



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代传感技术

© 厦门大学 黄元庆 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TP212/162

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

现代传感技术

主 编 黄元庆
副主编 万 瑾
参 编 颜黄苹
主 审 林玉池 颜国正

机械工业出版社

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书系统地阐述了各种现代传感技术的基本理论和相应的主要现代传感器件工作原理、结构、特性以及具体应用实例。全书共分8章：第1章介绍光波干涉传感技术；第2章介绍光电传感技术；第3章介绍图像传感技术；第4章介绍计量光栅传感技术；第5章介绍光纤传感技术；第6章介绍基于MEMS的传感技术；第7章介绍化学和生物医学传感器；第8章介绍多传感器融合与数据融合技术。上述的现代传感技术已广泛应用于工业、农业、商业、国防、科研、文教、医疗、卫生和家庭生活等各个领域。

本书取材新颖、内容丰富、结构合理，反映了现代传感技术领域的新发展和新成果。为了帮助读者掌握各章内容，本书设有一定数量的习题与复习思考题。

本书可作为仪器科学与技术、机械工程、信息工程、电子科学与技术、自动控制等学科或专业的本科生、研究生教材，也可供相关领域的工程技术和研究人员以及其他相近专业的师生参考。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取。

索取邮箱：EdmondYan@sina.com

EdmondYan@hotmail.com

图书在版编目 (CIP) 数据

现代传感技术/黄元庆主编. —北京：机械工业出版社，
2007. 11

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 22837 - 0

I. 现… II. 黄… III. 传感器 - 技术 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 177316 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：贡克勤 责任编辑：贡克勤 责任校对：申春香

封面设计：王伟光 责任印制：邓 博

北京京丰印刷厂印刷

2008 年 1 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 16.5 印张 · 385 千字

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 22837 - 0

定价：24.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 88379727

封面防伪标均为盗版

前 言

传感技术是现代信息技术的关键技术之一，与通信技术、计算机技术并称信息产业的三大支柱，分别是智能系统的“感官”、“神经”和“大脑”。现代传感技术的应用极其广泛，对于光机电一体化、控制、测试、计量等领域，传感器都是必不可少的获取信息的关键部件。越来越多的科技工作者对传感技术予以高度的重视，促使传感技术加速发展，以适应信息处理技术的需要。因此，编者根据自己的教学实践，参考有关最新资料编写本书，纳入最新传感技术到教材中，以区别现有的传感器类的教材。

本书共分8章，第1章介绍光波干涉传感技术；第2章介绍光电传感技术；第3章介绍图像传感技术；第4章介绍计量光栅传感技术；第5章介绍光纤传感技术；第6章介绍基于MEMS的传感技术；第7章介绍化学和生物医学传感器；第8章介绍多传感器融合与数据融合技术。上述的现代传感技术广泛应用于工业、农业、商业、国防、科研、文教、医疗、卫生和家庭生活等各个领域。

本书的主要特点是：按现代传感技术类别分章，内容新颖、信息量大、结构合理，涉及多学科领域，本书充分反映了现代传感技术的新发展和新成果。

本书可作为仪器科学与技术、机械工程、信息工程、电子科学与技术、自动控制等学科或专业的本科生、研究生教材，也可供相关领域的工程技术和研究人员以及其他相近专业的师生参考。不同专业可以根据教学要求有选择地进行讲授。现代传感技术是一门实践性较强的课程，为了保证教学质量，必须开设适量的实验。

本书绪论以及第1、2、3、4、8章由黄元庆编写，第5章由万瑾编写，第6、7章由颜黄苹、万瑾编写，黄元庆教授负责统编全稿，万瑾负责文稿的总体编辑整理工作。

本书在编写过程中，参阅了大量国内外文献，在此向这些文献的作者表示衷心感谢。本书由天津大学的林玉池教授、上海交通大学的颜国正教授主审，参加审稿的还有华侨大学的张认成教授、集美大学的迟岩教授、厦门理工学院的韩旻教授。他们对全书进行了全面、认真、细致的审读工作，提出了许多宝贵意见，编者在此表示深切谢意。本实验室的林淑芬等研究生以及



本单位许多其他同志均为本书的文字录入、校对付出了辛勤的劳动，在此一并表示感谢。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取。

索取邮箱：EdmondYan@sina.com

EdmondYan@hotmail.com

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免有错误和不足之处，恳请各位专家、读者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第1章 光波干涉传感技术

1.1 光波传感技术基本知识	6
1.1.1 光的电磁场理论	6
1.1.2 光波的合成与干涉	14
1.2 激光光束	21
1.2.1 激光器基本结构与模式	21
1.2.2 激光光束的特性	24
1.2.3 高斯光束	26
1.3 干涉传感技术与应用实例	37
1.3.1 外差干涉计量	37
1.3.2 准外差干涉计量	40
1.3.3 激光干涉测量应用实例	45
习题与复习思考题	51

第2章 光电传感技术

2.1 电磁波谱	53
2.2 辐射源特性及其度量	54
2.3 光电效应	55
2.3.1 光电导效应	55
2.3.2 光生伏特效应	58
2.3.3 光电发射效应	58
2.4 光电探测传感器件	59
2.4.1 光电探测传感器件的基本特性参数	60
2.4.2 描述噪声的基本参数	62
2.4.3 半导体光电探测传感器件	65
2.4.4 光电探测传感器件主要特性比较与选用原则	68
2.5 光电位置传感器	70
2.6 光电传感技术应用	73
2.6.1 光电传感技术的应用类型	73
2.6.2 光电传感技术应用实例	74
习题与复习思考题	77

第3章 图像传感技术

3.1 CCD 图像传感器	78
---------------------	----

3.1.1 CCD 的 MOS 结构及存储电荷原理	78
3.1.2 CCD 图像传感器基本特征参数	81
3.1.3 CCD 摄像器件	83
3.2 CMOS 图像传感器	86
3.2.1 CMOS 传感器结构与工作原理	87
3.2.2 CMOS 图像传感器的性能指标	89
3.2.3 典型 CMOS 图像传感器	94
3.3 CCD 与 CMOS 传感器的比较	99
3.4 图像测量技术	100
3.4.1 CCD 图像测量系统结构与测量原理	101
3.4.2 CCD 视频信号处理与数据采集系统	104
习题与复习思考题	108

第4章 计量光栅传感技术

4.1 计量光栅结构的基本特点与种类	109
4.2 光栅测量的基本原理与莫尔条纹的基本特性	110
4.2.1 莫尔条纹的形成	110
4.2.2 莫尔条纹测量原理与基本特性	110
4.3 常见的光栅光学系统	116
4.3.1 光强调制型光学系统	116
4.3.2 相位调制型光学系统	118
4.4 莫尔条纹信号处理方法	121
4.4.1 信号采集与运动方向辨别	121
4.4.2 信号处理——差分放大器	124
4.5 高倍细分技术	126
4.5.1 细分技术种类	126
4.5.2 电子细分技术	126
4.5.3 微控制器细分技术	133
4.6 计量光栅传感技术应用实例	138



4.6.1 虚拟光栅 Moire 形貌测试系统	139
4.6.2 光栅闭环数控机床位置检测装置	142
习题与复习思考题	143
第5章 光纤传感技术	144
5.1 光纤的基础知识	144
5.1.1 光纤波导的原理	144
5.1.2 光纤的分类	145
5.1.3 光纤的特性	146
5.2 强度调制型光纤传感器	148
5.2.1 非功能型光强调制	148
5.2.2 功能型光强调制	153
5.3 相位调制型光纤传感器	156
5.3.1 晶体的电光效应	156
5.3.2 晶体的弹(声)光效应	158
5.3.3 晶体的热光效应	159
5.3.4 晶体的磁光效应	160
5.3.5 相位调制型光纤传感器	161
5.4 波长调制型光纤传感器	161
5.4.1 光纤光栅调制原理	161
5.4.2 光纤光栅的分类	162
5.4.3 布拉格光纤光栅	163
5.4.4 长周期光纤光栅	165
5.4.5 LPFG 传感器	166
5.5 偏振调制型光纤传感器	170
5.5.1 基于旋光效应的偏振调制	170
5.5.2 基于磁光效应的偏振调制	171
5.5.3 基于普克尔效应的偏振调制	172
5.5.4 基于克尔效应的偏振调制	175
5.5.5 基于光弹效应的偏振调制	175
5.6 频率调制型光纤传感器	177
5.6.1 光学多普勒概念	177
5.6.2 光纤多普勒系统	177
5.7 光子晶体光纤传感器	179
5.7.1 光子晶体	179
5.7.2 光子晶体光纤的结构与制备	181
5.7.3 光子晶体光纤的特性	184
5.7.4 光子晶体光纤传感器	185
5.8 分布式光纤传感器	186
5.8.1 非本征式光纤传感器	187
5.8.2 分布式光纤传感器	188
习题与复习思考题	189
第6章 基于 MEMS 的微传感技术	190
6.1 用于微传感器的 MEMS 器件制作技术	190
6.1.1 超精密加工及特种加工	191
6.1.2 表面微加工技术	191
6.1.3 体微加工技术	192
6.1.4 LIGA 技术	193
6.2 力学微传感器	193
6.2.1 微压力传感器	193
6.2.2 微加速度计	195
6.2.3 微陀螺仪	198
6.3 光学微传感器	200
6.3.1 微红外线传感器	200
6.3.2 微光开关	201
6.3.3 微光机电系统型光开关	205
6.4 微流量传感器	208
习题与复习思考题	209
第7章 化学和生物医学传感器	210
7.1 化学传感器	210
7.1.1 化学传感器的结构与分类	210
7.1.2 气体传感器	211
7.1.3 湿度传感器	213
7.2 生物传感器	217
7.2.1 生物传感器的工作原理	217
7.2.2 酶传感器	218
7.2.3 微生物传感器	220
7.2.4 免疫传感器	221
7.2.5 生物传感器的发展趋势	223
7.3 生物芯片	224
7.3.1 生物芯片概述	224
7.3.2 生物芯片的分类	225
7.3.3 生物芯片的应用	228
7.4 化学与生物医学传感器的应用——嗅觉传感器	229
7.4.1 嗅觉器官基本结构与嗅觉识别气味的机理	229
7.4.2 嗅觉传感器的基本组成	231
7.4.3 嗅觉传感器的发展趋势	233
习题与复习思考题	234



第8章 多传感器融合与数据融合

技术	235
8.1 多传感器融合系统	235
8.1.1 多传感器融合基本概念	235
8.1.2 多传感器融合技术	236
8.2 多传感器数据融合技术概述	238
8.2.1 多传感器数据融合	238
8.2.2 多传感器数据融合的特点	238
8.3 多传感器数据融合系统	239
8.3.1 多传感器数据融合处理模型	239
8.3.2 多传感器数据融合层次	240
8.4 多传感器数据融合的系统结构	
形式	242
8.5 多传感器数据融合的理论方法	245
8.5.1 随机类方法	246
8.5.2 人工智能类方法	247
8.6 多传感器数据融合技术应用	
实例	248
8.6.1 多传感器数据融合技术在图像	
融合中的应用	248
8.6.2 多传感器数据融合在线检测系	
统中的应用	249
习题与复习思考题	252
参考文献	253

绪 论

人类社会进入信息时代，信息技术已成为促进科学技术进步、加速国民经济发展以及建设社会文明的关键技术，传感器也越来越受人们的重视。新的传感器件与传感技术不断涌现，它们在信息技术系统中的地位与重要性也进一步得到充分的体现。

信息技术是人们对外界信息进行采集、信号传输、处理以及控制过程所需的技术。它所涉及的技术领域非常广，其中包括微电子技术、传感技术、通信技术、计算机技术、材料科学与技术等。但作为一个系统，其构成单元只有3个：传感器、通信系统和计算机，即传感器、通信技术和计算机技术是现代信息技术的三大支柱，构成信息系统的感官、神经和大脑，实现信息的获取、传递、转换、处理与控制。

传感器是信息技术的基础，是信息系统的感官，其作用与地位十分重要。传感器的性能、质量和技术水平直接决定了信息系统的功能、精度、质量和所期望的结果。在科学研究中，传感器作为获取信息的“先行官”，为许多重大科学发现起关键性作用；在工业自动化生产过程中，具有“倍增器”作用；在国家安全国防建设上显示出极强的“战斗力”；而以传感器为核心构成的某些仪器仪表已成为国民在生活活动中的物化法官。因此，在某种程度上，传感器水平是一个国家综合国力的体现。

传感器发展极为迅速，已经逐渐形成了一门新的学科。以传感器为核心逐渐外延，与微电子学、材料科学、信息处理技术以及计算机技术相互结合而形成一种新的综合密集型技术。这种集成技术已逐渐形成了一个崭新的技术领域——传感技术。

按国家标准（GB/T 7665—1987），传感器（transducer/sensor）的定义为：能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件和装置，通常由敏感元件和转换元件组成。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受和响应被测量的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输和测量的电信号部分。

传感器获取的信息可以是各种物理量、化学量和生物量，而转换后的信息也可以有多种形式。从发展眼光看，有些信息的测量和控制并不一定需要用电量，某些情况下，用其他形式如光可能更为方便。当然，目前大部分传感器还是把外部信息转换为电量的。因为它与当前发展较成熟的电子信息技术和计算机技术更容易配套，符合方便使用的原则。

传感技术属于高技术范畴，涉及到多学科领域的一种集成技术。它的发展既受到相关技术的制约，又可对其他学科产生深远的影响。

传感器种类繁多，所涉及的面非常广，几乎包括了现代所有的学科。一种被测量可以用不同的传感器来测量，而同一原理的传感器通常又可测量多种被测量，因此分类方法各不相同，目前尚没有统一的分类方法。一般常用的分类方法有以下几种：

1. 按测量原理分类

现有传感器的测量原理主要是依据物理学各种定律和效应、化学原理以及相关理论



等。如根据电阻定律,相应的有电位计式、应变式传感器;根据变磁阻原理工作的有电感式、变压器式、电涡流式等传感器;根据半导体有关理论,则相应的有半导体力敏、热敏、光敏、气敏等固态传感器。

2. 按输入量分类

按输入量传感器可分为温度、压力、位移、速度、湿度等传感器。这种分类方法给使用者提供了方便,容易根据测量对象来选择所需的传感器。

3. 按输出量分类

按输出量分类,传感器有模拟式传感器和数字式传感器。模拟式传感器的特点是输出信号为模拟量;数字式传感器的特点是输出信号为数字量。

4. 按传感器的构成原理分类

按传感器的构成原理来分,可分为结构型传感器和物性型传感器两大类。结构型传感器是依靠传感器结构参数的变化而实现信号转换的,主要是通过机械结构的几何尺寸和形状变化,将这些变化转化为相应的电阻、电感、电容等物理量的变化,从而检测出被测量的信号。这种传感器目前应用得最为普遍,它们是20世纪60年代的先进技术。随着技术的发展和新型传感器的出现,结构型传感器面临着新的挑战。物性型传感器是相对于传统结构型传感器而言的,是依靠敏感元件材料本身物理性质的变化来实现信号变换的,主要指近些年出现的半导体类、陶瓷类、光纤类及其他新型材料的传感器。

新型物性传感器的基本特性与构成其敏感元件的核心材料的性能不可分割,是利用材料固有特性,即本身物理性质的变化,来实现对外界信息的检测。它主要是以半导体、电介质、铁磁体等作为最敏感材料的固态器件。例如,利用材料在光照下改变特性可以制成光敏传感器;利用材料在磁场作用下改变其特性可以制成磁敏传感器等。材料在外界条件下改变其特性的现象通常被描述为各种效应。从理论上说,各种效应均可能作为传感器的基础效应,由于直接利用了材料的各种效应,节省了各种转换环节,使敏感元件和转换元件结合为一体,因而实现了传感器的固体化,减少了体积,取消了可动部分,提高了可靠性。新型传感器又往往用微电子技术进行生产,使之易于批量生产,一致性好,降低了生产成本。

5. 按外界信息及变换效应分类

按其外界信息及变换效应,传感器可分为三大类,即物理传感器、化学传感器和生物传感器。

物理传感器是利用物理效应,处理光、声、电、磁、热等物理量,开发较早,因而也较成熟。其起导电作用的是电子,相对开发较容易。

化学传感器主要用于检测化学物质的种类和浓度,利用化学效应,其起导电作用的是离子。离子的种类很多,故化学传感器变化极多,较为复杂,相对开发难度也较大。

生物传感器是利用生物活性物质如分子、细胞,甚至某些生物机体组织对某些物质特性的选择能力构成的传感器。如葡萄糖酶和氧电极结合形成的葡萄糖传感器。它的研究历史较短,但发展非常迅速,随着半导体技术、微电子技术和生物技术的发展,生物传感器的性能将进一步改善,多功能、集成化和智能化的生物传感器也将成为现实,前景十分美好。



目前,传感器的应用领域已十分宽广,在国防、航空、航天、交通运输、能源、电力、机械、石油化工、轻工、纺织等工业部门和环境保护、生物医学工程方面都已经采用了大量传感器,而且也已经逐渐把传感器应用到办公用和家庭用的电器设备上了,使人们的工作、生活逐渐步入信息时代。所以有人把传感技术作为“支撑现代文明的科学技术”。

但传感技术的重要性并不是一开始就为人们所普遍认识的,它的发展相应于计算机而言已显得非常落后,其原因是多方面的:从计算机发展的历史看,1946年第一台计算机研制成功后,计算机主要用于复杂的计算,对传感器没有什么要求。而当1975年第一代集成电路计算机问世以后,计算机开始在工业控制等领域显示出卓越的功能。此时作为检测信息用的传感器并没有经历计算机这样的发展过程。计算机处理信息的能力经过30多年的发展已日趋完善,因此到了20世纪80年代,国际上出现了“信息处理能力过剩,信息获取能力不足”的问题。为了解决这一问题,世界各国几乎在同一时期掀起了一股“传感器热”。美国学术界及产业界把传感器作为“20世纪80年代的技术”。在日本,把传感技术列为6大核心技术(计算机、半导体、通信、激光、超导和传感技术)之一。我国在“八五”规划之后也把发展传感技术列为一级学科项目。因此开发各种新型的传感器已成为当前发展科学技术的主要课题之一。

近年来,随着科学技术的飞速发展,特别是微电子加工技术、计算机技术、信息处理技术、材料技术以及生物技术的发展,使得综合各种先进技术的传感技术进入一个前所未有的飞速发展阶段。

传感技术的发展主要沿着两个方向进行:一是开发新材料、研究新工艺和利用新概念、新原理、新的设计方法,开发出新型传感器;二是研究传感器的高精度、微型化、集成化、智能化以及多传感器的融合和传感技术的集成等。

新型传感器利用的原理包括了各种物理效应、化学反应、生物功能等。例如用硅作为传感器的材料,利用光电效应、光阻效应和光磁效应可以测量辐射光信号;利用硅的压阻效应横向光电效应可以测量力学信号;利用贝塞尔温差电动势效应、能斯特效应和苏里效应可以测量磁信号;利用离子场效应可以测量化学特性。

传感器与传感技术的发展与新材料研究开发是密切相连的,可以说各种新型传感器孕育在新材料之中。新型传感器采用的材料也趋于多样化,可包括黑色金属、有色金属、稀土金属工程塑料、半导体材料、高分子材料以及各种特殊材料(如压电材料、热电材料、光弹性材料、高磁导率材料等);设计技术主要开展多种传感器的参数优化设计、高精度非线性状态、动态仿真及建模并进行主要工艺的计算机模拟。传感器性能的关键工艺主要涉及到机械加工、电加工、化学加工、光学加工以及微细加工技术等。目前国际上如出现一种新原理、新材料、新元件或新工艺就会很快地应用于传感器,并研制出一种新的传感器。例如,由于半导体材料与工艺的发展,出现了一批能测量多参数的半导体传感器,甚至包括放大器和执行器在内的微系统。

新型传感器和现代传感技术与传统传感器及技术相比,其主要区别在于具有智能化、多功能化、综合型、集成化、网络化等特征。

智能化:可实现信息的自动获取、数据的自动采集、信号自动处理与传输、参数的自



动补偿（尤其是动态环境参数的随机自动补偿）、系统自校正、逻辑判断与自我诊断、控制信号的自动反馈与伺服控制。

多功能化：检测参数非单值，实现多参数同时检测，集检测、控制、显示等功能于一体。

综合型：涉及多学科知识，可检测不同学科的不同相关参量。

集成化：采用纳米技术与 MEMS 技术，实现传感器的阵列或多传感器的融合，集传感器、执行器、信号处理、通信接口甚至电源于一体，构成一个微系统。

网络化：采用通信接口技术，实现数据或图像的远程传输与对象远程监控，扩大传感器的功能与应用范围。

当前，新型传感器和现代传感技术研究热点主要集中在光传感器、化学传感器、生物医学传感器、MEMS 传感器以及多传感器融合技术等。

1. 光传感技术

光学是支古老的学科，但由于激光的出现以及光电子技术的快速发展，同时由于光子特有的抗电磁干扰性质和光学传感器具有抗腐蚀、耐高温等特性，故已广泛用于极端环境的信息提取、非接触精密测量、远程控制等。采用新原理、新材料、新设计方法、新工艺研究开发的光传感器不断涌现，并得到迅速应用。

光传感器件种类较多，传感技术内容涵盖的范围甚广。主要光传感器有光波干涉传感器、光电传感器、光纤传感器、图像传感器以及计量光栅传感器，随着器件的发展与应用不断推广，已形成了各自相关的传感技术。光电传感器的结构和形式多种多样，光电传感技术在电子装置和电子设备系统中有广泛的用途；光纤传感器具有抗电磁场干扰、高绝缘强度、耐高温、耐腐蚀、质轻、柔韧、能与数字通信系统兼容等突出特性，光纤传感技术在国民经济各部门的生产过程自动化控制、在线检测、故障诊断、安全报警等方面有着广泛的应用；CCD、CMOS 等图像传感器经过多年的发展，已形成从可见光到红外线的产业化规模，其图像传感技术已广泛应用于航天遥感、天文、医疗和工业检测仪器目标识别、图像测量、侦察等各个领域；基于光波干涉原理构筑的各类干涉系统，是目前超精密测量中应用最多的传感技术之一；而基于莫尔干涉条纹进行精密测量、定位与控制的计量光栅传感器，在工业数控机床等方面得到了极其广泛应用。

2. 化学传感技术

化学传感技术主要用于检测物质成分。近年来，化学传感技术之所以能够快速发展，是基于仿真学研制开发的嗅觉传感器和味觉传感器，能识别各种气体成分与各种气味。这类对气体敏感的气敏传感器可广泛用于环境污染、食品卫生、医疗、有害气体、违禁物品的检测，是一类很有生命力的传感器。

3. 生物医学传感技术

生物医学传感技术被列为 21 世纪五大医学检验技术之一，是现代生物技术与微电子学、化学、光学、热学等多学科交叉结合的产物。生物医学传感技术的最新进展是由于生物芯片技术的兴起。基于生物芯片技术的生物医学传感器，在医学上的临床诊断、医学工程以及基因工程有着广泛应用前景，是未来生物医学传感器发展的重要方向。

4. MEMS 传感技术

MEMS 传感技术所涉及的最重要的技术学科包括电子机械、IC、材料物理化学、生物、光学、流体等工程以及封装技术。MEMS 传感器已从对高度复杂的单个传感器的模拟信号分析,转变为由微处理器控制的对传感器阵列信号组成的数字化处理研究。由于单个传感器无法对一种未知化学物质做出惟一的鉴别,而多个传感器是阵列中每种传感器有不同的特性,将对物质中的化学成分产生不同的特征信号曲线,经神经网络等模式识别技术处理后,与标准曲线相比较,可准确鉴别出复杂的物质化学成分,这种多种传感器阵列与数据处理相结合,就是目前出现的“电子鼻”。这种“电子鼻”将在工业、国防、环保以及人们生活中得到广泛应用。

5. 多传感器融合技术

近年来,多传感器数据融合技术已经成为各相关学科研究的一个热点,在众多领域中得到了应用,并且不断有新的理论和应用方法问世。因为采用传感器融合技术,可实现综合考虑各传感器特性、解决相互干扰、优点共享,以及提高多传感器复合系统的性能、增强系统对周围环境情况的了解和判断的准确性。

随着科技的不断发展,现代传感器技术也必将不断创新与发展,在一个国家的综合国力中的作用,也一定会得到充分的体现。

第1章 光波干涉传感技术

自激光问世以来,光学这支古老学科显得异常活跃。经典的干涉仪、传统的光波干涉技术,与微电子、计算机等技术相结合,在信息提取、自动控制,尤其是在精密、超精密测量中得到新的广泛应用,形成一种新的现代传感技术。

本章主要介绍光波干涉传感技术中相关的光的电磁场理论基本知识、光波干涉的基本原理、激光光束的基本特性,以及现代光波干涉技术外差法、准外差法干涉计量技术与典型的干涉仪系统,并介绍了两个应用实例。

1.1 光波传感技术基本知识

1.1.1 光的电磁场理论

1. 麦克斯韦方程组

光是一种电磁波,因此可用电磁场理论解释光的辐射、反射、折射、干涉、衍射以及光与物质相互作用等现象。电磁场的普遍理论总结为麦克斯韦(Maxwell)方程组,它是麦克斯韦把稳定电磁场(静电场和稳恒电流的磁场)的基本规律推广到不稳定电磁场的普遍情况而得到的。从方程组出发,结合具体的条件,也可以定量计算在这些给定条件下发生的上述光学现象。

不稳定电磁场的普遍规律可以总结为下面4个微分方程式:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中, $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$ 分别表示电感强度、电场强度、磁感应强度和磁场强度;算符 $\nabla = x_0 \frac{\partial}{\partial x} + y_0 \frac{\partial}{\partial y} + z_0 \frac{\partial}{\partial z}$,称为哈密顿(Hamilton)算符, x_0 、 y_0 、 z_0 分别为 x 、 y 、 z 坐标轴的单位矢; $\nabla \cdot \mathbf{D}$ 表示 $\mathbf{D}$ 的散度(也记为 $\text{div} \mathbf{D}$); $\nabla \cdot \mathbf{B}$ 表示 $\mathbf{B}$ 的散度; $\nabla \times \mathbf{H}$ 表示 $\mathbf{H}$ 的旋度(也记为 $\text{rot} \mathbf{H}$ 或 $\text{curl} \mathbf{H}$); $\nabla \times \mathbf{E}$ 表示 $\mathbf{E}$ 的旋度; $\partial \mathbf{D} / \partial t$ 为位移电流密度,它表示单位面积上的位移电流值(通过电场中任一截面的位移电流等于通过该截面的电通量的时间变化率); $\mathbf{j}$ 为传导电流密度。

位移电流和传导电流是两个不同的物理概念。传导电流意味着电荷的流动,而位移电



流意味着电场的变化,但两者在产生磁场方面是等效的。因此,在不稳定电磁场中,磁场既包括传导电流产生的磁场,也包括位移电流产生的磁场。

构成一组完整的反映电磁场普遍规律的方程组还应结合下列方程:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}$$

式中, ε 、 μ 、 γ 分别称为介电常数(或电容率)、磁导率和电导率。在各向同性的均匀电介质中, $\gamma = 0$, ε 和 μ 为常数。

2. 电磁场的波动性

(1) 波动方程 从麦克斯韦方程组出发,可求解电磁场的波动方程。为简单起见,在此讨论在无限大均匀介质中的情况,这时 ε 、 μ 为常数,并且在远离辐射源的区域,不存在自由电荷和传导电流 ($\rho = 0, \mathbf{j} = 0$),因而麦克斯韦方程组简化为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

取式(1-2)中第三式的旋度,并将第四式代入,得到

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{H} = -\varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

根据矢量分析公式

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$$

由于 $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$, 所以 $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\nabla^2 \mathbf{E}$, 得

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

对于 $\mathbf{H}$, 同样可以得到

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0$$

令

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \quad (1-3)$$

以上两式可化为

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-4)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-5)$$

式(1-4)和式(1-5)即熟知的波动微分方程,表明电场和磁场以波动形式在空间传



播, 传播速度为 $v \left(= \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \right)$ 。真空中电磁波的传播速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \quad (1-6)$$

式中, ε_0 和 μ_0 为真空中的介电常数和磁导率, 已知 $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, 所以

$$c = \frac{1}{\sqrt{8.8542 \times 10^{-12} \times 4\pi \times 10^{-7}}} \text{ m/s} = 2.99794 \times 10^8 \text{ m/s}$$

该数值与实验中测定的真空中光速数值非常接近。现在测定的真空中光速的最精确数值为 $c = (2.997924562 \times 10^8 \pm 1.1) \text{ m/s}$ 。由这点也可看出, 光是一种电磁波。

由式 (1-3) 和式 (1-6), 可以得到电磁波在传播介质中的绝对折射率

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{\varepsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\varepsilon'\mu'} \quad (1-7)$$

式中, ε' 和 μ' 分别称为相对介电常数和相对磁导率, $\varepsilon' = \varepsilon/\varepsilon_0$, $\mu' = \mu/\mu_0$ 。

(2) 平面电磁波 式 (1-4) 和式 (1-5) 是两个偏微分方程, 它们的解可以有多种形式, 平面波、球面波和柱面波都可满足方程。解的具体形式由 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 满足的边界条件和初始条件决定。这里, 以平面波为例。

假设平面波沿直角坐标系 x 、 y 、 z 的 z 方向传播, 那么电磁场值与 x 、 y 坐标无关, 电磁场值只是 z 和 t 的函数。这样, 电磁场的波动方程式 (1-4) 和式 (1-5) 化为

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0$$

采用行波法或分离变量法求解, 可得波动方程的特解为

$$\mathbf{E} = \mathbf{A} \exp[-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{z})] \quad (1-8)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}' \exp[-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{z})] \quad (1-9)$$

相应的标量形式为

$$E = A \exp[-i(\omega t - kz)] \quad (1-10)$$

$$H = A' \exp[-i(\omega t - kz)] \quad (1-11)$$

式中, $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{A}'$ 和 A 、 A' 分别是电振动和磁振动的矢量振幅和标量振幅; ω 为角频率; $\mathbf{k}$ 为沿传播方向波矢量; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数。

式 (1-8) 和式 (1-9) 或式 (1-10) 和式 (1-11) 通常称为平面简谐波的波动公式, 对于光波来说, 它们就是平面单色光波的波动公式。

指数中的宗量 ($\omega t - kz$) 称为相位, 该量十分重要, 决定着平面波在传播轴上各点引起的振动的状态。角频率 ω 和平面波振动频率 ν 的关系为

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \frac{1}{T}$$



式中, T 为周期。周期 T 与速度 v 的乘积称为波长 λ , 即 $\lambda = vT$ 。

由于平面波的传播速度随介质而异, 因此在不同介质中, 波长有不同的数值, 即有

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

式中, λ 为介质中平面波波长; λ_0 为真空中平面波波长, $\lambda_0 = cT$; n 为平面波在介质中的折射率, $n = c/v$ 。

波动公式也可写成下列两种三角函数形式:

$$E = A \cos(\omega t - kz) \quad (1-12)$$

$$H = A' \cos(\omega t - kz) \quad (1-13)$$

为了表示单色光波的空间周期性, 往往将波长 λ 称为单色光波的空间周期, $1/\lambda$ 称为空间频率, 将波数 $k (= 2\pi/\lambda)$ 称为空间角频率。单色光波的时间周期性和空间周期性紧密相关。

若平面波沿空间任一方向传播时, 其相应波动公式为

$$E = A \exp[-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (1-14)$$

相应复振幅为

$$\tilde{E} = A \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})]$$

3. 平面光波在两个透明电介质分界面上的反射和折射

(1) 菲涅耳公式 根据熟知的反射定律和折射定律, 当一个平面光波射到两种不同均匀透明介质的分界面上时, 将分成两个波: 一个透射波和一个反射波。从电磁场的边界条件也可以证明这两个波的存在并求出其传播方向和振幅关系式。

假设平面光波 $E = A \exp[-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})]$ 沿着入射面 XOZ 投射到折射率分别为 n_1 和 n_2 的二介质分界面 XOY 上, 以 θ_1 、 θ_1' 和 θ_2 分别表示入射角、反射角和折射角, 如图 1-1 所示。 E 的方向不一定与入射面垂直或平行, 但可以把 E 分解为垂直于入射面的分量 E_s 和平行入射面的分量 E_p , 设 E_s 的正向沿着 y 轴方向, 即与图面垂直并背向读者, E_p 的正向如图 1-1 所示。下面只讨论电矢量垂直于入射面的光波在分界面上的反射与折射, 对于电矢量平行于入射面的光波的情形, 讨论方法完全类似。

以 E_{1s} 、 E'_{1s} 和 E_{2s} 分别表示入射波、反射波和折射波的垂直于入射面的电矢量分量, 它们的波动公式分别为

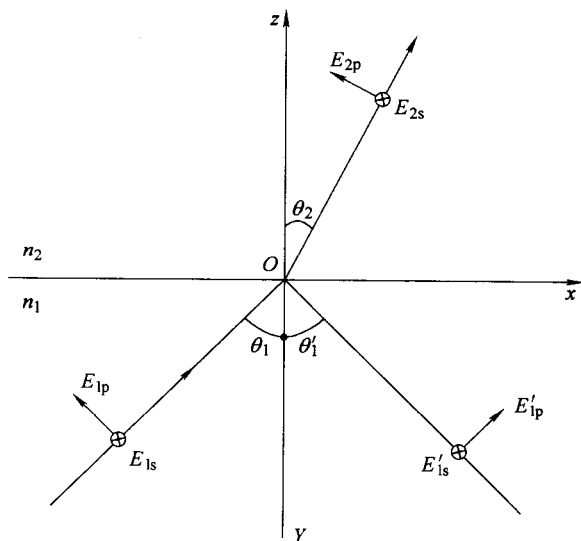


图 1-1 平面波入射到分界面 XOY