

# 基于岭回归分析的 TBM 净掘进速率预测模型研究\*

时 健<sup>1</sup> 张仕林<sup>1,2</sup> 范作松<sup>2</sup> 孔德森<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 266590, 青岛; 2. 青岛地铁集团有限公司第三建设分公司, 266071, 青岛)

**摘 要** [目的] 精确预测 TBM 净掘进速率对城市隧道施工方法选择、工程进度规划和建设成本控制有重要的参考价值。[方法] 以青岛地铁 1 号线双护盾 TBM 施工为背景, 对 TBM 净掘进速率预测模型的输入变量开展特征选取, 研究 TBM 净掘进速率与各输入变量间的相关关系, 并对输入变量进行共线性诊断。建立了基于岭回归分析的 TBM 净掘进速率预测模型(以下简称“岭回归预测模型”), 并验证了该模型的预测效果。[结果及结论] TBM 净掘进速率与岩石单轴抗压强度、完整性系数、刀盘推力和刀盘转速之间呈正相关, 且相关程度较为显著; TBM 净掘进速率预测模型的输入变量间存在一定程度的多重共线性, 影响偏回归系数的取值, 使得部分输入变量偏回归系数的检验结果失去统计学意义; 岭回归预测模型预测精度稍差, 但偏回归系数估值趋于合理, 使得该模型稳定性更高; 岭回归预测模型的绝对误差在 5 mm/min 以内, 能够满足工程预测的需要。

**关键词** 城市轨道交通; TBM 净掘进速率预测模型; 岭回归分析

**中图分类号** U455.44

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.20230594

## TBM Net Advance Rate Prediction Model Based on Ridge Regression Analysis

SHI Jian<sup>1</sup>, ZHANG Shilin<sup>1,2</sup>, FAN Zuosong<sup>2</sup>, KONG Desen<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, 266590, Qingdao, China; 2. The Third Branch of Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266071, Qingdao, China)

**Abstract** [Objective] Accurate prediction of TBM (tunnel boring machine) net advance rate is of significant reference value for selecting urban tunneling methods, planning construction schedules, and controlling construction costs. [Method] Taking the dual-shield TBM construction of Qingdao Metro Line 1 as the background, feature selection is conducted for the input variables of the TBM net advance rate prediction model. The correlations between the TBM net advance rate and various input variables are analyzed, and collinearity diagnostics are

performed on the input variables. A TBM net advance rate prediction model based on ridge regression analysis (hereinafter referred to as the 'ridge regression prediction model') is established, and its predictive performance is validated. [Result & Conclusion] The TBM net advance rate shows a positive and relatively strong correlation with uniaxial compressive strength of the rock, rock integrity coefficient, cutterhead thrust, and cutterhead rotation speed. There exists a certain degree of multicollinearity among the input variables of the prediction model, which affects the estimation of partial regression coefficients, rendering some of them statistically insignificant. Although the prediction accuracy of the ridge regression prediction model is slightly lower, its estimated partial regression coefficients tend to be more reasonable, resulting in higher model stability. The absolute prediction error of the ridge regression prediction model is within 5 mm/min, which meets the requirements of engineering prediction.

**Key words** urban rail transit; TBM net advance rate prediction model; ridge regression analysis

随着机械制造技术的进步和隧道行业的发展, TBM (全断面硬岩隧道掘进机) 以其安全高效、优质环保、自动化程度高等诸多优势被广泛应用于隧道建设中<sup>[1-2]</sup>。TBM 的安全高效掘进一直以来都是隧道工程领域的前沿热点问题<sup>[3-5]</sup>。

迄今为止, 国内外学者建立了许多 TBM 掘进性能评价预测模型<sup>[6-8]</sup>, 其中多元回归预测模型报道频次最多。与人工智能预测模型相比, 多元回归模型预测精度有限, 但其主要优点在于拥有具体的计算公式, 模型的可解释性强, 建模方法简单明确, 使用方便等, 对项目进度安排、成本估计仍具有较高的参考价值。文献[9]通过正向逐步线性回归分析建立了贯入度指数同岩石单轴抗压强度  $S_{UC}$  和岩石质量指标  $D_{RQ}$  的预测模型; 文献[10]通过逐步回归分析的方法建立了 TBM 净掘进速率的线性预测模型; 文献[11]针对东北某巨斑状黄岗岩 TBM

\* 山东省自然科学基金项目(ZR2023ME165)

施工隧道,建立了贯入度指数与关键地质因素之间的多元回归关系;文献[12]在单因素分析的基础上建立了 TBM 净掘进速率的多元线性回归预测模型;文献[13]应用统计回归法在分析 TBM 刀盘贯入度与刀盘推力、刀盘扭矩关系的基础上建立了 TBM 掘进速率预测模型。上述模型针对特定工程均具有较好的预测精度,但多数模型建立时未考虑输入变量间多重共线性的影响,导致模型预测稳定性差,失去实用价值。

鉴于此,本文依托青岛地铁 1 号线(以下简称“1 号线”)双护盾 TBM 施工隧道,开展输入变量特征提取,选择岩石单轴抗压强度、完整性系数、刀盘推力和刀盘转速作为模型输入变量。在诊断输入变量共线性的基础上,建立了基于岭回归分析的 TBM 净掘进速率预测模型(以下简称“岭回归预测模型”),并以实测数据验证模型的可靠性,以期为同类工程净掘进速率的预测提供参考。

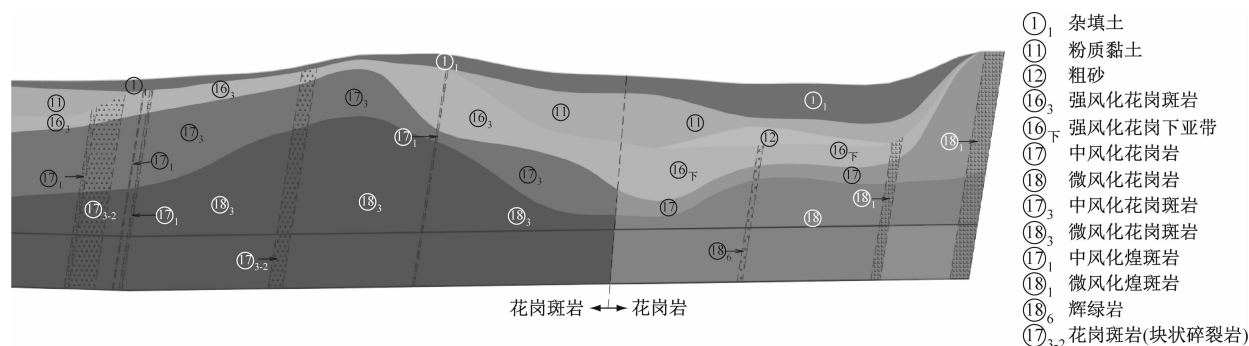


Fig. 1 Partial engineering stratigraphical profile of Guangrao Road Station-Taidong Station interval

## 2 数据库的建立

对于具体型号的 TBM 设备,影响 TBM 掘进性能的主要因素包括岩体特征和现场的掘进参数。据不完全统计<sup>[14-15]</sup>,国内外常用于 TBM 性能预测的表征岩体特性的参数有岩石单轴抗压强度  $S_{UC}$ 、岩石质量指标  $D_{RQ}$ 、岩石的脆性指数  $B$  等。上述参数中:单轴抗压强度  $S_{UC}$  是使用频次最高的岩体参数;岩石质量指标  $D_{RQ}$  与体现岩体不连续性的岩体完整性指数  $K_v$  存在一定对应关系,且岩体完整性系数  $K_v$  是一个能反映节理间距、节理张开度及充填情况的综合性指标;岩石的脆性指数  $B$  可由弹性模量  $E$  与泊松比  $\mu$  换算得到。研究表明<sup>[16]</sup>,TBM 净掘进速率  $P_R$  与弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$  间的相关性较差,故本次建模不考虑岩石脆性指数  $B$ 。TBM 掘

## 1 工程概况

1 号线广饶路站—台东站区间(以下简称“广台区间”)起点位于广饶路和延安路交界处,区间设计起止里程为 K36 + 586.4—K37 + 624.527,总长度为 1 038.127 m。场区地形起伏较大,覆盖层主要为第四系全新统人工杂填土、素填土,下伏基岩以燕山晚期花岗岩为主,局部可见辉绿岩、花岗斑岩呈脉状产出,岩脉揭露地带岩体较破碎。

广台区间隧道洞身主要穿越微风化花岗岩、花岗斑岩地层,富水性及其补给条件均较差;受区域构造作用影响,局部地段洞身穿越块状碎裂岩及节理密集带,岩体破碎,透水性中等,富水性中等-好,可能形成良好的地下水径流通道。广台区间局部工程地质剖面图见图 1。本区间以Ⅳ级围岩为主,占比约 81.4%,Ⅲ级和Ⅴ级围岩分别占比约 7.7% 和 10.9%,总体而言,本区间适宜采用 TBM 法施工。

进过程中,刀盘推力  $N$  和刀盘转速  $R_{PM}$  是主控参数,由操作人员根据前方地质情况进行动态调整<sup>[17]</sup>。刀盘扭矩  $T$  是从动参数,由岩体可掘性和刀盘推力共同决定。在装机容量范围内,刀盘扭矩  $T$  不会限制 TBM 的净掘进速率。综上,选择  $S_{UC}$  和  $K_v$  作为表征 TBM 掘进性能的岩体特征参数, $N$  和  $R_{PM}$  作为表征机械掘进效率的参数。

考虑到双护盾 TBM 施工时掌子面情况难以实时观察量测,为保证岩体指标取值的可靠性,选取 30 组数据作为样本。样本数据统计汇总于表 1。

## 3 单因素回归分析

为分析各影响因素与 TBM 净掘进速率间的内在联系,利用 SPSS (社会科学统计软件包)进行单因素回归分析,线性拟合结果见图 2。

表 1 样本数据统计

Tab.1 Statistics of sample data

项目	$S_{UC}/$ MPa	$K_v$	$N/kN$	$R_{PM}/$ (r/min)	$P_R/$ (mm/min)
最小值	10.63	0.15	2 430.00	3.40	11.00
最大值	63.66	0.81	9 880.00	7.20	38.00
均值	31.19	0.52	5 123.77	5.59	23.97
标准差	14.02	0.21	2 098.81	0.93	8.70

注:各输入变量的样本数量均为 30。

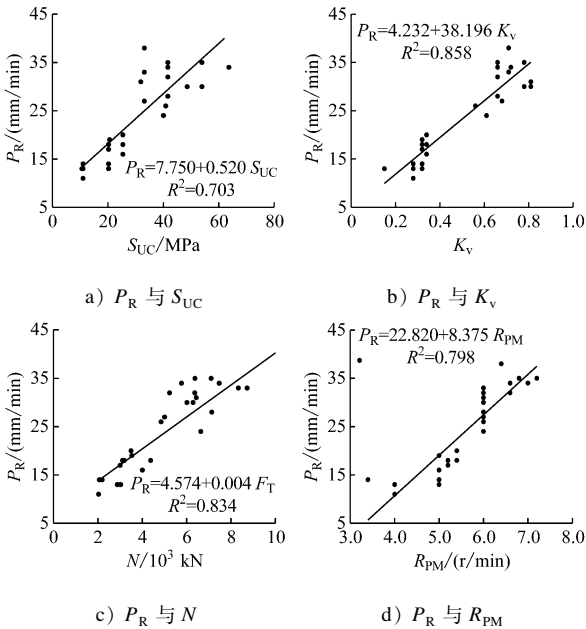


图 2 TBM 净掘进速率与各影响因素间的拟合曲线

Fig.2 Fitting curve between TBM net advance rate and each influential factor

由图 2 可知:TBM 净掘进速率与岩体单轴抗压强度、完整性系数,以及刀盘推力、转速等各参数间

呈较好的线性相关关系,即随着岩石单轴抗压强度、完整性系数、刀盘推力及刀盘转速的增加,TBM 净掘进速率呈不断增大的趋势。

4 多重共线性诊断

整体上,TBM 净掘进速率与各影响因素之间都存在较高的线性相关关系,这也恰好说明了影响 TBM 净掘进速率的机理十分复杂,必须考虑建立一种多变量预测的综合评价模型。

而输入变量间存在完全多重共线或近似多重共线关系会使模型估计失去稳定,难以估计其准确性<sup>[18]</sup>,因此,在进行多元回归分析前,需要检验变量间多重共线性的严重程度。常用的多重共线性检验方法有相关系数检验法、特征根判别法、条件数判别法和 VIF(方差膨胀因子)检验法<sup>[19]</sup>。通过样本数据计算对各变量间的共线性进行检验,诊断结果如表 2、表 3 和表 4。

表 2 中多个变量间的相关系数在 0.7 以上。表 3 中多个主成分特征根较小且第 5 主成分特征根数值趋近于 0。表 4 中 3 个变量的 VIF 大于 5;同时自变量  $S_{UC}$  和  $K_v$  偏回归系数的显著性水平大于 0.05,表明其统计意义不显著。上述指标共同提示变量间存在多重共线性。究其原因因为刀盘推力和转速等掘进参数是根据围岩地质条件动态设置的<sup>[20]</sup>。一般而言,岩体强度和完整性越高,所需的推力越大。而在坚硬稳定的岩体中掘进,操作手通常会提高刀盘转速以获得更高的净掘进速率。显然,自变量间存在相关性,与前述分析结果一致。

表 2 输入变量间的相关性

Tab.2 Correlation between input variables

输入变量	名称	$S_{UC}$	$K_v$	$N$	$R_{PM}$	$P_R$
$S_{UC}$	皮尔逊相关系数	1.000	0.871	0.659	0.875	0.838
	显著性水平		0	0	0	0
$K_v$	皮尔逊相关性	0.871	1.000	0.868	0.835	0.926
	显著性水平	0		0	0	0
$N$	皮尔逊相关性	0.695	0.868	1.000	0.762	0.913
	显著性水平	0	0		0	0
$R_{PM}$	皮尔逊相关性	0.875	0.835	0.762	1.000	0.893
	显著性水平	0	0	0		0
$P_R$	皮尔逊相关性	0.838	0.926	0.913	0.893	1.000
	显著性水平	0	0	0	0	

表 3 输入变量间的多重共线性诊断

Tab.3 Multicollinearity analysis of input variables

维数	特征值	条件指数	各输入变量或常量的方差比例				
			常量	$S_{UC}$	$K_v$	$N$	$R_{PM}$
1	4.824	1.000	0	0	0	0	0
2	0.116	6.448	0.05	0.03	0.02	0.02	0
3	0.046	10.189	0	0.23	0	0.32	0
4	0.010	21.703	0.02	0.27	0.95	0.50	0.01
5	0.003	38.571	0.93	0.46	0.03	0.16	0.98

表 4 输入变量的共线性统计

Tab.4 Collinearity statistics of input variables

模型	输入变量或常量	$B$	$S_E$	$B_{eta}$	$t$ 值	显著性水平	容差	VIF
普通线性 回归模型	常量	-8.382	3.831		-2.188	0.038		
	$S_{UC}$	0.020	0.078	0.032	0.251	0.803	0.144	6.960
	$K_v$	11.191	6.024	0.271	1.858	0.075	0.108	9.292
	$N$	0.002	0.000	0.403	3.800	0.001	0.204	4.893
	$R_{PM}$	3.115	1.034	0.332	3.012	0.006	0.189	5.302

注:  $B$  为未标准化系数, 即普通线性回归模型中自变量的原始回归系数;  $S_E$  为标准误差, 为  $B$  的估计误差, 反映  $B$  估计的精确度;  $B_{eta}$  为经过标准化后的系数, 消除了单位的影响;  $t$  值为  $t$  检验的统计量。

## 5 岭回归分析

岭回归是一种改良的最小二乘估计, 通过放弃最小二乘法的无偏性, 以损失部分信息、降低精度为代价获得更符合实际、回归系数更可靠的有偏估计法, 能够有效解决输入变量间共线性问题, 对病态数据的拟合要强于最小二乘法<sup>[19]</sup>。输入变量的相关矩阵  $X$  可表示为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{d,1} & x_{d,2} & \cdots & x_{d,N} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$N$ ——样本数量;

$d$ ——特征数量。

当输入变量间存在多重共线性时,  $X^T X$  是奇异的,  $X^T X$  的逆在数值上无法准确计算。  $X$  上一些小的扰动就会导致  $(X^T X)^{-1}$  发生大的改变, 进而使得最小二乘法估计的计算变得很不稳定。假定在  $X^T X$  上增加正常数矩阵  $kI$  ( $k$  为正数,  $I$  为常数矩阵),  $X^T X + kI$  的奇异性会比  $X^T X$  有所改善。将数据进行标准化处理, 定义回归系数的岭估计矩阵  $\hat{B}(k)$  为:

$$\hat{B}(k) = (X^T X + kI)^{-1} X^T Y \quad (2)$$

式中:

$k$ ——岭参数;

$Y$ ——输出变量矩阵。

$\hat{B}(k)$  是各回归系数的有偏估计, 此值比最小二乘法估值稳定, 岭回归的解可以看作是结构风险最小化准则下的最小二乘估计。  $k$  值越大, 损失信息越多, 预测精度越低, 因此,  $k$  值不宜过大。通常选择各自变量回归系数趋于稳定时的最小  $k$  值。

不同  $k$  值下各变量的部分标准化回归系数列于表 5 中, 相应的岭迹图如图 3 所示。显然,  $k$  值约为 0.4 时, 各自变量回归系数基本趋于稳定。

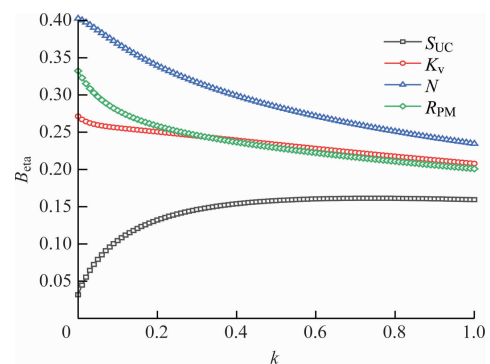


图 3 岭迹图

Fig. 3 Diagram of ridge trace

由于岭回归计算时需对全部变量进行标准化,



输出时仅给出各变量的标准化回归系数,不存在常数项。为获得非标准的偏回归系数和常数项,对输出结果进行非标准化处理,得到岭回归预测模型的方差分析表(见表5)和带有常数项的模型系数表(见表6)。

表5 岭回归预测模型方差分析

Tab.5 ANOVA for ridge regression prediction model

模型	项目	平方和	自由度	均方	F 值	显著性水平
岭回归预测模型	回归	2 029.826	4	507.457	77.764	0.000
	残差	163.140	25	6.526		

注:F 值为 F 检验的统计量。

表6 岭回归预测模型系数

Tab.6 Ridge regression prediction model coefficients

模型	输入变量或常量	B	标准错误	$B_{eta}$	t 值	显著性水平
岭回归预测模型	常量	-2.848	1.891		-1.506	0.145
	$S_{UC}$	0.095	0.215	0.154	4.438	0
	$K_v$	9.867	1.300	0.239	7.589	0
	N	0.001	0	0.299	8.018	0
	$R_{PM}$	2.218	0.335	0.237	6.620	0

由表5和表6可知:模型整体显著性检验(F 值为 77.764,显著性水平  $< 0.05$ )及各输入变量个体检验(各变量偏回归系数的显著性水平  $< 0.05$ )均达到统计学要求,表明模型构建有效且自变量对因变量影响显著。对比岭回归处理前后预测模型的拟合效果(见表7),虽然岭回归预测模型的决定系数  $R^2$  略小于普通线性回归模型,但岭回归预测模型通过丢失少量信息换来了偏回归系数的合理估计,在不丢失输入变量的前提下,保证了该模型估计的稳定性。通过岭回归预测模型分析得到的 TBM 净掘进速率的多元线性回归模型的表达式如下:

$$P_R = -2.848 + 0.095S_{UC} + 9.867K_v + 0.001N + 2.218R_{PM} \quad (3)$$

表7 岭回归处理前后模型拟合度对比

Tab.7 Comparison of model fitting degree before and after ridge regression treatment

模型	$R^2$	调整后的 $R^2$	$S_{EE}$
普通线性回归模型	0.943	0.933	2.244
岭回归预测模型	0.926	0.914	2.555

注: $S_{EE}$ 为标准估算错误。

## 6 岭回归预测模型验证

为验证岭回归预测模型的预测效果,在同区间随机抽取 15 组数据作为验证数据,将真实值与预测值进行对比,结果如图4所示。

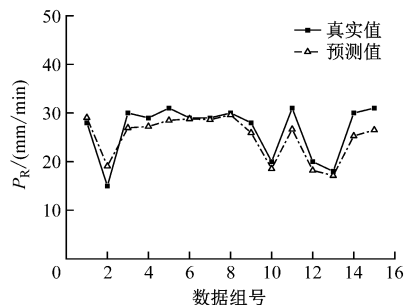


图4 TBM 净掘进速率真实值与预测值对比

Fig.4 Comparison between actual and predicted TBM net advance rates

由图4可见:TBM 净掘进速率的真实值与预测值较为接近,并具有相同的变化趋势;两者的绝对误差不超过 5 mm/min,说明岭回归预测模型的预测效果能够满足工程需要。

## 7 结论

1) TBM 净掘进速率与岩体参数(单轴抗压强度、完整性系数)和盾构掘进参数(刀盘推力、刀盘转速)间均呈正相关,且相关关系较为显著。

2) 基于特征选取的输入变量间存在不同程度的多重共线性,使得部分输入变量偏回归系数的取值无法得到合理解释,检验结果无统计学意义。

3) 与传统最小二乘法估计相比,岭回归预测模型预测精度稍差,但各输入变量偏回归系数的估值趋于合理,该模型稳定程度更高。

4) 岭回归预测模型的预测绝对误差在 5 mm/min 以内,总体上预测精度较高,能够满足工程需要。本文所提供的方法可以为相似条件下 TBM 掘进性能预测、掘进参数优化、工期和成本预测提供有益参考。

## 参考文献

- [1] 钱七虎,李朝甫,傅德明.隧道掘进机在中国地下工程中应用现状及前景展望[J].地下空间,2002(1):1.  
QIAN Qihu, LI Chaofu, FU Deming. The present and prospect of application of tunneler in China's underground engineering[J]. Underground Space, 2002(1):1.
- [2] 王江卡,谭顺辉,陈馈,等.岩石掘进机(TBM)施工关键技术

- 术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.
- WANG Jiangka, TAN Shunhui, CHEN Kui, et al. Key technologies in tunnelling by hard-rock type tunnel boring machine (TBM)[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.
- [3] 赵光泉, 刘鹏, 周强, 等. 青岛地铁1号线过海隧道工程双护盾隧道掘进机应用关键技术[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 169.
- ZHAO Guangquan, LIU Peng, ZHOU Qiang, et al. Key technologies of double-shield TBM applied to Qingdao Metro Line 1 undersea tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 169.
- [4] 韩超, 张柯. 双护盾隧道掘进机穿越地跨区间断层破碎带卡机机理及防卡机技术[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(6): 153.
- HAN Chao, ZHANG Ke. Jamming mechanism of double shield TBM excavating in metro tunnel interval fault fracture zone and antijamming technology[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(6): 153.
- [5] 周振梁, 李宗林, 郭震, 等. TBM掘进参数分布规律及高效掘进技术研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(增刊1): 121.
- ZHOU Zhenliang, LI Zonglin, GUO Zhen, et al. Research on distribution law of TBM tunneling parameters and high-efficiency boring technology[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(S1): 121.
- [6] 张庆龙, 朱燕文, 马睿, 等. 基于注意力加强 Bi-LSTM 模型的 TBM 掘进参数预测研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(4): 69.
- ZHANG Qinglong, ZHU Yanwen, MA Rui, et al. Study on prediction of TBM tunnelling parameters based on attention-enhanced Bi-LSTM model[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(4): 69.
- [7] 赵高峰, 姜宝元, 芮福鑫, 等. 基于数值仿真的复杂岩体 TBM 掘进性能评估模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 984.
- ZHAO Gaofeng, JIANG Baoyuan, RUI Fuxin, et al. TBM tunneling performance evaluation model in complex rock masses based on numerical simulation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3): 984.
- [8] 李建斌, 武颖莹, 李鹏宇, 等. 基于局部线性嵌入和支持向量机回归的 TBM 施工参数预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(8): 1426.
- LI Jianbin, WU Yingying, LI Pengyu, et al. TBM tunneling parameters prediction based on locally linear embedding and support vector regression[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(8): 1426.
- [9] HASSANPOUR J, ROSTAMI J, ZHAO J. A new hard rock TBM performance prediction model for project planning[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(5): 595.
- [10] YAGIZ S. Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(3): 326.
- [11] 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.
- DU Lijie, QI Zhichong, HAN Xiaoliang, 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.
- [12] 闫长斌, 杜旭阳, 戴晓亚, 等. 基于围岩力学参数的 TBM 净掘进速率多元回归预测模型[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(1): 48.
- YAN Changbin, DU Xuyang, DAI Xiaoya, et al. Multiple regression prediction model for TBM net boring rate based on mechanical parameters of surrounding rock[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(1): 48.
- [13] 罗华, 陈祖煜, 龚国芳, 等. 基于现场数据的 TBM 掘进速率研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(8): 1566.
- LUO Hua, CHEN Zuyu, GONG Guofang, et al. Advance rate of TBM based on field boring data[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(8): 1566.
- [14] 刘泉声, 刘建平, 潘玉丛, 等. 硬岩隧道掘进机性能预测模型研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 2766.
- LIU Quansheng, LIU Jianping, PAN Yucong, et al. Research advances of tunnel boring machine performance prediction models for hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 2766.
- [15] 曹瑞琅, 王玉杰, 陈晨, 等. TBM 净掘进速度预测模型发展现状及参数分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(8): 96.
- CAO Ruilang, WANG Yujie, CHEN Chen, et al. Development status and parameter analysis of TBM net tunnelling speed prediction model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(8): 96.
- [16] 闫长斌, 姜晓迪. 基于岩体指标和掘进参数的 TBM 净掘进速率预测模型[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(2): 26.
- YAN Changbin, JIANG Xiaodi. Prediction model of TBM net advance rate based on parameters of rock mass and tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(2): 26.
- [17] 卢泽霖, 王旭春, 曹云飞, 等. 富水硬岩地层泥水平衡盾构掘进参数的优化分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(10): 159.
- LU Zelin, WANG Xuchun, CAO Yunfei, et al. Optimization analysis of slurry balance shield tunneling parameters in water-rich hard rock stratum[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(10): 159.
- [18] 肖霞, 伍兴国. 线性回归中多重共线性的几何解释[J]. 统计与决策, 2021, 37(21): 46.
- XIAO Xia, WU Xingguo. Geometric interpretation of multicollinearity in linear regression[J]. Statistics & Decision, 2021, 37(21): 46.

(下转第 53 页)

下水渗流场变化规律的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(8): 217.

ZHANG Xuhai. Seepage point impact in urban rail transit station foundation pit enclosure structure on the variation law of surrounding groundwater seepage field[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(8): 217.

· 收稿日期:2025-02-26 修回日期:2025-03-20 出版日期:2025-06-10

Received:2025-02-26 Revised:2025-03-20 Published:2025-06-10

· 第一作者:陈伟,工程师,819634337@qq.com

通信作者:曹占林,博士研究生,2210741@tongji.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

#### (上接第 31 页)

LIU Xian, ZHANG Chenguang, ZHANG Yan, et al. Experimental study on the longitudinal joint of shield tunnels reinforced with composite cavity[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(2): 376.

[20] 柳献, 张乐乐, 李刚, 等. 复合腔体加固盾构隧道衬砌力学行为的宏观分析模型[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 78.

LIU Xian, ZHANG Lele, LI Gang, et al. A macroscopic analysis model for the mechanical behaviors of a shield tunnel segment lining reinforced with a composite cavity[J]. Modern Tunnelling

Technology, 2014, 51(5): 78.

· 收稿日期:2023-04-28 修回日期:2023-06-15 出版日期:2025-06-10

Received:2023-04-28 Revised:2023-06-15 Published:2025-06-10

· 第一作者:孙雪兵,正高级工程师,103982434@qq.com

通信作者:柳献,教授,xian.liu@tongji.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

#### (上接第 36 页)

HAI Wenlong, WANG Yahui, WANG Huaixiu. Gas load forecasting based on optimization of GRU neural network using IPSO algorithm[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(2): 126.

· 收稿日期:2023-06-02 修回日期:2023-07-06 出版日期:2025-06-10

Received:2023-06-02 Revised:2023-07-06 Published:2025-06-10

· 第一作者:周意,硕士研究生,hbhg\_zy@163.com

通信作者:王章琼,副教授,wzqcug@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

#### (上接第 42 页)

[19] 张文彤. SPSS 统计分析基础教程[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2017.

ZHANG Wentong. Basic course of SPSS statistical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2017.

[20] 段志强, 王力, 李立功, 等. 单盾盾隧道掘进机在砂岩、砂质泥岩地层中的掘进参数关系研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(7): 120.

DUAN Zhiqiang, WANG Li, LI Ligong, et al. Relation of tunneling parameters of single shield TBM in sandstone and sandy mud-

stone stratum[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(7): 120.

· 收稿日期:2023-05-28 修回日期:2023-10-11 出版日期:2025-06-10

Received:2023-05-28 Revised:2023-10-11 Published:2025-06-10

· 第一作者:时健,博士研究生,924532404@qq.com

通信作者:张仕林,博士研究生,高级工程师,zhangshilin.2005@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

#### (上接第 47 页)

ZHANG Yingxin, WANG Zhansheng, TAO Yufan, et al. Thrust prediction during diagonal cutting of concrete diaphragm wall for TBM based on machine learning[J]. Henan Science, 2024, 42(12): 1792.

[10] 邱广宇, 房欣悦, 张旺. 基于机器学习的高速列车车头型多目标优化设计[J]. 大连交通大学学报, 2024, 45(4): 41.

QIU Guangyu, FANG Xinyue, ZHANG Wang. Multi-objective optimization design of high-speed train head shape based on machine learning[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2024, 45(4): 41.

[11] 史刚. 基于机器学习的装载机铲装作业性能预测与优化研究[D]. 柳州:广西科技大学, 2024.

SHI Gang. Research on prediction and optimization of loader shoveling performance based on machine learning[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2024.

[12] YAO J, EDSON C P, YU S, et al. Bucket loading trajectory optimization for the automated wheel loader[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(6): 6948.

[13] 陆怀民, 张云廉, 刘晋浩. 土壤切削弹粘塑性有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 100.

LU Huaimin, ZHANG Yunlian, LIU Jinhao. Elastoviscoplastic finite element analysis of soil cutting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 100.

· 收稿日期:2025-02-13 修回日期:2025-04-20 出版日期:2025-06-10

Received:2025-02-13 Revised:2025-04-20 Published:2025-06-10

· 通信作者:曹昱,工程师,515141032@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license