

的能耗和噪音水平。

## 6 结语

暖通空调工程设计方法与系统分析对于优化设计方案、提高能源效率和推动可持续发展具有重要意义。然而，我们也意识到在实际应用过程中仍存在一些挑战和改进空间，如系统的智能化、自动化程度的提高，新技术的应用等。因此，建议在未来的研究和实践中，进一步深化暖通空调工程设计方法和系统分析的研究，加强与相关领域的交叉合作，推动技术创新和实际应用。同时，建议加强对暖通空调系统的监测和管理，实施有效的运维和节能措施，以实现系统的可持续运行和性能优化。通过不断地努力和改进，我们有信心能够建立更加高效和可持续发展的暖通空调工程设计方法与

系统分析体系，为建筑行业提供更加舒适、节能和环保的室内环境。

## 参考文献

- [1] 夏焱.“暖通空调工程设计方法与系统分析”课程教学方法探讨[J].科教导刊,2015(10):3.
- [2] 蔡少铭.暖通空调优化设计方法分析[J].科技创新与应用,2014(14):1.
- [3] 高源杰.关于暖通空调系统节能技术与设计方法的探究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2022(4):3.
- [4] 曹珏末.暖通空调制冷系统的优化与控制技术分析[J].工程建设与设计,2019(2):2.
- [5] 段云娇.暖通空调工程中制冷系统管道设计及施工技术分析[J].装备维修技术,2020(6):1.

# 智能光纤振动传感技术在智慧交通建设的应用

## ——以五峰山未来高速为例

### Application of Intelligent Fiber Optic Vibration Sensing Technology in Intelligent Transportation Construction

#### —Taking the Wufengshan Future Expressway as an Example

王峥嵘

Zhengrong Wang

华设设计集团股份有限公司 中国·江苏 南京 210000

Huashe Design Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

**摘要:** 光纤振动传感技术是一种新兴的高灵敏度传感系统, 现逐步应用于通信通讯线路、电力通信管道、智慧交通等线性系统的安全监测和破坏预警, 可直接利用系统的通信光纤作为传感和信号传输介质, 对光纤周边环境或光纤本身的振动信号进行探测、定位并发出报警。

**Abstract:** Fiber optic vibration sensing technology is an emerging high sensitivity sensing system that is gradually being applied to safety monitoring and damage warning of linear systems such as communication lines, power communication pipelines, and smart transportation. The communication fiber of the system can be directly used as the sensing and signal transmission medium to detect, locate, and issue alarms for vibration signals in the surrounding environment or the fiber itself.

**关键词:** 高速公路; 智慧高速; 瑞利散射; 碰撞监测

**Keywords:** expressway; smart expressway; rayleigh scattering; collision monitoring

**DOI:** 10.12346/etr.v5i5.8063

## 1 引言

光纤传感技术是一种利用光纤作为传感器的载体, 通过光学原理实现物理量的测量和检测的技术。它是在基于光纤通信技术的基础上发展而来的, 经过了长期的研究和发展, 已经成为了一种重要的传感技术。利用光纤作为传感器的载体, 通过光学原理实现物理量的测量和检测。在光纤传感过程中, 分布式光纤传感技术利用光缆本身作为传感单元和信息传输媒介, 通过检测光波参量的变化来获取光缆所处外部环境的变化信息。这种技术能够实现对光缆全程进行实时监测, 具有高灵敏度和高精度的特点, 能够检测光纤沿线任意区域内的信息, 并且传感距离可以达到几十甚至上百千米。分布式光纤传感技术相比多点式传感单元的准分布式光纤传感技术, 具有更低的成本, 因此在大型建筑的构架安全检验中应用更为广泛。这种技术能够通过检测光波参量的变

化, 实现对光缆全程进行实时监测, 具有高灵敏度和高精度的特点。所以, 全分布式光纤传感科技愈发备受民众的关注, 是现今光纤传感技术的关键探讨方向<sup>[1]</sup>。

## 2 国内外探究综述

风湿光纤传感技术运用光纤几何上一维特点开展检测, 其将被检测的物理量转化为光纤长度的变化, 对顺着光纤任何途径划分的外部物理参数开展不间断的检测, 提供了同时获得被检测物理参数随着空间与时间转变的数据方式。分布式光纤传感技术常常利用光纤内的光散射或非线性效应来检测光纤上随着外部环境变化的参数进行传感, 其中涉及拉曼散射、瑞利散射和布里渊散射三种类型的散射。国内外探究工作人员对各种分布式光纤传感器科技开展了深入的探讨, 目前, 分布式光纤传感技术的代表性应用主要包括基于

【作者简介】王峥嵘(1983-), 男, 中国江苏如皋人, 硕士, 高级工程师, 从事高速公路机电、智慧高速研究。

自发布里渊散射的布里渊光时域反射技术、基于受激布里渊散射的技术、基于瑞利散射的技术和基于拉曼散射的拉曼光时域反射技术。

### 3 基于瑞利散射的分布式光纤护栏碰撞探测科技

#### 3.1 技术原理

当激光脉冲在光缆中传递过程中，因光缆自身折射率的微观不均匀性，会形成一定的瑞利散射光。当依靠对瑞利散射原理中的光强，同时结合光缆的其他特征解析时，能够落实对光纤振动传感（phase-sensitive optical time-domain reflectometry,  $\Phi$ -OTDR，相位敏感光时域反射）监测或偏振传感（polarization optical time domain reflectometry, POTDR，偏振敏感光时域反射）检测。这两类技术均能够实现亚秒量级的振动检验速率。 $\Phi$ -OTDR 科技运用对光缆中光信号相位开展调整，光缆体验到振动时，相关点区域的光相位同时会形成一定的转变，其核心原理见图 1。

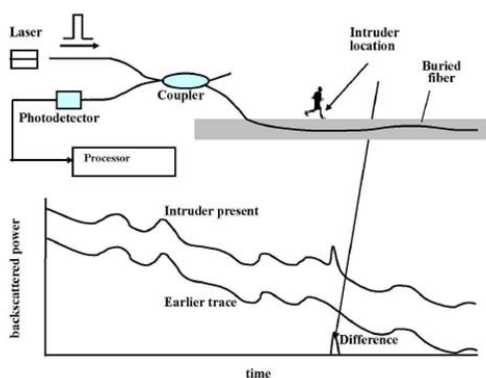


图 1  $\Phi$ -OTDR 技术相位探测原理示意图

假设  $\Delta L$  可以被分成  $M$  个随机的瑞利散射元，并且这些散射光的偏振相似。那么这  $M$  个随机散射的场矢量和可以表示为：

$$r_k \exp(j\phi_k) = \sum_{i=0}^M a_i \exp(j\Omega_i)$$

假设  $r_k$ 、 $\phi_k$  和  $k$  分别为脉冲内的第  $k$  段光纤的  $M$  个后向散射的幅度和相位的矢量和， $\alpha_i$  和  $\Omega_i$  分别为  $\Delta L$  长度光纤内的第  $i$  个后向散射的幅度和相位。假设  $r_k$ 、 $\phi$ 、 $\alpha_i$  和  $\Omega_i$  都是随机变量。假设  $\alpha_i$  和  $\Omega_i$  是独立的，并且对于所有的  $i$  的分布都是一样的，而且  $\Omega_i$  是平均分布在  $(-\pi, \pi)$  之间的。

当脉冲宽度为  $N\Delta L$  时，距离  $M\Delta L$  处的后向散射光的干涉场可以表示为：

$$E_b(m\Delta L) = E_0 \sum_{k=m}^{M+n+1} P_k r_k \exp(j(\theta_k + \phi_k)) e^{-\alpha_k m \Delta L}$$

其中， $P_k$ 、 $r_k$  和  $\theta_k$  分别为第  $k$  个反射镜的偏振、反射率和相位； $\theta_k$  为入射振动引入第  $k$  个反射镜中的相位变化。

一个系统的不同振动区域的相位转变是单独的且不会被相互作用，对几十千米的全线光缆，能够落实亚秒量级的扫描速率。

#### 3.2 算法研究

基于光纤振动监测系统，其系统检测的是瑞利散射光，拥有比拉曼、布里渊散射光更大的功率，使其更容易被检测到。即使是微小的外部扰动也会导致探测光功率的急剧变化。然而，正是由于这种敏感性，分布式光纤振动传感系统对周遭环境的影响非常敏锐，极有可能诱发多次误报，并且光纤内部偏振衰减可能导致探测结果的随机转变，这也可能被视为入侵信号的误报。所以，辨别真实侵入，提升检验效果是分布式光纤振动传感系统项目运用迫切必须处理的难题。目前针对分布式光纤振动探测技术的算法，大多数均是以降低误报率为着手点，未思考到提高漏报的威胁，并且这些算法基于理论探究，我们需要考虑基于分布式光纤振动探测技术系统在工程应用中实时监测报警的需求，因此需要确保算法具备及时性和简便性。在基于分布式光纤振动探测技术应用于项目监督过程中，算法重点思考下述要素：算法辨别精准度、实时性、简便性以及定位稳定性<sup>[2]</sup>。

#### 3.3 不同频率入侵探测事件的探究

针对光纤振动探测科技的研究，国内外的研究重点主要在于降低误报率，而对信号中囊括的振动次数信息探究的研究者较为稀少。然而，通过振动信号中所包含的频率数据，可以直接判断振动事件是真实的入侵还是外界的影响，并且还能够反映事件主体的差异化行为。传统的时间域单点振动辨别和空间域相邻点振动辨别相结合的算法，难以划分出不同频率的振动事件，因为它们是以维持一段时间同时左右一定范围内的光功率变化为参考的。因此，我们需要探讨频率判断与分类计算，以便对侵入事件中所包含的频率信息进行判断和划分，从而更好地区分实际入侵和外界影响，并为后续的设计模式判断算法提供借鉴。所以具备相关的研究价值与作用。

##### 3.3.1 频率响应范围分析

图 2 为当外界振动事件是以某一固定频率  $f$  的正弦振动后，运用时间域单一振动辨别与空间域相近点振动判断相融合的计算方式，获得的频率响应仿真效果图，在此之中图 2 (a) 中相应每一类频率下，算法提炼出的最大值，图 2 (b) 对应每一类频率下，算法获得的平均数值， $F$  为每秒采样数据帧数， $F \leq F_s/KS$  (其中  $F_s$  为系统采样率， $K$  为每一帧数据的累加次数， $S$  为光纤全程总采样点数)，曲线呈现的是计算完成后的平均数值，当振动次数  $f/F =$  整数时，有关某一类固定频率的正弦振动，每次采样成果均相似，如图 3 (a) 所示，时间域单点振动判断算法利用的是数据的变化幅度，因此，理论上无法识别出该频率的振动事件；当  $f/0.5F =$  奇数时，相邻两帧参数正好对应半个周期的参数，所以改变幅度最高，见图 3 (b)。

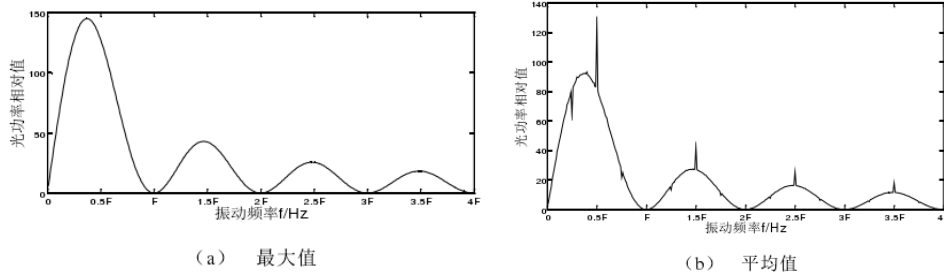


图 2 频率响应仿真效果

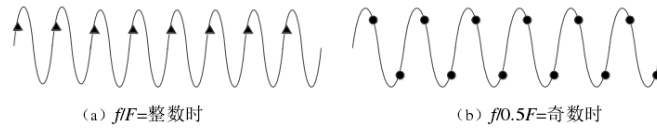


图 3 采样示例

通过仿真分析，我们可以得知，在每秒采样帧数为  $F$  时，频率响应范围不是固定的  $0 \sim F$ 。当振动频率更加明显时，信号可能会在某些阶段内丢失，导致频率响应范围的变化，时间域单点振动辨别是以参数的转变幅度为评估指标，所以对于高频率事件，理论上只需要外界振动事件不是以约为  $F$  的整数倍频率振动时，是能够依靠算法来判断的，可高频事件通常振动幅度较为低下，频率过大时，参数起伏较低，所以也难以判断<sup>[3]</sup>。

### 3.3.2 频率判断与划分

通过振动频率参数可以直接判断振动事件的来源，从而反映出事件的主体，还可以区分不同的行为特征。当外部干扰以特定频率振动时，可以通过该频率来判断入侵事件的发生，相关位置的光纤折射率也会相应地出现周期性变化，当频率振动为  $10\text{Hz}$  时，会导致后向瑞利散射光功率发生周期性变化，如下图所示，分布式光纤振动传感探测技术检验到的振动区域光功率参数。由于分布式光纤振动传感并不是线性系统，所以，光功率数据的变化不是按照固定频率的正弦规律发生变化，但它们具有高度的周期性一致性。因此，为了从光功率数据中获取振动的频率信息，需要观察数据的变化周期与外界振动事件的周期是否一致。只有在两者保持一致的情况下，才能正确地提取出振动的频率信息，运用下述计算方式：

$$\text{num}(p, q) = \sum_{j=1}^{L-1} F\{[x(p, j+1) - \text{std}(p)] \times [x(p, j) - \text{std}(p)] < 0\}$$

$$\text{num}(p, q) = \sum_{j=1}^{L-2} F\{[\text{diff}(p, j+1) - H(p)] \times [\text{diff}(p, j) - H(p)] < 0\}$$

振动位置单点历时曲线见图 4。

小波降噪后振动位置单点历时曲线见图 5。

上式 1 利用光功率数据振动转变阶段中超过基准值（滑

动均值或经验值）的频率作为判断依据，而上式 2 则利用光功率参数波峰波谷形成的频率作为参考，通过计算一阶差分过阈值次数来判断光纤传感器中的振动信号。因华宁因素与系统噪声的作用，必须优先挑选适当小波对信号降噪处置，如以上所示，紧接着再参考具体状况挑选 1 或 2 中最科学的一类计算方法对频率参数进行划分。

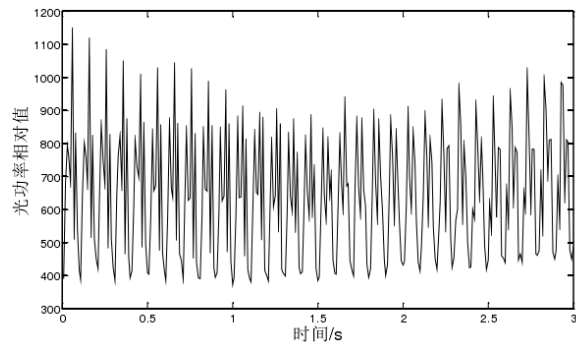


图 4 振动位置单点历史曲线

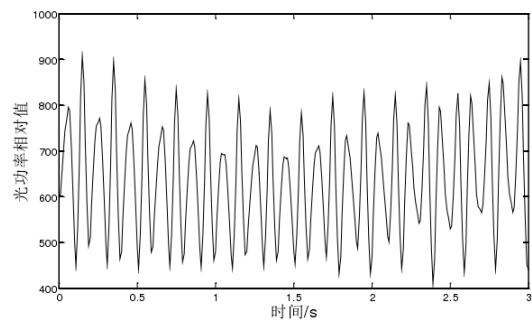


图 5 小波降噪后振动位置单点历史曲线

### 3.4 硬件设置

使用在线数据采集与监控系统实现全线监测。通讯光纤本身既是传感器，同时也是传感信号的传输介质。

系统由三大部分组成：传感器（通信光缆）、信号解调系统（硬件平台）和用户监控系统（软件平台）等组成。

该系统利用瑞利散射技术进行测量,包括光调制解调仪、光探测模板、信号采集设备、协调处理设备、传感光缆和检测分析报警系统等组成部分。硬件结构如图6所示,关键光调制解调仪、传感光缆、光探测模板、信号搜集设施、监测探析报警系统、协同处置设施、显示系统和存储系统组成。

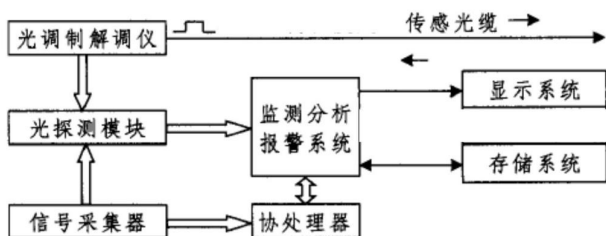


图6 硬件结构

该系统使用后向瑞利散射光的原理进行测量,通过将大功率窄脉冲光从光调制解调设备注入传感光缆中,产生后向瑞利散射光。这个后向瑞利散射光经过光调制解调设备分离后,该系统通过将大功率窄脉冲光注入传感光缆中,产生携带振动的光信号。这些光信号经过光探测模块转换为电信号,并通过前级放大处理。接下来,这些电信号经过A/D转换器进行模/数转换,进入信号采集设备进行采集。最终被协调处理设备处理并分析,以实现精确的监测和报警功能。以信道协调处置设施对数字参数开展预处置与探析核算,数据预备处置的成果输出到相关的探测分析处置体系,通过测量探析系统分析能够获得整个防区的振动资料,测量

分析处置系统的处置成果传递至主控器体系开展联合预警。

## 4 结语

在高速公路上,由于车辆行驶速度过快,交通事故时常发生。为了及时发现道路安全隐患,可以将光缆与护栏背面紧密附着。光缆由于柔韧性强,即使遭受猛烈撞击也不会轻易断裂。当车辆冲击护栏时,护栏和光缆会产生强烈振动,这些振动信号可以通过光缆传输到监测系统,实时监测道路安全状态。因此,采用光缆监测系统可以提高高速公路的安全性,减少交通事故的发生。在接收器处依靠对光强的测验与从发出光至形成干涉的时间能够明晰振动的区域<sup>[4,5]</sup>。

通过分布式光纤护栏碰撞探测技术,可实现24小时不间断,空间分辨率为2~3m高精度的实时检测,提高管理人员对交通事件的实时感知和定位能力,提高清排障的速度,有效降低二次交通事故的发生率。

## 参考文献

- [1] 姜德生,何伟,光纤光栅传感器的应用概况[J].光电子·激光,2002,13(4):420-430.
- [2] 王玉堂,张经武,王惠文,等.光纤传感器研究进展[J].光电子·激光,1996,7(1):1-7.
- [3] Culshaw B, Dakin J.光纤传感器[M].李少慧,译.武汉:华中理工大学出版社,1997.
- [4] 刘建胜,李铮,张其善.光纤完全分布式温度传感系统研究进展[J].电子科技导报,1999(3):10-13.
- [5] 黄尚廉,梁大巍,刘龚.分布式光纤温度传感器系统的研究[J].仪器仪表学报,1991,12(4):359-364.