

文章编号:1005-0523(2025)06-0031-11



基于DEA方法的钻爆法隧道无人化施工组织效率评价研究

李锐¹,朱春雨²,雷明锋²,肖颖鸣²,贾朝军²

(1. 国能朔黄铁路发展有限责任公司原平分公司,山西原平 034100; 2. 中南大学土木工程学院,湖南长沙 410083)

摘要:针对钻爆法隧道无人化施工组织效率评价问题,构建了基于超效率非期望产出SBM模型的评价体系。以西藏自治区某在建隧道为例,确定了包含4个投入指标和4个产出指标的评价指标体系,其中将超欠挖量作为非期望产出处理。对30个施工循环进行评价,结果表明:30个施工循环平均效率值为0.988,66.67%的循环达到DEA有效;子工序调度时间和工程进尺是影响施工组织效率的最关键因素;不同效率层次的循环呈现显著的灵敏度分层特征,效率提升存在边际递减效应。

关键词:钻爆法;无人化施工;效率评价;数据包络分析;超效率SBM模型

中图分类号:U455;TU721

文献标志码:A

本文引用格式:李锐,朱春雨,雷明锋,等.基于DEA方法的钻爆法隧道无人化施工组织效率评价研究[J].华东交通大学学报,2025,42(6):31-41.

DEA-Based Organizational Efficiency Evaluation of Unmanned Construction in Drill-and-Blast Tunnels

Li Rui¹, Zhu Chunyu², Lei Mingfeng², Xiao Yingming², Jia Chaojun²

(1. Yuanping Branch, CHN Energy Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Yuanping 034100, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To address the efficiency evaluation of organizational management in unmanned construction of drill-and-blast tunnels, an evaluation system based on the super-efficiency Slack-Based Measure (SBM) model with undesirable outputs was constructed. Taking a tunnel under construction in the Xizang Autonomous Region as a case study, an evaluation index system comprising four input indicators and four output indicators was established, wherein the overbreak volume was treated as an undesirable output. The evaluation of 30 construction cycles revealed that the average efficiency value was 0.988, with 66.67% of the cycles being DEA-efficient. The sub-process scheduling time and advance distance per cycle were identified as the most critical factors influencing the organizational efficiency. Furthermore, construction cycles at different efficiency levels exhibited significant sensitivity stratification characteristics, indicating the presence of a diminishing marginal effect in efficiency improvement.

Key words: drill-and-blast method; unmanned construction; efficiency evaluation; data envelopment analysis (DEA); super-efficiency SBM model

收稿日期:2025-10-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB2603901)

Citation format: LI R, ZHU C Y, LEI M F et al. DEA-based organizational efficiency evaluation for unmanned construction in drill-and-blast tunnels[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42 (6): 31-41.

随着社会经济水平的持续发展,中国的交通运输及工程建设规模与数量总体上不断增长^[1]。隧道作为地下通道的工程建筑物,也呈现出明显的增长趋势。钻爆法是隧道工程建设当中一种传统且常用的方法,因其对复杂地质条件极强的适应性、技术的成熟性以及经济的合理性,至今仍是隧道施工中应用最广泛、不可替代的关键技术之一。近年来,随着人工智能、物联网、大数据等技术的发展,无人化施工成为隧道工程智能建造的重要方向,通过智能装备替代人工作业,显著改善了施工环境和安全条件^[2]。但无人化施工技术尚处于发展阶段,施工组织效率评价体系不完善,缺乏对资源配置合理性和产出水平的科学评判,制约了技术的推广应用。建立科学的效率评价模型,识别影响施工组织效率的关键因素,对于优化无人化施工组织管理、提升工程效益、推动行业技术进步具有重要的理论意义和实践价值,是实现隧道工程高质量发展的迫切需求。

许多学者在施工组织效率评价和DEA方法应用方面开展了大量研究。Charnes等^[3]首次提出DEA方法,为效率评价提供了新工具。Banker等^[4]提出的BCC模型允许规模报酬可变,更适合实际工程评价。Tone^[5]提出的SBM模型直接考虑松弛变量,克服了径向模型的局限。在隧道工程领域,Sousa等^[6]采用DEA方法评价了不同隧道施工方法的效率,为方法选择提供了依据。Mahmoudi等^[7]运用网络DEA模型分析了地铁隧道施工的多阶段效率。姜银周等^[8]对比分析了加强型机械化施工的管理优势和效率提升效果。王君楼^[9]研究了软弱围岩隧道钻爆法机械化施工的关键技术装备。夏宇迪等^[10]基于AHP-模糊综合评价法构建了钻爆法隧道施工效率评价模型。在DEA方法应用方面,徐东强等^[11]采用AHP-DEA混合模型评估了公路隧道大变形风险。陈钊等^[12]运用SBM模型构建了公路工程安全管理绩效评价体系。然而,无人化施工与传统施工在组织模式上存在本质差异,主要体现在以下三个方面:一是人员配置方面,传统施工依赖大量现场作业人员,而无人化施工通过远程操控和自动

化装备大幅减少现场人员,转而需要配置设备操控、远程监测和应急处置等新型岗位,人力资源结构发生根本性变化;二是设备协调方面,传统施工中设备多为独立作业,而无人化施工强调多台智能装备的协同运行和实时通信,设备间的调度协调成为影响效率的关键因素;三是工序衔接方面,传统施工工序转换主要依靠现场管理人员的经验判断,而无人化施工通过智能管控平台实现工序自动调度和数据驱动决策,对调度时间的精细化管理要求更高。现有研究多聚焦于传统施工模式的效率评价,未能充分考虑无人化施工的上述特殊性,在指标体系构建、效率评价方法和改进策略等方面均缺乏针对性,难以准确反映无人化施工的技术优势和管理水平。此外,现有研究普遍缺乏系统的敏感度分析,无法为施工组织优化提供定量化的改进方向和优先级排序。

因此本文基于DEA方法,将超效率非期望产出SBM模型引入钻爆法隧道无人化施工组织效率评价。构建了涵盖人力、设备、材料、时间等多维投入和进度、安全、质量、经济等多维产出的综合评价指标体系。系统开展了单指标扰动灵敏度分析,定量揭示了各指标对效率的差异化影响机制,发现了产出主导、边际递减、分层差异等效率改进规律,丰富了隧道施工组织效率管理理论。

1 评价指标体系构建

数据包络分析(data envelopment analysis,DEA)由运筹学学者Charnes、Cooper和Rhodes首次提出,是一种基于数学规划的非参数效率评价方法。DEA适用于多输入、多输出的决策单元效率评估,其突出优点在于无需预先设定指标权重,从而有效避免主观偏差,保证评价结果的客观性。该方法不仅能够识别有效单元和无效单元,还能为无效单元提供具体的改进方向与改进数值,具有较高的指导价值。本文将DEA模型应用于钻爆法无人化施工效率评价,既可克服传统方法中权重设定的主观性,又能准确量化各投入指标的冗余程度与产出指标的不足情况,为施工组织优化提供科学依据。

科学合理的指标体系是准确评价施工效率的基础。本文在构建评价指标体系时遵循以下原则:一是系统性原则,指标应全面反映钻爆法隧道无人化施工的投入产出特征;二是可操作性原则,所选指标数据应易于采集且具有明确的物理意义;三是代表性原则,指标应能体现无人化施工的核心特点和关键要素。考虑到钻爆法隧道施工以循环作业方式进行,本文以单个施工循环为决策单元,确保评价结果具有可比性和适用性。

1.1 投入指标体系

投入指标反映了完成一个施工循环所消耗的各类资源,本文选取以下四个投入指标。一是每个循环的人数与工时,表示为人数乘以工时的乘积。表示为人数乘以工时的乘积,单位为人·h。该指标综合反映了施工循环中的人力资源投入规模。在无人化施工场景下,虽然现场作业人员大幅减少,但仍需配置必要的设备操控、远程监测和应急处置人员。这一指标能够衡量人力资源配置的合理性,以及无人化程度对人力需求的影响。二是每循环的机械设备总成本,以万元为单位,包括凿岩台车、装药机器人、出渣设备等智能化装备的折旧费用、能源消耗及维护保养费用。无人化施工高度依赖机械装备,设备投入是最主要的成本要素^[13]。该指标直接关系到施工的经济性,反映了智能装备的配置水平和使用效率。三是每循环所用到的材料成本,以万元为单位,涵盖炸药、雷管、锚杆、喷射混凝土等消耗性材料费用。材料成本在隧道施工总成本中占据较大比重,其控制水平直接影响工程效益。无人化施工通过精准爆破和智能支护,理论上能够降低材料消耗,该指标可用于评估这一优势的实现程度。四是每循环当中子工序间调度所用时间,以小时为单位,指钻孔、爆破、通风、出渣、支护等各子工序之间的衔接等待时间^[14]。无人化施工强调各工序的智能协同和自动化调度,调度时间的长短直接反映了施工组织的精细化程度和设备间的协调效率,是评价无人化施工组织管理水平的关键指标。

1.2 产出指标体系

产出指标体现了施工循环取得的成果,本文从期望产出和非期望产出两个维度构建指标体系。本文选取以下三个期望产出指标和一个非期望产出指标。一是每循环的工程进尺。以米为单位,直接反映施工进度和生产能力。进尺是衡量隧道施工最直观的产出指标,也是评价施工效率的核心要

素。在无人化施工模式下,通过优化工序衔接和提高设备利用率,理论上能够实现更高的循环进尺。二是每循环无事故工时,以人·h为单位,反映施工安全管理绩效。无事故工时越长,说明安全管理措施越有效。减少人员伤亡和安全事故是推行无人化施工的重要初衷,该指标能够量化无人化施工在安全方面的优势。三是每循环经济效益,通过计算计划成本与实际成本的差值与计划成本的比率得出,以百分数表示。正值表示成本节约,负值表示成本超支。该指标综合反映了资源利用的经济性和施工组织的合理性,是评价施工效率的综合性指标。非期望产出指标选取每循环的超挖量这一指标,以立方米为单位,评估施工质量和精度控制水平。超挖不仅造成材料浪费、增加支护成本,还可能影响围岩稳定性^[15]。无人化施工通过精准定位和智能控制,理论上能够显著降低超挖量。该指标作为非期望产出,数值越小表示施工质量越好,在效率评价中应予以负向考虑。

上述指标体系覆盖了钻爆法隧道无人化施工的关键要素,既包含了人力、机械、材料等传统投入要素,又关注了无人化场景下的调度协调能力;既评价了进度和安全等工程指标,又兼顾了质量和经济效益等综合绩效。特别是非期望产出指标的引入,使得评价体系更加全面和科学,能够真实反映无人化施工的技术优势和管理水平。

2 模型选择

2.1 模型选择依据

DEA模型根据生产过程的复杂程度可分为一阶段、二阶段和三阶段模型^[16]。一阶段DEA模型将生产过程视为一个整体,仅考察最终投入与最终产出之间的转换效率,不关注生产过程内部的中间环节^[17]。二阶段DEA模型将生产过程分为两个子阶段,通过中间变量连接,能够识别效率损失发生在哪个阶段。三阶段DEA模型在二阶段基础上进一步细分,适用于生产流程更为复杂、子阶段更多的系统^[18]。针对隧道施工每循环的决策单元,本研究选取一阶段DEA模型。且本研究存在超欠挖量这一非期望产出,因此选择能够处理非期望产出问题的SBM模型^[19]。传统SBM模型中,效率值为1的决策单元被判定为DEA有效,但无法对这些有效单元进行排序比较^[20]。为了进一步提高评价的区分度,本文采用一阶段DEA模型中的超效率SBM模型进

行评价。

2.2 模型原理

2.2.1 非期望产出SBM模型

假设有 n 个决策单元DMU,每个DMU有 m 个投入、 s_1 个期望产出和 s_2 个非期望产出。对于第 j 个决策单元DMU_j,其投入向量为 $\mathbf{x}=(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$,期望产出向量为 $\mathbf{y}^g=(y_j^{1g}, y_j^{2g}, \dots, y_j^{s_1g})^T$,非期望产出向量为 $\mathbf{y}^b=(y_j^{1b}, y_j^{2b}, \dots, y_j^{s_2b})^T$ 。

对于被评价的决策单元DMU₀,含有非期望产出的SBM模型可表示为

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^{g+}}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^{b-}}{y_{r0}^b} \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.:} \begin{cases} x_{i0} = \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- \\ y_{r0}^g = \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^g - s_r^{g+} \\ y_{r0}^b = \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^b + s_r^{b-} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ \lambda_j, s_i^-, s_r^{g+}, s_r^{b-} \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 为效率值,取值范围为0到1; s_i^- 为第*i*个投入的松弛变量,表示投入冗余; s_r^{g+} 为第*r*个期望产出的松弛变量,表示产出不足; s_r^{b-} 为第*r*个非期望产出的松弛变量,表示非期望产出过多; λ_j 为权重系数;约束条件 $\sum \lambda_j = 1$ 体现了规模报酬可变的假设。

该模型的核心特征在于目标函数的分式结构。分子部分反映投入的利用程度,投入冗余越大(s_i^- 越大),分子越小;分母部分同时考虑期望产出和非期望产出,期望产出不足(s_r^{g+} 较大)或非期望产出过多(s_r^{b-} 较大)都会使分母增大。因此,效率值 ρ 越小表示效率越低,当 $\rho=1$ 且所有松弛变量为零时,该决策单元达到DEA有效。

2.2.2 超效率SBM模型

超效率SBM模型在传统SBM模型基础上,将被评价单元DMU₀从参考集中剔除,其数学表达式为

$$\min \rho^* = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^{g+}}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^{b-}}{y_{r0}^b} \right)} \quad (3)$$

$$\text{s.t.:} \begin{cases} x_{i0} \geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j x_{ij} \\ y_{r0}^g \leq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j y_{rj}^g \\ y_{r0}^b \geq \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j y_{rj}^b \\ \sum_{j=1, j \neq 0}^n \lambda_j = 1 \\ \lambda_j \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

在超效率模型中,效率值 ρ^* 可以大于1。当 $\rho^* \geq 1$ 时,表示该决策单元为DEA有效; ρ^* 越大,说明该单元的效率优势越明显。超效率值的经济含义是:该决策单元的投入可以按比例增加倍数,才会降到效率前沿面上。这为有效单元的排序提供了定量依据。

图1为钻爆法隧道无人化施工组织效率评价流程图,首先确定决策单元,即将钻爆法施工的每一个循环作为独立的评价对象。在此基础上,综合分析施工现场施工组织效率的各影响因素,并将其归纳为投入评价指标与产出评价指标两大类,建立钻爆法隧道无人化施工效率评价指标体系。之后选用适当的评价模型进行分析以得到评价结果。基于评价结果,将施工循环划分为高效率循环与中低效率循环,并从三个维度进行深入分析:通过投入冗余分析识别资源浪费环节,通过产出不足分析明确成效短板,并通过指标灵敏度分析探明关键影响因素。最终形成闭环的管理机制,实现对高效率循环进行经验总结与标杆推广,以发挥其示范效应;对中低效率循环则提供具体的施工组织改进方向,从而实现过程的持续优化,全面提升隧道工程的无人化施工组织水平。

3 案例分析

本文以西藏自治区内某建设中的隧道为例,开展钻爆法无人化施工效率评价研究。该隧道工程在建设过程中智能大型机械应用普遍,配备了三臂凿岩台车、智能喷射机械手、自动化装药设备等先进装备,智能化水平较高。项目建立了完善的智能管控平台,实现了对施工过程的数字化监控和智能调度,在设备自动化和信息化管理方面处于行业领先水平。然而,受高原特殊地质条件、设备可靠性要求、安全管理规范以及部分辅助工序技术成熟度等因素限制,该工地当前尚未完全实现无人化施工,仍需配置必要的现场操作和监护人员。这种高

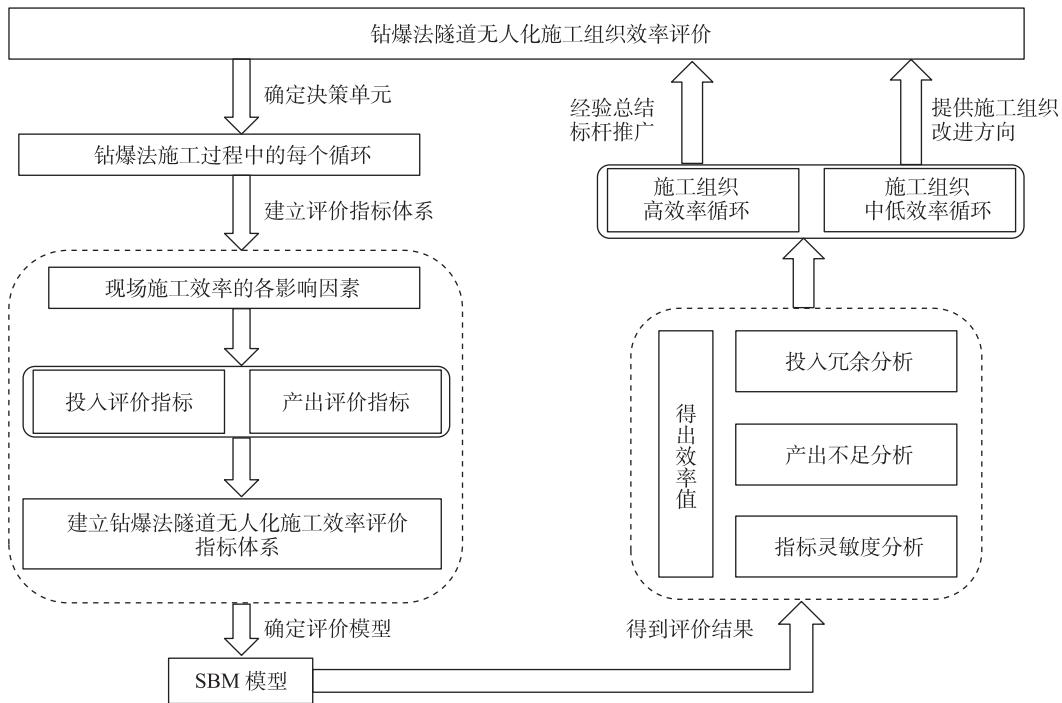


图1 钻爆法隧道无人化施工组织效率评价流程图

Fig. 1 Flowchart for evaluating the organizational efficiency of unmanned tunnel construction by drilling and blasting

度智能化但未完全无人化的施工状态,恰好代表了当前钻爆法隧道从传统施工向无人化施工过渡的典型阶段,对其进行效率评价具有重要的现实意义和推广价值。本研究选取该工程施工过程中的30个典型循环作为决策单元,运用超效率非期望产出SBM模型进行系统分析。表1为该隧道施工现场统计的各评价指标的原始数据。表2为由DEA方法得到的各决策单元的施工组织效率评价值。

3.1 整体效率水平评价

通过超效率SBM模型对30个施工循环进行计算,评价结果显示了钻爆法隧道无人化施工的整体效率特征。从效率分布来看,需要将30个决策单元划分为不同层次以便进行差异化分析。效率分界点的确定综合考虑了以下因素:一是DEA方法的理论特征,效率值为1表示决策单元达到生产前沿面,因此将 $\rho \geq 1.000$ 的循环定义为高效率组;二是参考已有文献中的分层标准,徐东强等^[11]和陈钊等^[12]在应用DEA模型时均采用0.920作为效率较低的临界值;三是结合本项目的实际情况,通过分析30个循环的效率分布特征,发现效率值在0.920附近呈现明显的分布断层,0.920以下的循环在松弛变量上表现出质的差异。综合上述考虑,本文将效

率分层标准设定为:高效率组($\rho \geq 1.000$)、中效率组($0.920 \leq \rho < 1.000$)和低效率组($\rho < 0.920$),这种划分既符合DEA理论,又契合本项目的特点,能够有效区分不同效率水平的施工循环。

高效率组循环达到了DEA有效,表明这些循环在现有技术和管理条件下实现了投入产出的最优配置。20个循环(占比66.67%)为高效率单元,形成了本项目当前的生产前沿面;这些循环的共同特点是:人力资源配置精简合理,机械设备利用率高,子工序调度衔接紧密,在保证安全和质量的前提下实现了较高的进尺效率。且高效率循环的超欠挖量控制良好,显示出无人化施工在精度控制方面的技术优势。

中等效率组循环虽未达到DEA有效,但整体表现尚可。6个循环(占比20.00%)处于中等效率水平,存在明显的改进潜力;这些循环在某些方面存在改进空间。通过松弛变量分析发现,中等效率组的主要问题集中在子工序调度时间偏长和机械设备成本控制不够严格两个方面。这说明无人化施工系统的智能调度功能尚未完全发挥,设备配置和使用策略有待优化。

低效率组循环的效率损失较为严重,存在明显的

表1 某隧道建设过程中30个循环施工数据

Tab.1 Data from 30 construction cycles during the construction of a certain tunnel

循环号	每循环人员工时/(人·h)	每循环机械设备总成本/万元	每循环所用到的材料成本/万元	每循环当中子工序间调度所用总时间/h	每循环的工程进尺/m	每循环无事故工时/h	经济效益(成本节约率)	每循环的超欠挖量/m ³
1	275.88	2.76	6.8	1.17	3.4	27.56	9.08%	14.1
2	210.06	3.02	7.2	1.08	3.8	27.16	9.04%	15.4
3	271.84	3.11	7.6	1.30	3.9	24.51	9.14%	15.9
4	215.42	2.91	6.9	1.30	3.6	24.23	9.08%	14.9
5	217.44	2.47	5.8	1.03	3.1	27.30	9.11%	12.6
6	203.62	3.36	8.2	1.05	4.2	24.39	9.15%	17.2
7	243.51	2.85	6.7	1.12	3.6	25.38	9.04%	14.6
8	234.98	3.16	7.8	1.12	4.0	25.54	9.14%	16.2
9	263.59	2.98	7.1	1.32	3.7	26.07	9.08%	15.3
10	235.97	3.04	7.4	1.07	3.8	24.60	9.12%	15.6
11	229.17	2.64	6.1	1.10	3.3	24.15	9.06%	13.5
12	247.56	2.92	6.8	1.42	3.6	24.76	9.12%	14.9
13	272.80	3.20	7.9	1.23	4.0	26.46	9.11%	16.3
14	242.53	2.54	5.9	1.00	3.2	27.38	9.13%	13.0
15	205.83	2.74	6.5	1.02	3.4	25.37	9.14%	14.0
16	240.04	2.88	6.8	1.13	3.6	26.35	9.09%	14.7
17	243.02	3.19	7.8	1.30	4.0	24.56	9.07%	16.3
18	222.17	2.72	6.3	1.37	3.4	26.07	9.10%	13.9
19	249.36	3.22	8	1.37	4.0	26.58	9.12%	16.5
20	257.74	2.74	6.5	1.27	3.4	27.35	9.12%	14.0
21	233.04	2.88	6.9	1.13	3.6	27.24	9.10%	14.7
22	212.15	3.07	7.3	1.33	3.8	25.95	9.05%	15.7
23	250.57	2.77	6.6	1.13	3.5	25.38	9.04%	14.2
24	239.97	2.86	6.7	1.35	3.6	27.29	9.06%	14.6
25	222.42	2.72	6.3	1.10	3.4	26.34	9.12%	13.9
26	250.80	2.89	6.8	1.05	3.6	24.04	9.06%	14.8
27	235.89	2.80	6.6	1.23	3.5	27.30	9.11%	14.3
28	210.08	2.40	5.6	1.22	3.0	27.35	9.08%	12.3
29	248.85	2.70	6.4	1.27	3.4	27.11	9.11%	13.8
30	226.87	2.98	7.2	1.25	3.7	24.38	9.08%	15.2

资源浪费或产出不足问题。4个循环(占比13.33%),第9、17、23、30循环,处于低效率水平。低效率组的突出问题包括:调度时间过长导致循环周期延长、机械设备故障率高增加了维护成本、超欠挖量控制不理想影响了质量和经济效益。

3.2 投入冗余分析

投入冗余反映了资源配置的浪费程度。通过对松弛变量的统计分析,发现不同投入要素的冗余情况存在明显差异。其中,人员工时冗余和子工序间调度时间冗余较为严重。其中,9号循环人员工时冗余高达52.672人·h,表明该循环存在人员配置不当问题,这种现象可能由于人员技能不匹配或人

员数量配置过多导致。而机械设备成本与材料成本松弛变量均为0,表明这两类投入要素的配置相对合理,说明项目在机械设备和材料采购、使用方面控制得当,不存在明显的资源浪费。子工序调度时间冗余是影响效率的关键因素。循环9、17、29、30存在明显的调度时间冗余。调度时间过长的原因包括:工序完成信息传递延迟、下一工序准备不充分、设备转场调度不合理等。

3.3 产出不足分析

产出不足反映了施工成果未能达到预期的情况,需要从期望产出和非期望产出两方面进行分析。期望指标方面,工程进尺不足是部分低效率循

表2 用DEA方法得到的各决策单元的施工组织效率

Tab.2 Construction organisation efficiency of each decision-making unit obtained using the DEA method

循环号	施工组织效率	松弛变量							
		每循环人 员工时/ (人·h)	每循环机 械设备总 成本/万元	每循环所用 到的材料成 本/万元	每循环当中子 工序间调度所 用总时间/h	每循环的工程 进尺/m	每循环 无事故 工时/h	经济效 益(成本节 约率)	每循环 的超欠 挖量/m ³
1	1.002	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1.016	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1.000	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0.927	4.634	0	0	0.231	2.386	0	0	0
5	1.028	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1.044	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0.950	27.715	0	0	0.031	1.461	0	0	0
8	1.000	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0.900	52.672	0	0	0.241	0.459	0	0	0
10	0.953	30.354	0	0.079	0.025	0.663	0	0	0
11	1.001	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1.003	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1.002	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1.014	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1.016	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0.959	26.780	0	0	0.058	0.097	0	0	0
17	0.903	36.128	0	0.108	0.233	1.238	0	0	0
18	1.001	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1.006	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1.000	0	0	0	0	0	0	0	0
21	1.001	0	0	0	0	0	0	0	0
22	1.001	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0.927	44.271	0	0.023	0.109	0.190	0	0.001	0
24	1.003	0	0	0	0	0	0	0	0
25	1.003	0	0	0	0	0	0	0	0
26	1.001	0	0	0	0	0	0	0	0
27	1.001	0	0	0	0	0	0	0	0
28	1.033	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0.932	16.806	0	0.072	0.245	0	0	0	0
30	0.921	18.899	0	0.078	0.191	1.895	0	0	0

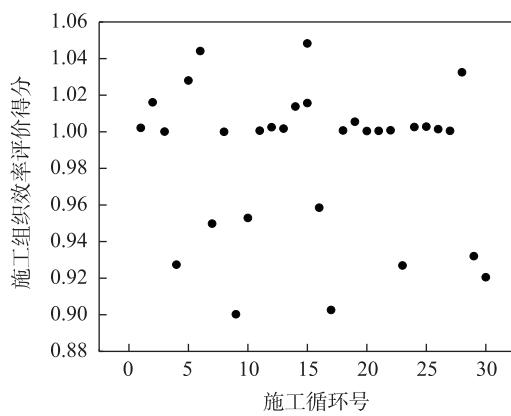


图2 每循环施工组织效率评价得分散点图

Fig. 2 Scatter plot of evaluation scores for construction organization efficiency per cycle

环的主要问题。循环29存在进尺不足问题,原因可能是爆破效果不理想、设备故障影响施工连续性、工序调度延误压缩了有效作业时间等。大部分循环的无事故工时松弛变量为0,表明安全管理相对稳定。大部分循环的经济效益松弛变量为0或接近0,表明成本控制措施有效。非期望产出指标方面,大部分循环超欠挖量为0,表明施工精度控制总体良好。超欠挖量过多作为非期望产出,在部分循环中影响了效率评价。循环6、19等的超欠挖量相对较大,说明在这些循环中精准控制能力有待提升。

3.4 指标灵敏度分析

本研究采用单指标扰动灵敏度分析方法,通过

改变某个DMU的某个指标值,观察效率值的变化,计算灵敏度系数,定量评估各指标对施工效率的影响程度^[21]。选取高效率组、中等效率组和低效率组共6个典型循环,根据统计学原理,当样本量 $n \geq 6$ 时,样本均值的标准差 $SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ 能够达到较低水平。

本文6个样本的标准差 $SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq 0.061$, 置信度达到95%以上,满足灵敏度分析的精度要求。对所选取的6个循环中的每个指标分别进行 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 15\%$ 的扰动。灵敏度系数定义为

$$S = \frac{\Delta\rho/\rho_0}{\Delta X/X_0} \quad (5)$$

式中: ρ_0 为原始效率值, $\Delta\rho$ 为效率变化量, X_0 为指标原始值, ΔX 为指标变化量。 $|S|$ 越大, 表明该指标对效率的影响越敏感。

根据效率评价结果,从不同效率层次选择6个典型循环进行深入分析,见表3。

表3 不同效率层次典型循环的效率值
Tab.3 Efficiency values of typical cycles at different efficiency levels

效率层次	循环号	效率值
高效率组	6	1.044 1
	28	1.032 5
中效率组	10	0.952 9
	4	0.927 4
低效率组	17	0.902 6
	9	0.900 3

对每个典型循环的8个指标分别进行 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 15\%$ 的扰动,每个扰动保持其他指标和其他29个DMU的数据不变,重新运行超效率非期望产出SBM模型,计算新的效率值和灵敏度系数。共完成6个DMU×8个指标×6种扰动=288次模型计算。

图3为8个评价指标对不同效率层次施工循环的平均灵敏度对比分析结果。结果表明,各指标对施工效率的影响程度存在显著差异,且不同效率组呈现出明显的分层特征。在产出指标方面,工程进尺、无事故工时和经济效益的灵敏度系数普遍较高,表明进尺等产出指标对效率影响显著。中等效率组对产出指标的灵敏度居中,表明这些循环通过提升产出水平仍有较大的效率改进空间。高效率组对所有指标的灵敏度都显著低于其他两组,说明

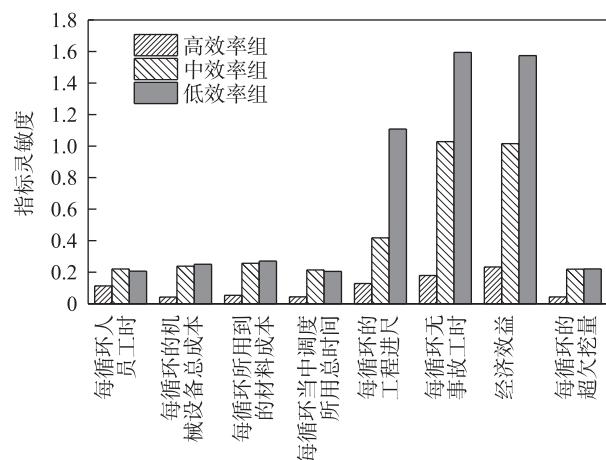


图3 不同效率层次施工循环的平均灵敏度对比
Fig. 3 Sensitivity comparison of construction cycles at different efficiency levels

这些循环在资源配置和产出水平上已接近最优状态,进一步优化的边际效益有限。在投入指标方面,材料成本的灵敏度系数最高,是投入端最敏感的因素;其次是调度时间、人员工时和机械成本,四者灵敏度较为接近,说明投入端的优化需要多方面协同推进。超欠挖量作为非期望产出,其灵敏度系数在中低效率组稳定在0.223左右,说明质量控制对效率具有稳定且重要的影响。总体而言,产出指标的灵敏度显著高于投入指标,这为制定合理的效率改进策略提供了科学依据。

图4为不同效率层次下施工循环各投入指标的平均灵敏度绝对值对比结果。结果表明,子工序调度时间的平均灵敏度系数绝对值最高,是所有投入指标中对效率影响最敏感的因素。这验证了调度优化是提升无人化施工效率的最关键措施。人员工时的平均灵敏度系数次之。且低效率组对人员工时的敏感性明显高于高效率组,说明人力资源优化在低效率循环中具有更大的改进潜力。材料成本和机械成本的灵敏度系数在各投入指标中较低,且在不同效率组间差异较小,说明设备成本控制已经相对稳定,不是当前的主要改进方向。

图5为不同效率层次下施工循环各产出指标的平均灵敏度绝对值对比结果。结果表明,在所有产出指标当中,工程进尺的平均灵敏度系数最高,且该指标对所有效率组的影响都较为显著且相对均衡。超欠挖量作为非期望产出,平均灵敏度系数绝对值为0.451,影响程度仅次于工程进尺。低效率组对超欠挖量的敏感性明显高于高效率组,说明质

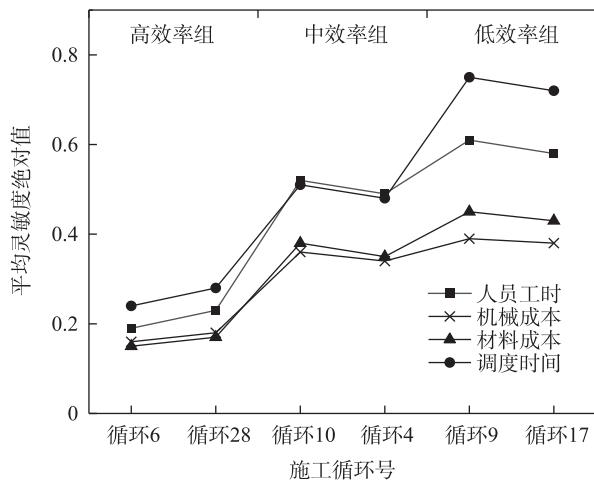


图4 不同效率层次下施工循环各投入指标的平均灵敏度绝对值变化规律

Fig. 4 Variation pattern of the average absolute sensitivity of input indicators for construction cycles under different efficiency levels

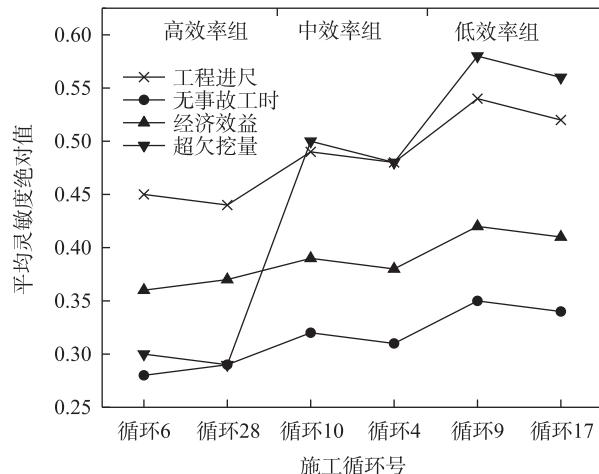


图5 不同效率层次下施工循环各产出指标的平均灵敏度绝对值变化规律

Fig. 5 The variation pattern of the average absolute sensitivity of each output indicator in the construction cycle under different efficiency levels

量控制对低效率循环的效率提升作用更大。对于经济效益该指标,各效率组的灵敏度差异不大,说明经济效益对所有循环都具有普遍意义。无事故工时的灵敏度系数在产出指标中影响程度最小。这与该工程安全管理整体良好、大部分循环已达到较高安全水平的实际情况相符。

图6为6个典型施工循环在不同扰动幅度下工程进尺指标的灵敏度变化规律,揭示了效率改进的非线性特征和边际递减效应。低效率组的两条曲

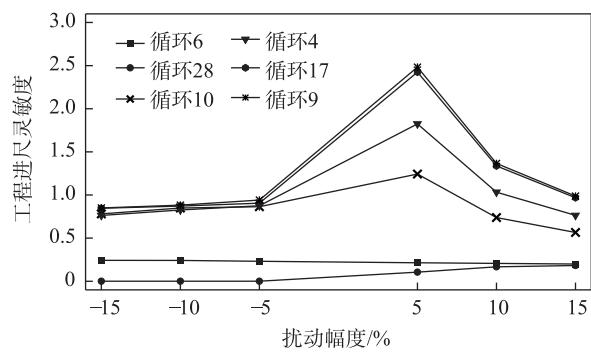


图6 不同扰动幅度下工程进尺指标的灵敏度变化规律

Fig. 6 Sensitivity variation of project advance indicators under different disturbance amplitudes

线始终位于最上方,在+5%扰动时灵敏度系数最高,随着扰动幅度增加到+10%和+15%,灵敏度系数逐步下降,充分体现了边际递减规律。这说明对于低效率循环,初期的产出改进能够带来快速显著的效率提升,但随着改进幅度加大,单位改进的效率收益逐渐递减。中等效率组的灵敏度曲线位于中间位置,曲线相对平缓,说明这些循环对进尺变化的响应较为稳定,不同改进幅度下的效率提升效果较为均衡。高效率组的曲线位于最下方,且循环6的曲线几乎与横轴平行,说明该标杆循环的进尺水平已经很高,继续提升进尺对效率的边际贡献极小。曲线的分层分布和下降趋势共同说明:效率改进应把握“早期快速见效”的时机窗口,对低效率循环应及时启动大力度的产出提升措施;同时要认识到“改进存在上限”,随着效率水平接近前沿,继续改进的难度和成本都会显著增加。管理者应实施分层差异化管理,把握最佳改进时机,从而实现施工效率的持续提升。

灵敏度分析为钻爆法隧道无人化施工效率改进提供了明确的方向、优先级排序和差异化策略。管理者应以提升工程进尺为核心,加强材料成本控制和质量管理,实施分层差异化管理,把握最佳改进时机,从而实现施工效率的持续提升。

4 结论

本文针对钻爆法隧道无人化施工组织效率评价问题,基于数据包络分析方法,构建了超效率非期望产出SBM模型,通过对30个施工循环的实证分析,得出以下结论。

1) 超效率非期望产出SBM模型能够有效评价

钻爆法隧道无人化施工效率。该模型既能处理超挖量这一非期望产出,又能对DEA有效单元进行排序,克服了传统DEA模型的局限性,为识别最佳实践和制定改进方案提供了科学工具。模型应用结果表明,30个施工循环的平均效率值为0.988,66.67%的循环达到DEA有效,整体效率水平较高。效率差异主要体现在人员工时冗余、调度时间冗余和超欠挖量控制水平三个方面。机械设备成本和材料成本的松弛变量均为0,表明项目在设备和材料管理方面控制得当。

2) 敏感度分析量化了各指标对效率的影响程度,为改进决策提供了科学依据。产出指标的平均灵敏度系数显著高于投入指标,说明提升产出水平比压缩投入资源更为有效。工程进尺的灵敏度最高且最稳定,是最可靠的改进方向;超欠挖量的灵敏度稳定,说明质量控制具有普遍且稳定的效率影响。不同效率层次的循环呈现显著的灵敏度分层特征,低效率组对产出指标极度敏感,中等效率组敏感性适中,高效率组灵敏度很低。

3) 基于效率评价和灵敏度分析,提出分层差异化改进策略。低效率循环应集中资源大幅提升工程进尺和控制超欠挖量,通过优化爆破参数和加强精度控制实现快速突破;中效率循环应采取投入产出平衡优化策略,在精简人员配置和控制调度时间的同时,稳步提升进尺和质量水平;高效率循环应注重经验总结和标杆推广,发挥示范引领作用。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic tunnel engineering research: 2022[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 1-40.
- [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] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [4] BANKER R D, CHARNES A, COOPER W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J]. Management Science, 1984, 30(9): 1078-1092.
- [5] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [6] SOUSA R L, EINSTEIN H H. Risk analysis during tunnel construction using Bayesian Networks: Porto Metro case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 27(1): 86-100.
- [7] MAHMOUDIR, EMROUZNEJADA, SHETAB-BOUSH-EHRI S N, et al. The origins, development and future directions of data envelopment analysis approach in transportation systems[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2020, 69: 100672.
- [8] 姜银周, 申百国. 大断面隧道加强型机械化施工管理及施工效果分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(8): 1334-1341.
JIANG Y Z, SHEN B. Strengthened mechanized construction management and construction efficiency analysis of large cross-sectional tunnel[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(8): 1334-1341.
- [9] 王君楼. 软弱围岩隧道钻爆法机械化施工关键技术及装备[J]. 铁道建筑, 2023, 63(6): 94-98.
WANG J L. Key techniques and equipments for mechanized construction of drilling and blasting tunnel in weak surrounding rock[J]. Railway Engineering, 2023, 63(6): 94-98.
- [10] 夏宇迪, 杨国庆, 贾朝军, 等. 基于AHP-模糊综合评价法的钻爆法隧道施工效率评价模型研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(S1): 121-127.
XIA Y D, YANG G Q, JIA (C/Z) J, et al. Study on evaluation model of tunnel construction efficiency by drilling and blasting method based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(S1): 121-127.
- [11] 徐东强, 李永亮, 王可意. 基于AHP-DEA的公路隧道大变形风险评估[J]. 中外公路, 2018, 38(4): 218-222.
XU D Q, LI Y L, WANG K Y. Risk assessment of highway tunnel serious deformation based on DEA-AHP method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(4): 218-222.
- [12] 陈钊, 孙景楠, 周子龙, 等. 基于DEA方法的公路工程施工现场安全管理绩效评价研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 105-114.
CHEN Z, SUN J N, ZHOU Z L, et al. Research on performance evaluation of safety management in road engi-

- neering construction site based on DEA method[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 105-114.
- [13] 曹国栋, 李国良, 李宁, 等. 铁路钻爆法隧道全工序机械化研究综述 [J/OL]. 铁道标准设计, 2025: 1-13. (2025-10-22). <https://link.cnki.net/doi/10.13238/j.issn.1004-2954.202505140001>.
- CAO G D, LI G L, LI N, et al. A comprehensive review on full mechanization of entire construction processes in drill-and-blast railway tunnels[J/OL]. Railway Standard Design, 2025: 1-13. (2025-10-22). <https://link.cnki.net/doi/10.13238/j.issn.1004-2954.202505140001>.
- [14] 胡赵磊, 宋鑫, 徐蕴航, 等. 基于BIM技术的轨道工务运维智慧信息平台研发[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(5): 56-64.
- HU Z L, SONG X, XU Y H, et al. Research and development of intelligent information platform for operation and maintenance of track maintenance based on BIM technology[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 56-64.
- [15] 郭建, 李兵, 刘桂勇, 等. 钻爆法施工隧道超欠挖控制研究[J]. 工程爆破, 2021, 27(1): 79-84.
- GUO J, LI B, LIU G Y, et al. Study on control of back-break and underbreak in tunnel excavation by drilling-and-blasting[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1): 79-84.
- [16] 杨国梁, 刘文斌, 郑海军. 数据包络分析方法(DEA)综述[J]. 系统工程学报, 2013, 28(6): 840-860.
- YANG G L, LIU W B, ZHENG H J. Review of data envelopment analysis[J]. Journal of Systems Engineering, 2013, 28(6): 840-860.
- [17] 张文会, 陈熙睿. 基于CCR模型的中小城市公交运行效率评价方法[J]. 交通科技与经济, 2024, 26(5): 18-27.
- ZHANG W H, CHEN X R. Evaluation method of bus operation efficiency in small and medium-sized cities based on CCR models[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2024, 26(5): 18-27.
- [18] 陈巍巍, 张雷, 马铁虎, 等. 关于三阶段DEA模型的几点研究[J]. 系统工程, 2014, 32(9): 144-149.
- CHEN W W, ZHANG L, MA T H, et al. Research on three-stage DEA model[J]. Systems Engineering, 2014, 32(9): 144-149.
- [19] 潘丹, 应瑞瑶. 中国农业生态效率评价方法与实证: 基于非期望产出的SBM模型分析[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3837-3845.
- PAN D, YING R Y. Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3837-3845.
- [20] 王少剑, 高爽, 黄永源, 等. 基于超效率SBM模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J]. 地理学报, 2020, 75(6): 1316-1330.
- WANG S J, GAO S, HUANG Y Y, et al. Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(6): 1316-1330.
- [21] 吕远, 李宁. 科研院所绩效评价及敏感度分析研究[J]. 科学学研究, 2024, 42(6): 1234-1237.
- LYU Y, LI N. Research on performance evaluation and sensitivity analysis for scientific research institute[J]. Studies in Science of Science, 2024, 42(6): 1234-1237.



第一作者:李锐(1980—),男,高级工程师,研究方向为铁道工务。E-mail:328305286@qq.com。



通信作者:贾朝军(1989—),男,副教授,博士,博士生导师,研究方向为隧道工程。E-mail:jiachaojun@csu.edu.cn。

(责任编辑:李根)