理论与值

DOI:10. 19651/j. cnki. emt. 2416622

# 基于量纲分析的近地爆地表振动速度模型优化

# 王 涛 孔德仁 潘正伟

(南京理工大学机械工程学院南京 210094)

摘 要: 传统爆炸振动速度预测模型多是应用在矿山与岩体爆破,对于近地爆地表振动速度模型研究较少且预测精 度较低,为研究近地爆地表振动强度模型,基于 LS-DYNA 分析软件建立了近地爆地表振动速度仿真模型,通过量纲 分析,引入振动波的传播速度这一影响因素,建立了地表振动峰值速度改进模型,并通过仿真数据对速度模型进行多 元非线性回归分析,最后通过试验应用了本文模型,验证了本文改进模型的准确性。结果表明:通过仿真数据拟合出 本文改进模型预测的平均相对误差为 11.33%,两种经典模型预测的平均相对误差分别为 34.05%和 31.67%,本文改 进的预测模型对试验测点振动速度预测的平均相对误差为 8.28%,两种经典模型的预测误差均高于 44%。因此本文 的改进模型的预测精度相较于现有的经典模型有较大的提升,能够较好的表征地表振动强度、反应地表振动峰值速度 的衰减规律,可以为近地爆试验预测地表振动峰值速度模型提供一些理论依据。

关键词: 地表振动速度;数值模拟;量纲分析;非线性回归分析

中图分类号: TJ01;TN06 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 130.35

# Improvement of surface vibration velocity model for near earth explosions based on dimensional analysis

Wang Tao Kong Deren Pan Zhengwei

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract**: Traditional explosion vibration velocity prediction models are mostly applied in mines and rock mass blasting. There is little research on the surface vibration velocity model of near earth blasting, and the prediction accuracy is low. In order to study the surface vibration intensity model of near earth blasting, a simulation model of near earth blasting surface vibration velocity was established based on LS-DYNA analysis software. Through dimensional analysis, the influence factor of vibration wave propagation velocity was introduced, and an improved model of surface vibration peak velocity was established. The velocity model was subjected to multiple nonlinear regression analysis through simulation data. Finally, the accuracy of the improved model in this paper was verified by experimental application. The results showed that the average relative error predicted by the improved model in this paper was 11. 33% through simulation data fitting, while the average relative errors predicted by the two classical models were 34. 05% and 31. 67%, respectively. The average relative error of the improved prediction errors of both classical models were higher than 44%. Therefore, the improved model in this article has a significant improvement in prediction accuracy compared to existing classical models, and can better characterize the intensity of surface vibration and reflect the attenuation law of peak velocity of surface vibration. It can provide some theoretical basis for predicting the peak velocity model of surface vibration in near earth explosion tests.

Keywords: surface vibration velocity; numerical simulation; dimensional analysis; nonlinear regression analysis

# 0 引 言

爆炸场地震波主要通过岩石,土壤等介质传播,并且其 衰减速度相较于空气冲击波压力要慢的多,因此爆炸场地 震波可对远距离目标产生较大的影响,并且可以对电子设备、相关武器装备产生较大的干扰,甚至可以使地面人员产 生不适使其丧失战斗能力,因此对于大当量的战斗部爆炸 引起的地震波的能量较大,其破坏能力不容忽视。所以爆 炸场地震波无论是对于战斗部威力评、进行军事防御,或者 是控制爆炸地震波对周围环境人员设施的影响,所以掌握 爆炸地震现象的基本规律有非常重要的意义。

李修贤等印研究高差、地形、地貌等因素对振动速度的 影响,通过无量纲化分析建立了改进萨道夫斯基预测模型, 此模型对于单次起爆的山体爆破的预测精度有所提高,但是 该模型仅适用于山体爆破的振动速度预测,且未考虑地质的 影响因素。李贺龙等[2]根据试验现场因素,将单排炮孔连线 长度引入振动速度预测模型,建立了可以反映柱状装药特征 的成排深孔爆破振动速度预测公式,该模型只能用于多排炮 孔连续起爆的爆破工况,对于单次起爆的预测效果较差,对 测点和爆点之间的位置关系的考虑不够全面,地质条件的影 响因素尚未考虑。万嗣鹏等[3]构建了考虑高差、水平爆心距 和岩体抗拉强度等因子的爆破振动速度预测公式,但是该模 型需要获取试验场地的岩石的抗拉强度而去做大量的岩体 原位实验,需要大量分析比较,难度较大。叶海旺等[4]基于 量纲分析引入爆破振动速度监测点与爆点之间的地形(高程 差和水平距离)影响因子改进了萨道夫斯基预测公式,有效 的提高了爆破振动速度预测精度,但该模型仅适用于山体爆 破的振动速度预测,未引入地质条件的影响因素,对于不同 的试验条件下的预测精度较低。代树红等[5]用量纲分析法, 考虑了药量、测点与爆点间的位置关系等因素推导出适用于 计算露天煤矿爆破振动速度的公式,但该模型适用与露天煤 矿的特殊地形地貌条件,且未考虑地质条件的对振动速度的 影响。上述的振动速度预测模型,都是运用在岩体爆破的试 验条件下,而岩体爆破都是采用钻孔装药的岩体内部爆炸, 而且为多发连续爆破,而本文所研究的爆炸方式是将炸药放 置在距地面一定高度下的近地爆炸,且为单发试验,冲击振 动在两种条件下的传播规律并不相同。

为解决上述模型存在的不足,本文将综合考虑药量、测 点与爆点的位置关系、地形地貌条件、地质条件等因素,基 于 LS-DYNA 有限元分析软件,分析不同物理量引起地表 振动峰值速度变化的规律,然后采用量纲分析方法,建立考 虑爆心高、水平距离以及振动波传播速度等影响因素的地 表振动峰值速度的预测公式,通过回归分析,通过仿真数据 将本文的模型和经典模型进行回归分析,并对比不同模型 预测的相对误差,以判别其拟合精度的高低,并通过试验应 用并验证本文推导的模型。本文的创新之处在于引入了可 以反映地质条件因素振动波传播速度这一因素,对大量只 能在特定试验条件下的振动速度预测公式进行了优化,使 本文推导的模型可以在不同的地质条件下进行爆炸振动速 度的预测,具有较高的准确度较强的通用性。

# 1 地表振动的形成机制及常用的振动峰值速度预 测公式

# 1.1 地表振动的形成机制

当炸药在空气中发生爆炸时,会瞬时转变为高温高压

产物,爆炸产物在空气中进行膨胀,强烈压缩空气从而形成 爆炸冲击波<sup>[6]</sup>。垂直入射到地面的冲击波波阵面传播到地 面以后,大部分能量仍反射冲击波的形式反向传播,一部分 能量转换为地震波,在地面中传播<sup>[7]</sup>。冲击波继续向前传 播,不断作用到地面,地面会发生振动变形,同样形成爆炸 地震波,形成示意图如图1所示。地震波可分为两种基本 类型:体波和面波。体波包括纵波和横波两种,纵波是在介 质内传播方向与质点振动方向一致的一种波,它使介质压 缩或产生膨胀变形,又被称为压缩波、拉伸波或疏密波,纵 波在3种波中能量最小,相应质点的振幅最小,但传播速度 最快,通常最先到达测点处。横波的传播方向与质点振动 方向垂直,质点在与传播方向垂直的平面内运动,使介质发 生剪切变形,又被称为剪切波。横波能量较纵波大,振幅也 较大,传播速度小于纵波速度。面波是沿介质表面或分界 面传播的波,当介质内存在不连续面和表面时,就会形成表 面波。面波中比较典型的是瑞利波和勒夫波,爆炸地震波 中瑞利波能量最大,引起地表振动的幅度最大,且衰减速度 最慢,瑞利波在沿介质表面传播时,质点在自由表面法向与 波传播方向组成的平面内做逆进的椭圆运动,其垂直振动 速度与水平振动速度之比是与泊松比有关的定值[8],因此 研究地表振动速度可以选择一维方向的振动速度,本文选 择的是垂直方向的振动速度。



图 1 近地爆地表振动的形成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of surface vibration formation of near-ground explosion

# 1.2 常用的振动峰值速度预测公式

目前最常用地表振动峰值速度计算公式(萨道夫斯基 公式)为<sup>[9]</sup>:

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{a} \tag{1}$$

式中:K 和 α 为与地形地貌有关的特征系数和相关系数,Q 为炸药当量,R 为爆心距,V 是振动峰值速度。学者李修贤 建立了考虑高差、地形、地貌等影响因素的预测模型<sup>10</sup>:

$$V = K_1 K_2 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{\beta_1} \left(\frac{H}{R}\right)^{\beta_2} \tag{2}$$

式中: $K_1$ 为场地系数与岩体性质、爆破工艺等因素有关;  $K_2$ 为地形影响系数与地形地貌有关; $\beta_1$ 为衰减系数; $\beta_2$ 为 高程影响系数,H为爆心与测振点之间的高差,其余 同式(1)。

# 2 地表振动的数值模拟

LS-DYNA分析软件主要是以拉格朗日算法<sup>[11]</sup>为主, 同时兼顾任意拉格朗日-欧拉算法(arbitrary Lagrange and Euler,ALE)和欧拉两种算法。其中 ALE 算法最早出现于 流体动力学分析的有限差分算法中,该算法同时兼备拉格 朗日算法和欧拉算法两种算法的优点,即可利用拉格朗日 算法准确地描述结构边界的运动情况,利用欧拉算法可使 内部的单元网格独立于网格内实体物质而存在且不产生网 格畸变,所以 ALE 算法可用于爆炸、金属成型加工等大变 形问题分析,同时利用这种方法,网格以及网格中的物质之 间也是可以流动的。故本文在近地爆地表振动模拟过程中 将采用共节点的多物质 ALE 方法。

#### 2.1 材料模型

1)炸药属性设置

TNT 在爆炸试验中具有较好的稳定性、威力、化学惰性和加工性,能够满足爆炸试验的需求并保证试验的安全性和有效性,所以本文采用三硝基甲苯(Tri Nitro Toluene, TNT)作为炸药,其材料模型为 008 号材料,并采用 Jones-Wilkins-Lee<sup>[11]</sup>状态方程描述其 TNT 状态该方程如下:

$$P = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V_b}\right) e^{-R_1 V_b} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V_b}\right) e^{-R_2 V_b} + \frac{\omega E_0}{V_b}$$
(3)

式中: $P_{v}V_{v}E_{0}$ 分别为爆轰产物的压力、单位体积的比容和初始内能,参数A\_B\_R\_1\_R\_2\_ $\omega$ 为常数,其相关参数如表1所示。

表 1 TNT 相关参数 Table 1 TNT related parameters

密度 p /	爆速/	$P_{C-J}$ /	A/	B/
$(kg \cdot m^{-3})$	$(m \cdot s^{-1})$	GPa	GPa	GPa
1 630	6 930	21	373.8	3.747
$R_1$	$R_2$	ω	$E_{o}/\mathrm{GPa}$	${m V}_{\scriptscriptstyle 0}$
4.15	0.9	0.35	6	1

2)空气属性设置

空气选用 009 号模型,空气状态状态方程为 LINEAR\_ POLYNOMIAL<sup>[12]</sup>,如下:

 $P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E$ (4)

其中, $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 和  $C_6$ 是线性多项式方程的系数; $E_0$ 是每单位体积的内能,空气参数如表 2 所示。

3)土壤属性设置

土壤采用 147 号材料模型,在 Saleh 和 Edwards<sup>[13]</sup>的 工作中,比较了 LS-DYNA 中的 4 种土壤材料,根据作者的 说法,该模型在表示爆炸荷载下的土壤方面更准确。因此, 本研究使用此材料模型来表征土壤的本构模型,土壤的主 要输入参数如表 3 所示。

表 2 空气材料相关参数

Table 2 Related parameters of air materials

密度 p /	C	C	C	C
$(kg \cdot m^{-3})$	C 0	$\mathbf{C}_1$	$C_2$	C 3
1.29	$-1 \times 10^{-6}$	0	0	0
$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E_{o}/\mathrm{GPa}$	$V_{\scriptscriptstyle 0}$
0.4	0.4	0	2.5 $\times 10^{-4}$	1

#### 表 3 土壤材料相关参数

#### Table 3 Related parameters of soil materials

密度 ρ /	体积模量 K/	剪切模量 G/	摩擦角
$(kg \cdot m^{-3})$	MPa	MPa	PHIMAX/Rad
2350	3.25	1.3	1.1
内聚力	含水量	残余摩擦角	土壤比重
COH/kPa	MCONT	PHIRES/Rad	SPGRAV
6.2	0.034	0.001	2.79

#### 2.2 几何模型建立

由于整个试验场庞大,实际三维模型具有不规则性,若 采用实际模型进行网格划分,前期建模与后期计算成本极 高。因此将土壤域理想化为均匀介质,且地面为平整地面, 建立 20 m×1 m×3 m 的土壤域的二分之一模型,网格大 小为 5 cm×5 cm×5 cm,采用流固耦合法<sup>[14]</sup>,建立 20 m× 1 m×10 m 的空气域使得空气域完全包含土壤域,网格大 小为 5 cm×5 cm×5 cm,TNT 为柱状装药,中心起爆,通 过关键字初始体积分数法建立。除土壤表面设置为自由面 即不添加边界条件和对称面,其余表面均设置无反射边界, 以模拟无限空气域和土壤域,三维模型如图 2 所示。



Fig. 2 3D simulation model

#### 2.3 仿真结果

通过开展炸药当量 20、40、60、80、100 kg,爆心距地面

高度 1.5~5.5 m 的地表振动速度仿真分析,在 TNT 爆心 垂直投影面上从 5 m 开始,每隔 1 m 监测地表下 20 cm 处 的垂直地表振动速度,监测点示意图如图 3 所示。





20 kg TNT 爆点距地面高度 3.5 m 爆心距 6、8 m 的振 动速度曲线如图 4 所示。



图 4 爆心距 6 m 和 8 m 的振动速度波形图

Fig. 4 Vibration velocity waveform of 6 m and 8 m core distance

分析振动速度波形发现 6 m 处的峰值到达时间为 17 ms,8 m 处的峰值速度到达时间为 22 ms,因此提取 17、22 ms模型压力云图,及监测点压力曲线,如图 5~7 所示。





通过分析图 5 和 6 的压力云图与图 7 监测点压力曲线 可以发现,炸药发生爆炸后产生冲击波,冲击波传播到地面 后有一部分压力入射到土壤中,另一部分反射波与冲击波 的入射波叠加形成马赫波继续向远处运动,当冲击波沿土 壤传播到达监测点后,土壤受到压力变形因而产生振动,由



图 6 22 ms 土壤与空气压力云图

Fig. 6 Cloud image of soil and air pressure at 22 ms



图 7 6 m 和 8 m 监测点压力曲线

Fig. 7 Pressure curves of the 6 m and 8 m monitoring points

于土壤具有一定弹性,其受到的压力存在波动,因此监测点 的速度曲线也会和压力曲线震荡趋势保持相反,所以就形 成图 4 所示的速度曲线。

仿真分析的地表振动速度数据如表 4~8 所示。对仿 真数据进行分析可得,同爆高下,当药量增加,地表振动峰 值速度变大;相同炸药当量下,爆点距地面高度的增加,地 表振动峰值速度开始衰减,随着爆心距的增加,地表振动峰 值速度的衰减速度逐渐降低;同当量下,爆点距地面高度逐 渐增加,远场的振动峰值速度趋于一致。

表 4 20 kg TNT 地表振动速度峰值 Table 4 Peak ground vibration velocity of 20 kg TNT

	0			•	0			
燿之距	爆点距地面高度/m							
糜心距	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5			
5	74.5	69.4	63.8	51.9	39.9			
6	49.4	45.5	43.2	36.5	28.9			
7	33.0	29.7	29.2	25.2	20.8			
8	22.1	19.1	19.8	17.6	15.0			
9	14.9	12.5	13.7	12.7	10.9			
10	10.1	8.5	9.9	9.3	7.8			
11	6.9	5.9	7.3	6.8	5.7			
12	4.9	4.2	5.4	5.1	4.2			
13	3.6	3.0	4.0	3.9	3.2			
14	2.8	1.9	3.0	3.1	2.5			

Та

	表 5	40 kg TNT 均	也表振动速度	[峰值
ble 5	Peak	ground vibra	tion velocity	of 40 kg TNT

握之距	爆点距地面高度/m						
糜心呾	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5		
5	122.3	110.1	104.6	86.7	68.4		
6	81.3	72.7	71.7	60.5	48.6		
7	55.0	48.0	49.3	42.0	34.8		
8	37.2	31.4	33.9	29.0	24.7		
9	25.0	20.6	23.1	20.1	17.8		
10	16.8	13.5	15.8	14.2	13.0		
11	11.4	9.0	11.1	10.4	9.5		
12	7.7	6.2	8.0	7.8	7.0		
13	5.4	4.4	5.9	5.8	5.2		
14	4.1	3.4	4.3	4.3	3.8		

表 6 60 kg TNT 地表振动速度峰值 Table 6 Peak ground vibration velocity of 60 kg TNT

<b>握</b> 之 距		爆点距地面高度/m						
糜心呾	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5			
5	162.0	150.3	136.6	116.3	94.2			
6	108.8	102.9	94.3	80.9	66.3			
7	75.2	72.8	66.3	56.8	46.9			
8	51.7	50.6	46.4	39.5	33.0			
9	35.2	34.6	32.2	27.5	23.4			
10	23.8	23.4	22.1	19.1	16.9			
11	16.1	15.8	15.2	13.7	12.5			
12	10.9	10.6	10.5	10.1	9.2			
13	7.4	7.3	7.6	7.5	6.7			
14	5.3	5.3	5.5	5.5	4.9			

表 7 80 kg TNT 地表振动速度峰值

	0			•	0			
燿ふ距	爆点距地面高度/m							
☞心呾 -	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5			
5	203.8	189.3	173.2	149.0	120.4			
6	145.2	129.8	118.4	103.0	85.2			
7	103.6	95.4	85.2	73.1	60.5			
8	73.8	69.2	61.9	53.0	43.5			
9	51.6	48.8	44.2	38.2	31.3			
10	35.3	33.6	31.1	27.1	22.3			
11	23.6	22.8	21.4	18.9	16.3			
12	15.8	15.4	14.7	13.4	12.2			
13	10.6	10.4	10.3	9.9	9.0			
14	7.1	7.1	7.4	7.3	6.5			

Table 7 Peak ground vibration velocity of 80 kg TNT

	表 8	100 kg	TNT 地表	振动速	度峰值		
Table 8	Peak	ground	vibration	velocity	of 100	kg ′	ГNТ

握い距		爆点距地面高度/m						
糜心距	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5			
5	227.9	212.2	194.8	170.5	139.5			
6	158.4	144.2	131.8	116.7	98.4			
7	111.2	103.0	93.5	82.4	69.7			
8	79.6	74.3	67.2	58.6	49.3			
9	56.9	52.9	48.1	41.8	35.2			
10	40.3	37.0	34.1	29.8	25.2			
11	27.7	25.5	23.7	21.3	17.9			
12	18.6	17.4	16.5	15.3	13.3			
13	12.6	11.9	11.6	10.9	10.0			
14	8.5	8.2	8.3	8.1	7.5			

注:表4~8中的爆心距单位为m,振动速度单位为 cm/s.

#### 地表振动峰值速度模型的建立 3

# 3.1 地表振动速度的影响因素分析

对于一个具体的爆区而言,爆炸振动波的在传播介质 中的速度 c 和当地的地质情况有着较大的关系,且可以体 现振动波在介质中的能量衰减规律,将仿真的波形,通过互 相关算法,计算出不同爆炸条件下相邻测点间的波速,如 表9所示。

# 表9 相邻测点间振动波平均传播速度

 
 Table 9
 Average propagation speed of vibration waves
 between adjacent measuring points

间距/	爆高 1.5 r	$m/(m \cdot s^{-1})$	爆高 4.5 m/(m•s <sup>-1</sup> )		
m	60 kg	100 kg	60 kg	100 kg	
$5 \sim 6$	835	1 113	608	742	
$6\!\sim\!7$	606	833	513	608	
$7\!\sim\!8$	514	607	476	514	
$8 \sim 9$	445	513	417	477	
9~10	392	445	393	417	
$10 \sim 11$	371	417	371	392	
$11 \sim 12$	351	371	351	371	
$12 \sim \! 13$	334	351	334	351	
$13 \sim 14$	317	334	334	334	

通过对比不同 TNT 当量,不同爆高的条件下振动波 在在介质中的传播速度可以发现:同爆高下,当药量增加, 振动波传播速度逐渐增大;相同炸药当量下,爆点距地面高 度的增加,振动波传播速度开始衰减,随着爆心距的增加, 振动波传播速度的衰减速度逐渐降低;同当量下,爆点距地 面高度逐渐增加,远场的振动波传播速度趋于一致,其衰减 规律和地表振动峰值速度衰减相同,并且相同传播介质下 振动波传播速度可以直接体现振动波的能量大小,从而可 以反映地表振动速度峰值的大小,因此本文将爆炸振动波 速度作为地表振动峰值速度的影响因素。

通过整理发现,影响爆炸振动速度V(对应量纲  $LT^{-1}$ )的影响因素主要有:TNT 当量 Q 对应量纲 M、炸药 装药密度  $\rho_e$  对应量纲 ML<sup>-3</sup>、单位质量炸药释放化学能 E<sub>e</sub> 对应量纲  $L^2 T^{-2}$ 、爆炸产物的膨胀指数  $\gamma_a$  为常数、空气初 始压力  $p_0$  对应量纲  $ML^{-1}T^{-2}$ 、空气初始密度  $\rho_a$  对应量纲  $ML^{-3}$ 、土壤密度  $\rho_{c}$  对应量纲  $ML^{-3}$ 、土壤弹性模量  $E_{c}$  对 应量纲  $ML^{-1}T^{-2}$ 、振动波传播速度 *c* 对应量纲  $LT^{-1}$ 、爆 心距 R 对应量纲 L、炸药距测点的垂直距离 H 对应量 纲L。

### 3.2 地表振动速度量纲分析

分析中忽略重力、材料强化及应变率等因素影响,则测 点峰值加速度可表示为:

$$V = f(\boldsymbol{Q}, \rho_e, \boldsymbol{E}_e, \boldsymbol{\gamma}_e; \boldsymbol{p}_0, \rho_a; \rho_s, \boldsymbol{E}_s, c; \boldsymbol{R}, \boldsymbol{H})$$
(5)

考虑到炸药种类相同、当量不同,目爆炸发生在标准大 气环境有:

$$\rho_e, E_e, \gamma_e; p_0, \rho_a = const \tag{6}$$

式(5)可以简化为:

$$V = f(Q; \rho_s, E_s, c; R, H)$$
<sup>(7)</sup>

因此, 洗取土壤弹性模量  $E_c$ 、爆心距 R、声速 c 为参考 物理量,各个物理量的量纲幂次系数如表 10 所示,行变换 后的系数如表 11 所示。

#### 表 10 爆炸振动速度问题中量纲幂次系数

# Table 10 Dimensional power coefficients in the problem of explosion vibration velocity

	1		1			v	
物理量	$E_s$	R	С	$ ho_s$	Q	Н	V
М	1	0	0	1	1	0	0
L	-1	1	1	0	0	1	1
Т	-2	0	-1	-2	0	0	-1

#### 表 11 爆炸振动速度问题中量纲幂次系数(行变换后)

 
 Table 11
 Dimensional power coefficients in explosion
 vibration velocity problem (after row transformation)

物理量	$E_s$	R	С	$\rho_s$	Q	Н	V
$E_{s}$	1	0	0	1	1	0	0
R	0	1	0	0	3	1	0
С	0	0	1	-2	-2	0	1

因此根据 π 定理<sup>[15]</sup>可以给出 4 个无量纲量:

$$\pi = \frac{V}{c}, \pi_1 = \frac{\rho_s c^2}{E_s}, \pi_2 = \frac{Q c^2}{E_s R^3}, \pi_3 = \frac{H}{R}$$
(8)

故爆破振动质点峰值速度的函数关系式可表示为:

$$\frac{V}{c} = \Psi\left(\frac{\rho_{s}c^{2}}{E_{s}}, \frac{Qc^{2}}{E_{s}R^{3}}, \frac{H}{R}\right)$$
(9)

对于同一个爆炸场而言土壤密度o。和弹性模量E。为 常数<sup>[10]</sup>,式(9)可以简写为:

$$\frac{V}{c} = \Psi\left(c^2, \frac{Qc^2}{R^3}, \frac{H}{R}\right) \tag{10}$$

不同的无量纲变量相乘仍然为无量纲量,因此上式可 以改写为:

$$\begin{cases}
\frac{V}{c} = \theta \left[ \left( \frac{Qc^4}{R^3} \right) \left( \frac{H}{R} \right) \right] \\
V = \theta' \left[ \left( \frac{Qc^5}{R^3} \right) \left( \frac{H}{R} \right) \right]
\end{cases}$$
(11)

由式(11)可以认为 $V 与 \left(\frac{Qc^5}{R^3}\right) \left(\frac{H}{R}\right)$ 存在一定的函数

关系和各变量间的衰减关系,其中 $\frac{Q}{R^3}$ 可以写为 $\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}$ ,并将 此函数写为对数关系:

$$\ln V = \beta_1 + \alpha_1 \ln \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} + 5\alpha_1 \ln c + \beta_2 + \alpha_2 \ln \frac{H}{R} \qquad (12)$$

令 
$$\ln V_{\circ} = \beta_{1} + \alpha_{1} \ln \frac{\sqrt[3]{Q}}{R}, \beta_{1} = \ln K_{1}$$
可以得到 $V_{\circ} =$ 

 $K_1\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{a_1}$ ,可以看出,此式正是传统的萨道夫斯基公式, 将此式带入到式(12)可以得到:

$$\ln V = \ln V_0 + 5\alpha_1 \ln c + \beta_2 + \alpha_2 \ln \frac{H}{R}$$
(13)

根据学者李恒<sup>[16]</sup>的研究,振动波速度 c 和爆心距离 L(测点到爆心的直线距离)存在如下函数关系:

$$c = ab^{L} \tag{14}$$

a 和b 是与爆源距离有关的待定系数无量纲,其中  $L = \sqrt{R^2 + H^2} \, .$ 将式(14)代入式(13)可以得到:

$$\ln V = \ln K_1 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{\alpha_1} + \beta_2 + \alpha_2 \ln \frac{H}{R} + (\ln a + \ln b \sqrt{R^2 + H^2})$$
(15)

$$5\alpha_1 \left(\ln a + \ln b \sqrt[\sqrt{R^2 + H^2}\right)$$

 $\diamondsuit 5\alpha_2 \ln a + \beta_2 = \ln K_2, \alpha_1 = \alpha, 5\alpha_1 = \beta, \alpha_2 = \gamma, 可以$ 得到:

$$\ln V = \ln K_1 + \ln K_2 + \ln \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^a + \beta \ln b \sqrt[\sqrt{R^2 + H^2}] + \gamma \ln \frac{H}{R}$$
(16)

令  $\ln K_1 + \ln K_2 = \ln K$ , 并将等式两边取 e 为底的指 数,并令  $b^{\beta} = \eta$  可以得到:

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{a} (\eta) \sqrt{R^{2} + H^{2}} \left(\frac{H}{R}\right)^{\gamma}$$
(17)

式中:K 为场地系数,与土壤性质,爆破工艺等因素有关;  $(\sqrt[3]{Q}/R)$ °为比例距离的倒数,其表示爆炸能量以球形向

• 41 •

四周传播,其能量衰减与爆心距的立方成正比;  $(\eta)^{\sqrt{R^2+H^2}}$ 反映了振动波在介质中传播速度随着爆心距R、爆心高H的增加而降低;  $(H/R)^{\gamma}$ 综合反映了爆心与测点的相对位置对地表振动速度的影响。

### 3.3 数据处理与回归分析

振动峰值速度与各影响因素之间并不是单一的线性相 关关系,而是某种复杂的非线性相关关系,使用非线性回归 分析方法。在这类问题的处理过程中,可以采用最小二乘 法<sup>[17-18]</sup>,根据非线性残差平方和最小的思想,确立拟合准 则,再结合牛顿迭代,最终求解出未知参数。将式(17)两端 取对数,先使其线性化,可得:

$$\ln V = \ln K + \alpha \ln\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right) + \ln \eta \sqrt{R^2 + H^2} + \gamma \ln\left(\frac{H}{R}\right)$$
(18)

 $\diamondsuit \ln V = \hat{y}, \ln(\sqrt[3]{Q}/R) = x_1, \quad \sqrt{R^2 + H^2} = x_2,$  $\ln(H/R) = x_3, a_0 = \ln K, a_1 = \alpha, a_2 = \ln \eta, a_3 = \gamma_0$ 

可以将式(18)表示为:

 $\hat{y} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \tag{19}$ 

令  $y_i(i=1,2,...,n)$ 为实测值  $\hat{y}_i$  为回归值,实测值与 回归值之间的偏差  $\delta_i$  越小,说明回归拟合的越好,令实测 值与回归值偏差的平方和为  $\delta$  则有:

$$\delta = \sum_{i=1}^{n} \delta_{i}^{2} = \sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \hat{y})^{2} = \sum_{i=1}^{n} (y_{i} - a_{1}x_{1} - a_{2}x_{2} - a_{1}x_{1})^{2}$$
(20)

由小二乘原理可以求出系数 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ ,即:

$$\frac{\partial \delta}{\partial a_0} = \frac{\partial \delta}{\partial a_1} = \frac{\partial \delta}{\partial a_2} = \frac{\partial \delta}{\partial a_3} = 0$$
(21)

得到正规方程组,为简化用  $\sum y_i$  代替  $\sum_{i=1}^{n} y_i$ :  $\begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} & \sum x_{3i} \end{bmatrix}$ 

$$\begin{bmatrix} \sum \mathbf{x}_{1i} & \sum \mathbf{x}_{1i} \mathbf{x}_{1i} & \sum \mathbf{x}_{1i} \mathbf{x}_{2i} & \sum \mathbf{x}_{1i} \mathbf{x}_{3i} \\ \sum \mathbf{x}_{2i} & \sum \mathbf{x}_{2i} \mathbf{x}_{1i} & \sum \mathbf{x}_{2i} \mathbf{x}_{2i} & \sum \mathbf{x}_{2i} \mathbf{x}_{3i} \\ \sum \mathbf{x}_{3i} & \sum \mathbf{x}_{3i} \mathbf{x}_{1i} & \sum \mathbf{x}_{3i} \mathbf{x}_{2i} & \sum \mathbf{x}_{3i} \mathbf{x}_{3i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{0} \\ \mathbf{a}_{1} \\ \mathbf{a}_{2} \\ \mathbf{a}_{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{0} \\ \mathbf{a}_{1} \\ \mathbf{a}_{2} \\ \mathbf{a}_{3} \end{bmatrix}$$

由上式即可求出 a<sub>0</sub>、a<sub>1</sub>、a<sub>2</sub>、a<sub>3</sub>。

本文借助 1stopt 软件进行非线性回归分析,分别对 式(1)、(2)、(17)进行多元非线性回归分析拟合运算,并求 出相对应的系数,得到地表振动速度的预测公式和相关性 系数 R<sup>2[19]</sup>并且可以算出各个条件下地表振动速度的预测 值,同时对各个预测公式的误差进行分析。非线性回归分 析拟合各公式相对误差统计如表 12 所示。

$$V = 240.\ 644 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{2.427}$$

$$R^{2} = 0.\ 937$$
(23)

$$V = 9.671 \times 22.577 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{2.687} \left(\frac{H}{R}\right)^{-0.319}$$
(24)

$$R^{2} = 0.987$$

$$V = 267.644 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{2.078} (0.987) \sqrt{R^{2} + H^{2}} \left(\frac{H}{R}\right)^{-0.222}$$

$$R^{2} = 0.993$$
(25)

表 12	非线性回归分析拟合各公式相对误差统计表
Table 12	Statistical table of relative errors of each formula

fitted by nonlinear regression analysis %

4- A	振动速度平均误差					
公式	20 kg	40 kg	60 kg	80 kg	100 kg	
式(23)	28.08	36.96	37.53	32.33	35.34	
式(24)	24.79	33.43	34.92	30.21	35.02	
式(25)	15.23	16.06	11.20	8.17	5.97	

根据表 12 可得,式(23)的平均相对误差均为 34.04%,式(24)的平均相对误差均为 31.67%;而本文通 过量纲分析推导出的式(25)的误差为 11.33%,拟合精度 最好,说明该公式能够较好对近地爆地表振动峰值速度进 行表征,并且可以表达地表振动峰值速度在不同条件下的 衰减规律。

# 4 试验分析

# 4.1 地表振动速度测试方案

本次试验选用弹药为 TNT,第1发当量为 20 kg,第2 发当量为 25 kg,试验时将弹药放置在预制好高度为 1.5 m 的弹架上,测点沿爆心布设在同一半径线上,由于需要研究 不同当量不同爆心距的条件下地表振动速度的衰减规律, 需要布设不同爆心距的测点,布设了 7 的爆心距的测点分 别是:5、7、9、11、13、15、17 m。测点布设情况如图 8 所示。

地表振动测试系统主要由地震波传感器和测振仪组成,爆炸场的地震波的频率范围在 30~300 Hz<sup>[20]</sup>,需要传感器有较好的响应时间,因此传感器选用中科测控的单轴 磁电式速度传感器,测振仪选用中科测控的 TC-4850。传感器在安装时需要将钢钎砸入土壤中,传感器通过螺纹连接在钢钎上并用土壤夯实,保证传感器和大地连为一体,同时需要保证传感器安装完成后保持水平,传感器上表面距离地面为 20 cm。弹药爆炸时,冲击波引起地面震动,通过土壤向远处传播,引起传感器的振动从而测得地表振动速度。测振仪设置为内触发,触发电平设置为 0.1 cm/s,采样时间为 8 s 并设置 2 s 的负延迟,测试系统组成如图 9 所示。试验现场传感器安装示意图如图 10 所示。

• 42 •



图 8 试验测点布置图

Fig. 8 Layout of test points



图 9 地表振动速度测试系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of surface vibration velocity testing system



图 10 试验现场传感器安装示意图

Fig. 10 Schematic diagram of sensor installation at the test site

#### 4.2 试验数据分析

试验结束后,读取并处理测振仪的数据,并得到7个半径的地表振动速度曲线,各个测点的峰值速度如表13和14所示,各公式相对误差统计如表15和16所示。

根据表 15 和 16 可以算出式(23)的平均相对误差为: 53.10%,式(24)的平均相对误差为:44.13%,式(25)的平 均相对误差为:8.28%,由此得出,本文建立的地表振动测 试系统较为可靠,较为准确的测量的地表振动的速度,本文 通过量纲分析推导出的近地爆地表振动峰值速度预测公式 的精度最高,可以有效地表征地表振动强度。 表 13 20 kg TNT 地表振动峰值速度实测值与预测值 Table 13 Actual and predicted peak velocities of 20 kg TNT surface vibrations

测点	实测值/	式(23)	式(24)	式(25)	
	$(\mathrm{cm} \cdot \mathrm{s}^{-1})$	预测值	预测值	预测值	
1	80.79	54.64	62.10	91.77	
2	42.2	24.15	27.99	47.91	
3	28.9	13.12	15.44	29.29	
4	18.42	8.06	9.60	19.67	
5	15.86	5.37	6.46	14.05	
6	11.23	3.80	4.61	10.50	
7	8.21	2.80	3.42	8.11	

#### 表 14 25 kg TNT 地表振动峰值速度实测值与预测值

Table 14 Actual and predicted peak velocity of 25 kg TNT

surface vibration					
测点	实测值/	式(23)	式(24)	式(25)	
	$(\mathrm{cm} \cdot \mathrm{s}^{-1})$	预测值	预测值	预测值	
1	95.55	65.45	75.84	107.11	
2	52.55	28.92	34.19	55.92	
3	33.44	15.72	18.85	34.19	
4	18.33	9.66	11.72	22.95	
5	16.38	6.44	7.89	16.40	
6	11.67	4.55	5.62	12.25	
7	8.58	3.36	4.18	9.46	

# 表 15 20 kg TNT 各公式相对误差统计表

 Table 15
 Statistical table of relative errors of

	0/0		
测点	式(23)	式(24)	式(25)
1	32.37	23.13	13.59
2	42.78	33.66	13.54
3	54.60	46.58	1.35
4	56.23	47.89	6.77
5	66.11	59.25	11.39
6	66.18	58.99	6.51
7	65.86	58.29	1.23

# 表 16 25 kg TNT 各公式相对误差统计表

Table 16 Statistical table of relative errors of

	%		
测点	式(23)	式(24)	式(25)
1	31.50	20.63	12.10
2	44.91	34.88	6.52
3	53.00	43.62	2.23
4	47.32	36.05	25.23
5	60.69	51.81	0.14
6	61.02	51.81	5.00
7	60.87	51.26	10.30

# 5 结 论

分析了爆炸场地表振动的形成机理,以及地震波的基本类型,并借此建立地表振动的有限元模型,分析了 20~100 kg TNT 在 1.5~5.5 m 爆心高的条件下 5~14 m 地表振动峰值速度,发现同炸药当量下随着爆点距地面高度变大,振动峰值速度呈现下降的趋势,但是远场的地表振动峰值速度随着爆心的增大其衰减速度会降低。

本文考虑振动波在介质中的传播速度作为影响因素, 建立的地表振动峰值速度预测模型,借助有限元仿真的数据,通过多元非线性回归析了量纲分析推导出的公式以及 萨道夫斯基公式和学者李修贤的预测公式。结果表明,本 文推导的地表振动峰值速度模型的平均相对误差为 11.33%,萨道夫斯基公式的平均相对误差为 34.04%,学 者李修贤的模型平均相对误差为 31.67%,所以本文的地 表振动速度模型精度最高,明显优于其余两个的预测公式, 能够较好对近地爆地表振动峰值速度进行表征,并且可以 表达地表振动峰值速度在不同条件下的衰减规律。

建立了地表振动测试系统,并指出了传感器安装方法, 进行近地爆地表振动试验结果表明建立的地表振动测试系 统较为可靠,可以准确的测量地表振动速度。将试验数据 分别带入到通过仿真数据拟合出的式(23)~(25),结果表 明本文推导出的地表振动速度模型的预测误差最低,为 8.28%,明显优于其余两个预测公式,因此,本文建立的测 试系统其拟合精度最高,能够较好的表征地表振动强度。

#### 参考文献

[1] 李修贤,程贵海,谭成驰,等.基于量纲分析法的爆破振动速度预测模型研究[J].化工矿物与加工,2022, 51(6):36-40.

> LI X X, CHENG G H, TAN CH CH, et al. Research on the prediction model of blasting vibration velocity based on dimensional analysis method [J]. Chemical Minerals and Processing, 2022, 51(6): 36-40.

- [2] 李贺龙,王浩.基于量纲分析的戈壁地区爆破振动衰减 模型[J].科学技术与工程,2023,23(28):11947-11953.
  LI H L, WANG H. Blasting vibration attenuation model in gobi area based on dimensional analysis[J].
  Science Technology and Engineering, 2023, 23 (28): 11947-11953.
- [3] 万嗣鹏,张义平,陶铁军,等.基于准岩体抗拉强度的爆破振动速度衰减公式改进[J].金属矿山,2019(7): 60-64.

WAN S P, ZHANG Y P, TAO T J, et al. Improvement of blasting vibration velocity attenuation formula based on tensile strength of quasi-rock mass [J]. Metal Mine, 2019(7):60-64.

[4] 叶海旺,袁尔君,雷涛,等.基于量纲分析的爆破振动质

点峰值速度预测公式[J]. 金属矿山,2019(5):56-61.

YE H W, YUAN ER J, LEI T, et al. Prediction formula of blasting vibration particle peak velocity based on dimensional analysis [J]. Metal Mine, 2019(5):56-61.

- [5] 代树红,安志奎,王晓晨,等. 露天煤矿爆破振动速度计 算公式研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学 版),2022,41(1):41-46.
  DAI SH H, AN ZH K, WANG X CH, et al. Research on calculation formula of blasting vibration velocity in open pit coal mine[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition),2022, 41(1):41-46.
- [6] 陈家辉,孔德仁,徐春冬,等.坑道内冲击波压力测试与 分析[J].国外电子测量技术,2022,41(12):63-68.
  CHEN J H, KONG D R, XU CH D, et al. Measurement and analysis of shock wave pressure in tunnel [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022,41(12):63-68.
- [7] 马坤.地表爆炸地震波测试与传播规律研究[D].太原:中北大学,2021.
  MA K. Research on seismic wave measurement and propagation of surface explosion[D]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [8] 张梦妹. 温压战斗部爆炸场地震波测试方法研究[D].
   南京:南京理工大学,2017.
   ZHANG M M. Research on seismic wave test method for detonation site of thermobaric warhead [D].
   Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2017.
- [9] 王超,周传波,路世伟,等.城市暗挖隧道爆破地震波传播规律研究[J].科学技术与工程,2017,17(6): 158-162.

WANG CH, ZHOU CH B, LU SH W, et al. Research on seismic wave propagation of urban underground tunnel blasting [J]. Science Technology and Engineering, 2017,17(6):158-162.

- [10] 李修贤.临近民房岩体爆破振动和飞石预测及控制措施研究[D].南宁:广西大学,2022.
  LIXX. Research on prediction and control measures of blasting vibration and flying rock in adjacent residential rock mass [D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [11] LINFORTH S, TRAN P, RUPASINGHE M, et al. Unsaturated soil blast: Flying plate experiment and numerical investigations [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 125(3): 212-228.

[12] ESMAEILI M, TAVAKOLI B. Finite element

• 44 •

method simulation of explosive compaction in saturated loose sandy soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019,116(1): 446-459.

- [13] SALEH M, EDWARDS L. Evaluation of soil and fluid structure interaction in blast modelling of the flying plate test[J]. Computers & Structures, 2015, 151(4): 96-114.
- [14] 邹晓晶. 地下井群结构受地震和爆炸动力响应仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
  ZOU X J. Simulation study on seismic and explosion dynamic response of underground well group structure[D]. Harbin; Harbin Institute of Technology, 2021.
- [15] 钟巍,田宙,寿列枫.基于线性代数的大规模快速量纲 分析算法及其在爆炸与冲击工程研究中的应用[J].计 算数学,2020,42(2):170-195.

ZHONG W, TIAN ZH, SHOU L F. Large-scale fast dimensional analysis algorithm based on linear algebra and its application in explosion and shock engineering [J]. Mathematica Numerica Sinica, 2020,42(2):170-195.

[16] 李恒. 白马铁矿爆破振动影响因素及预测系统研 究[D]. 昆明:昆明理工大学,2023.

> LI H. Study on influencing factors and prediction system of blasting vibration in baima iron mine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023.

[17] 伍兴国,雷钦礼.再议普通最小二乘法下回归系数的性质[J].统计与决策,2020,36(1):10-14.
 WU X G, LEI Q L. Rediscussing the property of regression coefficient under ordinary least square method[J]. Statistics

and Decision, 2020, 36(1):10-14.

[18] 鄢士程,解广成,辛全明,等.多监测条件下地铁明挖车 站周边地表沉降预测分析[J].电子测量技术,2022, 45(2):48-54.

YAN SH CH, XIE G CH, XIN Q M, et al. Prediction and analysis of surface settlement around underground excavation station under multiple monitoring conditions [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(2):48-54.

[19] 周亚中,何怡刚,邢致恺,等. 基于 IDBO-ARIMA 的电力变压器振动信号预测[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(8):11-20.
ZHOU Y ZH, HE Y G, XING ZH K, et al. Vibration signal prediction of power transformer based

on IDBO-ARIMA[J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2023,37(8):11-20.

- [20] 浑长宏. 基于加速度功率谱密度法的爆破振动研究[D].大连:大连理工大学,2016.
  HUN CH H. Research on blasting vibration based on acceleration power spectral density method [D].
  Dalian: Dalian University of Technology,2016.
- 作者简介

**王涛**,硕士研究生,主要研究方向为动态参量测试。 E-mail:wtnjust1999@163.com

**孔德仁**(通信作者),博士,教授,主要研究方向为爆炸动 态参量测试、测控技术及仪器、现代传感器技术及系统。 E-mail:derenkong@hotmail.com

**潘正伟**,博士研究生,主要研究方向为薄膜塑性测压。 E-mail:1757593883@qq.com