

摘要

基于 R5F513T5ADFL 的永磁同步电机控制器设计

近年来，“双碳”的提出引发了全球的关注，其中电机控制作为新能源技术的核心应用，不断向着数字化和智能的趋势蓬勃发展，MCU 和永磁同步电机的结合，已经成为当今智能家电控制的佳选择，为用户提供了更加安全可靠的解决方案。永磁同步电机具有低成本、小体积、高效率等特点，为了充分发挥其优势，则需以高性能、高精度的 MCU 为平台设计电机控制器。本文将选用瑞萨电子株式会社近年来推出的 RX13T 系列的 R5F513T5ADFL 芯片，为该芯片设计硬件电路、嵌入式软件、控制算法有机结合的表贴式永磁同步电机控制器。

本文的研究内容分为单片机软硬件方面和电机控制算法两个方面。首先在单片机方面根据电机运行的需求进行芯片选型，设计支撑电机算法运行的底层程序逻辑，合理安排软件时序。在完成软件设计后，使用 Altium Designer 软件绘制如主控电路、驱动电路及保护电路等硬件电路的原理图。

在电机控制算法方面，本文将永磁同步电机抽象为数学模型，在使用坐标变换进行解耦的基础上搭建了基于 $i_d = 0$ 的速度、电流双闭环 FOC 控制算法仿真平台，并对速度环与电流环 PI 控制器的参数进行了整定及优化。此后针对实际工况可能出现的负载突变问题搭建了滑模速度观测器与最小阶负载观测器相结合的控制算法仿真。为了减小滑模观测器的高频抖振现象，采用双曲正切函数替换了传统 SMO 的开关控制函数。在负载观测器中采用变前馈增益的转矩补偿方法，实现对转矩补偿效果的优化。

最后本文根据算法仿真模型编写代码，写入到电机控制器中，搭建实验平台，通过示波器监视相电流、电压波形以及使用 MATLAB 软件进行仿真分析、数据处理，证实了带有速度、负载双观测器的电机控制器的设计的可行性与对负载扰动抑制的有效性。

关键词：

MCU；永磁同步电机；无位置传感器控制；滑模观测器；负载扰动抑制

Abstract

Permanent magnet synchronous motor controller design based on R5F513T5ADFL

In recent years, the proposal of "double carbon" has attracted global attention. Electrical control, as the core application of new energy technology, has been developing vigorously towards the trend of digitalization and intelligence. The combination of MCU and permanent magnet synchronous motor has become the best choice for the control of smart household appliances, providing users with a more secure and reliable solution. The control system composed of MCU and permanent magnet synchronous motor has become a common solution to the control problem of intelligent household appliances. Permanent magnet synchronous motor has the characteristics of low cost, small size and high efficiency. In order to give full play to its advantages, it is necessary to design motor controller based on high-performance and high-precision MCU platform. In this paper, R5F513T5ADFL chip of RX13T series introduced by Renesas Electronics Co., Ltd. in recent years will be used to design a surface stick permanent magnet synchronous motor controller organically combining hardware circuit, embedded software and control algorithm for this chip.

The research content of this paper is divided into microcontroller hardware and software and motor control algorithm two aspects. Firstly, in the aspect of single chip microcomputer, the chip selection is carried out according to the needs of motor operation, the underlying program logic supporting the motor algorithm operation is designed, and the software timing is reasonably arranged. After completing the software design, use Altium Designer software to draw schematic diagrams of hardware circuits such as master circuit, driver circuit and protection circuit.

In terms of motor control algorithm, this paper abstracted the permanent magnet synchronous motor as a mathematical model, built a simulation platform of speed and current double closed-loop FOC control algorithm based on decoupling by using coordinate transformation, and adjusted and optimized the parameters of speed loop

and current loop PI controller. Then a simulation of control algorithm combining sliding mode velocity observer and minimum order load observer was built to solve the load mutation problem that may occur in actual working conditions. In order to reduce the chattering phenomenon of the sliding mode observer, the traditional switching control function of SMO is replaced by the hyperbolic tangent function. The torque compensation method with variable feedforward gain is used in the load observer to optimize the torque compensation effect.

Finally, this paper writes the code according to the algorithm simulation model, writes it into the motor controller, builds the experimental platform, monitors the phase current and voltage waveform through oscilloscope and uses MATLAB software for simulation analysis and data processing, and verifies the feasibility of the design of the motor controller with speed and load dual observer and the effectiveness of the load disturbance suppression.

Keywords:

MCU; Permanent magnet synchronous motor; Sensorless control; Sliding Mode Observer; Load disturbance suppression

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题的研究背景及意义	1
1.2 课题研究现状简介	3
1.2.1 MCU 在电机控制领域的应用	3
1.2.2 负载扰动抑制的研究现状	3
1.3 论文主要研究内容	5
第二章 主控的软件与硬件设计	7
2.1 芯片选型	7
2.1.1 电机控制器资源需求	7
2.1.2 RX13T 系列片上资源	8
2.2 控制器的底层逻辑与运行时序	9
2.2.1 控制芯片主程序结构	9
2.2.2 定时器中断时序	10
2.3 控制器的硬件电路	11
2.3.1 主控电路	11
2.3.2 驱动电路	13
2.4 本章小结	16
第三章 电机控制算法的研究	17
3.1 永磁同步电机及其控制理论	17
3.1.1 永磁同步电机的类型	17

3.1.2 基本控制理论	18
3.2 永磁同步电机的数学模型	20
3.2.1 静止坐标系下的永磁同步电机模型	20
3.2.2 坐标变换	22
3.2.3 同步旋转坐标系下的永磁同步电机模型	24
3.3 SVPWM 的基本原理	26
3.4 速度、电流控制器 PI 参数的整定	32
3.4.1 电流环 PI 参数整定	33
3.4.2 速度环 PI 参数整定	35
3.4 基于滑模观测器的无位置传感器控制算法研究	36
3.4.1 无位置传感器算法分类	36
3.4.2 基于滑模观测器的无传感器控制算法原理及仿真	37
3.4.3 滑模观测抗抖振的研究	39
3.5 负载扰动抑制算法研究	41
3.6 本章小结	42
第四章 仿真与实验	43
4.1 电机控制算法仿真模型的搭建	43
4.2 实验数据测量及分析	46
4.2.1 实验平台的搭建	46
4.2.2 实验结果与分析	47
4.3 本章小结	53
第五章 总结与展望	54

5.1 工作总结	54
5.2 工作展望	54
参考文献	56
作者简介及在学期间所取得的科研成果	60
致谢	61

第一章 绪论

1.1 课题的研究背景及意义

当今的工业发展需要大量的能源供应，而诸如天然气、石油、煤炭等传统能源有着不可再生、污染环境、产生过量二氧化碳等无法避免的问题。2020年9月，习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布：“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。”正式提出“双碳”目标^[1]。而“双碳”行动的关键一招在于技术创新，在推崇节能减排的新时代背景下，新能源技术开始受到世界各国的广泛关注，成为了时代的宠儿。作为新能源技术的主要应用对象，电机控制系统正朝着小体积化、高效能化、高频率化、高智能化方向发展，受可维护性、可靠性影响，永磁同步电机、无刷直流电机逐渐替换原有的有刷电机，市场占有率逐年提升。近年微电子技术、电力电子技术、新型电机控制理论的进一步发展，使永磁同步电机得到广泛的应用，为更多相关产业赋能。目前，永磁同步电动机不仅应用在汽车、智能家电、等生活常见领域，还应用在船舶推进、航空航天、风力发电、数控机床、石油化工等领域。

永磁同步电机（Permanent Magnetic Synchronous Motor, PMSM）由定子、转子和端盖等部件构成，通过叠片相互叠压形成的定子以减少电动机运行时产生的铁耗，其中装有三相交流定子绕组，称作电枢。其除去了集电环和电刷等易发生故障的器件，提高了电机运行时的稳定性。其具有高功率密度、高转矩密度、高效率 and 宽转速运行区间等优点^[2]，其较强的可靠性及优异的动态性能，更是使其在智能家电领域备受瞩目^[3]。如表 1.1 所示，其与传统的交流异步电机相比其性能在很多方面具有显而易见的优势。

+

表 1.1 交流异步电机与永磁同步电机性能对比

项目	交流异步电机	永磁同步电机
功率密度	中	高
峰值效率	90-95%	95-97%
负荷效率	90-92%	85-87%
转速	12000-20000rpm	4000-16000rpm
电机成本	较低	较高
控制性能	中	高
主要市场	欧美	中国

但从表 3.1 中可以看出永磁同步电机有一个比较明显的缺点，那就是由于稀土材料较为昂贵所导致的成本较高，这也是如今欧美的新能源汽车厂商更多地采用体积更大，效率更低的交流异步电机的原因。而我国因拥有全球 70% 的易开采稀土资源，号称“稀土王国”，这也使得中国成为了永磁同步电机的主要市场。为发挥这一“主场优势”，研究永磁同步电机控制技术成为了必不可少的一环。

以下两个方面可以总结出目前永磁同步电机控制技术的发展趋势：

1. 数字化

近年来，随着 DSP、MCU、FPGA 的功能趋于完善、成本不断降低，市面上更多的芯片开始支持浮点运算，开发者可不受定点运算的制约使代码更加精简，提高了代码可读性，在简化了开发过程的同时也使得更多的现代化先进控制算法得以在数字系统中运行。一些芯片厂商甚至设计有针对电机控制的开发板以及软件平台可实现控制系统在线调参、波形显示以及电机参数的在线自检等功能，不仅极大地缩短了开发周期，更是进一步推动了电机控制系统的数字化进程。

2. 智能化

面对复杂的工况，控制系统必须具备良好的抗干扰能力和鲁棒性，因此，基于智能控制理论的调节方法，如模糊调节、神经网络调节等，已经成为控制系统的主要组成部分。每种控制策略各有所长，所以将各种智能控制方法相互

结合，优势互补为获得更好的控制性能也将是未来的研究的发展趋势。当前先进的控制器能够实现离线或在线标定，使得不同参数的电机能够被有效地控制，并且具有自动调整功能，使得电机参数和调试过程中的控制参数能够被储存在控制系统的存储器中，从而使得下次上电时能够进行调整。这样具备参数存储与参数自整定功能的智能化控制器势必将成为如今电机控制器发展的趋势^[4]。

1.2 课题研究现状简介

1.2.1 MCU 在电机控制领域的应用

相比于 DSP（Digital Signal Processor）和 FPGA（Field Programmable Gate Array），MCU 在电机控制领域的发展可谓是历史悠久，应用范围也更加广泛。DSP、MCU 和 FPGA 在这个领域各有所长，其中 DSP 因其高速计算和强大的信息处理力量，更适合用于高级复杂性的电机系统管理，但它也受到软件算法稳定性和成熟度的限制，因此对开发人员的要求更高。FPGA 可以更好地满足自定义电机驱动的需求，但在电机控制的通用性方面仍有待提高。相比之下，MCU 更注重输入输出接口的总量和可编程存储器的规模，因此更适合于需要大规模输入输出功能的场景，因此在低成本、低功耗的控制系统中更为常见。早期的电机控制器主要依托于如 196 系列、51 系列等 8 位 MCU 平台，而如今随着人们对控制精度需求的不断提高，和芯片制造水平的不断进步，具有高运行精度、高运算能力的 32 位 MCU 在电机控制领域占据了一席之地。各大厂商目前的研发方向是通过在 MCU 内部集成电机控制模块，降低客户开发成本。在如今的市场上，很多公司都推出了为电机控制量身打造的 MCU 系列，如 ST 公司推出的 STM32 系列、灵动微推出的 MM32SPIN 系列、以及本文中所用到的 Renesas 公司推出的 RX13T 系列。

1.2.2 负载扰动抑制的研究现状

在一些对电机精度要求较高的应用领域如工业机器人、电动汽车、轧钢机中，如何在复杂的工况下，抑制内外部干扰提高系统的鲁棒性是在设计电机控制器时的关键问题。内部干扰主要是定子电阻、电感等电机参数随时间的变化，而外部干扰包括运行环境、电气及机械、负载等变化。其中电机负载的突变是

系统外部干扰的主要来源。在电机运行过程中无论是加载或者卸载负载，都会使当前转速和电磁转矩变化，引起瞬间的波动。在如轧钢机与 CNC 等工业加工领域，这种速度波动会严重影响产品质量、妨碍产品正常生产。在这些工况中，负载的变化因加工产品类别不同又是不规律的没有周期性的，无法有效地通过转矩前馈补偿去应对。这时就要通过设计负载扰动观测器对负载转矩进行在线观测和辨识，并在之基础上对所观测的扰动进行补偿，尽可能地减小速度的攀升或是跌落，使系统尽快恢复到突变前的转速，这样就能显著提高电机系统应对负载突变的鲁棒性。

目前国内外学者针对永磁同步电机负载扰动观测提出了多种方案如下：

1. 扰动观测器法

扰动观测器（Disturbance Observer, DOB）是在 20 世纪 90 年代由日本学者 Ohnishi^[5]提出的一种能提高系统抗扰动能力的算法。其基本原理就是通过对模型进行重构来捕获系统的内外部干扰，之后根据扰动转矩来对转矩电流进行前馈补偿来减轻电机转速的跌落。但是这种方法在实际应用中很大程度上受到系统噪声的限制。通过将 DOB 与分数阶滤波器相结合，郎志^[6]等人成功地抑制了双惯量系统的负载扰动，从而大大提升了系统的抗干扰能力。

2. 卡尔曼滤波器法

卡尔曼滤波（Kalman Filter）算法是在 1960 年由美国学者 Kalman 提出的一种通过线性系统状态方程来对系统状态进行最优估计的方法。其基本原理分为预测与校正两个部分，首先利用前一时刻的系统状态方程来对下一时刻的系统状态进行预测，之后与实际测量值比较得到优化后的校正预测值，如此往复便可以实现对每一个时刻系统状态量的最优估计。卡尔曼滤波器有很强的抗干扰、抗噪声能力，其后也衍生出在非线性滤波领域应用的扩展卡尔曼滤波器（Extended Kalman Filter, EKF）。李英春等人设计了一种扩展卡尔曼滤波的在线参数辨识方法，利用 Popov 超稳定理论设计自适应律，经模型参考自适应法辨识电机负载，经证明该方法误差较小，收敛速度较快^[7]。

3. 状态观测器

状态观测器是美国学者 Luenberger 在 20 世纪 70 年代所提出的一种相对完善的状态观测理论。在实际的被控系统状态量不可直接测量的情况下，该观测

器通过系统的输入输出量来对系统状态进行重构，并设计反馈矩阵来配置观测器的零极点来使观测值能收敛到实际值。按照观测器的阶数可分为全阶、降阶两类。李净净等人设计了一种新型的自适应 Luenberger 观测器对速度和负载扰动进行观测，该方法通过利用神经网络在线自学能力，实现了观测器参数的在线整定，提高了观测值对实际值得跟踪能力和对干扰的抑制能力^[8]。

4. 滑模观测器

滑模观测器（Sliding Mode Observer, SMO）是由 Emeleyanov 在 1962 年提出的一种非线性系统控制方法。其具有与一般控制所区别的不连续性，表现在其使用开关控制方式迫使系统状态沿着既定的轨迹做高频率的上下运动，所以其也被称为滑模变结构控制。该控制方法对外部干扰具有很强的鲁棒性，且算法简单，方便实现。但也由于其开关函数的不连续性，会使系统存在高频抖动现象，该问题是现如今对 SMO 研究的重点所在。侯利民等人提出了一种在线辨识转动惯量的扰动观测器系统的滑模控制方法，使用离散模型参考自适应方法对转动惯量进行辨识后，将转动惯量输入到扰动观测器中从而实现对负载的观测与对转矩的补偿^[9]。

5. 神经网络控制

神经网络控制属于智能控制领域，该类控制依靠神经网络的自我学习能力对系统的参数进行自辨识。胡近朱等人针对负载扰动问题设计了一种 BP 神经网络改进型自抗扰控制器，该方法使用神经网络对控制器的重要参数进行整定，针对传统神经网络收敛速度慢的缺点，引入了遗传算法对初始节点进行寻优^[10]。经该团队证明该控制方法有效地提升了系统的鲁棒性。

本文所采用的负载扰动观测器将采用改良趋近律的滑模观测器与最小阶扰动观测器相结合的方法，通过对电机变负载系统进行建模分析，并进行反馈观测与前馈补偿来改善负载突变的工况。

1.3 论文主要研究内容

第一章主要对永磁同步电机的应用领域、电机控制器的种类进行简单介绍，对 MCU 在电机领域的应用及负载扰动观测及抑制技术的现状进行描述与分析。

第二章中进行了芯片选型与对软件结构的设计以及电路原理图的绘制。软

件层面包括 MCU 代码底层逻辑设计，定时器时序合理化。在硬件层面首先对芯片的控制资源及引脚进行合理分配，此后根据电路功能划分模块进行设计。

第三章中主要对电机控制器核心的控制算法进行描述，包括电机的数学模型、两种坐标变换的基本原理、磁场定向控制策略、空间矢量脉宽调制技术、电流环与速度环的控制器参数整定，并对基于滑模观测器的速度、负载双观测器系统的原理及仿真进行详细介绍。

第四章中对以上三章的工作内容进行整合，将电机控制器实物与算法相结合，搭建实验平台，进行实机及仿真实验分析并证明电机控制器设计的合理性。

第五章中对本文的工作加以回顾，对工作存在的问题进行总结与反思，并对未来的工作方向进行展望。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/517142200160006050>