



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(工程硕士)

燃料电池轿车电动助力转向系统的
设计与试验研究

姓名：谢泽金

学号：1121180104

所在院系：汽车学院

职业类型：工程硕士

专业领域：车辆工程

指导教师：陈慧 教授

副指导教师：周中坚 副教授

二〇一七年五月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Engineering

Design and Test Study of Electric Power Steering System for Fuel Cell Vehicle

Candidate: Xie Ze Jin

Student Number: 1121180104

School/Department: School of Automotive Studies

Discipline: Engineering Master

Major: Vehicle Engineering

Supervisor: Prof. Chen Hui

Vice Supervisor: Associate Prof. Zhou ZhongJian

May, 2017

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

在全世界提倡节能环保、低碳绿色生活的大环境下，混合动力汽车、纯电动汽车逐渐普及，燃料电池汽车技术的研发加速发展。电动助力转向技术具有转向助力随速可调、节能环保和安全可靠等优点，已成为汽车转向技术发展的主流。目前燃料电池汽车技术尚未成熟，考虑开发周期和成本因素，现阶段国内外燃料电池汽车开发主要是以传统车型平台为基础，通过动力系统替换和整车适应性改造而实现。但由于燃料电池动力系统存在集成化程度低、体积大和质量重等特点，导致原车型平台的转向系统无法满足燃料电池汽车的开发要求。因此，基于原车型平台进行电动助力转向系统的设计开发，使系统布置、结构和转向性能达到燃料电池汽车开发要求，满足燃料电池轿车产业化开发是一个具有很实际意义的课题。

论文对燃料电池轿车电动助力转向系统进行设计和试验研究，具体内容如下：

首先，分析了燃料电池汽车对转向系统的要求，并对适合燃料电池轿车的电动助力转向系统的国内外发展现状及趋势进行了概述，指出了现阶段燃料电池轿车电动助力转向系统普遍存在转向助力能力不足，转向助力随速变化性能欠佳，转向主动回正和阻尼性能较差的问题；

其次，介绍了电动助力转向系统的基本组成及工作原理，分析了电动助力转向系统的类型及其特点。对燃料电池轿车电动助力转向系统的技术要求进行了归纳分析，并对燃料电池轿车电动助力转向系统的设计与试验流程进行了介绍。

再次，根据燃料电池轿车电动助力转向系统的技术要求，进行助力型式的选择和系统布置的方案设计，并对电动助力转向系统的转向器、减速机构、电机和传感器关键部件进行了结构和参数的匹配设计，以及对助力控制、回正控制和阻尼控制的控制策略进行了设计；

然后，参考《汽车电动助力转向装置技术要求和试验方法》标准征求意见稿，结合单位研发电动助力转向系统的台架试验规范，对燃料电池轿车电动助力转向系统的转向助力能力进行了台架试验研究，并对台架试验结果进行了分析；

最后，参考《GB/T6323-2014 汽车操纵稳定性试验方法》标准并结合单位研发电动助力转向系统的标定和性能试验规范，对燃料电池轿车电动助力转向系统的助力控制、主动回正控制及阻尼控制参数进行了标定和实车性能试验研究，并对性能试验结果进行了分析。

论文通过燃料电池轿车电动助力转向系统的设计和试验，将理论和工程研发

项目相结合，为燃料电池汽车电动助力转向系统开发提供了重要的理论依据，具有一定的实际借鉴应用意义。

关键词：燃料电池轿车，电动助力转向系统，设计，试验研究

ABSTRACT

In the global background of advocating energy conservation, environmental protection and low-carbon life, the universal use of hybrid electric vehicles and pure electric vehicles has accelerated the development of fuel cell vehicle technology. Due to the advantages of adjustable power changing along with speed, energy conservation, environmental protection and safety, electric power steering technology has become the mainstream of automobile steering technology. Nowadays, fuel cell vehicle technology is not mature, so the domestic and foreign fuel cell vehicle development is mainly based on traditional vehicle platform. At the present stage, considering the development cycle and the cost, the powertrain is replaced and the vehicle adaptability is modified, while the chassis system is retained. Because of the low integration, large volume and heavy quality of fuel cell system, the steering system of the original vehicle platform cannot meet the development requirements of fuel cell vehicles. Therefore, the matching design of electric power steering system based on the original vehicle platform is practical significance, which makes the layout, structure and steering performance meet the requirements of fuel cell vehicle development and mass production.

In this paper, the electric power steering system of fuel cell vehicle is designed and tested:

Firstly, the requirements of the fuel cell vehicle to the steering system were analyzed, and the development status and trend of electric power steering system suitable for fuel cell vehicles were summarized. At the present stage, it was pointed out that there are some problems in the system of electric power steering system for fuel cell vehicles, such as insufficient capability of steering power, poor performance of steering power changing with the speed, and the poor performance of steering active return and damping;

Secondly, the basic composition and working principle of electric power steering system were introduced, and the types and characteristics of electric power steering system were analyzed. After that, the technical requirements of fuel cell vehicle electric power steering system were analyzed and the design flow of electric power steering system for fuel cell car was introduced;

According to the technical requirements, power type was selected and the system

layout scheme was designed. The structure and parameters of the steering gear, the reduction gear, the motor and the sensor were designed. As well as the control strategy of power assist control, return control and damping control were designed;

Refer to the standard for Technical Requirements and Test Methods of Automotive Electric Power Steering gear(Draft for Comments) and the standard test frame for developing electric power steering system of SAIC, the bench test of electric power steering performance of fuel cell vehicle was carried out about the capability of steering power , and the bench test results was analyzed;

Finally, with reference to GB/T6323-2014 Test Method of Vehicle Handling Stability Standard and the electric power steering system calibration and performance test specification of SAIC, the steering performance of fuel cell vehicel electric power steering system was calibrated and was tested on vehicle, including assist contorl, active return and damping control. Then vehicle Test results were analyzed.

Through the research of fuel cell vehicle electric power steering system design and test, this paper provides an important theoretical basis for the development of electric power steering system for fuel cell vehicle. The combination of theory and engineering projects has certain practical significance and application value.

Key Words: Fuel cell vehicle, electric power steering system, design, test study

目录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 燃料电池轿车电动助力转向系统的发展现状及趋势	3
1.2.1 国外发展现状及趋势	3
1.2.2 国内发展现状及趋势	4
1.3 本文的主要研究内容	6
第2章 燃料电池轿车电动助力转向系统	9
2.1 电动助力转向系统基本组成及工作原理	9
2.2 电动助力转向系统的类型及其特点	9
2.3 燃料电池轿车电动助力转向系统技术要求	11
2.4 燃料电池轿车电动助力转向系统设计与试验流程	13
2.5 本章小结	15
第3章 燃料电池轿车电动助力转向系统设计	17
3.1 燃料电池轿车电动助力转向系统方案设计	17
3.1.1 助力型式的选择	17
3.1.2 系统布置设计	19
3.2 燃料电池轿车电动助力转向系统匹配设计	20
3.2.1 匹配设计分析	20
3.2.2 系统结构匹配设计	22
3.2.3 系统参数匹配设计	28
3.3 燃料电池轿车电动助力转向系统控制策略设计	32
3.3.1 助力控制	33
3.3.2 回正控制	36
3.3.3 阻尼控制	38
3.4 本章小结	39
第4章 燃料电池轿车电动助力转向系统台架试验	41
4.1 电动助力转向系统台架试验要求及设备	41
4.1.1 台架试验要求	41
4.1.2 台架试验设备	42
4.2 电动助力转向系统台架试验方案及结果分析	44
4.2.1 静态转向输出力试验	44
4.2.2 助力特性试验	45
4.2.3 静态转向力随方向盘转速变化试验	46
4.2.4 静态转向力随温度变化试验	47

4.2.5 静态转向力随电压变化试验	50
4.3 本章小结	53
第5章 燃料电池轿车电动助力转向系统性能标定和试验	55
5.1 电动助力转向系统性能标定	55
5.1.1 性能标定与试验流程	55
5.1.2 性能标定要求	56
5.1.3 助力特性标定	57
5.1.4 主动回正标定	58
5.1.5 阻尼控制标定	60
5.2 电动助力转向系统性能试验方案及结果分析	62
5.2.1 性能试验要求及设备	62
5.2.2 转向轻便性试验	63
5.2.3 转向回正性试验	67
5.2.4 转向阻尼试验	68
5.3 本章小结	70
第6章 结论与展望	71
6.1 结论	71
6.2 进一步工作的方向	72
致谢	73
参考文献	74
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	77

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

在能源危机和温室效应的背景下，新能源汽车以其节能环保的优势，受到了各国政府和各大汽车厂商的重视。“十一五”国家明确了新能源汽车发展规划以及启动了“十城千辆”节能与新能源汽车示范推广应用工程；“十二五”国家进一步明确了节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020)，新能源汽车越来越受到国家的重视，新能源汽车越来越走近老百姓的视野。

新能源汽车主要分三类：纯电动汽车（EV）、混合动力汽车（HEV）和燃料电池汽车（FCV）。燃料电池是一种将储存在燃料和氧化剂中的化学能转换为电能的电池^[1]。与传统的动力电池相比，它可以依靠不断供给的燃料和氧化剂维持电能输出，能量的维系不再受到充电时间和地点的限制，被认为是新能源汽车的一种理想动力源。燃料电池汽车已成为世界各大汽车集团新世纪激烈竞争的焦点，相关技术研究已取得重大成果，目前正处在产业化的途中。

氢燃料电池汽车作为燃料电池汽车的一种，以车载氢气为能量源、经燃料电池将氢气的化学能量转化为电能，以电机驱动车辆实现运输功能的汽车。氢作为交通运输行业的储能物质，具有可以大规模稳定储存、持续供应、远距离运输、快速补充的特点和优势，在未来以分布式为主、零排放为特征的能源构架中，氢能源系统作为能源之一，将满足交通运输、家庭生活、工业生产的能源需求，氢燃料电池汽车具有广阔的发展前景。

国际氢燃料电池汽车发展大致分为四个阶段：1) 2000 年之前主要完成了氢能燃料电池汽车的概念设计和原理性验证；2) 2000 年之后开始大力投入开展燃料电池汽车技术攻关研究，并陆续进行了技术验证性示范考核；3) 2010 年开始在特定用途领域商业化并取得成功；4) 2015 年之后乘用车开始面向部分区域的私人用户销售，初步进入商业化阶段。经过十几年的发展，氢燃料电池动力系统技术取得了一定的成果。2015 年丰田全新 Mirai 氢燃料电池轿车在日本国内率先上市，随后在美国和欧洲国家陆续上市。本田、奔驰、通用、现代、福特、宝马等国际车厂纷纷推出燃料电池汽车计划，燃料电池汽车新车型将计划在未来几年陆续推出上市销售。

国内在国家“863”计划“十五”电动汽车重大科技专项、“十一五”节能与新能源汽车重大项目、“十二五”电动汽车关键技术与系统集成重大项目的支持下，通过产学研联合研发团队的连续攻关，燃料电池电动汽车技术研发取得重大

进展。基于燃料电池轿车和客车动力系统技术平台，开发出多款燃料电池客车和燃料电池轿车。具备了百辆级燃料电池汽车动力系统平台与整车生产能力和进入国际市场的竞争力。先后在北京奥运会、上海世博会、GEF/UNDP 燃料电池城市客车商业化示范、新加坡青奥会、美国加州等活动和区域进行了示范运行。

虽然国内外燃料电池汽车技术取得了很大进步，但是燃料电池动力系统技术仍尚未成熟，存在集成化程度低、体积大、质量重等特点，导致同平台的燃料电池汽车相比传统汽车质量及轴荷增大，转向系统需要具备较大的转向助力能力；现阶段国内外燃料电池汽车开发主要是以传统车型平台为基础，通过动力系统替换和整车适应性改造而实现，前舱转向系统布置空间有限，便于布置和结构匹配容易实现，需要结构紧凑、模块化集成度高的动力转向系统；燃料电池汽车由于取消内燃发动机，原来靠发动机带动提供转向助力的动力转向泵失去动力源，传统的液压动力转向系统（HPS, Hydraulic Power Steering）已无法适应燃料电池汽车要求，转向系统需要自带独立的转向动力源^[2]。能满足燃料电池汽车上述特点和要求的助力转向系统主要有电动液压助力转向系统（EHPS, Electric Hydraulic Power Steering）和电动助力转向系统（EPS, Electric Power Steering）^[3]。EHPS 系统虽可以充分利用传统的液压动力转向系统技术，沿用较多成熟的 HPS 系统零部件，实现节能，提高转向性能，但液压装置仍存在，使得该系统仍有难以克服的环保缺点，是传统转向技术向未来动力转向技术发展的过渡技术，短期可以满足燃料电池汽车技术研究的要求，但无法成为燃料电池汽车产业化转向技术的发展方向。而 EPS 系统不存在液压装置，更加节能环保，模块化集成度高，转向性能和安全性方面比 EHPS 系统更佳，在传统汽车上已得到广泛的应用，适合燃料电池汽车转向技术的要求，已成为燃料电池汽车转向技术发展的主流^[2]。未来，转向系统还将朝着线控转向（SBW, Steering By Wire）技术发展^[4]。

现阶段国内外燃料电池汽车技术尚不成熟，考虑开发周期和成本因素，燃料电池轿车开发主要是以传统车型平台为基础，通过动力系统替换和整车适应性改造而实现。由于燃料电池动力系统存在集成化程度低、体积大和质量重等特点，导致基于原车型平台开发的燃料电池轿车质量和前轴载荷变大，其转向系统无法满足整车的开发要求。因此，需要基于原车型平台进行电动助力转向系统设计开发，使其布置、结构和转向性能达到燃料电池轿车开发要求。

笔者单位自 2006 年开始研发氢燃料电池汽车技术，先后研制成功第一代，第二代燃料电池轿车，目前正在研制第三代燃料电池轿车，是国内领先的燃料电池汽车研发单位。目前国外主机厂陆续推出氢燃料电池轿车量产计划，国内也面临市场的压力和挑战，单位迫切需要解决燃料电池轿车面向产业化开发在转向技术所面临的问题。

1.2 燃料电池轿车电动助力转向系统的发展现状及趋势

1.2.1 国外发展现状及趋势

电动助力转向系统 (EPS) 起源于上世纪八十年代, 并迅速得到高校和汽车生产厂商的关注。EPS 能够很好的改善驾驶员的操纵感, 弥补液压助力转向系统在节能环保方面的不足, 符合时代发展和市场的需求。国外对于 EPS 系统的研究起步较早, 日本从 20 世纪 80 年代开始即对 EPS 系统进行深入的研究, 起初由于 EPS 技术不太成熟, 主要应用于微型轿车^[5]。1988 年, 光洋精工成功研发出转向柱式电动助力转向系统, 并由铃木公司首先在小型轿车 Cervo 上装备, 随后还用在 Alto 车上^[6]。1990 年, 本田汽车公司在运动型轿车 NSX 上采用了本田公司自主研发的齿条助力式电动助力转向系统^[7]。欧美等国对 EPS 的研究虽然起步较晚, 但是开始后投入了大量的人力物力, 在技术上也获得了快速的发展。美国的德尔福 (DELPHI) 汽车公司、天合 (TRW) 汽车公司、德国的采埃孚 (ZF) 汽车公司等, 都相继推出了各自的电动助力转向系统^[7]。2003 年, 德国大众公司首先在第五代高尔夫上配备了 ZF 开发的双小齿轮式电动助力转向系统^[8]。

经过几十年的发展, 国外 EPS 技术日趋成熟, 先后研发成功了转向轴助力式 (C-EPS: Column-EPS), 齿轮助力式 (P-EPS: Pinion-EPS) 和齿条助力式 (R-EPS: Rack-EPS) 等各种类型的电动助力转向系统^[9], 研发生产 EPS 的企业都已具备大规模批量生产的能力。各大主机厂生产的乘用车市场配置 EPS 系统的占有率发展迅速, 逐渐将取代传统的 HPS 系统, 特别是推出的混合动力汽车和纯电动汽车, 几乎都配置了不同类型的 EPS 系统。近些年, 考虑到驾驶者以及某些高级乘用车对车辆行驶时的转向系统性能所提出的一些新要求, 国外 EPS 控制信号不仅需要考虑车辆行驶速度、方向盘操纵转矩信号, 而且需要进一步考虑方向盘角度信号、角速度以及横摆角速度、侧向加速度、路面附着系数等反映车辆运行状况的多个信号参数, 作为 EPS 中 ECU 的输入参数^[10], 最大程度地改善驾驶者的操纵手感, 提高车辆的安全行驶性能及操纵舒适性能^[11], EPS 控制技术已从成熟的助力控制、回正控制、阻尼控制等基本功能向摩擦控制、补偿控制等高级功能发展^[12]。

在 2000 年之前, 国外主要以概念车形式推出燃料电池汽车, 比较有代表性的包括戴姆勒-克莱斯勒的 NECAR1/2/3 系列燃料电池概念车, 丰田的 FCHV-1/2/3 燃料电池混合动力概念车, 本田 FCX-V1/2/3/4 燃料电池概念车, 通用汽车公司 HydroGEN1/2/3 燃料电池概念车等。这些概念车中采用的电动助力转向系统主要是实现基本的转向助力功能, 几乎没有考虑任何 EPS 系统性能匹

配的问题。在 2010 年之后，推出到市场的燃料电池乘用车均为租赁方式供客户体验使用。从推出的时间先后排序，包括本田公司的 FCX 燃料电池汽车、福特的燃料电池版福克斯轿车、日产的燃料电池版 X-Trail、梅赛德斯奔驰的 F-Cell、通用雪弗兰的 Equinox 燃料电池轿车、本田公司的 FCX Clarity 等。这些推出市场的燃料电池轿车主要是以传统车型平台为基础，通过燃料电池动力系统替换和整车适应性改造实现，转向系统基本都是沿用原车型平台的电动助力转向系统。尽管这些 EPS 系统针对原车型平台进行了充分的系统匹配设计和试验工作，转向轻便性、转向灵敏性、主动回正等特性满足原车型平台的转向开发要求，但缺少针对燃料电池轿车的特点和开发要求进行充分的系统匹配设计和试验工作，导致燃料电池轿车的 EPS 系统存在转向沉重、转便性差，回正残余角大、超调严重等问题，虽然可满足安全和可靠性的要求，但转向性能水平还需进一步提升。

从 2015 年开始，国外随着燃料电池技术的逐渐成熟，燃料电池乘用车开始面向部分区域的私人用户销售，进入商业化阶段。2015 年丰田公司推出未来 (Mirai) 燃料电池轿车，仅限在日本、美国和欧洲销售，2016 年本田推出仅在日本本土销售的燃料电池轿车 Clarity。这些推出市场的燃料电池轿车采用的电动助力转向系统基本实现了针对燃料电池轿车的特点和开发要求进行 EPS 系统匹配设计开发，性能标定和试验都比较充分完善，转向的轻便性、灵敏性、主动回正及阻尼性能和功能安全方面均可以满足产业化的要求。

1.2.2 国内发展现状及趋势

由于国外汽车公司技术保密等原因，国内对 EPS 技术的研究开发工作起步较晚。国内最早开始 EPS 研究的主要是高等院校，1998 年，吉林大学在国内率先开展轿车 C-EPS 的研究，并于 2000 年成功地安装到了昌河北斗星上，掀开了国内汽车转向历史上新的一页^[13]。由于它在转向方面跨跃性的优势，很受消费者的喜爱。正是北斗星在国内首装 EPS，带动了国内电动助力转向的研究热潮。2000 年 9 月，国家正式将电动助力转向系统列为汽车“高新技术产品”之一。2003 年，清华大学开始对 C-EPS 进行研究；2006 年，同济大学研究的 C-EPS 进行了实车试验；另外，天津大学、北京科技大学、华中科技大学、江苏大学、合肥工业大学、武汉理工大学、大连理工大学等院校也积极开展 EPS 的研究^[14]。同时，各高校和企业也强强联合，共同进行 EPS 技术的研发及产业链的建设，逐渐形成了产、学、研一体的研发模式。

经过十几年的发展，国内 EPS 研究取得了很大的成果。研究开发 EPS 的企业很多，但目前多数企业主要集中在小功率的 C-EPS 系统研究和开发。其中，株洲易力达机电有限公司已开发出 C-EPS 系统，在国内装车市场具有较大的规

模；浙江福林国润汽车零部件有限公司开发的 C-EP S 系统在吉利部分汽车车型上进行装车；比亚迪汽车自主研发的 EP S 已在比亚迪较多车型上装车配套；上汽集团自主研发的 C-EP S 和 P-EP S 在自主品牌荣威和 MG 车型上装车配套。据统计，昌河北斗星、奇瑞 A3，夏利，奇瑞 QQ，比亚迪 F3DM，上汽集团等自主品牌车型都标配或选配了本土 EP S 供应商研发的 EP S 产品。但国内企业自主开发的 EP S 技术与国外还存在较大差距，目前大量装车应用的主要是 C-EP S，采用的电机主要以有刷电机为主，具备基本的转向助力控制功能，在回正控制和阻尼控制技术上还较落后，可靠性需要提高。上汽集团自主研发的 EP S 技术起点较高，采用了无刷电机，并具备转向助力控制、主动回正控制和阻尼控制等功能，先后开发成功了 C-EP S 和 P-EP S 产品，装车规模上逐渐扩大。

总体来讲，中国本土企业的 EP S 系统开发技术，在采用有刷电机的 C-EP S 技术和实现转向基本功能的助力控制技术上较成熟，但在采用无刷电机技术、传感器技术、高级功能的控制技术和产品可靠性等方面与国外存在一定差距。目前 EP S 产品类型很单一，主要以 C-EP S 为主。P-EP S 仅有少数企业研发成功，很多企业仍处于研究，如株洲易力达、湖北恒隆汽车企业、豫北汽车转向系统有限公司和天津德科汽车部件有限公司等。在 EP S 高级功能的控制技术方面，只有部分转向技术研发能力强的企业正在开始着手研究，但 R-EP S 技术自主开发仍是空白。目前国内生产的 EP S，在系统性能匹配技术方面还比较弱后，而 EP S 系统匹配设计对系统性能及评价非常关键。国内仅有吉林大学，北京理工大学，江苏大学、同济大学等几所高校对 EP S 系统的匹配分析进行了研究，因此开发大功率的 EP S 系统，提高可靠性，进行匹配设计研究和转向高级功能的控制技术成为国内企业研发 EP S 技术的重点。

2006 年，由上海汽车、上海燃料电池汽车动力系统有限公司与同济大学联合开发的燃料电池轿车，当时由于国内 EP S 技术水平较弱，缺少国外 EP S 供应商的支持，只能采用 EHPS 系统实现基本的转向功能，存在转向沉重，助力能力不足，回正性能很差。2008 年北京奥运期间，由上海大众、上海燃料电池汽车动力系统有限公司与同济大学联合开发的帕萨特燃料电池轿车组车的车队在奥运会示范应用并提供交通服务，当时国内缺少大功率的 EP S 系统技术，为满足示范应用要求，转向系统仍只能采 EHPS 系统，而且缺少系统性能匹配设计和充分的试验，转向仍存在转向沉重，助力能力不足，回正残余角大和超调等问题。2010 年上海世博会，集成“新一代”自主知识产权的燃料电池轿车动力系统平台，上汽集团的“上海牌”燃料电池轿车、一汽奔腾燃料电池轿车、长安志翔燃料电池轿车、奇瑞东方之子燃料电池轿车组成的车队参加了中国最大规模的燃料电池轿车示范应用，这些燃料电池轿车基本都是基于传统车型平台上进行燃料电

池动力系统替换进行的整车适应性改造实现，转向系统除了部分采用 EHPS 系统外，其余都采用了电动助力转向系统。这些采用 EPS 系统的燃料电池轿车，由于考虑开发周期长和成本高的因素，缺少针对燃料电池轿车的特点和开发要求进行 EPS 系统匹配设计和试验工作，因此转向存在转向轻便性不佳、主动回正及阻尼控制性能差的问题。

2010 年后，国内研发燃料电池乘用车的整车企业较少，主要是上汽集团。上汽集团先后基于荣威 750 和 950 平台研发了“新一代”燃料电池轿车并进行了小批量的生产，采用的都是电动助力转向系统。但由于国内燃料电池动力系统技术还很不成熟，考虑开发周期和成本，研发的“新一代”燃料电池轿车仍然主要是基于原传统车型平台，通过动力系统替换和整车适应性改造实现。采用的 EPS 系统仍然没有针对燃料电池轿车的特点和开发要求进行充分的系统匹配设计，缺少完善的性能标定和试验，存在转向助力能力不足，转向助力随速性能欠佳、主动回正及阻尼控制性能较差等问题，因此距离小批量生产和产业化要求还存在较大差距。

1.3 本文的主要研究内容

本文针对单位研发的氢燃料电池轿车，见图 1.1。学习借鉴较成熟的传统车 EPS 系统设计开发经验，进行 EPS 系统选型、布置设计、结构及参数匹配设计和控制策略设计，并通过台架试验、性能标定和实车试验进行验证，开发出满足燃料电池轿车工程产业化要求的 EPS 转向系统。主要研究内容包括：

(1) 分析了燃料电池汽车对转向系统的要求，并对适合燃料电池轿车的电动助力转向系统的国内外发展现状及趋势进行了概述，指出了现阶段燃料电池轿车电动助力转向系统普遍存在转向助力能力不足，转向助力随速性能欠佳，转向主动回正和阻尼性能较差的问题；

(2) 介绍了电动助力转向系统的基本组成及工作原理，分析了电动助力转向系统的类型及其特点。对燃料电池轿车电动助力转向系统的技术要求做了归纳分析，并对燃料电池轿车电动助力转向系统的设计与试验流程进行了介绍；

(3) 根据燃料电池轿车电动助力转向系统的技术要求，进行助力型式的选择和系统布置的方案设计，并对电动助力转向系统的转向器、减速机构、电机和传感器关键部件进行了结构和参数的匹配设计，以及对助力控制、回正控制和阻尼控制的控制策略进行了设计；

(4) 参考《汽车电动助力转向装置技术要求和试验方法》标准征求意见稿，结合单位研发电动助力转向系统的台架试验规范，对燃料电池轿车电动助力转向

系统的转向助力能力进行了台架试验研究，并对台架试验结果进行了分析；

(5) 参考《GB/T6323-2014 汽车操纵稳定性试验方法》标准并结合单位研发电动助力转向系统的标定和性能试验规范，对燃料电池轿车电动助力转向系统的助力控制、主动回正及阻尼控制参数进行了标定和实车性能试验研究，并对性能试验结果进行了分析。



图 1.1 燃料电池轿车

第2章 燃料电池轿车电动助力转向系统

燃料电池轿车电动助力转向系统跟传统汽车的电动助力转向系统基本组成和工作原理类似，主要是根据燃料电池动力系统的特点，结合整车质量、布置空间及整车性能等开发要求进行设计开发。

2.1 电动助力转向系统基本组成及工作原理

燃料电池轿车电动助力转向系统，是一种直接依靠电动机提供辅助转矩的动力转向系统，可以根据不同的使用工况控制电动机提供不同的辅助动力^[16]。其主要部件包括转向轴、转向器、减速机构、电动机、传感器和电子控制单元（ECU）等，图 2.1 为 EPS 系统的示意图。

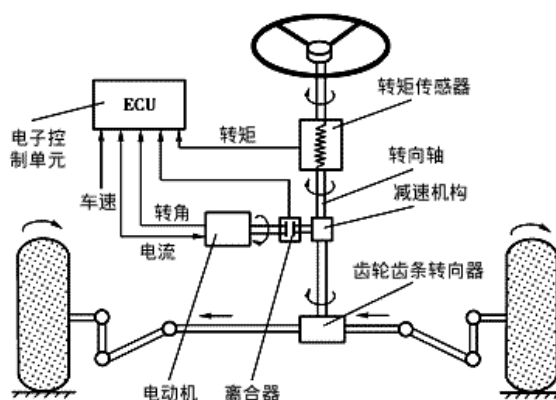


图 2.1 EPS 系统的示意图

电动助力转向系统的转向轴由转向输入轴和转向输出轴组成。转向输入轴通过转向管柱与方向盘连接。转向输出轴与转向器连接，通过转向器的转向拉杆控制车辆的车轮转动。转向输入轴与转向输出轴通过扭杆连接，转矩传感器安装在转向输入轴与转向输出轴之间。当转向轴转动时，在扭杆作用下，转向输入轴相对于转向输出轴有角位移，转矩传感器开始工作，此时将产生的相对转角转变成电信号传给 ECU。ECU 根据转矩传感器、车速传感器和转角传感器等信号计算处理控制电动机的旋转方向和电流的大小^[17]。电动机通过减速机构将辅助动力施加到转向系统中，从而完成转向的实时助力控制、回正控制和阻尼控制等功能。

2.2 电动助力转向系统的类型及其特点

燃料电池轿车电动助力转向系统根据电动机布置位置的不同,主要分为三种类型。分别为转向轴助力式(C-EPS)、齿轮助力式(P-EPS)和齿条助力式(R-EPS)三种。图 2.2 为电动助力转向系统的类型。

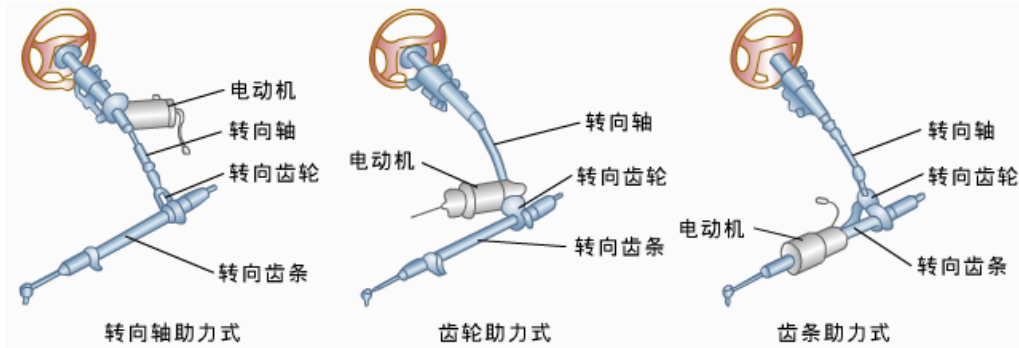


图 2.2 电动助力转向系统的类型

(1) 转向轴助力式

转向轴助力式电动助力转向系统(C-EPS)的电动机一般安装在转向管柱处,通过减速机构直接带动转向轴,转向轴将力传递给转向器,通过转向器的转向拉杆控制车辆的车轮转向^[18]。电动机、减速机构和转向轴设计时应综合考虑装配工艺性、维修方便、占用布置空间小等因素,进行模块化集成设计。但是由于电动机布置的位置离方向盘和驾驶舱很近,转向时输出力矩的波动容易传递到方向盘上,同时电动机工作的噪声也需要很好的控制。C-EPS 的电机布置于驾驶舱,集成在转向管柱上,其防水防尘要求低,对电动机的工作振动和噪声要求较高,提供的转向助力一般较小,适合于前轴负荷较小的车辆。

(2) 齿轮助力式

齿轮助力式电动助力转向系统(P-EPS)的电动机一般通过减速机构安装在转向器的转向齿轮输入轴上,与转向器集成在一起,其它的部件都与 C-EPS 系统相同^[13]。P-EPS 的电动机经减速机构直接驱动转向器的转向齿轮进行助力,布置在发动机舱,对电机的体积和工作噪声较 C-EPS 要求较低,但防水防尘要求较高,可以提供的转向助力较大,因此 P-EPS 适用于前轴负荷较大的车辆。

(3) 齿条助力式

齿条助力式电动助力转向系统(R-EPS)的电动机经减速机构直接连接至转向器的转向齿条上,因此这种助力系统提供的助力较大,而且系统刚度好,所以这种系统适用于较 C-EPS 和 R-EPS 两种前轴负荷都大的车辆。R-EPS 又分为双小齿轮式 EPS(简称 DP-EPS)和带传动 EPS(简称 BD-EPS)。

上述各种类型的电动助力转向系统,其选用的电机类型、转向器具有的齿条力能力和布置均具有各自的特点,表 2.1 为各种类型的电动助力转向系统特点。

表 2.1 各种类型的电动助力转向系统特点

助力类型	转向齿条力适用范围		布置特点
	电机类型	齿条力范围 (KN)	
C-EPS	有刷电机	2.5~8	电机、减速机构和 ECU 布置于驾驶舱, 集成在转向管柱上, 电机噪声要求高, 防水防尘要求低。
	无刷电机	5.5~10	
P-EPS	无刷电机	7~12	电机、减速机构和 ECU 布置位于发动机舱, 集成在转向齿轮上, 防水防尘要求高。
R-EPS	无刷电机	7~16	电机、减速机构和 ECU 布置于前副车架附近, 集成在转向齿条上, 防水防尘要求高。

2.3 燃料电池轿车电动助力转向系统技术要求

汽车转向系统是用来保持或改变汽车行驶方向的机构, 在汽车转向行驶时, 还要保证各转向轮之间有协调的转角关系^[19]。燃料电池轿车电动助力转向系统的功用是保证燃料电池轿车能按驾驶员的意愿进行直线或转向行驶, 需具有完善的助力特性、平滑的手感、良好的路感和良好的转向操稳性能^[20]。其主要技术要求如下:

(1) 转向轻便。驾驶员通过方向盘输入转向动作时, 电机需要随着不同的车速提供合适的助力^[21]。在低速时提供的助力大, 随着车速的提高, 助力减小, 阻尼增加, 防止高速“发飘”, 提高行车路感及安全。转向的轻便性主要通过静态转向力和动态转向力体现, 驻车工况转向表现的是静态转向力, 中低速工况转向表现的是动态转向力, 一般要求驻车转向时方向盘的转向力不大于 29N。

转向手力矩是施加在方向盘上的转向力矩, 直接反映了方向盘的转向力大小, 它是转向性能中的关键指标。转向的轻便性能可以通过转向手力矩来评判。由于各汽车公司对 EPS 系统要求不同, 市场上不同品牌、不同车型的转向手力矩要求也不一样, 乘用车方向盘手力矩要求见表 2.2。一般大众汽车车型对 EPS 轻便性比较苛刻, 要求转向手力矩比较小, 通用汽车车型宽松一些, 允许转向手力矩大些。转向手力矩的要求对系统的开发成本、周期等多方面都有影响。

表 2.2 乘用车方向盘手力矩要求

汽车行驶工况	最大齿条力 (%)	转向速度 (%/s)	方向盘手力矩 (Nm)
驻车工况	95	0~360	4~5.5 (95%转角行程)
低速 (<70km/h)	70	500	4~6 (+/-180°转角行程)
高速 (>70Km/h)	40	800	10~15 (+/-90°转角行程)

(2) 转向自动回正。驾驶员在转向后, 方向盘应能自动回正, 使汽车保持在稳定的直线行驶状态^[7]。车辆在低速下回正不足, 应该施加回正控制, 以减小

残留侧向加速度、横摆角速度和转向盘转角；而在中高速下，车辆有较大的回正超调和振荡，应该施加阻尼控制，以尽可能快的使振荡衰减下来^[21]，抑制回正超调现象。转向自动回正要求转向回正时回到中位，回正速度变化连续和均匀，回中无超调现角和较小的残余角，回正手感柔顺并无迟滞性。

(3) 转向工作可靠，具有故障安全功能。EPS 系统工作时，应实时监控系统的工作状态，当出现任何故障时，除上报故障在汽车仪表上亮灯提示驾驶员外，还应采取各种相应措施来保证转向功能正常，确保汽车安全运行。

当 EPS 系统判断工作环境温度过高或过低有可能导致轻微故障或严重故障现象时，应限制转向助力或停止转向助力采取机械转向，确保系统能正常工作，同时上报故障并亮灯提示，表 2.3 为转向功能随工作环境温度变化要求。当 EPS 系统判断蓄电池供电电压过高或过低导致轻微故障或严重故障现象时，应限制转向助力或停止转向助力采取机械转向，确保系统能正常工作，同时上报故障并亮灯提示，表 2.4 为转向功能随电压变化要求。当 EPS 系统判断系统相关零部件如电机、传感器或其线束等工作不正常有可能导致轻微故障或严重故障现象时，应限制转向助力或停止转向助力采取机械转向，同时上报故障并亮灯提示，确保系统能正常工作。

表 2.3 转向功能随工作环境温度变化要求

工作环境温度 (°C)	转向功能
-40~-29	转向助力限制
-29~105	转向助力全功能
70~90	转向助力全功能
105~120	转向助力限制

表 2.4 转向功能随电源电压变化要求

电源电压范围 (V)	转向功能
12.8~16	转向助力全功能
10~12.8	转向助力限制，允许方向盘手力变化
9~10	转向助力限制，允许方向盘手力变化
>16	转向助力限制
<9	转向丧失助力

燃料电池轿车电动助力转向系统的性能要求主要是根据燃料电池轿车 EPS 的技术要求，综合齿条力、燃油消耗、布置、重量、成本，同时考虑安全、性能和开发周期等来确定。燃料电池轿车电动助力转向系统的性能要求主要包括：静态转向力、动态转向力、低速回正性和转向阻尼等，表 2.5 为论文研究的燃料电池轿车 EPS 系统的主要性能要求。

表 2.5 燃料电池轿车 EPS 系统的主要性能要求

性能		内容		设计要求
转向 轻便性	静态转向力	3M 试纸, 车速 0kph, 360° 方向盘转角 (SWA), 施加在方向盘轮缘上的作用力。		≤29N
	动态转向力	车速 20kph	侧向加速度 0g	10~30N
			侧向加速度 0.1g	13~33N
			侧向加速度 0.25g	15~35N
		车速 60kph	侧向加速度 0g	7~27N
			侧向加速度 0.1g	9~29N
侧向加速度 0.25g			11~31N	
低速回正性	车速 20kph, 方向盘转角 180° 以上, 回正时握持方向盘所需力矩。		>0.5Nm	
转向阻尼	车速 100kph, 侧向加速度 0.4g, 释放方向盘, 横摆角速度从最大值衰减到稳态, 所需的时间。		<1.5s	

2.4 燃料电池轿车电动助力转向系统设计与试验流程

燃料电池轿车电动助力转向系统的设计与试验流程跟传统汽车电动助力转向系统设计与试验流程基本类似。图 2.3 为燃料电池轿车 EPS 系统设计与试验流程图。

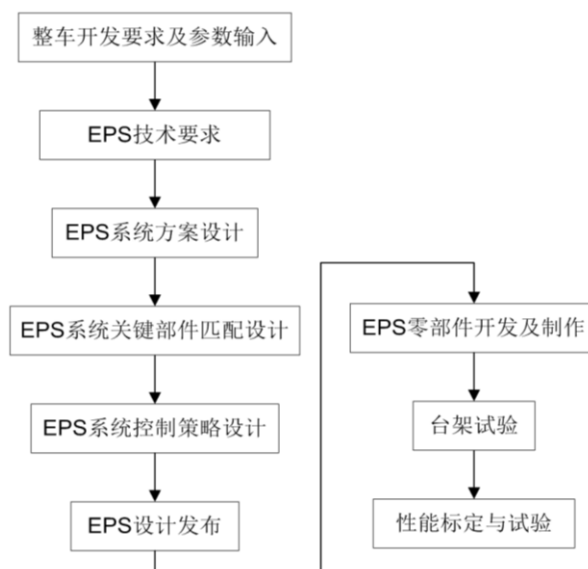


图 2.3 燃料电池轿车 EPS 系统设计与试验流程图

在进行 EPS 系统设计前, 应根据燃料电池轿车的整车开发要求及整车参数输入进行转向功能和性能分析并确定 EPS 系统的技术要求, 技术要求是对转向设计开发过程中所提出的技术性内容和性能的要求描述, 主要包括转向轻便、转向自动回正和转向功能安全等要求。

当确定 EPS 技术要求后，首先需要对 EPS 系统进行方案设计。方案设计是设计中的重要阶段，该阶段主要是从 EPS 技术要求出发，对实现 EPS 系统功能和性能所需要的系统类型进行选择，并结合整车布置要求进行系统的布置设计。EPS 方案设计完成后的主要任务是对 EPS 系统关键部件进行匹配设计，匹配设计是设计过程中的关键阶段，主要是依据选择的 EPS 类型及系统布置设计要求对转向器、减速机构、电机和传感器等关键部件进行选型，以及根据技术要求中确定的性能要求对关键部件的参数进行确定。EPS 系统部件匹配设计完成后需要进行 EPS 系统控制设计，EPS 系统控制策略设计是控制设计的核心，需要运用控制理论编制软件算法对 EPS 电机进行控制，主要包括助力控制、回正控制和阻尼控制等，达到 EPS 技术要求中确定的转向轻便性、转向回正性和转向阻尼等要求；在完成所有相关设计后再进行 EPS 系统设计发布。EPS 系统设计发布在 EPS 设计与试验流程中，是关键的一步，它意味着设计状态的锁定，锁定后设计是不能轻易更改的，后续的 EPS 零部件开发和试验都是围绕设计发布的要求进行了。

EPS 系统设计发布后，主要工作就是根据设计的要求进行零部件的开发与制作，并进行相关试验验证。试验是燃料电池轿车电动助力转向系统设计开发流程中的重要环节之一，其目的是为了检验设计开发的产品性能是否达到了设计的要求，电动助力转向系统试验主要包括台架试验、性能标定和性能试验，台架试验主要检验 EPS 系统级的功能和相关性能，性能标定和性能试验主要是通过修改 EPS 控制参数来调整转向的手感性能，并通过实车对手感性能进行主客观评价，保证达到转向设计的性能要求。

表 2.6 原平台轿车和燃料电池轿车整车参数

项目		整车参数	
		原车平台轿车	燃料电池轿车
外形尺寸 (mm)		4865/1765/1422	
总质量 (kg)	整备状态	1583	1940
	满载状态	2000	2315
前轴轴荷 (kg)	整备状态	950	1025
	满载状态	1040	1119
后轴轴荷 (kg)	整备状态	633	915
	满载状态	960	1196
轴距 (mm)		2849	

论文研究的燃料电池轿车，由于动力系统的变化，导致燃料电池轿车相比原车型平台质量和前后轴荷发生较大变化，满载质量比原平台轿车增加了 315kg，满载前轴轴荷比原平台轿车增加了 79kg，表 2.6 为原平台轿车与燃料电池轿车整

车参数。因此需要基于原车型平台按照电动助力转向系统的设计与试验流程进行相关设计，使布置、结构和性能满足设计要求，并通过试验验证转向性能达到燃料电池轿车的开发要求。

2.5 本章小结

本章首先介绍了电动助力转向系统的基本组成及工作原理，对其结构类型及特点进行了阐述。然后对燃料电池轿车电动助力转向系统的技术要求做了归纳分析总结，最后介绍了燃料电池轿车电动助力转向系统的设计与试验流程，以及在设计及试验过程中的主要工作。

第3章 燃料电池轿车电动助力转向系统设计

燃料电池轿车电动助力转向系统的设计工作主要是根据燃料电池轿车载荷和布置空间等特点,进行助力型式选择和系统布置设计确定总体设计方案;围绕总体设计方案对关键部件进行系统结构和系统参数的匹配设计;并进行转向的助力控制、回正控制和阻尼控制等的控制策略设计,使设计满足燃料电池轿车的EPS系统的技术要求。

3.1 燃料电池轿车电动助力转向系统方案设计

燃料电池轿车电动助力转向系统的方案设计主要工作是对实现EPS系统功能和性能所需要的系统类型进行选择,并结合整车布置要求进行EPS系统的布置设计。

3.1.1 助力型式的选择

助力型式的选择主要是确定EPS系统电动机的助力位置。助力位置是指助力电动机输出的助力转矩施加在转向系统中的具体位置。助力位置的选择对电动助力转向系统的性能有着重大影响。燃料电池轿车助力位置的选择要考虑整车前轴载荷大小、空间布置要求、机械系统设计的难易程度、电动机转矩波动对驾驶员的影响、安装的方便性等诸多因素,并进行综合权衡^[20]。

(1) 汽车前轴载荷的大小,是决定采用何种EPS助力型式的关键。转向助力需求的大小主要取决于前轴载荷,不同助力形式的EPS系统具有不同程度的助力能力。例如,德国ZF公司开发的EPS,对于前轴最大载荷小于6KN的汽车,一般选择C-EPS;对于前轴最大载荷小于11KN的中型轿车,常选择P-EPS;对于前桥最大载荷大于11KN的高级轿车或者轻型商用车,多选用R-EPS。目前研发的燃料电池轿车,由于燃料电池动力系统集成化程度低,需要较大的前舱空间布置,一般会选择高级别的轿车平台进行开发。另外,燃料电池动力系统相比原平台动力系统质量增加,导致前轴载荷增大,因此燃料电池轿车大多数选择P-EPS或R-EPS的电动助力转向系统,该两种EPS助力电机功率较大,助力性能匹配实现容易。

(2) 布置空间是确定电动助力转向系统助力型式的重要因素。现阶段的燃料电池轿车主要是基于原车型平台进行适应性改造开发,一般会尽可能的沿用原

车型平台的设计硬点。在汽车设计中，设计硬点是总布置设计过程中，为保证零部件之间的协调和装配关系，以及造型风格要求所确定的控制点（或坐标），控制线，控制面及控制结构的总称^[22]。设计硬点是汽车零部件设计和选型，内外饰附件设计及车身钣金设计、底盘设计的最重要的设计原则，一般确定后设计硬点不轻易调整^[17]。燃料电池轿车相比原车型平台布置变化较大的部分主要是前舱、后备箱和车体下方部分，涉及布置的系统包括前舱燃料电池动力系统模块、燃料电池发动机排气系统、动力蓄电池和车载供氢系统，图 3.1 为燃料电池轿车总布置示意图。C-EPS 相比传统转向系统，需要转向管柱周边的布置空间更大。如果采用 C-EPS，由于原转向管柱在驾驶舱内设计紧凑，没有预留足够的空间，所以无法在驾驶舱内安装。如想安装，必须对原车车身做较大改动，势必会增加设计难度及工作量，并且很难保证原平台轿车转向系统的设计硬点不变。因此常选择 P-EPS 或 R-EPS，这两种类型的结构布置所需要的空间主要在前舱及副车架附件，燃料电池轿车布置匹配容易实现。

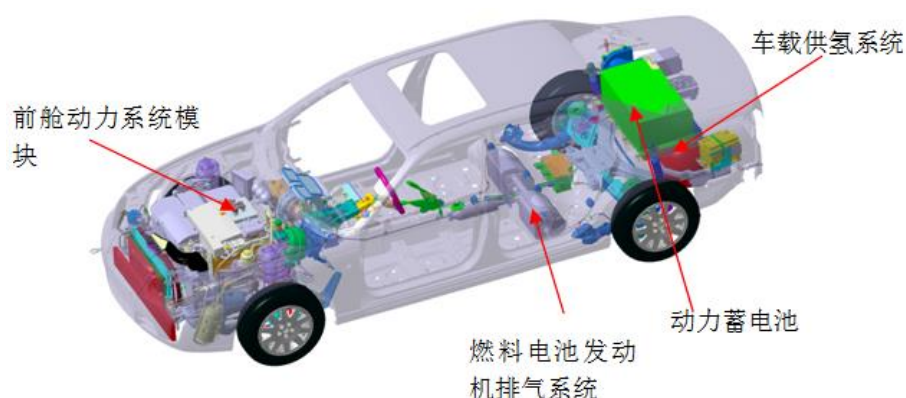


图 3.1 燃料电池轿车总布置示意图

(3) EPS 系统设计开发难度、成本和开发周期也是确定助力型式的考虑因素。现阶段国内外燃料电池轿车量产车型很少，各主要汽车制造商几乎很少针对燃料电池系统匹配开发底盘平台，为节省开发成本，缩短开发周期，相应的电动助力转向系统多数都是借用现有的传统量产轿车开发的 EPS 系统，因此在进行燃料电池轿车电动助力转向系统助力型式选择时，都会考虑基于现有的传统量产轿车已有的 EPS 系统结构型式进行选择，在此基础上进行应用开发，满足燃料电池轿车的开发要求。

论文研究的燃料电池轿车满载前轴轴荷为 1119kg，约 10.97KN，根据各种类型的 EPS 系统的转向助力能力以及前轴载荷的适用范围，考虑到沿用原平台轿车转向系统的设计硬点以及转向管柱周边有限的布置空间因素，可选择 P-EPS 或 R-EPS。但结合研究的燃料电池轿车笔者单位现量产车型仅有 C-EPS 和 P-EPS 两种系统类型的综合考虑，确定选择 P-EPS 类型的电动助力转向系统。表 3.1 为

选择的 P-EPS 系统结构及基本参数。

表 3.1 选择的 P-EPS 系统结构及基本参数

系统类型	齿轮式助力转向系统	系统结构	方向盘可调，溃缩式转向管柱，集成电机式转向器
转向器结构	齿轮齿条式	减速机构结构	涡轮蜗杆传动
电机类型	永磁同步电机	扭矩传感器类型	非接触式扭矩转角传感器
方向盘直径	380mm	方向盘总圈数	2.81 圈
转向器齿轮齿条传动比	59mm/rev	转向器齿条行程	165.8mm
电机最大输出转矩	4.7Nm	电机最大转速	2900rpm
涡轮蜗杆传动比	21	涡轮蜗杆传动效率	85%
中间轴效率	96%	转向器效率	90%

3.1.2 系统布置设计

燃料电池轿车整车总布置设计时会根据整车设计要求确定底盘的设计硬点及底盘总体结构，EPS 系统的布置设计需要在满足各系统布置要求的前提下进行，其设计准则如下：

(1) 满足转向系统设计硬点要求

转向系统设计硬点主要包括方向盘中心点、转向机输入轴点、转向机内球头中心点、转向机外球头中心点，图 3.2 为转向系统设计硬点示意图。转向盘中心点是总布置依据人机工程设计确定的，转向机输入轴点、转向机内球头中心点和转向机外球头中心点是根据底盘运动学设计确定的，这些设计硬点位置构建了转向系统布置的空间位置。

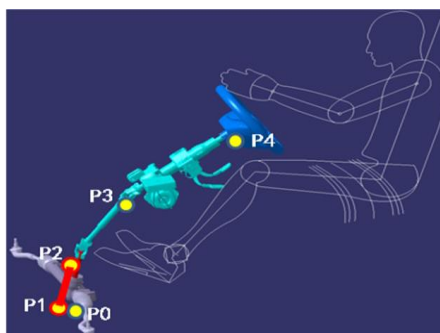


图 3.2 转向系统设计硬点示意图

(2) 满足转向系统零部件结构要求

燃料电池轿车 EPS 的布置设计不仅需要满足 EPS 系统零部件的结构特点，而且需要根据其结构特点定义清楚各种零部件的结构设计包络面，这些结构设计包络面是指导零部件结构设计与开发的依据。

(3) 满足转向系统装配和维修的要求

燃料电池轿车 EPS 在进行布置设计时需要考虑到零部件的装配和维修工艺方便性。

论文研究的燃料电池轿车依据布置设计准则,在沿用原平台轿车的转向系统设计硬点的基础上,结合燃料电池轿车的特点,对选择的 P-EPS 系统进行布置设计,图 3.3 为燃料电池轿车 P-EPS 系统布置总体方案。

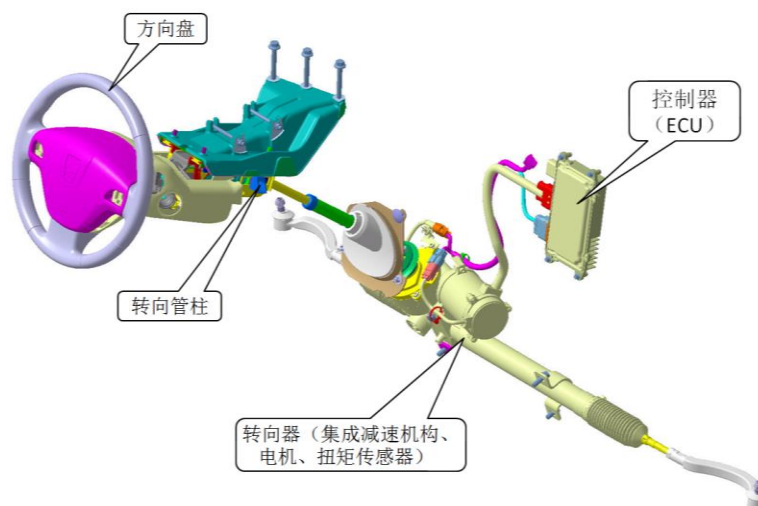


图 3.3 燃料电池汽车 P-EPS 系统布置总体方案

3.2 燃料电池轿车电动助力转向系统匹配设计

燃料电池轿车 EPS 系统设计的重要任务是对 EPS 系统关键部件进行合理的匹配设计,以保证转向时具有完善的助力特性、平滑的手感、良好的路感和良好的转向操纵稳定性能。

3.2.1 匹配设计分析

电动助力转向系统匹配设计的主要内容包括系统结构的匹配设计、系统参数的匹配设计以及传感器的匹配设计^[20]。系统结构的匹配设计主要是对转向器结构类型、减速机构结构类型、电动机类型和传感器类型进行选择。系统参数的匹配设计主要包括转向器性能参数的选择、减速机构传动比的确定、电动机参数的选择和传感器性能参数的确定。

根据汽车转向设计理论,齿轮齿条式电动助力转向系统存在一定的力传递关系,图 3.4 为 P-EPS 力传递关系示意图。

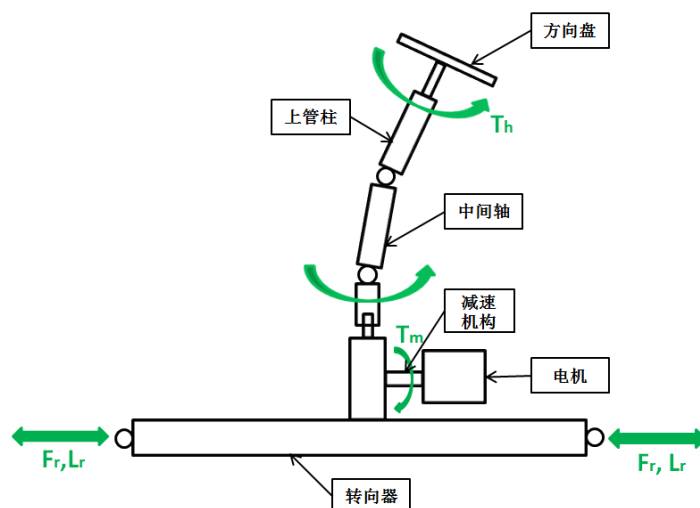


图 3.4 P-EPS 力传递关系示意图

P-EPS 系统参数存在如下关系

$$(T_h * \eta_2 + T_m * i * \eta_1) * \alpha * \eta_3 = F_r * L_r \quad (3.1)$$

式中， T_h 为方向盘手力矩，单位： $\text{N}\cdot\text{m}$ ； T_m 为电机输出转矩，单位： $\text{N}\cdot\text{m}$ ； i 为涡轮蜗杆传动比； η_1 为涡轮蜗杆效率； η_2 为中间轴效率； α 为转向轴转角； η_3 为转向器效率； F_r 为转向器齿条力，单位： KN ； L_r 为转向器齿条行程，单位： mm 。

转向轴转角是指在旋转方向盘时所转过的角度，它随着方向盘圈数变化而变化，转向轴转角计算公式如下

$$\alpha = 2\pi * n_h \quad (3.2)$$

式中， n_h 为方向盘圈数。

在齿轮齿条式转向器工程设计开发中，转向器的齿条行程与方向盘圈数比值通常称为转向器齿轮齿条传动比，计算公式如下

$$i_{c-factor} = \frac{L_r}{n_h} \quad (3.3)$$

式中， $i_{c-factor}$ 为转向器齿轮齿条传动比，单位： mm/rev ； L_r 为转向器齿条行程，单位： mm ； n_h 为方向盘圈数。

由式 (3.1)、(3.2) 和(3.3)推导可知，P-EPS 的转向器齿条力计算公式如下

$$F_r = \frac{(T_h * \eta_2 + T_m * i * \eta_1) * 2\pi * \eta_3}{i_{c-factor}} \quad (3.4)$$

式中， F_r 为转向器齿条力，单位： KN ； T_h 为方向盘手力矩，单位： $\text{N}\cdot\text{m}$ ； T_m 为电机输出转矩，单位： $\text{N}\cdot\text{m}$ ； i 为涡轮蜗杆传动比； η_1 为涡轮蜗杆效率； η_2 为

中间轴效率； η_3 为转向器效率； $i_{c-factor}$ 为转向器齿轮齿条传动比，单位：mm/rev。

针对 P-EPS 系统，由式 (3.4) 可知，转向器的齿条力和方向盘手力矩、电机输出转矩成正比，与转向器齿轮齿条传动比成反比。在保证方向盘手力矩一定要求的前提下，可以通过调整电机输出力矩和转向器齿轮齿条传动比来改变转向器的齿条力，实现转向助力的匹配。

燃料电池轿车电动助力转向系统的匹配设计需要综合考虑 EPS 系统的技术要求、安全、布置、成本、重量和开发时间等多种因素。表 3.2 为 EPS 系统匹配设计的主要项目，主要关键部件结构选择和相关参数的匹配。

表 3.2 EPS 系统匹配设计主要项目

项目	说明	项目	说明
转向器结构	根据悬架结构及系统类型选择	转向器齿轮齿条传动比	根据转向灵敏性要求确定
转向器最大齿条力	根据前轴载荷确定	转向器齿条行程	根据整车性能和底盘设计硬点确定
减速机构结构	根据系统选型和布置要求选择	涡轮蜗杆传动比	根据系统选型及减速机构结构确定
电机类型	根据系统选型和助力要求确定	电机最大功率	根据电机选型及电机特性确定
电机最大输出扭矩	根据转向轻便性要求确定	电机最大转速	根据电机选型及电机特性确定
扭矩传感器类型	根据系统选型和功能要求确定	扭矩传感器参数	根据系统性能和控制目标要求确定

3.2.2 系统结构匹配设计

3.2.2.1 转向器结构类型选择

转向器又称为转向机、方向机，它的作用是为了增大方向盘作用到转向传动机构的力，并且改变力的传递方向^[23]。转向器按结构形式可分为多种类型，目前较常用的有齿轮齿条式转向器、蜗杆曲柄指销式转向器和循环球一齿条齿扇式转向器等^[24]。

转向器结构类型的选择，主要是根据汽车的类型、前轴载荷、布置要求、使用条件等来决定。另外还需要考虑其效率特性、角传动比变化特性、装配及维修、寿命和成本等因素。

齿轮齿条式转向器是以齿轮和齿条传动作为传动机构，主要由转向器壳体、转向齿轮、转向齿条、转向外拉杆、转向内拉杆和防尘罩等组成。由于其具有结构简单紧凑，重量轻，刚性大，转向灵敏，制造容易，成本低，正、逆效率都高等特点，适合与麦弗逊式独立悬架配用，轿车、微型货车和轻型货车应用广泛。

燃料电池轿车一般是前置-前轮驱动，前悬架大多数是麦弗逊式独立悬架，普遍采用的都是齿轮齿条式转向器。

齿轮齿条式转向器的结构主要是根据转向系统的布置设计和性能要求确定，性能参数包括齿条行程、齿轮齿条传动比和转向齿条力等，图 3.5 为转向器结构布置示意图。转向器壳体结构是根据整车动力总成布置和尺寸要求，结合副车架的结构型式来确定，包含转向器支架位置和总长度等；转向外拉杆和内拉杆结构不仅需要满足整车轮距、动力总成布置及尺寸要求，而且还应满足摆臂的球头设计硬点要求；转向齿条、转向内拉杆和转向外拉杆直径以及转向齿轮、齿条结构等都需要根据齿轮齿条传动比、转向齿条行程和最大齿条力等性能参数要求确定。

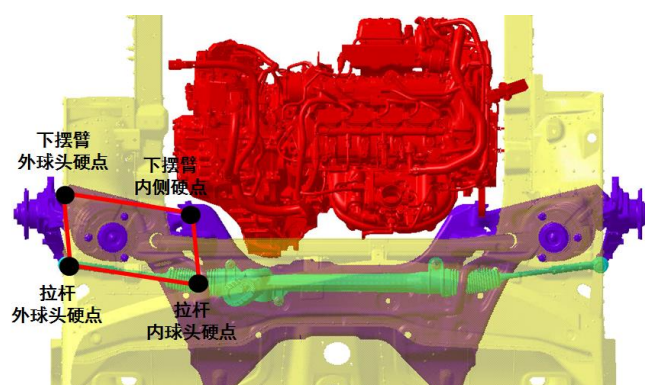


图 3.5 转向器结构布置示意图

论文研究的燃料电池轿车前悬架为麦弗逊式独立悬架，由副车架、锻铝的下摇臂、横向稳定杆、连接杆及麦弗逊式减振器支柱等组成。后悬架为带双横向控制臂结构的纵摆臂式独立悬架，由后副车架、上横向控制臂、下横向控制臂、球墨铸铁中空纵向摆臂、减振器、弹簧及横向控制杆组成。图 3.6 为燃料电池轿车悬架结构示意图，因此，选择的采用齿轮齿条式转向器结构的 P-EPS 可以满足燃料电池轿车的要求。

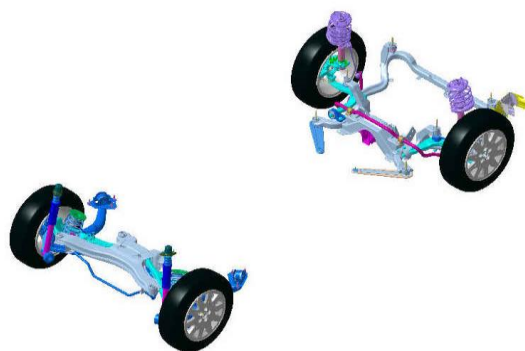


图 3.6 燃料电池轿车悬架结构示意图

3.2.2.2 减速机构类型选择

EPS 的减速机构与电机相连，起降速增扭作用。常见的减速机构包括蜗轮蜗杆机构、滚珠螺杆螺母机构和行星齿轮机构等^[25]。

减速机构在进行结构类型选择时，主要要求传动效率高、转动惯量小、能够实现双向可逆传动，同时要求尺寸尽可能小，以利于加工和装配^[15]。

蜗轮蜗杆减速机构具有结构简单、体积小、传动平稳、成本低和可靠性高等优点，在燃料电池轿车电动助力转向系统中应用较广泛。但是蜗轮蜗杆磨损、制造和装配误差均会导致蜗轮蜗杆之间存在啮合间隙，间隙大必然会产生换向噪音和颠簸路面异响，间隙小会导致转向手感波动大，因此蜗轮蜗杆机构对于间隙量尤为敏感，这是 EPS 减速机构遇到的最大难题。

燃料电池轿车具有绿色环保，低噪音等优点，其对电动助力转向系统的噪音性能要求高，一般减速机构通过设计蜗轮蜗杆间隙补偿动态自调整机构来实现对蜗轮蜗杆间隙量的控制，图 3.7 为蜗轮蜗杆间隙补偿动态调节机构示意图。

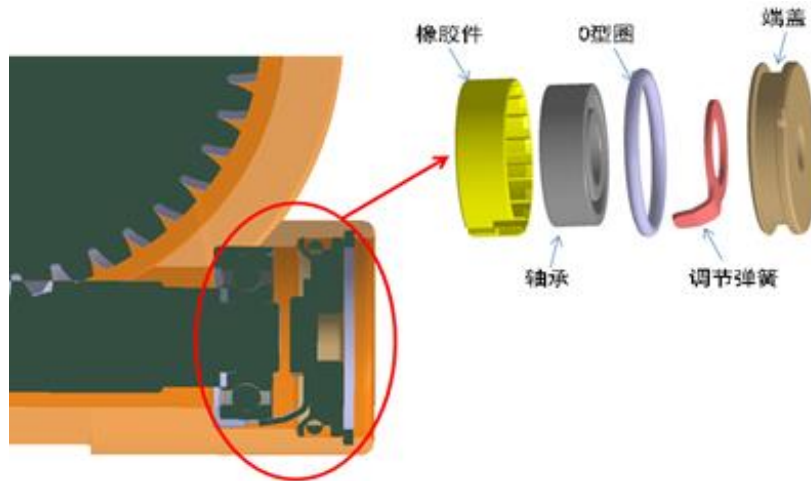


图 3.7 蜗轮蜗杆间隙补偿动态调节机构示意图

论文研究的燃料电池轿车选择的 P-EPS，采用的是蜗轮蜗杆减速机构，其蜗轮蜗杆间隙量通过蜗轮蜗杆间隙补偿动态自调整机构来实现调整。

3.2.2.3 电机类型选择

电机是 EPS 关键部件之一，主要功能是为 EPS 提供助力。目前 EPS 中应用的电机主要有永磁直流电机、异步电机、永磁同步电机以及正在研究的开关磁阻电机^[26]。EPS 系统对助力电机的基本要求是：低速大转矩，转矩波动小，转动惯量小，功率密度大，效率高，可靠性高，易控制以及较低的噪声等^[20]。表 3.3 为 EPS 各种电机的特性分析。电机最关键的性能是电机转矩与转速（T-n）的特性，它直接影响 EPS 系统的转向助力性能。

表 3.3 EPS 各种电机的特性分析

特性	永磁直流电机	异步电机	永磁同步电机	开关磁阻电机
可靠性	低	高	中	高
效率	低	低	高	中
功率密度	低	低	高	中
振动、噪音	大	小	小	大
控制难易程度	易	难	中	难
力矩波动	中	中	高	高
温度影响	低温影响大	小	高温影响大	小
电枢短路影响	有	无	有	无
EMC	高	小	小	中
成本	低	中	高	低
转动惯量	大	中	小	小
应用	C-EPS	P-EPS	所有 EPS	所有 EPS

电机的选型关键是为达到整车对转向系统的性能要求,确定在不同工况下随着方向盘转速的变化所需的转向齿条力、方向盘力矩和电机输出力矩的要求,提出电机转矩和转速特性要求,结合 EPS 各种电机的特性选择合适类型的电机。

燃料电池轿车一般前轴载荷较大,前舱布置空间有限,需要选择体积小,大功率的助力电机,通过分析 EPS 各种电机的特性可知,燃料电池轿车 EPS 系统通常需要选用永磁同步电机。

论文研究的燃料电池轿车选择的 P-EPS,采用的是永磁同步电机,具有体积小、功率密度高、输出扭矩大等特点,图 3.8 为选择的 P-EPS 永磁同步电机结构简图。电机的特性对 EPS 的性能非常重要,图 3.9 为选择的 P-EPS 永磁同步电机电机 (T-n) 特性曲线。经测试,在 105℃条件下,该电机转速 1000rpm 时输出扭矩为 4.4Nm,转速 1670rpm 时输出扭矩为 2.1Nm,转速在 2800rpm 时输出扭矩为 1.4Nm,最大输出扭矩为 4.7Nm,最大转速达到 2900rpm。通过以先进的电机 PWM 变频控制技术为基础,采用大功率 EPS 电机的驱动控制,可以实现了 EPS 输出助力力矩大、高效节能、扭矩波动小等要求。

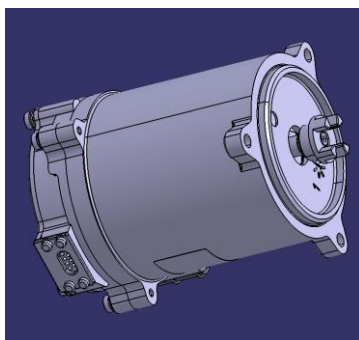


图 3.8 P-EPS 永磁同步电机结构简图

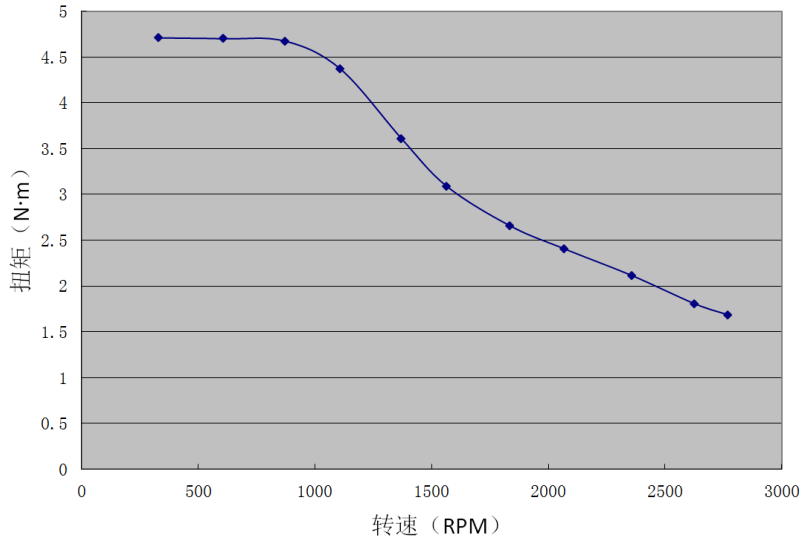


图 3.9 P-EPS 永磁同步电机电机 (T-n) 特性曲线

3.2.2.4 传感器类型选择

电动助力转向系统的传感器用来检测转向的工况信息，控制器根据这些信息通过控制策略来决定转向控制行为。传感器匹配选型的主要任务是根据 EPS 的功能来确定具体的控制目标，然后根据具体控制目标决定所需要配置的传感器种类和数量^[27]。

方向盘扭矩传感器主要用于检测方向盘转矩，考虑到使用寿命，控制精度和可靠性高的要求，一般都采用非接触式扭矩传感器。不带转角信号输出的非接触式扭矩传感器称为 TOS 扭矩传感器，带转角信号输出的非接触扭矩传感器称为 TAS 扭矩转角传感器。

为改善汽车的回正性能，电动助力转向系统还应具有回正控制的功能，要实现精确的回正控制，需要安装方向盘转角传感器。为进一步完善电动助力转向系统的动态性能，有的系统还进行各种补偿控制，如惯性补偿控制、方向盘转速补偿控制和摩擦补偿控制等，这些控制需要电动机的角速度信号^[20]。但由于传感器的成本在电动助力转向系统总成本中占有很大的比例，因此各类传感器的选择和配置时需要在测量精度、价格、可靠性等诸多要素之间进行折中考虑^[23]。为减少成本，车速传感器和方向盘转角传感器一般会与制动系统配置的车速传感器和方向盘转角传感器共用。电动机的角速度信号，为减少成本，也会通过检测电动机电压和电动机电流信号实时估计电动机的角速度来实现各种补偿控制。

燃料电池轿车电动助力转向系统一般具有随速助力控制、主动回正控制、阻尼控制、末端保护和摩擦补偿等功能，根据这些功能需要配置的传感器主要包括方向盘扭矩传感器、车速传感器和方向盘转角传感器。制动系统已配置了车速传感器和和方向盘转角传感器，因此除扭矩传感器外，车速和方向盘转角传感器可

与制动系统共用。ECU 根据检测到的方向盘转矩和车速传感器信号控制电机调节助力的大小，实现对路感的控制。目前燃料电池轿车电动助力转向系统主要采用 TAS 扭矩传感器。TAS 扭矩传感器输出信号类型有模拟信息和数字信号两种，其主要性能指标包括工作温度范围，工作电流、工作电压、扭矩测量范围、扭矩分辨率、转角测量范围，转角分辨率。

论文研究的燃料电池轿车电动助力转向系统具有随速助力控制、主动回正控制、阻尼控制等基本功能，根据这个功能所需配置的传感器主要包括扭矩传感器、方向盘转角传感器和车速传感器。其选择的 P-EPS，选用了 TAS 非接触式扭矩转角传感器，表 3.4 为选择的 TAS 扭矩传感器主要性能指标。所需的方向盘转角传感器和车速传感器信号可以通过沿用燃料电池轿车制动系统配置的传感器所获得，满足燃料电池轿车电动助力转向系统传感器匹配设计的要求。

表 3.4 扭矩传感器主要性能参数

传感器类型	TAS(Torque Angle Sensor)
信号类型	数字信号（扭矩、转角）
工作温度范围	-40℃~125℃
工作电压	4.55V~5.5V
工作电流	≤ 60mA
扭矩测量范围	±6°@ 2Nm/°
扭矩分辨率	0.0029°
转角测量范围	±738°
转角分辨率	0.013°

通过上述电动助力转向系统系统结构匹配设计可知，论文研究的燃料电池轿车选择的 P-EPS，采用了齿轮齿条式转向器，蜗轮蜗杆减速机构、永磁同步电机和非接触式 TAS 扭矩传感器可以满足燃料电池轿车转向系统结构匹配设计的要求。图 3.10 为燃料电池轿车 P-EPS 转向器总成结构示意图。

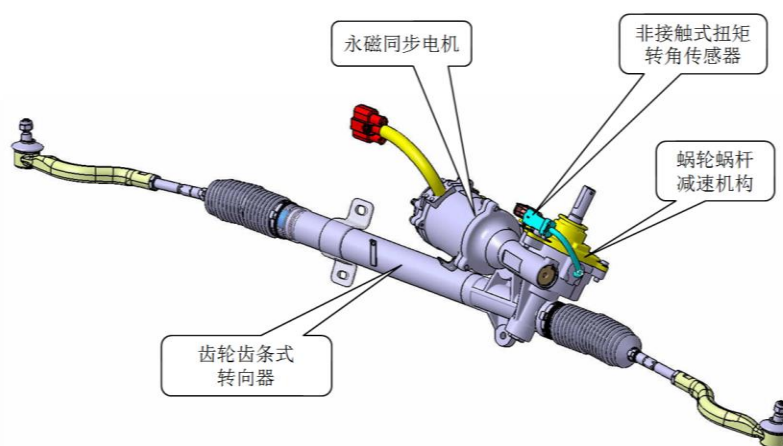


图 3.10 燃料电池轿车 P-EPS 转向器总成结构示意图

3.2.3 系统参数匹配设计

3.2.3.1 转向器参数匹配

齿轮齿条式转向器参数匹配设计主要是根据燃料电池轿车电动助力转向系统技术要求确定转向器的齿条行程、齿轮齿条传动比和最大齿条力等性能参数。

(1) 转向器齿条行程

转向器的齿条行程是指转向齿条左右运动的长度。齿条行程一般是根据转向器的设计硬点和转向角传动比的要求来确定。

转向器的最大行程是转向盘从左极端位置转到右极端位置时转向齿条运动的总长度。转向器的最大行程对应着方向盘的总圈数。

(2) 转向器齿轮齿条传动比

转向器齿轮齿条传动比是指每圈方向盘所对应齿条位移的变化，它跟汽车的转向轻便性和转向灵敏性有关。转向器传动比与方向盘的总圈数密切相关，方向盘的总圈数影响转向的灵敏性。轿车方向盘的总圈数较少，一般约在 3.6 圈以内，各汽车公司的车型所设计的方向盘圈数差异较大，多数在 2.7 圈~3.1 圈范围内，图 3.11 为各汽车公司轿车常用的方向盘圈数。

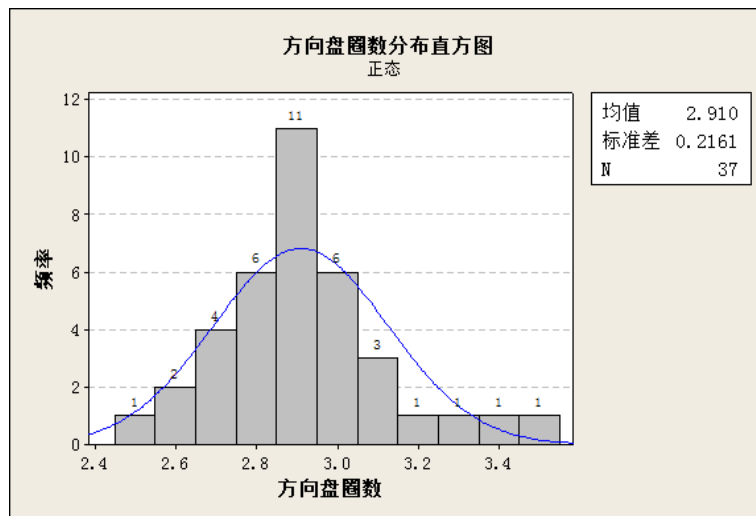


图 3.11 各汽车公司轿车常用的方向盘圈数

减小转向器齿轮齿条传动比，可以改善转向轻便性，但转向灵敏性会变差^[28]。对于固定传动比的机械转向系统而言，无法解决转向轻便性和转向灵敏性之间的矛盾^[29]。随着变传动比的转向器出现，这一矛盾得到了解决，但变传动比转向器结构复杂，加工难度高，提高了产品设计和制造成本，因此此技术很难得到市场的大规模推广^[30]。采用 EPS 系统后，可以不需要通过改变转向器的齿轮齿条传动比，通过控制电机的助力转矩来改善转向轻便性。因此，EPS 系统中

的转向器齿轮齿条传动比的选择可以充分考虑转向灵敏性的要求,设计传动比时选择大些。

由式(3.4)推导可知, P-EPS 系统的转向器齿轮齿条传动比计算公式如下

$$i_{c-factor} = \frac{(T_h * \eta_2 + T_m * i * \eta_1) * 2\pi * \eta_3}{F_r} \quad (3.5)$$

式中, $i_{c-factor}$ 为转向器齿轮齿条传动比, 单位: mm/rev ; T_h 为方向盘手力矩, 单位: N·m; T_m 为电机输出转矩, 单位: N·m; i 为涡轮蜗杆传动比; η_1 为涡轮蜗杆效率; η_2 为中间轴效率; η_3 为转向器效率; F_r 为转向器齿条力, 单位: KN。

改变转向器齿轮齿条传动比可以通过更改转向器内部的齿轮和齿条结构来实现, 内部结构更改将不会引起转向器总体的外形尺寸和结构发生变化, 对汽车的整体布置没有影响。因此在转向系统匹配设计中, 经常通过改变转向器齿轮齿条传动比来调整转向器的齿条力, 这种手段对转向器齿条力的改变明显, 调整空间比较大。

(3) 转向器最大齿条力

转向时驾驶员作用至方向盘上的手力与转向轮在地面上回转时产生的转向阻力矩有关, 影响转向阻力矩的主要因素有转向轴的负荷、轮胎与地面之间的滑动摩擦系数和轮胎气压^[27]。精确地计算出转向阻力矩是很困难的, 目前常用经验公式计算, 计算公式如下

$$T_r = \frac{f}{3} \sqrt{\frac{G_1^3}{P}} \quad (3.6)$$

式中, T_r 为转向阻力矩, 单位为 N·m; G_1 为前轴载荷, 单位为 N; P 为轮胎气压, 单位为 Pa; f 为轮胎与地面的滑动摩擦系数, 一般取 0.7。

转向器的齿条力是指转向器输出给车轮的力, 转向齿条力计算公式如下

$$F_r = \frac{T_r}{L_0} \cdot L_r \quad (3.7)$$

式中, F_r 为转向器齿条力; T_r 为转向器输出转矩; L_0 为转向节力臂; L_r 为转向器的齿条行程。

一般认为, 当汽车原地转向时, 转向阻力矩最大 $T_{r,max}$ ^[24]。为克服原地转向时的转向阻力矩, 对应的转向器齿条力也最大 $F_{r,max}$ 。

论文研究的燃料电池轿车前轴载荷 $G_1 = 1119 \times 9.8 = 10966.2$ N, 轮胎气压 $P = 0.22$ MPa, f 取 0.7, 由式(3.6)计算可得原地转向阻力矩 $T_r = 571.28$ N·m; 转向节力臂 $L_0 = 10.9$ mm, 转向器齿条行程 $L_r = 165.8$ mm, 由式(3.7)计算可得原地

转向器齿条力 $F_r=8694\text{N}$ ，该值一般认为是转向器的最大齿条力。因此本文研究的燃料电池轿车所需的转向器最大齿条力 $F_{r\max}$ 为 8694N 。

3.2.3.2 减速机构参数匹配

减速机构的主要参数是传动比 i 和传动效率 η_1 ，传动比 i 需要根据驾驶员操纵方向盘的最大转速和助力电机的最大转速确定，传动效率 η_1 一般在 $85\%\sim 90\%$ 之间。驾驶员在紧急避让时，方向盘的转速会大于 $500\text{ }^\circ/\text{s}$ ，依据美国国家公路交通安全管理局(NHTSA)的调查，紧急避让时，驾驶员对方向盘的操作可以达到 $1000\text{ }^\circ/\text{s}$ ^[23]。目前国内外各主机厂一般考虑方向盘的转速在高速紧急避让时设计要求大于 $800\text{ }^\circ/\text{s}$ 。为了保证汽车的安全性，在高速紧急避让的工况下，电机的最大转速应满足方向盘的最大转速^[31]，因此，减速机构的传动比 i 可以表示为

$$i = \frac{n_{m\max}}{n_{h\max}} \quad (3.8)$$

式中， $n_{h\max}$ 为紧急避让时方向盘最大转速； $n_{m\max}$ 为电机的最大转速。

蜗轮蜗杆减速机构结构简单，传动比设计方便，在 EPS 系统中的应用较多。如果选用有刷电机，减速机构的传动比一般在 $15\sim 18$ 之间选择；如果选用无刷电机，减速机构的传动比可以选择大些^[23]。

根据 2.3 章节燃料电池轿车电动助力转向系统技术要求中对转向轻便性的分析可知，燃料电池轿车在高速 ($>70\text{Km/h}$) 行驶工况下对方向盘转速要求达到 $800\text{ }^\circ/\text{s}$ ，各行驶工况下对方向盘转速的要求与原平台轿车或传统车的要求是一致的，因此燃料电池轿车减速机构的传动比可以尽可能的沿用所选用的 EPS 减速机构传动比。论文研究的燃料电池轿车选择的 P-EPS，采用的是蜗轮蜗杆减速机构，其传动比为 21，设计的传动比可以满足燃料电池轿车 EPS 系统匹配要求，考虑开发周期和成本，可以沿用。

3.2.3.3 电机参数匹配

电机的性能很大程度决定了 EPS 系统的助力能力，因此电机的参数匹配设计尤为重要。

电机的参数匹配主要是根据燃料电池轿车 EPS 系统的技术要求确定电机的最大输出转矩和最大转速。

(1) 电机最大输出转矩

汽车在转向时，转向阻力通过驾驶员施加在方向盘上的力矩和助力电机的输出力矩来克服。

由式 (3.4) 推导可知，P-EPS 电机输出转矩计算公式如下

$$T_m = \frac{F_r * i_{c-factor}}{2\pi * i * \eta_1 * \eta_3} - \frac{T_h * \eta_2}{i * \eta_1} \quad (3.9)$$

式中, T_m 为电机输出转矩, 单位: $\text{N}\cdot\text{m}$; F_r 为转向器齿条力, 单位: KN ; $i_{c-factor}$ 为转向器齿轮齿条传动比, 单位: mm/rev ; T_h 为方向盘手力矩, 单位: $\text{N}\cdot\text{m}$; i 为涡轮蜗杆传动比; η_1 为涡轮蜗杆效率; η_2 为中间轴效率; η_3 为转向器效率。

汽车在原地转向工况时转向阻力最大 $T_{r,max}$, 此时需要的电机输出转矩最大 $T_{m,max}$ [25]。

(2) 电机最大转速

在电动助力转向系统中, 电机的转速应随着驾驶员转动方向盘的速度变化而变化。电机转速计算公式如下

$$n_m = n_h * i \quad (3.10)$$

式中, n_m 为电机转速; n_h 为方向盘的转速; i 为涡轮蜗杆传动比。

当驾驶员以最快转速 $n_{h,max}$ 转动方向盘时, 电机应能跟上该转速 $n_{m,max}$ 。

论文研究的燃料电池轿车在原地转向工况时转向阻力最大, 在 3.2.3.1 章节中计算所需的转向器最大齿条力 $F_{r,max} = 8694\text{N}$ 。在 2.3 章节中, 指出了论文研究的燃料电池轿车电动助力转向系统的原地转向时静态转向力要求 $\leq 29\text{N}$, 对应的方向盘手力矩不超过 $T_h = 29 \times 0.19 = 5.5\text{N}\cdot\text{m}$ 。根据选择的 P-EPS 系统参数, $i_{c-factor} = 59\text{rev}/\text{mm}$, $i = 21$, $\eta_1 = 85\%$, $\eta_2 = 96\%$, $\eta_3 = 90\%$, 由式 (3.9) 计算可知, 电机输出力矩 $T_m = 4.79\text{N}\cdot\text{m}$, 因此燃料电池轿车 P-EPS 系统需要的电机最大输出力矩 $T_{m,max}$ 应大于 $4.79\text{N}\cdot\text{m}$ 。当驾驶员以最快转速 $n_{h,max} = 800^\circ/\text{s}$ 转动方向盘时, 由式 (3.10) 计算可知, 电机转速为 $n_m = 2800\text{rpm}$, 因此燃料电池轿车 P-EPS 系统需要的电机最大转速为 $n_{m,max}$ 应达到 2800rpm 。根据 3.2.2.3 章节介绍, 论文研究的燃料电池轿车选择的 P-EPS 系统的永磁同步电机转矩与转速 (T-n) 特性曲线可知, 该电机最大转速 2900rpm 可以满足 2800rpm 的电机转速匹配要求, 但电机最大输出转矩 $T_{m,max}$ 为 $4.7\text{N}\cdot\text{m}$ 达不到所需要大于 $4.79\text{N}\cdot\text{m}$ 的最大输出转矩匹配要求。

通过上述电动助力转向系统参数匹配设计可知, 论文研究的燃料电池轿车满载状态的前轴载荷 1119kg 相比原平台轿车的前轴载荷 1040kg 增加了 79kg , 对转向器最大齿条力的需求为 8694N 。如果沿用选择的 P-EPS 系统的转向器齿轮齿条传动比参数 $i_{c-factor} = 59\text{rev}/\text{mm}$, 其需要的电机最大输出转矩为 $4.79\text{N}\cdot\text{m}$, 超出了所选择的 P-EPS 的电机能力, 无法满足燃料电池轿车转向系统在驻车转向时方向盘的转向力不大于 29N 的要求。在 3.2.1 章节匹配设计分析中, 指出了转向器

的齿条力可以通过调整电机输出力矩和转向器齿轮齿条传动比来改变。在转向系统匹配设计中,经常通过改变转向器齿轮齿条传动比来调整转向器的齿条力。考虑到电机参数调整需要对电机重新选型和相关控制设计做更改、所需要的开发周期长和费用高等因素,因此通过改变转向器齿轮齿条传动比来调整转向器的齿条力。如果沿用选择的 P-EPS 系统的电机参数 $T_{mmax}=4.7 \text{ Nm}$,转向器最大齿条力达到 8694N,由式(3.5)计算可知,转向器齿轮齿条传动比 $i_{c-factor}$ 为 58mm/rev。因此,通过将所选择的 P-EPS 系统的转向器齿轮齿条传动比由原来的 59mm/rev 减小为 58mm/rev,可以实现转向器最大齿条力达到 8694N。由式(3.3)计算可知,当 $i_{c-factor}=58\text{mm/rev}$ 时,相对应的方向盘总圈数为 2.86 圈,调整后的燃料电池轿车方向盘总圈数 2.86 圈仍然在轿车方向盘圈数常用的 2.7 圈~3.1 圈设计范围内,满足系统参数匹配设计的要求。表 3.5 为论文研究的燃料电池轿车 EPS 系统主要技术参数。

表 3.5 燃料电池轿车 EPS 系统主要技术参数

系统类型	齿轮式助力转向系统	系统结构	方向盘可调,溃缩式转向管柱,集成电机式转向器
转向器结构	齿轮齿条式	减速机构结构	涡轮蜗杆传动
电机类型	永磁同步电机	扭矩传感器类型	非接触式扭矩转角传感器
满载前轴负荷	1119kg	转向器最大齿条力	8770N
方向盘直径	380mm	方向盘总圈数	2.86 圈
转向器齿轮齿条传动比	58mm/rev	转向器齿条行程	165.8mm
电机最大输出转矩	4.8Nm	电机最大转速	2800rpm
涡轮蜗杆减速比	21	涡轮蜗杆传动效率	85%
中间轴效率	96%	转向器效率	90%

3.3 燃料电池轿车电动助力转向系统控制策略设计

燃料电池轿车电动助力转向系统的控制主要是根据燃料电池轿车整车控制和转向性能要求进行控制策略的匹配设计。

燃料电池轿车 EPS 系统控制软件分为应用层软件和基础软件两个部分,一方面便于软件之间的通讯、节省内存资源;另一方面可以很方便地将此技术成果移植应用到其他项目上。图 3.12 为 EPS 控制软件分层方案, EPS 系统控制策略,故障诊断都集成在应用层软件中。图 3.13 为 EPS 控制应用层软件架构,基础软件平台由 OS、HAL、COM、CAL、Bootloader 及虚拟服务总线等软件模块组成。标准化的基础软件平台可以使后续的 EPS 系统更加方便有效地进行移植,从而大大缩短开发周期并提高整个软件系统的安全性和稳定性。

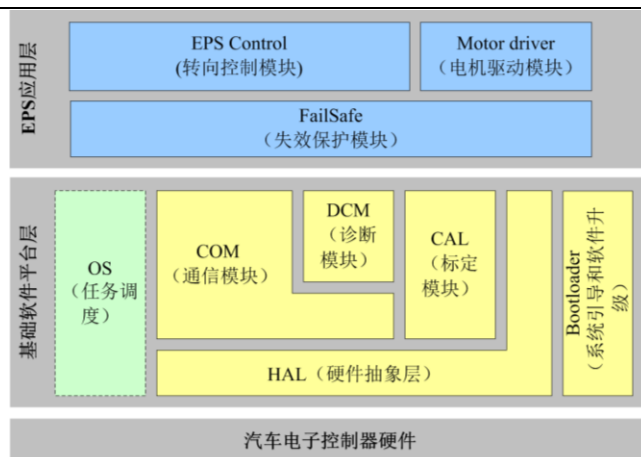


图 3.12 EPS 控制软件分层方案

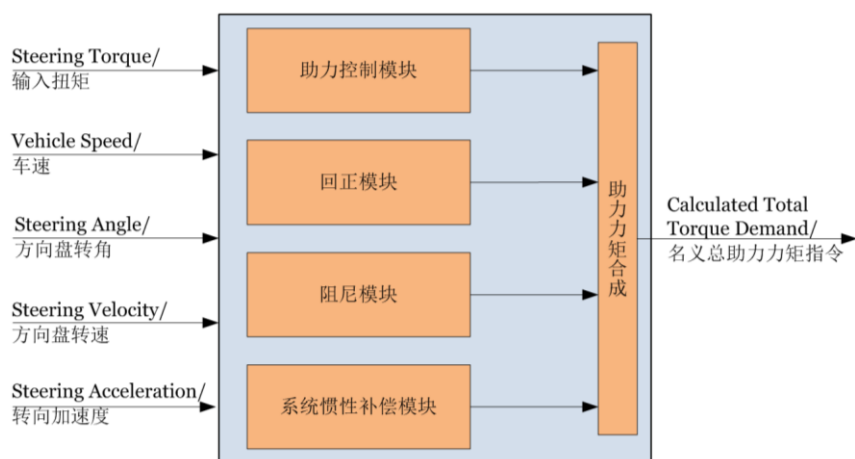


图 3.13 EPS 控制应用层软件架构

3.3.1 助力控制

在助力控制中，普遍采用的是基于电机的目标电流闭环控制，其需要解决的主要问题是目标电流的确定。转向助力控制是在驾驶员转向过程中（方向盘转角增大）通过电机给予一定的助力，从而减轻方向盘的操纵力，改善汽车的转向轻便性。汽车在低速时，转向阻力较大，需要较大助力；高速时转向阻力较小，助力也相对较小。在同一车速不同转角下，转向阻力也不同，所需的助力大小也不同，EPS 的助力随着车速，方向盘转矩和转角的大小变化而变化，此助力特性即为转向助力特性。由于在一定范围内电机转矩和电机电流成比例，因此可以通过不同车速下“转矩—电机助力目标电流特性曲线”来确定助力目标电流^[32-35]。

助力特性曲线的基本要求^[36]：

(1) EPS 在给予助力控制时需要一个转矩阈值，当转矩小于此阈值时，EPS 系统不助力，提高转向中间位置路感；

(2) 助力的大小与方向盘输入转矩的大小在变化趋势上一致，即方向盘输入转矩较小时，助力也应较小，以保持较好的路感；

(3) 在方向盘输入转矩较大时，EPS 系统要给予足够的助力，以达到提高转向轻便性的目的；

(4) 当助力要求以超出电机所能提供的最大助力时，出于对电机的保护，需要设定一个最大助力值；

(5) 从汽车的操纵稳定性方面考虑，车速较低时，助力较大，车速增高时助力应逐渐减小；

(6) 在方向盘上的最大操纵力应符合国家标准的要求。

根据上述助力特性曲线的基本要求，大多数 EPS 采用如图 3.14 所示直线型或分段折线型助力特性曲线，其特点是模型比较简单，容易调试，但是由于助力曲线不是处处可导，不能获得较好的转向手感梯度和转向中间位置感。曲线型的助力特性曲线虽能获得比较好的手感，但各参数之间存在耦合关系，调试不方便。燃料电池轿车电动助力转向系统采用了如图 3.15 所示参数独立的曲线型助力特性曲线^[37]，使车速变化过程中转向手感更加线性、更加平顺，中位转向响应更快，可满足在不同车辆状态下转向时提供不同助力的需求。

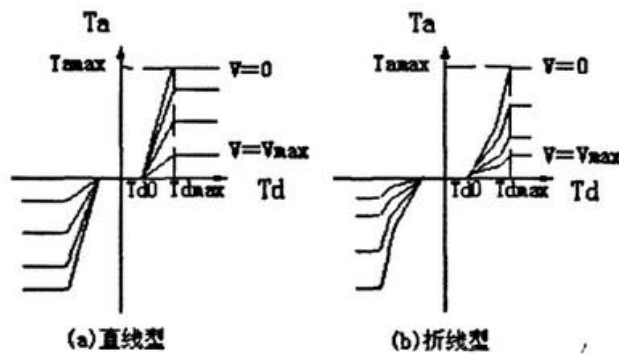


图 3.14 传统的直线型和折线型助力特性曲线

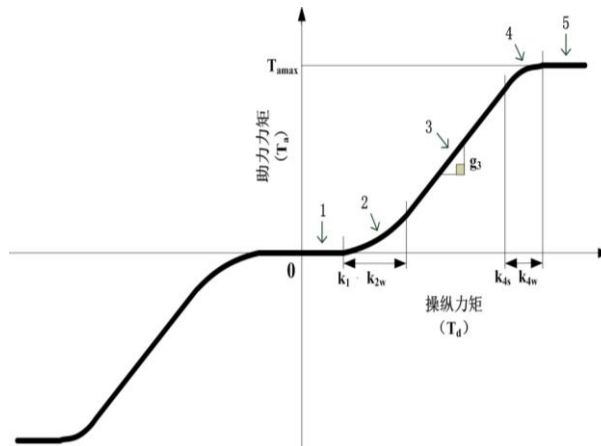


图 3.15 参数独立的曲线型助力特性曲线

助力特性曲线图的 x 轴为输入的操纵力矩, 用 T_d 表示; y 轴为电机助力力矩, 用 T_a 表示。如图 3.15 所示选取以下 6 个约束参数 k_1 , k_{2w} , g_3 , k_{4s} , k_{4w} , T_{amax} 可以确定 5 个区段的曲线形状。其所表示的具体含义分别是: k_1 为助力死区阈值, 即小助力区起点的横坐标; k_{2w} 为小助力区的 x 轴方向宽度; g_3 为大助力区的直线斜率; k_{4s} 为缓冲区起点的横坐标; k_{4w} 为缓冲区的 x 轴方向宽度; T_{amax} 为该车速下电机的最大助力值^[37]。

该曲线由 5 个不同的区段组成: 助力死区, 小助力区, 大助力区, 缓冲区和饱和区, 并且各相邻区段的连接点处均保证一阶导数连续。

助力死区是指方向盘操纵力矩较小, 电机不提供助力的区段, 采用的曲线类型为直线, 其方程为

$$T_a = 0 \quad (3.11)$$

小助力区是指车辆侧向加速度较小, 电机提供较小助力的区段, 采用的曲线类型为二次曲线, 其方程为

$$T_a = \frac{g_3(|T_d| - k_1)^2}{2k_{2w}} \quad (3.12)$$

大助力区是指车辆侧向加速度较大, 电机提供较大助力的区段, 采用的曲线类型为直线, 其方程为

$$T_a = g_3[|T_d| - (k_1 + k_{2w})] + \frac{g_3 k_{2w}}{2} \quad (3.13)$$

缓冲区是指减轻电机助力达到最大值时的冲击的区段, 采用的曲线类型为二次曲线, 其方程为

$$T_a = -\frac{g_3}{2k_{4w}}(|T_d| - k_{4s})^2 + g_3(|T_d| - k_{4s}) + g_3(k_{4s} - k_1 - \frac{k_{2w}}{2}) \quad (3.14)$$

饱和区是指电机助力达到最大值的区段, 采用的曲线类型为直线, 其方程为

$$T_a = T_{amax} \quad (3.15)$$

当调整任一个或者同时调整多个关键参数时, 其他参数不必作任何修改, 仍然能保证曲线的完整性和一阶导数连续性^[38]。直线型或分段折线型助力特性曲线的一阶导数不连续, 会导致转向手感非线性或突变。

燃料电池轿车电动助力转向系统设计了 13 条助力特性曲线(图 3.16), 相比装载在 POLO 上的 NSK EPS 系统的 5 条助力特性曲线(图 3.17), 有明显的优点:

(1) 每条助力特性曲线的一阶导数连续, 驾驶员在同一车速下可得到连续的、线性的驾驶手感和更好的转向中间位置感;

(2) 13 条助力特性曲线, 对助力车速区间划分更加细密, 驾驶员在不同车速下可以获得平滑变化的转向手感。

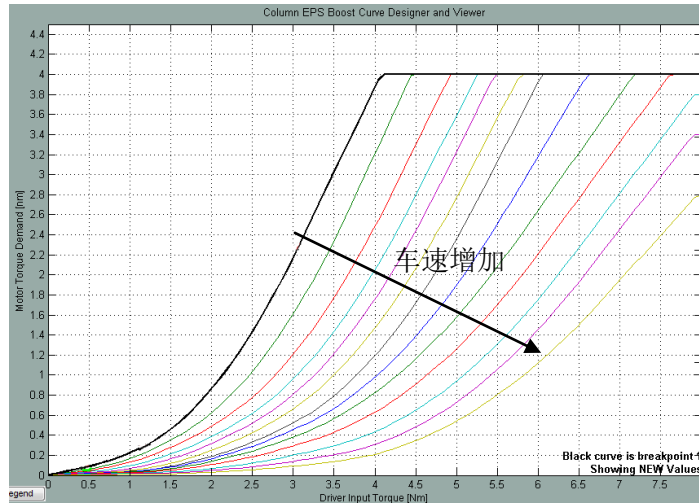


图 3.16 燃料电池轿车 EPS 的助力特性曲线

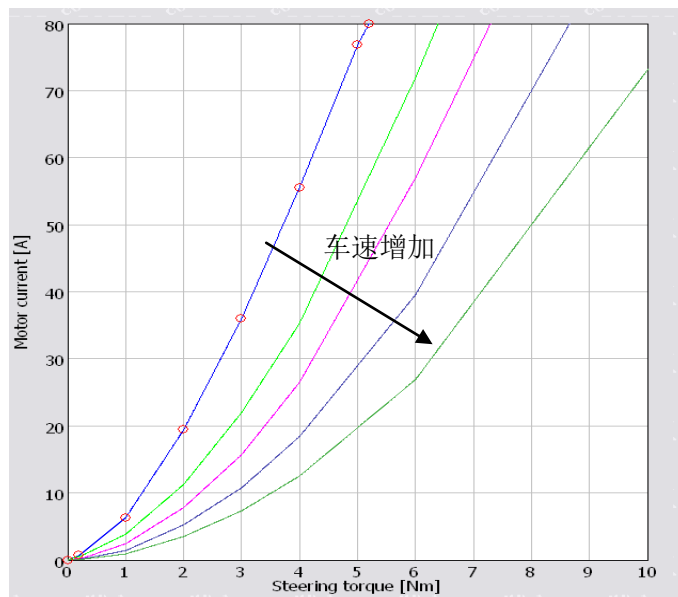


图 3.17 POLO EPS 的助力特性曲线

3.3.2 回正控制

车辆在低速行驶的过程中, 容易受到转向系统自身和轮胎的摩擦、阻尼的影响, 出现残留方向盘转角和横摆角速度等情况, 即方向盘不能回到中间位置而出现的回正不足的情况^[39-40]。在高速行驶的过程中, 车辆由于自身的回正力矩较

大，转向回正过程可能会出现方向盘转角超调，横摆角速度振荡等情况，即方向盘的回正位置超过了方向盘的中间位置而出现回正超调的情况^[41-42]。上述两种情况，降低了汽车的直线行驶性能，因此在汽车电动助力转向控制系统中必须引入回正控制，以改善汽车的回正性能^[43]。

由于 EPS 系统内摩擦大，车辆无法通过前桥的回正力矩实现自动回正，本论文研究的燃料电池轿车 EPS 系统利用方向盘转角信号、扭矩信号以及车速信号进行回正控制，在全转向范围内实现主动回正功能，显著改善车辆的回正性能，回正残余角小于 5°，优于采用 NSK EPS 的大众 POLO 的回正残余角。

燃料电池轿车 EPS 主动回正控制模块包括回正判断模块和回正力矩计算模块^[44]。

(1) 回正判断模块

基于状态机理论，本模块包括回正判断、回正待命、回正开始三种状态，通过方向盘转角信号、方向盘转速信号、扭矩传感器信号来判断当前是否需要施加回正力矩，图 3.18 为回正判断模块原理图。

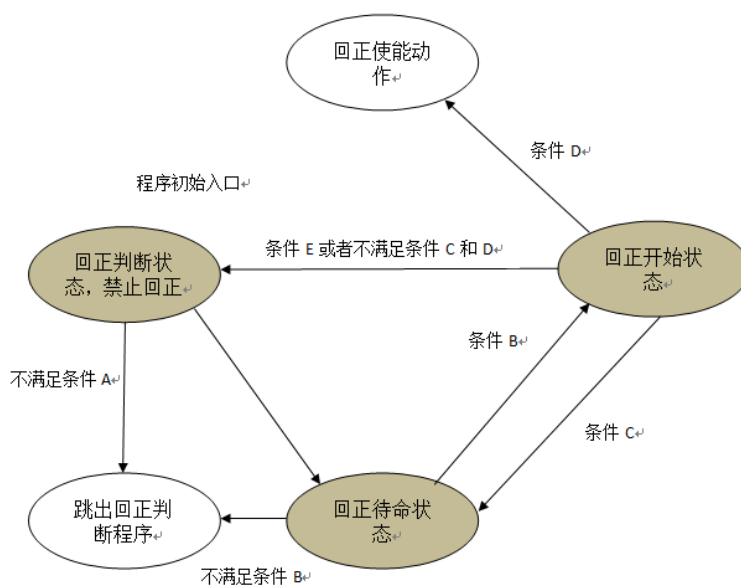


图 3.18 回正判断模块原理图

其中，条件 A：转角大于设定值 1；条件 B：转角方向与转速方向相反；条件 C：操纵力矩大于设定值 2；条件 D：转角方向与转速方向相反且操纵力矩小于设定值 2；条件 E：转角小于设定值 3。

(2) 回正力矩计算模块

回正力矩计算模块采用基于模型跟踪控制方法的转角跟踪闭环控制方法，根据当前的方向盘转角信号、车速信号计算出回正到方向盘中间位置所需要的回正力矩。

转角跟踪闭环回正力矩计算方法包含一个理想的转向系统回正模型，图 3.19 为基于模型跟踪的转角闭环回正力矩计算方法原理图。该模型的输出为理想的方向盘回正转角-时间历程，假设电动助力转向系统的摩擦阻力为 0，通过在不同车速下设置该理想转向系统回正模型的转向刚度和转向阻尼，可以提供在不同车速下的理想的回正过程。该模型输出由回正判断模块来使能，如果处于回正状态，则根据理想的转向系统回正模型的状态与实际转向系统的状态之差，通过一个积分环节，或者是带有积分环节的控制系统校正环节，计算出相应的回正控制力矩，在回正过程中使电机输出附加回正控制力矩，其控制框图如下：

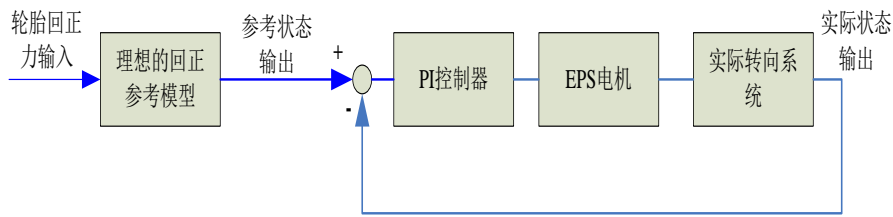


图 3.19 基于模型跟踪的转角闭环回正力矩计算方法原理图

实际的转向系统可以简化为一个包括 EPS 系统内摩擦的单自由度系统，其模型如下式

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2\alpha}{dt^2} \\ \frac{d\alpha}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_s}{I_s} & -\frac{K_s}{I_s} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\alpha}{dt} \\ \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{I_s} \\ 0 \end{bmatrix} T_h \quad (3.16)$$

其中， T_h 为驾驶员的方向盘手力矩，如果回正过程是撒手回正的话， T_h 约等于 0，这样，理想的转向系统的回正过程相当于一个典型的二阶环节的零输入响应，只要适当地设置 K_s 和 C_s ，即只要满足下式

$$C_s^2 - 4I_s K_s > 0 \quad (3.17)$$

系统即为过阻尼系统，回正时既不会产生超调，也不会产生残留转角。采用这种控制方法，主动回正残余角控制小，EPS 系统可以达到良好的回正效果。

3.3.3 阻尼控制

阻尼控制是根据车速、方向盘手力矩、方向盘转角和转速来确定电机附加的阻尼力矩的大小，可以有效地提高汽车高速直线行驶的稳定性且减小路面冲击对方向盘转向的影响^[45-46]。

燃料电池轿车 EPS 阻尼控制的力矩主要包括不同车速下随方向盘角度变化

的阻尼力矩，阻尼力矩随手力矩增益和阻尼力矩随转角增益控制。图 3.20 是阻尼控制的框图。

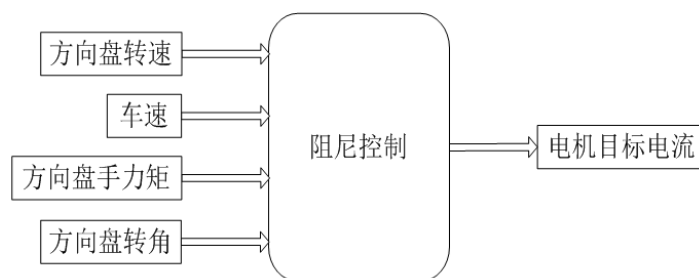


图 3.20 阻尼控制框图

当驾驶员快速转动方向盘时，粘性阻力产生较大的粘性阻力矩，使驾驶员快速转向时有转向沉重感，进行阻尼补偿控制可以解决这一问题^[47]。电机阻尼补偿力矩计算公式为^[47]

$$T_D = K_D n_m \quad (3.18)$$

式中， T_D 为电机阻尼补偿力矩； K_D 为电机阻尼补偿系数，它随车速的升高而变小； n_m 为电机转速。

阻尼控制主要分为两类，一类是依据电机转速(或方向盘转速)实现对目标电流的补偿，这种方法可以使方向盘在转速较高时力矩平稳，电机电流跟随助力特性变化。另一类是使电机电枢绕组短路，从而对方向盘的转动产生一定的阻尼作用，当方向盘输入的力矩处于助力特性的死区时，则对电动助力转向系统进行阻尼控制^[48]。在助力特性死区内进行阻尼控制，可实现如下效果：

(1) 阻尼控制可以有效地抑制回正超调。车辆高速行驶时，回正力矩可轻易克服系统的固有惯性和摩擦，但容易产生回正超调和振荡现象，阻尼控制可以很好地抑制这种振荡。

(2) 提高行驶安全性。使用阻尼控制可适当加大施加在方向盘上的阻力用于抑制汽车在高速转向行驶时由于路面干扰而引起的方向盘横摆震动，为驾驶员提供适度的“路感”。

3.4 本章小结

本章对燃料电池轿车电动助力转向系统设计进行了研究。首先，根据燃料电池轿车 EPS 的技术要求进行电动助力转向系统的方案设计，包括系统助力型式的选择和系统布置设计。再次，根据方案设计对 EPS 系统的关键部件转向器、减速机构、电机和传感器进行了系统结构和参数匹配设计与分析。最后，对燃料

电池轿车电动助力转向系统的助力控制、回正控制和阻尼控制策略进行了设计分析。

第4章 燃料电池轿车电动助力转向系统台架试验

燃料电池轿车电动助力转向系统直接影响汽车行驶的舒适、安全和可靠性。试验是验证燃料电池轿车 EPS 系统设计是否达到技术要求重要手段，台架试验主要检验 EPS 系统级的功能和相关性能。

4.1 电动助力转向系统台架试验要求及设备

4.1.1 台架试验要求

电动助力转向系统的台架试验主要有功能、疲劳、强度、环境和 NVH 等方面的测试试验。针对电动助力转向系统，国家陆续发布了《汽车电动助力转向装置技术条件与台架试验方法》、《汽车电动助力转向系统用电动机技术条件》、《汽车电动助力转向装置技术条件与台架试验方法》、《汽车电动助力转向扭矩测量用传感器技术条件与试验方法》等行业标准的征求意见稿，对 EPS 系统总成及主要零部件的性能及可靠性做出了规范要求。标准主要是从 EPS 系统的总成、控制器、传感器和转向电机等方面进行考核，表 4.1 为 EPS 系统总成主要试验项目及相关评价参数和试验曲线。多数电动助力转向系统的供应商和汽车主机厂参照国家发布的标准结合公司自身的试验资源和开发要求建立了各自的电动助力转向系统试验规范和相关试验台架。供应商主要侧重在 EPS 零部件级的台架试验，主机厂主要侧重在 EPS 系统级的台架试验。

表 4.1 EPS 系统的主要试验项目及相关评价参数和试验曲线

序号	项目名称	评价参数	试验曲线
1	功能试验	转矩波动量	转向力矩与转角曲线
2	输入、输出特性试验	曲线对称度/转矩波动量	输入输出力矩曲线
3	助力电流特性试验	左右转最大输出电流/助力增益	助力电流与转角曲线
4	反向冲击试验	响应时间/方向盘转角	脉冲响应曲线
5	空载转动力矩试验	最大转动力矩/转矩波动量	转向力矩与转角曲线
6	回正特性试验	回正启动转角/回正启动力矩	回正电流与转角曲线
		回正残留转角/回正残留力矩	
		回正增益	
		回正电流特性	回正电流曲线族
		最大主动回正力矩	不同转角条件下，车速和回正力矩曲线

序号	项目名称	评价参数	试验曲线
7	报警试验	系统是否正常工作	--
8	磨合试验	系统是否正常工作	--
9	疲劳试验	系统是否正常工作	--
10	强制转向试验	系统是否正常工作	
11	振动试验	系统是否正常工作	--
12	过载保护功能试验	输入力矩/输入电流	输入力矩与输入电流曲线
		阻尼启动车速	
		阻尼最大电流	
13	电磁特性试验	系统是否正常工作	--
14	噪声试验	系统最大噪声	噪声频谱曲线族
15	高、低温及湿热环境试验	系统是否正常工作	--

4.1.2 台架试验设备

针对 EPS 关键部件和系统，常用的台架试验设备主要有多轴转向试验台、疲劳试验台、EPS 性能试验台、管柱功能试验台、管柱疲劳试验台、弯曲试验台、蜗轮蜗杆试验台和电机试验台等。多轴转向试验台的试验项目主要有转向刚度、扭转间隙、助力曲线、移动力、转动力矩、加载性功能试验和道路谱试验等；疲劳试验台的试验项目主要有常温驻车疲劳试验、带环境温度驻车疲劳试验、转向系统总成疲劳试验和污水驻车疲劳试验等；EPS 性能试验台的试验项目主要有加载性能、转动力矩、助力特性、扭转强度、扭转破坏试验、液压阻尼加载手感测试、调节力及范围、移动力、刚度测试和带环境性能检测等；管柱试验台的试验项目主要有驻车疲劳、扭转疲劳和带温疲劳测试等；弯曲试验台的试验项目主要有弯曲强度试验、径向保持力试验、溃缩试验和弯曲疲劳试验等；蜗轮蜗杆试验台的试验项目主要有效率测量、逆效率测量、间隙测量、常温疲劳试验和带温度疲劳试验等；电机试验台的主要试验项目包括电机特性曲线测试、疲劳试验和阻力矩测试等。燃料电池轿车齿轮式电动助力转向系统的台架试验主要在 EPS 性能试验台完成相关性能测试。

EPS 性能试验台主要完成以下功能：1) 通过编程控制电机实现不同力矩曲线的模拟，例如汽车行驶时的转向阻力矩和回正力矩等；2) 实现数据的实时采集、显示、处理，例如方向盘转矩、方向盘转角及转角速度、车速、电机电流、工作状态等；3) 实现控制器参数的设定；4) 实现故障诊断功能^[25]。

EPS 性能试验台主要由以下基本单元组成，包括：转向器安装平台，试验台驱动供油单元，转向器试验用基本机械设备单元，试验台控制单元和其它测量单元，图 4.1 为 EPS 性能试验台结构示意图。

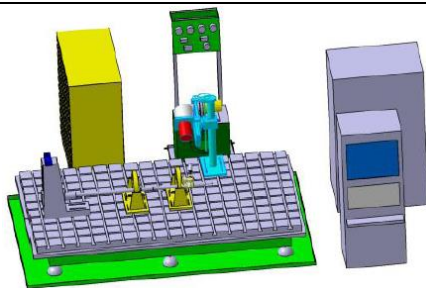


图 4.1 EPS 性能试验台结构示意图

转向器安装平台在长度和宽度方向上带有多条 T 型槽，方便转向器的安装，平台四周装有集油槽，底部带有集油盘，平台通过防震垫放置在集油盘上，通过阻尼匹配实现隔震。试验台驱动供油单元主要由油箱（含清洗盖、集成块、压力表架、冷却器支架等），液位计、空气过滤器、温度传感器、吸油过滤器、回油滤油器、高压球阀、单向阀、电磁溢流阀、精密滤油器、精密滤油器堵塞传感器、压力表开关、蓄能器、减压阀、压力传感器、压力表、液压泵电动机、液压泵弹性支架及联轴器、软管及接头等组成。转向器试验用的基本机械设备单元包括转向器输入轴驱动单元，转向器横拉杆上的载荷模拟负荷单元，被动油缸负荷单元系统单元，转向器齿条轴向的冲击油缸，转向器夹具及转向管柱安装支架等；试验台控制单元主要包括数据采集系统和控制软件两方面，图 4.2 为 EPS 性能试验台控制总体框图；其它测试单元还包括压块间隙测量单元，力矩测量单元和测力方向盘单元等，图 4.3 为 EPS 性能试验台。

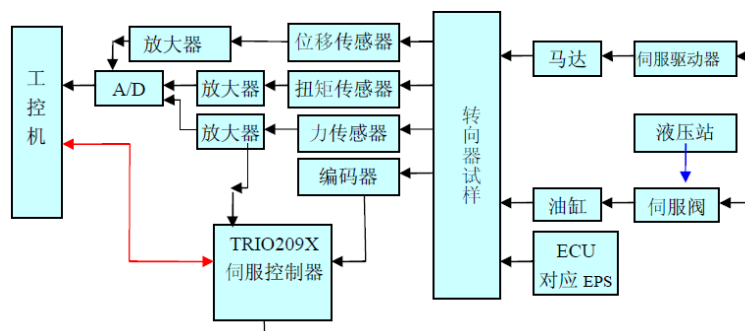


图 4.2 EPS 性能试验台控制总体框图

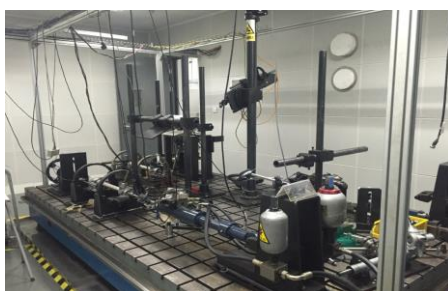


图 4.3 EPS 性能试验台

4.2 电动助力转向系统台架试验方案及结果分析

本文研究的燃料电池轿车电动助力转向系统台架试验主要针对 P-EPS 系统助力控制的静态转向力进行台架测试，图 4.4 为 P-EPS 台架试验图片。

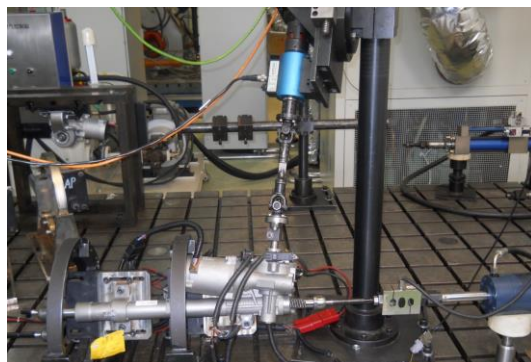


图 4.4 P-EPS 台架试验图片

4.2.1 静态转向输出力试验

静态转向输出力试验是为了验证方向盘手力矩在设计要求内, 转向器输出的最大齿条力能力, 表 4.2 为燃料电池轿车最大齿条力与方向盘手力矩设计要求。

表 4.2 燃料电池轿车最大齿条力与方向盘手力矩要求

最大齿条力 (%)	方向盘手力矩(Nm)
95	5.5(95%转角行程)
70	6(+/-180° 转角行程)
40	10(+/-90° 转角行程)

试验方法：将转向器总成安装在试验台上，电压为 $12.8 \pm 0.2V$ 、环境温度为 $23 \pm 5^{\circ}C$ （室温）、在转向器总成上施加 95% 的最大齿条推力 ($F_{r,max} = 8694N$)，小齿轮轴以 30 度/秒角速度从中间位置旋转到 100% 的全行程位置，测试方向盘的力矩。小齿轮由中间位置转动至左极限，然后再转动至右极限，最后回到中位作为一个试验循环，完成 3 次这样的试验。

测试结果：图 4.5 为静态转向力矩曲线，由图可知，正转时方向盘最大力矩为 4.9Nm，反转时方向盘最大力矩为 5.04Nm。满足设计要求中 95% 转角行程内方向盘力矩小于 5.5Nm，且 EPS 无异常。

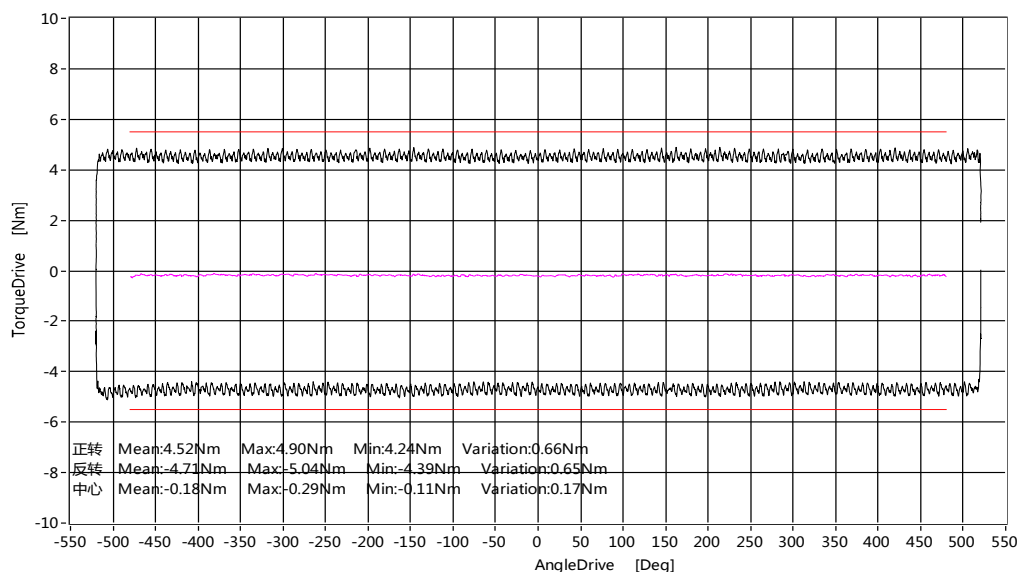


图 4.5 静态转向力矩曲线

4.2.2 助力特性试验

助力特性试验是为了检验 EPS 系统在不同车速下方向盘手力矩与转向力的变化关系, 以及方向盘力矩与电机输出力矩的关系, 要求每条助力曲线的公差控制在 $\pm 0.4 \text{ Nm}$ 的设计变化范围内。

试验方法: 将转向器安装在试验台架上, 电压为 $12.8 \pm 0.2 \text{ V}$, 环境温度为 $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ (室温), 系统正常工作, 至少采集五条不同车速(0、20、50、100、150km/h)的助力曲线。

测试结果: 图 4.6 为不同车速(0、20、50、100、150km/h)的手上力矩与齿条力的曲线, 图 4.7 为不同车速下电机输出力矩与齿条力的曲线。由图可知, 测试的不同车速下的方向盘力矩与齿条力的曲线和电机输入力矩与齿条力的曲线, 每条曲线公差在设计要求的 $\pm 0.4 \text{ Nm}$ 。

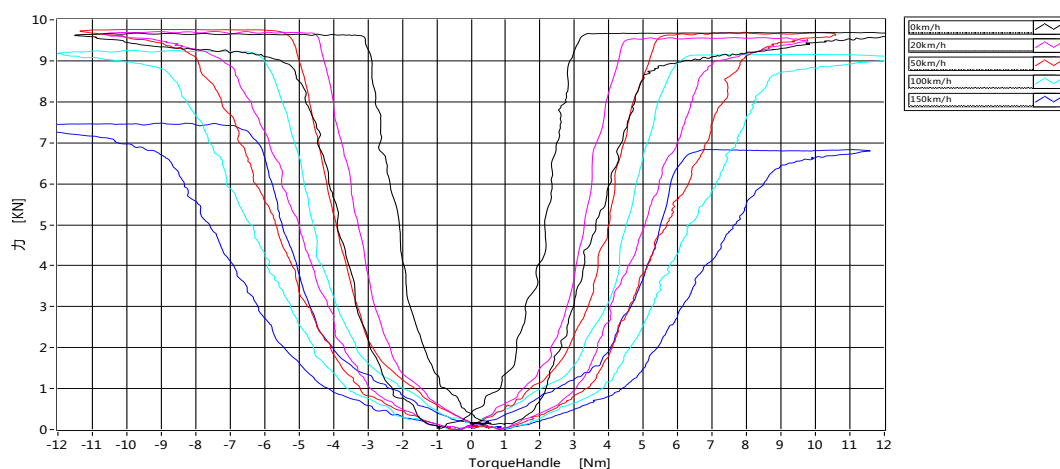


图 4.6 不同车速下方向盘力矩与齿条力的曲线

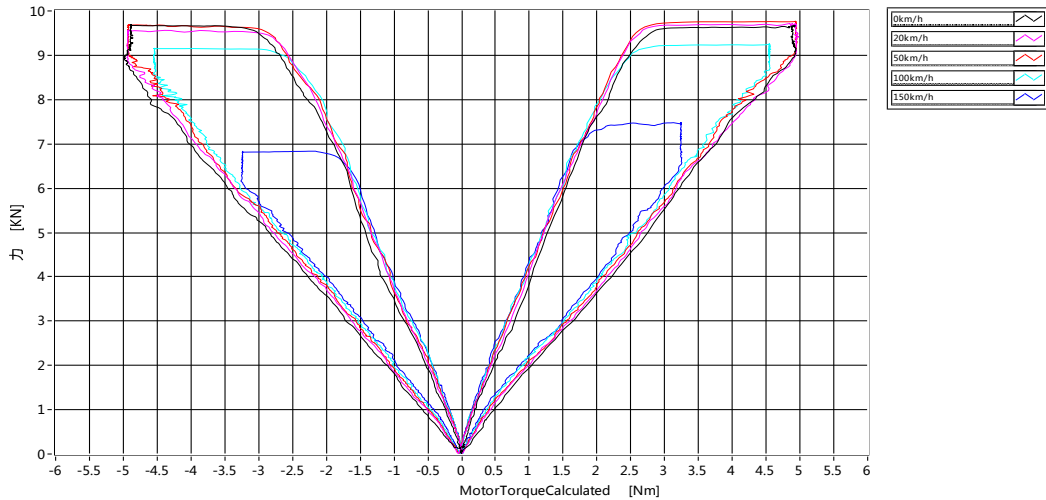


图 4.7 不同车速下电机输出力矩与齿条力的曲线

4.2.3 静态转向力随方向盘转速变化试验

静态转向力随方向盘转速变化试验是为了检验 EPS 系统在方向盘不同转速下，方向盘手力矩需满足表 4.3 的燃料电池轿车 EPS 系统设计要求。

表 4.3 燃料电池轿车方向盘转速与方向盘手力矩要求

方向盘转速(%s)	方向盘手力(Nm)
0~360	5.5(95°转角行程)
500	6(+/-180° 转角行程)
800	10(+/-90° 转角行程)

试验方法：将转向器总成安装在试验台上，电压为 $12.8 \pm 0.2V$ ，环境温度为 $23 \pm 5^\circ C$ （室温），在转向器总成上施加 95% 的最大齿条推力（ $F_{r,max} = 8694N$ ），方向盘分别以 30 %s 和 300 %s 的角速度从中间位置旋转到 100% 的全行程位置，测试方向盘的力矩。小齿轮由中间位置转动至左极限，然后再转动至右极限，最后回到中位作为一个试验循环。

试验结果：图 4.8 为方向盘转速为 30 %s 的转角与方向盘力矩的曲线，图 4.9 为 300 %s 的转角与方向盘力矩的曲线。由图可知，方向盘转速为 30 %s，正转的方向盘最大力矩为 4.79Nm，反转的方向盘最大力矩为 5.13Nm。方向盘转速为 300 %s，正转的方向盘最大力矩为 4.72Nm，反转的方向盘最大力矩为 5.13Nm，最大力矩均满足 $\leq 5.5Nm$ 的设计要求。

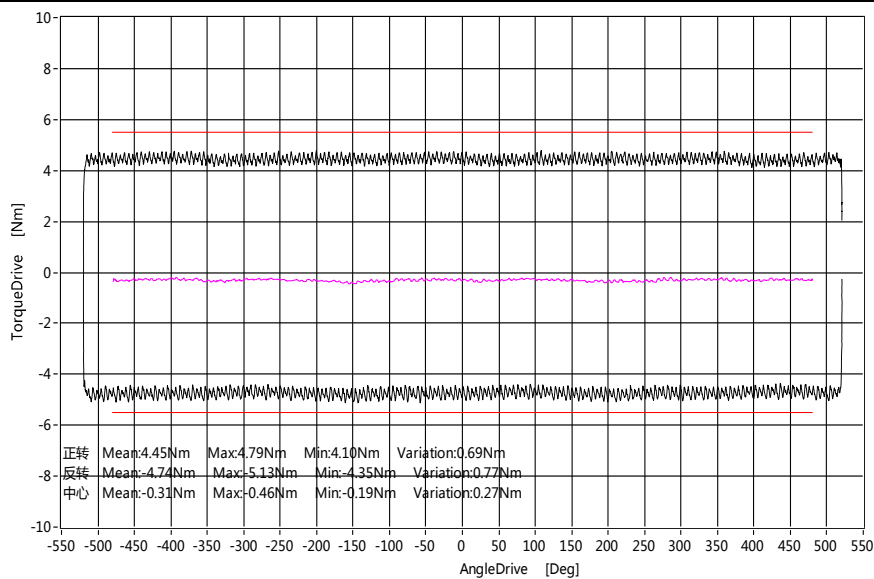


图 4.8 方向盘转速为 30 %s 的转角与方向盘力矩曲线

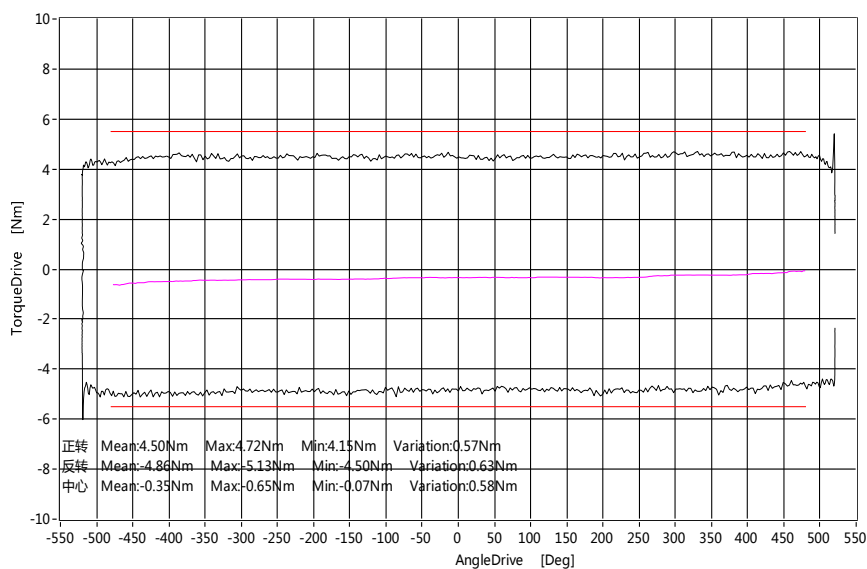


图 4.9 方向盘转速为 300 %s 的转角与方向盘力矩曲线

4.2.4 静态转向力随温度变化试验

静态转向力随温度变化试验是为了检验 EPS 系统在各种温度范围内，转向力需满足表 4.4 设计的要求，并且方向盘力矩要求 $\leq 5.5\text{Nm}$ 。

表 4.4 转向齿条力随温度变化要求

温度范围 (°C)	齿条力 (KN)
-40~-29	≥ 6.96 (80%Fmax)
-29~100	≥ 8.69 (100%Fmax)
100~120	由 100%助力 ramp-dawn 至零
>120	无助力

试验方法：将转向器总成安装在试验台上，电压为 $12.8 \pm 0.2V$ 、环境温度选取 5 个温度点，分别为 $-40^{\circ}C$ 、 $-29^{\circ}C$ 、常温、 $100^{\circ}C$ 和 $120^{\circ}C$ ，各个温度下在转向器总成上分别施加 80% 和 100% 的最大齿条力，方向盘从中间位置旋转到 5%-95% 的齿条行程内，测试方向盘的力矩。小齿轮由中间位置转动至左极限，然后再转动至右极限，最后回到中位作为一个试验循环。

试验结果：图 4.10 至图 4.14 分别为 $-40^{\circ}C$ 、 $-29^{\circ}C$ 、常温、 $100^{\circ}C$ 和 $120^{\circ}C$ 的转角与方向盘力矩曲线。由图可知，在 $-40^{\circ}C$ 、 $-29^{\circ}C$ 、常温、 $100^{\circ}C$ 和 $120^{\circ}C$ 下，方向盘最大力矩分别为 $5.3Nm$ 、 $5.1Nm$ 、 $4.9Nm$ 、 $4.9Nm$ 和 $1.7Nm$ ，最大力矩均满足 $\leq 5.5Nm$ 的设计要求。

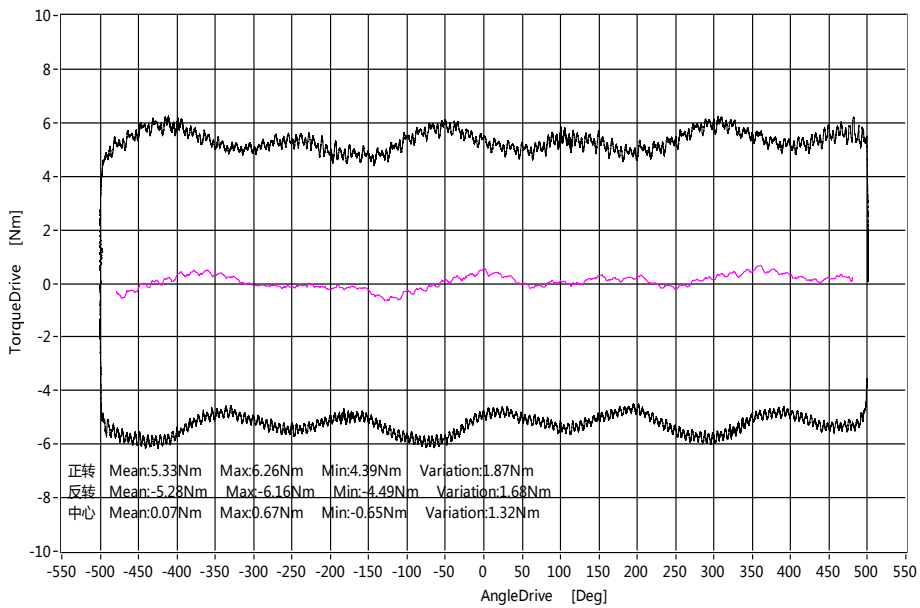


图 4.10 $-40^{\circ}C$ 转角与方向盘曲线

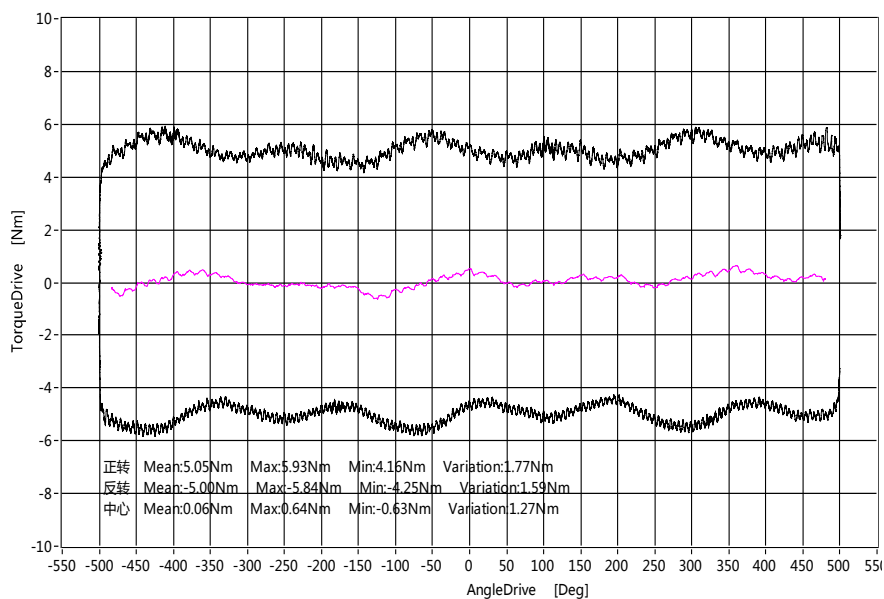


图 4.11 $-29^{\circ}C$ 转角与方向盘曲线

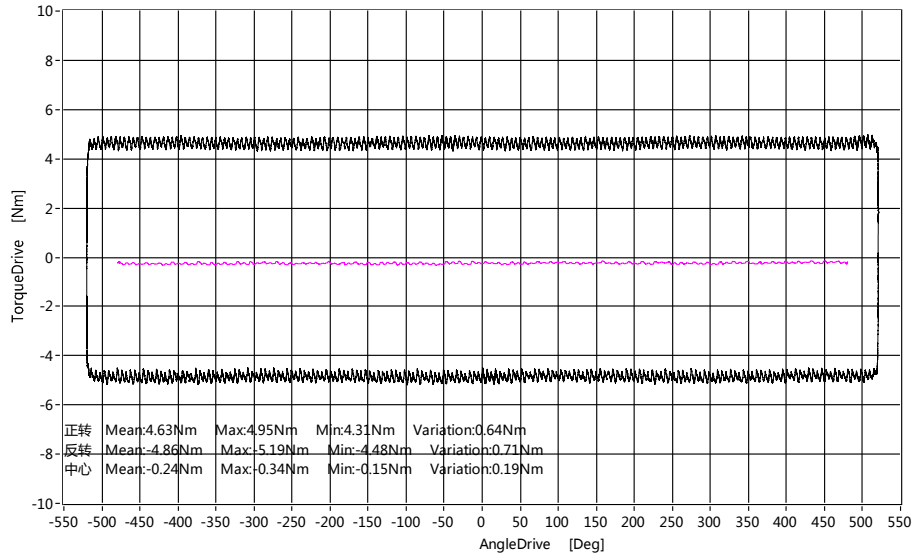


图 4.12 常温下转角与方向盘曲线

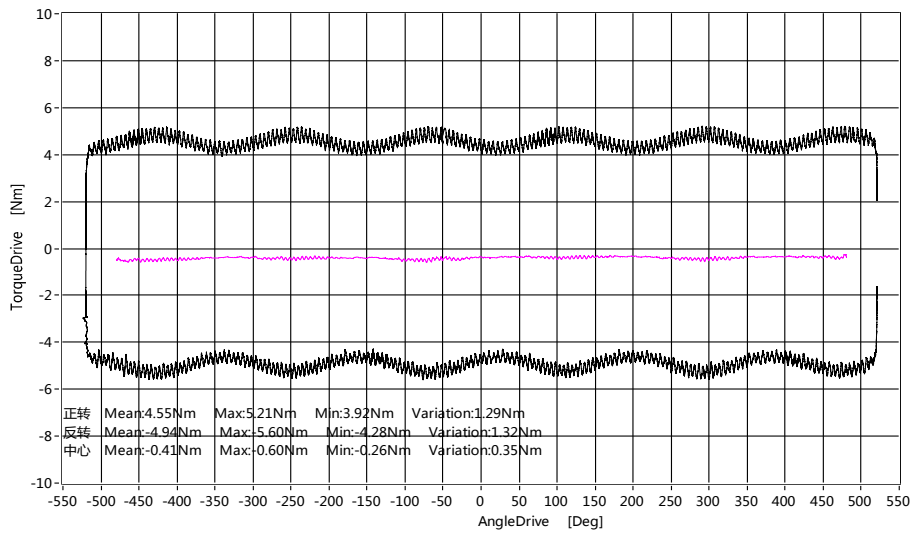


图 4.13 100°C 转角与方向盘曲线

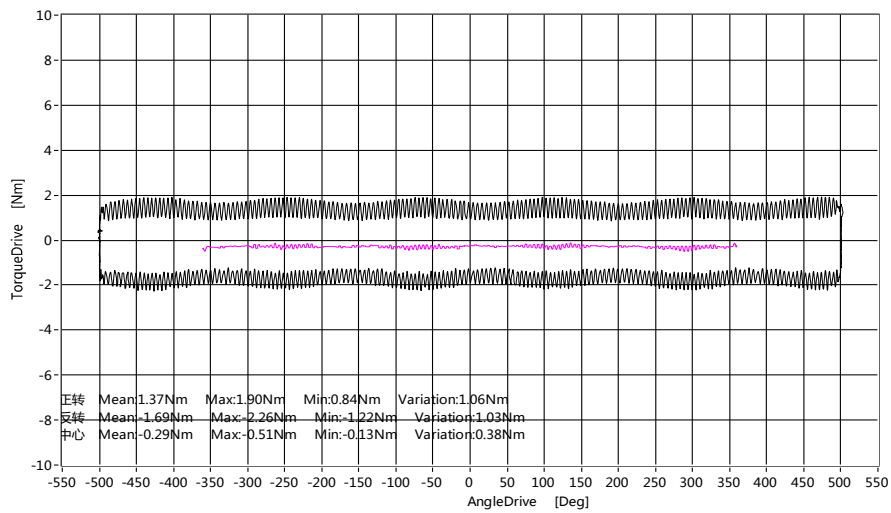


图 4.14 120°C 转角与方向盘曲线

4.2.5 静态转向力随电压变化试验

静态转向力随电压变化试验是为了检验 EPS 系统在各种电源电压范围内，转向力需满足表 4.5 设计的要求，并且方向盘力矩要求 $\leq 5.5\text{Nm}$ 。

表 4.5 转向齿条力随电压变化要求

电源电压范围 (V)	加载齿条力 (KN)
<9	允许无助力
9~10	≥ 5.22 (60%Fmax)
10~12.8	≥ 6.96 (80%Fmax)
12.8~16	≥ 8.69 (100%Fmax)

试验方法：将转向器总成安装在试验台上，环境温度为 $23\pm 5^{\circ}\text{C}$ （室温），电源电压分别为 9V、9.5V、10V、11.7V、12.8V、15.5V、16V。在转向器总成上分别按表 4.5 加载齿条力，小齿轮轴以 30 度/秒角速度从中间位置旋转到 100% 的全行程位置，测试方向盘的力矩。小齿轮由中间位置转动至左极限，然后再转动至右极限，最后回到中位作为一个试验循环。

试验结果：图 4.15 至图 4.21 电压分别为 9V、9.5V、10V、11.7V、12.8V、15.5V、16V 时的转角与方向盘力矩曲线。

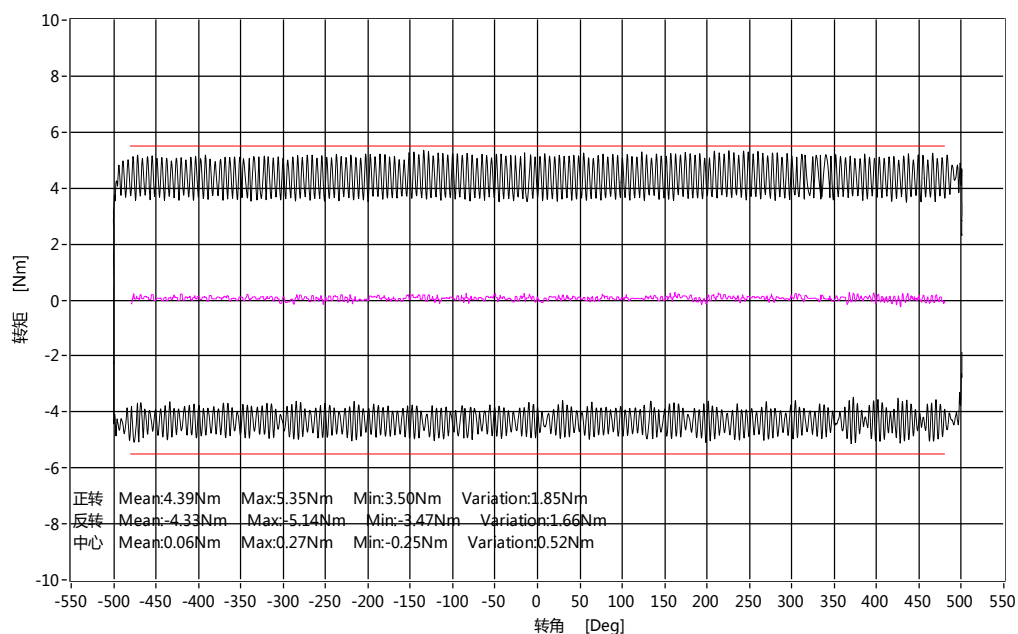


图 4.15 9V 时方向盘转角与力矩曲线

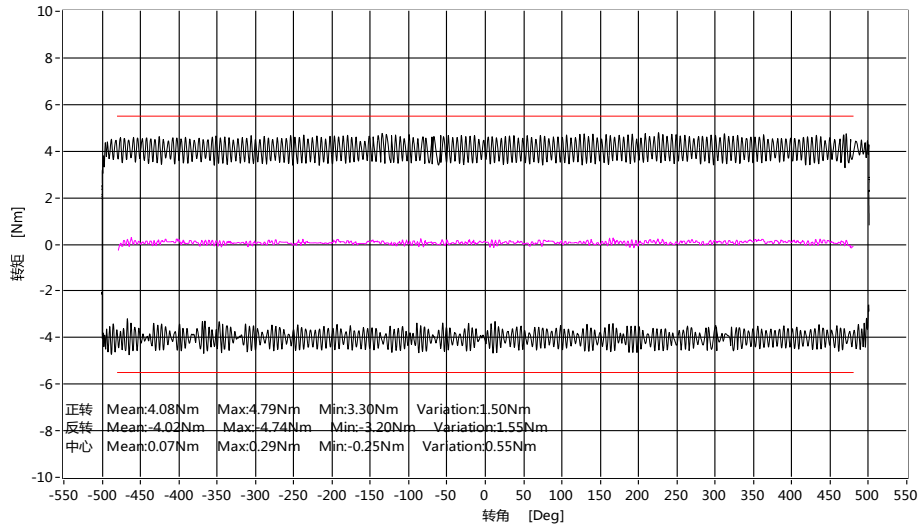


图 4.16 9.5V 时方向盘转角与力矩曲线

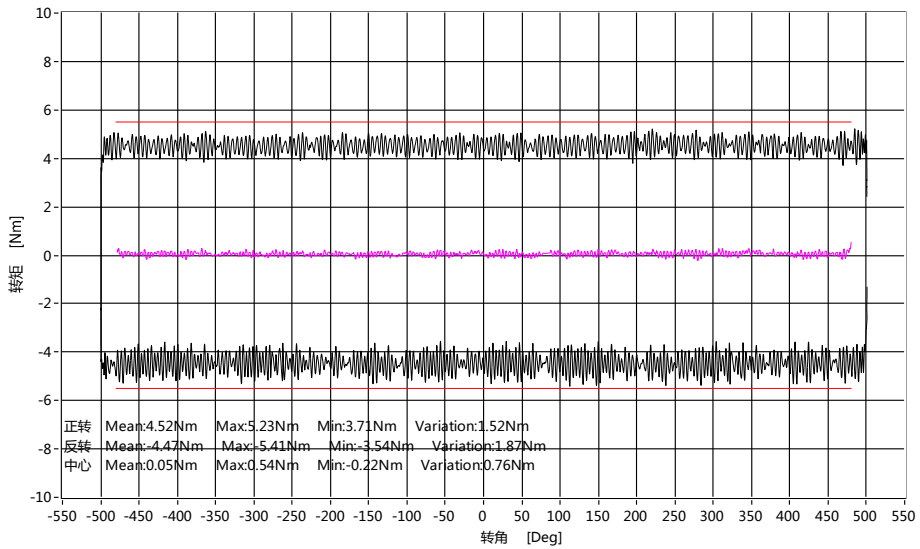


图 4.17 10V 时方向盘转角与力矩曲线

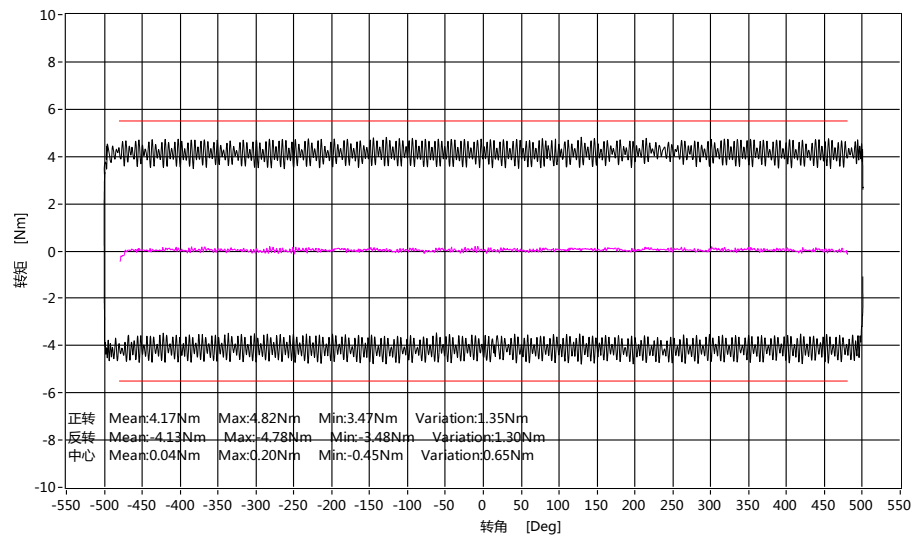


图 4.18 11.7V 时方向盘转角与力矩曲线

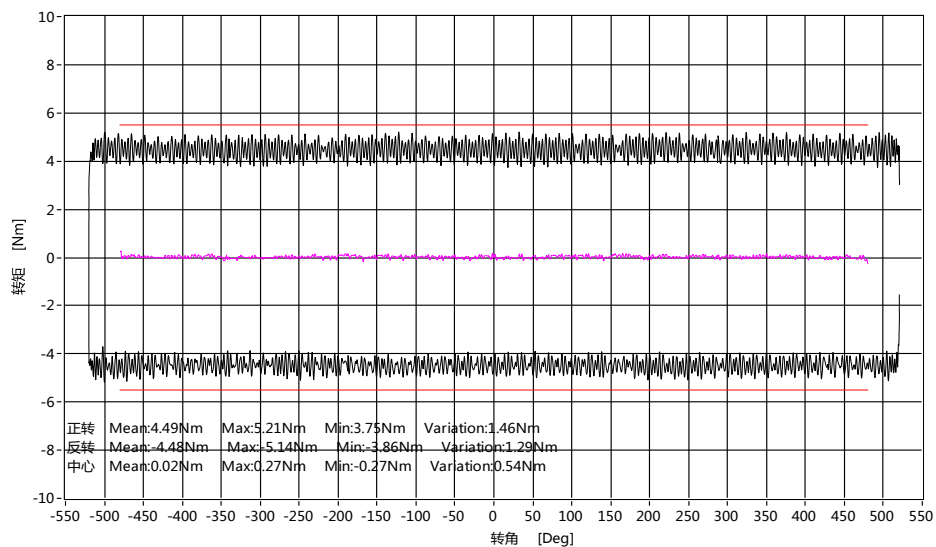


图 4.19 12.8V 时方向盘转角与力矩曲线

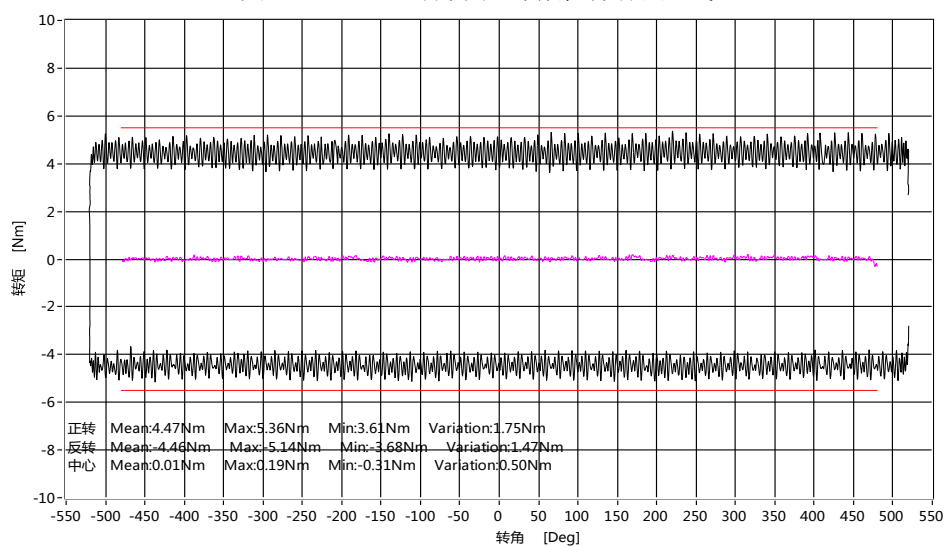


图 4.20 15V 时方向盘转角与力矩曲线

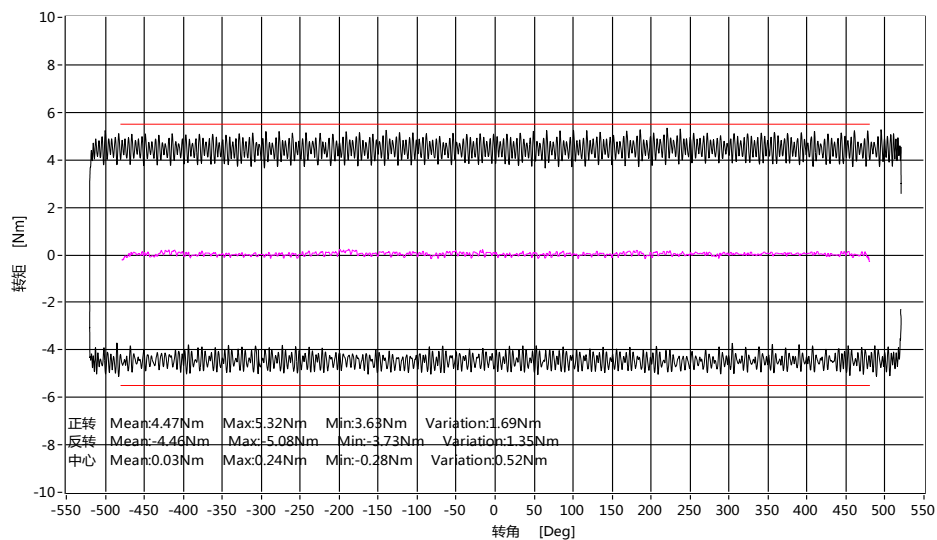


图 4.21 16V 时方向盘转角与力矩曲线

由图可知，EPS 系统在各种电源电压下工作，方向盘正转和反转的最大力矩如表 4.6 所示，最大力矩均满足 $\leq 5.5\text{Nm}$ 的设计要求。

表 4.6 各种电压下方向盘正转和反转最大转向力矩

要求		9V	9.5V	10V	11.7V	12.8V	15.5V	16V	结论
$\leq 5.5\text{Nm}$	正转	5.35	4.79	5.23	4.82	5.21	5.36	5.32	合格
	反转	5.14	4.74	5.41	4.78	5.14	5.14	5.08	

4.3 本章小结

本章对燃料电池轿车电动助力转向系统进行了台架试验研究。参考《汽车电动助力转向装置技术要求和试验方法》标准征求意见稿，结合单位研发电动助力转向系统的台架试验规范，分析了电动助力转向系统的试验要求和设备，并对台架试验的各项试验项目目的、方法和结果进行了分析，台架试验项目包括静态转向输出力、助力特性、静态转向力随方向盘转速变化、静态转向力随温度变化和静态转向力随电压变化试验。

第 5 章 燃料电池轿车电动助力转向系统性能标定和试验

燃料电池轿车电动助力转向系统通过台架试验验证后,需要进行 EPS 系统的性能标定和性能试验。EPS 系统的转向性能主要包括转向轻便性、转向回正性和转向操纵稳定性等^[49]。在工程开发中,这些性能一般统称为转向的手感性能。转向手感性能直接表现了 EPS 系统的设计和技术水平的高低,它可以通过修改控制器的控制模块参数改变,通过实车的转向轻便性、转向回正性和转向阻尼等试验进行客观评价。EPS 系统的性能标定是指使用工具和软件,对 EPS 控制模块的控制参数进行修改,来调整和提高转向手感性能。EPS 系统的性能试验是指采用测试设备,按照测试规范通过实车进行转向轻便性试验、转向回正性试验和转向阻尼试验,并验证转向手感性能是否达到了设定的性能目标。

5.1 电动助力转向系统性能标定

5.1.1 性能标定与试验流程

在燃料电池轿车开发过程中, EPS 的性能标定和试验过程可以概括为 4 个方面,即“设定目标、准备工作、性能标定、性能验收”。根据燃料电池轿车整车性能要求和 EPS 系统的技术要求设定转向性能目标;在性能标定和试验前需要按要求对 EPS 系统的零部件状态、车辆状态、标定工具和试验场地等做好准备工作;经过多轮性能标定,并通过主客观评估检验是否达设定的转向性能目标,完成标定和性能验收工作。图 5.1 为电动助力转向系统性能标定和试验流程图。

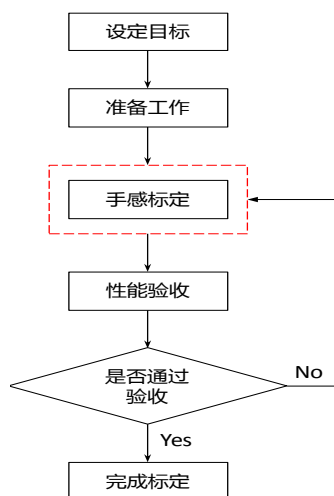


图 5.1 电动助力转向系统性能标定和试验流程图

5.1.2 性能标定要求

燃料电池轿车电动助力转向系统的性能标定主要指转向手感的标定，要取得整车优秀的转向品质，转向手感性能至关重要。EPS 性能标定的工作内容是使用标定工具和软件，通过装配所开发的电动助力转向系统的试验车辆，在各种试验场内根据设定的目标对控制模块的控制参数进行调整，经过主观评估和客观测试综合评价来确定转向手感是否满足转向性能设定的目标，只有达到设定目标才能锁定标定状态完成性能标定验收。图 5.2 为 EPS 手感标定过程示意图。

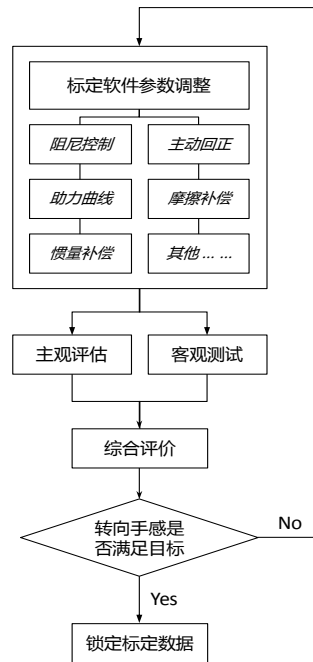


图 5.2 EPS 手感标定过程示意图

EPS 手感标定的项目主要依据 EPS 控制软件的功能，对各种功能的软件控制参数进行标定，一般包括助力特性参数、主动回正参数、阻尼控制参数、末端保护参数、摩擦补偿参数和惯性补偿参数等^[50]。

EPS 标定工具一般由诊断（OBD）转 CAN 连接盒、笔记本电脑、CANape 硬件盒、数据线、车载电源等组成，标定软件主要是与 EPS 控制器软件兼容的，可以支持更改控制模块参数的应用软件，如 CANape 软件、MATLAB 等。

EPS 转向手感标定的场地分为封闭场地与公共道路两部分，封闭场地一般指试验场或赛车场，公共道路一般指普通城市道路（包括高速公路，以及国道、省道、县道等非高速公共道路）。EPS 手感标定工作首先在试验场进行，然后在公共道路上进行精细化标定，待标定工作完成或阶段性完成后，再于试验场、赛车场、或公共道路上进行标定结果验收，以及在试验场完成相关的客观测试。

EPS 转向手感标定遵循“由慢到快、由粗到细、循环渐进”的基本思路。“由

慢到快”是指标定时的车速要由较低的车速逐渐向高车速递进，直至车辆或场地允许的最高车速，这样做既可以保证标定数据的连续性与线性度，更重要的是可以保证在低车速时察觉硬件或软件的问题，避免在高车速时发生安全事故。“由粗到细”是指在标定时对于各个标定模块（基本助力、主动回正、阻尼控制等模块）参数的更改的幅度，在标定初始阶段应当注重方向性的参数更改，即尽量做到每次参数更改都能产生明显的转向手感变化；而在标定中后期，此时的转向手感标定的基本方向已经确定，对于标定参数的更改则由“粗调”逐渐转化为“细调”、“微调”，即每次参数更改都不会对转向手感产生质的变化，标定参数仅在小范围内调整。“循环渐进”是指各个车速、各个标定模块都会按照一定的顺序循环标定，通常按照“基本助力”、“主动回正”、“阻尼控制”、“末端保所与其他功能标定”的顺序进行标定，直至最终符合转向手感目标。

5.1.3 助力特性标定

在 3.3.1 章节中，介绍了燃料电池轿车 EPS 系统的助力控制策略，其设计了 13 条助力特性曲线，每条曲线采用了参数独立的曲线型助力特性曲线设计。参数独立的助力特性曲线由 5 个不同的区段组成：助力死区，小助力区，大助力区，缓冲区和饱和区。在性能标定软件中，通常会将 5 个区段简化成由三段直线和两段曲线组成的助力特性曲线，图 5.3 为单条车速助力曲线。该曲线定义了 P0、PD、P1、P2、P3、P4、P5、P6 和 P7 共 9 个参数，其中 P0 为第一段直线横坐标长度，PD 为第一段直线斜率，P1 为第一段曲线横坐标长度，P2 为第二段直线斜率，P3 为第二段直线横坐标，P4 为第二段曲线横坐标长度，P5 为第三段直线斜率，P6 为第二段曲线横坐标，P7 为第三段直线纵坐标。在单个车速助力特性标定时，可以通过调整上述 9 个参数来改变助力特性曲线形态来满足各种驾驶工况下所需的助力性能。

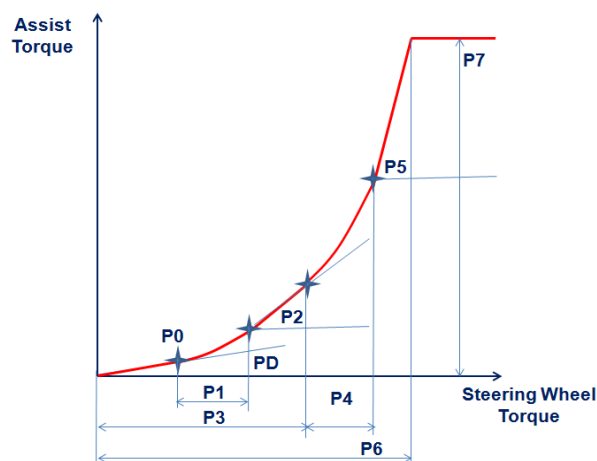


图 5.3 单条车速助力曲线

助力特性标定的主要工作是完成 13 条助力特性曲线形态的标定，助力特性曲线标定界面见图 5.4，助力模块共有 13 个车速断点，每个车速断点对应一条助力曲线，可以通过修改该车速断点的 P0、PD、P1、P2、P3、P4、P5、P6、P7 这 9 个参数改变曲线形态，使车速变化过程中转向手感更加线性、更加平顺，中位转向响应更快，满足车辆在不同的驾驶工况下最佳的转向助力性能。

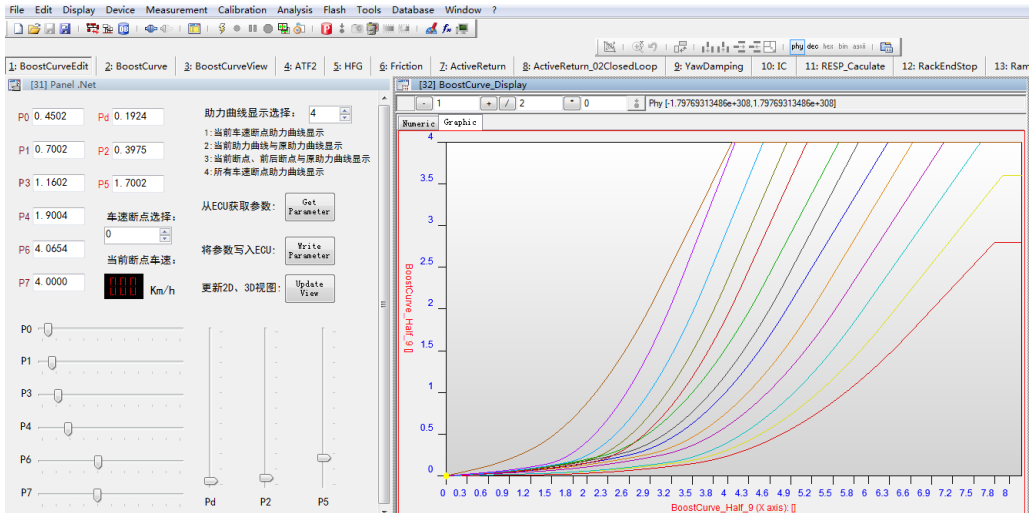


图 5.4 助力特性曲线标定界面

5.1.4 主动回正标定

在 3.3.2 章节中，介绍了燃料电池轿车 EPS 系统的主动回正控制策略，主动回正控制模块包括回正判断模块和回正力矩计算模块。在性能标定中，这两个模块参数是同时进行标定的。图 5.5 为主动回正标定界面，标定界面由 3 个参数标定模块部分组成，分别为不同车速下的回正力矩与回正期望转速参数，回正期望转速差值增益参数和回正力矩随手力矩增益参数。

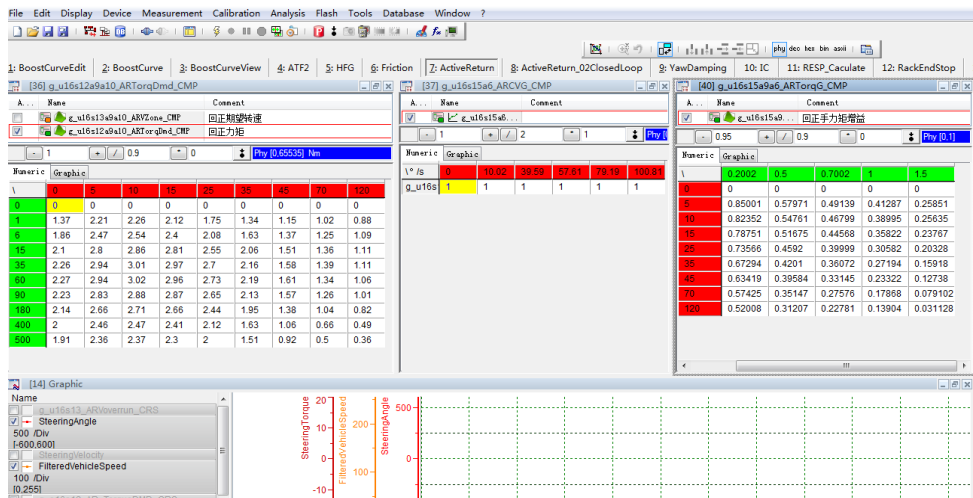


图 5.5 主动回正标定界面

图 5.6 为不同车速下的回正力矩与回正期望转速参数标定界面，根据不同的车速和方向盘不同的角度，EPS 输出不同的回正力矩值。由于车辆悬架机械回正力的规律是在低车速下很小，随车速升高而变大，为满足在整个车速范围内车辆都能实现柔顺、均匀、线性的回正效果，回正力矩标定一般遵循低车速强，高车速弱的规律。由于不同的车辆、不同的零件以及车辆使用过程中零件磨损的影响，转向系统机械摩擦力不尽相同，单独的回正力矩模块很难实现不同车辆具有好的转向回正效果，所以需要设计回正期望转速模块，当车辆间出现摩擦力差异导致回正转速不同时，通过计算期望回正转速与实际回正转速差值来输出相应的回正力，实现小的回正残余角、实现回正手感的无迟滞性。

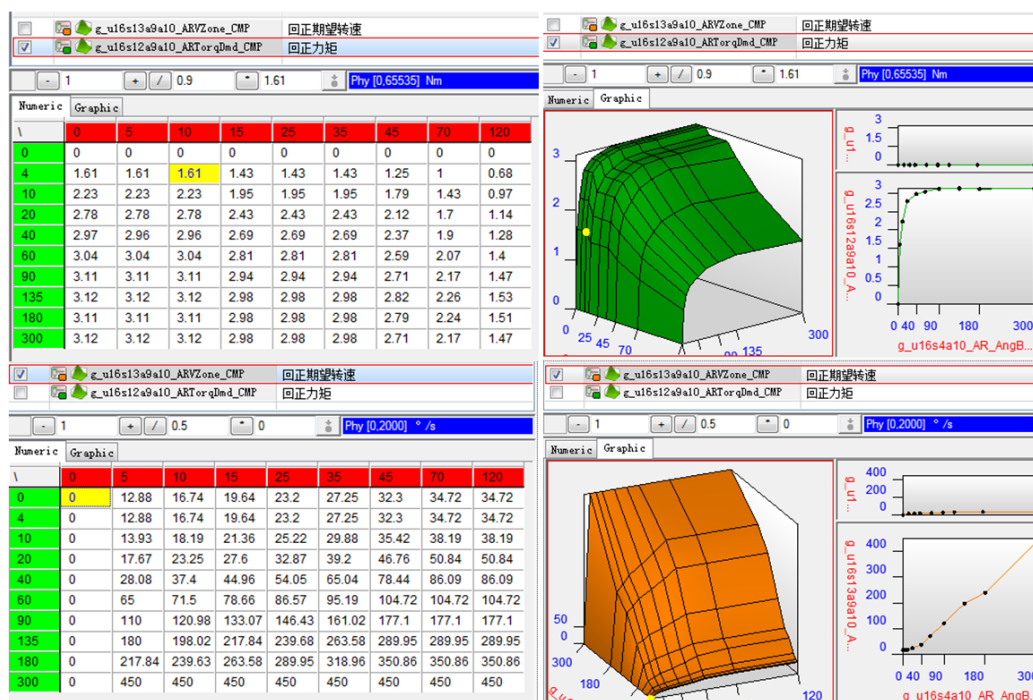


图 5.6 不同车速下的回正力矩与回正期望转速参数标定界面

图 5.7 为回正期望转速差值增益参数标定界面，主要是对转速差造成的补偿力矩值进行标定，它和回正期望转速一起共同构成闭环回正模块。回正期望转速是一个目标，车辆实际回正过程中，不同的车辆由于摩擦力的区别，实际的回正转速会有区别。摩擦力大的回正慢，摩擦力小的回正快，这样与期望转速的差值就会不同，摩擦力大的车子回正转速差值大，从而导致回正力大；摩擦力小的车子回正转速差值小，从而导致回正力小，这就实现了回正效果动态调节的作用，可以使回正比较连续、顺畅。同理这个功能对于同一辆车，如果在某个转角位置处的摩擦力比较大，也能起到调节的作用，使车辆回正不至于停在这个位置或到这个位置特别慢。包括对于中位残余角的控制，由于中位附近机械回正力几乎没有，主动回正力一般不能调太大，防止超调，调小又容易回不到位，或者有的车

能回到位，有的车不能，这个功能就可以很好的调节这个矛盾，不管摩擦力大不大，都能保证把方向盘很好的回到中位。

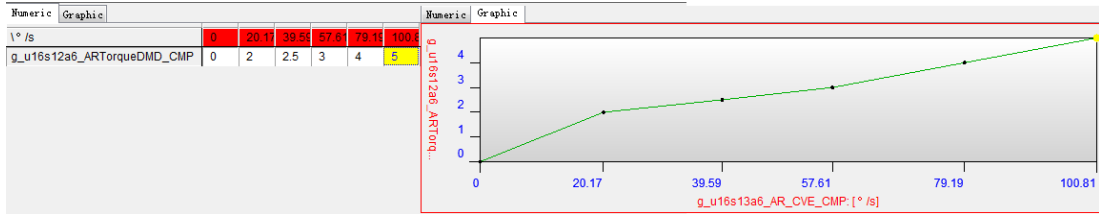


图 5.7 回正期望转速差值增益参数标定界面

标定过程中如果需要很强的回正力矩才能保证车辆的回正性能时，往往会导致回正力矩干预正常的转向过程，导致“弹簧感”；而如果车辆中位附件机械回正不强时，中位转向容易出现车辆回馈不明显，中位不清晰的问题。通过标定回正力矩随手力矩增益参数，根据不同的车速下对应不同的方向盘力矩进行回正手力矩增益值进行标定，当“弹簧感”过强时，降低回正力矩随手力矩增益，减小回正输出，改善“弹簧感”；当中位感觉不清晰时，可以提高回正力矩随手力矩增益，增加回正输出，改善中位转向的回馈，图 5.8 为回正力矩随手力矩增益参数标定界面。

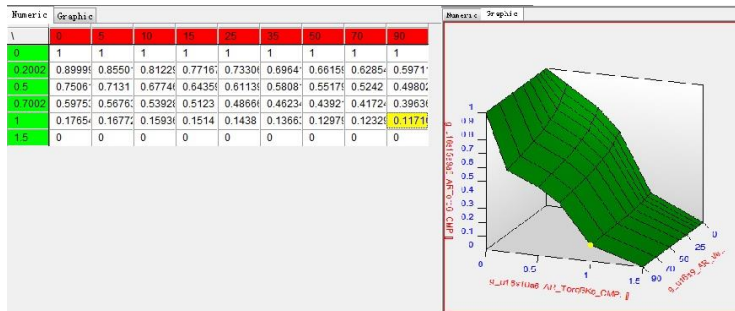


图 5.8 回正力矩随手力矩增益参数标定界面

通过对上述 3 个部分参数的标定，可以提高车辆的回正性能，实现较小的回正残余角，并且实现较好的回正力反馈。

5.1.5 阻尼控制标定

在 3.3.3 章节中，介绍了燃料电池轿车 EPS 系统的阻尼控制策略，阻尼控制主要是根据车速、方向盘手力矩、方向盘转角和转速来确定电机附加的阻尼力矩的大小，以此来有效地提高汽车高速直线行驶的稳定性且减小路面冲击对方向盘转向的影响。在性能标定中，阻尼控制参数标定模块主要包括 3 部分，分别为不同车速下，阻尼力矩随方向盘转速变化参数、阻尼力矩随手力矩增益和阻尼力矩

随转角增益参数，图 5.9 为阻尼力矩标定界面。

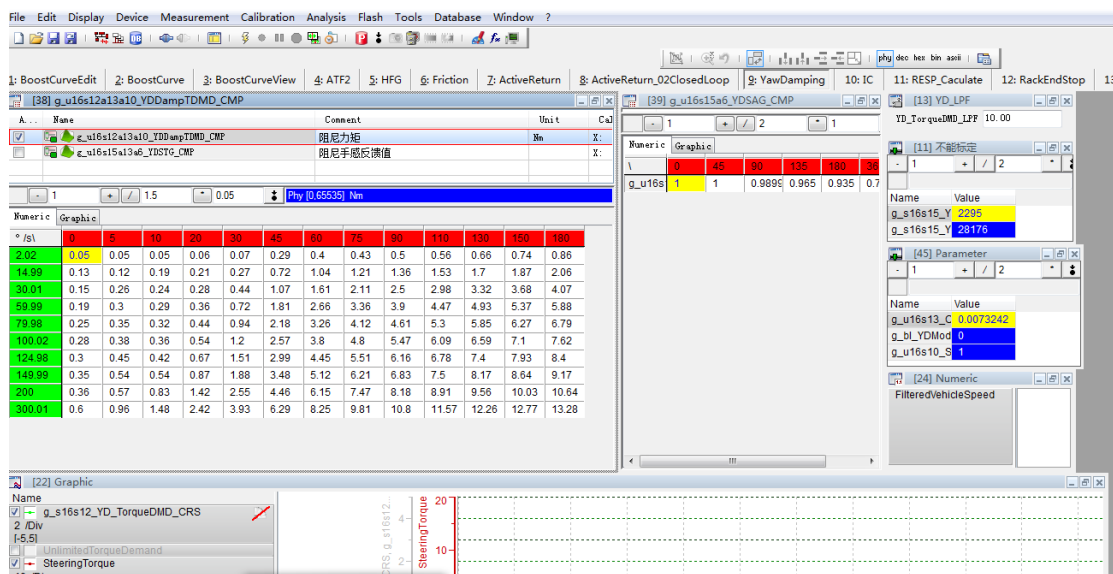


图 5.9 阻尼控制标定界面

对于不同车速下，阻尼力矩随方向盘转速变化参数标定界面如图 5.10。由于阻尼模块最重要的作用就是抑制车辆高速行驶的回正超调，保持系统稳定，所以阻尼的标定一般遵循低车速弱高车速强、转速越快阻尼越强的原则；另外，如果阻尼力设置得过大，容易导致转向手感的粘滞感，而合适的阻尼力可以使转向力显得“厚重”，提升转向力的质感，所以阻尼调试的重点是尽可能去平衡超调和转向感觉。

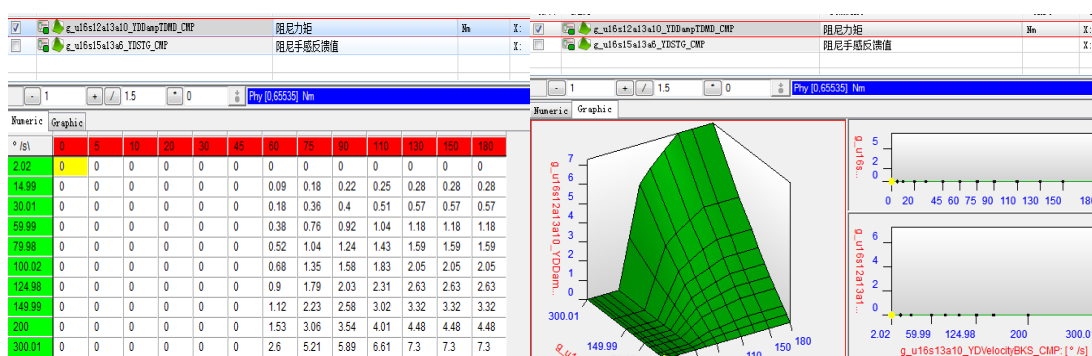


图 5.10 不同车速下阻尼力矩随方向盘转速变化参数标定界面

图 5.11 为不同车速下阻尼力矩随手力矩增益标定界面，这个模块可以帮助平衡稳定性和转向阻尼感这个矛盾，比如降低大手力下的增益，可以减轻转向粘滞感，而在非转向工况下，模块仍可输出较大的阻尼力，位置系统稳定。

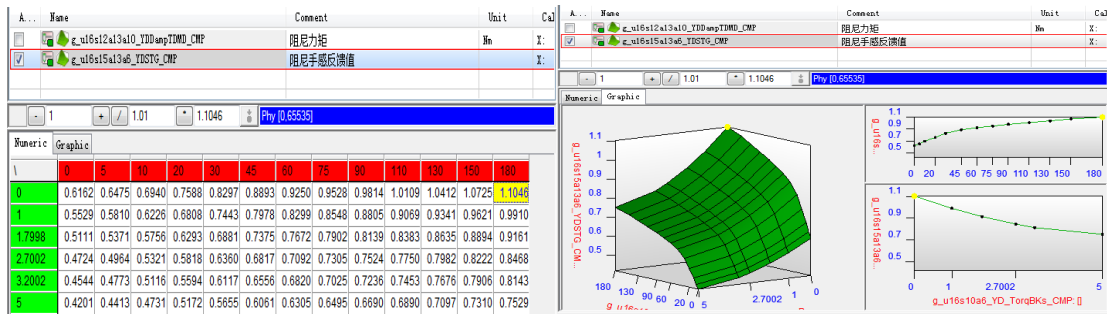


图 5.11 不同车速下阻尼力矩随手力矩增益标定界面

图 5.12 为不同车速下阻尼力矩随角度增益标定界面，这个模块作用是转向过程中不同角度输出不同力矩，即实现阻尼力矩能够随方向盘角度变化而变化，一般遵循转角越大，阻尼力矩越小的规律进行标定。在保证方向盘稳定收敛在中位的基础上，尽量实现非中位下真实的转向感觉，同时这种过渡可以连续而线性。

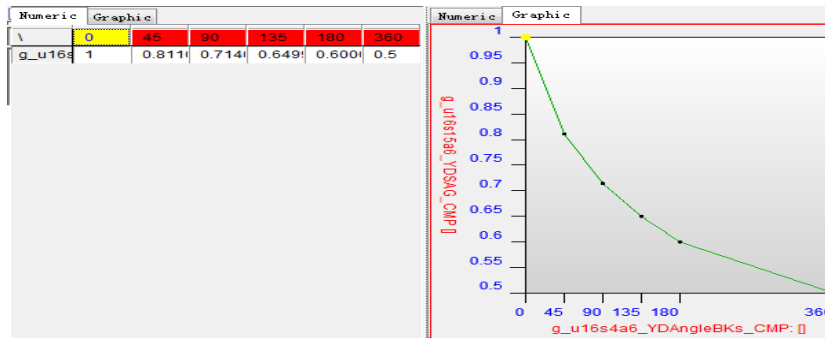


图 5.12 不同车速下阻尼力矩随角度增益标定界面

通过对上述 3 个部分阻尼控制参数的标定，实现不同车速下的阻尼力矩控制，可以有效地抑制回正超调和提高行驶安全性。

5.2 电动助力转向系统性能试验方案及结果分析

燃料电池轿车电动助力转向系统在完成性能标定后，对标定的手感性能需要通过实车进行性能试验验证，检验标定的结果是否达到设计要求。

5.2.1 性能试验要求及设备

电动助力转向系统性能试验的目的是基于整车状态评估转向系统与零件的性能指标，以及作为支持性能标定的验收手段。参考《GB/T6323-2014 汽车操纵稳定性试验方法》标准和单位研发电动助力转向系统的性能试验规范，性能试验项目主要包括转向轻便性、转向回正性和转向阻尼试验。

燃料电池轿车电动助力转向系统性能试验需要使用装备开发的燃料电池轿车试验车辆，通过测试设备在试验场完成。试验车辆需确保所有系统及零部件被正确安装，并都能正常工作。在试验前，对试验车辆需进行四轮定位参数测量，将四轮定位参数调整到整车制造的设定值范围内，轮胎气压设定为整车设计的冷态值，试验车辆的载荷需按照要求的载荷分布。性能试验仪器主要有数据采集仪、测力方向盘、双轴非接触式车速传感器、陀螺仪、高度传感器和方向盘角度力矩传感器等。

5.2.2 转向轻便性试验

转向轻便性试验主要目的是测量车辆在静止状态或行驶状态时表现的转向力特性^[51]，转向力特性指方向盘转向力对于方向盘转角的函数特性，分为静态转向力和动态转向力。

5.2.2.1 静态转向力

静态转向力试验的目的在于测量试验车静止状态的转向力特性。静态转向力一般是在室内 3M 试纸上，车速为 0Km/h，松开制动，测试 360 度转向输入时需要在方向盘轮缘上施加的作用力的值，应当小于或等于设计时静态转向作用力中的规定值 29N。

试验方法：试验前，按试验要求准备好试验车辆，安装调试好数据采集仪和方向盘角度力矩传感器等测试设备，并在室内 3M B 型中等粗糙度磨砂水平道路表面上对试验设备进行软件重新标定和调零。将方向盘摆正，以 5km/h 时速行驶 5m 后缓慢停止，释放转向系统内部扭矩。发动机怠速，挂空档，释放手制动，松开制动踏板，而后开始数据采集。缓慢连续而柔和地转动方向盘（30° /s），从中心位置顺时针转至锁止，而后缓慢回转至中心位置后继续沿逆时针完成同样动作后返回中心位置，停止采集。重复上述测量方法，完成共 3 组测试数据采集。

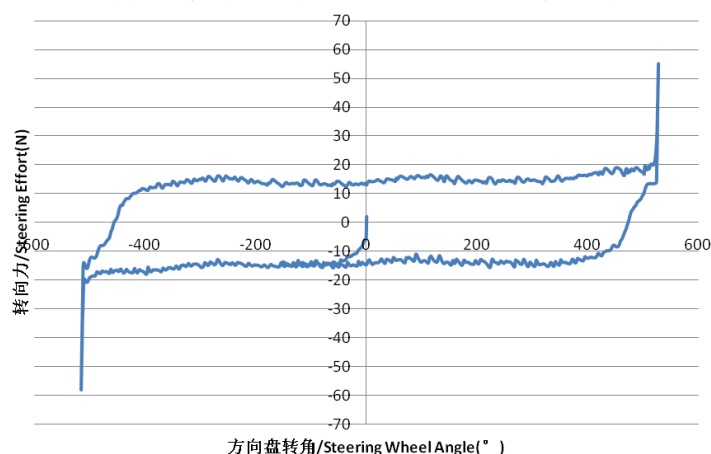


图 5.13 方向盘转角与转向力曲线

试验结果：对采集的数据进行处理后，得到如图 5.13 所示的方向盘转角与转向力关系曲线。

根据测试的 3 组数据，整理所得的静态转向力试验结果见表 5.1，测试的平均转向力为 16.70N，对应的转向力矩为 3.12Nm，满足设计的静态转向力要求。

表 5.1 静态转向力试验结果

测试次数	1	2	3	平均
转向力矩(N.m)	3.13	3.15	3.09	3.12
转向力(N)	16.74	16.85	16.52	16.70

5.2.2.2 动态转向力试验

动态转向力试验的目的在于测量试验车辆在低速 20km/h 和 60km/h 时的转向力特性。动态转向力特性指的是方向盘转向力对于侧向加速度的函数特性。动态转向力表现了车辆从停车场的行驶速度到达到一般的公路行驶速度这个范围内的转向力，主要测试低速的转向动态性能。在一定的车速和对应的侧向加速度下，动态转向力的值应该在规定的的设计范围内，表 5.2 为燃料电池轿车 EPS 系统动态转向力设计要求。

表 5.2 燃料电池轿车 EPS 系统动态转向力设计要求

车速	侧向加速度 (g)	方向盘手力矩 (N)
20kph	0	10~30
	0.1	13~33
	0.25	15~35
60kph	0	7~27
	0.1	9~29
	0.25	11~31

试验方法：试验前，按试验要求准备好试验车辆，安装并调试好数据采集仪、双轴非接触式车速传感器、陀螺仪和方向盘角度力矩传感器等测试设备，并在水平道路表面上对试验设备进行软件重新标定和调零。标准的试验包括 20km/h \pm 2km/h，60km/h \pm 5km/h 两种车速，侧向加速度峰值为 0.4g \pm 0.05g，为了精确确定峰值，可事先预测试并在方向盘上做转角的记号。在动态广场中缓慢连续而柔和地转动方向盘（30 %s），从中心位置顺时针转至锁止或侧向加速度达到指定峰值为止，而后缓慢回转至中心位置后继续沿逆时针完成同样动作后返回并转过中心位置（约转过 0.1g），停止采集。重复上述测量方法，完成共 2 组测试数据采集。

试验结果：对采集的数据进行处理后，分别得到图 5.14 至图 5.17 的 20km/h

和 60km/h 的侧向加速度与转向力矩关系曲线和方向盘转角与转向力矩关系曲线。

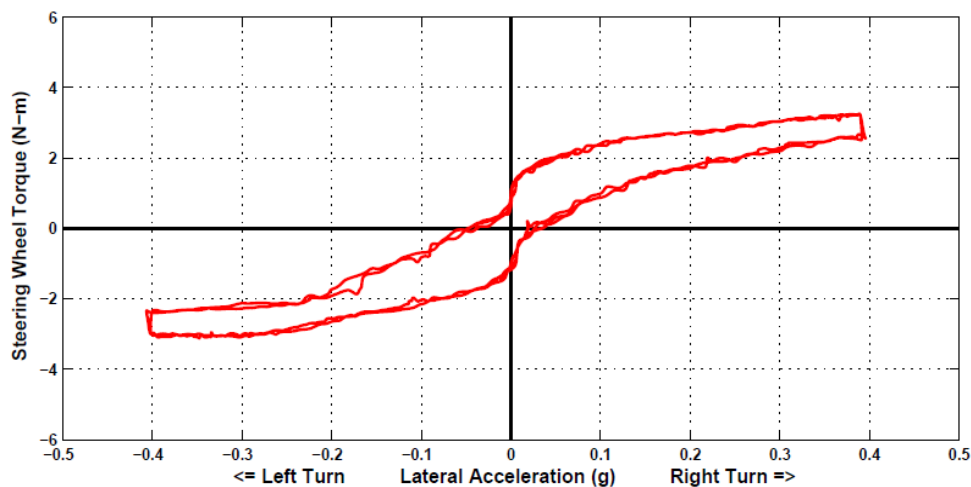


图 5.14 20km/h 侧向加速度与转向力矩曲线

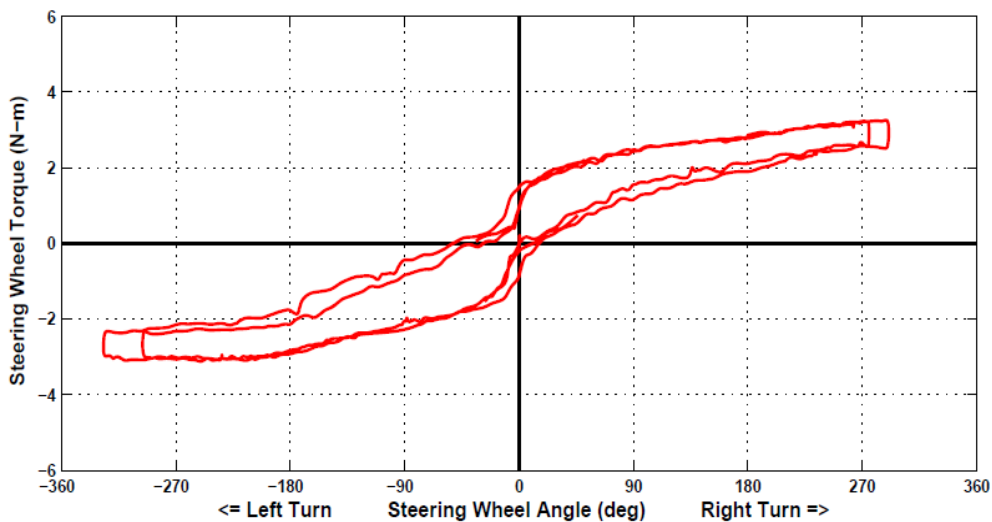


图 5.15 20km/h 方向盘转角与转向力矩曲线

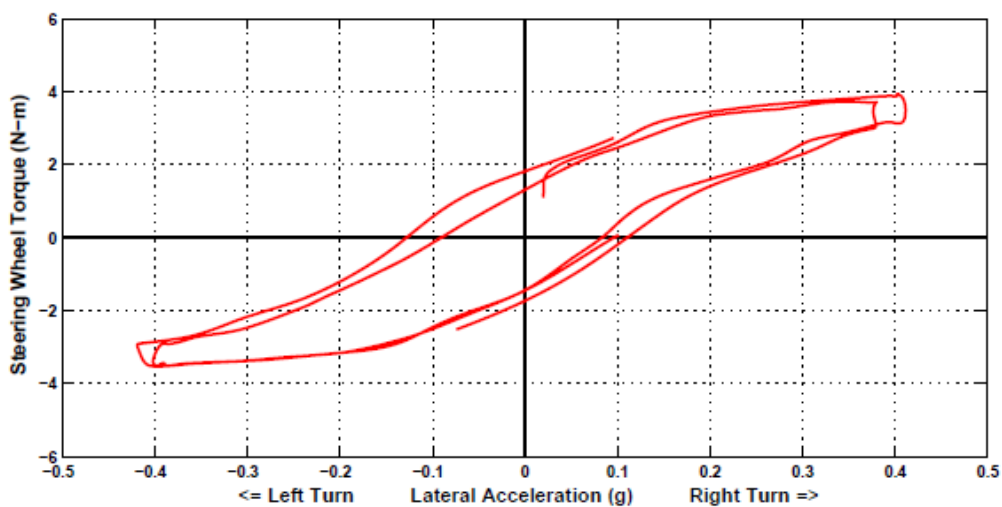


图 5.16 60km/h 侧向加速度与转向力矩曲线

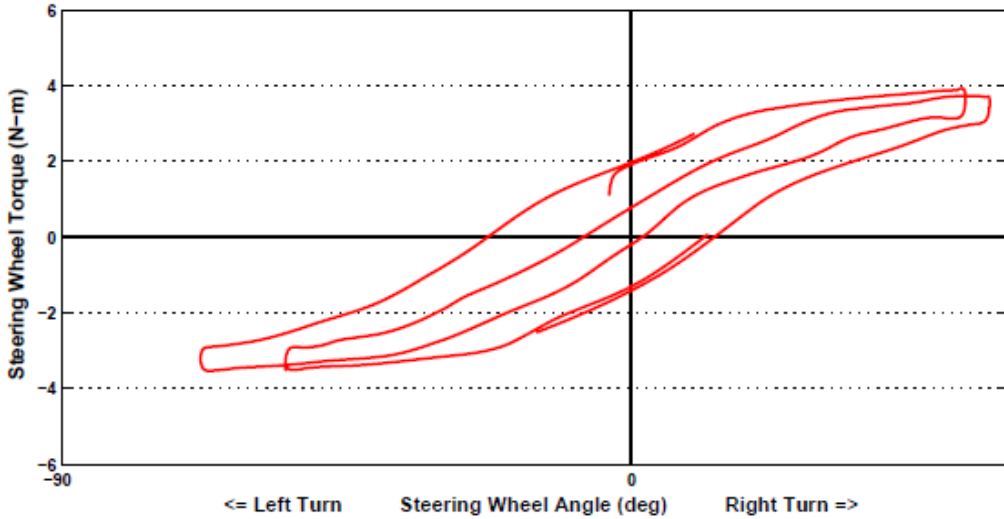


图 5.17 60km/h 方向盘转角与转向力矩曲线

根据测试的 2 组数据,分别整理所得的 20km/h 和 60km/h 的动态转向力试验结果见图 5.18 和图 5.19,可知满足设计的动态转向力要求。

Metric, by segment	Lateral Acceleration (g)						Speed (km/h)
	0.0		0.1		0.25		
	CW	CCW	CW	CCW	CW	CCW	
Steering Torque (N-m)							
1	0.95	-0.91	2.36	-2.05	2.85	-2.86	21.4
2	0.89	-0.97	2.37	-2.16	2.87	-2.93	21.6
Average	0.92	-0.94	2.36	-2.10	2.86	-2.89	21.5
Std Dev	0.04	0.04	0.00	0.08	0.02	0.05	0.1
Steering Torque Gradient (N-m/g)							
1	39.2	45.5	6.6	4.6	3.7	5.4	
2	43.4	37.1	5.8	7.7	3.0	2.7	
Average	41.3	41.3	6.2	6.2	3.4	4.1	
Std Dev	3.0	5.9	0.5	2.2	0.5	1.9	
Steering Sensitivity (g/100 deg SWA)							
1	0.11	0.14	0.12	0.15	0.14	0.15	
2	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15	0.16	
Average	0.12	0.13	0.12	0.14	0.14	0.16	
Std Dev	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	
Steering Wheel Velocity (deg/s)							
1	34.9	-20.7	38.1	-17.7	27.2	-32.8	
2	24.5	-36.3	39.0	-47.1	32.6	-34.8	
Average	29.7	-28.5	38.6	-32.4	29.9	-33.8	
Std Dev	7.4	11.0	0.6	20.8	3.8	1.4	

Steering Wheel Diameter = 375 mm			
Average Test Speed = 21.5 km/h			
	Lateral Acceleration (g)		
	0.0	0.1	0.25
	-----	-----	-----
Steering Torque (N-m)	0.93	2.23	2.88
Steering Wheel Rim Force (N)	4.96	11.91	15.34
Steering Torque Gradient (N-m/g)	41.30	6.19	3.71
Steering Wheel Rim Force Gradient (N/g)	220.3	33.0	19.8
Steering Sensitivity (g/100 deg SWA)	0.13	0.13	0.15

图 5.18 20km/h 动态转向力试验结果

Metric, by segment	Lateral Acceleration (g)						Speed (km/h)
	0.0		0.1		0.25		
	CW	CCW	CW	CCW	CW	CCW	
Steering Torque (N-m)							
1	1.82	-1.42	2.64	-2.50	3.60	-3.26	58.2
2	1.31	-1.72	2.47	-2.46	3.48	-3.28	58.7
Average	1.57	-1.57	2.55	-2.48	3.54	-3.27	58.4
Std Dev	0.36	0.21	0.12	0.02	0.09	0.01	0.3
Steering Torque Gradient (N-m/g)							
1	9.0	13.6	12.2	9.6	2.7	2.0	
2	13.8	12.3	8.6	12.1	2.1	2.4	
Average	11.4	12.9	10.4	10.8	2.4	2.2	
Std Dev	3.4	0.9	2.5	1.8	0.4	0.3	
Steering Sensitivity (g/100 deg SWA)							
1	0.71	0.60	0.78	0.73	0.69	0.72	
2	0.72	0.64	0.75	0.76	0.78	0.80	
Average	0.71	0.62	0.76	0.74	0.74	0.76	
Std Dev	0.01	0.03	0.02	0.02	0.06	0.05	
Steering Wheel Velocity (deg/s)							
1	75.3	-62.9	27.3	-50.9	36.3	-46.9	
2	44.0	-74.5	38.6	-35.5	29.6	-35.0	
Average	59.7	-68.7	32.9	-43.2	32.9	-40.9	
Std Dev	22.1	8.2	8.0	10.9	4.7	8.4	

Steering Wheel Diameter = 375 mm			
Average Test Speed = 58.4 km/h			
	Lateral Acceleration (g)		
	0.0	0.1	0.25
	-----	-----	-----
Steering Torque (N-m)	1.57	2.52	3.40
Steering Wheel Rim Force (N)	8.37	13.42	18.16
Steering Torque Gradient (N-m/g)	12.19	10.62	2.30
Steering Wheel Rim Force Gradient (N/g)	65.0	56.6	12.3
Steering Sensitivity (g/100 deg SWA)	0.67	0.75	0.75

图 5.19 60km/h 动态转向力试验结果

5.2.3 转向回正性试验

汽车的转向回正性能是评价汽车操纵稳定性的一项重要内容。转向回正性能试验是表征和测定汽车自曲线回复到直线行驶的转向过程，一般通过低速转向回正力矩和回正残余角考核回正能力^[52]。转向回正力矩是当车速为 20 km/h，将方向盘旋转 180° 以上，方向盘回正时握持方向盘所需的力矩应满足燃料电池轿车 EPS 系统的设计规定值大于 0.5 Nm。转向回正残余角是以车速为 20km/h，方向盘保持 360° 放开，2s 后方向盘回正后的转角，燃料电池轿车转向回正残余角设计规定值小于 15°。

试验方法：参考国家标准《GB/T6323.4-2014 汽车操纵稳定性试验方法一转向回正性能试验》^[53]，试验前，按试验要求准备好试验车辆，安装并调试好数据采集仪、双轴非接触式车速传感器、陀螺仪和方向盘角度力矩传感器等测试设备，并在水平道路表面上对试验设备进行软件重新标定和调零。在试验场的动态

广场上当车辆加速至 20km/h，分别将方向盘向左和向右旋转 180° 以上，稳定车速并开始数据记录。再次将车辆加速至 20km/h，分别将方向盘向左和向右保持 360°，稳定车速并开始数据记录，放开方向盘 2s 后停止，重复上述测量方法，完成共 2 组测试数据采集。

试验结果：对采集的数据进行处理后，图 5.20 为低速转向回正力矩曲线。图 5.21 和图 5.22 分别为左，右侧转向回正残余角曲线。

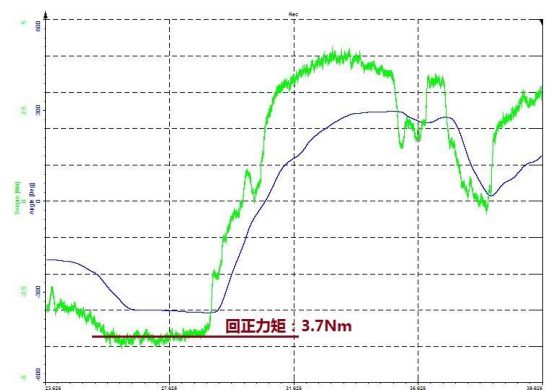


图 5.20 低速转向回正力矩曲线

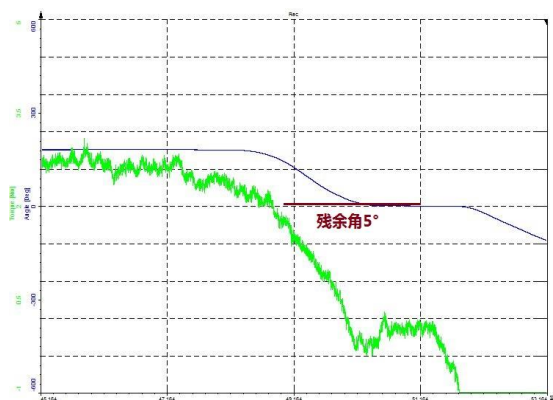


图 5.21 左侧转向回正残余角曲线

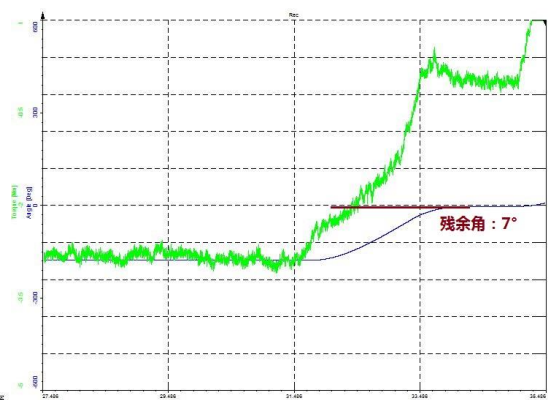


图 5.22 右侧转向回正残余角曲线

由图可知，在车速 20km/h 时，方向盘保持 180° 时转向回正力矩为 3.7Nm，达到设计的低速转向回正力大于 0.5Nm 的要求。在车速 20km/h 时，方向盘自 360° 放开 2s 后，转向回正的残余角左侧和右侧分别为 5° 和 7°，满足小于 15° 的残余角设计要求。

5.2.4 转向阻尼试验

转向阻尼试验的目的在于测试试验车辆在不同车速和侧向加速度时，从某一角度释放方向盘的横摆响应的衰减特性。横摆角速度衰减测量是指从初速状态到稳定状态的车辆响应时间^[54]。转向阻尼表现了转向稳态性能，当车速为 100

km/h，并且达到 0.4 g 的稳态侧向加速度时，释放方向盘后，车辆应该能回到稳定的行驶状态。燃料电池轿车 EPS 系统设计的横摆角速度从最大值衰减到稳态值（初始值 90%）所需的时间应该不超过 1.5s。

试验方法：试验前，按试验要求准备好试验车辆，安装并调试好数据采集仪、双轴非接触式车速传感器、陀螺仪和方向盘角度力矩传感器等测试设备，并在水平道路表面上对试验设备进行软件重新标定和调零。加速至 100km/h 并保持直行，进入试验场的动态广场后将方向打至产生侧向加速度峰值为 $0.4g \pm 0.05g$ 的角度，并将该角度标记下来。再次以 100km/h 车速直行入动态广场，开始数据记录，保持 2s 后释放方向盘，等待方向盘转角和车辆横摆衰减完毕后停止记录。重复上述测量方法，完成共 2 组测试数据采集。

试验结果：对采集的数据进行处理后，左转和右转方向的横摆角速度响应及拟合曲线分别见图 5.23 和图 5.24，其测试的 2 组转向阻尼试验结果如图 5.25，其横摆角速度从最大值衰减到稳态值（初始值 90%）所需的时间为 1.33s，满足设计规定（小于 1.5s）的值。

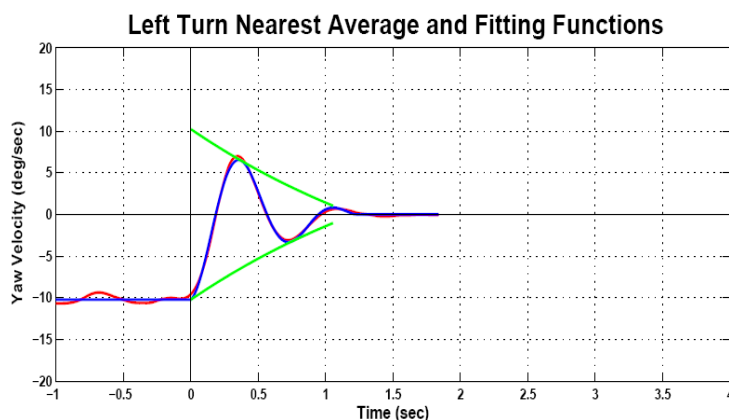


图 5.23 左转方向横摆角速度响应及拟合曲线

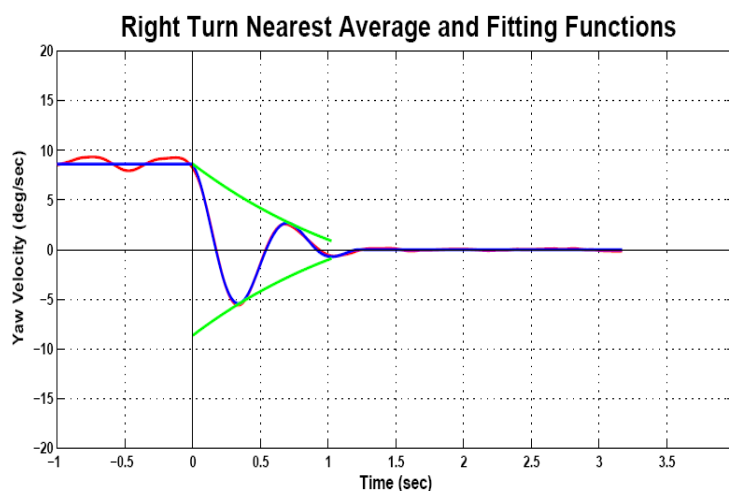


图 5.24 右转方向横摆角速度响应及拟合曲线

SEG	SETTLING TIME (sec)		TIME CONSTS (sec)		AMPLITUDES (deg/sec)			INIT AY (g)	YAW FREQ (Hz)	RMS ERROR (deg/sec)	
	63%	90%	TAU_V	TAU_C	a(-t)	a(+t)	a(0)			(-t)	(+t)
1	0.68	1.06	3.90	0.77	-10.23	-10.23	0.34	-0.47	1.31	4.06	3.19
2	0.64	1.03	2.66	0.76	8.64	8.64	-0.10	0.43	1.34	4.78	2.07

TURN	SEG	90% SETTling TIME (sec)	YAW FREQ (Hz)	V/C RATIO	INIT AY (g)	RMS ERROR (deg/s)
CCW	1	1.06	1.31	0.197	-0.47	5.16
CW	2	1.03	1.34	0.287	0.43	5.21
AVG	CCW	1.06	1.31	0.197	-0.47	5.16
SDEV	CCW	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
AVG	CW	1.03	1.34	0.287	0.43	5.21
SDEV	CW	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
AVG	ALL RUNS	1.04	1.33	0.242	0.45	5.19

图 5.25 转向阻尼试验结果

5.3 本章小结

本章主要对燃料电池轿车电动助力转向系统性能标定和试验进行了研究。首先，参考单位研发电动助力转向系统的性能标定规范，对性能标定要求进行了分析，并对助力特性、主动回正和阻尼控制标定方法和参数进行了介绍。再次，参考单位研发电动助力转向系统的性能试验规范和《GB/T6323-2014 汽车操纵稳定性试验方法》标准，介绍了性能试验要求及设备，对各项性能试验的目的、方法及结果进行分析，试验项目包括转向轻便性、转向回正性和转向阻尼试验。

第6章 结论与展望

6.1 结论

考虑目前燃料电池汽车技术尚不成熟,以及开发周期和成本因素等因素,现阶段国内外燃料电池汽车开发主要是以传统车型平台为基础,通过动力系统替换和整车适应性改造而实现。但由于燃料电池动力系统存在集成化程度低、体积大和质量重等特点,导致基于原车型平台开发的燃料电池汽车质量和前轴载荷变大,其转向系统无法满足整车的开发要求的问题,论文针对该问题提出了燃料电池轿车电动助力转向系统匹配设计的解决思路。通过学习与借鉴较成熟的传统车EPS系统设计开发经验,结合企业实际工程研究项目针对燃料电池轿车进行EPS系统选型、布置设计、结构及参数匹配设计和控制策略设计,并进行台架试验、性能标定和实车试验研究分析,最终开发出满足燃料电池轿车工程化要求的EPS转向系统。本文的主要工作和成果如下:

(1)分析了燃料电池汽车对转向系统的要求,指明电动助力转向系统已成为燃料电池汽车转向技术发展的主流。对适合燃料电池汽车的电动助力转向系统的国内外发展现状及趋势进行了概述,指出了现阶段燃料电池轿车电动助力转向系统存在转向的助力能力不足,转向随速助力性能不佳,主动回正和阻尼控制性能较差的问题;

(2)介绍了电动助力转向系统的基本组成及工作原理,分析了电动助力转向系统的类型及其特点。对燃料电池轿车电动助力转向系统的技术要求进行了归纳分析,并对燃料电池轿车电动助力转向系统的设计与试验流程进行了介绍;

(3)根据燃料电池轿车电动助力转向系统的技术要求,进行燃料电池轿车电动助力转向系统助力型式的选择和系统布置的方案设计,并对电动助力转向系统的转向器、减速机构、电机和传感器关键部件进行了结构和参数的匹配设计,以及对助力控制、回正控制和阻尼控制的控制策略进行了设计;

(4)通过参考《汽车电动助力转向装置技术要求和试验方法》标准征求意见稿,结合单位研发电动助力转向系统的台架试验规范,对燃料电池轿车电动助力转向系统的台架试验要求、设备和试验方案进行了研究。对所研究的燃料电池轿车电动助力转向系统的转向助力能力进行了台架试验及结果分析,验证其台架性能达到了设计要求;

(5)通过参考《GB/T6323-2014 汽车操纵稳定性试验方法》标准并结合单位研发电动助力转向系统的标定和性能试验规范,对燃料电池轿车电动助力转向

系统的性能标定要求、方法和性能试验方案进行了研究。对所开发的燃料电池轿车电动助力转向系统的助力特性、主动回正及阻尼控制性能进行了标定和实车性能试验研究，并对性能试验结果进行了分析。

6.2 进一步工作的方向

本文的研究将理论和工程研发项目相结合，虽然取得了初步的成果，具有一定的实际借鉴应用意义，但还存在许多需要进一步深入进行的研究工作，主要有如下几方面：

(1) 本文在进行燃料电池轿车电动助力转向系统匹配设计分析中，对电动助力转向系统的系统设计理论分析还不够深入，对关键部件性能参数对系统性能带来的影响缺少分析研究。后续需结合 EPS 系统建模及仿真分析进一步开展研究；

(2) 针对燃料电池轿车特点在进行电机的参数匹配设计中，由于对电机的特性和控制理论分析不够深入，基于已有的电机能力如何提高电机的性能未提出有效的优化方案，如提升系统工作电压，采用 48V 电源系统等。后续可以结合燃料电池轿车特点采用 48V 电源系统的电动助力转向系统进行研究；

(3) 本文在基于燃料电池轿车电动助力转向系统的控制策略对助力特性、主动回正和阻尼控制等转向手感性能进行了标定和试验方案研究中，对影响性能的控制参数分析还不够充分，导致转向手感的标定参数不够完善。特别是标定参数与实车性能客观测试结果的对应机制未进行深入研究。后续需通过大量的实车性能标定及客观测试数据进行分析研究；

(4) 电动助力转向系统控制设计受汽车整车电气架构和环境特点影响较大，本文未针对燃料电池轿车电气架构和电气环境特点进行研究分析，在电动助力转向系统电磁干扰技术方案缺少研究。后续需针对燃料电池轿车电气架构和控制要求对电动助力转向系统的故障诊断、电磁干扰等技术做进一步研究。

致谢

经过近 10 年的企业工作实践，有机会重新踏入校园，到同济大学进行学习深造，感到无比的庆幸与自豪。

2017 年辞旧迎新之际，论文即将完成，此时此刻我心里感慨万千。在这收获的时刻，首先诚挚的感谢我的导师陈慧教授。陈老师渊博的专业知识，严谨的治学态度，精益求精的工作风格，对科研工作敏锐的洞察力给我留下深刻的印象，是我毕生学习的楷模。本论文从初期选题，中期评审到最终完成，陈老师给予了大量的指导意见，教会我如何将理论知识与工作实践紧密结合，应用理论知识解决工程实际遇到的问题。在此，向陈老师表示深深的谢意。

其次，衷心感谢我的校外导师周中坚老师。周老师扎实的专业知识，丰富的工程开发经验，严谨认真的工作作风，平易近人的风格，深深的影响着我，是我学习的榜样。在这篇论文的写作过程中，得到了周老师多方面的指导，指导我如何在工程实践中升华理论知识，还不顾工作劳累尽心尽力指导我的论文写作。在此，向周老师表示衷心的感谢。

本论文的完成离不开工程硕士办公室的各位老师和单位同事的关心与帮助。在此，感谢我的同事张平、马国宸和翁辉在电动助力转向系统设计、性能标定和实车性能试验等方面的帮助。

最后，感谢我的父亲、母亲，妻子和儿子，是他们这么多年默默的给予我支持、帮助和鼓励，在工作和学习的较大压力之下，带给我温暖，化解我的烦恼，他们的爱是我努力前行的动力。

2017 年 5 月

参考文献

- [1] 李从飞, 陈凡, 周锦涛. 弧光保护在新能源发电中的应用[J]. 华中电力, 2011, 24(3):54-56
- [2] 谢泽金, 凌天钧. 燃料电池汽车转向系统综述[J]. 上海汽车, 2011(6): 4-8
- [3] 胡建军, 李彤, 龚为伦等. 汽车转向技术进展分析[J]. 液压与气动, 2006(12):17-22
- [4] Wemer Harter et al. Future Electrical Steering Systems: Realizations with Safety Requirements. SAE 2000-01-0822.
- [5] Masahiko NOGUCHI. Trends and Future Propects Regarding Steering System Technology. KOYO Engineering Journal, 2001, English Edition NO.159E.
- [6] 梁爽. 汽车电动助力转向系统控制策略研究及试验台方案设计[D]. 西安: 长安大学. 2010
- [7] 魏元东. 汽车电动助力转向系统(EPS)研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004
- [8] A.Osuka, etc. Development of Pinion-Assist TyPe Electric Power Steering System. KOYO Engineering Journal Edition No.161E.2002: 46-51
- [9] 张喆. 电动助力转向系统的仿真及性能分析[D]. 长春: 吉林大学, 2008
- [10] Akira Noguchi, etc. Development of a Steering Angle and Torque Sensor of Contact-type. Furukawa Review, 2004(25):36-41
- [11] 祖春胜. 电动助力转向系统补偿控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016
- [12] 许峰. 电动助力转向系统性能优化与试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008
- [13] 杨慰. 汽车电动助力转向系统控制策略研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011
- [14] 卢娟. 电动助力转向系统建模与仿真研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [15] F. Fukudome. Technical Trends Regarding Electric Components for Electric Power Steering. Koyo Engineering Journal English Edition No. 1 63E(2003).
- [16] 陈家瑞. 汽车构造[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006年
- [17] 厉晓飞. 一种新型转向轴式EPS系统减速机构的设计. 轻型汽车技术, 2011(Z1):9-12
- [18] 刘文举. 汽车电动助力转向控制系统的研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2011
- [19] 康展权. 汽车工程手册·设计篇[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000年
- [20] 申荣卫, 台晓虹, 赵剑锋, 施国标. 纯电动客车电动助力转向系统匹配设计理论研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2009, 36(4):63-65
- [21] 王博. 某乘用车电动助力转向系统控制策略的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009
- [22] 刘加利. 设计硬点在乘用车造型设计中的应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2015
- [23] 张春虎. 汽车电动助力转向系统研究及设计[D]. 西安: 长安大学, 2011
- [24] 王望予. 汽车设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [25] 何仁, 苗立东. 电动助力转向系统电动机与减速机构的匹配研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(3):111-114
- [26] 郑虎, 周中坚. 汽车电动转向系统用驱动电机现状及其发展[J]. 上海汽车, 2011(2):36-41
- [27] 肖峰. 汽车线控转向控制器的开发研究[D]. 西安: 长安大学, 2008
- [28] 孔繁盛. 夏利汽车电动助力转向系统的匹配研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010
- [29] Scott A.Millsap and E.Harry Law. Handling Enhance ment Due to an Automotive Variable

- Ratio Electric Power Steering System Using Model Reference Robust Tracking Control.SAE paper 960931
- [30] 薛兆俭. 线控转向系统实验台研究[D]. 西安: 长安大学, 2008
- [31] Koyo. Electric Power Steering System Series. Koyo Engineering Journal English Edition No. 160E(2002).
- [32] Bo-Chiuan Chen, Wei-Feng Hsu, Shih-Jer Huang.Sliding-mode retrun control of electric power steering[C].SAE Paper 2008-01-0499, 2008.
- [33] Ji-Hoon Kim, Jae-Bok Song. Control logic for an electric power steering system using assist motor. Mechatronics 1 2(2002)447-459.
- [34] Yuji Kozaki, Goro Hirose, Shozo Sekiya etc. Electric Power Steering(EPS). Motion&Control No.6-1999 NSK:9-15.
- [35] Masahiko Kurishige et al.A New EPS Control Strategy to Improve Steering Wheel Returnability[J].SAE paper 2000-01-0815
- [36] 马葳. 汽车电动助力转向系统控制策略及试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011
- [37] 刘庆, 陈慧, 南楠. 具有参数独立可调式曲线型助力特性的电动助力转向系统[P]. 中国专利: ZL200810202069. 7, 2012-01-04.
- [38] 南楠, 陈慧, 刘庆. 曲线型 EPS 助力特性的设计与分析[C]. 中国汽车工程学会年会, 2008
- [39] J.S.Chen.Control of electric power steering systems[C].SAE Paper 981116,1998
- [40] Chang Sub Shim, Byeong Jo Lee, Je Duk Kim, et al.Development of electronic controlled power steering system.SAE, NO.981117
- [41] Skin Takehara et al. Control Logic Design and Development of Electric Power-Assisted Steering(EPAS).Mzada Motor Corporation.
- [42] Aly Badawy et al.Modeling and Analysis of an Electric Power Steering System.SAE paper,1999-01-0399
- [43] Sanket Amberkar, Mark Kushion, Kirt Eschtruth and Farhad Bolourchi, Diagnostic Development for an Electric Power Steering System.SAE technical Paper series.2000-01-0819
- [44] 刘庆, 张磊磊, 陈慧. 具有主动回正控制功能的电动助力转向系统[P]. 中国专利: ZL200810204474. 2, 2013-06-05.
- [45] Xiang Chen, Xiaoqun Chen.Robust control of electric power-assisted system[C].2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 473-478
- [46] 孟涛. 电动助力转向控制策略的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006
- [47] 申荣卫, 林逸, 台晓虹等. 电动助力转向系统建模与补偿控制策略[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7):5-9
- [48] Yasuo Shimizu, Toshitake Kawai. Development of Electric Power Steering. SAE 910014.
- [49] Chih-Jung Yeh, Shih-Rung Ho, Ming-Chih Lin, et al.Development of a test bench for tuning and validating electric power steering control method[C].2007 IEEE: 618-622
- [50] T. Takamatsu, T. Tomim. Parameter Design and Tuning Tool for Electric Power SteeringSystem. Koyo Engineering Journal English Edition No. 1 65E(2004)
- [51] 汽车操纵稳定性试验方法 转向轻便性试验[S]. 中华人民共和国国家标准, GB/T6223. 5-1994
- [52] 宗长富, 郭孔辉, 李铂.汽车操纵稳定性的理论预测与综合评价[J]. 汽车工程, 2001,

- 23(1): 5-8
- [53] 汽车操纵稳定性试验方法 转向回正性试验 [S]. 中华人民共和国国家标准, GB/T6223.4-1994
- [54] Kenneth D. Norman. Objective Evaluation of On-Center Handling Performance. SAE840069.

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

谢泽金, 男, 1980年7月生。

2003年7月毕业于安徽理工大学机械设计制造及其自动化专业获学士学位。

2011年3月入同济大学读工程硕士研究生。

已发表论文:

- [1] 谢泽金, 凌天钧. 燃料电池汽车转向系统综述. 上海汽车, 2011, (6): 4-8
- [2] 谢泽金, 冷宏祥, 赖序年等. 燃料电池汽车电动液压助力转向系统设计研究. 上海汽车, 2012, (2): 4-8
- [3] 王燕文, 谢泽金, 陈益. 无人驾驶汽车电子稳定控制系统的应用研究. 上海汽车, 2016, (8): 15-19

申请专利:

- [1] 实用新型专利 《轻量化轿车用前副车架》. 专利号: ZL201120526942.5, 授权公告日: 2012-09-05.
- [2] 实用新型专利 《燃料电池汽车动力系统集成框架》. 专利号: ZL201120531307.6, 授权公告日: 2012-10-03.