

高速轴向电励磁双凸极电机设计与特性分析*

沈 澳, 孟小利

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 现代多电飞机技术不断发展, 对航空电源系统提出了更高的要求。依据航空起动发电机具有可靠性高、功率密度高、电源容量大的要求, 设计了一种高速轴向电励磁双凸极电机(DSAEM)。对电机的基本结构和工作原理进行了描述, 建立了电机的数学模型, 并通过有限元仿真加以验证, 详细分析了电机的磁场、电感、空载特性和负载特性。结果表明, 高速轴向电励磁双凸极电机具有完全对称的三相磁链, 可输出更稳定的电压, 其电机绕组的空间利用率高、功率密度大、效率高, 可满足航空电源的基本需求。

关键词: 多电飞机; 轴向电励磁双凸极电机; 空载特性; 负载特性; 三相磁链

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)09-0001-07

doi: 10.12177/emca.2023.098

Design and Characteristic Analysis of High Speed Doubly Salient Axial Electromagnetic Motor*

SHEN Ao, MENG Xiaoli

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With the continuous development of modern multi-electric aircraft technology, higher requirements are put forward for the aviation power supply system. According to the requirements of high reliability, high power density and large power supply capacity of aviation starter generator, a high speed doubly salient axial electromagnetic motor (DSAEM) is proposed. The basic structure and working principle of the motor are described, the mathematical model of the motor is established and verified by finite element simulation. The magnetic field, inductance, no-load characteristics and load characteristics of the motor were analyzed in detail. The results show that DSAEM has a completely symmetrical three-phase magnetic linkage which can output a more stable voltage. The motor winding has high space utilization rate, high power density and high efficiency, and can meet the basic requirements of aviation power supply.

Key words: multi-electric aircraft; doubly salient axial electromagnetic motor; no-load characteristics; load characteristics; three-phase magnetic linkage

0 引 言

多电飞机将飞机的二次能源统一为电能, 这不仅简化了飞机结构, 改善了飞机性能, 还可以节省运行成本, 多电飞机逐渐成为现代航空飞机的主要发展方向之一。但用电设备的增加又对航空

电源提出了更高的要求, 现代航空电源不仅需要更大的电源容量, 而且对电源可靠性和电能质量的要求也不断提高^[1]。查阅文献可知, 目前航空电源采用较多的电机是三级式无刷交流同步电机、永磁双凸极电机、永磁同步电机、开关磁阻电机和电励磁双凸极电机。

收稿日期: 2023-02-16; 收到修改稿日期: 2023-04-15

* 基金项目: 国家自然科学基金(51737006)

作者简介: 沈 澳(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电励磁双凸极电机本体设计。

孟小利(1970—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为交流伺服电机、无刷直流电机、双凸极电机。(通信作者)

三级式无刷交流同步电机采用变频直流发电模式,但由于三级式电机结构复杂,难以保证可靠性,且转子上安装旋转整流器,会限制电机转速,使得电机功率密度难以进一步得到提升;永磁电机虽然具有高功率密度优势,但永磁体在高温下易退磁,且无法实现故障灭磁;开关磁阻电机(SRM)转子上无绕组和永磁体,适用于恶劣环境,电励磁双凸极电机(DSEM)则在继承了SRM优势的基础上加以改进,采用全周期发电,同时定子上加装励磁绕组使得励磁可调,DSEM不仅结构简单,适合高温高速运行,且控制灵活,因此正逐步成为主流航空起动发电机的有力竞争者^[2]。

现有的DSEM大多采用传统径向励磁的方式,电机结构简单,便于制造,功率密度也高,但由于DSEM定子槽内需要同时放置电枢绕组和励磁绕组,因此在槽满率和导线最大电流密度的限制下,励磁和电枢匝数受限,往往难以发挥电机的最优性能。另外,由于各相磁路长度不同,各相磁链并不对称。因此,有学者提出了轴向励磁的构想。

文献[3]初步提出了轴向励磁双凸极电机的构想,但仅简单描述结构,并未进行深入研究。文献[4]设计了一种盘式双凸极电机,但盘式电机存在附加气隙,附加气隙会增大磁路磁阻,因此限制了功率密度。文献[5]提出了一种轴向混合励磁双凸极电机,电机磁链双极性变化,正弦度高,效率高,适于航空高速运行,但结构上将定子分成四份,结构复杂的同时容易产生更大的漏磁问题。文献[6]提出了一种轴向磁通线圈辅助定子励磁无刷直流电机,利用辅助励磁线圈和电枢绕组混合之后的励磁电流-转矩控制,实现了电机转速和转矩的快速调节,减小了转矩脉动,提高了电机稳定性。但此电机轴向的磁场仅起辅助调节作用,且并未研究其发电特性。

本文结合电励磁双凸极电机和轴向电机的优势,设计了一种新型轴向电励磁双凸极电机(DSAEM),文中对该电机结构和工作原理进行分析,并对其重要尺寸参数进行优化,再利用有限元软件仿真验证其优化效果,最后对其空载和负载特性进行分析。

1 电机结构和工作原理

1.1 电机结构

图1和图2为DSAEM的结构图,电机由两段定

子铁心、两段转子铁心、内导磁体和外导磁体组成,其中内导磁体即导磁转轴,图中为了不遮挡其他结构只画出了1/4的电机结构,为了便于散热,可将定子和外导磁体平均分成四块,电机整体可以看成是由a边和b边两个三相12/8电机组成,定子12极,转子8极,中部预留空间放置励磁绕组,电枢绕组集中缠绕在定子极上,转子上无绕组,定转子由硅钢片叠压而成,a边和b边定子极和转子极都对称放置。

电机绕组也分为a边绕组和b边绕组,绕组分布如图3所示,下面以A相为例说明绕组缠绕方式。对于a边来说,设其属于A相的线圈为A1、A2、A3、A4,正向串联,形成a边A相绕组,通入电流后,A相线圈将在定子极内产生同方向的磁链,方向为从转子极到定子极;对于b边来说,设其属于A相的线圈为A1'、A2'、A3'、A4',同样正向串联,形成b边A相绕组,通入电流后,A相线圈也会在定子极内产生同方向的磁链,方向为从定子极到转子极。a边A相绕组和b边A相绕组反向串联,以实现a边和b边的磁链叠加^[7]。

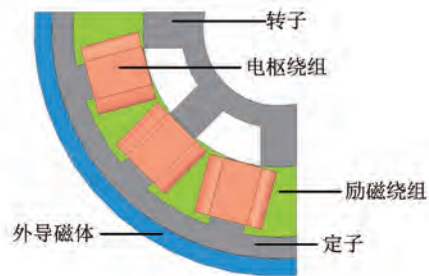


图1 DSAEM 二维图

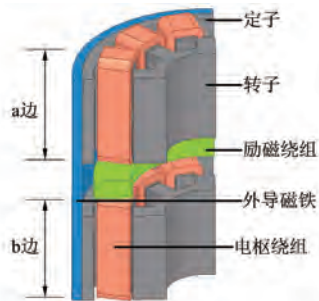


图2 DSAEM 三维图

1.2 工作原理

DSAEM的磁通路径如图4所示,根据磁通最小原理,当给励磁绕组通入直流电流后,会在内导磁体中产生沿轴向的磁场,磁场沿图4所示路径经过a边转子进入气隙再进入a边定子,通过外

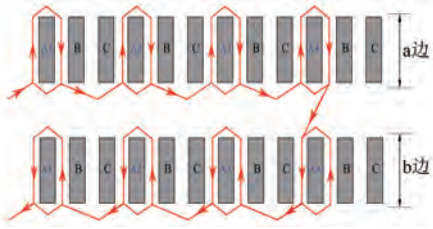


图3 绕组展开图

导磁体进入到 b 边定子中,再通过气隙和 b 边转子进入内导磁体形成闭合回路。由于同属一相的电枢绕组是反向串联关系,所以最终电机总磁链为 a 边和 b 边磁链绝对值之和。当转子转入定子极时,对应相的磁链增加;转子转出定子极时,对应相的磁链减小;定转子极无重合时,磁链不变,始终为 0。根据经验确定的电机结构尺寸见表 1。

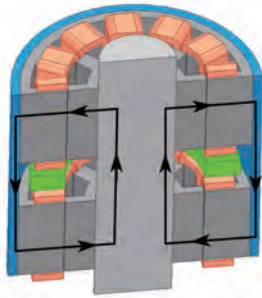


图4 磁通路径

表1 电机尺寸

参数名称	参数值
定子外径/mm	210
转子外径/mm	125
气隙长度/mm	0.5
单段定子轴向长度/mm	80
定子轭厚/mm	10
转子轭厚/mm	10
外导磁体厚/mm	7
转轴(内导磁体)直径/mm	70
中段轴向长度/mm	50

2 DSAEM 数学模型

DSAEM 的轴向结构相对复杂,每段磁路都不能简单地用线性磁阻方式来计算,且电机局部饱和以及漏磁等因素也会对其分析造成影响。为简化分析,这里忽略以上影响因素,建立简单的数学模型。

2.1 磁链方程

以 A 相为例,其磁链方程如下:

$$\psi_a = L_a i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + L_{af} i_f \quad (1)$$

式中: L_a 为 A 相自感; L_{ab} 为 A 相和 B 相互感; L_{ac} 为 A 相和 C 相互感; L_{af} 为 A 相和励磁绕组互感; i_p ($p=a, b, c, f$) 为各相电流和励磁电流。

2.2 转矩方程

转矩方程可表示为

$$T_e = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} + \frac{1}{2} i_f^2 \frac{dL_f}{d\theta} + i_a i_f \frac{dL_{af}}{d\theta} + i_b i_f \frac{dL_{bf}}{d\theta} + i_c i_f \frac{dL_{cf}}{d\theta} = T_r + T_e + T_f \quad (2)$$

式中: T_r 为磁阻转矩; T_e 为齿槽转矩; T_f 为励磁转矩。

磁阻转矩是由相绕组自感引起的转矩;齿槽转矩是由励磁绕组自感引起的转矩,表现为空载状态下定子将转子拉回到对齐位置的趋势;励磁转矩是相绕组和励磁绕组互感引起的转矩,为 DSAEM 的主转矩。

3 电机静态参数分析

采用三维有限元法,利用 Ansys 仿真软件中的 maxwell 电磁仿真模块搭建模型进行仿真分析。

3.1 空载磁场

空载时,固定励磁电流为 2 A。图 5 给出了 DSAEM 以定子极到转子极的空载磁场分布情况,图 5(a) 为电机定转子对齐位置轴向剖面的磁感应强度矢量图,图 5(b) 为轴向剖面磁感应强度云图。从图 5(a) 和图 5(b) 中可以看出,转轴中部磁感应强度最大,其次为外导磁体中部,这两处是磁力线分布最密集的地方,这也为电机设计提供了思路。因此,为了避免饱和,可适当增大转轴直径和外导磁体厚度。取 b 边电机正中部为横切面得到图 5(c) 和图 5(d),即为横向剖面的磁场分布情况图,由图 5(c) 和图 5(d) 可知,在定转子极对齐的位置,磁力线最密集,非对齐位置磁力线稀疏,存在一定的漏磁现象,这与径向励磁的双凸极电机一样,不同的是,DSAEM 所有磁力线的方向都相同。

3.2 气隙磁密

DSAEM 气隙磁密可分为两类,即圆周向气隙

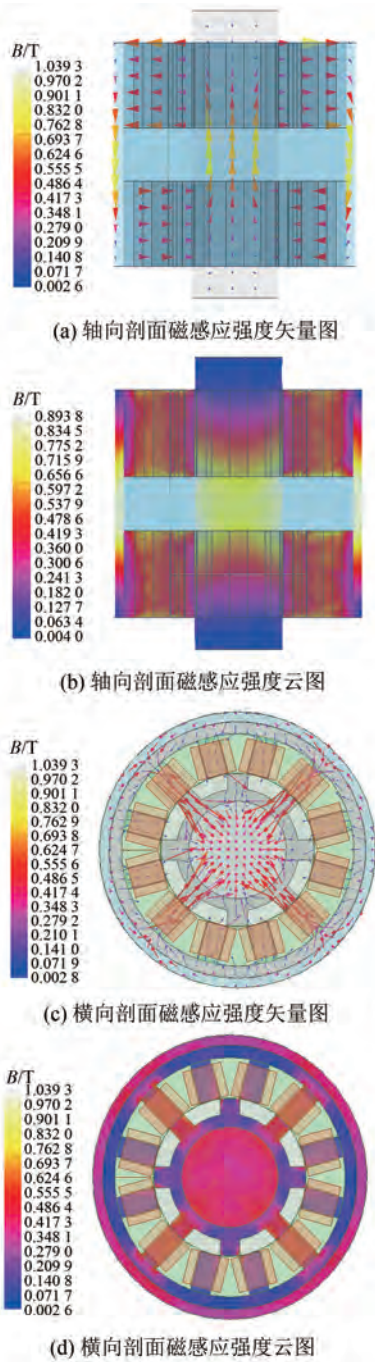


图5 DSAEM空载磁场分布

磁密和轴向气隙磁密。前者如图6所示,取电机b边正中部作横截面得到圆周气隙磁密图,后者如图7所示,取定转子极对齐位置的极中心线作竖切面得到轴向气隙磁密图。

圆周向气隙磁密在四个对齐位置达到最大值,约为0.45 T,在非对齐位置也存在一定的漏磁现象;轴向气隙磁密从b边端部开始,在[0 mm,

25 mm]上下波动较大;在[25 mm,80 mm]趋于稳定,稳定后也维持在0.45 T左右,但也可以看出,这一区间磁密依然在上升,这说明利用线性磁路法无法准确描述电机;[80 mm,130 mm]经过中部,磁密为0;[130 mm,210 mm]进入a边,磁密变化规律与b边相同。

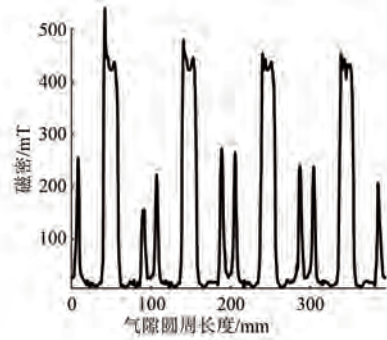


图6 圆周气隙磁密

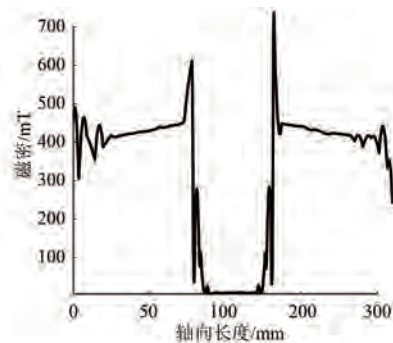


图7 轴向气隙磁密

3.3 磁链

图8给出了励磁安匝数统一为400状态下DSAEM和DSEM一个电周期内的三相磁链波形,两种电机磁链的变化规律基本一致。以A相为例进行说明,前1/3电周期转子转入定子极,磁链上升;第二个1/3电周期转子转出定子极,磁链下降;最后一个1/3电周期定转子无重合部分,磁链几乎为0。二者磁链的一致性使得用于DSEM的控制方式也同样适用于DSAEM,比如提前角控制策略^[8]、三相六状态控制策略^[9]、三相九状态控制策略等^[10-14]。

DSAEM相比于DSEM来说,由于磁各相磁路几乎相同,故其磁链波动很小,表2和表3分别为DSAEM和DSEM三相磁链数据。DSAEM各相磁链最大值波动0.38%,最小值波动0%,各相磁链基本一致;DSEM磁链最大值波动5.5%,最小值

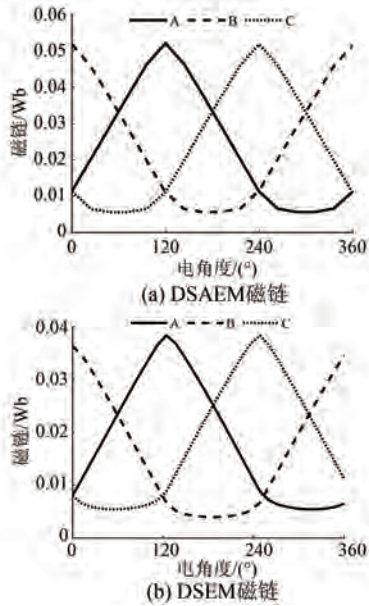


图8 三相磁链

波动 27.8%。

表2 DSAEM 磁链数据 Wb

	A	B	C
最大	0.052 0	0.051 8	0.051 8
最小	0.005 7	0.005 7	0.005 7

表3 DSEM 磁链数据 Wb

	A	B	C
最大	0.036 3	0.038 4	0.038 4
最小	0.003 9	0.005 4	0.005 4

3.4 电感

电感是 DSAEM 的重要静态参数,从 DSAEM 数学模型可以看出,无论是电机的磁链还是电磁转矩都与电感有着密切的关系。图 9 给出了励磁电流 $I_f=2\text{ A}$ 条件下的一个电周期内电枢绕组自感、电枢绕组互感和电枢绕组与励磁绕组互感图。

电感的计算式如下:

$$L = N^2 A \quad (3)$$

式中: N 为匝数, A 为磁导。

在 DSAEM 中,气隙随转子转角变化而不断变化,所以电感是位置角的函数,在定转子极对齐的位置,气隙最小,气隙磁导最大,电感最大。另外,由于磁路差异,DSAEM 中从 a 边某相穿出的磁链进入 b 边后会重新分配,这就导致 DSAEM

存在比 DSEM 更大的相间互感,相间互感会在电角度为 60° 时达到最大值。以 AB 互感为例,此时对于 A 相来说,转子极刚好一半进入定子极,而对于 B 相来说,转子极刚好一半转出定子极。

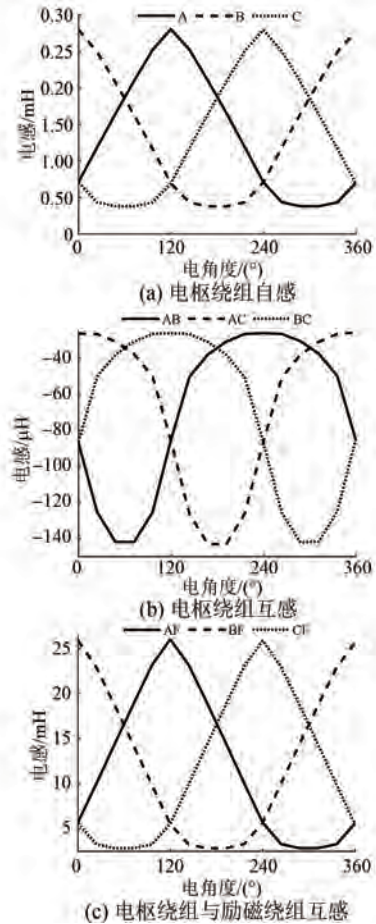


图9 DSAEM 电感

4 输出特性分析

4.1 空载特性

图 10 为外发电电路图,为了获得最原始输出的电压波形,发电外电路采用由六个二极管构成的整流电路,不采用滤波电容,外接负载电阻 R_o ,令 $R_o=\infty$ 得到空载输出电压。图 11 给出了 $I_f=2\text{ A}, 6\text{ A}, 10\text{ A}, 14\text{ A}$ 四个不同励磁电流下的空载输出电压波形图。

定义输出电压脉动为

$$K_v = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (4)$$

空载输出电压脉动率分别为 24.51%、26.37%、26.79%、26.59%。

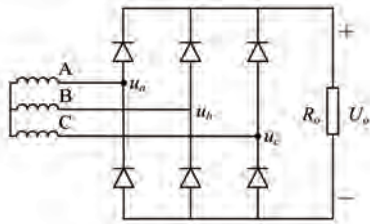


图 10 外发电电路图

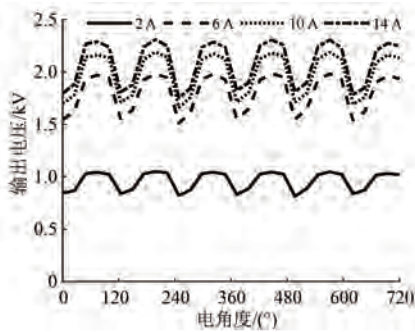


图 11 空载输出电压图

电机的空载特性如图 12 所示,从图中可看出电机在 $I_f=4\text{ A}$ 时开始进入饱和, $I_f=12\text{ A}$ 时已接近深度饱和,此时再增加励磁电流,输出电压增大则不明显。

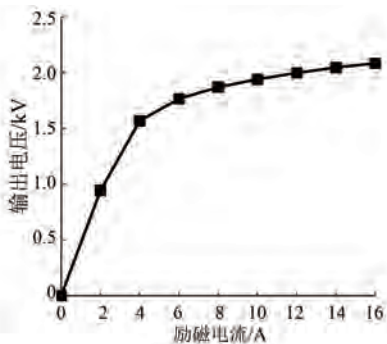


图 12 空载特性

4.2 负载特性

仍采用图 10 所示的电路,外接纯阻性负载,电机在不同励磁电流下的外特性和功率特性如图 13 所示。从外特性曲线可以看出,电机外特性较软,电压调整率较大。从功率特性曲线可以看出,随着励磁电流增加,电机功率增加,依据空载特性曲线,假定励磁电流 $I_f=16\text{ A}$ 时电机完全饱和,电机最大功率可达 30 kW ,此时输出电流达到 40 A ,输出电压为 750 V ,电机铁损为 1.68 kW ,铜损为 197.6 W ,效率为 93.74% ,功率密度为 6 000 kW/m^3 。

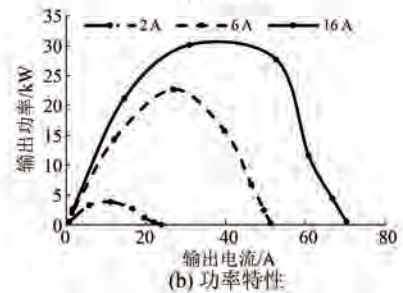
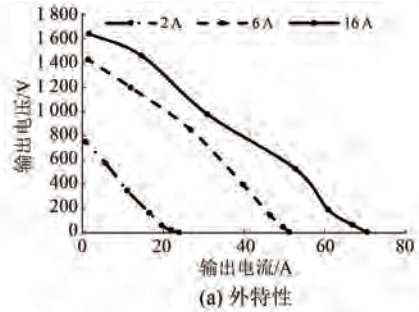


图 13 负载特性

5 结 语

本文设计并研究了一种新型高速轴向电励磁双凸极电机,介绍了电机结构和工作原理,并建立了数学模型,利用三维有限元法进行仿真分析,得出结论如下:

- (1) 电机具有双定转子结构,转子无绕组,无永磁体,可在恶劣条件下运行,且励磁可调,以便于调压,其效率高,功率密度大,适于航空电源系统。
- (2) 电机励磁绕组放置在中部,拥有更大的空间,避免了因槽面积和电流密度的限制而使得电机实际功率密度较低的问题,同时减轻了对定子槽内绕组的压力,定子槽内可放置更多电枢绕组,也有采用粗导线增加电流承载力。
- (3) DSAEM 三相磁路对称,三相磁链波动很小,可输出更稳定的电压,且由于磁链类似于 DSEM,控制上可直接采用 DSEM 的控制方式,简单方便。

【参考文献】

[1] 严仰光,秦海鸿,龚春英,等. 多电飞机与电力电子[J]. 南京航空航天大学学报,2014,46(1): 8.
 [2] 周兴伟,谈阳,周波,等. 航空电励磁双凸极无刷直流起动发电机系统控制关键技术综述[J]. 电机与控制应用,2021,48(1): 8.

- [3] 严仰光, 陈志辉, 孟小利. 轴向励磁的混合励磁双凸极电机; CN201010560410[P]. 2010-11-26.
- [4] 吴德平, 严仰光. 一种轴向结构双凸极电机; CN109687675A[P]. 2018-12-21.
- [5] 马昕晨, 陈志辉. 高压直流轴向混合励磁双凸极发电机的结构及特性分析[J]. 电气制造, 2022, 17(2): 65.
- [6] 刘爱民, 娄家川, 任达, 等. 轴向磁通线圈辅助定子励磁双凸极无刷直流电机及转矩脉动抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 9.
- [7] 汤蕴璆. 电机学[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [8] 戴卫力, 王慧贞, 严仰光. 电励磁双凸极电机的提前角度控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27): 6.
- [9] 刘星, 陈志辉, 朱杰, 等. 电励磁双凸极电动机三相六拍控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 138.
- [10] 王寅, 张卓然, 袁琬欣, 等. 双凸极无刷直流电机三相九状态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 8.
- [11] JIANG S, ZHOU B, XIONG L, et al. Analysis and design of a novel dual-stator DSEM for fault-tolerant operation under loss of excitation [C] // 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems, 2020: 1303.
- [12] 周倩云. 20 kW 高速电励磁双凸极电机电动特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [13] 马昕晨, 陈志辉, 赵雅周. 基于响应面法的轴向混合励磁双凸极航空发电机优化设计[J]. 航空科学技术, 2022, 33(10): 8.
- [14] DENG F, MENG X, XU L, et al. Optimization design of doubly salient electro-magnetic motor under fault-tolerant operation of excitation fault [C] // 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2020: 822.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于1959年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月10日出版,国内外公开发行人,邮发代号4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的

贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。近年还被JST日本科学技术振兴机构数据库(日)和Pж(AJ)文摘杂志(俄)等国外数据库收录。为及时刊载上述技术领域的最新研究动态,推广研发成果,推动研究与应用的紧密结合,欢迎各高校相关课题组及团队和科研技术人员等向本刊投稿,本刊不收取任何版面费或审稿费等费用!

《电机与控制应用》官网: <http://www.motor-abc.cn/djykyz/home>.