

非线性超声检测方法及应用

陆铭慧, 徐肖霞

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

摘 要: 为保证构件的安全使用, 需要建立可靠的、定量的材料无损评价和表征技术。利用超声波传播的非线性特性, 可以解决一些线性超声检测技术难以解决的问题。研究发现, 非线性超声检测方法在闭合裂纹检测、粘接结构粘接强度评价、力学性能退化评估等方面显示出了线性超声检测无法比拟的优点。

关键词: 材料无损评价; 非线性特性; 闭合裂纹; 力学性能退化

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)07-0061-06

Review of Nonlinear Ultrasonic Testing Method

LU Ming-Hui, XU Xiao-Xia

(Key Laboratory of Nondestructive Test(Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: It is necessary to establish reliable quantitative techniques for nondestructively evaluating and characterizing the materials in order to ensure the safe use of the component. The use of the nonlinear characteristic can solve some problem that linear ultrasonic testing technology is difficult to solve. With intensive research, now nonlinear ultrasonic detection method is having the incomparable advantages of linear ultrasonic testing in closed crack detection, adhesive strength assessment of adhesive structure, mechanical property degradation evaluation, etc.

Keywords: Nondestructively evaluation for materials; Nonlinear characteristic; Close crack; Mechanical property degradation

常规超声检测是利用声波在工件中的线性传播特性, 通过声速、声衰减、声阻抗、散射等信息来实现缺陷监测和性能表征。但理论上其检测分辨率极限值为波长的一半, 从而限制了其在微观缺陷评价和微细结构变化监测方面的应用。非线性超声检测利用有限振幅声波在材料中传播时介质或微小缺陷与其相互作用的非线性效应, 实现材料性能评估和微小缺陷的检测。非线性响应信号的来源主要是晶格的非简谐性、晶格微观缺陷、微结构特性及其它不连续^[1]。所以通过非线性超声可以实现与微细结构变化、晶格畸变有关的检测与评价。

收稿日期: 2012-02-08

作者简介: 陆铭慧(1963—), 女, 博士研究生, 副教授, 主要从事超声检测研究。

1 固体中的非线性波^[2]

对于各向同性固体, 描写介质的线性(二阶)弹性常数有两个, 即 λ, μ ; 三阶弹性常数有三个, 采用默纳汗形式表示为 l, m 和 n , 从而各向同性固体中的一维纵波非线性波动方程为:

$$\frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial a^2} = \left(3 + 2 \frac{l+2m}{\lambda+2\mu} \right) \frac{\partial u}{\partial a} \frac{\partial^2 u}{\partial a^2}$$

引入 $\beta = 3 + 2 \frac{l+2m}{\lambda+2\mu}$, 则有 $\frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial a^2} = \beta \frac{\partial u}{\partial a} \frac{\partial^2 u}{\partial a^2}$ 。

采用变动系数法求解, 得到:

$$u = A_1 \sin(ka - \omega t) - \frac{\beta(kA_1)^2}{8} a \cos 2(ka - \omega t)$$

二阶谐波的幅值为 $A_2 = \frac{\beta(kA_1)^2}{8} a$, 可知, 二阶谐波沿着声波的传播方向具有积累效应。则非线性系数

$\beta = \frac{8A_2}{(kA_1)^2 a}$, 在一定的传播距离处, 通过测量基频声波幅值和二阶谐波幅值, 然后计算可得非线性系数。

2 非线性系数的测量

在试验研究方面, 可以通过测量一定距离处透过固体材料的基波和二阶谐波的幅值, 获得材料非线性系数。目前常用的测量方法有激光探针、电容换能器和压电换能器等。由于压电换能器简单易行, 且对环境要求较低, 因而被广泛采用。

图 1 为 RAM 5000 SNAP 非线性超声测试系统进行材料非线性测量的实验装置。信号发生器产生的脉冲串经低通滤波、放大后, 驱动发射换能器向试件中输入超声脉冲串; 脉冲串在试件内传播时, 与材料内部的介质或微小缺陷发生非线性相互作用, 激发高频成分的声波产生, 表现为波形发生畸变; 接收换能器接收畸变后的声波, 对接收的信号进行 FFT 分析, 最终得到基波和高次谐波的幅值, 从而能够得到非线性系数的值。

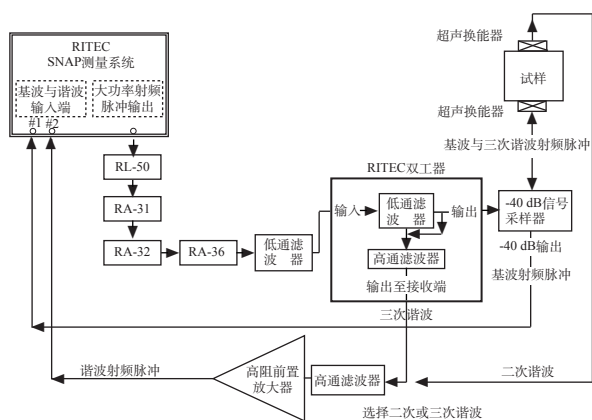


图 1 非线性测试系统

3 非线性超声检测的应用

利用有限振幅声波传播非线性特性进行无损检测与评价, 可以解决线性超声检测无法解决的一些问题, 如承受交变或循环应力构件使用寿命的预测、粘接面粘接强度的定量估计、材料和结构早期力学性能退化、闭合裂纹等。下面介绍非线性超声的具体应用。

3.1 材料弹性常数测试^[3]

对拉格朗日坐标下的非线性方程:

$$\rho_1 \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \left(A_{ijkl} + A_{ijklm} \frac{\partial u_m}{\partial X_n} \right) \frac{\partial^2 u_k}{\partial X_j \partial X_i}$$

引入直角坐标变换, 变换成:

$$\frac{\rho_0}{\mu_e} \frac{\partial^2 P_e}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 P_e}{\partial a^2} = - \frac{\nu_e}{\mu_e} \frac{\partial P_e}{\partial a} \frac{\partial^2 P_e}{\partial a^2}$$

定义非线性系数的表达式为:

$$\beta_e = - \frac{\nu_e}{\mu_e} = - \frac{A_{ijklm} N_j N_l N_n U_i U_k U_m}{A_{ijkl} N_j N_l U_i U_k}$$

从而得到 43 m、432 和 m3m 立方晶体结构中纵波在 $[100]$, $[110]$, $[111]$ 方向的非线性系数为:

$$\beta[100] = - \left(3 + \frac{C_{111}}{C_{11}} \right)$$

$$\beta[110] = - \left[3 + \frac{C_{111} + 3C_{112} + 12C_{166}}{2(C_{11} + C_{12} + 2C_{14})} \right]$$

$$\beta[111] = - \left[3 + \frac{C_{111} + 6C_{112} + 12C_{144} + 24C_{166} + 2C_{123} + 16C_{456}}{3(C_{11} + 2C_{12} + 4C_{44})} \right]$$

同理能得到 23 和 m3 立方晶体结构中纵波在 $[100]$, $[110]$, $[111]$ 方向的非线性系数。从而可以通过测量纵波在 $[100]$, $[110]$, $[111]$ 方向的非线性系数来计算立方晶体结构的弹性常数。

John H Cantrell 通过测量金刚石结构、fcc 结构、bcc 结构和 NaCl 结构等的 $\beta[100]$, $\beta[110]$, $\beta[111]$, 计算相应的弹性常数。试验发现, 固体的晶体结构不同, 其 $\beta[100]$, $\beta[110]$, $\beta[111]$ 具有不同的大小关系。

3.2 闭合裂纹的检测

金属构件在制造、加工和使用过程中, 不可避免地会在内部或表面产生微小的缺陷, 在一定的外部因素作用下不断扩展和合并, 形成宏观裂纹, 最终导致构件的断裂, 且常常是突然发生, 往往导致灾难性事故。

对未开口的裂纹, 粗糙的裂纹面会有相互接触, 使一部分声波穿透裂纹, 从而反射和散射的信号降低, 导致缺陷的定量偏小或是漏检。而闭合裂纹在有限振幅声波作用下, 由于入射声波的幅值与裂纹的开口宽度相当, 裂纹在声波的作用下会有张开-部分闭合-闭合之间的转换, 从而使声波发生畸变, 为闭合裂纹的检测提供了一种有效的手段。

Tae Hun Lee 等^[4-5]对离开口裂纹不同距离处的非线性特性进行试验测试, 得到非线性系数和扫描距离之间的关系如图 2 所示。试验结果表明, 随着到开口裂纹处距离的增加, 非线性系数有明显的变化, 即非线性系数减小, 就可以对结构材料闭合裂纹的开口程度作出定量评估。

陈斌^[6]研究了裂纹静态闭合合力非线性系数之间的关系(图 3)。Kawashima^[7-8]通过测量非线性系

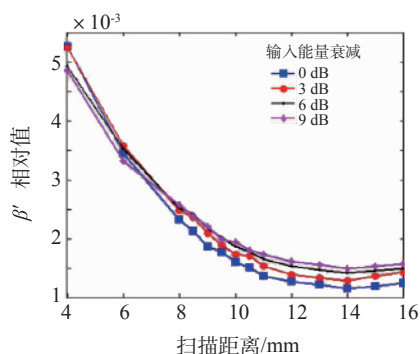


图2 非线性系数与扫描距离关系

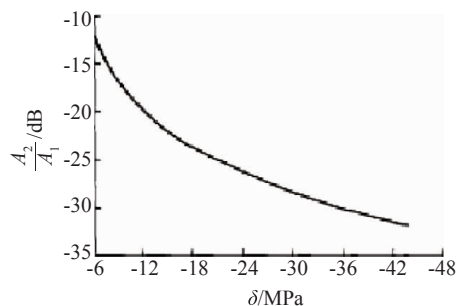


图3 静态闭合力与二阶谐波激发效率关系

数来检测冲击载荷作用产生的微裂纹,还实现了镍基合金焊缝应力腐蚀裂纹、玻璃板和焊接界面微裂纹的谐波成像(图4)。因此,借助于非线性超声技术可实现闭合裂纹的检测。

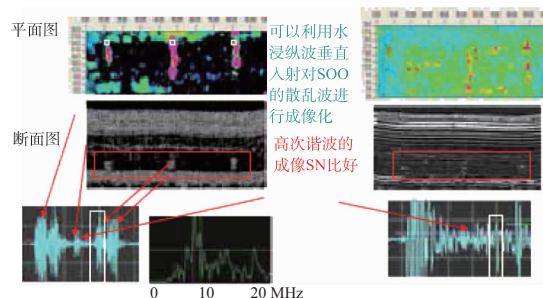


图4 应力腐蚀裂纹谐波和线性成像对比

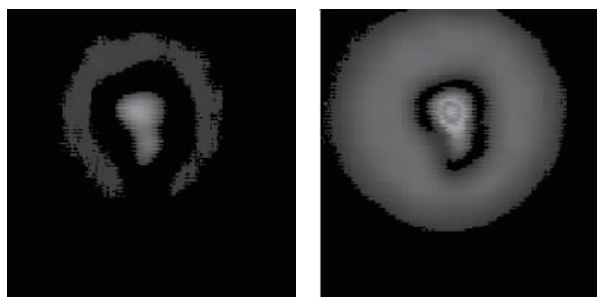
3.3 粘接面粘接强度评估

粘接结构性能优越、成本较低,在汽车和航空航天等工业领域的应用越来越广泛。对于粘接结构界面粘接强度的准确评价,直接影响粘接结构的有效使用。

对于粘接层的弱粘接,很难从回波的幅值上反映出来。当两材料的声阻抗相差很大时,强的反射信号会覆盖脱粘或弱粘接处的小信号,所以线性超声很难实现有效的检测。自从1997年首次将非线性超声用于铜-铜粘接面的检测,人们开始寻求用非线性超声来实现各种材料粘接强度的检测。

敦怡、师小红等^[9]用有限幅度方法研究了金属基复合材料结构的金属基体与复合材料界面间以及复合材料层界面间的粘接缺陷。试验结果表明:完全脱粘状态的非线性系数最大,完全粘好状态的非线性系数最小,弱粘接状态的非线性系数介于两者之间。

Wegner 和 Hirsekorn^[10-11]研究了扩散焊硅片的粘接质量与二阶谐波幅值之间的关系。日本的kawashima^[12-13]研究了不同粘接温度下的非线性系数,发现粘接温度越高,粘接质量越好,非线性系数越小,其还采用非线性C扫描系统,对粘接界面进行二阶谐波幅值成像,得到了比基波幅值成像更高的精度和分辨力(图5)。



(a) C扫描成像 (b) 二阶谐波成像

图5 C扫描和二阶谐波成像结果对比

3.4 材料力学性能退化

材料在承受各种载荷的过程中,其微结构会发生变化。这种微观变化在线性超声检测中表现很不明显,但使用有限振幅声波对材料进行评价时,则会表现出很强的非线性效应。

3.4.1 疲劳加载

材料疲劳是材料在循环或交变应力作用下损伤逐渐累积的过程,初期表现为微观组织结构和弹塑性的变化,然后是微裂纹的产生、扩展直至材料失效。疲劳过程中形成的位错和微小裂纹与有限振幅声波相互作用,表现出很强的非线性特性。

John H Cantrell 等^[14-15]使用 ASTM 标准规定的长为 1.9 cm、直径为 2.53 cm 的圆柱形试块(AA2024-T4 试块),在 276 MPa 应力下进行疲劳加载,测试不同循环次数载荷作用下的非线性系数,得到关系如图 6 所示。其还对多晶镍^[16]和 410Cb^[17]不锈钢进行了测试,得到类似的结果。

邓明晰、Peter B Nagy 等^[18-19]采用非线性超声检测技术研究疲劳加载条件下的非线性系数,得到类似的结论:疲劳加载条件下,被测试件未出现宏观裂纹时,材料的非线性系数随着循环载荷次数的增

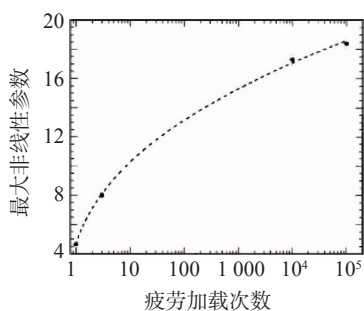


图6 非线性系数与疲劳加载关系

加会有明显的增加趋势。因此可以借助非线性超声试验,对材料出现裂纹直至断裂之前的性能退化进行评价,并可预测材料的疲劳寿命。

3.4.2 冲击载荷

纤维增强复合材料在航空结构上的应用越来越多,但在低速冲击载荷作用下,会在近表面产生分层。分层会严重降低局部的强度,导致灾难性的破坏。因此,高载荷作用下复合材料构件的缺陷和损伤的检测非常重要。

Michele Meo^[20]用非线性光谱调制法评定了AS4/3502板中碰撞损伤的存在,通过非线性超声响应频谱法,得到了分层面积与非线性系数之间的关系,可知在分层面积较小范围内,分层面积增大,非线性系数增大。Aymerich^[21]测试了不同冲击载荷作用下复合材料板中高次谐波的幅值,可知,冲击载荷的能量越高,复合材料的二次和三次谐波的幅值越大,且在10.1 J冲击能量作用下,三次谐波的幅值高于二次谐波。

研究发现,非线性系数对损伤的程度非常敏感,从而可以用来评价低速冲击载荷作用下的逐步疲劳损伤和循环压缩损伤。

3.4.3 拉伸载荷

拉伸载荷是工程材料和结构所承受的较为普遍的一种载荷。Kyung-Young Jhang^[22]研究拉伸加载情况下材料的力学性能退化和非线性系数之间的关系。使用SS41和SS45两种试样,在122, 203, 308, 516和637 MPa载荷作用下产生不同程度的性能下降。通过测量非线性系数,发现加载的应力越大,非线性系数越大。Viswanath^[23]使用AISI标准304SS试块和不同的拉伸载荷,发现随着载荷的增加,非线性系数增加。从而可以通过非线性系数来定征材料在拉伸载荷下的力学性能退化(图7)。

3.5 材料热损伤评价

长期在各种载荷和高温下运行的构件,由于不

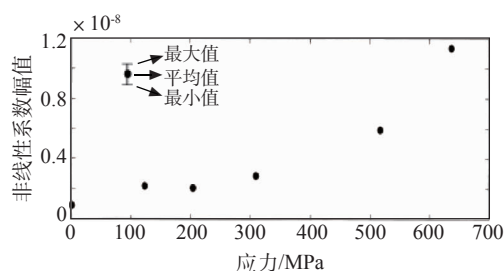


图7 拉伸载荷和非线性系数的关系

可预见的因素对其性能有一定的影响,故在使用过程中要对材料的性能进行评价,并预测其使用寿命。

由于非线性系数是直接表征晶格结构的非简谐性,所以它在描述单晶体的热弹性方面起着重要作用。Jhang等^[24]通过非线性超声试验研究了2.25Gr-1Mo钢非线性系数与高温热损伤(630℃)时间之间的关系,随着热损伤时间的增加,非线性系数增大。图8描述了相对非线性系数(经过热损伤的材料非线性系数与未经过热损伤的材料非线性系数之比)与热损伤时间的关系,对GrMoV材料^[25]进行测试也得到类似的结果。

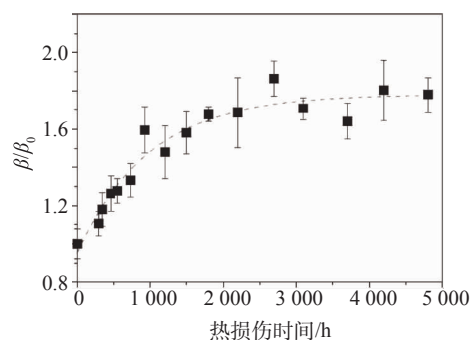


图8 相对非线性系数与热损伤时间关系

可见,超声非线性特性对材料的热损失非常敏感,进而可以通过非线性系数对材料的热损伤进行评价,并预测材料在高温环境下的使用寿命。

3.6 连续体铸造钢非金属夹杂检测

为生产无缺陷的钢铁,对连续体铸钢的内部裂纹和非金属夹杂物的无损检测是必不可少的。通常利用纵波传播时间来成像检测,但当非金属夹杂物的尺寸非常小时,由于铸钢中声衰减很大,故只能采用低频声波,而超声检测的理论极限值是波长的二分之一,从而对尺寸小的夹杂物的检测存在困难。

由于非金属夹杂物通过压应力镶嵌在钢中,夹杂物/钢界面是无凝聚力粘接,界面存在纳米级的缝隙,在高强度声波作用下的张开-闭合状态的转换,使透过的声波产生畸变,从而实现非金属夹杂物的

检测。

Kawashima^[26]用非线性扫描系统完成了连续体铸造钢中非金属夹杂物的检测。与传统 C 扫描结果对比,发现二阶谐波幅值成像具有更高的精度(图 9)。

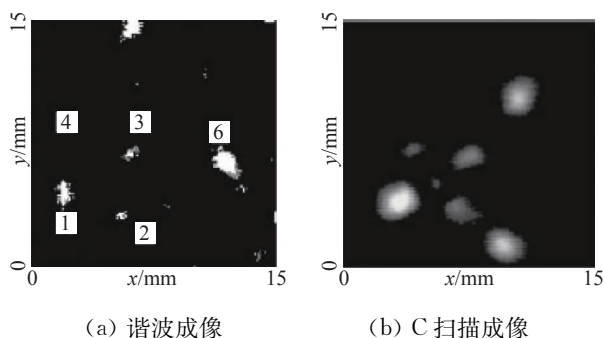


图 9 非金属夹杂物谐波和 C 扫描成像

3.7 缺陷定位

非线性超声在微观缺陷检测上有很高的精度,由于要接收信号进行频谱分析,很难从接收的信号上判断缺陷的位置,所以笔者认为其在缺陷定位上存在一定的不足。

Ayumu Osumi^[27]等采用非线性集束空中超声波对不同埋深(2~10 mm)的 ϕ 20 mm 缺陷进行检测。发现埋深不同时,声波的畸变比(二阶和三阶谐波速度变化的平方根与基波速度变化之比)不同,从而可以通过非线性测试得到声波的畸变比,来实现缺陷的定位。

Shiro Biwa 和 Shunsuke Hiraiwa 等^[28-29]研究了不同接触界面(抛光界面、粗糙界面和断裂界面)的非线性响应。发现抛光界面非线性响应最强,且发现随着外加闭合应力增加,谐波比(二阶谐波与基波幅值比)减小。Toshihiro Ohtani^[30]等将非线性超声用于锅炉热交换管焊缝热影响区的空隙检测,发现二阶谐波幅值成像结果和显微观察的结果能够很好地吻合。非线性超声检测技术还用于铝合金 AA7075 试样残余应力的测试^[31]以及涂层材料的质量评价^[32]。

4 展望

利用超声波传播的非线性特性可以对材料结构的微观变化进行评价,并对材料的寿命进行有效预测,但这主要集中在实验研究上。后续需要进行大量的理论研究,通过分析材料的微观组织结构变化,将材料的非线性行为和材料的宏观力学性能做定量联系。

参考文献:

- [1] Tribikram Kundu. Ultrasonic Nondestructive Evaluation[M]. United States of America: Crcpress, 2004: 363—436.
- [2] 钱祖文. 非线性声学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] John H Cantrell. Crystalline structure and symmetry dependence of acoustic nonlinear parameters[J]. Journal of Applied Physics, 1994(76): 3372—3380.
- [4] Tae Hun Lee, Kyung Young Jhang. Experimental investigation of nonlinear acoustic effect at crack[J]. NDT&E International, 2009(42): 757—764.
- [5] Nohyu Kim. Nonlinear behavior of ultrasonic wave at crack[J]. Review of QNDE, 2010(29): 313—318.
- [6] 施克仁. 无损检测新技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 162—204.
- [7] Koichiro Kawashima. Evaluation of minute cracks generated by spallation with nonlinear ultrasonic measurement[J]. Review of QNDE, 2001(20): 1283—1289.
- [8] Koichiro Kawashima, Kouichi Sekino, Kazuyoshi Ichigo. Higher harmonic imaging of tight cracks in glass plates and weld interface with mode-converted transverse waves[J]. ISNA, 2008(18): 537—540.
- [9] 敦怡, 师小红, 徐章遂. 非线性超声在金属基复合材料结构界面粘接强度评价中的应用[J]. 中国机械工程, 2008, 19(19): 2351—2354.
- [10] Wegner A. Assessment of the adhesion quality of fusion-welded silicon wafers with nonlinear ultrasound[J]. Ultrasonics, 2000(38): 316—321.
- [11] Hirsekorn S. Quality assessment of bond interfaces by nonlinear ultrasonic transmission[J]. Review of QNDE, 2000(19): 1367—1374.
- [12] Ryuzo Yamada, Koichiro Kawashima, Morimasa Murase. Application of nonlinear ultrasonic measurement for quality assurance of diffusion bonds of Gamma Titanium Aluminum alloy and steel[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2006(17): 223—239.
- [13] Koichiro Kawashima. Nonlinear ultrasonic imaging of imperfectly bonded interfaces[J]. Ultrasonics, 2006(44): 1329—1333.
- [14] John H Cantrell, William T Yost. Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures[J]. International Journal of Fatigue, 2001(23): 487—490.
- [15] John H Cantrell. Nondestructive evaluation of metal fatigue using nonlinear acoustic [J]. Review of QNDE, 2009(28): 19—32.
- [16] John H Cantrell. Acoustic nonlinearity in polycrystalline Nickel from fatigue-generated microstructures

- [J]. Review of QNDE, 2005(24):337—344.
- [17] John H Cantrell. Dependence of microelastic-plastic nonlinearity of martensitic stainless steel on fatigue damage accumulation[J]. Journal of Applied Physics, 2006(100):1—4.
- [18] 邓明晰, 裴俊峰. 无损评价固体板材疲劳损伤的非线性超声兰姆波方法[J]. 声学学报, 2008(33):360—369.
- [19] Peter B Nagy. Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization[J]. Ultrasonic, 1998(36):375—381.
- [20] Michele Meo, Umberto Polimeno, Giuseppe Zumpano. Detecting damage in composite material using nonlinear elastic wave spectroscopy methods[J]. Appl Compos Mater, 2008(15):115—126.
- [21] Aymerich F, Staszewski W J. Impact damage detection in composite laminates using nonlinear acoustic [J]. Composites, 2010(A41):1084—1092.
- [22] Kyung-Young Jhang, Kyung-Cho Kim. Evaluation of material degradation using nonlinear acoustic effect [J]. Ultrasonic, 1999(37):39—44.
- [23] Viswanath A. Nondestructive assessment of tensile properties of cold worked AISI type 304 stainless steel using nonlinear ultrasonic technique[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011(211):538—544.
- [24] Kim C S, Ik-Keun Park, Kyung-Young Jhang. Nonlinear ultrasonic characterization of thermal degradation in ferritic 2. 25 Cr-1 Mo steel[J]. NDT&E International, 2009(42):204—209.
- [25] Hyunjo Jeong A. Nondestructive method for estimation of the fracture toughness of CrMoV rotor steels based on ultrasonic nonlinearity[J]. Ultrasonic, 2003(41):543—549.
- [26] Koichiro Kawashima. Detection and imaging of non-metallic inclusions in continuously cast steel plates by higher harmonics[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2010(49):07HC—1—4.
- [27] Ayumu Osumi. A study of detecting internal defect in solid material using nonlinear aerial convergence ultrasonic waves[J]. Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 2011(32):511—512.
- [28] Shiro Biwa. Quantitative evaluation of harmonic generation at contacting interface[J]. ISNA, 2008(18):505—508.
- [29] Shiro Biwa. Pressure-dependent stiffness and nonlinear ultrasonic response of contacting surface [J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2009(3):10—21.
- [30] Toshihiro Ohtani. Nonlinear acoustic evaluation of creep damage in boiler heat exchange tubes[J]. Japan Journal of Applied Physics, 2007(46):4577—4582.
- [31] Minghe Liu. Experimental study of nonlinear rayleigh wave propagation in shot-peened aluminum plates-feasibility of measuring residual stress[J]. NDT&E International, 2011(44):67—74.
- [32] 常俊杰. 超声波的非线性对涂层材料的质量评价[J]. 大连海事大学学报, 2008(34):7—10.

(上接第 52 页)

以将 SQL 语句中 ACQ 替换成 PRI, SEC, TER, RES, 即可统计一道分析人员, 二道分析人员, 轮廓曲线分析人员和最终分析人员的工作量。

3 总结

文章讨论了核电站蒸汽发生器传热管涡流检验数据库的设计与实现。简要介绍了数据库的设计原则及构成数据库的数据表, 并基于关系数据库的特征定义了数据表间的关联方式, 同时介绍了数据的插入、更新与删除。最后利用 SQL Plus 工具, 列举了检查结果查询、检查状态查询、旋转探头复测查询及工作量统计的例子。后续工作将从提高数据的有效性和效率方面优化和改进数据库的设计。

参考文献:

- [1] 刘一舟, 严智, 叶琛, 等. 蒸汽发生器检测技术的发展

[J]. 压力容器, 2010, 27(7):31—36.

- [2] 贝雅耀, 李晓光, 宋涛. 蒸汽发生器传热管涡流数据自动分析技术[J]. 无损检测, 2009, 31(10):769—772.
- [3] Kline Kevin E, Kline Daniel, Hunt Brand. SQL 技术手册: 第三版[M]. 李红军, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009:1—3.
- [4] 曹永娜, 武法东. 基于 MapGIS 的油田勘探开发图文信息管理数据库的设计与实现[J]. 石油工业计算机应用, 2011(1):48—51.
- [5] Wilton Paul, Colby John. SQL 入门经典[M]. 敖富江, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006:7—8.
- [6] Elmasri Ramez, Navathe Shamkant B. 数据库系统基础[M]. 邵佩英, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2002:143—145.
- [7] 王珊, 萨师焯. 数据库系统概论: 第四版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006:170.