

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514517

PCCP 断丝监测技术进展*

高嘉竣, 封 皓, 沙 洲, 芮小博, 曾周末

(天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072)

摘 要: 预应力钢筒混凝土管(PCCP)广泛应用于长距离输水和城市供水工程,其预应力钢丝在腐蚀、应力松弛、交变载荷及制造缺陷等因素作用下可能发生断裂,导致局部预应力损失、承载能力下降,严重时引发爆管事故。针对 PCCP 断丝隐蔽、管线跨度大及不停水监测需求,在阐述断丝成因与结构影响的基础上,系统梳理了声波法、电磁法和分布式光纤传感(DAS)等技术的监测原理、系统组成、研究进展及工程应用。比较结果表明,声波法适于捕捉断丝瞬态事件并实现在线预警,但易受传播路径和环境噪声影响;电磁法能够较直接地估计断丝数量及空间分布,但依赖设备标定和管道参数,传统内检方式还受停水条件限制;分布式光纤声学传感具备长距离、连续化和沿线定位的优势。针对现有综述中对技术融合趋势和未来科学问题讨论不足的问题,进一步总结了 PCCP 断丝监测从“事件识别”向“状态评估与风险预测”、从“单一传感”向“多源融合与协同”的发展方向。未来应围绕断丝信号与剩余承载力映射、复杂噪声下智能识别等问题,构建由声学或 DAS 在线发现、电磁复核、结构模型评估组成的多源融合体系,推动 PCCP 监测由事件识别向状态评估、风险预测等方面发展。该研究可为 PCCP 管道断丝监测技术选择、系统设计和工程应用提供参考。

关键词: 断丝监测;预应力钢筒混凝土管;分布式光纤传感;智能化监测

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Advances in PCCP wire break monitoring technology

Gao Jiajun, Feng Hao, Sha Zhou, Rui Xiaobo, Zeng Zhoumo

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) is widely used in long-distance water conveyance and urban water supply systems. Under the combined effects of corrosion, prestress relaxation, cyclic loading, and manufacturing defects, prestressing wires may fracture, leading to local prestress loss, reduced load bearing capacity, and, in severe cases, catastrophic pipe bursts. To address the challenges posed by the concealed nature of wire breakage, the large spatial extent of PCCP pipelines, and the need for in-service monitoring without interrupting water delivery, this article first analyzes the causes and structural consequences of wire breakage and then systematically reviews the monitoring principles, system configurations, research progress, and engineering applications of acoustic methods, electromagnetic methods, and distributed acoustic sensing (DAS). Comparative analysis indicates that acoustic methods are well suited to capturing transient wire breakage events and providing online early warning, but their performance is susceptible to variations in propagation paths and environmental noise. Electromagnetic methods can provide relatively direct estimates of the number and spatial distribution of broken wires, but their accuracy depends strongly on equipment calibration and pipeline parameters, while conventional internal inspection is often constrained by shutdown and dewatering requirements. DAS offers distinct advantages in long-distance coverage, continuous monitoring, and distributed localization along the pipeline. In response to the insufficient discussion of technology integration trends and future scientific challenges in existing reviews, this article further summarizes the evolution of PCCP wire breakage monitoring from event identification toward condition assessment and risk prediction, and from single-modality sensing toward multisource fusion and coordinated monitoring. Future research should focus on establishing reliable relationships between wire breakage signals and residual load bearing capacity, as well as improving intelligent identification under complex noise conditions. A

收稿日期: 2025-09-19 Received Date: 2025-09-19

* 基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3203802)项目资助

multisource fusion framework that integrates online detection using acoustic methods or DAS, electromagnetic verification, and assessment based on structural models should be developed to promote the transition of PCCP monitoring from event identification to condition assessment and risk prediction. This review provides a reference for the selection of PCCP wire breakage monitoring technologies, system design, and engineering applications.

Keywords: wire breakage monitoring; prestressed concrete cylinder pipe; distributed fiber optic sensing; intelligent monitoring

0 引言

预应力钢筒混凝土管 (prestressed concrete cylinder pipe, PCCP) 作为 20 世纪发展起来的一种复合管材,由带钢筒的混凝土管芯、预应力钢丝以及覆盖在钢丝外的水泥砂浆保护层构成^[1],具有承压能力强、接头密封性好、耐腐蚀、运行费用低和防渗性能好等显著优点,被广泛应用于水流引导、污水处理、热力输送、天然气分配等管线建设工程中^[2-4]。据统计,目前我国各项引调水工程中采用的 PCCP 管道总长度已超过 20 000 km,在水利基础设施中扮演着举足轻重的角色。

然而,随着 PCCP 管道服役年限的增加,断丝问题凸显,成为威胁管道安全运行的主要隐患。由于 PCCP 管道深埋于地下,其空间尺寸大、跨度长,无法直观观察其断丝情况,亦无法直接获取断丝位置,而挖出管道检测断丝情况将严重影响输水管线的正常运行。工程事故统计表明,断丝是 PCCP 爆管的主要事故模式。多种原因会造成钢丝损伤或腐蚀,钢丝腐蚀到一定程度后断裂,所在部位管道强度下降。腐蚀进一步发展,同一部位出现更多断丝,强度显著降低,最终导致灾难性爆管^[5-6]。

传统 PCCP 断丝监测技术主要包括电磁法检测和声波检测两种方法^[7-8]。电磁法检测是在 PCCP 管道中沿轴线连续移动电磁波探测设备,探测每一管段中预应力钢丝的状态,通过探测估计每一管段中预应力钢丝的断丝数量。而声监测则通过安装在 PCCP 内部或外壁的传感器监测经由管道中水体传递的声活动,将管道中的每一声事件与钢丝断裂的声准则相比较,滤去环境噪声后分析断丝特征。然而,这些传统方法存在明显局限性:电磁法设备工作需在管线停运排空状态下进行,存在排查周期长、无法做到实时、在线监测的问题;而声监测虽然可以实现一定程度的实时监测,但易受环境噪声干扰,定位精度有限。

分布式光纤传感技术 (distributed acoustic sensing, DAS) 作为一种新兴监测手段,因其具有体积小、成本低、响应速度快、抗辐射和电磁干扰能力强等优势,适用于大型基础设施的结构健康监测^[9]。该技术能够做到传感光纤上任意位置的实时监测,克服了传统传感结构的缺点,为 PCCP 断丝监测提供了全新的技术路径。特别是近年来发展的融合型分布式光纤传感系统,如结合相位敏感

光时域反射计 (phase-sensitive optical time domain reflectometry, Φ -OTDR) 和马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 的技术方案,能够实现高定位精度和宽测频范围的振动测量,为 PCCP 管道安全监测带来了革命性的突破。

随着我国地下管网不断增多,管线事故频繁发生,对人民生命财产安全造成严重威胁。因此,保障地下管线的安全运行,减少事故发生,成为了基础设施建设中的重要问题。已有综述多聚焦于某一单项技术原理,尚缺乏对多种技术融合趋势与智能算法结合的系统梳理。本文拟弥补该不足,构建时间脉络与技术融合的全面视角,对 PCCP 断丝成因进行分析,按时间顺序梳理该领域的研究进展、技术原理及应用进展,为相关研究和工程实践提供参考。同时,帮助读者更好地理解技术演进趋势与研究焦点转移。

1 PCCP 断丝成因与影响

预应力钢筒混凝土管是一种复合结构管道,其典型构造如图 1 所示。

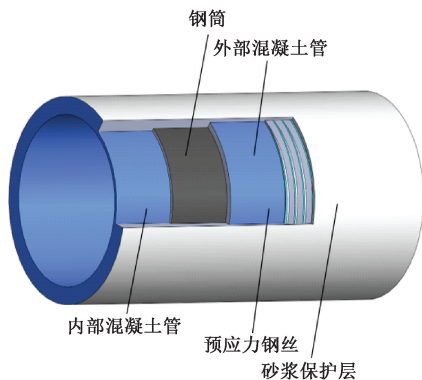


图 1 PCCP 管道结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PCCP pipeline structure

预应力钢丝通常螺旋缠绕于管体,通过预压应力抵消内水压力,提高管道耐久性^[10-11]。预应力钢丝的断裂会引起连锁式结构劣化,包括承载力下降、混凝土开裂、突发性爆管等,其发展过程通常具有渐进性和累积性特点。PCCP 的预应力钢丝通常采用高碳冷拉钢丝,其断裂主要由电化学腐蚀和应力腐蚀共同作用导致。

电化学腐蚀通常是由腐蚀介质的渗透造成。由于环境因素的影响,外部水泥砂浆层在工作过程中受到环境腐蚀产生微裂纹,进而诱发断丝现象^[12-13]。不同的地质环境导致地下腐蚀介质成分不同,进而产生不同的腐蚀模式:如环境中的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等腐蚀介质渗透至钢丝表面,引发腐蚀;在酸性土壤或杂散电流环境下,阴极反应产生的氢原子渗入钢丝晶格,导致氢致脆性断裂^[14-16]。同时,由于钢丝与钢筒的电位差形成原电池,也会加速预应力钢丝的局部腐蚀^[17]。

在 PCCP 管道使用过程中,钢丝受预应力松弛、动态载荷作用以及制造缺陷等因素的影响,导致钢丝的力学疲劳和应力集中,进而导致管道断丝的发生,如图 2 所示。



图 2 PCCP 断丝示意图

Fig. 2 Schematic diagram of PCCP wire broke

钢丝的预应力因混凝土的徐变松弛在长期服役中逐渐松弛,随着预应力的丧失,钢丝所承受的拉应力增大,从而降低了其抗拉安全裕度。当实际拉应力超过钢丝的疲劳极限(通常为抗拉强度的 40%~50%)时,会导致钢丝表面产生微裂纹。这些裂纹在反复加载下逐渐扩展,最终可能导致钢丝的断裂。其次,PCCP 管道在使用过程中还会遭受外界动态载荷的作用,如水锤效应和交通振动等交变载荷,这些载荷会加速钢丝裂纹的扩展^[18-20]。此外,钢丝在制造过程中,冷拉过程中的表面划痕、夹杂物等缺陷会成为应力集中源,导致局部区域应力增大,加速疲劳断裂的发生。

断丝对 PCCP 管道的影响主要表现在预应力损失与承载力下降。单根钢丝断裂会导致局部环向预应力降低 0.3%~0.5%,相邻钢丝负荷增加 5%~8%^[21]。PCCP 管道在断丝初期,砂浆保护层、管芯等部分在断丝区域形成应力集中,各极限状态的内水压降低。随着断丝比例的不断增加,管道整体刚度降低,砂浆保护层与钢筒进入塑性阶段的内水压值显著降低^[22]。同时因为断丝区域的应力集中,加速保护层裂缝的产生,加剧腐蚀介质的渗透,管道剩余承载力大幅下降,最终因为预应力钢丝屈服而整体失效。

2 基于声波法的 PCCP 断丝监测技术

2.1 系统原理及组成

如图 3 所示,当 PCCP 管道中的钢丝突然断裂时,由于应力释放和钢丝回弹与砂浆、钢筒的相互作用,会产生宽频瞬态声波^[23],这些声波通过管道内的水体以及管壁材料耦合传播。

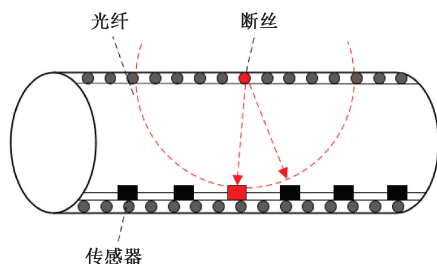


图 3 超声检测法原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the acoustic monitoring principle

传感器接收到的声波信号通常表现为短时高能脉冲,位于基站的工作站计算机通过信号处理滤除环境噪声,通过时差定位、频谱特征分析以及能量衰减规律,可以实现断丝事件的检测与定位。当沿线布设多个传感器时,还能够通过多点协同采集与信号处理提高定位精度和抗噪声能力。传统的水声监测法检测系统包括水听器基站、水听器阵列或管道表面安装的传感器 3 种形式^[24]。其中水听器基站方案通过阀门等接入口将单个水听器插入管内,部署与迁移便捷,但受单点采样影响,监测与定位精度相对有限。水听器阵列方案将多只水听器按一定间距以电缆或光缆串接,在带水状态下整体布设入管,可获得更长的监测覆盖与更高的定位精度。管道表面安装传感器方案则将声学传感器直接固定于砂浆保护层外表,施工简便、对管道运行影响小,但由于声波跨越管壁传播存在显著衰减,其事件识别与定位性能通常低于前两种方案。同时,近年来光纤声学监测和分布式声学传感技术的发展,整条长距离管线的连续实时监听成为可能。

2.2 研究进展

基于阵列与模式识别的水声监测法自 20 世纪 90 年代中期在 PCCP 断丝监测领域已初见端倪,如图 4 所示。Travers 等^[25]在 1997 年使用 12 只水听器并配合分类算法区分与断丝相关的声事件,首次证明了在役/带水条件下的断丝识别可行性,标志着阵列化与模式识别雏形的形成。Holley 等^[26]在马里兰州约 1.8 km 管段布设连续声学监测系统,可检测并定位断丝事件,被广泛引用为 PCCP 水声监测的早期工程样本。2010 年,美国 Schiff



图4 基于声波法的PCCP断丝监测技术研究进展

Fig. 4 Research progress on PCCP wire break monitoring technology based on acoustic wave method

Associates 公司的 Bell 等^[27] 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。

由于传统方法需要大量水听器,维护成本较高,光纤声学监测在管内取代分散水听器成为主流在线平台,但水听器基站/阵列仍在阶段性监听、局部重点管段与外部验证中发挥作用。Higgins 等^[24] 在 ASCE Pipelines 2006 报告了用于 PCCP 的声学监测传感器与光纤声学 (acoustic fiber optic, AFO) 体系,推动长距离覆盖与长期在线化,但仍保留了“水听器阵列”的传统路径。

同时,针对外表面布设的研究不断增加,以压电/声发射 (acoustic emission, AE) 传感阵列为代表的外检方案,一方面在试验平台上建立了“断丝数量—声学特征”的量化关联,另一方面也为现场分段抽检提供了快速筛查能力。近年来的进展显示,已在实尺寸试件上完成了基于压电阵列识别断丝数量的实验验证,为与管内 AFO/DAS 的互补应用提供了工程依据^[28]。

水声检测法相较停水内检或开挖抽检,其对管道运行影响小、覆盖效率高,且可通过长期连续监听形成时序数据,用于趋势分析与风险前置管理,具备长距离连续在线能力与较高的事件敏感性。但由于传播路径与噪声环境的不确定性,阀门操作、水力冲击与外部撞击等易引入干扰,若特征提取与阈值管理不足,可能导致误报或漏报。同时,阵列方案在长距离下对同步、时标与节距标定敏感,安装、密封、供电与通信链路增加了运维复杂度与成本^[29]。

2.3 总结与发展

综合来看,声波法和声发射法的优势在于能够直接捕捉钢丝断裂瞬间产生的瞬态声事件,适合在不停水条件下开展连续监听和快速预警。其工程价值主要体现在“事件发现”和“断丝发生时间记录”两个方面,尤其适用于高风险管段的在线预警和断丝活跃期判断。但该类方法对传播路径、管内水流状态、阀门操作、交通振动和外部施工噪声较为敏感,若仅依赖单一阈值或单点传感器,容易出现误报、漏报或定位偏差^[30]。

因此,声波法未来需要重点解决 3 个技术问题:1) 建

立断丝声源、管壁耦合传播与水体多路径传播之间的物理模型,明确不同管径、覆土、压力和水流条件下的特征频段与衰减规律;2) 发展多传感器阵列协同定位方法,通过高精度同步、互相关求时差、到达角估计和置信度评价降低定位不确定性^[31];3) 引入机器学习和深度学习方法,对断丝、砂浆脱空、水锤、阀门扰动等声事件进行分类识别,形成面向工程应用的低误报报警策略。

3 基于电磁感应的 PCCP 断丝监测技术

3.1 系统原理及组成

在 PCCP 结构中,预应力钢丝本身为高强度导电材料,且沿管芯外表面连续、有序地环向缠绕,形成封闭的导电回路。这种结构特性使 PCCP 在电磁感应行为上与金属管道相似,可以将其视为放大尺度的类金属管道试件。当交变磁场作用于钢丝层时,会在其内部感生涡流或感应电流,并在结构缺陷(如断丝)处产生明显的电磁特性变化,因此可利用电磁检测技术实现断丝的识别与定位。

电磁检测 PCCP 断丝的方法大体可分为两类:1) 基于涡流原理的电磁检测;2) 基于正交电磁原理的电磁检测。涡流检测法通过测量试件内部感生涡流变化引起的检测线圈阻抗变化,来评估导电材料的性能或近表面缺陷。在检测过程中,等截面线圈探头通入交流电流后会产生交变磁场 H1,该磁场使得钢丝产生感应电动势并形成环向涡流,涡流产生反作用磁场 H2。磁场 H1 与 H2 相互作用改变了探头原有的磁场分布,从而引起探头磁通量的变化。在保持电源电压恒定的条件下,这种磁通量变化表现为探头输入阻抗的波动。因此,通过分析探头输入阻抗的波动,即可初步判断断丝发生的位置^[32],原理如图 5 所示。

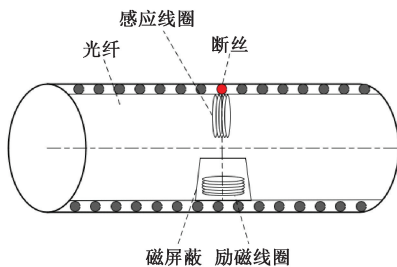


图5 电磁感应检测法原理

Fig. 5 Principle diagram of electromagnetic induction detection method

正交电磁检测是一种改进型的电磁感应检测方法,其核心思想是在激励与接收系统中通过几何布置与信号分离技术,使预应力钢丝中感应电流产生的磁场和激发

线圈产生的杂散磁场能够区分开来,理想情况下检测器拾取的信号主要是由钢丝中感应电流产生的。为减弱激励线圈与检测线圈之间的直接磁场耦合,正交电磁检测系统通常在两者之间设置磁屏蔽装置,并将激励线圈与检测线圈呈正交布置。检测过程中,通过分析检测器输出信号的幅值或相位变化,即可判断断丝的存在与位置。正交电磁检测技术相比远场涡流(remote field eddy current, RFEC),有效检测区域加大,且断丝信号特征更为明显,更加有利于识别。

3.2 研究进展

电磁法是当前国际上应用最广泛的 PCCP 断丝检测手段,其发展经历了从远场涡流原理提出,到多类检测仪器与工程化应用不断成熟的过程,如图 6 所示。

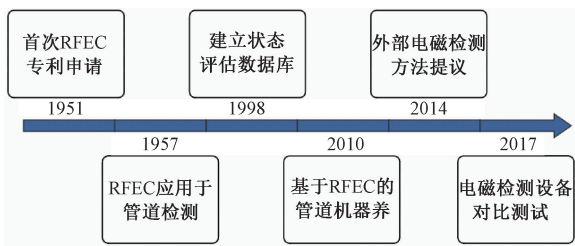


图 6 基于电磁感应的 PCCP 断丝监测技术研究进展

Fig. 6 Research progress on PCCP wire break monitoring technology based on electromagnetic induction

1951 年, Maclean^[33] 在美国首次申请了 RFEC 专利; 1957 年, Schmidt 将其成功应用于石油管道缺陷的检测^[34]。这一阶段主要完成了电磁法在管道无损检测中的概念验证, 为后续 PCCP 断丝检测奠定了物理和工程基础。同时, Russell NDE 公司^[35] 在 80 年代末开发了首套适用于热交换器管在役检测的 RFEC 设备, 为该技术的工程化应用提供了雏形。

国内对远场涡流的研究起步于 20 世纪 80 年代, 由南京航空学院和上海材料研究院等单位率先开展机理与

设备研究, 1990 年出版了《远场涡流检测技术》专辑^[35]。近年来, 国内科研机构和苏州混凝土水泥制品研究院等^[36] 企业联合研发 PCCP 电磁检测设备, 并于 2017 年参加了国家南水北调办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。

在应用方面, Galleher 等^[37] 利用电磁检测设备对圣迭戈水务局超过 400 km 的 PCCP 开展检测, 结合管道的设计、安装等历史数据建立了状态评估数据库, 实现了对管道劣化情况的持续跟踪。Mergelas 等^[38] 总结了 RFEC 在实际工程中的应用经验, 提出通过合理设定钢筒材料参数和管接头条件并配合声学监测, 可以降低误报率并提高检测的可靠性。Biggar^[39] 提出了外部电磁检测方法, 在无需停水的情况下可直接检测暴露管道, 节省了排水和停运成本, 但由于需要开挖管顶, 局限于局部检测。此外, Payton 等^[40] 提出了基于 RFEC 的管道机器人 (PipeCrawler 和 PipeWalker), 如图 7^[40] 所示, 能够实现带水运行状态下的管道检测, 技术指标如表 1^[35] 所示。



图 7 PipeCrawler 设备示意图

Fig. 7 Schematic diagram of PipeCrawler equipment

表 1 PipeWalker™ 主要技术指标

Table 1 Main technical specifications of PipeWalker™

最小进出口尺寸	电源	精度	温度/℃	湿度	水深	坡度
可通过最小 30 cm×40 cm 的人孔	能连续工作 10 h 以上的 12 V 可充电电池组	每处断丝数量估算 误差不超过 5 根	0~40	相对湿度 0~100%	水深最多不能 超过 30 cm	0~60%

这些进展表明, 电磁检测已从早期的实验室方法发展为适应多工况、多场景的工程化技术体系。

电磁法作为当前 PCCP 断丝检测的主流方法, 已在北美、中国等地的大规模管网工程中得到应用, 但其在实际工程中仍存在一定的局限性。电磁法 PCCP 断丝检测结果依赖校准精度, 断丝数量的判定通常需要通过已知

断丝数量的校准管进行标定, 不同地区、不同厂家或不同年代生产的 PCCP 管道在钢丝直径、绕丝密度等方面差异较大, 若校准不足或参考不当, 容易造成断丝数量的高估或低估。Gatalano 等^[41] 对比了 PPIC 和 Pure 公司的两种检测仪器的报告, 发现两者报告的存在断丝的管道数量存在差异, 指出造成这种现象的原因可能是由于校准

管道不同所造成的,突出了检测前的校准工作的重要性。

同时,检测结果易受外部构件与修复结构干扰。Dion 等^[42]指出用钢构件修复过的 PCCP 在检测时可能发生误报,这些附加金属结构会显著改变电磁信号,从而影响检测的准确性。在未来的发展过程中可考虑结合分布式光纤传感、声学监测等多源测量方式,以弥补单一电磁检测方法的不足。

3.3 总结与发展

综合来看,电磁感应法是目前 PCCP 断丝检测中工程应用较成熟、断丝数量估计能力较强的一类方法,其主要优势在于能够对既有管线开展周期性体检,并为管道剩余承载力评估提供较直接的断丝数量信息。与声波法相比,电磁法更适合获得管段尺度的空间分布结果和断丝累积状态;但其对设备标定、管材参数、钢筒和钢丝几何尺寸、管接头以及外部金属构件十分敏感,且传统内检方式常需要停水、排空或依赖专用机器人。

电磁法的未来发展应从“经验判读”转向“模型约束反演”,相关管道漏磁检测研究通过分析检测速度、动生涡流效应与漏磁场特征之间的关系,实现了管道内外壁缺陷的定位区分,为 PCCP 断丝电磁信号的特征分离和位置判定提供了参考^[43]。在技术实现上,可通过多频激励提高对不同深度和不同断丝数量的敏感性,通过标准化校准管和参数数据库降低不同厂家 PCCP 差异带来的反演误差;通过内检测机器人或外部局部扫描装置提高不停水条件下的适应性;通过与声学/DAS 在线监测结果互相校验,将电磁法的断丝数量估计能力与在线监测的实时预警能力结合起来,从而形成“在线发现—电磁复核—结构评估”的工程闭环^[44]。

4 基于 DAS 的 PCCP 断丝监测技术

分布式光纤传感技术作为 PCCP 断丝监测的核心手段,其基本原理是利用光纤作为连续分布的传感介质,通过分析在光纤中传输的脉冲光的参数变化来获取被测量信息^[45]。与传统点式传感器相比,分布式光纤传感系统能够实现大范围覆盖、分布式测量、长距离监测等,非常适合于 PCCP 管道这种大型线性结构的安全监测。在 PCCP 断丝监测应用中,当管道预应力钢丝发生断裂时,会产生瞬态弹性波和局部应变变化,这些物理量会被布置在管道表面的传感光纤捕获,并通过光信号的变化反映出来,最终实现断丝监测。目前,在 PCCP 断丝监测中应用的方法大致分为相位敏感光时域反射技术、马赫-曾德尔干涉仪和融合型 3 类。

4.1 系统原理及组成

相位敏感光时域反射技术是一种基于瑞利散射的分

布式光纤传感技术,该技术通过分析反射信号的衰减和时延,获取光纤沿线的光学特性变化。原理如图 8 所示,将光纤贴敷在 PCCP 管道表面,通过与预应力钢丝的耦合作用,将结构变形传递至光纤,光纤中的断裂、应变等位置会导致光信号背向瑞利散射光相位变化,最终通过解调相位信息确定异常位置^[46-47]。

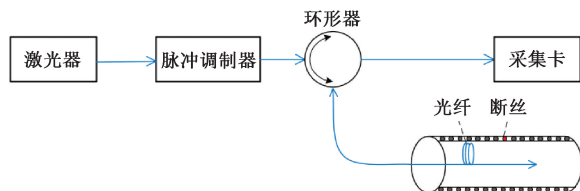


图 8 Φ -OTDR 系统原理

Fig. 8 Schematic diagram of the Φ -OTDR system

当窄线宽激光器发出的连续光波经过脉冲调制器调制为脉冲光后注入传感光纤,PCCP 管线周围无振动信号扰动时,传感光纤某一位置的光强 E_z 为^[48-49]:

$$E_z = E_{z0} [i(\omega t + \varphi_{z0})] \quad (1)$$

式中: E_z 为传感光纤某一位置的光强; E_{z0} 为传感光纤中的初始光强; ω 为角频率(单位为 rad/s); t 为时间(单位为 s); φ_{z0} 为初始相位(单位为 rad)。

当外部存在振动源时,扰动会引起光纤局部产生微小的应变,导致该位置处的光纤长度和有效折射率发生微小变化,从而使得后向瑞利散射光信号在该位置出现可测的变化,进而被探测系统捕捉,实现振动事件的感知与定位。设光缆长度的改变量为 ΔL , 折射率改变量为 Δn , 其相位变化 $\Delta\varphi$ 表示为:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta n L + n \Delta L) \quad (2)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为相位变化; λ 为传输光的波长(单位为 m); Δn 为折射率改变量; L 为传感单元的长度(单位为 m); n 为传感光纤的有效折射率; ΔL 为光缆长度的改变量。

通过对接收到的光信号的相位与光强进行对比,即可判断是否有异常情况发生。异常情况发生位置对应光缆长度计算公式为:

$$Z = \frac{c}{2n} t \quad (3)$$

式中: Z 为对应光缆长度; c 为光在真空中的传播速度 (3×10^8 m/s); n 为传感光纤的有效折射率; t 为探测器接收到的光波时间(单位为 s)。通过计算即可对异常位置进行定位。

Φ -OTDR 具备多点同步定位和分段独立响应能力,具有较高的空间定位精度与远距离传感优势。然而,其频率响应能力受限于系统的传感距离,通常在 1~10 kHz 范围内,难以充分捕捉包含丰富高频成分的动态信号^[50]。MZI 虽不具备事件空间定位能力,但在频率响应

方面表现优异,可实现 MHz 级的高频动态信号探测^[51]。原理如图 9 所示,将 MZI 系统的传感臂紧贴或缠绕于管体外壁。

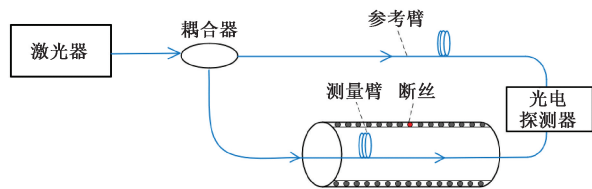


图 9 MZI 系统原理

Fig. 9 Schematic diagram of the MZI system

当 PCCP 管道内部预应力钢丝发生断裂时,会释放出局部应力并激发微小但高频的振动波(瞬态弹性波),该扰动会传导至光纤,引起光纤长度或折射率的微小变化,导致传感臂中的传播光波产生相位偏移。由于 MZI 结构具有干涉机制,这一微小相位差与参考臂之间的差异会导致输出端干涉光强的波动,从而将不可见的“微应变”转化为可量测的“光强变化”^[52]。

针对 PCCP 断丝监测对定位精度与频率响应能力的双重需求,融合这两种技术成为提升监测性能的有效路径。原理如图 10 所示。

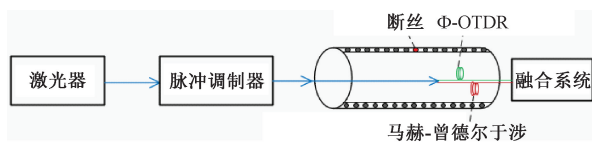


图 10 融合型系统示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the converged system

这种方法结合了 Φ -OTDR 的精准定位能力与 MZI 的高频响应特性,克服了单一技术在 PCCP 断丝监测中的局限,同时实现了长距离高精度定位断丝位置与宽频响应的监测目标。

4.2 研究进展

随着分布式光纤传感领域技术的不断成熟,其在 PCCP 断丝监测中的应用也逐步展开并取得一系列具有代表性的研究进展,如图 11 所示。

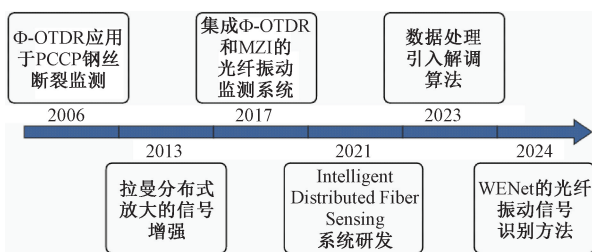


图 11 基于 DAS 的 PCCP 断丝监测技术研究进展

Fig. 11 Research progress of PCCP wire breakage monitoring technology based on DAS

早期研究主要聚焦于系统结构的优化与基本监测能力的验证,随后逐步延伸至信号识别精度、传感距离与响应频率的全面提升。2006 年, Pure Technologies 公司 Higgins 等^[24]首次将 Φ -OTDR 技术应用于 PCCP 断丝监测,开发了一种专门用于 PCCP 断丝监测的光纤声学传感系统即 SoundPrint AFO 系统,该系统通过捕捉预应力钢丝断裂时产生的高频声波,并利用声波传播时间差进行定位,实现对断丝事件的实时监测与报警。该系统首次部署在美国巴尔的摩的市政输水管线中,实现断丝的定位和记录。同时 Pure Technologies 也不断迭代其 SoundPrint AFO 系统,使其具备 60 km 级监测能力和秒级响应速度,形成完整的 PCCP 断丝全生命周期监测解决方案。

2013 年,王杰等^[53]在 Φ -OTDR 系统研究中提出了基于拉曼分布式放大的信号增强策略,以提升系统的有效探测距离。该方法通过对探测脉冲及后向瑞利散射信号的衰减进行补偿,克服了传统放大方式中存在的信号退化和系统噪声放大等问题。实验结果表明,该方法在 74 km 的传感光纤上实现了 20 m 的空间分辨率。随后, Peng 等^[54]将一阶双边拉曼放大技术与外差检测型 Φ -OTDR 系统相结合,显著提升了系统性能。最终实现了长达 131.5 km 的传感距离,8 m 的空间分辨率以及 375 Hz 的动态振动频率响应范围。该系列成果为 Φ -OTDR 系统在超长距离高精度监测中的应用提供了关键技术支撑。

针对 PCCP 断丝监测对定位精度与频率响应能力的双重需求,2017 年 Zhang 等^[55]设计了一种融合 Φ -OTDR 与 MZI 的光纤振动监测系统,创新性地传感光纤末端引入移频镜,从而使得 DAS 系统依赖的背向瑞利散射光与干涉型传感器所需的反射光在频率上产生差异,实现两种传感机制的频分复用。随后, Shan 等^[56]进一步提出一种基于 Φ -OTDR 与分布式反馈式光纤干涉仪融合的 DAS 系统架构,通过引入波分复用技术,在 2.16 km 的传感距离上同样实现了小于 10 m 的空间定位精度,并将系统的频率响应提升至 1 MHz,为高精度、高带宽的 PCCP 断丝监测提供了新型融合思路。

2021 年,中国船舶重工集团第七一五研究所牵头研发了 iDFS(intelligent distributed fiber sensing) 系统^[57],原理如图 12 所示。该系统集成了 Φ -OTDR、MZI 干涉仪结构,具备长距离、高分辨率、广覆盖、智能化的综合监测能力。iDFS 系统在江西省共青城市引调水工程中进行部署,对长达 50 km 的 PCCP 输水管线进行连续监测。系统利用 Φ -OTDR 主模块配合深度识别算法,实现 3 m 定位精度与全线断丝动态监控能力。

近年来,研究者更是尝试将 DAS 技术与智能算法结合,探索其在实际工程环境中实现高精度、长距离、实时

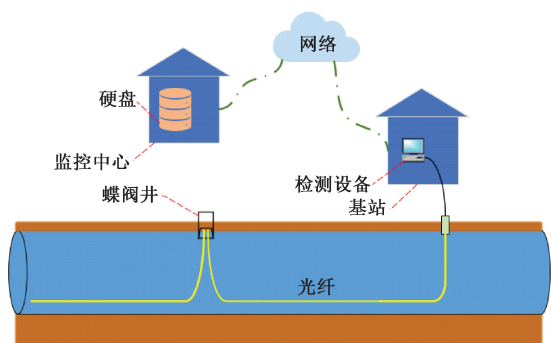


图12 iDFS系统示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the iDFS system

监测的可行性。熊菲等^[58]针对传统系统结构复杂、解调计算压力大的问题,引入优化后的同相正交解调算法,有效减少40%以上的数据运算量。该系统在单端接入结构下实现了 Φ -OTDR的高定位精度与MZI的高频率响应互补协同,在20 km的传感光纤上,系统实现了20 kHz的频率响应和 ± 2 m的空间定位误差。2024年,张海鹏等^[59]提出一种基于宽度回声网络的光纤振动信号识别方法。该方法成功构建了一个对非线性、非平稳的断丝变化进行预测的智能系统。通过预测结果对比,该模型的预测误差相较门控循环单元模型降低约15%~25%,相较长短期记忆网络模型降低达30%以上,同时异常值更少,预测曲线更平稳,表现出更强的工程适用性与稳定性。

在工程实践中,基于DAS的PCCP断丝监测技术已实现工业应用,最具代表性的是利比亚“大人工河”引水工程^[60]。该项目采用了SoundPrint AFO系统,在数十公里长的PCCP管线上铺设分布式光纤,实现了对断丝声波信号的实时感知与定位。运行期间,该系统成功预警多起真实断丝事件,帮助工程单位及时采取减压与检修措施。美国Tucson市也采用了相似架构的光纤系统,实现对城区主要输水管道的断丝事件记录与定位^[60]。国内方面,北京市南水北调中线干线工程在惠南庄至大宁调压池段部署了 Φ -OTDR分布式光纤系统,监测覆盖距离约35.7 km,实现了调压池、高风险节点及过河段等重要位置的实时监控^[61]。这些应用表明,分布式光纤技术已从实验验证走向规模化部署,成为保障大型输水工程结构安全的重要手段。

4.3 总结与发展

综合来看,DAS技术代表了PCCP断丝监测由点式传感向线式连续感知发展的重要方向。 Φ -OTDR具备沿线定位能力,MZI具备宽频动态响应优势,二者融合后能够同时兼顾长距离定位与高频断丝信号采集,是当前PCCP在线监测中最具发展潜力的技术路线。但DAS系

统也面临传感距离、空间分辨率、频率响应、信噪比和工程铺设条件等问题,特别是在长距离管线中,光纤衰减、接续损耗、环境噪声和光缆—管壁耦合质量都会影响断丝信号的稳定识别。

后续发展可从硬件、解调和算法3个层面展开:在硬件层面,采用低损耗传感光缆、优化光缆固定方式和耦合材料,并结合拉曼放大、外差检测和多端接入提升长距离信号质量;在解调层面,发展 Φ -OTDR/MZI频分或波分复用结构,实现定位信息与高频动态信息的同步获取;在算法层面,构建面向断丝事件的特征库和带置信度输出的识别模型,将时域能量、频谱特征、相位变化、空间传播规律和历史监测数据联合输入,实现由“断丝报警”向“断丝数量估计、发展趋势预测和风险等级评估”的转变。目前,机器学习与PCCP断丝监测结合的研究仍在开展,该类技术实现了从被动监测到智能预测的转变,为PCCP管道的结构安全监测提供了更为高效、精准的解决方案,具有广阔的工程应用前景与研究价值。

5 多元监测技术与融合发展路径

除声波法、电磁法和DAS外,PCCP断丝监测还可结合压电/声发射阵列、光纤光栅及分布式应变监测等方法,从而形成更全面的监测体系。单一技术通常只能反映断丝过程中的某一类物理量,例如声波法反映瞬态声事件,电磁法反映钢丝完整性和断丝数量,DAS反映沿线动态振动,而应变监测更接近结构承载状态。多种监测信息之间具有明显互补性,将其融合有助于解决单一方法误报率高、定量能力不足或工程适配性有限的问题。

5.1 压电/声发射与局部高灵敏监测技术

压电传感器和声发射传感阵列适合部署在重点管段、接头、转弯段、过河段和已知高风险区域,可对局部断丝、砂浆脱空和裂缝扩展等事件进行高灵敏监测。与管内水听器相比,外贴式压电/AE传感器施工相对灵活,便于进行短期诊断和局部复核^[3];但其有效覆盖距离有限,且对安装耦合质量和外部振动干扰敏感。因此,该类技术更适合作为DAS长距离在线系统的局部增强单元,用于对高风险信号进行复核和细化识别。

5.2 光纤光栅与分布式应变监测技术

光纤光栅(fibre Bragg gratings, FBG)、布里渊光时域分析(Brillouin optical time domain analysis, BOTDA)等光纤应变监测技术能够获取管体环向或轴向应变变化,与断丝后的预应力损失、混凝土开裂和结构承载力下降具有更直接的关系^[62-64]。该类方法的优势在于可将监测结果与结构力学模型相结合,用于评估管道剩余承载能力

和失效风险;不足在于其对断丝瞬态事件的响应不如声学方法直接,且需要良好的光纤布设和应变传递条件。未来可将应变监测作为“结构状态层”的信息来源,与声学事件监测和电磁断丝数量检测共同支撑 PCCP 安全评估。

5.3 多源融合与智能诊断

面向工程应用,PCCP 断丝监测的目标不应停留在单次断丝识别,而应形成包括感知、识别、评估和决策在内的完整技术链。可行路径是构建多源融合框架:由 DAS 或声学系统提供实时事件和位置,由电磁检测提供断丝数量与空间分布校准,由 FBG/BOTDA 等应变监测提供结构响应,由有限元模型或数字孪生模型将断丝数量、位置和应变状态映射为剩余承载力与风险等级。

6 结 论

PCCP 断丝问题是长距离输水工程结构安全中的关键风险源。本文在分析断丝成因、发展过程及其对承载能力影响的基础上,对声波法、电磁感应法、分布式光纤声学传感等技术进行了系统梳理。总体而言,声波法适合在线捕捉断丝瞬态事件,电磁法适合周期性定量评估断丝数量和空间分布,DAS 适合长距离连续在线监测,FBG/BOTDA 等应变监测方法则更适合服务于结构状态评估。不同技术各有优势和边界,未来工程应用需要根据风险等级和运行条件进行组合配置。

面对目前城市地下管网日益复杂化、运行风险隐蔽化的趋势,监测技术仍面临以下几个科学问题:1)断丝瞬态释放能量在钢丝、砂浆、钢筒、水体和土体中的多介质传播机理尚需进一步明确;2)断丝事件信号与断丝数量、断丝位置及剩余承载力之间的映射关系仍不完善;3)复杂运行环境下噪声源众多,如何实现低误报、高可靠的智能识别仍是工程化瓶颈;四是监测系统长期埋地或带水运行时的稳定性、可维护性和经济性仍需系统验证。这些问题决定了 PCCP 断丝监测技术不能仅依赖传感器性能提升,还需要与结构力学、电化学腐蚀、信号处理和智能运维深度结合。

未来,PCCP 断丝监测技术的发展可能并不仅仅集中在单一系统的超长距离覆盖能力,而是逐渐向“云-边-端”融合的分布式架构演进。首先,构建高可靠传感网络,在高风险管段采用 DAS 连续监测与压电/AE 局部增强相结合,在关键节点配置应变监测单元,提高弱断丝信号捕捉能力;其次,构建多源信息融合算法,将声学事件、电磁断丝数量、光纤应变、运行压力、历史维修记录和环境信息统一纳入风险评估模型;最后,建立 PCCP 管道数字孪生平台,通过有限元模型和在线监测数据的持续校准,实现断丝发展趋势预测和剩余承载力动态评估。

因此,PCCP 断丝监测技术的发展重点将由单一检测设备的性能改进,逐步转向“感知—识别—评估”的一体化系统建设。随着分布式光纤传感、物联网和人工智能技术的进一步融合,PCCP 管道有望实现从被动检修到主动预警、从局部抽检到全线感知、从断丝识别到全寿命健康管理的转变。这一转变不仅能够提高重大输水工程的安全保障水平,也将为地下管网智能运维和基础设施韧性提升提供重要支撑。

参考文献

- [1] 陶自成,何彦舫. PCCP 管道技术应用进展及国际化接轨若干问题探讨[J]. 水利水电技术, 2016, 47(11): 65-68.
Tao Zicheng, He Yanfang. Discussion on the application progress of PCCP pipeline technology and several issues of internationalization [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(11): 65-68.
- [2] 熊欢. 南水北调超大口径 PCCP 预应力分析模型与试验研究[D]. 北京:清华大学, 2010: 11-15.
Xiong Huan. Prestress model and prototype test on the ultra-diameter PCCP in the middle route of the South-to-North Water Diversion Project [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010: 11-15.
- [3] 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 piezo-electric sensing technology [J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121207.
- [4] 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.
- [5] 窦铁生,董晓农,章焯,等. PCCP 断丝破坏规律 I:原型试验研究[J]. 水利学报, 2023, 12(54): 1430-1438.
Dou Tiesheng, Dong Xiaonong, Zhang Xuan, et al. Failure law of PCCP broken filament I: Prototype experimental study [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 12(54): 1430-1438.
- [6] 王建慧,黄悦,张海鹏,等. 基于数据驱动的 PCCP 管道断丝状态评估与预测方法研究[J]. 北京水务, 2023(S2): 92-96.
Wang Jianhui, Huang Yue, Zhang Haipeng, et al. Research on data-driven evaluation and prediction method of PCCP pipeline breaking state [J]. Beijing Water, 2023(S2): 92-96.
- [7] 张社荣. 预应力钢筒混凝土管(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 Sherong. Design, production, construction and numerical analysis of prestressed steel cylinder concrete pipe (PCCP)[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2009: 1-10.
- [8] 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, 5(4): 233-241.
- Qi Haiming, Song Jianguo, Cui Youguo. Research on electromagnetic NDE inspection method for broken wire of PCCP[J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 5(4): 233-241.
- [9] 段维维, 赵士海, 王文凯. 分布式光纤传感在 PCCP 断丝监测中的应用研究[J]. 水利建设与管理, 2025, 45(1): 27-31.
- Duan Weiwei, Zhao Shihai, Wang Wenkai. Application research of distributed optical fiber sensing in PCCP wire break monitoring[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2025, 45(1): 27-31.
- [10] 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 Kaixu, Gao Yuan, Lou Xiguo. Discussion on safety performance and broken wire detection technology of PCCP[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(3): 104-106.
- [11] 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.
- [12] 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 Zhigang, Jiang Zhengwu, Li Wenting, et al. Influence of mineral admixtures on corrosion resistance of cement mortar exposed to strong acid and salt composite groundwater[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2015, 37(5): 82-87.
- [13] 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 Xiaoli. Analysis on the corrosion of groundwater to the concrete structure and the precautions[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2007(1): 272-273.
- [14] 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 Tiesheng, Yan Jiaqi. Failure modes and cause analysis on prestressed concrete cylinder pipe (PCCP)[J]. China Concrete and Cement Products, 2014(1): 29-33.
- [15] 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 Yi, Yang Guiyu, Li Weiwei. Production technology of prestressed wire for PCCP[J]. Metal Products, 2014, 40(5): 17-20.
- [16] 卢家鑫. PCCP 用预应力钢丝性能分析[J]. 金属制品, 2007(4): 38-40.
- Lu Jiaxin. Property analysis of prestressed steel wire for PCCP[J]. Metal Products, 2007(4): 38-40.
- [17] 胡士信, 王东黎, 张本革, 等. 预应力钢筒混凝土管阴极保护技术应用介绍[J]. 南水北调与水利科技, 2008(1): 303-307.
- Hu Shixin, Wang Dongli, Zhang Bengge, et al. Cathodic protection for prestressed concrete cylinder pipe[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008(1): 303-307.
- [18] 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.
- [19] 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 Jin, Tian Hua, Peng Zhenghui, et al. Application of remote field eddy current testing in PCCP broken wire inspection[J]. China Concrete and Cement Products, 2014(12): 32-34.
- [20] 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 Shukai. 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.
- [21] 窦铁生, 胡赫, 杨进新, 等. PCCP 断丝数量对内压承载力的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(7): 35-37.
- Dou Tiesheng, Hu He, Yang Jinxin, et al. Effect of PCCP broken wire on internal pressure bearing capacity[J]. China Concrete and Cement Products, 2015(7): 35-37.
- [22] 孙岳阳, 卢勇, 胡少伟, 等. 不同断丝比例对 PCCP 内外压承载能力影响研究[J]. 人民长江, 2023, 54(9): 160-165.
- Sun Yueyang, Lu Yong, Hu Shaowei, et al. Study on influence of different broken wires ratios on internal or

- external pressure bearing capacities of PCCPs [J]. Yangtze River, 2023, 54(9): 160-165.
- [23] 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 Yu, Feng Hao, Sha Zhou. Application of PCCP monitoring technology based on distributed optical fiber sensing [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2022, 42(10): 75-79.
- [24] Higgins M S, Paulson P O. Fiber optic sensors for acoustic monitoring of PCCP [C]//Pipeline Division Specialty Conference, 2006: 1-8.
- [25] Travers F A. Acoustic monitoring of prestressed concrete pipe[J]. Construction and Building Materials, 1997, 11(3): 175-187.
- [26] Holley M, Diaz R, Giovanniello M. Acoustic monitoring of prestressed concrete cylinder pipe: A case history[C]//Pipeline Division Specialty Conference, 2001: 1-9.
- [27] Bell G, Paulson P. Measurement and analysis of PCCP wire breaks, slips, and delaminations [C]//Pipeline Division Specialty Conference, 2010.
- [28] Xu W, Ye Y, Lei W. Experimental study on identifying the number of wire breaks in prestressed concrete cylinder pipe based on piezoelectric sensing technology [J]. Construction and Building Materials, 2024, 422: 135762.
- [29] 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 Jianjun, Yao Xuande, Zhang Dongsheng, 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.
- [30] 徐自强, 李成, 穆连波, 等. 基于改进阈值函数法在声波法直埋供热管网泄漏检测中应用[J]. 电子测量技术, 2024, 47(6): 143-150.
- Xu Ziqiang, Li Cheng, Mu Lianbo, et al. Research on the leak detection of directly buried heating pipe network by an improved threshold function [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(6): 143-150.
- [31] 郑晓亮, 谢晓贤, 王强. 基于灰狼优化的埋地管道泄漏双波谱定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 204-214.
- Zheng Xiaoliang, Xie Xiaoxian, Wang Qiang. Grey wolf optimization based buried pipe leak localization using dual-wave spectrum [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 204-214.
- [32] 胡少伟, 胡鑫, 陆俊. 基于涡流原理 PCCP 断丝的无损检测方法研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(2): 101-103, 114.
- Hu Shaowei, Hu Xin, Lu Jun. Study on eddy current principle-based nondestructive testing method for broken wire of PCCP [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(2): 101-103, 114.
- [33] Maclean W R. Apparatus for magnetically measuring thickness of ferrous pipe: US2573799A [P]. 1951-11-06.
- [34] Schmidt T R. History of the remote-field eddy current inspection technique [J]. Materials Evaluation, 1989, 47(1): 14-22.
- [35] 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 Xiaohui, Zhang Haipeng, Ma Haotian, et al. Comparative experimental study on electromagnetic detection equipment for wire break in PCCP [J]. Beijing Water, 2020(5): 59-62.
- [36] 刘焱, 曲民兴. 远场涡流检测技术研究的发展及现状[J]. 盐城工学院学报, 1998, 11(2): 23-25.
- Liu Yan, Qu Minxing. Development and current status of research on remote-field eddy current testing technology [J]. Journal of Yancheng Institute of Technology, 1998, 11(2): 23-25.
- [37] Galleher J J, Stift M T. Internal inspection and database development of PCCP [C]//Pipelines in the Constructed Environment, 1998: 721-730.
- [38] Mergelas B, Shatat S, Kong X, et al. RFEC/TC technology advancement through GMRA experience [C]//Pipeline Engineering and Construction International Conference, 2003: 687-695.
- [39] Biggar A. Detecting wire breaks from the outside of PCCP [C]//Pipeline Division Specialty Conference, 2010.
- [40] Payton R, Larsen M, Arredondo J. Innovative inspection of critical large diameter PCCP pipelines without completely De-watering and under a river crossing for dallas water utilities [C]//Pipeline Division Specialty Conference, 2010: 601-610.
- [41] Catalano L F, Mergelas B, Holley M. Comparison of RFTC and P-wave tests performed on the Rampart 54-inch PCCP raw water pipeline [C]//Pipelines 2009: Infrastructure's Hidden Assets, 2009: 75-85.
- [42] Dion L, Zarghamee M. Condition assessment of a 66-inch diameter PCCP raw water transmission main [C]//Pipelines 2008: Pipeline Asset Management; Maximizing Performance of our Pipeline Infrastructure, 2008: 61-72.

- [43] 耿浩, 夏浩, 王国庆. 高速漏磁检测过程中管道内外壁缺陷定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 70-78.
Geng Hao, Xia Hao, Wang Guoqing. Study on the defect location method of inner and outer wall of pipeline during high-speed magnetic flux leakage testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 70-78.
- [44] Liu B, Lian Z, Tian Y, et al. Development trends of internal inspection equipment and technologies for long-distance oil and gas pipelines[J]. Instrumentation, 2026, 13(1): 1-25.
- [45] 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 Haiming, Song Jianhua, Han Jiming, et al. Monitoring technology of PCCP wire-breaking by distributed FBG sensors[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2018(4): 1-4, 8.
- [46] 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): 100-117.
Zhang Xuping, Ding Zhewen, Hong Rui, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 100-117.
- [47] 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 Ziheng, Jing Hong. Analysis of pipeline leakage monitoring index based on distributed optical fiber acoustic sensing system[J]. China Instrumentation, 2021(8): 61-65.
- [48] 张鹏, 杨进新, 张奇, 等. 长距离输水工程 PCCP 管道断丝处理关键技术[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(S2): 120-124.
Zhang Peng, Yang Jinxin, Zhang Qi, et al. Key technologies for the treatment of broken wires in PCCP pipelines for long-distance water conveyance projects[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(S2): 120-124.
- [49] 吕增强, 杨江涛. 基于多路 ADC 交叉采样的数据采集系统设计[J]. 电子质量, 2022(6): 31-35.
Lyu Zengqiang, Yang Jiangtao. Design of data acquisition system based on multi-channel ADC cross sampling[J]. Electronics Quality, 2022(6): 31-35.
- [50] 刘建霞. Φ -OTDR 分布式光纤传感监测技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 199-204.
Liu Jianxia. Research progress of Φ -OTDR distributed optical fiber sensing monitoring technology[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 199-204.
- [51] 覃欣, 朱宁西, 刘刚, 等. 马赫-曾德干涉检测地下电缆周界振动的分析与实验[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2): 105-110.
Qin Xin, Zhu Ningxi, Liu Gang, et al. Analysis and experiment of surface vibration characteristics of underground cables by Mach-Zehnder interference detection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 105-110.
- [52] 王彦, 蒋超, 朱伟, 等. 基于 Lissajous 输出拟合的非平衡 M-Z 干涉仪相位解调[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 84-92.
Wang Yan, Jiang Chao, Zhu Wei, et al. Phase demodulation of unbalanced M-Z interferometer based on Lissajous output fitting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 84-92.
- [53] 王杰, 贾新鸿, 饶云江, 等. 基于双向拉曼放大的相位敏感光时域反射仪[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 224-228.
Wang Jie, Jia Xinhong, Rao Yunjiang, et al. Phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on bi-directional Raman amplification[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 224-228.
- [54] Peng F, Wu H, Jia X H, et al. Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 张旭苹, 周广南, 王浩然, 等. 基于分布式光纤声场传感的预应力钢管混凝土管断丝监测研究进展[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 149-160.
Zhang Xuping, Zhou Guangnan, Wang Haoran, et al. Research progress of broken wire monitoring of prestressed concrete cylinder pipe based on distributed optical fiber acoustic sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 149-160.
- [58] 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 Fei, Qu Boyang, Zhou Guangnan, et al. A broken

wire detection system of PCCP pipeline based on Φ -OTDR and MZI [J]. Optoelectronic Technology, 2023, 43(2): 133-141.

- [59] 张海鹏, 王建慧, 邵青, 等. 基于宽度回声状态网络的 PCCP 断丝智能预测 [J]. 计算机仿真, 2024, 41(11): 529-533, 538.

Zhang Haipeng, Wang Jianhui, Shao Qing, et al. Intelligent prediction for PCCP wire breakage based on broad echo state network [J]. Computer Simulation, 2024, 41(11): 529-533, 538.

- [60] 王五平, Jack Elliott, 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 Wuping, Jack Elliott, Song Renxin, et al. Acoustic fiber optic monitoring system for forewarning of PCCP failure [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(3): 68-70, 77.

- [61] 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 Yue. 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.

- [62] Huang J, Zhou Z D, Zhang D S, et al. Online monitoring of wire breaks in prestressed concrete cylinder pipe utilising fibre Bragg grating sensors [J]. Measurement, 2016, 79: 112-118.

- [63] Xu Z G, Feng X, Zhong S, et al. Surface crack detection in prestressed concrete cylinder pipes using BOTDA strain sensors [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017(1): 1-12.

- [64] 王威, 陶传义, 朱悦青, 等. 光纤光栅传感器阵列在撞击定位监测中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 76-82.

Wang Wei, Tao Chuanyi, Zhu Yueqing, et al. Application of fiber Bragg grating sensor array in impact location monitoring [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 76-82.

作者简介



高嘉竣, 2023 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为光纤水听器、管道检测。

E-mail: gjj2019@tju.edu.cn

Gao Jiajun received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2023. He is currently

pursuing his Ph. D. degree at Tianjin University. His main research interests include fiber optic hydrophones and pipeline inspection.



封皓, 2006 年于天津大学获得学士学位, 2011 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学教授, 主要研究方向为光纤传感技术、管道智能检测技术。

E-mail: fenghao@tju.edu.cn

Feng Hao received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2006, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2011. He is currently a professor at Tianjin University. His main research interests include optical fiber sensing technology, pipeline intelligent detection technology.



沙洲, 2013 年于天津大学获得学士学位, 2018 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学副教授, 主要研究方向为分布式光纤传感、管道安全预警系统。

E-mail: shazhou@tju.edu.cn

Sha Zhou received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2013, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2018. He is currently an associate professor at Tianjin University. His main research interests include distributed optical fiber sensing, and pipeline optical fiber early-warning systems.



芮小博, 2021 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学副研究员、硕士生导师, 研究方向为声学检测技术。

E-mail: ruixiaobo@tju.edu.cn

Rui Xiaobo received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2021. He is currently an associate researcher and a master's supervisor at Tianjin University. His main research interest is acoustic detection technology.



曾周末 (通信作者), 1982 年和 1985 年于华中工学院分别获得学士学位和硕士学位, 1993 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院讲席教授、博士生导师, 主要研究方向为检测技术及仪器。

E-mail: zhzmeng@tju.edu.cn

Zeng Zhoumo (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Huazhong University of Science and Technology in 1982 and 1985, respectively, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 1993. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include detection technology and instrument.