

文章编号:1000-6893(2008)06-1705-05

超声换能器脉冲波声场数值计算与测试

徐圆飞, 徐春广, 肖定国, 张迪

(北京理工大学 机械与车辆工程学院, 北京 100081)

Computation and Measurement for Pulse Sound Field of Ultrasonic Transducer

Xu Yuanfei, Xu Chunguang, Xiao Dingguo, Zhang Di

(School of Mechanical and Vehicular, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘要: 对超声无损检测中影响缺陷检出率和缺陷评价准确性的换能器脉冲波声场分布特性进行了研究。提出了一种计算超声换能器脉冲波声场声压分布的新方法, 计算了不同带宽的换能器脉冲波声场声压分布。研制了测量换能器脉冲波声场的实验系统, 实验结果与通过理论计算得到的声场声压分布有较好的一致性。研究结果为仿真换能器脉冲波声场提供了一种新方法, 同时为提高超声检测的缺陷检出率和缺陷评价的准确性提供了理论依据。

关键词: 超声检测; 无损检测; 脉冲波声场; 声压分布; 连续波声场; 缺陷评价

中图分类号: TB551 **文献标识码:** A

Abstract: The distribution characteristics of the sound field of the pulse wave from an ultrasonic transducer are discussed. It is known that these characteristics influence greatly the ratio of flaw detection and the accuracy of flaw evaluation. A new method to calculate the distribution of sound pressure of a transducer pulse field is proposed. The distribution of sound pressures of transducers with different bandwidths is calculated. An experimental system for the measurement of the transducer pulse field is developed. The theoretically calculated results are in good agreement with the experimentally measured results. These results provide a new way for the simulation of transducer pulse fields and are also of theoretical value for the improvements of the ratio of flaw detection and the accuracy of flaw evaluation.

Key words: ultrasonic testing; non-destructive testing; sound field of pulse wave; distribution of sound pressure; sound field of continuing wave; flaw evaluation

在航空航天工业的无损检测领域中, 超声检测起着越来越重要的作用。超声检测是利用待测物的非声量(如缺陷、厚度、浓度、密度、弹性模量等)与超声换能器辐射的声场的量(如声压分布、声阻抗等)之间的直接或间接关系实现的^[1], 超声检测的结果和声场的性质密切相关, 所以掌握换能器声场性质的信息是至关重要的。在实际超声检测中, 普遍使用的是超声脉冲波而不是单频连续波, 所以国内外众多学者对超声脉冲波声场特性进行了广泛的研究。目前主要的计算换能器脉冲波声场的方法有基于连续波的 Helmholtz-Kirchhoff 积分公式的傅里叶变换^[2-4]和基于声压和声强关系的多频叠加^[5-9]。前一种方法可以得到整个声场声压分布的计算公式, 但只能得到换

能器脉冲波声场轴线上的声压分布的解析解, 在声轴线之外的区域很难求出解析解^[3]; 后一种方法可以得到整个声场的声压分布, 但需要在声场中每一个测量点处采集声场时域信号, 并通过傅里叶变换将其转换为频域信号, 然后通过声压和声强的关系, 由多个频率下的声压幅值叠加成脉冲波声场的声压幅值, 由于计算量大, 文献^[5-9]也只计算了超声换能器脉冲波声场轴线上的声压分布。

本文在基于对超声换能器单频连续波声场的研究下, 利用脉冲波声场和连续波声场之间的内在关系, 提出了一种可以计算换能器整个脉冲波声场的新方法, 此方法计算量小, 便于在计算机上快速实现。并研制了测量换能器脉冲波声场的实验系统, 对不同带宽的换能器脉冲波声场声压分布进行了理论计算和实验测量。实验结果表明该方法具有快速、准确等优点, 从而提高超声检测的缺陷检出率和缺陷评价的准确性提供了理论依

收稿日期: 2008-06-05; 修订日期: 2008-08-22
基金项目: 国防科学技术工业委员会“十一五”计量项目
(C21209120)
通讯作者: 徐圆飞 E-mail: evans_xu@bit.edu.cn

据,并可用于仿真换能器脉冲波声场声压分布。

1 换能器连续波声场声压分布数值计算

广泛用于无损检测中的圆形平面换能器可以用无限大障板上的圆形活塞声源来模拟,在 $z=0$ 平面上,用以原点 O 为圆心、以 a 为半径的圆来模拟声源,在声源以外是刚性的障板,法向位移为零,如图 1 所示。在声源向 $z>0$ 的半空间辐射单频连续波时,声源表面均匀振动,振速幅度为 V ,由 Helmholtz-Kirchhoff 积分定理可得声场中任意一点处的声压为^[2,10]

$$p(\mathbf{r}) = -i\omega\rho_0 V \iint_{|\rho|<a} \frac{\exp(ikR)}{2\pi R} d\mathbf{r}' \quad (1)$$

式中: ω 为角频率; ρ_0 为 $z>0$ 的半空间中介质的密度; k 为波数, $k=2\pi/\lambda$; $R=|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|$; ρ 为向量 \mathbf{r}' 的模;积分区域是声源的范围。

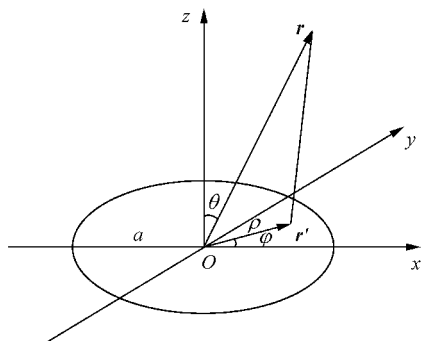


图 1 活塞声源示意图

Fig. 1 Piston acoustic source

如图 1 建立球坐标系,辐射声场关于 z 轴对称,采用 Fraunhofer 近似,则由式(1)可得

$$p(\mathbf{r}) = -i\omega\rho_0 a^2 V \frac{\exp(ikl)}{2l} \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (2)$$

式中: l 为向量 \mathbf{r} 的模; $J_1(ka \sin \theta)$ 为一阶贝塞尔函数。

当 \mathbf{r} 在轴线上时, $R^2 = z^2 + \rho^2$, $RdR = \rho d\rho$, 则式(1)即为

$$p(z) = -2iV\rho_0 c \exp\left(ik \frac{\sqrt{z^2 + a^2} + z}{2}\right) \sin\left(k \frac{\sqrt{z^2 + a^2} - z}{2}\right) \quad (3)$$

式中: c 为超声波在介质中的传播速度。

在 MATLAB 中应用式(3)编写程序计算圆形平面换能器 A (中心频率为 10 MHz, 半径为 3.175 mm) 辐射的单频连续波声场声轴线上的声

压振幅分布,为了方便比较,令 $V\rho_0 c = 1$, 在实际计算中,声场的声压分布是用声压振幅即 $|p(\mathbf{r})|$ 来表示,计算结果如图 2 所示。图中 N 为近场距离,由 $N = a^2/\lambda$ 决定,在近场距离处出现最后一个声压幅值的极大值,在近场距离后随着辐射距离的增加,声压幅值逐渐变小。应用式(2)计算换能器 A 在 Oxz 平面内的稳态连续波声场声压振幅分布,计算结果如图 3 所示。由图 3 可见,声压幅值随着声场向远处扩散而逐渐变小,声场中出现的主瓣旁瓣与文献中的一致^[10];在声场主瓣中,中心轴两侧的声压幅值大于中心轴上声压幅值,这是因为在偏离中心轴一个很小的角度 θ 时,式(2)中的除数 $ka \sin \theta$ 也很小,则由式(2)进行计算得到的结果将大于由式(3)计算的结果,这与文献[11]中图 4-27 所示一致。

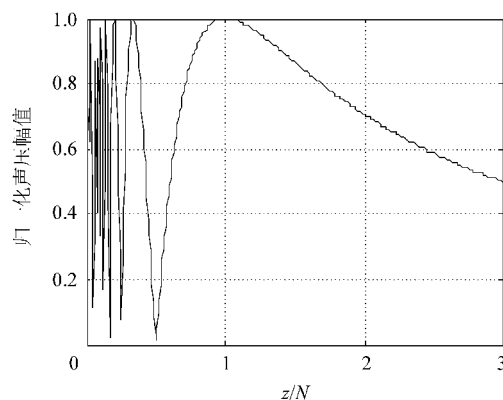


图 2 换能器连续波声场声轴线上声压分布

Fig. 2 Distribution of sound pressure on axis of transducer emitting continuous wave

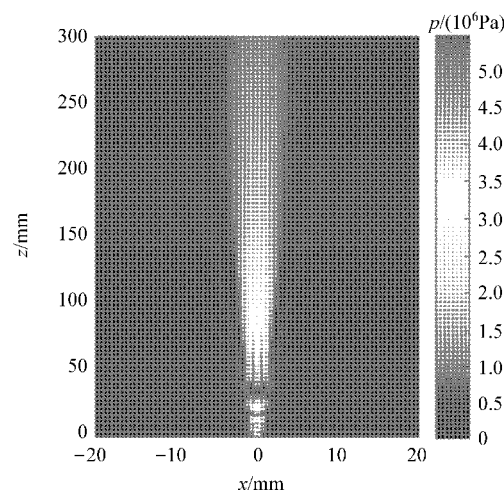


图 3 换能器连续波声场声压分布

Fig. 3 Distribution of sound pressure of transducer emitting continuous wave

2 换能器脉冲波声场声压分布数值计算

在实际超声检测中,激发换能器的电信号基本上都是脉冲信号,换能器辐射的是脉冲波声场。由电脉冲信号理论可知,一个脉冲信号可以看做是多个不同频率不同幅值的正弦信号叠加而成^[2],相应地,由电脉冲信号激发的超声脉冲波声场也可以看做是多个不同频率不同幅值的正弦电信号激发的超声连续波声场叠加而成,所以由式(2)可得脉冲波声场声压为

$$p_p(\mathbf{r}) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(\mathbf{r}) dk = -i\omega\rho_0 a^2 V \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(ikl)}{2l} \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} dk \approx -i\omega\rho_0 a^2 V \sum_{k=0}^{k=+\infty} \frac{\exp(ikl)}{2l} \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (4)$$

声压幅值为

$$|p_p(\mathbf{r})| \approx \frac{\rho_0 a^2 V c}{l} \sum_{k=0}^{k=+\infty} \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (5)$$

同样在声轴线上的声压幅值为

$$|p_p(z)| = -2V\rho_0 c \sum_{k=0}^{k=+\infty} \left| \sin\left(k \frac{\sqrt{z^2 + a^2} - z}{2}\right) \right| \quad (6)$$

在式(5)和式(6)中,当 k 的细分数很大时,利用式(5)和式(6)计算的结果就接近于积分计算的结果了。与文献[5]中的方法相比,用这种方法计算换能器脉冲波声场声压分布,计算量较少,并且数据不需要通过实验测得,避免带入了实验误差。其中,叠加的上下限 k 值可以根据换能器的带宽和上下限频率决定,例如对于 Panametrics 公司的型号为 V312 的换能器,其频率和尺寸与上面计算中的换能器 A 一样,其带宽约为 8 MHz,上下限频率分别是 5 MHz 和 13 MHz,则其相应的上下限 k 值分别为 21.23 和 55.19。在 MATLAB 中应用式(5)和式(6)编写程序计算换能器 A 脉冲波声场声轴线上和 Oxz 平面内的声压振幅分布,其中, x 轴向的位置间隔为 0.5 mm, z 轴向的位置间隔为 0.3 mm,频率叠加的细分数为 800,计算结果分别如图 4 和图 5 所示。

图 4 中的换能器脉冲声场轴线声压分布曲线与很多超声检测专著和论文中给出的有很好的相似性^[12-13],这也从侧面证明了本计算方法的正确性。比较图 4 和图 2 可知,虽然在近场范围内,脉冲波声场也存在着与连续波声场相似的波动,但波动幅度相对小很多,而且极大值远小于连续波

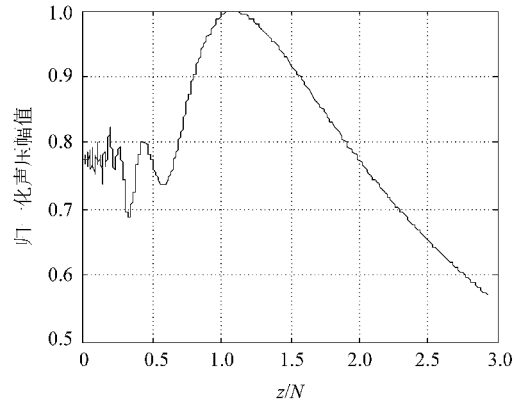


图 4 换能器脉冲波声场声轴线上声压分布
Fig. 4 Distribution of sound pressure on axis of transducer emitting pulse wave

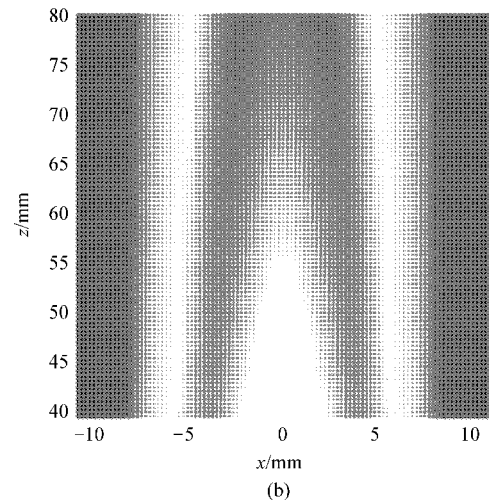
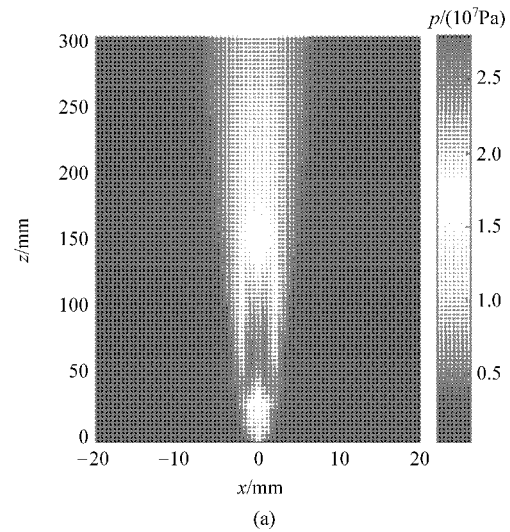


图 5 换能器脉冲波声场声压分布
Fig. 5 Distribution of sound pressure of transducer emitting pulse wave

声场声轴线上的极大值,极小值远大于连续波声场声轴线上的极小值。脉冲波声场出现声压幅值最大值的位置略大于一倍近场距离。单频连续波

声场声轴线上的声压最大值与最小值之比为 ∞ ，而脉冲波声场声轴线上声压最大值与最小值之比约为 1.4。图 5(a)所示的换能器脉冲波声场 Oxz 平面内的声压幅值分布与文献[11]很相似。比较图 5(a)和图 3 可知，换能器脉冲波声场的声束宽于连续波的声束，并且每点的声压幅值也大于连续波相应点处的声压幅值，当辐射距离约为一倍近场距离时，声压幅值达到最大，这与连续波声场的计算结果是接近的。为了更清楚地与实验结果比较，取出脉冲波声场的一段如图 5(b)所示。

如果在计算时将换能器 A 的带宽改为 4 MHz，上下限频率改为 8 MHz 和 12 MHz，计算得到的结果如图 6 所示。比较图 4 和图 6 可知，当换能器频带越宽，换能器声场声压幅值的波动越小，在对试件进行检测时缺陷的检出率和缺陷评价的准确性越高。这是因为当换能器频带越窄时，计算脉冲波声场需要叠加的频率成分就越少，脉冲波声场就越接近于某个频率下的连续波声场。这也反过来证明了上述计算过程的正确性。

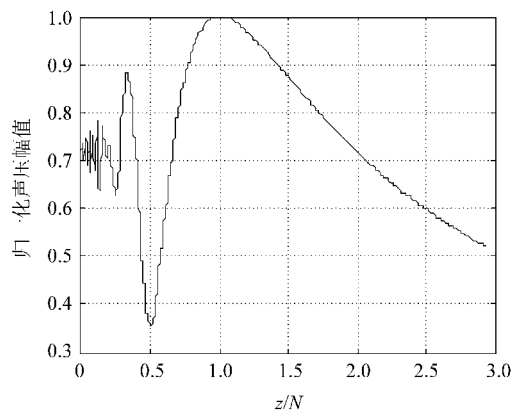


图 6 不同带宽的换能器脉冲波声场声轴线上声压分布

Fig. 6 Distribution of sound pressure on axis of transducer of different bandwidths emitting pulse wave

3 换能器脉冲波声场测量实验

换能器脉冲波声场测量实验系统如图 7 所示，基于小球反射法的测量原理，在水槽中将换能器中心与小球中心对准后，计算机控制换能器在 Oxz 平面内运动，通过脉冲收发卡激发和接收超声脉冲声波，再由数据采集卡采集数据，最后由计算机进行数据处理和图像处理，实现声场声压分布的图像显示。在本实验系统中，换能器为 Panametrics 公司生产的液浸换能器 V312，超声脉冲收发卡和数据采集卡是 PAC 公司生产的 AD-IPR-1210 卡，运动控制器是 PAC 公司生产的 SMC-4 卡，在 x 轴向上的测量间距是 0.1 mm，在

z 轴向上的测量间距是 0.2 mm，声场测量结果如图 8 所示。比较图 8 和图 5(b)可知，通过实验得到的声场声压变化趋势与仿真计算得到的有很好的相似性，在靠近换能器的范围内，声场主要分布在换能器的边缘，换能器中心部分的声压幅值相对较小，随着辐射距离的增大，声场慢慢向换能器中心集中，边缘部分的声压幅值相对变小，中心部分的声压幅值相对变大。但实验测得的声场在偏向 x 轴正向一侧声压值较大，分析可能是因为 x 向和 z 向扫描轴之间的垂直度不是很高造成的，另外当辐射距离大于一倍近场距离时，实验测得的声场声压幅值达到最大，这与计算结果有一点差别，但误差不大，在实际无损检测中是可以接受的。由于在声场扫描前没有采用精确的准直装置，造成声场中心轴线不在 x 轴线的原点上，但这并不影响对声场声压分布的分析和比较。

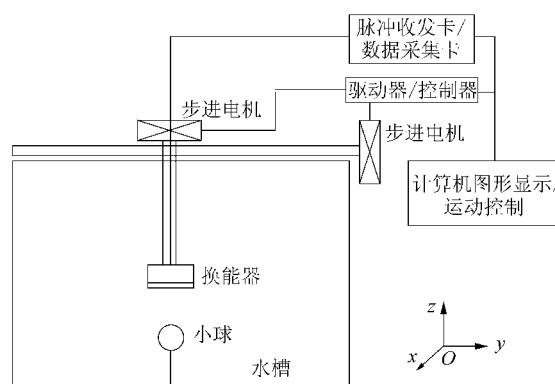


图 7 基于小球反射的超声脉冲声场测量示意图

Fig. 7 System of measuring pulse field of transducer based on reflection of small ball

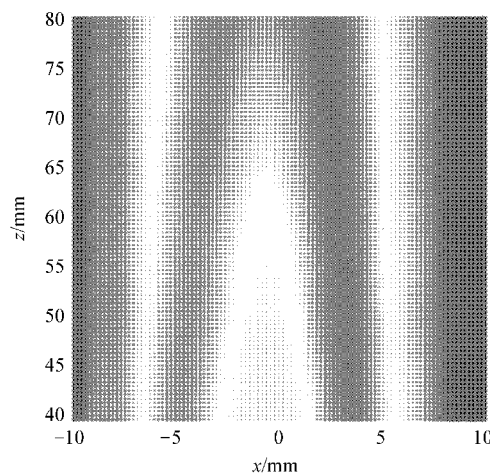


图 8 小球反射脉冲声场声压分布图

Fig. 8 Distribution of sound pressure of transducer emitting pulse wave measured through experiment

4 结 论

(1) 可以通过计算量较少的数值计算的方法计算换能器脉冲波声场声压分布, 这为仿真换能器脉冲波声场提供了一种新方法, 为提高缺陷检出率和缺陷评价的准确性提供了理论依据。

(2) 计算结果表明, 换能器脉冲声场在近场范围内主要分布在换能器的边缘, 换能器中心部分的声压幅值相对较小, 随着辐射距离的增大, 声场慢慢向换能器中心集中, 中心部分的声压幅值相对变大。

(3) 激发换能器的电脉冲信号频带越宽, 其近场范围内的声压波动幅度越小, 使用宽带窄脉冲换能器可以提高缺陷的检出率和缺陷评价的准确性。

参 考 文 献

- [1] 姚来凤, 冯益华, 王丽. 超声波及超声检测[J]. 山东轻工业学院学报, 2007, 21(2): 67-69.
Yao Laifeng, Feng Yihua, Wang Li. Ultrasonic and ultrasonic measuring [J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry, 2007, 21(2): 67-69. (in Chinese)
- [2] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999: 92-93.
Feng Ruo. Ultrasonics handbook[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999: 92-93. (in Chinese)
- [3] 韩秀甫, 滕永平, 吴迪, 等. 超声换能器暂态声场的理论分析与计算[J]. 安庆师范学院学报: 自然科学版, 2004, 10(3): 25-28.
Han Xiufu, Teng Yongping, Wu Di, et al. Study on transient fields of ultrasonic transducers[J]. Journal of Anqing Teachers College: Natural Science, 2004, 10(3): 25-28. (in Chinese)
- [4] Weaver R, Lobkis O. On the emergence of the Green's function in the correlations of a diffuse field: pulse-echo using thermal phonons[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1-8): 435-439.
- [5] 彭应秋, 郑初华, 李坚, 等. 航空制件超声检测中的声场特性分析[J]. 航空学报, 2003, 24(4): 301-305.
Peng Yingqiu, Zheng Chuhua, Li Jian, et al. Character analysis for acoustic field in ultrasonic testing of aeronautical products[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(4): 301-305. (in Chinese)
- [6] 彭应秋, 李坚, 李秋峰, 等. 脉冲波声场的数值计算与测试研究[J]. 测试技术学报, 2004, 18(2): 95-98.
Peng Yingqiu, Li Jian, Li Qiufeng, et al. Computerizing and measuring for acoustic field of pulse ultrasonic wave [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2004, 18(2): 95-98. (in Chinese)
- [7] 权义萍, 彭应秋, 杨五兵. 实用换能器频谱及声场特性分析[J]. 南昌航空工业学院学报: 自然科学版, 2002, 16(3): 28-32.
Quan Yiping, Peng Yingqiu, Yang Wubing. Practical transducer frequency spectrum and acoustic field characteristic analysis [J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology: Natural Science, 2002, 16(3): 28-32. (in Chinese)
- [8] 彭应秋, 李坚, 权义萍, 等. 超声检测中的声场特性及应用分析[J]. 无损检测, 2003, 25(12): 612-615.
Peng Yingqiu, Li Jian, Quan Yiping, et al. Analysis on acoustic field characteristic and application in ultrasonic testing[J]. Nondestructive Testing, 2003, 25(12): 612-615. (in Chinese)
- [9] 彭应秋, 李坚, 卢超, 等. 圆形活塞声源声场的分析, 计算与测试[J]. 南昌航空工业学院学报: 自然科学版, 2004, 18(1): 10-14.
Peng Yingqiu, Li Jian, Lu Chao, et al. Analysis, calculating and measuring of acoustic source and acoustic field of a plane circular piston[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology: Natural Science, 2004, 18(1): 10-14. (in Chinese)
- [10] 张海澜. 理论声学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 276-284.
Zhang Hailan. Theoretical acoustics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 276-284. (in Chinese)
- [11] 许肖梅. 声学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 195-196.
Xu Xiaomei. Foundation of acoustics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 195-196. (in Chinese)
- [12] 美国无损检测译审委员会. 美国无损检测手册(超声卷上册)[M]. 上海: 世界图书出版公司, 1996: 74-76, 300-301.
ASNT. Nondestructive testing handbook (ultrasonic testing)[M]. Shanghai: World Book Press Corp, 1996: 74-76, 300-301. (in Chinese)
- [13] 米露, 张德俊. 几种典型换能器声场特性的微机计算[J]. 声学技术, 1986, 5(3): 7-24.
Mi Lu, Zhang Dejun. Computerizing of characters of sound field of several typical transducers [J]. Technical Acoustics, 1986, 5(3): 7-24. (in Chinese)

作者简介:

徐圆飞(1982—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 检测与仪器技术, 自动控制。

Tel: 010-68912715

E-mail: evans_xu@bit.edu.cn

徐春广(1964—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 感知与测控技术, 先进传动与控制。

Tel: 010-68914283

E-mail: xucg@bit.edu.cn

(责任编辑: 蔡斐, 杨冬)