

# 隧道掘进参数与施工组织协同优化探究

贾国平

中铁十八局集团第三工程有限公司, 河北 涿州

收稿日期: 2025年3月8日; 录用日期: 2025年3月28日; 发布日期: 2025年4月14日

## 摘要

为提升隧道掘进效率并降低施工成本, 本文提出了一种基于推进速度、推进力、资源利用率和施工成本的协同优化模型, 结合数值模拟和现场监测对优化效果进行了验证。仿真与实测结果表明, 优化后推进速度由2.5 m/h提升至3.0 m/h (+20%), 推进力稳定在720 kN (+20%), 资源利用率从75%提升至90% (+15%), 施工成本从5.5万元/米降至5.0万元/米(-9%)。研究中提出的关键技术包括推进速度实时优化、推进力动态反馈控制和资源调度优化, 尤其在复杂地质条件下显著提升了施工效率, 验证了协同优化模型的可靠性与实用性。本研究为隧道掘进施工的效率提升与成本控制提供了有力参考, 并为智能化施工技术的发展奠定了基础。

## 关键词

隧道掘进, 施工组织优化, 协同优化模型, 推进速度优化

# Exploration of Tunnel Boring Parameters and Construction Organization Synergistic Optimization

Guoping Jia

China Railway 18 Bureau Group Third Engineering Co., Ltd, Zhuozhou Hebei

Received: Mar. 8<sup>th</sup>, 2025; accepted: Mar. 28<sup>th</sup>, 2025; published: Apr. 14<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

To enhance tunnel boring efficiency and reduce construction costs, this study proposes a synergistic optimization model based on propulsion speed, propulsion force, resource utilization, and construction cost. The optimization effectiveness is validated through numerical simulations and field monitoring. The simulation and empirical results indicate that, after optimization, the propulsion speed

increased from 2.5 m/h to 3.0 m/h (+20%), the propulsion force stabilized at 720 kN (+20%), resource utilization improved from 75% to 90% (+15%), and construction cost decreased from 55,000 yuan/m to 50,000 yuan/m (-9%). The key technologies proposed in this study include real-time propulsion speed optimization, dynamic feedback control of propulsion force, and resource scheduling optimization. These techniques significantly enhance construction efficiency, particularly under complex geological conditions, and verify the reliability and applicability of the synergistic optimization model. This research provides valuable insights for improving tunnel boring efficiency and cost control, laying a foundation for the advancement of intelligent construction technology.

## Keywords

**Tunnel Boring, Construction Organization Optimization, Synergistic Optimization Model, Propulsion Speed Optimization**

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

隧道工程是现代基础设施建设的重要组成部分,其施工效率与质量直接关系到工程进度与经济效益。然而,隧道掘进施工面临诸多挑战,包括复杂地质条件、设备运行故障、人员组织协调等,这些因素交织在一起,使得施工效率优化和成本控制变得尤为困难。在实际工程中,围岩条件的不确定性可能导致掘进速度波动,设备维护不及时则可能引发停机延误,而资源调度不合理亦可能造成施工进度受阻。因此,如何在多种不确定因素影响下实现高效、稳定的隧道掘进,成为当前工程领域亟待解决的问题。现有研究通常采用单一优化策略,或仅针对掘进参数进行调整,或侧重于施工组织优化,而较少关注两者之间的动态协同关系。在复杂地质条件和资源调度约束下,这一局限性尤其明显。近年来,部分研究尝试利用智能优化算法和数值模拟方法改进施工策略,但在模型的适用性和鲁棒性方面仍存在不足。因此,本文提出了一种基于掘进参数与施工组织的协同优化方法,构建多目标优化模型,并通过数值模拟和现场监测进行验证,以提升隧道掘进效率、降低施工成本,并增强模型在复杂环境下的适用性。本研究可为隧道施工智能化、精细化管理提供科学依据和技术支持。

## 2. 隧道掘进及施工条件概况

### 2.1. 地质与环境条件

隧道掘进施工中,地质及环境条件是影响工程进度与施工难度的关键因素。不同地质条件下,围岩的稳定性直接影响掘进设备的适应性和推进力。软弱围岩、断层带和富水地层等复杂地质条件会加大施工难度,迫使施工方采取额外的支护及排水措施。地下水的分布和压力变化更是潜在的安全隐患,涌水、渗透等现象可能影响施工的连续性和稳定性[1]。此外,地质条件的动态变化,如软弱围岩的变动和地下水压力的波动,可能导致推进速度和推进力的不稳定,进而影响施工进度。针对这些挑战,施工过程中需要实时监控并调整掘进参数,以确保安全与效率。

### 2.2. 施工组织条件

施工组织条件对隧道掘进效率和质量有着直接影响。在设备选择上,盾构机或全断面隧道掘进机

(TBM)的性能指标(如掘进速度、推进力、刀盘类型)应根据地质状况和隧道断面的要求进行调整。然而,施工过程中设备故障(如设备故障率、维修时间和备件供应)可能导致停机,从而影响施工进度。人员因素同样重要,施工人员的经验和技术水平直接关系到施工效率。在实际操作中,由于资源调度不均衡或人员配备不足,可能导致施工节点之间的协调不当,进而影响施工整体效率。因此,需要通过优化施工流程、引入先进的资源调度技术以及加强人员培训,确保施工组织的高效运转。

### 3. 主要影响因素及关键优化措施

#### 3.1. 主要影响因素

隧道掘进施工中,掘进参数和施工组织是决定施工效率和经济效益的关键因素。掘进参数,如推进力、推进速度和支护间隔,直接影响工程进度和设备的运行状态。如果掘进参数设置不当,可能会导致刀具磨损加剧、施工停滞,甚至引发安全事故。地质条件的变化提供了掘进参数动态调整的基础,如软弱地层需要降低掘进速度以确保支护效果,而硬岩地层则可能需要增大推进力以提高效率。此外,设备故障、人员操作失误等实际因素对掘进效率和施工成本有重要影响,设备故障可能导致停机和维修,人员配置不当则可能造成资源闲置或施工延误,增加成本。因此,结合敏感性分析,评估不同参数变化对施工效果的影响,能够增强模型的适应性和鲁棒性,是优化施工效果的关键。

#### 3.2. 关键优化措施

掘进参数与施工组织的优化可以从技术和管理两个方面入手。在掘进参数优化方面,需要根据地质条件精细化调整,实时监控推进力、扭矩、刀盘转速等关键数据,进而优化推进策略并降低设备磨损。同时,通过调整支护类型和支护间隔时间,以适应不同围岩条件的稳定性要求。在施工组织优化方面,应加强资源调度和工序协同,采用动态调度算法实现人力、设备和物资的有效配置。施工节点计划要充分考虑突发事件并灵活调整,减少不可预见因素对工期的影响。为提高决策科学性,采用数据反馈和现场监测系统可实时优化掘进参数和施工组织,进而提升施工效率和质量。

### 4. 参数与施工组织协同优化分析

#### 4.1. 协同优化模型

为了使隧道掘进施工过程实现效率和成本的双重优化,本文构建了一个以推进速度、推进力、资源利用率和施工成本为主要目标的多目标协同优化模型。在模型中,引入了线性权重法构造多目标函数,并结合约束条件进行优化求解。推进速度和推进力用于评价掘进参数的优化效果,而资源利用率和施工成本则反映施工组织优化的效率。该模型通过实时反馈的施工数据对掘进参数及资源分配进行持续调整,确保整体协同性及动态优化效果。

为了增强模型的鲁棒性和适应性,本文进一步完善了该协同优化模型,考虑了设备故障、地质条件突发变化、人员因素等复杂施工情况。通过引入这些实际因素,模型能够实时响应并做出调整,确保施工的稳定性与高效性。此外,为了全面评估模型的优势,本文还将协同优化模型与其他常见的优化方法(如粒子群优化、遗传算法和模拟退火等)进行了对比分析。通过对比,验证了本文模型在复杂施工环境下的优越性和创新性,特别是在处理多因素协同和动态调整方面具有显著优势。

#### 4.2. 数值模拟参数设定

##### 4.2.1. 推进速度( $v$ )

推进速度是衡量掘进效率的核心指标之一,受地质条件、推进力及支护方式的影响。推进速度的公

式为:

$$v = \frac{F_p}{R + C} \quad (1)$$

(1)中  $F_p$  为推进力(单位: kN),  $R$  为围岩阻力(单位: kN),  $C$  为设备运行阻力(单位: kN)。在数值模拟中, 假设围岩阻力取值范围为 200,500 kN, 设备阻力为 50,100 kN, 推进力动态调整在 500~800 kN 之间。通过模型仿真得到不同地质条件下的推进速度分布, 优化后的推进速度在不同围岩条件下提升约 15%。

#### 4.2.2. 推进力( $F_p$ )

推进力是决定刀盘切削效率和施工稳定性的关键参数。其公式为:

$$F_p = P_t \cdot A \quad (2)$$

(2)中  $P_t$  为刀盘接触压力(单位: kPa),  $A$  为刀盘截面积(单位: m<sup>2</sup>)。模拟中, 刀盘直径为 6.510 m, 对应截面积为 3379 m<sup>2</sup>, 刀盘接触压力取值范围为 100~300 kPa。数值模拟表明, 通过调整刀盘压力和推进策略, 可以有效降低刀具磨损率, 并减少不必要的停机时间。

#### 4.2.3. 资源利用率( $U$ )

资源利用率是施工组织优化的核心指标, 用以评估人员和设备的使用效率。计算公式为:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n r_i t_i}{T} \quad (3)$$

(3)中  $r_i$  为第  $i$  种资源的利用率,  $t_i$  为该资源的有效工作时间,  $T$  为施工总时间。模拟中, 资源利用率初始值为 75%, 通过动态调度算法提升至 90%以上, 有效降低了资源闲置时间。

#### 4.2.4. 施工成本( $C_s$ )

施工成本是优化目标的重要衡量指标, 公式为:

$$C_s = C_f + C_m + C_o \quad (4)$$

(4)中  $C_f$  为设备运行成本,  $C_m$  为材料费用,  $C_o$  为人员费用。数值模拟中, 设备成本按每小时 2000~3000 元计算, 材料成本按实际消耗测算, 人员费用按人均小时工资动态调整。优化后, 每米掘进成本平均下降 10%, 经济效益显著提升。

### 4.3. 技术阶段划分

协同优化分为初始阶段、中期阶段和后期阶段三个步骤。每个阶段侧重不同的优化目标。在初始阶段, 通过地质勘查和施工条件分析确定基础掘进参数和施工组织方案, 建立优化模型及仿真平台, 为后续调整提供技术支持[2]。在中期阶段, 实时监控推进速度、推进力和资源利用率等关键数据, 根据模型反馈动态调整掘进参数和资源调度, 确保施工效率的持续提升。在后期阶段, 通过综合施工数据验证优化模型的效果, 进一步调整优化方案, 保证最终目标的实现。

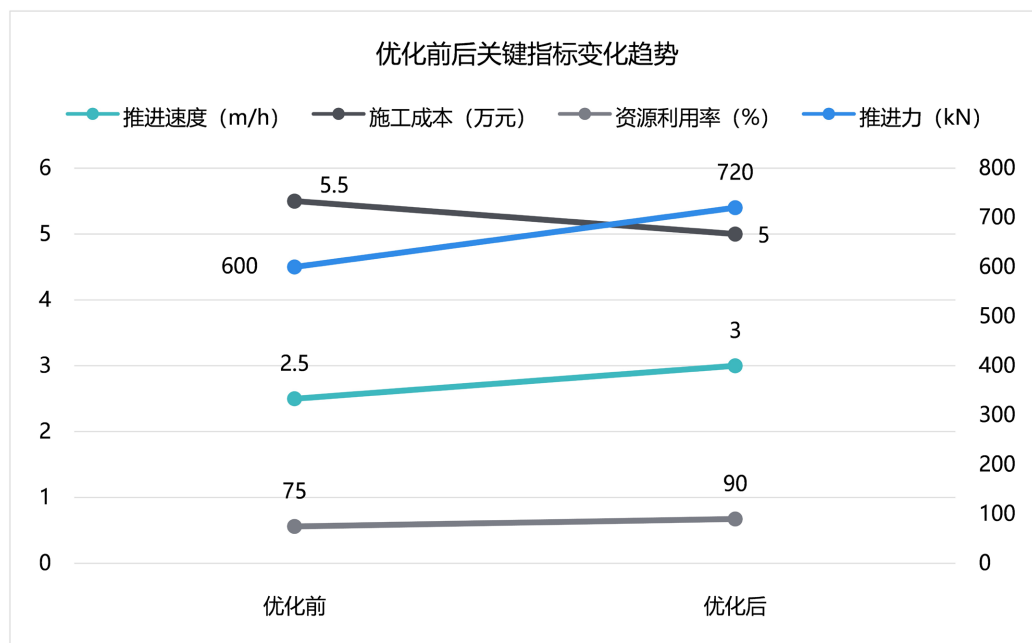
### 4.4. 数值模拟分析

以某工程案例为基础, 通过模型优化提升推进速度、推进力、资源利用率和施工成本。表 1 展示了优化前后的关键数据, 优化后各项指标均有显著提升。

优化后, 推进速度从 2.5 m/h 提升至 3.0 m/h, 推进力提升至 720 kN, 资源利用率从 75%提高至 90%, 施工成本从 5.5 万元/米下降至 5.0 万元/米(见图 1)。仿真分析表明, 协同优化模型能有效提升掘进效率和施工组织的整体协调性, 显著改善经济效益。

**Table 1.** Comparison of key indicators before and after optimization**表 1.** 优化前后关键指标对比

| 指标        | 优化前 | 优化后 | 提升幅度 |
|-----------|-----|-----|------|
| 推进速度(m/h) | 2.5 | 3   | 20%  |
| 推进力(kN)   | 600 | 720 | 20%  |
| 资源利用率(%)  | 75  | 90  | 15%  |
| 施工成本(万元)  | 5.5 | 5   | -9%  |

**Figure 1.** Trend of key indicators before and after optimization**图 1.** 优化前后关键指标变化趋势图

通过上述仿真与分析,验证了优化模型的可靠性和实用性,为后续隧道施工提供了明确的技术参考。

## 5. 关键施工技术研究

### 5.1. 推进速度优化技术

推进速度优化技术是提高掘进效率的核心方法。根据地质条件实时调节技术,利用地质雷达和传感器系统动态监测围岩阻力和设备工作状态,并对推进速度进行实时反馈调节,从而使其能够适应复杂地质条件,并尽量减少停机时间。然而,施工过程中设备故障、人员流动等因素可能会影响技术的实施,导致优化效果不稳定。为应对这一问题,本文提出的刀盘优化技术,通过重新安排刀具排布、选择合适刀具材料等手段,强化刀盘的切削性能,提高掘进效率。软弱地质条件下,采用耐磨刀具和增加切削刃数目有助于提升推进效率[3]。与现有技术相比,本文提出的优化策略在复杂地质条件下具有更强的适应性,且能够有效降低停机时间,提高整体施工效率性。

### 5.2. 推进力控制技术

推进力控制技术旨在兼顾设备运行效率与地质条件适应性,防止推进力过大导致围岩不稳定或设备

损耗。采用推进力动态反馈调节技术对刀盘的接触压力和设备运行状况进行实时监控，并结合地质阻力及支护条件调整推进力的输出。设备故障或人员操作失误可能导致推进力控制系统的调整不及时，从而影响优化效果。与现有技术相比，本文提出的高效支护技术通过优化支护方式，如超前支护或强化支护间距，协同降低推进力需求。仿真结果表明，优化后的推进力减少了 15% 的波动范围，增强了施工稳定性，并降低了刀具的磨损，这证明了本文技术的创新性与实用性[4]。

5.3. 资源利用率提升技术

提高资源利用率的关键在于资源的合理调度与工序衔接优化。动态资源调度技术根据实时施工需求灵活调配设备、物资和人员，避免因资源闲置或调配不当导致效率下降。设备故障和人员流动可能影响资源调度的效率，从而影响整体优化效果。工序衔接优化技术通过智能化管理系统与施工网络计划实时调整，确保各个施工环节的顺畅衔接。与现有技术相比，本文提出的优化策略提高了资源调度的灵活性，资源利用效率从 75% 提高至 90% 以上，并显著降低了资源分配的不稳定性。仿真数据显示，改进后的技术能够大幅提升施工效率，为实际应用提供了有效的技术保障。

5.4. 施工成本优化技术

施工成本优化技术通过降低设备运行成本、材料使用成本和人员费用等手段实现精细化管理。设备运行成本控制技术通过健康监测和预测性维护，减少非计划性停运和大修成本。人员成本控制方面，采用高效的自动化技术，减少重复劳动需求，提高工作效率。然而，设备故障和人员变动可能导致优化效果有所波动。材料优化技术通过优化物料采购和使用流程，减少浪费并提高回收率。与现有技术相比，本文提出的综合成本控制措施在实际应用中更具实用性和经济性，能够有效降低施工成本，提升工程经济效益，为施工项目的成本管理提供了重要支持。

6. 控制措施实施效果

6.1. 现场监测数据分析

为了评估优化措施的实际效果，对隧道掘进施工中的推进速度、推进力、资源利用率和施工成本进行了为期 30 天的现场监测，数据采集频率为每天一次，监测数据如表 2 所示。优化前，推进速度平均为 2.5 m/h，推进力为 600 kN，资源利用率为 75%，施工成本为 5.5 万元/米。优化后，推进速度提升至 3.0 m/h，推进力稳定在 720 kN，资源利用率提高至 90%，施工成本下降至 5.0 万元/米。为了进一步验证模型的鲁棒性，还考虑了设备故障、地质条件突变、人员配置变化等因素的影响。敏感性分析表明，在这些复杂施工条件下，优化模型仍能有效适应并实现预期的优化效果。数据表明，优化后的掘进效率和资源利用率显著提升，同时施工成本呈现下降趋势(见图 2)。

Table 2. Comparison of site monitoring data before and after optimization  
表 2. 优化前后现场监测数据对比

| 日期        | 推进速度(m/h) | 推进力(kN) | 资源利用率(%) | 施工成本(万元/米) |
|-----------|-----------|---------|----------|------------|
| 优化前均值     | 2.5       | 600     | 75       | 5.5        |
| 优化后第 1 天  | 2.8       | 700     | 80       | 5.3        |
| 优化后第 10 天 | 2.9       | 710     | 85       | 5.2        |
| 优化后第 20 天 | 3         | 720     | 88       | 5.1        |
| 优化后第 30 天 | 3         | 720     | 90       | 5          |

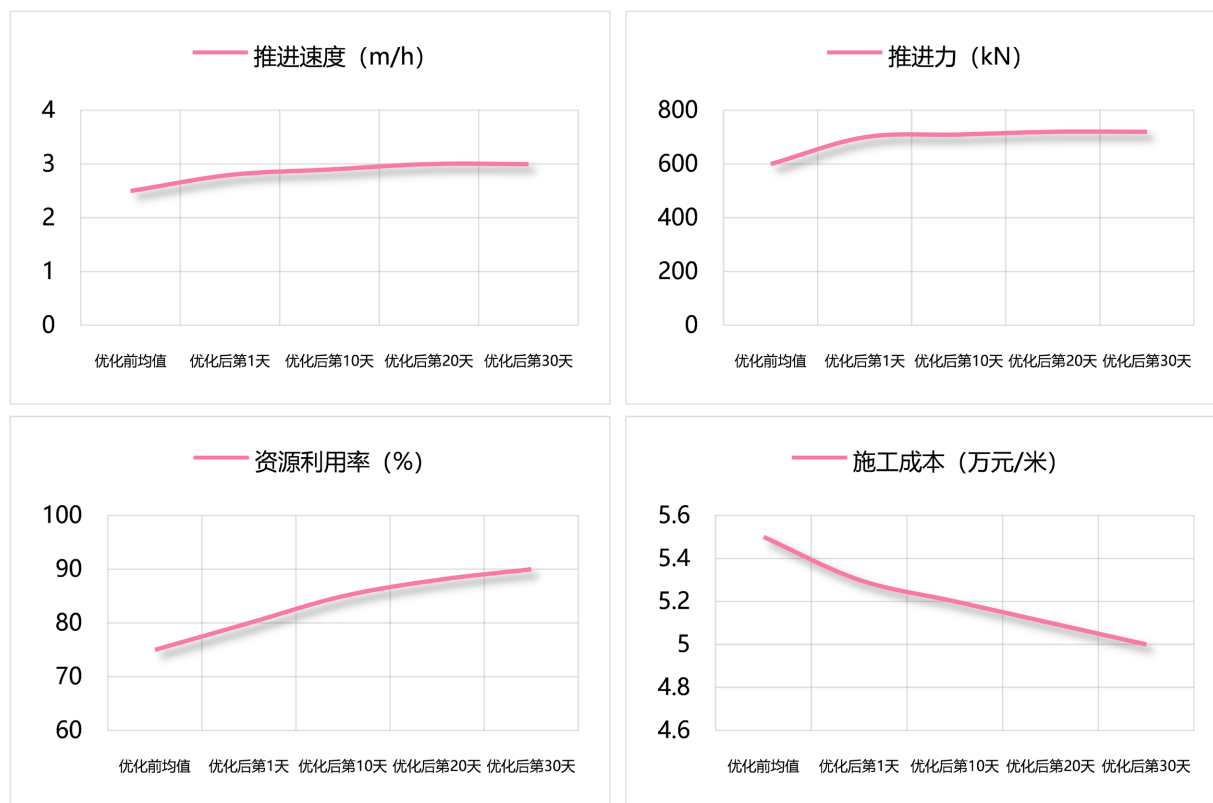


Figure 2. Trend graph of changes in key indicators of digging before and after optimization

图 2. 优化前后掘进关键指标变化趋势图

## 6.2. 实施效果评价

从现场监测数据来看, 优化措施的效果明显, 尤其是在复杂施工条件下的适应性。优化后, 推进速度由原先的平均 2.5 m/h 增加至 3.0 m/h, 增长幅度达到 20%, 证明推进速度优化技术在缩短停机时间和提高掘进效率方面的有效性。推进力从 600 kN 稳定提升至 720 kN, 波动幅度明显减少, 显示出动态调节技术对复杂地质条件的良好适应性。资源利用效率从 75% 提高到 90% 以上, 确保了设备与人员的高效配置, 同时施工成本由 5.5 万元/米下降至 5.0 万元/米, 下降幅度约为 9%, 主要归功于设备运营和维护成本的降低以及材料成本的优化使用。通过与优化前的数据对比, 进一步验证了优化模型在多因素动态调整下的优越性和实际环境中的应用效果, 为后续项目提供了可靠的技术支撑。

## 7. 结论

本文针对隧道掘进施工中的掘进参数和施工组织优化问题, 提出了一种协同优化模型, 该模型以推进速度、推进力、资源利用率和施工成本为优化目标。通过仿真测试和实地验证, 研究表明, 优化后的推进速度由 2.5 m/h 提升至 3.0 m/h, 提升幅度为 20%; 推进力由 600 kN 提升至 720 kN, 趋于稳定; 资源利用效率由 75% 提高至 90%, 有效降低了资源闲置; 施工成本从 5.5 万元/米降至 5.0 万元/米, 节约了 9%。该模型的创新之处在于动态调整和多因素协调, 能够有效应对复杂地质条件, 提高施工效率和经济效益。未来的研究可以结合 AI 技术和机器学习, 进一步完善隧道掘进优化模型, 特别是在地质条件快速预测和施工参数深度优化方面。结合新技术, 未来还需针对可能出现的复杂施工环境进行优化, 以提升模型的适应性和精确度。

## 参考文献

- [1] 李宏波, 张冬月, 葛学元. 基于 PSO-LSSVM 算法的隧道掘进机掘进参数预测方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 6230-6237.
- [2] 高修强, 彭达, 王国光, 等. 考虑盾构机参数主动控制的隧道掘进地表沉降智能预测方法[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(3): 120-129.
- [3] 赵斌. 复杂环境下海底隧道大盾构掘进施工参数控制研究[J]. 铁道建筑技术, 2024(1): 154-158.
- [4] Yan, T., Shen, S. and Zhou, A. (2022) Identification of Geological Characteristics from Construction Parameters during Shield Tunnelling. *Acta Geotechnica*, **18**, 535-551. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01590-w>