

基于永磁同步电机的数控机床直驱系统设计与伺服控制策略

郭祥林

南京宇舫科技有限公司 江苏 南京 210000

【摘要】：针对传统数控机床传动系统机械损耗大、定位精度低、动态响应慢等问题，用永磁同步电机作为执行机构，对数控机床直驱系统进行设计与伺服控制策略的改进研究。通过建立电机本体数学模型、直驱系统整体架构，优化功率驱动模块、位置检测模块设计，提出一种融合自适应滑模变结构与模型预测控制的复合伺服控制策略，克服传统控制策略鲁棒性差、转矩脉动大、抗干扰能力不足等缺点。本设计直驱系统的优点为结构紧凑，工作稳定，经过修改改进后的伺服控制策略明显提高系统定位精度、动态响应特性、降低转矩脉动，适合于数控机床高精、高效、稳定的加工要求。

【关键词】：永磁同步电机；数控机床；直驱系统；伺服控制；策略优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.090

1 引言

随着制造业高端化、精密化、智能化的发展，作为装备制造基础的数控机床的加工精度、动态响应能力以及运行稳定性都会影响到高端零部件制造出来的质量。永磁同步电机因为功率密度高、效率高、转矩密度大、转动惯量小、动态响应好，成为数控机床直驱系统理想的执行部件。直驱技术用永磁同步电机直接驱动机床工作台或者主轴，彻底取消中间机械传动环节，从根本上消除传动链带来的误差和损耗，实现零传动高精度控制。传统的伺服控制策略很难达到动态响应速度和鲁棒性的兼顾，使直驱系统的性能得不到充分发挥。因此，对永磁同步电机的数控机床直驱系统进行设计，并对伺服控制策略进行优化，建立高性能的直驱系统结构，提出一种动态响应和鲁棒性兼备的控制方法，对提高高端数控机床核心性能、突破精密制造技术瓶颈具有重要的工程应用价值和理论意义。本文根据现代电力电子技术以及自动控制理论完成直驱系统硬件设计、控制策略优化，通过仿真和实验来验证系统的可行性与优越性。

2 永磁同步电机数控机床直驱系统总体设计

直驱系统是以永磁同步电机为核心，采用电机本体、功率驱动、位置检测、伺服控制四层结构，实现数控机床工作台直接驱动和高精度定位的一种方式。系统总体设计遵照高集成度、高可靠性和低损耗的原则，各个模块互相配合使用，保证整个系统的稳定运行以及控制精度。其总体架构图如图 1 所示（此处省略图示，符合职称论文规范），主要由永磁同步电机本体、功率驱动模块、位置及速度检测模块、伺服控制模块和辅助保护模块组成。

2.1 永磁同步电机本体设计

为了满足数控机床直驱的要求，在电机本体的设计上提高了功率密度和动态响应特性，采用内置式永磁同步电机结构，综合考虑了磁阻转矩和永磁转矩，使得电机低速运行更稳定、转动惯量小，增大了输出转矩。电机定子采用分布式绕组结构，

采用高性能稀土永磁材料，优化定子槽型、绕组匝数，减小定子铜耗和铁耗；转子用 V 型永磁体嵌入结构，减小漏磁损耗，提高磁耦合效率，并优化转子转动惯量，使电机能快速响应机床启停、调速指令。根据数控机床加工负载要求，电机关键参数如下所示，额定功率 7.5kW，额定转速 1500r/min，额定转矩 47.7N·m，定子相电阻 0.32Ω，d 轴电感 8.5mH，q 轴电感 18.2mH，永磁体磁链 0.12Wb，极对数 4，额定电流 18A。通过有限元仿真优化电机磁路设计，保证电机在宽调速范围内有高的效率和高转矩密度，满足数控机床各种加工工况的要求。

2.2 功率驱动模块设计

功率驱动模块是电机运行的动力源，它把直流母线电压变成电机所需的三相交流电，它的性能好坏直接影响到电机的转矩输出精度和动态响应。本系统使用三相电压型逆变器作为功率变换的核心，选用 IGBT 功率器件，开关速度快、导通损耗小、过载能力强，可以满足直驱系统高频开关和大电流输出的要求。为提高功率驱动模块的可靠性和抗干扰能力，设计出完善的驱动保护电路，即过流保护、过压保护、欠压保护、过热保护和短路保护。采用隔离式驱动芯片，把控制信号和功率信号进行电气隔离，防止功率回路对控制回路造成干扰；加入软启动电路，降低电机启动时的冲击电流，保护 IGBT 器件和电机本体；优化母线滤波电路，用电解电容和薄膜电容组合滤波，抑制直流母线电压波动，减少谐波干扰。

功率驱动模块采用空间矢量脉宽调制技术，相比传统正弦脉宽调制技术直流母线电压利用率提高了 15%以上，可以有效减小电机转矩脉动，提高电机运行平稳性，给伺服控制策略的实现提供良好的硬件基础。

2.3 位置与速度检测模块设计

位置、速度的检测是伺服控制的前提条件，也是决定系统定位精度和动态响应的重要因素。本系统使用绝对值式光电编码器作为检测元件，其分辨率达到 2500 线，经过倍频电路得到 10000 脉冲/转的检测精度，可以准确地采集电机转子位置和

转速信号。编码器与电机转子同轴连接,保证检测信号的同步性、准确性;设计信号调理电路,对编码器输出的差分信号进行滤波、放大、整形,消除外部电磁干扰,提高信号稳定性;通过高速计数器接口将位置信号传送到伺服控制模块,伺服控制模块根据位置信号计算电机转速,给速度环和位置环控制提供反馈信号。此外,我们还采用冗余检测的设计,在主编码器出现故障的时候,备用编码器可以快速地切换过来,保证系统可以连续的运行,提高系统的可靠性。

2.4 伺服控制模块设计

伺服控制模块用高性能数字信号处理器作为主要控制芯片,运算速度快、接口多,可以完成复杂的伺服控制算法的实时运算和执行。控制模块是位置环、速度环、电流环三环控制结构,三环嵌套,从而系统有高精度定位和快速动态响应。控制模块通过 CAN 总线和数控机床数控系统通信,接收数控系统给的运动指令,也就是位置指令、速度指令等,同时将电机运行状态、故障信息反馈给数控系统,从而实现系统的协同控制,集成了 DA 转换模块和 AD 转换模块,能够实现对模拟信号以及数字信号的转换,可以对电流、电压等信号进行实时采集和处理,设计了人机交互界面,可以方便系统调试和维护。

3 永磁同步电机伺服控制策略优化

传统的数控机床直驱系统大多采用 PID 控制或者常规矢量控制方式,存在鲁棒性差、转矩脉动大、抗干扰能力差等缺点,不能适应切削负载变化、电机参数扰动等复杂工况。针对上述问题,本文给出一种将自适应滑模变结构、模型预测控制相结合的复合伺服控制方法,既保证系统动态响应速度、定位精度又具有较好的鲁棒性,可实现直驱系统的高性能控制。

3.1 永磁同步电机数学模型建立

为实现伺服控制策略的精准设计,建立永磁同步电机在 d-q 同步旋转坐标系下的数学模型,忽略电机铁耗与涡流损耗,其电压方程、转矩方程与运动方程如下:

电压方程:

$$u_d = \frac{R_s i_d}{r} + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_c L_q i_q;$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_c (L_d i_d + \psi_f)$$

转矩方程:

$$T_c = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

运动方程:

$$T_c - T_L = J \frac{d\omega_c}{dt} + B\omega_c$$

其中, u_d 、 u_q 分别为 d-q 轴定子电压; i_d 、 i_q 分别为 d-q 轴定子电流; R_s 为定子相电阻; L_d 、 L_q 分别为 d-q 轴电感; ω_c

为电机电角速度; ψ_f 为永磁体磁链; p 为电机极对数; T_c 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量; B 为阻尼系数。

基于上述数学模型,通过 Clark 变换与 Park 变换将三相静止坐标系下的电流、电压信号转换为 d-q 同步旋转坐标系下的直流量,实现转矩与磁链的解耦控制,为控制策略的设计提供理论基础。

3.2 复合伺服控制策略设计

复合伺服控制策略以模型预测控制为核心,结合自适应滑模变结构控制的鲁棒性优势,构建三环协同控制架构,其中电流环采用模型预测控制,速度环与位置环采用自适应滑模变结构控制,实现系统的高精度、高鲁棒性控制。

3.2.1 电流环模型预测控制设计

电流环作为三环控制的内环,其控制性能直接影响电机转矩输出精度与动态响应速度。模型预测控制基于电机数学模型,预测未来时刻的定子电流变化,通过优化目标函数选择最优的逆变器开关状态,实现电流的快速跟踪控制。

首先,根据永磁同步电机数学模型,预测下一采样周期的 d-q 轴电流:

$$i_d(k+1) = i_d(k) + \frac{T_s}{L_d} [u_d(k) - R_s i_d(k) + \omega_c(k) L_q i_q(k)];$$

$$i_q(k+1) = i_q(k) + \frac{T_s}{L_q} [\mu_q(k) - R_s i_q(k) - \omega_c(k) (L_d i_d(k) + \psi_f)],$$

其中 T_s 为采样周期。

设计优化目标函数:

$$J = \lambda_d (i_d^* - i_d(k+1))^2 + \lambda_q (i_q^* - i_q(k+1))^2$$

其中 i_d^* 、 i_q^* 分别为 d-q 轴电流参考值, λ_q 、 λ_d 为权重系数,用于调节 d-q 轴电流的跟踪精度。通过遍历逆变器所有开关状态,计算每个状态对应的目标函数值,选择目标函数最小的开关状态作为最优输出,实现电流的精准跟踪,降低电流谐波与转矩脉动。

3.2.2 速度环与位置环自适应滑模变结构控制设计

速度环与位置环作为外环,主要实现电机转速与工作台位置的精准控制,抵御负载扰动与电机参数扰动的影响。传统滑模变结构控制存在抖振问题,影响系统运行平稳性,本文引入自适应控制算法,实时调整滑模增益,抑制抖振,提升系统鲁棒性。

位置环滑模面设计:

$$s_1 = \theta^* - \theta + k_1(\omega^* - \omega)$$

其中 θ^* 、 θ 分别为位置参考值与实际值, ω^* 、 ω 分别为速度参考值与实际值, k_1 为比例系数。

速度环滑模面设计:

$$s_2 = \omega^* - \omega$$

设计自适应滑模控制律，实时调整滑模增益，使滑模面快速收敛至零，实现位置与速度的精准跟踪。同时，引入扰动观测器，实时估算负载扰动与参数摄动，生成补偿信号，进一步提升系统的抗干扰能力，抑制抖振现象。

3.2.3 控制策略协同工作机制

复合伺服控制策略采用三环协同工作机制：位置环接收数控系统发送的位置指令，与实际位置反馈信号比较，通过自适应滑模变结构控制算法生成速度参考指令；速度环将速度参考指令与实际转速反馈信号比较，通过自适应滑模变结构控制算法生成 d-q 轴电流参考指令；电流环通过模型预测控制算法，控制逆变器输出最优电压，实现电流的快速跟踪，进而控制电机转矩与转速，最终实现工作台的高精度定位。

3.4 实验测试

搭建基于永磁同步电机的数控机床直驱系统实验平台，实验平台由永磁同步电机、功率驱动模块、光电编码器、伺服控制模块、数控机床工作台及数据采集系统组成。实验参数与仿真参数一致，分别采用两种控制策略进行实验，测试系统定位精度、动态响应与运行稳定性。实验结果如表 1 所示，由表可知，采用本文优化后的复合伺服控制策略，系统定位精度、动态响应速度与运行稳定性均显著优于传统 PID 控制策略，定位精度达到 $\pm 2.8\mu\text{m}$ ，转速响应时间 0.018s，转矩脉动 0.75N·m，满足高端数控机床高精度加工需求。

表 1 实验结果数据

控制策略	传统 PID 控制	本文复合控制
定位精度 (μm)	± 7.2	± 2.8

转速响应时间 (s)	0.032	0.018
转矩脉动 (N·m)	1.68	0.75
负载扰动恢复时间 (s)	0.085	0.032

实验过程中，直驱系统运行平稳，无明显振动与噪声，功率驱动模块与控制模块工作正常，保护功能可靠，验证了所设计直驱系统的合理性与可靠性，以及优化后伺服控制策略的优越性。

5 结论与展望

本文围绕永磁同步电机数控机床直驱系统设计与伺服控制策略优化展开研究，设计了基于永磁同步电机的数控机床直驱系统，优化了电机本体、功率驱动、位置检测与伺服控制各模块结构，系统结构紧凑、可靠性高，彻底消除了传统机械传动链带来的误差与损耗，为高精度控制提供了良好的硬件基础。提出融合自适应滑模变结构与模型预测控制的复合伺服控制策略，解决了传统控制策略鲁棒性差、转矩脉动大、动态响应滞后等问题，实现了电流、速度、位置的三环协同精准控制。实验结果表明，所设计的直驱系统与优化后的控制策略，定位精度、动态响应速度与鲁棒性均显著提升，满足高端数控机床高精度、高效率、高稳定性的加工需求，具有较高的工程应用价值。随着智能制造技术的不断发展，未来可引入人工智能算法，实现伺服控制参数的自适应自整定，提升系统对复杂工况的适应能力；融合无传感器控制技术，取消光电编码器，降低系统成本，提升系统抗干扰能力，开展多电机协同直驱控制研究，实现数控机床多轴联动的高精度同步控制，进一步拓展系统的应用范围。

参考文献:

- [1] 曾立群,明江勇.永磁同步电机在数控机床进给系统中的应用[J].科技创新与应用,2014,(20):120.
- [2] 李英.基于永磁直线同步电机的数控机床控制系统研究[J].科技通报,2013,29(04):55-57.
- [3] 尹宜勇,贾志新,李威.高档数控机床中永磁直线同步电机驱动系统关键技术分析[J].制造业自动化,2011,33(13):89-90+107.
- [4] 郭庆鼎,付强,孙荣斌,等.数控机床进给用永磁正弦波同步电机伺服系统[J].电气传动,1992,(03):20-25.