



湖北省学术著作
出版专项资金
Hubei Academic Publications
Academic Publications

湖北省学术著作出版专项资金资助项目
数字制造科学与技术前沿研究丛书



光纤光栅 传感器 原理与技术研究

——飞机制造领域复合材料的光纤光栅结构健康监测

Researches on the Principle and Technology
of Fiber Grating Sensor

文晓艳 著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书

光纤光栅传感器原理与技术研究

——飞机制造领域复合材料的光纤光栅结构健康监测

文晓艳 著



武汉理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光纤光栅传感器原理与技术研究:飞机制造领域复合材料的光纤光栅结构健康监测/文晓艳著. —武汉:武汉理工大学出版社, 2016.9(2019.1重印)

ISBN 978-7-5629-5359-3

I. ①光… II. ①文… III. ①光纤器件-光电传感器-研究 IV. ①TP212.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 224163 号

项目负责人:田 高 王兆国

责任编辑:陈军东

责任校对:刘 凯

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社

地 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:武汉中远印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:10.25

字 数:152千字

版 次:2016年9月第1版

印 次:2019年1月第2次印刷

定 价:78.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

数字制造科学与技术前沿研究丛书 编审委员会

顾 问：闻邦椿 徐滨士 熊有伦 赵淳生

高金吉 郭东明 雷源忠

主任委员：周祖德 丁 汉

副主任委员：黎 明 严新平 孔祥东 陈 新

王国彪 董仕节

执行副主任委员：田 高

委 员(按姓氏笔画排列)：

David He	Y. Norman Zhou	丁华锋	马 辉	王德石
毛宽民	冯 定	华 林	关治洪	刘 泉
刘 强	李仁发	李学军	肖汉斌	陈德军
张 霖	范大鹏	胡业发	郝建平	陶 飞
郭顺生	蒋国璋	韩清凯	谭跃刚	蔡敢为

秘 书：王汉熙

总责任编辑：王兆国

总 序

当前,中国制造 2025 和德国工业 4.0 以信息技术与制造技术深度融合为核心,以数字化、网络化、智能化为主线,将互联网+与先进制造业结合,兴起了全球新一轮的数字化制造的浪潮。发达国家(特别是美、德、英、日等制造技术领先的国家)面对近年来制造业竞争力的下降,大力倡导“再工业化、再制造化”的战略,明确提出智能机器人、人工智能、3D 打印、数字孪生是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这几大数字化制造技术的突破,打造数字化设计与制造的高地,巩固和提升制造业的主导权。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,同时也是提高企业核心竞争力的重要手段。由此可见,在知识经济时代的今天,随着第三次工业革命的深入开展,数字化制造作为新的制造技术和制造模式,同时作为第三次工业革命的一个重要标志性内容,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,数字化制造的相关技术已逐步融入制造产品的全生命周期,成为制造业产品全生命周期中不可缺少的驱动因素。

数字制造科学与技术是以数字制造系统的基本理论和关键技术为主要研究内容,以信息科学和系统工程科学的方法论为主要研究方法,以制造系统的优化运行为主要研究目标的一门科学。它是一门新兴的交叉学科,是在数字科学与技术、网络信息技术及其他(如自动化技术、新材料科学、管理科学和系统科学等)跟制造科学与技术不断融合、发展和广泛交叉应用的基础上诞生的,也是制造企业、制造系统和制造过程不断实现数字化的必然结果。其研究内容涉及产品需求、产品设计与仿真、产品生产过程优化、产品生产装备的运行控制、产品质量管理、产品销售与维护、产品全生命周期的信息化与服务化等各个环节的数字化分析、设计与规划、运行与管理,以及产品全生命周期所依托的运行环境数字化实现。数字化制造的研究已经从一种技术性研究演变成为包含基础理论和系统技术的系统科学研究。

作为一门新兴学科,其科学问题与关键技术包括:制造产品的数字化描述与创新设计,加工对象的物体形位空间和旋量空间的数字表示,几何计算和几何推理、加工过程多物理场的交互作用规律及其数字表示,几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解,制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示,异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享,制造装备与过程的数字化智能控制、制造能力与制造全生命周期的服务优化等。本系列丛书试图从数字

制造的基本理论和关键技术、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造机械动力学、数字制造可靠性基础、数字制造智能控制理论、数字制造误差理论与数据处理、数字制造资源智能管控等多个视角构成数字制造科学的完整学科体系。在此基础上,根据数字化制造技术的特点,从不同的角度介绍数字化制造的广泛应用和学术成果,包括产品数字化协同设计、机械系统数字化建模与分析、机械装置数字监测与诊断、动力学建模与应用、基于数字样机的维修技术与方法、磁悬浮转子机电耦合动力学、汽车信息物理融合系统、动力学与振动的数值模拟、压电换能器设计原理、复杂多环耦合机构构型综合及应用、大数据时代的产品智能配置理论与方法等。

围绕上述内容,以丁汉院士为代表的一批制造领域的教授、专家为此系列丛书的初步形成提供了宝贵的经验和知识,付出了辛勤的劳动,在此谨表示最衷心的感谢!对于该丛书,经与闻邦椿、徐滨士、熊有伦、赵淳生、高金吉、郭东明和雷源忠等制造领域资深专家及编委会成员讨论,拟将其分为基础篇、技术篇和应用篇三个部分。上述专家和编委会成员对该系列丛书提出了许多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢!

数字制造科学与技术是一个内涵十分丰富、内容非常广泛的领域,而且还在不断地深化和发展之中,因此本丛书对数字制造科学的阐述只是一个初步的探索。可以预见,随着数字制造理论和方法的不断充实和发展,尤其是随着数字制造科学与技术制造企业的广泛推广和应用,本系列丛书的内容将会得到不断的充实和完善。

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》编审委员会

前 言

随着新材料技术的发展,使用先进的复合材料来制造航空航天结构(如机身、机翼、引擎罩盖、导流罩等),是新一代航空航天器设计制造的必然趋势。目前碳纤维复合材料在小型商务机和直升机中的比重已占 55%左右,在军用飞机中占 25%左右,在大型客机中占 20%左右。复合材料在机体结构质量中所占的比例已经成为衡量飞机先进性的重要标志之一。对复合材料结构的健康监测也已成为新一代飞机安全监测的重要内容。

常用光纤传感器的直径约为 $125\mu\text{m}$,与头发丝相当,可以植入复合材料内部实现在体在线检测。从尺寸小和质量轻的优点来讲,几乎没有其他传感器可以与之比拟,因此基于光纤的传感技术目前受到了广泛青睐。除可植入复合材料内部进行检测之外,光纤传感器也可粘贴于复合材料表面如机身、机翼蒙皮等处,实时监测飞行器的温度、应变、振动、裂缝延展情况等,为飞行器健康状态的判别提供重要依据,可以大大提高检测精度与可靠性、缩短检查时间、降低维护成本、提高飞行安全性和可靠性。基于光纤传感的飞机结构健康监测技术的研究与应用已成为当前国内外航空航天领域的热点课题。

本书主要讲述用于复合材料结构健康监测的光纤光栅传感技术,主要内容分为 9 章。第 1 章为绪论,介绍了传感器的原理、作用、分类、发展趋势、选用原则等基础知识;第 2 章阐述了光纤光栅传感原理与 CFRP 复合材料基本理论;第 3 章介绍了航空航天领域光纤光栅传感技术研究现状;第 4 章论述了光纤光栅复合材料结构健康监测研究现状;第 5 章和第 6 章分别阐述了演化算法求解光纤光栅结构参数和光纤光栅传感信号分析与处理方法;第 7 章用光纤光栅传感技术对复合材料的温度应力特性进行了研究。第 8 章介绍了运用光纤光栅传感技术对 CFRP 悬臂梁振动性能进行的研究;第 9 章介绍了运用光纤光栅传感技术对 CFRP 层板损伤进行探测的研究。

本书适合于从事测控技术与仪器、电子信息工程、电气工程与自动化等专业学习和研究的读者使用,也可供相关专业的教师、学生及工程技术人员从事相关研发工作时参考。

本书由武汉理工大学的文晓艳编写。武汉理工大学的李立彤、李杰燕参与了第3章部分内容的编写,张春峰、杨风平参与了第6章部分内容的编写。张东生教授对全书的整体结构和内容提出了宝贵意见。本书在编写过程中参阅和引用了大量相关书籍和文献,在此谨向这些参考资料的作者和所有给予本书出版以帮助的人表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中难免有不妥和疏漏之处,恳请读者予以指正。

编者

2016年7月

目 录

1 绪 论	(1)
2 光纤光栅传感原理与 CFRP 复合材料基本理论	(5)
2.1 光纤光栅应变传感原理及温度补偿	(6)
2.1.1 光纤光栅应变传感原理	(6)
2.1.2 光纤光栅温度传感原理	(9)
2.1.3 光纤光栅应变测量的温度补偿问题	(10)
2.2 光纤光栅的分类与制作方法	(10)
2.2.1 光纤光栅的分类	(10)
2.2.2 光纤光栅的制作方法	(11)
2.3 光纤光栅波长解调技术	(14)
2.3.1 边缘滤波解调法	(16)
2.3.2 匹配光纤光栅滤波法	(18)
2.3.3 光谱检测解调技术	(20)
2.3.4 非平衡 Mach-Zehnder 干涉解调法	(21)
2.3.5 可调谐滤波器扫描法	(22)
2.3.6 可调谐激光器波长解调法	(23)
2.4 光纤光栅传感网络复用技术	(24)
2.5 CFRP 复合材料应力应变相关理论	(25)
2.6 CFRP 层合板冲击损伤理论	(29)
参考文献	(30)
3 航空航天领域 FBG 传感技术研究现状	(36)
3.1 常温下航空航天领域 FBG 传感技术研究	(37)
3.1.1 美国的 FBG 传感技术研究	(37)
3.1.2 欧洲的 FBG 传感技术研究	(41)

3.1.3	日韩等国家和地区的 FBG 传感技术研究	(44)
3.1.4	国内的 FBG 传感技术研究	(48)
3.2	恶劣环境下的 FBG 传感技术研究	(51)
3.2.1	低温环境下 FBG 传感技术研究	(51)
3.2.2	高温环境下 FBG 传感技术研究	(56)
	参考文献	(58)
4	FBG 复合材料结构健康监测研究现状	(62)
4.1	美国的研究现状	(62)
4.2	欧洲的研究现状	(64)
4.3	日韩等国家和地区的研究现状	(67)
4.4	国内的研究现状	(75)
4.5	小 结	(76)
	参考文献	(77)
5	演化算法求解光纤光栅结构参数	(81)
5.1	差分演化算法求解光纤光栅结构参数进展	(81)
5.2	差分演化算法简介	(85)
5.3	差分演化算法求解 FBG 结构参数	(88)
5.4	基于差分演化算法的啁啾光纤光栅参数重构	(90)
5.5	基于差分演化算法的光纤光栅应力分布重构	(92)
5.6	小 结	(96)
	参考文献	(96)
6	光纤光栅传感信号分析与处理	(99)
6.1	小波滤波原理	(100)
6.1.1	基本概念	(100)
6.1.2	小波变换中常用的三个基本概念	(101)
6.1.3	小波变换的特点及重要性质	(101)
6.2	小波滤波降噪	(102)
6.3	高斯拟合寻峰	(105)
6.4	结果分析	(106)

6.5 小 结	(108)
参考文献	(108)
7 复合材料 FBG 温度应力特性研究	(110)
7.1 测量原理	(110)
7.2 FBG 传感器的封装	(111)
7.3 复合材料常温拉伸应变测试	(112)
7.3.1 异侧粘贴实验	(112)
7.3.2 同侧粘贴实验	(115)
7.3.3 复合材料损伤实验	(116)
7.4 结果分析	(117)
7.5 小 结	(118)
参考文献	(118)
8 CFRP 悬臂梁振动性能 FBG 研究	(120)
8.1 CFRP 悬臂梁振动性能研究	(120)
8.2 CFRP 悬臂梁受迫振动的 FBG 监测	(121)
8.3 CFRP 悬臂梁阻尼振动的 FBG 研究	(124)
8.4 CFRP 悬臂梁结构损伤对振动性能的影响	(126)
8.5 本章小结	(129)
参考文献	(129)
9 CFRP 层板损伤 FBG 探测	(130)
9.1 CFRP 超低温损伤研究	(130)
9.1.1 CFRP 常温无损状态下的弯曲模量与抗弯刚度测量	(130)
9.1.2 CFRP 液氮浸泡后的弯曲模量与抗弯刚度测量	(135)
9.2 CFRP 平板结构准静态荷载测试和低速冲击损伤研究	(138)
9.2.1 CFRP 平板结构准静态荷载下的 FBG 应变监测	(139)
9.2.2 相同冲击能量时 CFRP 平板结构冲击信号捕捉	(144)
9.2.3 不同冲击能量时 CFRP 板的冲击信号监测及损伤	(147)
9.3 本章小结	(150)
参考文献	(150)

1

绪论

航空航天对于国家安全与国民经济发展具有特别重要的战略意义。当今世界主要发达国家都将航空航天作为高科技发展的关键产业。国务院制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》中正式将大型飞机列入16个重大科技专项,同时将“航空航天重大力学问题”列为面向国家重大战略需求的基础研究方向之一。

航空航天领域中的飞行器、加速器、燃料箱等系统均涉及复杂的运行环境,确保这些系统中的结构部件在使用过程中的可靠性是非常重要的。其中最重要的是构件的力学性能,因为在低温、辐照、磁场、大电流等环境下,构件的应力残余、应变腐蚀、失超、蠕变、疲劳断裂等失效行为是导致系统毁坏的主要原因。构件的在线温度与应变分析是检测构件服役状态最直接、最有效的办法。对于航天技术中的运载火箭液氢液氧发动机,航天飞机燃料箱、机翼隔热面板等,不但要监控温度,更重要的是要监控材料和部件应力应变参数。以往,正是因为对复杂环境下运行的大型构件应变预报检测的缺乏,导致了灾难事故的发生。如1986年美国挑战者号航天飞机失事就是因为液氢液氧燃料箱的O形密封环低温变脆失效导致一系列连锁反应,最终爆炸解体;2003年哥伦比亚号航天飞机失事是因为左翼8—9号子系统面板隔热瓦失效导致爆炸。因此,利用传感器对飞行器结构及其部件进行实时在线安全监测是非常必要的。

航空航天业是一个传感器使用密集的行业。一个飞行器为了监测压力、温度、振动、燃料液位、起落架状态、机翼和方向舵的位置等,需要使用的传感器超过100个,因此传感器的尺寸、质量和可集成性显得尤为重要(图1-1)。随着航空航天技术的发展,飞行器技术不断进步,应用环境也日趋复杂,传统的电子和机电传感器渐渐无法满足实际的测量要求。例如,在航空领域,先进的航空飞行器在高超声速飞行、大迎角机动、隐身性能等方面的需求日益严苛,传统电阻应变片传感技术已

难以实现实时准确的数据测量。在航天领域,航天器在轨运行期间要经历极其复杂、严酷的空间环境(包括真空、低温、黑背景等),现有的传统电子测温传感设备无法串行工作,而受热真空环境限制目前尚未实现声振动参量监测,也无法实现应变和压力参量在极限温度下的大范围多点测量,无法全面表征航天器性能。这使得航天器存在不同程度的安全隐患。

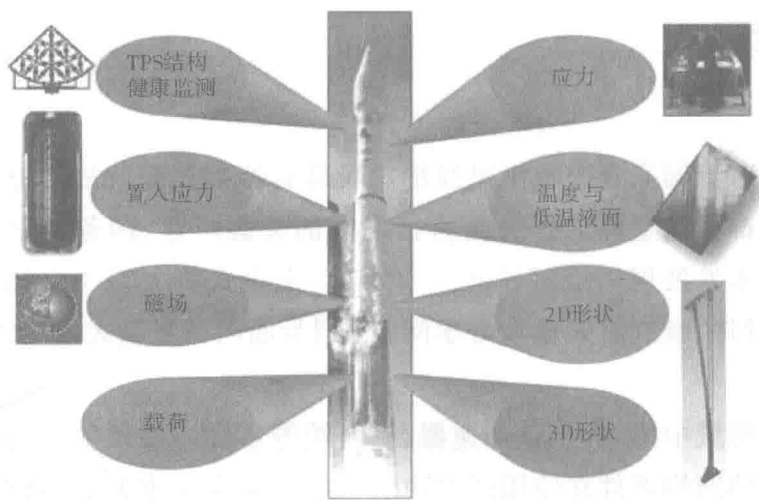


图 1-1 光纤传感技术在航空航天领域的应用

随着近年来新材料技术的发展,使用先进的复合材料来制造航空航天结构(如机翼等部件)是新一代航空航天结构设计制作的必然趋势。与金属材料相比,复合材料抗疲劳性更强、质量更轻、耐腐蚀性更好、强度质量比更高,并且能够任意成型,具有无可比拟的优势。复合材料主要用于制造航空器肋板、舷窗、引擎罩盖、机翼、机身和导流罩等。目前在航空航天领域运用最多的复合材料为碳纤维复合材料。碳纤维复合材料以其独特、卓越的理化性能,广泛应用在火箭、导弹和高速飞行器等航空航天领域。例如采用碳纤维与塑料制成的复合材料制造的飞机、卫星、火箭等宇宙飞行器,不但推力大、噪声小,而且由于其质量较轻,动力消耗少,可节约大量燃料。碳纤维具有耐高温、质量轻、硬度高等力学特点,广泛用作飞机、飞船等航空航天飞行器的结构材料。如飞机的一次构造材料:主翼、尾翼、机体;二次构造材料:副翼、方向舵、升降舵、内装材料、地板材料、桁梁、刹车片等及直升机的叶片;火箭的排气锥体、发动机盖等;人造卫星结构体、太阳能电池板和天线、运载火箭和导弹壳体等。目前小型商务机和直升机的碳纤维复合材料用量已占 55% 左右,军用飞机占 25% 左右,大型客机占 20% 左右。复合材料在机体结

构质量中所占的比例已经成为衡量飞机先进性的重要标志之一。传统的单质材料由于其自身性能的限制,已越来越无法满足上述前沿科技领域的研发需要。材料体系的复合化是材料工程功能发展提升的必然趋势。复合材料是将两种以及两种以上的单质材料相互结合构建的新型材料体系,它具备质量轻、强度高、耐腐蚀、耐高低温、易于成型等优点,对于降低结构质量、提升载荷极限、丰富结构设计具有特殊的意义。目前发展最快最为成熟、在航空航天结构部件上应用最多的是碳纤维增强树脂基复合材料(简称 CFRP),最具代表性的产品有复合材料推进剂燃料贮箱、复合材料机翼等。在实际生产过程中,即使生产前经过研究和实验制订了合理的工艺,但复杂生产过程中仍存在不可控的偶发性因素,其制造过程中仍然有较大可能产生内部缺陷,造成整体部件的强度不达标,继而引发整个结构件的失效,造成重大损失。对复合材料结构的健康监测已成为新一代飞机安全监测的重要内容。

传统使用的最为广泛的传感器是电阻应变片,发明于 1938 年,至今已有 70 余年的发展历史。电阻应变片测量精度高,贴片工艺成熟,在许多领域获得了广泛应用。然而,每个电阻应变片传感器均有两根引线,传感器之间无法串接,如果多点分布进行分布式测量,会产生巨大的引线数量,给测试工作带来极大的困难。并且,制作应变片的主要材料为金属铜,密度大,进行分布式健康监测时会增加额外的质量。同时,电阻应变片受电磁干扰严重,雷电、太空辐射等自然环境均会对测试结果造成影响。这些特征均不利于电阻应变片在航空航天领域的应用。特别是,应变片与引线尺寸较大,无法嵌入复合材料内部,无法实现在体在线监测。更为关键的是,复合材料的损伤具备隐秘性与渐进性的特点,这就要求监测技术具备嵌入式测量的特点。而损伤的产生可能出现在从纤维选材到材料成型制造整体过程中的任一环节。传统的测量技术手段都受限于传感机理以及传感器尺寸的大小,对于上述测量要求有着无法克服的障碍。

光纤传感具有体积小、质量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、远距离实时在线传感等优点,相对于传统的电阻应变片具有显著优势。光纤密度为 $2.32\text{g}/\text{cm}^3$,大约是金属铜的四分之一。常用光纤的直径为 $125\mu\text{m}$,与头发丝相当,可以置入碳纳米复合材料内部实现在体检测。从尺寸小和质量轻的优点来讲,几乎没有其他传感器可以与之比拟,因此越来越受到青睐。特别是光纤及光纤光栅具有纤细的结构,可以埋入复合材料内部进行在体在线监测。同时,光纤光栅传感器也可粘贴于复合材料表面如机身、机翼蒙皮处,实时监测飞行器的温度、应变、振动、裂缝延展情况

等,为飞行器健康状态的判别提供重要依据。利用光纤传感器进行飞行器结构健康监测,可以大大减轻飞行器质量、缩短检查时间、降低维护成本、提高飞行安全性和可靠性。基于光纤传感的飞机结构健康监测技术研究与应用逐渐成为当前国内外航空航天领域的热点课题,目前美国、欧洲、亚洲的日韩等国家和地区在该领域的研究已经取得了丰硕成果,我国也开展了广泛研究,取得了长足进步。

2

光纤光栅传感原理与 CFRP 复合材料基本理论

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性,通过紫外光曝光的方法,使光纤纤芯的折射率发生轴向周期性变化调制而形成的衍射光栅,是一种无源滤波器件。其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤波器或反射镜。当一束宽光谱光经过光纤光栅时,满足光纤光栅布拉格条件的波长的入射光将产生反射,其余波长的入射光透过光纤光栅继续传输。光纤光栅由于其谐振波长对温度、应变、折射率、浓度等外界环境的变化比较敏感,而且具有体积小、熔接损耗小、全兼容于光纤、能埋入智能材料等优点,因此在光纤通信和传感领域得到了广泛的应用。

随着光纤光栅应用范围的日益扩大,光纤光栅的种类也日趋增多。根据折射率沿光栅轴向分布的形式,可将紫外写入的光纤光栅分为均匀光纤光栅和非均匀光纤光栅。其中均匀光纤光栅是指纤芯折射率变化的幅度和折射率变化的周期(通常也称为光纤光栅的周期)均沿光纤轴向保持不变的光纤光栅,如均匀光纤布拉格光栅(折射率变化的周期一般为 $0.1\mu\text{m}$ 量级)和均匀长周期光纤光栅(折射率变化的周期一般为 $100\mu\text{m}$ 量级)。非均匀光纤光栅是指纤芯折射率变化幅度或折射率变化的周期沿光纤轴向变化的光纤光栅,如啁啾光纤光栅(其周期一般与光纤布拉格光栅周期处于同一量级)、切趾光纤光栅、相移光纤光栅和取样光纤光栅等。本书主要讨论均匀光纤光栅。均匀光纤光栅的传感原理如图 2-1 所示。

光纤光栅的反射波长主要取决于光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} [式(2-1)]^[1]。光纤光栅之所以能作为传感元件,是因为光栅周期和有效折射率的变化能够反映外界环境温度和应变的变化。当外界温度和应变变化时,光栅周期和有效折射率便随之变化,从而引起反射光波长的偏移,如图 2-1 所示。对于光纤光栅而言,有效折射率 n_{eff} 的变化主要由弹光效应和热光效应引起;光栅周期 Λ 的变化主要由热膨胀效应和外界的应变引起。

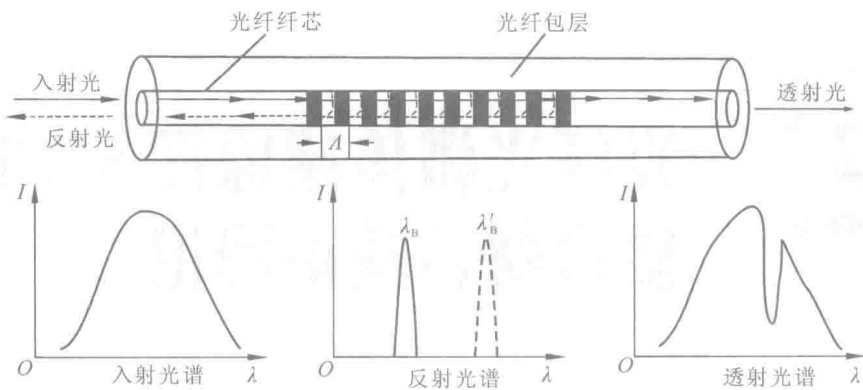


图 2-1 光纤光栅传感原理

2.1 光纤光栅应变传感原理及温度补偿

2.1.1 光纤光栅应变传感原理

最直接引起光栅布拉格中心波长漂移的方式是拉伸或挤压。光栅受到应力作用而产生应变,进而造成光栅周期 Δ 和有效折射率 n_{eff} 发生改变^[2-5]。在式(2-1)中,显然光栅布拉格中心波长 λ_B 也会发生改变,对式(2-1)左右同时做差分,应力引起光栅布拉格中心波长的改变可由式(2-2)描述。

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta \quad (2-1)$$

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta\Delta + 2\Delta n_{\text{eff}}\Delta \quad (2-2)$$

式中 $\Delta\Delta$ —— 光纤栅格周期的弹性形变;

Δn_{eff} —— 光纤的弹光效应。

式 2-2, 中外界应力或应变将使 $\Delta\Delta$ 和 Δn_{eff} 产生对光纤光栅中心波长不同的变化。考虑到光纤布拉格光栅形状通常为圆柱体形,故使光纤光栅产生变形的应力可在柱坐标系下分解为 σ_r 、 σ_θ 和 σ_z 三个方向, σ_z 为光纤光栅纵向拉伸或压缩的轴向应力作用,而 σ_r 为光纤光栅径向拉伸或压缩应力作用, σ_θ 为光纤光栅的扭转作用,三个方向的力共同形成光栅的体应力作用。

(1) 胡克定律的一般形式

胡克定律的一般形式可由下式表示:

$$\sigma_i = C_{i,j}\epsilon_j \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (2-3)$$