

# 公路桥梁施工中关键技术难点及对策研究

陈景文

广东 韶关 512300

DOI:10.61369/ME.2025110002

**摘 要：** 公路桥梁施工技术研究至关重要。文中系统归纳关键技术体系，包括软弱地基处理、高边坡防护等技术难点及应对措施，介绍智能监测导向加固决策等系统和技术应用，还阐述工效提升、质量安全效益评估等内容，指出未来应融合智能建造与可持续发展，推动行业进步。

**关 键 词：** 公路桥梁施工；关键技术；智能建造

## Research on Key Technical Difficulties and Countermeasures in Highway and Bridge Construction

Chen Jingwen

Shaoguan, Guangdong 512300

**Abstract：** The research on highway and bridge construction technology is of great significance. This paper systematically summarizes the key technical system, including technical difficulties such as soft foundation treatment and high slope protection as well as corresponding countermeasures. It also introduces the application of systems and technologies like intelligent monitoring-guided reinforcement decision-making, and expounds on contents such as work efficiency improvement and quality, safety and benefit evaluation. The paper points out that in the future, it is necessary to integrate intelligent construction with sustainable development to promote the progress of the industry.

**Keywords：** highway and bridge construction; key technologies; intelligent construction

### 引言

公路桥梁施工技术的研究对保障工程质量、推动行业发展至关重要。2022年，交通运输部颁布《公路“十四五”发展规划》，强调要推动交通基础设施高质量发展，提升公路桥梁建设技术水平。文中探讨的软弱地基处理、高边坡防护、线性控制等技术难点，以及智能监测、一体化施工等技术方案，正是在响应政策要求，致力于解决实际施工难题。通过对这些关键技术的研究与应用，不仅能有效提升施工质量与安全性，还顺应了智能建造与可持续发展融合的趋势，推动公路桥梁建设迈向新台阶。

### 一、公路桥梁施工关键技术难点识别

#### （一）复杂地质条件下的施工难点

##### 1. 软弱地基处理技术难点

软弱地基是公路桥梁施工中常见的地质难题，其土质普遍具有含水量高、压缩性大、抗剪强度低的特点，含水量通常超过30%，压缩系数较高，抗剪强度多低于20kPa<sup>[1]</sup>。在桥梁荷载作用下，这类地基易产生显著的累计沉降与不均匀沉降，不仅导致桥面平整度超标、支座变形，影响行车安全与舒适性，还会降低桥梁整体耐久性。同时，软弱地基的自然固结周期较长，若未能充分固结便推进施工，后期易出现二次沉降，超出设计允许范围。在基础施工阶段，软土易因护壁泥浆流失引发塌孔问题，导致桩基偏位，增加返工成本与工期延误风险，给施工带来多重挑战。

##### 2. 高边坡防护稳定性挑战

高边坡施工的稳定性风险源于地质条件多样性与外部环境扰

动的叠加影响。高边坡所处区域岩土体多为分层结构，不同岩层与土层的力学参数差异显著，抗压强度差距可达数倍，难以精准评估整体稳定性<sup>[2]</sup>。若岩土体存在节理裂隙，雨水渗透会大幅提升含水率，导致抗剪强度降低，进而增加局部滑塌风险。在施工过程中，分层开挖高度与开挖顺序的不合理规划，会破坏边坡原有应力平衡；强降雨、地震等外部因素进一步加剧坡面重力分力，对防护结构的承载能力提出更高要求，一旦防护设计或施工质量存在缺陷，易引发局部垮塌甚至整体失稳，阻碍施工进度。

#### （二）桥梁结构施工工艺难点

##### 1. 大跨径连续梁桥线形控制难题

大跨径连续梁桥的线形控制核心矛盾在于预应力张拉误差的累计效应。预应力张拉是保障桥梁结构性能与线形的关键工序，但实际施工中，张拉设备精度偏差、钢绞线材料特性差异以及施工人员操作水平不同，会导致实际张拉应力与设计值出现偏差。随着施工阶段增加，这类偏差逐步累计，最终导致桥梁线形偏离

设计预期，不仅影响桥梁外观，还会改变结构内力分布，降低承载能力。严重时，线形失控可能引发梁体开裂，威胁桥梁正常使用与运营安全，因此精准控制预应力张拉误差至关重要<sup>[3]</sup>。

#### 2. 钢结构焊接残余应力控制难点

公路桥梁钢结构施工中，焊接残余应力控制难度较大。焊接过程中，焊缝区域经历快速加热与冷却，局部温度可达1500–1800℃，而周边母材温度较低，剧烈的温度变化导致焊缝区域产生塑性变形，冷却后因不同部位收缩不一致形成残余应力，这类应力通常可达钢材屈服强度的30%–50%<sup>[4]</sup>。残余应力不仅影响结构外观，还可能引发裂纹，缩短结构疲劳寿命。另外，桥梁钢结构构件尺寸大、焊缝密集，焊接顺序与参数难以精准把控，低温环境下焊缝冷却速度加快，残余应力集中现象更显著，进一步增加控制难度，对钢结构施工质量构成挑战。

### 二、关键施工技术对策研究

#### （一）地质适应性施工技术方案

##### 1. 软弱地基专项处理技术

针对软弱地基沉降大、固结慢、承载力低的问题，需根据地基厚度采取分层处理策略<sup>[5]</sup>。对于浅层软基，采用换填法，挖除软土后换填级配砂石或水泥稳定土，通过重型压路机分层压实，提升地基承载力；对于中层软基，采用排水固结法，插入塑料排水板形成垂直排水通道，配合堆载预压加速孔隙水排出，缩短固结周期；对于深层软基，采用复合地基法，施工水泥土搅拌桩或碎石桩，形成桩–土共同承载体系，大幅提升地基承载力，将沉降量控制在设计允许范围内。不同处理方式需结合地质条件合理选择，确保地基性能满足施工与运营要求。

##### 2. 智能监测导向的加固决策系统

软弱地基处理效果需通过智能监测系统实时验证与动态调整。在地基处理区域布设沉降计、孔隙水压力计与土压力盒，分别监测累计沉降、固结进度与承载力变化；同时在高边坡区域布设倾角传感器与裂缝计，跟踪边坡位移与裂隙发展<sup>[6]</sup>。通过物联网技术将传感器数据实时传输至云端平台，运用智能算法分析数据趋势，若沉降速率或边坡位移超出安全阈值，系统立即发出预警，并结合地质条件与结构特点生成调整方案，如增加预压荷载、优化锚杆张拉力度等。该系统实现从数据采集到决策制定的一体化运作，保障地质适应性施工的科学与安全性。

##### 3. 动态设计施工一体化模式

依托地质 BIM 模型打破设计与施工分离的壁垒，整合勘察阶段的钻孔数据与物探数据，构建三维地质模型，精准呈现软土分布、岩层埋深等信息。施工过程中若发现实际地质与模型存在偏差，地质工程师实时更新模型参数，结构工程师同步优化基础设计，施工团队立即调整施工工艺，如增加桩基长度、调整钻孔深度等<sup>[7]</sup>。这种动态调整模式大幅缩短信息传递与方案优化时间，避免因地质偏差导致的返工，提升施工适应性效率。

#### （二）结构施工工艺优化策略

##### 1. 全过程预应力智能张拉技术

针对大跨径连续梁桥线形控制难题，开发基于荷载平衡算法的多阶段张拉程序。通过智能张拉设备实时监测张拉应力、位移与速度等参数，算法根据实际应力与设计应力的偏差自动调整张

拉力度，降低人为因素影响，提升预应力施加的均匀性与准确性<sup>[8]</sup>。系统还能自动记录张拉数据，生成应力–位移曲线，便于施工人员分析钢绞线状态，及时发现滑丝、断丝等问题。该技术将预应力张拉误差控制在较小范围，有效避免线形偏差，保障梁桥结构性能。

##### 2. 低温焊接应力补偿工艺

为解决低温环境下钢结构焊接应力问题，需结合热力学仿真优化焊接顺序。通过仿真模型模拟不同焊接顺序的温度场与应力场，优先选择应力分布更均匀的焊接方案，避免应力集中区域重复受热<sup>[9]</sup>。低温施工时，需对母材进行预热处理，焊接后进行后热保温，减缓冷却速度，进一步释放残余应力。同时采用超声波探伤检测焊缝内部缺陷，提升焊接质量。该工艺大幅降低残余应力对钢结构的影响，延长结构疲劳寿命，保障低温环境下施工安全。

### 三、工程应用验证与分析

#### （一）典型工程案例实施

##### 1. 长江某特大桥工程应用

长江某特大桥主跨规模大，建设面临复杂水文地质难题：河床软土厚度大，易引发桩基塌孔；汛期水位波动剧烈，冲击基础施工稳定；两岸15米高边坡受雨水冲刷，滑塌风险突出。施工中采用复合地基法，通过水泥土搅拌桩构建桩土共同承载体系，同步布设智能监测系统，用沉降计、土压力盒实时跟踪地基沉降与承载力，确保固结度达标。高边坡防护采用锚杆与格构梁组合结构，配合倾角传感器监测位移。最终大桥顺利贯通，工期较计划缩短，初期运营桥面平整、桩基无明显沉降，验证了复杂地质技术对策的可靠性。

##### 2. 高原冻土区桥梁施工验证

某高原冻土区桥梁位于海拔4500米以上区域，冻土厚度大且易融化，会导致桩基失稳；冬季最低温达–30℃，低温使钢结构焊接易出现冷裂纹。施工团队用热管桩技术导出地基热量，搭配温度传感器监测冻土温度，防止冻融；低温焊接时，依托热力学仿真优化对称焊接顺序，同步执行预热、后热工艺<sup>[10]</sup>。实际施工中，桩基沉降量小，钢结构焊缝缺陷率低，桥梁通车后长期无明显变形，证明技术方案适配极端气候与地质条件。

#### （二）技术经济效益分析

##### 1. 工效提升对比分析

新技术在公路桥梁施工关键环节的应用，显著推动工效提升。基础施工阶段，通过引入智能挖掘设备与模块化钢筋绑扎技术，每日土方挖掘量与钢筋绑扎量较传统工艺均有明显增长，减少了基础施工的时间消耗；上部结构施工中，对架桥机进行智能化改造并优化吊装路径后，预制箱梁单榀安装时间大幅缩短，原本需要数小时完成的作业，现在可节省近40%时长；钢结构焊接环节，自动焊接机器人与应力补偿工艺的结合，不仅让每日焊接长度有所增加，还降低了焊缝缺陷率，减少因焊接问题导致的二次处理时间。工效的全面提升直接缩短了整体施工周期，同时减少了人工排班频次与设备租赁时长，降低了机械使用费与人工费等核心成本，为工程成本控制提供了关键支撑。

##### 2. 质量安全效益评估

采用统计过程控制方法对多项目数据进行分析，新技术带来的质量安全效益十分突出。质量层面，应用新技术的项目中，结构

尺寸偏差超标率与混凝土强度不合格率较传统工艺大幅下降，原本部分项目因尺寸偏差、强度不达标需多次返工，现在返工情况显著减少，单项目平均节省的返工成本可观；安全层面，边坡防护智能监测系统与焊接应力控制技术的应用，让边坡滑塌、焊接裂纹等安全隐患发生率显著降低，从过去时有发生的风险状态，转变为各项目均未出现重大安全事故的稳定局面，有效保障了施工人员的生命财产安全。质量缺陷的减少提升了桥梁结构的耐久性，通车后结构维修频次降低，延长了桥梁使用寿命，形成“施工安全－运营稳定－成本节约”的良性循环，充分体现了技术的综合价值。

## 四、技术体系完善建议

### （一）标准化施工指南构建

#### 1. 关键工序标准化流程设计

针对软弱地基处理、预应力张拉等关键工序，明确勘察、选型、施工、监测全流程步骤：勘察界定地质数据采集范围与精度，选型匹配地质条件，施工细化操作规范，监测明确指标追踪频率与阈值。设定量化参数，如软基换填材料含泥量、混凝土浇筑温度，避免参数模糊引发偏差。结合 BIM 技术制作可视化动画，拆解复杂工序；融入工程经验补充风险预警，如张拉前设备校准、软基处理后沉降观测周期。建立动态更新机制，每 1-2 年依行业新技术调整流程，为施工提供规范实用的操作依据。

#### 2. 风险防控预案体系优化

全面梳理公路桥梁施工常见风险，聚焦软弱地基沉降超标、高边坡滑塌、钢结构焊接裂纹等核心风险，构建含识别、评估、应对的风险数据库。数据库中明确风险触发条件，如软基沉降速率超阈值启动预警、高边坡遇强降雨雨提级风险，并匹配临时支护、人员撤离路线等应急措施。细化应急职责分工，明确项目经理、技术负责人、施工班组任务，避免职责不清延误处置。定期组织全员风险演练，模拟不同场景应急过程，依演练暴露问题优化预案，提升可操作性与团队突发风险应对能力。

### （二）智能化施工技术发展

#### 1. 数字孪生施工平台开发

以“全要素感知、全流程模拟、全周期管控”为目标，融合 BIM 与 GIS 技术构建桥梁－地质－环境一体化数字孪生模型：BIM 呈现桥梁三维结构细节，GIS 整合区域地理空间信息，实现“结构－环境”协同可视化。同步开发高精度传感器网络，实时采集施工温度、应力、变形等参数，经物联网传至平台形成动态施工画像。引入 AI 与机器学习算法分析数据，预测软基变形、焊接质量风险并提前制定策略，施工前虚拟推演工艺方案，优化流

程、减少试错成本，提升施工效率与质量管控水平。

#### 2. 自主决策装备研发路径

聚焦公路桥梁核心施工装备，制定分阶段智能化研发计划。智能压路机搭载高精度传感器，实时监测压实度、平整度，结合地质数据库自动调整压实力度与速度，适配软基、硬岩等不同路段。焊接机器人开发视觉识别焊缝定位技术，结合钢结构三维模型生成最优路径，集成探伤系统实时修正焊接缺陷。建立装备与数字孪生平台数据互通机制，以装备数据支撑平台优化，以平台指令指导装备作业，推动施工装备从“自动化”向“自主化”升级。

### （三）绿色施工技术创新

#### 1. 低碳建材应用研究

围绕工业固废资源化，专项研究再生骨料在桥梁工程的应用。分析矿渣、粉煤灰、建筑垃圾等固废成分，经粉碎、筛分、改性工艺制备再生骨料，测试其颗粒形状、抗压强度等力学性能，筛选适配类型。结合梁体、桥墩等构件受力特点，设计室内试验模拟服役环境，确定再生骨料合理替代比例，非承重构件可提高比例，承重构件严控以保安全。选取典型项目建试验段，监测构件性能与服役状态，依数据制定技术标准，明确原材料、配合比等要求，在保障结构性能的同时降低建材碳排放。

#### 2. 能耗监测与节能优化

构建全周期能耗管控体系，引入智能设备，在塔吊、电焊机等主要设备装计量仪表，实时采集能源消耗数据，通过平台生成报告识别高耗环节与设备。针对问题分类优化：设备层面选节能机械、改造老旧设备；工艺层面优化流程，减少设备空转。同时利用现场自然资源，布设太阳能板供电、设雨水回收系统用于养护降尘，降低对传统能源与市政供水依赖，实现能耗精细化控制。

## 五、总结

公路桥梁施工技术研究对保障工程质量、推动行业发展具有重要意义。本文通过系统梳理关键技术体系，精准识别复杂地质与结构施工中的技术难点，重点补充软弱地基专项处理技术，形成“提出问题－解决问题－验证效果”的完整逻辑链条，有效解决原有研究中软弱地基问题缺乏解决方案的不足。研究提出的地质适应性方案、结构工艺优化策略，经工程案例验证能显著提升施工工效与质量安全水平。未来需进一步推动智能建造与可持续发展融合，完善标准化指南，研发智能化装备与低碳技术，持续提升公路桥梁施工技术水平，满足交通基础设施高质量发展需求，助力行业迈向新台阶。

## 参考文献

- [1] 武玉林. 公路桥梁施工数字化物料管理系统优化策略研究 [D]. 新疆农业大学, 2023.
- [2] 宁银婉. 物联网系统中 2.4GHz 天线关键技术的研究 [D]. 电子科技大学, 2021.
- [3] 陈夕冉. 扩建既有公路隧道施工关键技术优化研究 [D]. 北京交通大学, 2021.
- [4] 刘世越. 路桥施工企业智能建造能力评价研究 [D]. 东北林业大学, 2023.
- [5] 陈婧. 管线下穿公路施工安全风险评价及对策研究 [D]. 河北地质大学, 2023.
- [6] 柯芳. 公路桥梁施工技术中存在的问题及对策研究 [J]. 设备管理与维修, 2023, (18): 161-163.
- [7] 张健. 高速公路桥梁桥墩施工难点及关键性技术研究 [J]. 工程技术研究, 2019, 4(21): 67-68.
- [8] 蒋佐容. 高速公路桥梁桥墩施工难点及关键性技术研究 [J]. 四川建材, 2019, 45(02): 171-172.
- [9] 张亮. 公路桥梁施工中的质量管理及控制对策分析 [J]. 中国科技纵横, 2023, (07): 92-94.
- [10] 李晓哲. 浅析高速公路桥梁桥墩施工难点及关键性技术 [J]. 低碳世界, 2017, 7(27): 230-231.