

基于Mach-Zehnder原理的分布式光纤振动监测系统

设计了一种基于马赫-增德尔(M-Z)干涉原理的分布式光纤振动传感系统,在激光输出端添加偏振控制器,用于匹配偏振诱导相位,从而提高定位准确度;采用BP神经网络算法对振动信号进行类型判别,并通过试验证实其可行性。试验结果表明,对于已经分类的振源,系统的平均识别率可达93%,定位距离准确度在50 m以内,可广泛应用于电力电缆状态监测等工程实际。

刘 嵘 沈庆河 刘 辉 段玉兵 张 皓/山东电力研究院



刘 嵘/工程师

近年来,光纤传感技术凭借其高灵敏度、抗电磁干扰、传输损耗小和便于长距离传输等优势成为关注和研究的热点。光纤电流互感器^[1]、光纤分布式测温^[2-3]、光纤光栅温度、压力传感器^[4]和光纤周界安防^[5]等已经得到广泛的研究。本文设计的分布式光纤振动传感系统采用马赫-增德尔干涉原理,在系统中添加了偏振控制器,用于实时补偿光纤中偏振诱导相位,从而增强信号的相关性,提高系统的定位准确度,同时采用BP神经网络算法,对振动信号进行模式识别,实现了对振动信号的定位和模式判别功能。试验结果表明,对于已经分类的振源,系统的平均识别率可达93%,定位距离准确度在50 m以内,可应用于电缆振动、管道泄漏和周界安防等多个领域。

振动检测及定位原理

图1为光纤振动检测原理图,激光器

输出的光信号经过3 dB耦合器C₁分成功率相等的两束,一束光信号顺时针经过耦合器C₂,在耦合器C₂与C₄之间构成马赫-增德尔干涉传感区,感知外界振动信号,再经过耦合器C₃输出到光电探测器(PD₂);另一束沿着逆时针方向分别经过耦合器C₃、C₄和C₂达到光电探测器(PD₁)。当没有外界振动信号时,干涉输出稳定的相干信号,在忽略环境温度等干扰信号时,光电探测器输出光强稳定;当外界振动加载在干涉区域时,由于光弹效应改变了光纤的折射率,或导致光纤长度发生变化,干涉区域产生相位差。光电探测器测量到的光强为^[6]

$$I = A \cos(\Delta\varphi + \varphi_0) + B \quad (1)$$

式中,B为探测光强的直流分量;A为相干信号的光强系数; $\Delta\varphi$ 为振动引起的相位差; φ_0 为初始相位差。

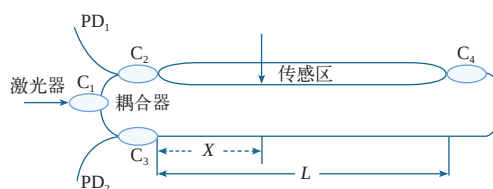


图1 光纤干涉原理图

如图1所示,当振动发生在距离耦合器X处,光电探测器分别接收到顺时针和逆时针方向的光信号有一个时间差 Δt 。在忽略耦合器到光电探测器的连接长度,假定耦合器之间光纤长度一致时,计算时间差为

$$\Delta t = \frac{2n(l-X)}{c} \quad (2)$$

式中,n为光纤的折射率,约为1.456;c

山东电力研究院科技项目:高压电缆的阻尼振荡波局部放电检测装置研究。

关键词/Keywords

分布式光纤·
马赫-增德尔干涉·
偏振控制器·
振动·
LabVIEW·

为光在真空中的传播速度, $c=3 \times 10^8$ m/s。

由此可见, 只要求出两个信号的时间差, 即可求出振动源的位置。

关键技术分析

1. 定位

本系统采用信号互相关原理进行定位, 通过计算两路光电探测器接收光信号的相关性, 求出准确的信号时延, 从而得出振源的位置。为此要求两路信号具有很好的相关性, 否则将产生较大的定位误差。在实际现场中, 由于光纤在制造中非轴对称、组分不均匀, 加上光纤铺设时, 由于弯曲、扭转造成光纤内部产生双折射, 特别是长距离的单模光纤, 累积的双折射效用可等价于引入了高双折射光纤^[7], 从而造成两信号的相关性差、相关系数不稳定, 随着时间变化而变化, 这种偏振诱导相位偏移是造成定位误差增大的主要原因, 与此同时, 还可引起偏振幅度衰落现象, 降低系统灵敏度^[8]。

为减小偏振诱导相位差, 提高定位准确度, 在激光器输出端加上偏振控制器(PC), 调制输入光信号的偏振态, 以匹配偏振诱导相位, 提高信号的相关性。光纤的外界环境错综复杂, 导致偏振诱导相位差不稳定, 因此PC根据两路信号的相关性, 按照一定的算法实时动态调制, 以满足相关系数保持在一个较高的、稳定的范围内。图2为未使用和使用PC后的两路采集信号波形。从图2中可以看出, 使用PC动态调制偏振态, 两路信号相关性很好, 能够提高定位准确度。

2. 模式识别

(1) 信号预处理

判别振动类型是分布式光纤振动系统的核心问题之一。采用基于小波包分析的“频带-能量”特征提取信号的特征向量, 建立信号的模式库, 然后将报警信号的特征向量进行比对, 确定信号类型。

采用小波包分析“频带-能量”特征提取信号的方法如下^[9]。

1) 对信号进行小波包分析, 在某尺度上对信

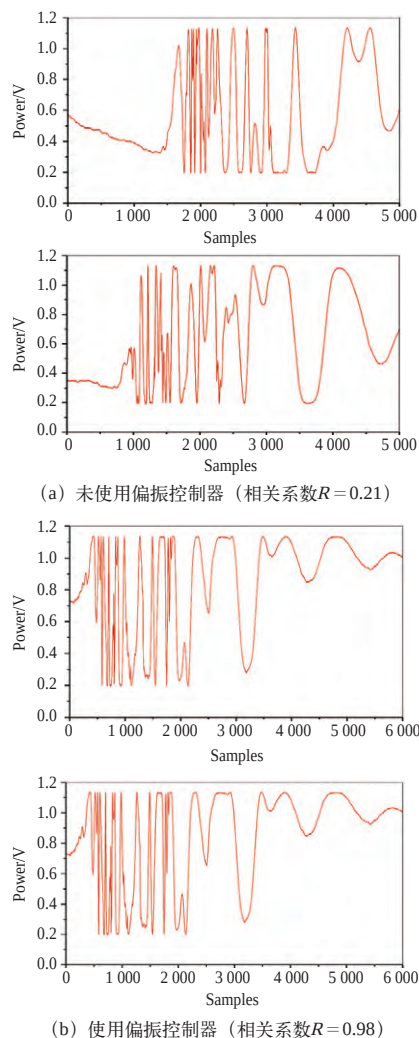


图2 采集信号对比

号进行分解, 以3层分解为例, 得出各频带的分解节点系数 X_{3i} , $i=0, 1, \dots, 7$ 。

2) 分别计算出各频带信号的能量 E_{3i} , 计算公式为

$$E_{3i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |X_{ij}|^2 \quad (3)$$

式中, X_{ij} ($j=1, 2, \dots, n$) 为重构信号各离散点的值。

3) 对各频带信号的能量 E_{3i} 进行归一化, 归一化能量为 E'_{3i} , 计算公式为

$$E'_{3i} = \frac{E_{3i}}{\sum_{j=0}^7 E_{3j}} \quad (4)$$

4) 信号的特征向量为 $T=[E'_{30}, \dots, E'_{37}]$ 。

(2) 信号模式判别

小波包分解提取的信号特征向量与振动信号

之间的对应关系是一种复杂的、非线性映射,通过BP神经网络建立一种理想的分类器。图3为BP神经网络结构图。

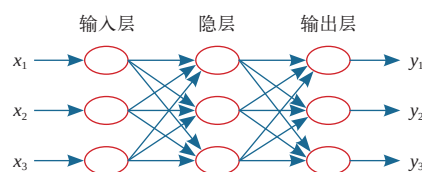


图3 BP神经网络结构图

BP神经网络一般由输入层、隐层和输出层构成,输入层即输入信号的特征向量,特征向量维数决定输入层的节点数;隐层的节点数目不确定,节点数越多则非线性映射能力越强,神经网络越稳健;输出层根据映射关系得出信号的模式。BP神经网络首先经过大量样本学习和训练,使得网络本身的权值、阈值等参数达到最优,训练结束后,当输出新的信号时,BP神经网络可以对其进行分类和识别。

试验与分析

如图4所示,搭建试验系统图,激光器输出功率为30 MW,线宽为10 MHz,输出波长为1 550.22 nm,采用NI采集卡PCI-6503控制型号为PCD-M02的全光纤动态偏振控制器模块,将任意输入偏振态转换为所需偏振态输出,以实现偏振衰减的补偿。测试光缆长度为20 km,振源测试距离约为2 km。光电探测器输出的信号经过滤波放大后输入到采集卡。采集卡选用PicoScope 5243A高速采集卡,分辨率从8位到16位可调,8位分辨率时两通道采样率可达500 MS/s,14位分辨率时采样率最高可达125 MS/s。借助功能强大的LabVIEW虚拟仪器开发软件设计分布式光纤振动系统软件,完成人机交互、信号采集、分析、显示和存储等功能,实现振动信号的报警和定位。

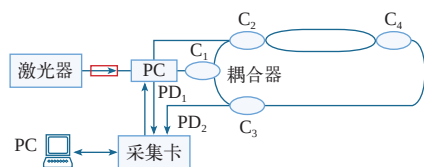
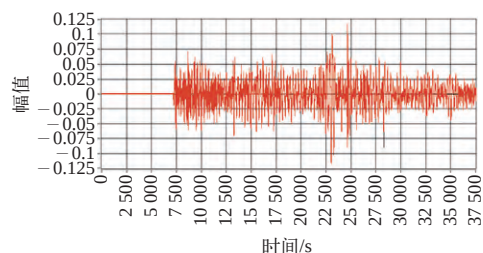
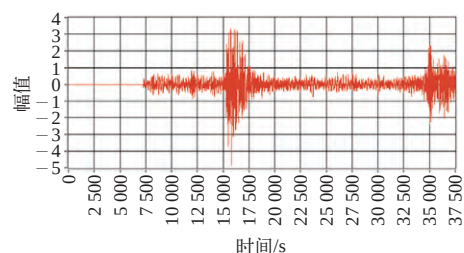


图4 分布式光纤试验系统图

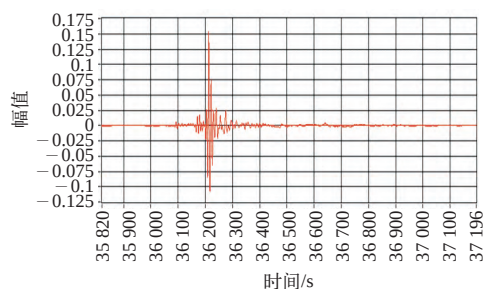
试验分别采用3种振动类型,分别为走路、风动和敲击3种模式,其振动波形及特征向量模式如图5所示。从图5中可以看出,当外界振动



(a) 风动引起的振动波形及特征向量



(b) 走路引起的振动波形及特征向量



(c) 敲击引起的振动波形及特征向量

图5 试验采集波形及特征向量图

加载在光纤线路时，采集的信号幅值会发生变化。风的吹动造成的扰动持续时间较长，同时强度较弱；走路振动持续时间较短，造成的强度跳变较大；敲动幅值较之走路的幅值要小，持续时间最短。

3种模式的特征向量区别也很明显，噪声引起的振动能量主要集中在第一低频区间，能量约为98%，其余振动能量较小；走路引起的振动能量分布为：第一低频区间能量约占43%，第二低频区间能量约占47%，第三低频区间能量约占2%，第四低频区间能量约为8%；敲击引起的振动能量分布分别为：第一低频区间能量约占13%，第二低频区间能量约66%，第四频率区间能量占17%，其余频率区间能量很小。经过大量的试验数据的积累，采用BP神经网络算法分别对以上3种类型进行测试，测试结果如下表所示。

表 3种振动类型的试验结果

种类	总次数	测试识别结果				识别率
		风动	走路	敲击	平均距离/km	
风动	100	95	3	2	2.43	95%
走路	100	6	90	4	2.18	90%
敲击	100	3	5	92	2.35	92%

从上表中可以看出，该系统对3种不同模式的振动类型平均识别率为93%，平均定位准确度在50 m以内。分别对使用和未使用PC时的测试定位距离进行对比，结果如图6所示。未使用PC时，定位距离误差很大，而使用PC后，平均定位准确度保持在50 m以内，说明PC起到了偏振补偿、提高信号相关系数的作用。该系统基本满足现场应用的

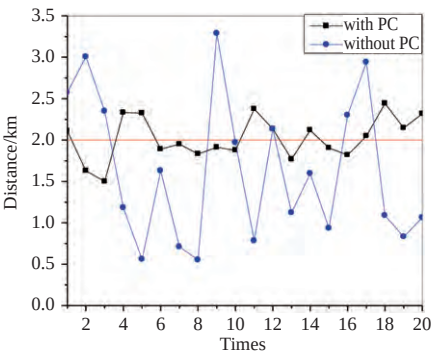


图6 测量定位对比图

要求，后续对于数据的分析和处理仍是研究的重点，有待更加深入的分析和研究。

结束语

所设计的分布式光纤振动监测系统采用了相关算法实现了振动信号的定位，通过提取信号的特征向量并结合BP神经网络算法对数据进行学习和训练，实现了对振动信号的识别。该系统在电力电缆状态监测、输油气管道监测等领域有一定的应用前景。

参考文献

[1] 王政平,王玥坤,孙帅.全光纤电子电流互感器技术探讨[J].光学与光电技术,2012,10(2):15-20.

[2] 田国栋.基于OTDR技术的光纤测试方法探讨[J].现代电子技术,2009,32(19):99-101.

[3] 肖恺,李平,罗巧梅,等.分布式光纤测温系统在电缆温度监测中的应用[J].现代电子技术,2014,37(12):153-155.

[4] 刘小红,吴怀玉,任济双,等.基于光纤光栅传感的变压器绕组温度检测系统[J].现代电子技术,2013,36(3):168-170.

[5] 董小鹏,郑俊达.基于波分复用的光纤多防区周界传感系统[J].中国激光,2012,39(9):1-5.

[6] 张颖,陈佳妹,李刚,等.马赫-曾德尔分布式光纤周界防范系统定位算法研究[J].中国激光,2012,39(6):118-121.

[7] 王肇颖,王永强,林冉,等.利用单模光纤实现增益平坦掺铒光纤放大器[J].光电子·激光,2004,15(2):138-141.

[8] 封皓.基于双Mach-Zehnder干涉仪结构的光纤管道安全预警系统建模及定位研究[D].天津:天津大学,2011.

[9] 谢鑫,吴慧娟,饶云江.一种基于光纤布喇格光栅振动传感器的光纤围栏入侵监测系统及其模式识别[J].光子学报,2014,5(5):32-37.

(收稿日期:2015-01-07) EA