

面向工程勘察的钻探作业自动化与智能化技术发展综述

郭 旺 武维民 韩 刚

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 洛阳 471000

摘 要: 工程勘察钻探作业是获取地下岩土体结构、物理力学参数及工程地质条件的基础手段,在水利、交通、能源和城市基础设施建设中具有重要作用。随着工程建设规模扩大、施工环境日益复杂及安全生产要求不断提高,传统以人工操作为主的钻探作业模式在效率、安全性和质量稳定性方面已难以满足现代工程勘察需求。近年来,自动控制、传感器、信息通信及人工智能等技术的快速发展,为工程勘察钻探作业向自动化与智能化转型提供了重要支撑。本文系统梳理了工程勘察钻探作业自动化与智能化技术的发展历程与研究进展,重点综述了自动化装备、施工参数控制、信息感知与智能决策等关键技术的研究成果与工程应用情况,在此基础上分析了当前面临的主要问题与挑战,并对未来发展趋势进行了展望,以期对相关技术与工程实践提供参考。

关键词: 工程勘察; 钻探作业; 自动化钻探; 智能化钻探; 工程装备

1 引言

工程勘察钻探作业是工程建设中认识地下空间结构和工程地质条件的核心技术手段,其成果直接关系到工程设计方案的合理性与工程实施的安全性。我国工程勘察钻探技术伴随重大工程建设需求不断发展,逐步形成了以岩心钻探、水文钻探和定向钻探等为代表的技术体系。王达等在回顾我国地质钻探工程70年发展历程时指出,我国钻探技术经历了由简单机械钻探向成套装备化、再向自动化和信息化演进的过程,其中工程勘察需求是推动技术进步的重要动力之一^[1]。

长期以来,工程勘察钻探作业以人工操作为主,施工过程中需频繁完成钻具连接、提下钻和参数调整等高强度作业,劳动强度大且安全风险较高。张金昌等指出,人工主导的作业模式已成为制约钻探效率提升和安全保障的重要瓶颈^[2]。随着工程建设规模和复杂程度不断提高,传统作业模式在深孔、复杂地层和特殊环境条件下的问题日益凸显。

进入21世纪以来,自动控制、机电一体化和信息技术在工业领域的成熟应用,为工程勘察钻探技术升级提供了重要支撑。黄洪波等认为,钻探装备向自动化、智能化和绿色化方向发展是行业的必然趋势^[3]。在此背景下,钻探作业自动化与智能化关键技术逐渐成为工程勘察领域的重要研究方向^[4-5],相关研究也从装备和技术体系层面进行了阶段性总结^[6-7]。然而,面向工程勘察应用场景,系统梳理钻探作业自动化与智能化技术的发展脉络、关键技术及未来趋势仍有必要进一步深化。基于此,本文从工程勘察实际需求出发,对钻探作业自动化与智能化技术进行系统综述。

2 工程勘察钻探作业的自动化、智能化需求

工程勘察钻探作业具有施工点位分散、作业环境复杂和地层条件多样等特点,钻探对象涵盖黏性土、砂土、卵砾石层及不同风化程度的岩体,不同地层对钻进工艺和施工参数的要求差异显著。冉恒谦等指出,复杂多变的地层条件是工程勘察钻探技术研究的重要难点之一^[8]。

在工程实践中,钻探作业需频繁进行钻杆连接、拆卸及提下钻操作,是劳动强度和安全风险最为集中的环节。刘跃进等认为,人工完成钻具操作效率较低,在高空和狭小空间作业条件下易引发安全事故^[9]。同时,工程勘察对钻孔垂直度、取样完整性和施工过程可控性的要求不断提高,对作业稳定性和标准化提出了更高要求。

此外,传统钻探施工中钻压、转速和泵量等关键参数主要依赖人工经验调节,难以实现精细化控制。李志强等指出,人为调节方式难以适应复杂地层变化,易导致钻进效率下降甚至引发孔内事故^[10]。因此,通过自动化与智能化技术实现施工参数的实时监测与动态调控,已成为提升工程勘察钻探质量与安全水平的重要途径。总体而言,钻探作业自动化与智能化是降低劳动强度、提高施工安全性和保障勘察成果质量的必然发展方向,并为后续相关技术研究奠定了应用基础。

3 钻探作业自动化技术研究进展

钻探作业自动化是工程勘察钻探技术由机械化向智能化过渡的重要阶段,其核心目标在于通过机械化装置与自动控制系统,替代或减少人工参与,实现关键作业环节的自动完成。张林霞等在分析我国地质找矿钻探装备发展趋势时指出,自动化是提升钻探作业安全性和效率的基础条件^[11]。工程勘察钻探作业自动化主要通过

在钻具操作、施工参数控制和设备运行保障等关键环节引入自动化装置与控制技术,实现对人工操作的有效替代,并提高作业过程的规范化和稳定性。

3.1 自动提下钻与钻具操作技术

在工程勘察钻探作业中,钻具连接、拆卸以及提下钻操作频繁,是劳动强度和安全风险最为集中的作业环节之一。自动提下钻与钻具操作技术通过设置自动夹持、对中和连接机构,实现钻杆的自动抓取、对接和下放,从而减少人工直接参与高风险操作。

张金昌等在自动化智能化地质岩芯钻探装备研发过程中,系统开展了孔口自动化系统的研究与工程应用,结果表明自动夹持与自动对中装置能够显著降低人工劳动强度,并有效减少钻具操作过程中的安全隐患^[7]。在工程勘察领域,受施工场地条件、钻机体量及运输要求等因素限制,自动提下钻技术多以半自动化形式应用,但在提高作业规范性和安全性方面已显示出明显优势。

3.2 钻探施工参数自动控制技术

钻探施工参数控制是钻探作业自动化的重要组成部分,其目标在于通过自动控制手段维持钻进过程的稳定性。工程勘察钻探中,钻压、转速和泵量等关键参数对钻进效率和孔内安全具有直接影响,传统依赖人工经验调节的方式难以适应复杂地层条件的快速变化。

杨传书等在综述自动化钻井关键技术时指出,自动送钻与施工参数控制技术是实现稳定钻进和减少人为干预的重要支撑^[12]。在工程勘察应用中,通过传感器实时采集钻进参数,并结合控制系统进行反馈调节,可在一定程度上避免钻压突变、钻速失稳等问题。现阶段,该类技术多采用基于经验规则或简单闭环控制的方法,其控制精度和对复杂工况的适应能力仍有待进一步提升。

3.3 设备运行保障与自动化支撑技术

除直接参与钻进作业的操作与控制技术外,设备运行保障也是工程勘察钻探自动化体系的重要组成部分。随着钻探装备功率和复杂程度的提升,设备运行的稳定性和安全性对施工连续性和工程质量提出了更高要求。

在工程实践中,变频驱动技术被广泛用于钻机动力系统,实现转速和输出功率的平稳调节;同时,通过运行状态监测系统对关键部件工况进行实时监控,可及时发现异常状态并触发故障报警与保护机制,从而降低设备故障风险。相关研究表明,运行保障类自动化技术在提升钻探装备可靠性和延长设备使用寿命方面具有重要作用,也是工程勘察钻探自动化系统不可或缺的技术支撑。

4 钻探作业智能化技术发展现状

随着自动化装备和控制系统在工程勘察钻探作业中

的逐步应用,单纯依赖机械执行和规则控制已难以满足复杂地层条件和精细化勘察需求。相比以动作替代和流程固化为特征的自动化技术,智能化钻探更强调对钻探过程状态的全面感知、多源信息的综合分析以及施工行为的自主决策与优化。

从工程勘察应用角度看,自动化与智能化钻探在技术定位、控制对象和数据利用方式等方面存在显著差异。智能化钻探是在自动化基础上引入信息感知、数据分析与智能决策机制,实现对钻探系统运行状态的综合调控。由此,钻探作业智能化逐渐成为工程勘察领域的重要发展方向。相关研究普遍认为,其核心在于构建“感知—决策—执行”的闭环控制体系,以提升系统对复杂工况的适应能力和决策水平^[13]。

4.1 多源信息感知与数据获取

钻探作业智能化的前提是对钻进过程状态的全面、可靠感知。与自动化阶段以单一参数监测为主不同,智能化钻探更加注重多源信息的协同获取与综合表征。多源信息感知和钻探过程状态识别是智能化钻探的重要技术基础。

刘选朝、张绍槐在智能钻柱研究中提出,通过在钻柱内部集成传感器、数据采集与传输模块,可实现井下钻压、扭矩、振动和温度等关键参数的实时获取与上传,为钻探过程状态感知提供了重要技术手段。在工程勘察钻探中,该类技术有助于弥补传统地面监测信息不足的问题,提高对孔内工况变化的感知能力。

此外,随着传感器技术和通信技术的发展,地面设备运行状态、钻探参数以及环境信息的同步采集逐渐成为可能。多源信息的融合获取为后续智能分析和决策提供了数据基础,也为钻探过程异常识别和风险预警创造了条件。

4.2 智能分析与决策技术

在多源数据获取能力不断增强的基础上,如何对钻探数据进行有效分析并支持施工决策,成为钻探作业智能化研究的核心问题之一。与自动化阶段以规则控制和简单闭环调节为主不同,智能化钻探更强调数据驱动和模型分析。

甘超等针对深部钻探过程数据复杂、实时性要求高的特点,构建了钻进过程流式大数据分析 with 动态预处理框架,为钻探参数的实时优化和异常状态识别提供了新的技术思路。相关研究表明,基于数据驱动的方法在复杂工况下具有更好的适应性。

与此同时,人工智能方法在工程勘察领域的应用研究逐渐增多。李灿锋等在综述人工智能在地质领域应用

时指出,机器学习和模式识别方法在地层特征识别、钻进状态判别以及参数优化方面具有良好应用前景。尽管现阶段相关方法多处于探索和验证阶段,但其在提升钻探决策智能化水平方面的潜力已受到广泛关注。

4.3 智能化钻探装备与工程示范

在工程应用层面,钻探作业智能化不仅依赖算法与软件方法,更取决于智能化装备与系统集成能力。智能化钻探强调系统整体协同与人机协作,其工程适用范围正由常规工况逐步向复杂地层和深部钻探拓展。近年来,相关装备在特深孔和复杂工程勘察中的示范应用不断增加。薛倩冰等通过集成多源感知、智能控制与自动化执行系统,验证了智能化钻探装备在提升作业效率、施工安全性和运行稳定性方面的综合优势。

需要指出的是,相较于油气钻井领域,工程勘察钻探在施工规模、作业环境及经济约束等方面存在明显差异,智能化技术的工程应用仍以局部集成和示范验证为主。如何在保证系统可靠性与经济性的前提下推进智能化技术的工程化应用,仍是工程勘察领域亟需关注的关键问题。

5 工程应用现状、发展趋势与结论

总体来看,钻探作业自动化与智能化技术已在部分工程勘察项目中得到应用,并在降低劳动强度、提升作业安全性和改善施工质量等方面取得了一定成效。通过在关键作业环节引入自动化装备和控制系统,工程勘察钻探作业的规范性和施工稳定性得到提升,为复杂地质条件下的安全施工提供了支撑。

从发展趋势看,工程勘察钻探作业正由单一环节的技术改造,逐步向成套装备集成和系统协同控制方向发展。自动化技术需进一步提升对复杂地层和施工环境的适应能力,智能化技术则有待在信息感知、数据融合与决策控制等方面持续深化。同时,绿色化和极端环境适应能力也将成为重要发展方向。

结语:综上所述,工程勘察钻探作业自动化与智能化

的发展,是工程需求提升与技术进步共同作用的结果。未来,通过加强关键技术研究、推进装备系统集成并完善相关标准,有望实现工程勘察钻探作业水平的持续提升。本文的综述可为相关研究与工程实践提供参考。

参考文献

- [1]李奉霖,吴金生,辛宗成,等.工程勘察定向钻探与核心技术规程编制及意义[J].钻探工程,2025,52(S1):412-416.
- [2]孙晓明,党伟.基于现代钻探技术的工程勘察精度提升研究[J].中国金属通报,2025,(08):183-185.
- [3]许芳芳.钻探取样中土壤扰动对岩土工程勘察结果的影响评估[J].建材发展导向,2025,23(03):55-57.
- [4]尹宇辰.浅谈岩土工程勘察中钻探设备及工艺的选择[J].中国设备工程,2024,(23):112-114.
- [5]马益友.岩溶地区岩土工程勘察钻探技术的应用分析[J].石化技术,2024,31(07):313-315.
- [6]杨光.海洋工程岩土工程勘察钻探施工及其影响因素探究[J].价值工程,2024,43(13):30-32.
- [7]温继伟,刘星宏,白坤晓,等.工程勘察钻探技术发展现状探讨[J].岩土工程技术,2023,37(05):505-517.
- [8]胡郁乐,周治刚,胡志新,等.工程勘察近水平定向钻探技术解读和规范编制的建议[J].钻探工程,2023,50(S1):530-536.
- [9]奚新定.工程勘察水上钻探作业施工通航安全保障方案研究:以长江流域某码头为例[J].水上安全,2023,(08):166-168.
- [10]蔡义名,姜月涛.矿山工程勘察中钻探工艺选取分析[J].中国金属通报,2023,(05):101-103.
- [11]郑玉涛,卢俊.岩土工程勘察中钻探工艺的选择研究[J].建材世界,2023,44(02):84-86+103.
- [12]周梦迪,刘欢,韩丽丽,等.用于工程勘察的水平定向钻探技术探讨[J].钻探工程,2023,50(02):135-142.
- [13]曾文.浅析植物胶在某金属矿山岩土工程勘察钻探中的应用[J].中国金属通报,2023,(02):107-109.