 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i4.9971

Modeling Steady-State Construction Efficiency and Risk Early Warning for Super-Large Diameter Pipe Jacking

Xiaoli Ouyang[1] Chunming Qi[1*] Shaohai Liu[2] Haibing Xie[2]

1. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan, 421001, China
2. Hunan Duichen Construction Co., Ltd., Hengyang, Hunan, 421111, China

Abstract

To investigate the efficiency patterns of pipe jacking construction, this study focuses on a super-large diameter DN4600 pipe jacking project for a stormwater box culvert in Hunan Province. An engineering model is established based on three key parameters—baseline advance rate (C), average pipe friction coefficient (λ), and measured efficiency coefficient of intermediate jacking stations (γ)—and their interactions. The model's generalization capability is rigorously validated using cross-validation. Furthermore, global sensitivity analysis is introduced to reveal the sensitivity characteristics of these parameters and to quantify their respective impacts on the efficiency prediction results. The findings provide a scientific model and a practical tool for evaluating the efficiency of similar pipe jacking projects, thereby enriching both the theoretical framework and practical applications in the field of pipe jacking construction.

Keywords

super-large diameter pipe jacking; construction efficiency; cross-validation; global sensitivity index

超大口径顶管稳态施工效率模型研究

欧阳小丽[1] 綦春明[1*] 刘绍海[2] 谢海冰[2]

1. 南华大学土木工程学院，中国 · 湖南 衡阳 421000
2. 湖南兑辰建设有限公司，中国 · 湖南 衡阳 421111

摘 要

为研究顶管施工效率规律，本文针对湖南省雨水箱涵超大口径DN4600顶管工程开展系统研究分析，建立基于三个参数（基础顶进速度C、管道平均摩阻力影响系数λ和中继间实测效率系数γ）及主要参数交互作用的工程模型，结合交叉验证法证明模型的泛化能力，同时引入全局灵敏度指数法，揭示各参数的灵敏度特征，明确参数对效率预测结果的影响权重。本文研究成果可为类似顶管施工的效率评估提供科学模型与实用工具，丰富顶管施工的理论与实践。

关键词

超大口径顶管；施工效率；交叉验证法；全局灵敏度指数

1 引言

随着我国城市化进程加速和地下空间开发向纵深发展，顶管技术因其对地表扰动小、环境影响低、穿越能力强等优势，在工程应用愈发常见。尤其是在超大口径顶管工程中，对该领域的施工效率与风险管控的研究仍较少。现有研究已观察到顶管施工效率呈现“初期升 - 中期较稳 - 末期速降”的宏观特征，然而当前相关研究仍存在明显短板，难以支撑工程实践的精细化需求。针对上述问题，本文创造性针对湖南省雨水箱涵顶管工程进行研究分析，提出一种基于三个参数及其交互作用的顶管施工效率模型，结合交叉验证法评估模型的泛化能力，通过 Sobol 法分析揭示参数不确定性，为类似顶管工程的安全高效推进提供理论支撑与实用工具。

【基金项目】湖南省自然资源科研项目（湘自资科：20230144DZ）。

【作者简介】欧阳小丽（2001–），女，中国湖南郴州人，硕士，从事工程管理与灾害防治研究。

【通讯作者】綦春明（1965–），男，中国湖南衡阳人，硕士，教授，从事工程项目管理研究。

2 模型构建

2.1 施工效率模型

$$v(x)=v_b(x)+r_k(x) \quad (1)$$

式中，$v_b(x)$为基础指数衰减项；$r_k(x)$为中继间实测效率调整项；顶管顶进距离 x 为自变量。

2.2 核心公式推导

2.2.1 基础项

物理机制：顶进时同时考虑根据现场实测顶力，剔除

顶管机迎面阻力后，可以反算出有序顶进过程中的平均摩阻力具备较强稳态规律 [1]。

$$v_b(x)=C\times\max(1-\alpha\lambda x,\beta)e^{-\lambda x} \quad (2)$$

式中，设备效率潜力：C 为基础顶进速度（单位：m/d），基于超大口径顶管稳态施工经验值取 3-6m/d，表现为正常施工状态；$e^{-\lambda x}$ 为指数衰减项，λ 为系数（单位：m^{-1}），取值 0.001-0.01，反映泥质粉砂岩土层管道平均摩阻力随距离导致的效率降低；

$$\max(1-\alpha\lambda x,0.1) \quad (3)$$

式中，α=0.15（经验系数），核心作用是限制 λ 与 C 的交互强度，避免因综合摩阻力过大导致基础顶进速度衰减过快，超出工程实际；β=0.1 确保基础速度不低于初始值 10% 的硬性约束，对于本模型而言，硬性约束已经足够小，不会对效率预测造成突变。

2.2.2 调整项

物理机制：中继间是顶管施工关键设置，它是分段克服摩阻力的一种施工技术，实际顶进中地层阻力非线性增长、顶力传递存在能量耗散，一个中继间的总顶力甚至实际仅考虑一半左右发挥作用 [1]。

$$g_k(x)=\gamma\Delta v(x)e^{-0.013\left(x-x_{r_{k,m}}\right)}H\left(x-x_{r_{k,m}}\right) \quad (4)$$

式中，γ：单个中继间实测效率系数，表示单个中继间可填补速度缺口的比例，0.1 ＜ γ ≤ 0.9，约为单个中继间最大实测效率；

$$\Delta v(x)=C_{\max}-v_b(x) \quad (5)$$

式中，设定基础速度与实际最大速度的差值为可补偿空间，以反映中继间的实际作用效果，C_{max} =6 m/d，取值约为中继间布置后施工理想状态；$e^{-\varepsilon\left(x-x_{r_{k,m}}\right)}$为单个中继间实测效率在泥质粉砂岩层中顶进表现，$\varepsilon$ =0.013m^{-1}（经验系数）表示距离中继间布置位置越远效率越弱，$x_{r_{k,m}}$ 为中继间布置位置，m 为中继间数量；

$$H\left(x-x_{r_{k,m}}\right)=\begin{cases}0, & x-x_{r_{k,m}}<0,\\ \dfrac{x-x_{r_{k,m}}}{L}, & 0<x-x_{r_{k,m}}<L\\ 1, & x-x_{r_{k,m}}>L,\end{cases} \quad (6)$$

式中，中继间推力本应平滑激活，消除液压系统瞬态冲击风险，需经过一段距离才发挥最大效率，模型在此处从实际数据出发简化。L 为中继间激活过渡距离，基于经验取 5m，对应液压系统从 0 升至额定顶力的行程。

$$r_k(x)=\min\left(\sum_i^m g_k(x),0.99\Delta v(x)\right) \quad (7)$$

限制所有中继间理论上最大提升 99% 速度缺口，距离合理布置的中继间之间的扰动效应可忽略，但不应超过设计的速度缺口

2.2 模型验证

2.2.1 模型验证方法选取

（1）k 折交叉验证法

通过 k 折交叉验证法将原始数据集分成 7:3 的训练集和验证集，验证模型在未参与拟合数据上的表现。k 折交叉验证可更准确地评估模型在未知数据上的表现，实现对模型性能的可信度评估 [2]。

（2）留一法

交叉验证法中最典型的交叉验证法为“留一法交叉验证（LOOCV）”，将该方法用于回归模型估计中即可得到“留一拟合优度（$LOOR^2$）”，一样可评估回归模型的样本外拟合能力 [3]，同时补全 k 折交叉验证法的细节、验证稳健性。一般情况下对于本文非线性模型的 $LOOR^2$ 比交叉验证 R^2 下降更快，那么可认为如果 $LOOR^2$ 与 k 折交叉验证 R^2 接近，说明模型对于该工程案例适应性较差；$LOOR^2$ ＞ k 折交叉验证 R^2 且＞ 0.6，则说明该工程案例样本质量不足；如 $LOOR^2$ ＜ R^2，说明模型本身泛化能力差。

2.2.2 模型评估指标

本文选用决定系数 R^2、均方根误差 RMSE 指标来评估模型性能。R^2 是空间交叉验证最核心的考核指标。RMSE 直接反映了预测误差，且对异常敏感，尤其是 RMSE 的平方项对于离群点给予了更多的惩罚，即使少量异常值也可能导致 RMSE 值偏大 [4]。

2.3 工程案例

2.3.1 工程概况

湖南某雨水箱涵工程基坑深度 7.5-16.37m，基坑深度范围主要为杂填土、强风化粉砂质泥岩及中风化粉质泥岩。本文研究顶管 DN4600 超大口径顶管，该施工段长 481m，内径 4.6m，外径 5.4m。J1~J2、J2~J3 段均采用管径 DN4600mm 顶管施工，J1、J3 井为接收井，J2 为工作井。

2.3.2 中续间设置

顶管自 J2 工作井向 J1、J3 接收井双向顶进。配备三台中继间以便正常顶进，分别设置于距离顶管机尾部 40 m、120 m、200 m 左右处。J2-J1 段顶进过程中设置于距离顶管机尾部 40 m、110 m 左右处。DN4600 箱涵侧面积大且穿过地层主要为强风化及中风化粉砂质泥岩，顶进施工困难，所以第一个中继间位置设计在顶管机后方约 40m 位置。《给水排水管道工程施工及验收规范》GB 50268—2008 规定一次顶进距离大于 100 m 应采用中继间技术，中继间设置合理 [1]。

2.3.3 数据预处理

本文针对施工过程中存在的噪声及离群点等问题进行数据预处理。首先基于原始监测数据，提取施工桩号之间的平均速度及施工描述，转换为对应的自始发井 J2 出发的顶管顶进速度，并严格记录中继间位置和周边的速度变化。其次，采用基于四分位距（IQR）箱线图法检测速度异常值，

并予以剔除。同时结合施工日志对特殊工况进行人工复核，避免误删有效数据。经清洗后保留 106 组有效数据。

2.3.4 模型拟合和验证

为了避免数据泄露，本文将 J2-J3 段按中继间分段且按施工顺序 7:3 划分，选取 J2-J1 工况作为额外测试集进一步评估模型的泛化能力。但 J2-J1 段不一定就是模型的拟合能力的真实体现，因为两段施工工况等要素还是有不同之处，所以另加入 $LOOR^2$ 看是样本数量、质量不足还是模型的泛化能力不强：如果 $LOOR^2$ 与 5 折验证 R^2 接近，说明模型对于该工程案例的施工工况适应性较差；如果 $LOOR^2$ 大于 5 折交叉验证 R^2 且大于 0.6，则说明该工程案例样本数量和质量不足；如果 $LOOR^2$ 小于 R^2 且小于 0.6，说明模型本身泛化能力差。

2.3.4.1 模型参数拟合结果

通过通过实测平均速度 与模型预测值 的误差最小化，直接用最小二乘法求解最优参数拟合，得表 1。J2-J1 段与 J2-J3 段模型决定系数分别为 $R^2\approx0.76$ 和 $R^2\approx0.83$，两者相差＜ 0.1，说明模型在两段顶管施工工程的拟合能力均表现良好。

表 1 模型参数拟合结果

参数	J2-J1 段	J2-J3 段	匹配属性
C	3.92	4.14	设备效率潜力
λ	2.38×10^{-3}	2.33×10^{-3}	泥质粉砂岩层摩阻特性
γ	0.61	0.48	实测中继间均效率验证
R^2	0.76	0.83	模型决定系数

2.3.4.2 模型验证

（1）交叉验证

对两段顶管施工过程均采用 5 折交叉验证的表现如图 1。J2-J3 段施工过程验证集 R^2=0.78，但 J2-J1 段 R^2 ＜ 0.6，为确认是否为泛化过拟合，应用留一交叉验证法得到 J2-J3 段 $LOOR^2$ 训练集和验证集分别为 0.83 和 0.76，J2-J1 段 $LOOR^2$ 训练集和验证集分别为 0.76 和 0.66。

（2）实验结果分析

对于交叉验证表现，J2-J1 段 $LOOR^2$ ＞ 5 折交叉验证 R^2 且＞ 0.6，说明该工程案例作为测试集样本数量和质量不足。评估指标总体处于一个令人满意的预测精度水平，不过也反映了对于长距离顶管情况，距离越长物理模型偏差 RMSE 越大，但数据集更充足时也更能捕捉顶管稳态施工效率规律。

3 参数不确定性分析

Sobol 法自 1993 年首次引入，现在仍被视为全局灵敏度分析方法中最强大的技术，它通过度量随机输入参数对输出的方差贡献程度来表示参数对输出的影响大小 [5]。其中总灵敏度不仅衡量了各参数对模型的独立作用，也涵盖了不同参数组合的相互作用，因此被视为评估参数对模型结果响应程度的重要标准。总体敏感度和一阶敏感度之差即交互敏感度，用于反映参数间的协同效应 [6]。Sobol 法计算结果如图 2 所示。

γ 的一阶效应和总效应占比最高，说明中继间实测效率系数 γ 及其交互作用对顶管稳态顶进施工效率结果的影响最大，证明工程中中继间的敏感程度；而且三个参数的不确定性明显很大部分来自交互敏感度，J2-J3 段中 λ 的交互敏感度比 J2-J1 段高 19.4%，说明在长距离作用下 λ 与其他参数间的协同效应比其他两个更敏感，符合泥质粉砂岩层顶管施工摩阻特性的工程逻辑。

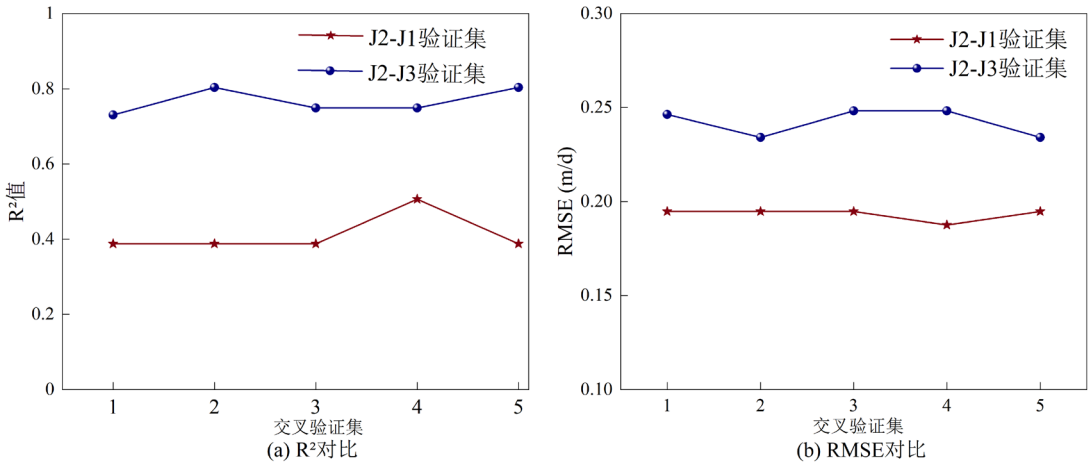


图 1 交叉验证表现

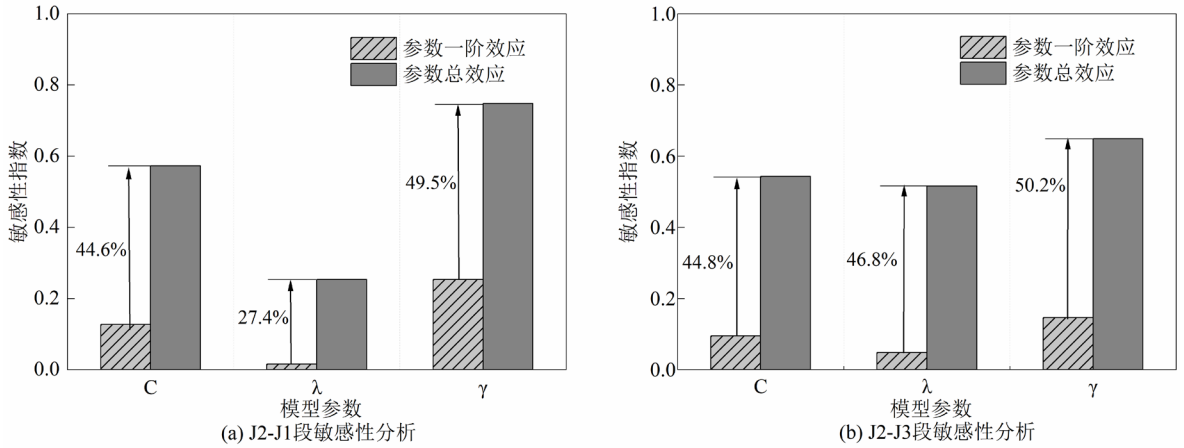


图 2 Sobol 法计算结果

4 结论

本文以湖南省雨水箱涵 DN4600 顶管工程为研究对象，探讨了泥质粉砂岩超大口径顶管稳态施工效率规律，主要结论如下：

建立的模型准确表征长距离泥质粉砂岩地层顶管 DN4600 工程正常施工效率（$R2_{J2\text{-}J1}$≈0.76，$R2_{J2\text{-}J3}$≈0.83），通过交叉验证法评估了模型泛化性能；整体预测精度水平还算满意，不过也反映了对于长距离顶管情况，距离越长物理模型偏差 RMSE 越大，但数据集更充足时也更能捕捉顶管稳态施工效率规律；Sobol 法揭示了模型运行的参数不敏感性权重和工程实际相符。

当然，由于顶管施工过程的复杂性，本文模型尚需进一步完善。将来研究工作可重点关注以下几个方向：1）增加样本数量，尤其是中续间设置前后的施工效率，优化 Heaviside 阶跃函数；2）研究落地工程措施，提升实用价值，也是有意义的研究课题。

参考文献

[1] 肖志军,张亮亮,曹波,等.超长距离顶管顶力估算与中继间设置研究[J].内蒙古电力技术,2023,41(04):66-72.

[2] 李博,刘宇翔,陈建国,等.基于物理信息神经网络的长距离顶管施工顶力预测[J].人民长江,2025,56(01):147-155.

[3] 齐霁.基于留一交叉验证的拟合优度比较研究[D].山东大学,2022.

[4] 王海波,黄林冲,林越翔,等.基于机器学习模型的节理岩体UCS预测方法[J].人民长江,2024,55(S1):192-197+202.

[5] 王娟,马义中.考虑相关输入变量的Sobol'指数计算方法和应用[J].系统工程理论与实践,2022,42(03):778-788.

[6] 施奇妙,徐宗学,卢兴超,等.基于局部和全局方法的SWMM模型参数敏感性分析[J/OL].水利水电技术(中英文),1-23[2025-08-14].