的毛刺或尖锐的凸起，那就意味着钢丝已经开始断裂，即便肉眼尚未发现端倪。需要注意的是，触觉检查对人员的经验与责任心要求很高，疏忽大意极易酿成严重后果。

2.2 磁力检测评估内部损伤

钢丝绳内部损伤检测需要借助于无损检测技术，其中电磁检测是目前应用最为广泛的方法。利用电磁感应原理，通过测量钢丝绳局部磁导率的变化，就可以判断其内部是否存在断丝、锈蚀等缺陷。与人工检查相比，电磁检测具有定量分析能力，不仅能揭示缺陷的存在，还能估算其数量与大小，因而检出率与准确度都要高出许多。当前，永磁法与交变磁场法是两种主流的磁力检测技术。前者采用永磁体充磁，后者利用交变电磁场反复充退磁 [3]。相比之下，交变磁场法具有磁化强度大、抗噪能力强等优势，已成为大型设备检测的首选。以 TCK.W 型电梯钢丝绳探伤仪为例，采用交变磁场技术，配合智能信号处理系统，每秒可检测 30 米绳长，能及时发现直径减小 7% 以下的微小断丝，高效检查钢丝绳内部质量。

2.3 超声红外识别温度异常

超声检测是钢丝绳内部缺陷评估的另一利器。当高频超声波在钢丝绳中传播时，内部的断丝、裂纹会造成声波的反射与衰减。通过分析反射回波的时间、频率、幅值等特征参数，就可以对损伤的位置、大小、性质做出判断。相比电磁检测，超声检测具有分辨率高、适用范围广等优势。它不仅能发现细微的线性缺陷，还能识别表面与近表面的局部损伤。这在钢丝绳断丝检测中至关重要。然而，超声检测的扫查速度较慢，而且对检测环境与表面状态要求较高，常作为电磁检测的有益补充，与之联合应用。此外，在钢丝绳安全评估中，热效应检测也不容忽视。钢丝绳在高速运行时，与曳引轮、导向轮等部件剧烈摩擦，局部温度骤然升高。温度过高会导致钢丝绳强度退化、润滑脂老化，埋下安全隐患。红外热成像技术可捕捉钢丝绳表面温度场分布，识别出异常高温区域。借助定量测温和趋势分析，热成像检测可揭示钢丝绳磨损、疲劳的早期征兆，从而为故障预警、维护保养提供新的思路。

2.4 动态监测采集运行数据

与间歇性的定期检测相比，在线动态监测可以持续不断地感知钢丝绳的实时状态，为其“画像”打造“24 小时”不间断数据流。状态监测系统通过布设在关键部位的多传感器网络，能够采集并分析钢丝绳振动、声发射等多源信息，全方位评判其健康程度。以振动监测为例，当钢丝绳发生松动、断股、脱槽等故障时，其固有频率、振动幅值都会发生显著改变。这

些变化信号被传感器捕获后，再通过机器学习算法进行特征提取与智能诊断，就可及时发现异常征兆，预警潜在风险。相比人工巡检，在线监测可避免检测盲区，消除人为干扰，提高预警的灵敏度与可靠性。而声发射检测则犹如布设在钢丝绳局部的“听音器”，能捕捉断裂瞬间产生的高频应力波，精准定位损伤部位。借助声发射技术，运维人员可以及时查明事故肇因，缩短故障诊断时间[4]。除了传统的振动、声发射监测，计算机视觉技术也在钢丝绳缺陷识别中崭露头角。机器视觉系统可通过高清工业摄像机采集钢丝绳表面图像，再利用深度学习算法自动分割、归类、量化断丝、磨损、变形等缺陷，为检修决策提供直观可视的依据。

3　电梯起重机械钢丝绳防范方法应用

3.1　规范安装确保均匀张力

电梯起重机械钢丝绳的安全使用始于规范化安装。安装前，应全面检查钢丝绳质量证明文件，确认各项参数指标满足设计要求，筛查出厂缺陷，为后续安全奠定基础。在安装过程中，技术人员应严格遵循相关工艺标准，把控关键环节。首先是卷绕方向与捻向的匹配，确保钢丝绳受力均匀，避免扭结变形。其次是张紧力矩的平衡调节，尤其是多绳并联布置时，采用分绳器等装置实现各绳力均等分配。此外，导向装置如滑轮、压轮的定位精度与运转顺畅也至关重要，它们直接影响钢丝绳的跳槽、打滑等异常行为。安装完成后，现场工程师还需开展系统性能测试，在满负荷、空载等不同工况下考核钢丝绳的实际运行状态。一旦发现张力不均、过松过紧等问题，必须及时调整，确保钢丝绳处于最佳初始状态。

3.2　定期润滑防止磨损锈蚀

在钢丝绳的使用寿命中，定期润滑养护至关重要。长期以来，钢丝绳在恶劣工况环境下经受着严酷考验。潮湿、酸碱、盐雾等因素无时无刻不在侵蚀钢丝绳的表面，而高负荷运行又导致钢丝绳内部绳股间剧烈摩擦。久而久之，如果缺乏有效的润滑防护，钢丝绳就会加速磨损、锈蚀，强度与韧性急剧下降，最终难逃断裂的厄运。因此，在钢丝绳日常维护中，定期涂覆高品质润滑脂至关重要。优质的极压润滑脂能在钢丝绳表面形成致密油膜，隔绝腐蚀介质，降低摩擦因数，同时渗透到钢丝绳内部，填充、粘结绳股，既可抑制内部疲劳，又能避免外部磨损。需要注意的是，润滑脂的选型和涂抹工艺必须科学合理。劣质油脂反而会加重钢丝绳污染，特别是含硫润滑脂还会引发化学腐蚀[5]。因此，应选用与钢丝绳材质相容的高性能润滑脂，并采用喷涂、刷涂、浸润等专业工艺，确保钢丝绳表里均匀饱和。与此同时，日常维护中还要定期清理钢丝绳表面的油污、灰尘，避免杂质侵入磨损芯部。

3.3　操作培训避免不当使用

钢丝绳作为特种设备核心部件，其使用维护对人员素质提出了较高要求。电梯维保工、起重司机等一线操作人员的技能水平与安全意识，直接影响设备运行安全。不规范操作是导致钢丝绳意外损坏的重要诱因。例如：电梯突发故障时，如果维保人员盲目复位、强制运行，极易造成钢丝绳打滑、跳槽等二次损伤。又如：起重机械吊装作业中，若司机野蛮操作、超载限位，必然加剧钢丝绳磨损变形。因此，加强从业人员培训和考核至关重要。一方面，要建立完善的培训体系，采用理实一体化培训模式，强化实际操作能力。尤其要重点演练事故工况下的应急处置，严禁盲目蛮干。另一方面，应健全持证上岗制度，定期开展技能鉴定与安全教育，强化红线意识，坚决杜绝违章作业。特别是在电梯“困人”、塔吊倾覆等险情发生后，操作人员要立即停机，全面排查钢丝绳损伤状况，经确认安全后方可恢复运行。

4　结束语

电梯起重机械钢丝绳的安全问题已成为制约行业高质量发展的关键瓶颈，必须充分认识到钢丝绳损伤预防与失效诊断的重要意义。未来，应在总结传统检测、维护经验的基础上，积极引入物联网、大数据、人工智能等前沿技术，推动构建钢丝绳全寿命周期智能化管理体系。同时，还需完善相关法律法规和技术标准，强化从业人员安全意识与操作技能，形成政府监管、企业自律、社会协同的多方联动机制。只有从成因分析、监测预警、维护保养、应急处置等环节入手，系统布局钢丝绳安全防控举措，才能为电梯起重机械的安全运行提供坚实保障。

参考文献：

[1]　段光宇.电梯起重机械钢丝绳的常见问题及检查防范方法[J].设备管理与维修,2024(18):73-75.
[2]　陈俊先.电梯起重机械钢丝绳的检测与维护探讨[J].科技资讯,2023,21(08):64-67.
[3]　张理云.电梯起重机械故障的诊断与治理[J].价值工程,2022,41(35):95-97.
[4]　王浩.浅谈电梯起重机械钢丝绳的检测与维护[J].中国设备工程,2022(20):180-182.
[5]　沙汀鸥.电梯起重机械钢丝绳的检测与维护探究[J].大众标准化,2020(12):16-17.