

# 智能化技术在钻爆法施工机械化中的应用探索

刘书良

中铁隧道股份有限公司

**摘 要：**钻爆法是目前隧道及地下工程建设的最常用施工方法之一，在很大程度上决定着隧道工程施工的速度和安全性，影响着整个工程项目的建设效益。因此有必要深入研究智能化在钻爆法施工机械化全过程中怎样实现系统的融合及推广应用，并着重论述智能化技术如何提升钻孔、装药、爆破等工序的施工设备感知能力、决策能力和执行能力，构造出“人—机—环”智能协同作业体系，并且就钻孔及布孔智能、爆破智能及爆破优化、施工全过程智能管理等关键技术点展开论述；同时分析现有机械化配套设备能以较低成本完成机械换人，进而达到机械化、智能化的工作目标。

**关键词：**智能化技术；钻爆法；施工；机械化

## 引言

钻爆法由于其对复杂地质条件的适应性强、施工成本低等特点，是现阶段隧道及地下工程施工在交通、水利和矿山等领域常用的施工方式之一，传统的钻爆法施工主要依靠人的经验及现场单机设备完成，在工作面狭小恶劣的条件下，不可避免地出现人员伤亡的风险，其次工作面各参数较难控制且变化较多，以及钻爆施工的产量不高、能耗较大等问题也使钻爆法传统的施工模式面临一定的困境。随着新一轮科技革命发展浪潮的兴起，以物联网、大数据、人工智能等为代表的技术已经进入到工程建设领域，传统的钻爆法施工也开始出现变革的步伐。把智能化技术应用到机械化流水化作业的钻爆法施工中，不仅仅是将人替换成机器，而是把以往没有意识的机器转变成有“眼睛”的、“耳朵”的，甚至是“大脑”的机器，让整个钻爆法施工过程由经验性驱动转变为基于大数据、模型作为指导的精准性驱动，从而达到机器降本提效，根据实际场景自我调节并规避风险的目的，最终打破目前瓶颈性制约，形成智能化协同联动和整体方案规划的产业生态链。本文从智能化技术应用钻爆法施工机械化技术路径方面出发，阐述我国现有设备的智能化升级途径，以供推动我国地下工程建设技术走向更高水平的自动化、智能化发展提供参考依据。

### 1 钻爆法施工机械化现状与智能化转型的必然性

目前钻爆法施工已经实现了一些关键技术的机械化配套，包括凿岩台车、装药机具、挖掘装载机和自卸汽车等组成的机械化作业线，极大地降低了人工强度，加快了施工速度。但是现有机械化工序还有明显

的缺陷：①设备“自动化”，而不是“智能化”。多数设备还需要人工驾驶，比如：台车钻孔的精准度、装药结构的合理性以及爆破参数的选择等都与操作人员有着较大的关系。因此造成了施工过程中对于施工质量管控存在一定的波动性，对于超欠挖也很难控制好。②信息“孤岛化”。因为每一道工序或每台设备都是独立运行的，并且孤立于其他工序和设备之外，在管理决策中无法得到本工序或者本设备的实时信息，也无法对多道工序和多台设备进行综合性的协调控制。③安全风险较高，掌子面、爆破等一些危险性大的区域目前仍然需要人靠近工作面进行操作，对围岩变化的响应会存在一定的滞后性。

因此，“机械化”的钻爆法施工向“智能化”的钻爆法施工转型升级具有内在必然性。智能化的根本是用技术将一部分人的专业知识、经验和智慧赋予机械设备。目的是建立一个基于智能感知的智能化作业环境，以达到自动掌握场站态势、正确判断施工工况、形成最佳工艺工序的目的；是满足当下的工程生产需要，也是为未来的深层、长大、地质更复杂的工程做足准备；把地质信息、设备状态、工艺参数等数据化、信息化后交给智能化设备自动分析、对比、决策，并实现精准施工、隐患提前预警、设备动态调度，最终实现安全生产、工程质量优质达标、工程建设进度和成本高效管控、工程建设低碳发展等目的。

### 2 智能化技术在钻爆法关键工序中的应用探索

智能化技术的应用需贯穿钻爆法“钻爆设计—钻孔—装药—爆破—通风散烟—出渣—支护”的全循环链条，其核心在于实现“感知—分析—决策—执行”的闭环控制。

作者简介：刘书良（1993—），男，本科，工程师，研究方向为工程项目机械设备管理，钻爆法施工机械化配套应用。

### 2.1 智能钻孔与布孔技术

钻孔作为钻爆循环的第一步,钻孔精度将直接影响到爆破质量。智能钻孔依靠的是高精度的定位与测量技术,通过激光扫描、摄影测量或者探地雷达等方式进行采集得到掌子面的三维点云数据,并将其导入到凿岩台车中形成三维可视化界面,然后通过导入的隧道设计模型(BIM),基于隧道设计模型与掌子面的实时对比,并分析轮廓边界和上一循环残存断面,结合预置好的智能布孔算法,得出适用于当前开挖断面的最优布孔方案(具体包含孔位、孔深、角度等)信息;由凿岩台车根据该信息下达指令后完成由工业机器人组成的钻孔模块的动作(如运动控制、自动定位、定向),并在钻孔过程中实时监控钻杆的推进速度、旋转扭矩、冲击压力等参数值,通过所测得的数据间接实现对前方岩层变化情况的认识,进而通过智能算法动态调节爆破参数,极大程度上提高钻孔的精度及一致性,完全摒弃了以往使用人工放样,根据个人经验手动微调的传统操作手法。

### 2.2 智能爆破设计与控制技术

爆破是钻爆法的灵魂,智能化意在从“技艺”走向“科学”,以准确的地质和环境数据为基础开展智能钻孔,再由集成了地质信息和孔网参数的人工智能算法调用或者训练爆破效果预测模型,模拟不同装药结构、起爆网络、延时方案的计算过程,达到“爆破块度分布理想、轮廓成型效果好、振动危害小”等多目标优化,以自动输出最佳爆破方案。针对装药,在装药方面开发应用智能装药设备,如采用具有计量、记录功能的机械化装药台车;或者研究使用机器人进行敏感炸药的精确定位填装,保证按照设计方案装药,并实时记录所有炮孔的装药量,并形成完整可追溯的数据链。在起爆上,目前国产最新型号高精度电子雷管已经实现了智能化爆破所需的智能化装备条件,其具有的毫秒级编程延时的功能使复杂起爆时序的设计成为可能,可以有效地控制炸药爆炸能量释放的时序和方向,以最大程度实现碎岩的合理性和控制好爆破形成的震动和飞石。

### 2.3 智能出渣与协同作业技术

爆破后的石碴能否及时全部清理转运掉将直接影响隧道施工一个循环作业时间,这是制约隧道施工进度的一个重要因素。传统的出渣工作是全凭目测进行判断,在出渣过程中不仅需要大量的人力体力投入,而且经常出现扒不净、路径重复、设备空载等不经济现象,如何提高出渣速度和质量、减轻人员劳动强度成为了亟待解决的问题。智能化出渣系统就是通过给

机械设备安装“眼睛”和“大脑”,使原来由“人控”变为“自控”、“智控”。具体而言,通过在扒渣机上集成三维激光扫描仪或深度视觉相机,系统能够实时获取爆堆的点云数据,并运用智能识别算法精准重构渣堆的三维形态,自动计算其方量。基于此模型,路径规划算法可动态计算出覆盖全面、避让障碍、移动距离最短的最优扒取顺序与机械臂运动轨迹,引导设备进行半自动或全自动的扒渣作业,显著提升单机作业效率与清底质量。

然而,单台设备的智能化只是一小步,如果想要出渣流程得到更好的优化就必须建立车机场一体化的智能物流体系。将每台扒渣机和自卸汽车安装上重量传感器、高精度定位模块和无线通信终端后,再由调度中心管理平台掌握全局,最大限度地让各台设备协调起来共同完成工作,将原有的设备分散运渣作业变成了成建制设备群“交通智慧大脑”的设备流连续运输智能化物流形式,同时由人工式分拣变为利用智能化手段自动分拣调配的省力型出渣系统作业方式。

### 2.4 智能支护与安全监控技术

支护紧跟着出渣,封围围岩,稳定洞室,保证施工安全是支护的关键环节,而传统支护靠的是测量人员放样、人眼判断岩况,会有时滞反应,参数凭经验估计,容易出现质量不稳定的情况。为了解决这个问题引入智能化的目的就是要达到支护“及时感知、精准施策、主动安全”的要求。

这个技术体系是基于开挖断面快反数字化建立起来的,在用台车或者无人机携带高精度的三维激光扫描仪,在出渣几分钟后就可以将出渣后的开挖面全部扫描过来得到毫米级精度的实景三维模型。再把这个实景三维模型与隧道设计BIM模型放到同一个平台里面进行自动的比对分析,它可以秒级快速实现全断面超挖、欠挖工程量的精准统计;并且通过点云数据跟图像识别的算法,自主来确定有无危石和松动块体的存在,并且还可以识别它的大小和形态,为支护提供具体精确的目标点。

再者,智能化支护基于动态监测数据和静态扫描数据,同时对围岩内部埋入或布置的光纤传感器、微震监测阵列等系统设备所采集到的动态监测数据和静态扫描数据进行全方位的综合采集,并结合计算机图像信息处理技术和智能分析平台,全面完成对数据的融合处理和模型解算,以实现对围岩稳定性的动态监测及发展趋势的动态预测,在检测数据达到预警阈值后,可以及时地通过系统警报的方式,预警分级并提出针对性支护方法,从源头上消除危险源。

### 3 施工全流程的智能集成管控平台

上述各工序的智能化并非孤立存在,其效能的充分发挥依赖于一个统一的神经中枢—施工全流程智能集成管控平台。该平台基于工业互联网架构,是智能化技术应用的最高层次体现。

平台核心功能在于采集数据、数据互联互通以及深度数据挖掘,部署在隧道内的各类地质、环境、视频等类型的传感器、设备控制器(PLC)、定位系统等设备,平台采集到地质勘探数据、设备运行数据、工艺执行数据、环境监测数据(比如有毒气体、粉尘)及视频监控数据,结合施工数字孪生体构建出动态映像。基于大数据分析和 AI 算法功能的实现:一是对施工过程进行实时可视化、透明化管理,管理者可以做到足不出户了解全貌;二是基于某一些特定参数进行智能化分析和预警,针对例如基于凿岩参数分析确定前方不良地质等,根据振动监测结果来调整下次爆破的设计等等;三是把施工进度、成本、质量关联起来并进行联动分析和动态优化,为施工项目的决策提供有效的数据支撑;四是对设备进行提前预判性维护,将设备运行状态的信息实时地传送到后台后对设备未来可能会出现的问题进行提前预判,然后提前制定相应的检修方案进行检测,以此来保证施工的顺利开展。

### 4 现有机械化配套设备智能化改造的可行性探索

完全替代现有设备,大量购进新的智能化设备对于大多数施工企业来说是不可行的,而对现有的机械化配套设备进行改装、嫁接式的智能化改造,则是一种可以先行先试的切实有效的途径。改造的要义是“赋能”,而非“替代”。

一是从可实施性角度,通过对感知层(为现有的凿岩台车增加 GNSS/全站仪等高精度定位模块、IMU 姿态传感器以及三维扫描仪;对挖装、运载车辆增加重量传感器、位置传感器(UWB/RFID)、摄像头等),让设备具有自主定位、岩面识读等功能;通过对控制层(为设备安装/升级 PLC/IPC,植入“大脑”),使设备可以接受来自上位机的控制指令;在数据交互

层(安装工业网关或加装 5G 通信模块),使设备接入现场的无线网络进行数据上传及指令接收;在应用层(利用项目级智能管控平台),通过平台上传的数据对设备进行处理分析后给改造后的设备下发优化过的作业指令。

这种改造方式的优点是投资少、见效快、灵活多变,可针对企业自身情况或资金情况,从单机或者单工序做起,在进行了少量设备智能化改造并取得一定的成效之后,再进行其他设备和其他工序的改造;可以通过“加传感、增控制、连网络、接平台”的方式将大量的传统存量设备转变为智能设备,逐步进入到智能施工的过程当中去,这样可以有效地降低企业智能建造的门槛。

### 5 结论

智能化技术与钻爆法施工机械化相融合,实现了隧道和地下工程从传统的劳动密集型到数据驱动型的转型,在此基础上开展了基于智能化技术在钻爆开挖关键工序的应用逻辑分析,并提出施工全流程智能集成管控平台是解决施工整体系统级优化的必要手段。此外,智能化技术渗透至单机运行上,实现了精准化高效率的同时,在整个作业过程中以数据为驱动打破工序壁垒,实现在线可感知、可分析、可优化、可控,从而系统地解决钻爆法施工经验不足、易存在质量缺陷、安全隐患较多、管理方式相对粗犷等问题。

#### 参考文献:

- [1] 张全成,杨建洲.平洞钻爆法开挖支护全工序机械化智能化施工技术[J].云南水力发电,2024,40(08):111-118.
- [2] 张桂生,王伟,方恽涛.AI 技术赋能钻爆法隧道新质生产力[J].绿色建造与智能建筑,2025,(01):73-77.
- [3] 时苒.智能化检测技术在市政园林工程施工质量管理中的作用[J].产品可靠性报告,2025,(11):37-38.
- [4] 王卫东.建筑施工现场智能化安全监控识别系统改进设计与应用[J].粘接,2025,52(11):272-275.