

基于波动理论的管结构损伤检测方法

孙海蛟,林哲,赵德有

(大连理工大学运载工程与力学学部船舶工程学院,大连 116024)

摘要:针对在役海洋平台的无损检测大都采用超声等主动检测手段,这会受到工况的影响。而声发射等被动检测手段避免了这一问题,实现了对现役海洋平台的在线监测。综述了基于瞬态波、应力波、导波和模态声发射等波动理论进行的管结构声发射检测研究成果。对基于波动理论进行复杂结构检测的前景做了展望。

关键词:声发射检测;波动;管结构

中图分类号:TG115.28

文献标识码:A

文章编号:1000-6656(2009)01-0068-04

Detecting Method of Tube Defect Based on the Wave Motion Theory

SUN Hai-Jiao, LIN Zhe, ZHAO De-You

(Department of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

Abstract: At present, the most widely applied method for offshore platform detection is active detection method, such as ultrasonic testing, but the working conditions will have impact on it. The passive detection, such as acoustic emission(AE), avoid this problem, the on-line detection to the offshore platform is realized. Description was made of the results of transient wave, stress wave, guide wave and modal acoustic emission for the tube testing based on wave motion theory. The detection to the complex structure based on wave motion theory was expected.

Keywords: Acoustic emission testing; Wave motion; Tube

目前,声发射检测大部分集中在参数分析方法上,但该检测方法存在较大的缺点,如它所接收到的信号受传感器噪声影响较大,一般只能做到缺陷的定位及简单的判别,不能确定 AE 源的其它性质,如缺陷的类型和程度等。波形分析方法^[1-3]则可以比较全面地揭示这些信息,其在声发射基本理论研究和工程实践中具有广阔的应用前景。

对声发射的研究涉及瞬态波、应力波、导波和模态声发射等波动问题,利用波动理论对简单管结构的缺陷检测已取得了丰富的研究成果。为此,笔者介绍了管道、圆柱壳等波动理论的研究成果,以期待对海洋平台领域的声发射检测研究提供新的思路和方法。

收稿日期:2008-02-26

基金项目:国家自然科学基金(50479060)

作者简介:孙海蛟(1977—),男,博士研究生,主要从事船舶与海洋工程结构物振动与噪声控制方法研究。

1 瞬态波

声发射是当材料破坏时产生的一种瞬态波动,因此,瞬态波动理论对研究声发射有借鉴意义。

腾宁钧等人^[4]利用广义射线法研究了 Timoshenko 型圆柱壳受对称冲击载荷作用时的弹性瞬态波的传播过程,将由波源发出的在某个瞬时到达接受点的波分解为直接到达、经过一次反射到达、经过两次反射到达、……、到经 N 次反射到达的波叠加而成,为壳体瞬态波的研究提供了有益的思路。

吴斌等人^[5]对计及剪切变形和转动惯性效应的有限长正交各向异性圆柱壳受冲击扭矩作用的问题进行了研究,指出冲击扭矩作用下剪力随时间的变化规律与纵波模型类似,经固定端反射后剪力加倍,此处为材料最易破坏的地方。

吴斌^[6]用特征线法研究了正交各向异性复合材料圆柱壳受冲击载荷作用的弹性波传播问题。说明随着角度(复合材料纤维与主曲率)的变化,即使只

受轴向冲击载荷作用,圆柱壳内力仍会产生耦合作用,使研究问题变得复杂。

李永池^[7]用粘弹比拟法研究了层合板中的瞬态波的传播问题。

田家勇等人^[8]利用改进的回转矩阵法对钢架结构中的瞬态波的传播进行了研究,并指出节点阻尼对弹性波传播的影响不可忽略。

2 应力波

应力波检测技术源于声发射思想,与声发射不同之处在于,它是一种主动检测手段。应力波技术自1976年由Egle等人提出以后,在各个学科领域,受到了许多学者的关注,进行了大量的研究和实验工作,并得到了许多有意义的结果。

Henneke等人^[9]研究监控疲劳载荷下的损伤比时提出了功率谱方法,结果表明采用功率谱法比采用刚度法效果更好。

王秀彦等人^[10]研究了轴对称加载条件下,有缺陷和无缺陷的管道中应力波的传播特性。研究中采用力锤激励,测量采用动态应变电测法。结果表明,在实验室条件下,金属管道中激励波的传播距离可达两百米以上。这种方法有可能用来实现管道的长距离检测;但由于缺陷较小,实验得到的时域信号中难以直接观察到缺陷回波,因此对缺陷的检测还需要进一步的研究。

周洪梅等人^[11]对输油管道中微弱应力波信号检测进行了研究,应用应力波检测的原理对人为破坏管道进行监测。采用主站-基站主从式无线通讯的方式,进行数据的传输以及溢油的报警定位,检测距离可达1 km。

柴华友等人^[12]进行了应力波在平台的桩系统中传播的试验研究。通过对平台上完整桩实测波形与异常桩波形进行比较和识别,并根据桩侧面测点及平台表面测点走时、相位和幅值间的信号比较,辨别桩身反射波信号。

3 导波

实际工程结构许多都是板、管等,很薄且有界介质,界面对体内传播的波动能施加影响。初始波和界面反射波有时可能形成新的波动,具有自己独特的传播特性,这种波称为导波。

20世纪50年代,Denos C Gazis对无限长空心圆柱壳中的导波传播规律进行了细致的理论推导,

于1959年发表了关于无限长圆柱壳中导波的传播规律的论文^[13]。论文讨论了自由应力边界条件下的解,以此奠定了管路导波研究基础。之后,大部分的导波研究都是在Gazis的理论基础上的发展。

Gazis的理论由以下波动方程入手:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}$$

式中 \mathbf{u} 表示位移; ρ 表示密度; λ 和 μ 为拉梅常数。将 \mathbf{u} 分解为 $\mathbf{u} = \nabla \phi + \nabla \times \mathbf{H}$ (ϕ 为; \mathbf{H} 为), 并进行推导变换, 使方程组变为 Bessel 方程形式, 从而得到波动方程的解。在应力自由边界条件 $\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{zz} = 0$ ($r=a, r=b$) 下, 推导出了经典的无限长空心圆柱壳中的导波频散方程 $|c|/66 = 0$ 。据此提出了管道中存在的三种导波模式, 即轴对称纵波 $L(0, m)$ 、轴对称扭转波 $T(0, m)$ 和非轴对称弯曲波 $F(n, m)$, ($n, m=1, 2, 3, 4, \dots$)。

对应于这三种导波模式, 每种都有无限多个对应的模态。而围绕这三种模式, 国内外的学者都做了很多的研究工作, 由于非对称弯曲波较其它两种模式的波复杂得多, 研究起来较为困难, 所以大多数还是集中在对 $n=0$ 的轴对称纵波与扭转波的研究。

Allen H Meitzler^[14]研究了导线中的弹性脉冲传播的模态耦合, 提出了高阶弯曲模态在确定临界频率时作用较大, 不可忽略; 提出了任意各项同性介质中利用各模态相速度的计算来确定临界频率区域的方法; 提出了 $L(0, 1)$ 模态的应用价值。

Chretien N^[15]利用导波理论研究了圆柱形铝棒的电解问题, 提出利用各模态的频谱来评价各个模态贡献的方法, 并且提出了传感器的位置影响问题。

Silk M G 等人^[16]在对热交换管道研究中, 讨论了 $L(0, 1)$ 和 $L(0, 2)$ 模态的差异; 文中对 U型管和直管进行了对比实验, 提出了各模式在两种管中传播上的差异。

Rose Joseph L^[17]对轴对称模式导波和非轴对称模式导波在空心圆柱体中的传播进行研究。研究表明, 可以利用非轴对称的局部载荷方法激励轴对称的导波模式。

杨湖等人^[18]进行了管道裂纹纵向超声导波检测仿真研究, 讨论了 $L(0, 1)$ 和 $L(0, 2)$ 模态的特性, 进行了仿真计算, 提出纵向超声导波可对有障碍物覆盖和阻碍物遮挡的管道进行长距离、有效和省时的在线检测。

程载斌等人^[19]进行了管道超声纵向导波裂纹检测数值模拟的研究。利用 Ansys 有限元计算软

件,通过对管道一端端部周向各节点施加轴向瞬时位移载荷模拟纵向入射应力波,同端接收反射应力波,根据裂纹纵波回波信号到达时间判断裂纹位置。

周义清等人^[20]同样进行了超声纵向导波检测管道裂纹的数值模拟研究,研究了单、双裂纹情况,通过对接收信号位置处周向各节点的位移时程曲线进行简单叠加,消除弯曲波的影响,确定裂纹回波和末端回波的位置。

Lowe 等人^[21]应用导波方法对带小开口的管进行了试验研究和有限元分析。研究表明, $F(1,3)$ 模式的反射系数对切口占管径的百分比呈正弦变化, 百分比为 50% 时, 反射系数最大, 而此时 $F(2,3)$ 模式的反射系数为零。文中同时讨论了焊缝的影响, 并对对接焊缝的两根管进行了研究。当 $L(0,2)$ 激发时, 除产生 $L(0,2)$ 模式外, 很可能引发出较为明显的 $F(1,3)$ 模式。因此对有焊缝的管当切口较短时, $F(1,3)$ 模式和 $L(0,2)$ 模式同样重要。

北京工业大学的何存富教授等人^[22,23]针对 90° 弯管进行了超声导波的研究, 并对 $L(0,2)$ 模式的弯管透射系数进行了研究与试验。分析结果表明 $L(0,2)$ 模式过弯管时会发生模式转换, 产生 $F(1,3)$ 模式。

4 模态声发射

模态声发射(MAE)最早称为板波声发射(PWAE), 它是利用兰姆波理论研究板中 AE 波的特点, 从而将 AE 波形与特定的物理过程相联系^[24]。

模态声发射(MAE)自 20 世纪 90 年代初期问世以来, 便迅速得到应用。利用模态声发射技术可以对声发射信号做出合理的噪声分离、合理的源特性解释, 有可能实现准确的源定位。

Surgeon 等人^[25]对 CFRP 薄板的声发射信号进行了模式分析, 说明了模态声发射的有效性。

耿荣生等^[26]对模态声发射做了较为系统的阐述, 并且对 MAE 在航天和腐蚀等领域的应用做了初步研究, 指出了 MAE 技术面临的难题, 即其需要对 AE 源机制有比较深刻的理解; 另外, 由于建立的 MAE 模型过于简单, 很难用于解决实际工程问题。

李耀东等^[27]结合模态声发射与参数分析方法的特点, 对疲劳裂纹检测进行了研究, 说明了该方法的可行性。

5 总结

上述几种波动理论中, 应力波和模态声发射检测在工程领域中已经得到了应用。而受到理论方面的影响, 如复杂结构中波的传播规律研究, 目前尚未有合适的理论模型来进行准确的描述, 因此, 其应用也受到了一定的限制。在瞬态波研究方面, 它能够对波源和波动的传播有比较清晰的刻画, 但是其研究方向主要集中在圆柱壳体方面, 对于复杂情况的分析则受到限制; 在导波研究方面, 理论与试验方法有了较大的进展, 但是这些研究在无损检测方面主要集中在主动检测研究上, 同样的, 导波对于处理复杂结构也尚未形成有效的方法。

可见, 对导管架式海洋平台的声发射检测应用仍处于起步阶段。声发射检测过程中基于瞬态波、应力波、导波及模态声发射等波动理论的研究仍需进一步展开及深入, 集中表现在以下几方面:

(1) 主要集中于直管等简单结构的波传播规律研究, 仅少数文献对单个弯管等问题进行了探讨, 对复杂管结构的研究尚未见报道。而从工程应用的角度考虑, 开展基于波动理论的复杂管结构检测研究更为必要。

(2) 超声导波和应力波检测的研究已经取得了很多的成果, 而模态声发射的研究还较少, 在这方面可以进行深入的研究。

(3) 对于导波模式的选取, 大都集中在 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$, 对 $F(n,m)$ 模式仍处于探讨阶段。

(4) 导波检测中传感器的布置优化问题, 尤其是超声导波检测, 传感器的布置对结果的准确性有很大的制约。

(5) 利用管道中微弱应力波信号检测对人为破坏管道进行监测, 检测距离可达 1 km。利用应力波对缺陷进行长距离的检测也是一个研究方向。

(6) 配合上述各种方法, 进一步进行仿真计算。

参考文献:

- [1] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 基于波形分析的声发射信号处理技术[J]. 无损检测, 2006, 24(6): 257—261.
- [2] 李光海, 刘时风. 基于小波分析的声发射源定位技术[J]. 机械工程学报, 2004, 40(7): 136—140.
- [3] 耿荣生, 景鹏, 付刚强. 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—296.
- [4] 腾宁钧, 苏先樾, 王仁. 有限长圆柱壳中轴对称弹性

- 瞬态波[J]. 力学学报, 1992, 24(6): 680—690.
- [5] 吴斌, 张善元, 杨桂通. 有限长正交异性圆柱壳受冲击扭矩作用的弹性波传播[J]. 太原工业大学学报, 1997, 28(2): 49—108.
- [6] 李永池, 陈力, 唐之景. 瞬态波在层合板中传播的粘弹比拟法[J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(2): 97—108.
- [7] 吴斌, 何存富. 复合材料圆柱壳受轴向冲击的弹性波传播[J]. 2001, 27(4): 29.
- [8] 田家勇, 苏先樾. 刚架结构中的瞬态波的传播[J]. 爆炸与冲击, 2001, 24(2): 500—504.
- [9] Tang B, Henneke E G II. Lamb wave monitoring of axial stiffness reduction of laminated composite plates [J]. The Journal of American Society for Nondestructive Testing, 1989, 47(8): 928—934.
- [10] 王秀彦, 金山, 李涌, 等. 应力波在管道中传播的实验研究[J]. 实验力学, 2004, 19(1): 97—102.
- [11] 周洪梅, 陈仁文, 张勇. 输油管道中微弱应力波信号检测的研究[J]. 测试技术学报, 2004, 18(1): 29—33.
- [12] 柴华友, 刘明贵, 李祺, 等. 应力波在平台—桩系统中传播的实验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 6.
- [13] Denos C, Gazis. Three-dimensional investigation of the propagation of wave in hollow circular cylinders [J]. The Journal of The Acoustical Society of America, 1959, 31(5): 568—573.
- [14] Allen H Meitzler. Mode coupling occurring in the propagation of elastic pulse in wires[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1961, 33(4): 433—445.
- [15] Chretien N. Stress wave propagation from electrical discharge on cylindrical aluminum rod[J]. Ultrasonics, 1978, 16(2): 69—76.
- [16] Silk M G, Bainton K F. The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to lamb waves[J].
- (上接第 67 页)
- Horng, et al. Noise characteristics of high T_c YBa₂Cu₃O SQUID gradiometers [J]. Physica C, 2002, 367: 290—294.
- [41] 丁红胜, 韩冰, 陈赓华, 等. 一种抑制市电对高温 SQUID 干扰的新方法[J]. 物理学报, 2002, 51(2): 220—224.
- [42] Panaitov G, Krause H J, Zhang Y. Pulsed eddy current transient technique with HTS SQUID magnetometer for non destructive evaluation[J]. Physica C, 2002, 372—376: 278—281.
- [43] 白世武, 丁红胜. 直流超导量子干涉器无损检测的原理与应用[J]. 无损检测, 2005, 28(5): 242—245.
- [44] 丁红胜, 孙景春, 何豫生, 等. 高温超导量子干涉器在 waves[J]. Ultrasonics, 1979, 17(1): 11—19.
- [17] Hyeyon Jae Shin, Rose, Joseph L. Guided waves generated by asymmetric and non—asymmetric surface loading on hollow cylinders[J]. Ultrasonics, 1999, 37(5): 355—363.
- [18] 杨湖, 王成. 管道裂纹纵向超声导波检测仿真研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(4): 348—351.
- [19] 程载斌, 王志华, 张立军, 等. 管道超声纵向导波裂纹检测数值模拟[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2004, 21(4): 258—262.
- [20] 周义清, 王志华, 马宏伟. 超声纵向导波进行管道裂纹检测的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(3): 76—79.
- [21] Lowe M J S, Alleyne D N, Cawley P. The mode conversion of a guided wave by a part—circumferential notch in a pipe[J]. Journal of Applied Mechanics, 1998, 65(9): 649—655.
- [22] 王秀彦, 刘增华, 孙雅欣, 等. 弯管中超声导波特性的研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(9): 773—777.
- [23] 何存富, 孙雅欣, 刘增华, 等. 弯管缺陷超声导波检测的有限元分析[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(4): 289—294.
- [24] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 模态声发射基本理论[J]. 无损检测, 2007, 24(7): 302—306.
- [25] Surgeon M, Wevers M. Modal analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates[J]. NDT&E, 1999, 32(6): 311—22.
- [26] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 模态声发射—声发射信号处理的得力工具[J]. 无损检测, 2007, 24(8): 341—345.
- [27] 李耀东, 黄成祥, 侯力. 模态声发射技术在构件疲劳裂纹检测中的应用[J]. 振动与冲击, 2005, 28(2): 122.
- 无损检测中的应用研究[J]. 测试技术学报, 2004, 18(4): 311—315.
- [45] Yoshimi Hatsukade, Tomohiro Inaba, Yoshio Maruno, et al. Mobile cryocooler based SQUID NDE system utilizing active magnetic shielding [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 723—728.
- [46] Isawa K, Nakayama S, Ikeda M, et al. Robotic 3D SQUID imaging system for practical nondestructive evaluation applications[J]. Physica C, 2005, 432: 182—192.
- [47] Lee S M, Lee H J, Choi D J, et al. A four channel HTS SQUID NDE system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003, 13(2): 203—206.