



同济大学 1907.2017  
Tongji U



同济博士论丛  
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

孔国玲 万钢 钟再敏 著

# 混合动力汽车用定轴式 有源传动装置关键技术研究

Research on Key Technologies of Fixed-Axle  
Active Transmission Used for HEV Application



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛  
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

孔国玲 万钢 钟再敏 著

# 混合动力汽车用定轴式 有源传动装置关键技术研究

Research on Key Technologies of Fixed-Axle  
Active Transmission Used for HEV Application



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

混合动力汽车是未来几十年汽车电动化过程中的过渡性技术,有着巨大的市场前景。本书提出一种基于图论的定轴式有源传动装置拓扑结构设计方法,并在此方法上推演出一种新型的传动方案 EMT。针对该方案的独特拓扑结构,突出两种关键瞬态过程控制,开发相应控制算法。本书针对定轴式有源传动装置的动力学分析以及关键技术研究将具有较强的工程应用价值,适于汽车专业院校师生和生产研发技术人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

混合动力汽车用定轴式有源传动装置关键技术研究/  
孔国玲,万钢,钟再敏著. —上海:同济大学出版社,  
2017.8

(同济博士论丛/伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-6945-2

I. ①混… II. ①孔…②万…③钟… III. ①混合动力汽车—液压传动装置—研究 IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 093786 号

---

---

## 混合动力汽车用定轴式有源传动装置关键技术研究

孔国玲 万 钢 钟再敏 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 吕 炜 卢元姗

责任校对 谢卫奋 封面设计 陈益平

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 10

字 数 200 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6945-2

---

定 价 50.00 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

## “同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强  
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

# “同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侗红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何晶晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城 莫天伟 夏四清 顾 明 顾祥林 钱梦騷  
徐 政 徐 鉴 徐立鸿 徐亚伟 凌建明 高乃云  
郭忠印 唐子来 閻耀保 黄一如 黄宏伟 黄茂松  
戚正武 彭正龙 葛耀君 董德存 蒋昌俊 韩传峰  
童小华 曾国荪 楼梦麟 路秉杰 蔡永洁 蔡克峰  
薛 雷 霍佳震

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姍 蒋卓文

# 总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月



# 论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017年5月

# 前言

在节节攀升的汽油价格以及越来越严的排放法规的社会背景下,传统汽车已经难以满足时代发展的需求,汽车动力系统的电动化成为未来的发展趋势。纯电动汽车和燃料电池汽车受限于基础设施薄弱、关键技术障碍、成本和可靠性等因素,短时间内难以市场化;而混合动力电动汽车相对技术成熟,有着极大的市场化潜力,并且已经有成熟的产品,如丰田的 Prius、通用的 Volt 等分别掌握了未来几十年汽车电动化过程中的过渡性技术,因此混合动力有着巨大的市场前景。

汽车动力系统的电动化引入了另一动力源电机,而电机与原有传动系统的集成是其关键技术之一,常见的集成方案是将变速器与电机集成为一个总成,本书将至少集成有一个电机的变速器装置定义为有源传动装置。目前应用于混合动力的有源传动装置有基于行星齿轮结构的耦合方案以及基于定轴式齿轮传动的方案。前者以丰田 THS(Toyota Hybrid System)和通用的双模有源传动装置等为代表,但鉴于其高技术门槛和专利保护等原因,另辟蹊径提出一种基于行星齿轮的新型混合动力传动方案相对困难。而基于定轴式齿轮传动的耦合方案具有相对技术门槛低、可靠、传动效率高以及成本低等突出优点,受到越来越多的

关注。

基于定轴式的有源传动装置能够有效地将并联式混合动力与定轴式齿轮传动的优点结合起来,既能满足传动系统的多挡位需求,适应复杂多变的行车工况,又能充分利用并联混合动力的优点,改善动力性以及燃油经济性。而且,定轴式齿轮变速器在国内有着良好的设计、加工和制造基础,成本低,具有极大的成本优势。因此,针对定轴式有源传动装置开展深入的动力学分析以及关键技术研究将具有较强的工程应用价值。

国内针对定轴式有源传动装置有着一定的研究基础,但未充分挖掘定轴式有源传动装置的技术潜力。为充分发挥定轴式有源传动装置的技术优势和挖掘其技术潜力,本书提出一种基于图论的定轴式有源传动装置拓扑结构设计方法,并在此方法基础上推演出一种新型的传动方案EMT,并针对该方案的独特的拓扑结构,提出两种关键瞬态过程控制过程,并开发相应的控制算法。具体内容如下:

首先,将图论理论引入到定轴式有源传动装置拓扑结构设计中,将定轴式有源传动装置各组成单元,如轴、同步器、离合器和齿轮等进行抽象,进而将一个由定轴式变速器和电机组合而成的复杂系统用抽象的拓扑结构来表达,在此基础上,用排列组合的方法穷举出全部潜在的组合方案,并通过图论理论以及各种边界条件来筛选出符合设计需求的方案,在最终得到的符合设计需求的方案中挑选最合理的方案作为本书的研究对象。

其次,对新型有源传动装置进行了结构原理和工作模式分析,根据方案拓扑结构特点,提出了离合器不分离换挡和动力不中断换挡两个瞬态过程。对关键部件即发动机、离合器、变速器、驱动电机和整车等进行了建模;针对有源传动装置在换挡过程中传动系统存在变拓扑的情况,

分别对两个瞬态过程即离合器不分离换挡和动力不中断换挡过程进行了传动系统建模,为离线控制算法的验证以及整车仿真提供平台。

第三,离合器不分离换挡和动力不中断换挡两个瞬态过程是本书的研究重点。本书介绍了离合器不分离换挡和动力不中断换挡过程的详细控制算法,并针对离合器不分离换挡过程的最关键技术,即同步器主动端惯量调速控制,提出了基于极小值原理的时间最优控制算法,以实现快而准的调速效果;瞬态过程切变过程中不可避免地涉及转矩的突变,为了确保行车舒适性,开发了状态切换过程中的转矩补偿策略,并加以仿真验证。

最后,开展了 EMT 试验台架研究,进行了离合器不分离换挡试验以及动力不中断换挡等典型工况试验,验证了控制算法的有效性。

# 目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.1.1 有源传动装置定义 .....	3
1.1.2 有源传动装置的基本类型 .....	4
1.1.3 有源传动装置国内外研究现状 .....	6
1.1.4 定轴式齿轮变速器动力中断问题国内外研究现状 .....	13
1.1.5 课题来源 .....	23
1.1.6 研究目的及意义 .....	23
1.2 研究内容 .....	24
第 2 章 基于形态分析法的定轴式有源传动装置拓扑结构设计 .....	27
2.1 传动系统拓扑方案设计研究现状 .....	27
2.2 定轴式有源传动装置拓扑图模型建立 .....	30
2.3 机构变量与约束条件的分析 .....	32
2.3.1 机构变量 .....	32



2.3.2	可行性条件与相容性约束 .....	33
2.4	邻接矩阵及其应用 .....	35
2.4.1	连接关系邻接矩阵和传动关系邻接矩阵 .....	35
2.4.2	基于传动关系邻接矩阵分析动力传递路径 .....	36
2.4.3	基于传动关系邻接矩阵判定运动干涉 .....	38
2.5	传动方案系统化设计流程分析 .....	40
2.5.1	总流程分析 .....	40
2.5.2	型综合过程分析 .....	41
2.5.3	数综合过程分析 .....	41
2.6	实施例 .....	45
2.6.1	结构类型综合 .....	45
2.6.2	方案数目综合 .....	46
2.7	本章小结 .....	49
<b>第3章</b>	<b>EMT 工作原理分析与建模 .....</b>	<b>50</b>
3.1	EMT 系统结构和基本工作原理 .....	50
3.1.1	EMT 系统结构 .....	50
3.1.2	EMT 工作模式分析 .....	51
3.1.3	典型模式功率流 .....	52
3.1.4	关键瞬态过程原理分析 .....	54
3.2	传动系统建模 .....	60
3.2.1	关键部件模型 .....	60
3.2.2	传动系统建模 .....	68
3.3	本章小结 .....	73
<b>第4章</b>	<b>EMT 关键瞬态过程控制算法及仿真 .....</b>	<b>74</b>
4.1	关键部件控制算法 .....	75
4.1.1	电机调速控制算法 .....	75
4.1.2	发动机调速控制算法 .....	78

4.2 EMT 离合器不分离换挡过程控制算法与仿真 .....	81
4.2.1 离合器不分离换挡对同步器的影响 .....	81
4.2.2 离合器不分离换挡过程控制策略 .....	84
4.2.3 离合器不分离换挡过程的评价指标 .....	85
4.2.4 同步器被同步端调速控制策略 .....	87
4.2.5 离合器不分离换挡仿真结果 .....	97
4.3 动力不中断换挡控制算法与仿真 .....	99
4.3.1 动力不中断换挡过程系统级控制策略 .....	100
4.3.2 动力补偿控制策略 .....	102
4.4 本章小结 .....	108
<b>第 5 章 EMT 总成台架试验研究 .....</b>	<b>110</b>
5.1 传动系统控制架构 .....	110
5.2 台架试验方案 .....	112
5.3 台架试验结果 .....	114
5.3.1 离合器不分离换挡试验结果 .....	114
5.3.2 动力不中断换挡试验结果 .....	120
5.4 本章小结 .....	124
<b>第 6 章 总结与展望 .....</b>	<b>126</b>
6.1 总结 .....	126
6.2 研究的创新点 .....	127
6.3 研究工作展望 .....	127
<b>参考文献 .....</b>	<b>129</b>
<b>后记 .....</b>	<b>138</b>



# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 研究背景及意义

随着全球气候变暖以及冰川逐渐消融,北极这个以前不怎么被人关注的区域,最近越来越受到瞩目,美国、俄罗斯、加拿大、瑞典、丹麦、挪威等北冰洋沿岸国家纷纷调整、推出各自的北极战略,力争未来在北极的资源之争中占据优势地位<sup>[1]</sup>。冰山融化和海平面上升已经成为无可争议的事实,北极周边国家在看到北极地下丰富的矿藏资源的同时,民众把更多的注意力集中在海平面上升给人类带来的危害以及如何减缓上升的速度。IPCC 2007 年曾预计,截至 21 世纪末,海平面将上升 18~58 cm,可能淹没低洼地带,致使数以百万计的民众流离失所<sup>[2]</sup>。海平面上升的主要原因是过量的温室气体的排放,尤其是第一次工业革命之后,温室气体以史前未有的迅猛速度排放到空气中,在不考虑未来采取有效措施的情况下,温室气体的排放速度仍有进一步增速的趋势。

奥斯陆气候和环境国际研究中心最近在美国《国家科学院学报》月刊上刊登研究报告说,汽车、轮船、飞机和火车使用燃料所释放的气体是目前造成全球变暖的主要原因之一。报告指出,过去 10 年全球二氧化碳排放总量增