

# 复杂地质条件下水工隧洞机械化施工参数优化研究

丁思全

北京海策工程咨询有限公司

DOI:10.32629/hwr.v9i12.6678

**[摘要]** 针对复杂地质条件下水工隧洞机械化施工中参数与地层动态适配的难题,研究通过理论分析与数据建模,系统揭示了软弱围岩、极硬岩及高地应力等典型地质条件对掘进推力、刀盘扭矩等关键参数的制约机制。构建了以地质超前预报与掘进实时感知数据融合为基础的参数动态优化模型,运用多目标优化算法实现了施工效率、能耗与设备损耗的综合平衡。该模型能够根据围岩强度、完整性和地下水状态等多重地质变量的实时反馈,动态调整推力与扭矩的匹配关系。提出了基于机器学习的地质-参数映射方法与自适应调控策略,形成了涵盖识别、决策与执行的智能化参数协同控制体系。该研究为提升复杂地质隧洞施工的适应性、经济性与安全性提供了系统的理论框架与关键技术支撑。

**[关键词]** 水工隧洞; 复杂地质; 机械化施工; 参数优化; 动态调控

**中图分类号:** TV672+.1 **文献标识码:** A

## Research on Parameter Optimization for Mechanized Construction of Water Conveyance Tunnels under Complex Geological Conditions

Siquan Ding

Beijing Haice Engineering Consulting Co., Ltd.

**[Abstract]** Focusing on the challenge of dynamic adaptation of parameters to geological conditions in the mechanized construction of water conveyance tunnels under complex geological conditions, this study systematically reveals the constraint mechanisms of typical geological conditions such as weak surrounding rock, extremely hard rock, and high ground stress on key parameters such as thrust and cutterhead torque through theoretical analysis and data modeling. A dynamic parameter optimization model based on the fusion of geological advanced prediction and real-time perception data during excavation is constructed. The multi-objective optimization algorithm is employed to achieve a comprehensive balance between construction efficiency, energy consumption, and equipment wear. This model can dynamically adjust the matching relationship between thrust and torque based on real-time feedback of multiple geological variables such as rock strength, integrity, and groundwater conditions. A geological-parameter mapping method based on machine learning and an adaptive control strategy are proposed, forming an intelligent parameter collaborative control system covering identification, decision-making, and execution. This research provides a systematic theoretical framework and key technical support for enhancing the adaptability, economy, and safety of tunnel construction under complex geological conditions.

**[Key words]** Water conveyance tunnel; Complex geological conditions; Mechanized construction; Parameter optimization; Dynamic control

随着国家水网建设与重大水利工程的持续推进,深埋长距离水工隧洞已成为现代水利基础设施的重要组成部分。在“十四五”规划强调基础设施高质量发展的背景下,软弱破碎围岩、极硬岩、高地应力等复杂地质条件对机械化施工提出了更为严峻的技术挑战。施工参数与地质环境的动态适配不仅是工程安全高效推进的关键瓶颈,更是实现智能建造与绿色施工的核心

环节。面对复杂多变的地质条件,传统的经验驱动型参数设置方法已显不足,亟需建立一套以地质信息为牵引、以数据模型为驱动的科学决策体系。因此,系统揭示地质条件与施工参数的相互作用机理,构建科学有效的参数优化体系,对推动我国水工隧洞建设技术创新与工程实践突破具有重要的理论与现实意义。

### 1 复杂地质条件与水工隧洞机械化施工现状分析

### 1.1 水工隧洞机械化施工技术水平与工程应用现状

当前水工隧洞机械化施工已形成以全断面隧道掘进机与钻爆法配套大型机械为主的两种技术体系<sup>[1]</sup>。全断面隧道掘进机在长距离、断面均一的隧洞工程里占据主导地位,其装备正朝着大直径、高扭矩、强适应性方向发展,还集成了一系列实时监测与姿态控制系统,钻爆法施工通过三臂凿岩台车、拱喷一体化台车、智能衬砌台车等高度机械化配套,实现了开挖、支护与衬砌工序的连续流水作业。施工技术的演进突出表现在自动化与信息化融合层面,部分先进项目已引入基于传感器网络的掘进参数实时采集、基于地质模型的动态反馈调整以及依托物联网平台的远程协同管理,即便如此,机械化施工的整体智能化水平仍处于局部环节自动化阶段,尚未形成贯穿勘察、设计、施工与运维全过程的自主决策与闭环控制能力。

### 1.2 复杂地质条件引发的典型施工难题与风险特征

复杂地质条件显著增加了水工隧洞机械化施工的技术难度与安全风险。在软弱破碎围岩地层中隧道开挖后围岩自稳能力较差,容易引发掌子面失稳、洞壁坍塌以及突发性涌水等状况,这不仅会制约机械掘进效率,更有可能导致设备卡滞或者被掩埋,极硬岩与高磨蚀性地层会致使刀具出现异常磨损、刀盘振动加剧以及主驱动系统负荷陡增等问题,造成掘进速率急剧下降以及关键部件寿命大幅缩短<sup>[2]</sup>。高地应力环境下硬岩岩爆与软岩大变形问题特别突出,岩爆呈现为围岩瞬时弹射破坏会威胁人员设备安全,大变形则会引起支护结构失效、隧道净空被侵占甚至引发持续性收敛变形。此外,活动断裂带、高外水压力、有害气体等地质风险相互交织,使得施工过程面临不确定性高、处置难度大、成本控制困难等系统性挑战。

## 2 复杂地质对机械化施工参数的影响机制

### 2.1 关键地质因素对掘进参数的动态作用规律

地质因素是决定机械化施工参数设置与动态调整的根本依据,围岩强度和完整性直接制约着掘进推力与刀盘扭矩的合理范围,在极硬岩地层当中高抗压强度会使所需推力呈指数级增长,刀盘扭矩也会因破岩难度增加而出现大幅上升的情况,岩体结构面发育程度比如节理裂隙密度与方位显著影响贯入度和掘进速度,在破碎带里过高的贯入度容易引发掌子面过度扰动和失稳现象,地下水的赋存状态对施工参数有着双重方面的影响,富水地层中水压与渗流作用会降低围岩有效应力进而可能降低所需推力,不过同时会加剧渣土改良难度以及出渣系统的负荷。高地应力场会和掘进卸荷过程相互耦合,进而诱发岩爆或者大变形风险情况,这就迫使推进速度与刀盘转速的预防性调低来控制能量释放速率,这些地质因素不是独立发挥作用的,而是形成了复杂的动态反馈系统,这要求掘进参数要依据地层条件实时揭示并做连续精准的适应性调整。

### 2.2 施工参数失配导致的工程效能与设备响应分析

施工参数与地质条件之间的失配会引发一系列连锁式的负面效应,直接损害工程效能与设备安全。当推力、扭矩等参数设置过于激进,超过特定地层承载或破岩所需程度时,就会造成能

量出现无效耗散,具体表现是掘进速度提升有限可是电能消耗会急剧增加,同时还会加大刀具出现非正常磨损和断裂的风险,相反地,如果参数设置过于保守,就没办法让设备能力得到充分发挥,导致掘进效率变得低下,工期也会因此延长,单位进尺成本会明显上升,参数失配对设备本身是个严峻考验,在软弱地层里刀盘转速过高会加剧对围岩的剪切扰动,进而引发塌方并且导致刀盘被卡住,在硬岩中转速过低和推力过高组合则可能让刀盘振动超过标准,损伤主轴承等核心部件。失配还会在设备运行数据中留下特征信号,如特定频段的振动能量出现升高、液压系统压力脉动存在异常等,这些信号能够作为早期预警方面的诊断依据,从系统响应的角度来看,参数失配还会破坏出渣以及支护等后续工序的平衡,进而造成渣土堵塞、支护滞后等并行问题,最终会将局部参数问题演变成影响整个施工链条效率与安全的系统性风险。

## 3 复杂地质条件下水工隧洞机械化施工参数优化

### 3.1 基于地质信息实时反馈的参数动态调控机制

基于地质信息实时反馈的参数动态调控机制,旨在构建以数据驱动的自适应控制闭环,这一机制通过整合超前地质探测数据、掘进过程参数以及围岩实时监测信息,达成对工程地质环境的动态感知<sup>[3]</sup>。超前探测数据能提供前方地层岩性、构造以及含水性方面的趋势判断,为参数预置搭建起宏观框架,在掘进过程中,设备推力、扭矩、转速以及振动等参数的连续变化情况,直接反映出掌子面岩体的即时力学响应,这些参数的时间序列特征被用来实时反演围岩强度与完整性变化,要实现精准反演,就得建立设备响应信号和岩体力学参数之间的映射关系数据库,并且通过机器学习方法持续迭代更新该关系模型。同时,布设在盾体结构及已施工区段的传感网络,持续捕捉围岩变形、应力重分布以及微破裂活动信号,以此来评估当前施工参数对围岩稳定性的影响程度,依据多源信息进行融合分析之后,系统可以动态生成参数调整的指令,进而实现施工参数与揭露地质条件之间的实时匹配与优化。

### 3.2 多目标约束下的施工参数优化建模与求解方法

施工参数优化需要在多重工程目标与约束条件下寻求平衡,其建模过程会把地质不确定性、设备物理极限还有工程管理要求转化成数学表达<sup>[4]</sup>。模型以地质勘察和实时感知数据作为输入,将围岩级别、强度指标、地应力状态等量化成约束条件或者目标函数里的权重系数,优化目标一般包含掘进速率、刀具消耗成本、系统能耗以及围岩扰动控制等多个维度,这些目标之间常常存在相互制约的关系。约束条件涵盖设备额定能力、支护系统安全阈值、施工进度要求以及特定地质风险控制标准,要处理这个多目标优化问题,需要建立非支配排序和Pareto前沿搜索模型,并且应用智能优化算法在可行解空间内开展高效寻优,求解结果并非单一的最优解,而是一组在给定的偏好下的非劣解集合,能为不同施工阶段和风险偏好的决策提供可选的参数策略组合。

### 3.3 不同地质区段的机械化施工参数适配技术

针对不同地质区段的特性,需发展具有针对性的施工参数适配技术。在完整硬岩地层这种地质条件下,参数适配重点在于实现高效破岩以及维持设备可靠运行,通常会采用较高的推力配备和经过优化的刀盘转速组合,在保证贯入深度的同时控制刀具的冲击荷载与热机械疲劳<sup>[5]</sup>。在高地应力硬岩潜在岩爆区段,适配策略转变为应力调控和风险缓释,通过控制掘进速度与循环进尺来管理能量释放速率,并且可能结合特定的刀盘操作模式以诱发应力平顺转移。在软弱破碎或富水地层当中,适配技术核心是维持开挖面稳定以及保障出渣顺畅,采取较低的推力与转速设定来减少对围岩的扰动,同时同步调整渣土改良系统的参数以确保渣土流塑性满足输送要求。对于具有特殊工程性质的岩层,比如遇水软化地层,就需要进一步调整掘进用水方案或者采用干式掘进工艺。

### 3.4 施工参数智能决策与协同控制系统构建

施工参数智能决策与协同控制系统是实现优化参数自动执行和多系统联动。该系统把参数优化模型当作计算引擎,集成了地质信息系统、设备状态监控系统以及专家知识库。其工作流程从综合解析实时地质数据和设备运行数据开始,优化模型依照这些数据生成初步的参数建议方案。智能决策模块开始介入工作,根据内置规则库和历史经验数据,对建议方案做安全性与可行性评估并做出最终决策。此评估过程不仅会考虑技术参数,还会融合经济性分析,像对比不同参数方案下的预估刀具成本和能耗成本。协同控制功能将决策指令分解后同步下发到各相关执行单元,推进液压系统接收推力与速度方面的指令,主驱动系统接收转速与扭矩的设定,辅助系统如渣土改良、背部注浆等接收相应材料配比和注浆参数指令。系统同时具备在线学习和自我调整的能力,通过持续比对设定目标和实际施工效果,迭代优化决策逻辑和控制参数。

### 3.5 参数优化方案的系统集成与协同流程构建

参数优化方案的有效性最终取决于其在整体项目管理框架中的系统性集成与标准化流程嵌入。集成工作首先将重点放在数据层面,需建立起统一的数据标准和接口规范,实现地质、设计、施工、监测等各个环节信息的互联互通,构建起全生命周期的数据底座,这要打破传统项目管理中经常出现的“信息孤岛”现象,推动BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)和实时监控

系统进行深度融合。在技术实施层面,应定义从地质信息采集分析、施工风险研判、参数优化计算、指令下达执行到效果后评估的标准化工作程序,明确各个节点的输入输出、职责分工和决策权限,在管理协同层面参数优化流程必须和施工组织设计、资源配置计划、设备维护保养体系以及安全质量管控程序进行深度融合。这意味着参数优化系统的输出能够直接触发相关的物料采购、维保安排及风险预案启动。通过这种深度集成的方式,参数优化从原本一项独立的技术活动,转变成为驱动整个工程项目达成精细化、智能化运行的核心管理流程与决策支持机制。

## 4 结语

通过融合地质实时感知、多目标协同优化与智能决策控制技术,构建了复杂地质条件下水工隧洞机械化施工参数的动态优化与调控体系,为解决施工参数与地质条件动态匹配难题提供了系统化方法。该体系能够有效提升隧洞施工的地质适应性和掘进效率,显著降低设备异常损耗与施工风险。未来应进一步结合人工智能算法与数字孪生平台,深化施工参数自主寻优与智能调控能力,推动水工隧洞施工向以数据驱动、智能响应为特征的智慧化建造模式演进,特别是探索基于强化学习的自适应控制策略,使掘进系统能够在与不确定地质环境的持续交互中自主学习并优化行为。为我国新阶段水利高质量发展提供有力的技术支持。

## 参考文献

- [1]张海彝,田平刚,江常敏.复杂地质水工隧洞GeodeEM3D物探技术应用[J].海河水利,2025,(10):107-110+128.
- [2]孙立公.水工隧洞施工现状及未来发展趋势探析[J].大坝与安全,2025,(03):69-72.
- [3]雷晗,许大鹏,江登峰.复杂地质条件下的长距离输水隧洞设计[J].特种结构,2025,42(03):12-16+34.
- [4]胡其林,张萍,罗臣.水利工程大断面输水隧洞机械化钻爆工艺应用[J].四川水利,2023,44(05):108-111.
- [5]郝俊锁.复杂地质特长深埋水工隧洞智能化施工关键技术研究[J].现代隧道技术,2021,58(06):188-196.

## 作者简介:

丁思全(1979--),男,汉族,四川绵阳人,本科,高级工程师,研究方向:水利水电工程施工管理。