



博士后文库
中国博士后科学基金资助出版

电磁直驱无人驾驶机器人 动态特性与控制

陈 刚 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

电磁直驱无人驾驶机器人 动态特性与控制

陈 刚 著



国家自然科学基金项目（编号：51675281、51205208）研究成果

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书比较全面系统地介绍了著者十余年来研究成果。全书共分8章,内容主要包括电磁直驱无人驾驶机器人总体系统设计、电磁直驱无人驾驶机器人动态特性及智能优化、无人驾驶机器人电磁直驱控制及联合仿真、车辆性能自学习及无人驾驶机器人协调控制、无人驾驶机器人车速跟踪智能控制策略研究、电磁直驱无人驾驶机器人车辆路径及速度解耦控制。

本书可作为车辆工程、装甲车辆工程、载运工具运用工程、机械工程及自动化、机械电子工程、交通工程、电子信息、计算机、电气工程及自动化等专业的研究生或工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁直驱无人驾驶机器人动态特性与控制/陈刚著. —北京:科学出版社, 2017

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-055379-9

I. ①电… II. ①陈… III. ①无人驾驶-机器人 IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第281281号

责任编辑:胡凯 许蕾/责任校对:彭涛

责任印制:张克忠/封面设计:许瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年12月第一版 开本:720×1000 16

2017年12月第一次印刷 印张:9 1/4

字数:200 000

定价:69.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

无人驾驶机器人是一种无需对车辆进行改装,可无损安装在不同车型的驾驶室内,替代驾驶员在危险条件和恶劣环境下进行车辆自动驾驶的智能化机器人。无人驾驶机器人是车辆自动驾驶的一种新思路,通过车辆结构尺寸和性能自学习,驾驶机器人可以不改变现有车辆结构的同时实现自动驾驶,并可以实现同一台机器人适应多种不同类型车辆。由于其无需对车辆进行任何改装,可以直接安装在不同车型的驾驶室内,因此其相关技术可广泛应用于车辆道路试验、车辆台架试验、自动驾驶车辆、无人地面移动武器机动平台等军民两用领域。开展无人驾驶机器人技术的研究,不仅可以加速汽车研发进度、提升我国汽车技术自主研发水平和试验手段,并可为其在汽车环保安全、无人驾驶车辆、无人战车等民用和国防军工领域的应用提供理论基础和技术支撑,具有重要的科学意义和广泛的应用前景。

电磁直驱无人驾驶机器人应用“电-磁-力”转换原理,采用电磁直驱方式将电能直接转换为直线运动与旋转运动所需的机械能,以控制油门机械腿、离合机械腿、制动机械腿、换挡机械手、转向机械手等执行机构完成相应驾驶动作,能同时实现高速、高精度的直线直接驱动和旋转直接驱动,消除了机械机构的迟滞,实现了“零间隙传动”,具有其他驱动方式无可比拟的高效性和节能性。

本书在课题组 DNC-1 全气动驾驶机器人、DNC-2 气电混合驱动驾驶机器人和 DNC-3 全伺服电动驾驶机器人以及目前国内外驾驶机器人技术的研究基础上,研究了 DNC-4 电磁直驱无人驾驶机器人总体系统设计、电磁直驱无人驾驶机器人动态特性及智能优化、无人驾驶机器人电磁直驱控制及联合仿真、车辆性能自学习及无人驾驶机器人智能换挡控制和多机械手协调控制、无人驾驶机器人车速跟踪智能控制策略、电磁直驱无人驾驶机器人车辆路径及速度解耦控制等若干关键技术和应用基础问题。

本书是国家自然科学基金项目(编号:51675281、51205208)、中国博士后科学基金项目(编号:2011M500922)、江苏省六大人才高峰计划项目(编号:2015-JXQC-003)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号:30916011302)

的部分研究成果。

感谢著者的研究生王纪伟、汪俊、虞沈林、吴俊、周楠、王和荣、陈守宝、苏树华等。

由于著者的水平有限，书中疏漏之处在所难免，欢迎广大读者指正。

作者

2017年6月

目 录

《博士后文库》序言

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状与分析	2
1.2.1 无人驾驶机器人国内外研究现状	2
1.2.2 无人驾驶机器人执行机构及智能优化	4
1.2.3 无人驾驶机器人驱动方式及动态特性	5
1.2.4 无人驾驶机器人协调控制及车辆运动控制	7
1.3 研究内容	8
1.4 本章小结	10
第2章 电磁直驱无人驾驶机器人总体系统设计	11
2.1 无人驾驶机器人性能要求	11
2.2 无人驾驶机器人总体结构	12
2.2.1 换挡机械手结构	12
2.2.2 油门/制动/离合机械腿结构	14
2.2.3 转向机械手结构	15
2.3 无人驾驶机器人电磁直驱方案	16
2.3.1 换挡机械手电磁直驱方案	17
2.3.2 油门/制动/离合机械腿电磁直驱方案	18
2.3.3 转向机械手电磁直驱方案	20
2.4 无人驾驶机器人控制系统设计	21
2.4.1 无人驾驶机器人控制系统结构	21
2.4.2 无人驾驶机器人示教再现系统	22
2.5 本章小结	24
第3章 无人驾驶机器人动态特性及智能优化	25
3.1 无人驾驶机器人运动学和动力学模型	25
3.1.1 换挡机械手运动学和动力学模型	25

3.1.2	油门/制动/离合机械腿运动学和动力学模型	29
3.1.3	转向机械手运动学和动力学模型	31
3.2	无人驾驶机器人动态特性仿真与分析	32
3.2.1	换挡机械手动态特性仿真与分析	32
3.2.2	油门/制动/离合机械腿动态特性仿真与分析	35
3.2.3	转向机械手动态特性仿真与分析	37
3.3	无人驾驶机器人结构群智能优化	38
3.3.1	粒子群优化算法	39
3.3.2	模拟退火优化算法	39
3.3.3	无人驾驶机器人模拟退火粒子群结构优化	39
3.3.4	无人驾驶机器人结构参数优化目标函数和约束条件	40
3.4	本章小结	48
第4章	无人驾驶机器人电磁直驱控制及联合仿真	49
4.1	电磁直线执行器及无刷直流电机驱动控制	49
4.1.1	电磁直线直驱执行器原理与驱动	49
4.1.2	电磁直线直驱执行器建模与控制	50
4.1.3	无刷直流直驱电机原理与驱动控制	56
4.2	电磁直驱无人驾驶机器人联合仿真与分析	57
4.2.1	换挡机械手联合仿真与分析	59
4.2.2	油门/制动/离合机械腿联合仿真与分析	60
4.2.3	转向机械手联合仿真与分析	62
4.3	本章小结	63
第5章	车辆性能自学习与无人驾驶机器人多机械手协调控制	64
5.1	驾驶机器人车辆性能自学习	64
5.1.1	驾驶机器人工作过程	64
5.1.2	车辆几何尺寸自学习	66
5.1.3	车辆性能参数自学习	67
5.1.4	试验结果与分析	69
5.2	无人驾驶机器人智能换挡控制	71
5.2.1	模糊神经网络结构及学习算法	71
5.2.2	驾驶机器人模糊神经网络换挡控制	73
5.2.3	试验结果与分析	76
5.3	无人驾驶机器人多机械手协调控制	78

5.3.1 递阶控制模型	78
5.3.2 协调控制方法	80
5.3.3 协调控制器设计	81
5.3.4 试验结果与分析	84
5.4 本章小结	85
第 6 章 无人驾驶机器人车速跟踪智能控制策略研究	86
6.1 驾驶循环行驶工况分析	87
6.2 无人驾驶机器人车速跟踪模糊控制研究	89
6.2.1 车速跟踪模糊控制方法	89
6.2.2 试验结果与分析	95
6.3 无人驾驶机器人车速跟踪神经网络控制研究	97
6.3.1 车速跟踪神经网络控制方法	97
6.3.2 仿真结果与分析	100
6.4 无人驾驶机器人车速跟踪模糊神经网络控制研究	102
6.4.1 车速跟踪模糊神经网络控制方法	102
6.4.2 仿真结果与分析	103
6.5 本章小结	105
第 7 章 电磁直驱无人驾驶机器人车辆路径及速度解耦控制	107
7.1 无人驾驶机器人车辆路径及速度解耦控制策略	107
7.1.1 无人驾驶机器人车辆模糊免疫 P 路径控制策略	108
7.1.2 无人驾驶机器人车辆模糊免疫 PID 速度控制策略	111
7.1.3 无人驾驶机器人车辆路径及速度解耦控制策略	113
7.2 无人驾驶机器人车辆解耦控制建模与联合仿真	114
7.2.1 无人驾驶机器人车辆解耦控制建模	114
7.2.2 无人驾驶机器人车辆解耦控制联合仿真	119
7.3 本章小结	122
第 8 章 总结与展望	124
8.1 全书总结	124
8.2 研究展望	126
参考文献	127
编后记	133

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

无人驾驶机器人是一种无需对车辆进行改装,可无损安装在不同车型的驾驶室内,替代驾驶员在危险条件和恶劣环境下进行车辆自动驾驶的智能化机器人。无人驾驶机器人是车辆自动驾驶的一种新思路,通过车辆结构尺寸和性能自学习,驾驶机器人可在不改变现有车辆结构的同时实现自动驾驶,并可以实现同一台机器人适应多种不同类型车辆。由于其无需对车辆进行任何改装,可以直接安装在不同车型的驾驶室内,因此其相关技术可广泛应用于汽车试验、自动驾驶汽车、无人驾驶军用车辆、无人地面移动武器机动平台等军民两用领域^[1-4]。

近年来,以雾霾为代表的大气污染问题成为社会关注的热点,我国部分地区出现 $\text{PM}_{2.5}$ 指标爆表的极端情况,在汽车出厂前进行大量试验,严格限制汽车尾气中有害物质的含量迫在眉睫^[5,6]。而通常汽车试验具有重复性强、危险性大、工作环境恶劣等特点,无人驾驶机器人可替代驾驶员在底盘测功机上或道路上进行汽车可靠性及性能试验、环境验证试验、耐久性试验和排放性能试验等。利用驾驶机器人代替人类驾驶员进行汽车试验,既可有效地提高试验效率、避免人工试验中驾驶员存在的安全隐患,又可提高试验结果的准确性和可靠性。另外,驾驶机器人作为辅助驾驶系统安装在车辆上,又可提高汽车主动安全性。

在医疗健康领域,不同等级的残疾者和各种不同智力的人对外界环境的变化会有不同程度的反应,因此需要研究他们驾车时的各种情况和可能性,但由他们自己做是不现实的。无人驾驶机器人用于残疾者康复训练,可仿生残疾者驾驶汽车操作,提高残疾者驾驶汽车的能力及安全性;用自动驾驶机器人来仿生各种不同等级的残疾者和不同智力等级的驾车者,来应付各种模拟的道路及交通情况会比真人来得方便、容易,由此取得的反馈信息有利于更好地改进车辆的设计及提高车辆对人的适应性。

在国防军工领域,无人驾驶机器人装备在军用暨特种车辆和自行火炮上,可完成作战、排爆、灭火等高风险任务。美国 DARPA(美国国防部国防先进研究计划署)已制定了无人地面作战平台战略计划,利用无人驾驶机器人作为地面移动武器机动平台的机器人驾驶员进行驾驶、通信、侦察以及武器操控,以便实现零伤

亡^[7-9]。另外,美国陆军装备部发展重点项目“军用无人驾驶地面车辆”项目,主要思想是在未来的作战中,赋予无人战车侦察、运输、排弹、医疗撤运(后送)和直接攻击目标等多种功能^[10-11]。通过将无人驾驶机器人装备在军用暨特种车辆上,可实现从有人战车到无人战车的转变,可有效快速地应对未来军事战场上各种可能的突发情况。

电磁直驱无人驾驶机器人应用“电-磁-力”的转换原理,采用电磁直驱方式将电能直接转换为直线运动与旋转运动所需的机械能,以控制油门机械腿、离合机械腿、制动机械腿、换挡机械手、转向机械手等执行机构完成相应驾驶动作,能同时实现高速、高精度的直线直接驱动和旋转直接驱动,消除了机械机构的迟滞,提高了整个系统动态响应及可靠性,实现了“零间隙传动”,具有其他驱动方式无可比拟的高效性和节能性^[12],在满足无人驾驶机器人操控系统高稳定性、可靠性要求的同时,又能有效地减轻体积及重量,提高其动态响应和操控精度。开展无人驾驶机器人技术的研究,不仅可以加速汽车研发进度、提升我国汽车技术的自主研发水平和试验手段,还可为其在环保汽车制造、汽车环保安全、无人驾驶车辆、无人战车等民用和国防军工领域的应用提供理论基础和技术支撑,具有重要的科学意义和广泛的应用前景。

1.2 国内外研究现状与分析

1.2.1 无人驾驶机器人国内外研究现状

20 世纪 80 年代中期,光化学烟雾事件和酸雨事件频繁发生,环境保护日益重要,对汽车尾气的排放标准日益严苛,因此国外许多科研机构开始试图开发能够代替人类完成驾驶任务的汽车排放试验用驾驶机器人^[2-5],比较著名的有德国 SCHENCK(见图 1.1)、STAHL(见图 1.2)、WITT、大众(见图 1.3)、德国慕尼黑联邦国防军大学^[4]、日本 HORIBA(见图 1.4)、Autopilot、Nissan Motor、AUTOMAX,英国 Froude Consine(见图 1.5)、MIRA、ABD(见图 1.6),美国 Kairos、LBECO 等,但其关键技术仍处在保密阶段。

国内于 20 世纪 90 年代中期开始进行驾驶机器人的研究工作,起步相对较晚,主要是一些汽车研究机构 and 高等院校,最具代表性的是东南大学与南京汽车研究所研制的 DNC 系列驾驶机器人,这是我国首个具有自主知识产权的驾驶机器人^[13-18]。近年来,南京理工大学^[1, 19-22]、清华大学^[23]、上海交通大学^[24]、北京航空航天大学^[25]、哈尔滨工业大学^[26]、太原理工大学^[6]、同济大学^[27]、中国汽车技术研究中心^[28]等高校和研究机构也相继开始研究车辆自动驾驶机器人。国内外有些学者把

汽车作为移动机器人,即智能汽车^[2, 29],可提供一体化的生活、娱乐、学习等智能服务,其不仅可作为机器人驾驶辅助系统,也可实现完全无人驾驶,但相比于驾驶机器人的不足之处是对车辆改装幅度较大。

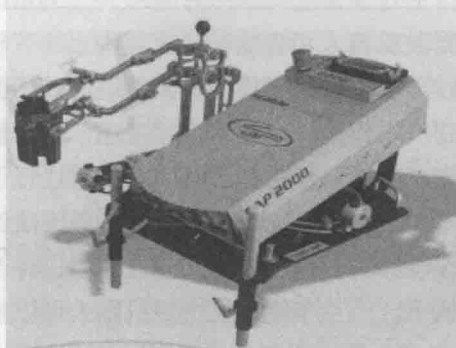


图 1.1 德国 SCHENCK 驾驶机器人



图 1.2 德国 STAHL 驾驶机器人

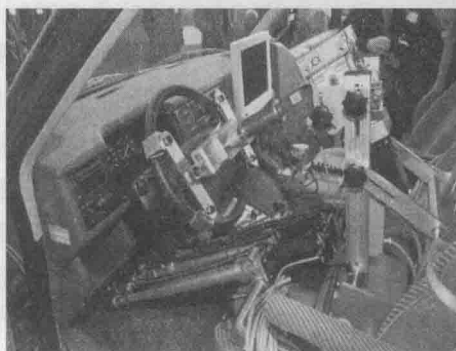


图 1.3 德国大众驾驶机器人

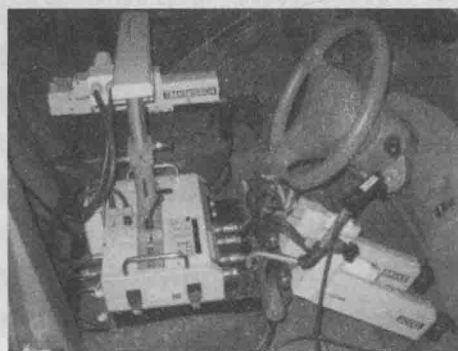


图 1.4 日本 HORIBA 驾驶机器人



图 1.5 英国 Froude Consine 驾驶机器人

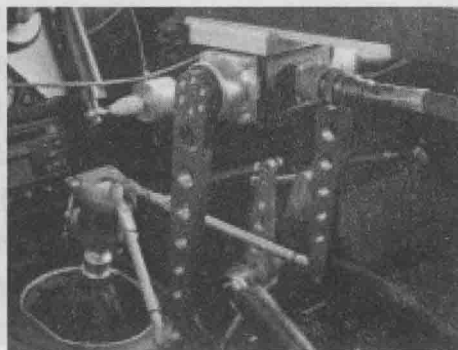


图 1.6 英国 ABD 驾驶机器人

国内高校如国防科技大学、清华大学、吉林大学、北京理工大学、浙江大学、南京理工大学等则在智能车辆研究领域处于领先地位。已经研制成功的自动驾驶系统包括^[30]：清华大学、北京理工大学、南京理工大学等高校共同研制的 7B8 系统；一汽集团和国防科技大学联合研制的自动驾驶智能汽车；清华大学的 THMR 系列自主车；吉林大学的 JUTIV 系统等。驾驶机器人和智能车辆在结构上具有相似性，主要都由油门机械腿、制动机械腿、离合机械腿和换挡机械手组成，其区别在于是否对汽车进行了改造。智能车辆将汽车作为一个整体进行考虑，把车辆作为移动机器人进行改装或重新设计，对汽车的操纵机构甚至动力系统等进行了比较多的改造，或者重新设计，成本高，一旦该车辆任何一部分损坏，就无法继续进行作业。而无人驾驶机器人并非构建在特殊的车辆上，不需要对车辆进行改造，而是可以无损地安装到各种规格的车辆上，一旦车辆损坏，该机器人可以换装在另一台车上使用。

1.2.2 无人驾驶机器人执行机构及智能优化

无人驾驶机器人的总体结构包括换挡机械手、转向机械手、油门机械腿、离合机械腿、制动机械腿。德国慕尼黑联邦国防军大学 Benedikt 等^[4]研究了直流电机驱动的绳绞车驾驶机器人。太原理工大学牛志刚等^[31]研制的驾驶机器人换挡机构为曲柄滑块机构，挂挡机构为滚珠丝杠机构，机械腿为四连杆机构，其机械腿结构较为复杂。上海交通大学石柱等^[24]研制的驾驶机器人换挡机械手为双平行四边形机构，该机构具有两个平面的转动自由度从而可以完成选挡和挂挡动作，该驾驶机器人机械腿为伺服电机驱动的摇杆机构。中国汽车技术研究中心陈弘等^[28]研制的驾驶机器人机械腿采用钢丝滑轮机构，换挡机械手机构为“三大臂+两小臂+两个 L 形调节臂”，两个伺服电机驱动分别完成选挡和挂挡动作，并可适应于不同结构驾驶室。北京航空航天大学余贵珍等^[32]研制的自动驾驶机器人换挡机械手结构为“滚珠丝杆+滑轨”结构，其换挡机械手由于只能实现挂挡运动，因此该机构只能适用于自动变速器汽车，其机械腿结构为“滚珠丝杆+滑块”机构。同济大学马志雄等^[27]研制的驾驶机器人换挡机械手包括机械手外管和机械手内管，机械手内管连接挂挡驱动单元完成挂挡动作，选挡驱动单元驱动一传动杆实现选挡动作，机械腿在直线驱动单元推动下作直线运动，但研究表明汽车离合器等踏板运动并不是严格直线运动，而是有一定弧度的曲线运动。吉林大学张友坤等^[33]研制的同步器试验换挡机械手为四连杆机构，选挡由伺服电机驱动，挂挡由气缸驱动。以上研制的驾驶机器人多是需要用伺服电机驱动，因此将需要许多减速机构，使驾驶机器人结构趋于复杂。本研究设计的无人驾驶机器人^[34, 35]换挡机

械手为平面二自由度七连杆机构,机械腿为曲柄连杆机构带动的摇杆机构,该设计方案可以实现换挡机械手和机械腿的电磁直驱,即只用电磁直线执行器即可完成无人驾驶机器人的驱动。研究表明本书设计的无人驾驶机器人各执行机构的结构还需进一步进行优化以便更加适应汽车自动驾驶的要求。

电磁直驱无人驾驶机器人的结构优化关系到无人驾驶机器人驾驶操纵性能和驾驶可靠性。无人驾驶机器人机构优化方法可分为传统优化方法和现代智能优化方法。以线性规划法、单纯形法、可容变差法、复合形法等为代表的传统优化方法只能解决数学特征能被精确认识的优化问题,且无法跳出局部优化解。介于传统优化方法的局限性,在数学理论尚未实质性突破的情况下,启发式算法^[36-38]应运而生,它可在有限时间内求得可接受的近似优化解。智能优化算法是一类特殊的启发式优化算法,它借鉴了自然界或生物体的各种原理和机理,同时具有自适应环境能力^[39]。代表性的智能优化算法包括模拟退火算法、遗传算法、蚁群算法、粒子群算法、蜜蜂群算法等。各种单一智能算法的优缺点和应用领域不同。群智能混合优化综合运用其他智能优化算法的思想对某种智能优化算法进行改进^[40,41],具有实现简单、全局优化能力强、受控参数少、收敛速度快等优点。另外,目前的全电动驾驶机器人换挡机械手是采用两个伺服电机和旋转变直线运动机构分别驱动驾驶机器人换挡机械手的选挡和挂挡过程。因此,本书拟通过利用电磁执行器取代“伺服电机+滚珠丝杆”结构来驱动无人驾驶机器人各执行机构,研究具有最佳动力传动路径的电磁直驱闭链机构,探索运用群智能混合优化算法,并综合考虑无人驾驶机器人结构约束和驾驶室约束等,建立电磁直驱无人驾驶机器人结构群智能优化模型。

1.2.3 无人驾驶机器人驱动方式及动态特性

电磁直驱无人驾驶机器人动态特性与驾驶机器人各机械手、机械腿以及箱体的结构特点和驱动方式有很大关系。国内外驾驶机器人大都由换挡机械手、转向机械手、油门机械腿、离合机械腿、制动机械腿和控制系统组成。无人驾驶机器人驱动方式主要有液压驱动、气压驱动、气电混合驱动、电动伺服驱动^[3,4,13,14,23-28]和电磁直驱^[1,19,34,35]五种。譬如东南大学张为公等设计了气压驱动机械手和“伺服电机+滚珠丝杆”驱动机械手;清华大学黄开胜等^[19]设计了“电动缸+滑动导轨”自动驾驶机器人;太原理工大学牛志刚等^[31]设计了“电机+齿轮/带轮+螺纹丝杠/谐波减速器”驱动的自动驾驶机器人。但研究表明,液压驱动方式需由专门的液压泵系统提供液压油,使系统故障点增多,机构复杂,并受温度影响大,对油的密封性要求高;气压驱动方式采用气缸进行驱动,使得执行机构和检测控制系统

复杂,并且气动执行机构难以实现轨迹控制和多点准确定位;电动伺服驱动方式采用“伺服电机/步进电机+滚珠丝杠/齿轮齿条/滑动导轨/带轮”进行驱动,由于驱动原理的局限性,其传动效率及位移和力的控制精度都相对较低。

电磁直接驱动可将电能直接转换为直线或旋转形式的机械能,无需中间传动环节,有着其他驱动方式无可比拟的优越性,成为机械驱动与传动研究中的发展趋势之一^[12]。电磁直驱无人驾驶机器人的主要结构特征是电磁执行器与其所驱动的无人驾驶机器人机械执行机构直接耦合在一起,结构紧凑,传动高效,可提高整个系统的定位精度、控制精度、重复性、稳定性、可靠性和动态响应^[42-44]。因此,电磁直驱是未来无人驾驶机器人驱动方式的发展趋势。本书采用电磁执行器直接驱动无人驾驶机器人各机械手和机械腿的方式来研究无人驾驶机器人的动态特性。

关于无人驾驶机器人动态特性的研究,太原理工大学牛喆等^[6]针对驾驶机器人换挡机械手有两个输入但只有一个输出的特性,将换挡机械手的挂挡部分和选挡部分进行拆解再进一步解析法分析和封闭矢量法分析,清晰明了地描述了机械手位移、速度和加速度与输入之间的关系。哈尔滨工业大学田体先等^[26]利用 ADAMS 软件对换挡机械手进行了动力学仿真,并通过构建线性化的状态方程来描述气缸驱动的离合机械腿的动态特性。但无人驾驶机器人系统是一个高度非线性的复杂系统,往往不能精确地给出其动力学方程,基于此问题,一般先求出机器人等系统的简化后的动力学特性方程,然后通过一些先进控制算法补偿系统运动过程的非确定性因素和外界干扰,如 Dasdemir 等^[45]设计了高度非线性系统的自适应控制器和鲁棒控制器;Oniz 等^[46]提出了机器人等高度非线性系统的模糊脉冲神经网络控制算法,该算法继承了滑模控制的高鲁棒性优点。此外针对复杂系统也可以利用软件仿真来帮助研究者解决问题,如南京理工大学陈刚等^[35]建立了电磁驱动无人驾驶机器人物理模型及虚拟样机模型,并进行了初步的操纵机构运动学和动力学分析及性能匹配优化。中国科学技术大学唐国明等^[47]研究了一种用于无人驾驶汽车运动模拟的三自由度并联机构,利用牛顿-欧拉方法得出了该动平台的动力学方程,借助力矩平衡原理与功率平衡方程得到了关节驱动力。太原理工大学牛志刚等^[31]采用 AUTOCAD 的建模工具建立了驾驶机器人的逼真模型,在 VC++ 开发平台上实现了驾驶机器人的可视化运动仿真。目前关于无人驾驶机器人动态特性的研究只是针对结构确定的机器人机构,而并未考虑无人驾驶机器人的执行机构结构参数变化是否对无人驾驶机器人动态特性有所影响。因此,本书将进行电磁直驱无人驾驶机器人动态特性研究,探索无人驾驶机器人执行机构的连杆结构尺寸的变化对无人驾驶机器人系统动态特性的影响。

1.2.4 无人驾驶机器人协调控制及车辆运动控制

无人驾驶机器人是一种仿生机器人,要实现无人驾驶机器人模拟人准确完成驾驶动作,必须实现无人驾驶机器人多机械手协调控制,建立合理的多机械手协调控制模型是关系到整个无人驾驶机器人系统驾驶行为优劣的关键。德国乌尔姆大学 Sailer 等^[48]研究了驾驶机器人操纵汽车的起步控制、制动控制,运用递归最小二乘法设计了一种闭环车速跟踪控制算法。新西兰奥克兰大学 Nicholas 等^[3]设计了用于自主车辆跟踪的驾驶机器人 PID 控制器,但踏板黏滑和油门/制动切换的非线性问题限制了控制器性能。德国乌尔姆大学 Sailer 等^[49]设计了基于平整度的驾驶机器人车速跟踪控制,但其近似发动机扭矩最大模型不准确,并且在线自适应性差。为了实现复杂驾驶循环工况下无人驾驶机器人多机械手协调控制和精确车速跟踪,本书提出了一种基于模糊逻辑理论的无人驾驶机器人递阶协调控制方法。在分析驾驶循环行驶工况的基础上,建立了基于 Saridis 体系结构的无人驾驶机器人递阶控制模型,研究了融合驾驶员操纵驾驶经验的无人驾驶机器人油门机械腿、制动机械腿、离合机械腿和换挡机械手综合协调运动规律,设计了无人驾驶机器人智能换挡控制器和油门/离合机械腿协调控制器及油门/制动机械腿切换控制器。

电磁直驱无人驾驶机器人是采用电磁直线执行器(直线电机)和无刷直流旋转直驱电机来直接驱动的,但由于直接驱动不存在中间减速机构和传动机构,系统对负载扰动、电动机推力波动和惯量变化较为敏感,直接驱动机器人的控制相对复杂,所以目前对直接驱动机器人的研究主要集中在控制算法上。譬如南昌航空大学贺红林教授等^[50]提出了二自由度直接驱动机器人臂杆自适应-PD 复合运动控制,消除了由于机器人难以建立精确模型而带来的参数和非参数不确定性。Thanok^[51]设计了具有动摩擦补偿的自适应控制器,具有良好的非线性补偿特性;Ibrahim 等^[52]设计了基于遗传算法的一种整体滑模控制器,从而很好地实现了对机器人轨迹的精确跟踪控制。此外美国约翰·霍普金斯大学 Brown 等^[53]研究了一种微型直接驱动四足行走机器人的运动效率和效果分析;Chavez-Olivares 等^[54]研究了拟人化直接驱动机器人的惯性及摩擦系数等参数辨识实验评价方案;日本大阪大学 Nakata 等^[55]进行了直接驱动肌肉跳跃机器人的刚度椭圆柔顺控制研究;加拿大 Hamelin 等^[56]提出了基于双观测器的水下直驱打磨机器人离散时间状态反馈速度估计控制器。总而言之,目前对于直接驱动机器人的控制算法研究是热点,无论国内还是国外的研究都有改进空间。

电磁直驱无人驾驶机器人车辆的运动控制主要根据车辆当前状态信息和路