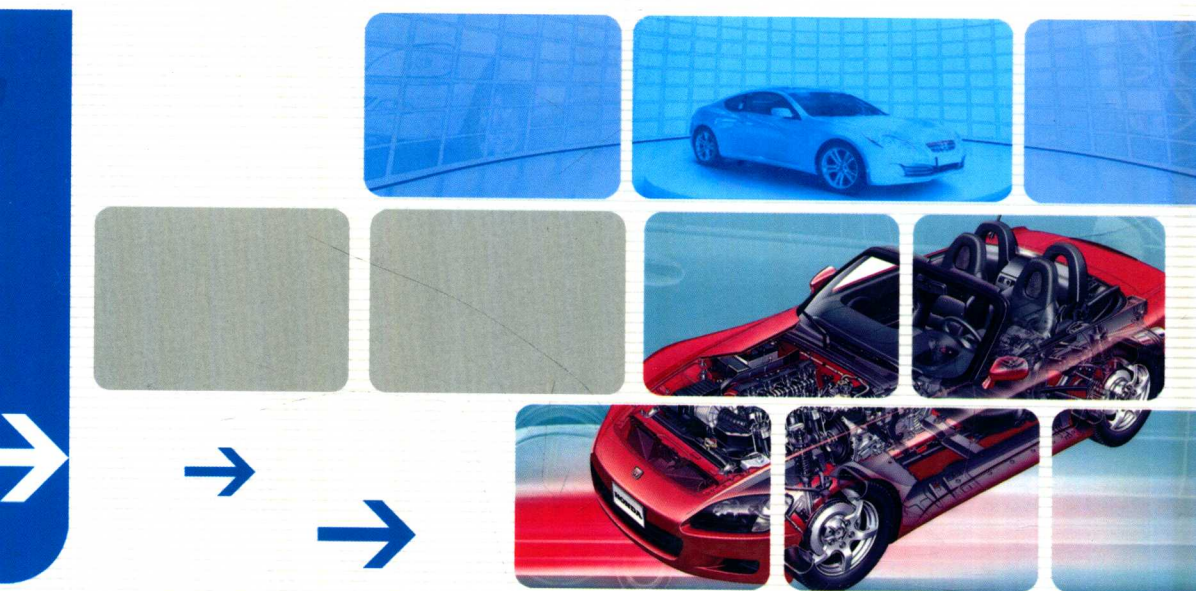


汽车线控技术

于蕾艳 著



中国石油大学出版社

汽车线控技术

于蕾艳 著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

汽车线控技术/于蕾艳著. —东营:中国石油大学出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-5636-4204-5

I. ①汽… II. ①于… III. ①汽车—线路—控制系统
IV. ①U463. 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 311753 号

书 名: 汽车线控技术
作 者: 于蕾艳

责任编辑: 高建华(电话 0532—86981536)

封面设计: 刘德进

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营, 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: gaojianhua6@163.com

印 刷 者: 东营石大博雅印务有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981536)

开 本: 180 mm×235 mm 印张: 11.25 字数: 215 千字

版 次: 2013 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

| 前 言 | Preface

随着汽车技术的发展,高效、节能、智能的汽车线控技术应运而生。汽车线控技术包括线控转向技术、线控制动技术、线控驱动技术等,在结构上与传统的机械转向技术、机械制动技术、液压助力转向技术、液压制动技术等相比,均有根本性变革,即取消了人机操纵界面(转向盘、制动踏板等)与执行部件(转向轮、制动轮等)之间的机械或液压连接。线控技术采用传感器采集驾驶员的转向、制动等驾驶意图,由导线传递到电子控制单元,识别驾驶意图,进而发出电机控制指令,由电机驱动实现期望的汽车转向、制动等运动。人机操纵界面与执行部件之间通过导线柔性连接,优化线控系统的控制算法可大大提高汽车的操纵稳定性、制动性、主动安全性等综合性能,因而是当前汽车新技术方面的研究热点。

本书作者中国石油大学(华东)机电工程学院于蕾艳副教授,在北京理工大学机械与车辆工程学院攻读博士学位期间得到林逸教授、刘昭度教授、施国标教授等专家的悉心指导。近年来,本书作者主持、承担国家自然科学基金各一项,在重要期刊、国际学术会议等发表四十余篇相关学术论文,并申请专利三项。本书是作者十多年从事汽车设计、动力学与控制等方向教学和科研工作的成果总结,重点讨论了线控转向技术、线控制动技术、线控底盘集成技术三个方面,并结合动力学建模与控制策略等给出了具体的实例。本书具有一定的系统性、实用性、先进性。

本书由中国石油大学(华东)机电工程学院机械与车辆工程系綦耀光教授、南京航空航天大学赵万忠副教授等主审。各位专家付出了艰辛的劳动,提出了很多宝贵的意见。本书得到了国家自然科学基金资助项目(51005248,51005115)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(11CX04039A,24720132069)、国家留学基金资助项目([2013]3018)、青年教师教学改革项目(QN201319)等多方面的资助。在此一并表示感谢!

在本书素材制作和编写中,得到了中国石油大学(华东)机电工程学院许多老师和研究生的大力支持。在此表示衷心的感谢!本书写作过程中查阅、参考了大量国内外相关文献,谨向这些文献的作者、编者表示衷心的感谢!



本书读者对象是高等工科院校车辆工程专业及相关专业的本科生和研究生,也可作为汽车行业工程技术人员的参考用书。希望本书能帮助他们更好地学习汽车线控技术方面的知识。期望拙著能给各位同仁在汽车线控技术、动力学与控制技术等方面提供点滴帮助。

鉴于作者水平和经验所限,书中难免有不妥之处,恳请专家、读者批评指正。

作 者

2013 年 10 月

| 目 录 | Contents

第 1 章 汽车线控技术概述	1
1.1 汽车线控技术的特点	2
1.1.1 汽车线控技术的优点	2
1.1.2 汽车线控技术的缺点	3
1.2 汽车线控系统的关键技术	4
1.2.1 传感器技术	4
1.2.2 容错控制与故障诊断	4
1.2.3 动力学分析	4
1.2.4 控制算法	4
1.2.5 总线技术	4
1.2.6 驾驶者驾驶意图与工况辨识	4
1.2.7 汽车线控系统的集成	4
1.3 汽车线控技术研究动态	5
1.3.1 线控换挡系统	5
1.3.2 线控节气门系统	5
1.3.3 线控转向系统	5
1.3.4 线控制动系统	6
第 2 章 汽车线控转向技术	8
2.1 线控转向系统的介绍	9
2.1.1 线控转向系统的结构与工作原理	9
2.1.2 线控转向系统的国内外研究现状	12
2.1.3 线控转向系统的关键技术	13
2.2 线控转向系统的设计	15
2.2.1 线控转向系统的机械结构设计	19
2.2.2 线控转向系统的参数设计	24



2.2.3	线控转向系统的关键零部件选型	24
2.2.4	基于 MATLAB 软件的线控转向系统计算图形用户界面	24
2.2.5	线控转向系统电控子系统的设计	26
2.3	线控转向系统关键机械部件的有限元分析	30
2.3.1	线控转向系统转向盘模块关键零部件的有限元分析	30
2.3.2	转向子系统关键零部件的有限元分析	35
2.4	线控转向系统的动力学建模及汽车操纵稳定性分析	36
2.4.1	线控转向系统的动力学建模	37
2.4.2	安装线控转向系统的汽车操纵稳定性分析	47
2.5	线控转向系统的参数优化	63
2.5.1	线控转向系统的稳定性条件	63
2.5.2	线控转向系统的参数优化	64
2.6	线控转向系统的路感反馈控制	64
2.6.1	路感的机理	64
2.6.2	汽车线控转向系统路感反馈的上层控制算法	64
2.6.3	汽车线控转向系统路感反馈的下层控制方法	71
2.6.4	结论	72
2.7	线控转向系统的转向控制算法	72
2.7.1	线控转向系统的转向控制目标	72
2.7.2	按控制内容分类的线控转向系统转向控制研究	73
2.7.3	按控制方法分类的线控转向系统转向控制算法研究	83
2.7.4	结论	90
2.8	线控转向系统的容错与故障诊断技术	90
2.8.1	汽车线控转向系统的容错	91
2.8.2	线控转向系统的故障诊断研究	94
2.8.3	结论	95
2.9	汽车线控转向系统的台架试验	95
2.10	汽车线控转向系统小结	97
第 3 章	汽车线控制动技术	98
3.1	线控制动系统的结构和工作原理	98
3.1.1	线控制动系统的分类	98
3.1.2	电控机械制动系统的结构	101
3.1.3	电控机械制动系统的性能特点	103
3.1.4	电控机械制动技术的国内外研究现状	104

3.1.5 电控机械制动系统的关键技术	105
3.1.6 电控机械制动系统的相关专利介绍	106
3.2 电控机械制动系统的动力学建模	108
3.2.1 轮胎模型	108
3.2.2 整车制动模型	110
3.2.3 电控机械制动系统的动力学建模	112
3.2.4 控制器模型	112
3.2.5 制动性能分析	112
3.3 电控机械制动系统的参数优化	122
3.3.1 电控机械制动系统的结构参数优化	122
3.3.2 电控机械制动系统的控制参数优化	127
3.4 电控机械制动系统的控制	127
3.4.1 车轮制动子系统的控制方法	128
3.4.2 电控机械制动系统的硬件在环试验	138
3.5 电控机械制动系统的应用和展望	139
3.6 结 语	139
第4章 汽车线控底盘集成技术	140
4.1 底盘集成概述	140
4.2 线控底盘的动力学建模	141
4.2.1 七自由度整车动力学模型	141
4.2.2 基于魔术公式的轮胎模型	143
4.2.3 轮胎的联合工况动力学分析	145
4.3 线控底盘的集成控制方法	148
4.4 线控底盘的其他研究内容	151
4.4.1 电动汽车线控转向、线控制动集成系统的集成控制策略	151
4.4.2 线控转向、线控制动集成系统的驾驶感觉评价与优化研究	153
4.4.3 线控转向、线控制动集成系统的容错机理研究	153
4.4.4 线控转向、线控制动集成系统的故障诊断研究	154
4.4.5 建立线控转向、线控制动集成系统的评价体系及“人-车-路”闭环仿真试验研究	155
4.4.6 汽车线控技术与车联网技术的结合	155
参考文献	156
致 谢	169

第 1 章

汽车线控技术概述

汽车底盘包括传动系、制动系、转向系、行驶系四大系统。传统的汽车底盘技术存在一些弊端,如:液压转向系统、液压制动系统结构和控制复杂,有泄漏隐患等;由于传统的节气门控制系统在节气门踏板和节气门之间存在机械连接,机械式驻车制动系统在驻车制动操纵杆和车轮制动器之间存在机械连接,拉杆等机械构件容易摩擦磨损,导致控制不精确;传统的转向系统在转向盘和转向轮之间存在机械连接,不能解决转向轻便和转向灵敏之间的固有矛盾。

同制动防抱死(Antilock Brake System,简称 ABS)等技术类似,线控技术首先应用在飞机上。随着汽车电子、控制等相关支撑技术的迅速发展,近十年来高效、节能、智能的汽车线控(X by Wire,简称 XBW)技术也在迅速发展,成为汽车新技术方面的研究热点。线控技术摒弃了驾驶员人机操纵界面(包括转向盘、制动踏板、节气门踏板、换挡杆等)与相应的执行机构(如转向轮、制动轮、节气门、变速器等)之间的机械或液压连接,而采用导线的方式柔性连接。线控系统由传感器采集驾驶员的操纵信息,如转向盘转角转矩传感器采集转向盘的转角转矩,制动踏板位移传感器采集制动踏板的位移,节气门踏板位移传感器采集节气门踏板位移,换挡杆霍尔传感器获得驾驶员选择的变速器挡位信息。电子控制单元(ECU)对传感器信息进行分析,获知驾驶员的转向、制动、加速、换挡等驾驶意图。ECU 经过储存的转向控制算法、制动控制算法、加速控制算法、换挡控制算法,分别控制转向电机、制动电机、节气门电机、换挡电机等实现期望的转向、制动、加速、换挡等。

按照各系统的功能不同,汽车线控系统包括线控转向(Steer by Wire,简称 SBW)系统、线控制动(Brake by Wire,简称 BBW)系统、线控驱动(Drive by Wire,简称 DBW)系统、线控悬架(Suspension by Wire)系统、线控换挡(Shift by Wire)系统等子系统。空气弹簧线控悬架系统的车身加速度、车身高度、侧向加速度、转向盘转

角等传感器信号通过总线传递给悬架系统控制器。控制器对所采集到的信号进行运算处理,判断车辆行驶状态,发送指令控制悬架刚度、阻尼及车身高度等,提高汽车行驶平顺性、操纵稳定性^[1]。

汽车转向系统和制动系统与汽车安全性紧密相关。目前,国内外研究较多的是线控转向系统和线控制动系统及二者的集成。图 1-1 为集成线控转向系统与线控制动系统的结构示意图。

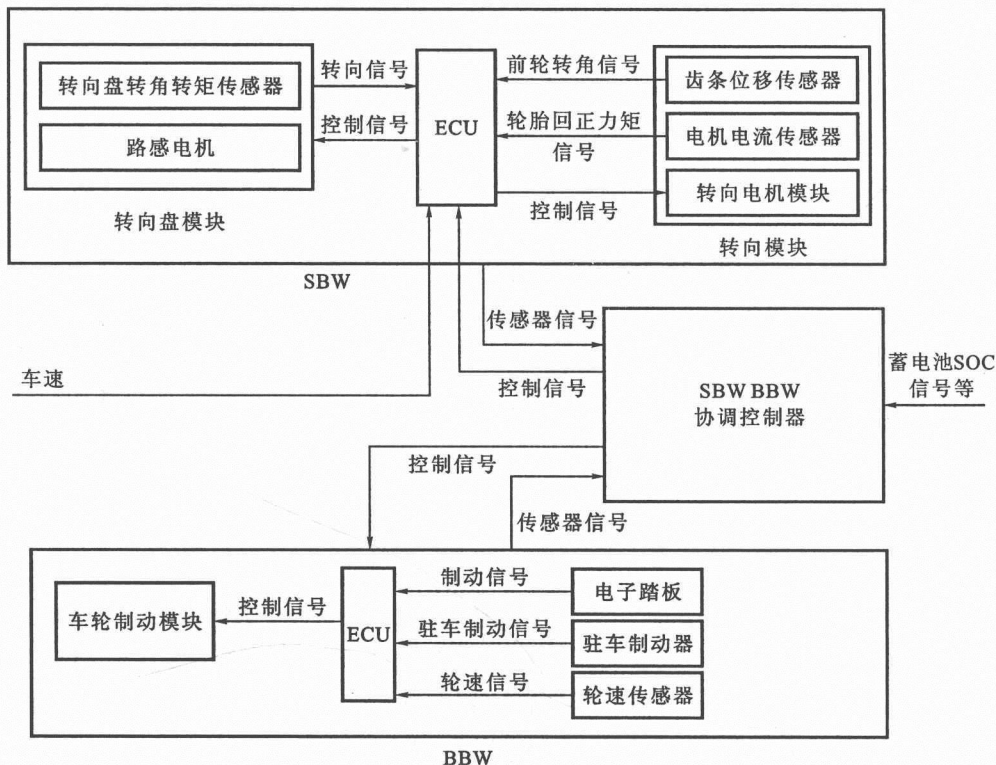


图 1-1 集成 SBW 与 BBW 系统的结构示意图

1.1 汽车线控技术的特点

1.1.1 汽车线控技术的优点

汽车线控技术采用导线柔性连接代替了原来的机械、液压连接,是由控制器(ECU)、传感器、执行器(主要是电机)、通信总线等组成的分布式实时系统,符合安全、节能、环保的要求,具有很多优点。

1. 通过优化控制算法,实现主动控制

线控系统的最大优点是驾驶员的人机操纵界面和执行机构之间的机械解耦,带来了控制性能的灵活性。线控转向系统的转向盘和转向轮之间解耦,转向传动比随车速等实时调整,提高了汽车的操纵稳定性,实现了车辆的主动转向。并通过安装在转向柱上的力反馈电机进行主动转向阻力反馈,优化转向感觉。线控制动系统灵活控制各个车轮处制动电机的力矩,实现制动防抱死、电子制动力分配等很多功能,提高其制动性。

2. 结构简单

线控系统摒弃了复杂的机械或液压连接,结构简化,仅包括传感器、控制器、电机等,便于模块化设计等。对于电动汽车,线控系统的轻量化可提高电动汽车的续航里程,提高汽车的经济性。

3. 节能环保

线控系统没有转向液、制动液等,不存在液体泄漏的问题。采用洁净的电驱动,节能环保。

4. 响应快速

与有较长传递路线的机械、液压连接相比较,各个执行装置的电机驱动响应更为迅速。

1.1.2 汽车线控技术的缺点

汽车线控技术采用导线柔性连接代替机械或液压连接,也带来了一些挑战。可靠性、成本和良好的驾驶体验等是线控技术普及的主要障碍。

1. 安全可靠有待提高

目前,安全可靠是汽车线控技术的最大技术瓶颈。由于线控系统取消了转向盘和转向轮之间、制动踏板和制动器之间的机械或液压连接,传感器的不稳定性、数据传输的不准确性等方面可能使系统发生故障,故必须引入故障诊断进行故障定位与隔离,保证系统的安全可靠性。线控系统必须是容错的,保证某一部件发生故障时汽车仍可实现安全转向和制动。因此,还需要大量试验验证线控系统的安全可靠性。

2. 成本有待降低

要提高线控系统的安全可靠性,需要提供足够的硬件冗余,因而提高了硬件成本。目前,在成本上线控系统具有同等性能的汽车系统相比,还不具有优势。

3. 驾驶体验有待优化

由于线控系统摒弃了转向盘和转向轮之间、制动踏板和制动器之间的机械或液压连接,而是通过电机等装置人为模拟路感、制动踏板感觉等驾驶感觉,所以驾驶感觉要较好地符合驾驶员的驾驶习惯和心理期望,还有待优化。

1.2 汽车线控系统的核心技术

1.2.1 传感器技术

线控系统要求传感器成本低、可靠性好、精度高、体积小。要使众多传感器集成在一起,并且达到体积小、精度高的要求,可采用集成化传感器和智能型传感器,并采用大规模集成电路将传感器、处理电路、计算机芯片等集成在同一芯片上,或通过数据融合技术实现^[1]。

1.2.2 容错控制与故障诊断

作为一种新的电子控制系统,汽车线控系统的可靠性需要进一步提高。某个元件出现故障时,系统应该具有容错功能,并能进行快速准确的故障诊断。

1.2.3 动力学分析

汽车线控系统的动力学建模与分析是开发控制算法的基础。

1.2.4 控制算法

控制算法的控制目标是提高汽车的操纵稳定性、制动性、安全性等性能。这涉及线控系统驾驶感觉优化的算法,包括线控转向系统的转向力反馈优化控制和线控制动系统的制动踏板感觉控制等方面的算法。

1.2.5 总线技术

汽车线控系统的总线技术要求数据传输速度高、可靠性高、通信时间离散度小,并且延迟固定,基于时间触发。目前,线控系统采用的总线包括 FlexRay、TTP/C 总线等。

1.2.6 驾驶者驾驶意图与工况辨识

根据人机界面处的各传感器,包括转向盘转角转矩传感器、制动踏板位移传感器等,判断驾驶者的驾驶意图。模式识别的方法(如模糊模式识别方法等)可在驾驶者的驾驶意图辨识领域应用^[1]。

1.2.7 汽车线控系统的集成

底盘控制功能、执行机构、传感器等增加时,子系统间的耦合、影响甚至控制动作

的冲突将不可避免。即使每个控制子模块达到很好的独立控制效果,如果不做任何协调或监督管理,可能仍达不到各自的控制目标。由于轮胎地面侧向力、纵向力和法向力存在耦合,因此线控转向系统、线控制动系统等的应用并不是简单的叠加,而是要对不同的子系统进行集成控制或协调控制。通过传感器信息融合、集成优化、控制、容错、故障诊断,使线控转向系统与线控制动系统相互协调,实现轮胎地面力的最优分配而达到操纵稳定性、主动安全性、舒适性、制动性能等整车综合性能最优^[2]。

1.3 汽车线控技术研究动态

由于线控技术具有重要的实用价值和应用前景,世界上各大汽车公司和许多高校已对其进行研究,并取得了一定的研究成果。

1.3.1 线控换挡系统

日本丰田公司开发的混合动力汽车线控换挡系统消除了换挡杆与变速器之间的机械连接,通过电控方式来选择前进挡、倒挡和空挡,采用电动开关来啮合或断开驻车机构。自由地设计换挡界面,换挡轻便容易,不像传统机械换挡拉杆那样受空间位置的限制,驻车时驾驶员只需轻轻触动开关。线控换挡系统的换挡杆紧凑,可安装在仪表板上。因此,可大幅度减少换挡操作量,优化换挡模式,解决驾驶员换挡时的误操作问题。换挡机构小型化也提高了驾驶员座椅周围的空间利用率^[3]。

1.3.2 线控节气门系统

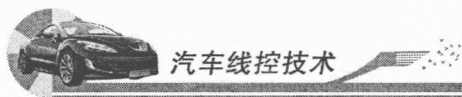
湖南大学的胡孝昌基于 MC9S12XF512 单片机设计实现了使用 FlexRay 总线通信的汽车线控节气门系统,具有良好的时间性能,并实现功能正确^[4]。

中国科学院沈阳自动化研究所的王锴等研究了基于 SAEJ1939 总线的线控节气门控制系统的设计与实现方法,包括节气门控制器模块的硬件与软件设计方法,实现了可调驾驶性能、酒后驾驶监控与报警等线控节气门扩展功能。样机测试结果表明,系统能够在所设计的多种功能模式下可靠地工作^[5]。

1.3.3 线控转向系统

重庆大学的郑国章研究了电动代步车线控转向系统的基本结构、工作原理、方法和数学模型,独立后轮直流电机 PWM 驱动电子控制系统,基于 dsPIC30F6010 集成开发环境的电动代步车驱动控制软件等,调试验证了线控技术在电动代步车中应用的可行性^[6]。

南京农业大学的陆焱忠研究了线控液压转向系统的电子控制,包括基于



TMS320F2812 的控制系统电路设计和系统软件设计。电路部分实现了传感器(转向盘转角传感器、油缸位移传感器)和执行器(电液比例换向阀 PWM)的信号调理。在主程序中加入模糊控制算法进行信号数据处理。搭建的液压系统试验平台对电控部分完成了软件和硬件的调试试验^[7]。

吉林大学的宗长富教授是国内汽车线控技术研究的发起者,其带领的团队在汽车线控底盘技术方面成绩斐然,独树一帜。

吉林大学的徐颖通过双重扩展卡尔曼算法,实时、准确地估算出车辆状态与路面参数的变化,应用到线控汽车转向控制策略中,使线控汽车具有更高的主动安全性和易驾驶性^[8]。

吉林大学的郑宏宇利用线控转向系统角传递特性和力传递特性可自由设计的优点,提出了基于卡尔曼滤波技术估计转向器齿条力的线控转向路感模拟控制策略、保证汽车稳态增益不变和动态反馈校正稳定性控制的主动转向控制策略。通过建立的线控转向多自由度整车动力学模型,选取典型试验工况对控制策略进行了计算机和硬件在环仿真试验^[9]。

吉林大学的何磊设计了基于 FlexRay 总线的双电机线控转向系统的结构,提出了 FlexRay 总线静态段与动态段时间长度的设置方法,实现了 FlexRay 总线的应用层容错控制策略。在电机及其供电系统没有故障的情况下,提出了基于驾驶员转向行为辨识的线控转向系统双电机控制方法;在电机故障的情况下,提出了基于双电机技术的电机容错控制方法。线控转向系统双电机硬件在环试验表明它可有效地提高线控转向系统的安全性、响应性^[10]。

线控电动汽车的人机界面与传统汽车相比发生了很大改变。西安理工大学的马哲通过对人体 H 点、眼椭圆、头部包络线、可及域等人车关键特征进行分析、调整,以第 95 百分位人体模型为例,结合线控电动汽车的操控特点,对车型及内部空间的概念设计方案进行了测试、分析、矫正、再设计,布局合理^[11]。

1.3.4 线控制动系统

美国密歇根大学的 Xiang Weidong 等设计了线控制动系统的容错结构以保证高可靠性,侧向和横摆稳定性控制采用模糊控制^[12]。美国 Purdue 大学的 Sohail Anwar 等设计了线控制动系统的非线性滑模控制器,并得到了试验验证^[13]。

表 1-1 列出了我国国家自然科学基金资助汽车线控技术方向的情况。可以看出,近十年来,线控技术的研究得到了国内汽车行业专家和国家技术部门的认可。研究重点包括线控技术的动力学建模与控制算法、底盘集成控制等方面,在理论和试验方面都形成了一定的独立知识产权,取得了一定的成果,但与国外研究水平相比还存在一定差距。我国对汽车线控技术还应继续加大投入和科学研究力度,切实提高我国在汽车电子领域的竞争力。

表 1-1 线控技术方向的国家自然科学基金资助情况

序号	国家自然科学基金名称	申请人所在单位
1	汽车线控转向系统节能设计理论与方法研究	湖北汽车工业学院
2	汽车前轮电子控制转向的关键技术研究	吉林大学
3	线控转向系统操纵杆及其双向控制方法研究	吉林大学
4	电动汽车线控转向系统优化控制与容错机理研究	中国石油大学
5	基于线控制动的汽车动力学控制研究	吉林大学
6	线控系统网络优化算法与基于模糊推理理论的在线诊断策略研究	中国科学院电工研究所
7	线控楔形制动系统设计理论与控制方法研究	重庆大学
8	基于线控制动的汽车动力学控制研究	吉林大学
9	融合转向制动功能的车辆集成线控系统关键技术研究	南京理工大学
10	线控汽车底盘控制方法和关键技术研究	吉林大学

第 2 章

汽车线控转向技术

安全、节能、环保是汽车工业一直追求的设计目标。汽车转向系统按照驾驶员的意愿控制汽车的行驶方向,改变或恢复汽车行驶或倒退方向,对汽车的操纵稳定性和主动安全性有重要影响,因此汽车转向系统的零件称为保安件。

如图 2-1 所示,汽车转向系统经历了机械转向系统、液压助力转向(Hydraulic Power Steering,简称 HPS)系统、电液助力转向(Electronic Hydraulic Power Steering,简称 EHPS)系统、电动助力转向(Electric Power Steering,简称 EPS)系统、线控转向系统等几个阶段。汽车转向系统分为两大类:机械转向系统和动力转向系统。其中,完全靠驾驶员手力操纵的转向系统称为机械转向系统,驾驶员作用在转向盘上的力矩通过机械零部件传递、通过转向器放大力矩,实现车轮转向,其缺点是转向较沉重。借助动力来操纵的转向系统称为动力转向系统。动力转向系统可分为液压助力转向系统、电液助力转向系统、电动助力转向系统和线控转向系统等。

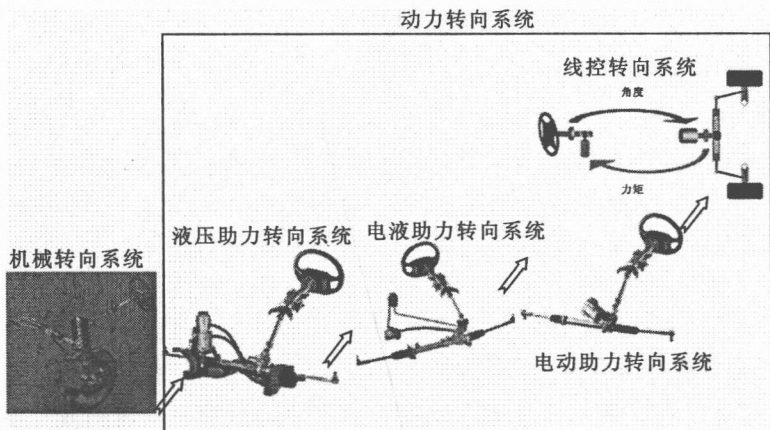


图 2-1 汽车转向系统的发展阶段

本章内容结构如下:2.1 对线控转向系统结构、关键技术等方面进行了总体介绍,2.2 介绍了线控转向系统的设计,2.3 介绍了线控转向系统关键机械部件的有限元分析,2.4 介绍了线控转向系统的动力学建模,2.5 介绍了线控转向系统的参数优化。在此基础上,进一步介绍了线控转向系统的控制算法。其中,2.6 介绍了线控转向系统的路感反馈控制算法,2.7 介绍了线控转向系统的转向控制算法,2.8 介绍了线控转向系统的容错与故障诊断技术,2.9 介绍了线控转向系统的试验技术。

2.1 线控转向系统的介绍

首先,介绍线控转向系统的结构与工作原理;其次,介绍线控转向系统的国内外研究现状;最后,介绍线控转向系统的关键技术。

2.1.1 线控转向系统的结构与工作原理

线控转向系统与电动助力转向系统在结构和设计方面有一些类似的地方。为了体现线控转向技术的优点,下面把线控转向技术与电动助力转向技术在结构与工作原理方面作一对比。

2.1.1.1 电动助力转向系统的结构与工作原理

电动助力转向系统是在机械转向系统的基础上加装转向盘转矩传感器、车速传感器、电子控制单元、直流电动机等装置构成的。其组成及在车上的位置如图 2-2 所示。电动助力转向系统以直流电动机作为转向助力源。

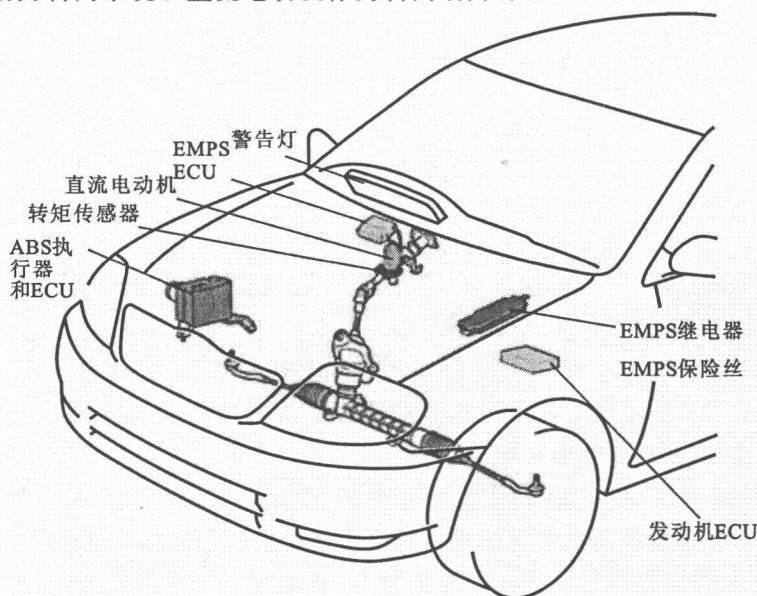


图 2-2 电动助力转向系统组成及在车上的位置