

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.069



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于可掘性解耦的盾构掘进参数阈值 动态控制方法

王建军^{1,2}, 李彤^{3,4}, 荣雪宁⁵, 王加俊⁵, 刘鹏¹

(1. 中交隧道工程局有限公司, 北京 100102; 2. 中交一公局集团有限公司, 北京 100024; 3. 江苏省地质局第一地质大队, 南京 210041; 4. 江苏省城市地下空间开发利用与安全防护工程研究中心, 南京 210041; 5. 南京工业大学 交通运输工程学院, 南京 210009)

摘要:为降低因刀盘扭矩波动过大导致的设备健康风险,以组合双因素方法解耦地质参数、掘进参数和岩体可掘性之间的网状影响机制,在掘进效率控制律约束下显式求解掘进参数动态控制策略,实现对刀盘扭矩超载和波动的动态抑制。结果表明:组合双因素方法能学习到可掘性控制因素之间差异影响机制的低维特征,多分组单调性分析和椭圆锥包络面模型能解释各因素对可掘性的影响机制,椭圆锥包络面方程在判定刀盘扭矩过载风险时兼具地层普适和解析清晰的优点;基于可掘性解耦的盾构掘进参数阈值动态控制方法,能为针对掘进参数波动和盾构关键元件损坏的风险管控提供显式的决策指令和快速响应指令的控制链:其指令层的输出具备可解释性——椭圆锥包络面方程二维投影在掘进效率控制律约束下可转化为以刀盘扭矩阈值为控制目标的掘进速率动态阈值,其应用层控制逻辑为先验条件下的单因素调控,能快速响应动态指令并增强掘进参数稳态。

关键词:盾构;掘进参数;可掘性;解耦;阈值

中图分类号:U455.43

文献标志码:A

文章编号:2096-6717(XXXX)XX-0001-11

A dynamic control method for shield tunneling parameter thresholds based on decoupling analysis of boreability

WANG Jianjun^{1,2}, LI Tong^{3,4}, RONG Xuening⁵, WANG Jiajun⁵, LIU Peng¹

(1. CCCC Tunnel Engineering Company Limited, Beijing 100102, P. R. China; 2. CCCC First Highway Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100024, P. R. China; 3. The First Geological Brigade of Jiangsu Geological Bureau, Nanjing 210041, P. R. China; 4. Jiangsu Province Engineering Research Center of Urban Underground Space Development, Utilization and Safety Protection, Nanjing 210041, P. R. China; 5. College of Transportation Science & Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, P. R. China)

收稿日期:2025-03-17

基金项目:国家自然科学基金(52208393);爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室资助(LGD-SKL-202208);中交隧道工程局有限公司2022年度科技研发项目(2022-01);中交集团2022年重点研发项目(2022-24)

作者简介:王建军(1972-),男,高级工程师,主要从事轨道交通工程技术研究,E-mail:292286190@qq.com。

李彤(通信作者),男,高级工程师,E-mail:gnotil80@163.com。

Received: 2025-03-17

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52208393); Funded by State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact (No. LGD-SKL-202208); Annual R & D Projects of CCCC Tunnel Engineering Company Limited in 2022 (No. 2022-01); Key Research and Development Projects of CCCC in 2022 (No. 2022-24)

Author brief: WANG Jianjun (1972-), senior engineer, main research interest: rail transit engineering technology, E-mail: 292286190@qq.com.

LI Tong (corresponding author), senior engineer, E-mail: gnotil80@163.com.

Abstract: In order to reduce the health risk of equipment due to excessive cutterhead torque fluctuation, the overload and fluctuation of cutterhead torque need to be dynamically suppressed. The dynamic control thresholds of tunneling parameters under the constraint of tunneling efficiency control law is explicitly derived to reveal the suppression strategy on the basis of decoupling the network influence mechanism among geological parameters, tunneling parameters and rock mass boreability through the combinational two-factor analysis. The results show that: the combinational two-factor analysis can learn the low-dimensional characteristics of the mechanism of differential interaction within the rock mass boreability control factors, the multigroup monotonicity analysis and the elliptic conic envelope model can explain the influence mechanism of the factors on boreability. The elliptic conic envelope model can accurately determine the overload risk of cutterhead torque in the form of analytical model in multiple stratum. In the risk management and control task against the tunneling parameters fluctuation and the key components damage of shield, the dynamic control method for shield tunneling parameter thresholds based on decoupling analysis of boreability can provide explicit decision instructions and the control chain of fast command response. The output of the instruction layer of the control method is interpretable for the two-dimensional projection of the elliptic conic envelope equation can be transformed into a dynamic threshold model of tunneling speed with the cutterhead torque thresholds as the control goal under the constraint of tunneling efficiency control law. The command logic of the application layer is prior-determined single factor control, which can not only respond to dynamic instructions quickly, but also enhance the steady state of tunneling parameters.

Keywords: shield; tunneling parameters; boreability; decouple; threshold

在盾构/TBM施工过程中,地质认识局限性、人员操作差异性问题是对施工效率和设备损坏风险实施有效管控的主要制约因素^[1]。合理设置掘进参数,是提高掘进效率、减少设备损耗的关键。掘进参数主要受地层参数和机械设备参数控制,在给定设备选型条件下合理评价岩体可掘性,是提高掘进参数地层适应性的必要条件。

盾构/TBM施工中的地层可掘性,反映了岩石自身的破碎难易程度^[2],其指标主要有掘进速率、贯入度、现场贯入指标FPI、扭矩贯入指标TPI等。相较于FPI和TPI指标,掘进速率和贯入度没有考虑破岩荷载因素。FPI和TPI的构造符合破岩力学机理^[3],是评价盾构/TBM性能和岩体掘进难度的合理指标。

地层的不确定性和不均匀性,以及各类地质参数、设备参数、掘进参数对可掘性指标的耦合影响,可通过理论分析、统计建模方法进行预测。Feng等^[4]建立了考虑岩石破碎机理和刀具受力平衡的FPI理论计算模型,在刀盘整体掘进复杂地层时,对多刀在刀-岩接触面复杂几何边界和刀盘变形协调的计算方法存在局限。统计建模方法建立在通过数学模型表达地质特征、掘进参数特征与可掘性指标之间的相关性,针对光面盘形滚刀,Parsajoo等^[5]利用模糊集方法构建了预测FPI的预测模型,Dardashti等^[6]采用回归方法实现了亚临界载荷条件下的FPI预测,Hassanpour等^[7]通过筛选与FPI之间

有关的QTBM参数提高了FPI预测精度,并简化了模型结构。Salimi等^[8]将反映岩石胶结、颗粒尺寸的变量添加进影响因素,构建了硬岩TBM的FPI预测模型。杜立杰等^[9]建立了以岩石单轴抗压强度和完整性指数为自变量的FPI二元指数显式预测模型。可掘性指标的预测模型为围岩分级、掘进参数和掘进效率预测提供支撑。张玉伟等^[10]以岩石强度、完整性指标作为自变量构建了FPI的二元预测模型,建立了以FPI为自变量的贯入度、刀盘推力和掘进速率单因素预测模型,采用聚类方法进行可掘性分级;刘佳伟等^[11]采用运筹学方法建立了基于FPI的可掘性和适应性分级方法;赵思成等^[12]建立了以FPI与TPI作为地层可掘性自变量的掘进参数预测模型;吴鑫林等^[13]基于FPI双变量预测模型对贯入度进行了定量预测。

综上所述,当前研究成果的主要局限在于:1)对可掘性指标、掘进参数的预测模型,单因素预测模型无法反映其他影响因素对应变量的影响,自变量不足;多元回归、神经网络等模型,在变量之间的耦合关系对输出的敏感性、模型结构对知识先验的反映程度、地层参数获取难度等方面的局限,导致模型缺乏可解释性,使得模型在地层变化时的泛化能力较弱。2)对FPI、TPI、掘进参数的预测模型,输出均为点估计,点估计在时间上的高波动频率使操作员难以频繁在控制面板上动态调控,缺乏便于操作且兼具理论和统计依据的掘进参数动态阈值。

为了克服可掘性预测和应用中欠缺影响因素耦合作用机制解释、基于可掘性预测的掘进参数点估计模型不适用于输出区间预测的局限,笔者依托盾构施工实测数据,以数理统计方法实施解耦分析,分析可掘性控制因素多元耦合机制,据此建立基于可掘性解耦的盾构掘进参数阈值动态控制方法,从而实现 对刀盘扭矩的动态控制。

1 工程背景

1.1 工程地质概况

南京地铁 6 号线金陵石化—十月广场区间(简称金—十区间)为 6 号线的最长盾构区间,区间单线长度 3 774 m,单环衬砌宽 1.2 m,轨道面最低点标高约 -11.97 m。覆盖层厚度 11.95~39.27 m,主要

为可塑~硬塑状态粉质黏土(①~④层)以及全风化泥质砂岩(Klg-1),对施工扰动敏感程度较低^[14],地面沉降风险较小。但土-岩界面、岩层软硬差异大,均质段和上软下硬段沿掘进轴线方向分布情况如图 1 所示,盾构掘进地层如表 1 所示,区间穿越里程最长的全断面均质地层为 J1-2xn-3、Klg-3 和 J31-2。

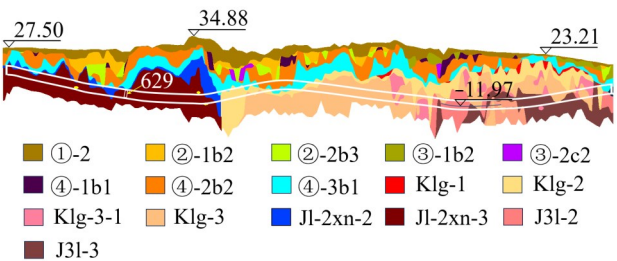


图 1 区间左线地层分布
Fig.1 Geological profile example of the section

表 1 盾构掘进地层信息

Table 1 Information of stratum drilled by shield

地层名称	地层描述	平均密度/(g/cm ³)	平均完整性指数	平均天然单轴抗压强度/MPa	围岩等级	穿越里程占比
Klg-2	强风化泥质砂岩	2.48	< 0.30	< 0.50	V	<5.00%
Klg-3-1	中风化泥质砂岩	2.55	< 0.30	1.06	V	<5.00%
Klg-3	中风化泥质砂岩	2.62	0.31	5.26	V	15.34%
J1-2xn-3	中风化泥质砂岩	2.67	0.37	14.57	V	18.75%
J31-2	强风化安山岩	2.57	< 0.30	1.50	V	5.17%
J31-3	中风化安山岩	2.68	0.36	7.82	V	<5.00%

1.2 盾构机概况

金—十盾构区间土压平衡盾构机主机长度 8.1 m,整机长度为 76 m。最大推力 42 575 kN。刀盘直径为 6 440 mm,最大扭矩为 6 841 kN·m。刀盘为辐板式构造,共配置 40 把 17 英寸镶齿滚刀,刀盘正面结构如图 2 所示,滚刀类型、间距与安装半径如表 2 所示。17 英寸镶齿滚刀如图 3 所示,围绕圆周共镶嵌有 32 个扁齿,扁齿高度为 11.5 mm。

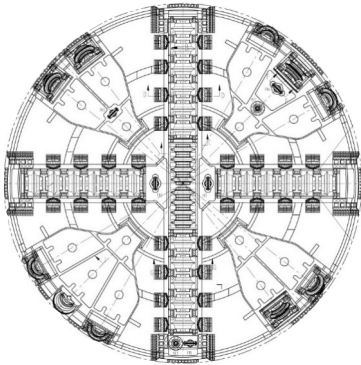


图 2 滚刀平面布置图
Fig.2 Location of disc cutters on cutterhead

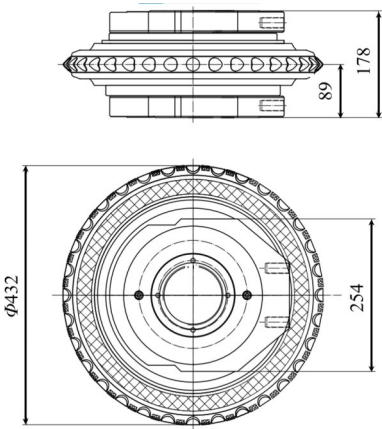


图 3 镶齿滚刀几何尺寸
Fig.3 Dimensions of flat tooth inserted disc cutter (unit: cm)

表 2 滚刀类型及滚刀间距

Table 2 Type and rotation radius of disc cutters

滚刀编号	滚刀类型	滚刀间距/mm
1~8	中心滚刀	90.0
9~36	正面滚刀	90.0~54.5
37~40	边滚刀	32.0、20.9

2 数据样本

2.1 地层参数

场地布置详勘勘探孔间距不大于 30 m,地层变

化较大时加密钻孔取样,岩芯采取密度较高。以天然单轴抗压强度 R 表征岩石坚硬程度,以岩体完整性指数 K_v 表征岩体完整性。对于缺少波速实验的岩芯,对其进行岩芯采取率(RQD)现场量测,以适用于立方体或条状岩块的式(1)推算岩体体积节理数 J_v ^[15-16], μ 为 RQD 取值;再根据国家标准^[17]中的 J_v - K_v 分段线性插值法推算 K_v 。

$$\mu = 110 - 2.5J_v \quad (1)$$

2.2 掘进参数

采集盾构控制系统中记录的各环掘进速率 v 、刀盘扭矩 T 、刀盘转速 n 、总推力 F 等,选取盾构双线中全断面掘进 J1-2xn-3、Klg-3、J31-2 层且有岩芯采样或现场岩块测试的环,作为后续分析的样本环,以样本环的稳定段^[18]掘进参数实测值作为掘进参数样本。

2.3 可掘性指标

FPI 原定义为单刀推力与贯入度之比,但光面盘形滚刀和镶齿滚刀在风化岩层中破岩掘进,扁齿刀部在掌子面上不断生成不规则的破碎坑,以及贯通裂纹与节理交叉形成的块状脱落,刀具阵列中各刀具受力存在差异。Delisio 等^[19-20]对 FPI 指标进行推力和洞径的修正,提出以 FPI_{blocky} 作为 TBM 现场性能与块状岩体条件之间的关联变量,虽然可以避免设置轴向力均布假设,但其数量级与单刀计算的 FPI 相差较大,不利于跨工程对比,且其定义偏离了 FPI 的力学机理。所以,本研究假设盾构滚刀阵列轴向力均布,即以滚刀阵列的轴向受力算术平均值 F/N 估计单滚刀轴向力,以单滚刀轴向力估计值 F/N 与贯入度之比作为实测 FPI 的估计值, N 为滚刀数量。相较于滚刀破岩室内试验、滚刀破岩数值模拟中根据单滚刀轴向力测量值计算得到的 FPI,滚刀阵列轴向力均布假设下 FPI 估计值的优越性在于:1) 可根据掘进参数直接计算得到,无须为每具滚刀单独进行轴向力量测,样本采集成本低,适用范围广;2) 能够以单指标对滚刀阵列 FPI 期望进行无偏估计,虽然在单个滚刀范畴内存在估计值对实际值的偏差,但是更能反映滚刀阵列 FPI 的统计特征,为掘进策略推导提供了具有统计意义的样本基础。

3 可掘性控制因素解耦分析

3.1 可掘性控制因素筛选

可掘性控制因素众多,为了学习到可掘性与关键影响因素之间相关性的低维特征,避免可掘性预测模型因自变量维数大、相关性差异而导致的可掘性指标点估计模型泛化能力差、对关键规律揭示不

充分的局限,应筛选影响可掘性的少数关键因素,并分析各因素之间的耦合关系。

岩体在镶齿滚刀法向力、滚动动力破岩下,依次产生破碎坑、扁齿间裂纹贯通岩片、相邻刀盘间裂纹贯通岩片,岩石坚硬程度和岩体完整性是镶齿滚刀法向力、滚动力的主要控制因素。各滚刀滚动力矩和是刀盘扭矩的主要部分,所以在单刀滚动力无实测的条件下,可将刀盘扭矩作为单刀滚动力的单调函数。单刀法向力和单刀滚动力之间存在耦合作用^[4],刀盘转速对单刀法向力和单刀滚动力的影响弱于贯入度^[4,21],单刀法向力和单刀滚动力消去贯入度影响等价于 FPI 和 TPI,所以可掘性控制因素之间的网状耦合影响结构如图 4 中的灰色有向网络所示。

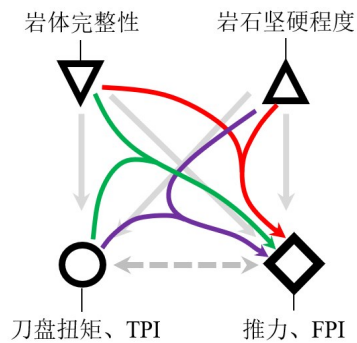


图 4 岩体可掘性关键影响因素解耦路径

Fig.4 Decoupling path of key influencing factors of rock mass boreability

地质参数对 FPI-TPI 相关性的影响如图 5 和表 3 所示, FPI 和 TPI 之间的指数相关模型(式(2)),在不区分样本岩石坚硬程度的情况下反映了 FPI 和 TPI 之间的对数线性相关性,间接反映了不宜被忽视的切向接触力对法向接触力的影响^[22]。但该模型在区分岩石坚硬程度分组条件下,对各分组的误差存在差异,体现了岩石坚硬程度对单刀法向力和单刀滚动力之间耦合作用的影响。Klg-3 地层天然单轴抗压强度在 15~30 MPa 的分组中,受样本数量较少的影响,归一化的均方根误差 NRMSE 较大,但在拟合线两边的实测点分布数量相等,残差分布较均匀,模型在本分组中仍具备合理性。式(2)中 χ 为 TPI 取值,单位为 kN·m/r/mm; λ 为 FPI 取值,单位为 kN/r/mm。

$$\chi = 0.48\lambda^{0.73}, \quad (2)$$

可通过组合双因素分析,研究岩体完整性、岩石坚硬程度、刀盘扭矩三因素中任意双因素对推力或 FPI 的影响,学习推力或 FPI 与双因素之间相关性的低维特征,实现对可掘性控制因素之间的网状耦合影响结构进行解耦分析,如图 4 所示。组合双

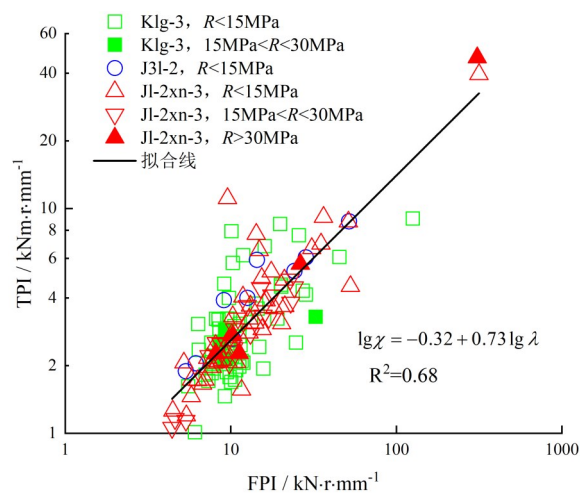


图5 FPI与TPI在不区分岩石坚硬程度分组时的对数线性相关性

Fig.5 Logarithmic linear correlation between FPI and TPI without distinguishing rock strength into groups

表3 岩石坚硬程度对FPI-TPI之间对数线性关系的扰动
Table 3 Disturbance of rock strength on the logarithmic linear correlation between FPI and TPI

岩层	天然单轴抗压强度/MPa	NRMSE
J3l-2	<15	0.16
Klg-3	<15	0.20
Klg-3	15~30	1.23
Jl-2xn-3	<15	0.06
Jl-2xn-3	15~30	0.12
Jl-2xn-3	>30	0.15

因素分析相较于多因素的回归分析、神经网络拟合等定量预测方法,可以更鲁棒地得到关键变量之间相互影响的显式统计规律,避免预测模型因陷入过拟合而掩盖关键变量之间相互作用的显著性。

3.2 地质参数与FPI的相关性

如图6所示,在不同岩石坚硬程度分组中,岩体越完整、节理裂隙越不发育,FPI越大,可掘性越差,完整性指数 K_v 对可掘性的影响显著且一致。

破碎岩体中,岩体完整性相近时,分布砾石在圆柱形试样中的粒径和含量较原地层中的偏低,导致虽然采取的圆柱试样天然单轴抗压强度 R 增大,但Klg-3层中存在FPI存在降低的情况。较破碎岩体中,随着岩石组分均匀性和岩体完整性的提高,岩石坚硬程度较高时FPI偏低的比例略有下降。

所以, K_v 与FPI之间相关性受 R 的影响,弱于 R 与FPI之间相关性受 K_v 的影响,岩体完整性对可掘性的影响更显著。

3.3 岩体完整性与刀盘扭矩耦合影响

确定掘进载荷、地质条件和可掘性之间的关系是解释可掘性控制因素之间的网状耦合影响结构的关键。如图7和表4所示,在区分样本岩体完整

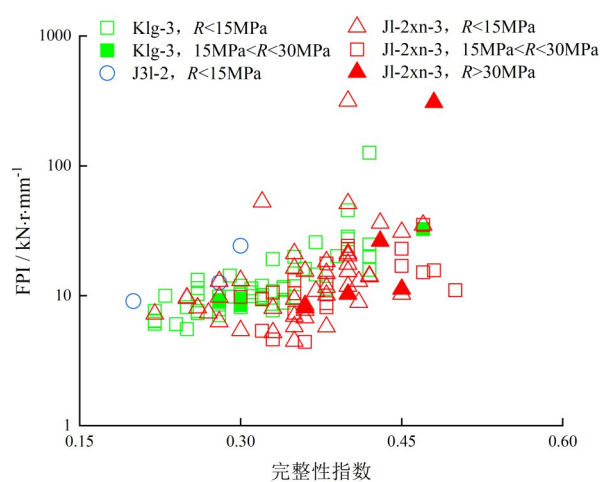


图6 岩体完整性指数、天然单轴抗压强度与FPI的关系
Fig.6 The relationship between intactness index of rock mass, natural uniaxial compressive strength of rocks and FPI

性的情况下,FPI和TPI之间的指数相关模型(式(2))在不同岩体完整性分组内的误差均较小,各组样本在模型两侧分布均较均匀,岩体完整性对FPI-TPI对数线性关系的扰动较小。

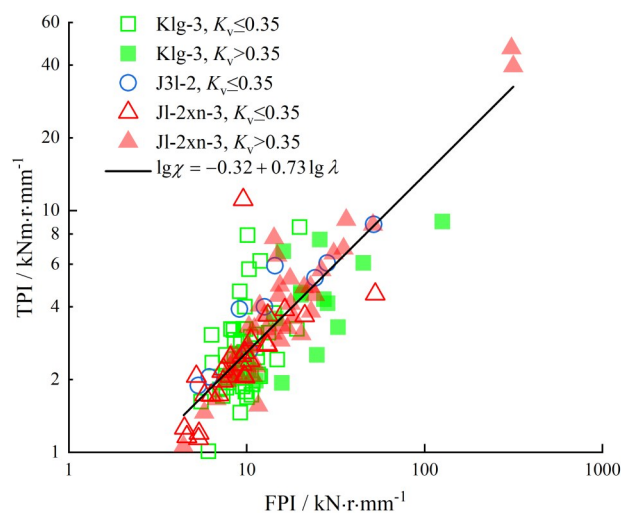


图7 岩体完整性指数、TPI与FPI的关系
Fig.7 The relationship between intactness index of rock mass, TPI and FPI

表4 岩体完整性对FPI-TPI对数线性关系的扰动
Table 4 Disturbance of rock mass integrity on the logarithmic linear correlation between FPI and TPI

岩层	K_v	NRMSE
J3l-2	≤ 0.35	0.16
Klg-3	≤ 0.35	0.17
Klg-3	> 0.35	0.38
Jl-2xn-3	≤ 0.35	0.19
Jl-2xn-3	> 0.35	0.06

3.4 岩石坚硬程度与刀盘扭矩耦合影响

如表5及图8所示,岩石坚硬程度与刀盘扭矩对FPI的耦合影响,可用椭圆锥包络面表达。椭圆

锥包络面方程如式(3)~式(6)所示, m 为一种地层中的样本组数, 方程中的系数 $\bar{f}$ 、 $\bar{T}$ 分别为样本中 $\lg \lambda$ 、刀盘扭矩的平均值, 是椭圆锥在 FPI- T 平面上投影圆心坐标的无偏点估计。 $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ 分别为样本中天然单轴抗压强度最大值、最小值, r_T 、 r_f 为椭圆锥在 FPI- T 平面上投影椭圆半轴的偏安全点估计。随着岩石坚硬程度的提高, 刀盘扭矩和 FPI 的耦合变化范围逐渐缩小, 刀盘扭矩波动超出包络范围的

风险逐渐增大, 刀盘扭矩稳定性的控制难度逐渐增大, 导致刀盘主驱动过载风险增大。强风化地层试样强度的极差较小, 导致椭圆锥包络面方程在强风化安山岩中精度较低, 但样本在 FPI- T 平面上的投影落在包络面内的比例仍超过 88%; 所以, 椭圆锥包络面方程能够较准确地解析表达 FPI、 T 、 R 三者包络关系, 揭示了地层条件变化时刀盘扭矩与总推力动态耦合的低维特征, 在 3 种地层中均可用于判定刀盘主驱动过载风险, 可解释性强。

表 5 FPI 包络面方程系数及分类精度指标

Table 5 Coefficients and classification accuracy of FPI envelope surface equation

地层名称	$\bar{f}$ / (kN·r/mm)	$\bar{T}$ / (kN·m)	$R_{\max}$ / MPa	$R_{\min}$ / MPa	r_T / (kN·m)	r_f / (kN·r/mm)	分类精度 ρ_{REC} $\rho_{\text{REC}} = \epsilon_{\text{TP}} / (\epsilon_{\text{TP}} + \epsilon_{\text{FN}})$
Klg-3	1.06	2 208.00	23.83	0.16	919.41	0.68	0.86
J3l-2	1.14	2 724.90	3.30	0.2	600.77	0.52	0.44
Jl-2xn-3	1.11	2 410.99	48.66	1.67	774.11	0.96	0.83

注: ϵ_{TP} 为位于包络面围成椭圆锥体内的样本数量, ϵ_{FN} 为位于包络面围成椭圆锥体外的样本数量。

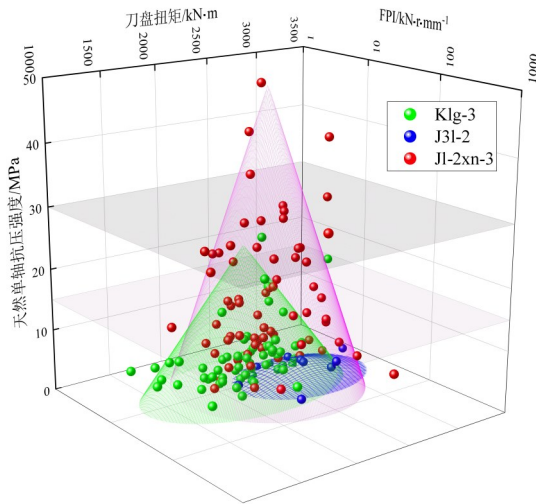


图 8 岩石坚硬程度与刀盘扭矩影响 FPI 包络面

Fig.8 Envelope surface of effect stem from rock strength and cutter head torque on FPI

$$\frac{(\lg \lambda - \bar{f})^2}{(r_f)^2} = \frac{(R - R_{\max})^2}{R_{\max}^2} - \frac{(T - \bar{T})^2}{r_T^2} \quad (3)$$

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^m \lg \lambda_i}{m} \quad (4)$$

$$r_f = \frac{(\lg \lambda_{\max} - \lg \lambda_{\min}) R_{\max}}{2(R_{\max} - R_{\min})} \quad (5)$$

$$r_T = \frac{(T_{\max} - T_{\min}) R_{\max}}{2(R_{\max} - R_{\min})} \quad (6)$$

4 掘进参数动态阈值控制方法

4.1 掘进效率指标

盾构的掘进效率, 包含掘进过程中的推进效

率, 如掘进速率、贯入度、比能等, 也包含掘进-管片拼装-检修-再掘进全流程的工作效率, 如掘进时间利用率等。掘进速率、贯入度侧重衡量破岩的速度, 难以直观反映设备损耗和健康状态。比能^[23]依赖单刀荷载和破岩量计算, 当刀盘上多具滚刀协同破岩时, 可通过推力均布假设计算总体比能, 但该假设掩盖了因受力分布不均导致的刀间比能差异^[24], 将比能差异完全等价于破岩体积差异。掘进时间利用率不但受地质条件、设备选型、掘进参数、施工操作等因素影响^[25], 而且受出渣系统和支护设备故障^[26]、岩体破碎卡机、涌水处置、液压设备故障、盾构后台配套水平、拼装作业水平等与掘进施工相关性较弱的因素制约, 导致该指标在衡量不同地层中盾构/TBM 掘进效率时的适用性存在差异。

掘进效率指标 α ^[27] 与掘进过程中的破岩速度正相关, 且与反映主驱动荷载、刀具磨损的刀盘扭矩负相关, 不但可以衡量掘进时的效率, 也可直接为判断盾构健康状态提供指标依据。

如图 9 所示, 式(7)能反映掘进效率指标与岩体基本质量指标之间的单调负相关性, 其中系数 a 反映了掘进效率对岩体基本质量指标 BQ 的放大倍数, 系数 b 反映了掘进效率随岩体基本质量指标的变化速率, $\hat{a}$ 为基于 BQ 单因素对 α 的预测值, η 为 BQ 取值。图 9 中的 2 个中等风化泥质砂岩数据分别为 Klg-3、Jl-2xn-3 地层中 α 实测平均值, 强风化安山岩 (碎块状) 数据为 J3l-2 地层中 α 实测平均值, 其余数据来自文献^[27], BQ 依据国家标准^[17]计算。

在图 9 中, 仅针对光面盘形滚刀的破岩效率预测曲线整体位于不区分滚刀类型时的破岩效率预

测曲线下方,表明镶齿滚刀样本纳入分析时对样本总体的提升效应,符合镶齿滚刀在风化较均匀、低强度且高磨蚀性地层中破岩效率高于光面盘形滚刀的先验规律,既证明了 α 在评价镶齿滚刀盾构掘进效率时的适用性,也证明了基于 α 的式(7)对镶齿滚刀破岩效率预测的适用性。

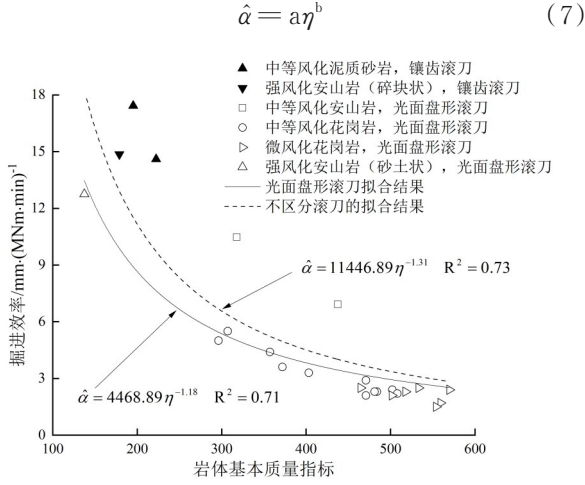


图9 岩体基本质量指标与掘进效率的关系

Fig.9 The relationship between rock mass basic quality and tunnelling efficiency

4.2 控制策略原理与实施方法

可掘性控制因素解耦解释了岩体完整性、岩石坚硬程度、刀盘扭矩三因素中任意两元素对FPI的影响。根据 α 定义和图9,掘进效率受掘进参数和地质参数影响,可在可掘性解耦模型成果基础上,通过显式表达掘进参数和地质参数对掘进效率的分层影响机制,进而推导以动态阈值形式体现的掘进参数动态控制策略,从而实现掘进参数动态阈值控制方法指令层的构建。

4.2.1 动态阈值推导原理

如图10所示,掘进效率与可掘性、刀盘扭矩的耦合作用在3个地层中均近似同一个三维指数曲面,掘进效率控制律模型如式(8)所示, $\hat{\alpha}'$ 为基于FPI和 T 双因素对 α 的预测值,样本总体平方残差系数约0.74。在掘进效率控制律模型中,掘进效率与可掘性、刀盘扭矩均负相关,当FPI一定时,应控制刀盘扭矩波动,减少因峰值过高导致的掘进效率降低;这一掘进参数控制策略不但符合方程自身的

偏导数走向,而且符合扁齿滚刀磨损与损坏观测规律。由式(3)可给出刀盘扭矩控制模型,如式(9)所示;由式(3)、式(8)联立消去FPI,可得与刀盘扭矩相关的掘进速率控制模型,如式(10)所示。 $T_u(\lambda, R)|_{(\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T})}$ 、 $T_b(\lambda, R)|_{(\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T})}$ 均为连续函数,在既有样本给出系数 $\bar{f}$ 、 $\bar{T}$ 、 $R_{\max}$ 、 r_T 、 r_f 及FPI构成的复合先验条件下,可为刀盘扭矩调控提供动态的主驱动过载预警值。 $v_u(R, T)|_{(\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T})}$ 、 $v_b(R, T)|_{(\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T})}$ 均为连续函数,在根据既有样本给出系数 $\bar{f}$ 、 $\bar{T}$ 、 $R_{\max}$ 、 r_T 、 r_f 的复合先验时,将式(10)的 T 赋值为式(9)中的刀盘扭矩阈值,可输出掘进速率调控动态阈值。

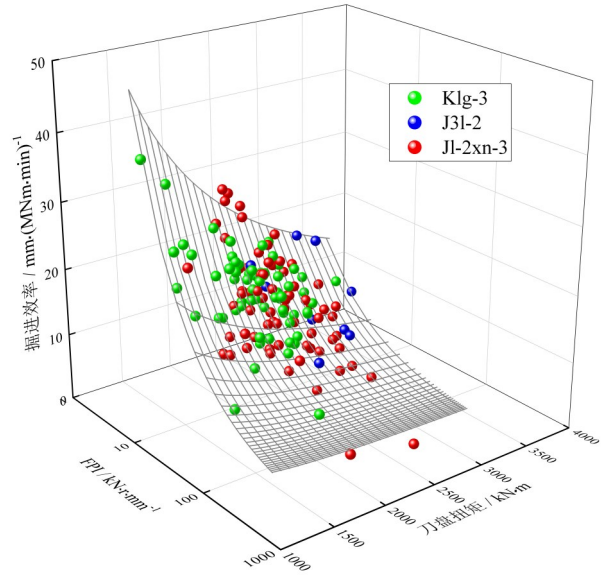


图10 掘进效率控制律曲面

Fig.10 Tunneling efficiency control law surface

$$\hat{\alpha}' = 304190.31\lambda^{-0.65}T^{-1.09} + 2.20 \quad (8)$$

$$\begin{cases} T_b(\lambda, R)|_{(\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T})} < T < T_u(\lambda, R)|_{(\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T})} \\ T_u(\lambda, R)|_{(\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T})} = \bar{T} + \xi(\lambda, R) \\ T_b(\lambda, R)|_{(\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T})} = \bar{T} - \xi(\lambda, R) \\ \xi(\lambda, R) = r_T \sqrt{\frac{(R - R_{\max})^2}{R_{\max}^2} - \frac{(\lg \lambda - \bar{f})^2}{(r_f)^2}} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} v_u(R, T)|_{(\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T})} = 304.19 \left\{ 10 \cdot [\bar{f} + \zeta(R, T)] \right\}^{-0.65} T^{-0.09} + 2.20T/1000 \\ v_b(R, T)|_{(\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T})} = 304.19 \left\{ 10 \cdot [\bar{f} - \zeta(R, T)] \right\}^{-0.65} T^{-0.09} + 2.20T/1000 \\ \zeta(R, T) = r_f \sqrt{\frac{(R - R_{\max})^2}{R_{\max}^2} - \frac{(T - \bar{T})^2}{r_T^2}} \end{cases} \quad (10)$$

4.2.2 控制方法的有效性工程验证

控制掘进参数的目的是使刀盘扭矩波动不超出动态阈值范围,对刀盘扭矩的控制效果可以直接检验控制方法的有效性。控制策略是控制方法的指令层,经应用层实施于掘进参数调控才能完成指令-响应和反馈的完整控制链。

如表 6 所示,在各均质地层中,控制策略实施后,刀盘扭矩超出动态阈值的数据量在掘进参数总记录次数中的占比 Φ_T 均降低,表明控制方法可有效降低刀盘主驱动过载风险;控制策略实施后刀盘扭矩的标准值均降低,表明控制方法能有效抑制刀盘扭矩波动,提高刀盘主驱动荷载的稳定性,有利于防范刀盘主驱动损坏。在不同地层中,系数 $\bar{f}$ 、 $\bar{T}$ 、 $R_{\max}$ 、 r_T 、 r_f 的复合先验受样本量差异影响,从而在式 (9) 和式 (10) 的统计量赋值运算中带入了先验差异,导致控制策略后验对 Φ_T 和标准差的改善程度存在差异,表明样本量是策略地层适应性的控制因素,提高不同地层样本量的均衡性有利于改善控制策略的地层普适性。

表 6 刀盘扭矩控制效果

Table 6 The effectiveness of cutter head torque control

地层名称	$\Phi_T/\%$		标准差/(kN·m)	
	未调控	调控	未调控	调控
Klg-3	17.75	11.29	543.06	485.07
J3l-2	13.45	10.67	386.47	329.80
Jl-2xn-3	16.81	8.54	578.96	446.18

如图 11 及图 12 所示,以左线 1 环~629 环的滚刀健康状态开仓逐刀跟踪观测为例,掘进地层以全断面 Jl-2xn-3 为主(图 1),对于旋转半径相近且磨损、损坏最严重的 33~40 号滚刀,在地层较均匀的 1 环~467 环中,掘进速率与刀盘扭矩能够较好地控制在阈值内,扁齿磨损速率约 0.5~1.4 mm/百环,扁齿无脱落。进入 467 环~629 环后,掌子面变为 J3l-2 与 Jl-2xn-3 组成的复合地层,虽然地层的总体坚硬程度下降,但坚硬程度和岩体产状变异性增大,掘进速率与刀盘扭矩波动频繁超过阈值,扁齿所受荷载变化幅度和频率升高,扁齿所受冲击荷载增大,掘进速率变化频率和幅度均随之增大,进一步增加了刀盘扭矩、推力和掘进速率协调控制难度;磨损速率迅速超过 1.4 mm/百环,且扁齿脱落数量急剧增大,磨损而不脱落的扁齿急剧减少且迅速在后续掘进中全部脱落,导致刀具从磨损状态迅速演化为报废。

4.2.3 方法优势

如表 7 所示,相较于多要素协同控制的掘进参

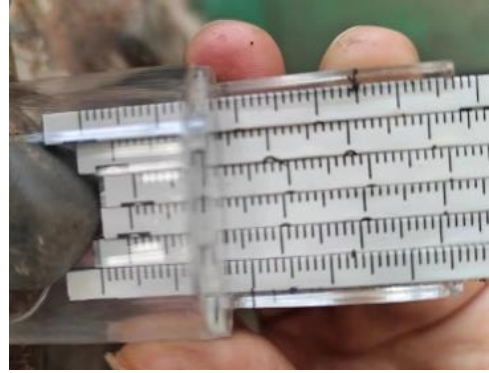


图 11 镶齿滚刀扁齿磨损快速测量单元^[28]

Fig.11 Fast wear measure unit for flat tooth of disc cutter



图 12 镶齿滚刀磨损及损坏过程

Fig.12 Wear and damage process of flat tooth inserted disc cutters

数控制方法,掘进参数动态阈值控制方法在指令层、应用层的优势分别体现为输出的可解释性增强、指令-响应时效性提升。

掘进速率是驾驶员的首要调控参数,总推力随掘进速率的变化而变化。可通过单独连续控制掘进速率波动不超出掘进速率调控动态阈值范围 $[v_b(R, T) | (\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T}), v_u(R, T) | (\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T})]$ 来确保刀盘扭矩波动不超出 $[T_b(FPI, R) | (\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T}), T_u(FPI, R) | (\bar{f}, R_{\max}, r_f, r_T, \bar{T})]$,从而实现通过单独连续控制掘进速率来抑制刀盘扭矩超载和波动,当刀盘扭矩在阈值范围内变化时无需额外单独调控总推力;在当前绝大多数盾构/TBM 的控制系统仍采用面板人工控制、电动-液压驱动装置在高频率大范围负载波动下耐久性急剧下降的局限下,掘进速率调控动态阈值控制方法适用性更强。

表 7 两类控制方法对比

Table 7 Comparison between two kinds of control methods

控制方法	决策原理	指令层对比项:输出的可解释性	应用层对比项:指令-响应时效性
掘进参数动态阈值控制方法	基于可掘性影响因素分层耦合低维特征的复合先验下单因素控制	1)可解释主要影响因素之间的耦合作用,模型能够解析表达低维特征 2)指令,即动态阈值,其推导完全显式,复合先验提高了动态阈值在连续变化工况下的适用性	在复合先验条件下,将单因素控制在阈值范围内,在保持较高阈值可靠性的前提下降低了人工调控的频率要求,指令响应较快,且有利于盾构主驱动、千斤顶等电动、液压设备负载波动偏稳态
多要素协同控制	基于多元回归、神经网络等多变量统计学习模型,反算目标变量控制值所对应的自变量参考值点估计	1)多变量统计学习模型能够显式或非显式地反映多参数耦合对目标变量的影响,但难以凸显相关性的低维特征,导致点估计模型依赖大量样本训练,经济和时间成本高 ^[29] 2)基于样本的模型正演训练过程基于迭代法、反向梯度下降、随机梯度下降等非显式方法,基于蒙特卡罗等方法的自变量反算过程进一步削弱了输出的可解释性	1)由于无法同时将各主要参数人工调控至与输出匹配,所以这种基于点估计决策的人工调控实际上是半耦合精确调控:指令响应时间较长,且调控环节削弱了指令的多参数耦合效应 2)依据模型输出,频繁调控各掘进参数,使盾构主驱动、千斤顶等电动、液压设备负载高频振荡,从而加剧元件机械损耗、密封老化,导致维修成本和停机风险增大

5 结论

1)组合双因素分析能够解耦可掘性控制因素之间的网状耦合影响结构,对多因素耦合作用的可解释性较好;岩体完整性比岩石坚硬程度对可掘性的影响更显著,岩石坚硬程度与刀盘扭矩影响 FPI 椭圆锥包络面模型,可为刀盘扭矩调控提供动态的主驱动过载预警值。

2)掘进效率受可掘性和掘进参数耦合影响,掘进效率解耦是掘进效率和地质参数、掘进参数之间的经验关系推导的充分条件。基于掘进效率解耦的掘进参数阈值在系数先验下能够给出掘进参数的动态调控范围,能为抑制刀盘扭矩过载和波动提供显式表达的量化指令,保证了控制方法指令层的可解释性。单独连续控制掘进速率是控制策略的实施逻辑,保证了控制方法应用层能够快速响应指令。

3)掘进参数动态控制策略的主体,是通过对多个统计学模型进行变量代换得到的掘进参数动态阈值,不同地层样本量均衡性影响统计学模型泛化能力,导致控制策略对不同地层的适应性存在差异。此外,解耦分析和包络面拟合中的关键变量不包含地层指标变异特征,导致低维特征挖掘路径在应用于上软下硬复合地层可掘性分析时无法反映掌子面地层非均匀性的影响,可通过增加地层参数离散性指标来改善复合地层可掘性分析和掘进参数控制策略推导中特征缺失的局限。

参考文献

[1] 唐少辉, 张晓平, 刘浩, 等. 复杂地层水下盾构隧道工程难点及关键技术研究与发展[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1477-1487.

TANG S H, ZHANG X P, LIU H, et al. Engineering difficulties and key technologies for underwater shield tunnel in complex ground [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1477-1487. (in Chinese)

[2] 李子琛, 朱杰兵, 张宜虎, 等. TBM 隧道岩石可掘性评价指标及其应用研究综述[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(增刊 1): 508-520.

LI Z C, ZHU J B, ZHANG Y H, et al. A review of rock boreability evaluation index and its application in TBM tunnel construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(Sup 1): 508-520. (in Chinese)

[3] CHEN Z Y, ZHANG Y P, LI J B, et al. Diagnosing tunnel collapse sections based on TBM tunneling big data and deep learning: A case study on the Yinsong Project, China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103700.

[4] FENG S X, WANG S Y. Theoretical considerations of field penetration index model and its application in TBM performance prediction [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 9(1): 84.

[5] PARSAJOO M, MOHAMMED A S, YAGIZ S, et al. An evolutionary adaptive neuro-fuzzy inference system for estimating field penetration index of tunnel boring machine in rock mass [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(6): 1290-1299.

[6] DARDASHTI A, AJALLOEIAN R, ROSTAMI J, et al. Performance predictions of hard rock TBM in subcritical cutter load conditions [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(1): 739-755.

[7] HASSANPOUR J, KAZEMI C, ROSTAMI J. Introduction of a modified QTBM model for predicting TBM penetration rate in rock, based on data from mechanized tunneling projects in Iran [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(5): 165.

- [8] SALIMI A, ROSTAMI J, MOORMANN C, et al. Introducing tree-based-regression models for prediction of hard rock TBM performance with consideration of rock type [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(8): 4869-4891.
- [9] 杜立杰, 齐志冲, 韩小亮, 等. 基于现场数据的 TBM 可掘性和掘进性能预测方法[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(6): 1284-1289.
- DU L J, QI Z C, HAN X L, et al. Prediction method for the boreability and performance of hard rock TBM based on boring data on site [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(6): 1284-1289. (in Chinese)
- [10] 张玉伟, 赵祎睿, 宋战平, 等. 基于贯入度指数的 TBM 围岩可掘性分级研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2024, 20(3): 949-958.
- ZHANG Y W, ZHAO Y R, SONG Z P, et al. TBM excavability classification of surrounding rock based on FPI [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2024, 20(3): 949-958. (in Chinese)
- [11] 刘佳伟, 张盛, 陈召, 等. 基于 TBM 掘进性能和适应性分析的围岩分级方法及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(8): 161-170.
- LIU J W, ZHANG S, CHEN Z, et al. A method for classification of surrounding rock based on the excavability performance and adaptability of tunnel boring machines and its applications [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(8): 161-170. (in Chinese)
- [12] 赵思成, 薛广文, 李晓军, 等. 基于实时地质信息的泥水盾构岩机映射模型[J]. *现代隧道技术*, 2021, 58(增刊 1): 403-410.
- ZHAO S C, XUE G W, LI X J, et al. Mapping model of slurry shield machine based on real-time geological information [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2021, 58(Sup 1): 403-410. (in Chinese)
- [13] 吴鑫林, 张晓平, 刘泉声, 等. TBM 岩体可掘性预测及其分级研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(5): 1721-1729, 1739.
- WU X L, ZHANG X P, LIU Q S, et al. Prediction and classification of rock mass boreability in TBM tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(5): 1721-1729, 1739. (in Chinese)
- [14] 张心悦, 张晓平, 许丹, 等. 气压辅助土压平衡盾构掘进地表变形规律研究[J]. *工程地质学报*, 2025, 33(1): 292-301.
- ZHANG X Y, ZHANG X P, XU D, et al. Study on the surface deformation law of shield tunneling in air pressure assisted earth pressure balance mode [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2025, 33(1): 292-301. (in Chinese)
- [15] PALMSTROM A. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD) [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20(4): 362-377.
- [16] 胡修文, 胡盛明, 卢阳, 等. 岩体体积节理数的统计方法及其在围岩分级中的应用[J]. *长江科学院院报*, 2010, 27(6): 30-34.
- HU X W, HU S M, LU Y, et al. Measurement of volumetric joint count and its application in surrounding rock classification [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, 27(6): 30-34. (in Chinese)
- [17] 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)
- [18] 陈祖煜, 范立涛, 张云旆, 等. 知识驱动和数据驱动在 TBM 智能施工机器学习中的应用[J]. *土木工程学报*, 2024, 57(6): 1-12.
- CHEN Z Y, FAN L T, ZHANG Y P, et al. Knowledge-based and data-based machine learning in intelligent TBM construction [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2024, 57(6): 1-12. (in Chinese)
- [19] DELISIO A, ZHAO J, EINSTEIN H H. Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Löttschberg Base Tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 33: 131-142.
- [20] DELISIO A, ZHAO J. A new model for TBM performance prediction in blocky rock conditions [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 43: 440-452.
- [21] 夏毅敏, 朱湘衡, 林赉贻, 等. TBM 刀盘掘进载荷影响因素研究[J]. *现代制造工程*, 2015(9): 1-6, 33.
- XIA Y M, ZHU X H, LIN L K, et al. Analysis of influence factors on load of TBM cutterhead [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2015(9): 1-6, 33. (in Chinese)
- [22] ZHANG Q, QU C Y, CAI Z X, et al. Modeling of the thrust and torque acting on shield machines during tunneling [J]. *Automation in Construction*, 2014, 40: 60-67.
- [23] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1965, 2(1): 57-73.
- [24] 翟淑芳, 杜红坤, 田浩, 等. TBM 三滚刀协同线性切割和回转切割破岩数值模拟[J/OL]. *郑州大学学报(工学版)*, 2025: 1-9. (2025-02-19). <https://link.cnki.net/doi/10.13705/j.issn.1671-6833.2025.03.006>. ZHAI S F, DU H K, TIAN H, et al. Numerical simulation of TBM three cutters cooperative linear and rotary cutting rock breaking [J/OL]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2025: 1-9. (2025-02-19). <https://>

link. cnki. net/doi/10.13705/j. issn. 1671-6833.2025.03.006.(in Chinese)

[25] 李庆民, 闫长斌, 姚西桐, 等. 考虑多源信息不确定性的 TBM 利用率预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(10): 4043-4056.
LI Q M, YAN C B, YAO X T, et al. Prediction of TBM utilization considering multi-source information uncertainty [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(10): 4043-4056. (in Chinese)

[26] 刁振兴, 薛亚东, 王建伟. 引汉济渭工程岭北隧洞 TBM 利用率分析[J]. 隧道建设, 2015, 35(12): 1361-1368.
DIAO Z X, XUE Y D, WANG J W. Analysis on TBM availability in construction of lingbei tunnel of Hanjiang River-Weihe River water conveyance project [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(12): 1361-1368. (in Chinese)

[27] 张世豪, 李彤, 李璇, 等. 花岗岩地层中盾构掘进效率影响因素研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(4): 105-111.
ZHANG S H, LI T, LI X, et al. Influence factors of shield tunneling efficiency in granite strata [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(4): 105-111. (in Chinese)

[28] 刘鹏, 苏明, 韩爱民, 等. 镶齿滚刀扁齿磨损快速集群测量装置: CN221802693U [P]. 2024-10-01.
LIU P, SU M, HAN A M, et al. Fast wear measure pack for flat tooth of disc cutter: CN221802693U [P]. 2024-10-01. (in Chinese)

[29] 陈湘生, 曾仕琪, 韩文龙, 等. 机器学习方法在盾构隧道工程中的应用研究现状与展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 1-13.
CHEN X S, ZENG S Q, HAN W L, et al. Review and prospect of machine learning method in shield tunnel construction [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 1-13. (in Chinese)

(编辑 XXX)