

DOI: 10.7652/xjtuxb201302014

利用正交试验的电容传感器仿真及优化设计

王小鑫, 闫洁冰, 胡红利, 高享想, 张肖

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对电容传感器存在检测场灵敏度分布不均匀及其测量灵敏度低的问题,提出一种基于有限元分析与正交试验设计相结合的方法,分别对二电极、四电极及八电极的电容传感器结构进行优化设计,并对试验结果进行方差分析。通过比较分析各参数对不同电极电容传感器的影响规律,得出同时满足电容传感器检测场灵敏度分布的均匀性和测量灵敏度的最优组合方案。仿真试验表明,随着电极数的增加,检测场区域的灵敏度分布越来越不均匀,电容传感器的测量灵敏度越来越高。通过对优化设计结果进行静态测试试验,得出二电极、四电极、八电极传感器试验数据的方差分别为 0.054 9、0.061 3、0.096 3,即灵敏度分布越来越不均匀,同时随着电极数的增加,灵敏度增大。试验结果与仿真计算结果具有较高的一致性,表明此方法所得出的优化结果具有合理性和正确性。

关键词: 电容传感器;正交试验;有限元分析;灵敏度测量

中图分类号: TM934 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)02-0081-06

Simulation and Optimization of Capacitance Sensor Based on Orthogonal Test

WANG Xiaoxin, YAN Jiebing, HU Hongli, GAO Xiangxiang, ZHANG Xiao

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Focusing on the poor sensing field sensitivity uniformity and low measuring sensitivity of the capacitance sensor, an approach combining finite element analysis with orthogonal experiment is proposed. In this work, 2-electrode, 4-electrode and 8-electrode capacitance sensors are optimally designed, and variance analysis is carried out for the test results. The optimum combination schemes, which satisfy the sensing field sensitivity uniformity and measuring sensitivity simultaneously, are obtained by comparing and analyzing the effects of various parameters on different capacitance sensors. The simulations show that with increasing electrode number, the sensitivity distribution of detection field gets more uneven, and the sensitivity of capacitance sensor gets higher, a static test experiment is conducted on these optimized results. With increasing electrode number, the variance of these three kinds of electrode sensor respectively reaches to 0.054 9, 0.061 3 and 0.096 3, the experimental results well coincide with the simulations.

Keywords: capacitance sensor; orthogonal experiment; finite-element analysis; sensitivity measurement

气固两相流参数检测技术在科学研究和工业生
产中发挥着越来越重要的作用,通过对流动参数的

获取,建立气固两相流流动过程控制模型^[1-2],可以
根据模型数据分析流动规律,为工业过程的精确计

算和优化控制提供可靠的参考价值。相浓度是气固两相流的核心检测参数之一,电容法浓度测量技术以其独特的优势(非侵入式安装、不干扰流场、无磨损老化、无辐射、结构简单可靠、响应快等特点)成为气固两相流浓度在线测量的研究热点^[3]。设计合理的电容传感器可以用于煤粉浓度的在线测量,对火电厂锅炉给粉系统进行调节和控制,从而实现煤粉的充分燃烧,提高热效率的目的。

针对传统电容传感器存在着检测区域灵敏度分布均匀性差、电容测量灵敏度低等问题,有学者提出采用阵列电极(即多电极对)构成的电容传感器可以在一定程度上解决这一问题^[4]。本文采用有限元分析与正交试验设计相结合的方法,对阵列电极构成的煤粉浓度测量电容传感器的各参数进行了优化设计,使其灵敏度场的分布尽量均匀,以减小流型和相分布的影响,同时提高电容测量灵敏度,以便更加准确地通过测量电容值求出系统所需要的相应煤粉浓度。

1 电容传感器有限元建模

在通常情况下,用于测量两相流的电容传感器结构如图 1 所示^[4],源电极(电极板 1)和检测电极(电极板 2)对称贴于绝缘管道的外侧,屏蔽层用来隔离外界电磁场对检测场内部电磁场的干扰。

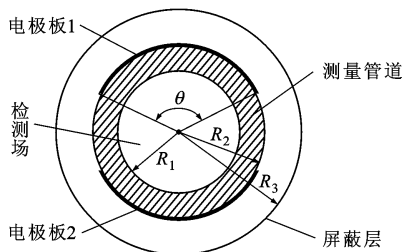


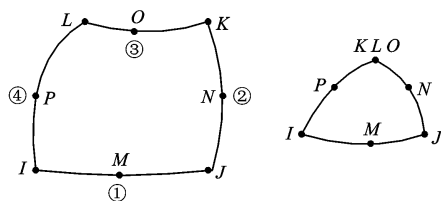
图 1 电容传感器结构

由于煤粉和空气的介电常数不同,当通过绝缘管道的煤粉浓度发生改变时,管道空间的等效介电常数也会发生变化,从而引起电容值的变化^[4-5]。因此,采用集总参数测量的方法,通过测量电容值就可以得到管道中的煤粉浓度的平均值。

在图 1 中电极板间的电容值是一个三导体系统电容求解问题,即电极板 1、电极板 2 及屏蔽层。在 $n+1$ 个导体构成的静电独立系统中,共应有 $n(n+1)/2$ 个部分电容,这些部分电容形成了多导体系统的电容网络^[6]。

在分析电容传感器结构模型的基础上,对传感器进行有限元建模,下面以二电极结构为例。

(1)定义单元类型。选择用于静电场分析的二维实体单元 PLANE121,如图 2a 所示。PLANE121 形状为 8 节点的四边形实体单元,自由度为电势。当实体模型进行三角单元网格剖分时,如图 2b 所示,节点 K、L、O 退化为同一个节点。



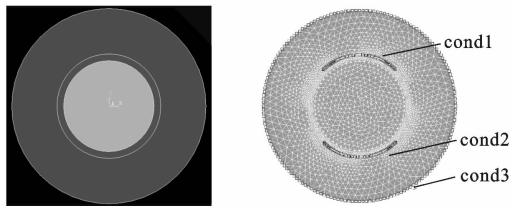
(a) 四边形实体单元 (b) 三角形单元

图 2 二维实体单元 PLANE121

(2)定义材料属性。在有限元仿真计算过程中,需要给实体模型定义 4 种不同物理属性的电介质材料,即空气的相对介电常数定义为 $\epsilon_1 = 1$,煤粉的相对介电常数定义为 $\epsilon_2 = 3$,管壁材料的相对介电常数为 ϵ_{wp} ,屏蔽层填充材料的相对介电常数为 ϵ_{fil} 。其中 ϵ_{wp} 、 ϵ_{fil} 为优化的因素,其值按照优化设计中对应的值选取。

(3)建立实体模型。建模时各优化参数按照优化设计中对应的值选择,建好的电容传感器实体模型如图 3a 所示。

(4)剖分网格。选择三角形单元自由网格划分的方式^[7],电容传感器的管壁部分相比其他地方灵敏度高,需要对管壁进行精细剖分以提高数值计算的精度。因此,管壁区域的剖分精度设置为 1,检测场区域的设置为 2,管道外围到屏蔽层区域设置为 1,剖分好的有限元模型如图 3b 所示。



(a) 实体模型图

(b) 网格剖分图

图 3 电容传感器的有限元模型

有限元分析软件中的 CMATRIX 宏命令可以求解静电场中多导体系统的对地电容矩阵和集总电容矩阵。在使用 CMATRIX 宏命时必须把电容传感器有限元模型中导体的节点组成节点组件,而且导体节点的组件名必须包括同样的前后缀,后缀为数字,按照 1 到系统中所含导体数目进行编号,最高

编号的组件必须为地导体^[8]。如图 3b 所示,选取电极板张角范围内的节点,分别定义为电极板组件 cond1、cond2,选取屏蔽层上的所有节点,定义为地组件 cond3。

四电极电容传感器结构及分析原理基本与二电极电容传感器结构类似,唯一不同的是采用了四片独立的电极,构成两对电极对称贴于绝缘管道的外侧。同理分析后面所提及的八电极电容传感器结构。

2 电容传感器的优化设计

电容传感器优化设计是一个多因素(即多参数)的优化设计问题。多因素优化设计问题中因素间总是存在着或大或小的交互作用^[9],这反映了因素间相互促进或相互抑制的作用^[10]。电容传感器优化设计过程中需要全面考察各参数及参数间所有的交互作用对优化指标的影响规律,以此来寻找对优化指标作用大的参数及交互作用组合,从而为最优目标提供合理的因素水平组合。正交试验设计是解决多因素变量试验问题的有效方法,又称多因素优选设计,在实际生产中广泛使用,是一种合理安排、科学分析各试验因素的有效的数理统计方法^[11]。

本文在优化设计时,根据电容传感器优化参数的性质将其分为结构参数和物理参数两大类,然后分别考察两类参数及参数间的交互作用,应用直积法综合考察两类参数及参数间的交互作用,从而降低对正交表列数和试验次数的依赖,满足了试验设计的要求。

2.1 电容传感器的正交试验方案设计

(1)确定试验指标。基于正交试验的电容传感器优化设计的指标确定为灵敏度均匀性误差 S_{VP} 和输出量程 ΔC 。

电容传感器的检测场区域灵敏度是在连续场域中定义的,通过改变检测场微元介质的相对介电常数来定义微元上的灵敏度。有限元法是通过离散化处理,把要分析的连续场域剖分为较小的区域,这些小区域称为“单元”,通过变分原理将待求解的问题转换为单元上的多元线性代数方程组的求解^[12]。

因此,本文在有限元分析软件中建立电容传感器的有限元模型后,在这些剖分后的离散场域上实现灵敏度场的计算,通过改变检测场区域单元介质的相对介电常数来求解单元上的灵敏度,其定义如下

$$S_{\epsilon,j} = \frac{C_{\epsilon,j} - C_0}{C_1 - C_0} \frac{1}{A_j}, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

式中: $S_{\epsilon,j}$ 为检测场区域第 j 个单元的灵敏度; $C_{\epsilon,j}$ 为第 j 个单元的介质是煤粉、其他单元的介质为空气时的电容值; C_0 为电容传感器检测场介质是空气时的电容值; C_1 为电容传感器检测场介质是煤粉时的电容值; A_j 为第 j 个单元的面积与检测场截面积之比; M 是检测场剖分单元的最大编号。

离散化场域上的检测场灵敏度均匀性误差参数计算公式如下^[5]

$$S_{VP} = \frac{\left[M^{-1} \sum_{j=1}^M (S_{\epsilon,j} - M^{-1} \sum_{j=1}^M S_{\epsilon,j})^2 \right]^{1/2}}{M^{-1} \sum_{j=1}^M S_{\epsilon,j}} \quad (2)$$

离散化场域上的电容传感器输出量程定义公式和连续场域上没有区别,都是空、满管情况下电容值的变化量,计算如下

$$\Delta C = C_1 - C_0 \quad (3)$$

由式(1)、式(3)可以看出,输出量程与灵敏度之间具有相辅相成的密切关系,输出量程增加通常会导致不同浓度变化下电容输出量相应增加,这样就能更加准确地表示出电容与煤粉浓度之间的关系。

(2)确定试验因素及因素水平。为了优化设计的方便性和通用性,将电容传感器的管壁内径设定为 100 mm(即 $R_1=50$ mm),管道外半径 R_2 用管壁厚度 R_2-R_1 来表示,屏蔽层半径 R_3 用屏蔽层厚度 R_3-R_2 表示,并将 R_2-R_1 、 R_3-R_2 相对 R_1 分别归一化为 k_1 ($k_1=(R_2-R_1)/R_1$)、 k_2 ($k_2=(R_3-R_2)/R_1$)。因此,实际上需要优化设计的参数为 θ 、 k_1 、 k_2 、 ϵ_{wp} 、 ϵ_{fil} 共 5 个参数,试验参数及其水平如表 1 所示。

(3)选择试验设计正交表及表头设计。确定了试验因素及其水平后,根据因素、水平以及需要考察的交互作用来选择合适的正交表。由于在优化设计

表 1 试验因素及水平

水平	$\theta/(^{\circ})$			k_1	k_2	ϵ_{wp}	ϵ_{fil}
	二电极	四电极	八电极				
1	60	30	15	0.05	0.2	3.45(有机玻璃)	1(空气)
2	90	45	22.5	0.15	0.6	8(陶瓷)	4(石棉)
3	120	60	30	0.25	1.0		

时仿真软件无法执行重复试验,因此为了对试验结果进行方差分析,所选正交表必须满足以下两个条件中的一个:一是正交表的列数大于等于因素所占列数加上交互作用所占列数再加上空列;二是正交表的自由度大于等于因素自由度加上交互作用自由度再加上误差自由度。

表头设计就是将试验因素和交互作用合理地安排到所选正交表各列中。由于本文设计中需要考虑因素间的交互作用,所以各因素应按照正交表的交互作用列表来进行安排,以防止设计中正交表的同一列上安排了两个或两个以上的因素或交互作用(这种现象称之为混杂)。当某列上出现了混杂现象,就无法区别造成混杂的这些因素或交互作用对试验指标的作用效果。例如,对电容传感器的结构参数 θ 、 k_1 、 k_2 进行优化设计时,由于要考察三个结构参数及其所有的交互作用,可以选用 $L_{27}(3^{13})$ 的

表 2 $L_{27}(3^{13})$ 表头设计

列号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
因素	θ	k_1	$(\theta k_1)_1$	$(\theta k_1)_2$	k_2	$(\theta k_2)_1$	$(\theta k_2)_2$	$(k_1 k_2)_1$			$(k_1 k_2)_2$		

表 3 各电极结构的最优方案及优化指标值

电极结构	各因素的优化水平					S_{VP}	$\Delta C/pF$
	θ	k_1	k_2	ϵ_{wp}	ϵ_{fil}		
二电极	2,3	2	3	2	1	0.266 379 17	15.703 009 06
四电极	2,3	2	2	2	1	0.639 278 30	27.484 961 10
八电极	2,3	2	2	2	1	1.100 576 27	38.125 756 57

S_{VP} 和 ΔC 同时达到最优;当 k_2 取水平3时,二电极结构的指标 S_{VP} 和 ΔC 同时达到最优;当 k_2 取水平2时,四电极、八电极结构的指标 S_{VP} 和 ΔC 同时达到最优。这是由于随着电极板数的增加,电极板间的互有电容在增大,而电极板的自有电容在减小,所以 k_2 取较小的水平时就可以满足四电极、八电极结构的设计需求。

考虑到电容传感器是整个测量系统最前端的测量元件,当传感器检测场具有均匀的灵敏度场时,可以减弱测量过程中流型和相分布的影响,这样可以防止把前端元件的非线性或测量误差引入测量系统。因此,在优化设计时先考虑优化指标 S_{VP} ,可以在优化值附近适当增大电极张角 θ 和适当减小 k_1 的取值,以增大电容传感器的输出电容值,但这需要以损失检测场的灵敏度均匀性为代价。此外,还可以通过适当增加电极板的长度和使用高增益的测量

正交表,根据交互作用列表,各因素在表头中的位置设计如表2所示。由于 θ 、 k_1 、 k_2 均取三个水平,即每个因素的自由度为2,任意两因素间交互作用的自由度为4,而正交表每列的自由度为2,因此每个因素在表头设计中只占一列,而因素间的交互作用则占两列,空白列用来对试验结果进行方差分析。

2.2 电容传感器优化总结

根据上述正交试验设计方案,使用有限元仿真软件计算得到二电极、四电极、八电极电容传感器的试验结果,并对试验指标 S_{VP} 、 ΔC 进行方差分析,采用综合平衡法得到了同时满足试验指标 S_{VP} 和 ΔC 的因素最优组合方案。各电极结构的最优组合方案如表3所示。经过计算,得到了各电极结构在电极张角 θ 分别为 100° 、 50° 、 25° (即因素水平在2与3之间)时,试验指标值 S_{VP} 和 ΔC 的优化值。

在表3中,当 ϵ_{wp} 取水平2、 ϵ_{fil} 取水平1时,指标

电路来提高电容传感器的测量灵敏度。

电容传感器二电极、四电极及八电极结构各参数取值为最优方案时,检测场区域灵敏度分布图分别如图4~图6所示。

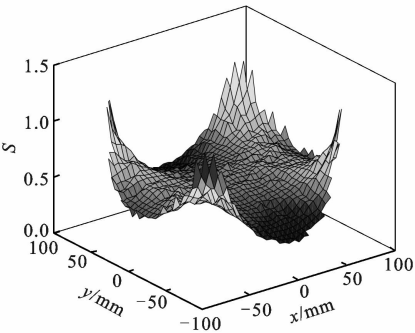


图 4 二电极结构检测场区域灵敏度分布图

从上述结果可以看出,随着电极数的增加,测量灵敏度增加而灵敏度的均匀性下降,这是因为随着

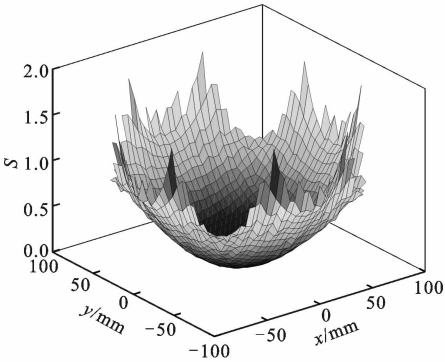


图 5 四电极结构检测场区域灵敏度分布图

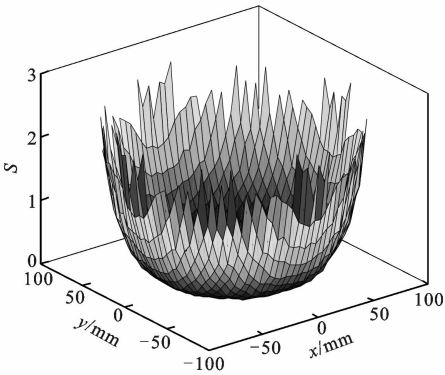


图 6 八电极结构检测场区域灵敏度分布图

电极数增加,平均电力线密度增加,导致测量灵敏度增加,而电力线密度在敏感场核心区域显著下降,在外周环形区域显著增加,导致灵敏度分布的均匀性下降。

3 静态试验测试

为了对优化结果进行验证,在实验室条件下,对优化后的二电极结构、四电极结构、八电极结构的电容传感器进行了静态试验测试,以验证检测场的灵敏度及其分布情况。

电容传感器接口电路的核心电路使用课题组研究设计的 C/V 转换电路^[13],如图 7 所示。接口电路的功能是对极板间的微小电容进行放大、滤波和转换。电容传感器输出电容极小,大致为 pF 级,而且系统中还存在很多不可避免的干扰,如引线电容、电极与屏蔽罩间的电容等,这些噪声和杂散电容的总和远远大于煤粉/空气两相流引起的电容量,此外杂散电容还易受环境温度、外部电场等干扰而发生变化,故 C/V 转换电路需要满足的条件有能测量微小电容、抗干扰性强、低温漂、高稳定性等。

试验过程中采用 $\Phi 10\text{ mm}$ 的有机玻璃棒来代替煤粉为测试棒,有机玻璃棒材料的相对介电常数大约为 3,接近于煤粉的介电常数,试验管道采用

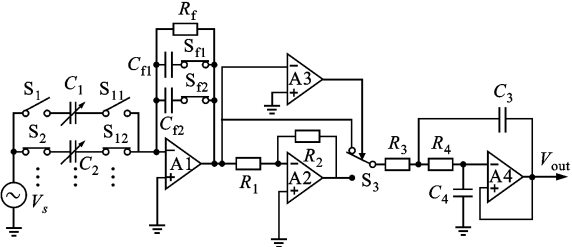


图 7 C/V 转换电路

$\Phi 100\text{ mm}$ 内径的有机绝缘材料,各电极结构的传感器参数取优化水平处对应的数值。

由于电容传感器电极分布的结构对称性,试验过程中选择了传感器检测场内具有代表性的 19 个点作为测试点,如图 8 所示。测试点 1 位于检测场中心,测试点 2~5 位于 $(1/3)R_1$ 处,测试点 6~12 位于 $(2/3)R_1$ 处,测试点 13~19 位于 $0.9R_1$ (测试棒紧贴测量管壁)处。通过测量测试棒在这 19 个位置的传感器输出电容值,就可以得到电容传感器检测场灵敏度的分布情况。

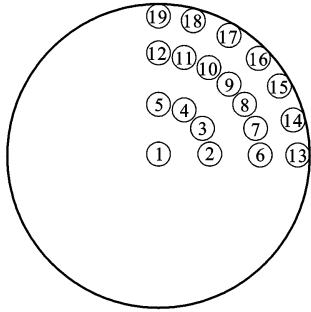


图 8 电容传感器静态试验测试点

图 9 给出了二电极、四电极、八电极结构的静态试验测试数据。从图中可以看出,随着电极数的增加,试验数据的分散性加大,二电极、四电极、八电极传感器试验数据的方差分别为 0.054 9、0.061 3、0.096 3。试验数据方差越小,则传感器检测场灵敏度分布越均匀;方差越大,则传感器检测场灵敏度分布越不均匀。试验结果表明,随着电极数的增加,电容传感器检测场的灵敏度分布将变得不均匀。

从图 9 中可以看出,在测试点 1~5 处,二电极结构的数据波动较四电极和八电极都要大,这表明二电极结构在电极中心区域有较好的电容测量灵敏度。在测试点 13~19 处,八电极结构的数据波动较二电极和四电极都要大,这表明八电极结构在电极区域有较好的电容测量灵敏度。从整体来看,随着电极数的增加,电容传感器的测量灵敏度在增大。

由于试验条件的限制,静态试验数据的精确度较仿真结果数据要低,但是可以在很大程度上验证

仿真结果。通过对比分析,静态试验结果和仿真计算结果具有较好的一致性,这表明此优化方案及结果具有合理性和正确性。

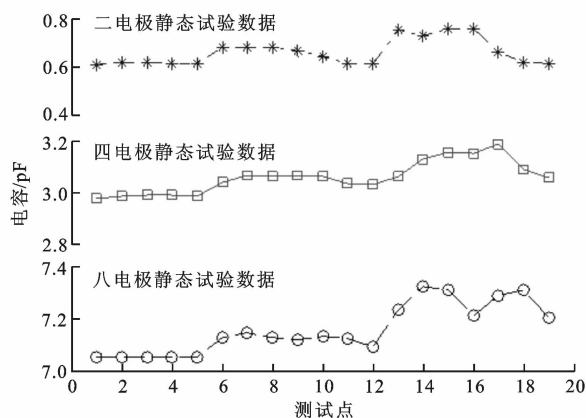


图9 静态试验测试结果

4 结 论

本文应用正交试验设计和有限元仿真设计相结合的方法对电容传感器进行了优化设计。首先,在有限元仿真设计软件中建立了电容传感器的有限元模型,采用正交试验法设计了试验方案。然后,在有限元软件中仿真计算得到3种电极电容传感器的试验结果,对试验指标 S_{VP} 、 ΔC 进行方差分析,并应用综合平衡法得到各电极结构下参数间的最优组合方案。最后,讨论和分析了3种不同电极电容传感器检测场灵敏度分布的特征以及各参数对灵敏度分布的影响,得出了随着电极数的增加,灵敏度增加,但是灵敏度分布均匀性降低的结论。通过对优化结果进行静态试验测试,证实了仿真结果的合理性和正确性。本课题的研究对火力发电厂锅炉输粉系统的煤粉浓度在线监测具有十分重要的推广价值。

参考文献:

- [1] YAN Y. Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines [J]. Measurement Science and Technology, 1996, 12(7): 1687-1706.
- [2] MATHUR M P, KLINZING G E. Flow measurement in pneumatic transport of pulverized coal [J]. Powder Technology, 1984, 40: 309-321.
- [3] AHMED W H. Capacitance sensors for void-fraction measurements and flow-pattern identification in air-oil two-phase flow [J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(5): 1153-1163.
- [4] HU H L, XU T M, HUI S E. A novel capacitive system for concentration measurement of pneumatically conveyed pulverized fuel at power stations [J]. Flow

Measurement and Instrumentation, 2006, 17(2): 87-92.

- [5] 金锋,许会,颜华,等. 气/固两相流相浓度传感器[J]. 东北大学学报, 1999, 20(1): 24-28.
JIN Feng, XU Hui, YAN Hua, et al. Phase concentration transducers for gas/solid two phase flow [J]. Journal of Northeastern University, 1999, 20(1): 24-28.
- [6] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 20-30.
- [7] DEHKHODA F, FROUNCHI J, VELADI H. Capacitive proximity sensor design tool based on finite element analysis [J]. Sensor Review, 2010, 30(4): 297-304.
- [8] 阎照文. ANSYS10.0 工程电磁场分析技术与实例详解 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 376-377.
- [9] PISHVA D. Spectroscopically enhanced method and system for multi-factor biometric authentication. [J] IEICE Transactions on Information and Systems, 2008, E91-D(5): 1369-1379.
- [10] 邱轶兵. 试验设计与数据处理 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 135-136.
- [11] ZHANG Ping, OUYANG Guang-yao, LU Jian-ming. Orthogonal experimental design applied in analyzing factors influencing on heat transfer performance of engine cylinder head [J]. Advanced Materials Research, 2011, 383/390: 4783-4786.
- [12] SLIWA A, MATULA M, DOBRZANSKI L A. Finite element method application for determining feedstock distribution during powder injection moulding [J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2009, 37(2): 127-132.
- [13] HU H L, XU T M, HUI S E. A high-accuracy, high-speed interface circuit for differential-capacitance transducer [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2006, 125(2): 329-334.

[本刊相关文献链接]

- 司刚全,张寅松,娄勇. 考虑自支持度和互支持度的多传感器一致性测度算子. 2012, 46(10): 20-23.
- 贺国,王豪,史日安. 一种船用超声液位传感器的优化设计模型. 2012, 46(5): 44-49.
- 张平,张小栋,刘春翔. 双圈同轴式光纤位移传感器的输出特性. 2012, 46(3): 27-30.
- 李继胜,李军浩,罗勇芬,等. 用于电力变压器局部放电定位的超声波相控阵传感器的研制. 2011, 46(4): 93-99.

(编辑 杜秀杰)