

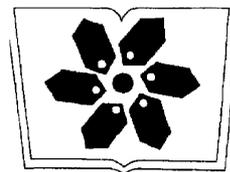


全分布式 光纤传感技术

张旭苹 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

全分布式光纤传感技术

张旭苹 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以全分布式光纤传感器为核心,详细介绍了光纤中的瑞利散射、拉曼散射、布里渊散射等散射效应;结合作者多年来在传感器领域的研究成果和经验,对全分布式光纤传感器的原理、结构和技术等方面进行了深入细致的阐述,并列举了大量应用实例。

本书可供理工科院校电子、信息、光电和自动化等专业从事传感器研究的高年级本科生、研究生以及相关领域的研究人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

全分布式光纤传感技术/张旭苹著. —北京:科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-036381-7

I. ①全… II. ①张… III. ①光纤传感器 IV. ①TP212.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 319043 号

责任编辑:杨 锐/责任校对:包志虹

责任印制:赵德静/封面设计:许 瑞

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>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013年1月第一次印刷 印张: 20 1/4

字数: 400 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

传感器作为信息获取的首要 and 关键部件，在信息科学技术中占有十分重要的地位。随着信息技术和自动化技术的发展，传感器技术已成为重要的基础性技术，掌握并合理应用传感器技术已经成为工程技术人员的基本素养要求。

与机电等传统型传感器相比，全分布式光纤传感器具有光纤传感器绝缘、抗电磁场干扰、损耗低、抗腐蚀、体小易埋入等独特的优势；而与传统点式或分立式光纤传感器相比，全分布式光纤传感因不需制作传感器（只需采用裸光纤）并可同时测量获得沿光纤路径上的时间和空间连续分布信息，完全克服了点式传感器（如光纤光栅传感器）难以对被测场进行全方位连续监测的缺陷，且具有损耗低、信号数据可多路传输等传统传感器所不具备的优越性能，因而在能源、电力、航空航天、建筑、通信、交通、安防、军事等诸多领域的故障诊断及事故预警中显示出十分诱人的应用前景。

虽然目前国内各高校相关专业均已开设了传感器技术课程，但光纤传感技术还只是其中的一个章节，而全分布式光纤传感器更是一带而过，这与缺乏系统专业的相关教材有关。随着物联网技术的推进，特别是国防和民生大型工程建设的飞速发展，从事光纤传感研究的队伍不断壮大，研究人员和研究生迫切需要一本系统介绍全分布式光纤传感技术的书籍。

基于此现状，本书着重介绍光纤中各种散射效应的物理机制，省略了光纤光学和波导光学等内容。对基于光纤中各种散射效应的全分布式光纤传感技术 [包括基于光纤中瑞利散射的光时域反射（OTDR）技术、相干光时域反射（COTDR）技术、偏振光时域反射（POTDR）技术等，基于拉曼散射的拉曼光时域反射（ROTDR）技术、拉曼光频域反射（ROFDR）技术，基于布里渊散射的布里渊光时域反射（BOTDR）技术、光时域分析（BOTDA）技术，等] 的研究现状和发展趋势、传感器设计方法以及应用领域进行了详尽的阐述。

本书第 1、3、5 章由南京大学张旭萃教授负责组稿撰写，其中南京大学王如刚、王峰、胡君辉分别参与了第 1、3、5 章的撰写，加拿大渥太华大学鲍晓毅教授撰写了 5.2 节和 5.5 节的部分内容；第 2 章由加拿大渥太华大学陈亮教授撰写；第 4 章由中国计量学院张在宣教授组稿撰写。南京大学光通信工程研究中心的全体同仁及研究生为本书的创作提供了许多资料和实验数据等，特别是路元刚、宋跃江、梁浩、吕立冬、王祥传、杨刚等为本书的整理、图表制作提供了很

多的帮助。本书还大量引用了国内外同行的研究成果。在此，一并表示衷心的感谢。若参考文献有漏标之处，敬请海涵。

在书稿撰写过程中还得到了中国工程院院士、中国仪器仪表学会理事长庄松林教授以及中国科学院院士姚建铨教授的指导与支持。

传感器技术已经由零散研究转为集中研究、由军用走向军民两用并举、由少量应用进入大面积开发、由单点传感步入全分布式网络化传感。可以预见，传感技术特别是全分布式光纤传感技术的发展将会像光网络的发展一样迅猛。本书结合了作者多年来在该领域的研究成果和经验，并列举了大量的应用实例。希望本书的出版，对相关领域的工作者了解光纤传感领域的前沿动态、启发创新思维有较高的参考价值。

本书得到了国家自然科学基金项目“新型连续分布式光纤应变/温度实时监测仪”(61027017)、“光栅阵列与 POTDR 融合传感系统的机理与技术研究”(61107074)，国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“新一代光纤智能传感网与关键器件基础研究”的第三课题“基于布里渊效应的光纤传感网基础研究”(2010CB327803)和第四课题“基于非线性效应融合原理的光纤拉曼光子传感网基础研究”(2010CB327804)的资助。此外，本书的出版得到了中国科学院科学出版基金的资助。

由于作者水平有限，时间仓促，错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2012年8月

目 录

前言

第 1 章 光纤传感技术	1
1.1 光纤传感技术概述.....	1
1.1.1 光纤传感技术原理与特点	1
1.1.2 光纤传感技术的分类	4
1.2 国内外光纤传感技术的发展历史和现状	11
1.2.1 国际光纤传感技术的发展历史和现状.....	11
1.2.2 我国光纤传感技术的发展历史和现状.....	13
1.3 全分布式光纤传感技术	15
1.3.1 全分布式光纤传感技术的特点.....	15
1.3.2 全分布式光纤传感技术的主要参数.....	16
1.3.3 全分布式光纤传感技术的应用.....	18
1.3.4 全分布式光纤传感技术的发展方向.....	23
参考文献.....	25
第 2 章 光纤中的光散射	27
2.1 光纤中的自发散射谱	27
2.2 宏观麦克斯韦方程组	28
2.3 电荷对电磁场的响应	35
2.4 瑞利散射	36
2.5 自发拉曼散射	38
2.6 自发布里渊散射	48
2.7 受激布里渊散射	51
2.8 总结	60
参考文献.....	60
第 3 章 基于瑞利散射的全分布式光纤传感技术	62
3.1 基于瑞利散射的光纤传感技术原理	62
3.2 光时域反射 (OTDR) 技术	63
3.2.1 OTDR 原理	63
3.2.2 OTDR 系统	64

3.2.3	OTDR 的性能指标	65
3.2.4	OTDR 的应用	67
3.3	相干光时域反射 (COTDR) 技术	68
3.3.1	COTDR 原理	69
3.3.2	COTDR 系统	72
3.3.3	超长距离 COTDR 系统中的非线性效应	73
3.3.4	COTDR 的关键技术	77
3.3.5	COTDR 的应用	89
3.4	偏振光时域反射 (POTDR) 技术	92
3.4.1	单模光纤中的偏振态	92
3.4.2	POTDR 传感技术	101
3.4.3	POTDR 的应用	107
3.5	光频域反射 (OFDR) 技术	111
3.5.1	OFDR 原理	111
3.5.2	OFDR 系统	112
3.5.3	OFDR 的应用	116
	参考文献	116
第 4 章	基于拉曼散射的全分布式光纤传感技术	120
4.1	基于拉曼散射的光纤传感技术原理	120
4.1.1	自发拉曼散射效应	120
4.1.2	基于拉曼散射的光纤温度传感器原理	121
4.2	拉曼光时域反射 (ROTDR) 技术	125
4.2.1	ROTDR 原理	125
4.2.2	光纤拉曼传感解调原理与技术	126
4.2.3	光纤拉曼温度传感器的结构、参数与优化设计	129
4.2.4	光纤拉曼温度传感器的研究现状和发展趋势	136
4.2.5	拉曼相关双光源自校正光纤拉曼温度传感器	141
4.2.6	脉冲编码光源光纤拉曼温度传感器	144
4.2.7	基于非线性散射效应融合原理的光纤传感器	147
4.2.8	拉曼散射传感信号的采集和处理技术	156
4.3	拉曼光频域反射 (ROFDR) 技术	170
4.3.1	ROFDR 原理	171
4.3.2	ROFDR 的空间分辨率和传感距离	174
4.3.3	ROTDR 和 ROFDR 的对比	175
4.3.4	ROFDR 的研究现状	177

4.4	全分布式光纤拉曼温度传感器的应用	178
4.4.1	在智能电网中的应用	178
4.4.2	在地铁中的应用	188
4.4.3	在油井和石油管道监测中的应用	195
4.5	总结	206
	参考文献	208
第5章	基于布里渊散射的全分布式光纤传感技术	217
5.1	研究概况	217
5.2	技术原理	219
5.2.1	光纤中的布里渊散射	219
5.2.2	基于布里渊散射的传感机制	224
5.3	布里渊光时域反射 (BOTDR) 技术	227
5.3.1	BOTDR 原理	227
5.3.2	直接探测型 BOTDR	230
5.3.3	相干探测型 BOTDR	236
5.3.4	BOTDR 中的交叉敏感问题	243
5.3.5	BOTDR 系统性能改善方案	245
5.4	布里渊光时域分析 (BOTDA) 技术	263
5.4.1	BOTDA 原理	263
5.4.2	基于差分脉冲对的 BOTDA	264
5.4.3	基于序列脉冲光的 BOTDA	272
5.4.4	其他一些 BOTDA	275
5.5	布里渊光频域分析 (BOFDA) 技术	277
5.6	布里渊光栅的产生及传感应用	281
5.6.1	布里渊光栅的特性	281
5.6.2	布里渊光栅的产生和读取	282
5.6.3	基于布里渊光栅的温度和应变传感器	284
5.7	布里渊光纤传感技术的应用	289
5.7.1	在结构健康监测中的应用	291
5.7.2	在通信领域中的应用	294
5.7.3	在智能电网中的应用	304
	参考文献	307

第 1 章 光纤传感技术

1.1 光纤传感技术概述

光纤传感技术是 20 世纪 70 年代伴随着光纤技术和光纤通信技术的发展而兴起的一种新型传感技术。它以光波为传感信号,以光纤为传输介质,感知和探测外界被测信号,在传感方式、传感原理以及信号的探测与处理等方面都与传统的电学传感器有很大差异。

光纤本身不带电、体积小、质量轻、易弯曲、抗电磁干扰、抗辐射性能好,特别适合在易燃、易爆、空间受严格限制及强电磁干扰等恶劣环境下使用。因此,光纤传感技术一经问世就受到了极大重视,在各个重要领域得到了研究与应用。

1.1.1 光纤传感技术原理与特点

1. 光纤传感器的工作原理

光纤传感器的基本工作原理可以用图 1-1 表示。在受到应力、温度、电场、磁场等外界环境因素的影响时,光纤中传输的光波容易受到这些外在场或量的调制,因而光波的特征参量如强度、相位、频率、偏振态等会发生相应改变,通过检测这些参量的变化,就可以获得外界被测参量的信息,实现对外界被测参量的“传”和“感”

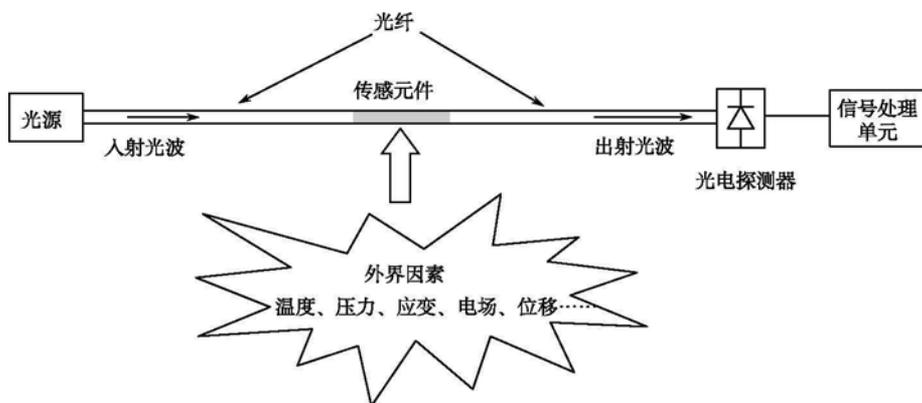


图 1-1 光纤传感器的基本工作原理

的功能。

光纤传感系统的工作原理简单描述如下：

由光源发出光波,通过置于光路中的传感元件,将待测外界信息如温度、压力、应变、电场等叠加到载波光波上;承载信息的调制光波通过光纤传输到探测单元,由信号探测系统探测,并经信号处理后检测出随待测外界信息变化的感知信号,从而实现传感功能。

2. 光纤传感器的基本结构组成

根据光纤传感器的工作原理,光纤传感系统主要包括光源、传输光纤、传感元件、光电探测器和信号处理单元等。

1) 光源

光源就是信号源,用以产生光的载波信号。光纤传感器常用的光源是光纤激光器和半导体激光器等。一般要求其体积小,以便减小与光纤的耦合损失;输出波长与光纤相匹配,减小在光纤中的传输损耗;在室温下可以连续工作以及寿命长和功率稳定;输出模式与传感光纤匹配等。其主要技术参数包括激光线宽、中心波长、最大输出功率、暗电流和相位噪声等。

2) 传输光纤

光纤作为传输介质担负信号的传输。光纤的分类方式有很多种,主要是按照材料、折射率分布和传输模式进行分类。按照制作光纤的材料分为石英光纤、塑料光纤和液芯光纤等;按照光纤折射率分布分为阶跃折射率光纤和渐变折射率光纤等;按照传输模式分为单模和多模光纤。光纤通信系统及光纤传感系统用的传输光纤主要是石英制作的阶跃折射率单模光纤。

3) 传感元件

传感元件是感知外界信息的器件,相当于调制器。传感元件可以是光纤本身,这种光纤传感器被称为功能型光纤传感器,这里光纤不仅起传光作用,它还是敏感元件,即光纤本身同时具有“传”和“感”两种功能;传感元件也可以是其他类型的可以感知被测参量并将被测参量转为光信号的敏感元件,这种光纤传感器被称为非功能型或传光型光纤传感器,其中光纤仅作为光的传输介质。

4) 光电探测器

光电探测器是把传送到接收端的探测光信号转换成电信号,将电信号“解调”出来,然后进行处理,获得传感信息。常用的光探测器有光敏二极管、光敏三极管

和光电倍增管等。其主要技术参数包括灵敏度、量子效率、等效噪声功率、放大倍数和带宽等。

5) 信号处理单元

信号处理单元用以还原外界信息,与光电探测器一起构成解调器。

3. 光纤传感器的特点

与传统的电类或机械类传感器相比,它具有以下诸多优点。

1) 抗电磁干扰、绝缘性能好、耐腐蚀

作为传感介质的光纤或光纤器件,其材料主要成分为二氧化硅,是本质安全的。因此光纤传感器具有抗电磁干扰、防雷击、防水防潮、耐高温、耐腐蚀等特点,可在条件比较恶劣的环境中(如强辐射、高腐蚀、易燃易爆等场所)使用。

2) 体积小、质量轻、可塑性强

光纤作为传感器的主要组成部分,其体积小、质量轻,而且可以进行一定程度的弯曲,因此可以随被测物体形状改变走向,能最大限度地适应被测环境,既可以埋入复合材料内,也可以粘贴在材料的表面,与待测材料有着良好的相容性。

3) 带宽大、损耗低、易于长距离传输

光纤的工作频带宽且光波在光纤中的传输损耗小(如 1550nm 光波在标准单模光纤中损耗只有 0.2dB/km),适合长距离传感和远程监控。

4) 可测参量多、对象广

通过不同的调制和解调技术,光纤传感器可以实现多种参量的传感。除了应力、温度、振动、电流、电压等传统传感领域,还被应用在测量速度、加速度、转速、转角、振动、弯曲、扭绞、位移、折射率、湿度、pH、溶液浓度、液体泄漏等新型传感领域^[1]。因此,光纤传感器的测量对象十分广泛,可感知的参量已经达到了 100 多种,包括但不限于图 1-2 所示的传感参量。

5) 灵敏度高

有效设计的光纤传感器(如利用光纤干涉技术)可以使光纤传感器实现非常高的灵敏度。

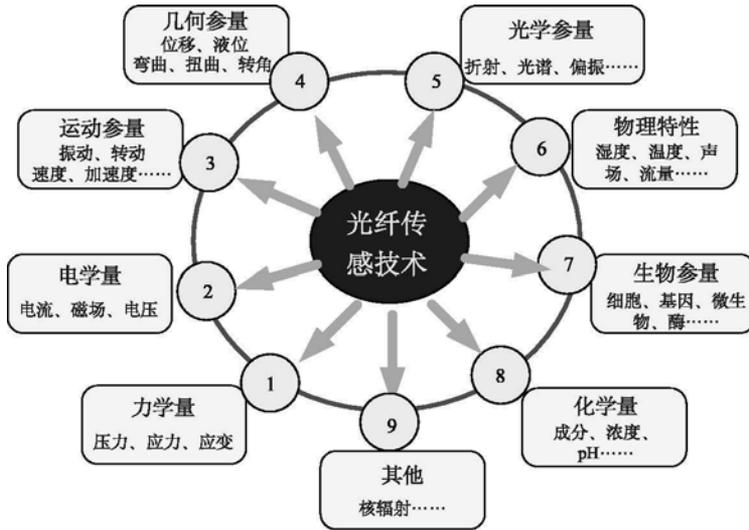


图 1-2 光纤传感技术传感参量示意图

6) 便于复用、成网

由于光波间不会相互干扰,可利用通信中的波分复用技术在同一根光纤中同时传输很多波长的光信号,而且光纤本身组网便利,有利于与现有光通信设备组成遥测网和光纤传感网络。

基于以上原因,光纤传感器受到了人们广泛的关注,并得到了飞速的发展。同时,具有新的机制和面向新的应用对象的光纤传感器也在不断涌现。

1.1.2 光纤传感技术的分类

光纤传感器的种类繁多,有多种分类方法。往往同一种被测参量可以用不同类型的传感器来测量,而同一原理的传感器又可以测量多种物理量。因此,了解光纤传感器的分类可以加深对传感器的理解,便于合理选用光纤传感器。常用的分类方法如下。

1. 按照光在光纤中被调制的原理分类

光纤传感器的关键技术就是检测光受到外界参数的调制,按照光在光纤中被调制的原理可以分为强度调制型、相位调制型、频率调制型、波长调制型和偏振态调制型五种类型光纤传感器。

1) 强度调制型光纤传感器

强度调制型光纤传感器通过测量光纤中发光强度受外界因素影响导致的变化来感知外界被测参量,主要有反射式强度调制型光纤传感器、透射式强度调制型光纤传感器、消逝场耦合型强度调制型光纤传感器和物理效应型强度调制型光纤传感器等。

2) 相位调制型光纤传感器

相位调制型光纤传感器通过被测能量场的作用,使光纤内传播的光波相位发生变化,再利用干涉测量技术把相位变化转换为发光强度变化,从而检测出待测的参量。

目前各类光探测器都不能直接感知光波相位的变化,必须采用光的干涉技术将相位变化转换为发光强度的变化,才能实现对外界参量的感知。常用的光纤干涉仪有迈克耳孙(Michelson)光纤干涉仪、马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)光纤干涉仪、萨奈克(Sagnac)光纤干涉仪和法布里-珀罗(Fabry-Perot)光纤干涉仪等。

3) 频率调制型光纤传感器

频率调制型光纤传感器利用多普勒效应,通过测量光受外界因素影响而发生频率变化来感知外界被测参量。

4) 波长调制型光纤传感器

光纤中光能量的波长分布或光谱分布受外界因素影响而改变,波长调制型光纤传感器通过检测光谱分布来测量被测参量。由于波长与颜色直接相关,因此波长调制也叫颜色调制。

5) 偏振态调制型光纤传感器

偏振态调制型光纤传感器利用外界因素引起光偏振态的变化来检测各种物理量。在光纤传感器中,偏振态调制主要基于人为旋光现象和人为双折射,如法拉第旋光效应、克尔电光效应和弹光效应等。

2. 按照光纤在传感器中的作用分类

按照光纤在传感器中的作用,光纤传感器分为功能型和非功能型传感器两种。

功能型光纤传感器也称为传感型或探测型传感器,光纤不仅起传光作用,它还是敏感元件,即光纤本身同时具有“传”和“感”两种功能。但是这类传感器的缺点是技术难度大、结构复杂、调整较困难,典型的例子有光纤电压/电流传感器、光纤液位传感器等。

非功能型光纤传感器也称为传光型传感器。非功能型光纤传感器中,光纤不是敏感元件,而是在光纤的端面或者在两根光纤中间放置光学材料、机械式或光学式的敏感元件等来感受被测参量的变化,从而使敏感元件的光学特性随之发生变化。在此过程中,光纤只是作为光的传输回路。为了得到较大的受光量和传输的光功率,使用的光纤主要是数值孔径和纤芯大的多模光纤。这类传感器的特点是结构简单、可靠、技术上易于实现,但是其灵敏度、测量精度一般低于功能型光纤传感器。典型的例子有光纤速度传感器、光纤辐射温度传感器等。

3. 按照测量对象分类

按照被测量的对象可以分为光纤压力传感器、光纤温度传感器、光纤图像传感器、光纤液位传感器等。

光纤压力传感器利用压力使光纤变形,进而影响光纤中传输光的强度,构成强度调制型光纤压力传感器。

光纤温度传感器的原理是当传感光纤的温度变化时,光纤的折射率会发生变化,而且因光纤的热胀冷缩其长度发生改变等。

光纤图像传感器是采用光纤传像束来完成的。

光纤液位传感器是基于全内反射原理制成的,其结构特点是在光纤的检测头端有一个反射器;当检测头置于空气中没有接触到液面时,由于液体的折射率与空气的折射率不同;全内反射被破坏,将部分光投射入液体中,使返回到探测器的发光强度变弱,返回发光强度是液体折射率的线性函数,就可以获得待测液面的情况。

4. 按照传感机制分类

按照传感机制可分为光纤光栅传感器、干涉型光纤传感器、偏振态调制型光纤传感器、光纤瑞利传感器、光纤布里渊传感器、光纤拉曼传感器等。对后面三种传感器本书将作重点介绍,这里不再赘述。

1) 光纤光栅传感器

光纤光栅是利用掺有铈等离子体的光纤纤芯材料的光敏性,通过紫外光等照射光纤,在纤芯内形成的折射率周期性变化的空间相位光栅。

当一定谱宽的光束进入光栅时,由于光纤光栅只反射入射光中满足布拉格衍射的光,其余光将被透射出去。如图 1-3 所示。

光纤光栅反射波的中心波长受光栅周期 Λ 和折射率 n 变化的影响。当光纤受外界应变和温度影响时,通过弹光效应和热光效应影响光纤折射率 n ,通过光纤长度变化和热膨胀影响光栅周期 Λ ,因此光栅对光纤轴向应变和温度变化非常敏感。所以光纤光栅传感器的基本原理就是利用光纤光栅有效折射率 n 和周期 Λ

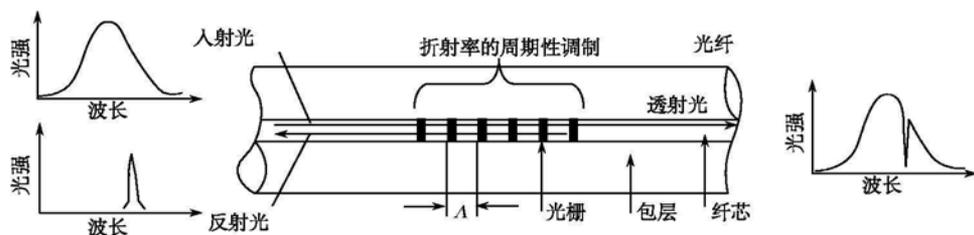


图 1-3 光纤光栅的工作原理

的空间变化对外界参量的敏感特性,将被测参量的变化转化为中心波长的移动,再通过检测该中心波长的移动来实现传感。

光纤光栅具有高的反射特性、选频特性和色散特性,波长移动响应快,线性输出动态范围宽,能够实现被测参量的绝对测量,不受发光强度影响,对于背景光干扰不敏感、小巧紧凑、易于埋入材料内部,并能直接与光纤系统耦合,它的出现极大地推动了光纤传感技术的进步。典型的光纤光栅传感器的结构如图 1-4 所示。

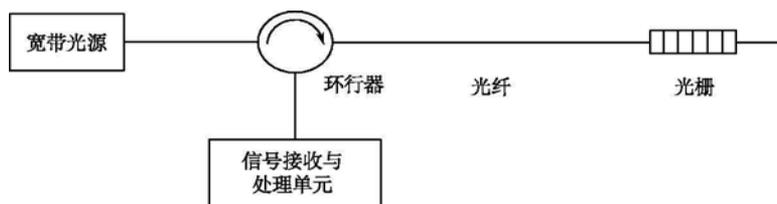


图 1-4 光纤光栅传感器结构

2) 干涉型光纤传感器

干涉型光纤传感器即相位调制型光纤传感器,基本传感机制是在待测场能量的作用下,光纤中传播的光波发生相位变化,再以干涉测量技术把相位变化转化为振幅变化,实现对待测参量的检测。

根据传感器的光学干涉原理,目前已研制成有迈克耳孙(Michelson)光纤干涉仪、马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)光纤干涉仪、法布里-珀罗(Fabry-Perot)光纤干涉仪以及萨奈克(Sagnac)光纤干涉仪等光纤传感器。图 1-5 为马赫-曾德尔光纤干涉仪传感器的简要示意图。

由于光纤中光波相位对外界参量极其敏感,相位调制型光纤传感器通常具有极高的检测灵敏度。但另一方面,也因为光波相位的极端敏感特性,外界干扰的影响也很容易被引入系统,从而增大了系统的随机噪声并降低其稳定性。

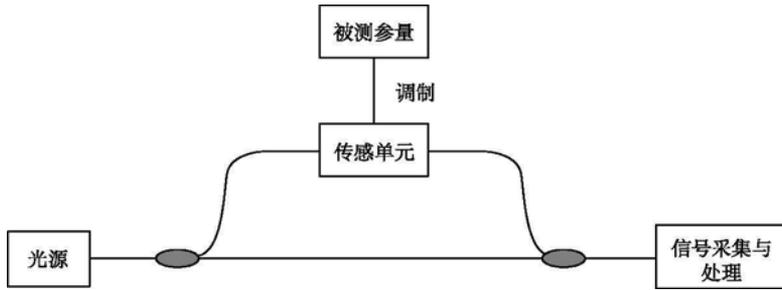


图 1-5 马赫-曾德尔光纤干涉仪传感器示意图

3) 偏振态调制型光纤传感器

在许多光学系统中,光波的偏振特性起着重要的作用,许多物理效应都会影响或改变光的偏振状态。在偏振态调制型光纤传感器中普遍采用的物理效应有旋光效应、磁光效应、泡克尔斯效应、克尔效应及弹光效应等。

典型的例子有光纤电流传感器、单模光纤偏振态调制型温度传感器。基本的光纤电流传感器结构如图 1-6 所示。

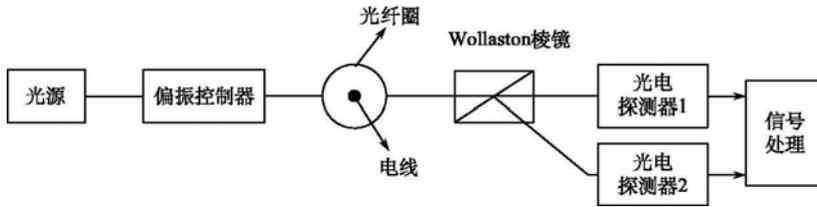


图 1-6 偏振态调制型光纤电流传感器示意图

光纤电流传感器的优点:没有磁饱和现象,也没有磁共振和磁滞效应;频率响应宽,动态范围大;体积小,能适应电力系统数字化、智能化和网络化的需求等。

5. 按照测量范围分类

按照传感的感知范围,光纤传感可以分为点式光纤传感器和全分布式光纤传感器两大类,如图 1-7 所示。

1) 点式光纤传感器^[2~5]

点式光纤传感器也称为分立式光纤传感器。按所使用传感单元数量的不同,

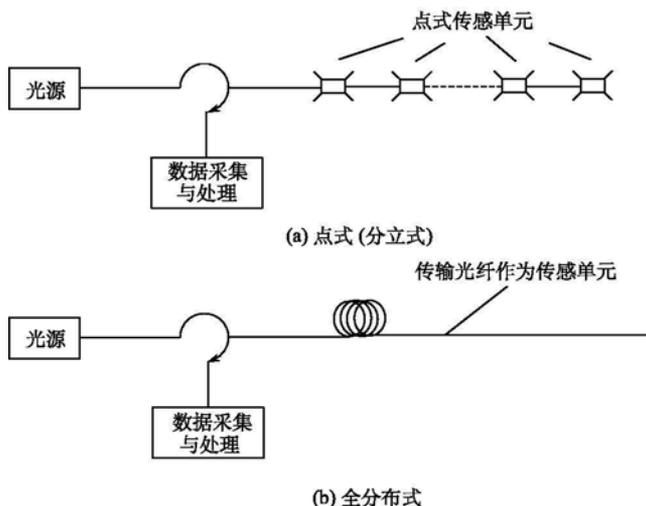


图 1-7 两种类型的光纤传感系统

点式光纤传感技术又可分为单点式和多点式光纤传感技术。单点式光纤传感技术通过单个传感单元来进行传感,可以用来感知和测量预先确定的某一点附近很小范围内的参量变化。通常使用的点式传感单元有光纤布拉格光栅、各种干涉仪等为测量某一特征物理量专门设计的传感器。如果是需要测量特定的某个位置,点式传感器可以出色地完成任

务。多点式光纤传感技术通过布置多个传感单元,组成传感单元阵列^[4,5],可以实现多点传感。这类光纤传感系统是将多个点式传感单元按照一定的顺序连接起来,使之组成传感单元阵列或多个复用的传感单元,利用时分复用、频分复用和波分复用等技术共用一个或多个信息传输通道构成分布式系统。该系统既可以认为是点式传感器,也可以认为是分布式传感器,所以称之为准分布式光纤传感器。

尽管准分布式的光纤传感技术可以同时测量多个位置处的信息,但它也只能够测量预先布设的传感器所在位置处的信息,其余光纤与点式传感器一样不参与传感,仅用于传输光波。而且当传感单元较多时,不但使施工复杂化,也使信号的解调更加困难。对点式光纤传感技术来说,光纤只作为信号的传输介质,大多数情况下不是传感介质。

传感器的复用是光纤传感器所独有的技术,其典型代表是复用光纤光栅传感器。光纤光栅通过波长编码等技术易于实现复用,复用光纤光栅的关键技术是多波长探测解调,常用解调的方法包括:扫描光纤 F-P 滤波器法、基于线阵列 CCD 探测的波分复用技术、基于锁模激光的频分复用技术和时分复用与波分复用技术等。

扫描光纤 F-P 滤波器法的准分布式光纤光栅传感器结构如图 1-8 所示。

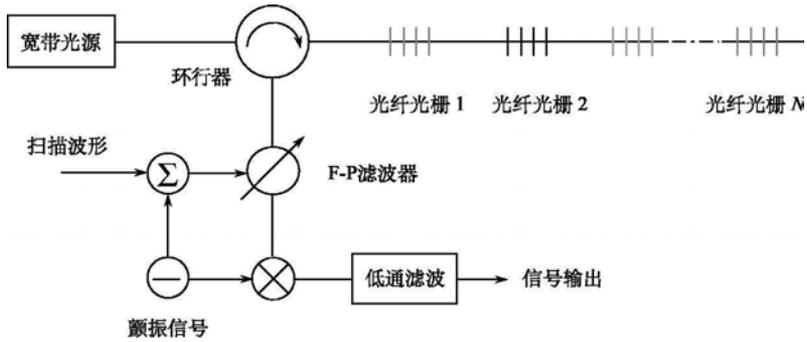


图 1-8 扫描光纤 F-P 滤波器法的准分布式光纤光栅传感器

2) 全分布式光纤传感器^[6~9]

有些被测对象往往不是一个点或者几个点,而是呈一定空间分布的场,如温度场、应力场等,这一类被测对象不仅涉及距离长、范围广,而且呈三维空间连续性分布,此时点式甚至多点准分布式传感已经无法胜任传感检测,全分布式光纤传感系统应运而生。在全分布式光纤传感系统中,光纤既作为信号传输介质,又是传感单元。即它将整根光纤作为传感单元,传感点是连续分布的,也有人称其为海量传感头,因此该传感方法可以测量光纤沿线任意位置处的信息。随着光器件及信号处理技术的发展,全分布式光纤传感系统的最大传感范围已达到几十至几百公里,甚至可以达到数万公里。为此,全分布式光纤传感技术受到了人们越来越多的重视,成为目前光纤传感技术的重要研究方向。

全分布式光纤传感器的工作原理主要基于光的反射和干涉,其中利用光纤中的光散射或非线性效应随外部环境发生的变化来进行传感的反射法是目前研究最多、应用最广也是最受瞩目的技术,其简要的结构示意图如图 1-9 所示。

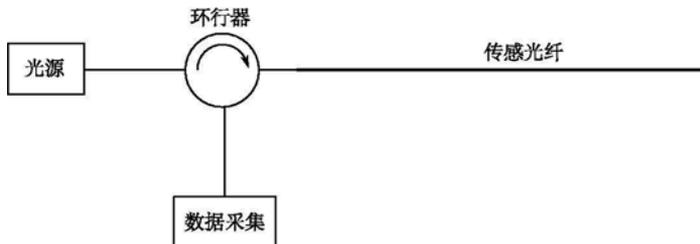


图 1-9 全分布式光纤传感器结构示意图

根据被测光信号的不同,全分布式光纤传感器可以分为基于光纤中的瑞利散射、拉曼散射和布里渊散射三种类型;根据信号分析方法,可以分为基于时域和基于频域的全分布式光纤传感技术。

1.2 国内外光纤传感技术的发展历史和现状

1.2.1 国际光纤传感技术的发展历史和现状

自20世纪70年代美国康宁公司研发出第一根低损耗光纤以来,光纤通信技术迅速发展,各种新型光器件、光电器件也相继被研制出来。与此同时,光纤传感技术也开始萌芽。1977年,美国海军研究所(NRL)开始执行由查尔斯·M·戴维斯(Charles M. Davis)博士主持的Foss(光纤传感器系统)计划^[10],这通常被认为是光纤传感器问世的里程碑。从此,光纤传感器的概念在全世界的许多实验室里变为现实。由于光纤传感器应用的广泛性及其广阔的市场,其研究和开发在世界范围内引起了高度的重视。同年,已经有数篇关于光纤传感的论文发表,如J. Bucaro利用马赫-曾德尔干涉仪的结构通过调相的方法实现了对声波的传感^[11],M. K. Barnoski提出了光时域反射(OTDR)技术,利用光纤中瑞利散射光的强度变化来测量光纤沿线各个位置的损耗情况^[12]等。此后,有关光纤传感的论文数和专利数逐年增加^[13,14]。图1-10、图1-11和图1-12分别给出了20世纪80年代~90年代初国际上关于光纤传感的论文数和专利数的递增情况以及在各个国家的分布情况。

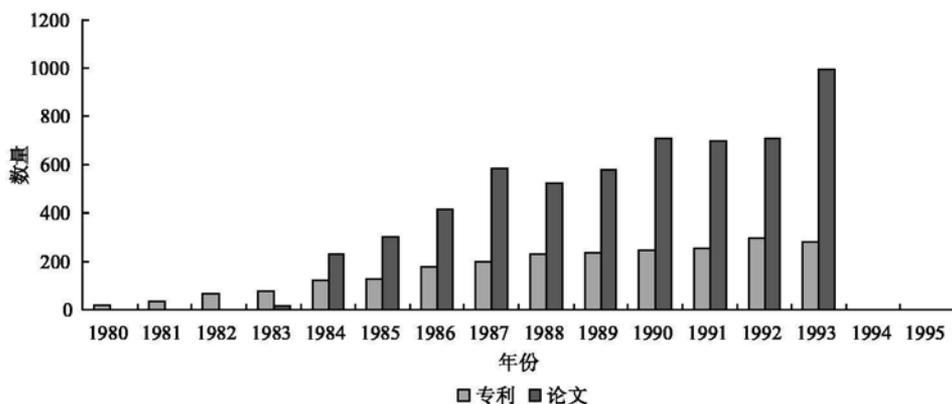


图 1-10 20 世纪 80 年代~90 年代初关于光纤传感的论文数和专利数

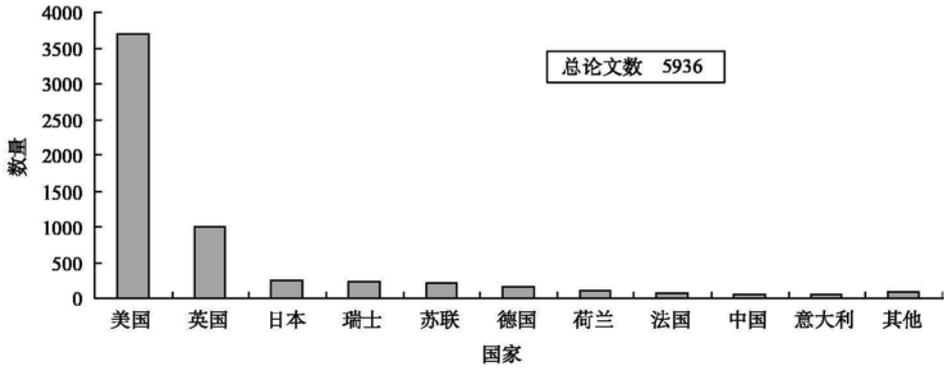


图 1-11 图 1-10 中论文数的不同国家分布情况

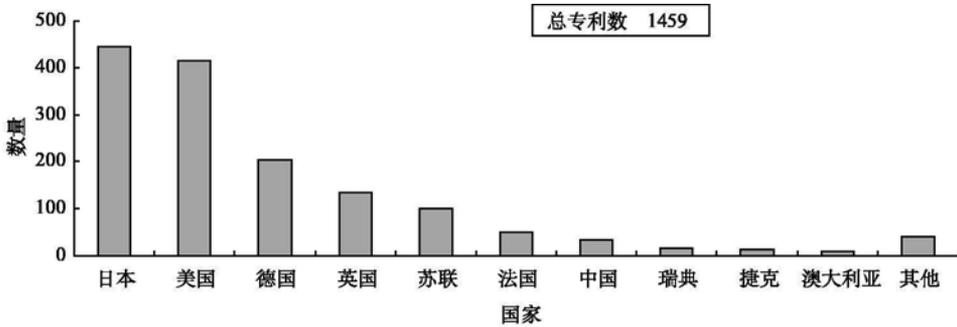


图 1-12 图 1-10 中专利数的不同国家分布情况

在光纤传感领域,最著名的国际会议之一是国际光纤传感器学术会议(International Conference on Optical Fiber Sensors, OFS)。该会议于 1983 年首次在英国举办,此后,该会议约 18 个月左右举办一届,迄今已经在美洲、欧洲、亚洲等地召开了 21 届,逐渐成为国际上光纤传感的标志性会议^[15]。第 22 届 OFS 会议于 2012 年 10 月首次在中国(北京)召开,会议主题涉及光纤传感理论、技术和实验等各方面的内容,及时报道和交流了光纤传感领域的最新进展。

20 世纪 90 年代,东芝、日本电气等 15 家公司和研究机构,研究开发出 12 种具有一流水平的民用光纤传感器。西欧各国的大型公司也积极参与了光纤传感器的研发和市场竞争,其中包括英国的标准电讯公司、法国的汤姆逊公司和德国的西门子公司等。目前世界上已有光纤传感器近百种,新的光纤传感的原理及应用不断出现,传感用特殊光纤、专用器件以及技术的不断问世,使许多新型光纤传感器被研制出的同时,其性能指标也不断地(常常是大幅度地)提高。随着光纤技术的迅猛发展,光纤传感技术以其独特的技术优势,在与传统的传感技术竞争中日益显

示出其强大的生命力。

1.2.2 我国光纤传感技术的发展历史和现状

我国在 20 世纪 70 年代末就开始了光纤传感器的研究,几乎与国际同步。我国光纤传感技术的发展历程大致可以分为三个阶段^[16~18]。

1. 20 世纪 70 年代末到 80 年代中期

在这个时期,我国光纤传感技术的研究发展迅速,形成一个小高潮。20 世纪 70 年代末,国际上光纤传感技术发展迅速,新的理论研究和应用领域不断开拓,学术活动十分频繁,相关产值每年以 30% 的速度增长,开始显现出新技术的生命力。当时这些情况已引起我国学术界和产业部门的重视,很多科研机构、高等院校和产业部门纷纷行动起来,从不同方面进行了多种光纤传感技术的研制,并试图推广应用。在此基础上,当时的国家科委新技术局于 1983 年 6 月在杭州召开了“光纤电流、电压传感器方案论证会”。此后,在国家科委和经贸委等的组织下,陆续召开了多次有关光纤传感的会议,表 1-1 给出了其中一些主要的会议。

表 1-1 早期有关光纤传感的主要国内会议

会议时间	会议名称	会议地点	论文数	会议主办单位
1983. 06	光纤电流、电压传感器方案论证会	杭州	3	国家科委新技术局
1983. 09	光纤传感器及其应用发展预测座谈会	扬州	11	国家科委新技术局
1984. 05	全国传感器学术交流会	武汉	10	国家经贸委、科委、中国仪器仪表学会
1984. 08	光纤传感器规划座谈会	北京	—	电子工业部
1984. 10	中国光学学会纤维光学和集成光学专业委员会成立暨学术交流大会	西安	15	中国光学学会
1984. 10	电工行业光纤技术座谈会工程光纤传感器规划座谈会	天津	5	机械工业部电工局
1984. 11	光纤传感器学术交流会	南京	11	机械工业部仪表局 中国仪器仪表学会
1984. 12	光纤传感器学术交流会	合肥	20	机械工业部仪表局 中国仪器仪表学会
1985. 01	全国光纤传感技术“七五”规划座谈会	北京	27	国家科委新技术局
1985. 11	光纤传感技术情报网成立及学术交流会	南京	—	机械工业部仪表局 中国仪器仪表学会

2. 20 世纪 90 年代

20 世纪 90 年代,我国光纤传感事业的发展进入第二阶段。随着光纤通信的迅速发展和光通信市场需求的急剧增长,国家的规划和投资部门以及光纤技术研究单位纷纷转向了光纤通信领域的研制、开发和应用。相比之下,光纤传感还处于发展初期,技术、工艺以及元器件的研制受到冷遇,走进低谷。光纤传感的研究进入发展缓慢的阶段,其可能原因主要如下。

(1) 技术不成熟。光纤传感由于技术、工艺以及元器件等多方面原因,不仅成品率低,而且使用环境干扰因素多,致使光纤传感尚不能在实际应用中得到认可。

(2) 元器件价格高。元器件是光纤传感技术和系统的关键,光纤传感所用的元器件往往有特殊的制作要求,而在研制初期,元器件的性能、质量都还达不到使用标准,并且大多由研究者自己研制,制作批量少、成本高,也制约了元器件的性能质量的提高和价格的降低。

(3) 特色不突出。光纤传感技术具有一些传统传感技术不能比拟的优点,但早期还是对其性能的预测与估计,在实际中没有显现比传统传感技术优越之处,其诸多优点特色还没有体现出来。例如,光纤传感灵敏度高,但信噪比、稳定性低;光纤传感抗环境干扰强,但因技术还不够成熟而受限制;加之使用还不太方便、性价比比较低等,影响了对其优点的认识。

(4) 市场无急需。由于国内当时生产技术水平还不够高,自动化水平也低,因此对光纤传感这一新型的安全、高精度检测系统缺乏市场需求。例如,由于国内的油库管理水平较低、人工检测成本低以及其他一些社会因素,光纤油罐检测系统虽已满足技术指标但难于推广使用。

3. 21 世纪以来

进入 21 世纪以来,随着光纤通信走进低谷,我国光纤传感技术的发展进入了第三阶段,又开始了蓬勃发展的新时期。许多光纤和相关元器件的生产单位将目光纷纷转向光纤传感,很多投资机构也看好这一市场;与此同时,光器件和电子技术的发展,使光纤传感技术本身有了很大的提高,不少光纤传感系统已可满足市场实用的要求,而更主要的则是市场的需求急剧增长,光纤传感的发展充满了机遇和挑战。国内已经有相当数量的研究成果具有很高的实用价值,达到了世界先进水平。

光纤传感技术经过 30 余年的发展已获得长足的进步,出现了很多实用性的产品,也基本形成了一个独立的体系。然而随着社会的发展和技术的进步,对光纤传感器的需求不仅数量上快速增长,而且性能参数上也呈现了多样化、高标准的发展趋势,可以说,光纤传感技术的现状仍然远远不能满足实际的需要,还有大量的研究

开发工作尚待完成。

总之,随着光纤传感技术的快速发展,光纤传感技术正逐步成为继光纤通信产业发展之后又一大光纤技术应用产业。

1.3 全分布式光纤传感技术

1.3.1 全分布式光纤传感技术的特点

全分布式光纤传感技术是应用光纤几何上的一维特性进行测量的技术,它把被测参量作为光纤位置长度的函数,可以在整个光纤长度上对沿光纤路径分布的外部物理参量进行连续的测量,提供了同时获取被测物理参量的空间分布状况和随时间变化状态的手段。

与传统测量仪器相比,全分布式光纤传感器除了具有 1.1 节所述普通光纤传感器的特点外,其最显著的特点就是能够进行连续分布式测量,具体表现如下。

1. 全尺度连续性

全尺度连续性是全分布式光纤传感器最有代表性也是分立式传感器不具备的独特优势,即全分布式光纤传感器可以准确地感知光纤沿线上任一点的信息,是一种连续分布式的监测,解决了传统点式监测漏检的问题。此外,光纤的柔韧性还可以使全分布式光纤传感技术应用到非标准待测物体表面或待测环境中。如图1-13所示。

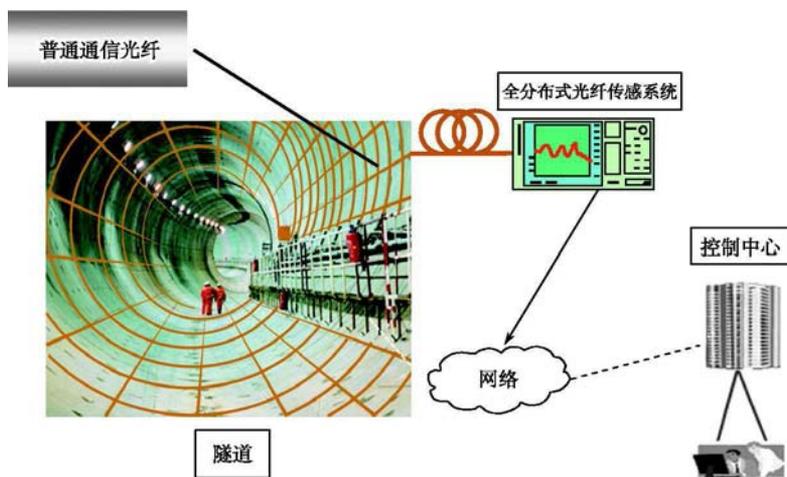


图 1-13 全分布式光纤传感对隧道进行全分布式网络化监测示意图

2. 网络智能化

由于传感器本身就是光纤,因此,全分布式光纤传感系统可以与光通信网络实现无缝连接或者自行组网,通过与计算机网络连接,实现自动检测、自动诊断的智能化检测以及远程遥测和监控。如果将光纤纵横交错铺设成网状,还可构成具备一定规模的监测网,实现对监测对象的三维立体全方位监测,如图 1-13 所示。

3. 长距离、大容量、低成本

由于全分布式光纤传感技术利用光纤感知并传输测量信号,光波在光纤中传输损耗低于 0.2dB/km ,因而,特别适合长距离连续性传感。此外,信号数据还可以实现多路传输,极大地提高了传感容量,可大大降低传感器的成本。因而,在长距离大范围监测的应用中,它具有其他传感技术无法比拟的高性价比。

4. 嵌入式无损监测

光纤体积小、质量轻,将作为传感单元的光纤嵌入被测物体内部,由于光纤的直径不足一百微米,嵌入后不影响材料的性能,也不增加材料的质量。如在制备飞机材料时,将光纤直接嵌入复合材料内并形成网络(图 1-14 所示),就可以实现对机翼、机身、支撑杆、电机、电路等各部位应力、应变、温度、位移等全方位、全程无损监测。



图 1-14 飞机材料中植入光纤进行全分布式监测的示意图

1.3.2 全分布式光纤传感技术的主要参数

由于传感机制不同,各种全分布式传感技术除具有共性的一些参数外,还有表示自身特点的参数,所以全分布式光纤传感技术涉及的参数较多,本节只介绍全分

布式光纤传感技术主要的性能参数,其他的参数将在各相关章节中介绍。

1) 灵敏度

传感器将待测信号 X 转换为输出信号(通常是电信号) V_0 ,灵敏度 S 是传感系统输出信号与输入信号的比例,其表达式是 $V_0 = SX$ 。理想情况下,灵敏度在整个工作范围内应保持为一常数,而与温度等环境因素无关。

2) 噪声

噪声存在于所有的传感器中,因为即使是电子在电阻中的随机波动也会引入噪声(热噪声)。传感器的带宽越宽,其输出信号的噪声往往越大,所以对噪声的分类通常是和频率相关的。

3) 信噪比

信噪比定义为传感器输出的信号强度与噪声强度的比值。

4) 分辨率

分辨率是可观测到的被测参量的最小变化量。若由被测参量变化带来的传感器输出电压的变化量与噪声电压有效值相等,则被测参量的变化量即定义为该传感器的分辨率。

全分布式光纤传感器中一个重要的性能参数是空间分辨率。它表征测量系统能区分传感光纤上相邻最近两个事件点的能力。因为每一时刻传感光纤上获得的信息实际上是某一段传感光纤上信号的积累,所以,不是传感光纤上任意无穷小段上的信息都能区分开,即传感光纤上小于空间分辨率的所有点的信息在时间上互相叠加。实际测量中,空间分辨率一般被定义为被测信号在过渡段的 $10\% \sim 90\%$ 上升时间所对应的空间长度^[19]。

空间分辨率主要由传感系统的探测光脉冲宽度、光电转换器件的响应时间、A/D 转换速度和放大电路的频带宽度等决定。

若探测光脉冲为矩形,脉冲宽度为 τ ,光纤中光的群速度为 V_g ,忽略光脉冲在传感光纤中的色散,认为光电探测器及放大器的频带足够宽,那么由探测光脉冲决定的空间分辨率 R_{pulse} 为

$$R_{pulse} = \frac{\tau V_g}{2} \quad (1-1)$$

若真空中的光速为 c ,普通单模光纤的纤芯折射率为 n ,那么光纤中光的群速度为

$$V_g = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{1.46} = 2.05 \times 10^8 \text{ (m/s)} \quad (1-2)$$

由式(1-1)和(1-2)可以得出在普通单模光纤中的空间分辨率 R_{pulse} 表示为

$$R_{pulse} \approx \frac{\tau(\text{ns})}{10} \quad (1-3)$$

A/D 转换速度 f 确定的空间分辨率 $R_{A/D}$ 可以估算为

$$R_{A/D} \approx \frac{100}{f(\text{MHz})} \quad (1-4)$$

若放大器的频带宽度为 B (含探测器上升时间的影响), 那么由其确定的空间分辨率 R_{amp} 可以估算为

$$R_{amp} \approx \frac{100}{B(\text{MHz})} \quad (1-5)$$

全分布式光纤传感系统的空间分辨率 R 可以表示为

$$R = \max \{ R_{pulse}, R_{A/D}, R_{amp} \} \quad (1-6)$$

式(1-3)~(1-5)中, R_{pulse} 、 $R_{A/D}$ 和 R_{amp} 的单位均为米(m)。

5) 动态范围

动态范围有两种定义方式: 双程动态范围和单程动态范围。双程动态范围指探测光在光纤中一个来回获得的探测曲线从信噪比等于 1 至最大信噪比的信号功率范围。单程动态范围的定义是取双程动态范围(单位 dB)的一半。

1.3.3 全分布式光纤传感技术的应用

随着大型基础设施(特别是大型国防基础设施)如桥梁、隧道、大坝、大型建筑物以及公路铁路、电力通信网络、油气管道等的不断建设和普及使用, 对它们进行安全健康监测以及及时发现故障、确保国家和人民生命财产安全显得越来越重要。应变和温度变化是物体特性发生改变的最主要和直接的表现, 因此, 应变和温度的监测成为最主要和最重要的手段。但是对这些大型基础设施的结构故障诊断、事故预警等安全健康监测具有监测距离长(数十公里以上)、精度要求高(米量级以下)、部位隐蔽(不便于或难以测量)、实时性(瞬态变化)、分布式(连续性)等要求, 使得传统监测手段难以胜任。全分布式光纤传感因不需制作传感器(只需采用裸光纤)并可同时测量沿光纤路径上时间和空间的连续分布信息, 完全克服了点式传感器(如光纤光栅传感器)难以对被测场进行全方位连续监测的缺陷, 且具有损耗低、耐腐蚀、易埋入、抗电磁场干扰、信号数据可多路传输等传统传感器所不具备的优越性能, 从而成为目前能源、电力、航空航天、建筑、通信、交通、安防等诸多领域最为理想的大型设施无损监测技术, 显示出十分诱人的应用前景^[20]。图 1-15 给出了全分布式光纤传感技术应用前景示意图。



图 1-15 全分布式光纤传感技术应用前景示意图

目前,全分布式光纤传感技术的研究已经取得了较大进展,并在大型土木工程、石油石化、隧道交通、高压输电线等领域得到了应用。现有的应用主要如下。

1. 在土木工程等领域中的应用

环境侵蚀、材料老化和荷载的长期效应等不利因素的影响,土木工程等结构将不可避免地产生损伤积累和抗力衰减等,从而导致其抵抗自然灾害甚至正常环境下的能力下降,可能引发灾难性的突发事件。因而,对它们进行长期实时的无损健康自动监测和诊断,及时发现结构的损伤,并评估其安全性非常重要,关系到一个国家的经济、军事乃至人民生命财产的安全。

全分布式光纤传感器的测量精度高,且具有很好的可靠性,可以采用分布式埋入,已经广泛应用于大型土木工程如建筑物、桥梁、大坝、隧道、河堤等结构的健康监测。从 20 世纪 90 年代开始,其在土木工程等领域的应用研究已经取得了很大的进展和较好的效果。如 2002 年, K. Komatsu 等将全分布式光纤传感系统用于土木工程领域中的应变测量^[21]。2005 年和 2006 年,南京大学将全分布式光纤传感系统用于隧道的健康诊断^[22,23]。2009 年, J. Ge 将全分布式光纤传感系统用于海堤沉降的安全检测^[24]等。

同时,全分布式光纤传感技术也非常适合用于交通领域和重要场所周界的安防监测系统,以最低限度避免它们遭到破坏。例如,全分布式光纤传感技术早在 1988 年就成功地在航空航天领域中用于无损检测。将光纤传感器埋入飞行器或者发射塔结构中,构成全分布式智能传感网络,可以对飞行器及发射塔的内部机械性能及外部环境进行实时监测。图 1-16 为全分布式传感技术在土木工程和交通领域中的几个应用实例。

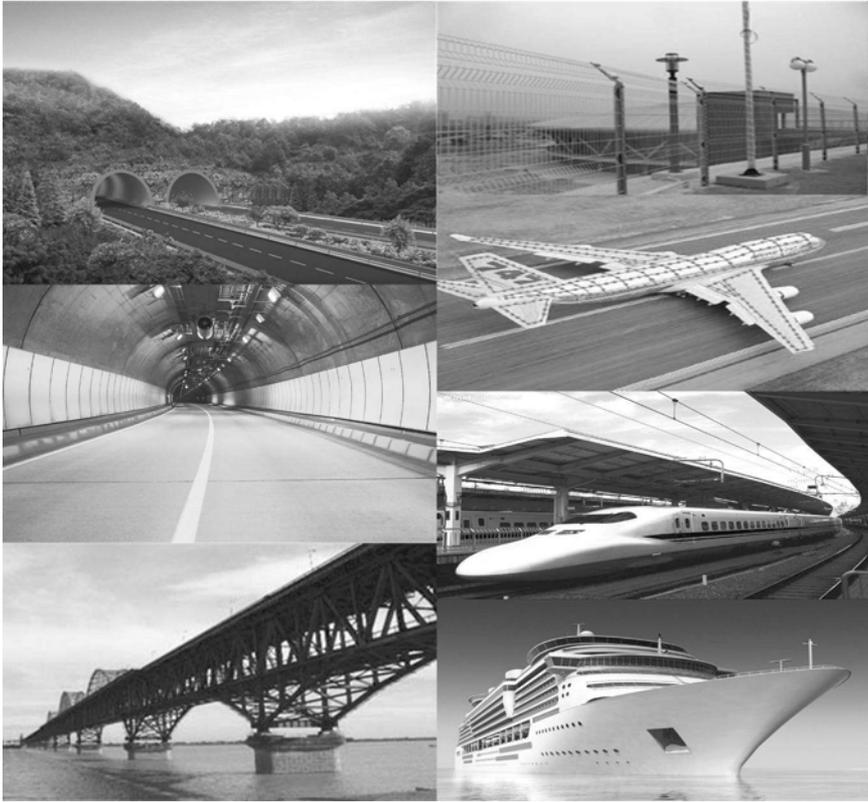


图 1-16 全分布式光纤传感技术在土木工程和交通领域中的应用实例

2. 在通信领域中的应用

通信是现代信息传输的重要手段,光纤通信网是信息传输的基础网络,但是光缆线路往往会由于一些人为因素(如施工挖断、盗割等)或自然灾害(如滑坡、塌方、地基沉降、洪水等)而造成线路中断。光缆线路一旦中断,将影响其承载的各业务网(如电话网、电视网、数据网等)的通信。特别是海底光缆,其承担了洲际通信90%以上的业务量,已经成为现代洲际通信的主力。海底光缆主要应用在沿海大陆架、内地江河湖泊等一些复杂恶劣的环境中。近几年,由于渔业活动愈发频繁,海底光缆在近海区域常常遭到不同程度的损坏,在大陆架地区海底光缆阻断事故的数量也急剧上升。为了保证通信畅通,维护部门采取了一系列措施以降低海底光缆故障发生的次数,但仍不能有效地抑制海底光缆被损坏的严重局面。在维护过程中,海缆海上故障点位置的探测与定位,是其工作中最为关键的技术之一。它关系到是否能在复杂的海上环境中快速地找到故障点,打捞故障海缆以完成修复

工作。鉴于通信光缆距离长,且自身含有光纤,全分布式光纤传感技术成为通信光缆最合适的监测技术。如光时域反射(OTDR)技术被用来检测光纤熔接点的质量(防止熔接损耗过大)、光纤微弯、断裂和光器件性能老化等造成的光衰减、光纤断裂等故障点定位;布里渊光时域反射(BOTDR)技术被用来对海底光缆进行防窃听、对海缆施工过程进行监理等。

2004年起,南京大学多次成功地利用全分布式光纤传感系统对海军某部海缆线路以及上海到嵊泗的宝钢海缆供电系统的故障进行了诊断和精确定位^[25,26]。2007年,南京大学光通信工程研究中心与华为技术有限公司合作,研制出了单跨测量距离分别为70km、100km,总测量长度大于10 000km的基于相干检测的全分布式光纤传感系统(COTDR)。2010年,南京大学研制出国内首台全分布式布里渊光纤传感系统的样机。图1-17所示为全分布式光纤传感技术在通信领域中的几个应用实例。



图 1-17 全分布式光纤传感技术在通信领域中的应用实例

3. 在石油化工等危险场合的应用

石油化工、燃气存储罐区等场合存在大量的有害物质,因此海上石油勘探、运输、储存和加工等各个环节都存在非常危险的安全隐患,如果不能及时探测、定位

和排除,可能造成严重的环境污染甚至是灾难性后果。而且,石油勘探及运输管道等地处野外,环境条件复杂,一旦发生事故,就会造成重大的经济损失和严重的环境污染。

永久连续的井下传感有利于油田的管理、优化和发展。目前只有少数的油井使用了连续井下油田监控系统,且主要是电类传感器,高温操作和长期稳定性的要求限制了电类传感器的使用,电类传感器用于诸如油气罐、油气井、油气管等易燃易爆领域的测量时存在不安全的因素。因此,利用光纤传感技术对石油管道的安全运行情况进行实时监测非常必要。

全分布式光纤传感器因其抗电磁干扰、耐高温、长期稳定并且抗辐射,非常适合用于井下传感。由于能够获得被测物理场沿空间和时间上的连续分布信息,它非常适合用于长距离管道泄漏检测等。利用铺设在管道附近的光纤传感器,可以获取管道由于泄漏、附近机械施工和人为破坏等事件产生的压力和振动等信号,再进一步通过相关技术检测管道泄漏等事件并能够对其进行准确的定位。此外,针对石油管道在出现泄漏、钻孔和盗油等事故时会产生振动及应变波动等变化信息,采用全分布式光纤传感技术可以对管道的安全运行进行监测,而且“边钻边测”的系统对钻井作业也是非常有利的。图 1-18 为全分布式传感技术在石油化工等领域应用的几个实例。



图 1-18 全分布式光纤传感技术在石油化工等领域的应用实例