

### 3.4 地表移动变形规律总结

基于监测数据的时间与空间演化特征分析,采动影响下地表移动变形呈现出显著的阶段性与空间分带性规律。时间演化方面,地表变形可分为初始期、活跃期与稳定期三个阶段。初始期对应工作面回采初期,采空区面积较小,地表变形量微弱,下沉量累计不足最终值的10%,变形速率小于5mm/d,此阶段持续时间约15~20天;活跃期对应采空区面积持续扩大,围岩移动剧烈,地表变形速率显著提升,下沉量累计占最终值的70%~80%,变形速率可达15~25mm/d,此阶段持续时间约30~40天,是地表变形的主要发生阶段;稳定期对应工作面回采结束,采空区上方岩层达到新的应力平衡,地表变形速率逐渐降低至2mm/d以下,变形量趋于稳定,此阶段持续时间约60~80天,最终形成稳定的地表下沉盆地。空间分布方面,地表变形以采空区为中心呈对称分布,形成椭圆形下沉盆地,下沉盆地的范围与采深、采厚呈正相关关系,采深越大、采厚越厚,下沉盆地的影响范围越广。沿工作面走向与倾向,地表变形指标均呈现出“中间大、两侧小”的分布特征,最大值集中在采空区正上方,向两侧逐渐递减,在采动影响边界处变形量趋近于零。

## 4 采动地表移动变形预测模型构建与优化

### 4.1 传统预测模型局限性分析

目前,采动地表移动变形预测常用的传统模型包括概率积分法、负指数函数法与双曲线法等,其中概率积分法因原理简单、参数易获取,在工程中应用最为广泛。但传统概率积分法存在明显局限性:一是模型参数设定多依赖经验公式,未充分考虑采深、采厚、岩层物理力学性质等因素的耦合影响,适应性较差;二是模型假设地表变形呈对称分布,难以适配复杂地质条件如岩层倾角变化、断层发育等场景;三是预测精度受监测数据样本量影响较大,在小样本数据条件下误差较大,难以满足高精度预测需求。基于此,本文结合监测数据与影响因子分析,对传统概率积分法进行改进,引入多影响因子优化模型参数,构建改进型采动地表移动变形预测模型。

### 4.2 改进型预测模型构建

改进型预测模型以概率积分法为基础,保留核心函数形式,通过引入采深影响系数 $K_1$ 、采厚影响系数 $K_2$ 与岩层稳定性系数 $K_3$ ,优化地表下沉量预测公式,同时修正水平移动与衍生变形的计算关系,提升模型适应性与预测精度。地表下沉量预测核心公式如下:

$$W(x,y)=K_1 \times K_2 \times K_3 \times W_0 \times \iint [1/(2\pi r^2)] \times \exp(-(x^2+y^2)/(2r^2)) dx' dy'$$

式中: $W(x,y)$ 为地表 $(x,y)$ 点的下沉量(mm); $W_0$ 为地

表最大下沉量(mm),由经验公式 $W_0=q \times M \times \cos \alpha$ 计算, $q$ 为下沉系数, $M$ 为采厚(m), $\alpha$ 为煤层倾角( $^\circ$ ); $r$ 为主要影响半径(m),由 $r=H/\tan \beta$ 计算, $H$ 为采深(m), $\beta$ 为主要影响角( $^\circ$ ); $K_1$ 为采深影响系数, $K_1=1-0.0012 \times (H-500)$  ( $H \geq 500m$ 时), $K_1=1$  ( $H < 500m$ 时); $K_2$ 为采厚影响系数, $K_2=0.85+0.05 \times (M/3)$ ;  $K_3$ 为岩层稳定性系数,根据岩体完整性系数确定,取值范围为0.7~1.0,岩体完整性越好, $K_3$ 值越大。水平移动量、倾斜变形、曲率变形与水平变形均基于改进后的下沉量公式推导计算,修正系数根据监测数据校准,确保各指标预测结果的一致性。

### 4.3 模型参数校准与精度检验

选取监测数据中的25个监测点作为训练样本,用于模型参数校准,剩余15个监测点作为检验样本,用于评估模型预测精度。通过最小二乘法拟合训练样本数据,确定模型核心参数:下沉系数 $q=0.72$ ,主要影响角 $\beta=75^\circ$ ,岩层稳定性系数 $K_3=0.88$ ,各影响系数的拟合误差均小于5%。采用平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)与平均相对误差(MAPE)作为精度评价指标,对比改进型模型与传统概率积分法的预测结果,检验结果如表2所示。由表2可知,改进型模型的MAE为32.6mm, RMSE为45.8mm, MAPE为2.8%,较传统概率积分法分别降低28.3%、25.1%与31.7%,预测精度显著提升,可有效适用于该区域的采动地表变形预测。

## 5 结语

本文通过现场监测、理论分析与模型构建,系统研究了采动影响下地表移动变形规律,构建了改进型预测模型,得出主要结论如下:采动地表变形呈初始期、活跃期与稳定期三阶段演化,空间上以采空区为中心呈对称分布,采深与采厚对变形强度及影响范围起主导作用;改进型模型引入多影响因子优化参数,预测精度较传统方法显著提升,可满足工程实际需求。未来可结合无人机遥感、InSAR等新技术,拓展监测范围与精度,深入探究复杂地质条件下多因素耦合影响机制,进一步优化模型结构,实现采动地表变形的动态预测与智能预警。

### 参考文献

- [1] 钱鸣高,石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2019.
- [2] 张玉卓. 采动地表移动变形规律及预测技术研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 892-901.
- [3] 李树刚,赵阳升. 深部开采地表移动变形数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 2890-2898.

# Research on the Cost Control Mechanism of Railway Engineering Construction Stage

Yan Chen

Tonghao (Zhengzhou) Electrification Bureau Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450000, China

## Abstract

The construction stage of railway engineering is characterized by complex procedures, concentrated resource inputs, and frequent cost fluctuations, and the level of construction management directly affects the effectiveness of project investment control. Focusing on the demand for refined cost control during the construction stage, this study systematically examines the structural characteristics of construction costs and the key influencing factors in railway engineering. An analytical framework is developed from the perspectives of objective systems, operational mechanisms, and managerial applications, forming a refined cost control framework that covers the entire construction process. By strengthening the decomposition of cost objectives, emphasizing control over critical construction procedures, optimizing resource allocation methods, and introducing dynamic monitoring and information-based support measures, construction cost management is transformed from result-oriented control to process-oriented control. The study aims to provide theoretical support and practical guidance for establishing a scientific and operable refined cost control mechanism during the construction stage of railway engineering, thereby enhancing project economic performance and the standardization of management practices.

## Keywords

Railway engineering; Construction stage; Cost management; Refined control; Management mechanism

## 铁路工程施工阶段成本精细化控制机制研究

陈龔

通号(郑州)电气化局集团有限公司, 中国·河南 郑州 450000

## 摘要

铁路工程施工阶段具有工序复杂、资源投入集中、成本波动频繁等特点, 施工管理水平直接影响项目投资控制成效。围绕施工阶段成本精细化控制需求, 系统梳理铁路工程施工成本的构成特征与关键影响因素, 从目标体系、运行机制与管理应用等层面展开分析, 构建覆盖施工全过程的成本精细化控制框架。通过强化成本目标分解、突出关键工序管控、优化资源配置方式, 并引入动态监控与信息化支撑手段, 实现施工成本由结果控制向过程控制转变。研究旨在为铁路工程施工阶段建立科学、可操作的成本精细化控制机制提供理论支撑与实践思路, 提升项目经济性与管理规范化水平。

## 关键词

铁路工程; 施工阶段; 成本管理; 精细化控制; 管理机制

## 1 引言

随着铁路建设规模持续扩大和工程技术标准不断提升, 施工阶段成本管理面临的约束条件更加复杂, 传统以静态核算和事后控制为主的管理模式难以适应当前项目精细化管理要求。施工阶段作为成本形成和消耗最为集中的环节, 其管理成效在很大程度上决定了项目整体投资控制水平。在专业交叉作业、工期约束严格和资源价格波动的背景下, 成本失控风险呈现出隐蔽化和累积化特征, 亟需通过系统化、机制化手段加以应对。推进施工阶段成本精细化控制, 有助于实现成本责任前移、管理重心下沉和控制手段协同, 是提

升铁路工程施工管理质量与经济效益的重要路径。

## 2 铁路工程施工阶段成本精细化控制的目标体系构建

### 2.1 施工阶段成本精细化控制的总体目标定位

铁路工程施工阶段成本精细化控制的总体目标, 聚焦于在既定投资规模和工期约束条件下, 实现施工成本投入的结构优化与过程受控。该目标并非单纯压缩费用支出, 而是通过对施工组织、资源配置和过程管理的系统统筹, 使成本支出与工程进度、质量安全保持协调一致。在施工阶段建立清晰的成本控制目标, 有助于引导管理重心由事后核算转向过程调控, 将成本管理嵌入施工决策与执行环节之中。通过对成本消耗规律的提前识别与动态掌控, 使各类费用支出具备可预期性和可调节性, 降低施工过程中因管理粗放、信息

【作者简介】陈龔(1991—), 男, 土家族, 本科, 工程师, 从事铁路工程成本管理研究。

滞后引发的成本偏差风险,从而保障铁路工程在复杂施工环境下实现经济性与规范性的协同提升。

## 2.2 施工阶段成本控制目标的分解与责任落实

施工阶段成本控制目标的有效实现,依赖于目标的科学分解与责任的明确落实。在铁路工程施工管理中,应结合工程规模、施工条件和组织模式,将总体成本目标分解至分部分项工程、关键工序和具体管理岗位,使抽象的控制目标转化为可执行、可考核的具体指标。通过建立与施工组织结构相匹配的成本责任体系,将成本控制要求嵌入项目经理、专业工程师及现场管理人员的职责范围,形成纵向贯通、横向协同的责任网络。在此基础上,依托过程考核与动态调整机制,使责任落实具备持续约束力,避免成本管理流于形式,为施工阶段成本精细化控制提供制度保障<sup>[1]</sup>。

## 3 铁路工程施工阶段成本构成及关键控制环节分析

### 3.1 施工阶段直接成本的构成特征与控制重点

铁路工程施工阶段直接成本主要由人工费、材料费和机械使用费构成,具有金额占比高、波动频繁的特点。在实际工程中,直接成本通常占施工总成本的65%—75%,其中材料费占比约40%—50%,人工费占比约15%—20%,机械使用费占比约10%—15%。材料价格受市场波动和采购方式影响明显,钢材、水泥等大宗材料价格每波动5%,均可能引起总成本变化2%以上。人工费用则受施工组织效率和劳动力配置水平制约,低效作业容易造成工日浪费。机械使用费与设备利用率直接相关,设备闲置率每提高10%,对应机械成本将上升约6%—8%。因此,直接成本控制应围绕材料采购计划、劳动力组织方式和机械调度效率展开,通过精细化管理降低不必要的资源消耗。

### 3.2 施工阶段间接成本的形成机理与管控要点

施工阶段间接成本主要包括项目管理费、临时设施费、安全文明施工费及各类摊销费用,虽然单项金额相对分散,但累积效应明显,通常占施工总成本的10%—15%。间接成本的形成机理与施工周期密切相关,工期每延长1个月,项目管理费用和临时设施维护费用将同步增加,平均增幅可达原月度间接成本的8%—12%。部分铁路工程中,因工序衔接不畅导致工期被动延长,间接成本超支金额可达合同预算的5%以上。管控间接成本的关键在于强化工期计划执行力和现场管理效率,通过优化施工组织、减少重复投入和无效支出,使间接成本保持在合理区间,从而避免其对总体成本造成持续侵蚀<sup>[2]</sup>。

### 3.3 施工关键工序与重点部位的成本敏感环节识别

铁路工程施工过程中,不同工序和部位对成本变化的敏感程度存在显著差异。桥梁的上部结构、路基处理以及轨道铺设等关键工序,通常涉及大量的材料投入和复杂的机械作业,且这些工序的成本占单项工程造价的30%—40%。例

如,桥梁上部结构的钢筋混凝土施工过程中,钢筋与混凝土的配比和施工工艺的微小调整就会导致单项工程成本大幅波动,钢筋单价每波动5%,可能引起总成本变化达200—400元/立方米。如果施工过程中未合理调配设备,或对施工工序组织不当,可能会导致机械设备空转、工序重复等现象,从而造成额外费用支出。因此,基于施工方案、工序衔接及技术参数的综合分析,提前识别和控制这些关键工序与重点部位的成本敏感环节,是确保铁路工程施工阶段成本精细化管理顺利实施的关键。

## 4 铁路工程施工阶段成本精细化控制的运行机制设计

### 4.1 基于施工流程的成本全过程管控制机制

基于施工流程的成本全过程管控制机制,强调将成本控制嵌入施工组织设计、工序实施与过程验收等关键节点,通过技术标准与管理流程的深度耦合,实现成本数据与施工行为的同步管理。在施工准备阶段,依托施工图预算和实质性施工组织设计,对分部分项工程成本进行前置测算,将单位工程成本细化至工序层级,形成标准成本基准。施工实施过程中,按照日进度、周计划对人工、材料和机械消耗进行实时记录,与基准值进行动态对比,当单项工序成本偏差超过3%时及时触发预警。以路基填筑工序为例,通过控制填料单耗和机械台班效率,使单位填方成本稳定在45—48元/立方米区间内,有效避免无序追加投入,实现施工流程与成本控制的全过程联动。

### 4.2 施工资源配置与成本协同控制机制

施工资源配置与成本协同控制机制以资源效率最大化为目标,通过技术测算与管理调度相结合,提升资源投入与成本产出的匹配度。在人员配置方面,依据施工强度和工序节奏确定合理劳动定额,将人工工效控制在0.85—0.90之间,避免人员冗余造成的人工成本虚增。在材料管理方面,采用分批采购与限额领用相结合的方式,将主要材料损耗率控制在规范要求以内,如混凝土损耗率控制在1.5%以下,钢筋损耗率控制在2%以内。机械资源通过统一调度平台进行协同管理,使主要设备利用率保持在70%以上,机械闲置台班占比压缩至10%以下,从而在资源配置层面实现成本协同控制<sup>[3]</sup>。

### 4.3 施工现场动态成本监控与反馈调整机制

施工现场动态成本监控与反馈调整机制依托现场数据采集和信息化管理手段,对成本变化进行连续跟踪和快速响应。通过移动终端和施工管理系统实时采集人工工时、材料消耗和机械运转数据,形成日成本报表和累计成本曲线,与目标成本进行滚动对比分析。当月度累计成本偏差达到预算值的2%时,及时启动原因分析和调整措施。在桥梁施工中,通过对混凝土浇筑量和机械设备工作效率的实时监控,能够将每个施工环节的成本波动控制在计划值 $\pm 4%$ 范围内。与