

# 两轮电动车电力驱动系统研究

作者：陈家新  
专业：控制理论与控制工程  
导师：江建中



上海大学出版社

· 上海 ·

2002 年上海大学博士学位论文

# 两轮电动车电力驱动系统研究

作者： 陈家新  
专业： 控制理论与控制工程  
导师： 江建中

上海大学出版社  
· 上海 ·

N533  
Z302  
2002

Shanghai University Doctoral Dissertation (2002)

# **The Research of the Electric Driving System in Electric Vehicle**

**Candidate:** Chen Jiaxin

**Major:** Control Theory and Control Engineering

**Supervisor:** Prof. Jiang Jianzhong

**Shanghai University Press**

• Shanghai •

# 上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

## 答辩委员会名单：

<b>主任：陶生桂</b>	教授，同济大学电气工程系	200080
<b>委员：贺益康</b>	教授，浙江大学电机系	310027
<b>李杰仁</b>	教授，上海海运学院电气工程系	200135
<b>秦 和</b>	教授级高工，上海电器科学研究所	200063
<b>屠关镇</b>	教授，上海大学机电工程及 自动化学院	200072
<b>导师：江建中</b>	教授，上海大学机电工程及 自动化学院	200072

评阅人名单:

- |            |                        |        |
|------------|------------------------|--------|
| <b>陶生桂</b> | 教授, 同济大学电气工程系          | 200080 |
| <b>陈国星</b> | 教授, 上海大学机电工程及<br>自动化学院 | 200072 |
| <b>李杰仁</b> | 教授, 上海海运学院电气工程系        | 200135 |

评议人名单:

- |            |                   |        |
|------------|-------------------|--------|
| <b>叶银忠</b> | 教授, 上海海运学院电气工程系   | 200135 |
| <b>袁海林</b> | 教授级高工, 信息产业部 21 所 | 200072 |
| <b>金如麟</b> | 教授, 上海交大电信学院      | 200030 |
| <b>付丰礼</b> | 教授级高工, 上海电器科学研究所  | 200063 |

## 答辩委员会对论文的评语

两轮电动车是城市绿色交通的重要工具之一。论文以两轮电动车电力驱动系统为研究对象,对电动摩托车和电动自行车的一些关键技术和理论问题进行了深入研究。论文不仅具有一定的学术价值,也很有实际应用意义。

论文作者阅读了 160 余篇相关文献,对国内外电动车技术发展概况、研究现状作出了分析和综述。在研究领域内作出了相应的正确评述。

论文对电动车的动力学分析与驱动策略、单边偏心气隙的永磁无刷直流电机、两轮电动摩托车的控制系统、再生控制技术等进行了一定的创造性的研究,并制作了实际的两轮电动车电力驱动系统,进行了相关的实验,得到了与理论相一致的结果。

在论文答辩中,陈家新同学产阐述清楚,回答问题正确,表明作者具有较好的理论基础和专业素养,良好的独立工作能力。

## 答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过陈家新同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席: **陶生桂**

2002年11月4日

## 摘 要

石油能源危机以及引起整个社会广泛关注的环境保护问题,使得电动车再次成为当今世界各国竞相研究和开发的重点。电动车是以电动机作为行驶驱动的原动机、以车载电源作为动力能源的车辆,它是电机、电力电子、机械、材料、能源和控制等多种技术学科的综合产物,以高可靠性、良好性能以及成本适宜为发展目标。鉴于两轮电动车如电动摩托车、电动自行车拥有广阔的应用价值以及永磁电机具有高效、高功率密度以及良好的转矩控制特性,本文着重于这类电机在两轮电动车中的应用特性进行了广泛的分析,这些分析对于当前存在问题颇多的两轮电动车来讲,显然具有实际的应用价值。

为了减少永磁无刷直流电动机的自定位力矩及其波动等问题,从电机设计角度出发,避开了人们常用的斜槽方法,提出了一种新的偏心气隙结构设计方法。该方法有效地减小了自定位转矩及其波动,并通过 MATLAB 对所设计的电机及其构成的驱动系统进行了仿真。

为了延长车辆的续航里程,从行车的驱动策略角度出发,研究了续航的一般计算数学模型以及分析步骤。通过该计算模型,利用最优控制理论,以最大续航里程为研究目标,对行车的驱动策略进行了深入的分析,得出了如加速行车优化驱动策略、减速行车优化驱动策略等多个重要的结论。考虑到永磁直流电动机驱动系统的特殊性以及减少 PWM 斩波引起的逆变器损耗的重要性,分析了 PWM 占空比为 100% 最大续航里程时的车



辆运行特征, 得出了在风阻等于滚动阻力时, 其车辆的续程达到最大的结论, 而这个结论与本文中提出的新的优化控制目标, 所得出的车辆运行特征是一致的. 利用这些结论, 不仅可以有效地延长车辆的续程, 而且有利于骑行者根据剩余的能量和尚需的行程进行相应的行车策略决策, 对改进目前的电动车性能具有显著的成效.

从转矩控制策略角度来看, 分析了电流反馈法以及开环 PWM 电压调速控制方法与车辆的驱动方式关系, 得出了电机驱动电压受限的情况下, 无论是从对车辆的动力性能影响还是从对车辆的驱动要求来讲, 开环 PWM 电压调速控制方法较电流反馈法更适用于以轮毂电机直接驱动方式的两轮电动车中. 其次, 根据电机的数学模型以及电机试验波形, 提出了一种利用数字信号处理器 (DSP) 以及单个电流传感器检测三相永磁无刷电机电枢电流的新方法. 这种方法具有较强的适应性、实时性, 它可以根据控制系统的要求, 适时地提供所需电流数据, 是目前许多文章关于无刷电机相电流平波的重要技术基础.

结合电动车的应用情况, 就电池供电的永磁直流电动机系统的车辆中的再生制动以及能量回馈进行了理论研究. 分析了能量再生原理, 并利用数学模型, 对其再生制动的效果如恒流制动、最大制动功率、最大能量回收、最大回馈效率等进行了一系列的分析, 提出了两轮电动车再生制动和能量回收控制的策略, 接着对最大回收功率的控制模型下的系统可靠性进行了重点的研究, 并给出了数学计算模型. 最后给出了恒流回收仿真和试验结果, 这些研究为电动车的能量再生系统走向实际的应用奠定了重要理论基础.

在电动摩托车控制系统的研制中, 尝试了运用信息系统的

设计方法来进行相应设计，给出了电动车控制系统的业务流程图、数据流程图、信息流程图以及各种模式之间的转换图，在此基础上，就各个模块的实现进行了分析。文章的最后，给出了具体的试验结果包括各种信号波形以及相应的试验数据。

**关键词** 电动车辆，永磁无刷直流电动机，永磁直流电动机，续程，转矩控制，能量再生控制，信息系统

## Abstract

Petroleum crisis in last century and the pollution of the environment make the electric vehicle as the researching emphases all over the world today. The electric vehicle is a kind vehicle that uses the electric motor as its driving motor and uses the energy resource on board. It is the outcome of development of other sciences, such as electric motor, electric power electron, machine, material and automatic controlling theory. High reliability, good performance and feasible cost are its developing goal. Considering that the electric motorcycle and electric bike have large market and permanent electric motor has the advantages in efficiency, power density and torque controlling, the characters of permanent motor which is used in those kinds vehicle will be analyzed in this paper. Under the condition of the electric vehicle at present, this work has obvious value.

In order to decrease electric motor fluctuate which caused by its slots, from the view of electric motor design, A new eccentric air gap structure is proposed and the MATLAB simulation which aimed at the designed electric motor system characters has been executed in this paper. It proved it is an effective method through the experiment on the motor.

In order to increase the rated distance, from the view of drive strategy, the rated distance calculated mathematics model and analysis process are studied. With the help of the math model and optimal controlling theory, the driving strategy which makes the

vehicle acquire the maximal rated distance has been researched and several important conclusions would be drawn. Considering that the special characters of permanent DC motor driving system and the importance of decreasing the inverter loss which caused by PWM chopper, the driving strategy under the condition of 100% PWM duty cycle and the maximal rated distance is analyzed and we can draw a conclusion that when the wind resistance equals the roll resistance, the vehicle could acquire the maximal rated distance. This conclusion is the same as that conclusion which is acquired through the other new analysis. These conclusions are not only propitious to increase the rated distance by more, but also is the basement of driver's choosing the drive strategy.

From the view of torque controlling strategy, the relation between the torque controlling strategy such as the electric current feedback method, PWM open loop method etc and the vehicle driving way is analyzed firstly, then the conclusion could be drawn that the PWM open loop method has more advantages than the electric current feedback method when they are both used in the same vehicle which is direct driving by hubcap motor. Secondly, based on the electric motor mathematic model and its experiment, a new permanent brushless dc motor phase electric current detector method in which a digital signal processor (DSP) and single current sensor are used is introduced. This new method could propose the electric current data in time and is basement of other new torque controlling method.

According to the actual condition of electric vehicle application, the energy regeneration technology in battery electric vehicle in which the permanent dc motor is used as its driving motor is studied.

Maximum regeneration power controlling mode, constant current regeneration controlling mode, maximum braking current controlling mode, maximum regeneration efficiency controlling mode, compare of four strategy and reliability under maximum regeneration power mode are analyzed successively. The experiment and simulation under constant current regeneration controlling mode are also done and some result are given.

In the process of designing the electric motorcycle driving system, it is attempted to use the management information system design method to design the electric motorcycle driving system. The operation flow chart, data flow chart, information system flow chart and transition chart among the different running mode are given. Then several key questions are been analyzed in-depth. In the end some result and experimental waves are given in this paper.

**Key words** electric vehicle, permanent brushless dc motor, permanent dc motor, rated distance, torque controlling, energy regeneration, information system

## 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 选题背景 .....	1
1.2 国内外电动车技术研究现状 .....	4
1.3 电动车驱动控制的几个关键技术 .....	9
1.4 论文主要内容与安排 .....	19
第二章 电动车动力特性分析与驱动策略研究 .....	21
2.1 引言 .....	21
2.2 电动摩托车动力特性分析 .....	22
2.3 电动车续程性能分析模型与步骤 .....	27
2.4 续程最大下的车辆驱动策略 .....	34
2.5 新最优控制目标 .....	38
2.6 使用永磁直流电动机车辆的续程性能进一步分析 .....	39
2.7 小结 .....	41
第三章 单边偏心气隙的永磁无刷直流电机电磁场设计 .....	43
3.1 引言 .....	43
3.2 电机有限元电磁场计算方法 .....	44
3.3 二维电磁场有限元分析软件包构成及其使用 .....	46
3.4 电动摩托车用电机计算实例 .....	47
3.5 仿真分析 .....	51
3.6 小结 .....	60
第四章 电动车转矩控制技术中若干问题的研究 .....	61
4.1 引言 .....	61

4.2 转矩控制策略 .....	62
4.3 单个传感器检测电机电枢电流技术 .....	67
4.4 小结 .....	77
<b>第五章 电动车能量再生控制技术研究 .....</b>	<b>78</b>
5.1 引言 .....	78
5.2 基于永磁直流电机驱动系统的能量再生原理 及数学模型 .....	79
5.3 能量再生系统稳态状态下的电路特性分析 .....	82
5.4 各种能量再生策略及其行驶特性研究 .....	86
5.5 最大回收功率控制模式下的系统可靠性研究 .....	90
5.6 恒流再生制动策略下的系统性能仿真研究 .....	92
5.7 基于永磁无刷直流电动机的能量再生原理与仿真 .....	95
5.8 小结 .....	97
<b>第六章 基于数字信号处理器的两轮电动摩托车控制     系统研究与试验 .....</b>	<b>99</b>
6.1 电动摩托车控制系统设计技术要求与 硬件资源需求 .....	99
6.2 电动摩托车控制系统-软件系统分析与设计 .....	103
6.3 电动摩托车控制系统试验 .....	112
6.4 小结 .....	115
<b>第七章 总结 .....</b>	<b>116</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>119</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>130</b>

# 第一章 绪 论

## 1.1 选题背景

20 世纪 70 年代, 能源危机的爆发, 使人们意识到发展不单以石油为燃料的交通工具的重要性. 80 年代后, 环境保护问题引起整个社会广泛关注, 使得电动汽车<sup>[1]</sup>自 1933 年沉寂后再次成为当今世界各国竞相研究和开发的重点<sup>[2-10]</sup>.

电动车是以电动机作为行驶驱动的原动机、以车载电源作为动力能源的车辆, 如: 电动自行车、电动摩托车、电动汽车等. 自从 19 世纪末诞生以来, 速度慢、价格高、重量重、续程短等缺点就一直是制约其发展的关键因素. 尽管这些年来与电动车相关的电机、电子、蓄电、控制、检测等技术水平有了较大的提高, 经过了近 30 年的大力研究和开发, 某些动力性能如启动性能、加速性能和爬坡性能已可与燃油车辆相比<sup>[11-13]</sup>, 但是由于蓄电技术没有获得实质性的突破, 致使伴随其多年的价格高、重量重、续程短等缺点没有得到根本性的改进<sup>[14-16]</sup>. 种种迹象表明, 这些因素以前是, 在今后较长一段时期内也将是决定电动车的研究与发展方向的关键. 以下是从 20 世纪 70 年代至今电动车研究已经历和正在经历的三个阶段.

### 1.1.1 蓄电池电动车 (BEV: Battery Electric Vehicle)<sup>[17-36]</sup>

这类电动车单独采用蓄电池作为系统的动力源, 是 20 世纪



90 年代以前电动汽车的主流设计, 研究重点集中于电力驱动系统控制技术、高功率密度、高能量密度的蓄电池及其充电技术。这三大技术尤其是电力驱动控制技术和充电技术在此期间获得了较快的发展, 蓄电技术虽也获得了较大的提高, 如质能比和使用寿命, 但是正如前面所言, 并没有获得实质性的突破。

### 1.1.2 混合型电动车(HEV: Hybrid Electric Vehicle)<sup>[37-56]</sup>

由于受蓄电池技术等因素的限制, 从 20 世纪 90 年代起, 人们逐渐意识到当前条件下, 单独使用蓄电池, 还不能使电动车的动力性能与燃油汽车相比, 结合燃油汽车的油耗特点, 人们逐渐认识到开发混合型电动车的重要性。在 HEV 系统中, 电力驱动系统与燃油马达驱动系统的相互联接的基本方式有并联和串联方式。不管采用何种联接方式, 通常驱动的做法是在车辆启动阶段使用电力驱动, 达到一定速度后使用燃油发动机。由于这种配合方式, 避免了燃油发动机在低速阶段油耗大的缺点, 因此降低了每百公里的油耗, 同时也减少了车辆在市区的废气排放和污染。由于 HEV 只是减少了汽车尾气的排放量, 并非真正的零排放车辆。

### 1.1.3 氢燃料电池为动力的电动车(FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle)<sup>[57-76]</sup>

1994 年, 世界上出现了燃料电池电动车——Necar。由于燃料电池通过氢氧化合反应得到电能, 而且副产物是无污染的纯净水。因此它与传统的燃油汽车相比, 具有很多优点: 零排放, 清洁无污染; 并且由于没有机械传动部件, 噪音小; 热效率高, 其效率大约为内燃机系统的 2~3 倍。缺点是由于采用铂金作为