

石灰岩地层下土压平衡盾构机 推进速度预测与分析*

刘 浩¹ 崔建波² 杨 侠¹ 王清扬³

(1. 济南轨道交通集团有限公司, 250014, 济南; 2. 中铁十四局集团隧道工程有限公司, 250003, 济南;
3. 中南大学机电工程学院, 410083, 长沙)

摘 要 [目的] 盾构机的推进速度不仅关系到隧道开挖的快慢, 对于施工周期与施工成本的预测也具有重要意义, 因此需对盾构机的推进速度进行预测和分析。[方法] 以济南地铁 3 号线龙奥站—奥体中心西站区间全断面石灰岩地层为研究对象, 收集盾构机掘进数据, 采用空推值、异常值剔除及数据去噪等多种方法对数据进行预处理。为了提高预测精度, 将数据集划分为训练集和验证集, 通过线性回归建立了基于刀盘扭矩、总推进力的推进速度预测模型, 并分析了掘进载荷对推进速度的影响规律。[结果及结论] 在石灰岩地层下, 3 组推进速度预测模型的线性回归预测精度均在 0.70 以上, 说明根据刀盘扭矩和总推进力可以正确预测推进速度。土压平衡盾构机在掘进过程中, 刀盘转速和推进速度波动均较小, 随着刀盘转速增大, 刀盘扭矩逐渐减小; 刀盘扭矩对推进速度有积极的影响, 刀盘扭矩越大, 推进速度越大; 在同一地层和掘进条件下, 由于刀盘挤土作用, 仅增加总推进力不利于推进速度的提高, 此时需同时增加刀盘转速。

关键词 城市轨道交通; 土压平衡盾构机; 推进速度; 石灰岩地层

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.040

Prediction and Analysis of Earth Pressure Balance Shield Machine Advancing Speed in Limestone Stratum

LIU Hao¹, CUI Jianbo², YANG Xia¹, WANG Qingyang³

(1. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., 250014, Jinan, China; 2. China Railway 14th Bureau Group Tunnel Engineering Co., Ltd., 250003, Jinan, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, 410083, Changsha, China)

Abstract [Objective] The advancing speed of shield machine is crucial not only for the tunnel excavation pace but also for the predicting construction schedule and cost. Therefore, it

is necessary to predict and analyze the advancing speed of the shield machine. [Method] Taking the full-section limestone stratum of Longao Station – Olympic Sports Center West Station interval on Jinan Metro Line 3 as research object, data from shield machine excavation are collected and preprocessed using methods such as zero-push value, outlier removal, and data denoising. To improve prediction accuracy, the dataset is divided into training and validation sets. A model for predicting thrust speed is established from linear regression based on cutterhead torque and total thrust, and the influence law of excavation load on advancing speed is analyzed. [Result & Conclusion] In limestone stratum, the linear regression prediction accuracy of three advancing speed prediction models all exceeds 0.70, indicating that advancing speed can be accurately predicted based on cutterhead torque and total thrust. During excavation with the earth pressure balance shield machine, fluctuations in cutterhead rotation speed and advancing speed are minimal. As the cutterhead rotation speed increases, the cutterhead torque gradually decreases. Cutterhead torque positively influences the advancing speed; the greater the cutterhead torque, the higher the advancing speed. Under the same stratum and excavation conditions, due to the soil extrusion action of cutterhead, merely increasing the total thrust is not conducive to improving advancing speed, calling for the necessity of simultaneously increasing cutterhead rotation speed.

Key words urban rail transit; earth pressure balance shield machine; advancing speed; limestone stratum

盾构法具有地层适应性广、施工安全系数高、推进速度快、劳动强度低、噪声与扰动小等特点, 目前广泛应用于国内外城市轨道交通的建造中。盾构机通过推进油缸产生的推力将刀具贯入岩土中, 在刀盘旋转的作用下, 将岩土从掌子面切削剥落。因此, 盾构机的推进速度同地质条件、油缸产生的

* 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2021CXGC010209)

推力、刀盘转速,以及由此产生的扭矩紧密相关。

盾构机的掘进性能一般采用推进速度来表示,它不仅关系到隧道开挖的快慢,对于施工周期与施工成本的预测也具有重要意义^[1-2]。国内外学者通过理论推导、掘进数据分析等多种方式对推进速度进行了研究。盾构机的掘进载荷主要为总推进力和刀盘扭矩。施工过程中,盾构机在总推进力的作用下不断克服阻力向前掘进,通过安装在刀盘上的刀具贯入地层,在刀盘扭矩的作用下维持刀盘转动,从而切削岩土层^[3]。文献[4]采用正交试验方法,通过现场掘进试验对盾构推进速度、刀盘扭矩的影响规律进行了研究,并建立了软土地层下盾构推进速度和刀盘扭矩的数学模型。随着刀盘转动,土体首先在刀盘面板积聚,而后通过刀盘开口排入土舱。土体在其积聚的过程中,刀盘与掌子面会对切削掉的渣土进行挤压,从而产生附加接触应力。考虑到刀盘开口率、刀盘转速、推进速度及土层性质等因素,文献[5]建立了刀盘挤土的力学模型,并推导出了刀盘附加接触压力的计算公式,结果表明,刀盘开口率越小,刀盘转速越慢,推进速度越快,附加接触压力越大。基于以上分析,文献[6]讨论了刀盘扭矩的影响因素,并推导出了刀盘扭矩的计算公式,揭示了刀盘扭矩同土舱压力、总推进力、推进速度及刀盘转速间的关系。盾构推进速度受多种因素的影响,采用理论推导的方式难以考虑所有因素,且模型的预测精度亦不高,因此一些学者通过分析盾构掘进数据研究推进速度的变化规律。文献[7]针对砂岩、砂质泥岩等地层,通过统计分析,拟合了推进速度与掘进参数间的关系方程。文献[8]采用数理统计的方法,分析了推进速度、推力、扭矩等关键盾构掘进参数与6种主要地层的相关性。文献[9-10]以盾构关键掘进参数为输入,建立了盾构推进速度预测模型,但未对该模型做过多的解释。

本文基于盾构施工数据,建立了石灰岩地层盾构不同转速条件下的掘进载荷与推进速度多源性预测模型,并结合前人建立的理论模型,讨论了掘进载荷对推进速度的影响规律,可为盾构推进速度与掘进载荷的控制提供指导。

1 工程概况

济南轨道交通3号线(以下简称“3号线”)龙奥站—奥体中心西站区间全长970.095 m,两并行

隧道中心线间距为13~14 m,区间隧道断面的顶部至自然地面的垂直距离为13.24~19.66 m,区间线路最大坡度为27‰。区间隧道主要穿越全断面中风化石灰岩地层,多次穿越填充型溶洞地层。该线路主要采用土压平衡式盾构机掘进,盾构机直径为6.68 m。龙奥站—奥体中心西站区间地质剖面图如图1所示。

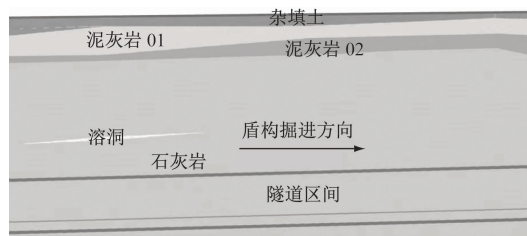


图1 龙奥站—奥体中心西站区间地质剖面图

Fig. 1 Stratigraphical profile diagram of Longao Station - Olympic Sports Center West Station Interval

2 掘进参数预处理及分布规律

2.1 掘进参数预处理

数据预处理是整个数据分析过程中不可缺少的一个环节,其结果质量直接关系到模型效果和最终结论。盾构机在掘进的过程中,会发生停机、掘进异常等多种情况;同时,恶劣的工作环境产生大量噪声,直接影响传感器的采集精度。因此,在对掘进参数分析之前,必须对掘进数据进行预处理。

2.1.1 空推值剔除

盾构机在掘进和非掘进状态下,其内部安装的PLC(可编程逻辑控制器)每秒钟记录一次各掘进参数的数据。因此,掘进原始数据包含大量空推值。盾构机推进速度随时间关系变化曲线,如图2所示。由图2可见:施工期间存在大量推进速度的空推值。

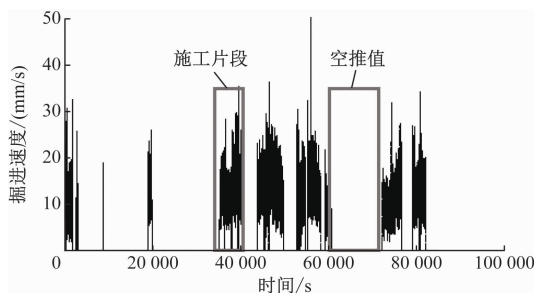


图2 盾构机推进速度随时间关系变化曲线

Fig. 2 Curve of shield machine advancing speed changing over time

2.1.2 异常值剔除

盾构机在施工过程中,由于多种原因如推进油缸回缩、掌子面岩土破碎剥落等,导致掘进参数存在异常。盾构机推进速度异常值示意图如图3所示。掘进参数中的异常值,导致其平均值的显著变化,对数据挖掘的影响很大,因此必须在数据预处理阶段剔除异常值。本文利用 3σ (σ 为标准差)法对掘进数据中的异常值进行处理。

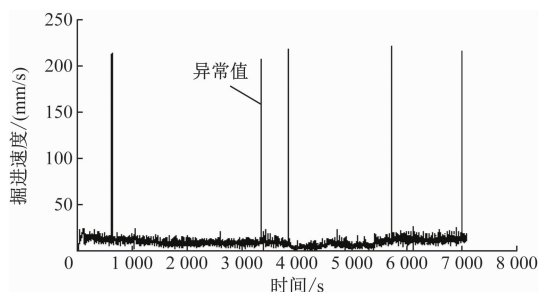


图3 盾构机推进速度异常值示意图

Fig.3 Diagram of shield machine advancing speed outlier

3σ 法处理的数据需满足正态分布。在 3σ 原则下,如果某数据超过3倍标准差,则可将视为异常值。根据 3σ 原则,异常值在 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ (μ 为平均值)内出现的概率为99.7%,在 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 外出现的概率为0.3%。 3σ 原则示意图见图4。

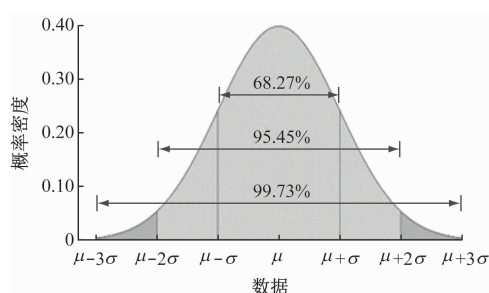


图4 3σ 原则示意图

Fig.4 Diagram of 3σ principle

2.1.3 噪声数据处理

盾构机在恶劣的工作环境下,传感器容易受到各种信号的干扰,通过 PLC 采集的信号含有大量噪声,干扰掘进参数的采集结果,从而影响掘进参数的准确性。因此,必须使用有效的信噪分离技术提前去噪,才能开展后续分析工作。相比传统的降噪技术,小波变换降噪具有很大的优势。小波变换降噪流程图见图5。小波变换降噪的流程为:对缺失值、重复数据及异常值等原始信号进行预处理;利用小波变换对处理后的信号进行多尺度分解,得到

小波系数,对不同尺度上的小波系数进行去噪,通常采用阈值法过滤小波系数的噪声值;通过小波逆变换得到重构信号。

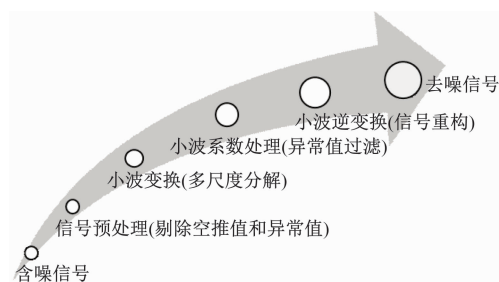


图5 小波变换降噪流程图

Fig.5 Diagram of wavelet transform denoising process

采用 Daubechies 小波和通用阈值规则对计算得到的阈值进行软处理,从而达到对掘进参数的降噪处理。这种方法能够保留数据的基本特征,从而保证降噪后数据的可靠性。Daubechies 小波滤波后的盾构推进速度-时间关系曲线见图6。

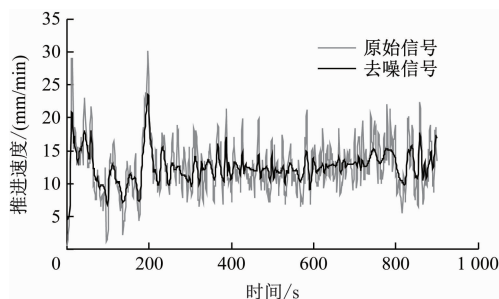


图6 Daubechies 小波滤波后的盾构推进速度-时间关系曲线

Fig.6 Curves of shield advancing speed and time relationship after Daubechies wavelet filtering

2.2 掘进参数分布规律

保持盾构机推进速度的稳定性对其掘进效率、刀具寿命均具有良好的影响。在盾构机掘进过程中,通过实时的调节液压、驱动系统来调整贯入度和刀盘转速使其达到最适宜的推进速度。贯入度是指刀盘旋转一周切入土体的深度。贯入度同推进速度和刀盘转速之间的关系为:

$$p = \frac{v}{w} \quad (1)$$

式中:

p ——刀具贯入度;

v ——盾构机推进速度;

w ——刀盘转速。

式(1)中,当 w 恒定时, p 与 v 的波动变化情况相同。

盾构机的 v 与掘进地层、 w 、刀盘推力及刀盘扭矩均相关。根据地勘信息,龙奥站—奥体中心西站区间为全断面石灰岩地层,因此本文只考虑该地层条件下的掘进情况。本文统计了第2环—第800环管片区段盾构机掘进数据,并绘制了盾构机 w 、 v 等掘进参数随管片环号的变化曲线,如图7—图8所示。从图7—图8中可以看出: w 主要稳定在 1.5 r/min、1.6 r/min 及 1.7 r/min。当 w 稳定时, v 波动的原因在于 p 的变化,而 p 的变化则主要由掘进载荷的变化决定。

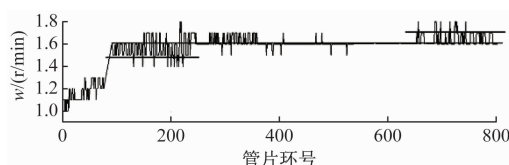


图7 w 随管片环号变化曲线

Fig. 7 Curve of cutterhead rotation speed (w) changing with segment ring numbers

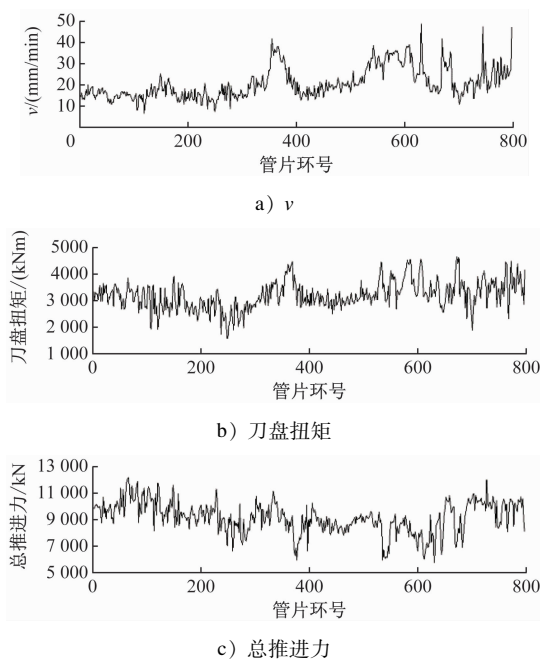


图8 v 、刀盘扭矩及总推进力随管片环号变化曲线

Fig. 8 Curves of advancing speed (v), cutterhead torque and total thrust changing with segment ring numbers

3 v 预测模型的建立与分析

3.1 v 预测模型的建立

采用线性回归方法建立了盾构机掘进载荷和 v 之间的数据驱动关系。尽管线性模型是在计算机时代之前开发的,但有充分的理由将其用于研究盾

构机性能。线性模型通常可以提供足够的精度,其简单的结构可以为盾构机掘进载荷和 v 之间的关系提供可解释的描述。

为了验证 v 预测模型的精度,将数据集划分为训练集和验证集,其占比分别为 80% 和 20%。其中验证集作为所建立 v 预测模型的验证,不参与模型的训练过程。给定输入模型特征参数 $X_i = [X_0 \ X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n]$,通过线性回归,采用式(2)中的线性模型对输出的因变量 Y 进行建模。

$$Y = \sum_{i=0}^n (\beta_i X_i) \quad (2)$$

式中:

X_i ——自变量;

Y ——因变量;

β_i ——回归系数。

X_i 表示刀盘扭矩和总推进力,通过计算得到 β_i ,使预测的结果尽可能接近 v 。相应地, β_i 显示了刀盘扭矩和总推进力在评估 v 中的重要性。通过线性回归找到 β_i 的最佳值,以最小化估计误差。

为了评估 v 预测模型的效果,采用决定系数 R^2 、均方根误差 E_{RMS} 及平均绝对误差 E_{MA} 等多个评价指标对该模型进行分析评价。其中: R^2 为回归平方和与总离差平方和的比值,表示总离差平方和中可以由回归平方和解释的比例。该比例越大, v 预测模型越精确,回归效果越显著。 R^2 的范围为 0 ~ 1,越接近 1,回归拟合效果越好。 R^2 、 E_{RMS} 和 E_{MA} 的计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

$$E_{\text{MA}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |(y_i - \hat{y}_i)| \quad (5)$$

式中:

m ——观测次数;

y_i ——观测值;

\hat{y}_i ——预测值。

为了消除刀盘扭矩、总推进力及 v 在数值大小上的差异,使各类别数据样本间可以对比,利用 Min-Max 量纲一化方法(见式(6)),对 3 组数据进行量纲一化处理。数据经量纲一化处理后,刀盘扭

矩、总推进力、 v 大小被映射到 0~1 范围内,消除了不同类别数据的量纲,将有量纲的数据进行量纲一化转换,从而简化计算。

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

式中:

x ——原始数据;

x' ——量纲一化后的数据;

x_{\min}, x_{\max} ——原始数据集中的最小值和最大值。

将刀盘扭矩、总推进力及 v 量纲一化后的数据代入所建立的线性回归预测模型,经求解计算得到不同 w 条件下基于掘进载荷的 v 预测模型。 w 分别为 1.5 r/min、1.6 r/min、1.7 r/min 条件下的 v 预测模型分别如下所示:

$$v_1 = 0.808T_1 - 0.384F_1 + 0.019 \quad (7)$$

$$v_2 = 0.702T_2 - 0.622F_2 + 0.356 \quad (8)$$

$$v_3 = 0.414T_3 - 0.530F_3 + 0.377 \quad (9)$$

式中:

T_i ——刀盘扭矩, $i=1, 2, 3$;

F_i ——总推进力, $i=1, 2, 3$ 。

不同 w 下 v 预测模型的精度如表 1 所示。

表 1 不同 w 下 v 预测模型的精度

Tab. 1 Accuracy of prediction model for advancing speeds (v) under different cutterhead rotation speeds (w)

$w/(r/min)$	R^2		E_{RMS}		E_{MA}	
	训练集	验证集	训练集	验证集	训练集	验证集
1.5	0.708	0.907	0.086	0.051	0.007	0.003
1.6	0.748	0.755	0.089	0.092	0.008	0.008
1.7	0.815	0.794	0.094	0.071	0.009	0.005

由表 1 可见:3 组 v 预测模型的线性回归预测精度均在 0.70 以上,说明根据刀盘扭矩、总推进力可以正确预测 v 。 v 的实测值和预测值对比曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出: v 的预测值与实测值基本保持一致。

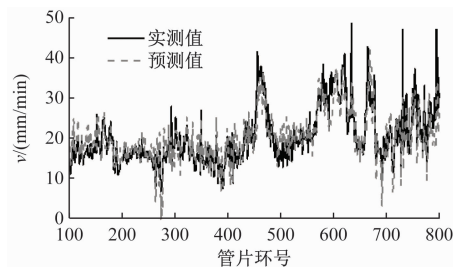


图 9 v 的实测值和预测值对比曲线

Fig. 9 Comparison curves of measured and predicted advancing speed (v) values

3.2 掘进载荷对 v 的影响规律

对刀盘扭矩和总推进力系数进行分析得到:刀盘扭矩系数均为正值,刀盘扭矩增大,则 v 增大;总推进力系数均为负值,总推进力增大,则 v 减小。根据文献[6]建立的盾构机掘进载荷与掘进参数数学模型,如式(10)所示。当掘进地层稳定时,土舱压力波动性较小,由此可见,本文建立的 v 预测模型与其建立的数学模型结果一致。

$$T = \alpha_0 + \alpha_1 p + \alpha_2 F + \alpha_3 \frac{v}{w} + \alpha_4 \frac{pv}{w} \quad (10)$$

式中:

p ——土舱压力;

T ——刀盘扭矩;

F ——总推进力;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ——盾构机相关参数。

盾构机各掘进参数组成一个复杂的系统,施工参数间相互影响。同一地质环境和掘进条件下,当 w 不变时, T 增大,表明刀盘与掌子面作用增强,提高了刀盘切削效率,使得 v 增大。此外, p 保持稳定时,通过增大 w , v 进一步增大; v 保持稳定时,通过增大 w , p 降低,导致 T 降低。因此, v 预测模型的扭矩系数随 w 的增大而减小。

土压平衡盾构机掘进时,为了保证切削后的土体顺利进入土舱,需满足如下条件:刀盘开口处的压力大于土舱压力,刀盘面板上的接触压力比静止侧向土压力大。因此,基于刀盘挤土作用^[5],盾构机必然挤压前方土体,从而产生附加接触压力。同一地质环境和掘进条件下,增大 F ,导致附加接触应力增大,不利于 v 的提高,因此 v 预测模型的 F 系数为负值。通过提高 w ,加快了切削后土体进入土舱的速度,从而减轻了挤土作用,附加接触应力随之减小,有利于 v 的提高。

4 结语

1) 土压平衡盾构机在掘进过程中, w 和 v 波动均较小,随着 w 增大, T 逐渐减小; T 对 v 有积极的影响, T 越大, v 越大;在同一地层和掘进条件下,由于刀盘挤土作用,仅增加 F 不利于 v 的提高,此时需同时增加 w 。

2) 本文研究成果可为土压平衡盾构机在同类型地层中的掘进载荷控制提供指导,以提高盾构机的 v 。后续须对不同地层及复合地层开展相关掘进载荷变化规律研究,并开展更多因素影响下的 v 预

测分析。

参考文献

- [1] 李杰, 张斌, 付柯, 等. 基于现场掘进数据的复合地层盾构掘进性能预测方法研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 97.
LI Jie, ZHANG Bin, FU Ke, et al. Site data based prediction of shield driving performance in compound strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(4): 97.
- [2] KOOPALIPPOOR M, NIKOUEI S S, MARTO A, et al. Predicting tunnel boring machine performance through a new model based on the group method of data handling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(5): 3799.
- [3] 张丽婷, 张茜, 周思阳, 等. 量纲分析与工程数据挖掘结合的掘进总载荷建模[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(4): 1121.
ZHANG Liting, ZHANG Qian, ZHOU Siyang, et al. Total loads modeling of tunnel boring machines based on dimensional analysis and in situ data mining[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(4): 1121.
- [4] 张厚美, 吴秀国, 曾伟华. 土压平衡式盾构掘进试验及掘进数学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5762.
ZHANG Houmei, WU Xiuguo, ZENG Weihua. Study on tunneling experiment and mathematical model of EPB shield [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5762.
- [5] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘挤土效应及刀盘开口率对盾构正面接触压力影响[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 113.
WANG Hongxin. Effect of cutterhead compressing the front soil and influence of head aperture ratio on contact pressure of EPB shield to the front soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7): 113.
- [6] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘扭矩计算及其与盾构施工参数关系研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 109.
WANG Hongxin. Calculation of cutterhead torque for EPB shield

and the relationship between cutterhead torque and shield driving parameters[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 109.

- [7] 段志强, 王力, 李立功, 等. 单护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 mudstone stratum[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(7): 120.
- [8] 赵博剑, 周建军, 谭忠盛, 等. 复合地层盾构掘进参数及其与地层相关性分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊1): 140.
ZHAO Bojian, ZHOU Jianjun, TAN Zhongsheng, et al. Variation of shield boring parameters and correlation analysis in mixed ground [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S1): 140.
- [9] 李杰, 付柯, 郭京波, 等. 复合地层下盾构掘进速度模型的建立与优化[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(3): 142.
LI Jie, FU Ke, GUO Jingbo, et al. Establishment and optimization of a driving speed model for shield tunnelling in mixed ground [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(3): 142.
- [10] 于云龙, 管晓明, 王旭春, 等. 砂黏复合地层盾构掘进参数变化规律及掘进速率预测研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(7): 1125.
YU Yunlong, GUAN Xiaoming, WANG Xuchun, et al. Tunneling parameters variation laws and velocity prediction of shield tunneling in sandy-clay composite strata[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(7): 1125.

· 收稿日期:2022-03-20 修回日期:2022-10-10 出版日期:2024-08-10

Received:2022-03-20 Revised:2022-10-10 Published:2024-08-10

· 通信作者:刘浩,高级工程师,haoliu_1988@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

中国将主持铁路自动驾驶国际标准制订

日前,在瑞典斯德哥尔摩召开的国际标准化组织 ISO/TC269/SC3 第九次全体大会上,经过法国、德国、日本等 13 个国家专家及观察员全体投票,一致同意通过由中国牵头的《应用自动驾驶模式的运营规则导则》特别工作组项目提案,决定成立工作组,由中国专家牵头标准编制工作。这是全球首个关于铁路自动驾驶的 ISO 国际标准(TR)。

《应用自动驾驶模式的运营规则导则》聚焦的自动驾驶领域是目前世界铁路行业前沿热点,项目以中国、欧洲、日本等国家和地区干线铁路自动驾驶应用为对象,通过识别应用自动驾驶模式时对铁路运营关键要素(岗位、流程、责任等)的影响,提出宏观运营规则编制原则。

(来源:人民日报)