

DOI: 10.7672/sgjs2026130134

土压平衡盾构出渣量智能联控与沉降 主动控制技术研究*

赵保森¹, 赵亚军², 吕 朋², 袁金鹏², 刘 伟¹

(1. 中建一局集团第五建筑有限公司, 北京 100024; 2. 中国建筑一局(集团)有限公司, 北京 100161)

[摘要] 为攻克复合地层盾构下穿敏感浅基础建筑群,因软硬不均岩层导致出渣量超排、地层扰动加剧及沉降风险高的技术难题,依托广州芳白城际夏白区间实践,构建了一套集地质理论计算、皮带机动态称重、渣斗容量校准与盾构油缸行程动态标定于一体的出渣量多源数据实时联控系统。通过建立油缸行程差与单斗装渣量的精准对应模型,设定动态安全控制区间,实现对每斗超挖风险的即时预警;进而将识别出的超挖量转化为下环同步注浆补偿量,并联动调整掘进参数,形成“感知-预警-补偿”的闭环智能控制。结果表明:该技术体系成功保障了盾构下穿工业厂房区的安全,建筑物累积最大沉降仅-3.0mm,监测点平均值-0.31mm,沉降控制效果显著。

[关键词] 隧道;盾构;复合地层;沉降;智能联控;动态补偿

[中图分类号] U455.43

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0134-06

Research on Intelligent Joint Control of Shield Excavation Mucking Volume and Active Settlement Control Technology for Earth Pressure Balance Shield Tunneling

ZHAO Baosen¹, ZHAO Yajun², LÜ Peng², YUAN Jinpeng², LIU Wei¹

(1. China Construction First Group Fifth Construction Co., Ltd., Beijing 100024, China;

2. China Construction First Bureau (Group) Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: To address the technical challenges of tunneling through sensitive shallow-foundation building clusters in complex geological formations, including excessive muck discharge, increased ground disturbance, and high settlement risks caused by uneven rock hardness, a real-time multi-source data control system for muck discharge was developed based on the practical experience gained during the section between the Xiamao Station and Baiyun City Center Station of the Fangcun-Baiyun Airport Intercity Railway in Guangzhou City. This system integrates geological theoretical calculations, dynamic belt conveyor weighing, muck bucket capacity calibration, and dynamic calibration of shield cylinder stroke. By establishing a precise correlation model between cylinder stroke deviation and single-bucket muck volume and by setting dynamic safety control ranges, the system enables real-time early warning of over-excavation risks for each bucket. Furthermore, the identified over-excavation volume is converted into the synchronous grouting compensation volume for the lower ring, and excavation parameters are adjusted in tandem, forming a closed-loop intelligent control system of “sensing-warning-compensation.” Results indicate that this technical system successfully ensured the safety of the shield tunnel passing beneath an industrial plant area, with a maximum cumulative building settlement of only -3.0mm and an average settlement at monitoring points of -0.31mm, indicating significant settlement control effectiveness. The active settlement control technical system developed through this research has

* 中建一局 2022 年度科技研发课题:富水岩溶发育条件下大直径长距离盾构关键技术研究(KJYF-2022-71)

[作者简介] 赵保森,高级工程师,E-mail: 252869464@qq.com

[收稿日期] 2025-11-24

effectively enhanced the safety and level of intelligence in shield tunneling projects passing beneath structures in complex environments.

Keywords:tunnels; shields; composite strata; settlement; intelligent joint control; dynamic compensation

0 引言

在复合地层岩性软硬不均、水文地质条件复杂,易导致盾构掘进参数波动大、超挖引发地层损失,进而导致地表沉降风险^[1-2]。目前,分析盾构掘进对地表沉降影响规律时,常用数值模拟作为研究方法,用以预测沉降、分析地层加固与参数优化等措施对沉降的控制作用^[3-4]。如温晓虎等^[5]针对超浅埋大盾构下穿市政隧道,提出了结构加固、掘进控制与多阶段注浆等保护措施;董立朋等^[6]运用皮尔逊相关系数法,识别出同步注浆量与土仓压力是影响地表沉降的关键参数;龚兴旺等^[7]通过正交试验验证了土仓压力与注浆压力对沉降的显著影响。此外,罗兴财等^[8]提出了采用每斗出渣量对应进尺控制地层损失,但存在单一计量方式在复合地层中适用性差、数据偏差大等局限。然而,既有研究多聚焦于掘进参数优化与注浆补偿,对于掘进过程中出渣量的实时、精准感知与超挖风险的即时预警,缺乏系统性闭环控制^[9-10]。

因此,本文构建一套融合地质理论计算、皮带动态称重、渣斗校准与油缸行程标定的出渣量多源数据实时联控系统。通过建立行程差与装渣量精准模型,设定动态安全区间,形成“感知-预警-补偿”智能控制闭环,有效解决超挖识别与补偿滞后难题,提升沉降控制精度,为复合地层下穿工程提供解决方案,推动盾构施工向智能化发展^[11-12]。

1 工程概况

1.1 盾构下穿建筑物概况

广州芳白城际夏茅站—白云城市中心站区间隧道采用 $\phi 8\ 840$ 土压/泥水双模盾构机,以土压平衡模式穿越望岗村工业建筑群。下穿区段左线长381m、右线长309m,隧道拱顶埋深19.4~22.4m,隧道与建筑物基础最小净距为17.0~18.9m。

区间正穿9栋工业厂房,均为2~5层大开间框架结构,独立基础,埋深2~3m,基底坐落于①₁杂填土、④_{N2}可塑状粉质黏土层。该类建筑结构整体性较差,对差异沉降敏感。同时该区段地质条件复杂,盾构掌子面地层交错分布⑦₁强风化砾岩、⑧₁₋₁中风化砾岩和⑨₁₋₁微风化砾岩,其中⑨₁₋₁层岩石单轴抗压强度达86.4MPa,⑧₁₋₁层约为16.2MPa,而⑦₁层岩体破碎、岩芯呈碎块状。隧道拱顶上方覆盖层以⑦₁层为主,厚8.1~9.6m,上覆⑤_{N-1}、⑤_{N-2}等

相对隔水层。局部建筑物基底下存在③₁粉细砂,该段地下水最大渗透系数为0.3m/d,盾构下穿区段地质剖面如图1所示。

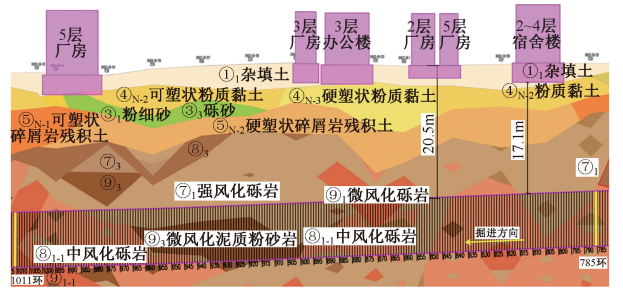


图1 盾构下穿区段地质纵断面

Fig. 1 Geological profile of shield underpass section

1.2 施工风险分析

本工程地质条件复杂,掌子面软硬岩交错分布,强风化砾岩自稳能力差,遇水易软化,而微风化砾岩强度高达86.4MPa,岩性差异显著。该类复合地层掘进导致软岩区超挖、硬岩区掘进困难,同时加剧刀具的非正常磨损;其次,部分厂房基础直接坐落于③₁粉细砂层,该层渗透性强,在盾构掘进扰动下,若土仓压力泄漏,将引发地下水流失和砂层固结沉降。最后,穿越的建筑为浅基础框架结构,对差异沉降极为敏感,而地面预注浆需破坏⑤_{N-1}、⑤_{N-2}等关键隔水层,钻孔至⑦₁地层注浆加固,如钻孔封堵不严密,将引发土仓气密性失效与二次沉降。因此,必须采取基于实时数据调控的动态控制技术体系,摒弃传统密集注浆为主的地层加固措施,以实现安全、高效下穿。

2 地层沉降控制核心技术体系

2.1 地质补勘验证

为精准掌握盾构下穿房屋段地质条件,降低施工不确定性,在每2个详勘孔约18m间距内加密布置补勘孔,形成对地层属性的交叉验证。补勘钻孔揭示地层分布与详勘钻孔无显著差异,在最不利地质区域⑦₁、⑧₁₋₁与⑨₁₋₁重叠区域设置的补勘钻孔揭示掘进范围的岩层主要为⑦₁强风化砾岩、⑧₁₋₁中风化砾岩,只有局部分布有⑨₁₋₁微风化砾岩,岩石未连接成整体,有利于盾构掘进和风险管控。

2.2 针对性地层加固方案

1)对于浅基础建筑直接与砂层接触的房屋进行预注浆加固,其核心机理是通过水泥浆渗透充填

砂层孔隙,胶结形成高强度复合地基,从而大幅提升基底承载力和抗变形能力。

2) 注浆钻孔沿建筑外墙布置,孔距 2m,排距 1m,钻至砂层底部。注浆采用对称作业方式,由 2 台钻机从房屋两侧同步施工,以确保压力均衡,防止基础偏压。注浆过程实行压力与沉降双控指标:每注完 1 罐 0.7m³ 浆液后监测房屋沉降变化;若注浆点抬升 1~2mm,停止该孔注浆,间隔 1 孔进行注浆作业,至注浆压力稳压 0.5MPa 为终止标准。房屋基础预注浆平面如图 2 所示。

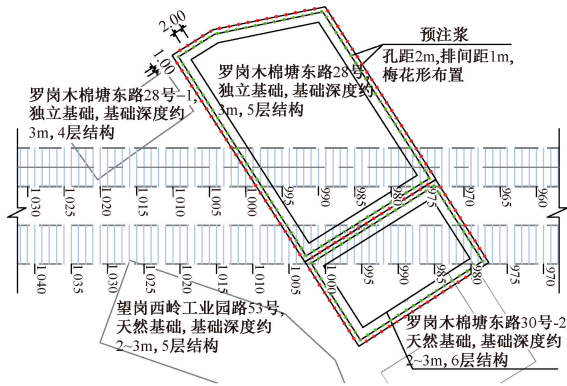


图 2 房屋基础预注浆平面

Fig. 2 Pregrouting plan of building foundation

3) 为规避传统地面钻孔对粉质黏土、残积土等关键隔水层的破坏风险,本工程未对隧道拱顶⑦₁ 地层进行大规模预加固,而是采用盾构掘进试验段测试参数与监测数据联动的跟踪注浆方案;在盾构下穿期间,对建筑物沉降按 2 次/d 的监测频率持续监测,当沉降速率≥2mm/d 或累积沉降≥30mm,立即启动跟踪注浆;钻孔至隧道顶以上 2m,从下至上注入双液浆固结⑦₁ 强风化砾岩,再以单液浆填充其上地层孔隙。注浆过程同样采用压力与监测数据双控,动态调整注浆点位,确保注浆效果同时防止地表隆起发生。

2.3 试掘进段参数分析

1) 盾构掘进本区段复合地层采用“分段递进式”参数优化机制,将盾构初始下穿道路段 15 环作为试掘进段,将试掘进取得的参数与风险管控结合。

2) 试掘进过程中,从螺旋机排出的渣样表明⑦₁ 地层已被上部的红褐色粉质黏土长期填充密实,形成了以黏土为基质、包裹砾石的稳定结构。实际地层的自稳性和隔水性远优于钻探岩芯所揭示的状态。经分析,差异主要源于地质钻探采用水力冲洗成孔工艺,高压水流冲走了岩层中的细粒填充物,仅留下未胶结的粗颗粒砾石,导致岩芯呈现“松散无填充”状态;实际掘进证实,拱顶地层具备良好的

自稳能力,且地下水流通性弱,所以取消径向膨润土注浆护壁方案,并需向土仓加水 18~20m³/环,进行渣土稀释,防止渣土成块状排出,堵塞排渣口。

3) 根据实际掘进表现,土仓保压效果良好,顶部设定压力与实际压力最大仅相差 0.1bar。因此,将原计划的中高仓位掘进优化为 1/3 仓位,有效降低盾构推进负荷,并减少刀具磨损。

4) 针对掌子面上半部为⑦₁ 均质的强风化砾岩,下半部为⑧₁₋₁ 岩石整体完整的中风化砾岩,掘进时所引起的刀盘扭矩波动大、超排风险高的问题,建立了基于扭矩分级的刀盘转速调控策略与出渣量实时联控技术,解决上述风险。盾构掘进参数对比如图 3 所示。

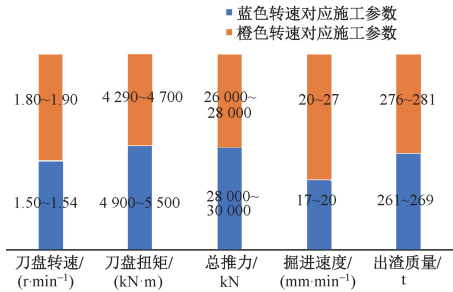


图 3 盾构掘进参数对比

Fig. 3 Comparison of shield tunneling parameters

由图 3 可知,在掘进⑦₁、⑧₁₋₁、⑨₁₋₁ 的软硬不均地层,对比左线 798~865 环刀盘转速、掘进参数与出土量之间的关系,当采用 1.50~1.54r/min 转速区间时,实测渣土称重质量约为 269t,相较于 1.8~1.9r/min 转速工况,能有效抑制盾构机超挖。但同时低转速掘进复合地层,会显著增加盾构机掘进负荷,导致刀盘扭矩与盾构总推力上升,同时使掘进速度下降;因此,在该类复合地层中掘进时,应根据实时扭矩的变化动态调整刀盘转速区间,使盾构保持良好的掘进效率。

2.4 盾构出渣量实时联控技术

为精准控制盾构掘进过程中的地层损失,解决因超挖引发的沉降风险,突破传统单一体积计量模式,构建一套集成理论计算、动态称重、容积标定与行程反馈的出渣量多源实时联控系统。通过多重数据交叉验证与智能分析,实现了对掘进渣土体积的精细化管控,为沉降控制提供核心数据支撑。

1) 理论出渣量计算

理论出渣量是衡量实际出土是否超限的基准。根据设计图纸给定的围岩等级、刀盘开挖直径、管片宽度,结合松散系数,计算理论出渣量。

本段 V 级围岩属软岩范畴,依据《工程地质手

册》(5版),低胶结软岩的松散系数建议取值为1.35~1.50。综合考虑本区段掘进地层软硬不均、地层松散且盾构刀盘扰动显著,故松散系数取上限值1.50。理论出渣量如式(1)所示:

$$Q = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 L K_s \tag{1}$$

式中: Q 为每环理论出渣量(m^3); D 为刀盘开挖直径(8.84m); L 为管片宽度(1.6m); K_s 为松散系数(1.5)。

计算得理论出渣量为 147.23m^3 ,该值为后续实时出土控制与偏差分析提供理论基准。

2) 皮带机动态称重与体积转换

为获取实时出渣量,在隧道连续皮带机落渣口前端安装高精度称重传感器,将瞬时渣土质量实时显示在计算机屏幕上并通过式(2)现场实测渣土平均密度为 $1.8\text{t}/\text{m}^3$,将出渣质量转换为体积:

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{2}$$

式中: ρ 为密度(g/cm^3); m 为量杯渣样质量(g); V 为量杯体积(mL)。

3) 掘进行程与渣斗容量联控

盾构隧道内采用连续水平皮带出渣,在车站内设置连续皮带架和落渣口,地面2列电瓶车编组各牵引7个土斗,每个土斗净容量 25m^3 ,实现交替装渣,最后起重机将土斗吊出至地面渣土坑内卸渣。

根据每环理论出渣量 147.23m^3 ,并采用工程百分比波动法,考虑10%的土仓加水和泡沫溶液混入膨胀的体积为 161.95m^3 ,相较理论出渣量多出 14.72m^3 ,换算成土斗体积为前6斗满,第7斗泥渣量约占土斗体积的3/5;为实现出渣体积可计量,在最后一节7号土斗内壁采用红油漆进行刻度标记:将斗高2.48m均分为5等份,标注刻度值(见图4),这样就可根据渣面高度判断当前出渣量,从而直观发现超挖,触发渣土总量预警。

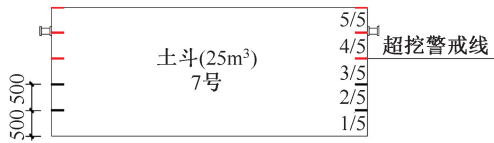


图4 土斗刻度标记
Fig. 4 Scale marking of soil bucket

4) 掘进行程与出渣量动态校准

为进一步提升对地层扰动的控制精度,研究形成了基于掘进行程与出渣量实时联动的智能动态校准方法。该方法的核心在于通过分析盾构油缸行程差与土斗装渣量的对应关系,实现对超挖、欠

挖风险的精准识别与预警。
首先施工人员位于皮带架末端的落渣口处,调控土斗装渣,同时地面监控室内管理人员通过监控大屏实时影像和掘进数据记录当前土斗装满后油缸行程并将每满斗的油缸行程输入至DeepSeek大模型进行系统分析,系统根据式(3)计算装满1渣斗(25m^3)的理论油缸行程差:

$$\Delta S_{\text{理论}} = \frac{V_{\text{斗}} / K_s}{A} \tag{3}$$

式中: $\Delta S_{\text{理论}}$ 为装满1土斗理论油缸行程差(mm); $V_{\text{斗}}$ 为土斗有效容积(m^3); K_s 为渣土松散系数(取1.5); A 为刀盘开挖面积(m^2)。

式(3)是基于理想均质地层,装满1土斗的理论行程差为271mm。然而,本区段地层存在软硬岩交错分布与渣土改良效果差异等不确定因素,单一理论值不能反映实际出渣体积,所以采用工程百分比波动法,取理论值的 $\pm 10\%$ 作为安全控制区间,即244~298mm;若装满1渣斗 25m^3 的推进行程差低于244mm则预警超挖风险,需及时调整掘进参数;而高于298mm则提示存在欠挖,应结合地质条件开仓检查边刀磨损状况。

5) 生成安全评估分析列表

通过融合多源数据,建立基于累积出渣体积、出渣质量换算体积及行程差的超挖体积三重验证机制,以此对掘进安全性进行综合研判。该分析方法的核心在于通过不同路径独立公式计算超挖量,并交叉验证结果的可信度,从而形成可靠的掘进安全评估体系。掘进行程与出渣量安全评估分析如表1所示。

表1 掘进行程与出渣量的安全评估分析
Table 1 Safety assessment and analysis of driving stroke and slag discharge

环号	斗号	起始行程/ mm	结束行程/ mm	行程差 $\Delta S/\text{mm}$	安全 评估 (单斗)	本斗 出渣量/ m^3	累计 出渣量/ m^3
817	1	662	903	241	(超挖)	25	25
	2	903	1 145	242	(超挖)	25	50
	3	1 145	1 380	235	(超挖)	25	75
	4	1 380	1 614	234	(超挖)	25	100
	5	1 614	1 852	238	(超挖)	25	125
	6	1 852	2 095	243	(超挖)	25	150
	7	2 095	2 265	170	(3/5斗)	15	165

由表1可知,本环总掘进行程1603mm。根据理论计算,单环出渣量上限值约为 162.34m^3 ,而按渣斗容积测算的实际累积出渣量为 165m^3 ,超出上限值 2.66m^3 ;但同时观察出渣体积指标却未超出上

限值,为进一步交叉验证,引入出渣质量数据,本环实际出渣总质量为 277t,根据实测渣土密度 1.8t/m³ 换算出渣体积为 153.89m³,相较于理论出渣量 147.23m³ 超出 6.66m³,进一步证实了超挖现象,但与渣斗容积计量存在差异。

为准确量化超挖量,采用基于行程差的第 3 种验证方法。其核心在于计算实际推进行程与理论行程的负偏差,并按式(4)计算各斗超挖体积:

$$V_{\text{超挖}} = A \frac{\Delta S_{\text{负}}}{1\,000} K_s$$

(4)

式中: $V_{\text{超挖}}$ 为实际超挖量(m³); $\Delta S_{\text{负}}$ 为最小单斗理论行程差与实际行程的差值(mm)。

根据式(4),对 817 环掘进过程中各斗超挖量进行逐斗计算,结果如表 2 所示。

表 2 基于行程差的逐斗超挖量

Table 2 Bucket by bucket overbreak gauge based on stroke difference

环号	斗号	实际行程差 $\Delta S/\text{mm}$	最小理论行程差 $\Delta S/\text{mm}$	行程差负值 $\Delta S_{\text{负}}/\text{mm}$	单斗超挖体积 $V_{\text{超挖}}/\text{m}^3$	合计超挖体积/ m^3
817	1	241	244	3	0.28	2.85
	2	242	244	2	0.18	
	3	235	244	9	0.83	
	4	234	244	10	0.92	
	5	238	244	6	0.55	
	6	243	244	1	0.09	
	7	—	—	—	—	

由表 2 可知,通过行程差法计算的 1~6 斗合计超挖量为 2.85m³,与渣斗容积法得出的超挖量 2.66m³ 结论高度接近,验证了评估结果的可靠性,但与质量换算法 6.66m³ 存在一定偏差,这种差异说明渣土密度动态变化对体积换算精度的影响,行程差法在复杂地层中具有更强的适用性。

2.5 超挖量的动态补偿技术

1) 同步注浆量的动态补偿

将安全评估计算确定的超挖量作为关键参数,在下环推进时,在理论注浆量的基础上,额外增加与超挖体积相等的注入量,以有效补充地层损失,抑制地表沉降:

$$Q_{\text{注浆}} = Q_{\text{理论}} + Q_{\text{超挖}}$$

(5)

式中: $Q_{\text{注浆}}$ 为当环实际需要的同步注浆量(m³); $Q_{\text{理论}}$ 为每环理论注入量(m³); $Q_{\text{超挖}}$ 为综合研判的超挖量(m³)。

同时为保障砂浆填充效果,同步注浆采用初凝时间为 2h 的快凝砂浆,确保在盾构推进与管片拼装后迅速形成支护体,有效抑制地层沉降。

2) 掘进参数的联动调整

当安全评估连续出现 2 斗超挖预警时,根据刀盘转速变化对掘进参数影响分析,立即将刀盘转速从 1.8~1.9r/min 区间降至≤1.5r/min,减少刀盘对地层的超挖扰动,待通过本段坚硬岩石区,并观察刀盘扭矩回落至 5 000kN·m 以下时,表明复合地层岩石强度降低,刀具负载减轻,将转速恢复至 1.8~1.9r/min,以保持正常的掘进参数,防止设备长时间处于超负荷状态。

3) 注浆强化措施与效果验证

为填补因砂浆收缩或顶部填充不密实所形成的空隙,在盾尾后 4~5 环管片位置对已终凝的同步砂浆顶部实施二次双液注浆。注浆前,通过径向开孔方式验证拱顶 120° 范围砂浆填充效果,检查是否存在漏水或后方来水情况。根据验证结果,调整同步注浆与二次注浆的配合比与注入压力,确保管片背后填充饱满,形成连续、密实的支护体。

2.6 监测效果分析

为系统评估出渣量-行程双控的超挖风险实时预警系统与超挖量动态补偿技术的有效性,对盾构左右线穿越工业厂房段施工过程中关键监测数据进行全面统计与分析,左右线盾构下穿建筑物累积沉降曲线如图 5、6 所示。

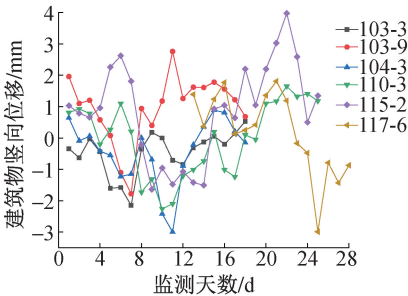


图 5 左线盾构下穿建筑物累积沉降曲线
Fig. 5 Cumulative settlement curve of shield underpass buildings on the left line

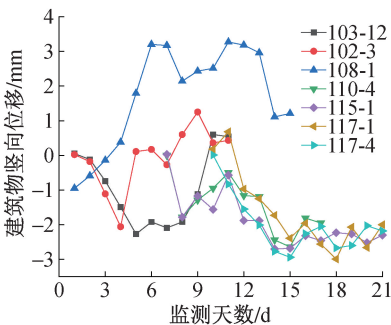


图 6 右线盾构下穿建筑物累积沉降曲线
Fig. 6 Cumulative settlement curve of shield underpass buildings on the right line

由图 5,6 可知,在盾构左右线穿越工业厂房段期间,建筑物沉降始终处于可控范围。监测点累积最大沉降为-3.0mm,平均值为-0.31mm。证明该技术体系能够有效识别超挖风险并及时进行补偿控制,显著提升地层沉降控制能力。

3 结语

1)构建了多源数据实时联控的超挖风险动态识别与补偿技术,适用于电瓶车土斗装渣工况,通过融合地层理论计算、皮带机动态称重、渣斗容量校准与油缸行程标定四重数据源,实现了每斗超挖量的精准识别,解决了传统单一计量方式滞后性与偏差大的问题。

2)基于油缸行程差与出渣量对应关系的智能预警系统,通过每斗行程差与单斗装渣量之间的精准对应关系,生成动态安全控制区间,使得系统能够在每斗装渣过程中实时判断掘进状态是否异常,并对超挖风险进行即时预警,从而在掘进过程中调整掘进参数设定。

3)形成了超挖量动态补偿与沉降主动控制机制,将识别出的超挖量转化为下环同步注浆补偿量,采用快凝砂浆与二次双液注浆工艺,有效填充地层损失。监测数据显示,建筑物累积最大沉降仅-3.0mm,平均值为-0.31mm,证明了该技术对地层沉降的抑制效果。

4)当前行程差与出渣量安全评估列表的生成主要依靠人工记录每满斗的行程并输入至智能决策模型进行逻辑分析,未来可开发 AI 算法,实现全自动实时分析与决策预警。

参考文献:

[1] 李宇健,黄戡,孙逸玮. 盾构参数对复合地层损失率和地表沉降的影响[J]. 交通科学与工程,2022,38(1):70-78.
LI Y J, HUANG K, SUN Y W. Effect of shield parameters on formation loss rate and surface subsidence in composite strata [J]. Journal of transport science and engineering, 2022, 38(1): 70-78.

[2] 丁健,冷建. 上软下硬地层中盾构施工对地表沉降影响分析及施工控制技术[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 229-233.
DING J, LENG J. Analysis of shield construction influencing ground settlement and construction control technology in upper-soft and lower-hard stratum [J]. Urban mass transit, 2022, 25(4): 229-233.

[3] 管浩,刘维,王峰,等. 基于数据增强和机器学习算法的盾构隧道引发地面沉降预测及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S1): 331-341.
GUAN H, LIU W, WANG F, et al. Prediction of surface settlement caused by shield tunneling based on data enhancement and machine learning algorithm [J]. Tunnel construction, 2022,

42(S1): 331-341.

[4] 黄茂庭,徐金明. 使用 CNN(卷积神经网络)-LSTM(长短期记忆)联合神经网络预测盾构隧道施工引起的地面沉降[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(6): 166-171.
HUANG M T, XU J M. Prediction of land subsidence caused by shield tunnel construction with joint CNN-LSTM neural network [J]. Urban mass transit, 2024, 27(6): 166-171.

[5] 温晓虎,高天增,吴彬,等. 超浅埋大盾构近距离下穿市政隧道控制技术[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 322-328.
WEN X H, GAO T Z, WU B, et al. The control technology of ultra-shallow buried large-diameter shield under-pass existing municipal tunnel at close distance [J]. Water resources and hydropower engineering, 2025, 56(S1): 322-328.

[6] 董立朋,聂清浩,孙晓坤,等. 基于皮尔逊相关系数法的盾构掘进参数对地表沉降影响分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(1): 116-123.
DONG L P, NIE Q H, SUN X K, et al. Analysis of impact of shield tunneling parameters on ground settlement based on Pearson correlation coefficient method [J]. Construction technology, 2024, 53(1): 116-123.

[7] 龚兴旺,龚伦,钟建,等. 泥质砂岩地层盾构掘进参数对地表沉降的显著性影响分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 430-439.
GONG X W, GONG L, ZHONG J, et al. Analysis of significant influence of shield tunneling parameters on surface subsidence in muddy sandstone [J]. Journal of Shandong Agricultural University (natural science edition), 2023, 54(3): 430-439.

[8] 罗兴财,周小文,张盛红. 盾构施工地层损失控制方法及实例[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(2): 12-18.
LUO X C, ZHOU X W, ZHANG S H. Method and case study of ground loss control in shield tunneling construction [J]. Journal of civil engineering and management, 2022, 39(2): 12-18.

[9] 宋钢. 土压平衡盾构长距离下穿浅基础房屋施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(7): 86-89.
SONG G. Construction technology of EPB shield tunneling through shallow foundation buildings for long distance [J]. Construction technology, 2023, 52(7): 86-89.

[10] 程志强. 盾构超长距离下穿既有线路施工沉降控制技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2023(9): 175-178.
CHENG Z Q. Research on settlement control technology of shield ultra-long distance undercrossing existing line construction [J]. Railway construction technology, 2023(9): 175-178.

[11] 裴烈烽,李章林,朱叶艇,等. 盾构辅助驾驶系统(SDAS)开发与工程应用[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(S1): 53-61.
PEI L F, LI Z L, ZHU Y T, et al. Development and engineering application of shield driving assistance system [J]. Tunnel construction, 2024, 44(S1): 53-61.

[12] 周鲁,刘胜利,王宇超,等. 基于机器学习的盾构开挖面地质类型智能识别研究[J]. 建筑施工, 2025, 47(1): 17-22.
ZHOU L, LIU S L, WANG Y C, et al. Study on intelligent recognition of geological types in shield excavation face using machine learning [J]. Building construction, 2025, 47(1): 17-22.