

导波技术在输电线路无损监测中的应用

殷志¹, 陈丽娟¹, 陈大兵², 许晓慧¹

(1.东南大学电气工程学院, 江苏南京 210096; 2.江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

摘要:输电线路损伤的定位及类型识别对于保障电力系统安全运行有着重要的意义。提出了基于超声导波的输电线路无损监测方法并进行了实验验证。实验采用磁致伸缩换能器产生和接收超声导波, 对钢绞线地线的断股损伤进行了检测研究, 通过得到的实验信号可以确定损伤位置, 并对损伤信号进行时频分析, 研究损伤信号与损伤程度的关系。实验验证了该方法的可行性。

关键词:超声导波; 输电线; 无损监测; 磁致伸缩效应

中图分类号: TM731

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2011)05-0024-03

研究输电线路损伤定位及类型识别的方法是保障电力系统安全稳定运行的关键问题之一。目前, 常用的输电线路损伤检测方法主要有人工检测法、航测法和巡线机器人检测法^[1]。人工检测和航测法效率低、费用高、检测精度不够; 而巡线机器人每次检测需要考虑人员的部署和机器人的搬运问题。因此, 这些方法在准确性、便捷性、经济性等方面均不能很好满足电力公司巡检的需要, 尤其是难以提供对输电线路损伤的实时监测, 无法进行损伤的早期预测。为了确保输电线路实现长距离大容量的电力输送稳定可靠, 需研究一种准确可靠、全面便捷、经济高效的输电线路损伤定位及类型识别方法。近年来出现的超声导波技术能够有效地解决这一问题。超声导波探伤技术已经在石油管道无损检测、混凝土非破损检测等领域得到广泛应用, 也被用于进行高压输电塔锚杆的腐蚀检测。国外有一些学者开始关注超声导波在电缆中的传播问题。Haag等用压电传感器在多线电缆中产生超声导波, 研究了弹性波能量在单线间的传播^[2]。Hernandez-Salazar和Baltazar等也采用压电传感器激励产生超声导波, 并采用时频分析方法分析检测信号^[3]。之后, Hernandez-Salazar和Baltazar等进行了单根钢线和单根铝线组成的简化模型的有限元分析, 研究超声波在缆线中的传播模式^[4]。国内目前尚未开展超声导波对输电线路进行无损检测的研究。文中采用超声导波技术对输电线路的损伤检测进行了初步的研究, 验证了该方法的有效性和可行性。

1 超声导波检测理论

本文首先对纵波在钢绞线地线中传播进行了研究。超声波入射到有边界特征的介质中后, 会在介质边界处发生反射、折射和波型转换, 从而形成

超声导波。对于钢绞线来说, 外围钢丝或中心钢丝均可看作是细长圆柱杆。在细长杆中沿轴向方向传播的超声导波存在3种不同的模式, 即纵向模式、扭转模式和弯曲模式, 分别记为 $L(0, m)$ 、 $T(0, m)$ 及 $F(n, m)$ 。其中 n 和 m 分别为模式的周向阶次和模数。纵向模式和扭转模式为轴对称导波, 弯曲模式为非轴对称导波^[5]。

钢绞线由多根表面自由的圆柱杆绞合而成。设圆柱杆半径为 a , 轴线沿 z 方向, 如图1所示。纵向模式是轴对称的, 具有径向位移分量 u_r 和轴向位移分量 u_z 。条件是周向位移分量 u_θ , 及 u_r, u_z 与周向角 θ 无关。考虑 $r=a$ 处的应力边界条件为 $\delta_r = \delta_z = 0$, 求解波动方程, 可得到Pochhammer频散方程为:

$$\frac{2\alpha}{a} = (\beta^2 + k^2) J_1(\alpha a) J_1(a\beta) - (\beta^2 + k^2)^2 \cdot$$

$$J_0(\alpha a) J_1(a\beta) - 4k^2 \alpha \beta J_1(\alpha a) J_0(a\beta) = 0 \quad (1)$$

式中: $\alpha^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2}$; $\beta^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2}$; ω 为圆频率; k 为波数; J 为

Bessel函数; c_L 为材质中的纵波波速; c_T 为材质中的横波波速。

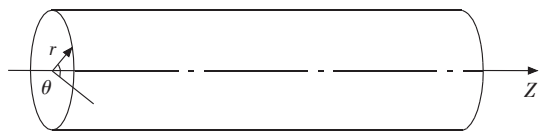


图1 柱坐标系下实心圆柱杆

通过数值求解可以得到相速度频散曲线。并利用 $c_g = d\omega/dk$ 可以得到群速度 c_g 频散曲线。在实际检测中, 根据频散曲线选取激励信号的频率, 以激励频散小的单一模式。再依据超声波回波来检测钢绞线的健康状况或物理特征。

超声导波在输电线路中传输的发射信号和反射信号如图2所示。记录超声导波发射信号与端面反射信号的时间差 Δt_1 , 发射信号与损伤反射信号时间

差 Δt_2 , 由式(2)和式(3)可以得到损伤位置 S_p 。

$$S=c \times \Delta t_1 / 2 \quad (2)$$

$$S_p=c \times \Delta t_2 / 2 \quad (3)$$

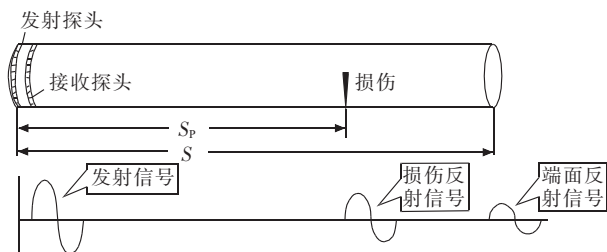


图2 超声波在输电线路中传输的发射信号和反射信号

2 实验系统

基于超声导波的输电线路监测原理如图3所示,在输电线上安装2个超声传感器,一是发射传感器,用于产生导波,一般为纵波,当导波遇到损伤,如破股、断股,部分波会反射,返回波由另一传感器接收。通过对反射波提取损伤特征,可对损伤进行定位和损伤程度判断。该方法便于将传感器长期安装在电力线上,无线发射器可集成在传感器中,间隙式地向中心交换节点或杆塔上的损伤数据集中器传送数据,从而实现对输电线路的实时监测。

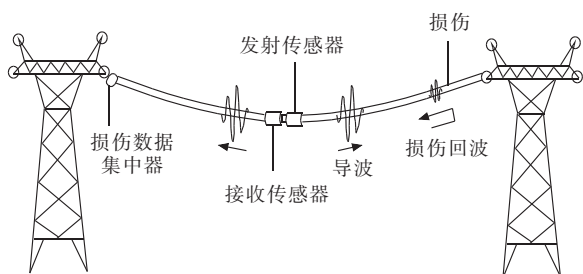


图3 输电线路超声导波无损监测示意图

实验装置如图4所示,主要由美国西南研究院(SwRI)的新型检测设备 MsSR3030 仪器、计算机、MsS 线圈探头、永磁铁、钢绞线组成。MsSR3030 仪器是由发射器和接收器两部分组成。

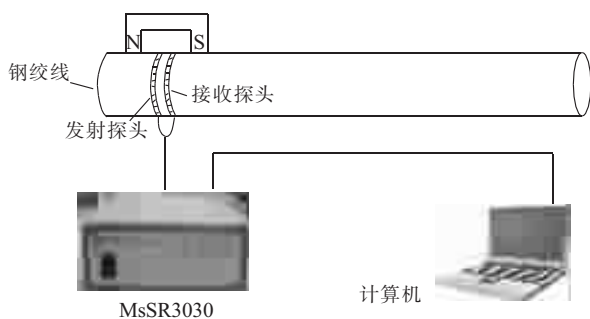


图4 实验装置示意图

实验中采用的钢绞线是铁磁性材料。铁磁体在外磁场中磁化时,其长度及体积均发生变化,这个现象称为磁致伸缩效应^[6]。在钢绞线外加永磁铁,钢绞线中施加的直流偏磁场使磁畴发生一定的偏转。带

状线圈探头在被检测的钢绞线周围形成一个环形的线圈,该线圈加载交流电后则会在线圈内产生沿轴向的交变磁场。交变磁场使磁畴在偏置磁场的方向上产生来回偏转,由此在钢绞线内部产生轴向的交变应力,从而产生超声波。

实验采用长 1 250 mm 的 7 芯钢绞线,其公称直径为 9.6 mm,中心及外围钢丝直径都为 3.3 mm,如图5所示。在距离钢绞线左端 800 mm 处用手锯从 1 至 7 根逐根锯断钢线,MsSR3030 产生导波频率为 32 kHz。在钢绞线左端安装 MsS 线圈探头,发射探头发出导波信号,遇到断股处有部分信号返回,接收探头接收到回波信号,输出给计算机。

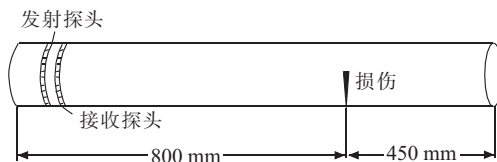


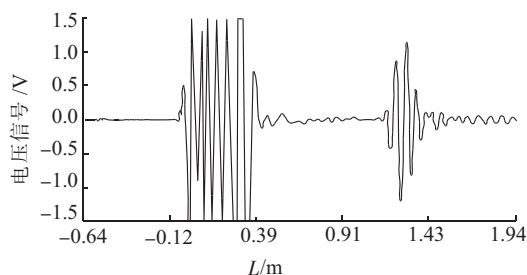
图5 钢绞线示意图

3 实验结果分析

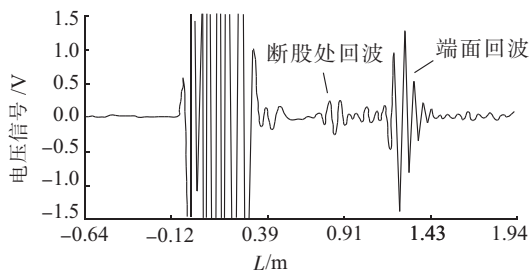
MsSR3030 接收器输出给计算机的信号如图6所示。波形横坐标为导波传播距离,纵坐标为电压值。从图中可清楚地观测到断股处的回波信号。

3.1 损伤定位

图6(a)为不断股线的波形,导波传至右端面返回,由回波返回时间和钢绞线长度计算可得波速约为 4.3 km/s。为方便观察,波形的横坐标可用时间与波速之积,即波传播的距离表示。图6(b)为断 1 股线的波形,由该图可见断股处距离钢绞线左端面约 0.8 m。从而验证了该方法用于损伤定位的可行性。



(a) 不断股的信号波形



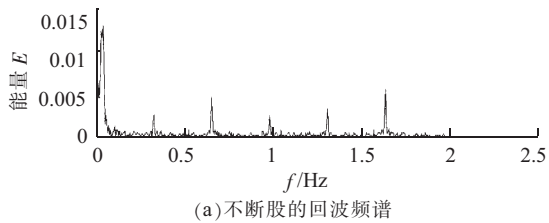
(b) 断 1 股的信号波形

图6 不断股和断 1 股时的信号波形

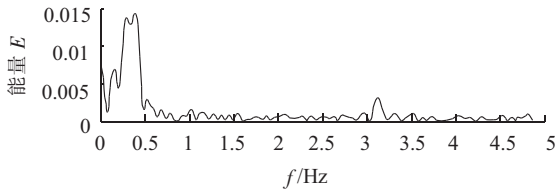
3.2 损伤程度与回波信号的关系

从获得的回波信号可知,随着断股数的增加,即损伤程度的增加,回波信号的幅值增大。

为了分析损伤程度和回波信号的关系,用matlab软件对不断股至断7股的8个回波信号进行快速傅里叶变换(FFT),可得到信号的频谱如图7所示。由图7(b)可见,回波主要包含一个频率分量。回波的频谱幅值与断股数的关系如图8所示,可见,随着断股数的增加,频谱幅值随之增大,回波的能量随断股数呈线性增长趋势,基于此,可用于判断损伤的程度。



(a) 不断股的回波频谱



(b) 断1股时的回波频谱

图7 对不断股和断1股时的回波信号进行FFT变换得到的频谱图

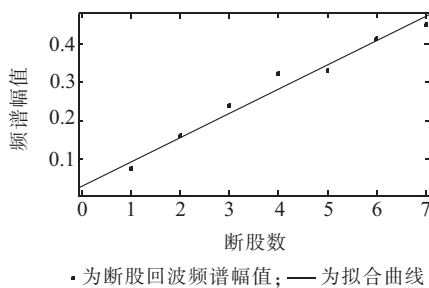


图8 断股数与回波频谱幅值的关系

4 结束语

超声导波检测的方法对钢绞线地线断股损伤

很敏感,可以准确地对钢绞线地线进行损伤定位,并且根据损伤回波信号的频谱幅值可以判断断股的损伤程度。本研究中采用的方法也可以应用于其他电缆监测应用系统。超声波监测对于多线电缆监测是很有前景的无损监测方法。本文的研究对今后进一步研究输电线无损监测奠定了基础。

参考文献:

- [1] 孙峰,陈民铀,罗涛.输电线断股损伤故障检测方法比较性研究[J].微计算机信息(测控自动化),2010,26(3-1):132-134.
- [2] HAAG T, BEADLE B M, SPRENGER H, et al. Wave-based Defect Detection and Interwire Friction Modeling for overhead Transmission Lines[J]. Archive of Applied Mechanics, 2009, 79(6-7):517-528.
- [3] HERNANDEZ-SALAZAR C D, BALTAZAR A. Damage Detection in Multi-wire Cables Using Continuous Wavelet Transform Analysis of Ultrasonic Guided Waves[C]. 2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2009.
- [4] HERNANDEZ-SALAZAR C D, BALTAZAR A. Structural Damage Monitoring on Overhead Transmission Lines Using Guided Waves and Signal Processing[J]. AIP Conference Proceedings, 2010(29):1921-1928.
- [5] 蔡成良.输变电设备无损检测技术[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [6] 罗斯J.L.固体中的超声波[M].何存富,译.北京:科学出版社,2004.
- [7] 王爱玲,祝锡晶,吴秀玲.功率超声振动加工技术[M].北京:国防工业出版社,2007.

作者简介:

殷志(1986-),女,江苏常州人,硕士研究生,从事电网设备检测方面的研究工作;
陈丽娟(1982-),女,江苏泰州人,高级工程师,从事电网设备检测方面的研究工作;
陈大兵(1978-),男,湖北大悟人,工程师,从事电力设备检验检测工作;
许晓慧(1981-),男,江苏苏州人,博士后,从事智能配用电技术研究工作。

Non-Destructive Monitoring of Power Transmission Line Using Guided Waves

YIN Zhi¹, CHEN Li-juan¹, CHEN Da-bing², XU Xiao-hui¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The positioning and the type recognition of transmission line damage are of great significance to ensure the security and stability of power system. In this paper, a non-destructive monitoring method for transmission line using ultrasonic guided waves was proposed and validated by experiment. The ultrasonic guided wave was produced and received using magnetostrictive transducer to detect the broken stocks damage of steel strand. And the damage location can be determined through the experiment signals. Finally, the time-frequency analysis for damage signals was made to research the relationship between damage signals and injury. Experimental results demonstrate the feasibility of the proposed method.

Key words: ultrasonic guided waves; power transmission line; non-destructive monitoring; magnetostrictive effect