

深埋长隧洞 TBM 施工效率的多因素关联分析

何 鑫

四川驥行工程项目管理有限公司 四川成都

【摘要】本文针对深埋长隧洞中盾构掘进机（TBM）施工效率受多因素影响的问题，采用多变量关联分析方法，系统研究了地质条件、施工参数及设备状态等关键因素对 TBM 效率的综合作用机制。通过实地数据采集与统计分析，揭示了影响施工进度的主要瓶颈，为提高深埋长隧洞 TBM 施工效率提供理论支持和优化建议，助力工程安全与经济效益的双重提升。

【关键词】深埋隧洞；盾构施工效率；多因素关联；地质影响；施工参数

【收稿日期】2025 年 6 月 13 日

【出刊日期】2025 年 7 月 11 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250330

Multi-factor correlation analysis of TBM construction efficiency in deep-buried long tunnels

Xin He

Sichuan Jixing Engineering Project Management Co., Ltd., Chengdu, Sichuan

【Abstract】 This paper addresses the issue of multi-factor influences on the construction efficiency of Tunnel Boring Machines (TBM) in deep-buried long tunnels. Using multivariate correlation analysis, it systematically investigates the combined effects of key factors such as geological conditions, construction parameters, and equipment status on TBM efficiency. Through field data collection and statistical analysis, the study identifies the main bottlenecks affecting construction progress, providing theoretical support and optimization recommendations to enhance TBM efficiency in deep-buried long tunnels, thereby promoting both engineering safety and economic benefits.

【Keywords】 Deep-buried tunnels; TBM construction efficiency; Multi-factor correlation; Geological impact; Construction parameters

引言

深埋长隧洞工程因其复杂的地质环境和施工难度，一直是地下工程领域的技术难点。盾构掘进机（TBM）作为现代隧道施工的主力设备，其施工效率直接影响项目的进度与成本。随着工程规模不断扩大，单一因素分析已难以满足实际需求，多因素综合关联分析成为提高 TBM 效率的关键途径。本文将聚焦深埋长隧洞 TBM 施工中的多重影响因素，探讨其相互作用关系，为工程实践提供科学依据。

1 深埋长隧洞 TBM 施工效率现状及问题分析

深埋长隧洞盾构掘进机（TBM）施工效率问题在近年来地下工程领域中日益受到重视。随着城市地下空间开发需求的增加和工程规模的不断扩大，TBM 作为主要的隧道掘进设备，其运行效率直接决定了工程的进度与成本控制^[1]。深埋长隧洞施工环境复杂，地质条件变化多端，包括软弱围岩、断层破碎带、高地下水压力等不利因素，这些都对 TBM 的掘进速度和掘进参

数的稳定性产生了显著影响。同时，深埋环境对设备的维护和更换带来了较大挑战，设备故障率相对较高，严重制约了施工效率的提升。

除地质条件外，施工管理和操作参数也是影响 TBM 效率的重要方面。掘进参数如推进速度、刀盘转速、刀具磨损状况及注浆压力等均需根据现场实际情况精细调控。由于长隧洞施工周期较长，设备运行过程中难免出现机械磨损、泥浆循环不畅及排渣系统阻塞等问题，这些都直接影响掘进连续性和作业效率^[2]。施工人员操作经验与现场管理水平参差不齐，导致参数调整和故障响应不及时，进而影响整体施工进度。工程环境中的突发事件，如涌水、地质突变等，也极易引发停机等待和调整，增加施工风险和时间成本。

在深埋长隧洞 TBM 施工效率的现状分析中，传统单因素研究方法已难以全面反映实际施工过程中的复杂性。施工效率受多种因素交互影响，需通过系统的多因素关联分析来揭示这些因素之间的内在联系。当前

部分工程项目在效率评估和问题诊断上依赖经验判断,缺乏科学的量化分析工具,这限制了针对性优化措施的制定。通过多维度数据采集与统计分析,深入理解地质、设备和施工管理等多重因素的综合作用机制,成为提升深埋长隧洞 TBM 施工效率的关键路径。此背景下,研究深埋长隧洞 TBM 施工效率的多因素关联问题,既符合行业发展需求,也为工程技术进步提供有力支撑。

2 影响深埋长隧洞 TBM 施工效率的多因素识别

影响深埋长隧洞盾构掘进机(TBM)施工效率的因素多样且复杂,涉及地质环境、施工参数以及设备状态等多个方面。深埋长隧洞的地质条件往往较为复杂,包括岩层结构多变、地下水丰富以及地应力大等特征,这些自然条件对 TBM 的掘进速度和稳定性产生直接影响。不同岩性的硬度、节理发育程度及断层破碎带的存在均可能导致刀盘阻力增大,从而降低掘进效率^[3]。地下水渗透性强的区域容易引发涌水或泥浆流失现象,影响掘进机的连续运行和施工安全。地质条件的不可控性和复杂性是影响 TBM 施工效率的首要因素,需要结合实际地质勘探数据进行详细评估和动态调整施工方案。

施工参数在 TBM 效率提升中同样占据重要位置。推进速度、刀盘转速、泥浆压力、支护注浆速度等施工参数需要精确控制以适应地质变化。掘进过程中合理的推进力分配不仅保证了掘进机的稳定,还能有效防止掘进面塌方及设备损坏。掘进速度与刀盘转速的匹配直接关系到切削效率,过高或过低都会导致能耗增加或机械故障^[4]。泥浆系统的参数调节影响掘进面稳定和泥浆循环的效率,而支护注浆则关系到隧道的即时支护效果,直接影响施工安全和进度。优化施工参数组合是提升深埋长隧洞 TBM 施工效率的关键环节,需要通过试验数据和现场反馈不断修正和完善。

设备状态及运行维护是保障盾构掘进机(TBM)在深埋长隧洞施工中持续高效作业的核心基础。机械性能的稳定性直接关系到设备的掘进能力和施工连续性,尤其是刀盘及刀具的磨损程度,对掘进效率影响极大。长期处于高强度、高负荷的地下环境中,刀盘和刀具难免出现不同程度的磨损甚至损坏,若不能及时检修和更换,将严重制约施工速度,增加施工成本。同时,液压系统的压力稳定性和电控系统的响应灵敏度同样是保障施工顺利进行的重要技术指标。液压系统的异常波动会导致掘进动作不协调,而电控系统的滞后或失灵则可能引发施工事故或设备停机。完善的设备监测与维护管理体系能够实时采集设备运行数据,对关

键部件状态进行动态分析,预测潜在故障隐患,提前实施维护和保养措施,从而最大限度减少非计划停机时间。科学合理的设备状态管理不仅提升了施工效率,也有效保障了施工安全,是深埋长隧洞 TBM 工程顺利推进不可或缺的保障条件。

3 多因素关联分析方法及实地数据采集

多因素关联分析在深埋长隧洞 TBM 施工效率研究中发挥着至关重要的作用。针对复杂的施工环境及多变的地质条件,传统的单因素分析已难以揭示各因素间的内在联系及其对施工效率的综合影响。因此,本研究采用多变量统计分析方法,综合考虑影响 TBM 施工效率的地质参数、施工工艺参数和设备运行状态等多个维度,通过数学模型实现因素间的量化关联^[5]。该方法不仅能够准确识别各因素的权重和相互作用关系,还能揭示潜在的非线性影响机制,为后续效率优化提供科学依据。

在数据采集方面,研究选取了多个典型深埋长隧洞施工项目作为样本,采集内容涵盖了岩层类别、地下水压力、围岩变形、TBM 推进速度、刀盘转速、设备故障频率等关键参数。数据采集过程中,利用高精度传感器和实时监控系统,确保信息的准确性和时效性。同时,结合施工日志和设备维护记录,构建了详尽的数据库,为多因素关联分析提供了充足的数据支撑^[6]。通过数据预处理,包括异常值检测和缺失数据填补,保证了数据的完整性和可靠性,提升了分析结果的科学性。

基于收集的高质量施工及监测数据,本文采用了主成分分析(PCA)、多元回归分析以及结构方程模型(SEM)等先进的统计方法,对深埋长隧洞 TBM 施工过程中各影响因素之间的相关性和因果关系进行了系统性和深入性的探讨。分析结果表明,地质环境中的地下水渗透压力和围岩稳定性是影响 TBM 推进速度的关键地质因素,二者对施工效率的制约作用尤为显著。同时,施工参数如刀盘转速、推进力以及掘进压力的合理调整,与设备运行效率密切相关,直接影响施工进度和机械负荷状态。结构方程模型的拟合与验证不仅揭示了这些因素间复杂的耦合关系,还明确了各变量对施工效率的直接和间接影响路径。基于此,能够为隧道施工管理提供科学的理论依据,支持制定精准的施工调整方案,有效缓解施工瓶颈,实现深埋长隧洞 TBM 施工效率的显著提升和工程进度的保障。

4 多因素综合作用机制及效率提升策略研究

多因素综合作用机制的研究对于提升深埋长隧洞中盾构掘进机(TBM)施工效率具有重要意义。TBM

施工效率不仅受单一因素影响,而是多种因素相互交织、共同作用的结果。地质条件复杂多变,岩体坚硬程度、地层破碎带分布以及地下水丰富程度等都会对掘进速度和设备磨损产生显著影响^[7]。施工参数如刀盘转速、推进速度、掘进压力等的合理调节,是适应不同地质环境的关键。同时,设备状态,包括盾构机的机械磨损、液压系统稳定性及传感器监测准确性,也直接影响施工的连续性和安全性。深入分析这些因素的交互关系,能够揭示影响施工效率的瓶颈,为施工管理提供精准的决策依据。

通过多变量统计分析和实地数据采集,研究发现地质条件与施工参数之间存在复杂的耦合效应。高硬度岩体要求降低推进速度以保证设备安全,但过低的速度又会降低整体效率。合理调整刀盘转速与掘进压力,可以在保证设备稳定运行的前提下,优化施工进度^[8]。设备状态的动态监测为参数调节提供了数据支持,及时发现机械异常并调整施工方案,避免因设备故障导致的工期延误。实际工程案例中,综合应用这些关联规律,通过反馈控制系统实现施工参数的智能调整,显著提升了 TBM 的施工效率和隧道掘进的连续性。

基于多因素综合作用机制的深入分析,本文提出了一系列切实可行的效率提升策略,以应对深埋长隧洞 TBM 施工中面临的复杂挑战。首先,完善地质预报与风险评估系统,能够提前识别潜在地质风险,提升施工方案的针对性和灵活性,确保施工过程更加科学合理。其次,强化设备状态的实时监控,借助先进传感技术和数据采集手段,提升故障预警能力和维护响应速度,最大限度减少设备故障带来的停工风险。优化施工参数调节机制,促进施工参数与现场复杂地质环境的动态适配,实现参数调整的精准化和智能化。除此之外,积极推进智能化施工技术的应用,利用大数据分析和机器学习算法深度挖掘施工效率影响规律,支持施工过程的精细化管理和决策优化。综合运用上述策略,能够有效破解深埋长隧洞 TBM 施工效率的技术瓶颈,推动工程进度和经济效益实现双重提升,助力隧道工程

高质量发展。

5 结语

深埋长隧洞 TBM 施工效率的提升依赖于对多因素综合作用机制的深入理解。地质环境、施工参数及设备状态之间的复杂关联决定了掘进进度和施工质量。精准把握这些因素的耦合关系,结合智能监测与动态调控技术,能够有效优化施工方案,提升效率与安全水平。未来施工实践应持续推动多因素分析方法与智能化技术的融合应用,为深埋长隧洞工程建设提供坚实的技术保障,推动隧道施工迈向高效、绿色的发展新阶段。

参考文献

- [1] 许增培,饶明明,桂欣.引调水工程深埋长隧洞施工方案与施工方法选择[J].四川水利,2025,46(03):78-81+88.
- [2] 朱文斌.某深埋 TBM 引水隧洞堵水灌浆施工研究[J].广东水利水电,2025,(01):75-80.
- [3] 叶焰中,高健,罗来辉,等.城市深埋隧洞 TBM 施工超前地质预报体系及应用[J].人民长江,2024,55(S1):59-62.
- [4] 肖逸飞.深埋长引水隧洞 TBM 施工通风方案与装备研究[J].水利技术监督,2024,(04):291-294.
- [5] 沈健.深埋长隧洞施工安全监测[J].人民珠江,2023,44(S1): 166-170.
- [6] 吕斌,邱道宏,杨修,等.深埋长距离引水隧洞敞开式 TBM 施工不良地质灾害处置措施研究[J].水利规划与设计,2022,(11):121-125.
- [7] 蔺凤林.深埋长隧洞岩爆及断层区域地质特征及施工方法[J].水利规划与设计,2022,(07):153-158.
- [8] 高涛,赵宁.深埋长隧洞软岩大变形控制措施[J].云南水力发电,2022,38(06):193-197.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

