

弹性波在高压输电线中的传播特性*

杨永军¹, 李华东¹, 裘进浩²

(1. 山东电力研究院国家电网电力机器人技术实验室 济南, 250002)

(2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 采用压电陶瓷设计了一种适用于高压输电线结构健康监测的传感器,分析了该传感器在输电线表面激励弹性波,得到了弹性波在输电线中的传播特性。利用Gabor小波变换计算传感信号到达时间的原理,试验得到了弹性波在输电线中传播的群速度频散曲线。结果表明,在低频段(低于30kHz)时,弹性波在输电线中的传播模态比较简单,适合用于结构健康监测。通过弹性波在输电线中的衰减试验,得到了信号峰值随传播距离的衰减曲线以及激励信号频率与信号峰值之间的关系曲线,得到弹性波在输电线中按照指数规律衰减。

关键词 输电线; 弹性波; 传播特性; Gabor小波变换; 结构健康监测

中图分类号 TB553; TN384

引言

长期以来,输电线在电力网中发挥着重要的作用。钢芯铝绞线是输电线上普遍采用的导线材料,主要是利用镀锌钢芯承受荷载,利用外层铝绞线输送电能。覆冰以及断股经常造成输电线路的舞动以致杆塔的倒塌以及电路短路,因此输电线的结构健康监测十分必要。由于弹性波在结构中能够传播较远距离,而且对结构中的损伤比较敏感,所以在结构健康监测领域得到了广泛的应用^[1]。基于弹性波对输油管道以及铁轨的结构健康监测已经取得了比较成熟的研究成果,但是利用弹性波对输电线的结构损伤以及覆冰监测还是一个比较新的研究方向。

基于弹性波的结构健康监测技术一般采用压电元件作为激励与传感元件^[2-4],通过分析监测信号遇到损伤时候产生的散射、反射等特征信号进行监测。弹性波在输电线中的传播具有频散特性,选择合适的频率使信号频散最小成为监测能否实现的关键,对弹性波在输电线中的传播特性的研究显得尤为重要。输电线结构比较特殊,一般是钢芯螺旋铝绞线,传统的压电功能器件以块状和片状居多,不易粘贴在非平面结构表面。笔者根据实际的输电线,设计了一种夹持装置,将压电陶瓷片贴在夹持装置上,共同组成传感器。通过试验系统,对弹性波在输电线中的传播特性进行了分析。基于小波变换计算峰值到达

时间的原理,得到了弹性波在输电线传播的群速度频散曲线,对不同的传播模态及频散特性进行了分析,为今后进一步选择适当的频率,利用弹性波对输电线进行结构健康监测提供了依据。在不同位置布置传感器,基于小波变换计算峰值到达时间的原理,测得了Lamb在输电线中传播的衰减特性曲线,拟合得到了衰减规律。

1 波速测量原理

1.1 基于小波变换计算峰值到达时间的原理

函数 $f(t)$ 的连续小波^[5-6]变换定义如下

$$\text{CWT}(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (1)$$

其中: $\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为小波函数;符号“*”为其共轭变换; a 为尺度因子; b 为平移因子。

小波函数由母小波 $\psi(t)$ 经过伸缩、平移后得到。

在允许条件下,通过 a, b 的移动,可得到一个灵活可变的时间-频率窗,高“中心频率”时,窗口自动变窄;低“中心频率”时,窗口自动变宽,达到时频分析的作用。

笔者选用的小波函数为Gabor小波,提供了更好的时频分辨率。Gabor小波函数^[7-10]定义如下

* 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(编号:2007AA032104);国家自然科学基金中美合作项目(编号:51161120326);教育部长江学者创新团队资助项目(编号:IRT0968)

收稿日期:2010-11-12;修改稿收到日期:2011-08-29

$$\psi_m(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\sigma^2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2} + j\omega_c t\right) \quad (2)$$

其傅里叶变换为

$$\hat{\psi}_m(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[4]{\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

其中: σ, ω_c 为正常数。

Gabor 小波函数看作中心在 $t=0$ 的 Gaussian 窗函数,其傅里叶变换的中心为 $\omega = \omega_c$ 。函数 $\frac{1}{\sqrt[4]{a}} \hat{\psi}_m \times \left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的中心为 $t=b$, 其傅里叶变换 $\sqrt{a} \hat{\psi}_m(a\omega) \times \exp(-j\omega b)$ 的中心为 $\omega = \omega_c/a$ 。Gabor 小波变换 $CWT_f(a, b)$ 代表函数 $f(t)$ 在 $t=b, \omega = \omega_c/a$ 附近的时频成分。试验令 $\omega_c = 2\pi$, 则 $1/a$ 等于中心频率 $f = \omega/2\pi$ 。

考虑沿 x 方向传播、相同单位幅度、角频率不同的两个谐波构成的发散波为

$$u(x, t) = e^{-i(k_1 x - \omega_1 t)} + e^{-i(k_2 x - \omega_2 t)} \quad (4)$$

使用 Gabor 小波对 $u(x, t)$ 作小波变换, 得

$$CWT_u(x, a, b) = \sqrt{a} \left\{ e^{-i(k_1 x - \omega_1 b)} \hat{\psi}_m^*(a\omega_1) + e^{-i(k_2 x - \omega_2 b)} \hat{\psi}_m^*(a\omega_2) \right\} \quad (5)$$

若 $\Delta\omega$ 足够小, 得到 Gabor 小波变换 (CWT_u) 模

$$|CWT_u(x, a, b)| \approx \sqrt{ab} |\hat{\psi}_m(a\omega_c)| \times [1 + \cos(2\Delta kx - 2\Delta\omega b)]^{1/2} \quad (6)$$

结果表明, 小波变换后的模在 $a = \omega_c/\omega_0, b = (\Delta k/\Delta\omega)x = x/c_g$ 时取得最大值, 即在 (a, b) 平面上的峰值对应频率为 $\omega_0 = \omega_c/a$ 时的波包, 以群速度 c_g 传播的到达时刻。

根据以上结论, 信号峰值到达时间 t 为信号 Gabor 小波变换的最大峰值所对应的时间, 利用到达时刻测量出信号到达时间。

1.2 基于信号传播时间的波速测量原理

试验系统基本思想是: 驱动器在结构表面激发主动监测信号, 同时传感器在同一表面的其他地方接收结构响应信号, 并对信号进行分析。笔者采用压电片 (PZT1) 进行激励, 另一压电片 (PZT2) 进行传感 (见图 1), 分别采集激励信号和传感信号, 对两种信号做小波变换, 得到激励信号的峰值到达时间 t_1 和接收信号的峰值到达时间 t_2 , 弹性波在两传感器之间的传播速度 v 为

$$v = L_0/\Delta t \quad (7)$$

其中: L_0 为 PZT1 到 PZT2 的距离; $\Delta t = t_2 - t_1$, Δt 为信号从 PZT1 传到 PZT2 的时间。由于 L_0 一定, t_1 和 t_2 可以通过对监测信号进行 Gabor 小波变换得到,

采用式 (7) 计算信号传播的速度 v 。

2 试验系统

试验系统采用了 2 片压电片, 1 片用作激励信号, 另 1 片用作接收信号。整个试验系统包括功率放大器、电荷放大器、NI 采集卡和计算机。试验系统示意图如图 1 所示。试验中, 为了研究弹性波在输电线中的传播特性, 采用 0~80 kHz、幅值为 10 V 的 7 波峰的正弦调制窄带信号作为激励信号。因为正弦曲线周期性比较平滑, 且达到波峰的时间相对于抛物线形状较快, 通过调制之后的正弦信号的周期数越多, 带宽越窄, 一定程度上缓解了 Lamb 传播过程中的频散。经过多次试验得出, 采用 7 波峰的正弦调制波在输电线中传播效率较高。因此, 笔者采用 7 波峰的正弦调制窄带信号作为激励信号。图 2 所示为 30 kHz 激励信号时的时域与频域图。

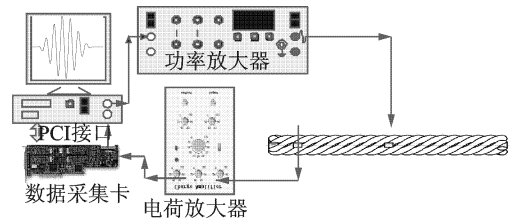


图1 试验系统示意图

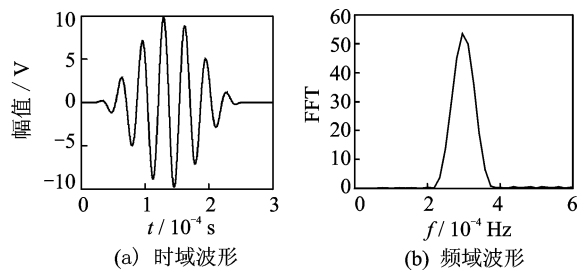


图2 激励信号的时域波形和频域波形

2.1 输电线的结构

输电线一般是钢芯铝绞线, 所选材质为内层是 7 根钢芯, 外层是 26 根铝绞线围绕的钢芯铝绞线, 如图 3 所示。其中每根钢芯的直径为 2.32 mm, 每根铝绞线的直径为 2.98 mm, 整个钢芯铝绞线的外径为 18.88 mm。钢芯的计算截面为 29.59 mm², 铝绞线的计算截面为 181.34 mm²。

2.2 传感器的设计

由于输电线的结构比较特殊, 为了使压电片能够更好地与输电线接触, 设计了一组夹持装置, 夹持

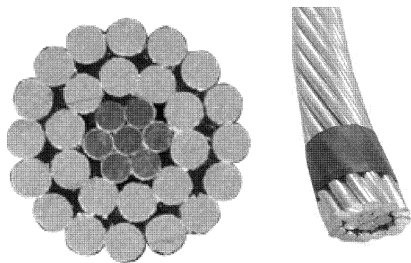


图3 钢芯铝绞线

装置是由铝合金制成,外径为 22.3 mm,内径为 18.88 mm,长 30 mm,如图 4 所示。将圆弧形的压电片贴在夹持装置上,压电片与夹持装置共同组成了传感器,这样组成的传感器可以夹紧在输电线上面,使传感器很好地与输电线接触,而且传感器可以很容易地沿着输电线移动,实现对输电线整体的监测,如图 5 所示。

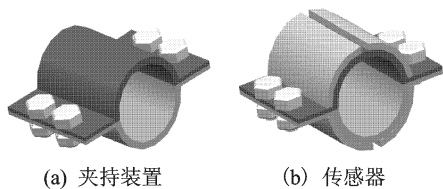


图4 夹持装置和传感器



图5 放置在输电线上的传感器与驱动器

3 弹性波在输电线中传播的特性

3.1 频散特性分析

在输电线中,不同的振动模式或振频的弹性波具有不同的相群速度,这种现象称为频散^[1]。试验中利用 PZT1 驱动元件激发不同频率的弹性波,对 PZT2 传感元件接收的信号进行小波变换,提取峰值到达时间信息,并根据式(7)计算波速,得到了弹性波在输电线中传播的群速度频散曲线,如图 6 所示。通过分析频散曲线可以看出,在低频段(低于 30 kHz)传播模式较少,仅有 III,IV 2 个模式。随着频率的增加,频散越严重。在高频段按照波速的大小会先后出现 5 个传播模式。图 7、图 8 分别为激励频率为 25 和 35 kHz 下传感器接收的时域信号。25 kHz 激励下,按照波速大小先后出现了 III,IV 2 个模式,35 kHz 激励下,按照波速大小出现了 I,II,III 和 IV 4 个模式。

通过试验对相速度频散特性进行了分析,在不

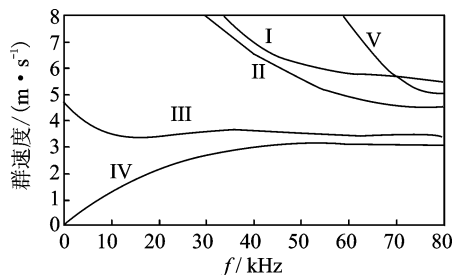


图6 群速度频散曲线

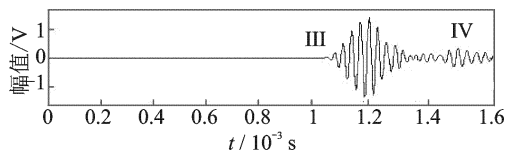


图7 频率为 25 kHz 时的接收信号波形

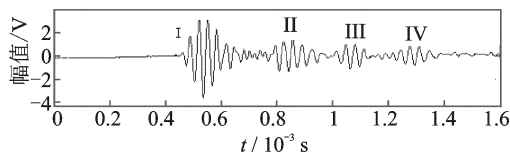


图8 频率为 35 kHz 时的接收信号波形

同频率下,信号在传播过程中会出现许多传播模式,许多模式的传播速度差别不大,容易造成信号的混叠。目前主要是利用损伤位置的反射回波信号实现对一维结构损伤的定位。由于传播过程会有许多模式出现,使得损伤反射信号与其他模式叠加在一起,很难提取有用的特征信号。不同的损伤类型对波的传播特性有很大影响,有的损伤对回波反射信号较强,有的则较弱,有的频率易反射,有的则不易反射。因此,选择合适的频率,使监测信号的模态尽可能少,是实现结构健康监测的关键。频散特性的分析为选择合适的激励频率提供了依据,基于以上观点和试验结果,30 kHz 比较适于作为输电线结构健康监测信号的中心频率。

3.2 弹性波在输电线中的衰减

根据频散实现分析结果,当激励频率为 30 kHz 时,传播模式简单,频散较小,适合用于输电线结构健康监测。为了研究该频率在输电线中传播衰减特性,在输电线一端布置驱动元件 PZT1,移动传感元件 PZT2 在输电线中的位置。通过对接收信号进行 Gabor 小波变换,提取信号峰值,得到弹性波的幅值与传播距离之间的关系,如图 9 所示。试验得到的幅值衰减曲线,说明弹性波在输电线中的传播按照非线性的衰减。经过对试验数据的拟合,得到的拟合函

数为: $A = 3.228e^{-0.7295x}$ 。经过分析发现,弹性波在输电线中的传播按照指数规律衰减,类似弹性波在板结构中的衰减规律: $A = A_0e^{-\alpha x}$ [12]。通过对弹性波在输电线中传播的衰减规律的研究,可以预测信号传播距离以及衰减情况。弹性波在输电线中波的传播特性还易受到多种因素的影响,如温度、湿度和输电线的张紧程度(张力)等。

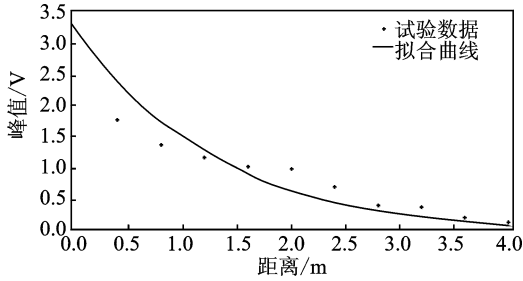


图9 信号峰值与传播距离之间的关系

4 结束语

利用压电传感器在输电线表面激励弹性波的方法,根据输电线的特殊结构,设计了一种传感器,实现了在输电线任意位置激励和接收弹性波。利用小波变换的方法提取时间信息,通过试验得到了弹性波在输电线中传播的群速度频散曲线和衰减特性曲线。分析频散曲线可以发现,低频段信号频散较小,传播模式简单和单一低频的模式进行单次探伤可以代替以往的多模式多次探伤,故大大减少了数据的冗余。该方法计算速度快,功耗小,非常适合输电线路结构的实时监测。试验得到的频散曲线为今后利用弹性波对输电线的结构健康监测的研究提供了试验依据。衰减特性试验结果表明,弹性波在输电线中的传播按照指数规律衰减,有助于分析弹性波在输电线中的长距离传播情况,并对较远距离的衰减情况进行预测。

参 考 文 献

[1] Tain J, Takagi T, Qiu J H. Intelligent material systems: application of functional materials[J]. Applied Mechanics Reviews, 1998, 51: 505-521.
 [2] Rose J L, Lee C M, Hay T R, et al. Rail inspection with guided waves[C]// 12th A-PCNDT 2006-Asia-Pacific Conference on NDT. New Zealand: Auckland, 2006.

[3] Cawley P, Wilcox P, Alleyne D N, et al. Lowe, long range inspection of rail using guided waves-field experience[C]// 16th World Conferences on NDT. Quebec City, Canada: University Laval, 2004.
 [4] Cawley, P, Alleyne D. Practical long range guided wave inspection-managing complexity [C]// Second Middle East Nondestructive Testing Conference and Exhibition. USA Washington: Amer Inst Physics, 2003.
 [5] Georgiev M. Crack growth resistance of railway rails [M]. Sofia: Ab Press, 1999: 125-138.
 [6] Rose J L, Lee C M, Hay T R, et al. Rail inspection with guided waves [C]// 12th A-PCNDT 2006-Asia-Pacific Conference on NDT. New Zealand: Auckland, 2006.
 [7] Ip K H, Tse P W, Tam H Y. Extraction of patch-induced lamb waves using a wavelet transform [J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13: 861-872.
 [8] Mallats H W. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
 [9] Chen Changming, Kovacevic R, Jandgric D. Wavelet transform analysis of acoustic emission in monitoring friction stir welding of 6061 aluminum [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43 (13): 1383-1390.
 [10] Chen Yuejun J, Shi Yaowen, Zhang Xinping. Detection of weak bonding in friction welds by ultrasound [J]. Ultrasonics, 1998, 36(1-5): 141-146.
 [11] Rose J L. Ultrasonic waves in solid media [M]. New York: Cambridge University Press, 1999.
 [12] 耿荣生, 景鹏, 付刚强, 等. 声发射波形分析技术在复合材料故障评价中的应用 [J]. 无损检测, 1999, 21(7): 289-293.
 Geng Rongsheng, Jing Peng, Fu Gangqiang, et al. Acoustic emission(AE) waveform analysis and its application in fault identification of composites [J]. Non-destructive Testing, 1999, 21(7): 289-293. (in Chinese)

第一作者简介:杨永军,男,1961年7月生,高级工程师。主要研究方向为电力系统及其自动化。

E-mail: zhaojl@powerrobot.org