

主 编：李正浩

副主编：夏静满 汤 捷

李鸿鹄

应用于电动助力车智能 力矩传感器设计

YING YONG YU DIAN DONG ZHU LI CHE ZHI NENG

LI JU CHUAN GAN QI SHE JI



电子科技大学出版社

应用于电动助力车智能 力矩传感器设计

主 编：李正浩

副主编：夏静满 汤 捷

李鸿鹄

电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

应用于电动助力车智能力矩传感器设计 / 李正浩主
编. — 成都: 电子科技大学出版社, 2015. 6 (2016. 7 重印)
ISBN 978-7-5647-3062-8

I. ①应… II. ①李… III. ①电动自行车—力矩传感器—设计 IV.
①U484. 02

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第139083号

应用于电动助力车智能力矩传感器设计

李正浩 主编

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段159号电子信息产业大厦
邮编: 610051)

策划编辑: 谭炜麟

责任编辑: 谭炜麟

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 郫县犀浦印刷厂

成品尺寸: 145mm×210mm 印张 3 字数 64千字

版 次: 2015年6月第一版

印 次: 2016年7月第二次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-3062-8

定 价: 16.90元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换

前 言

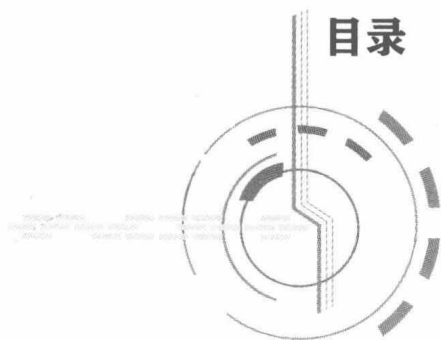
力矩传感器是电动助力车的核心部件。它实时检测骑行者用力变化，并根据信号处理的结果，控制电机实现助力。当前电动助力车普遍使用的力矩传感器存在所采集模拟信号数量少、速度慢和灵敏度低等突出问题，使得骑行者在骑行过程中，电机输出功率不稳定，助力效果不佳。

针对上述问题，本书作者融会运用多年来相关项目的科研经验，并在重庆市应用开发计划项目（cstc2013yykfC60006）以及重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室的资助下，设计开发了一种基于霍尔效应的智能力矩传感器。相比于传统的电动助力车，采用该智能力矩传感器的新一代电动助力车具有智能助力功能，能够实时准确地检测骑行者的施力状态，并线性调节电机输出功率，从而使得骑行者获得良好的驾驶感受。

在此，作者要感谢为本书提出宝贵意见的重庆大学龚卫国教授、李伟红副教授，重庆市科学技术研究院韩鹏主任，以及在本书成书过程中付出辛勤劳动的硕士生胡伦庭、杨隽莹。

由于作者水平有限，书中不妥与错误疏漏在所难免，敬请广大读者与同行批评指正。

目录



第①章 绪 论

1.1 引言	01
1.2 背景知识	02
1.3 智能电动助力车发展现状	04
1.3.1 智能电动助力车结构	05
1.3.2 智能电动助力车研究技术	07
1.3.3 技术难点	11
1.4 本书内容概述	12
1.5 本章小结	13

第②章 霍尔效应及其在传感器中的应用

2.1	霍尔效应基本原理	14
2.2	霍尔元件	16
2.2.1	霍尔元件的材料及种类	16
2.2.2	霍尔元件的结构及常用参数	18
2.2.3	霍尔元件的驱动电路	19
2.2.4	霍尔元件失调电压的产生	19
2.2.5	霍尔元件失调电压的抑制	20
2.3	霍尔传感器的种类与特性	22
2.3.1	霍尔传感器的种类	22
2.3.2	霍尔传感器的特性	24
2.4	本章小结	26

第③章 基于两对霍尔元件的力矩传感器结构设计

3.1	总体结构设计	27
3.2	各部分结构分析与设计	31
3.2.1	主被动部件结构分析与设计	31
3.2.2	磁环结构分析与设计	32
3.2.3	霍尔元件选择与感应结构设计	33

3.3 本章小结	35
----------------	----

第4章 基于两对霍尔元件力矩传感器的控制系统设计

4.1 智能电动助力车力学模型	36
4.2 力矩信号分析与设计	39
4.2.1 信号获取与处理算法	39
4.2.2 力矩信号转换算法	42
4.2.3 滤波算法	47
4.3 控制系统分析与设计	51
4.3.1 齿盘正反转判断算法	52
4.3.2 PID控制算法	53
4.4 控制系统测试分析	56
4.4.1 力矩转换测试分析	56
4.4.2 滤波算法测试与参数选取	58
4.5 本章小结	62

第5章 系统硬件控制电路设计与稳定性分析

5.1 力矩传感控制系统电路设计	63
------------------------	----

5.1.1	电源选取	63
5.1.2	力矩传感器电路设计	64
5.1.3	力矩控制电路设计	64
5.1.4	通信电路设计及分析	65
5.1.5	电机驱动电路设计	66
5.1.6	过流保护电路设计	67
5.1.7	电机正反转控制	67
5.2	力矩传感控制系统稳定性分析	68
5.2.1	比例系数测试分析	69
5.2.2	恒定用力时输出功率测试分析	70
5.2.3	不同负载时输出功率测试分析	71
5.3	本章小结	72
参考文献		73

第①章

绪 论

1.1 引言

电动助力车产业随着中国城市化进程的加快而保持着连续的高速增长。而智能电动助力车以其绿色环保、健康、经济的特性而不断的成为人们所追求的健身工具和日常生活用的交通工具^[1, 2]。然而,传统的电动助力车是通过手动转把来实现电机功率大小的调节。这种手动的电机功率输出控制方式受人为的因素影响较大,而且由于人为操作的随意性,使得电机的效率极低,造成很大浪费。同时,这种控制方式对电池寿命也有极大的影响。与传统的电动助力车相比,智能电动助力车能够根据骑行者用力大小、蹬踏频率和车子行驶速度等因素实时、动态地调整车中电机的输出功率,不仅提高了电机效率、延长了电池寿命,也提高了骑行舒适度。现如今,安装有力矩传感器的智能电动助力车越来越受到广大消费者的青睐,逐渐成为市场的畅销产品。



1.2 背景知识

以铅蓄电池或者锂电池作为主要或者辅助动力来源，以两个独立车轮作为支撑行驶工具，能够供人骑行，并且可以实现人力与电力交替驱动的车称为电动助力车。按照国家标准中的规定，电动助力车区别于电动摩托车的四个标准：1) 具有能够用力的脚踏；2) 整体的质量不能超过40千克；3) 电机的输出的最大功率为240瓦；4) 行驶时速不大于20千米/小时^[3]。电动助力车的广泛发展具有其深层次的原因。首先，随着国家政策的调整，城市化进程越来越快。但是，在城市化进程加快的同时，交通配套设施并没有跟上节奏，尤其是城市公共交通有很多不足，对广大居民的日常出行造成很大的影响。由于电动助力车具有灵活轻便的特点，使得其逐渐成为都市人解决“最后一公里”交通的不错选择；其次，随着近年来环境问题的日益突出，国家对绿色交通的扶持力度也在加大，为了能够减少对环境的破坏，减少化石能源的使用，电动助力车得到大力的推广。电动助力车不仅经济省力，而且能够实现对环境的零污染，也得到了消费者的普遍支持；最后，科技的发展也逐渐改变着消费者的心里。消费者明显倾向于购买既可以代步又可以健身的智能化产品，这在一定程度上也促进了电动助力车行业的发展。从市场对电动助力车市场的需求情况来看，根据权威的预测，在2017年全球的销量约为3500万辆，而中国市场就有2500万辆^[4]。而且，中国基本上具有全球最大的电动助力车产能，同时也已经成为全球消费最大、出口最多的国家。

经过长时间的技术积累和市场发展，电动助力车的研究和发展已经取得了很大的进步，在实际的使用上也得到了大量的普及。虽然市场需求很大，但是由于行业准入门槛较低和标准规范不统一等因素，使得电动助力车的发展出现了很多问题。例如，供电

设备的良莠不齐,充电设备规范化程度低、以次充好,电机效率低,电池寿命短,智能化程度低等。造成这些问题的主要原因有以下几点:第一,核心装设备科技含量不够高;第二,电动助力车整体产业链上中下游问题较多;第三,没有具体的电动助力车行业标准要求限制^[5]。

为了提高核心竞争力,实现智能化控制是目前电动助力车一个非常重要的研究发展方向,也是提升电动助力车科技含量的一个重要措施。智能化控制的一个重要研究领域就是控制电机的输出功率。传统的电动助力车是通过安装在车前方的手动控制器来实现控制电机功率的输出。但是,这种手动的电机输出功率控制方式有很多缺点:首先,手动的控制方式受到人为因素的影响比较大。人在感觉需要输出多大的功率的时候,带有很大的主观性,这种主观性会导致在控制的过程中不能准确的把握具体输出功率有多大;而且,人为的控制随意性比较大,不能很好的掌握输出功率的具体大小。其次,由于人为控制的随意性,对供电设备,特别是电池组有很大的损耗,使其寿命大大的缩短,影响骑行效果和继续使用的能力^[6]。最后,人为的控制会使得电机长期处于不良的工作状态,这对电机的损害是非常大的。综上,人为控制功率输出,对设备的使用寿命有很大的影响,而且因为人为控制的随意性,极大的降低了骑行效果。

为了能够克服这个缺点,在传统的电动助力车基础上增加智能化控制设备,达到实时、非人为地自动控制电机输出功率。本书介绍了一种基于霍尔效应的智能力矩传感器的设计方法,应用此种智能装置的助力电动车可通过其核心设备——力矩传感器,和相应的硬件电路实现智能控制电机的输出功率。智能电动助力车根据骑行者实时的骑车状态来调节电动机的动态输出功率,在逆风、上坡或者其他需要加大用力的条件下,能够感知这种力的

变化, 调节电机输出功率, 从而保证骑行者用力不费力, 达到绿色健康出行。

具有更好力矩传感器的智能电动助力车, 将使得企业在电动助力车市场的竞争日益激烈的环境中脱颖而出。中国作为一个庞大的智能电动助力车消费市场, 如果能够在智能电动助力车行业占领市场先机, 那么企业将会在竞争中处于有利的地位。这就要依靠核心竞争力。掌握智能电动助力车的力矩传感器的分析和设计, 就是掌握科研和市场竞争力的关键。

1.3 智能电动助力车发展现状



图 1.1 智能电动助力车的构成

1.3.1 智能电动助力车结构

在分析智能电动车的研究技术之前，首先对智能电动助力车的基本组成和其中的主要部分做介绍。

图1.1显示了智能电动助力车的各个主要组成部分。智能电动助力车主要由以下几个部分组成：机械车、充电器、智能控制器、力矩传感器、智能仪表、锂电池、电机、灯具等部分。

机械结构是智能电动助力车的最主要组成部分。它不仅是承重部分，也是所有的其他辅助功能结构的载体。没有机械部分作支撑，其他的各项功能也将无从谈起。机械部分的组成如下图1.2所示，其主要由车架结构、传动结构、制动系统、变速系统、转向系统及其他配套的零部件组成。

智能电动助力车的电气装置是助力车的核心组成部件。图1.3显示了智能电动助力车的电气部分的组成。电气部分主要包括电机、传感器、锂电池、智能仪表、智能控制器和充电器。其中，控制器包括仪表控制器、电机控制器和智能控制器三个部分。

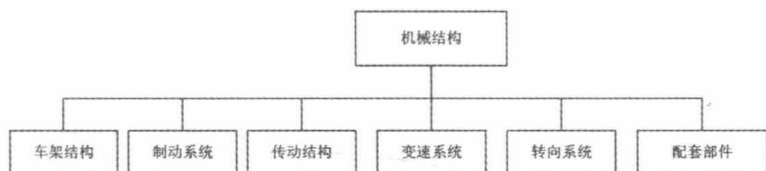


图 1.2 普通机械车的组成

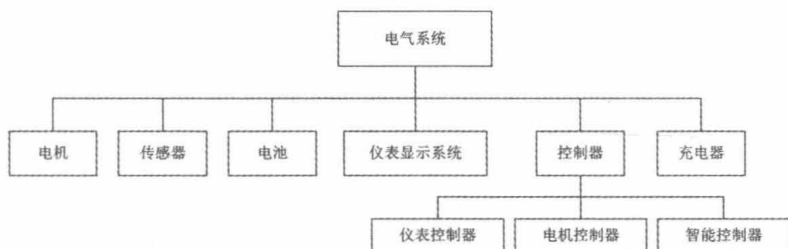


图 1.3 智能电动助力车的电气部分组成



1) 充电器

充电器是给智能电动助力车实现能量补充的装置。充电模式分为两种,第一种是二阶段充电模式,第二种是三阶段充电模式^[7]。在二阶段充电模式中,先以恒定电压进行充电,充电电流会随着电池电压的上升而逐渐减小,当达到一定程度后,转换为涓流充电;在三阶段充电模式中,先以恒定电流进行充电,使得电池电量得到迅速补充,然后进行恒定电压充电,最后转换为涓流充电。

2) 锂电池

锂电池是一类将化学能量转化为电能的装置。目前,锂电池已经成为电能提供的主流,在智能电动助力车上得到了推广。

3) 智能控制器

智能控制器是智能电动助力车中的重要组成部分,也是整个电动助力车的核心。智能控制器具有控制整车的速度、调节电机转速、控制电池电量输出、以及提供辅助骑行需要的作用^[8]。而且,智能控制器还具有骑行模式自动切换以及整车电气部件的自检功能,能够管理和控制各路传感器信号,控制电机实时助力,改善骑行效果^[9]。

4) 力矩传感器

力矩传感器是电气系统控制器的信号输入环节。力矩传感器实现信号的收集与转换,把各种物理上的或者化学上的信号转换为电信号输出。智能控制系统通过力矩传感器获取骑行者用力大小、蹬踏频率和正反转等数据,通过算法处理后控制电机实时助力。

5) 电机

电机是将电能转换为机械能的装置。它能够驱动电动助力车的行驶,使得骑行者的骑行更加舒适。电机结合电动助力车的控制系统能够提供较好的控制功率输出,达到助力的目的^[10]。

6) 其他辅助设备

智能电动助力车的其他辅助设备有灯具、智能仪表和刹车等。这些辅助的设备不仅为骑行带来方便,也保证骑行更加舒适、安全,且改变了以往普通车骑行单调乏味的过程。

1.3.2 智能电动助力车研究技术

对于智能电动助力车的每个部分都有相关研究。在充电器方面,一些无线充电器也得到研究和发展^[11]。在蓄电池方面,更大容量,更稳定的蓄电池也得到开发^[12]。为了检测电机转动情况,Hatwar等提出用霍尔传感器检测转子转动情况,同时输出PWM信号,从而控制电机的转动^[12]。Watterson等提出一种无极变速控制方法^[13]。而当前对于电动助力车的研究主要集中在智能化精确控制的研究上。它主要是通过获取车速、骑行者施力大小和蹬踏频率等因素来控制电机功率输出。获取骑行者施力大小是此类研究技术的关键。为了获取施力大小,实现对电动助力车的智能化控制,就需要通过各类传感器对骑行状态进行实行检测,通过算法对检测结果处理来达到智能化控制。依据于此,可以将电动助力车的研究分为三个方向:普通电动助力车研究、无力矩传感器的智能化电动助力车研究、有力矩传感器的智能化电动助力车研究。

1) 普通电动助力车

无力矩传感器的普通电动助力车是一种价格较为低廉,消费者容易接受,安装方便,结构简单,并且能实现全电动助力的设计方案^[14]。这种普通的电动助力车主要由机械车、电机、电池、手动控制装置、相关辅助功能电路以及其他辅助装置构成。普通的电动助力车使用简单,在启动时,只需打开电源开关,通过置于车头前方的控制转把调节电池电量输出和电机的输出功率就可



以实现电动车的助力^[15]。与传统的人力机械式车比较起来,虽然普通的电动助力车价格相对较高,但是其性价比远远大于其价格上的劣势,因此而有很大的市场占有率。目前,随着电能存储技术的发展,大容量电池和一些储能更好的设备被推出,这种普通的电动助力车将继续得到消费者的青睐^[16]。

然而,普通的电动助力车最明显的缺点是不能够按照骑行者的骑行状态,而实时动态的调节电机的输出功率。因为,普通电动助力车通过手动的方式来调节电机输出,这种操作方法有明显的随意性,即使是在骑行条件发生变化时,紧靠人为的感觉来调节电机输出是不可靠的。这不仅会造成电量的极大浪费,而且会影响电动助力车的使用寿命。所以,为了能够消除人为操作给骑行带来的极大不便,一种有效的解决办法是在整车的系统中加入可以感知骑行速度和骑车人用力变化的传感器。通过分析传感器的信号数据,设计合适的控制方法,就能实现对电机输出功率的实时动态控制。

2) 无力矩传感器的智能化电动助力车

无力矩传感器的智能化电动助力车需要借助于其他方式实现对力矩的估计,进而实现智能控制的目的。这种无力矩传感器的助力车更多的偏重于控制系统的设计。孙等设计了一种无力矩传感器的控制系统^[17]。文章首先对曲柄轴转速与曲柄轴力矩进行数学建模,进而通过曲柄轴的转速得到骑行者施加力的大小,实现控制输出的目的。这是一种典型的无力矩传感器设计方式,需要对相关各种变量进行较为精确的估计。Chang等提出一种利用扰动观测器来估计骑行者施加力矩和所受阻力力矩之和的方法,为电机的输出提供好的决策依据^[18]。吴等提出一种只需检测行驶速度就能实现智能控制的方法^[19]。Chen等提出一种三力矩控制策略,分别实现手动控制,比例控制和辅助控制^[20]。这种方法是建立在

对实际行驶速度和需要行驶速度的关系建立上。Niki等^[21]提出另外一种无力矩传感器控制方案。首先,在扰动观测模型下,骑行者所用的力和骑行过程中所受到的阻力被视作扰动力矩。然后,通过高通滤波,将人所施加的力矩分离开来,从而实现无力矩控制。

总的来说,无力矩传感器的智能化电动助力车需要对各个用力的部分进行精确的估计才能达到良好控制功率输出的目的。这种方法的优点是硬件成本较低,传感器的耗能也相对较低。缺点是对各成分的建模较为复杂,容易忽略一些变量的作用。

3) 有力矩传感器的智能化电动助力车

智能化电动助力车上安装的力矩传感器的重要作用就是能够实时动态的检测骑行者施加的力大小和变化情况,从而通过相应的硬件电路实现力信号到电信号的转变,达到能够被控制器直接使用的目的。在前面的小节中已经说明,一些无力矩传感器的智能化电动助力车为了能够实现对电机输出功率的控制,采用速度控制的方法,但是这种方法很难实时的感知骑行者的施力状态。相反,安装有力矩传感器的智能化电动助力车则可以随着骑行者施力大小而调节电机输出。当骑行的过程中受到较大阻力,或者在上坡的过程中,骑行者都需要施加较大的力才能保持车的正常快速运行。而力矩传感器能够检测到这一变化情况,骑行者所施加的力越大,那么通过传感器感应,信号的反馈,最后由智能系统自动增加电机功率输出,使得在不影响骑行者舒适度的情况下,做到省力的目的。相应的,当骑行者施加的力很小时,就会自动减小电机的输出功率,从而节约电能消耗。可见力矩传感器是其中的核心关键部件。

傅等提出一种智能化1:1助力传感器的电动助力车设计方法^[22]。这种方法首先确定骑行者在骑行过程中的蹬踏速度和扭矩,