

## Array Optimization and the Working Temperature Selection of MOS Sensors \*

PENG Jing, ZHANG Shun-ping, LI Hua-yao, XIE Chang-sheng \*

The State Key Laboratory of Plastic Forming Simulation and Mould Technology,

Department of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract :** Through array optimization and the working temperature selection of sensor array could improve the selectivity of sensor array and reduce the power consumption. In the experiment, a gas sensor array consisted of ten TGS sensors was used to test benzene, toluene, methanol, ethanol at different concentrations when sensor arrays worked at different temperatures. Then, through four methods of feature selection for array optimization, the DFA results of optimal feature at different temperatures were compared. Results showd that it could improve selectivity ( the correct recognition rate increased to 100 % from 91.7 % ) and reduce power consumption of sensor array at the best working temperature 4.4 V comparing with the traditional work temperature 5.0 V.

**Key words :** sensor array; temperature selection; array optimization; feature selection

EEACC:7230J

## MOS 气敏传感器阵列优化与工作温度选择 \*

彭 婧,张顺平,李华曜,谢长生 \*

(华中科技大学材料科学与工程学院,模具技术国家重点实验室,武汉 430074)

**摘 要 :**通过对金属氧化物半导体(MOS)气敏传感器阵列进行阵列优化和工作温度的选择,达到提高阵列选择性、降低其功耗的目的。实验采用 10 个 MOS 传感器组成阵列,在不同加热电压下,对不同浓度的苯、甲苯、甲醇、乙醇进行测试;利用四种特征选择方法进行阵列优化,同时对优化后的特征子集做 Fisher 线性判别(DFA)分析。结果表明,优化的阵列在比通用加热电压(5.0 V)低的加热电压(4.4 V)下工作,对四种物质的正确识别率由 91.7 % 提高到 100 %。

**关键词 :**传感器阵列;温度选择;阵列优化;特征选择

中图分类号:TP212

文献标识码:A

文章编号:1004-1699(2008)06-0903-05

研究表明<sup>[1-4]</sup>,金属氧化物半导体(MOS)气敏传感器对气体的选择性会随着工作温度的改变而不同,通过调制传感器的工作温度可以提高其对气体的选择性。MOS 气敏传感器阵列一般在固定温度下或温度调制下工作。在温度调制方式下,通过优化阵列温度调节方式(调节加热电压的信号波形<sup>[5]</sup>、温度调节的范围<sup>[5]</sup>、温度调节的振幅和频率<sup>[6-7]</sup>等),可以较大地改善传感器阵列的选择性,提高正确识别率。但是采用温度调制,硬件设计和数据处理较为复杂。同时,在温度调制方式下,传感器对气体响应达到动态平衡时才能提取特征<sup>[8]</sup>,若采用“吸气呼

气”式采样方式,需花费较长时间才能提取样本特征,故温度调制方式较适合在连续监测应用中使用<sup>[9]</sup>。目前,在大部分气体检测中 MOS 气敏传感器阵列仍在固定温度下工作,通过阵列优化,可以满足许多应用需求<sup>[10-12]</sup>。其中,通过优化传感器阵列的工作温度,既可以增加阵列的选择性,又可以降低阵列的功耗,具有非常重要的作用。

本文将阵列优化与温度选择相结合,得到了传感器阵列工作的最佳温度以及在此温度下较优的传感器阵列,提高了阵列的选择性,降低了阵列的功耗。

基金项目:国家高科技研究发展计划 863 计划资助(2006AA03Z338);材料基金新技术国家重点实验室(武汉理工大学)资助

收稿日期:2007-09-24 修改日期:2007-12-27

# 1 实验过程

## 1.1 气体测试过程

实验中采用 10 个传感器 (TGS822, TGS813, TGS842, TGS816, TGS830, TGS823, TGS823, TGS832, TGS842, QM-J2, MQ-5, QM-J1) 组成阵列,对四种易挥发性有机液体(甲醇、酒精、苯、甲苯)进行了测试。测试过程中工作温度通过调节传感器阵列的加热电压控制,共选择 7 个加热电压控制点 (4.2 V、4.4 V、4.6 V、4.8 V、5.0 V、5.2 V、5.4 V),对每类样本在每个温度点重复测试 12 次(每类样本选取  $50 \times 10^{-6}$ 、 $100 \times 10^{-6}$ 、 $200 \times 10^{-6}$ 、 $400 \times 10^{-6}$  四个浓度点,每个浓度点重复测试 3 次),共测试  $4 \times 12$  个样本。

## 1.2 特征参数的选取

将每次测试得到传感器对物质的响应曲线 ( $S-t$  关系) 转化为相空间中  $dS_i/dt - S_i$  的关系曲线。在相空间中提取特征参数也是一种常用的特征参数提取方法<sup>[13]</sup>。如图 1 所示,为 TGS822 对甲醇、苯的响应曲线,其中每类气体包含 4 个浓度点,每个浓度点含 3 个样本。由图 1 可见,对不同浓度的同一种

物质而言响应曲线的形状具有极大的相似性,而对不同的物质而言响应曲线的形状在长度高度比例上有明显不同。故可通过辨别响应曲线的形状达到分类识别的目的。根据曲线形状可提取以下六个形状参数作为特征参数:最大的敏感度  $S_0$ , 偏移量  $c$ , 高宽比  $\max(dS_i/dt) / S_0$  和  $\min(dS_i/dt) / S_0$ ; 峰度位置  $a/b$  和  $a'/b'$ , 如图 2 所示,  $S_0$  为  $S_i$  的最大值,  $c$  为波动值,  $\max(dS_i/dt) / S_0$  表示响应过程中曲线的高与宽之比,  $\min(dS_i/dt) / S_0$  表示恢复过程中曲线的高与宽之比,  $a/b$  表示  $\max(dS_i/dt)$  的位置,  $a'/b'$  表示  $\min(dS_i/dt)$  的位置。其中,  $S_i = (G_t - G_0) / G_0$ ,  $G_0$  是指传感器在空气中的电导,  $G_t$  是指传感器在测试过程中  $t$  时刻的电导。

据此,每个测试样本共可提取  $6 \times 10$  个特征参数,构成 60 维特征参数集;每个温度点下所有测试样本的特征参数构成  $48 \times 60$  的特征空间。为方便统计对每个测试样本的 60 个特征参数依次编号为 (1, 2, ..., 60), 对阵列中的传感器编号为 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10), 则特征与传感器的对应关系为表 1 所示。

表 1 特征编号与传感器编号的对应关系

特征类别	$S_0$	$a/b$	$\max(dS_i/dt) / S_0$	$c$	$a'/b'$	$\min(dS_i/dt) / S_0$
特征编号	1, ..., 10	11, ..., 20	21, ..., 30	31, ..., 40	41, ..., 50	51, ..., 60
传感器编号	1, ..., 10	1, ..., 10	1, ..., 10	1, ..., 10	1, ..., 10	1, ..., 10

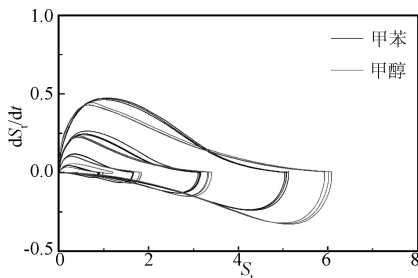


图 1 TGS816 对甲醇、苯的响应曲线

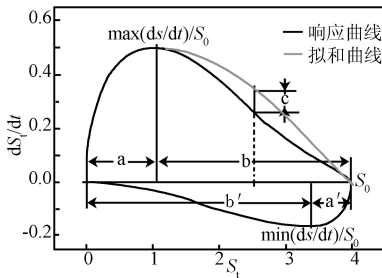


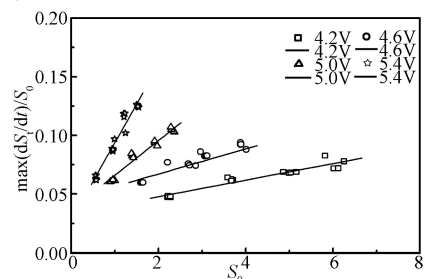
图 2 特征提取示意图

# 2 实验结果

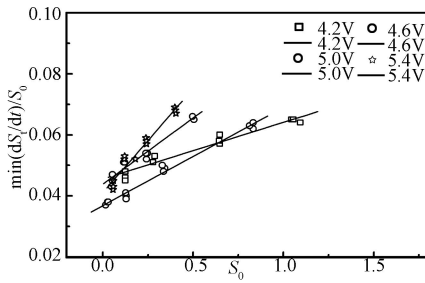
## 2.1 温度对传感器性能的影响

金属氧化物半导体气敏传感器对气体的选择

性会随着工作温度的改变而不同,主要是因为工作温度改变,会引起传感器对待测物质的敏感特性发生变化,并且由于不同物质在气敏材料上的吸附特性和最佳氧化温度不同,不同物质具有不同的敏感-温度特性。本文考察了工作温度改变对根据响应特性所提取出的特征参数值的影响,如图 3 所示。对同一加热电压下不同浓度的样本而言,  $S_0$  和  $\max(dS_i/dt) / S_0$  随浓度的变化均是呈线性关系的。对甲醇而言,随加热电压的升高,  $S_0$  有逐渐减小的趋势;  $\max(dS_i/dt) / S_0$  有逐渐增大的趋势。而对于苯而言,随加热电压的升高,在高



(a) 甲醇



(b) 苯

图 3 加热电压对特征参数值的影响

浓度,  $S_0$  有逐渐减小的趋势;在低浓度有先减小后增大再减小的趋势; $\max(dS_i/dt)/S_0$  则有先减小后增大的趋势。说明随工作温度改变,传感器对物质的敏感特性会发生变化,而变化的规律因不同的物质而不同。

### 2.2 各温度点下特征选择的结果分析

实验采用了四种常用的搜索策略(遗传算法(GA),模拟退火算法(SA),广义顺序前进算法,随机搜索算法)<sup>[14]</sup>,对各温度下的特征空间进行特征选择。类别可分性的评价准则选择基于类内类间距离的准则  $J^{[14]}$ ,  $J = \text{迹}\{S_w^{-1} S_m\}$ ,其中,  $S_w$  为总类内样本协方差矩阵,  $S_m$  为全局均值向量的协方差矩阵。四种搜索算法对样本空间进行搜索选择的结果(保留特征数目设定为 6),依  $J$  值的大小排列如表 2 所示。

表 2 不同搜索算法下特征选择结果

(a) 模拟退火算法

加热电压/V	特征子集编号	所选传感器编号	优化准则值 $J$
5.4	1,2,5,8,22,38	1,2,5,8	4 365.39
4.4	1,2,8,30,51,52	1,2,8,10	4 258.47
5.2	2,3,9,10,51,52	1,2,3,9,10	3 747.29
5.0	2,3,9,10,11,30	1,2,3,9,10	3 662.07
4.6	1,2,9,11,32,58	1,2,8,9	3 495.85
4.2	2,21,38,40,51,57	1,2,7,8,10	1 896
4.8	2,6,41,52,58	1,2,6,8	939.35

(b) 随机搜索算法

加热电压/V	特征子集编号	所选传感器编号	优化准则值 $J$
5.4	2,4,6,8,37,38	2,4,6,7,8	3 820.55
5.0	2,3,9,10,28,51	1,2,3,8,9,10	3 182.04
4.6	1,2,4,9,32,58	1,2,4,8,9	3 123
4.4	1,2,6,30,51,52	2,3,5,6,8,9	3 065.37
5.2	2,3,6,9,54,57	2,3,4,6,7,9	2 301.89
4.2	2,30,38,40,51,57	1,2,7,8,10	1 676
4.8	2,37,51,5,58,59	1,2,5,7,8,9	507.49

(c) 广义顺序前进算法

加热电压/V	特征子集编号	所选传感器编号	优化准则值 $J$
4.4	1,2,22,26,28,39	1,2,6,8,9	3 206.39
5.2	2,3,8,9,30,57	2,3,7,8,9,10	2 309.21
5.4	2,3,8,23,28,30	2,3,8,10	1 836.76
4.2	1,2,22,26,28,39	1,2,6,8,9	1 716.51
4.6	3,4,10,22,23,60	2,3,4,10	1 095.63
5.0	1,2,5,51,52,56	1,2,4,8,9,10	1 021.03
4.8	2,37,40,51,56,58	1,2,6,7,8,10	700.63

(d) 遗传算法

加热电压/V	特征子集编号	所选传感器编号	优化准则值 $J$
5.0	2,3,9,10,33,40	2,3,9,10	2 916.93
5.4	2,8,9,26,52,60	2,6,8,9,10	2 126.73
4.4	1,2,21,22,32,58	1,2,8	2 044.2
4.6	1,2,7,22,56,60	1,2,6,7,10	1 417.93
5.2	2,4,8,22,28,58	2,4,8	1 396.73
4.2	1,2,5,51,52,56	1,2,5,6	1 137.39
4.8	2,8,27,29,38,58	2,7,8,9	542.35

从特征选择来看,搜索策略不同,搜索得到的特征选择结果也有所差异。在本实验条件下,随机搜索方法和模拟退火算法得到的准则值较大,寻优能力略优于标准遗传算法和广义顺序前进算法。在同一加热电压下,以上四种搜索算法得到的特征子集虽然不完全相同,但均包含某些共有特征,如 4.4 V 下特征 1、2 的选择频率均较高。从传感器选择来看,四种方法下得到的最终传感器组合也有共同点,如 4.4 V 下都包含传感器 2、8。可见,通过阵列优化实现了对原始特征空间的有效降维,同时精简了传感器阵列的规模。

从温度选择来看,各加热电压按所得阵列优化准则值  $J$  从大到小依次排列为:  $5.4 > 4.4 > 5.2 > 5.0 > 4.6 > 4.2 > 4.8$ 。理论上, $J$  值越大,可分性越大,模式识别结果越好。但实际中,类别可分性评价准则值与模式识别结果并没有完全确定的对应关系。这种误差可能是因为在特征选择和模式识别两个过程中所依赖的评价准则不一致所致。因此,在考虑对最佳工作温度的选择时,必须根据各特征组合下的模式识别结果好坏判定。

### 2.3 各温度点下优化特征参数集模式识别结果分析

根据上述特征选择结果,对 7 个温度点下准则值最大的各特征组合进行 DFA 分析<sup>[15]</sup>得到各类样本的分布结果如图 4 所示。经 DFA 分析,传感器阵列对苯、甲苯、甲醇、乙醇四种气体的识别正确率均很高,除在 5.0 V 下优化子集的识别正确率为 91.7 %

外,在其余加热电压下优化子集的认识正确率均达到100%。从图4中各类样本的分布来看,在4.4V下,四类气体间界限最为明显,类与类之间的距离分布均较大,各类内样本离散度也较小,样本分布结果最优。同时从阵列优化的结果来看,在4.4V下,经模拟退火算法所选出的传感器数目只有4个也是较少的。因此,从分类识别效果和降低传感器工作温度两方面综合考虑,在本实验条件下4.4V的加热电压是最优的。

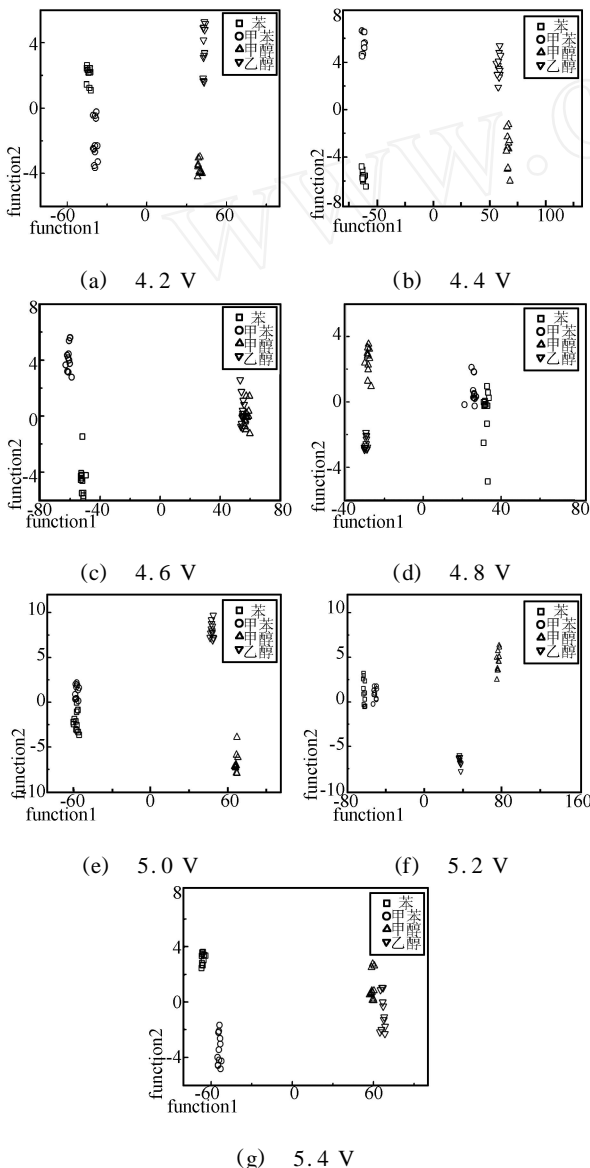


图4 不同加热电压下优化特征参数集中各类样本的分布

### 3 结论

实验采用10个MOS传感器组成阵列,在不同工作温度下,对不同浓度的苯、甲苯、甲醇、乙醇四类气体进行敏感性测试。考察了工作温度变化对传感器阵列选择性的影响,并将阵列优化与最佳工作温度的选择相结合,得到如下结论。

通过考察温度变化对所提取的各特征参数的影响。结果显示,传感器对不同物质响应特征值随温度改变的变化规律各不相同;

通过阵列优化,在保证识别正确率达到100%的前提下可将 $48 \times 60$ 的初始特征空间转换至 $48 \times 6$ 的低维空间,且能减少初始气敏传感器阵列中的传感器数目;

经对阵列优化后各特征子集的DFA分析结果进行比较,发现传感器阵列在通用的加热电压(5.0V)下工作与在优化的加热电压(4.4V)下工作相比,对四种气体的正确识别率由91.7%提高到100%,降低了工作温度。

### 4 致谢

衷心感谢国家高技术研究发展计划(863计划NO.2006AA03Z338)及材料复合新技术国家重点实验室(武汉理工大学)对本实验的资助。

### 参考文献:

- [1] Akrajas Muhaad, Mat Salleh, Muhamad Yahaya. Enriching the Selectivity of Metalloporphyrins Chemical Sensors by Means of Optical Technique[J]. Sensor and Actuator B, 2002, 85: 191-196.
- [2] Gardner J, Bardettceds E. Sensors and Sensory systems for Electronic nose [M]. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht-Boston/London, 1992.
- [3] Chang J, Kuo H, Leu I. The Effects of Thickness and Operation Temperature on ZnO:Al Thin Film CO Gas Sensor[J]. Sensors and Actuators B 84 (2002) 258-264.
- [4] Huang J, Li G, Huang Z. Temperature Modulation and Artificial Neural Network Evaluation for Improving the CO Selectivity of SnO<sub>2</sub> Gas Sensor[J]. Sensors and Actuators B, 2006, 114: 1059-1063.
- [5] Xing Huang, Fan Meng. Gas Sensing Behavior of a Single tin Dioxide Sensor Under Dynamic Temperature Modulation[J]. Sensors and Actuators B, 2004, 99: 444-450.
- [6] Fort A, Gr egorkiewitz M. Selectivity Enhancement of SnO<sub>2</sub> Sensors by Means of Operating Temperature Modulation [J]. Thin Solid Films 2002, 418: 2-8.
- [7] Vergara A, Llobet E. Quantitative Gas Mixture Analysis Using Temperature-Modulated Micro-Hotplate Gas Sensors: Selection and validation of the optimal modulating frequencies[J]. Sensors and Actuators B, 2006: 1-15.
- [8] 王磊, 曲建岭, 杨建华. 发展中的电子鼻技术[J]. 测控技术, 1999, 18(5): 8-10.
- [9] Natale C D, Fabrizio A M, Davide Arnaldo. A Self-Organizing System for Pattern Classification: Time Varying Statistics and Sensor Drift Effects[J]. Sensors and Actuators B, 1995, (26-27): 237-240.
- [10] 鲁小利, 王俊, 海铮. 基于遗传优化神经网络的电子鼻对可乐

- 的检测[J]. 传感技术学报, 2007, 6, 20(6):1211-1214.
- [11] 张覃轶, 电子鼻: 传感器阵列、系统及应用研究[D], 博士学位论文, 2005.
- [12] 张红梅, 王俊, 叶盛. 电子鼻传感器阵列优化与谷物霉变程度的检测[J]. 传感技术学报, 2007, 6, 20(6):1107-1210.
- [13] Martinelli E, Falconi C, Amico A D. Feature Extraction of Chemical Sensors in Phase Space, Sensors and Actuators B, 200395:132-139.
- [14] 边肇祺, 张学工. 模式识别(第二版) [M], 北京: 清华大学出版社, 2000:178-208.
- [15] 张覃轶, 谢长生. 电子鼻模式识别算法的比较研究[J]. 传感技术学报, 2005, 9, 18(3):576-579.



彭 婧(1985-), 女, 硕士生, 研究领域为气敏传感器、电子鼻的应用, pengjing000@126.com



谢长生(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为纳米材料制备及智能传感器, csxie@mail.hust.edu.cn

WWW.CNKI.NET