

# 基于电流与最高温度检测的异步电动机保护研究

杨明发, 张培铭

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 通过构建异步电动机定子温度分布的测试系统, 对典型运行状态下的异步电动机定子绕组的温度分布进行实际测试, 在实测温度分布数据的基础上分析了电动机定子温度分布的特点, 得出定子绕组最高温度区域位于接线盒区域传动侧绕组端部结论。基于异步电动机热理论建立了定子三维温度场仿真模型, 对更多运行状态下的温度分布进行研究, 验证了实验确定的定子绕组最高温度区域广泛适用性。提出以定子电流和最高温度区域温度为保护依据的电动机综合保护思路与具体保护方案, 可在确保电动机安全的同时最大限度发挥电动机的作用, 减少甚至避免生产过程中断带来的损失。

**关键词:** 异步电动机; 定子电流; 温度分布; 最高温度; 保护

## Induction motor protection research based on current and maximum temperature detection

YANG Ming-fa, ZHANG Pei-ming

(College of Electrical Engineering & Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** By establishing the induction motors stator temperature distribution test system, temperature distributions of induction motor stator winding under typical operating conditions are tested in this paper. Based on measured temperature distribution data, characteristics of motor stator temperature distribution are analyzed. It draws the conclusion that the maximum temperature of stator winding is located at shaft side end-windings at terminal box side. Based on thermal theory of induction motor, induction motor stator 3D temperature field simulation model is established to research temperature distributions in more operating stations. And the broad applicability of the stator windings' maximum temperature region which is determined by test is verified. On this basis, integrated motor protection ideas and specific protect program based on stator current and the maximum temperature are proposed. The scheme will ensure the safety of motor and maximize the role of the electric motor. It can reduce and even avoid the losses caused by interruption of the production process.

**Key words:** induction motor; stator current; temperature distribution; maximum temperature; protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0081-05

## 0 引言

在工业企业中, 大量的电动机保护器被用于保护电动机以最大限度地减少电动机烧毁以及由此引发的生产事故带来的经济损失。各种故障对电动机的损害最终都体现为绕组温度超过允许值导致绝缘快速老化甚至击穿而引发电动机烧毁等事故, 电动机保护器的任务归根到底是保护电动机不因温度过高而烧毁。

电动机保护器应该根据故障的危害程度采取不同的保护措施。对于短路、堵转以及接地等危害性大的故障, 故障发生后应快速采取保护措施, 避免

危害扩大; 对于过载、三相不平衡(包括断相)、过电压、欠电压等温度变化较缓慢、危害性较小的故障, 为了最大限度发挥电动机的作用, 减少生产过程中断带来的损失, 故障后不应该立即切断电源, 可以先给出报警信号, 只有绕组温度超过允许值才采取保护措施。

由于缺乏对电动机温度分布的了解, 同时考虑到温度测量的困难, 设计者在设计电动机保护器时大都不是以电动机的温度为保护依据, 而是以定子电流为保护依据<sup>[1-7]</sup>, 原因是大部分故障都会导致定子电流的异常, 而定子电流数量有限且易于测量。考虑到电动机热特性的复杂性, 以定子电流为动作依据的电动机保护器虽然能够辨别大部分的故障,

但是无法实现准确的超温保护。对于不会引起电流异常的故障，以定子电流为动作依据的电动机保护器则无法实现保护。比如，对于外置风扇强制冷却电动机，风扇损坏或风扇罩壳脱落并不会导致电流的异常，但是机座表面的冷却效果将大大下降，导致绕组温度上升，烧毁电动机。

显然，电动机热保护的实质是定子绕组运行最高温度部位的超温保护。如果以定子绕组的平均温度作为热保护的判据，即使其平均温度的检测是准确且未超温，但是最高温度可能已经超温或者说定子绕组局部可能已经超温，从而造成定子绕组局部绝缘损坏，导致整套电动机损坏。

本文以型号为 Y100L2-4 的异步电动机为对象，通过实际测量和仿真分析的方法，得出定子绕组温度分布规律。根据温度分布的规律，提出易于实现的以定子电流和电动机的最高温度为保护依据的电动机综合保护方案，实现准确可靠的超温保护，在确保电动机安全的同时最大限度发挥电动机的作用，减少甚至避免生产过程中断带来的损失。

## 1 定子三维温度分布规律

### 1.1 温度分布测试方案

Y 系列异步电动机的机座结构如图 1 所示。与其他区域不同的是，接线盒所在区域机座表面没有散热筋，该区域机座内表面散热条件不如分布有散热筋的区域。冷却风扇位于机座非传动侧（以下称为风扇侧），电动机工作时，冷却气流从风扇侧吹向传动侧。

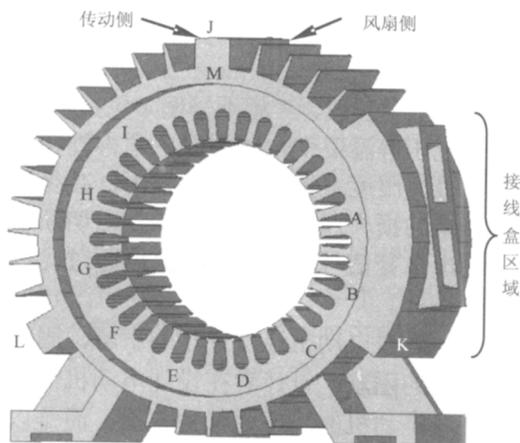


图 1 测温点分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of temperature measurement point distribution

为了准确掌握电动机内部温度分布的规律，在

被测电动机不同位置埋置了 61 个测温点。测温点的分布见图 1。用于测量定子绕组温度的 54 个测温点分为 A~I 共 9 组，每组 6 个点沿轴向分布，其中 1 号点位于传动侧端部，2~5 号点位于槽内并将整个槽 5 等分，6 号点位于风扇侧端部。J、K、L 共 3 组测温点位于机座表面，每组 2 个点，分别位于机座两端。M 组测温点只有一个点，位于机座顶部吊环孔内的铁芯表面。此外还有一个测温点用于测量环境温度。除了测量温度，实验过程还实时采集了三相绕组的电流值。

测试系统的温度传感器采用台湾兴勤电子股份有限公司生产的型号为 DHT0B104F4001NY，精度 ±1% 的负温度系数热敏电阻。

测试系统信号采集与处理电路原理框图如图 2 所示。温度和电流信号经过信号变换及 A/D 转换后进入 CPU 进行处理，得到的温度数据和电流数据通过 RS232 通信接口传递到上位机进行保存和再处理。

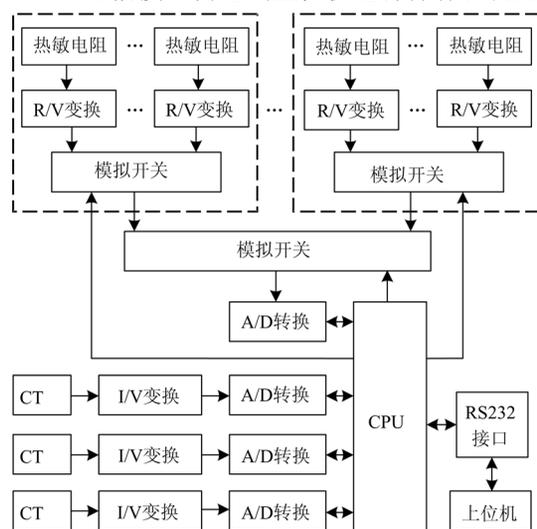


图 2 测试系统信号采集与处理电路原理框图

Fig.2 Block diagram of signal acquisition and processing circuit of test system

### 1.2 温度分布测量结果

实测结果表明，电动机运行时的绕组温度高于铁芯温度和机座温度。各种运行状态下的绕组温度分布如表 1~3 所示。其中表 1 为三相平衡时的温度分布，三相电流均为 6.8 A（额定电流），环温 31.4 °C；表 2 为 B 相断相时的温度分布，A、C 相电流为 7.5 A，环温 31.4 °C；表 3 为低压堵转时的温度分布，三相电流均为 4.7 A，环温 23.1 °C；表 4 为端部冷却风扇罩壳脱落时的温度分布，三相电流均为 6.5 A，环温 18.9 °C。

表 1 三相平衡时的温度分布

Tab.1 Temperature distribution of winding (rated load)

测量点位置	传动侧		槽内			风扇侧	
	端部					端部	
测量点编号	1	2	3	4	5	6	
接线盒区域	A	107.7	105.0	104.4	104.1	102.9	106.6
	B	110.4	100.7	99.8	98.8	99.5	106.6
	C	106.0	/	96.4	96.0	/	104.1
	D	107.7	97.4	94.4	95.2	93.1	/
	E	103.8	95.9	94.4	/	92.7	99.2
非接线盒区域	F	103.2	93.7	92.9	92.3	92.3	98.4
	G	102.5	93.6	93.3	91.6	90.9	99.8
	H	103.2	95.3	94.3	92.0	93.3	99.8
	I	103.9	95.8	93.6	/	91.9	99.1

表 2 B 相断相时的温度分布

Tab.2 Temperature distribution of winding (loss of B-phase)

测量点位置	传动侧		槽内			风扇侧	
	端部					端部	
测量点编号	1	2	3	4	5	6	
接线盒区域	A	100.9	97.3	96.7	96.3	95.3	100.3
	B	105.0	94.9	93.7	92.9	93.2	101.5
	C	94.7	/	83.1	80.5	/	89.7
	D	102.0	90.1	86.6	87.5	85.2	/
	E	95.6	89.8	88.5	/	87.0	89.4
非接线盒区域	F	81.1	79.8	79.4	78.4	78.3	78.3
	G	94.8	86.4	86.2	85.0	83.5	93.7
	H	94.0	90.1	89.3	86.8	88.3	95.1
	I	91.9	81.0	80.3	/	79.4	81.6

表 3 低压堵转时的温度分布

Tab.3 Temperature distribution of winding (low voltage locked rotor)

测量点位置	传动侧		槽内			风扇侧	
	端部					端部	
测量点编号	1	2	3	4	5	6	
接线盒区域	A	107.1	106.0	106.0	106.5	107.0	109.3
	B	108.7	102.8	102.8	103.9	103.8	108.8
	C	106.8	/	102.0	103.4	/	107.7
	D	107.3	103.1	102.0	103.1	102.6	/
	E	105.9	102.2	102.0	/	102.9	105.9
非接线盒区域	F	105.6	101.2	101.3	101.9	102.0	104.8
	G	105.4	101.2	101.6	102.0	101.8	102.8
	H	106.3	102.8	103.2	102.6	103.5	106.8
	I	106.6	103.4	102.9	/	103.6	106.8

表 4 风扇罩壳脱落时的温度分布

Tab.4 Temperature distribution of winding (cooling failure)

测量点位置	传动侧		槽内			风扇侧	
	端部					端部	
测量点编号	1	2	3	4	5	6	
接线盒区域	A	109.9	106.8	106.2	106.5	106.2	110.3
	B	111.2	99.8	98.9	98.6	99.2	107.9
	C	104.7	/	94	93.7	/	102.9
	D	105.3	94	91	91.9	89.8	/
	E	100.9	92.9	91.5	/	89.7	96.7
非接线盒区域	F	101.9	93.3	92.7	92.2	91.9	97.3
	G	103.4	96.7	96.8	96.4	94.8	98.9
	H	106.3	101.8	102	100.3	101.5	104.5
	I	109.6	104.4	103.4	/	102.6	106.5

注：由于工艺的原因，部分非最高温度区域的测温元件在生产过程损坏。

### 1.3 温度分布规律及其成因分析

从实测温度分布可以看出，不同运行状态下，同一绕组的端部温度均高于槽内温度，原因在于槽内绕组产生的热量直接经由槽绝缘传递到定子铁芯，再传递到机座，并从机座表面散发到周围环境中；而端部绕组产生的大部分热量需要经由槽内绕组再传到铁芯<sup>[8-9]</sup>，其温度必然高于槽内绕组。

在正常运行、过载、三相不平衡（包括断相）、过电压、欠电压等机座表面有风扇冷却的情况下，绕组温度分布是不对称的。比较传动侧和风扇侧绕组端部温度可以发现，对于同一绕组，传动侧的端部绕组温度总是高于风扇侧的端部绕组温度，原因在于冷却气流从风扇侧向传动侧流动过程中，吸收机座表面的热量使得温度逐渐升高。同时，由于摩擦和扩散等因素的影响，冷却空气相对机座表面的速度逐渐下降。两方面的因素都使得风扇侧散热效果好，传动侧散热效果差<sup>[10]</sup>。对传动侧绕组端部而言，不同位置的温度也有较大的差异，温度分布规律为接线盒区域温度明显高于其他区域。原因在于分布有散热筋的机座表面为强制对流散热，而接线盒所在区域机座表面主要为自然对流散热，其散热条件比其他区域差。

堵转时机座表面均没有风扇冷却，此时传动侧和风扇侧绕组端部的温度差异较小，接线盒区域的温度与其他区域的差异也很小。接线盒区域传动侧绕组端部依然是电动机内部温度最高的区域之一。

## 2 定子温度分布的有限元仿真

异步电动机的运行状态随负载的变化及故障的

不同而不同, 单纯依靠实验测量的方法研究各种运行状态下的绕组温度分布规律是很困难的。温度场仿真模型可以方便地仿真不同运行状态下的电动机温度分布, 为此本文建立了异步电动机定子三维有限元仿真模型, 对绕组温度分布规律, 特别是最高温度区域进行更广泛的研究。

### 2.1 有限元分析的理论基础

对于各向异性介质, 直角坐标下的三维导热偏微分方程为<sup>[11]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + q_v = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中,  $T$  为物体的温度;  $t$  为时间;  $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的导热系数;  $\rho$  为材料的密度;  $c$  为材料的比热;  $q_v$  为热源的发热密度。

对于稳态温度场, 温度  $T$  不随时间  $t$  变化, 式 (1) 中  $\partial T/\partial t=0$ , 考虑到边界条件, 对导热微分方程的求解可以归为一个边值问题。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z}) = -q_v \\ T|_{s_1} = T_0 \\ -k_2 \frac{\partial T}{\partial n}|_{s_2} = q \\ -k_3 \frac{\partial T}{\partial n}|_{s_3} = \alpha(T - T_f) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $S_1$  为第一类边界条件的物体边界;  $T_0$  为已知边界面的温度;  $k_2$  为第二类边界条件垂直于界面  $S_2$  的热传导率;  $q$  为通过界面  $S_2$  的热流密度;  $k_3$  为第三类边界条件垂直于界面  $S_3$  的热传导率;  $T_f$  为在界面  $S_3$  与物体接触的冷却介质的温度;  $\alpha$  为在界面  $S_3$  与物体接触的冷却介质的换热系数。

对应于式 (2) 的等价变换为式 (3)。

$$\begin{cases} J(T) = \frac{1}{2} \int_V \left[ k_x \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + k_y \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + k_z \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dv - \int_V q_v dv - \int_{s_2} q T ds + \frac{1}{2} \alpha \int_{s_3} (T - 2T_f) T ds \\ T|_{s_1} = T \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $V$  表示求解域。当泛函取极值, 即  $\partial J/\partial T=0$  时, 可得单元矩阵方程式 (4)。

$$KT = F \quad (4)$$

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。再将边界条件代入式 (4) 修改, 获得一个线性方程组, 解此方程组即可得到各个节点的温度值。

### 2.2 仿真结果及分析

本文根据所用电动机的结构尺寸采用 ANSYS 有限元分析软件建立了异步电动机定子三维有限元仿真模型, 根据负载情况和散热条件施加载荷并进行仿真分析, 额定负载时的绕组温度分布如图 3 所示。

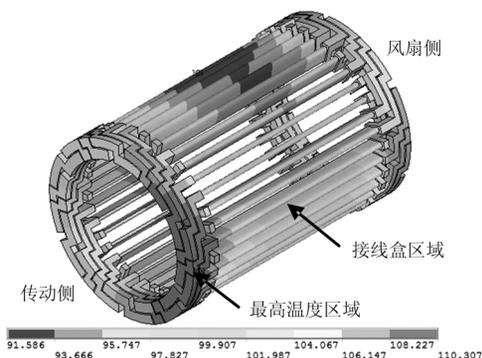


图 3 额定负载时的绕组温度分布图

Fig.3 Temperature distribution of windings at rated load

从仿真结果可以看出, 定子绕组温度分布规律与实测结果是相符的, 即绕组最高温度区域位于接线盒区域的传动侧绕组端部。应用该模型仿真其他各种负载及不同故障状态下的绕组温度分布, 仿真结果表明, 接线盒区域传动侧绕组端部始终是绕组的最高温度区域。

## 3 电动机综合保护器的设计

### 3.1 硬件电路设计方案

从以上实测及仿真结果可以看出, 不同运行状态下, 接线盒区域传动侧绕组端部均为电动机内部温度最高的区域。由于最高温度区域位于绕组端部, 在该区域安装温度传感器是很方便的, 其成本也是很低廉的。为此, 本文提出了直接在电动机最高温度区域埋置温度传感器, 实时在线监测电动机温度的电动机超温保护方案。由于电动机超温保护依据的是实时测量的电动机最高温度, 而不是目前常用的电流值或整个电动机的平均温度, 其可靠性得以大幅度提高, 可以大大减少电动机烧毁带来的直接经济损失和保护器误动作带来的间接经济损失。

电动机综合保护器的硬件电路原理框图如图 4 所示。其中 3 个热敏电阻分别埋置于接线盒区域传动侧的 A、B、C 三相绕组端部, 温度信号经热敏电阻转换为电阻信号以后通过 R/V 变换电路转换为电压信号, 再通过 A/D 转换电路转化为数字量进入 CPU 进行处理。同时, 电流互感器出来的电流信号也经过信号处理以后进入 CPU。电流和温度信号经 CPU 处理以后, 若判定电动机出现故障可根据故障

类型输出信号控制接触器切断电源或只给出报警信号。按键输入模块用于用户根据实际需要设置各类阈值, 状态指示模块用于指示各相电流值和各测量点的温度。

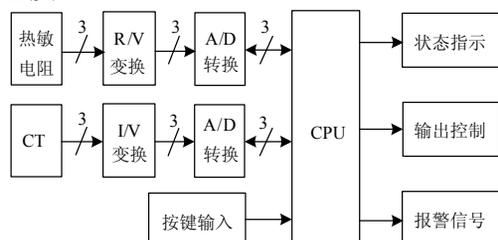


图 4 电动机综合保护器硬件框图

Fig.4 Hardware block diagram of integrated motor protector

### 3.2 软件设计方案

综合保护器的软件流程如图 5 所示。控制器采集电流信号以后判断是否发生故障, 如果有故障则根据故障类型给出报警信号。若属于堵转故障, 则直接切断电源, 避免危害扩大; 若属于过载、三相不平衡(包括断相)、过电压、欠电压等故障则暂时不采取保护措施, 转而判定温度是否超限, 如温度没有超过允许值, 则只给出报警信号而不切断电源, 以最大程度地发挥电动机的作用, 减少甚至避免生产过程中断带来的经济损失。一旦最高温度超限, 保护器立即切断电动机电源。

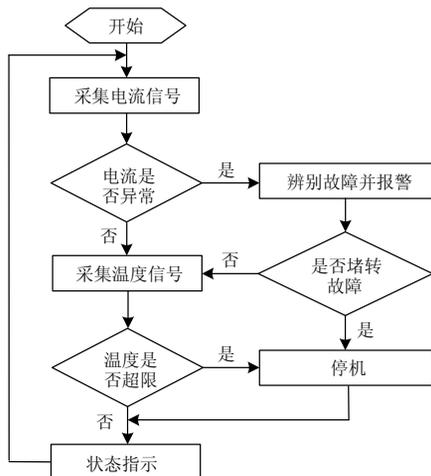


图 5 电动机综合保护器软件框图

Fig.5 Software block diagram of integrated motor protector

## 4 结论

由于电动机发热与散热过程的复杂性, 现有电动机保护器不仅无法将电动机电流准确地反映为温度量, 而且这些保护器均以整个定子的平均温度而不是以最高温度作为保护的依据, 因此在电动机保护研究与应用领域存在严重的误区, 使得现有电

动机保护器无法实现准确的超温保护。

电动机热保护的实质是定子绕组运行最高温度部位的超温保护。因此首先应该确定其最高温度区域, 并对该区域运行温度进行实时监测与保护控制。

以电流和最高温度作为保护判据是实现准确的电动机保护的基础, 以此判据为基础研发的电动机综合保护器, 既可以快速保护电动机又可以充分发挥电动机的作用, 可以有效减少甚至避免生产过程中断带来的经济损失。

Y 系列中小型电动机的结构型式相近, 各种规格电动机的散热条件也是相近的, 而散热条件是决定绕组温度分布的主要因素, 所以, 根据本文实验样机测量得出的温度分布规律也适用于同系列其他型号电动机。

以电流和最高温度作为保护判据的电动机保护思路对其他系列电动机的保护也有借鉴价值。

### 参考文献

- [1] 张清枝, 李新雷. 基于电动机热模型的微机反时限保护方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 86-89.  
ZHANG Qing-zhi, LI Xin-lei. Study on inverse-time protection method based on thermal model of induction motor[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 86-89.
- [2] 戴光武, 都洪基, 贾磊, 等. 基于P89LPC952单片机的电动机保护装置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 73-75, 79.  
DAI Guang-wu, DU Hong-ji, JIA Lei, et al. Motor protection equipment research based on P89LPC952 microcontroller[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 73-75, 79.
- [3] 卢庆港, 解中秀. 异步电动机热模型保护应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 107-109, 113.  
LU Qing-gang, XIE Zhong-xiu. Application of thermal model in asynchronous motor protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 107-109, 113.
- [4] 鲍光海, 吴功祥, 张培铭. 带微处理器的经济型电动机保护器[J]. 机床电器, 2004, 2: 7-9.  
BAO Guang-hai, WU Gong-xiang, ZHANG Pei-ming. Economical motor protector using microprocessor[J]. Machine Tool Electric Apparatus, 2004, 2: 7-9.
- [5] 王林虎, 王见乐, 胡志坚, 等. 基于DSP 的电动机保护装置[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(8): 69-72.  
WANG Lin-hu, WANG Jian-le, HU Zhi-jian, et al. Electromotor protective device based DSP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(8): 69-72.

(下转第 90 页 continued on page 90)

中, 对于同时出现的多点放电, 如何区分不同的超声波信号, 是进一步研究的重点。

参考文献

[1] 李茂军, 刘建明. 变压器局放信号监测中白噪声和周期干扰的抑制[J]. 长沙理工大学学报, 2007(4): 45-48.  
LI Mao-jun, LIU Jian-ming. Suppression of white noise and periodical narrow-band noise for on-line partial discharge monitoring of transformer[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology, 2007(4): 45-48.

[2] 李燕青. 超声波法检测电力变压器局部放电的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2003.  
LI Yan-qing. Study on ultrasonic-based method to detect partial discharge in transformer[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2003.

[3] 陈群, 贺建伟, 陈灵根, 等. 基于LS\_SVM高精度抑制局部放电信号窄带干扰的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 22-27.  
CHEN Qun, HE Jian-wei, CHEN Ling-gen, et al. A high accuracy algorithm for the suppression of narrowband interference in partial discharge detection based on LS\_SVM[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 22-27.

[4] 周立行, 李卫国, 邓本再. 基于混沌控制的周期窄带干扰抑制方法研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 39-41.  
ZHOU Li-xing, LI Wei-guo, DENG Ben-zai. Study of suppressing the periodic narrow bandwidth noise in partial discharge detection based on chaotic control[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(10): 39-41.

[5] 李红玲, 文习山, 舒乃球, 等. 小波变换去噪在绝缘子污秽放电声发射监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 56-59.  
LI Hong-ling, WEN Xi-shan, SHU Nai-qiu, et al. Application of wavelet transforms denoising in acoustic emission detection of polluted insulator discharge[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 56-59.

[6] 李加升, 黄文清, 戴瑜兴. 基于自定义阈值函数的小波去噪算法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(10): 21-24.  
LI Jia-sheng, HUANG Wen-qing, DAI Yu-xing. Wavelet-based power quality disturbances de-noising by customized thresholding[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(10): 21-24.

[7] 王东升, 丁立健, 于龙滨. 变压器局部放电在线监测技术[J]. 东北电力技术, 2007(4): 34-37.  
WANG Dong-sheng, DING Li-jian, YU Long-bin. On-line monitoring system for transformer partial discharge[J]. Northeast Electric Power Technology, 2007(4): 34-37.

[8] Uros Lotric. Wavelet based denoising integrated into multilayered perceptron[J]. Neurocomputing, 2004(62): 179-196

[9] Shih Yen-Yu, Chen Jyh-Cheng, Liu Ren-Shyan. Development of wavelet de-noising technique for PET images[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2005(29): 297-304.

[10] 董长虹. Matlab小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.  
DONG Chang-hong. Wavelet analysis toolbox theory and application on Matlab[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.

收稿日期: 2010-03-18; 修回日期: 2010-04-26

作者简介:

臧怀刚(1960-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为超声波、微波、红外等的智能仪器仪表的开发与研制, 以及实用型通信技术的研究与开发等;

郭小星(1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为信号的处理, 超声波智能仪器等; E-mail: guoxiaoxingandzhu@126.com

李小隼(1970-), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为脑电信息处理。

(上接第 85 页 continued from page 85)

[6] 迟长春, 李奎, 岳大为. 基于热积累的过载保护算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 52-56.  
CHI Chang-chun, LI Kui, YUE Da-wei. Heat accumulation based over-load protection algorithm[J]. Proceedings of the CSU - EPSA, 2008, 20(1): 52-56.

[7] 牟龙华, 邢锦磊. 反时限过载保护精确算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 36-38.  
MU Long-hua, XING Jin-lei. Precise algorithm for inverse-time over load protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 36-38.

[8] 魏永田, 孟大伟, 温嘉斌. 电动机内热交换[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

[9] 陈世坤. 电动机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.

[10] 鲍里先科 А И, 丹科 В Г. 电动机中的空气动力学与热传递[M]. 魏书慈, 邱建甫, 译. 北京: 机械工业出版社, 1985.

[11] 杨世铨, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

收稿日期: 2010-03-16; 修回日期: 2010-05-12

作者简介:

杨明发(1977-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为电动机电器及其系统智能化与在线检测技术; E-mail: yangmf@fzu.edu.cn

张培铭(1943-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电器及其系统智能化与在线检测技术。