

基于空中爆炸冲击波的动态爆心定位方法研究

吕中杰, 韩金良, 李浩阳, 黄风雷

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 为解决空中动态爆炸爆心位置难以测定的问题, 研究一种基于冲击波超压测试结果的爆心坐标五区定位方法. 将数字压力记录仪在爆炸区域组成测试方阵, 根据测点距预估爆心距离将所有测点划分到 5 个区域. 通过在每个区域选取一个测点共 5 个测点的方式得到多组测点, 以每组测点的相对坐标和冲击波超压值为原始数据, 基于空中静态爆炸自由场冲击波传播规律、动态爆炸冲击波超压工程计算公式、壁面反射规律等建立函数方程组. 借助 Matlab 软件和莱文-马夸特方法迭代求得多组爆心坐标, 通过格拉布斯法剔除异常数据, 将剩余数据求平均值得到最终的爆心 3 维坐标. 结合实爆试验, 将计算结果与监测结果进行对比, 结果表明该方法求解爆心坐标是可靠有效的.

关键词: 动态爆炸; 爆心坐标; 冲击波超压; 五区定位

中图分类号: TJ414

文献标志码: A

文章编号: 1001-0645(2019)10-1039-06

DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2019.10.008

Research on Dynamic Burst Location Method Based on Air Blast Shock Wave

LÜ Zhong-jie, HAN Jin-liang, LI Hao-yang, HUANG Feng-lei

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing

Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to solve the problem that the position of the airborne dynamic explosion is difficult to measure, a five-zone positioning method based on the results of the shock wave overpressure test was studied. The digital pressure recorder was composed of a test square in the explosion area, and all the measuring points were divided into five zones according to the estimated distance from the estimated point of the heart. Multiple sets of measuring points were obtained by selecting one measuring point in each zone, and the relative coordinates of each set of measuring points and the shock wave overpressure value were taken as raw data. The functional equations were established based on the airborne static explosion free-field shock wave propagation law, the dynamic explosion shock wave overpressure engineering calculation formula, and the wall reflection law. The Matlab software and the Levin-Marquard method were used to iteratively get a set of core coordinates, and the Gurbus method was used to eliminate the anomaly data and calculate the average of the remaining data to obtain the final three-dimensional coordinates of the core. Combined with the actual explosion test, the calculation results were compared with the monitoring results. The results show that the method is reliable and effective for obtaining core coordinates.

Key words: dynamic explosion; core coordinates; shock wave overpressure; five-zone positioning

战斗部爆炸爆心 3 维坐标是武器进行靶场测试的重要参数^[1], 是爆炸威力评估的重要指标. 在动态

收稿日期: 2018-12-10

基金项目: 国家部委基础科研资助项目(2016602B003)

作者简介: 吕中杰(1968—), 男, 博士, 副教授, E-mail: lvzhongjie@bit.edu.cn.

爆炸试验中,由于装药本身的牵连速度影响,爆心位置在测量过程中存在一定的不确定性. 目前装药动态爆炸爆心坐标的测试方法主要有:基于光信号或声信号的时延估计法,存在易受环境干扰、测试误差大的问题;基于 GPS/激光水平仪的仪器测量法,存在设备准备工作复杂、精度低的问题^[1-3]. 为提高空中动态爆炸爆心定位精度和自动化程度,提出一种基于理论计算方式的爆心坐标求解方法,即以爆炸冲击波超压测试结果为基本数据,基于爆炸冲击波传播规律建立函数方程组,通过迭代计算实现爆心 3 维坐标的求解.

1 动态爆炸爆心定位方法

本动态爆炸爆心定位方法基于理论计算的方式得到爆心坐标,包括建立函数模型和求解爆心坐标两部分. 建立函数模型是根据静态装药空中爆炸自由场冲击波传播规律、运动装药空中爆炸自由场冲击波传播规律和地面反射规律等,推导出运动装药空中爆炸冲击波地面超压测试结果与爆心 3 维坐标之间的函数关系,从而建立动态爆炸爆心 3 维坐标工程计算模型. 求解爆心坐标指选取地面测试超压数据,确定基本求解单元,借助 Matlab 软件迭代求解爆心坐标,最后对运算结果进行筛选优化等.

考虑空投和平衡炮发射两种典型试验情况,装药在爆炸时具有一个方向速度,故求解方程组包含

$$\Delta p_{sE} = \begin{cases} 1.407\ 17 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} + 0.553\ 97 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^2 - 0.035\ 72 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^3 + 0.000\ 625 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^4 & 0.05 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 0.30 \\ 0.619\ 38 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} - 0.032\ 62 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^2 + 0.213\ 24 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^3 & 0.30 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 1.00, \\ 0.066\ 2 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} + 0.405 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^2 + 0.328\ 8 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^3 & 1 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 10 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Δp_{sE} 为无限大空中静态爆炸自由场冲击波超压峰值; r 为爆心与测点之间的直线距离; ω 为装药量. 对于地面为土壤地面的近地爆炸,药量 ω 近似

$$\Delta p_{sG} = \begin{cases} 1.711\ 7 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} + 0.819\ 7 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^2 - 0.064\ 3 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^3 + 0.001\ 37 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^4 & 0.05 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 0.30 \\ 0.753\ 4 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} - 0.048\ 3 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^2 + 0.383\ 8 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^3 & 0.30 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 1.00, \\ 0.080\ 5 \frac{\sqrt[3]{\omega}}{r} + 0.599\ 3 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^2 + 0.591\ 8 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{r}\right)^3 & 1 \leq \frac{r}{\sqrt[3]{\omega}} \leq 10 \end{cases} \quad (4)$$

式中 Δp_{sG} 为近土壤地面空中静态爆炸自由场冲击

爆心 3 维坐标 (X, Y, H) 、装药运动速度 v 、装药量 ω 共 5 个未知数,通过 5 个测点数据列 5 组方程可求得爆心坐标. 爆心坐标求解方程组如式 1 所示, f 为求解函数,由式(3)~(12)组成,表示爆心与测点间等效距离、装药速度和测点地面反射超压之间的函数关系, $\bar{R}_1 \sim \bar{R}_5$ 为爆心与测点间等效距离,由式 2 计算得到, $\Delta p_1 \sim p_5$ 为测点地面反射超压. 将地面测点相对坐标 $(x_i, y_i, 0)$ 和测点冲击波超压值 Δp 代入函数方程组 f ,借助 Matlab 软件和莱文-马夸特方法进行迭代计算,可求得爆心 3 维坐标 (X, Y, H) .

$$\begin{cases} \Delta p_1 = f(\bar{R}_1, v) \\ \vdots \\ \Delta p_5 = f(\bar{R}_5, v) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\bar{R}_i = \frac{\sqrt{(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + H^2}}{\sqrt[3]{\omega}}. \quad (2)$$

2 建立爆心坐标函数模型

2.1 装药空中静爆自由场冲击波超压计算

装药在空中发生静态爆炸以后,若无外界能量补充,会进入自由场传播过程. 此过程中,冲击波在自主传播的同时,会随着传播距离和传播时间的增加而逐渐衰减^[4]. Henrych 用试验的方法得到冲击波超压峰值计算式为^[5]

认为是无限大空中爆炸药量的 1.8 倍. 故将 1.8 ω 替换式(3)中的 ω ,得到近土壤地面爆炸冲击波超压峰值计算式为

波超压峰值.

2.2 装药空中动爆自由场冲击波超压计算

运动装药在空中爆炸以后,装药速度主要影响了冲击波场空间位置和压力分布,对冲击波场作用范围影响较小.动爆冲击波超压随着装药速度方向夹角 θ 的增加近似呈余弦变化, $\theta=90^\circ$ 为压力升区域与压力降区域的临界点,压力增幅和压力降幅与装药运动速度的平方呈正相关^[6].

在静爆超压已知的情况下,可依据运动装药空中爆炸的冲击波超压峰值工程计算公式,计算动爆冲击波超压峰值为

$$\frac{\Delta p_d}{\Delta p_s} = \left(1 + \frac{0.3}{1+R} \frac{|v|}{c_0} \cos \theta\right)^2, \quad (5)$$

$$\cos \theta = \frac{v \times (X - x_i, Y - y_i, H)}{|v| \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + H^2}}, \quad (6)$$

式中: Δp_d 为动态爆炸自由场冲击波超压; Δp_s 为静态爆炸自由场冲击波超压; v 为装药运动速度; c_0 为波阵面前空气声速; θ 为爆心到测试点间连线与装药速度矢量方向的夹角.如已知装药速度、测点与爆心距离,无限大空中动态爆炸自由场冲击波超压峰值为

$$\Delta p_{dE} = \Delta p_{sE} \left(1 + \frac{0.3}{1+R} \frac{|v|}{c_0} \cos \theta\right)^2, \quad (7)$$

近土壤地面空中动态爆炸自由场冲击波超压峰值为

$$\Delta p_{dG} = \Delta p_{sG} \left(1 + \frac{0.3}{1+R} \frac{|v|}{c_0} \cos \theta\right)^2. \quad (8)$$

2.3 冲击波地面反射超压计算

冲击波超压的地面反射分为正规斜反射与马赫反射,当冲击波入射角大于马赫反射临界角时,发生马赫反射,小于马赫反射临界角时,发生正反射或正规斜反射,马赫反射临界角与装药高度和装药量有关^[7-8].用多项式拟合马赫反射临界角 φ_0 、装药量 ω 和装药高度 H 的函数关系为

$$\begin{aligned} \varphi_0 = & 719.94 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}\right)^6 - 2345.8 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}\right)^5 + \\ & 2930.4 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}\right)^4 - 1808.5 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}\right)^3 + 683.74 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}\right)^2 - \\ & 231.02 \left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H}\right) + 93.21, \end{aligned} \quad (9)$$

当 $\frac{\sqrt[3]{\omega}}{H} > 1$ 时, φ_0 取 40° .

超压入射角 φ 为测点 $(x_i, y_i, 0)$ 与爆心 $(X, Y,$

$H)$ 连线与竖直方向的夹角,超压入射角的正切值 $\tan \varphi$ 为

$$\tan \varphi = \frac{\sqrt{(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2}}{H}. \quad (10)$$

当超压入射角正切值 $\tan \varphi$ 小于马赫反射临界角正切值 $\tan \varphi_0$ 时,发生正反射或正规斜反射,壁面反射超压 Δp_r 为

$$\Delta p_r = 2\Delta p_{dE} + \frac{6\Delta p_{dE}^2}{\Delta p_{dE} + 7p_0}, \quad (11)$$

式中 p_0 为当地大气压.

当超压入射角正切值 $\tan \varphi$ 大于马赫反射临界角正切值 $\tan \varphi_0$ 时,发生马赫反射,壁面反射超压 Δp_m 为

$$\Delta p_m = 2\Delta p_{dG} + \frac{6\Delta p_{dG}^2}{\Delta p_{dG} + 7p_0}. \quad (12)$$

2.4 爆心 3 维坐标函数模型

爆心 3 维坐标的函数模型如图 1 所示.假设爆心 3 维坐标 (X, Y, H) 、装药速度 v 、装药量 ω 共 5 个未知数,通过式(3)(4)可建立爆心 3 维坐标、装药量和无限大空中静态爆炸冲击波超压 Δp_{sE} 、近土壤地面空中静态爆炸冲击波超压 Δp_{sG} 之间的关系;通过式(7)(8)可建立静态爆炸冲击波超压 Δp_{sE} 、 Δp_{sG} 与动态爆炸冲击波超压 Δp_{dE} 、 Δp_{dG} 之间的函数关系;通过式(9)(10)可计算出超压入射角和马赫反射临界角,从而判断测点 $(x_i, y_i, 0)$ 发生的是正规反射还是马赫反射;通过式(11)(12)可建立测点 $(x_i, y_i, 0)$ 的

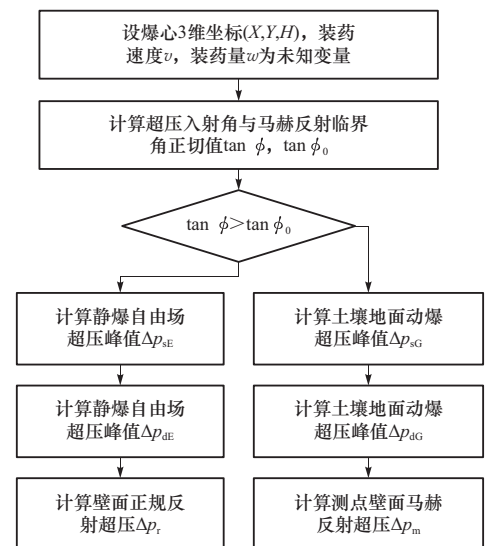


图 1 爆心 3 维坐标函数模型

Fig. 1 Three-dimensional coordinate function model

地面反射超压 Δp_r 、 Δp_m 与入射超压 Δp_{dE} 、 Δp_{dG} 之间的关系;从而建立了动态爆炸试验中测点地面冲击波超压 Δp 、测点相对位置坐标 $(x_i, y_i, 0)$ 与爆心 3 维坐标 (X, Y, H) 之间的函数关系. 如已知测试点相对位置坐标和测点地面冲击波超压值, 通过以上公式计算即可求得动态爆炸的爆心 3 维坐标.

3 求解爆心 3 维坐标

3.1 爆心 3 维坐标求解模型

爆心 3 维坐标的求解模型如图 2 所示, 如已知测点相对位置坐标 $(x_i, y_i, 0)$ 和地面反射冲击波超压测试值 Δp , 以高速摄影拍摄爆心坐标、装药运动速度和理论装药量作为动态爆炸爆心坐标计算过程中的初值 (X, Y, H, v, ω) , 由式 (3)~(12) 计算出动态爆炸冲击波地面反射超压 Δp_1 , fsolve 迭代函数的返回值 F 为理论计算反射超压 Δp_1 与测试反射超压 Δp 的差值, 如果 F 的绝对值小于等于终止条件 Tolfun, 则将初值输出为结果, 反之, 根据莱文-马夸特方法迭代得到一组新的初值并进行重新计算, 直到满足终止条件 Tolfun.

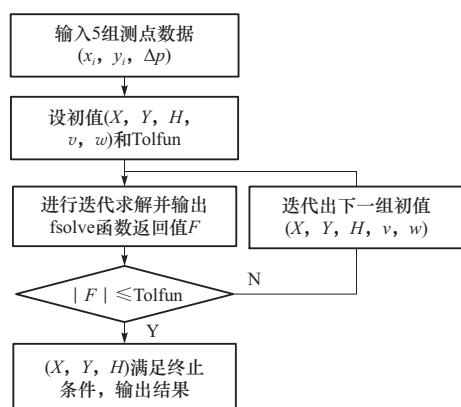


图 2 爆心 3 维坐标求解模型

Fig. 2 Three-dimensional coordinate solving model

3.2 五区定位方法

由于动态爆炸的爆心位置具有不可预见性, 为了便于后期数据处理, 将测点设备布置成等间距的网格形式. 由于求解爆心 3 维坐标的非线性方程组包含 5 个未知数, 故每 5 个测点数据可求得一组爆心坐标结果, 为了降低因测点数据选取不均导致的偶然性误差, 提出一种五区定位方法, 如图 3 所示. 以 18 个测点为例, 依据测点距预估爆心距离将所有测点划分到 5 个子区域, 每个区域

的测点数分别为 2、4、6、4、2 个, 通过在每个区域随机选取一个测点共 5 个测点的方式可得到 384 组测点数据.

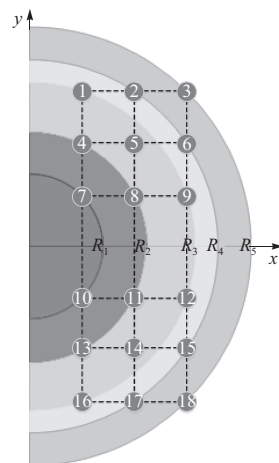


图 3 五区定位法的区域划分

Fig. 3 Regional division of five-zone positioning method

应用五区定位方法可以将非固定爆心的地面冲击波超压测试区域进行区域性划分, 应用足够求解数量的测点数据进行爆心定位分析. 五区定位方法要求非固定爆心的地面冲击波超压测点数至少为 5 个.

4 验证求解方法

战斗部静态爆炸是动态爆炸中装药速度为 0 时的特殊情况, 故可用静态爆炸试验数据来验证动态爆炸爆心定位方法. 在静态爆炸试验中, 以战斗部质心空间坐标作为静态装药爆炸的初置爆心位置; 在动态爆炸试验中, 以高速摄影观察爆心位置作为动态装药爆炸的初置爆心位置. 结合某实爆试验测试数据, 对第 3 节描述的动态爆炸爆心定位方法进行验证.

4.1 静态爆炸试验数据验证

静态爆炸试验共进行 4 发, 均为 9.6 kg TNT 装药, 预估爆心与地面冲击波超压测点布局如图 4 所示, 地面冲击波超压测点 12 个, 达到五区定位法最少测点数要求. 基于爆心定位方法对测试数据进行处理计算, 得到 4 组爆心 3 维坐标 (X, Y, H) , 与以战斗部质心空间坐标作为的预估爆心 3 维坐标 (X_1, Y_1, H_1) 进行对比, 以两点之间的差值 L_i 作为爆心 3 维坐标理论求解方法计算精度的评价指标. 分析结果如表 1 所示.

表 1 静态爆炸试验预估爆心与计算爆心对比结果

Tab. 1 Comparison of predicted and calculated detonation centers in static explosion tests

试验	X_1/m	Y_1/m	H_1/m	X/m	Y/m	H/m	L_d/m
1	0.00	0.00	2.08	-0.73	0.07	2.40	0.81
2	0.00	0.00	0.45	0.79	0.33	0.93	0.98
3	0.00	0.00	0.35	0.65	0.17	0.85	0.84
4	0.00	0.00	0.25	0.12	0.25	0.56	0.41

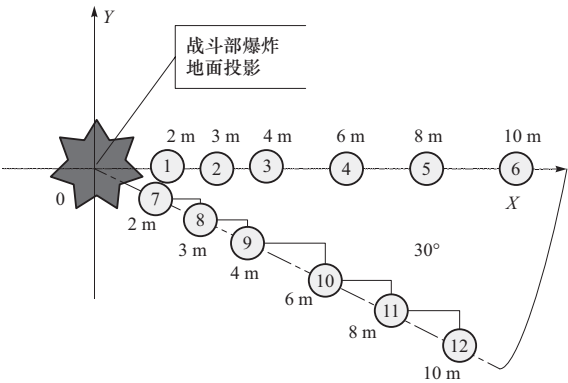


图 4 静态爆炸试验场地布置

Fig. 4 Layout of static explosion test site

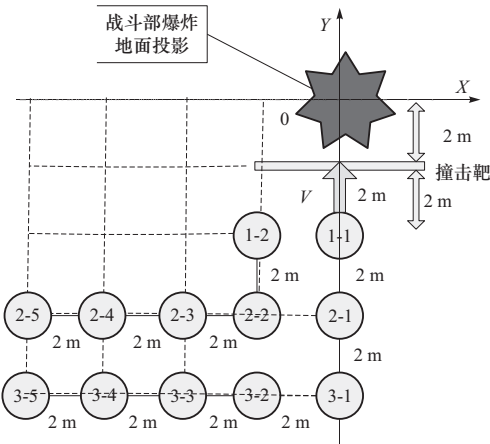


图 5 动态爆炸试验场地布置

Fig. 5 Layout of dynamic explosion test site

4.2 动态爆炸试验数据验证

动态爆炸试验共进行 5 发,均为 9.6 kg TNT 装药,预估爆心与地面冲击波超压测点布局如图 5 所示,地面冲击波超压测点 12 个,达到五区定位法最少测点数要求. 应用滑膛炮开展动态爆炸试验,弹体经滑膛炮发射后沿 Y 方向以一定速度 v 飞行,撞击靶板后触发引信,弹体继续向前飞行一段距离后爆炸,由于弹体本身的牵连速度影响,实际飞行距

离存在一定的不确定性,从而导致动态爆炸爆心位置的不可预见性.

基于爆心定位方法对测试数据进行处理计算,得到 4 组爆心 3 维坐标 (X,Y,H) ,与以高速摄影拍摄爆心位置作为的预估爆心 3 维坐标 (X_2,Y_2,H_2) 进行对比,以两点之间的差值 L_d 作为爆心 3 维坐标理论求解方法计算精度的评价指标. 分析对比结果如表 2 所示.

表 2 动态爆炸试验预估爆心与计算爆心对比结果

Tab. 2 Comparisons between predicted and calculated explosion centers in dynamic explosion tests

试验	X_2/m	Y_2/m	H_2/m	X/m	Y/m	H/m	L_d/m
1	0.00	0.00	2.08	1.53	-1.94	2.67	2.54
2	0.00	-0.20	1.40	-0.67	-0.18	2.47	1.26
3	0.00	-0.10	2.00	0.11	1.41	1.50	1.58
4	0.00	0.06	2.13	2.12	-0.06	0.16	2.90

4.3 验证结果

分析表 1 和表 2 中的数据结果可以发现,在静态爆炸中,计算爆心 3 维坐标和以战斗部质心作为的预估爆心 3 维坐标之间的差值在 1 m 以内;在动态爆炸中,计算爆心 3 维坐标和以高速摄影拍摄爆心位置作为的预估爆心 3 维坐标之间的差值在 3 m 以内. 结果表明,理论计算爆心坐标与预估爆心坐标基本相符.

爆心 3 维坐标求解方法中所用的 Henrych 静爆自由场冲击波超压计算公式、动爆自由场冲击波超压工程计算公式、地面反射冲击波超压计算公式均采用 TNT 装药,是在常规大气压力和温度下多次试验得到的经验公式,因而该方法只适用于 TNT 装药和常规试验环境,如果考虑极端恶劣环境以及带壳、长径比、添加剂等特殊装药因素的影响,需要对求解公式中的系数进一步修正. 在装药动态爆炸试验过程中,风速的大小远小于装药速度和冲击波速度,故对风的影响忽略不计.

5 结 论

基于五区定位法,以测点相对坐标和冲击波超压测试值为原始数据,通过装药静态爆炸自由场冲击波、装药动态爆炸自由场冲击波、地面反射冲击波等传播规律建立求解方程组,借助 Matlab 软件和莱文-马夸特方法迭代求解出爆心坐标,采用格拉布斯法剔除偏离度大的异常数据,对剩余数据求平均值

得到最终的爆心3维坐标,从而建立了一种基于冲击波超压测试结果的爆心3维坐标理论计算方法。

结合实测静、动爆数据对爆心定位方法进行了验证,结果发现计算爆心坐标与预估爆心坐标基本相符,表明该动态爆炸爆心定位方法在采用TNT装药、常规试验环境条件下是有效可靠的,为实现动态爆炸爆心坐标的准确快速定位奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] 陈绍钦. 三维炸点声定位技术研究[D]. 西安:西安工业大学,2012.
Chen Shaoqin, Study on acoustic detection of targets about three-dimensional burst point[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012. (in Chinese)
- [2] 李静, 雷志勇, 王泽民, 等. 近炸引信对空炸点位置测试方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(7): 1602 - 160.
Li Jing, Lei Zhiyong, Wang Zemin, et al. Acoustic detection of targets about three-dimensional burst point[J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(7): 1602 - 160. (in Chinese)
- [3] 孙崔源, 薛里, 孟海利, 等. 几种典型爆破振动控制技术的试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(4): 359 - 363.
Sun Cuiyuan, Xue Li, Meng Haili, et al. Experimental research on several typical blasting vibration controlling technologies[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(4): 359 - 363. (in Chinese)
- [4] 李鹏, 王成. 改进型WENO格式的一维爆轰波数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(12): 1211 - 1216.
Li Peng, Wang Cheng. Improved WENO schemes for one-dimensional detonation simulations[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(12): 1211 - 1216. (in Chinese)
- [5] 亨利奇. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987.
Henrych. Explosion dynamics and its application[M]. Xiong Jianguo, transl. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [6] 蒋海燕, 李芝绒, 张玉磊, 等. 运动装药空中爆炸冲击波特性研究[J]. 高压物理学报, 2017, 31(3): 286 - 294.
Jiang Haiyan, Li Zhirong, Zhang Yulei, et al. Characteristics of air blast wave field for explosive charge moving at different velocities[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(3): 286 - 294. (in Chinese)
- [7] 李国新, 蒋建伟, 王树友. 爆炸测试技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2008.
Li Guoxin, Jiang Jianwei, Wang Shuyou. Explosion testing technology[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [8] 杨旸, 姜宗林, 胡宗民. 激波反射现象的研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(2): 141 - 161.
Yang Yang, Jiang Zonglin, Hu Zongmin. Research progress of shock wave reflection[J]. Progress of mechanics, 2012, 42(2): 141 - 161. (in Chinese)

(责任编辑: 刘雨)