

# 光纤传感技术在水电工程安全监测领域应用研究综述

郝长江, 季 凡, 杜泽快, 胡长华

(长江水利委员会设计院, 湖北 武汉 430010)

**摘 要:** 光纤传感器以其特有的原理和性能正逐步得到工程界专业人员重视, 并已突破试验研究开始应用于特殊环境下的工程测量, 应用前景较好。本文结合长江水利委员会设计院近期设计的工程项目, 对光纤传感器在水电工程各项安全监测中的应用研究情况进行了较全面的论述。

**关键词:** 光纤传感器; 水电工程; 安全监测; 应用

**Title:** Application of fiber's sensing technology in safety monitoring of hydropower projects // by HAO Chang-jiang, Ji Fan, DU Ze-kui and et al. // Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research (CISPDR)

**Abstract:** The fiber optic sensor becomes more and more important to specialty technical personnel because of specific principle and performance. It has broken the experimental research and begins to use to the project survey under the specific environment. It has better foreground. In the paper, the application and research of fiber optic sensor in the all safety monitoring of Water-Power Engineering has been discussed overall combining with the current projects designed by CISPDR.

**Key words:** fiber optic sensor; hydropower engineering; safety monitoring; application

中图分类号: TV698.1

文献标识码: A

文章编号: 1671-1092(2007)01-0038-04

光纤传感技术是继光纤通信之后, 在 20 世纪 80 年代出现的集光学、电子学为一体的一种新兴的光学技术。光纤传感技术的核心技术是光纤传感器, 作为一种新型传感器, 它具有体积小、精度高、耐腐蚀、抗电磁干扰、耐久性好等优良特性, 适合于恶劣环境下物理量的测量。同时, 光纤传感器集传感和信息传输于一体, 可实现分布式或准分布式以及远距离监测, 因而特别适用于水电工程及其它领域结构物的安全监(检)测。

光纤传感器在我国水电工程领域的研究、应用和发展始于上世纪 90 年代初, 开始主要是在试验室内研究如何利用光纤传感器进行对混凝土结构的测量, 如: 应力、应变、弯曲、挠度、温度等方面的测量, 后来又在工程现场进行试验性研究。目前, 应用光纤传感器对建筑物结构进行实时在线监测已初见成效, 许多工程结构物中的光纤传感系统正在发挥着应有的作用。本文结合长江水利委员会设计院近期所设计的工程项目, 对目前光纤传感器在水电工程各项安全监测中的应用情况进行了较全面的论述。

## 1 光纤传感器的原理和类型

光纤传感器系统由光源、入射光纤、出射光纤、

光调制器、光探测器及解调器组成。其基本原理是将光源的光经入射光纤送入调制区, 光在调制区内与外界被测参数相互作用, 使光的光学性质发生变化而成为被调制的信号光, 再经出射光纤送入光探测器、解调器而获得被测参数。根据光在光纤中被调制的原理不同, 光纤传感器可分为: 强度调制型、相位调制型、频率调制型、波长调制型、偏振态调制型<sup>[1]</sup>。

光纤传感器根据其测量范围还可分为点式光纤传感器、分布式光纤传感器、F-P 光纤传感器和布拉格光栅传感器。而分布式光纤传感器大体上又可分为两大类: 全分布式光纤传感器和准分布式光纤传感器。一般来说, 全分布式光纤传感器是靠检测光在光纤中传播时产生的散射进行分布式测量, 是一种较理想的监测结构应力应变分布的传感器, 它把被测量物作为光纤位置长度的函数, 可以在整个光纤长度上对沿光纤几何路径分布的外部物理参数进行连续测量, 可同时获得被测物理参数的空间分布状态和随时间变化信息。准分布式光纤传感器是将呈一定空间分布的相同调制类型的光纤传感器耦合到一根或多根光纤总线上, 其实质上是多个分布式光纤传感器的复用系统, F-P 光纤传感器和布拉格光栅传感器均可组成准分布式光纤传感系统<sup>[2]</sup>。

## 2 光纤传感器的实验研究与分析应用

光纤传感器由于体积小,且主体材料与混凝土是同质材料,因而在混凝土结构应力应变检测方面具有特殊的优势。为探索用光纤传感器测量混凝土结构物内部应变信息,以及了解其内部应变的分布对宏观性能的影响,20世纪90年代,国内外进行了大量的原理性实验,并在此基础上将光纤传感器应用于试验结构物内部应力分析。国外这方面研究进行得较早,美国、德国、英国、加拿大、日本等国的研究人员都对光纤传感系统在土木工程中的应用进行了大量的研究工作,如:利用光纤传感器测量混凝土梁三点弯曲试验;测量混凝土梁从加载到破坏的试验;测量混凝土与钢筋间的滑移;测量混凝土梁的裂缝位置;测量混凝土试件的动应变及静态应变;测量土石坝及堤防基础渗漏等。

在国内,跟随国外光纤传感器研究进程,很多科研机构也陆续对光纤传感器进行了实验研究。武汉理工大学分析研究了光纤传感器用于土木工程检测如何消除温度和应变的交叉敏感、光纤保护材料的选取、光纤传感器工艺的实现等几个关键技术问题,并论证和实践了光纤传感器大规模用于土木工程检测的有效途径。近些年来又和长委设计院合作将光纤光栅传感器应用于水电工程建筑物安全监测领域,并做了大量的室内外研究工作。重庆大学较早地用F-P光纤传感器对各种混凝土试件做了受压和弯曲实验研究,并分析和讨论了光纤埋入工艺和埋入光纤传感器有关力学性质与混凝土力学性质不一致对应变测量的影响,在上世纪90年代曾经与长委设计院联合申请过有关“将光纤传感技术应用于三峡工程”的国家级科研攻关课题。另外,三峡大学、哈尔滨工业大学、北京理工大学等科研及教学单位也对光纤传感技术应用于混凝土结构物的监测或测试进行了实验研究。

## 3 光纤传感器在水电工程安全监测领域的应用

### 3.1 在面板堆石坝周边缝渗漏监测方面的应用

正常情况下,土石坝的渗流场主要受库水位、周边山体渗漏水、地下水、大气降水等因素的影响,且呈现一定的规律性。当坝体挡水层遭破坏时,坝

体渗流量会增大,但在初期或这种破坏很小时,更多地表现在坝体渗流场的改变。若将高灵敏度温度传感器埋设在土石坝的土石介质的挡水建筑物的基础或内部的不同深度,如测量点处或附近有渗流水通过和迁移,土中热量传递的强度发生改变,将打破该测量点处附近温度分布的均匀性及温度分布的一致性。在研究该处正常地温及参考水温后,就可确定测量点处温度异常是否是由渗漏水活动引起的,从而可以找出渗漏点。在面板堆石坝中,面板与趾板间的接缝(周边缝)处理是保证大坝安全运行的关键技术,为监视水布垭面板堆石坝周边缝的运行情况,沿周边缝布设了准分布式光纤光栅测温系统,沿大坝周边缝每100m为一段,构成一个测量单元,水布垭大坝周边渗漏监测范围1200m共划分成10个测量单元,在每单元内放置50~80个光纤光栅温度传感器,每个间距1.5~3m。由于水布垭坝高238m,水库深处水温较低,为准确地监测到较小流量的渗漏,系统配备了光缆加热装置。从2004年底开始施工,目前已完成一、二期面板长约800m的周边缝测温系统埋设,并已开始观测,由于大坝尚未挡水,仅坝前有部分积水,2006年5月监测结果:坝基有水部位温度在19℃左右,上部无水部位温度在23℃~26℃之间,与大气温度相近;启动加热装置后,各测点处温度平均上升约5℃左右,表明系统工作良好。

### 3.2 在面板堆石坝面板挠度监测方面的应用

光纤陀螺仪是一种基于光学Sagnac干涉效应的新型角速度测量装置,将光纤陀螺仪测量装置沿被测曲面运动,能连续记录其运动角速度,可测得该装置的运动轨迹。高面板堆石坝中混凝土面板的挠度变形是大坝运行安全的重要特征值,到目前为止,还没有一种传统的测量装置能连续地记录其变形轨迹。若将光纤陀螺仪应用于测量混凝土面板挠度,则当水库蓄水运行时,在水压力的作用下,混凝土面板会产生挠度变形,当光纤陀螺仪沿面板均匀平动时,坝面挠度对运动中的光纤陀螺产生一转动分量,转动大小与陀螺平动速度成正比例。因此,当光纤陀螺仪沿面板匀速运动,便可以测量出混凝土面板的挠度变形轨迹,计算出挠度变形量。水布垭面板堆石坝坝高238m,面板最大斜长400m,从2004年底起,在一、二期面板施工时,已在混凝土面板后埋设了光纤陀螺仪测量管道,目前系统还在试运行中。

### 3.3 在面板堆石坝面板受力监测中的应用

面板堆石坝上游钢筋混凝土面板在水库水压力及其它外力作用下,因受力环境及力学效应发生改变,其混凝土内部结构应力将发生变化,并重新进行分布。若在面板内埋设应变监测设施,则可直接了解混凝土面板的受力状况,判断混凝土面板是否遭挤压或拉裂破坏。在水布垭面板堆石坝混凝土面板中布设有光纤光栅应变测线,测线在混凝土面板表层和底层各1条(同块),测线上测点成组对应布设,监测顺坡向面板上下层混凝土应力变化。现已在一、二期面板混凝土中埋设完毕,2007年初拟进行第三期面板的埋设施工,至2007年4月,2条测线可完成全部施工。埋设在一、二期面板中的应变测线已取得部分监测资料,其测值稳定,应变变化趋势基本符合目前混凝土面板的应变规律。由于水布垭混凝土面板上所用的光纤光栅应变计为特制型大标距应变计,在仪器钢架与混凝土间线膨胀系数的差异、光纤光栅材料对温度的敏感等因素的影响下,使得按常规方法计算后的应变值偏大(压应变),还需在仪器率定、现场埋设试验等方面做进一步的工作。

### 3.4 在岩石锚固监测中的应用

岩石锚杆(锚索)是隧道、地下建筑物、边坡等岩土工程施工时经常应用的用以保障工程结构稳定的杆件,对岩石锚杆的应力应变监测能了解洞体或边坡围岩稳定状态或安全程度。2003年清江水布垭水电站地下厂房在岩锚梁施工时,选择了7根典型预应力锚杆,在每根锚杆上布设了5支光纤光栅应变计。同年,为了解长阳高速公路穿山隧道岩体的稳定性,在洞内地质条件非常差处,选择了11根锚杆,在每根锚杆上设置了4支光纤光栅应变计。通过现场锚杆张拉观测,这些锚杆光栅应变计测值,基本与千斤顶张拉力学参数一致,在后期观测中,大部分测点能反映围岩实际受力的变化情况,为隧道施工和设计提供了可靠的安全信息及资料。

### 3.5 在输水隧洞监测方面的应用

地下洞室在开挖过程中及之后,由于其地质环境及力学效应发生改变,洞室围岩会因应力重分布而产生卸荷松弛,即而促使围岩体发生柔性变形或脆性变形,加之洞室沿线地质条件差别很大,遇到不良地质区段,还会产生过大变形而致围岩失稳。引大济湟工程输水隧洞全长24.3 km,洞径6.2 m,最大埋深约1100 m,具有工程线路长、埋深大、地下水位高、地质条件复杂等特点,为监测隧洞在施工

与运行期的安全稳定状况,选择在围岩稳定性较差、洞室埋深较大或断层破碎带穿过的洞段共布置了10个监测断面,在不同的断面上分别布设了光纤多点位移计、光纤渗压计、光纤钢筋计、光纤应变计及无应力计等。另外,还在引水隧洞沿线布设了12支光纤水位计,以观测输水过程中水位沿程变化情况。这些光纤传感器均在隧洞完工前,分别引入11台光纤传感器采集单元(DMI),然后通过光缆接入工程管理楼安全监控室内,由计算机统一进行数据采集和管理。以上各种光纤传感器和相应的光纤传感器采集单元均选用加拿大ROCTEST公司产品,费用相对较高。目前在输水隧洞中已埋设了2个监测断面的光纤传感器,通过仪器埋设后3个月来的观测及资料分析,认为光纤仪器监测效果良好。

### 3.6 在钢筋混凝土薄体结构物受力监测方面的应用

三峡库区国家级重点文物白鹤梁题刻原址水下保护工程的主体结构为水下钢筋混凝土拱形壳体,属典型而特殊的薄体钢筋混凝土结构物。由于其永久位于水下,环境因素极其复杂,被确定为特级工程。为了解该钢筋混凝土拱形壳体在施工期和运行期,特别是在库区水位上升、泥沙淤积增大、船只意外撞击拱形结构体等不同工况条件下,其壳体各效应参量的变化,是否会出现拉应力区,拉应力是否超限引起混凝土开裂,壳体内、外压力是否平衡,其压差是否在允许范围内等,特在该壳体结构内布设了各种监测设施。其中设置光纤光栅混凝土应变计70支、光纤光栅温度计17支、光纤光栅钢筋计98支。这些光栅传感器由多芯光缆引至岸上监控室内,并通过解调器和计算机进行统一监控。从2004年11月开始埋设仪器到现在已接近两年,观测到光栅钢筋计和混凝土应变计最大测值为-60个微应变(拉),光栅温度计测得最高温度为25℃,最低温度为11℃,目前各监测仪器运行状况良好。

### 3.7 在混凝土固化监测方面的应用

大体积混凝土浇筑后,在凝固过程中将伴随着化学反应热量的释放而固化,从而引起混凝土内部温度的上升导致内外温差增大,引起拉应力,这是引起混凝土结构初始裂缝的重要原因之一。为了解丹江口大坝加高工程大体积混凝土固化过程中其温度分布规律和不均匀收缩应变对新老混凝土结合面的不利影响,以及了解相应工程措施的有效性,在典型坝段布设了准分布式光纤光栅温度计及

其他相关监测设施。光纤光栅温度计在大坝加高混凝土内按施工层面每 3 m 高度一层,每层一根光缆,每根光缆设置 6~9 个测点,共计 82 个光纤光栅温度传感器。现已埋 3 层光纤光栅温度计,通过 5 个月的观测及资料分析,认为监测效果较好,监测到了 8 月份混凝土最高温度梯度,即:从新老混凝土结合面至坝体下游面,其温度水平向分布依次为 27℃、28℃、26℃、25℃、23℃。

### 3.8 在混凝土结构裂缝监测方面的应用

水电工程各主要建筑物大量应用的混凝土结构中,损伤或破坏的最初表现为开裂,因而对混凝土结构物裂缝的产生和发展进行有效地监测十分重要。国外一些研究机构几年前已开始研究利用光纤传感技术监测混凝土结构的裂缝状况,他们采取单模、多模、环形光纤,及埋入式、表面式等多种方法,对混凝土试件及桥梁进行裂缝检测研究,已有阶段性成果。最近,日本已率先开发出了用于检测核电站、高速公路、隧道、桥梁等是否存在裂缝的光纤传感器。该传感器的灵敏度是差阻式测缝计的千倍以上,传感器安装后,如果被测物产生裂缝,传感器将会感知到由此产生的微小的声音和振动,从而使光纤内传导的光信号的波长发生变化,通过分析波长的变化,就可以发现裂缝位置和开裂程度。通过实验证明,无论裂缝位于建筑物的表面,还是混凝土的内部或埋在地下部分,传感器都能正确地探测到裂缝的位置<sup>[3]</sup>。

### 3.9 在钢筋锈蚀监测方面的应用

钢筋腐蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性的主要原因之一,随时了解在特定环境下钢筋的腐蚀状况,对防止结构耐久性失效引发的工程事故具有重要意义。目前国内外一些研究人员正深入研究这一课题,归纳起来主要有以下三种方式:(1)采用沿光纤局部“开窗”的光纤腐蚀传感器对钢筋腐蚀进行监测,通过多个“窗口”能判断出从一根光纤上的不同开窗区返回的腐蚀信息;(2)将钢筋利用真空镀膜沉积在光纤的纤心上,使之形成敏感光纤,从而用于模拟混凝土结构钢筋腐蚀监测,获取腐蚀信息<sup>[4]</sup>;(3)基于用 Fe-C 合金膜局部取代光纤介质包层,构成腐蚀敏感膜,使之形成光纤腐蚀传感器,埋入钢筋混凝土结构中,能对钢筋腐蚀情况进行监测<sup>[5]</sup>。据悉,美国研究人员已将光纤腐蚀传感器埋入桥梁内,正监测钢筋随时间的腐蚀情况。

### 3.10 在桥梁监测方面的应用

桥梁是土建工程中既古老又现代的结构类型,

也是光纤传感技术应用其上最早、最多和最成功的结构物。主要原因为光纤传感器的分布式测量能力及其物理性能可以解决传统监测方式无法实现的问题。国外好多发达国家早已将光纤传感器用于现代桥梁的健康监测,了解桥梁在发生极端荷载的情况下结构的承载历史,以便设计人员把实际荷重与设计荷载进行比较,进而改进设计理论和施工工艺,修订桥梁设计规范,同时当桥梁结构遭受损伤时,对桥梁的状况进行安全诊断与评估。他们的主要监测内容是:钢绞线预应力状态监测;预应力筋与混凝土之间的粘结滑移和应变松弛监测;混凝土的应力应变及温度的监测;动应变和结构振动监测等。

在国内,武汉理工大学研制的光纤光栅传感器已在武汉新长江大桥、巴东长江大桥、香港青马大桥、海口世纪大桥等桥梁监测中得到应用。哈尔滨工业大学和石家庄铁道学院在这一方面也有成功的实例。光纤传感技术为这些桥梁施工的各个阶段提供了准确可靠的测试数据,为正确评价大桥的受力状况和结构性能提供了可靠的科学依据。应用结果表明:光纤传感器在稳定性和耐久性上远优于传统的电阻应变片;光纤传感器可以有效地监测结构的应力(应变)和温度变化,是一种有效的、具有发展潜力的结构安全监测技术。

## 4 结 语

光纤传感器由于其具有特殊的物理性能和优点,通过十余年的研究和试验,现已在我国水电工程安全监测领域得到应用,并已初见成效。但从目前我国光纤传感器在水电工程安全监测领域的研究与应用情况来看,尚存在基础研究薄弱、将光纤传感器应用于水电工程的专业人员较少、针对性不强、传感器与基体材料互适应性研究较少、传感器在各种建筑物中的埋设方法和工艺还需要不断地探索、光纤传感器监测系统的经济性与传统监测系统相比并不占有优势、核心技术还需要进口、加之由于水电工程结构种类的多样性和复杂性,使不少监测项目的传感原理研究困难,同时还有采集系统和数据处理系统的通用性和实用性问题,使得这方面的研究与应用工作进展比较缓慢。然而,只要认真总结经验,加强基础研究,理论与实践紧密结合,光纤传感器及其相关的材料在水电工程安全监测领域的应用前景就会非常宽广,(下转第 44 页)

铝含量丰富。在《狮子滩水电站坝基排水孔黄色絮状物溢出成因分析》一文中关于第一类絮状物成因分析中有这样的叙述:“含钙量较多,其主要来源是地下水溶蚀了部分坝基帷幕灌浆形成的水泥结石”。由此可以说明环境水对帷幕水泥石产生侵蚀作用,而且,部分坝段基础帷幕防渗作用已发生了不同程度的衰减。

#### 4.3 高压水对基础的影响

众所周知,水库形成后,坝区岩体失去了天然河道的平衡状态,在水库高水头的作用下,岩体的结构必然会持续恶化。这是一个不可逆转的进程,其发展的速率与坝区地质条件的好坏、工程处理的程度、荷载作用的大小等诸多因素有关。岩体的断层、节理、裂隙在高压水的长期作用下,充填物逐渐被软化、离析,而形成通道。其明显的反映是渗透压力升高,渗流量增大。对狮子滩大坝而言,扬压力的升高也反映了高压水长期作用对坝区岩体的影响。

#### 4.4 扬压力孔设计上的问题

原坝基扬压力测孔与改建的测压孔(排水孔兼作扬压力孔)均深入基岩 10 m 左右,所谓扬压力是指坝底与基础结合面部位渗透压力与浮托力之和,对狮子滩大坝而言,扬压力就是坝底与基础结合面部位的渗透压力。把坝基排水孔兼作扬压力监测孔,这是很不合适的。其一是阻碍了排水孔的正常排水;更重要的是排水孔所测的“扬压力”已不是坝与基础结合部的扬压力,而是包含了坝与基础结合部深入坝基十多米这一段岩体的平均渗透压力,它与坝基扬压力的概念已完全不同。经过几十年的运行,部分排水孔已淤堵,造成排水不畅,这也是导致扬压力升高的另一原因。

因此,坝基扬压力的增加除了考虑设计、施工、环境水对防渗帷幕的侵蚀因素外,还应对坝基扬压力测孔埋置过深影响测值的准确性以及部分排水(上接第 41 页)它不仅能给古老而现代的水电工程安全监测学科带来勃勃生机,而且具有重大的科学意义和现实意义。 ■

#### 参考文献:

- [1]孙圣和,等.光纤测量与传感技术[M].哈尔滨工业大学出版社,2000.1
- [2]胡晓东,等.分布式光纤传感技术特点与研究现状[J].航空精密制造技术,1999,35(1).
- [3]裂缝检测光纤传感器在日本问世(综合信息)[J].电子元件与

孔的淤堵等情况加以综合考虑。

### 5 降低坝基扬压力的几点建议

坝基扬压力主要受坝上、下游水位影响,并与坝基地质条件及防渗帷幕、排水设施的布置及工作效能有关。针对狮子滩大坝基础扬压力超标的具体情况,提出如下几点处理建议:

(1)全面考虑大坝的实际运行环境和客观条件,有针对性地优先对大坝施工时遗留下来的隐患进行系统研究,制订切实可行的降低坝基扬压力的处理方案。如进行帷幕补强灌浆处理,基础扬压力超标坝段这部分灌浆应突出重点,分阶段、分步骤进行。另外,补强灌浆材料优先选用受环境水侵蚀小的水泥品种,如矿渣硅酸盐水泥或火山灰质硅酸盐水泥。

(2)对现有的扬压力观测孔进行技术改造。根据 SDJ21-78《混凝土重力坝设计规范》(试行)第 110 条和 DL/T5178-2003《混凝土坝安全监测技术规范》第 8.2.2 条的相关规定执行。

(3)对部分淤堵的排水孔进行扫孔处理,排水孔应满足 DL/T5178-2003《混凝土坝安全监测技术规范》的相关要求。

(4)每半年定期对库水(包括上层水、中层水、下层水)、排水孔水、扬压力孔水进行水质分析,并相互比较。若观测孔内的地下水对混凝土有较大侵蚀时,可制作水泥砂浆试块放入孔内,隔一定时间后取出,检验试件强度的变化。

(5)高度重视基岩中的析出物,对析出物做成分分析,检查是否有化学管涌或机械管涌发生。 ■

收稿日期:2006-07-28

作者简介:陈国平(1975-),男,湖北新洲人,重庆狮子滩发电公司工程师,工程硕士,从事水电厂水工水文管理工作。

材料,2003(6).

[4]李学金,等.钢筋腐蚀光纤传感器的研究[J].测控技术,2001.20(8).

[5]黎学明,等.光纤传感器对混凝土结构钢筋腐蚀监测的研究[J].光电子-激光,2001,12(10).

[6]蔡德所,著.光纤传感技术在大坝工程中的应用[M].中国水利水电出版社,2002.1.

收稿日期:2006-10-20

作者简介:郝长江(1956-),男,湖北武汉人,高级工程师,从事水工建筑物安全监测工作近三十年,现为长江委设计院安全监测专业技术负责人。