

华中科技大学

---

硕士学位论文

---

基于CAN总线的电模拟摩托车底盘测功机的研究

---

姓名：孔国初

---

申请学位级别：硕士

---

专业：计算机技术

---

指导教师：陈传波

---

20051110

# 华中科技大学硕士学位论文

---

## 摘要

在摩托车的开发研究过程中,对摩托车的各种性能试验是一项必不可少的重要工作。摩托车底盘测功机是摩托车整车室内试验中最常用的大型关键设备之一,它用途广泛,能进行摩托车动力性、经济性、排放分析及可靠性等多方向、多领域的试验研究。目前,国内外众多有实力的摩托车制造公司及科研检测机构都已配备了一定功能的底盘测功机,随着我国摩托车生产企业准入制度的实施,底盘测功机已成为各摩托车企业必须配备的关键设备之一。根据底盘测功机具有惯性载荷模拟装置,如机械式的飞轮机构或电气方式,即与道路载荷相同的模拟方式(电涡流机吸能装置等),模拟各种车辆的惯性载荷(包括平移质量和转动部件产生的惯性阻力)。分析如何正确进行加载,以保证底盘测功机能够准确模拟被检车辆的行驶状态,确保测试的准确性。为此,在正确分析摩托车在道路上行驶时所受到的阻力(空气阻力与车轮滚动阻力、传动系摩擦阻力之和)与车速的模型后,就涡流制动器在摩托车底盘测功机上电模拟再现摩托车的行驶阻力进行了初步研究,提出了利用电涡流制动器作为摩托车底盘测功机电模拟加载的方法。设计了一种新的制动强度可以无级调节的电涡流制动器,进行了其工作原理、软件及硬件的设计。并且通过试验验证了其制动力矩的调节能力及限流功能。同时还得到了制动器励磁电流与其提供的制动力矩之间的关系,该关系为进行摩托车底盘测功机电模拟加载提供了试验依据。设计了一种高性能脉宽调制(PWM)直流伺服系统,该系统在电涡流制动器工作时为底盘测功机提供制动力,以确保正确加载,模拟道路工况。设计了基于CAN总线的摩托车底盘测功机的数据采集与控制系统。

**关键词:** 底盘测功机、电模拟、脉宽调制系统(PWM)、CAN总线

## Abstract

In the motorcycle's development and research , a all-around performance's testing is a necessary work . The chassis dynamometer is one of the key equipments which are in common used. It is widely used to test motorcycle's performances ,such as power performance ,fuel economy,emission analysis and reliability . At present , some capable motorcycle factories are equipped with chassis dynamometers with certain functions as well as some scientific research institutions and testing centers. With the implementation of motorcycle manufacture admittance, chassis dynamometer became a necessary equipment for motorcycle factories . Chassis dynamometer was equipped with inertia load simulation device such as flywheel device in machine mode or other electric device . Simulating in the same way of road loading, such as electromagnetic energy absorbing device .The device can simulate inertia load of various vehicles , including transfer mass and inertia resistance of rotation parts. The method of loading directly effect whether the chassis dynamometer can correctly simulate the working condition of testing vehicle ,as well as the testing veracity. Therefore, after analyzing the relationship model of resistance and velocity of a real road moving motorcycle, we made some basic research on how to electro-simulate the driving resistance with electromagnetic retarder in the chassis dynamometer. We did the following work:

Proposed a electro-simulation method to load motorcycle chassis dynamometer with electromagnetic retarder. Designed a kind of electromagnetic retarder ,whose braking intensity can be adjusted continuously. Developed the software and hardware based on its working principle. Validated its braking torque adjusting ability and the current limit function. At the same time, got the relationship of the retarder excitation current and its braking torque. According to this relationship, we carry out electro-simulation loading correctly in the chassis dynamometer.

# 华中科技大学硕士学位论文

---

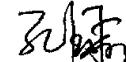
Designed a kind of high performance PWM DC servo system. When the electromagnetic retarder worked, this system offered the chassis dynamometer braking force, to make sure loading correctly and simulate the road condition.

Designed a data acquiring and controlling system based on CAN bus for motorcycle chassis dynamometer.

**Key Words:**      Chassis Dynamometer      Electro-simulation  
                        Pulse-Width Modulation      CAN Bus

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，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结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期：2005年11月10日

## 学位论文版权使用授权书

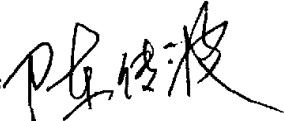
本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密口，在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。  
本论文属于 /  
不保密口。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

日期：2005年11月10日

指导教师签名：

日期：05年11月10日

## 1 绪 论

摩托车底盘测功机是一种综合运用现代检测技术、电子技术、计算机应用技术、自动控制技术，在台架上模拟摩托车道路行驶工况，并完成各种性能试验的大型检测系统。底盘测功机既能担负车辆动力性、经济性、可靠性和安全环保等方面的检测，又能担负车辆维修质量的检测以及在用车辆技术状况的检测评定，还能承担摩托车的科研、开发方面的性能试验和参数测试，检测项目广泛且有深度，能为车辆使用、维修、科研、教学、设计、制造等部门提供可靠技术依据<sup>[1]</sup>。

### 1.1 选题的意义

为保护环境，控制机动车尾气对大气的污染，2002年我国颁布了车用点燃式发动机及装用点燃式发动机汽车排气污染物排放限值及测量方法（GB14762—2002）、摩托车排气污染物排放限值及测量方法（工况法）（GB14622—2002）、轻便摩托车排气污染物排放限值及测量方法（工况法）（GB—18176—2002）、摩托车和轻便摩托车排气污染物限值及测量方法（怠速法）（GB-14621-2002）等标准。并于2003年1月1日起执行。特别是国标GB18285-2005于2005年7月1日开始强制实行，上述标准的强制执行都需要底盘测功机作为检测手段。

根据国家发展与改革委的要求，我国摩托车行业已实行行业准入制度，获得生产资格的企业都必须装备摩托车底盘测功机。目前，我国摩托车行业底盘测功机大部分是从日本及欧美国家引进的，因各国标准不一，因此难以全面贯彻执行国家标准。为了全面贯彻新国标，提高我国摩托车行业的竞争力，研制新型的底盘测功机是有非常好的现实意义的。

用于摩托车检测维修作业的底盘测功机，一般都不只是简单的检测摩托车的输出功率，而是还要具有满足检测维修作业需要的其它功能，主要有：

- (1) 测量摩托车驱动轮输出功率。

- (2) 检验摩托车滑行性能。
- (3) 检验摩托车加速性能。
- (4) 检验车速表误差。
- (5) 配备油耗仪的底盘测功机可以在室内模拟道路行驶，测量等速油耗。

测定摩托车驱动轮输出功率是底盘测功机最基本的功能。而模拟运行工况衍生检测摩托车排放污染物等功能，一般通用的底盘测功机均不具备，只有具备高精度阻力设定控制系统的专用底盘测功机才具有这样的功能<sup>[2]</sup>。

本课题“基于 CAN 总线的电模拟摩托车底盘测功机”就是针对目前中国摩托车企业的现状所提出来的，由于国家对摩托车生产准入的要求越来越严格，摩托车企业配备底盘测功机也是形势所需。

## 1.2 研究现状

与传统的道路试验相比，在室内模拟路试工况用底盘测功机完成有关的摩托车性能试验具有节省时间、降低费用、测量重复性好、精度高、数据稳定、可比性好、安全可靠等优点，目前，底盘测功机已经在工业发达国家，在汽车制造业、汽车维修业、环保排放检测，乃至车辆更新报废判定等工作中，获得了广泛的应用。以美国为例，2000 年仅用于环保汽车排放检测工作中的底盘测功机即高达 6000 台以上，而美国野马公司宣称，其测功机产量即达每周 150 台。中国汽车维修企业总数约 37 万户，其中一类维修企业，按 5% 计，约 1.8 万户。根据交通部关于汽车维修企业设备配置的规定一类维修服务企业及综合性能检测站均必须配备底盘测功机<sup>[3]</sup>。

国外的汽车底盘测功机的研究和生产经历了机械式、模拟电子式、数字测控式和计算机控制式这几个阶段。德国申克公司生产的汽车底盘测功机，它自己带有的全套控制模式能实现数字控制等模拟控制转速、滑行等功能，但是对人员的素质要求较高，试验周期长，自动化程度低；它的试验数据登陆部分，只对数据作低层次的处理；在打印机上不加选择的输出，需辅以大量的手工处理，才能得到所需要的

# 华中科技大学硕士学位论文

---

试验结果报告<sup>[4]</sup> [5]。

国内引进的大多是日本模拟电子式底盘测功机。1981年，天津公共汽车公司三厂和交通部脚踏科学研究院参考引进日本弥荣的CDM-310型底盘测功机，研制出汽车性能试验台。1991年，交通部公路研究所和成都汽车保修机械厂制成DCG-10A汽车底盘测功机，结束了我国不能生产底盘测功机的历史。汽车底盘测功机在我国已经有一些企业生产了一系列的产品，但是对于摩托车底盘测功机的研究却还不是很多。而国外已经有比较成熟的产品，但是这些产品在使用的过程当中都存在着一些问题，因此国内的研究现在主要集中在控制系统这一部分，因为机械部分都是非常类似的

华中科技大学开发了一种基于PC486微机并结合模拟调节器的直流电力底盘测功机，这种三轴六轮驱动直流电力底盘测功机（每轴带有两个直径0.8m的转鼓），可实现单轴、双轴或三轴驱动。基本上可对各种中小吨位的汽车进行道路模拟实验。前转鼓和后转鼓分别由两台直流电机驱动，第三轴则根据需要，通过离合器由后轴电机驱动或分离。三根轴的间距可调。由于前后转鼓是独立驱动的，因此可以实现轴间有力差或轴间有速度差的汽车的道路模拟实验，也可以实现一根轴驱动，而另一根轴随动的伺服驱动方式。控制方式灵活，既可由转鼓在某种恒定速度下反拖汽车行驶，实现传动系统摩擦损失的测量研究，又可以对汽车在不同速度情况下的道路阻力进行模拟，施加给电机而完成汽车动力性及经济性的研究。

清华大学自动化系开发了一种多功能汽车底盘测功机，其控制微机采用高性能的工业控制计算机，通过对传统控制系统和控制方法进行改进，采用经验控制和自适应控制相结合的控制方案实现了不同工况不同负荷下动力性能的连续测量并且增加了排放的连续测量功能。

TL-DCG-60型底盘测功机是武汉汽车工业大学、华南理工大学和广东省南海市闻拓高科技有限公司联合开发的产品。该底盘测功机的加速性能采用了电模拟方式，由测量系统对汽车加速过程中的车速、加速度实现实时检测，并由计算机依据行驶阻力的理论公式控制电涡流测功机实时生成各种行驶阻力，实现模拟加载。电涡流

测功器由定子和转子两部分组成，在定子四周装有励磁线圈，转子作为电磁盘与试验装置的主动滚筒想连。当励磁线圈通过直流电流时，就产生了磁场，而在该磁场中主动的转子盘上就产生了涡电流，又由于涡电流和定子的磁场之间相互作用，因而对转子盘产生一个制动力矩。只要控制电涡流测功器励磁线圈的电流大小，就可以改变对滚筒施加的制动力矩，该力矩等于作用于驱动轮上的旋转力矩。这就是电模拟的原理。

天津大学的DPC-1型摩托车底盘测功机于1999年9月通过天津市科委主持的市级鉴定。其主要性能指标优于国标GB/T14622-93和行标QC/T-93(这是比较老的标准)的要求，设计水平和测量精度均达到国外同类产品水平，它的研制成功填补了国内摩托车底盘测功机的空白，属国内首创，处于国内领先水平。

DPC-1底盘测功机采用全数字四象限运行的直流调速电机在检测设备和工控机控制下，再现道路行驶阻力，模拟匀速、变速、爬坡各种状况的道路阻力和惯性力作用；采用机械惯量和电惯量模补偿相结合的方法，实现无级差地模拟受试车的惯性作用；采用配有能耗制动单元的变频控制器，控制风速，达到风速跟踪的要求。

西安交通大学的交流底盘测功机的控制系统由一台下位工控机和一台PLC来协调整个控制功能，PLC主要实现各种逻辑切换控制功能；下位工控机主要用作道路阻力设定器的功能，实时计算得到当前应该给定的阻力大小并送至变频器。两台变频器分别用于控制冷却风机和测功机。

还有其他一些单位也开发了一些同类的产品。这些产品在实际的科研和生产中已经发挥了作用。但这些产品的功能的可扩充性不是很好，而且不能很好的适应新的国家标准<sup>[6]</sup>。

## 1.3 研究方案

我国生产底盘测功机的历史虽然已经超过15年，但主要集中在汽车使用和维修用的底盘测功机，而现在国内已经有部分研究单位已经在研究环保测量汽车摩托车排放专用底盘测功机。国内生产的主机（机械部分）已接近并在某些主要指标方面

# 华中科技大学硕士学位论文

---

达到或超过进口设备水平，主要差距仍然在测控系统的硬件和软件方面<sup>[7]</sup>。因此我在参与这次课题开发的过程中将自己的重点放在了测控系统的硬件和软件的设计方面。

对底盘测功机的要求主要有以下几个：

在底盘测功机上再现车辆道路行驶阻力；冷却风速跟踪车速变化；模拟变速工况中的实际惯性力。

因此针对国标对底盘测功机的要求以及考虑到行业的需求，本课题的研究方案主要特色是在硬件和软件方面的设计。硬件方面的设计的主体方案是采用 CAN 总线作为硬件系统的数据采集、参数控制以及传输总线，单片机的程序主要用 C 语言进行编写，这样有利于程序的移植和修改，同时应用模块化编程，使得程序的可读性强，修改和维护方便。上位机与下位机的通讯采用 CAN 转 USB 的接口，从而达到传递速度快，连接方便。上位机的控制软件则采用 delphi 进行编写。

由于摩托车底盘测功机需要测量的参数非常多，而且也非常分散，而其中一些参数也是底盘测功机的控制系统所必需的控制变量，因此将这些参数迅速测量出来并且送到 PC 机中进行处理就显得非常重要<sup>[8]</sup>。本文介绍的基于 CAN 总线的摩托车底盘测功机控制系统，将 CAN 总线应用到底盘测功机中，CAN 节点只需要用两根信号线就可以实现对摩托车底盘测功机所有数据的采集传输，使得传输线路大大简化，可靠性得到极大提高，有效的节约了线束安装空间和系统成本，而且有利于摩托车底盘测功机朝着规范化、智能化、网络化方向发展。将 CAN 总线应用到摩托车底盘测功机上可以使测功机的控制系统更加先进可靠，同时还具有良好的扩展性。

## 1.4 本文的主要内容

综述了底盘测功机的发展历史以及现状，阐述了开展本课题的重要性、必要性以及本课题的目标、任务、研究思想。

介绍了底盘测功机的整体设计。主要有机械部分的尺寸设计以及电涡流测功机的选取以及整个试验台架的搭建。

# 华中科技大学硕士学位论文

---

分析了摩托车底盘测功机的力学模型，从理论上对摩托车在底盘测功机上的运动和道路上的运动进行了分析，从而为底盘测功机的道路阻力模拟提供了理论基础。

介绍了底盘测功机的控制系统的硬件设计及组成，主要有三个节点的设计以及一些控制信号电路的设计。

介绍了该底盘测功机的控制策略以及下位机、上位机的软件的设计编写。

主要是在台架上对整个控制系统转速以及闭环响应进行了验证。

探讨了测功机存在的不足以及对测功机进行扩展。并就进一步提高系统的性能提出了建议和思路。

## 2 底盘测功机的设计

底盘测功机的主要功能是按照给定的程序和模式在转鼓上产生相应的阻力，使安装在转鼓上的摩托车能够像运行在道路上一样。我们首先研究一下底盘测功机的原理及结构。

### 2.1 底盘测功机的基本原理

在室内检测摩托车的输出功率，摩托车相对地面是静止不动的，因此必须创造一个使摩托车能输出所具有的动力的运动条件，即底盘测功机应有一种活动地面，使摩托车能够产生相对运动，同时还能制造摩托车行驶阻力，以平衡、吸收摩托车输出的动力。这样底盘测功机的基本构成应有：模拟路面的滚筒系统、模拟行驶阻力的加载系统和测量、控制系统<sup>[9]</sup>。

图 2—1 是摩托车底盘测功机示意图，检测时，待检测摩托车驱动轮支承在双滚筒上，驱动轮带动滚筒转动，滚筒就相当于移动路面，使摩托车产生相对行驶。与滚筒串接的加载装置用于定子对其转子施加制动作用，进行加载，增加滚筒转动的阻力。摩托车驱动轮为带动滚筒转动必须输出相应的动力以克服滚筒转动的阻力（即摩托车行驶阻力）。这样就可以根据检测的需要调节、控制摩托车的行驶阻力。摩托车等速运转时，驱动轮输出的动力与滚筒系统的转动阻力平衡。摩托车加速、滑行时的惯性阻力由滚筒串接的飞轮组的转动惯量模拟。驱动轮的转速从转速传感器测取<sup>[10]</sup>。

加载装置的定子对转子进行加载的同时，也受到大小相等、方向相反的力矩作用，此反力矩使定子绕其轴摆并经一定长度的杆臂传给测力传感器；测力装置便将测定的力矩及车轮相应的转速换算成驱动轮的输出功率或驱动力。

控制系统按照检测的需要，根据测力和测速传感器反馈的信息，向加载装置发出增减系统转动阻力的指令（即增减摩托车行驶阻力），以调节和控制摩托车驱动轮输

出的功率，进而实现运行工况的模拟<sup>[11]</sup>。

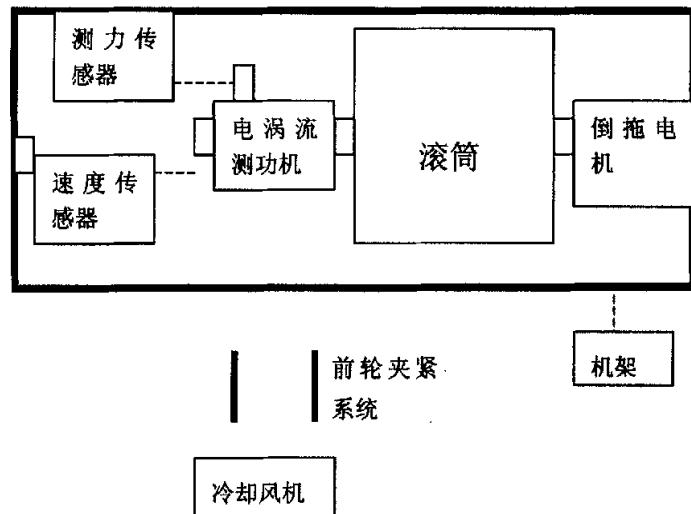


图 2-1 摩托车底盘测功机示意图

## 2.2 底盘测功机的结构设计

底盘测功机的结构与其功能密切相关，功能不同结构就有差别，功能越齐全，结构就越完备。功能较为齐备的电涡流机式底盘测功机的设计主要由以下几个部分构成。

### 2.2.1 滚筒装置的设计

滚筒装置是测功机的基本组件，其结构和性能的好坏，将直接影响测功机的测试精度。滚筒一般都是钢制空心结构。滚筒直径、表面状况是影响测功机性能的主要结构参数。

滚筒直径决定了车轮与滚筒的接触状况。直径大时，滚筒曲率半径大，车轮在滚筒上运转接近在道路上行驶的状况，滑转率小，滚动阻力小，测试精度高；滚筒

直径小时，由于接触比压大，滑转率大，滚动阻力大，在高速下会使传递功率损失7%~20%。同时，车轮在小直径滚筒上滚动时会增加轮胎的摩擦力，长时间的高速运转会使轮胎表面测试升高到临界值，导致轮胎早期损坏。因此，试验车速达到20km/h的滚筒直径不应小于350mm，速度达到160km/h的滚筒直径不应小于300mm。显然，大直径滚筒优于小直径滚筒<sup>[12]</sup>。

GB 14622—2002 规定摩托车底盘测功机滚筒的直径要大于或等于400mm，考虑到加工工艺的要求，本系统的滚筒直径设计为503mm，采用滚花滚筒。同时国标要求测功机的基本惯量是100kg，也就是要求电涡流测功机转子的转动惯量加上滚筒的当量惯量为100kg，电涡流测功机的当量惯量是12.6kgm<sup>2</sup>，因此按照这两个参数的要求可以设计滚筒的尺寸为：外径503mm，宽度为300mm，壁厚10.5mm<sup>[13]</sup>。

## 2.2.2 加载装置选取

用底盘测功机测试摩托车性能和检测摩托车技术状况，就必须能模拟摩托车在道路上行驶时所受到的各种阻力。摩托车行驶时内部阻力是因为摩托车传动系的损失而引起的，其值在道路上和测功机上都是一样的。摩托车在道路上行驶时的外部阻力就不同于在测功机上运转时的阻力。在测功机上运转只有驱动轮转动，所引起的外部阻力较在道路上行驶时少，在测功机上不存在摩托车在道路上行驶时所受到的空气阻力、爬坡阻力，以及从动轮的轴承摩擦、空气阻力摩擦和滚动阻力。这些外部阻力就靠测功机加载装置模拟，以使摩托车受力状况如同在道路上行驶<sup>[14]</sup>。

常用的测功机有电力测功机、水力测功机和磁粉测功机。这些测功机都是根据测功机作用力矩与测功机反作用力矩大小相等、方向相反的原理来测量的。水力测功机和磁粉测功机受工作原理以及测量范围的限制，很少在底盘测功机上应用<sup>[15]</sup>。

电力测功机的工作原理和电机基本相同，其转子和定子都是以磁通作为传递媒介进行工作的。转子和定子之间的作用力和反作用力大小相等、方向相反，所以只要将其定子做成能绕其轴线自由摆动的结构，便可测定其转子的制动转矩，即定子

的反力矩<sup>[16]</sup>。

电力测功机有直流电力测功机、交流电力测功机和电涡流测功机三种型式。

直流电力测功机与一般电机主要的不同之处是定子外壳被支承在一对轴承上，并可以绕轴线自动摆动。在定子外壳上固定一个力臂，它与测力机构连接，用以测定转矩。被测动力机械的输出轴与直流电力测功机的转子连接在一起旋转，此时电枢绕组切割定子绕组磁场的磁力线，在电枢绕组中产生感应电动势，即产生一个与转向相反的制动力矩，电机作发电机运行，以达到测功的目的。相反，当电枢回路有电流通过时，在磁场中会受到电磁力作用而产生一个与转向相同的驱动力矩，这是电机作电动机运行，以达到反拖（测量动力机械的摩擦功）的目的<sup>[17]</sup>。

常用的三相交流发电机可作为最简单的交流电力测功机。当被测动力机械直接驱动三相交流发电机时，其测得的有效功率为：

$$P_e = \sqrt{3} \frac{ui}{1000\eta} \cos\varphi$$

式中， $P_e$  为测得的有效功率 (kW)； $u$  为交流发电机的电压 (V)； $i$  为交流发电机的输出电流 (A)； $\eta$  为交流发电机的效率； $\cos\varphi$  为交流发电机的功率因数<sup>[18]</sup>。

基于和直流电力测功机同样的原因，交流电力测功机的定子外壳也应当做成可以绕转轴摆动的平衡式结构。交流电力测功机既可以按电动机运行，也可以按发电机运行。按发电机运行时，测功机发出的电能，可以消耗在负荷电阻上，在条件许可时，也可以输回供电电网加以利用<sup>[19]</sup>。

电涡流测功机主要由定子和转子两部分组成。定子周围装有激磁线圈，激磁线圈通直流电时，定子在铁芯与转子间隙处就有磁力线通过，转子（与测功机主滚筒串接）转动时形成波幅脉振的磁场，并在转子或定子上产生感应电势，产生感应电流（即电涡流）阻止磁场的脉振。该电涡流与它产生的磁场相互作用，使转子受到一个负荷力矩，力矩的方向和滚筒旋转的方向相反，成为制动力矩起到加载作用。调节激磁电流即可改变制动力矩的大小，从而形成被测动力机械的外部阻力。与此

同时，定子也受到一个与制动力矩大小相等，方向相反的力矩。由于定子浮动装于支承座上，受外力作用后定子便可转动。通过测力机械便可测定动力机械经滚筒输出的功率<sup>[20]</sup>。

被测动力机械输出的功率被电涡流器吸收，转换为电涡流，在涡流器的转子或者定子中转变为热能散发。因此，为使转子或定子处于正常的工作温度，必须尽快将其热量排出，迅速冷却。常用水或冷气作为介质把电涡流转化的热量排出。据此电涡流器分成水冷式和风冷式两类。一种风冷式电涡流测功机的结构如图 2—2 所示。

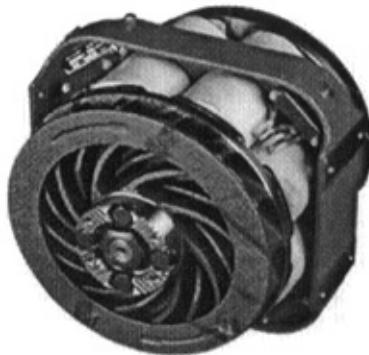


图 2—2 风冷式电涡流功率吸收装置的基本结构

风冷式电涡流功率吸收装置主要由转子、定子、励磁线圈、支承轴承、冷却风扇叶片、力传感器等组成，其特点是：结构简单，安装方便；冷却效率低，功率吸收装置不易长时间运行，其转子的导磁率随温度的上升而下降；因而其最大吸收功率随温升而减小，所以一般风冷式功率吸收装置在高转速、大负荷下工作时间不宜超过 5min；由于冷却风扇在工作时消耗一定的功率，所以应该将风扇所消耗的功率计入摩托车驱动轮的输出功率。

这种测功机体积小，转矩大，在工作区域内励磁电流与转矩近似呈线性关系。当励磁电流不变时，具有等转矩特性，响应速度快，最大功率下可在任一工况点工作，故特别适合在大转矩和中、低转速工况应用。由于高温会引起磁粉烧结和磁性退化，故需采取良好的冷却措施，且不宜长期在高速状态下使用。

由于电涡流测功机所消耗的励磁功率很小，只需要变动数安培的励磁电流，就能有效的控制制动转矩，这样可以方便地完成自动化控制，有利于实现按预定程序运转的自动测试，同时考虑到摩托车底盘测功机的转矩比较小，以及现场安装的方便，故采用风冷式电涡流测功机，型号为西班牙 KLAM 风冷电涡流测功机，连续工作 20min 最大吸收功率 23kW，最大扭矩  $150N \cdot m$ 。其当量惯量为  $0.26 kg \cdot m^2$ 。冷却风机采用双进风离心式风机，功率为 18.5kW，风机采用变频调速系统自动跟踪车速，采用三菱 FR-E500-18.5K 变频器<sup>[21]</sup>。

### 2.2.3 反拖装置

用电涡流测功机加载的底盘测功机，由于电涡流机只能吸收动能，不能输出动力。为此，该底盘测功机设有反拖装置。

底盘测功机反拖装置的功能是提供原动力驱动摩托车、测试台的传动系运动，以测试摩托车、测试台传动系统的传动阻力。因此，利用反拖装置可以检测底盘测功机滚筒系统的机械损失、摩托车传动系的机械损失以及车轮在滚筒上的滚动阻力等。

反拖装置的原动力均用电动机，电动机功率的大小选用 10kW 的反拖电机，通过调频装置改变电机转速，从而实现反拖速度从 0 km~100 km 的自动调节，使倒拖车速符合实际运行车速。反拖电机通过离合器直接与滚筒轴串接。

摩托车及测试台传动系阻力的测定，当前有两种方案，一是通过高精密度电功率表测定反拖电机在倒拖时消耗的电功率，再据测定的倒拖车速换算得出倒拖阻力；二是用测力传感器直接测定倒拖阻力，如同电涡流机的测力装置，倒拖电机外壳浮动支承在轴承座上，外壳（定子）受反力矩作用便可转动，从而对固装定位的测力传感器输出信号进行标定、处理即可得出倒拖阻力值。显然，第二种方案测试精确度高于第一种方案。考虑到测试精度，该系统采用后一种方案<sup>[22]</sup>。

## 2.2.4 冷却装置及夹紧装置

冷却风机是模拟摩托车行驶时的迎面风，使发动机的冷却效果与摩托车在路面行驶时的状态接近，因此要采用变速控制。冷却风机采用双进风离心式风机，功率为 18.5kw，风机采用变频器改变风机速度以满足在不同车速下气流的速度。变频器采用三菱 FR-E500-18.5k 变频器，对变频器的控制由控制节点按照速度的要求通过 D/A 输出来实现<sup>[23]</sup>。按照国标的要求，该风机的出口面积为 0.4m<sup>2</sup>，下边缘离地高度为 0.15m，至车轮前端距离 0.3m。

该系统测试时前轮需要夹紧，车轮夹紧装置采用气动自动对中夹紧。

同时考虑到测试环境的清洁，需要采用气动升降排烟系统，采用离心式风机，功率为 3kw，风量为 5000m<sup>3</sup>/h，整体气动方式，升程为 700mm，排烟口面积为 500mm\*500mm。

## 2.2.5 控制系统

控制系统是底盘测功机的关键组件，其技术水平的高低，性能的好坏，直接影响到整机的性能。

摩托车底盘测功机的控制系统分为全自动控制和半自动控制两种。全自动控制方式的全部测试项目都是自动控制。以功率测量为例，能够自动连续测试摩托车任一运行速度时的功率，整个测试过程由计算机控制，不用人工操作，此外，全自动控制方式可以自动模拟运行工况。

半自动控制方式与全自动控制方式的区别在于测量点不是任意的而是规定好的几个点，并且测量点不连续。半自动控制通常采用单片机控制<sup>[24]</sup>。

该底盘测功机控制系统采用全自动的控制。控制系统的硬件和软件设计见后面的章节。

# 华中科技大学硕士学位论文

---

---

## 2.3 小结

按国家标准 GB 14622—2002 确定摩托车底盘测功机的结构尺寸，分析比较电涡流测功机、水力测功机、电力测功机各自的特点后，选用电涡测功机作为摩托车底盘测功机的加载方式，产生的阻力使摩托车按照给定的程序和模式在转鼓上像运行在道路上一样，并研究电涡流测功机的自动控制方式。

### 3 摩托车底盘测功机阻力模拟

摩托车底盘测功机时应用现代电测和计算机技术，利用摩托车在路面行驶中与道路的相对运动关系，摩托车道路行驶工况（如：道路阻力状况、行驶惯性等）有效、等量转移到摩托车底盘测功机上，即摩托车整车道路试验项目以及应用工况法测量摩托车排气污染排放量等试验移至室内进行的专用试验设备。

摩托车在道路上行驶是摩托车相对禁止的路面运动，而摩托车在底盘测功机上进行台架动力性试验是在转鼓表面取代路面，并且相对于静止的摩托车作旋转运动。

摩托车底盘测功机行驶阻力的模拟如何实现、精度如何保证则是其技术关键。这必须从运动学、动力学入手加以分析。

#### 3.1 摩托车在道路上行驶

摩托车行驶在路面上，其发动机曲轴输出扭矩，经传动系统传递给驱动轮，经过轮胎与地面的接触（摩擦力足够大时，视为无滑动的纯滚动运动）产生驱动。同时还收到各种阻力。受力分析如图 3-1 所示。

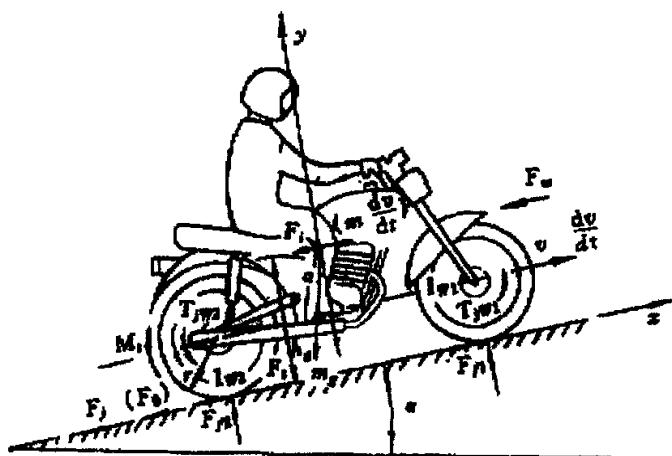


图 3-1 摩托车道路行驶阻力分析

当驱动力等于行驶阻力时，摩托车作匀速运动；当驱动力不等于（大于或者小

于)形式阻力时,摩托车作变速(加速或减速)运动。

### 3.1.1 摩托车的驱动力

摩托车的驱动力是由发动机曲轴输出扭矩,经离合器、变速传动系统(降速增扭作用)传递给驱动轮足够大的驱动扭矩,其对地面产生一圆周力(切向力),地面由于附着作用给驱动轮一反作用力(当附着条件即路面接触强度足够大时,其与圆周力可视为大小相等、方向相反)即为推动摩托车前进的驱动力。

$$F_t = F_0 = \frac{M_t}{r} = \frac{M_e \cdot i_1 \cdot i_g \cdot i_2 \cdot \eta_r}{r} \quad (3-1)$$

式中:  $F_t$ ——摩托车的驱动力。(N)

$F_0$ ——驱动轮对地面产生的圆周力。(N)

$M_t$ ——驱动轮上的驱动扭矩( $N \cdot m$ );

$r$ ——驱动轮工作半径,(m);

$M_e$ ——摩托车发动机曲轴输出扭矩, ( $N \cdot m$ );

$i_1$ ——一次传动比;

$i_g$ ——变速器传动比;

$i_2$ ——二次传动比;

$\eta_r$ ——传动变速系统总传动效率。

### 3.1.2 摩托车的行驶阻力

摩托车在行驶阻时受到的各种阻力,统称为行驶阻力。

#### 1) 滚动阻力

摩托车车轮弹性轮胎在路面上滚动时,来自路面与轮胎接触面之间的各种阻力,统称为滚动阻力。由于前、后轮的受力情况不同,故其滚动阻力则不同。在计

# 华中科技大学硕士学位论文

算滚动阻力时，按整车的滚动阻力考虑。

$$F_f = f \cdot m \cdot g \quad (3-2)$$

式中： $F_f$ ——整车的滚动阻力，(N)；

$m$ ——摩托车整车基准质量（含驾驶员质量 75Kg），(Kg)；

$g$ ——重力加速度，( $m/s^2$ )；

$f$ ——整车滚动阻力系数，其是路面状况、轮胎结构、充气压力、车速、载

荷等的函数， $f = f_1 \cdot \frac{G_1}{G} + f_2 \cdot \frac{G_2}{G}$ ；

$f_1$ ——从动轮的滚动阻力系数；

$G$ ——摩托车整车法向载荷，(N)；

$G_1$ ——从动轮法向载荷，(N)；

$f_2$ ——驱动轮的滚动阻力系数；

$G_2$ ——驱动轮的法向载荷，(N)；

## 2) 空气阻力

摩托车行驶时，在空气中运动受到空气的作用力，称为空气阻力。其主要由压力阻力(即形状阻力，迎面压力大于后部压力)和摩擦阻力(即表面阻力，在摩托车与切向气流摩擦表面上产生)构成。据实验测定，空气阻力主要是压力阻力，即：

$$F_w = \frac{1}{2} C_D \cdot A \cdot \rho \cdot v_r^2 \quad (3-3)$$

式中： $F_w$ ——空气阻力，(N)；

$C_D$ ——空气阻力系数；

$A$ ——迎风面积，即摩托车（含驾驶员）行驶方向的正投影面积，( $m^2$ )；

$\rho$ ——空气密度，( $Kg/m^3$ )；

$v_r$ ——相对速度，( $m/s$ )，无风时为摩托车行驶速度。

## 3) 坡度阻力

摩托车沿纵向坡度上行驶时，受重力沿坡道分力的作用，称为坡度阻力。上坡时，坡度阻力与驱动力方向相反；下坡时，两者方向一致。

$$F_i = mg \cdot \sin \alpha \quad (3-4)$$

式中：  $F_i$  —— 坡度阻力，(N)；

$\alpha$  —— 纵向坡度角 ( $^{\circ}$ )。

若按公路工程技术标准，公路以坡度值即  $p = \tan \alpha$  表示，并取代  $\sin \alpha$ ：

$$\sin \alpha \approx \tan \alpha \approx p$$

则：  $F_i = mg \cdot \sin \alpha \approx mg \cdot \tan \alpha = mg \cdot p$

可见，用道路的坡度值（以百分数表示）取代  $\sin \alpha$  时，是在  $\alpha$  值较小（在  $\alpha$  小于  $17^{\circ}$  时，所带来的误差将不超过 5%）时；若  $\alpha$  值较大，则不可如此计算。

#### 4) 惯性阻力

摩托车变速行驶时，除克服上述阻力外，还需克服其本身质量变速运动的惯性力。其由两部分组成：平移质量惯性力和旋转质量惯性力。将其换算到车轮上的等效惯性阻力为：

$$F_j = \delta \cdot m \frac{dv}{dt} \quad (3-5)$$

式中：  $F_j$  —— 变速行驶，换算到车轮上的总惯性阻力，(N)；

$\delta$  —— 质量换算系数；

$$\delta = 1 + \frac{g}{G} \cdot \frac{\sum I_w}{r^2} + \frac{g}{G} \cdot \frac{I_{f1} \cdot i_1^2 \cdot i_g^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_{T1}}{r^2}$$

$$= 1 + \left( \sum I_w + I_{f2} \cdot i_1^2 \cdot i_g^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_{T1} \right) \frac{1}{mr^2}$$

$$\sum I_w = I_{w1} + I_{w2}$$

$\frac{dv}{dt}$  —— 摩托车加速度，( $m/s^2$ )；

$\sum I_w$  —— 从、驱动轮转动惯量之和，( $kg \cdot m^2$ )；

$I_{w1}$ ——从动轮转动惯量, ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ );

$I_{w2}$ ——驱动轮转动惯量, ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ );

$I_{f1}$ ——发动机曲轴部件的转动惯量, ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ );

$I_{f2}$ ——离合器、变速器、二次传动装置等旋转部件的转动惯量, ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ );

$\eta_{T1}$ ——除一次传动外的传动效率。

在图 3—1 中,  $T_{jw1}$ 、 $T_{jw2}$  分别为从动、驱动轮产生的惯性转矩。

### 3.1.3 摩托车道路行驶方程

据上述各力在 x 轴上的投影, 可得到摩托车的道路变速行驶方程:

$$\begin{aligned} F_t &= F_f + F_w + F_i + F_j \\ &= fmg + \frac{1}{2}C_D \cdot A \cdot \rho \cdot v_r^2 + mg \sin \alpha + m \frac{dv}{dt} + \\ &\quad \frac{I_{w1} + I_{w2} + I_{f1} \cdot i_1^2 \cdot i_g^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_T + I_{f2} \cdot i_g^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_{T1}}{r^2} \cdot \frac{dv}{dt} \end{aligned} \quad (3-6)$$

该式表明了摩托车在坡道上变速行驶时的驱动力与行驶阻力的平衡关系, 亦表明了摩托车的动力性能。另外, 由于滚动阻力系数与行驶速度有关, 所以滚动阻力、空气阻力均为车速的函数, 在任何条件下均存在, 且为正值; 而坡道阻力、惯性阻力与车速无关(惯性阻力为加速度的函数), 且在一定条件下(即上坡或下坡、加速或减速) 存在, 且有正负值<sup>[25]</sup>。

### 3.2 摩托车在底盘测功机上行驶

摩托车在底盘测功机滚轮上行驶, 前轮被夹紧固定, 仅驱动轮和滚轮做相对旋转运动, 此时车辆相对滚轮是静止的, 车速为零, 而滚轮表面则取代了路面。受力分析如图 3—2 所示。

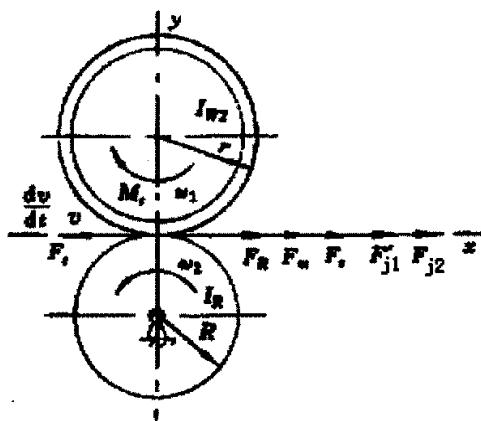


图 3-2 摩托车在底盘测功机上行驶受力分析

通过对驱动轮在滚筒上变速行驶时的受力分析，可得到摩托车在底盘测功机上的变速行驶方程：

$$\begin{aligned}
 F_1 &= F_R + F_m + F_e + F_{j1} + F_{j2} \\
 &= F_R + F_m + \left(1 + \frac{r}{R}\right) F_{f2} + \\
 &\quad \left( \frac{I_{w2} + I_{f1} \cdot i_1^2 \cdot i_g^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_T + I_{f2} \cdot i_g^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_{T1}}{r^2} + \frac{I_R}{R^2} \right) \frac{dv}{dt}
 \end{aligned} \tag{3-7}$$

式中：  $F_1$ ——摩托车的驱动力，(N)；

$F_R$ ——底盘测功机制动力，(N)；

$F_m$ ——底盘测功机滚轮、惯性轮及轴系总摩擦阻力，(N)；

$F_e$ ——驱动轮与滚筒间的滚动阻力， $F_e = \left(1 + \frac{r}{R}\right) F_{f2}$ ，(N)；

$F_{f2}$ ——驱动轮道路行驶的滚动阻力，(N)；

$F_{j1}$ ——驱动轮和发动机曲轴部件、离合器、变速器、二次传动装置等旋转部件的惯性力换算到车轮上的惯性阻力；

$$F_{j1} = \left( \frac{I_{w2} + I_{f1} \cdot i_1^2 \cdot i_g^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_T + I_{f2} \cdot i_g^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_{T2}}{r^2} \right) \cdot \frac{dv}{dt}, \quad (N);$$

$F_{j2}$ ——滚轮、惯性轮及轴系产生的惯性阻力,  $F_{j2} = \frac{I_R}{R^2} \cdot \frac{dv}{dt}$ , (N);

$I_R$ ——滚轮、惯性轮及轴系的转动惯量, ( $\text{kg}\text{m}^2$ );

$r/R$ ——摩托车驱动轮工作半径与滚筒半径之比。

### 3.3 底盘测功机模拟摩托车道路行驶方程

在底盘测功机上模拟摩托车道路行驶状况, 底盘测功机必须产生相当于某车型的摩托车在道路上行驶时所呈现的、与车速成函数关系的行驶阻力, 即底盘测功机模拟的行驶阻力与道路行驶阻力相等。

比较摩托车在道路上和在底盘测功机上的两个行驶方程式(1)和(2), 则两式右边应相等:

$$F_f + F_w + F_i + F_j = F_R + F_m + F_e + F_{j1} + F_{j2}$$

$$F_f + F_w + F_i + m \frac{dv}{dt} + \frac{I_{w1} + I_{w2} + I_{f1} \cdot i_1^2 \cdot i_g^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_{T1}}{r^2} \cdot \frac{dv}{dt}$$

即:

$$= F_R + F_m + F_e + \left( \frac{I_{w2} + I_{f1} \cdot i_1^2 \cdot i_g^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_{T1} + I_{f2} \cdot i_g^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_{T1}}{r^2} + \frac{I_R}{R^2} \right) \frac{dv}{dt}$$

整理可得:

$$F_R = F_f + F_w + F_i + m - F_m - F_e + F_j \quad (3-8)$$

其中  $F_j = \left( m - \frac{I_{f2} \cdot i_g^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_{T1} - I_{w1}}{r^2} - \frac{I_R}{R^2} \right) \frac{dv}{dt}$  (3-9)

分析式(3-8)、(3-9)可得到如下结论:

底盘测功机制动力  $F_R$  是速度和加速度的函数, 要使底盘测功机模拟摩托车道路行驶中的阻力, 只要实时检测车轮线速度和线加速度  $dv/dt$ , 使摩托车底盘测功机上所施加

的力等于上式所要求的力即可。

该测功机的主要功能是针对摩托车的十五工况法测排放污染，因此按 GB/T 18176—2002 的要求该试验可以不考虑坡度阻力。实现的方法是先得到摩托车的道路行驶阻力，同时得到测功机的摩擦阻力和摩托车传动系统的阻力。行驶阻力可以通过下面的道路试验方法得到，而测功机的摩擦阻力和摩托车传动系统的阻力则通过倒拖电机来测取<sup>[26]</sup>。

## 3.4 道路试验

要得到摩托车在路面行驶的滚动阻力、空气阻力之和，则需要采用惯性滑行法对其进行试验。将得到的与转速相对应的阻力值拟合成一条曲线储存在控制节点中，在测试的时候就可以通过测量转速来选取其对应的阻力值，然后在底盘测功机上进行阻力设定。按照 GB/T 5378—1994 中的规定，在摩托车和驾驶员在符合规范的道路上进行道路滑行试验，道路试验包括以下几个部分：

### 1) 测点速度 $V_j$

受试摩托车应从接近 80% 最高速度的车速（选取 10km/h 的倍数点）开始，以 10km/h 或 5km/h 的级差递减，直至 20km/h，至少应测取 5 点。本系统从 60km/h 开始测试，按 5km/h 的级差递减，直至 20km/h。

### 2) 滑行初速度 $V_{jk}$

$$V_{jk} = V_j + \Delta V_j$$

式中：  $\Delta V_j = 0.1V_j$  （在测试仪器难以达到时，可取 5km/h 或 10km/h）。

### 3) 滑行末速度 $V_{jj}$

$$V_{jj} = V_j - \Delta V_j$$

### 4) 滑行时间和滑行加速度的测量

#### (1) 滑行时间的测量

在预热行驶后，摩托车应尽快的加速。在车速超过滑行初速度约 10km/h 后调整

好驾驶姿态，迅速切断动力，确保在滑行初速度之前进入滑行。滑行时，若摩托车转换到空挡位置比较困难，可在离合器分离的条件下实现滑行。对于那些无法切断发动机传动机构的摩托车可以用其他动力装置进行牵引。同时应尽可能的避免转向操作，在结束滑行测量前不应使用制动器。

相对于测点速度  $V_j$  的滑行时间  $\Delta T_{jai}$  应为受试摩托车从速度  $V_{jk}$  到  $V_{ji}$  所经过的时间，反向滑行仍按上面的步骤进行，并测量滑行时间  $\Delta T_{jbi}$ ，且同一组试验往返时间间隔应尽可能的短。

计算往返滑行时间  $\Delta T_{jai}$  和  $\Delta T_{jbi}$  算术平均值  $\Delta T_{ji}$ ，往返时间偏差不得超过 10%。

$$\Delta T_{ji} = \frac{\Delta T_{jai} + \Delta T_{jbi}}{2} \quad (3-10)$$

试验至少要进行四次，而且任意两次滑行时间的偏差不得超过 3%，各个测点速度均按上述步骤进行，从而测得各测点速度下测得滑行时间  $\Delta T_j$ 。

$$\Delta T_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_{ji} \quad (3-11)$$

若测量仪器能保证，最好由一个连续的滑行来获得各测点速度下的滑行时间。

## (2) 滑行加速度的测量

当进行平均加速度测量时，仍用 4.1 的测试步骤进行操作，测量加速度。记录速度  $V_j$  时的加速度值  $a_{jai}$ ，方向滑行进行同样的试验并记录  $a_{jbi}$ 。求出往返滑行加速度  $a_{jai}$  和  $a_{jbi}$  的平均值  $a_{ji}$ ，往返加速度偏差不得超过 10%。

$$a_{ji} = \frac{a_{jai} + a_{jbi}}{2} \quad (3-12)$$

至少进行四次试验，任意两次加速度的偏差不得超过 3%，各个测点速度均按上述步骤进行，从而得到各测点速度下的滑行加速度  $a_j$ 。

$$a_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{ji} \quad (3-13)$$

### 3.5 数据处理

以下是行驶阻力的计算。

在测点速度  $V_j$  的行驶阻力由下式计算：

$$F(V_j) = \frac{1}{3.6} (m + m_r) \frac{2\Delta V_j}{\Delta T_j} \quad (3-14)$$

式中：  $F(V_j)$ ——测点速度  $V_j$  时的行驶阻力，(N)；

$m$ ——受试摩托车质量，包括驾驶员和仪器的质量，(kg)；

$m_r$ ——所有车轮及在道路上行驶时随车轮转动的摩托车零部件的当量惯量，(kg)。

该测功机的  $m_r$  可通过下面的经验公式来确定：

$$m_r = \frac{X \cdot m}{100} \quad (3-15)$$

式中：  $X$ ——用经验公式选择时估计的一常系数， $X=7$ 。

对于无法测取的高速点（90%最高车速点和最高测速点）和低速点（20km/h 以下的速度点，如 10km/h），其行驶阻力由 5.1 绘制的行驶阻力曲线向外延伸推出。

### 3.6 底盘测功机阻力设定

以下讨论测功机的设定。

#### 3.6.1 测功机设定程序

测功机作用的负荷力  $F_E$  由总摩擦阻力  $F_f$  ( $F_f$  为测功机的转动摩擦阻力、轮胎滚动阻力及摩托车行驶系统转动部分的摩擦阻力的总和) 和功率吸收部分的制动力  $F_{pau}$

组成。用下述等式表示：

$$F_E = F_f + F_{pau} \quad (3-16)$$

因此，前面道路试验得出的行驶阻力  $F(V_j)$  希望在测功机上按照摩托车行驶速度再现产生，即：

$$F_E(V_j) = F(V_j) \quad (3-17)$$

### 3.6.2 总摩擦阻力的测定

底盘测功机上的总摩擦阻力  $F_f$  的测试采用设计的倒拖电机进行测量。方法是采用恒速倒拖试验法来测量试验台的总摩擦阻力，其原理是：摩托车停在转鼓上，通过倒拖电机带动转鼓，倒拖摩托车驱动轮及转动系，再测定摩托车在底盘测功机上的总摩擦阻力。底盘测功机在倒拖模式下，转鼓由电机带动加速到各测量点 ( $v_1 \sim v_n$ )，稳定后测出相对应的阻力  $F_f(F_{f1} \sim F_{fn})$ ，将它们按类型存储起来供道路模拟时补偿。

### 3.6.3 功率吸收部分的制动力计算

测点速度  $V_j$  下测功机的制动力  $F_{pau}(V_j)$  由行驶阻力  $F(V_j)$  减去  $F_f$  计算得出：

$$F_{pau}(V_j) = F(V_j) - F_f(V_j) \quad (3-18)$$

根据该公式就可以拟合出来一条曲线，该曲线反应的是底盘测功机的制动力跟转速之间的关系，通过该曲线可以对底盘测功机进行设定，在控制节点中通过运算以后可以通过改变电涡流测功机的加载电流来实现<sup>[27]</sup>。

## 3.7 小结

分析建立摩托车道路行驶时的力学模型和摩托车在底盘测功机上的力学模型，要使底盘测功机模拟摩托车道路行驶中的惯性阻力，只要实时检测车轮线加速度  $d\nu/dt$ （可由角加速度计算得到），调整摩托车底盘测功机上所施加的力即可。在此基

# 华中科技大学硕士学位论文

---

---

基础上，进行了底盘测功机倒拖、滑行等功能的研究。

## 4 励磁电流无级可调的电涡流测功机设计

电涡流测功机的主要作用是为摩托车底盘测功机提供制动力矩，满足摩托车对惯性阻力的要求。本章将介绍制动强度无级可调的电涡流测功机的原理及软硬件实现。

### 4.1 电涡流测功机介绍

#### 4.1.1 电涡流测功机的基本结构及原理

电涡流测功机由机械装置和电控装置两部分组成，在本课题中的主要任务是设计电控装置部分。机械装置部分是由定子、转子及固定架等部件组成。图2-2是它的外形，图4-1给出了它的结构。

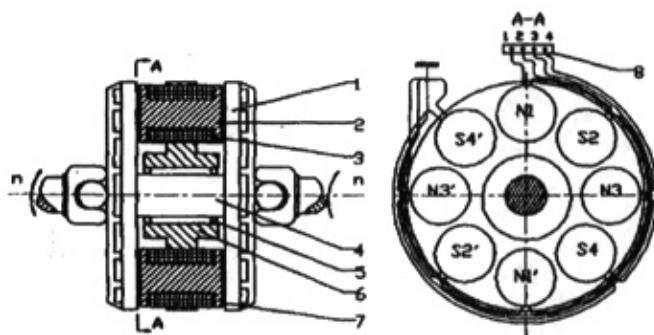


图 4-1 电涡流测功机的结构示意图

1—转子盘 2—铁心 3—激励线圈 4—转子

电涡流测功机制动力矩的产生具体过程是：当电涡流测功机的励磁线圈自动通以经调节的直流电流而励磁，产生的磁场在定子磁极、气隙和前后转子盘之间构成回路。磁极磁通量的大小与励磁线圈的匝数以及所通过的电流大小有关。这时在旋转的转子盘上，其内部无数个闭合导线所包围的面积内的磁通量就发生变化(或者说其内部无数个闭合导线就切割励磁线圈所产生的磁力线)，从而在转子盘内部产生无

数涡旋状的感应电流，即涡电流(简称涡流)。以磁极的正上方为界，在转子盘内就会分别产生磁通正在减少和磁通正在增加的两种涡流，其方向相反。一旦涡电流产生后，磁场就会对带电的转子盘产生阻止其转动的阻力(即产生制动力)，阻力的方向可由弗莱明(Flemin)左手法则来判断。阻力的合力沿转子盘周向形成与其旋转方向相反的制动力矩。同时涡流在具有一定电阻的转子盘内部流动时，会产生热效应而导致转子发热。这样，车辆行驶的动能就通过感应电流转化为热能，并通过转子盘上的叶片产生的强劲风力将热量迅速散发出去<sup>[28]</sup>。

## 4.1.2 控制方式

电涡流测功机励磁线圈采用汽车蓄电池提供的直流电驱动。在本系统中，采用开关驱动方式使半导体功率器件工作在开关状态，通过脉宽调制PWM来控制电涡流测功机线圈组平均电压，实现调速。

下图是利用开关管对电涡流测功机线圈组进行PWM调速控制的原理图和输入输出电压波形。

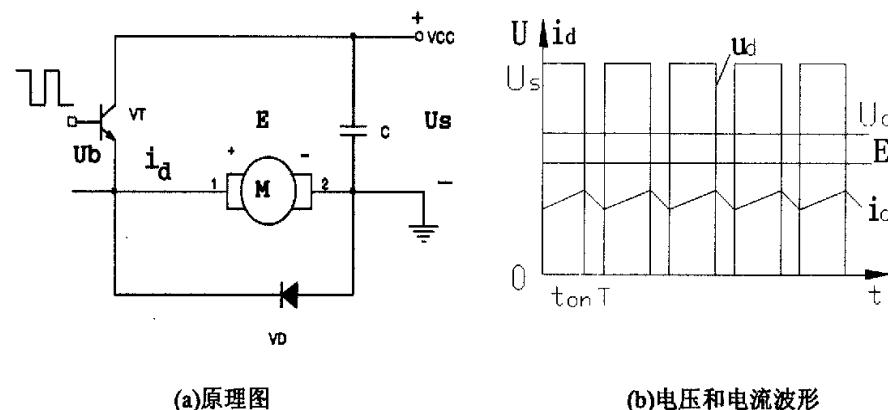


图 4-2 简单的不可逆 PWM 变换电路

图4-2中所示的PWM变换器实际上是一种直流斩波器，其开关器件采用全控式的电力电子器件（可以选用或MOSFET或IGBT等，本系统中采用IGBT）。电源电压Us由汽车蓄电池提供。电容C的作用是滤波，二极管VD在电力晶体管VT关断时为测功机励磁回路提供释放电感储能的续流回路。

电力晶体管 VT 的基极由频率为  $f$ (20kHz 左右),脉冲宽度可调的脉冲电压  $Ub$  驱动.在一个开关周期内,当  $0 \leq t < t_{on}$  时, $Ub$  为正,VT 饱和导通,电源电压通过 VT 加到测功机励磁线圈两端; 当  $t_{on} \leq t < T$  时,  $Ub$  为负, VT 截止, 电枢失去电源, 经二极管  $VD$  续流。电动机电枢两端的平均电压为  $U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s = \rho U_s$

式中,  $\rho = \frac{U_d}{U_s} = \frac{t_{on}}{T}$  ——PWM 电压的占空比, 又称负载电压系数。 $\rho$  的变化范围在 0~1 之间, 改变  $\rho$ , 即可实现对测功机励磁电流的调节。

PWM 控制方法与晶闸管可控整流的调节方法相比, 性能上有以下特点:

- (1) 由于开关频率高, 所以系统频带宽, 快速响应性能好, 动态抗干扰能力强。新开发的 MOSFET 和 IGBT 开关频率可以达到几十 kHz。
- (2) 由于开关频率高, 励磁线圈电流仅依赖于本身的电感就能连续, 不需增加饱和电抗器, 减小了损耗。
- (3) 主电路简单, 功率电路损耗小。

本系统中的驱动功率管门极的占空比可调的电压由单片机口发出。调节励磁电流的时候只需要改变驱动方波的占空比即可<sup>[29]</sup>。

### 4.1.3 系统基本结构及工作原理

如图 4-3 所示的单片机控制的电涡流测功机系统。控制器采用 MCS89S8252, 它是整个系统的核心, 主要负责信号的采集、控制量的计算、算法的实现、控制波形的调制以及控制量的输出等。单片机系统中还包括键盘及显示模块、A/D 转换模块、与上位 PC 的通信模块、PWM 波形发生模块以及电源模块等。电涡流测功机励磁绕组采用的直流斩波调速方式。同时系统中还设置温度、电流及速度传感器对电涡流测功机的工作过程进行反馈控制<sup>[30]</sup>。

系统的基本原理介绍如下。由单片机中的定时器产生周期固定, 占空比可调的方波通过单片机的 I/O 口发出, 然后把此方波电压作为功率管基极的驱动电压, 控制

功率管的开启和关断。从而在电涡流测功机的励磁线圈上产生脉动电压，当驱动方波的占空比方式改变时，励磁线圈中的平均电压得以改变，所以电涡流测功机的制动力矩也得以改变。电涡流测功机的励磁线圈的初始电流通过电涡流测功机手柄的初始位置确定。速度传感器及其信号处理电路将车辆的实时速度转换成方波的形式从单片机的中断口输入，在定时器的配合下测得方波的频率从而计算出汽车的实时车速。随后在单片机中将它们与设定的速度比较算出偏差，然后通过 PID 算法计算得出最佳的控制量（体现为驱动方波占空比的改变）从单片机的并口输出去调节电涡流测功机的励磁电流从而改变制动力矩，使车辆稳定在设定的理想车速。电流及温度传感器的作用是检测电涡流测功机的温度及电流，实现恒电流控制以及对电涡流测功机的最高工作温度进行控制。

键盘显示及与上位机通信模块的作用是人机交流的界面。通过键盘和上位 PC 机可以预先设定电涡流测功机及汽车的理想工作参数。通过数码管显示可以监测测功机的工作参数。同时通过单片机的串行通讯口将有关数据发送至上位 PC 机，可以通过预先编好的软件绘制汽车转速、电涡流测功机温度、电流及制动力矩等曲线，有利于对电涡流测功机的工作情况进行分析<sup>[31]</sup>。

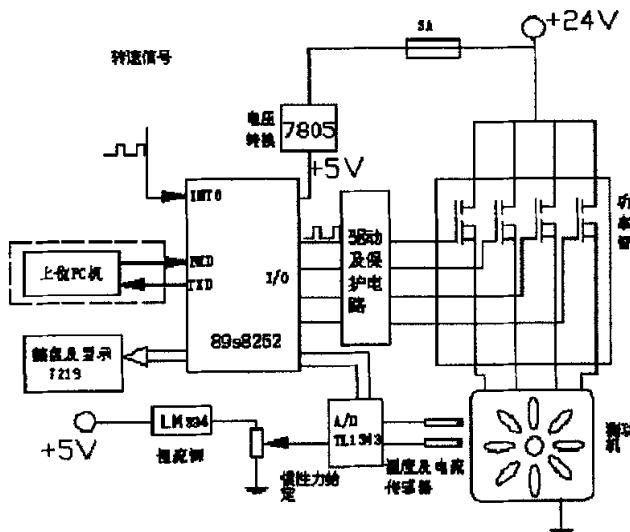


图 4-3 电涡流测功机控制器原理图

## 4.2 系统硬件设计

### 4.2.1 电子控制单元的选择

控制器的设计关键是选择一种适用于特定控制目标的单片机，对车辆制动系统来说，它对单片机要求有如下几个特点：

- (1)抗环境干扰，满足工业级芯片温度范围的要求，即—40——+80℃。
- (2)有较多的 I / O 口，以实现多种控制功能；快速的计算速度，以满足实时控制要求。一般制动系统的控制节拍在几十 ms 以内。
- (3)采用标准的通信接口，便于诊断功能的实现，同时具有与车辆上其他 CPU 进行通信的能力。
- (4)有较好的性能价格比，便于应用于批量装车，成为一种普及型产品。

系统中的控制单元采用 AT89S8252 型单片机。AT89S8252 是 ATMEL 公司推出的具有 SPI 功能的 8 位 CMOS 单片机。该器件与工业标准 80C51 指令集和引脚完全兼容，可通过 SPI 串行接口对片内存储器进行在系统编程。AT89S8252 功能强大，是嵌入式单片机控制系统灵活高效的解决方案。

AT89S8252 的主要特点如下：兼容MCS—51TM系列；8 kB可下载编程的FLASH 存储器，可循环写入 / 擦除1000次；2kB的EEPROM存储器，可循环写入 / 擦除100000 次；4. 0~6. 0 V的工作电压；全静态设计：0~24 MHz；256×8位的内部RAM；三级程序加密；32个可编程I / O口；3个16位定时器；9个中断源；可编程“看门狗”定时器；通用UART串行通道；SPI (Serial Peripheral Interface) 串行接口；低功耗空闲和省电模式。

AT89S8252 的一个主要的特点是其配置了 SPI 串行接口。SPI 是同步串行外设接口。主要用于与各种外围器件以串行方式进行通讯、交换信息。这些外围器件可以是简单的 TTL 移位寄存器、或是复杂的 LCD 显示驱动器或 A / D 转换子系统。SPI 接口很容易与许多厂家的各种外围器件直接相连。它使用 4 条线：串行时钟线 (SCK)、主机输入 / 从机输出线(MLSO)、主机输出 / 从机输入线(MOSI)、低电平有

效的使能信号线(CS)。这样，仅需3—4根数据线和控制线即可扩展具有SPI接口的各种I/O器件。由于SPI协议具有高速传输(最大速率1.5MBit/s)、连线简单(全双工、4线传输)等优点。所以我们在设计的单片机系统中尽量选用的是同样具有SPI功能的器件，它们将在后面介绍。它们与89S8252连接的典型结构如图4-4。

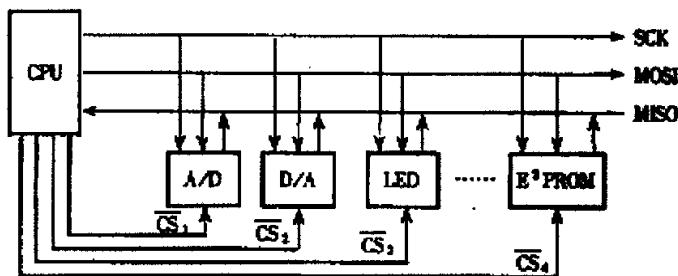


图4-4 SPI器件与89S8252的典型连接

通过SPI接口还可以方便的实现ISP功能。ISP(In-systemProgrammble，在系统可编程功能)是指对器件、电路板或电子系统的功能可随时进行修改和重构的能力。具有ISP功能的器件不需要使用编程器，只需要通过计算机接口和编程电缆直接在目标器件或系统上进行编程<sup>[32]</sup>。

如图4-5所示是由89S8252为控制器组成的单片机系统的电路图。其中包括了上面介绍的利用计算机的打印机口对单片机进行读写的电路部分。同时还包括下面将要介绍的一些主要器件的连接图。

华中科技大学硕士学位论文

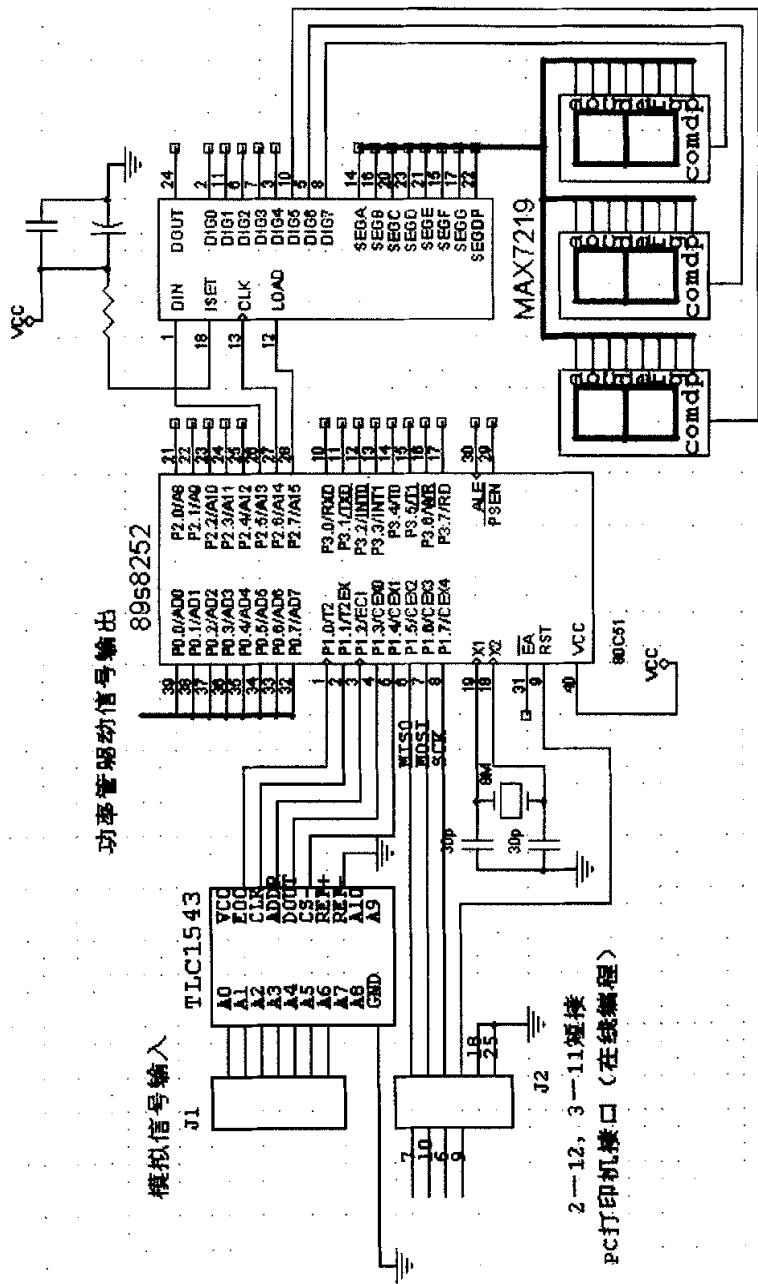


图 4-5 以 89S8252 为控制器组成的单片机系统

#### 4.2.2 显示芯片 7219

本系统用八位LED数码管对电流值、温度值及转速等内容进行显示。显示驱动器选用串行接口8位LED驱动器MAX7219。

7219是一种新型的串行接口的8位数字静态显示芯片。它是24脚双列直插式芯片，采用流行的同步串行外设接口(SPI)，可与任何一种单片机方便接口，并可同时驱动8位LED(或64只独立LED)。7219内部具有 $15 \times 8$ RAM功能控制寄存器，可方便选址，对每位数字可单独控制、刷新、不需重写整个显示器。显示数字亮度可由数字进行控制，每位具有闪烁使能控制位。当引脚CON(13脚)置高电平，可禁止所有显示，达到降低功耗的效果，但同时并不影响对控制寄存器的修改。7219还有一个掉电模式、一个允许用户从1位数显示到8位数显示选择的扫描界限寄存器和一个强迫所有LED接通的测试模式。其时序如图4-6。

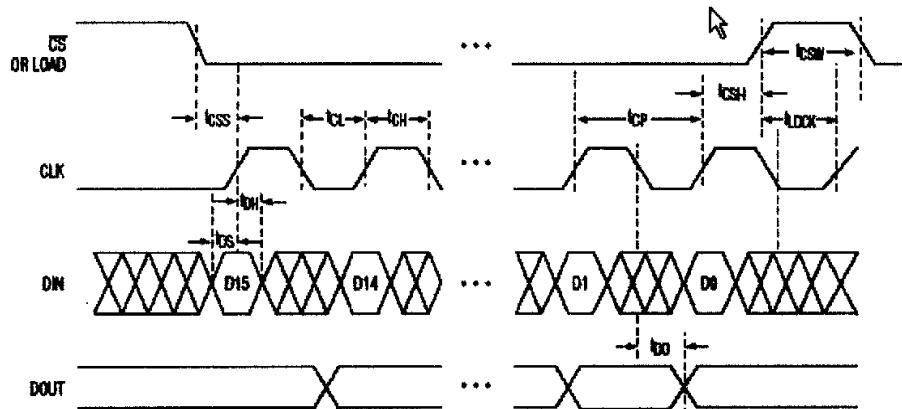


图 4-6 7219 时序图

构成的显示电路见图4-5。使用时，将DIN、LOAD、CLK三个引脚与CPU规定引脚相连，其中DIN为串行数据输入端，其作用是在时钟的上升沿将CPU发送的数据移入16位内部寄存器，在输入时钟信号的每个上升沿，均有1位数据由DIN移入内部寄存器中。LOAD为驱动端，其作用是在其上升沿将16位串行数据锁定。CLK端为时钟线。LOAD必须在第16个时钟上升沿的同时或之后、在下一个时钟上升沿之前变高，

否则数据将丢失。DIGO—DIG7为数码管显示选择端(MAX7219可驱动8位LED分别显示), SEGA—SEGG及SEGDP为七段LED及小数点显示驱动<sup>[33]</sup>。

### 4.2.3 A/D 转换芯片 TLC1543

电涡流测功机系统中采集的模拟信号很多。制动强度设定的输入、电流以及温度都是以模拟量的形式输入的。设计中选择的 A/D 转换芯片是同样具有 SPI 功能的 TLC1543。

TLC1543是美国TI公司生产的众多串行A/D转换器中的一种，它具有输入通道多、转换精度高、传输速度快、使用灵活和价格低廉等优点，是一种高性价的A/D转换器。TLC1543是CMOS、10位开关电容逐次逼近模数转换器。它有三个输入端和一个3态输出端：片选（CS）、输入/输出时钟（I/O CLOCK）、地址输入（ADDRESS）和数据输出（DATAOUT）。这样通过一个直接的四线接口与主处理器或其外围的串行口通讯。片内含有14通道多路选择器可以选择11个输入中的任何一个或3个内部自测试（self-test）电压中的一个。片内设有自动采样—保持电路。在转换结束时，“转换结束”信号（EOC）输出端变高，以指示转换的完成。系统时钟由片内产生，并由I/O—CLOCK同步。片内转换器的设计使器件具有高速（10μs转换时间）、高精度（10位分辨率、最大±LSB 线性误差）和低噪声的特点。TLC1543和微处理器之间的数据传送最快和最有效的方法是用串行外设接口SPI。系统中TLC1543与89s8252的P1口相连，SPI功能由P1口模拟实现。

TLC1543的工作由CS使能或禁止。工作时CS必须为低，CS被置高时，I/O CLOCK 和ADDRESS被禁止以及DATAOUT为高阻状态。其工作方式1的具体的工作时序图如图4-7所示。CS下降沿使DATAOUT引脚脱离高阻抗状态并启动一次I/O CLOCK的工作过程。上一次转换结果的3,4出现在CS的下降沿，以MSB前导方式从DATAOUT 口输出数据，在前4个I/O CLOCK的上升沿将下一次转换模拟通道地址打入 ADDRESSS端。整个构成需要10个时钟周期。

TLC1543的具体应用电路见图4-5。

timing diagrams

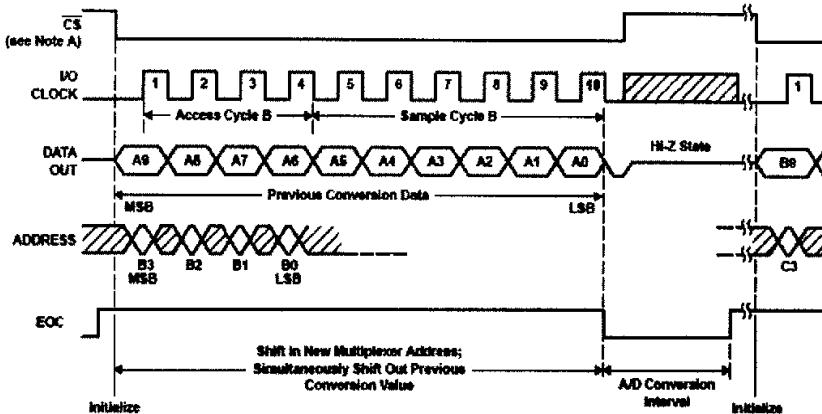


图 4-7 1543 时序图

#### 4.2.4 传感器及其应用电路

##### 1、温度传感器

测量转子圆盘温度的目的是为了考察温度对转子圆盘制动转矩的影响，由于圆盘是转动的而且要求仪器对温度响应性要好，所以只有采取非接触式的测温方法，红外测温方法是目前比较先进非接触式方法。系统中采用非接触式温度传感器 TPS334。

其基本特点如下：

- 1) 远距离和非接触测温—特别适合高速运动物体、带电体、高压及高温物体温度的测量。
- 2) 反应速度快—它不需要与物体达到热平衡的过程，只要接收到目标的红外辐射即可测量目标的温度。测量时间一般为毫秒级。
- 3) 准确度高—由于是非接触测量，不会影响物体温度分布状况与运动状态，测出的温度比较真实，其测量准确度可达到  $0.1^{\circ}\text{C}$ 。
- 4) 灵敏度高、测温范围广泛。

TPS334 的性能指标见表 4.1。

表 4.1 非接触式温度传感器 TPS334 参数

型号	传感器面积( $\text{mm}^2$ )	响应时间(ms)	环境温度( $^{\circ}\text{C}$ )
TPS334	$0.7 \times 0.7$	25	-40~100

图 4-8 中所示的是温度传感器 TPS334 的应用电路<sup>[34]</sup>。

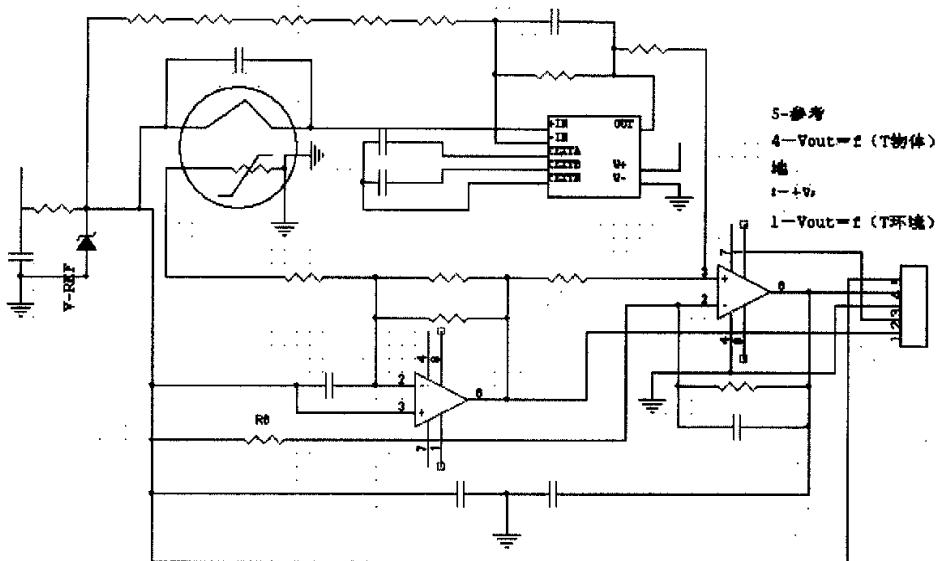


图 4-8 温度传感器电路

## 2、电流传感器

工程中常用的电流传感器有互感式和霍尔式两种。在直流自动控制调速系统中，用霍尔电流电压传感器代替电流互感器，不仅动态响应好，还可实现对励磁线圈电流的最佳控制以及对晶闸管进行过载保护。

霍尔电流传感器的结构如图 4-9 所示。用一环形导磁材料作成磁芯，套在被测电流流过的导线上，将导线中电流感生的磁场聚集起来，在磁芯上开一气隙，内置一个霍尔线性器件。器件通电后，便可由它的霍尔输出电压得到导线中流通的电流。如图 4-10 所示，将霍尔器件的输出电压进行放大，再经电流放大后，让这个电流通过补偿线圈，并令补偿线圈产生的磁场和被测电流产生的磁场方向相反。若满足条件  $I_0N_1 = I_sN_2$ ，则磁芯中的磁通为 0，这时下式成立： $I_0 = I_s(N_2/N_1)$  式中， $I_0$  为被测电流，即磁芯中初级绕组中的电流。 $N_1$  为初级绕组的匝数。 $I_s$  为补偿绕组中的电流。 $N_2$  为补偿绕组的匝数。由上式可知，达到磁平衡时，即可由  $I_s$  及匝数比  $N_2/N_1$

得到  $I_0$ 。所以将电阻 R 上的电压输入控制系统的 A/D 转换器即可测得待测电流  $I_0$ <sup>[35]</sup>。

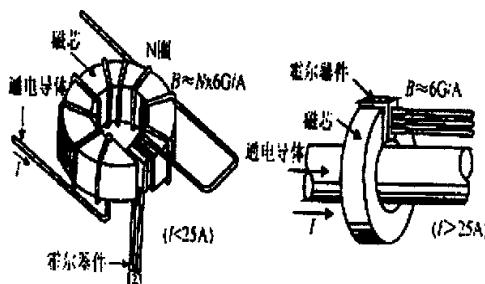


图 4-9 霍尔电流传感器构成原

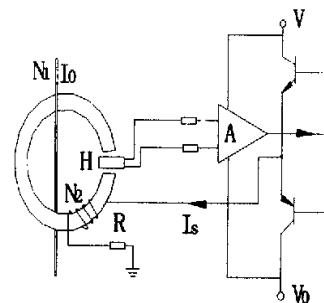


图 4-10 霍尔零磁通电流传感器

课题设计中选用的是南京中旭公司的HNC100LA型电流传感器。它能在电隔离的条件下测量直流、交流、脉冲及各种不规则波形的电压。它的特点是：高精度；良好的线性度；低温漂；频带宽以及抗干扰能力强。

## 2.5 电涡流测功机线圈的驱动及保护电路

如图 4-11 所示的是电涡流测功机线圈的驱动及保护电路，图中的主要元件介绍如下：

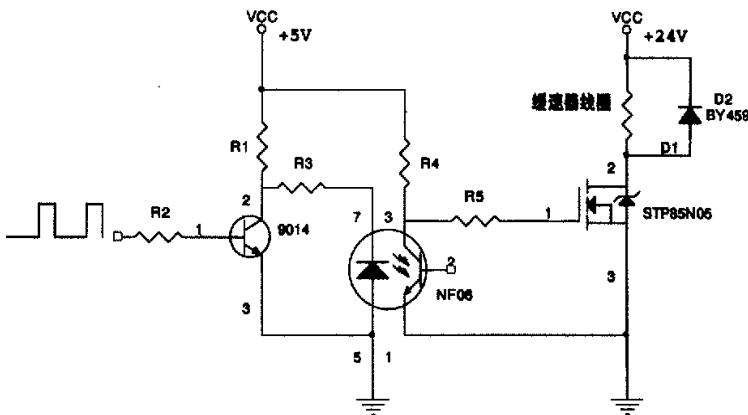


图 4-11 电涡流测功机驱动及保护电路

## a. 开关管的选择：

课题设计中的电涡流测功机一共有 8 个线圈，每两个串联成一组。每组两个串联线圈的阻值是  $4.02\Omega$ ，拖挂车的蓄电池电压一般为 24V。这样每个开关管的最大允许电流应该大于  $5.975A$ ，且开关频率足够高。

选用的功率管是 SGS-THOMSON 公司的 STP80N05 型的 N 沟道加强型 MOS 功率管。它的主要性能特点如下：

- 1) 采用超高密度技术
- 2) 典型  $R_{DS(on)}$  值为  $7\text{ m}\Omega$
- 3) 低门极驱动电压
- 4) 高电流承受能力
- 5)  $175^{\circ}\text{C}$  最高工作温度
- 6) 高开关速率

它的主要性能指标见表 4.2。

表 4.2 STP80N05 型功率管性能参数

参数	$V_{DSS}$	$R_{DS}$	$I_D$	$V_{GS}$	$T_{Max}$
数值	50V	$\leq 0.09$	80A	$\pm 20\text{V}$	$175^{\circ}\text{C}$

## b. 二极管的作用

电涡流测功机的励磁绕组属于感性负载，当开关管关闭的瞬间由于感应效应会在功率管两端产生与原电压方向相反的感应电压。电路中并联在线圈两端二极管的作用是为线圈回路提供释放电感储能的续流回路。设计中选用的是 BY459 型二极管。它的主要特点有：高速的开关特性、软的恢复特性  $VF = 1.2\text{ V} / 1.25\text{ V}$ 、高温表现好以及低的温度阻抗。

## 4.3 系统抗干扰设计

合理的电控单元硬件布置和软件抗干扰措施是保证系统的抗干扰性能，提高系

统可靠性的强有力手段之一<sup>[36]</sup>。

### 4.3.1 电源干扰的抑制

本系统是采用蓄电池作为电源的。系统中将信号电路、功率电路采用光耦器进行隔离，避免了线路共用。

电磁阀的开启会引起电源电压的波纹现象，对单片机的 A/D 采样造成信号波动。在设计上完成一独立的 V<sub>REF</sub> 与 AGND 基准电源设计，至于 AGND，应尽量保证它上面无噪声。而蓄电池供整个汽车电器使用，系统地上噪声信号很强。在单片机电源处理上采用共模低频扼流线圈将 AGND 与系统地 V<sub>SS</sub> 隔开，防止驱动电源±12V 和地线上干扰脉冲窜入数字电路和模拟电路。可以取得很好的效果。实际电源电路包括滤波电路、稳压电路，如图 4-12 所示。滤波电路由共模扼流线圈和电容 C1、C2、C3、C4 组成。滤波后有稳压管 7805 稳压，再由 C5、C6 滤波后供单片机使用。

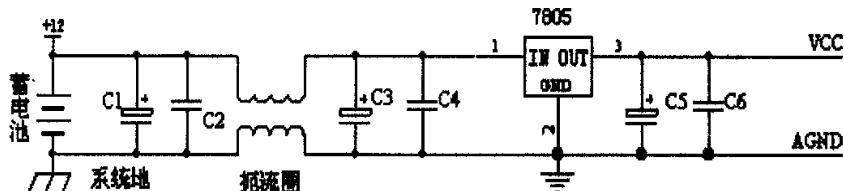


图 4-12 电源滤波与地线分布电路图

### 4.3.2 光电隔离

在输入和输出通道上采用光耦合器件来进行信息传输是很有好处的，它将微机和各种传感器、开关、执行机构从电气上隔离开来，很大一部分干扰（如外部设备和传感器的漏电现象）将被阻挡。对于各种数字信号，光耦合器件进行传送是没有问题的。对于模拟信号，可以用线性光耦合器件来传送。

### 4.3.3 硬件滤波电路

常用 RC 低通滤波器接在一些低频信号传送电路中。可以大大削弱各类高频干扰

信号（各类“毛刺”型干扰相对于慢变有效信号均属于高频干扰）。但硬件滤波电路的主要缺点是体积较大，要增加成本，如果截止频率定得很低（如 0.1Hz），硬件滤波是很难胜任的，还必须配合软件滤波（数字滤波）来实现。

#### 4.3.4 接地的抗干扰措施。

控制系统接地的有效设计能消除接地产生的噪声干扰。系统采用以下有效方法来抑制电线的干扰。

- a) 机壳接地：控制系统的机壳接地，对浮空控制设备采用屏蔽和屏蔽线接地的方法来消除空间产生的电磁干扰。
- b) 并联一点接地：系统中把传感器的输入电路和输出信号电路的地线并联一点接地，使各支路电流在导线上产生的压降互不影响，不会形成干扰。
- c) 交流地与信号地不共用：因在一段电源地线两端间会有数 mV、甚至几 V 电压，对低电平信号的电路来说是一种严重的干扰。系统在信号地接入 RC 滤波电路消除干扰信号地窜入。
- d) 数字地与模拟地

数字地通常有很大的噪声，而且电平地跳跃会造成很大的电流尖峰，系统中转速信号为数字信号、而压力信号为模拟信号，为了有效的消除它们之间的相互干扰，把所有的数字地共线，模拟地共线并且分开走线，各自地汇成一点连接，经汇流线接地。在信号接地前加入一个电阻以降低电流地反窜。

#### 4.3.5 空间干扰抑制

空间电磁干扰指电磁场在线路、导线、壳体上的辐射、吸收与调制。干扰来自应用系统的内部和外部、市电电源是无线电波的媒介，而在电网中有脉冲源工作时，它又有辐射天线，因而任一线路、导线、壳体都存在辐射、接受、调制。在现场解决空间干扰时，首先要正确判断是否是空间干扰。本系统为解决空间干扰，对系统接地进行了良好的设计，在信号传输线路中采用屏蔽线进行信号传输。

#### 4.4 电涡流测功机试验

为确定电涡流测功机所能提供的制动力与励磁电流的关系，进行了的电涡流测功机励磁电流及制动力矩测量试验和高温限流试验。

##### 4.4.1 电涡流测功机测试系统介绍

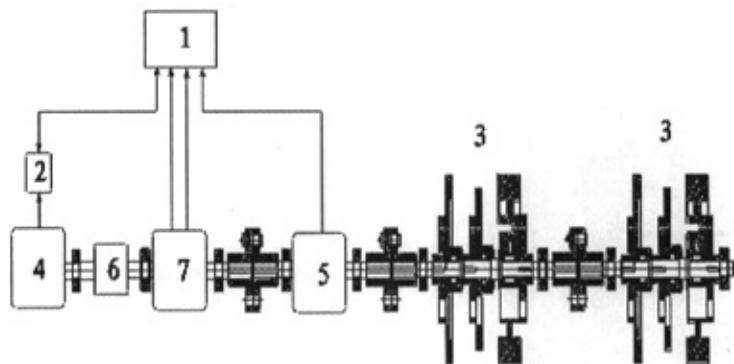


图 4-13 电涡流测功机测试系统示意图

图 4-13 是该测试系统的示意图。系统主要由 PC 机、PCL836 数据采集卡、变频器、电动机、电涡流测功机、自由组合飞轮组和转矩转速传感器等几个部分组成。

另外系统通过 PCL836 数据采集卡将采集的数据送入 PC 机中，PC 机通过数据采集软件显示数据。测试系统中用到的设备如表 4.3。

表 4.3 电涡流测功机测试系统所用的设备

序号	设备名称	型号	生产厂或备注
1	电流传感器	HNC-100LA	南京中旭电子科技有限公司
2	电压传感器	HNV025T	南京中旭电子科技有限公司
3	温度传感器	TPS334	PerkinElmer 公司
4	控制用计算机	Pentium3	—
5	电动机	YVP180M-2	上海电机厂有限公司
6	电磁离合器	DLY400	天津市首达永恒离合器厂
7	PCL836 采集卡	PCL-836	ADVANTECH 公司
8	变频器	西门子 MM430-18.5	西门子公司

# 华中科技大学硕士学位论文

---

## 4.4.2 实验数据

电涡流测功机的电流特性如图 4-14 所示。

不同测试速度下，制动力矩均随着励磁电流的增大而增大。电流与力矩之间近似是一种正比关系。增长速率大约为  $15\text{-}20\text{N.m/A}$ 。这说明课题中设计的电涡流测功机的力矩可以实现无级调节，能满足摩托车底盘测功机对制动力的控制要求。在软件设计中可以将电涡流测功机电流与力矩之间的关系用比例环节代替。

在评定电涡流测功机性能指标中，温度是对制动转矩的影响的一个很重要的参数，电涡流测功机的最高温度约为  $145^{\circ}\text{C}$ 。电涡流测功机温度升高会造成气隙减小，严重时会造成电涡流测功机的卡死。所以实现电涡流测功机的限流功能是十分必要的。

在限流试验中我们利用电涡流测功机测试系统模拟电涡流测功机在持续工作时的情况，由于电涡流测功机工作时间长，所以电涡流测功机的温度会随着工作时间的增长而不断的升高。当设计系统中的温度传感器监测到电涡流测功机温度超过设定上限时，ECU 会发出控制指令减小励磁线圈电流。当温度恢复到正常值时再次增大励磁电流。整个过程中由温度、转矩及电压传感器电涡流测功机温度、转矩等参数。

实验中利用温度传感器采集电涡流测功机转子温度，采样频率为每秒钟 10 次。ECU 中设定的电涡流测功机的最高工作温度是  $100^{\circ}\text{C}$ 。当 ECU 检测到电涡流测功机温度等于或超过  $100^{\circ}\text{C}$  时切断励磁电流。断电时间为 50ms，这么短的断电时间所以驾驶员不会感觉到什么变化。图 4-15 所示是经电子控制后电涡流测功机产生的制动力矩和转子温度曲线。

上述限流实验是在实验室中进行的，主要利用风机对电涡流测功机控制系统的限流原理及实现方法。具体的控制策略有待进一步完善。

除了上述选择温度作为限流的控制参考量外，还可以选择蓄电池电压以及其他参考量作为限流的依据。

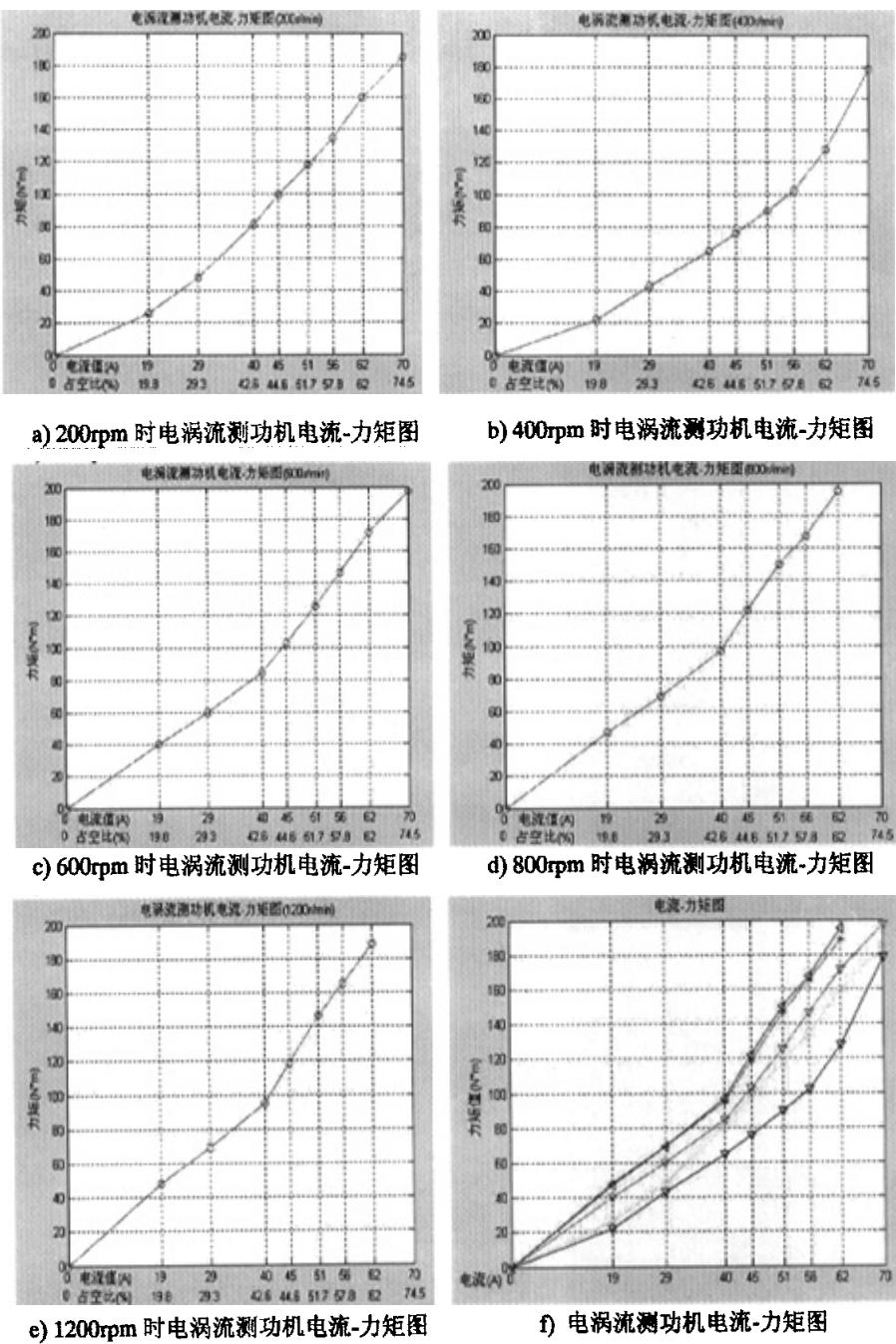


图 4-14 电涡流测功机不同转速下对应不同占空比的转矩

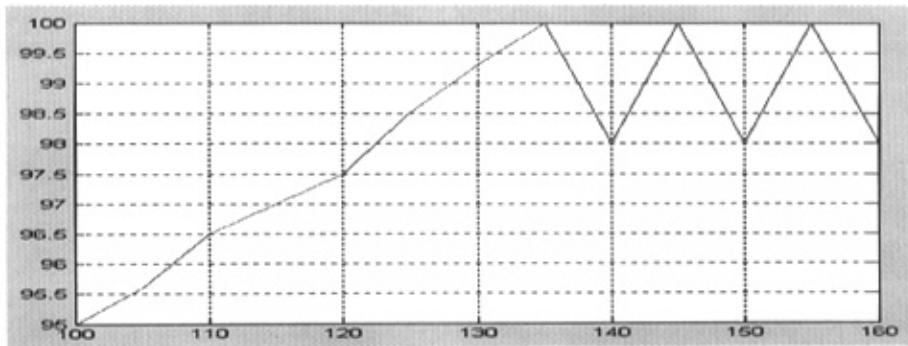


图 4-15 电涡流测功机温控曲线

#### 4.5 小结

设计了电涡流测功机用的 PWM 控制电系统，并用实验数据验证电涡流测功机励磁电流与制动力之间的关系，为摩托车底盘测功机电模拟惯性力提供实验基础，并系统研究了控制系统的抗干扰问题。

## 5 控制系统的硬件及软件设计

硬件系统的设计对整个底盘测功机的设计是至关重要的，硬件系统的设计的好坏直接影响到这个系统运行的稳定性，测量数据的精确性，系统的实时性。该控制系统的设计是基于 CAN 总线的。CAN (Controller Area Network) 即控制器局域网络。由于其高性能，高可靠性，及独特的设计，CAN 越来越受到人们的重视。国外已有许多大公司的产品采用了这一技术<sup>[37]</sup>。CAN 最初是由德国的 BOSCH 公司为汽车监测，控制系统而设计的。众所周知，现代汽车越来越多地采用电子装置控制，如发动机定时，注油控制，加速，刹车控制（ASC）及复杂的防抱死制动系统(ABS)等。由于这些控制需要检测及交换大量数据，采用硬接信号线方式不但繁琐，昂贵，而且难以解决问题，采用 CAN 总线上述问题可以得到很好的解决。有关资料表明，世界上一些著名的汽车制造商，如 BENZ(奔驰)、BMW(宝马)、PORSCHE (保时捷)、ROLLS-ROYCE(劳斯莱斯)和 JAGUAR(美洲豹)等都已开始采用 CAN 总线来实现汽车内部控制系统与各检测和执行机构间的数据通信。CAN 总线本身的特点，其应用范围目前已不再局限于汽车行业，而向过程工业、机械工业、纺织工业、农用机械、机器人、数控机床、医疗器械、楼层自动化及传感器等领域发展。CAN 已形成国际标准<sup>[38] [39]</sup>。

控制系统主要有三个节点，包括数据采集节点、控制节点、CAN 通讯节点。数据采集节点主要负责底盘测功机整个系统的数据采集和传输；控制节点则是根据数据采集节点发送的数据以及上位机的控制要求进行处理，然后向电涡流测功机发出控制信号，实现对测功机的精确控制；通讯节点主要负责将上位机和下位机之间的数据交换进行转换和传输。这样整个系统分工明确，编程简单<sup>[40]</sup>。

控制系统的原理框图如图 5-1 所示：摩托车底盘测功机通过 CAN 数据采集节点对系统采集的数据进行处理，然后通过 CAN 控制节点对摩托车底盘测功机进行控制。

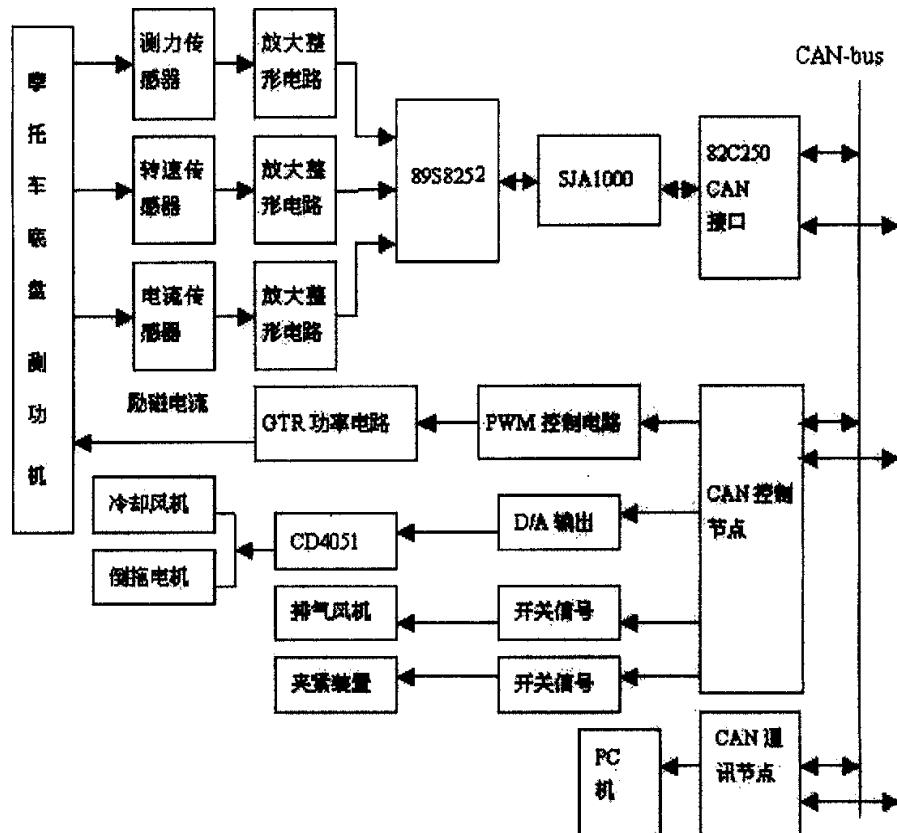


图 5-1 控制系统原理框图

在本系统中，控制系统需要测量的参数主要有滚筒的转速，测功机的扭矩以及加载电流的大小、尾气排放、油耗等。控制系统采用闭环控制，因此这些控制参数的测量至关重要。参数测量好以后经过放大整形电路输入到 AT89S8252，经过单片机的处理以后发到 CAN 总线上。

### 5.1 CAN 数据采集节点原理图

采集节点微控制器选用 AT89S8252（如图 5-2 所示），CAN 接口由独立控制器

SJA1000 和 CAN 控制器接口芯片 82C250 组成，SJA1000 是 Philips 公司生产的独立的 CAN 控制器，它在汽车和普通的工业应用上有先进的特征。SJA1000 有一系列先进的功能，适合于多种应用，特别在系统优化、诊断和维护方面非常重要<sup>[41]</sup>。

SJA1000 独立的 CAN 控制器有两个不同的操作模式：

- BasicCAN 模式
- PeliCAN 模式

BasicCAN 模式是上电默认的操作模式，PeliCAN 是新的操作模式，它能够处理所有的 CAN2.0B 规范的帧类型。而且它还提供一些增强功能使 SJA1000 能应用于更宽的领域<sup>[42]</sup>。

SJA1000 通过 CAN 控制器接口芯片 82C250 连接在物理总线上。82C250 器件提供对总线的差动发送能力和对 CAN 控制器的差动接收能力，完全与 ISO11898 标准兼容。其引脚 8 (Rs) 允许选择三种不同的工作方式：高速、斜率控制和待机。在低速和总线长度较短时，一半采用斜率控制方式，限制上升和下降斜率，降低射频干扰，斜率可通过由引脚 8 至地连接电阻进行控制。斜率正比于引脚 8 上面的电流输出。

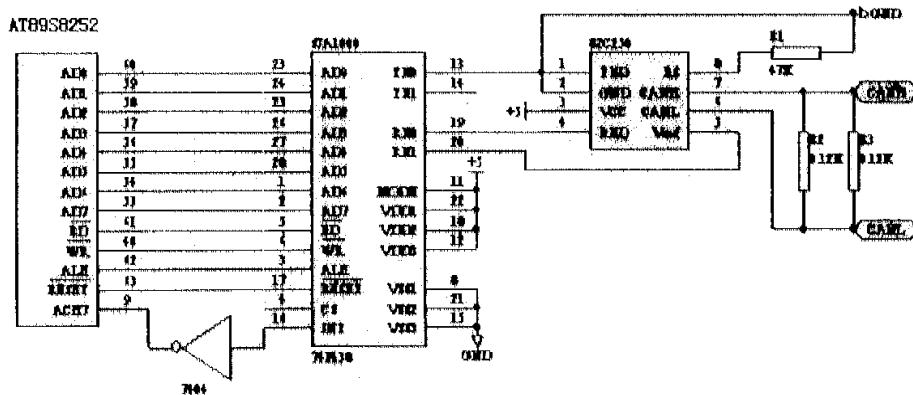


图 5-2 数据采集节点硬件原理图

采集过来的各种数据经过放大整形以后输入到 AT89S8252 中，微控制器对数据经过处理以后就可以将这些数据通过 CAN 接口发送到 CAN 总线上面。

## 5.1.1 转速信号处理电路

底盘测功机中的转速信号是个十分重要的控制参数，因此准确的测量这个参数显得尤为重要，信号的获取是在底盘测功机的滚筒轴上装有测速齿轮，每转一周装在测速齿轮上的转速传感器（磁电式传感器）产生 60 个脉冲信号，电涡流测功机的磁电式传感器输出的转速信号是交变的电压信号，先对信号进行放大整形，信号输入 AT89S8252 中。测量方法是使用测周法，只测信号的一个脉冲的周期，因此测试程序简化<sup>[43]</sup>。

## 5.2 CAN 控制节点原理图

底盘测功机控制系统的控制节点是控制系统的核心，它要对采集系统送过来的数据以及上位机发出的指令进行运算和处理，然后通过 D/A 输出向电涡流测功机发出控制信号，从而达到上位机的要求。

控制节点的原理图跟采样节点的原理图类似，但是为了达到控制电涡流测功机的目的，控制节点的后向通道加上了 D/A 输出，D/A 输出采用 MAX501 芯片。MAX501 是一个 12 位的 D/A 输出芯片，可以完全满足测功机的控制精度。D/A 输出电压加载到移相触发电路上面，由移相触发电路对可控硅整流电路进行控制。

### 5.2.1 输出通道的原理图

D/A 芯片用的是 Matrix 公司生产的 8 位的 MAX522 芯片，图 5-3 是 MAX522 的结构图，它是个电压输出型的 D/A 转换器。其内部的电阻都是用来在转换时候补偿用的。它内部带有一个运算放大器。

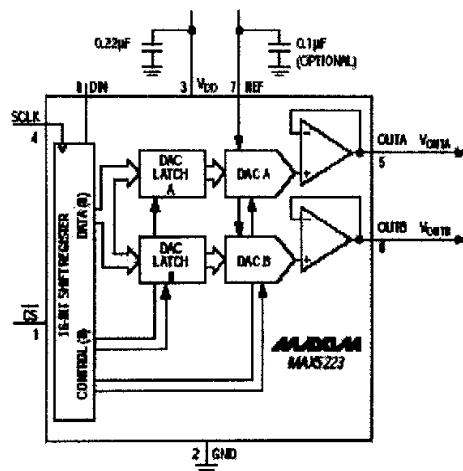


图 5-3 MAX501 的结构图

D/A 芯片需要两片，其中一片是控制 PWM 控制器，另外一片要用来分时控制变频器和倒拖电机，下面是用于控制移相触发电路的原理图，另外一片的电路与该电路相类似。

### 5.2.2 开关信号输出

该测功机还有排气鼓风机和夹紧装置电磁阀需要控制，采用 AT89S8252 空余的 I/O 口来进行控制，拟用 P1.0 和 P1.1 分别控制排气鼓风机和夹紧装置电磁阀，控制信号需要经过大功率三极管 2073 放大，驱动来实现。

## 5.3 通讯节点

在很多场合，嵌入式系统与 PC 机多采用 RS232/RS485 串口连接进行通讯，其缺点是通信速度低、可靠性不高。而 PCI 卡虽然通信速度快，但是安装很不方便，价格昂贵，而且开发周期也非常长。USB 总线（通用串行总线）是 Microsoft、Compaq、Intel、NEC 共同制订的一个串行总线标准，由于其通信速度快，连接简便、可靠性高等特点，正在计算机系统应用领域得到迅速发展。因此将 USB 应用到底盘测功机

也是一种新的尝试<sup>[44]</sup>。

### 5.3.1 USB 的主要优点

通用串行总线(USB)是近几年发展起来的一种新的总线接口规范,由于其具有众多优点,因此得到了迅速发展。现在绝大多数PC机上配备了USB主控制器和根集线器,操作系统也对USB全面支持,同时,众多具有USB接口的外围器件也大量出现,如键盘,鼠标,扫描仪,打印机等。

传统的数据采集外设与PC机通信一般采用PCI,ISA以及RS-232串行总线。然而PCI和ISA总线插拔麻烦,RS-232串行总线传输速率低,相比之下,USB具有如下特点,对上述问题予以解决。

- (1) 高速性。高速设备传输速率为480MB/S,全速设备传输速率为12MB/S。
- (2) 可靠性。USB规范中的硬件,电缆等确保了噪声的削弱,传输协议中也具有错    误校检,要求重发等规定,同时这些都由硬件完成,无需开发者编写。
- (3) 易用性。USB支持即插即用和热插拔。插拔时不必打开机箱。
- (4) 内置电源。PC机的USB接口及集线器可以提供5V电源以及最大500mA电流。对于低功率外设,避免了配备外部电源的麻烦。

### 5.3.2 接口硬件设计

CAN节点和USB接口的微控制器都采用采用Philips公司的P89C52,CAN总线接口采用Philips公司的SJA1000CAN控制器和PCA82C250CAN驱动芯片构成,同时在通信控制器和CAN驱动芯片之间采用6N137高速光耦进行光电隔离,从而有效的防止测试现场的电磁干扰。

USB接口由P89C52和Philips公司的PDIUSBD12芯片构成,PDIUSBD12能够实现微控制器的并行总线到USB总线的接口功能,且编程方便,适用于多种微控制器。它具有实现USB功能的PLL(Phase-locked Loop)、SIE(Serial Interface Engine,

串行接口引擎)、FIFO(先进先出队列)模块,与一个普通的微控制器相连接,再加上必要的外围芯片,就可实现一个功能完备的USB外设。PDIUSBD12是一个性能优化的USB器件,通常用于基于微控制器的系统并与微控制器通过高速通用并行接口进行通信,也支持本地DMA传输。该器件采用模块化的方法实现一个USB接口。允许在众多可用的微控制器中选择最合适作为系统微控制器。允许使用现存的体系结构并使固件投资减到最小。这种灵活性减少了开发时间、风险和成本,是开发低成本且高效的USB外围设备解决方案的一种最快途径。PDIUSBD12完全符合USB1.1规范。

图5-4是CAN转USB接口的硬件电路设计。SJA1000的片选信号使用89C52的P2.0,PDIUSBD12的片选信号使用89C52的P2.1。PDIUSBD12中的A0接地, PDIUSBD12通过ALE的下降沿是锁存地址信息。奇数地址的输出为命令,偶数地址的输出为数据。

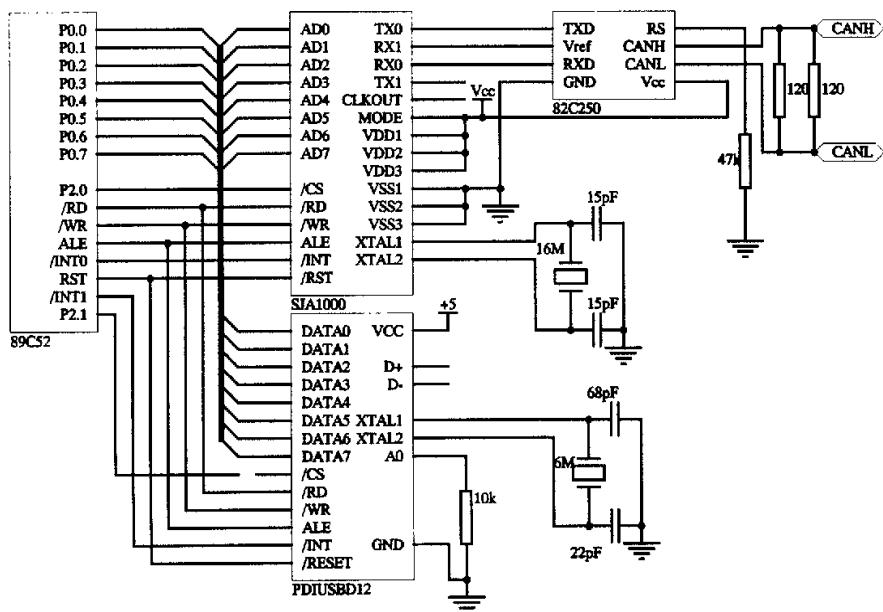


图5-4 CAN转USB接口原理图

## 5.4 系统软件设计

下面对测功机上位机及下位机的软件设计作一介绍。

### 5.4.1 下位机软件设计

该底盘测功机的主要功能是满足十五工况法测摩托车污染排放的道路阻力模拟，因此系统软件的设计主要也是针对测试摩托车污染排放而设计的。

控制节点和采样节点用的控制器是 AT89S8252，而通讯节点的控制器用的是 89C52。为了使程序简化，易懂同时可移植性增加，因此下位机的编程采用 C 语言。C 语言作为一种通用的中级语言，大幅度提高了单片机系统开发的工作效率，使之能够充分发挥出单片机处理器日益提高的性能，缩短产品的周期。

作为中级语言，C 语言支持对位字节和地址有关计算基本成分的操作，支持对位、字（字节）、指针的直接操作。C 语言又是具有高级语言特征的结构化语言，即：将程序和数据分离，通过子程序变量的定义可以将各部分程序功能模块化。汇编语言虽然是单片机最基本的语句，它对各个单元寄存器可以直接操作，使用灵活，但编程效率低，调试和修改困难。虽说比较简单的控制程序还能够用，但对于大的应用程序的开发效率简直难以忍受，因为汇编语言是非结构化语言，数不清的调用、跳转和下标将使程序难于阅读、改进和维护。更重要的是，从发展的角度，它不能在不同的单片机之间移植。总之，C 语言最重要的是移植性好，便于理解和维护，编程效率高；缺点是执行效率较汇编语言慢。

同时软件的设计也采用了模块化设计，各个模块之间的功能是相互独立的，通过变量进行联系，这样可以增加程序的可读性，同时也使得软件的维护和修改更加方便。

图 5-5 是整个控制系统的软件模块框图。

从图中可以看出，整个下位机系统的控制软件的编写都是模块化的，数据采集节点的软件所要完成的功能是根据上位机的要求完成数据的采集功能。而通讯节点的主要软件功能是通讯模块，完成上位机与下位机之间的相互通信。而控制节点的

软件显得较为复杂，其中的控制部分主要有四个子模块，分别是道路阻力模拟，测功机倒拖模块，扭矩传感器的标定模块和控制输出模块。其中的详细功能在后面将详细论述。

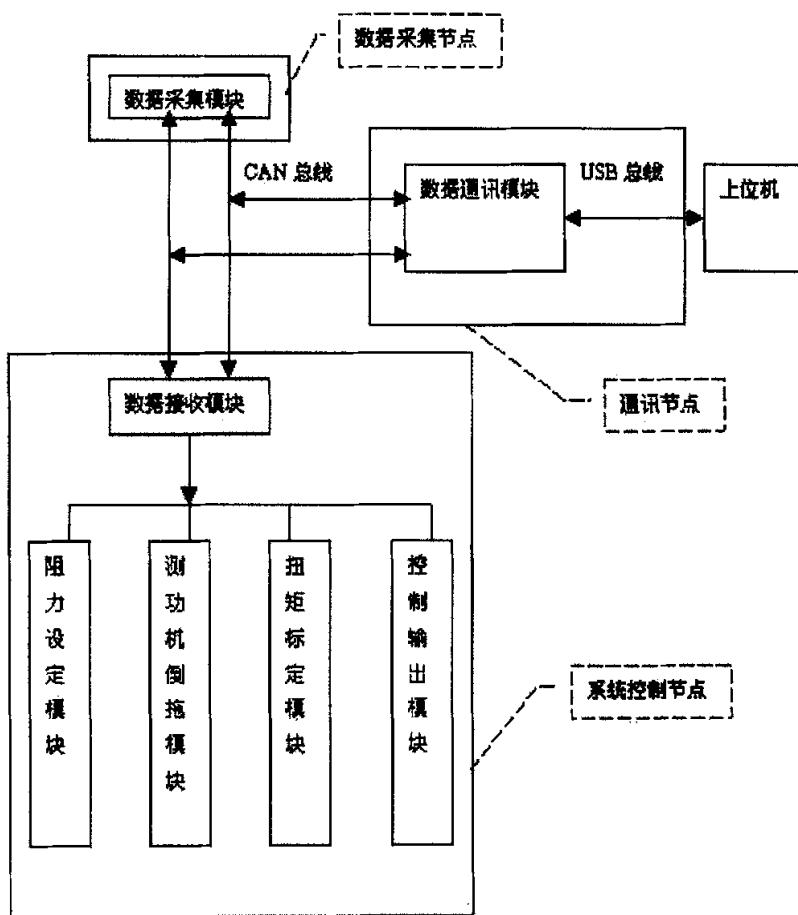


图 5-5 控制系统软件框图

### 1) 数据采集节点的软件设计

数据采集节点的主要功能是将整个控制系统所需要的参数采集过来并且通过控制器发送到 CAN 总线上面。其主要采集的数据包括滚筒的转速、扭矩、加载电流，同时也可增加其余的一些需要测量的参数，如油耗等。由于 CAN 总线是个局域网，因此，如果接口允许的话，测量的污染物排放的参数也可以扩展到这个节点中来，这

样，上位机软件的编写就只需要针对一个通讯节点，这样可以减少软件的开发周期。

数据采集节点软件流程如图 5-6 所示。

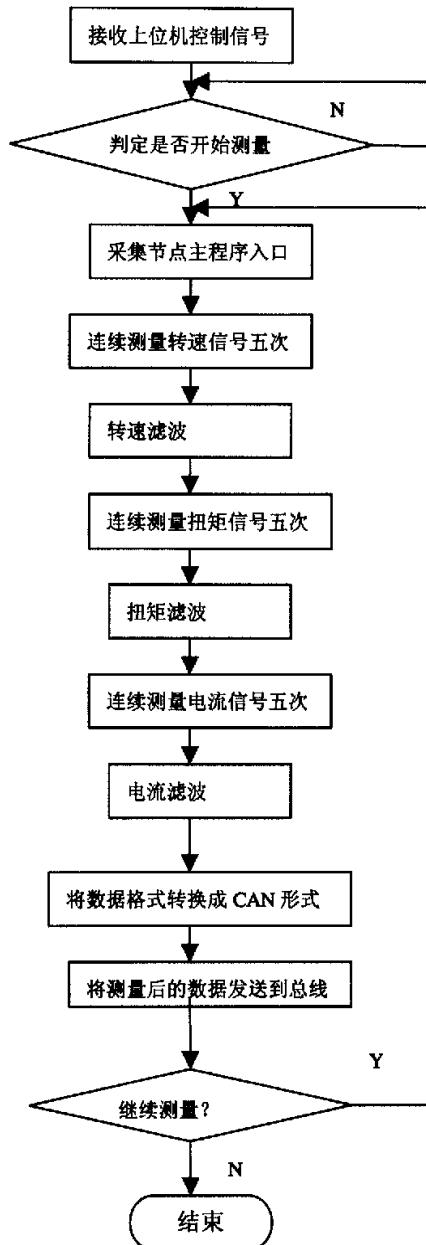


图 5-6 数据采集节点软件流程图

## 2) 控制节点软件设计

控制节点是整个系统的核心，该节点软件的设计的好坏将直接影响到整个控制系统的品质。控制节点主要完成的任务是根据上位机的要求读取数据采集节点的数据，对数据进行判定和运算，然后通过 PID 调节器进行电涡流底盘测功机的阻力设定，从而达到模拟路况的目的。其主要的控制过程是对十五工况法测摩托车污染物排放时进行道路模拟。

道路阻力设定模块主要是控制十五工况法测试摩托车排放污染物的时候的阻力模拟。恒速校正试验模块的软件功能是根据上位机的指令进行底盘测功机的恒转速控制，然后通过数据采集节点采集数据得到整个系统的总的摩擦阻力。扭矩传感器标定模块软件比较简单，主要是对扭矩传感器进行置零和标定。测功机倒拖试验模块的软件和道路模拟试验模块的软件比较类似，因此下面详细说明一下道路阻力模拟的控制原理图和软件的框图。

图 5-7 是道路模拟控制系统原理图，它采用扭矩闭环控制，控制方式采用数字 PID 调节器，。扭矩调节器的输出作为 PWM 的输入电压，该电压的改变可以调节电涡流测功机。

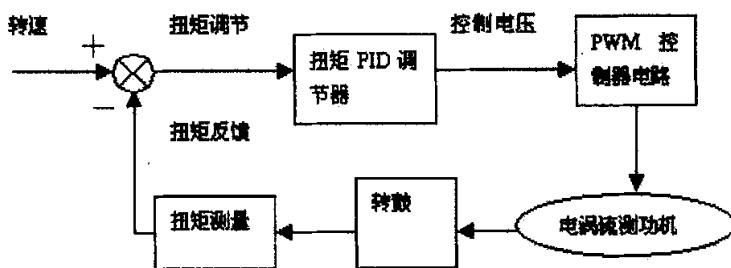


图 5-7 道路模拟控制原理图

图 5-8 是道路阻力模拟的软件框图，控制节点接收到上位机的控制命令以后，对控制命令进行判定，选择需要执行的模块。开始读取数据采集节点的数据，对数据采集节点发送过来的数据进行判定，运算以后向电涡流测功机发出控制信号，对

电涡流测功机进行调节。其中的扭矩调节用到了数字 PID 调节器，PID 控制算法是一种比较成熟的控制算法。

对于摩托车在底盘测功机上的恒速运行，电涡流测功机的控制模式将采用恒扭矩的控制方式。而对于摩托车在底盘测功机上的变速运行，电涡流测功机的控制将采用经验法，利用测功机的制动力与加速度之间的曲线，向测功机加载电流。

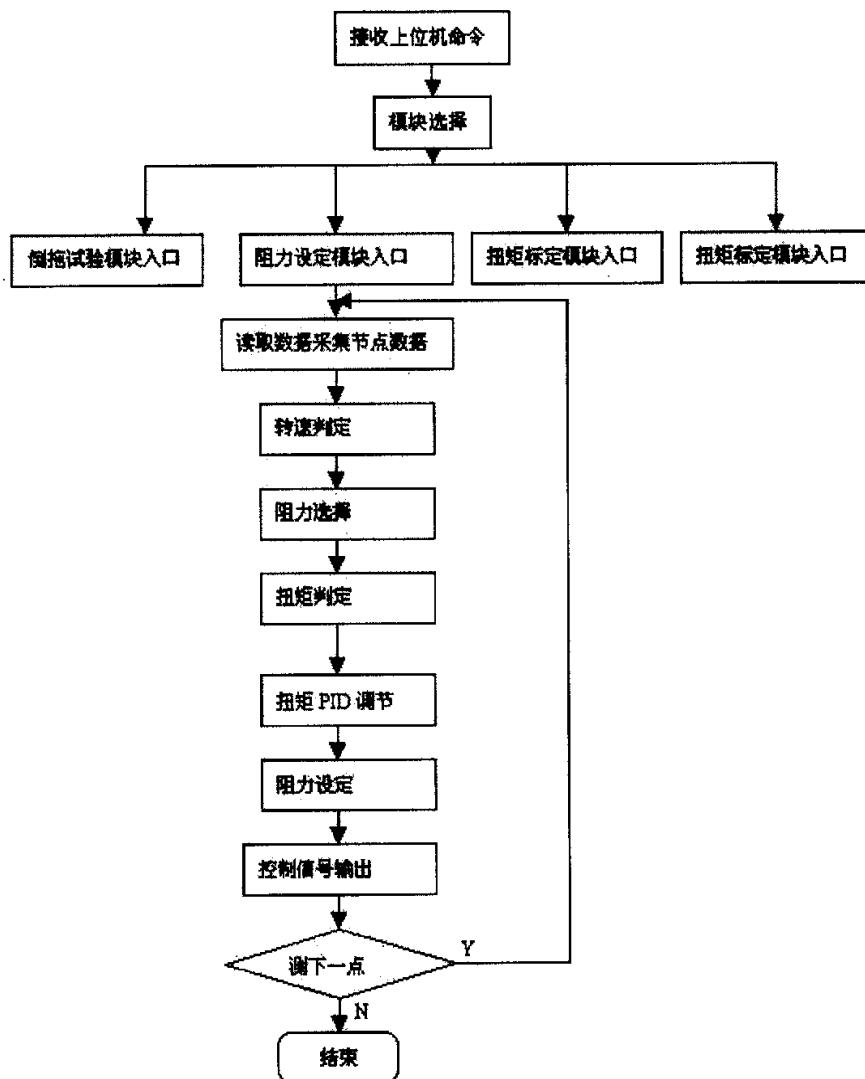


图 5-8 道路阻力模拟软件流程图

# 华中科技大学硕士学位论文

---

对于该控制系统而言，其中每个反馈过程都有一个 PID 调节器，PID 调节器的设计对控制系统来说至关重要，下面简要的解释一下该测功机的 PID 调节器的设计思想。

## 5.4.2 数字 PID 控制器设计

在摩托车底盘测功机控制系统中，恒速功能主要依靠调节电涡流测功机励磁绕组的励磁电流来实现。测功机调速系统是利用单片机及传感器组成的闭环控制系统。硬件部分已经在前面章节介绍过了，这里主要介绍控制算法及软件的实现。具体步骤是先确定控制采用的算法，然后是建立恒速控制系统的模型。然后依据建立的模型进行控制参数的优化，最后是仿真的结果。

### 1) 系统结构及数学模型

测功机恒速控制中以车速为控制目标，主要通过调节测功机励磁电流进行实现。所以所设计的系统属于典型的数字直流控制系统。以下依据直流控制系统的设计方法设计系统。

连续系统中的工程设计方法因其方法简单，使用方便，得到了广大工程技术人员的欢迎。计算机控制的 PWM 系统仍然可以使用连续域的工程设计方法，其步骤是，首先应用连续域工程设计方法求出调节器；然后对调节器进行离散化处理，再变换为差分分出进行计算机的编程。

在使用模拟系统设计方法时，应建立连续域系统数学模型。系统动态数学模型如图 5-9 所示。图中的信号  $v_s$  为设定车速信号， $v$  为输出车速，ASR 为车速调节器。

系统中的被控对象是要实现恒车速的车辆。它的输入是电涡流测功机提供的受车速调节器控制的制动力矩，它的输出是车速。由于被控对象车辆的模型比较复杂，其精确的数学表达式很难得到。所以课题中仍然利用上一章建立的 SIMULINK 可视化模型进行控制器的设计。

系统中使用高速开关器件 MOSFET 或者 IGBT 作为 PWM 功率变换器，其开关频率在 10kHz 以上，它所产生的延迟时间可以忽略。因此 PWM 功率变换器可以作

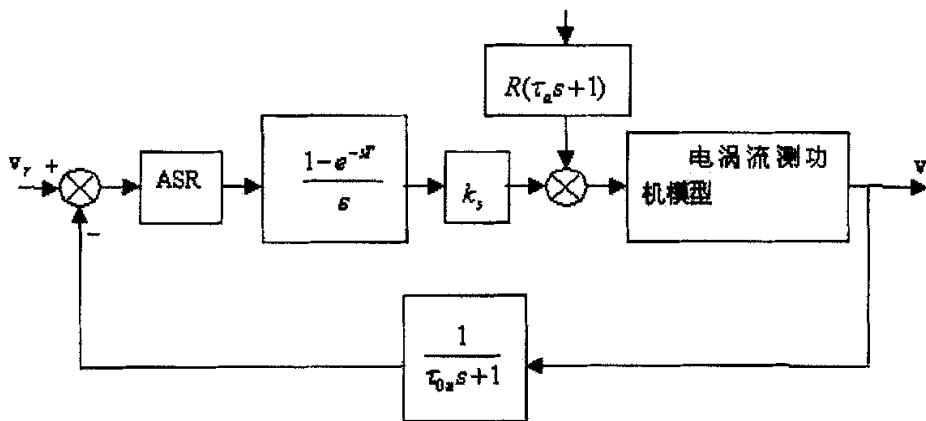


图 5-9 恒速控制系统的动态结构

为放大环节考虑，即  $\frac{U_d(s)}{U_a(s)} = K_s$ 。其中为计算机控制规律计算后得到的数值。而在

实际系统中应将  $U_a(s)$  转换为 PWM 的占空比  $\rho$ ，使加在电涡流测功机励磁线圈的平均电压  $U_d(s) = \rho U_s(s)$ 。当计算机使用实际数据计算时  $U_a(s) = U_d(s)$ ，于是在数学模型中有  $K_s = 1$ 。

测速传感器可以认为是放大环节；但速度信号中存在脉动或者噪声与干扰而需要增加信号滤波器。滤波器可以用硬件实现也可以用软件实现。无论采用何种滤波器，其传递函数都可以用一阶惯性环节来近似，即

$$\frac{v_D(s)}{v(s)} = \frac{\alpha}{\tau_{0n}s + 1}$$

式中  $\tau_{0n}$  — 滤波器的等效时间常数

$\alpha$  — 测速环节的增益

$v_D$  — 处理器计算的转速值。

如果处理器内使用实际转速数据进行运算，将采样信号变换为实际转速数据，这样可以认为  $\alpha = 1$ 。

采样系统的采样开关与零阶保持器传递函数可以近似为

$$G_h(s) \approx \frac{1}{\frac{T_s}{2}s + 1}$$

## 2) 数字控制器设计

### (1). PID 算法

PID(比例微分积分)控制是连续系统中技术成熟、应用最广泛的一种控制方式，也是我们在设计中采用的控制方法。它最大的优点是不需要了解被控对象的数学模型，只要根据经验进行调节器参数的在线整定，即可获得满意的结果，并且实施容易，因而 PID 控制保持了长久的生命力。它的不足之处是对被控对象参数变化敏感，对纯滞后的被控对象控制效果较差。

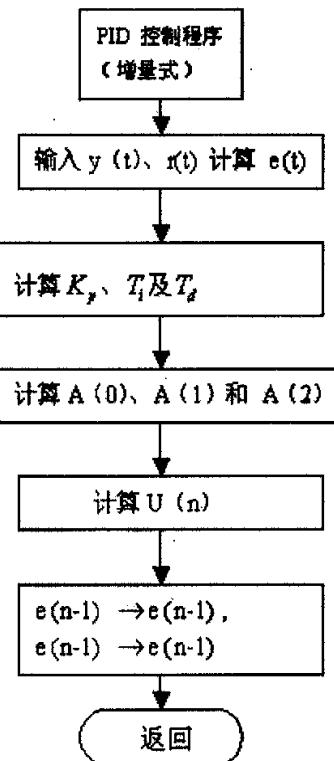


图 5-10 增量式 PID 算法流程图

被控对象德控制量  $u$  和偏差的传递函数关系是  $U(s) = (K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s)E(s)$

# 华中科技大学硕士学位论文

式中  $U(s)$ 、 $E(s)$ —系统控制量  $u$  和  $e$  的拉氏变换。

$K_p$ —比例系数  $K_i$ —积分系数  $K_d$ —微分系数

控制量  $u$  由  $e$  的比例、积分和微分部分线形组合而成，故称 PID 控制器。调节器作为一种校正环节对被控对象校正，使闭环系统得到预期的控制效果。通过调整比例、积分和微分系数可以得到不同特性的控制系统。

PID 控制器参数值对系统的影响：

$K_p$ —加快响应速度，减小静差。过大会产生较大超调，产生振荡，破坏稳定性。

$T_i$ —减小超调及振荡。但系统的静差消除随之减慢。

$T_d$ —加快响应、减小超调，增加稳定性。但系统抗干扰能力下降。

PID 算法既可以采用经典的控制理论在频率域中对被控对象的传递函数进行校正设计，也可以在 Z 域中对离散系统的模型进行设计。可以用上述原则适当确定各个环节的参数或用调节器零点去消除被控对象的极点，设计出理论上的控制器，但这主要依赖于传递函数模型的精度。这对我们要设计的恒速系统是不合适的。因而目前实际中 PID 的设计大多采用不依赖于模型的算法，即直接将时间域的 PID 控制规律变为离散控制规律。

标准的 PID 控制器模型为  $u(t) = K_p \{e(t) + 1/T_i \int_0^t e(t)dt + T_d * de(t)/dt\}$

上式经数字离散后得增量 PID 算式  $\Delta u(n) = A_0 * e(n) - A_1 * e(n-1) + A_2 * e(n-2)$

位置式 PID 控制算法可由上式推得

$$u(n) = u(n-1) + A_0 * e(n) - A_1 * e(n-1) + A_2 * e(n-2)$$

其中  $K_p$ —比例放大系数

$T_i$ —积分时间常数

$T_d$ —微分时间常数

$T$ —采样周期

# 华中科技大学硕士学位论文

$e(t) = r(t) - y(t)$  是输出量与给定值的误差（设定车速与实际车速的差值）。

$$A_0 = K_p \{1 + T/T_i + T_d/T\}$$

$$A_1 = K_p \{1 + 2T_d/T\}$$

$$A_2 = K_p * T_d / T$$

在本系统中， $u(n)$ 、 $u(n-1)$  为本次及前一次的控制器输出（电压值）。 $e(n)$ 、 $e(n-1)$  及  $e(n-2)$  是本次控制器输入误差、前一次和前两次的控制器输入误差（转速差值）。图 5—10 为 PID 算法流程图，在初始化程序中  $e(n-1) = e(n-2) = 0$ 。

## (2). PID 参数选择方法 ( $K_p$ 、 $T_i$ 和 $T_d$ 的确定)

$K_p$ 、 $T_i$  和  $T_d$  的确定可以通过理论设计法和试验设计法两种方法获得。

### i). 试验设计法

下列两种试验方法来选择 PID 控制参数就成为目前经常采用的，并且行之有效的方法。

#### a. 试凑法

PID 控制器的参数整定不是唯一的，事实上比例、积分和微分三部分相互作用影响。从应用角度看，只要被控对象主要指标达到设计要求即可。人们根据长期的实践经验发现，各种不同的被控对象的 PID 的参数都有一定的范围，这就给现场调试提供了一个基准。表 5-1 给出了几种被控量 PID 参数的经验数据，可供参考。

表 5-1 常见被调量的 PID 参数经验数据

物理量	特点	K <sub>p</sub>	T <sub>i</sub> /min	T <sub>d</sub> /min
液位	允许有静差，可不用积分和微分	1.25~2.5		
压力	对象的滞后不大，可不用微分	1.4~3.5	0.4~3	
温度	对象有较大滞后、常用微分	1.6~5	3~10	0.5~3
流量	时间常数小，并有噪声，K <sub>p</sub> 、T <sub>i</sub> 较小，不用微分	1~2.5	0.1~1	

具体试凑时可以按照比例—积分—微分的顺序反复调试参数。具体步骤如下：

# 华中科技大学硕士学位论文

首先，增大比例系数，观察响应，直到响应快、超调量小为止。如果此时的静态误差已在允许的范围内，并且达到 $1/4$ 衰减度的响应曲线，那么只需用比例环节即可。

然后如果在比例基础上静态误差仍然达不到要求，则必须加入积分环节。试凑时先给一个较大的值，将上一步获得的比例系数略微减小（例如取原值的80%），然后逐渐减小积分常数，根据获得的响应曲线进一步调试比例和积分常数，直到满意<sup>[45]</sup>。

最后，如果仍不能满意加入微分环节。先给一个很小的微分常数，逐渐增大同时调节其他两个常数直到满意。

## b 经验法（临界比例法）

首先将控制器选为纯比例控制器，并形成闭环。改变比例系数，使之由小到大变化使系统的阶跃响应达到临界状态，记下此时的比例系数  $K_r$  及临界振荡周期  $T_r$ ，根据 Ziegler-Nichols 提供的经验公式，就可以得到控制器参数，如表 5.2。

表 5.2 临界法参数整定表

类型	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_r$		
PI	$0.45K_r$	$0.85T_r$	
PID	$0.6K_r$	$0.5T_r$	$0.12T_r$

ii) 理论设计法—将直流电机看作一阶滞后环节（建立近似模型）

如图 5-11 的恒速系统的模型。

系统的模型可以近似认为是一阶滞后环节  $G(s) = R * e^{-sL} / (1 + sT)$ 。式中的  $R$ 、 $L$  和  $T$  可以由阶跃输入响应曲线得到。如图 5-12 的直流电机阶跃响应曲线，可以人工测量出  $R$ 、 $L$  和  $T$  参数。而后通过 Ziegler-Nichols 设定方法和最优整定方法确定出  $K_p$ 、 $T_i$  和  $T_d$ 。

## a. Ziegler-Nichols 设定方法

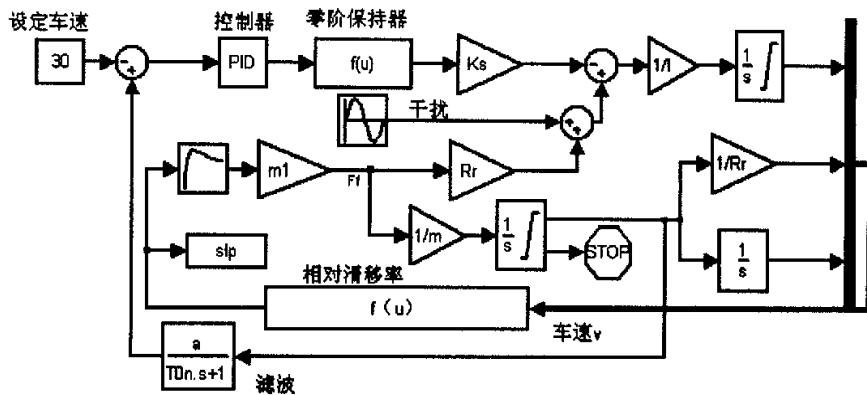


图 5-11 恒速控制系统模型

对于典型的 PID 控制器  $u(t) = K_p \{e(t) + 1/T_i \int_0^t e(t)dt + T_d * de(t)/dt\}$  有 Ziegler-

$$\text{Nichols 整定公式 } K_p = \frac{1.2T}{RL} T_D \quad T_i = 2L \quad T_D = 0.5L$$

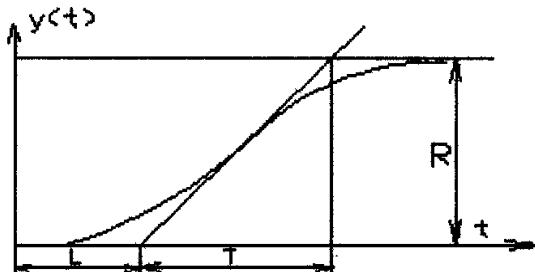


图 5-12 阶跃响应曲线

课题设计的恒速系统阶跃响应曲线中  $T=0.82$ 、 $L=0.71$ 、 $R=0.37$ ，则  $K_p=3.75$ 、

$$T_i=1.42, T_D=0.355.$$

#### b. 最优整定方法：

各种指标的 PID 参数最优设定方法公式  $I(x) = \int_0^\infty [te(x,t)]^2 dt$ 。式中  $e(x,t)$  是进入 PID 控制器的误差信号。

# 华中科技大学硕士学位论文

根据设定点的最优自整定算法，着重考虑三种情况：n=0,简记为 ISE 准则；n=1，简记为 ISTE 准则；n=2,简记为  $IST^2E$  准则。

针对上述的一阶滞后环节对典型 PID 结构可以建立经验公式。

$$K_p = a_1 * [L/T]^{b_1} / R$$

$$T_i = T / [a_2 + b_2 * L/T]$$

$$T_d = a_3 * T [L/T]^{b_3}$$

由  $L/T$  的值进行查下表 5-3 可得 a、b 及 c 的值。

表 5-3 设定点的 PID 控制器参数表

L/T 范围	0.1—1			1.1—2			
	准则	ISE	ISTE	$IST^2E$	ISE	ISTE	$IST^2E$
$a_1$		1.048	1.042	0.968	1.154	1.142	1.061
$b_1$		-0.897	-0.897	-0.904	-0.567	-0.579	-0.583
$a_2$		1.195	0.987	0.977	1.047	0.919	0.892
$b_2$		-0.368	-0.238	-0.253	-0.220	-0.172	-0.165
$a_3$		0.489	0.385	0.316	0.490	0.384	0.315
$b_3$		0.888	0.906	0.892	0.708	0.839	0.832

依据上述计算的 PID 参数得到的控制器的控制结果见图 5-13。从结果可以看出采用 PID 控制算法进行控制的底盘测功机恒速系统恒速时超调量不、无静差，并且响应速度快，所以采用的 PID 控制参数是合适的<sup>[46]</sup>。

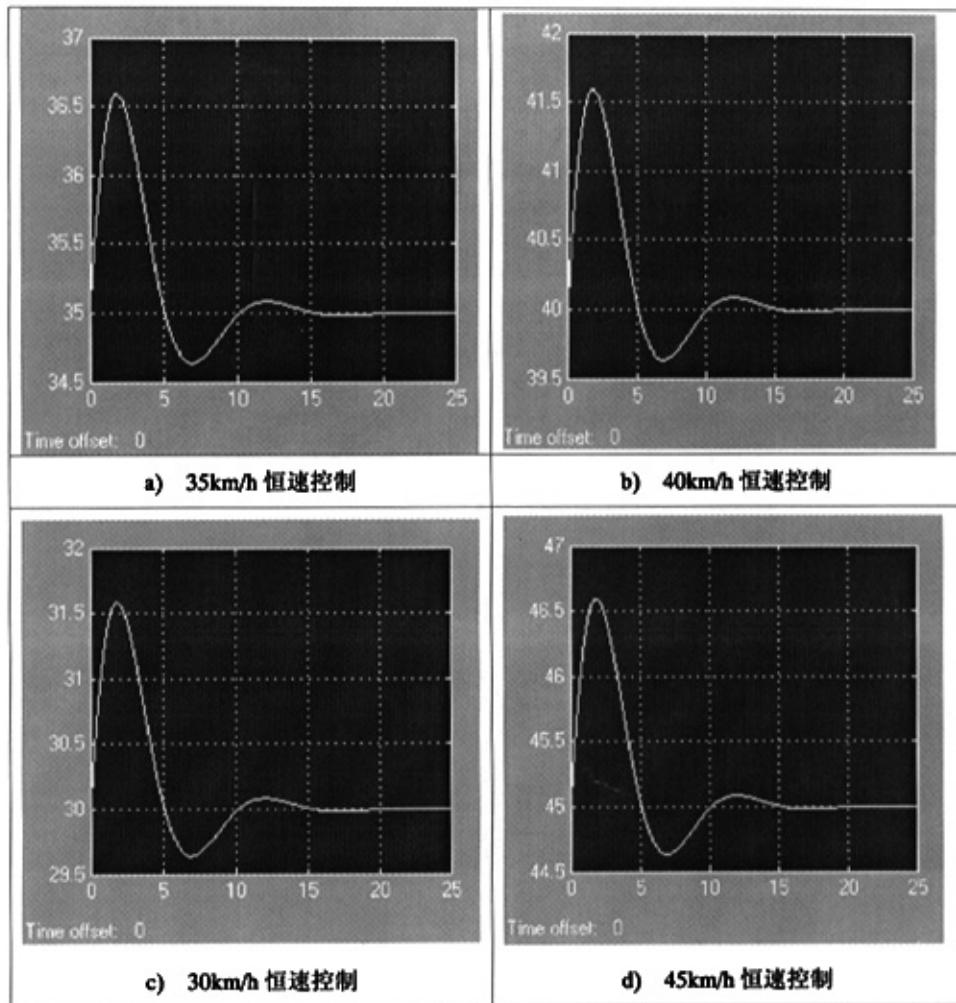


图 5-13 恒速控制结果

#### 5.4.3 通讯节点的软件设计

该接口的功能是处理 CAN 总线与上微机之间的通讯。该接口包含了两个功能模块，第一个是 CAN 接口模块，处理其余 CAN 节点的通讯；第二个是 USB 接口模块，建立下位机与上微机的通讯。

##### 1) CAN 模块

CAN 接口主要是接收来自网络中 CAN 节点的信息，并将信息储存到单片机的存储器中，等待 USB 模块的处理<sup>[47]</sup>。同时将来自上微机的控制命令通过 CAN 接口发送到总线上面。

SJA1000 发送信息有两种方式：中断方式和查询方式。采用中断方式发送数据时，必须在初始化时将发送中断位使能，同时将 CPU 的外部中断开放并置位高优先级。然后主程序等待或处理其他数据 SJA1000 的发送缓冲器释放，响应的状态位由 0 变 1，就会产生发送中断，中断信号作为 CPU 的外部中断使用，使程序转入中断服务程序执行发送。

表 5.4 SJA1000 寄存器的地址分配（BasicCAN 模式）

段名	CAN 地址	寄存器
控制段	0	控制寄存器
	1	命令寄存器
	2	状态寄存器
	3	中断寄存器
	4	验收代码寄存器
	5	验收屏蔽寄存器
	6	总线定时器 0
	7	总线定时器 1
	8	输出控制寄存器
发送缓冲器	10~11	发送 ID
	12~19	数据直接 1~8
接收缓冲器	20~21	接收 ID
	22~29	数据字节 1~8
	31	时钟分频寄存器

查询方式下 SJA1000 的发送中断信号无效，CPU 时刻检测控制器的状态寄存器，

相应的位置位时便认为发送缓冲器释放，执行发送程序。

同样，SJA1000 的接收也可以工作在查询方式和中断方式。接收信息前都要通过验收滤波器滤波，只有当接收信息中的识别位和验收滤波器预定义的值相等时，CAN 控制器才允许将已接收信息存入接收缓冲区。验收滤波器由验收代码寄存器和验收屏蔽寄存器定义。要接收的信息的位模式在验收代码寄存器中定义。相应的验收屏蔽寄存器允许定义某些位为“不影响”（即可为任意值）。

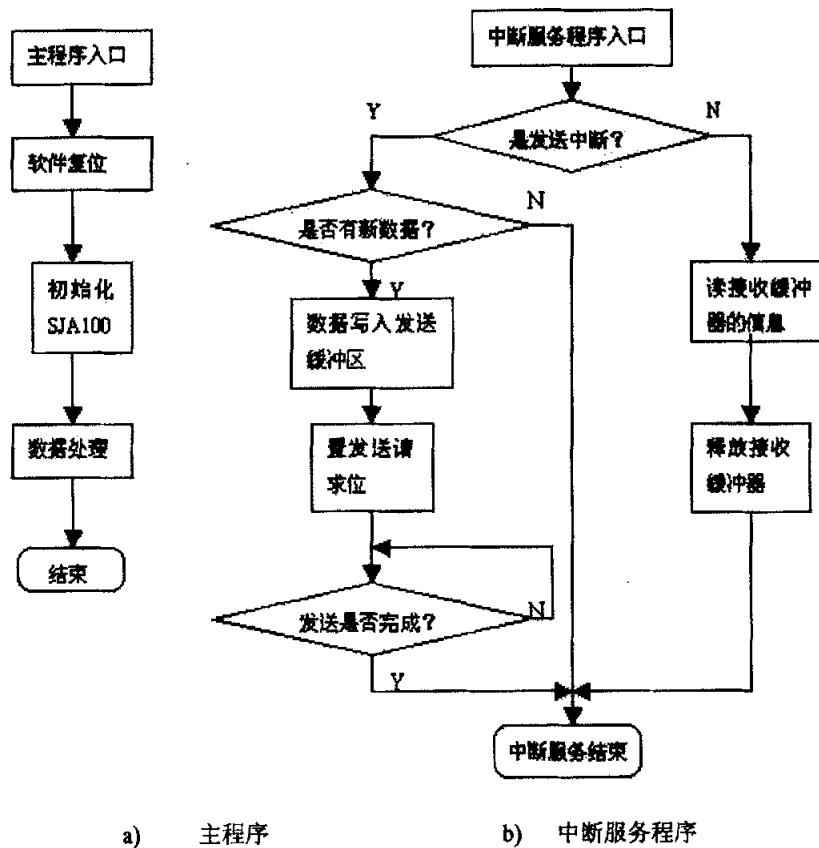


图 5-14 CAN 模块软件流程图

图 5-14 是 CAN 模块的软件流程图。SJA1000 工作在 BasicCAN 模式，CPU 采用自己单独的晶振，工作在中断方式，在对 SJA1000 的初始化期间禁止所有中断，

初始化完成后开中断<sup>[48]</sup>。

## 2) USB 模块

USB 模块接收来自上微机的控制信息，然后将信息储存在 CPU 的存储器中，等待 CPU 的处理；将 CAN 总线发送过来的数据传输给上微机，如滚筒的转速，测功机的扭矩等数据。

PDIUSBD12 完全符合 USB1.1 标准，可以实现图像设备、大容量存储设备、通信设备、打印设备、人机交互设备等多种类型的 USB 外设。另外，PDIUSBD12 提供 SoftConnect（软连接）技术，GoodLink(通信状态显示)技术，可编程的时钟输出技术、低频晶振技术、集成的终端电阻技术都极大降低了系统成本，易于用户实现 USB 外设的基本功能<sup>[49]</sup>。

### i) 工作模式

一片 PDIUSBD12 可以实现一个 USB 外设接口，在这个接口中用户可以使用 3 个端点，端点 0 用于控制传输，其他两个端点可以配置 4 种传输方式的任何一种，如表 5.5 所示。

表 5.5 PDIUSBD12 可配置的模式

模式 0 (非同步模式)	端点 0 为控制传输，端点 1 和端点 2 可用于块传输或中断传输
模式 1 (同步输出模式)	端点 0 为控制传输，端点 1 可用于块传输或中断传输，端点 2 可用于同步传输
模式 2 (同步输入模式)	端点 0 为控制传输，端点 1 可用于块传输或中断传输，端点 2 可用于同步输入
模式 3 (同步输入/输出模式)	端点 0 为控制传输，端点 1 可用于块传输或中断传输，端点 2 可用于同步输入或输出

### ii) 命令集

PDIUSBD12 的指令主要有初始化命令，数据流命令和通用命令三种，如表 5.6 所示。

表 5.6 PDIUSBD12 的命令

初始化命令		
命令名	命令字	命令说明
设置地址/使能	D0h	设置 USB 外设的地址并使能该地址
设置端点允许	D8h	使能指定的端点
设置模式	F3h	设置芯片配置和时钟分频
设置 DMA	FBh	设置 DMA 配置寄存器
数据流命令		
读中断寄存器	F4h	读中断寄存器，判断设备的状态和数据传输状态，选择端点
选择端点	00h~05h	将内部指针指向指定的地址区，从而读取状态
读最后一次传输状态	40h~45h	读最后一次进行端点数据传输的状态
写缓冲区	F0h	向指定的端点的数据缓冲区中写入数据
读缓冲区	F2h	将指定端点的数据缓冲区中的数据读出
设置端点状态	F1h	回应主机的设置命令
清除缓冲区	F2h	清除指定端点的数据缓冲区，以便接收新的数据
确认缓冲区数据	Fah	确认指定端点的数据缓冲区中的数据有效，并把发送给主机
通用命令		
发送 RESUME 信号	F6h	当设备处于挂起状态时向主机发送恢复信号
读当前的帧号	F5h	读最后一次成功接收道的数据帧的帧号

使用表 5.6 中的命令，可以方便地实现 USB 外设的初始化以及对主机初始化请求、通用 USB 请求和传输请求的响应。

### iii) USB 外设的软件实现

USB 接口的软件设计主要包括与系统中 CAN 节点的数据传输以及与上位机的 USB 通信的固件编程。固件设计的目标就是使 PDIUSBD12 在 USB 上达到最大的传输速率。PDIUSBD12 的固件设计成完全的中断驱动。当 CPU 处理前台任务时，USB 的传输可在后台进行。这样确保了最佳的传输速率和更好的软件结构，同时简化了编程和调试。

后台 ISR（中断服务程序）和前台主程序之间的数据交换通过时间标志和数据缓冲区来实现。PDIUSBD12 的批量输出端点可使用循环的数据缓冲区。当 PDIUSBD12 从 USB 接收到了一个数据包，那么就对 CPU 产生一个中断请求，CPU 立即响应中

# 华中科技大学硕士学位论文

断。在 ISR 中，固件将数据包从 PDIUSBD12 内部缓冲区移到循环数据缓冲区并随后清零 PDIUSBD12 的内部缓冲区以使能接收新的数据包<sup>[50]</sup>。

固件程序的结构如图 5—15，图中的箭头表示数据传输方向。单片机的软件使用 C 语言编程，可以很好地实现程序的模块化，便于整个系统的维护和功能扩展。

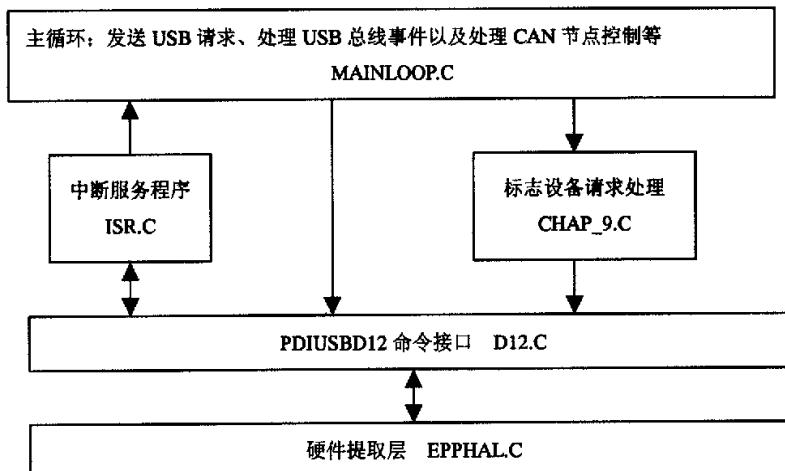


图 5—15 固件结构和数据流向

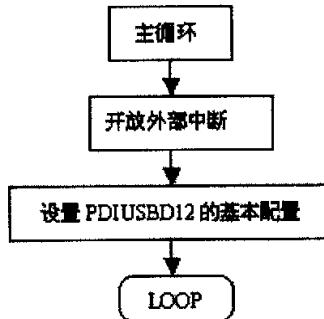


图 5—16 主循环流程图

主循环的流程图如图 5—16 所示，主要进行 PDIUSBD12 的基本配置。

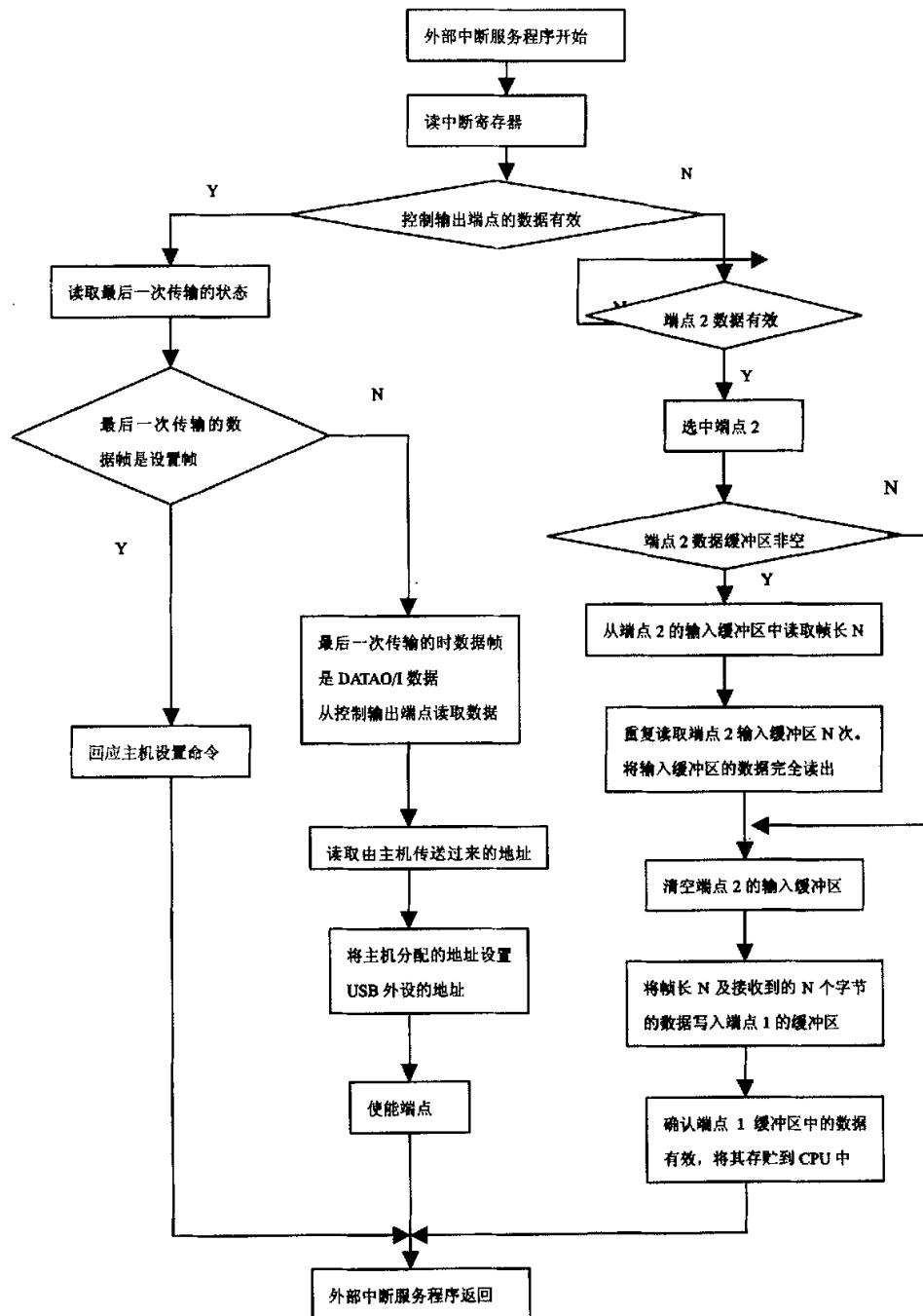


图 5-17 外部中断服务程序

外部中断服务程序的程序流程图如图 5-17 所示, 主要完成 USB 外设的初始化, 将主机发送过来的数据通过 USB 总线存储道接口 CPU 中等功能。

数据传输采用块传输方式, 端点 1 被配置为块传输 (Bulk Out) 传输方式, 端点 2 被配置为块输入 (Bulk In) 传输方式。

由于块传输是在总线带宽可用时访问总线进行传输, 不保证得到特定的带宽以及限定的延时, 因此需要由错误检测及重发机制。PDIUSBD12 的指令集中的通用命令为用户提供了相关指令来进行总线检测和数据重发<sup>[51]</sup>。

#### 5.4.4 上位机软件的设计

摩托车底盘测功机控制系统是一个功能多, 控制方式复杂, 实时性要求很高的控制系统。根据技术要求, 本软件必须完成下列功能:

- 1) 道路阻力参数设定
- 2) 测功机倒拖数据采集
- 3) 道路阻力模拟模式
- 4) 系统校准和标定
- 5) 测功机测试过程控制

##### 1) 软件的总体结构

本系统要对外界参数进行实时的测量, 并在一定的时限内完成对这些参数的处理, 同时对相应的转速、扭矩和励磁进行实时控制。整个过程是一个实时过程, 要求系统能同时完成多个任务, 因此整个程序的实现必须采用实时多任务方式。

多任务方式分为两类: 一类是任务系统的每个任务是串行执行的, 任务之间不会冲突, 中是按一定顺序执行, 称为串行多任务系统。另一类是各任务之间是并行的, 任何之间都可以互相跳转, 在不同的时刻、不同的状态, 会完成不同的任务, 成为并行多任务系统。

根据本系统的功能特点和技术要求, 同时考虑到使用方便程度和易维护性。在软件设计中采样了较易实现的串行多任务系统, 利用时间表间隙方式执行各程序。

本系统与下位机的通讯就是通过 USB 接口, 从主机的角度来看, 对下位机的管理和控制可以当做 PC 机的一个 USB 外设, 因此主机必须提供 USB 设备的驱动程序。USB 外设的驱动程序采用 WDM 模型, 由于本系统中的 USB 接口实现的是上位机与下位机之间的数据和控制命令的通信, 没有使用到 PDIUSBD12 的 DMA 功能, 而

Philips 公司提供了 PDIUSBD12 在各种操作系统下的驱动程序（不含 DMA），因此本系统直接使用了 Philips 公司的驱动程序，这样节省了开发的周期。

应用程序采用 Delphi 6.0 进行开发，对 USB 设备的读取使用 Windows API 函数，实现 USB 外设的底层操作，从而实现 PC 机跟于测试系统的数据通信功能。值得注意的是在接收数据的过程当中，PC 机的应用程序必须要有一个接收超时的操作。不然 PC 机在无限期地等待接收数据，而设备端因为接收错误或别的原因没有向 PC 机发送数据，这样很容易造成死机现象的出现。

图 5-18 是整个试验软件系统的模块图：

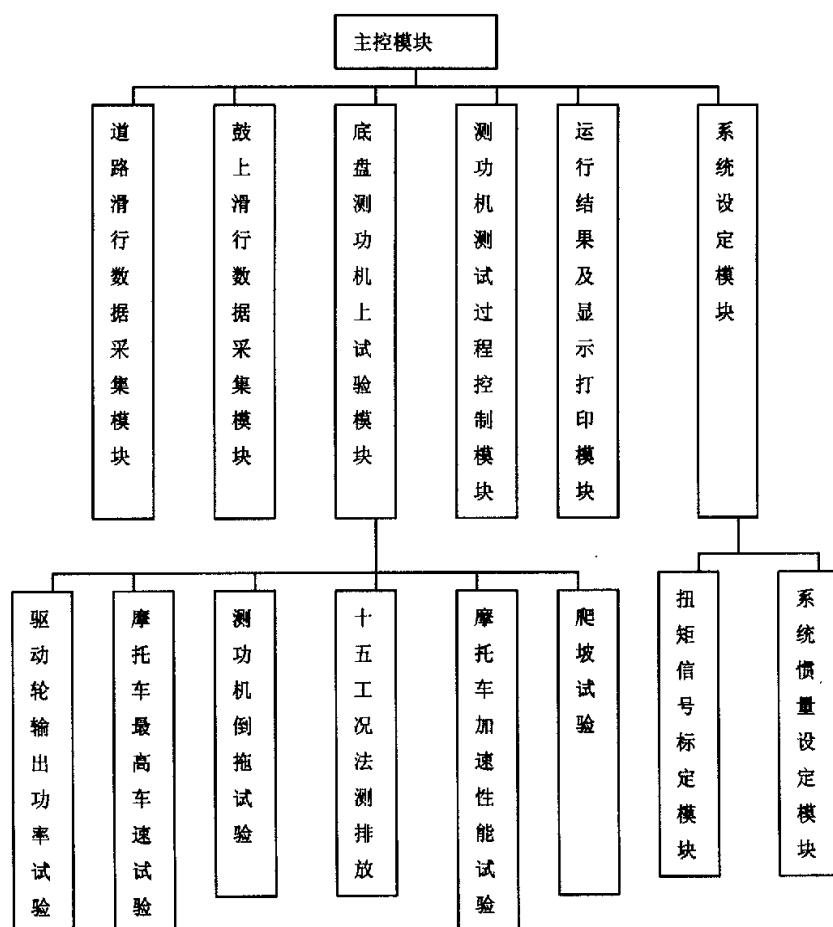


图 5-18 控制软件系统模块图

# 华中科技大学硕士学位论文

---

## 2) 各项功能的设计

### i) 道路滑行数据采集模块

该子程序是采集道路试验数据然后进行处理，得到底盘测功机上的道路阻力参数，从而为底盘测功机进行十五工况法测试摩托车排放污染物时提供道路阻力参数。

### ii) 测功机滑行数据采集模块

该子程序的功能是验证底盘测功机的试验精度，通过对比摩托车在道路上的滑行数据以及在底盘测功机的转鼓上滑行所得到的数据可以得出底盘测功机的测试精度。

### iii) 底盘测功机上试验模块

该子程序是整个上位机软件的主体，控制整个测试过程的运行，通过 USB 接口向下位机发送命令，该模块包括六个子模块，分别是测功机倒拖试验模块，十五工况法测排放，最高车速试验模块，驱动轮输出功率，加速性能试验，爬坡试验。

测功机倒拖试验模块主要是测试摩托车传动系阻力和底盘测功机的机械损失，对采集上来数据进行处理和运算可以得到总的摩擦阻力。

十五工况法是该控制系统的主要功能，执行该子程序便可以在底盘测功机进行十五工况法测量摩托车排放污染物。

最高车速试验模块是为了测试摩托车道路行驶时可以达到的最高车速。

驱动轮输出功率试验是测试摩托车在道路行驶时所输出的功率。

加速性能试验是为了检验摩托车的超越加速性能。

爬坡试验是检验摩托车的爬坡性能。

### iv) 系统设定模块

该模块含有三个子模块，其中有扭矩传感器的置零和标定模块以及电惯量设定模块。扭矩传感器的置零和标定是保证测试精度的关键部分。

### v) 测功机测试过程控制模块

该子程序的功能主要是对测试过程进行控制，通过 U S B 借口向下位机发出控制命令，包括夹紧装置电磁阀和排气风扇的开启命令等。以达到系统协调控制的目的。

vi) 运行结果及显示打印模块

该子程序的功能主要包括测试结果的输出显示，显示的数据主要有转速和扭矩。数据结果的存储才用了数据库，这样可以对结果进行更好的保存和管理。同时还设计的打印的功能。

## 5.5 小结

设计基于 CAN 总线的电模拟的摩托车底盘测功机的控制系统，并开发了整套控制测量、通讯用软件。在此基础上，进行了控制系统的 PID 参数的优化设计。

## 6 试验结果与分析

在完成整个摩托车底盘测功机控制系统的总体设计、硬件设计、软件设计之后，进行了台架试验。试验的目的：在底盘测功机上进行试验，检验硬件系统的稳定性和合理性，测量结果的精确性，试验方案的可行性。作为一个测控仪器，精度是首要的指标，我们设计的基于 CAN 总线的摩托车底盘测功机的被测量有：滚筒的转速，测功机扭矩，电流等。

### 6.1 转速测量精度分析

#### 6.1.1 理论精度分析

本系统中对转速采用磁电式传感器进行测量，传感器输出的是脉冲信号。通常的测量方法是采用在一定时间内记录脉冲的个数。由于采用可编程定时器实现定时可以达到很高的测量精度，因此测量主要的误差来自于测量脉冲计数的 $\pm 1$ 个字的误差。显然，若对实时性要求不高，可以采用较长的时间对脉冲进行计数。但在本系统中，要对转速进行闭环控制，因此计数的时间不能超过一个采样周期，即 10ms，这样就会产生很大的误差。例如，当转速为 1000 转/分时，60 齿的磁电式传感器每 10ms 产生 10 个脉冲，这样 $\pm 1$ 个字的误差导致的相对误差为  $\frac{1}{10} \times 100\% = 10\%$  这样的误差是无法接受的。

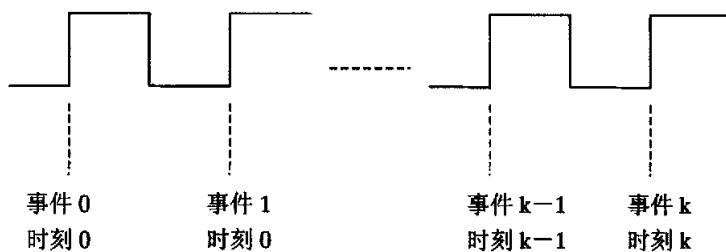


图 6-1 转速测量原理图

# 华中科技大学硕士学位论文

如图 6-1 所示, 为避免上述问题, 本系统中的测速方法采用记录单个脉冲波形的方法, 在 AT89S8252 单片机系统中, 通过高速输入口 HSI 进行相应的编程。AT89S8252 的告告诉输入口能记录下每一个脉冲上升沿(称为事件)发生的时刻。同时为了提高测量的精度, 转速信号在输入高速输入口之前经过放大整形电路, 在 AT89S8252 中读取事件发生的时刻, 并通过发生的时刻计算出发生这些事件需要的时间长度, 然后可以计算出转速。

$$\text{转速} n = 1 / [(\text{时刻} k) - (\text{时刻} k-1)]$$

## 6.1.2 实测结果

测试仪器: 信号发生器

测试结果如表 6.1。

表 6.1 转速测试结果

序号	系统读数 r/min	频率计读数 r/min	绝对误差 r/min
1	24	25	-1
2	48	48	0
3	112	113	1
4	278	280	-2
5	448	450	-2
6	660	661	-1
7	866	868	-2
8	1008	1010	-2
9	1150	1151	-1
10	1300	1298	-2
11	1420	1418	-2
12	1510	1508	-2
13	1600	1599	-1
14	1720	1717	-3

测试结论: 转速测量精度可达到  $\pm 2 \text{ r/min}$

由于底盘测功机的滚筒转速最高不会超过 2000 转, 因此分频以后的测试系统完全可以满足这个测试范围的要求。

# 华 中 科 技 大 学 硕 士 学 位 论 文

---

---

## 6.2 小结

在完成整个摩托车底盘测功机控制系统的总体设计、硬件设计、软件设计之后，进行了台架试验。特别是转速测量精度的实验研究，试验结果表明，底盘测功机符合国家标准的要求。

## 7 总 结

本章对全文的工作进行总结评价，阐述了本文研究的基本内容、方法，取得的成果，以及本文存在的优缺点和尚待改进和完善的地方，指明了后续工作的方向。

### 7.1 研究成果

本课题的任务是研究与设计一个基于CAN总线的摩托车底盘测功机的控制系统，用于十五工况法测量摩托车污染物排放。就电涡流测功机在摩托车底盘测功机上电模拟再现摩托车的行驶阻力进行了初步研究。具体成果如下：

1、提出了利用电涡流制动器作为摩托车底盘测功机电模拟加载的方法。

研制开发了一种新的制动强度可以无级调节的电涡流测功机控制器，进行了其工作原理、软件及硬件的设计。并且通过试验验证了其制动力矩的调节能力及限流功能。同时还得到了制动器励磁电流与其提供的制动力矩之间的关系，该关系为进行摩托车底盘测功机电模拟加载提供了试验依据。

2、研制开发了一种高性能脉宽调制（PWM）直流伺服系统，该系统在电涡流测功机工作时为底盘测功机提供制动力，以确保正确加载，模拟道路工况。

3、研制开发了基于CAN总线的摩托车底盘测功机的数据采集与控制系统。

系统作了测试和试验研究，从结果上来看，系统取得了比较好的效果。

### 7.2 展望

本系统目前略显粗糙，可以预计，还会有许多有待于改进的地方。如在控制策略上还有待于一定的改进，希望可以进一步提高控制的精度。同时随着技术的发展，必然会对摩托车的试验提出更高的要求，也必然会对测试仪器提出越来越高的要求。作者认为，在控制策略上面，可以考虑在闭环控制的时候加入模糊控制的理论，以进一步提高控制系统的控制精度和稳定性。

# 华中科技大学硕士学位论文

---

虽然该测功机是针对十五工况法测量摩托车排放污染物而设计的。但它同时也可测试摩托车驱动轮的驱动力、功率、最高车速、速度特性等。如果配备油耗仪也能测试摩托车的燃油消耗曲线，功能较为齐全，但需要对软件进行相应的扩充。

# 华中科技大学硕士学位论文

---

## 致 谢

随着学位论文的完成，我的学习生活也即将结束，回顾几年来的岁月，心中不禁感慨万千，在过去的这段岁月里，许多人给予了我热情而无私的帮助。

首先要感谢我的导师陈传波教授。陈教授学识渊博、思维开阔，引导我走上了学术研究的道路，我的毕业论文也倾注了陈老师的不少心血，陈教授严谨细致、一丝不苟的作风和活跃的学术思维都深深影响了我，这些都将令我日后受益无穷。在论文完成之际，向我的导师致以最诚挚的敬意。

特别感谢计算机学院的领导和老师们。在我的学习、工程实践和论文工作得到学院所有领导和老师的关心和支持，正是有了他们的帮助，我的学业才得以顺利完成。

还要感谢南昌摩检所领导在课题研究中的大力支持，感谢项目组的凌克工程师在软件工程实践过程中热情的帮助，以及同课题组喻玉华高工等同事在工程实践和论文阶段对我的帮助和建议。

最后要感谢我的父母和妻子及家人，对我的学业也给予了极大的鼓励与支持。一直以来，无论我经历了什么事情，做出了什么决定，他们都在我身后给我提供全力的支持和无私的帮助。他们对我的关爱、理解和信任伴随着我走过了过去岁月中的每一段路程，他们是我的精神支柱，他们是我最大的骄傲，没有他们，我无法完成今天的学业，也就没有今天的我。

感谢其他给我提供帮助的老师、同学、同事和朋友们，感谢各位对我的关心、支持和帮助。

孔国初

2005年8月28日

## 参考文献

- [1] 姜庆明, 甘永梅等. 摩托车交流底盘测功机电控系统的设计与实现. 小型内燃机与摩托车, 2004,(4),38-43
- [2] 张明盛, 修宗功, 朱双波. 摩托车底盘测功机及排放分析系统的配置. 摩托车技术. 2000, 8: 15-18
- [3] 张友坤,周云山等. 车辆电模拟转鼓试验台动态特性研究,农业机械学报,2001,32(1):83-85
- [4] Yorikatsu Suzuki, Ken Torikai et al. High accuracy high response 48 inch roll chassis dynamometer. SAE paper 940487, 1994: 22-25
- [5] Carl M. Paulina and John F. Schwarz. Performance Evaluation of Electric Dynamometers. SAE940485: 42-46
- [6] 徐志敏, 刘美生, 卿燕萍. 汽车底盘测功机的原理及检测.中国测试技术,2004,130(13): 9-12
- [7] 张为春, 夏大兴等. MCG - 200 型电模拟式车辆底盘测功机研制. 拖拉机与农用运输车,2003, (6): 17-18
- [8] everino D'Angelo etc. High-Performance 48 Inch Chassis Dynamometer for Small-Pit Installation. SAE 950515: 21-23
- [9] 涂泽玉, 过学迅. 底盘测功机行驶阻力模拟原理及设置方法的分析. 汽车科技. 1997, 3: 1-8
- [10]陈文润, 王培玲, 严峻等. 摩托车底盘测功机动力学原理. 机械设计 2001, 2: 22-25
- [11]李会方. 基于工控机的电涡流测功机综合测控系统, 微计算机信息, 1999, (6): 35-37
- [12]McCormick, R. L., et. Al. Comparison of chassis dynamometer in-use emission with engine dynamomet .SAE Paper 982653,1998: 22-25

# 华中科技大学硕士学位论文

---

- [13] GB 14622-2002 《摩托车排气污染物限值及测量方法（工况法）》附录C,国家环境保护总局发布:14-24
- [14] 宫建军. 摩托车道路行驶阻力的测试与设定. 摩托车技术. 2002, 7, :5-8
- [15] Che Wun Hong and Tson Wei Shio, Fuzzy control strategy design for an autopilot on automobile chassis dynamometer test stands, mechatronics ,VOL.6,NO. 5,537-555,1996: 25-28
- [16] 严兆大. 内燃机测试技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1993: 30-39
- [17] 朱仙斯. 中国内燃机工程师手册 [M]. 上海: 上海科学技术出版社: 2000:121-129
- [18] 张为公, 周宁宁. 汽车台架试验系统机械惯量电模拟方法. 汽车工程, 1998, 20 (5) : 284, 312-316
- [19] Hong C. W., An automotive dynamic performance simulator for vehicular powertrain system design. Int. J. Vehicle Des. 16. 1995: 264-281
- [20] J. M. D. Murphy and V. B. Honsinger, "Efficiency optimization of inverter-fed induction motor drives," in Conf. Rec. IEEE Annu. Meeting, 1982: 544–552
- [21] 盛朝强, 谢昭莉. 基于电惯量的汽车惯性式制动试验系统的设计. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28 (1): 101,90-92
- [22] D. S. Kirschen, D. W. Novotny, and T. A. Lipo, "On-line efficiency optimization of a variable frequency induction motor drive," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-21:, May/June 1985: 610–616
- [23] Masato Enokizono, Takashi Todaka, Hideki Takahashi , Electromagnetic retarder design using finite element analysis, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Volume 14, Numbers 1-4,2002: 43 – 46
- [24] D. W. Novotny and T. A. Lipo, Vector Control and Dynamics of AC Drives. London, U.K.: Oxford Univ. Press, 1996: 45-47
- [25] 姚锡凡,周锋. 汽车行驶阻力的数学模型及电模拟, 汽车工艺与材料 1998, 10: 27-31
- [26] 陈东雷,高世伦,余江胜. 底盘测功机控制系统的开发. 汽车工程. 20(3),1998:

# 华中科技大学硕士学位论文

---

139-144

- [27] 张庆. 涡流测功机的模糊控制. 黑龙江自动化技术与应用.1997, (1): 21-23
  - [28] 冯冬芹. 发动机台架计算机辅助试验系统[J]. 内燃机工程, 1999, (3): 27-31
  - [29] 樊尚春,周浩敏编著.信号与测试技术,北京:北京航空航天大学出版社,2002: 33-49
  - [30]Enjeti P N. Programmed PWM Techniques to Eliminate Harmonics--A Critical Evaluation[A]. IEEE IAS Conf. Rec. [C]. 1988: 418-430.
  - [31]T. Matsuo and T. A. Lipo, "Rotor design optimization of synchronous reluctance machine," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 9, June 1994: 359–365
  - [32]林旭东, 钟子锦, 林火木, 张重文.车辆行驶阻力在汽车底盘测功机上的再现.广东公路交通,2003( 02):64 –66
  - [33]T. Matsuo and T. A. Lipo, "Field oriented control of synchronous reluctance machine," in Conf. Rec. IEEE Power Electronics Specialists Conf., June 1993: 425–431.
  - [34]刘浚锋,魏学业.一种基于CAN 总线的铁路信号灯自动安全监测系统研究.北方交通大学学报,2003,27(6): 44-47
  - [35]Tetsuya Kaneko, Ichiro Kageyama, A study on the braking stability of articulated heavy vehicles, JSAE Review 24 (2003): 157–164
  - [36]T. A. Lipo, "Synchronous reluctance machines—A viable alternative for AC drives?," Elec. Mach. Power Syst., vol. 19, Nov./Dec.1991: 659–671,
  - [37]Philips Semiconductors Company. Products for CAN Applications. 1997: 41-44
  - [38]邬宽明. CAN 总线原理和应用系统设计. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996: 66-80
  - [39]史久根, 张培仁, 陈真勇编著. CAN现场总线系统设计技术.北京,国防工业出版社,2004: 53-59
  - [41]Brauniger J. Controller Area Network for Truck and Bus Application. SAE 902211
  - [42]陆文昌. 基于CAN总线的汽车发动机智能测控节点的设计. 汽车工工程  
2003,25(5): 464-467
-

# 华中科技大学硕士学位论文

---

- [43]Texas Instruments Incorporated. Products for ANALOG-TO-DIGITAL  
CONVERTERS WITH SERIAL CONTROL Application. 1995: 38-43
- [44]Mohan N, Undeland T M, Robbinss W P. Power Electronics: Converters, Applications  
and Design [M]. New York: Jhon Wiley, 1989: 28-31
- [45]李朝晖, 陈有方, 张 勇. 测功机模糊控制与仿真[J].重庆交通学院学报  
200,23(6):124-127
- [46]Humair Raza, Zhigang Xu, Bingen Yang, Petros A. Ioannou, Modeling and Control  
Design for a Computer-Controlled Brake System, IEEE TRANSACTIONS ON  
CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 5, NO. 3, MAY 1997: 51-58
- [47]王建群,赵洪武. CanBus在网络化发动机数控试验系统中的应用.内燃机工程.  
23(4),2002:60-62
- [48]E. SIMBU,D.GEORGES, Modelling and control of eddy current brake, Proceeding of  
IFAC conference on System ,Structure and Control, Nantes ,July 5-7,1995: 49-55
- [49]A. Kusko and D. Galler, "Control means for minimization of losses in AC and DC  
motor drives," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-19, July/Aug. 1983.: 561-570
- [50]Buckley J.J., Siler W. and Ying H.,Fuzzy control theory :a nonlinear case  
Automatica 26,1990: 513-520
- [51]Lai R S, Ngo K D I. A PWM Method for Reduction of Switching Los in a Full-bridge  
Inverter[J]. IEEE Trans. 1995, 10(3): 326-332.

# 华中科技大学硕士学位论文

---

---

## 附录

### 攻读学位期间主要科研成果

在硕士学位学习期间，主持研制了摩托车底盘测功机计算机控制系统。为南昌摩托车质量监督检验所成为全国四大摩托车检测机构（国家级）作出了重要贡献。

主持研制了 MFT 型摩托车道路油耗测试仪，大大提高了摩托车道路油耗试验的精度和工作效率。

在《洪都科技》2003 年第 3 期发表论文“摩托车道路工况模拟软件的开发”，在 2005 年第四期发表论文“37kW 底盘测功机计算机控制系统”。

# 基于CAN总线的电模拟摩托车底盘测功机的研究

作者：孔国初  
 学位授予单位：华中科技大学

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 闵永军, 甘英俊, 左付山, 杨风和, MIN Yong-jun, GAN Ying-jun, ZUO Fu-shan, YANG Feng-he 底盘测功机机械惯量电模拟方法的研究和实现 -公路交通科技2007, 24(11)

为开发汽车排气污染物简易瞬态工况法测试系统,研究了底盘测功机机械惯量电模拟的相关理论和方法。通过汽车在底盘测功机上运行状态的动力学分析,基于汽车驱动轮转动动态特性相同的原理,建立了汽车底盘测功机机械惯量的电模拟模型。分析了简易瞬态测试工况控制要求和风冷电涡流测功器的性能特点,构建了VMAS测试工况控制系统,应用预测控制和解耦控制理论和技术,设计了底盘测功机机械惯量电模拟控制方案,开发了基于DMC,具有模型增益自校正和解耦功能的VMAS测试扭矩控制器和简易瞬态工况控制试验系统。运行试验结果表明,该系统可以较好地模拟汽车加速运动惯量。

2. 学位论文 李百策 电模拟汽车底盘测功机的研制 1999

汽车底盘测功机是用来检测汽车动力性能的一种专用测量设备,研究小组所研制的电模拟汽车底盘测功机取消了传统的惯性飞轮组,在计算机的控制下,直接模拟各种汽车在各种不同道路上行驶时的惯性、加减速阻力、路面滚动阻力、风阻等各种参数,因而可实现汽车在各种行驶状况下的实时模拟,并可实现汽车发动机功率特性曲线、油耗、车速表和里程表检测等多种测量。

3. 学位论文 刘明明 汽车整车性能电模拟试验方法研究 1999

该文系统地分析了汽车底盘测功机的动力学模型及控制过程,并通过试验验证了这个动力学模型的正确性、控制方案的可行性。其各项技术指标已达到设计要求。该文首先对汽车在路面上行驶与在测功机上行驶两种情况进行了受力分析及比较,得出了控制汽车底盘测功机的动力学模型。然后完成了测功机的控制方案及软、硬件设计。在以上理论的基础上,该文列出了测功机的各种参数的识别过程,传感器的标定过程,控制测功机的控制模型。该文最后给出测功机对汽车滑行的测试结果,同汽车在同样条件下的在路面上滑行工况的情况相比较,证明了测功机对汽车测试的精确性。

4. 期刊论文 黄万友, 牛洪成, 李娟, 赵玉军, 程勇, 唐向臣, 赵炎军, HUANG Wan-you, NIU Hong-cheng, LI Juan, ZHAO Yan-jun, CHENG Yong, TANG Xiang-chen, ZHAO Yan-jun 简易瞬态工况底盘测功机控制系统理论设计 -内燃机与动力装置2008(4)

参照GB18285-2005中简易瞬态工况法的规定,在对现有的测控系统进行改造的过程中,对简易瞬态工况底盘测功机控制系统进行了理论设计,分析了人机复合控制系统的硬件设计和相应控制策略,提出了基于自动驾驶系统的测控方案。利用相应的硬件电路实现转矩的快速调节;采用电模拟技术对汽车行驶阻力和惯量进行模拟;综合应用预测控制、模糊控制和解耦控制理论,对底盘测功机力矩进行加载。理论分析与试验结果表明,系统有较快的响应速度,底盘测功机可以按照自动设定的测功机载荷进行控制。

5. 学位论文 闵永军 车辆排气污染物测试技术研究与工程实现 2006

工况法汽车排气污染物测试技术严重制约着我国I/M制度的实施。本文通过理论与试验研究相结合的方法,重点研究了在用汽车排气污染物ASM和VMAS测试工况控制方面的相关理论、技术和应用问题,研究成果不仅对ASM和VMAS测试工况的控制具有理论意义和工程应用价值,而且对同类其它车辆、发动机试验台的控制也有重要参考价值。

本文构建了工况法汽车排放测试系统,通过汽车在底盘测功机上运行状态的动力学分析,建立了汽车行驶阻力的底盘测功机模型。基于驱动轮转动动态特性相同的原理,建立了汽车惯量电模拟概念,推导了惯量电模拟模型,为汽车行驶阻力的工况法测试和惯量的电模拟提供了理论依据。

通过理论分析和试验研究,阐明了风冷电涡流测功器吸收扭矩同时受励磁电流和转速影响,参数非线性、时变和响应速度慢的性能特点,提出了风冷电涡流测功器控制用吸收扭矩的稳态和动态特性模型,为控制方法的研究提供了必要的基础。

设计了ASM和VMAS汽车排放污染物测试工况人机复合控制的具体方案;为降低转速变化对电涡流测功器吸收扭矩控制的影响,提出了测试工况扭矩车速反馈预测补偿解耦控制方案。

应用模糊控制理论和技术,设计并开发了基于P-FUZZY-PI复合控制的ASM测试扭矩控制器;提出了通过规范驾驶操作,应用预测方法适时改变测功器加载扭矩的设定值,解决了惯量电模拟中汽车瞬时加速度测量不准的问题。P+Fuzzy+PI复合控制不仅具有良好的动、稳态性能,而且系统的鲁棒性强,解决了风冷电涡流测功器参数时变和非线性引起的控制难题;预测控制方法的应用明显地提高了惯量电模拟扭矩的实际响应速度和惯量电模拟的精度。

应用预测控制和解耦控制理论和技术,设计并开发了基于DMC,具有模型增益自校正和解耦功能的VMAS测试扭矩控制器。DMC预测控制提高了测功器扭矩控制的响应速度;模型增益的自校正改善了控制的鲁棒性,提高了系统对被测车型和测试条件的适应性;采用车速反馈预测补偿解耦,有效降低了VMAS测试扭矩响应的最大冲击值。

研究了工况法汽车排放测试中测功器加载扭矩的设定及其工程实现的方法。提出了开发大直径工况法汽车排放污染物测试用底盘测功机的机理。开发了基于车轮力传感器的底盘测功机上轮胎滚动阻力(系数)的测试系统,为深入研究轮胎在滚筒上的滚动阻力提供了新方法。

开发了ASM和VMAS汽车排放污染物测试工况控制试验系统,试验结果表明,系统方案合理,总体设计可行,解决了工况法汽车排放污染物测试的核心技术。

6. 期刊论文 张为春, 夏大兴, 隋肃 MCG-200型电模拟式车辆底盘测功机研制 -拖拉机与农用运输车2003(6)

详细介绍了一种国产MCG-200型车辆底盘模拟测功机的基本结构参数、应用范围、电模拟式加载原理,并给出了某农用运输车产品的加速性能及其经济性与道路试验的检测结果。

7. 学位论文 张训 汽车底盘测功机测控系统的研究 2009

随着科学技术的发展,汽车结构不断完善,人们对汽车的性能更加关注。汽车本身是一个复杂的系统,在使用过程中,随着行驶里程的增加和使用时间的延续,汽车技术状况可能不断恶化,需要定期进行检测。汽车底盘测功机是一种不解体检验汽车性能的检测设备,采用现代电测和计算机技术,模拟汽车在各种路面行驶阻力,使汽车的道路试验项目移至室内进行,减少室外环境变化对测试的影响,能够很好的改善试验人员的试验环境和提高测试精度。

本文首先介绍了汽车底盘测功机的发展历史和研究现状,阐明了研究汽车底盘测功机测控系统的目的和意义,给出了汽车底盘测功机的结构和工作原理,在详细分析汽车道路上和底盘测功机上运行受力情况的基础上,建立了测功机电模拟模型。采用电模拟阻力加载装置,不仅省去了繁琐的惯性飞轮装置,简化了底盘测功机的结构,而且实现了惯性阻力的无级模拟。在系统硬件上,设计了转速转矩信号的采集电路和前端信号处理电路,提高了采集数据的准确性,保证系统的精度。并给出了励磁控制电路的设计与实现。在通讯上,设计CAN和USB互相转化的接口电路,不仅实现上下位机之间的通讯,而且还突破了传统底盘测功机上下位机通讯速率慢的瓶颈。在控制策略上,采用积分分离PID算法,实现转速、励磁电流和转矩、励磁电流的两个双闭环控制器,满足了汽车底盘测功机不同运行状况的需求。在软件上,采用模块化编程的思想,从而增强了程序的可移植性和灵活性。最后,构建了实验平台,对系统进行了实验研究,实验结果表明:系统能满足汽车性能测试的要求。

8. 学位论文 胡博 基于CAN总线的汽车底盘测功机测控系统研究 2008

随着科学技术的发展,汽车结构不断完善,人们对汽车性能的要求亦不断提高。汽车底盘测功机是一种不解体检验汽车性能的检测设备,采用现代

电测和计算机技术，仿真模拟各种路面行驶阻力，使整车的道路试验项目移至室内进行，减少室外环境变化对测试的影响，能够很好的改善试验人员的试验环境和提高测试精度。

本文设计了一种基于CAN总线的汽车底盘测功机测控系统。系统按功能划分为数据采集节点、控制节点和通讯节点，并由CAN转USB接口电路实现上下位机之间的通讯。基于CAN总线进行设计，使整个系统分工明确，有利于系统的扩展和网络化。文中首先介绍了底盘测功机的原理、结构，在详细分析汽车道路上和底盘测功机上运行受力情况的基础上，建立了测功机电模拟模型。采用电模拟阻力加载装置，不仅省去了繁琐的惯性飞轮装置，简化了底盘测功机的结构，而且实现了惯性阻力的无级模拟。在硬件设计上，给出了转矩、转速信号检测和处理电路的设计方法和具体的原理图，详细介绍了控制系统重要组成部分—励磁控制系统的工作原理与实现。在控制策略上，采用转矩、转速双闭环积分分离PID控制器，一定程度上提高了测控系统的精度。在软件设计上，给出了设计思想及主要流程图。该软件设计采用模块化编程，增强了程序的可移植性和灵活性。最后，进行系统的电磁兼容性设计，进一步保障了系统的可靠运行。

## 9. 期刊论文 闵永军. 张为公. 翟羽健. MIN Yong-jun. ZHANG Wei-gong. ZHAI Yu-jian 简易瞬态工况底盘测功机控制系统的研究 -测控技术2006, 25(9)

汽车惯量电模拟技术是汽车简易瞬态工况底盘测功机的发展方向。简易瞬态工况控制系统是一多输入、多输出、紧耦合、非线性、时变的复杂系统。综合应用预测控制、模糊控制和解耦控制理论，设计并开发了反馈预测补偿解耦、增益系数模糊自校正、动态矩阵控制的底盘测功机控制系统。试验结果表明该系统可以较好地模拟汽车加速运动惯性力。

## 10. 学位论文 涂泽玉 底盘测功机计算机控制系统的研究和开发 1996

用于二轮、四轮和六轮驱动汽车试验用电模拟底盘测功机是目前世界上最先进和最复杂的汽车整车试验设备之一，目前为止，中国还不能制造这类试验台。因此，研究其结构特点、控制原理及相应的试验方法，对中国自行设计和开发高精度的底盘测功机系统具有十分重要的意义。该文较系统地研究了东风汽车公司质量部进口的“三轴式底盘测功机”的结构原理，进而开发了一套全新计算机软硬件系统以取代原设备所带的Z80系统。

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_J005491.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_J005491.aspx)

授权使用：黑龙江工程学院(hljgcxy)，授权号：486ce41b-d704-43e7-9d64-9e9a01319865

下载时间：2011年3月2日