

DOI: 10.7672/sgjs2026080063

基于 Levenberg-Marquardt 的隧道模块化施工 工序智能调度系统*

管德彭¹, 王筱林², 轩勃娜²

(1. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 中铁一局集团智能科技公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 为应对隧道建设发展趋势和解决传统施工管理方法中的突出问题, 强化施工作业中各工序间有序衔接, 以钻爆法隧道开挖为背景, 以信息化、智能化、模块化、物联网和大数据为依托, 建立了一套基于神经网络算法的隧道模块化施工工序智能调度系统。该系统以6层架构为支撑, 实现神经网络算法辅助的特征化工序预置、自动派工流转、模块化工序填充替换、工序写实及大数据分析、人员车辆定位及规划等核心功能, 其服务范围覆盖项目全周期, 保障了隧道施工生产过程有条不紊、安全高效, 提升工程建设阶段的施工现阶段项目组织管理水平, 助力工程建设顺利推进, 为工程建设管理创新创优提供支撑。

[关键词] 隧道; 项目管理; 模块化; 智能调度; 神经网络; 施工技术

[中图分类号] U455.41

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0063-06

Intelligent Scheduling System of Tunnel Modular Construction Process Based on Levenberg-Marquardt Algorithm

GUAN Depeng¹, WANG Xiaolin², XUAN Bona²

(1. China Railway First Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Intelligent & Technology Company of China Railway First Group Co., Ltd.,
Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: To cope with the development trend of tunnel construction and solve prominent problems in traditional construction management methods, and to strengthen the orderly connection between various processes in construction operations, a intelligent scheduling system of tunnel modular construction process based on neural network algorithm is established, relying on informationization, intelligence, modularization, Internet of Things, and big data. The system is supported by a six layer architecture, which realizes core functions such as feature based sequence pre-setting, automatic dispatch flow, modular sequence filling and replacement, process realism and big data analysis, personnel and vehicle positioning and planning assisted by neural network algorithm. Its service scope covers the entire project cycle, ensuring the orderly, safe and efficient production process of tunnel construction, improving the current project organization and management level in the construction stage, assisting in the smooth progress of engineering construction, and providing support for innovation and optimization of engineering construction management.

Keywords: tunnels; project management; modularization; intelligent scheduling; neural network; construction

* 中铁一局集团有限公司课题: 钻爆法隧道超挖控制及混凝土降耗技术与应用研究(2023A-045); 中铁一局集团有限公司课题: 隧道工程泥水分离设备智能化分析监控系统研究(2023A-065); 中铁一局集团有限公司课题: 隧道与地下空间断面智能控制系统研发与应用(2023A-066); 中铁一局集团有限公司课题: 隧道与地下空间工程数字化平台及关键施工设备智能化技术研究(2023A-003); 中国中铁股份有限公司课题: 轨道交通工程数智运维及智能装备技术研究(2023A-004); 中铁一局集团有限公司课题: SLAM 双重定位关键技术及其在工程施工中的应用研究(2025-重点-18)

[作者简介] 管德鹏, 副总工程师, 高级工程师, E-mail: 178510220@qq.com

[通信作者] 轩勃娜, 助理工程师, E-mail: afeunbx219318@163.com

[收稿日期] 2025-11-22

0 引言

近年来规划或开建的铁路隧道多呈现工程地质环境复杂、施工条件差^[1]、客观因素导致的施工效率低、工期保障性差等特点,且传统的隧道工程建设项目在施工管理方法上仍依赖“生产调度员手工记录加经验管理”的方式,这种方式存在“记录难准确,录入和管理繁琐,实时性和动态性不足,数据难分析以及难以标准化”等问题^[2]。双重不利因素下导致项目团队无法准确获知项目实际进展情况,从而出现资源配置不足、各工序衔接不紧凑、作业时间长等突出问题,造成隧道工程进度缓慢,大幅度增加后期赶工成本,施工质量也不能得到有效保障。

因此,合理利用建设工程中各道工序间的天然分割,将隧道开挖中每道工序包含的内容封装为模块,依托神经网络分析预测模型进行施工全工序预置,以此为基础进行工程全局部署,在隧道施工阶段通过工序预置与写实对比、物联网、机器视觉图像感知及工序写实技术等实现隧道施工全阶段智能管控,实现从细分到整体的数据互联互通,是进行数据化管理、提升效益的关键。

1 工程项目管理方法现状

目前,项目组织管理面临繁杂且多变的挑战,通常涉及多工种配合、多专业协同和多产品集成的Y形生产模式^[3],需精准匹配所有资源以实现最佳效率。此外,施工环境的多变和过程中的多要素配合常导致大量变更和相互影响的放大效应,因此需强有力的工程管理部门进行及时协调和调度。故传统项目管理已无法满足这类项目建设需要。

隧道开挖工程有多种方式,如矿山法、明挖法、盾构法、沉管法等,可天然划分为多道工序,每道工序间有串行和并行工作模式。工序所对应的施工团队的任务进度和完成情况将直接与其衔接的上下游团队的任务产生影响^[4]。在有限的管理资源条件下,如何针对不同工序合理分配管理资源以达到最佳管理效果和项目产出,是工程项目管理中需着重考虑的问题^[5]。这不仅需对时间管理、资源管理、人员管理等项目管理知识体系有深入理解,而且需采用合适有效的方法手段对项目进度进行控制。常用的项目进度管理方法有甘特图^[6]、网络图^[7]、挣值法^[8]等,均在项目管理过程中得到广泛应用^[9]。包含基于关键路径法的改进型挣值法^[10]、蒙特卡洛方法研究关键链技术^[11]。但这些方法关注的重点多是单一项目某个阶段的项目管理,缺少对新立项目执行结果的预测,故无法为管理团队在

立项之初的资源、人员分配和资金预估方面提供支撑。而大数据技术的发展为项目管理提供了一种全新的方法手段,其包含基于大数据分析型^[12]项目管理预测方法、基于BP神经网络的项目安全管理方法^[13]。

2 基于神经网络的隧道开挖工序智能调度系统架构

基于神经网络的隧道模块化施工工序智能调度系统采用深度融合物联网、大数据的6层架构,包含物理层、数据感知层、数据传输层、数据处理分析层、功能业务层、演示层,如图1所示。

1)物理层。即为系统底层感知的对象,包括人员、车辆、施工设备、隧道物理环境。

2)数据感知层。数据感知层包含数据感知和数据采集,借助各类硬件设备及多类传感器实时感知隧道物理环境中的各类物理参数,人员、车辆和施工设备的各类信息。

3)数据传输层。利用多种高可靠传输手段将硬件收集到的数据信息传输至数据分析层,为系统提供数据支撑,主要包含平台各业务模块所需的基础空间地理数据、工程三维模型数据、工程图档数据、业务流程数据、设计建造数据和实时监控数据等,通过智能决策系统与人工监测相结合方式录入平台。

4)数据处理分析层。根据平台各业务模块需要进行后台分析处理,同时将采集到的工序数据与预设工序对比分析,实时修正。

5)功能业务层。根据隧道施工工序智能调度管理的业务需求,与数据分析层中的数据相结合后形成业务应用,包括工序循环管理、隧道信息管理、劳务管理、人员车辆定位的可视化集成,隧道建设过程中技术、进度、生产、质量、资源、安全环保等的管理。

6)演示层。通过PC端、app移动端、可视化电子大屏实现应用接入,为管理团队提供实时可视化辅助决策管控工具和决策会商环境与智能信息服务。

3 基于神经网络的隧道开挖工序智能调度系统关键技术

3.1 工序进度预设技术

3.1.1 施工进度影响因素分析

在隧道工程施工过程中,施工进度管理是重中之重。而影响施工进度的因素^[14]主要为资源因素、人员因素、技术因素、环境因素、资金因素、建设单位因素。

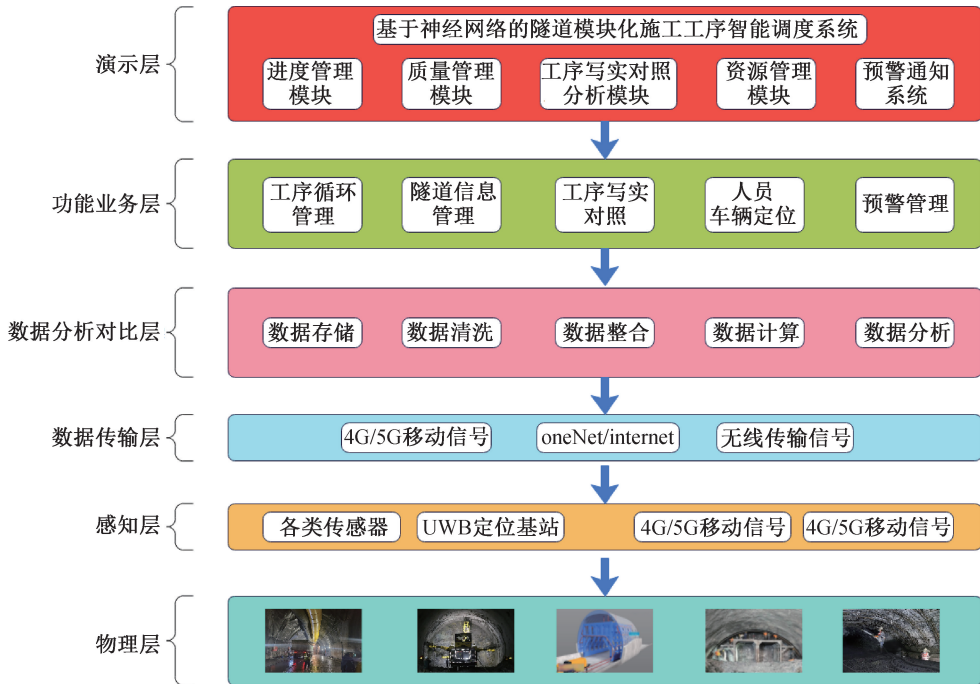


图1 基于神经网络的隧道开挖工序智能调度系统架构

Fig. 1 Intelligent scheduling system architecture of tunnel construction process based on neural network

由于技术因素、建设单位因素往往依赖资源和人员因素,环境因素可通过前期勘察和改进施工方案等方式加以应对,故上述3类因素的影响通常是间接的或依赖前述因素的有效管理,只有资源、资金和人员是隧道工程施工过程中的直接影响因素。

在这3类直接影响因素中,对于资源与资金的关系,充足的资金是确保施工资源(如材料和机械设备)及时、充分配置的前提,如资金短缺,会因无法及时购买或租赁足够的资源导致施工进度受阻;而施工过程中资源的消耗直接影响项目的资金使用,资源浪费或配置不合理会增加额外成本,影响资金的有效使用和项目预算控制。对于资源和人员的关系,资源充足与否直接影响施工人员的工作效率。如材料或设备短缺,施工人员可能会低效工作甚至停工,从而影响工程进度;而施工人员的技能和专业知识决定资源的有效利用,高素质人员能更好地利用和管理资源,减少浪费,提高施工质量和效率。对于资金和人员的关系,人员的有效管理可提高施工效率、缩短工时,从而减少资金浪费;而充足的资金可避免人员低效率工作。总之,这3个因素相互依赖和影响。隧道施工主要影响因素关系如图2所示。

3.1.2 工序内容预测模型

1) 项目数据采集。为了利用神经网络算法对隧道开挖工序的进度进行预测并预设,首先需收集公司项目部历史工序调度记录,作为神经网络模型

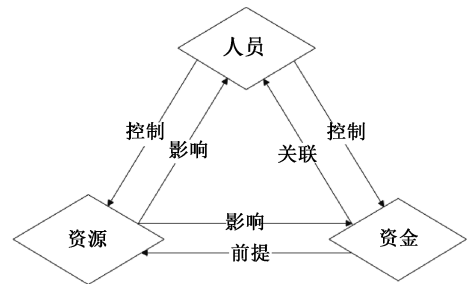


图2 隧道施工主要影响因素关系

Fig. 2 Interrelationship of key factors in tunnel construction

的训练集。本文收集了项目部历史项目中450项开挖工序调度情况汇总记录,将数据分为输入数据和输出数据两大类。

输入数据包含三大类,即施工作业团队数据、隧道数据和历史工序数据。施工作业团队数据包括团队成员平均工龄和平均职称2个参数。平均工龄取所有团队成员工龄的算术平均值。

平均职称的赋值规则为:高级职称得3分,中级职称得2分,初级职称得1分,其余得0分,平均职称取所有团队成员职称得分的算术平均值。

隧道数据包括隧道地质环境、隧道性质、开发难度和施工紧迫性4个参数。隧道地质环境按地质条件复杂性进行定分(区间为 $[0,1]$),隧道性质按横向或纵向结构分别赋值1和2,开发难度由勘察报告结论定分(区间为 $[0,1]$),施工紧迫性则以任

务完成时间(单位为小时)进行赋值。

历史工序数据包括各工序名称、所需器械、工序具体操作和工序执行时间。工序名称、所需器械和工序具体操作被编码为数值表示,以便于模型输入,工序执行时间则按小时计算。

输出数据包含三大类,即任务完成时间、任务完成质量和管理成本。任务完成时间指相对于规定完成时间的提前或滞后量,每道工序时长按小时计算;任务完成质量由管理团队评分(区间为 $[0,1]$),考虑隧道稳定性、工序操作精度及工程技术创新性等因素;管理成本指管理人员在本项目中投入的总工时。通过这些数据的收集和处理,可为神经网络算法提供训练数据集,以实现正在执行或未来工序执行的结果进行精确预测。

2)项目数据分析。由于输出结果具有较大分布范围,先以职称为输入、工序完成时间和质量为输出,关联数据直方图与高斯曲线拟合如图3所示。

对以上输入、输出数据进行关联分析,可从输入数据简单判断输出结果(如任务完成时间和完成质量)的大致范围和走向。

3)模型建立。输入参数 X 为上节中获取的9个参数, $X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9] =$ [团队平均工龄,团队平均职称,隧道地质环境,隧道性质,开发难度,施工紧迫性,工序名称,所需器械,工序具体操作]。考虑到输出数据间关系相对独立,采用多输入、单输出的神经网络模型分别对任务完成时间、任务完成质量和管理成本进行拟

合。建立两层前向反馈模型,隐藏层设为10个结点,采用Levenberg-Marquardt后向传播算法进行训练。前馈模型结构如图4所示。

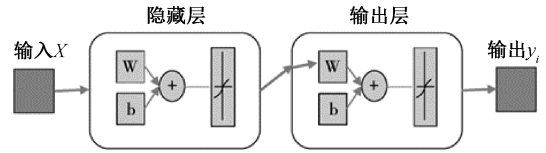


图4 前馈模型结构

Fig. 4 Structure of the feedforward model

其中,450项历史工序数据中的70%作为训练集、15%作为验证集、15%作为测试集。训练的目标是最小化均方差并最大化回归系数,以确保模型精度。

通过模型训练获得理想的回归系数(约0.8)和误差分布,训练误差直方图如图5所示。显示出误差大致呈正态分布,大部分误差集中在 $\pm 0.5h$,均方差约为13.6h。这表明输入数据与输出数据间存在较强关联性,所训练的模型能较准确地预测隧道工序的所需时间。

3.1.3 工序进度预设技术

结合训练模型,依照隧道开挖所需工序收集历史生产数据,分析各工序的时间消耗和资源利用情况,识别影响工序进度的主要因素,并根据分析结果将各工序全链封装建立工序预设库,以适应多样化作业需求。借助工序预制管理功能,施工管理人员可依照施工详细情况调整系统参数,由预设库自动调库生成初步工序进度模型并依照需求进行调

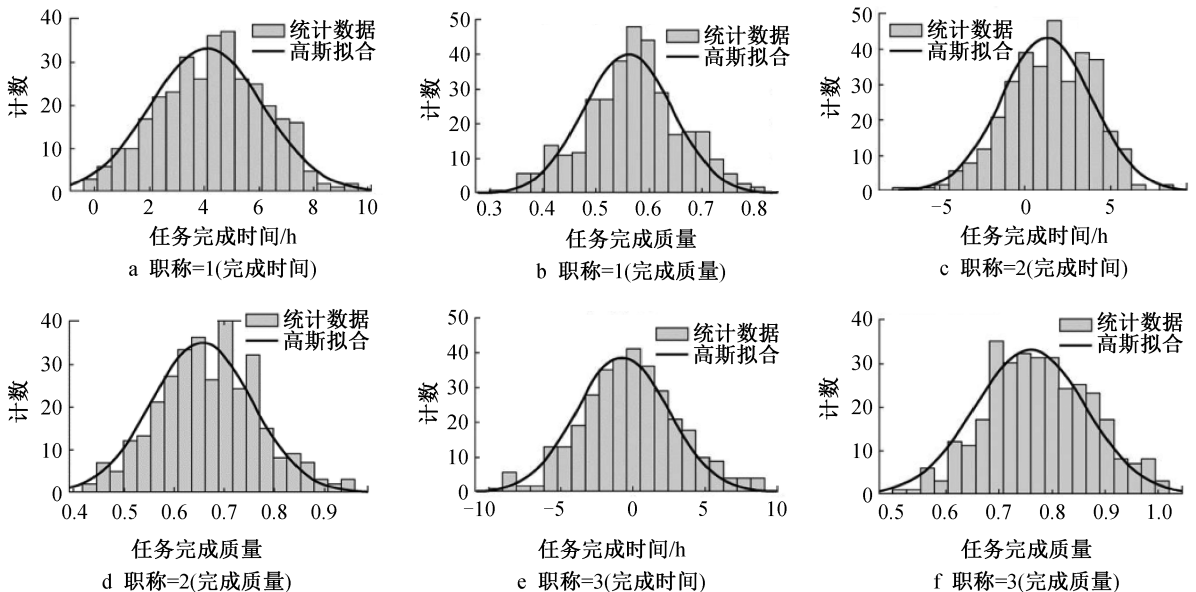


图3 工序因素关联数据直方图及高斯曲线拟合

Fig. 3 Process factor linked data histogram and Gaussian curve fitting

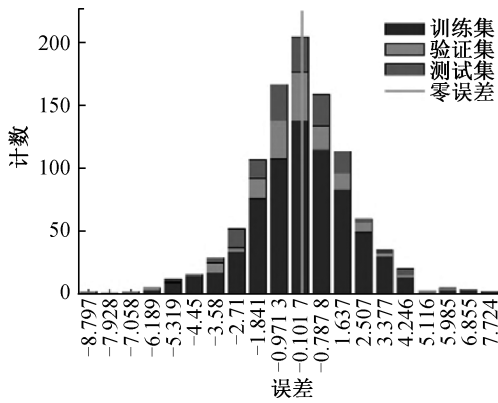


图5 训练误差直方图

Fig. 5 Training error histogram

整,生成最终工序调度方案。

此外,该技术也能确保系统按预设规则精准下发生产工序工单。在生产过程中,利用传输层对物理层的实时监测采集反馈,在演示层可视化对照原始工序调度方案,可实时掌握当前实际各工序进度。

3.2 质量管理模块

质量管理模块利用先进的神经网络技术对隧道开挖过程中的数据进行实时分析和监控,确保工程质量持续稳定。功能介绍如下。

1)数据采集与分析。通过传感器和监测设备实时收集隧道开挖过程中的各类数据,包括土壤压力、开挖速度、设备状态等。质量管理模块采用神经网络模型对这些数据进行深度学习分析,识别潜在在质量问题和异常情况。

2)质量检测与控制。神经网络模型能实时检测开挖作业中的质量指标,如开挖面平整度、支护结构稳定性等。模块会自动生成质量报告,提供详细的分析结果,并提出改进建议。通过这些措施确保施工过程中的每一环节都符合质量标准。

3)异常预警与处理。当系统检测到潜在质量异常或人员、车辆偏离预定标准的情况时会自动触发预警。通过智能算法分析异常原因,模块可实时调整施工参数或提供操作指导以纠正问题,避免进一步影响工程质量。

4)质量改进反馈。系统记录所有质量数据和改进措施,生成详细的历史记录。通过对这些数据的分析,神经网络模型能识别常见质量问题和改进机会,为未来的施工提供数据支持和改进建议。

3.3 预警通知模块

预警通知模块在基于神经网络的隧道开挖工序智能调度系统中负责实时预警和通知,以防止潜在在风险和问题影响工程进度。功能介绍如下。

1)风险预测与预警。通过分析历史数据和实

时监测数据,神经网络模型能预测可能出现的风险,如设备故障、地质异常等。模块会根据预测结果自动生成预警,提醒相关人员及时采取措施。

2)智能通知系统。提供灵活的通知设置,包括通知的触发条件、方式(如短信、邮件、系统内通知)和频率。系统可根据不同风险级别自动选择合适的通知方式和内容,确保信息迅速传达给相关人员。

3)实时事件响应。当预警发生时,系统会自动生成事件工单,并分配给处理人员。通过集成的事件管理功能,系统能跟踪事件的处理进度,确保问题得到及时解决。

4)通知历史记录。记录所有预警和通知信息,包括触发条件、处理过程和解决结果。这些记录可用于后续分析和评估,帮助优化预警机制和响应策略。

5)自定义预警规则。施工管理方可根据工程的具体需求灵活配置预警规则和处理流程。系统支持自定义风险参数和通知设置,确保预警机制适应各种复杂的工程场景。

3.4 人员、车辆轨迹监测及导航模块

人员、车辆轨迹监测及导航模块主要用于实时跟踪人员和设备位置、优化作业调度和导航。功能介绍如下。

1)实时定位与监控。通过 UWB 定位技术和各项物理基站及传感设备配合,实时跟踪隧道开挖过程中人员和设备位置。系统提供详细的轨迹记录和地图视图,帮助管理人员了解现场状况,并进行有效调度和管理。

2)智能导航。提供精确的导航功能,帮助人员和设备规划最佳路线,避开施工中的障碍物和危险区域。系统根据实时交通和作业条件优化导航路线,提升作业效率和安全性。

3)位置报告与分析。生成详细的位置信息报告,包括人员和设备的移动历史、停留时间、作业区域等。通过数据分析,管理层可了解资源使用情况、优化调度策略,从而提高施工效率。

4)安全管理。设置安全区域和警报功能,实时监控人员和设备的安全状态。例如,当设备进入危险区域或发生异常时,系统会自动触发警报,提醒相关人员采取措施,保障施工安全。

5)数据集成与共享。与其他系统(如调度系统、施工管理系统)集成,支持数据共享和联动。通过集成,系统能提供全面的作业信息、优化资源配置和运营协调,从而提高整体施工效率。

4 结语

隧道智能化建设是全国隧道建设的前沿发展

趋势,面对当前施工环境复杂、作业风险系数高、施工人员管理复杂的隧道钻爆作业施工场景,本系统基于物联网、大数据和人工智能技术设计了一款隧道开挖模块化工序管理平台。该平台通过项目部工序写实历史数据集,对其进行量化、分类,生成了神经网络训练数据集并训练出工序预估模型,依托该模型的基础建立了工序预设模块,缩短了项目管理方建立项目工序预估方案时间并实时跟进。此外,平台集成了高精定位技术和人员进出门禁,识别进入基站覆盖范围内的不同工序涉及施工的不同班组人员和施工机械,通过系统算法判定隧洞当前处于何种施工工序,从而计算出隧洞施工的工序耗时、间隔时间、循环作业时间。

该平台实现无人值守的工序自动化监测记录,减少现场管理人员的工作量,有效避免人工误报、漏报、瞒报等问题,提升隧洞施工的智慧化管控,助力施工管理者实时掌握施工情况、优化资源配置,从而提高施工效率和质量。

参考文献:

- [1] 王同军. 我国铁路隧道智能化建造技术发展现状及展望[J]. 中国铁路,2020(12):1-9.
WANG T J. Development status and prospect of intelligent construction technology for railway tunnel in China[J]. Chinese railways,2020(12):1-9.
- [2] 李利平,邹浩,刘洪亮,等. 钻爆法隧道智能建造研究现状与发展趋势[J]. 中国公路学报,2024,37(7):1-21.
LI L P,ZOU H,LIU H L,et al. Research status and development trends in intelligent construction of drill-and-blast tunnels[J]. China journal of highway and transport,2024,37(7):1-21.
- [3] 苗建,马正吕,陈其中,等. 基于 BIM 的高速公路施工项目模块化总控管理研究[J]. 科技创新与应用,2024,14(25):37-40,44.
MIAO J,MA Z L,CHEN Q Z,et al. Research on modular master control management of expressway construction project based on BIM[J]. Technology innovation and application,2024,14(25):37-40,44.
- [4] 任振,张文健,王成程,等. 基于复合式管理模式的大科学工程项目实施管理体系研究[J]. 项目管理技术,2019,17(4):84-89.
REN Z,ZHANG W J,WANG C C,et al. Implementation management system of large scientific project based on compound management mode[J]. Project management technology,2019,17(4):84-89.
- [5] 黄华,晏青,黄存婷,等. 基于神经网络算法的大科学工程项目进度管理探索[J]. 项目管理技术,2024,22(6):118-122.
HUANG H,YAN Q,HUANG C T,et al. Exploration of using neural network algorithms for project schedule management in large-scale scientific projects[J]. Project management technology,2024,22(6):118-122.
- [6] 张野. 铁路建设项目进度管理研究[J]. 中国集体经济,2022(17):74-76.
ZHANG Y. Research on progress management of railway construction project[J]. China collective economy,2022(17):74-76.
- [7] 王斐,周鹏. 基于流水施工原理与网络计划技术的施工进度控制实证研究[J]. 科学技术创新,2021(22):138-139.
WANG F,ZHOU P. Empirical study on construction schedule control based on flow construction principle and network planning technology[J]. Scientific and technological innovation,2021(22):138-139.
- [8] 张妍. 改进挣值法在道路施工项目成本控制中的应用[J]. 工程造价管理,2024,35(2):69-75.
ZHANG Y. Application of improved earned value method in cost control of road construction projects[J]. Engineering cost management,2024,35(2):69-75.
- [9] 武彪彪,廖瑞奇,刘金森,等. 地下工程“六大管理模式”[J]. 国企管理,2022(9):88-92.
WU Y B,LIAO R Q,LIU J S,et al. “Six management models” of underground engineering[J]. China state-owned enterprise management,2022(9):88-92.
- [10] 任振,沈敏圣,王成程,等. 改进挣值法在大型科研项目进度—成本管理的应用[J]. 科技管理研究,2016,36(20):211-214.
REN Z,SHEN M S,WANG C C,et al. The application of improved earned value method on progress-cost management of large research project[J]. Science and technology management research,2016,36(20):211-214.
- [11] 郭琦,何金静,胡苗. 基于蒙特卡洛模拟的工程项目网络计划进度风险分析[J]. 项目管理技术,2013,11(11):66-70.
GUO Q,HE J J,HU M. Risk analysis of project network planning schedule based on Monte Carlo simulation[J]. Project management technology,2013,11(11):66-70.
- [12] 胡荣春,刘知贵,胡茂. 基于大数据分析模型的学科项目管理探索[J]. 教育评论,2019(5):55-59.
HU R C,LIU Z G,HU M. Exploration of subject project management based on big data analysis model[J]. Education review,2019(5):55-59.
- [13] 顾志恒,冯乐. 基于主成分分析和 BP 神经网络的工程项目安全管理评价研究[J]. 项目管理技术,2017,15(4):36-39.
GU Z H,FENG L. Research on safety management evaluation of engineering project based on principal component analysis and BP neural network[J]. Project management technology,2017,15(4):36-39.
- [14] 王睿,段兆鑫. 工程管理工作中影响施工进度的因素及控制研究[J]. 四川建材,2024,50(7):207-208,221.
WANG R,DUAN Z X. Research on factors affecting construction schedule and their control in engineering management work[J]. Sichuan building materials,2024,50(7):207-208,221.