

公路工程施工质量精细化管理技术与实践研究

王 晨

和田开元建筑安装工程有限责任公司 新疆 昆玉 848116

【摘要】：随着高速公路路网从规模扩张转变为性能竞争，cm级平整度、mm级构造深度和毫克级污染物排放已成为衡量标准，传统“事后检验，经验修正”的模式已无法满足高质量建设的要求。当前桥梁隧道占比不断提升、高性能材料不断迭代、车路协同等对几何精度要求越来越高，运营阶段质量波动呈指数级增长，早期轻微离析就可能演变成桥头跳车、车辙壅包和智能感知失效等级联病害。将施工质量控制提升至“微米级配料，毫秒级响应”粒度，亟需建立“设计参数-工艺窗口-服役性能”的精细化通道，将隐蔽工程透明化，量化经验指标，达到“零缺陷移交，低维护负担”的目的。

【关键词】：公路工程；施工质量；精细化管理；技术与实践

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.064

精细化管理不是简单地加密检测频次，而是从系统视角重构“人-机-料-法-环”耦合关系，利用数字孪生、边缘计算和智能装备等技术，将质量数据嵌入各工序自反馈环路。路工程施工质量精细化管理技术与实践核心是将传统的终端验收转换成工艺能力指标，将物料基因、能谱线与时间空间坐标进行关联，形成可追踪、可预测、可优化的质量数字化进程。同时，打破设计-施工-监理-运营之间的信息孤岛，实现质量信息的双向流通，实现从“合格控制”到“波动抑制”的范式转换。

1 公路工程施工质量精细化管理核心特征与技术体系

1.1 核心特征

“精准化、全过程、闭环、数据化”是公路施工质量精细化管理的重要特征。精细化体现在管控目标的量化和管控参数的精细化上，针对不同的工程类型（高速公路、乡村公路）、不同结构部位（路基、路面、桥梁）分别制定不同的管控标准，如高速公路沥青路面压实度偏差控制在 $\pm 1\%$ 以内，路基压实沉降差不超过3mm。整个过程涵盖施工准备、原材料进场、关键工序执行、竣工验收等各个阶段，打破传统的“重成果轻过程”的模式，达到从源头到终端的整个链条控制。

闭环管控以“规划-实施-监控-反馈-优化”为主线，实现对质量问题的实时发现、快速响应和全面整改，保证管控措施的落地见效。以智能监控设备和信息管理平台为依托，将人-机-料-法-环等要素转化为可量化的数据，对质量状况进行可视化展示和溯源分析，为管控决策提供科学依据^[1]。

1.2 技术体系构成

从感知层、传输层和应用层三个层面，构建精细化管理技术体系。感知层以压实度传感器、含水量检测仪、钢筋保护层厚度测定仪、边坡位移监测仪等智能传感装置为核心，对路基压实过程中的压实次数、压实速度和压实度进行实时监测，采集每秒1次。

传输层采用5G、LoRa和物联网网关等技术，建立稳定、高效的数据传输网络，保证监测数据、施工图像、工艺记录等信息在传输时延不超过500ms，数据准确率 $\geq 99.5\%$ 。应用层包括质量控制平台、数据分析系统和预警响应模块，具有数据存储，统计分析，阈值预警，责任追溯等功能，可以对质量指标进行动态监测，对异常情况进行快速处理。

2 公路工程施工质量精细化管理关键技术应用

2.1 原材料质量精细化管理技术

在源头筛选方面，采取“供应商准入+原材料溯源”机制，建立合格供应商名单；对核心原材料，如砂石、水泥、沥青、钢筋等，实行“产地抽检+厂家送检”双重验证，其中，对沥青材料的针入度、延度、软化点等12项指标进行检测，合格率需达到100%方可准入。

进场检验依托智能检测设备，实现对原料品质的快速、准确判断。用激光粒度仪对砂石料进行粒度分析，误差在2%以内。用超声波探伤仪对钢筋的机械性能和内部缺陷进行检测，测试速度可达3m/min，水泥强度试验用全自动抗压强度试验机测定，并于24小时内出具检测报告^[2]。同时，利用射频识别（RFID）

技术对原材料进行标识,记录原材料的进场时间、批次、检验结果、使用部位等信息,实现对原材料的全过程可追溯。

对原材料的储存和使用过程进行监控,如水泥储存时的含水量要控制在0.5%以下,沥青的储存温度要保持在130-150°C之间,并用温度和湿度传感器对其进行实时监控,如果出现异常,就会发出警报。

2.2 路基工程施工精细化管控技术

路基施工质量的好坏直接关系到高速公路的整体稳定,因此,精细控制的重点是填料的选取、压实操作和边坡防护。按照“分级筛选+适应性检验”的原则,根据路基不同层次(上、下)要求,选用级配砂石粒径 $\leq 10\text{cm}$,液限 $\leq 50\%$,塑性指数 ≤ 26 的粘性土,进行压实前对填料含水率进行检测,以保证其在最佳含水率 $\pm 2\%$ 以内。

采用“智能化压实技术+全程监控”的方法,在压路机上安装GPS定位系统、压实度传感器和振动频率监测仪,实时收集压实次数 ≥ 6 遍、压实速度2-4km/h、压实度等数据,并将压实轨迹和质量指标实时显示出来,不符合要求的区域自动标注并提示补压。

边坡防护工程的精细化控制,主要是针对边坡的坡度控制和护坡施工质量两个方面进行的。利用无人机航测+全站仪定位技术对边坡开挖坡度进行实时监控,误差小于 $\pm 0.5^\circ$,在锚杆框架梁保护施工中,采用钢筋定位仪保证锚杆间距不超过5cm,用超声波检测仪检测灌浆密度,密实度 $\geq 95\%$ ^[3]。边坡排水系统施工要求排水坡度 $\geq 2\%$,排水管接口密封性经水压试验验证,渗透率 $\leq 0.05\text{L}/(\text{min}\cdot\text{m})$ 。

2.3 路面工程施工精细化管控技术

在沥青路面施工过程中,采用智能化拌和站对拌和温度(150-170°C)、油石比($\pm 0.3\%$)、骨料级配进行实时监控,以保证混合料品质的均匀性。摊铺采用摊铺机和压路机协同控制,采用红外线测温仪和厚度探测器对摊铺温度($\geq 130^\circ\text{C}$)和厚度(偏差 $\pm 5\text{mm}$)进行实时监控,采用自动找平系统对平整度进行控制,使其平整度偏差 $\sigma \leq 1.2\text{mm}/3\text{m}$ 。压实作业采取“初压-复压-终压”三级工艺,初压温度 $\geq 120^\circ\text{C}$,复压采用振动压路机,振动频率30-50Hz,终压采用光轮压路机,保证压实度 $\geq 96\%$ (高速公路)。

水泥砼路面施工的重点是配合比设计、浇筑技术和养护质量的控制。通过正交实验优选出水灰比为0.4~0.5、坍落度偏差 $\pm 10\text{mm}$ 的配合比,采用插入式振捣器配合平板振捣器进行浇筑,振捣时间控制在

20~30秒之间,防止漏振、过振。在养护过程中,通过对路面湿度($\geq 90\%$)和温度(5-35°C)进行实时监控,并在14天内进行养护,保证混凝土的强度达到标准^[4]。

2.4 质量监测与预警技术

在路基施工阶段,设置沉降观测桩和测斜管,路面施工阶段安装平整度检测仪和压实度传感器,桥梁施工阶段安装应力应变传感器,实现关键指标连续监测。

项目以大数据平台为基础,利用统计分析和趋势预测等方法,对监测数据进行深度处理,如采用回归分析法建立路基沉降随施工工期变化的模型,并对后期沉降趋势进行预测。当路面压实系数小于95%,路基沉降率大于5mm/天时,对异常值进行阈值对比,对异常值进行识别^[5]。

智能预警采取“分级响应”的方式,按质量隐患的严重性将其划分为一般、重大和紧急三个等级。二级预警(如原料含水量轻度超标),及时通知施工团队进行整改,重大预警(如路面压实度不达标),启动专项检查,暂停相关工序的施工^[6]。突发事件(如边坡位移率突然增加)触发应急响应,组织人员疏散和抢险救援,保证施工安全。

3 案例分析

3.1 工程概况

某高速公路全长42.8km,设计时速120km,路面宽27m,其中路基38.6km,桥梁6座(4.2km),隧道1座(总长度1.5km)。该工程穿越的山地和平原地形复杂(粉质粘土、风化岩、砂砾层),施工难度大,质量控制难度大。项目以精细化管控技术为核心,围绕路基压实、沥青路面施工、桥梁桩基础浇筑等关键环节,构建“智能监控+平台管控+闭环整改”的管控系统。

3.2 精细化管控实施过程

(1)原材料管控实践:项目制定原材料的精细化控制流程,对核心原材料如沥青、水泥、钢筋、砂石等进行全链条的控制。项目以70#道路石油沥青为研究对象,在进场前对其针入度(60-80mm),延度($\geq 100\text{cm}$),软化点($\geq 46^\circ\text{C}$)进行测试,并通过RFID标签对原材料的产地、批次和检测结果进行记录,从而实现全过程的可追溯性。砂石原料由当地合格采石场供应,进场后经激光粒度仪检验,级配曲线偏差在5%以内,含泥量在1%以内,钢筋选用HRB400E,进场后用超声波探伤仪对其进行机械性能测试。在该项目实施过程中,进场原材料126批次,检验合格率为

100%，未发现使用不合格物料。

(2) 路基施工精细化管控：采用智能压实系统进行路基施工，在压路机上配置 GPS 定位模块、紧实度传感器和数据传输终端，实现对压实遍数、压实速度、压实度等数据的实时采集，并将其上传到监控平台。在施工过程中，对填料的含水量进行严格控制，并用便携式水分检测仪对其进行现场测试，以保证其在最佳含水量（12%~15%）范围内。针对山区公路高边坡工程，利用无人机测风技术，每周监测边坡坡率，结合斜管监测边坡位移，位移速率控制在 2mm/天以内。路基压实后，用连续沉降计测定路基沉降，共设监测点 320 个，沉降差值均在 3mm 以内，压实度达标率为 100%。

(3) 沥青路面施工精细化管控：智能拌和站与摊铺机协同工作，对混合料的温度、油石比和级配进行实时监测，当发现数据出现异常时，会自动停机调整，摊铺机配有自动找平装置和厚度检测仪，摊铺厚度控制在 10cm（下层），中间层 6cm，上层 4cm，偏差在 ±5mm 以内。压实过程采用“初压（钢轮压路机、温度 120~130℃）—复压（光轮压路机、温度 80~100℃）—压实（80~100℃）”的压实工艺，对压实度进行实时监测，采用核密仪对压实度进行现场检测，压实度均 ≥96%。采用 3m 尺测量路面平整度，标准偏差 $\sigma \leq 1.0\text{mm}$ ，符合高速公路技术要求。

(4) 质量监测预警实践：通过对路基沉降、路面压实、桥梁应力等监测数据的融合，构建智能监测预警平台，实现质量状态的可视化展示。在桥梁桩基施工过程中，通过在钢筋笼内布置应力-应变传感器，实时监测混凝土的密实度和受力状况，共对 28 根桩进行了监测，未发现断桩、夹泥等质量问题。在隧道施工期间，利用围岩收敛仪对隧道变形进行监测，控制收敛速率 $\leq 0.5\text{mm}/\text{天}$ ，并利用环境监测设备对隧道内温、湿、尘等环境参数进行实时监测，确保施工质量和安

全。在工程建设过程中，共发布 36 次一般预警和 8 次重大预警，全部闭环整改，无质量隐患发生。

3.3 应用成效

采用精细化控制技术，可以提高工程质量，路基压实度控制指标由传统控制的 92% 提高到 100%，标准偏差 $\sigma \leq 1.0\text{mm}$ ，比规范要求提高 20%，该桥桩基质量合格率为 100%，围岩变形得到较好的控制。项目建成通车一年后，经质量检验，路面破损率 $\leq 0.1\%$ ，路基沉降 $\leq 5\text{mm}$ ，边坡稳定性良好，无滑移，各项质量指标均超过传统控制工程。

同时，精细化管控降低返工成本和资源消耗，项目返工率由传统模式的 8% 下降到 1.2%，节省项目投资 380 多万元，提高施工效率 15%，达到质量、效率和效益的协同提高（应用前后数据对比如表 1）。

表 1 应用前后数据对比

管控指标	传统管控	精细化管控	提升幅度
压实度达标率	92%	100%	8.7%
路面平整度 σ	$\leq 1.5\text{mm}$	$\leq 1.0\text{mm}$	33.3%
返工率	8%	1.2%	85%

4 结语

综上所述，公路工程质量精细化管控不只是交交时刻的“数字竞赛”，更是对全生命周期成本和出行体验进行重构。将隐藏工程转化为可计算的、可预测的、可优化的数字化资产，将质量波动扼杀于萌芽状态，为无人驾驶、车路协同、低碳养护等领域提供 mm 级精度物理接口。未来，通过“材料基因库-智能设备-碳足迹评估”的深度耦合，实现“自我感知、自我决策、自我修复”的闭环生态体系，促进公路基础设施向“韧性、绿色和可持续”方向发展，成为我国交通强国战略不可或缺的底层支撑。

参考文献：

- [1] 李丽萍.公路工程交通安全设施的施工质量管控体系研究[J].科技创新与生产力,2023,44(07):68-71.
- [2] 吴非,申铁军.山西公路工程质量管理与关键工序控制研究[J].四川建材,2023,49(05):209-211.
- [3] 冀文俊.公路工程施工过程中的质量控制与管理[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(10):103-105.
- [4] 路正富.关于公路工程施工质量控制与管理问题研究[J].质量与市场,2022,(10):133-135.
- [5] 贾雄.公路工程施工质量管理与控制重点分析[J].工程技术研究,2022,7(06):151-152.
- [6] 陆海波.公路工程施工质量管理与控制重点分析[J].运输经理世界,2021,(36):37-39.