

Gas Detection and Gas/Odor Source
Localization Technology

气体检测与气体源 定位技术

陈立伟◎著

在日常生活中，我们被各种各样的气体、气味所围绕着，这些气体的构成、浓度蕴含着丰富多样的信息。气体样本的定性定量分析方法以及建立在气体检测基础上的气体源定位技术具有非常强的实用性，值得深入研究。谨以此书分享我在该领域的研究成果与学习心得。



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

科学基金项目(编号: 61401403)和河南省科技攻关项目(编

号: 162102210004)资助

气体检测与气体源定位技术

陈立伟 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从实际操作的角度阐述了气体检测技术的基本理论、定性与定量检测的原理,以及气体样本采样方法,对目前国内外常见的气体检测设备及气敏传感器的工作原理、敏感机理、使用方法及适用范围进行了讨论与研究。本书的特色是结合多传感器阵列与模式识别算法对电子鼻(E-nose)技术的定性定量原理进行研究并研制了可视化气敏传感器阵列;对现有的气体源定位技术进行了阐述、归纳,研制了静态气体源定位系统与主动嗅觉机器人并分别进行研究与实验。

本书适用于院校师生、科研工作者、企事业单位实验人员,以及对气体检测、气体源定位技术有兴趣的读者。

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

气体检测与气体源定位技术/陈立伟著. —北京:电子工业出版社, 2017.8

ISBN 978-7-121-32437-6

I. ①气… II. ①陈… III. ①气体—检测②气源—定位 IV. ①TH138

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第190399号

责任编辑:徐蔷薇 特约编辑:劳嫦娟

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:720×1000 1/16 印张:12.75 字数:204千字

版 次:2017年8月第1版

印 次:2017年8月第1次印刷

定 价:49.00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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: xuqw@phei.com.cn。

前言

随着科学技术的快速发展、人民生活水平的不断提高，公众对环境污染的问题越来越重视，对相关的检测技术也有了更迫切的需求。因此，能够及时发现空气污染情况，并迅速识别气体污染物种类和评价污染程度的气体分析、检测技术也从学术领域逐渐走进了大众的视野。

气体检测技术是以气体样本为对象进行定性定量分析的技术，该技术常用于有毒、有害、易燃、易爆等危险气体检测，混合气体样本中目标组分定量检测，以及样本的组分分析。作为检测科学的一个重要分支，气体检测技术并不是近年来出现的新兴课题，其应用范围也并不局限于空气污染防治，17 世纪初就已经出现了能够发现环境中可燃气体，适用于矿井下瓦斯泄漏报警的安全矿灯，而针对气体样本进行分析的实验科学则出现得更早。进入 21 世纪以来，随着传感技术、计算机科学、模式识别理论等相关学科的不断进步，气体检测技术发展迅速，涌现出了许多新型检测仪器和分析方法，气体分析能力也有了大幅提升。另外，随着人们对自然科学探索的不断深入，许多特定气体所蕴含的信息也逐渐被发掘出来，成为评价生物、化学反应与进程的重要参考量。目前，气体检测技术的应用范围已经涵盖国防现代化、工农业生产、环境保护、航空航天、医疗卫生等领域。

20 世纪 90 年代开始兴起的气体源定位技术是融合了气体检测理论、新型传感器技术、源定位技术及计算机科学的交叉学科，该技术在风场环境中通过气敏设备采集目标气体浓度分布数据并建模分析，实现对气体源头进行定位。现代工业生产中常见的仓储泄漏、管道破裂、工业火灾等事故常伴随大量的有害气体、烟尘，快速、精准地对气体源进行定位能够有效确定灾源位置，从而实现迅速扑

救并减少灾害损失。基于分布式固定检测设备的静态气体检测技术和基于移动式机器人平台的主动嗅觉都属于气体源定位技术范畴。

本书首先从实际应用出发,概括讨论了气体检测技术所涉及的基本知识、检测理论以及实验原理,详细研究了气相色谱仪等气体检测设备的工作原理与操作方法,总结归纳了几种常用气敏传感器的敏感机理与适用检测对象。其次,基于笔者的科研经历,对新兴电子鼻技术的基本原理、识别算法进行研究,并基于自制的可视化金属卟啉气敏传感器阵列,开发了能够对部分胺类气体进行定性定量识别的电子鼻系统。最后,从静态气体源定位、主动嗅觉两个方面对气体源定位技术进行研究,在对现有定位技术进行分析讨论的基础上,分别研制了动、静态气体源定位系统,并在实验室环境下进行了实际定位实验。

能够完成一本关于气体检测技术的专著是笔者一直以来的理想,也是对自己的挑战。撰写本书,最初是希望通过写作过程对自己硕士、博士期间的研究经历与实验经验进行阶段性的总结,而当框架构思完成,真正开始撰写书稿时才发现自己的知识储备与经验积累距离预期的写作目的还有很远的距离。在本书的撰写过程中不断地重复着遇到问题—解决问题的循环,解决问题的过程让我得到了不断进步的机会,同时也时刻提醒注意自己的不足。完成本书更让我体会到了学术研究工作是没有止境的,而自己还需要更加努力。

在该专著的撰写与出版过程中,电子工业出版社的徐蔷薇编辑给予了我大力的支持与帮助,再次表示感谢。同时,对在撰写过程中给予我支持与帮助的同事与家人表示诚挚的谢意。该专著得到了国家自然科学基金项目(编号:61401403)和河南省科技攻关项目(编号:162102210004)资助。

陈立伟

2017年6月

目 录

第 1 章 气体检测技术概述	1
1.1 气体检测技术的发展	1
1.2 气体检测技术的应用领域	2
1.2.1 气体检测技术与空气污染	2
1.2.2 基于气体检测技术的质检与医疗	4
1.2.3 气体源定位技术	4
1.3 本书主要研究内容	5
第 2 章 气体检测实验中的基本操作知识	7
2.1 气体检测实验中的重要定律与公式	7
2.2 常用气体含量计量单位与换算	8
2.3 实验室常见的危险气体	9
2.3.1 实验室常见的可燃气体	10
2.3.2 实验室常见的有毒气体及毒性量化标准	11
2.4 气体标准物质的制备与保存	12
2.4.1 气体标准物质的制备	13
2.4.2 气体标准物质的保存	14
2.5 气体样本的采集	15
2.6 气体样本的干燥与过滤	17
2.6.1 气体样本的干燥	17
2.6.2 气体样本的过滤	19
2.7 本章小结	20

参考文献	20
第3章 气体样本分析与检测技术	22
3.1 气体样本分析与检测技术概述	22
3.2 检气管法	23
3.3 奥式气体分析仪	24
3.3.1 奥式气体分析仪的常用配件	25
3.3.2 奥式气体分析仪的结构与使用	26
3.4 分光光度计法	28
3.4.1 分光光度计的检测原理	29
3.4.2 分光光度计基本结构	30
3.4.3 红外分光光度计	32
3.5 气相色谱法	33
3.5.1 气—液色谱法的气体组分分离	33
3.5.2 气—固色谱法的气体组分分离	35
3.5.3 气相色谱仪检测器	37
3.5.4 气相色谱图概述	41
3.5.5 基于气相色谱法的定性定量分析	44
3.6 本章小结	46
参考文献	46
第4章 气敏传感器技术	48
4.1 气敏传感器	48
4.2 传感器基本特性	49
4.2.1 传感器静态特性	49
4.2.2 传感器动态特性	53
4.3 金属氧化物气敏传感器	58
4.3.1 金属氧化物气敏传感器分类	58

4.3.2 金属氧化物传感器反应机理	59
4.3.3 TGS2620 传感器特性	62
4.4 电化学气敏传感器	64
4.4.1 电化学气敏传感器分类	64
4.4.2 恒电位电解式电化学传感器	65
4.4.3 离子电极式电化学传感器	66
4.4.4 固体电解质电化学传感器	66
4.5 红外光学气敏传感器	67
4.5.1 基于气体吸收光谱的红外光学气敏传感器	68
4.5.2 红外光声传感器	71
4.6 传感器标定实验	72
4.7 本章小结	76
参考文献	77
第 5 章 基于传感器技术的检测系统	78
5.1 基于传感器技术的检测系统设计	78
5.2 基于气敏传感器的监测、报警电路	78
5.3 基于 DSP 的通用传感器采样平台	80
5.3.1 传感器检测设备的通用性特点	80
5.3.2 系统核心硬件结构	81
5.3.3 采样软件设计	83
5.4 基于物联网构架的传感器网络	84
5.4.1 物联网构架	86
5.4.2 无线传感器网络	87
5.4.3 基于虚拟仪器技术的人机交互程序	89
5.5 本章小结	89
参考文献	90

第 6 章 电子鼻技术	91
6.1 电子鼻技术概述	91
6.2 电子鼻工作原理与结构	92
6.2.1 多气敏传感器阵列	92
6.2.2 电子鼻模式识别算法	94
6.3 电子鼻在产品质检中的应用	97
6.3.1 酒类品质检测	97
6.3.2 食品质量检测	99
6.3.3 水果成熟度评价	100
6.4 NASA-JPL 空气质量监测电子鼻	102
6.4.1 NASA-JPL 电子鼻的气路设计	103
6.4.2 电子鼻传感器阵列	104
6.5 基于可视嗅觉的电子鼻技术	105
6.5.1 金属卟啉传感器阵列	106
6.5.2 可视嗅觉电子鼻系统结构设计	107
6.6 基于可视化嗅觉技术的胺类气体定量检测与分类	108
6.6.1 三甲胺定量检测	109
6.6.2 胺类气体识别	111
6.7 本章小结	113
参考文献	113
第 7 章 静态气体源定位技术	116
7.1 气体源定位技术	116
7.2 静态气体源定位技术	117
7.3 常用气体扩散模型	119
7.3.1 BM 扩散模型	119
7.3.2 三维有限元模型	120



7.3.3 Ooms 模型	121
7.3.4 高斯扩散模型	123
7.3.5 高斯湍流扩散模型	125
7.4 常用气体源定位算法	128
7.4.1 加权组合三边定位算法	129
7.4.2 椭圆交叉定位算法	130
7.4.3 非线性最小二乘估计算法	132
7.5 本章小结	133
参考文献	134
 第 8 章 基于粒子群算法及最小二乘算法的静态气体源 定位与实验	 136
8.1 粒子群优化算法	136
8.2 基本粒子群优化算法概述	137
8.3 基于 PSO 的气体源定位算法	141
8.3.1 基于最小二乘法则的适值函数设计	141
8.3.2 定位算法设计	142
8.3.3 观测误差与传感器数量对实验结果的影响	147
8.3.4 种群规模对迭代次数的影响	149
8.4 粒子群速度计算中的参数改进	150
8.4.1 惯性因子的改进	150
8.4.2 学习因子的改进	151
8.5 中值粒子群定位算法	152
8.5.1 基于 MBPSO 的改良定位算法设计	153
8.5.2 算法仿真实验	155
8.6 静态气体源定位实验	157
8.6.1 实验系统设计	157

8.6.2 气体浓度采集实验	159
8.7 基于改良型 MBPSO 的定位计算	162
8.8 基于最小二乘准则的适值比较定位法	164
8.9 基于最小二乘准则的适值遍历计算	167
8.10 本章小结	170
参考文献	170
第 9 章 主动嗅觉定位	172
9.1 主动嗅觉定位技术	172
9.2 主动嗅觉机器人发展历程概述	172
9.3 主动嗅觉机器人设计与实验	175
9.3.1 机器人硬件系统设计	176
9.3.2 Z 形搜索策略	178
9.3.3 单机器人主动嗅觉定位实验	182
9.4 多机器人协作定位	183
9.4.1 多机器人系统	183
9.4.2 基于粒子群优化算法的多机器人协作搜索策略	185
9.5 本章小结	191
参考文献	191

第 1 章

气体检测技术概述

1.1 气体检测技术的发展

在常温常压下呈气态的物质称为气体,气体检测最早实际应用于采矿业。由于井下环境复杂、不宜通风且作业时容易遇到瓦斯、一氧化碳等易燃、有毒气体,恶劣的空气环境时刻威胁着矿工们的生命安全,因此,可以说井下矿工是最早对气体检测技术具有强烈需求,并对检测手段的现场性、实时性、安全性提出要求的一群人。在没有出现专业检测设备的时代,有经验的矿工们能够根据蜡烛、火把的火焰燃烧情况判断空气中氧气浓度是否正常;也出现了利用金丝雀对有毒气体非常敏感的特性进行井下有害气体检测的案例。矿工们在这些简陋的检测方法帮助下勇敢地在地工作了几个世纪,直至 1815 年出现了真正意义上的现场气体检测设备:安全矿灯(Davy' Lamp),这种矿灯避免了明火直接点燃瓦斯的危险,灯内火焰的高度、明暗、颜色等信息能够提示工人环境中的氧气含量是否正常以及是否出现了有害气体。

随着物理、化学、电学等科学技术的不断发展以及气敏传感器的问世,能够应用于现场检测的气体检测系统与实验手段逐渐出现。早期的检测设备还是从人们的生产需求出发,以发现有害体、检测氧气浓度为

设计目的，主要应用于矿井、采油、燃料存储，以及远洋航运。进入 20 世纪 90 年代以后环境污染问题逐渐加剧尤其是空气污染问题日趋严重，各国科研工作者不断开发出新的气体检测技术，基于各种不同原理的气敏传感器、气体检测设备、实验方法层出不穷。如今气体检测设备的种类与规格已经非常丰富，所采用的工作原理从基本的氧化还原反应、电化学、吸收剂显色到更先进的光谱吸收、气相色谱法、色谱—质谱联用法、表面波等应有尽有，气体检测技术的应用领域也得到了极大的拓展。

1.2 气体检测技术的应用领域

气体检测技术最早应用于环境中有害、易燃等气体成分的检出及浓度检测，多应用于空气污染防治和工业、矿业及能源产业。近年来，在相关技术、理论快速发展的同时，气体检测技术的应用范围也有了很大的拓展。尤其是基于仿生学原理的电子鼻技术出现以后，气体检测技术的应用范围已经涵盖了采矿、能源、环境、国防、安保、农副产品质检、航空航天、医疗卫生等诸多领域。

1.2.1 气体检测技术与空气污染

改革开放以来我国进入了长期的高速发展阶段，随着经济的腾飞，石油、煤炭、冶金、化工等传统工业增长迅速，高速的工业化进程和城镇化建设促使人民生活水平快速提高。人们在享受现代化便利的同时却也正在面对前所未有的环境污染问题。目前所出现的各种污染问题中空气污染具有爆发突然、传播迅速、扩散范围大、难以控制、不易清除等特点，对人们的生产、生活影响巨大。影响空气质量的污染物有很多，目前主要有硫氧化物、氮氧化物、碳氢化物、一氧化碳以及铅、汞等重金属。

根据污染发生的场所和影响范围可以将其分为大气污染和室内污染两类，这种区分方法能够有针对性地选择采样、检测的手段并采取相应的处

理方法。大气污染物来源广泛，主要由能源、煤炭石油精炼、水泥生产、钢铁生产、汽车尾气排放等活动产生，而秸秆焚烧、火灾、爆炸以及存储泄漏都会造成突发性的污染事件。大气污染的危害在于一旦受到阳光照射、发生光化反应就可能产生更危险的光化污染物，而且污染气团形成后几乎无法人工干预，只能等自然风吹散。因此对于大气污染最好的应对办法是从源头防治，以及在污染形成后进行准确的灾情预测，为人们规避污染提供参考，从这两点出发运用气体检测技术可以在大气污染防治方面取得很好的效果。

从源头防治的角度出发，即在易产生污染物的工厂、油田、城市主要交通枢纽设置固定的气体检测设备实时监测有害气体，一旦发现泄漏或者汽车尾气浓度突然飙升则可以在形成严重污染前及时处理。这类对已知潜在污染源的监控一般能够预判污染气体的种类，因此可以有针对性地挑选传感器或检测方法，降低监测难度和成本。从灾情预测的角度看，由于大气污染的影响范围较大因此较容易发现，检测污染物气团的手段有很多，例如空气质量检测站、大范围分布式传感器网络、流动空气检测车，甚至卫星遥感、卫星图像都可以用来观测污染情况，结合气象数据通过计算机建模可以模拟出污染物未来的扩散方向以及持续时间。同时，通过多点监测采用适合的气体源定位技术，也可以逆向推算出污染源位置，从而实现灾害防治。

人们日常生活中常见的室内空气污染的主要来源是装修涂料以及家具的油漆和胶黏剂，其主要有害成分是甲醛、苯、苯酚、氨气等，还有在取暖、下厨时由于燃烧不完全产生的一氧化碳、甲烷等有害气体。针对这些室内污染物的气体检测通常采用固定式警报器或者手持检测仪器等基于气敏传感器的现场检测、监测设备，这些设备通常是嵌入式技术与气敏传感器、气敏传感器阵列相结合的产品。除了日常生活以外，室内空气检测技术还用于潜艇、民航甚至国际空间站的空气质量监测。美国国家航空航天局研制的电子鼻能够检测出多种有毒有害的有机、无机气体以及空气中的重金属污染物。由于这些密闭环境不能与外界进行空气交换，因此通常通过信号连接让气体检测设备参与空气净化器的自动控制。

1.2.2 基于气体检测技术的质检与医疗

气体检测技术的不断进步促使其应用领域在近年来得到了极大的拓展，现在该技术已经从传统的环境气体检测、监测发展到了产品质检及医疗卫生领域。目前，基于气敏传感器交叉敏感作用的电子鼻技术已经在农业生产、农副产品加工以及精细化工等领域得到极大的关注。利用该技术可以无损检测肉、蛋、奶、水产等农副产品是否新鲜，评价农田果园的蔬菜水果是否成熟适合采摘，或者对烟、酒、香水、茶叶等产品的品相做出评价，目前国外已经出现了能够实际应用与产品质检的商业化电子鼻产品。

根据气味检测人体疾病其实并不是一个新的创意，中医很早就建立了通过患者口气、体嗅、排泄物气味等信息诊断消化系统、循环系统疾病的系统理论；藏医也有通过晨尿气味为患者诊断的记载。但受制于技术手段的发展和人体呼气成分的复杂性，根据呼气成分进行诊断的研究以及真正能够通过呼气采样检测诊断疾病的现代化检测设备和实验方法是在近些年才快速出现的。目前出现了很多利用呼气实现疾病诊断的文献和案例，例如通过呼气成分检测对肺炎、肾脏疾病、肺癌以及消化道炎症等疾病的实验研究。而通过碳-13 呼气检测法排查幽门螺旋杆菌在我国已经成为许多医院的正规体检项目，通过这种呼气检测法可以进一步对胃炎、胃癌进行预诊断。

1.2.3 气体源定位技术

气体源定位技术是指在风场环境中通过收集目标气体浓度信息并加以分析利用，对气体泄漏源进行定位的技术。利用这一技术可以快速、精准地对气体源进行定位从而有效确定灾源位置，减少灾害损失。气体源定位技术还可以广泛应用于遇难人员搜救、毒品及爆炸物搜寻等领域。

和电子鼻一样，气体源定位技术的灵感最早来自仿生学。自然界中许多动物能够通过追踪气味源来进行觅食、寻偶及规避天敌等活动，受到这

一现象的启发, 20 世纪 90 年代以来, 人们开始研制能够模仿生物嗅觉实现气体源定位的主动嗅觉机器人。主动嗅觉机器人依据仿生学原理将移动机器人技术与现代气体检测技术相结合, 通过主动搜寻实现气体源定位。移动机器人依靠自身电子鼻对运动轨迹上的多点气体浓度进行检测, 从而决定未来的运动方向直至找到气体源。该方法需要移动机器人进行主动搜寻, 因此称为“主动嗅觉法”。

主动嗅觉法不需要依靠精确的气体扩散模型, 受湍流影响较小、能够在高速风场中实现对气味的搜索与跟踪, 但该方法难以对瞬时气体源进行定位, 实际定位效果在很大程度上受到地面障碍、裂隙和机器人自身移动条件的限制。因此, 在主动嗅觉不断发展的同时许多科研人员开始从事静态气体源定位方法的研究。现有的静态气体源定位主要依靠能够进行大范围分布式气体浓度采样的气体检测网络得到区域中的目标气体浓度分布信息, 然后结合气体扩散模型和环境参数逆向推算污染源头。这一方法对气体检测设备的要求并不高, 但对网络布局、信息汇总准确性及速度和扩散模型的完备性有很高的要求。

1.3 本书主要研究内容

本书介绍了气体检测技术中较为实用的实验技术、操作知识; 对分光光度计、气相色谱仪等常用气体检测仪器设备的工作原理进行了分析; 讨论了目前常见的气敏传感器的敏感机理、使用方法并在此基础上设计了几种具有代表性的检测系统; 对电子鼻技术的相关模式识别算法、实际应用和可视化电子鼻的敏感机理进行了讨论; 对基于气体检测的气体源定位技术进行了研究, 研制了主动嗅觉机器人并设计了采用分布式气体检测手段的气体源定位算法。

第 1 章是气体检测技术概述。第 2 章介绍了气体检测实验中的基本操作知识, 包括主要定律、公理和单位, 标准物制备, 气体的采样与储存和气体样本的干燥与过滤。第 3 章讨论了目前较为主流的 4 种气体样本分

析技术,即检气管法、奥式气体分析法、分光光度计法以及气相色谱法的工作原理、使用方法以及相关设备的应用范围。第4章对几种主要的气敏传感器敏感机理和基本结构进行分类说明;对传感器几种主要的具有普遍性的动、静态特性进行分析,并以TGS2620金属氧化物气敏传感器为例演示了传感器的标定实验方法。第5章从传感器的实用角度出发设计了3种结构功能不同的传感器检测系统,即基于气敏传感器的监测、报警电路,基于DSP的通用传感器采样平台,以及基于物联网构架的传感器网络,还包含了一些数电模电设计、无线传感器网络通信和虚拟仪器软件设计知识。第6章讨论了电子鼻技术、金属卟啉敏感单元的气敏原理以及该技术在医疗预诊领域的运用。第7章概括介绍了静态气体源定位技术和现有的主流气体扩散模型,讨论了3种常见定位算法的数学原理和使用方法。第8章设计了改良型中值粒子群静态气体源定位算法,并在实验室环境下进行气体源扩散实验,对定位算法进行验证。还设计了基于最小二乘的适值比较定位算法和适值遍历定位算法,并对两种算法进行了仿真实验。第9章设计了主动嗅觉机器人以及适用于单机器人搜索的定步长Z形搜索策略,在实验室环境下进行了非均匀风场单机器人的气体源定位实验。并基于粒子群算法设计了多机器人协同定位搜索策略,通过仿真实验进行了算法改良。