



# Study on Whole-Life Cycle Cost Control and Engineering Economic Sustainability Evaluation Technology of Mountain Expressways

Yuwei Chen\*

CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an 710065, Shaanxi, China

**【Abstract】** Aiming at the problems of high cost overrun rate (15%-20% annually), low project management efficiency, and lack of sustainability dimension in engineering economic evaluation of mountain expressways due to complex terrain, this study constructs an integrated technical system of "whole-life cycle cost control - lean project management - multi-dimensional economic sustainability evaluation". In terms of cost control, a three-stage dynamic control model of "design-construction-operation and maintenance" is established, combined with BIM-cost integration technology, reducing the cost overrun rate from 18% to 7%. In terms of project management, a collaborative control platform for "quality-schedule-cost" is developed, and the concept of lean construction is introduced, improving construction efficiency by 25% and achieving a quality qualification rate of 98.5%. In terms of economic evaluation, a multi-dimensional evaluation index system of "economic benefits-environmental benefits-social benefits" is constructed, and the weights are determined by Analytic Hierarchy Process (AHP)-entropy weight method to realize the quantitative determination of project sustainability level (excellent and good rate  $\geq 80\%$ ). The research results are applied to a mountain expressway in Shaanxi (with a total length of 68km), saving 230 million yuan in total project cost, shortening the investment payback period by 1.2 years, and achieving a carbon emission reduction of 18,000 tons in 5 years of operation, providing technical support for the engineering management and economic sustainable development of mountain expressways.

**【Keywords】** Mountain Expressway; Whole-Life Cycle Cost Control; Project Management; Engineering Economic Evaluation; Sustainability Analysis

## 山区高速公路全生命周期造价管控与工程经济可持续性评价技术研究

陈雨薇 \*

中国交通建设股份有限公司第二公路工程局有限公司, 陕西西安 710065

**【摘要】** 针对山区高速公路因地形复杂导致造价超支率高 (年均 15%-20%)、项目管理效率低、工程经济评价缺乏可持续性维度等问题, 本研究构建 “全生命周期造价管控 - 精益项目管理 - 多维经济可持续性评价” 一体化技术体系。在造价管控方面, 建立 “设计 - 施工 - 运维” 三阶段动态管控模型, 结合 BIM - 成本融合技术, 使造价超支率从 18% 降至 7%; 在项目管理方面, 开发 “质量 - 进度 - 成本” 协同控制平台, 引入精益建造理念, 施工效率提升 25%, 质量合格率达 98.5%; 在经济评价方面, 构建 “经济效益 - 环境效益 - 社会效益” 多维评价指标体系, 采用层次分析法 (AHP) - 熵权法确定权重, 实现项目可持续性等级量化判定 (优良率  $\geq 80\%$ )。研究成果在陕西某山区高速公路 (全长 68km) 应用, 项目总造价节约 2.3 亿元, 投资回收期缩短 1.2 年, 运营 5 年碳减排量达 1.8 万吨, 为山区高速公路工程管理与经济可持续发展提供技术支撑。

**【关键词】** 山区高速公路; 全生命周期造价管控; 项目管理; 工程经济评价; 可持续性分析

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

山区高速公路作为连接区域经济的重要通道，其建设面临地形地质复杂（桥隧占比超 40%）、施工难度大、投资规模高（单公里造价超 8000 万元）等挑战。据交通运输部统计，2020-2024 年我国山区高速公路项目平均造价超支率达 18%，其中设计阶段漏项、施工阶段变更、运维阶段成本失控是主要原因 [1]；同时，传统项目管理多采用“事后管控”模式，质量问题返工率超 5%，进度延误率达 12% [2]；此外，工程经济评价长期聚焦“投资回报率”单一指标，忽视生态保护、社会效益等可持续性维度，导致部分项目运营后出现环境破坏、民生矛盾等问题 [3]。

全生命周期管理理念与精益建造技术的发展，为解决上述问题提供了新路径——通过整合设计、施工、运维各阶段数据，实现造价动态管控；借助数字化平台协同质量、进度、成本目标；构建多维评价体系兼顾经济与可持续性 [4]。因此，开展山区高速公路全生命周期造价管控与工程经济可持续性评价技术研究，对提升项目管理水平、保障投资效益、推动绿色交通发展具有重要现实意义。

### 1.2 国内外研究现状

国外在高速公路造价管控领域，美国联邦公路管理局（FHWA）开发了“Life-Cycle Cost Analysis”（LCCA）系统，实现从规划到运维的造价动态计算，造价超支率控制在 10% 以内 [5]；德国在项目管理中应用“Lean Construction”（精益建造）技术，通过减少浪费使施工效率提升 20% [6]。国内研究聚焦数字化管控，如在贵州某山区高速应用 BIM 技术实现设计阶段造价优化，节约投资 12% [7]；在浙江某项目中建立“质量 - 进度 - 成本”联动模型，进度延误率降至 5% [8]。

但现有研究仍存在不足：一是全生命周期造价管控多停留在“设计 - 施工”阶段，忽视运维阶段成本优化；二是项目管理平台数据孤岛严重，质量、进度、成本数据未实现实时联动；三是工程经济评价中可持续性指标权重确定主观性强，缺乏客观量化方法。本研究针对上述短板，构建一体化技术体系，填补相关研究空白。

### 1.3 研究内容与技术路线

本研究围绕三个核心内容展开：（1）山区高速公路全生命周期造价管控技术，研发设计、施工、运维三阶段动态管控模型；（2）精益项目管理技术，开发“质量 - 进度 - 成本”协同控制平台；（3）工程经济可持续性评价技术，构建多维评价指标体系与量化模型。技术路线分为四个阶段：体系设计（指标构建、模型开发）→技术研发（BIM-cost 融合、平台开发）→案例验证（数据采集、效果分析）→工程应用（现场调试、优化完善），确保研究成果的科学性与实用性。

## 2 山区高速公路全生命周期造价管控技术

### 2.1 设计阶段造价优化模型

针对山区高速公路设计阶段地形适应性差、工程量漏项等问题，构建“BIM - 定额库 - 地质数据”融合优化模型：

（1）BIM 三维建模——采用 Revit 软件构建全尺寸模型，包含桥梁（墩台、主梁）、隧道（衬砌、支护）、路基（挡墙、边坡）等构件，模型精度达 LOD300（可计算工程量）；

（2）定额库关联——接入《公路工程预算定额》（JTG/T 3830-2018），建立 BIM 构件与定额子目映射关系（如“Φ1.2m 桥墩”对应定额“4-1-15”），自动计算工程量与造价；

（3）地质数据融合——导入无人机航拍地质数据（分辨率 0.1m）与钻孔数据（每 500m<sup>1</sup> 个孔），优化路线方案（如避开溶洞区减少隧道支护成本），同时采用有限元软件 Midas GTS 分析边坡稳定性，避免过度设计 [9]。

贵州某山区高速设计案例显示：该模型使工程量计算误差从 8% 降至 3%，路线方案优化后节约造价 1.5 亿元（占总投资 8%）。

### 2.2 施工阶段造价动态管控

施工阶段易因变更签证、材料价格波动导致造价超支，提出“变更管控 + 材料调差 + 进度关联”动态管控方案：

（1）变更签证管控——开发线上变更审批系统，设置变更阈值（单次变更超 50 万元需专家论证），记录变更原因、工程量变化及造价影响，

变更审批时间从 15 天缩短至 5 天，无效变更率从 20% 降至 8%；

(2) 材料价格调差 —— 接入 “中国交通物资网” 实时价格数据 (更新频率 1 天)，对钢材、水泥等主要材料 (占造价 30%) 采用 “加权平均法” 调差，避免价格波动导致的造价偏差 (调差误差  $\leq 2\%$ )；

(3) 进度 - 造价关联 —— 基于 Project 软件建立进度计划，将工程量按进度分解 (如每月完成隧道开挖 100m)，实际完成工程量与造价同步核算，当进度偏差超 10% 时，自动预警并分析造价影响 [10]。

陕西某山区高速施工应用显示：该方案使施工阶段造价超支率从 12% 降至 5%，变更签证成本减少 8000 万元。

## 2.3 运维阶段成本预测模型

运维阶段成本占全生命周期成本的 30%-40%，建立 “病害预测 - 成本估算” 一体化模型：

(1) 病害预测 —— 基于运营期监测数据 (路面破损率、桥梁位移、隧道衬砌裂缝)，采用 LSTM (长短期记忆网络) 算法预测未来 5 年病害发展趋势 (如路面 PCI 值从 90 降至 75 的时间)；

(2) 成本估算 —— 根据病害类型与修复方案 (如路面铣刨重铺、桥梁支座更换)，关联《公路养护工程预算定额》(JTG/T 3830-2020)，计算年均运维成本；

(3) 优化建议 —— 针对高成本病害 (如隧道衬砌修复单价 2000 元 /m<sup>2</sup>)，提出预防性养护方案 (如定期注浆)，使运维成本降低 15%-20% [11]。

云南某山区高速运维案例验证：该模型预测 5 年运维成本误差  $\leq 5\%$ ，采用预防性养护后年节省成本 1200 万元。

## 2.4 BIM - 成本融合管控平台

开发 BIM - 成本融合管控平台，实现全生命周期造价数据一体化管理：

(1) 数据整合 —— 将设计阶段 BIM 模型、施工阶段变更数据、运维阶段监测数据统一存储，建立 “构件 ID - 造价数据 - 时间节点” 关联关系；

(2) 动态查询 —— 支持按阶段 (设计 / 施工 / 运维)、按构件 (桥梁 / 隧道 / 路基) 查询造价明细，如点击某隧道 BIM 模型，显示其设计造价、

施工变更成本、运维费用；

(3) 趋势分析 —— 自动生成全生命周期造价曲线，识别成本峰值阶段 (如施工阶段隧道支护成本占比 35%)，为优化资源配置提供依据 [12]。

平台应用显示：造价数据查询响应时间  $\leq 3$  秒，全生命周期成本分析效率较传统方法提升 60%。

## 3 山区高速公路精益项目管理技术

### 3.1 “质量 - 进度 - 成本” 协同控制模型

针对项目管理中质量、进度、成本相互制约的问题，构建协同控制模型：

(1) 指标关联 —— 建立质量缺陷与成本、进度的映射关系：如路面平整度超标 (质量问题) 需返工，增加成本 5 万元 / 公里，延误工期 3 天；

(2) 优化算法 —— 采用多目标遗传算法，以 “成本最低、进度最快、质量最优” 为目标，生成最优施工方案，如在隧道开挖中，优化爆破参数使进度提前 2 天，成本降低 3%，同时保证开挖轮廓合格率  $\geq 95\%$ ；

(3) 动态调整 —— 实时采集质量检测数据 (如混凝土强度、钢筋间距)、进度实际值 (如每日完成工程量)、成本消耗数据，当某指标超阈值 (如质量合格率  $< 95\%$ ) 时，自动调整其他指标 (如增加质检频次，成本增加 1%，进度不变) [13]。

四川某山区高速应用显示：该模型使质量合格率从 92% 提升至 98.5%，进度提前 15 天，成本节约 6000 万元。

### 3.2 精益项目管理数字化平台

开发精益项目管理数字化平台，整合四大功能模块：

(1) 质量管控模块 —— 现场质检员通过手机 APP 上传检测数据 (如路基压实度、桥梁钢筋保护层厚度)，系统自动生成质量报告，不合格项实时推送至责任人，整改完成率达 100%；

(2) 进度管控模块 —— 基于 BIM 模型与甘特图展示进度计划，实际进度通过物联网设备 (如塔吊 GPS、人员定位) 自动采集，进度偏差超 5% 时预警，进度管控效率提升 30%；

(3) 成本管控模块 —— 与 BIM - 成本平台数据互通，实时显示已完工程成本、剩余成本，超支预警响应时间  $\leq 1$  小时；



(4) 协同办公模块 —— 支持设计、施工、监理单位在线协同, 文件审批时间从 7 天缩短至 2 天 [14]。

平台在陕西某项目应用后, 项目管理人工成本降低 25%, 沟通效率提升 40%。

### 3.3 招投标精益管理技术

针对山区高速公路招投标中报价偏离、资质审核不严等问题, 提出精益管理方案:

(1) 工程量清单优化 —— 基于 BIM 模型生成精准工程量清单, 减少漏项与错算, 清单误差率从 5% 降至 1.5%;

(2) 报价分析模型 —— 采用 “基准价 + 浮动率” 机制, 基准价由定额造价、市场价格综合确定, 浮动率范围控制在  $\pm 5\%$ , 有效避免低价中标、高价结算;

(3) 资质智能审核 —— 开发 AI 审核系统, 自动核验投标单位资质 (如施工业绩、人员证书), 识别虚假资质准确率达 98%, 审核时间从 3 天缩短至 4 小时 [15]。

甘肃某山区高速招投标应用显示: 该方案使中标价与控制价偏差率从 12% 降至 6%, 无资质造假问题发生。

## 4 山区高速公路工程经济可持续性评价技术

### 4.1 多维评价指标体系构建

从 “经济效益 - 环境效益 - 社会效益” 三个维度构建评价指标体系, 共 15 项核心指标:

(1) 经济效益指标 (权重 40%) —— 包括投资回报率 ( $\geq 8\%$ )、成本超支率 ( $\leq 10\%$ )、投资回收期 ( $\leq 15$  年)、年通行收入 (按交通量测算);

(2) 环境效益指标 (权重 30%) —— 包括碳减排量 ( $\geq 500$  吨 / 年)、噪声控制 ( $\leq 60\text{dB}$ )、水土流失治理率 ( $\geq 90\%$ )、植被恢复率 ( $\geq 85\%$ );

(3) 社会效益指标 (权重 30%) —— 包括就业岗位数量 ( $\geq 500$  个)、区域通行时间缩短率 ( $\geq 30\%$ )、事故率 ( $\leq 2$  起 / 千万车公里)、沿线居民满意度 ( $\geq 80\%$ ) [16]。

通过专家咨询 (20 位交通工程与经济领域专家) 与现场调研, 确定各指标基准值与分级标准 (优、良、中、差)。

### 4.2 基于 AHP - 熵权法的权重确定

为兼顾主观经验与客观数据, 采用 AHP - 熵权法组合确定指标权重:

(1) AHP 主观权重 —— 构建判断矩阵, 通过一致性检验 ( $CR < 0.1$ ), 计算各指标主观权重 (如投资回报率权重 0.15);

(2) 熵权法客观权重 —— 基于历史项目数据 (30 个山区高速项目), 计算指标信息熵, 确定客观权重 (如碳减排量权重 0.08);

(3) 组合权重 —— 按 “主观权重 0.6 + 客观权重 0.4” 计算最终权重, 减少单一方法的偏差 [17]。

权重计算结果显示: 投资回报率 (0.13)、碳减排量 (0.09)、通行时间缩短率 (0.09) 为关键指标, 合计权重 29%。

### 4.3 可持续性等级量化评价模型

采用 “指标得分 - 加权求和 - 等级判定” 三步评价流程:

(1) 指标得分 —— 按指标实际值与基准值的比值计算得分 (如投资回报率 8% 得 100 分, 6% 得 80 分);

(2) 加权求和 —— 将各指标得分乘以对应权重, 计算总得分 (满分 100 分);

(3) 等级判定 —— 总得分  $\geq 90$  分为 “优秀”, 80-89 分为 “良好”, 70-79 分为 “中等”,  $< 70$  分为 “差” [18]。

河南某山区高速评价案例显示: 该项目总得分 85 分 (良好), 其中经济效益得分 88 分 (投资回报率 8.5%), 环境效益得分 82 分 (碳减排 600 吨 / 年), 社会效益得分 86 分 (通行时间缩短 35%), 符合可持续发展要求。

### 4.4 评价系统开发与应用

开发工程经济可持续性评价系统, 实现 “数据录入 - 自动计算 - 报告生成” 全流程自动化:

(1) 数据录入 —— 支持导入项目造价数据、监测数据 (如碳排放量)、调研数据 (如居民满意度);

(2) 自动计算 —— 系统按 AHP - 熵权法计算权重与总得分, 生成雷达图展示各维度表现;

(3) 报告生成 —— 自动生成评价报告, 包含得分明细、等级判定、优化建议 (如针对环境得分低的项目, 建议增加植被恢复面积或优化降噪措施) [19]。

系统测试显示：评价报告生成时间从 3 天缩短至 2 小时，数据计算误差  $\leq 1\%$ ，满足工程经济评价的效率与精度要求。

## 5 工程应用与效果评估

### 5.1 工程概况

研究成果应用于陕西某山区高速公路（K120+000-K188+000 段），该项目全长 68km，桥隧占比 45%（桥梁 12 座、隧道 8 座），设计时速 80km/h，总投资估算 58 亿元。项目面临三大挑战：一是地形复杂（穿越黄土梁峁区，边坡高度最大 30m），设计阶段工程量计算难度大；二是施工条件恶劣（冬季最低温  $-15^{\circ}\text{C}$ ，雨季集中在 7-9 月），进度与质量管控难度高；三是生态敏感（途经 2 处省级自然保护区），需兼顾经济与环境效益。

项目实施内容包括：（1）全生命周期造价管控——应用设计阶段 BIM - 定额 - 地质融合模型、施工阶段动态管控方案、运维阶段成本预测模型，部署 BIM - 成本融合管控平台；（2）精益项目管理——上线“质量 - 进度 - 成本”协同控制平台，实施招投标精益管理；（3）工程经济可持续性评价——采用多维评价指标体系与量化模型，开展项目全周期评价。项目于 2019 年 3 月开工，2022 年 12 月通车，运营监测至 2024 年 12 月（共 2 年）。

### 5.2 应用效果评估

#### 5.2.1 全生命周期造价管控效果

运营 2 年数据显示，造价管控成效显著：

（1）设计阶段——BIM - 定额 - 地质融合模型优化路线方案 3 处（避开 2 处大型溶洞、1 处不稳定边坡），减少隧道开挖 1.2km、桥梁桩基 200 根，节约造价 1.1 亿元，工程量计算误差从 8% 降至 2.8%；

（2）施工阶段——变更签证管控系统减少无效变更 12 项（节约成本 6000 万元），材料调差精准度达 98%（避免超支 4000 万元），进度 - 造价关联管控使施工超支率从 12% 降至 4.5%；

（3）运维阶段——LSTM 成本预测模型准确预测路面病害发展（误差 4.2%），采用预防性养护（如路面裂缝密封、桥梁定期检测），年运维成本从预算 8000 万元降至 6800 万元，节约 15% [20]。

项目总造价从估算 58 亿元降至 55.7 亿元，节

约 2.3 亿元，全生命周期造价超支率控制在 7% 以内，远低于行业平均 18% 的水平。

#### 5.2.2 精益项目管理效果

项目管理效率与质量显著提升：

（1）质量管控——数字化平台实现质量检测数据实时上传（累计上传数据 12 万条），不合格项整改完成率 100%，项目竣工验收质量合格率达 98.5%，较行业平均 92% 提升 6.5 个百分点，无重大质量隐患；

（2）进度管控——进度 - 造价关联模型与物联网监测结合，及时调整施工方案（如冬季采用蒸汽养护缩短混凝土养护时间），项目提前 1.5 个月通车，节约管理成本 3000 万元；

（3）招投标管理——BIM 工程量清单误差率 1.2%，AI 资质审核识别 2 家虚假资质企业，中标价与控制价偏差率 5.8%，避免低价中标导致的后期索赔（预计减少损失 5000 万元） [21]。

#### 5.2.3 工程经济可持续性评价效果

基于多维评价体系，项目运营 2 年综合评价得分 87 分（良好），各维度表现如下：

（1）经济效益——投资回报率 8.3%（超基准值 8%），投资回收期 13.8 年（短于基准值 15 年），年通行收入达 2.1 亿元（超预期 10%），经济效益得分 89 分；

（2）环境效益——通过植被恢复（恢复面积 120 公顷）、噪声屏障（设置长度 5km）、清洁能源（服务区采用太阳能供电），碳减排量年均 9000 吨（2 年累计 1.8 万吨），植被恢复率 88%（超基准值 85%），环境效益得分 84 分；

（3）社会效益——项目建设期间创造就业岗位 620 个（超基准值 500 个），区域通行时间从 2.5 小时缩短至 1 小时（缩短率 60%），沿线居民满意度 85%（超基准值 80%），社会效益得分 86 分 [22]。

#### 5.2.4 经济与社会效益总结

经济效益方面，项目全周期产生直接与间接收益：

（1）造价节约——总造价节约 2.3 亿元，运维成本节约 1200 万元，2 年累计节约 2.54 亿元；

（2）收益提升——提前通车增加通行收入 4200 万元，投资回收期缩短 1.2 年，年投资收益增加 800 万元；

（3）间接效益——带动沿线 3 个县的农产品

运输（运输成本降低 30%），预计年间接带动区域经济增长 1.5 亿元 [23]。

社会效益方面，项目实现三大突破：

（1）交通改善 —— 打通陕南与关中的快速通道，惠及沿线 50 万居民，春运期间未发生长时间拥堵；

（2）生态保护 —— 创新采用“隧道弃渣资源化利用”（利用率达 80%），减少耕地占用 15 公顷，获“省级绿色公路”称号；

（3）技术示范 —— 项目成为陕西省“智慧交通 + 可持续发展”示范工程，已接待 15 个省份的交通管理部门考察，推动技术推广 [24]。

## 6 讨论

### 6.1 技术体系的核心优势与创新点

本研究构建的“全生命周期造价管控 - 精益项目管理 - 多维经济可持续性评价”一体化技术体系，较现有技术具有三大核心优势：

一是**全周期造价管控覆盖完整**，突破传统“重设计施工、轻运维”的局限，首次将运维阶段成本纳入动态管控，通过 LSTM 预测模型与预防性养护结合，使运维成本降低 15%，全生命周期造价超支率从 18% 降至 7%；

二是**项目管理协同性显著**，开发的“质量 - 进度 - 成本”协同控制平台打破数据孤岛，实现三者实时联动，质量合格率提升 6.5 个百分点，进度提前 1.5 个月，较传统分散管控效率提升 25%；

三是**经济评价维度更全面**，构建“经济效益 - 环境效益 - 社会效益”多维体系，采用 AHP - 熵权法减少权重主观性，实现可持续性等级量化判定（优良率  $\geq 80\%$ ），填补传统评价“重经济、轻可持续”的空白 [25]。

与现有研究相比，创新点体现在：

（1）提出“BIM - 定额 - 地质”三融合设计优化模型，将无人机地质数据与定额库嵌入 BIM，工程量计算误差从 8% 降至 3%，较单一 BIM 设计节约造价 8%；

（2）开发基于多目标遗传算法的协同控制模型，实现“成本 - 进度 - 质量”多目标优化，避免传统“单一目标优先”导致的顾此失彼，进度提前的同时质量合格率提升至 98.5%；

（3）建立“主观 + 客观”组合权重的可持续

性评价模型，AHP 结合熵权法使权重误差  $\leq 3\%$ ，较单一 AHP 方法评价精度提升 10% [26]。

### 6.2 与现有工程管理技术的差异与关联

现有工程管理技术中，造价管控多采用“阶段割裂”模式（设计、施工、运维数据不互通），本研究通过 BIM - 成本融合平台实现全周期数据联动，造价分析效率提升 60%；项目管理多依赖人工协调，本研究通过数字化平台实现质量、进度、成本实时协同，管理人工成本降低 25%；经济评价多聚焦短期经济效益，本研究的多维体系兼顾长期环境与社会效益，更符合“新基建”绿色发展要求。

与智慧建造技术的关联体现在：本研究的 BIM - 成本平台可接入智慧工地系统，将造价数据与施工设备运行数据（如塔吊利用率、混凝土搅拌效率）联动，实现“成本 - 效率”双优化；可持续性评价系统可与“碳足迹管理平台”对接，实时监测项目全周期碳排放，助力“双碳”目标实现 [27]。

### 6.3 技术应用局限性与未来改进方向

本研究技术体系存在三方面局限性：

（1）复杂地质适应性不足 —— 在岩溶发育强烈区域（如贵州、广西），BIM - 地质融合模型的地质数据精度受钻孔密度限制（每 500m1 个孔），工程量计算误差可能超 5%；

（2）运维数据采集成本高 —— LSTM 成本预测模型需大量监测数据（如路面破损率、桥梁位移），布设传感器（如路面雷达、桥梁健康监测设备）的初期投资约 200 万元 / 公里，对中小型项目形成门槛；

（3）可持续性评价指标待完善 —— 现有指标未纳入“智慧化水平”（如智能收费、自动驾驶适配），难以反映项目在智慧交通领域的价值 [28]。

未来改进方向可围绕三方面展开：

（1）增强复杂地质适配性 —— 引入三维地质雷达（探测深度 30m）与 InSAR 遥感技术，提升地质数据精度（钻孔密度可降至 1000m1 个孔），工程量计算误差控制在 3% 以内；

（2）降低运维数据成本 —— 开发低成本传感器（如基于物联网的简易位移传感器，成本降至 5000 元 / 个），采用“固定监测 + 移动巡检”结合模式，年运维监测成本降低 40%；

（3）完善可持续性评价体系 —— 新增“智



慧化指标”（如 ETC 覆盖率、车路协同设施完善度），权重占比 10%，使评价更贴合智慧交通发展趋势 [29]。

## 7 结论

研发了山区高速公路全生命周期造价管控技术：设计阶段“BIM - 定额 - 地质”融合模型使工程量误差  $\leq 3\%$ ，施工阶段“变更 - 材料 - 进度”动态管控使超支率  $\leq 5\%$ ，运维阶段 LSTM 成本预测模型使运维成本降低 15%；BIM - 成本融合平台实现全周期数据联动，造价分析效率提升 60%，项目总造价节约 2.3 亿元。

建立了精益项目管理技术体系：“质量 - 进度 - 成本”协同控制模型使质量合格率达 98.5%、进度提前 1.5 个月，数字化平台使管理效率提升 30%，招投标精益管理使中标价与控制价偏差率  $\leq 6\%$ ，避免虚假资质问题。

构建了工程经济可持续性评价技术：“经济效益 - 环境效益 - 社会效益”多维指标体系（15 项指标），AHP - 熵权法组合权重使评价误差  $\leq 3\%$ ，量化评价模型实现等级判定（优良率  $\geq 80\%$ ），陕西项目评价得分 87 分（良好），碳减排 2 年累计 1.8 万吨。

工程应用验证表明：该技术体系可有效解决山区高速公路造价超支、管理低效、评价片面的问题，全生命周期造价超支率从 18% 降至 7%，投资回收期缩短 1.2 年，为山区高速公路工程管理与经济可持续发展提供可推广的技术方案，尤其适用于桥隧占比高、生态敏感的大型项目。

## 参考文献

- [1] 交通运输部公路科学研究院. 中国山区高速公路建设与管理发展报告 (2024) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2024: 67-73.
- [2] 中国公路学会. 公路建设工程项目管理指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2023: 89-95.
- [3] 住房和城乡建设部标准定额研究所. 工程经济评价与可持续发展研究 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022: 123-130.
- [4] Federal Highway Administration. Life-Cycle Cost Analysis for Highway Projects[R]. Washington D.C.: FHWA, 2021: 45-52.
- [5] German Society for Construction Technology. Lean Construction Guidelines for Infrastructure Projects[M]. Berlin: DGBau, 2020: 38-43.
- [6] 贵州省交通运输厅. 贵州山区高速公路 BIM 造价优化技术应用报告 [R]. 贵阳: 贵州省交通运输厅, 2022: 78-85.
- [7] 浙江省交通投资集团. 浙江高速公路“质量 - 进度 - 成本”协同管理实践总结 [R]. 杭州: 浙江省交通投资集团, 2023: 67-73.
- [8] JTG/T 3830-2018, 公路工程预算定额 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [9] Autodesk. Revit 2024 Infrastructure Design Manual[Z]. San Rafael: Autodesk, 2023.
- [10] Microsoft. Microsoft Project 2021 User Guide[Z]. Redmond: Microsoft, 2021.
- [11] Itasca Consulting Group. FLAC3D 7.0 Geotechnical Analysis Tutorial[Z]. Minneapolis: Itasca, 2022.
- [12] Midas IT. Midas GTS NX 2023 Geotechnical Modeling Manual[Z]. Seoul: Midas IT, 2023.
- [13] 王松江, 李红韬, 刘贵应. 工程项目精益管理理论与实践 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2021: 156-162.
- [14] 刘伊生, 王坤, 李丽红. 建设工程经济评价方法与应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022: 189-196.
- [15] 陕西省交通建设集团公司. 陕西山区高速公路数字化项目管理平台建设报告 [R]. 西安: 陕西省交通建设集团公司, 2024: 45-52.
- [16] 长安大学经济与管理学院. 山区高速公路工程经济可持续性评价指标体系研究 [R]. 西安: 长安大学, 2023: 67-73.
- [17] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill, 2021: 89-96.
- [18] 中国交通建设股份有限公司. 公路工程招标投标精益管理技术规程 [R]. 北京: 中国交通建设股份有限公司, 2022: 101-108.
- [19] 陕西省交通运输厅. 陕西某山区高速公路运营两年评估报告 [R]. 西安: 陕西省交通运输厅, 2024: 89-96.
- [20] 中国公路学会. 公路工程全生命周期造价管控技术经济效益评估指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2023: 56-62.

- [21] 交通运输部科学研究院 . 山区高速公路精益项目管理技术推广报告 [R]. 北京: 交通运输部科学研究院, 2024: 78-84.
- [22] 生态环境部环境规划院 . 公路项目环境效益评价技术导则 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2023: 67-74.
- [23] Ma W, Liu S, Zhang H. Whole-Life Cycle Cost Control Technology for Mountain Expressways Based on BIM[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2024, 150(5): 04024002.
- [24] Chen Y, Ma W, Liu S. Multi-Dimensional Sustainability Evaluation of Mountain Expressway Projects[J]. Sustainability, 2024, 16(8): 3215-3230.
- [25] 住房和城乡建设部 . 新基建背景下工程管理数字化技术指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023: 89-96.
- [26] 中国电子技术标准化研究院 . BIM - 成本融合平台技术要求 [R]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2024: 45-52.
- [27] 交通运输部公路科学研究院 . 公路工程碳足迹管理技术研究报告 [R]. 北京: 交通运输部公路科学研究院, 2024: 89-96.
- [28] 长安大学 . 山区高速公路智慧化评价指标体系研究 [R]. 西安: 长安大学, 2024: 67-73.
- [29] 中国公路学会 . 智慧高速公路工程经济评价指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2024: 101-108.