

汽轮发电机转子端部及槽内供风量分布特性

路义萍¹ 阴文豪¹ 李俊亭² 韩家德¹ 曹文²

(1. 哈尔滨理工大学机械动力工程学院 哈尔滨 150080 2. 哈尔滨电机厂有限责任公司 哈尔滨 150040)

摘要 随着空冷汽轮发电机容量不断增加,线圈尺寸加长,通风系统复杂,转子通风系统属多风路冷却系统。为减小因通风不均引起的轴向温差,本文以某大型空冷汽轮发电机半转子为研究对象,建立两个槽包括径向副槽通风、轴向通风及端部通风的多风路通风结构物理模型,基于计算流体动力学(CFD)原理,运用有限体积法进行三维紊流流场的数值模拟,得出进入转子端部、轴向及副槽通风道的空气量,分析多种结构对转子上述三部分风量分配的影响。针对本体,提出单位绕组轴向长度供风量评价风量分布均匀性。本文的方法及结论对大型电机转子本体部分轴向通风与副槽通风长度优化设计提供理论依据。

关键词: 汽轮发电机 转子 多路通风 空气冷却 轴向通风长度优化
中图分类号: TM311

Distribution Characteristic of Air Flow Rate in Rotor End and Inner Slot of Turbo Generator

Lu Yiping¹ Yin Wenhao¹ Li Juntong² Han Jiade¹ Cao Wen²

(1. Harbin University of Science and Technology Harbin 150080 China 2. Harbin Electric Machine Company Limited Harbin 150040 China)

Abstract With the turbo generator's capacity increasing, the size of rotor coil is lengthened. The ventilation system becomes complicated, and the rotor ventilation system belongs to the multi-path cooling system. In order to reduce axial temperature difference due to the non-uniform ventilation, a physical model of multi-path ventilation structure is presented, combined with a given example of half rotor in the large turbo generator with air cooling; the multi-path ventilation consists of the radial sub slot ventilation, the axial ventilation and the rotor end ventilation. Based on computational fluid dynamics(CFD) principle, the three dimensional turbulent flow field is simulated by finite volume method, and the air mass flow rate of entering rotor end segment, axial ducts and sub slot is obtained. The effect of some structures on the air flow rate distribution of various ventilation segments mentioned above is analyzed. In view of the rotor body, the air flow rate per unit axial length of windings is presented to evaluate the uniformity of ventilation cooling. The method and the conclusion will provide theoretical guidance to the optimization design of the length of the axial and sub slot ventilation of the large generator rotor.

Keywords: Turbo generator, rotor, multi-path ventilation, air cooling, optimization of axial ventilation length

全性。以往，国内外针对电机温升研究多数采用有限元法^[1]、等效热网络法^[2]。大型汽轮发电机转子峰值温度及轴向温差由端部、轴向风道及副槽三部分流场、风量分配及传热特性决定，近年来随着电机容量增大，风路加长，风量沿轴向分布的不均匀性增大，导致轴向温差增大。国外越来越重视汽轮发电机的通风及冷却研究^[3-6]。国内运用计算流体力学中的有限体积法进行发电机内三维湍流流场^[7-9]、温度场^[10]及通风分布规律的研究^[11]也逐步展开。然而，上述研究物理模型多为局部，所以，无法揭示端部、轴向及副槽通风段三部分通风量随风道几何形状及风道长度等参数的变化特性。本文结合国内某空冷汽轮发电机通风风路设计，建立了转子两槽半轴向段包括端部、轴向通风及副槽通风的三维紊流多风路物理数学模型，进行变结构 CFD 辅助设计，研究转子端部绝缘挡块、轴向通风长度等结构变化对转子端部、轴向及副槽三部分风道内冷却介质分配的影响，提出单位绕组轴向长度供风量，用于评价轴向通风及副槽通风的均匀程度。研究目的：认识汽轮发电机转子端部、轴向及副槽段风量分配规律，减小因通风不均引起的温升；确定转子轴向及副槽通风段的长度；为端部及楔下垫条通风道局部结构确定及研发提供依据。

2 物理模型

某空冷汽轮发电机采用两端对称通风方式冷却。考虑转子本体截面周期性开槽，取其端部线圈最长的 7 号及 8 号两线圈半轴向段为研究对象，如图 1 和图 2 所示。

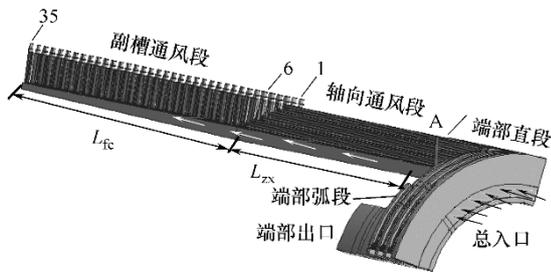


图 1 转子计算区域通风物理模型

Fig.1 Physical model for ventilation configuration of rotor calculation region

空气从总入口进入转子区域，部分空气流至本体端面 A 附近分为两路：一路由径向 12 个端部进风孔顺次流入端部直段、弧段绕组风道，最终经大齿（端部出口）流入气隙；另一路经径向 12 个轴

向进风孔进入本体轴向通风段，内部冷却本体前端槽内绕组，然后，每两匝风道内空气流入同一径向通风道，最终从 1~6 号槽楔出风孔流入气隙。其余部分经副槽风道分别进入双径向通风孔，在楔下垫条通风孔内汇集，并由各槽楔出风孔流入气隙。

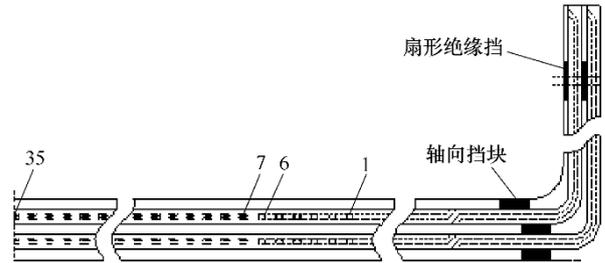


图 2 转子线圈通风布置平面示意图

Fig.2 Schematic diagram for ventilation arrangement of rotor coils

3 数学模型及边界条件

电机内流体流速远小于声速，流体为不可压缩流体，空气流动处于紊流状态。随着转轴旋转，在相对参考坐标系下，质量守恒方程及动量守恒方程为^[12]

$$\nabla(\rho u_r) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla(\rho u_r u_r) + \rho(2\Omega \times u_r + \Omega \times \Omega \times r) = -\nabla p + \nabla \tau + F \quad (2)$$

绝对速度矢量 u 与相对速度矢量 u_r 的关系为

$$u = u_r + \Omega \times r \quad (3)$$

针对三维紊流流动，反映湍流特性的控制方程采用 RNG $k-\varepsilon$ 两方程模型，见式 (4)、式 (5)；在壁面区，采用标准壁面函数法进行处理。

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中

∇ —— 散度，即 $\nabla(\rho u_r) = \text{div}(\rho u_r)$ ；

ρ —— 密度；

Ω —— 旋转角速度矢量；

R ——转动坐标系中的微元体的位置矢量;

$\rho(2\Omega \times u_r + \Omega \times \Omega \times r)$ ——科里奥里力;

F ——微元体上的体积力;

p ——作用于空气微元体上的静压力;

τ ——因分子粘性作用而产生的作用于微元体表面的粘性应力;

k ——湍动能;

ε ——湍动耗散率;

u_i ——时均速度;

$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, μ_t 为湍动粘度;

G_k ——由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项;

$C_{1\varepsilon}^*, C_{2\varepsilon}$ [12]——考虑时均应变率的修正系数;

$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ ——常数。

根据工程计算, 计算域空气总入口表压力为 5000Pa; 由于气隙内空气混合较强烈, 本体各出风口及转子端部出口压力均采用标准大气压。

计算区域采用结构化网格进行分割, 经多次试算, 流体与壁面接触处的近壁面无量纲距离 y^+ 的数量级满足标准壁面函数的要求。方程组采用分离、隐式求解, 针对旋转流动, 压力速度耦合选用 SIMPLEC 算法, 方程组获得收敛。

为减小因转子本体长度较长、轴向通风量分布不均匀引起的轴向温差, 鉴于本体外部冷却条件基本相同, 内部热源分布基本相同, 提出了轴向及副槽单位轴向长度供风量 M_1 ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$) 概念, 数值上分别等于本体轴向或副槽段的总通风质量流量除以相应通风段的绕组轴向长度 L_{zx} 或 L_{fc} , 如图 1 所示, 具有轴向段或副槽段单位长度绕组平均冷却通风量的物理意义, 用来评价本体轴向空气量分布均匀程度。关于沿轴向风道内部流动引起的空气温度变化对传热的影响, 经温度场计算后, 采用其他措施进一步设计。

$$M_1 = \frac{M}{L} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{L} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{u}_{ri} \rho \pi r_i^2}{L} \quad (6)$$

式中 M ——副槽或轴向通风段内各槽楔出风口的质量流量 m_i 之和, 对于本方案, 轴向通风段 M_{zx} , $j=1, N=6$; 对于图 2 副

槽通风段 M_{fc} , $j=7, N=35$; j, N 为槽楔出风口标号, 根据实际方案确定;

r_i ——出风口截面半径。

由于各出风口所在截面不同位置的相对流速 u_r 为三维变量, 采用出风口空气截面流速的积分均值

$$\bar{u}_{ri} = \frac{1}{A_i} \int_0^{A_i} u_r dA_i$$

计算 m_i ; 此外, 端部总质量流量

M_{db} 为端部出口处的风量。

4 计算结果分析

鉴于旋转态下的电机通风实验数据目前无相关报道, 而旋转状态与静态时受力不同, 静态与动态实验属非同类物理现象, 静态实验数据不能证明旋转态数值计算结果正确; 一般利用少数温度测点 [13] 证明流场与温度场耦合计算的方法及结果正确, 而流场决定温度场, 从而间接地证明了流场计算正确。本文采用文献 [10-11] 中流场计算方法, 计算结果与厂家采用等效热网络法计算结果一致。但等效热网络法无法提供三维的速度分布, 本方法可提供计算域内三维湍流的所有物理参数, 如端部弧段 $z=-3.264\text{m}$ 截面处线圈间风道布置扇形绝缘挡块局部开齿形槽时相对速度矢量如图 3 所示, 8 号线圈右侧径向风沟轴向与副槽风道附近相对速度等值线图如图 4 所示。本文研究供风量分布特性, 根据各部

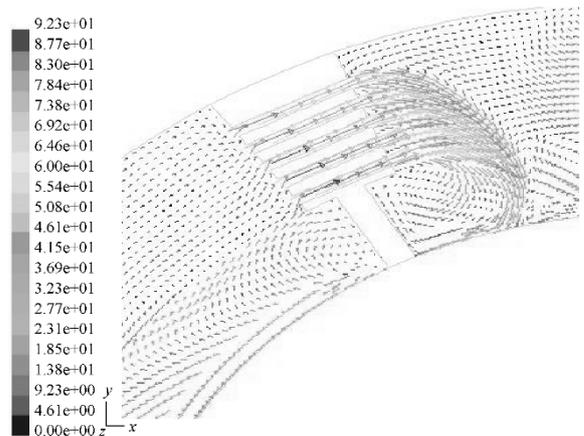


图 3 端部弧段通风道截面 $z=-3.264\text{m}$ 相对速度矢量图 (单位: m/s)

Fig.3 Vectors of relative velocity of the end arc segment ventilation duct with $z=-3.264\text{m}$

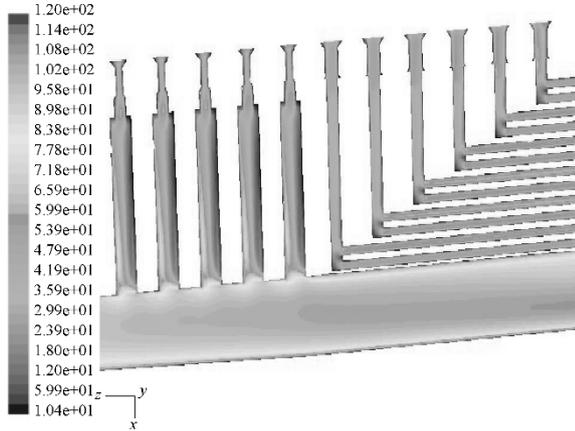


图 4 局部风道相对速度等值线图 (单位: m/s)

Fig.4 Contour of relative velocity magnitude of local ducts

分风道总风量大小, 判断峰值温度及轴向温差的变化趋势, 因此, 仅分析据三维流速计算得到的质量流量、单位绕组长度供风量等参数。

4.1 端部绝缘挡块的影响

为了确定端部结构, 共考虑三种方案: ① 线圈之间布置轴向挡块及扇形绝缘挡块, 扇形绝缘挡块局部开设齿形槽; ② 布置轴向挡块及扇形绝缘挡块, 扇形绝缘挡块局部未开设齿形槽; ③ 布置扇形绝缘挡块且未开设齿形槽, 不布置轴向挡块; 仅研究上述不同方案对端部及槽内供风量分布的影响。挡块采用常规结构。

由计算得知, 进入 7 号及 8 号线圈的流量差约 1.2%。7 号及 8 号线圈各通风道风量分布趋势相同, 故仅分析 8 号线圈的风量分布特点。表 1 给出了三种方案, 分别进入转子 8 号线圈副槽、轴向及端部通风孔总风量及其总和 M 。由表可知, 当布置轴向挡块时, 扇形绝缘挡块局部是否开齿形槽对进入副槽及轴向通风孔的风量影响不显著, 但计算发现, 约端部通风量 62% 的额外空气经所开齿形槽流入挡块另一侧空气区域, 如图 3 所示, 这将使端部弧段空气对流加强, 加大端部高温区弧段绕组的外部冷却。轴向挡块对整个转子空气流量分布影响较显著, 当不布置轴向挡块时, 转子端部流动阻力减小, 进入副槽、转子轴向通风孔及端部通风孔的空气量均增加, 分别比布置轴向挡块时增加约 0.7%、7.5% 及 17.4%, 尤其是端部通风孔流量增加较大。

表 1 端部绝缘挡块布置对转子空气量分布的影响

Tab.1 Effect of the end insulation block arrangement on the air flow rate distribution in rotor

(单位: kg/s)

方案	副槽 M_{fc}	轴向 M_{zx}	端部 M_{db}	总风量 M
a	0.181 92	0.066 62	0.032 08	0.280 62
b	0.182 61	0.066 43	0.031 94	0.280 98
c	0.183 94	0.071 41	0.037 49	0.292 84

4.2 轴向通风与副槽通风长度变化的影响

端部风道结构确定后, 如果本体轴向部分直段较长, 轴向风道内部空气沿程吸收热量较多, 传热温差变小, 轴向段绕组发热不易带走, 导致轴向段温度较高; 反之, 如果副槽轴向长度较长, 副槽部分各径向风道空气量分布偏差大, 引起副槽段绕组温升较大。因此, 本体部分轴向及副槽轴向长度直接影响各风道内的速度、冷却空气量分布、转子的峰值温度及轴向温差。在转子本体长度一定的前提下, 为了优化轴向通风段长度, 副槽径向通风孔轴向最少排数为 27, 副槽轴向中心位置不变, 以副槽径向通风孔 2 个节距为一步长, 增加副槽径向通风孔轴向排数, 相应缩短轴向通风道长度, 最多排数为 43。研究本体部分经各出风孔的冷却空气量 m_i 分布 (见图 5), 轴向与副槽通风长度变化对进入副槽、轴向及端部三部分的总风量 M 变化的影响 (见

图 6)。模拟计算时, 式 $M_{fc} = \sum_{i=7}^N \bar{u}_{vi} \rho \tau v_i^2$ 中, N 由 33 增加到 49。

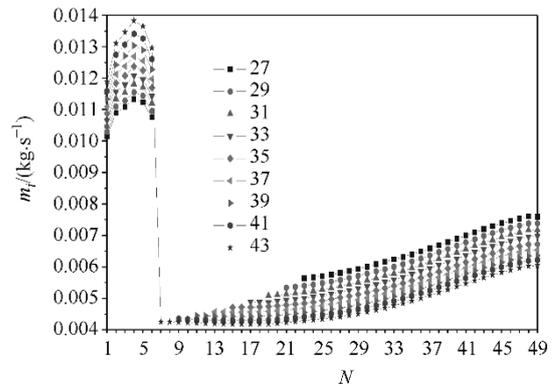


图 5 径向通风孔排数对各槽楔出风孔风量分布的影响
Fig.5 Effect of variable row number of radial ducts on air mass flow rate distribution on every outlet

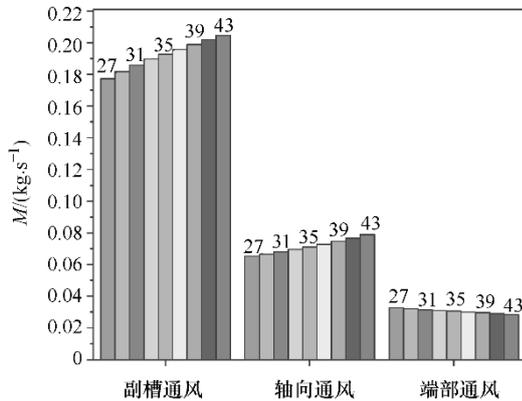


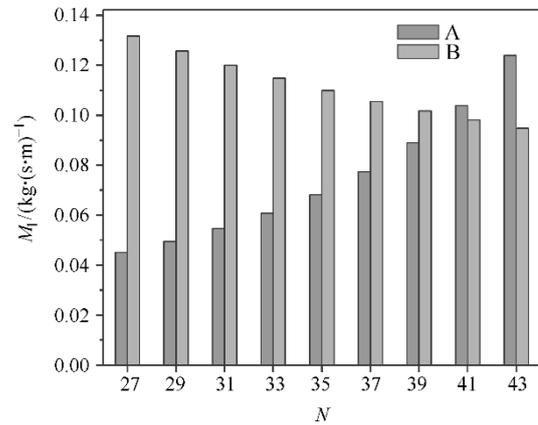
图6 径向通风孔排数对各通风道空气量的影响

Fig.6 Effect of variable row number of radial ducts on air mass flow rate distribution on each duct

由图5可知,在转子本体长度一定的前提下,随着副槽径向通风孔数量的增加,轴向通风道长度 L_{zj} 减小,沿程阻力减小,进入1~6号风道内的风量 m_i 增加,且风量逐渐增大,算得其平均增加率约2.28%;而副槽部分进入每一径向风沟的空气量 m_i 逐渐减小,其平均减少率约4.03%;副槽入口风量较少,中心(图5中 $N=49$)处风沟内风量最大,与理论分析及常规试验结果一致。

由图6可知,副槽径向通风孔轴向排数由27增加到43时,进入端部通风孔的空气量减少,且其占总风量的比率也呈减小趋势,说明端部温度将升高;进入副槽、轴向段的总空气量均增加,但 L_{fc} 增加, L_{zx} 减小;为了便于比较,同时评价本体绕组风量分配均匀程度,采用式(6)定义的单位轴向长度供风量 M_1 ($\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$)进行分析,如图7所示。

图7为副槽及轴向通风段单位轴向长度供风量 M_1 随径向风沟总排数 N 变化曲线,图中字母A、B分别代表轴向及副槽通风段。由图可知,随径向通风沟总排数增加,轴向通风段 M_1 增加,副槽通风段 M_1 减少,当径向风沟排数达到40排时,两通风段单位长度上的供风量基本相等。由于整个本体段绕组的热源分布相同,暂不考虑流体温升等因素,欲减小本体轴向温差及峰值温度,初步设计时,应首先使副槽通风段及轴向通风段绕组单位长度的供风量分布均匀,即 M_1 应相同,减小因轴向通风段的长度取值不合理引起的风量分布偏差;然后进行端部及本体轴向三维温度场计算,得出端部等位置的最高温度。在此基础上,采用微调措施,进行内部传热温差等因素修正,达到优化设计轴向通风段的长度、降低峰值温度的目的。

图7 副槽通风及轴向通风段绕组轴向单位长度空气量
Fig.7 Air mass flow rate per unit axial length of windings among the sub slot ventilation and axial ventilation

4.3 楔下垫条通风道结构的影响

本文8号线圈副槽通风段楔下垫条通风道拟采用梯形结构或圆柱形结构(见图8),经数值模拟得到进入各通风道的总空气质量流量,研究不同楔下垫条通风道结构对转子空气量分布的影响。

由表2可知,当楔下垫条通风道结构由圆柱形变为梯形结构时,入口流动阻力减小,进入副槽的空气量增加6.56%,比较显著;进入转子8号线圈的总风量增加3.65%,而进入轴向通风孔及端部通风孔的风量分别减少0.93%及3.37%,这将不利于转子端部及本体前端绕组的冷却,使峰值温度升高。此外,当采用梯形结构时,副槽通风各槽楔出风孔最大与最小质量流量 m_i 偏差率约64%,远大于圆柱结构时的38.2%,副槽通风段轴向温差较大。

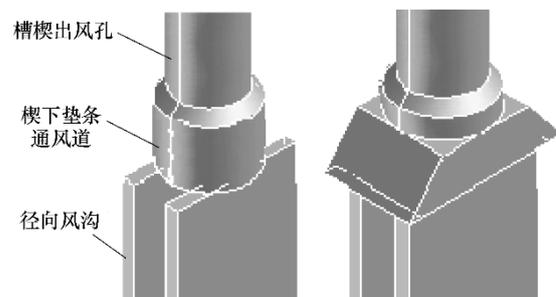


图8 副槽通风段径向通风道局部结构

Fig.8 Local structure for the radial ducts among the sub slot ventilation

表2 楔下垫条结构对转子空气量分布的影响

Tab.2 Effect of the structure of the cushion strip beneath wedge on the air flow rate distribution in rotor

(单位: kg/s)

楔下垫条风道结构	副槽 M_{fc}	轴向 M_{zx}	端部 M_{db}	总风量 M
----------	-------------	-------------	-------------	---------

梯形	0.193 85	0.066 00	0.031 00	0.290 85
圆柱形	0.181 92	0.066 62	0.032 08	0.280 62

5 结论

本文给出了汽轮发电机转子三维紊流多风路通风系统空气流量分布计算方法, 得出以下结论:

(1) 轴向挡块对转子各通风道流量分配影响较大, 扇形绝缘挡块局部开槽, 端部绕组高温区外部冷却空气量增加。

(2) 本体长度确定的前提下, 提出副槽及轴向通风段轴向单位长度的通风量相等时, 副槽及轴向通风段平均冷却空气量分布均匀, 按照该原则初步设计轴向或副槽通风段长度。

(3) 圆柱形楔下垫条通风道结构与梯形相比, 增大了进入转子常规高温区端部和轴向段的空气量, 有利于降低峰值温度和轴向温差。

参考文献

- [1] Rajagopal M S, Seetharamu K N, Aswatha P A. Finite element analysis of radial cooled rotating electrical machines[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 1999, 9(1): 18-38.
- [2] Aldo D, Andre C, Maria L, et al. A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor[J]. IEEE Transactions Industry Applications, 2003, 39(4): 945-952.
- [3] Taniyama Y, Kabata Y, Hashidate Y. Improvement of ventilation analysis in turbine generator[J]. American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division, 2005, 261: 605-612.
- [4] Fujita M, Kabata Y, Tokumasu T. Air-cooled large turbine generator with multiple pitched ventilation ducts[C]. 2005 IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, TX, United States, 2005: 910-917.
- [5] Gray R F, Nelson R, Pipkin J. Designing the cooling systems for the world's most powerful turbo generator-olkiluoto unit 3[C]. 2006 Power engineering Society General Meeting, 2006(1-9): 1624-1628.
- [6] Srinivas K N, Arumugam R. An investigation into the air velocity distribution inside switched reluctance motors[J]. Electric Power Components and Systems, 2004, 32(9): 893-900.
- [7] 马有福, 袁益超, 刘聿拯, 等. 气隙取气汽轮发电机转子全隐式取风斗取风特性数值研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(11): 120-125.
Ma Youfu, Yuan Yichao, Liu Yuzheng, et al. Numerical studies on ventilation characteristics of concave inflow slot wedge with application of gap-pickup rotor in turbo-generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(11): 120-125.
- [8] 李冬梅. 220MW 空冷汽轮发电机转子通风结构 CFD 分析[J]. 东方电机, 2006(1): 41-45.
Li Dongmei. CFD analysis of rotor ventilation configuration of air-cooling turbo generator[J]. East Electric Machine and Hydraulic Turbin, 2006(1): 41-45.
- [9] Li W L, Ding S Y, Jin H Y. Numerical calculation of multicoupled fields in large salient synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4): 1449-1452.
- [10] Li W L, Ding S Y, Zhou F. Diagnostic numerical simulation of large hydrogenerator after insulation aging[J]. Heat Transfer Engineering, 2008, 29(10): 902-909.
- [11] 路义萍, 李伟力, 韩家德, 等. 大型汽轮发电机转子风道结构对空气流量分配影响 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(4): 20-24.
Lu Yiping, Li Weili, Han Jiade, et al. Effect of rotor's cooling duct geometry on air mass flow rate distribution of large turbo generator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(4): 20-24.
- [12] Fluent Inc. FLUENT User's Guide. Fluent Inc, 2003.
- [13] 路义萍, 李伟力, 马贤好, 等. 大型空冷汽轮发电机转子温度场数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 7-13.
Lu Yiping, Li Weili, Ma Xianhao, et al. Numerical simulation of temperature field in rotor of large turbo generator with air-coolant[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(12): 7-13.

作者简介: 路义萍 女, 1965 年生, 博士, 教授, 从事电机通风冷却研究。 阴文豪 男, 1984 年生, 硕士研究生, 从事电机物理场数值计算的研究。

