

骆德汉 著

# 仿生嗅觉原理、 系统及应用



科学出版社

# 仿生嗅觉原理、系统及应用

骆德汉 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书从仿生嗅觉原理、系统构成及应用三个方面介绍仿生嗅觉的生理学基础和系统原理与技术，并结合作者的研究工作，详细叙述了几个典型的应用案例。

本书适合仿生嗅觉、生物医学工程、生物化学传感器、信息科学及人工智能等学科科研工作者阅读，也可供对仿生学和智能仪器系统等交叉学科感兴趣的大专院校师生学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

仿生嗅觉原理、系统及应用/骆德汉著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-035917-9

I. 仿… II. 骆… III. 嗅觉模拟-仿生-研究 IV. Q811.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 258427 号

责任编辑: 魏英杰 韩 默 / 责任校对: 朱光兰

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012 年 11 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 11 月第一次印刷 印张: 13 3/4

字数: 265 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

嗅觉作为生物了解外界信息的一个有效途径，与其他的感知途径（视觉、味觉、触觉、听觉）同样重要，并与之形成互补，在人类生活和工作中发挥着不可缺少和不可替代的作用。但是由于嗅觉形成机理复杂，人们对其缺少足够的理论认识和指导，缺乏有效获取仿生嗅觉信号的传感技术和手段，以致在 20 世纪，仿生嗅觉研究一直进展缓慢，远落后于机器视觉的发展。但各国科学家并没因此而停止对仿生嗅觉的研究，相反，近二十年来，各国科学家更是锲而不舍，一直在坚持不懈地努力探索嗅觉机理和新型材料与技术，试图早日突破制约仿生嗅觉快速发展的嗅觉传感器的瓶颈问题。

2004 年度诺贝尔生理学/医学奖获得者美国科学家 Richard Axel 和 Linda Buck 破解了“嗅觉之谜”，发现了气味受体和嗅觉系统的结构组成，阐明了人体嗅觉系统的工作机理，为仿生嗅觉的研究和发展奠定了理论基础；而近年来的材料科学、微电子学及其微加工技术的发展与应用，为仿生嗅觉的实现奠定了技术基础，使得开发商用嗅觉传感器成为可能。特别自 20 世纪 80 年代科学家提出阵列传感器概念之后，国际上研究仿生嗅觉的热潮一浪高过一浪，仿生嗅觉的研究获得了前所未有的快速发展，并取得了可喜的研究成果。目前国外已经有数十家公司开发出了基于仿生嗅觉原理的电子鼻系统，并在多个领域中获得初步应用。

本书阐述的大部分内容来自于本团队近年来的研究课题：国家自然科学基金“基于仿生嗅觉的辛味中药材气味指纹图谱研究”、安徽省自然科学基金“纳米生物电子传感理论与技术的研究”、广东省自然科学基金“自然态计算机嗅觉/味觉信息获取与关联方法的研究”、“基于机器嗅觉/味觉的中药五味理论（辛味）研究”的研究成果；部分内容来自于本团队的公开发明专利：《基于导电聚合物的仿生嗅觉传感材料及其制备方法》、《基于仿生嗅觉的中药材气味鉴别方法及其装置》、《一种嵌入式仿生嗅觉的气味识别方法及装置》、《一种基于仿生嗅觉的辛味中药材气味指纹图谱构建系统》和计算机软件著作权《仿生嗅觉气味分析识别软件》等成果。全书内容新颖、翔实、原创性强，处于当今国际该领域的研究前沿。

本书是我们团队在多年研究积累的基础上共同完成，其中广东工业大学信息工程学院陈益民副教授完成第三章和第四章部分的内容，广东药学院刘红秀讲师分别完成第五章、第六章及第八章的部分内容，其余内容由作者与所指导的历届研究生，包括许广桂、邹宇华、庄家俊、邓炳荣、伍世元、李江勇、邵雅雯、武

琳等同学共同完成。

北京航空航天大学陈伟海教授、同济大学刘钊教授、中山大学印鉴教授分别审阅了本书的部分书稿，并提出了宝贵的意见和建议。同时，本书出版得到科学出版社的帮助，在此一并表示由衷的感谢！

仿生嗅觉是一门多学科交叉的新技术应用科学，涉及的学科领域和技术范围宽广，具有很强的综合性。由于作者的知识和经验所限，加之我们的研究和部分成果还处于探索之中，对书中的某些内容难以准确把握，错误和不妥之处在所难免，恳请读者给予批评和指正。

作 者

2012年2月于广州

# 目 录

## 前言

<b>第一章 概述</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 仿生嗅觉的发展历程 .....	2
1.3 仿生嗅觉的应用领域 .....	3
1.4 仿生嗅觉的技术展望 .....	5
1.4.1 传感器技术 .....	5
1.4.2 嗅觉神经芯片 .....	6
1.4.3 气味数字化、重现及网络化传输 .....	8
<b>第二章 仿生嗅觉原理</b> .....	11
2.1 仿生嗅觉的生理学基础.....	11
2.1.1 人体嗅觉生理结构 .....	11
2.1.2 嗅觉的形成过程 .....	13
2.2 仿生嗅觉系统的结构、理论与技术.....	15
2.2.1 仿生嗅觉基本结构 .....	15
2.2.2 仿生嗅觉理论基础 .....	16
2.2.3 仿生嗅觉技术基础 .....	18
<b>第三章 仿生嗅觉传感</b> .....	21
3.1 仿生嗅觉传感器.....	21
3.1.1 金属氧化物半导体传感器.....	21
3.1.2 导电聚合物传感器 .....	25
3.1.3 质量型气敏传感器 .....	28
3.1.4 化学电容型传感器 .....	31
3.1.5 电位型气敏传感器 .....	32
3.1.6 其他气敏传感器 .....	34
3.2 仿生嗅觉传感器阵列.....	35
3.2.1 仿生嗅觉传感器的选型原则 .....	35
3.2.2 传感器阵列构造的基本准则 .....	36
3.2.3 阵列的响应模型 .....	38
<b>第四章 仿生嗅觉系统采样方法以及信号调理</b> .....	41
4.1 气味的采样.....	41

4.1.1	顶空采样法	41
4.1.2	扩散采样法	44
4.1.3	渗透采样法	45
4.1.4	起泡式采样法	46
4.1.5	采样袋方法	47
4.2	气味的预浓缩处理	48
4.2.1	预浓缩装置	48
4.2.2	去湿处理	49
4.2.3	使用预浓缩管提高选择性	49
4.3	接口电路及信号处理	50
4.3.1	接口电路	50
4.3.2	信号放大电路	61
4.3.3	A/D转换电路	65
4.4	信号预处理	70
4.4.1	基线处理	71
4.4.2	压缩处理	71
4.4.3	标准化处理	72
4.5	传感器漂移及补偿	75
4.5.1	漂移现象及漂移的物理原因	75
4.5.2	传感器漂移举例	77
4.5.3	模型构建策略	79
4.5.4	漂移补偿	81
<b>第五章</b>	<b>仿生嗅觉系统气味信息统计学分析</b>	<b>87</b>
5.1	气味信息的特征选择与提取	88
5.1.1	特征选择	88
5.1.2	特征提取	90
5.2	气味信息的预处理	91
5.3	主成分分析	92
5.4	独立成分分析	95
5.5	聚类分析	96
5.6	线性判别分析	99
5.6.1	Fisher 鉴别准则	99
5.6.2	最大散度差鉴别准则	101
5.6.3	其他线性分析简述	102
5.7	支持向量机分析	103
5.7.1	原理及算法描述	103

5.7.2	核函数及模型选择	105
<b>第六章</b>	<b>仿生嗅觉系统人工神经网络分析</b>	108
6.1	神经网络模型	108
6.2	反向传播多层前馈神经网络	112
6.2.1	反向传播神经网络结构	112
6.2.2	BP学习算法	113
6.3	其他神经网络	116
6.3.1	遗传神经网络	116
6.3.2	径向基函数神经网络	124
6.3.3	概率神经网络 PNN	126
6.3.4	竞争特征映射神经网络	127
<b>第七章</b>	<b>常见商用仿生嗅觉系统</b>	129
7.1	德国 AIRSENSE 公司 PEN 系列电子鼻	129
7.1.1	PEN3 的系统构成及检测原理	129
7.1.2	课题组开发的分析与处理系统	136
7.2	Cyranose 320 便携式电子鼻	138
7.2.1	Cyranose 320 的简介	138
7.2.2	Cyranose 320 的工作原理	140
7.3	法国 Alpha MOS 公司 FOX 系列电子鼻	142
<b>第八章</b>	<b>仿生嗅觉系统的应用</b>	145
8.1	在中药(材)识别中的应用	145
8.1.1	中药材种类识别	146
8.1.2	道地中药材鉴别	153
8.1.3	中成药百草油质量分析	159
8.2	在焙烤食品工业中的应用	162
8.2.1	焙烤食品气味的信息获取	163
8.2.2	广式焙烤食品的质量评判	167
8.3	在水产品中的应用	181
8.3.1	鱼类识别	181
8.3.2	鱼的新鲜度估计	183
8.4	在精细化工工业中的应用	187
8.5	在卷烟行业中的应用	191
8.5.1	卷烟品牌识别	191
8.5.2	卷烟等级识别	195
	<b>参考文献</b>	205



# 第一章 概 述

## 1.1 引 言

人类通过视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉的感知不断地接受各种信息，其中嗅觉作为我们了解外界气味信息的有效途径，与其他的感知途径同样重要，并且与之形成互补，在很多场合发挥着不可替代的作用。

气味是物质的重要特征之一，能代表物质的本质。物质所产生的气味就是对外界传播其本质特征的信息。对于一般无机物和有机物来说，气味代表着该种物质的挥发特性。具有挥发性的物质，其稳定性相对较低、活性较强。一种物质对应一种气味，没有气味完全相同的两种不同物质，物质不变，其气味一般不变，一旦气味改变了，物质一定发生了质的改变。因此，物质的气味最能代表物质的本质。没有绝对不挥发气味的物质。

气味感知是气味刺激生物嗅细胞而引起的感觉，即嗅觉。当气体分子作用于动物嗅觉细胞时，产生神经冲动，经嗅觉神经传导，最后到达大脑皮层的嗅觉中枢，形成气味感知。无论是高级动物还是低级动物，都会对周围环境的气味进行感知并作出适当反应。但任何生物的嗅觉感知都有一定极限范围，也就是说存在一定的感知盲区，即对气味种类和气味浓度的感知有一定的区域局限性。一般生物嗅觉的感知范围与它的生存需要有关，因此，对人类生存和生产相关的各种气味进行准确的感知（检测）是必要的。

目前在气味定性、定量检测与分析过程中，主要使用化学分析和物理仪器分析两种方法。化学分析方法是利用化学物质自身的化学性质进行定性或定量分析，主要是基于人们对已知物质的化学性质的分析。这种方法通常可以进行物质定性和定量分析。然而，使用化学分析方法用于对气味质量分析效果却不佳。例如，酒的香气质量是多种致香成分的综合反映，想要通过化学方法完全测出这些成分不仅非常复杂，还要花费很多时间和费用，有些成分含量极低，测试非常困难。

气味的物理仪器分析方法是建立在物理基础之上，主要是依据光波与物质气味所存的关联特性而工作。目前物理仪器分析方法主要有红外光谱、紫外光谱、质谱、原子吸收光谱、气相色谱、液相色谱等。使用物理仪器检测气味，可以使检测灵敏度提高、检测下限也大大降低，从而提高了气味检测分析的范围和准确

度。但此类设备结构较复杂、操作烦琐，经常需要对被测对象进行预处理，导致测试周期加长。

由于化学分析方法和物理仪器分析方法不能对一些复杂物质的气味进行检测分析，特别是对一些含有不同气味的痕量物质，因此，这两种方法目前还只能停留在人的嗅觉直接品鉴中。例如，酒类、香烟类、茶叶类等食品的质量主要是靠人的嗅觉感官和味觉感官来进行评判的。感官评判带有很大的主观因素，由于受到经验、情绪等主观因素的影响，感官评判结果随鉴别人员的不同而存在相当大的个体差异，即使是同一人员也会随其自身身体状态、情绪变化等而产生不同的结果。另外，人的感觉器官不能用于检测有毒气体，也不能连续长期工作和远程操作。因此感官评判存在主观性强、重复性差、耗时长和成本高等缺点。

鉴于化学分析方法和物理仪器分析方法及传统感官评定的不足，人们期望能有一种客观准确的嗅觉鉴别方法来代替目前的气味检测分析方法。于是仿生嗅觉理论与技术在这种需求下被寄予期望和重视。

仿生嗅觉又称为机器嗅觉或人工嗅觉，俗称电子鼻，是模拟生物嗅觉的一种仿生技术，其工作原理是通过模拟生物嗅觉功能对被测气体进行感知、分析、识别和判断，从而实现人的嗅觉功能，甚至能够扩展人的嗅觉功能。但长期以来，由于人们对生物嗅觉基础知识了解甚少，在多年的探索中也未能很好地理解嗅觉机理的根本问题，从而导致仿生嗅觉技术与应用远落后于当今的仿生视觉技术与应用。

近年来，随着微电子制造技术、传感器技术以及计算机技术快速发展，仿生嗅觉技术的研究取得了新的进展，其成果也开始在相关领域获得初步应用。

## 1.2 仿生嗅觉的发展历程

人类思索气味的问题至少可以追溯到公元前 4 世纪的古希腊时代。亚里士多德认为，气味是由物质发出的辐射，被我们感觉到。比亚里士多德稍晚的另一位希腊学者伊壁鸠鲁，在德谟克利特的原子论的基础上解释了嗅觉：不同形状的原子弹鼻子感觉到不同的气味。事实上，人类对气味的追索在一定程度上改变了人类的历史。

在过去的几十年中，国际上有很多科学家一直活跃在这一领域，包括 Wilkens、Dravnieks、Tanyolac、Herberhold、Persaud、Dodd 以及 Abe 等，他们都曾经尝试设计和制造包含生物嗅觉系统概念的设备。1961 年，Moncrieff 制成了一种机械式的气味检测装置，它可以检测简单气体成分。1964 年，Wilkens 和 Hatman 研制出了世界上第一个仿生嗅觉系统，其原理是利用气味在电极上的氧化-还原反应来检测气味成分。1965 年，Buck 等利用气味调制电导和 Dravieks

等利用气味调制接触电位方法，分别研制了另外两种不同原理的仿生嗅觉装置。1967年，日本 Figaro 公司率先将  $\text{SnO}_2$  金属氧化物半导体气敏传感器商品化，为现代仿生嗅觉发展奠定了信号传感检测基础。由于当时气敏传感器制造技术的限制，不能形成传感器阵列对气味进行检测，使得仿生嗅觉技术研究徘徊了 20 多年。

1982年，英国 Warwick 大学的 Persaud 和 Dodd 模仿哺乳动物嗅觉系统的结构和机理，提出了阵列传感器技术和电子鼻的概念，在这之后，人工嗅觉系统的研究出现了较快的发展。由于气味的特征与化合物的组合及浓度有着既复杂又非线性的密切关系，故采用阵列传感器系统来模拟表征人类嗅觉更为合理，这一概念的提出为仿生嗅觉奠定了可实现的技术基础。

1989年，北大西洋公约组织举办了一次关于化学传感器信息处理研讨会，该会议对电子鼻做了如下定义：电子鼻是由多个性能彼此重叠的气敏传感器和适当的模式分类方法组成的具有识别单一和复杂气味能力的装置。随后，于 1990年举行了第一届电子鼻国际学术会议，并在 1994年诞生了第一台商业化的仿生嗅觉仪器。目前具有代表性的仿生嗅觉仪器有：法国 Alpha-MOS 的桌面型 FOX 系列、德国 AIRSENSE 公司的 PEN 系列和美国加利福尼亚 Cyranosciences 公司的 Cyranose 等产品。

国内对于仿生嗅觉技术的关注始于 20 世纪 90 年代初期，当时仅限于对国外有关研究的报道、专业论文的翻译和嗅觉模拟技术的综述。目前，研究较多的是使用国外已有仿生嗅觉系统开展相关应用性研究，而由于诸多条件限制，开展仿生嗅觉系统装置研究与开发的则较少。

### 1.3 仿生嗅觉的应用领域

仿生嗅觉作为一种新兴、实用和复杂的仿生技术，在过去的几十年里一直是国际研究的热点。随着人们对其技术研究的不断深入，仿生嗅觉相关软硬件发展迅速，在此基础上，对它的应用研究也已受到人们的重视，不久的将来可望在以下领域中获得推广应用。

在食品工业中，烟酒产品的品质鉴别，长期以来都是依靠专家的感官，即嗅觉和味觉来进行主观评定。然而，专家评定方法往往受到人的生理、经验、情绪、环境等主客观因素的影响，难以得到科学、客观、准确的结论，因此人们期待一种更加准确、客观、快速的仿生评价方法和技术。

在精细化工行业中，如在香精香料、化妆品生产中，香气是评价其内在质量的主要指标之一。传统方法是采用专家评定和化学分析相结合。这种评定方法存在着很多弊端，因为人的感官易疲劳，并且还具有适应性和习惯性，而化学分析

方法所需时间长,并且得到的结果往往与人的感官感受又有差异。所以,仿生嗅觉技术可以在新产品开发和在线质量控制方面得到推广使用。

在中药材或者中草药的品质鉴别与分类中,大多中医师将中药材的气味当做产地、品种和质量鉴别的重要依据之一。药材的气味与所含成分、性质有关,每一种中药材都有其自身特殊的气味,有的甚至还具有很浓的刺激味。如鱼腥草具鱼腥气,白鲜皮具羊膻气,香加皮虽然与地骨皮形态相似,但香加皮具有浓厚的香气可与地骨皮区别。传统上使用眼看、手摸、鼻闻、口尝、水试、火试等简易的方法,通过观察中药材的形状、大小、气味、质地、颜色变化等来判断中药材的真伪优劣。然而,基于人体感官的经验鉴别法存在着不可避免的缺点,使得对中药材评判重复性差,准确度低,难以形成标准。如果运用仿生嗅觉技术获取中药材或者中草药的气味信息后,经过模式识别技术处理就可避免上述缺点,可以达到客观、快速、准确地对中药材或中草药进行真伪识别和品质评定的目的。

在医疗诊断中,传统方法之一是从人体中抽取出一些液体进行化验分析,其操作比较费时。有研究表明:患有疾病的人呼出的气体中会出现某些特定成分,如肝硬化患者的呼气中会出现脂肪酸,肾衰竭者的呼气中有三甲氨,肝癌患者的呼气中会存在烷类和苯的衍生物等。如果用仿生嗅觉技术直接检测患者呼出的气体并进行分析,就能简单快捷地对疾病进行诊断和医治。

在海关检查中,工作人员都会使用警犬的嗅觉来检查乘客行李中是否有危险品(如炸药)和违禁品(如毒品)等,但是训练和饲养警犬需要花费大量的资金和人力,并且警犬的嗅觉受它本身的情绪影响。如果采用仿生嗅觉技术并结合仿生视觉技术就能够更加精确和客观地得到检查结果。据报道,国外已有一种准确的仿生嗅觉系统,其功能超过了猎犬和警犬本领,能分辨出多种不同气味,可以很好地帮助警方搜捕罪犯和搜查毒品。

人类对外太空的探索是一个意义深远的课题。令人兴奋的是,仿生嗅觉系统也可以在寻找太空生命中发挥其作用。近些年来,在火星生命探索中,科学家们为了揭开火星上是否存在水和生命的秘密,先后在火星探测器上装有先进的精密气味检测装置,科学家们希望能闻到甲烷的气味,真正找到火星上有生命存在的直接证据。

在人们的日常生活中,周围环境总是会存在一些有害的气体,如  $H_2S$ 、 $SO_2$ 、 $CO$ 、 $NO$  和一些易挥发性物质,如苯、甲醛等。这些气体对人体的健康有着一定的影响,并存在着事故隐患,人们期待着能有一种像如今广泛应用的仿生视觉监控技术的仿生嗅觉监控技术来有效地监测我们周围环境的有害、有毒气体,并把它们控制在适度的范围之内,以此来保护我们正常的日常生活,保障人们的生命和财产安全。

综上所述,仿生嗅觉技术应用研究正在不断深入发展,并在以下行业(如

表 1.1 所示) 具有广阔的应用前景。

表 1.1 仿生嗅觉主要应用领域

应用领域	应用举例
食品工业	饮料、烟草、中药材(中草药)、食品质量监控
精细化工	香精香料、化工材料
医疗卫生	药品、疾病诊断、健康监测
农业工程	化肥及农药分析、农产品识别
环境监控	空气污染、有害、危险品监控
国防安全	公安、海关监测、爆炸性气体监测
航天航空	机舱环境监测、太空环境监测
消防预警	煤矿、油田、油库、建筑物报警
汽车工业	发动机控制、汽车排气质量监测、车内气体检测

## 1.4 仿生嗅觉的技术展望

仿生嗅觉技术包括仿生嗅觉系统硬件技术、软件技术及仿生嗅觉系统应用技术三个方面, 其中系统硬件技术以气体传感器阵列和嵌入式 CPU 为核心, 加上进气装置和加热控制模块等构成; 软件技术是基于嵌入式操作系统和智能信息处理算法, 研究开发系统控制程序和气味信息分析识别程序; 应用技术是基于系统硬件和软件环境, 研究拓展仿生嗅觉系统应用领域范围和提高仿生嗅觉系统应用的可靠性、准确性和实用性。随着仿生嗅觉技术不断发展和人们对嗅觉工作过程的深入了解, 仿生嗅觉系统的功能必将日益增强, 在越来越多的场合取代人鼻的作用, 甚至将大范围超越和延伸人类嗅觉功能, 其体积也会越做越小, 将会从台式发展到便携式, 再发展为微型式, 其成本也会大幅度降低。可以预见, 未来的仿生嗅觉技术将朝着强化技术、提高性能、降低成本、拓展应用等方向发展。

### 1.4.1 传感器技术

嗅觉传感器是仿生嗅觉硬件技术发展的瓶颈问题, 它是制约仿生嗅觉技术快速发展的主要因素, 也是全世界科学家专注研究的重点领域。

嗅觉传感器与一般气体传感器不同, 它是由多个具有交叉灵敏度气体传感器组成的阵列式传感器。如果要提高仿生嗅觉系统的功能和拓宽其应用范围, 必须首先提高阵列传感器性能和特性, 并减小其体积。因此, 研究新型传感器敏感材料, 灵活运用微机械加工技术、敏感薄膜形成技术、微电子集成技术等现代制造技术是嗅觉传感器发展的方向之一。

## 1. 新材料研究

目前金属氧化物半导体材料  $\text{ZnO}$ 、 $\text{SnO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等用于气体传感器已有较成熟的理论支撑,特别是在  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 、 $\text{CO}$  等单成分气体检测方面,基于这些材料制成的传感器具有较好的灵敏度和稳定性。然而,在嗅觉传感器材料研究方面,目前相关理论还不够完善,还不具有成熟理论能指导嗅觉传感器的生产和制造。目前这方面的工作只能以实验和实践为主导,朝着以下两个方向发展:一是利用化学修饰改性方法,对现有气体敏感膜材料进行掺杂、表面修饰和改性等处理,并对成膜工艺进行改进和优化,提高材料的稳定性、重复性和交叉灵敏度;二是研发新的气体敏感膜材料,如复合型和混合型半导体气敏材料、高分子气敏材料,使得这些新材料对不同气体具有高灵敏度和高稳定性。由于有机高分子敏感材料具有成本低、制膜工艺简单、易于与其他技术兼容、能在常温下工作等优点,也是嗅觉传感器材料的研究热点。

## 2. 传感器阵列微型化

仿生嗅觉系统是由传感器阵列获取气体信息的。传感器阵列是将不同气敏传感元件集成阵列式,利用各种敏感元件对不同气体的交叉敏感效应,对混合气体的各种成分同时检测,从而得到混合气体的组成信息,所以传感器的广谱特性是最重要的参数之一。具有广谱特性的气敏传感器具有对多种气体同时产生响应的特点,并且不同成分的反应强弱不同,例如:第一种气体可能会对某一个传感器产生较高的响应,但却对另一个传感器不太敏感;第二种气体可能会对其他的传感器产生较高的响应。单个气敏传感器对不同气体的广谱特性响应模式是不同的,但传感器阵列对单一气体或多成分气体的广谱特性响应模式是确定的、唯一的,这一点非常重要,它是仿生嗅觉系统气味信息获取的重要基础。

目前仿生嗅觉系统传感器阵列所采用的敏感材料主要是金属氧化物半导体和导电聚合物,配置的阵列单元数量从几个到几十个不等。从仿生角度考虑,现有的这些嗅觉传感器阵列的嗅觉单元数远少于人类鼻腔所拥有的嗅觉细胞数,其体积也大于鼻腔嗅上皮,因此,目前常见的这几种嗅觉传感器阵列还不是真正意义上的仿生嗅觉传感器。但可以相信,随着各种新材料、新原理和新技术的不断发展以及微机械电子加工技术的应用,嗅觉传感器阵列微型化将成为可能,在不久的将来,一种“嗅觉单元数”足够多、体积足够小、性能足够稳定的微型化集成嗅觉传感器阵列必将被研制和应用。

### 1.4.2 嗅觉神经芯片

近年来,生物传感器得到了迅速发展,突破了原来以酶电极为代表的传统生

物传感器技术,出现了可以连续传输受体与配体结合的实时信息亲和性生物传感器,尤其是以整个细胞作为敏感元件的细胞传感器,目前已经可以在微电极阵列和多种硅器件表面培养并固定多种神经细胞和组织,构成神经元与半导体硅基底芯片材料相耦合的神经芯片。神经芯片是用微机械加工技术在玻璃或硅基底上刻蚀出一个由金属微电极或场效应管栅极所构成的阵列,神经细胞在器件表面固定并培养。神经芯片是神经细胞和外围电路之间的桥梁,通过它可以将神经元的静息电位和动作电位等信号传递给外围电路,实现电生理活动的实时测量。

嗅觉神经芯片是以仿生嗅觉细胞传感器为基础,在芯片的器件表面培养嗅觉感受神经元,气体分子与神经元膜表面嗅觉受体相互作用,产生动作电位,达到检测气体的目的。

图 1.1 为直接用神经元细胞作为敏感材料的仿生嗅觉芯片构造示意图。在图 1.1 中,微电极阵列芯片放置在一个流通腔中,通过气味、药物或者化学物质对培养细胞进行刺激,同时,该芯片可集成阻抗谱、pH、氧和乳酸等多种传感指标,便于对细胞形态功能等生物活性作整体分析。

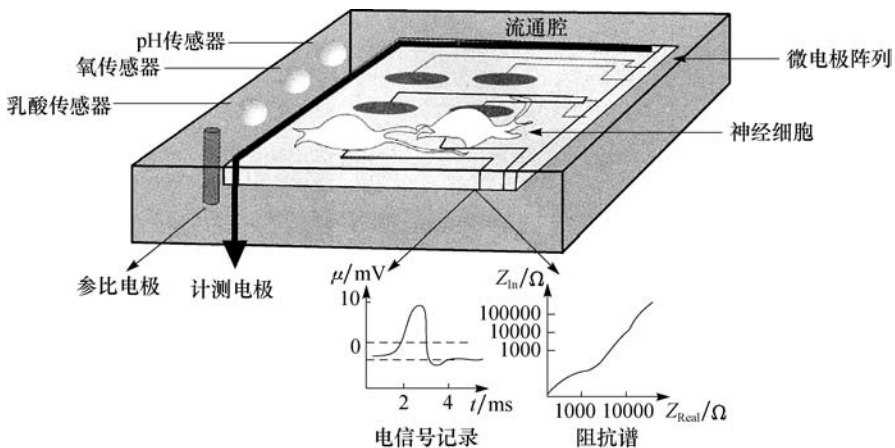


图 1.1 仿生嗅觉芯片结构示意图

用基底神经元阵列代替嗅觉感受神经元,气味分子与基底神经元阵列所产生的电生理变化与气味分子作用于嗅觉受体细胞而产生的电生理变化虽然不完全一样,但其电生理特性还是反映了细胞功能电特性变化,这为后续嗅觉神经芯片的研究奠定了基础。

虽然仿生嗅觉神经芯片的研究还处于起步阶段,但是从嗅觉生物学和芯片技术的研究基础看,构建出既能实现气味检测又能对生物嗅觉编码过程进行理解的仿生嗅觉芯片已具有较好的可能性。

### 1.4.3 气味数字化、重现及网络化传输

当前, 仿生视觉和仿生听觉的研究已取得巨大成功, 其技术已经非常成熟, 主要体现在各种视听系统快速发展和广泛应用等方面, 而仿生嗅觉技术的发展则远落后于它。

人们早在 19 世纪就能利用科学手段对声音和图像及影像信息进行模拟记录和重现, 并随着电子技术和计算机技术快速发展, 声音和影像的模拟信息实现了数字化, 因此, 随着互联网技术的出现, 已数字化的音、视频信息可以在数秒之内传播到世界任何一个有互联网的角落, 并且能通过音响、影像设备或显示器、打印机等设备重现出来。

声音可以用声波来描述, 频率和强度是其主要特征参数; 影像可以用色彩来描述, 红、绿、蓝是基色, 任何颜色都可以用这三种原色组合而成。在相关技术支持下, 一旦发明了能够精确描述声音和影像的科学方法, 就能研制出相应的记录与重现装备。然而, 与声音和图像特征相比, 气味特征要复杂得多, 它既不能像声音一样可以用几个物理量来描述, 也不能像影像那样仅用几种基色组合而成, 再加上人体嗅觉机理的复杂性, 到目前为止还没人提出能用于准确描述气味的科学方法, 这就是气味迟迟不能实现数字化和重现的根本原因之一。

虽然目前仿生嗅觉技术只用于气味的检测和识别, 还不具备气味信息网络化传输和复现功能, 但我们可以将仿生嗅觉技术对气味信息进行检测的过程看作是对气味信息的数字化过程。从这个角度来说, 气味可以用仿生嗅觉技术进行数字化描述, 并可将它用一种类似打印机设备的气味播发器重现出来。气味播发器含有基气味。

图 1.2 是一种实现气味数字化和气味重现的基本思想。图 1.2 中的嗅觉仪是一个仿生嗅觉系统, 用于气味的检测、存储和转换, 即把气味信息转化为数字信号, 相当于气味摄像头; 播发器相当于气味打印机, 它能根据嗅觉仪输出的气味数字信息, 采用不同基气味进行调配, 然后打印出被检测气体, 即还原出被检测气味。在该系统中, 播发器的设计思想类似于彩色打印机设计思想。彩色打印机输出的颜色来源于墨盒调制, 而播发器输出的气味则来源于基气味的配伍。虽然, 播发器通过基气味的配伍产生气味复原要比打印机通过墨盒调制色彩输出要复杂得多, 但基于多成分气味可以由一定数量的基气味按一定比例混合模拟的思想, 在设计播发器时, 把一定的数量可定义为  $2^n$  种 ( $n$  可根据实际需要选择), 由这  $2^n$  种基气味组成一个调气板, 并通过计算分析, 按一定比例产生多成分气味。



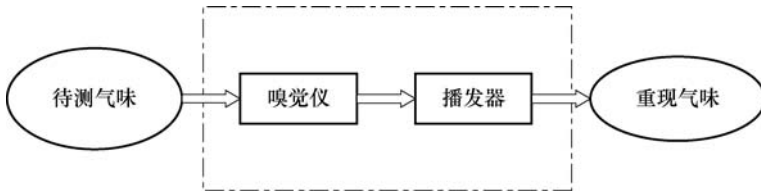


图 1.2 气味数字化与重现原理示意图之一

图 1.3 是另一种实现气味数字化和气味重现原理框图，它由气味记录仪、气味搅拌器、气味配方室等模块组成。其中，气体传感器阵列就是仿生嗅觉系统，用于检测目标气味，气味搅拌器内置若干种基气味，用于产生目标气味。

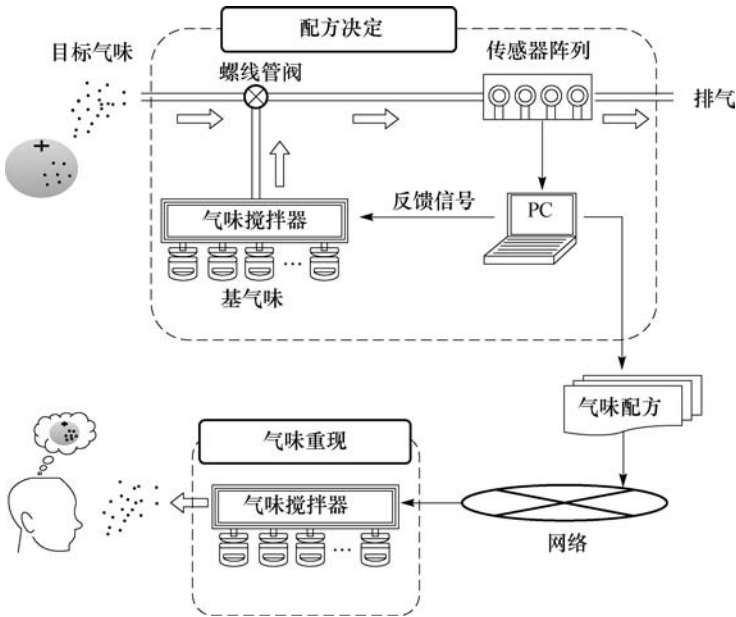


图 1.3 气味数字化与重现原理示意图之二

系统工作过程可用以下步骤描述：

① 目标气味（待测气味）经过电磁阀进入气体传感器阵列，而传感器对其作出响应并把响应信号传送至计算机保存，接着停止对目标气味检测。

② 内置于气味搅拌器的基气味形成混合气味，并开始按一定的流速通过电磁阀，并被送至传感器阵列，传感器阵列对其进行检测，把响应结果送至计算机。

③ 计算机比较目标气味响应和混合气味响应的差距，调整基气味成分，控制气味搅拌器的气味输出，从而改变基气味的混合比例。

④ 已改变混合比例的混合气味再次传送到传感器阵列，其响应结果送至计算机。

⑤ 重复步骤③、④，直至目标气味响应和混合气味响应的差距达到最小，系统就完成了对目标气味的记录（数字化），记录的结果则是所谓的气味配方，即混合气味的混合比例。

⑥ 终端气味搅拌器根据气味配方播放出目标气味，实现了气味的重现。

在上述工作过程中，由于气味配方已经是数字化气味信息，数字化信息可通过网络传输到远距离终端气味搅拌器上，并由终端气味搅拌器重现检测气味，从而可实现气味远距离传输。

虽然气味数字化、重现及网络化传输目前只处于设想和初步研究中，但有理由相信，这一技术在不久的将来就会实现，并且会普及到人们的日常生活中。

## 第二章 仿生嗅觉原理

动物的嗅觉是凭借鼻腔嗅出不同的气味，并作出相应的生理反应。人体对气体的嗅感来自鼻腔内的嗅觉受体细胞（olfactory receptors, ORS），每个嗅觉受体可以探测到数量有限的气体物质。嗅觉受体细胞位于鼻腔内壁嗅觉上皮，虽然嗅觉上皮内只含有限数量的嗅觉受体细胞，但它却能辨别出数以千计的不同气味。

仿生嗅觉是利用气敏传感器模拟人体嗅觉受体细胞，组成一定规模的传感器阵列对不同的气体进行感知。每一个气敏传感器具有一定的交叉灵敏度，能检测到一定数量的不同气体，并将所检测的信息交给计算机处理和识别。

### 2.1 仿生嗅觉的生理学基础

#### 2.1.1 人体嗅觉生理结构

人体嗅觉系统生理结构可用框图 2.1 表示，它由嗅上皮组织、嗅觉球和大脑皮质三部分构成。

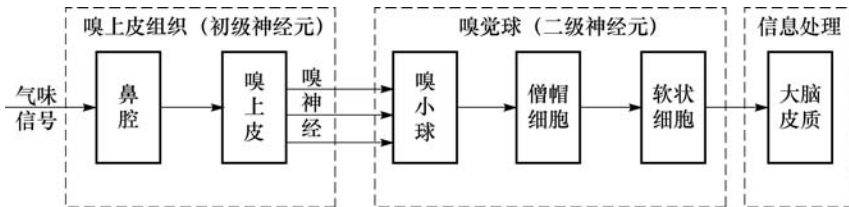


图 2.1 人体嗅觉系统生理结构框图

嗅上皮组织是感知气味的皮质组织，也称为初级神经元，其生理结构如图 2.2 所示。它由三种细胞组成：双极性嗅觉神经元（也称为受体细胞），它的一端是树枝状的纤毛，伸入到上皮组织上的一层  $10\sim 100\mu\text{m}$  厚的黏液层中以捕获气味分子，另一端是轴突，连接嗅觉球；支撑细胞（也称为支柱细胞，是一种神经胶质细胞），其面向黏液层的一端充满了微小的绒毛；基础细胞（如干细胞），能够生成新的嗅觉受体细胞。受体细胞是嗅上皮组织中最重要细胞，它直接感受气味分子，是嗅觉系统接受和处理气味信息的第一阶段。

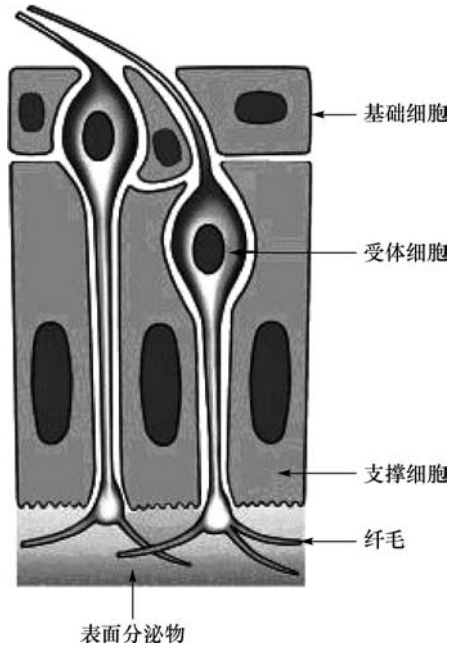


图 2.2 嗅上皮组织生理结构

嗅上皮组织是鼻腔中一个很薄的组织，在老鼠和狗中，它的颜色为淡黄色，很容易被辨别。然而，人体的嗅觉上皮组织是略带桃色的，同鼻腔的呼吸上皮细胞混合在一起，所以难以看到这两个小片组织（大约  $2\text{in}^2$  或者  $13\text{cm}^2$ ）<sup>\*</sup>。

嗅觉球是人体嗅觉系统第二组成部分，其组织结构剖面如图 2.3 所示。嗅上皮组织的嗅觉神经元（嗅觉受体细胞）的轴突聚集在一起并且通过在筛骨中的小孔到达嗅觉球。嗅觉球内部有大量复杂的球状神经原形质（称为嗅小球）形成二级嗅觉神经元。在二级嗅觉神经元中，嗅觉神经纤维链接双极细胞的轴突，嗅小球的神经纤维网链接嗅觉感受神经元的轴突和僧帽细胞的突触。表达同一类气体的嗅觉感受神经元（初级神经元）的信号聚合在嗅觉球内相应的一个嗅小球上。研究表明，嗅上皮所有嗅觉感受神经元轴突分别聚集到数个嗅小球上，而每个嗅小球只接受某一种类型的嗅觉受体的输入。嗅觉球中的局部神经元回路（内、外侧神经丝状层）对经过嗅小球筛选抑制后的气体嗅觉信号进行第一级处理。这样，僧帽细胞的分子接纳的信号范围就比嗅觉感受神经元感受的信号要少得多。因为单个嗅觉感受神经元（受体细胞）能够对多种气体作出响应，其输出的部分信号被嗅小球抑制过滤。

\*  $1\text{in}^2=6.4516\text{cm}^2$

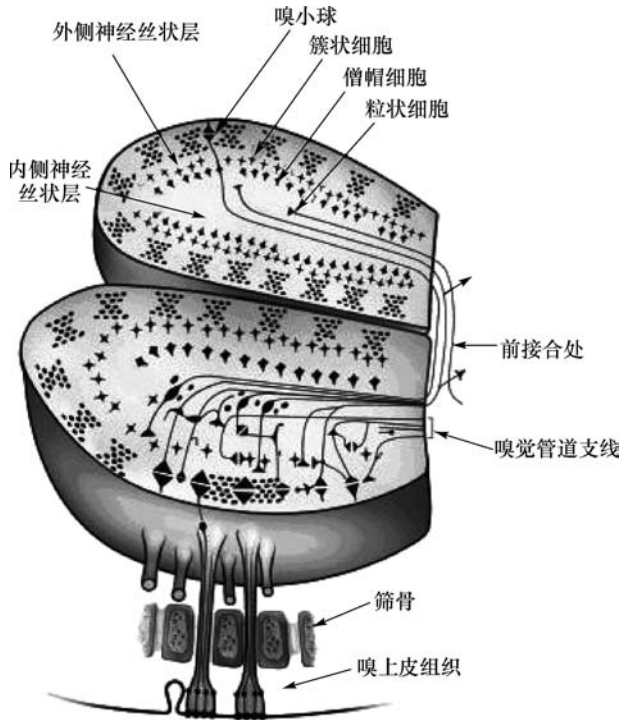


图 2.3 嗅觉球组织结构剖面图

大脑皮质是人体嗅觉系统第三组成部分。嗅觉球的信息由嗅觉管道传送到嗅前核、嗅结节、前梨状皮质和扁桃体，最后传到处处理嗅觉信号的大脑中央。前梨状皮质和扁桃体属于大脑边缘系统，除了处理嗅觉信号之外还负责控制情绪和记忆。嗅觉信息最终被传送到下丘脑和新皮层。研究人员利用脑电图学、正电子放射 X 射线断层摄影术和功能磁共振光谱测定法等非侵入式成像技术发现，前梨状皮质、眶额部以及顶叶和颞叶大脑皮质部分区域的活化程度依赖于气味性质和人在气味激励作用下的愉快程度。嗅上皮组织、嗅觉球和嗅觉神经以及下丘脑会随年龄增长而老化，相应的嗅觉功能也会衰退。

### 2.1.2 嗅觉的形成过程

嗅觉是嗅觉系统对某种气体或挥发性物质分子产生的一种生理反应，是由气味物质分子刺激嗅觉受体细胞（嗅觉感受神经元）引起的，嗅觉受体细胞气味物质作用后产生相应信号。该信号经嗅觉球处理后再通过嗅觉管道传送给大脑皮层，由大脑对嗅觉信号进行分析和判断。人体嗅觉系统的气味信息传导过程如

图 2.4 所示。

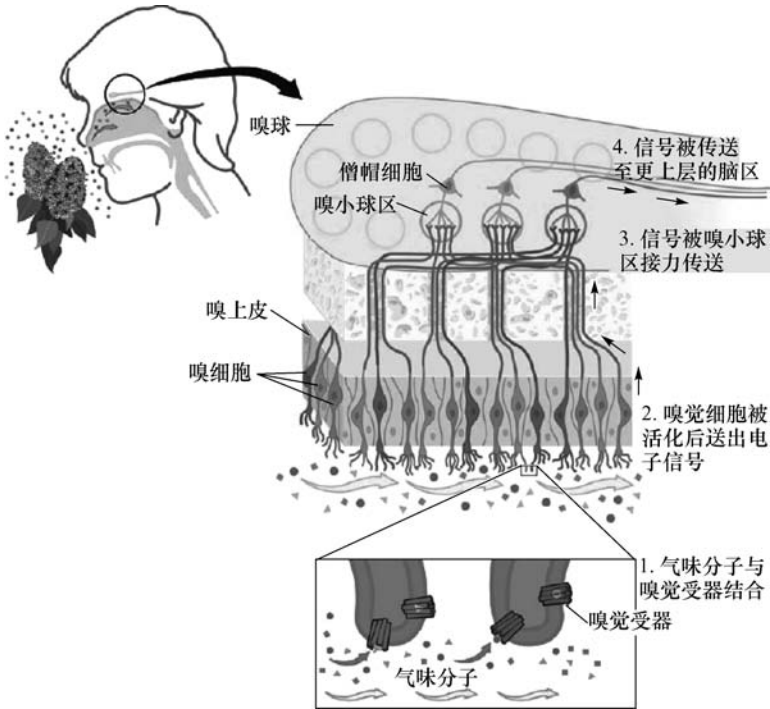


图 2.4 嗅觉系统的气味信息传导图

由 2.1.1 讨论可知，在人体嗅觉系统中，某一种嗅觉神经元（受体细胞）只对某些气体很敏感而不是对所有气体都敏感。但大多数气体是由多种气体分子构成的，因此，多种气体分子可以同时激活多种嗅觉神经元，这就可形成组合编码的气体模式，这种模式就是气体辨别的基本特征。各种嗅觉神经元（受体细胞）对气体的感受特征与其所在嗅上皮区域相关。

嗅觉系统在工作时，嗅觉受体细胞信号传送给嗅小球，传送时服从两个基本原则，即区对区传送原则和嗅小球汇聚原则。也就是说，在嗅上皮特定区域的嗅觉受体细胞信号必须传输给嗅小球内相对应的嗅小球。具有相同特征的嗅觉受体细胞的轴突汇聚于相应的嗅小球中。嗅小球随后又会激活僧帽细胞，每个嗅小球只激活一个僧帽细胞。僧帽细胞然后将信息传输到大脑其他部分。这样，来自不同的嗅觉受体细胞信息组合成与特定气体相对应的模式，大脑最终有意识地感知到特定的气体。

## 2.2 仿生嗅觉系统的结构、理论与技术

### 2.2.1 仿生嗅觉基本结构

仿生嗅觉是模拟人体嗅觉功能对被测气体进行感知、分析和识别，仿生嗅觉系统的结构则是模仿人体嗅觉系统构造而设计。

#### 1. 生物嗅觉系统的电性分析

图 2.1 简单描述了人体嗅觉系统的生理结构。从生物电子学角度分析，当气味作用嗅上皮时，在嗅细胞的胞体膜上产生极化型的感受电位，并在轴突膜上引起不同频率电位输出，通过嗅觉球传入大脑中枢神经。每一个嗅细胞只对一种或几种特殊的气味反应，输出相应的频率电位信号，并且在嗅觉球中，不同嗅小球只接收来自与自己相对应的嗅觉受体细胞信号。从仿生学角度考虑，人体嗅觉系统构成与工作机理可概括为三个部分：

① 鼻腔嗅上皮组织，由它构成初级嗅觉神经元（嗅觉受体细胞），其功能是感受外界气体分子信息并产生相应频率的电信号，它对气体分子的作用具有很高的灵敏度和交叉灵敏度。

② 嗅觉球，它由多个嗅小球和僧帽细胞及软状细胞构成二级嗅觉神经元，其功能是对初级神经元敏感的电信号信息进行调节、过滤、放大等处理，并形成相应气体模式对应的电位模式。

③ 大脑皮层，它接收来自二级嗅觉神经元的的信息电位模式信号，并将电位模式信号进行关联和存储，最终形成脑电信号而完成气体特征的分析、识别与判断。

#### 2. 仿生嗅觉系统的硬件构造

由于仿生嗅觉系统工作原理是模仿人体嗅觉机理，因此，其硬件结构也可以分为三个层次，即气敏传感器阵列、信号处理电路、模式识别系统等，如图 2.5 所示。

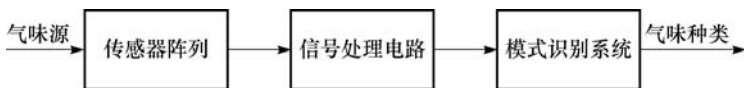


图 2.5 仿生嗅觉系统结构框图

各个层次功能阐述：

① 气敏传感器阵列相当于生物嗅觉系统中的嗅觉受体细胞（初级嗅觉神经

元)，它对被测气体进行吸附和解吸附，并将其转化为电信号。

② 信号处理电路相当于嗅觉球（二级嗅觉神经元）信号传递系统，它对气体传感器阵列产生的信号进行放大、滤波、A/D 转换及传输。

③ 模式识别系统相当于大脑皮层，它对预处理信号进行特征提取和模式分析，并给出气体的识别和判断。

由于气味可分为单一的和复合的，单一气味由一种气味分子形成，而复合气体则是由许多种不同的气味分子混合而成的，在现实生活中，我们所感受到的气味成分都极其复杂，有的是由上百种成分构成的。所以，必须采用多个敏感度不相同的气敏传感器组成阵列模拟生物的嗅觉感受细胞，以获取气味的综合信息，这也是仿生嗅觉系统不同于一般气体检测的关键所在。另外，在功能上，仿生嗅觉具有与生物嗅觉系统相同的特点，即对多种气体或气味敏感，并通过必要处理，能够识别所感受的气体或气味。人体嗅觉系统的结构和仿生嗅觉系统的结构对比如图 2.6 所示。

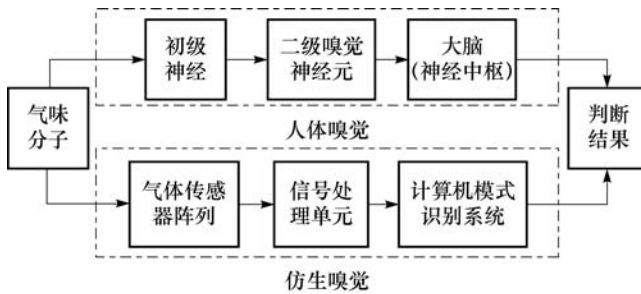


图 2.6 人体嗅觉和仿生嗅觉的结构对比框图

由于仿生嗅觉是模仿人体嗅觉系统构建，所以对人体嗅觉系统的神经生理结构理解决定了仿生嗅觉系统的基本结构和传感器阵列的组成及模式识别方法。

### 2.2.2 仿生嗅觉理论基础

仿生嗅觉系统主要由气敏传感器阵列、传感信号预处理和阵列信号处理及模式识别等部分组成，其工作原理如图 2.7 所示。仿生嗅觉系统与生物嗅觉系统除了在结构上相似，在功能上也具有生物嗅觉功能的特点。当待测气体呈现在仿生嗅觉系统中时，系统中的传感器阵列将气体输入信息转换成电信号，并形成该气体的响应谱。

显然，气体中的各种化学成分将与传感器阵列中的每个传感器发生作用，所以这种响应谱为该气体的广域响应谱。为实现对气体的定性或定量分析，仿生嗅觉系统必须对传感器阵列响应的气体广域谱进行适当的预处理（消除噪声、特征提取、信号放大等），然后采用合适的理论分析方法对其进行分析与识别。



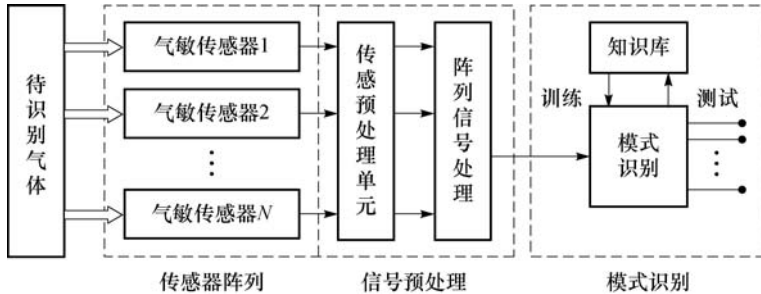


图 2.7 仿生嗅觉系统工作原理

目前，仿生嗅觉系统所用分析理论主要依据系统硬件结构可概括为两大部分，即信号预处理理论和气体分析识别理论，通常由它们构成了仿生嗅觉系统的核心软件部分。信号预处理相当于人体嗅觉系统的二级嗅觉神经元，它对传感器阵列响应的信号进行滤波、转换及特征提取等。目前常用的理论方法是：差分法、相对差分法、对数法、传感器归一化法和阵列归一化法等。这些方法既可以为信号后续处理做准备，也可以利用信号中的瞬态信息传感器阵列进行自校验。气体分析识别理论起着人的大脑功能的作用，它对已进行预处理的传感器阵列响应信号再进行适当的处理，以获得单一气体或混合气体的组分和模式分类，进而完成对气体的定性或定量分析。所谓定性分析主要是指对所测量气体的种类做出正确评价，而定量分析则除了要对气体种类正确评价外，还需对所测量气体的含量及成分进行评价。显然，定量分析的难度要远远大于定性识别。

目前仿生嗅觉系统中分析识别理论与方法采用模式识别理论和方法，主要是用于对气体的定性分析和识别。常用的模式识别算法有：最近邻邻居法（NN）、判别式函数分析法（DFA）、主成分分析法（PCA）、聚类分析（CA）、人工神经网络（ANN）法、概率神经网络（PNN）、学习向量量化（LVQ）、自组织映射（SOM）、统计模式识别法（SPR）和遗传算法（GA）等，其中 PCA 和 ANN 应用最为广泛。模式识别的过程分为两个阶段：

① 监督学习阶段，在该阶段运用被测样品来训练仿生嗅觉系统，使其自主学习。

② 应用阶段，经过训练的仿生嗅觉系统对被测气体进行识别，给出被测气体的识别结果。

有关仿生嗅觉系统中分析识别理论与方法详细内容将在第五章和第六章中介绍。目前能用于仿生嗅觉系统的气体定量分析与识别的理论和方法并不多，但是随着仿生嗅觉研究的不断深入和相关技术的快速发展，更多的仿生嗅觉分析与识别理论和方法将随着新的仿生嗅觉系统的出现会更加成熟，仿生嗅觉系统的气体

定量分析与识别的理论和方法也将在不久的将来会有所突破。

### 2.2.3 仿生嗅觉技术基础

仿生嗅觉系统通用硬件技术路线可用图 2.8 表述。在图 2.8 中，待测气体由气泵的作用通过净化装置，并在嵌入式处理器控制下被选通进入密闭气室，然后由气泵将气体排出。黑色实心箭头显示了气体的流通方向。

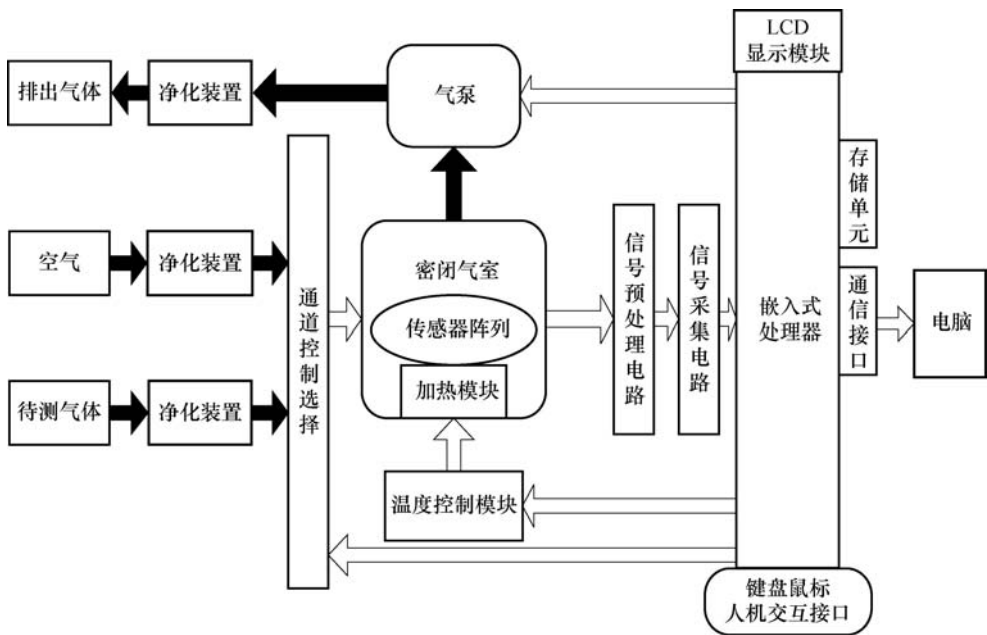


图 2.8 仿生嗅觉系统通用硬件技术路线

在密闭气室中有传感器阵列和加热模块。传感器阵列与密闭气室中的气体接触而输出相应电信号，其中加热模块对传感器阵列加热，使传感器工作在最佳的工作温度下。传感器阵列产生的电信号由信号调理电路进行滤波、除噪和放大，然后由嵌入式处理器控制系统对其采集和处理。嵌入式处理器系统配有 LCD 显示模块和人机交互界面及操作接口，也可通过通信接口与电脑 PC 机相连接，配合相关的数据处理软件，对采集的被测数据进行精确的分析，从而达到物体气味识别的目的。

#### 1. 进气装置及密闭气室技术

进气装置主要解决如何将被测的气体引入传感器阵列的气室中，在进气的过程中，需要解决气体净化及进气流量控制的技术问题。在气体净化装置中，需要

对被测气体中夹杂的水分及其他干扰气体进行过滤和隔除。进气流量控制，对仿生嗅觉系统的检测效果将产生很大的影响，进气流量的选取，将影响系统的检测性能及效果，具有不可忽视的重要作用。

密闭气室也是仿生嗅觉系统技术难点之一。传感器阵列中的每个传感器需要在气室中与被测气体进行均匀接触和响应，为了使每个传感器能够对气体进行快速的响应，一般希望密闭气室越小越好，因为吸入密闭气室的气体一般都是微量的，气室足够小，微量的气体就能够快速充满整个气室，传感器也能够较短的时间内与气体进行充分反应，进而使传感器阵列的响应速度提高。另外，由于密闭气室不可避免地要装入传感器阵列以及加热模块，所以传感器的个数以及合理的布置都将影响到密闭气室的设计。

## 2. 传感器阵列技术

传感器阵列技术是仿生嗅觉系统核心技术之一，它是利用阵列传感器的交叉敏感特性，提供气体模式信息供系统分析和识别。常用仿生嗅觉阵列传感器有：金属氧化物传感器（MOS）、导电聚合物气敏传感器（CP）、石英晶体微天平传感器（QCM）和声表面波传感器（SAW）等，其性能的好坏直接影响仿生嗅觉系统的功能的强弱，主要体现在系统的稳定性、灵敏度、选择性、抗腐蚀性等方面。金属氧化物传感器是由半导体材料构成的，传感器的选择性与掺杂物的性质和浓度有关。当气体接触传感器时，传感器的电阻值改变，因而有独特的气体选择性。根据检测要求，可在数十种金属氧化物传感器（ $\text{SnO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{WO}_3$  等）中选配合适的元件以达到较高的交叉灵敏度和较高的分辨率。此类传感器的敏感度和选择性可达到 ppm（百万分之一）~ppb（十亿分之一）数量级，对环境温度和湿度变化的敏感度也较低。

为了保证传感器阵列性能和特性，传感器的加工技术至关重要。目前在传感器制造中，气敏元件的制造工艺很多，但针对仿生嗅觉传感器的材料、特点及特性要求，微电子机械技术是其主要制造工艺技术之一。

微电子机械技术是通过系统的微型化、集成化来探索具有新原理、新功能的元件和系统。它是微电子技术和微加工技术为基础的一种新技术，分为体微机械技术、表面微机械技术和 X 射线深层光刻电铸成型技术。体微机械技术加工对象以体硅单晶为主，加工厚度几十至数百微米，关键技术是腐蚀技术和键合技术，优点是设备和工艺简单，但可靠性差；表面微机械技术利用半导体工艺，如氧化、扩散、光刻、薄膜沉积、牺牲层和剥离等专门技术进行加工，厚度为几微米，优点是 IC 工艺兼容性好，但纵向尺寸小，无法满足高深宽比的要求，受高温的影响较大；LIGA 技术采用传统的 X 射线包光，厚光刻胶作掩膜，电铸成型工艺，加工厚度达到数微米至数十微米，可实现重复精度很高

的大批量生产。

### 3. 温度模块控制技术

为了使传感器阵列具有较高的灵敏度和快速响应时间，大多仿生嗅觉系统需要设计加温控制模块，用于在测量时对阵列式传感器进行加温。加温控制模块主要由加热电路、温度传感器以及温度控制电路组成。半导体金属氧化物气敏传感器需要在一定的温度下才能够达到最佳的工作状态，而温度控制模块通过温度传感器反馈的信号对加热电路进行控制，使加热电路产生的温度，始终处于传感器阵列的最佳工作温度，进而提升系统的性能。

### 4. 信号调理与嵌入式技术

信号调理主要是对传感器阵列输出的信号进行处理，一般通过硬件实现。这是因为传感器阵列将气体信号转换为电信号时，不仅信号微弱，而且受温度、湿度等各种周围环境因素的影响。因此采用信号调理电路将有效消除噪声信号，放大有用信号，可有效提高系统信噪比、重复性及稳定性。嵌入式技术是指由嵌入式处理器构成的信号采集、控制与处理软硬件技术。在硬件上以嵌入式处理器为核心，配置相应的信号采集电路、人机接口电路和通信接口电路以及进气、排气、加热等控制电路；在软件上引入嵌入式操作系统，编制数字信号处理程序和气体分析识别应用软件，实现对被测气体有效分析和判别。

## 第三章 仿生嗅觉传感

嗅觉传感器是仿生嗅觉系统中的关键检测部件，直接影响后续的处理方法、检测精度和最终的处理结果。本章首先介绍几类典型的仿生嗅觉传感器，对它们的转换原理、结构、应用等做了详细的说明。然后，以这些传感器为基础，从应用的角度介绍了传感器的选型原则，并对嗅觉传感器阵列的构造准则以及阵列的响应模型作了理论分析。

### 3.1 仿生嗅觉传感器

仿生嗅觉传感器用于测量气体的类别、浓度及成分等信息并将其转换成相应的电信号。气敏传感器是气体检测系统的核心，也是仿生嗅觉的基础。从本质上讲，气敏传感器是一种将某种气体体积分数转化成对应电信号的转换器。按照工作原理，可将气敏传感器分为：金属氧化物型半导体传感器、导电聚合物传感器、质量型气敏传感器、化学电容型传感器、电位型气敏传感器、热电式气敏传感器、光学式气敏传感器等。

#### 3.1.1 金属氧化物半导体传感器

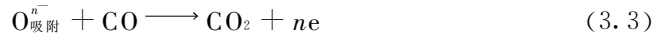
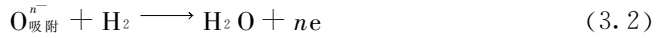
金属氧化物半导体传感器是目前应用最广泛的气敏传感器之一。最常见的材料有锡、锌、钛、钨和铈的氧化物，并掺入铂和钯等贵金属催化剂。金属氧化物半导体传感器需在  $200\sim 400^{\circ}\text{C}$  的温度下工作。当气体吸附于半导体表面时，引起半导体材料的总电导率发生变化，使得传感器的阻值随气体浓度的改变而变化，这就是金属氧化物半导体气敏传感器的基本原理。该类传感器主要分为表面电阻控制型（如  $\text{SnO}_2$  系列和  $\text{ZnO}$  系列）、体电阻控制型（如  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  系列）、非电阻型（如金属氧化物半导体场效应晶体管系列）。

##### 1. 金属氧化物半导体传感器的检测机理

###### (1) 表面电阻控制型气敏传感器

$\text{SnO}_2$ 、 $\text{ZnO}$  系列属表面电阻控制型气敏传感器，即 N 型半导体气敏传感器件。其表面在空气中吸附氧分子，并从半导体表面获得电子形成  $\text{O}^-$ 、 $\text{O}^{2-}$  等受主型表面能级，表面电阻增加。如果还原性气体（如  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$  等）作为被检测气体与其表面接触时发生氧化-还原反应，被氧原子捕获的电子重新回到半导体

中，表面电阻下降。上述过程可用下面三个化学方程式来描述：



在表面电阻控制型气敏传感器中， $\text{SnO}_2$  型气敏传感器是目前世界上生产量最大、应用最广泛的气敏传感器。

### (2) 体电阻控制型气敏传感器

很多氧化物半导体由于化学计量比的偏离，导致半导体晶体结构存在缺陷。在较低的温度下与气体接触时，半导体晶体中的机构缺陷就发生变化，继之体电阻改变，因此可利用这种机理进行气体检测。例如， $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  气敏传感器，当与气体接触时，随着气体浓度的增加，形成  $\text{Fe}^{2+}$  离子， $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  气敏转变成  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ，材料电导发生变化，体电阻下降。而这种变化是可逆的，当器件脱离被测气体进行恢复时，又恢复到  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的原来状态。这一过程可用下式表示：



但是值得注意的是， $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  是亚稳态的，当传感器工作温度较高时，亚稳态的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  就转变成稳态的  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ，失去气敏特性，因此这种传感器的工作温度一般不超过  $500^\circ\text{C}$ ，最佳工作温度一般为  $400\sim 420^\circ\text{C}$ 。

### (3) 非电阻型半导体气敏传感器

这种类型的传感器是利用半导体表面的空间电荷层或金属-半导体接触势垒的变化，导致半导体伏安特性的变化而进行气体检测的（详见 3.1.5 电位型气敏传感器）。

总之，以金属氧化物为基材料的半导体气敏传感器，其检测机理相对复杂。有的气敏传感器的工作过程可能同时包括多种机理，这些机理的作用程度如何则有待进一步的研究。

## 2. 金属氧化物半导体传感器的结构

图 3.1 是一种导电型金属氧化物传感器的基本结构示意图。电极通常是铂、铝或金，而基底材料可以是硅、玻璃或塑料。当传感器和挥发性有机混合物相互作用时会使活性材料的导电性发生变化，而电极对电阻的变化则可通过电桥或其他电路来测量。这类传感器的灵敏度在  $5 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$ 。金属氧化物型传感器的基准响应一段时间后会发生漂移，所以采用的信号处理电路或算法应能抵消这一类漂移。金属氧化物型传感器也容易被气味物中存在的硫化物所毒化。但