

高速公路软基智能 信息化监测技术

周院芳 万保安 熊茂东 著
胡钊芳 主审



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高速公路软基智能 信息化监测技术

周院芳 万保安 熊茂东 著
胡钊芳 主审

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2013

内 容 提 要

本书介绍了将光纤传感技术和网络通信技术结合为一体的新型软基监测系统,该系统可连续、实时在线对整个软基处理过程进行远程动态监测,实现软基施工及工后监测过程的智能化和信息化。全书共分8章,第1章主要介绍了公路软土地基监测现状以及光纤监测研究现状;第2~4章分别介绍了光纤光栅传感器的基本原理与解调技术、光纤光栅写入方法、光纤光栅传感器的分类和封装技术;第5、6章介绍了光纤光栅大量程位移传感器的研发和公路软基智能信息化监测系统的开发;第7、8章介绍了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。

本书可供从事公路工程、建筑工程软土地基设计、研究、开发和管理的科研人员、工程技术人员及现场管理人员等参考,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速公路软基智能信息化监测技术/周院芳,万保安,熊茂东著.
—北京:冶金工业出版社,2013.4

ISBN 978-7-5024-6242-0

I. ①高… II. ①周… ②万… ③熊… III. ①高速公路—
公路路基—软土地基—计算机控制 IV. ①U418.5-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第064986号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨秋奎 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6242-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京慧美印刷有限公司印刷

2013年4月第1版,2013年4月第1次印刷

169mm×239mm;12.75印张;245千字;190页

35.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

本书编写人员

周院芳 万保安 熊茂东 张 鸿

黎剑华 饶和根 刘优平 汪晓红

章哲明 廖卫平 殷妮芳

前 言

变形和稳定是软基筑路工程的两个关键性的问题，也是软基处理的主题，它们与土的应力、应变以及施工时加荷速率有着密切的关系。为了确保路基在施工过程中的安全稳定及准确预测工后沉降，根据《公路软土地基设计与施工技术规范》（JTJ017—1996）规定，应在工程全线选定具有代表性的特殊断面和一般断面进行软基监测，定量测定地基的应力和应变等参数，以便动态地控制加载速率，监控并指导全线路堤填筑施工，确保路堤施工安全和工程质量。因此，对软基进行监测是一项必不可少的工作。

目前，我国高速公路软基沉降监测主要采用沉降板和水准仪等人工测量的方法，其自动化程度及仪器可靠性低、数据处理不及时、测量精度低，监测过程中受施工机械和人为因素影响大，直接影响软基监测的效果和工后沉降的预测，不利于软土路基信息化施工。针对上述问题，在江西省科技支撑计划项目“高等级公路软基智能信息化监测关键技术研究”（2010BGB01302）、江西省交通运输厅重点科技项目“高速公路软基智能光纤监测系统研究与应用”（2010C00013）等资助下，我们对高等级公路软基智能信息化监测技术理论与应用进行了研究，利用光纤光栅传感器质量轻、体积小、灵敏度高、耐腐蚀、抗电磁干扰、能够自动采集监测数据等优势，开发了光纤传感技术和网络通信技术为一体的新型软基智能监测系统，实现了软基施工及工后监测过程的智能化和信息化，并将研究成果成功应用于江西省德昌高速公路软基监测实践中，确保了软基施工安全和工程质量，节约了工程

造价。

为了将该研究成果更好地进行推广应用，我们将高等级公路软基智能信息化监测技术理论研究和实践进行了归纳总结，编成本书。本书所介绍的研究成果不仅可应用于公路软基监测，也可应用于建筑、结构、桥梁、隧道、地铁、港口、码头等重大工程的施工监控和运营过程健康监测中，在理论和工程应用方面都具有重要意义。希望本书能够为工程技术人员解决类似工程问题提供重要的指导和借鉴。

本书首先介绍了光纤光栅基本原理和光纤光栅写入方法，重点介绍了光纤光栅传感器设计、光纤光栅大量程位移传感器的研发以及高速公路软基智能信息化监测系统的开发，最后介绍了高速公路软基施工常规仪器监测与工程应用和高速公路软基智能光纤监测系统工程应用。

本书得到了江西省交通运输厅德兴至南昌高速公路项目建设办公室和南昌工程学院的大力支持，北京科技大学高谦教授为本书提出了许多宝贵意见，在此作者表示诚挚谢意，并向支持本书出版的各位领导和专家表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中不足之处，恳请各位专家和读者批评指正。

作 者

2013 年 1 月于南昌

目 录

1 概述	1
1.1 路基监测技术的发展	1
1.2 光纤监测研究和应用现状	2
1.3 软基光纤监测研究和应用现状	4
2 光纤光栅基本原理与解调技术	6
2.1 光纤光栅传感原理	6
2.1.1 光纤基本结构与传输原理	6
2.1.2 光纤光栅传感基本原理	7
2.2 光纤光栅的分类	9
2.2.1 均匀周期型光纤光栅	9
2.2.2 线性啁啾光栅	10
2.2.3 Taper 型光栅	11
2.2.4 Moire 光纤光栅	11
2.2.5 Blazed 型光纤光栅	12
2.2.6 长周期光纤光栅	13
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	14
2.3.3 反射率	15
2.3.4 边模抑制	16
2.3.5 传感器的长度	17
2.3.6 传感器波长间隔	17
2.3.7 缓冲区	18
2.3.8 退火	19
2.4 光纤光栅解调技术	19
2.4.1 边缘滤波器法	20
2.4.2 可调谐滤波器法	24
2.4.3 干涉法	28

3	光纤光栅写入方法	30
3.1	光纤材料的紫外线增敏技术	30
3.2	内部写入法制作光纤光栅	32
3.3	干涉法制作光纤光栅	33
3.3.1	分振幅干涉法	33
3.3.2	分波前干涉法	35
3.4	点光源写入法	36
3.5	相位掩膜法	38
3.5.1	写入光斜入射	39
3.5.2	写入光正入射	41
3.5.3	相位掩膜板法制作光纤光栅	43
3.5.4	改变相位掩膜板的周期	44
3.6	光纤光栅制作中旁瓣的抑制	46
3.7	光纤光栅的写入光源	49
4	光纤光栅传感器的分类与封装技术	51
4.1	光纤光栅传感器的设计原则	51
4.2	光纤光栅应变传感器	52
4.2.1	基片式封装	53
4.2.2	嵌入式封装	56
4.2.3	金属管式封装	60
4.2.4	夹持式封装光纤光栅应变传感器	63
4.2.5	光纤光栅金属化封装	68
4.3	光纤光栅温度传感器	72
4.3.1	基片式光纤光栅温度传感器	73
4.3.2	聚合物封装光纤光栅温度传感器	74
4.3.3	金属管式光纤光栅温度传感器	75
4.4	光纤光栅位移传感器	77
4.4.1	拉杆式位移传感器	78
4.4.2	微位移传感器	79
4.5	光纤光栅压力传感器	80
4.5.1	边压力传感器	80
4.5.2	弹簧悬臂梁光纤光栅压力传感器	81
4.5.3	正弦力放大原理光纤光栅压力传感器	82
4.5.4	高压压力传感器	84

4.6 应变与温度同时测量的方法	85
4.6.1 参考光纤光栅法	85
4.6.2 长周期光纤光栅与 FBG 组合法	87
4.6.3 双波长光纤光栅法	88
4.6.4 光纤光栅二阶谐波法	89
4.6.5 闪耀光纤光栅法	90
4.6.6 超结构光纤 Bragg 光栅法	91
4.6.7 不同掺杂的光纤光栅法	92
4.6.8 不同包层直径光纤光栅法	94
4.7 光纤光栅传感器可靠性	95
4.7.1 光纤性质对传感器可靠性的影响	96
4.7.2 加工过程对光纤传感器可靠性的影响	100
4.7.3 封装与安装对传感器可靠性的影响	101
5 光纤光栅大量程位移传感器的研发	105
5.1 大量程传感器研发意义	105
5.2 大量程传感器研发原理	105
5.3 位移传感元件	106
5.4 大量程位移传感器组装	107
5.5 大量程位移传感器标定	108
6 公路软基智能信息化监测系统的开发	112
6.1 软基智能光纤监测系统开发	112
6.1.1 监测系统开发的目的	112
6.1.2 监测系统的主要功能	112
6.1.3 监测系统的结构	113
6.1.4 监测系统的特点	114
6.1.5 监测系统运行环境	114
6.1.6 监测系统登录	115
6.1.7 监测系统功能介绍	117
6.2 光纤远程在线监测系统的开发	121
6.2.1 系统的开发目的	121
6.2.2 系统的主要功能	121
6.2.3 系统运行环境	122
6.2.4 程序的安装	122

6.2.5 系统的使用	122
7 高速公路软基施工常规仪器监测与工程应用	128
7.1 工程概况	128
7.2 工程位置	128
7.3 地质环境条件	128
7.3.1 气象、水文条件	128
7.3.2 地形地貌	129
7.3.3 地层岩性	129
7.3.4 地质构造	130
7.4 软基常规监测方案	130
7.4.1 试验段的选择	130
7.4.2 监测断面及仪器布设	132
7.4.3 监测频率	133
7.4.4 软基监测控制标准	133
7.4.5 监测控制网建立及仪器埋设	133
7.5 常规仪器监测与结果分析	134
7.5.1 地表沉降变形监测与结果分析	134
7.5.2 地基土分层沉降监测与结果分析	140
7.5.3 地基深层测斜监测与结果分析	143
7.5.4 孔隙水压力监测与结果分析	147
8 高速公路软基智能光纤监测系统工程应用	155
8.1 软基光纤监测系统	155
8.1.1 软基光纤监测方案	155
8.1.2 光纤光栅解调仪	156
8.2 光纤光栅位移传感器安装埋设	157
8.2.1 传感器组装	157
8.2.2 测杆及其保护管组装	160
8.2.3 传感器基座组装	164
8.2.4 传感器基座固定	164
8.2.5 传感器安装	165
8.3 光纤光栅渗压传感器安装	168
8.3.1 光纤光栅渗压传感器	168
8.3.2 初步检验	169

8.3.3 创建零读数	169
8.3.4 检查率定	170
8.3.5 测压管或测井中安装	170
8.3.6 钻孔中安装	170
8.3.7 填土和坝体中安装	172
8.3.8 软土中推挤或打桩方式安装	173
8.3.9 过滤器的排气	174
8.4 光缆熔接及铺设	175
8.5 信号调试	175
8.6 监测系统试运行	175
8.7 监测结果	178
8.7.1 光纤传感器波长变化	178
8.7.2 软基参数监测结果与分析	180
参考文献	185

1 概 述

1.1 路基监测技术的发展

路堤是道路路基的主要结构形式之一。路堤对道路的修建、使用品质、行车安全、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。然而由于土力学理论的不成熟和问题本身的复杂性,目前对非饱和土高路堤的沉降规律还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,但国内外还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。填方路堤的沉降研究,通常包括路堤的沉降监测、沉降计算和根据观测数据预测路堤的沉降等。

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,我国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;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;而且体积大,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。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。此外,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。因此,本书将以江西南昌至德兴高速公路项目为依托,研究开发智能光纤传感技术和网络技术为一体的新型软基监测系统,可连续、实时在线对整个软基处理过程中孔压消散、沉降变形、水位、温度变化情况及土体排水固结等发展变化过程进行远程动态监测,从而实现软基施工及工后监测过程的智能化和信息化,节约工程造价,缩短建设工期,确保软基施工质量。

1.2 光纤监测研究和应用现状

国际上将光纤传感器用于土木工程结构的实时监测时间不长,目前正处于从萌芽到发展的过渡期。1989年,Mendez等人^[1]首先提出了把光纤传感器用于混凝土结构的检测,之后,日本、英国、美国、德国等许多国家的研究人员先后对光纤传感系统在土木工程中的应用进行了研究;日本、美国和瑞士的光纤传感器在土木工程中的应用领域相对较广泛,已经从混凝土的浇筑过程扩展到桩柱、地基、桥梁、大坝、隧道、大楼、地震和山体滑坡等复杂系统的测量或监测。Wolff和Miessler在一座长53m的桥梁桥面埋入光纤传感器,测量了伸长率和拉应力;Escoder等人在混凝土梁的三点弯曲试验中,将单模光纤传感器粘贴于梁表面和埋入梁内,使用干涉计技术测量其应变;Kruschwitz等人阐述了将外置式Fizeau光纤干涉计粘贴于或埋设于混凝土试件中进行试验的研究工作。

Idriss等人联合美国联邦公路局在新墨西哥州的Rio Puerco桥上安装了40个位移光纤传感器和24个温度传感器,光纤传感器在浇筑前预埋入结构中,用于监测预制梁的预应力损失。测量结果表明,浇筑温度对早期混凝土的预应力损失影响非常大,浇筑温度越低,其预应力损失越严重^[2,3]。Kronenberg和Glisic等人在瑞士和法国边界一个发电站水库的大坝(Emosson Dam)上安装了光纤传感器。由于一些原有的传感器操作不方便,对温度、湿度和电磁场等敏感,安装困难,因此用光纤传感器取代传统的传感器来测量坝体的裂纹和基础的位移。安装了两根超长位移计,一根长30m,另一根60m。测试结果表明,光纤传感器与传统的杆式伸长计结果非常吻合,测量结果更精确、更灵敏。唯一的缺点是需要约60天左右的传感器校正时间,用于调整光纤传感器涂覆层在运输过程中的变

形^[4,5]。Inaudi 等人在一个现存的隧道旁 30m 距离处修建的另一个隧道壁上安装了 8 个距离不等的光纤伸长计, 安装位置为从已存的隧道通向新隧道的小孔洞中, 用于监测修建隧道时土石的受压情况。测量结果表明, 距离隧道钻孔机 (即新隧道位置) 较近的光纤伸长计有较大的应变, 伸长计的变形量与其距新隧道垂直距离的远近呈指数下降趋势^[6]。Inaudi 及他的小组到 2001 年为止在约 9 年时间内共在桥梁、水坝、隧道、发电站等 70 多个不同场合成功安装了约 1500 个光纤传感器, 用于检测结构的应力、应变、振动、损伤和裂缝等或者进行大型结构的健康监测, 其中 95% ~ 100% 都达到了预期的设计功能^[7,8]。Pietro 等人详细探讨了光纤光栅 (fiber bragg rating sensor) 传感器的原理、检测方法、应变与温度信号分离的各种解决办法, 并指出光纤地震检波器、光纤地震仪等可以用于岩石变形监测、隧道监测和地震测量。Udd 等人^[9]在一座桥上安装了光纤光栅传感器, 测试结果表明, 该传感器不仅可以监测车辆的行驶速度, 而且可以称量运动中车辆的质量, 对交通流量进行分类; 其灵敏度甚至可以检测到成人在桥上的跑步或行走。

光纤传感器是一个新兴蓬勃发展起来的行业, 许多公司都在致力于研制并开发新类型、功能或更加廉价的光纤传感器产品, 几乎每天都有新型光纤传感器在申报或者获得专利。美国已有专利利用光纤传感器测量地下钻孔时孔表面的垂直地震响应, 利用测量动应变来测量一点处的三向加速度等。欧洲有公司采用光纤传感器利用基站与测量站之间的距离变化来测量 20km 以内的山体滑坡或者地面运动, 此种光纤传感器在全球定位系统等中也将起到积极的作用。目前各种新型的光纤传感器层出不穷, 从结构的静应力^[10]、振动的测量^[11]到结构应变的健康监测等^[12,13]。

1998 年, 欧盟几个发达国家联合成立了“混凝土结构性能评估集成监测系统” (Smart Project) 项目, 由 8 家公司联合组成。根据该项目的研究结果^[14,15], 光纤健康监测可使系统的运行费用降低 10% ~ 20%, 而且其模型对未来新建项目具有启发意义, 使其整个使用期总费用额外节省约 10%。如果光纤传感器在土木工程中成功地应用, 不仅会节省很多测量监测费用, 有着巨大的经济效益; 同时也会使测量精度进一步提高, 能够测量许多过去很困难或者根本无法测量的量。对于大型桥梁、水坝等基础设施的监测水平会有很大程度的提高, 更加可靠地保证人民群众的生命安全, 有着巨大的社会效益。

与国际上光纤传感器的迅猛发展相比, 我国近几年才开展这方面的研究工作。刘雄等人^[16]分析和比较了光纤传感器与普通传感器的优缺点, 研制了光纤钢环位移计和光纤测力计等并将其应用在实际测量中。哈尔滨工业大学智能材料系统和结构中心的冷劲松等人^[17]研制成功了端口耦合式光纤振动传感器及基于多模光纤模斑监测的光纤振动传感器, 并测试了其性能。梁磊和姜德生等人^[18]

讨论了光纤传感器与混凝土结构的相容性问题,并据此研制出一种新型的光纤传感器。潘树新和刘耀炜^[19]总结了地震科学发展的历史,指出观测技术的革新和进步可能是地震科学焕发青春的途径之一,光纤传感器在地震前兆观测中具有广泛的应用前景。如赵廷超、黄尚廉等人^[20]讨论和分析了土建结构中埋入光纤传感器问题,对结构内部的状态参数如应力、应变、温度等的无损检测,以及对结构整体性、安全性评估的原理和方法;李辰砂等人^[21]阐述了光纤监测复合材料成型过程的原理和可行性,研制了两种分别依据相位调制和强度调制的光纤传感器,用于监测复合材料固化过程中的内部变化历程;查开德^[22]研制成功了用于大型结构应变测量的光纤传感器,并介绍了这种光纤传感器的原理、结构和实验研究结果。哈尔滨工业大学欧进萍等人在渤海海洋平台建立了 JZ20-2MUQ 和 CB32A 导管式海洋平台健康监测系统。南京大学光电传感工程监测中心施斌等人把远程分布式光电感应应变监测系统用于南京市鼓楼隧道、广东河源高速公路滑坡监测等多项重大工程,取得了显著的社会、经济和工程效益。武汉理工大学储华平等将新一代的光纤光栅传感技术应用于武汉长江二桥、海口世纪大桥等十余座大型桥梁和湖北清江水布垭水利枢纽工程大坝的长期安全监测。哈尔滨工业大学蔡德所等人研制的结构健康监测的光纤光栅传感网络与集成系统,已经成功应用到胜利油田 CB32A 海洋平台、奥林匹克游泳中心“水立方”等工程中。光纤监测技术在边坡和滑坡等岩土工程也有成功应用。

总之,国内关于光纤智能健康监测系统的研究基本停留在探讨其应用可能性的水平上,除了用于小型的实验室模型外,实际结构中的应用报道不多。本书介绍的光纤传感技术和网络技术为一体的新型软基监测系统,可连续、实时在线对整个软基处理过程进行远程动态监测,预警路基稳定性,为控制软基加载速率和预测路面施工时机提供科学依据,从而实现软基施工及工后监测过程的智能化和信息化。这种监测技术为保证高速公路软基路堤施工质量和运营安全提供技术信息与依据,具有巨大的、潜在的经济效益和社会效益。

1.3 软基光纤监测研究和应用现状

传统电类传感器存在的线性度差,对电磁的抗干扰性能差,仪器较为笨重。光纤传感器与传统传感器相比有许多优点:

(1) 质量轻、体积小。普通光纤外径为 $250\mu\text{m}$,最细的传感光纤直径仅为 $35\sim 40\mu\text{m}$,可在结构表面安装或者埋入结构体内部,对被测结构的影响小,测量的结果是结构参数更加真实地反映。埋入安装时可检测传统传感器很难或者根本无法监测的信号,如复合材料或混凝土的内部应力和温度场分布、电力变压器的绝缘检测、山体滑坡的监测等。

(2) 灵敏度高。光纤传感器采用光测量的技术手段,一般为微米量级。采

用波长调制技术,分辨率可达到波长尺度的纳米量级。

(3) 耐腐蚀。由于光纤表面的涂覆层是由高分子材料做成,耐环境或结构中酸碱等化学成分腐蚀的能力强,适合于智能结构的长期健康监测。

(4) 抗电磁干扰。当光信息在光纤中传输时,它不会与电磁场产生作用,因而信息在传输过程中抗电磁干扰能力很强。

(5) 传输频带较宽。通常系统的调制带宽为载波频率的百分之几,光波的频率较传统的位于射频段或者微波段的频率高几个数量级,因而其带宽有巨大的提高。便于实现时分或者频分多路复用,可进行大容量信息的实时测量,使大型结构的健康监测成为可能。

(6) 分布或者准分布式测量,能够用一根光纤测量结构上空间多点或者无限多自由度的参数分布,是传统的机械类、电子类、微电子类等分立型器件无法实现的功能,是传感技术的新发展。

(7) 使用期限内维护费用低。

(8) 能结合互联网技术实现实时、在线监测。

虽然光纤传感器较传统电类传感器具有上述诸多优点,但目前在高等级公路软基监测的报道不多,武汉理工大学夏元友等人^[23]研制出新型的光纤 Bragg 光栅岩土工程监测仪器——光纤渗压传感器,并将其应用于高速公路软基中进行孔隙水压力监测,在试验过程中还解决了光纤渗压传感器量测系统、现场埋设以及数据采集等方面的问题。南京大学李科等人^[24]采用了分布式光纤监测系统对黏性土体干缩变形进行了监测实验研究,并对土体干缩变形规律进行了分析,验证了该技术应用于土体变形监测中的可行性。在高等级公路软基土体沉降监测中,该技术的应用还处于起步阶段,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,土体由松散颗粒组成,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。

2 光纤光栅基本原理与解调技术

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^[25,26]。

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。

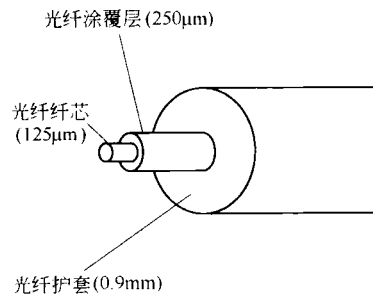


图 2-1 光纤基本结构示意图

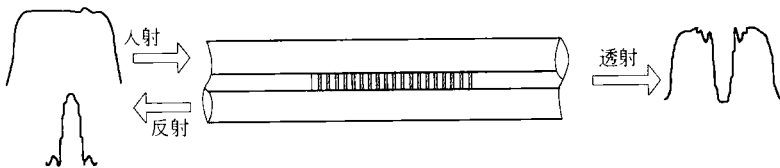


图 2-2 光纤光栅结构

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；按制造材料分为高纯度熔石英光纤、多组分玻璃纤维、塑料光纤、红外光纤、液芯光纤和晶体光纤等。

光纤工作的基本原理基于光的全反射现象，即由于纤芯折射率 n_1 大于包层