

基于高扭矩直流电机的电动绞盘系统设计与性能优化研究

胡金妙

浙江鸿宾工贸有限公司 浙江金华 321000

【摘要】 电动绞盘是高效牵引传动设备，广泛用于越野救援、工程作业、船舶装卸等领域，其工作性能决定作业效率与运行安全性。高扭矩直流电机因启动扭矩大、调速性能优、结构紧凑，成为电动绞盘系统核心动力源。本文基于机电一体化理念，以理论分析与逻辑推演为核心，探讨基于高扭矩直流电机的电动绞盘系统整体设计方案，剖析动力传递、控制调节、安全防护等关键模块设计要点，针对扭矩匹配、能耗控制、稳定性提升等问题提出性能优化策略。研究表明，合理的电机选型与传动机构匹配、精准的控制算法设计及完善的安全防护机制，是提升电动绞盘系统牵引效能、运行稳定性与使用寿命的关键。本文研究为高扭矩直流电机在电动绞盘系统的工程应用提供理论支撑，也为同类牵引设备设计优化提供参考。

【关键词】 高扭矩直流电机；电动绞盘；系统设计；扭矩匹配；性能优化

Research on Electric Winch System Design and Performance Optimization Based on High-Torque DC Motors

Hu Jinmiao

Zhejiang Hongbin Industrial & Trading Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang 321000

【Abstract】 Electric winches serve as high-efficiency traction transmission equipment widely used in off-road rescue operations, engineering projects, and maritime loading/unloading operations. Their operational performance directly determines work efficiency and operational safety. High-torque DC motors, characterized by substantial starting torque, superior speed regulation capabilities, and compact structure, have become the core power source for electric winch systems. Grounded in mechatronics principles and theoretical analysis, this study explores integrated design solutions for high-torque DC motor-based electric winch systems. Key module design considerations—including power transmission mechanisms, control algorithms, and safety protection systems—are systematically analyzed, with performance optimization strategies proposed for torque matching, energy consumption control, and stability enhancement. The research demonstrates that rational motor selection, optimized transmission mechanism coordination, precision control algorithm design, and robust safety protocols are critical factors in improving traction efficiency, operational stability, and service life of electric winch systems. This study provides theoretical foundations for engineering applications of high-torque DC motors in electric winch systems and offers valuable references for similar traction equipment design optimization.

【Key words】 High-torque DC motor; Electric winch; System design; Torque matching; Performance optimization

一、引言

在现代工业生产与应急救援领域，电动绞盘是核心牵引设备，承担重物拖拽等关键任务，其性能影响作业效率与安全。随着机电一体化发展，电动绞盘系统向智能化、高效化转型，动力源升级是关键。高扭矩直流电机优势显著，适配电动绞盘工作特性，成中大功率电动绞盘首选动力装置。

然而，电动绞盘系统应用中存在技术瓶颈，如高扭矩下电机与传动机构匹配精度不足、低速重载时转速稳定性差、复杂环境下安全防护机制待完善，这些制约工作效能，影响高端场景应用。

本文基于相关理论，结合高扭矩直流电机特性，构建电动绞盘系统一体化设计框架，从多方面分析系统，针对性能瓶颈提出优化路径。通过理论推演明确设计核心逻辑，为提升系统性能提供理论指导，助力高扭矩直流电机在牵引设备领域的应用与升级。

二、高扭矩直流电机的工作特性与选型原则

2.1 核心工作特性解析

高扭矩直流电机核心工作特性体现在扭矩输出、调速性能、运行稳定性三方面，与内部结构设计相关。扭矩输出上，通过优化电枢绕组、增大磁通量密度、优化换向器设计，提升启动与额定扭矩，低速扭矩大，适配电动绞盘低速重载需求，且扭矩系数高、动力转换效率优。

调速性能是另一核心优势，改变电枢电压或励磁电流可宽范围平滑调速，精度高、响应快，满足不同作业场景牵引速度需求，且机械特性硬度高，负载波动时转速变化小，运行稳定。

运行可靠性方面，结构紧凑、零部件少、故障率低、维护便捷，适应复杂环境，但存在电枢发热、换向火花问题，散热或负载不当易致电机过热，影响系统安全。

2.2 电动绞盘系统的电机选型原则

高扭矩直流电机选型要以电动绞盘作业需求为核心，综合负载特性、运行工况、性能指标等因素，实现动力输出、能耗控制与运行稳定性平衡。首要原则是扭矩匹配，根据绞盘牵引负载和传动机构损耗，确定电机额定与最大扭矩，保证稳定运行和过载应对能力。

转速匹配也是核心原则,结合绞盘牵引速度和调速范围确定电机额定转速与调速区间,电机转速要高于绞盘工作转速,通过传动比实现转速与扭矩转换,且调速时扭矩稳定。

此外,要兼顾能耗、散热与结构兼容性。能耗上选高效率电机,提升续航;散热要适配工作负载与时长,长时间重载作业选散热优化电机或配辅助装置;结构上选尺寸与安装方式适配的电机,保证系统紧凑合理。

2.3 选型常见问题与规避策略

电机选型不当会导致系统性能不足、能耗高、设备磨损等问题。常见误区有过度追求高扭矩忽视转速与负载匹配、未考虑作业环境因素选防护等级不足电机、忽视传动机构损耗致牵引扭矩不足。

为规避问题,选型要全面分析需求和理论计算,明确核心参数,充分考虑传动机构损耗和环境影响,预留性能冗余。优先选技术成熟、口碑好的电机产品,参考同类应用案例,以示例进行选型参考,提升选型合理性与可靠性。

三、基于高扭矩直流电机的电动绞盘系统整体设计

3.1 系统整体架构设计

该电动绞盘系统采用机电一体化架构,分动力、传动、控制、执行与安全防护五大核心模块,协同实现牵引作业精准控制与安全运行。动力模块以高扭矩直流电机为核心,搭配辅助部件提供动力;传动模块传递动力,减速增扭;控制模块精准控制电机;执行模块完成重物牵引;安全防护模块监测状态、触发保护。

系统设计遵循模块化、集成化原则,各模块独立且接口标准,便于安装等。动力与传动模块刚性耦合,减少损耗与振动;控制模块与其他模块实时交互;执行模块兼顾强度与便捷性。整体架构需考虑模块耦合,优化布局。

3.2 传动模块设计要点

传动模块连接动力与执行模块,影响动力传递等。通常采用“减速机构+联轴器+卷筒”结构,目标是减速增扭等。

减速机构选型是核心,常用行星、蜗轮蜗杆、谐波减速器。行星齿轮减速器适用于中大功率系统;蜗轮蜗杆减速器用于安全要求高、负载小场景;谐波减速器用于高端场景。传动比结合电机与绞盘转速计算,考虑损耗。

联轴器设计适配连接需求,减少振动与冲击;卷筒设计结合负载与钢丝绳规格。此外,传动模块需配备润滑装置。

3.3 控制模块设计逻辑

控制模块是系统“大脑”,负责接收指令、采集参数、控制电机,实现精准控制与智能化调节。采用“控制器+传感器+驱动器”架构,实现多种控制。

控制器选型适配控制需求,常用单片机、PLC、嵌入式控制器。单片机适用于小型系统;PLC适用于工业场景;嵌入式控制器适用于高端智能系统。控制器预设算法,精准调节电机,具备信号采集等功能,功能:响应传感器反馈信号与外部操作指令。传感器配置是实现闭环控制与状态监测的关键,要根据控制需求配置转速、扭矩、电流、温度等传感器。转速传感器采集电机与卷筒转速信号反馈给控制器,实现转速闭环调节;扭矩传感器监测传动模块扭矩,避免过载;电流与温度传感器监测电机工作电流与温度,为保护提供依

据。驱动器将控制器控制信号转换为电机驱动信号,实现电机精准控制,有过流、过压保护功能保障电机安全。

3.4 执行模块与安全防护模块设计

执行模块设计核心是确保牵引作业可靠与安全,由卷筒、钢丝绳、吊钩、导向轮等组成。卷筒选高强度合金钢,经热处理提升性能,表面有螺旋槽引导钢丝绳缠绕。钢丝绳选高强度、耐腐蚀型号,有张紧装置。吊钩有足够承载能力和防脱装置。导向轮改变钢丝绳牵引方向,减少摩擦损耗。

安全防护模块是电动绞盘系统设计重点,要构建多层次防护机制,包括过载、过流过热、紧急制动、防逆转等防护。过载防护通过扭矩传感器监测,超额定值时控制器指令停电机或报警。过流过热防护通过电流与温度传感器采集参数,异常时触发断电保护。紧急制动防护设独立按钮,可快速切断电源。防逆转防护通过传动模块的棘轮机构或电磁制动器防止重物反向拖动。此外,系统配备报警装置,对异常工况声光报警提醒处理。

四、电动绞盘系统性能优化策略

4.1 扭矩匹配优化与动力损耗控制

扭矩匹配不足会导致电动绞盘系统动力损耗大、机构磨损加剧,需从电机选型、传动比调整、动力传递结构优化三方面优化。电机选型要基于绞盘实际负载特性,精准计算扭矩需求,选契合的电机;负载波动大时,采用变扭矩控制策略。传动比优化是提升匹配精度关键,要结合电机与绞盘转速、负载扭矩需求确定最优值,还可采用多级减速结构。动力传递结构优化需减少接触间隙与摩擦损耗,提高部件加工与装配精度,采用高效润滑油脂。

4.2 调速性能优化与运行稳定性提升

调速性能优化目标是实现宽范围、高精度、平稳调速,可采用脉宽调制调速算法,引入PID控制算法构建闭环调速系统。运行稳定性提升要针对振动与噪声问题,在结构设计上增加刚度、优化布局,设置缓冲装置;抑制电机换向火花与噪声,采用抗干扰设计。

4.3 散热系统优化与能耗控制

高扭矩直流电机低速重载运行易发热,散热系统优化要结合电机发热特性与工况,小型系统可自然散热,中大功率系统需强制风冷,长时间连续作业可用水冷。能耗控制从提升电机效率与能量回收入手,选高效率电机,优化控制策略,引入能量回收机制。

4.4 安全防护机制优化与可靠性提升

安全防护机制优化要构建全方位、多层次防护体系。过载防护采用双传感器监测,负载超额定值触发电机停机并锁定卷筒。过流过热防护需优化监测阈值设定,结合电机额定参数与运行工况动态调整保护阈值,避免因阈值不当致防护失效或误触发。

优化防逆转防护机制,采用机械与电磁双重制动保障。机械制动用棘轮机构自锁,电磁制动在电机停机时快动锁定传动模块,防重物反向拖动,提升系统安全性。此外,增加故障诊断功能,控制器实时监测各模块运行参数,识别电机、传动机构、传感器等故障,发报警信号并记录故障信息,为排查维护提供依据,提升系统可靠性与可维护性。

五、系统设计与优化的理论验证与应用适配

5.1 理论验证逻辑与方法

基于高扭矩直流电机的电动绞盘系统设计与优化方案,需进行理论验证以确保可行性与合理性。验证围绕扭矩传递效率、调速精度等关键性能指标,采用理论计算与仿真分析相结合的方式,为工程应用提供理论支撑。

理论计算针对动力传递效率等指标,通过建立电机拖动等模型,代入参数计算分析,如计算传动机构效率损耗、电机发热与散热平衡。仿真分析用专业机电仿真软件构建整体模型,模拟不同工况,分析参数变化规律。

验证中重点关注极端工况下系统性能,针对问题及时调整设计参数与优化策略,直至满足要求。

5.2 不同作业场景的应用适配调整

电动绞盘系统应用场景多样,需根据具体场景适配调整设计方案。越野救援场景,需绞盘便携、响应快、适应环境,选小体积高扭矩电机,优化结构布局,强化过载防护与紧急制动。工程作业场景,对扭矩输出等要求高,选大功率电机,配备高强度传动机构与高效散热系统,增加远程控制功能。船舶装卸场景,环境湿度大、腐蚀性强,选防腐防潮零部件,强化防逆转与过载防护。

适配调整保持核心设计框架不变,重点优化电机选型等,确保满足场景需求且具通用性与可扩展性。

5.3 应用案例的理论参考价值

结合同类电动绞盘系统应用案例,可为本次设计与优化方案提供实践参考。某越野救援用绞盘系统,优化传动比与扭矩匹配,引入调速算法与安全防护机制,提升牵引性能与运行稳定性。另一工业级绞盘系统,优化散热与润滑方案,增加故障诊断功能,提升使用寿命与可维护性。这些案例表明本文设计框架与优化策略能解决核心技术瓶颈,具理论参考价值与工程应用前景。

六、关键技术瓶颈与未来发展趋势

6.1 当前核心技术瓶颈

基于高扭矩直流电机的电动绞盘系统设计与优化技术虽有进展,但实际应用中仍面临核心技术瓶颈。一是高扭矩工况下动力传递效率待提升,极端重载场景中传动机构摩擦与能量损耗明显,影响系统效能。二是电机散热与能耗平衡

难题未解决,高扭矩直流电机长时间重载发热量大,现有散热方式能耗高、结构复杂,难达散热与能耗最优平衡。三是智能化控制水平待提升,现有系统调速与负载适配多基于预设算法,缺乏复杂工况自适应调节能力,控制精度与稳定性有提升空间。四是材料与加工工艺受限,高扭矩传动对部件强度与耐磨性要求高,现有技术难满足极端工况需求,易加剧机构磨损,影响系统寿命。

6.2 未来技术发展趋势

随着机电、新材料、人工智能技术发展,电动绞盘系统将向高效化、智能化、轻量化、长寿命方向发展。动力源上,将研发高效节能高扭矩直流电机,优化结构、采用新型永磁材料,提升扭矩与能量转换效率,降低能耗与发热;应用混合动力驱动模式,结合电池与超级电容优势,提升续航与动力响应。智能化控制方面,融合人工智能算法与大数据分析,系统可学习作业场景特性与规律,实现自适应调速、扭矩匹配与故障预判,提升控制精度与智能化;应用远程控制与物联网技术,实现多台绞盘协同作业与集中管控,提升效率。材料与加工工艺上,应用新型高强度、高耐磨材料,采用3D打印等先进工艺,提升部件精度与性能,减少磨损与能耗,延长系统寿命。结构设计上,重点是轻量化,优化布局、采用轻材料,降低重量,提升便携与灵活;推进集成化,集成电机等部件,减少空间占用,提升集成度与可靠性。此外,绿色节能理念贯穿设计,通过能量回收等技术,实现能耗最小化,符合绿色发展需求。

七、结论

本文基于机电一体化理念,围绕高扭矩直流电机在电动绞盘系统的应用,探讨整体设计方案与性能优化策略。通过理论分析,明确各模块设计要点与耦合关系及优化方向,得出结论:高扭矩直流电机优势明显,适配电动绞盘作业特性,是中大功率系统理想动力源,选型要遵循相关原则确保契合需求。电动绞盘系统整体设计需构建一体化架构,各模块协同,传动、控制、安全防护模块是核心环节。针对系统问题,采用优化策略可提升牵引效能等。当前该系统面临技术瓶颈,未来要结合先进技术向高效、智能、轻量化发展。本文设计框架与策略为系统工程设计及同类设备技术升级提供参考。后续可结合实验与案例验证方案可行性,深入研究瓶颈问题,推动系统性能提升。

参考文献

- [1]杨少琴,庄衍平.一种直流电机驱动的内装式电动电缆绞盘[J].移动电源与车辆,2014(2):14-15,23. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4250.2014.02.004.
- [2]顾万里,张森,胡云峰,等.有刷直流电机非线性控制系统设计[J].吉林大学学报(工学版),2017,47(3):900-907. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201703029.
- [3]任星龙,张军,艾尔肯·衣的热斯,等.多功能高低压接地线绕放线机与绞盘机研究[J].工程技术研究,2024,6(24):147-149. DOI: 10.12417/2705-0998.24.24.049.
- [4]靳楠,孙孟文.车辆外置绞盘卡滞机理分析及防卡滞研究[J].汽车与驾驶维修,2025(11):65-67.
- [5]朱达荣,朱卫国.低速高扭矩永磁直流电机的设计及参数解析计算[J].安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2006,14(4):84-86. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4540.2006.04.025.