

土石堤坝渗漏病险探测模式和方法研究进展

苏怀智^{1,2}, 周仁练^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:综述了土石堤坝渗漏病险探测方法的工作原理、技术装备及其发展历程,对比了各项技术的适用场景、作业要求、各自优势及局限性,指出了汛期渗漏险情的快速巡查和高效处置是目前土石堤坝安全保障的薄弱环节,快速巡查-精准定位-高效处置成套装备体系的建设是亟待攻关的方向,建立具有时空连续性的堤坝自动化监测系统和预警系统是保障土石堤坝长效安全服役的远期目标。

关键词:土石坝;堤防;渗漏探测;安全监测;分布式光纤;热成像

中图分类号:TV698 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)01-0001-10

Research progress and prospect of earth-rockfill dam leakage detection modes and method//SU Huaizhi^{1,2}, Zhou Renlian^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The working mechanism, technical equipment and development process of existing leakage detection methods for earth-rockfill dam leakage were reviewed. The applicable scenarios, advantages and limitations of these technologies were summarized and compared. It is pointed out that the rapid inspection and efficient disposal of leakage danger in flood season is a weak link in the safety guarantee of earth-rockfill dams. The construction of complete equipment system of rapid inspection, accurate positioning and efficient disposal is a direction need to be tackled at present. The establishment of automatic monitoring system and early warning system with space-time continuity is the long-term goal to ensure the long-term and safe service of earth-rockfill dams.

Key words: earth-rockfill dam; river embankment; leakage investigation; safety monitoring; distributed optical fiber; infrared thermography

水库大坝和堤防工程,即堤坝工程,作为防洪体系的重要组成部分,是人民生活和社会生产的重要保障。截至2018年底,全国已建成各类水库大坝98 822座,5级及以上江河堤防总里程长达31.2万km^[1],其中绝大部分为土材质^[2]。我国现役水库大坝大部分建于20世纪50—70年代,受建设时期社会经济和技术水平的限制以及后期运管维护情况的综合影响,大量水库大坝在渗漏、抗震、防洪等方面存在安全隐患^[3-4],土石坝渗漏问题尤为突出^[5]。全国已开展两轮病险水库除险加固工作,一定程度上改善了水库大坝病险状态,但仍有大量中小型病险水库大坝尚未得到处置或处置不彻底^[4,6]。此外,随着服役时间的推移,许多水库大坝还将出现新的渗漏病险。

我国江河大湖的堤防多建于冲积平原上,堤基表面的弱透水覆盖层较薄,下层则是较厚的强透水粉细

砂或砂砾石层,极易产生渗漏,并在严重时发生管涌。另一方面,我国不少堤防修筑年代久远,堤身多经历朝历代填筑而成,且填料普遍就地取材,在堤后形成了大量覆盖层薄弱的坑塘^[7],成为管涌隐患。堤身填筑不均,裂缝、洞穴、松散体等渗漏病害的广泛存在^[8],使得每临汛期高水位,极易发生渗漏险情,结构性出险形式主要有管涌、漏洞、散浸、滑坡、崩岸和塌陷等。比如2020年汛期,全国范围内多处堤坝出现重大险情,仅长江中下游堤防就出险多达4 335处^[9]。

土石堤坝渗漏病险如果不能被及时发现,并得到有效处置,极有可能导致溃坝或溃堤。1954—2018年,全国累计溃决水库大坝3 541座,其中土石坝3 292座;2000—2018年共计溃坝76座,其中土石坝74座^[6]。由于我国人口众多,相当数量的水库大坝下游就是密集的居民区,即使是小型水库溃坝,也可能威胁成百上千人的生命安全,导致难以估量

的经济损失和生态破坏。随着社会经济的日益发展,溃坝造成的综合损失和严重的社会影响越发难以接受。表1统计了多起土石坝溃坝事故,可见渗漏是威胁土石堤坝安全的大敌,需十分重视。

1 土石堤坝渗漏病险探测模式

土石堤坝的渗漏具有隐蔽性、时空随机性以及初始量级细微等特征,从渗漏险情发生到堤坝严重破坏的时间很短^[10],及时发现、准确定位和合理处置渗漏隐患是保障土石堤坝安全的关键^[11-13]。国内外通过研究渗漏病害部位的物理量的特征和变化规律,形成了多种渗漏检测手段,利用的物理量包括电、电磁、振动波、水流、热、声、光等。

a. 电和电磁。堤坝材料的导电性与坝体介质类型、孔隙率、含水率等有关。堤坝存在缺陷或发生渗漏的区域,其电导率将发生改变。电法和电磁法通过探测堤坝中电性参数异常,从而实现堤坝内部缺陷和渗漏的间接诊断。在这方面形成了直流电阻率法、自然电场法、瞬变电磁法和地质雷达法等探测技术。

b. 振动波。堤坝存在缺陷或发生渗漏部位的密实度和弹性模量与正常区域不同。振动波的传播对介质密实度较为敏感,当振动波在这些部位传播时,波速、波形将发生改变。依据堤坝隐患与背景场的波速及波阻抗差异,可利用纵波、横波及面波进行分析。目前应用的振动波法探测技术主要包括地震反射波法、地震折射波法、地震映像法和瑞利面波法。

c. 水流。水流是渗漏的物理实体。传统采用

测压管和渗压计测量渗透压力,或采用量水堰测量渗漏量来监测堤坝渗漏。放射性同位素示踪技术将水流作为运载体,可用于调查地下水的补给关系、寻找渗漏入口、测定流速和流向。流场拟合法利用电流场来拟合渗流场,根据渗流场的分布快速寻找堤坝渗漏入口。

d. 热。无渗流土体内部的温度场由热传导主导。当渗流存在时,土体内的热传导强度将因水体的迁移而改变。研究表明,当土体渗透系数大于 10^{-6} m/s时,水体迁移引起的平流热传递将超越热传导,即使少量的水体迁移也将迫使土体温度与水温相适应,从而引起原温度场的局部不规则变化^[7]。因此,可通过温度变化来分析土石堤坝渗漏情况,近年来发展了分布式光纤监测技术以及红外热成像技术用于辨识土石堤坝渗漏。

e. 声。渗漏过程伴随的水体流动、水土摩擦以及土体发生渗透破坏等环节都会产生声发射现象。可通过声发射监测来判断渗漏发生、计算相对流量以及定位渗漏位置。

f. 光。通过人眼直接观察或分析可见光图像发现堤坝渗漏。

2 土石堤坝渗漏病险探测技术研究进展

2.1 基于电的探测技术

2.1.1 直流电阻率法

直流电阻率法通过人工对堤坝施加电场,采集视电阻率,根据视电阻率差异来分析堤坝构造及含水情况。通常洞穴、裂缝和松散体等病害表现为高

表 1 我国典型土石坝溃坝事故

坝名	所在地	溃决日期	坝型	库容 / 万 m ³	溃坝原因	生命损失 / 人
马山湖	广东饶平	1960-06-09	均质土坝	654.0	坝体质量差,管涌	104
桥墩门	浙江平阳	1960-08-10	土石混合坝	4 000.0	施工中超标洪水漫顶	291
水口坑	浙江永康	1960-09-12	均质土坝	100.0	冲毁溢洪道	89
夹河子	新疆玛纳斯	1961-04-10	均质土坝	8 000.0	坝身渗漏	80
刘家台	河北易县	1963-08-08	黏土心墙坝	4 054.0	超标洪水漫顶	943
紫山谷	山东淄川	1966-07-15	浆砌石坝	25.0	坝体渗漏	173
横 江	广东揭西	1970-09-15	均质土坝	7 879.0	坝体质量差,管涌	941
洞口庙	浙江宁海	1971-06-02	均质土坝	255.0	坝体质量差,滑坡	186
虎 台	辽宁抚顺	1971-07-31	黏土心墙坝	306.0	施工中超标洪水漫顶	512
龙 川	广东罗田	1973-05-08	均质土坝	176.8	坝体质量差,管涌	55
板 桥	河南泌阳	1975-08-08	黏土心墙坝	49 200.0	超标洪水漫顶	19 701
石漫滩	河南午钢区	1975-08-08	均质土坝	9 180.0	超标洪水漫顶	2 517
沟 后	青海共和	1993-08-27	面板砂砾石坝	330.0	坝顶止水破坏,未设排水	320
小渭港	湖北通山	1995-07-02	心墙土坝	14.0	严重渗漏,超标洪水	34
茶山坑	广东恩平	1998-06-26	均质土坝	597.0	超标洪水,副坝溃决	36
大路沟	四川会理	2001-10-07	壤土均质土坝	111.5	蚁害侵蚀,管涌	26
七仙湖	云南彝良	2005-07-21	浆砌石拱坝	8.0	工程质量差,渗漏	16
大 河	吉林桦甸	2010-07-27	黏土心墙堆石坝	400.0	管理不当,漫顶	38
沈家坑	浙江舟山	2012-08-10	均质土坝	23.8	管理不当,渗漏	11
联 丰	新疆乌鲁木齐	2013-02-02	均质土坝	40.0	除险加固不当,渗漏	1

阻异常,发生渗漏的区域则表现为低阻异常。现场操作时,传统常采用对称四极剖面法和对称四极电测深法^[8]。如图 1 所示,对称四极剖面法的供电电极 A、B 以及测量电极 C、D 之间间距固定,勘测时 4 个电极同时向同一方向移动,从而获得测线内坝体的视电阻率;对称四极电测深法的测量电极 C、D 位置固定,供电电极 A、B 向反方向等距移动,以测量坝体不同深度的视电阻率。

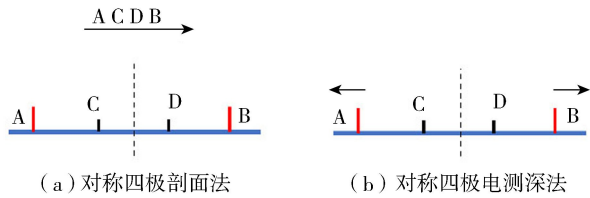


图 1 对称四极剖面法和对称四极电测深法示意图

高密度直流电阻率法,也称高密度电法,在两供电电极之间加密布置多个测量电极,将传统剖面法和测深法的原理与阵列思想相结合,探测系统具有较高的分辨率,能较精细地反映堤坝三维电性分布规律。

高密度电法的探测结果是视电阻率,而堤坝渗漏病险分析需要含水率、孔隙率等土性参数,因此需开展电阻率数据解算。反演是视电阻率数据解算与定量解释的重要手段,而正演是反演的核心,目前正演求解主要采用积分法、有限单元法以及有限差分法等数值方法。在求解大型稀疏矩阵问题上,简化边界条件^[12]、共轭梯度的有限差分格式^[13]等策略的提出,显著提高了正演求解的效率和精度。在反演方面,Sasaki^[14]提出的基于圆滑约束的最小二乘反演法奠定了高密度电法反演计算的基础。Loke 等^[15]基于 Sasaki 的研究提出了基于拟牛顿最优化非线性最小二乘反演算法,计算效率得到显著提升,以该算法为核心推出的商用软件沿用至今。Liu 等^[16]利用不等式约束,在保证精度前提下,提高了三维高密度电法的反演效率。Loke 等^[17]基于工程应用实例,提出 Sherman-Morrison 对称优化阵列布置,提高了高密度电法在大规模探测中的计算效率。赵涛等^[18]将遗传算法与 BP 神经网络相结合,提高了高密度电法的二维非线性反演效率和精度。

高密度电法是目前基于电的探测技术中应用最广的勘探技术,其局限性在于探测前需安装大量电极,限制了作业效率,并且供电电极间距必须大于测深的 2 倍,探测范围(剖面图形状)为倒梯形,难以对坝肩以下坝体进行探测。此外,高密度电法的探测结果易受大地自然电流和地下良导体的干扰,数据整理和解释工作较复杂。

2.1.2 自然电场法

在无需人工对地通电情况下,土石堤坝中就自然存在着电场。自然电场的形成机理主要有 3 类:①溶液和介质接触面上的氧化还原反应;②溶液的离子在空隙或渗流通道交界面上的扩散和土体骨架对离子的吸附作用;③水体的渗流和土体的过滤作用^[19]。自然电场的形成由均匀渗流和集中渗流产生的过滤电场起主导作用^[20]。

自然电场法最早见于 1969 年,Ogilvy 等^[21]将其用于堤坝渗漏探测。我国在 20 世纪 80 年代开始利用该技术探测土石堤坝渗漏。现场操作只需用到普通电测仪,采用非极化的电极测量电位差,根据测网绘制等势图,电位低处即为渗漏严重处。该方法操作简单,成本较低,测深可达 20~30 m,可以确定渗漏源的几何形状。相对于常规的人工电场法常常仅用于单次检测,自然电场法利用天然场源可实现野外长时间多次作业,目前还常作为综合物探法之一被应用在堤坝渗漏探测中^[22]。该方法的局限性在于,当水中可溶性盐含量较大,水的电阻率低于 $10 \Omega \cdot \text{cm}$ 时,所有测点获得的电阻率将很接近,该方法将无法探测。

2.2 基于电磁的探测技术

2.2.1 瞬变电磁法

瞬变电磁法(transient electromagnetic method, TEM)即时间域瞬变电磁测深法,其基本工作原理为电磁感应。如图 2 所示,TEM 利用不接地的发射线圈向地下发射一次脉冲磁场,通过观测分析脉冲电流断电瞬间感应涡流产生的二次磁场情况来分析地下构造。通常含水率越大,产生的涡流场越强,二次磁场也就越强。瞬变电磁系统一般由发射机、发射线圈、接收线圈、接收机和数据采集系统组成。

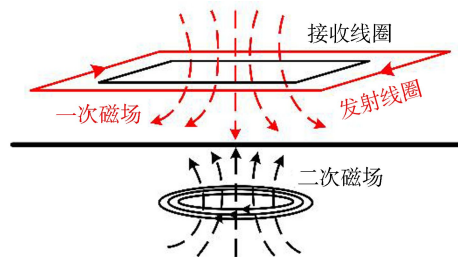


图 2 瞬变电磁法的工作原理

瞬变电磁系统所采集的数据为视电阻率或导电率等物探参数,与高密度电法探测结果解译类似,同样需要将其转化为含水率、孔隙率等土性参数。受计算机条件和数据解译技术的制约,在过去数十年中,瞬变电磁数据解译主要停留在视电阻率成像和一维反演阶段^[23]。为提高瞬变电磁法应用于复杂地下结构和起伏地形时的解译准确性,三维数值计

算得到快速发展。三维问题正演主要采用有限单元法、有限差分法以及积分方程法等数值方法。前两种方法离散化整个计算域,占用计算机内存较大。积分方程法只对感兴趣区域进行离散,具有存储量小的优点,但方程求解通常较困难,仅适用于模拟简单模型^[24]。正演问题求解有两种策略,一是直接在时间域中求解,二是先采用数值方法在频域或拉普拉斯域求解,再通过逆变换将求解结果转换到时间域分析。数值求解方法有显式和隐式两种。显式求解的数学概念简单明确,但需满足稳定性条件,因而严格限制了时间步长和单元大小。随着近年来计算机性能的快速提升,大型线性方程组求解效率大幅提高,无需满足稳定性条件的隐式求解方法逐渐体现出优势。目前三维电磁反演算法主要有非线性共轭梯度法、高斯牛顿法和拟牛顿法。三维模拟计算的发展在提高瞬变电磁数据解译效率和可靠性的同时,也为改进探测作业模式、提高探测效率提供了有益参考。

房纯纲等^[25-26]在瞬变电磁仪的研发和工程应用方面做了大量工作,对瞬变电磁法在土石堤坝渗漏病险排查中的应用起到了推动作用。TEM 探测深度大、不受地形和接地电阻影响,作业效率高,其局限性在于存在浅部探测盲区,并且探测结果易受堤坝内盐和金属以及环境电磁的干扰。

2.2.2 地质雷达法

地质雷达 (ground penetrating radar, GPR) 法属于反射波探测法,其基于高频电磁波理论,由发射天线向地下发射宽频带、短脉冲的电磁波,发射的电磁波经地下传播后返回地表为接收天线所接收,通过分析携带介质地电信息的回波信号实现对坝体构造情况的解析^[27]。GPR 对空洞、破碎、松散、脱空、富含水体等渗漏隐患均有较强捕捉能力,作业速度快、分辨率高,在堤坝浅部隐患探测中应用较多^[28]。

电磁波在土层和砂层中衰减严重,导致地质雷达法存在探测深度较小的局限性^[29]。收发天线系统的频率越低,探测深度越深,但分辨率越低;频率越高,衰减越严重,探测深度越浅,但对目标的分辨能力越高。

系统增益系数是衡量 GPR 探测能力的基本指标。目前瑞典 MALA、美国 GSSI、加拿大 SSI 和英国 Groundvue 等产品是 GPR 市场的主导,最大系统增益系数达到 200 dB 左右,收发天线频率范围在 0.5 Hz ~ 1 GHz。近 20 年来,国内 GPR 也得到长足发展,GER、LTD 和 CAS 等国产雷达的性能也十分优良。

2.3 基于振动波的探测技术

振动波法探测技术通过在地面激发震源来制造弹性波,并利用检波器接收,通过分析接收波的特征实现地下隐患探测^[30]。

地震映像法是基于反射波法中的最佳偏移距技术而发展起来的一种探测方法,又称地震多波勘探或高密度地震勘探。该方法可利用一种或多种波作为有效波进行分析,每一测点的波形记录都采用相同的偏移距激发和接收,在该偏移距处接收到的有效波具有较好的信噪比和分辨率,能够反映堤坝内部垂直方向和水平方向的构造分布情况。

瑞利面波是由体波与地表界面相互作用而产生的一种面波,对介质密实度相当敏感。瑞利面波法根据速度和频散曲线来分析堤坝隐患分布,探测深度较大,但具有一定的浅部盲区。

振动波属于弹性波,其波长较长、频率较小,这些特点限制了其分辨率,因而基于振动波的探测技术对具有一定规模且埋深较大的隐患探测效果较好,但难以探测尺寸较小的隐患,多用于堤防质量评价和软弱层探测。

2.4 基于水流的检测技术

2.4.1 传统渗漏监测方法

传统渗漏监测技术直接以渗漏水为量测对象,包括利用测压管和渗压计测量渗透压力、采用量水堰测量渗漏量,具有成本低、设备简单、监测结果易于解释等优点,目前仍是坝工渗流监测的主要手段。然而,这种技术属于点式监测,通常仅布设在少数关键断面^[31],易遗漏险情。

2.4.2 同位素示踪技术

示踪技术主要包括天然示踪法和人工示踪法。水中的稳定同位素 (D 、 ^{18}O 和 3H 等) 可作为天然示踪剂。在适当情况下,一些进入水中的物质也可作为天然示踪剂,如工农业废水、悬浮的沉积物、溶质等。人工示踪剂通常有染色示踪剂、盐类和放射性同位素。

天然示踪通常用于确定水库下游渗水和坝肩地下水的补给源及补给路径,从而分析可能的集中渗漏通道。人工示踪还可测定渗流流速和流向。峰值法和累计法常用于测量垂向流速,水平流速和流向常采用示踪稀释法测定。示踪稀释法于 1916 年由 Kocherin 提出,经 Moser 和 Drost 等逐步完善^[32-33]。我国在 20 世纪 80 年代引进放射性同位素示踪技术,并在同位素示踪仪器设备研制和分析方法上取得了较大进展。作业时通常将提前注入示踪剂的滤水管放入检测通道,根据渗透流速与示踪剂稀释速率之间的关系计算渗透流速,由流速的分布推定渗

流场^[34]。该技术成功应用于诸多水库大坝渗漏通道调查,取得了显著效益。

投放示踪剂通常需要钻孔,但某些区域钻孔作业受限。而且示踪剂投放后,需要经过较长时间观测,故该方法主要用于探测水库渗漏,不太适合堤防管涌渗漏的探测。

2.4.3 流场拟合法

电流场与渗流场在一定条件下具有相似性。流场拟合法通过电流场来拟合渗流场,通过电流场的分布推算渗流场的流向和相对流速。

巴甫洛夫斯基早在 1918 年就用电流场比拟水流场,首创了水电比拟试验^[7]。2000 年,我国何继善院士提出了流场拟合法^[35],并成功研制出管涌探测仪,该设备的核心部件包括向水中发送特殊波形编码电流场的发送机、船载接收机和置于水中测量电流密度的接收探头。该方法的可靠性和检测速度均较高,大量应用于水库渗漏和堤防管涌险情探测中^[33]。戴前伟等^[36]在流场法基础上提出了矢量流场法,为分析土石坝渗漏入口、渗流方向及渗漏等级提供了新思路。

流场拟合法能快速查明渗漏入口,尤其适用于汛期堤坝管涌等集中渗漏通道入口的查找。其局限性在于只能找到渗漏入口,不能反映渗漏在堤坝内部的具体分布情况。

2.5 基于温度的检测技术

20 世纪 60 年代,德国开始尝试通过温度变化来分析土石堤坝的渗流场^[37]。20 世纪 70 年代,欧美一些国家采用离散点温度值来研究大坝渗漏通道。20 世纪 80 年代,利用温度变化间接分析堤坝渗流性态的思路被引入国内,在丹江口水库开展了探索性工作^[38],通过研究坝基范围的温度场和渗流场,验证了从温度场角度分析坝基渗流场的可行性。陈建生等^[39]基于热源法推导并建立了带有渗流项的土石堤坝传热方程。实际操作时通过钻孔得到地层中一些离散点的温度值,从而计算地下集中渗流参数。此外,应用该技术,成功探测出了北江大堤石角段管涌通道^[40]。近年来,国内外许多工程实例均证实了温度监测资料对堤坝渗流分析的重要意义^[41-42]。针对传统点式测温漏检情况,近些年发展起来的分布式光纤监测技术和红外热成像技术较好地弥补了该缺陷。

2.5.1 分布式光纤监测技术

分布式光纤测温系统 (distributed temperature sensing, DTS) 以温度为感测对象、以光纤为媒介、以光信号为载体,能实时测读光纤沿程任一位置的温度。通过优化布设光纤传感网络,可实现分布式监

测。该方法对长条状走势的堤坝工程具有很好的适应性。

光纤测温技术的基本原理在于光纤内传输的光在沿程各点存在依赖于温度的后向散射,利用散射延迟时间和光纤内的光速可计算不同散射点的位置,因而可以得到光纤沿程上连续的温度分布。分布式光纤测温方式有梯度法和加热法两种。梯度法直接感测堤坝内部的温度场,该方法有效的前提是河内水温与测点位置的温度存在一定差异。为满足这一前提,光纤埋设位置通常与河水保持一定距离。加热法通过电脉冲对光纤金属套或特种光纤加热,使光纤周围土体温度升高,由于存在渗漏的位置温升速率更小,从而实现堤坝内部渗漏的识别和定位。

利用分布式光纤长期监测土石堤坝渗漏的构想于 20 世纪 90 年代被 Aufleger 等提出^[43]。随着 DTS 的问世,英国 York sensors limited 公司率先将 DTS 商品化^[44-45]。此后,通过光纤测温来研究堤坝渗流这一课题得到了大量关注。Markus 等^[46-47]开展了梯度法和加热法试验,分析了堤坝温度场、土体饱和度、渗流流速等参量之间的关系,较全面地介绍了分布式光纤在水利工程中的应用。Amir 等^[48-49]利用分布式光纤温度监测数据,提出了数据奇异值分解法、多元滤波法、盲源分离技术等多种数据分析方法,设计了基于分布式光纤监测的堤坝渗流数据自动处理、分析及预警系统。Cyril 等^[50]考虑地表微气候影响,开展了大尺度试验来检验加热法和梯度法,重点研究了温度数据与渗流流速间的关系。Sayde 等^[51-52]采用加热法对土体含水率分布情况进行评估,通过大量试验研究了土体热传导系数同含水率之间的函数关系。肖衡林等^[53-54]分析了加热光纤与渗流水体的传热过程,从理论层面推导了渗流流速与过剩温度、施加的电压和电流、介质的导热系数、铠装光纤直径和长度、土体孔隙率等之间的关系。王宏飞^[55]和吴善苟^[56]以西龙池水电站为工程依托,以无渗流段光纤的温升为基数,以渗流段和无渗流段光纤测温结果之差与该基数的比值为相对温差比,发现了相对温差比与渗流流速呈二次方关系。崔书生^[57]开展了模型试验研究,根据不同加热功率下光纤的温升曲线,引入名义导热系数获得了分布式光纤渗流流速监测实用模型。康业渊^[58]通过研究土石结合部的集中渗流,获得了渗流量和光纤温度的对应关系。

由于分布式光纤监测技术需要预埋光纤,现有研究多以模型试验和理论研究为主,在实际堤坝工程中应用较少,众多研究提出的理论和分析方法的工程应用效果尚不明朗。

2.5.2 红外热成像技术

红外热成像 (infrared thermography, IRT)^[59] 技术通过感测堤坝表面的红外热辐射温度异常达到发现渗漏的目的。IRT 主要有主动和被动两类,其中主动 IRT 需要对被检对象施加外部热源激励,而被动 IRT 在自然条件下成像^[60]。对实际大体积长距离的堤坝工程施加人工热激励是相当困难且不可取的,故在土石堤坝渗漏感测中主要利用被动 IRT。被动 IRT 借助红外传感器被动感测堤坝表面的辐射场,通过定量换算得到温度场,将该温度场按一一对应的关系映射到颜色空间便可获得形象直观的红外热图像。相比于传统点状或线状测温技术,IRT 获取的温度结果是矩阵平面,因而具有其他测温手段所不具备的数字图像学分析价值。

1997 年,Inagaki 等^[61]开展了不同水温条件下砂浆试件集中渗漏和随机渗漏的室内试验,验证了水体加热条件下 IRT 感测渗漏的可行性。彭波等^[62]开展了多种水头作用下均质土坝集中渗漏热成像室内试验,验证了热源激励条件下应用 IRT 感测土石堤坝渗漏的可行性,该试验条件与在机械设备检测领域中应用较多的主动 IRT 技术类似。Bukowska-Belniak 等^[63]通过帐篷内的土坝模型试验验证了常温条件下 IRT 感测土石坝渗漏的可行性。Chen 等^[64]在台湾蓝道溪上开展了土坝溃坝过程的 IRT 监测试验,指出辐射温度变化较大的坝面可作为土石坝的潜在破坏区。王玉磊等^[65]报道了借助无人机搭载红外热像仪检测到某小型土坝的早期非稳定渗漏。

上述研究在推动 IRT 应用于土石堤坝渗漏检测的同时,仍存在一些不足。已有研究很少关注红外热图像的形态学特性和纹理特征,对热图像的“图像”属性利用不足,可考虑将计算机视觉和深度学习算法引入该领域,以实现基于红外图像的渗漏自动辨识。此外,已有试验多在室内开展,通过人为扩大水体与堤坝表面之间的温差来达到理想的成像效果。如何剔除或利用堤坝表面微气候的不规则影响;如何在复杂地面(如杂草覆盖、起伏不平、动物活动、积水等)条件下识别和提取渗漏目标;在雨天、雾天等特殊天气条件下的应用效果怎样及如何提升感测效果等,均是值得研究的课题。

目前红外热成像仪以美国菲利尔和福禄克以及德国德图为主导品牌^[61],国内的高德红外、海康威视等品牌在近几年也得到飞跃式发展。热灵敏度和红外分辨率是红外热像仪最核心的两个指标。商业化的非制冷焦平面红外热像仪的热灵敏度目前可达到 20 mK,红外图像分辨率可达到 1 024×768。

IRT 作为一种非接触式感测手段,具有形象直观、机动性强、覆盖面广、作业效率高等优点,可在无光照的夜间正常作业,尤其适合土石堤坝汛期应急巡查,但也存在以下局限性:温差是基于 IRT 识别堤坝渗漏的前提,温差越大,渗漏导致的局部温度变化就越大,感测效果越好;作为一种表面感测技术,它不具备探测堤坝内部的能力,只有当渗漏影响到达堤坝表面时该技术才有效;目前红外热像仪的图像分辨率较低,图像细节信息较少,复杂地面条件下对感测结果的解释很困难,通常需要借助可见光图像或其他检测手段进行联合解释。

2.6 基于声的监测方法

渗漏过程中,水体流动、水土摩擦以及土体渗透破坏都会产生弹性声波。利用声发射监测系统对声发射信号进行捕捉和分析,可以判断渗漏发生、计算相对流量以及定位渗漏位置。徐炳锋^[66]从位错和能量观点推导了土体位错点源和应变能改变量同声发射参数的关系,并通过室内试验^[67]发现渗漏达到临界坡降和破坏坡降时的声发射信号突增,指出了声发射技术可用于土体渗透变形监测。张宝森等^[68]对柳园口闸下渗漏进行了声发射监测,发现渗漏的发生与声发射信号同步。明攀等^[69-70]开展了堤基管涌连续破坏过程中的声发射监测模型试验,发现堤基管涌破坏过程的声发射信号多为突发型信号,指出管涌过程的水力参数和声发射参数具有一致的分布规律,并提出了适用于堤防管涌过程声发射信号采集的系统参数设置^[71]。

由于实际工程体型庞大,因渗漏产生的声发射信号通常在传播过程中衰减消失,并且堤坝服役环境中的本底噪声较强,目前该技术主要停留在试验研究阶段。

2.7 土石堤坝渗漏病险探测技术比较

在土石堤坝工程渗漏隐患排查和病害检测中,通常需结合工程实际选取适当的检测方法开展综合探测。表 2^[8,72]总结了土石堤坝渗漏病险探测技术方法及其特点。

3 土石堤坝渗漏病险探测技术发展趋势及展望

我国堤防长度长、土石坝数量大,堤坝隐患病害多且空间分布广,汛期渗漏险情多发。1998 年洪水以来,土石堤坝渗漏病险探测技术取得了长足发展,形成了多种技术和装备,其中高密度电法、地质雷达法、瞬变电磁法等地质物探类方法较为成熟,极大提升了我国土石堤坝渗漏病险检测水平及处置能力。然而,目前土石堤坝安全保障在以下两方面还比较薄弱。

表 2 土石堤坝渗漏病险探测方法及其特点

方法	用途	作业要求	优点	局限性
高密度电法	探测裂缝、洞穴、松软层、高含砂层、高含水区等隐患	需安装大量电极	位置分辨率高,技术应用成熟,可识别液体种类	受堤坝内盐和金属及环境电磁干扰;探测坝肩有困难;测深有限;需安装大量电极,作业效率受限
自然电场法	测定渗漏路径及严重渗漏区	普通电测仪	可确定渗漏源几何形状及渗流路径,操作简单,成本低,方便多次作业	对可溶性盐含量大的水体(电阻率低于 $10\ \Omega\cdot\text{cm}$),该方法失效
瞬变电磁法	堤坝裂缝、洞穴、松软层、高含砂层等隐患详查	瞬变电磁仪	位置分辨率高,探测深度较大,深层分辨率比高密度电法高,便携,可机载或船载	存在浅层探测盲区;探测结果易受堤坝内良导体及环境电磁的干扰
地质雷达法	探测空洞、脱空、松散体、富含水体	地质雷达	位置分辨率高,检测速度较快,适合于土石坝浅层检测	测深较浅(一般小于 $10\ \text{m}$);非屏蔽线圈易受电磁干扰
弹性波法	探测规模和埋深较大的隐患	人工制造震源,检波器接收	探测深度大	分辨率较低,难以探测尺寸较小的隐患
同位素示踪法	调查地下水的补给源及补给路径;寻找渗漏入口、测定流速和流向	需要渗漏源作为运载体	能明确地下水的补给关系,能反映渗漏通道的渗透性	需要渗漏源,通常需钻孔,人工示踪剂投放困难;观测周期较长;放射性示踪剂对环境存在不利影响
流场拟合法	查找集中渗漏入口	管涌探测仪	可定位管涌入口,可船载,检测效率较高	只能发现渗漏入口,不能反映堤坝内部的渗漏分布
分布式光纤温度传感	监测渗流场分布,感测浸润线	需预埋光纤	可全天候分布式监测,尤其适合长条状堤防工程渗漏监测;不受电磁干扰	需在堤坝内部预埋光纤,在已建工程中推广困难。
红外热成像	发现渗漏出口及富含水坝坡	红外热像仪	便携,可机载,作业效率高;可用于大范围感测,尤其适合汛期堤防管涌、散浸等快速巡查;可在夜间作业	只能感测表面;复杂地面条件下感测结果解释有困难;受地表微气候影响较大
声发射法	监测渗漏发生;计算相对流量;定位渗漏	声发射监测系统	可定位渗漏,判断相对渗流量;价格较便宜	受本底噪声干扰;大体积工程监测困难

3.1 汛期渗漏险情的快速巡查和高效处置

大部分现行探测技术的作业效率、覆盖范围和可靠性远不能满足汛期快速全面发现渗漏病险的需求,以至于目前汛期发现渗漏险情还是主要依赖于人工拉网式排查,亟须研发作业高效、覆盖全面的土石堤坝渗漏险情快速巡查手段。

得益于近年来人工智能技术、通信技术的飞速发展,水利行业中已有水下机器人、无人船、机器狗和无人机等新兴装备出现,作业场景全面涉及了水下、水面、地面和空中。

水下机器人^[73]通过搭载不同功能的作业模块,可一定程度上替代人工潜水作业,在水下完成示踪剂投放、图像采集、地形勘测、渗漏入口查找和封堵等任务,不仅可避免人工潜水的危险,还对深水、激流、污水等恶劣环境具有较强的耐受能力。

无人船^[74]可在汛期激流中行驶,通过搭载水下地形仪、管涌探测仪等装备,能执行渗漏入口查找和 水下地形测绘等任务,为渗漏封堵和水下边坡变形分析及处置提供支持。

多足机器狗具备地面快速移动能力,通过搭载感测和探测设备,有望缓解当下人工巡堤的巨大资源消耗,实现近距离“看”、“触”、“测”、“探”等现场巡查。

无人机^[75]作为一种低空搭载平台,可搭载雷达、高清可见光相机、红外热像仪、倾斜摄影相机、RTK、激光扫描仪等仪器设备,利用其灵活飞行的优势,能快速感测土石堤坝及库岸边坡崩岸、塌坑、滑坡、管涌

等险情,为防汛抢险提供及时全面的信息支持。

综合利用水下机器人、水面无人船、地面机器狗和空中无人机等平台搭载合适的巡测仪器设备对堤坝进行快速巡查具有较好的研究价值和应用潜力,目前尚处于应用研究的初期阶段,装备的作业范围、适应性、可靠性和准确性等方面都还有很大的提升空间。以无人机平台为例,目前出现的无人机大多是将其他领域的成品直接应用到土石堤坝上,大部分都还停留于拍摄可见光图像层面。无人机装备及其配套技术对堤坝渗漏巡测作业场景的适应性不佳,对作业目标的贴合性不强,并且无人机平台的续航能力、搭载能力和抗风雨能力等都有待提升。因此,有必要针对土石堤坝“长条状”的特征及其渗漏位置和渗漏规律等特性,综合考虑地面条件、汛期天气条件和作业目的等因素,研制土石堤坝快速巡查专用装备。

此外,目前土石堤坝渗漏险情的发现、辨识和处置等环节联系不够紧密,尚未形成从险情巡查到应急处置的完整体系,极大限制了应急处置水平。快速巡查-精准定位-高效处置成套装备体系的建设是值得攻关的方向,可考虑利用无人机、无人船、地面机器狗等快速巡查装备发现堤坝渗漏,利用地质雷达、瞬变电磁仪等装备开展渗漏通道的精准定位和内部详查,以及利用先进封堵装备在进口投放封堵材料或向堤坝内部注浆进而对渗漏进口和通道进行快速封堵。

3.2 渗漏自动化监测、预测和预警

现阶段土石堤坝汛期渗漏险情的发现和处置是事后的,当发现渗漏险情时,渗漏已经在堤坝内部发育了相当长的时间,相当于临近病变的“晚期”阶段,以至于需要“抢险”,造成堤坝病险处置和风险控制处于相当被动的局面。

长远来看,保障土石堤坝长效健康服役的关键应当是建立具有时空连续性的堤坝自动化监测系统和预警系统,从现阶段少量次数的检查转变为全天候的实时监测;由堤坝表面检测延伸到堤坝内部监测;由对单点、少数断面、局部区域的监测转变为分布式的、全覆盖式的监测;由事后应急处置转变为事前预测和预警。在这方面,分布式光纤温度传感监测方法具有较大的研究价值和应用潜力,优化光纤布设方式使其能应用到已建堤坝工程,提高光纤在实际工程中的存活率、空间分辨率、监测信息解译效率和准确性,以及推进分布式光纤监测系统自动化和智能化建设等是值得努力的方向。

参考文献:

[1] 2018 年全国水利发展统计公报[EB/OL]. [2021-8-26]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/slfztjgb/201912/t20191210_1374268.html.

[2] 龚政,郭蕴哲,杭俊成,等. 沿海城市溃堤洪水模拟技术研究进展[J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):78-85. (GONG Zheng, GUO Yunzhe, HANG Juncheng, et al. Advances in dike-breaking flood simulation technology in coastal cities[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(3):78-85. (in Chinese))

[3] 王少伟,苏怀智,付启民. 病险水利工程除险加固效果评价研究进展[J]. 水利水电科技进展,2018,38(6):77-85. (WANG Shaowei, SU Huaizhi, FU Qimin. Advances in reinforcement effect evaluation for dangerous hydraulic projects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(6):77-85. (in Chinese))

[4] 温鹏,童学卫,赵春,陈煜. 全国小型病险水库除险加固进度管理系统研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2016,14(5):334-339. (WEN Peng, TONG Xuewei, ZHAO Chun, et al. Study on national management system of small hazardous reservoirs reinforcement[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2016,14(5):334-339. (in Chinese))

[5] 孙玮玮,龙智飞,周克发. 小型水库除险加固绩效评估指标体系研究[J]. 水利水电技术,2018,49(12):126-133. (SUN Wei, LONG Zhifei, ZHOU Kefa. Study on performance assessment index system for risk-elimination and strengthening of small-scale reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2018,49(12):126-133. (in Chinese))

[6] 李宏恩,马桂珍,王芳,等. 2000—2018 年中国水库溃

坝规律分析与对策[J]. 水利水运工程学报,2021(5):101-111. (LI Hongen, MA Guizhen, WANG Fang, et al. Analysis of dam failure trend of China from 2000 to 2018 and improvement suggestions [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(5):101-111. (in Chinese))

[7] 邹声杰. 堤坝管涌渗漏流场拟合理论及应用研究[D]. 长沙:中南大学,2009.

[8] 房纯纲,姚成林,贾永梅. 堤坝隐患及渗漏无损检测技术与仪器[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[9] 冯源. 2020 年长江中下游堤防险情特点分析与思考[J]. 人民长江,2020,51(12):31-33. (FENG Yuan. Analysis and reflection on characteristics of dikes dangers in middle and lower reaches of Yangtze River in 2020 [J]. Yangtze River,2020,51(12):31-33. (in Chinese))

[10] ZHONG Q, WANG L, CHEN S, et al. Breaches of embankment and landslide dams: state of the art review [J]. Earth-Science Reviews,2021(12):103597.

[11] 王新建,许宝田,陈建生. 温度场探测堤坝集中渗漏研究综述[J]. 水利水电科技进展,2008(3):89-94. (WANG Xinjian, XU Baotian, CHEN Jiansheng. Status and prospects of research on temperature field tracer method used in leakage detection [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2008(3):89-94. (in Chinese))

[12] 刘晓,彭友文,袁志辉,等. 高密度电法在堤坝渗漏监测中的模拟及应用[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):71-75. (LIU Xiao, PENG Youwen, YUAN Zhihui, et al. Modeling and application of high-density electrical method in dam leakage monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5):71-75. (in Chinese))

[13] SPITZERK. A 3-D finite-difference algorithm for DC resistivity modelling using conjugate gradient methods [J]. Geophysical Journal International, 1995, 123(3):903-914.

[14] SASAKI Y. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation[J]. Geophysical Prospecting, 1992,40(4):453-463.

[15] LOKE M, BARKER R. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method[J]. Geophysical Prospecting, 1996,44(1):131-152.

[16] LIU B, LI S, LI S, et al. 3D electrical resistivity inversion with least-squares method based on inequality constraint and its computation efficiency optimization [J]. Chinese Journal of Geophysics (Chinese Edition), 2012, 55(1):260-268.

[17] LOKE M, WILKINSON P, CHAMBERS J, et al. Optimized arrays for 2-D resistivity survey lines with a large number of electrodes [J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 112:136-146.

[18] 赵涛,于师建. 基于 GA-BP 神经网络算法的高密度电法非线性反演[J]. 煤田地质与勘探,2017,45(2):147-151. (ZHAO Tao, YU Shijian. GA-BP neural network algorithm-based nonlinear inversion for high density

- p>resistivity method [J]. Coal Geology and Exploration, 2017,45(2):147-151. (in Chinese))
- [19] 阳兵,崔益安,谢静,等. 基于粒子滤波的自然电场数据反演[J]. 地球物理学进展,2020,35(6):2407-2415. (YANG Bing,CUI Yian,XIE Jing,et al. Inversion of self-potential data by using particle filter [J]. Progress in Geophysics,2020,35(6):2407-2415. (in Chinese))
- [20] 郑灿堂. 土坝自然电场的分布特点[J]. 地球物理学进展,2006(2):665-669. (ZHENG Cantang. Distributing characters of dam spontaneous electric field [J]. Progress in Geophysics,2006(2):665-669. (in Chinese))
- [21] OGILVY A A, AYED M A, BOGOSLOVSKY V A. Geophysical studies of water leakages from reservoirs[J]. Geophysical Prospecting,1969,17(1):36-62.
- [22] 刘艳秋,徐洪苗,胡俊杰. 综合物探方法在水库坝坝隐患探测中的应用[J]. 工程地球物理学报,2019,16(4):546-551. (LIU Yanqiu,XU Hongmiao,HU Junjie. Application of comprehensive geophysical exploration technique to detecting hidden defects of reservoir dams [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2019,16(4):546-551. (in Chinese))
- [23] 齐彦福,智庆全,李貅,等. 考虑关断时间的地面瞬变电磁三维带地形反演[J]. 地球物理学报,2021,64(7):2566-2577. (QI Yanfu,ZHI Qingquan,LI Xiu,et al. Three-dimensional ground TEM inversion over a topographic earth considering ramp time [J]. Chinese Journal of Geophysics,2021,64(7):2566-2577. (in Chinese))
- [24] 薛国强,李貅,底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展,2007(4):1195-1200. (XUE Guoqiang,LI Zhen,DI Qingyun. The progress of TEM in theory and application [J]. Progress in Geophysics,2007(4):1195-1200. (in Chinese))
- [25] 房纯纲,葛怀光,贾永梅,等. 瞬变电磁法用于堤防渗漏隐患探测的技术问题[J]. 大坝观测与土工测试,2001(5):21-24. (FANG Chungang,GE Huaiguang,JIA Yongmei,et al. Techniques of transient electro-magnetic sounding in detection of hidden defects in levees [J]. Hydropower and Pumped Storage,2001(5):21-24. (in Chinese))
- [26] 房纯纲,葛怀光,鲁英,等. 堤防渗漏隐患探测用瞬变电磁仪[J]. 水电自动化与大坝监测,2002(5):38-41. (FANG Chungang,GE huaiguang,LU Ying,et al. Transient electromagnetic instrument for detecting hidden leakage defects in levees [J]. Hydropower and Pumped Storage,2002(5):38-41. (in Chinese))
- [27] DAVIS J, ANNAN A. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy [J]. Geophysical Prospecting,1989,37(5):531-551.
- [28] LOPORTE A, SOLDOVIERI F, PALOMBO A, et al. An integrated geophysical approach for water infiltration detection and characterization at Monte Cotugno rock-fill dam (southern Italy) [J]. Engineering Geology,2016,211:162-170.
- [29] 冷元宝,黄建通,张震夏,等. 堤坝隐患探测技术研究进展[J]. 地球物理学进展,2003(3):370-379. (LENG Yuanbao, HUANG Jiantong, ZHANG Zhen-xia, et al. Research progress in scatheless detection of hidden troubles in embankments [J]. Progress in Geophysics,2003(3):370-379. (in Chinese))
- [30] 徐轶,谭政,位敏. 水库大坝渗漏常用探测技术及工程应用[J]. 中国水利,2021(4):48-51. (XU Yi,TAN Zheng,WEI Min. Typical leakage detection techniques and the application for reservoir dams [J]. China Water Resources,2021(4):48-51. (in Chinese))
- [31] 顾冲时,吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M]. 南京:河海大学出版社,2006.
- [32] 陈建生,董海洲. 井中测定流速广义示踪稀释物理模型[J]. 水利学报,2002,33(9):100-107. (CHEN Jiansheng, DONG Haizhou. Generalized physical model of tracer dilution for measuring seepage velocity in well [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002,33(9):100-107. (in Chinese))
- [33] 邹声杰,汤井田,何继善,等. 流场拟合法在堤坝渗漏管涌探测中的应用[J]. 人民长江,2004(2):7-8. (ZOU Shengjie,TANG Jingtian,HE Jishan,et al. Application of flow field fitting method in seepage and piping detection of embankments [J]. Yangtze River,2004(2):7-8. (in Chinese))
- [34] 张茜,陈建生,董海洲,等. 示踪法测定井中渗透流速的广义稀释模型研究[J]. 长江科学院院报,2016,33(10):126-130. (ZHANG Xi,CHEN Jiansheng,DONG Haizhou,et al. Modified generalized dilution model of determining permeability velocity in wells by tracer method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2016,33(10):126-130. (in Chinese))
- [35] 何继善. 堤防渗漏管涌“流场法”探测技术[J]. 铜业工程,2000(1):5-8. (HE Jishan. Detection technology of seepage piping in embankment using“flow field method” [J]. Copper Engineering,2000(1):5-8. (in Chinese))
- [36] 戴前伟,崔永生,韩行进,等. 流场法探测土石坝渗流矢量分布的有效性分析[J]. 煤田地质与勘探,2021,49(1):270-276. (DAI Qianwei,CUI Yongsheng,HAN Xingjin,et al. Validity analysis of flow field method in detecting seepage vector distribution of earth-rock dam [J]. Coal Geology and Exploration,2021,49(1):270-276. (in Chinese))
- [37] KAPPELMEYER O. The use of near surface temperature measurements for discovering anomalies due to causes at depths [J]. Geophysical Prospecting,1957,5(3):239-258.
- [38] 肖才忠,潘文昌. 由温度场研究坝基渗流场初探[J]. 人民长江,1999,30(5):21-23. (XIAO Chaizhong,PAN Wenchang. Preliminary analysis on dam foundation seepage through temperature field [J]. Yangtze River,1999,30(5):21-23. (in Chinese))
- [39] 陈建生,董海洲,吴庆林,等. 虚拟热源法研究坝基裂隙岩体渗漏通道[J]. 岩石力学与工程学报,2005(22):4019-4024. (CHEN Jiansheng,DONG Haizhou,WU Qinglin,et al. Detection of leakage passage in fissure rock with assumptive heat source method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005(22):4019-4024. (in Chinese))

- [40] 陈建生,董海洲,陈亮. 采用环境同位素方法研究北江大堤石角段基岩渗漏通道[J]. 水科学进展,2003,14(1):57-61. (CHEN Jiansheng, DONG Haizhou, CHEN Liang. Application of the environment isotope method to study on the leakage passage in foundation of Beijang Dyke Shijiao section [J]. Advances in Water Science, 2003,14(1):57-61. (in Chinese))
- [41] 崔盈. 基于分布式光纤传感技术的堤防渗漏监测[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [42] SU H, TIAN S, CUI S, et al. Distributed optical fiber-based theoretical and empirical methods monitoring hydraulic engineering subjected to seepage velocity [J]. Optical Fiber Technology, 2016,31(Sup1):111-125.
- [43] AUFLEGER M, HUBER K. Sensitive long-term-monitoring of embankment dams by fibre optic temperature laser radar [R]. Paris: International Commission on Large Dams, 2012:443-446.
- [44] WOLFF R, PHILL IU. Application and reliability of a fiber optical surveillanee system for a stay cabie bridge[J]. Smart Materials & Structures, 1998,7(2):217-228.
- [45] CAROLYN D, WILLIAN M. Crack and damage assessment in concrete and polymer materials using Liquids released internally from hollow optical fibers [J]. SPIE, 1996, 2718:448-451.
- [46] MARKUS A, MARCO C, MATTHIAS G, et al. Innovative dam monitoring tools based on distributed temperature measurement[J]. Jordan Journal of Civil Engineering, 2007,1(1):29-37.
- [47] GERHARD K, THOMAS E, MARKUS A. Measurements of hydraulic subsurface processesby means of distributed fiber optic temperature sensing (DTS) [J]. Landslide Science and Practice, 2013,2:487-493.
- [48] AMIR A K, VALERIU V. A source separation technique for processing of thermometric data from fiber-optic DTS measurements for water leakage identification in dike[J]. IEEE Sensors Journal, 2008,8(7):1118-1129.
- [49] AMIR A K, VALERIU V. Automatic monitoring system for singularities detection in dikes by DTS data measurement [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2010,59(8):2167-2175.
- [50] CYRIL G, YVES-HENRI F, OLIVIER A, et al. Measurement results on full scale field experiment using optical fibre detection methods [C]//14th German Symposium of the international commission on large dams. Freising:International Commision on large Dam, 2007:17-19.
- [51] SAYDE C, GREGORY C, GIL-RODRÍGUEZ M, et al. Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics[J]. Water Resources Research, 2010,46:W06201.
- [52] GIL-RODRÍGUEZ M, RODRÍGUEZ-SINOBAS L. Application of active heat pulse method with fiber optic temperature sensing for estimation of wetting bulbs and water distribution in drip emitters[J]. Agricultural Water Management, 2013,120:72-78.
- [53] 肖衡林. 渗流监测的分布式光纤传感技术的研究与应用[D]. 武汉:武汉大学,2006.
- [54] 肖衡林,张晋锋,何俊. 基于分布式光纤传感技术的流速测量方法研究[J]. 岩土力学, 2009,30(11):3543-3547. (XIAO Henglin, ZHANG Jinfeng, HE Jun. Research on measuring method of flow velocity based on distributed optical fiber sensing technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(11):3543-3547. (in Chinese))
- [55] 王宏飞. 基于光纤测温的渗流检测系统研究[D]. 北京:清华大学,2007.
- [56] 吴善荀. 基于分布式光纤测温的渗流监测系统研究[D]. 北京:清华大学,2010.
- [57] 崔书生. 光纤测渗技术及其在土石堤坝中的应用研究[D]. 南京:河海大学,2013.
- [58] 康业渊. 穿堤涵闸土石结合部光纤测渗模型和方法研究[D]. 南京:河海大学,2014.
- [59] BAGAVATHIAPPAN S, LAHIRI B B, SARAVANAN T, et al. Infrared thermography for condition monitoring: a review [J]. Infrared Physics & Technology, 2013,60:35-55.
- [60] DOSHVARPASSAND S, WU C, WANG X. An overview of corrosion defect characterization using active infrared thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 96:366-389.
- [61] INAGAKI T, OKAMOTO Y. Diagnosis of the leakage point on a structure surface using infrared thermography in near ambient conditions [J]. Journal of NDT & E International, 1997,30(3):135-142.
- [62] 彭波,张得煊. 利用红外热像技术探测土石坝集中渗漏的研究[J]. 科学技术与工程, 2016,16(11):93-98. (PENG Bo, ZHANG Dexuan. Study on detecting concentrated leakage in earth-rock dam by infrared imaging technique [J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(11):93-98. (in Chinese))
- [63] BUKOWSKA-BELNIAK B, LESNIAK A. Image processing of leaks detection in sequence of infrared images [J]. Pomiary Automatyka Kontrola, 2017,63(4):131-134.
- [64] CHEN C Y, SHEN S C, CHEN K H, et al. Thermal monitoring and analysis of the large-scale field earth-dam breach process [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2018,190(8):483. 1-483. 7.
- [65] 王玉磊,汤雷,钱思蓉. 基于无人机和红外热成像技术的小型水库坝体早期非稳定渗漏检测系统[J]. 无损检测, 2020,42(12):61-65. (WANG Yulei, TANG Lei, QIAN Sirong. Early unsteady leakage detection system of small reservoir dam based on UAV and infrared thermal image[J]. Nondestructive Testing, 2020,42(12):61-65. (in Chinese))
- [66] 徐炳峰. 声发射技术在土工中的应用[D]. 南京:河海大学,1989.
- [67] 徐炳峰,钱家欢,朱正亚,等. 流土声发射监测试验研究[J]. 大坝观测与土工测试, 1995(1):32-36. (XU Bingfeng, QIAN Jiahuan, ZHU Zhangya, et al. Laboratory study on acoustic emission monitoring of soil flow[J]. Hydropower and Pumped Storage, 1995(1):32-36. (in Chinese))

(下转第 39 页)

