

# 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

丁树业<sup>1</sup>, 李伟力<sup>2</sup>, 马贤好<sup>3</sup>, 靳慧勇<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨理工大学, 黑龙江省 哈尔滨市, 150040; 2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江省 哈尔滨市, 150001;  
3. 哈尔滨电机厂有限责任公司, 黑龙江省 哈尔滨市, 150040)

## Calculation and Analysis of 3D Stator Temperature Field for Air Cooled Turbo-generator With Special Windings Structure

DING Shu-ye<sup>1</sup>, LI Wei-li<sup>2</sup>, MA Xian-hao<sup>3</sup>, JIN Hui-yong<sup>3</sup>

(1. Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, Heilongjiang Province, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China; 3. Harbin Electric Machinery Co. Ltd, Harbin 150040, Heilongjiang Province, China)

**ABSTRACT:** It is difficult to calculate temperature field of large scale air-cooled turbo-generator with special strands structure. In this paper eddy loss expressions of strands for large air cooled turbo-generator with inequality strands and sections of upper and bottom windings are deduced firstly; Physical model and mathematical model of 2D fluid field inside radial ventilation duct were established, and which was numerically computed by using of finite volume method (FVM), FELD coefficients distribution of stator strands along radial direction is solved under the generator rated operation; Physical model and mathematical model of 3D stator temperature field were established. Then a large scale air-cooled turbo-generator was taken as an example, 3D stator temperature field is numerically calculated using finite element method(FEM) based on the previous deducing, temperature distribution principle in solved region of generator temperature field was given. Lastly the computed data were compared with measured value and some useful conclusions were achieved.

**KEY WORDS:** air cooled turbo-generator; inequality sections; stator temperature field; finite volume method; finite element method

**摘要:** 对于具有特殊股线结构的大型空冷汽轮发电机温度场计算具有一定的难度。文中推导了大型空冷汽轮发电机定子

上、下层线棒的股线数和截面不等时绕组涡流损耗的表达式, 求解出发电机额定运行时定子股线沿径向分布的菲尔德系数; 建立了定子径向通风沟内二维流体场的物理模型和数学模型, 采用有限体积法对其进行了数值计算; 建立定子三维温度场的物理模型和数学模型。以1台大型空冷汽轮发电机为例, 在先前推导的基础上, 采用有限元法对定子三维温度场进行数值计算, 给出了在发电机温度场求解域中的温度分布规律。将计算结果与实测结果进行比较, 得出了一些有益的结论。

**关键词:** 空冷汽轮发电机; 不等截面; 定子温度场; 有限体积法; 有限元法

## 0 引言

目前, 国内外在空冷汽轮发电机组试验和理论方面都做了一定的工作, 就电机温度场的研究而言, 多是针对定子线棒具有相等股线数和相同股线截面的电机温度场<sup>[1-5]</sup>进行的, 而对于电机定子上下层线棒的股线数和股线的截面不等时的特殊股线结构的电机温度场的研究较少。本文以1台150MW两极空冷汽轮发电机为例(电机的基本数据入表1所示), 在定子绕组采用特殊线棒的情况下, 推导了定子线棒在通常结构下股线涡流损耗分布表达式<sup>[6-8]</sup>, 进而给出了定子线棒采用特殊结构时的股线涡流分布<sup>[9]</sup>, 在此基础上对电机定子线棒上下层线棒股线数和截面不等时的定子温度场进行了计算和分析。同时本电机在上层线棒的股线外埋设了测温元件对定子股线温度进行真实的测量, 改变了以

基金项目: 国家自然科学基金项目(50576021); 教育部博士点科研基金(20050214003)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50576021).

表 1 电机的基本数据  
Tab. 1 Rated specifications of the machine

电机参数	功率/MW	电压/V	电流/A	转速/(r/min)	频率/Hz	功率因数
额定值	150	15750	6469	3000	50	0.9

往的只能测量层间温度，然后根据绝缘温降计算电机温升的做法。最后将计算结果与实测结果进行了比较，得出了一些有用的结论。

### 1 定子绕组涡流损耗的数学推导

#### 1.1 具有相等股线数和相同股线截面的股线涡流损耗的数学推导

对于发电机定子三维温度场的计算，主要的热源除了定子绕组的基本铜耗之外，由于集肤效应引起的股线涡流损耗也是一个重要的方面，对于不同结构类型的电机以及不同结构形状的股线，它们在股线涡流损耗的确定方面也存在很大的差别和很多问题。

在以往的线棒股线涡流损耗的推导中，多是对线棒具有相等的股线数和相同的股线截面进行的。本文在通常的涡流损耗推导基础上，针对具有特殊线棒结构的大容量空冷汽轮发电机股线的涡流损耗进行了推导，得出这种结构的涡流损耗的分布规律。

电机定子线棒的股线沿槽高方向上各截面的漏磁通匝链数不同，因此感应电动势也不一样，由此在股线内部形成涡流<sup>[6]</sup>，使得电流在股线截面上分布不均匀，股线中的电流密度由槽底向槽口逐渐增加。这种效应相当于股线的有效截面积减小了，股线的交流电阻要比直流电阻为大，以  $K_F$  (菲尔德斯系数) 来计及电阻的增加，为了确定电机运行时股线涡流损耗的大小，进行下述推导。

图 1 为双层绕组中，上、下层属于同相槽的部分，槽内各导体的电流相同。假设导体  $P$  是槽中导

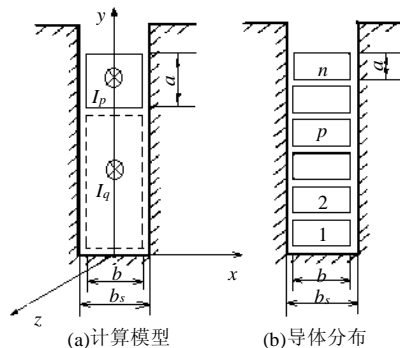


图 1 矩形开口槽内集肤效应的解析计算  
Fig. 1 Analytic calculation of skin effect in rectangular open slot

体的一部分。在不计铁心磁阻的条件下，对图 1(a) 所示的导体  $P$  以积分形式表示的安培环路定律和电磁感应定律为

$$\int_C H \cdot dl = \int_S J \cdot dS \tag{1}$$

$$\int_C E \cdot dl = - \frac{\partial}{\partial t} \int_S B \cdot dS \tag{2}$$

其中： $J$  为通过微分面积  $dS$  处的电流密度矢量； $\int_S J \cdot dS$  为通过曲面  $S$  的电流回路  $C$  的循环方向与面积  $S$  的法线方向之间符合右手螺旋关系。为使所求解的问题简化，在相应假设<sup>[6-7,9]</sup>的基础上，若导体存在集肤效应，导体  $P$  的有效电阻  $R_P$  为

$$R_P = r \frac{l_r}{ab} [j(x) + P(P-1)y(x)] \tag{3}$$

式中  $r$  为导体的电阻率。且

$$j(x) = x \frac{\text{sh}2x + \sin 2x}{\text{ch}2x - \cos 2x} \tag{4}$$

$$y(x) = 2x \frac{\text{sh}x - \sin x}{\text{ch}x + \cos x} \tag{5}$$

式中  $x$  为导体的相对高度， $x = a/a$ ，且

$$a = \sqrt{\pi f \frac{m_0 b}{r b_s}} \tag{6}$$

所以，因集肤效应引起的电阻增加系数为

$$K_F = j(x) + P(P-1)y(x) \tag{7}$$

并且当股线高度较小，股线的相对高度  $x$  在 0~1 之间时

$$\begin{cases} j(x) \approx 1 + \frac{4}{45}x^4 \\ y(x) \approx \frac{1}{3}x^4 \end{cases} \tag{8}$$

由以上的推导可以求解出定子上下层股线数相等时的菲尔德斯系数。

#### 1.2 具有不等股线数和不等股线截面的股线涡流损耗的数学推导

针对定子上、下层股线数不同以及股线截面不等的情况，其下层股线的菲尔德斯系数的求解和以上的推导是一致的<sup>[9]</sup>；上层股线的菲尔德斯系数可以由以下推导得出。假设上、下层股线数分别为  $m+x$  和  $m-x$  根，则上层股线的菲尔德斯系数可以表示为<sup>[9]</sup>

$$K_{Fb} = j(x) + \frac{I_1^2 + I_1 i_p}{i_p^2} y(x) \tag{9}$$

其中： $I_1$  为所研究股线下面全部  $P-1$  股线的总电流； $i_p$  为从槽底开始数第  $P$  根股线的电流。且上下层股线电流可以表示为

$$\begin{cases} i_p = i_c \frac{m}{m+x} \\ i_h = i_c \frac{m}{m-x} \end{cases} \quad (10)$$

式中  $i_c$  为上下层股线数相同情况下股线中的电流。经过计算可得

$$\frac{I_1^2 + I_1 i_p}{i_p^2} = 2x(2x-1) + 4xP + P^2 - P \quad (11)$$

且上层绕组平均菲尔兹系数可以表示为

$$K_{FA} = \frac{1}{m+x} \sum_{p=m-x+1}^{p=2m} K_{Fb} = j(x) + [2x(2x-1) + \frac{4x}{m+x} \sum_{p=m-x+1}^{p=2m} P + \frac{1}{m+x} \sum_{p=m-x+1}^{p=2m} (P^2 - P)] y(x) \quad (12)$$

利用

$$\sum_{p=m-x+1}^{p=2m} P = \sum_{p=1}^{p=2m} P - \sum_{p=1}^{p=m-x} P$$

将式中各项展开, 得

$$K_{FA} = 1 + 0.107 a_c^4 \left(\frac{b}{b_s}\right)^2 \left(\frac{f}{50}\right)^2 [3 \times 2x(3m+x) + 6m(m-x) + (m+x)^2] \quad (13)$$

$$K_{FA} = 1 + 7 \times 0.107 a_c^4 \left(\frac{b}{b_s}\right)^2 \left(\frac{f}{50}\right)^2 (m+x)^2 \quad (14)$$

式中  $a_c$  为上层股线的径向高度。

由以上推导就可以确定大型汽轮发电机具有特殊股线结构时的菲尔兹系数。针对本例中大型汽轮发电机股线结构参数就可以计算出相应的股线涡流损耗系数。

图2为定子上下层股线数和截面不同时, 考虑端部影响和不考虑端部影响的条件下不同槽高处股线的菲尔兹系数, 横坐标为股线数, 从槽底数起。从图2的曲线可以看出, 菲尔兹系数从槽底的股线到槽口的股线是逐步增大的, 并且从数值上来看槽底的股线菲尔兹系数近似为1, 而槽口股线的菲尔

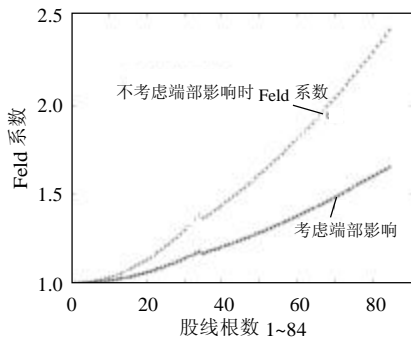


图2 汽轮发电机股线菲尔兹系数曲线  
Fig. 2 The strands FELD curves of turbo-generator

德系数最大, 下层线棒的最上层股线的菲尔兹系数比上层线棒的最下层股线的菲尔兹系数大; 并且端部绕组对菲尔兹系数的计算影响很大, 不考虑股线端部影响时最上层菲尔兹系数达到2.4099, 而考虑股线端部影响时只能达到1.4546。

## 2 定子三维温度场的模型和散热系数的确定

### 2.1 基本假设和温度场求解域的确定

本文仍以上述大型空冷汽轮发电机为例, 对其定子三维温度场进行求解。该电机采用的是轴径向通风冷却方式, 根据电机结构和风路的对称性以及基本假设<sup>[2-3,10-12]</sup>, 可以把该空冷汽轮发电机定子三维温度场的求解域确定为轴向半个铁心段, 周向整个齿距的范围, 如图3所示。

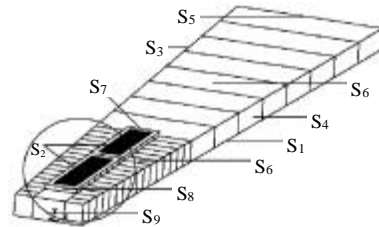


图3 定子三维温度场的求解域

Fig. 3 The solved region of 3D stator temperature field

图4为定子温度场求解域的局部放大图, 由于对电机定子温度进行了测量, 图中标示了测温元件的埋设位置。图中1、2、3号测温元件分别被埋设在电机定子上层线棒(为图4所示的相应定子铁心段中间位置, 即绝热面)的不同股线侧。

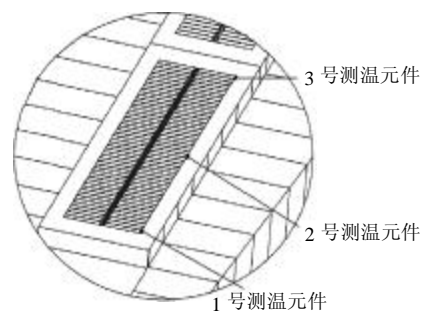


图4 求解域的局部图和测温元件的埋设

Fig. 4 Part of solved region and temperature sensors location

### 2.2 温度场的数学模型和求解域的剖分

根据图3所确定的温度场的求解域, 以及由传热学基本原理, 可以写出求解域内的温度场的微分方程<sup>[13-15]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x} (I_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (I_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (I_z \frac{\partial T}{\partial z}) = -q_v \quad (15)$$

式中： $T$  为求解域内各个节点的待求温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $I_x$ 、 $I_y$ 、 $I_z$  为求解域内各种材料沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； $q_V$  为求解域内各体的热源密度之和， $\text{W}/\text{m}^3$ 。

相应的边界条件为

$$\begin{cases} -I \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_2} = a(T - T_f) \\ T \Big|_{s_1} = T_1 \end{cases} \quad (16)$$

式中： $a$  为各散热表面的散热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ ； $T_f$  为散热面周围流体(冷却气流)的温度。

由变分原理知，上式(15)、(16)相应的泛函为

$$J(T) = \frac{1}{2} \int_V [I_x \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + I_y \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + I_z \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2] dV - \int_V T q_V dV + \frac{1}{2} a \int_{s_1} (T - 2T_f) T ds \quad (17)$$

其中： $V$  为求解域； $S$  边界面为， $S=S_s+S_j$ ，即  $S$  是由  $S_s$  和  $S_j$  两部分组成，分别为散热面和绝热面，且  $S_s$  如图 3 所示的面  $S_5$ 、 $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_8$ 、 $S_9$ ， $S_j$  如图 3 所示的面  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 。

泛函  $J$  取极值的条件为  $\partial J / \partial T = 0$ ，对上述变分问题作离散化处理后，可得到三维温度场有限元方程

$$K \cdot T = F \quad (18)$$

式中： $T$  为未知节点温度列向量； $F$  为节点温度的载荷列向量；系数矩阵  $K$  称为整体温度刚度矩阵，利用  $LDL^T$  法对上述方程进行求解，可以得到求解域内全部节点温度。

采用 8 节点 6 面体单元对求解域进行剖分，图 5 为温度场求解域的剖分图，其中节点数 274291，单元为 192951。

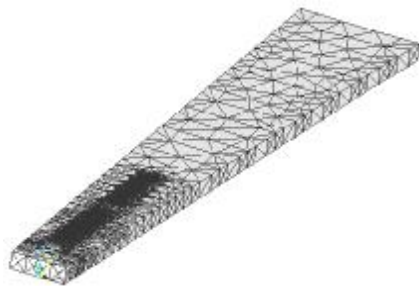


图 5 三维温度场的求解域剖分图  
Fig. 5 The mesh of 3D stator temperature field solved region

### 2.3 定子径向通风沟内流体场的计算

对于电机温度场的计算，除了求解域内电机各部分损耗的计算外，电机定子径向通风沟内流体流速的确定(即流体场的计算也是一个重要的方面)，

本文在相关文献[15]的基础上对电机定子径向通风沟内的流体场进行了计算。

图 6(a)是二维定子径向通风沟流体场求解结构图。

根据粘性流体力学理论<sup>[14]</sup>以及相关文献[15]，在完全紊流的流场条件下，可以得到如下标准  $k-e$  紊流计算模型<sup>[14-16]</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial t}(rk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(rku_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( m + \frac{m_i}{s_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - re \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(re) + \frac{\partial}{\partial x_i}(reu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( m + \frac{m_i}{s_e} \right) \frac{\partial e}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_{1e} \frac{e}{k} G_k - C_{2e} r \frac{e^2}{k} \quad (20)$$

式中相应参数的解释见文献[15]。方程中不包含时间项，这样可以大大地简化  $k-e$  的数学模型。通过求解上述两方程，采用有限体积法，对上述流体场进行计算，图 6(b)为采用有限体积法时求解域的剖分图，加之相应的边界条件<sup>[15]</sup>，即可以求解定子径向通风沟内的二维流体场。

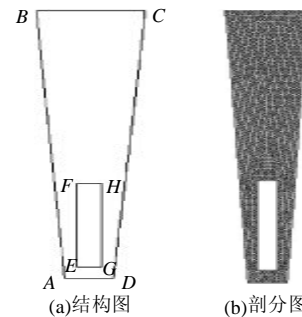


图 6 流体场计算区域  
Fig. 6 Solved region of fluid field

由以上流体场的分析，可以得到径向通风沟内流体场场图以及流体场的压强变化图，如图 7。

从图 7 可以看出：定子径向通风沟内流体的流速沿槽中心线是对称的，在通风沟内线棒两侧入口

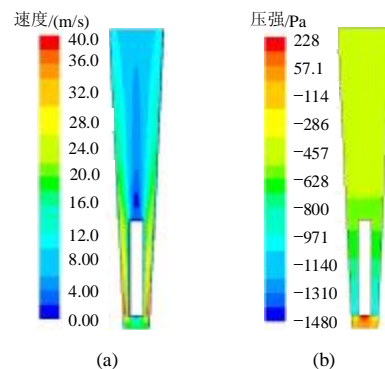


图 7 二维流场的速度和压力分布图  
Fig. 7 Velocity and pressure distribution of 2D fluid field

处流体流速的变化是很剧烈的,然后随着径向高度的增加流速的变化较为平缓一些,并且在线棒的尾部形成一定的涡流;从径向通风沟二维流体场的压强图可以看出,在径向通风沟的入口处流体的压强比较大,随着径向高度的增加,压强有所减弱。

## 2.4 各表面散热系数的确定

由以上的对电机定子径向通风沟内二维流体场进行计算,可以求解出定子径向通风沟各表面的流体流速。根据流体相似理论可以计算出各个区域的散热系数。

由流体相似理论,流体呈紊流状态下定子径向通风沟内流体满足如下相似准则方程<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} Re = Vd/n \\ Nu = ad/l \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $Re$  为流体的雷诺数;  $V$  为径向通风沟内流体的流速;  $n$  为流体的粘度系数;  $Nu$  为努谢尔数;  $d$  为通风沟的等效直径。

当流体在径向通风沟内呈紊流运动时,根据相应的文献[10]可以求出各散热表面的散热系数,再将所求得表面散热系数代入式(15)中,利用有限元法即可求得定子三维温度场。

## 3 空冷汽轮发电机定子三维温度场数值计算及分析

### 3.1 定子温度场的数值计算

本文对三维定子温度场进行了数值计算<sup>[17-18]</sup>。给出了求解域内最热面(即图3所示的面 $S_1$ )的温度分布,如图8所示。

从图8可以看出:大型空冷汽轮发电机在额定运行时,定子三维温度场的最高温度出现在定子绕

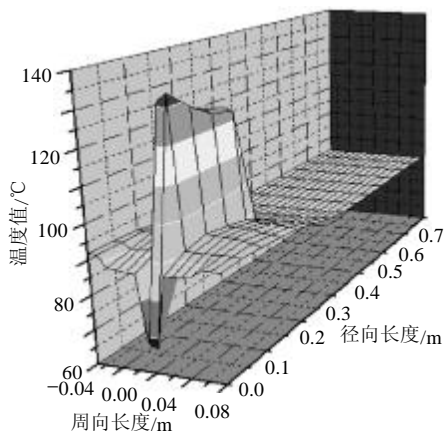


图8 三维定子温度场最热面的温度分布图

Fig. 8 The hottest section temperature distribution of 3D stator temperature field

组的上层线棒靠近齿顶的股线上,这是由于考虑了涡流损耗的影响;由于在径向通风沟入口处的槽楔上没有热源的存在,并且此处的散热条件较好,最低温度出现在定子径向通风沟的入口槽楔上;在铁心上温度的变化非常平缓,铁心的最高温度出现在齿部铁心上,并且最高温度在径向高度上的位置基本和定子线棒最高温度在径向高度位置上基本一致。

为了更加直观地看出计算结果,将计算结果进行了分析。表2列出了电机不同部件的温度值。

表2 计算结果数值分析  
Tab. 2 Numerical analysis of the computed result

温度值/°C	全部股线	上层股线	下层股线	定子齿部	定子轭部	层间绝缘
最低温度	116.82	122.55	116.82	75.16	80.30	79.70
最高温度	133.04	133.04	127.67	92.52	86.96	116.20
平均温度	126.81	128.74	124.08	83.94	83.00	98.42

在该电机温度场的计算中,冷却气流入口温度以及其他条件均与电机现场试验的数值一致。从表2可以看出:电机额定运行时的最高温度与电机额定运行时的绝缘等级的温度是很吻合的;并且经过计算可以准确地确定最高温度值的位置,为改善通风冷却效果寻找正确的理论根据。

### 3.2 定子温度场计算结果分析

由于电机在实验过程中是完全模拟电机实际工况进行的,并且在电机三维温度场的计算过程中也是完全按照电机的实际工况进行的,这样就有条件对计算结果与实测结果进行比较,表3对对应的测温点,将计算结果与实测结果进行了比较。

表3 计算值与试验值的比较  
Tab. 3 Comparison calculated result with measured value

测量点	测温点1	测温点2	测温点3
计算值/°C	127.85	121.35	112.62
测量值/°C	131.10	114.30	106.30
误差/%	2.48	6.17	5.95

从上表可以看出:采用本方法的计算结果与实验值的误差在6.5%之内,计算结果能够满足工程需要,其中第1个测量点的温度计算值与实验值之间相差最小,同时最高温度出现在相应的位置,更加证明了本文所采用方法的实用性;而第2个与第3个点测温点之间的温度计算值与实验值之间的误差比较大,这可能是由于大电机在损耗确定的过程中的误差造成。

## 4 结论

(1) 大容量空冷汽轮发电机定子股线结构的

特殊性对定子温度场求解域的确定没有影响, 根据结构和风路的对称性, 可以以轴向半个铁心段, 周向整槽整齿的范围为定子三维温度场求解域。

(2) 定子上下层线棒的股线数和股线截面不等时, 定子绕组涡流损耗的推导与股线数及截面相等时股线涡流损耗的推导过程是一致的。从推导的结果来看, 前者的下层股线的涡流损耗表达式与后者是一致的, 然而前者的上层股线的涡流损耗与后者却有很大的不同。

(3) 同一定子槽中沿径向高度不同位置处的股线的涡流损耗有很大的差别, 从齿根处向齿顶处涡流损耗逐渐增加, 增加的程度视是否考虑端部绕组的影响有所不同。

(4) 在温度场计算结果中, 最高温度出现在定子上层线棒离齿顶一定位置处的股线上, 最低温度出现在径向通风沟入口处的槽楔上, 铁心最高温度出现在齿部, 并且最高温度的位置于股线最高温度位置在径向高度上是一致的。

(5) 本方法计算的结果与实测结果相比, 能够满足工程实际的需要。

## 参考文献

- [1] 贾志东, 乐波, 张晓虹, 等. 发电机定子主绝缘老化特征的研究[J]. 电网技术, 2000, 24(4): 7-11.  
Jia Zhidong, Yue Bo, Zhang Xiaohong, et al. Study on aging characteristics of stator insulation generator[J]. Power system technology, 2000, 24(4): 7-11(in Chinese).
- [2] 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.  
Chen Nan. Ventilation and temperature-rise of large rated air-cooled turbogenerator[J]. Large Electric Machine, 2001, 2: 13-15(in Chinese).
- [3] 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(in Chinese).
- [4] 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.  
Luan Ru, Fu Deping, Tang Longyao. Study on temperature distribution in new evaporative cooling asynchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 205-209(in Chinese).
- [5] 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.  
Li Weili, Hou Yunpeng, Zhou Feng, et al. Calculating method of rotor temperature fields of turbo-generator with radial and tangential air-cooling system[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 74-78(in Chinese).
- [6] 陈世坤. 电机设计(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [7] 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, 92.  
Li Weili, Zhao Zhihai, Hou Yunpeng. Calculation of stator temperature field of generator[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 1-6, 92(in Chinese).
- [8] 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.  
Li Heming, Li Junqing. Review on temperature computation and application in electric machines[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(1): 1-5(in Chinese).
- [9] 汤蕴璆. 电机内的电磁场(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] 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, 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, 2000, 20(5): 14-17, 21(in Chinese).
- [11] 李伟力, 周封, 侯云鹏, 等. 大型水轮发电机转子温度场的有限元计算及相关因素的分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 85-90.  
Li Weili, Zhou Feng, Hou Yunpeng, et al. Calculation of rotor temperature field for hydro-generator as well as the analysis on relevant factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 85-90(in Chinese).
- [12] 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 Yunpeng, 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(in Chinese).
- [13] 魏永田, 孟大伟, 温嘉斌. 电机内热交换[M]. 机械工业出版社, 1998.
- [14] 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.
- [15] 李伟力, 丁树业, 靳慧勇. 基于耦合场的大型同步发电机定子温度场的数值计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 129-134.  
Li Weili, Ding Shuye, Jin Huiyong. Numerical calculation of large synchronous generator stator temperature fields based on coupled fields[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 129-134(in Chinese).
- [16] 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): 186-194(in Chinese).
- [17] 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(in Chinese).
- [18] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

收稿日期: 2006-05-09.

作者简介:

丁树业(1978—), 男, 助教, 在读博士, 主要从事大电机综合物理场的研究, [dingshuye@163.com](mailto:dingshuye@163.com);

李伟力(1962—), 男, 博士后, 教授, 博导, 主要从事大型电机综合物理场和特种电机理论研究;

马贤好(1966—), 男, 高级工程师, 主要从事大电机各类损耗的数值计算;

靳慧勇(1979—), 男, 硕士研究生, 主要从事大电机流场的数值计算。

(责任编辑 云爱霞)