

基于分布式光纤声场传感的预应力钢筒混凝土管断丝监测研究进展

张旭苹^{1,2}, 周广南^{1,2}, 王浩然^{1,2}, 王金³, 刘世超³, 张道⁴, 赵世松⁴, 王峰^{1,2}, 熊菲², 张益昕^{1,2*}

¹南京大学现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210023;

²南京大学智能光感知与调控技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210023;

³北京湜沅科技有限公司, 北京 102400;

⁴南京法艾博光电科技有限公司, 江苏 南京 211135

摘要 为了解决水资源时空分布不均匀的困境,我国目前正在兴建一系列大规模引调水工程。预应力钢筒混凝土管(PCCP)因其强度高、抗震好、防渗漏等优点,被广泛应用在长距离输水管道的建设中。但是随着服役年限的增加,PCCP管道存在预应力钢丝断裂的现象,积累到一定程度便有可能诱发爆管事故,因而迫切需要对PCCP断丝进行实时在线监测。相比于传统手段,基于分布式光纤声场传感(DAS)的PCCP断丝监测技术在传感器布置的便捷性和事件识别的准确性方面具有明显优势。本文分析了PCCP断丝成因,对比了现有的各种PCCP断丝监测方法,并介绍了近年来出现的基于融合式DAS原理的PCCP断丝实时在线监测解决方案,同时对其发展趋势进行了展望。

关键词 预应力钢筒混凝土管; 断丝监测; 分布式光纤声场传感; 融合型系统

中图分类号 TN818 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231405

1 引言

水资源是人民生产生活不可或缺的元素。我国水资源总量虽然庞大,但其时空分布非常不均匀^[1]。为防治水旱灾害、保障人民正常的生产生活,我国兴建了一系列大规模引调水工程,例如南水北调工程、引江济淮工程、引黄济青工程等。为满足大规模用水需求,提高引调水效率,就必须采用压力管道进行输水。预应力钢筒混凝土管(PCCP)中的预应力钢丝能够产生预压应力,从而抵偿由内压和外荷载产生的拉应力^[2-4],因此PCCP管道能承受高覆土、高工压,同时具有容量大、接头密封性好、耐腐蚀、运行成本低和防渗漏性能好等诸多优点,在我国被广泛应用于干线调水工程项目中^[5-7]。

然而在制造、安装、运行各个阶段中,PCCP管道中的预应力钢丝容易受到化学腐蚀或物理损伤,进而发生断裂,即所谓“PCCP断丝”现象^[8]。当单节管道中的断丝数量累积到一定比率时,就可能因强度降低而发生爆管事故。例如2010年宁夏宁东供水工程管线发生爆管事故,导致公路、收费站墙体被冲垮,直接经济损失约达100万元。图1所示为爆管事故现场图^[9]。



图1 爆管事故现场图^[9]

Fig. 1 Photograph of burst pipe accident scene^[9]

经检验发现,挖出的7根管道,其外部砂浆保护层空鼓处预应力钢丝锈蚀断裂比例平均超过45%^[10]。PCCP断丝诱发的爆管事件具有突发性,不仅会导致供水中断,同时也会造成严重的次生灾害。例如爆管后产生的水流可能诱发周边道路、房屋的坍塌,引起交通阻塞,甚至进而导致人员伤亡,可能带来严重的经济损失与社会负面影响。然而PCCP管道通常深埋于土壤中,尺寸大、跨度长,且管道中的预应力钢丝位于砂浆

收稿日期: 2023-08-14; 修回日期: 2023-09-26; 录用日期: 2023-10-07; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(U2001601, 62175100, 61975076)、装备预先研究项目(30601010104)、中央高校基本科研业务费资助项目(0213-14380202)

通信作者: *zyixin@nju.edu.cn

保护层中,无法从管道外表直接观察到断丝情况。如果想要获取断丝位置与数量情况,就需要挖出管道并破坏保护层。这种破坏性检测方法只能用于少量管道的取样验证,效率低、成本高,同时会影响到输水管道的正常运行。因此运维部门对于采用无损检测技术实现管道的健康监测具有十分迫切的需求。

传统的断丝探测技术主要有人工回声检测^[3]、电磁检测^[11]和水声监测等^[7, 12-13]。其中人工回声检测和电磁检测方法容易受到干扰,检测精度和效率低,且需要停水后方能作业。水声监测法的传感器布设密度低,监测到的断丝信号容易因水体中的长距离传输而产生畸变,从而形成较高的误报率。且该方法成本高昂,通常难以大规模组网。近年来分布式光纤声场传感(DAS)技术开始被应用于PCCP断丝监测。DAS技术将整段光纤作为传感器件,能够实现对数十千米范围内光纤沿线任意位置处微弱扰动的高灵敏探测与精准定位,其相较于传统的监测技术具有连续分布式、监测距离长、信号畸变低、便于大规模组网、环境适应性强等优势^[8]。且传感光缆可以带水布设,解调仪器仅须单端接入,便于传感系统在现场的安装部署。结合模式识别算法,该系统能够可靠地对具有爆管风险的PCCP管节提前发出预警。因此无论是面向新建还是在役管线,该技术均能够胜任监测任务,在PCCP断丝监测上有着广阔的应用前景。本文对PCCP断丝成因与演化过程进行了分析,对比了现有的各种PCCP断丝监测方法,并介绍了近年来出现的基于融合式DAS的PCCP断丝实时在线监测解决方案。最后对PCCP断丝监测市场的发展趋势进行了展望。

2 PCCP断丝成因与演化过程

PCCP管道主要由混凝土、钢筒、预应力钢丝以及水泥砂浆四种材料组成,其结构如图2所示。管道最内层是管芯混凝土,其次是钢筒,二者组成刚性管芯,可以抵抗内部水压与外荷载。钢筒同时能够起到防渗作用,抵抗轴向应力。钢筒外层是预应力钢丝,其以一定强度的拉应力被螺旋缠绕于钢筒上,能够挤压钢筒和管芯产生预压应力,抵偿PCCP管道内压以及外荷载作用,提高管道整体强度。最外层是砂浆保护层,用于保护预应力钢丝以及钢筒和管芯混凝土,防止管道受到外界物理损坏以及化学腐蚀^[11, 14]。

由于四种材料间相互作用、外部环境影响等因素,任何一种材料的损伤都可能引发或加速其他材料的损伤,而PCCP爆管的主要诱因便是预应力钢丝的断裂^[2, 15]。PCCP管道从生产制造到最终破坏的逐步演化过程如图3所示,可以大致分为早、中、后三个阶段^[16-17]。

1)在早期阶段,管道在出厂时就有可能存在设计、制造或安装过程中产生的缺陷。在设计过程中,对于不同工作环境的PCCP管道需要采用不同的设计标

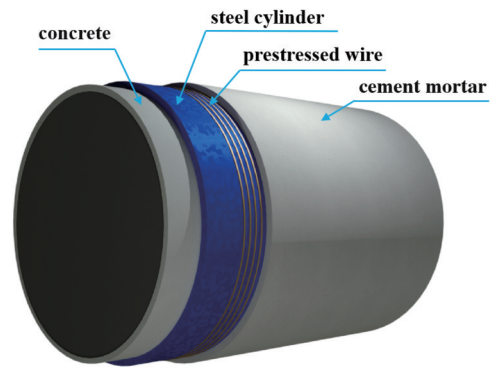


图2 PCCP管道结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of PCCP

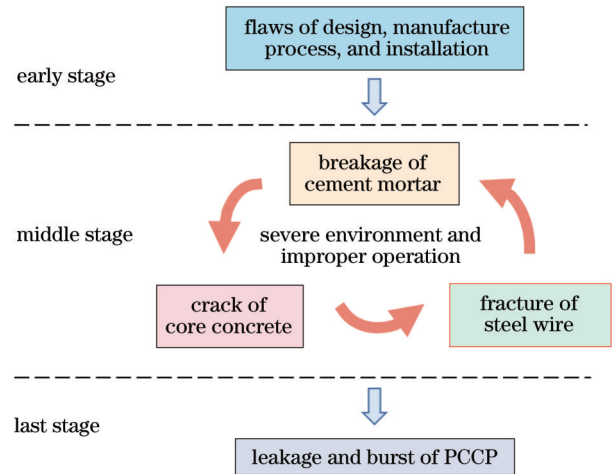


图3 PCCP管道破坏过程

Fig. 3 Failure process of PCCP

准:如果在强腐蚀性环境中工作,需要增加阴极保护和防腐涂层;如果在覆土较深的环境中工作,需要增加砂浆保护层和钢筒厚度。一旦出现设计方案与环境条件不匹配,就会产生选择荷载不当、管线超压运行等问题。制造期间,则有可能出现原材料使用不符合规范、预应力钢丝缠丝应力不足、管芯浇筑时间不合适等问题^[16]。尤其严重的是,如果没有严格控制钢丝冶炼制造时酸洗等过程中的环境条件,就会加剧氢渗入现象,导致钢丝更易产生氢脆断裂问题^[18-20]。在安装过程中,如果垫层未按照设计要求施工,管道露天堆放时间过长导致砂浆保护层风化或开裂,管道安装时因摩擦或撞击导致砂浆保护层损坏,同样会导致PCCP断丝风险增加^[15]。

2)在中期阶段,由于管道早期存在的缺陷和恶劣的服役环境,砂浆保护层中的水泥受到管线周边土壤中的酸、碱、盐以及水流压力等因素的侵蚀产生开裂,导致预应力钢丝暴露并受到环境腐蚀,进而有可能诱发断丝现象^[21-28]。不同地区的地理条件和地质构造不同导致了地下水成分的不同,进而产生不同的腐蚀模式:例如硝酸盐腐蚀产生裂纹、氯化物点蚀产生钢丝变

细、氢硫化物腐蚀产生氢脆。预应力钢丝腐蚀断裂数量达到一定的临界值时,管芯混凝土就会因外部预应力减小产生环向和纵向裂缝,导致管道承压能力下降^[20]。

3)在后期阶段,管芯混凝土的裂缝以及部分预应力钢丝断裂导致管道整体应力分布变化。管线运行过程中如果发生供水离心泵操作不当或跳闸断电等问题就会使水流对阀门及管壁产生压力,在短时间内加剧 PCCP 断丝的发生,管芯混凝土与钢筒无法承受外荷载与高内压,最终诱发管道泄漏甚至爆管事故^[29-31]。

在早期阶段,设计、制造以及安装中的隐患可以通过对操作流程的规范化予以规避。而一旦进入后期阶段,断丝的演化非常迅速,通常难以做出有效的应对。因此 PCCP 断丝的在线监测主要针对中期阶段,随时掌握管道中断丝情况并评估管道健康状态,及时通知运维部门介入,尽量避免破坏过程进入后期阶段而导致爆管事故的发生。

3 传统 PCCP 断丝监测技术

3.1 人工回声检测法

人工回声检测法是 PCCP 管道断丝的常规检测方法。如图 4 所示,该方法需要将管道疏干,通过识别敲击管壁产生的回声来确定管道内部缺陷位置,随后通过开挖检查其具体断丝情况。这种方法主要依靠个人经验,工作量大、检修效率低、精度较差^[2]。

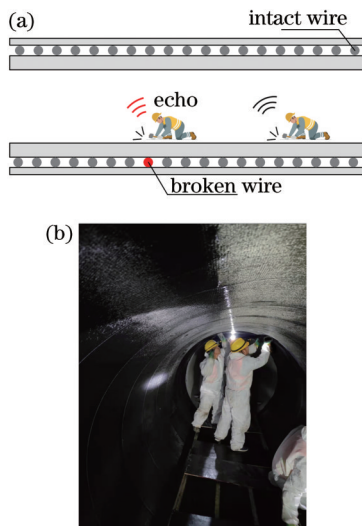


图 4 人工回声检测法。(a) 示意图;(b) 现场操作图
Fig. 4 Manual echo detection method. (a) Schematic diagram; (b) picture of site operation

3.2 电磁检测法

电磁检测法基于远场涡流(RFEC)原理,由美国布鲁克林理工学院的 MacLean 提出并于 1951 年在美国申请获得专利^[32]。如图 5 所示,该方法通过放置在 PCCP 管道内一端的激励线圈施加低频交变磁场,再利用管道另一端的测量线圈接收预应力钢丝中涡流产

生的磁场信号。当磁场信号沿管道传播时,信号会受到诸如幅度衰减和相位延迟等类型的调制^[29-30]。如果预应力钢丝出现断裂,则检测线圈接收到的信号特征参数通常会发生幅值减小、相位延迟增大等畸变,从而能够据此判断和定位断丝事件^[29, 32]。

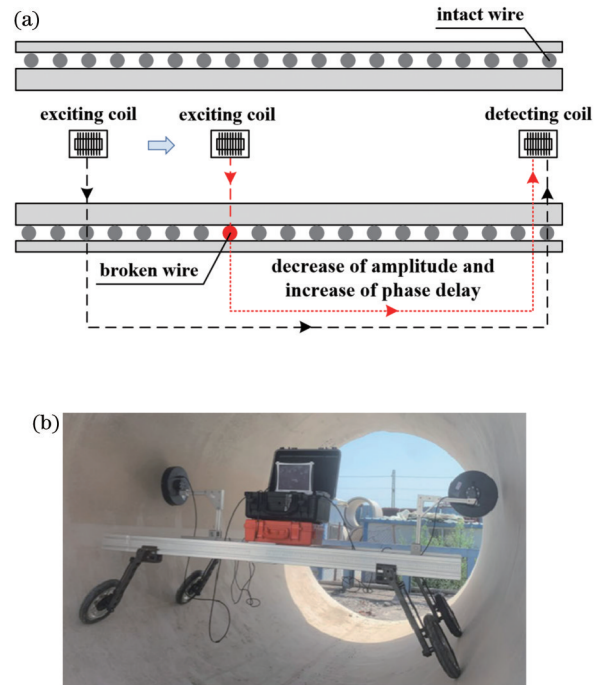


图 5 电磁检测法^[32]。(a) 示意图;(b) 设备实物图
Fig. 5 Electromagnetic detection method^[32]. (a) Schematic diagram; (b) picture of equipment

1958 年, Schmidt 团队^[33-34]与 Shell Development 合作研制了第一套应用于管道缺陷检测的 RFEC 检测系统。目前,国外从事 RFEC 技术检测设备开发应用的机构主要有加拿大皇后大学、加拿大 Pure 公司以及加拿大 Russell NDE 公司等^[29]。国内对 RFEC 技术的研究始于 20 世纪 80 年代。1991 年,南京航空航天大学的司家屯等^[35]利用有限元法分析了 RFEC 效应中激励线圈的能量传播路径,证明了利用 RFEC 效应检测 PCCP 断丝的可行性。2011 年,空军工程大学的荆毅飞等^[36-37]利用脉冲 RFEC 技术检测了油气管道的轴向裂纹,并设计了四种传感器模型,通过仿真分析为脉冲 RFEC 检测技术的应用提供了理论依据。2017 年,我国自主研发的 PCCP 断丝电磁检测设备 PWBD-006 参加了北京市南水北调中线干线工程建设管理局组织的电磁检测比对试验,结果显示该系统断丝判别最小数量为 5 根,定位误差可控制在 10 cm 以内^[29],已经达到了国外同类型设备的技术水平。此前我国多采用国外设备检测断丝,每公里检测成本高达数万元^[38]。国产 PCCP 断丝电磁检测系统的成功研发打破了国外技术垄断,大大降低了断丝检测的成本。

电磁检测法检测效果显著优于人工检测法,平均

准确率可达 65%~69%^[29]。但是该方法同样仅适用于 PCCP 停水检修阶段,需要疏干管道,无法带水工作,也无法进行实时在线监测。同时该方法完成整段 PCCP 管线的检测耗时较长,工作效率依然不高。相对来说,该技术更适合管线竣工前验收阶段以及大规模修缮管线时使用,对于管线运行期间由断丝诱发的事故,其预警效果有限^[24]。

3.3 水声检测法

PCCP 管道发生断丝时会产生高能瞬态弹性波,这种声波大多呈现快速衰减的脉冲特性,覆盖频段宽,并且声波持续时间很短,仅数十毫秒^[39-40]。因此,若要实现对 PCCP 管道断丝的实时监测,传感系统就需要具有较高的时间和空间分辨率,同时具有高保真宽频响应性能和瞬态信号的捕获与分析能力。位于基站的工作站计算机通过信号处理滤除环境噪声,将处理过的信号与标准的断丝声音信号进行相似度比对,即可判断是否发生断丝事件。通过计算相邻两个传感器捕获到同一断丝事件声音信号的时间差即可判定断丝事件发生位置^[41-44]。传统的水声监测法检测系统包括水听器基站、水听器阵列以及管道表面安装传感器三种形式^[45]。其中水听器基站方式将单个水听器通过阀门等位置插入管道,便于安装与移动,但监测精度相对较低。水听器阵列方式将多个水听器以一定间距通过电缆或光缆连接,再将水听器阵列带水布设入管道内,这种方式的监测距离以及定位精度均优于水听器基站方式。管道表面安装传感器方式直接将声学传感器安装在管道砂浆保护层的外表面,布设简单。但由于管道壁对声信号的衰减,其识别与定位精度均低于前两种方式^[30]。图 6 所示为基于水听器阵列的水声监测系统原理图,利用安装在管道内部的点式声学传感器即可接收断丝产生的声音信号并传输到监测基站。

水声监测法自 20 世纪 90 年代中期在 PCCP 断丝

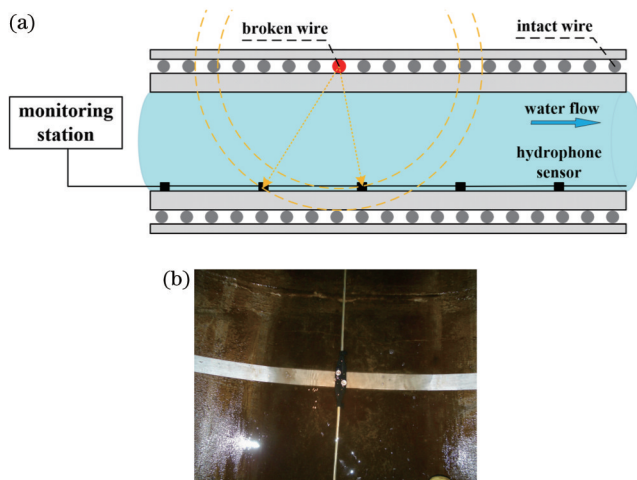


图 6 水声监测法^[45]。(a)示意图;(b)传感器实物图

Fig. 6 Acoustic monitoring method^[45]. (a) Schematic diagram; (b) picture of sensor

监测领域成功实现商用,最早见诸公开报道的水声监测系统于 2000 年由加拿大 Pure Technologies 公司的 Holley 等^[7, 45]提出,该系统采用了水听器阵列监测断丝信号,并被应用于美国马里兰州的一段 1.8 km 长的 PCCP 管线,为预防爆管事故提供了有效的技术手段。2010 年,美国 Schiff Associates 公司的 Bell 等^[46]采用水声监测法分析了 PCCP 断丝对管道承载能力的影响,利用声音信号的振幅和频率响应特征区分了 PCCP 断丝与砂浆分层等现象,实现了对 PCCP 管道健康状况的评估。我国近年来也开展了基于水声监测法的断丝监测研究。2016 年,北京市水利规划设计研究院的姚宣德^[47]研制了一套基于水声监测法的光纤光栅断丝监测系统,通过在管道内壁安装光纤光栅振动传感器来获取断丝产生的声音信号,实现了优于 1.5 m 的断丝定位精度以及 1 kHz 的频响范围。2018 年,北京航空航天大学齐海铭等^[48]在管道内壁设置光纤光栅传感器对断丝声波进行监测,并设计了悬臂梁装置用于微应变增敏,提高了断丝监测准确率,并获得了 0.11 m 的定位精度。

相较于人工检测法与电磁检测法,水声监测法无需停水即可进行连续在线监测,抗干扰能力相对较强^[45, 49-50]。但是该方法需要计算断丝声音信号到达相邻两个传感器的时间差来定位断丝位置,而断丝点距离相邻 2 个传感器的位置关系完全随机分布,声音信号到达 2 个传感器的路径可能存在较大的距离差异,从而经历不同的畸变过程,易诱发误报,影响定位效果。并且水声传感器在现场的安装、供电、通信也较为复杂,令该技术难以实现大规模组网^[41]。

4 基于 DAS 的 PCCP 断丝监测技术

针对传统水声检测法的局限性,研究人员将目光转向了全分布式光纤传感技术。DAS 技术将光纤同时作为传输媒介和敏感元件,在能够实现对声波的非接触式测量的同时还能做到多点同时监测^[48]。DAS 采用的连续分布的传感光纤,可以就近收集声波信号。断丝点与最近光缆间的距离,最大不会超过 PCCP 管道的直径。因此利用 DAS 技术采集到的声波畸变小,断丝定位准确率高。如图 7 所示为基于 DAS 的 PCCP 断丝监测技术的原理图。该技术无现场供电要求,通感一体易组网,可以实现大范围覆盖,能够带水安装传感光缆,克服了传统水声监测法的缺陷,非常适合应用于 PCCP 管道断丝监测^[51-52]。

4.1 基于 Φ -OTDR 的 PCCP 断丝监测技术

相位敏感型光时域反射计(Φ -OTDR)是实现 DAS 的一种常见技术途径,该技术利用高相干度的脉冲光源在光纤中传播时产生的背向瑞利散射信号对振动进行探测。图 8 为 Φ -OTDR 系统原理图,窄线宽激光器(NLLD)产生的连续光经过调制器调制变为脉冲光,脉冲光经过环形器进入被测光纤,当外界振动作用

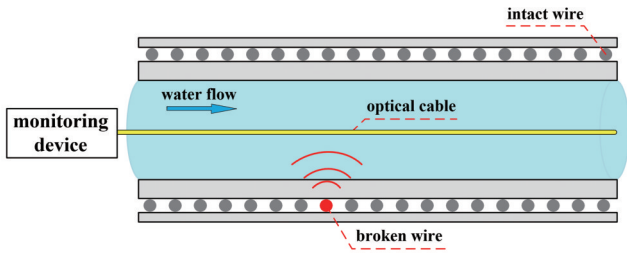


图 7 基于 DAS 的 PCCP 断丝监测技术原理

Fig. 7 Schematic diagram of PCCP broken wire monitoring technology based on DAS

在被测光纤上时,光纤中的背向瑞利散射光会发生相位变化,随后通过环形器进入数据采集卡(DAQ),通过解调散射光相位信息即可获得振动信号的位置以及时频特征^[52-53]。

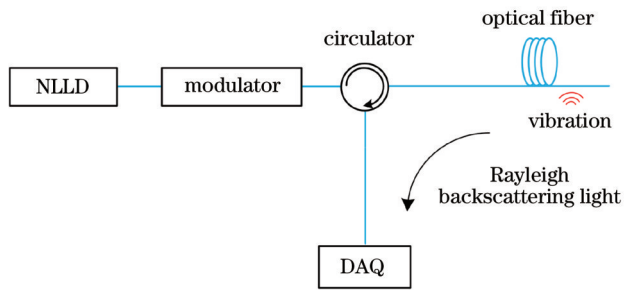


图 8 Φ -OTDR 系统原理图

Fig. 8 Schematic diagram of Φ -OTDR system

2006年,Pure Technologies公司的Higgins等^[45]首次将 Φ -OTDR应用于PCCP断丝监测,在美国巴尔的摩的一段饮用水输送管线上进行了试验,在4个月内监测到了11起断丝事件,定位不确定度约为 ± 1.5 m。2021年,中国船舶重工集团公司第七一五研究所的纪然然等^[54]将 Φ -OTDR技术应用于江西省共青城市的引调水工程项目中,其所构建的断丝监测系统能够实现50 km的监测距离以及3 m的定位精度。2023年,河北工程大学马宝龙等^[51]设计了一套基于 Φ -OTDR技术的PCCP断丝监测系统,利用基于深度学习的目标检测算法提升了对采集到的断丝信号的识别准确率,经过优化的断丝检测模型对于包含10次断丝信号的测试集查全率以及查准率均达到100%。不过该方案的数据集只采用了20 m范围内的管道断丝信号,对于实际工程中长距离条件下的断丝信号识别能力仍有待验证。

Φ -OTDR技术基于光脉冲的飞行时间法,能够探测的振动信号最高频率与监测距离相互制约,因此在数十千米监测距离上,其频率响应上限通常在kHz以下^[52, 55]。在这种情况下,由于高频特征成分的丢失或混叠,断丝事件声波信号容易与外界噪声信号产生混淆,导致断丝监测出现漏报、误报等问题。

4.2 基于干涉仪的PCCP断丝监测技术

光纤干涉仪(FOI)是实现DAS的另一种途径。该技术通过测量信号光与参考光之间的相位差来实现对振动的探测,具有响应速度快、频响能力强以及灵敏度高特点,但大多数FOI不具备精确定位的能力^[56]。白光FOI系统以及双马赫-曾德尔干涉仪(MZI)系统的诞生解决了FOI的定位问题。图9(a)为白光FOI系统原理图,白光FOI系统中由激光器(LD)产生的入射光在参考干涉仪处被分为两束,传感干涉仪发出传感光信号与标定光信号在参考干涉仪处发生干涉,干涉光再由DAQ采集。利用扰动点在白光FOI系统中位置不同、干涉信号频谱缺损位置不同这一特点,实现定位功能^[57]。图9(b)为双MZI系统原理图,该系统中LD产生的入射光由耦合器1分为两束,一束通过耦合器2分别进入传感光纤以及参考光纤,传感光与参考光于耦合器3处发生干涉,最后由光电探测器(PD)2接收;另一束通过耦合器4与耦合器3后从传感光纤以及参考光纤的另一端入射,传感光与参考光在耦合器2处发生干涉,最后由PD1接收。利用频谱分析不同频数下的能量特征并确定最优频数,然后通过互相关计算获取双路振动信号之间的时延,进而获得振动位置^[58]。

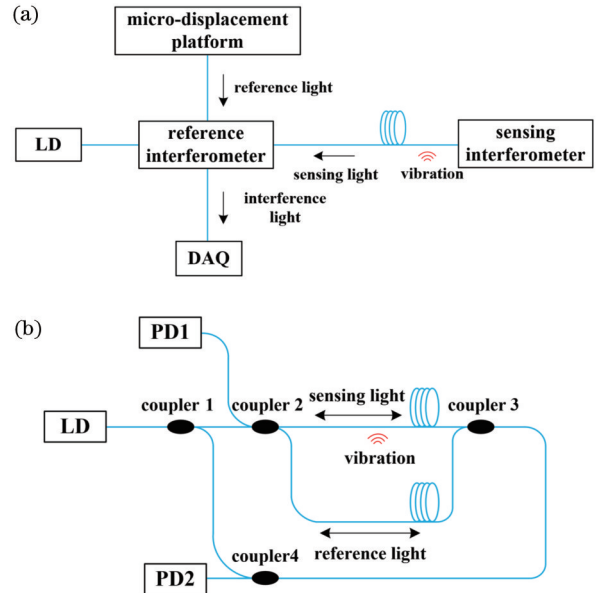


图 9 白光 FOI 系统和双 MZI 系统原理图。(a) 白光 FOI 系统原理图; (b) 双 MZI 系统原理图

Fig. 9 Schematic diagrams of (a) white light FOI system and (b) dual MZI system

2005年,复旦大学贾波课题组^[59]基于白光FOI原理设计了一套全光纤振动传感系统,实现了对25.5 km处振动信号的测量,定位误差为20 m。2023年,太原理工大学靳宝全课题组^[58]提出了一种基于伯格算法的双MZI传感系统,降低了噪声对系统的影响,在2.2 km的传感光纤上实现了7.3 m的绝对定位

误差。白光 FOI 技术灵敏度高,能够实现振动的定位,但无法实现单端监测,需要调节微位移台使传感干涉仪与参考干涉仪光程差相等,测量过程复杂。双 MZI 技术结构较为简单,对振动的定位误差与白光 FOI 技术接近,但同样无法实现单端监测。虽然基于 FOI 的分布式光纤传感系统目前已经能够实现对振动位置和频率信息的探测,但 FOI 在光缆沿线同时存在多个事件或存在强环境干扰的情况下效果不佳,且定位精度通常在 5 m 以上,难以满足单个管节断丝数量累加统计的需求。其在传感光缆的拓扑中多采用双路或光纤环结构,在实际工程应用中实施难度较高。

4.3 基于融合型 DAS 的 PCCP 断丝监测技术

为了同时获得大覆盖范围、高定位精度以及宽频率响应能力,已经有研究人员尝试将 Φ -OTDR 技术与 FOI 技术融合以实现高性能的 DAS 传感系统。图 10 所示为基于融合型 DAS 的 PCCP 断丝监测系统示意图。融合型 DAS 系统利用多芯光缆将两段光纤分别接入其中的 Φ -OTDR 部分和 FOI 部分,其中 FOI 部分接入的光纤尾端需要连接法拉第旋镜 (FRM) 将入射光反射回 FOI 系统,结合两部分传感功能同时实现对断丝振动信号位置以及频率信息的捕获。

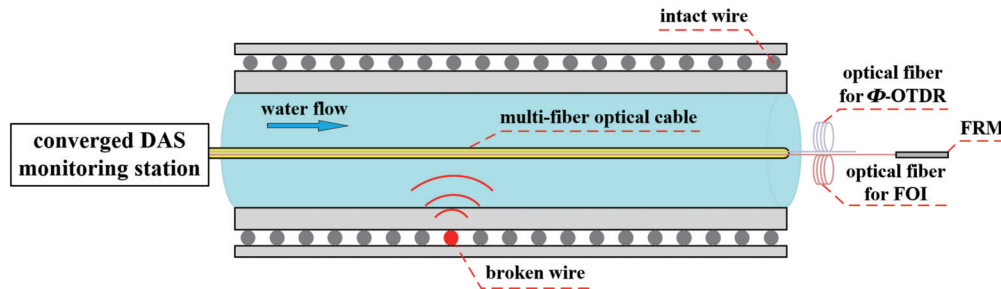


图 10 基于融合型 DAS 的 PCCP 断丝监测系统示意图

Fig. 10 Schematic diagram of PCCP broken wire monitoring system based on converged DAS

2017 年,南京大学张旭莘课题组^[60]设计了一种融合 Φ -OTDR 与 MZI 的振动监测系统,利用传感光纤尾端的移频镜令 DAS 所依赖的背向散射光和 FOI 所依赖的反射光形成频率差异,从而实现两种技术的频分复用。该系统实现了 6.35 km 传感距离上优于 10 m 的空间定位精度,最高频率响应可达 1.2 MHz。2018 年,该课题组还提出了一种基于 Φ -OTDR 和分布式反馈 FOI 的 DAS 实现方案,该系统采用波分复用技术在 2.16 km 的传感距离上同样获得了优于 10 m 的空间定位能力,最高频率响应可达 1 MHz^[61]。2018 年,香港理工大学的 Zhao 等^[62]利用空分复用实现 Φ -OTDR 与 MZI 融合,在 2.42 km 的传感距离上获得了优于 1 m 的空间定位精度,以及 12 kHz 的最高频响。2023 年,北京湜沅科技有限公司联合南京大学、南京法艾博光电科技有限公司共同研发了一种融合 Φ -OTDR 与 MZI 的 PCCP 断丝监测技术,实现了 20 km 的单端监测,空间定位误差在 ± 2 m 以内,最高频率响应达 20 kHz^[40],并推出了基于该技术的商用解决方案——智能分布式光纤传感系统 (iDFS)。

5 基于 DAS 的 PCCP 断丝监测的工程应用实例

5.1 Soundprint AFO 系统

2006 年,加拿大 Pure 公司研发的 Soundprint AFO 系统开始应用于美国加利福尼亚州圣迭戈市,截至 2009 年在该区域覆盖的输水管线长度总计达到了 79 km^[42]。该项目在安装光缆时,使用专用橡胶夹和

固定装置将光缆连接到管道的内壁。考虑到在长期的监测过程中,光缆一旦移动会影响系统对断丝事件的定位能力,因此光缆固定点设置在管道的拐点和湍流区域。

在 PCCP 管道中,每间隔一定距离须安装蝶阀,起到调流和节流的作用。为防止阀门关闭时将光缆夹断,需要将蝶阀两侧的管壁做打孔处理,引出光缆从管道外部跨越蝶阀^[63]。光缆接续盒须安装在蝶阀附近,方便光缆连接和后期维护,光缆蝶阀处连接示意图如图 11 所示。

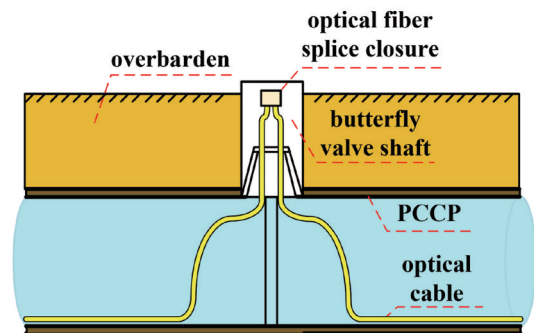


图 11 光缆蝶阀处连接示意图

Fig. 11 Schematic diagram of optical cable layout through butterfly valve

2017 年,北京市水科学技术研究院引进了 Soundprint AFO 断丝监测系统,并将其安装在南水北调中线京石段应急供水工程(北京段)中惠南庄泵站至大宁调压池的右线尾段 35.7 km 的管道上^[63]。

在该项目中,管道内铺设的光缆为带压安装,避免了因施工造成管道停运。但这一铺缆方法也造成光缆在管道内部没有固定点。光缆在管线内持续摆动,系统所记录的原始振动信号中低频背景噪声强烈,须通过信号处理手段对于干扰事件进行抑制。同时水流长期的单向流动与冲击,会令光缆随水流向下移动,因此运维人员必须定期将光缆拖拽到初始位置,并重新标定光缆皮长与管道长度间的映射关系。

Soundprint AFO 系统在安装后,可以针对每一节管道进行历史总断丝数的计数,但不能确定是否达到 PCCP 管道濒临爆管的高危值。由于管道在具体的尺寸、结构和铺设环境上存在差异,每节管道的断丝数量所对应的爆管概率也必然不尽相同。因此须针对不同项目背景,对 PCCP 断丝造成的管道承载能力下降以及爆管风险的提升进行个性化评估。同时该系统在工

作模式上,会将采集到的声学数据回传到位于北美的数据中心进行分析比对,事后仅告知断丝事件发生的时间和位置。在当前国际格局剧烈变换的大背景下,将涉及民生、工业的核心水务数据发送到国外,势必造成敏感信息泄露的风险。因此这种数据采集与分析均委托于国外公司的模式,在相当长的可预见时间段内都势必难以维系。

5.2 iDFS 系统

目前国内断丝监测技术领域拥有 iDFS 系统,其组成如图 12 所示。该系统在工程实施中,既可以在建设阶段将光缆与 PCCP 管体直接贴敷做刚性粘连,也可以针对在役管道采用与 Soundprint AFO 类似的方案,将光缆带压铺设到管道内。传感光缆单端引出后连接到监测站的融合型 DAS 主机。实时记录的传感信号通过互联网传输到监测控制中心,对管道的健康状况进行评估。

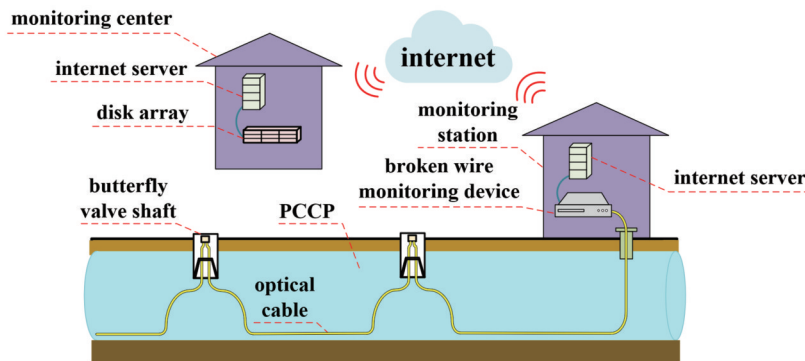


图 12 iDFS 系统示意图

Fig. 12 Schematic diagram of iDFS system

iDFS 系统预警平台的软件主界面如图 13 所示。该平台可以对断丝事件进行识别与记录,提供时间、位置、置信度等信息,对每节管道的历史断丝数量进行统计,并评估管道的健康状态。选择列表内的历史事件后,可以对断丝发生时刻前后一定范围时间窗口内的历史数据进行能量统计,同时展示包含断丝事件在内的局部时域图和频谱图,供运维部门进行进一步的人工研判与确认。

该系统已实地应用于南水北调工程中线北京段管线,监测管道长度为 16.7 km。该项目已通过北京市水科学技术研究院专家组评审,认为:“经过实地测试,设备系统稳定,功能、参数基本满足 PCCP 断丝声(振动)监测需求,软件扩展性较好,界面友好,性能满足使用要求。”尤其需要指出的是,在满足 PCCP 断丝监测需求的前提下,iDFS 系统享有完全的国内自主知识产权,核心元器件实现了 100% 国产化,所有数据处理均在国内的受控条件下完成,打破了国外监测系统针对断丝监测领域的垄断,规避了产生的数据安全问

6 总结与展望

目前在 PCCP 断丝监测领域,基于融合型 DAS 的 PCCP 断丝在线监测技术,因其实时在线、灵敏度高和易于安装等优势已经成为主流方案与发展方向。但实现长距离 PCCP 断丝监测涉及多种技术,除融合型 DAS 系统的设计外还需要考虑光缆设计以及布设方式等问题。由于 PCCP 管线涉及生活用水的输送,因此在设计传感光缆时需要保证光缆长时间浸泡于水中不会产生有害物质。除此以外,为提升光缆对断丝振动信号的探测能力,减小水流等外界噪声的影响,布设监测光缆时可以将光缆固定于管道内壁,因此固定采用的贴敷材料同样也应对人体无害,并且性质稳定、不易脱落。同时,现有的光缆结构在声信号传感中不可避免地存在入射方向敏感、声信号耦合差等局限性。未来可根据 PCCP 断丝监测的需求,设计专用的声传感光缆,优化其对断丝信号的耦合。

客观上,相较于国外 PCCP 管道断丝监测方案的提供者,国内厂商起步较晚,对于不同管道类型、服役环境下的断丝特征数据积累以及监测系统在现场实施

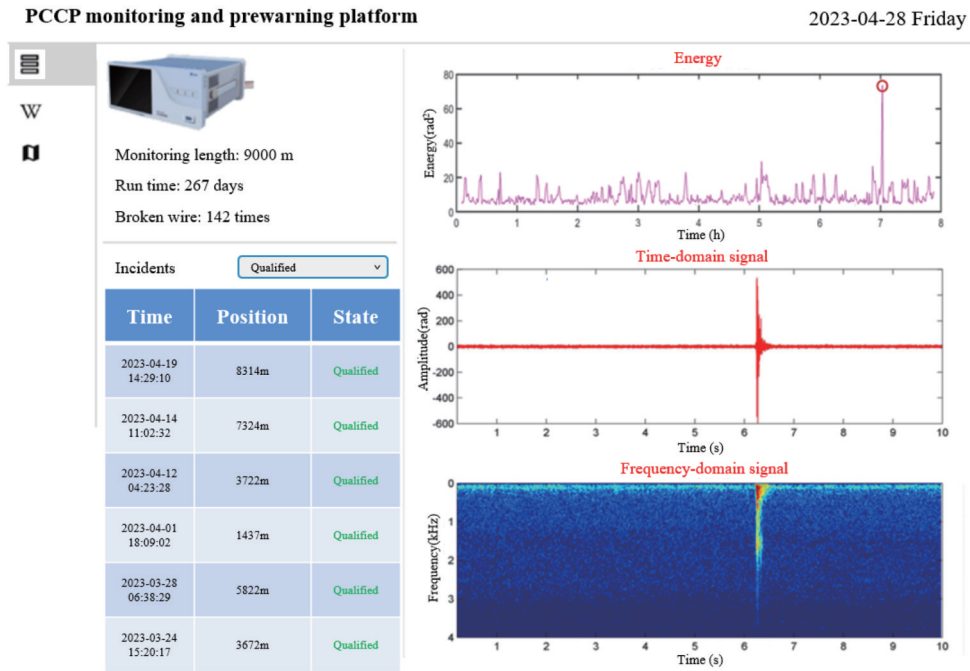


图 13 iDFS 系统预警平台软件主页面

Fig. 13 Main interface of prewarning platform software of iDFS system

中的方案设计还尚有欠缺。相关国产技术的产业化应用时间较短,要充分解决行业需求、提高技术的普适性、降低规模化复制的难度,尚需要开展进一步的工程经验、事件样本和信号处理方法的积累。但同时也应看到,中国的大规模调水工程建设方兴未艾,这给予国内传感仪器厂商成长的机会与市场空间。随着国内主导研制的断丝监测技术不断落地,国内相关工程经验的积累将会逐渐丰富,国产化系统必将实现从追赶到超越的转变,实现 PCCP 断丝监测技术的进一步革新。

参 考 文 献

[1] 陈湧城. 长距离管道输水工程的安全性及水锤危害防护技术[J]. 给水排水, 2014, 40(3): 1-3, 22.
Chen Y C. Safety of long-distance pipeline water conveyance project and protection technology of water hammer hazard[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(3): 1-3, 22.

[2] 高开绪, 高媛, 娄西国. PCCP 安全性能与断丝检测技术探讨[J]. 科学技术创新, 2020(3): 104-106.
Gao K X, Gao Y, Lou X G. Discussion on safety performance and broken wire detection technology of PCCP[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(3): 104-106.

[3] 张社荣, 张彩秀, 顾岩. 预应力钢管混凝土管(PCCP)的设计、生产、施工及数值分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 1-10.
Zhang S R, Zhang C X, Gu Y. Design, production, construction and numerical analysis of prestressed concrete-filled steel tube (PCCP)[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009: 1-10.

[4] Feng X, Li H Z, Chen B Z, et al. Numerical investigations into the failure mode of buried prestressed concrete cylinder pipes under differential settlement[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 111: 104492.

[5] Wang X, Hu S W, Li W H, et al. Use of numerical methods for identifying the number of wire breaks in prestressed concrete

cylinder pipe by piezoelectric sensing technology[J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121207.

[6] Dong X N, Dou T S, Dong P, et al. Failure experiment and calculation model for prestressed concrete cylinder pipe under three-edge bearing test using distributed fiber optic sensors[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 129: 104682.

[7] Holley M, Diaz R, Giovanniello M. Acoustic monitoring of prestressed concrete cylinder pipe: a case history[C]//Pipelines 2001: Advances in Pipelines Engineering and Construction, July 15-18, 2001, Reston, VA, USA. Reston: American Society of Civil Engineers, 2001: 1-9.

[8] 赵晓芳, 张军, 袁浩雁. 对提升 PCCP 输水工程安全性的思考[J]. 中国水利, 2021(8): 42-45.
Zhao X F, Zhang J, Yuan H Y. Considerations of enhancing project safety of PCCP water conveyance[J]. China Water Resources, 2021(8): 42-45.

[9] 北京湜沅科技有限公司. 供水安全问题亟待解决, 强化供水安全监管仍需提升[EB/OL]. (2021-06-22)[2023-07-17]. <http://www.aquaits.com/>.
Beijing Aqua Intelligent Technology Co., Ltd. The problem of water supply safety needs to be solved urgently, and the supervision of water supply safety needs to be strengthened[EB/OL]. (2021-06-22)[2023-07-17]. <http://www.aquaits.com/>.

[10] 薛塞光. 干旱寒冷地区大口径 PCCP 管爆裂分析与对策[J]. 中国农村水利水电, 2012(1): 106-108.
Xue S G. Analysis and countermeasures of large diameter PCCP pipe bursting in arid and cold areas[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(1): 106-108.

[11] 齐海铭, 宋建国, 崔友国. PCCP 断丝的电磁无损检测技术研究[J]. 电气工程, 2017(4): 233-241.
Qi H M, Song J G, Cui Y. Research on electromagnetic NDE inspection method for broken wire of PCCP[J]. Journal of Electrical Engineering, 2017(4): 233-241.

[12] 林天翔, 冯少孔, 叶冠林, 等. 大型压力输水管道泄漏监测方法的试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 136-142.
Lin T X, Feng S K, Ye G L, et al. Tests for leakage monitoring method of large pressure water pipeline[J]. Journal of

- Vibration and Shock, 2021, 40(5): 136-142.
- [13] 杨理践, 李佳奇, 高松巍, 等. 基于内听音的天然气管线泄漏监测方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33(1): 93-96, 107.
Yang L J, Li J Q, Gao S W, et al. Leakage monitoring method of natural gas pipeline based on inside-listening[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2011, 33(1): 93-96, 107.
- [14] 周立坤. PCCP 管道承载特性及管线设计研究[J]. 水利技术监督, 2016, 24(2): 45-47, 82.
Zhou L K. Study on bearing characteristics and pipeline design of PCCP pipeline[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2016, 24(2): 45-47, 82.
- [15] Ojdrovic R, Nardini P, Zarghamee M. Verification of PCCP failure margin and risk curves[C]//Pipelines 2011: A Sound Conduit for Sharing Solutions, July 23-27, 2011, Reston, VA, USA. Reston: American Society of Civil Engineers, 2011: 1413-1423.
- [16] 董晓农, 窦铁生, 赵丽君, 等. 预应力钢筒混凝土管安全评估概述[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 72-80.
Dong X N, Dou T S, Zhao L J, et al. An overview on safety assessment of pre-stressed concrete cylinder pipe (PCCP) [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(10): 72-80.
- [17] 马平. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的破坏模式及原因探析[J]. 智能城市, 2020, 6(23): 137-138.
Ma P. Failure mode and cause analysis of prestressed concrete-filled steel tube (PCCP) [J]. Intelligent City, 2020, 6(23): 137-138.
- [18] 窦铁生, 燕家琪. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的破坏模式及原因分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(1): 29-33.
Dou T S, Yan J Q. Failure modes and cause analysis on prestressed concrete cylinder pipe(PCCP)[J]. China Concrete and Cement Products, 2014(1): 29-33.
- [19] 尹一, 杨桂瑜, 李微微. PCCP用预应力钢丝生产工艺[J]. 金属制品, 2014, 40(5): 17-20.
Yin Y, Yang G Y, Li W W. Production technology of prestressed wire for PCCP[J]. Metal Products, 2014, 40(5): 17-20.
- [20] 卢家鑫. PCCP用预应力钢丝性能分析[J]. 金属制品, 2007, 33(4): 38-40.
Lu J X. Property analysis of prestressed steel wire for PCCP[J]. Steel Wire Products, 2007, 33(4): 38-40.
- [21] 陈嘉敏. 浅谈4m直径PCCP管制造中出现的一些问题[J]. 科技情报开发与经济, 2008(25): 193-194.
Chen J M. Talking about some problems appearing in the manufacturing of 4 m diameter PCCP[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2008(25): 193-194.
- [22] 杨志刚, 蒋正武, 李文婷, 等. 地下水强酸盐复合腐蚀环境下不同矿物掺合料对水泥砂浆耐腐蚀性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(5): 82-87.
Yang Z G, Jiang Z W, Li W T, et al. Influence of different mineral admixtures on corrosion resistance of cement mortar in combined corrosion environment of strong acid and salt in groundwater[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2015, 37(5): 82-87.
- [23] 赵明宇, 李金瑞, 王立明. 影响埋地预应力钢筒混凝土管耐久性因素分析[J]. 黑龙江水利科技, 2010, 38(6): 32-33.
Zhao M Y, Li J R, Wang L M. Analysis of factors affecting the durability of buried prestressed steel cylinder concrete pipe[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2010, 38(6): 32-33.
- [24] 张小丽. 浅析地下水对混凝土结构的腐蚀及其预防措施[J]. 科技情报开发与经济, 2007(1): 272-273.
Zhang X L. Analysis on the corrosion of groundwater to the concrete structure and the precautions[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2007(1): 272-273.
- [25] 彭海波, 董同刚, 黄春江. 海工混凝土掺料的研究与应用[J]. 混凝土世界, 2014(6): 69-72.
Peng H B, Dong T G, Huang C J. Research and application of marine concrete admixture[J]. China Concrete, 2014(6): 69-72.
- [26] 孙权仁. PCCP输水管道漏水原因与防漏措施的研究[J]. 包钢科技, 2008, 34(2): 79-81.
Sun Q R. Cause analysis of water leakage and research on anti-leakage measures for PCCP water transmission pipeline[J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2008, 34(2): 79-81.
- [27] 白耀华, 刘洋, 严亦洲, 等. 基于流固耦合计算的PCCP管爆管原因分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(5): 53-55, 59.
Bai Y H, Liu Y, Yan Y Z, et al. Analysis of reason for PCCP pipe bursting based on fluid structure interaction calculation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(5): 53-55, 59.
- [28] 要煜. 大尺寸预应力钢筒混凝土管局部钻探破坏修复[J]. 山西水利, 2009, 25(3): 52-53.
Yao Y. Repair of local drilling damage of large-scale prestressed steel cylinder concrete pipe[J]. Shanxi Water Resources, 2009, 25(3): 52-53.
- [29] 中国水利水电勘测设计协会. 调水工程应用技术研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 586-590.
China Water Conservancy and Hydropower Investigation and Design Association. Research and practice on application technology of water transfer project[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009: 586-590.
- [30] 徐进, 田华, 彭正辉, 等. 远场涡流技术在PCCP断丝检测中的应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(12): 32-34.
Xu J, Tian H, Peng Z H, et al. Application of remote field eddy current testing in PCCP broken wire inspection[J]. China Concrete and Cement Products, 2014(12): 32-34.
- [31] 张树凯. 在PCCP行业大发展时期要高度重视产品质量[J]. 混凝土与水泥制品, 2011(9): 1-3.
Zhang S K. Attach great importance to product quality in the period of great development of PCCP industry[J]. China Concrete and Cement Products, 2011(9): 1-3.
- [32] 王晓慧, 张海鹏, 马昊天, 等. PCCP断丝电磁检测设备比对试验研究[J]. 北京水务, 2020(5): 59-62.
Wang X H, Zhang H P, Ma H T, et al. Comparative experimental study on PCCP broken wire electromagnetic detection equipment[J]. Beijing Water, 2020(5): 59-62.
- [33] Schmidt T R. History of the remote-field eddy current inspection technique: materials evaluation, Vol.47, No.1, pp. 14 - 22 (Jan. 1989)[J]. Nondestructive Testing, 1995, 23(6): 364-364.
- [34] Xu X J, Zhang Z B, Jia Y L. Research on E-shape magnetic core based self-differential mode pick-up coil and its application for fine crack non-destructive testing[C]//Proceedings of the AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications (2015), June 27-28, 2015, London, UK. Paris: Atlantis Press, 2015: 76-80.
- [35] 司家屯, 曲民兴, 徐锋. 利用有限元法分析涡流远场效应的能流通道[J]. 南京航空航天大学学报, 1991, 23(3): 102-108.
Si J, Qu M X, Xu F. Finite element analysis on energy flow path of the remote field eddy current effect[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1991, 23(3): 102-108.
- [36] 刘雨, 张思全, 尹畅, 等. 两种管道电磁无损检测方法研究综述[J]. 机电工程, 2014, 31(7): 844-848, 853.
Liu Y, Zhang S Q, Yin C, et al. Summary of two pipeline electromagnetic nondestructive testing methods[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(7): 844-848, 853.
- [37] 荆毅飞, 王晓锋, 杨宾峰, 等. 管道轴向裂纹检测脉冲远场涡流传感器设计与仿真分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(6): 74-78.
Jing Y F, Wang X F, Yang B F, et al. Simulation research on design of pulsed remote field eddy current sensor for axial crack detection in pipeline[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2011, 12(6): 74-78.
- [38] InstrumentsHello. 电科院PWBD-006型PCCP断丝检测仪

- [EB/OL]. (2017-07-20) [2023-02-10]. <http://www.helloinstruments.com/archives/13327.html>.
- InstrumentsHello. EPRI PWBD-006 PCCP broken wire detection device[EB/OL]. (2017-07-20) [2023-02-10]. <http://www.helloinstruments.com/archives/13327.html>.
- [39] 孙钰, 封皓, 沙洲. 浅析基于分布式光纤传感的 PCCP 监测技术应用[J]. 水利建设与管理, 2022, 42(10): 75-79.
Sun Y, Feng H, Sha Z. Application of PCCP monitoring technology based on distributed optical fiber sensing[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2022, 42(10): 75-79.
- [40] 熊菲, 屈博扬, 周广南, 等. 一种融合 Φ -OTDR 和 MZI 的 PCCP 断丝监测系统[J]. 光电子技术, 2023, 43(2): 133-141.
Xiong F, Qu B Y, Zhou G N, et al. A broken wire detection system of PCCP pipeline based on Φ -OTDR and MZI[J]. Optoelectronic Technology, 2023, 43(2): 133-141.
- [41] 骆建军, 姚宣德, 张东生, 等. 大口径 PCCP 管道断丝频谱响应现场试验研究(I) [J]. 土木工程学报, 2016, 49(9): 110-116.
Luo J J, Yao X D, Zhang D S, et al. In-situ experimental research on spectrum responses of broken wire of large diameter PCCP pipelines(I) [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(9): 110-116.
- [42] Galleher J J, Holley M, Shenkiryk M. Acoustic fiber optic monitoring: how it is changing the remaining service life of the water authority's pipelines[C]//Pipelines 2009: Infrastructure's Hidden Assets, August 15-19, 2009, Reston, VA, USA. Reston: American Society of Civil Engineers, 2009: 21-29.
- [43] Rajeev P, Kodikara J, Chiu W K, et al. Distributed optical fibre sensors and their applications in pipeline monitoring[J]. Key Engineering Materials, 2013, 558: 424-434.
- [44] 苑立波, 童维军, 江山, 等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0100001.
Yuan L B, Tong W J, Jiang S, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0100001.
- [45] Higgins M S, Paulson P O. Fiber optic sensors for acoustic monitoring of PCCP[C]//Pipelines 2006: Service to the Owner, July 30-August 2, 2006, Chicago, Illinois, USA. Reston: American Society of Civil Engineers, 2006: 1-8.
- [46] Bell G, Paulson P. Measurement and analysis of PCCP wire breaks, slips, and delaminations[C]//Pipelines 2010: Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability: Renew, Rehab, and Reinvest, August 28-September 1, 2010, Reston, VA, USA. Reston: American Society of Civil Engineers, 2010: 1016-1024.
- [47] 姚宣德. 北京市南水北调配套工程 PCCP 管道断丝、漏水实时监测集成系统[J]. 水利水电技术, 2016, 47(10): 67-72.
Yao X D. Integrated real-time monitoring system of wire-breaking and leakage of PCCP pipeline of ancillary works for South-to-North Water Transfer Project in Beijing[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(10): 67-72.
- [48] 齐海铭, 宋建华, 韩继明, 等. 基于分布式光纤光栅传感器的 PCCP 断丝监测技术[J]. 管道技术与设备, 2018(4): 1-4, 8.
Qi H M, Song J H, Han J M, et al. Monitoring technology of PCCP wire-breaking by distributed FBG sensors[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2018(4): 1-4, 8.
- [49] 刘冬雨, 冯萃敏, 张炯, 等. 超大口径 PCCP 管道的断丝监测研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(1): 149-153, 159.
Liu D Y, Feng C M, Zhang J, et al. Study on broken wire monitoring of ultra-large diameter PCCP pipeline[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(1): 149-153, 159.
- [50] 王五平, ElliottJack, 宋人心, 等. PCCP 爆管预警的光纤声监测系统[J]. 水利水电技术, 2009, 40(3): 68-70, 77.
Wang W P, Elliott J, Song R X, et al. Acoustic fiber optic monitoring system for forewarning of PCCP failure[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(3): 68-70, 77.
- [51] Ma B L, Gao R Z, Zhang J J, et al. A YOLOX-based automatic monitoring approach of broken wires in prestressed concrete cylinder pipe using fiber-optic distributed acoustic sensors[J]. Sensors, 2023, 23(4): 2090.
- [52] 张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106004.
Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106004.
- [53] 王子恒, 景洪. 分布式光纤声波传感的管道泄漏监测指标分析[J]. 中国仪器仪表, 2021(8): 61-65.
Wang Z H, Jing H. Analysis of pipeline leakage monitoring index based on distributed optical fiber acoustic sensing system [J]. China Instrumentation, 2021(8): 61-65.
- [54] 纪然然, 宛立君, 吴梦实. 分布式光纤声波传感技术在 PCCP 管道监测中的应用[J]. 声学及电子工程, 2021(2): 15-17, 20.
Ji R R, Wan L J, Wu M S. Application of distributed optical fiber acoustic wave sensing technology in PCCP pipeline monitoring[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2021(2): 15-17, 20.
- [55] 张旭苹, 陈晓红, 梁蕾, 等. 长距离海缆在线监测改进型 C-OTDR 系统[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306001.
Zhang X P, Chen X H, Liang L, et al. Enhanced C-OTDR-based online monitoring scheme for long-distance submarine cables[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306001.
- [56] Ali T H, Medjadba H, Simohamed L M, et al. Intrusion detection and classification using optical fiber vibration sensor [C]//2015 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT), May 25-27, 2015, Tlemcen, Algeria. New York: IEEE Press, 2015.
- [57] 李川, 张以谟, 刘铁根, 等. 全光纤白光干涉型光纤传感器[J]. 传感技术学报, 2001, 14(2): 91-95.
Li C, Zhang Y M, Liu T G, et al. Optic fiber sensors of full-fiber optic white light interference type[J]. Journal of Transduction Technology, 2001, 14(2): 91-95.
- [58] 王华阳, 王宇, 杨佳沛, 等. 基于伯格算法的双马赫-曾德干涉光纤传感系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4): 183-191.
Wang H Y, Wang Y, Yang J P, et al. Dual Mach-Zehnder interferometric optical fiber sensing system based on Burg algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 183-191.
- [59] 孙尧, 贾波, 张天照. 基于反馈环全光纤干涉的定位系统[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(1): 44-46.
Sun Y, Jia B, Zhang T Z. Position determination sensing system based on all-fiber interferometer with feedback loop[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(1): 44-46.
- [60] Zhang Y X, Xia L, Cao C Q, et al. A hybrid single-end-access MZI and Φ -OTDR vibration sensing system with high frequency response[J]. Optics Communications, 2017, 382: 176-181.
- [61] Shan Y Y, Dong J Y, Zeng J, et al. A broadband distributed vibration sensing system assisted by a distributed feedback interferometer[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 10(1): 6800910.
- [62] Zhao Z Y, Tang M, Wang L, et al. Distributed vibration sensor based on space-division multiplexed reflectometer and interferometer in multicore fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(24): 5764-5772.
- [63] 曹悦. PCCP 管道断丝监测技术在南水北调中线京石段应急供水工程(北京段)的应用[J]. 北京水务, 2017(5): 44-48.
Cao Y. Application of PCCP pipeline broken wire monitoring technology in emergency water supply project of Beijing-Shijiazhuang section of the middle route of South-to-North Water Transfer Project (Beijing section)[J]. Beijing Water, 2017 (5): 44-48.

Research Progress of Broken Wire Monitoring of Prestressed Concrete Cylinder Pipe Based on Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing

Zhang Xuping^{1,2}, Zhou Guangnan^{1,2}, Wang Haoran^{1,2}, Wang Jin³, Liu Shichao³, Zhang Dao⁴,
Zhao Shisong⁴, Wang Feng^{1,2}, Xiong Fei², Zhang Yixin^{1,2*}

¹College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

²Key Laboratory of Intelligent Optical Sensing and Manipulation (Nanjing University), Ministry of Education, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

³Beijing Aqua Intelligent Technology Co., Ltd, Beijing 102400, China;

⁴Nanjing Fiber Photonics Technology Co., Ltd, Nanjing 211135, Jiangsu, China

Abstract

Significance As an indispensable part of people's life, water resources can ensure stable economic development. Although the total amount of water resources is enormous in China, their spatiotemporal distribution is very uneven. For the sake of resolving the dilemma of uneven distribution of water resources in time and space, a series of large-scale water diversion projects are being built in China. Prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) has been widely used in long-distance water delivery projects due to its advantages of high strength, good seismic resistance, and anti-leakage. However, with the increase in service life, there could be an occurrence of prestressed steel wire broken in PCCP pipelines, which may cause pipe burst accidents when broken wires accumulate to a certain extent. Therefore, it is urgent to carry out real-time online PCCP broken wire monitoring. Compared with traditional monitoring methods, the PCCP broken wire monitoring technology based on distributed optical fiber acoustic sensing (DAS) has obvious advantages such as continuously distributed sensing, long monitoring distance, and anti-electromagnetic interference. Meanwhile, the sensing optical cable can be put into the pipelines with water inside, which means that a broken wire monitoring system based on DAS can be deployed even if the PCCP pipeline is in operation. Therefore, DAS has broad application prospects in PCCP broken wire monitoring. As the broken wire monitoring system based on converged DAS gradually develops in recent years, the operation safety of PCCP pipelines will be better guaranteed.

Progress Traditional nondestructive PCCP broken wire detection methods include manual echo detection, electromagnetic detection, and acoustic monitoring. Manual echo detection utilizes the echoes from knocking on the pipes to determine the internal defect position, so its maintenance efficiency is low, and the accuracy is uncertain depending on personal work experience. Electromagnetic detection is based on the remote field eddy current (RFEC), which was proposed by MacLean in 1951. The magnetic field signal will distort when propagating through broken wires so that the location of broken wires can be acquired. However, electromagnetic detection is still inefficient and only practical during the pipeline maintenance period. Subsequently, acoustic monitoring which is able to capture acoustic signals of broken wires through electrical or optical sensors has attracted attention. In the 1990s, Mark Holley, Robert Diaz, and Michael Giovanniello first proposed and commercialized acoustic monitoring in a section of a pipeline in Maryland. Hydrophone arrays manufactured with sensors were adopted in the program to provide comprehensive information of the pipelines so that pipe burst accidents could be predicted and handled in time. Although acoustic monitoring resolves the problems of inefficiency and non-real-time detection, traditional acoustic monitoring methods are still susceptible to ambient noises because there is a certain distance between two adjacent sensors so that the acoustic signals of broken wires will be distorted before being acquired by the sensors. In order to reduce the signal distortion brought by ambient noises, researchers turn their attention to DAS. Michael S. Higgins and Peter Paulson from Pure Technologies first utilized phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) for PCCP broken wire monitoring and the monitoring device detected 11 broken wire incidents during four months. The positioning uncertainty of the device is about ± 1.5 m. However, the frequency response of Φ -OTDR is restricted by monitoring distance so that it is hard to distinguish the broken wire signals with high frequency from other ambient noises along a long monitoring distance. Therefore, a fiber optic interferometer (FOI) can come in handy for the monitoring of high-frequency signals. FOI can detect broadband vibration signals by measuring the phase difference between the sensing light and the reference light while it is hard for FOI to locate the accurate position of the vibration. Based on the advantages and disadvantages of Φ -OTDR and FOI, there have been some converged DAS systems of these two technologies to acquire the accurate position and broadband frequency characteristics of broken wires at the same time. In 2023, Beijing Aqua Intelligent Technology Co., Ltd, Nanjing University, and Nanjing Fiber Photonics Technology Co., Ltd jointly developed a broken wire monitoring system

converged by Φ -OTDR and FOI, which achieved single-ended monitoring along a section of a 20 km-long pipeline. The positioning uncertainty of the converged system is ± 2 m, and the top frequency response can reach 20 kHz. Compared with the broken wire monitoring devices of foreign companies, there may still exist some gaps in the performance indicators and monitoring accuracy of domestic devices. While the industrialization of the correlation technique in China is at an early stage, relevant construction experience and characteristic data of broken wires still need to be accumulated. With the increasing construction of large-scale water diversion projects in China, broken wire monitoring based on DAS will get further development and innovation.

Conclusions and Prospects Broken wire monitoring is an indispensable part of PCCP pipeline health monitoring, which can guarantee people's normal lives. DAS can take advantage of the whole section of optical fiber to locate any faint disturbance along a fiber of tens of kilometers accurately. In recent years, converged DAS system has been used in PCCP broken wire monitoring to give early warning of PCCP pipelines that are at risk of bursting. However, the relevant technology has not been applied in actual projects on a large scale in China. In the future, it is essential to carry out further engineering applications, gather characteristic data of broken wire events, and improve signal processing methods.

Key words prestressed concrete cylinder pipe; broken wire monitoring; distributed optical fiber acoustic sensing; converged system