

湖南大学

硕士学位论文

交流异步电力测功机系统的设计与建模

姓名：赵杰

申请学位级别：硕士

专业：机械电子工程

指导教师：张桂香

20090420

摘 要

随着摩托车应用的日益广泛，人们对摩托车发动机的排放等性能要求日趋严格，而摩托车发动机的性能试验是其生产、维修和研究中不可缺少的一个环节。发动机实验台架是进行发动机性能试验的主要设备，是其它测试设备的基础。本文重点阐述了基于摩托车发动机的交流异步电力测功机控制系统的仿真和研究。

本文先介绍了基于摩托车发动机的交流异步电力测功机系统的基本工作原理，分析了测功原理及系统各主要转矩量之间的关系，讨论了测功机稳定运行的条件，为测功机系统的建立奠定了理论基础；然后从以下几方面对系统进行阐述：

在硬件设计方面，本文介绍了基于摩托车发动机的交流异步电力测功机系统的设计，阐述了双 CPU 系统的工作原理，设计了实时控制子系统和人机交互子系统，分析了双口 RAM 的工作原理。在此基础上，设计了基于模拟电路的油门控制器控制电路，并对调试过程进行了分析。

在软件设计上，设计了基于 LabVIEW 的人机交互上位机程序，根据交流异步电力测功机系统的控制要求，设计了主程序流程图；根据 LabVIEW 软件编写的特点，对上位机程序分模块进行阐述。通过串口通讯对数据进行采集，利用中值滤波对数据进行处理，利用报表的方式对数据进行存储和图表显示。

在仿真方面，对测功机各个模型进行分析，在此基础上建立了测功机系统的数学模型，并利用 Simulink 建立了测功机系统的仿真模型，采用传统 PID、单神经元 PID、改良的单神经元 PID 算法对系统进行仿真，得到仿真曲线。将仿真结果进行比较和分析，选择适合于本系统的控制算法，通过仿真曲线与实验结果的分析比较验证仿真模型的正确性。

本文详略分明，对测功机系统进行了综合的阐述。最终试验证明，本系统仿真模型的正确性和系统的设计能满足发动机台架试验的要求。

关键词:油门控制器；发动机测试；交流电力测功机；速度特性；负荷特性；

双 CPU ； 单神经元 PID

Abstract

With the widespread application of motorcycle, the requirement for discharge and other performance of motorcycle is becoming stricter and stricter. The motorcycle engine performance testing is an important step in manufacture, maintenance and research. The motorcycle engine testing table is a main equipment for engine performance testing, and a foundation of other testing equipments. This article focuses on simulation and research based on asynchronous exchange of motorcycle engine dynamometer power control system

Firstly, this article introduces the basic principles of the system, the operating principle and the relations among the main torques of the system and discusses the stability conditions of the system. All of the above lay a solid theoretical foundation for the system's set up. Secondly, this article elaborates the system from the following aspects

From the aspect of hardware designing, this article introduces the design of the system, elaborates the operating principle of the dual-CPU system, suggests a design method to the man-machine interface, and explains the working principle of dual-port RAM. After that, this article makes a detailed description of the design of the accelerator control system and analyzes the debugging process.

From the aspect of software designing, this article focuses on the host computer program design based on the Labview, lists the main program flow chart, and makes a detail classification description introduction to modularization of software design. Collects data through the serial ports communication, processes data through the median filtering, and storages and charts data through statements.

From the aspect of simulation, this article sets up mathematical model for dynamometer system on the basis of analysis of various models. The simulation was set up through Simulink. This article uses a certain kind of method to make a simulation of the system, and then the simulation curve is obtained. At last, comparing the simulation results to experimental results, verifies the correctness of the mathematical model. It has a guide sense to the system controlling.

This article makes a comprehensive elaboration to the dynamometer system. The experimental results verifies the simulation model's correctness and the design of the system can achieve the requirement of the engine testing.

Keywords: throttle controller; engine testing; AC Power Dynamometer;
speed characteristics; load characteristics; Dual CPU; single neuron PID

附表索引

表 6.1 变频调速电机仿真电气参数	48
表 6.2 钱江 125 发动机的性能参数	52

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明:所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外,本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体,均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名: 

日期: 09年5月18日

学位论文版权使用授权书

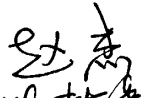
本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定,同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密□,在_____年解密后适用本授权书。

2、不保密□。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名: 
导师签名: 

日期: 09年5月18日

日期: 09年5月18日

第1章 绪 论

1.1 本文背景和国内外发动机测试的发展与现状

随着人们经济收入的不断提高，摩托车作为方便快捷的交通工具，日益受到人们的青睐，需求量增加的同时也促进了中国摩托车行业的迅速发展。1993年我国的摩托车产量已达到334.1万辆，超过日本当年产量，首次产量位居世界第一^[1]；1995年产量为786.6万辆，超过日本历史的最高水平；1996年我国的摩托车产量突破1000万辆大关。但与此同时摩托车排放的废气污染物对环境的污染也越来越被政府和人们所重视，世界各国对摩托车废气排放限制也越来越严格。为适应摩托车产品废气排放在新形势和未来形势条件下的要求，改进和完善各种排放是法规验证需要的试验手段。发动机试验是发动机生产、维修和研究中不可缺少的一个环节，在设计和生产过程中，许多重要的性能参数都是通过发动机试验的方法获取，利用测得的性能数据，绘制出各种特性曲线，对发动机整机运行状态与调整方向进行详细地了解，从而对改进发动机设计具有重要的指导意义^[2]。

发动机实验台架是进行发动机性能试验的主要设备，是其它测试设备的基础。它主要对发动机进行转速、扭矩测试和各种性能试验，也可以用于其它原动机和电机、齿轮箱、油泵油嘴调速器等零部件的性能试验、耐久试验。因此广泛应用于企业、科研机构、大专院校实验室。

早期的发动机试验台架大多采用水力测功机作为耗能装置，其负荷的调整完全靠手动调节完成；转矩的测量是借助于加载磅锤的偏转所形成的力矩，由偏转的指针在表盘上对应的读数来反映转矩的大小，用这种完全手动的操作方式形成稳定工况需要很长的时间，且操作和数据记录很不方便，需要人手也较多。在计算机技术和电子技术广泛应用之前，大多数内燃机生产厂家和科研机构进行发动机测试试验时，测试参数都是采用人工记录，并由人工进行数据处理，再由人工整理成数据表格，然后进行试验曲线绘制。这样的测试手段必然导致试验和开发周期较长，人工环节较多而导致原始数据记录和数据处理误差较大等缺点，很难满足发动机自动化测试和研究的要求^[3]。

90年代，国外发动机行业在市场竞争和环境保护的双重压力下，产品综合技术水平有了很大提高。一方面发动机的研制开发对测试技术提出了更高的要求；反过来，测试水平的提高又为研制开发高性能发动机提供了可靠的技术保证。因此，许多国外发动机厂商和研究机构都非常重视发展和完善各种先进的测试技术。

近年来，发动机测试技术与现代动力工程技术的发展相适应，产生了飞速发展。随着电子技术、传感器技术、计算机技术和控制技术的推广与应用，以前采

用人工采集处理测试数据、手工绘制曲线和人工操作控制发动机及能耗装置等测试技术手段正被计算机自动测控系统所代替,测量和控制精度、可靠性、稳定性和灵活性都有了很大提高。

从早期利用测功机进行手动的单一项目的测试,到目前完善的自动测试系统,发动机试验台架在不断地应用科技发展的新成果。现代的发动机测试台架集数学、自动控制、信号处理、人工智能、电子技术等各种现代科学技术于一体,其解决的主要问题是:(1)发动机的运行参数监测与控制;(2)测功机阻力矩的实时控制;(3)测控参数的高速采集;(4)测试数据的分析及图形处理等。

日本渊野公司 ESF-100 型发动机台架试验系统,采用计算机集成控制,能够对各种测试参数进行实时采集,并且能够实现数据处理、特性曲线绘制等功能;同时,采用 MC 技术的发动机台架试验系统使用高速交换以太网构成的现场信息总成,通过数据分布处理技术,实现了多个测控系统数据的实时监控与集中处理,并能完成数据库的实时建立与管理,使系统可扩展性与升级能力得到了很大程度的提高^[4]。

在国外,发动机测试设备的主要生产厂家有:日本小野测器,奥地利 AVL,策尔纳等。目前国际上应用广泛的是奥地利 AVL 公司的产品^[55]。AVL 的发动机测试设备种类齐全,适用范围广,测试精度高,技术先进,是国外内燃机测试行业的首选设备。但是它也毫不例外的具有进口设备的通病:价格昂贵,因此目前在国内使用较少^[5]。

1.2 国内外测功机及其控制技术的发展 and 现状

测功机是发动机测试的重要设备,作为发动机测试系统中的能耗装置,它不仅用来吸收被测发动机输出的功,而且通过控制测功机可以改变发动机的负荷及转速,形成所需的测试工况,以测定发动机实际使用的各种运行状态下的性能指标。因此,测功机检测和控制技术的发展对发动机测试显得尤为重要。国内外发动机试验台架常用的测功机可分为水力测功机、电涡流测功机、直流电力测功机和交流电力测功机等。

1.2.1 水力测功机

水力测功机因其单位转动惯量的扭矩吸收能力强,长期以来成为大功率内燃机试验优先采用的设备。目前主要有定充量水力测功机和变充量水力测功机。定充量水力测功机的吸收腔内始终充满具有一定压力的水,通过调节测功机的闸套开合位置(即调节测功机转子与定子间的工作面积)来改变测功扭矩大小,这类测功机稳定性好,但结构复杂。变充量水力测功机又称水涡流测功机。它是通过进、出水阀来调节水力测功机吸功腔内水量的多少,以达到改变其制动扭矩大小的目

的。变充量水力测功机工作时水压高，噪声大，而且在转速高、制动扭矩小的区段几乎不能稳定工作。目前，主要采取如下措施解决其工作不稳定的问题：①采用闭环控制发动机的油门或风门来控制发动机的转速；②采用闭环控制测功机水门来控制测功机的制动扭矩；③采用水力测功机的工作介质与冷却介质分离的方法（双介质法）。把前两种方法结合起来，采用双闭环控制测功系统转速和扭矩是当今世界水力测功机的先进控制方法^[54]。目前，国内杭州突科机电已开发出 WE 系列水涡流测功机产品。

1.2.2 电涡流测功机

电涡流测功机利用涡电流效应吸收发动机输出转矩和功率，具有低惯量、高精度、高稳定性、结构简单等特点，适用于操作控制的自动化，并且功率范围也较宽，转速较高，响应速度较快，测试工艺比较成熟，是目前各内燃机制造厂主要使用的测功机之一^[6]。基于其良好的控制性、可调性以及负载稳定性，电涡流测功机较合适用于发动机的开发和试验。此外，它也适用于发动机零部件的开发研究试验，汽车风阻、变速器、后轮轴的模拟试验及完整的传动系统模拟实验等。但是，传统的电涡流测功器吸收功率较小，技术水平偏低，自动调节系统动态结构中“恒流控制”和“恒速控制”两个调节闭环共用一只调节器，导致恒转矩控制和恒转速控制达不到精度要求。而且，与水力测功机一样，电涡流测功机只能吸收原动机的功，将其全部转化为热能消耗而不能回收，也不能作为电动机驱动发动机工作。由于其性能的限制，使得其精度的提高和实际应用受到限制。

1.2.3 电力测功机

电力测功机的基本结构和普通电机相似，由转子和定子构成，但与普通电机不同的是这种电力测功机的定子及其外壳不是固定在机座上，而是可以自由摆动。转子通过轴承支撑在定子外壳上，定子外壳通过滚动轴承浮动的支撑在支座上，定子外壳与电机底座之间用拉压传感器相连接。由于定子用轴承浮动支撑，所以拉压传感器产生的转矩与定子上所作用的转矩平衡，其大小由拉压传感器测出，故也称为平衡式电力测功机，它分为直流电力测功机和交流电力测功机。

1.2.3.1 直流电力测功机

直流电力测功机采用复式激励的直流电机，利用电枢绕组切割磁力线而产生感应电动势的原理，根据在不同电磁力作用下所产生大小不同、与转向相反的制动力矩来控制测功机的运行状态。直流测功电机由于控制简单、调速平滑，性能良好，一直占据主导地位。然而，直流测功电机结构上存在机械换向器和电刷，因此具有一些无法克服的固有缺点，如造价偏高，维护困难，寿命短，单机容量

和最高电压以及最高转速都受到一定的限制等等，导致直流电力测功电机在大容量、高速测功系统中难以广泛应用。

1.2.3.2 交流电力测功机

交流电力测功机按照电机类型的不同又可以分为同步电力测功机和异步电力测功机两大类^[7]。交流同步电力测功机系统原理如图 1.1 所示。同步方案测功电机采用绕线式异步电机。由发动机直接驱动测功电机在发电机状态下运行，K1、K3 断开 K2 闭合，提供直流励磁电流给测功机转子，作同步发电机运行方式，定子发电产生电能由电阻负载消耗或由整流、逆变系统回馈电网。在 K2 断开，K1、K3 闭合时，测功机可作为具有启动电阻 R 的三相绕线式异步电动机运行，可用于发动机冷磨合试验。交流同步测功机转矩控制可以通过调节励磁电流和负载电阻来实现，测功机本体发热较低，功率范围较大，操作简单，使用方便。由于具有电刷、滑环及其绕线式的转子结构，测功机运行速度受到限制。

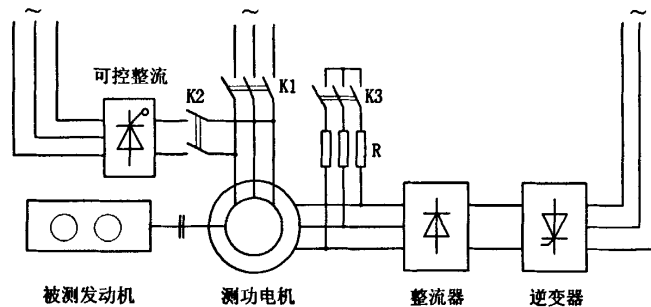


图 1.1 交流同步电力测功机系统原理图

交流异步电力测功机系统原理如图 1.2 所示：

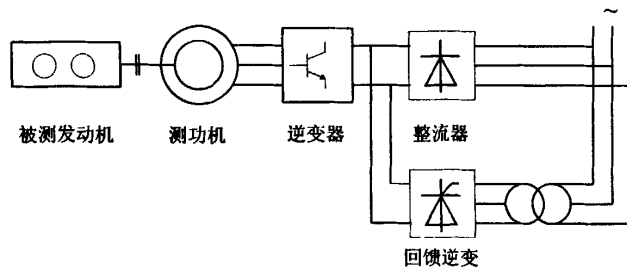


图 1.2 交流异步电力测功机系统原理图

异步方案测功机采用鼠笼式交流异步电机，定子三相绕组和三相变频电源连接，当三相变频电源驱动电机转子的转速与转向与被测动力机械相同时，被测机械输出接近空载。当三相变频电源降低频率，旋转磁场同步转速低于测功机转子转速时，测功机工作于发电机状态，产生的电磁转矩方向与被测机械输出转矩方向相反，即向被测试机械施加负载。此时，测功机将被测试机械输出的能量转换

成电能，通过输出给大功率电阻消耗或者回馈电网^[8]。

在国外研制或生产的电力测功机系统中，以 AVL 公司的 APA 系列、德国 SCHENCK 公司的 HT、LI 系列产品为代表，基本实现了测功机系统的自动控制，有较好的综合性能，并取得了良好的经济效益，但价格昂贵，在国内的应用不多^[9]。

与各类水力测功机及电涡测功机相比，交流电力测功机测功范围宽，而且可在测定原动机性能参数的同时，还以发电的形式回收能量，电能回收率可达 80%^[10]；与水力测功机相比，它节约了水资源及相应的配套设备，试验场地干净，对环境无污染，转矩控制响应迅速而且测量精度高；与直流电力测功机相比，也无需经常保养，空间小、成本低。另外，平衡式交流电力测功机还可以作电动机运行来拖动发动机，实现发动机电起动、冷磨合、摩擦功率和机械损失测量。

近几年来随着电机控制技术和电力电子技术的发展，交流传动系统在动、静态性能上得到了显著提高，因此对交流测功机的研究成为主流趋势。

目前，交流测功机并已广泛用于发动机、汽车底盘、电动汽车、电机性能试验、电机 M-S 曲线试验、液力变矩器、动力换挡变速箱、液力变速器总成、汽车变速箱、船用齿轮箱、减速器和其它传动装置的功率和效率测试，为各种动力机械及传动装置的研究开发开辟了新的应用领域。

在国外研制或生产的交流电力测功机中，由 AVL 和 ELIN 公司联合生产的 APA 系列测功电机具有一定的代表性，它是摇篮式笼形异步电机，主电路为交直流系统，以计算机为中心，进行数据采集、处理与工况自控。另外，还有德国申克、西门子、日本小野测功器等公司的产品。上述公司的电力测功机基本实现了自动控制，有较好的综合性能，并取得了良好的经济效益，但价格昂贵。

我国从 70 年代开始研究交流电力测功机，在此之前测功机多从国外进口。1974 年，湖南大学开始研究交流电力测功机，在异步方案的基础上研究成功“同步方案”测功机，先后研制成功 15KW、28KW、40KW、160KW 等规格的交流电力测功机。近年来与湘潭电机厂合作，研制了交流变频电力测功机和双馈电力测功机。湖南大学研制的 CY110、CY160 系列交流变频异步电力测功机通过了鉴定，并已申请专利。这些在低成本高性能的测功机及其测控系统领域所做的研究，对我国减少对进口产品的依赖，发展民族汽车工业具有极大的经济价值和实际意义^[5]。

1.3 本文涉及的基本问题 and 研究对策

本文交流电力测功机系统由若干功能模块组成，其基本组成包括：交流电力测功机、耗能负载电阻、各种传感器、信号调理模块、油门控制器、直流力矩电机、变频器、单片机控制模块(A/D 输入、D/A 输出、IO 模块)等。电力测功机作为发动机的负载，测功时在发电状态运行，所产生的电能由负载电阻消耗。测功机系统是一个复杂的多模块系统，需要进行研究和深入探讨的问题和理论有很多，本

文针对测功机系统研究中的以下几个部分展开论文的撰写:重点介绍了测功机的工作原理,系统整体数学模型的建立和仿真验证,简要介绍了系统的组成和硬件软件的有关设计,详细地阐述了油门控制器的方案选择和基于模拟电路方案的设计与调试,给出了交流电力测功机系统的上位机程序的编写方法并对系统的实验与仿真结果进行了分析。

1.3.1 电力测功机系统以及油门控制器的设计

测功机系统要对数据进行采集和处理必须设计相应的硬件与软件系统,测功机测试及控制系统硬件主要包括:转矩、转速、温度、电压与电流等传感器及相应的信号调理电路、单片机控制板各模块,键盘和 LCD 屏以及油门控制器及其执行机构等。本文根据实际应用对系统的硬件设计进行了有重点性的介绍,详细的介绍了双 CPU 系统的工作原理,对油门控制器的设计方案进行比较,选择了模拟电路搭建油门控制器的方法并对最终的设计方案进行了详细的阐述。本文中采用 LabVIEW 编写电力测功机系统上位机程序,上位机程序通过与单片机进行通讯控制试验的过程,实现操作人员对试验过程的交互式的控制,通过前面板对试验的数据进行实时显示并同时进行监测,一旦数据异常则进行报警提示并同时终止有危险的实验步骤的继续运行,对试验的数据进行采集滤波并保存。整个程序采用模块化设计,对实验的各种相关信息进行保存,极大的方便了实验过程和结果查询。

1.3.2 电力测功机系统的原理、数学模型与仿真验证

在进行测功系统控制研究时,首先要认识被控系统各部分的运动规律、各量之间的因果关系或定量关系以便于分析、设计。因此,必须建立系统主要物理量变化规律的数学模型。本文首先分析了测功系统工作的原理,围绕测功电机运行时定、转子上各转矩之间的定量关系进行了详细的讨论,在此基础上进一步对测功电机模型进行了深入的研究,寻求出测功系统转速、转矩控制方案。

交流电力测功机系统由若干功能模块组成,包括变频器、摩托车发动机、电力测功机、油门控制器等。各个模块在输入条件发生改变的情况下,模块的输出值呈现有一定规律却非线性的变化,为了更深入了解系统各个模块之间输入输出量的关系以及对他们采用控制算法后系统输入输出量的变化,观测系统的整体响应以及对系统测量数据的影响,在对系统的数学模型进行分析和有针对性的简化的基础上,建立系统各个模块的数学模型,利用 Simulink 建立系统的整体仿真模型,通过给定输入信号与相应的控制算法对系统进行仿真,得到系统相关参数的曲线,为实际控制方案的选择提供一定的理论依据。

1.4 本文的课题来源及主要内容安排

本文研究课题是以湖南大学机械与汽车工程学院承担的北方发动机研究所的横向课题“交流电力测功机及其测控系统开发”为研究背景，具有实际的工程背景和应用价值。根据作者的开发实践与心得，从该系统的技术理论基础、软件和硬件开发等方面进行全面陈述。本文下面的结构和主要研究内容安排如下：

第一章阐述了本文的研究背景、国内外发动机测试的发展和现状，以及本文研究的现实意义；讨论了发动机测试中最主要的设备——测功机，以及其控制技术在国内外的发展和研究状况，重点讨论了本文研究的交流电力测功机的特点、测功方案和系统工作原理。最后，对本文研究的主要内容、难点以及研究对策等方面详细地进行了总体概述，提出了本文的研究背景、意义和课题来源。

第二章详细讨论了测功系统工作原理，详细分析了测功系统内部各转矩量之间的关系，研究了系统的测功原理，提出了通过测量转矩和转速的间接测量系统功率的方法。然后根据情况对系统的工作稳定性进行了说明，介绍了发动机测试系统的速度特性实验和负荷特性试验的具体内容和控制要求，为后续章节的研究打好理论基础。

第三章对测功机系统相应的硬件与软件系统进行了介绍，测功机测试及控制系统硬件主要包括：转矩、转速、温度、电压与电流等传感器及相应的信号调理电路、单片机控制板各模块，键盘和 LCD 屏等。本文给出了双 CPU 控制系统的硬件组成，针对控制系统实验的需要，给出了系统的软件结构，同时对系统中关键的部分进行了详细的阐述，对硬件设计中的一些问题进行了说明。

第四章介绍了油门控制器的设计。油门控制器是由直流力矩电机和控制电路组成，油门控制器在系统中的作用十分重要，它的稳定性决定了整个系统的性能和实验结果的好坏。它的波动会直接影响油量的进给，进而对发动机的输出功率产生影响，导致实验数据的波动。油门控制器的设计原则就是要保证它的稳定性，在给定了控制量以后能在最短的时间内达到控制的要求而且在没有新的给定量出现的时候能一直保持该值不发生变化。油门控制器的设计核心就在于控制直流力矩电机的控制电路，本文中给出了控制电路的各个模块和对其工作原理进行了阐述，给出了调试的过程。

第五章介绍了电力测功机的上位机程序的设计。重点介绍了系统的主程序模块，给出了主程序的控制流程。对初始化模块、实验主界面模块、数据采集模块、报表生成模块的设计做了详细的说明，对系统的通讯安全性问题进行了研究。同时对系统采集数据的处理和保存也进行了说明。

第六章介绍了交流电力测功机系统数学模型，针对数学模型根据系统的实现情况进行了推导和有针对的简化，利用 Simulink 建立了系统的仿真模型，包括交

流电力测功机的仿真模型、变频器的仿真模型、发动机的仿真模型以及根据交流电力测功机系统的工作原理，将各个仿真模型的输入输出量联系起来，根据发动机性能测试的要求和系统工作的实际情况，选择了适当的控制算法对系统的控制量进行控制，建立了整个系统的仿真模型。根据对系统的仿真进行控制，得到了系统仿真的数据曲线，通过对仿真曲线的各种控制算法的分析与比较选择最适合测功机系统的控制算法，通过仿真曲线与实验得到的数据曲线进行比较，验证了数学模型正确性。

第七章在系统软硬件满足实验条件和交流异步电力测功机系统的仿真模型建立好的基础上，进行了系统的速度特性和转速特性的试验和仿真，对实验和仿真的结果进行比较和分析，验证数学模型的正确性和选择更好的控制算法。

第 2 章 交流异步电力测功系统的基本原理

交流电力测功机系统属于多学科交叉领域，涉及到机械、电机、电力电子、计算机和自动控制领域的理论和知识。本章以摩托车发动机实验台架为例，根据发动机性能测试的要求，将重点阐述测功系统的测功原理、测功电机运行时稳态转矩分析、电力测功机系统工作稳定性分析以及发动机性能测试内容与要求。

2.1 交流异步测功机系统测功原理

交流电力测功机作发动机的负载测功运行时实际上是一个处在发电状态下的交流异步电机，它吸收被测发动机发出的功，将发动机输出的机械能转变成电能，通过控制测功电机来改变发动机的负荷及转速。由于发动机自身的结构决定无法直接测出发动机的转矩，因此通常以测功电机转速和轴上的转矩作为被测量，来间接测量发动机的输出转矩和功率。当测功电机作电动机运行时，可作为绕线式异步电动机驱动发动机启动、冷磨合及测定机械损失。

一般采用的测功方法有测定电功率法和转速转矩测定法两种。测定电功率法由于测功效率易受外界负荷、转速、温度等的影响和电机参数受频率、温度变化影响较大，另再加上各种损耗，导致测定的电功率变化很大，必须采用曲线校正的方法，使得该方法的试验工作复杂化、试验结果不准确，因此应用较少。转速转矩测定法就是通过测量电机或被测试机械的转速和转矩，根据如下公式计算得到输出功率^[1]。如用 P 表示发动机输出的有效功率(KW)， M_p 表示有效输出转矩(N·M)， n 表示转速(r/min)，则三者之间的关系为

$$P = \frac{M_p \times n}{9550} \quad (2.1)$$

式(2.1)说明:有效功率 P 是通过测定某工况下被测发动机的输出转矩 M_p 和转速 n 计算得到的。因此，交流异步电力测功机轴上的加载转矩 M_p 和轴上转速 n 是为其基本组成的功率测试系统中两个关键的检测量。这种转矩测试的方法结构示意图如图 2.1 所示。

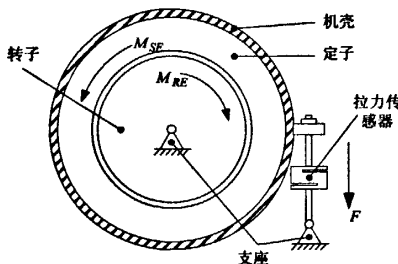


图 2.1 转速转矩测定法示意图

图 2.1 中符号代表的意义如下:

F :电机定子外壳与电机支座之间的拉力;

M_{RE} :作用在电机转子上的电磁转矩;

M_{SE} :作用在电机定子上的电磁转矩。

如图所示,平衡式交流异步电力测功机结构由转子和定子构成,但与普通电机不同的是定子及其外壳不是固定在机座上,而是可以自由摆动,是平衡浮置的。转子是通过轴承支撑在定子外壳上的,而定子外壳通过滚动轴承浮动地支撑在支座上,定子外壳与电机底座之间则用拉力传感器相连接。由于定子用轴承浮动支撑,因此拉力传感器就可间接测出定子上所作用的转矩即交流异步电力测功机的反向转矩,该反向转矩即为被测试设备的输出转矩。由于该测试方法简单、测定的数据不易受其他因素影响,因此测定的数据比较可靠。

2.1.1 测功(即发电)运行稳态转矩分析

如前所述,测功电机是通过测定浮置发电机定子外壳的反向转矩来测得发动机输出转矩和输出功率。当测功电机运行在发电状态时,假定测功电机转子按顺时针方向旋转,则作用在平衡式测功电机定、转子上的转矩分别如图 2.2(a)、(b)所示。

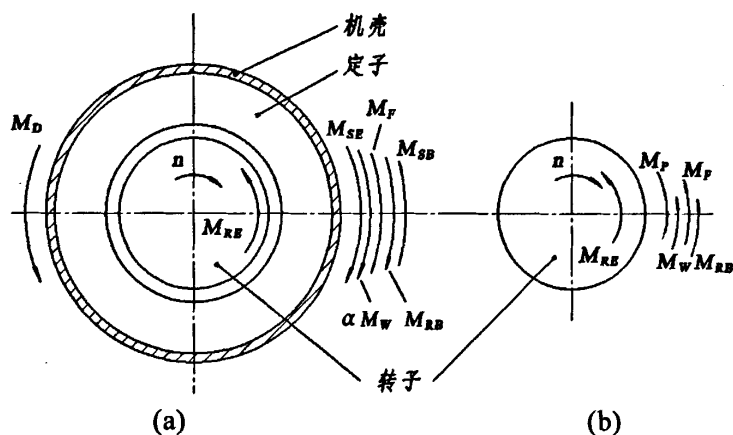


图 2.2 平衡式电力测功机测功运行时的转矩关系

图 2.2 中的符号代表的意义如下:

M_D :拉压传感器作用在定子外壳上的平衡转矩,即测得的转矩;

M_F :电刷与滑环之间的摩擦转矩;

M_P :发动机的输出转矩,即发动机作用在电机转子上的机械转矩;

M_W :电机转子转动时,冷却风在转子表面形成的风摩擦阻转矩;

M_{RE} :作用在电机转子上的电磁转矩;

M_{SE} :作用在电机定子上的电磁转矩;

M_{RB} :作用在电机转子轴承上的阻转矩;

M_{SB} :作用在电机定子轴承上的阻转矩;

平衡式电力测功机在测功(发电)状态运行时,由于气隙磁场的作用在定子和转子上形成一对大小相等、方向相反的电磁转矩,即

$$M_{RE} = M_{SE} \quad (2.2)$$

当被测发动机以顺时针方向转矩 M_P 拖动平衡式电力测功机转子旋转时,作用在转子上的转矩如图 2.2(b)所示。此时,测功电机转子侧,作用在电机转子上的电磁转矩 M_{RE} 、电刷与滑环之间传递给转子的摩擦转矩 M_F 、冷却风在转子表面形成的风摩擦转矩 M_W 以及转子轴承的转矩 M_{RB} 都是阻转矩,因此方向与原动机转矩 M_P 方向相反,转子力矩平衡方程式为

$$M_P = M_{RE} + M_F + M_W + M_{RB} \quad (2.3)$$

即

$$M_{RE} = M_P - M_F - M_W - M_{RB} \quad (2.4)$$

对于测功电机定子侧,作用在定子上的转矩如图 2.2(a)所示。由于气隙磁场的作用带动定子有随转子同向旋转的趋势,因此可知作用在电机定子上的电磁转矩 M_{SE} 、电刷与滑环之间传递给定子的摩擦转矩 M_F 、转子轴承传递给定子的摩擦转矩 M_{RB} 都是驱动转矩;而且当转子旋转时带动冷却风顺时针同向旋转,必然对定子产生一个同方向的作用力矩,其大小为整个风摩擦转矩的一小部分,用 αM_W 表示(α 为远小于 1 的系数);同时,定子侧还存在示功测力系统的平衡转矩 M_D 及定子轴承的阻转矩 M_{SB} ,其方向为逆时针。因此,定子力矩平衡方程式为

$$M_D + M_{SB} = M_{SE} + M_F + M_{RB} + \alpha M_W \quad (2.5)$$

即

$$M_{SE} = M_D + M_{SB} - M_F - M_{RB} - \alpha M_W \quad (2.6)$$

由式(2.2)、式(2.4)、式(2.6)可得

$$M_P = M_D + M_{SB} + (1 - \alpha)M_W \quad (2.7)$$

式(2.7)中 $(1 - \alpha)M_W$ 表示风摩擦阻力矩 M_W 的一部分,这部分转矩不是以机械转矩的形式作用在定子上。

因此,由式(2.7)可知:当平衡式电力测功机运行在测功(发电)状态时,由原动机的被测转矩 M_P 与示功测力系统测得的平衡转矩 M_D 、定子轴承的阻转矩 M_{SB} 和未传递给定子的风摩擦阻力矩 $(1 - \alpha)M_W$ 等三部分转矩之和平衡,其中平衡转矩 M_D 为主要部分。

2.1.2 拖动(即电动)运行稳态转矩分析

同理,当测功电机在拖动(即电动)状态运行时,测功机定、转子上转矩的组成与测功(发电)状态运行时的情况相似,只是各转矩的方向和平衡情况不同。图 2.3

表示了电力测功机在拖动状态运行时的转矩平衡状况,图中各变量的含义与图 2.2 相同。

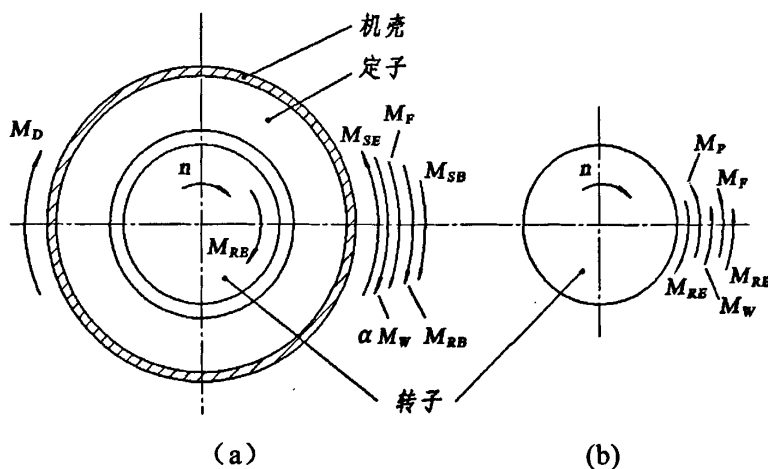


图 2.3 平衡式电力测功机电动机运行时的转矩关系

根据上述分析,同样可以得到图 2.3 所示的转矩及其方向,由图 2.3(b)得出转子侧转矩平衡方程为

$$M_{RE} = M_P + M_F + M_W + M_{RB} \quad (2.8)$$

对于图 2.3(a)中所示的定子侧的转矩平衡方程有

$$M_{SE} = M_D + \alpha M_W + M_F + M_{RB} + M_{SB} \quad (2.9)$$

同理,由于气隙磁场在定、转子上产生的电磁转矩大小相等,即 $M_{RE} = M_{SE}$,故

$$M_P = M_D + M_{SB} - (1 - \alpha)M_W \quad (2.10)$$

由式(2.10)可以看出:当电力测功机作拖动状态运行时,被测发动机处于被拖动状态,其轴上的转矩 M_P 为阻转矩,大小等于示功测力系统在定子上测得的转矩 M_D 与定子轴承的阻力矩 M_{SB} 之和减去没有传递给定子的风摩擦阻力矩 $(1 - \alpha)M_W$ 。

将式(2.7)和(2.10)合并得

$$M_P = M_D + M_{SB} \pm (1 - \alpha)M_W \quad (2.11)$$

上式中,“+”表示电力测功机处于测功(发电)状态,“-”表示其处于拖动(电动)状态。当采取如下一些措施:如尽量降低测功机外壳的不平衡度,采用静摩擦小的滚动轴承,定子轴承由于仅起支撑作用可以使用液体润滑油而不用润滑脂,以减小定子外壳微动时的摩擦力矩等,都可以尽可能的减小测功电机的损耗转矩 M_{SB} 、 M_W 。当测功机处于转动状态时,由于轻微的机械振动使定子支座滚动轴承的滚珠产生微小跳动,此时在润滑油的作用下使得定子轴承的静摩擦力矩 $M_{SB} \rightarrow 0$,导致 M_{SB} 可以忽略不计。因此,式(2.11)可表示为

$$M_P = M_D \pm (1 - \alpha)M_W \quad (2.12)$$

令 $M_0 = (1-\alpha)M_w$ ，称为测功电机的空载损耗转矩，则式(2.12)可表示为

$$M_p = M_D \pm M_0 \quad (2.13)$$

上式中，“+”表示电力测功机处于测功(发电)状态，“-”表示其处于拖动(电动)状态。由式(2.13)可知，当测功电机的转子轴与被测发动机驱动轴分离，并且使测功电机运行在电动状态时， $M_p = 0$ ，则作用在传感器上的转矩(即此时测功电机测得的转矩) M'_D 大小等于没有传递给定子的风摩擦阻转矩，即

$$M'_D = M_0 = (1-\alpha)M_w \quad (2.14)$$

利用测功电机运行在电动状态空转的这一特点可以测定不同转速下的 $(1-\alpha)M_w$ 的大小(即风摩擦阻力曲线)，准确地对电力测功机进行动态标定。

式(2.1)、式(2.11)、式(2.12)、式(2.14)分别表示了平衡式电力测功机测功、测量转矩以及测功机转矩标定的基本原理。

2.2 电力测功机系统工作稳定性分析

对上述两种工作状态下电力测功机的转矩分析可知:在某一转速下，测功电机定、转子上转矩平衡是其稳定运行的条件，称这种运行工况为测功机的稳定工况^[12]。测功机在平衡工况时的稳定程度是衡量测功机性能的一项重要指标，它是指当被测发动机和测功机的调节机构不动而输出转矩与阻转矩之间的平衡发生破坏时，测功机自行进行载荷调整，使其转速能迅速返回原平衡位置以等速运转的能力。测功机能否稳定工作取决于测功机扭矩特性($M-n$ 曲线)与发动机速度特性的匹配。测功运行时，发动机作为原动机，测功机为从动机；电动运行时，情形相反。由式(2.3)、式(2.8)可知:电力测功机系统中与发动机转矩平衡的主要是电磁转矩，且电磁转矩的变化可以反映发动机转矩的变化趋势；由式(2.13)、式(2.14)可知:示功测力系统测得的转矩 M_D 主要反映了发动机的转矩变化，同时，也间接地反映了电磁转矩的变化情况。因此，测功机电磁转矩响应特性对系统的稳定运行起到决定性的作用。在此，以 M_p 表示发动机的输出转矩， M_e 表示测功机的电磁转矩。当 M_p 、 M_e (测功运行时为阻转矩，电动运行时为驱动转矩)出现瞬时变化和波动时，测功机的转速也会随之出现波动，此时能否恢复到原稳定工况或者进入另外一个稳定工况，则取决于测功机和发动机各自转矩的动态响应特性^[13]。

2.2.1 测功运行工作稳定性分析

测功电机测功运行时，若要保证其稳定地工作，则必须使测功机的电磁转矩 M_e 特性的动态响应(即 M_e 对转速 n 的变化率)高于被测试发动机的转矩 M_p 特性的动态响应(即 M_p 对转速 n 的变化率)，即

$$\frac{dM_e}{dn} > \frac{dM_p}{dn} \quad (2.15)$$

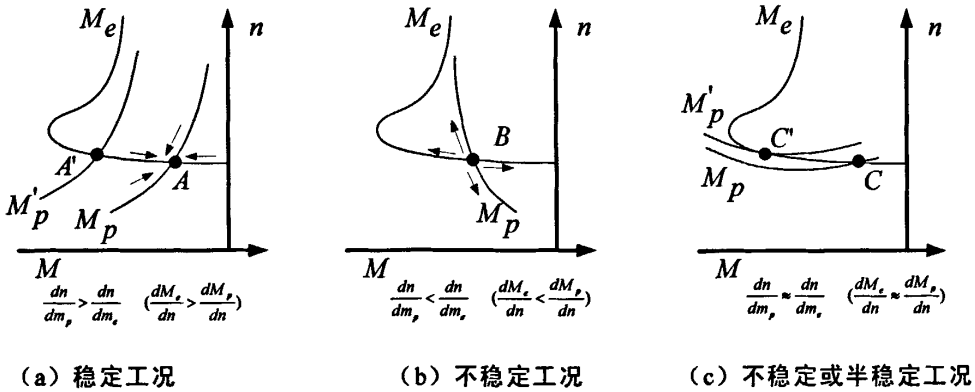


图 2.4 测功机作测功运行时系统工作稳定性分析

在图 2.4(a)中,当测功机与发动机在转速 n 稳定时,在 A 点 $M_{eA} = M_{pA}$ 。如果此时电磁阻转矩 M_e 暂时增大或者发动机驱动转矩 M_p 暂时减小,则 A 点的稳定工况被破坏,使转速 n 降低,当 n 降低至 n_1 时,由于此时 $M_p > M_e$,于是转速又上升至 A 点使 $M_{eA} = M_{pA}$,重新恢复原稳定工况;反之,当电磁阻转矩 M_e 暂时减小或者发动机驱动转矩 M_p 暂时增大, A 点的稳定工况也将被破坏,使转速 n 上升,当 n 升高至 n_2 时,由于此时 $M_p < M_e$,于是转速又下降至 A 点使 $M_{eA} = M_{pA}$,恢复原稳定工况。因此,当测功机在某一转速下取得转矩平衡时,即使转矩微小的波动导致转速变化,测功机始终可以收敛于该转速下的稳定工况。另外,在转速为 n 时,当发动机进入另一种工作状态,如发动机的转矩由曲线 M_p 变到曲线 M'_p 上时,由于 $M'_p > M_e$ 致使转速上升,此时 M_e 也逐渐增大, M'_p 慢慢减小,当 $n = n_2$ 时, $M_{eA'} = M'_{pA'}$,转矩在 A' 重新建立新的平衡状态,即系统可以进入另一个稳定工况点工作。

在图 2.4(b)中,当测功机与发动机在 B 点工作时,虽然在 B 点处转矩可以平衡,但只要 M_e 或 M_p 稍微变化,或者发动机转入另一转矩曲线工作,则转速不是不断上升(甚至“飞车”)就是逐渐下降至停机,即无法收敛于稳定工况点 B ,无法恢复到原平衡状态,此工况称为不稳定工况。

在图 2.4(c)所示,当测功机与发动机转矩曲线斜率相近且相差不大时,理论上来说系统可以稳定在 C 点,但实际上两者转矩稍有变化,都将会使转速变化很大,致使平衡状态恢复很慢,保持稳定运行的时间也很短(即所谓的“游车”现象),这样也无法满足工作要求,所以称这种情况为不稳定或半稳定工况。

由以上三种工作状况的分析可知:当电力测功机出于测功(发电)状态时,测功机的转矩特性 $M_e = f(n)$ 随转速 n 的增加上升越快,发动机的转矩特性 $M_p = f(n)$ 下

降越陡，当转矩瞬时发生变化或者进入另一工作点时，则测功机建立转矩平衡的时间越短，即进入稳定工况越快，系统的稳定性越好。

2.2.2 拖动运行工作稳定性分析

测功机拖动运行时，将作为绕线式异步电动机工作，其 $M-n$ 曲线如图 2.5 所示。作为异步电动机状态运行时，测功机具有较硬的机械特性，即此时作为测功机负荷的发动机转矩变化时，测功机的转速变化不大，即 $\frac{dM_e}{dn}$ 较小，此时测功机的转矩动态响应小于机械负载转矩的动态响应，即

$$\frac{dM_e}{dn} < \frac{dM_p}{dn} \quad (2.16)$$

因此，测功机运行在拖动(即电动)状态时，易处于稳定工况。式(2.15)、(2.16)即为“测功机——发动机”测功系统稳定运行的条件。

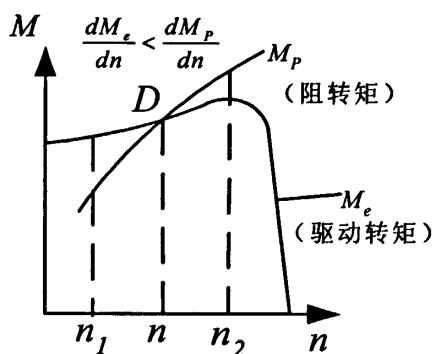


图 2.5 电动运行系统工作稳定性分析

2.3 发动机性能测试内容与要求

发动机机台架试验内容十分广泛，包括新产品或强化、改进、变型、转厂生产的内燃机性能及耐久可靠性试验；产品出厂前的性能调整及定期抽查试验等。我国于 1974 年曾制定内燃机台架试验方法(GB1105-74)，1984 年又颁布了汽车发动机试验方法的标准(JBn3744-84)。总的来说，内燃机性能测试主要包括功率标定、内燃机的负荷特性、内燃机的速度特性、万有特性、调速特性和烟度特性等，其中比较重要的有负荷特性、速度特性。下面重点介绍负荷特性和速度特性。

2.3.1. 负荷特性

负荷特性是指内燃机转速不变，其经济性指标随负荷变化的关系，以曲线表示，则这种曲线称为负荷特性曲线。这种特性测试中，通常通过改变发动机的节

气门开度(汽油机)或每循环的供油量(柴油机),同时调节测功机负荷(转矩)以保持转速不变,然后测取发动机的负荷和经济性能参数。

在负荷特性试验中,电力测功机处于恒转矩工作方式,发动机处于恒转速工作方式。改变负荷时,因为测功机转矩随转速变化不大,所以转速虽然波动,但是转矩能很快稳定在设定值附近,而发动机的油门位置由设定转速值与反馈的实际转速比较,差值作为转速控制器的输入,经控制算法运算后输出控制信号给油门驱动执行电机改变油门位置,油门位置的改变使转速再次回到设定值。

如图 2.6 所示,当调节励磁电流从 i_{f1} 变为 i_{f2} ,即测功机转矩由 M_{e1} 变为 M_{e2} 时,通过调节油门位置 α_1 到 α_2 即可使转速稳定在设定值 n_0 。

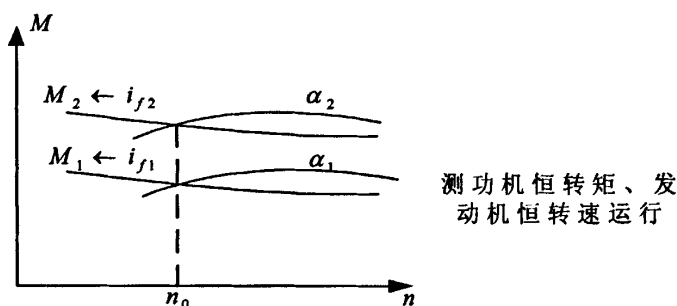


图 2.6 负荷特性试验中测功机—发动机调节情况

2.3.2 速度特性

速度特性是指内燃机性能指标随转速变化的关系,即发动机节气门开度(汽油机)或油量调节机构固定(柴油机)时,其有效功率 N_e 、转矩 M 、油耗率 g_e 、每小时耗油量 G_T 等随转速变化的关系,此时通常只调整测功机来改变发动机的转速。速度特性可分为外特性和部分速度特性,前者指发动机节气门全开或供油机构固定在额定功率循环供油量位置时,测得的速度特性,它代表该机在使用过程中允许的最高性能,所有内燃机均需做额定功率速度特性试验;后者指节气门部分开启或供油机构固定在额定功率循环供油量位置以下时所测得的速度特性。

在速度特性试验中,电力测功机在每个稳态测试点处于恒转速工作方式,发动机处于恒油门位置工作方式。如图 2.7 所示,当发动机的转速从设定值 n_1 变为 n_2 时,转速外环控制器时励磁电流从 i_{f1} 变为 i_{f2} ,即测功机转矩由 M_{e1} 变到 M_{e2} ,使测功系统重新稳定在转速设定值 n_2 点。

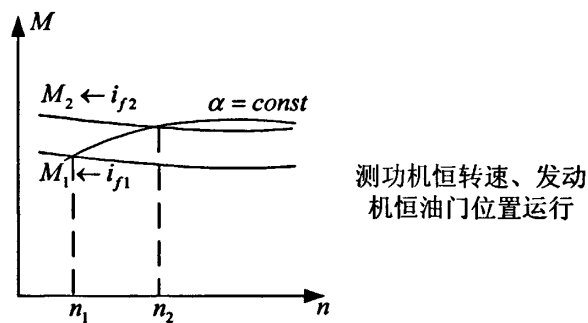


图 2.7 速度特性试验中测功机—发动机调节情况

2.4 本章小结

本章在第一章对测功系统进行全面概述的基础上，详细地研究了测功系统的工作原理，测功系统稳态运行时的转矩分析，分情况对测功机系统的工作稳定性进行了说明，给出了发动机性能测试的内容，为后续章节的研究奠定基础。

第3章 交流异步电力测功机系统的设计

3.1 控制系统组成

交流异步电力测功机系统采用双 CPU 结构,分别采用 80C196KC^[23]和 89S52。其中 80C196KC 主要进行数据的采集和算法的计算处理,单片机 AT89S52 主要处理键盘管理和液晶显示终端管理^[41];在控制板上,留有 JTAG 编程接口和 PWM 接口,便于在线编程和进一步的电机控制工作。整个系统框图见图 3.1,包括测功电机主回路和计算控制单元两大部分。主回路包括被测发动机,测功电机,变频器和负载电阻等设备;变频器控制交流异步电力测功机的加载,并吸收测功机发出的电能经负载电阻消耗掉;计算控制单元是控制系统的核心,其功能是采集通过信号调理模块处理后的转矩、转速和温度值,同时发出控制指令给变频器和发动机的油门控制系统。

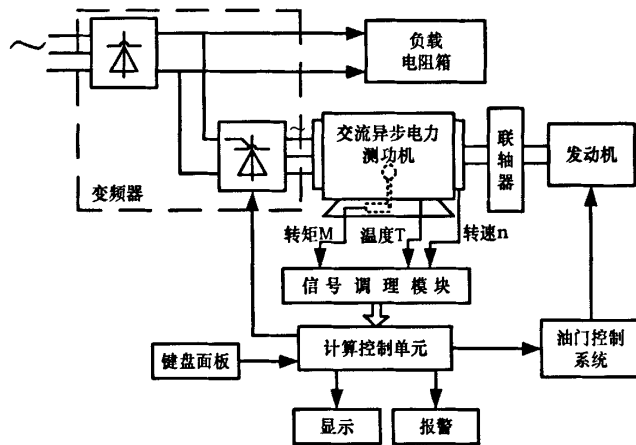


图 3.1 交流异步电力测功机系统

交流异步电力测功机控制系统包括图 3.1 中的信号调理模块和计算控制单元,主要完成转速、转矩、温度等数据的高速采集、分析计算、实时控制输出、键盘监控以及显示等任务。控制系统框图见图 3.2。整个系统分为以高性能 80C196KC 为核心的实时控制子系统和以 89S52 为核心的人机交互子系统。其中,实时控制子系统的任务是完成对转速、转矩等信号的高速采集处理,进行控制算法计算,实施系统的实时控制,而人机交互子系统的功能是对系统键盘进行监控以及控制液晶显示屏的输出^[42]。两个系统通过双口 RAM 芯片 IDT130 进行数据交换。此外,系统使用 CPLD(图 3.2 的 GAL16V8)实现逻辑电路,完成系统的译码,不仅减少芯片的使用数量,还大大提高了系统的可靠性^[43]。

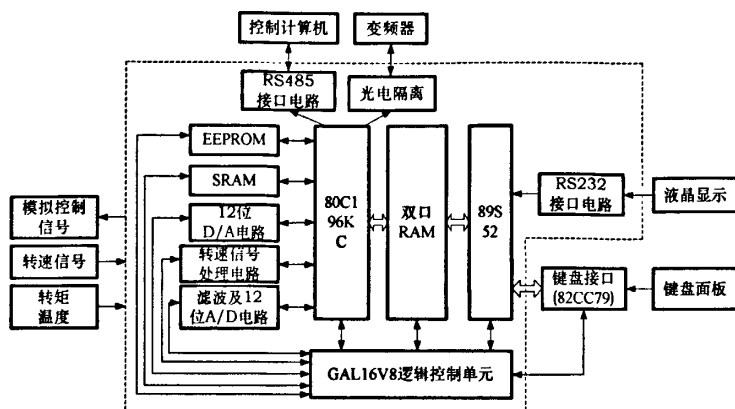


图 3.2 控制系统框图

3.2 实时控制子系统

图 3.2 中 80C196KC 及其左半部分为实时控制子系统。实时控制子系统利用 80C196KC 提供的高速输出 HSO 和内部定时器 T1 配合形成转矩、转速反馈信号的精确等间隔采样，数字滤波后利用 80C196KC 的外设事务服务器(PTS)块传输模式将数据保存到双口 RAM 中供人机交互子系统使用。PTS 类似于 DMA 操作，采用微代码硬件中断处理，可大大减少 80C196KC 响应中断的时间^[30]。此外，系统还充分利用了 80C196KC 提供的内部 A/D 转换器，来定时采集发动机的缸盖温度。

3.2.1 转矩检测及其处理模块

本系统测功机属于平衡式电力测功机，通过浮动的定子外壳与电机底座之间的拉压传感器测出转矩。拉压传感器选用中航电测的波纹管单点式称重传感器，型号为 HM11。它的信噪比高，抗干扰能力强，适合有电磁干扰的场合使用。A/D 转换器选择 12 位的 AD1674，输入电压范围 $0 \sim \pm 10V$ 或 $0 \sim \pm 5V$ ，单双极性可选。因 HM11 输出电压为 $0 \sim \pm 24mV$ ，为适应 AD1674 输入电压要求，需要将 HM11 的微弱信号放大。由于存在交流电力测功机电磁干扰、发动机振动、环境气候变化、电源及电器器件等干扰源，本系统选用仪表放大器 AD620 作为前置放大器，将 HM11 输出信号放大到 $-5V \sim +5V$ ；再接反相器实现信号缓冲和硬件调零，消除传感器输出信号和前置放大器的零漂；经过二阶巴特沃斯低通滤波器硬件滤波后，信号通过光耦隔离电路，实现强弱电线性隔离，并使信号源的接地点与模拟输入电路之间不共地，切断共模干扰信号的回路，防止电路部分“共地”引入共模干扰或各路之间数据串扰。原理如图 3.3 所示。

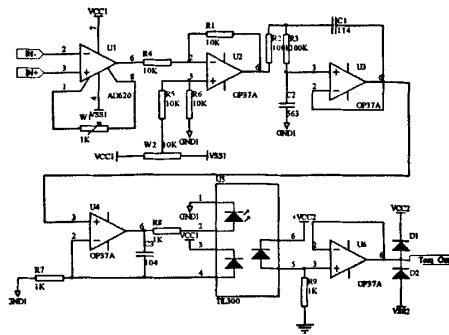


图 3.3 转矩调理电路原理图

图 3.3 中去耦电容 C3 防止干扰和振荡的发生；二极管 D1、D2 起限幅作用，防止尖峰电压的出现。此外，由于实时控制子系统主要工作于 8 位总线宽度下，而 AD1674 采用 12 位并行输出模式，因此系统设计时利用 80C196KC 的数据总线动态配置功能，通过 GAL16V8 译码使 80C196KC 在读程序时置数据总线为 8 位方式，而读 A/D 转换结果时置数据总线为 12 位方式，这样一次就可以读走 A/D 转换结果。在硬件上保证了高速采样的可行性和可靠性。

3.2.2 转速检测及其处理模块

转速传感器选用磁阻式磁电传感器，它结构简单，安装精度要求较低，无需配备电源，且输出脉冲信号，不易受干扰。具体转速检测电路如图 3.4 所示。感应磁头产生的交变模拟信号经过 LM324 构成的比较电路整形处理转化为数字信号，再由光耦器件 TLP521 隔离后送施密特非门触发器 74HC14 进一步整形，最后再送 80C196KC 外部中断输入口完成转速脉冲信号的采集。

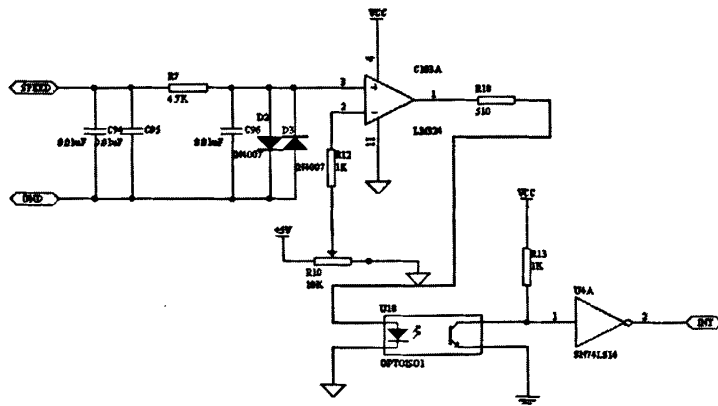


图 3.4 E2PROM 的扩展

系统中有些重要的参数如 PID 参数、控制周期等需要保存并防止掉电丢失，

走数据，并通过串口将数据发往液晶进行显示，从而减轻了实时控制子系统 CPU 的负担，提高了系统的可靠性。本系统选用 IDT 公司的 IDT7130^[44]作为共享缓存，IDT7130 是 1K×8 双口静态 RAM，它的时序与本系统的两个核心芯片(即 80C196KC 和 89S52)兼容，特别适合于大量数据高速传送。IDT7130 将 RAM 和总线仲裁电路集成在一片芯片上，既简化了应用电路结构，又提高了系统的可靠性；它的左右两个端口各有自己一套控制线、地址线和 I/O 数据线，两端 CPU 可以独立地读写双口 RAM 的任意单元，具有速度快、方式简单等优点，对左右两端的任意 CPU 而言，双口 RAM 等效于它的外部 RAM。

当两侧的 CPU 同时存取双口 RAM 的同一单元时，就产生了争用，会出现写入值或读出值不是期望值的混乱状态。IDT7130^[24]的片内总线仲裁电路具有 $\overline{BUSY}$ 和 $\overline{INT}$ 两种总线仲裁方式。运用 $\overline{BUSY}$ 标志的硬件仲裁方式要求 CPU 能插入等待状态，而人机接口子系统的核心芯片 89S52 不具有这种功能，因此本系统采用 $\overline{INT}$ 标志的中断方案。具体连线如图 3.6 所示。

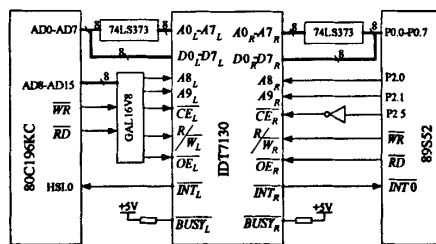


图 3.6 双口 RAM 电路连线图

IDT7130 的 $\overline{INT}_L$ 和 $\overline{INT}_R$ 分别接两端 CPU 的一个中断输入端。利用 IDT7130 上的两个特殊存储单元×3FEH 和×3FFH 产生中断信号供两侧 CPU 使用。需要注意的是，使用 $\overline{INT}$ 标志进行总线仲裁时，IDT7130 两端的 $\overline{BUSY}_L$ 和 $\overline{BUSY}_R$ 需要置为高电平。中断方案因排除了数据争用问题，且 CPU 不需要插入等待周期，可全速完成双口 RAM 的存取。

3.4 控制系统软件结构

系统软件包括 80C196KC 程序和 89S52 程序两部分。框图如图 3.7 所示。控制系统的工作过程为：上电后两个子系统分别进行自检，若不正常则报警。操作者通过键盘面板设置控制参数或者调用存储在系统中的最优参数。89S52 通过双口 RAM 将参数传给 80C196KC，控制过程开始。在控制过程中，80C196KC 高速采集反映发动机工况的转矩、转速及温度数据，数字滤波后通过控制算法算出控制量控制电机运转，并根据要求保存进双口 RAM，并产生中断使得 89S52 可以及时

读取当前数据，并送往液晶屏显示。

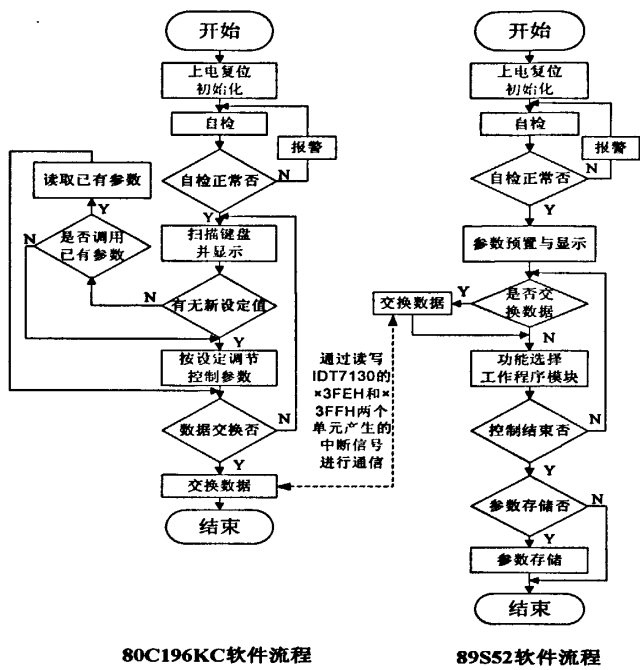


图 3.7 系统软件结构框图

3.5 本章小结

本章介绍了基于双 CPU 的交流电力测功机控制系统硬件结构，简要说明了系统的构成、工作原理和软件流程。由于本文重点不在整个系统的硬件设计，故不对具体的硬软件结构的设计与方案的选择进行详细的阐述，只分析了双 CPU 的工作方式和双口 RAM 的作用，具体介绍了基于 80C196KC 的实时控制子系统与基于 89S52 的人机交换系统的组成，给出了系统软件结构框图，为后续章节对本系统的研究打好了硬件实现的基础。

第4章 油门控制器的设计

4.1 油门控制器的作用和在系统中的关键地位

传统的工程机械油门控制一般通过手动控制油门拉线的位置来调节发动机的供油量，从而控制发动机的转速。在操作过程中，由于操纵量多，有时难以顾及油门的调节，而在发动机试验台架试验中，油门的控制要求非常精确而且要能根据控制的需要进行自动调节，显然手动控制油门的方法是行不通的。美国、日本等发达国家早在20世纪90年代就进行了发动机油门的电子化控制的研究，实现了节能精确控制。我国目前仍然有大量的发动机油门没有实现电子自动控制，对节能控制及工程机械电子化的实现非常不利。本课题中设计了一套油门控制装置，该油门控制装置可作为计算机控制的全自动化试验台的一个组成部分，也可独立使用，如对发动机进行隔室和远距离操作，从而提高一般试验台的自动化水平。

油门控制器在系统中的作用十分重要，它的稳定性决定了整个系统的性能和实验结果的好坏。它的波动会直接影响油量的进给，进而对发动机的输出功率产生影响，导致实验数据的波动。油门控制器的设计原则就是要保证它的稳定性和响应速度，在给定了控制量以后能在最短的时间内达到控制的要求而且在没有新的给定量出现的时候能一直保持该值不发生变化。

4.2 油门控制器设计方案的比较和选择

4.2.1 油门控制器的工作原理

油门控制器由控制电路和执行机构两大部分组成。工作原理是通过控制执行机构直流力矩电机转动一定的转角拉动发动机的油门线来达到对油门控制的目的。直流力矩电机属于低速直流伺服电动机，通常使用在堵转或低速情况下。其特点是堵转力矩大，空载转速低，不需要任何减速装置可直接驱动负载，过载能力强，长期堵转时能产生足够大的转矩而不损坏。直流力矩电机的基本工作原理和普通直流电机相同，只是在结构和外形尺寸比例上有所不同。从直流电机基本工作原理可知，设直流电机每个磁极下磁感应强度平均值为 B ，电枢绕组导体上的电流为 I ，导体的有效长度(即电枢铁心的厚度)为 L ，则每根导体所受的电磁力为 $F = B \times I \times L$ ，则电磁转矩为

$$T = N \times F \times \frac{D}{2} = (B \times N \times L \times D) \frac{I}{2} \quad (4.1)$$

式中， N 为电枢绕组总匝数； D 为电枢铁心直径。由式(4.1)可知，一台成品力矩电机的 B ， N ， L ， D 都是固定不变的。由于电磁转矩和 I 成正比，而 I 又和加在

电枢绕组导体上的电压有效值成正比，所以，电磁转矩和加在电枢绕组导体上的电压有效值也成正比^[27]。直流PWM(Pulse Width Modulation)驱动技术^[26]，即利用晶体管的开关特性来调制固定电压的直流电源，按一个固定的频率来接通和断开，并根据需要改变一个周期内“接通”与“断开”时间的长短，通过改变直流伺服电动机电枢上电压的“占空比”来改变平均电压的大小，从而控制电动机的转速。所以直流力矩电机广泛采用PWM方式的驱动模式，PWM方式驱动能实现宽范围的速度和位置控制，较常规的驱动方式而言具有无可比拟的优势。油门控制器设计的目的是达到对发动机油门实现精确稳定的控制，也就是设计控制电路对直流力矩电机转矩的精确控制。油门控制器的控制系统为一闭环系统，通过执行机构的反馈值与系统的设定值进行比较，然后通过一系列的算法转变成为对应的PWM波形，驱动功率放大器控制电机转动来控制油门^[21]。故油门控制器的设计方案的不同在于PWM波形的产生方式的不同，一般来说，可以通过PLC，单片机以及模拟电路直接搭建几种方法，下面对其进行简单的说明和比较。

4.2.2 油门控制器设计方案的比较

4.2.2.1 基于 PLC 的油门控制器的设计

PLC是可编程逻辑控制器，就是根据用户的要求，利用已经编程的逻辑来对电路等进行控制。它最大的优点就是可靠性高，不易受外界环境的干扰。所有的I/O接口电路均采用光电隔离，使工业现场的外电路与PLC内部电路之间电气上隔离。各输入端均采用RC滤波器，其滤波时间常数一般为10~20ms。各模块均采用屏蔽措施，以防止辐射干扰。良好的自诊断功能，一旦电源或其他软硬件发生异常情况，CPU立即采用有效措施，以防止故障扩大。图4.1是基于PLC的油门控制原理图。控制系统由油门驱动机构、PLC控制器、汽油机转速设定部件及工况输入开关等组成。该系统中采用PLC为核心控制器产生PWM波形通过驱动器来带动电机进行油门的调节。PLC的输入输出开关起按钮控制作用来控制步进电机的操作。一般是用在大功率的电机上面比如柴油机，特点是核心控制器为PLC，控制很稳定，不易受外界环境的干扰而发生改变，但是造价高，占用的体积比较大，驱动力强，一般适用于比较大型的机械如汽车等。

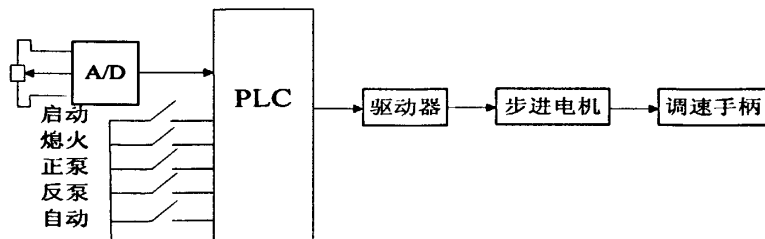


图 4.1 基于 PLC 的油门控制器系统图

4.2.2.2 基于单片机的油门控制器的设计

单片机品种多样，型号繁多，各个类型的单片机根据使用的场合不一样各自集成了不同的功能模块，有些单片机产品集成了PWM的输入输出口。就可以直接利用这些输入输出口加上相应的驱动电路就可以对电机进行控制。如DSP系列的TMS320LF2407就集成了PWM输出口，这样在硬件设计方面就相对简单只需要采用程序对PWM波形进行控制。采用单片机做为核心控制器的基本原理是，通过外部输入油门控制具体控制量，传感器检测电路检测输入油门控制的现有位置信号，通过A/D转换芯片转换为数字量输入核心控制器，通过核心控制器内的程序算法进行数据处理运算得到新的油门控制量由I/O口输出，通过驱动电路驱动电机进行油门控制。为了防止驱动电路对单片机的干扰，PWM输出采用光耦隔离后输送到驱动电路的输入端口用来控制油门开度的大小。此系统还可以对系统的输入输出油门控制量进行实时的数码显示。下面对单片机油门控制器的控制过程进行简单的介绍。控制器的软件设计主流程如图4.2所示。首先对单片机进行初始化；包括PWM方式的设定，A/D口控制字，I/O口控制字设定等。如果开关闭合，则从记忆存储器中读取比例系数 K_p 、积分时间常数 K_i 、微分时间常数 K_d ，然后根据偏差和PID算法，计算本采样周期的PWM的输出值，如果开关断开，则油门控制器处于PWM参数的调整状态，由A/D口分别读取 K_p 、 K_i 和 K_d ，然后进行控制^[25]。根据经验调整相应的PID参数值直至油门控制达到满意效果为止。然后将这个控制参数保存到记忆存储器中。为缩短调节时间、减小系统超调，在应用程序中还可判断偏差的大小，如果偏差大于某一给定门槛值，则进行PD控制，如果偏差小于这一门槛值，则进行PID控制^[21]。

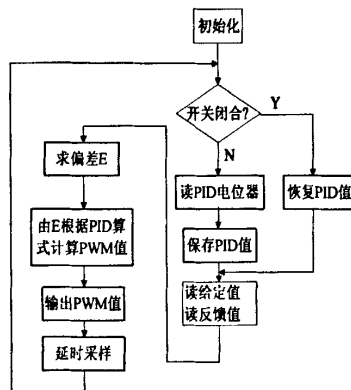


图 4.2 控制器的软件设计主流程图

此方案设计的油门控制器特点是控制效果取决于控制算法以及传感器数入的A/D转换结果的精度值，中间环节较多响应速度较慢，造价较高。比较适合与应用在要使用单片机的环节里，可以将油门控制器的部分集成到单片机系统中去。

4.2.2.3 基于模拟电路的油门控制器的设计

基于模拟电路的油门控制器的设计原理就是采用模拟元器件搭建起PWM的输出电路，驱动功率放大器对电机进行控制。模拟电路模块一般包括电源电路、比较器电路、波形发生器电路、驱动器电路、检测电路等。此方案的缺点是模拟电路的抗干扰性设计要求比较高，输入信号的滤波处理等都需要用比较复杂的电路来实现，调试过程涉及的问题较多，但是其成本低，专用性强，占用空间小，响应速度快，非常适合于我们的交流测功机系统。所以我们选择基于模拟电路的油门控制器的设计方案。

4.2.3 基于模拟电路的油门控制器控制电路的组成

油门控制器主要由两个部分组成:一是执行器部分，如图4.3所示，它是由直流力矩电机、谐波减速器、反馈电位器、拉线盘组成，承担发动机油门开度的执行任务；直流力矩电机通过谐波减速器驱动拉线盘拉动油门线控制油门开度。执行器中，直流力矩电机选用的是SYL-5型电机，空载转速为500rpm，连续堵转电流为1.8A，连续堵转力矩为0.49N.m。谐波减速器减速比为80，噪音小，运转平稳可靠。发动机试验时，拉油门在满行程时不超过3秒，系统响应速度快。因力矩电机具有工作在堵转状态的特点，使得系统运行可靠。二是调节控制器部分，它是由电压比较电路、三角波发生器及功放输出电路组成，完成对油门开度的设定和自动控制。发动机试验中，对其油门开启大小的控制要有一定的精度。此控制为一小功率位置随动控制，随动控制系统结构见图4.4。

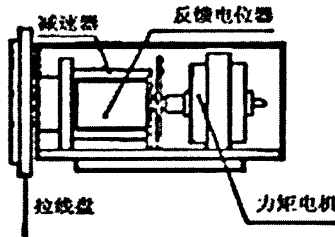


图 4.3 油门控制器执行结构示意图

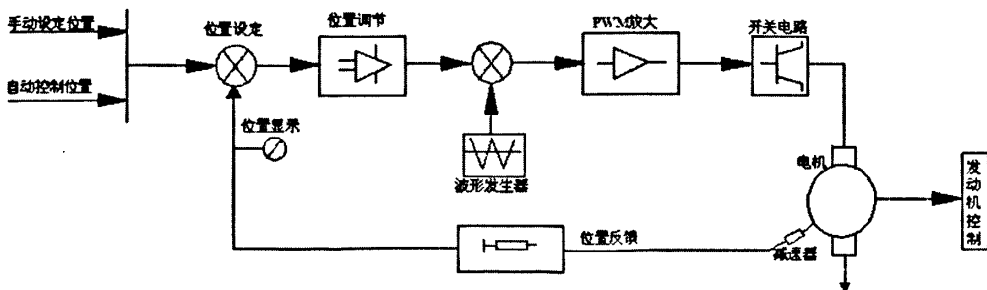


图 4.4 随动系统结构框图

当位置设定信号(0-10V)与位置反馈信号(0-10V)相比较, 0-10V对应油门开度0-100% , 其差值(正或负)经放大后, 通过脉宽调制器(即PWM调制器)将直流电压转换成一定频率的方波电压来控制大功率晶体管的开关, 从而在直流力矩电机的电枢上得到希望的方波电压, 使电机正转或反转。直流力矩电机在反馈电位器上产生的(0-10V)信号, 作为位置指示和反馈信号。当反馈信号等于或接近于设定信号时, 电机停止转动, 电机转动的角度稳定在某一值, 就对应当前的油门开度值。

4.2.3.1 电源电路的设计

输入端+19V、-19V、GND为220V的交流电通过变压器产生的正负交流电压, 此电压输入到控制电路板以后通过电桥电路的整流、电容的滤波以及稳压管的稳压作用共得到三组电源:一组是做为运算放大器和波形发生器的基准电压($\pm 15V$), 该电压要求精度高, 故采用稳压芯片7815与7915, 提高电源精度, 保证系统的稳定运行和PWM波形的产生, 这组电源是整个系统稳定性设计的基础^[45]; 第二组电源($\pm 24V$)是驱动电机所用, 这组电压通过驱动门电路来驱动电机工作, 故只要保证有效值在 $\pm 24V$ 左右就能满足系统的要求, 所以通过整流滤波后的电压就能满足要求, $\pm 24V$ 电压是根据所选用的力矩电机工作电源而决定的; 第三组电压是由LM317产生的可调电压^[46], 通过调节R8的阻值可以相应的改变输出电压的值, 根据设计需要将其调整到10V电压作为位置设定的基准电压。

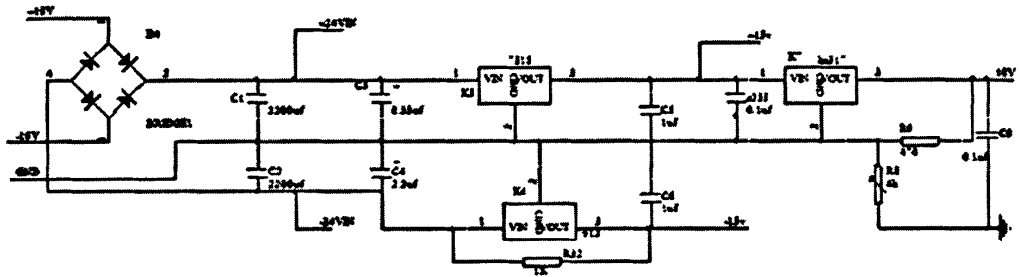


图 4.5 油门控制器的电源设计电路

根据油门控制器设计的需要, 系统设计的三组电压, 采用了整流, 滤波, 稳压的基本电源电路的设计方法^[31]。根据公式 $V_0 = 0.9 \times 1.414 \times V_i$, 其中 V_0 为24V, 得到变压器的输入电压为19V, 故选择220/19V的变压器, 芯片7815与7915的输入电压的范围为17.5—35V, 故可以直接利用24V作为芯片的输入电压, 图中电容起滤波的作用, LM317是常见的可调集成稳压器^[32], 最大输出电流为2.2A, 输出电压范围为1.25~37V。输出电压的计算公式是 $V_0 = 1.25(1 + \frac{R_8}{R_9}) + I_a \times R_8$, 故选择R8

为4K, R9为470, 通过调整可得到10V电压, 用做油门控制器系统位置设定信号的基准电压。

4.2.3.2 电压比较电路

本系统中，位置反馈环节，设定输入电压比较环节，检测比较环节是由一片四运放(LM324)所组成，使得整个电路硬件十分简化^[28]。这里主要说明一下输入设定处功能扩展接口。为了实现通过自动调节油门开度而达到恒扭矩控制目的，将油门控制作为一个内闭环，本控制器备有相应接口，图中用开关进行选通；为实现外控(如微机等)油门开度的目的，本设计中有外控输入接口IN1，外控输入端口输入幅值在0-10V的控制电压作为控制信号，在电路板上通过跳线来对信号进行内控和外控的选择。IN2为内环调节，输入通过调压电阻对LM317产生的基准10V电压进行电压调节后的0-10V控制信号。本电路前端电阻R4和R5阻值相等，当输入信号为零时，系统的输出信号不为零，可通过调节可调电阻R16的值对系统进行归零处理，当系统的控制信号还没有达到10V，但是油门开度已经到了最大，这时调节可调电阻R12，改变系统的比例值，将系统满刻度调小。此环节的输出信号为U1，作为系统的调节信号。此环节采用的运放器为LM324。LM324四运放电路具有电源电压范围宽，静态功耗小，选择电源电路产生的±15V作为它的基准电压，能很好的满足系统的要求。

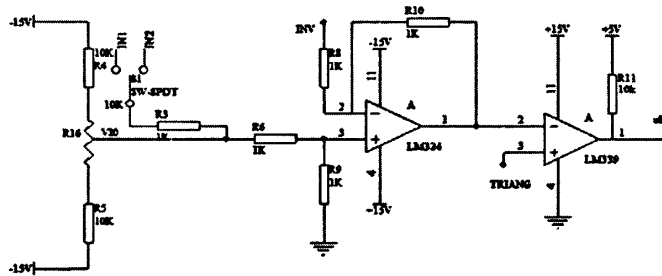


图 4.6 电压比较电路

4.2.3.3 信号处理电路

在得到比较电路输出的差值电压后，采用了PID调节的方式得到控制量。如图4.6所示，通过运算放大器LM324和电阻电容，搭建了一个模拟的PID调节电路来对输入的信号进行控制^[29]，通过调节可变电阻R1，R2的值就可以随时改变PID的参数，以达到更好的控制效果。如公式所示，我们取C1=C2=30uf，R1，R2为10K的可变电阻，通过反复调试，选择最合适的控制阻值，不同的控制要求阻值不一样。一般来说比例系数较大，积分系数以及微分系数准小于1。通过PID调节后的输出量U3输入到脉宽调制电路做为调制电压控制矩形波的占空比。

$$U0 = -\left(\frac{R2}{R1} + \frac{C1}{C2}\right)u3 - R2C1 \frac{du3}{dt} - \frac{1}{R1C2} \int u3 dt \quad (4.2)$$

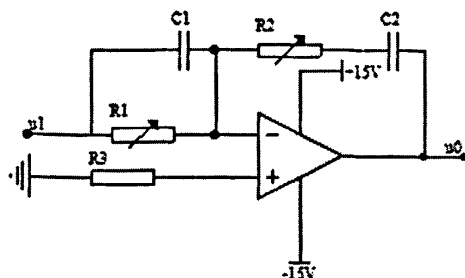


图 4.7 模拟 PID 控制电路

4.2.3.4 三角波产生电路

采用 ICL8038 作为波形发生器，它仅需要配备几个电阻电容即可同步输出三角波、正弦波、方波三种信号，工作频率范围可调(0.001Hz—0.3MHz)，不同于以前所用的分立元件组成的波形发生电路，使用简单可靠。本系统选用其产生三角波作为输出信号， U_s 为芯片工作电源，决定其幅值大小，三角波的幅值为

$U = 1/3 U_s = 5V$ ，波形占空比由芯片的 4、5 脚进行控制，选用精密电阻进行调整，本系统要求产生完全对称的三角波，要求占空比为 50%，所以取 $R_6 = R_{17}$ ，实际调试中在 R_6 ， R_{17} 与电压之间上连接一 1K 的可调电阻，通过调节可变电阻的阻值确保 ILC8038 的 4、5 两端的阻值完全相等，产生完全对称的三角波形。波形的频率与 4

脚的电阻和 10 脚的电容相关，通过公式计算得到 $f = \frac{0.3}{R_6 \times U_{10}} = 10kHz$ ， ILC8038

的 8 脚连接的可变电阻是为了调节系统的频率电压值，当系统的频率不需要进行细调的时候，可以把 7、8 脚直接连接起来，简化电路图。

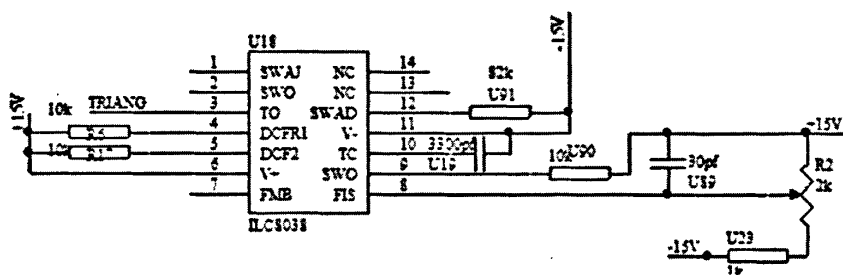


图 4.8 三角波产生电路

4.2.3.5 脉宽调制电路

为了能够产生能驱动电机转动的 PWM 电压波形，我们就利用三角波和比较电路产生的电压差值产生矩形波。通过比较器构成脉宽调制器。ILC8038 产生的三角波电压 V 与控制电路电压 U_3 比较后，送入运算放大器的输入端。当 $U_3 = 0$ 时，输出

电压 U_2 的正负半波脉宽相等，输出平均电压为0，见图4.9 (a)。当 $U_3 > 0$ 时，比较放大器I输出脉冲正半波宽度大于负半波宽度，如图4.9 (b)所示。当 $U_3 < 0$ 时，比较放大器I输出脉冲正半波宽度小于负半波宽度，如图4.9 (c)所示。因ICL8038芯片组成的三角波线性相当好，在放大器前不需增添一偏移电压，输出脉冲的宽度就可正比于控制电压 U_3 ，实现电压—脉冲的转换。

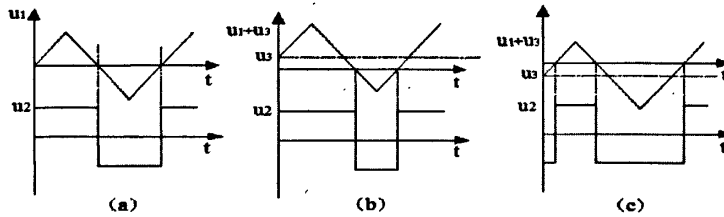


图 4.9 脉宽调制原理图

4.2.3.6 功放驱动电路

当脉宽调制电路输出的方波平均电压为正时， Q_1 、 Q_3 导通，力矩电机接到正电源上，电机正转。当脉宽调制电路输出的方波平均电压为负， Q_3 、 Q_4 导通，力矩电机接到负电源上，电机反转。当比较器输出的正、负半波相等时，电机不转。即改变脉宽调制器控制电压的大小和极性即能调节电机的转速和方向。在设计时，开关管应选择截止频率高的晶体管，同时具有足够大的耗散功率和集电极最大允许电流。此外因开关电路为双极性电路，所以大功率晶体管承受的反向电压较高，为电源电压的两倍，现 Q_1 、 Q_2 分别选为2N2955及2N3055比较合适。图4.10中稳压管 D_1 、 D_3 可以起到开放延迟作用，抗拒小于 U_w 的干扰信号，以免引起 Q_3 、 Q_4 的误动作。 D_2 、 D_5 为电机的续流二极管，用以防止电枢的自感电势将大功率晶体管击穿。

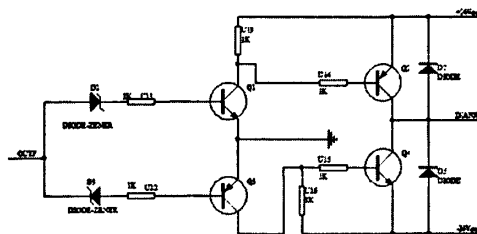


图 4.10 功放驱动电路

4.2.4 调试中出现的主要问题及解决方法

干扰问题:油门控制系统是交流电力测功机系统的一个子系统，在正常投入试验时，干扰源的途径很多，噪声干扰尤为常见:电路上要增加RC滤波，效果较好。另外油门控制器的信号传输线一般较长，为防止高频磁场的干扰，信号线必须绞

合且带屏蔽，屏蔽层需接地。电源变压器设计时，要采用双层屏蔽，即在原、副边绕组上设置接地的屏蔽层，使干扰电流只在两屏蔽层流过。

电压稳定性问题:系统的电压是系统的关键，在电压设计的调试的过程中发现系统的+15V电压和+10V电压按照设定的电路能很轻松得到的，但是-15V的电压值却一直在-20V左右波动，在排除稳压器7915损坏的情况后在7915的输入输出点接1K电阻后，电压值立即稳定在了-15V左右，无明显波动。分析原因是稳压器需要有一定的负载对电压进行调节。但是电阻阻值不能过大，否则影响系统的功耗。

矩形波问题:由于控制基准电压U3的实际输入范围为0-10V，而三角波的幅值通过计算为5V左右，这就存在一个问题，当基准电压的值在5-10V之间时，脉宽调制电路的输出将不再是一个矩形波，而是比较器的基准电压值15V。因此要调整U3的值在三角波的幅值内，应在系统的实际电路中通过两个阻值相等的电阻对U3进行分压，得到输入范围为0-5V的基准电压，以确保矩形波的产生。在脉宽调制电路中，开始使用的是放大器LM324，输入三角波和基准电压后得到的波形不是一个标准的矩形波而是一个梯形波，分析原因则是因为将运放器当成了比较器使用，运放器工作在非线性区域的响应速度没有比较器快，所以矩形波的翻转上下翻转有一定的延时，造成了斜波的出现。后改用LM339比较器后，矩形波接近于理想状态。

4.3 实验结果分析

系统加载时对本控制器进行了标定，结果如下:

U1	2.00V	4.00V	5.00V	8.00V	10.00V
Uout	2.01V	3.96V	4.95V	7.89V	9.89V

U1为系统输入的控制量电压，Uout为系统对直流力矩电机的驱动电压的有效值，与油门开度直接对应。从表中可看出最大误差为100mV，即精度达1% F.S。测得满行程反应速度(0—100%)小于3秒，工作电流为250mA，冲击电流为500mA，性能参数完全满足发动机台架试验要求。

4.4 本章小结

本章阐述了油门控制器在系统中的重要作用，分析了油门控制器的工作原理，给出了油门控制器的控制方案，通过对几种油门控制器设计方案的比较，选择了适合于测功系统的基于模拟电路的油门控制器的设计方案，并详细地对油门控制器的设计电路进行了说明，对调试过程中产生的问题以及其原因进行了分析，给出了油门控制器的实验结果，满足现有的异步测功机的系统要求。

第 5 章 交流异步测功机系统的上位机程序设计

5.1 虚拟仪器技术及其开发平台

虚拟仪器(virtual instrumentation)是基于计算机的仪器。计算机和仪器的密切结合是目前仪器发展的一个重要方向。粗略地说这种结合有两种方式,一种是将计算机装入仪器,其典型的例子就是所谓智能化的仪器。随着计算机功能的日益强大以及其体积的日趋缩小,这类仪器功能也越来越强大,目前已经出现含嵌入式系统的仪器。另一种方式是将仪器装入计算机。以通用的计算机硬件及操作系统为依托,实现各种仪器功能。虚拟仪器主要是指这种方式。图 5.1 反映了常见的虚拟仪器方案。

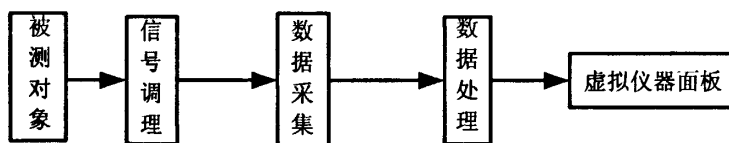


图 5.1 虚拟仪器示意图

与传统电子仪器相比,虚拟仪器的特点可概括如下^[33]:

(1)融合计算机强大的硬件资源,突破了传统仪器在数据处理、显示、存储等方面的限制,大大增强了传统仪器的功能;

(2)虚拟仪器以软件取代了部分硬件,用软件实现了数据读取,可以对测试数据实时进行分析处理、显示,突破了传统仪器只能用硬件实现这些功能的方式,而且具有传统仪器很难实现的数据编辑、存储、打印曲线及图表等功能,增强了仪器间数据交换及信息综合、自动分析判断的能力。因此,VI 技术使得仪器系统的研制过程变得简单,成本降低,应用先进的理论和算法可增加系统的灵活性,利用图形用户界面(GUI)技术还能实现界面友好、人机交互;

(3)提高测控系统地精度。在传统仪器中,信号每经过一次硬件处理都会引入误差,虚拟仪器由于减少了硬件的使用,因而克服了硬件固有的温漂等缺点,减少了测量误差,实现了较高精度的测试和控制;

(4)基于计算机网络技术和接口技术,VI 系统具有方便、灵活地互联能力,广泛支持诸如 CAN、FieldBus 等各种工业总线标准。因此,VI 技术可方便实现测量、控制过程的网络化,使其开放性、兼容性和可扩展性大大增强,使得虚拟仪器的开发变得更为方便,缩短了开发周期。与传统仪器一样,虚拟仪器也是由三大功能模块构成:信号的采集与控制、信号的分析与处理、结果显示与输出。虚拟仪器的硬件构成有多种方案,其基本体系结构如图 5.2 所示。电力测功机控制系统软件

开发工具选用的是美国 NI 公司的图形化编程软件 LabVIEW，它是 NI 公司以虚拟仪器概念为基础开发的，其中包含了很多数值分析和信号处理的模块，具有强大的调试、查错的功能。支持多种数据采集卡，支持 DLL、CIN 等形式的外部代码调用。

由于发动机测功系统要求测量的参数多，精度要求高，可扩展性强，用户可以定义和扩展参数，因此本文采用虚拟仪器技术研制电力测功机系统，不仅可以大大减少各种控制按钮和功能开关，使系统的功能更加灵活，而且提高了系统的可靠性和抗干扰能力，保证系统的精度和稳定性^[34,35]。计算机技术与虚拟仪器技术在发动机测功系统中的应用，对提高测功系统的测试与控制水平具有特别重要的意义，在发动机测试领域具有广阔的应用前景。

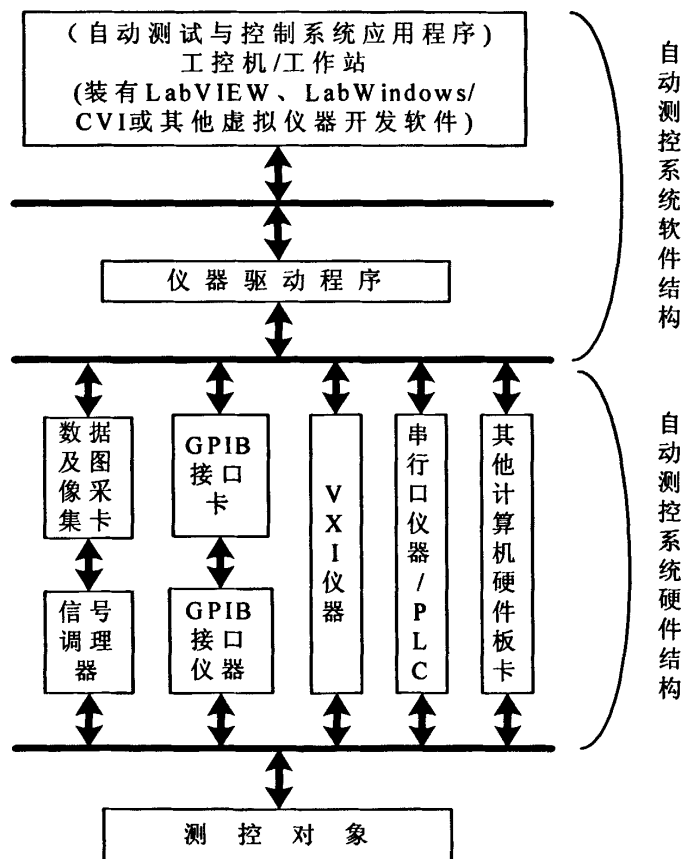


图 5.2 虚拟仪器系统的体系结构

本系统采用 LabVIEW 开发平台，在 LabVIEW 虚拟仪器开发平台上，利用其丰富的函数库、强大的接口功能，可以方便地设计应用程序。本系统是建立在 Windows 操作系统上的应用软件，选用 LabVIEW 作为开发工具，利用 LabVIEW 提供的串口通讯模块与电路板进行串口通讯，对试验的过程进行指导，对试验的结果数据进行采集和存储。

5.2 程序模块的划分

在对系统测试软件进行设计时,根据测试软件所要实现的功能以及 LabVIEW 的特点,将程序划分为以下几个模块:主程序模块、初始化模块、数据采集处理模块、显示模块、数据存储模块、判断模块。其中,转速调节模块和判断模块是电机测试过程的专用模块。由于 LabVIEW 的编程方式是基于数据流和多线程的方式进行的,所以各个功能模块之间有的是并行运行的,有的是串行运行的,因此,通过在主程序模块中调用其它子程序模块,按照试验的要求对各个模块进行依次调用,新调用的子程序操作模板遮住先前的主程序操作界面,只有当新调用的子程序操作完毕,才能继续对主程序界面进行操作,这样就保证了程序调用的顺序性和程序执行的逻辑性,依次才能完成系统的整个测试过程。

5.2.1 电力测功机系统的主程序模块

利用 LabVIEW 作为主程序界面的开发工具,以人机接口友好、功能实用、重要参数显示明确为原则,开发出电力测功机控制系统主界面如图 5.3 所示。测功软件运行时,首先出现的时主程序界面,通过选择界面上的按钮调用不同的子程序进入不同的操作界面。一开始试验,点击设置按钮,进入设置界面,对系统的各种参数和试验条件进行输入,然后再进入测试试验界面进行具体的试验操作,根据实际的试验操作流程,确定了如下的电力测功机控制系统主程序流程图如图 5.4 所示。

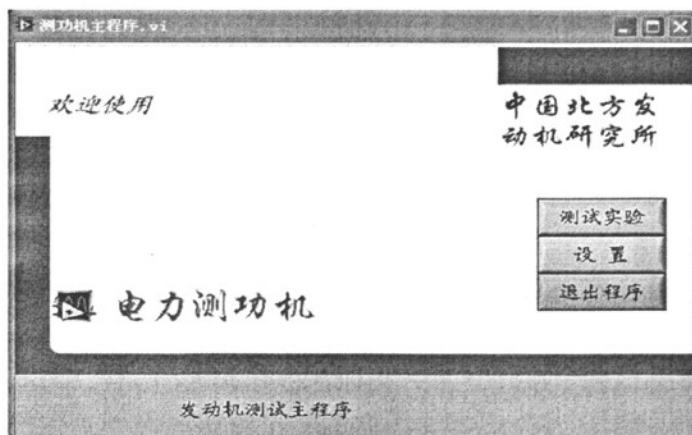


图 5.3 电力测功机的主程序界面

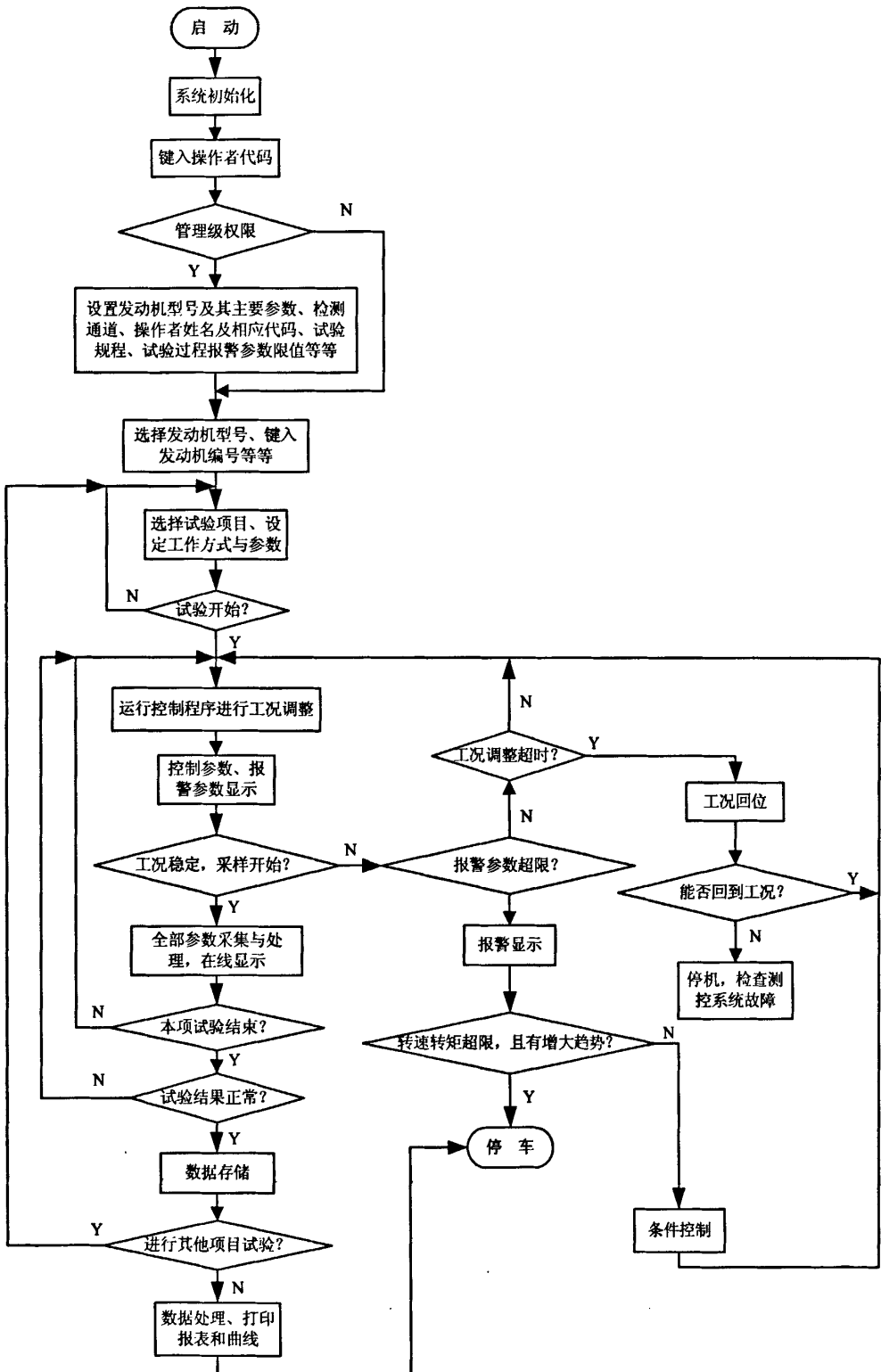


图 5.4 电力测功机控制系统主程序流程图

5.2.2 系统试验界面的设计

系统软件的试验界面是测试人员和测试系统交互的界面,良好的用户界面能简化用户的操作,使用户对系统的操作与功能一目了然。LabVIEW为设计者提供一个设计虚拟面板(也就是人机界面)的控制模板,控制模板里面有丰富的控件和图标。所以,用LabVIEW设计的人机界面丰富多彩而简单了然。电机测试界面如图5.5所示。界面上有一个示波器,用来显示测试转速的实时波形。将转速控制点和油门开度等试验重要的参数放在界面上,方便实验操作人员对试验过程的掌握和便捷操作。面板上实时显示重要的试验数据,以及在左下角对试验相关参数进行报警显示灯处理,右下角有操作按钮,对实验过程进行操作,按钮之间实现互锁。以避免误操作对系统造成不必要的损坏。

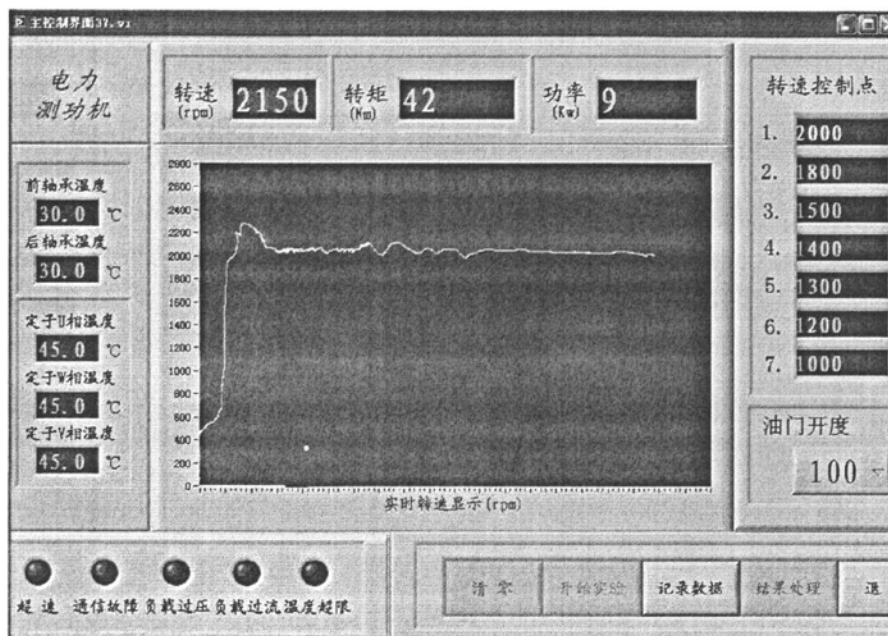


图 5.5 电力测功机试验操作界面

5.2.3 初始化模块设计

初始化模块是试验开始的前提,该模块在整个测试软件系统中负责系统参数配置和初始化等工作。其中包括两个部分的内容,一是记录试验过程中的基本信息如实验人员,时间,地点以及试验环境参数,发动机型号、发动机编号、测功机型号、测功机编号、化油器型号、以及送检单位等基本信息,将信息的内容保存到一个簇内。二是对试验过程中要用到的一些试验参数进行初始化设置,如COM口、转矩标定、油门标定、PID设置等。这些操作需要具有一定的管理员权限或者知道试验操作的密码,以防非实验人员对试验的参数进行随意修改。初始化模块

中的COM口、转矩标定、油门标定、PID设置操作通过串口通讯将相关的数据传递给单片机，对实验进行初始化。不是每一次开始试验都要进入初始化模块，当我们确定我们的各种试验参数都已经输入正确，试验配置也准备就绪，我们就可以直接进入试验操作界面进行试验。

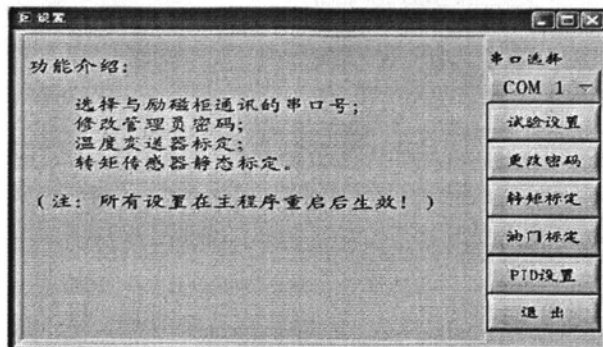


图 5.6 电力测功机初始化设置界面

5.2.4 数据采集模块的设计

5.2.4.1 通讯模块的设计

测功机系统的数据处理是对系统的各种数据进行采集并进行实时显示的过程。对数据进行实时显示就必须对数据进行实时采样并及时更新储存数据的变量并通过数字量或者波形图进行显示。为了保证实时性，本系统软件通过利用Labview提供的串口通讯模块与单片机进行通讯，通过基于事件触发响应的查询式处理，通讯模块基本上能实时将采集到的数据及时的保存在存储变量中，在前面板中显示出来，通过与单片机建立相对合理的通讯协议，来完成数据的实时显示。在通讯协议的设计中，为了保证通讯的可靠性采用了应答式通讯^[36]。以采集速度通讯协议的设计为例，上位机向测功机系统发送字符‘S’，单片机在接受串口数据‘S’后，回复‘*’加上当前采集的速度值，上位机只有在确认接收到‘*’后才可以将后面串口接收到的数据作为转速存储到变量里面，通过前面板显示出来。如果没有接受到字符‘*’，上位机将上次采样得到的转速做为这次的采样值，而不对接受到的数据进行处理。在通讯协议中，为了确保通讯的可靠性，除了建立好的通讯协议以外，信息校验也很关键，本程序中采用了CRC信息校验的方法，主机和从机应用校验码进行发送和接收信息，判断信息是否正确。计算步骤如下^[38]：

(1) 预置 1 个 16 位的寄存器为十六进制 FFFF(即全为 1)，称此寄存器为 CRC 寄存器。

(2) 把第一个 8 位二进制数据（通信信息帧的第一个字节）与 16 位的 CRC 寄存器的低 8 位相异或，把结果放于 CRC 寄存器。

(3) 把 CRC 寄存器的内容右移一位 (朝低位)用 0 填补最高位, 并检查右移后的移出位。

(4) 如果移出位为 0, 重复第 3 步 (再次右移一位); 如果移出位为 1, CRC 寄存器与多项式 A001 (1010 0000 0000 0001) 进行异或。

(5) 重复步骤 3 和步骤 4, 直到右移 8 次, 这样整个 8 位数据全部进行了处理。

(6) 重复步骤 2 到步骤 5, 进行通信信息帧下一个字节的处理。

(7) 将该通信信息帧所有字节按上述步骤计算完成后, 得到的 16 位 CRC 寄存器的高、低字节进行交换。

(8) 最后得到的 CRC 寄存器内容即为 CRC 码。

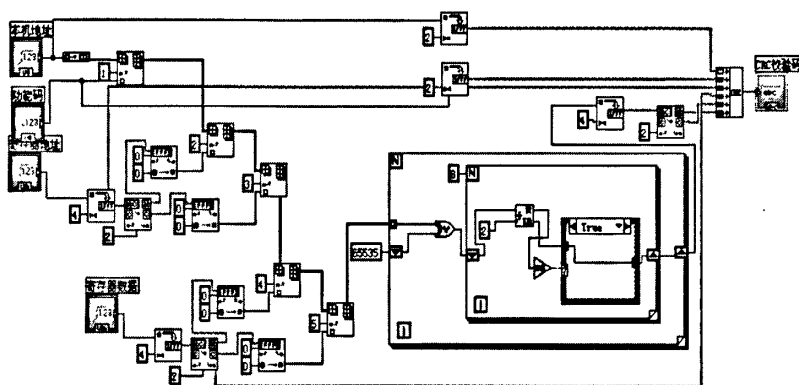


图 5.7 CRC 校验的 LABVIEW 程序实现

5.2.4.2 采集数据的处理

通过串口通讯采集到的数据, 在上位机中进行滤波处理以后才在前面板上显示出来, 软件滤波的方式有很多种, 如平均值滤波、中位值滤波、限幅滤波法等。本系统采用中值平均滤波法, 就是将采集到的数据数组进行顺序排列, 然后选取中间值, 将中间值组成一个新的数组, 求其平均值。将平均值做为系统的数据输出。具体程序见图 5.8。此法对于偶然出现的脉冲性干扰, 可消除由于脉冲干扰所引起的采样值偏差, 对周期性干扰有良好的抑制作用, 平滑度高。缺点就是比较浪费系统的内存, 影响系统的响应速度。

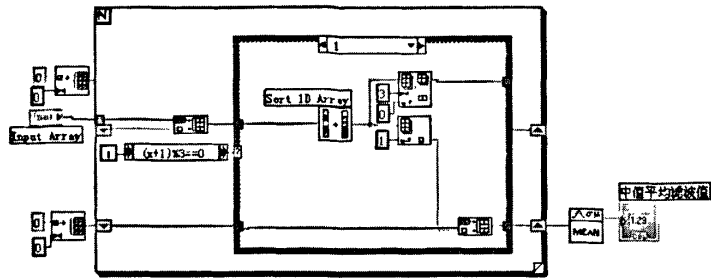


图 5.8 采集数据的滤波处理函数

5.2.5 报表处理模块的设计

LabVIEW Report Generation工具包通过ActiveX技术将Microsoft Word和Excel与LabVIEW集成开发环境结合起来，用于快速生成专业的报告，从而高效地表示出各种测试数据和结果。用户可以移植、修改现有的报告模板，并使用标准的labview功能，扩展该工具包的报告生成功能；通过运行由VBA编写的宏代码还可以进一步自定义修改报告生成过程并自动生成报告^[37]。

由于本系统采用Excel输出报表，所以本文主要介绍Excel格式报表的生成方法。首先新建一个Excel文档，为此在LabVIEW的Functions Report Generation模板中选择New Report.vi，将其放置在框图程序中，设置report type属性为Excel，当程序运行时LabVIEW利用ActiveX技术调用Microsoft Excel自动化服务器，从而达到控制Excel工作簿与工作表生成过程的目的。为了加速报告的生成，Excel的初始窗口模式设置为minimized.Excel Easy Title.vi函数用于为Excel文档指定标题，通过给字符串变量Title赋值，可以自定义报告的标题内容。此外，还可以设置标题的字体、字号、下划线、颜色等参数。Excel Easy Text.vi用于向工作表中添加文本和设置文本属性。参数start为文本区域左上脚的单元格，end为右下脚单元格，border值为True，即显示文本框。Excel Easy Table.vi可以向报告中插入表格，程序中将二维字符数组Test Table赋值给Excel Easy Table.vi，并显示表头。然后利用Excel模板输出报告在Microsoft Excel中，可基于模板来新建工作簿。模板中可包含格式样式、标准的文本、公式、Visual Basic for Applications宏和自定义工具栏等。使用模板可以减少输入的工作量、为复杂的报告制定标准格式、避免反复输入相同的信息或进行相同的格式修改，从而大大加快报表的生成速度。用户可以事先定制模板以确定报表格式，然后运行LabVIEW应用程序将测量结果插入到模板中的占位符处，此外还可以进行简单的编程快速实现报告的显示、打印、保存等功能。

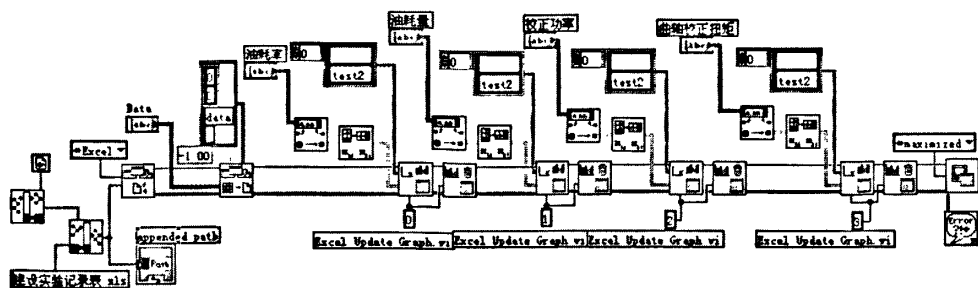


图 5.9 报表生成程序

5.3 本章小结

本章在前文测功原理分析、系统模型和系统硬件结构建立的前提下，讲述了上位机系统的程序设计方法。以 LabVIEW 为软件开发平台和工具，利用虚拟仪器技术，详细介绍了系统的各主要模块的设计。给出了系统主程序模块的执行流程，对系统的初始化模块进行了详细的说明。在数据采集模块方面，介绍了上位机程序与系统的通讯过程，为确保通讯的稳定性，对通讯协议的安全性设计和通讯的 CRC 校验做了详细的说明，对采集数据的中值滤波方法进行了分析，详细地阐述了报表处理插件的使用。

第 6 章 测功系统的数学模型与模拟仿真

交流异步电力测功机系统包括交流电力测功机、摩托车发动机、变频器以及其他一些辅助的控制设备和动力传送设备。其中交流电力测功机，摩托车发动机，变频器为一多变量、参数时变和非线性的系统^[22]，根据系统工作的实际模型需要，对以上系统分别进行分析以及在试验条件下对其数学模型进行合理简化，利用 Simulink 参照数学模型建立各自的仿真模型，用传统 PID、单神经元 PID、改良的单神经元 PID 对系统进行整体仿真，得到仿真曲线，对其进行比较选择最适合系统的控制算法。

6.1 交流异步电力测功机的仿真模型

交流异步电力测功机实质上是一个工作在发动机状态的异步发电机，其等效电路等同于异步电机的等效电路。由于交流异步电力测功机是一个多变量、参数时变和非线性的系统，因此在建立其数学模型时往往对其中一些工作条件和本身结构进行简化，例如，假设交流异步电力测功机的三相绕组空间上是对称的；不考虑齿间谐波以及磁动势沿气隙圆周按正弦规律分布；忽略铁心损耗；不考虑转速的变化对系统的定子电感、转子电感、定子电阻和转子电阻的影响；不考虑频率和温度的变化对电机参数的影响等^[14,15]。

6.1.1 三相坐标系中的数学模型

交流异步电力测功机实际物理模型见图 6.1。图中，定子三相绕组轴线 A、B、C 在空间是固定的，转子绕组轴线 a、b、c 随转子旋转，转子 a 轴和定子 A 轴间的电角度 θ 为空间角位移变量。此时，交流异步电力测功机的数学模型由下述电压方程、磁链方程、转矩方程和运动方程组成。

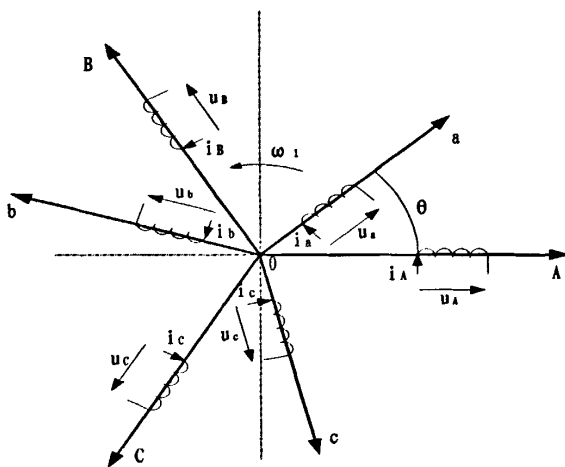


图 6.1 三相异步电动机物理模型

6.1.1.1 电压方程

交流异步电力测功机定子侧电压方程为

$$\begin{cases} u_A = i_A R_s + \frac{d\psi_A}{dt} \\ u_B = i_B R_s + \frac{d\psi_B}{dt} \\ u_C = i_C R_s + \frac{d\psi_C}{dt} \end{cases} \quad (6.1)$$

转子绕组折算到定子侧后的电压方程为

$$\begin{cases} u_a = i_a R_r + \frac{d\psi_a}{dt} \\ u_b = i_b R_r + \frac{d\psi_b}{dt} \\ u_c = i_c R_r + \frac{d\psi_c}{dt} \end{cases} \quad (6.2)$$

上述式中, $u_A, u_B, u_C, u_a, u_b, u_c$ 一为定子和转子相电压的瞬时值;

$i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ 一为定子和转子相电流的瞬时值;

$\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c$ 一为定转子各相绕组的全磁链;

R_s, R_r 一分别为定子和转子折算到定子侧的电阻。

以微分算子 p 代替微分符号 d/dt , 电压方程的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

6.1.1.2 磁链方程

在三相坐标系中, 写成矩阵形式的交流异步电力测功机为

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

式 6.4 中, $\psi_s = [\psi_A \ \psi_B \ \psi_C]^T$ 一定子各相绕组磁链;

$\psi_r = [\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]^T$ — 转子折算到定子侧各相绕组磁链；

$i_s = [i_A \ i_B \ i_C]^T$ — 定子各相电流；

$i_r = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ — 转子各相电流；

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{m1} + L_{l1} & -\frac{1}{2}L_{m1} & -\frac{1}{2}L_{m1} \\ -\frac{1}{2}L_{m1} & L_{m1} + L_{l1} & -\frac{1}{2}L_{m1} \\ -\frac{1}{2}L_{m1} & -\frac{1}{2}L_{m1} & L_{m1} + L_{l1} \end{bmatrix}; \quad L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{m1} + L_{l2} & -\frac{1}{2}L_{m1} & -\frac{1}{2}L_{m1} \\ -\frac{1}{2}L_{m1} & L_{m1} + L_{l2} & -\frac{1}{2}L_{m1} \\ -\frac{1}{2}L_{m1} & -\frac{1}{2}L_{m1} & L_{m1} + L_{l2} \end{bmatrix};$$

$$L_{rs} = L_{sr}^T = L_m \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix}$$

由于 L_{rs} 和 L_{sr} 两个分块矩阵互为转置，且与转子位置角 θ 有关，因此是一个时变参数矩阵，这是在三相坐标系中的交流异步电力测功机数学模型非线性的一个根源。为了把变参数转换成常数须利用坐标变换。

6.1.1.3 运动方程和转矩方程

在对于恒转矩负载的情况下，交流异步电力测功机的运动方程式为

$$M_p - M_e = \frac{J}{p_n} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (6.5)$$

式中， M_p 为负载阻转矩； J 为传动系统的转动惯量； p_n 为交流异步电力测功机极对数； ω_r 为转子电角速度。

根据机电能量转换原理，还可求得交流异步电力测功机电磁转矩方程为

$$M_e = p_n L_m [(i_A i_a + i_B i_b + i_C i_c) \sin\theta + (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a) \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) + (i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) \sin(\theta - \frac{2\pi}{3})] \quad (6.6)$$

6.1.2 两相坐标系中的数学模型

交流异步电力测功机在三相静止坐标系中的数学模型，虽然做了一些假设，使其定、转子电压微分方程都是线性的，但由于定、转子绕组是相对运动的，绕

组间的互感是转子位置角 θ 的函数，也是时间的函数，因此数学模型的基本方程都含有时变系数，使得要分析和求解这类问题变得十分复杂。为了简化分析和求解问题，常常采用坐标变换将原有的三相静止坐标系变换成两相静止或旋转坐标系。坐标变换是电路上的线性变换，形式上是一种数学变换，实质上是能量的变换，必须遵循其物理内涵。因此，在进行这些变换时需遵守磁势等效和功率不变原则。常用的坐标系是两相静止坐标系和两相同步旋转坐标系，在这里，我们只推导本文使用的在两相静止坐标系中的交流异步电力测功机数学模型^[39]。

两相静止坐标系是指正交定子坐标系 $dq0$ 坐标系。 $dq0$ 坐标系的 d 轴与三相(A、B、C)坐标系的A轴重合， q 轴与 d 轴垂直。空间矢量在 d 轴和 q 轴上的投影分别称为该空间矢量的 d 分量和 q 分量，如图 6.2 所示。

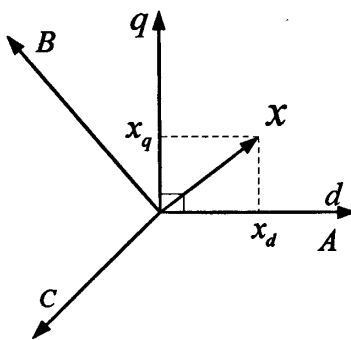


图 6.2 电路三相(a、b、c)坐标系与 $dq0$ 坐标系的关系

在 $dq0$ 坐标系上，交流异步电力测功机的等效电路如图 6.3 所示。

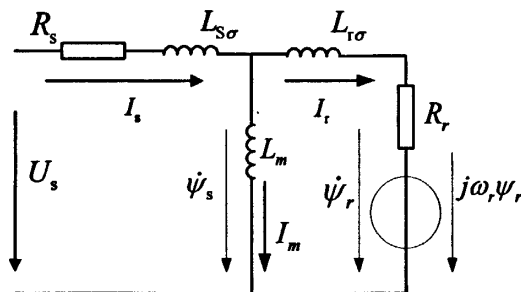


图 6.3 异步电机等效电路

图 6.3 中， $L_{s\sigma}$ 、 $L_{r\sigma}$ 分别为定子、转子每相漏感； L_m 为定子和转子之间的每相互感； u_s 为定子电压空间矢量； i_s 、 i_r 为定子、转子电流空间矢量； i_m 为互感电流空间矢量； ψ_s 、 ψ_r 为定子、转子磁链空间矢量。

根据图 6.2 和图 6.3，可以分别写出交流异步电力测功机在 $dq0$ 坐标系下的电压方程为：

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} \quad (6.7)$$

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} \quad (6.8)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} - \omega_r \psi_{dr} \quad (6.9)$$

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} + \omega_r \psi_{qr} \quad (6.10)$$

上述式中, u_{ds} 、 u_{qs} 分别为 u_s 的 d 分量和 q 分量; i_{ds} 、 i_{qs} 分别为 i_s 的 d 分量和 q 分量; i_{dr} 、 i_{qr} 分别为 i_r 的 d 分量和 q 分量; ψ_{ds} 、 ψ_{qs} 分别为 ψ_s 的 d 分量和 q 分量; ψ_{dr} 、 ψ_{qr} 分别为 ψ_r 的 d 分量和 q 分量。

交流异步电力测功机在 $dq0$ 坐标系下的磁链方程为:

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (6.11)$$

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (6.12)$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (6.13)$$

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (6.14)$$

上述式中, L_s 为每相定子电感, $L_s = L_{s\sigma} + L_m$; L_r 为每相转子电感, $L_r = L_{r\sigma} + L_m$; 电磁转矩 T_e 计算公式为:

$$T_e = \frac{3}{2} P (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) = \psi_{dr} i_{ds} - \psi_{qr} i_{qs} \quad (6.15)$$

系统的机械运动方程仍然为式(6.5)。

根据上述建立的在两相静止坐标系上交流异步电力测功机数学模型, 测功电机的动态方程和运动方程可以表示如下:

$$\frac{d}{dt} i_{ds} = -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_s}{L_r L_\sigma}\right) i_{ds} - \omega_r i_{qs} + \frac{R_r}{L_r L_\sigma} \psi_{ds} + \frac{\omega_r}{L_\sigma} \psi_{qs} + \frac{1}{L_\sigma} u_{ds} \quad (6.16)$$

$$\frac{d}{dt} i_{qs} = \omega_r i_{ds} - \left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_s}{L_r L_\sigma}\right) i_{qs} - \frac{\omega_r}{L_\sigma} \psi_{ds} + \frac{R_r}{L_r L_\sigma} \psi_{qs} + \frac{1}{L_\sigma} u_{qs} \quad (6.17)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{ds} = -R_s i_{ds} + u_{ds} \quad (6.18)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{qs} = -R_s i_{qs} + u_{qs} \quad (6.19)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p_n}{J} (M_p - M_e) \quad (6.20)$$

选取状态变量 $x = [i_s \quad \psi_s \quad \omega_r]^T = [i_{sd} \quad i_{sq} \quad \psi_{sd} \quad \psi_{sq} \quad \omega_r]^T$, 则可以得到交流异

步电力测功机四阶时变非线性状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}x = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (6.21)$$

其中, 输出向量 $y = [f_{ds} \ f_{dr} \ f_{qs} \ f_{qr} \ i_{ds} \ i_{qs}]^T$; 已知输入向量 $u = [u_{ds} \ u_{qs}]^T$;

系统矩阵

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s L_r}{L_d} & \frac{R_s L_m}{L_d} & 0 & 0 \\ \frac{R_r L_m}{L_d} & -\frac{R_r L_s}{L_d} & 0 & -w_r \\ 0 & 0 & -\frac{R_s L_r}{L_d} & \frac{R_s L_m}{L_d} \\ 0 & -w_r & \frac{R_r L_m}{L_d} & -\frac{R_r L_s}{L_d} \end{bmatrix};$$

输入矩阵 B 和输出矩阵 C 为:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad \text{其中 } R_s, L_r, L_m, R_r, L_s, L_d \text{ 为电机参数值。}$$

w_r 为根据转速发生改变的时变量,

$$w_r = \frac{-2n \times \pi \times 2}{60} \quad (6.22);$$

本系统采用的变频调速电机为 380V 采用 Y 型连接的交流测功机, 仿真中使用的电气参数见表 6.1。系统矩阵 A 中的 $L_d = 0.4(L_s L_r - L_m^2) = 0.000528$ 。将电机参数带入得到的系统矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -65.4695 & 61.5474 & 0 & 0 \\ 10.9885 & -11.3738 & 0 & \frac{n \times \pi}{15} \\ 0 & 0 & -65.4695 & 61.5474 \\ 0 & -\frac{n \times \pi}{15} & 10.9885 & -11.3738 \end{bmatrix}$$

其中 n 为转速。

表 6.1 变频调速电机仿真电气参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
极数 P	2	转动惯量 J	0.00053Kg. m ²
定子电阻 RS	0.28431 Ω	最高转速 N	3000r/min
转子电阻 Rr	0.05076 Ω	额定转速 N	1800r/min
定子电感 Ls	0.118328mH	额定转矩 M	32.25N.M
转子电感 Lr	0.121605mH	额定电流 I	19.5A
互感 Lm	0.11432mH	额定频率 f	61HZ

6.1.3 交流异步电力测功机系统仿真模型的建立

系统的状态方程 $\begin{cases} \dot{x}' = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$ 中, 矩阵B,C,D(D为零矩阵)的值时恒定的, 但矩

阵A中的值随转速的变化而发生改变。所以交流异步电力测功机是一个线性时变系统, 输入U是变频器逆变过来的电压值(u_d , u_q), 输出为磁链和电流的d分量和q分量, 此模型建立的关键就是如何将输入转速与系统状态方程的矩阵系数联系起来且通过状态方程输出测功机的输出量, 在Simulink软件中提供了一种S函数^[16], S-函数是系统函数(System Function)的简称, 是指采用非图形化的方式(即计算机语言, 区别于Simulink的系统模块)描述的一个功能块。用户可以采用MATLAB代码, C, C++, FORTRAM或Ada等语言编写S-函数。S-函数由一种特定的语法构成, 用来描述并实现连续系统、离散系统以及复合系统等动态系统; S-函数能够接收来自Simulink求解器的相关信息, 并对求解器发出的命令做出适当的响应, 这种交互作用非常类似于Simulink系统模块与求解器的交互作用。本模型就是采用Matlab代码写出的S函数来建立了时变系统的状态方程, 将u(u_d , u_q)与n_ref(转速)三个输入量作为S-函数的输入, fds,fdr,fqs,fqr,ids,iqs六个量作为系统的输出, 具体的仿真模型见图6.4.相应的S-函数见附录B, 电磁转矩 T_e 根据式(6.15)来进行计算。

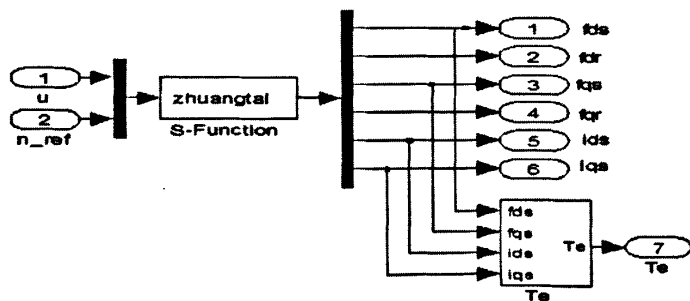


图 6.4 交流异步电力测功机仿真模型

6.2 变频器的仿真模型

在交流异步电力测功机系统中,变频器的功能是根据指令通过一定的控制算法来控制交流异步电力测功机运行在指定的工作状态,因此变频器数学模型的主要内容就是其内部控制算法。目前在交流调速领域,矢量控制和直接转矩控制是变频器使用最为广泛的控制算法,其基本思路是把交流电机的三相各量通过坐标变换变到两相坐标系中,实现非线性耦合解耦,从而可以按照直流电机的控制规律来控制交流电机或直接控制交流电机的旋转磁场,使系统具有较好的控制性能和调速性能^[40]。由于这些控制算法使用到了两个不同坐标系的量,不但需要大量的坐标变换计算,并且需要在每个坐标系下进行给定、比较、调节、运算、控制及输出等工作。此外,为了提高控制精度,算法中有许多环节还需要进行闭环控制设计,许多参数需要调节。因此,完整的变频器数学模型是复杂的且难于实现。由于本论文的研究内容不是变频器具体控制方法的研究和实践,且主要研究的是交流异步电力测功机稳态下的特性,因此出于简化仿真的需要,本文提出了一种简单的变频器数学模型。

6.2.1 变频器的数学模型

该变频器数学模型的提出是基于如下的一个事实:在交流异步电力测功机系统中,在测功机正常工作的恒转矩区域,不管采用哪种控制算法,变频器对交流异步电力测功机工作状态的控制是对其电磁转矩的调节,实现的途径是通过逆变器对其定子绕组输出一定的电压来实现,且输出电压的特点是基波幅值和基波频率成正比。在拖动工作状态下,该电压在测功机定子绕组中形成的同步转速 n_1 高于轴上的转速 n ;而在测功工作状态下,该电压在测功机定子绕组中形成的同步转速 n_1 低于轴上的转速 n ,如式 $n_1 = \frac{60f_1}{p_n} < n$ 所示,式中 $p_n=2$ 表示极数。且根据交流异步电机的特性,此时电磁转矩有如下的表达式:

$$M_e = \frac{\pi}{30} K \Phi_m^2 \Delta n p_n = 2\pi K \Phi_m^2 \Delta f \quad (6.23)$$

式中, K 为电机结构常数; Φ_m 为主磁场幅值,在恒转矩区为恒值; Δn 为转差, $\Delta n = n_1 - n$; Δf 使用频率表示的转差, $\Delta f = f - f_r = f_1 - \frac{np_n}{60}$, f_r 为转子频率。式(6.23)

表明,调节转差 Δn 就能方便的调节交流异步电力测功机的电磁转矩。而此时,变频器输出的每相电压的基波 u_s 可表示为:

$$u_s = A_1 \sin(2\pi f_1 t + \varphi) \quad (6.24)$$

式中, A_1 为 u_s 基波幅值, 其值与 f_1 成正比; φ 为 u_s 的相位。

根据式(6.23)和式(6.24), 本文提出的在测功状态下的变频器数学模型结构如图 6.5 所示。

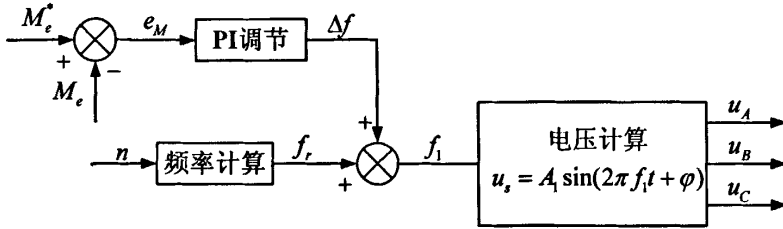


图 6.5 简化的变频器数学模型

图 6.5 中, 转差频率信号 Δf 由给定转矩 M_e^* 和当前交流异步电力测功机电磁转矩 M_e 形成的转矩误差信号 e_M 通过 PI 调节器产生。 Δf 与通过交流异步电力测功机的转速 n 计算对应的转子频率 f_r 叠加后形成定子同步频率 f_1 送入电压计算单元, 后者根据式(6.24)计算得到三相定子电压 u_A, u_B, u_C 。据式(6.24)所知, 该模型输出的电压值为幅值随频率变化的正弦波电压, 而实际的变频器模型的输出为矩形波波形。据上分析所知, 基于测功机系统中变频器的工作原理, 我们简化变频器的输出电压, 以其基波为实际输出, 而忽略了叠加成矩形波的其它正弦波对系统的影响。从结构上可以看出, 该模型结构简单, 而且只有 PI 调节器的参数需要调节, 因此实现起来非常方便。

6.2.2 变频器的仿真模型

根据上述建立了变频器的仿真模型如图 6.6 所示, 在此模型中应用了一个 PI 调节器, 对输入的电磁转矩控制量进行调节, 再与与转速有关的转差频率相比较, 通过函数转换成为三相定子电压 u_A, u_B, u_C , 再通过数学转换成为两相电压 V_d, V_q , 做为交流异步测功机的输入电压。此仿真环节利用 Simulink 中的 $f(u)$ 函数产生幅值和频率都随 Δf 发生改变的正弦信号^[17], 利用 clock 与 Δf 做为输入, 输出 V_a, V_b, V_c 的相位相差 $2\pi/3$, 其中 $f(u)=\sin(u(1)*u(2))*(u(2)*6.8*1.414/\pi)$, 具体的仿真模型见图 6.6。

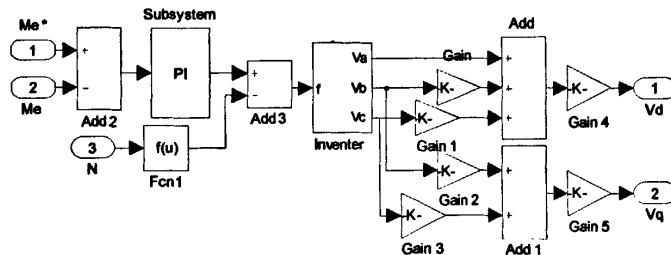


图 6.6 变频器的仿真模型

将变频器与交流电力测功机模型组合起来,给定转速 1200r/min, M_e^* 为 25N.M,调整 PI 参数为 $P=0.11, I=0.15$ 仿真结果如下图 6.7 所示:

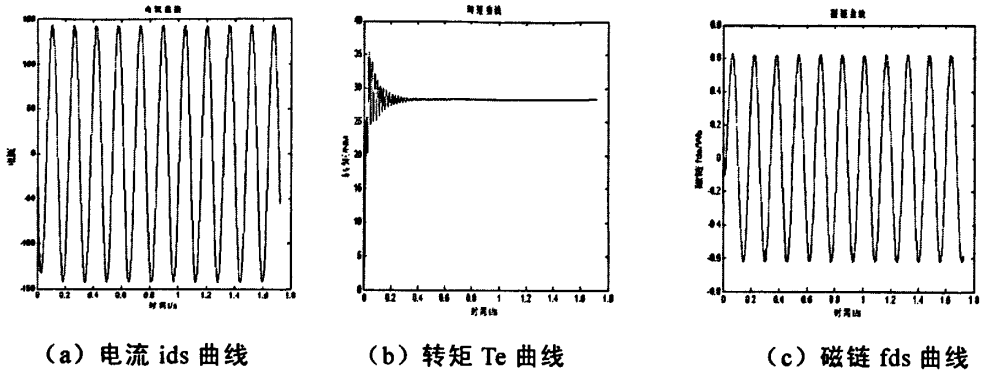


图 6.7 电机变频器仿真曲线

6.3 发动机模型的建立

与交流异步电力测功机类似,摩托车发动机是一个多变量、参数时变且耦合性很强的非线性系统。对发动机进行的研究有很多,主要集中在对其经济性、环保性、动力性的研究三方面。因此根据各种研究关心的问题不同,建立的发动机模型分为发动机表模型、发动机燃油喷射随机模型、发动机平均值模型等。其中发动机表模型主要特点是模型的计算以查表和拟合公式为主,计算工作量较小,对发动机稳态工况特性的模拟能够达到较高的精度此模型实际上是以发动机稳态特性的模拟为重点,对于发动机动态特性的描述仅考虑了各工作过程的时间延迟和进气歧管绝对压力及发动机转速增量的积分。适用于稳态特性研究。发动机喷射随机模型是可以根据发动机运行的情况,动态地采集各种数据,分析发动机燃油喷射的状况,从而修正发动机模型参数,它能够通过调整燃油混合气的比例来补偿空燃比的变化。主要用于发动机的燃油比等经济指标研究。平均值模型对进气管内进气及油膜的动态特性有较为深入的描述,可以对发动机瞬态过程的响应进行分析。平均值模型具有既可以描述发动机动态特性,又不需很大的模型运算量的特点。因而此类模型在发动机电控系统的设计中和发动机实时模拟转速控制的系统中得到了广泛应用。本文参考丹麦技术大学教授 Elbert Hendricks 及其实验室创建的模型建立了汽油机的一种控制平均值模型^[18]。

本文的研究重点在于发动机在油门开度和转矩输入作用的情况下,它的输出转速的变化,在测功机系统中,通过对油门开度的控制和转矩的加载来考察发动机的响应特性。故本发动机在建模时要根据我们建模的需要对平均值模型进行如下的设定:

(1) 主要考虑发动机模型的动力特性,建模主要集中在发动机的燃烧和曲轴转

动以及转速的产生过程,对其它一些次要的比如尾气排放的组成、发动机的震动等问题不进行考虑。

(2) 对发动机建模过程中的与动力特性相关的但是又不是我们研究和考虑的重点问题进行了简化和经验化处理,比如喷油器的喷油量、喷油时间、喷油夹角等根据经验公式和发动机的实际情况进行处理。

(3) 对一些影响动力的参数根据发动机的实际参数和试验情况进行了赋值,不考虑其变化带来的影响。如点火提前角、旁路阀占空因子等。

本系统采用的摩托车发动机型号为钱江125,发动机的参数见表6.2。根据发动机参数建立的发动机平均值模型包括进气歧管、曲轴转动、燃油三个子模型。下面分别对各个模块的建立进行说明。

表 6.2 钱江 125 发动机的性能参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
燃料燃烧值 Hu	43000kj/kg	歧管容积 Vm	0.000564
标定转动惯量 I	4.264kg mm	环境空气压力 Pcmb	1.013×10^5
发动机总转动惯量 Iac	0.48kg mm	临界压力比 Pc	0.4125
气体常数 R	0.00287	点火提前角 Theta	20
歧管空气温度 T	305k	旁路阀占空因子 Ds	0.02
发动机排量 Vd	1.249L		

6.3.1 歧管动力学子模型

歧管动力学子模型描述了发动机的进气动态过程,歧管进气质量 Ma 由通过旁路空气阀的空气流量 mis 和通过节气门的空气流量 mat 两部分组成。怠速时,节气门几乎关闭,旁路空气阀打开,此时存在 mis ,在其他工况下,旁路空气阀关闭,不存在 mis 。气缸进气质量,由通过节气门的空气流量 mat 决定。实际发动机中二者均同时存在。

$$Ma = mis + mat \quad (6.25)$$

mis 经过低通滤波器进入歧管,它与旁路空气阀占空因子 Ds 呈非线性关系:

$$mis = -0.0317Ds^4 + 0.0355Ds^3 + 0.0082Ds^2 + 0.00002Ds \quad (6.26)$$

根据表6.2和系统仿真的研究对象, Ds 变化对系统产生的影响不是我们研究的重点故根据发动机的运行工况选择 Ds 为0.02。 mat 由两个分离的、依赖于节气门角度 α 和进气歧管压力 $Pman$ 的近似等熵流来建模:

$$mat = 0.3988\beta - 0.01 \quad (6.27)$$

$$\beta = \beta_1 \times \beta_2 \quad (6.28)$$

$$\text{Beta1} = 1 - 1.4073 \cos(\alpha \times \pi / 180) + 0.4087 \times \cos^2(\alpha \times \pi / 180) \quad (6.29)$$

$$\text{Beta2} = \begin{cases} \sqrt{1 - \left(\frac{Pr - Pc}{1 - Pc} \right)^2} & Pr > Pc \\ 1 & Pr \leq Pc \end{cases} \quad (6.30)$$

式6.30中, Pr 为相对压力, $Pr = P_{man} / P_{cmb}$, P_{cmb} 为环境气压; P_c 为临界压力比,参考发动机参数为0.4125。按速度密度法,从歧管流出、进入气缸(进气阀口)的空气流量 map 为:

$$map = (n \times V_d \times \eta_{tvol}) / (120 \times V_m \times P_{man}) \quad (6.31)$$

式中, n 是曲轴转速; V_d 是发动机排量; V_m 是歧管容积; 具体的发动机参数取值见表6.2。 η_{tvol} 是容积效率系数,

$$\eta_{tvol} = 0.952 - (0.075 / P_{man}) \quad (6.32)$$

歧管压力的变化与流进、流出歧管的空气流量之差来表示:

$$\dot{P}_{man} = RT_m / \dot{V}_m \times (m_a - map) \quad (6.33)$$

式中, R 是气体常数; T_m 是歧管空气温度, 图6.8为对应的歧管动力学模型。

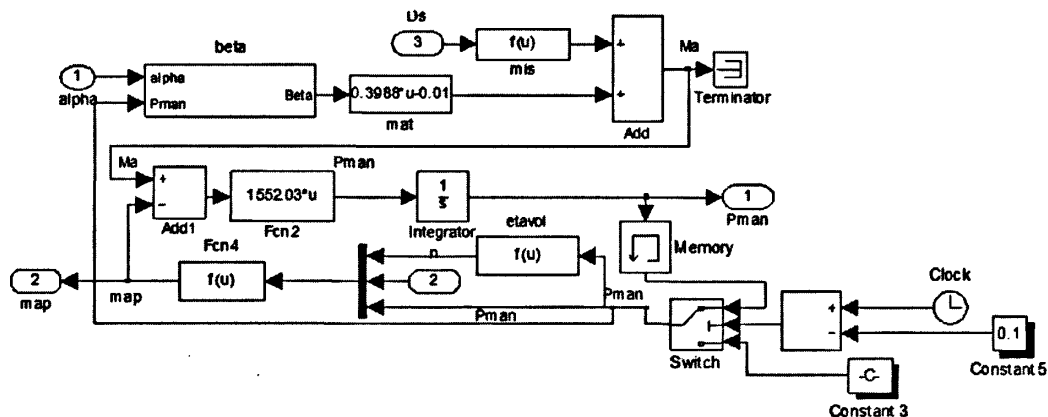


图 6.8 歧管动力学模型

6.3.2 曲轴动力学子模型

曲轴动力学子模型描述发动机热力学和机械动力学过程, 理论喷射燃油量为:

$$m_{fi} = map / 14.67 \quad (6.34)$$

按能量守恒定律, 燃油燃烧产生的理论热功率, 通过内部热效率 η_{ti} 转变为机械功率。理论热功率为:

$$P = [H_u / (n \times I)] \times \eta_{ti} \times m_{fi} \quad (6.35)$$

式中, H_u 是燃油燃烧值; I 是发动机标定转动惯量, I 与发动机特性有关见表据表6.2。 η_{ti} 是内部热效率。

$$\eta_{a_i} = \eta_{a_{in}} \times \eta_{a_{ip}} \times \eta_{a_{ilambda}} \times \eta_{a_{i\theta}} \quad (6.36)$$

其中 $\eta_{a_{ilambda}} = 1$,

$$\eta_{a_{in}} = -0.015 + 0.558 \times (1 - 0.392/n)^{0.36} \quad (6.37)$$

$$\eta_{a_{ip}} = 0.827 + 0.528 \times P_{man} - 0.392 \times P_{man}^2 \quad (6.38)$$

$$\eta_{a_{i\theta}} = 0.7 + 0.0024 \times (\theta - d) - 4.8^{-4} (\theta - d)^2 \quad (6.39)$$

式中, θ 是点火提前角; d 是最大制动力矩点火提前角。

$$d = \min(a, b, 45) \quad (6.40)$$

$$a = 47.31 \times P_{man} + 2.6214 + 4.7 \times n(1) \quad (6.41)$$

$$b = -56.55 \times P_{man} + 57.34 + 4.7 \times n(1) \quad (6.42)$$

当曲轴转速 $n > 4800 \text{ r/min}$ 时, $n(1) = 4.8$, 否则 $n(1) = n$ 。对于本测功系统的钱江 125 发动机而言, 最高转速为 2800 r/min , 所以 $n(1) = n$ 。仿真中 $\eta_{a_{i\theta}}$ 用积分函数计算。

$$P_b = \text{load} \times n^3 \quad (6.43)$$

机械能将克服充填泵消耗 P_p 和摩擦损失 P_f , 然后驱动负载 P_b , 产生加速度, 积分后输出转速 n 。

$$P_p / I \times n^{-1} = (-0.969 + 0.206) \times P_{man} / [I_{ac} \times 1000 \times (2\pi/60)^2] \quad (6.44)$$

$$P_f / I \times n^{-1} = (1.673 + 0.272) \times n + 0.0135 \times n^2 / [I_{ac} \times 1000 \times (2\pi/60)^2] \quad (6.45)$$

$$P_b / I \times n^{-1} = \text{load} \times n^2 / [I_{ac} \times 1000 \times (2\pi/60)^2] \quad (6.46)$$

式中, I_{ac} 是发动机总转动惯量; load 为外部输入负载系数。根据以上的数学模型建立的曲轴动力学模型见图 6.9。

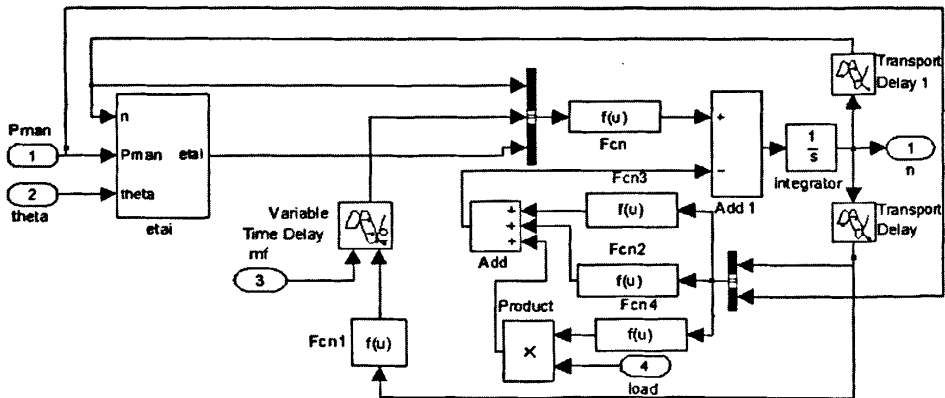


图 6.9 曲轴动力学模型

6.3.3 燃油动力学子模型

喷射燃油量 m_f 中的气化部分 m_{fv} 直接进入气缸。

$$m_{fv} = (1-X) \times m_f \quad (6.47)$$

$X \times m_f$ 未气化部分先沉积形成油膜，然后蒸发进入气缸。蒸发率为：

$$m_e = (X \times m_f - m_{fv}) / \tau \quad (6.48)$$

进入气缸的总燃油量 m_{fi} 为上述两部分之和：

$$m_{fi} = m_{ff} + m_{fv} \quad (6.49)$$

式6.48中， X 为沉积系数； τ 为油膜蒸发时间常数，均为实验标定的量。由于实验数据不好获得，而且此数据也不是我们研究和分析的重点。故我们利用代数方程模块来搭建模型^[19]，这样直观。易体现燃油各部分动态关系。子模型右边第一个输出量为汽化直接进入气缸油量 M_{fv} ，第二个为蒸发进入气缸油量 M_{ff} ，第三个为进入气缸油量的总和 M_f 。具体的燃油动力学模型如图6.10所示。

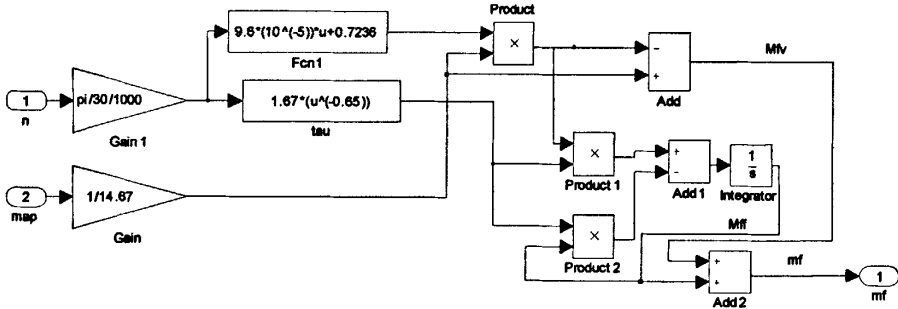


图 6.10 燃油动力学模型

6.3.4 摩托车发动机的整体模型

根据前文建立的歧管动力学模型，曲轴动力学模型，燃油动力学模型，根据各个模型相互之间输入输出量之间的关系建立了如图6.11所示的发动机的整体仿真模型^[20]，其中transport delay环节它的作用是对相应的变量进行延时，为避免形成代数环而添加的，整个系统的输入量为油门开度和转矩(负荷)，输出量为发动机的转速。发动机仿真模型的建立为整个测功系统的仿真模型的建立打好了基础。

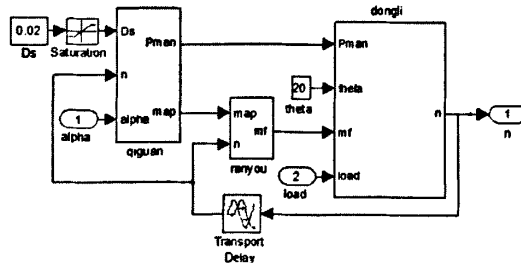


图 6.11 发动机的整体模型

6.3.5 油门控制器的数学模型

油门控制器是由直流力矩电机和相应的控制电路组成。系统的工作原理是:给定的位置信号,与反馈电路测得的目前位置信号相比较,求得位置偏差信号。位置偏差信号经电路转换成 PWM 输出矩形波的占空比因子,驱动力矩电机工作。因此,油门控制器是一个独立的控制系统,整体上是一个单输入单输出系统。如果忽略其内部调节过程,则系统的数学模型可以认为是一个比例环节,即

$$\delta_a = k_\delta u_\delta \quad (6.50)$$

式中, δ_a 为油门开度; u_δ 为油门开度给定电压信号。在仿真模型中将其作为理想比例环节集成到发动机模型中去。

6.4 系统的整体仿真模型

根据发动机测功系统的测试要求,需要进行测功机的负荷特性试验和速度特性试验。负荷特性试验中,测功机处于发电状态,变频器给定量 M_e^* 为恒值。恒转速控制器依靠检测反馈转速与给定转速的差值 $e_n(t)$ 来输出油门给定电压 u_δ 调节来油门的开度油门 δ_a , 使转速 $n(t)$ 稳定在给定的转速值上。负荷特性控制框图结构见图 6.12。

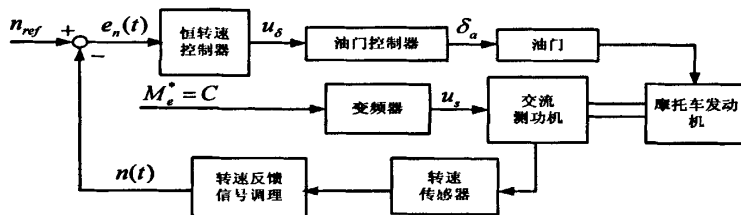


图 6.12 负荷特性控制框图

速度特性试验中,输入为变频器电磁转矩的值以及系统的期望转速,输出为发动机的转速。在速度特性试验中,测功机处于发电状态,油门给定 u_δ 恒定位置。此时,根据设定转速 n_{ref} 与当前转速采样值 $n(t)$ 的差值 $e_n(t)$ 即作为恒转速控制器的输入,控制器输出量即为变频器的转矩给定量 M_e^* 。变频器根据该给定量,将相应的电压 u_s 加至测功机,以调节发动机转速,构成转速的闭环控制。在实际的应用中,需要连续对多个油门开度下发动机的转速性能进行测试,但不管油门开度如何,控制算法始终依靠检测反馈转速与给定转速的差值 $e_n(t)$ 来调节测功机的转矩,使转速稳定在给定的转速值上,其控制框图如图 6.13 所示。

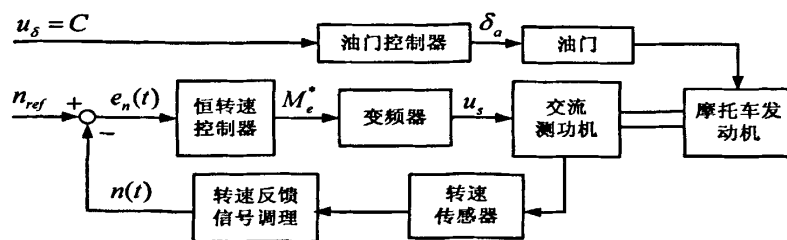


图 6.13 速度特性控制框图

根据交流异步电力测功机系统的工作原理和上述建立的各个模块的仿真模型，建立了如图 6.14 的交流异步电力测功机系统负荷特性和图 6.15 所示的交流异步电力测功机系统速度特性的仿真模型。

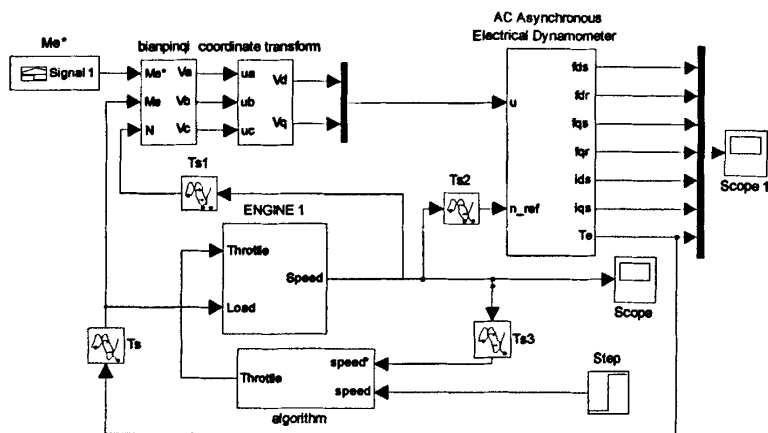


图 6.14 交流异步电力测功机系统负荷特性试验仿真模型

如图 6.15 所示为交流异步电力测功机系统速度特性的仿真模型，该模型中输入为发动机的油门开度的值以及系统的期望转速，输出为发动机的转速。

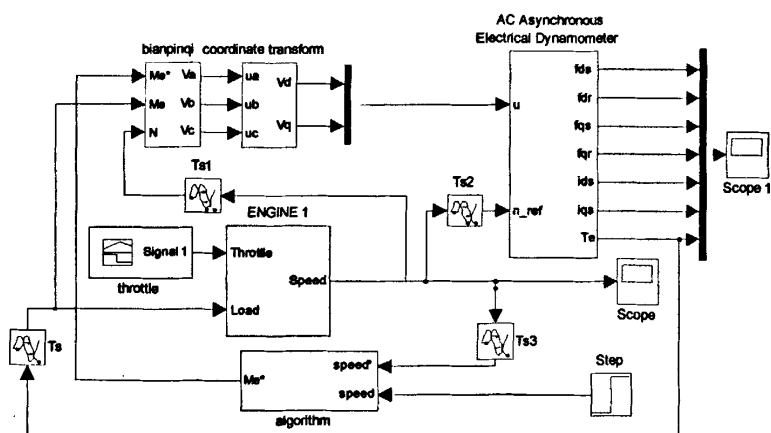


图 6.15 交流异步电力测功机系统速度特性试验仿真模型

6.5 系统仿真的控制算法

传统的PID控制算法在发动机测功系统研究的初期应用较多，但是PID参数整定是问题的关键，一个合适的参数值，可使控制精度得到较大提高。近年来，随着人工智能理论发展，在发动机测功系统的研究中，基于人工智能的控制方法如模糊和神经网络等越来越受到重视。基于模糊和神经网络的控制可以不需要了解控制对象的模型，特别是在非线性理论还不十分完善的情况下，模糊控制器和神经网络控制器的这个优点显得更为突出。模糊控制器规则的形成需要一定的知识和经验，而语言变量的子集、量化因子和比例因子等值多需要根据实际情况人为加以选定，所以模糊控制器的设计和优化参数过度依赖经验和实验数据。而神经网络具有无限逼近非线性函数的能力，而且它不需要任何的经验知识，只要有一定的数据进行训练即可，可以通过学习自动调整权值。本文根据系统仿真的需要，采用了神经网络和PID控制相结合的单神经元PID控制算法，该算法具备神经网络的学习训练功能和PID的调节功能，通过学习自动调节PID的参数比传统的PID控制具有更小的超调量，稳定性好。但是通过仿真实验发现其响应速度较慢，针对这个缺点提出了一种改良的单神经元PID控制算法。

下面分别介绍传统PID，单神经元PID，改良的单神经元PID算法。并利用三种算法对测功系统进行负荷特性的仿真，对结果进行比较和分析，选择系统需要的控制算法。

6.5.1 传统 PID 算法

传统的PID控制是关于偏差的比例、积分、微分及其组合的控制，PID控制系统的结构如图6.16所示，其中虚线框内为PID控制器。PID控制器的输出值 $u(t)$ 取决于系统给定值 $r(t)$ 和系统输出值 $A(t)$ 的偏差 $e(t)$ 偏差的积分、偏差的微分的线性加权组合，即

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6.51)$$

式中： T_i 为积分时间常数； T_d 为微分时间常数； K_p 为比例系数； $K_i = K_p / T_i$ 为积分系数； $K_d = K_p T_d$ 为微分系数。

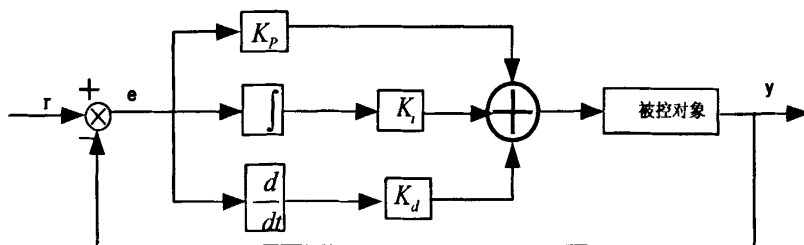


图 6.16 PID 控制系统结构框图

在PID控制器中,比例环节产生与偏差成正比的输出信号,以便消除偏差;积分环节产生与偏差的积分值成正比的输出信号,以便消除系统的静态误差;微分环节产生与偏差的变化率成正比的输出信号,以便加快控制器的调节速率,缩短过渡过程时间,减少超调。如果这三个部分配合适当,便可得到快速敏捷、平稳准确的调节效果。

PID控制器的设计的关键是如何选择比例、积分和微分系数^[52]。但是,在生产实际现场,由于条件限制,比如缺乏有关仪器,不允许附加扰动和调试时间短等。因此,PID参数的整定往往难以达到最优状态。并且即使针对某一工作点获得了PID控制的最优参数,由于工业过程对象一般具有时变性,仍存在整个工作范围内最优和保持长期工作最优的问题。从而限制了PID控制器的应用。

根据图6.14,采用传统PID对其进行控制, Me^* 信号为阶跃25N.M时,目标转速为1200r/min,调整PID参数为 $P=0.8, i=0.0427, d=0.001$ 。仿真的结果如下图所示。

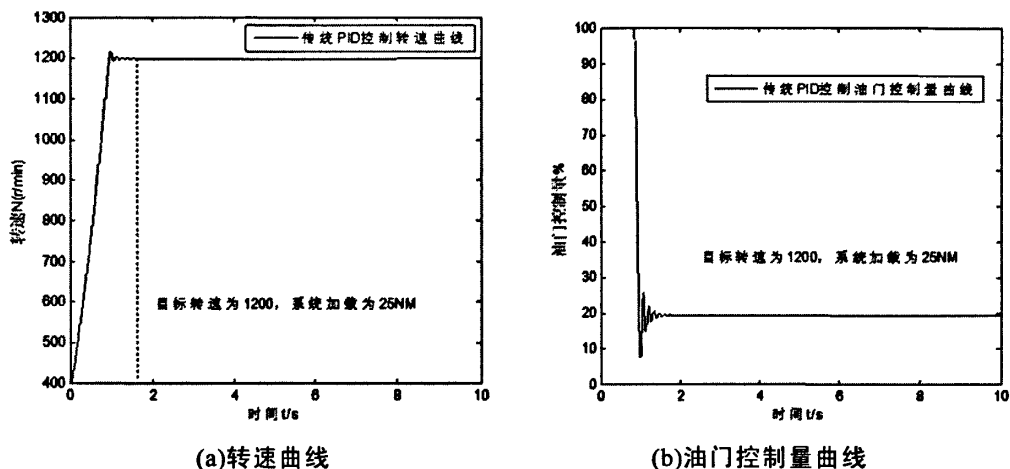


图 6.17 传统 PID 控制恒速控制曲线

根据图6.17,传统PID控制在参数调整好了以后,系统能进行快速响应,转速在经历20转左右的超调和振荡在1.8秒以后趋向于目标值且保持到控制结束。油门控制量的曲线可知PID控制先给定一个最大的油门控制量,加快响应速度,在系统转速快接近目标值时控制量快速下调20左右且振荡0.5秒,最后趋向于稳定。由此可知整个PID控制过程动态效果不理想,控制量突变大,在实际惯性系统中控制量不能达到这样的要求。

为了考察系统的动态调节品质,我们利用传统PID控制做了转速突变仿真。系统加载仍为25N.M,将系统的目标转速由1000转在仿真5秒时阶跃到1500转时,PID的控制曲线如下图6.18所示。

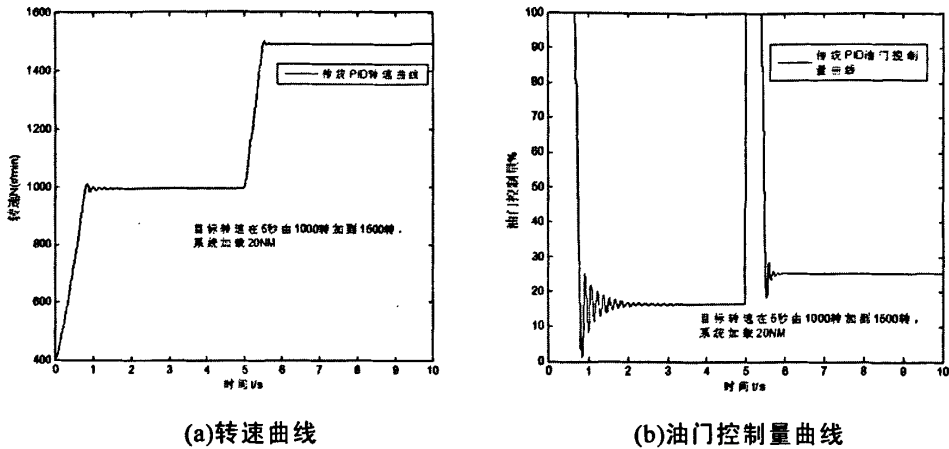


图 6.18 传统 PID 控制目标转速突变控制曲线

如图6.18(a)所示，当转速发生变化时，在传统PID控制下的转速曲线响应速度较快，但是有超调和振荡，在经过1秒左右的时间又再次达到稳定值。系统的超调量不大，振荡幅值也较小，基本能满足控制的要求。如图6.18(b)所示，油门控制量曲线在5秒目标转速突变时，油门控制量阶跃到最大值，保持一段时间以后再阶跃到一较小值，经几次振荡后稳定在新的恒定值上。控制量阶跃量大，不能缓慢的对系统进行调节，忽略了系统的惯性环节和系统的响应速度。故在实际控制中采用传统PID算法控制转速突变实验时，应该考虑系统的响应速度和惯性环节。

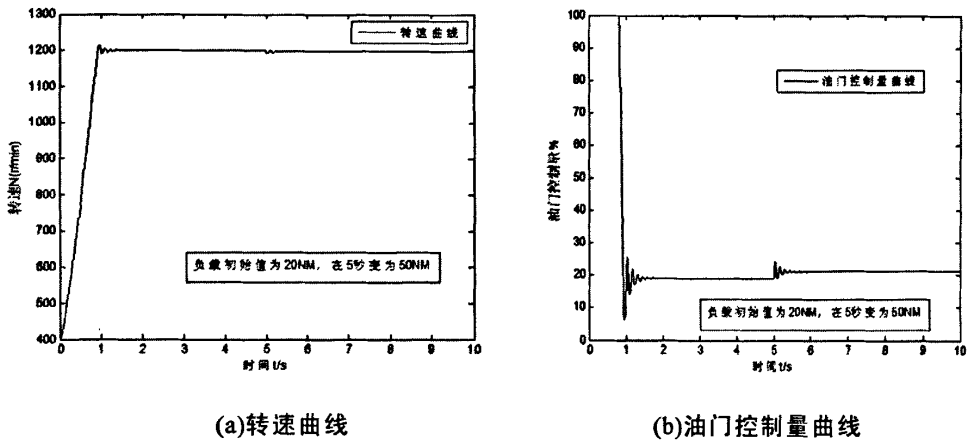


图 6.19 传统 PID 控制加载突变控制曲线

图6.19所示为系统的负载在仿真5秒时由初始的20N.M突变到50N.M的转速和油门控制量的曲线图。如图6.19(a)所示，当负载突变时，转速曲线出现了小幅的振荡，很快又稳定在目标转速。仿真结果说明系统的抗干扰能力和自我调整能力较好，能很快的对负载的变化做出反应。图6.19(b)的油门控制量曲线也在负载突变时出现了较小幅度振荡且很快趋向于稳定。

通过上述三个仿真实验结果的分析,传统PID控制算法在调整好系统的参数后能较快的响应,有一定的抗干扰能力和适应负载变化能力,但是有超调和振荡。由于系统给定的转速和负载都采用的是阶跃给定,导致油门控制量的阶跃变化较大,不能很好的反应实际的控制过程。

6.5.2 单神经元 PID 算法

为了克服传统PID控制的弱点,控制界已经提出了大量的对PID控制的改进方案,例如自校正PID控制、广义预测PID控制、模糊PID控制、专家PID控制、智能PID控制等等,以上各种方案的理论依据不同,采用手段也不相同,但它们的共同点都是针对如何选取和整定PID参数^[48],都是在保持传统PID控制器结构的基础上,采用新的方法在线或离线确定PID参数^[49]。这些方法在一定程度上提高了PID控制器的性能,但这些方案一般是针对某些具体问题,缺乏通用性,附加的结构或算法也增加了控制器的复杂性,使它们的广泛应用受到限制。近年来,随着神经网络的研究和应用,人们开始采用神经网络和PID控制相结合,以便改进传统PID控制的性能,这种将神经网络和PID控制相结合的研究已经得到了一些结果。单神经元PID控制器就是其中一种应用较广泛的结合形式,其控制系统的一般形式如图6.20所示,虚线框部分为单神经元PID控制器结构^[50]。

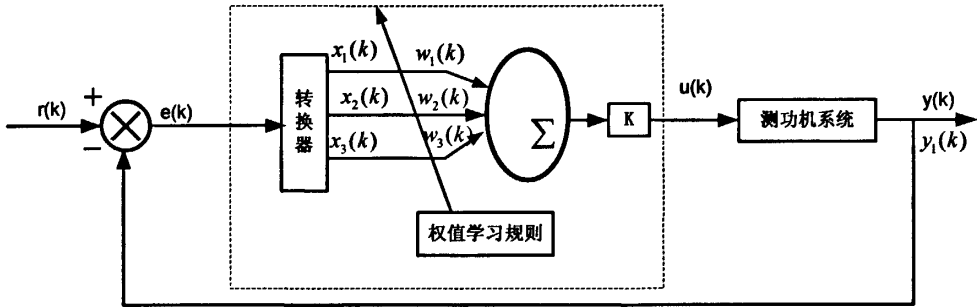


图 6.20 单神经元 PID 测功机控制系统

图6.20中误差信号 $e(k)$ 经转换器转换后得到单神经元的输入信号 $x_i(k)$ ($i=1,2,3$), 即

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) = r(k) - y(k) \\ x_2(k) = \sum_{j=0}^k e(j) \\ x_3(k) = \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \end{cases} \quad (6.52)$$

式6.52中, $e(k)$ 为误差信号; $r(k)$ 为期待输出值; $y(k)$ 为被控对象的输出。这样神经网络就被赋予了特定的物理意义: $x_1(k)$ 代表系统误差, $x_2(k)$ 表示系统误差的积累(相当于积分项), $x_3(k)$ 则代表系统误差的一阶差分(相当于微分项)。

神经元通过关联搜索来产生控制信号 $u(k)$ ，即

$$u(k) = K \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k) \quad (6.53)$$

式6.53中， $K>0$ 为神经元增益； $w_i(k)$ 是对应于神经元输入信号 $x_i(k)$ 的加权值，分别对应于常规PID控制算式(6.51)中的3个系数 K_p 、 K_i 、 K_d ，但它由神经元通过在线学习调整，不需要学习样本，反映了受控对象和过程的动态特性^[47]。

一般认为神经元通过修改其自身的突触加权值进行自组织。Hebb提出的规则是神经元的前置与后置突触同时触发，使突触权值增加，这个假设被广泛使用^[51]。假定在学习期间神经元的关联加权值正比于递进信号，同时缓慢衰减，则神经元的学习规则可表示为

$$w_i(k+1) = (1-c)w_i(k) + d_i p_i(k) \quad (6.54)$$

式中， $d_i, c>0$ ， d_i 是学习效率。

下面将基于神经元的学习理论，具体讨论图6.20所示的神经元PID算法的各种不同学习策略 $p_i(k)$ 。

(1) Hebb学习，即

$$p_i(k) = s(k)x_i(k) \quad (6.55)$$

表示对一个动态特性未知的环境，自适应神经元通过学习，以自身的适应能力对外界作出反应和作用。

(2) 监督学习，即

$$p_i(k) = z(k)x_i(k) \quad (6.56)$$

表示对一个动态特性未知的环境，神经元在教师信号 $z(k)$ 的指导下进行强迫学习，从而对外界作出反应和作用。

(3) 联想学习，即

$$p_i(k) = z(k)s(k)x_i(k) \quad (6.57)$$

它表示自适应神经元采用Hebb学习和监督学习相结合的方式，通过关联搜索对未知的外界作出反应和作用，以适应控制的要求。这意味着在教师信号指导下对环境信号进行自组织来产生控制作用，并隐含着对元作用信号的评价。

对于式(6.54)的学习算法，运用随机逼近理论，可以证明在较宽松的条件下，当 c 充分小时， $w_i(k)$ 收敛到某一稳态值，并与期望值的偏差达到允许的范围。

因此，由(6.52)、(6.53)、(6.54)三式可构成一个完整的绝对式神经元PID控制器，可归纳如下(已进行了相应的规范化处理，以保证算法的收敛性)：

$$\begin{cases} u(k) = K[\sum_{i=1}^3 w_i(k)x_i(k)] / [\sum_{i=1}^3 |w_i(k)|] \\ w_i(k+1) = w_i(k) + d_i p_i(k) \\ x_1(k) = e(k) = r(k) - y(k) \\ x_2(k) = \sum_{j=0}^k e(j) \\ x_3(k) = \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \end{cases} \quad (6.58)$$

6.5.2.1 单神经元 PID 算法的设计

由于神经元PID控制器不能直接用传递函数加以描述，若简单地应用Simulink将无法对其进行仿真，此时引入S函数。基于Hebb学习规则的神经元PID控制器的仿真模型如下图6.21所示。其中的S函数见附录C。在图6.21中 $e(k)$ 、 $e(k)-e(k-1)$ 、 $e(k)-2e(k-1)+e(k-2)$ 分别代表着单神经元PID的比例、积分、微分项。输出后加的滞后环节将前一阶段的控制量 $u(k-1)$ 和此时产生的控制量增量式的 ΔU 相加构成此次的输出控制量 $u(k)$ 。

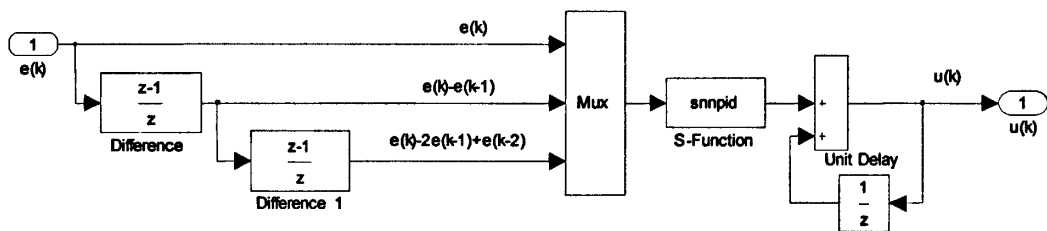
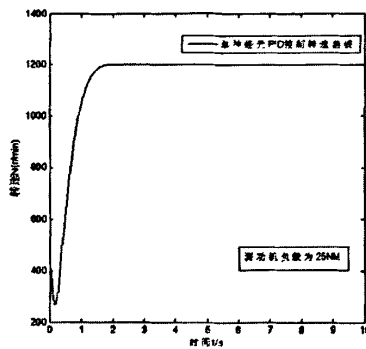


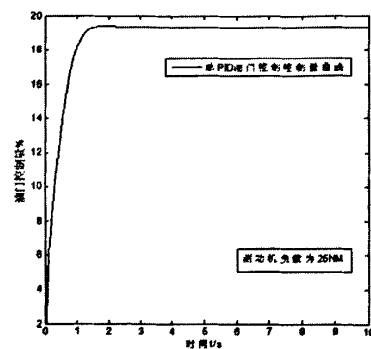
图 6.21 单神经元 PID 仿真模型

为了与传统PID控制算法进行比较，进行了负荷特性试验的仿真，通过不断调节比例系数K最终得到的 $K=0.0000065$ 。其它的参数如比例学习效率、积分学习效率、微分学习效率可以通过学习进行自我调整，对仿真的最终结果几乎没有影响。故取值为10、10、20。如图6.22所示，在图6.22(a)所示的转速曲线中，转速在经历过一个调整阶段后稳步上升，在2秒左右达到目标值且保持到控制结束。整个控制过程转速没有超调没有振荡，控制稳定性好。图6.22 (b)中油门控制量从最小开始快速增加到稳定值以后保持到仿真结束。整个控制过程没有明显的阶跃和突变，没有振荡和超调，具有良好的动态控制特性，比较符合实际系统的控制要求。与图6.17比较，单神经元PID控制反应速度较慢，但是整个控制过程没有超调，没有振荡，控制效果好，而且油门控制量效果明显好于传统PID控制。在如图6.23所示的负载突变的控制中，在仿真5秒时负载突变到50N.M时，转速出现了一个缓冲期，下降到1100转左右，然后缓慢回到设定值，油门控制量在负载突变后缓慢上调到新的稳定值，没有振荡和超调，控制稳定性好。图6.24所示速度曲线在目标转速发生改变后能及时的做出调整且较快的达到了新的设定目标转速，没有超调和振荡，

控制效果好。油门控制量曲线也在目标转速改变时从稳定值16N.m进行了及时调节，经过2秒左右的调整达到新的控制稳定值25N.m。

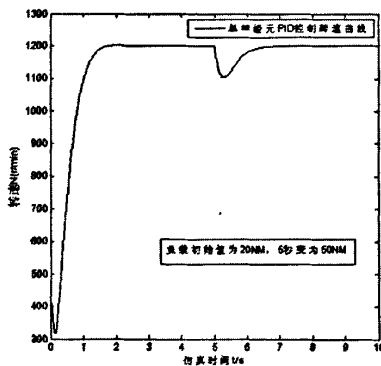


(a)转速曲线

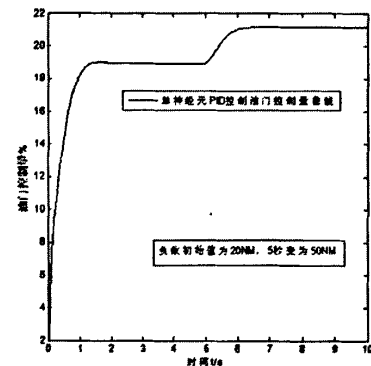


(b)油门控制量曲线

图 6.22 单神经元 PID 控制恒转速控制曲线

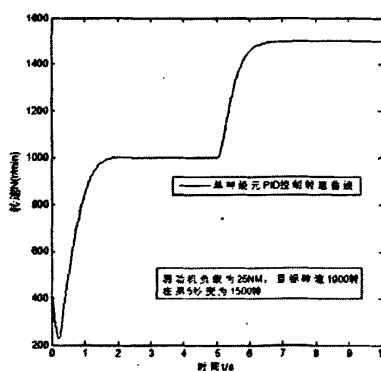


(a)转速曲线

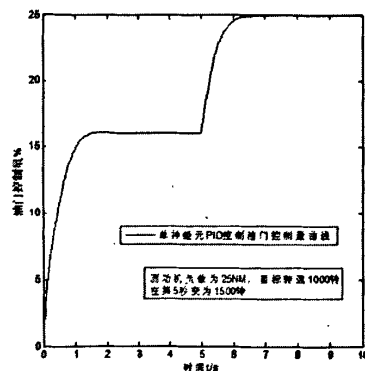


(b)油门控制量曲线

图 6.23 单神经元 PID 控制负载突变控制曲线



(a)转速曲线



(b)油门控制量曲线

图 6.24 单神经元 PID 控制转速突变控制曲线

与传统PID控制算法仿真结果的分析与比较，单神经元PID控制器具有以下特

点:

(1)采用单神经元自适应控制算法与PID相结合,融合了PID控制和人工神经元的优点,具有自我学习调整功能并且算法简单,适合进一步在实际工程开发。

(2)需要调节的参数少,对系统控制效果有影响的调节参数只有比例系数 K ,操作简单,根据系统的调节效果进行选择即可。而传统PID控制算法的参数调节很关键, K_p 、 K_i 、 K_d 都需要调节,而且不能在线调整。而且三者的选择需要依靠经验和对系统控制量的深刻理解,需要的时间长。

(3)单神经元PID控制器与传统PID控制器相比,此控制器适应性强、鲁棒性好,基本没有超调和振荡,但由于 K 值不能在线调整,为确保系统的控制效果避免超调, K 值一般较小,导致控制前期系统的响应速度较慢,通过上述实验结果比较,单神经元PID控制器响应速度比传统PID控制器要慢。

根据以上的仿真结果分析,单神经元PID控制的动态过程良好,且没有超调和振荡,适合于我们测功机系统的控制,但是它的响应速度较慢影响了它的控制效果,故根据单神经元PID控制的理论分析,提出了一种可以根据系统的误差在线调节单神经元PID的比例系数 K 的改良的单神经元PID控制算法。

6.5.3 单神经元 PID 算法的改良设计

单神经元自适应PID虽然可以调整权系数,但是它的比例系数却没有改变,不具备在线调整功能,最好应当使根据系统误差大小进行调整。由对系统动态过程的影响知道,在最初误差比较大时,就应当增大比例,使响应尽快追上给定值,但另一方面为了避免超调,在误差减小时要减小比例,以免系统振荡。因此,当偏差大时,控制量的改变应该比较大,相当于粗调过程。如果偏差小了,就必须让控制量的改变比较小,也就是说在一个很小的范围内变化,属于微调过程。因此采用一定的控制算法调节单神经元PID的比例系数,实现更优的控制品质。如图6.23所示,根据输入偏差值在线调整比例系数 K 值在系统控制的各个阶段的值。

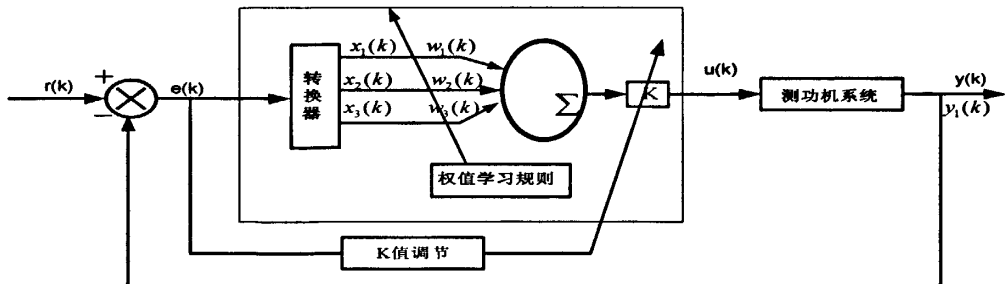


图 6.25 改良的单神经元 PID 测功机控制系统

对 K 的分析表明,应当在响应初期取较大的值,以提高响应速度;而在进入稳态以后, K 应逐步减少到某一稳定值,以保证系统不出现过大的超调量。为了满足上述要求,可以采用非线性变换法对 K 进行在线修改,调整公式如下:

$$K(t) = K_0 + \frac{\partial [e(t) - u(t)]^3}{e(t)^2} \quad (6.59)$$

式6.59中, K_0 为 K 的稳态值; ∂ 为误差参数, 其值视控制效果进行调整。取偏差的3次方是使偏差较大时 K 较大, 增加响应速度, 而偏差较小时, 后一项几乎不起作用, 以减小超调量。如图所以图(a)(b)(c)分别代表利用改良的单神经元PID对系统进行控制的恒转速控制、变负载控制、和转速突变控制的速度曲线图。

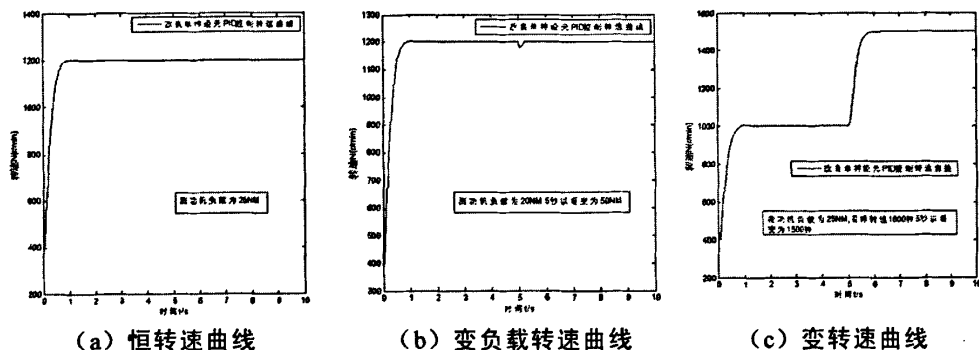


图 6.26 改良的单神经元 PID 控制转速曲线

通过与单神经元PID控制相比较具有以下的特点:

(1)在系统控制初期由于偏差量大, K 值增大, 系统的响应速度加快, 如图 6.26 所示, 基本能在一秒以内达到控制值, 且控制初期没有降速调整过程, 系统根据控制要求快速响应, 响应速度好于传统 PID 和单神经元 PID。

(2)由于只是对单神经元PID的比例系数进行调节, 所以它具有原单神经元PID的学习和自我调整功能, 对比图 6.26(b)和图 6.23(a)可知在负载突变时, 改良的PID控制由于负载突变导致偏差值增大, K 值增大, 响应速度快, 只有短暂的一个调整过程就达到了稳定值。

(3)增加了可调系数 ∂ , 在对改良的单神经元PID进行调节时, 先令 $\partial=0$, 调节 K 值使系统达到最佳的控制效果, 然后再慢慢的调整 ∂ 的值, 观察仿真曲线的超调和响应速度, 当系统出现的超调较小且响应速度快时, 选取此时的 ∂ 值。然后对 K 值进行一个比例的缩小, 一般在单神经元PID控制的 K 值的0.9左右。可以保证较好的控制效果。

通过上述的负荷特性试验的三种控制算法的仿真曲线的对比和分析可知, 单神经元PID控制器既具有传统PID控制器的结构简单、学习算法物理意义明确、容易实现等优点, 同时也具备神经网络的自学习、自适应等特点, 其实质为一变系数的比例、积分、微分复合控制器^[53]。它以一种简便的方式实现神经网络和PID控制的有机结合, 比传统的PID控制更具智能性, 在控制品质及对参数变化的适应性上要优于传统PID控制^[48]。通过改良的单神经元PID在系统的响应速度上又有了很大的提高。故能很好的对测功机系统进行控制。

6.6 本章小结

本章通过对整个交流异步电力测功机系统的数学模型进行分析，针对各个模型的实际参数和其在系统中的实际作用和相互影响，建立了各自的仿真模型，将各仿真模型根据系统的工作原理，采用了传统的 PID、单神经元 PID、改良的单神经元 PID 算法对系统进行了负荷特性试验的仿真分析，给出了相应的仿真曲线，通过对仿真结果的分析 and 比较选择了控制效果最好的改良的单神经元 PID 控制做为系统控制的算法。

第 7 章 模型仿真结果与实验结果的分析与比较

7.1 模型仿真与试验具备的条件

在第三、四章建立了整个系统的硬件与软件结构，第五章给出了系统的上位机程序和相应的转速控制算法以后，就完成了交流电力测功机系统的软硬件环境，具备完成发动机速度特性和负荷特性实验的条件，由于时间的关系我们采用的是传统 PID 控制算法对系统进行控制，得到了系统转速的实验曲线；在前文设计的基础上，在对系统的各个主要模块的数学模型分析后，第六章建立了系统的仿真模型，根据理论分析和测功机的控制情况下采用了传统 PID、单神经元 PID、改良的单神经元 PID 三种控制算法对系统的仿真进行控制。本章节分析和对比系统的实验曲线和仿真曲线，通过传统 PID 控制算法的仿真与实验曲线的比较验证系统仿真模型的正确性，通过单神经元 PID 与与实验的传统 PID 控制算法的对比来证明该控制算法的优越性和可靠性。在调试的基础上，本文进行了如下有代表性的实验和仿真：

(1) 负荷特性实验

负荷特性是指内燃机转速不变，其经济性指标随负荷变化的关系，以曲线表示，则这种曲线称为负荷特性曲线。实验方法是通过改变发动机的节气门开度，保持测功机转矩不变以保持转速不变，然后测取发动机的负荷和经济性能参数。

(2) 速度特性实验

速度特性是指内燃机性能指标随转速变化的关系，实验方法是在节气门开度 α 固定时测试某一转速下发动机的性能，通常只调整测功机转矩来改变发动机的转速，节气门在全开时所测的数据即代表该机在使用过程中允许的最高性能。

7.1.1 试验条件

1、被测摩托车发动机参数

发动机型号:钱江 125	额定转速和额定转矩:未知
输出轴转速范围:0~2800rpm	额定功率:10KW

2、测功电机主要参数

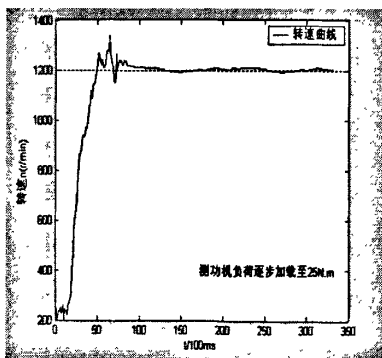
额定功率:10KW	额定电流:19.5A
额定电压:380V	额定转速:1800rpm
额定频率:61Hz	极对数 P:2

7.2 负荷特性实验与仿真

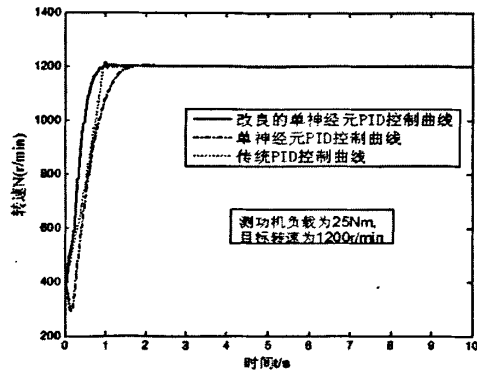
负荷特性实验同样包含两个方面，初始状态速度控制实验和运行中速度给定改变时系统的动态响应曲线。

负荷特性试验的控制框图见图 6.12。恒转速控制器依靠检测反馈转速与给定转速的差值给定的测功机转矩并不能在开始时由变频器全部加载至测功机，否则，摩托车发动机不能启动，因此，需要在节气门开度增加且摩托车发动机转速 $n \geq 800$ r/min 时，才能逐步增加载荷，为防止发动机熄火，造成“堵转”等严重后果，在上位机程序中有转速报警装置，当转速出现异常出现报警时，随即卸载而后关闭节气门，防止对测功电机造成损害。此过程控制过程与速度特性实验中的初始状态速度控制实验相似。实验时，设定转速为 1200 r/min，测功机电磁转矩为 25N.m，控制过程中转速数据如下图 7.1(a)所示，采用传统 PID 控制时，系统在控制初期有振荡，经历 0.5 秒后产生超调，超调量为 100r/min 左右，经历振荡后在 1.5 秒系统达到目标转速，稳定后，转速在 1200 ± 5 rpm 转内，满足控制的要求。

负荷特性试验仿真模型见图 6.14 所示。在系统的仿真模型中，根据负荷特性试验的要求，给定负载 25N.m，目标转速 1200 r/min，油门控制器的油门开度 throttle 通过传统 PID、单神经元 PID、改良的单神经元 PID 三种控制算法进行控制。具体的仿真 PID 参数见第六章。具体的仿真曲线见 7.1(b)所示。在图 7.1(b)中，传统 PID 控制曲线中系统能进行快速响应，转速在经历 20 转左右的超调和振荡在 1.8 秒以后趋向于目标值且保持到控制结束。通过与图 7.1(a)的实验转速曲线比较，PID 控制算法的响应过程基本相同，有超调和振荡且控制稳定时间都在 1 秒左右。在图 7.1(b)中的单神经元 PID 在控制初期由于 K 值较小响应速度较慢且有降速调节的过程，有轻微的超调，在 2 秒左右达到稳定值。整过过程没有振荡；改良的单神经元 PID 控制曲线在控制初期就快速响应，在 0.8 秒达到稳定值，无振荡有轻微超调，超调是由于参数 K 稍大所导致。



(a) 试验曲线图



(b) 仿真曲线图

图 7.1 负荷特性恒速仿真曲线图

下面我们考察系统的负荷特性的动态品质,做了转速从 1200r/min 到 1000r/min 的动态试验,在图 7.2(a)的试验曲线中,在控制转速发生改变时,系统在经历 0.8 秒左右的调整稳定在新的目标值,转速有振荡,最终转速范围也控制在目标值的 $\pm 5\text{rpm}$ 以内,满足实验的要求。如图 7.2(b)所示的三条曲线中,传统 PID 控制曲线在目标转速变化后响应速度最快,但是在经历过振荡调节后达到稳定值的时间在 1 秒左右,速度比单神经元 PID 控制快,比改良的单神经元 PID 控制慢 0.2 秒左右,改良的单神经元 PID 由于偏差值的增加不是很大,导致其响应速率没有传统 PID 控制算法快但是调整过程没有振荡的缓冲时间,能直接稳定在目标值,故实际控制时间比传统 PID 要短,体现出了良好的控制效果和响应速度。

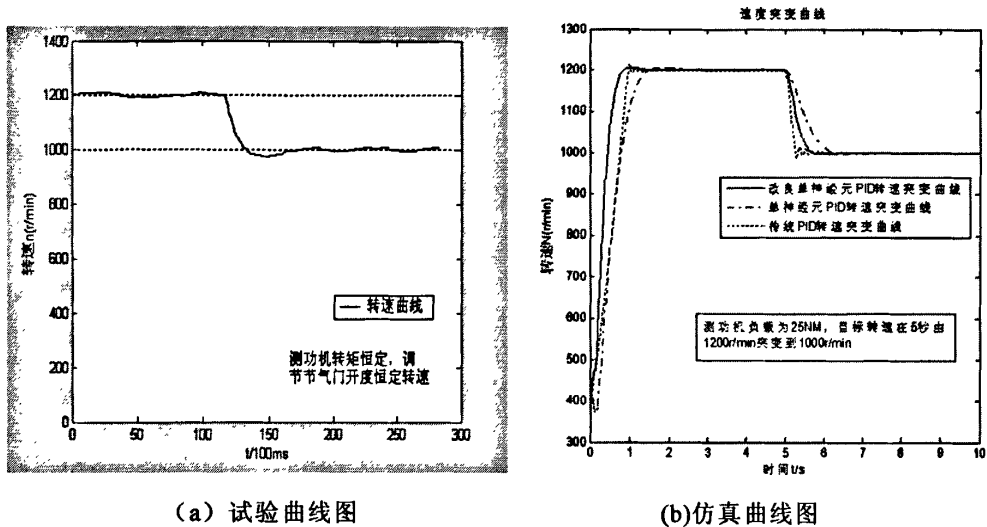


图 7.2 负荷特性转速突变仿真曲线图

通过上述分析和比较,证明了系统仿真模型的正确性,传统 PID 控制能满足实验的控制要求,但是其控制过程有振荡和超调,控制时间稍长(比单神经元 PID 短),而改良的单神经元 PID 在控制效果和控制时间上都优于传统 PID,故该算法适合于负荷特性的实验控制。

7.3 速度特性实验与仿真

速度特性实验也包含两个部分,初始状态速度控制实验和运行中速度给定改变时系统的动态响应曲线。

按照实验要求,发动机的节气门开度保持在固定的开度,继而对测功机转矩进行控制,然而,若将节气门开度直接打开至固定的开度,对单缸摩托车发动机来说,易在功率输出轴附近造成极大震动,这对与发动机相连的测功机和联轴器都会造成极大伤害,因此,实际实验要求,节气门开度需有步骤地进行开启,直

至达到设定的开度。这样，不会对测功机和联轴器造成冲击，为了使节气门达到固定开度的时间较短，且转速的超调较小，在本控制器中，控制程序在转速 500 r/min 时即开始作用，也就是在节气门开度未达到固定开度即进行控制，实验时为设定转速为 $n=1200\text{r/min}$ ，节气门开度为 50%，通过上位机程序调节油门开度，在油门开度由 0% 达到 50% 的过程中，利用双 CPU 控制板的串口通过 RS485 总线将数据传输到上位机程序中进行保存，同时对转速数据进行保存和监视。将保存的数据通过 Matlab 进行绘图，得到的曲线如图 7.3 (a)。图 7.3(a)中，在测功机负荷逐步加载到 25N.M 的过程中，实验曲线通过 1s 左右达到稳定状态，超调在 80 转左右，而且迅速下降到稳定值，有波动但是不大，能很好的稳定在 1200 转左右，达到了试验的要求。

图 7.3(b)中，控制初期系统响应速度较快(慢于单神经元 PID 与改良的单神经元 PID),传统 PID 转速曲线超调在 20 转左右，经过振荡后达到稳定值，整个调整时间为 1.4s，与 7.3(a)相比较控制过程基本相似，调整时间稍长，稳定后控制效果好。单神经元 PID 与改良的单神经元 PID 的响应速度都比较快，分别在 1.2s、1s 达到稳定值，控制效果好，超调小且没有振荡。

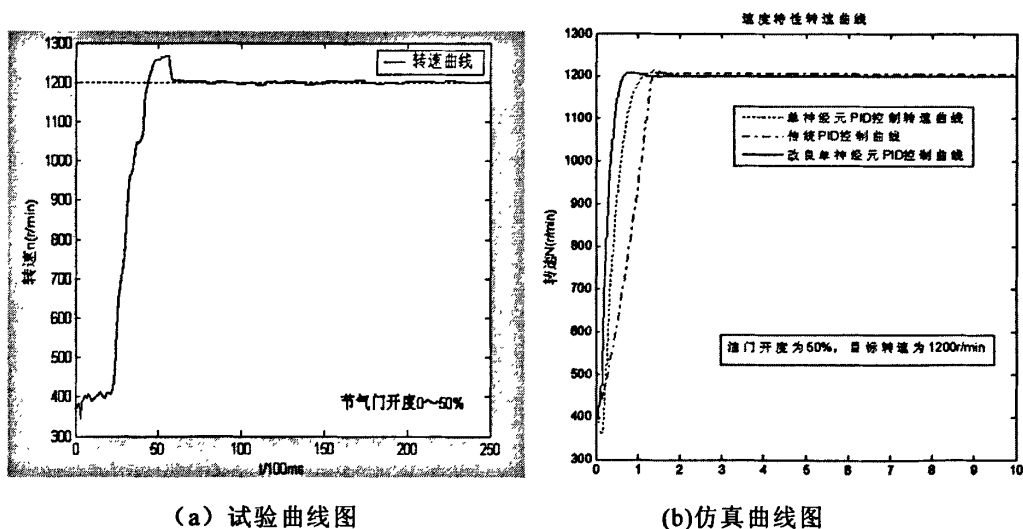


图 7.3 速度特性恒速仿真曲线图

图 7.4 所示为在速度特性实验条件下，目标转速由 1200 转上升到 1500 转的动态调整过程。在试验曲线图 7.4 (a) 中，系统快速响应，动态效果好，控制能快速稳定在新的设定值，在图 7.4 (b) 中，传统 PID 控制曲线响应速度最快，同图 7.2 所示，有振荡，控制效果最好的为改良单神经元 PID 控制算法。

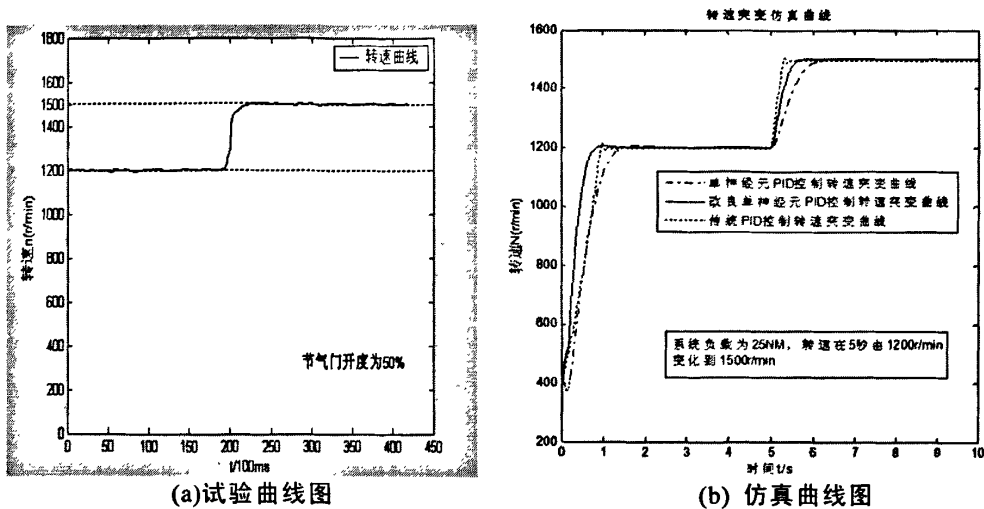


图 7.4 速度特性转速突变曲线图

通过试验曲线与仿真曲线的分析和比较，证明了系统是速度特性仿真模型的正确性，传统 PID 同样也能控制系统基本满足实验的控制要求，但是其控制过程有振荡和超调，控制时间稍长（比单神经元 PID 短），而改良的单神经元 PID 在控制效果和控制时间上都优于传统 PID，故该算法适合于速度特性的实验控制。

7.4 结果分析与结论

从以上实验结果可以看出，该转速闭环控制系统，能较好的控制转速在给定转速处稳定，且超调较小，稳态误差控制精度较高，在两种特性实验中，系统能较快达到所设定的状态。对于这两种特性实验来说，该控制系统可以满足其测试与控制要求。在仿真试验中，通过仿真的传统 PID 控制曲线与实验转速曲线相比较证明两种特性试验的模型的正确性。通过三种控制算法曲线的分析和比较，改良的单神经元 PID 控制器的控制效果好，无振荡，抗干扰强，故改良的单神经元 PID 控制算法是测功机系统控制的一个更好的选择。

结 论

交流电力测功机及其控制系统属于多学科交叉领域,涉及到机械、电机、电力电子、计算机和自动控制等领域的理论和知识,将先进的测试技术和控制理论运用于电力测功机控制系统,以提高发动机测试技术水平是测功系统研究的方向。本论文的研究是对基于摩托车发动机的交流异步测功机测控系统进行分析,根据工作的实际情况,对交流电力测功机系统的各个方面进行了说明,简要介绍了系统的双CPU硬件设计,详细阐述了基于模拟电路的油门控制器的设计,对系统的上位机程序的设计做了仔细的说明。针对系统各个模块之间的相互作用关系,分析了系统的数学模型,建立了基于simulink的交流异步电力测功机系统的仿真模型,最后对实验结果和仿真结果进行分析和比较,验证模型的正确性。

本文的研究工作主要体现在以下几个方面:

(1)详细地进行了测功原理研究,以“被测发动机—电力测功机”为中心,分析了测功系统各主要转矩量之间的关系,讨论了测功系统稳定运行的条件。

(2)分析了系统各模块之间的关系,给出系统各个模块的数学模型,对非线性多变量时变的模块如发动机,测功机,变频器等经过分析根据系统的实际情况进行了一定程度的简化,在此基础上建立了系统的仿真模型,根据负荷特性试验和速度特性试验的要求,采取不同的连接方式对系统进行仿真,采用传统PID、单神经元PID以及改良的单神经元PID对系统进行控制,得到系统的仿真输出曲线。对仿真结果进行分析和比较,选择适合于本控制系统的控制算法,通过仿真曲线与实验结果的分析比较验证仿真模型的正确性。

(3)对测功机系统的设计做了简要的说明,介绍了基于双CPU的交流电力测功机控制系统硬件结构,简要说明了系统的构成、工作原理和软件流程。由于本文重点不在整个系统的硬件设计,故不对具体的硬软件结构的设计与方案的选择进行详细的阐述,故只分析了双CPU的工作方式和双口RAM的作用,具体介绍了基于80C196KC的实时控制子系统与基于89S52的人机交换系统的组成,给出了系统软件结构框图。

(4)在分析了油门控制器的工作原理的基础上,通过对几种油门控制器设计方案的比较,选择了适合于测功系统的基于模拟电路的油门控制器的设计方案,并详细的对油门控制器的设计电路进行了说明,对调试过程中产生的问题以及其原因进行了分析,给出了油门控制器的实验结果,满足现有的异步测功机的系统要求。

(5)设计了基于LabVIEW的人机交互上位机程序,根据交流异步电力测功机系统的控制要求,设计了主程序流程图;根据LabVIEW软件编写的特点,对上位机

程序分模块进行阐述。在数据采集模块方面，重点介绍了系统通讯协议的安全性和数据的滤波处理方法，最后对数据的处理给出了Labview与Excel结合的报表处理的方法。

当前论文工作在如下几个方面需要改进与发展：

(1) 系统的仿真模型方面还需要进一步的完善，系统的发动机模型采用的是平均值模型，模型中很多给定的参数是参考同种类别发动机的参数，以后要通过试验进行修正。系统的控制算法采用的改良的单神经元PID算法，此算法对K值的调节还很粗糙，应该在试验的基础上根据实验的数据利用模糊理论建立K值和系统偏差之间的隶属函数，对K值进行最优化处理，优化系统的控制过程。

(2) 系统的硬件设计方面采用的是基于双CPU的硬件结构，其中主要处理数据的采集和算法的计算处理为芯片80C196KC，以后将采用专门处理数据计算的DSP芯片，提高系统的整体处理数据的能力。对现有的测量模型和控制算法进行改进，使其更好的满足发动机工况的变化，具有研究的现实意义。

(3) 油门控制器的设计主要是针对实现直流力矩电机的驱动和对油门控制器的控制主功能的实现，在反馈信号的处理方面还有待提高，应该有选择性的增加一些滤波环节，系统的控制精度应在电路的设计方面进行改进争取进一步的提高，系统的响应速度和稳定性也应在电路的设计方面做长足的考虑。系统的报警和调节指示灯等电路的设计也应集成到控制器中去。

(4) 系统的上位机程序的设计需要针对每个试验有独立的算法和数据的存储和报表处理方式，在现有程序的基础上根据试验的需要对报警系统的参数进行修改和调整。

(5) 由于系统恶劣的工作环境、机械检测装置自身结构和安装等方面固有的缺陷，如转矩传感器安装同轴度要求很高等，导致系统结构的复杂化和成本增加，而且本文转速、转矩是两个难以精确检测、控制的重要物理量。因此，利用便于检测的非机械量(如测功电机的电流、电压等)进行电力测功机系统转速、转矩的检测与控制具有很大的研究意义和实际价值，这将使交流电力测功机具有其他任何类型的测功机无法比拟的优点，它代表交流测功机控制系统研究的另一个新的方向。

参 考 文 献

- [1] 董敬, 赵斯重, 邓楚南等. 摩托车测试技术. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1992: 25-29
- [2] 卢春霞, 李平, 王奎顺, 段永红. 摩托车发动机试验平台测控系统的研制. 机械工程与自动化, 2005, (1): 74-76
- [3] 吴克刚, 曹建明. 发动机测试技术. 北京: 人民交通出版社, 2002: 22-35
- [4] 严兆大. 内燃机测试技术(修订版). 杭州: 浙江大学出版社, 1993: 102-124
- [5] 李宗帅, 董春, 刘颜. 国内外电力测功机发展现状. 电机控制与应用, 2007, 34(5): 1-4
- [6] 程京平, 祖炳洁, 郑明军等. 电涡流测功机的原理与应用. 石家庄铁道学院学报, 1999, (9): 77-79
- [7] 关强, 牡丹丰. 小型发动机测功机发展现状. 森林工程, 2006, 22(4): 24-57
- [8] 曾利权, 高文捷, 杨传泰. 平衡式电力测功机的精度分析. 湖南大学学报, 1989, 16(3): 21-28
- [9] Elin. APA-Asynchronous Squirrel Cage Dynamometer. AVL List Co.Ltd, 1996: 11-12
- [10] 曾利权等. 内燃机试验能量回收问题的探讨. 现代节能, 1989, (1): 11-21
- [11] Williamson A.C. Al-Khalidi K.M.S. An Improved Engine-testing Dynamometer. Electrical Machines and Drives, 1989: 374-378
- [12] 蒋强, 张光辉. 基于计算机的电力测功机自动测控系统. 机械, 2002, 29(5): 51-55
- [13] 徐萍萍, 宋建国, 王雁峰等. 电力测功机动态测试平台. 北京工业大学学报, 2007, 33(6): 582-586
- [14] 李华德. 交流调速控制系统. 北京: 电子工业出版社, 2002: 177-182
- [15] 李永东. 交流电机数字控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2002: 103-137
- [16] 陈桂明, 张明照, 戚红雨, 张宝俊. 应用 MATLAB 建模与仿真. 北京: 科学出版社, 2000: 12
- [17] 周建华, 黄燕. MATLAB4.3学习教程. 北京: 北京大学出版社, 2000: 10
- [18] Dotoli M. Fuzzy Idle Speed Control. Dept of Automation. 1997, 97, Part Tech. Rep: 858.
- [19] C.Manzie, M.Palaniswami, H.Watson. Gaussian networks for fuel injection control. Proc Instn Mech Engrs 2001, 215: 1053-1068
- [20] 刘恒. 孟瑞丽. 基于SIMULINK的汽油机速度模型与仿真. 汽车科技, 2006,

(5): 11-14

- [21] 宫文斌, 刘昕晖, 魏中奎. 发动机油门控制器的开发. 吉林大学学报工学版, 2005, 35(1): 49-51
- [22] 左承基, 欧阳明高, 刘峥, 张华. 发动机测功器系统的动态仿真. 设计·计算·研究, 1998, (2): 26
- [23] 孙涵芳. Intel 16位单片机. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002: 125-129
- [24] 居长江, 李高强, 康勇. 双口RAMIDT7130在全数字化交流调速系统中的应用. 电子技术应用, 1996, (10): 46-48
- [25] 杨智. 自整定PID调节器设计方法. 甘肃工业大学学报, 1998, 24(1): 77-82
- [26] 徐强. 脉宽调速系统. 上海: 上海科学文献出版社, 1983: 12-25
- [27] 程明, 林明耀, 张润和等. 微特电机及系统. 北京: 中国电力出版社, 2004: 25-36
- [28] 李清泉、黄昌宁著. 集成运算放大器原理与应用. 北京: 科学出版社, 1980: P196-217, P291-313
- [29] 康华光, 陈大钦. 电子技术基础(第四版). 北京: 高等教育出版社, 1998: 8
- [30] 谢勤岚, 陈红. 基于 80C196KC 的电机转速测量. 交通科技, 2003, (2): 91-93
- [31] 曲学基, 王增益, 曲敬铠. 稳定电源电路设计. 北京: 电子工业出版社, 2003: 61-65
- [32] Marty Brown. 电源设计指南. 沈德鸿, 沈旭, 译. 北京: 高等教育出版社, 2005: 45-48
- [33] 石博强, 赵德勇, 李畅等. LabVIEW 5.1 编程技术实用教程. 北京: 中国铁道出版社, 2002: 135-277
- [34] 叶盛, 何勇, 徐晓明. 基于虚拟仪器技术的发动机测控系统的研究. 浙江大学学报, 2003, 29(5): 575-578
- [35] 王宏伟, 刘清华, 王哲. 虚拟仪器技术在发动机测试系统的应用研究. 柴油机, 2001, (5): 30-33
- [36] 朱建平, 吕春峰. 基于LabVIEW 的单片机串口通信实现. 北京: 机械工程与自动化出版社, 2008: 8
- [37] 汪翠英, 裴锋. LabVIEW中Excel报告生成功能开发. 仪表技术, 2005, (3): 60-64
- [38] 戴鹏飞, 王胜开, 王格芳等. 测试工程与LabVIEW应用. 北京: 电子工业出版社, 2006: 51-54
- [39] 黎英等. 基于MATLAB\SIMULINK的异步电机建模与仿真. 电气传动自动化, 1999, (3): 35-37
- [40] 刘文良. Simulink中一般模型的创建方法及其在系统仿真中的应用. 天津轻

工业学院学报, 1999,(4):22-24

- [41] 王玉良. 微机原理与接口技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000: 280- 308
- [42] 王绍增. 发动机台架试验微机测控系统的开发. 林业机械与木工设备, 2001, (1): 18-20
- [43] 亿特科技. CPLD / FPGA应用系统设计与产品开发. 北京: 人民邮电出版社, 2005:74-76
- [44] 王建锋, 叶传良, 徐耀良等. 双口RAM IDT7130在数据采集系统中的应用. 上海电力学院学报, 1997, (3) : 51-55
- [45] 李哲英. 现代电子系统小功率直流稳压电源设计. 北京: 中国铁道出版社, 1996:15-18
- [46] 曹俊. 用LM317制作家用高品质稳压电源. 家用电器, 2002, (6): 46-48
- [47] K.JHunt. Neural networks for control systems-A survey. Automatica, 1992, 28(5) : 1083-1112
- [48] 刘金馄. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真. 北京: 电子工业出版社, 2004:97-99
- [49] Tjokro S, Shah S L. Adaptive PID Control. Proceedings of the 1985 American Control Conference . 1985: 1528-1534
- [50] 王永骥, 涂健. 神经网络控制. 北京: 机械工业出版社, 1998:51-66
- [51] Lin J-S, Kanellakopoulos I. Nonlinear design of active suspensions. IEEE Control System Magazine, 1997, (17): 45-59
- [52] Astrom.K.J, HagglundT, HangCC, HoWK. Automatic tuning and adaptation for PID Controller-A survey. Control Eng. Practice, 1993, 1(4): 699-714
- [53] 徐中, 孙伟, 刘晓冰. 单神经元自适应 PID 控制器的研究. 大连理工大学学报, 2006,(4):41-48
- [54] Junzhi Zhang, Qingchun Lu. Study on the Engine Dynamic Testbed. Vehicle Electronics, 1999, (1): 406-409
- [55] Koustas J, WastonN. A Transient Diesel Testbed with Direct Digital Control. SAE840347: 201-215

致 谢

在本论文即将完成之际,我的心情无法平静。从开始进入课题到论文的顺利完成,是可敬的老师、父母、同学给予我莫大的支持和帮助,陪伴我走过求学路程。

首先,对我的导师张桂香老师表达最诚挚的谢意!在研究生学业期间,张老师不仅在学业上悉心指导我们,在生活中也给予我们无微不至的关心和照顾,既是良师,亦是益友,令我终身难忘。本课题在选题及研究过程中得到张老师的悉心指导。张老师多次询问研究进程,并为我指点迷津,帮助我开拓研究思路,精心点拨、热忱鼓励。张老师一丝不苟的作风,严谨求实的态度,踏踏实实的精神,不仅授我以文,而且教我做人,虽历时三载,却给以终生受益无穷之道。对张老师的感激之情是无法用言语表达的。在此,我对张老师致以最深的敬意!

很庆幸,在研究生求学期间遇见敬爱的曾利权教授,他对严谨的治学态度、平易近人的待人风格、正直善良的高尚情操将是我一生的榜样,必将在今后的事业中鼓励、鞭策我。

感谢我的父母,焉得谖草,言树之背,养育之恩,无以回报,你们永远健康快乐是我最大的心愿。

感谢我的岳父岳母,在此期间他们对我的照顾和关心是我坚持下去的勇气。

感谢我的妻子张曦,她无微不至的关心让我有更多的精力投入到学习和论文中去。

此外,要感谢陈鸿蔚博士的在这三年来对我学习生活的帮助和指导,感谢田永建博士、周之光博士、以及陈小辉、宋立杰、高峰同学和吴绪成等师弟和师妹们,感谢你们对我课题研究、学习和生活的帮助与支持。

衷心祝愿张桂香老师,曾利权老师和我的亲人身体健康!愿我所有的朋友们幸福安康!

赵杰

2009年4月于湖南大学

附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

- [1] 赵杰, 张桂香, 吴绪成. 基于PLC的车门焊接生产线系统的设计. 计算机测量与控制. 已录用

附录 B 交流异步电力测功机的 S 函数

```

function [sys,x0,str,ts] = csfunc(t,x,u,flag)
A=[-64.4695,61.5474,0,0;10.9885,-11.3738,0,1400*2*pi*2/60;0,0,-64.4695,61.5474;0
,-1400*2*pi*2/60,10.9885,-11.3738];
B=[1,0;0,0;0,1;0,0];
C=[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1;230.2752,-215.48,0,0;0,0,230.2752,-215.48];
D=[0,0;0,0;0,0;0,0;0,0;0,0];
switch flag,
    case 0,
        [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
    case 1,
        sys=mdlDerivatives(t,x,u,A,B,C,D);
    case 3,
        sys=mdlOutputs(t,x,u,C,D);
    case { 2, 4, 9 },
        sys = [];
    otherwise
        error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes(A,B,C,D)
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 4;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 6;
sizes.NumInputs = 3;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = zeros(4,1);
str = [];
ts = [0 0];
function sys=mdlDerivatives(t,x,u,A,B,C,D)
A=[-64.4695,61.5474,0,0;10.9885,-11.3738,0,u(3)*2*pi*2/60;0,0,-64.4695,61.5474;0,

```

```

-u(3)*2*pi*2/60,10.9885,-11.3738];
B=[1,0;0,0;0,1;0,0];
C=[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1;230.2752,-215.48,0,0;0,0,230.2752,-215.48];
D=[0,0;0,0;0,0;0,0;0,0;0,0];
sys = A*x + B*[u(1); u(2)];
function sys=mdlOutputs(t,x,u,C,D)
A=[-64.4695,61.5474,0,0;10.9885,-11.3738,0,u(3)*2*pi*2/60;0,0,-64.4695,61.5474;0,
-u(3)*2*pi*2/60,10.9885,-11.3738];
B=[1,0;0,0;0,1;0,0];
C=[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1;230.2752,-215.48,0,0;0,0,230.2752,-215.48];
D=[0,0;0,0;0,0;0,0;0,0;0,0];
sys = C*x + D*[u(1); u(2)];

```

附录 C 单神经元 PID 的 S 函数

```
function [sys,x0,str,ts] = snnpid(t,x,u,flag,ap,ai,ad,k)
```

```
switch flag,
```

```
    case 0,
```

```
        [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes;
```

```
    case 1,
```

```
        sys=mdlDerivatives(t,x,u);
```

```
    case 2,
```

```
        sys=mdlUpdate(t,x,u,ap,ai,ad,k);
```

```
    case 3,
```

```
        sys=mdlOutputs(t,x,u,ap,ai,ad,k);
```

```
    case 4,
```

```
        sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
```

```
    case 9,
```

```
        sys=mdlTerminate(t,x,u);
```

```
    otherwise
```

```
        error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
```

```
end
```

```
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes
```

```
sizes = simsizes;
```

```
sizes.NumContStates = 0;
```

```
sizes.NumDiscStates = 3;
```

```
sizes.NumOutputs = 1;
```

```
sizes.NumInputs = 3;
```

```
sizes.DirFeedthrough = 1;
```

```
sizes.NumSampleTimes = 0;
```

```
sys = simsizes(sizes);
```

```
x0 = [0.5 0.5 0.5];
```

```
str = [];
```

```
ts = [];
```

```
function sys=mdlDerivatives(t,x,u)
```

```
sys = [];
```

```
function sys=mdlUpdate(t,x,u,ap,ai,ad,k)
```

```
sys(1) = x(1)+ai*u(1)*u(1);    %u(1)=e(k)=r(k)-y(k)
sys(2) = x(2)+ap*u(1)*u(2);    %u(2)=e(k)-e(k-1)
sys(3) = x(3)+ad*u(1)*u(3);    %u(3)=e(k)-2(k-1)+e(k-2)
function sys=mdlOutputs(t,x,u,ap,ai,ad,k)
sys = k*(x(1)*u(1)+x(2)*u(2)+x(3)*u(3))/(abs(x(1))+abs(x(2))+abs(x(3)));
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)
sampleTime = 0.0167;
sys = t + sampleTime;
function sys=mdlTerminate(t,x,u)
sys = [];
```

交流异步电力测功机系统的设计与建模

作者：[赵杰](#)

学位授予单位：[湖南大学](#)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1510646.aspx

授权使用：黑龙江工程学院(hljgcxy)，授权号：c55ec6c5-23da-42fc-b761-9e9a0136ba68

下载时间：2011年3月2日