

2000 年上海大学博士学位论文 6

应用于两轮电动车辆的 永磁无刷直流电机的研究

作者：谭 徽

专业：控制理论与控制工程

导师：江建中



51

上海大学出版社

191

2000.1
T. X.

2000 年上海大学博士学位论文

应用于两轮电动车辆的 永磁无刷直流电机的研究

作者： 谭 徽
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 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (2000)

**Research on Permanent Magnet
Brushless DC Motor for Small
Electric Vehicle Drives**

Candidate: Tan Hui

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：

主任：	贺益康	教授，浙江大学	310027
委员：	陶生桂	教授，同济大学	200092
	金如麟	教授，上海交通大学	200032
	袁海林	教授级高工，电子部 21 所	
	俞修海	教授，上海大学	200072
导师：	江建中	教授，上海大学	200072

评阅人名单:

贺益康	教授, 浙江大学	310027
陶生桂	教授, 同济大学	200092
王群京	教授, 合肥工业大学	230009

评议人名单:

陈国呈	教授, 上海大学	200072
李仁定	教授, 上海交通大学	200030
屠关镇	教授, 上海大学	200072
李杰仁	教授, 上海海运学院	200135

答辩委员会对论文的评语

城市交通的重要工具——燃油车辆,已对生态环境造成极大的污染,加之世界石油资源有限,研究和发 展电动车辆已成为现代社会的重要课题。该论文的选题具有重要的学术意义和实用价值,它从电动车辆的驱动系统出发,对永磁无刷直流电机的设计及控制进行了深入的研究,其主要创新点如下:

1. 采用场路耦合的时步有限元法,对非正弦供电下的永磁无刷直流电机进行设计计算,针对该电机星型绕组中点电位波动的特点,提出了增加三个辅助电压方程和一个中点电压方程的办法,并使系统矩阵保持对称,从而使场路耦合时步有限元法适用于星型无中线电机,该方法有很大的实用性;

2. 对永磁无刷直流电机的转矩脉动进行较深入的研究,从系统功率控制出发,首次提出了该电机电磁转矩脉动可抑制区域的概念,指出了抑制转矩脉动的必要条件,避免了单纯用电流控制的方法抑制电机转矩脉动;

3. 根据逆变器与滤波电容的拓扑结构关系,提出了二者之间耦合及解耦的概念,并采用单个电流传感器检测永磁无刷电机的三相电流,使电机转矩闭环控制的成本降低;

4. 针对电动车辆能量反馈制动和电动运行两种状态,提出了全桥型逆变器PWM控制策略,逆变器无需对电机的运行状态进行判别;

5. 以智能型电动自行车为研究对象,利用电涡流检测原理,实现自行车人力驱动力矩的检测,解决了智能化驱动系中的关键技术。

论文的研究成果表明作者具有坚实、宽广的理论基础,很好地掌握了电机、电磁场理论、电力电子技术及微机控制技术等系统深入的专门知识,有较强的科研能力和创造性。论文条理清晰,文笔流畅,图表规范。同意通过博士论文答辩,并建议授予博士学位。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过谭徽同学的博士学位论文答辩,建议授予博士学位。

答辩委员会主席: **贺益康**

2000年11月1日

摘 要

为解决城市交通带来的污染，大力发展和推广电动车辆以逐步取代传统的内燃机车已成为发展现代城市交通的共识，其广阔前景为电机工业带来了新的应用增长点。这一类系统中运动控制的研究目前在国内外正处于逐步深入的过程。电动车辆对驱动系统的运行效率、转矩输出能力以及转速运行范围等方面均有着很高要求。永磁无刷直流电动机由于高效、高功率密度及良好的转矩控制特性，在电动车辆驱动应用中具有独特的优势。因而结合电动车辆的特性进一步研究永磁无刷直流电机及其控制系统，提高其运行性能，具有很大的实际应用价值。

对驱动性能要求的提高以及控制方法的不断进步促使电机设计及其控制日益紧密地结合起来。永磁无刷直流电机机电一体化的特点更要求从系统的角度将电机本体设计和驱动控制方法综合考虑。因此，本文结合永磁无刷直流电机在电动自行车、电力助动车以及电动摩托车等小型电动车辆中的应用，着重进行了电机的设计模型和驱动控制两方面的研究。

从设计的角度出发，本文研究了永磁无刷直流电机场路耦合的时步法有限元模型。这一模型将电机电磁场的有限元计算方法从传统的静态场和正弦稳态场扩展到了非正弦的时域。静态场和正弦稳态场模型需要以电流作为已知量，而场路耦合的时步法有限元模型则以电压作为输入量，转子可以转动，与大多数电机的实际运行状态更加吻合，为电机的动态运行性能的

计算分析提供了有力工具。逆变器供电状态下,绕组为星形无中点联接的永磁无刷直流电机常常给场路耦合模型的求解带来极大的困难。本文对此提出了良好的解决方法,使得适用于绕组为星形有中点联接的计算方法可以很方便地扩展应用于星形无中点联接的情况。

对永磁无刷直流电机控制特性的研究分为电动运行和制动运行两个部分进行。在电动运行方面,首先从转矩控制的角度出发,对永磁无刷直流电机电磁转矩波动抑制方法进行了研究,首次指出了永磁无刷直流电机转矩波动的可抑制范围。然后结合电动车辆应用的特点,研究了功率逆变部分的拓扑结构,提出了滤波电容与逆变器耦合和解耦的概念,并以此为基础,给出了采用单个电流传感器实现转矩闭环控制的方法。其次,根据对电动摩托车和电动自行车的动力特性分析的结果,研究并实现了永磁无刷直流电机的恒功率运行控制方法,指出了分析恒功率运行状态时采用系统仿真分析的重要意义。在制动控制方法的研究中,分析了电动车辆制动控制的特点,并提出可以实现低速运行状态下能量反馈制动的独特的控制方法。

基于以上的研究基础,本文最终研制并实现了智能型电力助动自行车系统。这一助动车辆的特点是可以自动跟踪人力驱动力矩并自动实现实时助力。在这一系统中,本文的独特贡献在于采用电涡流感应原理研制了人力力矩传感器,解决了本系统实现智能化助动的关键问题。

关键词 电动车辆, 永磁无刷直流电机, 有限元时步法, 转矩控制, 恒功率控制

Abstract

It is getting generally accepted to control air pollution from traditional inner combustion vehicles in cities by developing and expanding the use of electric vehicles (EV). Its promising future brings a new opportunity to promote electric machinery industry. High efficiency, big torque output and excellent torque control performance are highly preferred in an EV drive system and BLDCM (permanent magnet brushless dc motor) is a competitive candidate in EV systems due to its adherent advantages such as high efficiency, high power density and convenience in torque control. It is worthwhile to improve EV performance by studying the driving control methodology of a BLDCM with the consideration of EV system characteristics.

Because of the increasing requirement of driving performance and continuous improvement in control methods, the design of electric machine and driving control strategies go closely by and by. Moreover, the synthetical consideration in system level of the two parts is highly demanded due to the mechatronic nature of BLDCM. Therefore, the design model and driving technique are concentrated in this article with the consideration of such applications as electric bikes, electric scooters and electric motorcycles.

Firstly, the circuit-field coupled time-stepping finite element model of BLDCM was studied from the viewpoint of design, which extends from traditional static electromagnet method and sinusoidal steady state method to the non-sinusoidal characteristic analysis in time domain. Compared with the traditional methods, the circuit-field coupled time-stepping finite element model takes the terminal voltage as system inputs instead of currents and in further, the rotor is able to rotate. This makes the simulation match most practical driving system operation and offers a powerful platform to analyze dynamic motor operation characteristic. It is very difficult to solve the system

equations when an inverter is used to drive a star connected motor without neutral point. An excellent solution was proposed here, which inherited the solution for star-connected motor model with neutral point easily.

The research on BLDCM control characteristics consists of two sections: motoring operation control and energy generating braking control. The research on motoring states was started with the analysis of torque-ripple-reduction control methods. It shown for the first time that there is a limitation in all the torque ripple reduction strategies because of the topology of power converter and back electromotive force. Considering the characteristics of EV power module design, its topology was studied then. The concept of coupling and de-coupling between capacitor filter and invert was proposed, based on which, a novel phase current measuring method was given to realize closed loop torque control.

Constant power operation in motoring mode is always an issue in BLDCM applications, especially in EVs. According to the study of EB and EM dynamic operation, a constant power control method was realized and evaluated. A further study on the complication of constant power running states illustrated the value of system simulation method in evaluating BLDCM constant power running ability. For braking control, the particularity of EV system was studied and a unique inverter control method suited for both motoring and braking was proposed.

Based on studies aforesaid, an intelligent electric bike system was developed. Its unique characteristics is no hands control operation, which enables the motion drive system to develop torque in proportion to manual torque on pedals. The author's special contribution lies in the development of the manual torque transducer using eddy current sensing theory, which is the most critical module of the system.

Key words electric vehicle, BLDCM, time-steeping FEM, torque control, torque ripple reduction, constant power control, torque transducer, electric bike

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 选题背景	1
1.2 电动车辆相关技术	6
1.3 永磁电机及其控制技术	11
1.4 论文内容安排	23
第二章 永磁无刷直流电机场路耦合时步法有限元模型 及其应用	26
2.1 电机有限元静态场方法	27
2.2 电机有限元场路耦合的基本方法	29
2.3 永磁无刷直流电机场路耦合的有限元时步法 模型基本方程	31
2.4 仿真系统软件构成	37
2.5 定子绕组为星形联结时有限元时步法的场路 耦合方程	39
2.6 计算实例及实验验证	42
第三章 永磁无刷直流电机转矩波动研究	47
3.1 永磁无刷直流电机基本转矩分析	47
3.2 永磁无刷直流电机转矩波动控制方法	51
3.3 永磁无刷直流电机换相过程中的电流波形分析	56
3.4 换相过程中的 PWM 控制与电磁转矩波动抑制	60
3.5 本章小结	65
第四章 永磁无刷直流电机相电流检测技术研究	67
4.1 引 言	67
4.2 不同 PWM 方式下的相电流采样分析	69

4.3 不同 PWM 策略的电流调整特性	72
4.4 逆变器与滤波电容解耦及耦合对相电流 检测的影响	73
4.5 逆变器与滤波电容耦合状态下的相电流检测	76
4.6 本章小结	82
第五章 两轮电动车辆用永磁无刷直流电机驱动控制研究	84
5.1 电动车辆动力分析模型及其基本公式	85
5.2 电动摩托车及电动自行车系统动力特性分析	88
5.3 永磁无刷直流电机的恒功率运行	92
5.4 永磁无刷直流电机制动控制研究	97
5.5 本章小结	104
第六章 智能型电动自行车系统研制	106
6.1 引言	106
6.2 智能型电力助动自行车系统介绍	108
6.3 智能型电动自行车用力矩传感器原理与实现	111
6.4 实验结果	116
6.5 本章小结	118
第七章 总 结	119
参考文献	122
致 谢	138

第一章 绪 论

1.1 选题背景

汽车是现代社会中极其重要的交通工具。但 70 年代以来,汽车数量急剧增多也带来了严重的环境污染,其废气排放已成为目前空气污染最主要的原因之一^[1]。如何继续享用汽车以及其它燃油车辆所带来的便利而又不致造成环境污染,已成为现代社会一个令人非常关切的问题。其次,全球石油资源储量有限,也必须考虑将来交通工具的能源形式。这两方面成为促进环保车辆研究开发和推广应用的积极因素。

近年来出现的环保车辆种类多样,有采用天然气、植物油等燃料的“低污染排放”汽车,也有采用电能作为动力的“零污染排放”汽车^[2]。在许多可供选择的方案中,电动车辆脱颖而出,成为当代内燃机车更新换代的方向性产品。

1.1.1 电动汽车发展概述

实际上电动车辆并不是新生事物,早在 19 世纪末,电动汽车就已经出现。当时内燃机和电动机均处于发展的初期,它们同蒸汽机一起竞争,希望成为机动车辆的驱动装置。1896 年举行的首届美国机动车大赛,七辆中的两辆就是电动汽车。在 1918 年之前,电动汽车相当流行而且销售量也不错。但是随着内燃机技术的发展,燃油汽车逐渐取得了优势地位,相比之下,电动汽车

速度较慢而且价格也较高, 逐渐退出了市场. 到了 1933 年, 电动汽车的数量已经将近为零^[3].

在随后的几十年间, 电动车辆一直处于发展的低谷, 然而 70 年代初的石油危机使人们开始意识到应该发展不以汽油为燃料的机动车辆. 从 80 年代起, 环境问题日益为人们所关注, 考虑到 42% 的空气污染是由交通车辆所造成的, 零污染排放的电动汽车又被重新推到了前台^[4]. 再加上各国政府法律法规的鼓励, 各大汽车制造厂商及众多的科研机构均投入了大量人力物力开发现代的电动汽车. 美国、日本和欧洲等发达国家和地区, 早在 20 世纪 60 年代便开始了新一轮的电动汽车研究与开发, 到了 90 年代, 电动车技术更是飞速发展.

从 60 年代至今, 电动汽车的开发和演变可以大致划分为三个阶段^[5-68]:

1) 90 年代以前, 电动汽车的主流设计是单独采用蓄电池作为系统的动力源, 可称为蓄电池电动车(BEV: battery electric vehicle). 研究方向主要集中于蓄电池供电状态下的电机驱动系统控制技术, 高功率密度的新型蓄电池的开发及充电技术. 这两大领域的技术在此期间开始得到长足的发展.

2) 90 年代起, 人们开始意识到如果仅仅使用蓄电池, 电动汽车在近期内还难以与传统汽车相提并论, 从而混合型电动汽车(HEV: hybrid electric vehicle)的研究开始得到各大汽车制造商的重视. HEV 系统中, 蓄电池系统与燃油系统相互配合使用, 可以大大减小车辆在市区的废气排放和污染. 其中 Fuji 公司提出的混合车的概念极富创意: 其车体分为燃油引擎驱动模块与电动车(BEV)模块, 两部分可以方便地拆开和组合. 在市区的短距离运行中, 可以将燃油引擎脱离车体, 长途运行时

则可以将其与车体组合，成为 HEV。由于 HEV 并非真正的零排放车辆，人们始终将其看作电动汽车发展过程中的过渡性产品。

3) 1994 年，DaimlerChrysler 公司推出了采用燃料电池的电动车（FCEV: fuel cell electric vehicle）- Necar。燃料电池通过氢氧化合反应得到电能，反应过程的副产物为纯净水(或水和二氧化碳)。氢可以直接以液态的形式储存，也可以采用其他原料通过化学分解反应获得。所以 FCEV 中的能源储存方式与传统的燃油车辆类似，能量密度较蓄电池显著提高。由于燃料电池不具备回收电能的功能，电动车辆驱动大多采用 FCEV 与 BEV 相结合的形式，通常也称为混合车。目前 Ballard Power Systems, Daimler Chrysler 和福特公司，通用汽车和丰田公司已分别组成商用 FCEV 开发联盟；而大众，菲亚特，马自达，本田，尼桑等公司也已开始大规模投资这一应用研究开发。

70 年代起，我国电动车辆的研究开发便一直在进行之中。1987 年 12 月，中国电工技术学会电动车辆研究会成立。1991 年至 1992 年间，国家科委和国家计委先后将电动车辆的研究列入国家计划。1993 年，国家科委确定开展国家十大重点科技工程，其中电动车辆工程于当年 6 月启动并在广东设点。1996 年 1 月国家科委组织了“国家重大科技产业工程项目电动汽车实施方案”综合评审会，制定了电动汽车的发展目标。表 1-1 为我国部分厂家电动车辆研制开发状况^[6]。

1.1.2 小型电动车辆在全球的发展^[25-42]

与汽车相比，灵活方便的中短途个人交通工具，如自行车、助动车和摩托车等，在全球依然占据绝大多数。全世界每天在役的自行车约为 10 亿辆，每年有 1 亿辆新自行车进入市场^[26]。实际上