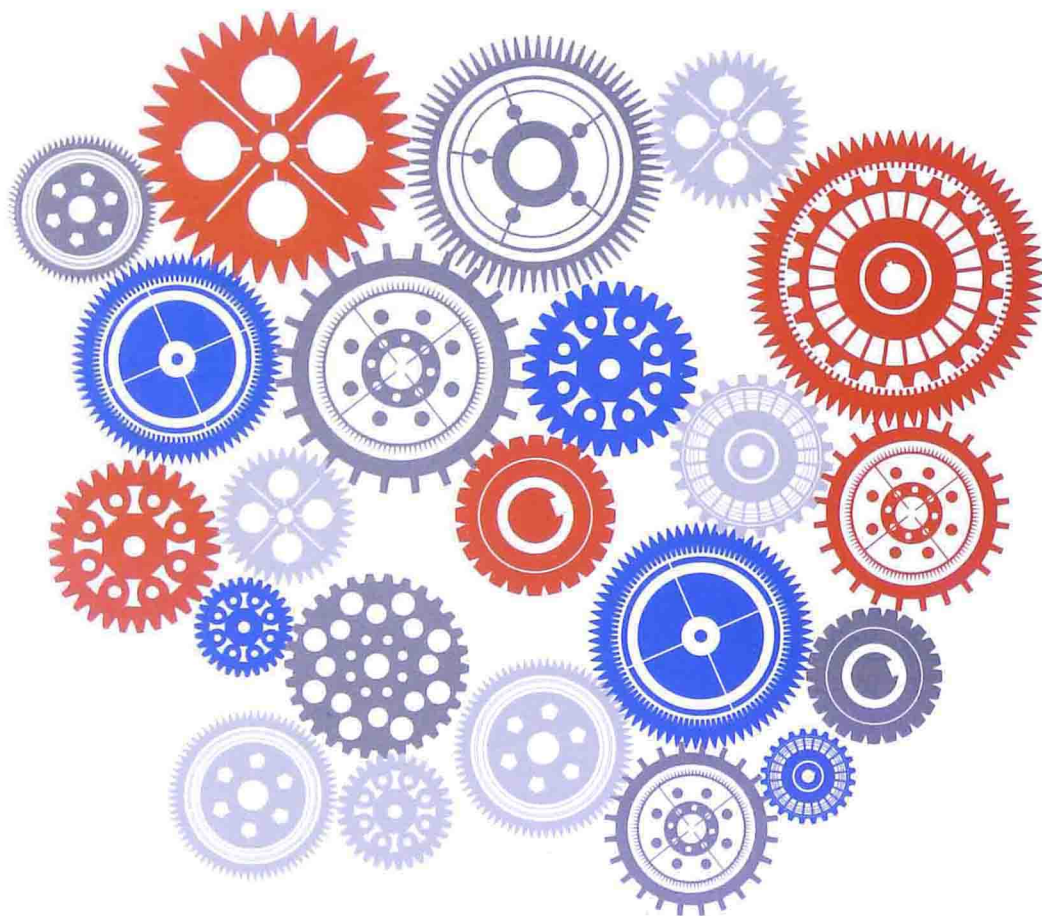


系统总结气体传感器领域最新研究成果和当前研究热点
详细阐述电子鼻领域大量有关实验和算法的分析测试方法与结果



电子鼻

PRINCIPLE AND TECHNIQUES OF ELECTRONIC NOSE SYSTEMS

系统原理及技术

◎ 魏广芬 余隼 唐祯安 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子鼻系统原理及技术

Principle and Techniques of Electronic Nose Systems

魏广芬 余 隽 唐祯安 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要内容包括电子鼻系统的基本原理、电子鼻系统的实验测试平台设计、微热板式气体传感器的结构及其性能测试分析、气体传感器的混合气体响应机理分析、气体传感器阵列信号的特征参数分析和盲分离处理、气体传感器温度调制原理和测试及基于傅里叶变换和 Hilbert-Huang 变换的动态特征分析技术,以及最新的压缩感知理论在电子鼻系统中的应用。书中每章包含了大量反映电子鼻和气体传感器领域的最新研究成果和当前研究热点的总结,提供了大量有关实验和算法的详细分析步骤和测试结果。

该书内容丰富新颖,可作为电子鼻系统、气体传感器相关领域同人的参考,同时也可以为对该领域感兴趣的读者提供帮助。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子鼻系统原理及技术 / 魏广芬, 余隽, 唐祯安著. —北京: 电子工业出版社, 2014.7

ISBN 978-7-121-23191-9

I. ①电… II. ①魏… ②余… ③唐… III. ①智能传感器—研究 IV. ①TP212.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 101584 号



策划编辑: 薄 宇

责任编辑: 王凌燕

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 14.75 字数: 249 千字

版 次: 2014 年 7 月第 1 版

印 次: 2014 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

随着科学技术的发展，工业生产规模逐渐扩大，产品种类不断增多，在生产中使用的气体原料和生产过程中产生的气体种类和数量也不断增多。这些气体中有些是易燃易爆气体，有些是毒性气体，它们的泄漏不仅污染环境，而且易产生爆炸、火灾及使人中毒等恶性事件。同时随着人类生活水平的不断提高，石油液化气、天然气及城市煤气作为家庭用燃料也迅速普及，由于这些气体的泄漏引起的爆炸和火灾事故也严重威胁人们的生命财产安全。因此，对这些气体进行快速准确的检测和监控是十分必要的。另外，随着科技的发展，气体传感器可与大规模集成电路、计算机等结合起来，应用于各种检测和控制等方面，也促进了气体传感器的发展。

半导体气体传感器是集物理性能、化学性能、电性能于一体的微电子器件，它能够实时地对各种气体（有毒有害、易燃易爆）进行在线检测及分析，具有广泛的应用。但半导体气体传感器的选择性和稳定性问题是制约其发展的瓶颈。因此，如何改善气体传感器的选择性和稳定性成为气体传感器的研究热点。再加上仿生技术的发展，如何在已有传感器的基础上研制各种面向实际应用的电子鼻系统引起了广大科技人员的浓厚兴趣。电子鼻系统的研究涉及物理、化学、电子电路、模式识别及控制等多个学科领域的交叉，具有较强的系统融合性。

本书以金属氧化物气体传感器为主，讨论由其构成的电子鼻系统的原理、关键技术及一些新技术。本书主要章节的内容涉及本人及项目组多位同人的工作，多数内容已在国内外相关的主流刊物上发表。本书中涉及的前期研究成果多取材于国家自然科学基金委信息学部支持的相关课题“基于 Hilbert-Huang 变换的气体传感器温度调制技术研究（60746001）”、“基于压缩感知的新型电子鼻系统原理研究（61174007）”、“硅基纳米多级复合结构

集成气体传感器（61131004）”、“基于形变在线调控技术研究微热板气体传感器在应力作用下的稳定性和可靠性（61274076）”和山东省优秀中青年科学家奖励基金项目“气体传感器温度调制关键技术研究（BS2010DX022）”等项目的部分内容，以及国家 863 项目“气体检测微系统（2003AA404180）”等项目的支持。

在本书立题和撰写的过程中，得到了多位专家的关心与支持。感谢大连理工大学电子科学与技术学院的王兢教授、闫卫平教授等多位教授的指导和帮助，尤其要感谢我的导师唐祯安教授和王立鼎院士，正是他们对我的指导才成就了本书的主要内容。感谢学院和项目组的朱智林教授、华臻教授、王永强教授、魏书田副教授、林忠海博士、王平建博士及何爱香老师等多位老师的支持和帮助！

当然，本书中的一些观点并不成熟，可能仅为本人的一家之言，将本书出版，也希望能够得到读者的批评指正。希望本书的出版能够为电子鼻领域或对该领域感兴趣的读者提供帮助。

魏广芬

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 气体被测对象	1
1.2 电子鼻系统	3
1.2.1 电子鼻系统原理	3
1.2.2 电子鼻应用及发展	4
1.2.3 集成化电子鼻芯片	5
1.3 电子鼻系统关键技术	7
1.3.1 气体传感器	7
1.3.2 气体传感器阵列技术	9
1.3.3 气体信息特征参数的提取	12
1.3.4 模式识别	13
1.3.5 温度调制技术	14
1.3.6 气敏机理及模型的研究	14
1.4 当前亟待解决的问题	16
1.5 主要内容简介	18
第 2 章 电子鼻系统研究测试平台	20
2.1 实验平台设计	20
2.2 配气系统	23
2.2.1 动态配气系统	23
2.2.2 静态配气系统	25
2.3 控制测试系统	26
2.3.1 硬件系统设计	27
2.3.2 软件界面设计	29

2.3.3 测试系统的性能	32
2.4 温度调制实验系统	33
2.4.1 基于 DDS 技术的气体传感器温度调制实验系统	34
2.4.2 基于程控电源的气体传感器温度调制实验系统	36
2.5 测试	37
2.6 本章小结	39
第 3 章 气体传感器及其性能测试和分析	40
3.1 半导体气体传感器的发展	40
3.2 微热板式气体传感器的结构及工艺流程	45
3.3 微热板式气体传感器的性能测试	47
3.3.1 工作温度-加热功耗曲线	48
3.3.2 灵敏度-工作温度曲线	49
3.3.3 微热板升(降)温曲线	50
3.3.4 选择性	51
3.3.5 灵敏度-气体浓度曲线	52
3.3.6 响应时间和恢复时间	52
3.3.7 稳定性	53
3.3.8 预热时间的影响	57
3.3.9 环境温湿度的影响	57
3.3.10 对混合气体的响应	58
3.4 与标准 CMOS 工艺及气敏材料的制备工艺兼容的微热板	59
3.4.1 微热板式气体传感器加热材料的选取	59
3.4.2 钨微热板式气体传感器的加工流程	59
3.4.3 钨微热板式气体传感器性能测试	61
3.5 本章小结	64
第 4 章 气体传感器的混合气体响应机制	65
4.1 SnO_2 薄膜的敏感机理	65
4.1.1 敏感机理综述	65
4.1.2 SnO_2 薄膜	70
4.2 气敏机理的密度泛函分析	73
4.2.1 密度泛函理论	74

4.2.2	计算平台	75
4.2.3	DFT 计算和分析	76
4.3	微热板式气体传感器的电学响应模型	82
4.3.1	模型描述	82
4.3.2	参数优化	84
4.4	环境中 O_2 的影响分析	87
4.5	本章小结	90
第 5 章	气体传感器特征参数分析	92
5.1	阵列信号处理方法综述	93
5.1.1	信号预处理	93
5.1.2	特征参数优化	94
5.1.3	模式分类	96
5.2	稳态响应特征参数	99
5.3	特征分析	101
5.3.1	气体传感器响应测量	102
5.3.2	响应特征分析	102
5.3.3	电阻和电导参数比较	103
5.3.4	其他特征分析	104
5.4	混合气体识别	107
5.4.1	神经网络模式识别	107
5.4.2	气体量化识别	111
5.5	本章小结	112
第 6 章	气体传感器阵列信号的盲分离	113
6.1	盲分离模型的建立	113
6.1.1	混合气体分析问题描述	113
6.1.2	盲信号分离问题	115
6.1.3	混合气体分析的盲可辨识性	117
6.2	基于盲分离模型的信号处理算法	118
6.2.1	主成分分析法 (PCA)	118
6.2.2	独立成分分析法 (ICA)	120
6.2.3	非线性主成分分析法 (NLPCA)	122

6.3	二元混合气体的 BSS 分析	124
6.3.1	稳态数据的 BSS 分析	124
6.3.2	连续测量数据的 ICA 分析	127
6.3.3	非线性叠加模型的信号处理探讨	128
6.4	与 BP 神经网络的结合	130
6.4.1	特征选择	130
6.4.2	特征提取和预处理	131
6.4.3	在二元混合气体分析问题中的应用	133
6.5	本章小结	134
第 7 章	气体传感器的温度调制技术	135
7.1	温度调制原理	135
7.2	温度调制技术现状	136
7.2.1	温度调制模式的多样化	137
7.2.2	气体传感器动态响应信号处理技术	140
7.2.3	动态响应机理分析及建模	143
7.3	温度调制实验	144
7.3.1	实验设置	144
7.3.2	测试结果及分析	145
7.4	调制信号预处理	148
7.5	虚拟阵列	151
7.6	本章小结	153
第 8 章	基于傅里叶变换的动态特征分析	154
8.1	傅里叶变换	154
8.2	动态信号处理	158
8.2.1	信号分析	158
8.2.2	特征提取	160
8.2.3	特征分析依据	161
8.3	温度调制模式分析	161
8.3.1	温度调制实验设计	161
8.3.2	甲烷和一氧化碳气体特征差异	162
8.3.3	乙醇和一氧化碳气体特征差异	163

8.3.4 乙醇和甲烷气体特征差异·····	164
8.3.5 模式分析结论·····	165
8.4 混合气体检测·····	167
8.5 本章小结·····	170
第 9 章 基于 Hilbert-Huang 变换的动态特征参数分析·····	171
9.1 Hilbert-Huang 变换·····	171
9.1.1 经验模态分解 (EMD)·····	172
9.1.2 Hilbert 谱分析 (HSA)·····	173
9.2 动态信号处理·····	175
9.2.1 信号的 HHT 分析·····	176
9.2.2 瞬时频谱特征·····	180
9.2.3 调制周期的影响·····	182
9.2.4 其他波形中的应用·····	183
9.3 混合气体检测·····	185
9.4 本章小结·····	187
第 10 章 压缩感知电子鼻系统·····	189
10.1 物联网环境下的新需求·····	190
10.2 压缩感知理论·····	191
10.2.1 稀疏变换·····	193
10.2.2 测量矩阵·····	194
10.2.3 信号重构·····	196
10.3 压缩感知电子鼻系统·····	197
10.3.1 原理框架·····	197
10.3.2 压缩感知电子鼻系统模拟仿真·····	198
10.3.3 压缩感知电子鼻系统中的关键问题·····	200
10.4 本章小结·····	200
总结与展望·····	202
参考文献·····	206

第 1 章

绪 论

□1.1 气体被测对象

工业环境和生活环境中存在各种各样的气体和气味，有些简单，有些复杂。简单气味（气体）通常指气体形态小的极性分子，可进入鼻腔并被感受到。复杂或混合气体（与简单气体相对）是指两种或两种以上的挥发性化学物质聚合在一起形成的气味。此类气味由于混合种类、浓度等的任意组合而更加复杂。组成各种气味的气体分子可以是有机分子，也可以是无机分子。有机分子根据其分子结构可以分为很多种类，如醇类（alcohol 如乙醇）、醚类（ether 如乙醚）、醛类（aldehyde）、酮类（ketone）、酸类（acid）、酯类（ester）、内酯类（lactone）、胺类（amine）、腈类（nitrile）、异腈类（isonitrile）、硫基类（thiol）、氨基化合物（amide）等^[1]。无机分子包括一氧化碳、甲烷、氮氧化物、硫化物等。这些气体在分子结构上有相似之处，但表现出来的气味却可能大相径庭。

不论被测气味/气体简单还是复杂，其在环境中通常都是以多种气体的混合状态存在的，这就需要从背景气氛中对被测气体/气味进行辨别，如对泄漏的天然气的辨别，或者对香料气味的辨别。实际上，从依靠人的感觉器官到各种分析仪器，人类对气体的检测分析从来没有停止过。利用感觉器官鉴别气味由来已久，但其结果主要依靠人的生理和心理条件，它本身就是一门精湛的技术。这种工作常常需要经过训练并有丰富经验的专家进行鉴别。人工鉴定往往带有或多或少的主观因素。一般来看，由于鉴定人员受经验、情绪

等因素的影响,感官鉴定方法的判断结果随鉴定人员的不同而存在很大的个体差异,根据人的身体状态、情绪等的不同变化而产生不一样的结果,即便是同一个人也会有不同的结果。因此,人的感官很容易随检测时间、健康状况、以前判断的气味、疲劳度等不同原因波动,造成主观性、重复性差,耗时间长和花费体力大,并且人的感官不能用来检测毒性气体、远距离操作和连续作业^[1-2]。

对有毒或无毒气味的工程检测方法主要使用廉价简便的化学或生化传感器,或者基于质谱、能谱或色谱等昂贵复杂的分析化学仪器。这些仪器的试验结果并不能直接鉴别某种气体/气味,而是操作人员要进行大量的干预以进行分析、判断某些与该气体相关联的特性,才能得出结论。并且,质谱仪、气相色谱仪检测系统结构复杂,操作烦琐,仪器价格昂贵,测试时间长,且不能够进行持续检测^[1-7]。这些缺点限制了它们的使用与推广。

随着科学的发展和人类生活质量的不断提高,对气体气味的鉴别不仅要迅速准确,而且还要求能够运用微机进行监测和调控,要求整个系统体积小、重量轻,并能适应在线检测。传统的检测办法根本满足不了这些需求。于是人们开始研究能够实时地对各种气体进行鉴别、分析、判断,并能够实现反馈调控的气体传感器。目前已经研发了许多种类的气体传感器,如金属氧化物半导体传感器、电化学传感器、石英晶振及声表面波传感器、导电聚合物传感器、光学类传感器等,并取得了很大的发展。

近年来微电子、半导体技术发展迅速,半导体气体传感器受到广泛关注和研究。该类传感器能够实时地对多种气体进行检测及分析,并可以反馈控制,有效地克服了气相色谱分析等方法带来的仪器体积庞大,价格昂贵,不宜连续、实时、实地监测及反馈控制的缺点,很适合在工业、农业、家庭等多种场合应用。随着半导体工艺的发展,微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)是在集成电路工艺和微机械工艺的基础上发展起来的交叉性的高新技术,其发展速度非常迅猛。用该技术制作的微气体传感器具有体积小、功耗低、灵敏度高、易批量生产、成本低、加工工艺易与IC工艺兼容等优点,成为气体监(检)测仪器中极具开发潜力的产品,对于气体传感器的集成化、智能化、多功能化,以及提高其选择性和可靠性都有重要意义。

环境中的气体通常都是以多种气体的混合状态存在的,而气体传感器又难

以做到只对一种气体响应而不受其他气体干扰。因此,为了有效地检测被测单一或混合气体,将多只具有交叉敏感性的气体传感器优化组合,构成气体传感器阵列,利用单一气体传感器对气体响应的非专一性和对特定气体/气味的择优响应特性,根据实际应用,利用阵列的多维空间气体响应模式,结合先进的信息融合算法对气体/气味进行定性、定量识别。这就是电子鼻系统。

□1.2 电子鼻系统

1.2.1 电子鼻系统原理

电子鼻在功能和结构上模拟人类和其他哺乳动物的嗅觉系统,用以完成气体或气味的定性、定量识别,因此也被称为人工嗅觉系统^[2]。1984年,美国的 Zaromb 和 Stetter 提出用对不同气体有不同响应的多个气体传感器组成气体传感器阵列进行气体识别和测量的概念^[7],基本要点是将多个具有不同选择性的气敏元件组成阵列,用它测量多种气体,气体传感器阵列的输出为一组与被测气体对应的数据,对该数据进行分析,可识别气体种类和浓度。这是电子鼻的雏形。20世纪80年代末,英国 Warwick 大学的 J.W.Gardner 正式使用了电子鼻(electronic nose)这一术语^[8],并于90年代初与 P.Bartlett 共同提出了电子鼻的概念,即“电子鼻是由气敏性能彼此重叠的多个气体传感器构成的阵列和适当的模式识别系统组成的仪器装置,具有识别简单和复杂气味的能力。(An electronic nose is an instrument, which comprises an array of electronic chemical sensors with partial specificity and an appropriate pattern recognition system, capable of recognizing simple or complex odors.)^[9-10]”

图 1-1 是电子鼻的基本原理框图。其一般工作流程为:首先利用一定数量的传感器组成阵列,使其与混合气体发生响应产生电信号,并通过数据采集及 A/D 转换,得到一系列的响应信号,进行去噪等简单预处理后,从各响应信号中提取特征参数,然后通过阵列或多维信号处理技术进一步提取特征值,最后将特征参数或特征值送入模式识别系统,得到气体/气味的种类及浓度信息。

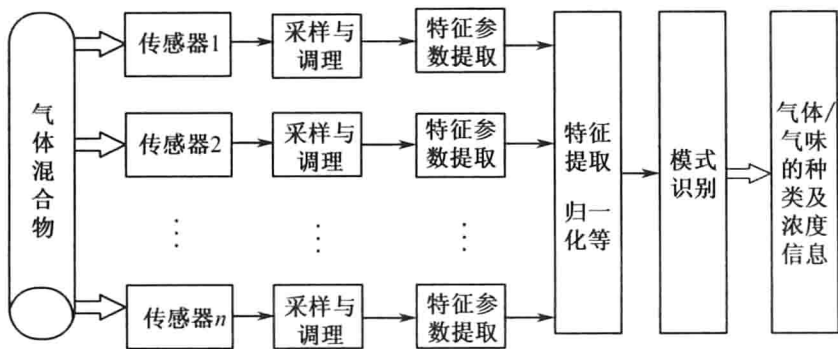


图 1-1 电子鼻的基本原理框图

1.2.2 电子鼻应用及发展

电子鼻在汽车、航空航天、农业、化学分析、消防、环保、化工控制、质量控制、安全等领域具有潜在的应用前景。现在已有电子鼻应用于烟草雾气的监控，有机磷硫化合物、咖啡品/豆的等级，牛肉的异味，啤酒的鲜度，鱼的鲜度等检测领域。随着电子鼻研究的迅速发展，北大西洋公约组织于1989年召开了第一次以电子鼻为重要内容的国际学术会议，随后第一届电子鼻国际会议于1990年举行，电子鼻技术已经成为国际传感器会议的一个重要组成部分，发展非常迅速。目前国际上已经有商业化的电子鼻系统，其中比较著名的是法国的Fox2000电子鼻，它包含一个由6个金属氧化物传感器组成的阵列，每个传感器有两个工作温度可供选择，从而增加了其识别能力，该电子鼻需要一台微机来校正和驱动气体传感器阵列^[11]。表1-1列出了一些商品化的电子鼻系统。

表 1-1 一些商品化的电子鼻

产 品 名 称	制 造 商	传感器阵列	型 式
Fox2000, 3000,4000 ^[13]	法国 Alpha MOS 公司	(6,12,18,24) MOS, QCM	台式电子鼻
Impulse X 系列多气体 检测仪 ^[14]	Neotronics 公司	CP, MOS, QCM	便携式电子鼻
ZNose ^[15]	加拿大 Electronic sensor technology 公司	SAW	台式电子鼻
Cyranose320 ^[16]	美国 Cyrano Sciences 公司	CP	便携式电子鼻
AromaScanner ^[17]	英国 AromaScan 公司	CP	台式电子鼻
MOSES II ^[18]	德国 Lennartz Electronic GmbH	MOS, QCM	台式电子鼻

说明: MOS 为金属氧化物半导体气体传感器 (Metal Oxide Semiconductor), QCM 为石英晶振气体传感器 (Quartz Crystal Microbalance), CP 为导电聚合物气体传感器 (Conductive Polymer), SAW 为声表面波气体传感器 (Surface Acoustic Wave)。

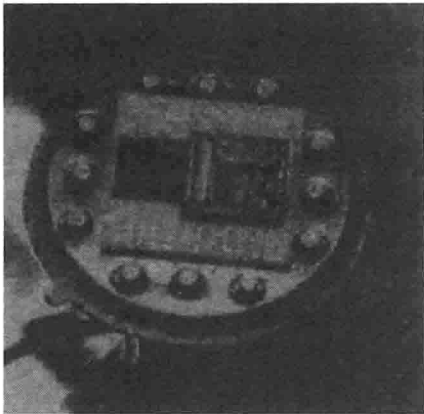
国内电子鼻技术领域的发展也较为迅速,一些高校和研究单位如吉林大学、浙江大学、西北工业大学、北京大学、西安交通大学、华中科技大学、中科院合肥智能所和北京电子所、微电子所及中国电子科技集团第 49 研究所等(在此不一一列举),在传感器及相应的信号处理方面展开了研究,取得了一些进展,但目前尚未见到小型化、实用化的电子鼻仪器进入市场。作为测量气味和气体的电子仪器,电子鼻是气敏传感技术与信息处理技术的有效结合。因此,在电子鼻技术的研究中,气体传感器技术与信号处理技术的研究就显得尤为重要。

1.2.3 集成化电子鼻芯片

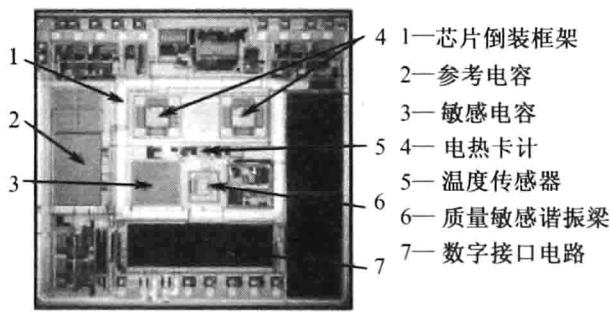
MEMS 自从诞生的那天起就注定要朝着系统集成化的方向努力。由微机械加工工艺与 IC 工艺兼容的难度及系统集成复杂度增加带来的市场净收益的负面影响,促使系统集成化朝两个方向发展,即封装内系统(System in a package, SIP)和片上系统(System on a chip, SOC)。SIP 是将具有独立功能(传感器、接口电路、执行器等)的芯片封装在一起形成一个全功能系统,因此又称为多芯片组装技术(Multi Chip Module, MCM);SOC 是将所有功能模块制作在一个芯片上形成全功能单片系统。目前来说二者各有优劣,各有发展。但是从科学研究的角度来说,SOC 是我们不懈追求的目标。

沿着模块化电子鼻、封装内系统电子鼻到单片电子鼻的研究道路,电子鼻以势不可挡的速度向前推进。早在 1995 年,Abdel-Aty-Zohdy H.S.等人就开始了适用于气体传感器阵列的接口集成电路的设计^[19],并于 1998 年公布了带有人工神经网络处理单元的专用集成电路(ASIC)^[20],能够实现使用 4 传感器阵列辨别 4 种有机气体。2001 年,P.-F. Ruedi 等人在 IEEE 会议上报道了一种 SIP 电子鼻^[21],其结构见图 1-2(a),该系统能够控制传感器的工作电压,对 $5\text{k}\Omega\sim 100\text{M}\Omega$ 之间的电阻进行采样并转换成数字信号。同年,瑞典的物理电子实验室(Physical Electronic Lab, PEL)在《自然》(Nature)

杂志上报道了一种单片电子鼻系统^[22]，集成了 3 种类型的传感器（聚合物电容型、悬臂梁质量型、电热卡计型）和数字接口电路、A/D 转换电路、传感器控制电路、电源管理电路和数字接口总线。此后带有接口控制电路的电子鼻芯片的报道接踵而至^[23-31]。



(a) SIP 电子鼻^[21]



(b) SOC 电子鼻（芯片尺寸：7×7mm）^[23]

图 1-2 智能电子鼻

纵观现有的单片电子鼻的报道，其结构主要包括气体传感器、气体传感器的加热控制电路（恒温或温度调制）、传感器的接口电路、A/D 转换电路、电源管理电路及接口总线。芯片的输入/输出主要通过接口总线进行，部分电子鼻芯片增加了串口通信电路^[32]。由于使用了标准总线接口，该电子鼻芯片如同一般电子元件，可以直接和微处理器相连，简化了仪表设计电路的复杂性，信号进入微处理器后通过嵌入其中的信号处理算法识别和量化被测气

体。但是，同时可以看出，这种单片电子鼻并非一个完整的“系统”。

电子鼻的各个环节仍然存在许多需要解决的问题：作为仿生器件，人类及哺乳动物的嗅觉机理尚需深入了解；气体传感器的稳定性、重复性、抗干扰性等特性需要改进；气体传感器阵列的优化，包括传感器的种类、阵列维数的确定、余度配置等；针对实际问题的复杂性，构造切实可行的信号处理和模式识别算法；通用意义上的电子鼻设计原则和方法；信号处理算法的集成电路实现；完整功能的单片电子鼻系统的实现等。

□1.3 电子鼻系统关键技术

由电子鼻系统的原理框图可以看出，电子鼻系统的关键技术主要包括气体传感器技术、阵列技术、温度调制技术及信号处理与模式识别技术。

1.3.1 气体传感器

与哺乳动物的嗅觉系统类似，气体传感器是电子鼻系统的“气味感受细胞”，感受到气味时就将信号通过接口电路及一些预处理电路（生物嗅觉中对应的部位为“嗅球”）传到信息处理中心（大脑），通过“大脑”内的嗅觉信号处理单元，完成对气味的识别和简单量化，并发送相应的控制信号。

气体传感器是集物理性能、化学性能、电性能于一体的微电子器件。目前市面上气体传感器种类繁多，分类方法很多。根据所测量信号的类型，气体传感器主要可以分为：气敏材料在吸附气体后，它的表皮电阻发生变化的金属氧化物半导体传感器（Metal Oxide Semiconductor, MOS）、测量阻抗发生变化的导电聚合物气敏传感器（Conductive Polymer, CP）、其振荡频率发生变化的石英晶体微天平（Quartz Crystal Microbalance, QCM）和声表面波传感器（Surface Acoustic Wave, SAW）及测量电流变化的安培计传感器等。另外，还有固体电解质气体传感器、光学式气体传感器等。当前研究和用最广泛的是 QCM、CP 和 MOS 类型，关于 QCM、CP 和 MOS 传感器的性能对比可参见表 1-2^[102]。