

国家自然科学基金
江苏省高技术项目
中央高校基本科研项目基金
江苏省输配电装备技术重点实验室

资助

双凸极电机的结构 设计与系统控制

Structure Design and System Control of Doubly
Salient Machines

戴卫力 马长山 朱德明 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国家自然科学基金

江苏省高技术项目

资助

中央高校基本科研项目基金

江苏省输配电装备技术重点实验室

双凸极电机的 结构与系统控制

Structure Design and System Control of Doubly
Salient Machines

戴卫力 马长山 朱德明 著

机械工业出版社

本书对双凸极电机的发展、电磁分析方法和系统控制技术等内容进行了系统的梳理和介绍；总结了双凸极电机结构的演变规律和构建新型双凸极电机满足的必要条件；详细阐述了双凸极永磁电机和电励磁电机的有限元分析建模，并分析了电机在空载和负载下的静态电磁特性，归纳了短路运行、电枢反应与换相重叠的特点；介绍了基于双凸极电励磁电机的双通道发电技术和基于双凸极混合励磁电机的双向励磁调压技术，对发电机数学模型、系统构成、调压控制动态模型以及系统参数设计进行了详细的探讨；比较了转子直槽型和斜槽型双凸极电机的电动控制策略，并就标准角度控制、提前角度控制、新型开通关断角控制以及“三相六状态”控制技术的应用特点和实现方法进行了详细介绍；针对双凸极电机转矩脉动大的缺陷，构建了转矩内环和滑模变结构的转矩控制系统，设计了相应的转矩观测器，并对转矩控制系统进行了详细的分析、仿真和试验验证。

本书内容翔实，既有理论分析，又体现了丰富的工程实践，非常适合作为相关磁阻类电机设计及其系统控制技术研究的研究人员、工程技术人员以及高校相关专业研究生的技术参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

双凸极电机的结构设计/系统控制/戴卫力, 马长山, 朱德明著. —北京: 机械工业出版社, 2011. 12

ISBN 978-7-111-36308-8

I. ①双… II. ①戴…②马…③朱… III. ①凸极式发电机—结构设计②凸极式发电机—控制系统 IV. ①TM31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 223432 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: 张俊红 责任编辑: 张俊红

版式设计: 霍永明 责任校对: 樊钟英

封面设计: 马精明 责任印制: 乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

140mm × 203mm · 7.75 印张 · 236 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-36308-8

定价: 33.00 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

社 服 务 中 心: (010) 88361066

销 售 一 部: (010) 68326294

销 售 二 部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

门户网: <http://www.cmpbook.com>

教材网: <http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

推 荐 序

美国 F35 战斗机是世界上第一种多电战斗机，机上首次应用 250kW 开关磁阻起动发电机。发动机工作前，电机工作起动发动机；发动机工作时，带动电机发电，向飞机电网提供直流电。电机结构简单，适合在高温环境下和高速飞行下使用，有助于提高飞机的战术性能和技术性能。该电机作发电机使用时，必须与由多个开关管构成的变换器配合，在使用硅基开关管的今天，这限制了可靠性的进一步提高。励磁双凸极电机不仅有和开关磁阻电机同样的简单结构，且发电工作时只要用二极管整流桥将电机的交流电整流成直流电，调节励磁电流即可稳定输出电压，可靠性更高。

电机是现代工业的基础零部件，几十年来与电力电子和微电子结合，其技术性能大幅度提高，应用领域不断扩大。与此同时，开关磁阻电机和双凸极电机等新型电机也进入了应用阶段，成为直流电机、异步电机和同步电机的重要“伴侣”，充分认识它的特性和控制特点，才能合理地使用它，才能不断地扩大它的应用领域。

戴卫力、马长山、朱德明三位先生几年前在南京航空航天大学攻读博士学位，从事双凸极电机及其控制系统的基础研究和应用基础研究工作；毕业后他们到了不同的工作岗位，但仍满腔热情地从事双凸极电机的研究，这点十分可贵，展现在读者面前的这本书就是他们研究工作的阶段总结。

作者在书中总结了 20 世纪 90 年代美国 T. A. Lipo 教授提出双凸极电机以来国内外学者的研究成果，拓展了双凸极电机的结构，分析了双凸极发电机的电磁特性和控制原理，阐述了双凸极电动机的原理及其调速系统。本书便于未接触过该类电机的人们入门，

也可作为电机工作者深入研究和应用这类电机的参考。但愿本书的出版能吸引更多的人加入双凸极电机的研究和应用队伍，共同促进它的发展。

严仰光

2011 年冬于南京

前言

双凸极电机作为一类特殊的磁阻型电机，早在 20 世纪 50 年代就已经初见雏形，但却受制于当时的永磁材料性能，而没有得到重视和推广应用。随着永磁材料和电力电子技术的发展，20 世纪 90 年代初期，美国 Wisconsin 大学的著名电机专家 T. A. Lipo 教授重新对双凸极电机开展了研究工作，从而为此正名。在最近的 20 多年中，双凸极电机在磁路结构设计、电磁性能分析以及控制技术等方面都得到了迅猛的发展，使之在航空航天、电动汽车、风力发电等特殊领域率先得以应用。

双凸极电机与开关磁阻电机结构类似，与传统的永磁同步电机相比，同样的输出功率所需的永磁体大大减少，这在稀土材料价格不断飞涨的今天，是非常具有吸引力的。研究表明：双凸极电机转子上无绕组，结构简单坚固，无铜损，能进行高速高效运行；与开关磁阻电机相比，其双边励磁均能输出功率的特点，使之也具备较高的功率密度和输出转矩。然而，定、转子凸极式的结构也使得该电机具有转矩脉动大的缺点。20 世纪 90 年代至今，科研工作者们一直试图通过改进电机磁路结构和控制策略来改善这一缺陷，取得了比较大的进展。总体来说，20 多年双凸极电机的研究发展和推动的过程，也是作者亲身感受和见证该电机在结构制造、电磁特性分析、控制策略以及应用领域拓展等方面发展的一段时期。笔者坚信，随着国家对稀土资源的控制趋紧，稀土价格的持续上扬，双凸极电机与开关磁阻电机等磁阻型电机必将引起产业界的关注，并推动其在不同工业领域得以应用。

笔者有幸在攻读硕士学位和博士学位期间有机会从事双凸极电机的研究，先后对该电机的磁路结构、电磁分析方法、驱动与发电运行控制等进行了较为全面细致的研究分析，取得了一些科研成果。博士毕业后，虽然彼此从事不同的工作岗位和研究方向，

但每逢大家相聚探讨技术、交流心得之余,也总有个心愿——希望能够将大家从事双凸极电机研究所积累的成果进行整理,编辑成书付诸出版。首先,是对大家研究多年来所取得的科研成果做个阶段性的总结;其次,希望能向从事电机设计与控制方面的科研技术人员展现双凸极电机近年来的发展和科研成果,增进学术与技术的交流;再次,本书的出版算是抛砖引玉,希望能够引起业界相关技术人员的关注,吸引更多的人才来从事这方面的开发和研究,以便更好地推动我国工业技术的发展。

在撰写本书的过程中,虽然作者们彼此相隔千里,但大家却都为此书付出了艰辛和汗水。为了能够使本书在内容上层次分明,条理清晰,又兼具技术参考价值,作者们经过仔细斟酌,反复讨论,确定了本书的内容分成6章,先对电机的由来和20多年的研究发展历史进行了简要的回顾;随后,以双凸极电励磁电机为本体,对电机的结构演变和构成的必要条件进行了论述;进而分析了不同励磁方式的双凸极电机的基本电磁特性;讲述了双凸极电机的发电运行与控制技术;以转子槽形为区分,分别简单介绍了转子直槽型和转子斜槽型双凸极电机的电动控制策略,并归纳了各控制策略的特点;最后,对高性能的双凸极电机转矩控制系统和滑模控制技术在双凸极电机控制中的应用进行了简要介绍。

在本书成形的过程中,戴卫力博士负责撰写了本书的第1章、第3章、第4章和第5章的大部分内容;马长山博士撰写了第5章的部分内容和第6章;而朱德明博士负责撰写了第2章内容;全书由戴卫力博士进行编排、校验和统稿工作。为此,作者们感谢各自家庭在本书写作期间所给予的无私的支持和理解。同时,戴卫力先生要特别感谢在生活和工作上一直给予默默关心和支持的妻子刘莹女士,没有她承担了大量的日常家务,就没有此书的尽快成稿。

本书在成稿的过程中还得到了许多专家学者的帮助。首先,作者们要特别感谢攻读博士期间的导师严仰光教授和周波教授。没有严老师和周老师的悉心培养,谆谆教诲,我们就不可能在学术上取得如此大的进步,也就没有本书呈现在读者的面前。另外,

严老师还在百忙之中抽时间审阅了全稿，并为本书作了推荐序。其次，作者们还要感谢在学术道路上一起成长的师兄弟们，特别是秦海鸿博士，没有他的支持和兄弟般无私的帮助，就不可能有今天的成绩和本书的出版。衷心地感谢成长道路上给予我们支持和关心的各位前辈专家学者，正是你们对后辈的关爱，才使我们快速成长。本书在撰写的过程中也参考了大量的文献，特别是近年来新发表的论文，在此对参考文献的各位作者表示衷心的感谢！本书的大部分研究内容得到了国家自然科学基金（项目编号为50337030）、江苏省高技术项目（项目编号为BG2004009）以及河海大学中央高校基本科研项目基金（项目编号为2009B31114）的资助；另外，本书的出版得到了河海大学江苏省输配电装备技术重点实验室的部分资助，在此一并表示感谢！

尽管作者试图对双凸极电机的相关基础理论与控制技术做一个全面、准确、详细的阐述，但限于水平和经验，加之时间比较仓促，书中难免存在错漏之处，恳请广大同行、读者批评指正。

作 者

目 录

推荐序

前言

第 1 章 双凸极电机的发展概述	1
1.1 双凸极电机的提出	1
1.2 双凸极电机的结构与类型	2
1.3 双凸极电机的电磁分析方法	9
1.4 双凸极电机的发电与电动控制	12
1.5 双凸极电机的应用	16
1.5.1 电动汽车驱动系统	16
1.5.2 风力发电系统	17
1.5.3 航空起动/发电系统	18
1.6 本章小结	20
第 2 章 双凸极电机的结构	21
2.1 三相双凸极电机的结构	21
2.1.1 单元电机结构形式与类型	21
2.1.2 单元电机结构形式的衍变	24
2.1.3 定子极宽/定子极距之比	25
2.1.4 电势波形宽度	27
2.2 单相和多相 DSEM 单元电机结构	27
2.2.1 单相 DSEM 单元电机结构	27
2.2.2 两相 DSEM 单元电机结构	29
2.2.3 五相 DSEM 单元电机结构	31
2.3 多单元结构双凸极电机	33
2.4 双凸极混合励磁电机	34
2.5 本章小结	37
第 3 章 双凸极电机的电磁分析	39
3.1 双凸极永磁电机的空载运行	39
3.1.1 静态磁场分布	39

3.1.2 电感与磁链	41
3.2 双凸极永磁电动机的负载运行	42
3.2.1 电枢反应分析	42
3.2.2 理想情况下电感和磁链分析	43
3.2.3 实际情况下电感和磁链分析	46
3.3 双凸极电励磁发电机的空载运行	48
3.3.1 SRG 发电方式下的空载运行	48
3.3.2 DSG2 发电方式下的空载运行	55
3.4 双凸极电励磁发电机的短路运行	58
3.4.1 SRG 和 DSG1 发电方式下的短路运行	58
3.4.2 DSG2 发电方式下的短路运行	65
3.5 双凸极电励磁发电机的负载运行	72
3.5.1 SRG 发电方式下的负载分析	72
3.5.2 DSG2 发电方式下的负载分析	83
3.6 本章小结	92
第4章 双凸极电机发电系统的构成与调压控制	94
4.1 双凸极电励磁与混合励磁电机发电系统	94
4.1.1 DSEG 数学模型与电压调节器控制策略	95
4.1.2 DSHEG 数学模型与电压调节器控制策略	97
4.2 DSEG 的双输出直流发电	102
4.2.1 不同性质负载对 DSEG 的影响	103
4.2.2 DSG2 发电方式下的外特性和调节特性	119
4.2.3 双输出 DSEG 直流发电	121
4.3 基于 DSHEG 的调压系统动态模型	139
4.4 本章小结	148
第5章 双凸极电机电动驱动系统的构成和控制	149
5.1 双凸极电机电动系统的构成	149
5.1.1 双凸极永磁电动机的数学模型	149
5.1.2 双凸极电励磁电动机的数学模型	151
5.2 直槽型 DSM 控制技术	152
5.2.1 标准角度控制	152
5.2.2 提前角度控制	161
5.2.3 新型开通关断角控制	169
5.3 斜槽型 DSM 控制技术	176

5.3.1 单斩 PWM 电流滞环控制	177
5.3.2 稳态工作原理分析	178
5.3.3 试验结果	186
5.4 本章小结	189
第 6 章 双凸极永磁电机转矩控制系统	190
6.1 双凸极电机的转矩脉动问题	190
6.2 基于转矩内环的 DSPM 驱动控制系统	193
6.2.1 转矩观测器设计	193
6.2.2 系统仿真分析	201
6.2.3 试验结果	203
6.2.4 小结	203
6.3 基于滑模变结构的转矩控制系统	205
6.3.1 滑模变结构的基础理论	205
6.3.2 基于滑模的速度调节器设计	208
6.3.3 滑模控制仿真	213
6.3.4 试验结果	220
6.4 本章小结	228
附录	229
参考文献	231

第 1 章 双凸极电机的发展概述

本章回顾了双凸极电机的发展历程，介绍了不同磁路结构和激磁方式的双凸极电机，并简要地概括了各自的性能和特点，进而讲述了双凸极电机的电磁分析方法以及其作为发电机与电动机的相关控制策略。最后，简要地叙述了双凸极电机在电动汽车驱动系统、风力发电系统以及航空起动/发电系统等领域中的应用。

1.1 双凸极电机的提出

1955 年，Rauch 和 Johnson 在论文《Design Principles of Flux-Switch Alternators》中首次提出了双凸极电机的概念雏形^[1]，其主要工作原理为磁通变换。由于当时采用的永磁材料是 Alnico，磁能积很低，因而该类电机的体积较大，难以在实际应用中推广使用。后来，随着高磁能积的新型永磁材料不断问世，双凸极电机（Doubly Salient Machine, DSM）又重新开始得到重视。1993 年，美国 Wisconsin 大学 T. A. Lipo 教授明确提出了双凸极永磁电机（Doubly Salient Permanent Magnetic Machine, DSPM）^[2]，并研究证明：DSPM 转子上无绕组，结构简单，适合高速运行，并具有高的功率密度。自此，双凸极电机开始受到各国学者的广泛关注和研究。

DSPM 主要用于电动运行，当其作为发电机运行时，若电机出现故障，由于永磁体的存在，电机将无法进行灭磁，容易使发电机损坏。另外，双凸极永磁发电机需依靠三相绕组后接有源开关构成的变换器才能实现电压调节^[4]，降低了电压调节系统的可靠性。为了避免发电机出现故障时无法进行灭磁，南京航空航天大学严仰光教授带领的课题组提出了双凸极电励磁电机^[5]（Doubly Salient Electro-magnetic Machine, DSEM）：用励磁绕组代替了原来的永磁体。励磁绕组的加入，使得发电机可以通过改变励磁绕组中的电流大小来实现发电机的输出电压调节，从而也实现了发电机故障时通过切断励磁电流来实现灭磁。

虽然 DSEM 解决了双凸极发电机的故障灭磁, 然而励磁绕组的励磁损耗却使得发电机的效率有所下降。能否将永磁电机的高效和电励磁电机的磁场可调两项优点结合在一起, 成为摆在电机专家们面前最为紧迫的课题。随着电动汽车等驱动系统应用和技术要求的不断拓展, 对高效宽调速范围电机的渴望日益迫切, 混合励磁电机正是在这一背景下应运而生的。专家学者们纷纷投身于混合励磁电机的研究, 希望通过优化电机的磁路结构或合理配置永磁与电励磁之间的比例来寻求出一种高效宽调速范围的新型电机。21 世纪初期, 双凸极电机的研究者们也顺应新能源汽车驱动系统的技术潮流, 提出了各种类型的双凸极混合励磁电机 (Doubly Salient Hybrid Excitation Machine, DSHEM)。

自此, 永磁、电励磁以及混合励磁等不同励磁方式和磁路结构的双凸极电机构成了一族新的磁阻电机家族——双凸极电机。随着研究的日益深入, 双凸极电机的设计和控制技术日趋成熟, 其应用也日渐广泛。迄今, 双凸极电机已经在电动汽车驱动系统、风力发电系统以及航空航天等领域得到了应用。

1.2 双凸极电机的结构与类型

双凸极电机在结构上与开关磁阻电机类似, 都属磁阻型电机。其中, 定、转子极均呈凸极结构, 转子上无绕组, 结构简单。1993 年, T. A. Lipo 教授提出的三相双凸极电机结构^[2]如图 1-1a) 所示: 电机定、转子均为凸极结构, 定子铁心左右两侧各嵌有一块切向励磁磁钢。定、转子极为 6/4 结构, 每个定子极上都绕有集中绕组, 相对的两个定子极绕组串联构成一相, 而转子上无绕组。从结构上可以看出, 该电机转子只有铁耗, 无铜损, 结构坚固, 适合在高温、高速下运行。在此基础上, T. A. Lipo 教授在 1994 年又提出了一种定、转子极为 4/6 极结构的双凸极永磁发电机^[3], 如图 1-1b) 所示: 相对的两个定子绕组串联构成一相, 由于该电机在某些转子位置没有起动转矩, 因而只能作一般发电机使用。

香港大学的陈清泉教授提出了一种 8/6 极结构的 DSPM^[7], 其静态特性与 6/4 极结构电机类似, 但功率密度较高, 调速范围较宽, 转速脉动也较小, 如图 1-1c) 所示。詹琼华教授等人提出了一种新型

单相 4/6 极 DSPM^[8], 如图 1-1d) 所示: 定子有 4 个均匀分布的极, 一对永磁体放置在定子轭中, 产生激磁磁场, 定子槽中放置集中绕组; 转子有 6 个极, 无绕组和永磁体。定子极上安排的阶梯气隙是为了获得起动转矩, 可双向转动。

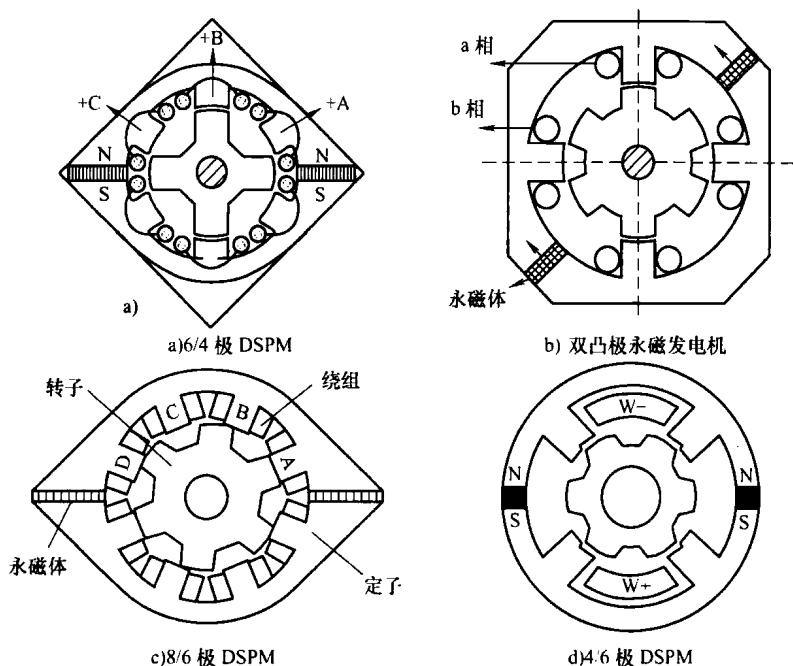


图 1-1 早期的双凸极电机结构

东南大学林明耀教授等人提出了一种新型 12/8 极 DSPM^[9], 并运用有限元法对电机的磁场分布、电感、磁链和反电势等静态特性进行了分析, 建立了具有斜槽转子结构的电机模型, 其截面如图 1-2 所示。文 [10] 将 6/4 极 DSPM 与 12/8 极 DSPM 进行了比较, 并得出了在功率相同的情况下, 12/8 极 DSPM 的定子内外径比值和功率密度较大、电机性能较好、其制造成本相对较高的结论。

罗马尼亚学者 Radulescu 提出了一种称为电传导的 6/4 极 DSPM^[11]。这种电机的结构类似于开关磁阻电机 (Switched Reluctance Machine, SRM), 其差别主要在于转子上有高磁能积的永磁。该电机

电磁转矩的产生机理与永磁无刷直流电机相同，两者间的差别在于当电源切断时，电传导 DSPM 能产生一个使电机转子保持静止的转矩，这样即使在带载的情况下也不存在突然转动的危险。该电机结构简单，能量密度大，输出转矩大，可以代替现有的工业用交流电机，特别适用于小型电机的变速驱动。

为满足电动汽车的应用需求，文 [12] 提出了一种适合电动汽车驱动的外转子 8/10 极 DSPM，如图 1-3 所示：定子极数为 10，转子极数为 8，外转子的结构可以实现轮毂的直接驱动，提高了驱动效率与汽车整体的性价比。

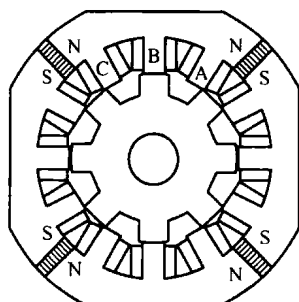


图 1-2 12/8 极 DSPM

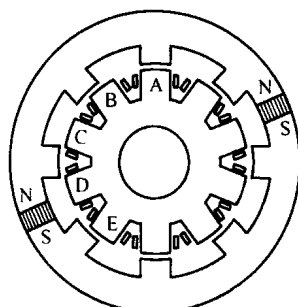


图 1-3 外转子 8/10 极 DSPM

近年来，学者们还提出了一种新型的磁通切换型双凸极永磁电机^{[13][14]}，如图 1-4 所示。这种电机在结构上与传统的 DSPM 类似，但其通过在每个定子极下镶嵌永磁体，并进行特定方式的充磁后，就能使电机的相磁链随着转子的转动而发生极性变化。同时，该电机也改善了原 DSPM 电机的磁链和电势波形，使电机的磁链和电势趋于正弦，减小了谐波，增加了电机的出力。正弦波电势特性也使该电机更适合作为交流电机使用。目前对该电机的研究还处在初级阶段，因此在后续的章节中，不作深入探讨。

DSPM 的永磁体一旦被充磁以后，电机磁场很难调节。当作为发电机运行时，存在着输出电压调节困难和内部短路故障灭磁难等缺点。为此，基于 DSPM，提出了用励磁绕组替代原电机的永磁磁钢的 DSEM，其截面如图 1-5 所示。DSEM 作发电机使用时，可取消可控功率变换器和转子位置传感器，将电机三相绕组与不可控整流电路相

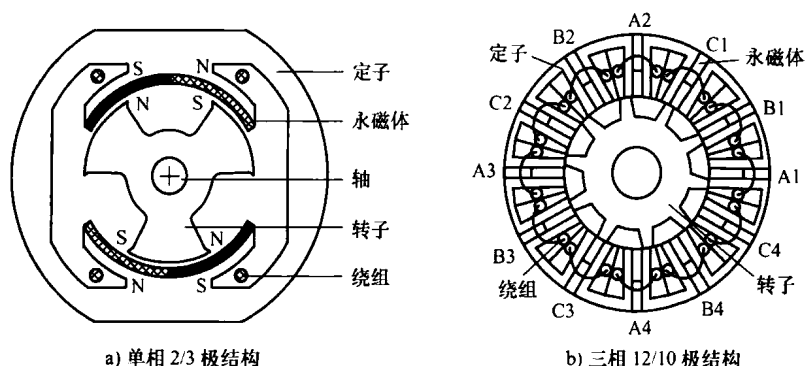


图 1-4 磁通切换型双凸极永磁电机

连即能构成双凸极电励磁无刷直流发电机 (Doubly Salient Electro-magnetic Generator, DSEG)^[5]。这种发电机结构简单, 可靠性高, 只需通过调节励磁电流的大小, 就可获得稳定的输出电压。

文 [15] 将 DSEM 用于风力发电系统中, 并进行电机设计分析, 其截面呈方形, 如图 1-6 所示。该电机能在较宽的转速范围内, 提供恒定输出电压和高效率。文 [16] 还将该电机用于电动汽车驱动系统中。

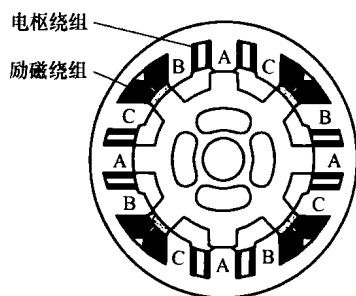


图 1-5 12/8 极 DSEM

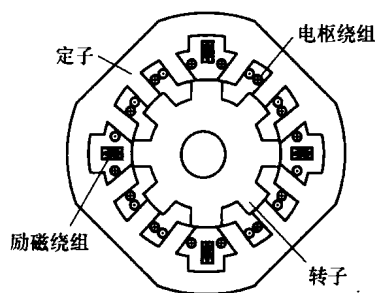


图 1-6 12/8 极 BDFDS 电机

DSEM 由于励磁绕组的存在, 效率相对 DSPM 较低, 为此人们提出了双凸极混合励磁电机。早在 1995 年, T. A. Lipo 教授就在研究 DSPM 的基础上提出了三相双凸极混合励磁电机^[17], 该电机保留了 DSPM 的全部优点: 结构简单、坚固、易冷却、功率密度高。由于励

磁绕组安装在定子上,不需要滑环、电刷装置,系统可靠性得以提高。电机结构如图 1-7 所示。其中,图 1-7a) 适合稀土永磁,图 b) 适合铁氧体永磁。该电机通过控制励磁电流的方向和大小来调节气隙磁场,实现弱磁升速。直流线圈产生的磁通与永磁磁通具有相同的路径,两个磁势源为串联磁势方式,因此永磁铁存在不可逆退磁的风险^[17]。除此之外,人们还提出了通过机械力将铁磁材料靠近定子永磁体,“短路”一部分永磁磁通,以达到削弱气隙磁场的目的;但该电机结构复杂,不易实现^[18]。

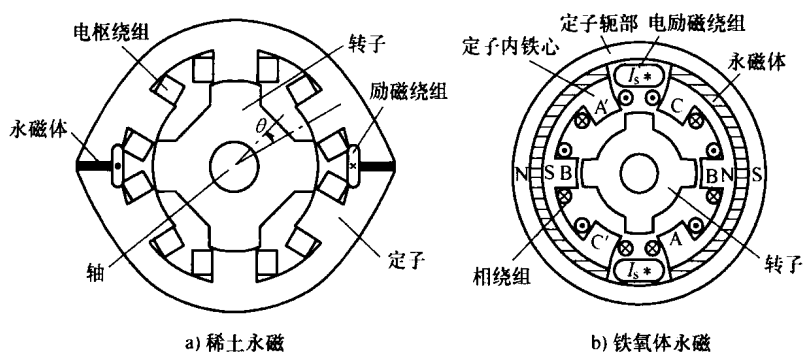


图 1-7 双凸极混合励磁电机

东南大学程明教授等针对电动汽车应用场合,提出了一种磁桥式双凸极混合励磁电机^[19](定、转子结构与定子绕组同文[17]中类似),其结构如图 1-8 所示。定子轭部嵌入 4 块采用高性能钕铁硼(NdFeB)材料切向充磁的永磁体,形成电机气隙主磁场;与永磁体相邻的定子槽内放置电励磁绕组。为提高电励磁的效率,实现以较小的电流励磁获得较大的磁场调节能力,设计者在永磁体与电励磁绕组之间预留了一定尺寸的铁心导磁桥。利用永磁体漏磁,使导磁桥工作在相对饱和状态,通过合理选择饱和和导磁桥的尺寸,为电励磁绕组提供额外的并联磁分路,以达到用较小的直流励磁磁势获得较大气隙磁通调节范围的目的。

图 1-9 所示为另一种双凸极混合励磁电机^[20],区别于前面两种 DSHM,电励磁绕组处在电机端部,引入轴向电励磁磁场,永磁磁场为径向磁场,两者在气隙中实现磁场叠加。电励磁轴向磁路不经过