

杭州电子科技大学

毕业设计（论文）开题报告

题 目 无刷直流电机无感矢量控制观测
器算法及软件开发

学 院 电子信息学院

专 业 电子科学与技术

姓 名 陈炫润

班 级 21040911

学 号 21032311

指导教师 秦兴

一、综述本课题国内外研究动态，说明选题的依据和意义

无刷直流电机（BLDC）因其高效、可靠及维护成本、以其瞬间大扭矩和强爆发力的等特点而在现代工业中广泛应用。然而，随着应用领域的不断拓展，对其控制精度和效率的要求也越来越高。针对这一需求，需要对控制算法进行进一步深入研究。

FOC 是一种电机控制技术，全称为 Field Oriented Control（磁场定向控制），也称作矢量控制。近年来，FOC[1]的发展为无刷直流电机的控制提供了更高效的解决方案。该技术能够提高电机的效率、控制稳定性和精度，广泛应用于电机驱动系统中，是目前无刷直流电机（BLDC）主流控制算法、也是最优方法之一。FOC 技术通过将电机的控制问题转化为直流控制问题，实现了对电机转矩和磁通的独立控制，大幅提高了电机的运行效率和动态响应性能。

选题的依据主要是，结合 FOC 控制与观测器算法进行研究与开发，这样的协同闭环系统有助于克服传统控制方法在参数不确定和动态负载变化下的局限性，进一步提升电机的性能。通过完善控制算法和软件开发，可以显著提高电机驱动系统的可靠性与智能化水平。在国内外[2][3]的研究平台，有相关研究人员提出了各种有关观测器算法在整机平台上的应用，以实现准确估算转子位置，观测器可提供必要的转速反馈，这对于实现精确的速度控制至关重要。通过实时估算转子的转速，FOC 系统能够进行精准的电流调节，从而提高扭矩输出。主要集中在无感观测器的鲁棒性与实时性优化上，通过改进算法和控制策略，使得无感观测器能够在复杂工况下依然保持良好的控制性能。

本研究的意义，从电机行业角度来讲，随着半导体工艺的进一步提升，算力价格的下降，基于算力不足而对算法硬件化的意义越来越小。基于纯软件的算法模块会有更高的灵活度和广泛的适配度；从软件算法本身来讲，有关 FOC 以及各类观测器特性的文献已相当丰富。对其原理进行分析后，设计结合观测器的无感 FOC 软件控制算法，对 BLDC 的控制探讨有重要的实践意义。最重要的是，能否给出一份具有多平台适用的开源代码，也就是需要把核心的控制理念算法从复杂的硬件适配性剥离出来[4]，需要一定的面向对象编程思想；从个人角度讲，是对本科阶段所学课程---信号与系统、自控原理、线性代数等课程的重要综合应用，也是对动手调试、撰写代码能力的一个考研，可以极大地促进个人的发展。

二、研究的基本内容，拟解决的主要问题：

本次的设计算法主要围绕以下几个方面展开研究、量化。

1、FOC 控制算法（主要架构）：

详细探讨 FOC 的基本原理及数学模型，无感 FOC 的整个流程和原理[5]。

2、观测器（核心难点）：

掌握观测器的核心原理，并选择一种适合的观测器模型。主要有无感和有感观测器两种类型，首先要弄明白两种各自的优缺点。对比有感观测器[6]和无感观测器[7]各自的优缺点，适用领域。

3、仿真环节，系统验证（最优化）

首先，在 MATLAB 上进行 FOC 闭环回路模型的搭建，对于观测器系统的选择，会有不同的组合方案：如滑膜观测器[8] + PLL[9]、FAST 观测器[10]+反正切[11]、龙伯格观测器+PLL[12]等组合的搭建，通过 Simulink 进行模块组合搭建，对比得出最适合的情况。

4、电机控制调试（必要环节）

即正确移植算法，使得 MCU 能正确跑算法，实现电机的精确控制。

5、算法可移植性、平台弱依赖性(最终目标)

将观测器与 FOC 控制算法集成，形成完整一套自己实现的无感控制系统开源代码，让 foc 无感观测器控制算法具有更强的灵活性。

6、加入深度学习、机器学习（附加选项）

查阅有关在电机控制算法融入机器学习的论文,使得观测器能够自适应地观测电子转子位置[13][14]。

三、研究步骤、方法及措施：

针对上述研究的基本内容和拟解决的主要问题，以下是具体的研究步骤、方法和措施：

1. FOC 控制算法研究步骤：

1.1 通过分流电阻采集三相电流（采样）：

关键就是理解采样电阻 R 需要在同一时刻采集到两个相位的电流值，根据基尔霍夫电流定律重构电流，这之中，需要对于对于 CMOS 导通情况，结合矢量图，划分六个扇区情况，需要结合模电和数电、电路分析的知识进行理解。最关键的是对于非观测区电流重构需要对 PWM 波形进行移相，从而预留出足够宽的采样窗口用于采集相电流，移相的规律可以概括为大占空比右移，小占空比左移。

1.2 理解 Clark 变换与 Park 变换（坐标变换）：

关键是理解旋转磁场的产生背景（时变电流时变电压），利用复频域的变换，去理解三相电流合成的电压矢量表达式。为了实现核心的位置控制，是通过速度控制实现的。然后为了控制速度，要对对应的正弦信号做处理，以实现误差最小化，我们需要进行线性化（通过线性代数的旋转矩阵，变换坐标系）。之后得到的线性信号就可以方便借助 PID 控制器实现第一层控制了。

1.3 PID 控制器(主要是 PI)

PI 控制器的设计注意点,PI 控制器通过获取所需设定点与测量值之间的差值来计算校正。如果所有参数设置正确,PI 算法将控制系统,使测量值与所需的设定点值相对应,并具有最小的延迟和超调。在电机中,PI 控制了电流的误差,也即转速的误差。

1.4 SVPWM

SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) 是一种空间矢量脉宽调制技术,也称为电压空间矢量脉宽调制技术。它是电力电子技术中一种非常重要的调制方法,广泛应用于交流电机控制、电力电子变换等领域。

SVPWM 的基本思想是以三相对称正弦波电压供电时三相对称电动机定子理想磁链圆为参考标准,用逆变器不同的开关模式所产生的实际磁链矢量来追踪基准圆磁链矢量。具体实现方法是通过控制逆变器的开关状态,合成所需的电压矢量,使得电机的定子绕组中产生相应的电流矢量,从而产生所需的磁场矢量。

相比于传统的 SPWM 方法,SVPWM 具有更高的直流电压利用率和更好的动态性能,因此在电力电子领域中得到了广泛应用。

2. 启动算法方案研究[15]:

方法一：强拖

方法二：高频注入[16]

3. 观测器设计与实现

完成 SVPWM 这一步后,就按照自己的项目要求,确定自己的方向,是有感 FOC,还是无感 FOC,从软件算法的角度来讲,无感 FOC[17]是比较难的,因为没有传感器去获取电角度,也就是位置信息。只适合一些精度要求不高的地方,但特点是节约了成本。步骤如下:

在 MATLAB/Simulink 环境中实现观测器设计,通过 Simulink 块实现电机状态实时监测。

- 进行多次迭代优化观测器设计,评估不同增益值对估算精度的影响,并选择最佳配置进行后续实验。
- 在软件中设计测试程序,确保观测器能够在不同状态下稳定运行,记录其性能数据。

4. 控制系统的集成与优化

整合控制系统:将设计的观测器与 FOC 控制算法整合,形成完整的控制框架。

参数优化:采用线性控制理论和最优控制策略,对控制参数进行调优,确保系统的响应速度和稳态精度达到预期。

- 利用蒙特卡洛仿真或遗传算法等优化工具,自动化优化控制参数设置,减少手动调试的时间和精力。
- 进行多次实验验证,记录不同工况下的响应特性,以便于对最优控制参数的总结与分析。

5. 算法性能评估与实验验证

搭建电机测试算法平台:准备实物测试平台即,结合 BLDC 板子的硬件电路,确认选择的 MCU 型号,基本确认是以 STM32[18]系列为主控。

制定测试方案:设计系统的性能评估方案,包括电机速度控制精度、动态响应时间与系统稳定性等指标的测试方法。

- 进行标准化测试,确保每次实验在相同条件下进行,以便于数据的比较和分析。
- 利用数据记录仪和软件工具,对实验数据进行实时采集与后期分析,确保结果的准确性与可重复性。

6. 算法可移植性、平台弱依赖性、识别参数[19](最终目标)

进一步结合 C++编程中面向对象的思想,把面向对象的、以及接口的思想引入项目中,进行更深层次的思考打磨。实现至少两个平台(包括 ST 系列、或者国产 GD 系列、或者是 TI 系列等硬件平台)的运行。

- 学习积累面向对象编程的思想
- 对于无感 FOC 观测器算法来说,需要把 MCU 抽象为一个实例,如何定义最重要的接口(基本上要包括外设的引脚,比如 PWM 控制需要 timer。那要考虑 mcu(对象)调用 timer(属性)setpara(方法)这样的思想,更需要把电机也抽象为一个对象。对于每一个具体的 mcu 平台,就可以进行实例化,对于不同型号的电机也可以进行实例化。若能实现,这将会是一非常灵活的、具有很好可移植性的算法,之后再慢慢成熟维护就行了,预计将会在 Github 上面开源,记录分支进展。

四、研究工作进度：

序号	时间	内容
1	2024. 10. 16-2024. 11. 3	指导教师报题，学院审题，学生选题
2	2024. 11. 4-2024. 11. 8	任务书
3	2024. 12. 23-2024. 12. 25	开题报告会 与导师沟通选题
4	2024. 12. 30-2025. 1. 12	简单了解、读懂 FOC 算法流程后，进行实操，结合已有开源项目，建模仿真，运行算法，深刻体会控制 CMOS 导通的方波各个情形，多多动手调试实践，要求能掌握 SVPWM 的控制，保证电机在死区不出现问题。
5	2025. 1. 13-2025. 3. 2	在综合比对各个方案后，给出选择最优方案的理由，在此基础上进行增量式开发。要求观测器能够准确预测转子位置，并且易于移植。同时推进多平台运行算法的构思，比如结合已有的 SimpleFOC 开源项目(C++)、VESC、BLHEli 等围绕 C 语言进行面向对象、面向接口编程。
6	2025. 3. 3-2025. 3. 16	验证算法的在 M0 核上的可行性。进一步修正各处细节，完善项目。考虑 FOC 算法的某一步的创新或是优化，丰富内容。
7	2025. 3. 17-2025. 3. 30	结合调试，得出算法在各个 MCU 平台下运行的效果，进行数据可靠性分析，可视化图标绘制化，为撰写论文丰富数据支撑。
8	2025. 3. 31-2025. 4. 6	撰写毕业论文
9	2025. 4. 7-2025. 4. 23	论文评审及查重
10	2025. 4. 24-2025. 4. 30	答辩报告会

五、主要参考文献：（所列出的参考文献不得少于 10 篇，其中外文文献不得少于 2 篇，发表在期刊上的学术论文不得少于 4 篇。）

- [1] 尚喆.永磁同步电动机磁场定向控制的研究[D].浙江大学,2007.
- [2] R. I. Zhilgotov and V. Y. Frolov, "Development of the sensorless control system BLDC motor," 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2017, pp. 1109-1111
- [3] 任雪亮.永磁同步电机无位置传感器 FOC 算法设计与实现[D].哈尔滨工业大学,2019.
- [4] N. Romano, M. Canigliula and G. D' Angelo, "Design and Optimization of an MCU-based controller implementing Field-Oriented-Control of a BLDC motor," 2024 25th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), Catania, Italy, 2024, pp. 1-5,
- [5] S. I. N. S. Khadkikar, P. V. R. M., & Ghandour, A. (2020). "A comprehensive review on sensorless control strategies for Brushless DC motors." IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67(8), 6796-6808.
- [6] Anno Yoo, S. -K. Sul, Dong Cheol Lee and Cha Seung, "Novel speed and rotor position estimation strategy using a dual observer for low resolution position sensors," 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece, 2008, pp. 647-653.
- [7] S. Zhai and M. Wang, "An Improved Position Observer for Sensorless FOC Algorithm," 2021 4th International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA), Zhanjiang, China, 2021, pp. 43-49,
- [8] 许为龙,徐宏宇.基于滑膜观测的 FOC 无刷电机控制系统设计[J].机电工程技术,2024,53(01):159-162+211.
- [9] 高政.基于 DSP 的 PMSM 滑膜观测器的设计与实现[D].杭州电子科技大学,2015.
- [10] 王晓远,傅涛.基于全局快速终端滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制[J].电工技术学报,2017,32(11):164-172.
- [11] Y. Yao, X. Sun, Y. Peng, H. Li, J. Ding and H. Zhou, "A Method for Improving the Current Sampling Accuracy in FOC by Calculating the Magnetic Field Angles with Arctangent," 2024 43rd Chinese Control Conference (CCC), Kunming, China, 2024, pp. 4160-4166.
- [12] Z. Kandoussi, Z. Boulghasoul, A. Elbacha and A. Tajer, "Luenberger observer based sensorless Indirect FOC with stator resistance adaptation," 2014 Second World Conference on Complex Systems (WCCS), Agadir, Morocco, 2014, pp. 367-373
- [13] C. -I. Nicola and M. Nicola, "Improvement Performances of Sensorless Control for PMSM Based on FOC Strategy Using MRAS Observer, Ant Colony Optimization, and RLTD3 Agent," 2023 3rd International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Tenerife, Canary Islands, Spain, 2023, pp. 1-6.

- [14] 滕青芳,柏建勇,朱建国,等.基于滑模模型参考自适应观测器的无速度传感器三相永磁同步电机模型预测转矩控制[J].控制理论与应用,2015,32(02):150-161.
- [15] 李耀华,刘晶郁,张德鹏,等.永磁同步电机 FOC/DTC 系统启动方法研究[J].电气传动自动化,2012,34(05):16-19.
- [16] 翟世权.基于单片机的无刷直流电机无感 FOC 算法研究[D].哈尔滨工业大学,2021.
- [17] Z. Zhang, J. Liu, Z. Liu, R. Chen, & B. Guo. (2021). "A Novel Sensorless Control Method Based on Extended State Observer for Brushless DC Motors." *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(9), 6228-6238.
- [18] R. Wu, Y. Chen and H. Ke, "STM32 microcontroller-based closed-loop speed control drive system design for FOC motors," 2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC), Dalian, China, 2022, pp. 335-337.
- [19] C. -I. Nicola, M. Nicola, A. Vintilă and D. Sacerdoțianu, "Identification and Sensorless Control of PMSM Using FOC Strategy and Implementation in Embedded System," 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2019, pp. 1-6.