文章编号:1007 - 4252(2021)05 - 0005 - 425

声音传感器在地下电缆防外破的应用与发展

王　川[1],马　俊[1],周　哲[1],曾繁洋[2,*]

(1. 国网重庆市电力公司经济技术研究院,重庆 404100; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所,上海 200050)

摘要:随着社会的发展,地下电缆在城市建设中越来越重要,但是由于地下电缆分布复杂,监管不足,因外力破坏导致的地下电缆事故频频发生。本文介绍了现阶段提出的多种地下电缆防护措施并分析优缺点,其中,基于声音传感器的预警型防护措施最符合地下电缆防护的应用。当前,基于声音传感器的预警型防护措施主要采用声纹识别技术,本文提出声源定位技术与声纹识别技术结合的方法,分析各类声源定位技术的优缺点,得出基于到达时间差(TDOA)的声源定位技术在地下电缆防护中最具有可实现性。

关键词:地下电缆防护;声音传感器;声纹识别;声源定位;TDOA

中图分类号:TM757.3　　**文献标识码**:A

Application and Development of Sound Sensor in Underground Cable Anti-breaking

WANG Chuan[1], MA Jun[1], ZHOU Zhe[1], ZENG Fan-yang[2,*]

(1. State Grid Chongqing Electric Power Company Economic and Technical Research Institute, Chongqing 404100, China; 2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: With the development of society, underground cables are becoming more and more important in urban construction. However, due to the complex distribution of underground cables and insufficient supervision, there are many accidents by external force damage often occur. This article introduces a variety of underground cable protection solutions proposed at this stage and analyses their advantages and disadvantages. Among them, the early warning protection solutions based on sounds sensors are most suitable for the application of underground cable protection. At present, the early warning protection solutions based on sound sensors mainly use voiceprint recognition technology. This article proposes the combination of sound source localization technology and voiceprint recognition technology, introduces some characteristics of various sound source localization technologies, and obtains a sound source based on Time Difference of Arrival (TDOA) is the feasibility of positioning technology in underground cable protection.

收稿日期:2021-07-20;　　**修订日期**:2021-09-22

基金项目:电缆隧道自适应巡检综合在线监控系统方案设计服务 (SJY20200501-03).

作者简介:王　川 (1987-),男,硕士,工程师,主要研究方向输电线路规划与设计 (E-mail:zfy_966 @ 163.com).

Key words: Underground Cable Protection; Sound Sensor; Voiceprint Recognition; Source Localization; TDOA

0 引言

近年来,随着我国国民经济的高速健康发展,城市化进程不断加快,电能的重要性也日益增加,电力安全比以往任何一个时候都更加重要。在电能传输过程当中,电缆的安全稳定运行是保障供电可靠运行的关键。传统的架空线路虽然成本低、机动性强,容易修复,但是架空线路阻碍了交通,容易受到污染,而架空线靠近树木和其他测量的设备或物品,容易造成火灾、电击、短路等事件。因此,国内很多城市开始大力推动地下电缆的建设,目前,深圳的地下电缆铺设率超过了 90%,珠海、天津等城市地下电缆占比也超过了 80%[1]。

但是,随着国家发展步伐加快,各地建设工程大幅增加,地下电缆受损事故频频发生,这将严重影响国家经济稳定,给人们的生活和安全保障带来严重影响。如:2018 年 5 月 8 日深夜,位于肇庆市鼎湖区的一家国家级高新技术企业发生停电,仅有的备用电源只能为办公使用,正在运行的生产线被迫暂停。由于产能紧张,订单需求又大,停电意味着订单不能按时交付,损失较大。据南方电网广东肇庆鼎湖供电局现场查勘,起因为钻机钻探施工破坏导致的停电事件。2018 年 7 月 24 日,中铁十七局电气化工程有限公司在成都地铁进行吊装铁构件作业时,因误操作造成电缆破坏,导致附近的六千多户居民停电。

经国家电网调研发现,在已发生的地下电缆事故中,有三分之一都是外力破坏导致的[2],地下电缆本身质量问题占一半。抛开内因来说,外力破坏是导致电缆故障最重要的因素。在外力破坏地下电缆事件中,基本上都是由于工程队不正当的使用工程机械进行施工作业,导致电缆破损、断开。如果能够减少或消除由于工程队误操作造成的影响,地下电缆事故将会大大减小。

1 地下电缆防护研究现状

目前,已经有很多专家学者提出了方案来减少或消除外力破坏对电缆事故的影响,可以大致概括为两种,一种为防护型方法,另一种为预警型方法。

1.1 防护性方法

梁波等[3]采用在电缆旁放置警示牌的方法来警示附近有电缆铺设。这种方法在实际使用中警示作用并不大,比如,不明显的警示牌位置,或是由于外力导致警示牌位置变化,都会极大影响警示效果。

罗志勇等[4]提出人工巡检的方法,通过有关部门安排一些工作人员对电缆进行不定时巡查,一旦发现施工单位有违规施工时及时制止。但是这种方法成本高,且不具有实时性,当工作人员离开后,施工单位进行暴力施工,很难及时发现异常情况。当施工地点环境恶劣时,工作人员根本无法正常进行巡查工作。

化晨冰等[5]建议在地下电缆安装时设计外管,增强抗破坏性能,以提高抗外力强度。使用这方法在一定程度上可以保护地下电缆的安全,但地下电缆铺设作业难度大大增加,防护成本也过高,并且对于大型工程机械来说,一样可以对地下电缆造成破坏。

1.2 预警型方法

刘凯、余慧[6-7]提出使用智能视频监控方法,这种方法的主要手段是使用摄像头收集地下电缆周边环境的视频信息,对经过的车辆以及类型进行分类识别,当检测到有工程机械出现时,向有关部门发出警告,工作人员再进行核对。这种方法能够非常直观的看到地下电缆周围环境的具体情况,而且摄像头容易安装。但这种方法存在的问题也是很明显的,摄像头更适合在视野比较宽广的地区使用,若是视野较为狭隘,只能通过安装更多摄像头来解决。由于成本问题,一般只在重要线路上使用。而且在天气恶劣的情况下,监控设备容易受到遮挡,从而导致识别效果较差。

谭康、王平、周正仙、杨斌等[8-11]提出使用振动信号来监测工程机械,该方法是把光纤振动传感器安装在地下电缆中,当地面上产生振动(压力)时,光纤内部就会发生形变,引起光纤内部的光线的变化,通过干涉现象,根据不同的振动信号特点,采用不同的振动信号,将所检测到的振动信号和数据库匹配,可以识别并定位振动源,向有关部门传送工程

机械的种类地点等信息,以达到警报效果。与其他几种方法相比,该方法受自然环境因素较小,预警效果好。但是对于不同环境来说,工程机械产生的振动信号不尽相同,因此容易影响识别结果,容易发生误报。而且该设备价格高昂,难以推广应用,多用于重点线路防护。

Cao、何冰等[12-14]提出通过声音传感器来监测工程机械。该方法是把声音传感器安装到地下电缆当中,由于工程机械的声音具有独特的特征信号(声纹),通过采集地下电缆周围环境声音,经过预处理和特征提取,再与模型数据库做匹配,就能完成对工程机械的识别。识别完成后能够及时向相关部门发出预警,达到地下电缆的防护。这种方法相比于其他方法来说,智能化最高、成本最低,非常适合广泛应用。但在实际应用过程中,仅仅通过声音信号的特征来识别工程机械,不能精准地确定工程机械的位置,只能粗略地估计工程机械的大概位置。

基于声音传感器的预警型防护措施与其他方法比较,有着明显的优势,针对该方法的一些局限性,本文提出一种基于声音传感器的声源定位技术与声纹识别技术相结合的方法来实现对工程机械的实时识别和定位。通过声音传感器来监测工程机械的声音信号,对工程机械进行实时地识别与定位,可以有效地提高监管部门的工作效率。后文将简述声源定位的种类与特点。

2　基于声音传感器的声源定位技术

基于声音传感器的声源定位技术的研究在国内外受到了很大的重视。目前,这种定位技术已经在很多地方广泛使用,例如汽车、家电、航空航天等。根据文献[15]内容上的分类,可以将其划分为下面几类:第一类为基于最大输出功率的可控波束形成;第二类是基于高分辨率谱估计;第三类是基于到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)。

2.1　声音传感器

声音传感器是一种能够将声音信号转换成电信号,从而将声音信号采集起来的传感器,现在主要有磁电式传感器、微型机电系统硅传感器、电容式传感器三大类。其中磁电式传感器主要是声源发出声波,声波传递振动,使得感应线圈由于位移变化产生电动势,不同的声音信号会产生不同的电信号,但是这种磁电式传感器的灵敏度较差,只能用于近距离的使用。微型机电系统硅传感器外形尺寸小,能承受元件贴装时的工业高温,但实际应用中发现,微型机电系统硅传感器寿命不长,不适合恶劣的工作环境,而且当在远距离采集声音信号的时候,该种传感器的性能较差。电容式传感器的工作原理是背景板(电极)与薄膜(振膜)形成电容结构,在采集声音信号时,薄膜随着声波发生振动,此时,电容结构的电容量也随膜片振动而发生变化,经过耦合电容,将电位变化的信号输入放大器,输出信号为电压信号。电容式传感器具有较好的灵敏度,其工作原理如图 1 所示。

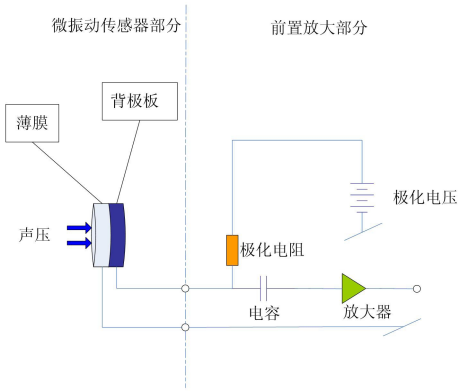

图 1　电容式传感器的工作原理

Fig. 1 The working principle of capacitive vibration sensor

如图 1 所示,薄膜会随着声压发生位移,使得电容结构的电容量发生变化,从而使得输出电压发生变化。电容式传感器电压随位移的转化公式为:

$$u = U_0 \cdot \frac{d}{D_0} \tag{1}$$

式中,u 为电压变化量;U_0 为电极电压;d 为膜片的距离变化;D_0 为两极板间初始距离。因此,可以通过输出电压变化来收集声音信号。

2.2　基于最大输出功率的可控波束形成定位算法

基于最大输出功率的可控波束形成技术,它的原理是将每个声音传感器采集来的声源信号先加权再进行求和,形成波束,通过改变加权系数让信号取得最大输出功率。通过改变声音传感器的接收方向,对整个区域进行扫描,来判断可能性最高的声源位置来引导波束,输出功率最大的点就是声源位置。这项技术理论基础最早是由 Hahn 等人在文献[16]中

提出的,对于该方法的影响因素和改进算法也得到了广泛研究[17-18]。该技术流程图如图 2 所示。

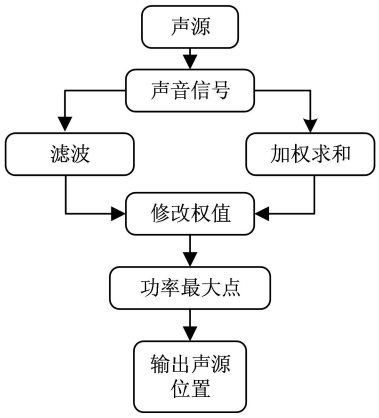

图 2 基于最大输出功率的可控波束形成技术

Fig.2 Controllable beamforming technology based on maximum output power

波束形成技术实际上是一种最大似然估计(Maximum Likelihood Estimation,MLE),在现实应用中,想使得算法性能最高,就需要得到声源和背景噪声的先验信息,但先验信息是很难获取的。而且由于 MLE 属于非线性最优化问题,这种问题经常出现几个极点,并且对初始值设定要求也很高,在运算过程中,容易陷入局部极值点,并且这种技术的运算量较大,难以实现实时定位。因此,基于波束形成的定位技术在工程机械的定位应用中很受限。

2.3 基于高分辨率谱估计的定位算法

基于高分辨率谱估计定位技术的主要原理是通过计算出声音传感器阵列之间的协方差矩阵,并分解成不同的参数子空间进行谱估计,所以人们也称该技术为基于子空间的声源定位技术。其中,多重信号分类(Multiple Signal Classification,MUSIC)[19]算法是目前应用最广泛、性能最好的高分辨率谱估计定位算法,该方法通过获取声音传感器阵列的信号来分解得到声源的信号子空间和噪声子空间。

但是,对于实际问题而言,该方法也有一定的局限性,首先这个技术仅适用于统计平稳信号,在实践中,一般声音信号都是短暂的平稳状态,因此这将导致基于高分辨率谱的估计定位算法的性能降低。第二,该算法利用有关矩阵最大的几个特征值进行定位,如果受到方向干扰的影响,且其能量类似于信号源,则有可能定位到干扰方向,影响定位结果。而且这种技术运算的数量较多,难以进行实时的定位。因此,基于高分辨率谱的定位技术不适合在地下电缆防护中实际应用。

2.4 基于 TDOA 的定位算法

基于 TDOA 的定位算法是当前研究和应用最广的声源定位算法,这种定位技术是双步定位方法,首先求取声源信号和不同声音传感器的时延估计(Time delay estimation,TDE),TDE 对应不同声音传感器和声源位置的路程差,再通过几何关系来确定声源的位置[20-21]。基于 TDOA 的定位系统的模型图如图 3 所示。基于 TDOA 的声源定位过程由图 4 进行说明。

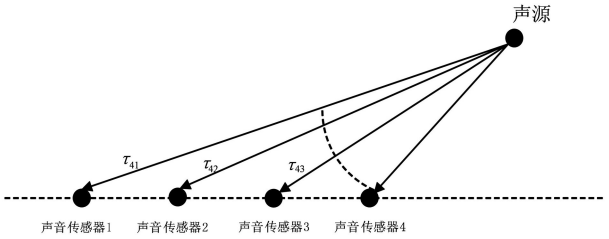

图 3 基于 TDOA 的定位系统的模型图

Fig.3 Model diagram of TDOA-based positioning system

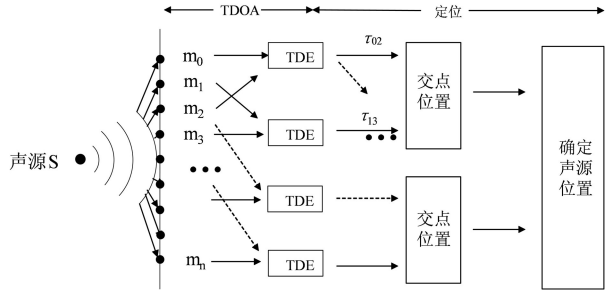

图 4 基于 TDOA 的声源定位的过程

Fig.4 The process of sound source localization based on TDOA

基于互相关的时延估计[22]是求取声源 S 到声音传感器阵列的时间延迟 TDOA,是声源定位目前应用最广的方法,对声音传感器阵列接收的声音信号进行互相关操作,来获取 TDE。广义互相关(GCC)在互相关的基础上,进行了优化改进。广义互相关法是通过计算阵列接收信号的互相关函数,而互相关函数的峰值所对应的时间点就是信号之间的 TDE。广义互相关(GCC)方法的算法流程图如图 5 所示:

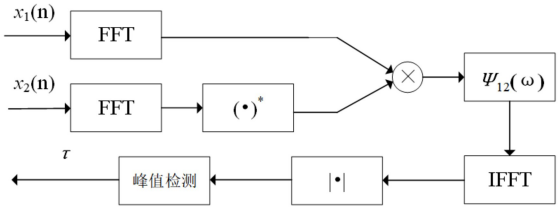

图 5　广义互相关(GCC)方法的算法流程图

Fig. 5 Algorithm flow chart of the generalized cross-correlation (GCC) method

如图 5 所示,x_1、x_2为不同声音传感器采集的同一声源发出的声音信号,为时域信号。然后,声音信号 x_1、x_2通过傅里叶变换从时域变换为频域,再将其频域信号相乘,得到互功率谱。接着,互功率谱通过加权操作,以此削弱或消除实际环境中噪声造成的影响。再通过傅里叶逆变换得到信号 x_1、x_2的互相关函数,该互相关函数的峰值所对应的时间点信号为 x_1、x_2之间的 TDOA。

基于 TDOA 的定位方法计算速度较快,能够在实际应用中实时计算,所以能够在很多场景应用。但是,该方法也有它不足的地方[23]:首先,该计算方法被分为两步进行,因此第二步中需要使用的参数是上一步的到达时间差,而第一步中的误差也会直接影响到下一步的位置估计,从而造成误差增大;第二,无论是以互相关函数为估算基础,还是以传递函数为基础,TDOA 的估算都是以信号采样数来衡量,要达到更高的估算精度,信号采样频率也需要提高。但与前两种声源定位算法相比,这种算法的运行量非常小,硬件成本也更低,因此基于 TDOA 的定位算法既可以满足工程机械实时定位的需要,又能够节省成本。

3　结语与展望

本文介绍了近几年地下电缆防护的一些措施,通过对比总结发现,基于声音传感器的声纹识别预警技术在各个方面都优于其他防护方法,但是也有一定的局限性,因此,本文提出基于声音传感器的声源定位技术与声纹识别预警技术相结合的方法,进而简要分析了目前在声源定位系统中的一些算法,通过对比,总结得出基于 TDOA 的声源定位技术在地下电缆防护中能够得到较好的应用。但在以下几个方面还有待研究改进:(1)在面对环境噪声干扰,声纹识别和声源定位的性能会下降,如何减少噪声对整个系统的影响;(2)在基于 TDOA 的声源定位基础上,减少 TDE 的误差,是否能够大大提高声源定位的精度。

参考文献:

[1]钧　达,胡新建. 论地下电缆发展的必然趋势 [J]. 城市照明, 2012, 016(002): 14-16.

[2]何扬清,侯　锐,夏　晗. 浅谈城市配网电缆遭受外力破坏的问题 [J]. 科技信息, 2013, 4: 418-419.

[3]梁　波,李文修. 电力电缆防外力破坏的措施 [J]. 农村电工, 2016, 24(03): 25.

[4]罗志勇,张国瑞. 配网外力破坏防范对策 [J]. 中国电力企业管理, 2015, 2: 48.

[5]化晨冰,张铂雅,刘学强. 配电线路防外力破坏典型措施 [J]. 自动化应用, 2013, 5: 86-88.

[6]刘　凯. 大连地区电缆隧道在线监测系统的设计与实现 [D]. 大连理工大学, 2016.

[7]余　慧. 多摄像机下的智能视频监控及其在电缆防盗中的应用研究 [D]. 西南科技大学, 2015.

[8]谭　康. 地下电缆防外力破坏监控中的振动信号识别 [D]. 华南理工大学, 2012.

[9]王　平,陈子龙,彭翀翊. 基于检波器阵列的地下电缆防外力破坏检测方法研究 [J]. 科技创新与应用, 2017, 26: 65+67.

[10]周正仙,田　杰,段绍辉等. 基于分布式光纤振动传感原理的电力电缆故障定位技术研究 [J]. 光学仪器, 2013, 35(05): 11-14.

[11]杨　斌,孙玉国. 新型光纤电缆故障定位系统 [J]. 光电技术应用, 2013, 28(06): 63-66.

[12]Cao J W, Wang W, Wang J Z, et al. Excavation Equipment Recognition Based on Novel Acoustic Statistical Features [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47 (12): 4392-4404.

[13]Cao J W, Zhao T, Wang J Z, et al. Excavation equipment classification based on improved MFCC features and ELM [J]. Neurocomputing, 2017, 261: 231-241.

[14]何　冰,孟夏卿,顾俊杰等. 微振动传感与声振特征识别的输电线路环境异变预警研究 [J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(09): 57-63.

[15]Microphone arrays: signal processing techniques and applications [M]. Springer, 2001.

[16]Hahn W R, Tretter S A. Optimum processing for delay-vector estimation in passive signal arrays [J]. IEEE Trans-

actions on information theory, 1973, 19(5): 608-614.
[17]李有哲,张永斌,毕传兴.基于双测量面阵列的波束成形方法研究 [J].合肥工业大学学报(自然科学版), 2012,35(08): 1049-1053+1121.
[18]冯全明,陈 智,李冬生.基于波束成形网阵的声源定位及影响因素探究 [J].预应力技术, 2015, 2: 23-27.
[19]Schmidt R, Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1986, 34(3): 276-280.
[20]Wang H, Chu P. Voice source localization for automatic camera pointing system in video-conferencing [C]. Proceedings of IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, New Paltz, NY, 1997.
[21]Huang Y T, Benesty J, Elko G W. Passive acoustic source localization for video camera steering [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, Istanbul, Turkey, 2000, 2: 909-912.
[22]崔玮玮,曹志刚,魏建强. 声源定位中的时延估计技术 [J]. 数据采集与处理, 2007, 1: 90-99.
[23]李 杨. 基于小型声音传感器阵列的声源定位系统设计与实现 [D]. 哈尔滨工业大学, 2014.