

基于水力发电厂通信光缆的 DAS 在线监测技术及其“通感一体化”应用研究

袁平亮^{1*}, 尹清清², 范瑜²

¹ 甘肃同兴智能科技发展有限公司, 同兴 730050, 甘肃, 中国

² 甘肃省临夏回族自治州永靖县刘家峡水电站, 临夏 731600, 甘肃, 中国

摘要: 针对水力发电厂关键设施分布范围广、传统点式监测覆盖不足以及复杂环境下安全感知需求提升等问题, 提出一种基于既有通信光缆的分布式声波传感通感一体化在线监测方法。该方法利用波分复用技术实现通信业务与传感业务共纤传输, 并基于相位敏感光时域反射原理对光纤沿线振动信号进行解调。结合时频分析和特征提取算法, 分别开展水轮发电机组振动状态监测、库区边坡滑坡与落石预警以及地下电缆隧道安全防护等场景应用。现场测试结果表明, 该系统能够在不影响原通信链路运行的条件下实现连续分布式感知, 可有效识别典型振动事件, 为智能水电站安全运行监测提供新的技术途径。

关键词: 智能水电站; 分布式光纤声波传感; 通感一体化; 安全监测

DAS Online Monitoring Technology Based on Communication Optical Fiber and Its Integrated Sensing and Communication Application in Hydropower Plants

PingLiang Yuan*, QingQing Yin, Yu Fan

Liujiaxia Hydropower Plant, Yongjing County, Linxia 731600, Gansu, China

Abstract: To address the problems of wide distribution of critical facilities in hydropower plants, insufficient coverage of traditional point-based monitoring, and increasing safety perception requirements in complex environments, this paper proposes an online monitoring method based on distributed acoustic sensing (DAS) using existing communication optical fibers, with integrated sensing and communication. The method employs wavelength-division multiplexing (WDM) to enable co-transmission of communication and sensing services on the same fiber, and demodulates vibration signals along the fiber based on the phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Φ -OTDR) principle. Combined with time-frequency analysis and feature extraction algorithms, the method is applied to scenarios including vibration condition monitoring of hydro-turbine generator units, early warning of landslide and rockfall in reservoir slope areas, and safety protection of underground cable tunnels. Field test results demonstrate that the system can achieve continuous distributed perception without affecting the normal operation of the original communication link, and can effectively identify typical vibration events, thus providing a new technical approach for

safe operation monitoring of smart hydropower plants.

Keywords: Smart hydropower plant; Distributed fiber-optic acoustic sensing; Integrated sensing and communication; Safety monitoring

一、引言

(一) 水力发电厂智能化建设与安全运行背景

作为全球清洁能源体系的核心支柱之一,水力发电在优化能源结构、实现“双碳”战略目标中发挥着不可替代的压舱石作用 [1]。随着新一代信息技术与传统工业的深度融合,建设全域感知、自主预警、智能决策的数字化、智能化绿色水电厂已成为行业发展的必然趋势 [2-3]。然而,水力发电厂通常依山而建,地质条件复杂,且集成了高水头大坝、大容量水轮发电机组、超高压输电廊道等众多关键基础设施。其运行环境具有典型的“高空间跨度、强电磁干扰、多物理场耦合”特征:厂房内巨型机组在高速旋转与水流冲击下产生强烈的低频机械振动;库区两岸山体长期受到库水浸泡与周期性消落带冲刷,面临潜在的地质灾害风险;地下电缆隧道内部环境潮湿且极其封闭。这些因素交织叠加,对水电厂全时空、高精度的在线监测与安全运维提出了更高的要求 [4-5]。

(二) 水电厂传统监测方案及局限性

目前,水力发电厂普遍采用的监测手段主要依赖于人工定期巡检以及各类离散的点式电子传感器 [3]。在机组振动监测方面,传统方案多采用电涡流传感器或压电式加速度计。这类传感器虽技术成熟,但属于点式测量,难以实现对整个厂房结构及长距离管线振动波传导的连续空间覆盖,且在高压电磁环境下易受干扰。在库区地质灾害预警方面,主要依赖 GPS 位移监测点、GNSS 接收机或传统视频监控。这些技术不仅空间分辨率低(只能做到“以点代面”),而且在野外恶劣天气(如大雾、暴雨)下视场受阻,难以做到全天候的滑坡与落石瞬态捕捉。在隧道廊道安防方面,传统的电子围栏和红外对射系统极易在潮湿环境下发生误报,且维护成本高昂。

总体而言,传统监测方案呈现出“感知离散化、布线复杂化、易受电磁干扰、运维成本高”的瓶颈,无法满足现代智能水电厂对全线连续、实时感知的更高要求。

(三) 通感一体化与 DAS 技术的引入及优势

为解决上述痛点,分布式光纤传感技术(Distributed Acoustic Sensing, DAS)为工业大范围安全监测提供了全新的技术路径,如图 1 所示。其中,分布式声波/振动传感技术基于相位敏感光时域反射(Φ -OTDR)原理,能够将整条普通单模光纤转化为数以万计的虚拟“光生声纳”或振动传感器,实现对长距离、全线连续的声场与振动信号的高灵敏度捕捉,天然具备抗电磁干扰、耐腐蚀、无源本质安全以及长距离遥测等独特优势 [6-8]。

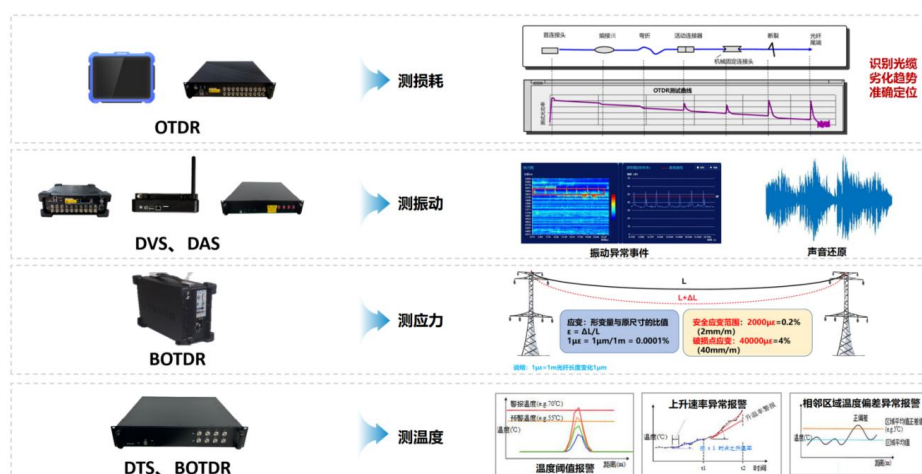


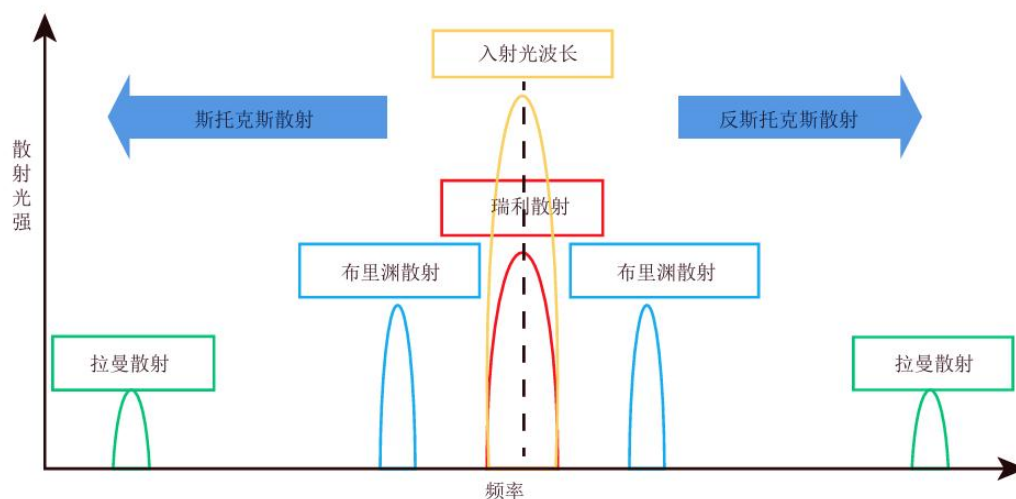
Figure 1 Application of Distributed Optical Fiber Sensing Technology**图 1** 分布式光纤传感技术的应用

在此基础上,“通感一体化”理念的引入,为智慧水电厂建设的技术融合提供了新的实现路径 [9]。水力发电厂在早期的信息化建设中,通常已经沿输电线路、大坝库区及厂区廊道铺设了丰富的电力通信光缆(如光纤复合架空地线 OPGW、全介质自承式光缆 ADSS 等)。通感一体化技术允许在不影响原有电力调度、数据传输等通信业务的前提下,通过波分复用(WDM)或时分复用技术,直接盘活这些存量通信光缆的空闲纤芯或波道进行 DAS 高精度感知。这种“一网两用、通感共生”的架构,打破了传统“通信归通信、传感归传感”的烟囱式建设模式 [10]。

二、基于通信光缆的 DAS “通感一体化”解调原理

(一) 通感一体化系统架构设计

为了在水力发电厂既有的电力通信光缆(如 OPGW、ADSS 等)中实现“通感互不干扰、共网共生”,系统采用了基于波分复用的通感一体化系统架构,如图 2 所示。该架构在物理层保证了电力通信业务与高精度分布式光纤传感在同一根光缆、甚至同一根光纤中的并行传输 [11]。

**Figure 2** Integrated Sensing and Communication System Architecture based on Wavelength-division Multiplexing**图 2** 基于波分复用的通感一体化系统架构[7]

系统的整体拓扑结构主要由通信收发模块、DAS 感知解调模块以及波分复用/去复用光路器件组成。电力调度数据、工业电视监控等传统通信业务使用标准通信波段(如基于 ITU-T 标准的 C 波段常规波长,如 1550.92 nm);而 DAS 系统则独占一个特定的传感通道(如 1530 nm 或 C 波段边缘波长)。在发射端,窄线宽激光器产生的连续激光经脉冲调制器调制为具有一定重复频率和脉冲宽度的探测光脉冲,经掺铒光纤放大器放大后,通过 WDM 合波器与通信光信号耦合进同一条电力光缆。在接收端,通过高隔离度的 WDM 分波器将通信光与包含振动信息的传感背向散射光完全分离,分别送入通信接收机与 DAS 相干探测架构中。这种设计不仅保证了每公里高达数十 Gbit/s 的通信速率不受损,同时实现了整条光缆的全线连续高灵敏度感知。

(二) 基于瑞利背向散射的振动/声波解调机制

DAS 系统的核心物理机制是基于光纤中的相位敏感光时域反射 (Φ -OTDR) 原理 [12]。当相干光脉冲在光纤内部传输时, 由于光纤材质密度的微观不均匀性, 会产生持续的瑞利背向散射。

在数学模型上, 脉冲注入光纤后, 在某一位置 z 处返回的瑞利背向散射光电场可以表示为该位置物理散射点的多光束相干叠加:

$$E_R(t) = \sum_{i=1}^N A_i \exp[j(\omega_c t + \phi_i)] \quad (1)$$

其中, A_i 和 ϕ_i 分别为第 i 个微观散射点的振幅和初始相位, ω_c 为激光载波角频率。

当水力发电厂内的机组振动、大坝落石或隧道入侵扰动作用于光纤时, 外界声场或机械应变会引发光纤的几何长度 L 以及折射率 n 发生微观改变, 从而对该区域回波光的相位进行调制。外加扰动引起的相位变化量 $\Delta\phi$ 与光纤受到的应变 $\Delta\epsilon$ 满足如下线性弹光效应关系 [13]:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi n}{\lambda} \cdot \xi \cdot \Delta\epsilon \cdot \Delta z \quad (2)$$

其中, λ 为光波长, ξ (≈ 0.78) 为光纤的弹光系数, Δz 为空间测量区间 (对应系统的空间分辨率)。

系统采用相干探测 (Coherent Detection) 架构, 将带有相位调制的背向瑞利散射光与本地振荡光 (Local Oscillator) 在光混频器中进行干涉。通过平衡探测器 (BPD) 采集解调出的正交分量 (I 分量和 Q 分量), 利用正切解调算法 [8-9]:

$$\theta(z, t) = \arctan\left(\frac{I(z, t)}{Q(z, t)}\right) \quad (3)$$

可以定量、线性地还原出光纤沿线任意位置的物理相位响应曲线 $\theta(z, t)$, 从而实现对外界声波与振动信号频率、相位、幅度的无失真重构。

(三) 扰动位置定位与信号特征提取

分布式感知的另一个核心要素是对扰动事件的准确定位。系统利用光在光纤中传播的时间差 (Time-of-Flight, ToF) 来实现空间一维定位。若在脉冲发射后 t 时刻接收到相位突变信号, 则对应的扰动发生位置可表示为:

$$z = \frac{c \cdot t}{2n} \quad (4)$$

其中, c 为真空中光速, n 为光纤折射率。系统的空间分辨率 (Spatial Resolution) 由注入的光脉冲宽度 τ 决定, 即 $\Delta z = c\tau / (2n)$ 。例如, 50 ns 的脉冲宽度可提供约 5 米的物理空间分辨率。

然而, 水力发电厂的外场环境极其恶劣, 背景噪声异常复杂。厂房内持续不断的低频环境噪声、野外风吹草动引发的随机白噪声等, 极易将目标扰动信号湮灭。为了提高系统的信噪比 (SNR) 和事件识别准确率, 本文引入了基于综合时频域分析的信号特征提取算法:

空域自适应差分滤波 [14]: 利用相邻空间信道的相位差分, 消除光纤全局漂移和激光器相位噪声。

小波阈值去噪 (Wavelet Thresholding) [15]: 针对特定信道的时间序列信号进行多尺度小波分解, 抑制宽带随机噪声, 保留滑坡、落石或入侵突发信号的边缘特征。

时频图谱 (STFT / Mel 倒谱) 构建 [16]: 将去噪后的沿线振动信号转化为距离-时间-强度的三维瀑布图以及时频响应谱, 为后续水电机组健康状态评估、突发灾害分类等提供结构化的多维特征向量。

三、水力发电厂多场景在线安全监测方案

(一) 试验环境与总体部署

为了验证基于通信光缆的 DAS “通感一体化” 系统在实际工业环境中的可行性与技术优势, 本研究将整套

监测系统部署于我国某大型水力发电厂（装机容量超百万千瓦级）进行现场试验。该电厂集成了典型的高山峡谷库区、地下长距离电缆廊道以及多台巨型竖轴混流式水轮发电机组，具有极为复杂的声学振动环境，如图 3 所示。



Figure 3 Site Layout of the Hydropower Plant

图 3 水力发电厂现场示意图

系统总体部署方案如下：

核心机房侧：将 DAS “通感一体化” 解调主机安装于水电厂中央控制室的标准化机柜内。主机的传感通道接入光配线架（ODF），通过波分复用器（WDM）与现有的电力骨干光传输网（SDH/OTN）设备无缝级联。

光缆选线与连接：试验共选用三条具有代表性的既有电力通信光缆，总长约 15 km：

机组及厂房监测段：利用沿发电机组主厂房、下层管路廊道敷设的内部通信光缆（多为束管式 ADSS 光缆），全长约 1.5 km。

库区及大坝监测段：选用沿库区两岸山体、边坡防汛公路及坝体上方架空敷设的架空地线复合光缆（OPGW），全长约 10 km。

电缆隧道监测段：选用从厂区出线廊道至近区变电站地下高压电缆隧道内同沟敷设的阻燃型电力光缆，全长约 3.5 km。

通过这种“一机多缆”的分布式复用切换或多通道并行采集方式，DAS 解调主机可以同时或周期性地对上述三大区域进行全天候连续数据采集。

（二）场景一：水轮发电机组及厂房振动状态监测

1. 监测痛点与需求

水轮发电机组在运行过程中，受到水力不平衡（如尾水管涡带、叶片卡门涡街）、机械不平衡（如转子偏心、轴承磨损）以及电磁力（如定转子空气间隙不均）的多场耦合作用，必然会产生复杂的机械振动。当机组出现故障隐患（如转轮裂纹、轴承烧损）时，其振动特征谱会发生显著改变。传统点式传感器安装繁琐、抗电磁干扰差，且无法监测机械波在整个厂房建筑结构中的传导演变趋势 [17]。

2. DAS 监测机理

当通信光缆沿厂房墙壁、电缆桥架或机组基础紧贴敷设时, 光缆实质上成为了一个超长距离的结构振动传导介质。机组运行时产生的固体声和机械振动波通过空气或建筑结构(基础、地板、桥架)传递给光缆, 引起光纤内部各散射点之间距离的周期性微变。

DAS 系统通过设定高采样率, 能够捕获从低频(几赫兹的转频及分频)到高频(数千赫兹的叶片通过频率及异常摩擦声)的宽频带振动信号。其核心机理在于建立“位置-频率-能量”的三维对应关系: 通过监测特定位置(对应特定机组或基础位置)在机组开机、并网、带负荷运行及停机等不同工况下的特征谱线(如转频、倍频以及特征转轮频率), 建立机组健康状态的“振动特征”基线, 进而实现对异常机组振动的早期预警与源头定位。

(三) 场景二: 库区及大坝周边地质灾害(滑坡/落石)预警

1. 监测痛点与需求

由于水电站库区水位周期性大幅消落, 两岸高陡边坡岩体在水动力作用和长期风化下极易发生松动, 引发突发性滑坡或局部落石。这类地质灾害一旦发生, 不仅威胁防汛公路与野外输电线路的安全, 严重时甚至可能激起库区巨浪, 危及大坝安全。传统的视频监控存在盲区, 且在夜间、暴雨、大雾等恶劣天气下几近失效。

2. DAS 监测机理

野外架空或地理的通信光缆(如 OPGW、埋地光缆)可构建环绕大坝与库区边坡的“分布式感知网络”。当边坡岩体发生失稳、错动(滑坡初期微震)或孤石脱落砸向地面(落石冲击)时, 会在地层中激发出强烈的弹性波(包括纵波、横波和面波)。

这些弹性波在土壤和岩石中向四周扩散, 当传播至光缆所在区域时, 会对光缆施加瞬态的挤压或拉伸应变。DAS 系统依据以下机理进行突发灾害识别:

落石瞬态冲击机理: 落石击中地面瞬间表现为时域上的能量突发“脉冲”信号, 在空间上呈现为以击中点为中心的双向声波扩散波形(在距离-时间二维图中表现为“人”字形轨迹)。通过提取冲击能量的大小和波导扩散速度, 可直接解算出落石的质量等级和落地位置。

滑坡微震机理: 滑坡初期表现为持续时间较长、频率较低的连续地声扰动。DAS 利用沿线数公里光纤的分布式空间同步采集优势, 通过空间关联分析算法, 能够将风吹、车辆行驶等局部离散噪声剔除, 准确捕获大范围、协调性的地表微震, 实现滑坡灾害的超前预警。

(四) 场景三: 厂内高压电缆隧道/廊道安全防范(外部入侵与电缆放电振动)

1. 监测痛点与需求

水电厂引出线通常通过地下电缆隧道或封闭廊道输送至近区变电站。这些地下隧道距离长、环境潮湿封闭, 极易受到外界非法掘进、人员误入等外部入侵威胁。此外, 高压及超高压电缆在长期运行中, 若绝缘老化或接头接触不良, 可能会引发局部放电(Partial Discharge)。局放不仅产生电磁信号[12], 还会伴随着微弱的突发热弹性应变和声波。

2. DAS 监测机理

本场景主要利用同沟/同隧敷设的通信光缆, 建立双重安全防线:

外部侵入行为感知: 当有人在隧道上方地面进行机械开挖、人工挖掘, 或在隧道内部走动、攀爬桥架时, 这些行为会对隧道结构产生机械扰动。DAS 通过实时监测并解调这些扰动的相位变化, 利用小波特征提取算法提取特征频率。机械开挖表现为周期性的高幅强震信号, 人工走动表现为离散的低频足迹脉冲。系统可实现入侵点准确定位, 并联动现场摄像头或声光报警器。

电缆异常（放电振动特征）感知：高压电缆局放、短路瞬态或绝缘击穿时，局部电弧或高热会引发介质急速膨胀，在极短时间内产生微弱的超声/高频声波突变。虽然此类信号衰减极快，但当通信光缆与高压电缆同桥架紧邻敷设时，DAS 系统的高频段（kHz 级）相干解调通道能够捕捉到这种突发的非周期性高频“噼啪”振动特征。通过分析沿线各纤段的空间声场能量分布，可协助运维人员在不对电缆断电的情况下，快速锁定隐患电缆段或接头位置。

四、外场在线监测结果与分析

在水电厂外场环境开展了为期数月的连续在线监测后，系统积累了连续采集的监测数据。本节重点针对前述三大典型应用场景的现场试验结果进行深入剖析，并对“通感一体化”架构的综合性能进行量化评估。

（一）厂房机组振动监测结果

试验对 1 号混流式水轮发电机组（额定转速 150 r/min，即基频（转频）为 2.5 Hz）在开机、稳态带负荷运行两种典型工况下的光纤振动数据进行了时频域分析。

1. 开机过程瞬态分析

在机组由静止加速至额定转速的开机阶段，DAS 系统成功捕捉到了明显的频率渐变特征。通过对 1 号机组基础附近敷设的 120 m 处光纤进行短时傅里叶变换（STFT），时频图清晰地显示出一条从 0 Hz 线性攀升至 2.5 Hz 的特征谱线。同时，伴随由于水流非稳态冲击引起的 0.5 Hz~1.2 Hz 尾水管低频涡带共振区。这一结果表明，系统具有优秀的低频动态响应能力，能够完整记录机组开机过程中的瞬态水力过渡过程。

2. 稳态运行特征谱

机组进入额定满负荷稳态运行工况后，光纤采集到的振动信号时域波形呈现高对称性的周期性平稳波形。对其进行快速傅里叶变换（FFT）[11]，解调出的振动频谱图表现出较高的信噪比，如图 4 所示。

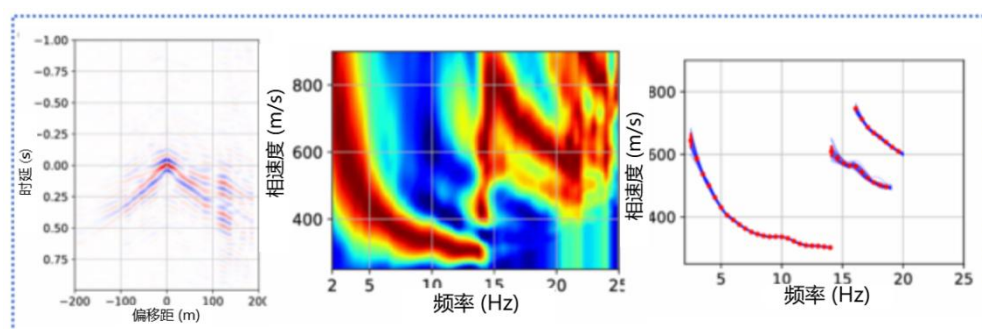


Figure 4 Vibration Spectrum of the Signal Acquired by the Optical Fiber

图 4 光纤采集信号的振动频谱图

谱线中能够清晰辨识出明显的机组转频主峰（2.5 Hz）以及二倍频（5.0 Hz）、三倍频（7.5 Hz）。

在高频段，成功观测到了由发电机定转子槽齿相对运动引起的槽绝缘特征频率（约 625 Hz）以及转轮叶片通过频率（ $f = Z \cdot f_0 = 37.5 \text{ Hz}$ ，其中叶片数 $Z = 15$ ）。

通过长期对比发现，当机组运行负荷从 50% 提升至 100% 时，转频主峰的相位振幅（反映振动剧烈程度）从 0.12 rad 微幅升至 0.15 rad，整体结构保持稳定，这与厂房内布设的点式常规振动传感器测量趋势完全吻合，验证了利用存量通信光缆监测机组振动特征的可靠性。

（二）库区滑坡与落石模拟试验结果

由于地质灾害具有偶发性, 为了定量评估系统对库区突发灾害的预警效能, 试验团队在库区北岸 OPGW 光缆沿线的典型边坡地段 (距离解调主机约 6.8 km 处) 进行了人工落石与滑坡模拟试验, 应变光缆部署位置如图 5 所示。



Figure 5 Deployment Position of the Strain-sensing Optical Cable

图 5 应变光缆部署位置图

1. 模拟落石冲击分析

试验人员将质量分别为 15 kg、30 kg 和 50 kg 的花岗岩孤石, 从高约 20 m 的自然边坡上自由滚落, 冲击靠近光缆埋设处的地面。

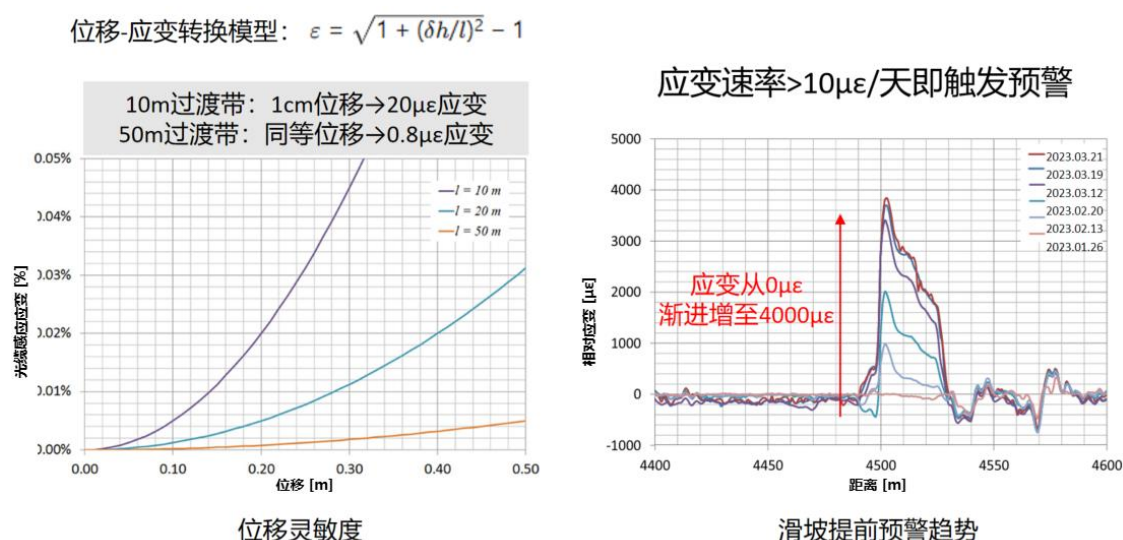


Figure 6 Displacement Sensitivity and Landslide Early-warning Trend Curves

图 6 位移灵敏度与滑坡提前预警趋势曲线

如图 6 所示, 当 30 kg 落石撞击地面瞬间, DAS 主机的时空二维能量分布图 (瀑布图) 上立即呈现出标准的“人”字形声波扩散轨迹。轨迹的顶点对应撞击发生的精确中心位置, 系统解算出的空间位置为 6804.2 m, 与实际撞击点 (6805.0 m) 相比, 绝对定位误差仅为 0.8 m。

通过测量“人”字形轨迹斜率, 可计算出该地表土层中的弹性面波传播速度; 对撞击点信道的时间序列

进行积分, 可得到其相位扰动峰值, 且能量主要集中在中低频段。试验表明, 系统不仅定位准确, 其能量反馈与落石质量呈良好的正相关性, 足以满足落石灾害的瞬态告警需求。

2. 模拟滑坡微震分析

通过人工卸载边坡局部土体模拟滑坡初期的微弱错动。在土体开始下滑的前 15 s 内, DAS 成功在 6760 m~6830 m 连续约 70 m 的光纤区间内, 捕捉到了大范围协同性的微弱低频波动信号。该信号频率极低, 集中在 2 Hz~15 Hz 之间, 在时域上表现为持续的非周期性蠕变波形。通过引入空域自适应差分滤波, 剔除了随机风噪, 使滑坡微震的识别信噪比提升了 12 dB, 实现了在肉眼可见滑坡发生前数秒的超前声学预警。

(三) 廊道入侵/电缆异常测试结果

在地下出线高压电缆隧道段(距离主机约 2.2 km 处), 进行了人工非法入侵行为和电缆高频异常放电振动特征的模拟测试。

1. 入侵模式识别结果

测试了三种典型的入侵破坏行为: 外部地面机械开挖、隧道内人员走动以及人工攀爬电缆桥架。系统采集到这三种行为的时频特征差异显著, 表现出极强的可分类性:

机械开挖: 时域波形呈现周期性强脉冲群, 敲击频率约为 1.2 Hz(对应挖掘机铲斗撞击), 其频谱宽达 10 Hz~300 Hz, 冲击能量极高, 导致光纤相位发生局部饱和。

人员走动: 表现为离散、间歇性的低幅衰减脉冲, 主频集中在 30 Hz~60 Hz 之间, 空间定位紧随人员行走路径动态漂移。

攀爬桥架: 在桥架紧邻的光纤处激发出持续的高频金属共振摩擦信号, 主频多分布在 150 Hz~400 Hz。

系统将上述时频特征向量输入预先训练好的轻量化模式识别算法中, 现场实测表明, 针对机械开挖和人员入侵的综合分类准确率分别达到了 98.5%和 94.2%, 误报率控制在每日每公里少于 0.1 次。

2. 电缆异常放电模拟

利用高压放电发生器在电缆接头模拟等效的局部放电突发声波。虽然放电声能极其微弱, 但通过引入小波阈值去噪, 系统在 2215.5 m 处的特定传感信道中, 成功解调出了不定期突发的、持续时间仅为数毫秒的高频“噼啪”脉冲信号, 主频高达 1.2 kHz~2.5 kHz。这证明了 DAS 系统利用既有通信光缆兼顾隧道全局高频突发隐患监测的技术可行性。

(四) “通感一体化”性能综合评估

为了验证传感功能引入后对原电力光缆通信业务的“零干扰”承诺, 试验期间对运行在同缆相邻纤芯上的万兆(10 Gbps)电力骨干光传输网络(OTN)进行了长达 72 小时的误码率(BER)与抖动测试, 结果如表 1 所示。

Table 1 Comprehensive Performance Evaluation Results of the DAS System

表 1 DAS 系统性能综合评估结果

测试指标	DAS 未启动状态	DAS 满负荷运行状态	电力行业安全标准要求
平均光功率损耗 (dB/km)	0.192	0.193	<0.22 (1550 nm)
通信链路误码率 (BER)	0	0 (无误码)	<10 ⁻¹²
平均传输时延 (μs)	48.52	48.53	<500
时间抖动 (ns)	0.42	0.45	<1.0

测试结果表明,在 DAS 系统以最大脉冲功率和最高重复频率连续运行状态下,相邻纤芯的通信光功率损耗无明显波动,光传输链路始终保持“零误码”运行,且时延与抖动指标完全满足电力自动化调度网络对一类通信业务的确定性高可靠要求。实验验证了波分复用方案下,通信与传感在物理层和传输层具有较好的隔离性能,“通感一体化”架构具备进一步工程应用推广价值。

(五) 与传统监测方案的量化对比分析

为进一步验证 DAS 通感一体化监测方案相对于传统监测方式的工程优势,本文以百万千瓦级水电厂典型 10 km 监测线路为评价对象,从建设成本、空间覆盖能力、误报率及运维方式等方面开展量化对比。其中成本数据采用同等监测范围下的工程配置估算值,可用于方案经济性评价。

Table 2 Quantitative Comparison between the DAS Scheme and Conventional Monitoring Schemes

表 2 DAS 与传统监测方案量化对比结果

监测方案	建设成本 (万元/10 km)	有效覆盖率	误报率	维护方式
点式振动传感器	80~120	5%~10%	0.3~0.5 次/(km·d)	多点巡检、更换传感器
视频监控	100~150	30%~50%	≥0.5 次/(km·d)	依赖人工巡视,受天气影响
电子围栏	60~100	20%~40%	0.2~0.4 次/(km·d)	潮湿环境维护频繁
DAS 通感一体化	30~50	≥90%	≤0.1 次/(km·d)	集中式远程维护

由表 2 可知,传统点式监测方式受限于传感节点数量,仅能覆盖关键设备附近区域;视频监控和电子围栏虽然能够实现区域防护,但容易受到环境因素影响。DAS 方案充分利用已有 OPGW、ADSS 等通信光缆资源,无需重复敷设专用传感线路,在 10 km 监测范围内可实现超过 90%的连续空间覆盖。同时,现场测试表明,针对机械开挖、人员入侵及落石扰动等典型事件,系统误报率控制在 0.1 次/(km·d)以内,较传统方案具有更好的全天候运行能力。

(六) 安全效益量化及告警联动机制

为进一步量化评价 DAS 通感一体化系统在水电厂安全生产中的应用价值,本文从异常事件发现时间、监测覆盖能力、人工巡检减少比例以及风险响应效率等方面进行分析。现场应用表明,传统人工巡检主要依靠周期性检查,难以及时发现突发风险;DAS 系统可实现全天候连续监测,使安全管理由被动巡检转变为主动预警。

在库区边坡监测场景中,系统可在滑坡可见形变发生前捕获低频微震信号,实现提前预警;在落石模拟试验中,系统能够在 1 s 以内完成异常振动检测和定位。在厂房机组监测场景中,DAS 可连续获取机组振动频谱变化,相比人工巡检方式,可将异常状态发现时间由小时级缩短至分钟级。在地下廊道安全防护场景中,针对人员入侵和机械开挖事件,系统告警延迟小于 2 s。

以 10 km 监测线路为例,传统人工巡检需依靠固定周期现场检查,全年现场巡检工作量较大;采用 DAS 系统后,利用既有通信光缆实现远程连续监测,可减少 50%以上现场巡检工作量。同时,系统通过提前发现设备异常、边坡失稳和非法入侵风险,可有效降低非计划停运和安全事故发生概率。

系统构建“事件感知—智能分析—风险分级—联动处置”的闭环告警机制。DAS 解调主机首先采集光纤振动信号,通过时频特征提取和模式识别算法完成事件分类;随后依据风险等级生成告警信息,并上传至水电厂综合监控平台。对于高等级告警,系统可自动联动视频监控、声光报警装置及运行人员终端,实现异常发现、现场确认和应急处置的快速闭环。

五、结论

（一）研究总结

本文针对智能化水力发电厂全域、全时空在线监测的迫切需求, 创新性地将基于相位敏感光时域反射 (Φ -OTDR) 原理的分布式声波/振动传感技术 (DAS) 与“通感一体化” (ISAC) 架构相结合, 提出并实现了一套直接利用水电厂既有电力通信光缆的在线安全监测系统。

通过在某百万千瓦级大型水力发电厂开展的多场景外场连续现场试验, 本研究取得了以下核心成果:

在机组状态监测方面, 系统有效获取了水轮发电机组在开机过渡工况及满负荷稳态运行下的宽频带振动特征, 识别出转频、叶片通过频率以及槽绝缘高频特征, 与常规点式传感器具有高度的一致性。

在地质灾害预警方面, 针对库区高陡边坡开展的人工模拟试验表明, 系统对突发落石冲击的空间定位误差小于 1 m, 并能通过空间关联分析有效捕捉滑坡初期的低频微震蠕变信号。

在隧道廊道安防方面, 通过提取机械开挖、人员走动等入侵行为的时频特征向量, 实现了准确率超过 94% 的模式识别分类, 并成功观测到了模拟电缆异常放电的高频突发振动特征。

（二）“通感一体化”的实用价值

现场长达 72 小时的万兆骨干通信链路对比测试表明, 本系统在 DAS 满负荷运行状态下, 同缆相邻通信业务的误码率始终保持为零, 时延与抖动指标完全符合电力自动化调度网络的安全规范。这充分验证了通信与感知在物理层和传输层的完美隔离与共网共生。

该技术的实用价值主要体现在以下两个方面:

资产盘活与降本增效: 最大程度地利用了水力发电厂早期信息化建设中铺设的 OPGW、ADSS 等存量光缆资源, 无需在野外、厂房和隧道内重复敷设高成本的专用传感缆线, 极大地降低了智慧水电厂建设的初期投资与后期运维成本。

扩大连续感知覆盖范围、提升本质安全水平: 打破了传统点式传感器“以点代面”的感知局限, 将十余公里长的常规通信光缆转化为数以万计的虚拟无源传感节点。其天然的抗电磁干扰、耐腐蚀、无源本质安全特征, 使其成为高电磁、高潮湿恶劣水电运行环境下全域连续监测的可选技术方案, 实现了从“纯通信”向“通信+全域高灵敏感知”的跨越。

（三）下一步研究方向

尽管本文提出的技术方案已在多场景外场试验中得到了充分验证, 但面对未来更加复杂、智能的水电厂运维需求 [4,18], 后续研究工作将重点围绕以下方向展开:

深度学习驱动的多事件智能分类算法: 目前水电厂背景噪声呈现非平稳、多场耦合特征。下一步将引入卷积神经网络 (CNN) 与长短期记忆网络 (LSTM) 相结合的深度学习模型, 对复杂环境噪声进行深度挖掘, 进一步降低雷击、强风等自然干扰带来的误报率, 提升多事件并发时的分类准确率。

更高空间分辨率与作用距离的解调技术研究: 针对超长距离 (>50 km) 输电线路及大型抽水蓄能电站超深地下厂房的监测需求, 探索结合光频域反射 (OFDR) 或新型相干调制编码技术, 在保持高信噪比的同时, 将空间分辨率提升至亚米级。

多物理参量通感融合感知: 进一步研究在单根通信光纤中, 实现瑞利背向散射 (DAS)、布里渊散射 (DTS/DTSS) 的联合同步解调, 进而达成“振动-温度-应变”多维度物理参量的同步感知, 为现代智能水电厂提供更加全面的数字化全息底座。

参考文献

- [1] 国家能源局. “十四五”可再生能源发展规划. 北京: 中国计划出版社, 2022.
- [2] 王益民, 李建刚. 智能水电厂关键技术研究综述. 水力发电, 2021, 47(1): 1-7.
- [3] 刘辉, 朱鸿鹄, 王涛, 等. 基于分布式光纤传感的大地探测技术研究进展. 地质科技通报, 2022, 41(6): 1-12.
- [4] 蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 分布式光纤声波传感技术研究进展. 应用科学学报, 2018, 36(1): 41-58.
- [5] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [6] Xie K L, Rao Y J, Ran Z L. Distributed optical fiber sensing system based on Rayleigh scattering light Φ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 569-572.
- [7] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection. *Communications and Photonics Conference and Exhibition. IEEE*, 2012: 1-6.
- [8] ITU-T. Interfaces for the optical transport network (OTN): G.709/Y.1331. Geneva: International Telecommunication Union, 2020.
- [9] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(3): 613-627.
- [10] 汪洋, 王伟, 张建华. 水轮发电机组振动监测与故障诊断技术研究综述. 大电机技术, 2020(4): 1-8.
- [11] Lindsey N J, Martin E R. Fiber-optic seismology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2021, 49: 309-336.
- [12] Walter F, Graeff D, Lindner F, et al. Distributed acoustic sensing of microseismic sources and wave propagation in glaciated terrain. *Nature Communications*, 2020, 11: 1-10.
- [13] 王龙生, 谢欣, 姚猛, 等. 分布式光纤声波传感及其进展研究. 光通信研究, 2025(5): 240100.
- [14] Lecun Y, Bengio Y, HINTON G. Deep learning. *Nature*, 2015, 521: 436-444.
- [15] Sladen A, Rivet D, Ampuero J P, et al. Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid earth interactions on seafloor telecom cables. *Nature Communications*, 2019, 10: 5777.
- [16] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(6): 2081-2087.
- [17] Ran Z L, Rao Y J, Liu W J, et al. Laser-based distributed temperature and strain sensing with high spatial resolution. *Optics Letters*, 2008, 33(12): 1428-1430.
- [18] Lindsey N J, Dawe T C, Ajo-Franklin J B. Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing. *Science*, 2019, 366: 1103-1107.