

激光与光电子学进展

基于分布式光纤感测的岩土体变形监测研究综述

程刚^{1,2,3*}, 王振雪¹, 朱鸿鹤², 李冬艳¹, 马茜²

¹华北科技学院(中国煤矿安全技术培训中心)计算机学院, 北京 101601;

²南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023;

³南京大学(苏州)高新技术研究院, 江苏 苏州 215123

摘要 随着我国各类复杂重点工程建设的深入推进,工程安全问题引起了越来越多的关注,然而对岩土体进行变形监测是保障工程安全的重要手段之一。与传统的电磁法、声发射、经纬仪、水准仪、位移计、应变计等岩土体变形监测技术相比,分布式光纤感测技术具有实时性、高精度、全分布、长距离和抗干扰等优势,已成为当前岩土体变形监测研究及应用领域的关注焦点。本文总结了光纤感测技术在岩土体变形监测中的应用现状,介绍了几种典型的分布式光纤感测技术原理及适用场景,探讨了光纤感测技术在岩土体变形监测应用中的关键问题,分析了光纤感测技术在边坡、水利、隧道、管道、铁路等工程及地面沉降与塌陷方面监测中的应用成果与挑战。最后,展望了光纤感测技术在岩土体变形监测中亟需攻破的难题与对策。

关键词 光纤光学; 岩土体变形监测; 分布式光纤感测技术; 关键问题; 研究综述

中图分类号 TU42

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1900004

Research Review of Rock and Soil Deformation Monitoring Based on Distributed Fiber Optic Sensing

Cheng Gang^{1,2,3*}, Wang Zhenxue¹, Zhu Honghu², Li Dongyan¹, Ma Qian²

¹*School of Computer Science, North China Institute of Science and Technology (National Safety Training Center of Coal Mines), Beijing 101601, China;*

²*School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China;*

³*Nanjing University High-Tech Institute at Suzhou, Suzhou 215123, Jiangsu, China*

Abstract With the in-depth promotion of various complex key projects in China, engineering safety has attracted more and more attention. However, deformation monitoring of rock and soil mass is one of the essential means to ensure engineering safety. Compared with traditional rock and soil deformation monitoring technologies such as electromagnetic method, acoustic emission, theodolite, level gauge, displacement gauge, and strain gauge, distributed fiber optic sensing technology has the advantages of real-time, high precision, full distribution, long-distance, and anti-interference. It has become the focus of the research and application field of rock and soil deformation monitoring. This paper summarizes the application status of fiber optic sensing technology in rock and soil deformation monitoring, the principles and application scenes of several typical distributed fiber optic sensing technologies are introduced, the critical problems of fiber optic sensing technology in rock and soil deformation monitoring are discussed, and the application achievements and challenges of fiber optic sensing technology in slope, water conservancy, tunnel, pipeline, railway, land subsidence, and collapse monitoring are analyzed. Finally, the problems and solutions of fiber optic sensing technology in rock and soil deformation monitoring have been prospected.

Key words fiber optics; rock and soil deformation monitoring; distributed fiber optic sensing technology; critical problems; research review

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-09-30; 录用日期: 2021-10-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505104)、中央引导地方科技发展资金项目(226Z5404G)、河北省物联网监控技术创新中心(21567693H)、河北省高等学校科学技术研究项目(Z2017043, Z2019044)、中央高校基本科研业务费专项(0132, 3142021009)、苏州市科技计划项目(SYG202034)

通信作者: *chenggang@ncist.edu.cn

1 引 言

随着我国经济向高质量、高水平发展模式的不断演化,地下空间、水利、电力、公路铁路、矿山等各类基础设施工程建设项目日益增多。与此同时,岩土工程建设的难度也越来越大,由此引发的安全问题引起了全社会的高度关注,如岩土体开挖和填筑过程中的岩土体变形和稳定问题,各类构筑物的变形和不均匀沉降问题,水利工程中的大坝、库岸边坡稳定性问题,矿山开采引起的地面塌陷及深部岩体稳定性问题等。上述灾害一旦发生,往往将造成严重的经济损失和极端的社会效应。因此,为了保证工程的安全建设及使用,对其进行实时监测并科学评价其健康状态是防治岩土体变形失稳的必要手段,也成为岩土(地质)工程领域发展的迫切现实需要。

大量的现场工程监测研究表明,岩土体变形监测具有监测对象复杂、周期长、手段单一且严重受制于现场施工环境等特点^[1]。当前岩土体变形监测中主要采用电感式、电阻式和振弦式的应变计,以及位移计和图像扫描仪等相关测量设备,这些传感器感测部件多为金属材料且大多为点式采集,受传感器材质、适用环境、海量数据、信号传输等因素的制约,具有易腐蚀失效、成活率低、耐久性差、精度不高且实时性及智能化监测程度低等缺点,已无法满足当前复杂岩土体变形监测的需求^[2-3]。因而,全球科研人员持续探索和研发岩土体变形监测创新技术,基于监测距离和精度的优势,分布式光纤感测技术已成为全球学者的关注焦点^[4-5]。

分布式光纤感测(DFOS)是以通信技术为基础,伴随光导材料变革而迅猛发展的一种将光作为载体,光纤为媒介,感知并传输被测量信号(如应变、温度、位移、

应力等)在空间和时间上连续信息的新型光电技术^[6]。相较于现行主流监测技术,其具有耐腐蚀、抗电磁、强灵敏度、高精度和分布式等优点,且可实现实时自动化远程监测。结构化的土木建筑大都呈规则性特征,这给开展分布式监测带来了极大的便利,因而长期以来分布式光纤感测技术在工程中的应用研究主要集中于钢结构、混凝土结构的健康监测和损伤诊断等方面。近十几年来,随着光纤传感器性能和布设工艺的大幅提升,针对岩土体变形分布式光纤监测的深入研究逐年递增,地质与岩土工程分布式监测已成为一些发达国家竞相研究的热点^[7]。国际上,英国皇家工程院院士、美国加州大学伯克利分校 Soga 教授团队,加拿大皇家科学院院士、渥太华大学 Bao 教授团队,美国伊利诺伊大学芝加哥分校 Ansari 教授团队等已在岩土体变形分布式监测技术方面取得了重要的成果^[8-10],积累了大量的理论和实践经验。在国内,南京大学(苏州)高新技术研究院、武汉理工大学武汉理光产学研平台、东南大学吴智深教授团队、哈尔滨工业大学董永康教授团队、西安科技大学柴敬教授团队等将分布式光纤监测系统应用于基础工程、边坡工程、水利工程、隧道工程和矿山工程等大型工程建设及运营期监测中^[11-14],获得了大量的现场监测数据和研究成果,科学地展示了光纤感测技术应用于岩土体变形监测的优越性。因此,实施基于分布式光纤感测技术的岩土体变形监测对防灾减灾及保障工程全寿命周期安全具有重要意义。

自 21 世纪以来,我国在岩土体变形监测技术方面开展了卓有成效的研究。据中国知网(CNKI)数据库,以关键词“岩土体变形监测”搜索到的论文有 65 篇,利用 VOSviewer 软件对其进行关键字提取后得到高频关键字图谱,如图 1 所示(图中方框越大表明该关键字出

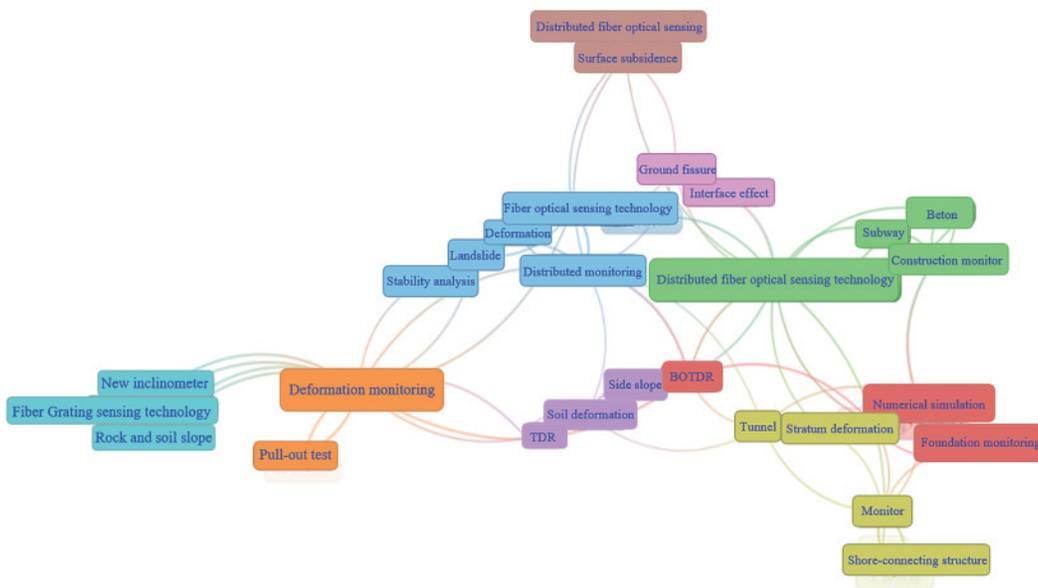


图 1 岩土体变形监测高频关键字图谱

Fig. 1 High frequency keyword spectrum of rock and soil mass deformation monitoring

现的频次越高)。在导入文献中共提取关键字 299 个, 出现频次大于 5 次的有 44 个。由此可见, 分布式光纤感测技术是应用于岩土体变形监测的主要技术之一。

2 几种典型的分布式光纤感测技术

在分布式光纤感测技术中, 光纤既可作为传输介质, 同时其上的每一点又是传感器, 即在无需布设额外的传感元件下可实现长距离的实时监测。相比于点式监测, DFOS 技术具有全分布、长距离、大范围的显著优势, 且具有高可靠性与便携性。基于不同的感测原理, 对 DFOS 技术进行典型分类(图 2)。现阶段, 岩土体变形监测光纤感测技术主要包括: 光纤布拉格光栅技术(FBG)、光时域反射技术(OTDR)、布里渊光时域反射技术(BOTDR)、布里渊光时域分析技术(BOTDA)、布里渊光频域分析技术(BOFDA)和分布式声学感测技术(DAS)。

2.1 光纤布拉格光栅技术

1978 年, Hill 等^[15]选用驻波法研制了全球首个光纤布拉格光栅, 四十多年来发达国家竟相对该技术进行了深入研究。FBG 技术是利用光纤材料的紫外光敏性, 在纤芯内部形成空间相位光栅, 当具有一定频谱宽度的光信号经过光纤光栅后, 满足条件($\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$, 其中 n_{eff} 为纤芯有效折射率, Λ 为光栅周期)的波长将被反射回来, 其余波长的光信号则直接投射出去。当光纤中光栅位置发生拉伸(压缩)或温度变化时会使得发射光的波长发生规律性变化, 通过对变

化量进行计算便可获得该处的变形(温度)值。目前, 该技术的精度可达到 0.0001%, 且数据采集时效高, 可实现实时远程自动化监测。FBG 技术测量原理如图 3^[16]所示。

FBG 传感器较之传统传感器有其突出的优越性: 利用光纤将多个 FBG 传感器串联成测试网络, 综合利用波分复用(WDM)、空分复用(SDM)、时分复用(TDM)等复用技术, 可实现准分布式监测。该方法可以精确得到各 FBG 测量点的信息, 但是需要预估结构受力情况, 存在一定的监测盲区, 不能实现全分布式监测。目前, 该技术主要适用于结构工程的关键点位监测, 如地下管廊、地铁隧道和水利工程中关键位置的变形过程监测。在野外岩土体变形监测中, 常规 FBG 存在易折断、协调性差、成活率低、布设工艺复杂、成本较高等问题, 需要结合具体监测环境和对象研制特种 FBG 传感器^[17]。贾立翔^[18]针对土工离心机光纤光栅测试系统研究, 研发了多种适用于室内外试验的小型 FBG 传感器, 其主要性能参数见表 1。

2.2 光时域反射技术

OTDR 是一种早期的分布式光纤感测技术, 起初主要用于检测光纤断点, 1980 年 Fields 和 Cole 首次提出基于微弯损耗原理的光纤微弯传感器, 用于待测体局部变形测量。OTDR 的基本原理是利用光纤中前(后)向散射光, 测量光纤中因散射和吸收等作用产生的传输损耗以及纤芯破坏引起的结构损耗^[19]。当光纤某一点受温度或应变作用时, 该点的散射特性将发生

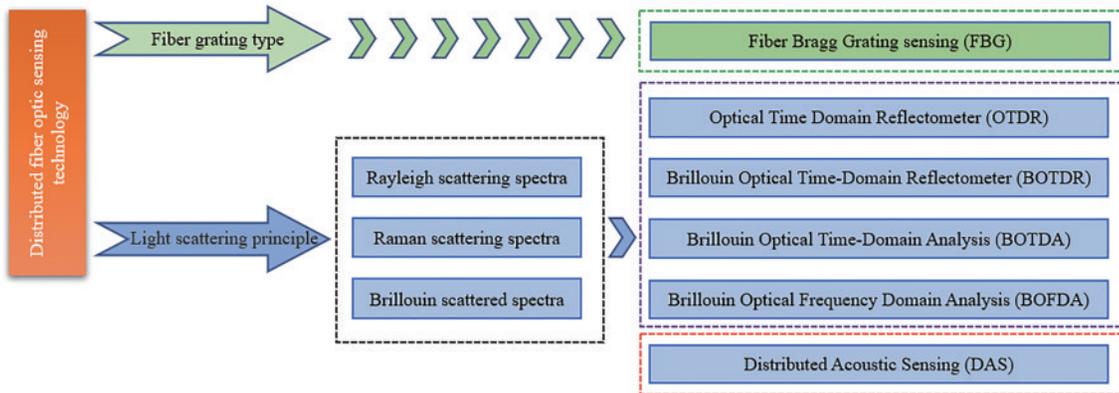


图 2 分布式光纤感测技术典型分类^[4]

Fig. 2 Typical classification of DFOS^[4]

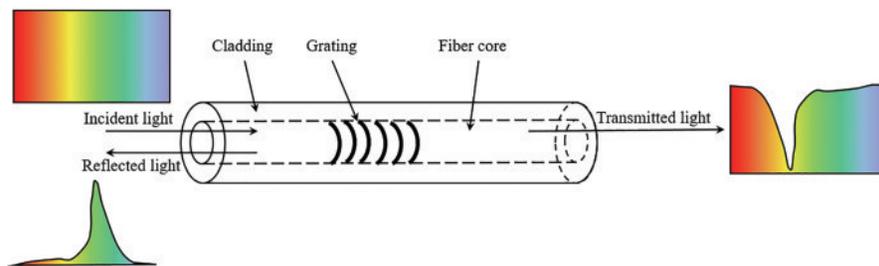


图 3 FBG 技术测量原理^[16]

Fig. 3 Measuring principle of FBG technology^[16]

表 1 小型 FBG 传感器性能参数
Table 1 Mini FBG sensor performance parameters

Sensor	Monitoring content	Parameter index
 FBG (string)	Structural internal force Structural strain Temperature measurement	Size: 0.25 mm × 10 mm Spacing: 20 mm Precision: 1 με, 0.1 °C
 Micro FBG pressure sensor	Soil pressure	Size: 40 mm × 16 mm Range: 200–3000 kPa Precision: 0.1% F.S. Wavelength: 1528–1568 nm Reflectivity: ≥90
 Micro FBG displacement sensor	Compression of soil Structural displacement Soil settlement gage	Size: 6 mm × 170 mm Range: 10–150 mm Precision: 0.1% F.S. Resolution: 0.05% F.S. Wavelength: 1510–1590 nm Reflectivity: ≥90
 FBG temperature sensor	Temperature measurement	Range: -40–200 °C Resolution: 0.1 °C Wavelength: 1510–1590 nm Reflectivity: ≥90

(note: F.S. means full scale)

变化。因此,将发生光损位置与光纤长度进行对应标记,便可以实现外界形变(温度)检测。利用下式可计算出事件点与分析仪的距离。

$$d = ct/2n, \quad (1)$$

式中: c 为真空中的光速; n 为光纤折射系数; t 为脉冲光发送与散射光接收的时间间隔。由于传统的 OTDR 分析仪是对模拟光进行强度检测,因此存在空间分辨率低、监测精度差等缺点。近年来,国际上出现了高分辨率的光时域反射计(V-OTDR)。该技术采用光子计数,借助短脉冲光可精确地定位动态范围,空间分辨率达到 0.1 m,灵敏性大大增强,可实现大弯折和损伤点检测。

岩土体变形与混凝土结构和钢结构变形存在较大差异,特别是土体的变形常常属于大变形,如土体的蠕变,而常规的感测光缆应变测试范围为 ±1.5%,这就要求通过研究特种感测光缆及方法,实现土体大变形监测。德国联邦材料研究院的 Habel 等^[20]成功地将基于 OTDR 技术的尼龙光纤(POF)植入土工织物(图 4),测量的应变达到 40%,且大变形时光纤的光导属性不发生改变。在德国,它已经被应用于铁路路堤的稳定性监测。但该编织工艺尚存在光纤易弯折问题,从而导致应变损失,因此在实际推广应用中,编织工艺有待进一步发展。

2.3 布里渊光时域反射技术

BOTDR 是 1993 年由 Kurashima 等^[21]首次研发成功的,该技术只需在传感光纤的一端设置光源,无需构

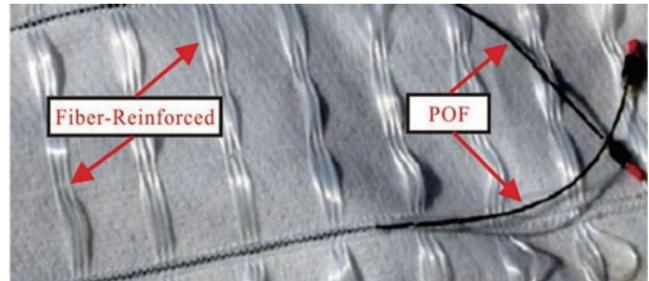


图 4 植入尼龙光纤的土工织物^[20]
Fig. 4 Geotextiles embedded with nylon fiber optic^[20]

成回路即可实现分布式监测,因此实际应用十分方便。其原理是:利用入射光与光纤中的声学声子相互作用产生布里渊散射,当光纤沿线存在轴向应变(温度)变化时,其中的背向布里渊散射光频率相对于入射光频率将产生漂移,且漂移量与光纤所受的轴向应变(温度)变化呈一定线性关系,如图 5^[22]所示。光纤所受的轴向应变(温度)与布里渊频移可表示为

$$\epsilon = C_S (v_B - v_{B0}) + \epsilon_0, \quad (2)$$

$$T = C_T (v_B - v_{B0}) + T_0, \quad (3)$$

式中: ϵ 为光纤的应变; T 为温度; C_S 为布里渊频移-应变系数; C_T 为布里渊频移-温度系数; v_B 为光纤的布里渊频移; v_{B0} 、 ϵ_0 和 T_0 分别为初始光纤布里渊频移量、应变和温度^[23]。在温差小于 5 °C 时,通常剔除温度对结果的影响。由于该技术需从光纤一端检测强度非常低的散射光,早期 BOTDR 仪器的空间分辨率仅为 1 m。

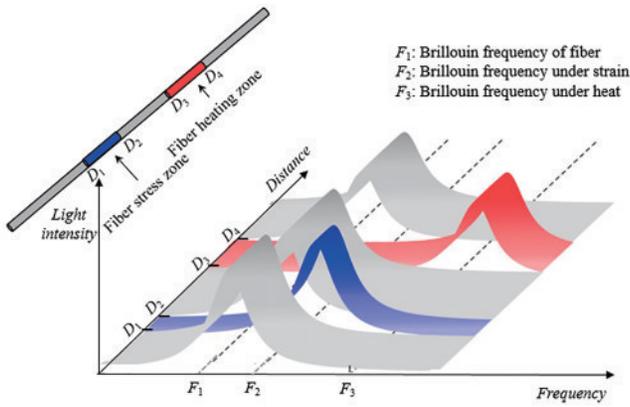


图 5 BOTDR 技术测量原理^[22]

Fig. 5 Measurement principle of BOTDR technology^[22]

日本 ANDO 公司于 2001 年研发出 AQ8603, 满足大多数岩土体变形监测, 但对于小于 0.5 m 的分辨率仍存在困难。不久, 日本 Advantest 公司开发出 N8511 型 BOTDR 解调仪, 空间分辨率达 0.5 m。在国内, 2013 年中国电子科技集团公司第四十一研究所研制了完全国产化的高性能 BOTDR 解调仪, 其测试速度、精度和稳定性较同类设备显著提高。

当前, BOTDR 技术应变测量范围为 $\pm 1.5\%$, 测量精度达 $\pm 0.003\%$, 可满足常规岩土体的变形监测要求。本技术的最大优点是单端测量, 即使监测过程光纤被拉断, 仍可获取断点处至测站间的光纤数据。同

时, 可实现岩土体变形的大范围、连续性监测, 目前已完成 80 km 距离的有效测试, 已在隧道、桥梁、基坑、边坡、矿山、水利等工程领域取得了良好的应用效果。例如, 结合待测滑坡地质条件, 将光纤设计成纵横交错的感知网布设于滑坡表面和内部, 即可实现滑坡体由线到面的立体监测^[24]。

2.4 布里渊光时域分析技术

BOTDA 最早由日本电信公司 (NTT) 的 Horiguchi 等^[25] 提出, 期初被作为一种无损检测技术, 分辨率为 100 m、应变精度为 $100 \mu\epsilon$, 由于分辨率和测量精度显著性高于其他监测技术, 因而被广泛关注。自提出至今, 全球专家学者持续性开展了 BOTDA 研发改进。瑞士 Omnisense 公司研发的 DiTeSt, 在测试距离低于 10 km 时, 实现了空间分辨率、应变和温度精度分别为 1 m、 $20 \mu\epsilon$ 、 1°C 的测量; Kishida 等引入预泵浦脉冲方法, 完成了厘米级分辨率的试验研究, 并通过日本 Neubrex 公司量产出 PPP-BOTDA, 其中的 NBX-7020 型解调仪实现空间分辨率、应变和温度精度分别为 0.02 m、 $7 \mu\epsilon$ 、 0.3°C 的测量, 测试距离长达 20 km。该技术原理是: 利用泵浦光脉冲变化, 使跳跃型泵浦光和连续光分别自光纤两端注入感测光纤中激发声波, 声波在泵浦脉冲抵达待测位置之前被预泵浦脉冲激发, 从而导致泵浦脉冲、预泵浦脉冲、探测光、声波在光纤中产生碰撞作用, 形成受激布里渊散射。图 6^[26] 为 BOTDA 技术测量原理。

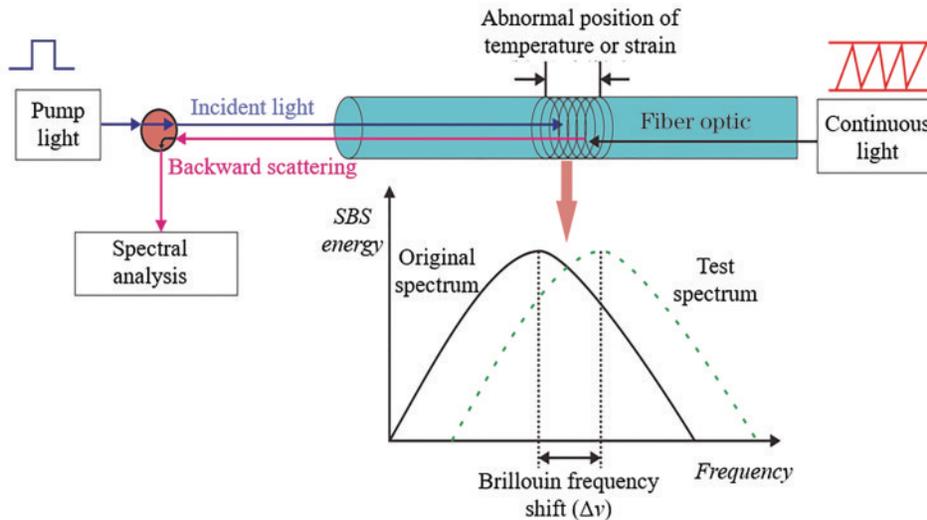


图 6 BOTDA 技术测量原理^[26]

Fig. 6 Measurement principle of BOTDA technology^[26]

BOTDA 技术不仅适用于 BOTDR 技术适用的应用领域, 而且具有更高的精度。但是在野外岩土体变形监测中, 由于该技术需构建双端测试回路, 一旦测试回路中产生断点且无法修复时, 常会造成监测系统中止, 给工程应用带来巨大隐患。因此, 相较于单端测试的 BOTDR, 该技术对于测试环境好、精细化要求高的室内模型试验研究更加适用。

2.5 布里渊光频域分析技术

BOFDA 技术是由德国的 Garus 等^[27] 提出的一种基于布里渊光频域分析的光纤感测技术, 亦是通过对布里渊频移的变化进行应变(温度)测量, 但其空间定位则主要由复合基带传输函数实现。Dieter 等通过大量试验实现了分辨率和温度精度 3 m、 5°C 的测量, 完成了 26°C 条件下应变系数 $(500 \pm 6) \text{ MHz}/\%$ 、温度系数

(1.16 ± 0.013) MHz/°C 的标定试验研究,理论空间分辨率达 1 mm。该技术原理是:将两类不同的激光分别从光纤两端注入,其中一端为经调幅的连续泵浦光,具有可调节的频率 f_m ,另一端为斯托克斯光,两种光源的频率差为 Δf 。泵浦光和斯托克斯光的光强在通过测试段光纤后均产生了变化,布里渊背向散射光传输到分析仪后,同泵浦光与斯托克斯光的初始相位和幅度进行比较,并基于此开展了相关运算,对不同 f_m 扫描,将获得同其对应基带传输函数,进一步计算可获知光

纤中具体位置与频移量的对应关系。图 7^[28] 为 BOFDA 技术测量原理。

目前,德国在 BOFDA 技术方面研发实力较强, fibris Terre 公司已研制出实现工程应用的量产化产品。相比于 BOTDR,BOFDA 有着更高的分辨率和测试精度,虽然同 BOTDA 在分辨率和测量精度方面的区分度不强,但是后者受限于测试环境要求高,在实际工程应用中,其稳定性和信噪比均明显低于 BOFDA 监测系统。

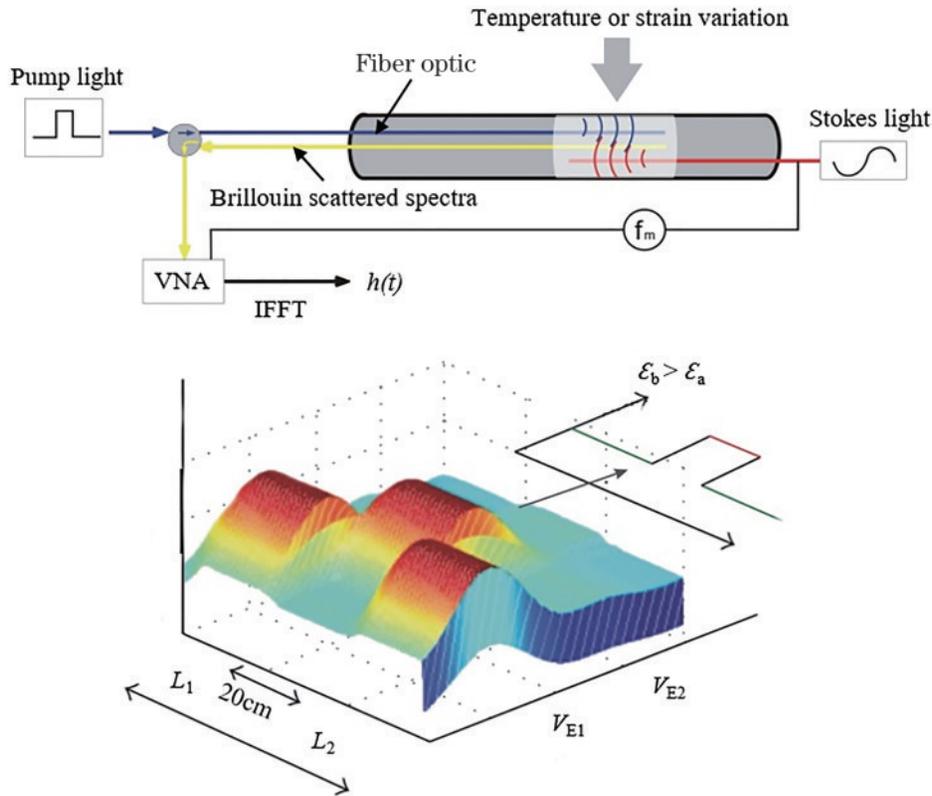


图 7 BOFDA 技术测量原理^[28]

Fig. 7 Measurement principle of BOFDA technology^[28]

2.6 分布式声学感测技术

DAS 是一种基于瑞利光散射的分布式声学感测技术,起源于 20 世纪 90 年代,该技术主要通过干涉式声波传感对外部的振动信号进行感知与测量,即当振动引起光纤某处的干涉光相位产生线性变化时,利用相关解调仪解调出不同时刻该点的干涉信号,进而完成该点相关物理参数的定量化监测,其工作过程为:激光器向光纤中注入脉冲光,部分脉冲光与入射光在脉冲内发生干涉,反向散射的干涉光将被带回信号处理器,同时将光纤沿线的振动信息回传至信号处理器。基于光速一定,从而可计算获得一定距离光纤的振动测量结果。

DAS 技术不仅拥有光纤感测技术的各项优点,而且可实现光纤沿线动态应变的长距离、分布式、实时

性监测。目前,该技术已被应用于管道、油气、铁路、机场等基础设施建设与运行监测以及周界安全监测等多个领域^[29-30]。随着 DAS 技术的不断发展,地震学家尝试将其应用于地震观测和城市地下结构探测与成像。未来,利用该技术可以实现城市地下空间的“透明化”探测,进而持续性保障各类城市地下工程的建设与维护。图 8^[31] 为 DAS 技术测量原理。

除上述典型的光纤感测技术,诸如美国 LUNA 公司的背光反射计 OBR 4600 和国内自主研发的超高精度 OFDR 等产品也被尝试性应用于实际工程监测,受限于测试距离和环境,仍需通过各类试验进一步改进完善,尚未在现实工程中大范围推广。为了更加直观地对上述技术进行对比,系统性汇总了几种测试技术的重要参数及其主流商用设备技术指标,详见表 2。

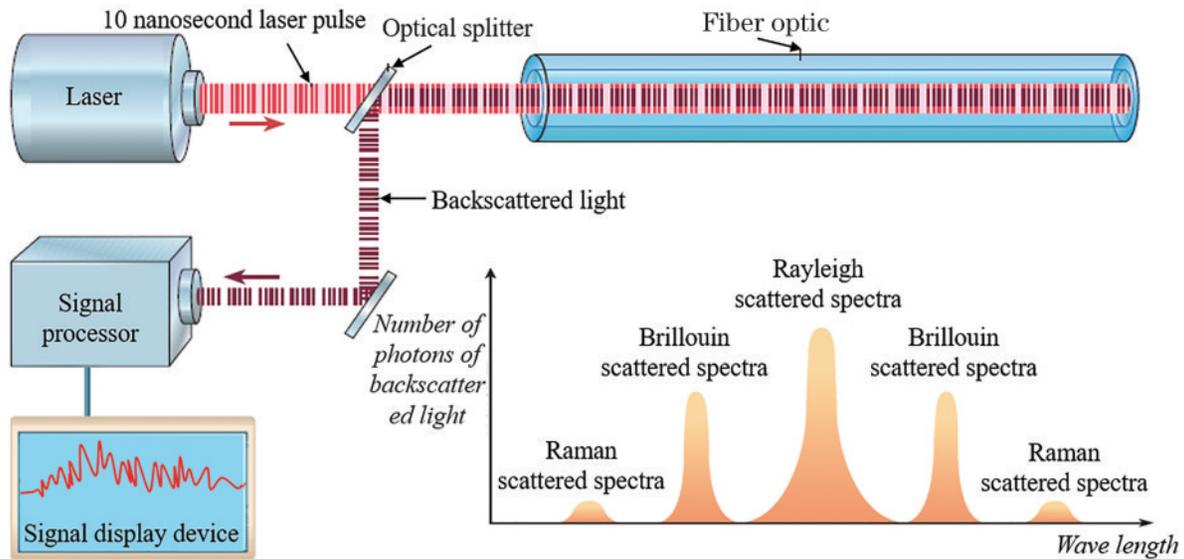


图 8 DAS 技术测量原理^[31]

Fig. 8 Measurement principle of DAS technology^[31]

表 2 几种典型光纤技术参数及主流商用化设备技术指标对比

Table 2 Comparison of several typical fiber optic technical parameters and technical indicators of main commercial equipment

Fiber optic sensing technology	Measurement distance	Strain measurement range	Measurement precision	Space resolution	Measurement time	Commercialized products	
						Device	Parameters
FBG	Series length	-3000~+5000 $\mu\epsilon$	1 $\mu\epsilon$ /0.1 $^{\circ}\text{C}$	—	1-60 s	NZS-FBG-A03 	Wavelength range: 1528-1568 nm Wavelength resolution: 1 pm Repeatability: ± 2 pm Demodulation speed: ≥ 1 Hz Dynamic range: 45 dB Working temperature: -5-45 $^{\circ}\text{C}$
OTDR	256 km	—	—	0.1 m	1-5 s	FOT-100 	Pulse width: S/A 5 ns-10 μs , S/B 5 ns-20 μs , MM-A: S/A 5 ns-1 μs Distance resolution: 0.1 m Loss resolution: 0.001 dB Space resolution: 1 m
BOTDR	80 km	-15000~+15000 $\mu\epsilon$	30 $\mu\epsilon$ /1 $^{\circ}\text{C}$	0.5 m	5 min	AV6419 	Sampling resolution: 0.05 m Frequency scan range: 9.9-12 GHz Demodulation repeatability: ± 10 $\mu\epsilon$
BOTDA	30 km	-15000~+15000 $\mu\epsilon$	7 $\mu\epsilon$ /0.3 $^{\circ}\text{C}$	0.02 m	10 min	RP 1000 	Space resolution: 0.02 m Frequency scan range: 10-13 GHz Strain test repeatability: $< \pm 4$ $\mu\epsilon$ Sampling resolution: 0.01 m
BOFDA	50 km	-15000~+15000 $\mu\epsilon$	2 $\mu\epsilon$ /0.1 $^{\circ}\text{C}$	0.2 m	3 min	ftB2505 	Space resolution: 0.2 m Frequency scan range: 9.9-13 GHz Strain test repeatability: $< \pm 4$ $\mu\epsilon$ Sampling resolution: 0.05 m
DAS	50 km	—	—	2-10 m	—	MS-DAS 	Sampling resolution: 0.1 m Frequency scan range: 0-50 kHz Sensitivity: < 0.05 ne@5-100 Hz Timing accuracy: 1 μs Working temperature: 0-40 $^{\circ}\text{C}$

3 光纤感测技术应用于岩土体变形监测的几个关键问题

3.1 温度补偿方法

光纤感测技术的一个关键问题是监测中的温度补偿问题。基于该技术存在温度和应变交叉敏感性^[32],即在监测过程中,无论是采用FBG技术还是DFOS技术,待测体的应变和温度会被同时感知,因而在温差较大的环境下进行岩土体变形监测时需进行温度补偿,以消除温度对监测结果的影响。光纤感测技术的这一特性使其应用受到了一定的局限,为此国内外科研人员开展了大量的攻关试验,提出了一些有效的温度补偿方法。

3.1.1 FBG 温度补偿方法

目前基于FBG技术常用的温补方法有双光栅法、双参量法、补偿性封装法等^[33]。在具体的应用过程中,通常采用双光栅温度补偿法,即平行将一个FBG温度计与FBG应变计布设于同一位置,且保持FBG温度计不受力,仅测量环境温度变化,基于二者位置近似一致,即将FBG温度计波长漂移视作温度效应造成的误差,进而实现温度补偿,其温度、应变满足以下关系^[34],

$$\begin{cases} \frac{\Delta\lambda_t}{\lambda_t} = K_t \Delta t \\ \frac{\Delta\lambda_s}{\lambda_s} = K_{se} (\Delta\epsilon + \alpha \Delta t) + K_{st} \Delta t \end{cases}, \quad (4)$$

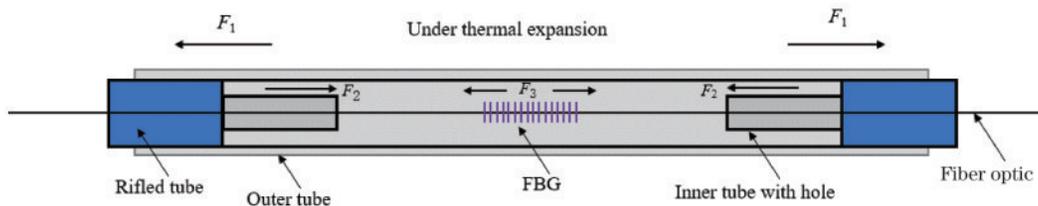


图9 温度自补偿传感器原理^[36]

Fig. 9 Principle of temperature self-compensation sensor^[36]

3.1.2 全分布式温度补偿方法

目前,基于布里渊的光纤感测技术常用的温度补偿方法主要有参考光纤法、光纤温度变化传感器法、双参量矩阵法、Landau-Placzek比率法、联合拉曼-布里渊散射法等^[37-38]。基于方法简单易行的原则,当前实际应用中大都采用参考光纤法。

参考光纤法与FBG温度补偿方法类似,即在铺设分布式应变光纤的同时,在其旁铺设单一测温松套光纤,并保持光纤不与待测物接触,这样便可获得温度影响值。该方法中温度、应变存在如下关系,

$$\begin{cases} v_{BT}(t) = v_{BT}(0) + \frac{dv_{BT}(t)}{dt} \Delta t \\ v_{Be}(t) = v_{Be}(0) + \frac{dv_{Be}(\epsilon)}{d\epsilon} \Delta\epsilon + \frac{dv_{Be}(t)}{dt} \Delta t \end{cases}, \quad (5)$$

式中: λ_t 和 K_t 分别为FBG温度计的布拉格波长和温度灵敏系数; λ_s 、 K_{se} 和 K_{st} 分别为FBG应变计的布拉格波长、应变灵敏系数和温度灵敏系数; α 为机体材料热膨胀系数。采用热水浴法对FBG及钢管封装FBG应变传感器的温度灵敏系数进行标定,得出两者温度灵敏系数分别为 $5.71 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $18.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。将钢管封装FBG应变传感器平行布设于FBG附近,并与之串连,用于测量温度影响,应用数显式液压万能试验机对FBG应变灵敏系数进行标定,得出应变灵敏系数为0.813。

朱鸿鹄等^[35]对香港新界公路边坡进行监测,在每个光纤光栅应变传感器旁布设一个光纤光栅温度传感器进行了一对一的温度补偿。为了最大限度降低成本,陈敏^[36]设计了温度自补偿传感器(图9),其原理为:采用双层金属管封装工艺,内管材质热膨胀系数较高,外管材质热膨胀系数相对低,且外管较薄,内管较厚,利用内外管热膨胀系数之差,对光栅受热膨胀及光热效应等产生的应变进行校正,测试获得的温度灵敏度为 $2.64 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,应变灵敏度为 $1.392 \text{ pm}/\text{kg}$ 。此外,苏州南智传感科技有限公司研制出自补偿光纤光栅静力水准仪,其核心构件为开口矩形梁,在梁的受力变形区设置应变感测FBG,在梁的恒不受力区设置温度感测FBG,进而实现了温度和应变的独立测量。然而,由于应变传感器封装工艺和测试原理各不相同,因此自补偿法适用性并不广泛。

式中: v_{BT} 和 $\frac{dv_{BT}(t)}{dt}$ 分别为BOTDR温度光纤中的布里渊频移和温度影响系数; v_{Be} 、 $\frac{dv_{Be}(\epsilon)}{d\epsilon}$ 和 $\frac{dv_{Be}(t)}{dt}$ 分别为BOTDR应变光纤中的布里渊频移、应变影响系数和温度影响系数^[39],通过式(5)可以算出监测体发生的应变 $\Delta\epsilon$,从而剔除温度的影响。贾立翔^[18]在锚杆上使用细直径镀锌管(波纹管)承装温补光纤(图10),达到仅对温度敏感的效果,与应变光纤测试数据进行差值计算,实现了对锚杆变形的精准监测,并通过室内试验获得常规感测光纤自由状态下的温度系数为 $1.1 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ 。由于该方法需要额外布设一套参考光纤,在复杂施工环境中布设难度较大,且难以实现松套光纤完全不受力。此外,不同的粘贴剂也会给测试结果产生影响。因此,在使用过程中应针对不同的工况

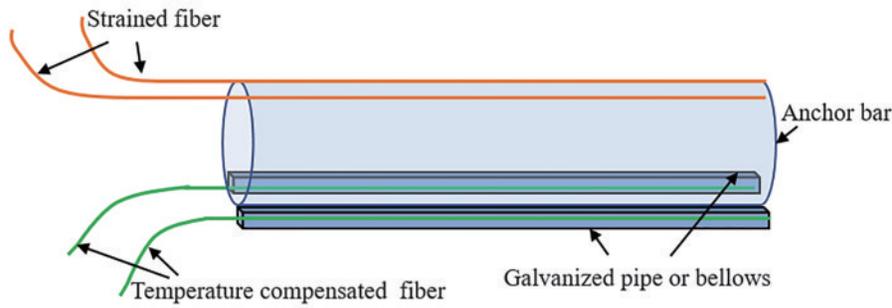


图 10 参考光纤法补光纤布设^[18]

Fig. 10 Refer to the fiber optic supplement method for fiber optic layout^[18]

和材料进行数据修正。

此外,部分学者也利用光纤温度变化传感器法进行了探索性研究,该方法是在布设感测光纤时,每隔一定距离从感测光纤中按照固定直径盘绕一个线圈,由于该线圈不与待测体接触,因而仅仅对温度变化敏感。假定两次不同温度下获得的应变变化值为 $\Delta\epsilon'$,通过光纤温度变化传感器获得温度变化值 Δt 。则实际应变变化值 $\Delta\epsilon$ 为

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon' + \alpha\Delta t, \quad (6)$$

式中: α 为比例系数,单位为 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$,根据光纤材料和仪器参数设置而不同。由式(6)可求得监测体发生的应变 $\Delta\epsilon$,从而剔除了温度的影响。

Wang 等^[40]在边坡模型试验中采用该方法进行光纤布设(图 11),获得了校准后的光纤应变测试值。该方法在实际应用中操作方便,但受限于感测技术空间分辨率,缠绕线圈通常需大于 1 m,且不能叠加受力。由于在现实应用中很难保证准确性,因而存在一定的测量误差。

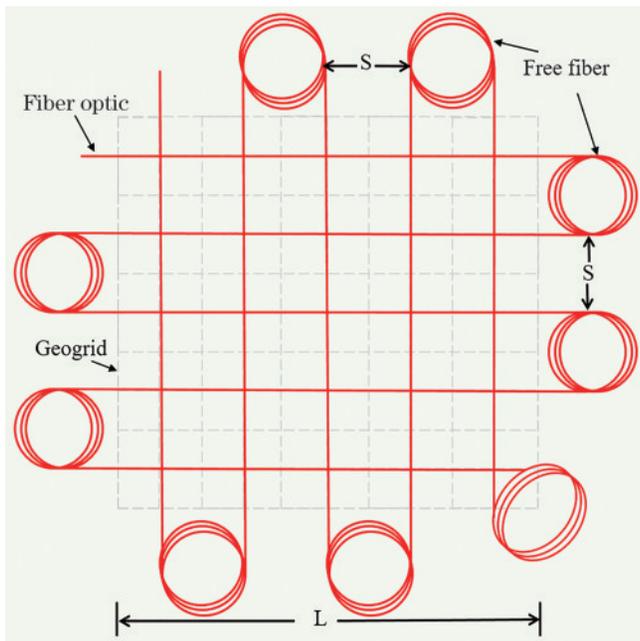


图 11 BOTDR 温补光纤布设^[40]

Fig. 11 BOTDR temperature-compensating fiber optic layout^[40]

3.2 岩土体变形计算方法

岩土体变形方式主要分为均匀变形和非均匀变形,分布式光纤感测技术的监测结果主要体现在光纤沿线的应变分布中。对于以均匀变形为主的岩土体变形监测,通常采用下式进行变形值计算,

$$\delta = \epsilon d, \quad (7)$$

式中: ϵ 为光纤应变值; d 为光纤应变段长度; δ 为待测段变形值。目前,根据光缆封装工艺的不同,应变测试范围存在一定的差异,通常为 $\pm 1.5\%$ 。岩土体变形的光纤监测精度可达 $1 \mu\epsilon$,采用 BOTDR 技术的最大监测长度为 80 km,空间分辨率 0.5 m, BOTDA 技术的最大监测长度 30 km,空间分辨率 0.02 m。

对于非均匀变形的岩土体变形监测,目前现实工程中多采用定点光纤法,其定点距离可结合具体的工程条件和监测目标进行加工设计,监测时光纤中两定点间测得的变形被近似作为均匀变形进行分析,如在地面沉降与矿山煤层覆岩变形监测中,通常采用下式进行变形计算^[41],

$$\Delta L = \int_{z_1}^{z_2} \epsilon(z) dz, \quad (8)$$

式中: ΔL 表示 $z_1 \sim z_2$ 的变形量; z_1 和 z_2 表示光纤长度方向的距离; $\epsilon(z)$ 表示光缆 z 处的应变值。针对线性构筑物,如隧道施工和运行期产生的整体性非均匀沉降,其沉降变形值可参照挠度计算方法近似确定,表示为

$$y = \iint \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{d} dx dy, \quad (9)$$

式中: ϵ_1 和 ϵ_2 为平行布设于线性构筑物顶部与底部监测光纤测得的应变; d 为顶部与底部光纤的垂向距离。同时,在实际工程监测过程中,结合相关数值模拟技术可进一步实现岩土(地质)体变形的精准计算。具体方法是首先获得光纤的监测数据,其次利用其进行边界条件和阈值设定,最后通过有限元或离散元等数值方法进行计算反演获得线性构筑物的精准变形分布^[42]。

3.3 光纤-岩土体耦合性评价方法

感测光纤与岩土体之间的耦合性直接影响光纤应变数据的质量,进而对监测结果产生显著影响,该问题将直接决定监测结果的可靠性。因此,光纤-岩土体耦合性问题是岩土体变形分布式监测必须解决的关键问

题。近十几年来,国内外学者通过理论计算、拉拔试验和现场实测等方法对光纤-岩土体耦合性能开展了全面研究。李科等^[43]开展了基于DFOS技术的黏性土干缩变形过程试验,验证了DFOS技术应用于土体变形监测的可行性与使用范围,试验发现对于含水率在8%~58%的土体,其变形规律判定是精准的。张丹等^[44]利用FBG技术开展了饱和和膨胀土失水开裂试验研究,发现FBG传感器测得的应变与土体的真实变形存在一定的差异。程刚等^[45]利用BOTDA技术进行了光纤-砂土耦合性能拉拔试验研究,全面分析了两者间的耦合过程及光纤在砂土中的应变分布规律,并将作用过程分为全耦合、半耦合和相对滑动三个阶段,建立了位移关系模型(图12)。Zhang等^[46]通过研制可控围压光缆-岩土体相互作用拉拔试验装置(图13),系统性开展了不同围压下感测光缆与松填砂土、击实砂、黏混合土之间的耦合性,得出了在拉拔状态下光缆-岩土体界面呈现渐进性破坏特征,且与围压水平密切相关的认识。此外,孙义杰等^[47]通过理论建立了待测体表面粘贴光纤法的应变传递模型,并计算得到感测光纤粘贴长度与低感测段距离的关系曲线。上述研究成果为

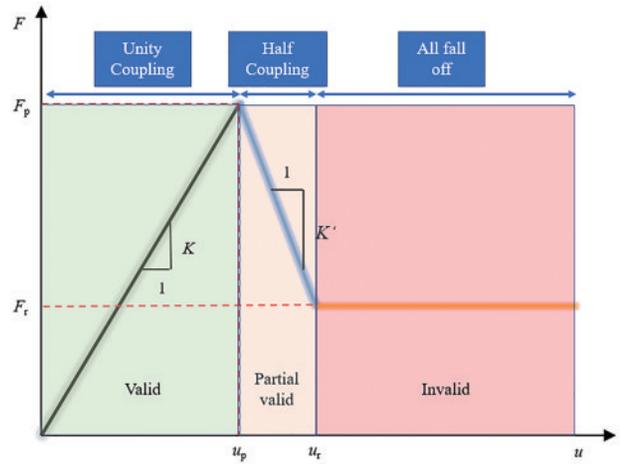


图 12 光纤-砂土耦合作用过程模型^[45]

Fig. 12 Coupling process model of fiber-sand^[45]

科学认识光纤-岩土体作用关系,定量分析两者耦合特征提供了数据支撑,从而为岩土体变形中光纤监测数据的有效性评价提供了依据。随着测试条件与方法的不断改进,光纤与土体之间的协调变形过程将会得到更全面的揭示。

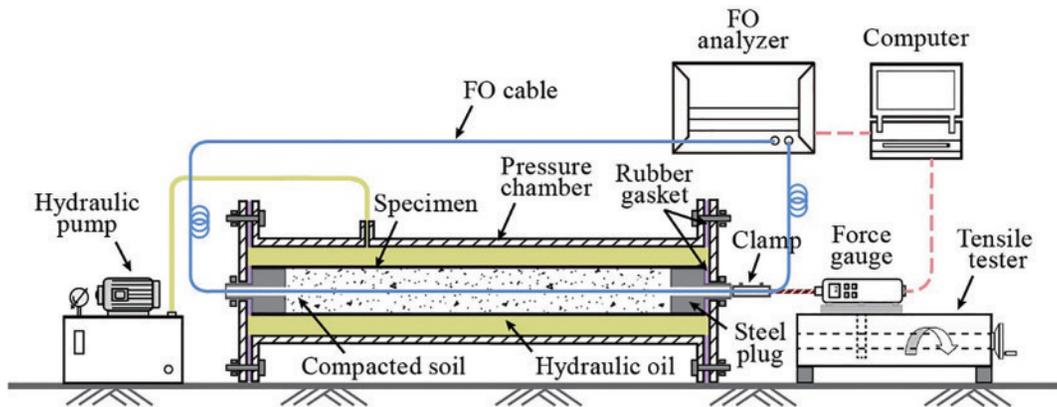


图 13 可控围压光缆-岩土体耦合性试验装置^[46]

Fig. 13 Controlled pressure cable-rock and soil mass coupling test device^[46]

3.4 感测光缆的布设工艺

大量工程实践表明,感测光缆的布设效果对数据质量和可靠性产生直接影响,是决定岩土体变形中光纤监测数据有效性的关键因素之一。根据光缆与被测岩土体的接触方式不同,光缆布设工艺主要分为附着式与埋入式。

所谓附着式是通过粘贴、绑扎等方式将光缆附着于锚杆(索)、工字钢、钢筋笼等构件,或通过预预制桩、抗滑桩等构筑物表面刻槽,或在生产构件时同步将光缆布设于其中,与构件融为一体,图14^[48]为附着式布设工艺。此方法多用于边坡支护和基坑开挖支护的岩土体变形监测中。如对于软硬介质交杂的边坡,采用直接埋设方法会造成光缆出现应变数据不均匀现象,且碎石易造成光缆破断,故多选用附着于杆件等方式进行布设,而对于表面形态较为平整的岩质边坡或已

对坡表进行处理的岩质边坡,可采用刻槽和表面粘贴的方式进行布设。Wang等^[49]采用固定夹具将光缆固定于地铁隧道壁表面,用于监测地铁隧道的变形和沉降。程刚等^[48]将光缆布设于锚杆(索)等支护结构表面,随支护结构一起植入基坑侧壁,用于基坑开挖变形监测。Monsberger等^[50]将光缆粘贴于锚杆上用于监测锚杆支护边坡的稳定性,实现了对不同锚固层受力变形的自动化监测。

所谓埋入式是通过人工开挖横向沟槽与施工垂向钻孔等方式,将感测光缆直接植入岩土体内部,并回填细沙、黏土及细骨料等,待回填稳定后进行光纤监测数据采集,图15为埋入式布设工艺。孙义杰等^[51]在滑坡表面开挖横向沟槽,将光缆沿沟槽中线水平铺设,并选用原状土回填后进行滑坡变形的实时监测。吴静红等^[52]利用导锤将光缆植入地面钻孔,采用BOTDR与

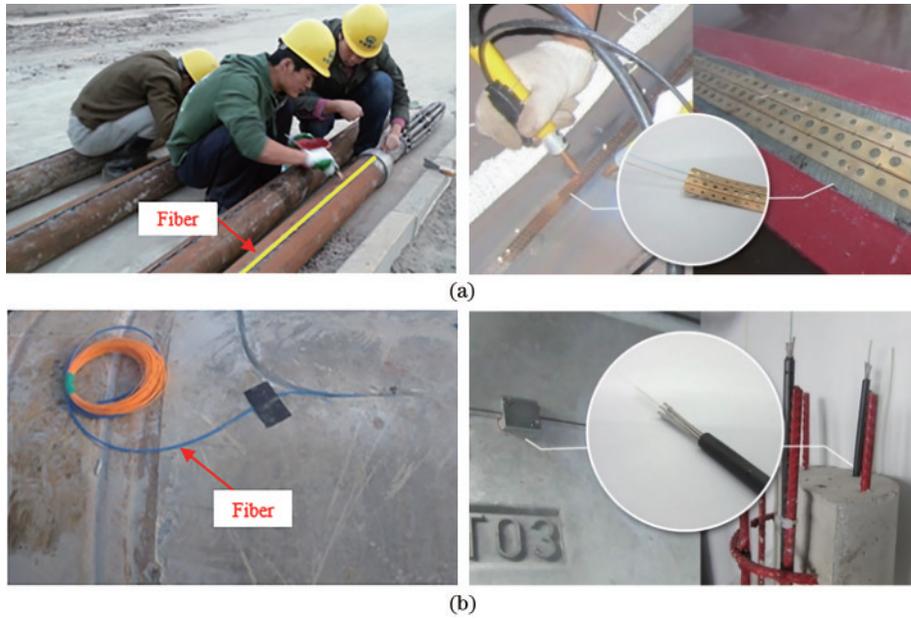


图 14 附着式布设工艺。(a)锚杆及钢结构的粘贴式布设方法;(b)PHC 桩刻槽及混凝土预植入式布设方法^[48]

Fig. 14 Attachment type layout technology. (a) Anchorage bolt and steel structure sticking arrangement method; (b) PHC pile grooves and concrete pre-embedded placement method^[48]

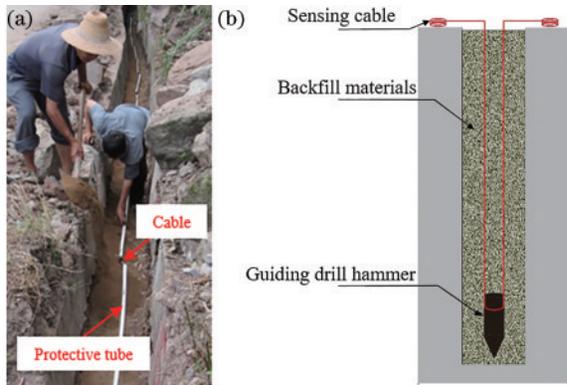


图 15 埋入式布设工艺。(a)开挖沟槽布设法;(b)钻孔植入布设法

Fig. 15 Embedded layout technology. (a) Excavation trench layout method; (b) borehole implantable layout method

FBG 联合的光纤感测技术对苏锡常地层变形进行了长期监测,实现了地面沉降的全过程认知。张平松等^[53]基于地面和井下联合钻孔,利用导锤和 PVC 管将感测光缆布设于钻孔中,实现了煤层开采覆岩变形的全过程监测。

此外,对于准分布式的 FBG 技术,FBG 感知元件均由裸纤经飞秒刻制,存在性能脆弱的不足,直接将其应用于施工岩土体变形监测中往往难以实现,因此必须将其经过封装后再进行现场安装。目前,较为成熟的三类方法为:粘贴封装法、管片式封装法及植入复合材料封装法。粘贴封装法是将裸 FBG 通过黏合剂直接布设于钢管桩、锚杆(索)、管片表面,该封装方法简便易行,适用于规则结构体的变形监测。管片式封装法是先裸 FBG 布设于棒、网、片等附着材料上,再采用流程化封装工艺制作成标准传感器,这是当前最为

成熟的 FBG 传感器封装方法,如将该方法制作的 FBG 传感器预先埋入隧道衬砌和围岩土体中,则可实现隧道支护体变形的实时监测。植入复合材料封装法是直接将裸 FBG 植入碳纤维加筋或玻璃纤维加筋等复合材料内部,形成智能杆件,替代传统支护杆件,由于该方法消除了光纤和粘贴层间的界面效应,因此测量值更加逼近真实结果^[54]。

4 光纤感测技术在岩土体变形监测中的典型应用

4.1 边坡工程

边坡工程大都位于地质条件复杂区域,以库岸型边坡尤甚。在强降雨、地震等因素的作用下,诱发滑坡、泥石流等地质灾害的风险倍增。因此,对高速公路、住宅区、水利市政等设施临近的高危边坡群实施长期实时监测具有重要的防灾减灾意义,研发一套精度高、稳定可靠的实时边坡监测系统,不仅可实现边坡工程的实时监测预警,还可揭示不同类型边坡变形失稳机理,为评估边坡安全性和编制加固方案提供依据^[55]。国内外学者利用光纤感测技术对边坡工程开展了全面的室内外试验研究^[56]。图 16^[57]为基于光纤感测技术的边坡工程监测系统。

Zhu 等^[58]研发了基于光纤监测的边坡应变场可视化系统,对边坡应变场监测数据进行了可视化展示,并开展了一系列的室内边坡模型试验研究,获得了坡体不同位置和深度的变形监测数据,解决了边坡内部变形监测难题,实现了从边坡的整体结构进行层级划分,为全面掌握边坡的受力变形特征及时空破坏规律提供了重要参考。李晴文等^[59]利用熵权法,基于改进的变

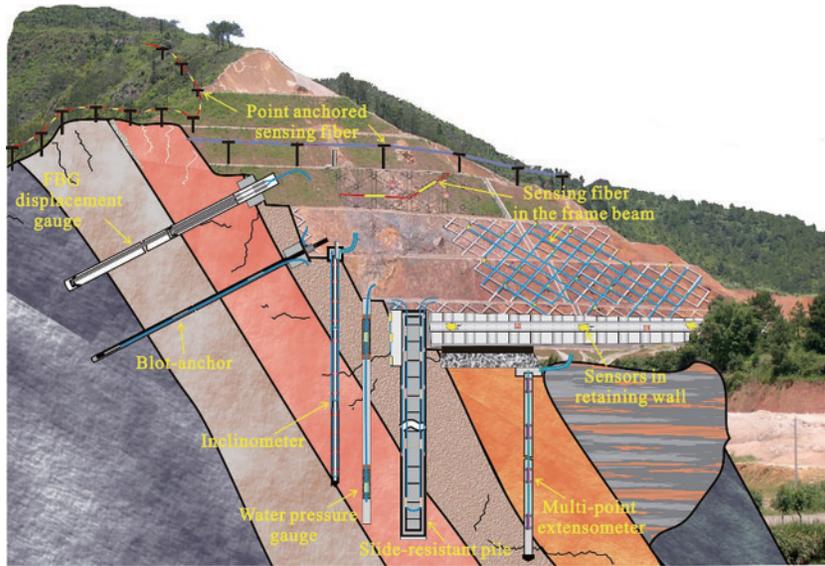


图 16 基于光纤感测技术的边坡工程监测系统^[57]

Fig. 16 Slope engineering monitoring system based on fiber optic sensing technology^[57]

权缓冲模型 NGM(1, 1, k, c) 和 PSO-SVR 模型建立了一种优化组合模型(图 17), 提升了边坡光纤监测数据信息的有效性及预测结果的可靠性。Zhang 等^[60]利用 BOTDR 和 FBG 的融合技术进行了滑坡全面监测研究, 首先通过 BOTDR 技术(应变测量精度 30 $\mu\epsilon$ 、监测长度 80 km、空间分辨率 0.5 m)获取完整滑坡体的宏观信息, 其次根据宏观信息定位出关键监测位置, 进

而通过 FBG 技术(应变测量精度 1 $\mu\epsilon$ 、监测长度为实际串联长度)对关键位置的变形过程进行加密监测, 实现了大范围、分布式与高精度的互补, 从而实现了点-线-面一体化的滑坡实时精准监测, 相关成果在三峡马家沟滑坡监测中取得了成功应用, 两种技术的融合为光纤感测技术在滑坡监测领域的应用提供了一种新思路。

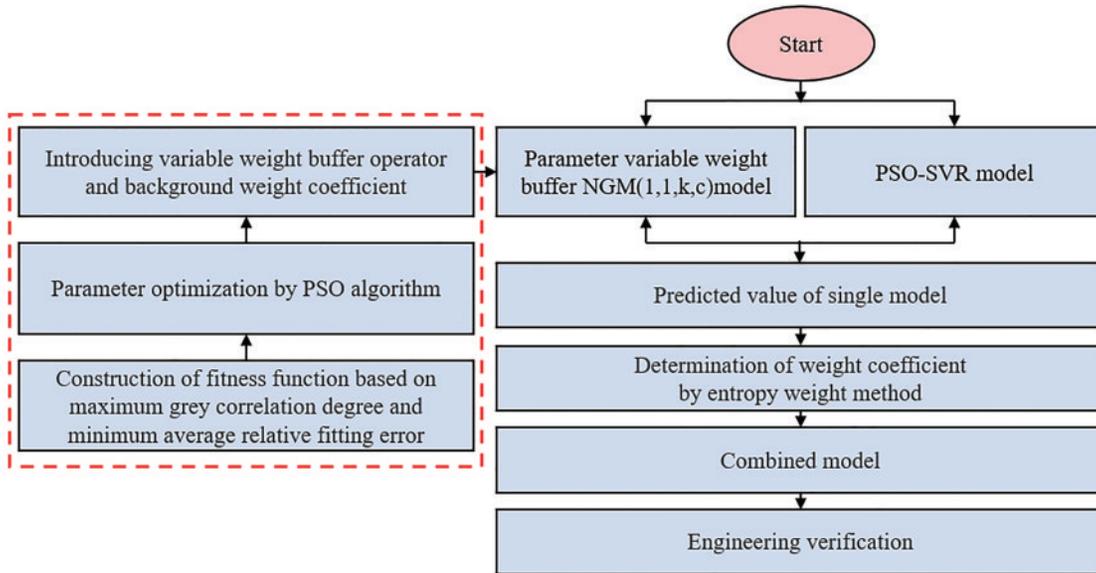


图 17 组合预测模型流程图^[59]

Fig. 17 Flow chart of combined prediction model^[59]

当然, 在实际边坡工程应用中, 受限于现场监测条件, 如何快速有效地完成光缆布设与监测系统搭建, 并保证系统在工程施工和运行过程中能长期正常工作是开展边坡工程光纤监测的关键所在。

4.2 水利工程

在水利工程中, 坝体坝基的变形特征是评价大坝

稳定性的核心因素, 因此开展坝体坝基全覆盖的变形监测对于精准掌控大坝运行状态和稳定性预测评价均具有重要意义。Zhu 等^[61]设计了微型杆式 FBG 传感器, 并应用于大坝变形监测模型试验中, 其测试原理为: 当布设有 FBG 的杆件埋入坝体中, 此杆件即可被视为底部固定的弹性梁, 当杆件由于模型内部滑移

产生纵向或横向变形时,便随之引起杆件表面的 FBG 产生拉压应变,从而实现了大坝内部变形的分布式监测。崔何亮^[62]基于 BOTDR/A(应变测量精度为 $15 \mu\epsilon$ 、监测长度为 30 km、空间分辨率为 0.02 m)技术对水电工程结构进行监测研究,提出了高拱坝上下游坝面、高面板堆石坝变形和裂缝监测等几类新型水电工程结构的应变监测方案,并对电站厂房内的保压蜗

壳进行了实时监测,获得了连续性、全断面的变化数据,展示了 BOTDR/A 应用于水利结构的突出优势,图 18^[62]为蜗壳光纤布设方案。包腾飞等^[63]基于 OTDR 技术,利用塑料光纤开展了大体积浇筑混凝土的变形裂缝监测,系统分析了单条光纤监测多条结构裂隙的性能特征,为塑料光纤复用评价提供了重要参考依据。

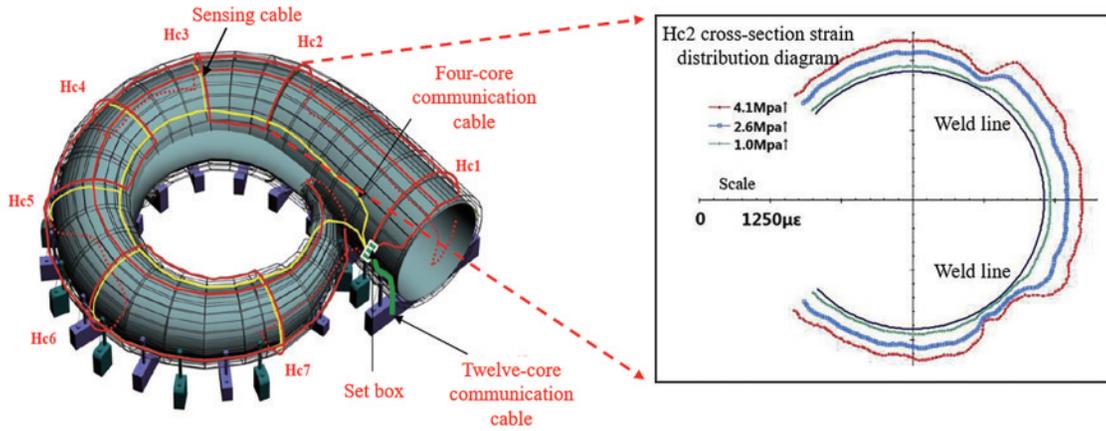


图 18 蜗壳光纤布设方案^[62]

Fig. 18 Volute fiber optic layout scheme^[62]

4.3 隧道和洞室工程

在隧道和洞室工程中,因特定的地质条件和自身结构特点,往往表现出规律性的变形破坏模式,如果可预先采用长距离、大范围分布式监测技术掌握其宏观变形破坏规律,进而有针对性地选择高精度高分辨率的准分布式监测方法对危险区域进行重点监测,则不仅大大提高了监测效率和安全性,而且极大地降低了监测成本。

Gómez 等^[64]利用分布式光纤感测技术,监测巴塞罗那 TMB L-9 地铁隧道附近施工活动对隧道衬砌结构健

康的影响,通过对关键断面连续多点的应变监测,得出了附近施工活动仅对衬砌应力产生轻微影响,隧道安全性得到保证的结论。但同时提出了需要通过制定标准化指南来确保各光纤传感器成功的部署,主要包括光纤与结构的耦合方式、温度对读数的影响及异常数据的后处理等。图 19^[65]为 DFOS 技术在地铁隧道工程中的应用示例。王兴^[66]融合 FBG 和 BOFDA(应变测量精度为 $1 \mu\epsilon$ 、监测长度为 50 km、空间分辨率为 0.2 m)两种光纤感测技术设计出监测盾构隧道的布设方案,并成功研发了基于 DFOS 技术的苏州地铁盾构隧道监

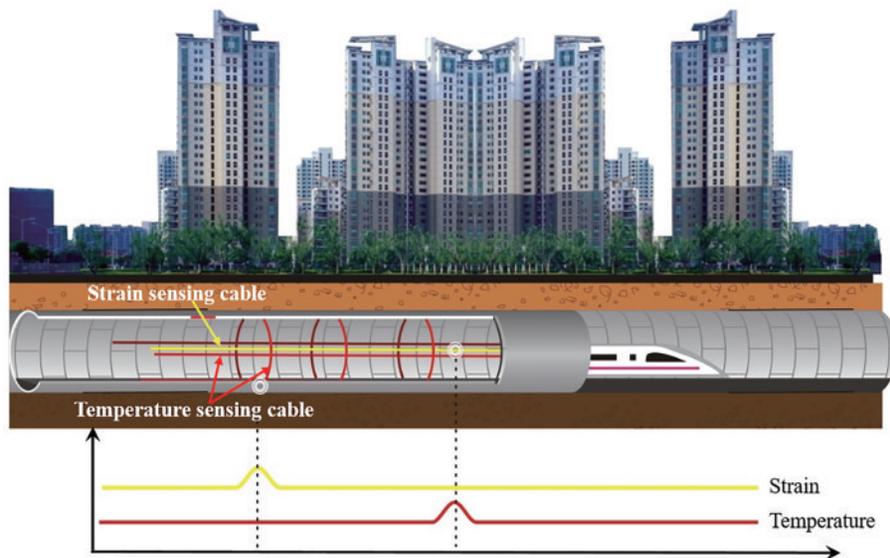


图 19 光纤感测在隧道中的实际应用^[65]

Fig. 19 Practical application of fiber optic sensing in tunnel^[65]

测系统,该系统实现了隧道结构受力形变、上覆岩土体沉降与水平位移、地下水位及周围环境的全方位变形监测(图 20)。张宇等^[67]基于 FBG 技术,对白鹤滩水电站主厂房洞室开挖过程中的围岩变形进行监测,实现了孔深 14 m 处围岩应变 $-43.94\sim 896.85\ \mu\epsilon$ 的监测,并将其与常规的多点变位计数据进行对比,计算得出一致性系数分别为 0.92 和 0.94,获得了洞室围岩时空变形规律和演化特征。然而在现场试验中发现 FBG 传感器易受施工振动影响,且伴随着监测周期的增加,有效数据不断减小。因此,如何保证 FBG 传感器的抗震性与数据持久性是其在洞室工程中应用的关键所在。

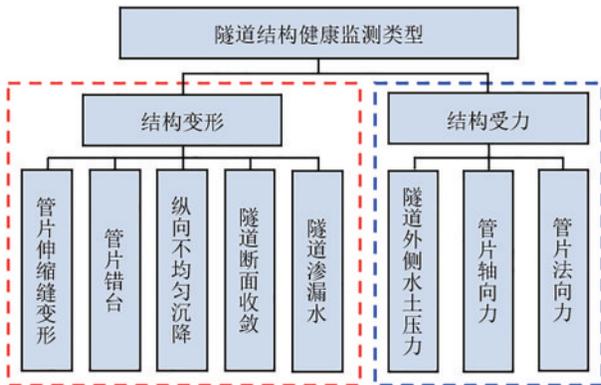


图 20 盾构隧道监测类型^[66]

Fig. 20 Monitoring type of shield tunnel^[66]

4.4 地面沉降与塌陷

随着人类工程经济活动的迅猛发展,特别是地下水资源的过度开采,在自然和人为因素的共同作用下,

地面沉降与塌陷现象的发生频率和影响范围与日俱增。根据国土部门有关统计,截至 2016 年,我国遭受不同程度地面沉降灾害影响的的城市已逾百,其中 9 个城市的最大沉降量超过 50 mm,地面沉降已成为我国当前城市发展面临的 5 大地质问题之一^[68]。相较于地面沉降,地面塌陷往往具有突发性,一旦发生将对城镇建筑设施和人民生命财产造成极大威胁,同时也对矿山安全开采等地下工程造成极为不利的影

响。施斌等^[69]采用自主创新的联合钻孔全断面 DFOS 技术,对苏州盛泽地面沉降进行精细化监测(应变测量精度为 $1\ \mu\epsilon$ 、空间分辨率为 0.5 m),实现了地面沉降过程中的应力场、应变场、地温场和水分场等多场多参量的数据获取,为地面沉降的防灾减灾提供了一种创新技术。卢毅等^[70]利用 BOFDA 技术开展了地面塌陷的模型试验研究,对不同类型和厚度的土体在塌陷过程中的变形特征进行监测,捕获了地面塌陷的发生发展全过程及塌陷变形规律,为地面塌陷的防治提供了一定的参考依据。徐骏等^[71]基于分布式光纤振动技术,采用分层布设方式将振动传感器布设于岩溶土洞的上部位置,构建了路基塌陷分布式监测系统,实时采集岩溶土洞演化过程产生的振动信号(图 21)。试验过程中,监测系统实现了岩溶土洞塌陷振动扰动信息的实时获取,并可对塌陷位置及影响范围进行精准定位。受限于感测光缆的量程和敏感性,如何通过增加光缆护套强度和采用定点方式外,仍需要通过大量的室内外试验进行攻关研究。

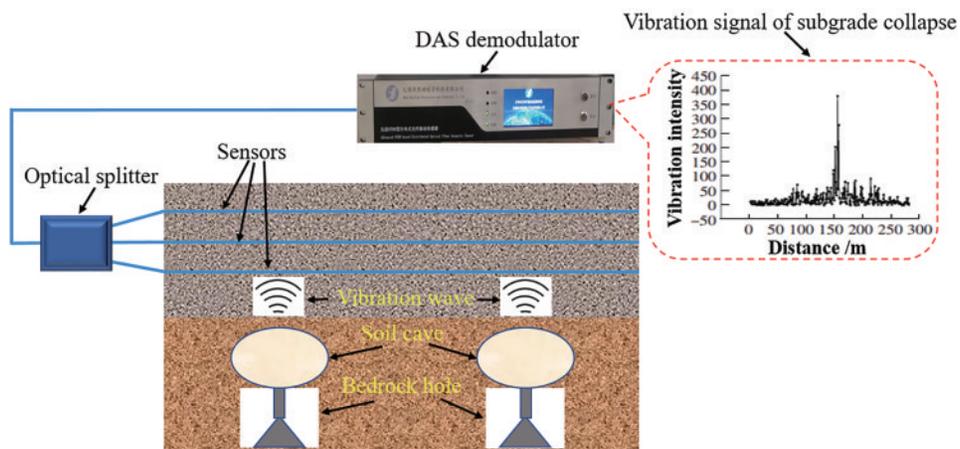


图 21 路基塌陷监测^[71]

Fig. 21 Subgrade collapse monitoring^[71]

4.5 管道工程

管道作为一种重要的气(液)体运输通道,为调节资源配置做出积极贡献,尤其是地下管线被称为城市运行的“生命线”。因此,为了确保运输过程的安全性,对管道结构状态进行实时监测是一项安全“必修课”。与其他基础工程相比,DFOS 技术在管道工程安全监

测中的应用还相对较少,目前该技术在此领域的应用多集中于管道泄漏监测,主要是通过管道内外表面粘贴或制作管道时预先植入感测光纤等方法进行管道运行状态的实时监测。

吴文婧等^[72]综合运用有限元数值计算和模型试验测试,提出了一种用于管道结构状态的感知方法。在

管道的外表面布设横向和环向的感测光纤,当管道运行过程中某处产生裂纹或发生泄漏时,管道内部压力会迅速发生改变,随之引起横向和环向感测光纤产生应变变化,通过对这种变化进行处理分析,进而可识别出管道的泄漏位置。图 22^[72]为管道结构状态监测与评价流程。朱鸿鹄等^[73]基于 FBG 和 BOTDR 技术对地面塌陷过程中的管道受力特征进行了分析研究,建立了光纤应变数据与地面沉降变形之间的数学关系模型,并通过对分析验证了理论值与实测值具有良好的一致性,同时利用粒子图像测速(PIV)技术得

到了管道周边土体的变形大小与过程,为开展地下管道的监测预警和安全评估提供了一个新思路。图 23^[74]为埋地管道光纤监测布设方案。Zhang 等^[74]采用分布式光纤传感器和点式电阻应变计对长输管道的变形进行了实时监测,建立了管道的有限元模型和 PVC 模型,利用分布式应变数据和离散应变数据进行管道位移计算,获得了管道位移的测量精度与测点数量有关的认知,即测点越多,位移的测量精度越高,充分说明了分布式光纤感测技术可更好地应用于管道变形监测。

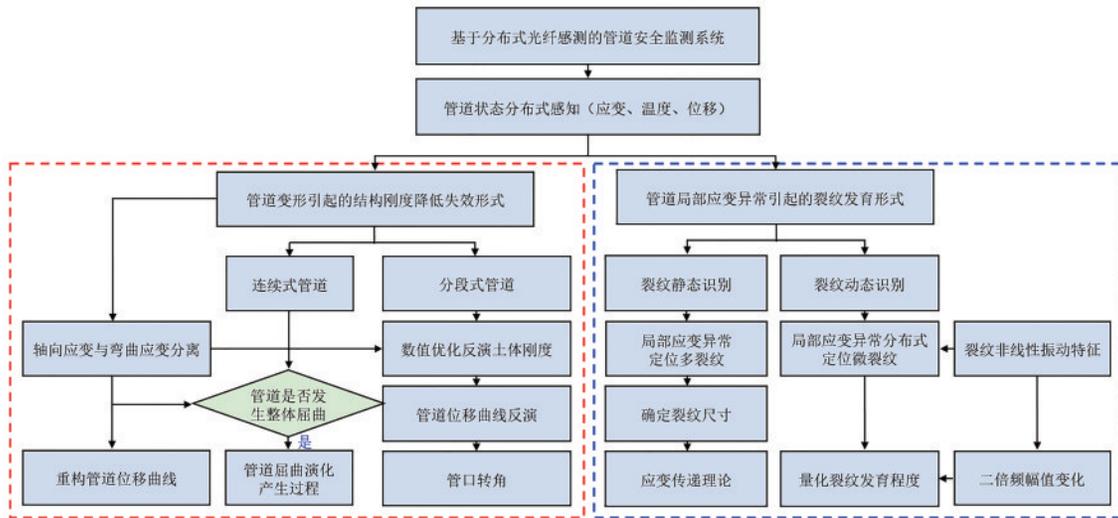


图 22 管道结构状态监测与评价流程^[72]

Fig. 22 Pipeline structure state monitoring and evaluation process^[72]

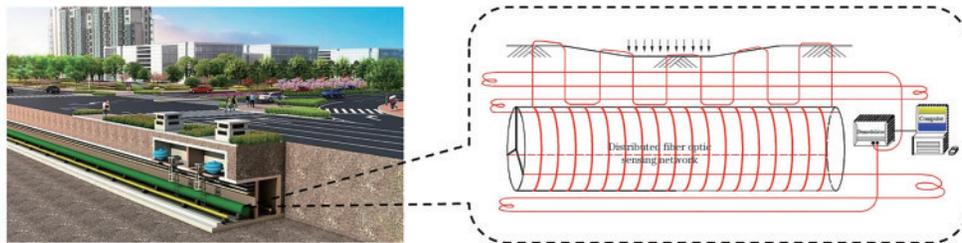


图 23 埋地管道光纤监测布设方案^[74]

Fig. 23 Fiber optic monitoring layout scheme for buried pipeline^[74]

4.6 铁路工程

安全、平稳、高速的运行状态是保障铁路工程健康发展的基础,然而铁路路基的精准控制与稳定性评价作为核心要素,是整个工程的关键所在。伴随着地下空间的不断开发和新建铁路的日益增多,既有铁路路基产生沉降、隆起、水平位移等变形,对路基的稳定性和运行安全造成了严重影响。因此,建立一套科学合理、安全高效的路基远程监测系统,对铁路工程变形进行全生命周期分布式监测,已成为铁路现代化发展的重要标志。

Minardo 等^[75]利用受激布里渊散射技术,将感测光纤沿轨道或粘贴于铁路石拱桥的表面进行变形监

测,并开展应变动态测量。通过监测数据可以确定列车运行条件和路基结构对列车通过的响应,为评估路基完整性、耐久性和可靠性,以及确保最佳维护和安全运行计划提供技术参考。刘大玲等^[76]利用 FBG 技术建立了高铁轨道监测系统,并构建了轨道状态神经网络预测模型,实现了预测数据误差小于 7%,因此预测模型基本上满足了应用要求。

高速铁路的实时性预警,为高铁轨道检修提供指导。张翠等^[77]利用全同弱光纤 Bragg 光栅阵列(WFBG)对铁路运行产生的轨道应变进行实时监测,通过降低损耗工艺进行了传感器封装,传感器的敏感性和重复性均得到大幅度提升,灵敏度达 3.4 pm/με,

线性度达 0.99782, 迟滞误差达 0.8%, 满足了现代化铁路运行与维护的实际需要。然而, 随着 DAS 技术在振动监测领域优势的日益凸显, 苏靖棋^[78] 尝试将其应用于铁路路基变形实测中, 实现了铁路路基与轨道健康状态的实时监测。未来, 融合 DAS 与 AI 技术进行铁路路基监测(图 24), 将极大地提升铁路工程监测的智能化和精准化水平。

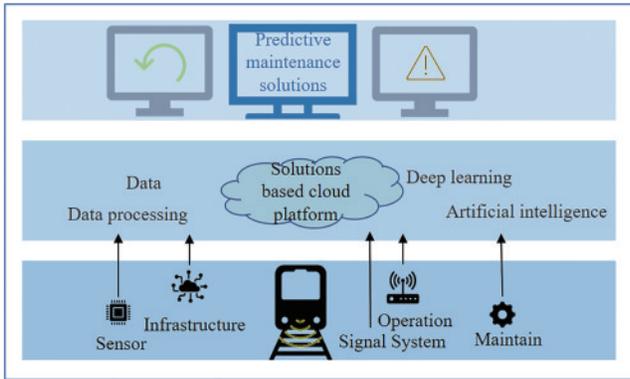


图 24 DAS 与 AI 融合的铁路工程监测方案^[78]

Fig. 24 Railway engineering monitoring scheme integrating DAS and AI^[78]

5 结束语

5.1 结论

岩土体变形失稳是各类工程灾害的直接诱因, 一旦发生往往造成难以弥补的严重损失, 因而对岩土体变形进行有效和实时监测具有重要的意义。本文对光纤感测技术在岩土体变形监测中的应用现状进行了概述性总结, 介绍了几种典型的分布式光纤感测技术原理及适用场景, 重点讨论了光纤感测技术应用于岩土体变形监测的几个关键问题, 系统性分析了光纤感测技术在岩土体变形监测中的典型应用, 得到如下结论:

1) 在岩土体变形监测方面, 光纤感测技术相比于传统技术具有抗电磁干扰、耐腐蚀、灵敏度高、精度高和分布式监测等优点, 且可实现实时自动化远程监测。

2) FBG 技术测量精度高, 系统测量时间短, 可实现准分布式测量, 但由于无法实现全分布式, 存在一定的监测盲区, 故多用于岩土工程关键部位的变形监测, 且需要根据具体的监测环境与对象开展传感器的封装保护作业。

3) OTDR 技术主要用于岩土体局部变形的测量, 存在空间分辨率低、精度差等缺点。经改进的 V-OTDR 技术空间分辨率达到 0.1 m, 可实现大弯折和损伤点检测, 但存在应变损失过大的不足。BOTDR 技术精度达 $\pm 0.003\%$, 优点是单端测量, 即使光纤断裂, 仍可获取断点至测站间的光纤数据。但受限于测量精度, 目前尚无法应用于高精度变形监测。BOTDA 分辨率和精度均优于 BOTDR, 然而存在需

形成测试回路的不足, 一旦回路中产生断点, 极易造成系统瘫痪, 严重影响工程应用, 因而常用于室内精细化试验。BOFDA 理论分辨率为 0.001 m, 且对测试环境要求不高。在同等监测条件下, BOFDA 的稳定性和信噪比均明显优于 BOTDA。

4) DAS 技术是基于瑞利光散射的分布式声学感测, 将光纤沿线的振动声波信号进行解调, 实现外界物理量的定量测量。其不仅拥有 DFOS 技术的各项优点, 而且可实现光纤沿线动态应变的长距离、分布式、实时性监测, 已被应用于地震观测和城市地下结构探测。

5) 目前 FBG 技术温补方法有双光栅法、双参量法、补偿性封装法等, 应用中以双光栅法为主。全分布式温补方法有参考光纤法、光纤温度变化传感器法、双参量矩阵法、Landau-Placzek 比率法、联合拉曼-布里渊散射法等, 基于方法便捷性, 应用中大都采用参考光纤法。通过对比分析不同条件下的分布式光纤耦合性试验结果, 获得了对光纤与岩土体间应变传递规律及表面粘贴光纤应变传递模型的新认知, 为科学认识光纤-岩土体作用关系, 定量评价光纤监测数据的有效性提供依据。从布置方法、适用条件及监测对象等方面对附着式与埋入式布置工艺进行了系统性分析, 并介绍了 FBG 传感器的封装与安装工艺。

6) 介绍了光纤感测技术在边坡、水利、隧道、管道及铁路等工程中岩土体变形监测方面的典型应用, 以及在地面沉降与塌陷方面的应用现状与改进思路, 提出了通过融合 DAS 与 AI 技术的监测理念, 以提升未来岩土体变形监测的智能化和精准化水平。

5.2 展望

由于岩土体结构构造复杂、空间变异性大、影响因素多, 且部分建设工程隐蔽性强、人为干预性多、多场作用效应叠加。因此, 岩土体变形分布式光纤监测在方法技术层面上仍然面临诸多亟需攻破的难题:

1) 在监测技术的改进与选用方面, 可根据同一监测目标体, 采用数据融合技术, 校正和降低不同光纤感测技术的测量误差, 如采用 FBG 与 BOTDR 融合技术开展长距离、大范围的宏观定位与精准辨识, 从而解决数据源不相协同与测量精度不足问题。

2) 在传感器的研发与安装工艺方面, 研发出适用于不同变形测量范围和适用环境的传感器, 尤其是岩土体大变形监测传感器和极端恶劣环境下可正常运行传感器的研制。在考虑待测体变形模式和温度效应的基础上, 分类选用相应的光纤传感器与安装工艺, 并结合现场安装条件进行工艺改进。如在基坑工程支护结构监测方面, 应结合地质条件及排桩、锚杆(索)的设计密度进行精准监测, 对于开槽布置的管桩, 在管桩埋入土体时, 应将竖向布置光纤垂直于基坑侧壁; 对于支护锚杆, 则可通过焊接辅筋, 并在其侧方沿水平方向布置光纤, 以保护光纤在锚杆入土时不被损坏。

3) 在监测数据智能处理方面,由于部分岩土体变形监测技术已实现全实时监测,如何对采集的海量数据进行智能处理,并快速精准地从中获取岩土体变形失稳的关键信息已成为监测技术发展亟需突破的瓶颈。可借助人工智能算法对海量数据进行清洗提取,采用聚类、模糊算法、关联规则等进行数据挖掘,并结合机器学习建立岩土体变形趋势预测模型,这将是未来岩土(地质)工程监测预警的一个重要研究方向。

4) 在风险控制与应急处置方面,监测的最终目的是工程的防灾减灾,因此应将岩土体变形监测数据与风险控制有机结合,打破数据单一化表示的桎梏,以工程监测规范为基础,结合工程风险等级划分和监测数据阈值进行预警等级设定。同时,应加强岩土体变形常规监测与应急监测的互补融合,进一步加强光纤感测技术在岩土体变形失稳应急处置中的关键作用,打通监测-预警-响应-处置流程,为筑牢灾害防控的安全屏障打下坚实基础。

参 考 文 献

- [1] 施斌, 徐学军, 王镒, 等. 隧道健康诊断 BOTDR 分布式光纤应变监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2622-2628.
Shi B, Xu X J, Wang D, et al. Study on BOTDR-based distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2622-2628.
- [2] Li Z X, Hou G Y, Hu T, et al. Deformation behavior monitoring of a tunnel in its temporary shoring demolishing process using optical fiber sensing technology[J]. Measurement, 2021, 176: 109170.
- [3] 王凡, 赵亮, 吴晓东, 等. 基于 CT 及数字图像相关法的混凝土变形场测量分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 21-28.
Wang F, Zhao L, Wu X D, et al. Measurement and analysis of concrete deformation field based on CT and digital image correlation method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 21-28.
- [4] 施斌. 论大地感知系统与大地感知工程[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 582-591.
Shi B. On the ground sensing system and ground sensing engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 582-591.
- [5] 王德洋, 朱鸿鹄, 朱泳, 等. 薄壁圆环分布式光纤测力传感器的性能[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 54-59.
Wang D Y, Zhu H H, Zhu Y, et al. Performances of distributed fiber optic strain sensor with thin-walled ring[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 54-59.
- [6] 施斌, 张丹, 朱鸿鹄. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
Shi B, Zhang D, Zhu H H. Distributed fiber optic sensing for geoenvironment monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [7] 朱鸿鹄, 施斌, 张诚成. 地质和岩土工程光电传感监测研究新进展——第六届 OSMG 国际论坛综述[J]. 工程地质学报, 2020, 28(1): 178-188.
Zhu H H, Shi B, Zhang C C. Current progress and trends in opto-electronic sensor-based monitoring in geoenvironment: a summary of 6th OSMG-2017[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(1): 178-188.
- [8] Soga K. Understanding the real performance of geotechnical structures using an innovative fibre optic distributed strain measurement technology[J]. Rivista Italiana di Geotecnica, 2014, 48(4): 7-48.
- [9] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. Sensors, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [10] Ansari F. Practical implementation of optical fiber sensors in civil structural health monitoring[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007, 18(8): 879-889.
- [11] 吴涵, 朱鸿鹄, 周谷宇, 等. 考虑变形协调的土体剪切位移分布式测试研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 716-724.
Wu H, Zhu H H, Zhou G Y, et al. Experimental study on distributed monitoring of soil shear displacement considering deformation compatibility[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(4): 716-724.
- [12] Wu Z S, Zhang H, Yang C Q. Development and performance evaluation of non-slippage optical fiber as Brillouin scattering-based distributed sensors[J]. Structural Health Monitoring, 2010, 9(5): 413-431.
- [13] Dong Y K, Chen X, Liu E H, et al. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 7810-7815.
- [14] 柴敬, 薛子武, 郭瑞, 等. 采场覆岩垮落形态与演化的分布式光纤检测试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(6): 1185-1192.
Chai J, Xue Z W, Guo R, et al. Experimental study of overlying mine strata collapse and its evolution by a distributed optical fiber system[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(6): 1185-1192.
- [15] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.
- [16] 贾书丽. FBG 解调系统与 OTDR 组网关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012: 9-13.
Jia S L. Research on the key technologies of FBG demodulation system and OTDR networking[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012: 9-13.
- [17] 朱鸿鹄, 殷建华, 靳伟, 等. 基于光纤光栅传感技术的地基基础健康监测研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 109-115.
Zhu H H, Yin J H, Jin W, et al. Health monitoring of foundations using fiber Bragg grating sensing technology[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6): 109-115.
- [18] 贾立翔. 基于光纤感测技术的岩土工程感知杆件研发

- [D]. 南京: 南京大学, 2017.
- Jia L X. Research on perceived pole of geotechnical engineering based on optical fiber sensing technology[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [19] 黎华. 基于 OTDR 和光功率测试的光纤故障监测应用方法[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(5): 1357-1359.
- Li H. Based on OTDR and light power test of fiber optic fault monitoring application[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(5): 1357-1359.
- [20] Habel W R, Krebber K. Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(3): 268-280.
- [21] Kurashima T, Horiguchi T, Izumita H, et al. Brillouin optical-fiber time domain reflectometry[J]. IEICE Transactions on Communications, 1993, 76: 382-390.
- [22] Sasaki T, Park J, Soga K, et al. Distributed fibre optic strain sensing of an axially deformed well model in the laboratory[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 72: 103028.
- [23] 隋海波, 施斌, 张丹, 等. 边坡工程分布式光纤监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3725-3731.
- Sui H B, Shi B, Zhang D, et al. Study on distributed optical fiber sensor-based monitoring for slope engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3725-3731.
- [24] 史彦新. 分布式光纤应变监测系统研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- Shi Y X. Study for distributed fiber optic strain monitoring system[D]. Beijing: China University of Geosciences, Beijing, 2010.
- [25] Horiguchi T, Tateda M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(8): 1170-1176.
- [26] 隋海波, 施斌, 张丹, 等. 地质和岩土工程光纤传感监测技术综述[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 135-143.
- Sui H B, Shi B, Zhang D, et al. Review on fiber optic sensor-based monitoring techniques for geological and geotechnical engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 135-143.
- [27] Garcus D, Gogolla T, Krebber K, et al. Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis for distributed temperature and strain measurements[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(4): 654-662.
- [28] 程刚. 煤层采动覆岩变形分布式光纤监测关键技术及其应用研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- Cheng G. Research on key technologies and application of distributed fiber optic sensing for overlying rock deformation during coal mining[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.
- [29] 李彦鹏, 李飞, 李建国, 等. DAS 技术在井中地震勘探的应用[J]. 石油物探, 2020, 59(2): 242-249.
- Li Y P, Li F, Li J G, et al. Application of distributed acoustic sensing in borehole seismic exploration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(2): 242-249.
- [30] 蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感技术[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 1-16.
- Cai H W, Ye Q, Wang Z Y, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing technology based on coherent Rayleigh scattering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 1-16.
- [31] 周小慧, 陈伟, 杨江峰, 等. DAS 技术在油气地球物理中的应用综述[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(1): 338-350.
- Zhou X H, Chen W, Yang J F, et al. Application review of DAS technology in oil and gas geophysics[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(1): 338-350.
- [32] 白浪, 郑刚, 郭媛, 等. 高精度调频连续波光纤压力传感器温度特性分析及补偿方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 393-401.
- Bai L, Zheng G, Guo Y, et al. Analysis and compensation method of temperature characteristics of high-precision frequency-modulated continuous wave fiber optic pressure sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 393-401.
- [33] 焦浩然. 地质与岩土工程传感光缆(器)温度效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2019: 2-7.
- Jiao H R. Study on the temperature effects on fiber optic cables (sensors) used for geological and geotechnical monitoring[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019: 2-7.
- [34] 田石柱, 赵雪峰, 欧进萍, 等. 结构健康监测用光纤 Bragg 光栅温度补偿研究[J]. 传感器技术, 2002, 21(12): 8-10.
- Tian S Z, Zhao X F, Ou J P, et al. Research on temperature compensation of fiber Bragg grating for structural health monitoring[J]. Journal of Transducer Technology, 2002, 21(12): 8-10.
- [35] 朱鸿鹄, 殷建华, 洪成雨, 等. 基于光纤传感的边坡工程监测技术[J]. 工程勘察, 2010, 38(3): 6-10.
- Zhu H H, Yin J H, Hong C Y, et al. Fiber optic based monitoring technologies of slope engineering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(3): 6-10.
- [36] 陈敏. 温度自补偿式光纤 Bragg 光栅应变传感器[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010: 9-12.
- Chen M. Temperature self-compensating fiber Bragg grating strain sensor[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010: 9-12.
- [37] Bao X Y, Smith J, Brown A W. Temperature and strain measurements using the power, line-width, shape, and frequency shift of the Brillouin loss spectrum[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4920: 311-322.
- [38] Alahbabi M N, Cho Y, Newson T P. Simultaneous temperature and strain measurement with combined spontaneous Raman and Brillouin scattering[J]. Optics Letters, 2005, 30(11): 1276-1278.
- [39] 张耀, 谭跃虎, 陶西贵, 等. 光纤传感器 FBG 和 BOTDR 应用于结构监测的若干比较研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(4): 465-470.
- Zhang Y, Tan Y H, Tao X G, et al. Research on some aspects of optical fiber sensors FBG and BOTDR applied

- in structural health monitoring[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(4): 465-470.
- [40] Wang B J, Li K, Shi B, et al. Test on application of distributed fiber optic sensing technique into soil slope monitoring[J]. Landslides, 2009, 6(1): 61-68.
- [41] Cheng G, Shi B, Zhu H H, et al. A field study on distributed fiber optic deformation monitoring of overlying strata during coal mining[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(5): 553-562.
- [42] 施斌, 徐洪钟, 张丹, 等. BOTDR 应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 493-499.
- Shi B, Xu H Z, Zhang D, et al. Feasibility study on application of BOTDR to health monitoring for large infrastructure engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 493-499.
- [43] 李科, 施斌, 唐朝生, 等. 黏性土体干缩变形分布式光纤监测试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1781-1785.
- Li K, Shi B, Tang C S, et al. Feasibility research on soil deformation monitoring with distributed optical fiber sensing technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1781-1785.
- [44] 张丹, 徐洪钟, 施斌, 等. 基于 FBG 技术的饱和膨胀土失水致裂过程试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(1): 103-108.
- Zhang D, Xu H Z, Shi B, et al. FBG technology based experimental studies on cracking of expansive soil due to dehydration[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(1): 103-108.
- [45] 程刚, 施斌, 朱鸿鹄, 等. 光纤和砂土界面耦合性能的分式感测试验研究[J]. 高校地质学报, 2019, 25(4): 487-494.
- Cheng G, Shi B, Zhu H H, et al. Experimental study on coupling performance of fiber and sand interface based on distributed sensing[J]. Geological Journal of China Universities, 2019, 25(4): 487-494.
- [46] Zhang C C, Shi B, Gu K, et al. Vertically distributed sensing of deformation using fiber optic sensing[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(21): 11732-11741.
- [47] 孙义杰, 张强, 程刚, 等. 基于光频域反射技术的表面粘贴分布式光纤传感器应变传递特性分析与试验[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 46-52.
- Sun Y J, Zhang Q, Cheng G, et al. Optical frequency domain reflectometry technology based theoretical analysis and experiment on strain transferring of surface-attached optical fiber sensor[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(33): 46-52.
- [48] 程刚, 施斌, 卢毅, 等. 一种基坑锚杆(索)分布式检测方法[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 89-95.
- Cheng G, Shi B, Lu Y, et al. A distributed testing method for foundation anchors[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(4): 89-95.
- [49] Wang X, Shi B, Wei G Q, et al. Monitoring the behavior of segment joints in a shield tunnel using distributed fiber optic sensors[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(1): e2056.
- [50] Monsberger C, Lienhart W, Hirschmüller S, et al. Monitoring of soil nailed slope stabilizations using distributed fiber optic sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10598: 778-789.
- [51] 孙义杰, 张丹, 童恒金, 等. 分布式光纤监测技术在三峡库区马家沟滑坡中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 97-102.
- Sun Y J, Zhang D, Tong H J, et al. Research of distributed fiber optic sensing technology in monitoring of Majiagou landslide of Three Gorges[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 97-102.
- [52] 吴静红, 姜洪涛, 苏晶文, 等. 基于 DFOS 的苏州第四纪沉积层变形及地面沉降监测分析[J]. 工程地质学报, 2016, 24(1): 56-63.
- Wu J H, Jiang H T, Su J W, et al. DFOS-based monitoring on quaternary sediments deformation and land subsidence in Suzhou, China[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(1): 56-63.
- [53] 张平松, 张丹, 孙斌杨, 等. 巷道断面空间岩层变形与破坏演化特征光纤监测研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2): 260-266.
- Zhang P S, Zhang D, Sun B Y, et al. Optical fiber monitoring technology for evolution characteristic of rock stratum deformation and failure in space of mining field [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 260-266.
- [54] 田高洁. 碳纤维增强复合材料中埋入光纤 Bragg 光栅的传感研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
- Tian G J. Study on fiber Bragg grating embedded in carbon fiber composites[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.
- [55] 徐靓, 程刚, 朱鸿鹄. 基于空天地内一体化的滑坡监测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 90-103.
- Xu L, Cheng G, Zhu H H. Research review of landslide monitoring methods based on integration of space-air-ground-interior[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 90-103.
- [56] 朱鸿鹄, 施斌, 严珺凡, 等. 基于分布式光纤应变感测的边坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 821-828.
- Zhu H H, Shi B, Yan J F, et al. Physical model testing of slope stability based on distributed fiber-optic strain sensing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 821-828.
- [57] 孙义杰. 库岸边坡多场光纤监测技术与稳定性评价研究[D]. 南京: 南京大学, 2015: 69-77.
- Sun Y J. Bank slope multi-fields monitoring based on fiber optic sensing technologies and stability evaluation study[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015: 69-77.
- [58] Zhu H H, Ho A N L, Yin J H, et al. An optical fibre monitoring system for evaluating the performance of a soil nailed slope[J]. Smart Structures and Systems, 2012, 9(5): 393-410.
- [59] 李晴文, 裴华富, 宋怀博, 等. 基于熵权法优化组合的 PSO-SVR-NGM 边坡位移预测[J/OL]. 工程地质学报:

- 1-10[2021-05-06]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2021-0036>.
- Li Q W, Pei H F, Song H B, et al. Prediction of slope displacement based on PSO-SVR-NGM combined with entropy weight method[J/OL]. Journal of Engineering Geology: 1-10[2021-05-06]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2021-0036>.
- [60] Zhang L, Shi B, Zhu H H, et al. PSO-SVM-based deep displacement prediction of Majiagou landslide considering the deformation hysteresis effect. Landslides, 2021, 18(1): 179-193.
- [61] Zhu H H, Yin J H, Zhang L, et al. Monitoring internal displacements of a model dam using FBG sensing bars[J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 13(2): 249-261.
- [62] 崔何亮. 布里渊光时域感测技术与水电工程结构监测研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- Cui H L. Research on BOTDA based sensing technology and hydropower structure monitoring[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [63] 包腾飞, 赵津磊, 李润鸣. 基于 POF-OTDR 的混凝土坝裂缝监测复用能力分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(8): 804-809.
- Bao T F, Zhao J L, Li J M. Multiplexing capability analysis of crack monitoring of a concrete dam based on POF-OTDR[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(8): 804-809.
- [64] Gómez J, Casas J R, Villalba S. Structural health monitoring with distributed optical fiber sensors of tunnel lining affected by nearby construction activity[J]. Automation in Construction, 2020, 117: 103261.
- [65] 吴静红, 叶少敏, 张继清, 等. 基于光纤光栅监测技术的京雄高铁大断面隧道结构健康监测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 113-121.
- Wu J H, Ye S M, Zhang J Q, et al. Structural health monitoring of large-section tunnel of Jingxiong high-speed railway based on fiber Bragg grating monitoring technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 113-121.
- [66] 王兴. 盾构隧道变形光纤监测关键技术与应用研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- Wang X. Key technology and application research in shield tunnel deformation monitoring based on fiber optic sensing technologies[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [67] 张宇, 史波, 汤国强. 光纤光栅传感技术在洞室围岩变形监测中的应用[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 126-130.
- Zhang Y, Shi B, Tang G Q. Application of fiber grating sensing technology in deformation monitoring of cavern surrounding rock[J]. Yangtze River, 2019, 50(8): 126-130.
- [68] 金丽华, 岳昊, 武丽梅. 基于 InSAR 技术的城市地面沉降信息统计分析研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(S1): 200-205.
- Jin L H, Yue H, Wu L M. Research on statistical analysis of urban ground subsidence information obtained by InSAR technology[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(S1): 200-205.
- [69] 施斌, 顾凯, 魏广庆, 等. 地面沉降钻孔全断面分布式光纤监测技术[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 356-364.
- Shi B, Gu K, Wei G Q, et al. Full section monitoring of land subsidence borehole using distributed fiber optic sensing techniques[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 356-364.
- [70] 卢毅, 于军, 龚绪龙, 等. 基于 BOFDA 的地面塌陷变形分布式监测模型试验研究[J]. 高校地质学报, 2018, 24(5): 778-786.
- Lu Y, Yu J, Gong X L, et al. Experimental study on distributed monitoring of ground collapse deformation based on BOFDA[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(5): 778-786.
- [71] 徐骏, 何建平, 陈建宁. 路基塌陷分布式光纤振动传感监测技术[J]. 山西建筑, 2015, 41(27): 140-141.
- Xu J, He J P, Chen J N. Collapse monitoring of subgrade based on distributed optical fiber vibration sensing technique[J]. Shanxi Architecture, 2015, 41(27): 140-141.
- [72] 吴文婧. 基于分布式光纤监测的管道结构状态识别方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- Wu W J. Research on pipeline structure state recognition method based on distributed fiber sensing monitoring[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [73] 朱鸿鹄, 王德洋, 王宝军, 等. 基于光纤传感及数字图像测试的管-土相互作用试验研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 317-326.
- Zhu H H, Wang D Y, Wang B J, et al. Experimental study on pipe-soil interaction using fiber optic sensing and digital image analysis[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 317-326.
- [74] Zhang S H, Liu B, He J P. Pipeline deformation monitoring using distributed fiber optical sensor[J]. Measurement, 2019, 133: 208-213.
- [75] Minardo A, Coscetta A, Porcaro G, et al. Structural health monitoring in the railway field by fiber-optic sensors[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2015, 319: 359-363.
- [76] 刘大玲, 黄小钢. 高速铁路无砟轨道系统状态监测及预防性维修[J]. 中国机械工程, 2019, 30(3): 349-353.
- Liu D L, Huang X G. Condition monitoring and preventive maintenance of ballastless track systems for high-speed railways[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(3): 349-353.
- [77] 张翠, 陶渊, 童杏林, 等. 基于全同弱光纤 Bragg 光栅阵列的铁路轨道监测系统[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 379-385.
- Zhang C, Tao Y, Tong X L, et al. Monitoring system of railway track based on identity weak fiber Bragg grating array[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(6): 379-385.
- [78] 苏靖棋. 分布式声学传感技术在状态修中的应用[J]. 现代城市轨道交通, 2019(4): 87-91.
- Su J Q. Acoustic sensing technology of distributed type supporting condition-based maintenance strategy[J]. Modern Urban Transit, 2019(4): 87-91.