doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 001
刘泉声,潘玉丛,周阳宗,等. 复杂地层超大直径TBM适配选型和智能掘进关键技术研究[J]. 有色金属(矿山部分),2026,78(6):1-14.
Liu Quansheng, Pan Yucong, Zhou Yangzong, et al. Research on key technologies for adaptive selection and intelligent excavation of super-large diameter TBMs in complex grounds[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2026, 78(6): 1-14.

复杂地层超大直径TBM适配选型和智能掘进关键技术研究

刘泉声[1],潘玉丛[1],周阳宗[2],杨旭辉[2],潘洪月[3],彭　潜[3],李　蘅[4],邵小康[4]
(1. 武汉大学 土木建筑工程学院,武汉 430072;
2. 中国南水北调集团江汉水网建设开发有限公司,武汉 430048;
3. 中国长江三峡集团有限公司,武汉 430010;
4. 长江勘测规划设计研究有限责任公司,武汉 430010)

摘　要: 我国已经成为世界上隧洞(道)建设速度最快、规模最大和难度最高的国家,TBM(隧道掘进机)工法已经成为深埋长大隧洞建设的首选方案和必然选择。然而,复杂地层超大直径TBM面临选型设计地质适应性不足、功能子系统施工匹配性欠佳、工程灾害预测预警防控效果有限和施工过程数智管控水平薄弱等诸多技术难题。本文围绕复杂地层超大直径TBM适配选型和智能掘进关键技术,介绍了项目组在复杂地层超大直径TBM地质适应性选型和设计方法、TBM地质适应性提升装备和系统、TBM工程灾害预测预警和防控技术、TBM施工全过程数智管控技术等方面取得的创新性研究成果。上述成果已成功应用于南水北调中线引江补汉等国家重大工程,施工中避免了工程灾害的发生,显著提高了掘进效率,保障了工期和施工安全,整体提升了我国TBM装备设计制造和施工控制的技术水平,经济和社会效益显著。

关键词: 隧道掘进机;超大直径;地质适应性;适配选型;灾害防控;数智管控
中图分类号: TD421　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0001-14

Research on key technologies for adaptive selection and intelligent excavation of super-large diameter TBMs in complex grounds

Liu Quansheng[1], Pan Yucong[1], Zhou Yangzong[2], Yang Xuhui[2], Pan Hongyue[3], Peng Qian[3], Li Heng[4], Shao Xiaokang[4]
(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. China South-to-North Water Diversion Jianghan Water Network Construction and Development Co., Ltd., Wuhan 430048, China;
3. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China;
4. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: China has become the country with the fastest speed, largest scale and highest difficulty in tunnel construction worldwide, and TBM (Tunnel Boring Machine) method has also become the preferred and inevitable construction scheme for deep-buried long and large tunnels. However, the use of super-large diameter TBMs in complex grounds is still confronted with some technical challenges, including insufficient geological adaptability of TBM type selection and parameter design,

收稿日期:2026-10-09
基金项目:湖北省科技创新人才计划项目(2024DJA007);湖北省自然科学基金资助项目(2024AFD359);中国南水北调集团有限公司科研项目(JHSW/KJ/FW-2023001);国家自然科学基金资助项目(42472351)
作者简介:刘泉声,中国工程院院士,教授,博士生导师。
通信作者:潘玉丛,副教授,硕士生导师。

poor matching performance of functional sub-systems during construction, limited prediction, early warning, prevention and control effectiveness for engineering disasters, and weak digital-intelligent management and control capability for whole construction process. Concentrated on key technologies for adaptive selection and intelligent excavation of super-large diameter TBMs in complex grounds, this paper introduces the innovative achievements obtained recently in the following four aspects: geological adaptive type selection and parameter design methods for super-large diameter TBMs, equipment and systems for TBM geological adaptability improvements during construction, prediction, early warning, prevention and control technologies for TBM-related engineering disasters, digital-intelligent management and control technologies for TBM whole-process construction. These research achievements have been successfully applied to Yangtze-River-to-Han-River Water Diversion Project and other major national projects. Consequently, engineering disasters are prevented, tunneling efficiency is greatly improved, construction schedule and safety are guaranteed. The overall technical level of TBM equipment design, manufacturing and construction control in China has been advanced, yielding remarkable economic and social benefits.

Key words: TBM (Tunnel Boring Machine); super-large diameter; geological adaptive; adaptive type selection; engineering disaster prevent and control; digital-intelligent management and control

1 研究背景和意义

我国已经成为世界上隧洞(道)建设速度最快、规模最大和难度最高的国家,洞径超十米、埋深超千米、长度超数十千米的深埋长大隧洞施工难度大,建设工期长,已经成为川藏铁路、南水北调中线引江补汉等国家重大工程的关键控制性项目[1-3]。TBM(隧道掘进机)施工速度快、安全性能高,逐步成为深埋长大隧洞建设的首选方案和必然选择[4-6]。然而,深部地层构造活动强烈,地应力高且空间变异性强,岩体结构复杂多变,超大直径TBM面临选型设计地质适应性不足、功能子系统施工匹配性欠佳、工程灾害预测预警防控效果有限和施工过程数智管控水平薄弱等诸多技术难题,掘进效率低下,工程灾害频发,极易造成工期延误和经济损失[7-12]。

首先,TBM施工普遍面临高地应力、多变地层等复杂地质和卡机、岩爆等工程灾害,同时超大直径TBM高效掘进和灾害防控难度显著增加,选型设计与地质条件不匹配时极易导致工程事故、工期延误和成本增加[13-16]。现有TBM选型设计方法大多聚焦不同地质条件掘进效率和灾害防控需求,缺少兼顾工程进度和成本等多因素的协同决策体系。工程实践中TBM选型设计往往通过经验研判,主观性强,缺乏客观的量化评价体系。同时,10 m以上超大直径TBM应用案例有限,选型设计缺乏可供借鉴的理论依据和实践经验。因此,亟需提升复杂地层超大直径TBM地质适应性选型和设计方法。

其次,复杂地层超大直径TBM施工地质适应性仍存在多方面技术挑战,难以实现高效掘进和灾害防控[17-20]:传统TBM施工模式针对不利地质条件的适应性有限,面对高地应力、软弱破碎围岩等工况时,掘进和支护装备的工序协同性不足,难以兼顾掘进和支护效率,导致施工进度严重降低;传统超前钻探与锚固装备的作业范围有限,超前探测精度与支护施作效率低,难以满足灾害预警防控需求;现有TBM岩-机信息实时感知、互馈分析与智能决策能力薄弱,装备控制多依赖人工经验,难以实现复杂地层自适应智能掘进。因此,亟需研制复杂地层超大直径TBM地质适应性提升装备和系统。

再次,超大直径TBM在复杂地层中掘进时极易发生卡机和岩爆灾害,原因在于:卡机和岩爆灾害孕育演化机理和支护控制作用机理不明确,不能真实揭示灾害“时间-空间-强度”演化特征和围岩“超前处置-开挖支护”控灾过程;卡机和岩爆灾害现场监测系统及预警技术不成熟,难以准确捕捉灾变特征和精准确定临界指标,不能实现提前预警;TBM装备缺乏有效的超前处置和预应力支护子系统,控制措施不能有效实施,卡机和岩爆灾害防控效果差。因此,亟需开发复杂地层超大直径TBM掘进卡机、岩爆灾害预测预警和防控技术[21-24]。

最后,现有TBM施工数字孪生技术难以满足施工全过程数智化管控需求:信息感知能力有限、模型构建精度不高、系统集成分析不足,无法实现TBM施工海量多元异构信息高精度感知、数字孪生模型高保真构建以及全过程一体化呈现,制约了“以虚映实”的有效实现;信息融合深度不够、推演可靠性不足、模型泛化能力有限,难以在虚拟空间对物理空间进行精准模拟/预测,阻碍了“以虚预实”目标的达成;现有系统与平台多集中于监测/预警功能,在决策控制科学性和智能性以及施工环境适应性与执行

性方面存在明显短板，导致“感知-决策-执行”闭环断裂，无法支撑“以虚控实”的闭环管控。因此，亟需开发复杂地层超大直径TBM施工全过程管控数字孪生系统[25-28]。

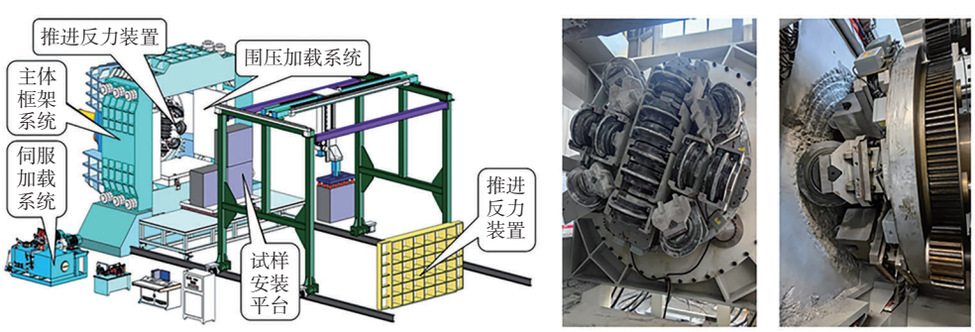
因此，项目组围绕复杂地层超大直径TBM适配选型和智能掘进关键技术开展研究，提出了复杂地层超大直径TBM地质适应性选型和设计方法，实现了复杂地层超大直径TBM量化综合选型及装机主参数针对性设计；研制了复杂地层超大直径TBM地质适应性提升装备和系统，提升了复杂地层超大直径TBM高效施工和灾害防控能力；研发了复杂地层超大直径TBM工程灾害预测预警与防控技术，实现了复杂地层超大直径TBM掘进卡机和岩爆灾害精准预警和高效防控；研发了复杂地层超大直径TBM施工数字孪生系统，实现了集掘进/支护方案决策实施、卡机/岩爆灾害预警防控于一体的TBM施工全过程数智化管控。

2　研究进展

2.1　复杂地层超大直径TBM地质适应性选型和设计方法研究

1）复杂地层超大直径TBM高效破岩和优化配置理论

针对现有TBM性能测试方法难以复现深埋复杂地层地应力高、岩体结构复杂多变等真实赋存特征的缺陷，研发了深部复杂地层TBM全尺寸刀盘性能试验系统(图1)和缩尺寸刀盘性能试验系统，可以在最大80 MPa双向围压下针对超硬岩、极软岩、节理岩和软硬复合岩等复杂岩体开展多刀具协同破岩和磨损机理试验；基于不同刀盘刀具性能试验系统，阐明了深部高地应力、软硬复合岩体、刀具配置参数和掘进控制模式对TBM全刀盘多刀具协同破岩和磨损性能的影响机理(图2)[29-32]，形成了深埋复杂地层TBM高效破岩和优化配置理论(图3)，为复杂地层超大直径TBM选型和设计提供了试验平台和理论支撑。



(a)平台概念图　(b)刀盘实物图　(c)刀盘破岩图

图1　TBM全尺寸刀盘性能试验系统(a)：平台概念图，(b)：刀盘实物图，(c)：刀盘破岩图

Fig. 1　Full-scale TBM cutterhead performance testing system

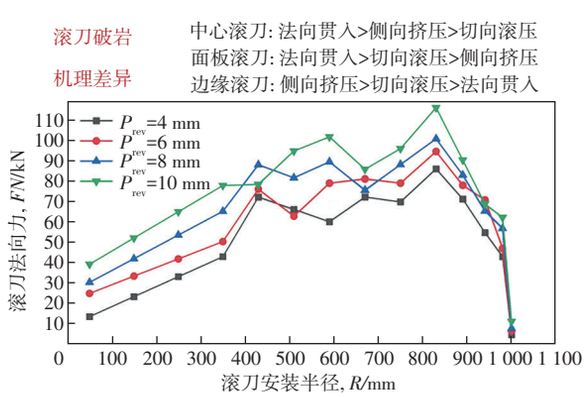
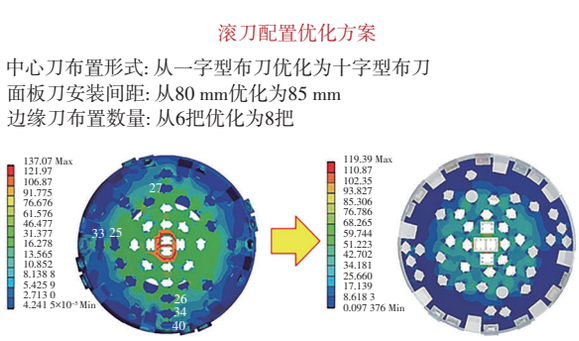


图2　滚刀受力差异化分布规律

Fig. 2　Differential distribution law of disc cutter cutting force



(a)优化前：刀盘应力集中　(b)优化后：刀盘受力均匀

图3　依据滚刀受力差异化分布规律优化滚刀配置

Fig. 3　Disc cutter layout optimization based on differential cutting force distribution law

2)复杂地层超大直径TBM选型多因素协同决策体系

建立了深部复杂地层TBM选型设计和施工案例数据库,构建了“目标层-准则层-指标层”三级结构的TBM选型评价框架,确立了“隧洞设计参数-地质条件参数-不良地质问题参数”有机耦合的TBM选型指标体系,提出了以模糊综合评价法确定选型指标适应度、以层次分析法确定选型指标权重的深埋复杂地层TBM量化选型方法(图4),克服了传统选型方法系统性不足、主观依赖性强、量化程度低的缺陷;与现行规范中以不利地质条件比例阈值为评分的TBM选型方法深度结合,建立了“地质与结构适应、工期与经济协调”的深埋复杂地层TBM综合选型方法(图5),将工程进度和建设成本等现场因素综合纳入TBM选型流程,形成TBM选型多因素协同决策体系,成功应用于引江补汉工程10台12 m级超大直径TBM选型(图6)[33-35]。

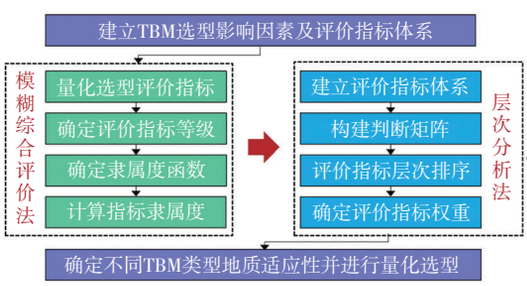


图4　深埋复杂地层TBM适应性量化选型方法

Fig. 4　Quantitative type selection method based on TBM adaptability in deep-buried complex grounds

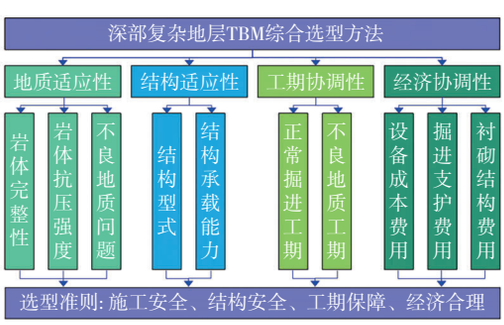


图5　深埋复杂地层TBM综合选型方法

Fig. 5　Comprehensive type selection method for TBM in deep-buried complex grounds

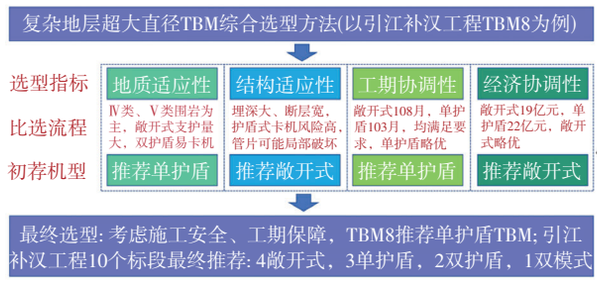


图6　TBM综合选型方法在引江补汉工程中的成功应用

Fig. 6　Successful use of comprehensive TBM type selection method in Yangtze-River-to-Han-River Water Diversion Project

3)复杂地层超大直径TBM装机主参数针对性设计方法

针对现有TBM装机主参数设计多采用单一计算方法、设计结果往往与现场实际工况偏差较大的缺陷,提出了融合经验公式法、理论解析法与数值模拟法的TBM装机主参数设计方法(图7);针对现有TBM装机主参数设计往往针对正常掘进工况,难以充分考虑卡机脱困等极端工况的缺陷,提出了针对正常掘进和卡机脱困两种工况的TBM装机主参数设计方法(图8)。结合上述两种方法,建立了多算法有机融合、多工况综合考虑的TBM装机主参数综合设计模型,实现了不同围岩条件和施工工况下TBM装机推力、扭矩和功率的差异化计算,为超大直径TBM刀盘驱动系统和推进系统选配提供理论支撑,成功应用于引江补汉工程10台12 m级超大直径TBM装机主参数设计(图9)[1,36]。

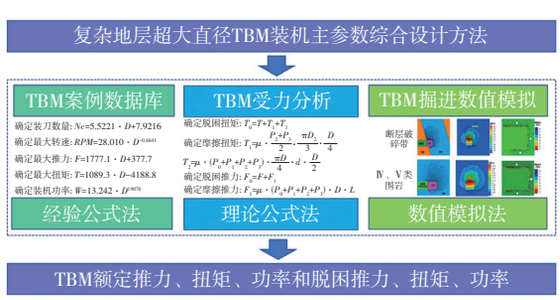


图7　多算法有机融合的TBM装机主参数设计方法

Fig. 7　TBM Installed parameter design method based on multi-algorithm fusion

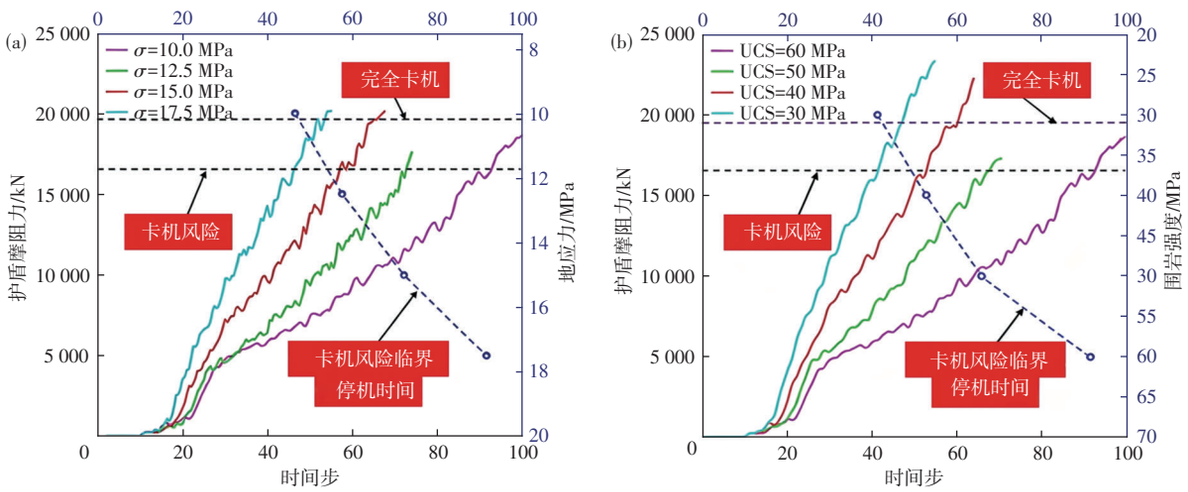


图8　引江补汉工程不同地应力(a)和围岩强度下(b)TBM卡机脱困数值模拟

Fig. 8　Numerical simulation for TBM jamming and escape under different in-situ stresses (a) and rock mass strengths (b) in Yangtze-River-to-Han-River Water Diversion Project

标段	机型	额定推力/kN	额定扭矩/(kN·m)	脱困推力/kN	脱困扭矩/(kN·m)
TBM1	敞开式	35 000	17 500	40 000	26 250
TBM 4、5、9	敞开式	35 000	20 000	40 000	35 000
TBM 6、7、8	单护盾	35 000	22 000	141 000	32 000
TBM 2、3	双护盾	35 000	22 000	88 000	35 000
TBM10	双模式	—	30 961	125 983	—

图9　引江补汉工程10台TBM装机主参数设计结果

Fig. 9　Installed parameter design results for 10 TBMs in Yangtze-River-to-Han-River Water Diversion Project

2.2　复杂地层超大直径TBM地质适应性提升装备和系统研究

1) 复杂地层超大直径TBM地质适应性提升装备[37]

研制了超大直径敞开式TBM钢管片支护和辅助油缸推进系统，阐明了围岩-充填层-钢管片系统协同变形特征与联合承载机制，构建了适配不同围岩变形等级的敞开式TBM钢管片支护技术体系(图10)。研发了超大直径单护盾TBM推拼同步系统，揭示了推进-拼装工序时空耦合关系、推进油缸压力分配机制和TBM掘进姿态调控原理，阐明了分级推力下围岩-充填层-管片-护盾系统受力演化规律与承载响应特征，建立了兼顾掘进支护效率与管片结构安全的单护盾TBM推拼同步技术体系(图11)。研制了超大直径双护盾TBM锚喷系统，揭示了管片-预应力锚索系统对岩爆灾害的防控机理及高性能喷混修复岩爆破损管片的联合承载机制，解决了强岩爆动力冲击下的管片安全承载和快速修复问题(图12)。

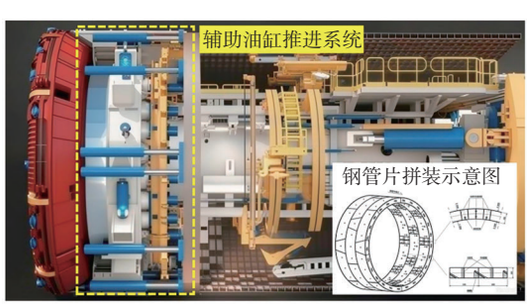


图10　敞开式TBM钢管片支护和辅助油缸推进系统

Fig. 10　Steel segment lining and auxiliary cylinder thrust system of Open TBM

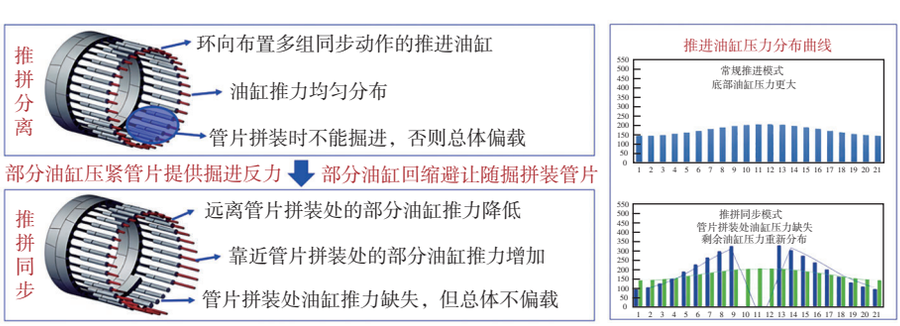


图11　单护盾TBM推拼同步系统

Fig. 11　Simultaneous thrusting and segment erection system of single-shield TBM

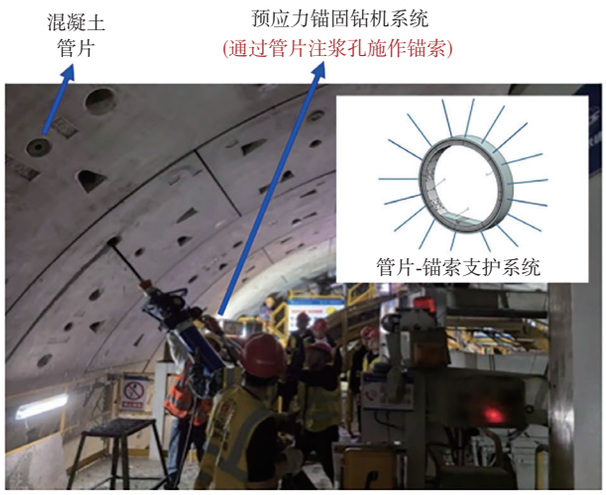


图 12 双护盾 TBM 锚喷系统

Fig. 12 Bolt-shotcrete system of double-shield TBM

2) 复杂地层超大直径 TBM 工程灾害预测防控装备[37]

研发了“钻探灌”一体化全周向超前钻机系统(图 13):研发出基于“随钻测试+钻孔窥视”的岩体信息感知技术,实现了岩体参数智能解译和围岩等级智能辨识;研发出钻杆导向装置和防脱锁止装置,解决了钻杆不能小角度切入岩壁且频繁卡钻、掉钻的工程难题;研发出环形导轨装置和超高压大流量超前灌浆系统,实现了掌子面前方 360°全周向高效灌浆。研发了法向预应力锚固钻机系统(图 14):研发出全自由度多关节运动装置,实现了洞壁全周向垂直钻孔精准钻进;研发出钻杆自动接杆装置,实现了深长钻孔连续高效施作;研发出锚杆(索)高预应力施加系统,最大限度发挥了预应力锚固对围岩的支护控制作用。

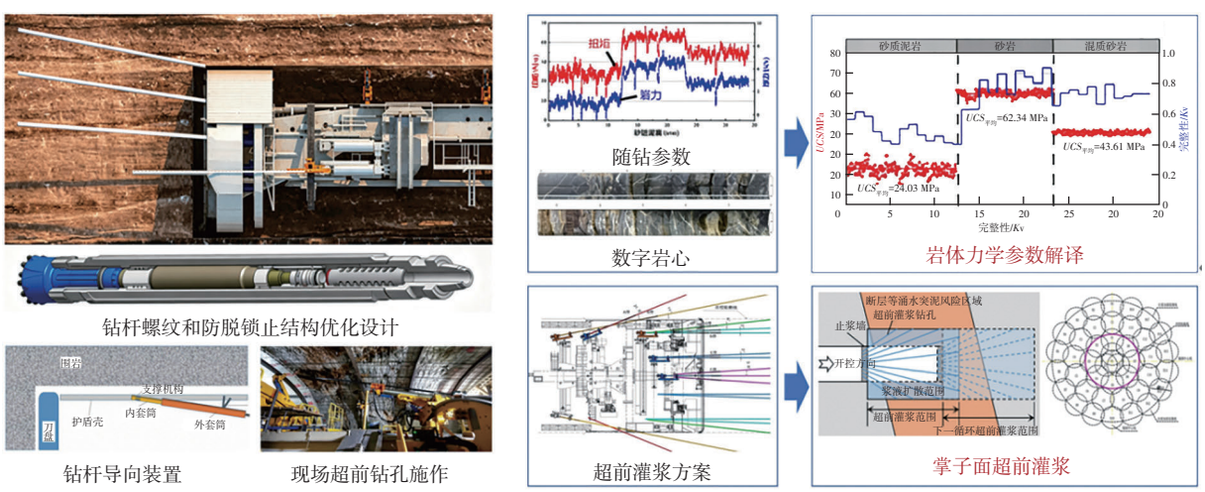


图 13 “钻探灌”一体化超前钻机系统

Fig. 13 Integrated advance drilling and grouting rig system

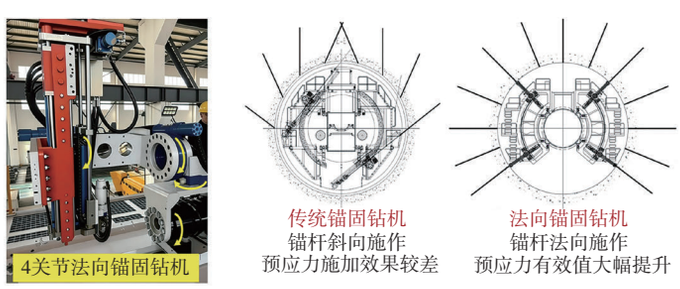


图 14 法向预应力锚固钻机系统

Fig. 14 Normal prestressed anchoring drilling rig system

3) 复杂地层超大直径 TBM 自适应智能掘进控制系统

研发了岩体强度和完整性信息、刀盘刀具-掌子面作用信息和护盾-围岩作用信息实时感知系统(图 15)[38-39],实现了复杂地层超大直径 TBM 掘进海量多元异构数据实时获取;建立了岩-机作用信息智能互馈分析方法、岩体参数和 TBM 掘进参数实时预测/评价模型(图 16)[40-41],实现了复杂地层超大直径 TBM 掘进状态和岩体状态精准分级;构建了基于施工进度最大和灾害风险最小等多场景决策与多目标优化的 TBM 掘进参数动态匹配算法(图 17)[1],实现了复杂地层超大直径 TBM 掘进过程自适应智能决策控制。

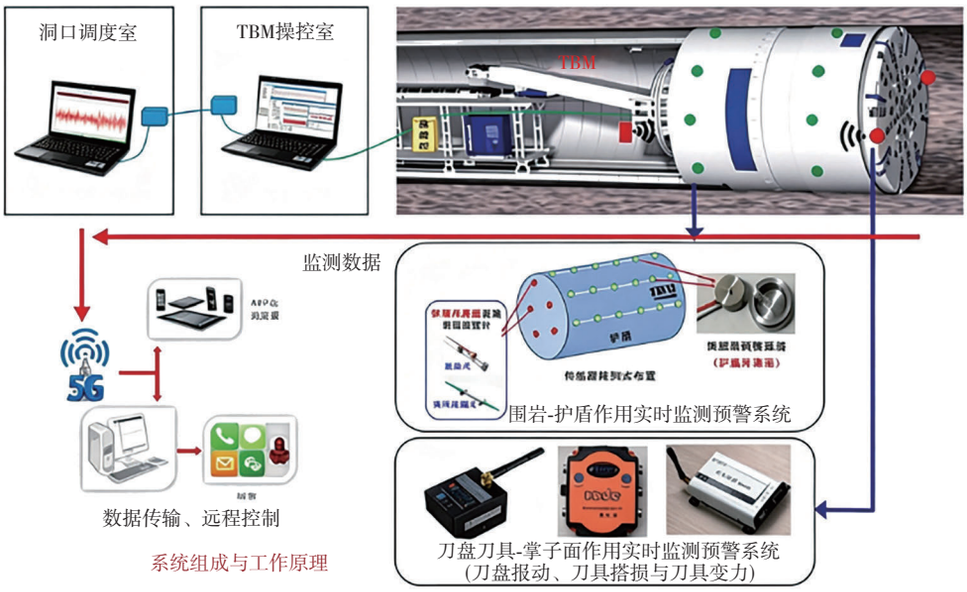


图15　TBM掘进岩-机作用信息实时感知系统

Fig. 15　Real-time sensing system for rock-TBM interaction information during tunneling

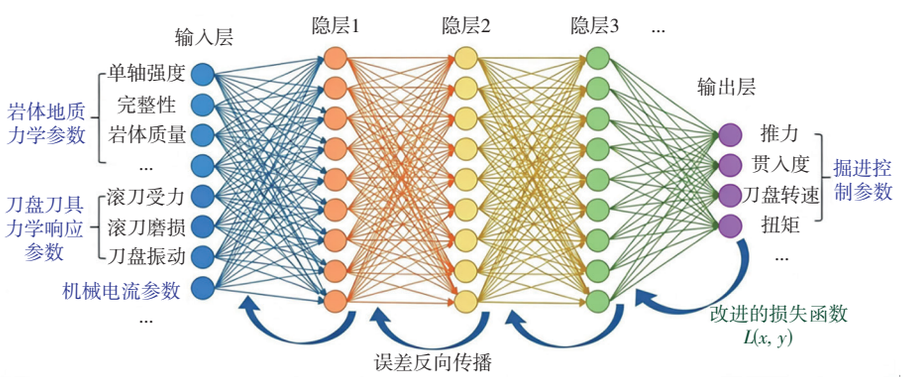


图16　TBM掘进岩-机作用信息智能互馈分析模型

Fig. 16　Intelligent mutual feedback analysis model for rock-TBM interaction information during tunneling

优化函数	$max\ obj=\lambda1\cdot AR+\lambda2\cdot W+\lambda3\cdot Es+\lambda4\cdot Rs+\lambda5\cdot Rb$
优化变量	AR—施工进度，W—滚刀磨损，Es—破岩比能，Rs—卡机风险，Rb—岩爆风险
载荷约束	刀盘推力: $F=g_1(n, v, geo., etc.)$　$0<F\leqslant\eta_F\cdot F_{max}$ 刀盘扭矩: $T=g_2(n, v, geo., etc.)$　$0<T\leqslant\eta_T\cdot T_{max}$
功率约束	刀盘功率: $T\cdot n\leqslant P$
设计约束	刀盘转速: $n_l\leqslant n\leqslant n_u$, 掘进速度: $v_l\leqslant v\leqslant v_u$
风险约束	刀盘转速: $n_{sl}\leqslant n\leqslant n_{su}$, 掘进速度: $v_{bl}\leqslant v\leqslant v_{bu}$

图17　TBM掘进多场景决策和多目标优化函数

Fig. 17　Multi-scenario decision-making and multi-objective optimization function for TBM tunneling

2.3　复杂地层超大直径TBM工程灾害预测预警与防控技术研究

1)TBM掘进卡机灾害综合预警方法和成套控制技术

基于现场卡机灾害监测预警系统获得的卡机孕灾过程信息，采用FDEM数值模拟方法揭示了卡机灾变特征和临界指标，采用机器学习方法建立了挤压变形量、挤压变形等级和护盾挤压力预警模型，形成了“机理＋数据”双驱动的TBM掘进卡机灾害综合预警方法(图18)[42-43]。针对不同卡机风险等级，

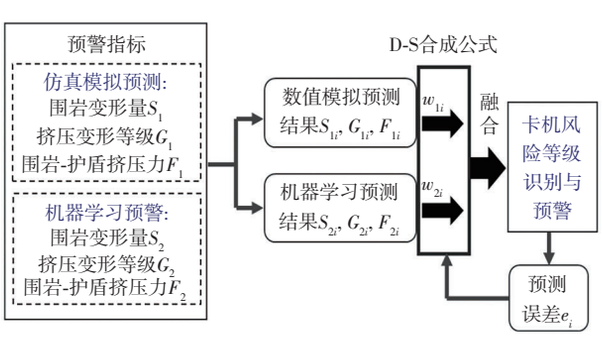


图18　卡机灾害综合预警方法

Fig. 18　Comprehensive prewarning method for jamming hazard during TBM tunneling

建立了“超前钻精准探测＋高压注浆超前改性＋预应力锚注及时支护”＋“变径扩挖＋脱困模式掘进”为核心的卡机灾害成套控制技术，即：超前钻精准探测前方不良地质体，高压注浆超前改性前方围岩条件，开挖揭露后预应力锚注及时支护，刀盘大变径扩挖，“启动脱困电机、降低刀盘转速、加大刀盘扭矩和主驱动推力”脱困模式掘进(图 19)，实现了卡机灾害精准防控[44-45]。

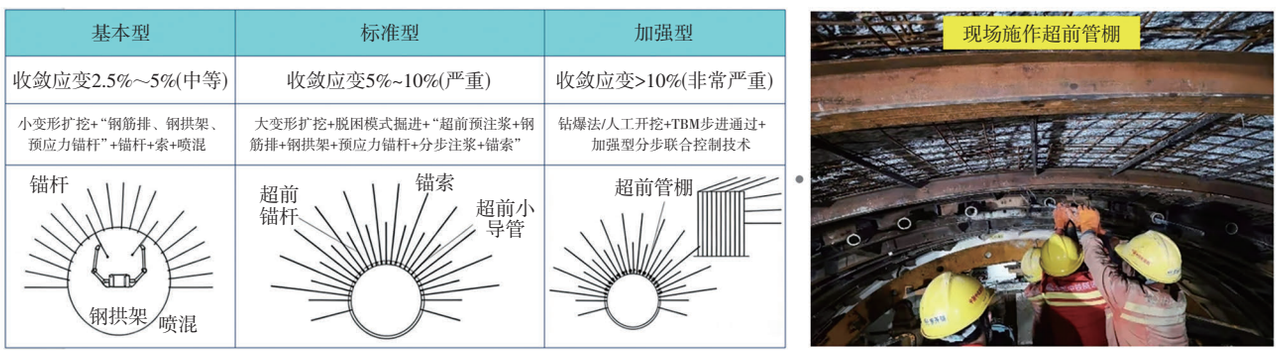


图 19　卡机灾害分步联合支护控制技术及现场应用

Fig. 19　Stepwise and combined support control technology for TBM jamming hazard and field application

2)TBM 掘进岩爆灾害综合预警方法和成套控制技术

基于现场微震监测和岩爆预警系统获得的岩爆孕灾过程信息，采用机器学习方法建立了微震信号高效降噪和识别新方法、微震源精准定位和定级新模型、岩爆灾害前兆微震序列特征和临界指标多算法融合预测模型，形成了“机理＋数据”双驱动的 TBM 掘进岩爆灾害综合预警方法(图 20)[46-47]。针对不同岩爆风险等级，建立了以“超前释能＋应力状态恢复”为核心的岩爆灾害成套控制技术(图 21)，即“大孔径钻孔、预裂爆破、注水软化”超前释能，“高预应力锚固”应力状态恢复，及时联合支护，实现了岩爆灾害精准防控[37]。

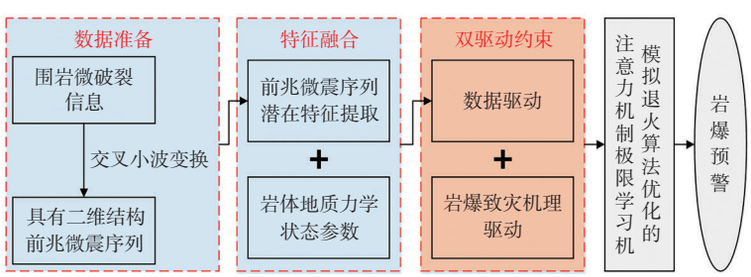


图 20　岩爆灾害综合预警方法

Fig. 20　Comprehensive prewarning method for rockburst hazard during TBM tunneling

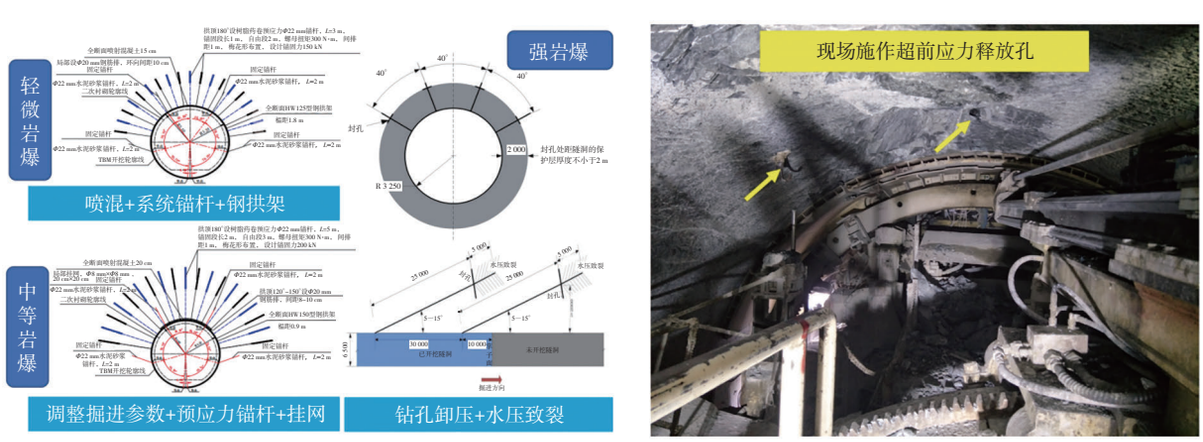


图 21　岩爆灾害成套控制技术及现场应用

Fig. 21　Combined support control technology for TBM rockburst hazard and field application

2.4　复杂地层超大直径TBM施工全过程管控数字孪生系统

1）复杂地层超大直径TBM施工“以虚映实”技术[48-50]

构建了融合知识驱动与数据驱动的TBM施工岩-机作用信息映射方法(图22)：基于知识驱动原理，对岩体状态演化、刀盘掘进破岩、围岩-支护相互作用等物理过程进行理论建模与数值仿真，在虚拟环境中重构TBM施工场景与设备动态行为；借助数据驱动技术，从海量施工数据中挖掘岩-机作用物理过程之间的隐含关联，揭示岩-机作用物理行为的表征规律；最终实现了TBM施工全过程围岩、刀盘、护盾、支护等多种类物理实体，岩体参数、掘进参数、支护参数等多维度物理参数，破岩、排渣、支护等多阶段物理过程在虚拟空间中的高保真、全要素和系统性数字化映射(图23)。

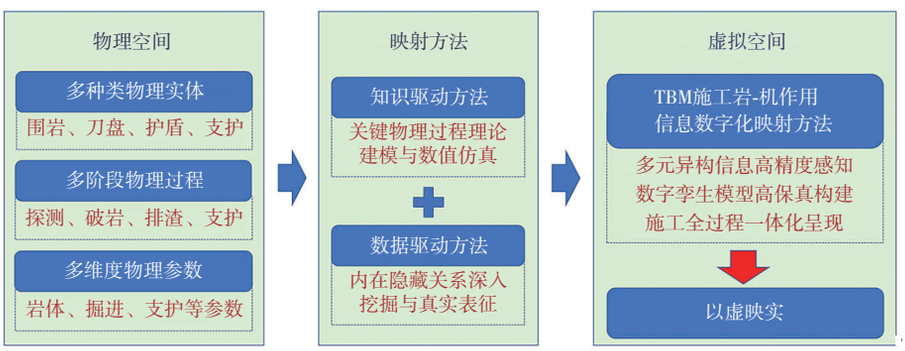


图22　TBM施工岩-机作用信息映射方法

Fig. 22　Rock-TBM interaction information mapping method

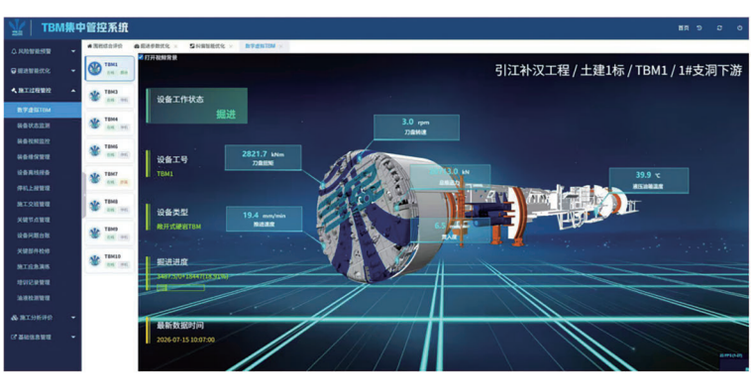


图23　TBM施工数字孪生系统(数字虚拟TBM模块)

Fig. 23　Digital twin system for TBM tunneling (Digital virtual TBM module)

2）复杂地层超大直径TBM施工“以虚预实”技术[48-50]

开发了基于高保真仿真和历史数据挖掘的TBM施工分析预测模型(图24)：深度融合岩体参数智能反演、施工过程动态预测与工程灾害风险多源预警等模型，在虚拟空间中构建与TBM施工物理过程实时映射、同步演进、持续优化的数字孪生体；通过高保真仿真技术精准再现岩-机作用演化机理和未来趋势，通过大数据技术深入挖掘历史施工数据隐蔽模式和发展规律，形成了基于多维度时变数据耦合分析的TBM施工分析预测模型，突破了单一维度预测技术的局限性；最终实现了对TBM施工围岩状态、机器掘进状态及潜在灾害的多维度协同动态推断与全周期前瞻性模拟(图25)。

3）复杂地层超大直径TBM施工“以虚控实”技术[48-50]

研发了TBM施工全过程智能管控平台(图26)：深度集成掘进/支护方案决策实施及卡机/岩爆工程灾害预警防控等功能，构建了TBM施工全要素、全场景和全环节数字孪生管控体系；依托数字孪生虚拟空间仿真决策结果，对物理现场施工进行精准指导与动态调控，同时将物理现场施工结果同步反馈至虚拟空间完成模型迭代与方案优化，形成了双向联动、闭环迭代的“虚拟决策-物理执行-数据反馈-虚拟优化”全流程联动滚动优化机制(图27)，最终实现了TBM施工全过程精细化、协同化和数智化管控。

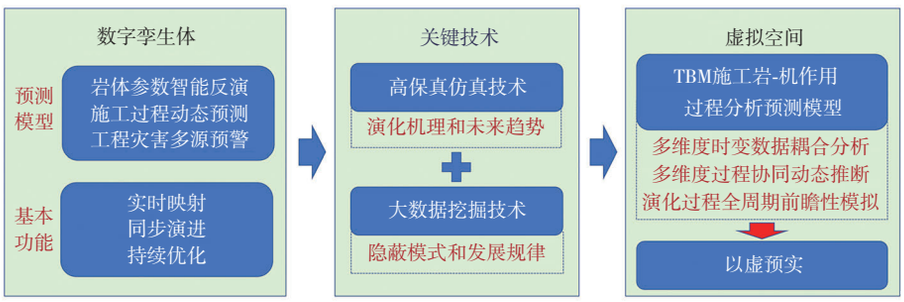


图 24　TBM 施工分析预测模型体系

Fig. 24　Analysis and prediction model system for TBM tunneling



图 25　TBM 施工数字孪生系统(分析预测模块)

Fig. 25　Digital twin system for TBM tunneling (analysis and prediction module)



图 26　TBM 施工全过程智能管控平台

Fig. 26　Intelligent management and control platform for whole TBM construction process

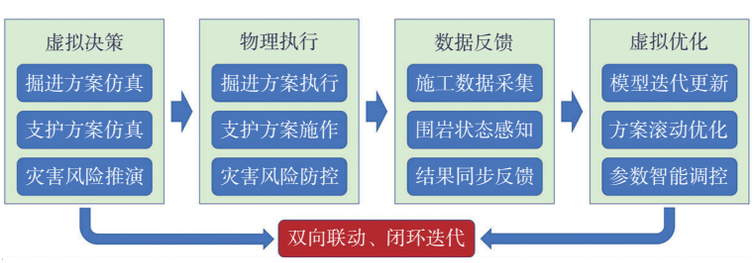


图 27　TBM 施工全流程联动调控机制

Fig. 27　Full-process coordinated regulation mechanism for TBM tunneling

3　主要创新点

1）复杂地层超大直径TBM地质适应性选型和设计方法研究：现有TBM性能测试方法大多只能测试单把滚刀在简单工况下的破岩和磨损性能，新研发的TBM性能试验系统可以揭示深部高地应力（双向围压80 MPa）和软硬复合岩体（岩石强度5～350 MPa）下全刀盘多刀具协同破岩和磨损机理。现有TBM选型设计方法不能充分考虑复杂地层中不同类型超大直径TBM的施工适应性，新建立的量化和综合选型方法及装机主参数综合设计模型，实现了TBM选型设计的科学性、系统性和针对性。

2）复杂地层超大直径TBM地质适应性提升装备和系统研究方面：常规TBM功能配置相对固化，地层适应范围有限，新研制的多模式掘进装备提升了复杂地层多类型TBM的地质适应性，解决了原有设备侧重单一工况作业、缺少多模式协同的缺陷。传统超前钻机系统覆盖范围有限，探测精度不高；传统锚固钻机系统不能垂直洞壁施作锚杆（索），预应力施加效果差；新研发的全周向超前钻机系统和法向预应力锚固钻机系统，实现了灾害超前探测与防控处置一体化，充分发挥了超前探测预报预警和锚注支护高效防控作用。传统TBM掘进岩-机信息采集维度有限，分析深度不够，智能决策能力薄弱，施工控制大多依靠人为经验，新研发的TBM掘进岩-机作用智能决策系统，克服了现有技术不能保证TBM始终处在最优掘进状态的缺陷，推动TBM装备由人工操控向智能掘进转变，综合技术优势突出。

3）复杂地层超大直径TBM工程灾害预测预警与数智管控技术研究方面：首次提出了“机理＋数据”双驱动的卡机和岩爆灾害综合预警方法，克服了机理驱动方法难以适配复杂工况，数据驱动方法缺乏物理可解释性，现有技术难以提前预警的缺陷。提出的卡机和岩爆灾害成套控制技术突破了传统TBM防护手段简单的局限，充分发挥了围岩-支护耦合系统对围岩稳定性和工程灾害的控制作用。

4）现有TBM施工数字孪生技术多局限于简单数据展示与事后模拟验证，缺乏实时推演与自适应决策能力，难以实现施工方案自主动态调控，不具有现场应用价值。本文给出的方法实现了TBM掘进多物理实体、多物理参数、多物理过程在虚拟空间的数字孪生，实现了对围岩状态、TBM掘进性能和灾害风险的数智化预判，实现了TBM施工“虚拟决策-物理执行-数据反馈-虚拟优化”全流程联动滚动优化机制，真正从“以虚映实”、“以虚预实”和“以虚控实”实现了TBM施工全过程数智化管控。

4　成果实施成效

复杂地层超大直径TBM适配选型与智能掘进关键技术在中国南水北调集团江汉水网建设开发有限公司等建设、设计、施工、设备制造单位负责的多项重大隧洞工程进行了推广应用，并取得了显著的应用效果，经济、社会效益显著。举例来说，研究成果在南水北调中线引江补汉工程中全面应用：

引江补汉工程是南水北调后续工程首个开工项目，是全面推进南水北调后续工程高质量发展、加快构建国家水网主骨架和大动脉的重要标志性工程。工程输水总干线采用有压单洞自流输水，沿线地质条件复杂，施工难度大，工程具有大埋深、长线路、大洞径等技术特点和“高地应力（实测最大水平主应力量值约35.2 MPa）、高水压（勘探钻孔实测最大水压力约5.7 MPa）、高岩石强度（实测最大强度354 MPa），断层多（主洞穿越区域性深大断裂7条，大型断层66条）、地下水多（预测涌水洞段长约10.7 km）、软岩多（中等及以上软岩大变形风险洞段长度约26 km）”等地质难点，是我国调水工程建设极具挑战性的项目之一。

研究成果深度融入工程全过程应用：

1）工程方案研究阶段，研究成果指导了引江补汉工程方案优化，将可研阶段TBM6、TBM7、TBM8等3台TBM型式由敞开式TBM调整为单护盾TBM，技术方案调整后，节省投资44 212万元，将穿越白河-谷城断裂及下游洞段施工方案由钻爆法优化调整为土压平衡盾构/单护盾双模式TBM，取消了21#、22#施工支洞（合计1 613 m），该洞段工期由控制工程总工期的108个月降至90个月。最终形成了“1台土压平衡盾构/单护盾TBM双模式、2台双护盾，3台单护盾，4台敞开式”10台12 m级超大直径多类型TBM选型方案，提升了工程的总工期保障率；

2）设备生产制造阶段，研究成果系统优化10台、4类机型超大直径TBM选型配置，开展针对性设计研究，提升了TBM地质适应性；

3）施工阶段，TBM掘进遭遇了白河-谷城断裂、黄化断层等多处不良地质，如TBM8掘进遭遇宽度约457 m的区域性大型断裂破碎带“黄化断层”，该洞段围岩条件极端恶劣，属于世界级重大控制性

不良地质洞段，施工扰动下极易诱发塌方、涌水、TBM卡埋等重大工程灾害，施工风险极高、处置难题复杂突出。应用了研发的“钻探灌”一体化全周向超前钻机等工程灾害高效防控装备，实现了围岩高效超前加固。对穿越断层过程中TBM掘进岩-机作用信息实时感知、互馈分析，对全过程风险动态研判与主动防控。实现了处置后仅用27天快速安全穿越超长破碎带洞段，创下同等复杂地质条件下TBM安全高效穿越重大不良地质洞段的工程纪录。

4)掘进效率创新高，12 m级TBM设备利用率达到55.98%、设备完好率达到96.26%，敞开式TBM月进尺达到474 m，护盾式月进尺达到567 m，断层及岩爆段月均进尺超过350 m。

综上所述，研究成果成功破解复杂地层超大直径TBM掘进系列技术难题，有力保障引江补汉工程平稳推进；显著提升TBM装备选型、结构设计的科学性与地质适应性，降低重大地质灾害发生概率；同时最大限度减少施工活动对区域原生生态环境的扰动，推动经济效益、社会效益、生态环境效益和安全效益协同提升。

5 结论与展望

本文围绕复杂地层超大直径TBM适配选型和智能掘进关键技术开展研究，在复杂地层超大直径TBM地质适应性选型和设计方法、TBM地质适应性提升装备和系统、TBM工程灾害预测预警和防控技术、TBM施工全过程数智管控技术等方面取得创新性研究成果。成果已成功应用于南水北调中线引江补汉等国家重大工程，施工中避免了工程灾害的发生，显著提高了掘进效率，保障了工期和施工安全，整体提升了我国TBM装备设计制造和施工控制的技术水平，经济和社会效益显著。未来可以在如下方面进行深入研究：提出的TBM地质适应性选型和设计技术所依据的案例数据库需要不断更新，地质适应性提升装备和系统应在现场应用中不断验证和改进，掘进工程灾害预测预警与防控技术的预警时效性和控制有效性需要进一步提升，TBM施工全过程管控数字孪生系统需要在更多现场应用场景下进行不断改进。

参 考 文 献

[1] 周阳宗，李蘅，杨旭辉，等. 深埋长大隧洞TBM选型配置与智能掘进[M]. 武汉：长江出版社，2026.
Zhou Yangzong, Li Heng, Yang Xuhui, et al. Selection, configuration and intelligent tunneling of TBM for deep-buried long-large tunnels[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2026.

[2] 洪松，孙宝升. 深埋长隧洞TBM施工组织设计关键技术[M]. 郑州：黄河水利出版社，2021.
Hong Song, Sun Baosheng. Key technology of TBM construction planning of deep buried long tunnel[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2021.

[3] 薛云峰，杨继华. 深埋长隧洞勘察与TBM掘进关键工程地质问题研究[M]. 郑州：黄河水利出版社，2022.
Xue Yunfeng, Yang Jihua. Study on geology investigation and key engineering geological problems of TBM tunneling in deep-buried long tunnels[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2022.

[4] 王梦恕，李典璜，张镜剑，等. 岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例[M]. 北京：中国铁道出版社，2004.
Wang Mengshu, Li Dianhuang, Zhang Jingjian, et al. Rock tunnel boring machine (TBM) construction and engineering cases[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.

[5] 陈馈，孙振川，李涛. TBM设计与施工[M]. 北京：人民交通出版社，2018.
Chen Kui, Sun Zhenchuan, Li Tao. TBM design and construction[M]. Beijing: China Communications Press, 2018.

[6] 孙振川，陈馈，杨延栋，等. 山区复杂地质长大隧道岩石掘进机(TBM)及其掘进关键技术[M]. 北京：人民交通出版社，2020.
Sun Zhenchuan, Chen Kui, Yang Yandong, et al. Key technologies for rock tunnel boring machine and long-and-large tunnelling in mountainous complex geologies[M]. Beijing: China Communications Press, 2020.

[7] 李建斌，龚秋明，刘斌. 隧道掘进机辅助智能化施工技术[M]. 北京：科学出版社，2020.
Li Jianbin, Gong Qiuming, Liu Bin. Assisted intelligent construction technology of tunnel boring machine[M]. Beijing: Science Press, 2020.

[8] 宋嶽，高玉生，贾国臣，等. 水利水电工程深埋长隧洞工程地质研究[M]. 北京：中国水利水电出版社，2014.
Song Yue, Gao Yusheng, Jia Guochen, et al. Engineering geological study on deep-buried long tunnels in hydraulic and hydropower projects[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014.

[9] 邓铭江，谭忠盛. 超特长隧洞TBM集群掘进分析及施工技术研究[J]. 隧道建设(中英文)，2021，41(11)：1809-1826.
Deng Mingjiang, Tan Zhongsheng. Study on boring indexes and key issues of tunnel boring machine cluster construction of super-long tunnels[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1809-1826.

[10] 毛启勇. 超特长深埋输水隧洞TBM施工期地质灾害风险评估及处置方案研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2025.
Mao Qiyong. Study on geological disaster risk assessment and disposal scheme of super long deep buried water conveyance tunnel during TBM construction period[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2025.

[11] 刘泉声，黄兴，刘建平，等. 深部复合地层围岩与TBM的相互

作用及安全控制[J]. 煤炭学报，2015，40(6)：1213-1224.
Liu Quansheng，Huang Xing，Liu Jianping，et al. Interaction and safety control between TBM and deep mixed ground [J]. Journal of China Coal Society，2015，40(6)：1213-1224.

[12] Liu Quansheng，Huang Xing，Gong Qiuming，et al. Application and development of hard rock TBM and its prospect in China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2016，57：33-46.

[13] 谢成涛，赵海雷. 高黎贡山铁路隧道彩云号TBM的创新性设计与应用[J]. 隧道建设(中英文)，2019，39(7)：1201-1208.
Xie Chengtao，Zhao Hailei. Innovative design and application of Caiyun TBM to Gaoligongshan Railway Tunnel [J]. Tunnel Construction，2019，39(7)：1201-1208.

[14] 吕瑞虎. 城市地铁TBM施工适应性评价研究[J]. 现代隧道技术，2017，54(1)：31-39，47.
Lv Ruihu. On adaptability assessment of a TBM used in urban subways [J]. Modern Tunnelling Technology，2017，54(1)：31-39，47.

[15] 赵录学. 城市轨道交通工程TBM选型分析研究[J]. 现代隧道技术，2013，50(2)：7-13.
Zhao Luxue. Analysis of TBM selection for an urban rail transit project [J]. Modern Tunnelling Technology，2013，50(2)：7-13.

[16] 安仓. 长距离硬岩隧洞微型TBM选型及关键技术研究[J]. 施工技术(中英文)，2026(6)：158-163.
An Cang. Selection and key technologies of a micro-TBM for long-distance hard rock tunnels [J]. Construction Technology，2026(6)：158-163.

[17] 邓铭江. 深埋超特长输水隧洞TBM集群施工关键技术探析[J]. 岩土工程学报，2016，38(4)：577-587.
Deng Mingjiang. Key techniques for group construction of deep-buried and super-long water transfer tunnel by TBM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2016，38(4)：577-587.

[18] 程桦，唐彬，唐永志，等. 深井巷道全断面硬岩掘进机及其快速施工关键技术[J]. 煤炭学报，2020，45(9)：3314-3324.
Cheng Hua，Tang Bin，Tang Yongzhi，et al. Full face tunnel boring machine for deep-buried roadways and its key rapid excavation technologies [J]. Journal of China Coal Society，2020，45(9)：3314-3324.

[19] 张灿锋，周飞，刘彦. 超前地质探测及预加固技术对TBM掘进的影响研究[J]. 云南水力发电，2026，42(8)：65-68.
Zhang Canfeng，Zhou Fei，Liu Yan. Research on the impact of advanced geological exploration and pre-reinforcement technology on TBM excavation [J]. Yunnan Water Power，2026，42(8)：65-68.

[20] Yang Huayong，Zhou Xinghai，Gong Guofang. Perspectives in intelligentization of tunnel boring machine (TBM) [J]. Tunnel Construction，2018，38(12)：1919-1926.

[21] 刘志明，关志诚，池建军，等. TBM卡机脱困及高效掘进[M]. 北京：中国水利水电出版社，2021.
Liu Zhiming，Guan Zhicheng，Chi Jianjun，et al. TBM jamming release and efficient tunneling [M]. Beijing：China Water & Power Press，2021.

[22] 林鹏. 隧道TBM卡机地质判识与防控技术[M]. 北京：人民交通出版社，2024.
Lin Peng. Geological identification and control technology for hard-rock TBM jamming [M]. Beijing：China Communications Press，2024.

[23] 高玉生，张宏，赵国斌，等. 深埋长隧洞岩爆机理研究及防治实践[M]. 北京：中国水利水电出版社，2014.
Gao Yusheng，Zhang Hong，Zhao Guobin，et al. Rockburst mechanism and prevention & control practice of deep-buried long tunnels [M]. Beijing：China Water & Power Press，2014.

[24] 冯夏庭，张传庆，李邵军，等. 深埋硬岩隧洞动态设计方法[M]. 北京：科学出版社，2013.
Feng Xiating，Zhang Chuanqing，Li Shaojun，et al. Dynamic design method for deep tunnels in hard rocks [M]. Beijing：Science Press，2013.

[25] 李天昊. TBM施工岩机数字孪生及应用[D]. 济南：山东大学，2023.
Li Tianhao. Digital twin of rock and machine for TBM construction and its application [D]. Jinan：Shandong University，2023.

[26] 吕佳峻. 基于数字孪生的TBM虚拟掘进系统研究与实现[D]. 杭州：浙江大学，2021.
Lv Jiajun. Research and implementation of TBM virtual tunneling system based on digital twin [D]. Hangzhou：Zhejiang University，2021.

[27] 刘耀儒，侯少康，魏芳，等. TBM智能施工研究进展及展望[J]. 隧道建设(中英文)，2025，45(1)：21-45.
Liu Yaoru，Hou Shaokang，Wei Fang，et al. State of the art and development trends in intelligent construction of tunnel boring machines [J]. Tunnel Construction，2025，45(1)：21-45.

[28] 谭忠盛，邓铭江. 超特长隧洞TBM智能辅助掘进技术研究及应用[J]. 隧道建设(中英文)，2024，44(3)：442-463.
Tan Zhongsheng，Deng Mingjiang. Research on and application of intelligent auxiliary boring technologies for tunnel boring machines in construction of ultra-long tunnels [J]. Tunnel Construction，2024，44(3)：442-463.

[29] Pan Yucong，Liu Quansheng，Liu Jianping，et al. Full-scale linear cutting tests in Chongqing Sandstone to study the influence of confining stress on rock cutting forces by TBM disc cutter [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2018，51(6)：1697-1713.

[30] Pan Yucong，Liu Quansheng，Liu Jianping，et al. Comparison between experimental and semi-theoretical disc cutter cutting forces：implications for frame stiffness of the linear cutting machine [J]. Arabian Journal of Geosciences，2018，11(11)：266.

[31] Pan Yucong，Liu Quansheng，Peng Xingxin，et al. Full-scale rotary cutting test to study the influence of disc cutter installment radius on rock cutting forces [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2018，51(7)：2223-2236.

[32] Peng Xingxin，Liu Quansheng，Pan Yucong，et al. Study on the influence of different control modes on TBM disc cutter performance by rotary cutting tests [J]. Rock Mechanics and

Rock Engineering, 2018, 51(3): 961-967.

[33] 周阳宗, 刘泉声, 李蘅, 等. 引江补汉工程输水隧洞TBM地质适应性选型研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2026, 59(8): 1311-1321.
Zhou Yangzong, Liu Quansheng, Li Heng, et al. Study on geologic adaptability-based TBM selection for the water conveyance tunnel of the Yangtze-to-Hanjiang Water Diversion Project [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2026, 59(8): 1311-1321.

[34] 黄云辉, 喻亚奇, 刘泉声, 等. 基于不良地质条件阈值评判的TBM选型方法[J]. 人民长江, 2025, 56(8): 170-176.
Huang Yunhui, Yu Yaqi, Liu Quansheng, et al. TBM selection method based on threshold evaluation of adverse geological conditions[J]. Yangtze River, 2025, 56(8): 170-176.

[35] 杨旭辉, 刘泉声, 李蘅, 等. 深部复杂地层TBM综合选型方法及应用[J/OL]. 人民长江, 1-11[2026-10-15]. https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20260627.1412.006.
Yang Xuhui, Liu Quansheng, Li Heng, et al. Comprehensive TBM type selection method for deep complex grounds and its application in Yangtze-River-to-Han-River Water Diversion Project [J]. Yangtze River, 1-11[2026-10-15]. https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20260627.1412.006.

[36] 陶少雄, 周阳宗, 李阳, 等. 复杂地层双模TBM刀盘装机主参数设计方法研究[J]. 人民长江, 2026, 57(5): 168-173, 184.
Tao Shaoxiong, Zhou Yangzong, Li Yang, et al. Study on design method of cutterhead parameters for dual-mode TBM in complex ground[J]. Yangtze River, 2026, 57(5): 168-173, 184.

[37] 宋志忠, 李蘅, 邵小康, 等. 引江补汉工程超大直径TBM集群设备选型及配置关键技术[J]. 中国水利, 2025(21): 65-72.
Song Zhizhong, Li Heng, Shao Xiaokang, et al. Key technologies for type-selection and configuration of super-large-diameter TBM clusters in the Water diversion project from the Yangtze River to the Hanjiang River[J]. China Water Resources, 2025(21): 65-72.

[38] Huang Xing, Liu Quansheng, Huang Tao, et al. Method and apparatus for monitoring the interaction between surrounding rocks and TBM in TBM tunneling process: US2020267456A1[P]. 2022-03-15.

[39] Huang Xing, Liu Quansheng, Liu He, et al. Development and in-situ application of a real-time monitoring system for the interaction between TBM and surrounding rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 187-208.

[40] Liu Quansheng, Wang Xinyu, Huang Xing, et al. Prediction model of rock mass class using classification and regression tree integrated AdaBoost algorithm based on TBM driving data[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 106: 103595.

[41] 邵小康, 李蘅, 杨旭辉, 等. 融合超前钻探和TBM掘进参数的围岩类别智能预测[J/OL]. 人民长江, 1-11[2026-10-15]. https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20260527.1101.004.
Shao Xiaokang, Li Heng, Yang Xuhui, et al. Intelligent prediction of surrounding rock classification by fusing advanced drilling and TBM tunneling parameters [J]. Yangtze River, 1-11[2026-10-15]. https://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20260527.1101.004.

[42] 伯音. 基于机器学习的TBM掘进过程挤压变形预测及卡机灾害预警方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2023.
Bo Yin. Study on tunnel squeezing deformation prediction and warning methods for TBM jamming disaster during TBM excavation based on machine learning techniques[D]. Wuhan: Wuhan University, 2023.

[43] 陈梓韬. TBM掘进隧道卡机致灾机理及预测仿真的3D-FDEM方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2026.
Chen Zitao. Study on disaster mechanism of TBM jamming based on 3D-FDEM prediction and simulation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2026.

[44] 王中伟. 弱胶结软岩隧道大变形过程及支护控制的FDEM模拟方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
Wang Zhongwei. FDEM-based modeling method for large deformation and tunnel support in weakly cemented soft rock[D]. Wuhan: Wuhan University, 2022.

[45] 李培涛. 深部软岩巷道碎胀大变形FDEM模拟与分步联合支护方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2023.
Li Peitao. The combined support method and FDEM numerical simulation for the larger deformation in deep soft surrounding rock[D]. Wuhan: Wuhan University, 2023.

[46] 吴坚. 节理岩体中应力波衰减规律研究及其在微震监测中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
Wu Jian. Study on the attenuation laws of stress wave in jointed rock masses and its application in the microseismic monitoring[D]. Wuhan: Wuhan University, 2021.

[47] 殷欣. 深埋TBM隧洞微震信号降噪识别、震源定位及岩爆智能预警方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2023.
Yin Xin. Study on microseismic denoising-recognition-location and rockburst intelligent warning in deep-buried TBM tunnel[D]. Wuhan: Wuhan University, 2023.

[48] 宋志忠, 谢明霞, 冯敏, 等. 数字孪生引江补汉建设初探[J]. 中国水利, 2022(18): 57-60.
Song Zhizhong, Xie Mingxia, Feng Min, et al. Preliminary studies on applying digital twin to the River Diversion Project from the Yangtze River to the Han River [J]. China Water Resources, 2022(18): 57-60.

[49] 孙瑞刚, 陶少雄, 管林杰, 等. 引江补汉工程建设管理数字孪生体系的构建研究[J]. 中国水利, 2022(18): 70-72.
Sun Ruigang, Tao Shaoxiong, Guan Linjie, et al. Studies on formation of digital twin system in project construction and management of the River Diversion Project from the Yangtze River to the Han River[J]. China Water Resources, 2022(18): 70-72.

[50] 向志鹏, 周阳宗, 杨旭辉, 等. 复杂地质条件超大直径TBM集群智能化设计与针对性配置研究[J]. 水利规划与设计, 2026(11): 70-74.
Xiang Zhipeng, Zhou Yangzong, Yang Xuhui, et al. Research on intelligent design and targeted configuration of super-large diameter TBM cluster under complex geological conditions[J]. Water Resources Planning and Design, 2026(11): 70-74.