

Distributed Fiber Optic Sensing for
Geoengineering Monitoring

地质与岩土工程
分布式光纤监测技术

◎ 施斌 张丹 朱鸿鹄 著



科学出版社

地质与岩土工程分布式光纤监测技术

施 斌 张 丹 朱鸿鹄 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

分布式光纤感测技术为地质灾害预测预警与岩土工程安全监测提供了一个新的监测理念和技术手段。本专著是作者团队二十年来在地质与岩土工程分布式光纤监测技术方面研究成果的总结,全书包括十章。在介绍了地质与岩土工程监测特点和分布式光纤感测技术的工作原理与技术优势的基础上,系统地展现了研究团队在分布式光纤感测技术性能、光纤传感器与传感光缆、地质与岩土工程多场光纤监测技术、分布式光纤监测系统、光纤大变形监测技术与现场布设、土工模型试验光纤测试技术、岩土工程和地质灾害光纤监测技术等八个方面的研究成果。书中还附有符号表、参考文献、名词术语和索引等。

全书多为原创性成果,理论联系实际,内容十分丰富,应用面广泛,实用性很强,是开展地质与岩土工程分布式光纤监测的重要专业文献,也可作为高等学校地质工程、岩土工程、土木工程、光学电子工程等学科的本科生和研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地质与岩土工程分布式光纤监测技术 / 施斌, 张丹, 朱鸿鹄著. —北京: 科学出版社, 2019.5

ISBN 978-7-03-060598-6

I. ①地… II. ①施… ②张… ③朱… III. ①光纤传感器—应用—地质灾害—灾害防治②光纤传感器—应用—岩土工程—灾害防治 IV. ①P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 034166 号

责任编辑: 周 丹 / 责任校对: 杨聪敏

责任印制: 师艳茹 / 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

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 5 月第一次印刷 印张: 22 1/4

字数: 550 000

定价: 298.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介

施斌，博士，1961年10月生于江苏省启东市，籍贯江苏省海门市。1979年9月考入南京大学地质系水文地质工程地质专业学习，1986年6月硕士研究生毕业后留校工作，历任助教、讲师、副教授、教授等教职，期间于1991年9月~1995年6月在职攻读博士学位；先后在俄罗斯矿业设计院、日本地质调查所、美国麻省大学、日本茨城大学、美国北卡罗来纳大学作为访问学者工作和学习。现为南京大学特聘教授，博士生导师。



施斌现任南京大学（苏州）高新技术研究院院长，南京大学地质工程与信息技术系主任；是国家杰出青年科学基金获得者，江苏省“333高层次人才培养工程”中青年科学技术带头人，江苏省高校优秀科技创新团队带头人，南京市具有突出贡献的中青年专家，苏州市姑苏创新创业领军人才，苏州工业园区科技领军人才；兼任国际环境岩土工程学会（ISEG）副主席（2000~2008），国际智能基础设施结构健康监测学会（ISHMII）理事，中国地质学会工程地质专业委员会副主任等。

施斌长期从事岩土工程与地质灾害的监测与评价研究，是国家重点基础研究发展计划（973计划）、国家科技支撑计划、国家重大仪器专项、国家自然科学基金重点基金等数十个科研项目的负责人；他创造性地建立了岩土工程与地质灾害分布式光纤监测理论与技术体系，在地质与岩土工程多场光纤监测原理、感测技术与装备、灾变机理与防治方面取得了系统的创新性成果；出版专著和教材8部；发表论文500余篇，其中SCI论文110余篇，EI论文210余篇；论文他引9800多次，其中SCI他引1500多次；获国家授权发明专利30余项；主编和参编国家规范和行业规程5部；创立地质与岩土工程光电传感监测国际论坛；以第一完成人成果获第47届“日内瓦国际发明展”金奖、2018年国家科技进步奖一等奖、2017年教育部技术发明奖一等奖、2016年中国专利优秀奖、2012年中国产学研合作创新成果奖、2008年教育部科技进步奖一等奖、2004年国际环境岩土工程学会（ISEG）杰出贡献奖及其他省部级奖励共10余项。



张丹，博士，1976年4月生，山东威海人。2004年6月获得南京大学工学博士学位并留校任教，现为南京大学副教授，南京大学光电传感工程监测中心副主任，在国家留学基金委的资助下赴英国剑桥大学做访问学者，先后在欧盟玛丽居里等项目的资助下赴比利时根特大学和瑞士洛桑联邦理工学院（EPFL）开展学术研究，曾任英国杜伦大学高级研究员。主持国家自然科学基金项目3项，省部级项目等7项，作为科研骨干参与国家“973计划”、国家科技支撑计划、国家重大科研仪器研制项目等10余项。研究领域涉及分布式光纤传感技术、地质灾害监测与评价、特殊土的工程性质以及能源地下结构等。已出版教材1部；发表学术论文80余篇，其中SCI收录20篇、EI收录36篇；获授权专利17项，其中授权发明专利15项；主编中国工程建设协会标准1部，参编行业标准1部。作为第二完成人获得2018年国家科学技术进步奖一等奖、2017年教育部技术发明奖一等奖、2008年教育部科学技术进步奖一等奖和2012年中国产学研合作创新成果奖各1项。现为能源地下结构与工程专业委员会委员、国际工程地质与环境协会（IAEG）会员、中国岩石力学与工程学会会员、南京土木建筑学会理事等。

朱鸿鹄，博士，1979年7月生，江苏苏州人。2009年于香港理工大学获得工学博士学位，现为南京大学教授、博士生导师、南京大学“登峰人才支持计划”入选者，苏州市基础工程分布式传感监测技术重点实验室副主任，主要从事地质工程、岩土力学领域的科研工作。主持国家自然科学基金优秀青年科学基金项目、国家重点研发计划等国家级课题4项、省部级课题2项，参与国家重点基础研究发展计划（973计划）、国家科技支撑计划、国家自然科学基金重点项目等10余项课题。已出版英文专著1部、发表学术论文100余篇，其中SCI收录51篇、EI收录32篇，获授权专利9项、软件著作权3项。近年来围绕地质灾害光纤监测、岩土变形预测及边坡加筋机理等开展了系统的研究工作，相关成果成功应用于汶川震区泥石流预警、京昆高速攀田段边坡治理、三峡库区滑坡监测、上海及深圳地铁隧道监控等重大项目。先后获得国家科技进步奖一等奖、中国产学研合作创新成果奖、中国地质学会青年地质科技奖和工程地质专委会“谷德振青年科技奖”等。曾赴英国剑桥大学、美国加州大学洛杉矶分校（UCLA）做访问学者，现为国际工程地质与环境协会（IAEG）、国际土力学与岩土工程学会（ISSMGE）及国际智能基础设施结构健康监测学会（ISHMII）会员，中国土木工程学会工程风险与保险研究分会理事。



序

最近，施斌教授等撰写的《地质与岩土工程分布式光纤监测技术》专著即将付梓，他邀请我为之写一个序，我欣然接受，原因有三：一是施斌教授与我是同行，在工作上经常有联系，是多年的老朋友，老朋友出书理应祝贺；二是施斌教授团队近二十年来在地质与岩土工程分布式光纤监测技术研究及其成果转化方面，独树一帜，成果斐然，近期还获得了国家科学技术进步奖一等奖，可喜可贺；三是在我承担的柠条塔煤矿、双鸭山煤矿和渭武高速木寨岭特长隧道的实时在线监测项目中，均用到了施斌教授团队研发的光纤监测技术，对这一技术也比较了解。因此，我没有任何理由推托，恭敬不如从命了。

翻开这部 50 多万字的宏篇大作，可圈可点的地方很多，总结起来有以下几点：

1. 新颖性

光纤感测技术是从光纤通讯技术中衍生出来的，经历了四十多年的研发，从最初的光纤光栅点式传感技术到目前的准分布和全分布式光纤感测技术，发展十分迅速，显示出其旺盛的生命力。然而，以往的光纤传感技术主要应用于土木和机电工程等的人工结构监测，很难应用于岩土体和地质灾害的监测，原因是岩土体是自然历史的产物，规模大、距离长、结构复杂、随机不确定性强、多场作用强烈，纤细易断的玻璃光纤很难安装在岩土体中。然而，施斌教授团队经过二十年的攻关，较好地解决了这一关键技术瓶颈。在专著的第一章到第三章中，重点介绍了施斌教授团队通过提高测量精度，将光纤传感技术变成了光纤感测技术；通过换能和功能化封装等技术，将传感光纤研制成了传感光缆，强健而敏感，犹如人身上的感知“神经”，将其植入到岩土体中，就能感知大地，以达到防灾减灾的目的。这一新颖的构想，在他们的努力下，正在变成了现实。

2. 原创性

专著中除了一些光纤感测技术的基本知识和原理外，基本上是施斌教授团队多年来的原创性成果。从第四章到第七章，重点介绍了光纤传感器和传感光缆的研发，地质工程多场光纤监测技术，地质与岩土工程分布式光纤监测系统，以及光纤大变形传感器（缆）封装与现场布设等；第八章到第十章，重点介绍了分布式光纤监测技术在土工模型试验、岩土工程和地质灾害三个方面的应用成果，揭示了多种地质灾害新机理，提出了理论新判据，丰富了地质与岩土工程灾害预警和防治理论体系。这些原创性成果开辟了地质与岩土工程监测新的技术领域。

3. 成果转化成效显著

在专著的前言中，施斌教授介绍了这一成果三个阶段的形成过程。从前十年的基础研

究，到后六年的产业化，再到后四年的技术产品快速应用和推广，完全符合一个高科技成果的转化规律，实现了大学、地方和团队共赢的良好局面。这一成果的成功转化过程启示我们，科研成果应该顶天立地、落地开花，这对于实现我国创新性社会意义重大，将论文写在祖国和世界的大地上，应该成为每一位科技工作者奋斗的目标。

该专著内容十分丰富，理论联系实际，应用面广泛，实用性很强，书中还附有符号表、名词术语、主要参考文献和索引等，是一本难得的光纤应用专业书。我衷心地祝愿这一专著的出版，将对地质与岩土工程监测技术的进步能起到变革性的推动作用，也祝愿施斌教授团队早日实现感知大地的梦想！



2019年2月18日

前 言

我国是一个地质灾害与岩土工程问题十分严重的国家。特别是近四十年来，随着基础设施建设的高速发展，人类工程活动对地质环境的扰动前所未有，并大大加剧了各类灾害的发生，直接影响到人民的生命和财产安全。据不完全统计，我国每年因各类自然和工程灾害造成的经济损失高达 2000 亿元人民币。因此，防治地质灾害、解决岩土工程问题是我们的重大需求。

由于地质灾害、岩土工程等具有规模大、多场作用、影响因素复杂、隐蔽性强、跨越区域多、环境恶劣、实时性监测要求高、监测周期长等特点，目前点式、电测类监测技术和手段还难以满足防灾减灾需求，并给灾害的预警预报和防治带来了巨大的挑战。

分布式光纤感测技术是从 20 世纪 80 年代伴随着光导纤维及光纤通信技术的发展而迅速发展起来的，是一类以光为载体、光纤为媒介、感知和传输外界信号（被测量）的新型感测技术。它可以对沿光纤几何路径分布的外部物理参量进行连续的测量，同时获取被测物理参量的空间分布和随时间的变化信息。因此，分布式光纤感测技术具有传统点式、电测类监测技术无法比拟的优势。

1998 年，施斌教授从美国访学归来，恰逢发生长江特大洪灾，在对长江堤防考察的途中，面对堤防管涌监测难题，了解到了基于布里渊散射光的时域分布式光纤感测技术，它能够长距离、分布式监测被测物的形变和温度等物理指标。从那时起，施斌教授带领团队进行了长达二十年的科技研究和成果转化工作，在十余个关键理论和技术问题上取得了突破，实现了“基础研究—核心技术—硬件设备—系统集成—成果转化—工程应用”的全过程创新，创造性地建立了岩土工程与地质灾害分布式光纤监测理论与技术体系，在地质与岩土工程灾害机理和理论判据方面取得了新的突破，并形成了新的技术产业链，开创了地质与岩土工程监测新的技术领域。“地质工程分布式光纤监测关键技术及其应用”研究成果获得了 2018 年度国家科学技术进步奖一等奖。

该成果的形成可分为三个阶段：1998 年至 2008 年是成果的基础研究阶段，开展了理论和室内外试验研究，解决地质与岩土工程光纤监测中的关键理论和技术问题；2009 年至 2015 年是成果的产业化阶段，研究成果在苏州工业园区转化，形成了技术产品体系，并推向了市场；2016 年至今是成果的快速应用和推广阶段，技术产品不断被社会了解和接受，事业得到快速发展，实现了大学、地方和团队共赢的良好局面。

目前有 80 余种产品推向了国内外市场，并在长三角和京津冀地面沉降区、南水北调、三峡库区、青藏铁路、港珠澳大桥、北京故宫、锦屏电站、延长油田、城建隧道、工程基桩等 300 余个项目中得到应用，相关技术产品已出口到英国、美国、意大利、智利、马来西亚等国，节省部分工程监测费用 70%~80%，产生了显著的社会和经济效益。施斌教授于 2005 年创立了地质与岩土工程光电传感监测国际论坛，现已成功举办了六届，引领了地质

与岩土工程分布式光纤监测技术的发展。

在该成果形成的过程中,先后得到了下列科研项目的资助:南京大学“985”学科建设项目“分布式光纤传感工程监测技术”;国家杰出青年科学基金项目“工程地质学”(40225006);教育部重点项目“大型工程布里渊散射光时域光纤网监测技术研究”(01086);建设部2002年科学技术计划项目子课题“南京市玄武湖隧道远程分布式光纤应变监测”;江苏高校优秀科技创新团队“沿海城市地质灾害防治与分布式传感网监测技术”[苏教科(2013)10号];国家973计划课题“重大工程灾变滑坡演化多场信息表征与状态判识”(2011CB710605);国家科技支撑计划课题“地质灾害光纤传感监测技术研发与示范”(2012BAK10B05);国家自然科学基金重点项目“基于分布式感测的多场作用下土体结构系统变形响应和灾变机理研究”(41230636);国家重大科研仪器研制项目“地质体多场多参量分布式光纤感测系统研制”(41427801)等,特此说明!

本专著是施斌教授团队在地质与岩土工程分布式光纤监测技术方面上述成果的系统总结,全书包括十章。第一章绪论,主要介绍了地质与岩土工程多场监测的特点和要求、分布式光纤感测技术优势及其应用现状;第二章分布式光纤感测技术,介绍了光纤感测技术的工作原理、技术分类,常用的分布式光纤感测技术特点等;第三章分布式光纤感测技术性能研究,主要介绍了光纤光栅,瑞利、拉曼和布里渊三种散射光的光纤感测性能,感测性能提高的方法,应变测量的温度补偿技术等;第四章光纤传感器与传感光缆,介绍了准分布式FBG传感器的种类、特点、标定和耦合感测特性,全分布式传感光缆的护套效应、标定方法和疲劳性能等,详细介绍了全分布式传感光缆的耦合感测性能;第五章地质与岩土工程多场分布式光纤监测技术,详细介绍了应变场、应力场、变形场、温度场、水分场、渗流场和化学场的光纤监测技术,包括监测原理、监测方案、解调技术及传感光缆(器)和应用案例等;第六章分布式光纤监测系统,介绍了分布式光纤监测系统的设计原则、基本结构与内容、数据采集与传输、数据处理及异常分析、三维可视化、监测分析模型与预警预报等;第七章光纤大变形监测技术与现场布设,主要介绍了大变形FBG传感器和传感光缆的封装、传感光缆(器)现场布设及应用案例等;第八章土工模型试验光纤测试技术,介绍了土工模型试验的测试要求、光纤感测技术的选择、特种传感器与传感光缆研发和安装要点等,重点介绍了抽-灌水条件下土工模型试验、覆岩变形物理模型试验和土工离心机模型试验的光纤测试方法;第九章岩土工程光纤监测技术研究,主要介绍了桩基、隧道、基坑等光纤监测方案和应用实例;第十章地质灾害光纤监测技术研究,主要介绍了钻孔全断面光纤监测技术,地面沉降、地裂缝、边坡等的光纤监测方案和应用实例等。书中还附有符号表、参考文献、名词术语和索引等。

虽然,本专著的署名作者只有施斌、张丹、朱鸿鹄三人,但必须指出的是:本专著中的许多研究成果凝聚了施斌教授在这二十年中所指导的光纤监测方向各届博士后、博士生和硕士生的辛勤付出,他们是:王宝军、丁勇、王光亚、陈斌、徐洪钟、高俊启、崔何亮、王士军、胡建平、索文斌、张巍、刘杰、朱友群、隋海波、魏广庆、陈峰军、马骥、朴春德、胡盛、李科、李海涛、宋震、高磊、刘春、张勇、甘宇宽、卢毅、段朝峰、杨豪、赵洪岩、席均、顾凯、孙义杰、周春慧、王静、张昊宸、童恒金、费冰、张弛、朱昆、韦玉超、严珺凡、程刚、宋占璞、方海东、时以亮、揭奇、汪义龙、张其琪、尹建华、王可、

王雪帆、张振、曾绍洪、苗鹏勇、贾立翔、汪其超、孟志浩、王兴、吴静红、张磊、缪长健、王涛、段超喆、曹鼎峰、梅世嘉、马佳玉、张岩、海那尔·别克吐尔逊、张诚成、孙梦雅、张磊、郑兴、刘苏平、张长宇、龚雪强、冯晨曦、李佳程、王相超、孙鑫、焦浩然、杨鹏、韩贺鸣、张婉玲、陈嘉傲、张松、张晓明、段新春、郝瑞等，他们在不同时期参与了本成果的研究和应用推广工作，并为相关成果的形成做出了贡献，在此镌名致谢。其中，要特别感谢魏广庆博士，毅然辞去事业单位的稳定工作，与施斌教授一起在苏州共同创立了南智传感产学研平台，并任苏州南智传感科技有限公司总经理，他为本专著中有关技术的研发和产品介绍作出了重要贡献！

在二十年的研发历程中，还得到了国内外许多专家和同行的关心和支持。时任日本茨城大学教授、现任职于中国东南大学的吴智深教授，在布里渊散射光光纤解调设备引进和在南京大学光纤监测实验室初创时期给予了研发团队重要指导和帮助；加拿大皇家科学院院士、渥太华大学物理系 X.Y. Bao 教授在分布式光纤感测技术的监测方法和感测性能改善方面给予了技术指导；英国皇家工程院院士、剑桥大学 Kenichi Soga 教授在分布式光纤感测技术应用于土木工程结构监测方面进行了交流和合作；国际智能基础设施结构健康监测学会 (ISHMII) 前主席、美国伊利诺伊大学芝加哥分校 F. Ansari 教授和 ISHMII 前主席、德国联邦材料与测试研究所 (BAM) 的 W.R. Habel 博士在桥梁与岩土工程分布式光纤监测技术方面进行了合作；韩国金乌国立工科大学 K.T. Chang 教授在岩土工程分布式光纤监测技术方面给予了技术指导；意大利那不勒斯第二大学 Zeni 教授在滑坡光纤监测技术方面进行了合作；中国科学院院士、中国水利水电科学研究院陈祖煜教授在分布式光纤感测技术应用于高填方边坡和输水管道监测方面给予了重要指导并开展了项目合作；中国科学院院士、山东科技大学宋振骥教授和中国科学院院士、中国矿业大学 (北京) 何满潮教授在分布式光纤感测技术应用于矿山开采安全监测方面给予了重要指导并开展了项目合作；香港理工大学殷建华教授在 FBG 光纤监测方面进行了交流和合作。在此，谨向以上专家致以衷心的感谢！

在该成果的技术推广过程中，许多合作单位给予了大力支持和帮助，主要有：苏州南智传感科技有限公司，中国电子科技集团公司第四十一研究所，中国能源建设集团山西省电力勘测设计院有限公司，广东省水利电力勘测设计研究院，北京城建勘测设计研究院有限责任公司，中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，上海港湾工程质量检测有限公司，中国地质调查局地质环境监测院、南京地质调查中心、天津地质调查中心、西安地质调查中心、水文地质环境地质调查中心，江苏省地质调查研究院，安徽省地质环境监测总站，中国地质大学 (武汉)，中国矿业大学，中铁隧道局集团有限公司，中兵勘察设计研究院有限公司等数十家单位，在此一并致谢。

特别感谢南京大学、国家自然科学基金委、科技部、教育部、江苏省政府、苏州市政府、苏州工业园区等，为本成果的取得在政策、人才、资金和条件上给予的大力支持，在此，向上述有关部门表示衷心的感谢！

本专著由施斌、张丹、朱鸿鹄撰写，全书由施斌统稿，张丹协助组稿与出版工作。各章具体分工如下：施斌撰写了前言、第一章、第二章、第五章、第八章和第十章（钻孔全断面光纤监测技术部分）；张丹撰写了第三章、第七章、第十章（其他部分）和符号表；

目 录

序	
前言	
符号表	
第一章 绪论	1
1.1 地质与岩土工程监测	1
1.2 地质体的特点与监测要求	2
1.3 常规监测技术及其不足	3
1.4 分布式光纤感测技术	5
1.5 土木工程光纤监测现状	7
1.6 地质与岩土工程光纤监测现状	8
1.7 本专著的主要内容	10
第二章 分布式光纤感测技术	12
2.1 光纤与光缆	12
2.2 光纤感测技术的工作原理	13
2.3 光纤感测技术的分类	14
2.3.1 点式光纤感测技术	15
2.3.2 准分布式光纤感测技术	15
2.3.3 全分布式光纤感测技术	17
2.4 几种常用的分布式光纤感测技术	17
2.4.1 基于布拉格光栅的准分布式光纤感测技术	18
2.4.2 基于瑞利散射的全分布式光纤感测技术	23
2.4.3 基于拉曼散射的全分布式光纤感测技术	26
2.4.4 基于布里渊散射的全分布式光纤感测技术	27
2.5 常用光纤感测技术的特点分析	36
第三章 分布式光纤感测技术性能研究	38
3.1 概述	38
3.2 FBG 的感测性能	38
3.2.1 FBG 中心波长与应变和温度的关系	38
3.2.2 光纤光栅的光敏性	39
3.2.3 FBG 的稳定性	40
3.2.4 FBG 温度与应变交叉敏感问题	40

3.3	基于瑞利散射的分布式光纤感测性能研究	41
3.3.1	主要性能指标	41
3.3.2	提高感测性能的途径	42
3.4	基于拉曼散射的分布式光纤感测性能研究	43
3.4.1	主要性能指标	43
3.4.2	提高感测性能的途径	44
3.5	基于布里渊散射的分布式光纤感测性能研究	45
3.5.1	基本性能指标	45
3.5.2	提高感测性能的方法	46
3.5.3	布里渊散射光谱特性分析	49
3.5.4	提高空间分辨率的频谱分解法	54
3.5.5	布里渊频谱降噪	58
3.6	应变测量的温度补偿技术研究	59
3.6.1	温度变化对光纤参数的影响	59
3.6.2	温度补偿方法	60
第四章	光纤传感器与传感光缆	65
4.1	概述	65
4.2	准分布式 FBG 传感器	65
4.2.1	FBG 传感器的种类和特点	65
4.2.2	FBG 传感器的感测性能标定	69
4.2.3	FBG 传感器的感测特性研究	72
4.3	全分布式传感光缆	73
4.3.1	传感光缆的标定方法	73
4.3.2	传感光缆的结构及护套效应	75
4.3.3	传感光缆的疲劳性能	79
4.3.4	传感光缆的温度感测性能对比	82
4.4	缆-土耦合感测性能研究	87
4.4.1	缆-土界面耦合变形力学模型	87
4.4.2	缆-土界面参数及光缆测值可靠性判据	94
4.4.3	缆-土界面耦合的影响因素	96
4.4.4	土中直埋式光缆的应变分布特征	105
4.5	传感光缆与回填材料的耦合性能研究	106
4.5.1	考虑高围压的光缆-回填料耦合性研究	106
4.5.2	传感光缆钻孔注浆耦合材料配合比研究	112
第五章	地质与岩土工程多场分布式光纤监测技术	116
5.1	概述	116
5.2	应变场的光纤监测技术	117

5.2.1	监测原理	117
5.2.2	传感光缆(器)	117
5.2.3	应用实例	119
5.3	应力场的光纤监测技术	120
5.3.1	监测原理	120
5.3.2	解调技术与传感光缆(器)	120
5.3.3	应用实例	122
5.4	变形场的光纤监测技术	123
5.4.1	监测原理与方案	123
5.4.2	解调技术与传感光缆(器)	123
5.4.3	布设方式	125
5.4.4	应用实例	125
5.5	温度场的光纤监测技术	126
5.5.1	监测原理与方法	126
5.5.2	解调技术与传感光缆(器)	126
5.5.3	布设方案	126
5.5.4	应用实例	127
5.6	水分场的光纤监测技术	128
5.6.1	概述	128
5.6.2	水分场分布式光纤监测原理	129
5.6.3	加热型 FBG 传感器研制	130
5.6.4	加热型传感光缆研制	131
5.6.5	水分场光纤监测	134
5.6.6	应用验证	135
5.7	渗流场的光纤监测技术	137
5.7.1	概述	137
5.7.2	监测原理	138
5.7.3	解调技术与传感光缆(器)	138
5.7.4	渗流速率的标定	139
5.8	化学场的光纤监测技术	141
5.8.1	概述	141
5.8.2	基本监测原理	142
5.8.3	海水盐度 LPG 监测试验	142
5.9	其他场的光纤监测技术	147
5.10	地质与岩土工程分布式光纤多场监测	148
第六章	分布式光纤监测系统	149
6.1	概述	149

第一章 绪 论

1.1 地质与岩土工程监测

我国是世界上地质灾害最严重、受威胁人口最多的国家之一，地质条件复杂，构造活动频繁，崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降、地裂缝等灾害隐患多、分布广，且隐蔽性、突发性和破坏性强，防范难度大。特别是近年来受极端天气、地震、工程建设等因素影响，地质灾害多发频发，给人民群众生命财产造成严重损失。根据国土资源部公布的2016年全国地质灾害数据，全国共发生地灾9710起，造成370人死亡、35人失踪，直接经济损失31.7亿元。地质灾害发生数量、造成的死亡失踪人数和直接经济损失比2015年分别增加18.1%、41.1%和27.4%。据国土资源部发布的2017年地质灾害通报，全国共发生地质灾害7521起，共造成329人死亡、25人失踪、169人受伤，直接经济损失35.9亿元。2017年全国共成功预报地质灾害1642起，有效应急避险55356人，避免直接经济损失14.5亿元。2017年地质灾害发生数量、造成的死亡失踪人数均有所减少，与2016年相比分别减少22.5%和12.6%，造成的直接经济损失增加13.2%。

在这些地质灾害中，因人类工程活动引起的地质灾害不断增多。此外，极端气候如厄尔尼诺后效应、突发性强对流天气、台风等的频繁发生也是重要诱因。因此，人类如何在对大地的索取和利用与地质灾害防治和地质环境保护之间找到平衡，实现社会的可持续发展，是人类长期需要解决的课题，更是地质工程研究者的中心课题。

在大规模的基础工程建设中，各类岩土工程问题大量出现，如基坑塌陷、隧道变形渗漏、地下连续墙垮塌、地基和路基不均匀沉降等，给人民群众生命和财产造成重大损失，增加了建设成本，延长了工程周期，因此，解决好各类岩土工程问题，是岩土工程工作者的中心课题。

本专著中所述的地质工程是指与地质灾害防治和地质环境保护相关的各类工程，而岩土工程是指在基础工程建设过程中所有与岩土体有关的改性、加固和防治的相关工程。因此，二者都与地质体有关，共同的目标就是防治各类地质灾害、解决各类岩土工程问题，而地质与岩土工程监测就是采用各种监测技术手段，对地质灾害和岩土工程问题的发生、发展过程进行观测与分析，从而为防灾减灾提供科学依据。地质工程监测侧重于地质灾害及其防治工程的安全评价、预测和预警，监测的对象主要是自然地质体和各类地质灾害的防治工程结构体；岩土工程监测侧重于与基础工程建设有关的岩土工程问题发生、发展的过程监测，监测的对象不仅仅有自然地质体，更多的是工程岩土体以及为提高岩土工程安全的各种加固结构。一般来讲，工程岩土体的大小和规模比自然地质体要小得多，工程岩土体的监测对象主要涉及受工程影响的那部分地质体，而地质灾害的监测常常涉及一个区域和地区。因此本专著中提到的地质体既包括自然地质体，也包括工程岩土体；自然

地质体主要针对地质灾害而言，而工程岩土体主要针对岩土工程问题而言。

为防治和减轻各类地质灾害和岩土工程问题，目前采取的解决途径主要有两条：一条途径就是灾害风险控制，即通过对地质灾害和岩土工程目标区的工程地质条件分析、分区和风险评价，采取各种地质灾害防治和岩土工程措施，防患于未然，预防各类地质灾害和岩土工程问题的发生；另一条是临灾预警预报，即通过各种监测手段，对一些具体的地质灾害如滑坡和泥石流等和岩土工程问题如基坑稳定性问题等进行临灾预警，疏散人群，转移财产，采取相应工程措施以减少损失。显然，在上述两条途径中，监测始终是实现防灾减灾的前提。

然而，目前地质与岩土工程的监测技术尽管在不断发展和革新中，但依然远远不能满足防灾减灾的要求。这一方面说明了在监测技术水平方面还需要不断提高，另一方面也与地质体的特点密切相关。

1.2 地质体的特点与监测要求

与土木工程中的人造结构系统如钢筋混凝土结构、钢结构和合成材料结构不同，地质体是自然历史的产物，是一个固、气、液多相体系。岩体坚硬、构造不规则；土体松软，不仅具有多孔和低强度等特征，而且它们还在不断地受到自然和人类工程活动的作用和影响。从地质与岩土工程监测的角度，地质体具有如下特点，并对监测技术提出了更高的要求。

1) 结构构造复杂，空间变异性大

地质体是经过了漫长的地质历史演化而来，期间不知经过了多少次的地质运动和沧海桑田的环境变迁，因此，地质体具有十分复杂的结构和构造，在空间上呈现出各向异性和不规则性，空间变异性大，不确定性高，且它们控制着地质体的变形和稳定。地质体的这一特性，要求相应的监测技术必须具备分布式、大规模覆盖的功能，只有这样才能全面地监测到地质体的整体变化。

2) 规模广，距离长，深度大

当人们在大地上进行各类工程活动时，为了确保工程的安全，保护地质环境，就要对构筑物的地基及其周围的地质条件和环境进行评价和演化过程分析。显然，与各类工程有关的地质体规模、范围和深度都要比其承载的构筑物大得多。如体积达到几千万方的大型边坡体；长度可达几十公里，甚至几百公里的江河堤防；范围可达上百万平方公里的冻土区；一些矿山开采的影响深度可以达到数千米。因此，要掌握如此大的地质体的变化规律，必须要有长距离、覆盖性比较好的监测系统才能获得地质体各种场参量的大数据信息，在此基础上才能分析和掌握地质灾害和岩土工程问题的成因，以及岩土体与工程结构间的相互作用机理。

3) 穿透性弱，隐蔽性强

上天难、入地更难。这是因为地质体是具有特殊结构与构造的自然物质体，探测地球

无法像向太空中发射飞船那样容易。如果不借助探测手段,人们无法从地表掌握地下和岩土工程内部地质体的状态变化。但坚硬的岩石很难钻孔,松散层中很难获取原状试样,而深部地质体更难接触到,只有通过一些地球物理的方法间接地获取相关地下深部信息。地质体的这种不易穿透性和隐蔽性阻碍了人们对地质体变化状态的信息获取,妨碍了人们对于地质灾害和岩土工程问题形成机理和发展规律的认识。

4) 多场作用, 影响因素复杂

地球上发生的各种地质现象和地质灾害,均与地球的内动力、外动力或两者结合的地质作用有关。人类居住在地球表面,因此地球表层数十米、甚至几千米深的地质体的内部状态和运动规律,直接影响到人类社会的安全。由于地壳表层处在岩石圈、水圈、大气圈和生物圈多层圈作用的结合部位,它必然受到应力场、温度场、水分场、化学场等多场的耦合作用,因此,影响表层地质体状态和变化的因素十分复杂。要掌握各种地质现象以及各类岩土工程问题的形成机理,减轻各类地质和工程灾害,必须要弄清这些影响因素间的相关信息。

5) 形态不规则, 地质环境多样

人造的土木工程结构规则平整,而自然地质体和工程岩土体的形态一般是不规则的,高低起伏,形成了千姿百态的地貌。形态的不规则性对于监测元件的安装、数据处理和机理分析都会造成很大障碍。地质环境也是复杂多变,高山峡谷,高温寒冷,浅表深部等,对于地质体监测系统的安装和保护,以及系统的可靠性与耐久性带来极大挑战。

1.3 常规监测技术及其不足

要准确、快速、大范围获得地质体及其岩土工程结构的多场多参量数据及其随时间的变化规律并非易事,有赖于监测系统的先进性,有赖于先进理论和方法的指导。根据当前地质与岩土工程的观测与监测手段特点,相关的监测技术体系可分为三大类:

第一类技术为遥感遥测技术。它们依托卫星、飞船、航天飞机、飞机以及近空间飞行器等空间平台,利用可见光、红外、高光谱和微波等多种探测手段,获取地表温度、植被、地貌、污染等的分布变化信息。这类技术包括全球导航卫星系统(GNSS)技术、甚长基线干涉测量(VLBI)技术、雷达干涉测量(InSAR)技术、机载激光雷达测量(LiDAR)技术、卫星遥感和卫星重力测量等。这类技术十分适用于观测大地表面宏观的区域信息变化,但目前还无法穿透地表获得一定深度的地下信息,也还没有做到实时的精确观测。此外,观测精度受环境因素影响很大,很难做到全天候的观测。在这类技术中,GPS等定位技术,在地表形变和地壳运动观测中得到了很好的应用,但还不能对地质体内部的形变进行测量,在观测精度上还需要提高。

第二类技术为地球物理方法。地球物理方法是一种地球勘探方法,包括重力勘探、磁法勘探、电法勘探、地震勘探、地温法勘探、核法勘探等,相关的技术设备覆盖面很广,包括地震仪器、电法仪器、磁法仪器和重力仪器等。通过测量地球的物理场(如重力场、电场、磁场等)及其在时间和空间上的变化规律,探测地球内部的物质成分、结构构造及

其变化。然而，由于地球表层影响因素复杂，动态变化快，灾变的时效性强且成因隐蔽，而现有的地球物理方法多为静态探测，地质体中界面分辨率不够精细，探测结果常出现多解性，因而一般仅适用于地球深部大尺度和浅部地层的事件探测。

第三类技术为传感监测技术。传感监测技术是现代信息技术的重要组成部分，也是地质与岩土工程监测中不可缺少的关键技术。在传感监测技术中，传感器的研发和应用又是最为重要的一环。信息技术包括计算机技术、通信技术和传感器技术。目前计算机技术和通信技术发展极快且相当成熟，但传感器技术方兴未艾，随着社会对自动化和人工智能的需求不断增大，传感器技术已成为国际上许多国家重点攻克的关键技术之一（高国富等，2005）。由于传感监测技术是在地质体与岩土工程结构中植入传感器来实现监测的，因此，它既可以获得地表的信息，也可以监测到地下一定深度的地质与岩土工程相关的多场多参量信息，可以说，传感监测技术是地质与岩土工程监测最为直接和实用的技术手段。

目前传统的地质与岩土工程传感监测技术主要以基于振弦式和电阻式的点式监测技术为主。图 1.1 是目前常用的接触式岩土体变形监测技术。这些监测技术多为点式测量，常出现漏检和盲区问题，无法实现长距离、大面积和深部的岩土体监测；岩土体恶劣的环境，如高温、低温、高压、高湿度等，常使这些监测元件和探头成活率低、易生锈腐蚀、耐久性差；基于电感原理的感测元件易受电磁场干扰，存在着长期零漂，影响监测精度和稳定性。这些监测技术的不足无法满足地质灾害与岩土工程问题的监测与预测预警的要求，严重地阻碍了人们对地质灾害和岩土工程问题孕育、发生和发展规律的认识，因此十分需要通过不断创新，研发先进的地质与岩土工程监测技术，以满足地质灾害和岩土工程的理论研究和技术应用需求。

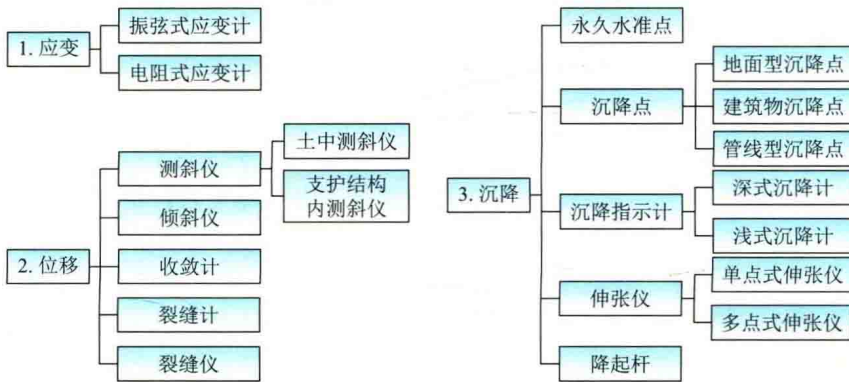


图 1.1 常用的接触式岩土体变形监测技术

为了克服地质与岩土工程监测技术的瓶颈，近三十年来许多国家制定相关计划，投入大量人力和物力，研发各类新技术和新方法，期望能对各类地质灾害和岩土工程中的科学和技术问题提供强有力的监测手段，在地质灾害和岩土工程监测技术方面抢占制高点，而光纤感测技术就是这样的一种接触式监测手段，是近三十年来各国竞相研发的高端传感监测技术。