

发电机定子径向通风系统流量分配模型研究

全庆华¹, 胡晓红², 袁益超², 槽根², 郭闯²

(1.上海市特种设备监督检验技术研究院,上海 200062; 2.上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093)

摘要:以汽轮发电机定子轴向分段多流式径向通风系统为研究对象,建立了定子径向通风系统流量分配模型.考虑到定子各风区间的流量相依性,利用压力平衡来判断风区间的汇流点和分流点,使模型研究结果更加切合实际.应用模型对某空冷汽轮发电机定子轴向分段多流式径向通风系统进行研究,并将研究结果与真机试验结果进行比较,结果表明,精度满足工程要求,从而验证了模型的正确性.

关键词:汽轮发电机; 定子; 径向通风; 流量分配模型

中图分类号: TM 311 **文献标志码:** A

Characteristics of the Flow Rate Distribution in the Axial Sectional Type Radial Ventilation System of a Turbo-Generator Stator

TONG Qinghua¹, HU Xiaohong², YUAN Yichao², CAO Gen², GUO Chuang²

(1. Shanghai Institute of Special Inspection and Technical Research, Shanghai 200062, China;

2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A model for the flow rate distribution of the radial ventilation in stators was built, taking the axial sectional type radial ventilation system of a turbo-generator stators as a research example. Considering the flow volume dependency between the ventilation zones in the stator, the confluence point and the diversion point were determined according to the pressure balance between ventilation zones so as to make the results more practical by the model. The fluid field of an air-cooled turbo-generator stator was analyzed based on the model. The results were compared with the experimental results, which shows that the accuracy meets the need in engineering, and the model was verified.

Keywords: turbo-generator; stator; radial ventilation; flow rate distribution model

1 定子轴向多流式径向通风系统

汽轮发电机定子轴向分段多流式径向通风系统

简称径向通风系统,因该系统与轴向通风系统相比具有较小的轴向温升,被广泛应用于不同容量的空冷、氢冷汽轮发电机定子冷却中^[1-2].在发电机温度场计算中,流场的变化是各散热系数变化的重要因

收稿日期: 2016-06-13

第一作者: 全庆华(1980-),男,工程师.研究方向:节能技术. E-mail: ghtong1980@163. con

通信作者: 胡晓红(1980-),女,助理研究员.研究方向:大型发电机冷却技术. E-mail: huxihong@163. con

素之一.定子各径向风沟的流量分配直接影响定子铁芯和绕组的温度分布,因此,对定子各径向风沟间冷却介质流量分配特性进行研究是非常重要的^[3-6].

定子轴向分段多流式径向通风系统如图1所示,定子铁芯沿轴向分为若干个进、出风区,进、出风区交替布置.出风区各径向风沟在气隙处形成分流,进风区各径向风沟在气隙处形成汇流.端部出风区靠近励端的径向风沟的气流主要来自气隙进口,其沿定子径向风沟不断分流;靠近端部进风区侧,径向风沟的冷却气体主要来自端部进风区,气流从端部进、出风区交界处沿励端逐渐分流;中间出风区及中心出风区径向风沟气流则来自其相邻进风区,气流从进、出风区交界处沿出风区不断分流,因此,出风区属于分流系统.对于进风区,由于冷却气体从铁芯背部流至气隙后需从定子出风区流出,因此,在进风区段气隙形成汇流,其属于汇流系统.因定子径向各风沟不断分流与汇流使得气隙沿轴向静压分布不均匀,造成定子进、出风区各径向风沟气体流量分配不均匀,最终导致定子绕组和铁芯温升的不均匀.

目前对定子轴向分段多流式径向通风系统的研究主要集中在定子径向风沟局部流场对定子温度场的影响.文献[7-11]针对定子铁芯径向风道的流场及其对铁芯散热的影响进行了研究;文献[12-14]则对铁芯的局部温度场进行数值模拟研究.现有文献对定子各径向风沟间流量分配情况研究较少,然而,各径向风沟间冷却介质流量分配研究是定子径向风道内流场和温度场研究的前提,对定子各径向风沟流量分配进行研究是非常必要的.定子各径向风沟流量分配若采用数值方法模拟发电机流场,会因电机内部结构较复杂,建模时需要对结构进行必要的简化,使模型和工程实际有一定的偏差.为此,

本文考虑定子轴向分段多流式径向通风系统的流动特点,建立定子通风系统的冷却介质流量分配模型,并将某空冷汽轮发电机的模型研究结果与真机试验结果进行比较,以验证模型的正确性.模型不仅可以对影响定子通风系统流量分配的因素进行研究,而且可以用于定子径向通风冷却结构的优化.

2 轴向分段多流式径向通风系统流量分配模型

2.1 物理模型

现以某空冷汽轮发电机为例,发电机定子采用轴向分段多流式4进5出通风系统,即定子沿轴向被分为9个分区,4个进风区,5个出风区,进、出风区交替布置.其中,1~20,33~43,54~65,76~85,99~118径向风沟对应定子5个出风区,21~32,44~53,66~75,86~98径向风沟对应定子4个进风区,其定子通风系统图如图1所示.因采用轴向分段多流式通风冷却系统的发电机,其结构是左右对称的,所以,可仅对发电机一半结构进行研究.

2.2 数学模型

根据图1定子轴向分段多流式径向通风冷却系统结构,可建立定子进、出风区相应的通风系统风路图(下页图2),以端部出风区为例.对于第 n 段气隙风沟,有

$$P_{G1} - P_{Gn} = Z_{Gn} Q_{Gn}^2 \quad (1)$$

式中: P_{G1} 为气隙进口处静压; P_{Gn} 为气隙 n 节点静压; Z_{Gn} 为第 n 段气隙总风阻, $Z_{Gn} = \rho \xi_{Gn} / 2A_{Gn}^2$; ξ_{Gn} 为第 n 段气隙沿程和局部阻力系数之和; A_{Gn} 为第 n 段气隙流通面积; Q_{Gn} 为第 n 段气隙流量.

对于第 n 定子径向风沟,有

$$P_{Gn} = P_{SBO} + Z_{Sn} Q_{Sn}^2 + \Delta P_{SDn} \quad (2)$$

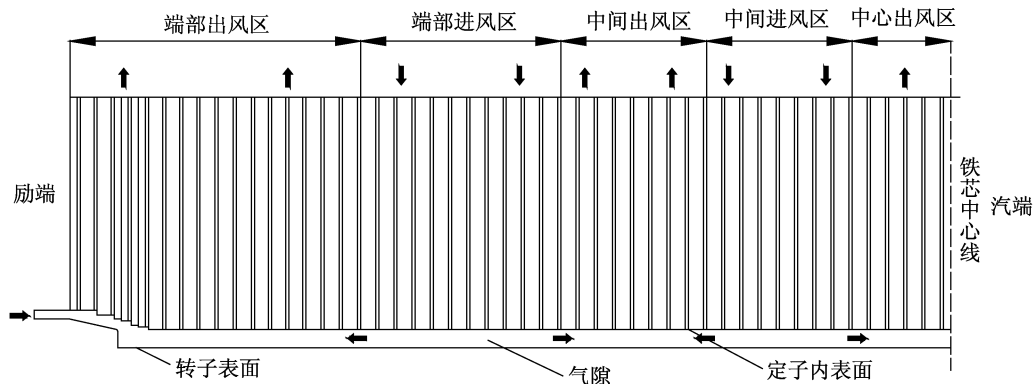


图1 轴向分段多流式径向通风系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the axial sectional type radial ventilation system

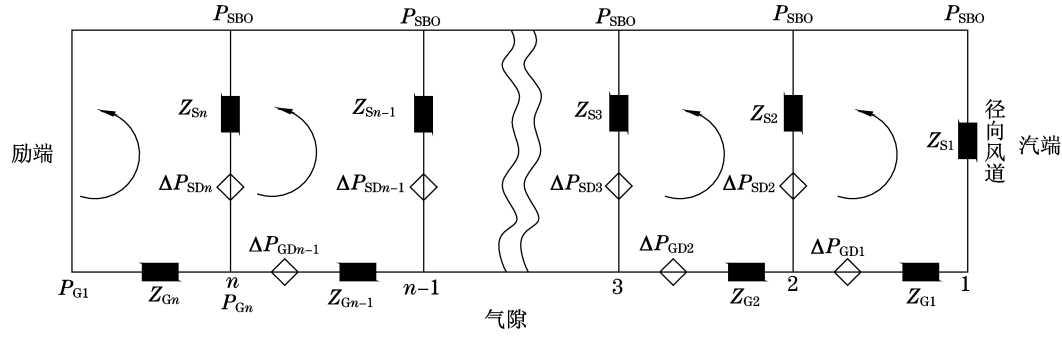


图2 定子出风区径向通风冷却风路图

Fig.2 Flow chart of the radial ventilation system in outlet ventilation zone

式中: P_{SBO} 为定子出风区背部静压; Z_{Sn} 为定子第 n 径向风沟沿程和局部风阻之和, $Z_{Sn} = \frac{\rho \xi_{Sn}}{2A_{Sn}^2}$; ξ_{Sn} 为定子第 n 径向风沟沿程及局部阻力系数之和; A_{Sn} 为定子第 n 径向风沟流通面积; Q_{Sn} 为定子第 n 径向风沟流量; ΔP_{SDn} 为冷却气体径向分流使分支处流场产生变化引起的损失, $\Delta P_{SDn} = \frac{\rho \xi_{SD}}{2} V_{Gn}^2 = \frac{\rho \xi_{SD}}{2A_{Gn}^2} Q_{Gn}^2 = Z_{SDn} Q_{Gn}^2$; ξ_{SD} 为定子径向风沟分流阻力系数^[15]; V_{Gn} 为第 n 段气隙流速; Z_{SDn} 为定子径向风沟分流风阻。

对于定子风区末端径向风沟, $\Delta P_{SD1} = 0, Z_{SD1} = 0$ 。

$$\begin{cases} P_{GI} - P_{SBO} = Z_{S1} Q_{S1}^2 + (Z_{G1} Q_{G1}^2 + \Delta P_{GD1}) + (Z_{G2} Q_{G2}^2 + \Delta P_{GD2}) + \dots + \\ \quad (Z_{Gn-1} Q_{Gn-1}^2 + \Delta P_{GDn-1}) + Z_{Gn} Q_{Gn}^2 \\ P_{GI} - P_{SBO} = (Z_{S2} Q_{S2}^2 + \Delta P_{SD2}) + (Z_{G2} Q_{G2}^2 + \Delta P_{GD2}) + (Z_{G3} Q_{G3}^2 + \Delta P_{GD3}) + \dots + \\ \quad (Z_{Gn-1} Q_{Gn-1}^2 + \Delta P_{GDn-1}) + Z_{Gn} Q_{Gn}^2 \\ P_{GI} - P_{SBO} = (Z_{S3} Q_{S3}^2 + \Delta P_{SD3}) + (Z_{G3} Q_{G3}^2 + \Delta P_{GD3}) + (Z_{G4} Q_{G4}^2 + \Delta P_{GD4}) + \dots + \\ \quad (Z_{Gn-1} Q_{Gn-1}^2 + \Delta P_{GDn-1}) + Z_{Gn} Q_{Gn}^2 \\ \vdots \\ P_{GI} - P_{SBO} = (Z_{Sn-1} Q_{Sn-1}^2 + \Delta P_{SDn-1}) + (Z_{Gn-1} Q_{Gn-1}^2 + \Delta P_{GDn-1}) + Z_{Gn} Q_{Gn}^2 \\ P_{GI} - P_{SBO} = Z_{Sn} Q_{Sn}^2 + \Delta P_{SDn} + Z_{Gn} Q_{Gn}^2 \end{cases} \quad (5)$$

根据质量守恒原理,存在下式:

$$Q_{Gn} = Q_{S1} + Q_{S2} + Q_{S3} + \dots + Q_{Sn} \quad (6)$$

将第 i 径向风沟的流量用第 1 径向风沟流量来表示

$$Q_{Si} = \epsilon_i Q_{S1}, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中, ϵ_i 为第 i 径向风沟与末端径向风沟流量的比值。

则式(6)可表示为

$$Q_{Gn} = \sum_{i=1}^n \epsilon_i Q_{S1} \quad (8)$$

由式(5)中第 i 与 $i+1$ 个方程可得

整理式(1)和式(2),可得

$$P_{GI} - P_{SBO} = Z_{Gn} Q_{Gn}^2 + Z_{Sn} Q_{Sn}^2 + \Delta P_{SDn} \quad (3)$$

与此类似,对于节点 $n-1$,有

$$P_{GI} - P_{SBO} = Z_{Gn} Q_{Gn}^2 + \Delta P_{GD(n-1)} + Z_{G(n-1)} Q_{G(n-1)}^2 + Z_{S(n-1)} Q_{S(n-1)}^2 + \Delta P_{SD(n-1)} \quad (4)$$

式中: $\Delta P_{GD(n-1)}$ 为因冷却介质沿径向支路分流,在气隙风沟产生的压力损失, $\Delta P_{GD(n-1)} = \frac{\rho \xi_{GD}}{2} V_{Sn}^2 =$

$\frac{\rho \xi_{GD}}{2A_{Sn}^2} Q_{Sn}^2 = Z_{GDn} Q_{Sn}^2$; ξ_{GD} 为气隙风沟分流阻力系数^[15]; Z_{GDn} 为气隙风沟分流风阻;

同理,在末端至第 n 定子径向风沟,可建立 n 个关系式

$$\begin{aligned} & (Z_{Si+1} Q_{Si+1}^2 + \Delta P_{SDi+1}) - (Z_{Si} Q_{Si}^2 + \Delta P_{SDi}) - \\ & (Z_{Gi} Q_{Gi}^2 + \Delta P_{GDi}) = (Z_{Si+1} Q_{Si+1}^2 + \\ & Z_{SDi+1} Q_{Gi+1}^2) - (Z_{Si} Q_{Si}^2 + Z_{SDi} Q_{Gi}^2) - \\ & (Z_{Gi} Q_{Gi}^2 + Z_{GDi+1} Q_{Si+1}^2) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9),可得

$$\begin{aligned} & (Z_{Si+1} + Z_{SDi+1} - Z_{GDi+1}) \epsilon_{i+1}^2 + 2Z_{SDi+1} \left(\sum_{k=1}^i \epsilon_k \right) \epsilon_{i+1} + \\ & (Z_{SDi+1} - Z_{SDi} - Z_{Gi}) \left(\sum_{k=1}^i \epsilon_k \right)^2 - Z_{Si} \epsilon_i^2 = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

2.3 定子进、出风区压力平衡点确定

定子轴向分段多流式径向通风系统因各风区冷

却介质分流、汇流相互交错,使得气隙处静压分布较复杂.如图1所示,端部出风区的冷却介质一部分来自气隙入口处,另一部分则来自端部进风区.而端部进风区的冷却介质则是一部分流入端部出风区,另一部分流入中间出风区.这样,在出风区所对应的气隙中就出现汇流点(如图3所示),而进风区所对应的气隙则出现分流点(如图4所示).在前述的计算中需已知汇流点与分流点位置.因此,汇流点与分流点的正确确定是定子径向通风冷却系统流量分配计算的关键.

设 P_{D0}^- , H_{D0}^- 和 P_{S0}^- 分别是冷却介质从汇流点左边沿气隙流动到 C 处时的动压、全压和静压; P_{D0}^+ , H_{D0}^+ 和 P_{S0}^+ 分别是冷却介质从汇流点右边沿气隙流动到 C 处时的动压、全压和静压; P_{D1}^- , H_{D1}^- 和 P_{S1}^- 分别是冷却介质从分流点左边沿气隙流动到 C' 处时的动压、全压和静压; P_{D1}^+ , H_{D1}^+ 和 P_{S1}^+ 分别是冷却介质从分流点右边沿气隙流动到 C' 处时的动压、全压和静压.令压差 $f(C) = P_{S0}^- - P_{S0}^+$, 则在出风区两股气流的汇流点处必有 $f(C) = 0$. 若假定汇流点位于实际汇流点左侧,则对该处静压差进行校核时,有 $P_{S0}^- < P_{S0}^+$, 即 $f(C) < 0$; 若假定汇流点位于实际汇流点右侧,有 $P_{S0}^- > P_{S0}^+$, 即 $f(C) > 0$. 同理,令压差 $f(C') = P_{S1}^- - P_{S1}^+$, 若假定分流点位于实际分流点左侧, $f(C') < 0$; 若假定分流点位于实际分流点右侧, $f(C') > 0$.

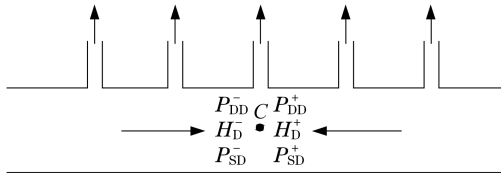


图3 出风区汇流

Fig.3 Confluence of the flow in outlet ventilation zone

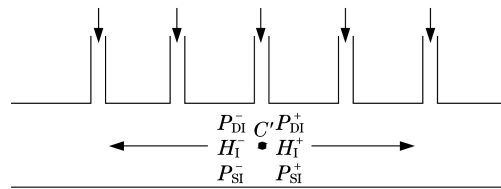


图4 进风区分流

Fig.4 Diversion of the flow in inlet ventilation zone

首先假定汇流点和分流点位置(通常可假定为进风区和出风区的中间位置)以及末端风沟气体流量初值 Q_{S0}^0 . 根据式(10)计算出第2径向风沟的流量 Q_{S2}^0 , 依次类推, 可求得定子各径向风沟流量分配 Q_{Si}^0 及 P_{S0}^- , P_{S0}^+ , P_{S1}^- , P_{S1}^+ . 当 $f(C^0) = 0$ 时, 假定的

C^0 点位置即为所求. 当 $f(C^0) > 0$ 时, 则实际汇流点应位于假定的 C^0 点右侧, 假定风区长度为 L , 即 $C^{(1)} \in [C^0, L]$; 当 $f(C^0) < 0$, 则实际汇流点应位于假定的 C^0 点左侧, 即 $C^{(1)} \in [0, C^0]$. 此时, C 点的实际位置被限定在出风区一半的范围. 同理, 可以判断出 C' 点的实际位置区间. 根据 $f(C)$, $f(C')$ 值大小重新设定汇流点和分流点的位置, 再进行通风计算, 逐次迭代, 直至假定点 C, C' 处符合 $f(C) = 0, f(C') = 0$ 为止. 确定 C, C' 位置后, 可由式(10)求得定子各风区各径向风道的流量 Q_{Si} 及气隙静压分布, 将所得气隙进口静压及进、出风区交界处的静压与已知值进行比较, 当两者误差小于一定值时, 迭代结束.

3 计算结果与分析

3.1 定子径向风沟流量分配

图5给出了某空冷汽轮发电机定子全部径向风沟流量分配模型的研究结果. 从图5中可以看出, 端部出风区靠近励端定子径向风沟的气流主要来自气隙进口, 由于沿汽端方向定子径向风沟的不断分流, 气隙流速逐渐减小, 静压升高, 而出风区背部静压相同, 因此, 径向风沟流量逐渐增加; 对于端部出风区靠近端部进风区侧, 径向风沟的冷却气体主要来自端部进风区, 气流从端部进、出风区交界处沿励端逐渐分流, 气隙静压升高, 径向风沟流量亦逐渐增加. 当端部出风区来自气隙进口及来自进风区的两股气流相遇时, 静压达到最大, 该处径向风沟气体流量最大. 对于进风区(端部进风区和中间进风区), 由于冷却气体从铁芯背部流至气隙后需从定子出风区流出, 在进风区段气隙形成合流, 进风区中间气隙轴向气流速度较小, 两端气流速度较大. 因此, 在进风区, 中间气隙静压较高而两边相对较低, 中间径向风沟流量较小而两端径向风沟冷却介质流量较大.

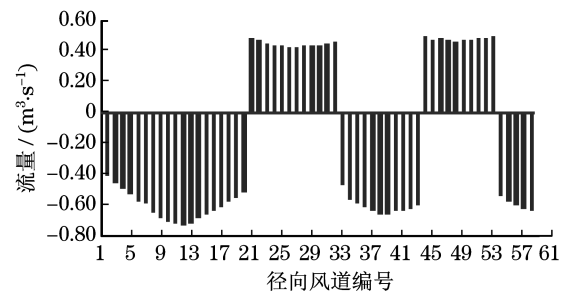
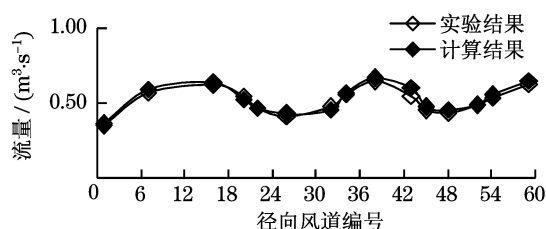


图5 空冷汽轮发电机定子径向风沟流量分布

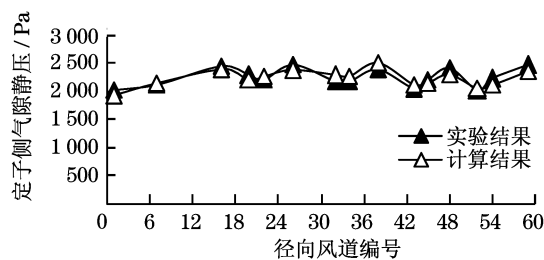
Fig.5 Mass flow rate distribution in radius ducts of an air-cooled turbo-generator stator

3.2 定子径向风沟流量分配模型的试验验证

图6给出了某空冷汽轮发电机定子轴向分段多流式径向通风系统模型结果与真机试验结果之间的比较. 研究表明, 耦合模型结果与试验结果基本吻合, 两者偏差在5%以内. 从图6中可以看出, 在定子各风区中, 因定子背部风压相等, 定子径向风沟间的流量分配主要取决于定子侧气隙静压分布(图6). 在出风区, 若气隙静压大, 则所对应的径向风沟进、出口压差大, 冷却介质流量大; 在进风区, 因冷却气体由背部流至气隙, 气体流动方向与出风区相反. 气隙静压越大, 径向风沟压差越小, 冷却介质流量越小.



(a) 径向风沟流量分配模型



(b) 定子侧气隙静压分布模型

图6 模型研究结果与试验结果的比较

Fig. 6 Comparison between the model results and experimental results

4 结论

以空冷汽轮发电机为例, 对汽轮发电机定子轴向分段多流式径向通风系统流量分配模型进行研究, 得出以下结论:

a. 根据节点质量守恒以及回路流量压力平衡的基本关系, 建立了定子轴向分段多流式径向通风系统流量分配模型. 应用分配模型对某空冷汽轮发电机定子径向风沟流量分配进行研究, 得到了定子各径向风沟的流量分配规律.

b. 将流量分配模型研究结果与真机试验结果相比较, 结果表明, 模型研究结果和试验结果较吻合.

c. 以汽轮发电机定子进、出风区为代表的分

流、汇流系统, 可适用于发电机转子径向通风系统和其他工业领域, 本文的流量分配模型可为类似问题的研究提供参考.

参考文献:

- [1] 毛国光. 1 000 MW 级汽轮发电机技术问题概述[J]. 中国电力, 2006, 39(7): 15-22.
- [2] 金煦, 袁益超, 刘聿拯, 等. 大型空冷汽轮发电机冷却技术的现状与分析[J]. 大电机技术, 2004(4): 33-37.
- [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.
- [4] 王芳, 董惠, 安志华, 等. 大型汽轮发电机定子变结构对温度场的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013, 18(6): 95-99.
- [5] 吴德义. 大型空冷汽轮发电机通风结构中气体运动流场的合理建模[J]. 大电机技术, 2005(6): 8-10.
- [6] 路义萍, 丰帆, 孙明琦, 等. 同步电机定子与气隙流场数值计算与分析[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(8): 47-51.
- [7] 胡磊, 袁益超, 李立军, 等. 300 MW 双水内冷汽轮发电机定子铁心内空气流动特性研究[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(5): 456-460.
- [8] 李伟力, 靳慧勇, 丁树业, 等. 大型同步发电机定子多元流场与表面散热系数数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 138-143.
- [9] 靳慧勇, 李伟力, 马贤好, 等. 大型空冷汽轮发电机定子内流体速度与流体温度数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 168-173.
- [10] 项欢, 李伟力, 程树康. 大型水轮发电机定子径向风沟与散热[J]. 大电机技术, 1999(2): 11-14.
- [11] 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.
- [12] 丁树业, 李伟力, 马贤好, 等. 特殊绕组结构的空冷汽轮发电机定子三维温度场计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 140-145.
- [13] 李伟力, 杨雪峰, 顾德宝, 等. 多风路空冷汽轮发电机定子内流体流动与传热耦合计算与分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 24-31.
- [14] 栾茹, 傅德平, 唐龙尧. 新型浸润式蒸发冷却电机定子三维温度场的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 205-209.
- [15] 华绍曾, 杨学宁. 实用流体阻力手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

(编辑: 石 瑛)