

真空飞轮转子强化辐射换热实验研究

鲍炳炎^{1,2}, 王 军^{1,2}, 余中军³, 阮 琳^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘要:电机是飞轮储能系统实现电能和动能转换的关键部件,为提高飞轮储能系统效率,电机转子通常在真空环境下运行。然而,在真空环境中,转子产生的热量仅能通过热辐射方式向外传递,且辐射换热强度很低,这使得转子产生的热量难以排散,导致转子温度不断升高,甚至引起磁钢退磁而损坏电机。为此,本文提出了飞轮电机定子侧低温蒸发冷却方案和转子侧高辐射涂层方案,主要研究定子侧低温和转子侧高辐射涂层对转子温升的影响,通过实验验证了所提方案对电机转子辐射换热的强化作用。实验结果表明:定子侧温度降低15℃仅使转子温升降低1℃,对于辐射换热强度的提升效果并不显著;涂覆高辐射涂层后,定子侧温度降低15℃使转子温升降低近3℃,冷却效果显著改善;将定子侧低温蒸发冷却与转子侧高辐射涂层相结合,能够进一步强化辐射换热,获得更好的冷却效果。

关键词:飞轮电机;转子真空散热;热辐射;定子蒸发冷却;高辐射涂层

中图分类号:TM30 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2024.12.013

[引用本文格式]鲍炳炎,王 军,余中军,等.真空飞轮转子强化辐射换热实验研究[J].热能动力工程,2024,39(12):113-118.

BAO Bingyan, WANG Jun, YU Zhongjun, et al. Experimental study on enhanced radiation heat transfer of vacuum flywheel rotor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(12): 113-118.

Experimental Study on Enhanced Radiation Heat Transfer of Vacuum Flywheel Rotor

BAO Bingyan^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, YU Zhongjun³, RUAN Lin^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code:100190;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code:100049; 3. National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan, China, Post Code:430033)

Abstract: The motor is the key component of the flywheel energy storage system to realize the conversion of electric energy and kinetic energy. In order to improve the efficiency of the flywheel energy storage system, the motor rotor is usually operated in a vacuum environment. However, the heat generated by the rotor can only be transmitted outward through thermal radiation in a vacuum environment and the radiation heat transfer intensity is very low. This makes the heat generated by the rotor difficult to disperse, resulting in a continuous increase in the rotor temperature and even causes the demagnetization of the magnetic steel to damage the motor. Therefore, this paper proposes a low-temperature evaporative cooling scheme on the stator side of the flywheel motor and a high-radiation coating scheme on the rotor side. The effects of low temperature on the stator side and high radiation coating on the rotor side on the temperature rise of the rotor are mainly investigated. The enhancement effect of the proposed scheme on the radiation heat transfer of the motor rotor is verified by experiments. The experimental results show that only the rotor temperature rise is reduced by 1℃ after the stator side temperature is reduced by 15℃. The improve-

ment effect on the radiation heat transfer intensity is not significant. After coating the high radiation coating, the stator side temperature is reduced by 15 ℃, the rotor temperature rise is reduced by nearly 3 ℃ and the cooling effect is significantly improved. The combination of low-temperature evaporative cooling on the stator side and high-radiation coating on the rotor side can further enhance the radiation heat transfer and obtain better cooling effect.

Key words: flywheel motor, rotor vacuum heat dissipation, thermal radiation, stator evaporative cooling, high radiation coating

引 言

目前常见的储能方式包括抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、电化学储能、超级电容储能和超导磁储能等。相比于其他储能方式,飞轮储能具有比能量高、比功率高、循环寿命高、能量转化效率高和安全可靠等优势^[1]。这些特点决定了飞轮储能适用于需要短时高功率电能输出且充放电频繁场合,目前已经在轨道交通能量回收、船舶综合电力系统、新能源并网发电、不间断电源等领域得到应用^[2]。

飞轮储能系统损失主要包括系统损耗和散热损耗,系统损耗又包括电损、风损和轴承损耗^[3]。高速飞轮储能系统的转速可达 40 000 ~ 50 000 r/min,为减小高转速下飞轮储能系统的风阻,转子通常在低压或真空条件下运行。同时,为减小系统轴承摩擦损耗,常采用电磁轴承,将飞轮转子悬浮于真空中,飞轮储能系统效率可达 95% 以上^[4-5]。然而在真空环境中,飞轮电机转子产生的热量基本只能通过热辐射方式向外传递,且辐射强度很弱^[6]。系统产生的热量排散困难,导致转子温度不断升高,甚至会引起磁钢退磁而损坏电机。

对于飞轮电机转子冷却,其方式主要有轴孔内油冷、填充惰性低分子冷却气体和强化辐射换热等。文献[7]采用数值模拟的方法研究了飞轮储能系统转子单回路热虹吸冷却结构,该冷却方法是将飞轮转子旋转过程中产生的离心力,作为热虹吸回路中冷却流体的驱动力,通过冷却介质将转子发热部位的热量迅速传导至转轴冷端进行冷却。文献[8]提出了轴心内热虹吸冷却结构,通过在电机和磁轴承发热部位布置储液槽的方式,可同时对电机和磁轴承转子进行冷却。专利[9-10]提出了飞轮储能系

统转子轴孔冷却方式,分为主动式和自吸式冷却方案。通过在转子轴心开孔,并导入冷却气体或液体的方式带走系统热量。在保证一定真空度的情况下,可向真空室内填充氦气和空气混合物,以增强转子流动换热能力。Suzuki 等人^[11]和 Ajisman 等人^[12]研究了在飞轮储能系统真空室内填充氦气对系统风阻的影响。结果表明,与纯空气相比,在真空室内填充氦气和空气混合物,可以在有效降低风阻的同时,提高击穿电压,并增强转子散热能力。

虽然已有大量文献、专利对电机转子冷却进行了研究,但在实际过程中,由于系统转子处于高真空环境和磁悬浮状态,大多数冷却技术方案都缺乏一定的可实施性。在真空环境下,飞轮电机转子热量几乎只能通过辐射换热向外散发。此时,构建更大的定子侧内表面与转子侧外表面的换热温差将有利于强化辐射换热,有助于控制转子温升。本文提出将飞轮电机定子浸泡于低温冷却工质中,通过降低定子侧温度的方法来验证低温定子侧内表面对真空环境下辐射换热的强化作用。在此基础上,在转子侧外表面涂覆高辐射层,验证转子侧外表面高辐射涂层对真空环境下辐射换热的强化作用。

1 定子低温蒸发冷却方案

1.1 辐射换热原理

热辐射是由于原子或分子电子构型的变化而以电磁波(或光子)的形式传递能量。所有固体、液体、气体都能不断地发射辐射,且不断地吸收辐射。辐射换热不需要中间介质,两平面间辐射换热如图 1 所示,图中 N_i, N_j 为两表面的法向方向, θ_i, θ_j 为辐射面法向与两个面单元的夹角, A_i, A_j 为辐射面的面积。

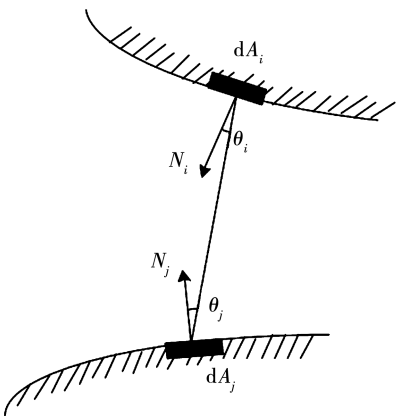


图 1 两平面间辐射换热示意图

Fig. 1 Schematic diagram of radiation heat transfer between two planes

辐射换热速率与材料表面发射率、两个辐射面的温度及角系数有关,在计算辐射换热的温度场时普遍应用以下方程:

$$Q_i = \sigma \varepsilon_i F_{ij} (T_i^4 - T_j^4) \tag{1}$$

式中: Q_i —表面的辐射换热速率; σ —斯蒂芬-玻尔兹曼常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε_i —材料表面发射率; T_i 、 T_j —辐射面的温度; F_{ij} —角系数,由下式计算:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \iint \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i \tag{2}$$

式中: r —辐射面间的距离。

由式(1)可知,辐射换热速率与两平面的温差及平面材料表面的发射率有关。增加定子侧内表面与转子侧外表面的换热温差和增大材料表面的发射率,将有助于强化辐射换热,从而控制转子温升。

1.2 定子低温蒸发冷却模型

飞轮电机在高真空环境下运行,散热条件受限很大,转子热量几乎只能通过辐射换热向外散发。降低定子侧内表面的温度来增大定子内侧和转子外侧的温差,能够提高转子外表面的辐射换热作用。针对定子侧的冷却方式,与常规空气冷却、水冷却相比,蒸发冷却方式具有环保、无腐蚀、高绝缘性、高稳定性、散热更均匀的特点^[13]。基于此,本文提出一种基于压缩制冷循环的定子浸泡式蒸发冷却方案,建立了定子低温蒸发冷却系统如图 2 所示。

该冷却系统主要由飞轮电机和蒸发冷却循环装置组成。在飞轮电机定子侧安装定子套管形成外部

密封腔,将定子完全封装并浸泡在蒸发冷却工质中。密封腔顶部设置出气口,底部设置入液口,和蒸发冷却循环系统连接。冷却工质汽化后的气液混合物从顶部的出气口进入系统的气液分离器,分离器出来的汽态冷却工质经过压缩机加热加压后进入冷凝器冷却,冷却后的液态工质进入储液罐储存。经过电子膨胀阀(EEV)调节供液量后,储液罐的蒸发冷却工质由入液口进入密封腔内,实现整体系统的循环。通过该系统可降低定子侧温度,从而研究不同定子温度对转子温升的影响。

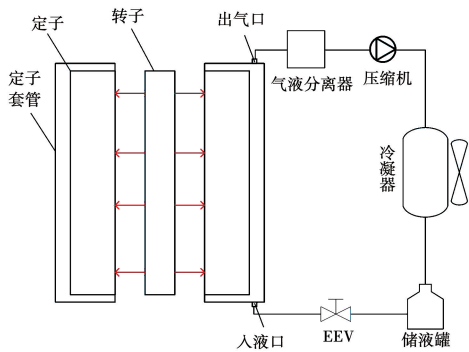


图 2 定子低温蒸发冷却系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stator low temperature evaporative cooling system

2 实验平台设计

2.1 实验台搭建

为验证定子低温蒸发冷却方案的可行性,设计了如图 3 所示的实验台。真实电机定子侧发热,热负荷较高,压缩制冷系统可以正常运行。模拟实验样机热源来自转子辐射换热,而定子不发热,导致系统热负荷过低,容易造成压缩机不能正常回液,发生故障。因此,实验中采用冷水机组替代压缩制冷机组,为飞轮电机模拟样机的定子侧提供冷源,以此实现定子侧不同的壁面温度。本实验的目的是验证定子侧温度对辐射换热强度的影响,实验重点在于实现不同的定子侧壁面温度,因此,采用更易实施的冷水机组制冷法,在冷水机组和实验样机的连接管道上放置温度计和流量计来检测温度和流量,泵为流动循环提供动力。

为了便于数据测量,在保证基本尺寸不变的情况下,实验样机为飞轮电机的简化模型。实验样机的基本尺寸参数如表 1 所示。

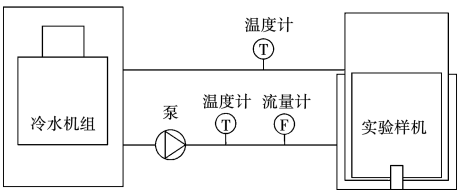


图 3 实验台设计原理图

Fig. 3 Diagram of experimental platform design principle

表 1 实验样机基本参数 (mm)

Tab. 1 Basic parameters of experimental prototype (mm)

参 数	数 值
箱体高度	440
箱体内径	127.5
定子高度	330
转子高度	310
定子内径	107.5
定子外径	117.5
转子外径	105
气隙宽度	2.5
流道宽度	10

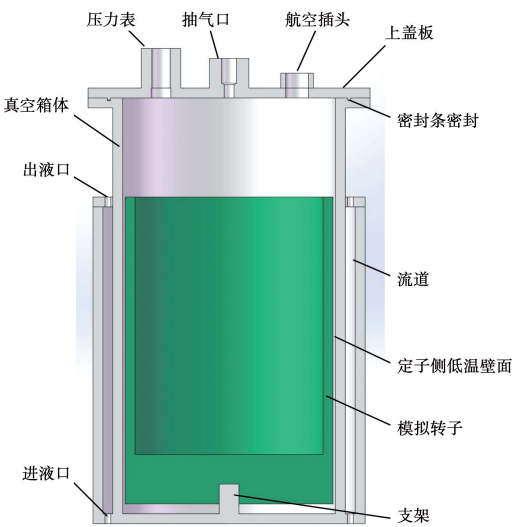


图 4 实验样机剖面图

Fig. 4 Profile diagram of experimental prototype

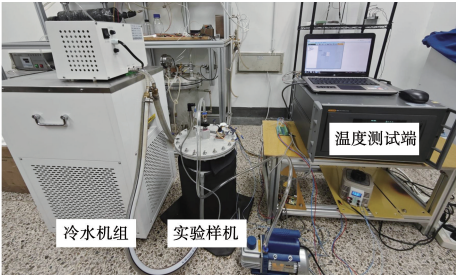


图 5 实验平台

Fig. 5 Experimental platform

飞轮电机的模拟实验样机剖面如图 4 所示。实验样机的真空箱体及水套采用不锈钢材质。为减小转子质量,采用铝合金材质加工模拟转子部件,并将其中间挖空,转子部件为可活动零部件,便于拆卸。转子中空内表面便于布置热电偶、加热膜等实验器材。同时,采用支架将转子部件与箱体隔离,以减少转子部件和真空箱体的接触热传导。真空箱体内的接线通过航空插头引出,将上盖板和真空箱体通过密封条进行密封。最后,通过真空泵在抽气口抽气,直到飞轮电机真空箱体内压力达到实际运行压力,还原真空的实验环境。

实验平台如图 5 所示,由冷水机组、实验样机和温度测试端 3 部分构成。冷水机组通过改变制冷功率来改变定子侧的温度。当定子侧温度达到某一稳定值时,通过加热膜提升实验样机内模拟转子的温度。改变定子侧温度,待转子温度冷却为室温后,重复进行加热。将定子侧温度和转子侧随时间变化的温度通过温度传感器传入温度测试端进行记录,得出不同定子侧温度对转子侧温升的影响规律。

2.2 实验结果与讨论

设置 4 种实验工况。定子侧温度分别设定为 1.6, 6.3, 11.1 和 16.1 ℃, 转子侧温度稳定为室温。选用加热膜的功率为 120 W, 每进行一个工况前都要使转子侧温度冷却为室温。实验研究的是转子温升, 并不需要完全相同的室温, 保持稳定即可。为保证实验效率及安全运行, 需控制转子的温度在 60 ℃ 以下, 以 1 800 s 为一个实验周期可满足实验要求。

通过加热膜对转子加热, 分析辐射换热温差对强化转子真空散热的影响。图 6 为转子外壁温度变化图。如图 6(a) 所示, T_w 表示实验中真空箱体的壁温, 即定子侧壁面温度, 曲线为 4 种不同 T_w 下转子温升的变化趋势。增大转子侧和定子侧的换热温差有利于强化辐射换热强度。当定子侧温度为 1.6 ℃ 时, 转子壁面温度曲线的上升速率明显较低, 温升速率为 1.25 ℃/min。同时, 在 1 800 s 实验周期内, 当定子侧温度由 1.6 ℃ 上升为 16.1 ℃ 时, 转子温升由

37.58 ℃ 提高到 38.6 ℃。可以看出,降低定子侧温度对辐射换热的强化效果并不显著,定子侧温度降低 15 ℃ 仅能使得转子温升降低 1 ℃。由于实验采用的转子部件由铝合金材质制造并且表面进行了抛光,其表面发射率一般仅为 0.05 ~ 0.15,这也是导致辐射换热量较小的原因。

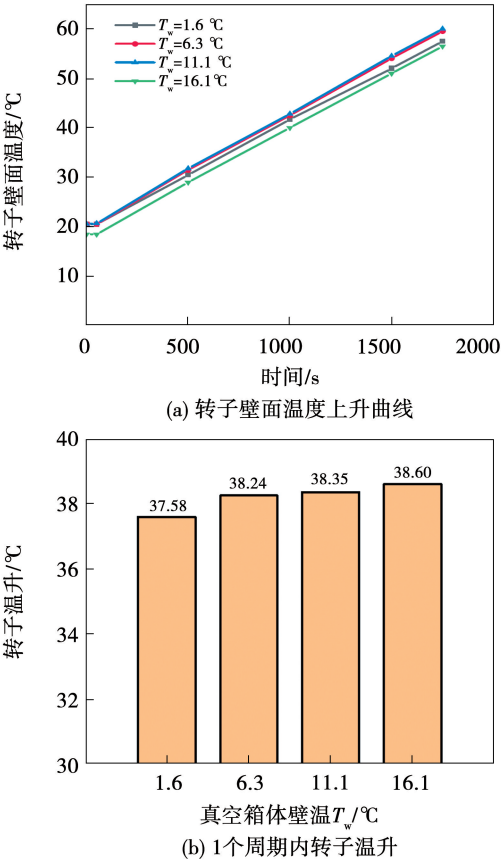


图 6 转子外壁温度变化

Fig. 6 Changes in rotor outer wall temperature

3 转子外侧高性能涂层优化

3.1 高辐射涂层材料选取

选取 3 种高辐射纳米复合陶瓷材料 JN-HD003 型、JN-HS001 型及 JN-HS003 型作为备选涂层。实验检测了 3 种涂料在碳纤维板上的附着力及发射率,并以此作为涂层选型依据。遵循标准 GB/T 9286-2021,检测条件为:温度 25 ℃、50% RH,24 h 的基本环境;选用 6 mm × 6 mm, $d=2\text{ mm}$ 的规格参数;基材为碳纤维板。

采用划格法的涂层附着力进行检测,检测结果均为切割边缘完全光滑,网格内无脱落。结果表明,3 款涂层与碳纤维基材的附着力均达到最高等级。

另一方面,遵循标准 GJB 5023.2-2003 检测了 3 种涂层材料的发射率,检测条件为:温度 120 ℃;波长范围为 4 ~ 20 μm ;基材为碳纤维板。

JN-HD003 型、JN-HS001 型及 JN-HS003 型 3 种型号材料的发射率分别为 0.65,0.68,0.72。结果表明,JN-HS003 型涂层具有最高的发射率。因此,本文综合比较 3 种涂层的附着力和发射率,选取 JN-HS003 型涂层作为实验转子部件的喷涂材料。

3.2 实验结果与讨论

图 7 为不同转子侧壁面温度下采用 JN-HS003 型涂料喷涂后的转子温度变化趋势。

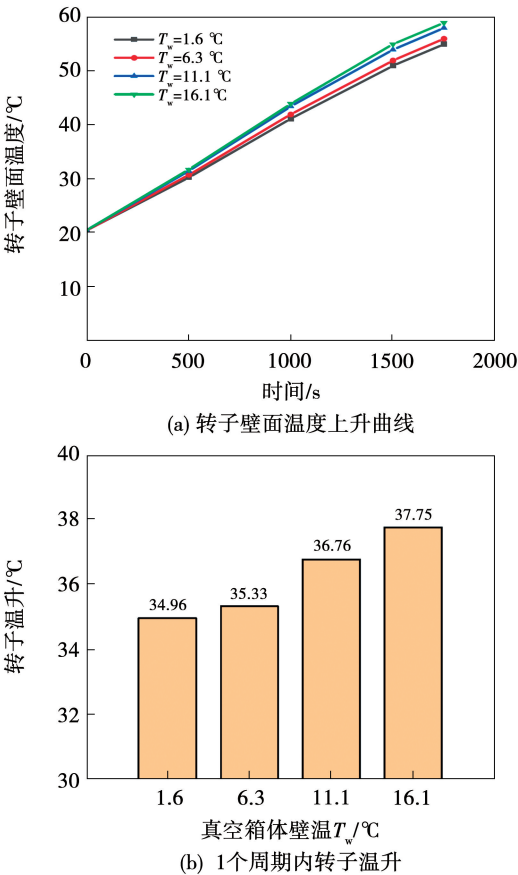


图 7 涂层转子外壁温度变化

Fig. 7 Changes in coated rotor outer wall temperature

当定子侧温度为 1.6 ℃ 时,转子壁面温度曲线的上升速率明显较低,温升速率为 1.16 ℃/min。随着定子侧温度的升高,转子壁面温度曲线的上升速率也逐渐升高。在 1 800 s 实验周期内,当定子侧温度由 1.6 ℃ 上升为 16.1 ℃ 时,转子温升由 34.96 ℃ 提高到 37.75 ℃。涂覆高辐射涂层后,降低定子侧温度对辐射换热的强化效果有所增强,定子侧温度降低 15 ℃ 使得转子温升降低了近 3 ℃。

图 8 为涂层对转子温升的影响,对比了转子部件高辐射涂层和无涂层情况下的温升。结果表明,在相同的时间和相同的定子侧温度下,高辐射涂层转子部件的温升低于无涂层转子部件的温升。两者的温差随着定子侧温度的降低逐渐增大,最大可降低约 3 ℃。由此得出,低定子侧温度下与高辐射涂层的结合,能够进一步强化辐射换热。

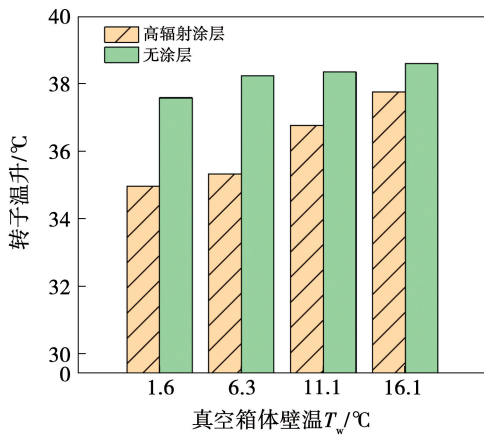


图 8 涂层对转子温升的影响

Fig. 8 Effect of coating on rotor temperature rise

4 结 论

在真空环境中,转子产生的热量仅能通过热辐射方式向外传递,产生的热量难以排散。基于此,本文提出了飞轮电机定子侧低温蒸发冷却方案和转子侧高辐射涂层方案,并通过实验验证了所提方案对电机转子侧辐射换热的强化作用。得出如下结论:

(1) 定子侧温度降低 15 ℃ 仅使转子温升降低 1 ℃,对于辐射换热强度的提升效果并不显著。

(2) 转子侧涂覆高辐射涂层,即提高转子侧外壁面发射率时,定子侧温度降低 15 ℃ 使转子温升降低近 3 ℃,冷却效果显著增强,对辐射换热强度的提升作用较为明显。将定子侧低温与转子侧高辐射涂层相结合的方法能够有效强化辐射换热,达到更好的冷却效果。

参考文献:

[1] 戴兴建,魏鲲鹏,张小章,等. 飞轮储能技术研究五十年评述[J]. 储能科学与技术,2018,7(5):765-782.
DAI Xingjian, WEI Kunpeng, ZHANG Xiaozhang, et al. A review on flywheel energy storage technology in fifty years[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(5): 765-782.
[2] 张 丹,姜建国,陈 鹰,等. 地铁牵引供电系统中高速飞轮储

能系统控制研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(12): 1-8.
ZHANG Dan, JIANG Jianguo, CHEN Ying, et al. Research on control strategy of high speed flywheel energy storage system in metro traction power supply system[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(12): 1-8.
[3] 冯 奕,林鹤云,颜建虎,等. 基于机械轴承飞轮储能系统损耗的构成分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(1): 71-75.
FENG Yi, LIN Heyun, YAN Jianhu, et al. Loss component analysis of flywheel energy storage system with mechanical bearings[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(1): 71-75.
[4] 王新文,邱清泉,宋乃浩,等. 飞轮储能用磁悬浮轴承研究进展[J]. 低温与超导, 2018, 46(11): 41-46, 51.
WANG Xinwen, QIU Qingquan, SONG Naihao, et al. The progress of the flywheel energy storage system with magnetic suspension bearing[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2018, 46(11): 41-46, 51.
[5] 马骏毅,巴 宇,赵 伟,等. 飞轮储能的关键技术分析研究状况[J]. 智能电网, 2017, 5(1): 9-16.
MA Junyi, BA Yu, ZHAO Wei, et al. Analysis on the key technology and research status of flywheel energy storage[J]. Smart Grid, 2017, 5(1): 9-16.
[6] 董剑宇,黄允凯,金 龙,等. 高速永磁电机设计与分析技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4640-4653.
DONG Jianning, HUANG Yunkai, JIN Long, et al. Review on high speed permanent magnet machines including design and analysis technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4640-4653.
[7] LI F, GAO J, SHI X, et al. Experimental investigation of single loop thermosyphons utilized in motorized spindle shaft cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 134: 229-237.
[8] JUNG S, LEE J, PARK B, et al. Double-evaporator thermosiphon for cooling 100 kWh class superconductor flywheel energy storage system bearings[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 2103-2106.
[9] VELTRI J A, MACNEIL C, LAMPE A. Cooled flywheel apparatus[P]. US: 2014067018 A1, 2014-08-05.
[10] ARSENEAUX J, ANSBIGIAN D, DESANTIS D, et al. Self-pumping flywheel cooling system[P]. US: 20170009845 A1, 2017-01-12.
[11] SUZUKI Y, KOYANAGI A, KOBAYASHI M, et al. Novel applications of the flywheel energy storage system[J]. Energy, 2005, 30(11/12): 2128-2143.
[12] AJISMAN, YAMAGATA K, KOBUCHI J, et al. Study of cooling gases for windage loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2000, 120(3): 478-483.
[13] 蒋小平,周光厚,刘传坤. 蒸发冷却技术在大型发电电动机上的应用优势及模拟试验研究[J]. 东方电气评论, 2017, 31(2): 38-42.
JIANG Xiaoping, ZHOU Guanghou, LIU Chuankun. Advantages of evaporative cooling technology in large generator-motor and its simulated test[J]. Dongfang Electric Review, 2017, 31(2): 38-42.

(姜雪梅 编辑)