

基于分布式光纤传感技术的堤防工程健康监测系统

冷元宝^{1,2}, 朱萍玉³, 周 杨^{1,2}

(1. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 河南 郑州 450003;

2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;

3. 广州大学机械与电气工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:针对分布式光纤传感技术在堤防工程健康监测上应用的关键技术和实施问题, 构建了基于分布式光纤传感器、侧重堤防形变和渗漏两大隐患的健康监测系统; 以室外修建的大型实体堤防模型健康监测为例, 探讨了分布式光纤传感器的布设方案和配套专用监测软件的开发, 给出了试验测试结果, 可作为进一步研究渗漏和形变隐患的预警判据, 为分布式光纤传感技术在堤防工程健康监测上的实际应用提供参考。

关键词:分布式光纤传感器; 堤防工程; 健康监测; 渗漏; 形变

中图分类号:TV698.1

文献标志码:B

文章编号:1006-7647(2012)S2-0084-05

堤防工程是重要的防洪工程之一, 其主要作用是约束水流, 抗御风浪和海潮, 限制洪水泛滥, 保护两岸工农业生产和人民生命财产安全等。据不完全统计, 我国现有河道堤防 28 万 km 左右, 其中主要堤防 6.57 万 km。由于堤防工程自身的复杂性和施工技术水平限制, 相当数量的堤防工程存在不可忽视的隐患问题。随着堤防保护区内社会经济的迅猛发展, 堤防工程在防洪减灾中的地位不断加强, 其安全性也越来越引起全社会的高度关注。堤防工程的安全涉及到堤防、堤岸防护工程以及穿堤建筑物的安全等。鉴于堤防工程的复杂性、特殊性与重要性, 迫切需要建立一套完善、先进的堤防工程健康监测体系, 为堤防的安全运行提供强有力的保障。因此, 新的堤防隐患探测手段和安全监测新技术被不断引入到水利工程中, 以期确保堤防更有效和安全地运行。光纤传感技术由于具有抗电磁干扰、集信号的传感和传输于一体等诸多优点, 在航空航天和土木工程领域得到了较好的应用, 近年来开始出现在水工结构的随机裂缝检测和混凝土大坝的温度场试验研究方面^[1-2]。其他方面的探索性研究还有高陡边坡深部变形监测^[3], 用电热脉冲法检测混凝土面板坝的渗流^[4], 清华大学开展的光纤光栅组监测丁坝

的滑移, 土坝渗流的监测^[5]等。光纤传感技术在水利上应用正处于方兴未艾之时, 然而, 这一技术在水利上的应用之初大多借鉴之前在刚性结构体上的埋设和布置方案, 对于桥梁等大型建筑建构, 其主体易于为光纤传感技术的实施提供事先人为设计的便利条件, 诸如智能桥梁结构将桥梁结构健康监测的技术体系及制度升级为嵌入式的智能桥梁结构系统。堤防及其水工结构与桥梁等土木结构同样遭受疲劳载荷、动载荷和变化恶劣的环境影响, 其功能在逐渐完善和加强中, 进而对其安全性要求也越来越高。但是, 水工结构有其特殊性和复杂性, 堤防自身的介质为土质、岩土结合, 并掺杂了很多其他成分, 光纤传感技术在这一领域的应用不能简单地套用其他已有的成功模式^[5-6]。与此同时, 新技术的应用必然带来具体监测方案的实施、数据处理、系统可靠性和监测结果评判等一系列技术问题需要解决。

本文针对分布式光纤传感技术在堤防健康监测应用时的相关问题, 构建基于分布式光纤传感器、侧重堤防形变和渗漏两大隐患的健康监测系统, 探讨分布式光纤传感器的布设方案和配套专用监测软件的开发, 并在室外修建的大型实体堤防模型上实施监测方案, 给出初步试验结果。

基金项目: 水利部科技推广计划 (TG1116); 水利部公益性行业专项 (200901053); 水利标准化工作资助项目 (1261120162509, 1261120162510); 农业标准化示范区资助项目 (水利工程建设质量监控标准化示范区)

作者简介: 冷元宝 (1963—), 男, 湖北谷城人, 教授级高级工程师, 主要从事工程安全研究。E-mail: zty0760@yahoo.com.cn

1 不同堤防工程上的应用模式研究

由于黄河是著名的悬河,黄河堤防不同堤段修建的年代不同,各险工的靠水情况有很大差别,因此,对堤防隐患探测的重视级别上会有所差异,所采用的监测手段也不同。分布式光纤传感技术在很大程度上取决于光纤的布置是否合理、有效。传感光纤起作用的关键在于光纤与被测对象的直接接触,从而通过光纤的变化感测环境的改变。以堤防的形变和渗流为例,光纤一般需要埋设到堤身内部,但对于堤防的管理者来说,在已经建好的堤防内部布设光纤,意味着对堤身人为的破坏,除非重大工程和重要监测对象,否则这种人为的破坏需要周密的计划和细致的方案。而对于新建堤防,则可以按照设计者的意图在修建之前做出很好的方案,并在修建过程中得到实施。分布式光纤传感技术在不同堤防监测上的应用结构如图 1 所示。

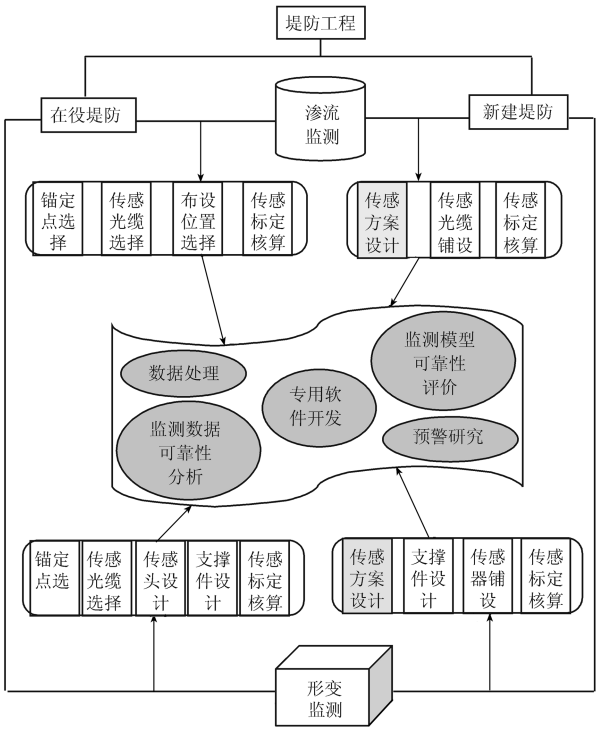


图 1 分布式光纤传感技术在不同堤防监测上的应用

1.1 分布式光纤在在役堤防工程上的应用

一个卓有成效的堤防健康监测系统,应该具备为负责该段堤防管理和维护工程的技术人员,提供可靠且有用的堤防运行状态数据和隐患预报、预警功能。目前,对于在役堤防工程的隐患探测和监测有很多不同的仪器设备和方法。选择何种方法对某一特定堤防进行健康监测和维护的关键在于设计一个成功的监测系统。选择光纤作为一种传感元件所构建的是一套高技术水平的监测系统,主要关注堤防的形变和渗漏信息,亦即与之相对应的应变和温

度两个物理量。该监测系统的监测对象不包括很少发生严重渗漏破坏的地段,以及通常被认为并不时常发生的典型破坏。在传感光纤的布设中需要专门的工具,并涉及到传感器的封装、保护等技术问题和堤防大范围的开挖等工程问题,更为重要的是分布式光纤监测系统的高可靠性、高质量数据的获取和实时监测能力需通过后续充足的资金和必要的系统继续完善升级和维护加以保证。在这套监测系统的软件功能得到进一步的开发和操作更简洁明了之前,系统的使用和维护要求专门的人员,不至于因为缺乏相关技术人员的用户不理解这项技术而认为测试的不可靠或者是低劣操作而产生与期望相去甚远的结果,也不会质疑或者犯难因高科技的应用引起系统安装成本相对较高的事实。因此,对于一般很少靠流和不重要监测的堤防段,分布式光纤监测系统将被视为过于复杂,不建议采用分布式光纤传感技术。而采用分布式光纤传感技术的重要堤段和险工工程上,则有利于确保管理部门在每年的运行费用中有必须的资金支持,同时也有助于该新技术在水利工程和工程技术人员中的推广和普及。

针对在役堤防工程,光纤传感器的安装主要以实用和有效为原则,辅以适当的工程开挖。由于堤防安全监测的目的旨在通过对仪器采集的数据进行解读,进而揭示堤防长期运行规律和当前状态。因此,堤防安全监测的重点在于可能破坏长期运行正常规律与稳定结构状态的洪水汛期险情监测上。对于已经完工处于服役期间的重点监测堤防,需要根据堤防所处的位置,实地考察后,选择不破坏堤防主体和光纤的前提下最能反映堤防状态变化的位置铺设光纤传感器。渗流和形变为两种不同形式的破坏,其出险点也很大的差异,则监测方案中传感器埋设要区别对待。目前市场上使用的野外传感光纤,主要有温度传感光缆、应变传感光缆、温度应变同时监测的传感光缆 3 种。渗流的监测主要通过温度的变化体现,对单纯监测渗流的堤段,则可选用不需要特别固定的温度光缆;对于较易出现管涌的情形则选用温度和应变同时监测的传感光缆,以借助温度的变化和应变的突变综合确定大渗流的发生。对于形变的监测,由于光纤监测应变的原理是在两固定点之间拉伸光纤,实际工况必须采用固定桩和光纤变性的弹性载体,具备锚定打桩条件的可采用在固定桩之间布设应变传感光缆;不具备锚定打桩施工条件或打桩后布设传感光缆需要大范围开挖堤身的则建议重新设计有针对性的传感头装置,对形变进行监测。在这些方案中则需对传感头的灵敏度和装置的校准系数进行标定核算,供后续的数据处理之用。

1.2 分布式光纤在新建堤防工程上的应用

新建堤防工程主要指设计完成后未进行施工和拟建堤防,这些堤防由于并未开始真正的现场作业,给分布式光纤传感技术的应用带来契机,可以从隐患溯源的角度出发,将传感光纤布设在最能反映隐患生长源头。堤防监测的最终目的是监测堤防隐患生成之前的征兆,并确立隐患的规模、位置及预测其发展趋势。任何隐患不是即刻形成的,而是逐步积累的,发展的速度有快慢,但总的发展趋势是朝累计递增方向发展,因此,对于分布式光纤传感技术在新建堤防工程上的应用,其关键在于最佳传感布设方案的设计,相对于在役堤防而言,其实施过程更容易,设计效果更能实现。新建堤防的渗流监测考虑的问题是传感方案设计,传感光缆铺设和所用传感器的传感系数标定和核算。形变监测则主要涉及传感方案设计、支撑件设计、传感器铺设和传感器传感系数的标定和核算。

2 分布式光纤监测系统

2.1 监测系统数据处理

本文所论述的分布式光纤监测系统主要基于分布式光纤传感分析仪 DiTeSt,因此,监测系统所得到的数据处理和管理软件均针对该仪器。仪器用户终端是管理系统的最基本的工作站,亦即堤防安全的野外监测层。整个监测和管理系统的信号数据流程如图 2 所示。堤防监测系统的 3 个主要环节是:①测试仪器;②数据采集;③数据处理和管理。目前,在这 3 个方面都有许多成熟的可供利用的工具来改善和优化提出的监测系统。传感光缆和分布式光纤分析仪 DiTeSt-STA202 用来完成数据采集,其中又包括灵活改变仪器分辨率的“触发式扫描”和根据经验设定的具有不同固定分辨率的“设定的常规日程扫描”。在人工巡检中发现任何隐患迹象都将直接触发“触发式扫描”。在数据采集环节中既

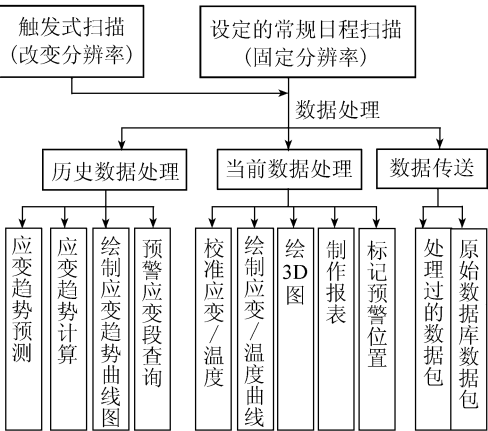


图2 堤防工程健康监测系统数据流程

有人工的手工记录信息,也有专门的采用计算机执行的数据记录。无论哪种,用户都可以根据监测任务的改变而设置与之对应的信息获取频率和积累日程数据。在仪器的监测系统中,最初获得的光信号被转换为电信号,之后再被转换为数字信号,经过需要的各种数据处理后成为常规用户可以明白的显示信息,如应变趋势图等。数据管理的任务是利用各种工具包括电子表格等完成自定义数据库的数据的分类存储,包括用于上传的备份数据和提取的重要简明信息。对于分布式光纤传感分析仪 DiTeSt-STA202,当“幅值”和“温度/压力”超过阈值时具有自动存储的功能,共有 3 种保存的方式选项。第一种选项是新测试,操作系统自动创建新的文件,新文件名的规则是在上个文件名的基础上添加一个数字,如:measurement_1. txt,增加的测试次数则不改变原有的文件名。第二种选项是建新文件夹,如果文件夹里之前没有文件,系统会自动创建一个。最后的选项是覆盖原来的文件,此选项用新的测试文件替换现有的文件,如果文件夹里面没有文件,系统会创建一个新文件。

为获得更多直观的、可接收的变量,专门开发了进一步数据处理的软件,典型界面如图 3 所示。在本监测系统中,有 3 个数据处理功能模块,第一个模块是当前数据处理,包括了绘 3D 图、绘制应变/温度曲线、校准应变/温度、制作报表和标记预警位置;第二个模块是历史数据处理,包括温度/渗漏趋向的计算,应力趋向的计算,绘制趋向曲线,寻找预警点;最后一个模块是数据传送模块,包含直观图标数据包和原始数据包。

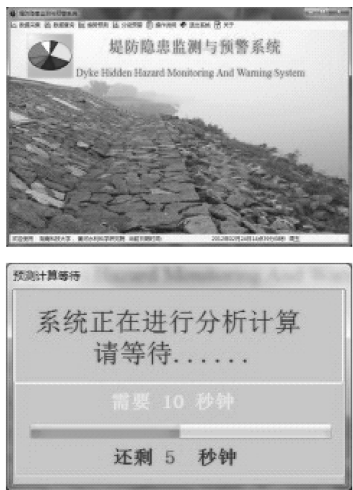


图3 健康监测系统软件典型界面

2.2 监测系统的可靠性问题

2.2.1 监测系统的可靠性评价

一个成功的监控系统应该为系统的操作员和负

责堤防工程运行与维护的工程技术人员提供可靠的和有意义的堤防状态信息,因此,监测系统作为保证大型工程正常工作与安全维护的重要手段被广泛应用。高可靠性、低风险的监测系统是系统设计者和用户追求的目标,基于光纤传感的监测系统其可靠性研究还很少见,随着分布式传感技术更深入的应用研究,监测系统的可靠性问题将成为工程实际应用中不可回避的现实课题。

2.2.2 可靠性评估模型

当系统的结构确定以后,任何一个分布式监测系统的可靠性都可以用元件可靠性构成的系统可靠性函数来表示,即

$$R = f(r_1, r_2, \dots, r_m) = \sum_{i=1}^m [a_i \prod_{j=1}^n r_j^{k_{ij}}] \quad (1)$$

式中: R 为系统可靠性; m 为系统可靠性函数中乘积式的项数; a_i 为第 i 项乘积式的系数 ($i=1, 2, \dots, m$); r_j 为 j 类元件的可靠性 ($j=1, 2, \dots, n$); n 为监测系统中元件类型数; k_{ij} 为第 i 项乘积式中 j 类元件可靠性幂次。

分布式光纤监测系统均采用高精度的光电子器件,但独立元器件的高精度并不意味着整个系统的高可靠性,如何保证监测系统的优化配置和高可靠性,需要对其模型进行进一步的系统研究。如分布式光纤监测系统的传感光缆,有两种最典型的配置方式,即循环配置和镜面配置,如图 2 所示。

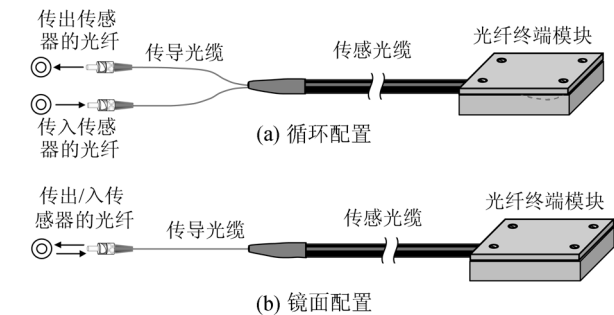


图 4 分布式光纤监测系统中传感光缆的典型配置

传感光缆不同的配置方式将形成不同的分布式光纤监测系统,其可靠性分析模型有待下一步的深入研究。

2.2.3 监测数据的可靠性分析

以全新的观点和视觉看待堤防的监测系统,对于堤防管理者来说是非常重要的。随着光纤传感技术的进步和在这方面取得的成果,用户将拥有更多的选择,基于分布式光纤传感技术的监控系统将伴随着工艺费用的降低而得到优化和广泛采用。在此之后,监测数据的可靠性问题将凸显出来,如何判定监测系统所得的数据,对数据系统误差的检验和对数据系统误差的补偿等都将是完善可靠的监

测系统所必须考虑的。

2.3 堤防工程健康监测系统预警模式

对黄河重要堤防采用分布式光纤监测系统的首要目的就是能对重大灾害、险情实时预警。由于黄河堤防的渗流尤其是形变与黄河汛期的洪水和暴雨侵袭有直接关系,而同一个地点的险情发生的频度不稳定,不同堤段的具体地理条件又存在着差异,研究者缺乏统计资料和隐患的特征量信息的提取,这些都给监测系统的预警带来困难。因此,开展构建黄河堤防实体模型,研究典型重大隐患发生、发展的过程,有助于建立合理的隐患预警阈值。同时,辅以早期不同信息、征兆的综合预警模式也是一个研究方向。

3 实体模型试验

为积累实际堤坝发生形变和渗漏隐患时的光纤信号,以进一步分析光纤传感数据的特点,从而完善隐患特征参数的提取和数据的处理方法,选取郑州黄河边的岗李水库作为试验点。根据岗李水库的现状,将库区东北侧堤防改建规整为试验区,修建的试验堤主要服务于病害探测、监测实验研究,如图 5 所示。

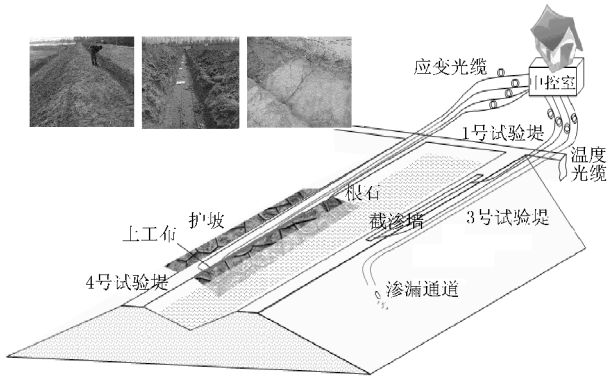
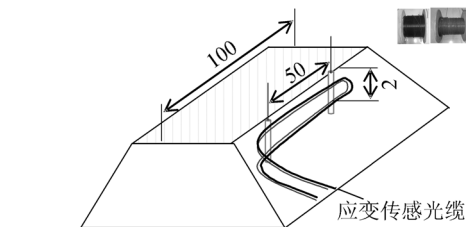


图 5 按实际尺寸修建的试验堤

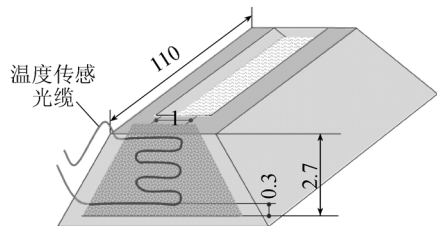
对修建的试验堤,利用温度和应变光纤传感器,从修建、稳定期、放水试验等不同时期不定期的实时测试堤坝内的温度和应变两种信号。采集并存储所有数据,用于下一步的数据处理和隐患预警判据研究。试验主要采用 DiTeSt 光纤传感分析仪、温度传感光缆、应变传感光纤,具体布设如图 6 所示。

传感光缆布设好后,在试验堤修建完毕的初期和稍后一段时间分别进行了应变和温度测试,图 7 为距离堤顶 2 m 处 II 型光缆在堤防修建初期和稳定后的应变测试结果,图 8 为距离堤顶 3.7 m 处 III 型缠绕方式铺设的光缆在夏季和冬季温度测试结果。

由图 7 可以看出,由于试验堤修建时间不长,也未施加外载荷,因此应变值变化不大。由图 8 可以

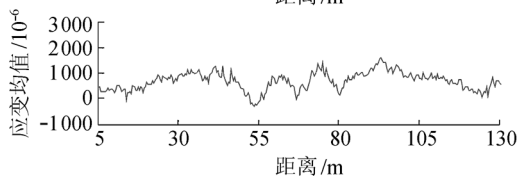
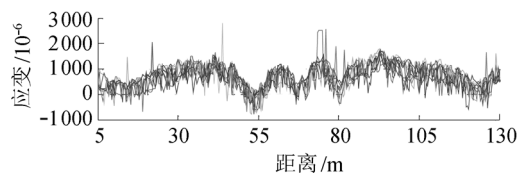


(a) 应变传感光缆布置

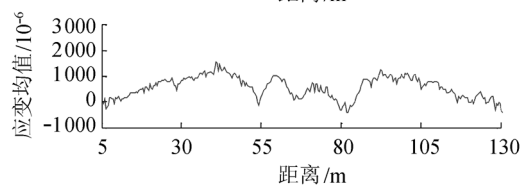
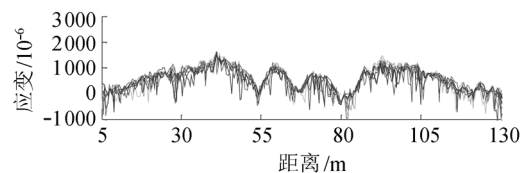


(b) 温度传感光缆布置

图6 光纤传感器的布设(单位:m)



(a) 修建完毕初期测试结果



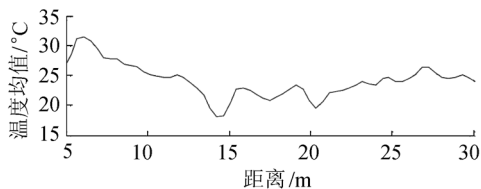
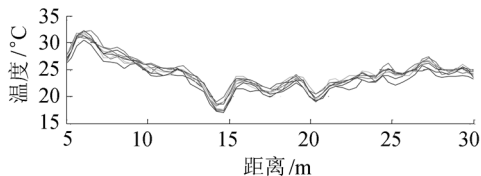
(b) 稳定1个月测试结果

图7 应变和应变均值曲线

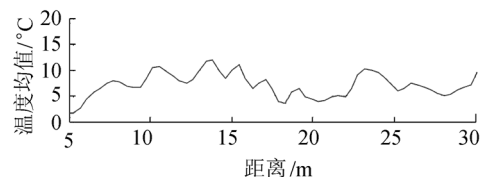
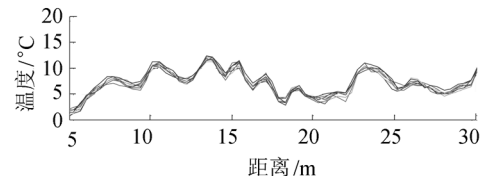
看出,由于传感光缆埋设的位置距离堤顶较浅,冬季和夏季试验堤身内部的温度值受外界环境的影响有较大的变化,这是对测试数据进行处理、研究隐患预警判据时必须加以考虑的因素。

4 结 语

分析了分布式光纤传感技术在黄河堤防上应用时的相关问题,从监测系统中的传感光缆布设和监测系统的可靠性和监测数据的可靠性分析,探讨了需要解决和有待进一步开展的研究。厘清和解决这



(a) 夏季测试结果



(b) 冬季测试结果

图8 温度和温度均值曲线

些问题,有助于分布式光纤传感技术在黄河堤防这类松散介质体上的广泛应用。

致谢:诚挚地感谢湖南科技大学硕士研究生雷华为本文试验研究所做的工作。

参考文献:

- [1] 蔡德所. 分布式光纤传感监测三峡大坝混凝土温度场试验研究[J]. 水利学报, 2003(5): 88-91.
- [2] 蔡德所. 光纤传感技术在大坝工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [3] 万华琳, 蔡德所, 何薪基等. 高陡边坡深部变形的光纤传感监测试验研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学学报, 2001, 23(1): 20-23.
- [4] 孙东亚, MARKUS A. 基于光纤温度测量的土石坝渗漏监测技术[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(4): 29-31.
- [5] ZHU Pingyu, ZHOU Yang, THEVENAZ L, et al. Seepage and settlement monitoring for earth embankment dams using fully distributed sensing along optical fibers [C]//2008 International Conference of Optical Instrument and Technology (OIT'08), 2008, Beijing. Proc. SPIE 7160, 716013-1-716013-7.
- [6] 冷元宝, 朱文仲, 何剑, 等. 我国堤坝隐患及渗漏探测技术现状及展望[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(2): 59-62.

(收稿日期: 2012-07-30 编辑: 熊水斌)