

基于耦合场的大型同步发电机定子温度场的数值计算

李伟力¹, 丁树业², 靳慧勇²

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江省 哈尔滨市 150010; 2. 哈尔滨理工大学, 黑龙江省 哈尔滨市 150040)

NUMERICAL CALCULATION OF LARGE SYNCHRONOUS GENERATOR STATOR TEMPERATURE FIELDS BASED ON COUPLED FIELDS

LI Wei-li¹, DING Shu-ye², JIN Hui-yong²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China; 2. Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: According to the theory of fluid dynamics, presented the fluid movement differential equation inside stator radial ventilation ducts, the solution region and the edge conditions of 2D fluid fields are given, and the fluid field is calculated and analysed, fluid field distribution inside radial ventilation ducts were compared at the different inlet velocity. At the same time, the heat transfer coefficient inside radial ventilation ducts were calculated on the basis of computational fluid dynamics (CFD), established mathematical model and physical model of stator 3D temperature fields, the stator 3D temperature field is computed and compared the result of it with the result calculated by tradition method, and measured value, some useful conclusions were achieved, and testified the accuracy of this method.

KEY WORDS: Electric machinery; Large synchronous generator; Radial ventilation duct; Fluid field; Temperature filed

摘要: 根据流体力学理论, 建立了定子径向通风沟内流体运动微分方程, 给出了二维流体场的求解域和边界条件并且进行了计算和分析, 对入口风速不同时径向通风沟内流场的分布进行了比较。同时在流体场计算的基础上计算了径向通风沟内各风壁的散热系数, 建立了定子三维温度场的数学模型和物理模型, 对定子三维温度场进行了计算, 将考虑流场具体分布时的计算结果与传统的温度场计算结果及解析法计算的结果和实测值进行比较, 得出了一些有益的结论, 说明了该方法的准确性。

关键词: 电机; 大型同步发电机; 径向通风沟; 流体场; 温度场

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目 (E00-14)。

1 引言

无论是水轮发电机, 还是汽轮发电机, 定子内部风道的存在对电机的散热都具有重要的作用。电机内部热现象的分析和温度场准确计算很大程度上取决于电机的散热系数及散热介质的温度, 而电机通风沟内冷却介质流速的变化是决定散热系数的最重要因素。通常电机通风沟内流体的流动状态是非常复杂的, 流体流速的变化也是不均衡的, 流场的准确计算具有一定的难度。因此, 电机通风沟内流速及散热系数的计算具有相当大的难度。

目前大多数文献[1-10]中, 都是采用传统的方法把径向通风沟内风速在齿部和轭部的流动分别视为恒定的, 这样虽然给计算带来一定的便捷, 但是对电机内部真实温度场的描述来说具有较大的偏差, 和实际情况是有出入的。而本文利用流体力学的紊流理论, 计算出电机定子径向通风沟流体流速的变化和分布规律, 进而更加准确地确定表面散热系数和定子温度场, 为研究电机通风发热计算提供了新的理论依据。

本文在流体力学理论和有限元方法的基础上, 通过对一台大型水轮发电机定子温度场的计算, 得出的结果与实测值更加接近, 并且将计算结果与传统的温度场计算结果、解析法计算结果进行了比较, 表明了本方法的准确性和适用性。

2 定子径向通风沟内流场的数学模型

2.1 连续方程和雷诺方程

根据粘性流体力学理论,以不可压缩流体紊流流动写出通用的控制方程。在直角坐标系中采用时均法,流体流动方程可用如下时均连续方程、瞬时N-S方程和雷诺方程描述^[11-13]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u'_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

$$r \frac{\partial u_i}{\partial t} + r u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = r F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + m \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \tag{3}$$

$$r \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + r \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = r \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (m \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{r u'_i u'_j}) \tag{4}$$

式中 \bar{u}_i 为时均流速; u'_i 为脉动流速; F_i 为质量力; \bar{p} 为时均压力; $i=x, y; j=x, y$, 且 $i \neq j$; m 为流体粘性系数; r 为流体的密度。

2.2 紊流 k-e 数学模型

标准 k-e 紊流数学模型在紊流计算模型中应用十分广泛。其中 $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ 代表脉动动能,称为 k 方程,

$e = n \frac{\partial \overline{u'_i u'_i}}{\partial x_j \partial x_j}$ 代表能量耗散率,称为 e 方程。当

不考虑质量力或在重力场中,压力项代表流体动压力时,应用式(4),经过一系列推导,可以得到 k-e 一般形式。在完全紊流的流场条件下,通过修正有如下标准 k-e 紊流计算模型^[11]。

$$\frac{\partial}{\partial t} (rk) + \frac{\partial}{\partial x_j} (rku_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} [(m + \frac{m_t}{s_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k - re \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (re) + \frac{\partial}{\partial x_j} (reu_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} [(m + \frac{m_t}{s_e}) \frac{\partial e}{\partial x_j}] + C_{1e} \frac{e}{k} G_k - C_{2e} r \frac{e^2}{k} \tag{6}$$

式中 $G_k = m_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ 为紊流产生率;紊流

粘性系数 $m_t = r C_m k^2 / e$, C_m 、 C_{2e} 、 C_{2e} 是常量; s_k 和 s_e 是 k 方程和 e 方程的紊流普朗特数 (Pr)。

由于电机中流体的雷诺数很大,属于紊流,因此应采用紊流模型对电机内流场进行求解。在采用大气压下空气冷却的大型同步发电机中,可以忽略浮力和重力的影响;电机内流场中马赫数 (Ma) 很小,故可以把流体作为不可压缩流体处理,只研究电机定子径向通风沟内风速的稳定状态,即定常流动,

方程不含有时间项可以大大简化紊流 k-e 数学模型。

2.3 流场的基本假设与边界条件

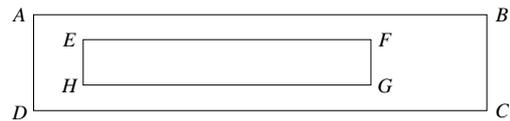
本文以龙羊峡 320MW 水轮发电机为例(基本数据如表 1 所示),计算了定子径向通风沟内流场,认为风速在定子通风沟内沿轴向不发生变化,且风是水平进入径向通风沟的,这样可采用二维模型利用有限体积法对流场进行计算,图 1(a)是二维定子径向通风沟流体场求解结构图, \overline{AB} , \overline{DC} 为定子径向通风沟两壁, \overline{AD} , \overline{BC} 分别为定子径向通风沟的入口和出口即定子铁心的内圆和外圆, \overline{EFGH} 为线棒周边。

表 1 电机的基本参数
Tab. 1 Rated specifications of the machine

额定值	功率/MW	电压/V	电流/A	功率/kW	转速/(r/min)	功率因数	
	320	15750	13035	320000	125	0.9	
基本尺寸	定子内径/mm	定子外径/mm	槽数	通风沟数	高/mm	槽深/mm	槽宽/mm
	11850	12800	630	46	10	233.5	24

边界条件:通风沟两壁和线棒为无滑移边界条件,即 $u|_{\overline{AB,DC,EFGH}} = 0$ 。出口压力为标准大气压。

图 1(b)为采用有限体积法时求解域的剖分图。



(a)结构图



(b)剖分图

图 1 流体场计算区域
Fig. 1 Solved region of fluid field

3 同步发电机定子径向通风沟温度场的模型

3.1 假定条件

以大型间接空冷水轮发电机轴径向通风系统为例^[1,3-6],作如下假设:

(1) 位于同一定子槽中的上、下层绕组是同相的,在同一时间内流过相同的电流。

(2) 考虑定子绕组铜耗时,涡流效应对每根股线的影响相同,即取其平均值。

(3) 槽楔近似当作与槽同宽,槽内的所有绝缘(股线绝缘、层间绝缘)为热性能与主绝缘相同。

(4) 通风沟中齿和轭的表面、槽绝缘的外表面及轭背部与空气接触面的散热系数分别取其分区域平均值（电机定子径向按照渐进的原理分为多段如图 2(a)所示）。

(5) 定子径向通风沟内流体的物性参数变化对定子温度场的影响较小，忽略不计。通风沟内的风温沿径向呈线性分布。

3.2 求解域

根据采用轴径向通风沟冷却方式的大型同步发电机，由于该通风系统沿轴向和径向分别对称，故可以把温度场求解域确定为半个铁心段，周向半个齿距的范围。求解结构如图 2(a)所示。

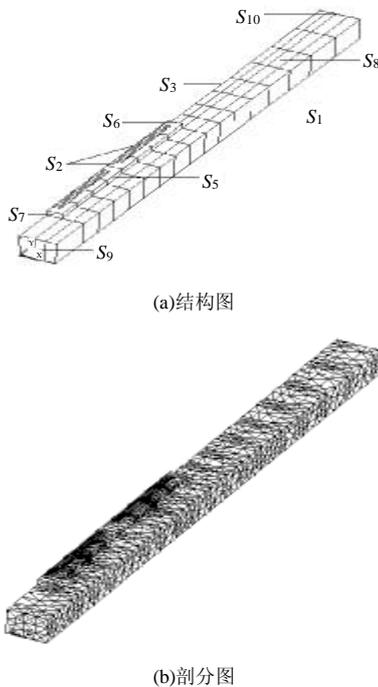


图 2 计算区域
Fig. 2 Solved region

由图 2 得到，定子温度场定解问题为^[14-15]

$$\begin{cases} I_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + I_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + I_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -q \\ \frac{\partial T}{\partial n} = 0 & \text{在 } S_p \text{ 上} \\ -I \frac{\partial T}{\partial n} = a(T - T_f) & \text{在 } S_Q \text{ 上} \end{cases} \quad (7)$$

式中 S_p 是由各绝热断面 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 构成； S_Q 是由各散热面 S_5 、 S_6 、 S_7 、 S_8 、 S_9 、 S_{10} 构成； I_x 、 I_y 、 I_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ； q 为热源密度，是定子侧各项损耗密度之和； a 为散热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ； T_f 为流体的温度。

由变分原理可知，方程(7)可写成如下等价变分

方程

$$J(T) = \int_V \left[\frac{I_x}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{I_y}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \frac{I_z}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - Tq \right] dV + \frac{1}{2} \int_{S_Q} a(T - T_f) T dS \quad (8)$$

当泛函取极值，即 $\frac{\partial J}{\partial T} = 0$ 时，可得 $KT=F$ ，式中 T 为求解域内全部节点温度所形成的温度列阵； K 和 F 分别为总体系数矩阵和总体右端列矢量。求解该方程组即可得到求解域内的温度分布。

3.3 散热系数的确定

关于流场与温度场的耦合，其主要思路为通风沟流场的计算，得到通风沟内流体流速的具体分布，然后由相应的公式计算出不同区域表面的散热系数。因此，定子径向通风沟流场的数值计算是否准确，决定了温度场的求解是否准确。

还以上述水轮发电机为例，采用有限元法对定子三维温度场进行求解，采用 8 节点 6 面体单元对求解域进行剖分，图 2(b)是求解域的剖分图，其中节点数 7086，单元数为 33224。由以上流体场的计算结果得出的定子径向通风沟内的流体流速的变化可以计算出各个区域的散热系数^[5]。

(1) 电机径向通风沟内轭部散热系数

$$a_e = \frac{1+0.25v_e}{450} \times 10^4 \quad (9)$$

(2) 电机径向通风沟内齿部散热系数

$$a_c = \frac{1+0.25v_c}{450} \times 10^4 \quad (10)$$

式中 v_e 、 v_c 分别为径向通风沟内轭部和齿部的风速。

(3) 定子铁心内圆的散热系数

$$a_n = \frac{1+0.25v_n}{450} \times 10^4 \quad (11)$$

式中 v_n 为铁心内圆处冷却气体的速度。

(4) 定子铁心外圆的散热系数

$$a_w = \frac{1}{10 \frac{1}{a}} \times 10^4 \quad (12)$$

系数 $\frac{1}{a}$ 依转子周速 $v = \frac{\pi D_2 n_N}{60}$ m/s 而定。

(5) 通风沟内绝缘侧的散热系数

$$a_b = \frac{1+0.25v_b}{450} \times 10^4 \quad (13)$$

式中 v_b 为通风沟内绝缘侧的风速。

以上的风速均由流体场的计算得到，其他部位的散热系数亦可用同样的方法得到。

4 流场和温度场的数值计算与分析

4.1 流场计算结果

采用有限体积法对定子径向通风沟内的流体场进行数值计算^[14-15]，可利用有限体积法差分隐式迭代的收敛格式。通过计算可得径向通风沟内流场分布图及等速线图，分别如图3和图4所示。

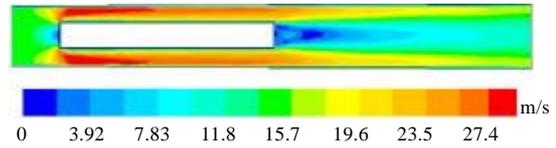


图3 二维流场的速度分布图
Fig.3 Velocity distribution of 2D fluid field



图4 二维流场的等速线图
Fig.4 Equal velocity curves of 2D fluid field

从定子径向通风沟流场计算结果可以明显地看出：通风沟内风速分布是不均匀的，齿部通风沟内的风速较大，轭部通风沟内的风速较小。当空气水平进入定子通风沟时，流场风速分布沿槽中心线是对称的，沿通风沟壁两侧风速较大，在线棒齿根处形成漩涡，增加风量损失。为了更加明晰地看出风速沿通风沟径向的变化情况，给出了图5和图6。其中图5为流场风速在定子齿部范围内沿径向不同截面处的变化曲线，直线1为入风口速度，曲线2~6为流场在定子股线五等分位置的风速大小；图6为

流场风速在定子轭部范围内沿径向不同截面处的变化曲线，曲线1~7为定子通风沟轭部分为七等分时的风速变化曲线，曲线8为出风口风速变化曲线。

从以上的两个图形的变化曲线可以明显地看出：在进口风速一定的情况下，风速沿通风沟径向截面的位置不同风速分布也是不同的。在齿部由于线棒的存在，风从线棒两侧的通风道内流过，且风速在越接近定子进风口处的截面，变化越剧烈，随着远离定子进风口风速的变化而变得缓和一点；而在轭部通风沟范围内，风速随着接近出风口侧变化的趋势较为缓慢一些，到达出风口处截面的风速变化得最小，而在靠近线棒的轭部通风范围内由于涡流的存在，使得在此截面处风速的变化产生一定的畸变，如图6曲线1所示。

图7给出了径向通风沟入口风速不同时的流场风速沿径向的变化曲线。其中曲线1,4、2,5和3,6分别为入口风速为20m/s, 14.8m/s, 10m/s时半齿中心线（如图1(a)中直线AB和直线EF之间区域的中心线）和槽中心线风速沿径向通风沟的分布曲线。可以直观的看出：对于不同的径向通风沟的入

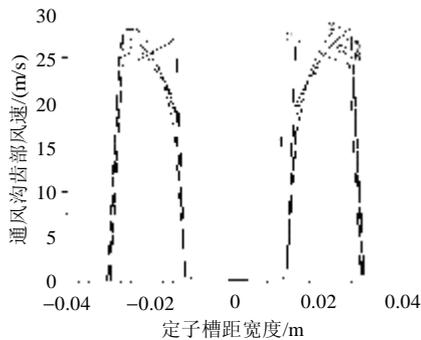


图5 流场风速在齿部风速变化曲线
Fig.5 Variety curves of wind velocity on tooth in fluid field

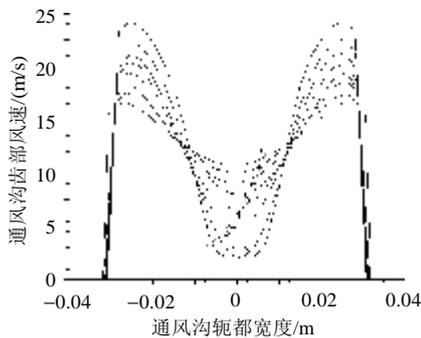


图6 流场风速在定子轭部风速变化曲线
Fig.6 Variety curves of wind velocity on yoke in fluid field

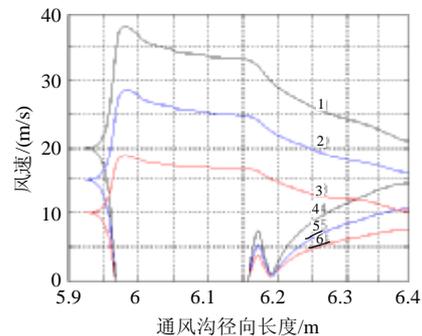


图7 入口风速不同时的流场流速变化曲线
Fig.7 Variety curves of wind velocity at different inlet wind velocities in fluid field

口风速，在通风沟内半齿中心线和槽中心线处风速的分布趋势是一致的，入口风速的大小发生变化，径向通风沟内半齿中心线和槽中心线处风速的分布也作相应的变化。

4.2 温度场计算结果

图 8 给出了定子额定风速时基于流体场计算时定子求解域的温度场分布图。

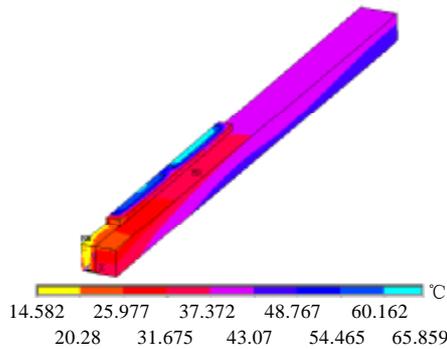


图 8 考虑流场分布时的温度场图
Fig. 8 Temperature field considering fluid field distribution

采用传统方法对温度场的计算时，认为通风沟内风速在定子的齿部和轭部是分别恒定的。为了便于进行比较，图 9 给出了采用传统方法计算的定子温度场分布图。

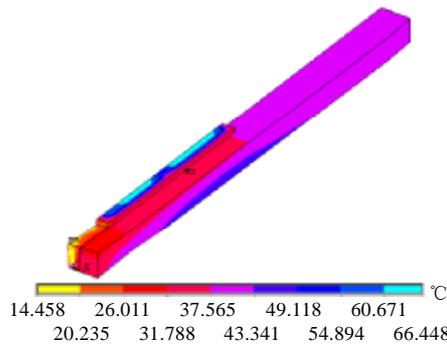


图 9 采用传统方法计算的温度场图
Fig. 9 Temperature field calculated by traditional method

从图 8 和图 9 可以看出，虽然温度场的温度极值没有很大的变化，但是温度场的分布却有较大的差异，并且当入口风速为 14.8m/s 时，对这两种计算的结果与解析法计算的结果及实测值进行了比较，如表 2 所示。

采用基于流体场计算的温度场的求解较传统方法的求解与实测值更加接近；温升在上层的差别较大，而在下层的差别较小，这是由于基于流体场计算的温度场计算考虑了风速在通风入口及齿部变化较大的原因。

表 2 定子股线三维温度场计算结果比较
Tab. 2 Result comparing of 3D stator windings temperature field calculated

320MW 水轮发电机 温度场数值	基于流场 计算	传统方 法计算	实测值	解析法 计算
上层 股线	最低温升/K	39.394	43.167	—
	最高温升/K	53.639	56.064	—
	平均温升/K	50.458	53.024	—
下层 股线	最低温升/K	47.400	47.143	—
	最高温升/K	57.359	57.948	—
	平均温升/K	54.533	54.935	—
平均温升/K (层间绝缘)	39.313	45.898	41.7	58.7

同时入口风速的变化对定子温度场的影响也较大，本文对不同的入口风速的情况也进行了计算。当入口的风速为 10m/s 和 20m/s 时的温度场图如下图 10 和图 11 所示。

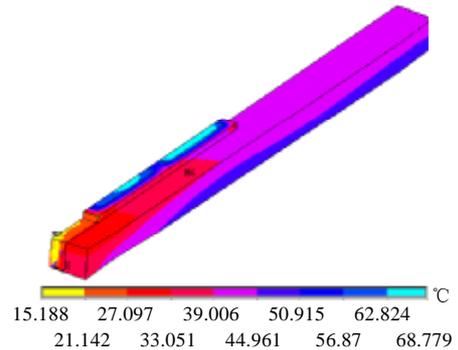


图 10 入口风速为 10m/s 时的温度场图
Fig. 10 Temperature field at the inlet velocity of 10m/s

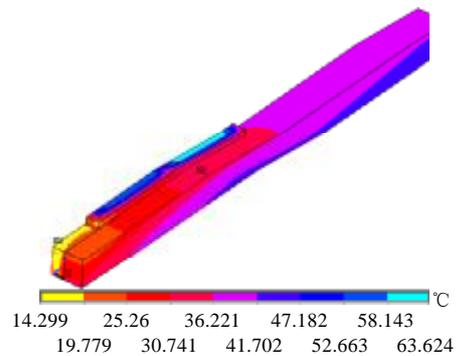


图 11 入口风速为 20m/s 时的温度场图
Fig. 11 Temperature field at the inlet velocity of 20m/s

当入口风速不同时，流场对温度场也有一定的影响见表 3。

5 结论

(1) 要想准确地计算定子温度场，对电机径向通风沟的流体场进行分析是很必要的，当风水平地进入径向通风沟时，风速沿电机定子槽中心线是

表 3 不同入口风速时定子温度场计算结果比较
Tab. 3 Result comparing of stator temperature fields at the different velocity 单位: °C

入口风速	温度项	股线温度	齿部温度	轭部温度	绝缘温度
10m/s	最低温度	51.563	28.102	40.188	19.725
	最高温度	68.779	47.838	46.937	67.713
	平均温度	63.901	41.186	44.371	58.150
14.8m/s	最低温度	48.404	24.374	37.519	19.27
	最高温度	65.859	45.006	44.443	64.799
	平均温度	60.679	37.928	42.374	54.920
20m/s	最低温度	45.645	21.845	35.577	17.116
	最高温度	63.624	42.947	43.256	62.559
	平均温度	58.224	35.484	40.967	52.456

对称的,所以温度场求解域的选取是合理的,而且从表 1 的分析结果来看,采用基于流体场计算的温度场的计算结果与实际值更加接近。

(2) 风速沿定子径向通风沟的分布是变化的,在定子径向不同截面处的变化也不一样,在线棒靠近齿顶处和靠近齿根的轭部处风速的变化最大,并且在线棒的尾部风速的变化最为剧烈,存在涡流现象。

(3) 是否考虑风速具体分布对定子温度场的求解有较大的影响,从图 8 来看在径向通风沟的入口部位的散热效果比图 9 的相应部位明显的好些,在股线段散热性能也明显的比图 9 的相应部位好。

(4) 从定子温度场的分布来看,由于冷却介质的温度在入口处较低,因此最低温度值出现在定子通风沟入口槽楔上,同时也因为槽楔上无热源存在;最高温度值均出现在定子下层绕组的股线上,这与以往的计算结果是一致的^[1,3-10]。

(5) 定子温度场的冷却效果不仅与冷却介质的速度有关,还与冷却介质的温度有关,在通风沟的入口处到齿根的范围温度是升高的。

(6) 对于相同的运行状态,当入口风速不同时,电机定子的冷却效果也是不相同的。无论是电机的股线温度、齿部铁心温度、轭部铁心温度还是绝缘温度随着入口风速的变大,它们的冷却效果变佳,最高温度均呈下降趋势。

参考文献

- [1] 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,2001,21(7):14-21.
Li Weili, Fu Min, Zhou Feng *et al.* Calculation of 3D stator temperature fields of large and medium scale synchronous motor on the basis of theory of fluid similarity and 3D FEM[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 14-21.
- [2] 温家斌,孟大伟,鲁长滨.大型水轮发电机通风发热综合计算[J].中

国电机工程学报,2000,20(11):115-119.

- Wen Jiabin, Meng Dawei, Lu Changbin. Tynthetic calculation for the ventilation and heating of large waterwheel generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 115-119.
- [3] 李伟力,侯云鹏,周封,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.
Li Weili, Hou Yunpeng, Zhou Feng *et al.* Heating analysis of stator strands of large hydro-generator based on numerical method [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 115-119.
 - [4] 李伟力,周封,侯云鹏,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.
Li Weili, Zhou Feng, Hou Yunpeng *et al.* Calculation of 3D stator temperature field of large and medium scale synchronous motor on the basis of fluid similarity and 3D FEM[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 14-17.
 - [5] 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 Ruoping, Rao Fangquan. Research on stator thermal field of evaporation cooling hydro-generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 87-90.
 - [6] 侯云鹏,李伟力,周封,等.大型水轮发电机定子三维温度场的等参元计算[J].大电机技术,2000,(6):14-19.
Hou Yun-peng, Li Weili, Zhou Feng *et al.* Calculation of 3D temperature in stator for large hydro-generator based on 3D isoparametric element method[J]. Large Electric Machine, 2000, (6): 14-19.
 - [7] Armor A F. Heat Flow in the stator core of large turbine generators by the method of three-dimensional finite elements. Part I: analysis by scaler potential formulation; Part II: temperature distribution in the stator iron[J]. IEEE Trans.on PAS 1976, 95(5): 1648-1668.
 - [8] 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.
 - [9] 张大为,汤蕴璆.大型水轮发电机定子最热段三维温度场的有限元计算[J].哈尔滨电工学院学报,1992,5(3):186-194.
Zhang Dawei, Tang Yunqiu. 3D stator thermal field calculation in the hottest-segment of turbo-generator on the basis of finite element method[J]. Transaction on Harbin Institute of Technology, 1992, 5(3): 86-194.
 - [10] 项欢,李伟力,程树康.大型水轮发电机定子径向通风沟与散热[J].大电机技术,1999,(2):11-14.
Xiang Huan, Li Weili, Cheng Shukang. Radial duct and heat elimination in stator of hydro-generator[J]. Large Electric Machine, 1999, (2): 11-14.
 - [11] 章梓雄,董曾南.粘性流体力学[M].北京:清华大学出版社,1998.
 - [12] 郭荣良,郭清南,祝世兴.流体力学及应用[M].北京:机械工业出版社,1996.
 - [13] 钟声玉,王克光.流体力学和热工理论基础[M].北京:机械工业出版社,1980.
 - [14] 丁舜年.大型电机的发热与冷却[M].北京:科学出版社,1992.
 - [15] A. N. 鲍里先科.电机中的空气动力学与热传递[M].北京:机械工业出版社,1985.

收稿日期:2005-03-21.

作者简介:

李伟力(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事大型电机综合物理场和特种电机理论研究工作;

丁树业(1978-),男,博士研究生,助教,主要从事大电机综合物理场的研究;

靳慧勇(1979-),男,硕士研究生,主要从事大电机流体场的数值计算。