

学校编码：10384
学号：X2007223024

分类号____密级____
UDC____

厦 门 大 学

工 程 硕 士 学 位 论 文

基于模糊 PID 控制的无刷直流电机控制系
统的设计与仿真分析

Design and Simulation Analysis on the Control System for
Brushless DC Motor Using Fuzzy-PID control

魏自强

指导教师姓名：余 臻 教授
专 业 名 称：控制工程
论文提交日期：2013 年 月
论文答辩时间：2013 年 月
学位授予日期：

答辩委员会主席：_____
评 阅 人：_____

2013 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用说明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅，借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采取影印、缩印或者其他方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1、经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文于 年 月 日解密，解密后适用于上述授权

2、不保密，适用上述授权

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用于上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

无刷直流电机与传统有刷电机相比,继承了其良好动态、静态特性的同时,由于其结构上用电子换相器代替了传统的机械换相器,使得其体积更小,更利于控制,在很多领域得到广泛的应用。采用正确合理的控制策略将使得系统更加精确、更加稳定、响应更加迅速。如今越来越多的学者加入到对无刷直流电机控制系统的控制策略的研究中去。

随着工业的迅猛发展,无刷直流电机的大量使用,传统的PID控制算法已经越来越难以满足现代工业生产的需要。因为传统的PID控制算法对控制对象有着较严格的要求,在线性时不变的情况下最佳。对于时变、强耦合、非线性系统而言,传统的PID控制算法就不再适合了,而无刷直流电机正是属于这种情况,本文将采用模糊PID控制策略来对无刷直流电机的控制系统进行相应的设计。

首先,本文简要介绍了直流无刷控制的国内外现状,阐述了无刷电机的工作原理、机构、数学模型和控制方法。确定以DSP为控制器,发挥DSP较单片机的运行速度快的特点,从而采用较复杂的控制策略,使BLDCM实现有效、高精度的控制。

其次,本文还介绍了传统的PID控制、单纯的模糊控制的原理和设计的注意事项,通过比较这两种控制策略的优缺点,采用了模糊自适应PID控制策略,并对模糊自适应PID控制器的实现作了详细说明。

此外,还对系统的实现应用进行了构想,涵盖了硬件框架与软件流程设计。硬件框架设计了电机控制电路、检测电路、保护电路和电机驱动电路等。软件流程设计了主程序和中断子程序,并绘制程序流程图。

利用MATLAB建立系统仿真模型并进行仿真结果分析,验证了该算法较传统算法的优越性。

最后,论文进行了总结,并对全文进行了展望。

关键词: 无刷直流电机; 模糊PID控制; 仿真模型

Abstract

Brushless dc motor has not only the traditional dc motor good dynamic and static feature, uncomplicated construction, easy to control and maintenance is convenient wait for a characteristic, the application in industry more and more widely. With the precision of the system and the response velocity in the industrial control system requirements more and more high, control algorithm is reasonable or not will become very important. At present, brushless dc motor control system control strategy research is the research hot spot.

The traditional motor control algorithm is mainly classic PID control algorithm. When the control object is when the constant linear, PID control can have very good control effect. However, brushless dc motor is a time-varying, strong coupling and nonlinear system, with the motor running condition of motor parameters change. Therefore, classic PID control algorithm is not suitable for precision control of the situation, this article will fuzzy control rule applied in brushless dc motor control strategy of. Based on DSP design of brushless dc motor control system.

First of all, this article briefly introduces the brushless dc control of the situation at home and abroad, this paper expounds the working principle of brushless motor, institutions, the mathematical model and the control method. Determine control scheme for the main controller by DSP, control system is mainly using digital signal processor advantage, high speed of operation function, all kinds of effective control algorithm is easy to realize and high precision control of brushless dc motor control for the purpose.

Secondly, based on PID control of brushless dc motor control performance faults, the fuzzy control and PID control with the combination of the control method, put forward the fuzzy adaptive PID control strategy, the design and implementation of brushless dc motor fuzzy adaptive PID controller.

In addition, the detailed introduction of BLDCM control system design, system hardware and software design of the system. Hardware design motor control circuit, detection circuit, protection circuit, motor drive circuit. The software design main program and interrupt subroutine, and draw the program flow chart.

Finally, using MATLAB simulation model system is established. Results verify the

algorithm and the advantages and disadvantages of traditional algorithm. Explain the advantages and disadvantages.

Finally, the paper summarized, and the prospects of the full text.

key words: Brushless dc motor; Fuzzy PID control; The simulation model

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究的背景和意义	1
1.2 国内外的研究现状	1
1.2.1 电机控制策略发展.....	1
1.2.2 电机控制器的现状	3
1.3 课题研究的主要内容	4
1.4 本章小结	4
第二章 无刷直流电机的基本原理和数学模型	5
2.1 无刷直流电机的基本结构	5
2.2 无刷直流电机的工作原理	5
2.3 无刷直流电机的数学模型	6
2.3.1 三相平衡电压方程	6
2.3.2 电势方程	7
2.3.3 扭矩方程	8
2.3.4 机械运动方程.....	9
2.3.5 机械特性	9
2.4 本章小结	9
第三章 无刷直流电机的控制系统策略	10
3.1 PID 控制策略	10
3.1.1 PID 控制的基本理论.....	10
3.1.2 设计 PID 控制器的注意事项	11
3.2 模糊控制策略	12
3.2.1 模糊控制的基本理论	12
3.2.2 模糊控制器的设计步骤	13
3.3 模糊自适应 PID 控制策略	15
3.3.1 模糊自适应 PID 控制器的结构	15
3.3.2 模糊自适应 PID 控制器的设计	15
3.4 本章小结	18
第四章 系统的硬件框架设计	19
4.1 系统硬件的总体设计	19
4.2 DSP 外围电路设计	20
4.2.1 控制器的选择.....	20
4.2.2 电源电路的设计	21
4.2.3 外扩存储器和 JTAG 口电路	22
4.2.4 通讯接口电路设计	23
4.3 驱动单元设计	25
4.4 速度检测单元设计	27
4.4.1 转子位置检测.....	27

4.4.2 电机转速检测	28
4.5 电流检测单元设计	28
4.6 保护电路设计	29
4.7 本章小结	30
第五章 系统的软件流程设计	31
5.1 系统软件的总体结构	31
5.2 主程序	31
5.3 中断子程序	32
5.3.1 速度捕获中断子程序	32
5.3.2 位置捕获中断子程序	33
5.3.3 故障保护中断子程序	34
5.4 控制器的程序设计	35
5.5 本章小结	36
第六章 无刷直流电机控制系统仿真	37
6.1 仿真工具 MATLAB	37
6.2 无刷直流电机控制系统仿真模型的建立	37
6.2.1 无刷直流电机的总体模块	37
6.2.2 逆变器模块	41
6.2.3 速度调节器模块	42
6.2.4 电流控制模块	42
6.3 仿真结果与分析	43
6.4 本章小结	49
第七章 结论与展望	50
7.1 结论	50
7.2 展望	50
参 考 文 献	52
致 谢	55

Content

Chapter 1 introduction	1
1.1 Reserch background	1
1.2 Current research and analysis of intenal and international.....	1
1.2.1 Development of the motor control strategy.....	1
1.2.2 Current situation of motor contro	3
1.3 Main content of the research	4
1.4 Chapter summary	4
Chapter 2 Working principle and mathematical model of Brushless	
DC motor	5
2.1 Basic structure of Brushless DC motor	5
2.2 Working principle of Brushless DC motor	5
2.3 Mathematical model of Brushless DC motor	6
2.3.1 Three-phase voltage equilibrium equation.....	6
2.3.2 Potential equation.....	8
2.3.3 Torque equation.....	9
2.3.4 Mechanical motion equation.....	9
2.3.5 Mechanical properties	9
2.4 Chapter summary	10
Chapter 3 Control strategy of Brushless DC motor	11
3.1 PID control	11
3.1.1 Basic theory of PID control.....	11
3.1.2 Matters needing attention in design of PID controller.....	12
3.2 Fuzzy control	13
3.2.1 Basic theory of fuzzy control	13
3.2.2 Design of fuzzy controller	14
3.3 Self-adaptive Fuzzy PID control	16
3.3.1 structure of Self-adaptive Fuzzy PID controller	16
3.3.2 Design of self-adaptive fuzzy PID controller.....	17
3.4 Chapter summary	19
Chapter 4 Hardware design of the Brushless DC motor control	
system	20
4.1 Overall design of the Brushless DC motor control system hardware. .	20
4.2 Peripheral circuit design of DSP	21
4.2.1 Selection of the controller.....	21
4.2.2 Design of power circuit.....	22
4.2.3 External memory and JTAG circuit.....	23

4.2.4 Design of communication interface circuit	25
4.3 Design of driver element.....	27
4.4 Design of The speed detection unit	29
4.4.1 Rotor position detection.....	29
4.4.2 Motor speed detection	30
4.5 Design of current detecting unit	30
4.6 Design of protection circuit.....	31
4.7 Chapter summary	32
Chapter 5 Software design of Brushless DC motor control system	33
5.1 Overall design of the Brushless DC motor control system software....	33
5.2 Main program.....	33
5.3 Interruption subroutine	34
5.3.1 Speed interruption subroutine	34
5.3.2 Position capture interruption subroutine	35
5.3.3 error protection interruption subroutine	36
5.4 programming controller	37
5.5 Chapter summary	38
Chapter 6 system simulation of Brushless DC motor.....	39
6.1 Simulation tools MATLAB.....	39
6.2 Establishment of simulation model for Brushless DC motor control system	39
6.2.1 Module of Brushless DC motor.....	39
6.2.2 Inverter module	43
6.2.3 Speed regulator module	44
6.2.4 Current control module.....	44
6.3 Simulation results and analysis	45
6.4 Chapter summary	50
Chapter 7 Conclusion and Prospect.....	51
7.1 Conclusion	51
7.2 Prospect	51
Reference	53
Acknowledgments	56

第一章 绪论

1.1 课题研究的背景和意义

电动机作为机电能量转换设备,发展的历史超过一个世纪,它应用在国民经济和人们的日常生活的各个领域。直流电动机具有效率高、机械特性好、控制简单、调速范围大等优点,在相当长的一段时间,成为电机速度控制系统的首选电机。但传统的直流电机采用机械电刷进行换相,这就不能避免机械摩擦,从而导致了一系列的问题:如噪声、寿命短等缺点,这些都限制了传统直流电机应用范围。

在 1930 年代早期,就有人考虑使用电力电子装置代替机械换向器,提出了“无刷电机”的概念。到 1955 年,美国 D.Harrison 等人申请专利,用晶闸管的变换电路代替直流电机机械换向器,这标志着现代无刷直流电机的诞生^[1]。

随着永磁新材料、微电子技术、自动控制技术、电力电子技术特别是高功率开关器件的发展,无刷直流电机得到了长足的发展。今天,无刷直流电机系统已成为一个集电机、驱动、光或磁测量、控制软件和硬件为一体的机械产品。无刷直流电机不仅有传统直流电机良好的动态和静态特性,同时又具有结构简单,运行可靠,易于控制和维护方便等特点,这使得无刷直流电机在各种工业生产领域处处可见。因此,对无刷直流电机控制策略的研究成为当今的一大热点。

1.2 国内外的研究现状

1.2.1 电机控制策略发展

无刷直流电机控制系统常用在高精度、高速度响应的场合,其控制策略的选择必须根据控制对象的特点及应用的场合,目前,无刷直流电机的控制策略主要分为传统 PID 控制策略、现代控制策略、智能控制策略^[2-4]。

1. 传统 PID 控制策略

传统 PID 控制策略主要适用于以线性模型为控制对象,外在环境相对稳定的场合。PID 控制具有以下优点:控制原理简单,易于实现和广泛应用,稳定性好。只要根据实际的控制对象建立数学模型,通过设置正确的比例、积分时间常数、微分时间常数,就能达到较好的控制效果。

但 PID 控制算法对控制对象参数的变化很敏感, 参数确定之后, 一般不得改变。因此 PID 控制算法设置时间长, 易受参数变化影响等缺点, 导致其难以实现高精度的控制, 具有一定的局限性。

2. 现代的控制策略

在非线性和在外界干扰较大的情况下, 传统 PID 控制方法有一定的局限性, 不能满足高精度控制和快速响应的要求。于是便出现了现代控制策略, 现代控制策略以其优良的特性, 在这方面有着非常广泛的应用。各种现代控制策略也层出不穷, 如自适应控制、预见控制、变结构控制等。

自适应控制应用于控制对象有一些不确定性的情况, 这种不确定是指控制对象数学模型部分未知或完全未知。因为自适应控制是建立在未知系统上的, 所以它对参数的变化具有适应性, 对外界的干扰具有抑制作用。

预见控制就是预判控制系统的输出量和未来发生的一些干扰量, 进行输出量与给定量调节, 使输出偏差最小, 预见控制研究的是输出和未知干扰量之间的关系。

变结构控制是控制理论常见的一种控制方法, 适合线性和非线性系统, 对于干扰强的系统有很好适应性, 响应速度快等优良特性, 但由于受到现代控制理论的反馈控制器和控制对象的限制, 在电机控制系统, 它的应用受到一定的限制。

3. 智能的控制策略

目前采用先进的智能控制策略的控制方法总称为智能控制, 如专家控制、神经网络控制和模糊控制等。稳定的性能及快速反应能力使智能系统在现代控制系统中的应用越来越广泛。

专家控制是计算机技术与人工智能技术结合在一起的一种控制技术。它以专业的数据库为依托, 模仿人的思想来解决发生的问题, 但是专家系统需要收集大量的专家知识组成数据库, 这方面制约了专家控制系统的发展。

神经网络控制以人工神经网络理论与控制理论为基础, 通过模仿动物神经网络特征, 调节节点之间相互作用的关系, 完成复杂的运算。神经网络控制还在理论的阶段, 现在还不健全, 加上现在的硬件运算速度还达不到支持神经网络运算的速度, 限制了它的应用。

模糊控制作为当前较先进的控制手段, 它是建立在模糊集合的理论上, 简单易

懂,易于实现。它不依赖被控对象精确的数学模型,适应能力强,鲁棒性好,且支持模糊控制的硬件非常完美,因此模糊控制在复杂系统得到广泛的应用,但它也有缺点,就是难以消除调节终了时系统的稳态误差。

文献〔9〕采用单闭环控制的模糊PID控制策略,模糊控制器有两个输入:电机转速误差 e 、误差变化率 ec ,输出为PID的三个修正参数,最终完成对PID参数的在线自校正^{〔9〕}。

文献〔18〕在无刷直流电机控制系统中应用的是一种位置跟踪的Fuzzy-PID控制策略,整个控制系统是一个三环控制系统,电流环和速度环均采用积分分离的PI控制算法,位置环作为最外环直接决定伺服控制系统的动静态性能,因此这种Fuzzy-PID控制器能通过偏差的大小,自动选择是采用模糊控制策略或是PID控制策略,从而达到提高系统性能的目的^{〔18〕}。

文献〔19〕使用了TI公司的DSP56F8367控制器组成的调速控制系统。针对大多数采用位置检测器无法测出瞬时速度的缺陷,采用卡尔曼滤波器,在大量干扰和噪声环境中的电机转速进行最优估计,因此能够提高每个状态瞬间速度估计量精度^{〔19〕}。

1.2.2 电机控制器的现状

计算机、微电子、电力电子等科学日新月异的发展,推动了电机应用技术进一步发展,出现了越来越多新类型的电机,而电机控制技术也变得更加灵活、更有效率,如逆变器控制的异步电机伺服系统就是一个典型的例子。

控制器的主要作用就是对输入数据进行处理,实现各种运算,发送控制信号或将运算结果输出给其他外围设备,接受外围设备指令并进行处理。它经历了从模拟控制器发展到数字控制器的一个过程:模拟控制器的一些参数容易受到外部因素的影响,准确性较差,控制效果不理想;随着微电子技术、电力电子技术、永磁材料技术的发展,电机控制器逐渐朝数字化方向发展。数字控制器和模拟控制器相比,其优点相当明显:可靠性高,调整方便,控制精度高,受环境因素干扰小等。

目前,数字控制器常见有单片机和DSP两种。与单片机相比,DSP设备具有更高层次的集成:DSP具有更快的CPU,更多的内存容量,内置有波特率生成器和FIFO缓冲,提供高速、同步串行端口和标准异步串行端口,一些片内还集成的A / D和采样/保持电路,可提供PWM输出等^{〔6〕}。该系列的外部设备,如:数字转换器(A / D)、脉

冲宽度调制发生器 (PWM) 和数字信号处理器 (DSP) 集成在一起, 就获得一个经济且功能强大的数字信号处理器。

近年来, 各种各样的单片 DSP 性能得到很大的改善, 如越来越多、越来越好的软件开发工具, 大大降低的价格等。部分低端产品的价格已经接近单片机价格水平, 但性能却优于单片机。采用 DSP 芯片和一些其他的可编程逻辑器件可以极大地减少系统的体积, 提高系统的处理能力, 实现复杂的实时控制。如今越来越多的用户采用使用高性能的 DSP (数字信号处理器) 来作为电机控制器。而它的应用, 又推动着 BLDCM 朝着高智能化、全数字化的方向进一步的发展。

1.3 课题研究的主要内容

1. 通过介绍 BLDCM 控制策略国内外的研究现状, 阐述了它的基本结构、工作原理、数学模型和控制策略等, 确定以 DSP 为主要控制器的控制方案。

2. 分析了传统 PID 控制及单纯的模糊控制在 BLDCM 控制中优缺点, 确定了采用模糊 PID 控制策略来设计了 BLDCM 的控制系统。

3. 从硬件框架和软件流程, 分别设计了 BLDCM 控制系统。硬件框架设计包括电机控制电路、检测电路、保护电路、驱动电路。软件流程设计则列出了主程序和中断子程序等流程图。

4. 利用 MATLAB 建立系统的仿真模型, 并对改进之后的控制系统与传统控制系统进行了验证比较, 说明优缺点

5. 在最后对全文进行了总结, 展望了未来的研究工作。

1.4 本章小结

通过对文献资料的查阅, 这一章主要介绍了无刷直流电机 (BLDCM) 控制系统的研究现状和发展趋势, 揭示了课题的研究背景和目的, 并指出了课题研究的主要内容。

第二章 无刷直流电机的基本原理和数学模型

2.1 无刷直流电机的基本结构

永磁无刷直流电机与永磁有刷直流电机相比,最大的不同在于其用电子换相电路代替了传统的电刷,永磁无刷直流电机的磁极在转子上,电枢在定子上,这个布局和有刷直流电机相反,这样的好处就是让固定更加方便^[40]。

传统的无刷直流电机按原理功能视为由转子位置传感器、电子换相器和永磁电机本体组成,其基本的组成原理框图如图2-1所示^[8]。

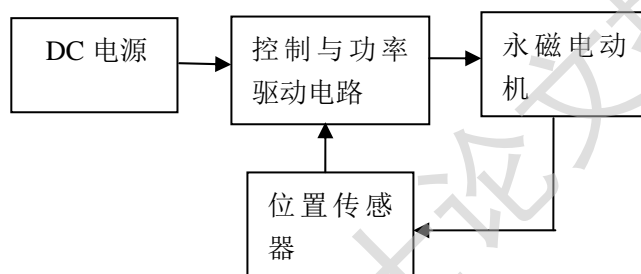


图 2-1 无刷直流电机基本原理框图

无刷直流电机的控制与功率驱动电路决定定子绕组传导时间和顺序。它接收来自位置传感器的信号,并通过触发末级功率管的方式来控制定子绕组的有序换流,产生恒转矩使电机正常工作,它是整个无刷直流电机的核心部分。位置传感器主要用于检测转子的位置,发出信号来控制电路的转换^[6]。

2.2 无刷直流电机的工作原理

BLDCM定子绕组多设计为3相、无中性点的三相星型结构。

三相无刷直流电机绕组和三相桥型式转换电路在一起形成三相全控操作模式。三相全控具有高效率、波动小、电路成本较低等优点,从而被广泛采用。三相全控的主电路图如图2-2^[18]。

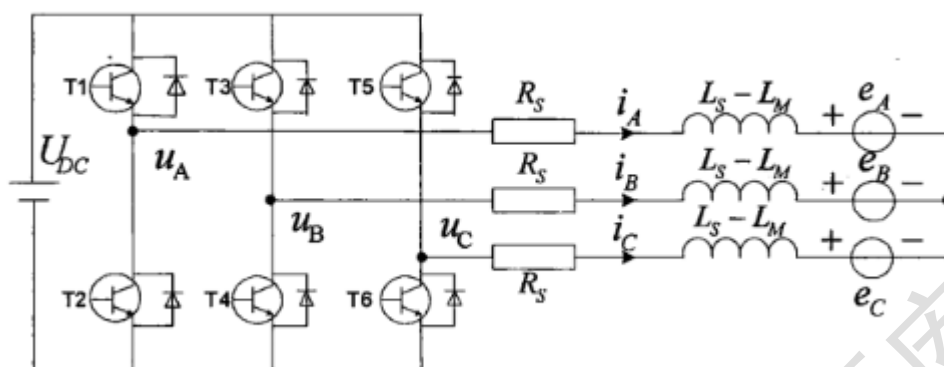


图2-2 三相全控电路原理图

三相全控操作方式可以分为120度导通模式(两两传导的方式)和180度导通模式(三三传导模式)。任意时刻(除了扭转力矩)均有不同相的三个开关电源传导是180度的导通方式,电角度每隔60度换相一次,每次只有一个功率管扭转,每个功率管角传导180度电角度。各个功率管按照T1T6T3、T6T3T2、T3T2T5、T2T5T4、T5T4T1.....等导通顺序导通。任意时刻(除换向瞬间)各有不同相的两个上、下桥臂开关元件导通,是120度导通方式,电角度每隔60度换相一次,每个功率管导通120度电角度。各个功率管按照T1T6、T6T3、T3T2、T2T5、T5T4、T4T1....等导通顺序导通。

2.3 无刷直流电机的数学模型

2.3.1 三相平衡电压方程

我们选择转子为永磁装式结构、定子绕组为三相星型接法的无刷直流电机为例,来分析其数学模型。为了便于分析,我们必须执行下列五个假设^[9-10]。

1. 忽略了定子绕组电枢反应对系统性能的影响;
2. 电机内部气隙磁场均匀,饱和磁路不会产生,磁滞损耗不考虑。
3. 驱动系统逆变电路的功率管和续流二极管具备理想的开关特性;
4. 永磁电机转子产生的气隙磁场波形为梯形波,三相绕组反电势为梯形波,波顶是120度的电力角宽度;
5. 三相电机定子绕组完全对称的,结构是相差120度的,具有同样的电角度和参数;

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库