



硕士学位论文

(专业学位)

基于扭矩传感器的电动助力自行车 助力系统研究

作 者 姓 名 : 陈创东

郭钟宁

导 师 姓 名 : 田君

学科(专业)或领域名称 : 机械工程

论 文 答 辩 年 月 : 2022年5月



分类号：U484

学校代码：11845

UDC:

密级：

学 号：2111901340

广东工业大学硕士学位论文

(工程硕士)

基于扭矩传感器的电动助力自行车助力系统

研究

陈创东

导师姓名（职称） : 郭钟宁（教授）

田君（教授）

学科（专业）或领域名称 : 机械工程

学 生 所 属 学 院 : 机电工程学院

答 辩 委 员 会 主 席 : 张永康（教授）

论 文 答 辩 日 期 : 2022年5月31日

A Dissertation Submitted to Guangdong University of Technology
for the Degree of Master
(Master of Engineering)

**Research on assist system of electric power
assisted bicycle based on torque sensor**

Candidate : Chen Chuangdong

Supervisor : Prof. Guo Zhongning

Prof. Tian Jun

May 2022

School of Electromechanical Engineering

Guangdong University of Technology

Guangzhou, Guangdong, P.R.China, 510006

摘要

近年来，倡导绿色低碳出行成为主流。电动助力自行车因其绿色、便捷等特点，备受世界各地人们的欢迎。电动助力自行车搭载扭矩检测装置和智能助力控制算法，具有很大的研究挖掘潜力。

助力系统的研究是电动助力自行车的关键所在，其包含扭矩检测与助力控制算法。目前市面上的电动助力自行车扭矩检测主要分为两种，一种是用速度传感器感知，通过算法估算骑行踩踏的力矩，进而输出助力扭矩。另一种是采用扭矩传感器，通过扭矩传感器识别骑行踩踏的力矩，算法控制输出助力扭矩。当前市场上的助力自行车扭矩检测存在精度不高，助力系统性能难以满足使用要求的问题。在助力控制算法上，采用的是传统定助力比助力方式，助力性能缺乏智能性，不能很好适应骑行路况。针对上述问题，本文的主要研究内容如下：

(1)设计整车驱动系统。现有电动助力自行车驱动系统多采用前置或后置式轮毂电机驱动，存在许多缺点。本文设计的驱动系统为中置式布置方式，驱动系统输出轴与脚踏中轴重合，性能更佳。在结构设计上了分析整车驱动传动关系，选取合适的驱动电机，设计了减速装置，搭建了驱动系统。硬件电路上设计了主控芯片电路、电机驱动电路、供电模块电路。

(2)扭矩检测系统设计。针对现有的扭矩检测方案存在精度不足的问题，设计了一款基于应变片的中轴扭矩传感器，适用于本设计的中置式驱动系统。阐述本设计方案应变式扭矩传感器的工作原理以及惠斯通电路电桥测量原理。在扭矩传感器供电以及信号传输问题上，采用了磁耦合谐振式无线传输代替了传统的导电滑环传输方式，详细描述了无线传输模块的电路原理。

(3)助力算法优化。模糊控制是一种基于规则的控制，它直接采用语言型控制规则，出发点是控制经验或相关专家的知识。模糊控制控制机理和策略易于接受与理解，设计简单，便于应用。针对目前助力算法不够智能问题，提出在定助力比助力算法的基础上采用模糊控制算法处理骑行特殊路况，提高助力性能。推导出整车骑行过程中的动力学模型，采用 MATLAB/simulink 软件搭建仿真模型，对本设计的控制算法进行仿真验证。

(4) 设计模拟骑行实验装置与实验。结合整车骑行过程中受力分析，设计了一款模拟骑行实验装置，采用磁粉测功机与伺服电机分别模拟骑行阻力与踩踏力，并实验验证该装置的可行性。采用 simulink 仿真验证与实验装置验证两种方案，验证本设计助力算法在起步性能与坡度助力性能比传统定助力算法好。在上述实验基础上，实车骑行验证助力系统的稳定性与可靠性。

关键词：电动助力自行车；助力系统；扭矩传感器；无线传输；模糊控制

ABSTRACT

In recent years, advocating green and low-carbon travel has become the mainstream. Electric power assisted bicycles are welcomed by people all over the world because of their green and convenient characteristics, prompting people to diversify their choices for short-distance travel. Electric power assisted bicycle is equipped with torque detection device and intelligent power assisted control algorithm, which has great research potential.

The research on the power assisted system of electric power assisted bicycle is the key of electric power assisted bicycle, which includes torque detection and power assisted control algorithm. At present, the torque detection of electric power assisted bicycles on the market is mainly divided into two types. One is used the speed sensor to sense the speed, estimate the riding and trampling torque through the algorithm, and then output the power assisted torque. The other is used the torque sensor to identify the riding and trampling torque through the torque sensor, and control the output boost torque through the algorithm. At present, there are some problems in the torque inspection of power assisted bicycle in the market, such as low measurement accuracy and the performance of power assisted system is difficult to meet the use requirements. In the assist control algorithm, the traditional fixed assist ratio is adopted. The assist performance is lack of intelligence and can not well adapt to the riding road conditions. In view of the above problems, the main contents of this thesis are as follows:

(1) Design vehicle drive system. The existing electric power assisted bicycle drive system mostly adopts front or rear wheel hub motor drive, which has many disadvantages. The driving system designed in this paper is in a central layout. The output shaft of the driving system coincides with the central shaft of the pedal, which has better performance. In the structural design, the driving relationship of the whole vehicle is analyzed, the appropriate driving motor is selected, the deceleration device is designed, and the driving system is built. The main control chip circuit, motor drive circuit and power supply module circuit are designed in the hardware circuit.

(2) Design of torque detection system. Aiming at the problem of insufficient accuracy in

the existing torque detection scheme, a central shaft torque sensor based on strain gauge is designed, which is suitable for the central drive system of this design. This paper expounds the working principle of strain torque sensor and the measuring principle of Wheatstone circuit bridge. On the power supply and signal transmission of torque sensor, magnetic coupling resonance wireless transmission is used instead of the traditional conductive slip ring transmission. The circuit principle of wireless transmission module is described in detail.

(3) Boost algorithm optimization. Fuzzy control is a rule-based control. It directly adopts language control rules. The starting point is the control experience or the knowledge of relevant experts. The fuzzy control mechanism and strategy are easy to accept and understand, the design is simple and easy to apply. Aiming at the problem that the current assistance algorithm is not intelligent enough, a fuzzy control algorithm is proposed based on the assistance algorithm with fixed assistance ratio to deal with special road conditions and improve the assistance performance. The dynamic model of the whole vehicle riding process is deduced, and the simulation model is built with Matlab / Simulink software to verify the control algorithm of this design.

(4) The experimental device and experiment of simulated riding are designed. Combined with the force analysis of the whole vehicle during riding, a simulated riding experimental device is designed. The magnetic particle dynamometer and servo motor are used to simulate the riding resistance and trampling force respectively, and the feasibility of the device is verified by experiments. Simulink simulation verification and experimental device verification are used to verify that the starting performance and slope assistance performance of the designed assistance algorithm are better than the traditional fixed assistance algorithm. Based on the above experiments, the stability and reliability of the power assist system are verified by real vehicle riding.

Key words: electric power assisted bicycle; power assist system; torque sensor; wireless transmission; fuzzy control

目 录

摘要	I
ABSTRACT	III
目录	V
CONTENTS	VIII
第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景及研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 电动助力自行车整车研究现状	2
1.2.2 电动助力自行车扭矩检测研究现状	2
1.2.3 电动助力自行车助力算法研究现状	7
1.3 本文主要研究内容和章节安排	8
1.3.1 本文主要研究	8
1.3.2 章节安排	8
1.4 课题来源	9
1.5 本章小结	9
第二章 助力驱动系统设计	10
2.1 整车体系结构	10
2.1.1 整车功能模块组成	10
2.1.2 驱动系统布置方式	11
2.2 驱动系统设计	13
2.2.1 电机类型	13
2.2.2 电机参数设计	14
2.2.3 电机传动系统设计	17
2.3 驱动系统电路设计	18
2.3.1 主控芯片电路	19
2.3.2 电机驱动电路	20

2.3.3 供电模块设计	21
2.4 本章小结	22
第三章 扭矩传感器设计	23
3.1 扭矩传感器测量机理	23
3.1.1 扭矩传感器的工作原理	23
3.1.2 扭矩测量理论分析	26
3.1.3 应变片测量原理	28
3.1.4 应变式传感器测量电路	30
3.2 传感器信号传输方式	32
3.2.1 导电滑环传输	32
3.2.2 无线传输	33
3.2.3 磁耦合谐振式无线传输	34
3.3 磁耦合谐振式无线传输电路分析	36
3.3.1 电路总体架构	36
3.3.2 电源电路	36
3.3.3 定子板电路	37
3.3.4 转子板电路	39
3.4 传感器性能实验	40
3.4.1 传感器性能指标	40
3.4.2 传感器测试装置及标定实验	41
3.4.3 传感器性能测试	43
3.5 本章小结	45
第四章 助力算法设计	46
4.1 传统助力算法	46
4.2 模糊控制理论及控制原理	47
4.2.1 模糊控制理论起源	47
4.2.2 模糊控制系统结构	47
4.3 整车系统动力学建模	49

4.3.1 助力自行车动力学模型	49
4.3.2 电机动力学模型	50
4.3.3 整车系统模型搭建	51
4.4 模糊控制器设计及 simulink 仿真搭建	52
4.4.1 模糊控制器设计	52
4.4.2 simulink 模糊控制器仿真搭建	55
4.4.3 simulink 整车仿真搭建	57
4.5 本章小结	58
第五章 助力系统性能测试实验	59
5.1 整车综合性能实验装置设计	59
5.1.1 实验装置构成	59
5.1.2 实验装置可靠性实验	61
5.2 扭矩检测系统测试实验	62
5.3 助力算法实验验证	63
5.3.1 起步性能验证	63
5.3.2 坡度助力性能验证	65
5.4 整车实地骑行	66
5.5 本章小结	67
总结与展望	69
参考文献	71
攻读学位期间取得与学位论文相关的成果	76
学位论文独创性声明	77
致 谢	78

CONTENTS

ABSTRACT(IN CHINESE)	I
ABSTRACT(IN ENGLISH).....	III
CONTENTS(IN CHINESE).....	V
CONTENTS(IN ENGLISH).....	VIII
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research background and research significance of the subject	1
1.2 Research status at home and abroad.....	2
1.2.1 Research status of electric assist bicycles	2
1.2.2 Research Status of Torque Detection of Electric Power Bicycles.....	2
1.2.3 Research Status of Electric Assisted Bicycle Assist Algorithm	7
1.3 The main research content and chapter arrangement of this paper	8
1.3.1 The main research of this paper	8
1.3.2 Chapter arrangement	8
1.4 Project source	9
1.5 Chapter summary	9
Chapter 2 Design of power assisted drive system.....	10
2.1 Vehicle Architecture	10
2.1.1 Composition of vehicle functional modules.....	10
2.1.2 Layout of the drive system	11
2.2 Drive system design	12
2.2.1 Motor Type	13
2.2.2 Motor parameter design.....	14
2.2.3 Design of motor drive system	17
2.3 Design of power assist control system	18
2.3.1 Main control chip circuit	19
2.3.2 Motor drive system.....	20

2.3.3 Design of Power Supply Module	21
2.4 Chapter summary	22
Chapter 3 Torque Sensor Design.....	23
3.1 Torque sensor measurement mechanism	23
3.1.1 The working principle of torque sensor	23
3.1.2 Theoretical analysis of torque measurement	25
3.1.3 Measuring principle of strain gauge.....	28
3.1.4 Strain sensor measurement circuit.....	30
3.2 Sensor Signal Transmission Mode	32
3.2.1 Conductive slip ring transmission	32
3.2.2 Wireless Transmission.....	33
3.2.3 Magnetically coupled resonant wireless transmission	34
3.3 Analysis of Magnetically Coupled Resonant Wireless Transmission Circuit	35
3.3.1 The overall structure of the circuit	35
3.3.2 Power circuit.....	36
3.3.3 Stator board circuit.....	36
3.3.4 Rotor Plate Circuit.....	38
3.4 Sensor performance experiment	40
3.4.1 Sensor Performance Index.....	40
3.4.2 Sensor Test Device and Calibration Experiment.....	41
3.4.3 Sensor performance test	43
3.5 Chapter summary	45
Chapter 4 Assisting Algorithm Design.....	46
4.1 Traditional power assist algorithm	46
4.2 Fuzzy control theory and control principle	47
4.2.1 The origin of fuzzy control theory	47
4.2.2 Fuzzy control system structure	47
4.3 Vehicle system dynamics modeling	49

4.3.1 Dynamic model of power assisted bicycle	49
4.3.2 Motor dynamics model.....	50
4.3.3 Vehicle system model construction	51
4.4 Design of fuzzy controller and Simulink simulation.....	52
4.4.1 Design of fuzzy controller.....	52
4.4.2 Simulation of Simulink fuzzy controller	55
4.4.3 Simulink vehicle simulation.....	57
4.5 Chapter summary	58
Chapter 5 Performance test experiment of power assist system.....	59
5.1 Design of vehicle comprehensive performance experimental device.....	59
5.1.1 Composition of experimental device.....	59
5.1.2 Reliability test of experimental device	61
5.2 Test experiment of torque detection system	62
5.3 Experimental verification of boost algorithm	63
5.3.1 Starting performance verification.....	63
5.3.2 Slope assistance performance verification	65
5.4 Vehicle field riding	66
5.5 Chapter summary	67
Conclusion and prospect.....	69
References	71
Publication and patents during study.....	76
Statement of original authorship and copyright licensing declaration	77
Acknowledgements	78

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及研究意义

随着人类社会的不断发展，化石能源不断使用，温室效应导致的全球变暖问题愈发严重。因其产生的一系列问题如极端天气频发、冰川消融、海平面上升、土地干旱等已经给人类的生产和生活造成了巨大的影响^[1]，成为人类面临的最大非传统安全挑战。《第五次气候变化评估报告》内容中表明，人类生产活动而产生的温室气体如二氧化碳、甲烷等已被认为是导致全球气候变化的主要原因。而在这些温室气体中，由化石能源燃烧产生的二氧化碳气体占了绝对比重^[2]。以燃油为主的汽车交通出行，排放的尾气大气污染问题困扰着人们的日常生活，绿色清洁的交通出行方式将是主流，大力推行绿色智慧出行将有益于整治空气污染严重问题，以汽车为主要的出行方式将会被取代。

电动助力自行车自 90 年代诞生以来，因其绿色、高效、经济、便捷等优点，备受日本、欧洲等地的青睐^[3, 4]，成为短途通勤的首选。为应对全球气候变化，政府在报告中提出国家在节能减排方面的计划，在 2030 年前达到碳排放峰值，并在 2060 年前完成碳中和任务，达到绝对减排的目的^[5]。我国人口基数大，城市务工人群广泛，5 公里以内“幸福通勤”比重 53%^[6]，短途通勤将是城市通勤的主流，未来电动助力自行车必将成为我国城市上班族日常通勤的首选。

欧洲自行车销量稳定，电动助力自行车迅速崛起。欧洲 1985-2020 年自行车销量维持在 1500-2000 万辆之间，欧洲具有悠久的自行车文化传统，自行车是主流的出行方式之一，电动助力自行车产业发展有良好基础。2014 年电动助力自行车销量突破 100 万辆，进入高速发展阶段，截至 2020 年电动助力自行车销量近 450 万辆，位居世界前列。

电动助力自行车是一种人力+电机助力的自行车，它与传统的电动车最大的区别是其不需要转把油门来控制电机输出的功率获取动力，而是配备有智能助力控制系统，通过扭矩检测装置检测骑行者踩踏力，通过智能控制算法控制电机输出功率来输出助力^[7]。其在外观上保留了原有自行车的外形，骑行者既可以通勤又可以达到健身的效果，而且其在上下班高峰期速度并不逊色于汽车^[8]。2020 年，我国两轮电动车行业保

有量约 3.25 亿辆，两轮车行业前景巨大，本课题具有较大的研究价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 电动助力自行车整车研究现状

我国现阶段的自行车市场中，占主导地位的还是传统的手把控制式电动自行车，通过扭转手把控制电机的输出功率进而提供动力^[9]，没有对骑行过程的路况、状态进行传感器感知，是一个开环控制，没有基于外界环境的适应能力，骑行体验感较差。同时，其一般整体重量超过 55Kg，安全性能较低。另一种是基于扭矩检测的电动助力自行车，能动态地根据骑行过程中的力矩输出助力，整车重量较轻。国内比较有代表性的企业有八方、轻客，国外有博世、雅马哈、本田、禧玛诺。

目前国内市场上，电动助力自行车销售占有小额市场。但现有产品其助力控制算法较为简单^[10]，采用速度传感器感知，通过算法估算出力矩大小，精度较差，典型的有哈罗和美团共享助力自行车。这种助力方式较为粗糙，虽然能达到助力的目的，但骑行体验感较差，要么在骑行过程中感受不到助力，要么需要持续在骑行过程中持续踩踏脚踏，更有甚者在上坡或者下坡的时候容易出现误助力的情况。这种类型的电动助力自行车不能满足消费者需求，不能适应未来智能化的要求。

1.2.2 电动助力自行车扭矩检测研究现状

扭矩传感器作为电动助力自行车最重要的部分，其精度直接影响着骑行过程的助力精度，影响着舒适度。目前市场上销售的电动助力自行车采用的扭矩检测方案主要分为两种，一种是基于霍尔传感器或者编码器获取速度反馈，通过建立速度与扭矩模型关系，确定骑行扭矩，进而输出电机助力。PC Chen^[11]等学者，提出一种人力和干扰估计的电动助力自行车速度控制方法，开环和闭环干扰观测器的实现都是根据 Q 滤波器的直流增益进行调节。Takumi Kurosawa^[12]等学者提出一种通过安装在电机上的霍尔效应传感器估计踏板扭矩的方法，采用傅里叶级数展开来提取与曲柄角度相关的扰动扭矩周期性分量，然后使用条件递归最小二乘法估计负载转矩的模型的参数，最后，基于扰动观测器和估计的负载扭矩获得瞬时踩踏扭矩。上述方法虽然在理论上可以实现踩踏扭矩估算，但是由于精度较低，无法达到预期舒适度。同时，采用上述扭矩检测方案存在一些缺陷，如上坡的时候由于车速度减小导致助力电机输出扭矩减小，

无法适应坡度提供有效的助力；在下坡的时候车速较快，如此时继续踩踏踏板，会继续输出助力，容易导致安全隐患。通过上述分析可知，利用速度反馈进行扭矩检测实现助力的方案并不可行，因此现有的扭矩检测研究大多为基于扭矩传感器的检测方案 [13]。

目前国内外基于扭矩传感器的检测方案主要有以下几种：逆磁致伸缩效应传感器、后轴爪勾传感器、扭簧式传感器、应变式传感器。

逆磁致伸缩效应传感器是利用铁磁材料的磁场特性，通过检测磁场量变化，转换为扭矩量变化的一种传感器。磁致伸缩效应是指当对磁性材料施加磁场后，导致其材料内部的分子沿着磁场特定方向排列，磁场的变化导致磁性材料其外形尺寸的变化。与磁致伸缩效应原理相反，逆磁致伸缩效应是指铁磁材料在压力、扭力或者拉力作用下，其外形尺寸变化导致铁磁材料的磁化状态发生转变的现象^[14, 15]。简单来讲，逆磁致伸缩效应是指在外力作用下，铁磁材料的物理特性发生变化，从而导致其磁场发生变化。当这种扭矩传感器粘贴在电动助力自行车受力部位时，骑行时铁磁材料受到扭力作用产生变形，导致其磁特性产生变化，根据磁特性变化量转化为电信号变化量，然后根据信号与扭矩的等量关系转换为具体扭矩大小便能实现扭矩检测功能。



图 1-1 Thun 中轴扭矩传感器示意图

Fig.1-1 Schematic diagram of Thun middle shaft torque sensor

在日本和欧美等市场中，逆磁致伸缩传感器被普遍使用。日本松下、雅马哈在 90 年代就开始研发逆磁致伸缩传感器的相关技术^[16]。在相关技术不断发展下，德国的 FAG 公司开始加入研究逆磁致伸缩传感器的行列中，并应用于 Bosch 的中置电机系统中。Thun 不同于以上几家，Thun 公司将逆磁致伸缩扭矩传感器集成在中置电机系统内，同时开发了能安装在自行车五通内的中轴扭矩传感器，从而给使用前后置式轮毂电机的整车系统配备扭矩传感器提供了可能，示意图如图 1-1 所示。由于此方案通过特殊材料实现，在国内的使用暂不成熟，且存在开发难度大，成本高昂等问题，不适

用于产品初期研发，但其材料及加工成本低，适合长远发展。

后轴勾爪传感器测量原理是使用压力传感器检测踩踏力矩的大小，该方案将压力传感器安装于整车的后轴勾爪上，安装效果如下图 1-2 所示。后轴勾爪传感器安装在车体的后上叉和后下叉的结合处，其实相当于一个额外的结构连接件，材料通常为铝合金材质。当人在骑行过程中，踩踏的扭矩通过脚踏-曲柄-牙盘-链条-飞轮-后花鼓-车架传递链传递到后轴勾爪传感器，此时传感器会读出电信号，通过算法转换识别扭矩踩踏扭矩大小。后轴勾爪传感器优点是结构简单、价格低廉、制造难度低。但该种方案测量时需要经过脚踏、曲柄、牙盘、链条、飞轮、后花鼓、车架的一系列传动环节，而金属件间的传动会使能量传输过程中不规则散失，同时金属会有“弹性滞后”效应，使得测量的扭矩不仅误差大而且有延迟，无法做到实时检测。

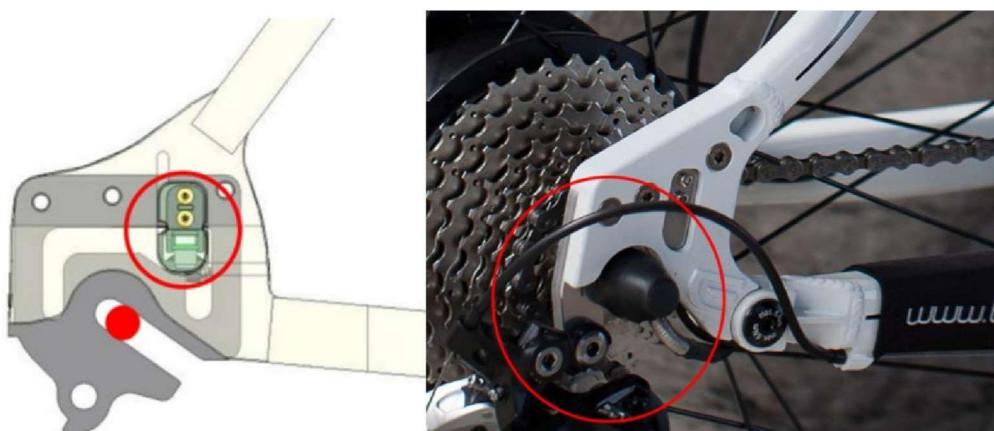


图 1-2 后轴勾爪传感器示意图

Fig.1-2 Schematic diagram of rear axle claw sensor

后轴勾爪传感器安装在后轮后叉处，在平路上是能平稳地检测踩踏扭矩，但是遇到颠簸路面，路面的冲击力会挤压后轴勾爪传感器从而误判断为骑手踩踏扭矩，导致误助力，影响骑行安全。同时由于该种类型传感器制造材料为铝合金，在颠簸路况下容易损坏，测量精度以及使用寿命随着使用时间增长不断减低，所以后轴勾爪传感器适合在平路路况中骑行使用，并不适合于颠簸路况。“后轴勾爪传感器”虽有成本低廉、原理简单等优势，但存在力矩测量精准度底，延迟高，导致骑行体验差。该传感器对安装处的生产车辆工艺要求高，等于将传感器节约的成本转移到整车车架中，从整车成本上来看并没有得到改善。同时由于铝合金材质容易变形，使用寿命短，用户的后期维护成本高，所以目前稍微高端一些的电助力车均抛弃了这种传感器。刚开始研发时，捷安特尝试过这种方案，使用“后轴勾爪传感器”生产低端电助力车，但因

此类产品故障多、体验差、寿命短而放弃。小米 2016 年推出的骑记助力自行车，使用的就是后轴勾爪传感器。

扭簧传感器的原理是利用胡克定律将弹簧形变长度转化为扭矩大小，它的结构比较简单，检测模块由两个铝合金盘片组成，一片铝合金盘片与曲柄相连，另一片铝合金盘片固定在牙盘上，二者以弹簧作为转接件，并且其内部有内置的霍尔传感器，它的结构图如下图 1-3 所示。当人在骑行过程中踩脚踏时，曲柄带动铝合金盘片压缩弹簧，同时带动牙盘一起转动，由胡克定律知此时弹簧的形变长度与受到作用力的大小成线性关系。在弹簧压缩过程中，两个盘片就会产生相对位移，安装在其上的磁铁随之移动，霍尔传感器也就探测到磁场的变化，进而判断出受作用力的大小。当没有踩踏力时，传感器输出值为原始信号初相位，当踩踏曲柄时，传感器内的弹簧被压缩，传感器产生相位差。整体的工作流程可以简化为脚踏受力-弹簧受力被压缩-牙盘与曲柄产生相对位移带动磁铁产生相对位移-霍尔传感器检测到磁场变化-算法得出扭矩值-电机输出助力。扭簧传感器的优点是技术门槛低，电路结构简单；缺点是以霍尔传感器作为测量单元，精度较低，同时弹簧在使用久后难以保持一致性。

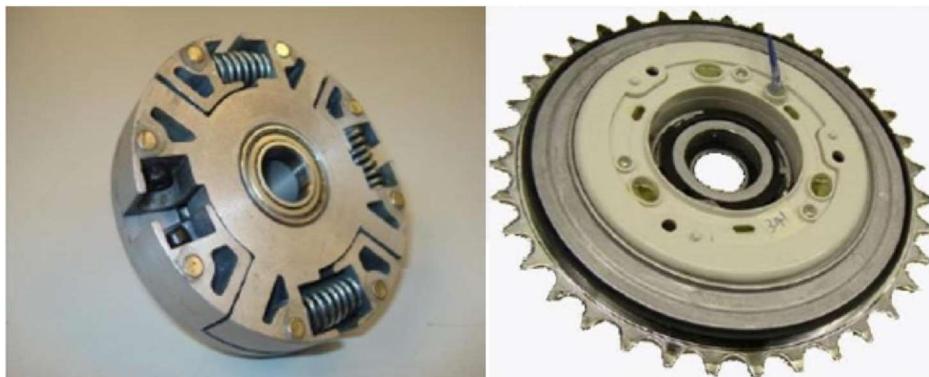


图 1-3 扭簧传感器示意图

Fig.1-3 Schematic diagram of torsion spring sensor

应变式传感器通过检测粘贴于弹性敏感元件（也称“弹性体”）上的电阻应变计惠斯通电桥电阻变化大小，将被测量扭矩转换为电信号的敏感转换器件^[17]。此类传感器应用在助力自行车中，只需要将应变式传感器粘贴于受力部件上，粘贴效果如下图 1-4 所示。当人踩踏踏板受力使应变片产生微弱的变形，引起应变片电阻阻值发生变化，然后通过惠斯通电桥电路把应变量转化为电信号^[18]，通过导电滑环或者无线传输技术进行供电以及数据传输，检测出骑行过程总的扭矩大小。应变式传感器具有结构

简单，尺寸小，性能稳定可靠，精度高，变换电路简单，易于实现测试自动化等特点^[19]。因此，将应变式传感器应用于电动助力自行车扭矩检测中，可以提高其检测精度，满足骑行舒适度要求。

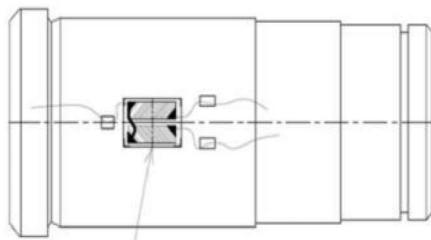


图 1-4 应变式传感器示意图

Fig.1-4 Schematic diagram of strain sensor

以上所陈述的 5 种扭矩检测方式其技术特点如下表 1-1 所示，经过对比各种传感器可以得出结论：逆磁致伸缩效应传感器与扭簧式传感器的工艺要求比较高，成本也高，后轴勾爪传感器与应变式成本相比上述两种较低。其中逆磁致伸缩效应传感器这种技术已经非常成熟，目前已经被一些知名厂商进行研发使用并申请了专利^[20,21]，如日本 Yamaha、德国 Bosch 等，要突破专利限制比较难。扭簧式传感器难以保证弹簧一致性，而且该方案是采用线性转接线且不是刚性的连接弹簧，因此无法持续测量脚踏力矩，同时检测到形变的量会有延迟和精度误差^[22]。后轴勾爪传感器在传递力过程中存在金属滞后效应，无法满足助力自行车扭矩检测实时性的要求，同时会导致能量传输过程中损耗，精度与可靠性不足。

表 1-1 电动助力自行车扭矩检测方式技术特点

Table.1-1 Technical characteristics of torque detection mode of electric power assisted bicycle

扭矩检测方式	机械结构	精度	工艺要求	成本
速度传感器+算法	简单	低	低	低
逆磁致伸缩传感器	简单	高	高	高
后轴勾爪传感器	复杂	低	低	低
扭簧传感器	复杂	低	高	高
应变式传感器	简单	高	低	中

应变式传感器扭矩检测方案相对其余四种方案，其有机械结构简单，精度高，成本低，可靠性高等优点。因此，对于本助力系统设计而言，采用应变式传感器是一种很好的选择。

1.2.3 电动助力自行车助力算法研究现状

电动助力自行车助力算法控制着电机输出扭矩的大小，影响着骑行过程的舒适度，所以拥有一套好的助力算法尤为关键^[23]。目前国内外对于电动助力自行车的研究主要聚焦在基于扭矩检测的各种不同方案进行研究，而关于检测扭矩后如何进行实时路况分析或者如何实现与实时路况相匹配的扭矩助力的研究比较少。现在市面上的主流品牌助力方式比较单一，多为定助力比助力算法，按照检测的扭矩大小输出相应比例的电机扭矩助力。吴战国^[24]提出一种通过前轴、后轴安装速度传感器来检测路况信号，然后通过执行机构(如步进电机)来驱动机械变速装置完成档位切换，进而控制助力输出。周好斌^[25]将 H_{∞} 鲁棒控制技术应用到控制系统中，设计了能量回收系统，提高定助力比控制方式的续航里程。Chen^[26]将骑行过程中的期望速度、实际速度、扭矩三者之间构建函数关系，设计了助力比控制、手动控制、辅助控制三种扭矩输出策略定。小米 2016 年推出的骑记电动助力自行车，实车如下图 1-5 所示，其采用后轴勾爪传感器作为扭矩检测模块，在助力算法上手动调节档位为健身模式、经济模式、平衡模式、加强模式，这四种模式，与传统的定助力比助力没有差别。



图 1-5 小米骑记助力自行车

Fig.1-5 XiaoMi QiCYCLE

由此可以看出，现有的关于助力自行车的骑行助力算法大部分还是传统的比例控制，比例控制助力算法是根据扭矩检测装置检测的扭矩大小，恒定比例输出电机助力，并没有考虑实际路况，如突然陡坡、下坡、起步等影响骑行体验感的特殊情况不能很好表现助力，造成骑行体验效果欠佳。即使具有检测精度极高的扭矩传感器，同时要搭配精确的助力控制算法方能发挥出助力自行车最大的性能，因此骑行助力控制算法的研究也是本文的研究内容之一。

1.3 本文主要研究内容和章节安排

1.3.1 本文主要研究

本文在对现有电动助力自行车扭矩检测方案以及助力控制算法研究分析的基础上，提出了基于应变式扭矩传感器和模糊控制策略的电动助力自行车助力系统。主要研究内容如下：

(1) 扭矩检测方案设计。分析现有电动助力自行车扭矩检测方案的不足，针对助力自行车的使用工况，设计一款基于应变片的扭矩传感器，阐述其可行性以及惠斯通电路电桥测量原理。

(2) 磁耦合谐振式无线传输。在应变片式中轴传感器的设计基础上采用磁耦合谐振式无线传输解决动静件间的信号与能量传输问题。传统的信号与能量传输采用导电滑环方式，通过电刷触点与金属环的相互摩擦传递能量与信号，使用一段时间后电刷容易磨损失效，从而导致信号传输功能失效，而磁耦合谐振式无线传输具有传输稳定、无接触磨损、可靠性高等优点，适合于本助力自行车助力系统中。

(3) 模糊控制算法。针对现有传统定助力比助力方式不能适应陡坡、起步、下坡等特殊骑行状态，提出了采用模糊控制的方式，将扭矩与速度划分模糊论域，在传统定助力比的基础上对电机的输出力矩进行控制。仿真与实车验证模糊控制的可行性。

(4) 助力自行车动力学模型建立以及 simulink 仿真搭建。分析了助力自行车骑行过程中的受力情况，搭建了整车的数学模型，并搭建了 simulink 仿真，将模糊控制与传统定助力比进行仿真比较。

(5) 搭建模拟真实骑行实验装置。设计了一款能模拟真实骑行的实验平台，将整车放置于实验平台上便可进行相关实验。该实验平台采用磁粉测功机进行加载模拟骑行过程中的阻力，采用伺服电机模拟人真实骑行。在磁粉测功机转轴上带有橡胶轮进而模拟路况，更换不同橡胶轮可以实现模拟不同路况下的地面摩擦阻力。上位机编程给定扭矩驱动信号，带动传动系统进而模拟骑行。同时实车实路况试验，在标准坡道上进行不同算法助力比较。

1.3.2 章节安排

本文基于扭矩传感器扭矩检测系统，改进骑行助力算法，完成了助力系统的设计。

本文分为五个章节，章节安排如下：

第一章：绪论。本章主要介绍电动助力自行车的背景以及研究现状，分析国内外关于扭矩检测研究现状、助力算法研究现状，根据上述研究提出本文的研究内容。

第二章：助力驱动系统设计。根据整车特性，设计选择中置式驱动系统布置方式。根据整车动力学分析，计算出驱动电机性能参数，在此技术上设计了减速装置。设计设计系统的主控芯片电路、电机驱动电路、供电电路。

第三章：扭矩传感器设计。根据现有的助力自行车扭矩检测方式，提出采用应变式传感器作为敏感元件，阐述惠斯通电桥测量原理，设计了一款中轴式扭矩传感器。在传感器信号与能量传输方式上，设计了一款磁耦合式无线传输模块。在完成传感器设计后，实验验证其精度是否达到要求。

第四章：助力算法设计。针对现有定助力算法的不足，提出模糊控制算法，并构建整车动力学模型，搭建 simulink 仿真模型。

第五章：助力系统性能测试实验。设计整车综合性能实验装置，设计仿真与实车实验，验证模糊控制助力性能的优越性。

1.4 课题来源

本课题来源于广东高标电子科技有限公司，并受以上资金资助。公司为该项目提供高低温测试平台、电机测试平台、老化测试房、安规测试仪、ROHS 检测仪、阻燃测试仪、盐雾试验机、测功机等实验设备。

1.5 本章小结

本章首先介绍了电动助力自行车的研究背景，以及现有关于助力自行车研究的扭矩检测与助力控制算法的技术难点，然后对这两种难点进行国内外相关研究现状进行综述，分析现有方案存在的不足之处，提出本文应变式扭矩传感器和模糊控制算法的相关研究内容。

第二章 助力驱动系统设计

2.1 整车体系结构

2.1.1 整车功能模块组成

电动助力自行车的核心部件如下图 2-1 所示，主要包括助力驱动系统、供能模块、仪表、车架、等部件。



图 2-1 电动助力自行车整车组成图

Fig.2-1 Composition diagram of electric power assisted bicycle

助力驱动系统包含众多部件，包含电机、控制器、传感器、减速齿轮箱等部件。其中电机通常采用高速电机，其输出轴转速快，通常与减速齿轮箱配合使用起到减速增加扭矩的作用^[26]。传感器包含扭矩传感器与速度传感器。扭矩传感器实时检测骑行者蹬踏力矩，并将力矩信号发送至控制器，控制器经运算处理后按照算法处理需要输出的扭矩大小，进而控制电机输出功率^[27]。速度传感器实时检测整车速度，配合扭矩传感器实时控制电机输出助力扭矩。

助力自行车的供能模块一般由电池与电池管理系统组成。铅酸电池安全性能差，质量较重会加重整车的负担，导致耗能严重，铅酸电池的电解液处理不当会污染环境。同时铅酸电池的安全一直备受诟病，近些年电动车失火的新闻不断，究其主要原因是电动车常用的铅酸蓄电池在充电过程中有一定概率会引起火灾^[28]。传统的电动车多使用铅酸电池，而电动助力自行车均为锂电池。锂电池有着轻便环保、能量密度大、寿命长等优点^[29]，非常适合电动助力自行车使用。

仪表是电动助力自行车与用户交互的界面，可以显示车辆实时信息如速度、加速度、电量、骑行功率、行驶里程等。用户通过观看仪表的参数，可以了解到整车的运

行情况，做出相应的骑行操作。

上述对整车的功能模块进行了概述，助力系统作为整车的核心部分是研究的重点难点，本文将对助力系统进行研究，解决助力自行车的核心问题。

2.1.2 驱动系统布置方式

驱动系统的布置方式影响着助力系统的工作状态、整车生产成本、骑行安全性能^[30]，与汽车、电动自行车的电机安装位置一样，助力自行车的驱动系统也可以分为前置式、后置式、中置式。

前置式方案将驱动系统安装在车体的前叉上，如图 2-2 所示，驱动系统动力输出轴心与前轮转动轴心重合，这种方案无需对车体原本结构进行改装，使得整车结构比较简单，生产装配简单方便。但这种方案对整车以及骑手的牵引力均由前叉提供，驱动系统与前轮转轴相连，使得其在颠簸的路况下容易对驱动系统造成冲击，降低了使用寿命。同时，前置式方案在重心上存在不足，重心偏前容易牵引力不足。在上坡时，如果对前轮施加的压力不足，则会导致打滑现象从而产生危险。



图 2-2 驱动系统前置方案

Fig.2-2 Front layout scheme of drive system

后置式方案将驱动系统安装在车体的后轮中轴上，如图 2-3 所示，驱动系统动力输出轴心与后轮转动轴心重合，它与前置方案一样无需对车体结构进行改装，使得整车结构比较简单。该种布置方式在普通电动车中最为常见，采用轮毂电机后置式布置，整车偏笨重。整车重心偏后，不存在前置式的重心导致牵引力不足问题，但其后轮存在链条和较多走线，拆卸困难，不便于维修。同时后轮在颠簸路况下会对驱动系统造成冲击，容易损坏部件。



图 2-3 驱动系统后置方案

Fig.2-3 Rear layout scheme of drive system

现有的电动助力自行车多为前置或者后置式驱动系统布置方案，采用轮毂电机输出轴与转动轴重合的设计，导致其在颠簸路况下寿命短。基于前置后与后置式驱动系统在结构上的缺陷，本文提出采用中置式布置方案，将驱动系统整合在整车的中轴处，驱动系统输出轴与脚踏中轴重合。该方案是将电机、传感器、控制电路、减速齿轮等集合到一个模块中来，安装在整车的中轴位置。这种安装方式使得人、车、助力系统三者的重心在同一条直线上，如下图 2-4 所示，符合人体工程学，是比较合理的部件布局方式。同时，中轴位置布局减少了振动导致驱动系统损坏的可能性，结构强度和避震性能都比前后轴好。



图 2-4 驱动系统中置方案

Fig.2-4 Central scheme of drive system

本文综合考虑助力自行车的安全性、使用寿命、结构合理性等因素，设计选择中置式驱动系统布置方案。

2.2 驱动系统设计

驱动系统为助力自行车的关键，它由控制器通过控制电路发送信号给电机提供骑行助力，其设计的合理性影响着助力系统的性能^[30]。

2.2.1 电机类型

助力自行车采用的是蓄电池供电，供电功率有限，使用的电机要求与一般的工业或者家用电器电机的要求有所不同，因此电机选型的时候应该充分考虑功率和效率。为确保环保特性，整车要求轻便，这就使得电机选型与助力电机设计满足体积与重量都不大的要求。同时为保证骑行的舒适性，电机也要有振动小、噪声低、运行平稳的特点。目前电动助力自行车常用的电机有永磁式直流电机、高速永磁无刷电机、无刷直流电机三种^[31]。

有刷直流电机主要由定子磁极、转子、电刷和外壳4个部分组成。定子磁极一般采用的是永磁体，它可以由铁氧体、铝镍钴、钕铁硼等材料制造而成。转子是由硅钢片叠压而成，转子铁心的两槽之间由漆包线缠绕，其各接头分别焊在换向器的金属片上。电刷是一种连接转子绕组与电源的导电部件，它具有耐磨与导电性的特点。永磁式直流电机由于不需要直流励磁电源，因此可以极大地减少电源的消耗；且没有励磁绕组，减少铜耗，有利于节约资源。但是由于受到材料的限制，永磁式直流电机的容量相对较小，且电压调整率差，在助力自行车中难以得到广泛应用。

高速有刷电机一般用于前后置式方案的轮毂式电机^[32]，它由定子、转子、减速离合器、轮毂外壳等部件组成，其转速相比其他电机较高，所以使用时一般需要减速器，因此结构相对复杂。与普通的永磁同步电机类似，高速永磁无刷电机定子可以采取整数槽、分数槽、无槽的结构。转子是电机本体的转动部分，它由永磁体、导磁体、支撑零件三部分组成。电机盖上可以安装霍尔传感器，用以测电机的转速。位置传感器有磁敏式、光电式和电磁式3种类型，每种类型都有各自的特点，可以根据不同的需要采用不同的位置传感器。高速永磁无刷电机具有结构简单、运行可靠、体积小、质量小、损耗少以及效率高等特点，具有广泛的应用前景，但是其电机内的损耗相对其他电机要大得多，尤其是铁耗，这对于电动自行车来说是十分不利的，需要改善。

无刷直流电机由永磁体转子、多极绕组定子、位置传感器三部分组成。定子由导

磁的定子铁芯和导电的电枢绕组组成，在电机运行时始终保持静止状态^[33]。转子是由磁性材料制成的具有特定磁极对数的永磁体，采用内嵌式结构，将矩形的永磁体内嵌到转子铁芯中，是电机本体的转动部分，也是产生激励磁场的部件。它采用半导体电子开关器件实现换向，即用电子开关器件代替传统的接触式换向器和电刷。因没有电刷而不需要定期维护，具有较高可靠性、噪声低、无换向火花等优点，同时其效率也比有刷电机高^[34, 35]。

上述三种类型电机参数如下表2-1所示。

表 2-1 三种类型电机主要技术指标

Table.2-1 Main technical indexes of three types of motors

技术指标	有刷直流电机	高速永磁有刷电机	无刷直流电机
效率	中	低	高
功率密度	低	高	中
寿命	中	短	长
振动	小	中	中
噪声	中	大	小
可靠性	中	低	高
结构	复杂	复杂	简单

根据三种类型电机技术指标对比可知，从效率、寿命、可靠性、噪声、结构复杂性等方面来看，无刷直流电机比有刷直流电机和高速永磁有刷电机更适合电动助力自行车驱动系统动力源，故本课题驱动系统的驱动电机采用无刷直流电机。

2.2.2 电机参数设计

电动助力自行车要想达到高效率运行，必须选择合适的电机参数如电机最大功率与电机极限转速，最大限度的发挥电机的性能。若选取的电机功率偏大，可明显提升驱动效果，但大功率电机所占体积和重量大，导致驱动系统质量高，与整车轻量化不相符。与此同时，高功率低使用功率属于一种设计上的浪费，高功率电机售价高带来了成本的提高，不利于商品化。但如果为了追求轻量化、低成本而选择小功率的电机，无法满足使用要求，电机长时间在过载情况下工作会降低其使用寿命，对电机和电池都是有很大的影响。

在选取电机功率时，应首先根据实际使用工况计算其功率大小，功率与电机的效

率 η 可以表示为：

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.1)$$

其中 P_{out} 为无刷直流电机的输出轴转动机械功率， P_{in} 为电机输入端的电输入功率，且 $P_{in} = UI$, U 为电机输入的电压， I 为电机输入端的电枢电流^[36]。

输入功率与输出功率之间存在差值，这个差值就是无刷直流电机在运行过程中的功率损失^[37]。产生功率损失主要有以下四个原因：

(1)电枢绕组铜耗 P_{cu} 。铜损在大功率电机总损耗中所占比重较大，降低铜损可以通过增加用铜量、减小电流密度、增加铁心长度来实现^[38]。若电枢电阻为 R ,则

$$P_{cu} = I^2 R \quad (2.2)$$

(2)铁心损耗 P_{Fe} 。铁心损在小功率电机中占比较大，高速 BLDCM 运行时由于定子铁心内磁场交变频率很高，产生的铁耗较大。铁心损耗包括涡流损耗和磁滞损耗，它与磁通量密度的平方成正比。

(3)机械损耗 P_j 。机械损耗主要与机械摩擦和气动阻尼因素引起的损耗。

(4)其余损耗 P_{qy} 。其余损耗是指电机系统中除上述三种损耗方式以外的损耗方式，其占比一般比较小，一般占总负载的 1%左右。

综上，无刷直流电机的功率损失 P_s 为：

$$P_s = P_{cu} + P_{Fe} + P_j + P_{qy} \quad (2.3)$$

由此可得无刷直流电机的效率 η 公式为：

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{cu} + P_{Fe} + P_j + P_{qy}}{P_{in}}\right) \times 100\% \quad (2.4)$$

根据以上公式，在挑选电机的时候应挑选功率损失低的，效率高的。

电机输出功率 P_{out} 与转速 n 和扭矩 T 的关系为：

$$P_{out} = \frac{T * n}{9.55} \quad (2.5)$$

由此可得，电机输入功率 P_{in} 为：

$$P_{in} = \frac{T * n}{9.55 * \eta} \quad (2.6)$$

式中： T 为电机的额定扭矩，单位Nm; n 为电机的额定转速，单位r/min。

根据助力自行车行业标准，助力自行车在行使速度超过 25km/h的情况下，助力

电机将不再提供助力输出，此时电机转速与扭矩输出均为 0，即极限助力工况下车轮的最大车速 $v = 416.67m/min$ 。

助力自行车尺寸为 26 寸，1 寸为 25.4mm，对应的车轮半径为 $r = 0.33m$ 。由线速度与转速公式：

$$n = \frac{v}{2\pi r} \quad (2.7)$$

式中： v 为线速度，单位 m/min ； r 为半径，单位 m ； π 为圆周率，一般取 3.14。

根据上述公式可得，助力自行车在极限助力工况下车轮的转速 $n_{vehicle}$ 为：

$$n_{vehicle} = \frac{v}{2\pi r} = 210r/min \quad (2.8)$$

中置式驱动系统输出端的轴心位于中轴处，中轴曲柄牙盘与后轮牙盘之间存在传动关系，其传动比为 i_1 。则

$$i_1 = \frac{z_1}{z_2} = \frac{n_{vehicle}}{n_1} \quad (2.9)$$

其中 z_1 是中轴曲柄牙盘齿数，为 44； z_2 是后飞轮牙盘齿数，为 14； n_1 为中轴曲柄牙盘的转速，将数据代入式 2.9 可得 $n_1 = 66.82r/min$ 。电机动力输出端经过齿轮减速箱再输出到中轴曲柄牙盘，其间经过减速箱减速，减速比为 $i = 40.34$ 。将其代入式 2.9，由此可得选取的驱动系统电机最高转速为 $n = i * n_1 = 2695.52r/min$ 。

根据电动助力自行车设计准则，要求电动助力自行车在最高助力行驶时最低扭矩不得低于 $2N \cdot m^{[10]}$ 。电机的效率选取 88%，将数据代入式 2.6 可得电机的功率 P_{in} 不小于 584W。

综上所述，根据实际情况，本设计选取的电机参数如下表 2-2 所示

表 2-2 电机主要技术指标

Table.2-2 Motor main specifications

技术指标	具体参数
额定电压	36V
最大转矩	2Nm
最大转速	3000r/min
效率	88%
尺寸	Φ 80×L45.5
电机功率	450W
重量	810g

2.2.3 电机传动系统设计

电机的转速较高，输出的扭矩较低，要带动整车以及骑手需要很大的驱动扭力，所以电机输出端到曲柄中轴间需要加减速齿轮装置^[39]。考虑到结构紧凑、传动效率高、平稳性、可靠性等因素，本驱动系统减速装置将采用三级齿轮减速，三级齿轮减速可以满足助力系统大扭矩输出的需求。前后置式的驱动系统是将减速装置内置于电机的轮毂内，也称为轮毂电机。轮毂电机整体较为笨重，而且车轮带动轮毂电机转动时定子与转子之间的相对转动产生了电磁感应力，使得在正常骑行无助力情况下骑行费力，与此同时，轮毂电机维修拆卸复杂困难。本驱动系统采用中置式齿轮减速装置，能排除电磁感应力导致骑行费力的现象，骑行体验感相比前后置式的驱动系统好。

工程塑料广泛应用于各个领域，这是由于塑料这种材料具备很多金属材料所不具备的特点，如质量轻、吸振和消声、比强度高、成形加工方便等^[40]。在一级传动中，电机转动轴转速快，噪声与振动大。故本设计的驱动系统减速箱一级传动中与电机输出端啮合的齿轮采用 POM 塑料齿轮。参考机械设计手册，本设计的减速箱各环节的技术参数如下表 2-3 所示，减速箱总传动比*i*为：

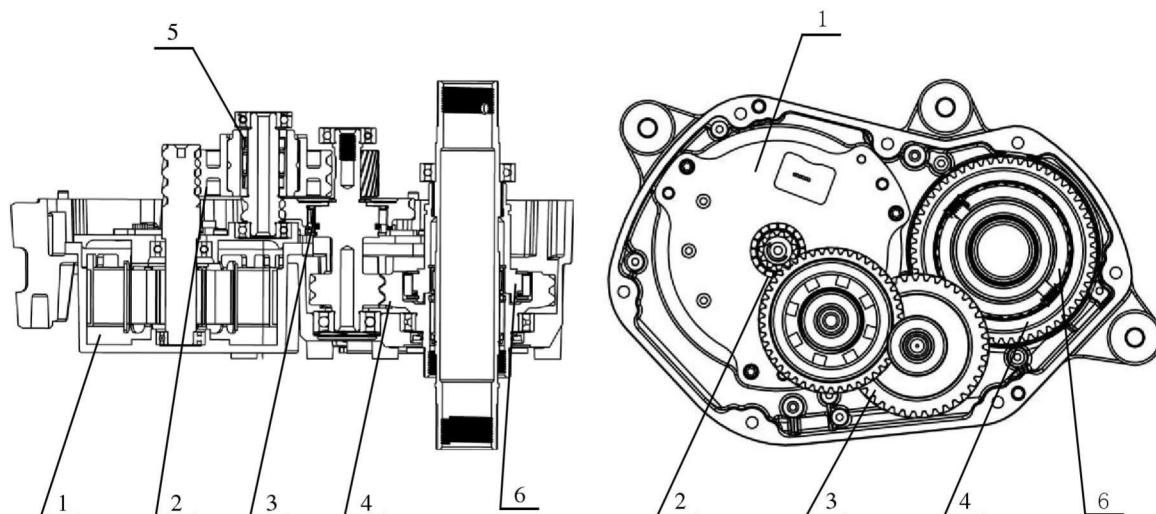
$$i = \frac{z_2 z_4 z_6}{z_1 z_3 z_5} \approx 40.36 \quad (2.10)$$

表 2-3 齿轮传动技术参数

Table 2-3 Gear transmission technical parameters

传动类别	齿数
一级传动电机轴 z1	11
一级传动 POM 齿轮 z2	46
二级传动齿轮 z3	11
二级传动齿轮 z4	39
三级传动齿轮 z5	23
三级传动齿轮 z6	57

在骑行过程中，会有一些异常情况会对减速箱造成破坏，如人反踩脚踏或者骑行路况冲击导致的脚踏反向抖动，反向的力会对齿轮造成冲击影响齿轮使用寿命。另一方面，助力自行车真正工作的电机转向为正转输出，如果电机由于故障或者控制失误导致反转，则会与人骑行踩踏力产生反向冲击力进而误伤骑手。基于上述考虑，在一级传动与三级传动中各增加一个单向离合器，两个离合器分别作用，可以分离开人踩踏反转和电机反转带来的冲击力，可以确保骑手安全性以及驱动系统的使用寿命。整个传统系统设计效果图如下图 2-5 所示。



1. 无刷直流电机 2.一级齿轮减速 3.二级齿轮减速 4.三级齿轮减速 5.单向离合器一 6.单向离合器二

图 2-5 电机传动系统图

Fig.2-5 Motor drive system diagram

2.3 驱动系统电路设计

硬件电路是助力自行车系统的基础，驱动系统硬件电路包括主控芯片电路、电机

驱动电路、供电电路。根据实际使用工况，硬件电路的设计要注意以下几点：（1）电机驱动及其控制算法的实现；（2）电池供放电管理（3）扭矩检测系统能量与信号接收（4）电机自身状态的检测。本文的控制系统包含信号采集以及电机驱动模块组成，其中信号采集模块包含踩踏扭矩采集模块、车辆速度采集模块、电池电量采集模块。助力自行车的整体控制逻辑如图 2-6 所示。

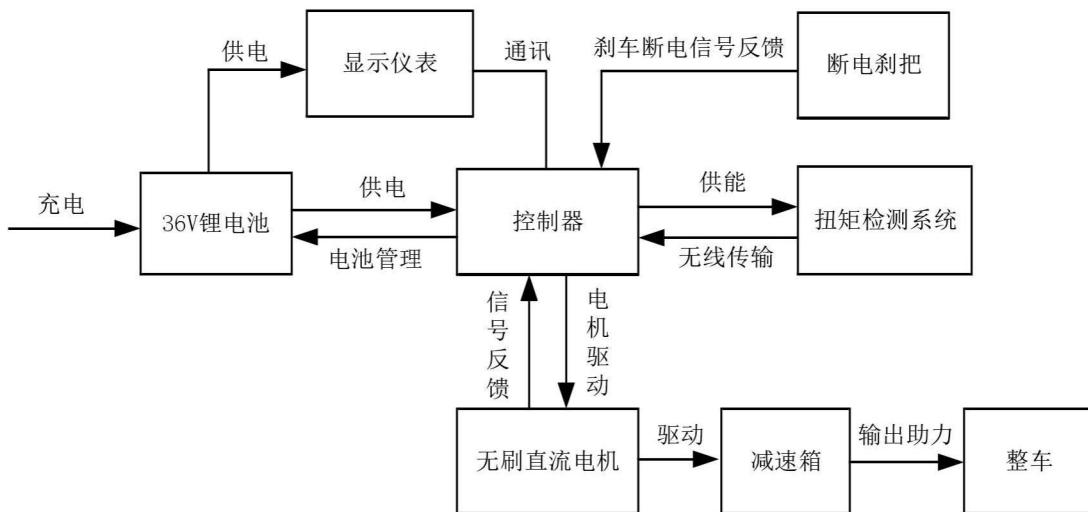


图 2-6 整车控制逻辑图

Fig.2-6 Vehicle control logic diagram

本设计的驱动电路设计包含主控芯片电路、电机驱动电路、供电模块电路三大模块。

2.3.1 主控芯片电路

由于本设计需要用控制器进行电机的控制、电池电量管理、传感器信号处理等功能，涉及到大量的浮点运算，而 DSP 相比于单片机具有复杂数字信号处理能力^[41-43]，因此使用 DSP 作为电动助力自行车控制器比 MCU 具有更大的优势，可以实现更好的助力控制。本文经过对比比较选取了瑞萨 R5F524TAADFM 作为主控芯片，该款芯片是一款高效强大的 32 位数字信号处理单元，能满足电机控制需求。其主要特点如下：

- (1) 内置 32 位 RX CPU 内核：最大工作频率可达 100MHz，165DMIPS 性能（以 100MHz 运行时），可变长度指令格式可大幅缩短编码，5 段流水线的 CISC 哈佛体系结构。
- (2) 内置独立看门狗定时器。

(3) 低功耗功能：4种低功耗模式。

(4) 工作电压：单 3.3V、单 5V、3.3V 产品能使用 5V 模拟电源。

(5) 内置最多 7 个通信接口：CAN（符合 ISO11898-1 标准）内置 32 个信箱、SCI (3ch)、异步模式（带噪声消除功能）、智能卡接口模式、I²C 总线接口支持 SMBus (1ch)、RSPI (1ch)、LIN (1ch)。

设计的驱动系统主控芯片原理如图 2-7 所示。

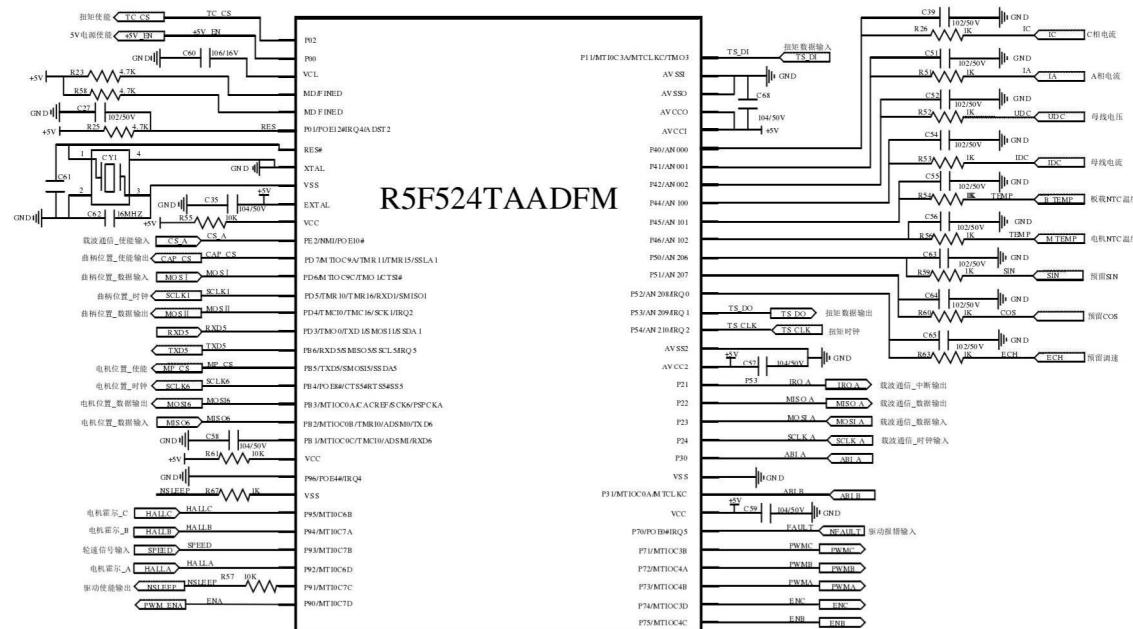


图 2-7 主控芯片原理图

Fig.2-7 Schematic diagram of main control chip

2.3.2 电机驱动电路

本设计中所使用的助力电机为三相无刷直流电机，它既具有积小、运行可靠、结构简单、维护方便、寿命长、价格便宜等优点，又具有运行效率高、调速性能好的优点，同时励磁无损耗^[44]。而三相无刷直流的使用需相应的 MOSFET 驱动芯片和三相逆变电路，因此本小节重点是 MOSFET 驱动芯片的选型和设计三相逆变电路。

助力系统最终的作用是输出电机助力，而电机 MOSFET 驱动在其中尤为重要。由于 MOSFET 是电气系统中最基本的部件之一，选择正确的 MOSFET 对整个设计是否成功起着关键的作用^[45]。MOSFET 驱动模块属于功率器件，直接与电机的三相相连，它的功能是将控制器发送过来的逻辑信号转化为电机电流电压控制信号。它的选择需要考虑电机额定功率、额定电压、额定电流等参数要求，同时响应速度应该尽可能快。

本设计选取瑞萨公司的MP6530作为无刷直流电机的MOSFET驱动模块。MP6530是一款设计用于三相无刷直流电机驱动应用的栅极驱动IC，它能驱动由6个高达60V N-通道功率MOSFET组成的三个半桥。同时还集成有稳压器（3.3V和5V），可以满足系统内微处理器或其他系统的供电需求。MP6530使用自举电容为高侧MOSFET驱动供电。内部涓流电流充电电路可以维持充足的栅极驱动电压，支持100%占空比工作。内部安全特性包括可编程过流保护、可调节死区时间控制、欠压锁定保护（ULVO）和过温保护。下图2-8为MP6530电机驱动芯片的原理图。

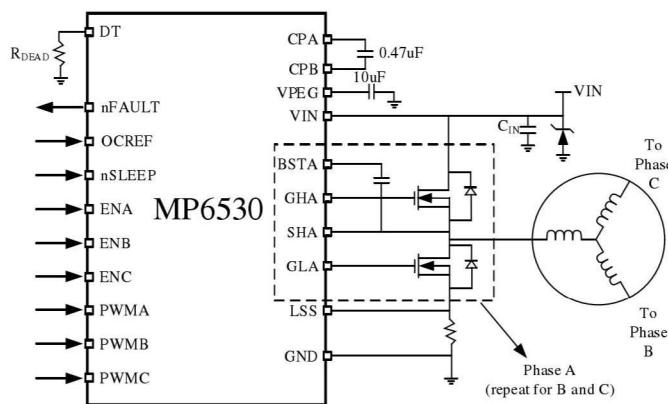


图 2-8 MP6530 电机驱动芯片原理图

Fig.2-8 Schematic diagram of MP6530 motor drive chip

2.3.3 供电模块设计

助力驱动系统使用的是36V锂电池供电，输出电流为12A，其与主控芯片、电机驱动芯片所需要的额定电压和额定电流不符合，硬件电路的稳定运行，需要稳定以及可靠的电源提供保障，所以需要电压转换模块。

本供电模块设计首先用DLW5ATN501MQ2L共模滤波器对外部锂电池电源输入进行滤波保护处理，使得电路没有外部干扰，提高电路稳定性。然后用MAX17504同步DC-DC降压器将电压降为8V，提供给外部设备使用，如车灯、仪表、断电刹把等。MAX17504具有内部补偿，可在任意输出电压下稳定工作，峰值效率高于90%，无需肖特基同步电路，提高效率、降低成本等优点。经过MAX17504降压器后电压为8V，但仍不能满足主控芯片与电机驱动芯片的电压5V要求，增加一个XC6209F502DR-G低压差线性稳压器使电压从8V降为5V，整体电路如下图2-9所示。XC6209F502DR-G具有高纹波抑制和低输入输出压差的特性，芯片内部包括一个参考电压源，一个误差运

算放大器,一个电流限制器,一个相位补偿电路和一个驱动三极管。输出稳定,并且具有良好的瞬态响应,即使负载变化也能保证电路稳定的工作。同时 XC6209 系列的 foldback 电路可为电流限制器和输出引脚提供短路保护。

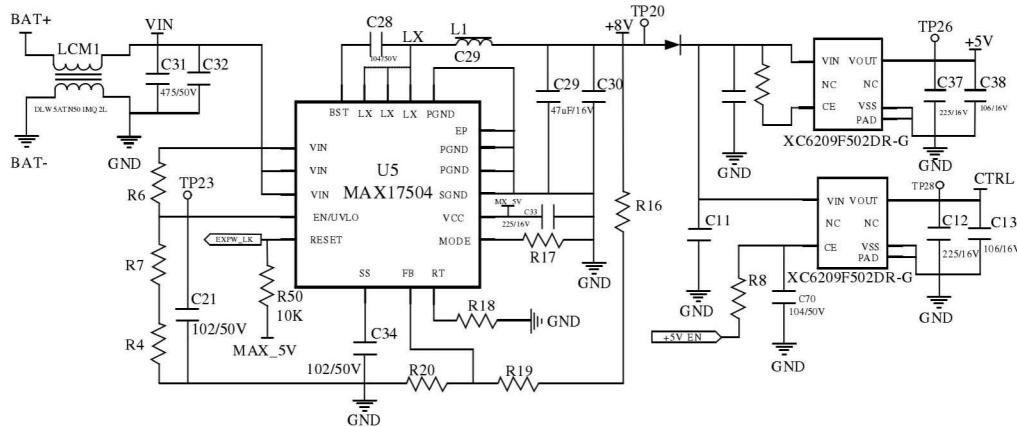


图 2-9 供电模块电路图

Fig.2-9 Power supply module circuit diagram

2.4 本章小结

本章完成了助力驱动系统的设计，为下一章扭矩检测系统做准备。首先阐述了整车的体系结构，选择了中置式的驱动系统布置方式。然后从电机类型、电机参数设计、电机传动系统设计三个方面进行助力驱动电机的设计。最后设计了驱动系统控制电路，设计了主控芯片、电机驱动、电压转换电路。

第三章 扭矩传感器设计

扭矩传感器是电动助力自行车的核心部件，本章将详细介绍本设计应变式扭矩传感器的工作原理以及磁耦合无线传输方案的设计。

3.1 扭矩传感器测量机理

电动助力自行车目前使用的扭矩检测方式多为逆磁致伸缩效应传感器、后轴爪勾传感器、扭簧式传感器、应变式传感器这四种。本文在对上述这四种传感器对比分析后，选择了应变式传感器。同时，结合电动助力自行车的实际情况，在对比三种驱动系统布置方式后选择了中置式布置方案。因此，本设计的扭矩传感器是一款中轴式扭矩传感器，该款传感器粘贴于脚踏中轴上，随中轴一起旋转，通过踩踏力与中轴扭矩传感器建立关系，从而实现扭矩检测目的。

3.1.1 扭矩传感器的工作原理

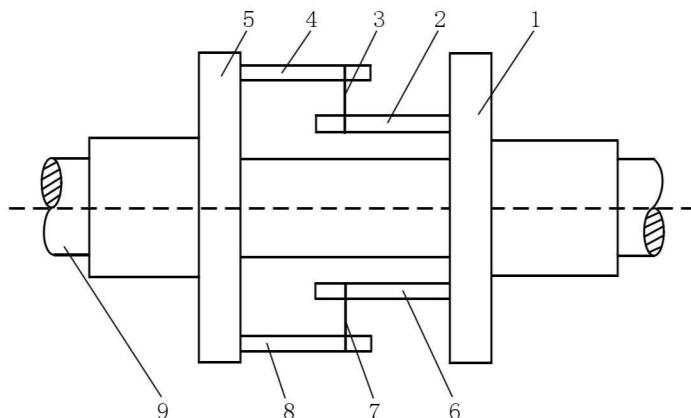
中轴式扭矩传感器实际上与传动轴扭矩测量方法类似，根据测量手段的不同，可以分为四类^[46]：

(1) 平衡方法：在机械系统中，当传动轴在扭矩作用下转动时，必然会存在与该扭矩大小相等作用方向相反的平衡扭矩。平衡力法就是根据测量该平衡扭矩的大小进而测量工作扭矩大小。该方法适工作空间比较大的动力机械中，这与助力自行车中置式驱动系统力求结构紧凑、轻量化的设计不想符合，不适用于助力自行车中轴扭矩检测。

(2) 吸收法：该种方法是通过能量转换方式测量，施加制动扭矩给传动轴，制动过程的制动力以热量的形式散发出来，通过测量该热量测量制动扭矩进而确定传动轴的扭矩大小。因助力自行车骑行过程中不可能制动式检测扭矩，这样会造成飞车等危险，所以该方式同样不适用于电动助力自行车中轴式扭矩检测。

(3) 扭转角检测法：该种方法是利用轴在扭矩作用下产生扭转变形角以及切应变角设计而成，它有光电式、振弦式、磁致伸缩式三种。以振弦式为例，如图 3-1 所示，被检测轴的两端装上套筒 1、套筒 5，在套筒支架 2、4 装上振弦 3，套筒支架 6、8 装上振弦 7，振弦安装的时候保留一定的预紧力。由材料力学可知，当待测转轴 9 在收到扭矩后，其相邻截面会存在扭转变形而产生扭转角，在扭转角的作用下其中一个

振弦受到拉力另外一个受到压力。在待测转轴 9 弹性范围内，其受到扭矩与扭转角成正比关系，而振弦的张力与扭转角成正比关系，从而建立起振弦张力与扭矩的关系。该传感器特点是结构复杂、灵敏度低，导致其测量准确度低、无法满足助力自行车扭矩检测的性能要求。



1.套筒 2.套筒支架 3.振弦 4.套筒支架 5.套筒 6.套筒支架 7.振弦 8.套筒支架 9.待测转轴

图 3-1 振弦式扭矩传感器

Fig.3-1 Vibrating wire torque sensor

光电式结构图如下图 3-2 所示，它是由一个扭轴和两个光栅盘组成，两光栅盘有相等数量的辐射状黑色部位。当扭轴受到转矩作用时，相邻两截面产生扭转角变形，使得光栅盘 1 与 2 形成错位产生一个透光口，导致光电元件有一调宽脉冲输出。当转轴转矩越大，转角变形越大，则透光口开度也就越大，因而光电流脉冲的宽度也就越大。

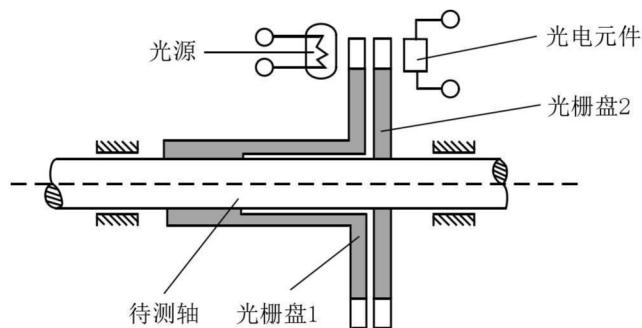


图 3-2 光电式中轴扭矩传感器

Fig.3-2 Photoelectric middle shaft torque sensor

脉冲电流平均值与转矩成正比，所以只要测量输出电信号值，便可以测量出外加扭矩值。光电式扭矩传感器属于非接触式扭矩测量，要求光源必须稳压供电。该种传感器由于其静态标定极为困难、结构复杂，且测试环境要求高，所以实际应用很少，

不适用于电动助力自行车中轴扭矩检测^[46]。

磁致伸缩式传感器是利用铁磁性材料的特性，当外力使铁磁材料产生形变时，导致其磁场发生变化，磁场各向异性。它原理如下图 3-3 所示，在待测转轴固定距离安装两个相互交叉的铁芯 1 和铁芯 2，在铁芯 1 上绕有励磁线圈，铁芯 2 上绕有感应线圈，测量电路与线圈组成磁桥，从而可以检测到因扭矩导致变形引起的磁场变化。通过建立磁场变化推导出扭矩大小，从而实现扭矩检测。磁致伸缩式扭矩传感器具有高灵敏度、结构简单、高稳定性等优点。但磁致伸缩式扭矩传感器测试法存在结构上无法克服的因素，如沿转轴圆周磁导率的固有误差等，因此磁致伸缩式扭矩传感器准确度很难提高^[46]。

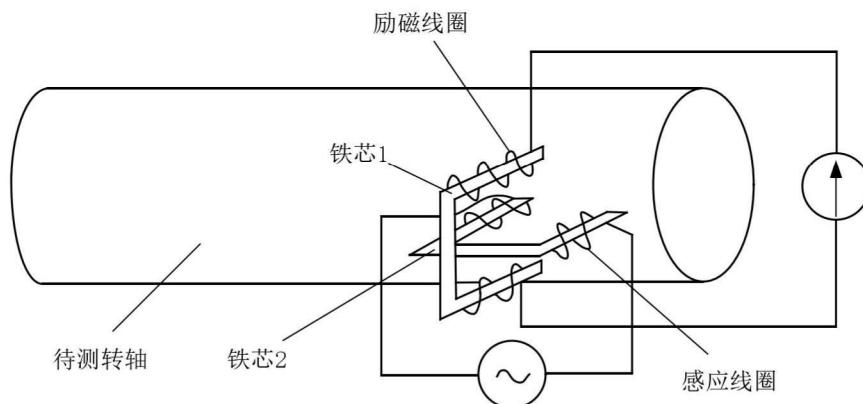


图 3-3 磁致伸缩式传感器

Fig.3-3 Magnetostrictive sensor

(4) 应变片检测法：应变片检测法是利用惠斯通电路电桥原理，检测应变片内部电阻变化。将金属应变片或者半导体应变片粘贴于传动轴表上，当传动轴有扭矩作用时产生变形，导致通电路电桥的四个电阻出现差异，通过建立扭矩与电路电桥信号变化检测扭矩大小。这种方法一般将扭矩传感器粘贴于传动轴后进行标准扭矩加载标定，拟合出扭矩与应变片输出电信号的关系，进而检测扭矩大小。应变式传感器具有结构简单，尺寸小，性能稳定可靠，精度高，变换电路简单，易于实现测试自动化和多点同步测量，远距测量，因此应用于很多领域^[19, 47]。

根据对比分析，本文采用应变片作为敏感元件，将其粘贴于脚踏中轴上，扭矩传感器。下文将对本设计扭矩测量原理以及无线信号传输进行分析。

3.1.2 扭矩测量理论分析

弹性体是转动轴扭矩检测的对象，是电动助力自行车中轴扭矩传感器的基础，正确选择使用弹性材料是扭矩传感器性能的关键。因钢材料的抗扭强度比较好，所以目前比较常用的传感器弹性元件材料主要为钢材料。钢材料种类多，本文根据助力自行车中轴扭矩传感器的特性，选取 20CrMoh 合金结构钢作为弹性元件

弹性轴弹性轴在受到扭转时发生形变，轴上会有应力和应变产生，其横截面会受到剪应力，如图 3-4 所示，该弹性轴横截面剪应力按照直线规律变化，在轴的中心处为零，轴表面处为最大^[46, 48]。

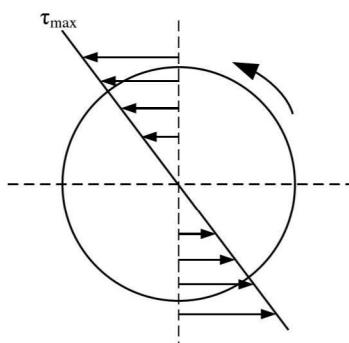


图 3-4 弹性轴横截面剪应力

Fig.3-4 Cross section shear stress of elastic axis

弹性轴横截面剪应力大小分布规律可以表示为：

$$\tau_{max} = \frac{M}{W_p} = \frac{16M}{\pi D^3(1 - \alpha^4)} \quad (3.1)$$

式中， τ_{max} 为扭转轴横截面上的最大剪应力； M 为扭转轴受到的外部扭矩； W_p 为扭转轴横截面的抗扭截面系数，实心圆轴抗扭截面系数为 $W_p = \frac{\pi D^3}{16}$ ，空心圆轴抗扭截面系数为 $W_p = \frac{\pi D^3(1-\alpha^4)}{16}$ ， D 为圆轴外径， d 为空心圆轴内径， $\alpha = \frac{d}{D}$ 。本设计的助力自行车为中置式助力系统，为追求轻量化，所以脚踏中轴采用中间镂空式空心圆轴，故抗扭截面系数为 $W_p = \frac{\pi D^3(1-\alpha^4)}{16}$ 。

在弹性轴的径向表面取一个单元体进行研究，如图 3-5 所示，在轴表面与轴心线成 45° 和 135° 的斜面上，均收到法向应力，该法向应力为主应力，它在数值上与横截面上的剪应力相等。在弹性轴收到扭矩作用时，轴面上的产生最大压应力 σ_1 和最大拉应力 σ_2 ，并且 $\sigma_1 = \sigma_2 = \tau_{max}$ 。

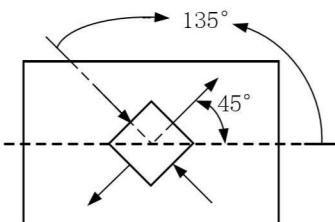
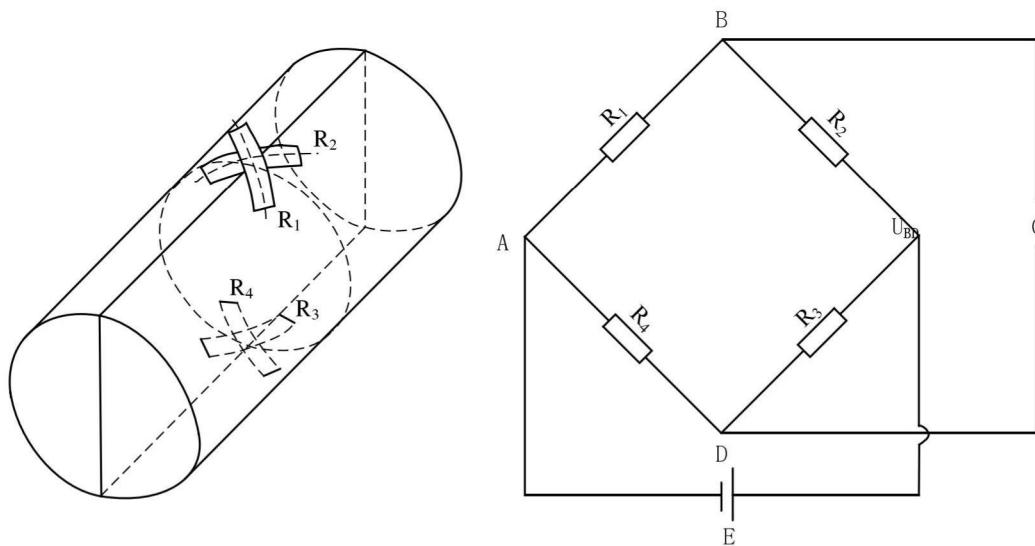


图 3-5 弹性轴表面法向应力

Fig.3-5 Normal stress on elastic shaft surface

因此在粘贴应变式传感器于中轴上时，应在与轴线呈 45°和 135°的两个方向上各粘贴一个应变片，使得电阻应变片受到最大拉应力和最大压应力的作用，这种粘贴法称为全桥应变片粘贴法，如下图 3-6(a)所示。



(a) 全桥应变片粘贴法

(b) 惠斯通电桥原理

图 3-6 应变片粘贴原理图

Fig.3-6 Schematic diagram of strain gauge pasting

全桥式应变粘贴法实际上是利用惠斯通电桥原理，如上图 3-6(b)所示，由四个电阻组成电桥电路，利用电阻的阻值变化进行测量电路参数的变化，进而测量粘贴处物理量（应变）的变化。

根据材料力学可知，应变片 R_1 和 R_2 方向的应变 ε_1 和 ε_2 分别为：

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{\sigma_2}{E} = \frac{1}{E} (\sigma_1 - u\sigma_2) \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - u \frac{\sigma_1}{E} = \frac{1}{E} (\sigma_2 - u\sigma_1) \quad (3.2)$$

上式中, E 为弹性模量, u 为泊松比。

因 $\sigma_1 = \sigma_2 = \tau_{max}$, 将其代入上式整理可得

$$\varepsilon_1 = (1 + u) \frac{\sigma_1}{E} = -\varepsilon_2 \quad (3.3)$$

由此可知, 粘贴于轴上的应变片 R_1 和 R_2 受到的应变绝对值大小相等。以应变片 R_1 为分析对象, 将式 3.1 代入式 3.3 中可得:

$$\varepsilon_1 = (1 + u) \frac{16M}{\pi D^3 E (1 - \alpha^4)} \quad (3.4)$$

整理可得扭矩 M 与应变 ε_1 关系为:

$$M = \frac{\pi D^3 E (1 - \alpha^4)}{16(1 + v)} \varepsilon_1 = C_1 \varepsilon_1 \quad (3.5)$$

式中, C_1 为常数, 其数值为 $\frac{\pi D^3 E (1 - \alpha^4)}{16(1 + v)}$ 。由此可以得出, 通过建立全桥应变片, 搭建惠斯通电路即可用应变片检测扭矩大小。

3.1.3 应变片测量原理

上述已经确定采用应变片粘贴于中轴上作为中轴扭矩传感器, 并对扭矩测量原理进行了分析, 下面将进行应变片的测量原理进行分析。

应变片由引线、覆盖层、基底、敏感栅四个部分组成, 其结构组成如图 3-7 所示, 基底上贴有敏感栅, 敏感栅上有覆盖层作保护作用, 敏感栅与引线焊接连接, 引线与外部通讯连接读取应变信号。

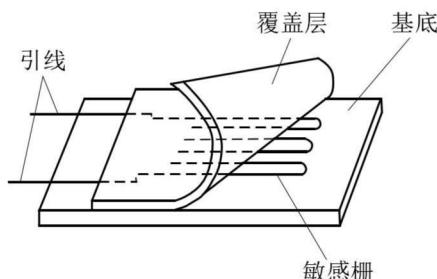


图 3-7 应变片结构原理图

Fig.3-7 Schematic diagram of strain gauge structure

当待测中轴在扭矩作用下受力变形时, 引起应变式传感器粘贴点发生应变, 导致其测试点上的粘贴基底发生形变, 敏感栅也随之变形, 由导体测量理论可知, 其电阻

值发生变化。敏感栅的材料为金属丝，应变效应是金属丝电阻大小随应变大小改变的一种物理现象。对于一根长为 L ，横截面积为 A ，电阻率为 ρ 的导体，由电阻定律可得：

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.6)$$

当导体受到如图 3-8 所示的力作用时，导体受力横向半径缩小 Δr ，纵向伸长 ΔL 对上式 3.6 进行全微分，得出导体受力变形后的电阻相对变化量为：

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} \quad (3.7)$$

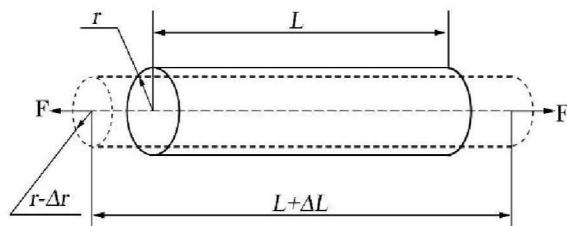


图 3-8 导体受力变形图

Fig.3-8 Stress deformation diagram of conductor

对于半径为 r 的导体， $A = \pi r^2$, 则：

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \frac{\Delta r}{r} \quad (3.8)$$

由材料力学可知，在弹性范围内：

$$\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon \quad (3.9)$$

$$\frac{\Delta r}{r} = -u\varepsilon \quad (3.10)$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = -\lambda E \varepsilon \quad (3.11)$$

式中， ε 为应变片的应变，数值很小，常为； u 为材料的泊松比； E 为弹性模量。

将式 3.8、3.9、3.10、3.11 代入 3.7 可得：

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2u + \lambda E)\varepsilon \quad (3.12)$$

令 $k = 1 + 2u + \lambda E$ ，则：

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad (3.13)$$

由上述分析的公式 3.5 将其代入上式，可得：

$$M = \frac{\Delta R}{R} \frac{C_1}{k} \quad (3.14)$$

由式 3.14 可知, 因 C_1 与 k 均为常数, 故可以得出转轴扭矩大小与应变片电阻变化量程正比, 因此采用应变片测量电动助力自行车骑行过程中的踩踏扭矩是可行的。

3.1.4 应变式传感器测量电路

根据前文分析, 可以知道本设计的中轴扭矩传感器粘贴必须在测点处与轴线呈 45° 和 135° 方向 (互相垂直) 分别粘贴一个应变片, 形成一对应变花。根据应变电测技术, 这种半桥两片检测扭矩的方法可以排除弯矩和拉力的干扰, 但是依然容易受到横剪力的影响, 影响测量的精度。但是半桥四片或全桥四片测扭矩, 均能排除横剪力的影响。所以应该按如图 3-6(a) 的方式进行贴片。

但由于相同侧的应变片, 如 R_1 与 R_2 会存在层叠效应, 层叠会导致两个应变片之间会相互影响, 使得应变片得应变检测能力降低。为解决层叠问题, 在满足使用要求与不影响应变片性能的情况下, 本文选取了 Sigmar 生产的 BSF120-2HA 应变片, 它的敏感栅排布方式如下图 3-9 所示, 敏感栅之间成 90° 排布, 解决了层叠排布问题。该应变片阻值为 120Ω , 灵敏系数为 $2.0 \pm 1\%$, 应变极限为 2% , 适用的温度范围为 -30°C 到 80°C , 具有温度自补偿功能, 可以满足电动助力自行车的使用需求。

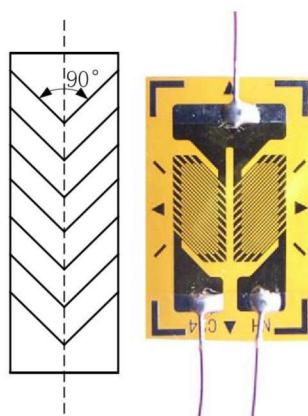


图 3-9 导体受力变形图

Fig.3-9 Stress deformation diagram of conductor

如下图 3-10 惠斯通应变测量电路所示, 四个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别粘贴在 A、B、C、D 之间, 构成全桥电路的四个桥臂。整个测量电路由一个输入端一个输出端组成, 输入端为电源输入电压 E , 外接于 A、C 端口上; 输出端为外部测量单元, 接于 B、D 端口上, 用于测量 BD 端的电压 U_{BD} 的大小。根据闭合电路欧姆定律可知, U_{BD} 与电

阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和输入电压 E 的关系为:

$$U_{BD} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) E \quad (3.15)$$

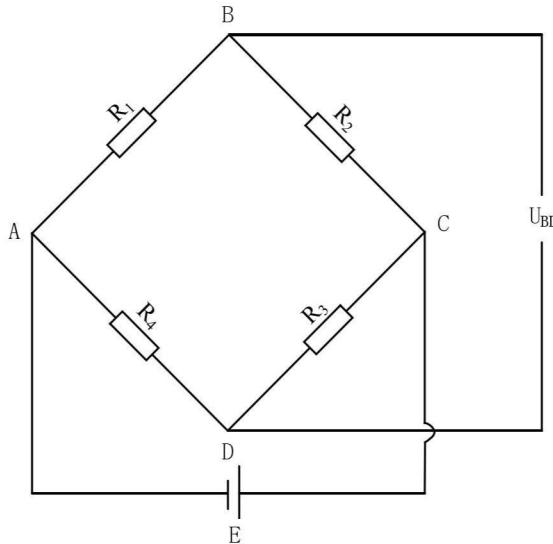


图 3-10 惠斯通电路电桥原理图

Fig.3-10 Whiston circuit bridge schematic diagram

当惠斯通电桥上的四个电阻大小相等时，输出电压 $U_{BD} = 0$ ，此时电桥处于平衡状态。当应变片粘贴的轴受到扭矩作用时，设此时的四个电阻变化量分别为 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 ，此时的输出电压为：

$$\begin{aligned} U_{BD} + \Delta U_{BD} &= \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right) E \\ &= \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} E \\ &= \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \frac{E}{4} \end{aligned} \quad (3.16)$$

由于本设计采用的两个应变片的四个电阻均相等，即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ，同时，由应变片粘贴位置以及上述的应力分析可知 $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4$ ，代入上式可得，扭矩作用产生应变下电桥的电压输出为：

$$U_{BD} + \Delta U_{BD} = \frac{\Delta R}{R} E \quad (3.17)$$

根据上文式 3.13 推导结果可知，传动轴上扭矩作用下的应变大小与应变片的电阻变化成正比，但是电阻的变化是不能直接测量出来的，所以引入惠斯通电桥电路测量

电路因电阻阻值变化引起的电压量变化。式 3.17 可以明显看出电压变化量跟电阻也是成正比的，因此通过惠斯通电桥可以将电阻变化量 ΔR 转化为可测得电压信号。

3.2 传感器信号传输方式

上述已经对扭矩测量部分进行了原理以及设计分析，由于本设计采用的是中轴式扭矩传感器，将应变片粘贴于中轴上，骑行过程中随中轴一起转动。如果将导线连接到旋转部件上，机械部分无限制地连续旋转 360°，就会有导线缠绕的问题。转动中轴与固定于驱动系统上的电路板之间的信号与能量传输，属于动静件间的传输，因此需要对信号以及能量传输进行设计。

3.2.1 导电滑环传输

传统的相对转动构件之间的信号传输主要是靠导电滑环来实现，导电滑环也称为集电环，属于电接触滑动连接的应用范畴。导电滑环是通过导电环的滑动接触、静电耦或电磁耦合，在固定件与转动件间传输信号的部件。导电滑环这一精密输电装置可以实现两个相对转动体之间图像、数据信号及动力的传递，尤其适用于连续旋转、并需要把功率或数据从固定位置传送到旋转位置的场所^[49]。

导电滑环的原理如下图 3-11 所示，它由转动件、电刷组件、固定件组成，它的每一个部件都影响着导电滑环的信号传输性能。滑环芯轴上的材料通常是紫铜、黄铜或金材料等导电性能好的材料，导电环的表面需要镀上多层贵金属，起到耐磨降噪的作用。由于导电滑环工作时电刷与滑环组件一直处于运动摩擦接触，所以要求电刷材料的耐磨性能要非常好，弹性压力对滑环的压强要适中。同时滑环的同轴度应足够好，不应出现偏心晃动等现象，同时还要考虑电屏蔽性能，防止电磁干扰。

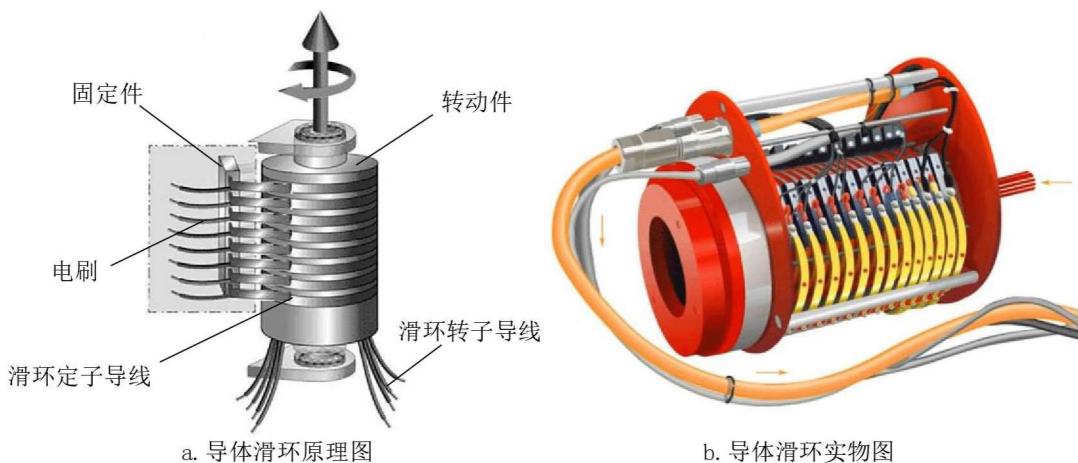


图 3-11 导电滑环原理图

Fig.3-11 Schematic diagram of conductive slip ring

导电滑环运行过程中存在力、热、电多场耦合作用，对电刷存在磨损消耗，其主要磨损现象为黏着磨损和磨粒磨损，并伴随着脆断、微动磨损和电气腐蚀等现象^[50, 51]，上述现象都会对导电滑环的寿命以及使用的设备造成影响。导电滑环由于是接触式摩擦传输信号，所以会伴随噪音的产生。与此同时，导电滑环一般需要大的占用体积，需要供电的功率也比较大，不适用于电动助力自行车的使用工况。

3.2.2 无线传输

由于传统电能传输方式存在可靠性、安全性、便利性不足等问题，近年来国内外学者研究新的无线电能传输方式解决传统传输方式的不足^[52, 53]。借助电磁场或者电磁波进行能量传输的技术叫做电能传输^[54]。无线电能传输是指在电能传输过程中，无需导线等中间介质物理接触的一种传输方式^[55]。目前比较成熟的无线电能传输技术主要有电场耦合式、电磁辐射式、磁场耦合式。电磁辐射式主要是通过无线电波和激光进行电能传输，磁场耦合式主要是通过感应式和谐振式进行电能传输。电磁辐射式能量传输技术具有定向性高、辐射大和效率低特点，能够实现大功率与长距离的传输功能，主要针对无塔电视台、空间太阳能电站等传输应用^[56]。考虑到结构紧凑以及成本性，电场耦合式和电磁辐射式并不适用于电动助力自行车中轴传感器的无线传输模块中，故采用磁场耦合式作为无线传输模块。

2007 年 MIT 的研究团队在《Science》上发表论文，提出了磁耦合谐振式能量无线传输技术。MIT 研究团队指出该技术在两米多的距离能让 60W 的灯泡正常工作，实现了中等距离的电能传输^[57-59]，其实验装置如下图 3-12 所示。在能量无线传输技术中，

磁耦合谐振式能量无线传输由于传输的效率较高、距离适中、抗干扰性强和对人体安全性高等优点得到了研究学者的重视。自此，该能量无线传输技术开始了爆发式的发展，成为国内外医学、工业、学术界研究热点，日本、德国等诸多国家都对能量无线传输技术进行了探索^[60, 61]。



图 3-12 MIT 团队实验装置图

Fig.3-12 MIT team experimental device diagram

我国在能量无线传输领域的起步时间较晚，不过随着高校以及各研究机构的不断研究，该技术在我国发展迅速，应用领域涉及到家电、汽车、手机等领域。在高校研究中，如中国矿业大学^[62]、南京理工大学^[63]、哈尔滨工业大学^[64]、重庆大学^[65]、南京邮电大学^[66]等高校都对无线传输研究作出了很大的贡献。

3.2.3 磁耦合谐振式无线传输

磁耦合谐振式无线传输模块主要由谐振耦合回路、电源、负载三个部分组成，组成图如下 3-13 所示。对于本设计，电源模块为主控板将 36V 锂电池降压 5V 后流到谐振电路的电压，电源端包含整流滤波电路和谐振电路。谐振耦合回路主要由定转子板上的互感线圈和相关的补偿电路组成^[55]。电源端经高频 DC/AC 逆变电路转换成工作所需的高频交变电流，注入到由耦合线圈和谐振补偿电容组成的耦合谐振网络中，二次侧谐振网络接收到交变电流后经过整流滤波电路后输出稳定功率给负载供电^[67]。

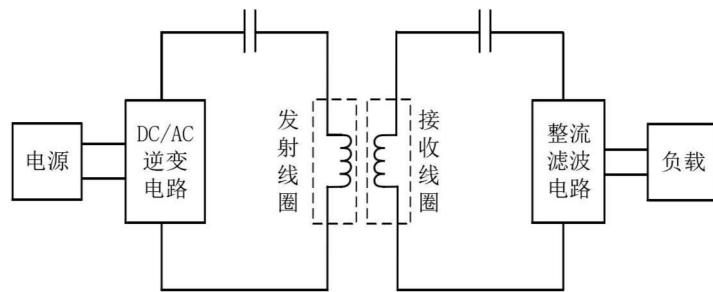


图 3-13 磁耦合谐振式原理图

Fig.3-13 Schematic diagram of magnetic coupling resonance

由于扭矩传感器固定于中轴上且随中轴一起转动，因此主控 MCU 无法通过线束的方式与扭矩传感器实现数据交互，因此使用无线通讯方式实现能量与信号的传输，选择通过线圈耦合的磁耦合谐振式无线传输方式。扭矩传感器在检测到骑行扭矩后，通过惠斯通电桥电路转化和数字信号处理之后产生了数字电压信号，通过脉冲宽度调制将电压信号转变成交变的磁场，在线圈中形成一个具有频率信息的磁场量，通过耦合电路传输完成后，在接收端经电压比较电路将正弦信号的频率信号再转换成电压信号（方波），再通过模数转换得到电压信号（数字），将信号输出^[68]。

无线通讯的部分主要分为两部分，定子板部分和转子板部分。定子板固定在电机外壳上，主控板通过线束与定子板实现通讯，通讯方式为标准的 SPI，通讯速率 32Kbit/s。转子板与中轴式扭矩传感器一起随脚踏中轴转动，转子板与扭矩传感之间通过 FPC 连接通讯。原理框架图如图 3-14 所示：

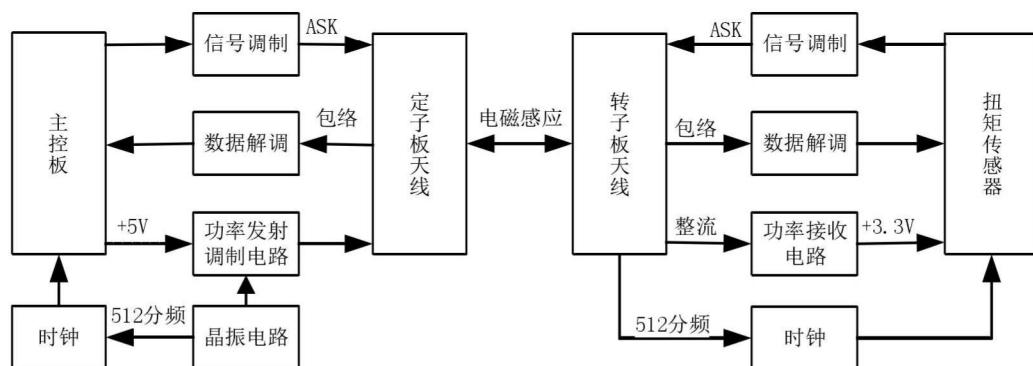


图 3-14 本设计原理框图

Fig.3-14 The design principle block diagram

主控板向定子板提供+5V 电源，定子板通电后，振荡电路的晶振开始工作，产生基频正弦信号（载波信号），经过计数器进行 512 分频产生 32K 的时钟信号，该信号用于定子板与主控板之间 SPI 的通讯时钟。主控检测到时钟后，发送 500HZ 的使能信号，同时开始发送读取传感器数据的信号至定子板，定子板调制电路将数据调制到定子板天线线圈上面，定子板天线会将数据耦合至转子板天线，转子板解调电路将数据解调出来发送给扭矩传感器。转子板上的天线将数据耦合至定子板天线上，定子板连接给转子板的传感器提供电能。扭矩传感器在扭矩作用下会产生扭矩信号，扭矩信号经过数据的调质，反发送给定子板，最终完成信号与能量的交互。

3.3 磁耦合谐振式无线传输电路分析

3.3.1 电路总体架构

根据本设计的无线传输方案，电路分为三个模块，分别是电源电路、转子板电路、定子板电路。

电源电路为定子板与转子板供电，其一般由整流电流、滤波电路和稳压电路组成。

定子板与转子板同心，主要给转子板提供电能并与之进行数据交换，定子板将高频的交流信号耦合至转子板。定子板主要包括六大模块：基频产生模块、时钟电路、功率发射电路、数据调制电路、数据解调电路、谐振电路。

转子板主要是将定子板耦合的电能提供给扭矩传感器，并将定子板发送的模拟信号转化为数字信号传输给扭矩传感器，同时将扭矩传感器检测的扭矩数字信号转为模拟信号发送给定子板。转子板与扭矩传感器之间通过 FPC 连接，固定在中轴上并随中轴转动。转子板主要包括四大模块：功率接收电路、时钟电路、数据调制电路、数据解调电路。

3.3.2 电源电路

电动助力自行车使用的是 36V 锂电池，通过线束给转动中轴传感器供电是不现实的，所以采用了无线电传输技术。电池供电首先经过一个全桥整流电路，然后再经过稳压电路。锂电池输出的 36V 电压变为传感器需要的 3.3V 电压，需要一个降压的过程。

理论上在定子板发射线圈稳定的情况下，转子板接收线圈的电路电压应该也是稳定的。但是在实际的传递过程中，接收线圈的电压值还是有所波动。对于电压波动，本文在电路中增加了整流稳压的部分，将接收的电压先进行整流稳压，再通过电路进行电压输出。

转子板端将能量接收线圈的交流信号转换为直流信号，通过线性稳压器(LDO)降压至+3.3V 为扭矩传感器电路提供电能。其中全桥整流电路采用的是 RSX071VYM30FH，线性稳压器(LDO)采用的是 TAR5S33U。传感器电源电路如下图 3-15 所示。

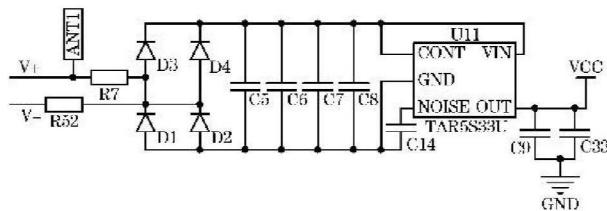


图 3-15 电源电路图

Fig.3-15 Power circuit diagram

3.3.3 定子板电路

定子板与转子板同心，主要给转子板提供电能并与之进行数据交换，定子板将高频的交流信号耦合至转子板。定子板主要包括六大模块：基频产生模块、时钟电路、功率发射电路、数据调制电路、数据解调电路、谐振电路。下面将对这 6 个部分进行模块的工作原理。

时钟电路是使电路的模块的任何工作都按照一定时间顺序进行的一种振荡电路。时钟电路利用计数器进行分频，计数器应用为清零法，清零口由主控 MCU 控制。清零的信号为 500HZ 占空比 50% 的方波，高电平时计数器一直处于清零状态，此时时钟输出一直为零，此时不进行数据交换。低电平时，产生 32K 的时钟，此时与主控板进行数据交换，每次数据交换包含 32bit。具体电路图如下图 3-16 所示。

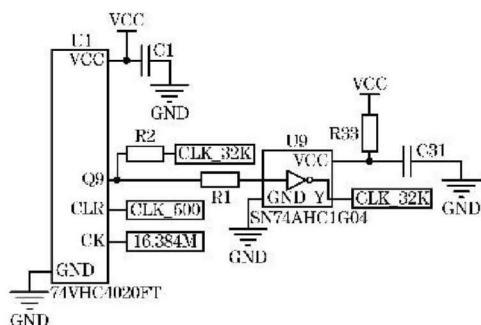


图 3-16 时钟电路

Fig.3-16 Clock circuit

功率发射电路功率发射电路将晶振模块的 16.384MHz 方波信号通过 6 路非门并联进行电流放大，放大后经过一级 LC 滤波滤掉高次谐波，将 16.384MHz 方波信号转换为 16.384M 正弦信号，调送至定子板线圈。功率发射电路如下图 3-17 所示。

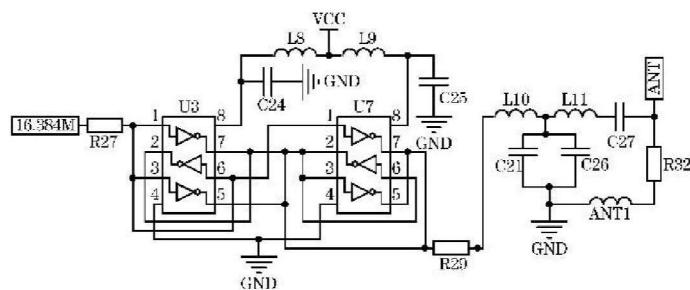


图 3-17 功率发射电路

Fig.3-17 Power transmitting circuit

数据调制电路包括：载波信号生成电路，用于生成调制正弦信号；调制单元，与信号放大电路连接，还与载波信号生成电路连接，用于通过载波信号对放大信号进行调制，得到调制信号；发射线圈与调制单元连接，用于产生调制信号。调制电路采用幅移键控（ASK），通过双 MOS 管开关来改变振荡器 ANT1 线圈回路的阻抗，使 ANT1 网络的信号幅值发生变化，主要电路原理图如下图 3-18 所示。

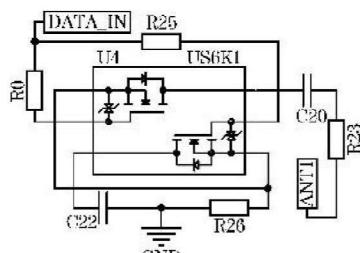


图 3-18 数据调制电路

Fig.3-18 Data modulation circuit

解调电路是将耦合后幅值不相等的模拟信号转换为数字信号，该信号包括扭矩传感器返回的扭矩数据与温度数据。解调电路主要包括五部分，倍压电路、包络检测电路、LC 滤波电路、直流偏置电路、参考电压电路。主要电路原理图如下图 3-19 所示。

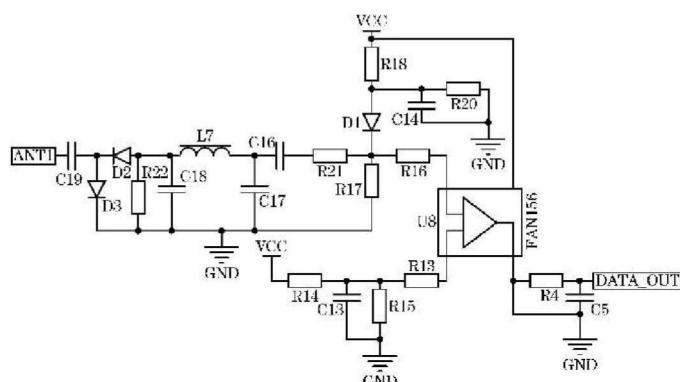


图 3-19 解调电路

Fig.3-19 Demodulation circuit

谐振电路结构为LC震荡电路，谐振电路将发射边震荡器 ANT1 的电压幅值增大，目的提高定子板与转子板之间的能量传输的效率。ANT2 通过 PCB 底层的绘制图案形成的，ANT2 绘制天线的线宽 0.15mm，间距 0.2mm，线圈平均直径 52mm，电路结构如下图 3-20 所示。

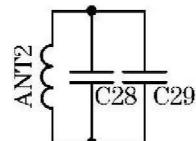


图 3-20 谐振电路

Fig.3-20 Resonant circuit

3.3.4 转子板电路

转子板主要是将定子板耦合的电能提供给扭矩传感器，并将定子板发送的模拟信号转化为数字信号传输给扭矩传感器，同时将扭矩传感器检测的扭距数字信号转为模拟信号发送给定子板。转子板与扭矩传感器之间通过 FPC 连接，固定在中轴上并随中轴转动。转子板主要包括六大模块：功率接收电路、时钟电路、数据调制电路、数据解调电路。

功率接收电路用于接收定子板耦合的电能以及模拟信号，其电路图如图 3-21 所示。功率接收电路由转子板底层的线圈 ANT3 与电容 C29 串联之后再与 C28 并联。C29 为隔直电容，C28 为并联的谐振电容。

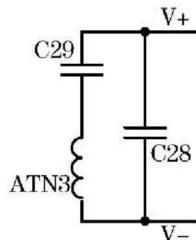


图 3-21 功率接收电路

Fig.3-21 Power receiving circuit

数据调制电路将传感器输出的数字信号转为模拟信号，利用双 MOS 管改变 ANT3 线圈上的耦合电容的大小，使谐振点偏移基频谐振点，具体电路如下图 3-22 所示。

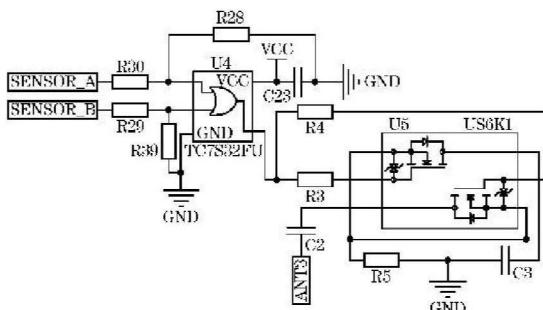


图 3-22 数据调制电路

Fig.3-22 Data modulation circuit

数据解调电路是将 ANT1 耦合至 ANT3 网络上幅值不相等的模拟信号转换为数字信号，该信号是主控 MCU 发给传感器的读取指令。解调电路主要包括四部分，倍压电路、包络检测电路、直流偏置电路、参考电压电路，电路图如下图 3-23 所示。

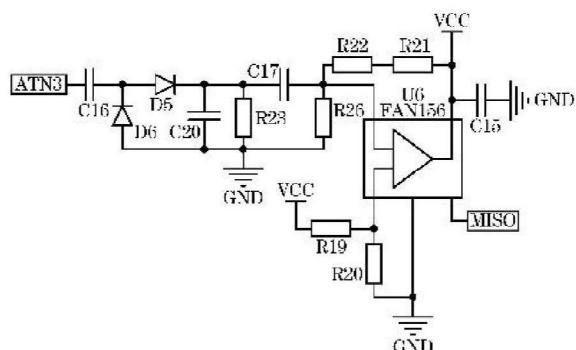


图 3-23 数据解调电路

Fig.3-23 Demodulation circuit

3.4 传感器性能实验

3.4.1 传感器性能指标

上述已对传感器进行了原理以及检测电路的设计与分析，现需要在使用扭矩传感器前进行性能指标的测定。扭矩传感器的性能指标是指传感器不随时间变化的扭矩作用下的输出特性，主要有线性度、迟滞、重复性等性能指标^[69]。

线性度表示扭矩传感器的输出特性与拟合的曲线的偏离程度，即最大偏移量与满量程的百分比表示^[70]，其公式为：

$$A_L = \frac{\Delta L}{y_{FS}} \times 100\% \quad (3.18)$$

式中, ΔL_{max} 输出特性曲线与拟合的曲线最大差值; A_L 为线性度; y_{FS} 为满量程情况下的传感器输出。

迟滞是指扭矩传感器在扭矩作用下加载过程中，正反形成那个传感器曲线间的不

重合度。正反行程是指扭矩传感器标定或者使用过程中扭矩值正向递增和反向递减。

其公式为：

$$A_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (3.19)$$

式中， ΔH_{max} 为正反行程下传感器的最大差值； A_H 为传感器的迟滞误差； y_{FS} 为满量程情况下的传感器输出。

重复性是扭矩指传感器在同一单因素实验条件，扭矩加载作用下的传感器输出值是否能保持一致性的程度。其表现为数据输出值的偏离，偏离程度越大，重复性越差。测量过程中，一般测量两次及以上。其计算公式为：

$$A_R = \pm \frac{\Delta R_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (3.20)$$

式中， ΔR_{max} 为同一测量扭矩值下多次测量的极差值； A_R 为传感器的重复性误差； y_{FS} 为满量程情况下的传感器输出。

扭矩传感器在使用过程中的误差是由多方面造成的，如粘贴工艺是否可靠、传感器标定方法的合理性、传感器自身误差等因素。本设计只考虑传感器标定过程中的线性度、迟滞、重复性三者误差，该三者误差对中轴式扭矩传感器的总误差为：

$$A_S = \sqrt{A_L^2 + A_H^2 + A_R^2} \quad (3.21)$$

3.4.2 传感器测试装置及标定实验

在完成了扭矩传感器的原理以及电路设计后，根据设计制作传感器的实物，实物效果如下图 3-24 所示。

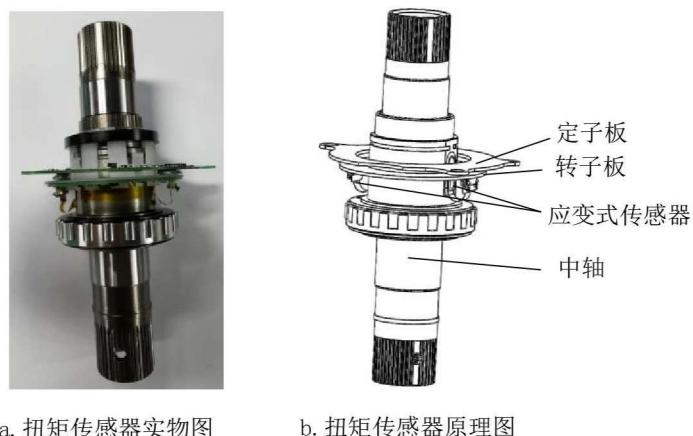


图 3-24 中轴式扭矩传感器实物图

Fig.3-24 Physical drawing of middle shaft torque sensor

传感器在使用前需要对传感器进行标定，标定是指施加标准的扭矩到中轴上，使粘贴在中轴上的应变片产生形变，惠斯通电桥电路检测出电压信号，建立起电压信号的与扭矩大小的关系。由扭矩公式可得：

$$T_a = mgl \quad (3.22)$$

式中， m 为标准砝码的重量，单位为 kg ; g 为重力加速度，一般取 9.8m/s^2 ; l 力臂的长度，单位为 m 。

根据扭矩公式，本设计采用标准长度的力臂下增加标准砝码的方式测量。同时，由于金属存在热胀冷缩的物理效应，未免室温不恒定对扭矩传感器标定过程中造成影响，本设计将在恒温箱中进行。标定过程中需要不断加砝码，所以砝码不能盘不能放置于恒温箱内，整体设备的效果如下图 3-25 所示。在标定过程中，先将中轴式扭矩传感器放置于恒温箱内，设置温度大小后，等待温度到达设定点后静止一段时间避免中轴局部温度不均衡。等待恒温箱温度静止完成后，在外部左侧的力臂砝码盘上加载砝码，加载砝码时要注意保持加载后力臂保持水平状态，可以通过角度盘读取是否为水平状态。

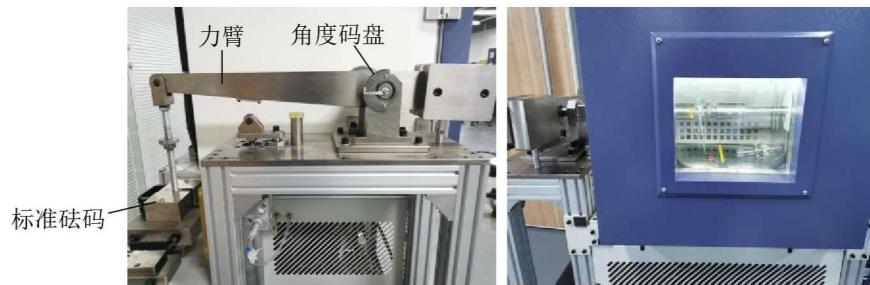


图 3-25 标定装置图

Fig.3-25 Calibration device diagram

本次实验标定的扭矩范围设置为 0 到 100Nm，等扭矩间隔分别加载扭矩，测量扭矩传感器的输出电压。实验结果如下图 3-26 所示，明显看出扭矩传感器的线性度非常好，说明扭矩传感器的方案设计合理，适用于电动助力自行车扭矩检测。

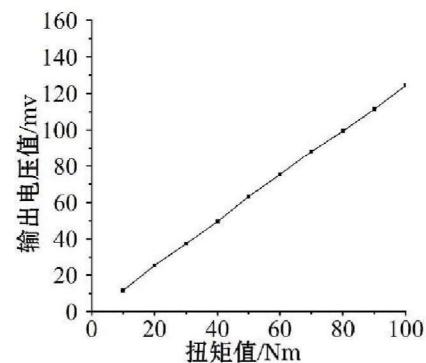


图 3-26 扭矩传感器标定曲线图

Fig.3-26 Calibration curve of torque sensor

3.4.3 传感器性能测试

在完成标定实验后，对传感器进行性能测试，性能测试包括误差分析和实车验证两个模块。

误差测试实验中，采用等间距加载扭矩，检测出输出电压大小，根据图 3-25 拟合的传感器标定曲线图读取传感器检测到的实际扭矩大小。整个实验测试正反向加载各三次，得出的传感器数据如下表 3-1 所示

表 3-1 扭矩传感器误差测试数据

Table.3-1 Torque sensor error test data

加载扭矩值 Nm	正行程 1	反行程 1	正行程 2	反行程 2	正行程 3	反行程 3
0	0	0	0	0	0	0
10	10.05	10.14	10.16	10.08	10.34	10.11
20	20.22	20.16	20.11	20.35	20.49	20.13
30	30.18	30.35	30.14	30.07	30.25	30.25
40	40.26	40.61	40.33	40.14	40.21	40.16
50	50.25	50.14	50.18	50.36	50.16	50.15
60	60.60	60.39	60.26	60.15	60.73	60.25
70	70.38	70.61	70.14	70.43	70.19	70.22
80	80.34	80.14	80.32	80.06	80.15	80.94
90	90.77	90.15	90.65	90.99	90.24	90.88
100	100.65	100.34	100.16	100.43	100.78	100.21

对上述表 3-1 的数据进行处理，分别求出平行程的平均值、反行程的平均值、正反行程的总均值、总均值与加载扭矩的差值、正反行程均值的差值，处理后的数据如下表 3-2 所示。

表 3-2 扭矩传感器误差测试数据

Table.3-2 Torque sensor error test data

加载扭矩 值 Nm	正行程 均值	反行程 均值	正反行程 总均值	加载扭矩值与总均值之差 绝对值	正反行程均值的差 值绝对值
0	0	0	0	0	0
10	10.18	10.11	10.15	0.15	0.07
20	20.27	20.21	20.24	0.24	0.06
30	30.19	30.22	30.21	0.21	0.03
40	40.27	40.30	40.29	0.29	0.03
50	50.20	50.22	50.21	0.21	0.02
60	60.53	60.26	60.40	0.40	0.27
70	70.24	70.42	70.33	0.33	0.18
80	80.27	80.38	80.33	0.33	0.11
90	90.55	90.67	90.61	0.61	0.12
100	100.53	100.33	100.43	0.43	0.20

根据上文的线性度定义可知，线性极限误差为 ΔL_{max} 为 $0.61Nm$ 。根据式 2-18 可知，线性度误差为：

$$A_L = \frac{\Delta L}{y_{FS}} \times 100\% = \frac{0.61}{100} \times 100\% = 0.61\% \quad (3.23)$$

根据上文的迟滞误差定义和表 3-2 可知, 正反行程下的最大差值 ΔH_{max} 为 $0.27Nm$ 。

根据式 2-19 可知, 迟滞误差为:

$$A_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{max}}{y_{FS}} \times 100\% = \pm \frac{1}{2} \frac{0.27}{100} \times 100\% = \pm 0.135\% \quad (3.24)$$

对于上述表 3-1 与表 3-2 的数据, 每一个正行程加载扭矩, 其值与三个正行程的均值均有一个差值, 最大差值的绝对值为 $0.37Nm$; 每一个反行程加载扭矩, 其值与三个反行程的均值均有一个差值, 最大差值的绝对值为 $0.52Nm$ 。根据上文的重复性误差定义和表 3-2 可知, 正反行程下的重复性绝对误差 ΔR_{max} 为 $0.52Nm$ 。根据式 2-20 可知, 重复性误差为:

$$A_R = \pm \frac{\Delta R_{max}}{y_{FS}} \times 100\% = \pm \frac{0.52}{100} \times 100\% = 0.52\% \quad (3.25)$$

由此可知, 本设计的中轴式扭矩传感器的标定测试结果误差为:

$$A_S = \sqrt{A_L^2 + A_H^2 + A_R^2} = 0.82\% \quad (3.26)$$

根据实验结果可知, 该扭矩传感器选型设计合理, 电路结构适用于无线传输模块, 能很好满足电动助力自行车的使用要求。

3.5 本章小结

本章首先对扭矩检测原理进行分析, 然后阐述应变式扭矩传感器作为电动助力自行车扭矩检测模块的应用优势。阐述了应变式扭矩传感器的工作原理以及惠斯通电路电桥的测量原理。在扭矩传感器供电以及信号传输问题上, 采用了磁耦合谐振式无线传输代替传统的导电滑环传输信号以及能量, 详细描述了本设计的电路原理。在扭矩传感器设计完成后, 完成了传感器性能实验设计以及数据分析, 通过数据分析扭矩传感器的可行性。

第四章 助力算法设计

电动助力自行车的控制算法直接控制助力自行车助力系统的扭矩输出，控制算法的好坏直接影响着骑手的骑行舒适度。本章将在传统助力控制算法的基础上对控制算法进行优化，推导出整车动力学模型，采用 MATLAB/simulink 软件建立仿真模型，对本设计的控制进行仿真验证可行性。

4.1 传统助力算法

目前关于电动助力自行车的研究，大多集中在扭矩检测模块的研究上，涉及到扭矩检测后如何实现精确助力的研究比较少。市场上的电动助力自行车的助力算法大体上分为两类，一类为不适用扭矩传感器进行扭矩检测，根据算法模块感知扭矩大小，如吴战国^[24]提出采用速度作为控制决策依据的算法。这种依据速度感知助力的算法，缺陷较大，如在上坡时由于费力导致踩踏频率降低，助力输出低，感受不到助力；在下坡时速度快，容易造成高速助力，安全隐患大。

另一类为定助力比助力，即根据检测到的扭矩大小，按照给定的比例输出等比例的助力扭矩来实现助力。目前大多数产品采用的是日本标准的电动助力自行车定助力比助力算法，该算法在速度 0-15km/h 时助力比为 1:1，即人踩踏扭矩多少电机输出多少扭矩。当车速度大于 15km/h 时，速度每增加 1km/h，助力功率减少 1/9，总体的助力原理如下图 4-1 所示。

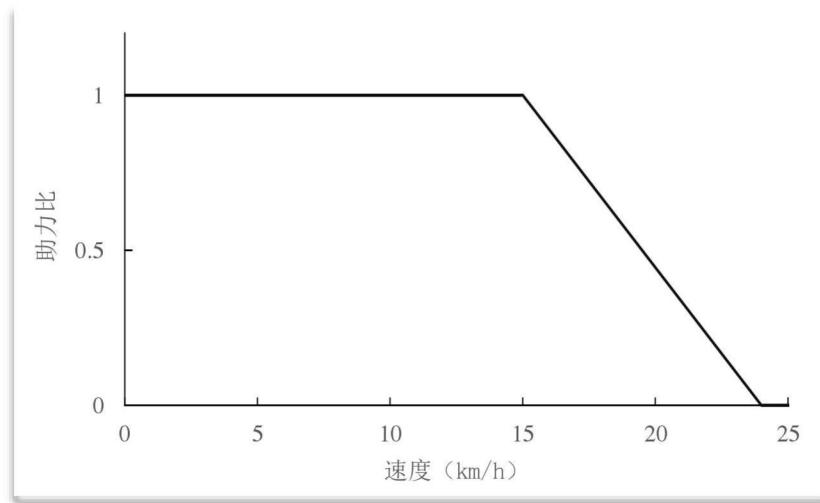


图 4-1 定助力示意图

Fig.4-1 Schematic diagram of constant boost

传统的定助力比助力方式单纯依靠扭矩传感器检测的扭矩值作为助力依据，并且按照一定比例输出助力，显然是不科学的。这种助力方式没有考虑道一些特殊的路况，如陡坡、颠簸、下坡、起步等情况，同时没有将外部因素考虑进去，如骑手自身的质量和环境阻力，缺乏骑行灵活性。

还有一种助力方式是采用人力+电力混合助力的方式，这种助力方式要维持正常助力，需要不断踩踏并且持续输出更大的踩踏力，这可能会给骑行者带来更大的疲惫感，根本达不到助力的初衷^[71]。典型的产品是我国现有市场上大部分的轻便型电动车，这种电动车大多为代驾型车，即可油门式又可混合助力，实际上是一种‘伪助力自行车’。

显然，现有的电动助力自行车的助力算法并不能满足未来智能化、舒适化的助力自行车行业要求。本章从定助力比控制算法的基础上，引入模糊控制，对骑行过程中的扭矩与速度进行解耦，划分为几个区域，制定模糊规则表，智能控制助力输出。

4.2 模糊控制理论及控制原理

4.2.1 模糊控制理论起源

1965 年，美国加利福尼亚大学的 Zadeh L A^[72]教授发表了一篇论文，首次提出模糊数学理论，其后在控制算法领域发展成为模糊控制算法。由于模糊控制算法具有模型依赖性不强、鲁棒性高、容错力高、运行速度快等特点，受到了学术界研究人员的广泛关注^[73]。1975 年，Mamdani^[74]学者在首次将模糊控制算法应用于工业领域中，并且效果很好，从此以后模糊控制得到了迅速发展，许多高校团队投入研究当中来，其被广泛应用于工业生产、医疗、经济、军事等领域。

4.2.2 模糊控制系统结构

模糊控制系统一般由输入输出模块、执行机构、被控对象、反馈装置、模糊控制柜后器五个部分组成，其模块结构如下图 4-2 所示。

在五个模块组成中，模糊控制器为该控制系统的中心，它的设计合理性将直接影响该控制系统的性能。模糊控制器由模糊化、模糊推理、模糊规则库、清晰化四个部分组成^[75]。

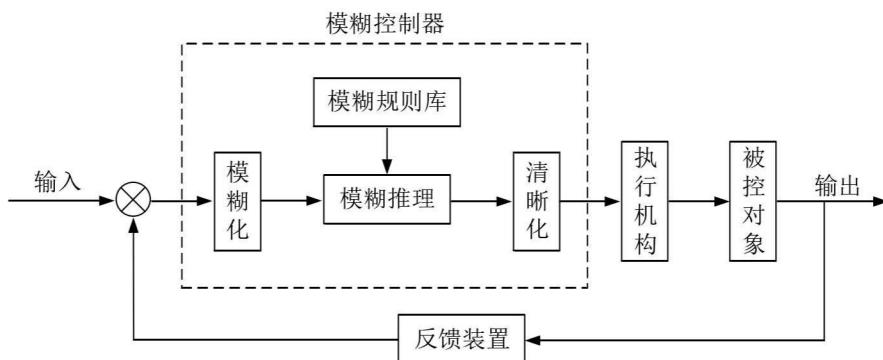


图 4-2 模糊控制系统结构图

Fig.4-2 Structure diagram of fuzzy control system

模糊化：采用模糊化的语言对模糊控制系统的精确输入量进行模糊转换描述，输入量包含外界的参考输入、系统反馈的输出或状态等参数。模糊化的过程为：（1）将输入量进行变换处理，转换成模糊控制器需要的输入量。（2）将上述已经处理的输入量进行论域范围划分。（3）将已经划分论域范围的输入量模糊处理，这时候精确的输入量已变为模糊量，并将模糊量用模糊集合来表达。

目前常用的模糊化方法主要有线性划分法和非现行划分法，线性划分法与非线性划分法的主要区别是它们划分的论域范围是否均匀，均匀的为线性划分法，不均匀的为非线性划分法。

模糊推理：模糊推理具有模拟人进行模糊概念推理的能力，根据模糊规则库的规则进行推理得出相应的结果。

模糊规则库：知识库中含有应用领域中的众多知识，它是人类专家根据应用工程领域的工程实践建立起来的专家知识库，里面含有许多模糊输出规则，推理语言采用“if-then”语句进行判断。

清晰化：由于经过模糊推理得出的结果为模糊量，不能应用于控制系统当中来，所以必须对模糊推理的输出结果进行“反模糊化”，将其转变为控制系统能精确认别应用的精确控制量。常用的清晰化方法主要有重心法和最大隶属度函数法。最大隶属度函数法是在推理结果中选取隶属度最大的数，若多个数出现且均为最大则选取平均值，作为精确控制量。重心法是取隶属度函数与坐标轴所围成的面积的重心作为精确的控制量，实际应用中多选取输出范围内多个离散量的重心。最大隶属度函数法在选

取的时候只关注最大值，而忽略了其他重要的值，因此其精度较低。重心法相对于最大隶属度函数法精度更高，输出的精确控制量更合理。

4.3 整车系统动力学建模

4.3.1 助力自行车动力学模型

电动助力自行车在道路上行使时，整车受力分析如下图 4-3 所示，骑行过程中的主要驱动力为人踩踏力 F_{man} 和驱动系统电机助力 F_a 。骑行过程中的阻力共有 3 个，分别是骑行过程中的风阻 F_w 、重力沿坡度方向的分量 F_G 、前后轮胎与地面间的滚动摩擦力 F_f 。

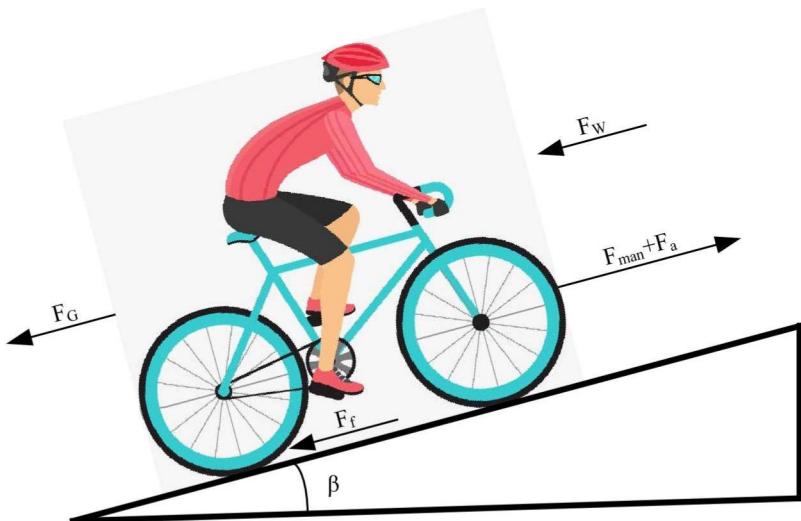


图 4-3 整车受力图

Fig.4-3 Force analysis diagram of the whole vehicle

根据上图 4-3 的受力分析，由牛顿第二定律可得：

$$F_a + F_{man} - F_G - F_f - F_w = (m + \frac{I_q}{r^2} + \frac{I_h}{r^2}) \frac{dv}{dt} \quad (4.1)$$

上式中， m 为整车和人的总质量； I_q 为前轮的转动惯量； I_h 为后轮的转动惯量； r 为车轮的半径。左边等式为整车系统的合外力大小，右边为总质量与加速度乘积。

对于骑行过程中的风阻 F_w ，其表达式为：

$$F_w = \frac{1}{2} C_w \cdot \rho_{air} \cdot S \cdot (V_{vehicle} + V_{wind})^2 \quad (4.2)$$

式中， C_w 为空气的阻力系数，与整车系统的迎风面积、形状、粗糙度有关； ρ_{air} 为空气的密度，干燥的空气为 1.293g/L； S 为骑行过程中整车系统（包括人）的迎风面积的大小； $V_{vehicle} + V_{wind}$ 为运动系统中整车系统与空气的相对速度。

整车沿斜面上的重力分量 F_G , 其计算公式为:

$$F_G = mgsin\beta \quad (4.3)$$

式中, β 为斜坡的角度, 当整车在平路上行使时, $\beta = 0$ 。

整车前后轮胎与地面间的滚动摩擦力 F_f , 其计算公式为:

$$F_f = \mu mgcos\beta \quad (4.4)$$

式中, μ 为行使时路面对轮胎的动摩擦因素, 与轮胎气压、实地路况、轮胎的材料与结构形式有关。

为让式 4.1 更加简便明了, 令:

$$M = m + \frac{I_q}{r^2} + \frac{I_h}{r^2} \quad (4.5)$$

$$F_Z = F_G + F_f + F_W \quad (4.6)$$

式 4.1 简化后的动力学表达式为:

$$T_a + T_{man} - T_Z = Mr^2 \frac{d\omega}{dt} \quad (4.7)$$

4.3.2 电机动力学模型

本文采用的助力电机为无刷直流电机, 无刷直流电机的电力特性公式为:

$$U_t = U_f + iR = K_f \cdot \omega_d + iR \quad (4.8)$$

机械特性公式为:

$$T_d = iK_d = J \frac{d\omega_d}{dt} + B\omega_d + T_f \quad (4.9)$$

上式 4.8 和 4.9 所描述的物理参数如下表 4.1 所示:

表 4-1 电机特定公式物理参数

Table 4-1 Specific formula and physical parameters of motor

参数变量	具体物理意义
U_t	驱动电机的放大电压值
i	电机的电枢电流
R	电机电阻
K_f	电机反电动势常数
U_f	电机反电动势
K_d	转矩系数
T_d	电磁转矩
J	旋转惯性矩系数
B	电机摩擦系数
T_f	电机负载转矩
ω_d	电机角速度

4.3.3 整车系统模型搭建

前面两小节已经将整车外部与电机的动力学模型求解出来，现需要将二者结合，搭建起整车系统动力模型。

助力系统从无刷直流电机输出端到曲柄牙盘端经过一个减速增矩的减速箱，减速输出扭矩 T_a 与无刷电机输出扭矩 T_f 的关系为：

$$T_a = iT_f \quad (4.10)$$

式中， i 为驱动系统减速装置的传动比， $i = 40.34$ 。

联立式 4.9、式 4.10 可得：

$$K_d \frac{U_t - K_f \omega_d}{R} = J \frac{d\omega}{dt} + B \omega_d + T_f \quad (4.11)$$

将式 4.7、式 4.10、式 4.11 三式联系求解，可以得出

$$Mr^2 \frac{d\omega}{dt} = iK_d \frac{U_t - K_f \omega_d}{R} - ij \frac{d\omega_d}{dt} - iB \omega_d + T_{man} - T_z \quad (4.12)$$

无刷直流电机输出扭矩需经过减速比为 i 的减速箱，驱动系统到整车后轮需要经过传动比为 i_1 的中轴曲柄牙盘与后轮牙盘。所以驱动系统在输出助力时，电机输出轴角速度 ω_d 与后轮角速度 ω 关系为：

$$\omega_d = \frac{i}{i_1} \omega \quad (4.13)$$

联立式 4.12 与 4.13, 并整理出与 ω 有关的动力学表达式为:

$$T_{man} - T_Z + \frac{iK_d}{R} U_t = \left(Mr^2 + \frac{i^2}{i_1} J \right) \frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{i^2 K_d K_f}{i_1 R} + \frac{i^2}{i_1} B \right) \omega \quad (4.14)$$

化简式 4.14 后可得:

$$T_{man} - T_Z + F U_t = G_1 \frac{d\omega}{dt} + H_1 \omega \quad (4.15)$$

$$\text{式中, } F = \frac{iK_d}{R}; \quad G_1 = Mr^2 + \frac{i^2}{i_1} J; \quad H_1 = \frac{i^2 K_d K_f}{i_1 R} + \frac{i^2}{i_1} B.$$

可以得出, 本设计的整车系统动力学传递函数框图为:

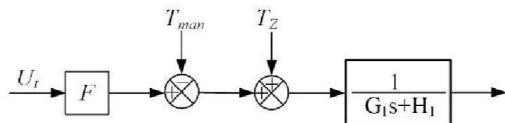


图 4-4 传递函数框图

Fig.4-4 Transfer function block diagram

4.4 模糊控制器设计及 simulink 仿真搭建

现有电动助力自行车采用的是定助力比助力, 其在陡坡或者起步时由于扭矩输出不足或者扭矩输出不足以适应实时路况, 导致爬坡困难或者起步困难等, 严重影响骑行过程的舒适性。为解决上述问题, 本文提出采用模糊控制原则, 在传统定助力比情况下, 实时检测异常情况, 异常情况采用模糊控制的规则库输出助力, 提高舒适度。

本节首先对控制系统进行分析, 确定输入、输出量和模糊控制器的结构; 然后, 对模糊化接口、模糊控制规则和去模糊化接口进行设计; 最后对模糊控制器进行模拟和仿真。

4.4.1 模糊控制器设计

(1) 模糊控制器结构

常用的模糊控制器结构, 按维数一般分为一维、二维以及三维模糊控制器, 维数大小是根据输入变量的个数确定的。一维模糊控制器只包含一个输入变量, 在调控系统时只考虑了偏差值的变化, 因此系统的动态性能没有得到较好的改善。三维模糊控制器包含三个输入变量, 三个变量控制会使系统控制得更精确, 但由于结构复杂, 会使推理运算时间延长。电动助力自行车实时检测扭矩的频率较高, 传感器控制板读取数据为 1 秒 100 个数据, 要求实时检测, 若采用三维模糊控制器, 将影响扭矩检测性

能。二维模糊控制器的控制变量比一维模糊控制器的控制变量要多，其控制精度明显比一维模糊控制器要高。与此同时，二维模糊控制器控制变量比三维模糊控制器的变量少，模糊规则比三维模糊控制器简单，电动助力自行车的控制系统相对比三维的要简单，因此采用二维模糊控制器是最适合的。

(2) 模糊控制器变量

由于骑行过程中异常输出助力与扭矩变化大小和车速度有关，因此本模糊控制器的输入变量为扭矩变化率 ΔT 与车速度 v 。扭矩大小采用本设计的扭矩检测系统实时检测骑行者踩踏扭矩 T 的大小，车速度 v 采用速度传感器采集车速。扭矩变化率 ΔT 的表达式为：

$$\Delta T = \frac{T(t+1) - T(t)}{T(t)} \quad (4.16)$$

式中， $T(t + 1)$ 为当前时段的扭矩传感器检测到骑手踩踏扭矩大小； $T(t)$ 为前一时间段的扭矩传感器检测到骑手踩踏扭矩大小。

输出变量为电机在定助力比基础下的扭矩增益 $\Delta\gamma$ ，其对应的表达式为：

$$T_f(t + 1) = (1 + \Delta\gamma)T_f(t) \quad (4.17)$$

式中， $T_f(t + 1)$ 为当前驱动系统电机应当输出的扭矩大小； $\Delta\gamma$ 为定助力比基础下的扭矩增益； $T_f(t)$ 为上一时间段的电机输出扭矩大小，实际上，对于定助力比（通常情况下，采用 1:1 助力），上一时间段的电机输出扭矩大小为扭矩传感器检测到的扭矩 T 大小。

(3) 变量模糊化

上述已经对变量进行了相关的定义与阐述，本节将对上述三个变量进行模糊化。

由于三角形函数具有计算量少、形状简单、灵敏度高等优点，故本模糊控制器采用三角形隶属度函数^[75]，并采用线性划分法划分模糊论域。

在骑行过程中，理论上扭矩变化率 ΔT 的变化范围为 $(-\infty, +\infty)$ ，根据骑手的性质，人是不能踩踏到无穷大的扭矩变化，实际上正常骑行状态下骑手的扭矩变化率范围为 $(-0.9, 0.9)$ ，但 $(-0.9, 0)$ 范围内的扭矩变化实际为踩踏扭矩减少阶段，不存在起步、爬坡等特殊状态，不需要定助力比下扭矩增益提供，故扭矩变化率 ΔT 的模糊论域划分为 $(0, 0.9)$ 范围。模糊子集的数量一般选取 3 到 10 个^[76]，综合考虑，本设计的扭矩变化率

论域划分为 5 级模糊子集：5 级模糊子集：{负大，负小，零，正小，正大}，记作{NB, NS, ZO, PS, PB}，对应的取值特征点为 {0,0.225,0.45,0.675,0.9}。扭矩变化率 ΔT 的隶属度函数曲线如下图 4-5 所示。

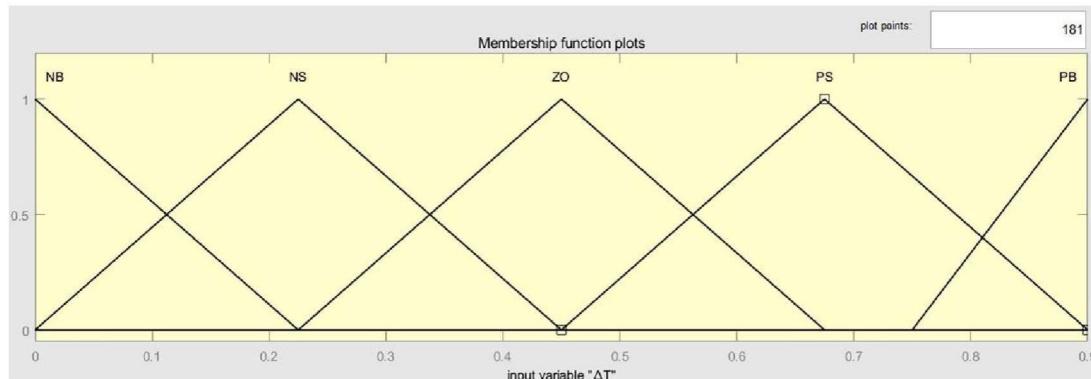


图 4-5 扭矩变化率 ΔT 的隶属度函数曲线

Fig.4-5 Membership function curve of torque change rate ΔT

由于电动助力自行车的速度 v 达到 25km/h 时将不再输出助力，所以车速变量值范围为 0~25。将其划分为 5 级模糊子集：{负大，负小，零，正小，正大}，记作{NB, NS, ZO, PS, PB}，对应的取值特征点为 {5,10,15,20,25}。电动助力自行车的速度 v 的隶属度函数曲线如下图 4-6 所示。

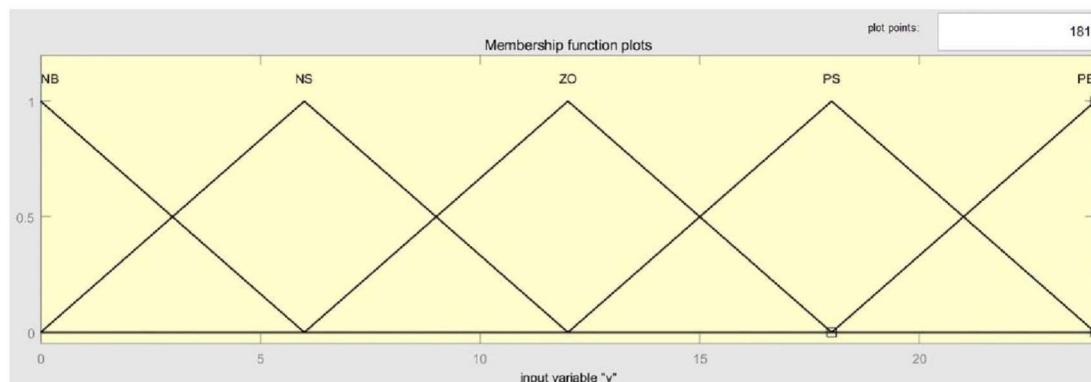
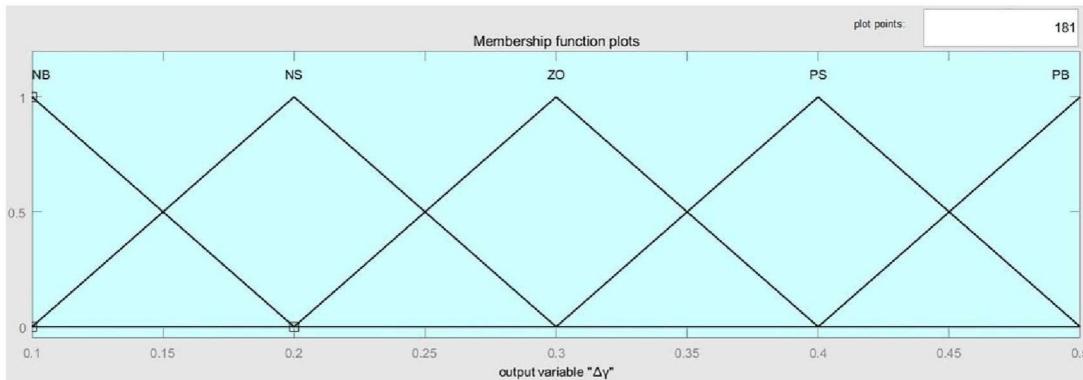


图 4-6 车速 v 的隶属度函数曲线

Fig.4-6 Membership function curve of vehicle speed v

输出变量扭矩增益 $\Delta\gamma$ 为电机输出扭矩增加的百分比值，因考虑安全性能，故扭矩增益 $\Delta\gamma$ 不可过大，将其设置范围为 0~0.5。将其划分为 5 级模糊子集：{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}，记作{NB, NS, ZO, PS, PB}，对应的取值特征点为 {0.1,0.2,0.3,0.4,0.5}。扭矩增益 $\Delta\gamma$ 的隶属度函数曲线如下图 4-7 所示。

图 4-7 扭矩增益 $\Delta\gamma$ 的隶属度函数曲线Fig.4-7 Membership function curve of torque gain $\Delta\gamma$

(4) 模糊规则制定

对于骑行起步阶段，车速处于 NB 论域内，而扭矩变化率 ΔT 处于 PS 或者 PB 论域内，此时按照定助力比输出助力扭矩难以达到省力起步作用，需要助力电机输出大的扭矩增益 $\Delta\gamma$ ，扭矩增益 $\Delta\gamma$ 论域范围应在 PB 内。同理，当整车处于陡坡阶段，在入坡前速度往往处于 ZO 或者 PS 论域内，为保持速度此时在定助力比基础上应给予扭矩增益，但不宜过大。除上述两种情况外，在平路骑行若扭矩徒增而车速较低时，此时骑手目的为加速，同样施加定助力比基础上扭矩增益 $\Delta\gamma$ 。因此，所建立的模糊规则表如下表 4-2 所示：

表 4-2 模糊规则表

Table.4-2 Fuzzy rule table

v	NB	NS	ZO	PS	PB
ΔT	NB	ZO	ZO	PS	PB
NS	ZO	ZO	PS	PS	PB
ZO	NS	ZO	ZO	PS	PS
PS	NB	NS	NS	ZO	ZO
PB	NB	NB	NS	NS	NS

4.4.2 simulink 模糊控制器仿真搭建

在 MATLAB 中启动 simulink，并打开 Fuzzy 模块，将模糊控制器的输入输出变量分别导入窗格中，如图 4-8 所示。

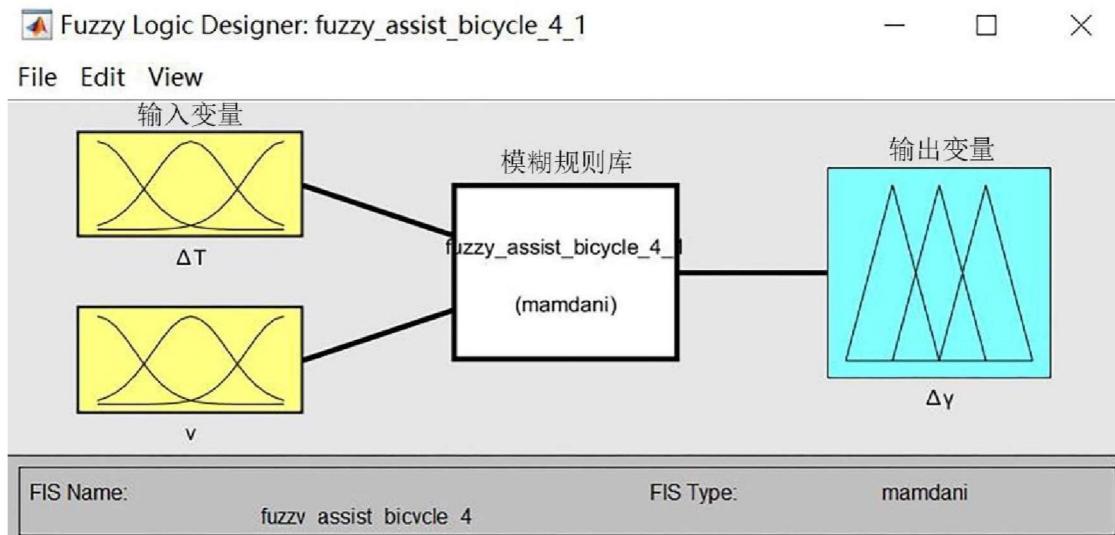


图 4-8 模糊推理系统编辑器

Fig.4-8 Fuzzy inference system editor

设置完相关参数后，在模糊规则库输入 25 条推理规则，编写的模糊规则如图 4-9 所示。

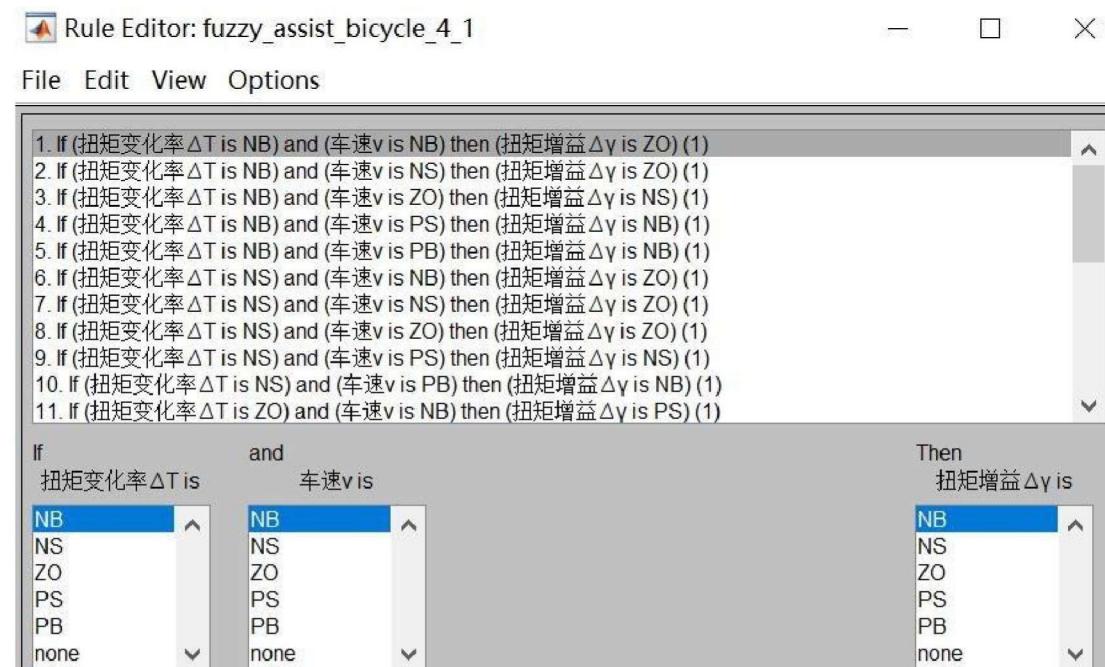


图 4-9 模糊控制规则库

Fig.4-9 Fuzzy control rule base

在 MATLAB 中导出模糊规则三维曲面，如下图 4-10 所示。

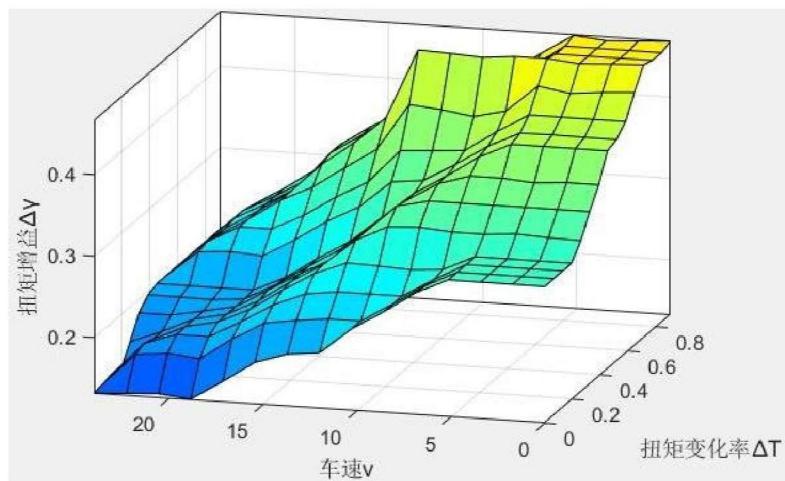


图 4-10 模糊控制规则特性曲面

Fig.4-10 Fuzzy control rule characteristic surface

4.4.3 simulink 整车仿真搭建

前文推导出式 4.15 整车动力学方程式，现只需在 simulink 仿真模块中加入电机控制模块。在直流无刷直流电机中，由于其励磁磁场和电枢磁场的空间磁动势相互正交，所以其控制系统简单、有效。在电机控制中，常用到如图 4-11 的三种坐标系，分别为 ABC 三相静止坐标系、 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系、dq 两相旋转坐标系。从 ABC 三相静止坐标系变换到 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系变换称为 Clarke 变换，从 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系变换到 dq 两相旋转坐标系称为 Park 变换。通过坐标变换使其三相定子电流变换为两相旋转坐标系中的电流，实现电流的解耦控制，需要用到如下三种坐标变换。根据电机控制与模糊控制器导入，建立的 simulik 仿真如下图 4-12 所示。

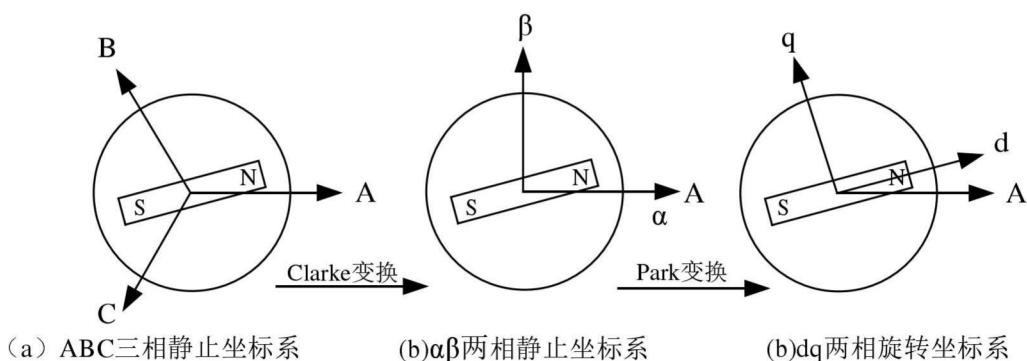


图 4-11 电机控制坐标变换

Fig.4-11 Motor control coordinate transformation

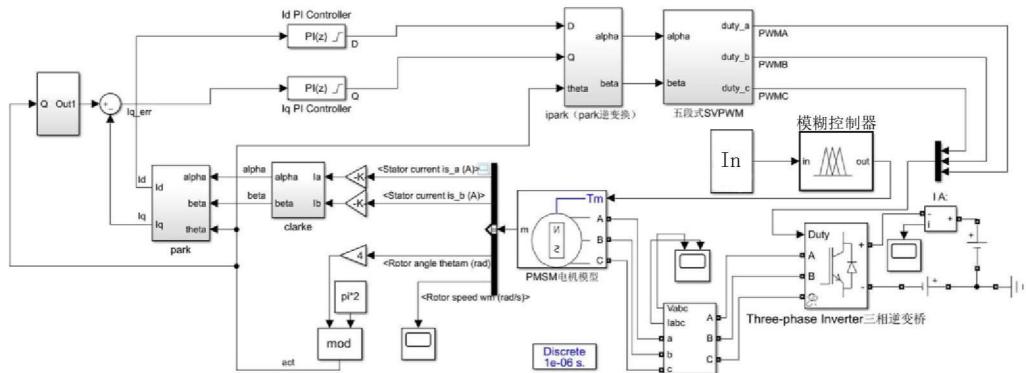


图 4-12 simulink 仿真

Fig.4-12 Simulink simulation

4.5 本章小结

本章首先对传统定助力算法进行分析，然后提出在定助力比算法基础上用模糊控制算法处理定助力比助力在处理特殊路况的不足。整个章节内容包含了推导出整车系统动力学模型、设计模糊控制器、simulink 中建立整个系统仿真。

第五章 助力系统性能测试实验

前文已经对整车的助力系统进行了设计，并对扭矩检测系统的扭矩检测模块与信号传输模块进行设计，在助力算法搭建上还对传统定助力比算法进行优化。本章将设计一套模拟骑行装置，进行实车模拟实际路况的测试，并与 simulink 仿真结果进行对比。与此同时，对整车进行实际路况骑行测试，验证整车系统的可行性。

5.1 整车综合性能实验装置设计

目前国内外的关于助力自行车整车综合性能测试的实验装置设计比较少，现有的大部分实验装置多为关于传统电动车的性能测试装置，无法适用于助力自行车测试需求。如何真实地模拟实地骑行路况，根据路况输出助力参数，是性能实验装置设计的关键。本节将根据整车受力分析情况，设计一款能真实反映骑行路况的实验装置，用于助力系统性能验证。

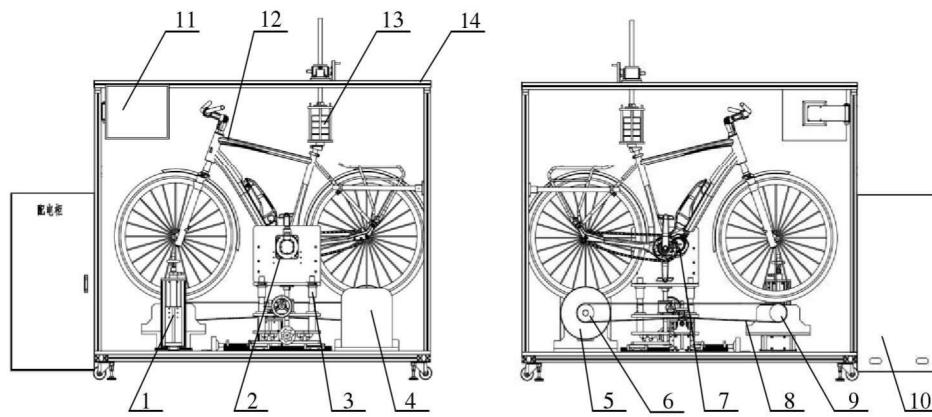
5.1.1 实验装置构成

根据前文推导式 4.1 的整车骑行动力学分析可知，整车在骑行中的整车受力主要分为驱动力和阻力。驱动力为人踩踏力 F_{man} 和驱动系统电机助力 F_a ，阻力为骑行过程中的风阻 F_w 、重力沿坡度方向的分量 F_G 、前后轮胎与地面间的滚动摩擦力 F_f 。本实验装置采用磁粉测功机加载扭矩作为后轮负载，模拟整车骑行过程中的骑行过程中的风阻 F_w 、前后轮胎与地面间的滚动摩擦力 F_f 。采用伺服电机连接助力系统中轴输出扭矩，模拟骑行过程的人踩踏力 F_{man} ，当中轴扭矩传感器检测到伺服电机的扭矩时，助力系统即输出助力与伺服电机一起带动后轮转动。此外，利用飞轮模拟骑行过程中的骑行动能^[77]。

磁粉测功机是由定子、实心转子、激磁线圈、磁粉介质、支架、底板等组成，当磁粉测功机内部线圈通过电流时产生磁场，使内部磁粉按磁力线排成磁链，由磁粉链产生拉力变为阻止转子旋转的阻力，该力即为负载力矩。改变激磁电流即可改变负载力矩。

实验装置示意图如下图 5-1 所示，本实验装置主要由机械传动系统、数据采样系统、辅助装置三个部分组成。机械传动系统由伺服电机、中置式驱动系统、磁粉测功机、飞轮、后轮滚筒、同步带、前轮滚筒组成。伺服电机输出端配备弹性联轴器，避

免整车运行过程因不同心导致的弯矩。前轮滚筒与后轮滚筒均与车轮直接接触，滚筒上有橡胶轮，通过更换不同的橡胶轮改变摩擦系数进而模拟不同的路况。为证前后轮同时同速转动，前轮滚筒与后轮滚筒间采用同步带传动。数据采样系统由磁粉测功机、转速传感器、状态显示屏组成。辅助装置主要由装置框架、配电柜、前轮升降台、伺服电机 XYZ 轴调节机构、配重砝码组成。装置框架为整个系统的固定部分，包含整车、伺服电机、磁粉测功机等零部件。前轮升降台用于调节前轮的高度，通过调节不同的高度即可模拟坡度。伺服电机 XYZ 轴调节机构用于调剂伺服电机输出轴位置，便于与中置驱动系统的中轴连接。配重转置可以模拟人的体重，配重装置在垂直方向上为可上下窜动式。实验装置实物图如下图 5-2 所示。



1.前轮升降台 2.伺服电机 3.伺服电机XYZ轴调节机构 4.磁粉测功机 5.飞轮 6.后轮滚筒 7.中置式驱动系统
8.同步带 9.前轮滚筒 10.配电柜 11.状态显示屏 12.车体 13.配重装置 14.装置框架

图 5-1 实验装置原理图

Fig.5-1 Schematic diagram of experimental device



图 5-2 实验装置实物图

Fig.5-2 Physical drawing of experimental device

实验时预先安装同步带，并根据摩擦系数大小安装橡胶轮，将电动助力自行车放

置于试验台上，将其与装置框架固定连接。安装车体后将配重砝码按照实验设定的重量大小架子。将伺服电机与中置式驱动系统连接，安装时要同心连接，避免因不同心导致附加弯矩产生，影响扭矩输入。连接好通讯设备后，按照设定扭矩大小驱动伺服机并采集实验数据。

5.1.2 实验装置可靠性实验

本设计的实验装置从受力分析的角度模拟实验，模拟实验是否能真正模拟，是否能真正实现真实骑行的反映，需要设计相关的实验进行可靠度分析。本次可靠性实验分为两部分，分别为驱动力实验与阻力实验。驱动力实验主要对人踩踏力 F_{man} 进行验证，也就是验证伺服电机模拟人骑行扭矩是否可行。阻力实验为对骑行过程中的风阻 F_w 、前后轮胎与地面间的滚动摩擦力 F_f 进行实验，也就是验证磁粉测功机能否真正模拟上述两种阻力。

(1) 驱动力实验

驱动力实验主要验证伺服电机模拟人力的可行性，所以本实验驱动伺服电机，用伺服电机内置的扭矩检测模块读出伺服输出 T_s 的扭矩大小，同时用本设计助力自行车扭矩检测系统读出扭矩 T_p 大小，验证二者扭矩是否一致。实验数据如下图 5-3 所示，伺服输出的扭矩 T_s 与本设计助力自行车扭矩检测系统读出的扭矩 T_p 大小几乎相等，误差不大，说明本实验装置用伺服电机模拟人踩踏扭矩的方法可行。

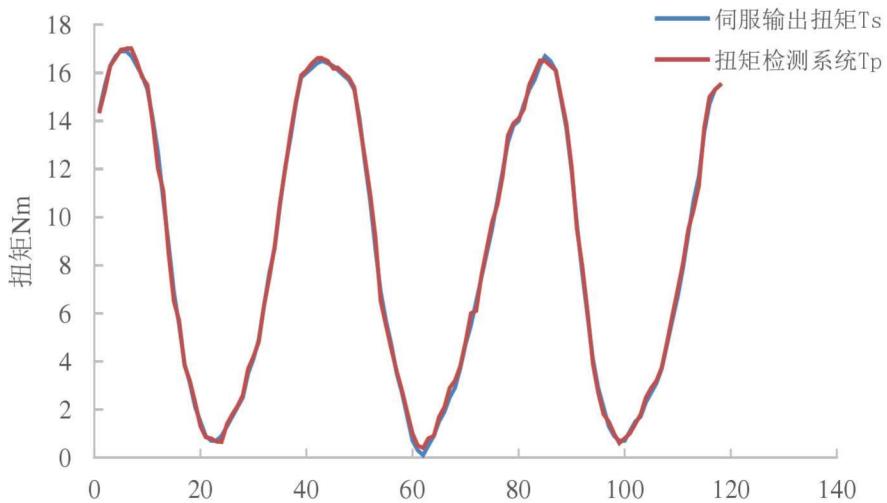


图 5-3 驱动力验证实验

Fig.5-3 Driving force verification experiment

(2) 阻力实验

阻力实验主要验证磁粉测功机施加负载模拟人力的可行性，本次实验将磁粉测功机设定恒定阻力值 20Nm ，驱动伺服电机并同时恒定增加伺服电机驱动扭矩值，直至伺服电机能克服磁粉测功机扭矩带动整车，记录整个过程的实验数据值。实验数据如下图 5-3 所示。

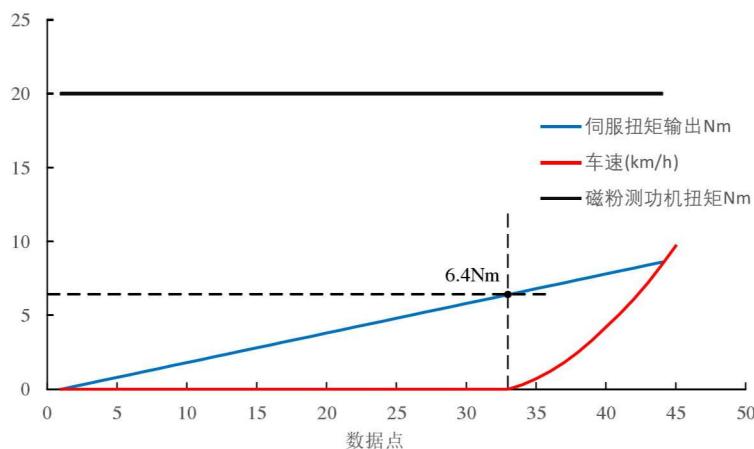


图 5-4 阻力验证实验

Fig.5-4 Resistance verification experiment

由式 2.9 可知，中轴曲柄牙盘与后轮牙盘之间的传动关系为 $i_1 = \frac{z_1}{z_2} \approx 3.14$ ，因此磁粉测功机加载扭矩 T_O 与伺服电机理论输出扭矩 T_{S2} 关系为：

$$T_{S2} = \frac{T_O}{i_1} \approx 6.37 \quad (5.1)$$

由牛顿第二定律可知，伺服电机驱动整车需克服磁粉测功机阻力大小，其输出扭矩必须大于临界值 6.37 才能驱动整车。由实验数据可知伺服电机在扭矩值达到 6.4 Nm 整车驱动，由此验证磁粉测功机模拟扭矩方案可行。

5.2 扭矩检测系统测试实验

扭矩检测系统测试实验主要是在本设计的整车综合性能台架上模拟踩踏扭矩，根据踩踏扭矩输出大小验证前文的传感器测试装置的可行性。

本实验将采用磁粉测功机施加负载使整车不转动，然后中轴施加扭矩，测试分别为直接在曲柄水平处挂砝码和伺服电机加载扭矩的方式。进行了三组实验测试：(1). 传感器测试装置：在传感器测试装置上施加扭矩，读出传感器检测到的扭矩大小。(2). 伺服电机加载测试：磁粉测功机满载保证整车不转动情况下，给定伺服电机扭矩大小，

读出传感器检测到的扭矩大小。(3).曲柄悬挂加载测试：磁粉测功机在满载情况下保证整车不转动，按照实验要求在曲柄下悬挂标准砝码使中轴受到扭矩作用，读出传感器检测到的扭矩大小。上述三组实验的数据如下表 5-1 所示，根据计算可得，三种实验测试方案在同一扭矩加载情况下，最大实验误差为0.9%，说明扭矩检测系统精度高，满足要求。

表 5-1 电机特定公式物理参数

Table.5-1 Specific formula and physical parameters of motor

实验组别 \ 加载扭矩(Nm)	10	20	30	40	50	60	70
(1)	10.09	19.94	30.04	40.02	50.09	60.03	70.06
(2)	9.95	20.04	29.96	39.98	49.95	59.97	69.92
(3)	10.10	19.99	30.04	40.06	49.91	59.99	69.96

5.3 助力算法实验验证

本文设计助力算法为在定助力比基础上采用模糊控制算法来处理骑行过程中起步、陡坡等特殊路况，本节将从仿真结果和整车综合性能实验装置结果两个方面验证本助力算法的优势。

5.3.1 起步性能验证

(1) simulink 仿真验证

在前文搭建的 simulink 仿真模型中导入相同的踩踏扭矩，在此种情况下对比定助力比算法与模糊控制算法在起步时以及后续助力到助力极限的性能。仿真结果如下图 5-5 所示。

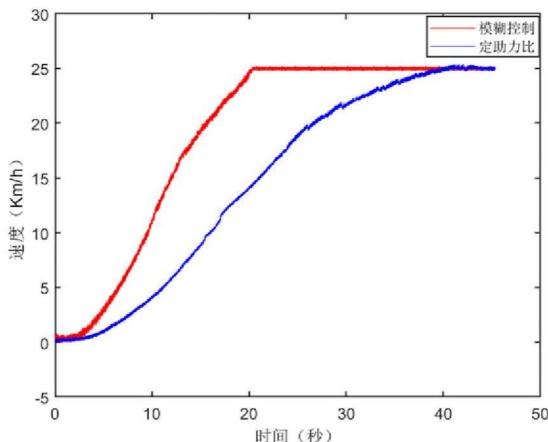


图 5-5 起步性能仿真结果

Fig.5-5 Starting performance simulation results

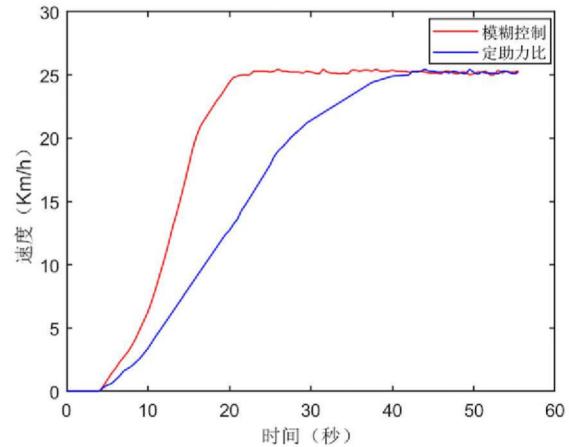
由上述仿真结果可知，模糊控制助力方式比传统定助力比助力方式的起步扭矩与起步速度要大，模糊控制在 20s 时已达到助力极限速度，而传统定助力需要在 40s 时才达到助力极限速度。仿真结果表明，本设计的模糊控制助力方式起步性能更好。

(2) 实验装置实车实验

本实验的装置采用所设计的整车综合性能实验装置，磁粉测功机施加恒定阻力负载，伺服电机按照上述仿真设定的扭矩大小驱动中轴，数据采集模块采用手提电脑连接数据发送接口的方式采集，实验如下图 5-6 所示。



a. 整车起步性能验证



b. 实验结果

图 5-6 骑行性能实车验证

Fig.5-6 Vehicle verification of riding performance

由上述实车实验结果可知，模糊控制助力方式比传统定助力比助力方式的起步扭

矩与起步速度要大，模糊控制在 20s 时已达到助力极限速度，而传统定助力需要在 40s 时才达到助力极限速度，与仿真结果几乎吻合。实车实验结果表明，本设计的模糊控制助力方式起步性能更好。

根据以上的 simulink 仿真与实车实验可知，模糊控制助力方式的起步性能比传统定助力比更好。

5.3.2 坡度助力性能验证

(1) simulink 仿真验证

在搭建 simulink 的仿真模型中导入相同的踩踏扭矩使其达到极限速度 25km/h，在达到极限速度后加入 15° 坡度阻力，坡度阻力大小按照式 4.3 计算得到。在导入坡度后采集 20 秒数据观察二者速度的变化，对比定助力比算法与模糊控制算法在遇陡坡时的助力性能。仿真结果如下图 5-7 所示。

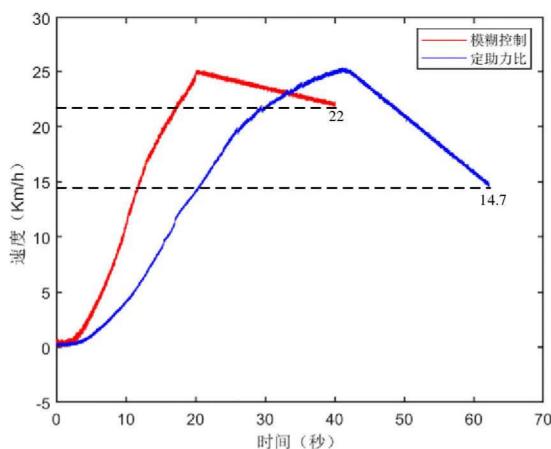


图 5-7 坡度助力性能仿真

Fig.5-7 Slope assistance performance simulation

由上述仿真结果可知，在整车提速到 25km/h 遇到 15° 陡坡后，定助力比助力方式速度从 25km/h 下降到 14.7km/h，下降幅度为 10.3 km/h；而模糊控制方式从 25km/h 下降到 22km/h，下降幅度为 3 km/h。根据仿真结果可以得出模糊控制方式比定助力比助力方式坡度助力性能更好。

(2) 实验装置实车实验

本实验的实验装置为所设计的整车综合性能装置，由磁粉测功机施加恒定阻力负载，伺服电机按照上述仿真设定的扭矩大小驱动中轴使其达到极限速度 25km/h。在达

到极限速度后往磁粉测功机加入 15° 坡度阻力，坡度阻力大小按照式 4.3 计算得到。在导入坡度阻力后采集 20 秒速度数据，对比定助力比算法与模糊控制算法在遇陡坡时的助力性能。数据采集模块采用手提电脑连接数据发送接口的方式采集，实验如下图 5-8 所示。

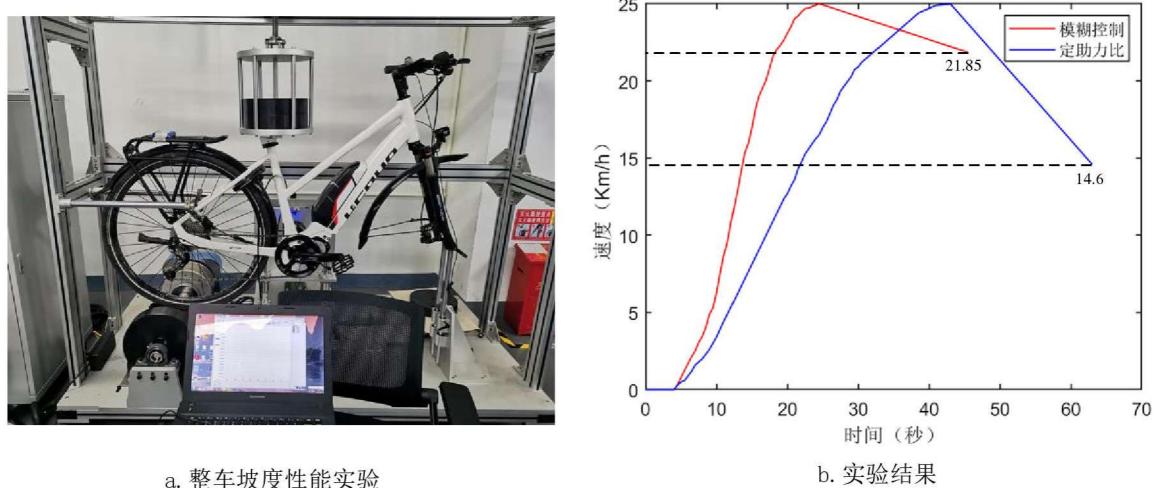


图 5-8 坡度助力性能实车验证

Fig.5-8 Vehicle verification of slope assistance performance

由上述实车实验结果可知，在整车提速到 25km/h 遇到 15° 陡坡后，定助力比助力方式速度从 25km/h 下降到 14.6km/h ，下降幅度为 10.4 km/h ；而模糊控制方式从 25km/h 下降到 21.85km/h ，下降幅度为 3.15 km/h ，实车实验数据与仿真结果几乎吻合。实车实验结果表明，本设计的模糊控制助力方式坡度助力性能更好。

本节实验从 simulink 仿真与实验装置实车实验两个方面分别验证起步性能与坡度助力性能，仿真与实车实验结果均证明模糊控制助力方式比传统定助力比方式好，更能适应特殊骑行路况。

5.4 整车实地骑行

本文设计的助力系统最终是要安装于整车车架上使用，故本实验需要实车实地验证整个助力系统的稳定性。实验采用手提电脑连接数据发送串口读取数据，采集骑行扭矩、速度信息，采集频率为 10HZ ，即 1 秒采集 10 个数据，设定采集总时间为 2 小时，每种数据应为 43200 个。实地骑行场地为某公园内，该公园有上坡、下坡、弯道等路况，同时有沥青、混凝土、砂土地等路面，能满足现实骑行的所有路况。实验装置如下图 5-9 所示。

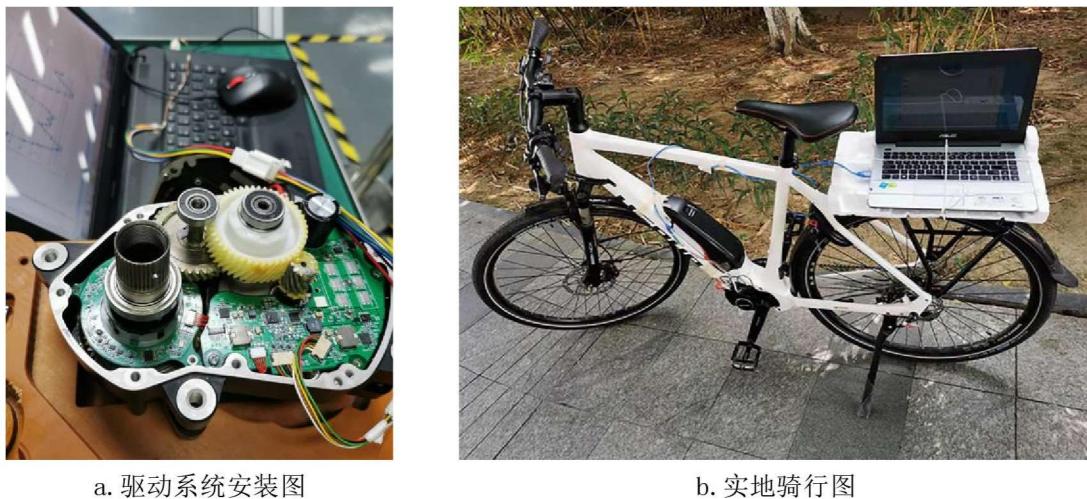


图 5-9 整车实地骑行图

Fig.5-9 Vehicle road riding diagram

实验采集的数据如下图 5-10 所示，总数据量为 43200 个，整车骑行过程中无数据丢失情况，证明无线传输方案稳定可靠，并且骑手一致反馈模糊控制助力方式比传统定助力比助力方式骑行舒适度好。

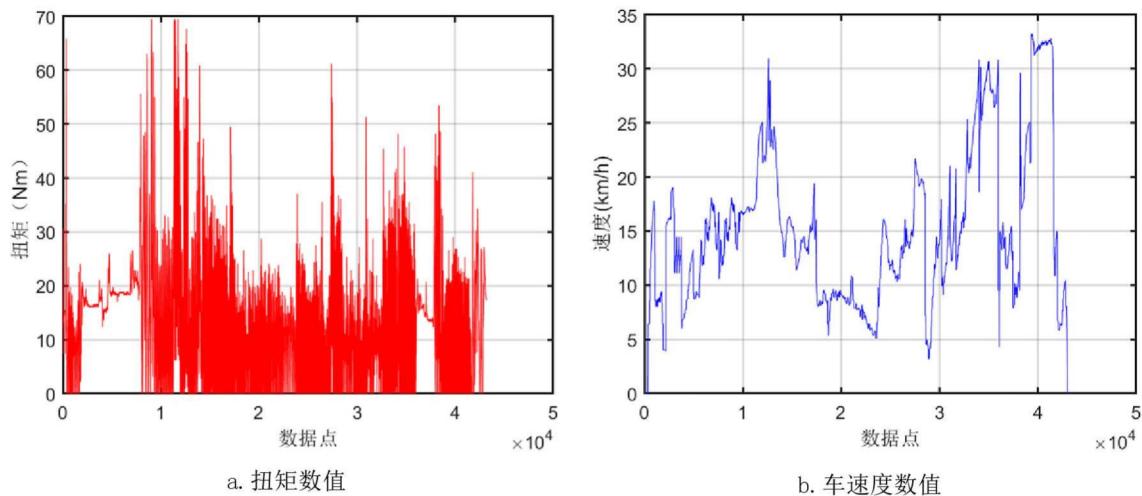


图 5-10 整车实地骑行数据

Fig.5-10 Vehicle road riding data

5.5 本章小结

本章首先根据助力自行车骑行过程中的受力特性设计了一套模拟骑行装置，将骑行过程中的阻力与驱动力用磁粉测功机以及伺服电机模拟，并且实验验证该实验装置的可行性。采用前文推导搭建的 simulink 仿真模型对起步性能以及坡度助力性能进行验证，并在此基础上用模拟骑行装置验证仿真结果。simulink 仿真与模拟骑行装置实

车实验结果表明，模糊控制助力方式均比传统定助力比方式好。在完成起步性能以及坡度助力性能后，进行了实地实车骑行实验，验证了本助力系统的可行性。

总结与展望

(1)全文总结

电动助力自行车助力系统的研究是电动助力自行车的关键所在，其包含扭矩检测与助力控制算法。目前市面上的电动助力自行车扭矩检测主要分为两种，一种是用速度传感器感知速度，通过算法估算骑行踩踏的力矩，进而输出助力扭矩。另一种是采用扭矩传感器，通过扭矩传感器识别骑行踩踏的力矩，算法控制输出助力扭矩。因此当前市场上的助力自行车扭矩检测精度不高，难以满足使用要求。助力控制算法普遍采用的是传统定助力比助力方式，助力性能缺乏智能性，不能适应特殊的骑行路况。针对上述问题，本文完成了以下几项工作：

(1)采用中置式驱动系统布置方式，分析了整车驱动传动关系，对比选取了合适的驱动电机，并设计了减速装置，搭建了传动系统。在控制系统设计上设计了主控芯片电路、电机驱动电路、供电模块电路。

(2)在扭矩检测系统设计方面，对国内外现有的扭矩检测方案进行研究与对比，提出了一款基于应变片的应变式中轴扭矩传感器。阐述了本设计方案应变式扭矩传感器的工作原理以及惠斯通电路电桥测量原理。在扭矩传感器供电以及信号传输问题上，采用了磁耦合谐振式无线传输代替传统的导电滑环传输，并详细描述了电路原理。本设计的扭矩检测模块的线性度好，能很好满足助力自行车的精度要求。

(3)针对目前助力算法不够智能问题，提出在定助力比助力算法的基础上采用模糊控制算法处理骑行特殊路况，提高助力性能。推导出整车骑行过程中的动力学模型，采用 MATLAB/simulink 软件搭建仿真模型，对本设计的控制算法进行仿真验证。

(4)结合整车骑行过程中受力分析，设计了一款模拟骑行实验装置，采用磁粉测功机与伺服电机分别模拟骑行阻力与踩踏力，并实验验证该装置的可行性。采用 simulink 仿真验证与实验装置验证两种方案，验证本设计模糊助力算法在起步性能与坡度助力性能与传统定助力算法的对比。模糊控制助力方式比传统定助力比助力方式的起步扭矩与起步速度要大，模糊控制在 20s 时已达到助力极限速度，而传统定助力需要在 40s 时才达到助力极限速度。仿真结果与实车试验表明，本设计的模糊控制助力方式起步性能更好。在整车提速到 25km/h 遇到 15° 陡坡后，定助力比助力方式速

度下降幅度比模糊控制方式下降幅度大。仿真结果与实车试验可以得出模糊控制方式比定助力比助力方式坡度助力性能更好。实车实地骑行验证了本助力系统的稳定性与可靠性。

(2)全文展望

本文针对电动助力自行车助力系统进行了初步的设计和实验研究，取得了相应的成果。但由于本课题的研究内容涉及多科学交叉融合，时间有限，未能进行更加深入的研究。后续工作可从以下几个方面进一步研究：

(1)针对现有扭矩检测精度不足问题，在应变式传感器研究上，可以着手研究MEMS式半导体应变片。半导体应变片的温度漂移较大，可以通过改进半导体封装工艺，优化软硬件或者优化算法进行温度补偿，从而处理半导体应变片的温度温度漂移导致的扭矩检测精度问题。

(2)针对助力性能问题，可引入深度学习进行专家库学习，提高控制算法的智能性。与此同时，可结合多传感器技术，如添加陀螺仪、重力传感器、角度传感器等，通过多传感器感知精确认识路况。

(3)针对骑行体验感，可以引入生命科学技术，骑手的生命体征与路况相结合，精确输出助力。

参考文献

- [1] 耿文欣. 国际视角下化石能源节能减排表现研究[D]. 天津大学, 2018.
- [2] Hsu R C, Liu C, Lee W, et al. A Reinforcement Learning Based Power Assisted Method with Comfort of Riding for Light Electric Vehicle, 2010[C]. IEEE, 2010.
- [3] Kai Z, Dejun Y. A control approach adaptive to load and road slope for electric power assisted bicycle, 2017[C]. Technical Committee on Control Theory, CAA, 2017.
- [4] Deyi Z, Kai Z, Dejun Y. A New Torque Control Approach for Electric Power Assisted Bicycle Based on Model-Following Control, Xiamen, China, 2017[C]. IEEE, 2017.
- [5] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021,21(03):1-15.
- [6] 任震宇. 5 公里内“幸福通勤”同比提高[N]. 中国消费者报, 2021-07-27(002).DOI:10.28867/n.cnki.nxfzb.2021.001565.
- [7] Abagnale C, Cardone M, Iodice P, et al. A Dynamic Model for the Performance and Environmental Analysis of an Innovative e-bike[J]. Energy Procedia, 2015,81:618-627.
- [8] Watterson P A, Abagnale C. An electric assist bicycle drive with automatic continuously variable transmission: International Conference on Electrical Machines & Systems, 2008[C]. IEEE.
- [9] 陈章华. 智能电动自行车用中轴转速传感器的设计和优化[D]. 苏州大学, 2018.
- [10] 王宇涵. 电动助力车电机调速控制系统设计[D]. 杭州电子科技大学, 2017.
- [11] Chen P C, Chuang H S, Hsiao C C, et al. The velocity control with disturbance estimation for the E-Bike systems, 2011[C]. IEEE, 2011.
- [12] Kurosawa T, Fujimoto Y. Torque Sensorless Control for an Electric Power Assisted Bicycle with Instantaneous Pedaling Torque Estimation[J]. IEEJ Journal of Industry Applications, 2017,6(2):124-129.
- [13] 夏静满. 基于霍尔元件的力矩传感控制系统的研究与实现[D]. 西南大学, 2015.
- [14] 洪利, 尚鲁龙, 邱忠超, 等. 基于逆磁致伸缩效应的铁磁构件应力检测方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020(06):92-94.

- [15] 董俊威. 磁致伸缩效应的研究现状及其应用[J]. 柴油机设计与制造, 2019,25(04):1-5.
- [16] 朱丽娅. 助力自行车用扭矩传感器方案分析[J]. 科学与财富, 2014(8):192-193.
- [17] 石荣武, 白新玉, 余康, 等. 关于电阻应变式测力传感器 STC 补偿方法的讨论[J]. 衡器, 2020,49(05):41-45.
- [18] 资新运, 赵姝帆, 耿帅, 等. 应变式扭矩传感器的分析及 ANSYS 仿真[J]. 仪表技术, 2014(10):50-54.
- [19] 袁明. 电阻应变式传感器误差原因以及补偿方法[J]. 电子技术与软件工程, 2019(09):227.
- [20] 文西芹, 赵明光. 基于非晶薄带逆磁致伸缩特性的非接触扭矩传感器[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2006(02):11-14.
- [21] 翁玲. 超磁致伸缩振动传感器的模型与实验研究[D]. 河北工业大学, 2008.
- [22] 李涛. 电动助力自行车动力辅助系统设计[D]. 杭州电子科技大学控制工程, 2018.
- [23] 闫传奇. 电动助力车控制系统设计[D]. 杭州电子科技大学控制科学与工程, 2017.
- [24] 吴战国, 杜聪慧. 电动助力车机械变速装置智能控制方案[J]. 机电一体化, 2013,19(8):81-83.
- [25] 周好斌, 龙波, 白志峰, 等. 能量回收电动助力车鲁棒控制器研究[J]. 西安交通大学学报, 2007(05):567-570.
- [26] Chen P, Lin H, Chang S, et al. The torque control of human power assisted electric bikes, 2010[C]. IEEE, 2010.
- [27] 张夏栋. 基于力矩传感器的智能电动车控制系统研究[D]. 苏州大学计算机科学与技术, 2016.
- [28] 张卫华, 魏飞雄, 梁栋. 铅酸蓄电池电动车充电过程起火机理探析[J]. 时代汽车, 2022(01):123-124.
- [29] 张夏栋. 基于力矩传感器的智能电动车控制系统研究[D]. 苏州大学, 2016.
- [30] 葛帅. 助力自行车传感器及控制系统研究[D]. 河北工业大学, 2018.
- [31] 查建东. 电动自行车电机技术的现状及发展[J]. 中国新技术新产品, 2019(04):10-11.
- [32] 何鹏. 电动自行车用新型轮毂驱动系统设计开发[D]. 重庆大学, 2019.
- [33] 龙驹. 基于 MATLAB 的永磁无刷直流电动机转速控制系统的优化设计[J]. 信息与

- 电脑(理论版), 2010(16):30.
- [34] 李小明. 无刷直流电机调速系统研究与设计[J]. 科技信息, 2010(35):124-125.
- [35] 张培君. 电动自行车电机的分类与特点[J]. 电动自行车, 2012(04):47-48.
- [36] 国绍文, 魏国丰, 王巍, 等. 无刷直流电机系统工作效率研究[J]. 黑龙江工程学院学报, 2014,28(06):25-28.
- [37] 王洁涵. 电动汽车用 BLDC 损耗机理及提高效率方法的研究[D]. 长春工业大学, 2018.
- [38] 顾佩佩, 陈家新. 高速小功率永磁无刷直流电机铁心损耗研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(10):39-42.
- [39] 葛延, 赵玉良. 齿轮箱设计的基本原则[J]. 重型机械, 2010(S2):144-148.
- [40] 余漳南. POM 塑料齿轮成型工艺技术[J]. 漳州职业技术学院学报, 2020,22(04):76-79.
- [41] Strauss W. Digital signal processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2000,17(2):52-56.
- [42] 葛俊峰. 基于 DSP 的无刷直流电机控制系统设计[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2015,31(01):47-48.
- [43] 李涛, 杨成忠. 基于 DSP 的电动助力自行车控制系统设计[J]. 信息与电脑(理论版), 2016(21):149-152.
- [44] 李涛. 电动助力自行车动力辅助系统设计[D]. 杭州电子科技大学, 2018.
- [45] Jonathan Harper, Enrique Rodriguez. 选择正确的 MOSFET: 工程师所需要知道的[J]. 今日电子, 2007(11):32-33.
- [46] 禹精达. 传动轴扭矩测量技术及精度分析[D]. 中北大学, 2012.
- [47] 吕华溢, 杨军, 宋娜. 轴系扭矩测量方法与发展趋势[J]. 计测技术, 2017,37(02):6-10.
- [48] 廖丽媛. 基于应变式扭矩传感器的测量系统的设计[D]. 东华大学, 2013.
- [49] 周文韬. 导电滑环的接触力学特征与磨损寿命分析[D]. 湘潭大学, 2014.
- [50] 董霖, 陈光雄, 周仲荣. 载流摩擦磨损系统研究[J]. 润滑与密封, 2009,34(07):102-106.
- [51] 朱岩峰, 赵桂瑾, 李贤兵. 一种精密导电滑环瞬短瞬断检测方法的研究[J]. 科技资讯, 2010(28):110-111.

- [52] Kim S, Ho J S, Chen L Y, et al. Wireless power transfer to a cardiac implant[J]. *Applied Physics Letters*, 2012,101(7):79-85.
- [53] Hui S, Ho W. A new generation of universal contactless battery charging platform for portable consumer electronic equipment[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004,20(3):620-627.
- [54] 丁俊东. 基于 ZigBee 技术的不停车收费车载设备的设计[D]. 南京理工大学, 2009.
- [55] 王萌, 黄睿, 杨杰. 基于磁耦合谐振式无线电能传输系统的原理及技术分析[J]. 电子技术与软件工程, 2015(04):146-147.
- [56] 王茂. 基于磁耦合谐振的无线传能系统设计与实现[D]. 重庆大学, 2016.
- [57] Okamoto T, Duong Q T, Higashino T, et al. A proposal of data transmission in parallel line fed wireless power transfer: 2015 15th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2015[C].
- [58] 刘佳. 磁耦合谐振式无线电能传输系统频率追踪研究[D]. 河北工业大学, 2020.
- [59] 潘伟玲. 一种磁耦合谐振式电能无线传输系统的研究[D]. 中国计量学院, 2016.
- [60] Sanftl B, Pflaum F, Trautmann M, et al. A novel approach for reliable communications within inductive power transfer systems: Wireless Power Transfer Conference, 2016[C].
- [61] 伍雪冰. 谐振式无线电能传输系统磁耦合机构的研究与设计[D]. 重庆理工大学, 2020.
- [62] Xia C, Wang W, Liu Y, et al. A bidirectional wireless power transfer system for an electric vehicle with a relay circuit[J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2017,25:3037-3051.
- [63] 李长生, 张合. 基于非铁磁性金属管的无线能量与信息同步传输技术[J]. 仪器仪表学报, 2011,32(05):1165-1170.
- [64] Wang Y, Yao Y, Guan Y, et al. A novel modulation and demodulation method for wireless power and data transmission: 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2017[C].
- [65] Li X, Tang C, Dai X, et al. An inductive and capacitive combined parallel transmission of power and data for wireless power transfer systems[J]. *IEEE Transactions on Power*

- Electronics, 2017, 33(6): 4980-4991.
- [66] 林武. 基于梯形波电流的无线电能与信号同步传输技术的研究[D]. 南京邮电大学, 2018.
- [67] 王巧凤. 磁谐振式能量与信息双向传输技术研究[D]. 中北大学, 2020.
- [68] 周航. 基于双线圈的力矩传感器及其测试系统研究[D]. 苏州大学, 2016.
- [69] 李爱学, 王成, 胡叶, 等. 传感器及其应用[G]. 西安电子科技大学出版社.
- [70] 冯齐斌, 姜毅輝, 周宇仁. 浅谈静态压力传感器的计量检定[J]. 仪器仪表用户, 2020, 27(11):110-112.
- [71] 马艳菊. 电动助力车控制技术研究[D]. 杭州电子科技大学, 2018.
- [72] Zadeh L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1978, 1(1):3-28.
- [73] 胡茹. 浅谈模糊控制原理及应用[J]. 科技风, 2019(02):19-20.
- [74] Mamdani E H. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller[J]. International Journal of Man-Machine Studies, 1975, 7(1):1-13.
- [75] 孙吉超. 基于模糊原理的变质量动力吸振器控制策略研究[D]. 长安大学, 2020.
- [76] 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其 MATLAB 仿真[M]. 清华大学出版社, 2008.
- [77] 刘梦洋. 电动自行车整车综合性能检测试验台的研究[D]. 华南理工大学, 2019.

攻读学位期间取得与学位论文相关的成果

发表和投稿与学位论文相关学术论文

1. 陈创东, 郭教授, 李伟健, 田教授, 刘君琰, 张秋阳. 基于无线传输的助力自行车扭矩检测系统[J]. 机电工程技术, 2022, 51(03):40-44.

申请专利和软件著作权

1. 陈创东. 基于扭矩传感器的电动助力自行车助力系统 V1.0. 登记号: 2021SR0862094.
2. 陈创东. 基于矢量控制算法的无刷电机控制系统 V1.0. 登记号: 2021SR0862033.
3. 陈创东. 基于 GUI 的电动助力自行车显示仪表显示系统 V1.0. 登记号: 2021SR0862034.
4. 刘君琰, 郭教授, 陈创东, 郭琦伟. 消毒鞋垫. 实用新型专利号: 2021221964534.

学位论文独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是我个人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明，并表示了谢意。本人依法享有和承担由此论文所产生的权利和责任。

论文作者签名：陈创东 日期：2022.6.15

学位论文版权使用授权声明

本学位论文作者完全了解学校有关保存、使用学位论文的规定：“研究生在广东工业大学学习和工作期间参与广东工业大学研究项目或承担广东工业大学安排的任务所完成的发明创造及其他技术成果，除另有协议外，归广东工业大学享有或特有”。同意授权广东工业大学保留并向国家有关部门或机构递交该论文的印刷本和电子版本，允许该论文被查阅和借阅。同意授权广东工业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、扫描或数字化等其他复制手段保存和汇编本学位论文。保密论文在解密后遵守此规定。

论文作者签名：陈创东 日期：2022.6.15

指导教师签名：郭细平 日期：2022.6.15

致 谢

行文至此，感慨万千。回顾三年读研路，心中满是五味陈杂，酸甜苦辣咸贯穿我的这三年。从课题定题到论文定稿，虽有万重艰辛，但幸于付出皆有回报。在遇艰辛时，曾想过放弃，但料及当今学者焉能遇障以弃学？遂转而研之，通习前人之髓，精研治学，乃至此文出。

感谢我的父母，他们虽然接受教育不多，但懂得全心全意全力奉献支持我上学，支持我做的一切决定。与此同时，我的爷爷奶奶兄弟姐妹更是我强大的后盾，为我排除学习以外的一切困难，令我甚是欣慰。

感谢我的导师郭钟宁教授，导师渊博的专业知识，严谨的治学态度，朴实无华、平易近人的人格魅力，诲人不倦的高尚师德，精益求精的工作作风，对我影响深远。从选题到论文终稿定稿，郭钟宁教授给了我很大的支持，提出了很多宝贵的意见。郭教授不仅在学业上对我帮助良多，而且生活上对我也是关切蛮多，如此恩情定当铭记终生。

感谢我的校外导师田君教授和张秋阳高级工程师，他们在我完成课题的过程一直帮助我，为我解惑，传授了许多学校学不到的工程知识。与此同时，感谢所有帮助过我的广东高标电子科技有限公司的同事。

感谢叶正伟、叶凯冬、李伟健三位舍友的帮助，同舍一起研习的日子给我三年学习画上了浓厚的一笔受益良多。感谢实验室团队刘君琰、张凯、邓翠园、吴春艳等同门的帮助，在一实验室下共成长和进步，也让课余的生活添加了更多色彩和欢乐。

停笔至此，求学术研之路算是画上了句号，回顾三年前入学的雄心壮志，立志在科研路上干一番事业，读博留学皆为所愿。但叹于世事之多变，命运之多舛，家境之窘困，父母尚需照料，我又此能只身不顾而求学？虽求学修习之路至此而止，但学习之路定不止于此，终身治学方乃吾出路。向人民学习，将所学所得奉献人民；向伟大的领导者学习，跟随其脚步终生受教。

二零二二年二月于广东工业大学

