迈向万米深地:智能运维技术与仪器保驾护航

刘 志 亮
(电子科技大学机械与电气工程学院 成都 611731)



刘志亮,电子科技大学教授、博士生导师,入选国际工程资产管理学会会士(ISEAM Fellow)、全球前 2%顶尖科学家、四川省学术与技术带头人后备人选、IEEE 资深会员。主要研究方向为复杂装备智能测试、诊断与运维。主持国家自然科学基金、国家重点研发计划及校企合作项目等 30 余项,发表学术论文 100 余篇,出版学术专著与教材各 1 部;申请及授权国家发明专利、计算机软件著作权 50 余项,实施专利技术转让 1 项,参编国家/行业标准 5 项。研究成果荣获日内瓦国际发明展金奖、中国仪器仪表学会科技进步奖等奖励。受聘为国家企业技术中心专家顾问、国家自然科学基金评审专家、全国研究生教育评估监测专家及教育部学位与研究生教育发展中心专家。多次担任 PHM 系列国际学术会议出版/程序/宣传委员会主席和受邀做大会主旨报告、特邀报告。

深地工程是人类探索宇宙和生命的世界级重大工程,也是关系国家能源资源安全和可持续发展的战略选择。2016 年,习近平总书记指出:“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”。“十五五”时期,应协同推进战略性矿产勘查开发、深地科学探测与人工智能赋能自然资源保护利用,以基础科学、工程技术、高端装备的深度融合为支撑,推动资源开发与科学探索相互促进。其核心,是把工程上可以到达的深度,转化为科学上可以认识、产业上可以安全利用的空间。

2025 年,深地塔科 1 井以 10 910 米井深完成钻探,深地川科 1 井随后突破 10 000 米,标志着我国深地工程已进入万米探索的新阶段。万米钻探获取的岩心、测井与原位资料,为研究特深层地质结构和油气赋存提供了直接依据。国产万米自动化钻机及配套技术的工程应用,则展现了重大工程对科学认知、工艺方法和装备研制的联合牵引作用。然而,突破深度纪录并不等于获得稳定的深地开发能力。越是向深部延伸,工程决策的可靠性与作业安全性越需要以运行状态的连续感知和及时调控为支撑。

这一要求源于深部环境对工程问题的根本重塑。高地应力、高地温、高渗透压与工程扰动相互耦合,使岩体变形破坏、井筒失稳和灾害演化呈现强非线性与显著不确定性。超长管柱、多压力系统和窄安全密度窗口,又使局部异常可能通过结构与作业链条放大。与此同时,岩样脱离原位环境后,温度、压力和受力边界的变化会削弱地面试验对深部真实状态的代表性。因而,深地工程需要从依赖离线参数和事后处置,转向原位观测、在线认知和风险前馈。

在这一转变中,智能运维并非附加于工程末端的单项技术,而是连接地层、装备与作业过程的关键机制。以深地钻井平台为例,地面提升、旋转和钻井液循环装备通过钻柱与井下作业耦合,套管与固井结构共同维持井筒完整性,近钻头仪器则承担地层和工程参数测量。地层变化会改变钻进载荷,装备退化会扰动运行响应,作业调整又反向影响井下压力和结构受力。只有把异常信号置于这一整体过程中解释,才能由状态检测走向灾害预警、预测性维护与作业优化。

要使智能运维贯穿深地工程全过程,基础条件是在极端环境中持续获得真实、可靠且可解释的原位信息。高温、高压、强振动与介质侵蚀会引起器件性能漂移、信号失真甚至功能失效,深地工程智能运维技术与仪器因而需要兼顾环境适应性、测量灵敏度与长期稳定性。随着光纤、微机电、声波、电磁和机器视觉等技术由单一参数测量向多源连续感知发展,工程问题也由能否获取信号转向能否准确表征状态。不同观测只有在明确敏感对象、时空尺度和误差来源的基础上建立物理关联,才能形成可供分析的状态信息。

在此基础上,人工智能为复杂状态的反演、识别和预测提供了新的方法。然而,故障样本稀缺、类别分布不均、强噪声干扰和工况持续变化,使单纯依赖历史数据训

练的模型难以覆盖实际工程条件。将物理机理引入特征表达与状态反演,利用自适应方法识别工况变化,并通过现场数据校核模型边界,是提高模型可解释性和跨工况适用性的基本路径。由此,可靠仪器、原位感知、状态认知与运行支持形成相互衔接的技术链,现场反馈则推动模型和测量方法持续修正,构成深地工程智能运维技术框架。

《仪器仪表学报》“深地工程智能运维技术与仪器”专题共收录围绕该技术链条开展研究的 9 篇论文。在作业前方感知方面,随钻声波前视研究分别围绕发射换能器、相控稀疏阵列和强干扰下的回波增强展开,形成由器件、阵列到信号处理的技术链。随掘电法动态可视化则利用装备推进过程中的连续观测实现前方异常体成像。这些研究将探测范围由已揭露区域延伸至钻头或截割头尚未进入的空间,使地质风险识别逐步前移。

感知对象进一步由外部地质环境延伸至装备自身。深地钻探装备电磁无损检测研究梳理了不同方法的物理机制、适用边界及发展瓶颈;多层管柱壁厚反演通过互补观测与物理引导提高分层辨识能力;定滑轮组视觉诊断则根据运动学关系将绳槽磨损映射为可解释的转速偏离。三类工作虽分属综述、反演与诊断,却共同建立了“损伤机制—测量响应—状态评估”的联系,体现出装备运维由异常检测向状态认知的发展。

要使这种状态认知进一步服务于工程运行,还需要处理分布变化与信道干扰等现实约束。盾构机刀盘扭矩预测以残差学习和测试时自适应跟踪跨地层工况,钻井液脉冲组合滤波则通过泵速反馈和相关匹配提升井下信息传输的可靠性。它们分别回应了“模型失配”和“信号受扰”的典型难题,体现出相关方法对工况变化和传输条件等实际工程约束的关注。

这些成果勾勒了深地工程智能运维的技术轮廓,为相关技术的系统集成与工程应用奠定了基础。在已有仿真、缩尺模型、实验平台及现场研究的基础上,下一步应着力加强器件、阵列、信号处理与决策模型之间的协同,持续开展长周期现场验证。其目标,是推动相关技术从单点突破走向系统集成、从实验可行走向现场可用,并在长期运行中验证可靠性,使深地工程智能运维技术与仪器真正走向工程成熟。这一过程不仅需要技术能力的持续提升,也离不开测量标准、评价方法与工程责任边界的逐步完善。

面向这一目标,需依托重大工程,协同攻关关键材料、敏感元件、耐高温电子与专用仪器,将标定、环境适应和寿命评估纳入研制全过程。更为重要的是,应建立贯通地面与井下、地质与装备、建造与运维的数据基础,使施工记录、运行载荷、检测结果和维护效果得以连续积累。通过跨工况试验与现场验证明确模型的适用边界,以统一的数据描述、质量评价和接口规范促进系统协同,使现场运行反馈能够持续修正模型、改进仪器、优化维护策略,形成闭环迭代。

深地开发的每一次跨越,都是对科学认知、工程装备与组织能力的共同检验。智能运维的价值,正在于使仪器测量转化为对深部规律的认识,使工程数据转化为设计、作业和维护的知识。期待本专题促进地学、力学、机械工程、仪器科学与人工智能的深度交叉,推动智能运维技术和自主仪器在重大工程中相互验证,为建设安全、高效、可持续的深地开发能力提供支撑。