

高速永磁电机定转子小间隙三维流场计算*

李 维¹, 程文杰¹, 贾修建², 肖 玲¹, 樊红卫³, 孙岩桦⁴

(1. 西安科技大学 理学院, 陕西 西安 710054;

2. 中航光电科技股份有限公司, 河南 洛阳 471003;

3. 西安科技大学 机械学院, 陕西 西安 710054;

4. 机械结构强度与振动国家重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049)

摘 要: 为了考察高速、超高速下这种“定转子环形间隙+定子槽”并联冷却结构的流场特性, 针对一台额定转速 120 000 r/min 的超高速永磁电机, 采用计算流体动力学方法对定转子小间隙三维流场进行了研究, 分别考虑了定子槽、轴向冷却流, 以及转速对电机定转子小间隙流场的影响。结果表明: 定子开槽后, 原先存在于定转子环形间隙内的泰勒涡消失了, 另外高转速、轴向流加强了环形间隙区气流与定子槽区气流的混合程度。研究结果为高速永磁电机转子热设计提供了重要参考依据。

关键词: 永磁电机; 流场; 定转子小间隙; 轴向流; 泰勒涡

中图分类号: TM 301.4+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)12-0094-06

Calculation of 3D Fluid Fields in the Stator-rotor Narrow Gap of the High Speed Permanent Magnet Motor*

LI Wei¹, CHENG Wenjie¹, JIA Xiujian², XIAO Ling¹, FAN Hongwei³, SUN Yanhua³

(1. Department of Basic Courses, Mechanics Research Center, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, 710054, China;

2. China Aviation Optical-Electrical Technology Co., Ltd., Luoyang 471003, China;

3. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

4. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to explore the flow characteristics of the cooling structure (stator-rotor ring gap+stator slots) under the ultra-high speed, taken a rated speed 120 000 r/min ultra-high speed PM motor as an example, and studies 3D fluid fields in the stator-rotor narrow gap by computational fluid dynamics method with considering the influences of stator slots, axial flow and rotational speed on the flow field. It showed that taylor vortices in the stator-rotor ring gap will disappear for the slotting stator. Furthermore, a high rotational speed and axial flow will enhance the mixing degree of the air in the stator-rotor ring gap and the air in the stator slot. The resulted provides a significant reference for the thermal design of rotor of the high speed PM motor.

Key words: permanent magnet motor; fluid field; stator-rotor narrow gap; axial air flow; taylor vortex

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51605380, 11502196, 51275386, 51175411, 51705413); 973 计划“先进重型燃气轮机制造基础研究”项目(2013CB035705); 中国博士后资助项目(2015M580865, 2016M602842, 2017M613291XB); 陕西省教育厅资助项目(15JK1483); 2016 年陕西省大学生创新创业训练计划项目(201610704047)

作者简介: 李 维(1996—), 男, 研究方向为永磁电机电磁场、流场。

程文杰(1982—), 男, 博士, 研究方向为高速永磁电机耦合场。

贾修建(1991—), 男, 硕士, 研究方向为高速永磁电机冷却系统设计。

0 引言

高速、超高速永磁电机功率密度高、体积小、效率高、可靠性高、维护简单,且可以直接驱动负载。其功率能覆盖小到几百瓦大到兆瓦级的范围,在飞轮储能^[1-2]、电动汽车^[3-4]、飞机发动机^[5]、透平压缩机^[6]和微型燃气轮机^[7]等领域具有广阔的应用前景。目前常用的稀土钴或者钕铁硼永磁体的剩磁和矫顽力均随温度的上升而降低。过高的温度会使得永磁体励磁磁通减小,引起电机偏离设计工作点,甚至造成永磁体永久性退磁。不可否认,高速将带来诸多优点,如整机尺寸减小,结构紧凑,重量减轻,但如转子没有经过合理的热设计,这些优点会造成转子散热困难。

目前超高速永磁电机转子散热的主流技术是采用轴流、离心风扇对定子小间隙进行鼓风或抽风,达到强迫空气冷却转子的目的。当无轴向流时,定子小间隙内的流动属于 Taylor-Couette 流动,间隙内会出现典型的泰勒涡^[8-9]。若引入轴向流,则此种流动属于 Taylor-Couette-Poiseuille 流动,强迫空冷下定转子间隙的流动即属于这种情形。针对 Taylor-Couette 流动,文献[10]考虑了定子开槽、转子光滑时不同旋转雷诺数(泰勒数)和定子槽数对间隙内气体流动模态的影响,并确定了流体模态转换的临界雷诺数,但是没有考虑轴向流的影响。针对 Taylor-Couette-Poiseuille 流动,Werely 和 Lueptow^[11]试验分析了旋转雷诺数、轴向雷诺数对旋转圆筒间隙内流动模态的影响。文献[12]则通过数值计算复现了 Werley 等人的试验结果。但是上述研究都没有考虑定子开槽的情形。对于定子无槽、转子开槽的情形,文献[13]分析了轴向雷诺数和旋转雷诺数对转子表面对流换热系数的影响。事实上,低速时转子开槽或者加棒会增强其散热,但在高速时反而会加剧转子风摩擦损耗。对于永磁电机散热,Fenot M^[14]总结了轴向流对定子小间隙流场特性和散热效果的影响,但缺乏对定子槽效应的论述。文献[15-18]对一台 60 000 r/min 的磁悬浮高速永磁电机,进行了转子空气摩擦损耗计算及测试研究。文献[19]对一台兆瓦级的高速永磁电机进行了通风系统设计,并对其冷却效果进行了研究。目前,关于计入电机定子槽效应、轴向流、超

高速影响的定转子小间隙流场特性的研究还鲜有报道。试验测量高速电机定转子小间隙气流场极为困难,而理论预测则是一种指导转子热设计经济可行的方法。

工程中,可以将定子槽满率设计稍低一些,将多余的槽间隙作为轴向冷却风道,并与定转子环形间隙并联。为了考察高速、超高速下这种“定转子环形间隙+定子槽”并联冷却结构的流场特性,本文以一台转速 120 000 r/min 的弹性箔片轴承支承的超高速永磁同步电机为例,采用计算流体动力学方法研究了定子槽效应、轴向流、转速对三维流场的影响规律,为转子的对流散热技术提供了参考。

1 3D 流体场模型及边界条件

大部分电机的定转子之间流体流动为紊流。当气流的马赫数 $M_a < 0.3$ 时,可以认为气流是不可压缩的,即流场中的压力场仅造成气体的运动,而不会改变气体的密度。本文所研究的定转子环形气隙内的气流平均 $M_a \approx 0.29$ 。为简化计算,根据旋转周期性对称性,取电机的 1/12 进行建模,并作如下假设:①气体按不可压缩处理;②不考虑定子损耗的影响,即定子槽的所有壁面视为绝热;③轴向流垂直于气隙入口截面流入;④在运动效应上,转子等效成薄壁筒。

研究的物理模型如图 1 所示。

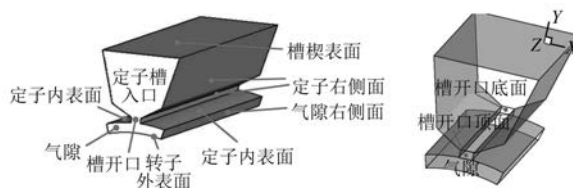


图 1 定子间隙 1/12 模型

本文考虑了三种计算模型:无槽无轴向流、有槽无轴向流及有槽有轴向流。有槽模型的边界条件设置如表 1 所示。

图 2 所示为计算模型的横截面及观察结果需要用到平面和直线,其中 l_1 为 77° 方向,定转子之间的径向线段; l_2 为 90° 方向,定子槽底部与转子表面之间的径向线段;另外, $l_3 \sim l_8$ 均为轴向线段。具体为, l_3 在 77° 方向,离转子表面 0.75 mm 处(气隙中间); l_4 在 90° 方向,离转子表面

表 1 计算模型的边界条件设置

项目	入口	出口	定子槽表面	转子外表面	环形气隙左侧面	环形气隙右侧面
无轴向流	轴向周期性	轴向周期性	绝热壁面	旋转壁面	周向周期性	周向周期性
有轴向流	速度	流量	绝热壁面	旋转壁面	周向周期性	周向周期性

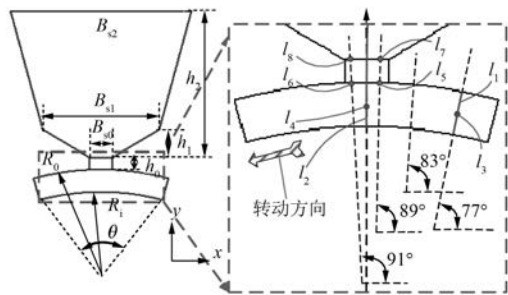


图 2 模型横截面及尺寸

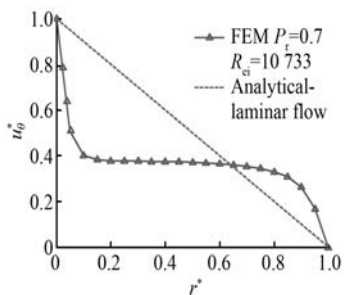


图 3 Couette 流的周向速度对比

0.75 mm 处, l_5 、 l_7 分别在 89° 方向槽开口顶面和底面处; l_6 、 l_8 分别在 91° 方向槽开口顶面和底面处。无槽模型与有槽模型的横截面尺寸如表 2 所示。

表 2 模型参数

项目	R_i	R_0	$\theta/(^\circ)$	B_{s0}	B_{s1}	B_{s2}	h_0	h_1	h_2
无槽	15.9	17.4	30	-	-	-	-	-	-
有槽	15.9	17.4	30	1.5	7.8	12.8	0.8	1.8	1.3

计算模型的某些物理量采用无量纲形式: 径向长度 $r^* = (r - R_i) / (R_o - R_i)$, 轴向长度 $z^* = z / l_{ef}$, 周向速度 $u_\theta^* = u_\theta / (\Omega R_i)$, 其中 l_{ef} 为定子铁心的轴向长度, Ω 为转子角速度。

2 不同条件下的流场计算结果分析

2.1 定子无槽和无轴向流的流场

无槽、无轴向流下的同轴旋转圆筒间的流动属于 Couette 流。当流动为层流时, 速度场只含有周向分量 $u_\theta(r)$, 且具有解析解。当流动为紊流时, 速度场将与层流不同, 其差异如图 3 所示: 在高的雷诺数下, $u_\theta(r)$ 是半径的非线性函数, 其在气隙中间段 ($r^* = 0.2 \sim 0.8$) 分布较均匀, 而在靠近定转子壁面处变化剧烈。

另外, 紊流还含有径向速度 $u_r(r)$ 和轴向速度 $u_z(r)$ 分量, 其在 r - z 平面上形成如图 4 所示的泰勒涡, 并且随着转速的增加, 单位长度内的泰勒涡个数减少, 涡的速度增强。这表明泰勒涡有裹挟流体的作用, 不利于散热, 但是能加强转子、定子表面流

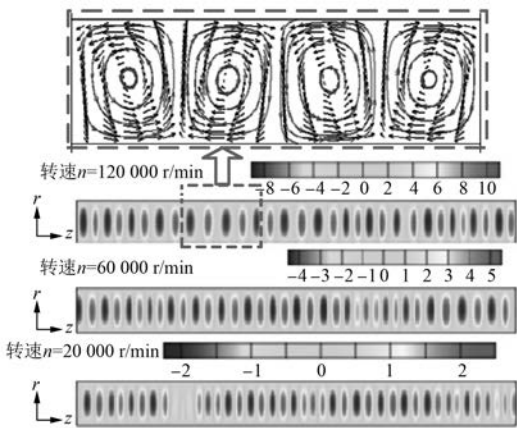


图 4 Couette 流的泰勒涡分布

体之间的能量交换, 转速越大, 能量交换越强烈。

2.2 定子槽和轴向流对流场的影响

2.2.1 无轴流时定子槽对流场的影响

转子转速 120 000 r/min, 无轴向流, 定子开槽时流场的计算结果如图 5、图 6 所示。如图 5(a) 所示, 周向速度沿 l_1 和 l_2 下降非常快, 在槽开口区已减至约 12 m/s, 而在定子槽区几乎为零。如图 5(b) 所示, 无槽时由于泰勒涡的作用, 径向速度沿轴向呈类似正弦波动 (幅值约 10 m/s), 而开槽后, 这种波动非常微弱, 表明定子开槽后, 破坏了泰勒涡形成的条件, 泰勒涡消失。

图 6(a) 为模型出口端面处的流线图 (周向速度+径向速度)。由图 6(a) 可知, 当环形间隙区的气流进入槽开口区时, 会形成一个顺时针旋转的涡, 而当槽开口区内的气流进入定子槽区时, 又会

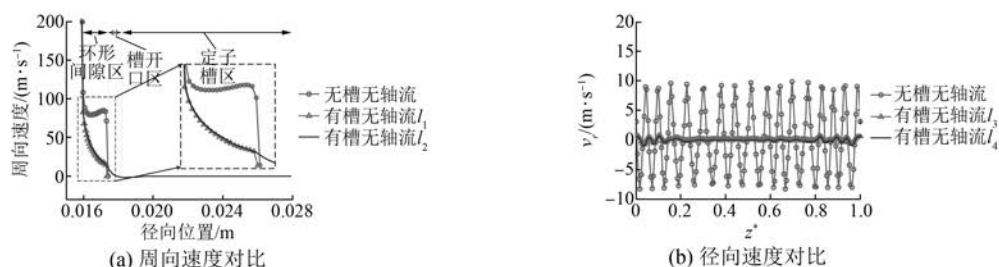


图5 定子槽对流场的影响

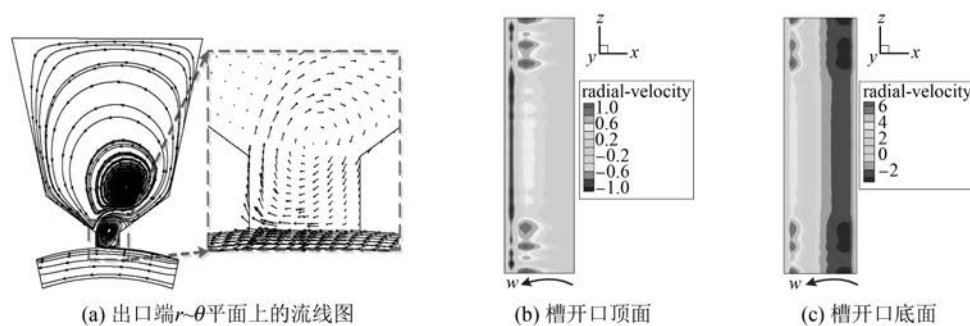


图6 有槽无轴向流的流场云图

形成一个逆时针旋转的涡,形成一个“涡对”。

图6(b)和图6(c)显示了槽开口顶面和槽开口底面的径向速度云图,对比可见,槽开口顶面上的径向速度幅值较小($<1\text{ m/s}$),且大部分区域速度为零。图6(b)中槽开口底面上的径向速度分布非常明显,左边为正(气流穿过槽开口底面进入定子槽区),右边为负(气流从定子槽区穿过槽开口底面进入槽开口区)。这种情形正好与图6(a)中槽开口区内的涡流动一致。

2.2.2 定子开槽时轴向流对流场的影响

转子转速 $120\,000\text{ r/min}$,入口风速 40 m/s ,定子开槽时流场的计算结果如图7~图10所示。如图7(a)所示,引入轴向流后,图6(a)所示的涡

仍然存在,只不过轴向流将“涡对”的生成位置吹向了“下游”。

如图7(b)所示,引入轴向流后,径向速度在槽开口顶面大部分为正,而且幅值较无轴向流时增大了7倍,说明环形间隙内的气流进入槽开口区的流量增大了。图7(c)的径向速度幅值是图6(c)的3.7倍,表明轴向流增强了气流从槽开口底面进入到定子槽区的流量,有利于散热。从以上结果分析可知,一种最理想的冷却效果为:引入轴向流将图7(a)所示的涡对吹出去,消除其对热量的裹挟作用,将对流换热效果最大化。

如图8所示,轴向流对 l_3 处(环形间隙内)的径向速度影响较小,而对 l_4 处(槽开口正下方处

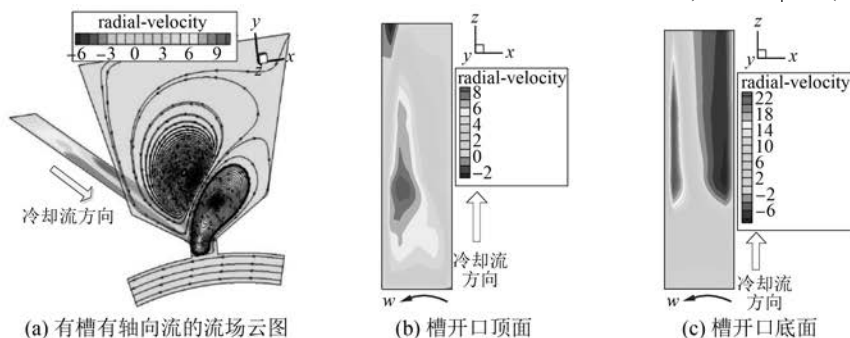


图7 有槽有轴向流的流场云图

的环形间隙内)的径向速度影响较大,沿 l_4 分布的径向速度的幅值变大了(约2 m/s),除出口附近处外,其在整个轴向长度内都是正值。这意味着轴向流增强了槽开口正下方处的环形间隙内的气流径向速度。

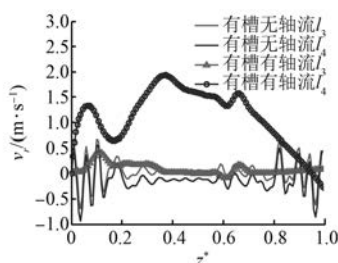


图8 开槽时轴向流对径向速度的影响

轴向线段 $l_5 \sim l_8$ (槽开口顶面、底面上)上的径向速度和轴向速度分布如图9和图10所示。

如图9(a)所示,较无轴向流的情形,引入轴向流后,当 $z^* \in (0 \sim 0.2)$,径向速度在 l_5 、 l_6 上的分布相同;当 $z^* \in (0.2 \sim 1)$,径向速度为正,幅值显著增大,且 l_6 上的径向速度大于 l_5 上的。这说明环形间隙内的气流流入到槽开口,且槽开口左壁面处(迎着转子旋转方向那侧)的流量大。在图9(b)中,当 z^* 超过0.2后,径向速度沿 l_8 快速上升至15 m/s,后下降至5 m/s,而沿 l_7 快速下降至-7.5 m/s,然后缓慢升至-6 m/s,这说明大部分气流顺着“槽开口左侧壁面”进入到定子槽区,少部分气流顺着“槽开口右侧壁面”从定子槽区“回流”到槽开口区。

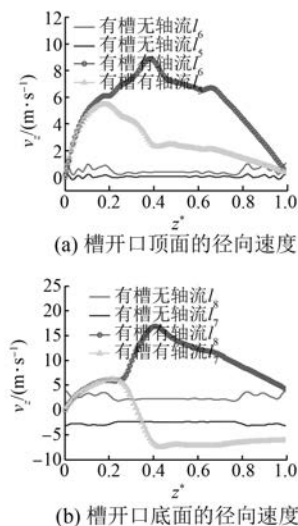


图9 槽开口顶面和底面处的径向速度

如图10所示,无轴向流时,槽开口区的气流没有轴向速度,引入轴向流后,槽开口底面的轴向速度比顶面的大。特别地,图10(b)显示,沿 l_7 分布的轴向速度幅值要比沿 l_8 分布的快约6.5 m/s,说明“回流”前进得更快一些,气流的迹线为三维螺旋型。另外,在 $z^* \in (0.2 \sim 1)$,图9和图10中的速度分布都相同,说明轴向流将涡的发生位置吹到了 $z^* = 0.2$ 处。

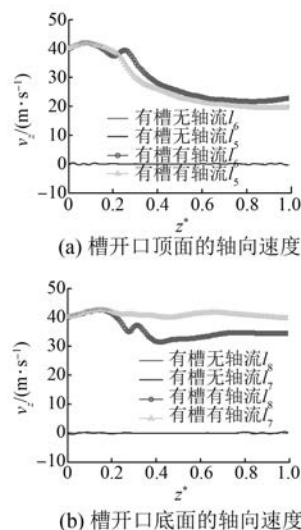


图10 槽开口顶面和底面处的轴向速度分布

3 结 语

(1) 定子无槽、无轴向流时,随着转速的增加,单位长度内的泰勒涡个数减少,涡的速度增强。定子开槽后,泰勒涡消失,但是气流会在槽口区和定子槽区之间来回流动,形成一个“涡对”,使气流呈现出一种新的运动模式。

(2) 轴向流将“涡对”的生成位置吹向了“下游”,并且增强了气流从槽开口底面进入到定子槽区的流量,有利于散热。一种最理想的冷却效果为:引入轴向流将此“涡对”吹出去,消除其对热量的裹挟作用,将对流换热效果最大化。

(3) 定子开槽后,大部分气流沿着“迎着转子旋转方向那侧的槽开口壁面”进入到定子槽区,少部分气流沿着“槽开口的另一侧壁面”从定子槽区“回流”到槽开口区,但“回流”前进得更快一些,使气流的迹线呈三维螺旋型。

【参考文献】

[1] CAO H, KOU B, ZHANG D, et al. Research on loss

- of high speed permanent magnet synchronous motor for flywheel energy storage [C] // 16th IEEE International Symposium on Electromagnetic Launch (EML) Technology, Beijing, China, 2012: 1-6.
- [2] KOU B, CAO H, ZHANG D, et al. Structural optimization of high speed permanent magnet synchronous motor for flywheel energy storage [C] // 16th International Symposium on Electromagnetic Launch (EML) Technology, Beijing, China, 2012: 1-7.
- [3] NERG J, RILLA M, RUUSKANEN V, et al. Design of direct-driven permanent magnet synchronous motors for an electric sports car [C] // 20th International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, 2012: 177-182.
- [4] NERG J, RILLA M, RUUSKANEN V, et al. Direct-driven interior magnet permanent-magnet synchronous motors for a full electric sports car [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 4286-4294.
- [5] FERNANDO W U N, BARNES M, MARJANOVIC O. Direct drive permanent magnet generator fed AC-DC active rectification and control for more-electric aircraft engines [J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5(1): 14-27.
- [6] BLUNIER B, MIRAOUI A. Proton exchange membrane fuel cell air management in automotive applications [J]. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2010, 7(4): 1571-1574.
- [7] 田野, 孙岩桦, 杨利花, 等. 带弹性支撑和挤压油膜阻尼器的高速电机支撑系统实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 79-86.
- [8] 吴波. 泰勒库特流数值模拟方法的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [9] WERELEY S T, LUEPTOW R M. Velocity field for taylor-couette flow with an axial flow [J]. Physics of fluids, 1999, 12(11): 3637-3649.
- [10] LIU D, KANG I S, CHA J E, et al. Experimental study on radial temperature gradient effect of a taylor-couette flow with axial wall slits [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011(35): 1282-1292.
- [11] WERELEY S T, LUEPTOW R M. Velocity field for taylor-couette flow with an axial flow [J]. Physics of Fluids (1994-present), 1999, 11(12): 3637-3649.
- [12] HWANG J Y, YANG K S. Numerical study of taylor-couette flow with an axial flow [J]. Computers & Fluids, 2004, 33(1): 97-118.
- [13] FENOT M, DORIGNAC E, GIRET A, et al. Convective heat transfer in the entry region of an annular channel with slotted rotating inner cylinder [J]. Applied Thermal Engineering, 2013(54): 345-358.
- [14] FENOT M, BERTIN Y, DORIGNAC E, et al. A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(7): 1138-1155.
- [15] 邢军强, 王凤翔, 张殿海, 等. 高速永磁电机转子空气摩擦损耗研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 14-19.
- [16] 徐云龙. 高速永磁电机损耗计算与热分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
- [17] 邢军强. 高速永磁电机转子损耗及通风散热研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
- [18] 张凤阁, 杜光辉, 王天煜, 等. 兆瓦级高速永磁电机通风系统设计与转子表面风摩擦损耗 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(2): 50-55.
- [19] 黄允凯, 余莉, 胡虔生. 高速永磁电动机设计的关键问题 [J]. 微电机, 2007, 39(8): 6-9.

收稿日期: 2017-05-03

[主要栏目]

- 综述
- 研究与设计
- 变频与调速
- 控制与应用技术
- 应用
- 运行与保护
- 新产品介绍
- 新能源与风力发电
- 电机系统节能
- 测试技术与检测设备
- 行业信息