

文章编号:1006-1355(2015)05-0193-05

大电机定子绝缘损伤成像检测方法研究

李 豪, 李锐华, 胡 波, 潘 玲, 郭其一

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要:为了准确评估定子绝缘结构健康状况,基于导波理论进行定子绝缘结构损伤成像检测研究。首先根据定子绝缘材料特性参数,建立定子线棒结构有限元模型。对定子绝缘损伤检测中导波的激励、传播和接收进行数值模拟,并建立横向裂纹、纵向裂纹、气隙和分层四种典型定子绝缘损伤模型。利用希尔伯特变换提取损伤散射信号到达时间作为损伤特征,采用概率成像方法对定子绝缘中的损伤状况进行成像检测。数值仿真结果表明:损伤散射波飞行时间是表征损伤位置的有效特征,A0模式损伤散射波对定子绝缘损伤更敏感,概率成像能够直观地检测出定子绝缘中的损伤并能进行准确定位,为进一步应用导波进行大电机定子绝缘状态评估提供有效的参考信息。

关键词:振动与波;定子绝缘;状态评估;损伤检测;弹性导波;概率成像

中图分类号:TM3

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2015.05.041

Damage Detection of Large Generator Stator Insulation Using Guided Wave-based Imaging Method

LI Hao, LI Rui-hua, HU Bo, PAN Ling, GUO Qi-yi

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to accurately assess the health condition of stator insulations, the basic theory of guided-wave and probability-imaging method was employed for stator insulation damage detection of large generators. The excitation, propagation and acquisition of the guided wave for the stator insulation damage detection were simulated numerically. Finite element models of four typical insulation damages, i.e. void, delamination, longitudinal and transverse cracks were established. Hilbert Transform (HT) was used to extract the time of flight (ToF) of damage scattered wave as the damage feature for damage location detection. Then, the probability-imaging method was used to detect the damage situation of the stator insulation. Numerical simulation results reveal that the ToF is an effective feature that can represent the damage location, the A0 mode Lamb wave is more sensitive to the insulation damage, and the probability-imaging method can be used to detect and locate the damage in the stator insulation immediately and accurately. This work provides effective information for further study of the stator insulation condition assessment based on the guided wave.

Key words: vibration and wave; stator insulation; condition assessment; damage detection; guided wave; probability imaging

定子绝缘状况在很大程度上决定了大型发电机的寿命及运行可靠性^[1-3]。由于受到电、热、机械和环境因素的联合作用,大型发电机定子绝缘(主绝缘)在长期的运行过程中其机械性能、介电性能逐渐变坏,即发生老化,最终导致绝缘失效。目前对大型发电机定子绝缘进行状态评定主要依靠绝缘老化过

程中的宏观电气参量^[4,5],尤其是局部放电的测量^[6]。但是这些特征参量难以反映绝缘结构老化状况。研究表明,绝缘结构老化是绝缘性能劣化的主要原因^[7],具体表现为绝缘内部结构性损伤的形成与发展。因此,及时、准确地检测并识别出定子绝缘结构损伤,就能够为大电机绝缘状态诊断提供有效和可靠的参考信息。

针对大电机定子绝缘的状态评估,研究工作主要围绕着如何有效表征绝缘老化特性,并以此为基础进行绝缘诊断而展开。这些研究工作对认识和了解大电机主绝缘老化机理,提高电机绝缘诊断和寿命评估技术水平起到了一定的作用,但是对绝缘老

收稿日期:2015-01-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51177110)

作者简介:李豪(1989-),男,安徽省安庆市人,博士生,主要研究方向:电力设备绝缘状态诊断与寿命评估。

通讯作者:李锐华,男,博士生导师。

E-mail: rhli@tongji.edu.cn

化的微观本质即结构性损伤(缺陷)的产生与发展却缺乏系统的分析和研究。如果能够检测出定子绝缘中的局部缺陷,甚至识别出损伤在定子绝缘中的具体位置和大小,将对大电机定子绝缘状态评估更有意义。

结构健康性监测(SHM)通过实时检测出发生在结构内部和表面的损伤,对结构状态进行早期诊断和预报,能够显著提高设备运行可靠性。导波具有良好的传播特性而且对结构中的微小损伤和初始损伤较为敏感。近年来,基于导波的损伤检测方法被广泛地应用于工业、军事、航天等领域^[8-10]。利用损伤成像方法能够对复合材料中的损伤位置和损伤程度进行直观和定量评估^[11]。其中,概率成像方法^[12,13]所需传感器数目较少并且计算简单,能够减少成像时间和提高图像的分辨率,因而获得了广泛应用。

大电机定子绝缘属于层压复合材料结构,绝缘老化本质上为结构性损伤的形成与发展。本文主要通过有限元数值模拟方法,研究导波在定子绝缘中的传播特性,并利用导波概率成像方法进行大电机定子绝缘典型损伤的检测及定位。

1 定子绝缘损伤概率成像原理

1.1 Lamb波理论

Lamb波是一种在固体板状结构(板的上、下表面应力为零)中传播的二维弹性导波。Lamb波传播时声场遍及整个板的厚度,它对传播介质中由损伤引起的应力变化十分敏感,因此特别适合对结构的表面和内部损伤进行检测。Lamb波具有多模态和频散特性。其中,多模态特性是指Lamb波在传播时存在多种模式,如对称模式S0、S1、S2……,反对称模式A0、A1、A2……,这些模式可相互独立地在板中传播;频散特性是指Lamb波的相速度和群速度随频率的变化而发生弥散。描述Lamb波的理论依据是Rayleigh-Lamb频率方程^[14],定义如下

$$\frac{\tan(qd/2)}{\tan(pd/2)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad \text{对称模式} \quad (1)$$

$$\frac{\tan(qd/2)}{\tan(pd/2)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad \text{反对称模式} \quad (2)$$

其中

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2 \quad (3)$$

$$q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 \quad (4)$$

式中 d 为板厚, k 是Lamb波沿传播方向上的波数,其数值等于 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为Lamb波长, ω 为波的角

频率。 c_L 和 c_T 分别为板材的纵波和横波速度,分别由式(5)和(6)得到

$$c_L = \sqrt{\left(\frac{1-\nu}{1-\nu-2\nu^2}\right)\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

其中 E 为弹性模量, ν 为泊松比, ρ 为材料密度,将式(5)和(6)分别代入式(3)和(4),通过数值求解(1)和(2)可以获得Lamb波的相速度 c_p 和群速度 c_g ,分别为

$$c_p = (\omega/2\pi)\lambda \quad (7)$$

$$c_g = \frac{d(kc_p)}{dk} = c_p + k \frac{dc_p}{dk} \quad (8)$$

通过数值求解式(1)和(2),可以获得不同模式下的Lamb波相速度和群速度随频率的变化关系。频散曲线可以直观地揭示Lamb波的多模式和频散特性,能够为Lamb波激励频率的选择和识别Lamb波传播模态提供理论参考依据。

1.2 概率成像原理

根据惠更斯原理,Lamb波传播过程中遇到损伤时会发生散射现象。通过解析损伤散射Lamb波,可以获得损伤信息。损伤散射Lamb波飞行时间(ToF)是表征损伤位置的有效特征,利用ToF进行损伤定位的原理如图1所示。

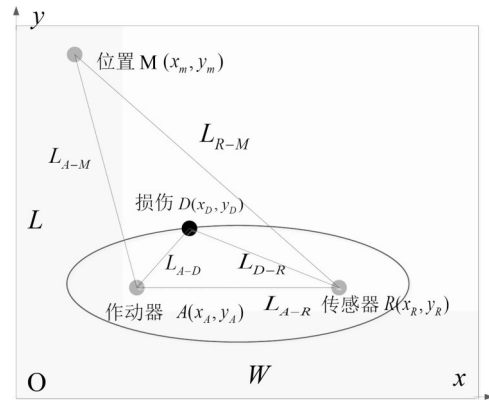


图1 基于ToF的损伤定位原理图

考虑一对激励—接收路径,由作动器 $A(x_A, y_A)$ 激励出的Lamb波经损伤 $D(x_D, y_D)$ 后,传感器 $R(x_R, y_R)$ 接收的损伤散射信号飞行时间为

$$T_{A-D-R} = (L_{A-D} + L_{D-R})/V_g \quad (9)$$

其中 L_{A-D} 为作动器A到损伤D的距离; L_{D-R} 为损伤到接收传感器R之间的距离。 V_g 为Lamb波在定子绝缘中的群速度。当 T_{A-D-R} 确定后,便可以确定一个以作动器A和传感器R为焦点,长轴为 $L_{A-D} + L_{D-R}$ 的椭圆,如图1中的椭圆轨迹,该轨迹表

示损伤在定子绝缘中可能存在的位置。显然,距离该轨迹越近的位置存在损伤的概率越大。对任意位置 $M(x_m, y_m)$, Lamb波由A传播到M,再从M传播到R的时间为: $T_M = (L_{A-M} + L_{R-M})/V_g$ 。当M正好位于该椭圆轨迹上,此时 $T_M = T_{A-D-R}$ 。用 $T_{ij} = |T_{A-D-R} - T_M|$ 表示 T_{A-D-R} 和 T_M 的时间偏移, T_{ij} 越小说明该位置越接近实际损伤位置,存在损伤的概率也越大。为了量化损伤存在概率,引入高斯概率积分函数^[15]

$$F(T_{ij}) = \int_{-\infty}^{T_{ij}} f(T_{ij}) dT_{ij} \quad (10)$$

其中 $f(T_{ij}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{T_{ij}^2}{2\sigma^2})$ 为概率密度函数, σ 为均方差。根据高斯分布的性质,对于某一特定的 T_{ij} 该位置存在损伤的概率 $P(T_{ij})$ 为

$$P(T_{ij}) = 1 - |F(T_{ij}) - F(-T_{ij})| \quad (11)$$

根据式(11)计算定子绝缘所有空间位置的损伤存在概率,并与图像像素点的灰度值相对应,得到单一路径下的损伤概率成像结果。假定定子绝缘中有 N 条激励—接收路径,对各路径下的概率成像结果 $P(i)$ 进行几何融合^[15]

$$P = \left[\prod_{i=1}^N P_i(i) \right]^{1/N} \quad (12)$$

式(12)中 P 为定子绝缘损伤概率重建图像。损伤概率图像中像素点的值越高,表明损伤越有可能存在于该位置。通过这种方式对定子绝缘结构健康状况进行图形化重建,直观呈现损伤在定子绝缘中的位置。

2 定子绝缘损伤检测有限元模型

为了验证导波概率成像应用于定子绝缘损伤检测的可行性,利用有限元软件 Abaqus 对定子绝缘损伤检测中导波的激励、传播和接收进行数值模拟,并建立了几种典型的绝缘损伤模型。

2.1 定子绝缘结构模型

大电机定子线棒近似于长方体结构,中间为导电的铜股线排,四周叠包绝缘材料。对取自(18 kV, 300 MW)的某大型发电机定子线棒建立其结构有限元模型,线棒长度为1 200 mm,绝缘厚度为6 mm,横截面尺寸为60 mm×30 mm,图2为其截面图。

定子绝缘复合材料特性参数经反演推算^[16]如表1所示。

根据定子绝缘的材料和结构参数,利用单元大小为1 mm的C3D8R线性六面体单元,建立定子绝缘的结构有限元模型,如图3所示。

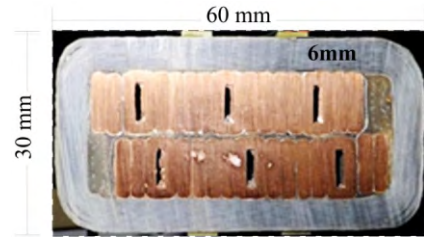


图2 定子绝缘线棒截面图

表1 大电机主绝缘材料特性参数

E/GPa	ν	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
43.736	0.419 8	4 200

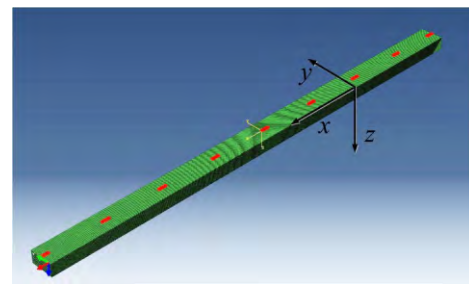


图3 定子绝缘三维有限元模型

在定子绝缘有限元模型上表面布置导波激励和接收传感器。通过点载荷方式对定子绝缘施加应力激励出导波。通过提取定子绝缘不同位置的应力形变信号获得导波接收信号。定子绝缘中的传感器配置如图4所示。

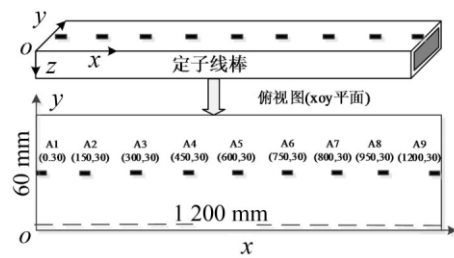


图4 传感器配置图

2.2 Lamb波激励频率选择

Lamb波激励信号决定了Lamb波在定子绝缘中的传播模式和频散特性。频散曲线是选择Lamb波激励频率的参考。根据表1所示的材料属性参数,通过数值求解式(1)和式(2),获得在定子绝缘中的Lamb波频散曲线,如图5所示。

图5中可以看出,当激励频率为13 kHz时,定子绝缘中仅有S0和A0两种Lamb波模式传播,并且它们的群速度随频率的变化相对平缓,这为Lamb波模式识别和特征提取降低了难度。此外,对激励信号增加窗函数能有效减少能量泄漏。综上考虑,本文采用13 kHz的5个波头汉宁窗正弦脉冲信号作为

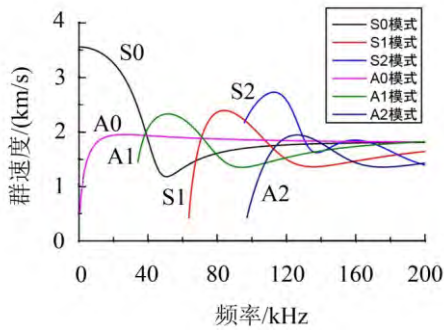


图5 群速度频率曲线

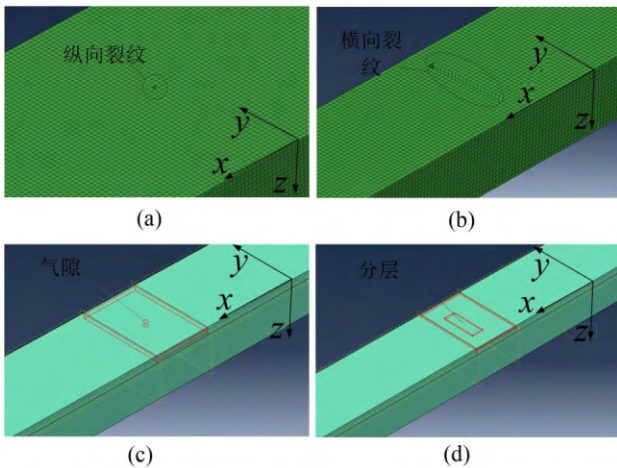
激励信号,信号表示如下

$$u(t) = \frac{v}{4} [H(t) - H(t - 5/f_c)] \cdot (1 - \cos \frac{2\pi f_c t}{5}) \sin 2\pi f_c t \quad (13)$$

式中: v 为信号峰峰值; f_c 为信号中心频率; $H(t)$ 为 Heaviside 阶梯函数。

2.3 定子绝缘结构损伤模型

由于受到电、热、机械和环境的联合作用,定子绝缘在老化过程中结构发生损伤。横向裂纹、纵向裂纹、气隙和分层是四种典型的定子绝缘结构损伤。为了验证利用导波概率成像对绝缘损伤的检测效果,在定子线棒长度方向 825 mm 处模拟了以上四种定子绝缘损伤,分别如图 6 所示:



(a) 纵向裂纹; (b) 横向裂纹; (c) 气隙; (d) 分层

图6 典型定子绝缘损伤有限元模型

其中:图 6 (a) 所示为:直径 $\Phi 1$ mm,深度为 6 mm (z 方向) 的纵向裂纹损伤;

图 6 (b) 所示为 1 mm (x 方向), 10 mm (y 方向), 1 mm (z 方向) 的表面裂纹损伤;

图 6 (c) 所示为直径 $\Phi 2$ mm,深度为 1 mm (z 方向) 的定子主绝缘内部气隙损伤;

图 6 (d) 所示为: 5 mm (x 方向), 10 mm (y 方向), 1 mm (z 方向) 的内部分层损伤。

3 定子绝缘损伤概率成像结果

3.1 损伤散射 Lamb 波飞行时间提取

如 1.2 所述,准确提取损伤散射 Lamb 波飞行时间 T_{A-D-R} 是进行损伤概率成像的关键。散射 Lamb 波信号可以通过对有损和无损时的 Lamb 波信号作差获得^[15]。由于 Lamb 波的频散特性,其在传播过程中容易发生波包变形和混叠。为了准确提取损伤散射 Lamb 波飞行时间,利用希尔伯特变换对散射信号进行时域聚焦^[15],获得其信号包络。图 7 所示为 A1 激励 A4 接收的定子绝缘气隙损伤散射 Lamb 波信号及其包络图。

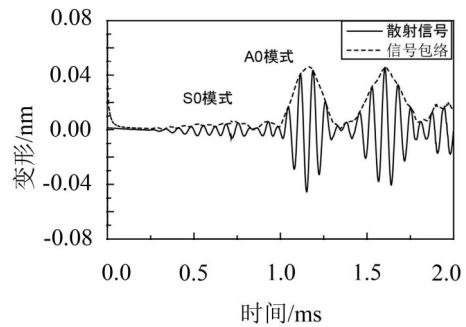


图7 A1 激励 A4 接收的定子绝缘气隙损伤散射信号

从图 7 中可以看出, S0 模式 Lamb 波信号幅值较小,包络混叠严重,信号辨识度不高,难以准确提取包络峰值时间;而 A0 模式 Lamb 波信号幅值较大,具有更清晰的包络线。将 A0 模式散射 Lamb 波包络峰值时间减去激励信号包络峰值时间获得损伤散射 Lamb 波飞行时间。图 7 中 A0 模式散射 Lamb 波包络峰值时间为 1.165 ms,激励信号峰值时间为 0.194 ms,因此损伤散射波飞行时间为 $(1.165 \text{ ms} - 0.194 \text{ ms}) = 0.971 \text{ ms}$ 。分别提取定子绝缘传感器网络中各激励-接收路径下的损伤散射波飞行时间,作进一步损伤概率成像。

3.2 损伤概率成像结果

根据所提取 Lamb 波散射信号飞行时间,利用式(11)和(12),对定子绝缘中的纵向裂纹、横向裂纹、气隙和分层四种典型损伤进行概率成像,成像结果分别如图 8 所示。图像中灰度值越大的像素点表明损伤越有可能存在于该位置。从图 8 中可以看出利用导波概率成像能够直观检测出定子绝缘中的纵向裂纹、横向裂纹、气隙和分层损伤。为了评价导波概率成像方法对不同类型绝缘损伤的位置识别精度,计算损伤识别位置与损伤实际位置之间的误差,相对误差 X_f 定义为

$$X_f = \frac{X_a - X_b}{X_a} \times 100\% \quad (14)$$

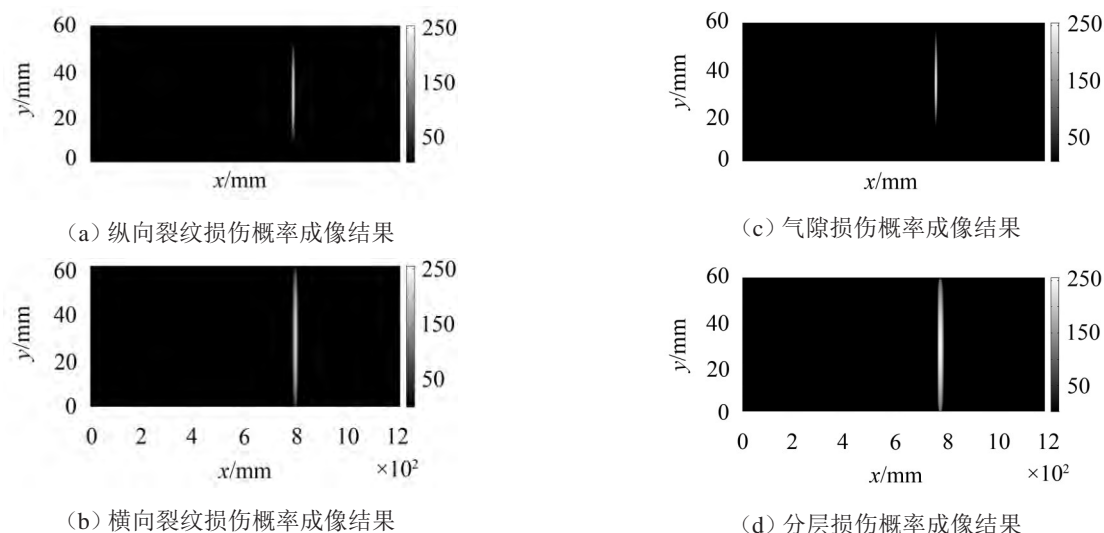


图8 定子绝缘损伤概率成像结果

式中 X_b 为概率成像所识别的定子绝缘损伤在长度方向上(x 方向)的位置, X_a 为定子绝缘损伤实际位置(825 mm)。对定子绝缘中的四种典型损伤定位结果如表2所示。

表2 定子绝缘概率成像损伤定位结果

损伤类型	实际位置/ mm	定位结果/ mm	定位误差/ mm	相对 误差
纵向裂纹	825	788	37	4.48 %
横向裂纹	825	796	29	3.52 %
气隙	825	772	53	6.42 %
分层	825	790	35	4.24 %

从表2中可以看出,导波概率成像方法对定子绝缘中纵向裂纹、横向裂纹、气隙和分层损伤的损伤识别位置于与实际损伤位置接近,定位误差小于7%。这表明利用导波概率成像不仅可以检测定子绝缘损伤存在,而且可以确定定子绝缘中的损伤具体位置。

4 结语

(1) 应用导波概率成像方法进行大电机定子绝缘损伤检测,损伤散射波飞行时间是表征损伤位置的有效特征。定子绝缘中的导波在A0模式下时域分辨率和辨识度更高,更利于提取波包飞行时间进行损伤概率成像检测;

(2) 通过有限元仿真对定子绝缘中的纵向裂纹、横向裂纹、气隙和分层损伤的成像,结果表明导波概率成像可以检测并定位定子绝缘损伤。验证了利用导波进行大电机定子绝缘损伤检测的有效性和可行性,为进一步的研究基于导波的大电机定子绝缘状态评估提供参考依据。

参考文献:

- [1] M Fernando, W Naranpanawa, R Rathnayake, et al. Condition assessment of stator insulation during drying, wetting and electrical ageing[J]. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, 2013, 20: 2081-2090.
- [2] Stone G C. Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings -A review[J]. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, 2013, 20(6): 2073-2080.
- [3] R Li, L Pan, C Yan, et al. Condition evaluation of large generator stator insulation based on partial discharge measurement[J]. **Advances in Mechanical Engineering**, 2013.
- [4] 张晓虹,张亮,乐波,等. 基于局部放电的矩特征分析大电机主绝缘的老化[J]. **中国电机工程学报**, 2002, 22(5): 94-98.
- [5] G Stone. A perspective on online partial discharge monitoring for assessment of the condition of rotating machine stator winding insulation[J]. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, 2012, 28: 8-13.
- [6] Bo Yue, Xiaolin Chen. Diagnosis of stator winding insulation of large generator based on partial discharge measurement[J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2006, 21(2): 387-395.
- [7] K. Kimura. The role of microscopic defects in multistress aging of micaceous insulation[J]. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, 1995, 2: 426-432.
- [8] Zhongqing Su, Lin Ye, Ye Lu. Guided lamb waves for identification of damage in composite structures; A review [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2006, 295: 753-780.

(下转第216页)

4 结语

针对考虑诱发脱冰效应的输电线路脱冰振动问题,系统研究了阻尼变化对发生始发脱冰后系统动态特性的影响,结论如下:

(1) 考虑系统的时变特性后,阻尼不仅决定着电线振动过程中消耗能量的多少,也影响着电线释放能量的多少,两者共同作用加剧了振动的幅度,增加了对线路结构安全的危害。故在今后的自然脱冰动力分析中,必须考虑诱发脱冰效应及阻尼变化的影响;

(2) 在阻尼取值方式中,考虑覆冰的影响后,增加了系统阻尼,导致系统的振动幅度减小;采用阻尼矩阵在每一时间步更新的模型所得系统振动幅度略大于阻尼矩阵不变时的结果,在需要精确求解系统动态响应时,应采用阻尼矩阵在各时间步随时更新的模型。

参考文献:

- [1] 李黎,夏正春,付国祥,等. 大跨越输电塔一线在线路脱冰作用下的振动[J]. **振动与冲击**,2008,27(9):32-34+50

- [2] 沈国辉,袁光辉,孙炳楠,等. 考虑脱冰速度效应的输电线路脱冰模拟[J]. **重庆大学学报**,2010,33(09):132-138.
- [3] 杨凤利,杨靖波,李正,等. 覆冰输电线路脱冰跳跃及抑制方法研究[J]. **振动与冲击**,2010,29(05):20-25.
- [4] 陈科全,严波,张宏雁,等. 冲击载荷下导线覆冰脱落过程的数值模拟[J]. **应用力学学报**,2010,27(04):761-766.
- [5] 周建星,刘更,马尚君. 齿轮箱声固耦合系统噪声辐射研究[J]. **噪声与振动控制**,2011,31(1):38-42.
- [6] Van horssen W T, Pischanskyy O V. On the stability properties of a damped oscillator with a periodically time-varying mass[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2011, 330(13): 3257-3269.
- [7] Kalman T, Farzaneh M, Mc Clure G. Numerical analysis of the dynamic effects of shock-load-induced ice shedding on overhead ground wires[J]. **Computers and Structures**, 2007, 85(7): 375-384.
- [8] Ji K, Rui X, Li L, et al. A novel ice-shedding model for overhead power line conductors with the consideration of adhesive/cohesive forces[J]. **Computers and Structures**, 2015, 157(9): 153-164.

(上接第166页)

参考文献:

- [1] 王福军. 计算流体力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004. 1-158.
- [2] 毕嵘. 复合式消声器声学特性的分析方法和实验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
- [3] 胡效东. 基于CFD仿真和实验的抗性消声器研究[D]. 济南:山东大学,2007.

- [4] 马家义. 消声器内部流场声学特性研究[D]. 长春:吉林大学,2005.
- [5] 张晓龙,李功宇. 扩张式消声器消声特性理论研究和实验分析[J]. **噪声与振动控制**,2008,28(1):105-107.
- [6] Iljae Lee, Kyungwon Jeon, Jaebung Park. The effect of leakage on the acoustic performance of reactive silencers[J]. **Applied Acoustics**, 2013, 74(4): 479-484.

(上接第197页)

- [9] 孙凯,孟光,叶林,等. 基于超声导波的钢梁结构损伤大小识别研究[J]. **振动与冲击**,2011,(9):227-231.
- [10] 孙学伟,李富才,苗晓婷,等. 厚梁结构中的超声导波传播与损伤识别[J]. **机械工程学报**,2012,(14).
- [11] X Zhao, R L Royer, S E Owens, et al. Ultrasonic Lamb wave tomography in structural health monitoring[J]. **Smart Materials and Structures**, 2011, 20: 105002.
- [12] 张海燕,马世伟,冯国瑞,等. 兰姆波结构健康监测中的概率损伤成像[J]. **声学学报**,2012,(4):401-407.
- [13] 严宏,周丽. 基于损伤存在概率成像方法的复合材料结

- 构损伤识别[J]. **振动与冲击**,2012,31(13):76-80.
- [14] Li F C, Meng G, Ye L, et al. Dispersion analysis of Lamb waves and damage detection for aluminum structures using ridge in the time-scale domain[J]. **Measurement Science and Technology**, 2009, 20(9): 1-10.
- [15] C. T. Ng, M. Veidt. A lamb-wave-based technique for damage detection in composite laminates[J]. **Smart Materials and Structures**, 2009, 18: 074006.
- [16] 孔铭,李富才,周利民. 应用兰姆波测定材料弹性参数的反演方法[J]. **噪声与振动控制**,2014,34(5):228-233.