

文章编号 1004-924X(2008)09-1716-06

声波探雷及其信号处理方法

王 驰¹, 李醒飞¹, 付 娟¹, 李洪宇¹, 梁光强², 张国雄¹

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学 武装部, 天津 300072)

摘要: 为了研究声波探雷机理, 设计一个基于声-地震耦合的实验系统, 并用曲线拟合的方法研究了复杂的测试信号变化规律。简述了声-地震耦合基本原理, 分析了土壤-地雷系统的共振作用; 然后, 分别用扬声器和地震检波器串激发和接收地表振动; 最后, 采用平均值算法进行地表振动速度曲线拟合, 并解释实验现象。结果显示, 有地雷的地表振动速度与无雷的比值在很宽的频带内都 >1 , 其峰值达 24。表明地雷能引起地表振动的明显变化, 所提出的实验系统及曲线拟合方法可用于声波探雷信号的进一步研究。

关键词: 声波探雷; 曲线拟合; 声-地震耦合; 信号处理

中图分类号: TB52 **文献标识码:** A

Acoustic landmine detection and its signal processing method

WANG Chi¹, LI Xing-fei¹, FU Juan¹, LI Hong-yu¹, LIANG Guang-qiang², ZHANG Guo-xiong¹

(1. *State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*; 2. *Armed Force Department, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: In order to investigate the mechanism of acoustic landmines detection, an acoustic-to-seismic coupling based experimental system was developed, and a curve-fitting method was adopted to study the measured complex signals. Acoustic-to-seismic coupling theory was briefly described, and the resonance mechanism of soil-mine system was analyzed. Then, a loudspeaker and a geophone array were employed to induce and receive the ground vibration respectively. Finally, an average algorithm was used to fit the curves of ground vibration velocity and to explain experimental phenomenon. Experimental results indicate that the ratio of ground vibration velocity on-to-off mine is greater than 1 in wide frequency range and up to 24 in peak frequency. It proves that landmines can induce the distinct changes of ground vibration, and proposed experimental system and curve-fitting method are applicable for further study of acoustic landmines detection signals.

Key words: acoustic landmine detection; curve-fitting; acoustic-to-seismic coupling; signal processing

收稿日期: 2008-01-22; 修订日期: 2008-02-22.

基金项目: 天津市自然科学基金重点基金资助项目 (No. 05YFJMJC14100); 国防预研基金资助项目 (No. 9140A0902210TJW1401)

1 引言

当空中传播的声波入射到地面时,除大部分能量被反射回空中外,还有一部分以地震波的形式耦合到土壤中,这种现象称为声-地震耦合^[1-4]。地震波在传播过程中如遇到地雷等埋藏物,会发生反射或散射等现象,并引起地雷与其上方土壤的共振作用,最终明显地改变地表的振动,通过检测地表振动的变化可以研究地雷的存在性。自从上世纪90年代,在国际人道主义排雷行动的推动下,利用声-地雷耦合机理探测地雷的研究得到了一定范围的开展,取得了实验室阶段的良好探测效果^[5-6]。但这项研究付诸实用还需做大量工作,尤其在国内外很少见到相关报道,其中一个重要原因就是声耦合的地表振动信号特别复杂,受声源参数、土壤结构、地雷类型及埋藏深度等多方面的影响,难以提取表征地雷存在性的有效特征量。

本文在简述声-地震耦合机理的基础上,求出土壤-地雷共振系统的频响传递函数,并设计了一个基于地震检波器的实验系统,用平均值曲线拟合算法研究分析实验结果。结果显示,地雷能增强声耦合的地表振动,所设计的实验系统及数据处理方法可用于声波探雷特征量提取、地雷成像等问题的进一步研究。

2 理论基础

2.1 声-地震耦合原理

一般来说,浅层地表土壤是由固体、液体、气体构成的多相媒质,具有多孔性和可压缩性;当声波从空气中传播到地面时,部分能量通过动量作用及空气与土壤粒子的粘滞摩擦作用,形成地震波,而且耦合地震波的能量要远远大于由土壤固体基质构成的单相媒质。如图1所示,耦合到土壤中的地震波有3种形式:瑞利波、横波和纵波,但能量主要集中于纵波。根据Biot提出的孔隙介质中弹性波传播理论^[1-2],纵波又可以分为传播速度相对较快的快纵波和速度相对较慢的慢纵波。根据斯涅尔折射定律(Snell's Law),慢纵波折射角会相对很小,在传播过程中向入射法线方向偏折。研究表明,快、慢纵波都能在土壤固体和流体中传播,但快纵波引起较强的固体相振动,较

弱的流体相振动;而慢纵波引起较弱的固体相振动,较强的流体相振动^[7-8]。另外,地震波频率、地表振动速度频率与声源频率是相等的,这是实验数据处理的一个重要依据。

土壤固相基质的密度和弹性模量等机械特性与雷体相当,因此它与雷体的特性阻抗差别较小;但地雷存在时其位置处的孔隙度相对上方土壤大大减小,可认为减小至零。因此,根据快、慢纵波的传播特性,快纵波遇到地雷时会因较小的声阻抗差而发生反射或散射作用的能量比较少;而慢纵波会因较大的声阻抗差而发生强烈的反射或散射作用,结合下文要阐述的土壤-地雷的共振作用,最终引起地表振动状态的明显变化。

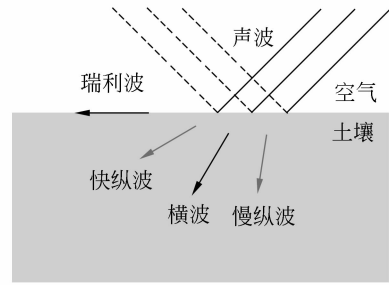


图1 声-地震耦合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of acoustic-to-seismic coupling

2.2 土壤-地雷共振模型

在声波探雷中,所用声源频率一般 ≤ 1 kHz,地震波波长大于或远大于地雷的几何尺寸及其埋藏深度(一般 ≤ 20 cm),因此可用集总参数系统的模型进行分析。地雷由雷体、柔性引信和气腔等构成,顺性系数较大,可等效为一个弹簧,而其正上方的土壤可等效为一个质量块,在地震波作用下组成一个有阻尼质量-弹簧共振系统,如图2所示。其中, f 是施加到地面的外力,由入射声波决定; m_1 和 m_2 分别为地雷上方土壤和雷体气腔罩的质量; r_1 和 r_2 分别为土壤剪切和拉伸作用的阻尼系数; r_3 为对应于地雷的阻尼系数; k_1 和 k_2 分别为土壤的剪切应力和法向应力所对应的弹簧劲度系数; k_3 是雷体气腔罩的等效弹簧劲度系数; x_1 和 x_2 分别为 m_1 和 m_2 的位移。

根据线性振动理论,有

$$M\ddot{\mathbf{X}} + R\dot{\mathbf{X}} + K\mathbf{X} = \mathbf{F}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X} = \text{diag}(x_1, x_2)$ 为位移矩阵, $\dot{\mathbf{X}}$ 、 $\ddot{\mathbf{X}}$ 分别为相应的速度矩阵和加速度矩阵, $\mathbf{M} = \text{diag}(m_1, m_2)$

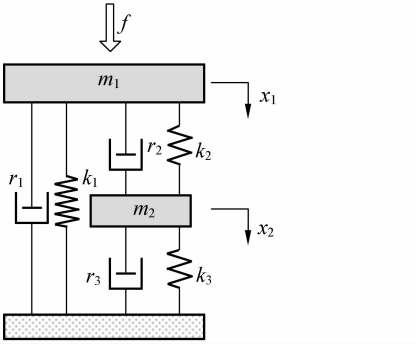


图 2 土壤-地雷共振模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of soil-mine resonance model

为质量矩阵, $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_1 + r_2 & -r_2 \\ -r_2 & r_2 + r_3 \end{pmatrix}$ 为阻尼系数矩阵,

$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{pmatrix}$ 为刚度矩阵, $\mathbf{F} = \text{diag}(f, 0)$ 为激励外力矩阵。

如果 $\mathbf{F} = \mathbf{F}_0 \exp(j\omega t)$, 即为简谐激励, 则对式 (1) 做傅里叶变换可得:

$$(\mathbf{K} + j\omega \mathbf{R} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{X}(\omega) = \mathbf{F}(\omega), \quad (2)$$

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_d(\omega) = \mathbf{K} + j\omega \mathbf{R} - \omega^2 \mathbf{M}, \\ \mathbf{Z}_v(\omega) = \frac{1}{j\omega} \mathbf{Z}_d(\omega) = \frac{1}{j\omega} \mathbf{K} + \mathbf{R} + j\omega \mathbf{M}, \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{Z}_d(\omega)$ 为位移阻抗, $\mathbf{Z}_v(\omega)$ 为速度阻抗。

所以速度频响函数(即速度传递函数)为:

$$\mathbf{H}_v(\omega) = \mathbf{Z}_v^{-1}(\omega) = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{v11}(\omega) & \mathbf{H}_{v12}(\omega) \\ \mathbf{H}_{v21}(\omega) & \mathbf{H}_{v22}(\omega) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

任一元素 $\mathbf{H}_{lp}(\omega)$ 表示第 l 点的响应与第 p 点激励之间的速度频响函数, $\mathbf{H}_{v11}(\omega)$ 即为 m_1 在外力 f 作用下的速度传递函数, 以下简称 $\mathbf{H}_{11}(\omega)$ 。根据以上条件, 可以推出 m_1 的幅频特性函数为

$$|\mathbf{H}_{11}(\omega)| = \left(\frac{A_6 \omega^6 + A_4 \omega^4 + A_2 \omega^2}{B_8 \omega^8 + B_6 \omega^6 + B_4 \omega^4 + B_2 \omega^2 + B_0} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

式中,

$$A_6 = m_2^2, A_4 = r_{23}^2 - 2m_2 k_{23}, A_2 = k_{23}; B_8 = m_1^2 m_2^2,$$

$$B_6 = S_1 - 2m_1 m_2 S_2, B_4 = T_1 + 2T_2 - 2T_3,$$

$$B_2 = U_1 - 2U_2, B_0 = (k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3)^2;$$

$$S_1 = (m_1 r_{23} + m_2 r_{12})^2, S_2 = k_{12} m_2 + k_{23} m_1 + r_{12} r_{23} - r_2^2;$$

$$T_1 = (k_{12} m_2 + k_{23} m_1 + r_{12} r_{23} - r_2^2), T_2 = m_1 m_2 (k_{12} k_{23} - k_2^2),$$

$$T_3 = (m_1 r_{23} + m_2 r_{12})(k_{12} r_{23} + k_{23} k_{12} - 2k_2 r_2);$$

$$U_1 = (k_{12} r_{23} + k_{23} r_{12} - 2k_2 r_2)^2,$$

$$U_2 = (k_{12} k_{23} - k_2^2)(k_{12} m_2 + k_{23} m_1 + r_{12} r_{23} - r_2^2);$$

$$k_{12} = k_1 + k_2, k_{23} = k_2 + k_3; r_{12} = r_1 + r_2, r_{23} = r_2 + r_3.$$

根据共振理论研究, 公式 (5) 表示的是一个四阶共振系统, 存在四个共振频率点 $\omega_{r1}, \omega_{r2}, \omega_{r3}, \omega_{r4}$, 当外界激励信号频率等于共振频率时, m_1 的响应速度会是极大值(因阻尼作用不会是无穷大), 表现为地表振动速度要远大于没有雷的情况。另外存在反共振频率点: $0, \omega_{a1}, \omega_{a2}$, 如果外界激励信号频率等于反共振频率, 那么 m_1 的响应速度会是极小值(在阻尼作用下不会为 0), 表现为地表振动速度在有雷的情况下要小于无雷的情况。需要说明的是, $\omega = 0$ 只是理论上的反共振频率, 对一个实际的声-地震耦合系统并不存在; 另外, 反共振只是系统的一个局部现象, 而共振则是整体现象。

综合以上分析, 当声波激励土壤-地雷系统时, 会出现地震波的反射及共振、反共振现象, 表现为有雷和无雷的地表振动速度比率在 >1 与 <1 之间出现交替现象。当然, 因土壤非线性、地雷结构复杂性等原因, 用声-地震耦合得到的地表振动信号是非常复杂且不规则的, 这也是实验结果分析中选用平均值曲线拟合方法的原因所在。

3 实验系统及方案

实验系统组成如图 3 所示, 主要包括以下几个部分:

(1) 实验箱: 用尺寸约 $1.02 \text{ m} \times 0.75 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 的方形木箱, 放于室内地板上, 箱中装入经筛漏的干燥、松散的黄土(可认为是均匀、线性的), 土粒直径 $<1 \text{ mm}$, 土层深约 0.67 m 。一个六九式反坦克塑料教练地雷(圆柱形, 直径约 26 cm , 高约 7.5 cm , 气腔直径约 5 cm) 埋藏在箱体中央, 深约 10 cm , 考虑到安全问题, 地雷中的炸药用干燥的细沙土代替。

(2) 声波发射装置: 采用 Tektronix 公司生产的 AFG3022 双通道任意函数发生器, 发出单频正弦波, 通过调音台、功率放大器放大能量后由音响喇叭(正对检波器位置, 相对高度约为 28 cm) 发出高强度声波; 用风雷普通声级计 PSJ-2B 在检波器位置测试声压级大小, 其 C 计权值分布于 $115 \sim 130 \text{ dB}$ 。

(3) 接收装置: 因地震波信号比较微弱, 选用

5×1的法向地震检波器串(图示是单只检波器)接收地表振动速度信息,并通过NI 5112(100 MS/s)数据采集卡采集到计算机中。根据出产厂家提供的测试数据,该检波器串固有频率为28 Hz,有效频率响应范围为28~1 000 Hz,测试灵敏度增益约为138 V/(ms⁻¹)。

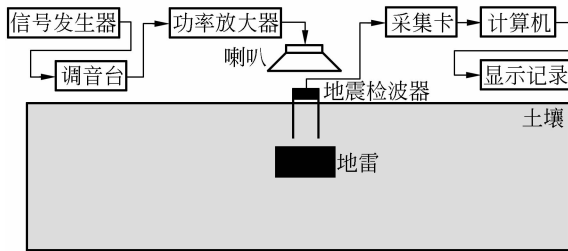


图3 实验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

因地震检波器和土壤的耦合状态及土壤本身松散状态对测试信号都有较大影响,当系统设置好后,可过几天再进行测试以减小误差(先测无雷的情况,之后把雷埋到地下约9 cm处,其它条件参数不变,再过同样的天数进行测量,以保证实验条件相同)。测试过程中,调音台和功率放大器的增益保持不变,在基于Labview的虚拟测试平台上进行滤波、求功率谱并显示、记录等。手动控制信号发生器,从50 Hz开始扫频至700 Hz,每增加1 Hz,记录一组功率谱数据,存成Excel文件格式,用Matlab软件做进一步的分析处理(如曲线拟合)。需要说明的是,测试信号是由声波直接耦合及经地雷、甚至箱底等反射的地震波等多种地震波成分共同作用的结果。

4 测试结果及分析

图4是实验系统设置好后过2 d测得的有雷和无雷时的FFT速度频率特性曲线(注意,都是三次测量平均值曲线)。可以发现,它们的最大值 $\leq 1.3 \times 10^{-3}$ m/s,有雷时的幅值整体上要大于无雷的情况,也存在小于无雷的频段;不管有无地雷,都在低频段信号相对更强,这是因为地震波衰减随着频率增加而增加的缘故;另外,二者都在150 Hz附件出现了极值(而且是无地雷的最大值),这可以用快纵波相长干涉原理来解释^[3]:快纵波因衰减系数小、传播到箱体底部后能反射回

地表并与另外耦合的快纵波满足一定条件时发生相长干涉,致使出现峰值现象,因为地雷气腔的存在使其衰减了部分能量,因此还出现了图4所示的在150 Hz附件有雷的速度幅值相当程度上小于无雷的情况。但整体来看,曲线比较复杂、不光滑,不易发现深层次的作用规律。

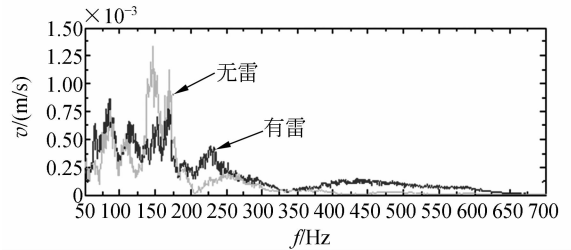


图4 有雷、无雷地表振动速度幅频特性

Fig. 4 Magnitude velocity spectra of ground vibration on-to-off mine

下面利用平均值曲线拟合的方法进行更深入的探讨,其拟合算法是:对任一测量频率点,取其前后若干个点进行算术平均作为其速度幅值,并在Matlab环境下实现绘图。图5是和图4对应的15点平均得到的拟合曲线。可明显看出,在200 Hz以下的低频段速度较大,变化趋势也相对较为复杂;自200 Hz以后的较高频段,速度相对较小,这与图4的测试及分析结果相对应。但图5相对图4显然更为简洁且光滑。为了更深入地分析图5所示有雷和无雷时的信号差别,绘出了与之对应的有雷和无雷拟合曲线比值的幅频特性曲线,如图6所示。

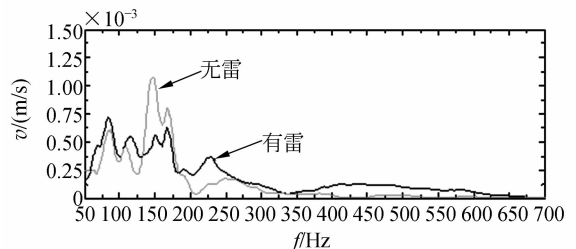


图5 与图4对应的速度平均值拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of average velocity as Fig. 4 shown

从图6容易发现,从200 Hz开始到之后的几乎整个扫频范围内,有雷的速度幅值都要大于无雷的情况,即比值 > 1 ,尤其是在400~650 Hz,最大比值达到24,这充分说明了地雷能增强地表振动的性质。而且,在50~300 Hz,曲线显示了

比值 >1 和 <1 交替出现的现象,这一方面是由于地雷气腔对快纵波衰减作用的影响,另一方面是理论分析中介绍的土壤-地雷系统的共振与反共振现象的作用,与 Yu、Zagrai 等人的研究结果是一致的^[9-10];但从整体来看,反共振作用相对比较弱。

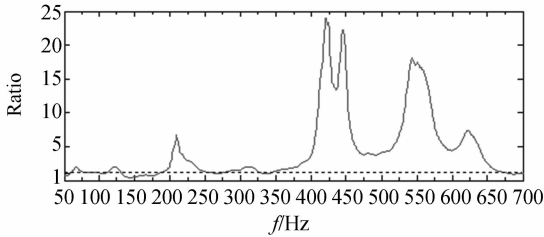


图 6 与图 5 对应有雷和无雷拟合曲线比值

Fig. 6 Ratio of fitting curves on-to-off mine according to Fig. 5

综合上述分析,平均值曲线拟合方法能使复杂的地表振动速度曲线变得简洁、光滑,有利于声波探雷机理的深层探索。事实上,根据拟合曲线规律,选择合适的频段(如 400~600 Hz),进行速度比值的面积积分,把积分值作为一个强度值,而把实际地面测点位置作为二维位置坐标值,采用地面测点扫描的方式,记录每一个二维物理位置的强度值,从而可以实现地雷的三维成像问题,有地雷的地方会呈现明显的凸起。

5 结 论

本文在对声-地震耦合机理简述的基础上,用解析法求出了土壤-地雷共振系统的频响传递

函数;并设计了一个基于地震检波器串的实验系统,测得了在有雷和无雷的情况下地表振动速度;由于所测振动信号比较复杂,用平均值算法对速度曲线进行了拟合,使其变得光滑、简明,在此基础上用相长干涉原理及土壤-地雷共振作用解释了曲线变化规律。实验结果显示,在本实验条件下,有雷与无雷的速度拟合曲线比值在 200 Hz 之后的几乎整个频带内都 >1 ,尤其是 400~600 Hz 比值更为明显,最大值能达 24。这表明地雷能增强声波激发的地表振动,所设计的实验系统及所提出曲线拟合方法可用于声波探雷的进一步研究。

由于不同的地雷类型、埋藏深度及不同的土壤环境都会对测试信号带来很大的影响,需要深入研究实验的可重复性问题,本文采用设置好实验系统后隔几天再进行测试的方法,初步探讨了声波探雷机理及其信号处理方法。关于地雷埋藏深度等参数条件变化时的实验现象及其规律,限于篇幅本文不作深入展开,随着研究的进一步深入,会在别的文章中给予详述。由于测试信号弱、受地震检波器与地面耦合状态影响大,建议采用高灵敏度的压电式加速度计进行地表振动加速度信息检测^[11],并进行多传感器的数据融合技术以提高检测精度和灵敏度^[12];由于雷区现场环境是非常复杂的,建议进行复杂环境下的目标识别研究^[13]。

参考文献:

- [1] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1956, 28(2):168-178.
- [2] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher-frequency range [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1956, 28(2):179-191.
- [3] SABATIER J M, BASS H E, BOLEN L N. Acoustically induced seismic waves [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1986, 80(2): 646-649.
- [4] SABATIER J M, BASS H E, BOLEN L N. The interaction of airborne sound with the porous ground: The theoretical formulation [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1986, 79 (5): 1345-1352.
- [5] DONSKOY D, EKIMOV A, SEDUNOV N, et al.. Nonlinear seismo-acoustic land mine detection and discrimination [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2002, 111: 2705-2714.

- [6] XIANG N, SABATIER J M. An experimental study on antipersonnel landmine detection using acoustic-to - seismic coupling [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003,113(3):1333-1341.
- [7] 杨顶辉. 双相各向异性介质中弹性波方程的有限元解法及波场模拟[J]. *地球物理学报*, 2002,45(4): 575-583.
YANG D H. Finite element method of the elastic wave equation and wavefield simulation in two-phase anisotropic media[J]. *Chinese J. Geophys*, 2002,45(4): 575-583. (in Chinese)
- [8] 裴正林. 三维双相各向异性介质弹性波方程交错网格高阶有限差分法模拟[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2006,30(2):16-20.
PEI ZH L. A staggered-grid high-order finite difference method for modeling elastic wave equation in 3-D dual-phase anisotropic media[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2006, 30(2):16-20. (in Chinese)
- [9] YU S H, AVINASH G, THOMAS R W, *et al.*. Physically based method for automatic mine detection using acoustic data—a transmission zero approach [J]. *SPIE*, 2002, 4742:701-708.
- [10] ZAGRAI A, DONSKOY D, EKIMOV A. Resonance vibrations of buried landmines[J]. *SPIE*, 2004,5415: 21-29.
- [11] 刘俊,秦岚,刘京诚,等. 一种新型差动式压电加速度传感器[J]. *光学精密工程*, 2007,15(6):903-909.
LIU J, QIN L, LIU J CH, *et al.*. A novel differential piezoelectric accelerating sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(6):903-909. (in Chinese)
- [12] 高印寒,周晓华,梁杰,等. 数据融合技术在声全息测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 2007,15(7):1104-1111.
GAO Y H, ZHOU X H, LIANG J, *et al.*. Application of data fusion to acoustic holography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(7):1104-1111. (in Chinese)
- [13] 林玉池,崔彦平,黄银国. 复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. *光学精密工程*, 2006,14(3):509-514.
LIN Y CH, CUI Y P, HUANG Y G. Study on edge detection and target recognition in complex background[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3):509-514. (in Chinese)

作者简介:王 驰(1982—),男,博士研究生,主要从事精密测控与测试技术的研究。E-mail: wangchi@tju.edu.cn

通讯作者:李醒飞(1967—),男,教授,主要从事精密测控与测试技术的研究。E-mail:lixif@tju.edu.cn

●下期预告

中子衍射应力谱仪垂直聚焦单色器的优化设计

王晓影,李 建,谢超美,刘 荣

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所,四川 绵阳 621900)

对中子衍射应力谱仪的垂直聚焦单色器的设计进行了研究。首先,应用蒙特卡罗模拟程序 MCS-TAS 对中子衍射应力谱仪的垂直聚焦 Ge(511)单色器的聚焦进行了优化计算,得到垂直聚焦单色器的高度与单晶片之间的倾角等参数的最佳值。然后,对比分析了在垂直聚焦单色器与平板单色器两种情况下样品处的中子注量率。最后,讨论了单色器起飞角对谱仪分辨率产生的影响。计算结果表明:单色器尺寸为 50 mm×150 mm;相比平板单色器垂直单色器增益为 4.99 倍。利用垂直单色器可以显著提高应力谱仪样品处的中子注量率。