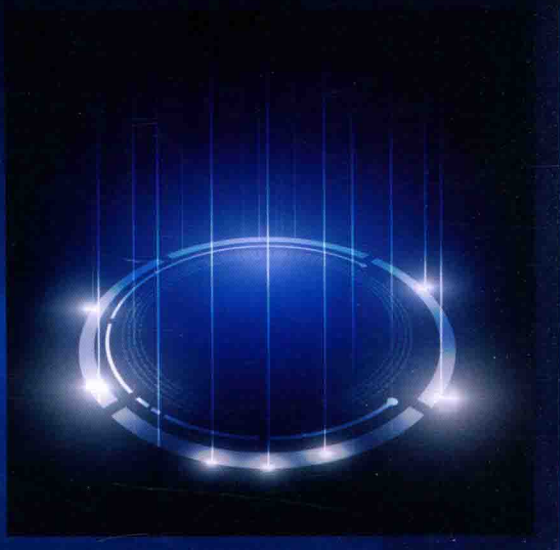


黄辉 胡余生◎等编著

永磁辅助同步磁阻电机 设计与应用



全面性、实用性、先进性

系统介绍永磁辅助同步磁阻电机的基本理论、设计及工程应用
多年研发经验的总结
体现该电机的最新发展和应用成果
理论联系实际，兼顾科研和产品开发

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



中南大学图书馆



101162985

TM351
HH

永磁辅助同步磁阻电机 设计与应用

黄 辉 胡余生 等编著



机械工业出版社

永磁辅助同步磁阻电机综合了同步磁阻电机和永磁电机的特点,可降低对永磁体性能的要求,具有功率密度高、效率高、成本低等优点,具有广泛的应用前景,可推广应用到空调、机械设备、新能源电动汽车等领域。

本书总结了作者多年从事永磁辅助同步磁阻电机的研究成果以及行业内的最新发展和应用成果,共分为6章:第1章介绍永磁辅助同步磁阻电机的发展历程和研究现状;第2章从该电机的运行原理入手,研究永磁体层数、气隙、绕组形式、永磁含有率、永磁体用量、永磁体剩磁对电机参数及性能的影响;第3章介绍该电机退磁及充磁的基本原理,探讨永磁体层数、永磁体厚度、极弧系数、隔磁桥、充磁方向、永磁体嵌入深度、绕组形式、定子裂比、极对数等参数对电机抗退磁能力的影响;第4章总结该电机电磁振动和噪声的产生机理,从绕组形式、电机磁路结构、变频器控制等多方面进行降噪设计研究;第5章研究该电机的控制原理和矢量控制策略;第6章介绍该电机在空调压缩机、新能源电动汽车及工业领域中的应用。

本书采用理论与实践相结合的写作原则,既阐述永磁辅助同步磁阻电机的基本原理和概念,又提供具体设计方法及应用案例,力求全面系统地介绍永磁辅助同步磁阻电机的研究成果。

本书既可供从事永磁电机及驱动研究、设计、制造和使用的科研人员、工程技术人员和科技管理人员使用,也可以作为高等学校电类专业师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

永磁辅助同步磁阻电机设计与应用/黄辉等编著. —北京:机械工业出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-111-57576-4

I. ①永… II. ①黄… III. ①永磁同步电机-磁阻电机-设计
IV. ①TM46

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第182123号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:江婧婧 责任编辑:翟天睿

责任校对:刘秀芝 封面设计:鞠杨

责任印制:孙炜

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2017年10月第1版第1次印刷

169mm×239mm·13.75印张·266千字

0 001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-57576-4

定价:59.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com



黄辉，1963年生，教授级高级工程师。现任珠海格力电器股份有限公司总工，兼任国家节能环保制冷设备工程技术研究中心主任，华中科技大学兼职教授及博士后合作导师，中国制冷学会副理事长，广东省制冷学会副理事长，广东省轻工业协会副理事长等。

入选“国家百千万人才工程”，并被授予“国家有突出贡献中青年专家”称号，享受国务院政府特殊津贴。先后荣获“广东省五一劳动奖章”“全国五一劳动奖章”等荣誉。

长期从事制冷和热泵、压缩机、电机领域的研究工作，主持、参与了国家科技支撑计划、国家火炬计划等9项国家级课题。曾获国家科学技术进步二等奖、广东省科学技术特等奖、中国制冷学会技术发明特等奖、中国专利优秀奖、广东省专利金奖等奖项。



胡余生，1978年生，教授级高级工程师，任空调设备及系统运行节能国家重点实验室副主任，享受国务院政府特殊津贴，曾获广东省轻工业协会科学技术突出贡献奖。

长期从事压缩机、磁悬浮轴承及控制、电机领域的研究工作，负责的5项新产品、新技术取得显著的经济和社会效益，鉴定达到“国际领先”水平。曾获国家科学技术进步二等奖、广东省科学技术特等奖、中国制冷学会技术发明一等奖、广东省专利金奖等奖项。获授权发明专利35项，其中4项美国发明专利，1项欧盟发明专利。

电话服务

服务咨询热线：010-88361066

读者购书热线：010-68326294

010-88379203

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

策划编辑◎江婧婧 / 封面设计◎鞠杨

试读结束：需要全本请在线购买：www.ertongbook.com

序

稀土永磁同步电机由于具有功率密度高、效率高、体积小、结构简单等优点，获得了广泛的应用。但由于稀土材料的紧缺和价格偏高，又限制了它的进一步推广。因此，争取少用稀土材料同时又能获得其优良性能成为电机业界的研究热点。由同步电机的磁阻现象引申而来的永磁辅助同步磁阻电机，由于可以减少稀土材料的用量，甚至改用铁氧体永磁材料，同时仍有可能获得稀土永磁同步电机同等优良的性能，因此国内外学者都积极开展研究，提出不同方案，力促其实现。

珠海格力电器的研究团队从2005年开始进行攻关，取得了技术突破。不仅制造出性能优良的电机产品，解决了该电机特有的噪声和振动问题，而且显著降低了电机的成本。该团队已研制出5个系列的铁氧体永磁辅助同步磁阻电机，成功应用于变频压缩机及空调系统中，取得了巨大的经济效益，也充分证明了企业是创新主体的事实。

当我见到黄辉和胡余生等同志编著的书稿，看到书中充分反映了他们的研究团队多年以来从事永磁辅助同步磁阻电机研发的丰硕成果以及行业内的最新发展和应用情况，而且还对电机的设计做了非常详细清晰的论述，感到十分高兴。

这种类型的电机不仅适用于空调，而且在其他家用电器以及电动汽车和工业用电机等领域都有广阔的应用前景。相信国内电机行业的从业者对其感兴趣的人很多，但相关参考书却很少，有此一册在手，等于有了一个可靠的工作指南，真可省去很多摸索的功夫。

随着我国经济建设事业的发展，相信对各种电机的市场需求会越来越大，但我们的知识却可能不足以应付。有些人往往热衷于引进，以为把国外的企业收购进来就万事大吉。但根据我的体会，深知路是要靠自己的双脚一步一步走出来的，事实证明想靠别人背我们登上高峰，终究只能是幻想。

我自1958年大学毕业以来，长年在电机厂从事技术工作，虽然也想多做贡献，但由于各种因素所限，往往不如人愿。所以我很羡慕年轻的一代，你们切莫辜负了美好时光，要加紧努力，做出比我们这一代更加光荣伟大的业绩。

中国工程院院士
前四川东方电机厂总工程师 饶芳权

前 言

永磁辅助同步磁阻电机结合了永磁同步电机和同步磁阻电机的特点，同时使用磁阻转矩和永磁转矩，降低了对永磁体的性能要求，仅需使用较少的稀土永磁体，甚至直接使用铁氧体永磁体，就可能达到稀土永磁同步电机的能效水平。该电机具有功率密度高、效率高、调速范围宽、成本低等显著优点，而且可以减少稀土的消耗，具有广阔的应用前景。

该电机于20世纪80年代被提出，随着稀土资源的不断消耗，近年来已成为电机科研人员和工程技术人员的研究热点。作者所在的团队长期从事永磁辅助同步磁阻电机的技术研究和产品开发，在该电机的理论研究、设计方法、控制技术和工艺制造等方面积累了大量经验，同时对该电机在变频空调压缩机、电动汽车、工业电机等领域的应用也进行了研究。

为了促进永磁辅助同步磁阻电机的技术进步和推广应用，也为了推动我国电机行业的可持续发展，特将作者多年来从事永磁辅助同步磁阻电机的研究成果进行总结，并结合国内外研究结果，对该电机的基本理论、设计及工程应用等方面进行研究分析和探讨。

本书采用理论与实践相结合的写作原则，既阐述了永磁辅助同步磁阻电机的基本原理和概念，又提供了具体设计方法及应用案例，力求全面系统地介绍永磁辅助同步磁阻电机的研究成果。

本书的主要内容由黄辉和胡余生撰写，参加撰写的还有陈彬、肖勇、史进飞、周博、王长恺、区均灌、米泽银、陈华杰、孙文娇和刘亚祥，协助整理文稿和绘图的有李权锋、吴曼、王敏、张辉，全书由黄辉负责定稿。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

作者

目 录

序

前言

第1章 绪论	1
1.1 永磁辅助同步磁阻电机的发展历程	1
1.2 永磁辅助同步磁阻电机的研究现状	4
第2章 永磁辅助同步磁阻电机的参数及特性	11
2.1 电机基本结构及运行原理	11
2.2 电机的磁路模型	13
2.2.1 空载磁路模型	13
2.2.2 交轴磁路模型	16
2.2.3 直轴磁路模型	17
2.3 电感参数的仿真与测试	18
2.3.1 d 、 q 轴电感参数的仿真计算	18
2.3.2 d 、 q 轴电感参数的测试	19
2.3.3 磁路饱和对 d 、 q 轴电感的影响	21
2.4 电机结构对参数及性能的影响	23
2.4.1 永磁体层数对参数的影响	23
2.4.2 气隙对电感参数的影响	26
2.4.3 绕组形式对电机参数的影响	27
2.4.4 永磁含有率对参数的影响	28
2.4.5 永磁体用量对电机参数及性能的影响	29
2.4.6 永磁体剩磁对电机参数及性能的影响	32
2.5 电机参数对输出转矩及功率的影响	34
2.5.1 最小直轴磁链对输出特性的影响	34
2.5.2 凸极比对输出特性的影响	35
第3章 永磁辅助同步磁阻电机的充磁及抗退磁	42
3.1 充磁的基本原理	42
3.1.1 永磁体磁化原理	42
3.1.2 充磁磁场产生方式	43
3.1.3 电机充磁工艺	45
3.2 永磁辅助同步磁阻电机的充磁问题	46
3.2.1 转子充磁受力分析	46

3.2.2	减小转子充磁偏转转矩的方法	48
3.3	退磁的基本原理	49
3.3.1	磁滞回线及退磁曲线	49
3.3.2	回复线	50
3.3.3	内禀退磁曲线	51
3.4	退磁磁路模型	51
3.5	电机结构对抗退磁的影响	53
3.5.1	永磁体层数对抗退磁的影响	53
3.5.2	充磁方向对抗退磁的影响	55
3.5.3	永磁体厚度对抗退磁的影响	58
3.5.4	极弧系数对抗退磁的影响	61
3.5.5	永磁体沉入深度对抗退磁的影响	62
3.5.6	隔磁桥厚度对抗退磁的影响	63
3.5.7	绕组形式对抗退磁的影响	65
3.5.8	定子裂比对抗退磁的影响	66
3.5.9	极对数对抗退磁的影响	67
3.5.10	各层永磁体抗退磁一致性改善的示例	69
第4章	永磁辅助同步磁阻电机振动和噪声	71
4.1	噪声的一般概念及噪声源	71
4.1.1	振动、声波、噪声	71
4.1.2	电机的噪声源	74
4.2	永磁辅助同步磁阻电机电磁振动和噪声产生原理	75
4.2.1	能量传递过程	75
4.2.2	定子固有振动特性	76
4.2.3	定、转子磁动势和气隙磁导	78
4.2.4	电磁力解析表达式	80
4.2.5	电机电磁力及振动和噪声仿真分析	84
4.2.6	转矩脉动对电机振动和噪声的影响	86
4.2.7	变频器供电对电机噪声的影响	89
4.2.8	偏心对电机振动和噪声的影响	92
4.2.9	磁饱和、磁致伸缩等对电机振动和噪声的影响	96
4.3	永磁辅助同步磁阻电机振动和噪声抑制技术	97
4.3.1	整数槽绕组与分数槽绕组的选择	97
4.3.2	定子齿靴切边设计	100
4.3.3	永磁体槽不对称设计	101
4.3.4	极弧优化和磁极削角	102
4.3.5	变频器降噪控制技术	107
4.3.6	其他电机本体降噪技术	111

4.4 机械和空气动力源的振动和噪声	114
4.4.1 机械噪声	114
4.4.2 空气动力噪声	116
第5章 永磁辅助同步磁阻电机的驱动控制	118
5.1 矢量控制	118
5.1.1 坐标变换	118
5.1.2 数学模型	120
5.1.3 电压空间矢量调制技术	121
5.2 永磁辅助同步磁阻电机电流控制策略	124
5.2.1 单位功率因数控制	124
5.2.2 MTPA 控制	125
5.2.3 最大效率控制	127
5.3 永磁辅助同步磁阻电机弱磁控制技术	130
5.3.1 电压极限圆和电流极限圆	130
5.3.2 弱磁控制原理	133
5.3.3 弱磁控制方法	134
5.3.4 弱磁效果分析	138
5.4 永磁辅助同步磁阻电机无传感器控制技术	140
5.4.1 基于电机数学模型的开环估计法	140
5.4.2 模型参考自适应	141
5.4.3 滑模观测器	146
5.4.4 扩展卡尔曼滤波器	148
5.4.5 旋转高频电压注入法	149
5.4.6 脉振高频电压注入法	151
5.4.7 PWM 载波成分法	154
5.5 永磁辅助同步磁阻电机参数自整定策略	155
5.5.1 永磁辅助同步磁阻电机控制环路设计	155
5.5.2 永磁辅助同步磁阻电机参数辨识	160
第6章 永磁辅助同步磁阻电机的应用	165
6.1 在空调压缩机中的应用	165
6.1.1 变频压缩机的特性要求	165
6.1.2 在变频压缩机中的应用	166
6.2 在新能源电动汽车中的应用	174
6.2.1 新能源电动汽车的类型与特点	174
6.2.2 新能源电动汽车电机驱动系统	174
6.2.3 新能源电动汽车电机的特性要求	174
6.2.4 应用案例	175
6.3 在工业领域中的应用	181

6.3.1 电机能效标准	181
6.3.2 工业电机应用案例	181
6.4 总结与展望	184
附录	185
附录 A 电机测试方法	185
A.1 感应电动势常数测试方法	185
A.2 转子的转动惯量测试方法	185
A.3 电气时间常数测试方法	187
A.4 转矩波动系数测试方法	188
A.5 齿槽转矩测量方法	188
A.6 温升测试方法	189
A.7 噪声测试方法	189
附录 B 常用硅钢片磁化曲线及铁损曲线	193
附录 C 常用永磁体的性能参数及退磁曲线图表	197
参考文献	206

第 1 章 绪 论

21 世纪以来,我国煤、石油、天然气等不可再生资源消耗巨大。并且随着全球变暖及环境污染问题的日益加剧,低碳、节能、环保在全世界范围内受到了越来越广泛的关注。

据 2015 年《中国电机行业市场调查研究报告》统计,全国现有各类电机系统总装机容量超过 4 亿 kW,其用电量约占全国用电量的 60%。目前的电机系统多采用异步电机,运行效率低,浪费了大量的电能。而永磁电机相比于异步电机具有结构简单、运行可靠、体积小、重量轻、损耗少、效率高等显著优点,可广泛替代异步电机。

随着永磁材料的发展,特别是高性能的钕铁硼永磁体问世后,永磁电机的研究取得了长足的进步。高性能钕铁硼永磁体的应用,显著提高了永磁电机的效率及功率密度。目前永磁电机的功率范围从几毫瓦到几千千瓦,应用领域从玩具、机械设备到舰船牵引动力装置,在国民经济、军事、工业、航空航天等方面都得到广泛应用。

目前永磁电机大多采用稀土钕铁硼永磁体,稀土永磁体使用量大。我国的稀土储量约占世界稀土储量的 1/3,但每年的开采量却达到了世界总开采量的 90% 以上,稀土储量占世界总储量的比例逐年降低,同时稀土的开采带来了诸多的环境破坏问题。

为减轻永磁电机对稀土的依赖,减少稀土开采对环境的破坏,并且大幅降低永磁电机成本,急需研发一种少稀土乃至无稀土的高效电机。

永磁辅助同步磁阻电机结合了永磁同步电机和同步磁阻电机的特点,该电机充分利用磁阻转矩和永磁转矩,具有功率密度高、效率高、调速范围宽及体积小、重量轻等显著优点。相比于永磁同步电机,永磁辅助同步磁阻电机可以减少永磁体用量,降低对永磁体的性能要求,具有广阔的应用前景。

1.1 永磁辅助同步磁阻电机的发展历程

永磁辅助同步磁阻电机是从同步磁阻电机演变而来的。早在 19 世纪初,研究人员观察到转动的普通电励磁同步电机的励磁绕组断开时,电机仍没有停转,从而发现了磁阻现象。从此,专家学者开始了对磁阻电机的研究。

1923 年, Kostko J K 在美国工业工程师协会期刊上提出了多相反应同步电机

(Polyphase Reaction Synchronous Motors) 的概念及转子结构, 如图 1-1 所示, 并预言到这种电机未来会被广泛应用。这种电机就是同步磁阻电机的雏形。

与此同时, 凸极同步电机双反应理论的提出, 特别是派克 (Park) 方程的建立, 使电机的理论分析从定性分析阶段跨越到比较严格的以数学模型为基础的数理分析阶段, 对凸极电机中磁阻转矩的分析有了质的突破, 推动了同步磁阻电机的研究。

1965 年 1 月, 德国布伦瑞克工业大学的 Brinkman 发表的论文《利用反应原理改良电机的理论和实验研究》(Theoretische und experimentelle untersuchen an einem motor mit verbesserter ausnutzung des reaktionsprinzips) 中提到了一种改良的同步磁阻电机转子结构, 如图 1-2 所示, 可以提高电机的功率因数和效率。

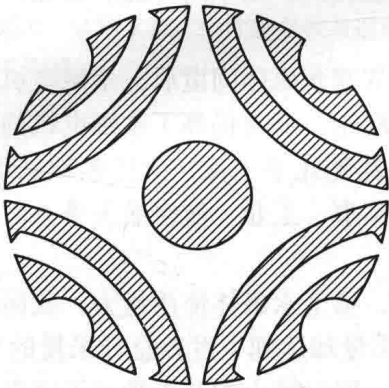


图 1-1 多相反应同步电机转子结构示意图

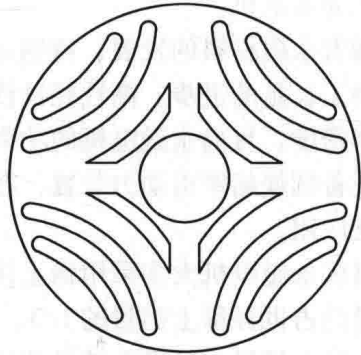


图 1-2 改良的同步磁阻电机转子结构

另一种典型的早期同步磁阻电机的转子结构如图 1-3 所示, 通过在凸极转子中设置双层磁障, 增加 d 、 q 轴的磁阻差来提高磁阻转矩。由于当时的换向器频率很低, 因此必须在转子上安插鼠笼条产生异步起动转矩。这种结构的同步磁阻电机最高凸极比不超过 2, 电机效率和功率因数都很低, 且在起动过程中会有严重振荡的问题, 所以未能在工业上得到广泛应用。

随着电机设计理论和电力电子技术的发展, 出现了第二代同步磁阻电机, 如图 1-4 所示。该电机通过分块拼装结构来增加凸极比, 凸极比可以达到 5~6, 同时去掉笼型转子, 直接使用逆变器变频起动, 削弱了转子振荡现象。但是该电机工艺结构复杂, 并且为了产生大的磁阻转矩需要增大定子侧励磁电流, 而效率和功率因数仍然较低, 致使该种电机未得到推广使用。

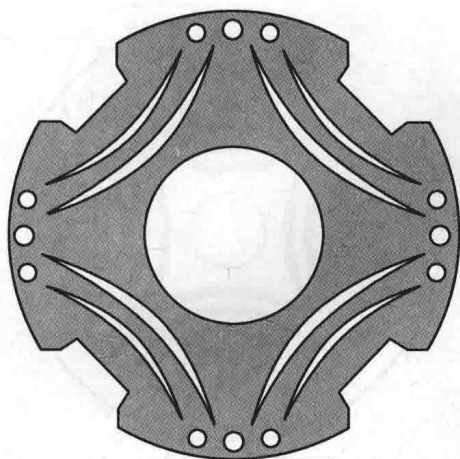


图 1-3 早期同步磁阻转子结构

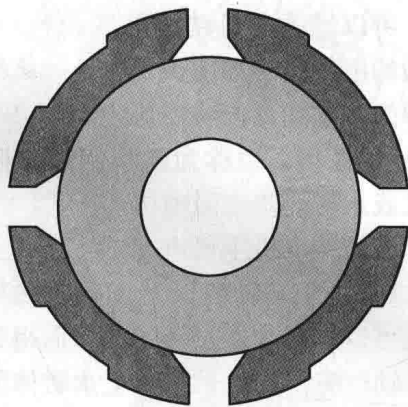


图 1-4 第二代同步磁阻电机结构

为尽可能增大 d 、 q 轴的磁阻差，同时减小励磁电流，增大功率因数，在 20 世纪 70 年代初期产生了第三代同步磁阻电机，其转子结构如图 1-5 所示。其中一种为轴向叠压式 (ALA) 转子，如图 1-5a 所示，即将导磁材料和非导磁材料按一定厚度比沿轴向交替叠压，可以获得最大的 q 轴电感和最小的 d 轴电感，从而实现磁阻转矩的最大化。这种电机的转矩密度、效率和功率因数都较高，但加工工艺复杂、机械强度较低，制约了其在工业中的应用。另一种为横向叠压式 (TLA) 转子，如图 1-5b 所示。通过在转子硅钢片中冲压多个空气磁障来产生 d - q 轴磁阻差异。此种电机转子结构简单、机械强度高，更适合工业大批量生产。

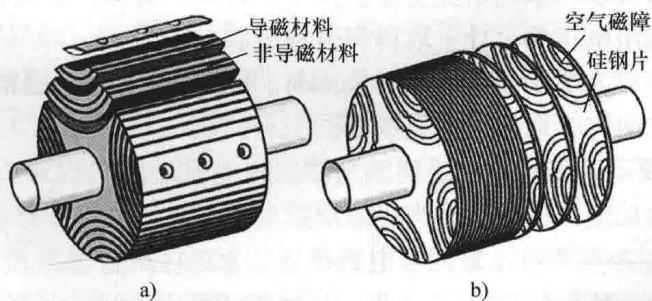


图 1-5 第三代同步磁阻电机转子结构

a) 轴向叠压式转子结构 b) 横向叠压式转子结构

事实上，同步磁阻电机普遍存在一个问题，即为获得足够大的转矩，需要定子侧提供较大的励磁电流，因此牺牲了效率和功率因数。

20 世纪 80 年代后期，电机研究人员发现在同步磁阻电机转子的多层磁障中

添加适量永磁体, 提供 d 轴方向的永磁磁通, 可以提高电机功率因数和转矩密度, 典型的电机结构如图 1-6 所示。该结构电机即为永磁辅助同步磁阻电机 (PMASynRM) 的原型, 也称为新型同步磁阻永磁电机或永磁同步磁阻电机。

该结构电机主要有如下特点:

1) 由于 q 轴磁路上无隔磁磁障, 磁力线可以顺畅地通过转子, 从而得到较大的 q 轴电感。而 d 轴磁路上永磁体的磁导率接近于气隙, 阻碍了磁力线的通过, 得到了较小的 d 轴电感, 从而提供较大的磁阻转矩。

2) 永磁体镶嵌在 d 轴方向上的多层磁障里, 提供永磁转矩。

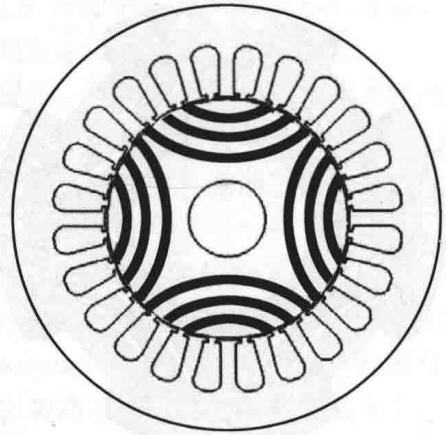


图 1-6 永磁辅助同步磁阻电机结构

1.2 永磁辅助同步磁阻电机的研究现状

自 20 世纪 80 年代后期永磁辅助同步磁阻电机发明以来, 专家学者对其进行了广泛的关注和研究。

1992 年, 在 IEEE IAS 年会组织的同步磁阻电机的专题研讨会上, 诸多学者对永磁辅助同步磁阻电机的基本理论和应用进行了分析讨论, 随后许多国家的专家学者都对其展开了一系列研究工作。其中以日本、美国、意大利等为代表, 在永磁辅助同步磁阻电机的设计上取得突破性进展。

日本大阪府立大学的 Morimoto、Sanada、Inoue 等人对永磁辅助同步磁阻电机展开了系统的研究, 取得了一定成效。

2001 年, 该团队研究了永磁辅助同步磁阻电机磁障层数对 L_d 、 L_q 及永磁磁链的影响, 结构如图 1-7 所示。当磁障层数为 4 层时, 电机具有最优性能, 效率可达到 94.4%, 与同容量永磁同步电机接近, 永磁体用量仅为其 1/4。同时通过磁障端部设计对齿槽转矩进行了优化, 齿槽转矩降低 50%。并校核了电机高速运行 (6000 r/min) 下转子的机械强度, 最大应力为 65.9N/mm^2 , 具有 5 倍的安全系数。

2004 年, 该团队研究了磁障末端与定子齿边缘的相对位置对转矩脉动的影响, 并设计了非对称磁障结构的 36 槽 4 极永磁辅助同步磁阻电机进行验证。其转子结构如图 1-8 所示, 以转子上的某一极为基准, 将每极下内层磁障的末端位置逐一偏离 $n\delta$, 其中 $\delta = \tau_s/p$, n 为不大于 p 的整数, τ_s 为定子槽距角, 外层磁

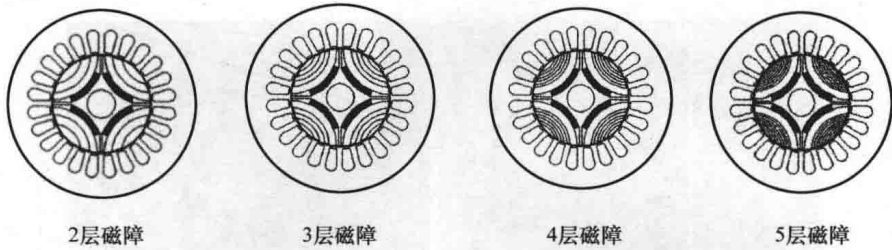


图 1-7 不同磁障层数永磁辅助同步磁阻电机结构

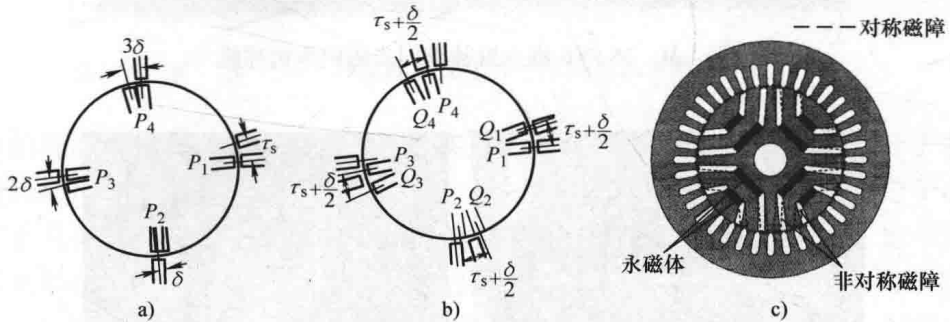


图 1-8 非对称磁障转子对比示意图

a) 第 1 层磁障偏移距离 b) 第 2 层磁障偏移距离 c) 非对称磁障转子对比示意图

障和内层磁障末端距离为 $\tau_s + \delta/2$ 。此种不对称磁障转子设计能够避免定转子槽对齐时的齿槽效应，从而抑制转矩脉动。

2011 年，Morimoto 等人开始专注于研究铁氧体永磁辅助同步磁阻电机，通过增加最外层永磁体厚度，磁障端部锥化设计，使得电机在最大去磁电流时只有 0.6% 的不可逆退磁，抗退磁能力显著提高。并设计了一款 2.5kW 的 36 槽 6 极永磁辅助同步磁阻电机，样机如图 1-9 所示。该电机实测最大效率为 91.9%，其功率密度和效率与同容量内置式永磁同步电机相近。同时指出由于铁氧体永磁辅助同步磁阻电机磁阻转矩占比大，因此相比于稀土永磁电机受永磁体退磁的影响更小。

2013 年，该团队对采用黏结稀土永磁体的永磁辅助同步磁阻电机进行了研究，指出在两层磁障及分布绕组的电机结构下，放置适量的永磁体同样能够达到较优的电机性能。并与相同容量下采用烧结稀土永磁体的永磁同步电机进行对比，指出永磁同步电机具有较小的铜损，中低频效率较高，而永磁辅助同步磁阻电机具有更优的弱磁性能及更低的铁损，在运行范围及高频效率上更有优势。

同期，Morimoto 等人设计了一台电动汽车用 48 槽 8 极铁氧体永磁辅助同步磁阻电机，样机如图 1-10 所示。通过增加永磁体厚度及中间磁障设计优化抗退磁能力，同时对电机的机械强度进行了校核。通过实验验证，该样机在较宽的转

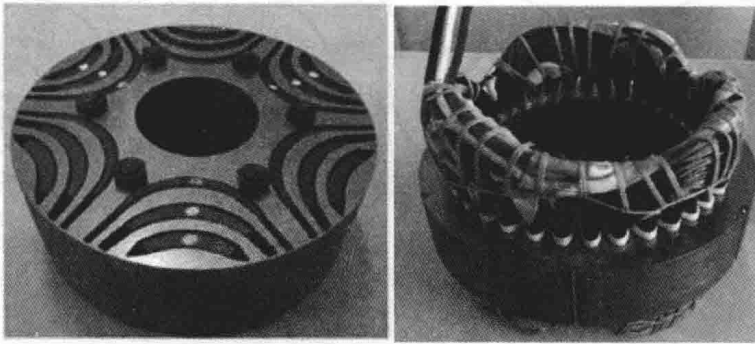


图 1-9 36 槽 6 极永磁辅助同步磁阻电机样机

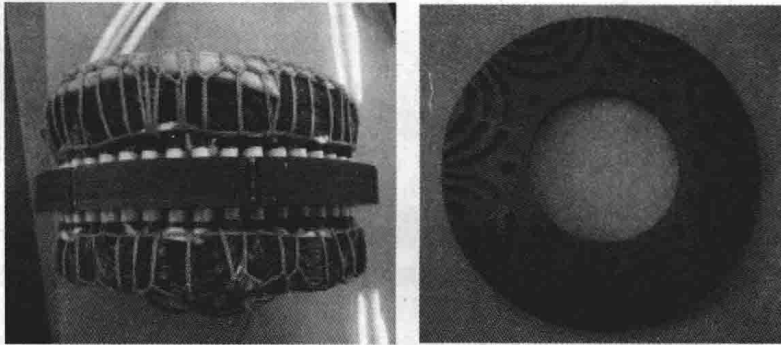


图 1-10 48 槽 8 极铁氧体永磁辅助同步磁阻电机样机

速运行范围内功率密度大于 5kW/L ，最大功率密度达到 6.8kW/L ，最大效率为 95.5% ，与第二代丰田普锐斯电动汽车驱动用永磁同步电机效率相当。

在此基础上，Morimoto 等人对该样机的转矩脉动进行了优化，转子结构如图 1-11 所示。永磁体采用方形结构并且分段插入，转子采用不对称磁障结构，保持一个极下的磁障位置不变（标记为 Type_A），相邻极的第 2 层磁障沿着磁极对称轴向最外层永磁体方向偏移 1.4° （标记为 Type_1.4），以此改变瞬时转矩的相位。仿真结果表明，在输出转矩不变的情况下，优化电机的转矩，脉动可降低 50% 。

美国威斯康星大学麦迪逊分校的 Staton D A 等人对轴向叠片的永磁辅助同步磁阻电机进行了深入研究，分析了转子层数、饱和及叠片结构对转矩特性的影响。并对该电机的极数、绝缘含有率、气隙长度进行了有限元仿真优化，提升了电机的凸极比。该团队和 Soong W L 合作设计出一台 7.5kW 三明治式的轴向叠片永磁辅助同步磁阻电机。

同时，该校的 Han S H, Jahns T M 等人指出一般内置式永磁同步电机额定负