

土壤-地雷共振系统模型解析^{*}

王 驰^{1)†} 于瀛洁¹⁾ 李醒飞²⁾ 梁光强³⁾

1)(上海大学(延长校区)精密机械工程系,上海 200072)

2)(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

3)(天津大学武装部,天津 300072)

(2009 年 11 月 18 日收到;2009 年 12 月 29 日收到修改稿)

在研究土壤-地雷共振系统模型的基础上,提出一种共振与反共振相结合的声波探雷模型.根据地雷顺性大及低频声学的特征,把地雷与其上方的土壤分别等效为弹簧和质量块,构成质量-弹簧共振系统,通过对系统频响函数的解析,讨论模型的共振与反共振现象.通过实验发现有、无地雷的地表振动速度比值存在大于 1 的极大值频率点和小于 1 的极小值频率点交替出现,与理论预测符合.表明土壤-地雷共振系统同时存在共振与反共振现象,可用于地雷成像的研究.

关键词: 共振模型, 反共振, 频响函数, 声波探雷

PACC: 4360, 4380, 4385G

1. 引 言

非金属地雷的安全、有效探测一直是摆在国内外排雷专家面前的难题.因它们和土壤之间的电学特性差异较小,使用最为广泛的手持金属探雷器以及探地雷达探测效果较差.相对而言,不管是塑料地雷还是金属地雷,它们与土壤的机械特性差别较大,这使得利用地雷机械特性的声波探雷技术显得更为可靠.

基于地雷机械特性的声波共振探雷方法近年来越来越引起人们的重视.其中,以 Sabatier, Donskoy 等人提出的土壤-地雷组成的质量-弹簧共振模型为代表,取得了实验室条件下的良好探测效果^[1-4],但 Sabatier 在其发表的文章中只是定性地阐述该系统的共振作用对地表振动状态的影响.后来,Yu,Zagrai 等人分别研究了该模型的反共振及多模态共振现象,并进行了实验验证^[5,6].所谓反共振是指多自由度振动系统在某些特定频率的谐波外力激励下,系统某些部位出现振动响应等于零的现象,相应的频率点称为反共振频率.但他们都没有给出该共振模型较详细的理论解析,而且在地雷成

像的研究中,通常是用地表振动信号幅频特性曲线在整个扫描频率范围内的面积积分作为表征地雷存在性的特征值,虽然共振频率和反共振频率是在不同的频率点,它们分别会在整体上降低反共振或共振模型研究的特征值,加上地表振动信号很弱以及环境噪声的影响,最终使探测系统的灵敏度很低,不利于实用声波探雷系统的研制.

在国内有关声波探雷技术的文献还很少见.笔者在文献[7]中阐述了声波由空气到土壤介质中的传播特性及其在地雷探测应用中的基本原理,在文献[8,9]中初步分析了土壤-地雷共振模型的解析方法——频响传递函数.为了进一步研究并利用土壤-地雷系统的共振与反共振现象,本文详细解析该系统模型的频响函数,在深入研究共振与反共振机理的基础上,明确提出共振与反共振相结合的声波探雷模型.通过实验表明,有雷与无雷的地表振动速度比率的幅值在较宽的频带内都大于 1,而且存在极大值和极小值频率点交替出现的现象,与理论预测符合,从而验证了土壤-地雷共振系统同时存在共振与反共振作用以及所提声波探雷模型的潜在价值.

^{*} 上海市教委“机械电子工程”创新团队资助的课题.

[†] E-mail: wangchi@shu.edu.cn

2. 声波共振技术探雷的基本思想

对一个实际的埋雷区,地雷埋藏深度一般在数厘米量级,即埋在浅层地表土壤中. 这种土壤由固体颗粒、空气和水等构成,可压缩性强,其孔隙度的存在使声波穿透土壤传播到地下的能量相对由土壤固体基质构成的单相介质要大得多. 如图 1 所示,在声波等外力作用下,土壤中的声波不仅有快纵波、慢纵波,还有瑞利面波、横波等多种成分,而且这些不同成分的声波的频率与引起的地表振动频率以及声源的频率是相等的^[10]. 不过声波由空气穿透到地下传播时的能量以快、慢纵波为主,对地雷振动的影响程度也最大. 快、慢纵波具有不同的传播特性,快纵波速度相对较快,引起较强的固体相振动、较弱的流体相振动;慢纵波速度相对较慢,引起较弱的固体相振动、较强的流体相振动^[11,12]. 由于雷体的声阻抗与土壤固相基质相当,而与土壤流相相差很大,因此,快纵波传播到地雷时会因较小的声阻抗差而穿透雷体继续传播;而慢纵波却因较大的声阻抗差而发生强烈的反射或散射现象^[7]. 由于土壤-地雷系统的谐振作用,最终会通过反射或散射的慢纵波而引起地表振动状态的独特变化.

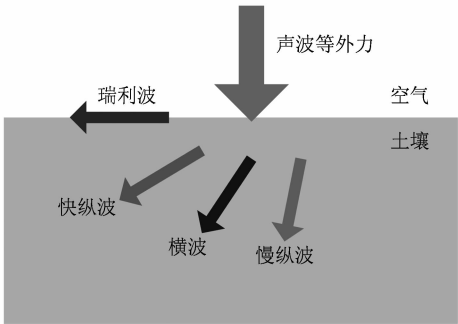


图 1 声波等外力由空气穿透到地下的能量传播示意图

3. 共振与反共振相结合的声波探雷模型

3.1. 土壤-地雷共振系统集中参数模型

土壤-地雷共振系统的频响传递函数,在文献[8,9]中有初步的描述,为了便于表达及更充分地解析所研究的共振与反共振相结合的声波探雷模型,下面给出土壤-地雷共振系统模型的建立方法.

反步兵地雷直径 5—10 cm,埋藏深度 5 cm 左右,反坦克地雷直径 20 cm 左右,埋藏深度一般不超过 20 cm. 根据低频声场的特点,地雷的几何尺寸及埋藏深度一般要小于 1 kHz 以下的声波对应的波长,因此,可用集中参数系统的模型进行分析. 另外,地雷的共振作用对地表振动信号的影响主要是通过雷体罩的振动传播实现的,因此,可把雷体罩及地雷上方的土壤分别等效为质量块. 由于地雷的柔性相对埋藏其中的土壤较大,这也是所研究的探雷模型的重要理论基础,为突出这一特性,在建模过程中可用刚度这个参数. 另外,土壤具有黏滞特性,而且地雷振动会对周围的土壤有拖动作用,这两种情况都会导致能量的消耗,把这种振动能量的衰减作用等效为阻尼因子. 在此基础上,考虑声波由空气穿透到地下的传播特征,由于土壤中的声波不仅有纵波成分而且有横波成分,或者土壤振动不仅有拉伸应力而且有剪切应力,为体现这种应力特征,在建模过程中分别用与之相对应的阻尼因子和刚度系数来表征. 根据以上分析,最终构成一个有阻尼的多自由度集中参数振动系统模型,如图 2 所示,其中, f 是由入射声波决定的施加到地表的外力; m_1 和 m_2 分别为地雷上方土壤质量和雷体气腔罩质量; c_1 和 c_2 分别为对应于土壤剪切和拉伸作用的阻尼系数; c_3 对应于雷体气腔罩的阻尼系数; k_1 和 k_2 分别为因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.

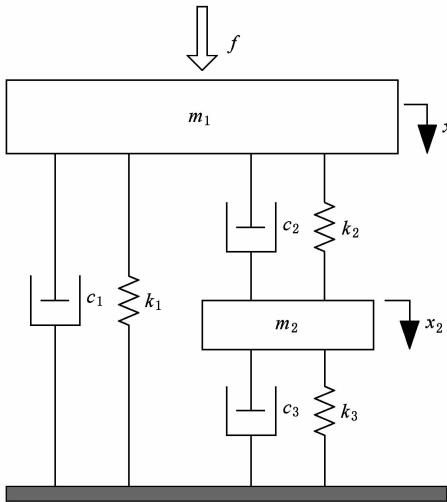


图 2 土壤-地雷共振集中参数模型

3.2. 土壤-地雷共振系统的频响传递函数

根据线性振动理论和牛顿力学原理,可推出地表振动速度的幅频特性函数为

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

其中

$$\begin{aligned} A_6 &= m_2^2, \\ A_4 &= c_{23}^2 - 2m_2k_{23}, \\ A_2 &= k_{23}; \\ B_8 &= m_1^2m_2^2, \\ B_6 &= S_1 - 2m_1m_2S_2, \\ B_4 &= T_1 + 2T_2 - 2T_3, \\ B_2 &= U_1 - 2U_2, \\ B_0 &= (k_1k_2 + k_1k_3 + k_2k_3)^2; \\ S_1 &= (m_1c_{23} + m_2c_{12})^2, \\ S_2 &= k_{12}m_2 + k_{23}m_1 + c_{12}c_{23} - c_2^2; \\ T_1 &= (k_{12}m_2 + k_{23}m_1 + c_{12}c_{23} - c_2^2)^2, \\ T_2 &= m_1m_2(k_{12}k_{23} - k_2^2), \\ T_3 &= (m_1c_{23} + m_2c_{12})(k_{12}c_{23} \\ &\quad + k_{23}c_{12} - 2k_2c_2); \\ U_1 &= (k_{12}c_{23} + k_{23}c_{12} - 2k_2c_2)^2, \\ U_2 &= (k_{12}k_{23} - k_2^2)(k_{12}m_2 + k_{23}m_1 \\ &\quad + c_{12}c_{23} - c_2^2); \\ k_{12} &= k_1 + k_2, \\ k_{23} &= k_2 + k_3; \\ c_{12} &= c_1 + c_2, \\ c_{23} &= c_2 + c_3. \end{aligned}$$

对于该频响传递函数的详细推导过程可参考文献[8],下面着重讨论该函数隐含的共振与反共振现象.根据(1)式可知,整个系统具有4阶共振的基本特性.幅频特性函数 $|H_{11}(\omega)|$ 的分子是关于 ω^2 的三次多项式,存在三个零点 $0, \omega_{a1}, \omega_{a2}$,即是系统的反共振频率点,它表示当入射声波频率等于或接近这些反共振频率时,地表的响应速度会出现极小值,当然因阻尼作用不会是0,这时在有地雷埋藏的情况下地表振动速度相比没有地雷还要小.应当指出的是, $\omega = 0$ 只是理论上的反共振频率,此时可理解为整个系统在做刚体运动,对一个实际的声-地震耦合系统并不存在.但声波探雷中所用的声波扫描

频率一般从50 Hz开始,在激发频率很低或初始扫频时可能会发生一定程度的反共振作用.幅频特性函数 $|H_{11}(\omega)|$ 的分母是关于 ω^2 的四次多项式,存在四个极小值点 $\omega_{r1}, \omega_{r2}, \omega_{r3}, \omega_{r4}$,即是系统的共振频率点,它表示当入射声波频率等于或接近这些共振频率时,地表振动的响应速度会出现极大值,不过因阻尼作用不会是无穷大,有地雷存在时地表振动速度相比没有地雷埋藏的情况要大得多.从以上分析可知,所研究的系统模型具有多个谐振频率,因此,属于多模态共振系统,从一定意义上讲,这就概括了Sabatier, Yu和Zagrai等人分别从共振、反共振及多模态共振角度研究的理论成果.此外,根据多自由度系统线性共振理论,土壤-地雷系统的各阶共振、反共振频率点会交替出现,即每一个共振(或反共振)之后一定出现反共振(或共振),但一般而言共振占主导作用.

3.3. 土壤-地雷共振系统的反共振

作为土壤-地雷共振系统的一个特例,其反共振现象也可以采用如下解析方法简化分析^[5,7].假设 m_1 的位移 x_1 和速度 $\dot{x}_1$ 都为0,即地表静止,则图2所示模型可以等效为图3所示.

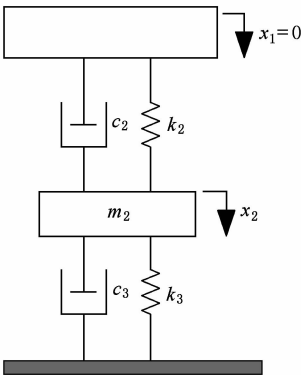


图3 地表静止时与图2对应的简化模型

由地表施加的外力应满足

$$F = -(c_2 + c_3)\dot{x}_2 - (k_2 + k_3)x_2. \quad (2)$$

根据牛顿第二定律对 m_2 列微分方程得

$$m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = -(c_2 + c_3) \frac{dx_2}{dt} - (k_2 + k_3)x_2. \quad (3)$$

解得

$$x_2(t) = \chi e^{-\xi\omega_0 t} \sin(\omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}t + \varphi), \quad (4)$$

其中, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k_2 + k_3}{m_2}}$, $\xi = \sqrt{\frac{c_2 + c_3}{2m_2\omega_0}}$, χ 和 φ 依赖于

m_2 的初始条件.

从上面的分析可以看到,当施加的外力满足一定条件时,地表的振动会为 0 或者变得很小,此时,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_2 + k_3}{m_2}}$$
就是模型系统的一个反共振频率. 当

外界激励频率与这个频率相等或接近时,系统的输出为 0,即发生反共振现象,地表振动速度为 0.

3. 4. 土壤-地雷系统共振与反共振相结合的声波探雷模型

综合以上分析,当声波激发土壤-地雷系统由低频向高频扫描时,初始可能首先出现反共振现象,之后出现共振、再出现反共振的现象. 不过由于土壤的非线性及地雷结构类型复杂性等原因,土壤-地雷系统本质上是复杂的非线性系统,声波作用下的地表振动信号也因此是非常复杂的. 但根据所研究的简化的线性共振系统模型,地表振动速度应该会出现极大或极小的情况,表现为有雷和无雷的速度比率在大于 1 与小于 1 之间出现明显的交替现象,其中共振是主要的,反共振相对较弱.

正如上文所提到的, Sabatier, Yu 和 Zagrai 等人分别从共振、反共振及多模态共振的角度对土壤-地雷谐振系统模型进行了分析和实验验证,在地雷成像的研究中,大都是用地表振动信号幅频特性曲线在整个扫描频率范围内的面积积分作为表征地雷存在性的特征值. 由于共振与反共振是同一个模型所拥有的振动属性,虽然共振频率和反共振频率是在不同的频率点,但它们在积分过程中分别会在整体上降低反共振或共振模型的特征值,加上地表振动信号很弱以及环境噪声的影响,最终使探测系统的灵敏度很低,不利于实用声波探雷系统的研制.

为此,本文提出共振与反共振相结合的声波探雷模型,模型的基本结构同图 2 所示,理论研究方法基于频响传递函数的解析法. 对于实验验证的研究,一方面, Sabatier, Yu 和 Zagrai 等人的研究成果,从某种意义上来讲可作为不同侧面的证据;另一方面,限于实验条件,本文着重强调共振与反共振相结合的声波探雷模型所体现的振动特征的验证,即有雷与无雷埋藏时地表振动速度比值的幅频特性曲线是否出现明显大于 1 与小于 1 的情况,在此基础上,提出表征地雷存在性的新的特征量.

4. 实验系统

实验系统硬件装置与文献[7—9]相似,如图 4 所示,主要包括实验木箱、声波发射装置、地表振动信息接收装置以及数据的分析和处理单元等几部分. 考虑到成本、技术成熟度等问题,选择信号发生器和音响系统分别作为信号源和声波发射单元. 其中,信号源要求能输出幅值稳定、谐波失真小的低频正弦波信号;音响系统由调音台、功率放大器和扬声器等构成,要考虑功率、频响特性及各组成部件之间的输入、输出匹配问题. 由于声波能量由空气穿透到地下的效率很低,实验要求激励声波的能量很强,信号源输出如果有小的扰动都有可能烧毁扬声器,调音台在这里主要起前置放大的保护作用. 考虑到精度、成本及便携等因素,可选择灵敏度高、体积小、成本低的地震检波器作为地表法向振动速度接收传感器接收地表振动信息,并通过数据采集卡采集到计算机中进行分析、处理、显示和记录等. 整个实验系统在室内进行,在检测地表位置的 C 计权声压级值分布在 115—130 dB. 所用的地

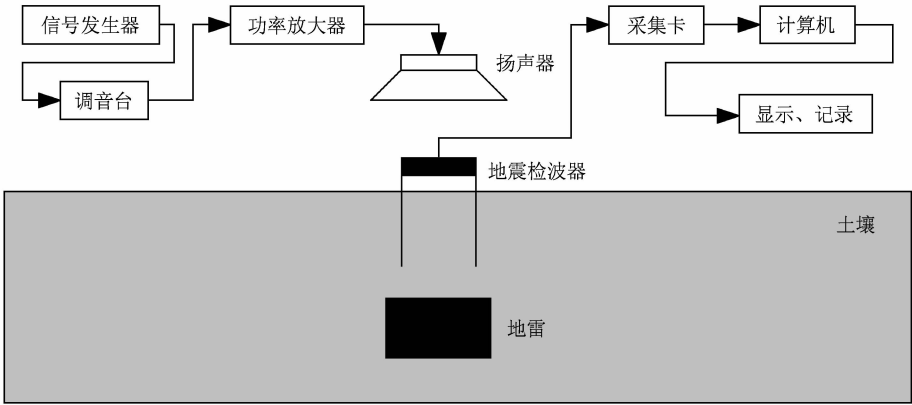


图 4 实验系统示意图

雷样品为六九式反坦克塑料教练地雷,直径约 26 cm,埋藏深度约 10 cm,考虑到安全问题,地雷中的炸药用机械特性与其相似的干燥的细沙土代替.关于更详细的系统介绍(包括参数设置、实验方法等)可见文献[7—9].

5. 实验结果及分析

图 5 是在有雷及无雷情况下分别进行三次测量取平均值及其比值的地表振动速度幅频特性

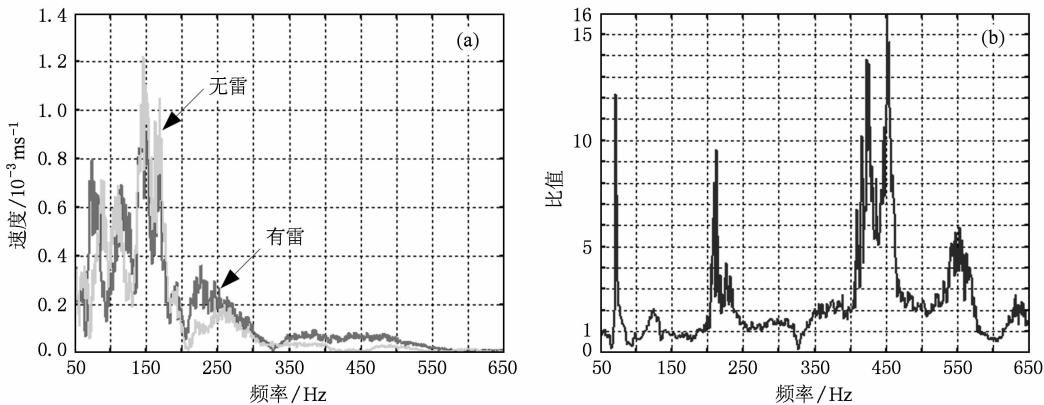


图 5 有、无地雷三次测量平均值及其比值 (a)平均值;(b)有、无雷比值

另外,从图 5 也可看出如下几个结论.首先,它们的最大值都不超过 1.25×10^{-3} m/s,说明信号比较弱,这因声波能量由空气穿透到地下的效率很低所致.其次,在 140—170 Hz 这个范围,二者不仅都有整个频段内的最大值,而且有地雷幅值明显低于没有地雷的情况,这可利用快纵波相长干涉理论来解释^[7].因快纵波固体相振动强烈、速度快,传播到箱体底部后会发生反射或散射现象,并再次传播到地表与另外的快纵波在满足干涉条件时发生相长干涉作用,从而使振动出现极大值或最大值;但地雷因其气腔的存在,使快纵波得到某种程度的衰减,因此在有地雷的情况下既出现较大的幅值,但又小于没有地雷的情况.第三,由于土壤的非线性及不同深度本质上可认为是分层的,不同声波的传播特性会异常复杂,最终导致测试振动信号的复杂性与不规则性,但总的变化规律主要取决于快纵波的相长干涉、慢纵波的反射现象以及土壤-地雷系统的谐振机理.

通过上述实验分析,定性地验证了共振与反共振相结合的声波探雷模型的振动特征,不仅存在共振现象,也存在反共振现象,而且总体上振动信号

曲线.可以看出,有地雷时的地表振动幅值整体上要高于无地雷的情况,但在某些频段也存在小于无地雷的幅值.在 73 Hz,214 Hz,424 Hz,450 Hz 出现明显的极大值点,分别达 12,9.6,13.8,16.在 67 Hz,96 Hz,328 Hz 出现极小值,分别达 0.2,0.3,0.18,即有雷的幅值最低相当于没有地雷的近 1/5.显然,这些极小值频率点和极大值频率点是依次出现的,与 Yu,Zagrai 等人的研究结果一致,应是所建共振模型的反共振和共振频率.

很微弱,为了便于数据的处理以及将来地雷声学成像的研究,下面初步探讨基于共振与反共振相结合的声波探雷模型的地雷机械特征量.

根据有、无地雷地表振动相对值的幅频特性曲线,借鉴 Sabatier 等人的研究成果,通过对比值在频域上进行面积积分探索表征地雷存在性的新的机械特征参量.但为了充分利用共振与反共振现象,在面积积分过程中首先作一个幅值判断:如果在某频率点处的幅值大于 1,认为是共振作用的结果,就用该值本身;如果幅值小于 1,则认为是反共振作用的结果,积分时用该值的倒数.这种积分算法的数学表达式可表示为

$$M = \int_{f_0}^{f_N} R(f_i) df$$

(5)

和

$$R(f_i) = \begin{cases} r(f_i), & r(f_i) \geq 1, \\ 1/r(f_i), & r(f_i) \leq 1, \end{cases}$$

(6)

其中, $r(f_i)$ 表示有、无地雷地表振动速度在频率 f_i 处的比值, f_0, f_N 表示扫描频率的下限和上限, M 表示了地雷对地表振动速度幅值的影响,不仅体现了

共振的增强作用,也把反共振的减弱作用换算为增强作用,因此,最终对积分值都起到了增强的作用,这就避免了利用共振或反共振单一现象的模型受到的反共振或共振现象的不利影响. 为了描述的方便,在这里也不妨称 M 为“地雷振动强度”. 如果在

某点测得的 M 明显大于 1,说明存在共振和反共振的可能,如果在一定面积尺寸范围内在各个点测得的 M 都明显大于 1,说明地下存在地雷. 基于这种地雷特征值的地雷成像示意图如图 6 所示,如果地下埋有地雷,则会呈现明显的凸起^[2].

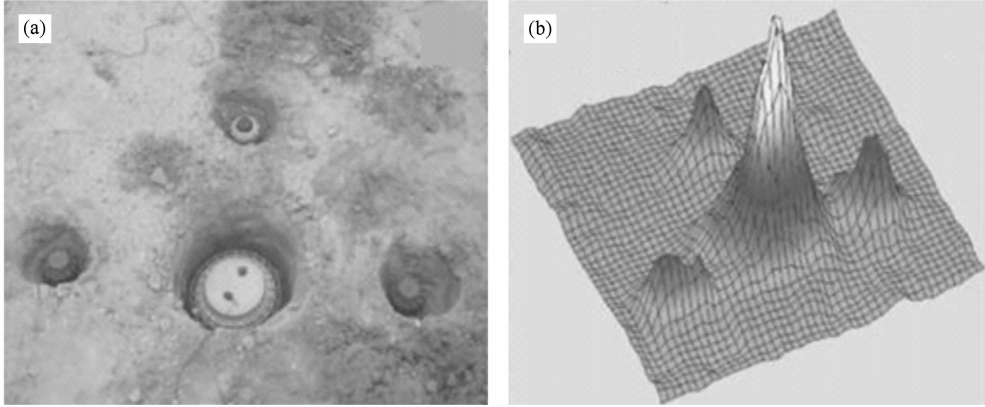


图 6 地雷成像示意图 (a) 实际雷区; (b) 地雷声波成像

6. 结 论

本文在简要描述声波共振技术探雷机理的基础上,解析了土壤-地雷线性共振系统模型,通过对地表振动速度幅频特性函数表达式的剖析,得出土壤-地雷系统同时存在共振与反共振及多模态谐振的结论,在此基础上提出了共振与反共振相结合的声波探雷模型,并通过实验表明,有雷与无雷的地表振动速度比率会在相当宽的频带内大于 1、某些频段小于 1,而且会存在多个交替出现的极大值和极小值频率点. 另外,基于实验结果及所提出的共振与反共振相结合的声波探雷模型,初步讨论了地

雷新的机械特征参数的提取方法,限于实验设备尚不能做到扫描探测,给出了地雷成像的示意图.

当然,本文的研究还处于非常初期的探索阶段,在一定程度上是对已有研究成果的总结和深化,距离实用探雷工程系统的研制还需要做大量工作. 首先,要精确验证频响传递函数的正确性,需要测出土壤、地雷的有关机械参数,比如频响传递函数中所用到的质量 m 、阻尼 c 、刚度 k 等. 另外,声波能量穿透到地下及其传播过程,也需要深入的分析,建议参见文献[13—16]中所描述的矢量辐射传输研究方法、岩石坠落激发表面波生成机理、有限深分层流体中运动物体等效移动质量源的数值方法及随机波的解析方法等.

- [1] Sabatier J M 2000 *Proceedings of SPIE* **4038** 781
- [2] Xiang N, Sabatier J M 2003 *J. Acoust. Soc. Am.* **3** 1333
- [3] Donskoy D, Reznik A, Zagrai A 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **2** 690
- [4] Donskoy D 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **5** 3042
- [5] Yu S H, Avinash G, Thomas R W 2002 *Proceedings of SPIE* **4742** 701
- [6] Zagrai A, Donskoy D, Ekimov 2004 *Proceedings of SPIE* **5415** 21
- [7] Wang CH, Liu ZH G, Li X F 2008 *Acta Acustica* **4** 354 (in Chinese) [王 驰、刘志刚、李醒飞 2008 声学学报 **4** 354]
- [8] Wang CH, Li X F, Fu J 2008 *Opt. Precision Eng.* **9** 1716 (in Chinese) [王 驰、李醒飞、付 娟 2008 光学精密工程 **9** 1716]
- [9] Wang CH, Liu ZH G, Li X F 2008 *J. Tianjin Univ.* **6** 745 (in Chinese) [王 驰、刘志刚、李醒飞 2008 天津大学学报 **6** 745]
- [10] Wang CH, Li X F, Liu ZH G 2008 *Chin. J. Sensors Actuators* **5** 887 (in Chinese) [王 驰、李醒飞、刘志刚 2008 传感技术学报 **5** 887]
- [11] Yang D H 2002 *Chin. J. Geophys* **4** 575 (in Chinese) [杨顶辉 2002 地球物理学报 **4** 575]

[12]

Pei Z L 2006 *J. China Univ. Petr.* **2** 16 (in Chinese)[裴正林 2006 中国石油大学学报 **2** 16]

6743 (in Chinese)[何海伦、刘永军、莫 军、宋金宝 2009 物理学报 **58** 6743]

[13]

Cheng T H, Gu X F, Yu T, Chen L F, Tian G L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7368 (in Chinese) [程天海、顾行发、余 涛、陈良富、田国良 2009 物理学报 **58** 7368]

6750 (in Chinese)[尤云祥、赵先奇、陈 科、魏 岗 2009 物理学报 **58** 6750]

[14]

He H L, Liu Y J, Mo J, Song J B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58**

[16]

Chen X G, Guo Z P , Song J B 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3387

Analysis of earth-mine resonance model^{*}

Wang Chi^{1)†}

Yu Ying-Jie¹⁾

Li Xing-Fei²⁾

Liang Guang-Qiang³⁾

1) (Dept. of Precision Mechanical Engineering , Shanghai University , Shanghai 200072 , China)

2) (State Key Lab of Precision Measuring Technology & Instruments , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

3) (Arming Office , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

(Received 18 November 2009 ; revised manuscript received 29 December 2009)

Abstract

Based on the earth-mine resonance model, a model combining resonance and anti-resonance was presented for acoustic mines detection. Considering the high compliance and low-frequency acoustics characters, a landmine and the earth on top of it were respectively equivalent to a spring and a mass, resulting in a mass-spring system. The model’s resonance and anti-resonance mechanisms were discussed by means of frequency response function. The experimental results showed that the vibration velocity ratios of the ground surface with and without mine buried under it show alternate maximum and minimum frequencies with the ratios greater than 1, and less than 1 respectively. The results consisted with the theoretical prediction and indicated that the earth-mine system’s resonance and anti-resonance mechanisms exist concurrently, which can be used to further study of the acoustic mine imaging.

Keywords: resonance model, anti-resonance, frequency response function, acoustic landmines detection
PACC: 4360, 4380, 4385G

*

Project supported by the Mechatronics Engineering Innovation Group Project from Shanghai Education Commission.

†

E-mail: wangchi@shu.edu.cn