



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



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

国家出版基金资助项目

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

机械装置 的 光纤光栅动态检测技术及应用

Application of Fiber Bragg Grating Sensing Network
on Dynamic Monitoring of Mechanical Systems

谭跃刚 洪流 著



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



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



湖北省学术著作
出版专项资金
Hubei Academic Works
Publishing Special Fund

国家出版基金资助项目

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

机械装置的光纤光栅动态 检测技术及应用

谭跃刚 洪流 著

常州大学图书馆
藏书章

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

光纤光栅动态检测技术可通过光波长调制实现多参数、分布式、大容量的动态检测,可有效弥补电类传感器在长期稳定性、耐腐蚀性、抗电磁干扰、多测点布置等方面的不足,可用于各种设施和设备/装备的在线监测。本书在介绍光纤光栅传感与波长解调等基础理论知识的基础上,结合作者课题组 10 余年来在光纤光栅传感检测技术及其应用研究所取得的经验和成果,详细介绍了光纤光栅传感网络及光纤光栅传感检测技术在机械装备监测方面的应用案例。

本书可供从事结构及机械装备监测等工作的工程技术人员、相关领域科研院所的科研人员与大专院校相关专业的本科生、研究生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

机械装置的光纤光栅动态检测技术及应用/谭跃刚,洪流著. —武汉:武汉理工大学出版社, 2018.1

(数字制造科学与技术前沿研究丛书)

ISBN 978-7-5629-5683-9

I. ①机… II. ①谭… ②洪… III. ①机械设备-光纤光栅-动态测定-研究 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 285851 号

项目负责人:田 高 王兆国

责 任 编 辑:黄玲玲

责 任 校 对:李正五

封 面 设 计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉中远印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:12.5

字 数:238 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1—1500 册

定 价:75.00 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。

本社购书热线电话: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

在大型工程结构健康监测和机电装备安全监测等领域,多测点(分布式)的参数检测已成为一种必然的发展趋势,特别是在航空航天、核工业、石油化工等领域,相应设施和装备的状态监测更是需要多测点(分布式)多参数的动态检测技术。光纤光栅作为一种新型的光纤无源传感器件,以其细小柔软、抗电磁干扰、环境适应性强、耐腐蚀、传感光信号可远距离传输,且在一根光纤上可制备多个光纤光栅实现一线多点测量等特点,可组成多测点(分布式)多参数动态监测系统所需的理想传感网络。因此,近年来,光纤光栅传感器技术受到了人们的广泛关注,先后研究开发了多种光纤光栅传感器及其传感网络和相应的检测系统,形成了多测点(分布式)多参数光纤光栅动态检测技术,并在工业各领域得到了广泛的应用,在未来的智能制造、智能家居、智能交通等领域也将扮演重要的角色。

光纤光栅动态检测技术可通过光波长调制实现多测点(分布式)多参数、大容量的动态检测,可有效克服电类传感器在长期稳定性、耐腐蚀性、抗电磁干扰、多测点布置等方面的不足,应用于各种设施和设备/装备监测,可实现从静态检测到动态检测、从单信号检测到多信号检测、从单测点检测到多测点检测、从离线检测到在线检测、从定期检测到长期连续检测的转变,基于这种多测点(分布式)多参数的动态检测易于获得设施和设备/装备运行所呈现的多维性、时变性、耦合性和非线性特征信息,从而可提高各种设施和设备/装备健康安全监测的水平。另外,光纤光栅动态检测技术也可应用于新产品开发,可从多维、分布、动态等多个角度提供性能测试与验证手段,对提高新产品开发能力和水平都有积极的作用。因此,研究和开发光纤光栅动态检测技术及其系统,对发展现代检测技术、提高监测诊断技术的水平和促进新产品开发都具有重要的意义。

本书是对我们十余年来在光纤光栅传感检测技术研究及其应用所取得成果的总结,得到了国家国际科技合作专项(科技部)“重型数控机床光纤传感在线监测与热误差补偿合作研究”(项目编号:2015DFA70340)的支持,其主要内容包含光纤光栅传感基本原理、光纤光栅传感器及其传感网络,以及在机械装备监测方面的应用。希望本书的出版能对监测技术领域的科研和工程技术人员有所帮助,同时也希望通过本书的出版扩大与读者的交流、切磋和讨论,以共同推动我国检测技术的发展。

本书在编写过程中得到了很多老师和学生的大力支持,周祖德教授、刘明尧教授、曲永志副教授对本书的撰写提出了很好的建议,李天梁博士、李瑞亚博士、黄晓博士、夏萍博士、张志建硕士、王资硕士等为本书的撰写、整理等付出了大量的时间和精力,在此一并表示真诚的感谢。

鉴于作者水平有限,书中可能会有不妥和错误之处,恳请读者指正!

谭跃刚 洪流

2017年4月于武昌马房山

目 录

1 绪论	(1)
1.1 动态检测的概念和任务	(1)
1.1.1 动态检测	(1)
1.1.2 动态检测的主要任务	(2)
1.2 光纤光栅动态检测技术与系统	(3)
1.2.1 光纤光栅动态检测技术	(3)
1.2.2 光纤光栅动态检测系统的基本组成	(4)
1.2.3 多测点(分布式)多参数动态信号的分析处理	(6)
1.3 光纤光栅动态检测技术的应用现状	(7)
1.3.1 大型工程结构状态检测的应用	(7)
1.3.2 机械装备运行状态检测的应用	(8)
1.3.3 其他检测应用	(9)
2 光纤光栅检测基础	(11)
2.1 光纤光栅	(11)
2.1.1 光纤光栅的制作	(11)
2.1.2 光纤光栅的类型	(13)
2.2 光纤光栅的传感原理和性能指标	(15)
2.2.1 光纤光栅的传感原理	(15)
2.2.2 光纤光栅的传感性能指标	(16)
2.3 光纤光栅增敏封装	(17)
2.3.1 光纤光栅应变增敏	(18)
2.3.2 光纤光栅温度增敏	(18)
2.4 光纤光栅波长解调技术	(19)
2.4.1 光纤光栅波长解调的基本概念	(19)
2.4.2 单点光纤光栅波长解调	(20)
2.4.3 多点光纤光栅波长解调	(26)
2.5 光纤光栅的交叉敏感解耦原理	(28)
2.5.1 应变与温度交叉敏感解耦	(28)
2.5.2 压力与温度交叉敏感解耦	(29)
2.5.3 位移与温度交叉敏感解耦	(30)

2.6 光纤光栅的复用技术	(32)
2.6.1 光纤光栅波分复用技术	(33)
2.6.2 光纤光栅时分复用技术	(34)
2.6.3 光纤光栅空分复用技术	(35)
3 光纤光栅传感器	(36)
3.1 光纤光栅应变传感器	(36)
3.1.1 粘贴式光纤光栅应变传感器	(36)
3.1.2 增敏型光纤光栅应变传感器	(41)
3.2 光纤光栅温度传感器	(43)
3.2.1 裸光纤光栅温度传感器	(43)
3.2.2 增敏型光纤光栅温度传感器	(44)
3.3 光纤光栅振动传感器	(46)
3.3.1 非接触式光纤光栅振动传感器	(46)
3.3.2 温度解耦的光纤光栅振动传感器	(50)
3.3.3 二维光纤光栅振动传感器	(53)
3.3.4 三维光纤光栅振动传感器	(59)
3.4 光纤光栅位移传感器	(65)
3.4.1 光纤光栅位移测量原理	(65)
3.4.2 光纤光栅位移传感器的传感特性	(67)
3.5 光纤光栅压力传感器	(68)
3.5.1 光纤光栅压力测量原理	(68)
3.5.2 光纤光栅压力传感器的传感特性	(71)
4 光纤光栅动态检测信号的传输与处理	(73)
4.1 分布式光纤光栅传感信号的传输	(73)
4.1.1 分布式光纤光栅传感信号的传输要求	(73)
4.1.2 分布式光纤光栅传感信号的传输方法	(74)
4.2 非接触光纤信号耦合传输方法	(74)
4.2.1 非接触光纤信号耦合传输原理	(74)
4.2.2 非接触光纤信号耦合传输方法	(75)
4.2.3 旋转机械光信号的光耦合传输	(78)
4.3 分布式传感信号的配准与融合原理	(79)
4.3.1 分布式传感信号的时空配准方法	(79)
4.3.2 分布式传感信号的融合原理	(89)
4.4 非平稳信号处理的基本方法	(95)
4.4.1 短时傅立叶变换	(95)

4.4.2	小波变换	(95)
4.4.3	希尔伯特-黄变换	(96)
4.4.4	局部均值分解	(98)
5	大型薄壁结构件变形的光纤光栅动态检测	(101)
5.1	大型薄壁结构件变形检测	(101)
5.1.1	薄壁件变形的光学监测技术	(102)
5.1.2	薄壁结构件变形的在线监测技术	(105)
5.2	大型薄壁件的光纤光栅测量	(106)
5.2.1	大型薄壁件变形的光纤光栅分布测量系统	(106)
5.2.2	大型薄壁件的光纤光栅测点布置	(107)
5.2.3	大型薄壁件变形的重构计算模型	(113)
5.3	基于光纤光栅测试数据的大型薄壁件可视化实时变形监测系统	(120)
5.3.1	可视化监测	(120)
5.3.2	三维曲面重构基本原理	(120)
5.3.3	大型薄壁件变形的可视化监测	(121)
6	旋转机械的光纤光栅动态检测	(124)
6.1	旋转机械动态检测的基本问题	(124)
6.1.1	旋转机械动态检测的概念	(124)
6.1.2	旋转机械动态检测的主要方法	(125)
6.1.3	旋转机械动态检测的主要问题	(126)
6.2	旋转机械光纤光栅动态检测方法	(126)
6.2.1	旋转机械的光纤光栅测点布置	(126)
6.2.2	旋转机械光纤光栅多测点(分布式)多参数检测系统	(127)
6.3	旋转叶片的光纤光栅动态检测	(129)
6.3.1	旋转叶片的光纤光栅测点布置	(130)
6.3.2	基于光纤光栅的旋转叶片状态监测实验系统	(135)
6.3.3	旋转叶片的静态特性测试	(138)
6.3.4	旋转叶片的动态特性测试	(139)
6.4	汽轮机转子的光纤光栅动态检测	(145)
6.4.1	转子的光纤光栅测点布置	(145)
6.4.2	转子的光纤光栅动态检测与分析	(146)
6.5	齿轮箱的光纤光栅动态检测	(148)
6.5.1	旋转齿轮的光纤光栅测点布置	(149)
6.5.2	旋转齿轮的光纤光栅动态检测与分析	(150)

7 大型金属结构件热变形的光纤光栅动态检测	(154)
7.1 大型金属结构件热变形的基本问题	(154)
7.1.1 热变形的基本概念	(154)
7.1.2 热变形测量的主要方法	(155)
7.1.3 热变形测量的主要问题	(163)
7.2 大型金属结构件热变形光纤光栅测量	(164)
7.2.1 大型金属结构件热变形光纤光栅测量的优势	(164)
7.2.2 大型金属结构件热变形的光纤光栅测点布置	(165)
7.2.3 基于测量数据的大型金属结构件热变形计算方法	(166)
7.3 大型数控机床热变形误差的光纤光栅检测	(174)
7.3.1 大型数控机床热变形误差的基本问题	(174)
7.3.2 大型数控机床热变形误差光纤光栅测量	(176)
参考文献	(182)

1 绪 论

检测是采用合适的方法和装置拾取系统信息的过程,在国民经济建设与发展及人们的日常生活中起着重要的作用,科学研究、新产品开发、产品质量检验、生产自动化等都需要检测。进入 21 世纪后,现代机械系统日趋复杂,其功能越来越多,自动化和智能化的要求越来越高,系统的测试、分析和验证已经成为当今新型机械产品开发的基本要求。现代机械系统的可靠运行和维护、自动化和智能化等功能的实现都必须依靠先进的监控手段,这些都离不开检测技术的支撑。因此,现代检测技术及其系统作为“感官”功能部件已成为现代机械系统必不可少的组成部分。

1.1 动态检测的概念和任务

1.1.1 动态检测

信号是信息的载体,机械系统的信息是其客观存在或运动状态的特征,它往往反映于机械系统各种信号的变化上,这种随时间变化的信号就称为动态信号。机械系统的振动/噪声、力/压力、应力/应变、温度等信号的变化就是其运行状态特征的反映。通过对这些动态信号的测量和分析,就可以掌握机械系统的运动过程、运动状态及性质。机械系统的检测就是对各种信号进行测量与分析,提取出机械系统运行状态的信息,它是认识和掌握机械系统运行规律的一种有效方法。因此,检测技术不仅是机械系统运行监测、故障诊断、可靠运行维护的基础,也可为新的机械产品开发提供数据和技术支撑。

动态检测就是通过对系统动态信号的测量和分析,提取系统动态特性信息的过程。简单地说,动态检测就是对动态信号的检测,在时域上就是对随时间“快速”变化信号的检测,在频域上就是对“高”频率信号的检测。动态检测过程主要包含动态信号的采集、变换、传输、存储、分析处理和显示,动态检测技术就是针对信号采集、变换、传输、存储、分析处理和显示过程的方法、工艺、技巧和手段,也可

认为是动态检测工程实践的方法、工艺、技巧和手段。

与动态检测相对应的有静态检测,静态检测主要是对不随时间变化或随时间缓慢变化的信号的检测。静态检测和动态检测是针对信号时域特性的不同检测方法。

现代机械系统的运行通常是一个连续的动态过程,必须采用动态检测技术来掌握或了解其运行状态及性质,特别是一些关系到国防和国民经济发展的重大战略性机械装备(系统),从设计制造到安全运行维护的整个生命周期都已离不开动态检测技术,动态检测不仅可为机械装置或机械系统的运行质量和性能评估提供准确可靠的运行数据和技术支撑,而且可为进一步改进、探索、开发新产品提供有效的测试和验证方法与手段,从而促进新技术、新产品的发展。另外,随着科学技术的发展,现代机械系统往往在高速、高温、重载等极端工况下运行,其运动呈现出高速/超高速、高精度、高可靠性的发展趋势。这就对动态检测技术提出了新的要求,多维、分布、动态、实时、准确地描述和刻画现代机械系统的运行状态及性质已经成为一种必然趋势。

在实际的动态检测中,有时为了研究被测对象运动的某些特征规律,常采用试验装置人为地将需要的信息从被测对象中激发出来,再进行检测。因此,从信息论的观点来看,动态检测过程包含信号激励、测量、传输、存储、分析处理及显示记录等环节。

1.1.2 动态检测的主要任务

对于处于高速、高温、重载等工况下的机械装备(系统),动态检测的目的就是实时在线测量和监视机械装备(系统)的实际运行状态。为达到这种实时在线测量和监视的目的,动态检测的主要任务就是针对实际机械装备(被测对象)分析设计相适应的动态检测方法及系统,亦即面向被测对象设计合适的动态测量方法和建立性能指标满足相应要求的动态检测系统,以获得描述被测对象运动特征的信息。因此,动态检测的根本任务就是通过某种方法和装置(系统)复现表征被测对象运行特征的动态信息。

动态检测系统一般由传感(子)系统和数据处理(子)系统等组成。传感系统的主要作用是将被测对象的动态信号(一般是非电信号)转换为易于分析处理的信号(一般是电信号);数据处理系统的主要作用是对由传感系统获得的信号按照一定要求和规则进行分析处理,以获得被测对象的特征信息,并进行记录或显示。传感系统的响应特性和处理系统的实时有效性是动态检测系统的重要性能。

传感(子)系统主要由传感器等器件组成,其响应特性是指在输入信号(被测信号)作用下的输出信号变化特性,一般分为动态响应特性和静态响应特性。动

态响应特性主要表示传感系统的输入信号与输出信号之间的动态关系,反映系统输出响应的稳定性和快速性,其评价指标分时域指标和频域指标,时域指标主要有动态过程时间、超调量等,频域指标主要有带宽、稳定裕量等。静态响应特性主要反映传感系统的输入信号与输出信号之间的稳态关系,主要反映系统输出响应的准确性,其评价指标主要有线性度、量测范围和量程、迟滞和重复性、灵敏度、分辨力和阈值、漂移和静态误差等。这些响应特性都与传感系统的信号转换方法及结构密切相关。

数据处理(子)系统主要是由数据处理单元及 I/O 接口单元等组成(或者就是一个计算机系统),主要作用是对信号进行计算和分析处理,如降噪处理、时频分解处理等,以获得描述被测对象运动特征的动态信息。这要求数据处理系统的数据计算和分析处理有较高的有效性、可靠性、实时性,这都与数据分析处理的方法密切相关。

因此,要想从被测对象中获取所需的动态信息,就必须有合适的检测系统,且检测系统需具有相适应的动静态响应特性和有效的数据计算分析处理方法。动态检测技术的研究重点就是检测系统的响应特性和有效的数据分析处理方法,其关键是信号转换方法及传感器。

传感器是实现检测方法的关键器件,即将感受到的被测对象的信号变换成所需形式的信号的器件或装置。若检测方法或传感器能直接测量被测对象中的特征信息,那么后续的信号分析处理就会很简单甚至不需进行分析处理。目前,由于检测方法或传感器所获信号的限制,动态检测领域内的很大一部分研究侧重于信号分析处理的算法上,希望从有限的信号中获取足量的有用信息。这就好比人们到医院诊断病情一样,早期由于缺乏有效的检查手段(检测方法),诊断病情主要靠医生的经验和水平(诊断算法),而先进的病症检查方法出现后,对原来认为的疑难病症进行诊断就容易多了。因此,动态检测技术的发展主要依赖于传感器和信号分析处理方法的发展。

1.2 光纤光栅动态检测技术与系统

1.2.1 光纤光栅动态检测技术

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)(以下简称光纤光栅)是由加拿大光通信研究中心的 Hill 等人在 20 世纪 70 年代末研究光纤非线性光学效应时发现的,它可以形象地看成是在一般光纤的纤芯内额外加入了一个窄带反射镜或窄带滤光器,当一束宽光谱光经过光纤光栅时,与窄带反射镜(窄带滤光器)相匹

配的光波就被反射(被透射),不相匹配的光波就被透射(被反射)。现在一般是利用光纤材料的光敏性,通过紫外光曝光的方法将入射光相干场图样写入光纤纤芯,形成一个窄带的反射镜,即通过紫外光干涉条纹在纤芯内产生沿纤芯轴向的折射率周期性变化,这种折射率的周期性变化就恰似在光纤纤芯内“刻蚀”出了一道道的光栅,其栅距的变化就会引起反射光波长的变化,也就是说若能将被测物理量的变化转化为光纤光栅栅距的变化,就会引起光纤光栅反射(透射)光波长的变化,即反射(透射)光波长的变化对应着被测物理量的变化。因此,光纤光栅可以作为一种波长调制传感器,依据光纤光栅反射波长的变化就可获得被测物理量的变化。

在一根光纤上制备的光纤光栅将被测物理量信息转化为光信号,光信号再由光纤传输,亦即光纤光栅传感及信号传输是一体的。加之光纤材料所具有的稳定性能高、环境适应性强等特性,使得光纤光栅作为传感器的优势十分明显,主要表现在:

① 传感信号和传输信号都是光信号,不受电磁场干扰,且光纤信号传输距离一般比电类传感器信号的传输距离远。

② 光纤光栅结构简单,体积小,光纤轻巧柔软,易于实现一线多点、多参量测量。一根光纤上可制备出多个光纤光栅传感器,若被测对象的测量部位、所需测量的物理量符合要求,有时可通过铺设一根光纤进行测量。

③ 光纤光栅稳定性高,耐腐蚀性好,环境适应性强。一般电类传感器有较严格的使用环境要求,如半导体传感器就不能在高温、高湿环境下使用,而光纤光栅传感器一般能承受 $300\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温,高湿、油污等环境对光纤光栅传感及信号传输几乎没有影响。

④ 光纤光栅的传感响应灵敏,可在较大频率范围内检测动态信号。

光纤光栅动态检测技术就是以光纤光栅作为主要传感器件的一种动态检测技术,这种动态检测技术的主要特点除了环境适应性强、抗电磁干扰、抗腐蚀外,突出的就是可较方便地实现多测点(分布式)多参数的动态检测,或者说光纤光栅动态检测就是一种多测点(分布式)多参数动态检测。因此,光纤光栅动态检测技术要研究的主要问题除了响应特性、准确性等动态检测系统的基本特性外,还需重点研究针对被测对象的测点传感网络规划、多测点(分布式)多参数传感信号时空配准传输及其分析处理方法等问题。

1.2.2 光纤光栅动态检测系统的基本组成

光纤光栅将被测信号转换为光信号主要是基于光栅栅距的变化,即被测物理量变化引起光纤光栅栅距变化,光栅栅距变化就会引起光纤光栅反射光波长变

化。因此,只要能将被测物理量的变化转变为光栅栅距的变化,光纤光栅就可对被测物理量进行测量,从而可设计制作多种面向不同物理量的光纤光栅传感器。由光纤光栅传感器组成传感网络,就可实现多测点(分布式)多参数测量。

光纤光栅动态检测系统的基本组成如图 1-1 所示,主要包含光纤光栅传感网络、光耦合器、宽带光源、波长测量装置和信号处理装置等。宽带光源将一定带宽的光通过光耦合器入射到光纤光栅阵列中,这些宽带光波在通过光纤光栅时,符合光纤光栅波长选择条件的光波就被反射,反射窄带光再由光耦合器送入波长测量装置。波长测量装置的作用就是用某种方法识别反射窄带光的中心波长,并将其转换为对应的电信号再输出。当光纤光栅传感阵列中某个或某些光纤光栅测点感应到被测量变化时,相应的反射光波长就发生变化,由波长测量装置检测这些反射光的波长变化就可获得对应测点处的被测量变化情况。

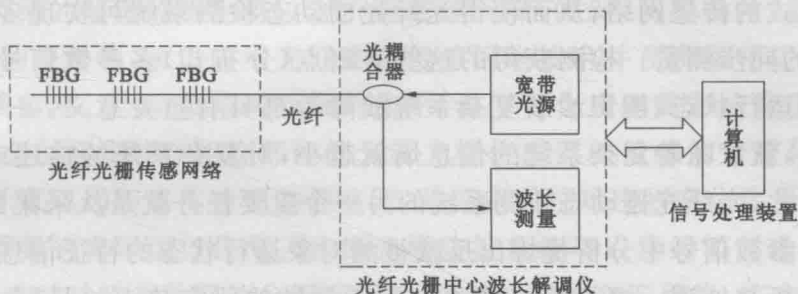


图 1-1 光纤光栅动态检测系统的基本组成

光纤光栅本质上是一个波长调制型光器件,被测量变化引起的光纤光栅反射中心波长的变化就是对光纤光栅反射中心波长的调制。因此,波长测量实际上就是对光纤光栅反射中心波长进行解调。实际应用中,一般将宽带光源和波长测量装置做成一体,称为光纤光栅波长解调装置(或仪器)。显然,波长解调仪是光纤光栅动态检测系统的关键部件,它对光纤光栅反射中心波长变化的解调速度、解调精度和解调范围直接关系着光纤光栅动态检测系统的动态响应特性和检测精度。目前,中心波长检测方法有很多,一般来说,可调谐滤波法、光源波长可调谐扫描法、射频探测法和干涉法等解调技术适合于对解调精度、动态测量能力要求高的系统。

图 1-1 所示的光耦合器(也称为光纤耦合器)实际上起着光分路的作用,将输入的光信号按照一定要求分配给相应支路输出,每条支路上的光信号分配比例可以相同,也可以不同。光纤光栅动态检测系统中的光路就是由光耦合器这类光学器件连接起来构成的,随着光纤光栅传感网络的规模化和宽带化、光纤复用技术的发展,对光耦合器这类光学器件的工作带宽和传输损耗提出了更高的要求,希