



赵朝会 张卓然 秦海鸿 著

混合励磁电机的 结构及原理



科学出版社

www.sciencep.com

TM33
Z292

混合励磁电机的结构及原理

赵朝会 张卓然 秦海鸿 著

科学出版社

北 京

TM33
Z292

内 容 简 介

本书在系统总结混合励磁电机发展和研究现状的基础上,提出了新型混合励磁同步电机和混合励磁双凸极电机结构形式;讨论了其工作原理和运行特性;系统论述了转子磁分路混合励磁同步电机的磁路计算、三维有限元分析与建模方法;探讨了并列式混合励磁同步电机中切向磁钢永磁同步电机和电励磁同步电机的设计规律以及并列式混合励磁同步电机的运行特性、轴向漏磁等特殊问题;研究了并列式混合励磁双凸极电机的静态特性、发电方式和电动运行工作特性。

本书可作为高等院校电气工程学科的硕士生、博士生和教师的参考书,也可供从事电气传动和发电系统研究开发的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

混合励磁电机的结构及原理/赵朝会,张卓然,秦海鸿著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-026986-7

I. 混… II. ①赵…②张…③秦… III. 励磁机 IV. TM33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 042495 号

责任编辑:姚庆爽/责任校对:钟 洋

责任印制:赵 博/封面设计:鑫联必升

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2010 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 3 月第一次印刷 印张:19

印数:1—3 000 字数:336 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

现代社会电气化程度不断提升,航空航天、工业控制等领域对电力需求越来越大,电气设备不断增多,电机的应用越来越广泛。随着电工材料、电力电子技术和计算机技术的快速发展,电机已不再是一个孤立的器件,往往与控制系统一道构成高性能发电或驱动系统。这样,无论是发电机,还是电动机,都迫切需要电机技术向更高水平发展,新结构、新原理电机(磁阻电机、混合励磁电机、超声电机乃至微/纳米电机等)的研究引起学者的高度关注和研究兴趣。

混合励磁电机力求最大程度综合永磁电机高效高功率密度和电励磁电机控制方便的优势而克服它们的不足,成为电机领域研究的一个热点。由于励磁方式的变化,混合励磁电机结构的复杂程度不得不有所增加,寻求简单、合理的电机本体结构是一个很重要且富有挑战的研究课题。

赵朝会、张卓然和秦海鸿等围绕混合励磁电机新结构探索方面做了非常有价值的研究工作:在转子磁分路混合励磁同步电机和并列式混合励磁同步电机的新结构拓扑、电磁场分析和建模方法方面开展了系统、深入的研究;在混合励磁双凸极电机结构拓扑和运行特性方面也进行了深入研究。三位教授的研究成果系统地汇聚成《混合励磁电机的结构及原理》这本著作,丰富了混合励磁电机的结构形式,拓宽了混合励磁电机的研究思路,对推动该类新型电机技术发展和应用具有重要意义。近些年来,关于电机本体研究方面的著作较少,这本专门针对新型电机本体研究的著作对于其他新结构电机的研究也有很好的借鉴作用。

混合励磁电机的研究尚处于不断完善的过程中,希望作者坚持研究方向、持续创新、再接再厉,在混合励磁电机本体结构的优化及其控制技术方面做出更多、更大的成绩,为新型混合励磁电机早日应用于航空电源系统、新能源发电及驱动系统做出贡献!

中国科学院院士



2010年1月9日

序 二

1969年钕钴永磁材料诞生,它具有高的剩磁感应强度、高矫顽力和线性去磁曲线,使永磁电机的功率重量比和电气性能显著提升,受到航空电气界的高度重视。20世纪70年代,国外研制了 $150\text{kV}\cdot\text{A}$ 飞机永磁发电机和额定容量 $60\text{kV}\cdot\text{A}$ 应用钕钴永磁电机的飞机变速恒频起动发电系统。后者还在美国A-10飞机上进行了飞行试验。但是由于永磁电机调磁困难,在发电机运行发生电机内部短路时无法灭磁,导致短路故障扩大,危害飞机飞行安全,而不得不放弃。与此同时,由稀土永磁构成的无刷直流电动机迅速发展,不仅在航空航天领域得到了广泛运用,在其他工业部门也得到了广泛应用。在用作电动汽车驱动电机时,遇到了恒功率调速范围小,弱磁升速困难的问题。

因此,国内外学者早在20世纪80年代就开始研究混合励磁电机,以使这类新的电机既有稀土永磁电机体积重量小和效率高的优点,又能调节气隙磁场,满足多方面使用要求的优点。赵朝会、张卓然和秦海鸿的新书《混合励磁电机的结构及原理》不仅对国内外学者以往研究成果进行了归纳总结,同时对三种混合励磁电机的新结构进行了深入浅出的阐述。

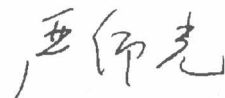
混合励磁电机发展的关键是构思电机的合理结构。已发表的混合励磁电机大多数为无刷结构,因此,无刷结构已成为各国学者对混合励磁电机的共识。国内外研究较多的转子分割型混合励磁电机采用铁心极和永磁极交叉排列的结构,巧妙地实现了电励磁和永磁磁势的并列,减小了电励磁磁势,扩大了调磁范围,防止了永磁体的退磁。该结构的不足是必须使用机壳作为轴向磁路,表贴的永磁体限制了气隙磁密的提高,从而限制了电机功率密度的升高,不用电机壳体作为电机的轴向磁路已成为各国学者追求的目标。有的混合励磁电机作为交流发电机或电动机使用,有的作为直流电机使用,有的既可作交流电机也可作直流电机使用。作交流电机时电机的频率、相数和波形必须与现有正弦交流电源一致,约束条件更多。仅作直流电机使用时约束条件较少。划分电机的交直流应用背景,有助于拓展思路,提出更好的混合励磁电机结构形式。由永磁同步电机与磁阻电机并列构成的混合励磁电机是两种不同类型电机的组合,这种新的尝试可发挥不同类型电机各自的优势,以期达到“一加一大于二”的目的。磁场定向控制和直接转矩控制使交流电机具有直流电机的特性而得到广泛应用,同样,混合励磁电机与电力电子变换和控制技术的组合,必将进一步发掘混合励磁电机的潜能。

经过近30年国内外学者的努力,混合励磁电机已从基础研究、应用基础研究

转入了工业应用的阶段。例如,俄罗斯已将混合励磁无刷直流发电机用于火箭和导弹的电源,显著地提高了电源的可靠性和环境适应性,从而提高了武器的战术和技术性能。法国的电动汽车专家对异步电机、永磁同步电机和混合励磁电机在电动汽车整个工作转速范围内的运行情况进行了比较,指出混合励磁电机效率最高。有专家指出,混合励磁发电机在直驱风力发电机方面有重要应用价值,与永磁电机相比,不仅永久磁钢用量减小,电机成本降低,且具有调磁能力,可以省去脉宽调制型整流器,有助于提高风力发电机系统的可靠性和降低运行成本。

《混合励磁电机的结构及原理》的出版将推动对该类电机的研究和应用,促进我国装备制造业的发展。

南京航空航天大学



2010年1月

前 言

混合励磁是永磁励磁与电励磁两种励磁方式的有机结合。混合励磁电机力求继承永磁电机的优点,同时使其具有气隙磁场调节能力,用作发电机可提供恒压电源,用作电动机具有起动转矩大、调速范围广的优势,在许多工业领域和航空航天、新能源发电与驱动等领域具有重要的应用前景。探索合理的混合励磁电机结构形式是推动混合励磁电机技术发展和应用的重要环节。

本书内容力求反映作者多年来在混合励磁电机领域中取得的理论研究成果和技术上的最新进展。全书共分4章。第1章论述了混合励磁电机的基本概念,并系统总结了混合励磁电机的研究现状;第2章围绕提出的新型转子磁分路式混合励磁同步电机,从磁路计算、三维有限元分析与结构优化、建模方法等方面开展了深入研究;第3章讨论了并列式混合励磁同步电机的结构原理、设计规律以及发电运行的三种工作模式;第4章系统研究了并列式混合励磁双凸极电机的静态特性、发电运行和电动运行特性。

书中所述并列式混合励磁双凸极电机、切向结构混合励磁同步电机分别于2007年和2009年通过了国防科技成果鉴定,鉴定委员会认为,并列结构双凸极混合励磁电机和切向结构混合励磁同步电机创新点突出,具有良好的应用前景,处于国内领先水平,达到了国际先进水平。

南京航空航天大学严仰光教授早在十多年前就敏锐地意识到混合励磁电机研究的重要性,指导作者开展了系统的研究工作,并在百忙中详细、认真审阅了全部书稿,提出了许多宝贵建议;赵淳生院士对作者在混合励磁电机方面的研究工作给予了充分肯定和鼓励,并欣然为本书作序;南京航空航天大学航空电源重点实验室的领导和老师们对本书的研究工作给予过许多指导和帮助;上海电机学院的领导、专家对本书的出版给予了大力支持,黄振琳老师为本书的编排做了大量工作,本书的出版得到了上海市教育委员会电力电子与电力传动重点学科(J51901)的资助。在此,作者谨向他们表示衷心的感谢!

关于混合励磁电机的研究仍处于不断发展和完善的过程中,鉴于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2009年12月

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 混合励磁电机的基本概念及研究现状	1
1.1 混合励磁电机的基本概念	1
1.2 混合励磁电机的分类	2
1.3 混合励磁电机的研究现状	2
1.3.1 混合励磁同步电机的研究现状	2
1.3.2 混合励磁双凸极电机的研究现状	11
1.4 混合励磁电机的特点与基本要求	15
1.5 混合励磁电机的应用前景	16
1.5.1 航空电源系统	16
1.5.2 风力发电系统	18
1.5.3 电动汽车驱动系统	19
1.6 小结	20
第 2 章 转子磁分路式混合励磁同步电机	21
2.1 转子磁分路式混合励磁同步电机结构的提出	21
2.1.1 永磁同步电机的典型结构	21
2.1.2 转子磁分路式径向结构混合励磁同步电机	22
2.1.3 转子磁分路式切向结构混合励磁同步电机	27
2.2 转子磁分路式切向结构混合励磁同步电机的等效磁路	30
2.2.1 双向励磁下的等效磁路	31
2.2.2 径向磁路磁化特性	32
2.2.3 轴向磁路磁化特性	34
2.2.4 径/轴向磁场分布与磁路特点	36
2.3 转子磁分路式切向结构混合励磁同步电机调磁特性的影响因素	43
2.3.1 转子磁分路作用的基本约束关系	43
2.3.2 转子长径比对电机调磁特性的影响	44
2.3.3 极对数对电机调磁特性的影响	45
2.3.4 永磁体结构对电机调磁特性的影响	47
2.3.5 主气隙/附加气隙长度比对电机调磁特性的影响	51

2.3.6	转子导磁体延伸段截面积对电机调磁特性的影响	54
2.4	转子磁分路式切向结构混合励磁同步电机的三维场分析与结构优化 ...	56
2.4.1	三维静磁场分布	56
2.4.2	导磁桥结构优化	59
2.4.3	转子 N 极、S 极导磁体结构(延伸端及过渡段)优化与等截面原则	62
2.4.4	不同磁钢宽度下的气隙磁场调节性能	66
2.4.5	漏磁特性与补偿磁钢的作用	68
2.5	转子磁分路式切向结构混合励磁同步电机的电枢反应	72
2.5.1	直轴与交轴电枢反应磁通路径	72
2.5.2	基于电枢反应计算确定励磁磁势的基本方法	74
2.6	转子磁分路式切向结构混合励磁同步电机的运行特性	79
2.6.1	瞬态场路耦合模型	79
2.6.2	空载特性	80
2.6.3	外特性	81
2.6.4	短路特性	82
2.7	基于三维有限元分析结果的 MATLAB/Simulink 建模方法	85
2.7.1	基于三维静磁场分析的主气隙磁通变化特性	85
2.7.2	基于三维瞬态场路耦合分析的同步电抗计算	85
2.7.3	MATLAB/Simulink 建模方法	88
2.8	小结	92
第 3 章	并列式混合励磁同步电机	94
3.1	并列式混合励磁同步电机的结构	94
3.2	并列式混合励磁同步电机的磁路特点与运行原理	97
3.3	并列式混合励磁同步电机中永磁同步电机	98
3.3.1	切向结构永磁同步电机的结构	98
3.3.2	切向结构永磁同步电机磁钢厚度和气隙磁密的关系	99
3.3.3	切向结构永磁同步电机的非导磁衬套	103
3.3.4	切向结构永磁同步电机辅助磁极的优化	107
3.3.5	切向结构永磁同步电机的优化	115
3.3.6	设计实例	116
3.4	电励磁同步电机部分的三维场分析与设计规律	127
3.4.1	不同励磁磁势下气隙磁场的变化规律	127
3.4.2	铁心长度与气隙磁场调节范围的关系	129
3.5	轴向漏磁现象及其对磁场特性的特殊影响	133
3.5.1	轴向漏磁通的存在与路径	133

3.5.2 双向励磁下轴向漏磁分布与三维场有限元分析	134
3.5.3 轴向漏磁对电励磁部分调磁性能的影响	137
3.5.4 轴向漏磁对永磁部分气隙磁场的影响	138
3.6 并列式混合励磁同步发电机的运行特性	139
3.6.1 并列式混合励磁同步发电机的结构尺寸	139
3.6.2 电励磁同步发电机的空载和负载特性	146
3.6.3 并列式 HESM 运行模态的分析	152
3.6.4 并列式混合励磁同步发电机中的永磁同步电机和电励磁同步电机的三种组合方式	158
3.6.5 实验验证	161
3.7 并列式混合励磁无刷直流发电机瞬态场仿真与实验验证	164
3.7.1 空载特性	165
3.7.2 外特性	167
3.7.3 永磁部分与电励磁部分转子相对位置问题	167
3.8 小结	169
第4章 并列式混合励磁双凸极电机	171
4.1 并列式混合励磁双凸极电机的结构与原理	171
4.1.1 三相双凸极电机结构	171
4.1.2 双凸极电机的基本概念和定义	174
4.1.3 并列式混合励磁双凸极电机的数学模型	177
4.2 并列式混合励磁双凸极电机的静态特性	181
4.2.1 空载磁场	182
4.2.2 空载磁链、感应电势、电感特性	183
4.3 并列式混合励磁双凸极无刷直流发电机	197
4.3.1 双凸极无刷直流发电机发电方式及运行原理	198
4.3.2 电励磁双凸极无刷直流发电机的外特性和短路特性	232
4.3.3 并列式混合励磁双凸极电机发电工作的运行模式	237
4.3.4 混合励磁双凸极无刷直流发电机的工作特性	240
4.4 并列式混合励磁双凸极无刷直流电动机的工作特性	247
4.4.1 双凸极无刷直流电动机的构成	247
4.4.2 双凸极无刷直流电动机的运行原理	249
4.4.3 单极性 PWM 控制时的电流拖尾现象	264
4.4.4 并列式混合励磁双凸极无刷直流电动机的机械特性和调速特性	273
4.4.5 双凸极无刷直流电动机的效率特性	281
4.5 小结	284
参考文献	288

第 1 章 混合励磁电机的基本概念及研究现状

1.1 混合励磁电机的基本概念

电机是以磁场为媒介进行机械能和电能相互转换的电磁装置。在电机内建立进行机电能量转换所必需的气隙磁场有两种基本方法：一种是在电机绕组内通以电流来产生磁场，称为电励磁方式；另一种是由经过磁化处理的永磁体产生磁场，称为永磁励磁方式。

1821 年，法拉第发现通电导线能绕永久磁铁旋转，第一次成功实现了电能向机械能的转换，从而建立了电机的实验室模型，被认为是世界上第一台电机，其实质是永磁励磁方式的永磁电机。其后 30 余年间，不断有新结构形式的永磁电机出现，但当时所用的永磁材料是天然磁铁矿石，磁能密度很低，电机体积庞大、性能较差。1857 年，英国惠斯通用电磁铁代替永久磁铁，发明了电励磁方式，开创了电励磁电机的新纪元。当时，电励磁方式更容易在电机中产生足够强的磁场，因此随后的 70 多年间，电励磁电机理论和技术得到迅猛发展，而永磁励磁方式在电机中的应用则较少。一直到 1967 年和 1983 年，钕钴永磁材料和钕铁硼永磁材料（二者统称为稀土永磁材料）相继问世，它们具有高剩磁密度、高矫顽力、高磁能积和线性退磁曲线的优异磁性能，从而使永磁电机的发展和应用进入一个新的历史时期，永磁电机的品种和应用领域不断扩大，正向大功率化、高功能化和微型化方向发展。可见，永磁电机和电励磁电机一直在技术进步和自身完善中不断竞争发展。

励磁方式的不同使得电机输出特性、功率密度以及效率等性能有很大区别。电励磁电机通过改变励磁绕组电流可以方便地调节气隙磁场强度，从而实现宽范围输出电压调节或调速特性，断开励磁回路可以有效灭磁，实现电机系统的短路和故障保护，但由于励磁损耗的存在使得电机系统效率相对较低，难以实现高功率密度。永磁电机省去了励磁绕组和励磁电源，结构简单，运行可靠，同时消除了励磁损耗，提高了电机效率，功率密度大，结构形式灵活多样。但是，由于永磁材料的固有特性，永磁电机制成后其气隙磁场基本保持恒定，这导致发电运行时，电压调节和故障灭磁困难；电动运行时，恒功率区较窄，调速范围有限。因此，气隙磁场难以调节和控制成为限制高性能永磁电机应用和推广的重要技术瓶颈，从电机本体和控制系统的角度出发，如何实现气隙磁场的有效调节成为永磁电机研究领域的热点和难点之一。

混合励磁电机正是为解决永磁电机的上述问题, 努力将永磁励磁与电励磁两种励磁方式进行合理的有机结合, 最大限度地综合两者优势又能克服各自缺陷的一种新型电机。“混合励磁 (hybrid excitation)” 思想最早于 1985 年由美国人提出, 也可称为组合励磁或双励磁 (double excitation), 是指电机内同时存在永磁和电励磁磁势源, 由它们相互作用共同实现电磁能量转换, 是对单一励磁方式的有效拓宽与延伸。也有学者在开关磁阻电机控制中利用 C-dump 变换器实现两相励磁, 以减小电机振动和噪声, 并称为混合励磁方式, 但实质上电机励磁方式仍然为单一的电励磁。而混合励磁电机, 则是在力求保持电机较高效率和功率密度的前提下, 合理改变电机的拓扑结构, 由两种磁势源共同产生电机主磁场, 实现电机气隙磁场调节和控制, 改善电机调速、驱动性能或调压保护特性的一类新型电机。一般来说, 为最大限度地继承永磁电机高效率的优点, 励磁源主要由永磁磁势提供, 电励磁磁势主要用来增强或削弱主磁路磁通, 起调节作用。利用混合励磁技术的永磁同步电机, 我们称为混合励磁同步电机, 当然, 它既可以是混合励磁同步发电机, 也可以是混合励磁同步电动机。

1.2 混合励磁电机的分类

混合励磁电机有不同的分类方式, 根据电机原型和机理不同, 可以分为混合励磁同步电机和混合励磁双凸极电机两大类, 前者是在同步电机原理基础上产生的; 后者以磁阻式双凸极电机为基础; 按照转子运动方式的不同, 可以分为旋转式混合励磁电机和混合励磁直线电机; 从永磁体放置位置来看, 可以分为转子永磁型混合励磁电机和定子永磁型混合励磁电机。目前来看, 定子永磁型混合励磁电机主要是混合励磁双凸极电机。2007 年欧洲电力电子及应用会议上, Hoang 等学者提出了一种永磁体位于定子上的磁通开关混合励磁同步电机, 它实际上也是双凸极电机结构。另外, 从电机内永磁磁势和电励磁磁势相互作用关系来看, 混合励磁电机可分为串联磁势式和并联磁势式两大类。

1.3 混合励磁电机的研究现状

1.3.1 混合励磁同步电机的研究现状

1.3.1.1 串联磁势式混合励磁同步电机

串联磁势式混合励磁同步电机 (hybrid excitation synchronous machine, HESM) 的结构形式和运行原理相对简单, 永磁体都位于转子磁极上。依据励磁磁势的来源不同, 可以分为两种形式: 一种是励磁磁势由转子磁极上的励磁绕组

产生；另一种是励磁磁势由定子电流产生。

图 1.1 是串联磁势式 HESM 的典型结构图^[1]，励磁绕组安放在转子永磁体的下面，永磁和电励磁磁势串联。电机的结构较简单，但转子励磁电流的引入采用有刷式，电机的可靠性降低。

采用表面贴装式转子磁极结构的多相复合式永磁无刷直流电机也是串联磁势式 HESM 的一种，可以认为是一种励磁磁势由定子电流产生的串联磁势式 HESM。该电机的气隙磁通是由永磁励磁和处于永磁磁极下的定子电流的电励磁共同产生的，因此具有永磁无刷电机和串励直流电机的复合特性。其定子励磁电流是由控制器根据转子位置信号以及电流反馈信号进行实时独立控制的。

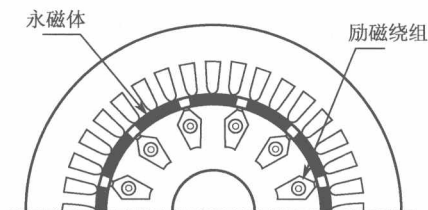


图 1.1 串联磁势式 HESM

串联磁势式 HESM 的结构较为简单，励磁绕组安放在转子永磁体的下面，不需要占有额外的空间，所以电机的体积小、重量较轻；但典型结构中仍然存在滑环和电刷，由于励磁绕组提供的磁势和永磁体磁势串联连接，电励磁的磁路经过永磁体，磁路磁阻大，调节气隙磁场所需励磁电流和励磁损耗较大。同时，电励磁磁动势直接作用于永磁体，容易发生不可逆退磁。

1.3.1.2 并联磁势式混合励磁同步电机

1) 磁分路式的 HESM

磁分路式的 HESM 是较早出现的一种 HESM 形式，其结构如图 1.2 所示^[2]。它的转子部分与径向结构永磁同步电机转子类似，稀土永磁体 7 外装有由非磁性材料 9 和极靴 10 间隔焊成的紧圈，它是爪极转子的一部分，爪极部分的电励磁绕组 4 及其导磁支架 2 固定不动，由于电励磁磁路存在非工作气隙 δ_1 和 δ_2 ，从而实现了无刷励磁。

磁分路式 HESM 的基本工作原理是利用励磁磁势控制轴向磁路里的永磁磁通分量，从而调节工作（主）气隙磁通。转子为径向磁化结构，气隙磁密较低，而轴向磁路中 N 极和 S 极爪极磁极受形状约束结构难以优化，局部饱和和漏磁现象较为严重，导致工作气隙的磁密值进一步降低。

2) 旁路式 HESM

旁路式 HESM 的结构如图 1.3 所示^[3]。该电机主要由机壳、两个端盖、两套直流励磁绕组、定子和转子组成。其特点在于转子表面磁极由永磁极和铁心极交错排列构成，所有的永磁极极性相同。机壳和左右两个端盖需由导磁材料制成，两个端盖内侧有带有双向侧壁的凸缘，凸缘的内侧壁与转子铁心之间留有较

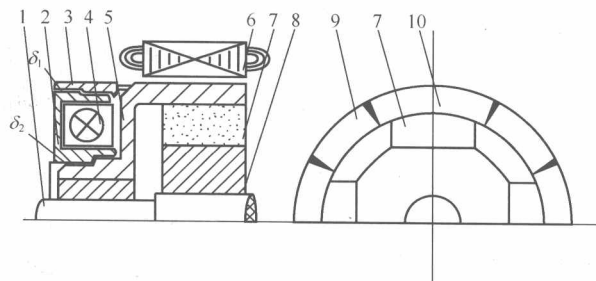


图 1.2 磁分路结构的 HESM

1. 转轴; 2. 导磁支架; 3. S 极爪极磁极; 4. 励磁绕组; 5. N 极爪极磁极; 6. 定子铁心; 7. 稀土永磁体; 8. 转子背轭; 9. 非磁性材料; 10. 极靴; δ_1 、 δ_2 . 附加气隙

小的气隙（第二气隙），而凸缘的外侧壁与左右两个端盖内壁之间形成的环形凹槽可以嵌入励磁绕组，两套直流励磁绕组电流大小相等、方向相反。电机的极对数等于转子永磁极个数，也就是铁心极的个数。

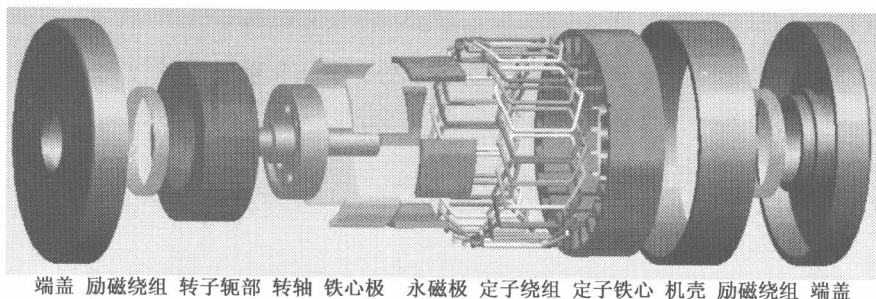


图 1.3 旁路式混合励磁同步电机

这种电机实现了无刷结构，同时由于铁心极的存在，励磁磁势也不会对永磁体产生不可逆退磁。但从其结构原理上可以看出，受轴向磁路限制，电机轴向长度不能太长，而同时为保证轴向磁路的旁路作用，两端的凸缘必须具有足够的轴向长度，这使得转轴连接固定转子轭部部分的轴向长度有限，影响电机结构的可靠性。另外，直流励磁磁势作用下，电机端盖和双向凸缘的磁密较高。

3) 转子磁极分割型的 HESM

转子磁极分割型 HESM 是一种具有代表性的并联磁势式 HESM^[4,5]。英国学者 Spooner 提出该电机拓扑后，得到日本、美国以及中国学者的广泛关注，并开展了大量的研究与改进。转子磁极分割型 HESM 可以分为径向磁场和轴向磁场两种基本结构。

径向磁场转子磁极分割型 HESM 的英文名称为 consequent pole permanent

magnet hybrid excitation machine, CPPM, 其结构如图 1.4 所示。该电机的定子电枢绕组为通常的三相对称绕组。定子铁心被定子环形直流励磁绕组分成两段, 两段铁心由其外部的背轭(用于轴向导磁的机壳)实现机械和磁连接; 转子也分成两部分: N 极端和 S 极端, 每极端由同极性永磁极和铁心形成的中间极交错排列, 且两端的 N、S 永磁极及中间极也交错排列。转子铁心及转轴间有一实心导磁套筒(转子背轭), 用于转子的轴向导磁。

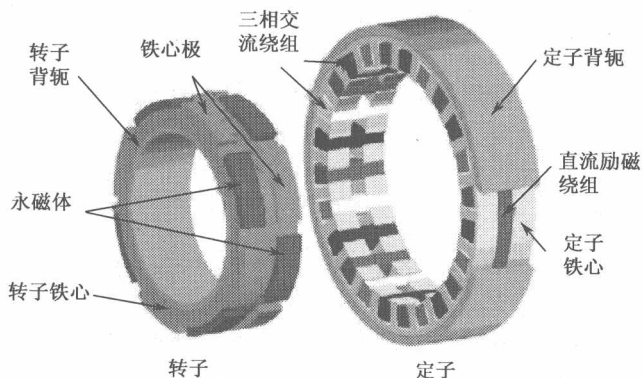


图 1.4 径向磁场 CPPM 电机

轴向磁场转子磁极分割型 CPPM 电机分为 TORUS 结构、KAMAN 结构和单定子/转子轴向磁场结构等多种结构形式^[6]。图 1.5 为美国学者 Lipo 于 2002 年提出的 TORUS 结构 CPPM 电机的一种 N-S 方案。

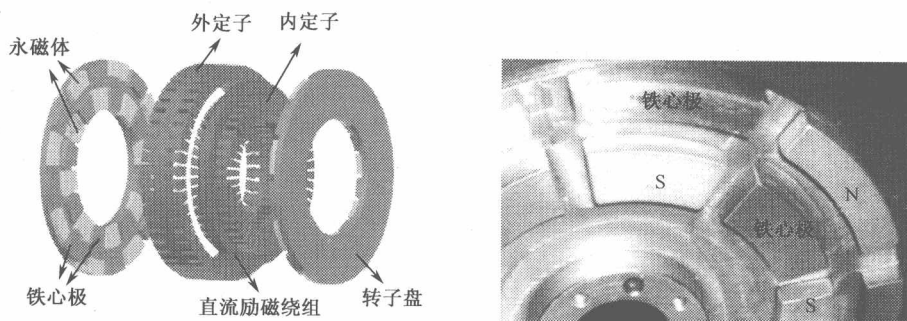


图 1.5 轴向磁场 TORUS 结构 N-S 型的 CPPM 电机

该电机由两个环形定子铁心(其中嵌有多相电枢绕组)、两个盘式转子和一个直流励磁绕组构成。直流励磁绕组放置在内外环形定子之间。两个盘式转子表面被分成内圈和外圈, 上面交错排列着永磁极和铁心形成的中间极。NdFeB 永磁极被轴向安装在两片转子的内表面, 永磁极的 N 极如果被放在转子的内圈, 那么 S 极就被放在转子的外圈。通过调节励磁绕组的电流, 气隙中的磁场就可以

发生改变。

无论是轴向磁场转子磁极分割型 HESM, 还是径向磁场转子磁极分割型 HESM, 它们的基本工作原理都是类似的: 电机气隙的主磁场是由转子上的永磁体和定子上电励磁绕组产生的磁场叠加而成的。当励磁为零时, 气隙磁通主要经过 N 极永磁极和 S 极永磁极之间闭合。当直流励磁绕组中通入励磁电流时, 由于永磁极磁阻比铁心极磁阻大得多, 因此电励磁磁势产生的磁通主要通过铁心极、气隙以及定转子铁心形成回路。在某一方向励磁电流下, 电励磁磁通和永磁磁通合成的效果是使气隙磁场的有效分量 (如径向磁场转子磁极分割型 HESM 中气隙磁场的径向分量) 增磁的, 则在反方向励磁电流下, 电励磁磁通和永磁磁通合成的效果将是弱磁效果, 从而实现励磁电流的双向调节作用。由于为轴向结构电机, 所以电机为短而粗形式。

4) 混合励磁爪极电机

混合励磁爪极电机 (hybrid excitation claw pole machine, HECPM) 可以分为无刷结构和有刷结构两大类。图 1.6 所示的是香港大学和上海大学研究并应用于电动汽车驱动系统的无刷结构 HECPM^[7], 主要由定子铁心、电枢绕组、极爪, 转轴励磁绕组支架、固定的励磁绕组、永磁体等组成, 其中定子含内、外两部分, 外定子与普通电机的定子类似, 槽中嵌有多相对称绕组, 内定子上放有环形直流励磁绕组, 形成无刷结构。环形励磁绕组通电后, 产生轴向磁通经转子磁轭到达爪极, 然后经气隙、定子铁心、气隙和爪极回到转子磁轭, 形成磁回路, 在爪极表面形成 N、S 交替极性。励磁电流产生的磁通与永磁磁通在磁路上呈并联关系, 通过控制励磁绕组中电流大小和方向可以灵活调节气隙磁场。电机励磁绕组置于爪极的内、外单元所形成的区域内, 空间利用率高, 电机结构紧凑。爪极电机的主要问题在于结构和磁路复杂, 漏磁较严重。

合肥工业大学在爪极发电机基础上提出的混合励磁爪极发电机^[8], 其结构特点在于转子两个极爪之间嵌入永磁体, 在电励磁磁场基础上增加永磁磁场, 补偿电励磁爪极发电极爪之间漏磁的影响, 提高发电机气隙磁密和输出功率, 改善发电机的低速输出特性。由于该电机励磁绕组和电励磁式爪极电机一样, 仍然位于电机转子上, 故为有刷结构。永磁体放置在相邻的两个爪极之间, 磁化方向为切向, 这样既能增加主磁通, 又能有效地补偿爪极电机由于极间漏磁所带来的气隙磁通减少、低速性能差的缺点。

5) 混合励磁转子磁极同步电机

法国学者研究的混合励磁转子磁极同步电机的结构如图 1.7 所示^[9~11]。定子的壳体为实心铁心, 电枢铁心为叠片; 绕组采用了集中绕组, 较之传统的分布绕组, 有更好的绕组系数和较小的绕组端部。转子铁心也由实心铁心和叠片铁心构成, 转子结构的变化构成了单极和双极电机。电机有两种磁势源: 永磁体安放

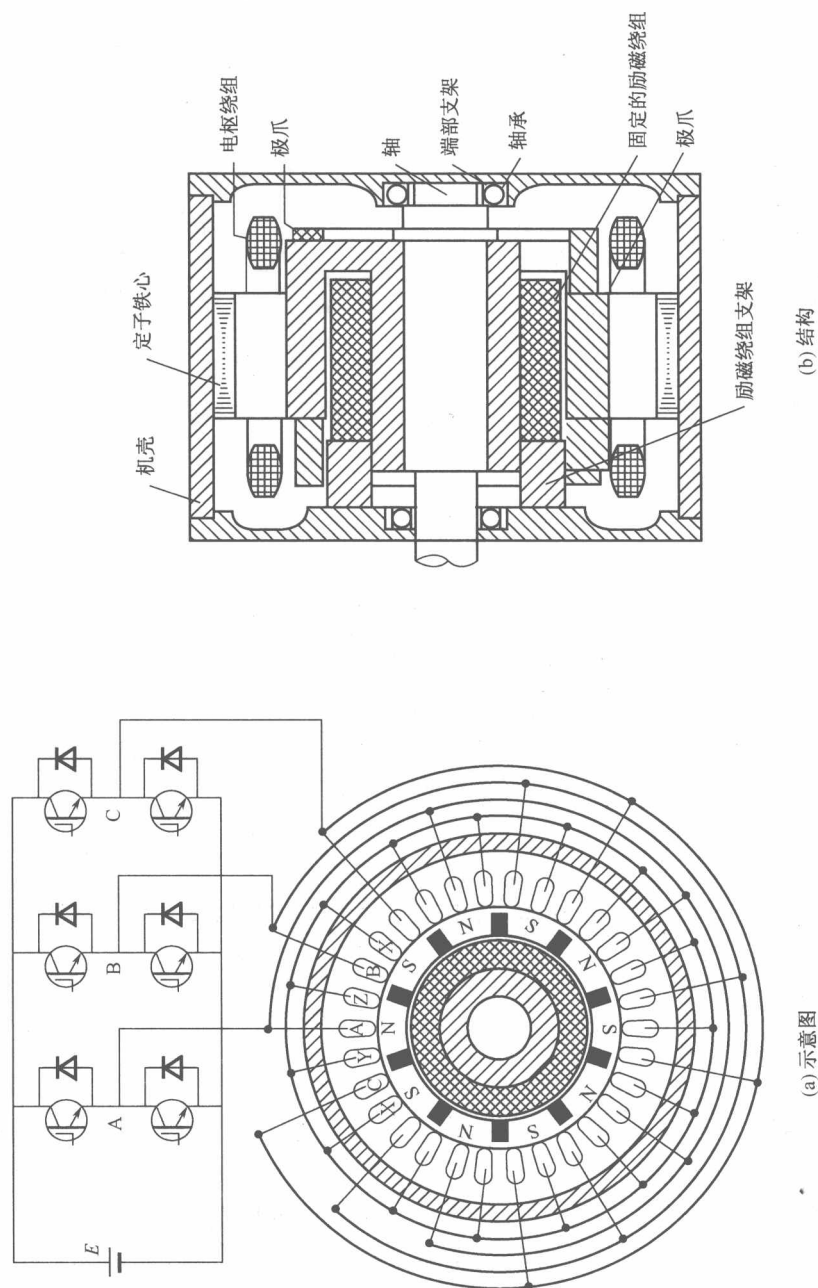


图1.6 HECPM的结构