

钻井泵电缸驱动系统设计方案研究

申 岩¹, 李满江², 王 航^{1*}, 李占柱²

(1. 西安石油大学机械工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 中国石油川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司, 陕西 西安 710018)

摘要:传统钻井泵动力传输多采用曲柄连杆机构或液压传动方式, 存在结构笨重、压力和流量脉动显著、施工作业排量不足、工作效率低等问题。基于深层超深层和非常规油气资源开发对钻井泵大排量、高效率的技术需求, 讨论了新型钻井泵电缸驱动系统, 该系统由动力、传动、执行及辅助四大模块组成, 形成“动力+控制+辅助”协同的一体化动力传输系统, 推动钻井泵驱动方式由传统的曲柄连杆向电缸驱动转变。该系统的提出, 可以提高钻井泵传动效率、降低输出压力脉动、节约设备维护成本, 能够精准适配油田作业现场钻井泵高负荷、大排量、连续作业的工作特征, 为钻井泵向高效、智能、环保方向发展提供全新的技术路径。

关键词:钻井泵; 电缸驱动; 泵压波动; 自动化设备; 智能化钻井; 深层超深层钻井

中图分类号:TE926;P634.3⁺2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)S1-0154-07

Research on the design scheme of electric cylinder-driven system for drilling pumps

SHEN Yan¹, LI Manjiang², WANG Hang^{1*}, LI Zhanzhu²

(1. Mechanical Engineering College, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi 710065, China; 2. Changqing Drilling Corporation, CNPC Chuangqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710018, China)

Abstract: The traditional power transmission of drilling pumps mostly adopts crank-linkage mechanisms or hydraulic transmission methods, which have problems such as heavy structure, significant pressure and flow pulsation, insufficient working volume for construction operations, and low efficiency. Based on the technical requirements for drilling pumps with large flow rates and high efficiency in the development of deep and ultra-deep well as well as unconventional oil and gas resources, this article discusses a new type of electric cylinder-driven system for drilling pumps. This system consists of four major modules: power, transmission, execution, and auxiliary. It forms an integrated power transmission system of "power+control+auxiliary" that works collaboratively, transforming the driving method of drilling pumps from the traditional crank-linkage mechanism to electric cylinder drive. The proposal of this system can improve the transmission efficiency of drilling pumps, reduce output pressure pulsation, save equipment maintenance costs, and precisely adapt to the working characteristics of high-load, large-flow, and continuous operations of drilling pumps at oilfield operation sites. It provides a new technical path for the development of drilling pumps towards efficiency, intelligence, and environmental friendliness.

Key words: drilling pump; electric cylinder-driven; pump pressure fluctuation; automation equipment; intelligent drilling; deep and ultra-deep well drilling

收稿日期: 2026-05-06; 修回日期: 2026-07-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.017

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 52074346); 陕西省重点研发计划(编号: 2023-YBGY-431)

第一作者: 申岩, 男, 汉族, 2002年生, 硕士研究生, 机械工程专业, 研究方向为石油装备智能化, 陕西省西安市雁塔区电子二路18号, 1372883184@qq.com。

通信作者: 王航, 男, 汉族, 1978年生, 教授, 材料工程专业, 博士, 主要从事套管柱失效控制、石油装备智能化、机器视觉及三维高精度测量工作, 陕西省西安市雁塔区电子二路18号, wanghang220710@163.com。

引用格式: 申岩, 李满江, 王航, 等. 钻井泵电缸驱动系统设计方案研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 154-160.

SHEN Yan, LI Manjiang, WANG Hang, et al. Research on the design scheme of electric cylinder-driven system for drilling pumps [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 154-160.

0 引言

钻井泵作为石油钻井设备的三大核心部件之一,是钻井液循环系统的关键装备^[1-2]。其核心功能是将机械能转化为钻井液的液压能,驱动钻井液循环,确保钻井作业的连续性与安全性。

国内外对钻井泵动力端已有大量研究。赵珑等^[3]针对现有三缸钻井泵作业效率低等问题,研制出一种单电机五缸钻井泵,该泵配备新型减速器结构及曲轴结构,减小了整机质量及体积,具有功率大、结构紧凑、重量轻及智能控制等优点。

张洪生等^[4]针对钻井泵质量大、噪声大的问题,以3500HP型钻井泵曲轴为研究对象,采用有限元分析及结构拓扑优化的研究理论与方法,对曲轴减振降重,优化后曲轴质量减少7.55%。王存洋等^[5]提出了一种利用缓冲缸密闭空间压力油控制液控阀的液压缸自动换向方法,并根据此方法设计了三缸单作用钻井泵,该泵动力端采用液压传动。胡亚^[6]研究并设计了用于瓦斯抽采的BLY220/9型液压直驱钻井泵,该泵最大输出压力9 MPa,最大排量220 L/min,动力端采用液压直驱传动方式,改变了传统钻井泵的结构形式。

综上,现有钻井泵动力端主要采用曲柄连杆机构,液压直驱为钻井泵新型驱动方式,且当前钻井泵向着大排量、低波动的趋势发展。曲柄连杆机构受其结构特征制约,活塞运动呈现正弦规律变化,进而引发瞬时流量和压力的剧烈脉动^[7-8],限制了钻井泵向大排量、低波动方向发展。液压传动虽能改善瞬时流量的脉动问题,且能实现长冲程、大排量的需求^[9-11],但系统结构复杂,执行机构对控制信号响应滞后,对液压缸密封性要求极高,因此存在液压油泄漏的隐患。

随着深层超深层和非常规油气资源的开发,对钻井泵提出了大排量、高效率的技术需求。为提高钻井泵的排量与工作效率,本文提出电缸作为钻井泵的动力端,这一方案能够有效解决传统驱动方式冲程短、压力和流量脉动大的问题,还能推动钻井泵向自动化、智能化、绿色化发展,具有重要的技术价值和行业意义。

1 电缸驱动方式的技术优势

与曲柄连杆机构及液压传动方式相比,使用电

缸作为钻井泵的动力端,其本质特征均为通过特定的机械结构将动力转化为钻井泵活塞的往复直线运动,因此三者核心功能上具有等效性。

1.1 动力传递效率

电缸驱动具备较高效率,采用直接传动方式降低了能量损耗,效率为90%以上。曲柄连杆机构驱动的效率相对偏低,因其传动链较长、机械摩擦损耗较为明显,效率为70%~80%。液压传动的效率处于中等水平,存在液压油泄漏以及节流损耗问题,效率为75%~85%。

1.2 控制精度

电缸驱动传动精度较高,伺服电机可实时对执行机构进行调节,从而实现精准控制,定位精度能够达到毫米级别^[12]。曲柄连杆机构的精度较低,排量调节需依靠更换缸套等机械方式,且调节范围具有一定局限性。液压传动通过液压阀对流量和压力进行调节,受液压油可压缩性以及泄漏等因素的影响,其精度相较于曲柄连杆机构有所提升,但低于电缸驱动。

1.3 流量和压力波动

电缸驱动通过高精度伺服控制系统对活塞运动进行精确调控^[13],且活塞运动可以实现匀加速-匀速-匀减速,理论上能够直接消除流体脉动现象。由于曲柄连杆机构固有的运动学特性,活塞运动呈正弦规律变化,导致瞬时流量与压力波动明显,通常需配置空气包等辅助稳压装置改善流体的输出稳定性。

液压传动具有较小的脉动水平,利用液压油的可压缩性实现对脉动能量的有效缓冲,其运动平稳性相较于纯机械驱动系统具有显著优势。综上,不同驱动方式在动力传递效率、控制精度、流量和压力波动等方面存在显著差异,具体优缺点如表1所示。

表1 不同驱动方式性能对比

驱动方式	主要优点	主要不足
传统钻井泵	技术成熟,可靠性高	冲程长度短、流量和压力脉动大
液压直驱泵	流量和压力脉动小,功率密度高	液压系统复杂,存在泄漏可能
电缸驱动泵	控制精度高,响应速度快; 流量和压力脉动小	体积较大

2 电缸系统

2.1 工作机制

电缸作为一种执行部件,其主要功能是借助机械结构将电机的旋转运动转换为执行机构的直线运动(图1)。伺服电机接收控制系统的电信号指令后启动,电机输出轴连接减速机构,进而带动丝杠转动,丝杠上的螺母副将旋转运动转化为轴向直线位移,驱动与螺母副连接的执行机构做往复运动,完成对目标部件的精准控制。对于多电缸驱动,通过合理配置每个电缸的相位差,各电机输出旋转运动,经减速机构和滚珠丝杠副转换为直线运动,推动泵活塞完成不同相位的吸入和排出过程,确保输出流量平稳。

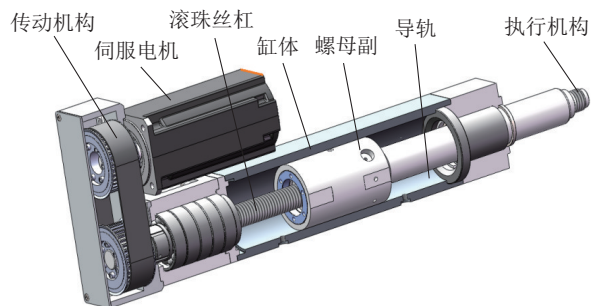


图1 电缸结构示意图

2.2 结构组成

2.2.1 动力模块

作为电缸的动力来源,驱动单元主要由伺服电机、电机支架及制动装置构成。伺服电机通常选用永磁同步电机,具有低损耗、高功率密度、调速范围宽等特性^[14-15]。制动装置选用电磁制动器,在设备停机或突发断电时迅速锁死电机输出轴,防止执行机构因负载的作用发生窜动,保障作业安全。

2.2.2 传动模块

传动模块是实现旋转运动向直线运动转化的核心模块,核心组件为丝杠和螺母副,配套包含齿轮、带、轴承座等部件(见图2)。根据负载特性,一般选用滚珠丝杠,通过滚珠在丝杠与螺母副之间的滚动摩擦,传动效率高,且磨损小,精度保持性好,适配长期高频次作业^[16]。对于负载能力较小的工况,选用带传动,负载能力大的工况,选用齿轮传动。

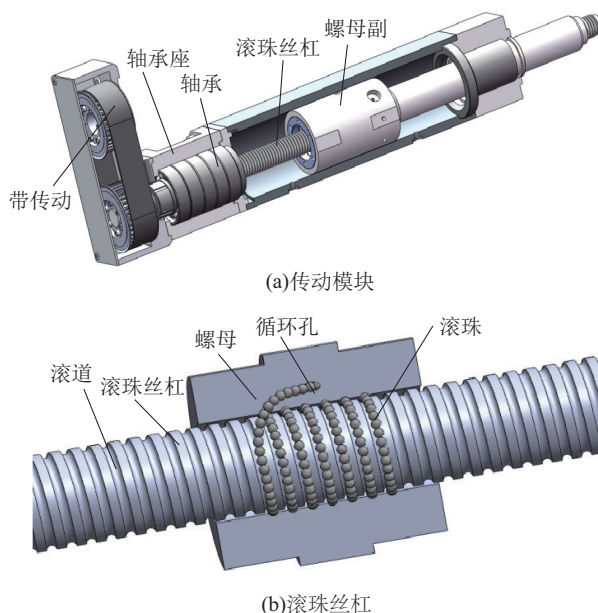


图2 传动模块与滚珠丝杠结构示意图

2.2.3 执行模块

执行模块负责将动力传递至负载端,并在整个电缸系统中承担力输出、运动导向和结构支撑的关键作用。通常包含推杆或滑台、缸筒、导向机构、连接法兰以及末端安装接口等部分,能够在电机与丝杠的驱动下,稳定推力,作用于外部负载。在实际工况中,执行模块需要保证高精度的位置控制,以及在重载、振动或恶劣环境下保持足够的结构强度和运行稳定性。

2.2.4 辅助模块

辅助模块保障电缸的稳定运行,主要包含润滑系统、监测传感器及安装附件。润滑系统通过定期或持续向丝杠、螺母副供给润滑脂或润滑油,有效降低摩擦磨损、减少运行阻力,提高传动效率,是延长电缸寿命的关键环节。监测传感器包括位置反馈编码器、温度传感器、振动传感器以及限位开关等,实时监测电缸运行状态,为闭环控制、故障预警和安全保护提供数据支撑。安装附件包括法兰、底座、耳环、铰链等连接件,确保电缸在作业设备中的可靠固定。

3 电缸驱动系统设计方案

3.1 技术方案

围绕动力传输模块、控制系统集成及辅助系统配置三大核心模块,构建电缸在钻井泵中的核心应用方案,形成“动力+控制+辅助”协同的一体化应

用体系,确保适配钻井泵高负荷、连续作业的工况需求。图 3 为电缸驱动系统的技术方案。

在动力传输模块,使用伺服电机和滚珠丝杠结构,实现动力的高效传递。针对钻井泵的往复式作业特性,通过电缸的直线驱动代替钻井泵的曲柄连杆或液压形式的动力端,减少传动环节的能量损耗。同时,根据钻井泵的额定输出功率,配置不同规格的动力模块,满足不同型号钻井泵的动力需求,且支持多电缸协同驱动,保障钻井泵作业时的动力稳定性。

在控制系统集成方面,构建“上位机+PLC+

伺服控制器”的三级控制系统。上位机负责作业参数设定、工况实时监控与数据存储分析。PLC 作为核心控制单元,实现多电缸动作协同、作业逻辑判断及故障预警。伺服控制器与电缸内置的位移传感器、压力传感器等联动,实现电缸行程、速度、推力的闭环控制,确保钻井泵的排量、压力等关键作业参数精准匹配钻井作业的要求,伺服电机可以通过扭矩控制模式、速度控制模式和位置控制模式来实现运动控制,图 4 为伺服电机三环控制系统框图。此外,控制系统还可预留与钻井平台整体控制系统的接口,实现智能化钻机一体化协同控制。

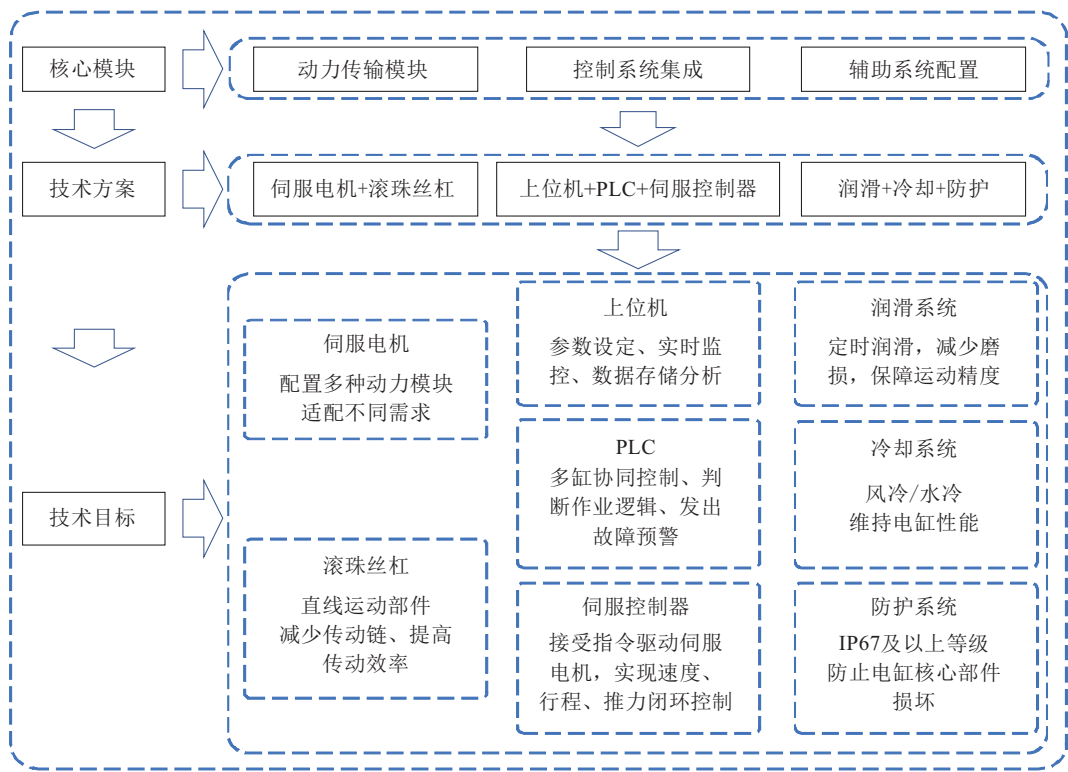
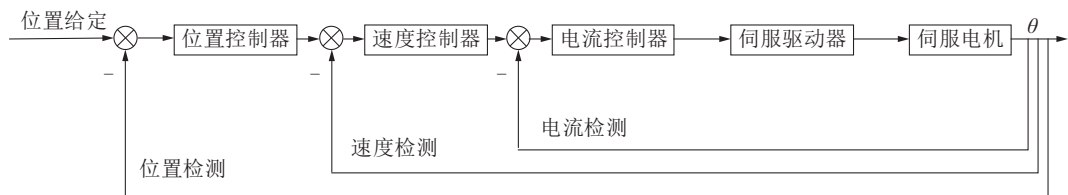


图 3 电缸驱动系统技术方案



注:θ—反馈信号,角位移。

图 4 伺服电机三环控制系统框图

辅助系统配置目的在于保障电缸稳定运行,主要包括润滑系统、冷却系统和防护系统。润滑系统

采用自动定时润滑模式,针对丝杠、导向套等关键运动部件实施精准供油。冷却系统采用风冷或水

冷方式,可根据电缸作业温度自动启停。防护系统采用IP67及以上等级的密封设计,配备防尘、防泥浆、防腐蚀的防护罩,防止钻井作业的恶劣工况对电缸核心部件的侵蚀。

3.2 电缸驱动系统的选型设计

主要对伺服电机、滚珠丝杠进行选型。结合钻井泵作业工况,针对性匹配电缸的关键参数,确保选型的科学性与经济性,围绕作业场景、作业需求和环境条件三个方面展开。

对于陆地常规油田,钻井环境相对稳定,作业负荷波动较小,侧重电缸的动力参数与经济性。根据泵压 ≥ 20.7 MPa确定额定推力,根据钻井泵额定功率的1.2~1.5倍配置伺服电机功率,确保动力冗余。控制精度方面,流量脉动率控制在 $\pm 3\%$ 以内即可满足需求^[17],选用常规精度级电缸,降低采购成本。

对于海洋、沙漠等特殊工况,选型核心在于环境适应性,包括高温、高湿度、高盐雾、多粉尘等。在海洋作业场景中,选用具备耐腐蚀、抗盐雾、抗振动等特性的定制化电缸,密封等级不应低于IP67,材质优先选择不锈钢或经防腐处理的合金材料^[18]。沙漠作业场景应重点关注防尘、防沙设计,配备加强型防尘罩,同时选用耐高温的伺服电机,提高设备可靠性。

对于深层超深层钻井、高压钻井等复杂作业工况,作业负荷大、参数波动频繁,选型侧重电缸的控制精度与承载能力。优先选择高精度滚珠丝杠,确保钻井泵各参数的精准调控。按钻井泵最大负荷的1.5~2.0倍配置^[19]额定推力,选用高强度合金材质的缸体与丝杠,提升电缸的抗冲击能力。

4 电缸驱动系统的技术难题及解决思路

4.1 关键技术难题

电缸在钻井泵的应用中面临极端工况适应、功率匹配、控制精度三大核心技术挑战,直接影响钻井泵的运行稳定性与作业成效。

4.1.1 极端工况适应

钻井作业场景复杂多样,常面临高温(沙漠地区 $\geq 60^\circ\text{C}$)、低温(寒区 $\leq -30^\circ\text{C}$)、高湿度、高盐雾(海洋环境)、多粉尘(沙漠环境)以及强振动、冲击负荷等极端工况^[20-23]。在极端温度条件下,伺服电机和

电缸的性能会受到明显影响。随着环境温度升高,伺服电机的绝缘性能会逐渐降低,润滑脂的流动性增大,润滑效果变差;在低温环境下,绝缘材料可靠性、润滑脂的流动性降低,导致电缸动作卡顿、磨损加剧。高湿度、高盐雾环境易造成电缸金属部件腐蚀、电气元件短路,强振动与冲击负荷则可能导致丝杠变形、传感器失灵,影响电缸正常运行。

4.1.2 功率匹配

在钻井泵作业过程中,由于井深、地层压力、钻井液密度与黏度、井眼清洁程度等随时间不断变化,泵压可能在短时间内出现波动^[24-27]。若功率配置不足,电缸会触发过载保护而停机,影响作业连续性。若功率配置过高,则会造成能源浪费,增加设备采购与运行成本。此外,多个电缸同步驱动时,功率分配不均会导致电缸受力失衡,加剧设备磨损,缩短设备使用寿命。电缸驱动系统功率密度低于液压系统,在同一功率需求下,电缸体积较液压系统更大,但通过高功率密度伺服电机、多电缸并联驱动及模块化布置,可实现紧凑化设计。

4.1.3 控制精度

钻井作业对钻井泵的排量、压力等参数要求极为严格,要求电缸具备高精度的位置与速度控制能力。在实际作业中,电缸运行会受到负载波动、外部振动等因素影响,导致控制精度降低。例如,钻井液黏度变化会改变钻井泵负荷,进而影响电缸的运行速度与位置精度。长期作业后,丝杠磨损会使传动间隙增大,导致排量与压力波动明显,最终可能对钻井作业的安全性构成威胁。

4.2 设计需求

针对上述问题,需满足以下设计需求:

(1)伺服电机绝缘等级满足极端温度运行要求,滚珠丝杠副采用宽温度范围的润滑材料,保证其启动、运行性能。

(2)电缸防护等级不低于IP67,关键电气部件具备防潮、防盐雾能力;结构设计需提高抗振动和抗冲击能力。

(3)伺服电机额定功率应与电缸负载相匹配,避免能源浪费;应综合考虑所需驱动功率、负载能力和安装空间。

(4)多电缸并联驱动时,各执行单元之间需实现合理的功率分配,避免因负载不均造成单个电缸

过载。

(5)具备高分辨率位置检测能力,实现闭环位置控制。

4.3 解决思路

围绕工况适配、功率优化及精度提升三大关键技术难题以及设计需求,本文提出以下方案,为电缸驱动系统在钻井泵中的稳定高效应用奠定基础。

4.3.1 工况适配解决方案

采用“材质优化+结构改进+辅助系统强化”的综合策略。在材质选择方面,针对极端工况选用耐腐蚀、耐高温或低温的特种材料。结构改进方面,采用多道密封圈组合使用,增强防尘、防水、防盐雾能力。辅助系统强化方面,配置智能温控系统与自动防尘清洁系统,实时适配作业工况的变化。还可通过工况模拟试验,预先验证电缸在极端工况下的性能,确保其适配性。

4.3.2 功率优化解决方案

构建“动态匹配+智能分配”的功率调控体系。采用变频调速伺服电机,根据钻井泵实时负载动态调控输出功率,实现功率的精准匹配,避免出现过载或功率浪费的情况。配置过载保护装置与能量回收系统,过载时自动切断动力并报警,在制动过程中回收能量,提高能源利用率。在多缸协同工作时,使用基于PLC的智能功率分配算法,实时监控各电缸的负载情况,动态调整各电缸的输出功率,确保功率分配均衡,减少电缸受力失衡问题。通过前期的工况仿真模拟分析,精确计算钻井泵最大负荷,科学配置电缸的功率冗余,兼顾作业的连续性与经济性。

4.3.3 精度提升解决方案

通过“硬件升级+算法优化+定期维护”的多维度方式保障精度。硬件升级方面,选用高精度传感器(如光栅尺位移传感器,精度达0.001 mm)与高性能伺服控制器,提升信号采集与处理精度。算法优化方面,引入自适应控制算法与模糊PID控制算法,实时补偿负载波动、摩擦力变化等因素对控制精度的影响,动态调整控制参数,确保电缸运行的稳定性。建立电缸维护台账,定期检查丝杠的磨损情况、清理传动部件的杂质、补充润滑脂等。

未来,电缸在钻井泵中的应用将围绕技术升级与场景拓展两大方向发展。(1)智能化与自主

化,开展电缸与人工智能、数字孪生等前沿技术的融合应用,实现对电缸运行状态的实时监测、故障预测与自主诊断,提前预警潜在故障并给出维护建议。(2)轻量化与集成化,采用高强度轻质材料(例如碳纤维复合材料)减轻电缸重量,优化结构设计,实现电缸与钻井泵的一体化集成,实现快拆快装等。

5 结论

电缸在钻井泵中的应用,凭借动力传输高效性、控制精准性、运行稳定性等优势,能够有效解决传统钻井泵传动效率低、压力脉动明显、维护成本高的问题,提升钻井作业的效率、质量与安全性,具有重要的工程应用价值与经济价值。

(1)新型电缸驱动系统的设计能够提高钻井泵传动系统效率、降低输出压力脉动、减少设备维护成本,适配作业现场钻井泵高负荷、大排量、连续作业的工况特征,为钻井泵向高效、智能、环保方向发展提供全新技术路径。

(2)新型钻井泵电缸驱动系统设计包括动力、传动、执行及辅助模块,形成“动力+控制+辅助”协同的一体化动力系统,推动钻井泵驱动方式由传统曲柄连杆向一体化电缸驱动转变。

(3)围绕工况适配、功率优化及控制精度提升三大关键技术难题,提出了对应的解决方案,为电缸驱动系统在钻井泵中的应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 张正,冉恒谦,张毅,等.特深科学钻探装备技术现状与发展建议[J].钻探工程,2024,51(4):14-22.
- [2] 秦永和,曹晓宇,张志伟,等.油气钻采装备技术发展现状与展望[J].前瞻科技,2023,2(2):89-104.
- [3] 赵珑,张天临,牛玺辉,等.LS-2600五缸钻井泵设计与应用[J].机械研究与应用,2024,37(1):98-101.
- [4] 张洪生,田旭东.3500HP型钻井泵曲轴结构研究与优化[J].工业加热,2019,48(6):60-63.
- [5] 王存洋,刘银.液压缸驱动式液压泥浆泵的研究[J].液压与气动,2007(9):19-21.
- [6] 胡亚.液压直驱泥浆泵的设计与研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2011.
- [7] 张洪生,李向荣,谷敏永,等.DP160-4型液压驱动隔膜泵方案设计[J].机床与液压,2010,38(12):46-47,80.
- [8] 侯勇俊,何浩,刘傲,等.基于曲柄摇杆机构的长冲程往复泵仿真与性能分析[J].机械设计,2026,43(3):47-54.
- [9] 王新华,王建新,齐明侠,等.液压驱动往复泵活塞运动特性分析[J].石油机械,2002,30(5):22-24,27.

- [10] 袁庆洪. 液压往复泵与泵用转阀及控制技术的研究[D]. 成都:西南石油大学, 2011.
- [11] 惠记庄, 罗联社, 纪真, 等. 新型泥浆泵液压系统设计与仿真分析[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(10): 1271-1274.
- [12] 刘振强, 张天保, 李玉峰. 深海电动缸齿轮传动机构设计及仿真[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(16): 109-114.
- [13] 李瑾瑾. 基于前馈控制的电动缸位移调节研究[J]. 智能制造研究与应用, 2026, 2(2): 17-19.
- [14] 雷先华, 贺沅玮, 吴其亮, 等. 永磁同步电机机电耦合高精度数值仿真研究[J]. 机械科学与技术, 2026, 45(7): 1165-1172.
- [15] 高群松. 永磁同步电机在石油化工行业的应用[J]. 中国化工装备, 2025, 27(6): 22-25.
- [16] 胡鑫, 赵昕, 李伟, 等. 采用电动缸的火炮随动系统位置控制研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(1): 245-248, 258.
- [17] 张洪生, 郑武, 李继霞, 等. 基于Matlab的五缸钻井泵流量动态特性的研究[J]. 机床与液压, 2013, 41(15): 96-99.
- [18] 潘平. 适用于深海的电动缸设计[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(13): 109-113.
- [19] 全国石油钻采设备和工具标准化技术委员会. 石油天然气工业钻井和修井设备钻井泵: GB/T 32338—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] 陈远鹏, 王志远, 孙宝江, 等. 极地钻井关键设备橡胶密封材料的优选[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 54-60.
- [21] 王宴滨, 张辉, 高德利, 等. 低温环境下钻柱材料力学特性试验及强度设计[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 35-41.
- [22] 赵越. 极端气候条件下钻井机械设备的适应性改造与防护措施[J]. 石油和化工设备, 2025, 28(10): 193-195, 189.
- [23] 李春光. 高温环境对钻井设备的影响及改进措施[J]. 山东工业技术, 2016(23): 96.
- [24] 王小江, 郝子轩, 房勇钢. 钻井中泵压变化原因分析及事故预防措施[J]. 中国高新技术企业, 2016(6): 151-152.
- [25] 黎强. 油田钻井设备常见故障诊断与维修技术研究[J]. 清洗世界, 2026, 42(3): 187-189.
- [26] 张涵驰. 高温高压钻井技术优化措施研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2026, 46(4): 157-159.
- [27] 刘久春. 自动化钻井系统的关键技术研究与应用[J]. 石油和化工设备, 2025, 28(10): 181-183.

(编辑 王文)