

DOI: 10.7672/sgjs2025070025

# 基于 Ylvie 模型的盾构有效推力及摩擦损耗分析\*

袁 阳

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 盾构施工过程中由于盾壳摩擦等诸多因素,导致施加在工作面上的有效推力往往小于液压油缸实际提供的总推力,而对于有效推力的准确评估能够有效提升盾构施工的稳定性及经济性,但相关的研究成果依旧匮乏。为了更准确地预测硬岩地层中盾构施工时工作面所受有效推力以及刀盘滚刀切削速率,基于 Ylvie 模型考虑地层特性建立了矩阵形式的分析框架以及预测模型。在盾壳摩擦损耗预测中将 Ylvie 模型与 Heikal 模型进行了对比,在切削速率预测中与 Gehring 和 CSM 模型进行了对比分析,验证了所构建的预测模型的准确性。分析结果表明,研究区间的盾构施工过程中,盾壳摩擦对总推力的损耗达到 41%。

[关键词] 隧道;盾构;摩擦损耗;刀盘扭矩;参数预测;机器学习

[中图分类号] U453.5

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0025-07

## Analysis of Effective Thrust and Friction Loss of Shield Machine Based on Ylvie Model

YUAN Yang

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

**Abstract:** Due to many factors such as shield friction during shield construction, the effective thrust applied to the working face is often less than the total thrust actually provided by the hydraulic cylinder. Accurate evaluation of the effective thrust can effectively improve the stability and economy of shield construction, but relevant research results are still scarce. In order to more accurately predict the effective thrust on the working face and the penetration rate of the cutterhead during shield construction in hard rock formations, a matrix analysis framework and prediction model were established based on the Ylvie model considering the formation characteristics. The Ylvie model was compared with the Heikal model in the prediction of shield friction loss, and compared with the Gehring and CSM models in the prediction of penetration rate, verifying the accuracy of the prediction model constructed in this paper. The analysis results show that during the shield construction in the study area, the loss of total thrust due to shield friction reached 41%.

**Keywords:** tunnels; shields; friction loss; cutterhead torque; parameter prediction; machine learning

### 0 引言

在隧道施工时准确预测盾构机的性能至关重要。然而由于实际施工环境通常非常复杂,传统的盾构机工作性能预测精度有限<sup>[1-2]</sup>。为提高不同地层中盾构性能评估的准确性及可靠性,提出了一种考虑地质情况的机器学习预测方法,同时考虑了盾构机工作期间的施工参数分析。

盾构机在隧道掘进时通常会持续记录刀盘扭矩和推进力等盾构关键参数。这些参数实际上能够反映隧道施工过程中所遇到的岩土条件。部分文献利用特定能耗、特定切削深度以及扭矩比等性能指标对掘进期间监测的施工参数进行了分析,发现推进过程中推进力的波动会影响这些性能指标的变化<sup>[3]</sup>。在实际开挖中,推进过程的稳定性高度依赖有效推进力,即盾构机所施加的总推力减去盾壳摩擦力后的剩余推力<sup>[4]</sup>。然而对于刀盘与掌子面之间的相互作用,由于盾壳与隧道周围土体内壁的复杂接触涉及各种影响因素,因此实际受到的摩

\* 中国铁建股份有限公司 2022 年度科技研究开发计划 (2022-C1);  
中铁十八局集团有限公司 2022 年度科研创新项目 (C2022-051)

[作者简介] 袁 阳,工程师,硕士,E-mail: yyang112025@163.com

[收稿日期] 2025-01-22

擦力组成十分复杂。盾壳摩擦以及盾构主机的配套系统在推进过程中所抵消的部分推进力会干扰系统对掌子面岩体特性的判断<sup>[5]</sup>。因此,为了更精准地预测盾构在施工过程中遇到的岩体条件,需要采用更精细的方法对盾构施工过程中监测的施工参数进行评估,从而将盾壳摩擦对掘进效率的影响考虑进去<sup>[6]</sup>。既有研究显示尽管盾构施工时持续采集的施工参数能够提供大量诸如刀盘扭矩、推进力等关键参数,但现有的分析模型却难以基于这些数据系统分析盾构机受到的复杂荷载与地质条件之间的相互关系<sup>[7]</sup>。由于推进力在盾构工作时的波动对性能指标有显著影响,因此若要提升对盾构数据的评估精度,分析盾壳摩擦产生的影响是提升预测精度的有效切入点之一<sup>[5]</sup>。

Ylvie 模型是一种新颖的盾构机施工参数分析方法,可用于提高隧道施工中的盾构性能预测精度。该模型可自动计算推进过程中的摩擦力,从而增强盾构在不同地质力学环境下的预测性能。本文基于 Ylvie 模型提出了一种融合机器学习与盾构-岩土相互作用分析的新方法,以提升不同地质环境中盾构性能的评估准确度和可靠性。该方法整合了盾构施工参数以及地质勘察数据分析方法,能够准确预测实时推进速率并估算盾壳摩擦造成的总推力损耗。借助机器学习挖掘施工参数中的潜在规律,明确地层特征与施工参数变化间的关联。

## 1 工程概况

西安地铁 8 号线广泰门站—堡子村站区间自广泰门站沿广运大道由南向北敷设,于广运潭大道与产灞大道十字转入西北角空地,后转入产灞一路向西敷设进入堡子村站。区间隧道位于西安市郊区,隧道上方的广运潭大道宽 60m,为双向六车道,产灞一路宽 40m,为双向四车道。盾构区间左、右线隧道长度分别为 1 038.791m 和 1 069.875m,隧道埋深 12.26~24.95m,左右线间距为 16.7~17.5m,其中堡子村站前接 510m 停车段隧道施工。根据研究区地质资料,施工场地在勘探深度范围内自上而下划分为 6 个工程地质单元层,如图 1 所示。研究区内隧道涉及地层以闪长岩为主。根据区间工程地质条件选用中铁科工制造的 ZTE6440 土压平衡盾构机进行施工。盾构机主要参数如表 1 所示。

## 2 摩擦力的测定

推力切削梯度(TPG)可用于评价盾构机刀具性能,表示每个刀具在旋转一圈后的切削能力,通常以每旋转一周(rev)所产生的切削量(mm)来表示。该概念最初由 Wild 等人提出,随后被大量学者采

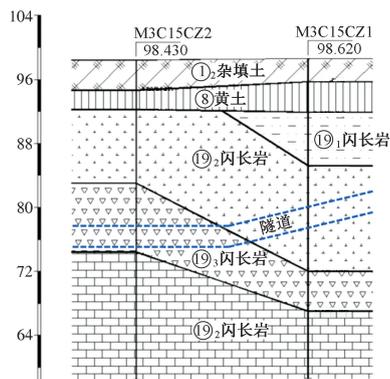


图 1 区间地质剖面

Fig. 1 Geological section of the interval

表 1 盾构机主要参数

Table 1 Main parameters of shield machine

指标	性能参数
刀盘开挖直径/mm	6 470
管片外径/mm	6 200
刀盘转速/(r·min <sup>-1</sup> )	0~2.5
最大推进速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	80
最大推力/kN	42 553
刀盘形式	辐条式
刀具	中心鱼尾刀 1 把,焊接式撕裂刀 58 把,刮刀 66 把,边刮刀 12 把,保径刀 12 把,大圆环保护刀 12 把
额定扭矩/(kN·m)	8 128
脱困扭矩/(kN·m)	9 579

纳,主要用于分析力学因素与岩土条件之间的相互作用<sup>[8]</sup>。Wilfing<sup>[9]</sup>对该方法进行了简化,忽略了推力较低时的“平台区”设定,并在扭矩呈现非线性增长时为推力增量设定了线性增长斜率。Wilfing 将“平台区”推力较低解释为“亚临界切削”,认为这部分变化不会对实际开挖过程产生影响,此外,无论 TPG 因地质条件如何变化,都会存在一个 3mm/rev 的触发值<sup>[9]</sup>。盾构施工开始前期往往会进行 100m 的试推段,以便根据现场岩土条件调整推力或者刀盘转速等参数。试推段的数据也可用于预测掘进性能,并对现有模型进行优化或修正。同时,盾构会自动记录 TPG 的变化并将其与给定的岩石性质进行比对。为确保这些结果在其他工程项目上具有通用性,进行试推时不仅需要掌子面尽可能均质,还需要滚刀状况良好。此外,充分记录掌子面的围岩条件以及隧道衬砌情况也十分关键。试推段施工参数及地质勘察数据如图 2 所示。图 2 中,TPG 曲线可用于分析某一特定围岩条件下刀具对土体的切削性,UCS 为工作面岩土的单轴抗压强度,TS 为抗拉强度。在切削速率较低时,推力(TF)会呈超线性速度增加。此阶段由于切削速率低而

导致相对较高的推力,即为“亚临界切削”。当切削速率超越亚临界阶段后,地层中会形成额外应力场,达到地层材料抗拉强度时则会产生与压应力垂直的裂缝。对于岩石而言,当这些裂缝叠加时,岩石碎片则产生剥落。盾构施工过程中进行起止试验时,先将盾构从掌子面后退一小段距离,再进行“空推”以估算静摩擦。在此过程中,通过记录推力和切削速率的变化,可以深入了解不同阶段的力学行为,并据此优化盾构施工参数,提升整体掘进效率和安全性。

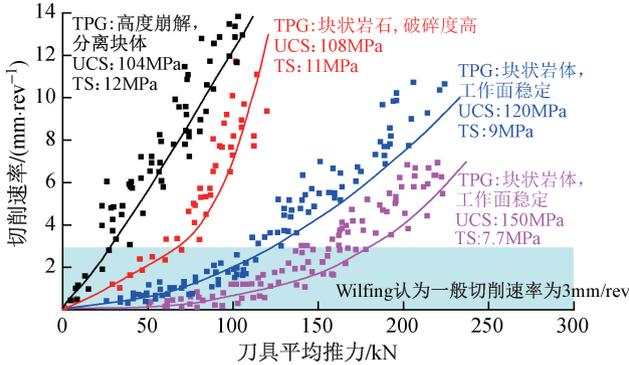


图2 试推段施工参数及地质勘察数据

Fig. 2 Construction parameters and ground investigation of the test push section

然而这种方法的不足之处在于,在进行“空推”时仅能测量刀具和盾壳的摩擦力,而在实际推进时整个刀盘也在运转。部分研究表明,机器在空推前进和后退时所受的力会相差约一个数量级<sup>[10]</sup>。此外,试推试验最大的局限性在于只能在停机期间有限制地进行。在对盾构数据进行评估时,需要综合分析记录的参数和理论计算值。而盾构前进时的总推力受到盾壳摩擦的显著影响,这种摩擦取决于岩体力学特性、隧道底部围岩的细颗粒含量,以及刀盘质量与盾壳和围岩之间的接触面积<sup>[11]</sup>。

盾壳摩擦与盾壳和围岩的接触面积有关,围岩强度较低或盾尾间隙被岩石碎片卡塞时,可能导致盾壳摩擦增大,从而间接影响总推力(TF)以及单个滚刀上分配到的推力分量。现有文献中记载的盾壳摩擦系数范围从0.01到0.85不等,表明目前对盾壳摩擦的测量及预测结果差距仍然较大。在实际施工中,所测得的TF往往需要扣除盾壳摩擦、刚度及切削中心位置等因素造成的推力损失,从而得到与工作面岩石切削密切相关的有效推力。Türtscher<sup>[12]</sup>认为在高初始地应力条件下,有效推力可能仅达到总推力的50%,因此本文引入了Ylvie模型评估盾构施工过程中的摩擦损失。

Wild基于Weh提出的方法通过对盾壳与围岩的接触力与每个行程测量到的扭矩进行详细对比来实现盾壳摩擦的量化<sup>[8]</sup>。这一方法的分析思路如图3所示,可分为4个步骤:首先在一定范围内,使扭矩保持恒定状态(图中以红色标记);然后随着推力增大,扭矩也随之增大直到超过特定阈值,扭矩开始显著上升,当扭矩达到 $1\text{MN}\cdot\text{m}$ 前,这种上升基本呈线性增长(图中以绿色标记);当扭矩超过该点后,上升速率明显加快,斜率迅速增大,直至达到图中蓝色标记的上限值。

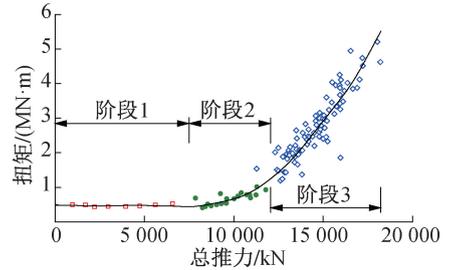


图3 Wild法的摩擦力确定过程

Fig. 3 Friction determination process of Wild method

而对于摩擦的评估关键在于识别恒定扭矩区间(红色)与线性增长区间(绿色)之间的交点,该交点代表克服摩擦力(FF)所需的最小推力。通过计算恒定区间扭矩的平均值,并代入线性增长区间的回归函数中即可确定此交点。采用Wild法对扭矩以及推力数据进行分析前,需要首先排除异常值并综合考虑平均值和回归曲线的标准差,从而得到准确且可靠的误差范围。

Heikal等基于布伦纳基底隧道Ahrental至Pfans勘探段的实测数据,提出了一个新的参数——理论推进力 $F_{N,theo}$ ,该参数通过对盾构施工参数进行回溯性分析得到。而切向力 $F_{tang}$ 则通过式(1)基于刀盘扭矩、空转扭矩行程及所有滚刀半径之和除以滚刀数量得到的平均半径来计算<sup>[13]</sup>:

$$F_{tang} = (T - T_0) \cdot \sum_{i=1}^n (r_i) \quad (1)$$

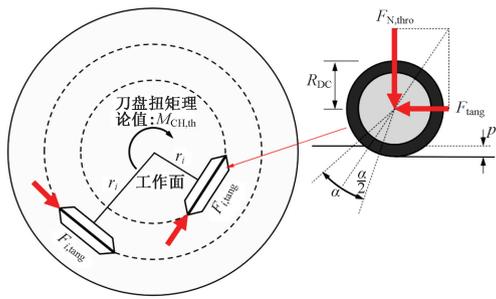
式中: $F_{tang}$ 为切削力; $T$ 为刀盘扭矩; $T_0$ 为附加扭矩; $n$ 为刀具数量; $r_i$ 为与刀盘中心的距离。

滚刀的贯入角度 $\alpha$ 根据贯入深度和盘形滚刀的半径来估算,估算方法如式(2)所示,计算原理如图4所示。

$$\alpha = \cos^{-1} \left[ \frac{R_{DC} - p}{R_{DC}} \right] \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 为切割角度,也称为贯入角度; $R_{DC}$ 为刀具半径; $p$ 为切削深度。

依据式(3)则可以求得法向力 $F_n$ :

图 4  $F_{N,theo}$  计算示意Fig. 4  $F_{N,theo}$  calculation

$$F_n = F_{tang} \cdot \left[ \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right]^{-1} \quad (3)$$

式中:  $F_n$  为法向力。

最后,基于滚刀数量,根据式(4)可推导出理论推进力:

$$F_{N,theo} = n \cdot F_n \quad (4)$$

式中:  $F_{N,theo}$  为 Heikal 等<sup>[13]</sup>提出的理论推力。

Heikal 的计算方法中摩擦损失被量化为最初测得的推力(TF)与理论推进力( $F_{N,theo}$ )之间的差值。然而,该方法需要确定空转扭矩的行程( $T_0$ ),目前尚无统一的标准方法可用于确定这一参数。Erharter 等<sup>[6]</sup>针对硬岩条件下的盾壳摩擦进行了基于理论研究、模型试验以及现场监测的分析,其中采用了剪切试验来确定不同土层的摩擦系数。本文在对广泰门站—堡子村站区间的盾构监测数据进行分析时,采用了 Heikal 的方法来评估盾壳摩擦。

尽管现有研究为推力切削梯度(TPG)及其对盾构性能的影响提供了基础性认识,但在实际施工中如何计算盾构运行过程中的摩擦损失目前仍鲜有研究。虽然 Erharter 等<sup>[6]</sup>的研究能够整合实测数据和理论框架以估算盾体摩擦及推进力,但这类方法往往需要人工整理大量数据。因此本文采用 Ylvie 模型算法,基于数据驱动的机器学习对盾构施工数据进行分析,从而明确盾壳摩擦(FF)及其对盾构性能的影响。

### 3 Ylvie 预测模型构建

#### 3.1 盾构数据记录和预处理

Ylvie 模型能够快速处理大量由盾构记录的施工参数,这些参数包括:盾构机位置、记录日期和时间、管片编号、切削速率、推力、刀盘扭矩、刀盘转速。Ylvie 模型会将大量原始数据转换为“.parquet”格式,并对数据进行预处理,包括去除异常值和归一化操作,以确保数据质量<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 摩擦损失分析的计算方法

Ylvie 模型分析摩擦损失的过程主要包括 3 个步骤:空转扭矩计算、摩擦力计算、计算 TPG。其中在计算空转扭矩时,为了与 Wild 对 TPG 的研究方法相呼应,Ylvie 模型在分析每个盾构行程时,首先集中于第 1 阶段。该阶段推力增大的过程中扭矩保持恒定,对数据进行预处理时,首先去除贯入量或 TF 为 0 的记录。再使用 z-score 对数据进行异常值检测并剔除超出 3 倍标准差的点,以确保仅对具有实际意义且 TF 为正值的样本进行分析,从而提升结果的准确性和相关性。在进行各行程的迭代时,假设共有  $j$  个行程,每个行程迭代  $i$  次,步长设为 5。在第  $j$  个行程的第  $i$  次迭代中,从行程  $j$  的 TF 向量  $TF_j$  中选取最大值,以此定义为阈值  $TF_{start,i,j}$ ,随后将  $TF_{start,i,j}$  递减至 0,分若干步降低阈值,对当前行程的数据集进行分段分析。在每次迭代中,对于阈值区间  $[0, TF_{start,i,j}]$ ,假设 TF(自变量  $x$ )与扭矩(因变量  $y$ )之间呈线性关系,如此可在各个 TF 子区间中找出相应的线性关系。

$$f(x) = c_{i,j} \cdot x + d_{i,j} \quad (5)$$

式中:  $c_{i,j}$  为斜率;  $d_{i,j}$  为截距。

进一步考虑物理属性的曲线拟合,为确保结果具有物理意义,模型对  $c$  和  $d$  两个参数设置限制:截距  $d$  为正,且小于该行程扭矩上限,以代表系统正常运行时的基准扭矩;斜率  $c$  为正,且设定上限  $c_{max}$  以防止扭矩对 TF 变化过于敏感。在此基础上,若当前阈值下的斜率  $c$  为正,或数据量足够,模型会减小  $TF_{start,i,j}$  以提高分析细度;若斜率  $c$  出现负值或数据不足,则模型增大  $TF_{start,i,j}$ 。通过循环迭代,最终得到稳定的平均空转扭矩  $\tau_{idle,j}$ ,即图 5 中的“阶段 1”,对应刀盘未实际切削的起始阶段扭矩。

第 2 步为摩擦力计算,在完成空转扭矩  $\tau_{idle,j}$  的计算后,进一步分析图 5 中阶段 2(实际切削阶段)。该阶段表现为推力(TF)与扭矩之间的非线性增长关系,即刀盘已开始切削岩土。为避免时间造成的影响,需要对数据进行再分配,这是因为与阶段 3 相比,盾构作业的阶段 1 和阶段 2 持续时间相对较短,阶段 3 通常会生成数量过多的数据点,由此导致对阶段 2 的拟合失真。为此,数据仅基于推力区间进行分段,由  $TF_{start,i,j}$  开始并以固定间隔  $\Delta$  递增。随后,在每个区间内计算平均扭矩值,以均衡数据分布,分析过程排除扭矩低于  $\tau_{idle,j}$  的数据点。在完成上述步骤后,通过式(6)所示的二次函数对整理后的数据进行拟合,用以描述“阶段 2”中扭矩随 TF 的非线性增长特征。最终摩擦力  $TF_{FF}$  则通过求解式

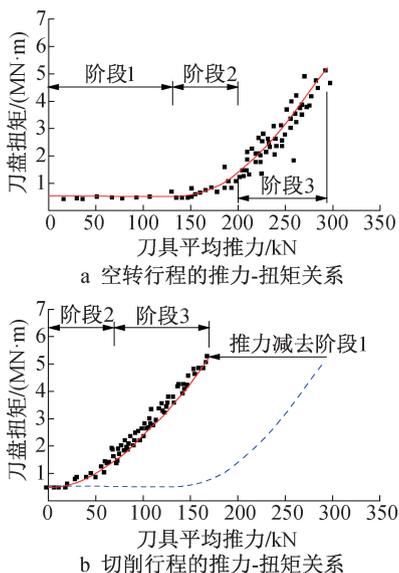


图5 基于 Ylvie 模型分析盾壳摩擦

Fig. 5 Analysis of shield shell friction based on Ylvie model

(7) 得到, 其中  $x_j$  表示实际切削阶段扭矩  $g_j(x)$  等于空转扭矩  $\tau_{idle,j}$  时对应的推力。

$$g_j(x) = ax_j^2 \quad (6)$$

$$g_j(x) - \tau_{idle,j} = 0 \quad (7)$$

最后基于摩擦力计算 TPG, 为了构建基于 TPG 划分行程的矩阵, 需要对原始行程数据格式进行调整。首先忽略摩擦力  $TF_{FF}$ , 使分析对象从扭矩转向切削深度, 进而更好地近似阶段 3 (见图 5), 以便生成 TPG。为取得对切削深度  $h(x)$  的最优拟合 (见式 (8)), 再次执行类似于前述的数据再分配步骤, 保证数据平衡性, 从而准确逼近这一阶段所对应的数据点。

$$h(x) = ax^2 + bx \quad (8)$$

式中:  $a, b$  为拟合系数。

## 4 应用分析

### 4.1 扭矩影响

为了分析 Ylvie 模型在进行盾构施工状态评估中的可靠性, 针对 Radoncic 等<sup>[15]</sup>定义的扭矩因子进行计算, Radoncic 等针对硬岩盾构施工提出了扭矩因子  $f$  与盾构系统行为之间的关系, 当扭矩因子介于 0.7~0.9, 表明围岩处于稳定状态; 当该值低于 0.7 时, 则说明盾体摩擦增大; 而当该值超过 1.0 时, 表明刀盘前方可能存在破碎岩体, 导致摩擦阻力增大。在进行刀盘扭矩理论计算前, 需首先确定法向力  $F_n$ :

$$F_n = \frac{\text{Thrust} - 3\,500}{77} \quad (9)$$

式中:  $F_n$  为法向力; Thrust 为测得的推力; 3 500 为

对应推力测得的摩擦力; 77 为刀具数量。

随后确定切削角  $\alpha$ , 并根据式 (3) 计算切向力  $F_{tang}$ 。刀盘的总扭矩可视为所有切向力与其在刀盘上力臂的乘积之和 (见式 (10))。参数  $f$  可按照式 (11) 确定。

$$M_{CH,th} = \sum_{i=1}^{77} (F_{tang,i} r_i) + M_0 \quad (10)$$

$$f = \frac{M_{CH,real}}{M_{CH,th}} \quad (11)$$

式中:  $M_{CH,th}$  为理论刀盘扭矩;  $M_0$  为由内摩擦引起的扭矩分量;  $M_{CH,real}$  为测得的刀盘扭矩。

Ylvie 模型能够在逐行程分析的基础上计算空转行程时的扭矩。在任何开挖工作启动前, 都应当先确定空转行程的扭矩, 从而保证安全标准并实现性能最优。然而, 不同施工环境下空转行程所需扭矩可能存在差异, 由此将空转行程扭矩视为固定值在实操中难以适用。因此, 本文所提出的 Ylvie 模型这类基于机器学习的动态方法可更精确、灵活地确定隧道施工中的扭矩因子。

### 4.2 通过 Ylvie 模型进行增强 TPG 矩阵分析

Ylvie 模型在推力切削梯度 (TPG) 分析矩阵构建中的应用, 为预测硬岩环境下的隧道掘进性能提供了重要的方法。TPG 分析矩阵基于具体隧道工程实测数据, 将地质条件分类后得到一系列性能曲线。矩阵中每个分组由若干岩土参数定义——岩石单轴抗压强度 (UCS) 及岩体完整状态 (根据节理长度与围岩周边比分为“微裂隙” (<2/3) 和“高裂隙” (>2/3))。参照 Hoek-Brown 分类方法, UCS 以 50MPa 为间隔进行划分。将这些地质特征与盾构施工持续监测的施工参数 (切削速率和由 Ylvie 模型校正后的推力) 相结合形成 TPG 分析矩阵<sup>[16]</sup>。广泰门站—堡子村站区间 TPG 与岩体亚类别和单轴抗压强度 (UCS) 分类之间的对应关系如图 6 所示。随着岩石强度的增加和岩体裂隙程度的降低, TPG 的斜率逐渐平缓, 其中⑩<sub>1</sub> 地层中的闪长岩在微裂隙的状态下, 当刀盘上刀具的平均推力达到 220kN 时, 切削速率约为 6mm/rev。

## 5 模型验证及对比分析

### 5.1 摩擦损耗预测

通过与文献 [13] 提出的理论推进力模型进行直接对比以验证 Ylvie 模型, 采用 Ylvie 模型对研究区间的隧道进行了摩擦损耗评估。文献 [13] 中的模型给出的平均摩擦损失约为 39%, 而 Ylvie 模型的估算值则在 41% 上下。两种模型与实测数据之间的对比如图 7 所示, 实测推力 (TF) 与 Ylvie 模型

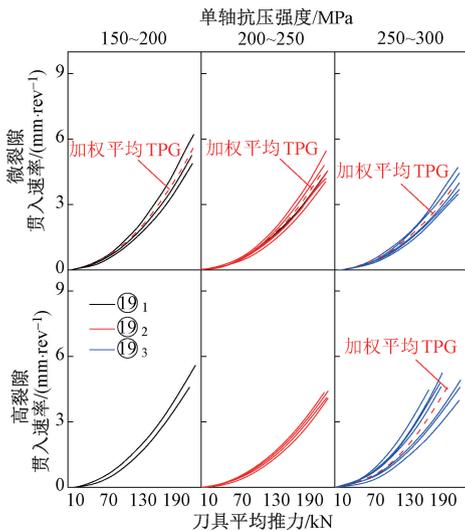


图6 广泰门站—堡子村站区间 TPG 分析矩阵

Fig. 6 TPG analysis matrix for the interval from Guangtaimen Station to Baozicun Station

以及 Heikal 模型计算的推力(TF)之间的差异,来源于两种模型都要从推力中扣除摩擦力,以获取施加在工作面上的有效推力。图7中虚线即为根据实测推力数据扣除摩擦力后得到的有效推力。实测有效推力的摩擦损失为45%~48%,因此进一步证明了 Ylvie 模型在准确计算摩擦损失方面的有效性。而 Ylvie 模型的优势在于基于机器学习算法,能够逐个行程地自主确定空程扭矩,并不断更新数据集。这一特性使其能够对盾构运行中每个行程进行更加精准的分析,显著提高了摩擦损失和施工动态的估算精度。

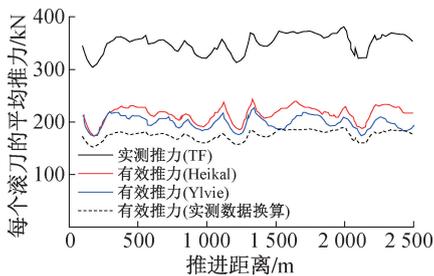


图7 理论推力与实测数值的对比

Fig. 7 Comparison of theoretical thrust with measured values

## 5.2 切入深度预测

针对西安地铁8号线广泰门站—堡子村站区间的盾构施工,采用 Ylvie 模型进行切削速率预测,同时将预测结果与 CSM 模型、Gehring 模型以及实际隧道施工数据进行了对比(见图8)。结果显示, Ylvie 模型在切削速率预测方面优于当前主流的 Gehring 和 CSM 模型。相比于实测数据,后两者对

于切削速率的预测结果偏低,尤其在本研究依托工程所处的硬岩地层中的预测效果并不理想。

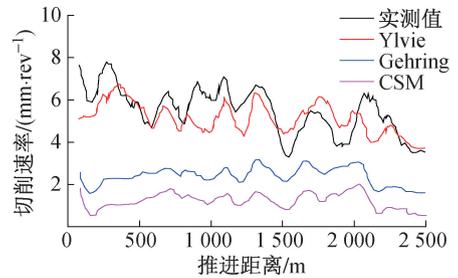


图8 理论切削速率与实测切削速率对比

Fig. 9 Comparison of theoretical penetration rates with measured data

## 6 结语

本文基于 Ylvie 模型对盾构施工时有效推力以及切削速率进行了评估分析,利用机器学习<sup>[17-18]</sup>实现对空转行程扭矩和推进过程中每个行程摩擦损失的自动计算。并将 Ylvie 模型的预测结果与 Heikal 模型进行了对比分析,结果表明在预测精度和可靠性上均满足需求。同时,基于 Ylvie 模型提出了矩阵形式的分析框架,可利用盾构施工参数监测数据对地质条件进行回溯性评估,为隧道施工决策提供更加全面的信息支持。

目前本文提出的评估方法主要适用于硬岩环境中的盾构隧道施工,进一步研究可将滚刀磨损和维护等因素纳入考虑,并进一步提升模型预测功能,以提供更完整的盾构性能视角。

### 参考文献:

- [1] 王子文. 基于多智能算法融合的盾构机土压预测研究[J]. 自动化应用, 2024(23): 31-35, 39.  
WANG Z W. Research on earth pressure prediction of shield machine based on multi-intelligence algorithm fusion [J]. Automation application, 2024(23): 31-35, 39.
- [2] MACIAS F J. Hard rock tunnel boring: performance predictions and cutter life assessments [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [3] 王柱琰, 李栋, 沈振东. 复合地层埋深突变条件下盾构施工掘进参数分析[J]. 四川建筑, 2023, 43(4): 145-151.  
WANG Z Y, LI D, SHEN Z D. Analysis of tunneling parameters of shield construction under the condition of sudden change of buried depth of composite stratum [J]. Sichuan architecture, 2023, 43(4): 145-151.
- [4] 黎水昌, 李洋溢, 秦鲜卓. 下穿黄河强透水砂卵石地层隧道施工参数研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(3): 31-35.  
LI S C, LI Y Y, QIN X Z. Study on construction parameters of tunnel underpassing Yellow River strong permeable sandy cobble stratum [J]. Construction technology, 2022, 51(3): 31-35.
- [5] 白廷辉, 郑勇波, 李晓军, 等. 施工阶段盾构衬砌结构受力特性影响因素数值分析[J]. 施工技术, 2019, 48(7): 98-102.

- BAI T H, ZHENG Y B, LI X J, et al. Numerical analysis of influencing factors of stress characteristics of shield lining structure in construction stage [ J ]. Construction technology, 2019, 48(7) :98-102.
- [ 6 ] ERHARTER G H, GOLIASCH R, MARCHER T. On the effect of shield friction in hard rock TBM excavation [ J ]. Rock mechanics and rock engineering, 2023, 56(4) :3077-3092.
- [ 7 ] 宋建学, 郝凌霄, 师刚, 等. 盾构隧道施工对柔性地下管线的影响预测及分析 [ J ]. 施工技术 ( 中英文 ), 2021, 50(19) :1-5.  
SONG J X, HAO L X, SHI G, et al. Prediction and analysis of the influence of shield tunnel construction on flexible underground pipelines [ J ]. Construction technology, 2021, 50(19) :1-5.
- [ 8 ] WILD K. The Influence of Rock Mass Characteristics on TBM penetration-a case study in the nant de drance access tunnel [ D ]. Zürich; ETH Zürich, 2012.
- [ 9 ] WILFING L S F. The influence of geotechnical parameters on penetration prediction in tbn tunneling in hard rock [ D ]. Munich; Technische Universitaet Muenchen, 2016.
- [ 10 ] GONG Q M, ZHAO J, JIANG Y S. In situ TBM penetration tests and rock mass boreability analysis in hard rock tunnels [ J ]. Tunnelling and underground space technology, 2007, 22(3) :303-316.
- [ 11 ] BERGMEISTER K, REINHOLD D C. Learning and optimization from the exploratory tunnel-Brenner base tunnel [ J ]. Geomechanics and tunnelling, 2017, 10(5) :467-476.
- [ 12 ] TÜRTSCHER M. Analysis and prognose von penetration und vortriebsgeschwindigkeit bei maschinellen vortrieben im festgestein [ M ]. Innsbruck; Innsbruck Univ. Press, 2012.
- [ 13 ] HEIKAL G, ERHARTER G H, MARCHER T. A new parameter for TBM data analysis based on the experience of the Brenner Base Tunnel excavation [ J ]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 833(1) :012158.
- [ 14 ] SHARMA K, MARJIT U, BISWAS U. Efficiently processing and storing library linked data using apache spark and parquet [ J ]. Information technology and libraries, 2018, 37(3) :29-49.
- [ 15 ] RADONCIC D N, HEIN D M, MORITZ D B. Determination of the system behaviour based on data analysis of a hard rock shield TBM/analyse der maschinenparameter zur erfassung des systemverhaltens beim hartgesteins-schildvortrieb [ J ]. Geomechanics and tunnelling, 2014, 7(5) :565-576.
- [ 16 ] SAYANTAN C, BISAI R, SATHISH K P, et al. Failure modes of rocks under uniaxial compression tests: an experimental approach [ J ]. 2019. DOI:10.5281/ZENODO.3461773.
- [ 17 ] 常佳奇, 黄宏伟, 张东明, 等. 基于聚类与 Transformer 算法的上软下硬地层盾构滚刀正常磨损预测 [ J ]. 施工技术 ( 中英文 ), 2024, 53(1) :107-115.  
CHANG J Q, HUANG H W, ZHANG D M, et al. Normal wear prediction of disc tool based on clustering and Transformer algorithm for tunneling in upper soft and lower hard strata [ J ]. Construction technology, 2024, 53(1) :107-115.
- [ 18 ] 张旭峰, 肖超, 王科伟, 等. 基于机器学习的土压平衡盾构参数预测研究 [ J ]. 施工技术 ( 中英文 ), 2023, 52(11) :17-21, 26.  
ZHANG X F, XIAO C, WANG K W, et al. Prediction of shield parameters based on machine learning for EPB [ J ]. Construction technology, 2023, 52(11) :17-21, 26.