

# 水利勘察履带钻机自动提下钻技术适配性研究综述

耿智 张峰 贺伟

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 洛阳 471000

**摘要:** 钻探工作是水利工程勘察的基石,直接关系到后续水利建设的质量与安全,是保障水库、堤坝、输水管道等核心水利设施选址科学性、设计合理性的关键前置环节。水利工程作为关乎国计民生的基础设施,其勘察质量直接影响工程耐久性与运行安全性,而钻探数据的精准度与作业效率则是决定勘察质量的核心要素。当前行业正面临劳动力老龄化加剧、一线作业强度大、生产效率瓶颈突出等现实困境。在这样的背景下自动化转型已成为破解行业发展困局的必然选择。针对水利工程勘察中履带钻机提下钻作业自动化程度低、劳动强度大、数据采集标准化不足等核心痛点,本文对面向履带钻机的自动提下钻技术进行了系统性综述。本文首先系统剖析水利勘察钻探作业的工况特殊性及其对自动化技术的差异化需求,进而深入探讨直接移植现有自动化技术面临的核心挑战提出以“模块化、轻型化、人机协同”为核心的适配性技术实现路径,并以自动提下钻机构研发为例,展望水利勘察钻探自动化的应用前景,为行业技术升级提供参考。

**关键词:** 履带钻机; 自动化; 水利工程勘察; 钻探装备

## 1 引言

水利工程勘察钻探,大多是在露天环境里展开的<sup>[1]</sup>。从钻杆的取放、拧卸,到实际钻进作业,整个流程的核心环节过去都高度依赖人工操作。当前,现场操作人员老龄化日益明显,而高强度、环境艰苦的一线工作对年轻人的吸引力有限,导致熟练技工越来越紧缺,导致熟练技工短缺问题日益严峻。这些客观因素进一步放大了人工操作的难度与风险。在起放钻杆、高空辅助作业等环节,人工操作不仅劳累,更伴随坠落、碰撞等风险,稳定性不足进一步放大了安全隐患。这一现状不仅导致现有作业队伍的工作负荷持续攀升,还造成技术传承断层,许多经验性的操作技巧难以有效延续,进一步影响了钻探作业的稳定性与规范性。人力成本持续上涨,而起下钻、拧卸等大量辅助作业却极为耗时,整体效率难以提升,项目成本控制压力不断加剧。这些困难使得水利勘察钻探行业必须通过自动化技术来改变现状,逐步将人从重复、繁重、高危的劳动中解放出来<sup>[2]</sup>。

当前主要的钻探自动化技术多源于石油、煤炭等行业,这些技术核心设计原本适配深孔、固定场地、长期连续施工的场景。针对水利工程勘察领域广泛使用的移动式履带钻机,其自动化研究却比较落后。这主要因为在施工场景中上存在差异,现在的水利勘探行业的作业特点具有“浅孔、频迁、设备多样、环境露天”的鲜明特征。现有的那些重型自动化方案,要么成本太高,要么系统过于复杂,要么拆装不够便捷,根本没法适应履带钻机灵活转场、投资回报周期短的作业要求<sup>[3]</sup>。因此,

如何将自动化技术“轻量化”、“模块化”地集成到移动钻探平台上,成为学术界与工程界共同关注的重点。近年来,虽有部分学者开始探讨小型钻机的辅助机械手或拧卸装置,但系统性的研究仍显不足。大多数成果集中在单一功能的实现上,缺乏从移动钻机整体作业特性出发的全面分析。针对这一现状,本文旨在对面向履带钻机的自动提下钻技术进行梳理。首先,将深入剖析履带钻机作为移动平台的所带来的约束与需求;其次,系统分析在这些约束下实现自动化面临的主要技术挑战;最后,结合技术发展趋势,探讨以“模块化集成、轻量化设计、人机协同”为核心的适应性实现路径。本文的综述旨在梳理该领域的技术发展脉络,为后续面向国家水利智能化战略的专用装备研发提供清晰的学术参考与工程思路。

## 2 水利勘察工况的特殊性剖析

水利工程勘察钻探的作业场景,和石油、煤炭这些行业的钻探比起来存在本质差异。这决定了自动化技术不能简单照搬,必须根据其自身特点进行针对性调整,这也是实现技术适配的核心前提<sup>[4]</sup>。

### 2.1 水利孔深特性要求高效与经济

水利工程勘察的钻孔深度,一般在几十米到几百米之间。水利勘探与石油钻探比起来,它有着单孔作业周期短、项目批量小、作业点位分散的鲜明特点。这要求钻机自动化系统得能实现快速安装调试,要是设备部署就得耗掉大半天时间,那整体施工进度肯定会被拖慢。在经济上需要具有适配性,水利钻孔产值本身就有限,

自动化系统的研发和购置成本要是太高,很容易让项目陷入经济的困境,必须把投资回收期控制在合理范围内。因此,水利勘察的自动化技术没必要追求全流程覆盖、高精度冗余性能,更应该聚焦核心功能的实现,把高性价比当成重要的设计导向。

## 2.2 水利勘探频迁特性要求模块化与快速拆装

水利勘察钻探的一大痛点,就是设备需要频繁搬迁。因为工程点位分散、勘察线路长,钻机往往刚在一个点位完工,就得拆解运输、到下一个点位重组安装。这对自动化系统的结构设计提出了相当严苛的要求。自动化单元得能拆成小型化、轻量化的标准模块,方便装车运输和人工搬运,模块之间、自动化系统和钻机本体之间的连接,要做到简洁高效,最好能实现即装即用,不用再做复杂的现场调试。钻机的每个自动化模块都得有自己的防护结构,能扛住搬迁过程中的振动、碰撞,避免设备还没开工就先受损。因此,设计辅助工作平台成为关键,通过搭建标准化的安装接口层,让自动化模块和钻机实现快速对接,解决频繁搬迁带来的适配难题<sup>[5]</sup>。

## 2.3 水利勘探的环境多样和差异要求高适配性与高可靠性

水利勘察现场用的履带钻机,品牌杂、型号多,新旧不一,液压系统和操作方式千差万别。这就要求自动化系统具备良好的兼容性,能够通过柔性设计适配多种型号钻机,避免因设备差异导致自动化技术无法推广。同时,野外作业环境恶劣,高温、低温、潮湿、粉尘、振动等因素持续影响设备运行,这对自动化系统的可靠性提出极高要求。钻机自动化机械结构需具备足够的强度和耐磨性,抵御野外环境的侵蚀并且电子控制系统需具备防尘、防水、抗干扰能力,确保在复杂环境下稳定运行。

## 3 水利勘探的技术提升的难点

石油、煤炭等行业的成熟自动化技术借鉴到水利勘察钻探领域,不能直接硬套,从技术特性到工程实践,都会碰到绕不开的障碍。其中最核心的挑战,主要集中在适应性、可靠性和人机协作关系这三个方面。

### 3.1 钻机的接口缺失与系统协同难

现在市面上的多数履带式钻机,依旧沿用的是传统人工或半人工操作的设计思路,机身根本没有预留自动化系统的标准对接接口。不管是液压动力的传输路径、机械结构的空布局,还是设备运行的控制逻辑,当初设计时都没考虑过要和自动化模块协同工作。这就给自动化技术的集成应用带来障碍。自动化系统要正常运转,就得让动力需求、控制信号和钻机原有的液压、电气系统实现无缝

对接。可问题在于,不同型号钻机的液压回路设计差异很大,控制协议也没有统一标准,想要做到精准适配,难度非常高。钻机的结构也存在问题,自动化模块(如机械臂)的安装可能与钻机的钻塔、操作台、液压管路等发生空间干涉,需要对钻机进行改造,而改造工作不仅增加成本,还可能影响钻机原有性能。

### 3.2 作业可靠性具有挑战

水利勘察与石油、矿山等行业常在固定场地运行的自动化系统不同,勘察的现场是完全露天的野外环境。这对设备的可靠性提出了近乎苛刻的要求,构成了技术落地最难跨越的一道坎。野外无处不在的振动、粉尘,还有剧烈的温度波动,会直接盯上自动化系统里的精密部件。机械臂的关节轴承,很容易因为粉尘侵入而加速磨损,严重时还会出现故障。野外的电力供应可能不稳定,更没有设备完善的维修车间。一旦自动化系统在野外故障,很难指望有专业工程师带着备件迅速到场。一个小小的传感器故障或程序报错,都可能导致整个钻探作业陷入停滞,直接影响项目工期。在这种条件下,系统的可靠性和容错能力,远比它在实验室里展现的峰值性能更为重要。

### 3.3 人机协同关系具有挑战

水利勘察钻探的作业现场变数极多,地下的地质条件、钻进过程中的设备状态都可能毫无征兆地发生变化,想单靠自动化系统应对所有突发状况,目前还不现实。这就要求我们必须处理好自动化与人工的协同关系,找准两者之间的平衡点。自动化系统需具备足够的自主运行能力,减少人工操作强度,还需建立灵活的人工干预机制,确保在突发情况下操作人员能够快速介入,调整作业参数或处理故障。若过度追求全自主,可能导致系统在复杂工况下适应性不足,若人工干预流程繁琐,则会降低自动化系统的实用价值。如何实现两者的有机平衡,确保作业的安全性与灵活性,是自动化技术设计的重要挑战。

## 4 水利勘探的轻型化与模块化探讨

结合水利勘察钻探的工况特性和核心挑战来看,自动化技术研发必须跳出传统思维定式,走差异化与适应性并行的发展路子。核心路径可概括为“功能定制、平台化模块化、简易可靠控制”三大方向。

### 4.1 水利勘探需要功能定制,而非性能堆砌

水利勘察钻探自动化需要解决那些劳动强度大、又反复机械的辅助作业,而非追求从头到尾全流程自动化,所以功能定制化才是该遵循的设计核心,需抓住关键需求,而非多余的性能。机械臂的设计方面,无需照

搬多轴高精度的工业机器人，转而开发一款专用执行机构就足够了。它只需要精准实现钻杆工作的核心动作，通过简化结构设计，就能把设备的成本和体积都控制在合理范围内。钻机自动化需采用小型化伺服电机驱动，结合减速装置调节作业速度，既满足作业需求，又降低能耗和设备重量，通过程序预置轨迹和简单的现场校准，确保作业可靠性。

#### 4.2 平台化与模块化设计，破解频迁与适配难题

考虑到水利勘察钻探作业搬迁频繁、设备型号繁杂的现实痛点，平台化与模块化设计就成了破题的关键。通过辅助作业平台，连接自动化系统和钻机之间的标准化桥梁。辅助工作平台采用模块化设计，拆解为安装基座、连接构件、防护外壳等标准模块，重量控制在人工可搬运范围内，便于搬迁和安装。这样搬迁和现场安装都能省时省力<sup>[6]</sup>。平台上可以预留标准化接口，只要根据不同型号履带钻机的结构特点，调整一下连接件的尺寸和安装位置，就能实现自动化模块和钻机的快速对接，使得完全适配不同设备。

#### 4.3 简易可靠的感知与控制，优先保障实用性

对水利勘察钻探自动化而言，需要的是稳定可靠，而非技术先进。因此，控制系统应采用程序预置轨迹为主、简易传感器为辅的设计策略。基于提下钻作业的标准化流程，在程序中预置机械臂的运行轨迹，通过现场校对位置，修正实际误差，确保作业精度，避免依赖复杂的视觉识别或激光定位系统，并采用限位开关、压力传感器等简易传感设备，实现对机械臂位置、钻杆抓取状态的基础感知，既降低系统复杂度和成本，又提高抗干扰能力。通过建立人工优先的控制机制，系统默认按预置程序运行，当操作人员发现异常或需要调整时，可通过简单的操作指令介入控制，系统优先执行人命

令，确保作业安全与灵活<sup>[7]</sup>。

## 5 结论

对水利工程勘察钻探进行自动化改造，是破解行业劳动力短缺、作业效率偏低、安全风险突出等痛点的必然出路，也是响应国家水利行业智能化转型战略、推动行业高质量发展的核心抓手。水利钻探有着钻孔浅、搬迁勤、设备杂和作业环境恶劣的独特工况，想直接照搬其他行业的自动化技术，显然很难做到精准适配。正因如此，水利勘察钻探的自动化发展，必须走出一条差异化、高适配性的路子。这项技术能不能落地见效，核心就在于能否平衡好轻量化、模块化、可靠化和经济性。通过简易可靠的控制策略保障野外作业稳定性。只有紧密结合行业工况特性，摒弃技术堆砌的误区，才能开发出真正符合工程需求的自动化技术。

## 参考文献

- [1]王坤安,郑燕峰,汪小龙.履带式露天潜孔钻机的自动化钻孔精度提升研究[J].中国机械,2025,(09):51-55.
- [2]高鑫.窄体履带钻机变幅装置立柱滑轨的多场耦合分析与结构优化[J].煤矿机械,2025,46(09):160-162.
- [3]曾义金,金衍,周英操,等.深层油气钻采技术进展与展望[J].前瞻科技,2023,2(02):32-46.
- [4]任万杰.煤矿自动化锚杆钻机的标准化设计探讨[J].大众标准化,2024,(17):34-35+38.
- [5]张世殊.水利水电深部工程地质勘察技术现状与发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2025,44(06):1377-1404.
- [6]蔡文军,张慧峰,孙长征,等.钻柱自动化排放技术发展现状[J].石油机械,2008,36(12):71-74.
- [7]代炳晓,王臣.一种自动化钻机机具协同作业优化办法[J].设备管理与维修,2021,(17):90-91.