

光纤传感技术在岩土工程安全监测中的应用

高 垠, 马玉华, 李克绵

(中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130061)

摘要: 详细介绍了光纤光栅传感技术及其特点、光纤 FBG 光栅传感器技术特性指标及选择, 给出了光纤传感技术在国内岩土工程安全监测中成功应用的实例。研究结果为从事岩土工程安全监测设计、现场监测的人员提供参考和借鉴。

关键词: 光纤光栅; 传感器; 岩土工程; 安全监测

中图分类号: TN818 + TU454

文献标识码: B

文章编号: 1000-0860(2013)02-0117-06

Application of optical fiber sensing technology to safety monitoring of geotechnical engineering

GAO Yin, MA Yuhua, LI Kemian

(China Water Northeastern Investigation Design and Research Co., Ltd., Changchun 130061, Jilin, China)

Abstract: The optical Fiber Grating sensing technology and its characteristics as well as the technical indexes of FBG (Fiber Bragg Gratings) sensor and its selection are described in detail herein along with the introduction made on the successful cases of the application of this technology to the safety monitoring of geotechnical engineering construction projects in China. The study result can provide some valuable references for the persons engaged in the design of safety monitoring of geotechnical engineering and the relevant in-situ monitoring.

Key words: optical fiber grating; sensor; geotechnical engineering; safety monitoring

1 引言

光纤传感技术始于 20 世纪 70 年代中期, 最早应用于军事方面。如美国海军用光纤传感技术对舰船潜艇结构状态进行监控, 并研究开发超灵敏的光纤布喇格光栅声纳系统; 美国宇航局用光纤传感技术对飞行器材料性能和结构状态进行监控并优化。到了上世纪末, 光纤传感技术已拓展到多个领域, 以其独特的传感方式在国防、航空、石油、建筑、抗震等方面得到了应用。

美国和加拿大是研究光纤传感器起步最早和水平最高的国家。日本和西欧各国也高度重视并投入大量经费开展光纤传感器的研究与开发。国外对光纤光栅传感器的研究已经基本实现了其商品化和工程化。我国在 70 年代末开始对光纤传感技术进行研究, 起步时间与国际相差不远。目前, 相关研究

的单位已有上百家, 他们在光纤测量温度、位移、压力、流量、液位、振动等物理量进行了大量的研究, 取得了上百项科研成果, 其中相当数量的研究成果具有很高的实用价值, 有的达到世界先进水平, 部分已经转化为产品, 如上海紫珊光电技术有限公司, 北京路科锐威科技有限公司、哈尔滨工业大学等。

2 光纤传感技术

光纤易受到外界环境(温度、压力等)的影响, 从而导致光在传输过程中传输光的强度、相位、频率、偏振态等光波量发生变化, 通过监测这些量的变化可以获得相应的物理量。根据光纤这一特点,

收稿日期: 2012-08-13

作者简介: 高 垠(1963—), 男, 高级工程师, 副总工。

利用紫外激光直接写入法在光纤的纤芯内形成空间相位光栅,也就是在纤芯内形成一个窄带的滤光器或反射镜,其纤芯折射率沿轴向呈周期性变化。本征型光纤传感器是利用外界因素改变光纤中光的特征参量,从而对外界因素进行测量和数据传输的光纤传感器。它具有传感合一的特点,信息的获取和传输都在光纤之中。一般有 OTDR 测量系统、法布里-珀罗(F-P)干涉仪型传感器和光纤布拉格光栅传感器(FBG)。

目前,用于岩土工程位移、压力等物理量测量的光纤传感技术基本是光纤光栅传感器。与传统的电量型传感器相比,光纤光栅具有以下优点:

(1)可靠性好。由于光纤光栅对被测信息用波长编码,而波长是一种绝对参量,它不受光源功率波动以及光纤弯曲等因素引起的系统损耗的影响,因而光纤光栅传感器具有非常好的可靠性和稳定性。

(2)抗干扰。检测量是波长信息,不受光源功率波动和光纤弯曲等因素引起的系统损耗影响,抗电磁干扰、抗腐蚀、电绝缘性好,导线和传感器无需担心防雷,不受潮湿环境影响,耐久性好,具有抵抗包括高温在内的恶劣环境及化学侵蚀的能力,抗环境干扰能力强。

(3)灵敏度和测量精度高。精确的透射和反射特征使其更加准确地反映了应力和温度的变化。测量动态范围只受到光源谱宽的限制,不存在多值函数问题。

(4)测量效率高。单路光纤上采用多个光纤光栅传感器,可以构成分布式光纤传感网络,对大型工程可以进行分布式测量,其测量点多,测量范围大。

(5)适应性好。传感头结构简单、尺寸小、质量轻,适于各种应用场合,尤其适合于埋入材料内部构成所谓的智能材料或结构。

3 光纤光栅传感器技术指标选择

3.1 中心波长

FBG 反射光谱中对应反射峰值的波长,即反射谱中尖峰的中心波长。这些峰值波长随着被测环境物理量的改变而改变,如当温度升高或应变增大时,FBG 传感器的峰值波长变长。如果一个峰值波长 1 535.050 nm 的传感器从 25 °C 加热到 35 °C,传感器的峰值波长将增加到 1 535.150 nm(见图 1,每 °C 变化 10 pm)。大多数 FBG 查询系统工作在 50 nm

窗口范围内从 1 520 ~ 1 570 nm。

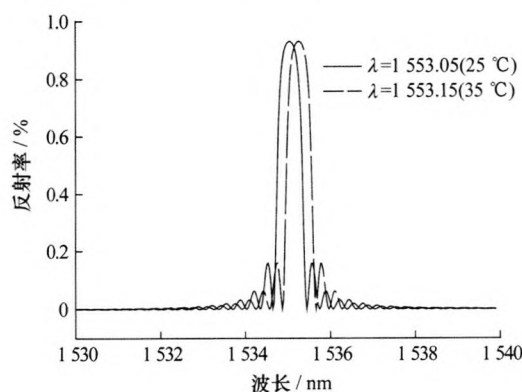


图1 传感器中心波长变化曲线

3.2 带宽

图2为FBG反射光谱中峰值反射率下降3 dB对应的波长范围。带宽是每个传感器反射峰所对应的数值,带宽过宽会降低波长测量的准确性,带宽越小测量精度越高。根据制作工艺水平和精度要求,合理的带宽值在0.2~0.3 nm,通常取0.25 nm。一般的解调设备峰值探测算法通常也是在假设带宽为0.25 nm和谱形为光滑的高斯型基础上设计出来的。

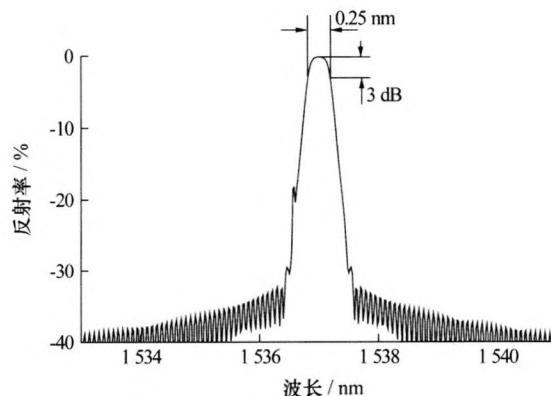


图2 FBG带宽

3.3 反射率

反射率为FBG反射光谱中反射峰值的功率与入射光功率的比值。光纤光栅的反射率越高,返回到测量系统的光功率就越大,相应的测量距离就越长,而且反射率越高,带宽越窄,光栅越稳定。反射率小,噪声对其影响就大,波长查询仪的工作要求就越高,影响测量精度。为了获得最好的性能,一般光栅反射率应该大于90%,但是,单纯的强调高反射率的同时,也要同时考虑边模抑制。可以说,反射率决定信号强度,边模抑制决定了信噪比。

3.4 边模抑制

边模即反射谱中两边存在的许多次峰。边模抑制比为主峰反射率与最高次峰的反射率比值。对于两边有许多旁瓣的传感器,查询仪会错误的把某些旁瓣当作峰值。因此,一个好的传感器谱图除了要具有一个光滑的峰顶外,两边光滑也很重要。控制边模,提高边模抑制比需要有较高的工艺水平,但它同时也是决定传感性能较重要的一个参数,直接决定了信噪比。在反射率大于90%的情况下,边模抑制比应高于15 dB。选用高质量的全息相位掩模板,切趾可以平滑传感器的光谱,消除两边的旁瓣,确保边模不会干扰峰值的探测。通常未切趾的反射谱在短波长方向仍然会存在许多旁瓣(见图3),切趾补偿技术可以消除短波长方向的旁瓣,实现整个光谱平滑(见图4)。目前,光栅写入技术的进步和光学精细度的提高已可以制造出边模抑制比超过20 dB的光纤光栅,满足了FBG传感器的要求。

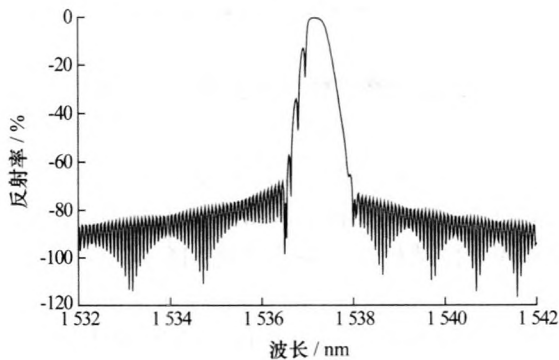


图3 高斯未切趾补偿

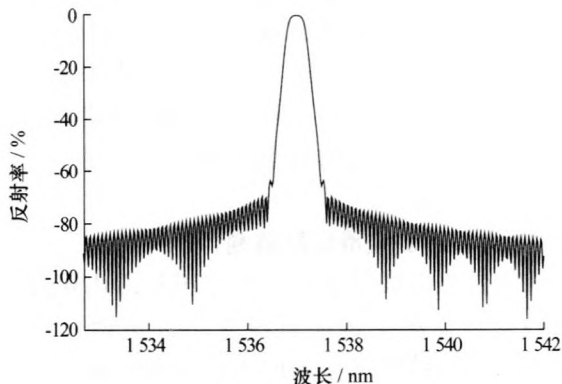


图4 高斯切趾补偿

3.5 传感器的长度

传感光栅的长度决定了测量点的精确程度,理论上光栅的长度越小,测量点越精确。而实际制作光栅时要综合光栅的各种参数,光栅越短,反射率

越低,带宽越宽。很短的光栅,其反射率和带宽都很难达到要求,因此要在三者之间做一个中和。所以,对于0.25 nm的带宽,传感器光栅的物理长度应为10 mm,这个长度适合于大多数物理量的监测应用。当然,通过改变带宽,不同的传感光栅长度也可以满足一定的要求。

3.6 传感器波长间隔

传感器波长间隔就是两个FBG中心波长的差。FBG传感器阵列包含了大量传感光栅,因此必须保证能“寻址”每一个光栅,即根据独立变化的中心波长确认每一个光栅。为此,要求每个通道内各个光栅的中心波长($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$)及其工作范围($\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \dots, \Delta\lambda_n$)互不重叠,所以其中有两个方面需要考虑:传感光栅之间的缓冲区和每个传感光栅的探测范围 $\Delta\lambda$ 。探测范围 $\Delta\lambda$ 是由测量范围决定的,测量范围越大,探测范围就越大。

3.7 缓冲区

两相邻传感光栅之间必须留有一个缓冲区以保证第一个光栅最大波长与第二个光栅最小波长不相交。此外,要考虑的是传感器在制造过程中中心波长的误差,一般在 ± 0.5 nm,精度比较高的大约为 ± 0.05 nm。这个误差必须被加到缓冲区中以确保设计出合适的间隔。所以,在选择光纤光栅传感器上,要综合考虑传感器数、传感器波长间隔、缓冲区和测量范围几个方面,以达到所需的要求。

4 工程应用

4.1 德昌高速公路路基沉降监测^[1]

工程监测部位为D10标段软基,软基采用CFG桩加固处理。基础0~3.5 m深度范围内为粉质粘土,3.5~5.0 m深度内为淤泥质土,5.0~8.0 m深度内为粉质粘土,8.0 m深度以下为细砂、圆砾。软基沉降监测断面上共布置4个监测孔,分别为监测路基总沉降以及3.5 m、5.0 m和8.0 m分层沉降。传感器采用光纤光栅传感器。同时,工程对常规沉降板监测的沉降与光纤监测沉降进行了比较。两种监测方式的沉降变化趋势基本一致,但常规监测的沉降漂移较大,而光纤监测的沉降没有出现上、下反复漂移,误差较少。

4.2 南京长江隧道光纤光栅安全监测系统^[2]

南京长江隧道直径为14.93 m,全长3 032 m,采用大直径盾构法施工,隧洞穿越长江,地层环境复杂,承受外水水压0.64 MPa。工程施工中面临击穿冒顶、江底沉降、透水坍塌等巨大安全风险。为了全

面了解隧道施工和运营期的结构安全状况,对其存在的安全隐患进行预测、预报,沿隧道纵向和横向断面布置了光纤光栅传感器,组成 TSHMS 实时在线监测系统。监测项目为管片接缝张开度、结构温度分布监测、隧道外侧水土压力、隧道外侧水压力、管片钢筋受力、管片混凝土受力、连接螺栓受力等。采用的监测仪器为光纤光栅测微计、温度计、土压力盒、渗压计、钢筋计、混凝土应变计、应变计等。工程基于光纤传感测试技术的 TSHMS 体系和方法,有力地解决了大型盾构隧道施工和运营期安全监测和状况评估的技术难题。

4.3 三峡大坝坝前水温监测^[3]

三峡大坝坝体内部靠近上游面埋设有点式温度计,因埋设点位于坝体内,所测温度与实际库水温度存在一定的差异。为了能更真实地反映库水温度的变化规律,长江科学院结合坝前水温观测的实际现状,在左厂 14-2 坝段布设 1 条测温垂线,采取光纤 Bragg 光栅温度传感器进行监测。传感器按回路布置,测点布置上密下疏,即从正常蓄水位 175 m 到防洪限制水位以下 10 m(即高程 135 m),每 5 m 布置一个测点,从高程 135 m 至库底每 10 m 布置一个测点,共计 18 个温度测点。监测结果与水银温度计直接测量库水温相比较,光纤 Bragg 光栅温度传感器测量水温与实际情况相符。同时光纤 Bragg 光栅温度传感器取得空间上连续的库水温度监测资料,避免了传统的温度计埋在坝体内测量温度的缺陷。通过实际工程应用,光纤 Bragg 光栅温度传感器测量水温,可以满足水温监测的要求,且结果较好。

4.4 龙潭隧道锚杆轴力监测^[4]

龙潭隧道是沪一蓉国道湖北境内白氏坪至恩施高速公路上的一条隧道,设计为上下分离式隧道,净宽 2 m × 9.75 m,净高 5 m,右幅全长 8 599 m,左幅全长 8 693 m,最大埋深约 500 m,是目前国内第 2 条特长隧道。龙潭隧道处于岩溶和岩溶水发育、断层破碎带的影响、软岩和硬岩并存的复杂地质条件下,并具有洞身长、埋深大、地应力高的特点,为了长期监测锚杆的受力状况,在龙潭隧道布置了 3 个监测断面的光纤 Bragg 光栅应变片进行量测,监测锚杆分别选用长 2.5 m、3 m 和 3.5 m 的 $\phi 22$ mm 螺纹钢,每根锚杆等间距布置 4 个测点光纤光栅应变片。通过现场实际应用,得到了监测断面在采用台阶法预留核心土的开挖方式下,靠近孔口 2 个测点轴力变化的特性(见图 5)和同一量测断面拱顶部位同一根锚杆上 4 个不同埋深的测点轴力

变化(见图 6)。

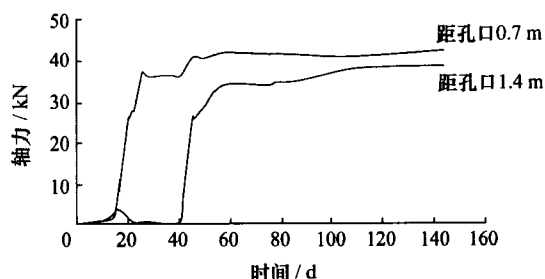


图 5 锚杆轴力随开挖时间变化过程

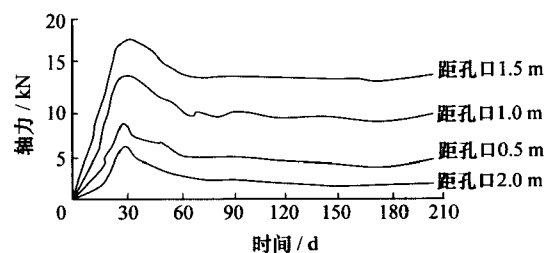


图 6 衬砌前后锚杆轴力变化过程

4.5 荆岳长江公路大桥预应力索索力监测^[5]

工程位于湖北、湖南两省交界处,是湖北省“六纵五横一环”骨架公路网中随州至岳阳高速公路跨越长江的特大型桥梁工程。大桥主体工程为跨南汉深泓主桥和跨北汉滩桥。主桥为主跨 816 m 非对称混合梁斜拉桥,北滩桥为 100 m + 5 × 154 m + 100 m 七孔预应力混凝土连续梁。监测选取北滩连续梁桥段 21[#]、23[#]号墩,墩顶选用预应力索 T21,索长为 154 m,设计监测断面 7 个,每个监测点安装光纤光栅应变传感器 2 个,光纤光栅温度传感器 1 个。2010 年 11 月进行了滩桥的成桥荷载试验,试验结果表明,预应力的变化量与加载工况有很好的对应关系,加载级别不同,变化量也不一样。证明传感器选择、安装、运行达到了预期的效果,能实时监测预应力索索力的变化情况。

4.6 北川县西山坡滑坡群监测^[6]

北川县西山坡滑坡群位于北川县曲山镇任家坪村,主要包括魏家沟泥石流及其沟道两侧山体滑坡。魏家沟流域位于县城曲山镇南麓,魏家沟主沟由南至北进入北川县城,最后汇入湔江。受“5·12”汶川地震及地震所引发的地质灾害影响,魏家沟及其支沟两侧山体发生大面积山体滑坡,大量松散物源堆积在魏家沟及其支沟沟道内。香港理工大学与中国科学院山地灾害研究所合作,在滑坡高危区域钻孔并安装了光纤光栅原位测斜仪,采用光纤

光栅技术对北川魏家沟任家坪村附近松散边坡进行长期安全监测,得到了光纤光栅原位测斜仪在不同深度的位移分布情况(见图7)。

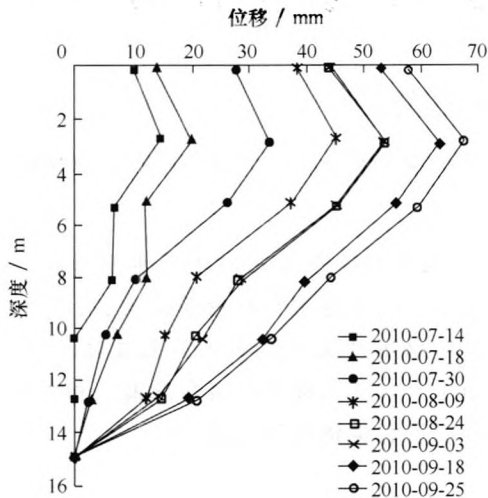


图7 滑坡体不同深度位移分布

4.7 香港新界鹿径道公路边坡监测^[6]

香港新界鹿径道公路边坡位于香港新界上水,坡高10 m,长51 m,坡角为35°。该边坡地质条件复杂,风化严重,受到沙头角海潮汐的影响,该区域降水丰富。初步监测结果显示,该边坡发生往复性的整体侧向变形,边坡一旦失稳,将影响公路的正常通行。为了对边坡稳定状态进行长期监测,在该边坡上安装了百余个光纤光栅传感器,组建了一个光纤光栅边坡监测系统。监测对象包括边坡的内部位移以及土钉、抗滑桩的受力性状。在一根长14 m的土钉上,布置了两组10个光纤光栅应变传感器,并在相应位置布置了10个光纤光栅温度传感器对温度补偿。在抗滑桩内H型钢的两翼缘板上布设了18个光纤光栅应变传感器和9个光纤光栅温度传感器,用于估算抗滑桩的受力状态。在边坡中埋设了一根长15 m,外径60 mm,内径50 mm的光纤光栅式测斜仪,用于监测边坡深部位移。测斜仪表面十字交叉方向布设了4根光纤,每根光纤上串联11个光纤光栅应变温度传感器,得到了测斜仪水平位移监测结果(见图8)。

4.8 大伙房水库应急入连工程输水隧洞安全监测^[7]

工程以碧流水库为界,分碧流水库北段工程和碧流水库南段工程。引水采用埋设管线和开挖隧洞相结合的方式。碧流水库北段工程输水线路全长165.07 km,包括输水管线150.96 km,输水隧洞14.11 km。输水隧洞采用无压洞,宽3.2 m,高3.48 m,

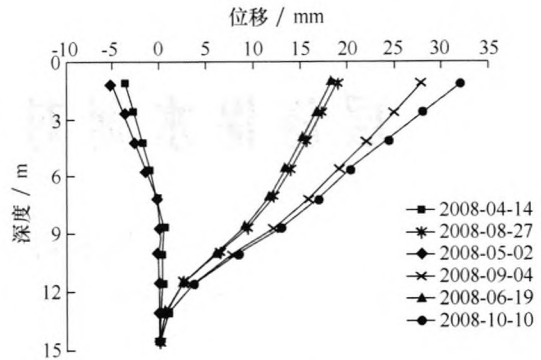


图8 边坡位移监测结果

为I级重要建筑物。输水隧洞的洞线长,监测项目多,支洞数量有限,如采用常规的监测系统,监测断面受限制,监测分站设置较多,不便于管理,而且造价很高。根据工程实际情况和特点,在隧洞段采用光纤光栅仪器建立监测自动化系统,对建筑物进行长期而系统的监测。监测项目有隧洞变形监测、隧洞外荷载监测、隧洞裂缝监测、隧洞应力应变监测等。使用的监测仪器为光纤光栅多点位移计、锚杆应力计、土压力计、渗压计、测缝计、钢筋计、应变计、温度计等。

4.9 水布垭大坝周边渗漏监测^[8]

大坝周边渗漏范围为1200 m,系统沿大坝周边缝每100 m分为1段,每段构成1个测量单元,共划分10个测量单元,在每个单元内放置50~80个光纤光栅温度传感器,间距1.5~3 m。由于水布垭坝高233 m,水库深处水温较低,为能准确监测到较小流量的渗漏,系统配备了光缆加热装置。每个监测段的光纤光栅传感器相互串接,前后两端各用1根光缆引入控制室,一端接信号处理器,另一端备用。光纤光栅渗流监测系统在水布垭工程的成功应用,为水布垭工程客观评价周边缝渗流情况提供了可靠的定性资料。与传统的渗流监测方法相比,分布式测温渗流监测技术具有成本低、在空间上可连续测量、灵敏度高、施工方法简单等优势。目前,该方法在广东长调水电站面板坝、贵州三板溪水电站面板坝、浙江桐柏水电站面板坝、思安江面板坝、河南宝泉抽水蓄能电站、四川冶勒水电站沥青混凝土心墙堆石坝中得到成功应用。

5 结 语

(1)目前,国内在岩土工程安全监测中普遍采用传统的电学量测试技术,但这些测试技术由于受到工程因素和自身技术的限制难以满足岩土工程测试的一些要求,如开挖爆破对弦式或差阻式仪器的振动影响

(下转第128页)

由图5可知,对于水样DX,投加高浓度臭氧水与水射器投加相比:前者在臭氧投加量为1.40 mg/L时溴酸盐仍未超标;后者在臭氧投加量接近1.00 mg/L时溴酸盐超标。而直接通入臭氧气体的方式,在臭氧投加量为0.21 mg/L时,溴酸盐就已经超标。

3 结论与讨论

(1)某一集中区域的原水在单项水质指标上具有一定相似性:湖南、湖北、黑龙江原水溴离子浓度较低,江苏、河北原水的溴离子浓度相对较高。

(2)实际地下水溴离子浓度越低,pH值越低,投加臭氧后生成的溴酸盐一般也较少,这与实验室自配水的研究结果一致。

(3)高浓度臭氧水投加方式下,溴酸盐生成量与臭氧投加量呈线性正相关关系;水射器投加方式下,溴酸盐生成量与水射器出口臭氧余量一定范围内呈线性正相关关系。

(4)同一水样在相同投加量下,三种臭氧投加方

式下对应的溴酸盐生成量由小到大依次为:投加高浓度臭氧水、水射器投加、直接通入臭氧气体。

参考文献:

- [1] 吴一繁,高乃云,乐林生. 饮用水消毒技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [2] 杨敏,曲久辉. 水源污染与饮用水安全[J]. 环境保护,2007(10):62-64.
- [3] Berne F, Chasson G, Legube B. Effect of Addition of Ammonia on the Bromate Formation during Ozonation[J]. Ozone Science and Engineering, 2004, 26: 267-276.
- [4] Pinkernell U, Von Gunten U. Bromate Minimization during Ozonation: Mechanistic Considerations [J]. Environment Science and Technology, 2001, 35: 2525-2531.
- [5] 何茹,鲁金凤,马军,等. 臭氧催化氧化控制溴酸盐生成效能与机理[J]. 环境科学,2008,29(1):99-103.
- [6] 裴义山,杨敏,郭召海,等. 含溴水源水臭氧处理时溴酸盐的产生与控制[J]. 环境科学学报,2007,27(11):1767-1770.
- [7] 吴清平,孟凡亚,张菊梅,等. 臭氧消毒中溴酸盐的形成、检测与控制[J]. 中国给水排水,2006,22(16):12-15.

(责任编辑 欧阳越)

(上接第121页)

等。随着光纤传感技术的发展,各类光纤传感器在桥梁、大坝、隧道等岩土工程安全监测中得到了广泛应用,光纤传感技术已越来越受到岩土工程界的关注。

(2)大型岩土工程其结构和基础设施体积大、跨度长、分布面积大、使用年限长,采用传统的电测传感设备组成的长期监测系统,其性能稳定性、耐久性等都不能很好地满足工程实际的需要,如组网后的防雷技术等,未来势必由大规模分布式光纤传感监测系统所替代。

(3)我国水力资源丰富,水利水电工程众多,已建成的包括长江三峡、黄河小浪底等工程,水库大坝约有8万多座。而在50~70年代兴修的一批水库大坝,基本上没有安装坝体安全监测系统。随着运行年限的延长,工程已呈现出不同程度的病险状态,在对其进行维护的同时,亟待安装一批现代化的安全监测系统对其状态进行实时监控。据统计,我国在建的新库坝以及需要监测的病险库坝总计有四千多座,还有大量的江河护堤安全监测配套工程。由于光纤传感技术的优势,必然以其独特的传感方式在水利水电安全

监测工程中得到广泛的应用。

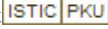
参考文献:

- [1] 黎剑华,张鸿,刘优平,等. 光纤 Bragg 光栅在公路软基沉降监测中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(5):1442-1446.
- [2] 刘胜春,张顶立,黄俊,等. 大型盾构隧道结构健康监测系统设计研究[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(4):741-748.
- [3] 段杭,任大春,王宗魁,等. 光纤 Bragg 光栅温度传感器在三峡大坝坝前水温监测中的应用[J]. 长江科学院院报,2010,27(9):25-28.
- [4] 林传年,刘泉声,高玮,等. 光纤传感技术在锚杆轴力监测中的应用[J]. 岩土力学,2008,29(11):3161-3164.
- [5] 胡军,陈宏波,应汉雨. 光纤光栅在桥梁预应力索索力监测中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2011,33(10):96-99.
- [6] 殷建华,崔鹏,裴华富,等. 基于光纤传感技术的边坡监测系统的研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2011,47:290-292.
- [7] 杨延有,张峰. 输水隧洞自动化监测系统与应用[J]. 测绘科学,2010,35:226-227.
- [8] 许小东,燕乔,吴长彬. 水布垭面板堆石坝周边缝渗流监测新技术[J]. 人民长江,2010,41(14):87-89.

(责任编辑 郭利娜)

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告

光纤传感技术在岩土工程安全监测中的应用

作者: [高垠](#), [马玉华](#), [李克绵](#), [GAO Yin](#), [MA Yuhua](#), [LI Kemiao](#)
作者单位: [中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林长春, 130061](#)
刊名: [水利水电技术](#) 
英文刊名: [Water Resources and Hydropower Engineering](#)
年, 卷(期): 2013, 44(2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_slsdjs201302031.aspx