

# 基于传热反问题的异步电机参数估计方法研究

刘慧开, 杨立, 孙丰瑞

(海军工程大学动力工程系热工教研室, 湖北省武汉市 430033)

## Estimate Method for Parameters of Asynchronous Motor Based on Inverse Heat Conduction Problem Analysis

LIU Hui-kai, YANG Li, SUN Feng-rui

(Engineering Thermal dynamic & heat transfer Faculty, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** The conduction coefficient of insulative layer between ring and stator of asynchronous motor and the convection coefficient within the gap between stator teeth and rotor were computed by L-M method. The 2D thermal field of stator was rebuilt by finite volume method. The inverse heat conduction problem analysis can estimate the parameter and boundary conditions of motor accurately. When measurements are precision, the calculation results are accurate. With little errors of measurements, the calculation results can satisfy engineering need. For plus errors, the anti-jamming of identification of the two parameters is much better. When measurement error reach  $0.2^{\circ}\text{C}$ , the computing error of conduction coefficient is only 3.36% and that of the convection coefficient is near 10%. When estimate parameters of asynchronous motor based on inverse heat conduction problem analysis minus errors should be avoided.

**KEY WORDS:** asynchronous motor; stator; thermal field; inverse heat conduction problem; heat transfer

**摘要:** 用 Levenberg-Marquardt 方法对异步电机定子绕组与铁心之间绝缘接触层的导热系数以及气隙内的对流换热表面传热系数进行了反问题计算, 并对温度场进行了重建。通过对计算结果的分析研究, 发现利用传热反问题的方法可以达到对电机内部参数和边界条件定量估计的目的。当测量结果比较准确时, 计算结果和真实解非常接近。当测量存在较小误差时, 计算结果仍能满足工程需要, 两个参数的反问题计算对测量正误差的抗干扰性都很强。当测量误差达到  $0.2^{\circ}\text{C}$  时, 绝缘层导热系数的计算误差仅为 3.36%, 对流换热表面传热系数的计算误差也在 10% 左右。因此, 在对异步电机定子绕组与铁心之间的绝缘接触层的导热系数和气隙内对流换热表面传热系数进行反问题计算时, 应尽量避免测量负误差的出现。

**关键词:** 异步电机; 定子; 温度场; 导热反问题; 传热

## 0 引言

在科学研究和工程技术领域, 广泛存在着以求解边界条件、初始条件、材料热物性参数、内热源强度、几何形状等方面的导热反问题。国外对导热反问题的研究可以追溯到 20 世纪 50 年代末期, 著名的科学家主要有 Blackwell, Imber, Mulholland, Williams, Burggraf, Langford, Beck<sup>[1]</sup>等等, 国内对导热反问题的研究起步较晚, 其中台湾 Cheng-Hung Huang 对求解边界条件和内部几何形状的导热反问题进行了研究<sup>[2-4]</sup>, 大连理工大学的薛齐文、杨海天等用共轭梯度法对多宗量边界条件的反演进行了研究<sup>[5-6]</sup>, 华北电力大学的关荣华结合红外技术和导热反问题方法对设备内部缺陷的形状进行了研究<sup>[7]</sup>, 谢李兵用迭代和插值的算法对二维温度场重建进行了研究<sup>[8]</sup>, 东北大学的田丰对温度场图像的重建进行了研究<sup>[9]</sup>。

电机发热是影响绝缘寿命的主要因素。早在 1930 年德国学者蒙辛格尔就提出绝缘寿命与电机持续运行温度呈指数规律减小的关系。因此, 分析和研究电机的热模型对电机设计和运行中的维护都是十分重要的。文献[10]建立了 QFS-300-2 型发电机端部温度场数学模型, 应用传热学理论就有关散热系数、等效热传导系数以及发电机压圈水管温度分布等问题作了研究, 文献[11]用有限元法和 3 种确定径向通风沟表面散热系数的方法计算了两台大型水轮发电机的定子温度场分布, 文献[12]基于流体相似理论用直三棱柱单元的有限元方法计算了大中型异步电机的定子温度场分布, 文献[13-14]用有限元法对采用蒸发冷却电机的定子温度场进行了研究, 文献[15]用最小二乘法对定子铁心温度模型中的参数

进行了辨识, 利用辨识得到的定子铁心温度模型计算了发电机在各种正常运行状态下定子铁心温度的标准值, 文献[16]对大型发电机的主绝缘老化进行了热重分析和差式扫描热分析研究。

在对电机进行热分析时, 定子槽内绕组和铁心之间绝缘接触层的导热系数、定、转子之间气隙内的对流换热表面传热系数等因空间狭小, 很难准确测定, 而这些参数对电机的热分析又至关重要。本文将运用二维导热反问题中 L-M 方法建立一种有别于传统的测试计算方法, 对异步电机定子绕组和铁心之间的绝缘接触层的导热系数以及定、转子气隙内的对流换热表面传热系数进行定量估计。

### 1 传热正问题

#### 1.1 网格划分和数学模型

异步电机的种类非常繁多, 但结构基本相似, 本文以 Y100L-2 型电机定子部分为例进行建模和计算。考虑到结构的对称性, 为简化计算, 可取电机轴向中间横截面的半个槽距进行分析, 然后再将计算结果扩充至整个横截面, 如图 1 所示。采用有限差分法对研究区域进行网格划分, 划分的单元总数为 320 个, 其中定子槽为 15×3 个, 定子轭为 14×8 个, 定子齿为 18×4 个, 槽绝缘为 19 个, 固定绕组的槽楔为 2×4 个, 机壳和定子铁心之间的接触气隙为 1×8 个, 机壳为 7×8 个。

计算区域的内外边界属第三类边界条件, 由于结构的对称性, 左右边界可看作绝热, 所以计算区域二维稳态传热模型为

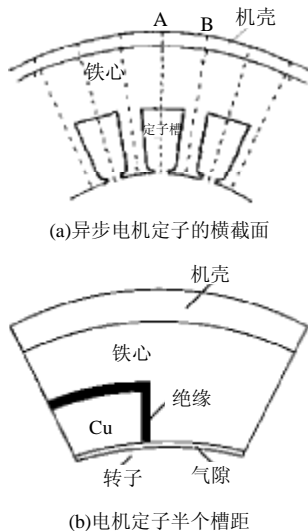


图1 计算区域  
Fig.1 Study field

$$\begin{cases} I_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + I_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_v = 0 \\ -I_n \frac{\partial T}{\partial n} |_{\partial W} = a(T |_{\partial W} - T_f) \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $I_x$ 、 $I_y$  分别为传热媒质在  $x$ 、 $y$  方向的导热系数;  $q_v$  为媒质的发热率;  $a$  为边界上的对流换热表面传热系数;  $W$  为计算区域;  $\partial W$  为计算区域边界;  $T$  为定子温度;  $T_f$  为冷却介质温度。式(1)离散化后的求解方程为

$$\sum_{j=1}^k G_{i,j}(T_i - T_j) + a_i A_i (T_i - T_f) = P_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

式中:  $n$  为节点数;  $A_i$  为  $i$  节点所在单元与冷却介质的接触面积;  $G_{i,j}$  为  $i, j$  两节点间的热导;  $a_i$  为  $i$  节点所在单元与冷却介质的换热系数, 对非边界单元  $a_i=0$ ;  $p_i$  为  $i$  节点所在单元的发热量。

本文对计算模型作了如下假设:

- (1) 忽略轴向传热, 只考虑横截面的径向传热。
- (2) 电机表面向周围环境的辐射换热数量较小, 可将辐射换热的影响折算到电机外表面与周围空气的对流换热表面传热系数中。
- (3) 转子发热量对定子温度场的影响转化为定子齿和气隙内空气的对流换热。
- (4) 定子槽部绕组的集肤效应忽略不计。

#### 1.2 内热源的确定

电机的各种损耗是电机发热的内在因素, 在研究电机温升和温度场分布时, 首先应该了解电机中的热源及其分布。电机的损耗主要有铁损耗、铜损耗、机械损耗等。机械损耗产生的部位是转子, 在定子温度场计算中, 可以将它们的影响用气隙内空气的对流换热来代替。因此在分析定子温度场时, 只需确定定子铁耗和定子绕组铜耗。

铁心损耗包括基本铁耗和附加铁耗。基本铁耗由于产生原因不同, 可分为磁滞损耗和涡流损耗。但两者同时发生在铁心中, 没有必要将两者分开计算。基本铁耗的计算公式为<sup>[17]</sup>

$$P_{Fe} = K_a p_{Fe} G_{Fe} \quad (3)$$

式中:  $G_{Fe}$  为定子轭和定子齿的净用铁量;  $K_a$  为由于硅钢片的加工, 磁通密度的分布不均, 以及其不随时间正弦变化等原因而引起损耗增加的系数;  $p_{Fe}$  为单位质量的损耗, 也称为比损耗。

比损耗的计算方法如下

$$p_{Fe} = p_{10/50} B^2 (f / f_0)^{1.3} \quad (4)$$

式中:  $p_{10/50}$  为当  $B=1\text{T}$ ,  $f=50\text{Hz}$  时, 单位质量内的损耗<sup>[17]</sup>。

由于铁心中轭部和齿部的加工情况及磁通密度分布不同, 因此在计算轭部和齿部的基本铁耗时, 式(3)中的损耗系数  $K_a$  的选取有所不同, 比损耗计算式中的磁通密度选取也有所不同<sup>[17]</sup>。

在异步电机中, 空载铁心附加损耗表现为脉振损耗, 但常常不单独计算异步电动机的脉振损耗, 而是根据经验把脉振损耗计于基本铁耗的经验系数  $K_a$  中。

铜损耗是由基本铜损耗和附加铜损耗构成的。基本铜损耗是电流在绕组导线内产生的损耗。根据焦耳-楞次定律, 此损耗等于绕组电流的二次方与电阻的乘积。如果电机具有多个绕组, 则应分别计算各绕组基本铜耗相加而得。对  $M$  相绕组, 如果电流一样, 电阻相同, 则定子铜损耗为

$$P_{\text{Cu}} = MI^2R \quad (5)$$

附加铜损耗是由槽内漏磁场和谐波磁场所产生的损耗。附加损耗计算十分困难, 在中小型电机中通常不详细计算, 一般取输入或输出功率的一定百分数。

### 1.3 边界条件的确定

电机定、转子间气隙内的对流换热表面传热系数, 亦即求解域的下边界条件和电机的转速有关, 是本文的待求量。

对于封闭式异步电机来说, 机座是电机向外散发热量的最终路径。机座表面的对流换热表面传热系数, 可由努塞尔特常数和空气导热系数算出。

$$a_{fr} = \frac{Nu_{fr} I_a}{d_{fm}} \quad (6)$$

式中:  $Nu_{fr}$  为机座散热筋的努塞尔特常数,  $Nu_{fr} = 0.626Re_{fm}^{0.522}$ ;  $Re_{fm}$  为机座散热筋的雷诺数;  $I_a$  为空气导热系数。

试验证明按上述公式计算的对流换热表面传热系数与实际相差较大, 因此采用经验公式<sup>[18]</sup>

$$a_{fr} = 9.73 + 14V_x^{0.62} \quad (7)$$

式中  $V_x$  为对应于计算单元位置的散热筋间的风速。

## 2 传热反问题

导热反问题是相对正问题而言的, 在正问题中被研究对象的热物性和边界条件以及初始条件都是已知的, 通过这些条件可以求得设备内部的温度场分布。导热反问题是通过测量设备内部或表面若

干个离散点的温度值, 来反推研究对象的热物性或边界条件。

本文中定子绕组和铁心之间的绝缘接触热阻以及气隙内的对流换热表面传热系数为未知量。利用红外热像仪和热电偶测量研究区域内部和表面  $m$  个离散点的温度值  $Y_i(i=1, \dots, m)$ , 测量值  $Y_i$  存在测量误差。因此, 对参数定量估计的传热反问题可以描述为: 由若干离散点的测量温度  $Y_i$  来估计设备热物性参数和边界条件  $f$ , 进而对温度场重构。

$$J[f(x)] = \sum_{i=1}^m (T_i - Y_i)^2 = \mathbf{U}^T \mathbf{U} \quad (8)$$

其中:  $T_i$  为由  $f$  的估计值通过正问题计算得到的离散点温度值;  $m$  为试件内部和表面测量点的个数。

求解反问题时, 通过迭代计算方程式(1)使式(8)达到最小。

## 3 Levenberg-Marquardt 方法

### 3.1 方法介绍

本文需要辨识的参数和条件有两个, 分别为绕组和铁心之间的绝缘接触层导热系数以及定子齿和气隙内空气的对流换热表面传热系数, 可用向量  $f=[f_1, f_2]$  来表示。求解反问题时, 要使式(8)取得最小值应有

$$\frac{\partial J}{\partial f_j} = \sum_{i=1}^m \left[ \frac{\partial T_i}{\partial f_j} \right] [T_i - Y_i] = 0 \quad j=1, 2 \quad (9)$$

其中  $m$  应大于或等于未知量的个数, 否则方程(9)会存在多解。通过对  $T_i(f)$  进行泰勒级数展开, 且只保留一阶项可对(9)式进行线性化处理。在结果表达式中加入参数  $m'$  来改善方程的收敛速度。Levenberg-Marquardt 方法可表示为<sup>[4]</sup>:

$$(\mathbf{F} + m' \mathbf{I}) \Delta \mathbf{f} = \mathbf{D} \quad (10)$$

其中:  $\mathbf{F} = \mathbf{j}^T \mathbf{j}$ ,  $\mathbf{D} = \mathbf{j}^T \mathbf{U}$ ,  $\Delta \mathbf{f} = \mathbf{f}^{n+1} - \mathbf{f}^n$ , 上标  $n$  和  $\mathbf{T}$  分别表示迭代的次数和矩阵的转置;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $\mathbf{j}$  为雅可比矩阵, 且

$$\mathbf{j} = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{f}} \quad (11)$$

将  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{f}$  表达式代入式(10)可得

$$\mathbf{f}^{n+1} = \mathbf{f}^n + (\mathbf{j}^T \mathbf{j} + m' \mathbf{I})^{-1} \mathbf{j}^T (\mathbf{T} - \mathbf{Y}) \quad (12)$$

其中当  $m'=0$  时为牛顿法, 当  $m'=\infty$  时为最速下降法。至此, 可以看出 L-M 方法实际上是对牛顿法和最速下降法的结合。迭代开始时可采用最速下降法来提高收敛速度, 随后逐渐减小  $m'$  值至牛顿法来得到反问题的最终解。

### 3.2 迭代终止条件

如果温度的测量不存在测量误差，那么反问题的迭代终止条件为

$$J(f_1, f_2) < e \tag{13}$$

其中  $e$  为给定的某个很小的正数。然而，测量中不可避免地存在测量误差，因此式(8)不可能等于零。若测量误差为  $d$ ， $^{\circ}\text{C}$ ，那么  $e$  可表示为

$$e = md^2 \tag{14}$$

式中  $m$  为测量点个数。

### 3.3 求解过程

Levenberg-Marquardt 方法的求解步骤如下：

(1) 给定待求条件的初值  $f$ ，由方程式(2)求解传热正问题得到  $T$ 。检查迭代终止条件是否满足，若满足，则终止，否则继续。

(2) 构造雅可比矩阵，由(12)式求得下一步迭代的  $f^{n+1}$ 。

(3) 利用求得的  $f^{n+1}$  求解正问题，检查迭代终止条件，若满足，则终止，否则返回第二步继续。

## 4 算例与结果分析

为了验证方法的正确性，首先进行正问题的计算。以 Y100L-2 型电机空载运行时为例，实验时环境温度为  $10.69^{\circ}\text{C}$ ，定子轭铁耗为  $70.26\text{W}$ ，定子齿铁耗为  $18.45\text{W}$ ，定子铜耗为  $43.32\text{W}$ ，机壳表面的对流换热表面传热系数为  $48.34\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，气隙内的对流换热表面传热系数  $99.33\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，气隙温度为  $34.32^{\circ}\text{C}$ ，绕组和铁心之间绝缘层的导热系数为  $0.11\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。实验示意图如图 2 所示，用安杰伦数采系统测量电机内部温度(采用 K 型热电偶)，将适时测量结果输入计算机；用加野 6004 热线式风速仪测量机壳表面风速；用 HY2001G 红外热像仪采集机壳表面红外热像；用 EMT260C 转速仪测量电机转速。

利用有限体积法求解正问题，得到计算区域的温度场分布。各部分的计算结果和实验测量结果如

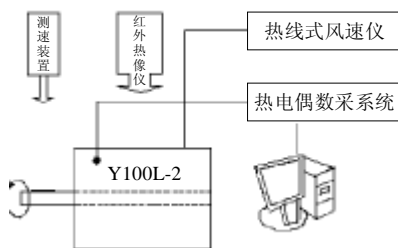


图 2 实验示意图  
Fig.2 Experiment sketch map

表 1 所示，将计算结果扩展至整个横截面的温度场曲面图和等高线分布如图 3、4 所示。从图中可以看出，异步电机定子铁心的温度分布以定子绕组的温度为最高，横截面上的温度分布在绕组和铁心之间的绝缘接触层以及铁心与机壳之间的接触处的温度落差为最大。其主要原因是绝缘层和空气的导热系数相比铁心和绕组的导热系数非常小的缘故。从表 1 可以看出计算结果和实测结果相比误差很小，尤以绕组和机壳表面的计算结果最为接近。以上可以说明，正问题的数学模型是准确可靠，能够满足工程应用的。

表 1 计算结果和实测结果的比较  
Tab.1 Calculation and measured results

位置	计算结果/ $^{\circ}\text{C}$	实测结果/ $^{\circ}\text{C}$	误差/%
定子绕组	35.33	34.71	1.79
机壳和铁心接触处	24.71	26.12	5.40
机壳表面	20.84	21.60	3.52

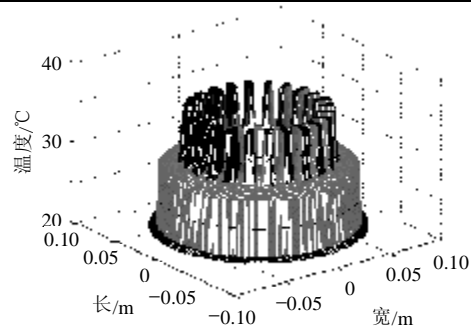


图 3 异步电机横截面的温度场曲面图  
Fig.3 The thermal field of asynchronous motor's cross section

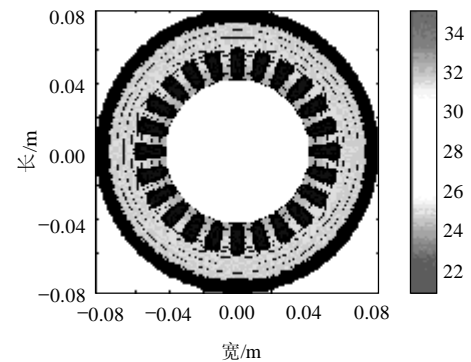


图 4 异步电机横截面的温度等高线图  
Fig.4 Temperature contour of asynchronous motor's cross section

用红外热像仪测量机壳表面温度，用电偶和安杰伦数采系统测量内部若干离散点的温度，由这些测量点的温度测量值利用 L-M 方法对绕组和铁心之间绝缘层的导热系数以及气隙内对流换热表面传热系数进行辨识求解。红外热像仪测温是通过测量被测物体表面发射的辐射来确定其温度的。在

实际温度测量过程中, 不可避免的存在测量误差, 通过分析计算, 用红外热像仪测量该型电机表面温度时最大测温误差不超过 3.5%<sup>[19-20]</sup>, 因此可人为加入测量误差, 来分析测量误差对计算结果的影响。

表 2 为不同测量误差时反问题的求解结果。从表中可以看出在测量误差  $d=0$  时, 反问题的计算结果非常准确, 误差均小于 0.3%。当测量存在误差时, 计算结果的误差随着测量误差的增大逐渐增大。导热系数的反问题计算对测量正负误差的抗干扰性都很强, 对流换热表面传热系数的反问题计算对测量负误差的抗干扰性不是很好。当测量误差为正时, 两参数的反问题计算抗干扰性都很强, 当  $d$  达到 0.2℃ 时, 绝缘层导热系数的计算误差仅为 3.36%, 对流换热表面传热系数的计算误差也在 10% 左右。因此, 为达到对绕组和铁心之间绝缘层的导热系数以及气隙内对流换热表面传热系数的准确估计, 在调整测量仪器时, 应尽量避免测量负误差的出现。

表 2 不同测量误差时的  $l$  和  $a$  的反问题计算结果  
Tab.2 Computing result of  $l$  and  $a$  by L-M method at different measure errors

测量误差	$l/(W/(m\cdot K))$	$a/(W/(m^2\cdot K))$	$l$ 和 $a$ 的计算误差/%
$d=0$	0.1099	99.0542	0.0909; 0.2777
$d=\pm 0.02$	0.1103	100.3042	0.2727; 0.9808
	0.1096	92.4946	0.3636; 6.8815
$d=\pm 0.05$	0.1109	101.6550	0.8182; 2.3407
	0.1091	82.8781	0.8182; 16.5628
$d=\pm 0.1$	0.1118	104.9670	1.6364; 5.6750
	0.1051	64.2918	4.4545; 35.2745
$d=\pm 0.2$	0.1137	109.4603	3.3636; 10.1986
	0.1035	61.3204	5.9091; 38.2660

## 5 结论

通过对异步电机定子温度场导热反问题的计算和分析, 可以看出利用 L-M 方法对绝缘层导热系数和气隙内对流换热表面传热系数的定量估计能够满足工程要求。通过对计算结果的分析, 主要可以得出以下几条结论:

(1) 当测量误差  $d=0$  时, 反问题计算的结果误差很小, 可以忽略不计。

(2) 导热系数的反问题计算对正负误差的抗干扰性都很强, 对流换热表面传热系数的计算对负误差的抗干扰性不是很好。

(3) 利用 L-M 方法对绝缘层导热系数和气隙内对流换热表面传热系数的反问题计算, 对测量正误差的抗干扰性很好, 当  $d$  达到 0.2℃ 时, 绝缘层导

热系数的计算误差仅为 3.36%, 对流换热表面传热系数的计算误差也在 10% 左右。

因此, 在对异步电机定子绕组与铁心之间的绝缘接触层的导热系数和气隙内对流换热表面传热系数进行反问题计算时, 应尽量避免测量负误差的出现。

## 参考文献

- [1] Beck J V, Blackwell B, St-Clair Jr C R. Inverse heat conduction: ill-posed problems[M]. New York: Wiley-Interscience, 1985.
- [2] Huang C H, Ozisik M N. Inverse problem of determining unknown wall heat flux in laminar flow through a parallel plate duct [J]. Numerical Heat Transfer, Part A, 1992, 21(1): 55-70.
- [3] Huang C H, Yan J Y. An inverse problem in simultaneously measuring temperature dependent thermal conductivity and heat capacity [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(18): 3433-3441.
- [4] Huang Cheng-Hung, Chao Bor-Herng. An inverse geometry problem in identifying irregular boundary configurations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(9): 2045-2053.
- [5] 薛齐文, 杨海天, 胡国俊. 共轭梯度法求解瞬态传热组合边界条件多宗量反问题[J]. 应用基础与工程科学学报, 2004, 12(2): 113-119.  
Xue Qiwen, Yang Haitian, Hu Guojun. Solving inverse heat conduction problems with multi-variables of boundary conditions in transient-state via conjugate gradient method[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 12(2): 113-119(in Chinese).
- [6] 杨海天, 胡国俊. 共轭梯度法求解多宗量稳态传热反问题[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(2): 174-181.  
Yang Haitian, Hu Guojun. Solving inverse heat conduction problems with multi-variables in steady-state via conjugate gradient method [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2002, 10(2): 174-181(in Chinese).
- [7] 关荣华. 三维球形拐角内壁缺陷形状的红外定量计算[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(5): 456-459.  
Guan Ronghua. Infrared quantification calculation to inner wall defects at the corner of 3D spheroid[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(5): 456-459(in Chinese).
- [8] 谢李兵, 刘彤, 张志刚, 等. 基于迭代和插值算法的二维温度场重建[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 249-252.  
Xie Libing, Liu Tong, Zhang Zhigang, et al. The 2D temperature reconstruction based on the algorithm of interpolation and iterative [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 249-252(in Chinese).
- [9] 田丰, 孙小平, 邵富群, 等. 基于高斯函数与正则化法的复杂温度场图像重建算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 212-215.  
Tian Feng, Sun Xiaoping, Shao Fuqun, et al. A study on complex temperature field reconstruction algorithm based on combination of gaussian functions with regularization method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 212-215(in Chinese).
- [10] 杜炎森, 黄学良, 刘磊, 等. 大型汽轮发电机端部三维温度场研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(2): 95-101.  
Du Yansen, Huang Xueliang, Liu Lei, et al. Study on temperature distribution in the end region of large turbogenerators[J]. Proceedings

- of the CSEE, 1996, 16(2): 95-101(in Chinese).
- [11] 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 field in stator for large hydrogenerator based on 3D isoparametric element method[J]. large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2000, (6): 14-19(in Chinese).
- [12] 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.  
Li Weili, Fu Min, Zhou Feng, et al. Calculation of 3D stator temperature field of large and medium scale asynchronous motor on the basis of theory of fluid similarity and 3D fem[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 14-17(in Chinese).
- [13] 姚若萍, 饶方权. 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. Analysis of 3D thermal field in the stator of large hydro-generator with evaporation-cooling system [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 87-90(in Chinese).
- [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.  
Luan Ru, Fu Deping, Tang Longyao. Study on 3D temperature distribution in new evaporative cooling asynchronous generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 205-209(in Chinese).
- [15] 李俊卿, 李和明. 基于状态监测的汽轮发电机定子铁心温度标准值的确定[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 156-160.  
Li Junqing, Li Heming. Determination of standard temperature of stator iron-core in turbogenerator for condition monitoring [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 156-160(in Chinese).
- [16] 鲍棋铭, 高乃奎, 马小琴, 等. 大型发电机主绝缘老化的热分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 99-101.  
Bao Qiming, Gao Naikui, Ma Xiaoqin, et al. Study on the aging of stator insulation of large generators using thermo analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 99-101(in Chinese).
- [17] 魏永田, 孟大伟, 温嘉斌. 电机内热交换[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [18] 黄国治, 傅丰礼. Y2 系列三相异步电动机技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [19] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 红外技术, 1999, 21(4): 20-24.  
Yang Li. Calculation and error analysis of temperature measurement using thermal imager[J]. Infrared Technology, 1999, 21(4): 20-24(in Chinese).
- [20] 寇蔚, 杨立. 热测量中误差的影响因素分析[J]. 红外技术, 2001, 23(3): 32-34.  
Kou Wei, Yang Li. Error analysis of infrared measurement[J]. Infrared Technology, 2001, 23(3): 32-34(in Chinese).

收稿日期: 2006-05-12.

作者简介:

刘慧开(1977—), 男, 河北省邢台人, 博士研究生, 主要从事传热传质与热流体力学、热物理量测方面的研究, [huikailiu@tom.com](mailto:huikailiu@tom.com);

杨立(1962—), 男, 重庆市人, 教授, 博士生导师, 主要从事传热传质与热流体力学、红外测量与故障诊断, 热物理量测方面的研究;

孙丰瑞(1939—), 男, 黑龙江省牡丹江人, 教授, 博士生导师, 主要从事现代热力学、有限时间热力学, 传热传质, 热力系统故障诊断等方面的研究。

(责任编辑 云爱霞)