



同济大学 1907-2017
Tongji University



总主编 伍江 副总主编 雷星晖

马琮淦 左曙光 著

电动车用永磁同步电机非线性 电磁振动和异常噪声研究

Study on Nonlinear Electromagnetic Vibration and
Abnormal Noise of Permanent Magnet Synchronous
Motor for Electric Vehicle



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

马琮淦 左曙光 著

电动车用永磁同步电机非线性 电磁振动和异常噪声研究

Study on Nonlinear Electromagnetic Vibration and
Abnormal Noise of Permanent Magnet Synchronous
Motor for Electric Vehicle

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书主要做了以下四个方面的工作: ① 建立了考虑永磁体磁场非正弦分布、定子开槽、变频器供电下时间谐波电流等因素的表贴式永磁同步电机的统一非线性解析模型, 预测了转矩波动的阶次和频率, 提出了实验测量高阶转矩信号的转速判据; ② 考虑了时间谐波电流, 推导了径向力波表达式, 求得了径向集中力的解析解, 预测了变频器供电时永磁同步电机径向力和电磁噪声的特征阶次; ③ 通过实验模态分析初步揭示了螺栓预紧力和不同部件间接触类型对轮毂永磁同步电机的模态参数的影响规律及结构阻尼特性。结合电磁力激励频率范围, 实现了电机模态规划; ④ 提出了车用工况下永磁同步电机异常噪声诊断和分析的“黑箱方法+白箱方法”。黑箱方法不需永磁同步电机内部参数。简化了永磁同步电机异常噪声分析过程, 提高了效率。

本书可作为从事电动车用永磁同步电机相关研究人士的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电动车用永磁同步电机非线性电磁振动和异常噪声研究 / 马琮淦, 左曙光著. —上海: 同济大学出版社, 2018. 10

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-6992-6

I. ①电… II. ①马… ②左… III. ①电动汽车—永磁同步电机—非线性振动—研究②电动汽车—永磁同步电机—噪声控制—研究 IV. ①U266.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 093693 号

电动车用永磁同步电机非线性电磁振动和异常噪声研究

马琮淦 左曙光 著

出品人 华春荣 责任编辑 翁 哈 卢元姗

责任校对 徐逢乔 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 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 14.75

字 数 295 000

版 次 2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6992-6

定 价 89.00 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	何品晶
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 璠
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 钱梦馥
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 卢元姗 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

本书以国家自然科学基金项目“分布式驱动电动汽车电动轮—悬架系统高频振动特性研究”(51375343)、973 计划项目“高性能分布式驱动电动车关键基础问题研究”(2011CB711200)和国家自然科学基金项目“燃料电池汽车空辅系统噪声源理论分析与控制方法研究”(51075302)为依托,研究了电动车用永磁同步电机非线性电磁振动和异常噪声。本书首先对引发电动车用永磁同步电机非线性振动和异常噪声的振源——非线性电磁转矩波动和径向力进行了研究,建立了考虑永磁体磁场非正弦分布、开槽、变频器供电下时间谐波电流等因素的统一解析模型,分析了电磁转矩和径向力的阶次特征,通过有限元法和实验验证了解析分析的正确性;然后通过解析模态分析、有限元计算模态分析和实验模态分析,识别了电动车用永磁同步电机的模态参数,验证了所建结构模型的准确性,并进行了模态规划;在此基础上,建立了电动车用永磁同步电机电磁振动集中参数模型和结构有限元模型,分析了电磁振动的非线性特性;最后,首次提出了车用工况下永磁同步电机异常噪声识别、诊断、分析的“黑箱方法+白箱方法”:先应用适用于系统级分析的黑箱方法快速识别和诊断出所有异常噪声源,再考虑这些异常噪声源,应用



白箱方法做异常噪声的建模和分析。通过永磁同步电机噪声测试实验验证了所提“黑箱方法+白箱方法”的正确性。

本书主要完成的研究工作及取得的成果如下：

(1) 针对电动车用永磁同步电机非线性扭转振动的主要振源——永磁同步电机电磁转矩波动,首先从理论上建立了考虑永磁体磁场非正弦分布、定子开槽、变频器供电下时间谐波电流等因素的永磁同步电机的统一非线性解析模型,获得了谐波转矩的解析解,预测了转矩波动的阶次和频率,进而提出了实验测量高阶转矩信号的转速判据。然后通过高阶转矩波动实验测得了24阶以内的高阶转矩信号,验证了本书所提的永磁同步电机非线性电磁转矩波动解析模型相对于已有的线性解析模型的优越性。理论研究和实验研究表明:永磁同步电机的转矩具有明显的阶次波动特征,主要阶次有 $h-1$ 阶、 $2(h-1)$ 阶、 $6k+h-1$ 阶、 $6k-h+1$ 阶(h 为时间谐波电流阶次,且由变频器决定; $k \in N^*$); h 次时间谐波电流将单独引起 $h-1$ 阶、 $2(h-1)$ 阶的转矩波动, h 次时间谐波电流、非正弦永磁磁场分布、开槽将共同引起 $6k+h-1$ 阶、 $6k-h+1$ 阶的转矩波动。

(2) 针对电动车用永磁同步电机非线性径向振动和异常噪声的主要振源——永磁同步电机的径向力,通过磁势磁导法得到了考虑时间谐波电流的气隙磁场分布,应用麦克斯韦张量法获得了径向力波,并沿外转子表面应用复合柯特斯公式对径向力波积分,求得了具有6阶代数精度的径向集中力的解析解,预测了变频器供电时永磁同步电机径向力的特征阶次: $2h_i$ 、 $2h_j$ 、 $2(2\mu-1)$ 、 $h_i \pm h_j$ 、 $2\mu-1 \pm h_i$ 、 $2\mu-1 \pm h_j$ (h_i 、 h_j 为时间谐波电流阶次, $\mu \in N^*$)。当 h_i 或 h_j 是分数时,径向力将出现分数阶特征频率。

(3) 应用解析模态分析、有限元计算模态分析、实验模态分析识别

了轮毂永磁同步电机的模态参数,探讨了长径比对解析模态分析计算精度的影响,初步揭示了螺栓预紧力和不同部件间接触类型对轮毂永磁同步电机的模态参数的影响规律及结构阻尼特性,发现不同螺栓预紧力和不同部件间的接触类型会显著影响电机的模态参数,并发现轮毂永磁同步电机是非线性阻尼结构,如果采用经典论著中提到的线性模态阻尼计算电磁振动和噪声会导致较大误差,应通过实验获取阻尼参数。结合电磁力激励频率范围,应用非支配排序遗传算法,实现了电机模态规划,为低噪声电机设计提供了指导意见。

(4) 为分析电动车用永磁同步电机振动的非线性特性,首先,利用集中参数法建立了永磁同步电机扭转振动和径向振动的非线性动力学模型,获取了定子铁芯、机壳的刚度和阻尼参数。然后,采用状态变量法求得了非线性方程组的解。最后,通过实验验证了非线性振动模型的有效性。

(5) 首次提出了车用工况下永磁同步电机异常噪声识别、诊断、分析的“黑箱方法+白箱方法”:先应用黑箱方法快速识别和诊断出所有异常噪声源;再考虑这些异常噪声源,应用白箱方法做异常噪声的建模和分析。为快速识别与诊断永磁同步电机异常噪声源,本书提出了一种永磁同步电机噪声源识别与诊断的黑箱方法。黑箱方法分为三个步骤:第一步,考虑时间谐波电流、变频器、偏心、滑动轴承、共振等异常噪声源,建立以转速为输入信号和以噪声频率为输出信号的黑箱测试理论模型;第二步,在加速工况下进行永磁同步电机噪声黑箱测试实验,分析永磁同步电机噪声的物理声学指标和心理声学指标,评价声品质;第三步,结合黑箱测试理论模型和黑箱测试实验,对永磁同步电机异常噪声源进行识别和诊断,进一步分析出各个异常噪声源对心理声学指标的噪声贡献量。所提方法不需永磁同步电机内部参数,例如结构参数和电磁参



数,仅利用噪声测试中转速信号和噪声信号就可识别与诊断出异常噪声源,极大地简化了以往研究中永磁同步电机异常噪声的分析过程,提高了效率。由于本方法遍历了所有转速,采用心理声学指标和物理声学指标相结合的方式评价永磁同步电机噪声,因此,通过本方法,可了解永磁同步电机噪声的全貌和声品质。进而,采用白箱方法,建立了计算异常噪声的三维边界元模型,应用声学边界元法预测和分析了永磁同步电机的异常噪声,并通过电机噪声测试实验验证了所提方法的正确性。理论研究和实验研究均表明:永磁同步电机电磁噪声具有明显的阶次特征,阶次不仅包含了偶数阶、开关频率附近阶次,还包含了大量奇数阶、甚至以往研究中被当做信号毛刺而忽略的分数阶。主要阶次有: $2h_i$ 、 $2h_j$ 、 $2(2\mu-1)$ 、 $h_i \pm h_j$ 、 $2\mu-1 \pm h_i$ 、 $2\mu-1 \pm h_j$ (h_i 、 h_j 为时间谐波电流阶次, $\mu \in N^*$)。当 h_i 或 h_j 是分数时,电磁噪声将出现分数阶特征频率。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 本课题研究的目的和意义	1
1.2 永磁同步电机电磁振动和噪声的研究现状	2
1.2.1 永磁同步电机非线性电磁力的研究现状	3
1.2.2 永磁同步电机结构模态的研究现状	9
1.2.3 永磁同步电机非线性电磁振动的研究现状	10
1.2.4 永磁同步电机电磁噪声的研究现状	12
1.3 电动车用永磁同步电机非线性电磁振动和异常噪声的 研究现状	14
1.3.1 永磁同步电机非线性电磁振动的研究现状	14
1.3.2 永磁同步电机异常噪声的研究现状	16
1.4 主要研究内容和技术路线	19
1.4.1 主要研究内容	19
1.4.2 采用的技术路线	19



第 2 章 电动车用永磁同步电机非线性电磁转矩波动分析	21
2.1 永磁同步电机电磁转矩的线性解析模型	22
2.2 永磁同步电机电磁转矩波动的非线性解析建模	23
2.2.1 考虑永磁体磁场非正弦分布的电磁转矩波动非线性 解析建模	23
2.2.2 考虑定子开槽的电磁转矩波动非线性解析建模	43
2.2.3 考虑时间谐波电流的电磁转矩波动非线性 解析建模	55
2.2.4 电动车用永磁同步电机的统一非线性解析模型	57
2.3 永磁同步电机电磁转矩波动的阶次特征分析	60
2.4 永磁同步电机高阶转矩波动实验研究	61
2.4.1 高阶转矩波动实验的技术瓶颈	61
2.4.2 高阶转矩波动信号的转速判据	62
2.4.3 高阶转矩波动实验的实施方案和技术要点	64
2.4.4 高阶转矩波动实验的测试结果和机理分析	64
2.5 本章小结	69
第 3 章 电动车用永磁同步电机非线性径向力分析	71
3.1 考虑时间谐波电流的永磁同步电机气隙磁场解析建模	71
3.1.1 气隙磁势	72
3.1.2 气隙磁导	75
3.1.3 气隙磁密	76
3.2 考虑时间谐波电流的永磁同步电机径向力波的解析建模	77
3.3 考虑时间谐波电流的永磁同步电机径向集中力的 解析建模	80
3.4 考虑时间谐波电流的永磁同步电机径向力阶次特征分析	86
3.5 本章小结	96

第 4 章 电动车用永磁同步电机模态分析和模态规划	98
4.1 外转子圆柱壳体的解析模态分析	99
4.1.1 外转子圆柱壳体的解析模态建模	99
4.1.2 长径比对模态解析模型计算精度的影响分析	110
4.2 永磁同步电机的有限元计算模态分析	116
4.2.1 三维结构有限元模型参数化建模过程和技术 要点	116
4.2.2 永磁同步电机模态参数的计算结果	119
4.3 永磁同步电机模态参数的实验识别	120
4.3.1 实验设备、参数设置和传感器布置	120
4.3.2 永磁同步电机模态参数的测量结果	122
4.4 基于非支配排序遗传算法的永磁同步电机模态规划	127
4.4.1 电磁力激励范围和模态频率的确定	127
4.4.2 基于非支配排序遗传算法和薄壳理论的 模态规划	130
4.5 本章小结	134
第 5 章 电动车用永磁同步电机非线性电磁振动建模和分析	136
5.1 非线性电磁振动的集中参数建模和分析	137
5.1.1 永磁同步电机非线性扭转振动建模和分析	137
5.1.2 永磁同步电机非线性径向振动建模和分析	144
5.2 永磁同步电机电磁振动的结构有限元分析	150
5.3 本章小结	153
第 6 章 电动车用永磁同步电机异常噪声源的诊断和异常噪声 分析	155
6.1 永磁同步电机异常噪声源诊断的黑箱方法	155
6.1.1 黑箱方法的建模过程	157