

石油钻井设备机械机电一体化问题分析

张丹

中原石油工程有限公司钻井二公司 河南 濮阳 457001

【摘要】：随着石油勘探开采不断朝着复杂、隐蔽的深层推进，对钻井设备机械及相关技术的使用也提出了更高要求。绞车、转盘与顶驱、泥浆泵、井控装置及动力配电单元在高载荷、强振动、连续冲击与腐蚀性介质环境下长期工作，任何环节的参数漂移、执行机构迟滞、信号干扰或控制策略不匹配，都可能引发联动失调、保护误动作与停机故障，进而放大作业节奏波动和井下风险。而机械机电一体化则为新时期的石油深层、超深层钻井的复杂工况应用提供了关键支撑。文章结合石油钻井设备机械机电一体化面临的新形势与挑战，剖析了机械机电一体化存在的主要问题，并对相关优化策略进行了有效探讨，以供参考。

【关键词】：石油钻井；设备；机械机电一体化；问题；策略

DOI:10.12417/3083-5526.25.05.027

引言

在油田开采过程中，钻进作业是十分关键的环节，设备的使用、技术的应用等都会对钻进作业的安全性、高效性产生直接影响，随着石油开采不断朝着更为深层、复杂的地层推进，尤其是超深水海洋石油钻井作业，对钻进设备的要求也越来越高，需要在不断提高钻井设备的安全性、可靠性方面下功夫，才能满足日益提高的石油钻井作业需求。自动化、智能化作为新时代发展的显著特征，也成了当前石油钻井设备提升的必然方向，进而实现作业强度有效降低的同时，提高钻井作业的安全性、高效性。机械机电一体化在石油钻井设备操作中的应用实现了对机械、电气、控制等学科的有效融合，使得钻进设备的结构得到进一步优化，实现对钻进作业需求的动态响应，以自动、智能的设备操控更好地满足复杂石油钻井作业要求，为钻井安全、高效提供保障。

1 石油钻井设备机械机电一体化面临的形势和挑战

1.1 日益复杂的开采条件

随着陆地浅层油气资源的日益枯竭，勘探与开展工作也不断朝着深层、超深层的方向发展。钻井作业也因此面临更为复杂的地层环境。同时，海洋的深水石油钻井开采也不断发展，甚至占据全球油气资源开采的绝大比例。这些都对石油钻井设备的使用提出了更高要求。新时期的钻井设备必须能够适应高温高压、强腐蚀、高振动的作业环境，同时设备出现性能衰减、密封失效、电气故障等一系列问题，也对石油钻井作业的安全性、可靠性产生极大威胁^[1]。

1.2 自动化、智能化发展要求

随着数字油田建设水平的不断提升，石油开采也不断朝着智能化方向发展，对钻井作业的自动化、智能化也提出了更高要求，钻井控制的自动化，钻井参数的智能化优化也自然成为

行业发展的必然趋势。尤其是其中的异常工况自动报警、电气设备的智能化处理、重要设备的预测维护等，在降低人员投入成本、提高作业效率等方面发挥着重要作用。而当前，人工智能技术在石油钻井设备中的应用不但有着较高的人才需求，而且在故障智能诊断、性能自动化优化等方面的技术体系应用尚未十分成熟，面对恶劣的井下作业环境，无人化的钻井设备操作仍然面临严峻挑战。

2 石油钻井设备机械机电一体化中存在的主要问题分析

2.1 机械与电气设计协同度不足

就当前的石油钻井设备研发与制造过程而言，机械设计、电气设计互相独立，整个过程缺乏足够的关联性沟通。其中，机械设计对于设备的强度、刚度等力学性能的优化更为重视，缺乏对设备电气及控制特性需求的充分考虑；而电气设计则侧重对设备硬件的选型把控和电路保护设计，在设备运作规律、机械结构方面知之甚少。两者互相独立的设计模式下，出现接口不匹配、参数优化衔接不畅等问题对设备的综合性能产生极大影响。

2.2 设备选型与工况匹配度不足

深层、超深层的石油钻井作业要求设备运行的动态性能能够适应复杂多变的工况条件。而当前，许多钻井设备的选型过程对于实际的运行工况把握不够精准，在设备适应性的评估方面不够科学、准确^[2]。尤其是无法结合实际的作业工况要求对设备选型进行定量化、规范化评估。甚至在大多数时候仅凭设计人员的主观经验进行设备选型，自然难以实现钻井设备和石油开采工况需求的最佳匹配。

2.3 控制系统集成度不足

在现阶段的石油钻井设备数控体系中，PLC控制、集散控

制等模式的应用仍较为普遍,在与机械、电气系统的有机融合方面不够深入,数控集成度与设备机械一体化要求相差甚远。这样的控制系统下,设备运行的实际工况难以实现及时、准确捕捉,影响设备动态特性的精准控制,也无法实现对设备运行状态的智能诊断与性能预测。加上钻井施工涉及的各种设备通常来自不同的供应厂商,在设备通信方面存在协议不统一、数据接口不匹配等问题,严重影响数据的集成与共享,不利于钻井设备作业的协调与优化。

3 优化石油钻井设备机械机电一体化相关策略

3.1 强化机电液一体化设计

首先,针对石油钻井设备应用特性,构建机电液耦合仿真分析模型,结合对机械、电气、压液系统之间的动态作用分析对设备运行特性进行精准刻画。机电液一体化设计需充分利用机电液有限元分析技术、多体动力学仿真技术等构件钻进设备耦合仿真模型,对设备在对应的钻井工况下的力学性能、热学性能、电磁性能等规律及变化进行分析,为设备系统的整体结构优化与参数配置提供依据,实现各设备运行性能匹配的最优化。耦合仿真模型的构建,需要对机械系统、电气系统、液压系统等的特性参数进行深入分析,掌握各个系统之间的能量传递及相互作用规律,明确其中的耦合关系,同时兼顾对设备运行精度与效率的计算,对设备运行系统及参数条件进行简化、优化,提高仿真可行性^[3]。借助机电液耦合仿真分析对可能影响钻井设备性能发挥的相关因素进行准确揭示,为设备结构布局优化、提升效能提供依据。

其次,需要做好对设备的多学科协同优化设计。在系统层面面对石油钻井设备的设计参数进行优化,综合衡量机械、电气等运行目标,对设备的各项性能需求进行合理平衡,完善设备的优化设计。简单来说,就是明确钻井设备综合性能优化目标,对系统的机械、电气、控制等性能进行多学科目标优化,结合多因素耦合约束对设备参数进行最优化设计,实现对机、电、液等多学科性能需求的系统统筹,基于全局约束对设备综合性能的最优参数进行合理确定,构建统一的设备优化模型。整个过程涉及对多种智能优化算法的应用,以及对各个目标权重的衡量与协调,进而得到设备机械机电一体化的最优配置。值得注意的是,石油钻井设备机械机电一体化的多学科优化设计是一个复杂且系统的工程,有着较高的专业建模、计算能力与工程实践经验要求,在复杂钻井设备系统综合配套性能一体化优化配置方面有着十分重要的应用意义。

3.2 加强设备选型配置优化

优化设备选型配置,是提高石油钻井设备运行安全与效率的重要保障,需要基于设备运行总体工况的深入分析与全面的数据积累,进行设备选型数据库的合理构建,做到量化、规范化的设备选型配置。

首先,需要准确把握设备工况的适应性配置,确保设备能够很好地应对复杂的钻井作业工况。利用仿真分析技术对设备的机械特性、电气特性等工况适应性进行全面评估,对设备使用工况进行明确。整个过程需要基于对钻井作业现场应力、温度、荷载等特性参数的全面收集,准确把握钻井工况对设备的影响^[4]。然后结合数值仿真等技术手段,对极端工况下设备的力学性能变化等进行分析,得到设备失效模式与运行寿命的科学评估结果,为设备结构的抗疲劳设计等提供依据。也可利用海量的工况数据构建设备寿命预测模型,对钻井工况下设备机械机电的多维时空特性进行分析,准确把握设备性能需求,然后基于机器学习等数据驱动,挖掘作业工况和设备性能之间的关联图谱,为设备选型提供智能化辅助。

其次,通过构建设备匹配优选数据库提高设备选型的可靠性与效率。石油钻井设备的选型匹配需要综合考虑设备性能参数、作业工况等适配性,结合选型实践经验,对设备选型规律与匹配原则进行归纳、提炼。进而运用机器学习、大数据分析等对设备性能与钻井工况关联进行挖掘,构建多层次的设备选型优化匹配数据库,并不断完善设备参数收集,与工程应用数据相结合构建结构化的设备信息数据库,形成各种油田工况下的设备选型应用知识库。同时还需重视加强对专家经验数据的收集,建立设备选型专家库,形成对设备数据的多源异构关联融合,完善设备选型的关联规则,建立设备性能匹配模型。这些模型的应用需要在完善优化规则的同时嵌入操作性能较好的工程设计软件,以供设计、施工、管理等相关人员使用,降低人为经验判断的局限性,更好地提高石油钻井设备机械一体化的效率与可靠性。

3.3 强化设备控制系统的集成度

机械机电一体化在石油钻井设备中的成熟应用需要实现设备控制系统较高的集成化、智能化水平,实现对设备整个运行生命周期的智能化管控,并基于对数据的不断积累与算法优化创新,建设复杂工况下的高度集成的钻井设备机械机电一体化控制系统。

首先,需要构建设备全生命周期数据中心,为设备的精准化控制以及设备运行的智能化决策奠定基础。借助对物联网技术、边缘计算技术等的应用,对设备设计、制造、运行、维护等数据的全面收集,将设备的结构、运行工况、控制状态、故障信息等全面纳入设备的数据中心当中。同时需要积极突破设备运行各个环节之间的数据壁垒,实现全过程的数据互联互通,并基于对这些数据的采集汇聚,在统一数据标准下做好数据的清洗、存储、管理,尤其是要做好对异构数据的标准化、规范化处理,全面解决设备、系统之间的数据不兼容问题,在实现多源数据的无缝集成的基础上,运用大数据处理技术进行数据的关联、融合处理,建立形成完善的设备全生命周期数据中心,奠定设备内在规律挖掘与控制策略优化的数据基础^[5]。

同时数据中心的建设还需加强与油田信息化建设的融合力度,充分发挥云计算、大数据等优势,构建钻井设备工业互联网平台,实现设备数据采集、存储、计算、服务的一体化集成建设,为石油钻井设备的精准控制与预测性维护提供保障。

其次,加强对自学习、自由化智能控制系统的研发。人工智能技术的应用,在解决复杂工况下钻井设备参数动态变化引发的性能发挥不确定性问题方面有着重要作用。通过对具备自我学习、自我优化能力的智能钻井设备控制系统的研发,有效弥补了传统控制算法无法适应复杂工况的问题。算法创新、工程实践是智能控制系统构建不可或缺的两大要素。构建智能化控制的石油钻井设备运行系统,将智能化控制覆盖至设备性能管理、设备控制策略等方面,为设备运行工况提供智能化分析与智能控制决策管理,强化石油钻井设备机械机电一体化效益。同时还需要重视加强基于数据驱动的设备控制算法应用研究,对设备运行与控制规律进行深入挖掘,提高设备对未知钻井过程,强耦合作业、非线性作业等的自适应控制水平^[6]。

参考文献:

- [1] 裴红军.石油钻井设备机械机电一体化问题研究[J].中国设备工程, 2021.
- [2] 刘杰,任立柱.石油钻井设备机械机电一体化问题研究[J].石油石化物资采购, 2025(9):184-186.
- [3] 周志军.石油钻井设备机械机电一体化问题研究[J].中国科技期刊数据库 工业 A, 2023(4):3.
- [4] 张绍坤.石油钻井设备机械机电一体化问题[J].Engineering Science Research & Application, 2025, 6(19).
- [5] 杨丽.机电一体化系统在机械工程中的应用分析[J].电子测试, 2017(1):2.
- [6] 于文旭.基于机电一体化的海洋石油钻井设备智能化控制研究[J].中文信息, 2025(8):57-58.

此外,加强对人机协同设备智能运维模式的创新研究。发挥 VR/AR 技术、数字孪生技术等优势构建设备虚实映射模型,动态监测、感知设备实时态势,实现对故障的预警与诊断,构建智能化的设备运维体系,为故障的预测与防控提供处置决策建议与可视化界面,提高人机交互水平,推动钻井设备机械机电一体化智能化发展水平提升。

结束语

综述可知,石油钻井作业正朝着深层、超深层的方向发展,设备作业面临着越发复杂的工况环境,对设备的机械机电一体化提出了更高要求。面对机械与电气设计协同度不足、设备选型与工况匹配度不足、控制系统集成度不足等的发展困境,相关单位、部门、人员需要从强化机电液一体化设计、加强设备选型配置优化、强化设备控制系统的集成度等方面着手,以应对新形势下日益复杂的开采工况,以及满足自动化、智能化发展要求,为我国石油钻井设备安全与经济效益的提升提供保障。