

激光超声波成像技术在奥氏体不锈钢焊缝检测中的研究

曾 伟¹ 王海涛¹ 田贵云^{1,2} 汪 文¹ 王 晓¹ 胡国星¹

(¹ 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016

² 纽卡斯尔大学电气与电子工程学院, 纽卡斯尔 EU1 7RU 英国)

摘要 提出一种激光超声波成像技术对奥氏体不锈钢焊缝中的人工缺陷进行检测, 利用 Nd:YAG 脉冲激光器对奥氏体不锈钢焊缝进行扫查, 对接收到的超声波信号进行离散正弦/余弦变换(DST/DCT)和希尔伯特变换(HT)。常规的超声波成像方法不能有效检测焊缝边界及焊缝中的人工缺陷, 采取离散正弦/余弦变换和希尔伯特变换相结合的激光超声波成像技术不仅能直观、高效地检测出焊缝边界, 而且对焊缝中的缺陷位置、大小及形状等也能有效检测。离散正弦/余弦变换和希尔伯特变换的激光超声波成像技术为焊缝缺陷中的定量检测提供了基础。

关键词 激光技术; 激光超声成像; 奥氏体不锈钢焊缝; 缺陷; 离散正弦/余弦变换和希尔伯特变换; 定量检测
中图分类号 TN249; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0703004

Research on Laser Ultrasound Imaging in Detection of Austenitic Stainless Steel Weld

Zeng Wei¹ Wang Haitao¹ Tian Guiyun^{1,2} Wang Wen¹ Wang Xiao¹ Hu Guoxing¹

(¹ College of Automation Engineering, Nanning University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

² School of Electrical and Electronic Engineering, Newcastle University, Newcastle NE1 7RU, UK)

Abstract A technique of laser ultrasonic imaging is proposed to detect austenitic stainless steel weld with artificial defects. Austenitic stainless steel weld is scanned using the pulse of Nd:YAG laser, and the received ultrasonic wave is transformed by discrete sine/cosine transform (DST/DCT) and Hilbert transform (HT). The conventional ultrasound imaging method can not effectively detect the weld edge and the artificial defect, however, laser ultrasound imaging technology, which combines DST/DCT and HT, can not only directly and efficiently detect the weld edge, but can also detect the location, the shape and the size of damage in the weld. Therefore, the laser ultrasound imaging technology based on the discrete sine/cosine transform and Hilbert transform provides the basis for quantitative detection.

Key words laser technique; laser ultrasound imaging; austenitic stainless steel weld; defects; discrete sine/cosine transform and Hilbert transform; quantitative detection

OCIS codes 140.3538; 140.3540; 140.3460

1 引 言

奥氏体不锈钢因其结构具有较好的耐热性、耐腐蚀性及较佳的工艺性能, 在核工业、电力、航空航天等领域得到广泛使用。奥氏体不锈钢材料主要采

取焊接等方法制造, 其焊接部位质量受到焊接工艺、焊接尺寸及残余应力等多种因素的影响^[1]。焊缝的常见缺陷有气孔、夹渣、未熔合及裂纹缺陷等, 这些缺陷直接影响到焊接结构的性能、可靠性及使用寿

收稿日期: 2013-11-18; **收到修改稿日期**: 2014-01-14

基金项目: 国家科技部国际合作项目(2011DER71080)、欧盟 FP7 项目(FP7-PEOPLE-2010-IRSES 269202)

作者简介: 曾 伟(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事激光超声波检测技术方面的研究。E-mail: 270401671@qq.com

导师简介: 田贵云(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事传感器技术、电磁与电磁超声无损检测与评估、数字信号处理等方面的研究。E-mail: tian280@hotmail.com

命,为了保证焊接结构件的安全运行,需要对其焊接部位进行无损检测。

常见的无损检测方法有超声、磁粉、射线、电磁等,其中,超声检测^[2-4]和射线检测^[5]是焊缝缺陷检测中应用最为广泛的检测方法。超声检测技术在检测奥氏体焊缝时,经常由于焊接部位材料晶粒散射噪声大,其超声波信号衰减严重。相控阵技术^[6-7]和超声衍射时差(TOFD)检测法^[8]是焊缝检测中常见的两种超声检测技术。Yoshihiko等^[9]采取相控阵方法检测管道中的焊缝缺陷,尽管相控阵技术和超声 TOFD 检测法能准确地检测出焊缝中的缺陷大小和位置,但是这些技术都不适合于对一些大面积、弯曲或不规则的曲面进行检测。

激光超声波成像技术^[10-13]作为一种将激光技术^[14-16]和超声技术相结合的交叉学科,不仅具有传统超声检测技术特性,而且具有非接触性,可实现对被测试件进行大面积、快速扫描成像。Yashiro等^[17]提出采取激光超声波成像技术对焊缝中的气孔、夹渣、未熔合及裂纹缺陷等缺陷进行成像检测,该方法可以有效地对缺陷进行位置检测,但是对缺陷的大小无法进行检测。因此,针对缺陷大小无法检测这一问题,提出了一种离散正弦/余弦变换(DST/DCT)和希尔伯特变换(HT)相结合的激光超声波成像技术。采取这种超声波成像技术对奥氏体不锈钢焊缝进行二维扫描检测。实验结果表明,这种超声波成像技术能有效地对焊缝边缘和焊缝中的人工缺陷大小及其位置进行图像化检测。

2 激光超声波检测系统

激光超声波检测系统示意图如图 1 所示,该激光超声波传播检测系统主要包括:波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 脉冲激光器、控制脉冲激光器和二维动镜(LMS)及采集卡的控制器、二维动镜、超声波传感器、放大器及模拟数字转换(A/D)采集卡等。脉

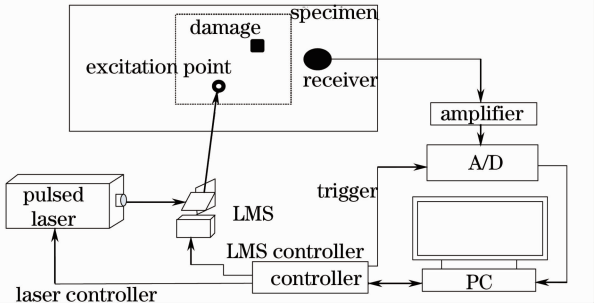


图 1 激光超声波检测系统示意图

Fig. 1 Schematic of laser ultrasonic inspection system

冲激光器的最大重复频率为 20 Hz,其激光束直径小于 0.5 mm,接收端选取一个中心频率为 2 MHz 的超声波传感器。其主要工作原理为,将 Nd:YAG 脉冲激光器产生的激光束通过扫描动镜,通过动镜偏转改变激光辐照于被测物体的位置,以达到对被测件扫描的目的,实验过程中将激光器的能量控制于热弹机制中。

实验过程中采取奥氏体不锈钢焊缝试块,激光器扫描示意图如图 2 所示,检测试块尺寸为 400 mm×200 mm×20 mm,焊缝采用 U 型坡口,焊缝结构为粗晶奥氏体,在 U 型焊缝中加工了矩形凹槽缺陷。图 2 为激光器对奥氏体不锈钢焊缝的扫描示意图,从图 2 中可知,超声波传感器距离扫描区域为 20 mm,选取大小为 1 mm×5 mm×3mm 和 1 mm×3 mm×2mm 的凹槽缺陷及半径为 1 mm 的圆孔缺陷进行实验,扫描区域为 10 mm×20 mm 的矩形区域。在扫描过程中,每个扫描点的间距为 0.2 mm,因此,总的扫描点为 101×51,在整个扫描过程中,高速 A/D 采集卡接收采集到的超声波信号为 5151 个。实验过程中,采集卡的采样频率设置为 25 MHz,采样点为 500,总的采样时间为 20 μs,并采用 1~3 M 带通软件对超声波信号进行滤波。

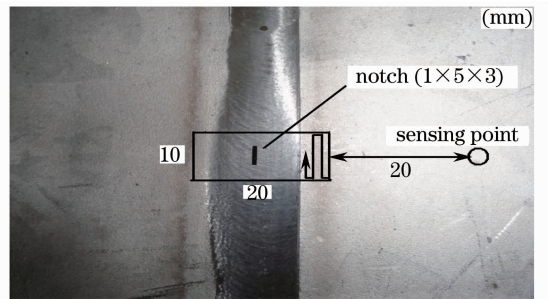


图 2 激光器扫描示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser scanning

根据超声波传播的互易原理,当激光超声波接收端与激光激发点位置固定时,交换超声波接收端与激光激发点位置,所接收到的超声波信号不变。

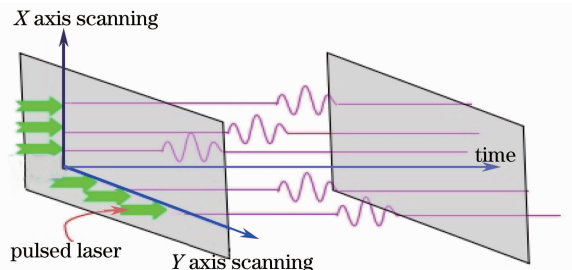


图 3 激光超声波传播成像方法

Fig. 3 Laser ultrasonic propagation imaging method

因此,根据超声波传播的互易原理,得到了激光超声波传播成像方法,如图3所示,将激光器在扫描区域内各点所得到的超声波信号存储于 (X, Y, t) 中,从而得到不同时刻的超声波在扫描区域的传播图像。

3 离散正弦(余弦)变换和希尔伯特算法

离散正弦(余弦)变换是以实数作为变换核的一种变换,类似于傅里叶变换,亦可作为一种主要的分析连续和离散信号和系统的分析工具。离散正弦(余弦)分析方法提供了一种把时域信号转换到类似频域进行分析的途径,是一种时频完全分离的方法。对于给定的 N 点超声波离散信号 $x(0), x(1), \dots, x(n)$,其超声信号的离散正弦变换(DST)定义为

$$y(k) = a(k) \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left[\frac{\pi(2n+1)k}{2N}\right], \quad (1)$$

式中 $a(k)$ 为采集的 k 点处超声波信号幅值, $0 < k \leq 500$ 。其超声信号的离散余弦变换(DCT)定义为

$$z(k) = a(k) \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left[\frac{\pi(2n+1)k}{2N}\right]. \quad (2)$$

希尔伯特变换主要揭示了响应信号由傅里叶变换后时域与频域之间的互换关系^[18],其变换不受傅

里叶分析的局限,其响应信号经希尔伯特变换后,能反映出响应信号的时频图、幅值谱和时频谱,具有较好的局部适应性。利用希尔伯特变换得到超声波信号在被测材料的时域信号包络线。对于任意连续超声波信号 $V(t)$,可得到它的希尔伯特变换 $U(t)$ 为

$$U(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{V(\tau)}{t-\tau} d\tau. \quad (3)$$

$V(t)$ 与 $U(t)$ 为复数共轭对,其解析信号为

$$A(t) = V(t) + jU(t) = R(t) \exp[j\theta(t)], \quad (4)$$

式中 $R(t)$ 为 $V(t)$ 的外包络线, $\theta(t)$ 为瞬时相位,则

$$R(t) = \sqrt{V^2(t) + U^2(t)}, \quad (5)$$

$$\theta(t) = \arctan \frac{U(t)}{V(t)}. \quad (6)$$

图4(a)为某点接收的超声波信号时域图,从图中可以看出所检测的超声波信号,并且在 $t = 19 \mu\text{s}$ 处可以检测到焊缝凹槽产生的缺陷回波信号。根据离散正弦变换,将接收到的超声波信号转化成类似时频信号图,如图4(b)所示。图4(c)为所接收到的超声波信号经离散正弦变换后的正向包络图。

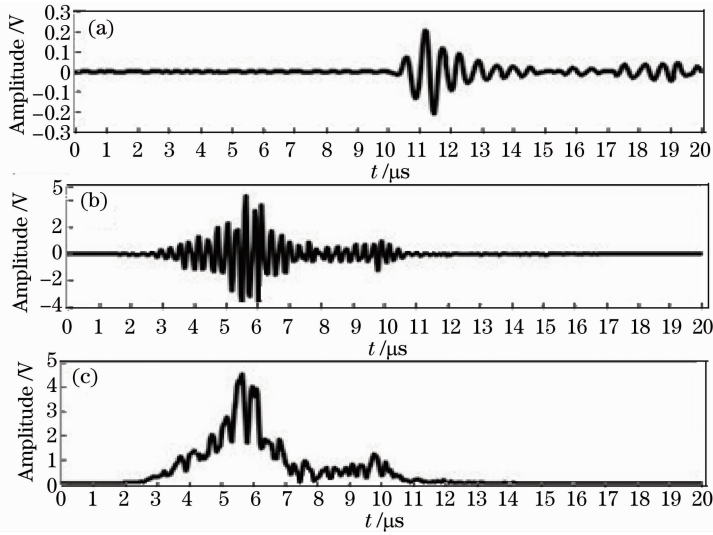


图4 超声波变换。(a) 时域信号;(b) 离散正弦变换后信号;(c) 离散正弦-希尔伯特变换后信号

Fig. 4 Ultrasonic data in transform domain. (a) Time-domain signal; (b) DST transform domain signal; (c) DST-Hilbert transform domain signal

4 实验结果与讨论

图5为超声波信号在奥氏体不锈钢焊缝中的传播图像,从图中可以看出,超声波的传播方向为从右到左。当 $t = 11.92 \mu\text{s}$ 时,超声波在不锈钢焊缝边缘传播平稳,这是由于焊缝边缘处的物质晶粒均匀,因此信号在表面传播平稳。但是当 $t = 12.92 \mu\text{s}$

时,此时超声波刚好传播到焊缝边缘,由于焊缝边缘处的物质晶粒发生了变化,因此,焊缝边缘处的超声波信号幅值发生变化。当 $t = 15.28 \mu\text{s}$ 时,超声波信号刚好传播到焊缝处的凹槽缺陷,可以发现其凹槽处的超声波信号发生急剧变化,由于凹槽缺陷的作用,超声波信号无法传播到缺陷的另一侧。随着

传播时间的增加,当 $t=16.48 \mu\text{s}$ 时,从图形可以看出,凹槽缺陷产生了回波信号。但是,从不同时刻的超声波传播图像中可以看出,由于奥氏体不锈钢焊缝晶粒颗粒的作用,超声波信号在焊缝边缘处发生

变化,无法对焊缝中凹槽缺陷的位置和大小进行检测。因此,提出了采用离散正弦变换和希尔伯特变换对超声波信号进行数据处理。

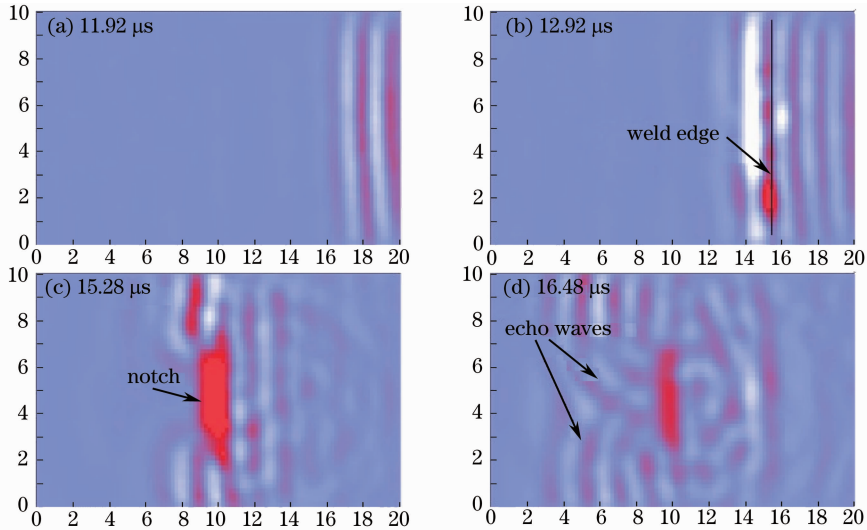


图 5 不同时刻超声波传播图像

Fig. 5 Ultrasonic wave propagation images at different propagation time

图 6 为采取离散正弦变换后,超声波信号在奥氏体不锈钢焊缝中的传播图像,从图中可以看出,超声波信号在奥氏体不锈钢中传播时,由于受到焊缝中凹槽缺陷的作用,在超声波传播方向的一侧,其信号幅值发生急剧增加,这是由超声波信号与缺陷产生的回波信号相叠加产生的。采取离散正弦变换的超声波传播图像,可以比较清晰地看出在凹槽缺陷边界,超声波信号出现断续,超声波无法向凹槽缺陷的另一侧进行传播,但是这种变换无法对凹槽缺陷的大小和形状进行检测。因此,采取离散正弦变换后,需要利用希尔伯特变换对超声波信号进行处理。

3 mm的凹槽缺陷的作用,超声波无法向前传播。从图 7 和图 8 中可以看出,在超声波的传播图像中出现了尺寸约为 $1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 和 $1 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的凹槽缺陷,与实际实验过程中凹槽的大小相一致,在凹槽缺陷的另一侧的超声波信号幅值较低。

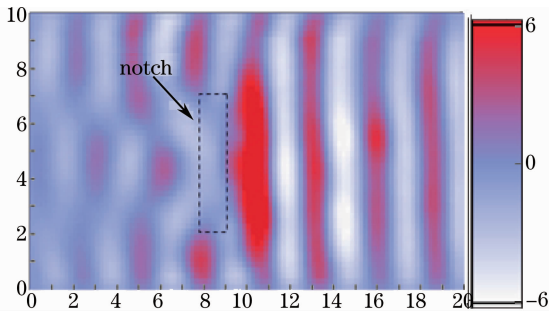


图 6 不锈钢焊缝超声波传播图像(离散正弦变换)

Fig. 6 Ultrasonic wave propagation image (discrete sine transformed) in stainless steel weld

图 7 和图 8 分别为采取离散正弦和希尔伯特变换后的超声波信号在不锈钢焊缝中的传播图像,受到焊缝中尺寸分别为 $1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 和 $1 \text{ mm} \times$

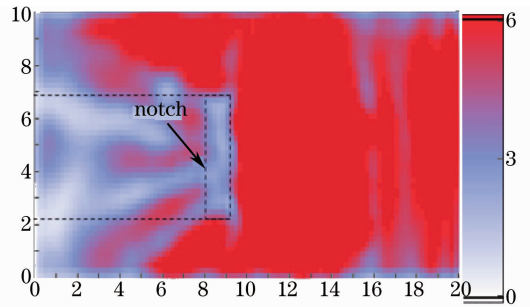


图 7 超声波传播图像(离散正弦-希尔伯特变换,凹槽缺陷 $1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$)

Fig. 7 Ultrasonic wave propagation image (discrete sine-Hilbert transformed, with a $1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ notch)

图 9 为采取离散正弦和希尔伯特变换后的超声波信号在不锈钢焊缝中的传播图像,从图中可以看出,在超声波的传播图像中出现了尺寸约为 $\phi 2 \text{ mm}$ 的圆孔缺陷,与实际实验过程中圆孔大小相一致,因此,采取离散正弦和希尔伯特变换的超声波成像技术,不仅能检测奥氏体不锈钢焊缝缺陷的位置,而且能有效地对缺陷的大小进行定量检测。

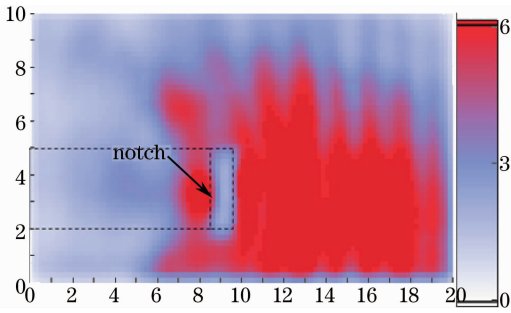


图 8 超声波传播图像(离散正弦-希尔伯特变换, 凹槽缺陷 1 mm×3 mm)

Fig. 8 Ultrasonic wave propagation image (discrete sine-Hilbert transformed, with a 1 mm×3 mm notch)

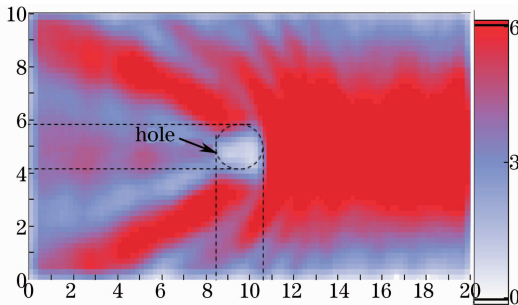


图 9 超声波传播图像(离散正弦-希尔伯特变换, 圆孔缺陷 ϕ 2 mm)

Fig. 9 Ultrasonic wave propagation image (discrete sine-Hilbert transformed, with a ϕ 2 mm hole)

5 结 论

提出了一种激光超声波成像技术对奥氏体不锈钢焊缝进行可视化检测,并利用离散正弦/余弦变换和希尔伯特变换进行数据处理,该数据处理方法不仅能对奥氏体不锈钢焊缝中的缺陷进行位置定位,而且能对缺陷的大小进行定量检测。

采用这种激光超声波成像技术不需要任何参考信号,就可以从具有缺陷的奥氏体不锈钢材料中提取出缺陷信息,从而实现焊缝缺陷的可视化检测,下一步将对奥氏体不锈钢焊缝的气孔、夹渣、未熔合等缺陷进行可视化检测。

参 考 文 献

- Han Zandong, Wang Bingfang, Yuan Keyi, *et al.*. Ultrasonic scanning imaging for austenitic thick-wall welds[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 9: 62-65.
韩赞东, 王柄方, 原可义, 等. 奥氏体厚壁焊缝超声扫描检测成像[J]. 材料工程, 2012, 9: 62-65.
- Y K Zhu, G Y Tian, R S Lu, *et al.*. A review of optical NDT technologies[J]. Sensors, 2011, 11(8): 7773-7798.
- Y Javadi, M Akhlaghi, M A Najafabadi, *et al.*. Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of

- aluminum plates[J]. Material & Design, 2013, 45: 628-642.
- R T Yekta, K Ghahremani, S Walbridge. Effect of quality control parameter variations on the fatigue performance of ultrasonic impact treated welds [J]. International Journal of Fatigue, 2013, 22(10): 145-156.
- E Padilla, N Chawla, L F Silva, *et al.*. Image analysis of cracks in the weld metal of a wet welded steel joint by three dimensional (3D) X-ray microtomography [J]. Materials Characterization, 2013, 83(9): 139-144.
- A Azema, F Angelini, B Mille, *et al.*. Ultrasonic phased array contribution to the knowledge of the flow fusion welding process used to make the Roman large bronze statues[J]. Welding in the World, 2013, 57(4): 477-486.
- Jian Li, Xianglin Zhan, Shijiu Jin. An automatic flaw classification method for ultrasonic phased array inspection of pipeline girth welds [J]. Insight: Non-Destructive Testing & Condition Monitoring, 2013, 55(6): 308-315.
- A Praveen, K Vijayarekha, S T Abraham, *et al.*. Signal quality enhancement using higher order wavelets for ultrasonic TOFD signals from austenitic stainless steel welds [J]. Ultrasonics, 2013, 53(7): 1288-1292.
- U Yoshihiko, S Ichinori, Y Yuichiro. Non-destructive inspection of welding defects in friction stir welds and prediction of their fatigue life[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2012, 30(3): 220-227.
- T E Michaels, J E Michaels. Application of acoustic wavefield imaging to non-contact ultrasonic inspection of bonded components [J]. AIP CP820-Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, 2006, 31(7): 1484-1491.
- W J Staszewski, B C Lee, R Traynor. Fatigue crack detection in metallic structures with Lamb waves and 3D laser vibrometry[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(3): 727-739.
- M N Salim, T Hayashi, M Murase, *et al.*. Visualization and modal analysis of guided waves from a defect in a pipe [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2009, 48(7): 1-5.
- M Ruzzene. Frequency-wavenumber domain filtering for improved damage visualization [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(6): 2116-2129.
- Xu Baiqiang, Yang Xiaoping, Xu Guidong, *et al.*. Theoretical model of singly-scattered laser-induced ultrasound in weak-scattering materials [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0303003.
许伯强, 杨小平, 徐桂东, 等. 弱散射材料中激光超声单散射理论模型[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303003.
- Li Jia, Ni Chenyin, Zhang Hongchao, *et al.*. Detection of micro-crack by ultrasonic approach of one-sided pitch-pitch method based on laser assisted heating [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0408008.
李加, 倪辰荫, 张宏超, 等. 基于激光辅助加热的激光超声投捕法识别微裂纹[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408008.
- Zeng Wei, Yang Xianming, Wang Haitao, *et al.*. Laser ultrasonic technology and its applications [J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(12): 49-52.
曾伟, 杨先明, 王海涛, 等. 激光超声技术及其应用[J]. 无损检测, 2013, 35(12): 49-52.
- Shigeki Yashiro, Nobuyuki Toyama, Junji Takatsubo, *et al.*. Laser-generation based imaging of ultrasonic wave propagation on welded steel plates and its application to defect detection [J]. Materials Transactions, 2010, 51(11): 2069-2075.
- N E Huang, Z Shen, S R Long, *et al.*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proc R Soc Lond, 1998, 454: 903-995.