

复杂环境下公路工程施工技术优化研究

杨彩霞

内蒙古交通集团有限公司呼和浩特分公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要:公路工程施工不可避免地遭遇各类复杂环境条件,包括高海拔严寒、深大峡谷、软土沼泽、岩溶发育区以及极端气候频发地带。这些环境因素的叠加作用显著恶化了施工装备效能、材料性能发挥和人员作业状态,使常规施工技术体系频繁失效。本文从环境复杂性的科学认知入手,系统构建了“环境识别—扰动分析—技术适配—动态调控”的施工技术优化理论框架。研究指出,复杂环境下施工技术优化的本质不是对单一工法的局部改进,而是基于环境-技术-管理耦合的系统适配设计。在此基础上,详细论述了地基处理、隧道开挖、高边坡防护、路面铺筑及施工便道布设等关键领域的技术优化方向,并提出了快速响应决策机制与技术预案体系的构建方法,为提升极端工况下的施工可靠性与工程品质提供系统化的理论指导。

关键词:公路工程;复杂环境;施工技术;技术优化;系统适配

引言

我国公路建设正在大踏步向西部山区、高寒地带、深水软基区和生态敏感区延伸,工程所面临的环境条件日趋复杂严酷。海拔 4000 米以上的高原冻土、切割剧烈的横断山脉、年温差超过 60℃ 的大陆性气候以及年降水量逾 2000 毫米的潮湿多雨地区,都对公路施工技术提出了超出常规经验的严峻挑战。在这些环境中,设备功率严重衰减、材料凝结与强度发展规律变异、边坡稳定性极度依赖于瞬息万变的气象条件,沿用平原地区的成熟工艺往往导致质量缺陷、工期延误甚至重大安全事故。然而,当前施工技术优化研究多针对单一环境因子(如单纯低温或单纯高海拔)展开,对于多种不利因素耦合作用的关注不足,更缺乏将环境条件作为主动设计变量而非被动约束条件的理论视角。事实上,复杂环境下的施工技术优化不应是遇到问题再打补丁的应急模式,而应在深刻认知环境作用机理的基础上,将技术方案与特定环境进行全要素适配。

1 复杂环境的分类表征与作用机理

1.1 复杂环境的内涵与分类

公路施工语境下的“复杂环境”不能简单等同于“恶劣自然条件”,其内涵包含三个层次:一是环境因子的苛刻程度超出常规技术体系的耐受边界;二是多种环境因子在时空上形成叠加或耦合效应,产生单一因子分析无法解释的新增约束;三是环境条件在施工窗口期内呈现高频波动,使稳态施工假设不再成立。据此可对环境进行三维分类:按地理特征分为山地峡谷型、高原

冻土型、软土水网型、岩溶喀斯特型和沙漠风积型;按气候扰动分为极寒型、酷暑型、多雨型、干旱型和强风沙型;按人为扰动分为城区密集施工型、生态脆弱区受限型和既有设施交叉影响型。多数复杂工况属于上述类别的复合形态。

1.2 环境因子对施工系统的扰动路径

环境因子对施工技术效能的影响遵循三条主要路径。其一是“装备路径”——低气压使内燃机功率下降、液压系统响应迟滞,低温使润滑油黏度剧增、蓄电池容量锐减,高温使散热系统超负荷运转,这些效应直接削弱机械装备的设计输出能力。其二是“材料路径”——环境温湿度与大气压力改变水泥水化反应动力学、沥青黏温曲线和混凝土养护强度增长规律,配合比设计参数需进行针对性修正^[1]。其三是“人体路径”——作业人员在低氧、极温或高湿环境下的持续有效工作时长显著缩短,操作失误率上升,这要求技术方案在工序编排和劳动组织上进行适应性调整。三条路径相互叠加,形成对施工效率与质量的复合钳制。

1.3 环境复杂性的量化表达与等级划分

为建立优化措施的差异化标准,需对环境复杂性进行等级化处理。可按工程所在区域多年气象数据和地形地质参数,构建“环境综合复杂度指数”,该指数由气候严酷度(温度极值、降水变率、风频)、地形障碍度(平均坡度、高差、植被覆盖度)和地质不稳定度(地震烈度、断层密度、岩溶率)三个分项加权合成。根据指数值将环境划分为轻度复杂、中度复杂、重度复杂和

极度复杂四个等级，不同等级对应不同的技术优化深度和资源配置标准，避免过度设计或应对不足。

2 施工技术优化的理论基础与目标体系

2.1 系统适配理论

复杂环境下的施工技术优化不能采用“以不变应万变”的通用方案，也不能对每一种环境变化都进行全盘否定式重新设计。其方法论根基应为系统适配理论——将施工技术体系视为由工法参数、装备组合、材料配方和劳动组织四个子系统构成的有机整体，优化的任务是在特定环境输入条件下，寻求四者之间的最佳匹配状态。适配不是平均值匹配，而是极端工况匹配：施工方案应确保在最不利环境组合（如低温伴随大风、暴雨叠加高温）出现时，各子系统仍能协同工作而不出现断裂。

2.2 优化的三层目标

复杂环境施工技术优化的目标构成金字塔结构。底层为“可靠性目标”——确保施工过程在极端环境条件下不中断、不出安全质量事故，这是基本底线。中间层为“效率目标”——在保障可靠性的前提下，最小化环境因素导致的工效折减损失，使施工进度可预测、可控制。顶层为“经济性目标”——在可靠性与效率之间找到投入产出比最优的平衡点，避免不计成本的超高规格配置。三层目标自上而下逐层支撑，优化的最终方案需在三者之间达成帕累托最优。

2.3 优化的时空尺度

优化决策需在三个时空尺度上分层展开。宏观尺度（项目整体）确定施工季节窗口、总体施工方向和大型装备选型原则；中观尺度（分项工程）确定各工艺环节的技术路线比选和主要参数取值范围；微观尺度（工序作业）确定具体的操作参数动态调整规则与应急处置切换条件。三层尺度相互嵌套，宏观决策为中微观划定约束边界，中微观的现场反馈又可能触发宏观方案的阶段性修正，形成自上而下分解与自下而上反馈的双向优化回路。

3 关键施工技术的优化策略

3.1 特殊地基处理技术优化

复杂环境下的地基处理首先需解决环境因素对加固材料与工法效果的干扰。在冻土地区，核心矛盾是施工热扰动可能导致冻土融沉，优化方向包括采用热棒制冷、碎石通风层和保温板覆盖的组合隔热措施，并严格限定施工季节在寒季冻结期，同时将机械碾压改为静

压或低频振动，减少输入热量^[2]。在软土沼泽区，优化的关键在于排水与加载速率的协同控制——根据软土固结系数和现场沉降监测数据动态调整分级加载间隔，避免急速加载导致地基失稳。对于岩溶发育区，应建立基于地质雷达连续扫描结果的注浆方案动态生成机制，将注浆孔位、深度和浆液配比与实时探测到的溶洞分布匹配，实现“边探边注、一孔一策”。

3.2 隧道与地下工程施工技术优化

复杂环境中的隧道施工面临的重大威胁来自不确定的地质突变和有害气体。技术优化的首要方向是将超前地质预报从辅助手段提升为工序节点，综合运用超前钻探、地震波反射和瞬变电磁法，构建距离掌子面 50 米范围内的三维地质风险图像，据此动态调整开挖工法（全断面、台阶法或双侧壁导坑）和支护强度。在高地应力软岩地层，优化核心是“让抗结合”——允许围岩产生可控变形以释放能量，但通过及时施作高柔性锚喷支护将变形量控制在断面收敛容许范围内，支护时机须精确到开挖后数小时之内，错过最佳支护窗口则围岩自承能力急剧丧失。对于瓦斯隧道，须将通风系统划分为日常通风与应急排险两套运行模式，日常模式按瓦斯涌出量自动调节风量，应急模式在浓度超限时自动切换并联动关闭非防爆电源。

3.3 高边坡与深路堑施工技术优化

高边坡施工的技术风险随着环境湿度与降雨强度的变化呈指数级上升。优化的核心在于将“静态支护设计”转变为“动态监测反馈设计”——在边坡开挖过程中，于关键断面布设深层位移测斜仪、孔隙水压力计和锚索应力计，监测数据实时回传并自动与设计稳定系数进行对比计算。当监测曲线出现突变拐点或持续蠕变加速时，触发支护方案的在线增补设计，包括增加预应力锚索数量、加密注浆孔或增设抗滑桩^[3]。同时在坡面防护上，摒弃单一的浆砌片石护坡，采用柔性防护网与生态植被相结合的分层防护结构，利用植被根系增强浅层稳定性的同时降低雨水冲刷导致的表层剥落。施工顺序上严格执行“开挖一级、防护一级、绿化一级”的时序刚性约束，不得为抢进度而将多级开挖与防护脱节。

3.4 路面结构层施工的技术优化

路面施工对环境敏感性最高，其优化核心是温湿度匹配。在高温季节进行沥青面层施工时，应调整拌合温度至合理下限、增加碾压设备台数并缩短碾压区段长度，确保在混合料温度降至有效压实温度下限之前完成全部碾压遍数；在低温季节，则需采用添加温拌剂、

覆盖保温毡以及选择日照充足的昼间时段施工等组合措施。对于水泥稳定碎石基层,养护条件是决定最终强度的关键——在蒸发量大的环境中应铺设节水保湿养护膜并增加早期喷雾次数,在低温环境中则需要覆盖保温层并适当延长养护龄期后方可进行下一工序^[4]。更为重要的是,路面施工应放弃固定的施工日历计划,转而采用以现场实测温度、湿度为依据的“条件触发式”作业窗口管理制度,设置明确的允许施工气象参数范围,不达标即停工等待,杜绝条件不满足时的冒险作业。

3.5 施工便道与临建设施的适应性技术

施工便道在复杂环境中往往不再是临时辅助设施,而成为制约全线施工进度的瓶颈。优化的方向是提高便道建设标准并建立分级维护体系:将连接国道与主体工程的主干便道按四级公路标准建设并硬化路面,确保大型设备全年通行;次干便道则采用泥结碎石路面加设排水横坡,雨后4小时内恢复通行。在季节性冻融区,便道路基应换填非冻胀性材料且抬高路拱,并在每年开冻前进行专项普查加固。此外,拌合站与预制场的选址应进行多方案微气候比选,优先选择背风向阳、排水通畅且地质稳定的位置,避免布置于山谷风口或冲沟下游。

4 技术优化的动态调控与保障机制

4.1 快速响应决策机制

复杂环境的特点之一是不可预见的局部环境突变(如突发暴雨、骤降气温、局部塌方)。因此技术优化体系中必须嵌入快速响应决策机制。该机制的核心是建立“异常识别—预案匹配—授权执行—效果确认”的四步流程。异常识别由现场监测系统自动完成并将信息推送给技术负责人;预案匹配在预编制的环境突变应对方案库中进行检索;授权执行则通过预先授予现场技术团队的有限自主决策权来实现,避免逐级汇报延误时机;效果确认要求在处置措施实施后规定时间内反馈验证数据,以判断是否需要进一步加码或撤回。

4.2 技术预案的系统编制

预案库是快速响应机制的内容基础。针对每一种可能出现的环境异常场景(持续暴雨致边坡饱和、寒流突袭致路面摊铺中断、大风致高空吊装不安全等),预先制定分级技术预案。预案的颗粒度应达到工序级,包括设备切换清单、材料替代方案、工序调整顺序和人员重新分工方案。预案的生命力在于定期演练与更新——每个施工季度至少组织一次关键场景的桌面推演,验证预

案的可行性和各岗位人员的熟悉程度,根据演练暴露的问题及时修订预案文本,确保预案不成为束之高阁的形式文本。

4.3 技术交底与现场执行保障

再优化的技术方案若不能传递到作业层面并正确执行,则毫无价值。复杂环境下的技术交底应区分常规交底与环境专项交底——常规交底涵盖工艺标准和验收要求,环境专项交底则侧重当日本地气象条件、已启动的预案措施及作业人员应特别注意的异常状态辨识特征。交底方式应采用图文并茂的作业指导卡,将关键参数和操作禁忌用可视化方式呈现,减少纯文字描述的理解歧义。现场执行保障依赖于建立“技术员驻守+质检员巡检”的双重监督机制,技术员随作业班组同步在场,随时解答执行中的疑问并纠偏,质检员则按工序节点进行独立抽检验证。

5 结语

复杂环境对公路工程施工技术提出的挑战绝非单一工法改良所能应对,其本质要求是将环境因素从施工的外部约束转化为技术方案的内部设计变量。本文系统构建了以系统适配理论为骨架、以三层目标体系和三档时空尺度为经纬的施工技术优化框架,并围绕地基处理、隧道开挖、边坡防护、路面铺筑和施工便道等关键领域,分别论述了面向具体环境扰动的技术优化方向。贯穿始终的核心方法论是“以动态监测驱动动态设计,以预案预控应对环境突变”——将施工技术方案从一次性设定转变为持续迭代、与环境实时交互的自适应系统。这一转变对企业的技术管理能力和现场执行素质提出了更高要求,但却是公路建设向更广泛地理区域延伸的必由之路。

参考文献

- [1] 马洪亮,王建国,陈永志.高海拔地区公路施工机械效能衰减规律与补偿策略[J].筑路机械与施工机械化,2023,40(3):22-29.
- [2] 刘永健,赵新宇,王海峰.高寒冻土区公路路基稳定性的热力耦合分析及工程对策[J].中国公路学报,2022,35(8):112-122.
- [3] 孙国栋,杨晓明,周丽萍.多雨山区高边坡施工期稳定性实时评估方法[J].岩土力学,2025,46(1):251-260.
- [4] 黄海涛,陈晓阳,李志刚.沥青路面低温施工关键技术参数优化试验研究[J].公路工程,2024,49(3):78-86.