

基于振动法检测的瓷绝缘子损伤探讨

李晓红, 郭慧英, 刘云, 李静

(武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为减少在役支柱绝缘子断裂事故, 提高其检出率及检测速度, 笔者首次研究了将整体损伤检测法——振动法引入绝缘子检测的可行性, 并设计了 4 个试样绝缘子的自由悬挂与地面放置状态试验, 用力锤激励绝缘子使其振动并采集加速度响应信号, 对采集的信号分别进行频谱分析和小波包分析, 以提取损伤特征参数, 并比较这两种信号处理方法的优劣。结果表明, 用 3 层小波包分解的信号处理方法可有效检测出支柱绝缘子 4 mm 深的裂纹损伤。

关键词: 瓷绝缘子; 振动法; 频谱; 小波包

中图分类号: TM216

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0101-03

Research on Vibration-based Damage Detection Method of Porcelain Insulators

LI Xiao-hong, GUO Hui-ying, LIU Yun, LI Jing

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to cut down the cracking accidents of in-service porcelain insulators, enhance the detectable rate and detecting velocity of a detection method, this paper proposed a vibration-based damage detection method for detecting insulators by making use of the global damage detection method. Four freely suspended or on-ground porcelain insulators were tested with an aluminum hammer activating them. Vibration signal and acceleration response were analyzed respectively with frequency spectrum analysis and wavelet packet analysis to achieve fault characteristic parameter. The results indicated that a 4mm deep defect could be effectively detected by utilizing wavelet packet analysis.

Key words: porcelain insulator; vibration; frequency spectrum; wavelet packet

0 引言

支柱绝缘子由于其工作环境恶劣、质量劣化及自然老化等问题导致断裂的事故时有发生^[1,2], 严重影响了电力系统的安全运行, 故研究绝缘子在役检测具有重要的应用价值。文[3,4]研究用超声法检测支柱绝缘子, 该法受操作者熟练程度的影响较大, 而且由于是一种局部损伤检测法, 受检测空间和现场条件的限制, 对在役支柱绝缘子仅能检测其法兰部位 30 mm 左右区域, 大部分区域未能进行检测。文[5,6]中介绍的红外、紫外成像法和激光多普勒振动法是整体损伤检测法, 但还存在检测结果易受环境因素影响、对机械损伤不敏感、设备造价高等问题待解决。振动法^[7-10]是目前国内外对整体结构损伤进行检测的研究热点, 并在很多结构检测中得到应用推广, 笔者基于振动法首次研究了支柱绝缘子损伤检测的可行性。

1 瓷柱损伤振动法检测试验

1.1 试验装置

试验采用东方振动和噪声技术研究所研制的 INV306DF 型 16 通道智能信号采集仪, 配合 INV 信号调理仪来实现绝缘子振动信号的采集。按图 1 连接各仪器, 组成测试系统。

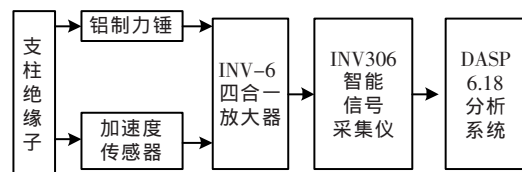


图 1 瓷柱损伤振动法检测原理

1.2 试样

试样为厂家检验的合格产品, 编号为 1~4 号, 表 1 给出各试样的几何尺寸和伞裙特点。文[3,11]给出了瓷柱断裂的特征和临界裂纹尺寸: 约 95% 以上发生在法兰口内 30 mm 到第 1 伞裙之间, 垂直安装的支柱绝缘子断裂临界裂纹尺寸在 16.5 mm 左右。研究

收稿日期: 2008-04-20; 修回日期: 2008-10-12

作者简介: 李晓红(1959-), 女, 博士, 教授, 从事电力行业关键部件的无损检测方法研究。

中为了解试验系统与裂纹深度之间的响应关系以及检测的灵敏度,首先对2号试样进行振动测试,然后在该试样上制作缺陷(第1伞裙附近沿周向切一8 mm深的裂纹),再进行振动测试,将采集的2组振动响应信号分别进行傅里叶谱分析,发现二组信号已显示出明显的差别。笔者为了提高检测灵敏度,减少了另外3个试样的裂纹深度,见表1。

表1 瓷柱试样几何尺寸与裂纹深度 mm

试样	高度	伞裙数	柱径	伞径	裂纹深
1号	1 148	13	106	224	4.0
2号	1 148	16	103	210	8.0
3号	1 040	14	103	205	4.0
4号	1 040	13	140	250	4.5

1.3 试验方法

试样分2种状态进行试验:自由悬挂与地面放置。为减小测点或激振点选择不当而造成的振动模式损失,采用多点激励单点拾振的锤击方法:将传感器分别固定于试样的上端面、第1层伞裙、中间层伞裙、下层伞裙上,用铝制力锤依次敲击上、中、下伞裙,见图2。地面状态下测试了4个试样,考虑到悬挂大重量物体危险性较高,自由状态下只对1号、2号试样进行测试。

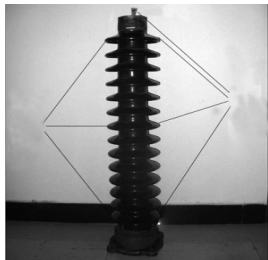


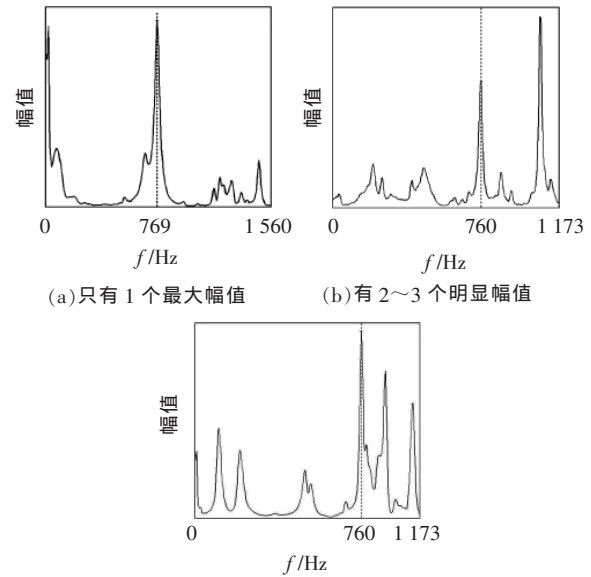
图2 锤击点与加速度传感器布置图

2 试验结果及分析

2.1 频谱分析

针对不同的激励、拾振位置,每个试样在不同情况下(完好与损伤)各进行了12组试验。将采集的时域信号进行傅里叶谱分析,发现频谱图具有以下几种特征:只有一个最大幅值;有2~3个明显幅值;幅值较多而且杂乱。各种特征的图谱分别见图3(a)、(b)、(c)。比较各试样完好与损伤的振动傅里叶谱,发现有以下几种频谱变化:损伤发生前后均只有一个最大幅值,损伤后幅值左移;完好时一个幅值,损伤后幅值不小于2个;完好与损伤时有2~3个幅值,但幅值大小比例不同;损伤前后幅值均较多,有无差异不易判别。显然,两种频谱的变化能够识别损伤。

依据上述损伤评定的原则进行统计,1、3、4号试样的地面状态下的损伤检出率为64%,2号检出率达到75%,这与其裂纹尺寸最大有关;1、2号自由状态下的损伤检出率为79%。



(c)幅值较多且杂乱

图3 不同特征的频谱图

2.2 小波包分析

由于构件损伤会导致其结构刚度的改变,当用一个含有丰富频率成分的脉冲信号作为输入对瓷柱进行激励时,结构会产生某种振动响应,损伤的发生会导致结构刚度发生变化,损伤的程度不同变化量也不同。因此,在各频率成分信号的能量中,包含了丰富的损伤信息,小波包能量谱能够直观地表征结构损伤对不同频带能量分布变化的影响^[12-16]。

笔者使用MATLAB软件对试验采集到的各试样加速度响应信号进行3层小波包分解,分别提取第3层共8个频率成分的分解系数,然后对小波包分解系数进行重构,提取各频带范围的信号,求出各频带总能量

$$E_i = \int |S_i(t)|^2 dt = \sum_{j=0}^n |x_{ij}|^2 \quad (1)$$

式(1)中, $S_i(i=0,1,\dots,7)$ 为各频带重构信号, $x_{ij}(i=0,1,\dots,7,j=0,1,\dots,n)$ 表示重构信号 S_i 离散点的幅值。

试验时对每组试验都进行5次测试,分别计算每次测试的各频段能量。小波包分解得到的第一频段是低频段,因摆动时有时无,主要是力锤敲击导致试样在测试过程中有低幅的摆动(这一摆动在自由状态下较明显),故其能量值波动范围较大;而其他几个频段的能量在求得平均值后,大多在 $\pm 5\%$ 范围内波动。因此,在比较完好与损伤时不考虑第一频段的能量值,用后7个频段进行分析。对每一试样的完好状态测试5次之后,将每一频段的能量进行平均计算,结果显示,每一频段的能量有70%在平均能量的 $\pm 5\%$ 范围内波动,最大波动范围不超过 $\pm 10\%$ 。

大量研究表明,小波包分析用损伤发生前后的能量差这一绝对值来评定损伤很有限,不能反映出它在完好时的能量中所占的相对比例,因此将损伤

发生前后各频段的能量变化率作为损伤的特征参数

$$\eta = \frac{|E_{完好} - E_{损伤}|}{E_{完好}} \times 100\% \quad (2)$$

用公式(2)计算出7个频段的能量变化率 η ,再结合各频段能量与平均能量的最大波动范围不超过 $\pm 10\%$ 的分析结果,确定了小波包分析试样损伤的原则为:试样的能量变化率 $\eta \geq 10\%$ 时,即判为损伤。对4个试样计算两种状态下(自由与地面)同种激励、拾振位置时的能量变化率,发现5个或大于5个频段的能量变化率 $\geq 10\%$ 的均占90%左右,受篇幅所限,图4给出1号、2号试样传感器在上端面,

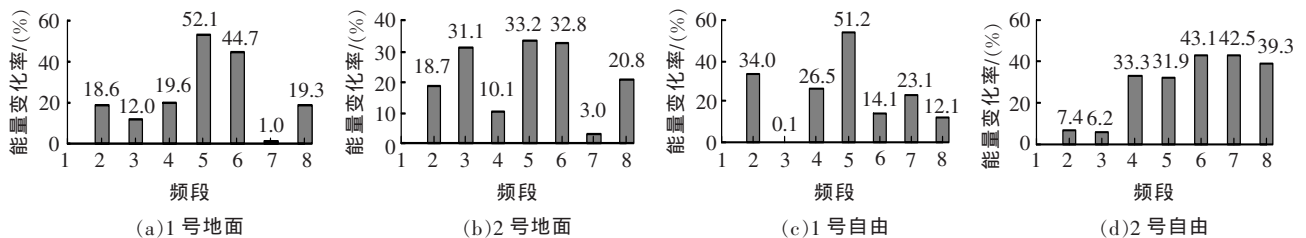


图4 4个试样不同测试状态下的能量变化率

表2 各试样所占的比例

1号地面	2号地面	3号地面	4号地面	1号自由	2号自由
2/12	5/12	2/12	1/12	6/12	10/12

伤发生前后振动特性的改变,所不同的是:频谱分析时地面状态下的损伤检出率为64%,自由状态下的为79%左右,而小波包分析时各个状态下的损伤检出率可达90%左右;从检测客观性讲,频谱是图形分析,小波包是数据分析,相比之下数据比图形更客观直接,不受主观因素影响。因此,振动法检测瓷绝缘子选择小波包分析效果更好。

3 结论

(1)应采用合适的信号处理方法提取损伤特征参数。结果表明,振动法能有效地检测出支柱绝缘子4 mm深的裂纹损伤。

(2)对振动信号进行3层小波包分解以提取各频段的能量,计算损伤发生前后的能量变化率,并以试样的能量变化率 $>10\%$ 作为损伤判据,其检测的可靠性高于频谱图分析。

(3)损伤程度越大时,小波包分析的能量变化率越大;同一损伤程度下,相比地面状态,自由状态下瓷柱的检测灵敏度更高。这一研究结果有助于对线路绝缘子在役检测的研究。

参考文献:

[1] BIRLASEKARAN S, LI H J. Detection of Faulty Insulators on Power Transmission Line [C]// Power Engineering Society Winter Meeting on IEEE, 2000: 2 817-2 821.
[2] 顾洪连, 沈其荣. 输电线路绝缘子掉串事故的原因分析[J]. 电力建设, 2002, 23(2): 30-31.

敲击中伞时能量的变化率。还发现4个或大于4个频段的能量变化率 $\geq 20\%$,所占比例见表2。表2显示出1号、2号试样的自由状态和2号试样的地面状态能量变化率较其它几个大,尤其是2号试样的自由状态的比例达到10/12,该结果与前面频谱分析的结果一致,表明所研究的瓷柱振动检测方法更适用于自由状态的检测,灵敏度和可靠性非常高,对研究线路绝缘子的检测很有帮助。

2.3 信号处理方法分析与讨论

笔者通过对绝缘子试样的振动响应信号进行频谱分析和小波包分析,发现二者都能给出绝缘子损

[3] 李晓红, 王敏, 吴敏,等. 支柱瓷绝缘子的超声检测有效性[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 159-163.
[4] 何喜梅, 丁辉. 支柱瓷绝缘子超声波检测研究[J]. 青海电力, 2003, 71(1): 7-11.
[5] 王雪, 张冠军, 严璋. 国内高压绝缘子在线检测方法综述[J]. 电瓷避雷器, 2006(6): 3-5.
[6] BOLOGNA F, MAHATHO N, HOCH D A. Infra-red and Ultra-violet Imaging Techniques Applied to the Inspection of Outdoor Transmission Voltage Insulators [J]. IEEE African, 2002(2): 593-598.
[7] 杜永祥, 唐贵基, 何青. 发电机端盖结构动态特性分析及其故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 69-71.
[8] 高维成, 刘伟, 邹经湘. 基于结构振动参数变化的损伤探测方法综述[J]. 振动与冲击, 2004, 23(4): 1-7.
[9] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B. Summary Review of Vibration-based Damage Identification Methods [J]. Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2): 91-105.
[10] 罗忠辉, 薛晓宁, 王筱珍,等. 小波变换及经验模式分解方法在电机轴承早期故障诊断中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 125-129.
[11] 李晓红, 刘叙笔, 张杰,等. 支柱瓷绝缘子断裂临界尺寸的分析与计算[J]. 高压电技术, 2004, 30(增刊): 102-103.
[12] 丁幼亮, 李爱群, 缪长青. 基于小波包能量谱的结构损伤预警方法研究[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 42-48.
[13] 于志伟, 苏宝库, 曾鸣. 小波包分析技术在大型电机转子故障诊断系统中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 158-162.
[14] 胡昌华, 李国华, 刘涛,等. 基于MATLAB 6. X的系统分析与设计-小波分析 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
[15] HOU Z, NOORI M, AMAND R ST. Wavelet-based Approach for Structural Damage Detection [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2000, 126(7): 677-683.
[16] YEN G G, LIN K C. Wavelet Packet Feature Extraction for Vibration Monitoring [J]. IEEE Trans. Ind. Electron, 2000, 47(3): 650-667.