

文章编号 1004-924X(2014)05-1331-08

用于非金属地雷探测的声-地震耦合识别方法

丁 卫, 沈高炜, 王 驰*, 周瑜秋, 吴文雯
(上海大学 精密机械工程系, 上海 200072)

摘要:研究了用于非金属地雷探测的声-地震耦合识别方法。介绍了基于声-地震耦合的声共振探雷技术的基本原理, 讨论了如何利用声学参量表征地雷的机械特征以及综合利用声波共振和反共振的作用。设计了车载式声波探雷实验系统, 测量了埋藏地雷时的地表振动速度。最后, 根据扫描探测结果, 研究了地雷的声学振动特征。结果显示, 埋藏有地雷的位置会呈现振动特征的明显凸起, 在给定实验条件下, 地雷中心振动强度是无雷区域的 15 倍, 利用提高信噪比的方法还可使该值提高到 20 倍。实验表明: 基于地雷振动强度和扫描探测的方法可研究地雷掩埋位置的振动特征, 而且所设计的实验系统具有操作简便、成本较低的优点。

关键词:声-地震耦合; 声共振; 地雷探测; 非金属地雷

中图分类号: TJ517 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142205.1331

Acoustic-to-seismic coupling based discrimination for non-metallic mine detection

DING Wei, SHEN Gao-wei, WANG Chi*, ZHOU Yu-qiu, WU Wen-wen

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

* Corresponding author, E-mail: wangchi@shu.edu.cn

Abstract: An acoustic-to-seismic coupling based discrimination method was investigated for experimental research of buried non-metallic mine detection. The fundamental theory of acoustic resonance technique for mine detection based on acoustic-to-seismic coupling was introduced. The acoustic parameters that characterize the mechanical features of buried mines were studied and the application of combination effect of acoustic resonance and anti-resonance was discussed. A vehicular experimental system for acoustic mine detection was designed to measure the surface vibration velocities with/without mines in soil. Finally, the acoustic vibration characters of buried mines were analyzed according to the results of scanning detection. The results show that the location with mines buried will exhibit an obvious boost in vibration. Under the given circumstance, the intensity of vibration in the center of mine is 15 times that of off-mine location. The intensity will rise to 20 times if the signal-to-noise ratio is increased. The proposed method can be used to study the acoustic vibration characters of mines buried location. The designed experimental system is cost efficient and easy to operate.

收稿日期: 2013-08-30; 修订日期: 2013-10-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41104065)

Key words: Acoustic-to-seismic (A/S) coupling; acoustic resonance; mine detection; non-metallic mine

1 引言

近年来,地雷危害的规模和严重性越来越大,引起国际社会的普遍重视。据报道,目前世界各地还遗留有 1.1 亿枚未爆地雷,分布在 80 多个国家或地区(包括我国云南中越边界、金门及马祖等地),每年都有 1.5 万到 2 万人因触雷致残或者死亡,而过去的十几年中,因恐怖主义事件致残或致死的人数平均每年为 3 千左右,比较而言,地雷的危害程度更为严重。因此,排除雷患已成为世界各国需要共同应对的全球性问题。其中,非金属地雷的安全、可靠探测一直是摆在排雷专家面前的世界性难题。常用的金属探测器是基于电磁感应原理制成的,故只能探测金属地雷,对金属含量很少的塑料等非金属地雷的探测效果较差。其它如红外、探地雷达、X 射线等成像技术在探测机理上难以区分出埋藏物为地雷还是岩石、砖头或其它碎片;一些非成像技术,如中子分析是通过检测炸药的化学特性进行识别的,具有较强的地雷鉴别能力,但其系统特别复杂、检测信号过于微弱,尚处于应用可行性论证阶段。另外,一些生物探雷技术(如探雷蜜蜂、探雷狗和探雷草等)亦处于探索阶段。

基于地雷机械特性和声-地震耦合原理的声共振探测技术具有广阔的应用前景,近年来受到国外学者的青睐。自 20 世纪 90 年代以来,声共振探雷的机理模型就在国外得以研究和发展。1999 年,美国密西西比大学的 Sabatier 教授和 Xiang 博士先后发表文章探索了用声波探测地雷的可行性,他们指出土壤和地雷构成了一个线性谐振系统,该系统的共振作用能明显地增强地表的振动状态^[1-4]。随后, Donskoy 博士研究了“土壤-地雷”谐振系统的非线性共振效应,提出了利用非线性声波振动技术探测地雷的方法^[5-7]。2002 年, S. H. Yu 博士探索了地雷的反共振机理,并借助 Sabatier 教授等人的实验数据进行了

验证^[8],指出反共振的存在会降低地表的振动速度。2005 年, Zagrai 博士发表文章论述了地雷的多模态共振现象^[9]。在地雷声波成像的实验研究方面,密西西比大学的 Baird 教授在 1990 年提出了基于地震检波器阵列的地表振动检测方法,绘制出埋藏物上方地表振动速度的三维表示图和等高线图^[10]。1999 年 Sabatier 等人提出了基于激光多普勒振动计的地表振动检测系统^[11],将傅里叶变换后的每个探测点的信号进行处理,以显示埋藏的地雷。Kasban 等人在此基础上还研究了用图形灰度和强度自动识别地雷的算法^[11]。近几年,声波探雷技术在应用领域与信号处理方法方面都有了一些新的研究成果。2008 年,意大利北约海底研究中心(NATO Undersea Research Centre)的 A. Tesei 发表文章探索了复杂环境中水雷的声波探测方法^[12]。2009 年,美国 Prometheus Inc. 的 E. J. Sullivan 研究了通过降低地表振动检测装置的噪声提高信噪比的声波探雷方法^[13]。2010 年,英国利物浦大学(University of Liverpool)的 U. S. Khan 研究了基于倒谱法(Cepstral Approach)的快速地雷成像方法^[14]。

在国内,有关声共振探雷技术的研究近年来陆续有文章发表。文献[15-16]描述了声-地震耦合探雷技术的基本原理和初步的信号处理方法,文献[17]描述了“土壤-地雷”谐振模型的解析方法,文献[18-20]描述了实验室条件下声波探雷技术的实验系统和方法,以及声波探雷技术的地雷鉴别能力。这些研究一方面在理论上探索了地雷共振、反共振、多模态共振的统一解析方法,另一方面验证了声共振技术对地雷的可靠鉴别能力。但这些研究缺乏对地雷声波成像的研究,而这是实用工程探雷系统研制的一个关键技术。为此,本文在国内外已有研究成果的基础上,设计了基于探雷车的声-地震耦合探雷实验系统装置,研究了地雷的机械特征量和声波探测识别方法,为声波探测非金属地雷的进一步研究提供一种借鉴方法和实验基础。

2 声-地震耦合探雷技术的基本原理

如图1所示,当空气中的声波传播到地面时会发生声-地震耦合现象,即声波的小部分能量因为土壤空隙及其与土壤固相基质的动量和黏滞摩擦作用而耦合到地下,形成瑞利波、快纵波、慢纵波、横波等多种成分的地震波。其中:瑞利波是沿着地表传播的面波;横波、快纵波和慢纵波是向地下传播的体波。由于流体不能承受剪切力,横波只能在固体相中传播。快纵波使土壤产生相对较强的固体相振动,较弱的流体相振动;慢纵波使土壤产生相对较强的流体相振动,较弱的固体相振动^[21-23]。雷体的密度和弹性模量等机械特性与土壤固体相当,这决定了雷体与土壤固体相的特性阻抗差较小;相反雷体可以认为不存在流体相,雷体与土壤流体相之间的特性阻抗相差很大。因此,快纵波传播到地雷位置时会因相对较小的声阻抗差而使其大部分能量穿透雷体,而慢纵波传播到地雷位置时会因为较大的声阻抗差而发生强烈的反射或散射现象^[24]。

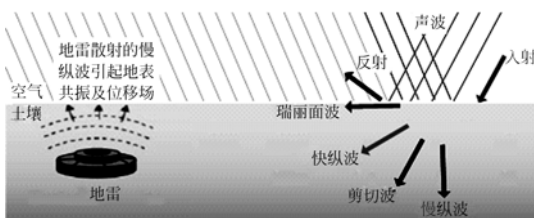


图1 声-地震耦合及地雷谐振作用示意图^[24]

Fig.1 Schematic diagram of acoustic-seismic coupling and resonance effect of mine

慢纵波是一种扩散波,在土壤中传播的衰减系数很大,反射回地表时改变地表振动状态的能量很弱,一般不足以判别地下是否存在掩埋物(如地雷)。然而,地雷由雷体、气腔和引信等构成,这种复杂的结构决定了它较高的声顺(俗称柔性),能与其上方的埋藏土壤构成“质量-弹簧”谐振系统,在激励声波作用下发生谐振现象,进而较大程度上改变反射回地表的地震波能量,最终使地雷上方的地表振动状态产生明显而独特的变化,因此,通过检测地表振动状态的变化,可进一步判断地雷是否存在,并用于地雷掩埋位置

声波识别方法的研究。

3 地雷的振动强度

“土壤-地雷”谐振系统在声波的激励下会出现复杂的共振、反共振以及多模态共振现象。根据线性振动理论和已有研究成果^[17]，“土壤-地雷”谐振系统的共振与反共振依次交替出现,分别会增强和减弱声波激发的地表振动,具体表现为有、无地雷埋藏时的地表振动速度的比值大于1和小于1。根据振动与波的关系,激励声波的频率和地表土壤的振动频率以及地下埋藏地雷的频率相同。当地下埋藏有地雷时,地表在声波激励下会引发地雷的谐振作用而产生异常的振动变化,为表征地雷的这种谐振作用对地表振动状态的影响,可利用文献^[17]中定义的“振动强度”来表征地雷的机械特征量,其涵义如下:用从低频到高频扫频的方法,测得地表振动速度的幅频特性曲线,再对幅频特性曲线进行扫频范围内的面积积分,该积分值即为“振动强度”。该参数体现了地雷的共振、反共振及多模态共振对地表振动幅值的综合影响,其数学表达式可表示为:

$$M = \int_{f_0}^{f_N} V(f) df, \quad (1)$$

其中: f_0 、 f_N 分别表示扫描声波的起始和终止频率, $V(f)$ 表示激励频率为 f 时地表振动速度。将测量区域利用二维的 X 、 Y 坐标表示,所有测得的点的“地雷振动强度”作为 Z 坐标便可以得到地表振动的三维表示图,从而达到地雷位置成像的目的。为了能在一定程度上抑制环境噪声的影响,可以在测量各点地表振动速度 $V(f)$ 后,选取地下无埋藏的点作为参考点,测量其地表振动速度 $v(f)$,对 $V(f)$ 与 $v(f)$ 的比值进行扫频范围内的面积积分,然后除以频率范围,利用该值表征地雷的振动强度,其数学表达式为:

$$M_r = \frac{1}{f_N - f_0} \int_{f_0}^{f_N} \frac{V(f)}{v(f)} df. \quad (2)$$

由于声-地震耦合的效率很低,由声波激发的地表振动信号很微弱,而有、无雷时地表振动速度的比值会较大,因此,式(2)利用求相对值的方法使有、无雷情况下地表振动表现出更大的差异,在一定程度上提高了信噪比。如果埋藏地雷,那么测得的地雷振动强度 M_r 会明显大于1,

也就是说如果在一定范围内测得的 M_r 大于 1, 则可判断地下埋有地雷。

为了进行地雷的扫描探测, 可采用图 2(彩图见期刊电子版)所示的基于地震检波器的检测方法。图 2 中红色圆表示地雷, 黑色小实圆表示检波器阵列, 白色小空圆表示测量点的位置。检波器阵列测完一组数据就在地表移动 2 个单位距离, 保证有 2 列检波器的测量位置与上一次测量重合, 直至测完全部待测区域。该方法虽然存在操作不便、测量速度慢的劣势, 但系统灵敏度高、结构简单、成本较低, 适用于初期探索阶段的实验研究。

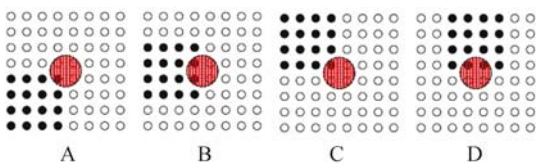


图 2 检波器阵列测量示意图

Fig. 2 Measurement schematic of geophone array

4 实验研究

4.1 实验系统

如图 3 所示, 实验系统主要包括以下几部分: 由信号发生器、调音台、功率放大器、扬声器以及放置声源的“探雷车”组成的车载式声波发射装置, 以及由地震检波器、数据采集卡以及计算机组成的地表振动信号检测装置。其中: 信号发生器采用 Tektronix 公司生产的 AFG3022 任意波形/函数发生器, 扬声器采用音王(Soundking)集团有限公司生产的 JB215 专业音箱, 地震检波器采用威海双丰公司生产的产品, 其频率响应范围为 28~1 000 Hz, 数据采集卡型号为 LDI320VSE。

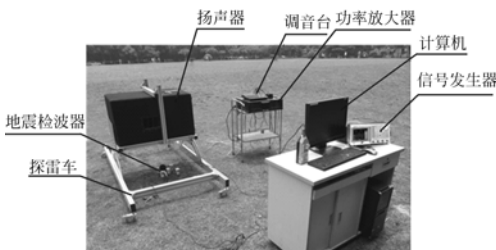


图 3 实验系统

Fig. 3 Experimental system

实验在室外进行, 周围无较大的噪声。实验场地为长、宽、深分别为 60 cm×60 cm×30 cm 的沙坑, 如图 4 所示, 在沙坑中埋藏一个 69 式塑料地雷(直径为 28 cm)和一个 58 式塑胶地雷(直径为 12 cm), 埋藏深度为 9 cm, 用细沙填平。将沙坑中心 60 cm×45 cm 的长方形区域划分成 12×9 的网格, 如图 5 所示, 每个网格边长为 5 cm, 每个点用横坐标 x 和纵坐标 y 表示。图中大小 2 个圆分别表示 69 式塑料地雷和 58 式塑胶地雷, 它们的中心网格坐标分别为(4, 4)和(9, 4)。



图 4 69 式塑料地雷和 58 式塑胶地雷

Fig. 4 Type 69 and type 58 plastic mines

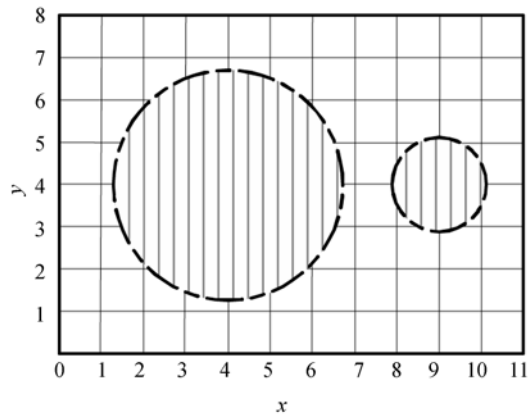


图 5 网格划分及地雷位置示意图

Fig. 5 Sketch map of meshing and mines' location

将“探雷车”移动至沙坑上方, 扬声器发声口置于沙坑中心正上方 40 cm 处, 正对沙坑。信号发生器发出正弦波信号时, 经过调音台处理, 再经过功率放大器对信号进行放大, 最后通过扬声器发出声压强度为 120 dB 左右的声波。实验时信号发生器从 50~100 Hz 扫频, 地震检波器在如图 5 所示的网格上从(0, 0)到(11, 8)逐点进行检测, 得到图 5 所示区域每个点的地表振动速

度。选取图中离埋藏地雷位置较远的点(11, 0)作为基准点,用该点的数据表示无雷时地表振动速度。

4.2 实验结果及分析

对测得的数据进行快速傅里叶变换,可以得到每个点处的地表振动速度幅值频谱曲线。图6为图5中点(4, 4)处在埋藏有地雷和无埋藏物情况下,地表振动速度的幅频特性曲线,图7是与图6相对应的埋藏有地雷时地表振动速度与无埋藏物时地表振动速度比值的幅频特性曲线。从图6和图7中可以明显看出,在几乎整个扫描频率范围内,埋藏地雷时地表振动速度明显大于无雷时的地表振动速度,比值曲线幅值整体大于1。

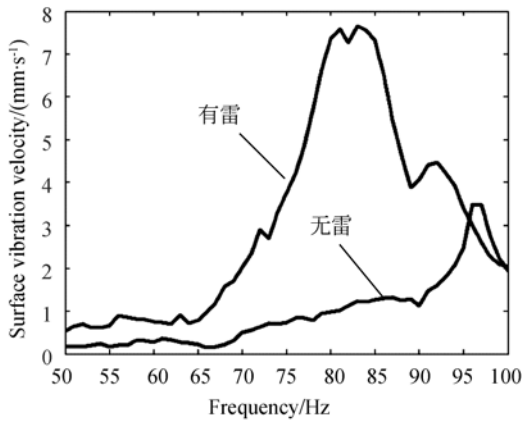


图6 有、无地雷情况下地表振动速度幅频特性曲线
Fig. 6 Magnitude spectra of surface vibration velocity with/without mines

根据式(1)将每个点处的地表振动速度经傅里叶变换后在频域上进行积分,得到图5网格上的每一个点的振动强度 M_{xy} 。用 Matlab 软件对实验数据进行光滑拟合处理后可以得到地表振动分布图(图8)以及相应的等高线图(图9)。

图8显示在测量区域内有明显的突起,与理论相符。图9显示左边等高线的中心为(4, 4),与图7所示69式塑料地雷的中心位置相同,等高线近似为圆形,且最外圈与地雷大小基本相同,很好地表示出了69式塑料地雷的中心位置和大小。地雷中心点(4, 4)的振动强度为153.8 mm/s,扫描区域边缘无雷处点(11, 0)的振动强度为10.3 mm/s,与地雷中心点的强度相差近15倍,地雷位置成像效果明显。右边等高线轮廓不太规则,其中心为(8, 4),与图7所示58式塑料

地雷的中心(9, 4)相差5 cm。这可能是由于2个地雷埋藏距离过近,69式塑料地雷引起的地表振动对58式塑料地雷上方的地表振动有影响所致。此外,58式塑胶地雷尺寸较小,其谐振特征对地表的振动影响可能比较微弱,以致靠地震检波器这种接触式传感器难以检测其振动特征。

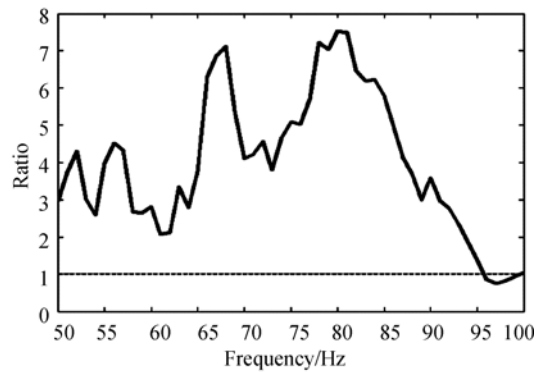


图7 有、无地雷时地表振动速度比值
Fig. 7 Ratio of surface vibration velocity with/without mines

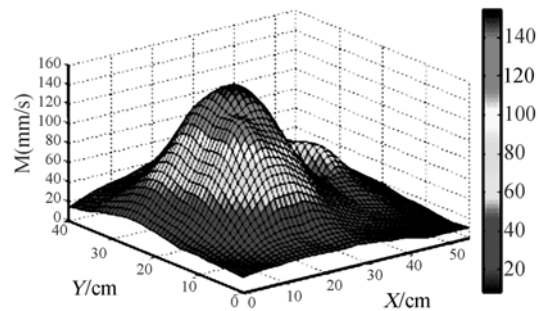


图8 地表振动强度的三维表示图
Fig. 8 3-D presentation map of surface vibration intensity

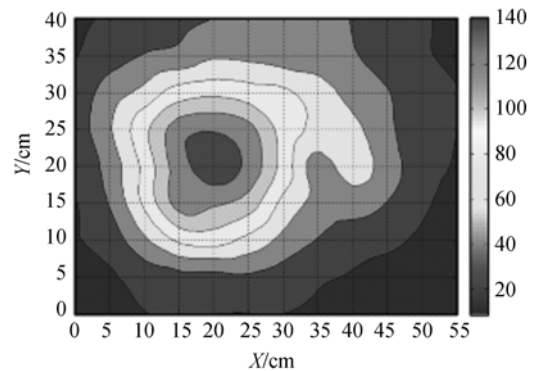


图9 地表振动强度等高线图
Fig. 9 Contour map of surface vibration intensity
根据式(2)对每个点处的地表振动速度与基

准点处地表振动速度的比值分别在扫频范围内进行面积积分,用 matlab 对实验数据拟合处理后,得到如图 10 所示地表振动强度三维表示图以及如图 11 所示的等高线图。

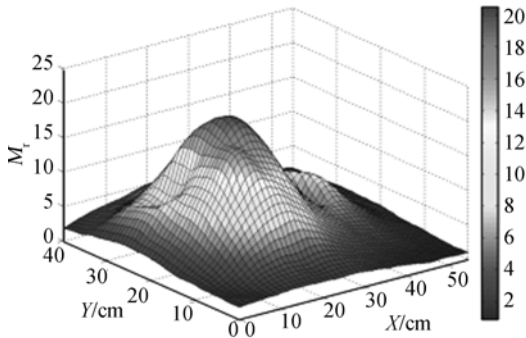


图 10 地表振动强度相对值的三维表示图

Fig. 10 3-D presentation map of relative surface vibration intensity

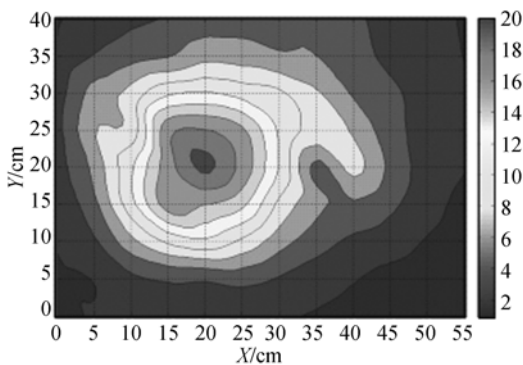


图 11 地表振动强度相对值的等高线图

Fig. 11 Contour map of relative surface vibration

从图 10 和图 11 中可以看出,69 式塑料地雷中心点(4, 4)的值 M_r 为 20.36,扫描区域边缘无

雷处点(11, 0)的值为 1,两者相差近 20 倍,并且图 11 显示等高线较图 9 更为密集,有雷区域和无雷区域的区分更加明显。另外,对于 58 式地雷,可能由于埋藏位置、实验系统和尺寸大小等限制,凸出效果不理想。

5 结 论

本文在分析基于声-地震耦合的声共振探雷方法原理的基础上,对地雷振动强度的概念、测量方法以及地雷掩埋位置的识别方法进行了讨论,研究了一种基于地雷振动强度和扫描探测的声-地震耦合探雷实验方法,描述了声波探雷识别的实验系统及实验方案,为声-地震耦合探雷技术的进一步研究以及工程声波探雷系统的研制提供了一种实验方法和基础。实验结果显示,采用对地表振动进行频率范围内积分的方式对地雷位置进行识别,地雷中心振动强度 M 是无雷区域的 15 倍,对其进行提高信噪比处理后,该比值能够达到 20 倍。

然而,声探雷是一项复杂的工作,一个实际的工程探雷系统,应是完全非接触式的探测系统。作者建议今后可利用非接触的激光多普勒振动计(LDV)进行地表振动的测量,选择不同尺寸和类型的干扰物和地雷放在一起进行对比实验,测试影响探测结果的干扰因素,以进一步检验声-地震耦合探雷技术对地雷的鉴别能力。此外,文献[25]描述的复杂背景成像条件下运动点目标的轨迹提取方法,文献[26]研究的激光雷达目标三维姿态估计方法,都是今后声波探雷方法研究中的有益参考。

参考文献:

[1] SABATIER J M, XIANG N. Laser-doppler-based acoustic-to-seismic detection of buried mines[C]. *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IV*, SPIE, 1999, 3710:215-222.

[2] XIANG N, SABATIER J M. Land mine detection measurements using acoustic-to-seismic coupling [C]. *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets V*, SPIE, 2000, 4038:645-655.

[3] SABATIER J M, XIANG N. An investigation of a-

- coustic-to-seismic coupling to detect buried antitank landmines [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(6):1146-1154.
- [4] 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.
- [5] DONSKOY D M. Detection and discrimination of nonmetallic land mines [C]. *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IV*, SPIE, 1999, 3710:239-246.
- [6] DONSKOY D, REZNIK A, ZAGRAI A, *et al.*. Nonlinear vibrations of buried land mines[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005, 117 (2), 690-700.
- [7] DONSKOY D. Nonlinear seismo-acoustic landmine detection [J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, 123 (5): 3042-3043.
- [8] YU S H, AVINASH G, THOMAS R W, *et al.*. Physically based method for automatic mine detection using acoustic data—a transmission zero approach [C]. *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VII*, SPIE, 2002, 4742:701-708.
- [9] ZAGRAI A, DONSKOY D, EKIMOV A. Structural vibrations of buried land mines[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005, 118(6):3619-3628.
- [10] BAIRD G. *Acoustic/Seismic Detection of Buried Objects*[S]. Dept. Physics & Astronomy, University of Mississippi, Technical report to U. S. Army Waterways Experiment Station, 1990.
- [11] KASBAN H, ZAHARAN O, EL-KORDY M, *et al.*. Efficient detection of landmines from acoustic images[J]. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2009, 6:79-92.
- [12] TESEI A, FAWCETT J A, LIM R. Physics-based detection of man-made elastic objects buried in high-density-clutter areas of saturated sediments [J]. *Applied Acoustics*, 2008, 69(5):422-437.
- [13] SULLIVAN E J, XIANG N, CANDY J V. Adaptive model-based mine detection/localization using noisy laser doppler vibration measurements [C]. *Oceans IEEE Bremen: Balancing Technol., Future Needs, Bremen, Germany*, 2009, 1-4.
- [14] KHAN U S, WALEED A N, ABD E S, *et al.*. Detection of landmines and underground utilities from acoustic and GPR images with a cepstral approach[J]. *J. Visual Commun. Image Represent.*, 2010, 21(7):731-740.
- [15] 王驰, 刘志刚, 李醒飞, 等. 声-地震耦合探雷技术分析[J]. *声学学报*, 2008, 33(4):354-359. WANG CH, LIU ZH G, LI X F, *et al.* Analysis of acoustic to seismic coupling technique for buried landmines detection [J]. *Acta Acustica*, 2008, 33 (4):354-359. (in Chinese).
- [16] 王驰, 李醒飞, 付娟, 等. 声波探雷及其信号处理方法研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(9): 1716-1721. WANG CH, LI X F, FU J, *et al.*. Acoustic landmine detection and its signal processing method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1716-1721. (in Chinese)
- [17] 王驰, 李醒飞, 于瀛洁, 等. 土壤-地雷共振系统模型解析[J]. *物理学报*, 2010, 59(9):6319-6325. WANG CH, LI X F, YU Y J, *et al.*. Analysis of soil-mine resonance model [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(9):6319-6325. (in Chinese)
- [18] 王驰, 于瀛洁, 李醒飞. 一种基于声-地震耦合的室内声波探雷实验系统[J]. *天津大学学报*, 2011, 44(1):79-84. WANG CH, YU Y J, LI X F. An acoustic-to-seismic coupling based landmines detection system in lab-scale experimental environment [J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, 44(1): 79-84. (in Chinese)
- [19] MAO X, LI G Q, WANG CH, *et al.*. Experimental study of acoustic resonance technology for non-metallic mines detection[J]. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2012, 9 (88): 162-165.
- [20] 王驰, 周瑜秋, 沈高炜, 等. 掩埋物对声-地震耦合效率的影响[J]. *天津大学学报*, 2013, 46(6): 498-502. WANG CH, ZHOU Y Q, SHEN G W, *et al.*. Impact of buried objects on acoustic-to-seismic coupling efficiency [J]. *Journal of Tianjin University*, 2013, 46(6):498-502. (in Chinese)

- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] BIOT M A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media [J]. *J. Appl. Phys.*, 1962, 33(4):1482-1498.
- [24] ROBERT W H, KENNETH D R. Standoff acoustic laser technique to locate buried land mines [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1):3-22.
- [25] 丛明煜, 何文家, 逯力红, 等. 复杂背景成像条件下运动点目标的轨迹提取[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7):1619-1625.
CONG M Y, HE W J, LU L H, *et al.*. Trace extraction of moving point targets in complex background images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1619-1625. (in Chinese)
- [26] 郭裕兰, 万建伟, 鲁敏, 等. 激光雷达目标三维姿态估计 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4): 843-850.
GUO Y L, WAN J W, LU M, *et al.*. Three dimensional orientation estimation for ladar target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):843-850. (in Chinese)

作者简介:



丁 卫(1969—), 男, 江苏武进人, 讲师, 2007 年于上海大学获得博士学位, 主要从事机器人技术与柔性自动化, 机器视觉, 模式识别等方面的研究。E-mail: dingwei@shu.edu.cn



王 驰(1982—), 男, 河南太康人, 副研究员, 2009 年于天津大学获得博士学位, 主要从事声波探测、光纤传感等方面的研究。Email: wangchi@shu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)