doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 012
贺飞, 魏晓龙, 鞠翔宇, 等. 金属矿山TBM智能掘进关键技术研究与应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 124-135.
He Fei, Wei Xiaolong, Ju Xiangyu, et al. Research and application of key technologies for intelligent TBM tunneling in metal mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2026, 78(6): 124-135.

金属矿山TBM智能掘进关键技术研究与应用

贺　飞, 魏晓龙, 鞠翔宇, 杨　晨
(中铁工程装备集团有限公司, 郑州 450016)

摘　要: 针对深部金属矿山高地应力、围岩破碎等复杂工况, 传统矿用TBM普遍存在智能化程度偏低、多源监测数据孤岛化、掘进参数调控过度依赖人工经验等问题, 同时缺少适配矿山复杂工况的一体化专用管控平台。本文构建“感知-决策-控制-平台”四层一体化智能掘进架构, 围绕设备多参量智能传感、岩体多源融合感知、数据驱动智能决策、模糊PID闭环自主控制、云边协同一体化管控平台五大核心技术完成成套技术研发。融合高精度传感、多手段超前物探、机器视觉与机器学习算法, 完成“地质-设备”多源信息的联合解析, 实现地质灾害、设备故障分级智能预警, 掘进参数自适应调控及井下全域数字化闭环管理。整套体系可有效破除数据孤岛壁垒, 降低掘进作业对人工经验的依赖, 显著提升深部矿山巷道掘进效率, 同时强化围岩与设备的安全管控水平。研究成果可为金属矿山TBM智能化升级、新建智能矿山工程提供成套技术方案, 推动井下少人、无人掘进作业落地实施, 为深部智能矿山建设提供重要技术支撑。

关键词: 金属矿山; TBM; 智能感知; 超前地质预报; 数据驱动决策; 一体化管控平台
中图分类号: TD421　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0124-12

Research and application of key technologies for intelligent TBM tunneling in metal mines

He Fei, Wei Xiaolong, Ju Xiangyu, Yang Chen
(China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: Aiming at the complex working conditions of deep metal mines, such as high in-situ stress and fractured surrounding rock, conventional mine-used TBMs suffer from insufficient intelligence, isolated multi-source monitoring data and heavy reliance on manual experience for tunneling parameter adjustment. Moreover, there is a lack of a special integrated management platform adapted to complex mine conditions. This paper constructs a four-layer integrated intelligent tunneling architecture of perception-decision-control-platform. A complete set of technologies is developed focusing on five core technologies: multi-parameter intelligent sensing of equipment, multi-source fusion perception of rock mass, data-driven intelligent decision-making, closed-loop autonomous control based on fuzzy proportional-integral-derivative (Fuzzy-PID), and cloud-edge-collaboration-based integrated management platform. By combining high-precision sensors, multi-method advanced geophysical prospecting, machine vision and machine learning algorithms, joint interpretation of multi-source geological and equipment information is realized. Graded intelligent early warning of geological disasters and equipment faults, self-adaptive adjustment of tunneling parameters, as well as full-site digital closed-loop management underground are achieved. The proposed system can effectively break the barriers of data silos and reduce the dependence of tunneling operations on manual experience. It greatly improves the tunneling efficiency of roadways in deep mines and strengthens the safety prevention and control capacities for surrounding rock and equipment. The research results can provide complete technical schemes for intelligent transformation of TBMs and newly-built intelligent mine projects in metal mines, facilitate the implementation of low-manpower and unmanned underground tunneling, and offer important technical support for the construction of deep intelligent mines.

Key words: metal mines; TBM; intelligent perception; advanced geological prediction; data-driven decision-making; integrated management platform

收稿日期: 2026-07-07
作者简介: 贺　飞, 博士, 正高级工程师, 主要从事全断面硬岩掘进机设计研发与隧道施工智能化研究。
通信作者: 鞠翔宇, 硕士, 高级工程师, 主要从事隧道设备智能化终端研发。

国内矿产资源开发持续向纵深推进，未来10年，我国开采深度超千米的在产金属矿山占比将突破30%。深部矿区普遍面临高地应力、高地温、围岩破碎、采矿扰动强烈等恶劣地质条件。传统钻爆法掘进效率偏低，独头巷道月进尺仅60～100 m，深部矿井恶劣的地质条件会进一步制约施工进度，导致采掘失衡问题持续加剧，施工工效难以匹配长距离开拓巷道的建设需求[1-2]。全断面隧道掘进机(TBM)集掘进、支护、出渣于一体，对围岩扰动小，井下作业安全性高，已逐步在金属矿山长距离运输巷、斜坡道工程中推广应用。工程实践表明，矿用TBM月掘进进度可达400～600 m，效率较钻爆法提升数倍，能够有效压缩矿山基建周期、控制综合运营成本，行业推广价值显著[3-4]。

不同于水利、交通领域隧道工程，金属矿山巷道地质条件更为复杂，对TBM设备的运行稳定性提出了严苛要求。在智能矿山与无人化开采成为行业主流发展趋势的背景下，实时感知TBM运行状态、动态监测围岩环境变化、精准识别掘进工况，是实现井下装备自主运行与远程智能调控的底层基础，亦是推进矿山少人化、无人化建设的核心前提。《金属非金属矿山智能化建设指南(2025年版)》要求地下矿山构建涵盖综合管控平台在内的智能化整体架构[5]；《有色金属行业智能矿山建设指南(试行)》亦提出建成集全流程少人无人化生产、基于工业大数据的智能决策于一体的智能矿山[6]。

当前，智能传感、无线通信、大数据与人工智能等新一代信息技术快速发展，为矿用TBM智能化升级提供了有力的技术支撑与政策保障[7]。国内学者已针对矿用TBM超前地质探测、设备工况在线监测、井下环境感知等单一模块开展了试验研究，单项技术趋于成熟，但成套智能掘进体系仍存在显著短板：

1)各类监测、探测子系统独立部署，数据互不相通，存在数据孤岛问题；尚未构建“地质-设备-施工工况”一体化岩机感知体系，多源异构数据融合分析能力薄弱[1]；

2)掘进参数调整和地质灾害处置高度依赖现场人员经验，基于大数据和人工智能的智能预警、自主决策算法发展滞后；

3)市政、交通隧道成熟盾构管控平台无法适配矿山高地温、强腐蚀、岩爆多发、小半径转弯掘进等特殊工况；与煤矿成套智能化体系相比，金属矿山缺乏适配TBM全生命周期管理的专用一体化管控平台，难以开展设备集群调度、风险闭环处置、装备预测性维护等综合业务[8]。

上述技术短板严重制约了矿用TBM智能化升级，难以满足智能掘进、无人矿山建设的发展需求[9]。在此背景下，本文面向金属矿山特有复杂掘进工况，提出“感知-决策-控制-平台”一体化智能掘进设计思路，构建分层闭环技术架构，系统研究设备多参量智能传感、岩体多源融合感知、数据驱动智能决策、自主闭环控制、一体化管控平台五大关键技术，阐明了各项技术实现路径。研究成果可消除矿山TBM数据割裂、人工经验主导、专用管控平台缺失等行业痛点，提高掘进效率与安全管控水平，为矿用TBM智能化新建和改造项目提供技术支撑，也可为同类地下掘进装备的智能化迭代提供工程参考。

1　金属矿山TBM智能掘进技术架构

针对金属矿山TBM掘进地质条件复杂、设备工况波动大、风险预警滞后、各系统数据孤立等痛点，本文构建“感知-决策-控制-平台”四层一体化融合体系，如图1所示；依托多源信息采集、数据融合分析、智能算法研判、现场联动执行及全域综合管控全业务链路，构建地质、装备及施工工况协同闭环运行体系。

1.1　系统整体设计思路

结合金属矿山高地应力、围岩破碎、岩爆、软岩大变形多发的工程特征，本架构以岩机协同感知为底层基础、多源数据融合为核心、地质灾害主动防控为导向、设备自主智能运行为最终目标完成整体设计。系统通过多源感知设备持续采集掌子面地质条件、TBM整机运行状态、出渣渣片特征等信息；利用深度学习算法完成原始数据清洗、特征挖掘、多源关联分析，实现断层、富水破碎带、刀具失效、卡机等风险智能识别与分级预警，求解最优掘进参数；随后，智能决策指令直接下发至TBM控制系统，完成推力、刀盘转速、推进速度动态调节，高风险工况下自动联动设备降载、停机阻断灾害；最终依托一体化管控平台实现全量数据汇总、三维可视化展示、多业务协同、设备全生命周期运维管理。

1.2　四层一体化融合体系

1)感知层

感知层是体系的数据源头与底层支撑，融合智能传感与多手段超前地质预报技术[10-11]。一方面，

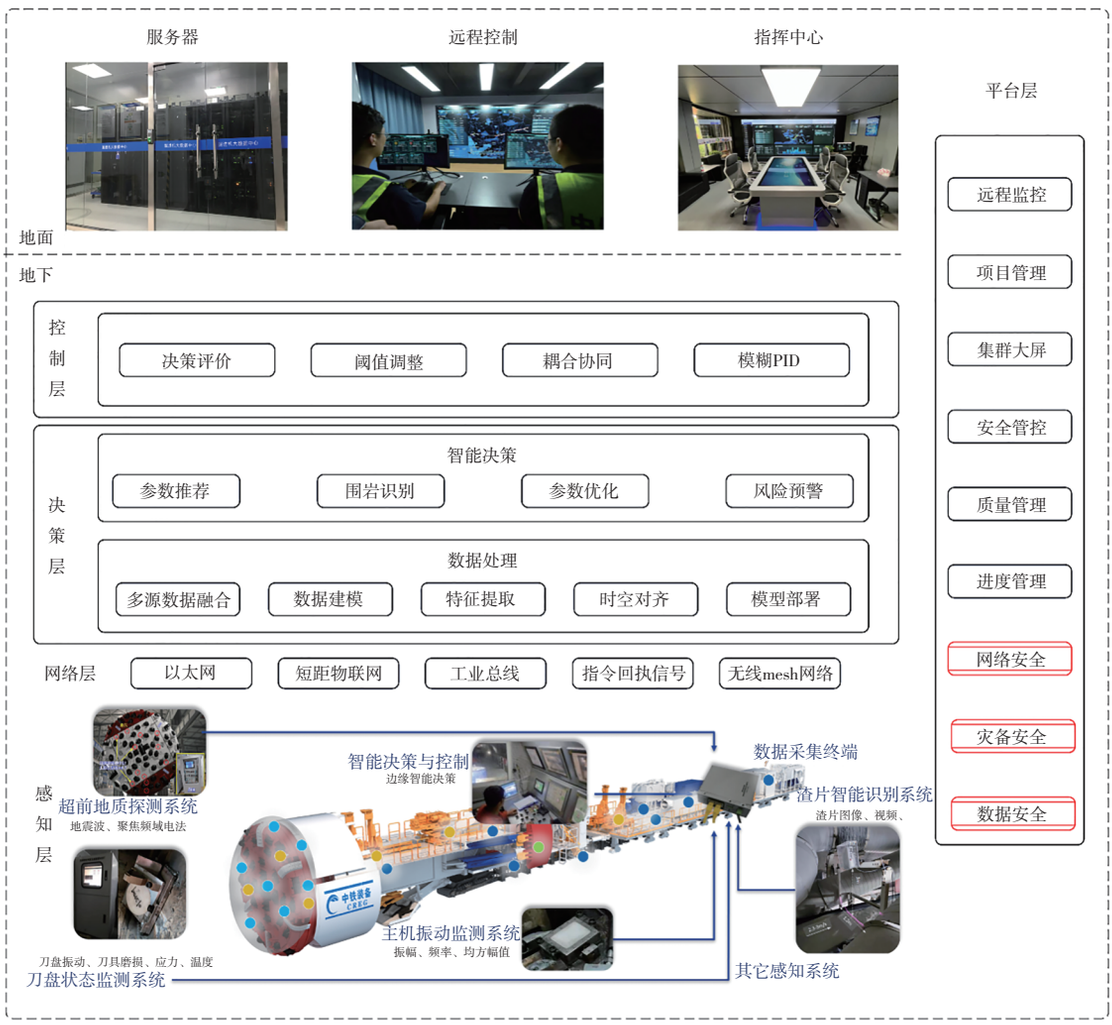


图1 四层一体化融合体系

Fig. 1 Four-layer integrated fusion system

TBM搭载具备自诊断、自校正及本地存储能力的高精度传感器，全面监测整机设备运行状态；另一方面，系统构建融合式超前地质预报体系，配合破岩出渣特征分析技术，实现掘进与探测同步。采集得到的多源信息向上输送至智能决策层进行解析研判。

2)智能决策层

智能决策层是整体架构的核心，负责将原始数据转化为有效决策指令。该层级先对地质、设备、渣片等多源数据进行降噪、异常剔除、标准化处理及时空配准，构建统一数据集；再基于智能算法构建多模态风险研判模型与自适应参数优化模型，结合探测成果、设备工况、历史数据等，挖掘内在规律，将人工操作经验数字化，求解最优运行参数，最终输出预警信息、参数方案与施工建议。

3)智能控制层

智能控制层是现场执行单元，对接TBM控制系统，实现决策指令落地执行。系统依据优化方案实时调整掘进参数，使设备运行状态与围岩条件实现动态匹配；同时，依托设备状态监测数据，及时推送维护保养信息，保障装备稳定运行。设备实时运行数据反馈回传至感知与决策前置模块，形成全流程数据闭环，持续迭代优化，提升算法模型的预测精度与工况适配能力。

4)智能管控平台层

智能管控平台层采用云边协同架构，承担全域综合管理职能。边缘单元完成设备接入、协议解析及本地预处理，减轻云端算力负担；基础设施层提供服务器、存储及网络等硬件保障；数据中台实现数据集成治理及可视化，构建金属矿山TBM专属数据资产库；业务应用层集成实时监控、风险溯源、设备运维及进度管控等功能，依托三维可视化打通业务链路，支持远程调度指挥，实现掘进全生命周期一体化管控。

1.3　体系建设核心目标与功能定位

本技术体系围绕金属矿山TBM智能掘进需求，明确五大建设目标。1）实现地质、装备、工况全要素精细化感知，开展全天候无盲区监测；2）建立主动安全防控体系，提前识别各类灾害风险及设备故障，减少安全事故发生率；3）以数据驱动方式优化掘进参数，提升施工效率，降低设备损耗，减少非计划停机频次，实现降本增效；4）打破数据孤岛，构建岩机一体化感知体系，推动传统装备向智能化转型，助力无人化金属矿山建设；5）形成标准化技术范式，为同类工程及掘进装备智能化研发提供参考。

上述五大建设目标明确了本技术体系的总体发展方向。立足实际工程应用，该体系具体功能定位如下：1）实现多源异构数据的统一汇聚、治理与存储，构建行业专属数据底座；2）针对TBM卡机、围岩失稳、主驱动故障等典型核心风险，形成风险识别、等级判定、溯源分析、处置指导的一体化闭环管控；3）建立地质条件与掘进装备间的自适应参数调控机制，有效减少井下掘进作业对操作人员经验的依赖；4）实现设备健康状态定量评估与预测性运维，改变传统被动维保模式，延长TBM关键部件服役寿命；5）统筹施工进度、工程质量、安全生产、人员设备等全维度管理，兼具工程示范应用与算法迭代优化双重价值，为金属矿山TBM掘进场景提供一体化综合智能技术支撑载体。

2　关键技术研究方案

通过梳理矿用TBM智能化领域的国内外研究现状，剖析当前技术体系的现存短板与行业发展趋势，结合金属矿山深部掘进工程的复杂工况与实际需求，本文研发构建了TBM智能掘进五大核心关键技术体系。

2.1　设备多参量智能传感

针对金属矿山TBM施工恶劣环境，设备传感硬件需兼顾可靠性、稳定性以及准确性，本文面向TBM关键部件协同感知需求，构建设备多参量智能传感系统。围绕TBM关键部件完成感知硬件集成与架构设计，依托高精度传感单元、标准化边缘采集终端及工况自适应采集策略，实现掘进装备多源状态信号采集，为设备故障诊断、健康评估、预测性运维提供底层数据支撑。

以刀盘刀具状态监测系统为例，其失效机理与围岩地质条件强耦合，具有失效随机性强、影响因素复杂的特点，为此设计刀盘刀具状态监测系统，如图2所示，其监测数据是TBM设备感知的核心参数。综合破岩工况，基于磁化效应和磁感应强度矢量叠加原理，将滚刀刀毂滚动产生的多磁场信号进行互馈验证，计算滚刀转速，测量准确度达到98%。通过数

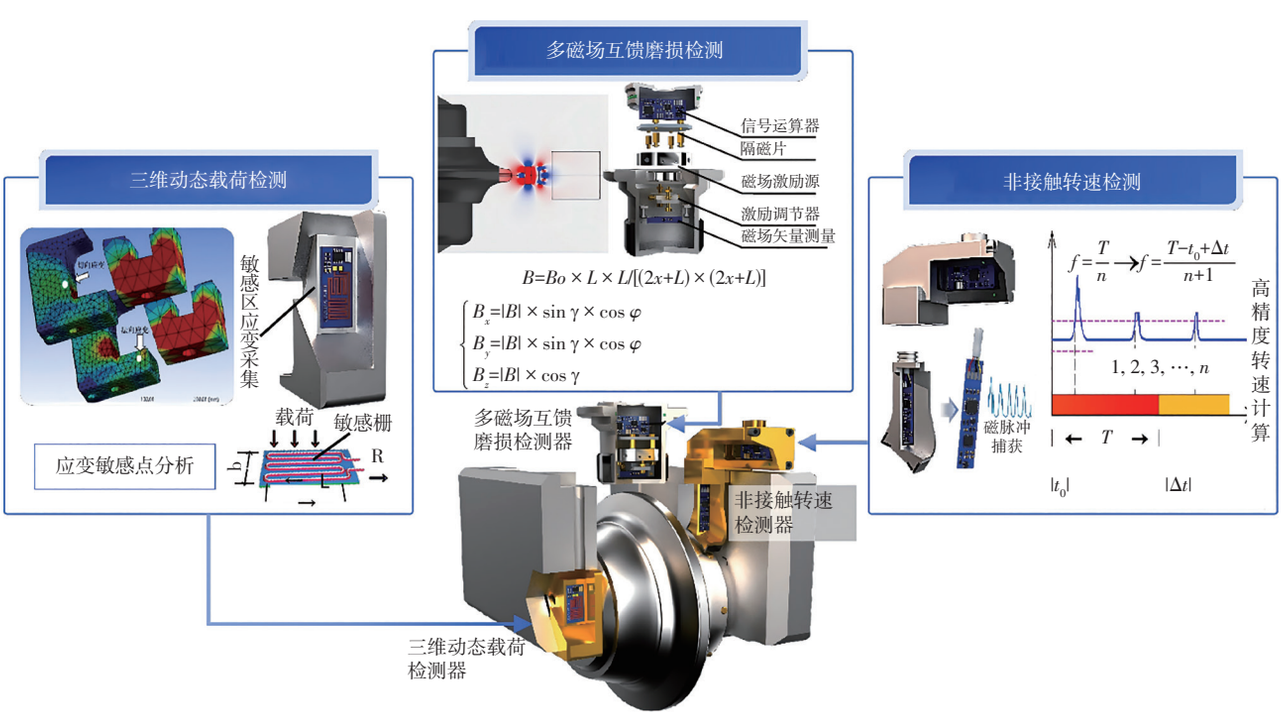


图2　刀盘刀具状态监测系统

Fig. 2　Cutterhead and cutter condition monitoring system

值模拟刀具应变敏感区域与应力变化规律，研发具有动态测力功能的滚刀支撑装置，有效测量滚刀最大载荷35 t。刀盘刀具状态监测系统与PLC交互，识别TBM空推、上升、稳定3类运行工况，确保TBM在稳定运行阶段，自动开启数据采集，同时利用模型算法，通过滚刀转速精准计算滚刀磨损值。将本系统搭载应用于某金属矿山项目，设备全生命周期内实现刀具寿命提升40%、施工效率提升25%、安全隐患降低90%。

此外，金属矿山TBM掘进过程中，受外部激振、环境污染等影响，还需主动监测主驱动、密封等关键部件的运行状态，做好设备部件维护保养，降低因部件损坏而扩大损失的可能性。围绕这些关键部件开发了主驱动状态监测系统、油液状态检测系统等，从被动维护转为主动维护。设备多参量智能传感技术可精准表征设备实时健康状态，支撑装备自诊断、风险预警、智能运维，满足深部矿山巷道TBM长周期、高可靠掘进感知需求，为智能决策提供数据支撑。

2.2 岩体多源融合感知

受探测原理与现场环境限制，单一超前地质预报技术难以全面满足金属矿山破碎围岩、软岩大变形、高地应力及岩爆等多源灾害风险的探测需求[12-13]。本文提出超前地质预报与破岩出渣特征分析协同的多源融合感知思路，构建矿山围岩岩体状态感知技术体系，以渣片图像智能识别作为原位验证与反馈手段，形成“前方预报-原位验证-参数修正”的闭环感知逻辑，实现围岩状态全维度、全过程精准感知。

研究多物探数据融合的超前地质探测技术，如图3所示，涵盖3类物探数据、2类工程特征数据以及相关基础数据。其中物探手段主要包含3类：1)被动震源地震波法(HSP)，利用TBM破岩激发的振动信号作为震源实现随掘探测；2)聚焦频域电法(TEAM)，可精准识别富水破碎带及裂隙发育异常区域；3)微震监测系统，能够实时采集围岩微震破裂信

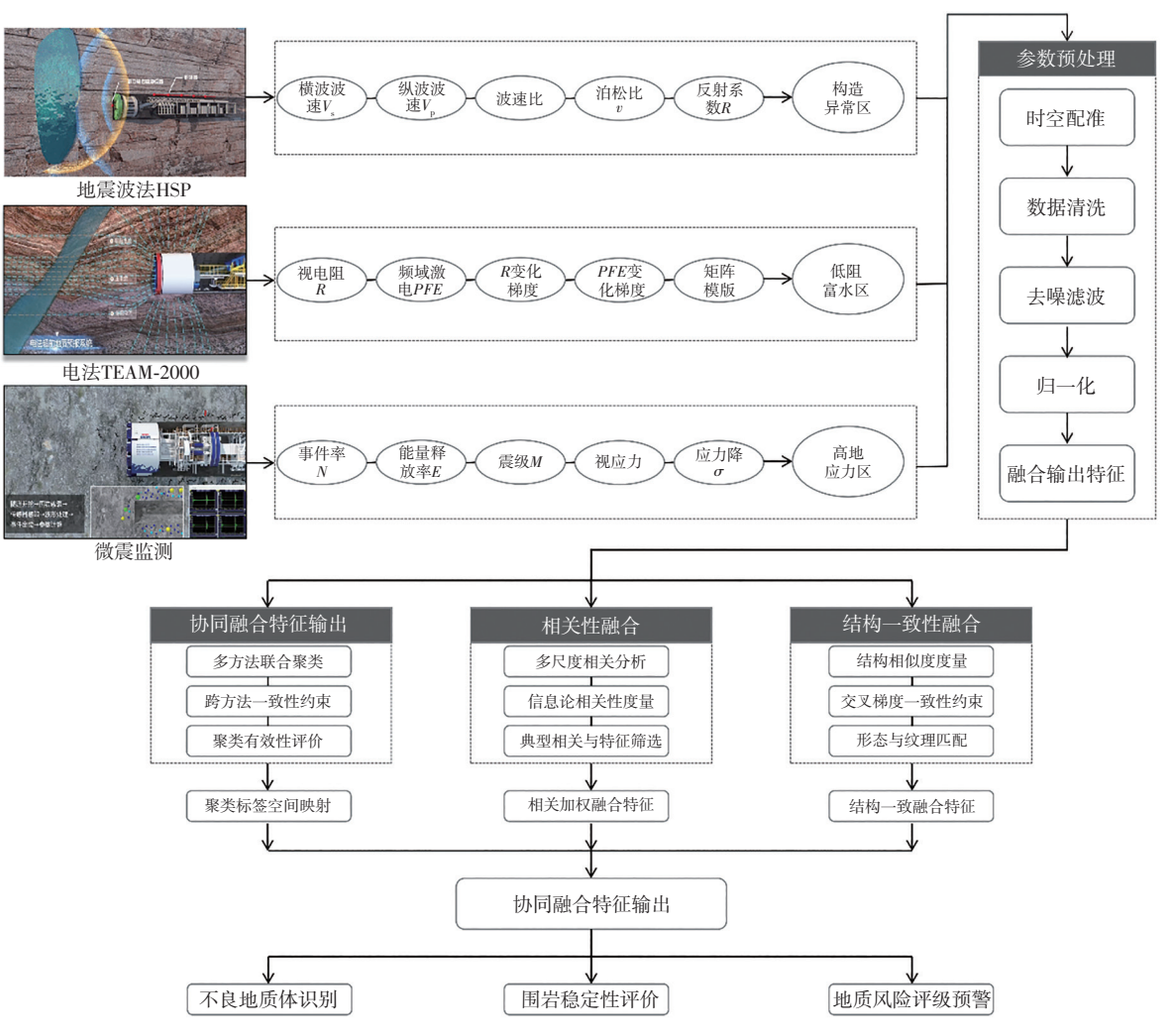


图3 多物探数据融合的超前地质探测技术

Fig. 3 Multi-source geophysical data fusion-based advanced geological detection technology

号，动态监测高地应力条件下围岩破裂活动。工程特征数据包括 TBM 实时掘进参数与皮带出渣渣片图像特征，基础数据为地勘资料、地震波、电性、微震等多源信息。物探数据融合从三个维度推进，协同融合通过联合聚类与一致性约束输出聚类标签空间映射；相关性融合经多尺度分析与信息论度量得到加权融合特征；结构一致性融合通过相似度度量与交叉梯度约束输出结构一致融合特征。最终输出不良地质识别、围岩评价与风险预警，融合后物探综合准确率提升至 85% 以上，多物探数据融合结果如图 4 所示。

为验证各物探方式输出结果的准确性并实现参数修正闭环，引入渣片监测系统作为验证与反馈手段。渣片监测系统连续采集出渣图像并计算得到出渣流量，以图像分割算法完成渣片粒径与块体形态特征提取，自动分类统计渣片形态与粒径分布。综合以上数据构建掘进参数、渣片特征参数与围岩等级耦合分析模型，通过渣片变化规律实时反演掌子面围岩破碎程度，形成“渣片采集 - 特征分析 - 围岩状态反演 - 灾害预警”闭环逻辑，融合掘进参数与渣片参数的围岩识别模型如图 5 所示。

在闭环修正方面采用综合解译方法，构建“前方预报 + 原位验证”双向耦合机制，以多源物探数据为核心输出掌子面前方围岩状态预报结果，以 TBM 掘进参数反演结果与渣片特征识别结果作为已掘段

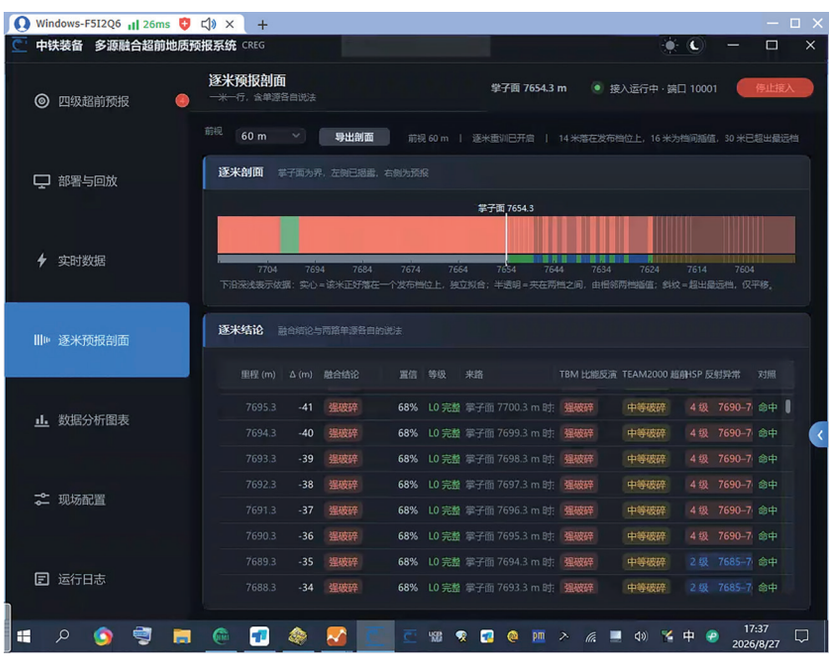


图 4　多物探数据融合结果

Fig. 4　Fusion results of multi-source geophysical data

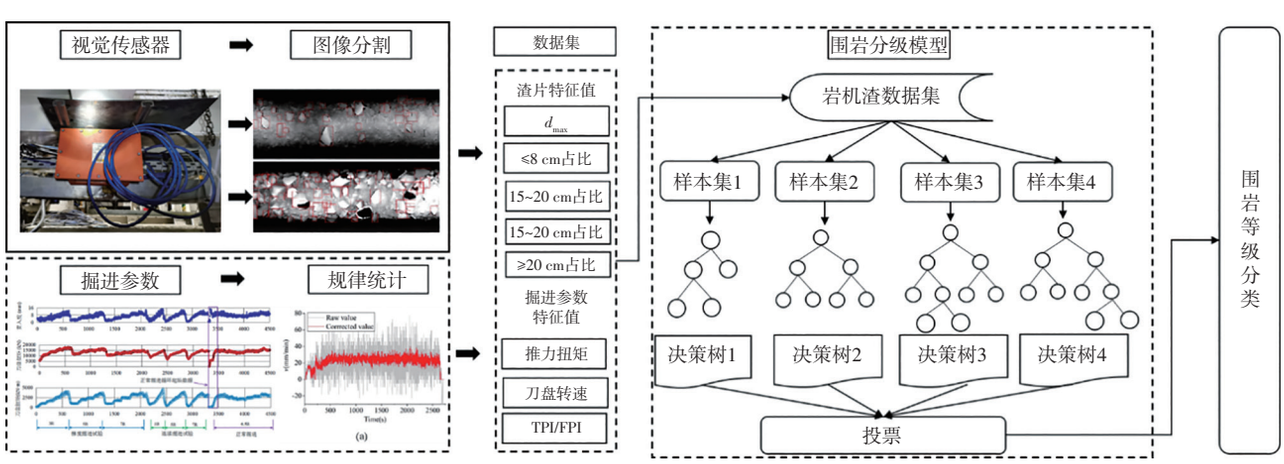


图 5　融合掘进参数与渣片参数的围岩识别模型

Fig. 5　Surrounding rock identification model fusing tunneling parameters and muck fragment parameters

真实围岩的验证依据，将验证结果反馈至超前预报模型，对物探解译参数进行优化并实施人工修正，有效规避单一物探方法的解译偏差与多解性问题，显著提升超前地质预报的准确性与可靠性。

综上，岩体多源感知整套技术集成震源激发、多场信号采集、智能融合反演、机器视觉验证及灾害分级预警功能，全部探测工序嵌入TBM掘进工序中，实现掘进与超前探测同步作业，全方位提升掌子面前方地层透明度。该体系解决了传统单一预报手段信号杂乱、解译误差大、易造成掘进工期延误、风险识别维度单一等问题[14]，经工程现场验证，预报准确率满足施工要求，可精准识别断层、裂隙破碎带等不良地质体，提前预警围岩坍塌、突泥涌水等灾害，为矿用TBM智能掘进提供可靠的地质数据支撑。

2.3 数据驱动智能决策

针对传统金属矿山TBM施工决策高度依赖现场操作人员经验[15]，在多变地层、复杂设备工况易发生主观判断偏差，进而诱发刀具异常磨损、掘进参数匹配不合理等问题[16-17]，本文提出数据驱动智能决策算法。

依托设备多参量智能传感与岩体多源融合感知技术构建数据驱动智能决策模型。通过异常清洗、多源时序对齐及工况关键特征提取，完成多源传感数据标准化整合；融合地质感知结果、渣片特征、刀具磨损检测值及设备运行参数等多维信息，借助机器学习算法实现设备传感参量与岩体感知信息的互补校验，为TBM数据驱动智能决策提供高质量数据输入支撑，提升复杂工况下决策研判精度。

智能决策总体架构如图6所示，原始设备传感参数与岩体多源感知数据经异常剔除、时序校准及数据整合处理，完成标准化预处理。预处理数据分为数值类时序数据与地质文本类数据两类，采用双分支并行处理架构，数值时序数据通过滑动窗口输入到卷积神经网络(1D-ResNet)提取窗口内局部特征，再经多层长短期记忆网络(LSTM)挖掘跨窗口时序耦合特征，输出时序特征张量；地质文本数据经中文

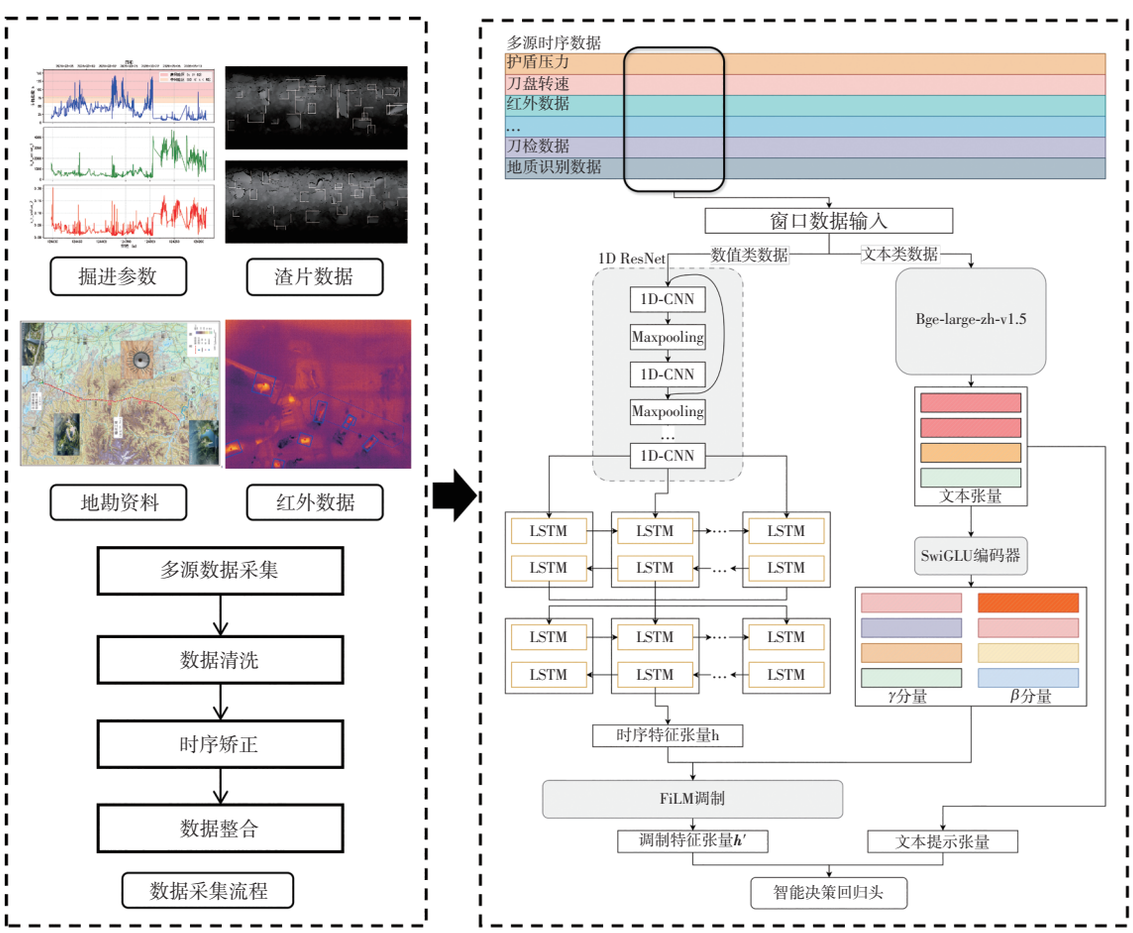


图6 智能决策总体架构

Fig. 6 Overall architecture of intelligent decision-making

专用语义嵌入模型(Bge-large-zh-v1.5)向量化后，由门控前馈模块编码器(SwiGLU)生成特征级线性调制(FiLM)所需的缩放与偏移分量。利用FiLM模块对时序特征张量实施条件调制，实现时序工况特征与地质文本信息跨模态融合，得到调制特征张量，经智能决策回归头处理后，最终输出TBM掘进控制参数。

为验证数据驱动智能决策方法的工程有效性，选取经验丰富司机施工的实际掘进区段作为对比基准，将智能决策输出的掘进控制参数与人工操作参数进行对比分析，参数决策人机对比如图7所示。司机操作参数与智能决策系统给出的推荐速度相比，平均绝对百分比误差(MAPE)为10.25%，刀盘转速的MAPE为6.62%，且智能决策系统输出参数在相邻掘进循环间的数值变化更为平滑，验证了数据驱动智能决策系统的有效性和先进性，为自主掘进控制阶段提供合理可靠的目标参数。

2.4　模糊PID闭环自主控制

自主掘进控制是金属矿山TBM智能掘进体系的执行终端，是实现井下少人化、无人化掘进的核心落脚点。本文以智能决策前端输出的最优掘进控制参数为输入，以主机振动及渣片特征作为反馈信号，构建一体化闭环控制系统，并配套掘进效果百分制量化评价模块，实现掘进参数自主调节、工况实时纠偏及施工效果动态评估，基于智能决策的控制技术如图8所示。

系统融合模糊PID控制与自适应线性耦合协同控制算法，形成“目标下发-参数调节-反馈修正-迭代

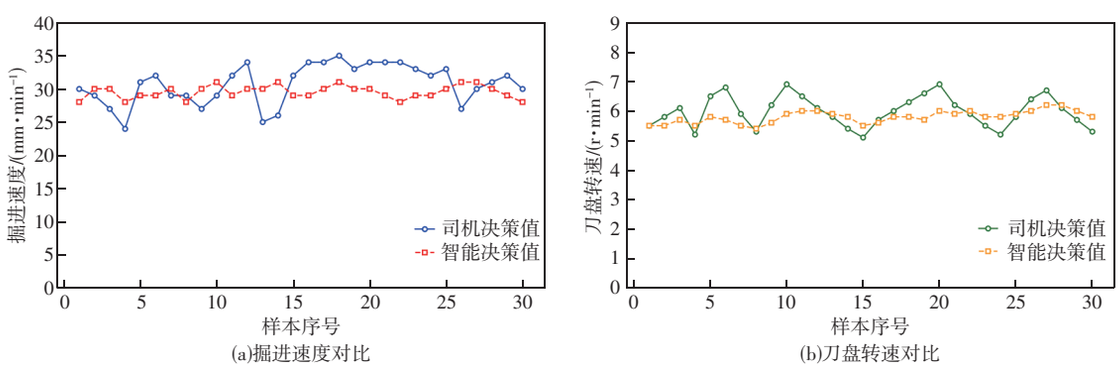


图7　参数决策人机对比

Fig. 7　Human-machine comparison results of parameter decision-making

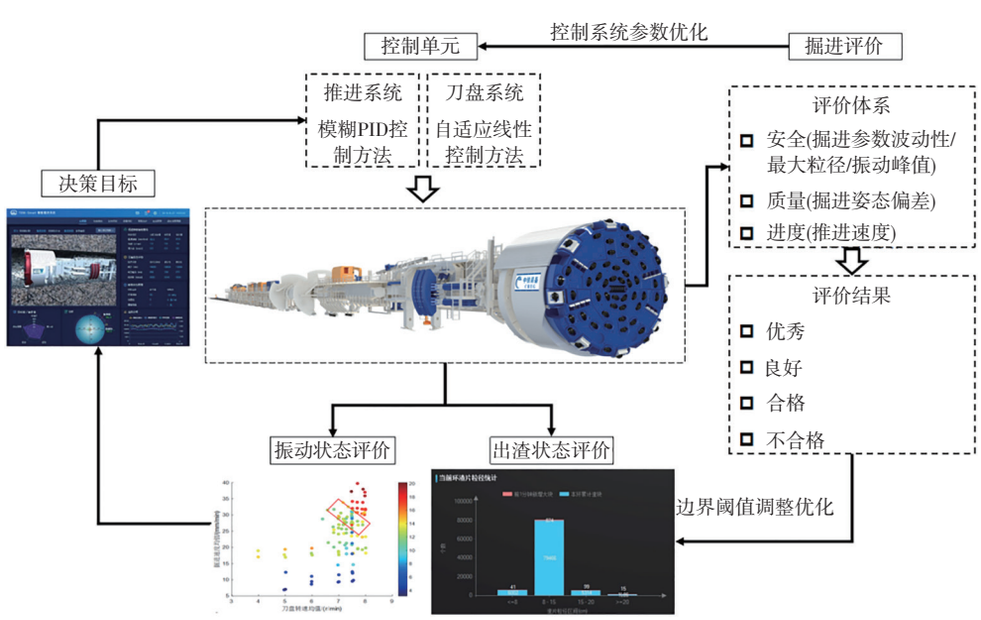


图8　基于智能决策的控制技术

Fig. 8　Control technology based on intelligent decision-making

运算”的完整闭环。自主掘进开始时，系统实时比对设备实测工况与决策输出的目标值，基于模糊PID算法抑制振动幅值波动，使掘进参数快速逼近最优设定值。为适配围岩多变带来的反馈信号波动，基于“振动-渣片”双反馈信号偏差划分四类典型掘进工况：正常掘进(两类偏差均在阈值范围内)、负载突增(振动幅值骤升并伴随渣片粒径减小)、围岩变好(振动幅值下降并伴随渣片粒径增大)及异常振动(冲击峰值超标而渣片特征无明显变化)。针对不同工况，系统调用差异化的调控策略：正常掘进时执行精细微调；负载突增时优先降低推进速度并微调刀盘转速，使振动幅值回归目标区间；围岩变好时在确保振动幅值平稳的前提下逐步提升推进速度，充分发挥设备性能；异常振动时立即执行降速保护并停机检查，确保安全掘进。

为量化自主控制实际效果，建立安全、质量、进度三维度综合加权评分体系，采用百分制动态量化评分，将掘进控制效果划分为优秀、良好、合格、不合格四个评价等级。评价指标包含振动均方幅值、振动峰值、渣片最大粒径、设备姿态偏差及实时掘进进尺；系统基于实时监测数据自动分项打分并计算综合得分；评价结果反向优化控制算法阈值与参数，实现闭环控制与效果评价双向迭代，持续提升TBM自主掘进稳定性与智能化水平。

为进一步验证自主控制系统的实际应用效果，在同一隧洞区段内，对比经验丰富司机人工操作与系统自主控制的掘进数据，从掘进安全、掘进质量、掘进进度三个维度开展分析。掘进安全维度以刀盘扭矩参数波动水平作为评价指标，量化评估掘进过程载荷稳定性；掘进质量维度以设备姿态偏差为评价依据，评判隧道掘进成型控制效果；掘进进度维度采用单环掘进耗时作为考核指标，衡量掘进作业效率。通过人工控制与自主控制多维度对比可知(图9)，自主控制模式下掘进载荷状态更为平稳，设备姿态控制稳定性更高，发散程度更小，自主控制单环掘进耗时与熟练司机人工操作的时间差值控制在5分钟以内，可满足现场施工的进度要求。通过多维度的自主控制与人工操作对标试验，充分验证了该自主掘进控制系统具备良好的有效性与工程可用性。

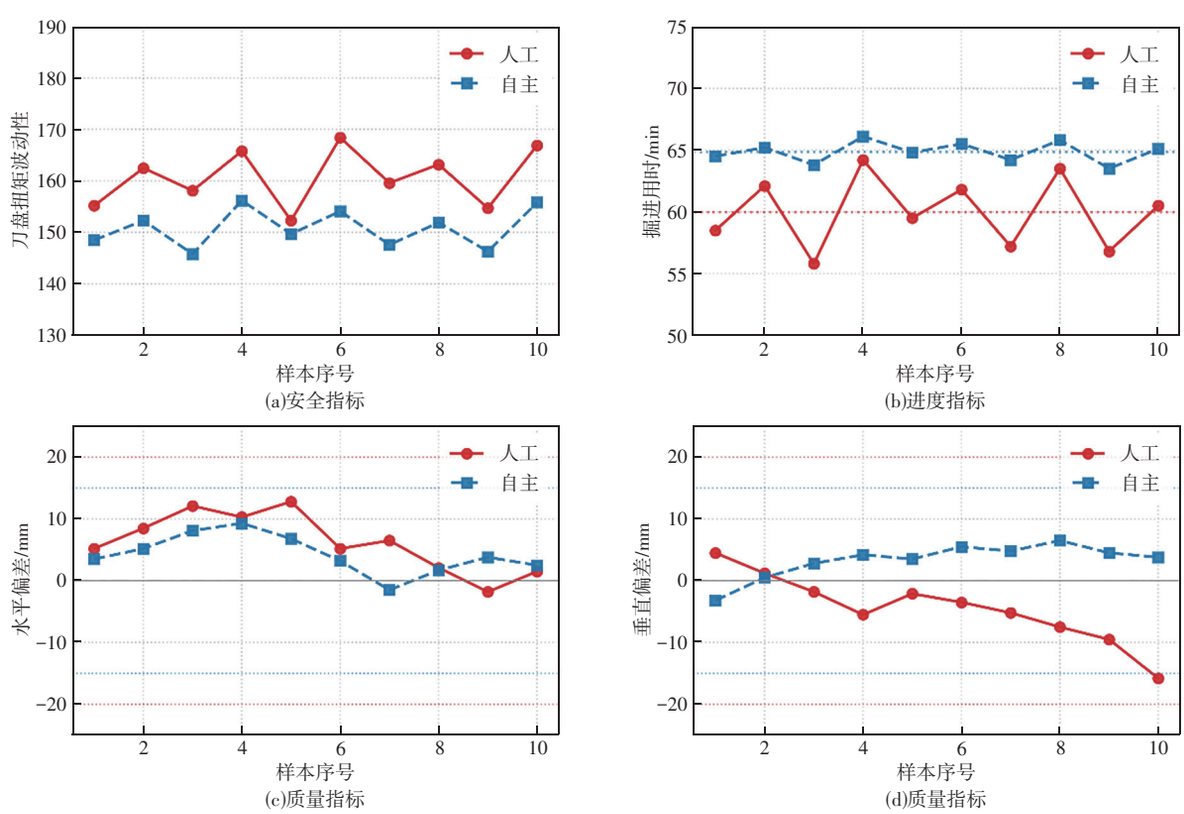


图9 人工控制与自主控制多维度对比结果

Fig. 9 Multi-dimensional comparison between manual control and autonomous control

2.5　云边协同一体化管控平台

云边协同一体化智能管控平台作为整套智能掘进体系的顶层载体，负责感知、决策、控制全流程的数据整合与全局协同优化，对各子系统传感数据、智能算法模型以及设备控制指令开展统一标准化集成，智能管控平台架构如图 10 所示。系统搭建覆盖数据采集、清洗、转换、融合、存储及共享全流程的多源异构数据治理体系，兼容各类设备与子系统通信协议，有效解决传统掘进数据碎片化、可信度低等问题，为智能研判与数字化管控筑牢统一数据底座；同时围绕掘进进度、安全生产、工程成本三大主线构建管理体系，量化各业务指标的耦合关联机制，为管理人员提供数据驱动的客观决策依据，有效弱化传统经验管理模式带来的主观偏差；依托穿透式组织架构、标准化业务流程及人员数字化能力建设，推动数字化管控深度融入施工全过程，形成“数字化技术＋现场管理”双闭环管控模式。

平台架构遵循低耦合、高扩展、易运维的设计原则，将各功能独立封装，采用标准化接口实现对接，构建起“数据采集 - 数据传输 - 数据处理 - 算力支撑 - 业务应用”的完整业务链路。平台向下统一汇聚井下全部感知终端数据，向上为三维可视化、远程调度、设备运维等业务模块提供标准化数据服务，搭建适配金属矿山 TBM 智能掘进的完整数字化底座。

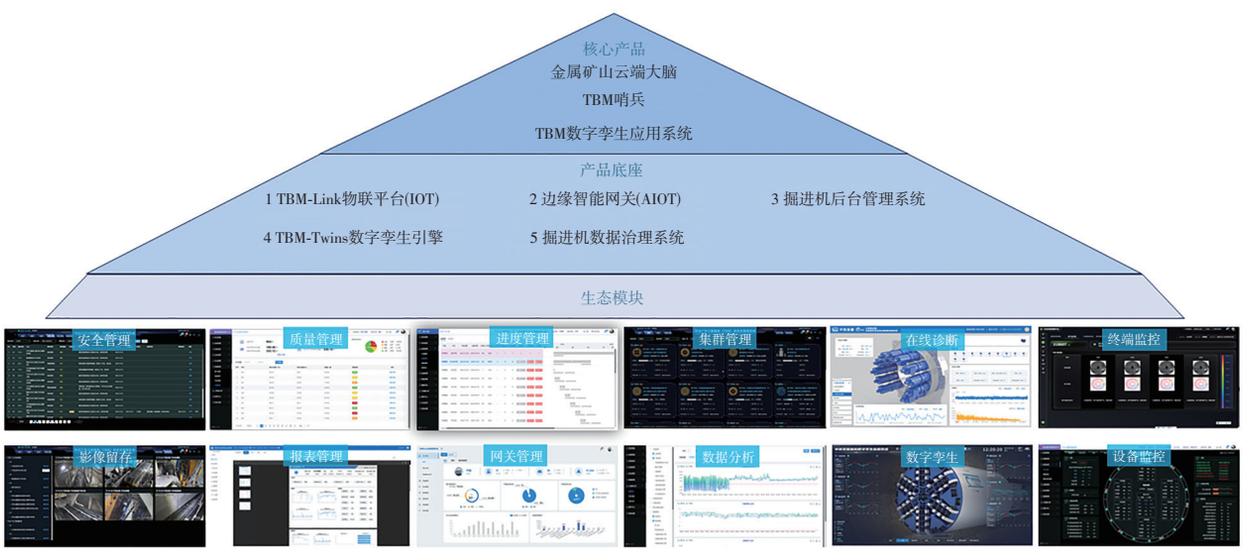


图 10　一体化智能管控平台架构

Fig. 10　Architecture of integrated intelligent management and control platform

3　总结与展望

本文面向深部金属矿山高地应力、围岩破碎等特殊掘进工况，提出五项关键技术研究方案，有效解决矿山 TBM 数据孤岛、掘进调控高度依赖人工经验、缺少专用数字化管控平台等行业突出问题。整套技术体系可实现地质、设备全要素全域感知，地质灾害与设备故障分级智能预警，掘进参数自适应优化、井下自主闭环调控，全方位提升深部金属矿山巷道掘进效率与井下安全防控能力。本文主要创新点如下：

1）构建适配深部金属矿山特殊工况的“感知 - 决策 - 控制 - 平台”四层一体化闭环智能掘进体系，打通地质感知、智能研判、自主调控、全域数字化管控全链路，突破现有大多数研究聚焦单一监测模块的碎片化局限；

2）提出多物探数据融合的超前地质探测技术，配套渣片监测系统验证体系，实现掘进与探测一体化作业，解决了单一物探手段存在的多解性、预报精度不足等问题；

3）建立以主机振动与渣片特征为反馈信号的模糊 PID 耦合自主掘进控制模型，配套多维度掘进效果动态评价体系，实现掘进参数自适应调节与掘进效果量化迭代优化；

4）研发金属矿山 TBM 专用云边协同一体化管控平台，构建矿山专属数据资产库，集成安全、进度、成本等全业务数字化管理，填补金属矿山 TBM 全生命周期管控平台的空白。

受客观条件制约,当前研究仍存在一定局限性,后续可重点围绕以下方向开展深化研究:1)迭代优化机器学习与时序预测模型,提升模型在极破碎围岩、强岩爆等极端地质条件下的预报预警能力,增强模型对多类型地层的泛化适配能力,加强TBM全生命周期预测性维护及故障自愈研判;2)研制轻量化、低成本感知硬件及边缘计算模块,降低中小型矿山智能化改造的投入成本;3)搭建井下多装备协同自主掘进体系,同步开展智能掘进相关技术标准研究,推动深部金属矿山TBM掘进从少人化向无人自主化方向发展,为智能矿山高质量建设提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] 刘泉声,潘玉丛,余宏淦,等. 深部金属矿山巷道TBM掘进技术应用现状及研究进展[J]. 有色金属(矿山部分),2024,76(6):25-41.
Liu Quansheng, Pan Yucong, Yu Honggan, et al. Application status and research progress of TBM tunnelling technology in deep metal mine roadways[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(6): 25-41.

[2] 崔广龙,吴立根. TBM在金属非金属地下矿山的应用前景分析[J]. 采矿技术,2023,23(5):33-36.
Cui Guanglong, Wu Ligen. Application prospect analysis of TBM in metal and nonmetal underground mines[J]. Mining Technology, 2023, 23(5): 33-36.

[3] 刘荣乐,樊忠华,张春虎,等. TBM施工技术在金属矿山长距离运输巷掘进的应用[J]. 现代矿业,2024,40(6):179-181,185.
Liu Rongle, Fan Zhonghua, Zhang Chunhu, et al. Application of TBM construction technology in excavation of long-distance transportation roadway in metal mines[J]. Modern Mining, 2024, 40(6): 179-181, 185.

[4] 黄建鑫. TBM在某金属矿山长距离井巷掘进中的应用[J]. 现代矿业,2023,39(7):205-209.
Huang Jianxin. Application of TBM in long-distance tunneling in a metal mine[J]. Modern Mining, 2023, 39(7): 205-209.

[5] 国家矿山安全监察局. 金属非金属矿山智能化建设指南(2025年版)[EB/OL]. (2026-01-04)[2026-06-26]. https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/tzgg/202601/W020260104754767878924.pdf.
National Mine Safety Administration. Guidelines for intelligent construction of metal and nonmetal mines (2025 Version)[EB/OL]. (2026-01-04)[2026-06-26]. https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/tzgg/202601/W020260104754767878924.pdf.

[6] 工业和信息化部,国家发展改革委,自然资源部. 有色金属行业智能矿山建设指南(试行)[EB/OL]. (2020-05-07)[2026-06-26]. http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057569/n3057572/c7900821/part/7900847.pdf.
Ministry of Industry and Information Technology, National Development and Reform Commission, Ministry of Natural Resources. Guidelines for the construction of intelligent mines in non-ferrous metal industry (Trial)[EB/OL]. (2020-05-07)[2026-06-26]. http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057569/n3057572/c7900821/part/7900847.pdf.

[7] 朱爱山,周慧鹏,李勇. TBM法用于金属矿山深部开拓巷道的风险分析及应对措施[J]. 钻探工程,2021,48(7):110-114.
Zhu Aishan, Zhou Huipeng, Li Yong. Risks and solutions of the TBM method used in deep roadway boring for metal mines[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 110-114.

[8] 陈炳瑞,王旭,姜桂鹏,等. 深部金属矿TBM开拓岩爆微震智能监测与预警[J]. 东北大学学报(自然科学版),2025,46(7):148-162.
Chen Bingrui, Wang Xu, Jiang Guipeng, et al. Intelligent microseismic monitoring and early warning for rock burst during TBM excavation of deep metal mines[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2025, 46(7): 148-162.

[9] 孙怀凤,李貅,李术才,等. 考虑关断时间的回线源激发TEM三维时域有限差分正演[J]. 地球物理学报,2013,56(3):1049-1064.
Sun Huaifeng, Li Xiu, Li Shucai, et al. Three-dimensional FDTD modeling of TEM excited by a loop source considering ramp time[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(3): 1049-1064.

[10] 李术才,刘斌,孙怀凤,等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090-1113.
Li Shucai, Liu Bin, Sun Huaifeng, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1090-1113.

[11] 王其丁,李文翰,刘文韬,等. TBM隧道环境下的多源瞬变电磁成像方法研究[J]. 地球物理学进展,2024,39(6):2463-2470.
Wang Qiding, Li Wenhan, Liu Wentao, et al. Research on multi-source transient electromagnetic imaging method in TBM tunnel environment[J]. Progress in Geophysics, 2024, 39(6): 2463-2470.

[12] 袁亮,张平松. TBM施工岩巷掘探一体化技术研究进展与思考[J]. 煤田地质与勘探,2023,51(1):21-32.
Yuan Liang, Zhang Pingsong. Research progress and thinking on integrated tunneling and detection technology of rock roadway with TBM[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 21-32.

[13] 刘泉声,黄兴,潘玉丛,等. TBM在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展[J]. 煤炭科学技术,2023,51(1):242-259.
Liu Quansheng, Huang Xing, Pan Yucong, et al. Application

and research progress of TBM tunneling in coal mine roadway[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 242-259.

[14] 沈远伟，朱昊，曹梦炫，等. 基于智能集成算法的煤矿TBM掘进参数多目标优化方法研究[J]. 煤炭工程，2025，57(9)：129-137.
Shen Yuanwei, Zhu Hao, Cao Mengxuan, et al. Research on multi-objective optimization method of TBM tunneling parameters based on intelligent integration algorithm[J]. Coal Engineering, 2025, 57(9): 129-137.

[15] 朱同功，王满，陈召，等. 深部复杂条件下巷道智能化掘进技术体系研究与创新实践[J]. 中国煤炭，2026，52(4)：29-37.
Zhu Tonggong, Wang Man, Chen Zhao, et al. Research and innovative practice of intelligent tunneling technology system for tunnels under deep and complex conditions[J]. China Coal, 2026, 52(4): 29-37.

[16] 王飞，龚国芳，段理文，等. 基于XGBoost的隧道掘进机操作参数智能决策系统设计[J]. 浙江大学学报(工学版)，2020，54(4)：633-641.
Wang Fei, Gong Guofang, Duan Liwen, et al. XGBoost based intelligent determination system design of tunnel boring machine operation parameters[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(4): 633-641.

[17] 荆留杰. TBM掘进性能预测及智能辅助控制研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2022：91-93.
Jing Liujie. Research on TBM tunneling performance prediction and intelligent auxiliary control[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022: 91-93.