

集电环笛型通风冷却结构的温度分析及优化

张瑞洁¹, 陈榴¹, 胡磊², 戴韧¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海电气电站设备有限公司, 上海 200240)

摘要: 汽轮发电机滑环与碳刷之间的摩擦造成滑环表面温度升高。采用流热耦合模型计算滑环表面的温度分布, 通过分析滑环外侧气流分布与滑环温度分布的对应关系, 提出在无碳刷区域滑环上方布置多排孔笛型管, 强化滑环表面对流换热。计算结果表明: 笛型通道沿滑环重新分配风机流量, 并在笛型管孔口下方形成射流, 直接冲击滑环表面, 发挥强化换热作用; 通风结构优化后, 滑环碳刷的接触点最高温度降低了 28.3%, 平均温度降低了 29%。

关键词: 集电环; 流热耦合; 多风路通风系统; 笛型管

中图分类号: TK221 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.12.006

[引用本文格式] 张瑞洁, 陈榴, 胡磊, 等. 集电环笛型通风冷却结构的温度分析及优化[J]. 热能动力工程, 2021, 36(12): 38-44. ZHANG Rui-jie, CHEN Liu, HU Lei, et al. Temperature analysis and optimization of flute ventilation cooling structure of collector ring[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(12): 38-44.

Temperature Analysis and Optimization of Flute Ventilation Cooling Structure of Collector Ring

ZHANG Rui-jie¹, CHEN Liu¹, HU Lei², DAI Ren¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093; 2. Shanghai Electric Power Station Equipment Co., Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200240)

Abstract: Because of the friction between turbo-generator slip ring and carbon brushes, the slip ring surface becomes over heated. A coupled calculation model of flow and heat transfer is used to calculate the temperature distribution over the slip ring surface. Through analyzing the corresponding relationship between the air flow distributions outside the slip ring and temperature distribution over the slip ring, we propose a flute-like ventilation tube structure with multi-row holes arranged on the upper part of slip ring in brushless region to strengthen the heat convection over the slip ring surface. The calculated results show that the flute channel redistributes the fan flow along the slip ring, the jet flow is formed at the lower part of flute pipe hole, which impinges the slip ring surface directly, playing the role of strengthening heat transfer. With the optimized ventilation structure, the maximum temperature value on the contact points of slip ring carbon brushes is reduced by 28.3%, the average temperature is reduced by 29%.

Key words: collector ring, fluid heat coupling, multipath ventilation system, flute tube

收稿日期: 2021-01-19; 修订日期: 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(52006147)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(52006147)

作者简介: 张瑞洁(1996-), 女, 河南周口人, 上海理工大学硕士研究生。

通讯作者: 陈榴(1983-), 女, 浙江金华人, 上海理工大学副教授。

引 言

汽轮发电机集电环通风冷却系统由两个主要部件组成:碳刷和旋转轴组成的滑环及轴端引风机。运行过程中滑环旋转,碳刷静止,两者之间的摩擦会造成滑环表面温度升高,刷面的通风冷却由轴端引风机实现。在某台 1 000 MW 发电机的现场检测中发现,滑环表面温度不均匀,甚至出现局部热点温度超过设计值 40° 的现象,造成碳刷打火等安全隐患。

分析碳刷滑环系统温度的难点在于碳刷与滑环是相对高速运动的;集电环换热结构属于多风路通风系统,部件的导热与其外表面冷却换热是耦合的。文献[1]应用红外图像测量滑环和碳刷的温度,解决了滑环运行状态监测和故障诊断的问题,但不能反映超温故障的原因。近年来,学者们基于有限体积法^[2-3]以及有限元法^[4]分别对大型发电机的定子、转子以及全域温度进行计算,为汽轮发电机的冷却设计提供了有力指导。马宏忠等人^[5]基于热电耦合方法,采用滑环周向均匀热源模型,计算分析了自然对流条件下风力发电机碳刷滑环的温度分布特性,初步揭示了滑环表面温度分布与碳刷压紧力的关联,但是忽略了碳刷的间断性分布以及集电环运行过程中多风路汇集的特点,还不能完全适用于大型发电机通风冷却结构。

孔板射流可以显著提高通道表面传热系数。San 等人^[6]和岳小棚等人^[7]将圆形射流喷射到冷却板上,实验验证板面努塞尔数 Nu 随射流间距与射流直径的比值呈近似线性增长。马朝等人^[8]通过在试件和喷嘴阵列之间的气流出口处增加挡板,改变气体的流动方向,使试件表面传热均匀性得到大幅度提高。

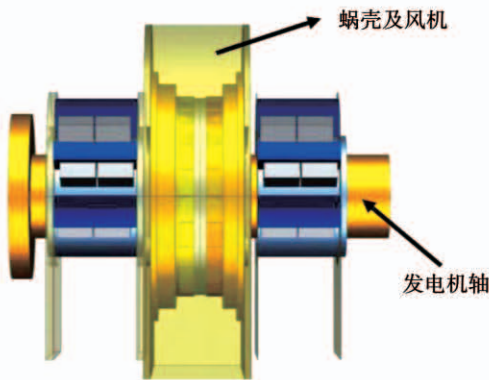
Ievgen 等人^[9]基于多管汇集流和孔板射流换热理论,参考旋转圆筒壁面的流动特征与换热特性,首次在集电环滑环上方无刷区域布置多排孔导流板。该孔板类似笛型管的结构,利用小孔射流的强化换热作用,改善壁面的传热系数分布,解决滑环无刷区域对流传热分布不均匀的问题。采用流动与传热的

耦合计算方法,计算碳刷滑环系统的温度分布,准确评估笛型通风结构的冷却换热效果,并获得性能最佳的通风结构。

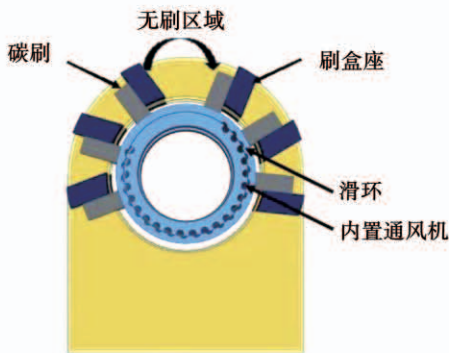
1 模型建立

1.1 碳刷滑环模型

某发电机集电环由进口通风管、小罩壳和排气管三部分组成,其中小罩壳部分包括滑环、双向离心风机、碳刷、刷盒座、滑环内置通流管道和蜗壳等结构。滑环上安装 6 排碳刷,每排碳刷上有刷盒座和刷柄,放置于两侧导电板之间,如图 1 所示。



(a) 集电环整体模型



(b) 碳刷、滑环模型

图 1 集电环模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of collector ring model

1.2 流动分析模型

采用 ANSYS CFX 19.0 软件包进行集电环流动与传热的数值计算,考虑到集电环冷却空气在冷却碳刷和集电环表面的流动过程中温度的变化,选用可压缩流体的定常流动方程描述集电环外部空气流动,流动边界条件如表 1 所示。

表 1 流动边界条件
Tab.1 Flow boundary conditions

参 数	数 值
进口静压/ Pa	101 325
主流湍流度/ %	5
出口总压/ Pa	101 325
滑环及风机转速/ r · min ⁻¹	3 000

采用压力 - 速度耦合方程组的 SIMPLE 算法求解离散方程, 湍流模型采用剪切应力输运模型 (SST), 集电环模型中的动静交界面采用冻结转子方法进行处理, 滑环网格划分如图 2 所示。

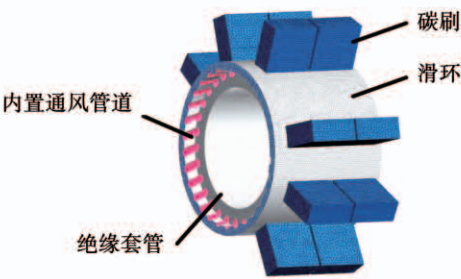


图 2 滑环网格划分
Fig.2 Mesh division of slip ring

1.3 碳刷滑环传热模型

为计算滑环表面的温度, 求解碳刷滑环表面域热传导方程:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q \tag{1}$$

式中: c_p —比定压热容, J/(kg · K); q —滑环内部热流密度, W/m²; ρ —材料密度, kg/m³; T —物体温度, K。

滑环以及碳刷材质物性如表 2 所示。

表 2 材料属性
Tab.2 Material properties

参 数	滑 环	碳 刷
密度/kg · m ⁻³	7 854	2 250
比定压热容/J · (kg · K) ⁻¹	434	710
导热系数/W · (m · K) ⁻¹	60.5	151

集电环上的热源主要由两部分组成, 一是在滑环周围及内部所布置引线的电流通过产生的电阻发

热功, 二是固定在滑环上方的碳刷与高速旋转的滑环相互摩擦产生的摩擦损耗, 假设其在碳刷与滑环接触面是均匀分布的, 沿滑环周向 τ 是间隔分布的。根据 Herz 弹性接触理论^[10], 可以计算碳刷与滑环接触面的摩擦损耗功率, 但是由于实际运行中碳刷压紧力的差异和接触面磨损, 难以精确计算每只碳刷与滑环接触面的摩擦损耗功率。

通过对电刷滑环系统发热机理和损耗的分析确定碳刷以及滑环为热源体, 在滑环旋转过程中电刷与滑环是多点间断性接触, 其中散热面边界条件为:

$$-k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{f_d} = h(T - T_s) \tag{2}$$

式中: f_d —模型中的散热面, 包括碳刷整体、滑环外表面和滑环内部通风管道内外表面; T_s —流体温度, K; T —周围介质温度, K; h —表面对流传热系数, W/(m² · K); n —边界法向量; k_n —物体在不同方向的导热系数, W/(m · K)。

通过现场实测某台发电机滑环表面的最高温度和平均温度, 标定出滑环表面的平均热流密度和接触面的摩擦热流密度。接触面热流密度 q_1 给定 34 000 W/m², 滑环热流密度 q_2 给定 2 500 W/m², 来流温度为 309.15 K, 作为后续通风结构改进的计算热边界条件, 标定结果如表 3 所示。模型计算值与实测值的相对误差小于 3%, 本文数值计算可反映出集电环工作状态, 满足工程应用的要求。

表 3 滑环表面温度的实测标定
Tab.3 Measurement calibration of slip ring surface temperature

参 数	实测数据	模拟数据
风机运行流量/m ³ · s ⁻¹	4	4.13
发电机侧滑环平均温度/K	344.95	346.55
轴承侧滑环平均温度/K	343.95	346.55
发电机侧接触面热点温度/K	403.15	403.11
轴承侧接触面热点温度/K	403.15	400.95

2 滑环温度场分析

图 3 给出了运行过程中轴承侧沿轴向位置 10%、50% 和 90% 三个截面滑环与碳刷沿中心截面的温度分布, 碳刷整体温度高于滑环温度, 并且在滑

环与碳刷的接触面温度较高,可以达到 403.15 K 左右。不同轴向位置,碳刷与滑环表面的温度分布是不同的,这与滑环外部气流的分布和内部通风冷却能力分配有关。碳刷热量经滑环表面传递到滑环内部,滑环下半部分内嵌多根斜向管道,流体从管道入口抽入滑环管道内,提高滑环内部导热能力,在滑环上方无碳刷区域,滑环靠近风机侧温度比另一侧温度低约 15 K。

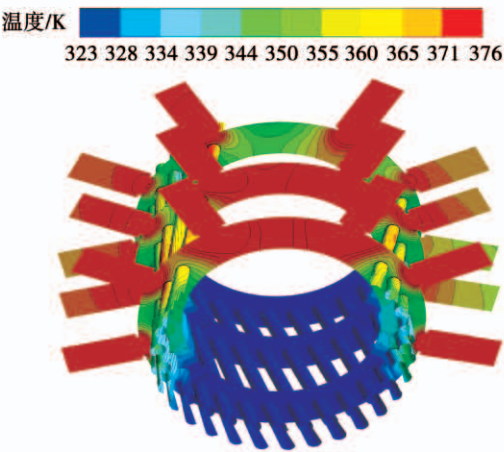


图 3 轴向位置三个中心截面的温度分布
Fig. 3 Temperature distribution of three central sections at axial location

图 4 为滑环上方无刷区域内轴向速度云图及速度流线图。在无碳刷区域,滑环上方沿轴向流速不均匀,靠近风机入口阻力小、流速高,而远离风机侧流速低。这是由于离心风机在滑环出口的抽吸作用使流量主要集中在滑环的近端,而远端风速只有近端风速的 1/5。因为滑环表面传热系数的高低取决于流经刷面的气流流速,所以要使滑环表面的换热均匀性达到要求,必须重新设计进口结构,使其沿集电环流量合理分配。

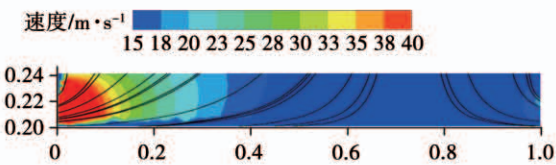


图 4 滑环轴向空气流动速度云图与流线图
Fig. 4 Velocity and streamline nephograms of air flow in axial direction of slip ring

3 滑环强制通风结构的优化

基于笛型管流量分配原理,提出在滑环外侧安装均匀孔径的笛型管导流装置,重新分配滑环上方无刷区域空气流量,如图 5 所示。此时将滑环笛型管通风冷却结构视为两个同心圆管夹层内的强制对流传热模型,内层圆管旋转,外层圆管静止。冷却工质从旋转轴端和笛型孔分别进入两层管之间的夹层空隙,沿轴向流动。由于多个孔射流的沿程汇集,同心管内的流动是复杂的三维形式。轴向流速和内圆柱旋转速度,形成了冷却气流绕滑环(内圆柱)表面的螺旋形流动。冷却气流不仅有轴向的表面换热作用,也会因为滑环自身的旋转具有对流换热效应。

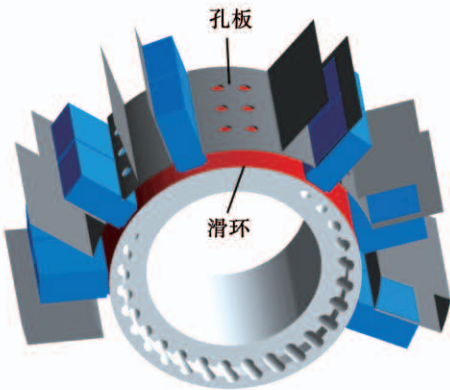


图 5 集电环笛型孔板示意图
Fig. 5 Schematic diagram of collector flute hole plate

图 6 给出了带有均匀孔径笛型管后轴承侧沿轴向 10%、50% 和 90% 位置处滑环与碳刷沿中心截面温度分布。从图中可以看出,笛型管进口导流结构使滑环上方无刷区域以及碳刷表面温度明显降低,而且碳刷与滑环摩擦面附近的局部高温区域消失,最高温度从 403.15 K 降低到 383.45 K,下降了 17.8%,平均温度降低了 25.85%。

图 7 比较了轴向湍动能及速度流线分布。原始模型滑环表面湍动能低,笛型管导流结构使一部分流体从孔口冲射到滑环表面,另一部分流体从远端水平抽入,两个方向的流体在管内发生掺混,增强滑环上方流体湍动能,提高滑环表面对流换热能力。

筒型管导流结构降低滑环温度的作用机理是调节沿通风流向孔的流量。优化筒型孔板获得最大程度的降温和温度均化效果,需要调整孔板孔径达到换热均匀。假设沿通风流向孔径分布表示为:

$$d_i = d_0 \cdot \varepsilon^{k-1} \tag{3}$$

式中: d_0 —第一排孔进口半径; d_i —其余孔进口半径, $i = 1, 2, 3$; ε —孔径缩放比。

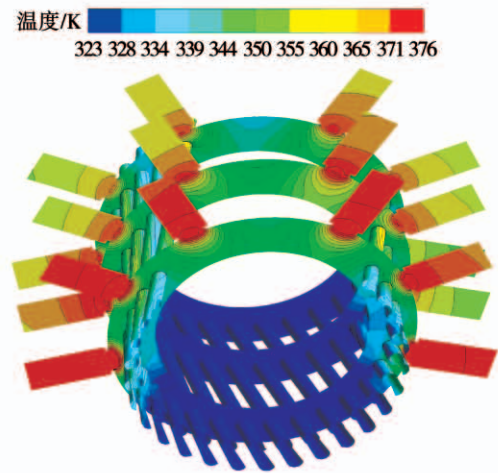


图 6 带有均匀孔径筒型管后轴承侧轴向位置三个中心截面温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of three central sections of fluted pipe with uniform hole diameter at axial locations of bearing side

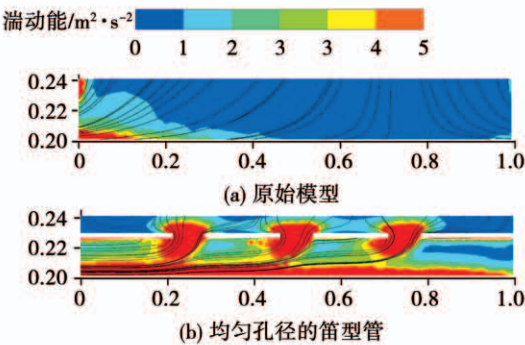


图 7 不同模型轴向湍动能

Fig. 7 Axial turbulent kinetic energy of different models

图 8 给出了原始模型以及筒型管不同缩放比下滑环无刷区域轴向速度变化,横坐标表示沿滑环表面相对位置,纵坐标表示滑环表面轴向速度。从对比来看,加筒型管进口导流装置后,由于来流从不同

轴向位置的孔口进入管内,提高了滑环远端流体的轴向速度,改善了原始集电环无刷区域在轴向速度上相差较大的问题。

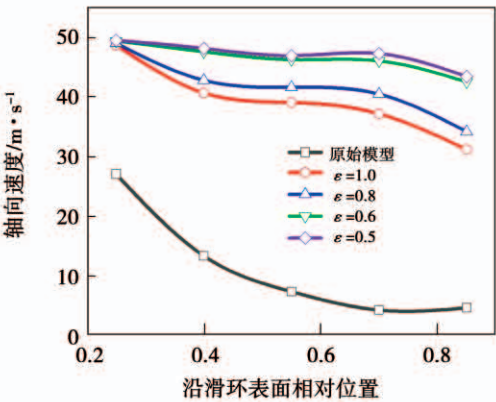


图 8 滑环无刷区域轴向速度分布

Fig. 8 Axial velocity distributions of slip ring in brushless region

图 9 是与图 8 对应区域的传热系数分布,由于滑环远端流体轴向速度的提高,使滑环远端传热系数增强,其中在缩放比为 0.6 时,滑环表面平均传热系数相较于原始模型提高 37.5%,与均匀孔径的模型相比提高 9.4%。随着孔径缩放比 ε 的减小,改善了滑环两端换热不均匀的问题。

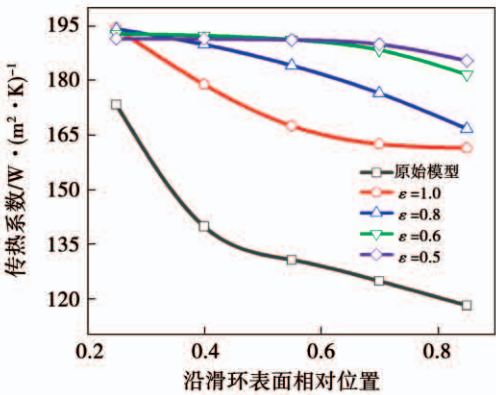


图 9 滑环无刷区域轴向传热系数分布

Fig. 9 Distributions of axial heat transfer coefficients of slip ring in brushless region

图 10 给出了原始模型以及不同孔径筒型管导流进口结构下集电环轴承侧滑环轴向平均温度分布。从结果来看,均匀孔径筒型管结构与原型相比,

滑环最高温度下降 28.7%,平均温度下降 26.5%。相比较于均匀孔径的笛型管,采用渐缩孔径方法可以进一步降低滑环最高温度。

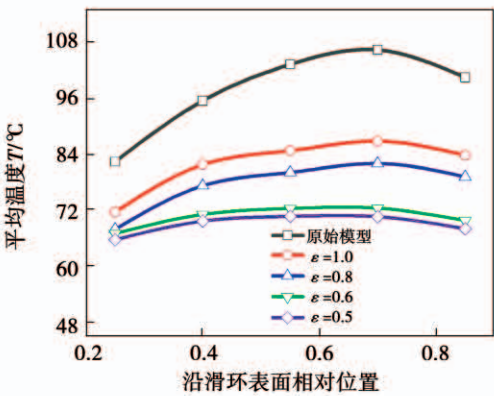


图 10 滑环无刷区域轴向温度分布

Fig.10 Axial temperature distributions of slip ring in brushless region

图 11 是孔径缩放比为 0.6 时集电环温度云图,此时,滑环上方无碳刷区域中间的高温区域消失,轴向温度分布均匀。

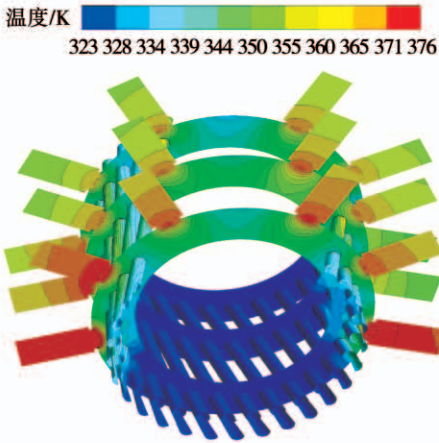


图 11 笛型管缩放比为 0.6 时中心截面温度分布

Fig.11 Temperature distribution of central section with flute pipe scale ratio of 0.6

为了进一步表示滑环表面温度均匀性,将滑环表面各点温度与面平均温度的差值分为不同等级,用 A、B、C、D、E 分别代表 0 ~ 276.15 K,276.15 ~ 279.15 K,279.15 ~ 282.15 K,282.15 ~ 285.15 K 以及大于 285.15 K 的温度差值范围。图 12 给出了每

种等级占整体差值的百分比。采用渐缩孔径方法后笛型管方案有效地提高了滑环表面温度分布的均匀性。

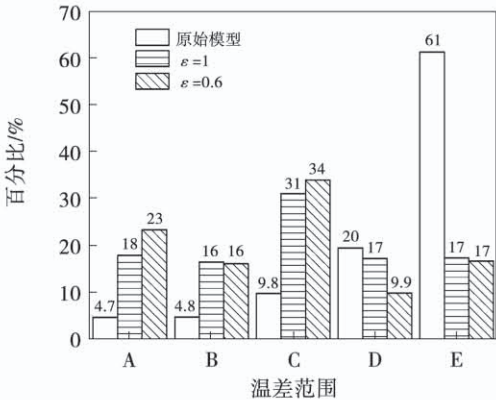


图 12 不同模型无刷区域温度偏差

Fig.12 Temperature deviations of different models in brushless region

4 结 论

(1) 运用流热耦合分析,计算得到集电环通风冷却的流量分配及其对滑环表面温度分布的影响规律。很好地反映了碳刷与滑环相对旋转时造成的局部接触面摩擦产热,以及滑环表面温度不均匀的特征。为确定滑环表面温度热点和评估碳刷滑环系统的温度分布,提供了准确的量化依据。

(2) 碳刷滑环采用笛型管导流装置后,提高了通风流量的利用率,避免了冷却空气直接从近端吸入引风机内,以强制对流的形式直接对远端滑环表面产生冷却效果,明显降低了滑环表面的平均温度。

(3) 通过对笛型管孔径的优化,进一步增强了滑环表面的换热能力与换热均匀性。其中缩放比为 0.6 的笛型管导流结构,使滑环表面平均传热系数相比较于原始模型提高 37.5%,与均匀孔径相比提高 9.4%。

参考文献:

[1] 陈碧辉,曾 旭.发电机组滑环温度的红外在线监测[J].云南水力发电,2006,22(5):80-82.
CHEN Bi-hui, ZENG Xu. Infraredon-line monitoring of slip ring

- temperature of a generating unit[J]. Yunnan Water Power, 2006, 22(5): 80–82.
- [2] 路义萍, 郑国丽, 李俊亭, 等. 空内冷汽轮发电机的转子多路通风均匀性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 99–104.
LU Yi-ping, ZHENG Guo-li, LI Jun-ting, et al. Uniformity of multi-path ventilation in rotor of air inner-cooled turbo-generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 99–104.
- [3] 霍菲阳, 李 勇, 李伟力, 等. 大型空冷汽轮发电机定子通风结构优化方案的计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 69–75.
HUO Fei-yang, LI Yong, LI Wei-li, et al. Calculation and analysis on stator ventilation structure of different optimum proposal in air-cooled turbo-generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 69–75.
- [4] 姚若萍, 饶芳权. 蒸发冷却水轮发电机定子温度场研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 87–90.
YAO Ruo-ping, RAO Fang-quan. Analysis of 3D thermal field in the stator of large hydro-generator with evaporation-cooling system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 87–90.
- [5] 马宏忠, 陈涛涛, 时维俊, 等. 风力发电机电刷滑环系统三维温度场分析与计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(30): 98–105.
MA Hong-zhong, CHEN Tao-tao, SHI Wei-jun, et al. Analysis and calculation on three-dimensional temperature field of brush and slip ring systems for wind generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(30): 98–105.
- [6] SAN J Y, CHEN J J. Effects of jet-to-jet spacing and jet height on heat transfer characteristics of an impinging jet array[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2014, 71(4): 8–17.
- [7] 岳小棚, 田丽亭, 张 宇, 等. 带射流斜肋微通道的强化散热研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(1): 164–170.
YUE Xiao-peng, TIAN Li-ting, ZHANG Yu, et al. Study on heat dissipation intensification of microchannel with impinging jets and inclined ribs[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(1): 164–170.
- [8] 马 朝, 严 超, 曹学伟, 等. 阵列空气射流传热均匀性问题的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(11): 2378–2384.
MA Chao, YAN Chao, CAO Xue-wei, et al. Numerical study on array air jet heat transfer uniformity[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(11): 2378–2384.
- [9] IEVGEN M, 林静雯, 蔡建程, 等. 强吸气旋转圆筒壁面湍流边界层建模及计算[J]. 力学学报, 2020, 52(5): 1323–1333.
IEVGEN M, LIN Jing-wen, CAI Jian-cheng, et al. Modelling and calculation of the turbulent boundary layer on a rotating cylinder surface with strong suction[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(5): 1323–1333.
- [10] 王步康, 董光能, 谢友柏. 滑动接触中摩擦发热的数值分析[J]. 中国机械工程, 2002, 13(21): 86–89.
WANG Bu-kang, DONG Guang-neng, XIE You-bai. Numerical analysis of rolling-sliding contact with frictional heating[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(21): 86–89.

(刘 颖 编辑)

(上接第 37 页)

- [13] GABRIELE C, MASSIMILIANO R, FLAVIO C, et al. Limiting the effect of ambient temperature on micro gas turbines (MGTs) performance through inlet air cooling (IAC) techniques: an experimental comparison between fogging and direct expansion[J]. Energy Procedia, 2015, 75: 1172–1177.
- [14] XIAO Gang, YANG Tian-feng, LIU Huan-lei, et al. Recuperators for micro gas turbines: a review[J]. Applied Energy, 2017, 197: 83–99.
- [15] JAN Z, AXEL W, MANFRED A. Experimental investigations of pressure losses on the performance of a micro gas turbine system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133(8): 082302.
- [16] LI Yong-yi, ZHANG Guo-qiang, WANG Li-gang, et al. Part-load performance analysis of a combined cycle with intermediate recuperated gas turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 205: 112346.
- [17] MASSIMILIANO R, FRANCESCO P, MARCO B. Syngas feed of micro gas turbines with steam injection: effects on performance, combustion and pollutants formation[J]. Applied Energy, 2017, 206: 697–707.

(丛 敏 编辑)