

300 MW 双水内冷汽轮发电机定子铁心内 空气流动特性研究

胡磊^{1,2}, 袁益超¹, 李立军², 咸哲龙², 梁旭彪²

(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发电机厂, 上海 200240)

摘要: 针对某电厂 300 MW 双水内冷汽轮发电机实际运行中出现的汽、励两端铁心温度不均衡, 且端部几档铁心存在过热的问题, 采用二维数值模拟的方式, 研究其铁心及端部铁心内的空气流动特性。结果表明, 过热铁心档相邻的冷却通道流量较小可能是上述问题的主要原因。提出增加挡风板高度的措施, 使端部铁心过热问题得到有效解决, 电厂随后实际运行数据验证了该措施的可靠性, 为双水内冷系列汽轮发电机的增容改造及优化设计提供一定的参考依据。

关键词: 双水内冷汽轮发电机; 定子铁心; 过热; 数值分析

中图分类号: TM 311 **文献标志码:** A

Air Flow Characteristics in Stator Core of 300 MW Double Water Inner Cooled Turbo Generator

HU Lei^{1,2}, YUAN Yi-chao¹, LI Li-jun², XIAN Zhe-long², LIANG Xu-biao²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Electric Power Generation Equipment Co., Ltd. Generator Plant, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the operation data collected from a certain power plant, it is found that the temperature distribution on stator core between turbine end and exciter end is quite nonuniform, furthermore, there exists some overheated step core in the step iron. By means of numerical analysis, it is found that the volume flow of radial vent channel beside the overheated step core is quite low compared with other adjacent radial vents. The overheat problem was resolved by increasing the height of the baffle locating in the inner step iron, and the test data support the above measure. Some useful conclusions were given for the future optimum design and unit capacity enlargement.

Key words: double water inner cooled turbo generator; stator core; overheat; numerical analysis

收稿日期: 2013-10-12

第一作者: 胡磊(1980-), 男, 博士研究生. 研究方向: 汽轮发电机通风冷却系统流动及传热研究. E-mail: hulei@shanghai-electric.com

通讯作者: 袁益超(1965-), 男, 教授. 研究方向: 强化传热及节能技术. E-mail: ychuan@163.com

自1958年10月上海电机厂(上海电气电站设备有限公司上海发电机厂前身,以下简称上发厂)研制成功世界上第一台12 MW 双水内冷汽轮发电机以来,上发厂已经形成了60,135,300 MW 等级汽轮发电机的产品线,目前正在开发660 MW 双水内冷汽轮发电机。

双水内冷汽轮发电机定子、转子线圈均采用水直接冷却,定子铁心采用空气冷却,端部结构件(如铜屏蔽)部分采用水冷却。由于没有氢系统,发电机结构简单,且完全避免氢爆危险,机座、端盖均可以大大简化并无需作防爆处理。以上都是双水内冷汽轮发电机所特有的运行优势。

随着双水内冷汽轮发电机容量的不断提升,定子铁心尤其是端部铁心的发热问题,一直是制约其增容、提高进相运行能力的瓶颈之一。端部铁心及结构件由于存在漏磁而导致发热,同时,空气本身的物性同氢气相比其冷却能力有限,因此,上发厂采取了一系列改进措施,如减小端部铁心档的轴向尺寸、加强铁心齿部的冷却、采用铜屏蔽将损耗集中并用水冷却等,以解决端部铁心及结构件的发热问题。

解决定子铁心尤其是端部铁心的冷却问题,实质上包括两个方面:一是要确定热源的分布,这涉及端部电磁场的计算问题;二是要解决流场分布与热源分布的匹配问题。

目前针对双水内冷汽轮发电机定子铁心部分流场与温度场的数值模拟研究较少。国内外学者对空冷汽轮发电机的数值研究文献较多,例如,以一个定子径向风道作为研究对象,对电机内流场与温度场进行研究^[1-7];也有部分学者根据多路通风系统内流体流动与传热特点,对空冷汽轮发电机定子多路通风系统,建立三维流体场与温度场耦合求解的数学模型与物理模型进行研究^[8-14]。随着发电机线负荷的增加,端部漏磁也随之增加,因此,端部电磁场的计算一直是国内外电机界学者研究的重要课题,并取得了不少有价值的研究成果^[15-17]。

针对某电厂2台300 MW 双水内冷汽轮发电机

实际运行中出现的汽励两端铁心温度不均衡,且端部几档铁心存在过热的问题,以该发电机定子铁心为研究对象,对其建立包括径向风道、铁心档、气隙的二维模型,根据数值模拟结果提出相应的改造方案。电厂实施改造方案后,实际运行数据验证了数值模拟结果的可靠性。

1 问题的提出

300 MW 双水内冷汽轮发电机定子铁心采用径向全出风通风方式。空气从铁心内圆进入,通过铁心档之间的径向风道沿程吸收热量,最后从铁心外圆排出。由于所有冷却空气都从气隙进入,所以,气隙入口处风速较高,导致边段铁心处内圆和外圆之间的静压差较小,冷却空气不易进入且容易造成各风道的风量分配不均,致使局部铁心档出现过热。因此,一般采用在汽、励两端铁心内圆的某一位置放置一定高度的挡风板,以改善风量分配不均问题。

某电厂1,3号汽轮发电机均为上发厂生产的QFS系列300 MW 双水内冷汽轮发电机,经过增容改造,目前的额定功率为330 MW。此两台汽轮发电机汽、励两端靠近边段铁心处的第98和第7两档铁心内圆处,分别装有高度为 h 的径向挡风板,电厂增容过程中未对此挡风板进行改动。每一档铁心的齿部和轭部均埋有测温元件,齿部测温元件接近定子槽底位置,轭部测温元件靠近铁心外圆位置。铁心档的编号从励端开始,汽端结束,依次为1~104。

表1和图1(见下页)给出了这2台汽轮发电机在5种运行工况下(其中,1号机2种运行工况,3号机3种运行工况)的主要参数及铁心轭部温升分布。

表1及图1中的数据表明:

a. 1号机铁心最高温升出现在汽端的第100档轭部,3号机的最高温升出现在汽端的第101档轭部。根据电厂提供的测试数据,1,3号发电机汽、励端的本体部分铁心温升基本相同,据此可判断汽、励端的进风量基本相当。

表1 2台汽轮发电机运行数据

Tab.1 Operation data of two generators

机组	时间	有功功率/MW	容量/MVA	定子电压/kV	定子电流/A	转子电流/A	功率因数	汽端进风温度/℃	励端进风温度/℃
1号机	04-08	298	315	17.96	10 100	1 605	0.946	26	29
1号机	04-09	261	276	18.00	8 900	1 470	0.944	26	28
3号机	03-31	333	352	18.40	11 001	1 745	0.947	23	23
3号机	04-08	294	308	18.00	9 900	1 586	0.954	21	25
3号机	04-09	260	277	17.97	8 900	1 493	0.938	16	21

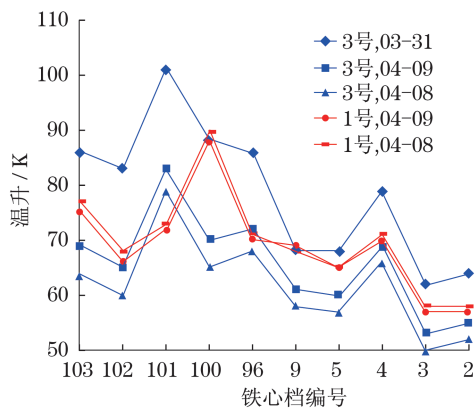


图 1 1,3 号汽轮发电机铁心轭部温升分布
Fig.1 Temperature distribution on stator yoke core of No 1 and 3 generators

b. 发电机运行工况对温升的影响比较明显. 1 号机 4 月 9 日(容量 276 MVA,功率因数 0.944)虽然比 4 月 8 日(容量 315 MVA,功率因数 0.946)出力低、定子电流和转子电流也较小,但边段铁心温升基本相当;而 3 号机 4 月 9 日(容量 277 MVA,功率因数 0.938)虽然比 4 月 8 日(容量 308 MVA,功率因数 0.954)出力低,但边段铁心温升普遍较高,说明功率因数与温升的关系较大.

2 数值模拟

2.1 物理模型

采用两维模型进行数值模拟,由于汽端和励端关于铁心中心线对称,因此,计算域取一半铁心. 计算模型及局部放大图如图 2 所示. 图 2 中入口部分为速度进口边界条件,出口部分为压力出口边界条件,汽端的第 104 档与 103 档铁心之间的径向通道编号为 103,其余依次类推.

2.2 数学模型

根据计算流体力学理论,本文采用标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型进行求解. 当流体为不可压缩定常流动时,其通用的控制方程为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S$$

式中, ϕ , U 为通用变量; Γ 为扩散系数; S 为源项; ρ 为流体密度.

由于风道中冷却气体的雷诺数较大,属于充分发展的湍流,因此,采用上述湍流模型对流场进行求解. 双水内冷汽轮发电机内部压力接近于大气压力,可以忽略浮力和重力的影响;同时由于马赫数小于

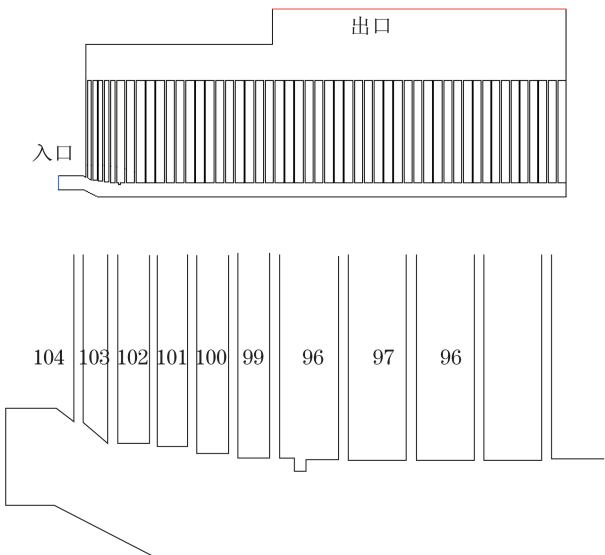


图 2 计算模型及局部放大图
Fig.2 Numerical model and partial enlarged detail

0.3,因此,可作为不可压缩流体处理. 压力与速度耦合采用 Simple 算法,动量、湍动能和耗散率均采用二阶迎风格式,近壁面处采用标准壁面函数. 经计算,第一层网格的壁面率 y^+ 值绝大部分在 30~100 范围内,故认为已符合精度要求.

2.3 结果分析

分别对径向挡风板高度为 0, h , $1.5h$, $2h$, $2.5h$ 及 $3h$ 且分别位于第 98,97 档铁心内圆处时的流场特性进行模拟,其结果如表 2 和表 3 所示;同时,选取径向挡风板位于第 98 档铁心内圆、高度为 $0.3h$ 两种情况为典型代表,其靠近挡风板处的速度云图如图 3 所示. V 为速度.

表 2 挡风板位于第 98 档铁心时不同高度下的各风道流量
Tab.2 Radial channel flow volume under different height of baffle locating at 98th step core kg/s

径向通道编号	挡风板高度					
	0	h	$1.5h$	$2h$	$2.5h$	$3h$
103	0.10	0.11	0.14	0.17	0.20	0.26
102	-0.21	-0.20	-0.18	-0.16	-0.14	-0.02
101	0.16	0.15	0.15	0.14	0.11	0.01
100	-0.01	-0.01	-0.06	-0.14	-0.24	-0.40
99	-0.23	-0.28	-0.30	-0.35	-0.40	-0.47
98	0.13	0.29	0.33	0.38	0.42	0.49
97	0.13	-0.12	-0.21	-0.25	-0.30	-0.31
96	0.12	0.18	0.10	-0.09	-0.25	-0.30
95	0.12	0.15	0.13	0.14	0.07	-0.25

由图 3、表 2 和表 3 可知:

表 3 挡风板位于第 97 档铁心时不同高度下的各风道流量
Tab.3 Radial channel flow volume under different height
of baffle locating at 97th step core kg/s

径向通道 编号	挡风板高度					
	0	h	$1.5h$	$2h$	$2.5h$	$3h$
103	0.10	0.12	0.13	0.15	0.19	0.25
102	-0.21	-0.19	-0.20	-0.18	-0.16	-0.05
101	0.16	0.15	0.14	0.12	0.11	0.08
100	-0.01	0.01	-0.16	-0.23	-0.27	-0.28
99	-0.23	-0.26	-0.29	-0.30	-0.36	-0.44
98	0.13	0.18	0.21	0.23	0.31	0.40
97	0.13	0.28	0.31	0.33	0.40	0.49
96	0.12	-0.15	-0.20	-0.23	-0.28	-0.29
95	0.12	0.16	0.15	0.11	-0.17	-0.29

a. 挡风板分别位于第 98,97 档铁心时,随着挡风板高度的增加,位于来流上游的第 98,97 号风道的流量也随之增加;挡风板在其高度低于 h 时,无论位于第 98 档还是第 97 档铁心处,第 100 号风道流量均较小,易引起局部过热,这与电厂实测数据是一致的,热点出现在第 100 号风道的两侧,即第 100 档或第 101 档铁心轭部。

b. 挡风板高度也不宜过大,挡风板高度增加到 $3h$ 时,第 101,102 号风道的流量会急剧下降;部分风道流量为负值,这是由于气隙进口处压力较高,气流速度较大(约 60 m/s),局部会产生负压区(内圆处静压小于外圆处静压),因而导致逆流。

根据上述数值模拟结果,对这 2 台发电机提出

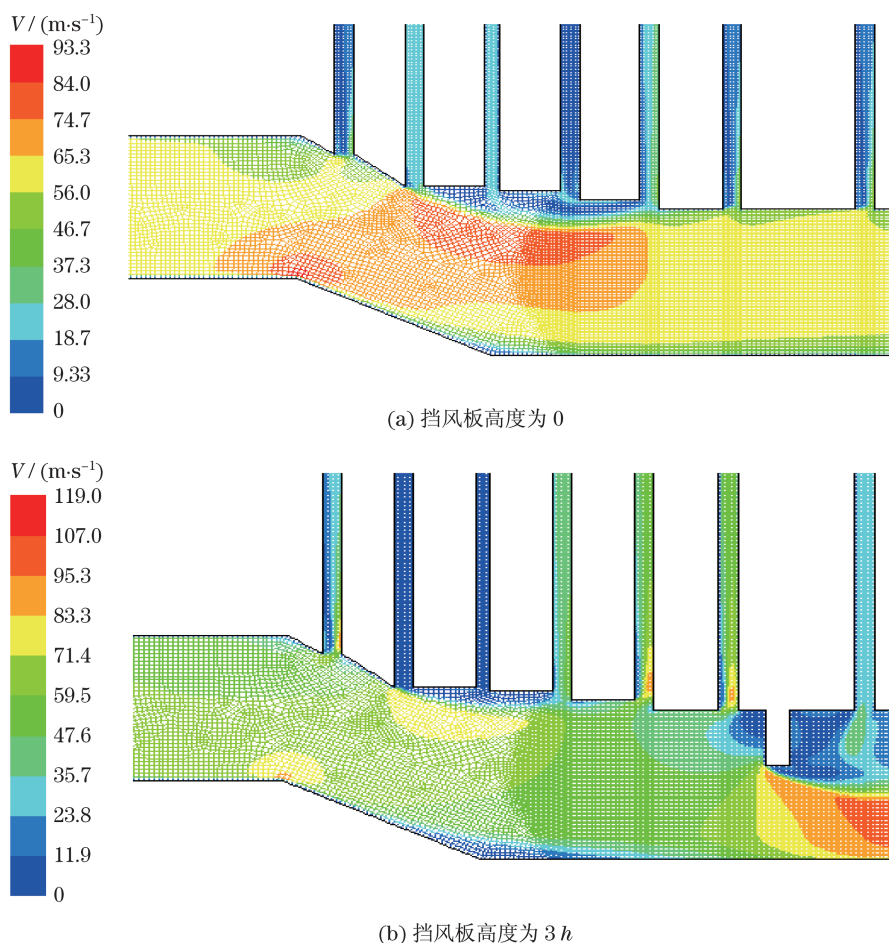


图 3 挡风板在不同高度情况下局部速度等值线图

Fig.3 Local velocity isogram under different height of baffle

了相应的改造建议,即将汽端挡风板移至第 97 档铁心处且高度为 $2h$,以显著增加第 100 号风道流量,并使各风道流量分配也较均匀;若不便改变挡风板位置,则仅将挡风板高度加大至 $2h$,也能达到较好的效果。

3 实验验证

该电厂于 6 月 16 日对 1 号发电机挡风板按照上述建议进行了改造:将汽端挡风板高度由原来的

h 改为 $2h$,位置仍位于第 98 档铁心处;励端由于端部不存在过热现象,挡风板高度及位置均保持不变.

表 4 和图 4 给出了挡风板改造前(4 月 10 日)、后(6 月 16 日)某一时刻运行状况较为接近的发电机的有关运行数据.在图 4 中,横坐标为铁心档编号,纵坐标为汽、励两端相对于各自进风温度的温升.

表 4 1 号发电机挡风板改造前后实际运行数据

Tab.4 Operation data of No.1 generator before and after baffle modification

时间	有功功率/MW	定子电压/kV	定子电流/kA	转子电压/V	转子电流/A	汽端进风温度/℃	励端进风温度/℃
04-10	240	18	8.2	344	1 417	26	28
06-16	237	18	8.0	328	1 362	30	29

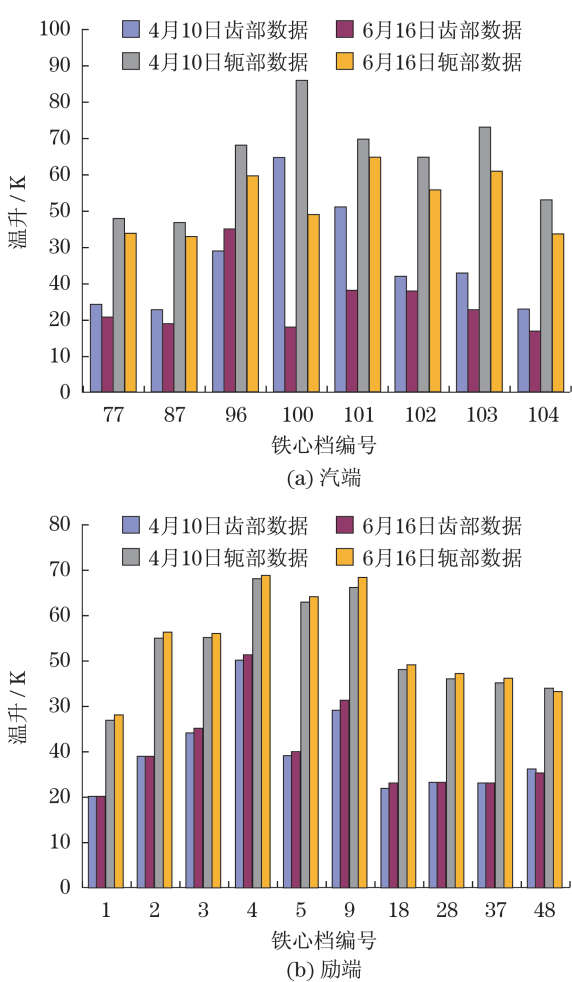


图 4 挡风板改动前后汽端、励端铁心温升

Fig.4 Comparison of stator core temperatures at turbine and exciter ends before and after baffle modification

对比电厂调整挡风板高度前后的实测数据可知,调整挡风板高度收到了明显的效果.在励端铁心温升基本保持不变的前提下,汽端铁心温升有所降低,特别是汽端原来出现热点的第 100 档铁心,其轭部温升由 86 K 降为 49 K,齿部温升由 65 K 降为 18 K,表明改造后第 100 档铁心两侧风道(第 100,

99 号风道)的冷却空气流量明显增大,这与表 2 中数值模拟结果一致.

4 结 论

针对某电厂 300 MW 双水内冷汽轮发电机实际运行中出现的汽、励两端铁心温度不均衡,且局部几档铁心存在过热的问题,选取轴向一半铁心,建立包括径向风道、铁心档、气隙的二维模型并进行数值模拟.结果表明,过热档铁心相邻的冷却通道流量较小,可能是导致局部铁心档出现过热的主要原因,并提出了相应的挡风板改造方案.电厂实施改造方案后的实际运行数据验证了数值模拟的可靠性,为双水内冷系列汽轮发电机的增容改造及优化设计提供一定的参考依据.

由于端部铁心热负荷分布的复杂性,本文的数值分析只考虑了流场分布,并没有耦合温度场,且对模型进行了适当简化,但仍然取得了较好的效果.当然,若能将流场和温度场耦合,并且就不同结构对端部漏磁损耗的影响进行细致研究,在设计阶段尽可能使风量与热负荷分布相匹配,可作为进一步的研究方向.

参考文献:

[1] 陈楠.大容量空冷发电机通风及温升研究[J].大电机技术,2001(2):13-15.

[2] 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.

[3] 栾茹,傅德平,唐龙尧.新型浸润式蒸发冷却发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.

[4] 李伟力,侯云鹏,周封,等.汽轮发电机径切两向空冷系统转子温度场的计算方法[J].中国电机工程学报,2000,20(8):74-78.

- Bonferroni mean[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 20 (2) : 217 - 228.
- [14] Dutta B, Guha D. Trapezoidal intuitionistic fuzzy Bonferroni means and its application in multi-attribute decision making[C]// IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Hyderabad; IEEE, 2013.
- [15] Xia M M, Xu Z S, Zhu B. Geometric Bonferroni means with their application in multi-criteria decision making [J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 40 (4) : 88 - 100.
- [16] Xu Z S, Yager R. Some geometric aggregation operators based on intuitionistic fuzzy sets[J]. International Journal of General Systems, 2006, 35(4) : 417 - 433.
- [17] 彭国樑, 姚俭. 不确定性供应链风险的模糊综合评判 [J]. 上海理工大学学报, 2010, 32(4) : 373 - 377.
- [18] 周晓辉, 姚俭, 吴天魁. 梯形模糊数直觉模糊 Bonferroni 平均算子及其应用[J]. 数学理论与应用, 2014, 34(1) : 71 - 82.
- [19] 周晓辉, 姚俭, 吴天魁. 基于梯形直觉模糊数的 TOPSIS 多属性决策方法[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(3) : 281 - 286.

(编辑: 丁红艺)

(上接第 460 页)

- [5] 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.
- [6] 李伟力, 赵志海, 侯云鹏. 大型同步发电机定子同相槽和异相槽的温度场计算[J]. 电工技术学报, 2002, 17 (3) : 1 - 6.
- [7] 李和明, 李俊卿. 电机中温度计算方法及其应用综述 [J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(1) : 1 - 5.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 丁树业, 李伟力, 靳慧勇, 等. 发电机内部冷却气流状态对定子温度场的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3) : 131 - 135.
- [11] 李伟力, 付敏, 周封, 等. 基于流体相似理论和三维有限元法计算大中型异步电动机的定子三维温度场 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5) : 14 - 17.
- [12] Sarkar D. Use of 3-dimensional finite elements for computation of temperature distribution in the stator of an induction motor [J]. IEE Proceeding B, 1991, 138(2) : 75 - 86.
- [13] 李伟力, 侯云鹏, 程树康, 等. 大型水轮发电机定子股线导热的数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (7) : 115 - 119.
- [14] 李伟力, 杨雪峰, 顾德宝. 空冷汽轮发电机冷却气流流量对定子内流体的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21) : 53 - 61.
- [15] Ban D, Zarko D, Mandic I. Turbogenerator end-winding leakage inductance calculation using a 3-D analytical approach based on the solution of Neumann integrals [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(1) : 98 - 105.
- [16] 姚若萍, 侯小全, 饶芳权. 大型水轮发电机在各种工况下的端部磁场计算 [J]. 上海交通大学学报, 2002, 36 (2) : 234 - 236.
- [17] 梁艳萍, 黄浩, 李林合, 等. 大型空冷汽轮发电机端部磁场数值计算 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3) : 73 - 77.

(编辑: 石 瑛)