

Design of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System for Electric Tractors and Optimization of Control Strategy

Xing Yu

The Party Building Work Office of Chagan Nuor Township, Bohu County, Bazhou, Xinjiang, 841400, China

Abstract

With the acceleration of agricultural mechanization and intelligence, electric tractors have become the development trend of agricultural equipment due to their advantages such as high efficiency, greenness and intelligence. Permanent magnet synchronous motors are widely used in drive systems due to their high power density and excellent speed regulation performance. This paper systematically analyzes motor selection, drive structure, key parameter matching and control strategy optimization. Combined with the operating conditions, it discusses methods such as vector control, direct torque control and energy management. The results of model simulation and real vehicle tests show that the optimized control strategy significantly improves the response speed, anti-interference ability and energy efficiency of the drive system, and extends the battery life. The article also puts forward future technological research and development directions, providing theoretical and engineering references for the electrification and intelligence of agricultural equipment.

电动拖拉机永磁同步电机驱动系统设计与控制策略优化

于兴

博湖县查干诺尔乡党建工作办公室，中国·新疆巴州 841400

Keywords

electric tractor; permanent magnet synchronous motor; drive system; control strategy; vector control

摘要

随着农业机械化和智能化加速，电动拖拉机凭借高效、绿色、智能等优势成为农业装备发展趋势。永磁同步电机因其高功率密度和优良调速性能被广泛应用于驱动系统。本文系统分析了电机选型、驱动结构、关键参数匹配及控制策略优化，结合作业工况，探讨了矢量控制、直接转矩控制及能量管理等方法。模型仿真与实车测试结果表明，优化的控制策略显著提升了驱动系统响应速度、抗干扰能力和能效，延长了电池寿命。文章还提出了未来技术攻关方向，为农业装备电动化和智能化提供理论与工程参考。

关键词

电动拖拉机；永磁同步电机；驱动系统；控制策略；矢量控制

1 引言

伴随乡村振兴和绿色农业战略的推进，农业机械电动化成为现代农业装备升级的重要趋势。传统内燃机拖拉机存在排放高、噪音大、能耗高等弊端，难以适应生态农业与可持续发展需求。电动拖拉机以零排放、低噪音和高效率等优势，逐步获得业界重视。永磁同步电机因结构简单、效率高、调速性能优良，已成为电动拖拉机驱动系统的主流。与异步电机、直流电机相比，PMSM 更能满足频繁启停、高峰负载等复杂作业需求。然而，农业工况多变，对驱动系统动力

性、能效性和控制鲁棒性要求极高，现有研究多聚焦单一环节，缺乏面向实际应用的全链路优化。本文基于电动拖拉机典型工况，综合分析驱动系统架构、器件匹配、控制策略创新及系统仿真与实车测试，提出全流程优化方案，旨在为高性能驱动系统设计与智能控制策略的应用推广提供理论依据与工程支持。

2 电动拖拉机永磁同步电机驱动系统总体设计

2.1 系统结构与总体架构分析

电动拖拉机驱动系统通常由动力电池组、主驱动电机、控制器、功率变换器、传动机构及辅助系统组成。永磁同步电机作为核心执行单元，直接决定整机的动力响应和能效水平。系统总体架构需要根据拖拉机作业特点（如耕地、运输、

【作者简介】于兴（1984-），女，蒙古族，中国新疆巴州人，本科，工程师。

犁地、田间作业等),合理设计电池容量、电机额定功率、峰值扭矩与传动比。平台架构宜采用分布式或集中式动力方案,兼顾系统集成度与维护便捷性。在驱动链路上,PMSM与逆变器通过高速CAN或Ethernet协议进行数据交互,实现实时状态监控与故障预警。辅助系统包括液压泵、转向系统、冷却系统和远程通信单元。为适应高温、粉尘、潮湿等复杂农业环境,系统须具备优良的防护等级和环境适应性。整机架构设计应以高集成度、模块化和易维护为核心,实现关键器件的快速更换与功能扩展。

2.2 永磁同步电机选型与参数优化

永磁同步电机的选型直接影响电动拖拉机的动力性能与能效表现。拖拉机作业过程中常伴有高峰负载、频繁启停和低速大扭矩需求,因此电机须具备高过载能力、宽调速范围与良好的热管理性能。参数设计上,需平衡额定功率、峰值扭矩、最高转速、效率曲线和热容量。通过多目标参数优化方法,结合仿真与实验数据,确定最优电机磁极对数、定子槽数、永磁材料类型及尺寸、绕组方式、冷却结构等。为提升系统可靠性,需加强转子磁钢防退磁设计、轴承抗振与绝缘保护,确保长期高负载下的稳定运行。针对不同机型与作业需求,可采用双电机耦合或一体化集成电机方案,提升系统的动力适应性和扩展性。^[1]

2.3 功率变换器与驱动控制器设计

驱动系统中的逆变器和主控器件对整机能效和响应速度起决定性作用。功率变换器多采用三相全桥IGBT或SiCMOSFET拓扑,兼顾高效率和高频开关特性。控制器集成多核处理器、FPGA与多路AD采集,支持高精度电流/电压检测、PWM调制和故障诊断。驱动控制器需支持多模式切换,包括纯电驱动、能量回馈、辅助功率管理等。主控软件应具备高可靠性和容错设计,支持多任务并行处理和冗余容错机制。通信协议设计要符合车载总线标准,支持远程升级和云端数据交互,便于运维和系统优化。

3 永磁同步电机驱动系统关键技术与工程实现

3.1 工况分析与驱动系统参数匹配

电动拖拉机作业场景复杂,典型工况包括田间作业、道路运输、低速重载和高速空载等。不同工况下,对驱动系统的扭矩、功率、能耗及响应速度要求差异明显。通过大数据采集与典型工况建模,分析拖拉机在各类作业下的动力需求,确定电机、变频器和电池组的最佳参数匹配关系。工况分析还需考虑坡道作业、泥泞路况、频繁换挡等特殊场景,保证驱动系统在极端环境下具备充足的动力储备与能耗控制能力。参数匹配采用仿真—台架—实地测试三级联动方法,确保设计参数的合理性与工程适应性。^[2]

3.2 永磁同步电机的散热与保护系统

PMSM在高负载、长时间作业时极易产生发热,热管理系统的优劣直接影响电机寿命与运行安全。针对农业作业

的高温高湿环境,需设计高效散热结构(如风冷、水冷或油冷),结合温度传感器实时监测,动态调节冷却策略。电机保护系统包括过流、过温、短路、过压、欠压等多重保护机制,主控器能实时识别异常并执行相应的保护动作。对关键部件采用冗余设计,提升系统的安全冗余能力。通过多维度热管理与保护策略,显著提升电机的可靠性与抗故障能力。

3.3 系统集成与车辆功能拓展

为提升整机智能化水平,PMSM驱动系统需支持与农机作业管理系统、智能监控终端等设备的数据互通。系统集成要求驱动控制、能量管理、远程运维、GPS定位等多模块协同工作,实现拖拉机的智能控制和精准作业。基于CAN/以太网的分布式系统架构,可支持动力系统、作业系统、环境感知系统的深度融合。面向未来农业无人化、自动驾驶等趋势,预留算法接口和传感器接入端口,提升拖拉机智能化和自动化应用拓展空间。

4 永磁同步电机驱动系统控制策略优化

4.1 矢量控制策略的原理与优化实现

矢量控制(Field Oriented Control, FOC)是当前PMSM驱动的主流控制方法,能够实现对电机磁链和电流的解耦控制,实现快速、精准的动态响应。其基本原理是在旋转坐标系下,将三相电流变换为直轴(d轴)和交轴(q轴)分量,通过PI或自适应调节器分别控制磁链和转矩。为适应拖拉机多变工况,优化FOC控制器的参数整定和实时自适应能力是关键。可采用遗传算法、神经网络等智能算法实现参数在线优化,提升系统鲁棒性。加入前馈补偿和观测器设计,有效抑制电机振荡和外界扰动影响,确保驱动系统在低速大转矩、高速轻载等极端工况下的稳定运行。^[3]

4.2 直接转矩控制与高性能自适应策略

直接转矩控制(DTC)以其控制结构简单、响应速度快、对模型依赖性低等优点,被广泛应用于高性能PMSM驱动。DTC通过直接调节定子磁链与转矩,实现无速度传感器下的高精度控制。针对电动拖拉机频繁启停和多任务作业,优化DTC的转矩脉动抑制算法,提升系统的平顺性和响应速度。在实际应用中,将自适应模糊控制、滑模变结构控制等现代控制理论与传统DTC融合,实现控制参数在线辨识与自调节。通过多模型切换与抗干扰设计,提高驱动系统的自适应能力,确保在作业负载快速变化时的系统稳定性和高效性。

4.3 能量管理与多工况协同优化

拖拉机作业能耗大且工况多变,能量管理策略直接影响整机经济性和电池寿命。基于作业工况识别的能量管理方法,将拖拉机典型作业划分为高负载、低负载、怠速待机等多种状态,根据当前工况动态分配驱动能量与回馈能量。通过集成SOC(电池荷电状态)估算、能耗预测与智能调度算法,实现驱动功率、电池输出、能量回收的协调优化。对

回馈制动能量、辅助功率消耗等环节进行动态管理,兼顾动力性与经济性。引入多目标优化算法,根据不同作业需求自动调整控制策略,提升驱动系统整体能效和可靠性。

5 系统仿真分析与实车验证

5.1 仿真平台构建与性能测试方法

基于 MATLAB/Simulink 平台,建立包含电池、PMSM、逆变器、控制器、作业负载等子模块的电动拖拉机系统仿真模型。仿真平台可对不同作业工况下的驱动系统性能、动态响应、能耗分布、故障工况等进行虚拟测试与性能评估。性能测试包括加速性能、负载响应、再生制动、极端工况下的保护响应等指标。通过仿真对控制策略进行参数优化与可行性验证,为实车测试提供理论支撑。采用 HIL (Hardware-in-the-Loop) 仿真技术,实现控制系统与物理模型的高效集成与动态互动,提升开发效率和安全性。

5.2 实车试验系统搭建与测试流程

选取典型电动拖拉机机型,集成 PMSM 驱动系统及优化控制器,搭建实车测试平台。通过安装多通道数据采集设备,实时监测电机电流、电压、转速、温度、负载扭矩、电池 SOC 等关键参数。测试工况涵盖田间耕作、运输、怠速、坡道起步、高速行驶等典型作业模式。测试流程包括驱动系统启动与加速、稳态巡航、负载突变、故障保护等环节。分析不同控制策略下系统的动力响应、能效表现与故障恢复能力,对比仿真结果与实测数据,验证设计方案的可靠性与工程适用性。^[4]

5.3 测试结果分析与优化建议

实车测试结果表明,基于自适应矢量控制与多工况能量管理的 PMSM 驱动系统,在各类作业环境下均表现出优良的动力响应和能效水平。动力输出平顺,负载波动时电机转矩调节迅速,能量回馈效率高,有效延长了电池续航能力。故障检测与保护机制反应灵敏,有效防止了过载与过热风险。针对部分极端工况(如重载泥泞路段、连续高负载作业等)下的电机温升和功率输出波动,可进一步优化散热系统与控制参数整定。建议后续通过深度融合 AI 控制算法、提升器件热管理能力与系统自诊断水平,持续提升驱动系统整体性能与安全性。

6 未来发展方向与技术攻关建议

6.1 复杂农业环境下驱动系统适应性提升

电动拖拉机作业环境多变,对驱动系统的环境适应性和鲁棒性提出更高要求。未来需加强驱动系统的防尘、防水、

防振等能力设计,研发适应高温、高湿、低温、强冲击等极端环境的新型电机与控制器。通过环境自感知与参数自适应技术,实现系统在多变工况下的动态调节与自我保护。

6.2 智能化控制与自主作业技术创新

伴随农业无人化、精准作业的需求提升,PMSM 驱动系统将深度融合智能感知、路径规划与自主决策等技术。开发基于深度学习、专家系统的自适应控制策略,实现拖拉机自主作业、障碍物规避与能耗最优路径规划。推动驱动系统与智能农机云平台、北斗导航等系统的协同集成,赋能未来农业装备智慧升级。^[5]

6.3 高效能量管理与系统集成优化

为进一步提升电动拖拉机运行经济性和可靠性,需深化多源能源协同优化管理技术研究。发展基于大数据与 AI 的能耗预测、智能调度、故障自诊断等技术,实现电机、电池、逆变器、作业负载等多系统协同优化。加快新型高性能永磁材料、高效冷却技术及模块化系统集成的产业化推广,推动我国农业电动装备迈向绿色、智能、高端发展新阶段。

7 结语

电动拖拉机永磁同步电机驱动系统的设计与控制策略优化,是推动现代农业绿色转型和装备智能化升级的核心关键。本文系统梳理了电动拖拉机 PMSM 驱动系统的结构设计、核心器件参数匹配、智能控制策略与能量管理等关键环节,提出了系统集成优化与未来发展建议。仿真与实车验证表明,基于矢量控制、自适应优化和多工况能量管理的驱动系统,能够显著提升整机动力响应、能效和可靠性。面对农业复杂工况和多样化应用需求,需持续推动驱动系统的智能化、集成化与环境适应性技术创新,为我国农业机械电动化、智能化进程提供坚实技术支撑和工程样板。

参考文献

- [1] 张昊.电动汽车永磁同步电机SiC驱动系统硬件设计研究[J].专用汽车,2024,(09):103-105.DOI:10.19999/j.cnki.1004-0226.2024.09.025.
- [2] 郑伟亮,王成群.基于双核架构的永磁同步直线电机驱动控制系统设计[J].中国集成电路,2025,34(03):63-70.
- [3] 陈宗楠.电动汽车电机驱动系统可靠性研究与分析[D].大连交通大学,2023.
- [4] 白聪.永磁同步直线电机驱动系统扰动抑制方法研究[D].西安理工大学,2023.
- [5] 顾捷,邓孝华,叶萌,等.电动汽车永磁同步电机IGBT驱动系统硬件设计[J].机电元件,2022,42(06):14-17.作者信息表