电力电缆隧道震动监测技术研究与应用

分析了电力电缆隧道结构面临的风险，研究利用震动监测技术进行风险的评估和预警。搭建了一套完整有效的震动监测系统，并开展了实际的应用研究。该系统目前已应用于国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司管辖的太原66 kV变电站电力电缆隧道，运行情况良好，对提高风险预警能力、减轻人工巡查工作压力及减少外力事故等效果显著。

白　晗　张劲松　邹明贺／沈阳供电公司
杨震威／山东康威通信技术股份有限公司

白　晗／工程师

关键词／Keywords
电力电缆隧道·
震动监测技术·
应用研究·

近年来，随着国民经济的迅速发展及城市电网的不断改造，电缆在电力线路中的比例正在持续提升，尤其在城市供电网中采用电缆线路优越性更加突出，已经广泛应用于输电线路和配电网中[1-2]。但是近年来，市政土建工程大型施工和其他外力破坏导致的电力电缆隧道事故时有发生，且呈现逐年上升态势，严重影响电力安全和经济效益。以沈阳供电公司的统计数据来看，2011～2013年共发生电力电缆隧道外力破坏事故5起，造成直接经济损失400万元。因此，以特定的技术手段对电力隧道实施有效的震动监测，从而对发生于隧道周边的机械施工等风险行为做出及时的测报和预警，对保障电力安全可靠运行及电力财产安全意义重大。

目前，震动监测技术已经应用在工程建设中，以评估对周围建筑物的影响[3-4]，但还未有专门针对电力隧道震动监测的研究成果。本文结合电力电缆隧道安全防范的实际需求，开展了有针对性的、系统的震动监测技术研究。研究成果在国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司管辖的太原66 kV变电站电力电缆隧道进行了试用。经过为期一年多的试用，该系统对提高风险预警能力、减轻人工巡查工作压力及减少外力事故效果显著。

电力隧道震动监测

1. 监测对象及目的

根据震源对电力隧道的破损风险程度和既往破坏案例的统计数据，本项目确定监测的主要震源对象是：破拆、挖掘、碾压、夯实、打桩和钻探等，同时兼顾地震、爆破和重载车辆等因素对电力隧道结构的影响。

监测运动参量的选取主要考虑能够准确、直观和及时反映震源对隧道结构的影响。项目确定以三轴向加速度为主参量，以三轴向角速度为辅助参量。

2. 监测技术原理

对电力隧道结构体承受的各种各轴向运动参量进行测量，对测量所得数据进行分析，根据分析结果判断震源的性质、方位和强度，进而对被监测隧道结构体及内部设施面临的安全风险进行预警。

3. 监测点现场布置

现场试验地点选取沈阳供电公司电缆运检中心某电力隧道（长度为1 km）作为项目试点。地音探测监测装置在每个监测点的有效测量半径为150 m，本次项目共设置6个监测区域作为检测试点。在系统建设完成后，选定本测试系统终端进行隧道内的监测信号和数据传输测试，根据监测信号等测试来验证本系统对于电力隧道外力破坏监测的能力。

4. 测量数据的分析处理

鉴于项目领域内可用于借鉴的成熟

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

技术和研究成果较少，因此主要借鉴地震监测研究、地铁运行对周边影响等领域的研究成果和经验[5]，采用简单阈值方法、时窗方法、频域方法和网络方法等手段对测量所得的原始数据进行分析处理，依据处理结果确定风险等级，推断震源性质。

（1）简单阈值方法

该算法主要适用于强震动的监测，这一算法仅仅依据任何时刻的信号是否超过预先设定的阈值作为依据，即当信号超过预先设定的阈值时，触发告警。对于环境震动干扰较强的情形，宜选择这一算法。

（2）时窗方法

时窗方法也称为STA/LTA触发算法，最早应用于地震监测领域。该方法通过两个移动的时间窗，即短时间平均窗（STA）和长时间平均窗（LTA），对滤波震动信号进行处理，STA测量震动信号的瞬时（instant）振幅，LTA监测平均震动噪声。

（3）网络方法

配置于电力隧道各处的运动参量传感器构成一个测量网络，系统根据网络各点上传的震动数据特征，结合测量点的位置，以推知震源的大致方位，从而使给出的预警信息更有针对性。

（4）频域方法

配置于电力隧道结构体的运动参量传感器直接采样拾取的原始数据，是三轴向的加速度和三轴向的角速度时域波形数据。而多数情况下信号的特征是与频率密切相关的，因此对原始的时域数据做一个时域到频域的变换，得到信号的频域波形，有利于根据信号的频域信息对信号进行分析，判断和确定震源的性质。

综合以上几种算法的特点，采用了时域－频域变换算法，利用快速傅里叶变换得到震动信号的频域信息[6]，结合各种震源的频率特征，可实现对震源的初步定性。

监测系统组成

1. 系统主要功能

安装在地下电缆通道内的防破坏地音监测装置可以接收和测量电缆通道周边由大地传导的各种震动，通过对各项震动参数（如次数、时间间隔、频率、方向和加速度等）的分析，可以推知周边是否有机械施工行为存在，并测算出机械施工的大体方位，从而为风险的评估和防范提供依据，对保障地下电力设施的安全可靠运行意义重大。

2. 系统组成结构

电缆通道防外力破坏地音监测预警系统的研究与应用由针对于“架空入地”后采用隧道、排管及管沟方式敷设的缆化高压电缆，采用基于远程供电和通信共缆传输、抗干扰及保护技术的“N合一”有线传输解决方案组成。

电缆通道防外力破坏地音监测预警系统的研究与应用从结构层次的角度可分为5层（如下图所示）：第一层是由各种应用服务器、数据库服务器、打印终端、存储设备、显示大屏和综合数据智能监测管理平台软件等软硬件设备组建的综合数据智能监测管理平台；第二层是由综合监控主机等软硬件设备组建的二级远程集控监测平台，主要涉及多状态综合监控主机；第三层是由远程供电和通信传输线缆、低压远程供电和同心共缆铠装通信信号电缆组成的总线式载波通信网络；第四层是实现采集、数字化预处理、通信和控制功能的传输采集装置（即各种数据采集器和远程控制单元），主要涉及三维加速度采集器等；第五层是终端监测装置，属于系统的最底层，主要涉及三维加速度传感器等。

3. 系统组网方式

电缆通道防外力破坏地音监测预警系统的研究与应用采用数字编址总线式载波通信网络。在分控变电站内安装多状态综合监控主机，监控该变电站附近10 km以内的防破坏地音监测装置，采用低功耗设计的防破坏地音监测装置安装在电缆通道内。分控变电站二级远程集控监测平台的主控设备与电缆隧道内安装的三维加速度采集器之间通过由低烟无卤阻燃通信信号电缆组建具备远程供电和载波通信信号同芯线对共缆传输技术的数字编址总线式载波通信网络进行数据交互传输，通信速率约为1 200 bit/s；二级远程集控监

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

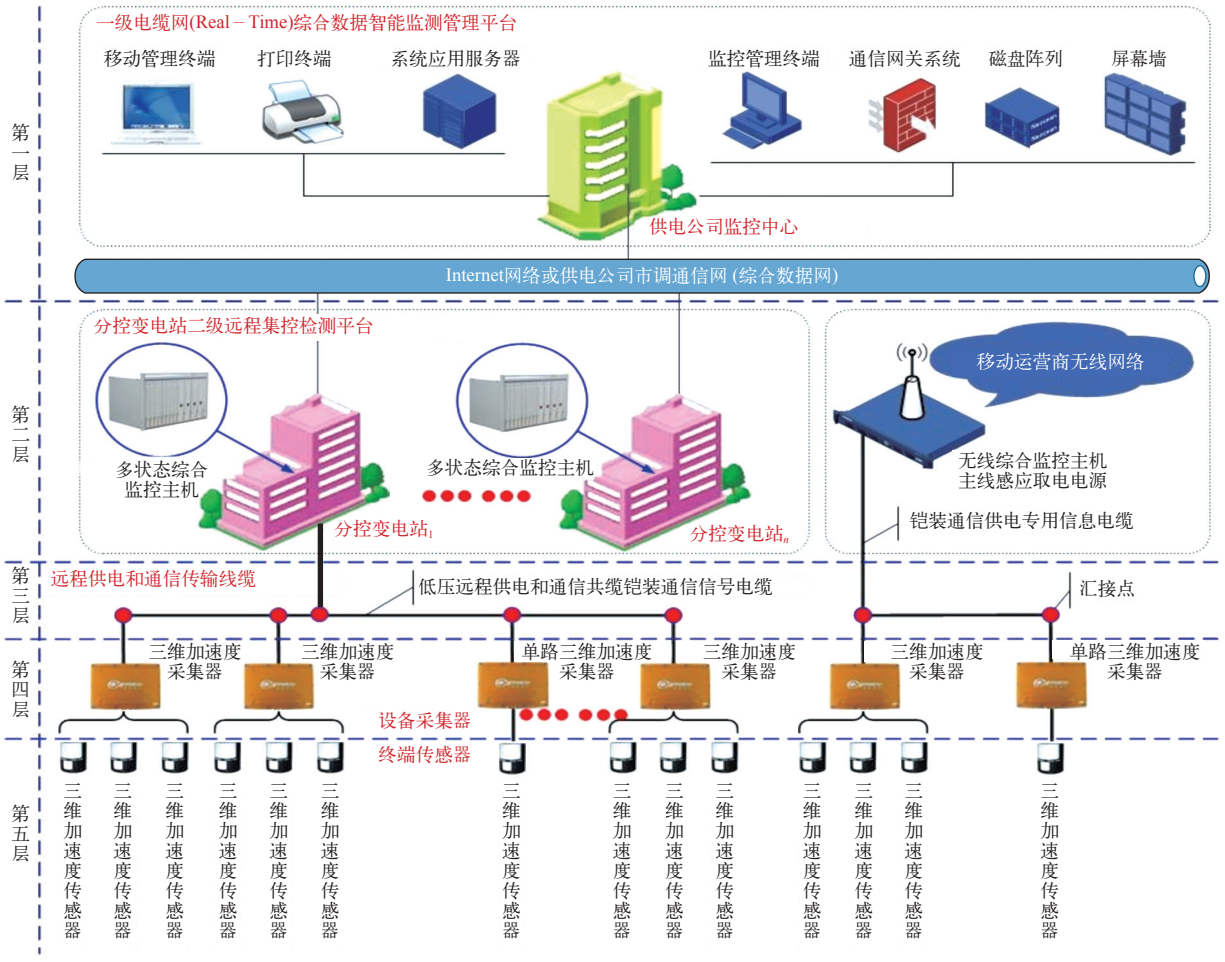

图　电缆通道防外力破坏地音监测预警系统的研究与应用原理架构图

测平台与一级集中监控中心的综合智能数据管理平台之间通过现有的市调通信网或综合数据网以TCP/IP以太网接口的通信方式进行通信。三维加速度采集器可与多个应用系统传输采集装置同时接在一台多状态综合监控主机上，可与多个应用系统共用数字编址总线式载波通信网络。

分控变电站内的多状态综合监控主机通过沈阳供电公司现有的市调通信网或综合数据网以TCP/IP以太网接口的通信方式实现与一级集中监控中心的综合智能数据管理平台通信，上传状态信息和接收中心的控制指令，达到远程集中监测、集中显示报警、集中联动控制和集中管理的目标，实现综合监测预警系统数据有效交互和执行。

4. 系统主要结构

（1）多状态综合监控主机

多状态综合监控主机部署在电缆通道就近的分控变电站内，与电缆通道内安装的三维加速度采集器监测装置进行连接，多状态综合监控主机与沈阳电缆运检中心电缆网综合监测平台服务器之间的通信可以利用TCP/IP、专线MODEM（ADSL）和拨号MODEM等传输资源，是整个系统前端与后台相联系的桥梁和纽带。

多状态综合监控主机通过低烟无卤阻燃通信电缆对下带的电缆通道内安装的终端监测装置进行远程供电、远程控制和自动监测，从而实现在线式实时监控。电缆通道现场无须外供交流220 V电源。电缆通道内安装的终端监测装置采用数字编址总线方式。

多状态综合监控主机具备全工模式和半工模式两种工作模式，用户可根据实际需求选用，以求达到最佳使用要求和经济成本。

多状态综合监控主机处于半工工作模式时，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

若主用户板故障，可切换到备用主板，增强了工作的稳定性和可靠性，故障时可不断电维护，方便可靠。

（2）三维加速度采集器

三维加速度采集器（监测装置）获取电缆通道及电力设施周边的震动次数、时间间隔、频率、方向及加速度等各项三维震动参数。其采用硬件高度集成化、超低功耗设计、抗干扰及保护技术，由信号调整单元、数据采集单元、嵌入式计算机和载波通信共缆传输单元组成。该装置采用分时复用方式复接在数字编址总线式载波通信网络传输通信线缆上，将传感器输出信号就近于被测对象进行信号采集、转换和预处理，并通过载波通信共缆传输单元将处理后的数据编码上传至多状态综合监控主机，采用嵌入式算法模型对防护对象遭受外力破坏的类型进行分析判断。

（3）三维加速度传感器

三维加速度传感器接收和测量由大地传导的三维震动参数，如震动次数、时间间隔、频率、方向及加速度等，对电缆通道及电力设施三维振动参数进行实时监测和预警。

结束语

该电力隧道震动监测系统已经在国网辽宁省沈阳供电公司太原66 kV变电站电力电缆隧道小批量试用了18个月，试用期间系统运行稳定，测报灵敏，效果良好。当前系统测报的主要依据是三轴向加速度数据，下一步将增加三轴向角速度数据和三轴向地磁数据，通过九轴运动感知数据的融合，进一步滤除噪声干扰，减少误报，提高测报符合率。

参考文献

[1] 杜伯学，马宗乐，霍振星，等．电力电缆技术的发展与研究动向 [J]．高压电器，2010，46 (7)：100-104．

[2] 应启良，魏东．我国高压及超高压交联聚乙烯绝缘电力电缆的应用与发展 [J]．电线电缆，2001 (3)：3-9．

[3] 甘如鲁．爆破对邻近隧巷工程的影响分析及其控制研究 [D]．长沙：中南大学，2014．

[4] 叶培旭，杨新安，凌保林，等．近距离交叉隧洞爆破对既有隧道的振动影响 [J]．岩土力学，2011，32 (2)：537-541．

[5] 周雍年．强震动观测技术 [M]．北京：地震出版社，2011．

[6] 奥本海默．离散时间信号处理 [M]．西安：西安交通大学出版社，2001．

（收稿日期：2015－07－25）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net