

岩土工程光纤光栅监测 理论与实践

◎张 鸿 徐 斌 刘优平 著

中国建筑工业出版社

岩土工程 光纤光栅监测理论与实践

张 鸿 徐 斌 刘优平 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土工程光纤光栅监测理论与实践/张鸿等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 2
ISBN 978-7-112-21702-1

I. ①岩… II. ①张… III. ①岩土工程-光纤光栅-监测-研究 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 325547 号

光纤光栅的工程应用正逐步趋于成熟, 光栅技术和传感器技术水平不断提高, 光纤光栅传感的迅速发展使其在土木工程领域大有替代传统监测技术的趋势。本书重点介绍了近年来作者在高速公路软基沉降监测、高边坡变形安全监测中相关光纤光栅传感器的研发和工程应用情况, 以期推动光纤光栅传感技术在我国岩土工程监测中的应用。全书共分为 9 章, 分别为绪论、光纤光栅基本原理、光纤光栅写入方法、光纤光栅传感器、光纤光栅大量程位移传感器的研发、公路软基智能信息化监测系统的开发、公路软基施工常规仪器监测与工程应用、公路软基智能光纤监测系统工程应用、基于光纤光栅传感技术的测斜仪研发与工程应用。

本书适合从事岩土工程监测的工程技术人员和科研人员, 也可供高等院校相关专业师生参考。

责任编辑: 杨 允

责任设计: 李志立

责任校对: 张 颖

岩土工程光纤光栅监测理论与实践

张 鸿 徐 斌 刘优平 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 $\frac{3}{4}$ 字数: 264 千字

2018 年 4 月第一版 2018 年 4 月第一次印刷

定价: 40.00 元

ISBN 978-7-112-21702-1

(31552)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

由于岩土工程（如软土地基、边坡工程、基坑工程、大型水库和尾矿库大坝等）的复杂性和受到现有研究水平的限制，人们对大型岩土工程的监测给予了高度重视。无论是在生产实践还是在科学研究中，岩土工程监测已被广泛应用，岩土工程监测已成为掌握岩土体与结构的受力变形动态、确保工程安全、了解失稳机理和开展安全预警预报的重要手段。

传感监测技术是工程监测系统的重要组成部分，它为工程监测提供精确、可靠的基础性测量数据。常规的传感器，如差动电阻式、钢弦式、电阻应变计式和电感式传感器等，普遍存在抗干扰性、耐久性和长期稳定性等较差的缺点，难以适应现代工程监测的要求。而近年来兴起的光纤光栅传感器则具有抗电磁干扰、防水防潮、抗腐蚀和耐久性长等特点，对监测对象的材料性能和力学参数等影响较小。另外，光纤传感技术采用光纤进行信号传输，传输损耗小，容易实现远距离信号传输和自动监测控制。光纤传感技术正是由于以上优点而成为工程监测系统中的研究热点，国内外学者在土木工程、水利工程和航空航天等领域已经开展了广泛的光纤传感技术理论和应用研究，取得了一系列研究成果，但是在岩土工程的安全和健康监测中，所见系统的研究报道不多，这主要是由于岩土工程本身的复杂性所决定的。

由于光纤与松散岩土体变形不协调以及光纤传感器封装和现场埋设困难，导致光纤传感技术在岩土工程监测领域应用发展比较滞后。近十年来，在岩土工程光纤光栅监测研究领域，作者及其研究团队在模型试验、现场试验、理论研究、数值模拟等方面开展了一系列研究工作，研发了适合于高速公路软基大变形监测的光纤光栅位移传感器，在传感技术研发领域实现了重大突破；建立了软基监测光纤传感现场数据采集系统，开发了在软基中封装和埋设光纤传感器的新技术；研发了一种监测岩土体内部变形的光纤光栅测斜装置及测斜计算方法，解决了现有测斜仪存在精度低、使用寿命短、数据处理不及时、暴雨等恶劣天气无法监测等难题；研究开发了软基和高边坡智能光纤在线监测系统，实现了软基和高边坡安全监测的智能信息化，部分成果取得了发明专利授权，研究成果在江西省德昌高速公路、九江绕城高速公路、万宜高速公路等多个项目上进行了工程应用，本书即是这些研究成果的总结。本书重点介绍了近年来作者在高速公路软基沉降监测、高边坡变形安全监测中相关光纤光栅传感器的研发和工程应用情况，以期推动光纤光栅传感技术在我国岩土工程监测中的应用。

本书研究工作得到了国家自然科学基金项目（51569016）、江西省科技计划项目（2010BGB01302、20151BBG70060）、江西省教育厅科技项目（GJJ161101、GJJ151096）和江西省优势科技创新团队重点项目（20171BCB19001）、江西省主要学科学术和技术带头人计划（20172BCB22022）、南昌市2017年优势科技创新团队项目（2017CXTD012）的资助，在此表示感谢。感谢南昌工程学院岩土工程研究所的全体老师对作者研究工作的支持和帮助！感谢南昌工程学院对本书出版的大力支持！

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请专家和读者批评指正。

2017年12月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究概况	2
1.2.1 软基监测研究现状	2
1.2.2 边坡监测研究现状	3
1.2.3 光纤光栅传感的工程应用现状	5
1.3 本书的主要内容	6
第2章 光纤光栅基本原理	8
2.1 光纤光栅传感原理	8
2.1.1 光纤基本结构与传输原理	8
2.1.2 光纤光栅传感基本原理	9
2.2 光纤光栅的种类	10
2.2.1 均匀周期型光纤光栅	11
2.2.2 线性啁啾光栅	11
2.2.3 Taper 型光栅	12
2.2.4 Moire 光纤光栅	12
2.2.5 Blazed 型光纤光栅	13
2.2.6 长周期光纤光栅	14
2.3 光纤光栅传感器阵列的指标	14
2.3.1 传感器波长	14
2.3.2 传感器带宽	15
2.3.3 反射率	15
2.3.4 边模抑制	16
2.3.5 传感器的长度	16
2.3.6 传感器波长间隔	16
2.3.7 缓冲区 (buffer)	17
2.3.8 退火	18
2.4 光纤光栅解调技术	18
2.4.1 边缘滤波器法	19
2.4.2 可调谐滤波器法	22
2.4.3 干涉法	24

第3章 光纤光栅写入方法	26
3.1 光纤材料的紫外线增敏技术	26
3.2 内部写入法制作光纤光栅	27
3.3 干涉法制作光纤光栅	28
3.3.1 分振幅干涉法	28
3.3.2 分波前干涉法	30
3.4 点光源写入法	31
3.5 相位掩膜法	32
3.5.1 写入光斜入射	33
3.5.2 写入光正入射	34
3.5.3 相位掩模板法制作光纤光栅	35
3.5.4 改变相位模板的周期	36
3.6 光纤光栅制作中旁瓣的抑制	38
3.7 光纤光栅的写入光源	41
第4章 光纤光栅传感器	43
4.1 设计原则	43
4.2 光纤光栅应变传感器	44
4.2.1 基片式封装	45
4.2.2 嵌入式封装	47
4.2.3 金属管式封装	50
4.2.4 夹持式封装光纤光栅应变传感器	53
4.2.5 光纤光栅金属化封装	57
4.3 光纤光栅温度传感器	60
4.3.1 基片式光纤光栅温度传感器	60
4.3.2 聚合物封装光纤光栅温度传感器	61
4.3.3 金属管式光纤光栅温度传感器	62
4.4 光纤光栅位移传感器	64
4.4.1 拉杆式位移传感器	64
4.4.2 微位移传感器	66
4.5 光纤光栅压力传感器	66
4.5.1 边压力传感器	66
4.5.2 弹簧悬臂梁光纤光栅压力传感	68
4.5.3 正弦力放大原理光纤光栅压力传感器	69
4.5.4 高压传感器	70
4.6 应变与温度同时测量	71
4.6.1 参考光纤光栅法	71
4.6.2 长周期光纤光栅与FBG组合法	72

4.6.3	双波长光纤光栅法	73
4.6.4	光纤光栅二阶谐波法	74
4.6.5	闪耀光纤光栅	74
4.6.6	超结构光纤 Bragg 光栅法	76
4.6.7	不同掺杂的光纤光栅	77
4.6.8	不同包层直径光纤光栅	78
4.7	光纤光栅传感器可靠性	79
4.7.1	光纤性质对传感器可靠性影响	80
4.7.2	加工过程对光纤传感器可靠性影响	83
4.7.3	封装与安装对传感器可靠性影响	84
第5章	光纤光栅大量程位移传感器的研发	87
5.1	研发意义	87
5.2	研发原理	87
5.3	位移传感元件	88
5.4	大量程位移传感器组装	89
5.5	大量程位移传感器标定	90
第6章	公路软基智能信息化监测系统的开发	93
6.1	软基智能光纤监测系统开发	93
6.1.1	监测系统开发的目的	93
6.1.2	监测系统主要功能	93
6.1.3	监测系统结构	94
6.1.4	监测系统的特点	94
6.1.5	运行环境及系统要求	95
6.1.6	系统登录	95
6.1.7	系统功能介绍	97
6.2	光纤远程在线监测系统的开发	100
6.2.1	系统开发目的	100
6.2.2	系统主要功能	100
6.2.3	运行环境及系统要求	101
6.2.4	程序安装	101
6.2.5	系统使用	101
第7章	公路软基施工常规仪器监测与工程应用	106
7.1	工程概况	106
7.2	工程位置	106
7.3	地质环境条件	107
7.3.1	气象、水文	107

7.3.2	地形地貌	107
7.3.3	地层岩性	107
7.3.4	地质构造	108
7.4	软基常规监测方案	108
7.4.1	试验段的选择	109
7.4.2	监测断面及仪器布设	109
7.4.3	监测频率	110
7.4.4	软基监测控制标准	111
7.4.5	监测控制网建立及仪器埋设	111
7.5	地表沉降变形监测与结果分析	112
7.6	地基土分层沉降监测与结果分析	117
7.7	地基深层测斜监测与结果分析	118
7.8	孔隙水压力监测与结果分析	121
第8章	公路软基智能光纤监测系统工程应用	127
8.1	软基光纤监测系统	127
8.1.1	软基光纤监测方案	127
8.1.2	光纤光栅解调仪	127
8.2	光纤光栅位移传感器安装埋设	129
8.2.1	传感器组装	129
8.2.2	测杆及其保护管组装	131
8.2.3	传感器基座组装	134
8.2.4	传感器基座固定	134
8.2.5	安装传感器	135
8.3	光纤光栅渗压传感器安装	137
8.3.1	光纤光栅渗压传感器	137
8.3.2	初步检验	138
8.3.3	创建零读数	138
8.3.4	检查率定	139
8.3.5	测压管或测井中安装	139
8.3.6	钻孔中安装	140
8.3.7	填土和坝体中安装	141
8.3.8	软土中推挤或打桩方式安装	141
8.3.9	过滤器的排气	142
8.4	光缆熔接及铺设	143
8.5	信号调试	143
8.6	监测系统试运行	144
8.7	监测结果	145
8.7.1	光纤传感器波长变化	145

8.7.2 软基参数监测结果	148
第9章 基于光纤光栅传感技术的测斜仪研发与工程应用	151
9.1 光纤 Bragg 光栅监测原理	151
9.2 光纤测斜仪结构设计与工作原理	152
9.2.1 光纤光栅测斜仪结构设计	152
9.2.2 工作原理	153
9.3 工程应用	155
参考文献	158

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

随着我国国民经济的快速发展,国家基础设施建设迅速,尤其是近年来高速公路、高速铁路等交通设施建设突飞猛进,而我国长期以来的工程技术发展中存在着重建设、轻维护等现象,再受限于现有的工程监测技术水平以及后续投入经费等原因,导致诸如桥梁、隧道、边坡、软基以及高层建筑等重大工程的安全监测与维护相对缺失,多数情况下都是在工程出现危险或灾害已经发生后才开始考虑工程结构安全健康监测。

我国幅员辽阔,高速公路建设不可避免要穿过软土地基区域,特别是东部沿海诸省,这些地区的地质环境,大部分为河相、海相或泻湖相沉积层,在地质史上属于第四纪全新世 Q_4 的土层。土类多为淤泥、淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土及淤泥夹砂层,属于饱和的正常固结软黏土。这些土类的主要特点:含水量高、孔隙比大、压缩性高、强度低、透水性小、灵敏度大。这些特性给高速公路的建设带来不少弊病,有的甚至成为工程成败的关键,因此,软土地基的处理就成为高速公路建设的一个关键问题。如果处理不当,就会产生以下一些问题^[1]:(1)路堤整体滑动,桥台破坏;(2)构筑物与路堤衔接处差异沉降,引起桥头跳车及路面破坏;(3)涵身、通道凹陷,沉降缝拉宽而漏水;(4)路面横坡变缓,造成积水等。如日本常磐高速公路神田桥从 1986 年 9 月 20 日通车后,19 个月中平均每月修补一次错台,严重影响了路面质量和通行能力;我国沪嘉高速公路通车 4~5 个月后桥头错台大者达 7~8m,导致行车速度大为下降;江苏宁连一级公路,由于软基沉降问题,使路面开裂,桥头错台,通车几年来一直小修不断。随着高速公路、高速铁路的修建,软土问题越来越突出,已成为影响工程质量、工程周期和工程造价的关键因素之一。因此,加强高速公路软基处理和沉降监测的研究,已经成为我国交通事业发展的一个非常重要课题。

与此同时,随着我国中西部山区交通事业的快速发展,公路建设过程中不可避免地开挖产生了大量的岩土边坡,这些岩土边坡的自身稳定性制约着公路的安全运营。2003 年 5 月 22 日,兰州至临洮高速公路第 11 合同段 K58+820m 左侧上边坡发生坍塌,将 8 个正在施工的民工埋入土体中,造成 7 人死亡,1 人受伤的重大事故。2010 年 07 月 06 日,渝武高速公路 K930+600 处高边坡段发生垮塌,垮塌 10 万 m^3 土石,造成双向车道被埋,高速公路中断,所幸未造成人员伤亡事故,此次是边坡垮塌中断交通 4 天。因此对地质灾害开展有效的监测,对灾害提前做出预警,可以有效避让自然灾害,减小或避免灾害损失。对于边坡工程尤其是高陡边坡开展长期、有效的安全监测预警技术与应用研究有着重要的理论和实际意义,主要体现在以下方面^[2]:可以对边坡的稳定、安全做出预警,为边坡的施工、使用过程中提供变形等重要监测信息,对可能出现的危险提供分析资料和科

学依据；为研究滑坡及边坡的滑动蠕动变形等提供技术依据，通过监测可以对边坡岩土体内部的变形特征和趋势提供有价值的参数依据；对于开展过监测技术后发生滑坡或者崩塌的边坡，滑坡过程中的监测数据信息也是重要的分析资料，对研究边坡的形变规律和预警防治具有重要科学价值；为边坡稳定性分析模型研究提供科学数值信息，边坡稳定分析模型的理论研究离不开工程实际的监测得到的数据。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 软基监测研究现状

路堤作为道路路基的主要结构形式之一，对道路的使用品质、行车安全、修建和运营经济性等起着至关重要的作用。为适应这一发展的需要，近年来在路堤设计理论和方法、填筑材料和施工工艺、边坡稳定、养护技术和管理方面开展了大量的研究工作，积累了一定的经验，提高了路堤工程的理论水平和技术水平。但软基路堤的沉降问题，一直是铁路、公路路基需要研究解决的主要问题。对路堤沉降性状的分析研究，不仅是正确认识和评价路基稳定性的基础，也是提高路基设计水平，发展施工控制技术的有效途径。高路堤自重应力大、应力水平高，由填土自身压缩产生的沉降较为可观，过大的沉降会对公路和铁路的路基本身及路面结构产生危害。因此，世界各国历来十分重视对路堤沉降分析计算的研究。然而由于问题本身的复杂性和土力学理论的不成熟，目前对非饱和土高路堤的沉降规律尚缺乏合理的理论计算方法，尤其是对于高速铁路和公路，其沉降控制的要求更高，但国内外尚无同类工程的可靠技术成果和工程经验，可供应用的系统观测资料尤其缺少，这原因不仅在于填土体累积沉降量难以确定，还在于施工过程中堤身、堤基发生的沉降量占总的累积沉降量的比例也难以明确^[3]。

20世纪80年代以来，我国众多岩土工作者对工程沉降观测工作展开了研究，监测技术取得了显著的进展。高速公路、一级公路、铁路一般进行二等或二等以下的水准观测，设备主要为水准仪、经纬仪、分层沉降仪、电磁式分层沉降仪、垂直变位仪、垂直相对变位仪、沉降管。碾压土石坝垂向观测设备与公路、铁路相似。机场进行二等或二等以上的水准观测，设备主要为水准仪、钢钢尺等。

目前，我们国家的道路施工监测路基沉降的方法基本都采用沉降板法这一传统方法。沉降板法是在道路施工期间在路基下铺设一块沉降板，记录其高度。然后再路基铺设完毕后测出沉降板高度，然后根据高度差来显示路基沉降情况。这种沉降板法使用传统的测量仪器，精度为1mm；并且体积大，安装不便，测点易损，不可恢复；需要人工逐点测量，不能自动获取数据；阴雨天气无法测量，间断的获取数据；长期人工测量费用高；人工测量误差不可避免，计算、绘图不方便；不能实现多层测量。另外沉降板法只能在施工期间测量，一旦道路修好通车，便无法继续监测到路基沉降的状况，缺乏长期性。另外还有类似的水准测量法、监测桩法和沉降水杯法等。从目前沉降监测技术来看，还是主要以人工使用传统仪器测量为主，这种方法只能在高速公路施工期间进行测量，或者在公路运营后定期的测量，不能全天候自动获取沉降数据，需要人工逐点测量，长期人工测量费用高、误差大。

总之,我国高速公路软基沉降监测存在自动化程度及仪器可靠性低、数据不及时、测量精度低等现象,影响软基监测的效果和工后沉降的预测,不利于信息化施工。

1.2.2 边坡监测研究现状

边坡是指山体、土体等在自然作用下或者人为开挖而形成的具有一定坡度临空面,因此按照边坡的形成形式可将其分为自然边坡和人工边坡,一般将度超过 20m 的土质边坡以及高度超过 30m 的岩质边坡认为是高边坡。边坡工程常见于人们的日常生活——大坝水库开挖形成的边坡、交通沿线的边坡、临山建筑边坡等等,山区交通工程的主要形式就是高架桥梁、隧道和边坡,以找到可以直接铺轨筑路的平整地段。而对于铁路线来讲,其勘察设计线路管尽可能地避免地质危害严重地带,但由于铁路线自身需要尽可能的直线通,转弯半径最小限制等特征,铁路沿线的土木工程比公路更为复杂,对于桥、隧道、边坡这三种工程,边坡的稳定问题尤为突出,对交通线的安全威胁大。

边坡的稳定问题直接关系到工程安全,对高危边坡开展有效的监测,及时了解和跟踪其变形趋势,分析其潜在的失稳区域,掌握边坡的整体动态,对于预防和避免灾害的发生意义重大。边坡监测的主要目的就是获得其潜在滑动区域的变形走势、变形速率、应力状态等科学数据,再结合岩土力学等相关理论,研究分析边坡的稳定性。因此获得边坡准确、有效、全面的状态数据信息,是开展边坡安全研究的基础,而监测方法、监测技术能否合理、有效至关重要。

边坡监测是一个典型的古老而又常新的课题,是现代岩土工程领域持续研究的热点问题。现代意义上的边坡监测始于 20 世纪 40 年代,当时的日本研究人员斋藤迪孝开展了有关边坡稳定以及失稳滑坡预测方面的工作。随着科学技术的不断发展,目前,各种新的监测方法和先进科学仪器不断投入到边坡工程中,边坡监测的两个最主要的内容就是变形位移监测和应力状态监测^[4-7],其监测技术的发展历程如下:

1. 变形位移监测

边坡的变形监测主要包括边坡内部的不同深度处的水平变形和边坡表面的滑动变形位移。坡体内部变形表征的是整个边坡的运动状态与趋势,一直以来都是边坡监测的重点对象。边坡表面滑动位移监测,主要是考虑到即使坡体内部没有变形位移的发生,表面在风化、雨水的作用下也经常出现崩塌等现象,因此内部和表面两个方面的监测都不可或缺。

(1) 简易观测:即人员的现场巡视与观测,主要是指有关技术工作人员在高危边坡失稳的影响范围里开展周期的观测,定期用皮尺等计量工具测量裂缝开裂大小、趋势等,并作出相应颜色等明显的标示警示等。依靠技术人员的肉眼观测,可以发现边坡较为明显的变形,例如坡面明显的裂缝、塌陷,但肉眼无法查看到边坡表面和内部的微小形变与积累,因此无法达到微观、实时监测,从工程监测与预警要求来讲,人员的现场巡测可以作为自动化监测的有效补充而不是主要方法。这种人员观测法一直伴随着边坡工程的发展,尽管目前有很多自动化的监测仪器,但该方法仍不可或缺。

(2) 设立监测站点观测:是指在远离边坡变形之外的地方建立固定测点,利用各种观测仪器定期监视边坡上某一坐标点的变形位移。主要监测技术手段有利用经纬仪、水准仪等开展的大地测量、利用 GPS 全球定位系统开展的地表位移监测、利用近景摄影技术开展的观测点三维坐标变化监测。GPS 监测技术是伴随着美国 GPS 定位卫星的

全部到位后,逐步在边坡领域应用,该方面的应用基本在20世纪90年代以后。近景摄影测量技术的应用从20世纪70年代开始的^[8],是摄影测量和遥感测量的重要组成。从我国有记录的使用情况来看,最早在1981年,在西汉华银粮仓和大明宫遗址的测绘上使用了该方法,在后续的近30年里,该方法在精密摄影仪器技术的不断发展支撑下,已经非常成熟。设站观测法,还是人工周期的开展变形记录,自动化程度并不高,且无法达到在线监测。

(3) 测斜仪器观测:通过在边坡上安装有关仪器,监测内部及坡面的变形。最常用的监测仪器就是测斜仪^[9,10],一般是需要先先在边坡上钻孔,埋入带有导槽的测斜管,测斜仪沿着导槽放入。通过记录不同深度处的测斜仪读数,推导处随着测斜管变形的坡体内部变形。我国最早是在1955年从苏联引进的HIII-2等型号的测斜仪^[11],到1959年才有了第一家测斜仪生产厂家。70~80年代是我国测斜仪技术发展最快的一段时期,在各个矿区、水库等的边坡变形监测中不断应用。目前国内外的测斜仪技术日趋成熟,也是目前主流的边坡变形测量手段,但其使用方法和监测形式等没有改变,一直是由人员定期地将仪器放入测斜管内,周期性的开展变形记录。

(4) 光纤传感测量:利用光纤传感器技术监测,按照传感原理的不同,基本可分为布里渊散射光时域反射监测技术(BOTDR)和光纤光栅(FBG)技术。BOTDR技术是通过检测作用在光纤上的变形带来的光强度的变化来分析变形信息的,而FBG技术主要是通过检测其中心波长的变化来分析外界的变形信息。

2007年,剑桥大学的Hisham Mohamad^[12]等人利用分布式光纤传感器系统制作了深部测斜仪,对边坡抗滑桩进行监测,对比抗滑桩的变形,验证了光纤传感用于深部位移测量的可行性。同年,克兰菲尔德大学的G. Kister^[13]等人将16个封装保护好的光纤光栅串埋入混凝土应变桩内,监测浇注过程以及后续凝固受力时中的温度和应变变化,取得了良好的监测效果。2010年,香港理工大学的裴华富^[14,15]等人提出了一种光纤光栅边坡原位测斜技术,提出了一种差分方程来推导测斜管上的光纤光栅应变和弯曲变形之间的关系,并将该光纤光栅测斜仪应用到工程实际。

国内方面,南京大学对BOTDR技术在边坡等土木工程上开展的研究和应用较多,例如2005年丁勇^[16]等人设计了一种基于光纤应变监测(BOTDR)技术的边坡模型加载监测网络,该传感网络能够精确的分析发生异常的区域和应变大小,2008年隋海波等人^[17,18]将设计的BOTDR变形监测系统安装在实际工程的破体内,该边坡的变形实施分布式监测,取得了较好的效果。同年浙江大学的李焕强^[19,20]等结合光纤BOTDR和FBG技术进行边坡模型试验的坡面变形测量。总体来讲,光纤传感是边坡监测中的一种新技术,发展迅猛,但目前仍处于实验科研和验证阶段,各种传感器技术水平、安装施工工艺等不够成熟。

2. 边坡内部应力监测

主要包括坡内岩土压力监测和边坡加固支护结构如锚杆、框架梁等的应力监测。岩土压力监测主要使用的仪器为土压力传感器,国内外对于土压力传感器的研究报道很多,集中在传感器的标定方法和安装方法上的研究较多,这是因为不同的标定测试方法和安装方式对于传感器的输出结果有很大影响。

例如, Gregory^[21]等指出了土压力传感器因工作环境土壤作用力的不均匀分布而带来

的测量结果的不同,这使得土压力的测量参数变得更为复杂。Kinya Miura 等^[22]指出了土压力传感器工作环境中的砂砾碎石带来的压力分布不均匀而导致的传感器测量误差。分析不同尺寸的碎石介质带来的不同误差及分布规律,试验结果对传感器的后续安装使用有指导作用。Ahangari 等^[23]指出土压力传感器自身材料刚度往往很难与其工作环境中介质的刚度一致,带来压力传递的“拱效应”,进而导致测量精度误差。同时,基于光纤光栅原理的土压力测量方法也在最近十几年迅速发展,王俊杰等^[24]设计了一种差动式的 FBG 土压力传感器。

锚杆测力方面,最初的锚杆预应力等检测大都是通过电阻应变片布置在锚头的外部测力结构上来实现的,光纤光栅技术的出现,使锚杆测力技术得到飞跃发展,例如,2005 年,姜德生^[25]等人通过在锚杆上粘贴固定光纤光栅来测量锚固过程中的应变变化,2009 年又将光纤光栅锚杆应变计应用到宜万铁路工程防护中^[26]。目前光纤光栅的锚杆测力技术,主要是对工程用锚杆表面打磨清洁,直接布置粘贴光纤光栅,再施加尾纤保护等,然后放入边坡锚固。这种方法无法对锚杆实施标定,不同的粘贴光栅由于工艺等的不同,灵敏度有一定差异,不经过标定就直接应用,测量误差较大。

1.2.3 光纤光栅传感的工程应用现状

光纤传感器因其具备体积小、重量轻、光信号不受电磁干扰、可大规模组网测量、光信号沿光纤远距离传输等优势而备受重视^[27,28]。光纤传感技术在军事、大型结构工程、土木工程以及大型机械装备等领域的应用发展迅速^[29-31]。光纤光栅传感是光纤传感领域的一个重要方面,国内外对该技术领域研究的十分炽热,近 20 年来,光纤光栅传感技术得到了广泛推广和应用,在诸如大型土木工程、机械装备等领域得到越来越多的应用。

土木工程结构的受力、应变状态等关键物理量对于诸如桥梁、隧道、边坡、高层建筑等的安全和维护至关重要(结构健康监测),光纤光栅在大型土木工程中的结构状态监测应用最早始于 1993 年的加拿大 Raymond^[32] 桥梁上,在后续的光纤光栅传感的工程应用报道中,运用最多的领域仍为土木工程领域,特别是桥梁领域。1996 年,瑞士联邦材料测试与研究实验室的学者以其使用光纤光栅长期开展长期监测的工程为例,说明了光纤光栅传感的可靠性、适用性以及可持续性,并预测光纤光栅在封装合理的情况下其寿命可以达到半个世纪以上^[33]。1997 年,瑞士联邦理工学院的 Kronenberg^[34] 等人对该国和法国交界处的水电站大坝安装了两个光纤变形传感器,监测大坝坝体的相对位移。水电站复杂的电磁环境下,电信号类传感器的适用性受到影响,光纤传感器表现出了优越性能。2001 年瑞士学者 Inaudi^[35] 详细介绍了他们在 9 年的时间里开展的光纤光栅在建筑、桥梁、隧道、大坝、管道、锚杆上的应用情况。2005 年,谢利菲尔德大学和南洋理工大学的研究人员^[36] 研制了一种新型光纤光栅应变传感器和温度传感器,并应用在高速公路大桥上测量动态应变、静态应变和温度,该研究和应用结果证明了只要光纤光栅经过合理的封装,就能够有效的应用在桥梁工程等恶劣环境下。2006 年,香港理工大学的研究人员^[37] 在 TsingMa 大桥的吊索、摇轴支座以及构架梁等上安装了四十余个光纤光栅传感器开展结构健康监测,光纤光栅传感器的杰出性能表现与大桥上安装的一套 Wind and Structural Health System 一致。2013 年,伦敦城市大学的 Richard^[38] 等对孟买的一座有结构稳定问题的铁路大桥开展了状态监测。在实验室测试对比了几种商业光纤光栅传感器的性能选择

了性能最佳的应变传感器安装在大桥的箱梁内部,监测列车行驶过程中桥梁的应变分布情况。

国内开始光纤光栅传感技术的研究时间几乎是与国外同步的,但受到我国整体科技水平的影响,光纤传感的技术水平不如国外,但仍有很多企业、高校和研究机构等一直开展研究,并取得骄人成绩。市场上也出现了很多诸如用于大型土木工程安全监测的光纤光栅锚杆计、锚索计、土压计、位移计、混凝土应变计等测试产品。国内高校像武汉理工大学、大连理工大学、哈尔滨工业大学等在光纤光栅技术的工程结构安全监测中的研究成果突出。2004年,哈尔滨工业大学研究人员^[39]在呼兰河大桥的建造施工过程中埋入了12个光纤光栅应变传感器和三个温度传感器,成功的监测到了大桥的箱梁施加预应力过程中的应变变化、运行过程中的应变分布、温度变化等状态参数。哈尔滨工业大学和杉杉集团组建的宁波杉工结构健康监测公司,具有较为成熟的光纤光栅结构健康监测技术,在象山港大桥、九江长江大桥、天津西河大桥等工程上得到应用^[40]。2007年,武汉理工大学通过在武汉长江二桥的吊索上安装光纤光栅振动传感器,根据弦振动频率法反推拉索的工作拉力,获得了不同行车状况下的拉索载荷分布情况,得到了桥梁运行的重要参数,为掌握大桥的运营状态和结构维护提供了有效的科学数据。武汉理工大学创办的理工光科公司,广泛开展土木工程领域的结构健康监测研究,在国内多个桥梁工程上安装了光纤光栅长期安全监测系统。

近十年来,光纤光栅在边坡工程监测方面逐步发展并得到应用,2005年,姜德生^[25]等将光纤光栅应用在水布垭水利工程的锚杆应力监测中,介绍了具体的光纤光栅在锚杆上的粘贴布设工艺,锚杆施工时的安装工艺、张拉测试等。同年,丁勇等^[16]设计了一种用于边坡稳定监测的光纤传感网络。利用分布式光纤应变监测技术(BOTDR),将光纤按一定方式铺设成测点网,埋入边坡表面以下一定位置,通过监测光纤的应变变化,推算出边坡的表面变形。对室内模型进行的加载实验表明,该网络对悬挂重物而引起的表面变形很敏感,且能够精确分析发生异常的区域和应变大小,进而对表面变形状态进行三维模拟。

2007年,剑桥大学的Hisham Mohamad^[41]以伦敦一因正在施工开挖的地下室而形成的边坡为研究对象,在边坡挡土墙一侧安装光纤传感器监测挡土墙的变形,并在邻近挡土墙上安装倾角仪,光纤传感器与倾角仪器取得一致的测量结果。文章还对两种测量技术的优缺点进行了对比讨论。2008年,裴华富等^[42]利用光纤布拉格光栅传感器,设计了锚杆测力计和一种光纤光栅测斜仪,并应用到攀田高速公路高边坡工程的健康监测中。2009年,南秋明等^[26]以宜万铁路项目为工程背景,针对该线边坡治理的几种措施,提出了相应的光纤光栅传感监测技术,主要包括锚桩应力监测、防护网锚拉绳拉力监测、土压力监测来评估边坡和支护结构的变形、受力及周围环境的变化。

1.3 本书的主要内容

光纤光栅的工程应用正逐步趋于成熟,光栅技术和传感器技术水平不断提高,光纤光栅传感的迅速发展使其在土木工程领域大有替代传统监测技术的趋势。但是在岩土工程的安全和健康监测中,所见系统的研究报告不多,这主要是由于岩土工程本身的复杂性所决定的。

在岩土工程土体变形监测中，光纤传感技术的应用尚处于起步阶段，这是因为存在以下几个难点：（1）光纤与土体的协调变形问题，光纤表面多为光滑保护层材料，与土体间摩擦力较小，必然产生相对滑移，影响监测结果的真实性；（2）光纤在土体变形监测中的安装问题，土体为松散颗粒组成，如何保证传感器与土层的固定安装是一大技术难题；（3）光纤传感器监测精度高，量程有限，土体变形一般较大，甚至超过光纤传感器的量程。本书共分9章，分别为概述、光纤光栅基本原理、光纤光栅写入方法、光纤光栅传感器、光纤光栅大量程位移传感器的研发、公路软基智能信息化监测系统的开发、公路软基施工常规仪器监测与工程应用、公路软基智能光纤监测系统工程应用、基于光纤光栅传感技术的测斜仪研发与工程应用，重点介绍了近年来作者在高速公路软基沉降监测、高边坡变形安全监测中相关光纤光栅传感器的研发和工程应用情况，以期推动光纤光栅传感技术在我国岩土工程监测中的应用。

第 2 章 光纤光栅基本原理

2.1 光纤光栅传感原理

2.1.1 光纤基本结构与传输原理

光纤是光导纤维的简称。它是工作在光波波段的一种介质波导，通常是圆柱形。它把以光的形式出现的电磁波能量利用全反射的原理约束在其界面内，并引导光波沿着光纤轴线的方向前进，光纤的传输特性由其结构和材料决定^[43,44]。

如图 2-1 所示，光纤的基本结构是两层圆柱状媒质，内层为纤芯，外层为包层；纤芯的折射率 n_1 ，比包层的折射率 n_2 稍大。当满足一定的入射条件时，光波就能沿着纤芯向前传播。实际的光纤在包层外面还有一层保护层，其用途是保护光纤免受环境污染和机械损伤。图 2-2 为光纤光栅结构示意图，光波沿着光纤传播过程中，具有特定波长的光被光纤光栅所反射回去。

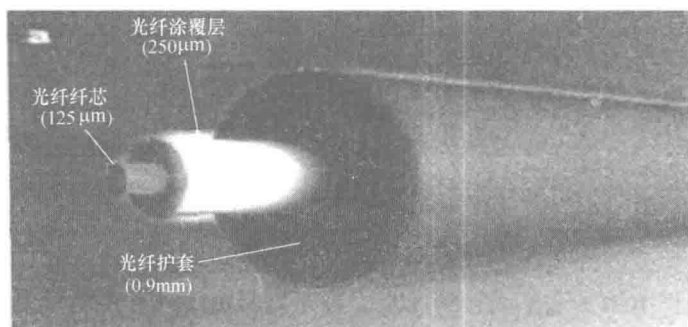


图 2-1 光纤基本结构示意图

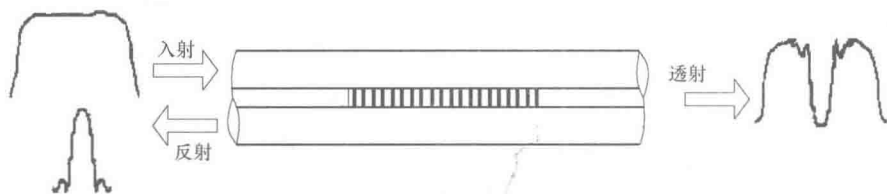


图 2-2 光纤光栅结构

光波在光纤中传输时，由于纤芯边界的限制，其电磁场解是不连续的。这种不连续的场解称为模式。光纤分类的方法有多种。按传输的模式数量可分为单模光纤和多模光纤；按纤芯折射率分布分为阶跃型和梯度型光纤；按偏振态分为保偏光纤和非保偏光纤；按制