



Classified Index: TP273


Dissertation for the Master Degree in Engineering

Design of Control System for HEV Power Battery Performance Testing Platform

| | |
|-------------------------------------|--|
| Candidate: | Dai Xianqing |
| Supervisor: | Li Gechen |
| Academic Degree Applied for: | Master of Engineering |
| Specialty: | Control Theory and Control Engineering |
| Date of Oral Examination: | March, 2010 |
| University: | Harbin University of Science and Technology |

哈尔滨理工大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《电动车动力电池仿真系统的研究与设计》，是本人在导师指导下，在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文研究工作做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：

日期：2010年3月10日

哈尔滨理工大学硕士学位论文使用授权书


《电动车动力电池仿真系统的研究与设计》系本人在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间在导师指导完下成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨理工大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨理工大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门提交论文和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权哈尔滨理工大学可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。


本学位论文属于

保密 ，在 年解密后适用授权书。

不保密 。

(请在以上相应方框内打√)

作者签名： 日期：2010年3月10日

导师签名： 日期：2010年3月10日

电动汽车动力电池仿真系统的研究与设计

摘 要

电动车由于它的节能性及对环境污染小的优点，已成为 21 世纪汽车工业的发展方向。动力电池是电动车的核心，其性能直接影响电动车的性能。全世界有很多国家都在对电动车动力电池进行研究，随着电池性能不断地改进，对电动车电池测试技术的要求也越来越高。本文设计了电动车动力电池仿真系统来模拟汽车在实际运行条件下动力电池的充放电情况，为检验动力电池的性能提供依据。

系统用温湿度控制系统来模拟电动车周围环境的温湿度变化；用震动试验台来模拟实际条件下的各种路况；采用电动车驱动系统作为动力电池的充放电平台；用大电机作为被测动力电池的放电负载及充能量回收；用驾驶仿真系统模拟汽车的运行获得相关控制参数；储能蓄电池所使用的电池为磷酸铁锂电池。

系统上位机软件采用 NI 公司的 LABVIEW 开发软件，包括数据采集模块、数据滤波模块、PID 控制模块、报警模块及数据保存分析模块等。上位机通过 RS-485 和车载 CAN 实现与各硬件设备的通讯。

本文通过对不同类型的电动车的动力系统进行了分析研究，同时对电动车在实际过程中的电池的充放电情况进行了研究，并对电动车的运行阻力进行了数学建模，实现了模拟电动车运行下的电池充放电的仿真测试。

基于 LABVIEW 的电动车动力电池仿真系统的调试结果表明，采用震动平台和温控系统模拟电动车实际运行的工况，在测试平台上对动力电池进行在线测量，使测量结果更加真实的反映出电池实际运行时的状况。

关键词 动力电池，能量回收，仿真测试，LABVIEW；

Research and design of power battery electric vehicle simulation system

Abstract

Electric vehicles, because of its energy efficiency and the benefits of reduce environmental pollution has become the development direction of automotive industry of the 21st century. Power battery is the core of electric vehicles, which performance of has a direct impact on the performance of electric vehicles. There are many countries all around the world have already do lots of research on the power battery of electric vehicle, with the constantly improving of battery performance, the demands of electric vehicle battery testing technology has also increasingly high. In this article, we designed a battery-powered electric vehicle simulation system to simulate the performance of charge and discharge of power battery under actual operating conditions, in order to provide a basis for testing the performance of the power battery.

This systems using the temperature and humidity control system to simulate the temperature and humidity changes of electric vehicles surrounding environment; with the vibration testing rig to simulate the actual conditions of various road conditions; using electric vehicle drive system as the power battery charge and discharge platform; with big power motor as the discharge load and charging energy recovery systems of the power battery being measured; using simulated vehicle driving simulation system to obtain the relevant control parameters; power batteries and energy storage batteries are lithium iron phosphate battery cells.

System Human-Machine software using NI's development software labview, using vibration platform to simulate the actual run-time electric vehicle vibration conditions, using temperature control system to simulate the actual run-time ambient temperature of vehicle battery. Design data collection

system to measuring power batteries' voltage, loop current, temperature and other data under different shock and vibration environments of different temperatures; host computer and the hardware devices using the RS-485 communications and vehicle CAN-BUS.

In this paper, different types of electric vehicle power system was analyzed, while electric cars in the actual process of the battery charge and discharge studies were carried out, and electric vehicles running resistance carried out mathematical modeling to achieve a simulation electric cars to run under the battery charging and discharging of the simulation testing.

System Human-Machine software uses NI's LABVIEW software development, including data acquisition module, data filtering module, PID control module, alarm module and save the data analysis module. Host computer through the RS-485 and vehicle CAN achieve the communication with the various hardware devices.

Key words power battery , energy recovery , simulation testing ,
LABVIEW;

目 录

| | |
|-------------------------------|----------|
| 摘 要..... | I |
| Abstract..... | II |
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 动力电池的现状及技术指标..... | 1 |
| 1.1.1 车载动力电池的现状..... | 1 |
| 1.1.2 电动车对动力电池性能要求..... | 2 |
| 1.2 动力电池组..... | 3 |
| 1.3 系统仿真的类型..... | 3 |
| 1.4 本课题研究的目的及主要内容..... | 3 |
| 第 2 章 系统的硬件组成及设计 | 5 |
| 2.1 系统整体设计..... | 5 |
| 2.2 温湿度环境仿真系统..... | 6 |
| 2.3 震动仿真系统..... | 6 |
| 2.4 电动车驱动模拟系统..... | 8 |
| 2.4.1 电动车动力系统分类..... | 8 |
| 2.4.2 驱动电机..... | 11 |
| 2.4.3 驱动电机冷却方式..... | 12 |
| 2.4.4 驱动电机控制器..... | 12 |
| 2.4.5 电机矢量控制..... | 12 |
| 2.5 负载模拟系统..... | 13 |
| 2.5.1 可控负载电机..... | 13 |
| 2.5.2 负载电机冷却装置..... | 14 |
| 2.5.3 负载电机控制器..... | 14 |
| 2.5.4 储能蓄电池系统..... | 14 |
| 2.5.5 充电机..... | 15 |
| 2.5.6 系统能量回收的实现..... | 15 |
| 2.6 数据采集系统..... | 16 |
| 2.6.1 信号类型分析..... | 16 |
| 2.6.2 传感器的选型..... | 17 |

| | |
|--------------------------------|-----------|
| 2.6.3 数据采集卡配置..... | 20 |
| 2.7 信号抗干扰技术..... | 21 |
| 2.7.1 独立地线设计..... | 22 |
| 2.7.2 硬件滤波电路设计..... | 22 |
| 2.8 本章小结..... | 23 |
| 第 3 章 系统的软件组成及设计..... | 24 |
| 3.1 系统开发软件平台..... | 24 |
| 3.1.1 虚拟仪器简介..... | 24 |
| 3.1.2 LABview 简介..... | 26 |
| 3.2 上位机软件总体设计..... | 26 |
| 3.3 数据采集模块软件设计..... | 27 |
| 3.3.1 脉冲信号采集软件设计..... | 28 |
| 3.3.2 模拟量信号采集软件设计..... | 29 |
| 3.4 数字滤波程序设计..... | 29 |
| 3.5 系统通讯模块设计..... | 31 |
| 3.5.1 CAN 通讯模块设计..... | 31 |
| 3.5.2 RS485 通讯模块设计..... | 32 |
| 3.6 动力电池性能分析与控制设计..... | 33 |
| 3.6.1 动力电池充放电 PID 控制..... | 33 |
| 3.6.2 动力电池 SOC 估计..... | 35 |
| 3.7 驾驶仿真系统设计..... | 36 |
| 3.8 本章小结..... | 37 |
| 第 4 章 动力电池充放电分析与仿真..... | 38 |
| 4.1 电动车运行状态分析..... | 38 |
| 4.2 动力电池的放电分析..... | 39 |
| 4.2.1 电动车动力电池的放电分析..... | 39 |
| 4.2.2 仿真系统电池放电仿真..... | 40 |
| 4.3 动力电池的充电分析..... | 40 |
| 4.3.1 电机的再生制动..... | 40 |
| 4.3.2 电动车动力电池的充电实现..... | 41 |
| 4.3.3 仿真系统电池充电仿真..... | 41 |
| 4.4 坡度仿真建模..... | 41 |
| 4.5 电动车运行阻力损耗建模..... | 43 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 4.5.1 电动车滚动阻力损耗建模..... | 43 |
| 4.5.2 电动车加速阻力损耗建模..... | 44 |
| 4.5.3 电动车空气阻力损耗建模..... | 44 |
| 4.6 外界环境仿真建模..... | 45 |
| 4.7 本章小结..... | 47 |
| 第 5 章 动力电池仿真系统的性能测试与分析..... | 48 |
| 5.1 系统能量回收测试..... | 48 |
| 5.2 动力电池仿真测试..... | 48 |
| 5.3 本章小结..... | 50 |
| 结论..... | 51 |
| 参考文献..... | 52 |
| 攻读学位期间发表的学术论文..... | 55 |
| 致谢..... | 56 |

第1章 绪论

1.1 动力电池的现状及技术指标

1.1.1 车载动力电池的现状

国内外研究开发的电动车动力电池主要使用铅酸电池、镍氢电池、燃料电池、锂离子电池等电池,下面就各类型的电池的优缺点进行分析^[1]。

1. 铅酸电池

铅酸电池具有可靠性高、成本低廉、原材料来源丰富及铅回收率可高达98%等优点,目前电动汽车使用的铅酸电池的寿命达400次以上;但作为电动汽车用动力电池,仍面临三大问题:电池的能量及功率密度不高;循环使用寿命低;快速充电能力差等^[2]。

2. 镍氢电池

镍氢电池的优点是:能量密度、功率密度均高于铅酸电池和环使用寿命在实际电动汽车用电池中是最高的;快速充电和深度放电世放电效率高;无重金属污染;全密封免维护。

镍氢电池的缺点为:成本高,价格为相同容量铅酸电池的5~8倍;单体电池电压低(1.2V);自放电损耗大;对环境温度敏感,电池组热管理任务重。

近几年来,随着混合动力汽车的产业化和燃料电池汽车的研制开镍氢电池受到了非常普遍的关注,随着镍氢电池技术的不断发展,其能量密度、循环寿命和快速充电能力会大幅度提高,价格将会降低。许多公电池作为今后混合动力汽车和燃料电池汽车使用的首选电池^[3]。

3. 燃料电池

燃料电池是一种电化学发电机,它相当于一个内燃机-发动机组的功能,它利用空气中的氧和氢(或碳氢化合物转换来的氢)为燃料,将化学能直接转换成电能供给电动机实现驱动车辆。它的主要优点是:效率高,可节省燃料;零排放或少排放;噪音小等,特别适合于做车辆动力源。因此,人们认为燃料电池车将最终取代用石油产品为燃料的汽车。燃料电池虽然有许多优点,被认为是未来汽车的理想动力源。但受价格、铂资源、氢源、服务配套系统和在以空气为氧化剂条件下燃料电池性能有待进一步提高等制约因素,燃料电池车的

推广应用和商业化不是近期能实现的，还要有相当一段时间^[4]。

4. 锂离子电池

锂离子电池是所有可充电电池中，综合性能最优的一种新型电池。与其他电池相比，具有电压高、重量轻、能量密度和能量效率高的优势。国内很多电池厂家对锂电池在电动汽车方面的应用都表现特别的关注^[5]。

当前，锂离子电池仍然存在的主要问题有：快速放电性能差、价格高和过放电保护问题。在过充或滥用的条件下，锂电池可能发生火灾或爆炸。因此，为确保锂离子电池的安全性，必须加电池管理系统。

1.1.2 电动车对动力电池性能要求

电动车分为纯电动车(EV)和混合动力(HEV)两种主要模式^[6]，不同模式的电动车对电池的要求各有不同，这里分别说明：

1. 纯电动汽车电池的工作要求

纯电动汽车行驶完全依赖电池的能量，电池容量越大，可以实现的续航里程越长，但电池的体积、重量也越大。纯电动汽车要根据设计目标、道路情况和行驶工况的不同来选配电池。具体要求归纳如下。

(1) 电池组要有足够的能量和容量，以保证典型的连续放电不超过 1C，典型峰值放电一般不超过 3C；如果电动汽车上安装了回馈制动，电池组必须能够接受高达 5C 的脉冲电流充电。

(2) 电池要能够实现深度放电(例如 80%)而不影响其寿命，在必要时能够实现满负荷功率和全放电。

(3) 需要安装电池管理系统和热管理系统，显示电池组的剩余电量和实现温度控制。

(4) 由于动力电池组体积和质量大，电池箱的设计、电池的空间布置和安装问题都需要认真研究^[7]。

2. 混合动力汽车对动力电池的工作要求^[8]

不同类型的混合动力汽车，由于工作环境、汽车结构、工作模式的不同，对混合动力汽车用动力电池的要求也有所不同，但一些典型、共性的要求可以归纳如下。

(1) 电池的峰值功率要大，能短时大功率充放电。

(2) 循环寿命要长，达到 1000 次以上的深度放电循环和 40 万次以上的浅度放电循环。

- (3) 电池的 SOC 应尽可能保持在 50%-85% 的范围内。
- (4) 需要配备电池管理系统和热管理系统。

1.2 动力电池组

单体电池的容量和电压均无法满足电动车的供电要求，必须将单体电池进行串并联，以满足电动车的使用要求，于是出现了电池组。由于电池组内的单体电池的串并联的各数各不相同，所以电池组的容量也各不一样。

电池组内的单体电池需要经过分选，其目的是挑选性能基本一致的电池，以保证电池组的寿命；因为电池组的寿命和性能以该电池组内的性能最差的单体电池性能为准。通常，电池组内都加电池管理系统，组内的各单节电池进行监控和过冲、过放保护^[10]。

1.3 系统仿真的类型

系统仿真技术以相似理论、信息处理技术、计算机技术、控制理论及仿真领域的技术为基础，以计算机系统及相应的物理设备及仿真器为工具，利用系统模型对真实或假想的系统进行试验，实现对系统的特性进行分析研究。仿真技术已经广泛应用与航空航天、电力电子、化工、汽车等领域^[11,12]。

根据仿真模型的不同，可将系统仿真分为物理仿真、半物理仿真和数学仿真。物理仿真具有直观、形象的优点；其缺点式模型改变难，投资大；数学仿真也称计算机仿真，就是在计算机上实现描写系统物理过程的数学模型，并在这个模型上对系统进行定量的研究和实验。它的特点是重复性好、精度高、灵活性大、使用方便、成本较低、可以是实时的、也可以是非实时的。数学仿真可采用模拟计算机、数字计算机和数字-模拟混合计算机。

仿真软件有通用和专业之分。用于电动汽车的专业软件主要有：ADVIWOR、VehProp、EASY5 等；通用的仿真软件有 Matlab 和 labview。

1.4 本课题研究的目 的及主要内容

本课题通过建立一个与纯电动车实际运行条件高度相似的物理仿真平台，动力电池在该测试平台下进行充放电试验，通过分析试验数据；以此检验动力电池(组)的性能。本仿真系统主要针对锂离子电池(组)。主要研究内容如下：

1. 对外界环境和路况进行数学建模，并利用温湿度综合控制箱和震动试验

台做环境和路况仿真实验。

2. 了解和分析当前电动车所使用的各种类型的动力总成系统，建立了一套动力电池充放电模拟装置，更实际客观的模拟动力电池的充放电环境。

3. 利用驾驶仿真系统进行车辆模拟运行，通过数据采集系统采集油门、刹车、车速、路况信息、环境信息等参数；作为仿真系统的控制仿真依据。

4. 设计了电子可控负载系统，作为驱动系统的负载，同时实现能量回收。

5. 通过车载 CAN 系统，与电池管理系统进行数据交换，对电池组内部的单体电池进行电压、电流、温度等信息进行监控。

6. 上位机软件用 LABVIEW 编写，软件包括数据采集程序，数据分析，数据保存程序，系统控制(PID)程序；通讯程序等等。

7. 实现了系统仿真测试。

第2章 系统的硬件组成及设计

2.1 系统整体设计

为模拟电动车上的电池组的充放电条件，系统硬件分为有 F1 和 M1 组成的驱动系统、由 F2、M2 和 B2 组成的负载模拟系统、模拟温湿度的环境模拟系统、模拟路况的震动仿真系统和数据采集系统(计算机系统)等部分。系统的总体的构架如图 2-1 所示。

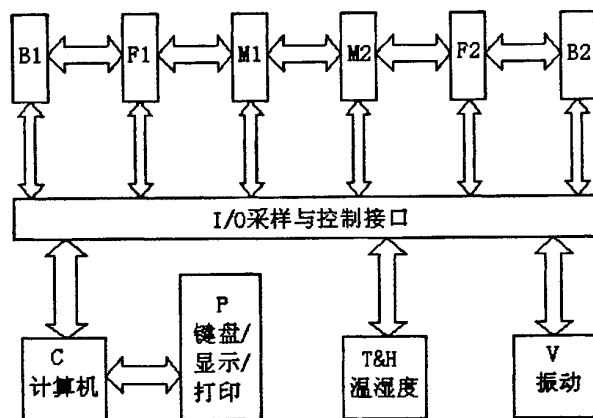


图 2-1 系统整体框图

Fig.2-1 Overall system block diagram

其中：

- B1—被测电池组
- F1—被测电池组变频器
- M1—被测电池组驱动电机
- B2—储能蓄能系统
- F2—储能蓄能电池组变频器
- M2—储能蓄能电池组电机
- I/O—采样与控制接口
- C—控制计算机
- P—键盘/显示/打印
- T—温湿度环境装置
- V—振动环境装置

2.2 温湿度环境仿真系统

温湿度环境仿真系统通过温湿度控制箱(简称温控箱)控制不同温度及湿度的变化实现对外界环境温度湿度的仿真。

温控箱有试验箱、空气压缩机、加热装置、加湿装置和冷却水塔等几部分组成，能实现制热、制冷及加湿等功能；每个功能相互独立工作，系统使用PID控制温度和湿度。

1. 制热：温控箱的制热是电阻丝导电后在封闭的试验箱内产生热量，实现温度的升高。

2. 制冷：设备采用蒸汽压缩制冷，其原理是利用氟利昂等液体的蒸发潜热从被冷却物体中吸热而实现制冷。

3. 加湿：利用水盘力的电热管进行加热二产生蒸汽，然后蒸汽进入试验箱中，使的箱内的空气加湿。

2.3 震动仿真系统

电动车在运行过程中，由于路面的不平整，会产生持续不断的震动，震动的频率大小与路面的不平度有关；这对组合电池即电池包模块造成了极大的损害；模拟仿真一定频率下的震动对于电池包内单体电池组合是否牢靠非常有用。

电动振动试验系统是用来产生正弦、随机、正弦加宽带随机、窄带随机加宽带随机和冲击等激励的一整套设备。它通常由电动振动台、功率放大器、振动控制仪及其附属设备组成。系统框图 2-2 如下：

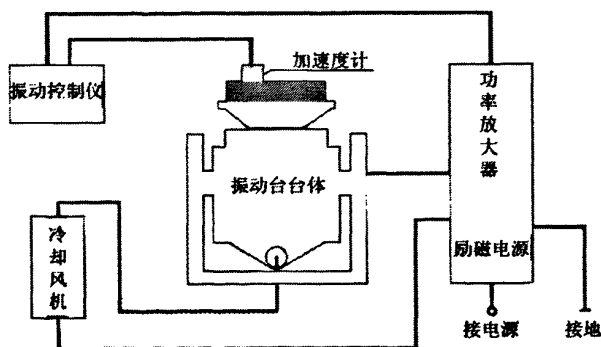


图 2-2 电动振动试验系统组成

Fig.2-2 Electric vibration test system components

1. 振动台体^[14]

振动台体是将电能转换为机械能的换能器。基本工作原理基于载流导体在磁场中要受到电磁力作用的安培定律。载流导体所受电磁力与导体中的电流、导体在磁场中的有效长度及导体所处磁场的磁感应强度成正比。电磁力的方向用左手定则决定。

驱动线圈置于磁体的空气隙中，由左手定则可知驱动线圈受力 F 作用使台面产生向下运动，如改变流过驱动线圈中电流的方向，驱动线圈受到一相反的力，使台面向上运动。若在驱动线圈中通一交变电流时它将使工作台面在磁场中产生相对的交变运动。

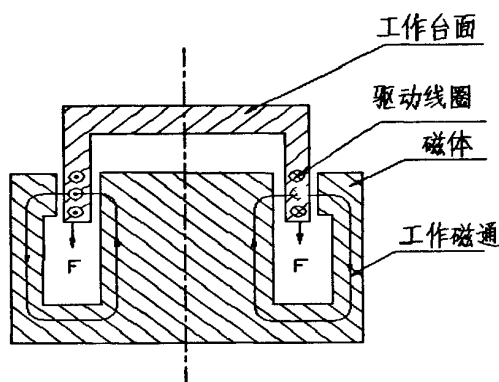


图 2-3 振动台台体

Fig.2-3 Vibration taiwan and taiwan body

通常驱动线圈中的交变电流是由可变频率的励信号源经功率放大器放大后供给，而恒定磁场可以由电磁或永磁产生，但多用电磁产生。电动振动台除振动台本体外，还有配套的电器设备和电子仪器，如信号发生器、功率放大器、直流励磁电源、冷却系统等。信号发生器产生交变信号，经功放放大后，输入到动圈，它与磁场作用即产生一个交变的力 F ，推动可动系统运动。试件与台面一起在激振力 F 的作用下振动，其频率决定于信号发生器的频率 ω ，振动幅值取定于电流。

2. 功率放大器

作为电动振动台推动装置的功率放大器是目前广泛使用的数字放大器，它的作用是：它将是来自信号源的小功率信号放大，供给驱动线圈足够的“不失真”功率的驱动电源。

开关功率放大器的工作原理，简单地说就是采用正弦脉冲宽度调制技术，结合振动台对功放的特殊要求，产生一个由正弦信号控制占空比的矩形波，将矩形波控制功率开关，将直流电源斩波，再通过解调，即可得到一个满足振动台强烈要求的正弦信号，开关功率放大器原理框如图 2-4 所示：

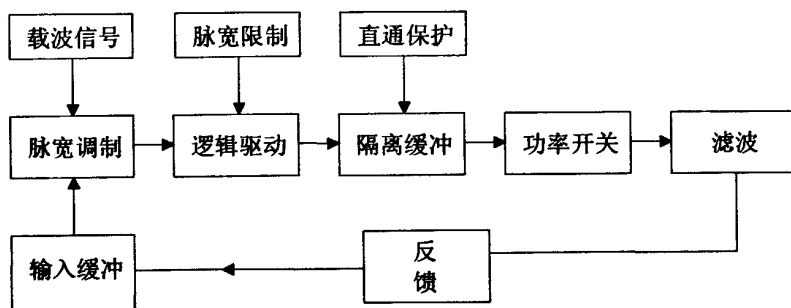


图 2-4 开关功率放大器原理

Fig.2-4 Switching power amplifier principle

3. 冷却装置

电动振动台在工作过程中的发热主要有两个原因，一是流过驱动线圈、励磁线圈的电流引起导体电阻损耗而发热，二是导体在驱动线圈交变磁场中因涡流损耗而发热。他们产生的热量必须消散，否则会烧坏部件。冷却的方法分自然冷却和强制冷却，强制冷却又分风冷和液冷，液冷又分水冷和油冷。本振动台采用采用强制风冷。

2.4 电动车驱动模拟系统

2.4.1 电动车动力系统分类

不同类型的电动车上的动力系统也各不相同，这里简单说明一下几种常见的动力系统。

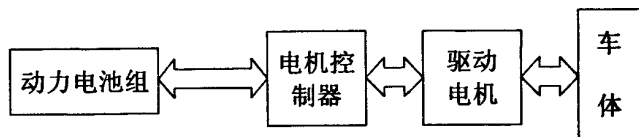


图 2-5 纯电动动力系统模型

Fig.2-5 Pure electric power system model

1. 纯电动动力系统模型^[15]

在纯电动车是中动力电池为唯一能量源来提供驱动力；纯电动汽车实现了汽车零排放的要求，将是未来电动车的发展方向。

2. 串联型混合动力汽车动力模型^[16]

在串联式混合电动汽车中只有动力电池直接提供驱动力，串联驱动系统如图 2-6 所示：

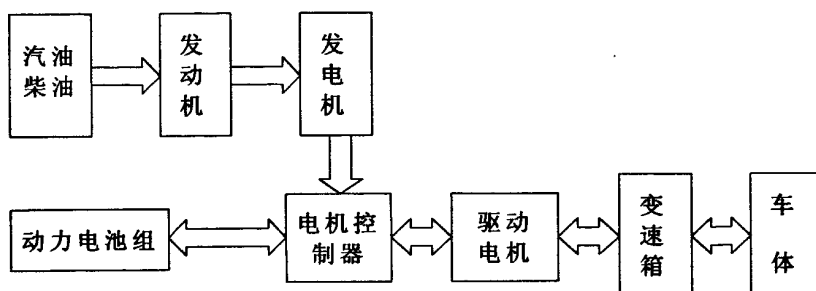


图 2-6 串联型混合动力汽车动力模型

Fig.2-6 Series hybrid electric vehicle dynamic model

发动机带动发电机发电，产生的电能直接输送到电池或电动机，由电动机产生驱动力矩驱动汽车。电池组用于平衡发电机输出功率与电动机的输入功率；发动机运行路况不受汽车行驶路况的影响，始终保持运行在其最佳工作区。当发电机的发电功率大于电动机所需的功率时（如汽车减速滑行），发电机向电池组充电以维持能量的平衡；当发电机发出的功率低于电动机所需的功率时，电池则向电动机提供额外的电能。

3. 并联型混合动力汽车动力模型^[17]

并联驱动方式如图 2-7 所示，汽车可由发动机和电动机共同驱动或各自单独驱动。因此，对电机、发动机功率的要求可以降低，电池容量也可减小。由于发动机可通过机械传动机构直接驱动车，所以能量利用率相对较高，并且电池质量要求降低，因此汽车的燃油经济性以得到改善。由于并联式驱动系统的发动机路况受汽车行驶路况的影响。因此，在汽车行驶路况变化较多、较大的情况下，控制较为困难。相比于串联结构，并联式结构系统布置和控制策略要复杂得多。在并联混合电动汽车中，电机通过从驱动系统中加、减转矩来调节发动机的负荷。加速时，电机作为电动机消耗电池中的电能为驱动系统提供转矩；减速时，电机作为发电机将电能储存到电池中。

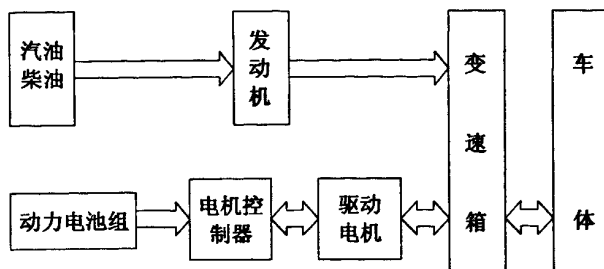


图 2-7 并联型混合动力汽车动力模型

Fig.2-7 Parallel hybrid electric vehicle dynamic model

4. 混联式混合动力汽车动力系统

混联式驱动系统是串联式与并联式的综合。混联驱动方式如图 2-8 所示：当汽车低速行驶时，驱动系统以串联方式工作；当汽车高速稳定行驶时驱动系统则以并联工作方式为主。发动机产生的驱动转矩一部分通过机械传动部件传送给车轮，另一部分则驱动发电机发电。发电机发出的电能输送给电机或者电池，电动机产生的驱动转矩与发动机产生的驱动转矩一起传送给轮。混联式驱动系统兼具串联式和并联式驱动系统的优点，从结构上保证了更复杂路况下，系统在最优状态工作，更容易实现排放和油耗的控制目标。混联式动力复合比并联式更复杂，对动力复合装置的要求更高^[18]。

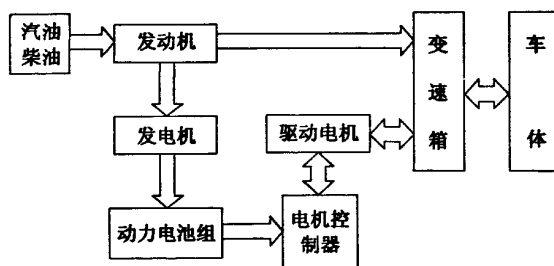


图 2-8 混联型混合动力汽车动力模型

Fig.2-8 Parallel hybrid electric vehicle dynamic model

尽管电力驱动系统在各种类型的电动汽车中的布置及结构稍有区别，但均包括以下几部分：电机驱动装置、机械传动装置和车轮，其中机械减速器在某些应用中可省略。不论电动汽车的驱动系统采用哪种布置方式，其电机驱动装置的结构基本上都相同，主要由三个部分组成：电动机、电机控制器(变频器)和电子控制器。

2.4.2 驱动电机

电动汽车使用的驱动电机通常要求能够频繁地启动、停止、加速、减速。低速行驶或爬坡时要求电动机能够高转矩运行，高速行驶时要求电动机高转速运行，电机调速范围要求很宽。对电动汽车驱动电动机性能的要求有^[19]：

1. 要有3~5倍的过载能力满足短时间内加速行驶与最大爬坡度的要求；
2. 最高转速应能达到额定转速的3~5倍；
3. 要求电动机有高功率密度、高效率和高功率因素，即在较宽的转速和转矩范围内都有较高的工作效率；
4. 可控性高，稳态精度高，动态性能好且能够多机协调运行；
5. 在较恶劣的环境中也能够正常工作；
6. 制动再生效率高。

目前电动汽车驱动电机主要有：直流电动机和交流电动机两种。

直流电机在额定转速以下运行在恒转矩状态，额定转速以上运行在恒功率区。它的这种特性很适合汽车对动力源低速高转矩、高速低转矩的要求，而且直流电机结构简单，易于平滑调速，控制技术成熟；但是直流电机的效率和转速相对较低，不宜在多尘、潮湿、易燃易爆环境中使用，其换向器维护困难，很难向大容量、高速度发展。直流电机价格高、体积和重量大，各大公司研制的电动车电气驱动系统已逐渐淘汰了直流电机。

相比直流电机，交流电机体积小、质量轻、效率高、调速范围宽、可靠性高、价格便宜、维修简单方便，在电动汽车上得到了广泛应用。当电动汽车减速或制动时，电机处在发电制动状态，给电池充电，实现机械能到电能的转换。在电动汽车上，由功率半导体器件构成的功率逆变器把蓄电池电源提供的直流电变换为频率和幅值都可以调节的交流电。

实验室的实验用的驱动电机为永磁同步电机。与传统的励磁电机相比，永磁同步电机具有结构简单，运行可靠；体积小，重量轻；损耗小、效率高；电机的形状和尺寸可以灵活多样等显著优点。和直流电机相比，它没有机械换向器和电刷；与异步电机相比，它不需要无功励磁电流，因而功率因数高，定子电流和定子电阻损耗小，在稳态运行时没有转子电阻损耗，效率高，且转子参数可测、定转子气隙大、控制性能好。永磁同步电机的矢量控制系统能够实现高精度、高动态性能、大范围的速度和位置控制^[21]。

2.4.3 驱动电机冷却方式

驱动电机的冷却方式与电动车驱动电机的冷却方式一致，使用水冷。水冷是在电动机定子里或外壳里按需要分布了可以通过液态冷却介质管路，并通过管路里的冷却液，把热量带到专用的热交换器里，再把热量送到外界。这种散热方式可以很好的保证电机的散热效果，电机过载能力能显著增强。对电动车的适应能力和总体性能提高有很大的帮助。特别重度混合电动车和大型电动客车对电机散热要求很高，大功率水冷电动机在这一领域已经得到广泛应用^[22]。

2.4.4 驱动电机控制器

实验室使用的驱动电机控制器为变频器；变频器就是将固定频率的交流电变为频率连续可调的交流电的装置。变频器技术随着计算机技术、电力电子技术、微电子技术和自动控制理论的发展而不断发展。变频器的问世，对电气调速领域具有十分重要的意义。交流电动机变频调速技术具有节能、改善生产流程。变频器作为一种智能调速设备，以其多用途、高可靠性和明显的节电效果，已经广泛的应用于各类电动车的控制上^[23]。

2.4.5 电机矢量控制

电机控制采用的是矢量控制，矢量控制是一种高性能异步电动机控制方式，它的基本思路是将电动机的定子电流分为产生磁场的电流分量(励磁电流)和与其垂直的产生转矩的电流分量(转矩电流)，并分别加以控制。

矢量控制方式分转差频率控制的矢量控制方式、无速度传感器矢量控制方式和有速度传感器的矢量控制方式等^[24]。

采用矢量控制方式的通用变频器不仅可在调速范围上与直流电动机相匹配，而且可以控制异步电动机产生的转矩。矢量控制方式所依据的是准确的被控异步电动机的参数，这些参数通常由变频器厂商指定。

目前新型矢量控制通用变频器中已经具备异步电动机参数自动检测、自动辨识、自适应功能，带有这种功能的通用变频器在驱动异步电动机进行正常运转之前可以自动地对异步电动机的参数进行辨识，并根据辨识结果调整控制算法中的有关参数，从而对普通的异步电动机进行有效的矢量控制。

2.5 负载模拟系统

在实验室环境下, 由于没有汽车的行走系统(轮胎), 通常使用大功率的测功机作为汽车负载。测功机是将驱动电机的机械能全部转化为热量, 利用冷却装置进行散热。本系统使用大电机作为负载, 并与电机控制器, 储能蓄电池仪器组成可控负载系统, 利用发电机原理实现对动力电池能量的回收。负载电机将回收的能量储存在储能蓄电池上。

可控电子负载系统包括: 可控负载电机、负载电机控制器、负载电机冷却系装置、储能蓄电池、充电机, 如图 2-9 所示:

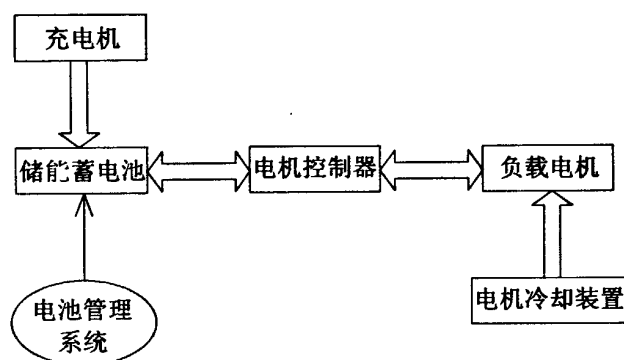


图 2-9 负载模拟系统组成

Fig.2-9 Load simulation system composed of

2.5.1 可控负载电机

可控负载电机选用异步交流电机, 使用永磁同步电机作为负载电机有两个优势^[21]:

1. 永磁同步电机由于功率密度高、调速性能好、在宽转速范围内运行效率高(90%~95%)。非常适合作为可控负载电机。
2. 永磁同步电机体积小、质量轻、效率高、调速范围宽、可靠性高、价格便宜、维修简单方便。
3. 使用与驱动电机相同型号的电机, 在控制上可以用相同的控制策略, 减少了工作量, 而且能保证控制的稳定性和可靠性。

可控负载电机由于作为负载使用，其输出功率要求比驱动电机的输出功率大 2~3 倍，这样才能保证驱动电机在任何输出功率的情况下，负载电机工作在最佳工作区域。

2.5.2 负载电机冷却装置

电机冷却是保证电机正常稳定工作的重要一环，经过综合好考虑，负载电机使用的是强制风冷的冷却方式。

在电机外部，增加了加快散热器表面空气流速的风扇，使得电机在温度较高的工作环境里也能很好的保证冷却效果，保证电机正常运行。当负载电机的温度达到设定的 80℃时，电机风扇开始启动，当负载电机温度小于 40℃时，电机风扇停止。电机风扇的操作由工控机自动完成，不需要人为的操作^[25]。

2.5.3 负载电机控制器

负载电机控制器与驱动电机控制器一样使用变频器，电机控制方式也用矢量控制。采用与驱动系统一样的电子负载系统与控制方式非常有必要：

1. 可以减少工作量，节省负载电机调试时间；
2. 在系统运行时，无缝的可以实现两电机驱动和制动的相互转化，实现被测动力电池充电和放电的瞬间切换；
3. 便于维护与维修；

2.5.4 储能蓄电池系统

1. 储能蓄电池

负载电机的供电不直接从电网取电，而是和电动车的驱动电机一样，使用直流电池供电；储能蓄电池不仅作为负载电机的供电源，同时还把负载电机回收的能量储存起来；当负载模拟系统作为被测动力电池的充电器时，储能蓄电池会作为动力电池的供电源。

储能蓄电池所使用的电池为容量型磷酸亚铁锂电池组，电池组总电压要求为 500V；容量越大越好，这是由于储能蓄电池是整个仿真系统的能量源，它必须有足够大的电量满足系统运行；本系统的储能蓄电池的总的容量为 1000Ah，满足系统连续运行 12 个小时。

为防止过充、过放导致使用寿命的缩短，电池组安装了电池管理系统实时

监控以保证储能蓄电池的使用寿命。

2. 电池管理系统

电池管理系统是用来对蓄电池电池组进行安全监控及有效管理，提高蓄电池的使用效率，增加其使用寿命的，降低运行成本的目的，进一步提高电池组的可靠性的重要保证。

电池管理系统分电池管理单元(BMU)和电池控制单元(BECU)。

电池管理单元主要负责电池组内部单节电池的电压的采集和电池组内部温度及各单体电池之间的均衡作用，避免导致个别单体电池的电压过高或过低，保证电池组内个单节电池的一致性，保证电池组的使用寿命。电池管理单元通过 CAN 通讯与电池控制单元进行数据交换。

电池控制单元负责管理所有电池管理单元，采集电池组的总电压和总电流，进行数据处理，SOC 和 SOH 估算，通过 CAN 总线与计算机进行数据交换^[26]。

2.5.5 充电机

在仿真系统运行中，由于负载电机和驱动电机的损耗，整个系统总的能量会越来越来少，最终系统将无法正常运行。实验室配备一台大功率充电机，负载给储能蓄电池充电。

充电机为高频开关电源，具有功耗小，效率高、体积小，重量轻、稳压范围宽等优点。

本实验室所使用的充电机的最大充电电压为 650V，最大稳态放电电流为 300A，可实现恒流充电和恒压充电两种充电要求，最快可以在 5 小时内把空的储能蓄电池充满电。

2.5.6 系统能量回收的实现

可控电子负载的另一个重要的功能就是能量回收。仿真系统在运行时，动力电池将所储存的化学能转化为机械能带动负载电机旋转，负载电机工作在制动的状态下，将机械能转化为电能。

能量回收的原理是负载电机在作为动力电池放电的负载同时，利用发电原理，把驱动电机的机械能转化为电能储存在储能蓄电池，这样就实现了部分能量的回收。如图 5-1 所示：

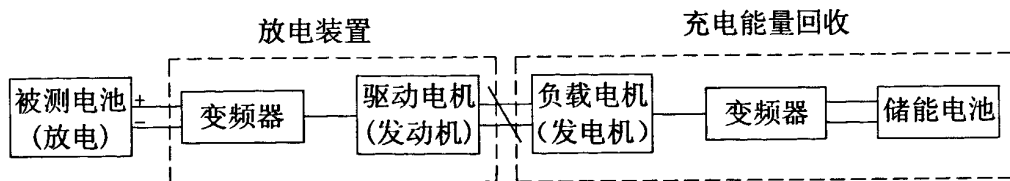


图 2-10 蓄电池能量回收原理图

Fig.2-10 Schematic diagram of battery energy recovery

同理当动力电池充电时，整个原理正好与动力电池的放电原理相反，负载电机作为发动机带动驱动电机旋转，驱动电机作为发电机给被测动力电池充电（如图 2-11 所示），这也就是刹车时电动车的能量回收原理。

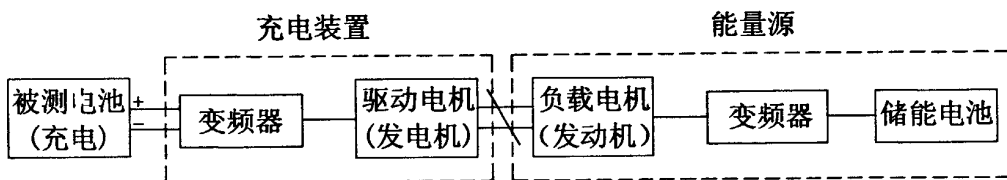


图 2-11 被测动力电池能量回收原理图

Fig.2-11 The measured power battery energy recovery diagram

2.6 数据采集系统

动力电池仿真系统是以计算机为“智能处理核心部件”的检测、控制系统；要求将计算机与外部物理设备相连，而实现这种连接的桥梁就是数据采集系统，数据采集系统的优劣将反映系统的稳定性和可靠性。

2.6.1 信号类型分析

实验室要采集的信号有上百个之多，信号类型也分好几种；不同的信号的测量方式及其对采集系统的要求各不相同。只有了解了被测信号的特性，才能选择合适的传感器及采集设备。

根据信号蕴含信息方式的不同，可以将信号分为数字信号和模拟信号。数字信号又可以分为开关信号和脉冲串信号；模拟信号则口译为直流时域信号和频域信号^[27]。

1. 开关信号

开关信号蕴含的信息与信号瞬间状态有关。TTL 信号就是一个开关信号，当 TTL 信号在 2.0~5.0V 之间，就定义为逻辑高电平；当在 0~0.8V 之间，则定义为逻辑低电平。

2. 脉冲串信号

脉冲串信号包括一系列状态转换，信息就包含在状态转换发生的数目、转换速率、一个转换间隔或多个转换间隔的时间里。实际应用中，有些装置需要数字输入，比如一个步进式马达就需要一系列的数字脉冲串输入来控制位移和速度。

3. 模拟直流信号

模拟直流信号可以是静止的或者是变化非常缓慢的模拟信号。直流信号最重要信息是它在给定区间内蕴涵的信息的幅度。常见的直流信号有温度、流速、压力等。采集系统在采集模拟直流的模拟信号时，需要有足够的精度以正确测量信号。直流信号的变化比较缓慢，一般选用软件计时，而不需要使用硬件计时。

4. 模拟时域信号

模拟时域信号与其他信号的不同在于，模拟时域信号所蕴涵的信息不仅有信号的电平，还有电平随时间的变化。在测量一个时域信号时，也可以说在测量一个波形时，需要一些有关波形形状的特性，比如斜度、峰值等。因此，为了测量一个时域信号必须 4 个精确的时间序列，序列的时间间隔也应该合适，以保证信号的有用部分被采集到。同时还要以一定的速率进行测量，并且这个测量速率要能跟上波形的变化。

本系统：电动机转速和扭矩测量用的是脉冲信号；电路回路电流和被测电池组总电压用模拟直流信号采集。温度、湿度等信号用模拟直流采集。

2.6.2 传感器的选型

1. 编码器的选型

编码器选用型号为 PIE8-1024-G05E 编码器是测量电机转速的传感器。它将信号(如比特流)或数据进行编制、转换为可用以通讯、传输和存储的信号形式的设备。

本系统采用绝对增量式编码器，其型号为 PIE8-1024-G05E，它具有如下特点：

分辨率为: 1000P/R
电源电压: 24VDC
最大转速: 6000r/min
输出电压: $V_H > 15\text{V}$; $V_L < 0.5\text{V}$
相应频率: 100kHz (max)
启动力矩: $3 \cdot 10^{-3}\text{N}\cdot\text{m}$
防护等级: IP54

2. 电流传感器的选型

霍尔电流传感具有测量精度高, 稳定性高、抗干扰强等优点; 是测量电流的好选择, 本系统使用的电流传感器具有如下优点:

测量范围: 0~1000A
额定输出电流: 0~100mA
负载电阻: 30 欧姆
工作电压: $\pm 15\text{V DC}(\pm 5\%)$
相应时间: $< 1\mu\text{s}$
温度漂移: $\pm 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ 以内
工作频率范围: 0-150kHz
环境操作温度: $-20^{\circ}\text{C} \sim +75^{\circ}\text{C}$
绝缘耐热等级: B 级(130°C)
抗电强度: 可承受工频 6000V/1 分钟

3. 扭矩传感器的选型

扭矩传感器采用国际先进的弹性应变测量技术原理传感器信号输出及能量导入均采用无接触式传递方式; 传感器在测量正、反向扭矩时, 无需进行换向及调零设置传感器信号输出采用多种方式(频率、模拟量、总线方式)传感器信号输出经调整后可直接进入 PLC 采集系统转速测量: 转速测量采用旋转编码器、光电齿盘方式; 高速测量时采用光电齿盘方式, 低速测量时采用旋转编码器、也可进行角度测量 信号及供电均为非接触方式传递, 无滑环或电刷; 无须调零和换向即可测量正、反力矩; 信号采用频率输出方式, 信噪比高, 抗干扰性好; 响应快, 可测启动力矩, 更可测量过渡过程力矩; 不受转速高低的限制, 可精确测量实时力矩和功率; 传感器的线性度、重复性好、可靠性高; 传感器结构紧密、体积小、重量轻。

技术指标如下:

线性度: 0.1~0.5% F.S

滞后: 0.1~0.5% F.S

过载能力: $\leq 150\%$

绝缘电阻: $> 200M$

工作温度范围: $-20^{\circ}C \sim +60$

相对湿度: $< 90\%RH$

传感器供电电压: $\pm 12VDC$

传感器功耗: $< 4W$

负载电流: $< 15mA$

4. 温度传感器的选型

两种不同材质的导体, 如在某点互相连接在一起, 对这个连接点加热, 在它们不加热的部位就会出现电位差。这个电位差的数值与不加热部位测量点的温度有关, 和这两种导体的材质有关。这种现象可以在很宽的温度范围内出现, 如果精确测量这个电位差, 再测出不加热部位的环境温度, 就可以准确知道加热点温度。由于它必须有两种不同材质的导体, 所以称之为“热电偶”。不同材质做出的热电偶使用于不同的温度范围, 它们的灵敏度也各不相同。热电偶的灵敏度是指加热点温度变化 $1^{\circ}C$ 时, 输出电位差的变化量。对于大多数金属材料支撑的热电偶而言, 这个数值大约在 $5\sim 40mV/^{\circ}C$ 之间。

热电偶传感器有自己的优点和缺陷, 它灵敏度比较低, 容易受到环境干扰信号的影响, 也容易受到前置放大器温度漂移的影响, 因此不适合测量微小的温度变化。由于热电偶温度传感器的灵敏度与材料的粗细无关, 用非常细的材料也能够做成温度传感器。也由于制作热电偶的金属材料具有很好的延展性, 这种细微的测温元件有极高的响应速度, 可以测量快速变化的过程。

5. 电压传感器的选型

电动车需要的总电压为 $500V$ 左右, 而模拟量采集卡的输入范围为 $0\sim 10V$, 需要将电池的电压信号按一定比例缩小, 才能进行采集, 故电流传感器又叫电压变送器; 实验室用的电压变送器的技术参数如下:

输入范围: $0\sim 700V$

输出类型: $0\sim 5V$

精度等级: 0.5 级

负载能力: 电压输出 $\leq 5mA$;

电流输出: $\leq 300\Omega$

响应时间: 400mS
辅助电源: +12V
静态功耗: 200 mW
隔离耐压: $\leq 2500\text{VDC}$

2.6.3 数据采集卡配置

信号测量与数据采集有所不同, 只要信号类型相同, 就可以用同一张采集卡采集。

根据采集的信号类型的不同, 本系统使用了模拟量采集卡和脉冲采集卡; 对于需要快速采集及控制的参数(如回路电流和电压), 使用了高速采集卡; 对于像温度等变化相对缓慢的参数使用普通的数据采集卡。

1. PCI-1714 模拟量高速采集卡

它具备 12 位 A/D 转换器, 转换最高速度每秒 30M 采样点; 4 路单端模拟量输入; 每个输入通道的增益可编程; 板上 FIFO 存储器; 4 个 A/D 同时采样; 多种 A/D 触发模式; 可编程触发器/定时器。

2. PCI-1747U 模拟量采集卡

它有如下特点: 64 路单端或 32 路差分模拟量输入, 会组合输入方式; 16 位高分辨率; 250K/s 采样速率; 自动校准功能; 单级/双极性输入范围; 用于 AL 的 1024 采样 FIFO; 总线主控 DMA 数据传输。

3. PCI-1784U 4 轴正交编码器及计数器卡

它是一款专门针对编码器计数的采集卡; 它具有: 4 个 32 位加/减计数器; 单端或差分输入; 脉冲/方向和加/减计数; 每个编码器 $\times 1$, $\times 2$, $\times 4$ 计数; 光隔保护 2500VDC; 4 阶数字滤波器, 可选采样速率; 随机 8 位定时器, 带宽基于时间选择器; 多个中断源, 用于精确应用; 4 路隔离保护的输入; 4 路隔离保护的输出。

除此之外本系统还使用了研华公司的带隔离的数字量 I/O 卡和 CAN 通讯卡:

1. PCI-1750 32 路隔离数字量 I/O 及计数卡

16 路隔离数字量输入和 16 路隔离数字量输出; 所有隔离通道高压隔离 (2500V_{DC}); 隔离输出通道上的高汇点电流(200Ma/每通道); 支持干接点或 5~50V_{DC} 隔离输入; 中断处理能力; 定时器/计数器中断能力。

2. PCI-1680 2 端口 CAN 通用 PCI 通讯卡

通用 PCI 卡(3.3V 和 5V 信号); 2 端口 CAN 接口; 1Mbps 高传输速率; 高电压隔离保护(1000V_{DC})。

所有的采集卡和 I/O 卡都安装在工控机上, 本系统所采用的工控机同样使用的是研华公司的工控机。工控机与普通电脑的最大区别是: 工控机的底板的插槽比普通电脑的多的多, 并且工控机工作环境相对恶劣。

2.7 信号抗干扰技术

自然现象(如静电放电)产生的电子扰动或因某些设备引起的其他电子设备的非正常响应都会产生电磁干扰。电磁干扰的范围很大, 从探测不到的微弱干扰到高强度干扰, 大体可以分为三级: 轻微干扰、中等强度干扰和灾难性干扰。大多数电磁干扰一般都属于中等强度干扰。本仿真系统的干扰就属于中等强度干扰; 电磁干扰分传导干扰和辐射干扰^[28]。

本系统所采用的电机(包括驱动电机和负载电机)以及电机控制器在工作时会产生强大的电磁干扰, 特别是电机控制器, 由于进行交/直流转换, 其电磁干扰极为严重。如不进行抗干扰处理, 传感器特别是霍尔传感器的测量精度大大降低; 并且在传输的过程中, 信号极易受到干扰, 使得采集系统采集的信号的稳定性和可靠性大大降低, 严重时, 数据将严重的偏离实际值导致系统控制失败。

本课题同时进行了硬件抗干扰和软件滤波。硬件滤波手段更多, 更有效果; 采取了如下抗干扰措施:

1. 用金属壳子将电机控制器的电磁辐射屏蔽;
2. 在动力线外面套上一层金属浪管, 屏蔽动力线产生的辐射干扰;
3. 使用屏蔽双绞线传输信号;
4. 在数据线的外面同样套一层金属浪管, 隔绝外界电磁干扰的影响;
5. 使用抗干扰较强的传感器;
6. 所有设备机壳及金属屏蔽管的一端接大地(独立地线);
7. 数据线的屏蔽层的一端(输入端)接大地(独立地线);
8. 在数据输入端接滤波电路;
9. 使用带隔离的采集卡采集数据;
10. 在输入端套上磁环, 消除高频;

2.7.1 独立地线设计

大地是一个电阻非常低，而且电容量非常大的物体，它拥有吸收无限电荷的能量，而且在吸收大量电荷或能保持电位不变，因此电气上把它作为一个系统的参考电位体，被称为电气地^[29]。

将电力系统或电气装置的某一部分经接地线连接到接地极上，称为接地

1. 实验室铺设独立地线的目的^[30]

(1) 安全接地

将高压设备(电机、变频器等)的外壳与大地连接。一是防止机壳上积累电荷，产生静电放电而危及设备和人身安全防止出现事故；二是可以屏蔽设备巨大的电场，起到保护作用。

(2) 工作接地

工作接地是为电路正常工作而提供的一个稳定的零电位参考点。该基准电位可以设为电路系统中的某一点、某一段或某一块等。当该基准电位不与大地连接时，视为相对的零电位。但这种相对的零电位是不稳定的，它会随着外界电磁场的变化而变化，使系统的参数发生变化，从而导致系统工作不稳定。当该基准电位与大地连接时，基准电位视为大地的零电位，而不会随着外界电磁场的变化而变化。

2. 独立地线的要求

独立地线采用铜芯绝缘导线或电缆，不得利用镀锌扁铁或金属软管；工作接地线与保护接地线必须分开，保护接地导体不得利用金属软管；埋设时，将接地极打入地表层一定深度倒入盐水，地线周围最好全部采用炭粉实埋，用来增强导电性；一般系统接地电阻小于 4Ω ，共点接地电阻小于 1Ω ，移动设备，接地电阻不大于 10Ω 。

3. 具体做法

实验室的独立地线用 10 条镀锌角钢长 1 米在实验室外面的空地上每隔 2 米垂直打入地面，每根角铁离地面 1.5 米深，角铁之间用扁钢焊接在一起；独立地线的电阻为 2.1 欧姆，经实际测试，所铺设的独立地线满足了系统要求。

2.7.2 硬件滤波电路设计

滤波电路时减少信号干扰的一种非常有效的手段，有用信号的频率带宽是有范围的，超出了这个范围的频率的信号就认为是干扰信号，需要在被采集卡

采样前进行处理，滤波电路的作用实质上是“选频”。即允许某一部分频率的信号顺利通过，而使另一部分频率的信号被急剧衰减^[10]。

滤波电路分无源滤波电路和有源滤波电路两种；无源滤波电路是通过电阻、电容以及电感的元器件实现滤波。

本系统所用的滤波电路为由集成运放和 RC 网络组成的低通(100Hz 以下)有源滤波电路如图 2-11 所示。该滤波电路有 2 个二阶低通滤波电路(截至频率为 150Hz)、1 个带通滤波电路(50Hz)和一个加法器组成，其目的是滤掉频率在 150Hz 以上和工频干扰信号。

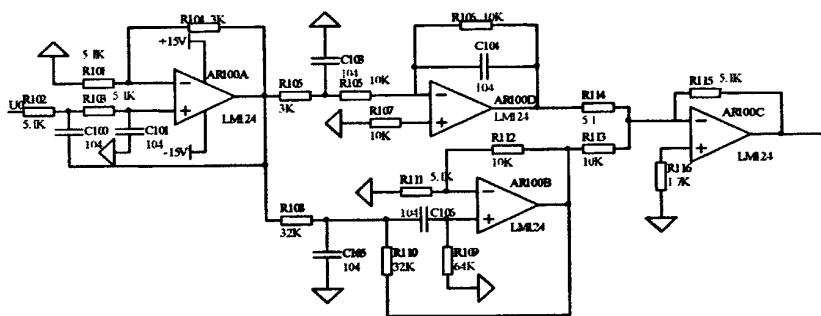


图 2-12 硬件滤波电路

Fig.2-12 Hardware filter circuit

2.8 本章小结

本章介绍了仿真系统的硬件组成，说明了温湿度试验箱的组成和温湿度实现原理；震动系统的组成和震动实现原理；介绍了驱动模拟系统和负载模拟系统的组成；分析了仿真系统的信号类型，根据不同的信号选用了不同的传感器和采集卡；最后介绍了实验室的抗干扰措施。

第3章 系统的软件组成及设计

3.1 系统开发软件平台

3.1.1 虚拟仪器简介

虚拟仪器是计算机技术与仪器技术相结合的产物，计算机和仪器的密切结合是目前仪器技术的一个重要发展方向^[39]。虚拟仪器具备传统电子仪器的数据采集、数据分析和数据表达三大功能模块，如图 3-1 所示。

结合图 3-1 更进一步讲，虚拟仪器是以透明的方式将计算机资源与仪器硬件的测控能力相结合，实现仪器的功能运作。应用程序将可选硬件(GPIB、VXI、RS-232/485、DAQ 等)与可重复使用的源码库函数等软件相结合从而实现模块间的通信、定时和触发，源码库函数为用户构造自己的虚拟仪器系统提供基本的软件模块^[18]。

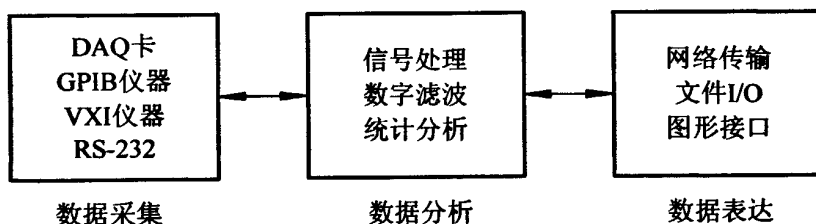


图 3-1 虚拟仪器的功能模块

Fig.3-1 The function modules of the virtual instruments

虚拟仪器具有以下特点^[32,33]：

1. 突出“软件就是仪器”的新概念，用户可自定义测量功能。在通用硬件平台确定后，可由软件取代传统仪器中的硬件来完成仪器的功能。软件的灵活性和复用性使用户可以按自己的需要定义(设置)测量功能。

2. 强大的数据处理功能。虚拟仪器将信号分析、显示、存储、打印和其他管理交由计算机来集中处理，充分利用了计算机强大的数据处理、传输和发布功能。

3. 灵活性和可扩展性强，性价比高，便于组成复杂的测试系统。

4. 良好的人机界面。虚拟仪器的操控界面是一种虚拟面板，亦称为软面板。虚拟面板可以模拟传统仪器面板的风格来设计，也可以由用户根据实际需求自行设计。测量结果可以通过计算机显示器以曲线、图形数据或表格等形式方便灵活地显示出来。

5. 与其他设备互连的能力强。虚拟仪器通常具有标准化的总线或通信接口，具有与其他设备互连的能力，可实现远程测试、监控和故障诊断等功能，以便充分利用有效资源，提高测试效率。

数据采集虚拟仪器的硬件构成的基本结构如图 3-2 所示，被测对象先通过信号调理，使被测对象的信号大小满足数据采集卡的采集范围，在通过数据采集卡或其他硬件设备进行数据采集，在进行处理之后显示在虚拟仪器面板上。

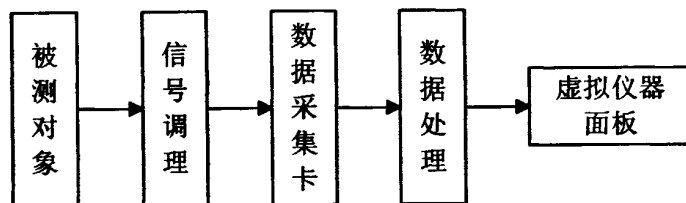


图 3-2 典型的虚拟仪器设计方案

Fig.3-2 The design of the typical virtual instruments

软件构成^[34]：

构成一个虚拟仪器系统，当基本硬件确定以后，就可通过不同的软件来实现不同的功能。软件是虚拟仪器系统的关键，没有一个优秀的控制分析软件，很难想象可以构成一个理想的虚拟仪器系统。以 VXI 虚拟仪器系统为例，从图 3-3 可知，VXI 虚拟仪器系统至少需要仪器、通信和驱动程序三种接口软件。

其中，仪器接口为仪器与计算机之间的通信协议和方法；通信接口按标准方式将仪器连接起来，它是仪器与仪器驱动程序之间的通信接口，实际上就是 VXI 系统的 I/O 接口软件；仪器驱动程序接口将通信接口与开发环境(ADE)连接起来。应用软件开发环境将计算机的数据分析和显示能力与仪器驱动器融合在一起，为用户开发虚拟仪器提供必要的软件工具和环境^[23]。

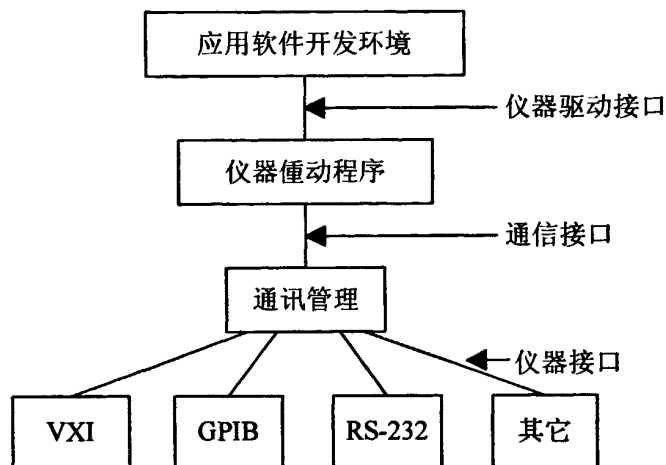


图 3-3 VXI 虚拟仪器软件结构

Fig.3-3 The architecture of the VXI virtual instruments

3.1.2 LABview 简介

LabVIEW 是美国国家仪器公司(National Instruments, NI)的软件产品。LabVIEW 结合了简单易用的图形式开发环境与灵活强大的 G 编程语言, 提供了一个非常直观的编程环境; 有专为大型应用开发、集体开发及应用配置设计的附加开发工具, 包括应用程序生成器、图形比较、源代码控制、程序码编写指导及复杂矩阵运算等功能^[39]。

LabVIEW 不仅仅是一种编程语言, 还是一种用于测量和自动化的特定应用程序开发环境, 一种用来快速设计工业原型和应用程序的高度交互式的开发环境。LabVIEW 适用于测量和自动化应用程序的能力与通用编程的能力相互增强和扩展, 使其在两个方面体现出强大的功能^[24]。

LabVIEW 是一种用图标代替代码创建应用程序的图形化编程语言。与其他基于文本的程序设计语言相比, LabVIEW 具有如下特点:

1. 直观、易学易用;
2. 通用编程系统;
3. 模块化设计;

3.2 上位机软件总体设计

本系统的上位机软件以工控机为载体, 集数据采集、数据保存、数据显

示、数据分析及数据控制为一体的综合性系统。

如图 3-4 所示上位机系统通过 RS485 与温湿度试验箱进行数据通讯，通过 CAN 通讯实现与电池管理系统的进行通讯；

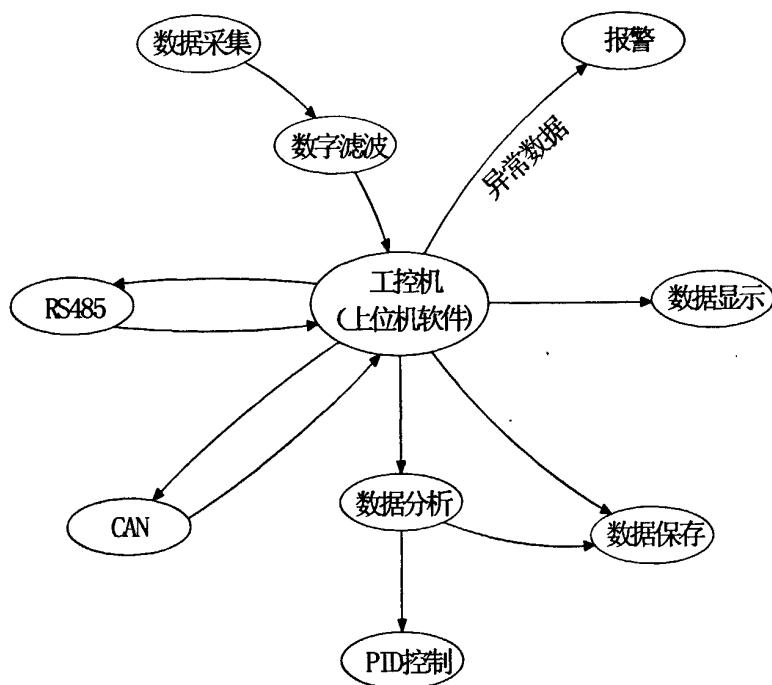


图 3-4 上位机软件整体构架

Fig.3-4 The whole fabric of host computer software

同时通过数据采集卡进行数据采集，上位机保存所有的原始信号，以备试验结束后分析；同时上位机将对部分的数据进行及时分析，以此判断系统状态和电池状态。对于动力电池的电流和电机转速等需要控制的参数，实行高速采集，时时相应的控制方式，其控制策略为 PID 控制算法。






3.3 数据采集模块软件设计

数据采样要求快速、准确、稳定。数据采集卡本身就具备这种能力，对于而言上位机编程提供了很大的便利，所以上位机软件的数据采集程序相对比较简单^[35]。

下面简单介绍程序模块：

表 3-1 部分程序模块介绍

Table 3-1 describes part of the program modules

| 程序名称 | 作用 | 模块程序 |
|--------------------|--------------------|---|
| 1 DeviceOpen.vi | 该程序模块用于打开指定 PCI 卡 |  |
| 2 DeviceClose.vi | 该程序模块用于关闭指定的 PCI 卡 |  |
| 3 MAIVoltageIn.vi | 该 VI 用于模拟量数据采集 |  |
| 4 QCounterRead.vi | 该 VI 用于脉冲计数 |  |
| 5 ADV DIO Write.vi | 该 VI 用于数字量输出 |  |

3.3.1 脉冲信号采集软件设计

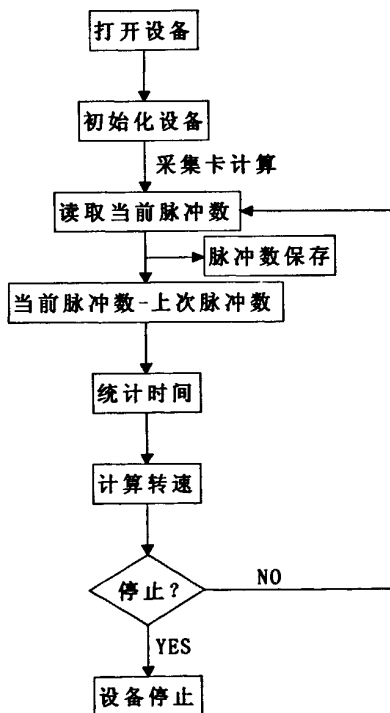


图 3-5 脉冲采集软件流程图

Fig.3-5 Pulse acquisition software flow chart

脉冲读数的上位机编程如图 3-6 所示下：

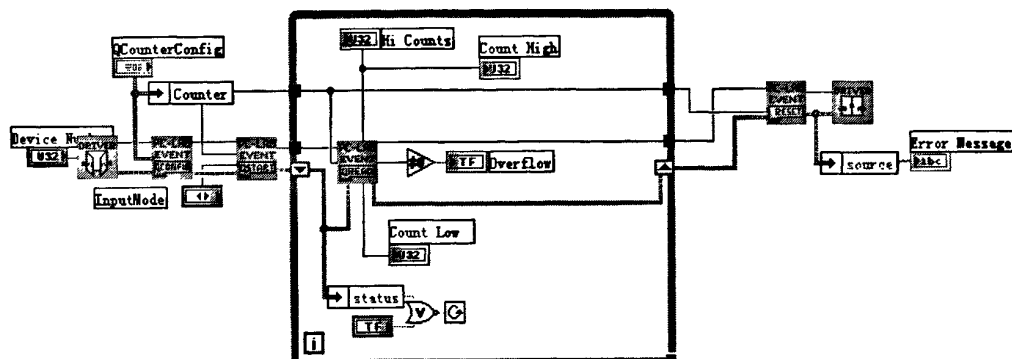


图 3-6 编码器脉冲采集程序

Fig.3-6 Encoder pulse acquisition program

3.3.2 模拟量信号采集软件设计

模拟量信号采集比脉冲采集相对简单，对设备初始化之后，使用 WHILE 循环，不停的循环即可。其软件如下图所示：

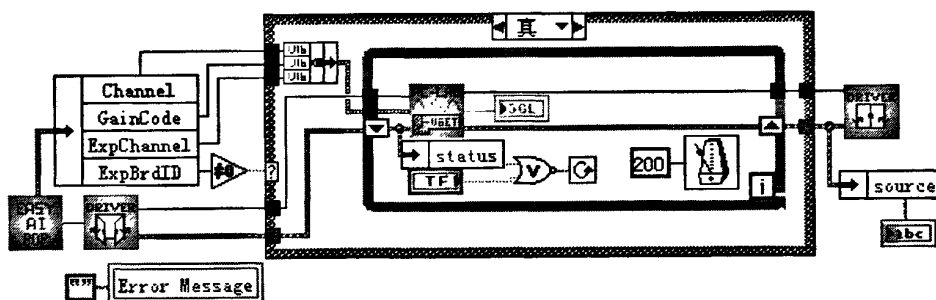


图 3-7 模拟量采集程序

Fig.3-7 Analog acquisition program

3.4 数字滤波程序设计

数字滤波：用电子计算机通过褶积的数学处理过程，在时间域内实现对信号的滤波作用，称为数字滤波。

数字滤波器是由数字乘法器、加法器和延时单元组成的一种装置。其功能是对输入离散信号的数字代码进行运算处理，以达到改变信号频谱的目的。应用数字滤波器处理模拟信号时，须对输入模拟信号进行限带、抽样和

模数转换。数字滤波器输入信号的抽样率应大于被处理信号带宽的两倍，其频率响应具有以抽样频率为间隔的周期重复特性，且以折叠频率即 1/2 抽样频率点呈镜像对称。

为得到模拟信号，数字滤波器处理的输出数字信号须经模数转换、平滑。

数字滤波器具有高精度、高可靠性、可编程改变特性或复用、便于集成等优点。数字滤波器在语言信号处理、图像信号处理、医学生物信号处理以及其他应用领域都得到了广泛应用。

数字滤波器有低通、高通、带通、带阻和全通等类型^[36]。

本系统的有用信号均为直流信号，故所使用的数字滤波器采用中值滤波器。其程序如下：

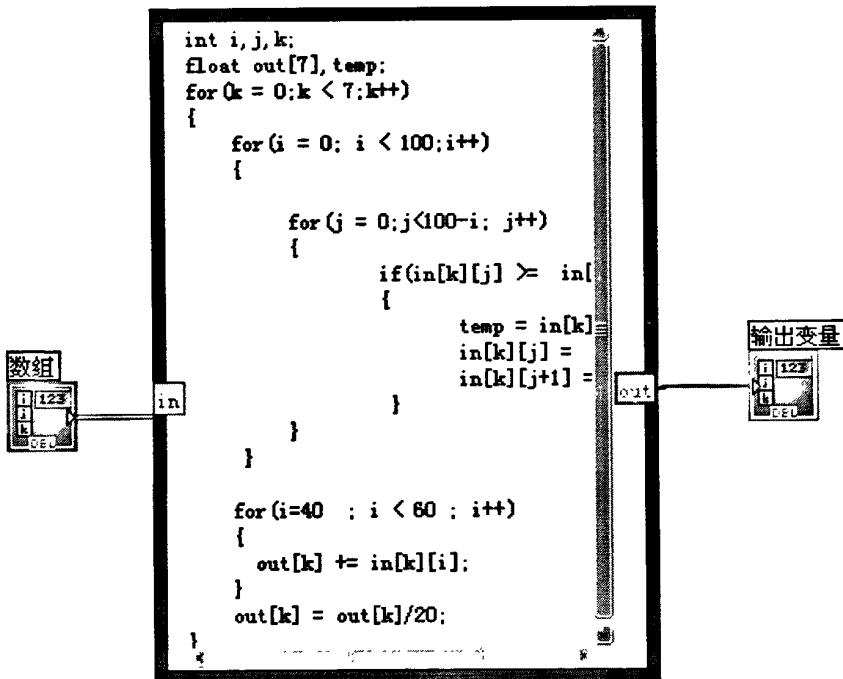


图 3-8 数字滤波程序

Fig.3-8 Digital filtering procedures

3.5 系统通讯模块设计

3.5.1 CAN 通讯模块设计

控制器局域网(简称 CAN)最初是德国 Bosch 公司于 1983 年为汽车应用而开发的一种能有效支持分布式控制和实时控制的串行通讯网络,属于现场总线的范畴。1993 年 11 月,ISO 正式颁布了控制器局域网 CAN 国际标准(ISO11898),为控制器局域网标准化、规范化推广铺平了道路。目前它已经成为国际上应用最广泛的开放式现场总线之一^[37,38]。

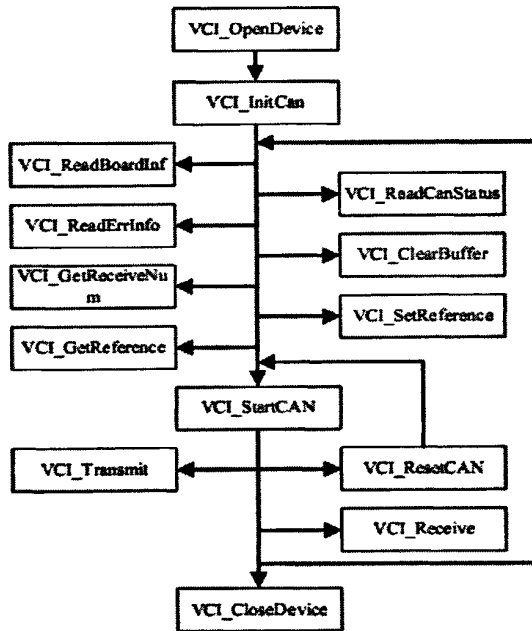


图 3-9 CAN 通讯流程图

Fig.3-9 CAN communication flow chart

CAN-BUS 即 CAN 总线技术,全称为“控制器局域网总线技术”。CAN 总线的通讯介质可采用双绞线,同轴电缆和光导纤维。通讯距离与波特率有关,最大通讯距离可达 10km,最大通讯波特率可达 1Mpbs。CAN 总线仲裁采用 11 位标识和非破坏性位仲裁总线结构机制,可以确定数据块的优先级,保证在网络节点冲突时最高优先级节点不需要冲突等待。CAN 总线采用了多主竞争式总线结构,具有多主站运行和分散仲裁的串行总线以及广播

通信的特点。CAN 总线上任意节点可在任意时刻主动地向网络上其它节点发送信息而不分主次,因此可在各节点之间实现自由通信^[39]。

Can-Bus 总线技术的应用可以大量减少车体内线束的数量,综合了发动机、变速箱、安全气囊、组合仪表、ABS 和舒适电脑诊断系统。通过控制器区域网络,使汽车的各个系统协调运作,信息共享,保证车辆行驶更安全、舒适和可靠。

电池管理系统做为电动车的一部分,与上位机的通讯方式就必须使用 CAN-BUS 总线通讯。通讯协议满足 1939 协议。

美国的汽车工程学会 SAE 于 2000 年提出的 J1939,成为货车和客车中控制器局域网的通用标准。J1939 标准已经成为世界各大车辆部件制造商均支持的重要通信标准,在大客车、载货汽车、特种车辆、农业装备和工程机械中得到了广泛的应用。因为 J1939 具备如下特点:

1. 通讯速率高,最高可达到 250Kbps 最大传输距离 40 米。
2. 实时性好,根据重要程度,J1939 协议可以定义各个子系统的优先级,这些都利于满足车辆的。
3. 对汽车中应用到的各类参数都进行了规定。
4. 具有容错性能,该性能保证了数据传输的可靠性。
5. 灵活性高,J1939 可以将不同类型的子系统有机地融合在一起,易于实现车辆电子单元的集成化和模块化。
6. 通用性强,J1939 协议具有通用的故障诊断接口诊断协议,满足了不同控制系统的要求。
7. 子系统相对独立,每个子系统可以独立工作,使得某个子系统出现故障时并不影响其他系统的正常工作^[40]。

3.5.2 RS485 通讯模块设计

上位机与变频器之间的通讯方式为 RS485 通讯。RS485 有以下优点:

1. RS-485 的电气特性:逻辑“1”以两线间的电压差为+(2-6V)表示;逻辑“0”以两线间的电压差为-(2-6V)表示。接口信号电平比 RS-232-C 降低了,就不易损坏接口电路的芯片,且该电平与 TTL 电平兼容,可方便与 TTL 电路连接。
2. RS-485 的数据最高传输速率为 10Mbps。

3. RS-485 接口是采用平衡驱动器和差分接收器的组合，抗共模干扰能力增强，即抗噪声干扰性好。

4. RS-485 最大的通信距离约为 1219M，最大传输速率为 10Mb/S，传输速率与传输距离成反比，在 100Kb/S 的传输速率下，才可以达到最大的通信距离，如果需传输更长的距离，需要加 485 中继器。RS-485 总线一般最大支持 32 个节点，如果使用特制的 485 芯片，可以达到 128 个或者 256 个节点，最大的可以支持到 400 个节点^[41]。

因 RS-485 接口具有良好的抗噪声干扰性，长的传输距离和多站能力等上述优点就使其成为首选的串行接口。因为 RS485 接口组成的半双工网络，一般只需二根连线，所以 RS485 接口均采用屏蔽双绞线传输。RS485 接口连接器采用 DB-9 的 9 芯插头座，与智能终端 RS485 接口采用 DB-9(孔)，与键盘连接的键盘接口 RS485 采用 DB-9(针)。

上位机的 RS485 通讯程序为：

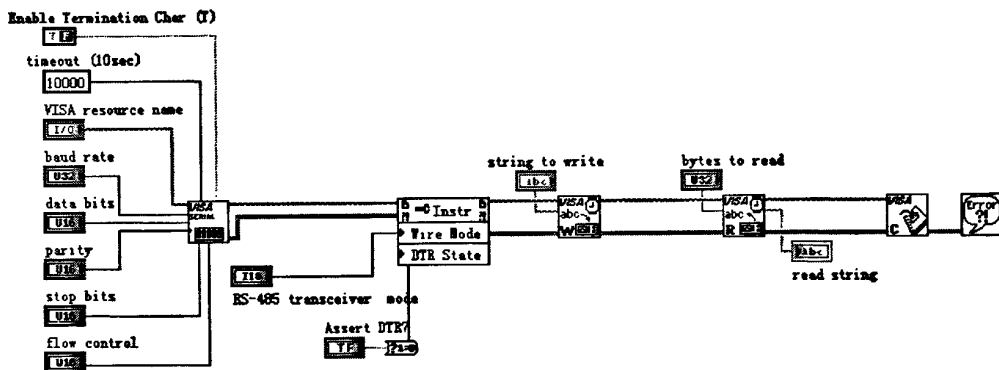


图 3-10 RS-485 通讯程序

Fig. 3-10 RS-485 Communication program

3.6 动力电池性能分析与控制设计

3.6.1 动力电池充放电 PID 控制

对于动力电池本身而言，横流充放电和恒压充放电是非常基础的充放电过程，对于电动车而言，电机的转速控制非常重要。本仿真实验室能实现电流控制、电压控制、和转速控制。不论哪种参数控制，都是以 PID 控制为核心算法^[42]。

PID 调节器是一种线性调节器，PID 调节是工业控制中应用最广泛的一种调节方式。这种调节器是将设定值 $r(t)$ 与输出值 $c(t)$ 进行比较构成控制偏差 $e(t) = r(t) - c(t)$ 。

将其按比例、积分、微分运算后，并通过线性组合构成控制量，如图所示，所以简称为 P(比例)、I(积分)、D(微分)调节器^[43]。图 3-11 中的“被控对象”只的是电流、电压或者是电机转速等参数。

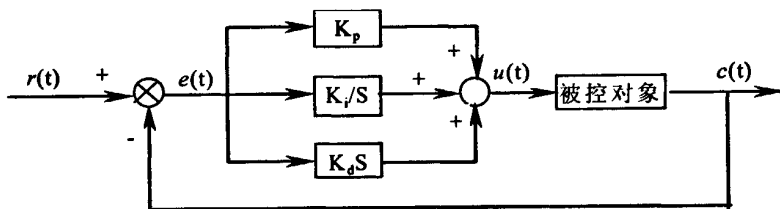


图 3-11 PID 调节器控制系统框图

Fig.3-11 PID regulator control system block diagram

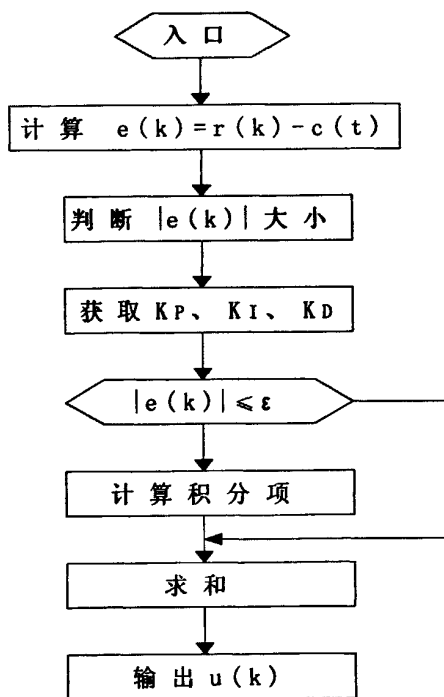


图 3-12 PID 算法软件流程图

Fig.3-12 PID algorithm for software flow chart

1. 系数 K_P 的作用是加快系统的响应速度，提高系统的调节精度。 K_P 越大，系统的响应速度越快，系统的调节精度越高，但易产生超调，甚至导致系统不稳定； K_P 过小，则会降低调节精度，使响应速度缓慢，从而延长调节时间，使系统静态、动态特性变坏。

2. 积分系数 K_I 的作用是消除系统的稳态误差。 K_I 越大，系统的稳态误差消除越快，但 K_I 过大，在响应过程的初期会产生积分饱和现象，从而引起响应过程的较大超调；若 K_I 过小，将使系统稳态误差难以消除，影响系统的调节精度。

3. 微分作用系数 K_D 的作用是改善系统的动态特性。其作用主要是能反应偏差信号的变化趋势，并能在偏差信号值变的太大之前，在系统引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减少调节时间。

仿真系统是一个实时性非常强的系统，电机响应速度非常快，并且利用电机控制电流的大小并没有确定的数学模型，系统采用了改进型的位置式的智能 PID 控制算法。

其中 K_P 、 K_I 、 K_D 随着 $|e(k)|$ 的大小而进行调整，当 $|e(k)|$ 较大时，只进行比例控制，当 $|e(k)|$ 小于一定值之后，才加上积分项。

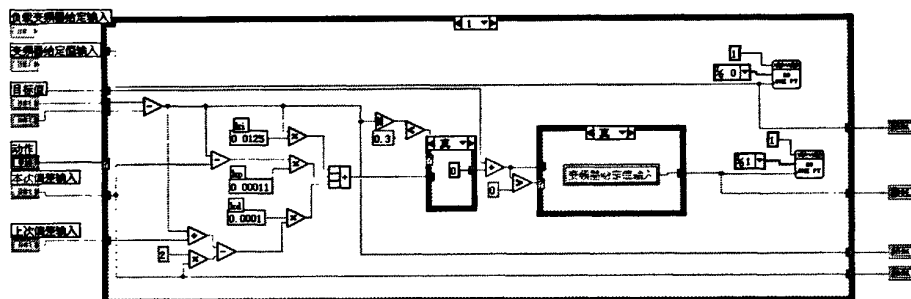


图 3-13 PID 控制软件程序

Fig. 3-13 PID control software program

3.6.2 动力电池 SOC 估计

电动车特别是纯电动车完全依靠电池提供能量，司机在行驶过程中必须时刻关注电池的剩余电量，防止汽车在开到半路，因电池没电而无法启动。因此，对电池剩余电量的估计即 SOC 估计的准确性非常关键。由于电动车上使用的是组合电池，单体电池的 SOC 估计有内嵌在电池组内部的电池管理系统处理，仿真系统进行电池组的 SOC 估计。

动力电池组的荷电状态SOC 是被用来反映动力电池组的剩余容量状况，其数值上同样定义为组电池剩余容量占组电池容量的比值：

$$SOC_{module} = \frac{Q_c}{C_i} \quad (3-1)$$

式中： Q_c 为动力电池模组剩余的容量， C_i 为动力电池模组以恒定电流 i 放电时所具有的容量。

这样定义动力电池模组就是把它等效为一个电池单体。为了确保电池的安全性，要用能力最差单体电池的SOC来作恒流发电的下限条件。

根据定义得到的电池SOC，在放电电流变化的情况下，同样会出现不适应性，其原因与单体单体相似。

安培时间积分法是所有SOC估计算法的基础。安培时间积分法的基本思路就是将充驱动电流积分。这里面要用到一个加权系数 w_i ， w_j ， w_i 与 w_j 通过实验与整车路试得到。等效放电电量方程：

$$C(t) = \int_0^t w_{(i,j)} \cdot i d\tau \quad (3-2)$$

式中：

放电时： $i > 0$ ， w_i 为放电系数；

充电时： $i < 0$ ， w_i 为充电系数；

C：以电流充放电电池容量；

3.7 驾驶仿真系统设计

驾驶仿真系统相当于电动车的驾驶室，其作用是提供一个虚拟的驾驶环境，通过驾驶员的操作获取汽车驾驶信息，在经过 RS485 通讯传输给系统上位机；上位机将获得的数据作为模拟仿真的依据，进行系统控制。

驾驶仿真系统由于为仿真系统运行提供依据，其作用非常重要，它给上位机提供的数据必须与电动车实际运行时各个参数(特别是刹车和油门信号)一样的类型和相应速度，这样才能确保仿真系统模拟实际汽车动力系统。

系统使用的油门、刹车、方向盘等等都与实际汽车上用的一模一样，确保信号输出的一致性；驾驶仿真系统由电脑作为其控制器，采集油门、刹车及其他操作的数据信号，并且通过 C++ 编写驾驶模拟软件，模拟不同的驾驶环境，通过 RS485 通讯给工控机提供数据。

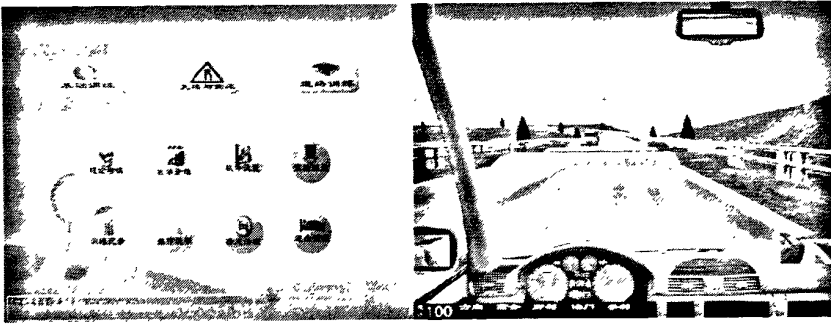


图 3-14 驾驶仿真系统软件

Fig. 3-14 Driving simulator system software

驾驶仿真系统提供不同的驾驶环境：有典型的山区道路、城市道路、乡村道路、高速公路、一般道路等路况环境和晴天、雨天、雪天、雾天等天气模拟环境，确保能够模拟所有的路况环境和天气环境，实现系统模拟环境的完整性和可靠性。

3.8 本章小结

本章主要介绍仿真实验室的上位机软件，首先介绍了编写上位机程序的软件和上位机的总体设计方案；接着，介绍了上位机软件的数据采集模块，数字滤波模块，通讯模拟，PID 控制模块和电池的 SOC 估计模块。最后，简单的介绍了一下驾驶仿真系统。

第4章 动力电池充放电分析与仿真

电动车上的动力电池起着非常重要的角色，是电动车最核心的部件之一。电动车在不同的运行条件下，动力电池处于什么样的状况对于仿真系统非常重要。只有完全了解电动车是如何运行的及电动车实际运行下的电池充放电状态，才能实现对电动车运行的仿真。

下面就电动车在那些运行情况动力电池放电，在那些运行条件充电及动力电池的外界环境进行说明，并实现系统仿真。

4.1 电动车运行状态分析

电动车在实际运行时，有倒车和前进两种运动；电动车前进时驱动电机的转相被定义为正转，电动车倒车时驱动电机的转向定义为方转；通过变频器的模拟指令的正负给定，实现倒车和前进两种状态。通过模拟指令的大小实现驱动电机的转速的大小，同时也实现电动车的车速。如图 4-1 所示：

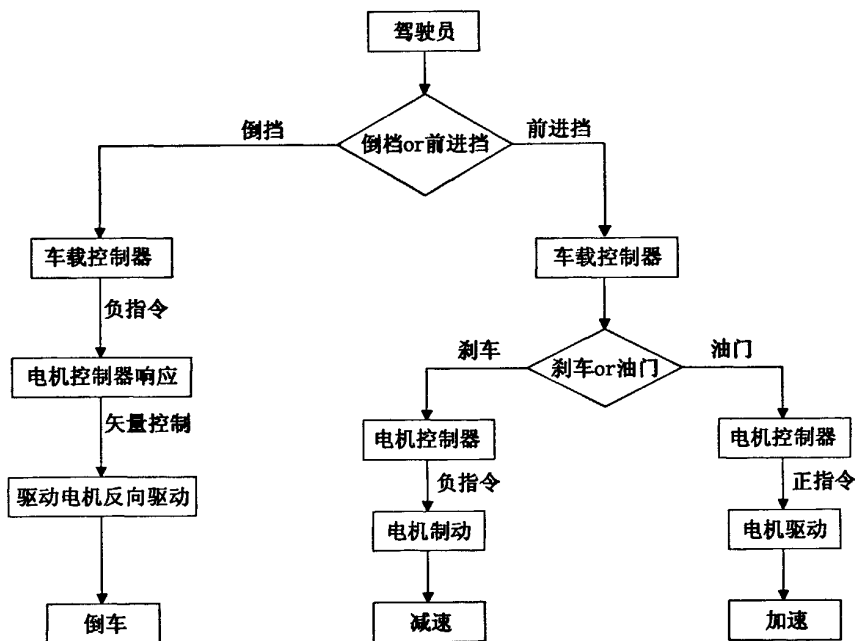


图 4-1 电动车动力系统运行原理

Fig.4-1 Electric vehicle power system operation principles

当驾驶员按倒档按钮(电动车分倒车档、前进档和控档)，车载控制器通过

采集倒档信号判断出驾驶员的倒车意图，它给电机控制器的模拟指令保持负数输出，电机控制器根据得到的负数指令控制驱动电机进行反向驱动，电机转轴连接传动轴带动轮胎反转，电动车实现倒车。当驾驶员按前进档，车载控制器判断出驾驶员的开车前进意图，电机控制器获得正数指令，驱动电机正转，电动车前进。

在汽车行驶过程中，车载控制器时时采集油门信号和刹车信号，以此作为控制电机控制器的根据。在电动车运行过程中，当车载控制器监控到有油门信号，车载控制器就相应的输出电机驱动指令，油门信号越大，电机驱动指令也越大，驱动电机的驱动功率也随之增大，汽车加速；当车载控制器监控到有刹车信号，车载控制器相应的输出电机驱动指令，驱动电机作为发电机给动力电池回馈能量。

这里需要说明的是，车载控制器并不是完全按照油门信号和刹车信号的大小来输出控制指令的。当油门信号的值达到一定程度后，车载控制器会通过车身传感器判断当前的情况，如果当汽车下坡，而驾驶员的油门踩的更大，油门信号增加时，车载控制器就会判断是驾驶员误操作，电机控制指令将不会相应的增加；在刹车时，指令控制器会先检测动力电池的总电压，如果总电压高，就说明电池现在处于满电的状况，于是，车载控制器的制动指令就会很小，让绝大部分或是全部的机械能全部有机械制动消耗。这样就可以防止电池电压过高，从而保护动力电池。

4.2 动力电池的放电分析

4.2.1 电动车动力电池的放电分析

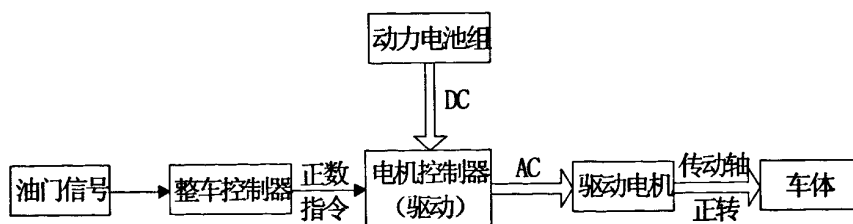


图 4-2 电动车运行时动力电池放电原理

Fig.4-2 Run-time electric vehicle battery power discharge principle

当电动车在运行过程中，为了保持车速电机必须保持扭矩输出以消除汽车

运行时的阻力，否则汽车将减速直到停止，所以，司机如想保持一定车速，通常情况下都必须踩住油门。如图 4-2 所示，当整车控制器检测到油门信号时，发出驱动控制指令，电机控制器根据相应的驱动指令将动力电池的直流电经过直交变换过程转化不同频率的交流电驱动电机电机运转。整个工程就是将动力电池储存的化学能转化为机械能的过程，即电池放电的过程。

4.2.2 仿真系统电池放电仿真

在仿真系统对动力电池的放电过程进行了如图 4-3 所示的仿真：从图中可以发现，整车控制器的功能被工控机代替，车体在行驶中的阻力利用负载电机通过与驱动电机相反的作用产生的阻力来取代；通过数学建模，车体在电动车在运行时所受到的阻力转换到负载电机的功率输出上，对于电机的功率输出效果基本一致；实现了动力电池的放电仿真。

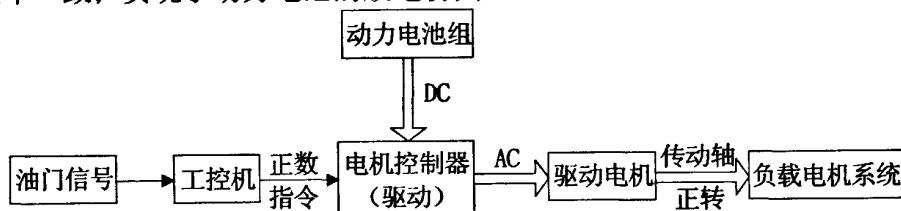


图 4-3 系统仿真时动力电池放电原理

Fig.4-3 System simulation principles when the power battery discharge

4.3 动力电池的充电分析

这里需要说明的是，动力电池的充电分析是在汽车在运行过程中的充电。在电动车运行时，只有司机踩刹车时，才有动力电池的充电情况发生。首先，说明一下电机的再生制动原理。

4.3.1 电机的再生制动

电动汽车与传统汽车的一个重要区别是可以实现再生制动，能够回收传统汽车在制动过程中损失的一部分能量^[42]。

再生制动是指在车辆减速或制动时，其中一部分的能量转化为其他形式的能量的过程。再生制动是通过将牵引电机作为发电机，使车轮产生制动力矩同时给蓄电池充电来实现的。根据资料显示，美国对电动汽车的实际运行测试结果表明，再生制动给蓄电池补充能量，可以使电动汽车一次充电后行驶里程增

加 10%~25%。

4.3.2 电动车动力电池的充电实现

再生制动过程实际上就是能量回收过程，也是动力电池的充电过程。其实现过程如图 4-4 所示：当整车控制器检测到有刹车信号时，首先检查电池的电压和电机的转速，判断电池当前的情况和当前的车速；然后根据刹车信号和电池情况、车速情况输出制动指令，驱动电机处于制动状态，将电动车的机械能部分的转化为电池的化学能。

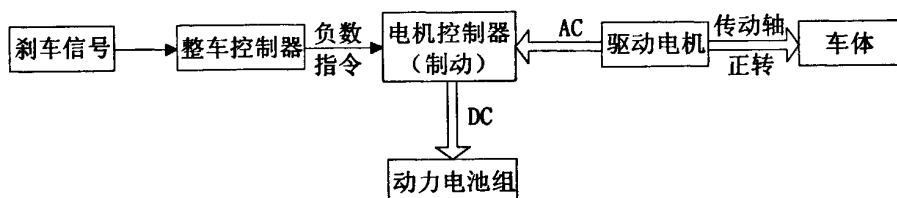


图 4-4 电动车运行时动力电池充电原理

Fig.4-4 Run powered electric vehicle battery charging principles

4.3.3 仿真系统电池充电仿真

在实验室中，动力电池的充电过程和原理与电池放电的仿真一样，其实现过程如图 4-5 所示，系统高度模拟了动力电池的充电过程。

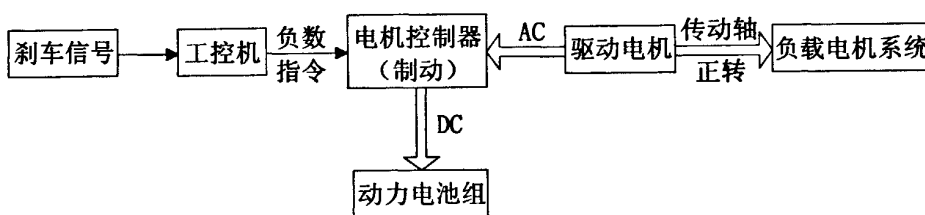


图 4-5 系统仿真时动力电池充电原理

Fig.4-5 System simulation principles when the power battery charging

4.4 坡度仿真建模

前面已经对电动车的前进、倒车、刹车及加速等影响动力电池充放电状态进行了分析，实现了系统仿真。影响电池充放电的还有很多因素，比如汽车行驶在上坡、下坡和平路时电池的充放电情况就不太一样。电动车在上坡时阻力

更大，电池放电电流也就更大。下坡正好与上坡相反，电池放电电流较小，甚至电池可能处于充电状态。

坡度的不同对电池充放电的影响非常大，所以在系统仿真里，非常有必要对坡度进行仿真。

我们设定汽车的车速保持恒定，电动车上坡或者下坡是导致电流的变化，其本质是由于地心引力的作用，如图 4-6 所示：

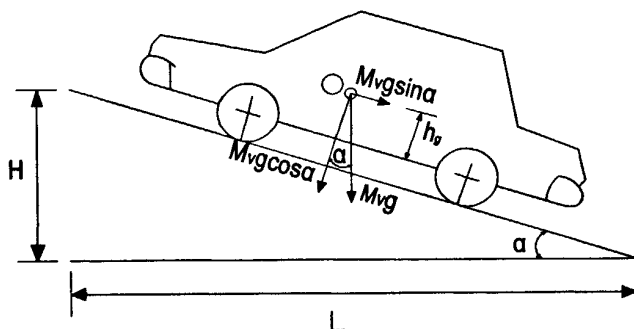


图 4-6 汽车上坡时受力分析

Fig.4-6 When the car uphill force analysis

设电动车以某一速度在平面上的阻力为 F_0 ，电动车的总的质量为 M_r ，坡度为 α ，则沿着坡度朝下的分力为：

$$F_1 = M_r g \sin \alpha \quad (4-1)$$

由于重力的垂直与坡面的分力引起的摩擦力为：

$$F_2 = M_r g f \cos \alpha \quad (4-2)$$

式中： f —汽车滚动系数；

如果电动车爬坡，汽车总的阻力为：

$$\begin{aligned} F &= F_0 + F_1 + F_2 \\ &= F_0 + M_r g \sin \alpha + M_r g f \cos \alpha \end{aligned} \quad (4-3)$$

也就是说，如果要仿真汽车在上坡时的运行情况的话，增加负载电机的转矩，其 $mg(\sin \alpha + f \cos \alpha)$

如果电动车下坡，汽车总的阻力为：

$$\begin{aligned}
 F &= F_0 + F_1 - F_2 \\
 &= F_0 + M_r g \sin \alpha - M_r g f \cos \alpha
 \end{aligned}
 \tag{4-4}$$

也就是说, 如果要仿真汽车在下坡时的运行情况的话, 增加负载电机的转矩, 其 $(\sin \alpha - f \cos \alpha)$, 如果 $\sin \alpha$ 小于 $f \cos \alpha$ 的话, 为维持车速恒定, 电动机实际上需要制动(刹车), 即电池回收一部分能量。

4.5 电动车运行阻力损耗建模

汽车在行驶过程中, 阻力始伴随在作用, 实验室使用负载电机模拟电动车在行驶过程中的阻力, 为了更真实的反映电动车的阻力, 需要通过对汽车在行驶过程中受到的阻力进行分析和建模。

汽车在行驶过程中的阻力主要有滚动阻力、加速阻力以及空气阻力; 现在分别分析各种阻力并对每种阻力消耗的功率进行数学建模。

4.5.1 电动车滚动阻力损耗建模

在汽车运行时, 轮胎和路面都会发生一定的变形。轮胎内部摩擦产生的弹性迟滞损失和路面发生变形的能量消耗, 加上车轮轴承也有摩擦, 这几种由于车轮滚动而消耗的能量, 就构成了车轮滚动时的阻力, 我们把它称为滚动阻力。滚动阻力的大小和滚动阻力系数及车轮的负荷成正比。

设滚动阻力消耗的功率(Kw), 则

$$P_f = \frac{fGVc\alpha}{3600}
 \tag{4-5}$$

式中: f —滚动阻力系数

V —汽车行驶速度(km/h)

G —汽车重量(N)

轮胎的滚动阻力系数是用来计算滚动阻力的一个系数。它是车轮滚动时所需的推力(即滚动阻力)与车轮载荷的比值。在良好的沥青或水泥路面上, 滚动阻力系数一般在 0.010~0.018 之间对于轿车而言, 滚动阻力系数可以按下式计算:

$$f=0.0165 \quad (V<50\text{km/h})$$

$$f=0.0165[1+0.01(V-50)] \quad (V>50\text{km/h})$$

对于大型客车，其计算公式为： $f=6+0.00014V$ 。

4.5.2 电动车加速阻力损耗建模

汽车如果加速，就必须克服等速运动的惯性力，也就是加速阻力。加速阻力的大小，等于加速度与汽车质量的乘积。加速度越大，加速阻力也越大。

设加速阻力消耗的功率为 P_j ，则

$$P_j = \frac{GV\delta}{3600g} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (4-6)$$

式中： $\frac{dv}{dt}$ — 加速度 (m/s^2) ($2m/s^2$)

g — 重力加速度 ($9.8N/s^2$)

δ — 旋转质量转换系数与电动机飞轮的转动惯量、车轮的转动惯量以及传动系的传动比有关，其计算表达式如下：

$$\delta = 1 + \frac{g \cdot \sum I_w}{G \sum r^2} + \frac{g \cdot I_f \cdot i_g^2 \cdot i_0^2 \cdot \eta_T}{G \cdot r^2}$$

其中：

I_f 、 I_w —分别为飞轮和车轮的转动惯量 ($kg \times m$)；

i_g 、 i_0 —分别为变速器各档位的传动比和减速器的减数比；

r —车轮半径

对轿车而言，汽车的旋转质量转换系数在 1.06~1.25 之间，大型客车的旋转质量转换系数为 1.06~1.50 之间

4.5.3 电动车空气阻力损耗建模

汽车在行驶中由于空气阻力的作用，围绕着汽车重心同时产生纵向、侧向和垂直等三个方向的空气动力阻力。设空气阻力消耗的功率为 P_w ，则

$$P_w = \frac{C_D A V_a^3}{21.15 \times 3600} \quad (4-7)$$

式中： A —汽车迎面面积(m^2)， A =车宽×车高；

V_a —相对速度(km/h)，设风速为 V_w ，则 $V_a = V - V_w$ (km/h)

C_D —空气阻力系数

不同类型车的空气阻力系数有所不同轿车的空气阻力系数为 0.4~0.6 之间, 大型客车的空气阻力系数为 0.6~0.7 之间。

4.6 外界环境仿真建模

1. 温湿度环境仿真建模

动力电池所处的环境对动力电池放电性能有一定的影响。温度下降会导致电池容量下降, 并且放电电压平台也明显下降。温度升高一般对放电容量不会有负面影响。但高温会缩短电池的寿命, 温度过高还会带来安全隐患。电池处于搁置状态时, 自放电的速度也与环境有关, 环境温度越高、湿度越高、环境介电常数越高自放电速度越高。因此, 模拟温湿度环境是电动车动力电池仿真系统的一个重要的仿真环节。

表 4-1 能量包的自放电

Table. 4-1 packets of energy self-discharge of

| 环境温度 | SOC | 自放电率 |
|------|------|-----------|
| 55℃ | 100% | <12%/Week |
| 25℃ | 100% | <7%/month |

环境仿真系统通过温湿度控制器(箱)控制不同温度及湿度的条件实现对外界不同环境温度湿度湿度的变化。

我国幅员辽阔, 各地的天气温湿度差异很大, 北方天气寒冷干燥; 南方高温潮湿; 由于高温对电池的影响更大, 更有研究价值, 本文只针对高温进行仿真模拟。

表 4-2 我国部分城市的最高气温记录

Table.4-2 China's highest temperature records in some cities

| | | | |
|------|-------|-----|-------|
| 北京 | 42.1℃ | 银川 | 38.9℃ |
| 天津 | 40.7℃ | 拉萨 | 31℃ |
| 哈尔滨 | 39.5℃ | 成都 | 41℃ |
| 长春 | 40.1℃ | 重庆 | 42.5℃ |
| 乌鲁木齐 | 42.2℃ | 石家庄 | 43.1℃ |
| 郑州 | 42.5℃ | 杭州 | 41.3℃ |
| 长沙 | 42℃ | 台北 | 41.1℃ |
| 广州 | 39.7℃ | 海南 | 38.5℃ |

表 4-2 显示的是我国部分城市的最高气温记录, 可以看出, 全国各地的最高气温相差不大; 实际上电池在充放电时, 动力电池模块内部的由于电池自身

的内阻的消耗温度会高于外界温度，如图 4-7，4-8 所示。

图 4-7 为动力电池在 5C 放电下温度与时间的关系曲线，不同颜色的曲线代表其电池组内的电池串联数目，从图中可以很明显的发现，随着时间的推移，电池组温度上升极为明显。图 4-8 为动力电池在 1C 的放电条件下获得的温度数据。通过对比，可以很明显的发现当电池的放电倍率越高时，器温度上升的越快。

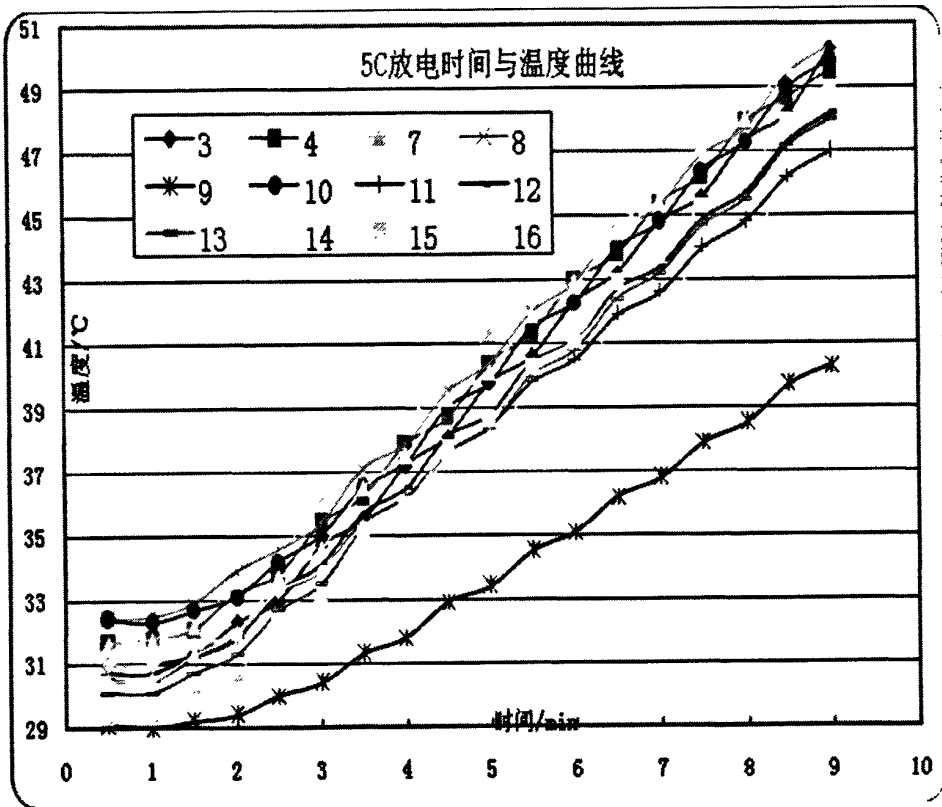


图 4-7 5C 放电时间与温度曲线

Fig.4-7 5C discharge time and temperature curve

2. 路况建模仿真

电动车在行驶过程中，由于路面的不平整，会出现持续性的颠簸(震动)，这会对电池特别时组合电池包的结构产生极大的影响；由于电池包与车体是固定在一起的，所以电池组受到的上下方向的震动的影响最大，本文也只对上下方面的震动进行模拟仿真。

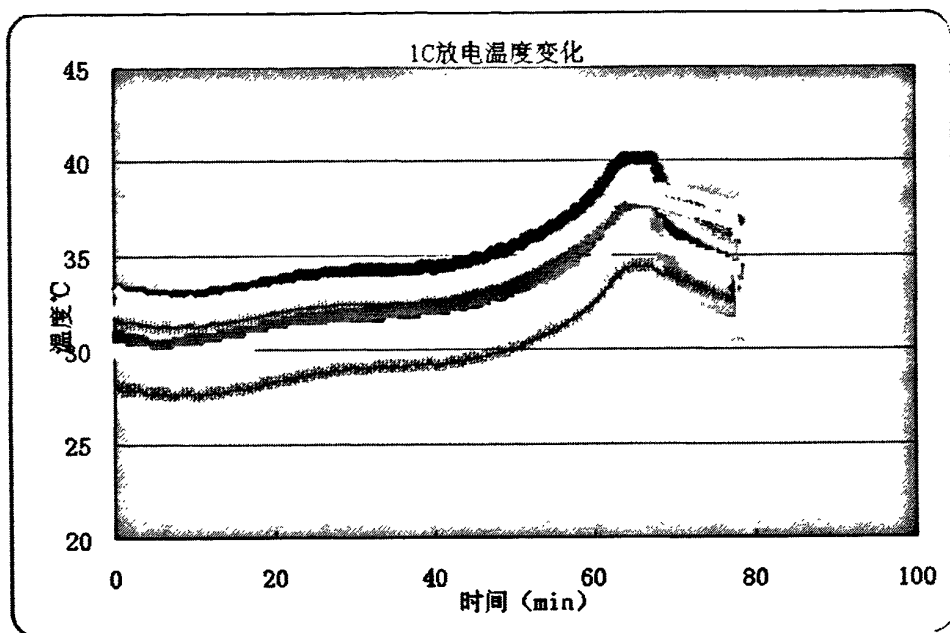


图 4-8 1C 放电温度变化

Fig.4-8 1C discharge temperature

4.7 本章小结

本章对纯电动车的运行情况进行了分析；阐述了动力电池在电动车实际运行时的充放电情况；根据实际情况进行了动力电池的充放电的系统仿真；建立了汽车在上坡下坡时的负载模型。

第5章 动力电池仿真系统的性能测试与分析

5.1 系统能量回收测试

对于仿真系统运行时，负载电机能将动力电池的能量回收率，就是电机的转化效率。现做如下测试：

- 步骤一：动力电池放电 40A，检测电池回路电流；
- 步骤二：动力电池 20A 放电，检测蓄电池回路电流；
- 步骤三：动力电池 10A 放电，检测蓄电池回路电流；
- 步骤四：储能蓄电池 20 放电，检测动力电池回路流；
- 步骤五：储能蓄电池 20 放电，检测动力电池回路流；

如图 5-1 所示，红线所表示的是动力电池的放电电流，白线为负载电机回路的电流，可以知道当动力电池回路的放电电流为 40A 时，负载端回收的电流为-20A(充电时的电流方向为负)；其能量回收接近 50%，其能量回收的效果非常明显。

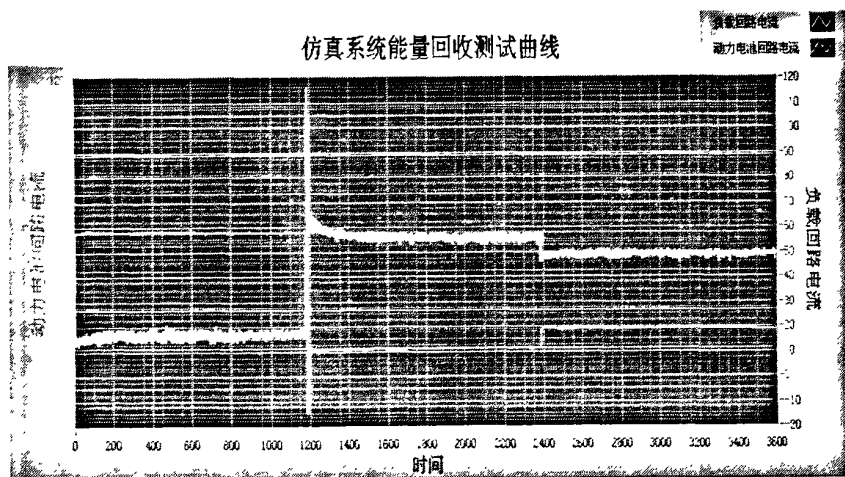


图 5-1 能量回收试验电流曲线

Fig.5-1 Test current curve of energy recovery

5.2 动力电池仿真测试

仿真试验条件设定：

温度：50°C

湿度：80%

路面模拟：振幅 2.2mm，频率 55HZ,加速度 2g

坡度情况：平路

电动车类型：纯电动大巴

被测对象：磷酸铁锂电池组 1 个(另有 19 个陪放)，容量为 300Ah

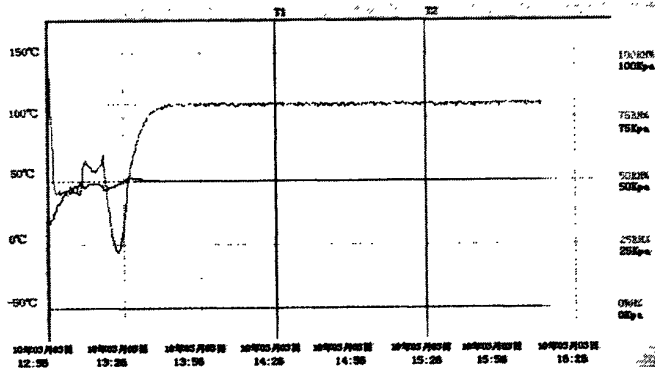


图 5-2 温度和湿度曲线

Fig.5-2 Temperature and humidity curves

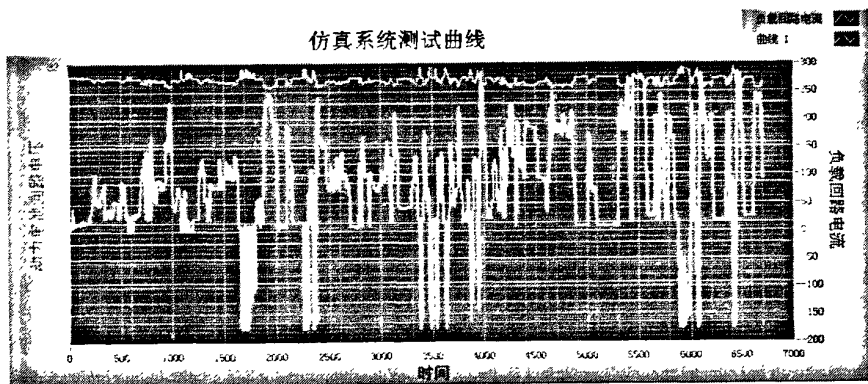


图 5-3 动力电池仿真测试曲线

Fig.5-4 Simulation test curve of power battery

图 5-3 为仿真实验室的测试曲线；其中，白线为被测电池的充放电曲线，红线为被测动力电池的电压曲线。当驾油门信号不为零时，被测电池为放电（大于零），电流的大小的不同由油门信号的变化导致，其瞬间放出的电流最大值接近 270A，接近 1C 的放电。当刹车信号不为零时（刹车信号和油门信号不同时为零），被测电池为充电（小于零），其充电的电流大小跟随刹车信号。从图中可以看出，仿真系统完全实现电动车运行条件下动力电池的充放电模

拟，达到了系统的设计要求。

5.3 本章小结

本章介绍了仿真系统的能量回收效率试验的分析，确定了系统的能量回收率；介绍了根据国家检验标准做了动力电池测试试验；最后介绍车辆实际运行模拟测试，并与实际测量的数据进行对比，试验表明：系统能真实的模拟电动车在实际运行时电池的充放电情况。

结论

仿真系统分为驱动系统、负载系统、驾驶仿真系统、环境及路面仿真系统控制系统。驱动系统的作用是作为动力电池的充放电装置。负载系统在动力电池放电时，作为被测动力电池的负责，同时，实现对系统的能量回收；在动力电池充电（电动车刹车制动的仿真）时，作为能量源提供能量。驾驶仿真系统能够提供油门信号和刹车信号等驾驶模拟信号作为系统仿真的依据。环境及路面仿真系统能够模拟各种条件下的温湿度和路况信息。系统使用 LABVIEW 作为开发软件，其编写的软件结构简单，显示界面简洁灵活。

以永磁交流同步电机为驱动电机和以变频器为电机控制器组成的驱动系统、负载电机、电机控制器和储能蓄电池组成的负载系统、以震动试验台和温湿度综合控制箱模拟的外界环境和路况和以驾驶仿真系统组成的动力电池仿真系统能够很好的模拟动力电池在电动车上的充放电情况，系统运行稳定、可靠，为检测动力电池（组）的性能提供了一个非常好的测试平台，具有一定的先进性和较强的实用性。

参考文献

- [1] 张会强. 李革臣. HEV 动力电池性能测试平台控制系统的设计. 哈尔滨理工大学, 硕士学位论文, 2009.3: 15-16
- [2] 陈全世, 朱家珺, 田宇. 先进电动汽车技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.7: 200-255
- [3] 王金良. 二次电池工业现状与动力电池的发展[J]. 新材料产业, 2007, (2): 45-46
- [4] 朱巨军. 二次电池检测系统的研制[J]. 检测与仪表, 1998, (3): 24-26.
- [5] 毛国龙. 锂离子动力电池发展现状及应用前景; 中国电子商务, 基础电子 20098: 1-3.
- [6] 雷惊雷, 张占军. 电动车用电源及其发展战略[J]. 电源技术, 2001, 25 (1): 40-46.
- [7] Levi M D. Aurbach D. The application of electro analytical methods to the analysis of phase transitions during intercalation of ions into electrodes [J]. Journal of Solid State Electrochemistry. 2007, 11(8): 1033-1038.
- [8] Bradley A J, Ralph E W. Characterization of commercially available Lithium-ion batteries [J]. Power Sources, 1998, 70(1): 48-54.
- [9] 王金良. 二次电池工业现状与动力电池的发展[J]. 新材料产业, 2007, (2): 45-46.
- [10] Gregory L. Plett. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs [J]. Power Sources, 134 (2004): 252-261.
- [11] 李明泽. 混合动力电动汽车驱动系统控制策略研究. 武汉理工大学硕士学位论文. 2002:1
- [12] 杨朔, 何莉萍, 钟志华. 基于 CAN 总线的电动汽车电池管理系统[J]. 贵州工业大学学报, 2004, 33 (2): 90-94.
- [13] 周杰敏. 混合动力电动汽车的建模与仿真. 清华大学硕士学位论文
- [14] 刘振善, 范秋涛. D-350 型振动台工作原理及维修方法[J]. 机械工程师, 2004.10: 83-85
- [15] 徐小东, 张炳力. 混合动力技术与未来汽车的发展[J]. 安徽建筑工业学院学报, 2008, 16 (3): 94-96.

- [16] 程立文. 电动车电池技术最新进展[J]. 电源技术, 2007, 31 (12): 943-945.
- [17] 秦朝举, 袁丽娟. 混合动力汽车的研究现状与发展前景[J]. 山东交通科技, 2008, (4): 97-100.
- [18] 程立文. 电动车电池技术最新进展[J]. 电源技术, 2007, 31 (12): 943-945.
- [19] 李军求, 张国忠. 电动汽车开发的关键共性技术及其研究方向[J]. 沈阳大学学报, 2005, 8 (6): 54-56.
- [20] Joan Gregore, Jose J, Garcia Jareno. Kinetin calculation of the Ni anodic dissolution from EIS [J]. Original Paper, 2005(9): 83-90.
- [21] 黄明星. 新型永磁电机的设计、分析与应用研究[D]. 浙江大学电气工程学院 2008 : 15-21.
- [22] 李静, 程小华. 永磁同步电机的发展趋势; 防爆电机, 第 44 卷 (总第 150 期)
- [23] 陈全世, 朱家琏, 田光宇. 先进电动汽车技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.7: 200-255.
- [24] 林辉, 刘军. 基于矢量控制的永磁同步电机研究, 电机技术, 2009 年第 1 期: 18-20.
- [25] 向久鸿. 一次风机电机冷却系统改造及效果分析. 《湖南电力》. 2002 年 1 期: 2-3.
- [26] Pattipati B, Pattipati K, Christopherson, J. Automotive battery management systems [J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2008(8): 581-584.
- [27] 白云, 高育鹏, 胡小江. 基于 LabVIEW 的数据采集与处理技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009: 14-16.
- [28] 王常余. 接地技术 220 问[M]; 上海: 上海科学技术出版社: 1-9.
- [29] 陈家斌. 接地技术与接地装置; 北京: 中国电力出版社, 2002.12: 237-346.
- [30] 邹一琴, 袁昌. 高压电网中性点接地技术探析; 电力系统保护与控制. 2008 年 15 期.
- [31] 闫杰, 王百鸣. 基于采样保持器的滤波电路研究; 微电子学, 2006 年 6 期. 2-4.
- [32] 王海宝, 吴光杰, 谭泽富. LabVIEW 虚拟仪器程序设计与应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2004: 91-121.

- [33] 白云, 高育鹏, 胡小江. 基于 labview 的数据采集与处理技术.. 西安, 西安电子科技大学出版社, 2009.3: 3-4.
- [34] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW8.20 程序设计从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 50-201.
- [35] VINOGRADOV V. Distributed modular systems for DAQ and control applications[M]. Nuclear Science Symposium Conference Record, 2001, 4: 2498-2503.
- [36] MITRASK. Generalized structural Subband Decomposition of FIR Filters and its Application in Efficient FIR Filter Design and Implementation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II, 1993, 36(2): 363-374.
- [37] HAO L H, SONG W N, XUE Y J. Creation of Multithreaded Applications in LabVIEW[J]. Electronic Measurement and Instrument Society of Chinese Institute of Electronic, Conference Proceedings of the Sixth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2003, (1): 1516-1519.
- [38] 林长加. CAN 总线技术在混合动力汽车中的应用[D]. 大连理工大学硕士学位论文, 2007: 20-35.
- [39] 董珂. CAN 总线技术及其在混合动力电动车上的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 133-165.
- [40] Vetter J, Novak P, Wanger M R, et al. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries [J]. Power Source, 2005, 147: 269-281.
- [41] CONTE F V. Battery and battery management for hybrid electric vehicles: a review[J]. Electronic and Information, 2006, 123(10): 520-525.
- [42] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 256-301.
- [43] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26 (3): 347-355.

攻读学位期间发表的学术论文

1. 李革臣, 戴贤青, 王海英. 电动车动力电池仿真系统的研究与设计. 应用能源技术(已录用)

致谢

本文的选题、课题的研究工作及撰写工作都是在导师李革臣教授的直接关怀和悉心指导下完成的。在攻读硕士学位期间，李老师严谨的学风、渊博的知识、敏锐的思维和对科学孜孜不倦的态度使我受益终身。在完成论文之际，我深深体会到导师的辛勤培育和无私奉献的崇高精神。谨向李老师致以最崇高的敬意和衷心的感谢！

在实验室的建设过程中，我还得到了赛恩斯能源科技有限公司研发中心各位同事关系和帮助，感谢朱锦其工程师和一起工作的陈盼盼师兄在生活上和工作上的关心和帮助，特别感谢王海英老师的精心评阅和细心指导，感谢同学兼同事陈洪图和贾金林在过去一年半的陪伴。在此向他们表示我深深的谢意。

我还要借此机会感谢我的父母，正是他们无私的奉献，在家境并不富裕情况下让我有幸能够一直学习到今天。

最后向参加论文评审、答辩的专家和老师表示衷心的感谢和崇高的敬意！