

文章编号: 1001-1455(2013)03-0231-07

# 土中爆炸成腔问题中确定炸点状态的一种计算反求方法\*

张伟, 刘杰, 韩旭, 谭柱华

(湖南大学机械与运载工程学院特种装备先进设计技术与仿真教育部重点实验室, 湖南长沙 410082)

**摘要:** 提出了一种通过给定的土中爆炸成腔毁伤效应确定炸点状态的计算反求方法。该方法将确定炸点状态的反问题转化为求解爆炸毁伤效应的计算值与给定值误差函数最小的优化问题。在反求过程中, 采用基于误差减小比率技术的多项式近似模型代替土中爆炸数值分析模型, 以便提高反求效率。采用 Tikhonov 正则化方法克服反求过程中出现的病态问题。在此基础上, 引入信赖域管理策略判断当前近似模型与实际模型的逼近程度, 以确定最优的反求向量。炸点状态反求结果与实验结果的对比分析表明, 该方法能够有效且稳定地通过给定的毁伤效应实现炸点状态的反求, 这可为炸点状态的设计提供参考。

**关键词:** 爆炸力学; 反问题; 近似模型管理; 土中爆炸; 正则化方法; 牛顿法

**中图分类号:** O383.1

**国标学科代码:** 1303520

**文献标志码:** A

近年来, 无论在军事还是民用领域, 土中爆炸成腔问题的研究受到了广泛关注<sup>[1-3]</sup>。一般地, 采用爆炸成腔的半径和深度描述土中爆炸毁伤效应。土中爆炸毁伤效应与其炸点状态即炸药药量以及炸药埋深量密切相关。通过毁伤效应确定炸点状态是研究土中爆炸成腔问题的关键所在。在军事领域, 利用毁伤效应可以对地面装备和土中防护工程进行破坏性评估, 战时还可以对掩体工事进行快速开挖等。在民用方面, 利用毁伤效应开坑除障的实例广泛存在于交通运输、水利建设以及矿藏开发等工程中。因此, 研究如何通过土中爆炸成腔毁伤效应确定炸点状态成为当前工程领域急需解决的关键技术难题。

传统的土中爆炸成腔问题研究主要集中在对土中爆炸毁伤效应的机理与预测中。然而, 土中爆炸现象涉及应力波在固体介质中的传播, 固体介质在高温、高压和高应变率下的动态力学性能, 爆轰产物与固体介质之间相互作用以及空气与固体介质的相互作用等问题, 是十分复杂的力学与物理学、化学等交叉学科问题。目前, 土中爆炸毁伤效应的机理研究大多停留在定性解释阶段<sup>[4]</sup>。土中爆炸毁伤效应的评估与预测虽然有了大量的探索和研究<sup>[5-6]</sup>, 取得了不少成功的经验, 但是尚未形成系统的理论。

通过土中爆炸成腔毁伤效应确定炸点状态是建立在毁伤效应机理及预测研究基础上的。这方面的探索尚处于起步阶段, 许多问题有待深入研究。由于受到技术条件与经济条件等限制, 根据毁伤效应对炸点状态尚无有效方法直接确定。然而, 发展有效的计算反求方法是解决这类问题行之有效的途径<sup>[7]</sup>。随着计算模拟技术的发展, 一些计算反求方法在解决各种复杂的工程反问题中已经得到了广泛的应用, 这为计算反求方法在土中爆炸领域的应用奠定了技术基础。

本文中, 针对通过给定的土中爆炸毁伤效应确定炸点状态这类复杂反问题, 提出一种新颖实用的计算反求方法。这种方法将确定炸点状态的反问题转化为优化问题。首先, 为了减少计算耗时, 采用基于误差减小比率技术的多项式近似模型代替实际模型。其次, 采用正则化方法解决病态性问题, 并且引入信赖域方法对当前近似模型与实际模型的误差进行管理。最后, 通过炸点状态反求结果与实验结果的对比, 说明本文方法的有效性。

\* 收稿日期: 2012-01-04; 修回日期: 2012-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(11202076); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB832700); 装备预先研究项目(62501036012)

作者简介: 张伟(1982—), 男, 博士研究生。

## 1 问题描述

一般地,土中爆炸成腔正问题是由已知炸药药量  $m_t$  和埋深  $h_t$ , 预测毁伤效应即成腔半径  $d$  和成腔深度  $H$ 。而相应的反问题为通过给定毁伤效应即成腔半径  $d$  与成腔深度  $H$ , 确定炸点状态即炸药药量  $m_t$  和埋深  $h_t$ 。图 1 给出了土中爆炸成腔问题中确定炸点状态的反问题描述。

现在,将确定炸点状态的反问题,转化为求解毁伤效应计算值与给定值误差函数最小的优化问题。

最小化误差函数可以表示为:

$$\min_{\mathbf{X}} m(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n \| \mathbf{Y}_i^c(\mathbf{X}) - \mathbf{Y}_i^g(\mathbf{X}^t) \|^2$$

$$x_i(L) \leq x_i \leq x_i(U) \quad (1)$$

式中: $m(\mathbf{X})$ 为目标函数, $\mathbf{X}$ 为 $n$ 维炸点状态反求向量, $x_i$ 为反求向量中的元素,其取值范围上下界分别为 $x_i(U)$ 和 $x_i(L)$ 。 $\mathbf{Y}_i^c(\mathbf{X})$ 为通过正问题求解器计算得到的毁伤效应向量。 $\mathbf{X}^t$ 为 $n$ 维炸点状态向量的真实值。 $\mathbf{Y}_i^g(\mathbf{X}^t)$ 为给定的真实炸点状态向量对应的毁伤效应向量。

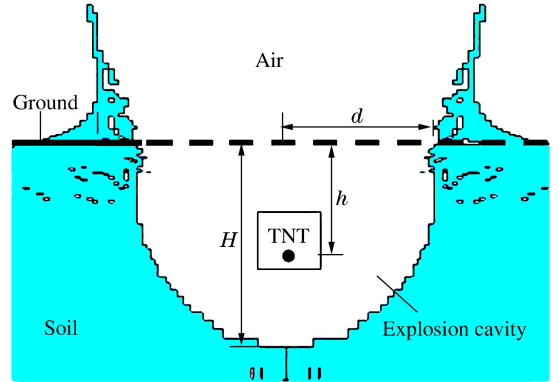


图 1 土中爆炸反问题描述

Fig. 1 Schematic diagram for inverse problem of an underground explosion

## 2 炸点状态的反求

### 2.1 土中爆炸正问题模型

反问题建立在正问题成功求解的基础上,因此有效的土中爆炸成腔正问题模型对其炸点状态的反求至关重要。本文中按照文献[5]中的实验条件建立土中爆炸数值计算模型。考虑到密实介质中爆炸问题数值模型建立的复杂性,作者在另文中详细讨论了土中爆炸数值模型的确认问题<sup>[8]</sup>。综合考虑计算精度高和计算耗时少的原则,采用文献[8]表2中工况7作为本文土中爆炸正问题数值计算模型,即土壤、空气以及炸药均采用欧拉单元,网格尺寸为5 mm,几何尺寸为3 600 mm。按照对称性要求,土中爆炸数值模型可以简化为二维轴对称模型。在计算模型中,空气采用理想气体状态方程,TNT炸药采用JWL状态方程,土壤状态方程采用Mie-Grüneisen方程以及Drucker-Prager屈服准则。

### 2.2 建立近似模型

在炸点状态反求过程中,需要多次调用土中爆炸正问题,由此导致了反求过程计算量巨大。为了提高反求过程的计算效率,本文中采用近似模型代替计算耗时的数值模型。除了提高计算效率,近似模型的另一个优点是在一定程度上能对真实函数进行降噪处理,使炸点状态能够获得良好的反求效果。

土中爆炸成腔毁伤效应 $\mathbf{Y}$ 可以近似地表示为炸点状态 $\mathbf{X}$ 的函数形式

$$\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{F}(\mathbf{X}) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}$ 为炸点状态向量,包括药量 $m$ 和埋深 $h$ 等2个分量。 $\bar{\mathbf{Y}}$ 为毁伤效应向量,包括成腔半径 $d$ 和成腔深度 $H$ 等2个分量。函数关系向量 $\mathbf{F}$ 包括成腔半径 $d = f(m, h)$ 和成腔深度 $H = g(m, h)$ 。采用展开多项式形式表示 $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ ,以成腔半径 $f$ 为例

$$f = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_k x_k + a_{k+1} x_1^2 + a_{k+2} x_1 x_2 + \dots + a_{N-1} x_k^m = \sum_{i=0}^{N-1} a_i u_i \quad (3)$$

式中: $u_i$ 是所有因素在 $m$ 次方下所有可能的组合形式,多形式的系数 $a_i$ 是待定系数。多项式结构总项数 $N = (k+m)! / (k!m!)$ 。

本文中采用结构选择技术<sup>[9]</sup>确定多项式结构。该技术是在(3)式的多项式所有项中,评估每项的显著性,并按照误差减小比率的大小选出有效的多项式项,获得土中爆炸最佳多项式近似模型。

将式(2)代入式(1),则有

$$\min_{\mathbf{X}} \bar{m}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n \|\bar{\mathbf{Y}}_i^c(\mathbf{X}) - \mathbf{Y}_i^g(\mathbf{X}^t)\|^2 \quad \max\{x_i(L), x_i^k - \Delta_k\} \leq x_i \leq \min\{x_i(U), x_i^k + \Delta_k\} \quad (4)$$

式中: $\bar{m}(\mathbf{X})$ 为近似计算目标函数, $\bar{\mathbf{Y}}_i^c(\mathbf{X})$ 表示采用土中爆炸近似模型计算得到的毁伤效应向量。 $\Delta_k$ 表示第 $k$ 迭代步的信赖域半径,它与当前反求参量 $x_i^k$ 构成的搜索区域称为当前信赖域。信赖域半径将在反求迭代过程中不断更新。

### 2.3 正则化方法

本文中采用 Tikhonov 正则化方法<sup>[10]</sup>处理反求过程中由于非敏感性、噪声放大和数值计算误差等引起的病态性问题。Tikhonov 正则化方法的基本思想是将较小的奇异值 $\sigma$ 乘以正则化算子 $f_\alpha(\sigma)$ ,进而使小奇异值趋于零。正则化算子表达式为

$$f_\alpha(\sigma) = \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + \alpha} \quad (5)$$

式中: $\alpha$ 为正则化参数,用以调节残差范数以及解的范数的相对大小。求解过程中,存在一个最佳的正则化参数。本文中选用适用性强的 L 曲线准则<sup>[11]</sup>确定最佳正则化参数 $\alpha$ 。

引入正则化方法后,基于近似模型技术的土中爆炸成腔中炸点状态反问题最终转化为

$$\min_{\mathbf{X}} \sum_{i=1}^n \|\bar{\mathbf{Y}}_i^c(\mathbf{X}) - \mathbf{Y}_i^g(\mathbf{X}^t)\|^2 + \alpha^2 \|\mathbf{X}\|^2 \quad \max\{x_i(L), x_i^k - \Delta_k\} \leq x_i \leq \min\{x_i(U), x_i^k + \Delta_k\} \quad (6)$$

### 2.4 信赖域近似模型管理策略

本文中在土中爆炸近似模型的基础上引入基于信赖域方法的近似模型管理策略<sup>[12]</sup>。该策略的主要目的是在反求过程中根据当前近似模型与实际模型的逼近程度,对反求变量搜索空间中的信赖域进行更新,以保证在该区域内的当前近似模型能够与实际模型基本一致。当两者的逼近程度比较低时,就缩小信赖域,反之,则放大信赖域。为此,定义信赖度指标以评价当前近似模型与实际模型的逼近程度:

$$\rho_k = \frac{\bar{m}(\mathbf{X}_k) - \bar{m}(\mathbf{X}_k^t)}{\bar{m}(\mathbf{X}_k) - \varphi(\mathbf{X}_k^t)} \quad (7)$$

式中: $\bar{m}(\mathbf{X}_k)$ 被视为实际模型, $\varphi(\mathbf{X}_k^t)$ 被视为当前近似模型, $\mathbf{X}_k^t$ 为求解式(6)后得到的最优解。信赖度指标 $\rho_k$ 表示第 $k$ 迭代步时,点 $\mathbf{X}_k$ 与 $\mathbf{X}_k^t$ 间真实模型的实际变化与当前近似模型的预测变化的比。 $\rho_k$ 越接近1,表明当前近似模型与实际模型越接近。在迭代过程中,根据 $\rho_k$ 可以更新下一代步信赖域半径。

本文中采用非线性牛顿法为求解式(6)的优化工具。将获得的最优炸点状态参数作为反求结果。鉴于以上分析,图2给出土中爆炸成腔中炸点状态的反求流程。

### 3 反求结果及讨论

本文的土中爆炸数值计算模型中,药量为 $0.125 \text{ kg} \leq m \leq 10.14 \text{ kg}$ ,埋深为 $80 \text{ mm} \leq h \leq 680 \text{ mm}$ ,选取30个样本点,通过Autodyn软件得到了20ms时刻毁伤效应成腔半径 $d$ 和成腔深度 $H$ 的计算结果。此时爆炸成腔趋于稳定。

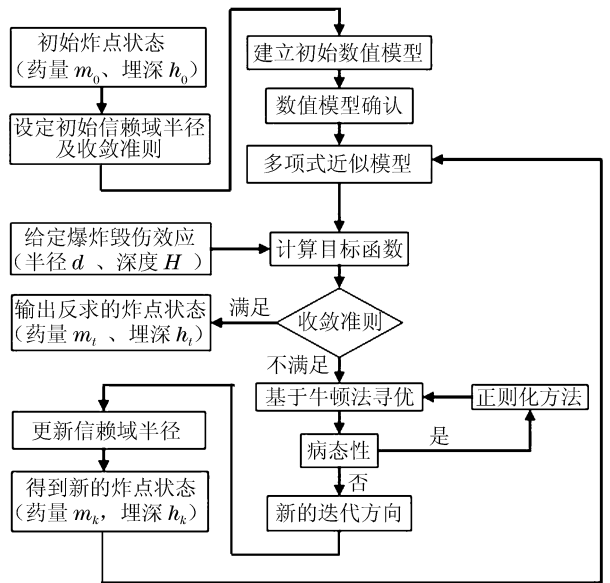


图2 炸点状态反求流程图

Fig. 2 Flowchart of the present inverse technique

图 3 为毁伤效应的 Autodyn 计算结果。从图 3 可以清晰地看出以下几点规律：(1)在炸药埋深一定条件下，爆炸成腔半径和深度均随着药量的增加而增大。(2)在药量一定条件下，存在一个最优深度使得爆炸成腔半径最大(见图 3(a))。(3)在药量一定条件下，爆炸成腔深度随着炸药埋深的增加而增大(见图 3(b))。图 3 说明了毁伤效应参量中成腔半径和成腔深度对炸点状态参量中的药量和埋深变化是敏感的。这种敏感性表明了土中爆炸毁伤效应与炸点状态之间存在较强的因果关系，因而保证了通过毁伤效应反求炸点状态的可能性。

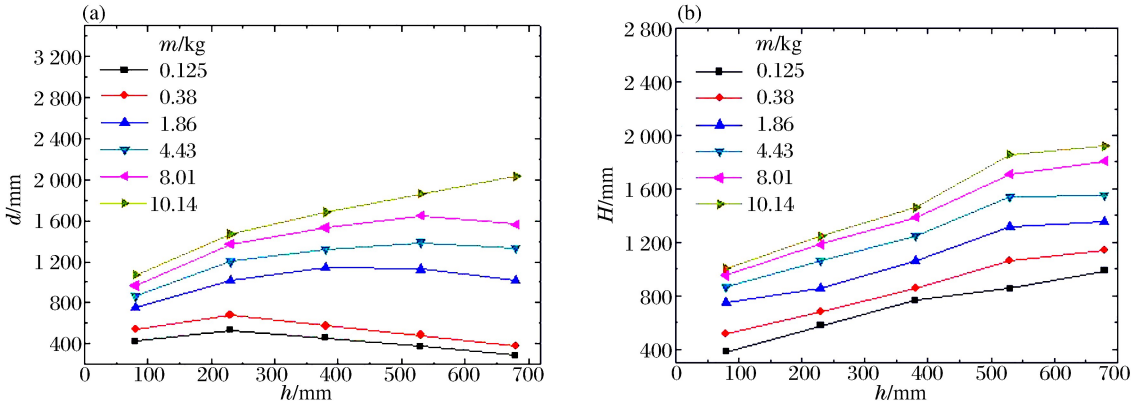


图 3 毁伤效应对炸点状态的敏感性

Fig. 3 Sensitivity of damage effects to detonator statuses

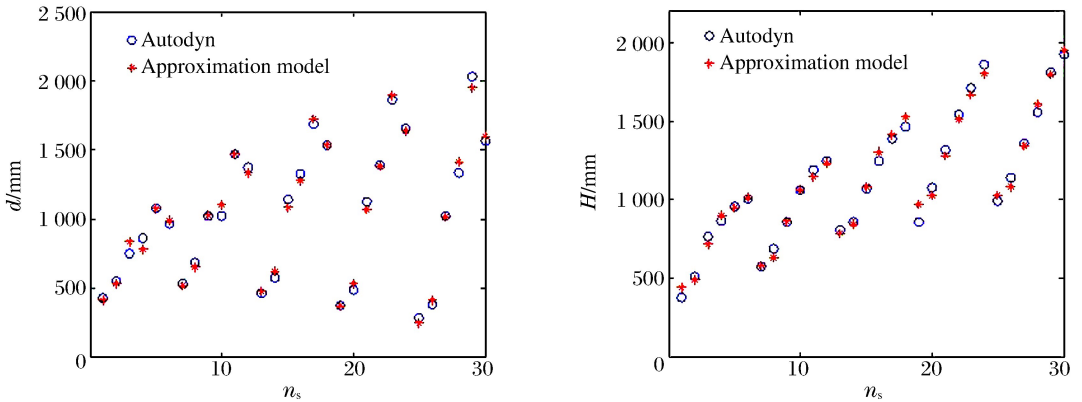


图 4 近似模型与 Autodyn 计算值对比

Fig. 4 Comparison of approximation models with Autodyn

现在,利用上述 30 个样本点,分别建立爆炸成腔半径和成腔深度关于药量和埋深的多项式近似模型。图 4 给出了 30 个样本点爆炸成腔半径和深度多项式近似模型计算值与为 Autodyn 计算值的对比图。从图 4 可知,多项式近似模型计算值与 Autodyn 的计算值较好吻合,表明多项式近似模型的计算精度可以接受。

通过多项式近似模型计算遍历炸点状态取值范围,可得爆炸毁伤效应即成腔半径和成腔深度的可行域,如图 5 所示。图 5 显示了炸点状态与毁伤效应的对应关系,说明了毁伤效应在可行域中选择才能保证炸点状态反求解的存在性。另外,图 5 还表明,要得到毁伤效应可行域以外的区域,必须改变炸点状态。这对炸点状态的设计有一定的指导意义。

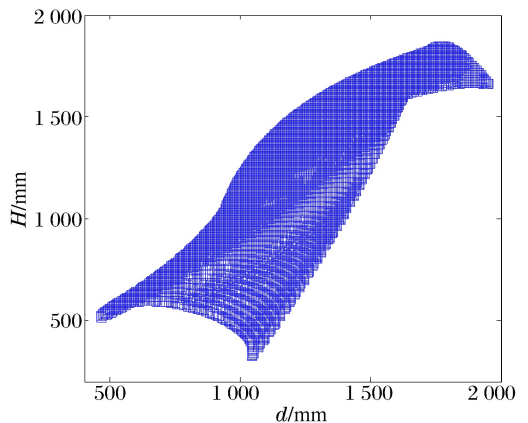


图 5 爆炸成腔毁伤效应可行域

Fig. 5 Reliable area of damage effects



### 3.1 基于数值模拟数据的反求结果

表1给出了2种工况下炸点状态反求的数值验证结果。工况1中,假定炸点状态真实值为埋深 $h_i = 400.0\text{mm}$ 、药量 $m_i = 7.0\text{kg}$ ,将这组炸点状态真实值代入多项式近似模型,可以计算获得毁伤效应成腔半径 $d = 1\,360\text{mm}$ 和成腔深度 $H = 1\,407\text{mm}$ 。现在,由计算得到的成腔半径和成腔深度作为给定条件,利用上一节中提出的计算反求方法确定炸点状态参量值。分别考虑炸点状态参量的2种不同初始值,即 $h_0 = 300.0\text{mm}$ 和

$m_0 = 5.0\text{kg}$ ,  $h_0 = 600.0\text{mm}$ 和 $m_0 = 9.0\text{kg}$ ,初始信赖域半径分别为100和2,最大迭代步为70,反求过程循环进行直至满足最大迭代步要求。工况2的炸点状态反求过程与工况1类似。表1显示,2种工况下,炸点状态反求值与真实值相对误差最大值仅为1.01%,可见,本文中提出的计算反求方法的精度可以接受。图6给出了2种工况下炸点状态反求值的收敛曲线。从图6可知,不同初始值条件下,2种工况下的炸点状态的反求均有良好收敛效果。图6还显示,反求过程中调用正问题的次数最大不超过30次,说明该方法具有较高的收敛效率。

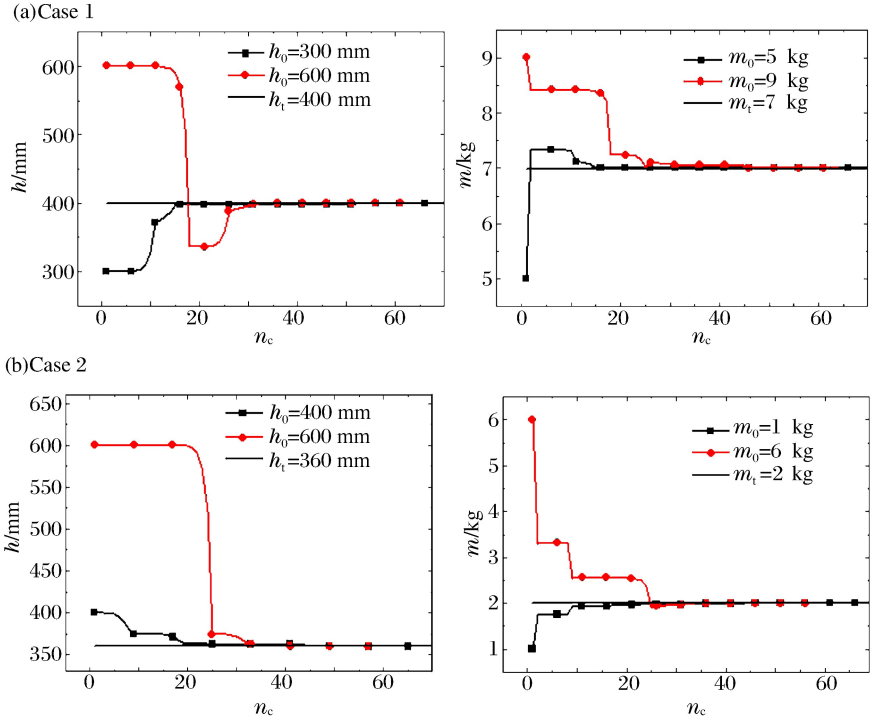


图6 2种工况炸点状态反求收敛曲线

Fig. 6 Convergence performance of the present inverse technique for two cases

表1 炸点状态反求结果

Table 1 Inverse results

工况	$d/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$h_0/\text{mm}$	$m_0/\text{kg}$	$h_i/\text{mm}$	$m_i/\text{kg}$	$h_i/\text{mm}$	$m_i/\text{kg}$	$\epsilon_n/\%$	$\epsilon_m/\%$
1	1 360	1 407	300.0	5.0	398.1	7.01	400.0	7.0	0.50	0.14
			600.0	9.0	401.5	7.02			0.40	0.29
2	1 068	1 046	400.0	1.0	359.8	2.01	360.0	2.0	0.06	0.50
			600.0	6.0	358.7	2.02			0.40	1.01

### 3.2 基于物理实验数据的反求结果

考虑文献[5]中给出的2种工况土中爆炸外场的实验结果。在工况1中,当 $h_i = 500\text{mm}$ ,  $m_i = 4.0\text{kg}$ 时,  $d = 1\,520\text{mm}$ ,  $H = 830\text{mm}$ 。在工况2中,当 $h_i = 500\text{mm}$ ,  $m_i = 10.0\text{kg}$ 时,  $d = 1\,965\text{mm}$ ,  $H = 1\,270\text{mm}$ 。为了验证该方法的工程实用性,现将采用以上2种工况毁伤效应实验值进行炸点状态反求,并将反求结果与实验结果进行对比分析。

实验所测得的成腔深度是爆炸成腔中心处回填土表面到地表面的垂直距离。然而,数值模拟很难再现爆炸后土的回填过程,数值计算得到的成腔深度是未考虑回填土的实际成腔深度。因此,在通过毁伤效应实验值反求炸点状态时,需要将成腔深度进行相应处理。具体做法是,首先,根据实验获得的成腔半径,在毁伤效应可行域(见图5)中找出所对应成腔深度的取值范围。其次,利用实验获得的成腔半径以及从毁伤效应可行域中获得的相应成腔深度的取值范围,通过反求方法确定炸点状态。

工况 1 中,爆炸成腔半径  $d=1\ 520\ \text{mm}$ 。由图 5,可得到对应成腔深度的范围为  $1\ 230\ \text{mm} \leq H \leq 1\ 700\ \text{mm}$ 。在这个成腔深度范围内均匀选取 30 个点,与成腔半径  $d=1\ 520\ \text{mm}$  组成 30 组毁伤效应状态。采用反求方法分别求出与给定的这 30 组毁伤效应相对应的 30 组炸点状态。这 30 组炸点状态与其中 1 组实验结果对比,如图 7 所示。同样,工况 2 爆炸成腔半径  $d=1\ 965\ \text{mm}$ ,相应成腔深度的范围为  $1\ 630\ \text{mm} \leq H \leq 1\ 960\ \text{mm}$ 。反求出的炸点状态和 1 组实验结果对比,如图 7 所示。

由图 7 可知,2 种工况中炸点状态药量的实验结果完全被包含在反求得到的药量区域中,并且这个反求区域范围较小。这说明了与药量实验结果对比,药量的反求结果是有效的。图 7 还显示,炸药埋深的反求区域并未包含其实验值,但偏离并不是很远,这也就是说炸药埋深的反求值与实验值存在一定误差。然而,考虑 2 种工况下炸药埋深反求的极端情况,即视炸药埋深反求区域两端点值为其实验值对应的反求结果,得到炸药埋深反求值与实验值的最大相对误差仅为 14.2%。对于土中爆炸这类复杂的非线性问题,这个反求精度在工程应用上是可以接受的。因此,图 7 说明了本文中提出的反求方法在解决工程中通过给定毁伤效应来确定炸点状态问题时是有效的和实用的。

本文中提出的计算反求方法在求解炸点状态反问题时应注意以下几点:首先,本方法仅适用于土中爆炸在药量和埋深取值范围内有明显毁伤效应的工况,隐爆工况尚未考虑。其次,在外场实验中,土中爆炸成腔的测定会有较大误差,通常误差范围 30%~40% 均属正常现象。因此,要得到良好的炸点状态反求效果,就要保证土中爆炸数值模型和近似模型具有可接受的计算精度。最后,在结合毁伤效应实验结果进行炸点状态反求时,需将实验获得的成腔深度通过毁伤效应可行域转换成数值成腔深度,以便得到有效的反求结果。

## 4 结 论

采用基于误差减小比率技术的多项式近似模型代替实际计算模型。在此基础上,提出了基于信赖域管理策略的计算反求方法。反求结果与实验结果的对比分析表明,这种方法能够准确、有效并快速通过给定的土中爆炸毁伤效应确定相应的炸点状态。这种方法简便稳定,为传统方法难以确定炸点状态的问题提供了新的求解思路,并且也为炸点状态的设计提供了合理的指导意见。另外,该方法结合了土中爆炸数值模拟与物理实验,可以减少实验次数,在实际工程应用中具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] Bull J W, Woodford C H. Camouflets and their effect on runway support[J]. Computers and Structures, 1998,69: 695-706.
- [2] 钱七虎. 岩石爆炸动力学的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2009,28(10):1945-1968.  
Qian Qi-hu. Some advances in rock blasting dynamics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(10):1945-1968.
- [3] 宁建国,宋卫东,任会兰,等. 冲击载荷作用下材料与结构的响应与防护[J]. 固体力学学报, 2010,31(5):532-552.  
Ning Jjian-guo, Song Wei-dong, Ren Hui-lan, et al. Response and protection of materials and structures under impact loadings[J]. Chinese Journal of Solid and Mechanics, 2010,31(5):532-552.
- [4] 施鹏,辛凯,杨秀敏,等. 土中装药不同埋深爆炸试验研究[J]. 工程力学, 2006,23(12):171-174.  
Shi Peng, Xin Kai, Yang Xiu-min, et al. Experimental study of explosion with different burial depths in soil[J]. Engineering Mechanics, 2006,23(12):171-174.

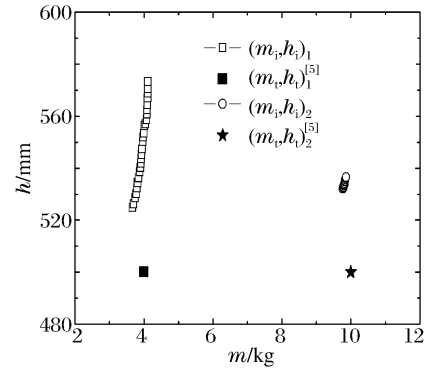


图 7 炸点状态参量反求结果  
与实验结果对比

Fig. 7 Comparison of inverse results  
with experimental ones

- [5] Luccioni B, Ambrosini D, Nurick G, et al. Craters produced by underground explosions[J]. *Computers and Structures*, 2009,87:1366-1373.
- [6] 穆朝民,任辉启,辛凯,等. 变埋深条件下土中爆炸成坑效应[J]. *解放军理工大学学报*,2010,11(2):112-116.  
Mu Chao-min, Ren Hui-qi, Xin Kai, et al. Effects of crater formed by explosion in soils[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010,11(2):112-116.
- [7] Liu G R, Han X. *Computational inverse techniques in nondestructive evaluation*[M]. Florida: CRC Press, 2003.
- [8] 张伟,韩旭,刘杰,等. 一种基于正交试验设计的土中爆炸数值模型确认方法[J]. *工程力学*,2013,30(3):58-65.  
Zhang Wei, Han Xu, Liu Jie, et al. A method for validation of numerical model on underground explosion based on the orthogonal experiment design[J]. *Engineering Mechanics*, 2013,30(3):58-65.
- [9] Xu Dao-lin, Lu Fang-fang. Modeling global vector fields of chaotic systems from noisy time series with the aid of structure selection techniques[J]. *Chaos*, 2006,16:043109-043116.
- [10] Tikhonov A N, Goncharsky A N, Yagola A G. *Numerical methods for the solution of ill-posed problems*[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [11] Hansen P C, O'Leay D P. The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problem[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1993,14(6):1487-1503.
- [12] 姜潮. 基于区间的不确定性优化理论与算法[D]. 长沙:湖南大学,2008.

## A computational inverse technique for determination of detonator status in underground explosion \*

Zhang Wei, Liu Jie, Han Xu, Tan Zhu-hua

*(Key Laboratory of Advanced Design and Simulation Techniques for Special Equipment,  
Ministry of Education, College of Mechanical and Vehicle Engineering,  
Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)*

**Abstract:** A computational inverse technique is presented for determining the detonator status in an underground explosion from the given damage effects. In this technique, the detonator status can be determined by minimizing the error functions formulated using the given damage effects and those computed using the forward solvers based on the candidates of the detonator statuses. To reduce the computational cost, the polynomial approximation model based on error reduction ratio is used to replace the actual computational model. The nonlinear Newton's method is employed as the inverse procedure. In order to improve the computational efficiency, the trust region method is adopted to manage the error between the approximation model and the actual one. Additionally, the Tikhonov regularization method is applied to the ill-posed problems. The results demonstrate that the detonator status can be determined from the given damage effects with high efficiency through innovative use of the present method.

**Key words:** mechanics of explosion; inverse problems; approximation model management; underground explosion; regularization method; Newton method

\* Received 4 January 2012; Revised 8 May 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11202076);

the National Basic Research Program of China (973 Program) (2010CB832700)

Corresponding author: Liu Jie, liujie@hnu.edu.cn