

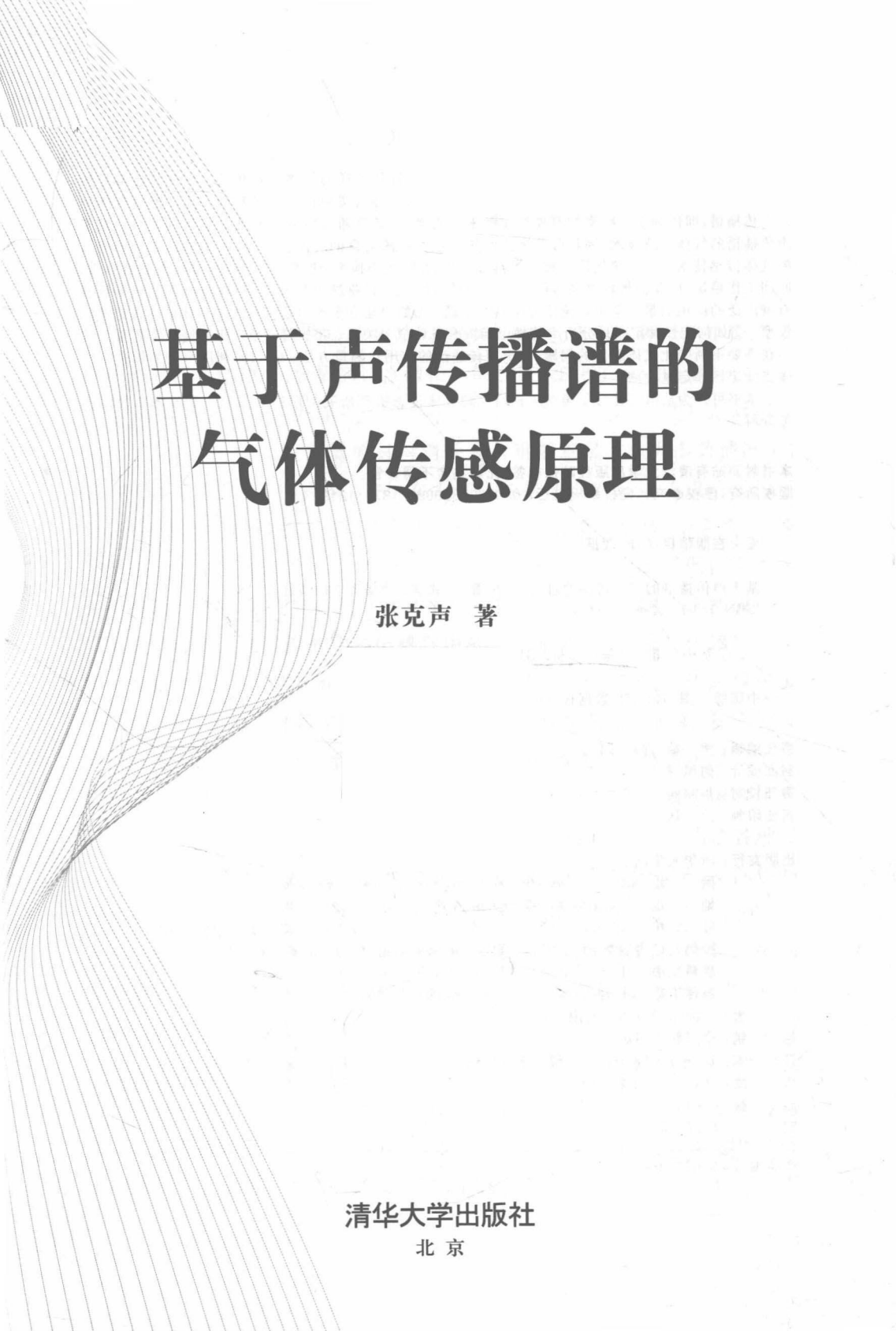
Theory for
Gas Sensing Based on
Acoustic Spectra

基于声传播谱的 气体传感原理

张克声 著



清华大学出版社



基于声传播谱的 气体传感原理

张克声 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

人类的日常生活和各种工业生产都不可避免地和各种各样的气体密切相关。气体传感器是传感器中的一个重要类别,也是传感器中品种及数量最庞大的、实用化程度最高的一类。混合气体中的声传播谱,即依赖于声频率的声吸收和声速频散谱线,具有随气体成分改变而变化的特性。基于声传播谱的气体传感技术,因其可直接获得气体分子结构信息的突出优势,成为当前具有发展潜力的气体传感技术之一。该气体传感技术具有在线检测、无损检测、快速响应、微低功耗、组成简单、长时间工作稳定,以及测量精度高等优点,在工业过程控制、职业健康与安全、环境与排放监测等领域有着广泛的应用前景。本书讨论了以下4个问题:①如何建立多元混合气体中声传播谱的理论预测模型;②如何定性和定量地分析声传播谱与混合气体成分关系;③如何避免声传播谱传统测量方法存在需要不断变化气体腔体的问题,给出声传播谱的实用化测量方法;④如何利用声传播谱进行气体成分定性和定量检测。

本书可作为从事气体分子声学理论研究和气体传感机理研究的研究人员及工程技术人员的参考资料。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于声传播谱的气体传感原理/张克声著. —北京:清华大学出版社,2018
ISBN 978-7-302-49205-4

I. ①基… II. ①张… III. ①声传播 IV. ①O422

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 331726 号

责任编辑:贾 斌 薛 阳

封面设计:何凤霞

责任校对:焦丽丽

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市国英印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×230mm 印 张:9.75

字 数:140千字

版 次:2018年6月第1版

印 次:2018年6月第1次印刷

印 数:1~1000

定 价:59.00元

产品编号:076201-01

前 言

随着经济发展和现代工业进步,人们在日常生活和各种工业生产活动中所排放的气体种类、数量都日益增长。特别地,在化工、石油、煤炭、电力、汽车、医药等工业行业中都要求对各种气体介质进行计量和控制,这对于保证产品质量、节省能源、降低原材料消耗具有重要意义。在大多数情况下,这些气体都是有毒有害气体,它们在大气中的排放会对环境造成很大的污染,进而影响生态平衡,甚至导致爆炸、火灾、中毒等重大事故,给家庭、工业生产甚至国家造成巨大损失,危害人类生命和财产安全。为了保护人类赖以生存的自然环境,对各种气体在环境中的排放进行有效监控、检测成为一项重大的课题。气体传感器是传感器中的一个重要类别,也是传感器中品种及数量最庞大的、实用化程度最高的一类。越来越多的气体传感器正被广泛地应用,在工业过程控制、职业健康与安全、环境与排放监测、住宅健康与安全等方面起到了至关重要的作用。气体传感器能将气体种类及其浓度等信息转换成电信号,根据所测得电信号的强弱就可以获得与待测气体在环境中存在情况相关的信息,实现检测、监控以及报警等目的。当前各种气体的快速检测技术发展迅猛,各种检测技术会根据被测气体性质、实际检测条件、检测精度的差别,具有不同的检测原理、适用范围和优缺点。因此,已有的气体检测技术仍需根据检测的实际情况不断研究创新,以满足不同的检测要求。基于声传播谱的气体检测技术,以其快速检测、无损检测、不易受污染影响、硬件简单、性价比高等优点,特别是可直接获得气体分子结构信息的突出优势,成为一种具有广泛应用前景的新型气体传感技术。

本书总结作者和研究团队近七年的研究成果,系统讨论了基于声传播谱的气体传感的基础理论,其内容涉及声传播谱的建模、分析、重建和气体检测应用4个方面。本书的出版得到了国家自然科学基金地区项目“基于声

谱特征点的多元可激发混合气体检测方法研究”(批准号: 61461008)的资助。其相关研究内容先后得到过国家自然科学基金项目“基于声谱特征点的多元可激发混合气体检测方法研究”(批准号: 61461008)、“气体成分与弛豫信息对应关系的声谱盲分解研究”(批准号: 61371139)、“基于超声波谱的气体探测”(批准号: 60971009)、“基于有效弛豫时间的声学气体探测方法研究”(批准号: 61001011), 贵州省科学技术基金项目“基于分子弛豫有效热容的煤层瓦斯气体超声检测方法研究”(批准号: 黔科合J字[2015]2065号), 贵州理工学院高层次人才引进项目“大气碳排放的超声监测方法研究”(批准号: XJGC20140601)的资助。

对于本书的出版, 首先要衷心感谢华中科技大学的博士研究生导师王殊教授。恩师国际化的视野、前沿而精髓的学术造诣、严谨勤奋的治学风格令我钦佩不已; 先生温而不厉、威而不猛、恭而安的人格魅力让我明白了许多为人处世的道理, 深刻影响着我的工作和生活。我必将时刻牢记恩师的教诲走好我的人生道路。其次, 要感谢朱明副教授。他和我亦师亦友, 每当我有学术问题向他请教时, 他总能给予准确的答复并使我深受启迪; 每当我在生活中遇到困难时, 他总能及时为我排忧解难。谨以此书献给所有关心、鼓励、帮助过我的良师、益友、家人们。

天地有大道而不言, 有太多的奥秘等着我们去解答。值此书整理结束之际, 才发现自己其实只完成了原定目标的一部分工作, 真切知道自己原来有太多的不知道, 真切感到在未来的学术道路上还需上下而求索。面对人生的诸多困难和挫折, 我想用一句话与大家共勉: 如果你的前面有阴影, 你的背后一定有阳光(Even the darkest cloud has its sliver lining.)。限于作者水平, 书中难免存在不妥之处, 真诚希望专家和读者对本书提出批评和指正。

作 者

2018年3月

于贵州理工学院

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 气体传感技术和超声波传感器概述	1
1.1.1 气体传感技术	1
1.1.2 超声波传感器	2
1.2 基于声传播特性的气体传感技术	4
1.3 本书的研究意义	6
1.4 本书研究内容和组织结构	8
1.4.1 本书的研究内容	8
1.4.2 本书的组织结构	10
第 2 章 气体介质中声传播谱的理论基础	13
2.1 理想气体中声传播的热力学理论	13
2.1.1 理想气体	13
2.1.2 理想流体介质中声传播的三个基本方程	15
2.1.3 声波动方程	17
2.1.4 绝热过程的理想气体状态方程	18
2.2 声波在非理想气体介质中的吸收和频散	20
2.2.1 非理想气体介质中的经典声吸收	22
2.2.2 非理想气体介质中的声弛豫过程	24
2.2.3 气体分子弛豫吸收理论的发展历程	28
2.2.4 DL 理论模型的存疑	30
小结	31

第3章 多元混合气体声传播谱的理论预测模型	33
3.1 混合气体声经典吸收谱的计算	33
3.1.1 混合气体黏度系数	34
3.1.2 混合气体热传导系数	36
3.1.3 混合气体声经典吸收谱的计算结果	37
3.2 多元可激发混合气体声弛豫谱的解析模型	38
3.2.1 单一弛豫过程的唯象理论	38
3.2.2 混合弛豫气体的有效定体摩尔热容	39
3.2.3 混合气体振动弛豫方程	44
3.2.4 碰撞能量转移概率的求解	46
3.2.5 内外自由度温度变化率之比的数值解	49
3.2.6 混合气体声复合弛豫谱的解析表达式	50
3.3 解析模型的仿真和分析结果	52
3.3.1 仿真结果与实验结果的对比	52
3.3.2 声弛豫谱的解析分析	57
3.3.3 振动-振动量子交换数对声弛豫吸收谱的影响	59
小结	61
第4章 声传播谱与气体成分的关系分析	62
4.1 多模式振动弛豫的解耦合	62
4.1.1 内外自由度温度变化率之比的解析结果	63
4.1.2 混合气体有效热容的解耦合表达式	64
4.1.3 基于解耦合模型的声弛豫吸收谱仿真结果	65
4.1.4 解耦合过程与声弛豫吸收谱的关系	70
4.2 声弛豫吸收谱的分解	74
4.2.1 声复合弛豫吸收谱的可分解特性	74
4.2.2 单一解耦合弛豫吸收谱的模式贡献度	76

4.2.3	复合弛豫吸收谱的分解仿真结果	78
4.2.4	解耦合单弛豫吸收谱的振动模式贡献度分析	79
4.3	声弛豫过程的三要素	84
4.3.1	弛豫过程三要素与声传播谱的关系	84
4.3.2	外部环境对弛豫时间的影响	86
4.4	振动能量转移速率影响声弛豫过程形成的分析	88
4.4.1	20%N ₂ -80%CH ₄ 中振动能量转移速率影响 声弛豫过程形成的分析	88
4.4.2	20%N ₂ -80%CO ₂ 中振动能量转移速率 影响声弛豫过程形成的分析	92
4.4.3	5%Cl ₂ -75.05%N ₂ -19.95%O ₂ 中振动能量 转移速率影响声弛豫过程形成的分析	95
小结		98
第5章	声传播谱的实用化重建算法及其在气体检测中的应用	101
5.1	不同热力学过程下的振动弛豫时间	101
5.2	单一弛豫过程有效热容的重建算法	103
5.2.1	基于两频点声测量值的单一弛豫过程有效热容	104
5.2.2	PL 重建算法的更正推导	105
5.3	基于特征点的声弛豫谱重建算法	107
5.3.1	特征点重建算法	107
5.3.2	特征点重建算法的仿真结果	110
5.3.3	特征点重建算法合成误差和频率选择	114
5.4	重建算法在气体检测中的应用	120
5.4.1	PL 重建算法在气体检测中的应用	120
5.4.2	特征点重建算法在气体检测中的应用	123
5.4.3	基于有效弛豫区域的气体检测原理	128

小结	131
第 6 章 总结与展望	134
6.1 本书研究内容总结	134
6.2 后续研究展望	137
参考文献	138

第 1 章 绪 论

本章首先概述了目前气体传感技术和超声波传感器的发展情况,着重介绍了两者结合的产物——超声气体传感技术的发展历程。然后对于目前超声气体传感技术的前沿研究,即基于声传播谱的气体传感技术,指出其所面临的理论和技术难题,进而引出本书的研究意义所在。最后给出了本书的研究内容和组织结构。

1.1 气体传感技术和超声波传感器概述

1.1.1 气体传感技术

人类的日常生活和各种工业生产都不可避免地与各种各样的气体密切相关。随着经济发展和现代工业进步,尤其是化工、石油、煤炭、汽车等工业行业的迅猛发展,人们在日常生活和生产活动中所排放的气体种类、数量都日益增长。而这些气体大多数都是有毒有害气体,它们在大气中的排放会对环境造成很大的污染,进而影响生态平衡,甚至导致爆炸、火灾、中毒等重大事故,危害人类生命和财产安全。为了保护人类赖以生存的自然环境,对各种气体在环境中的排放进行有效监控、检测成为一项重大的课题。气体传感器技术指人们为了对被测气体进行定性的了解和定量的掌握所采取的一系列技术措施;气体传感器则是完成相应传感功能的器件或装置^[1-3]。气体传感器将气体成分及含量等信息转换成电信号,并根据这些电信号获取待测气体在环境中存在情况有关的信息,从而达到检测、监控和报警的目的。

气体传感器大体可分为物理类气体传感器和化学类气体传感器。物理

类气体传感器是指在传感器的工作过程中利用气体的物理性质而没有化学反应发生的气体传感器；化学气体传感器在工作过程中则有化学反应发生。根据检测原理，目前检测气体成分的传感技术主要有：化学反应、半导体、气相色谱和红外光谱吸收、热传导等技术^[2-4]。但这些技术存在着各自的缺点，比如：化学反应类传感器寿命短（不可重复使用）、对象单一、易时漂、需定期标定、信号易产生干扰；半导体类传感器耗电大，气体选择性较差、输出与气体浓度不成比例；色谱、光谱类传感器成本高、实现复杂、响应时间较长而不适合现场气体检测；其他一些气体传感技术还存在破坏待测气体（比如接触燃烧式）、灵敏度低（比如热传导式）、存在对于混合气体的测量结果解释困难等问题^[2,4-6]。从 2009 年 IBM 公司提出“智慧地球”的概念，到目前国内外许多个城市把建设“智慧城市”作为城市发展的重要任务，这些构想的实现需要物品之间进行普遍连接而形成所谓的“物联网”^[7]。物联网需要将各种传感技术嵌入各种物体中，实时检测物体物理状态的变化，让物品“开口说话、发布信息”，最终让各种资源能“智慧”地为人类服务^[8]。气体传感器是传感器中的一个重要类别，也是传感器中品种及数量最庞大的、实用化程度最高的一类^[3]。因此，寻找成本低、寿命长、功耗小、受工作环境影响小、可实时连续在线检测、具有适中灵敏度、易于大规律应用的新气体传感技术就具有了迫切的现实需求。

1.1.2 超声波传感器

声波是一种在弹性介质中传播的机械波。按照频率的高低，声波可分为次声波（频率小于 20Hz）、可闻声波（频率在 20Hz~20kHz 之间）、超声波（频率范围则在 20kHz~1GHz 之间）^[9,10]。超声波频率高，因而波长短，易汇聚成束定向传播；由于声强与频率的二次方成正比，故超声波的强度比一般声波大得多，具有较强的贯穿能力。市场上已有成熟的超声波换能器产品，其工作频率一般为 20kHz~10MHz^[9,10]。

传感器的概念来源于“感觉”（sensor）一词，它能起到代替或补充人体五

官功能的作用。按照国家标准《传感器通用术语》(GB/T 7665—2005),传感器定义为:能感受被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成(如图 1.1 所示)。敏感元件指传感器中能直接感受或响应被测量的部分。转换元件指传感器中将敏感元件感受或响应的被测量转换成适用于传输或测量的电信号部分。传感器的基本功能是检测信号和信号转换,其性能将直接影响整个测试系统,对测量精确度起决定性作用^[9]。传感器可分为两个大类:①能感受规定物理量并转换成可用输出信号的物理量传感器;②能感受规定化学量并转换成可用输出信号的化学量传感器。



图 1.1 传感器工作模式示意图

超声波传感器是一种声信号和电信号的转换装置,可以产生和接收超声波,以超声波作为其检测手段的物理量传感器。按工作原理,它可以分为压电式、磁致伸缩式、电磁式等,其中以压电式最为常用^[2]。超声波传感器具有以下优点^[11-15]:①低成本和低功耗;②高分辨率和高准确度的测量;③快速的传感器瞬态响应,可用于在线实时测量;④体积小,易于安装和维护,可进行灭菌和清洁处理;⑤探头不易被污染,耐用、在恶劣环境下仍可长时间稳定工作;⑥可进行无创测量;⑦适合于易爆气体环境的使用(比如在线检测氢气在空气中的含量)。这些优点使得它广泛应用于冶金、船舶、机械、食品、石油、汽车、医疗、化学、生物工程、环境工程等各种行业的超声探伤、测距、测厚、检漏、医疗成像诊断(比如广泛使用的B超)以及加工过程控制等方面^[2,9,11,13,16-18]。正是超声波传感器所具有的这些优点,使得其具有可大规模应用的实用价值。

1.2 基于声传播特性的气体传感技术

利用超声波传感器进行检测的基本思想很简单^[12]：发送声波，声波与待测物质相互作用后进行接收，接收到的超声信号便携带了待测参量的信息；通过分析测量得到的参量（有些参量则可能需要进行补偿抵消），进而达到相应的检测目的。基于超声波传播特性的气体传感技术，是指通过直接测量气体介质中的声速和声衰减系数这两个声传播特性参量，然后通过它们与气体成分、含量之间的物理关系，获取气体成分的变化信息，从而达到对气体介质进行实时检测和监控的目的。

目前较广泛应用的另一种声气体传感技术，是通过在声表面波器件的声通道上贴特定的敏感薄膜，制成的声表面波气体传感器。采用敏感膜的声表面波气体传感器基本原理是以声表面波振荡器为传感元件，利用覆盖于声表面波期间表面的敏感膜对待测气体的吸附，基于各种传感激励引起声传播特性发生改变，从而导致振荡器振荡频率、幅度或相位发生变化，进而完成对待测气体量的测量^[19,20-22]。声波气体传感器的类型主要分为体声波、表面声波、表面横波、水平剪切声平板波等。它们具有结构简单、体积小、成本低、响应时间短、灵敏度高、可靠性好等优点。但我国对于该类型的声波型气体传感器的研究还处于起步阶段。可见，其传感原理与本书所讨论的直接测量声传播特性的物理量检测原理是不同的，本质上应属于化学量传感器。由于特定的敏感薄膜只能测量特定的气体，因此声表面波气体传感器的气体选择性较差；且化学气敏膜会对待测气体发生化学反应，其寿命较短而需要定期更换。

利用声在气体中的传播特性进行气体成分检测已经有一百多年的历史。早在 19 世纪末 Fritz Haber 就发明了利用声速变化来判断地下采矿时空气中是否存在氢气或甲烷的瓦斯哨子^[23]。瓦斯哨子利用了甲烷和氢的分子质量远小于干燥空气的分子质量，当它们与空气混合后会使得声速增加的特性，从而使哨子发生共振而音高增加，以达到报警的目的。最早用二元气

体分析的电声传感器出现在 20 世纪 20 年代,Geberth^[24]和 Griffiths^[25]利用声速随气体含量变化的特性,以及音叉和石英晶体的声共振效应制造的检测装置,在测量氧气中混入少量氢气时敏感度可达 0.1%,在测量空气中的二氧化硫时的敏感度可达 1%。随着声换能器制造工艺的提升,1981 年 Guillon^[26]则通过声传播时间(Time-of-Flight, TOF)来分析³He-⁴He 混合气体含量变化,精确度可达 0.6%。Schoenewolf^[27]采用 TOF 的方法设计了实时监控空气和水蒸气混合气体含量变化的实用装置,并申请了相关专利。Polturak^[28]用同样方法获取声速来检测丙烷和乙烯二元混合气体,灵敏度可高达 0.008%。1994 年,Lueptow 和 Phillips^[29]则继续利用 TOF 的方法,测量了当甲烷含量由 75%变化到 100%时,天然气(其主要成分除甲烷外,还包括乙烷、丙烷、丁烷、氧气、氮气和二氧化碳等气体)中的声速。该研究发现,当甲烷含量变化时引起的声速变化范围为 400~450m/s;当利用测量声速值来预测天然气中甲烷含量时,其误差不超过 1.2%,预测置信度达 95%。并根据此研究结果,他们申请了天然气燃烧腔体中声传感器测控装置的专利^[30]。2005 年,卡西尼-惠更斯号(Cassini-Huygens)土星探测器在土卫六表面降落,其所带的探测仪器中包括无源声传感器,用于记录可能发生的雷声等环境声音和有源声传感器来测量地形地貌、风速、表面声阻抗,以及利用声速来计算土卫六大气中甲烷浓度随海拔变化的关系^[31-34]。以上这些研究和应用由于只利用了声速这一个声传播特性参量,并未利用另一个重要的声传播特性参量——声衰减系数,因此它们仅适用于检测二元混合气体。

一般情况下的监控环境都是成分复杂的混合气体,因此单独依靠声速的声气体传感技术往往不能够提供足够的信息,这时就需要测量声衰减系数来获得额外的信息。1985 年,Terhune 等人^[35]就设计了同时利用某一频点的声速和声吸收两个声学量,来定量检测三元混合气体的方法和装置(比如核反应堆中就需要实时监控氢、氧和水蒸气三元混合气体的含量变化),但是他们在做相关理论分析时忽略了由分子弛豫过程引起的声弛豫吸收,而仅考虑了由分子运输现象造成的声经典吸收;2003 年,Phillips 等人^[36]则

完善了 Terhune 等人的工作,进行理论分析时,在忽略分子弛豫对声速的影响的前提下,将声弛豫吸收的部分也包括进来,指出该方法可用于实时监控三元混合气体——氮气-甲烷-水蒸气(可作为一种经济的汽车燃料),以及氢-氧-水蒸气(可用于航天飞船中的空气再生系统)的成分变化,并指出当把成分比例固定的混合气体视为一种气体时(比如空气),该方法还可以拓展到三元以上的混合气体中。2003 年开始,瑞典 Lule University of Technology 的 Carlson 研究小组^[37-39]则利用随频率变化的声衰减谱线来定量分析乙烷和氧气二元气体(乙烷摩尔分数由 20%变化到 80%)。2005 年起,在美国国家航空航天局(NASA)基金支持下,美国 Northwestern University 的 Lueptow 研究小组^[40-42]则进一步提出利用随频率变化的声吸收和声速频散谱线,也即声传播谱,来实时检测三元及其以上混合气体的气体传感技术是未来声气体传感器的发展趋势,指出该方法在矿井中瓦斯泄漏报警和测量低等级天然气杂质的应用前景。利用声传播谱的气体检测技术,相比单频点测量声速和声吸收检测技术而言,其突出优势在于^[41]:可获得气体成分更为基础的信息——气体分子的结构特征,而不只是声速和声吸收本身,从而让气体传感器可以智能地分析气体成分变化。

1.3 本书的研究意义

由 1.2 节的讨论可知,目前基于声波传播特性的气体传感技术的研究前沿在于:如何利用随频率变化的声吸收和声速谱线,提取多元混合气体成分的相关信息而达到检测的目的。若要达到这一目标,则需要解决下面 4 个基本问题。

首先,鉴于气体分子的声热弛豫传统理论不能适用于三元及以上的混合气体的问题,就需要建立一个适用于不同环境条件下的、可用于多元(三元及以上)混合气体的声传播谱预测模型,其理论结果要能够与实测数据相一致。这是基于声传播谱的气体传感技术的理论基础。

其次,要建立能够定量和定性地分析得到声传播谱和多元混合气体成

分之间关系的理论模型。这是实现基于可激发声传播谱气体传感技术的理论关键。但是在目前所知的文献中,对于这个问题都不能给出解答(这一点将在 2.2 节和 2.3 节进行详细说明)。

第三,怎样能够找到声传播谱可实用化的测量方法,这是该气体传感技术可大规模应用的先决条件。大多数可激发气体(非单原子分子气体)介质中,常温常压条件下的声吸收和声频散谱线所覆盖的频率范围为 $10 \sim 10^8 \text{ Hz}$ ^[43]。目前市场上的超声波换能器往往只能发送点频率的声信号(即使有宽频域超声波换能器,其价格也较昂贵),所以通过采用足够多的点频率声换能器来覆盖整个谱线的频率范围的测量方法,是无法适应于大规模的实际应用需求的。传统上,这一困难是利用气体分子弛豫时间与环境压强成反比的特性来进行解决,也即采用一个(或几个)频点的声传感器,通过不断改变压强进行一系列的测量而获得一个宽范围频率-压强比来获得整条声传播谱^[44-51]。但是,这一传统的测量方法只能停留于实验室中的研究应用,因为它会带来以下 4 个问题:①需要改变气体腔体压强,这会极大增加测量装置的制造难度;②较小的压强会使得接收信号被淹没在噪声中,或者较大的压强则使得需要考虑气体的非理想特性;③为了获得所需的压强范围,则需要时间对气体腔进行抽气和充气,并等待气体温度回归到变压前的数值,这使得该方法不能应用于对测量时间敏感的场所,即无法应用于实时的在线监测;④必须进行气体采样,操作复杂度较高。总之,这种需要不断改变腔体压强的测量方法,无疑会使得基于声传播谱线的传感技术无法得到大规模的实际应用。所以,就需要找到声传播谱的实用化测量方法——用少数的几个点频的超声换能器,不需要改变气体腔体的压强,就可以测量获得所需的声传播谱。

第四,在获得声传播谱可实用化的测量方法后,又如何利用声吸收谱进行气体成分检测。

本书的研究意义在于:通过解决以上 4 个问题,从而为基于声传播谱的气体传感技术的信息获取方法提供必要的理论支持。

本书的研究内容先后得到了国家自然科学基金项目“基于声谱特征点

的多元可激发混合气体检测方法研究”(批准号: 61461008)、“气体成分与弛豫信息对应关系的声谱盲分解研究”(批准号: 61371139)、“基于超声波谱的气体探测”(批准号: 60971009)、“基于有效弛豫时间的声学气体探测方法研究”(批准号: 61001011), 贵州省科学技术基金项目“基于分子弛豫有效热容的煤层瓦斯气体超声检测方法研究”(批准号: 黔科合 J 字[2015]2065 号), 贵州理工学院高层次人才引进项目“大气碳排放的超声监测方法研究”(批准号: XJGC20140601)的资助。

1.4 本书研究内容和组织结构

1.4.1 本书的研究内容

基于超声波传播特性谱的智能气体传感技术框图(如图 1.2 所示), 本书的研究内容即为图中所示的智能分析部分: ①如何建立与实测结果相一致的三元及以上混合气体中的声传播预测模型, 从而提供分析声传播谱和气体成分关系的理论基础; ②如何从测量得到的两条声传播谱中提取得到气体分子特征和成分的构成信息; ③如何在不需要改变气体腔体压强, 利用少数单频点的超声换能器, 便可测量得到两条声传播谱, 从而获得可实用化的测量方法。

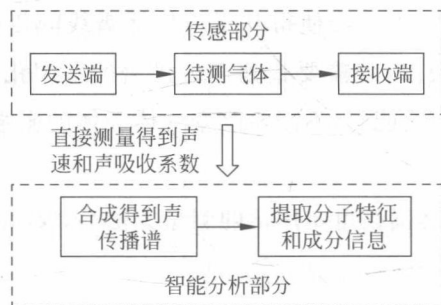


图 1.2 基于超声波传播谱的智能气体传感技术示意图