



隧道及地下工程科技创新讲坛

(第六期)

隧道智能建造体系 科普手册

主办单位:

中国土木工程学会隧道及地下工程分会

中铁隧道局集团有限公司

承办单位:

中铁隧道勘察设计研究院有限公司

广东省隧道结构智能监控与维护企业重点实验室

《隧道建设（中英文）》编辑部

2023年11月

目 录

第一章 隧道智能建造简介	1
1.1 智能建造概念	1
1.2 智能建造发展历程	2
1.3 隧道工程智能建造技术	3
第二章 钻爆法隧道智能建造技术	4
2.1 隧道围岩智能判识技术	4
2.2 基于机械化施工的隧道围岩稳定性及控制技术	5
2.3 钻爆法隧道施工数字化仿真技术	6
2.4 隧道智能装药技术	7
2.5 钻爆法隧道智能建造管理协同管理技术	8
第三章 TBM 隧道智能建造技术	10
3.1 TBM 隧道智能掘进技术	10
3.2 TBM 隧道智能支护技术	10
3.2.1 TBM 支护智能决策系统	10
3.2.2 TBM 智能喷浆系统	11
3.3 TBM 隧道智能拼装技术	12
3.3.1 仰拱块铺设自动测量系统	12
3.3.2 敞开式 TBM 净空快速测量系统	12
3.4 TBM 隧道智能运输技术	13
3.5 TBM 隧道智能保障技术	14
3.5.1 TBM 隧道智能通风技术	14
3.5.2 TBM 智能在线监测系统	14
3.5.3 TBM 滚刀异常损坏预警系统	15

第一章 隧道智能建造简介

1.1 智能建造概念

钻爆法隧道工程智能建造及数据协同管理是指利用先进的技术和系统，实现隧道施工过程的自动化、智能化和数据化管理。主要包括智能建造相关技术和数据协同管理相关技术。钻爆法隧道智能建造相关技术包括但不限于智能控制与施工技术、智能养护与检测技术、智能调度与管控技术等。



图 1.1-1 三维信息智能提取

智能感知层集中汇集各类智能装备、硬件传感器、触发装置、定位装置、采集分析芯片和扫描设备所感知或采集的装备自身、施工环境、工程地质条件、围岩条件、结构状态等信息资源，并传输至数据服务平台。数据服务平台作为数据资源的基础平台，汇集全国铁路隧道建设、运维期的各类数据信息，并将勘察设计数据、施工数据、监理数据、物资数据、质量评价和管理档案分类存储，供智能决策分析。智能决策是隧道智能化建造的核心与难点，涵盖统计学、工程统筹、人工智能等学科交叉耦合，灵活采用机器学习、深度学习、交互分析，在大数据汇集的基础上，实现智能进阶，为智能管控服务。智能管控是隧道智能化建造的最终目标与体现，涵盖动态化三维设计（BIM+GIS）、智能化施工和管理 3 个方面，实现三维图纸管理、动态施工管理、集成信息管理、监控量测管理、风险评估、可视化交底与虚拟建造，将一般意义上的隧道建设提升为智能化的建造。

隧道智能化建造的特征是实现机械化、信息化深度融合，实施基础是实现机械水平、数据资源、人员素质和管理模式的有效提升，研发路径遵循循序渐进、突破重点、技术集成到人机结合的发展规律，目标定位为无人化、可视化、智慧化。

1.2 智能建造发展历程

我国是隧道建设大国，在过去的几十年间，随着隧道和地下工程建设的迅速发展，我国已成为世界上隧道数量最多、隧道地质条件及结构形式最复杂、隧道技术发展速度最快的国家。我国不仅建成了大量的隧道工程，而且在隧道修建技术上取得了长足进步，制约隧道建设和运营的许多技术瓶颈及设备取得了重大突破。特别是随着盾构/TBM 工法的大量运用，使得隧道建设达到新高度。

(1) 钻爆法隧道智能建造

钻爆法隧道自从 17 世纪问世以来，已有近 400 年的发展历史，依据主要作业手段进行划分，可以分为“人工+简易工具”、“人工+小型机械”和“大型机械装备”3 个阶段。随着 21 世纪初第 4 次工业革命强势来袭，大数据、云计算、物联网、5G、人工智能等新一代通讯和信息技术得到蓬勃发展，并积极向各行业、各领域渗透，钻爆法隧道开始进入“智能装备”阶段。近年来，在郑万、成兰、贵广等铁路工程建设中，钻爆法隧道大型机械化建造技术得到了长足发展和广泛应用。以郑万高铁为代表，系统研究了隧道机械化大断面法的工法工艺、支护设计方法、大型机械配套方案、数字化管理，并进一步探索了智能建造的体系架构、智能设计、智能施工、智能装备、智能协同管理等技术。

(2) TBM 隧道智能建造

盾构始于英国，发展于欧美日本等国，现今跨越发展于大陆，已有近 200 年历史。如今盾构机的发展呈现出一种多样化的态势，盾构机的出现对于隧道行业的发展起到了至关重要的作用。从最初的手掘式，到气压机械式、土压泥水闭胸式，到现在的满足大直径、高智能和多样化的准智能掘进机器，盾构机的不断发展也体现了时代对于隧道行业的要求。盾构掘进技术的发展主要分为 4 个阶段：

第一阶段，以布鲁涅尔（Brunel）盾构为代表的手掘式盾构开始在欧美兴起，英国利用它建成了第一条盾构隧道—伦敦泰晤士河盾构隧道；

第二阶段，以机械式和气压式为代表的盾构机开始得到大规模应用，世界各个国家的盾构技术都开始得到不同程度的发展，盾构法也成为了修建地下铁道和各种大型管道的首选；

第三阶段，以泥水压和土压式为代表的一众闭胸式新型盾构被广泛应用，较传统的盾构机在地表平衡和施工效率方面有了巨大突破，适用于各种复杂环境的盾构机

型不断出现；

第四阶段，更多大直径、高智能的异形盾构得到了飞速发展，以中国为代表的发展中国家更是兴起了盾构机发展的热潮，逐渐打破了欧美盾构占主导地位的局面。

1.3 隧道工程智能建造技术

钻爆法隧道工程智能建造及数据协同管理是指利用先进的技术和系统，实现隧道工程智能建造技术主要包括智能化勘察设计技术、成套成系列的铁路隧道快速施工工法和智能化建造标准化协同管理技术。

铁路隧道智能化勘察设计技术体系。主要包括基于 GIS 的工程勘察涵盖空天地一体化隧道地质勘察预报、隧址范围内地形地貌全要素信息获取与快速处理、隧道工程地质和环境综合勘察与基于隧址范围内地质信息的综合勘察判释、隧道超前地质预报多源信息融合与智能快速解译、不良地质体的亚米级成像技术、围岩信息的“快速采集—实时传输—远程评价”智能化分级和隧道施工中围岩质量渐进性评价技术。

成套成系列的铁路隧道快速施工工法。主要包括主动变形支护体系的关键设计参数及变形控制值、变形主动支护体系中各支护构件的安全性及可靠性评价方法、隧道主动支护体系机械化施工适配工法工艺、围岩监控量测与超前地质预报、洞内循环作业优化与有害气体检测、火工品管理与人员定位、钻爆法施工监控的自适应控制、智能工装施工状态实时感知与动态调控以及预制装配式衬砌结构施工监控与自适应控制技术、隧道钻孔、开挖、支护、衬砌等主要工序施工装备智能化技术、基于隧道智能施工装备的施工质量控制技术和隧道施工质量智能监测技术及其体系、隧道全断面高能地质条件下隧道智能化施工技术、隧道施工质量评价方法信息化和隧道监测自动化技术。

铁路隧道智能化建造标准化协同管理体系。主要包括“地-隧-机-信-人”智能建造协同管控与可视化远程控制系统、施工期风险源识别处置与管控的施工风险评价及管控系统、三维隧道及围岩环境信息化模型展示及设计参数动态优化的智能化动态设计辅助系统以及超前支护、钻爆开挖、初期支护、二次衬砌、防排水体系、沟槽施作等工序的信息存储查询、三维可视化、设计施工监测数据实时反馈的智能化动态施工管控系统。此外，还包括参建各方信息汇集分析与处置的智能建造信息化协同管控及远程控制系统和全过程数字化管理的铁路隧道智能化建造标准化协同管理体系技术。

第二章 钻爆法隧道智能建造技术

2.1 隧道围岩智能判识技术

在隧道施工现场采用超前地质预报物探、钻探、地质雷达、地质素描以及凿岩台车钻进等手段获取的岩层地质信息的基础上，综合利用计算机视觉检测、三维重建技术以及多目标优化理论等先进技术，通过施工隧道掌子面图像的获取以及图像矫正拼接等计算机图像处理技术，制作隧道围岩全景展开图。利用计算机视觉以及机器学习算法，获取掌子面及洞壁节理信息，实现围岩的智能化分级。利用三维重建技术，建立融合隧道几何空间信息和地质信息的隧道三维实景模型。通过地质模型及围岩信息，动态优化初始设计方案，在隧道设计时同时考虑程序行性能与设计成本等多方面因素，开展多目标优化理论的隧道综合优化设计，节省工程成本控制投资，提高隧道工程投资效益，提升集团与股份公司核心竞争力。

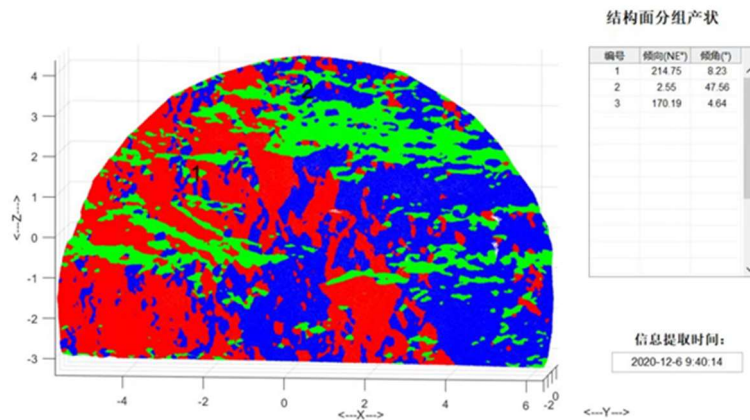


图 2.1-1 三维信息智能提取

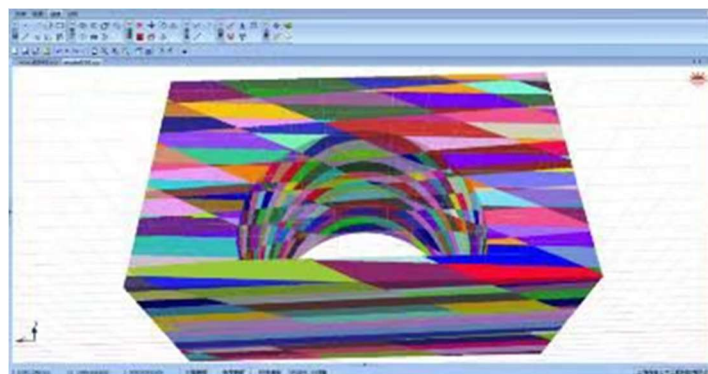


图 2.1-2 三维非连续建模

2.2 基于机械化施工的隧道围岩稳定性及控制技术

通过设定不同的隧道开挖/支护参数工况，采用三维数值模拟计算得到机械化开挖隧道的围岩稳定性影响规律，并结合现场实测数据修正计算结果，为确定合理的隧道开挖/支护参数提供理论支撑。对于复杂不良地质条件的机械化开挖隧道，通过三维数值模拟计算，得到各种不同复杂地质条件下围岩稳定性加固参数对变形受力的影响规律，并结合现场实测数据修正计算结果，为不良地质隧道围岩稳定性控制的参数优化提供理论支撑。)在多个工程中进行隧道机械化现场施工数据的积累和分析，结合理论计算结果，建立的机械化开挖参数标准体系及开发的现场实用程序，可为现场施工人员快速安全确定施工开挖参数、优化支护加固参数提供技术支持，为机械化快速安全施工提供保障。

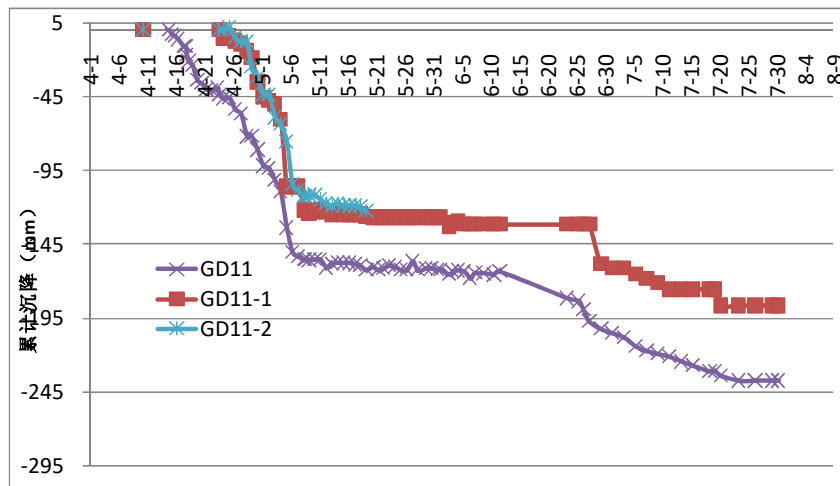


图 2.2-1 软岩隧道拱顶沉降安全监测曲线

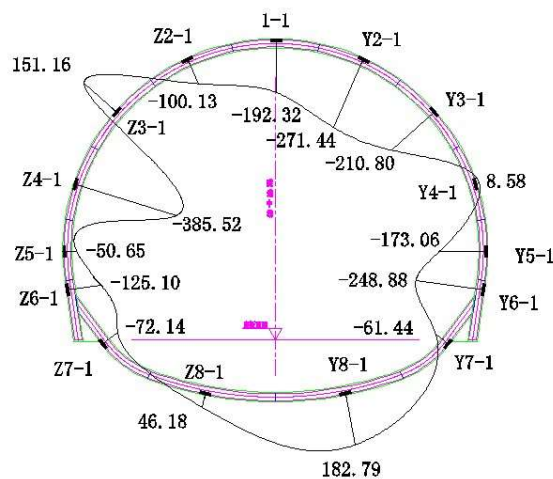


图 2.2-2 型钢拱架应力测试结果

2.3 钻爆法隧道施工数字化仿真技术

基于钻爆法隧道施工智能化指标体系和总体架构设计方案，提出钻爆法隧道施工全要素信息模型参数化快速建模技术、钻爆法隧道施工全工序仿真评价体系，实现钻爆法隧道施工全要素模型参数化、快速调配适应性信息模型；实现钻爆法隧道全工序虚拟仿真建造，通过虚拟数字化手段动态调整、优化工序，提升施工管理效率、质量。通过课题的研究，基于钻爆法隧道施工智能化指标体系和总体架构设计方案，提出钻爆隧道爆破数字化设计体系，搭建爆破数字化设计系统，实现爆破设计数字化及效果模拟数字化；提出虚拟多目成像及三维重构爆破掌子面验证体系，通过虚拟影像重构模型与 BIM 精确模型对比验证爆破效果，提升爆破参数优化，提高施工效率。搭建隧道施工仿真模拟平台，通过集成融合多源异构施工要素模型，对隧道施工全工序进行虚拟预建造分析，数字化展示现场各工序工艺、设备空间关系，对各试验方案进行量化分析与比对、动态优化，实现隧道工程不同工法、设备工装开挖进尺、超前支护、初期支护及二次衬砌等工序作业时间的数字化综合分析，提升施工组织设计质量与现场管理水平，并形成经验数据库，为隧道数字化施工提供研究试验平台。

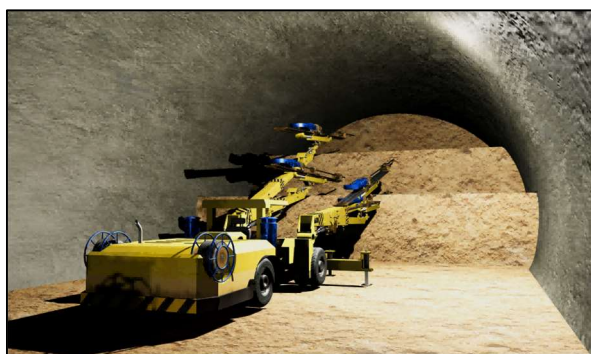


图 2.3-1 凿岩台车作业施工仿真



图 2.3-2 虚拟多目系统数字影像采集与掌子面三维重构

2.4 隧道智能装药技术

基于 KJ Method-AHP 理论方法，构建隧道智能装药机器人指标体系。基于机器视觉原理，开发隧道智能装药机器人自动寻孔技术和自动装填技术。充分应用机器视觉技术，实现隧道装药机器人掌子面炮孔自动识别及快速定位，开发炮孔检测装置，实现对炮孔角度的快速检测及炮孔位置和深度的检测。研制集炮孔钻孔质量检测、炮孔清理、成品乳化炸药卷自动装填功能于一体的隧道智能装药机器人，形成更实用、更智能、更经济的铁路隧道智能装药技术。

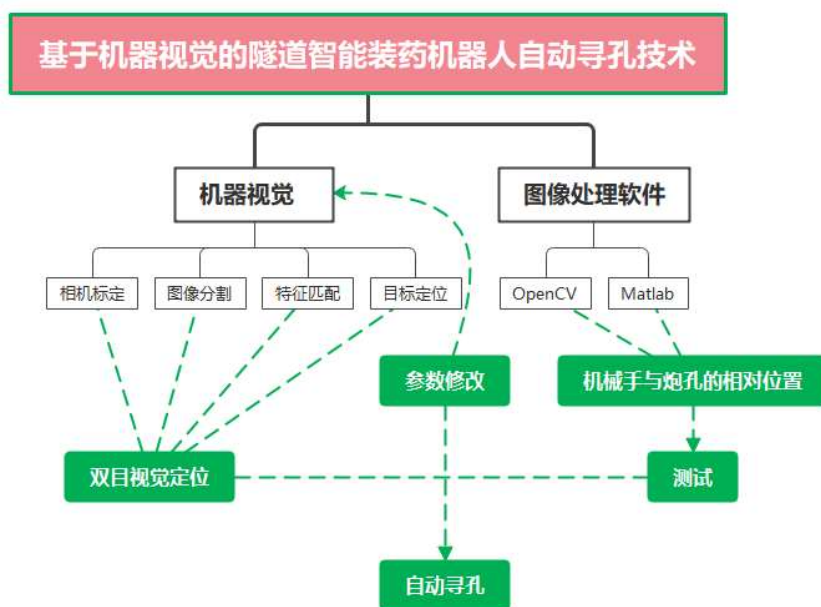


图 2.4-1 基于机器视觉的隧道智能装药机器人自动寻孔技术



图 2.4-2 隧道智能装药机器人

2.5 钻爆法隧道智能建造管理协同管理技术

基于钻爆法隧道施工智能化指标体系和总体架构设计方案，制定钻爆法隧道智能建造标准，提出智能化建造实现的途径及方法，提出隧道施工智能化与工业智能化区别与对比分析因素，为实现隧道全生命周期智能化建造提供基础与前提；达到隧道内装备与装备、装备与环境、装备与围岩的互联互通互动，为隧道智能建造提供保障。

在隧道智能装备体系中，充分应用智能控制技术，实现隧道智能装备施工环境自感知、目标导向定位自执行、施工状态与反馈自学习、施工效果自评估、施工组织自决策、施工过程自我管理，形成更实用、更智能、更经济、全系列的铁路隧道智能装备及施工技术，打造铁路隧道钻爆施工智能化技术示范基地。

结合隧道施工作业线，机械化配套设备和工装，将隧道智能装备在施工过程中监测和采集的施工状态、围岩参数、环境感知等数据进行快速处理、共享、存储，具备在线联网功能，实现隧道施工工序及装备数据信息的交互应用，智能化施工装备涵盖超前作业、开挖、初期支护及二次衬砌等施工工序，实现设备群之间数据采集、分析、处理、共享，提高信息资源利用率，信息化、智能化指导装备施工，提高施工进度及效率。

建立钻爆法隧道工程大数据数智化协同管理平台，结合国内现状以及调研情况，参考已有智能建造方案，组织专业骨干人员对平台建设大框架进行探讨研究，形成初步的平台建设框架；研发与试点阶段-单工序智能，研究设计并制造自动化、数字化与智能化的施工装备，在样机通过出厂检测后，在试点项目进行应用，积累施工数据，为后续智能化的建设开展奠定基础；研发与试点阶段-全工序智能，通过全工序智能，使人、设备、平台之间通过通信设备实现数据信息的互联互通，实现项目进度、质量、安全等多目标的协同管控。



图 2.5-1 钻爆法隧道智能建造管理协同管理平台分析



图 2.5-2 钻爆法隧道智能建造管理协同管理平台工序管理

第三章 TBM 隧道智能建造技术

3.1 TBM 隧道智能掘进技术

传统 TBM 隧道掘进依赖人工经验，工程装备与地质环境适配难，掘进机效能发挥不充分。依托全国重点实验室盾构/TBM 工程大数据平台，攻克了边缘离线控制反馈与 TBM 终端关键系统模糊控制技术，建立了掘进主动参数预测模型；应用图像 AI 识别技术，研发了拱架-撑靴自主识别与精准定位的智能换步技术；采用专家知识与历史数据融合驱动模式，建立了 TBM 姿态控制、被动参数预警、卡机等异常事件预报与熔断控制模型，构建了 TBM 智能掘进大脑核心。该系统首次在高原铁路应用，开启了“一键启动智能巡航”TBM 控制新模式。实现了 TBM 掘进由“人工经验决策”到“大数据科学决策”的智能控制转型。

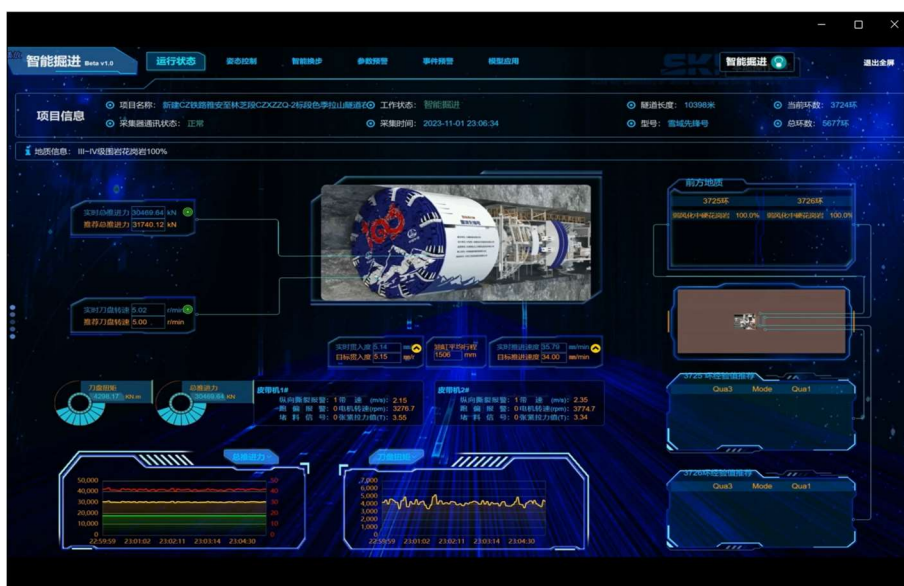


图 3.1-1 TBM 隧道智能掘进系统

3.2 TBM 隧道智能支护技术

3.2.1 TBM 支护智能决策系统

通过护盾尾部围岩状况分析确定支护参数的传统方法，容易造成地质风险不能提前预判、支护参数选取滞后等问题。TBM 支护智能决策系统，由护盾围岩间隙感知、围岩可视化、水气冲洗等模块组成。通过可视化实时监测护盾内围岩破碎范围，通过测量护盾与围岩间隙，监测预警设备停机状态下围岩破碎和收敛的发展趋势，结合超前预报以及掘进参数的关联分析，实现隧道支护参数的提前决策及地质风险的及时预警。

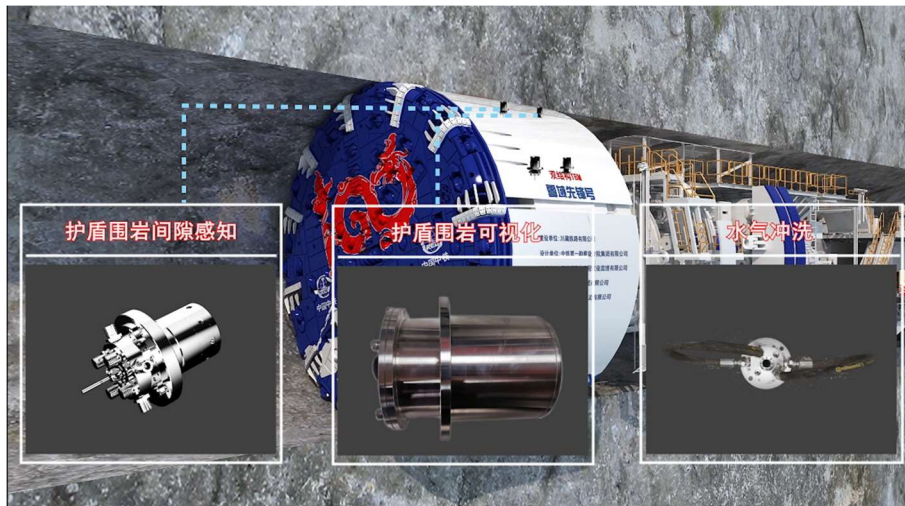


图 3.2-1 TBM 支护智能决策系统

3.2.2 TBM 智能喷浆系统

为解决喷浆回弹率高、质量控制难、劳动强度大等问题，研发了 TBM 智能喷浆系统。系统由视觉识别系统、数据处理系统、控制系统和执行系统四大功能模块组成。采用雷达获取洞壁点云数据，生成隧道轮廓三维图像并进行特征识别；通过超欠挖分析及路径规划控制喷浆系统，完成智能喷浆作业。先后攻克了复杂多变大空间隧道扫描建模、复杂特征点云处理、多目标路径规划等关键技术。该系统已在高原铁路色季拉山隧道、四川四姑娘山隧道等项目成功应用，可实现喷浆无人化，可有效降低喷浆回弹率，提升平整度。



图 3.2-2 TBM 智能喷浆系统

3.3 TBM 隧道智能拼装技术

3.3.1 仰拱块铺设自动测量系统

针对隧底仰拱块铺设人工测量效率低、精度不稳定的问题，研发了自动测量系统，系统由马达全站仪、后视棱镜、仰拱块激光靶，以及数据传输和控制显示单元组成。铺设时系统控制全站仪锁定并测量激光靶棱镜，激光靶内置倾斜仪测量仰拱块横滚角，系统将仰拱块姿态偏差实时推送到操作平板，操作人员据此调整仰拱块的水平度、方向偏差与高程偏差。系统实时动态提供仰拱块偏差信息，数据刷新率高于每秒 1 次，精度达到 ± 5 毫米，现场每班减少 1 名测量人员。

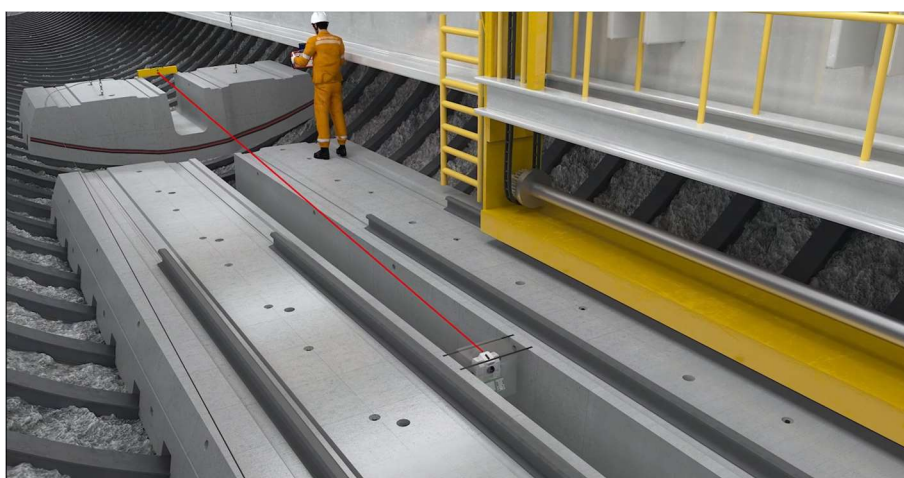


图 3.3-1 仰拱块铺设自动测量系统

3.3.2 敞开式 TBM 净空快速测量系统

为及时发现拱架侵限问题，研发了敞开式 TBM 净空快速测量系统，该系统由导轨、测距挡板、断面仪以及数据传输和控制显示单元组成。系统实时读取 TBM 位姿信息，得出断面仪中心坐标。断面仪测得拱架的斜距与竖直角，从而实时计算测点的里程、位置与超欠挖值。与常规方法相比减少了坐标传递，对中整平、后视定向等系列复杂操作，提高工作效率 3 倍以上，精度提升 50%，现场每班减少 1 名测量人员。

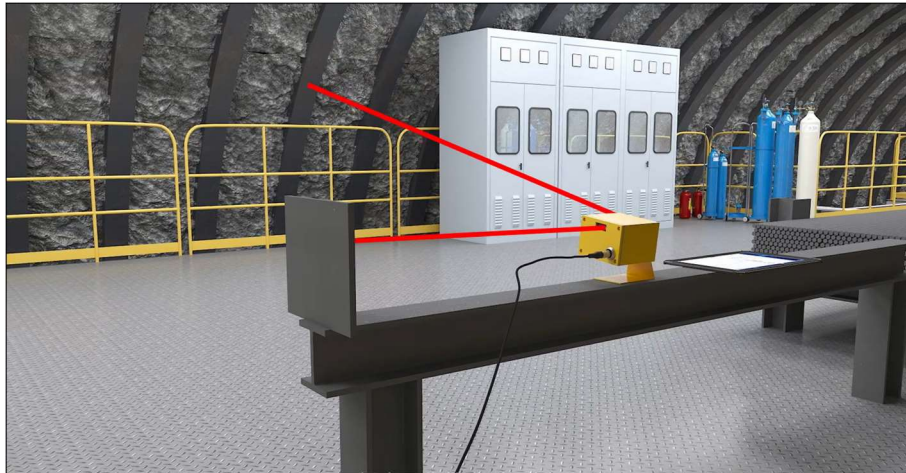


图 3.3-2 敞开式 TBM 净空快速测量系统

3.4 TBM 隧道智能运输技术

隧道长距离有轨运输存在信息不畅通、调度管理差、资源保障难、行车风险高等问题，因此，以提高运输安全和效率为基础，以优化运输组织及方案为手段、以创建运输信息化与智能化为目标，构建 TBM 隧道长距离有轨智能运输新技术。TBM 隧道有轨智能运输系统主要由信号传输系统、环境感知与定位系统、故障报警系统、智能调度管理系统组成。该系统是全国首套集隧道施工运管一体化的智能运输调度系统，基于物联网技术，实现人机实时定位、音像实时传输、道岔自动开闭、障碍自动避让、运输智能规划以及一体化调度指挥，使得列车编组运行信息更加透明化，完全避免了运输事故发生，大大提高了运输组织效率。每列编组减少调车员 1 人，TBM 运输综合效率提升 20%以上，每月节约运输成本约 60 万元，市场前景应用广阔，具有较强的推广性与实用性。

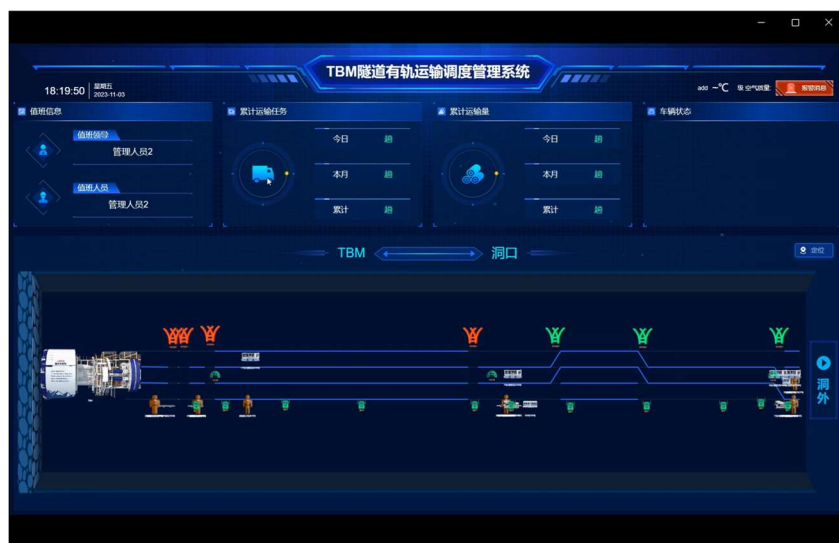


图 3.4-1 TBM 隧道智能运输系统

3.5 TBM 隧道智能保障技术

3.5.1 TBM 隧道智能通风技术

巷道式智能通风系统是在巷道式通风系统的基础上搭载智能通风系统，主要由进新风巷道，排污风巷道、轴流风机、射流风机、通风管路、隧道环境识别模块、控制主机、送风执行器管理模块、智能控制系统组成。隧道环境识别模块将采集到的环境参数信息实时传输到云服务系统，控制主机实时分析环境参数与运行数据。结合预设控制量，计算出送风目标量。以该目标量为基准，再计算出风机运行频率。送风执行器管理模块实时驱动变频器对应频率运行，最终实现通风系统智能化控制。同时智能系统具备预警功能，工作区域温度、氧含量、粉尘、一氧化碳等环境参数超标，系统将发出声光报警并短信通知相关人员。

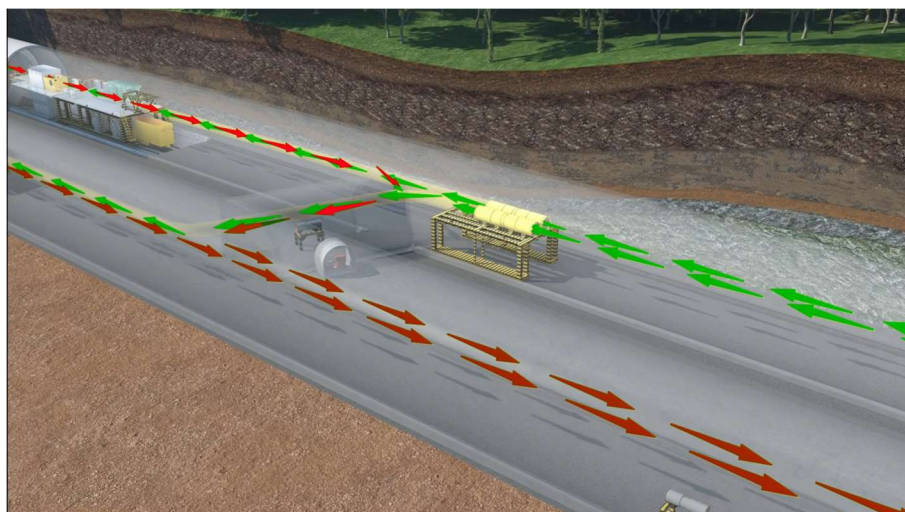


图 3.5-1 TBM 隧道智能通风系统

3.5.2 TBM 智能在线监测系统

油液劣化和振动异常极大影响了 TBM 设备的正常运行，甚至威胁设备寿命。TBM 智能在线监测系统主要由油液在线监测和振动在线监测系统模块组成。油液在线监测系统实时获取油液温度、粘度等关键参数（温度、密度、粘度、介电常数、污染度、颗粒度），动态掌握齿轮油和液压油的工作状态。振动在线监测系统可实时监测主轴承、电机、减速机的振动速度、加速度、位移以及轴承的 HDM、HDC 等状态数据。根据监测点振动波形、趋势分析判断轴承损伤、润滑情况；利用智能逻辑算法，实现了设备工况数据采集、逻辑数据筛选、动态标准设定等功能，同时，基于物联网实现了 TBM 设备运维智能保障。



图 3.5-2TBM 智能在线监测系统

3.5.3 TBM 滚刀异常损坏预警系统

复杂多变地质环境下，可能出现滚刀异常损坏、检查与更换不及时容易造成刀具批量损毁。研发了 TBM 滚刀异常损坏监测预警系统，该系统由滚刀温度监测、水气自动冲洗、补光控制等单元组成。基于先进的视频图像处理技术，建立了滚刀刀号动态识别模型，通过单把滚刀温度趋势变化、相邻半径滚刀温度类比、区域滚刀温度对比分析，及时识别滚刀异常。实现了滚刀温度异常预警、刀盘喷水流量智能调节、刀具检查与更换辅助决策，停机检查刀盘时间评价降低 30%，刀具消耗量降低约 20%，降低了恶劣环境下换刀的劳动强度和职业健康风险，提升了掘进效率。

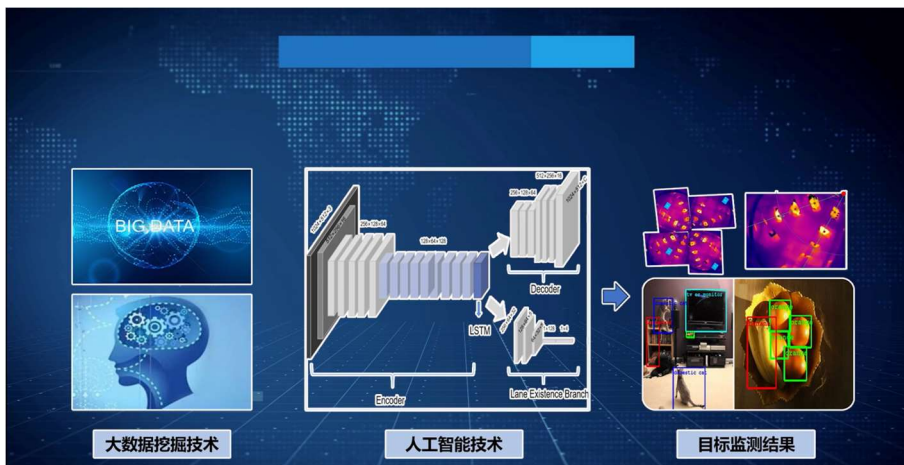


图 3.5-3 TBM 滚刀异常损坏预警系统