

文章编号 1004-924X(2021)04-0710-11

## 激光自混合测振技术在声共振探雷实验中的应用

王 驰<sup>1,2</sup>, 马 辉<sup>1</sup>, 李金辉<sup>2</sup>, 张小青<sup>1</sup>, 栾信群<sup>2</sup>, 方 东<sup>2\*</sup>

(1. 上海大学 精密机械工程系, 上海 200444;

2. 近地面探测技术重点实验室, 江苏 无锡 214035)

**摘要:** 利用激光自混合干涉测振技术, 研究一种非接触式声共振探雷方法。在论述激光自混合测振技术原理的基础上, 以 69 式防坦克塑壳地雷、72 式防坦克金属地雷、58 式防步兵橡胶地雷和砖块作为测量对象, 构建其声学特征测量实验系统, 设计并搭建地雷在埋设情况下的探测实验系统, 利用激光自混合测振技术研究不同类型埋设地雷及同一地雷在不同埋深和土壤条件下的声振特性。实验结果显示, 地雷在外界激励下表现出独特的多模态振动特性, 在不同埋设条件下表现出不同的声振特征, 地表振动强度随着深度的增加和土壤孔隙度的减小而减小, 而对土壤湿度的变化不明显。利用激光自混合测振技术可进行地雷振动特征的非接触式检测, 埋设地雷的声振特征不同于砖块等干扰物, 与地雷的类型及埋设条件有关。

**关键词:** 激光自混合干涉; 声共振; 地雷探测; 声-地震耦合

**中图分类号:** TN247; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212904.0710

## Application of laser self-mixing vibration measurement technique in acoustic resonance landmine detection

WANG Chi<sup>1,2</sup>, MA Hui<sup>1</sup>, LI Jin-hui<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-qing<sup>1</sup>, LUAN Xin-qun<sup>2</sup>, FANG Dong<sup>2\*</sup>

(1. Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Science and Technology on Near-surface Detection Laboratory, Wuxi 214035, China)

\* Corresponding author, E-mail: stnsdl@126.com

**Abstract:** A non-contact acoustic resonance method for landmine detection was studied by a laser self-mixing interference vibration measurement technique. Based on the principle of the laser self-mixing vibration measurement technique, taking a type 69 anti-tank plastic landmine, a type 72 anti-tank metal landmine, and a type 58 anti-personnel rubber landmine and brick as testing targets, an experimental system was built to measure their acoustic characteristics. Experimental tests were conducted for a comparative analysis. An experimental system for detecting buried landmines was designed and built, and the laser self-mixing vibration measurement technique was used to study the acoustic vibration characteristics of different types of buried landmines and those of the same landmine under different buried depths and soil conditions. The experimental results show that landmines exhibit unique multi-modal vibration characteristics under external excitations. Buried landmines exhibit different acoustic vibration characteristics under different buried

收稿日期: 2020-12-02; 修订日期: 2020-12-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41704123, No. 61773249); 近地面探测技术重点实验室基金资助项目 (No. TCGZ2020C003); 上海市科技创新行动计划项目 (No. 20142200100)

conditions. The vibration intensity increases with the increase of buried depth and decrease of soil porosity, thus is not sensitive to soil humidity. These results indicate that the laser self-mixing vibration measurement technique can be used for the non-contact detection of acoustic vibration characteristics of landmines. The acoustic vibration characteristics of buried landmines are different from other objects such as bricks and are related to the type of landmine and the buried conditions.

**Key words:** laser self-mixing interference; acoustic resonance; landmine detection; acoustic-to-seismic coupling

## 1 引 言

由于雷区环境复杂且地雷种类多样,埋设地雷的安全有效探测一直是世界性难题。基于地雷声振特性和声-地震耦合原理的声波共振探雷技术是一种极具潜力的探测方法。当声波从空气中传播入射到土壤时,大部分能量被反射回空中,还有一小部分能量通过动量作用及空气与土壤粒子的黏滞摩擦作用,以地震波的形式耦合到土壤中,并引起地表的振动,这种现象称为声-地震耦合<sup>[1-2]</sup>。此外,地雷作为一个弹性腔体结构,其声顺性远大于埋藏土壤和石块、树根、金属弹片等杂物,在声波耦合的地震波能量作用下会发生谐振作用,致使地表振动产生独特的变化。利用高灵敏度的振动传感器检测地表振动的变化情况,可以判断地雷的存在性。然而,声-地震耦合的效率很低,声波耦合的地表振动即使在地雷发生谐振的作用下仍然很微弱,加上环境噪声的影响,如何精确检测微弱的地表振动特征信号,一直是声波共振探雷技术研究的关键问题。

在声波共振探雷技术研究中,对于地表微弱振动信号的检测使用了不同类型的传感器,包括接触式传感器和非接触式传感器。接触式传感器主要包括地震检波器和加速度计<sup>[3-4]</sup>,它们结构简单、成本较低,在声共振探雷模型验证的实验室研究阶段用于检测地表微弱振动信号,并取得了较好的效果,但不适用于工程探雷系统。非接触式传感器主要包括激光多普勒振动计<sup>[5-7]</sup>、雷达振动计<sup>[8-9]</sup>和超声振动计<sup>[10-11]</sup>等,它们虽然各有特点,但因在可靠性、快速性和便携性等方面的局限,无法较好地胜任微弱复杂地表振动信号的检测工作。

近年来,研究人员关注到激光自混合干涉测振技术在声波耦合的地表振动检测中的应用潜

力。激光自混合干涉测振技术是指来自激光器输出的激光束投射到振动目标表面,经目标反射或散射后,有一部分携带目标振动信息的反射光或散射光反馈回腔内与腔内光相互干涉,从而调制激光器的输出功率和频率,通过分析封装在激光器中的光电探测器检测到的输出光功率变化,即可得到目标物体的振动信息<sup>[12]</sup>。实验研究表明,激光自混合测振技术可以实现复杂粗糙表面振动的精确快速测量,测量精度可达纳米量级<sup>[13-14]</sup>。与现有的非接触式地表振动检测技术相比,激光自混合测振技术具有稳定性好、光路简单和测量精度高等优点。因光路简单,激光自混合测振仪器占用体积小、质量轻、便于携带<sup>[13-15]</sup>。目前,该技术已逐渐应用于工业生产、生物医学等领域,如微机电系统(MEMS)的动态测量<sup>[16]</sup>、机械设备的故障诊断<sup>[17-18]</sup>、生物振动信号(人体皮肤的振动,耳鼓的振动等)的检测<sup>[19-20]</sup>等,并取得了良好的检测效果。

本文将激光自混合干涉测振技术应用于声共振探雷实验研究中,根据地雷固有频率所在的频段,利用高功率音箱采用正弦扫频的激励方式激励地表产生微弱振动,利用激光自混合测振技术进行微弱复杂地表振动信号的高精度非接触式检测。对不同类型埋设地雷与砖块作为干扰物进行对比实验,验证利用激光自混合测振技术进行声共振探雷技术研究的可行性;同时,通过改变69式防坦克塑壳地雷的埋藏深度以及其上方覆土土壤的湿度和孔隙度,研究了地雷在不同埋藏条件下的声振特性。

## 2 激光自混合干涉测振原理

激光自混合干涉测振原理可利用三镜腔模型进行分析,三镜腔模型如图1所示。反射镜A,

B 构成了激光器的内腔, 反射镜 B 和反射体(待测目标, 如地雷或地表) M 构成了激光器的外腔。\$l\$ 和 \$L\$ 分别表示激光器的内腔长度和外腔长度。

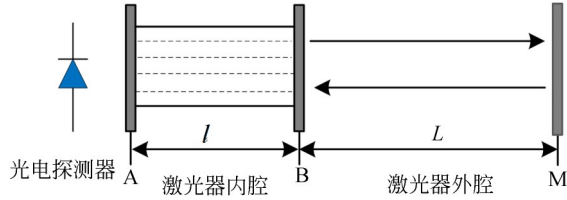


图 1 三镜腔模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-mirror cavity model

忽略外腔的多次反射, 光反馈存在时可得自混合干涉系统的频率方程和功率方程式分别为<sup>[21]</sup>:

$$2\pi\tau_L\nu_0 = 2\pi\tau_L\nu_F + C \sin [2\pi\tau_L\nu_F + \arctan \alpha], \quad (1)$$

$$P = P_0 [1 + m \cos(2\pi\nu_F\tau_L)], \quad (2)$$

式中: \$\nu\_0\$ 为无光反馈时激光器的光频率; \$\nu\_F\$ 为有光反馈时激光器的光频率; \$\tau\_L = 2L/c\$ (\$c\$ 为真空中的光速), 表示光在外腔往返一周的时间; \$C\$ 为光反馈强度系数, 表示激光自混合干涉系统中外部光反馈量的强弱; \$\alpha\$ 为激光器线宽展宽因子; \$P\_0\$ 为无光反馈时激光器的初始光功率; \$P\$ 为有光反馈时激光器的输出光功率; \$m\$ 为调制系数, 可视为常数。

由式(1)和式(2)可知, 激光器输出功率 \$P\$ 和光频率 \$\nu\_F\$ 均与外腔长度 \$L\$ 相关。随着目标物体的振动, 即外腔长度 \$L\$ 的改变, 激光器的输出光功率 \$P\$ 相应改变。通过分析光电探测器检测到的输出光功率的变化, 即可得到目标物体 M 的振动信息。激光器的外腔反射体每移动半个波长, 即 \$\Delta L = \lambda\_0/2\$ (\$\lambda\_0\$ 为激光器初始的输出波长) 时, 激光器输出光功率信号就产生一个干涉条纹, 即一个周期的自混合信号。

假设目标物体做简谐振动, 振动信号随时间变化的规律为:

$$L(t) = L_0 + A \sin(2\pi ft), \quad (3)$$

其中: \$L\_0\$ 是外腔的初始长度, 即反射镜 B 到目标的距离; \$A\$ 和 \$f\$ 分别是目标物体的振幅和振动频率, \$t\$ 是时间变量。则有:

$$\tau_L(t) = \frac{2L(t)}{c} = \frac{2[L_0 + A \sin(2\pi ft)]}{c}. \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)可得:

$$P = P_0 \left\{ 1 + m \cos \left[ 4\pi\nu_F \frac{L_0 + A \sin(2\pi ft)}{c} \right] \right\}. \quad (5)$$

根据式(1)和式(5), 可得到不同振幅和频率下的简谐振动对应的模拟自混合信号波形。仿真条件如下: 激光器的初始输出波长 \$\lambda\_0\$ 为 \$1.31 \mu\text{m}\$, 初始外腔长度 \$L\_0\$ 为 \$5 \text{ cm}\$, 光反馈强度系数 \$C\$ 为 \$0.5\$, 线宽展宽因子 \$\alpha\$ 为 \$4\$, 可得如图 2 所示的自混合仿真信号。图 2(a)~2(c) 分别对应反射体 3 种简谐振动: \$A\_1 = \lambda\_0, f\_1 = 100 \text{ Hz}\$; \$A\_2 = 2\lambda\_0, f\_2 = 100 \text{ Hz}\$; \$A\_3 = 2\lambda\_0, f\_3 = 200 \text{ Hz}\$。比较图 2(a) 和图 2(b) 可以看出, 图 2(b) 对应的自混合信号条数为图 2(a) 的两倍, 由于自混合信号一个周期对应着反射体 \$\lambda\_0/2\$ 的位移, 故随着反射体振动峰值的增加, 自混合信号条纹数量也成倍增加。比较图 2(b) 和图 2(c) 可以看出, 图 2(c) 对应的自混合信号条数为图 2(b) 的两倍, 自混合信号的一个周期与反射体振动的一个周期完全对应, 随着反射体振动频率的增加, 自混合信号的频率也成比例增加。

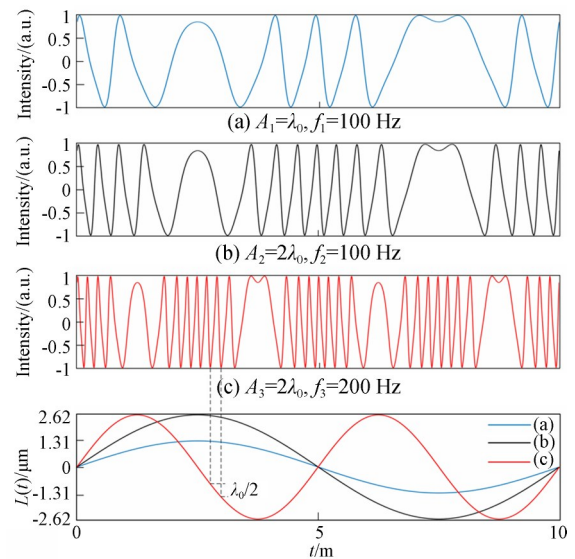


图 2 模拟振动信号及相应的自混合仿真信号

Fig. 2 Simulated vibration signals and corresponding self-mixing signals

### 3 地雷声振特性检测

基于上述激光自混合干涉测振原理, 本课题组采用模态分析法研究了地雷的声振特性<sup>[22]</sup>。

利用高效可靠的脉冲锤(力锤)激振方式,对地雷外壳上标记的点进行激励。采集各点的激振信号及振动响应信号,根据激励信号与响应信号的关系,采用参数识别法获取地雷的模态参数(包括固有频率和模态振型)。如图 3 所示,地雷模态特性测量实验系统包括力锤、数据采集系统、激光自混合测振仪、模态分析仪、计算机和实验对象(地雷)。力锤敲击待测目标产生力信号,激光自混合测振仪检测待测点的振动响应信号。激光自混合测振仪与数据采集系统和模态分析仪相连,将检测到的振动信号经模态分析仪和数据采集系统输入到计算机,最后通过专业模态分析软件进行进一步处理和显示。

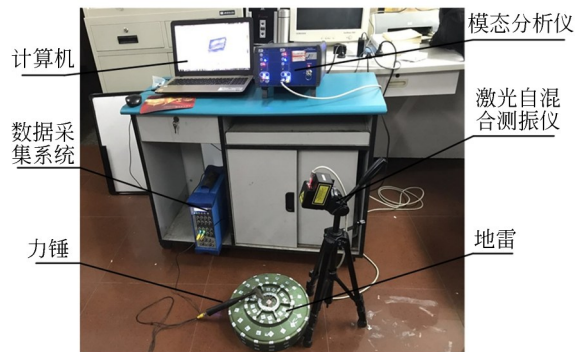


图 3 地雷模态特性测量实验系统

Fig. 3 Experimental system for landmine modal characteristics measurement

图 4 为模态实验的实验对象和分析模型,模态特性检测实验方案中实验对象为塑料外壳的 69 式防坦克地雷(以下简称塑壳地雷)。在塑壳地雷的表面标记敲击力点,根据塑壳地雷的自身结构,在塑壳地雷上标记 127 个待测点,对这些标记点进行编号,将地雷底部用泡沫胶粘在刚性平台上。利用力锤依次敲击地雷模型表面所标记的各点,产生冲击力信号,激光自混合测振仪对准地雷中心点检测振动响应信号,经过模态分析仪和模态分析软件进行数据处理及分析,得到激励点和中心点之间的振动响应传递函数以及地雷壳体的模态振型。

图 5 为塑壳地雷固有频率和模态振型的测量结果。由图 5 可知,塑壳地雷第一次振幅最

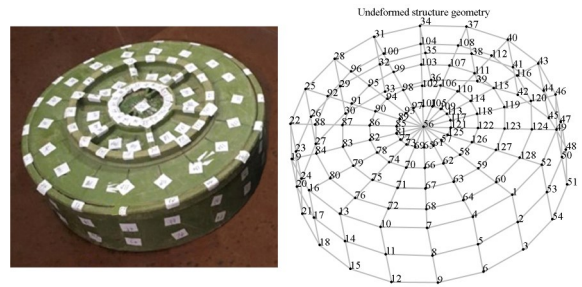


图 4 69 式防坦克地雷及其模态分析模型

Fig. 4 Type 69 anti-tank landmine and its modal analysis model

大值在 112 Hz 附近,对应于塑壳地雷的第一阶固有频率和一阶模态振型,故其一阶固有频率为 112 Hz,振幅为 -73 dB。塑壳地雷的二阶模态出现在频率 232 Hz 处,对应二阶固有频率,此时振幅为 -84 dB。三阶模态出现在频率 723 Hz 处,对应三阶固有频率,振幅为 -96 dB。塑壳地雷是弹性腔体结构,其机械形状是规律的几何图形,因此地雷所激发的模态振型呈现规律的几何图形,振型的变化也是规律的几何变化。从而证实激光自混合测振仪能够准确有效地检测地雷

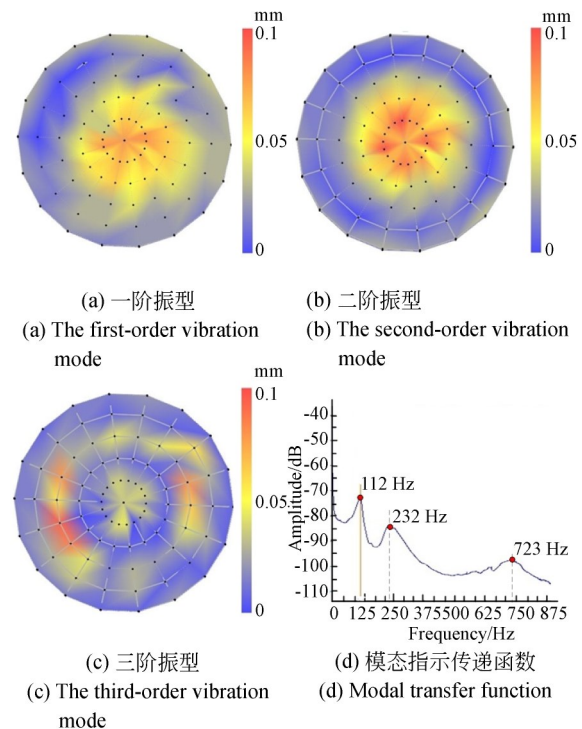


图 5 69 式防坦克塑壳地雷的模态测量结果

Fig. 5 Modal vibration characteristics of type 69 anti-tank plastic landmine

外壳的振动响应信号,从而实现模态特性的测量。

用同样的方法可测量 72 式防坦克金属地雷、58 式防步兵橡胶地雷和一砖块的模态参数。根据文献[22]的实验结果,地雷和砖块的一阶和二阶固有频率如表 1 所示,由实验结果可看出地雷的不同阶模态振型具有明显的特征,不同类型地雷的各阶振型特征不同,尤其塑壳地雷表现出更强烈的振动特征。地雷上壳的弹性板壳结构所呈现的模态振型迥异于砖块,这是由于砖块作为不规则物体,其阻尼特性比壳体地雷大了很多,因此砖块所激发的模态振型没有明显规律,并且砖块的高阶模态振型难以激发。3 种类型地雷的前两阶共振频率均处于低频段(低于 500 Hz),为声波激励地表振动信号频段的选择提供了参考。

表 1 地雷和砖块的前两阶共振频率

Tab. 1 The first- and second-order natural frequencies of landmines and brick (Hz)

探测目标	一阶共振频率	二阶共振频率
69 式防坦克地雷	112	232
72 式防坦克地雷	74	290
58 式防步兵地雷	35	74
砖 块	38	106

## 4 实 验

### 4.1 实验系统的构建

基于激光自混合测振技术和地雷的声振特性,本文设计并搭建了地雷在埋设情况下的探测实验系统。如图 6 所示,该探雷系统包括声波发射部分和地表振动信号检测部分。声波发射部分是由信号发生器、调音台、功率放大器和音箱组成。地表振动信号检测部分由激光自混合测振仪(包括激光头和控制单元)、数据采集卡以及计算机组成。音箱发出声波激励地表的同时,激光自混合测振仪检测土壤表面的振动信号,通过数据采集卡传输到计算机进一步进行处理。其中,激光自混合测振仪采用 Julight 公司生产的单点式 VSM1000-L-EXT 产品,其相关性能参数如表 2 所示。



图 6 基于激光自混合测振的声共振探雷实验系统  
Fig. 6 Experimental system of acoustic resonance landmine detection based on laser self-mixing vibration measurement

表 2 VSM1000-L-EXT 型激光自混合测振仪的性能参数  
Tab. 2 Performance of VSM1000L-EXT laser self-mixing vibrometer

参 数	指 标
可测最大振动(峰峰值)	43 mm(理论上), 1 mm(实际上)
可测振动频率	DC~3 MHz
工作距离	0.5~5 m
检测表面	散射或背反射表面
激光头几何尺寸	50 mm×70 mm×105 mm
激光波长	1 310 nm(测量激光) 650 nm(指示激光)

### 4.2 实验方案

实验场地为 100 cm(长)×90 cm(宽)×40 cm(深)的凹坑,实验土壤为普通沙土。如图 7 所示,将 69 式防坦克塑壳地雷(直径约为 27 cm),72 式防坦克金属地雷(直径约为 30 cm),58 式防步兵橡胶地雷(直径约为 12 cm)和砖块(长 23 cm、宽 12 cm)布置在沙坑里,彼此保持一定距离,埋深设为 2 cm。将沙坑表面制作成许多 4 cm×4 cm 的矩形网格,并用横坐标和纵坐标对所有点进行标定,利用激光自混合测振仪依次检测网格中的所有点。在实验过程中,音箱的发声口对准埋设有地雷及砖块等检测目标的沙坑,为了避免音箱遮挡激光自混合测振仪输出的检测激光束,将音箱倾斜 30°左右,发声口距沙坑表面中心点约 0.7 m。激光自混合测振仪装在装有减震装置的三角支架上,激光出射口正对沙坑,距离沙坑表面约 0.8 m。

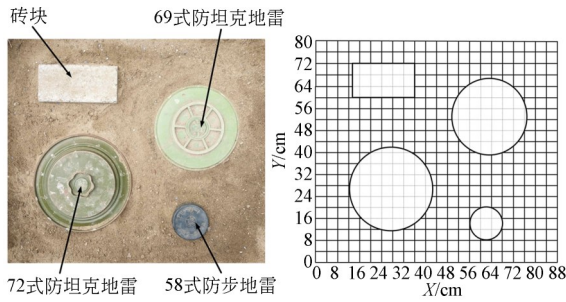


图 7 实验土壤区域埋藏物的种类及分布

Fig. 7 Distribution of buried objects in experimental bunker

现有的实验研究表明,声波激励的地表振动信号能量随信号频率的增加而显著衰减,当频率大于 400 Hz 时,检测到的地表振动信号几乎被环境噪声淹没<sup>[23]</sup>。同时,参考已测得的 3 种类型地雷的前两阶固有频率所在的频段,本文选择 60~400 Hz 的扫频范围,在 60 Hz 的基础上每增加 1 Hz 进行扫频检测。由信号发生器产生 60~400 Hz 的扫频信号,经调音台和功率放大器后由音箱发出声波,利用声压计测得声波大小在 95~115 dB 之间。利用激光自混合测振仪逐点检测各测点的振动信号,并将信号传输到计算机中经滤波后进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)处理,得到各测点处的地表振动信号的幅频特性曲线。

根据声波共振探雷的基本原理,在由低频到高频扫描的声波激励下,“土壤-地雷”系统会产生复杂的共振和反共振现象,致使地表振动状态呈现异常而独特的变化<sup>[1-2]</sup>。为了表现地雷上方地表振动的异常,定义“振动强度”这个体现地雷声学振动特征的物理量,其含义如下:利用声波扫频法测得地表某位置的幅频特性曲线,再对幅频特性曲线进行扫频范围内的幅值求和,求和后再取平均值,得到待测地表位置的“振动强度”,其表达式为:

$$M_{xy} = \frac{1}{f_N - f_0} \sum_{s=0}^N A(f_s), \quad (6)$$

式中: $f_0, f_N$  分别表示扫描声波的起止频率和终止频率, $A(f)$  表示激励频率为  $f_s$  的地表振动幅值。将测量区域用二维的  $X, Y$  坐标表示,所有测量点的“振动强度”作为  $Z$  轴,便可得到地表振动强度

关于测量位置的三维图,进而直观地分析地雷的埋设信息及其声学振动特性。

### 4.3 实验结果分析与讨论

图 8 所示为实验得到的埋设深度为 2 cm 时各埋藏物中心点上方地表振动信号的幅频特性曲线。可以看出,埋藏地雷时地表振动幅值明显大于无埋藏物和埋藏砖块时的地表振动幅值。这是因为地雷的弹性腔体结构使其声顺性较大,在受声波激励时,“土壤-地雷”系统能产生强于刚性干扰物(例如砖块)和土壤背景的振动响应。其次,各地雷中心点上方的振动幅频特性曲线都呈现出一个明显的峰值,对应各地雷与其上方覆土所构成的“土壤-地雷”系统的共振频率,当扫频信号的频率接近或等于系统的共振频率时,会激发系统产生共振。此时地雷上方地表振幅最大,与无地雷处和干扰物上方的地表振幅对比最明显,最有利于识别埋设地雷。

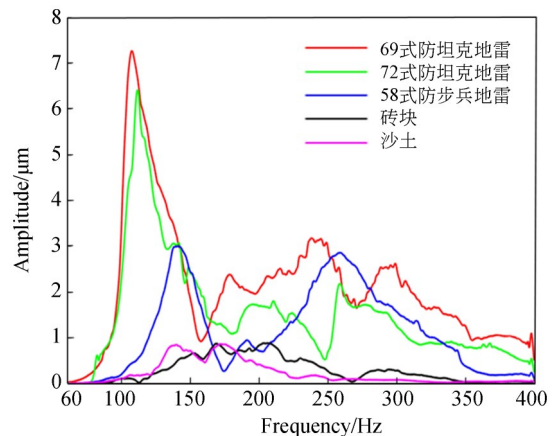


图 8 各埋藏物中心点上方地表振动幅频特性曲线  
Fig. 8 Amplitude-frequency characteristic curves of buried objects

根据式(6)计算网格中每个点的表面振动强度  $M_{xy}$ ,从而得到测量区域处表面振动的三维及二维成像图,如图 9 所示。可以看出,埋设地雷处三维成像图中有明显的凸起,二维成像图中光斑大小明显,从而证明了基于激光自混合干涉测振的声-光探雷技术的可行性。

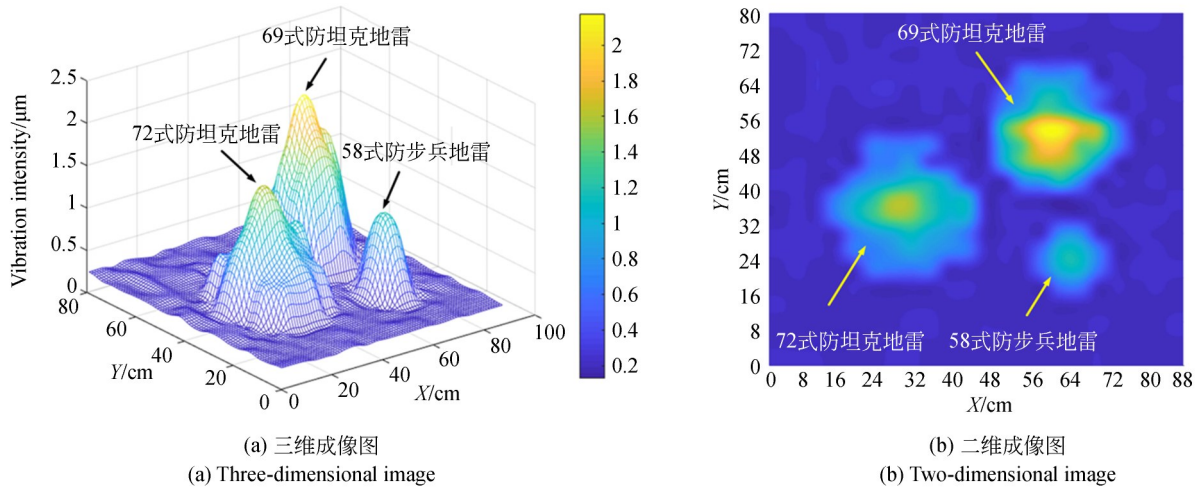


图9 埋设深度为2 cm时的地雷成像图

Fig. 9 Images of landmines buried in depth of 2 cm

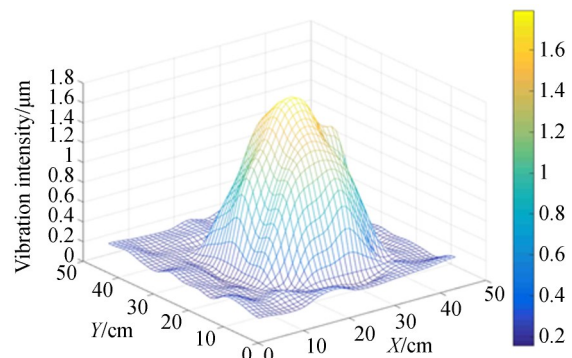
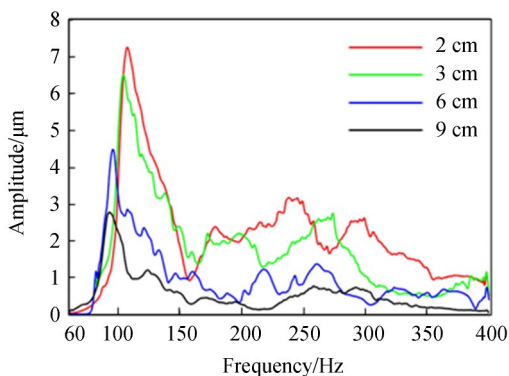
## 5 不同埋设条件下的地雷探测实验及分析

将69式防坦克塑壳地雷埋藏于沙坑中心,同样将其埋藏区域制作成多个 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ 的矩形网格,并用横坐标和纵坐标对所有点进行标定,利用激光自混合测振仪依次检测网格中的所有测点。利用上述探测埋设地雷的实验方法进行实验。通过改变69式防坦克塑壳地雷的埋藏深度以及其上方覆土土壤的湿度和孔隙度等,研究地雷在不同土壤条件下的声振特性。

### 5.1 埋设深度不同

图10(a)所示为69式防坦克塑壳地雷在埋

设深度分别为2,3,6和9 cm时其中心点上方地表振动的幅频特性曲线。可以看出,随着埋藏深度的增大,“土壤-地雷”系统的振幅和共振频率都在逐渐减小,但其共振频率随着埋深的增加趋于稳定。为了进一步验证埋藏深度对“土壤-地雷”系统振幅的影响,计算网格中每个点的表面振动强度 $M_{xy}$ ,从而得到69式防坦克塑壳地雷埋藏深度在3,6和9 cm测量区域处表面振动强度的三维图,分别如图10(b)~10(d)所示。塑壳地雷在3,6和9 cm埋深下土壤表面的最大振动强度分别为1.75,0.95和0.57  $\mu\text{m}$ ,在埋深为2 cm所测得的最大振动强度为2.13  $\mu\text{m}$ ,可以看出随着埋深的增加地表振动强度逐渐减小。



(a) Amplitude-frequency curves

(b) 3 cm

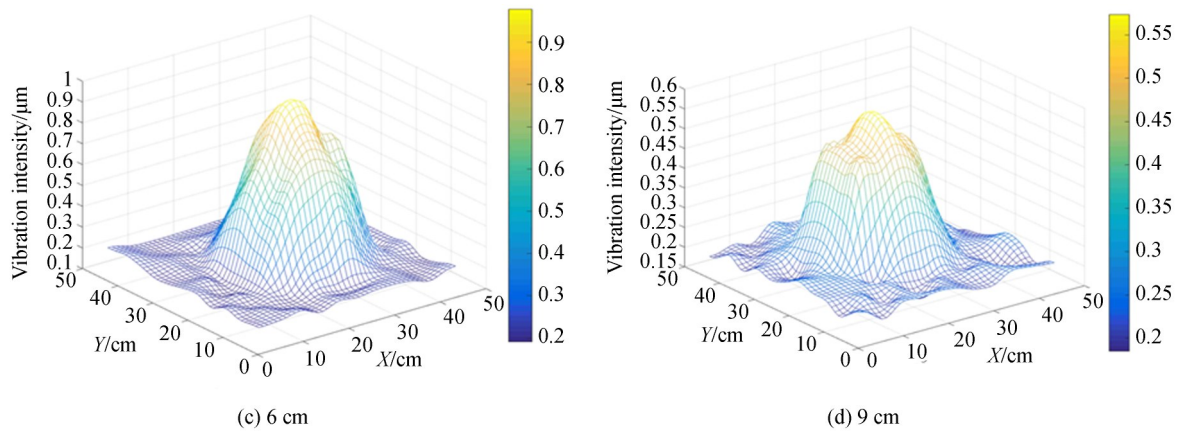


图 10 不同埋深下幅频特性曲线及振动强度三维图

Fig. 10 Amplitude-frequency characteristic curves and 3D graphs of vibration intensity under different buried depths

5.2 土壤湿度不同

将上述实验所采用的干燥沙土的含水量设为 0%, 将加入的水采用重量法计算土壤含水量, 其表达式定义为:

$$W = \frac{M_{\text{water}}}{M_{\text{water}} + M_{\text{soil}}} \times 100\%, \quad (7)$$

其中:  $W$  代表土壤的含水量,  $M_{\text{water}}$  表示所加入水的质量,  $M_{\text{soil}}$  表示现有沙土的质量。

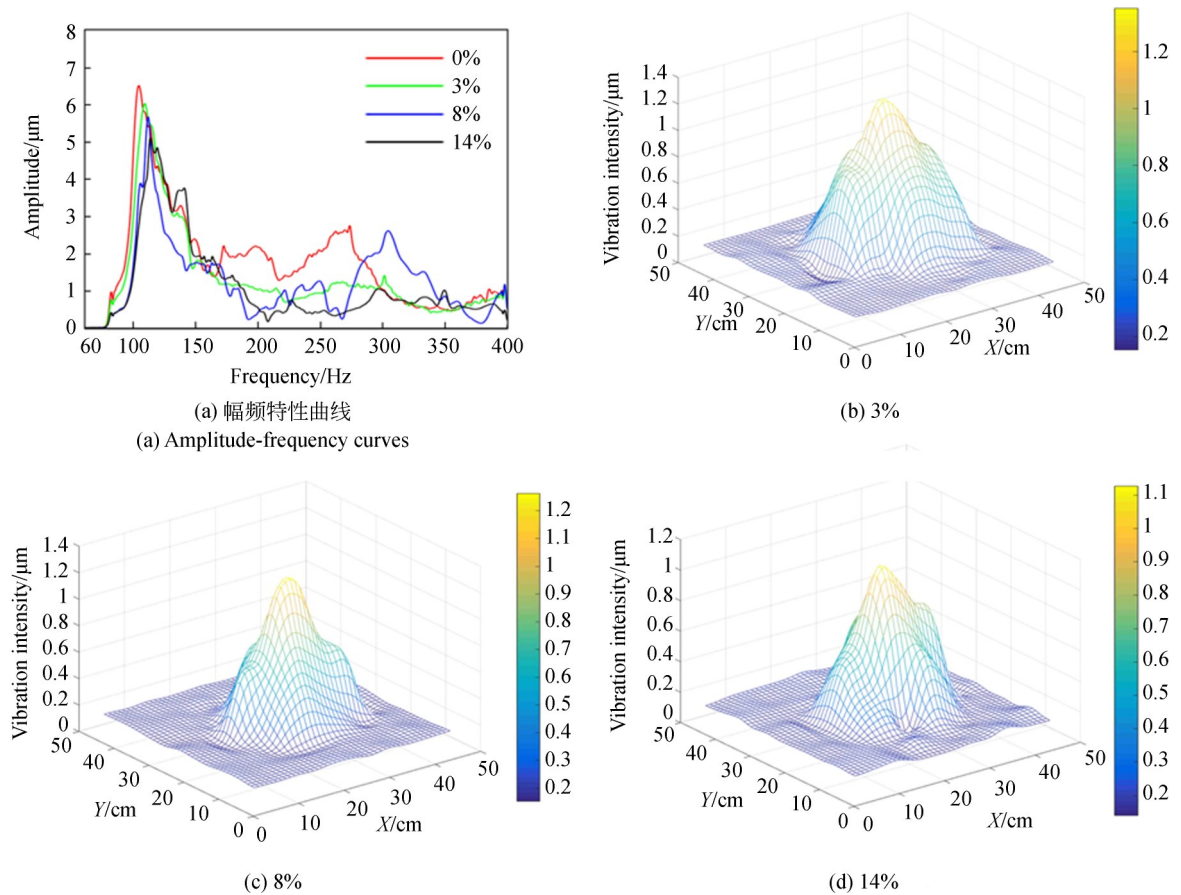


图 11 不同湿度下幅频特性曲线及振动强度三维图

Fig. 11 Amplitude-frequency characteristic curves and 3D graphs of vibration intensity with different soil moistures

将塑壳地雷埋深设为 3 cm,对相同深度但含水量不同的沙层重复实验,实验中水分均匀分布于各层。测得含水量分别为 0%,3%,8% 和 14% 时地雷中心点上方地表振动的幅频特性曲线及网格扫描区域的振动强度三维图,如图 11 所示。由图 11(a)可以看出,随着土壤湿度的增加(含水量的增加),“土壤-地雷”系统的共振频率逐渐增加,尤其在含水量相对小的情况下出现较大增幅,而在含水量较高的情况下变化不大。由图 10(b)和图 11(b)~(d)可知,含水量分别为 0%,3%,8% 和 14% 所对应的土壤表面的最大振动强度分别为 1.75,1.35,1.26 和 1.12  $\mu\text{m}$ 。可以看出,随着湿度的增加地表振动强度略有减小,土壤湿度的变化对“土壤-地雷”谐振系统中地表振动强度没有明显的影响。

### 5.3 土壤孔隙度不同

在保证声源、土壤湿度等条件相同的情况下,将埋深为 6 cm 的塑壳地雷上方土壤进行 3 次压缩,随着压缩次数的增加,土壤的孔隙度逐渐降低。测得的塑壳地雷中心点上方地表振动的幅频特性曲线和网格区域范围内的振动强度三维图,如图 12 所示。由图 12(a)可以看出,随着孔隙度的减小,“土壤-地雷”系统的共振频率略有增加,但其振幅显著减小。由图 10(c)和图 12(b)~(d)可知,塑壳地雷上方土壤在无压缩、第一次压缩、第二次压缩和第三次压缩情况下所测得的最大振动强度分别为 0.95,0.76,0.55 和 0.38  $\mu\text{m}$ 。可以看出,随着孔隙度的减小,地表振动强度显著减小。

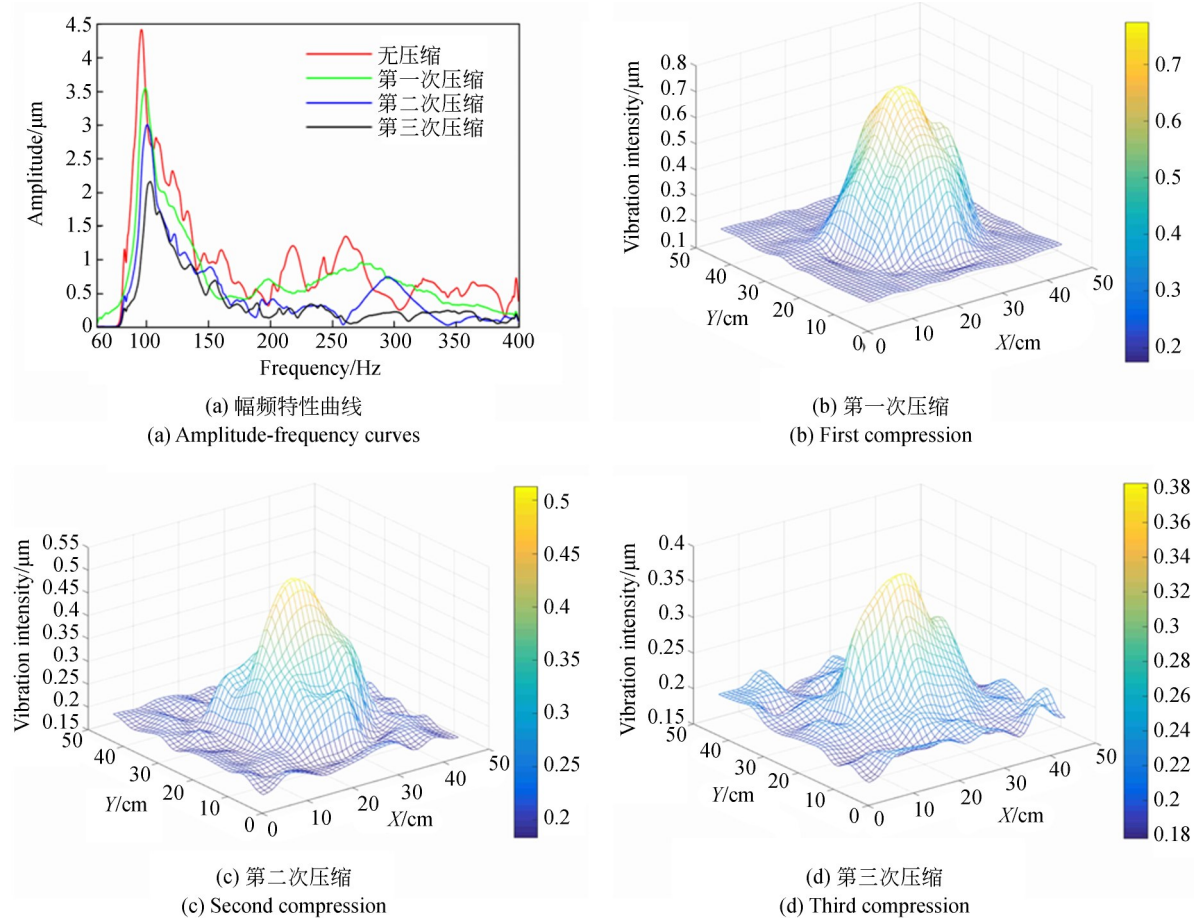


图 12 不同孔隙度下幅频特性曲线及振动强度三维图

Fig. 12 Amplitude-frequency characteristic curves and 3D graphs of vibration intensity under different soil porosities

## 6 结 论

本文在论述激光自混合测振技术原理的基础上,描述了地雷模态特性的检测方法及系统,对3种类型地雷和一砖块在空气中的模态特性测量结果进行了分析。设计并搭建了基于激光自混合测振的非接触式埋设地雷探测实验系统,对不同类型埋设地雷与砖块作为干扰物进行对比实验,并通过改变地雷的埋藏深度以及其上方覆土土壤的湿度和孔隙度,研究地雷在不同土壤条件下的声振特性。实验结果表明:地雷作为弹性腔体结构,其上壳的弹性板壳结

构所呈现的模态振型和固有频率与砖块有显著差异;基于声-地震耦合原理,利用激光自混合测振技术可进行埋设地雷的非接触式探测;不同类型地雷因其力学性能不同,对声波激发的地表振动强度和共振频率不同;随着地雷埋藏深度的增加,声波激发的地雷上方地表振动强度逐渐减小,“土壤-地雷”系统的共振频率逐渐减小;土壤湿度的增加会导致“土壤-地雷”系统的共振频率增加,地雷上方地表振动强度略有降低;随着土壤孔隙度的降低,地雷上方地表振动强度显著减小,“土壤-地雷”系统的共振频率略有增加。

### 参考文献:

- [1] WU Z Q, ZHANG Y L, WANG C, *et al.*. 3D characteristic diagram of acoustically induced surface vibration with different landmines buried[J]. *Transactions of Tianjin University*, 2016, 22 (4) : 367-373.
- [2] LI H Y, WANG Y J, CHANG H W, *et al.*. Acoustic impedance and its application in seismo-acoustic landmines detection models[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 99(sp1): 92-98.
- [3] MARTIN J S, LARSON G D, SCOTT W R. An investigation of surface-contacting sensors for the seismic detection of buried landmines [J]. *Acoustical Society of America Journal*, 2006, 120 (5) : 2676-2685.
- [4] 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)
- [5] LIBBEY B, PEREA J. Doppler-vibrometer landmine-detection system operated from a moving vehicle[J]. *SPIE*, 2019, 1101: 110120W.
- [6] ARANCHUK V, LAL A K, HESS C F, *et al.*. Multi-beam laser Doppler vibrometer for landmine detection[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(10) : 104302.
- [7] ARANCHUK V, SABATIER J M, BURGETT R D. Fast acoustic landmine detection using multiple beam laser Doppler vibrometry [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 123 (5):3043.
- [8] SCOTT W R, MARTIN J S, LARISON G D. Experimental model for a seismic landmine detection system [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(6): 1155-1164.
- [9] LEE S H, SCOTT W R Jr. A focused radar antenna for use in seismic mine detection systems[J]. *Radio Science*, 2004, 39(4): RS4S01.
- [10] RAJESH K R, MURALI R, MOHANACHANDRAN R, *et al.*. Realisation of Ultrasonic Doppler Vibrometer array for Landmine Detection [J]. *Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2012, 1027-1030.
- [11] PETCULESCU A G, SABATIER J M. Doppler ultrasound techniques for landmine detection [J]. *SPIE*, 2004, 5414: 30-34.
- [12] WANG X F, SONG X M, TAN R X, *et al.*. Micro-vibration measurement based on current modulation and secondary feedback self-mixing interference technology [J]. *Optical Review*, 2019, 26 (2): 241-246.
- [13] ZHANG Z H, SUN L Q, LI C W, *et al.*. Laser self-mixing interferometry for micro-vibration measurement based on inverse Hilbert transform [J]. *Optical Review*, 2020, 27(1): 90-97.
- [14] DONATI S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(3): 393-417.
- [15] 李金辉,马辉,杨辰辉,等.用于声-地震耦合探雷

- 的激光测振技术研究进展 [J]. 中国光学, doi: 10.37188/CO.2020-0134.
- LI J H, MA H, YANG CH Y, *et al.*. Research progress of the laser vibration measurement techniques for acoustic-to-seismic coupling landmine detection [J]. *Chinese Optics*, doi: 10.37188/CO.2020-0134. (in Chinese)
- [16] ZHANG Z Y, GAO Y, SU W. Laser self-mixing interferometer for MEMS dynamic measurement [J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2013, 6 (2): 210-215.
- [17] ATASHKHOEI R, URRESTY J C, ROYO S, *et al.*. Runout tracking in electric motors using self-mixing interferometry [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19 (1): 184-190.
- [18] 姜春雷, 韩加明. 基于激光自混合传感器的齿轮局部故障振动信号分析[J]. 光学技术, 2016, 42 (4): 306-311.
- JIANG CH L, HAN J M. Vibration signal analysis of gear local fault based on laser self-mixing sensor [J]. *Optical Technique*, 2016, 42 (4): 306-311. (in Chinese)
- [19] MILESI I, NORGIA M, POMPILIO P P, *et al.*. Measurement of local chest wall displacement by a custom self-mixing laser interferometer [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(8): 2894-2901.
- [20] DONATI S, NORGIA M. Self-mixing interferometry for biomedical signals sensing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(2): 104-111.
- [21] WANG X F, YUAN Y, CHEN P, *et al.*. Laser self-mixing based on peak-valley point detection algorithm for displacement reconstruction [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 52(1): 1-11.
- [22] WANG C, DUAN N Y, WU Z Q, *et al.*. Method for detecting multi-modal vibration characteristics of landmines [J]. *Instrumentation*, 2018 (4): 39-45.
- [23] SONG Z Y, ZHANG Y L, WANG C, *et al.*. Experimental measurement of acoustically induced surface vibration with different soil conditions [J]. *Advances in Manufacturing*, 2016, 4 (3): 278-285.

#### 作者简介:



王 驰(1982—),男,河南周口人,博士,教授,2004年于河南科技大学获得学士学位,2009年于天津大学获得博士学位,主要从事光学检测与融合传感技术的研究。E-mail: wangchi@shu.edu.cn

#### 通讯作者:



方 东(1971—),男,江苏无锡人,博士,高级工程师,1993年于东南大学获得学士学位,主要从事近地面探测技术的研究。E-mail: stnsdl@126.com