

# 导弹动、静试验差异的参数化建模及补偿

谢美华

(国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 不同类型的导弹试验之间通常存在差异, 对该类差异的分析和建模, 目前尚无有效的方法. 本文以侵彻战斗部为例, 利用回归分析方法对异类试验数据进行联合建模, 给出了动爆与静爆试验数据差异分析的一种参数化方法, 并给出了该方法的一种示例分析. 仿真结果验证了参数化方法的可行性.

**关键词:** 侵彻战斗部; 动静差异; 参数化

**中图分类号:** E932.3      **文献标识码:** A

## The parameterized modeling and compensation of the difference between the dynamic-blast and the static-blast of missile test

XIE Mei-hua

(Science College, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

**Abstract:** Difference often exists between different kinds of missile tests. Unfortunately there is no any effective way to analyze and model this difference. By using the recursive analysis to model different kinds of test data, we establish the parameterized model for the difference between the dynamic-blast and the static-blast of intrusive warheads, along with an illustrative example. Simulation results confirm the feasibility of the parameterized method.

**Key words:** intrusive warhead; difference between dynamic-blast and static-blast; parameterized

### 1 引言(Introduction)

导弹研制、生产及试验过程中, 通常需要进行多次静爆和动爆试验, 通过对这两类试验数据进行指标评估和鉴定. 但是, 在研究过程中, 经常会出现动爆与静爆试验结果不一致的问题, 这种不一致直接影响了相关评估结论的给出. 为此, 需要对动爆与静爆试验进行差异分析、建模及补偿. 目前, 对于动静差异的研究并无成熟的理论研究成果, 主要是通过数值模拟的方法来比较动静试验的差别<sup>[1]</sup>, 这种方法一方面易受数值模拟误差的影响, 另一方面, 将使差异分析停留在单次试验的模拟上, 不能对差异分析形成规律性的研究成果.

本文以侵彻战斗部为例, 通过融合异类试验数据, 建立参数化的毁伤响应模型, 研究动爆与静爆试验数据差异的参数化建模及补偿方法, 并给出该方法的一种示例分析.

### 2 差异建模与补偿的参数化方法(Parameterized method for difference modeling and compensating)

#### 2.1 参数化方法的主要步骤(The main steps of parameterized method)

动、静差异产生的原因非常复杂, 包括起爆深度、爆前姿态、爆前状态等不一致所引起的差异, 要通过量化这些因素来完成差异的建模与补偿很难. 因此, 本文将转换思路, 不建立差异产生的物理模型, 而拟通过对二者的试验数据进行分析, 来建立差异分析与补偿的参数化方法.

这种建模过程将主要结合毁伤响应函数的构造来进行<sup>[2]</sup>. 其基本步骤为:

1) 对动爆试验, 采用侵爆分离的方法, 利用导弹着靶的初始条件, 对侵彻过程进行模拟计算, 得到其炸点深度和炸点姿态, 以此作为动爆试验的试验条件, 也可以采用相关经验公式求其炸点深度和姿

态<sup>[2,3]</sup>;

2) 利用动爆试验数据, 初步建立毁伤效果关于炸点深度及炸点姿态的毁伤响应函数;

3) 综合动爆与静爆试验数据, 建立基于动爆与静爆数据的联合响应模型;

4) 对模型中的参数进行估计, 对比动爆与静爆的毁伤响应函数, 得到两者的差异.

### 2.2 参数化模型(Parameterized model)

设两类试验的弹、靶条件相同, 不同的是两者的弹靶交互条件, 通过侵爆分离数值模拟方法对动爆结果进行处理后, 这种不同就进一步反映在炸点深度和炸前姿态上. 设经过侵爆分离数值模拟方法处理后, 得到各发动爆试验的炸点深度为 $h_i$  ( $i = 1, \dots, N_1$ ), 炸前姿态角为 $\theta_i$  ( $i = 1, \dots, N_1$ ), 毁伤面积为 $S_i$  ( $i = 1, \dots, N_1$ ), 式中 $N_1$ 为动爆试验次数. 设静爆试验的炸点深度为 $h_i^*$  ( $i = 1, \dots, N_2$ ), 炸前姿态角为 $\theta_i^*$  ( $i = 1, \dots, N_2$ ), 毁伤面积为 $S_i^*$  ( $i = 1, \dots, N_2$ ), 式中 $N_2$ 为静爆试验次数. 建立的毁伤响应函数模型为毁伤面积与炸点深度及炸前姿态角之间的经验关系式, 即

$$S = f(\mathbf{h}, \boldsymbol{\theta}), \quad (1)$$

式中 $f(\mathbf{h}, \boldsymbol{\theta})$ 为毁伤响应函数.

按式(1)建立毁伤响应函数后, 可利用试验数据 $h_i, \theta_i, S_i$  ( $i = 1, \dots, N_1$ )及 $h_i^*, \theta_i^*, S_i^*$  ( $i = 1, \dots, N_2$ ), 建立如下 $N_1 + N_2$ 个响应方程:

$$S_i = f(h_i, \theta_i), \quad i = 1, \dots, N_1, \quad (2)$$

$$S_i^* = f(h_i^*, \theta_i^*), \quad i = 1, \dots, N_2. \quad (3)$$

其中响应函数 $f(\mathbf{h}, \boldsymbol{\theta})$ 的函数表达式一般可用低阶多项式来描述, 也可采用有确切物理意义的模型. 式(2)(3)在建模过程中只考虑了动静试验在爆点深度及爆前姿态角上的不同, 而没有考虑其他更复杂的因素, 因此, 模型(2)(3)不能完全准确地描述动静试验结果. 为使模型(2)(3)能更好地描述试验, 把其他因素所带来的动静差异看成是一种系统误差来建模. 即在模型(3)中引入动静差异的误差项, 从而将模型改写为

$$S_i^* = f(h_i^*, \theta_i^*) + w_i. \quad (4)$$

其中:  $w_i$ 为第 $i$ 次试验的动静差异项,  $i = 1, \dots, N_2$ . 为了能从式(4)中给出毁伤响应函数及动静误差的估计结果, 一般可假设其他的因素所引起的动静差异可用某种模型来描述, 以线性模型为例, 模型(4)可改写为

$$S_i^* = f(h_i^*, \theta_i^*) + a_1 h_i^* + b_1 \theta_i^* + c_1'. \quad (5)$$

式中:  $a_1, b_1, c_1'$ 为待估的系统误差参数,  $i = 1, \dots,$

$N_2$ . 确定模型(2)、(5)中的响应函数 $f(\mathbf{h}, \boldsymbol{\theta})$ 的表达式以后, 即可联立这两个模型, 得到毁伤响应函数与系统误差系数 $a_1, b_1, c_1'$ 的参数估计值, 从而完成动静差异的补偿.

假设响应函数 $f(\mathbf{h}, \boldsymbol{\theta})$ 可用二次多项式来描述, 即

$$f(h_i, \theta_i) = \alpha_1 h_i^2 + \alpha_2 \theta_i^2 + \alpha_3 h_i \theta_i + \alpha_4 h_i + \alpha_5 \theta_i + c_1, \quad (6)$$

根据联合建模的思想<sup>[4]</sup>, 联合式(2)(5)及(6)后的参数估计模型为

$$\begin{cases} S_i = \alpha_1 h_i^2 + \alpha_2 \theta_i^2 + \alpha_3 h_i \theta_i + \alpha_4 h_i + \alpha_5 \theta_i + c_1, \\ S_j^* = \alpha_1 h_j^{*2} + \alpha_2 \theta_j^{*2} + \alpha_3 h_j^* \theta_j^* + \alpha_4 h_j^* + \alpha_5 \theta_j^* + a_1 h_j^* + b_1 \theta_j^* + c_2. \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $c_2 = c_1' + c_1, i = 1, \dots, N_1, j = 1, \dots, N_2$ . 对模型(7)进行参数估计, 即可得到动静差异模型和相应的毁伤响应函数. 值得注意的是此时所获得的毁伤响应函数中的参数是融合动、静试验数据得到的, 比仅使用动爆数据进行估计得到的参数更准确. 因此, 这种动静差异的参数建模方法不但能给出动静差异的规律性研究成果, 也能提高毁伤响应函数的准确度.

### 3 仿真结果(Simulation results)

假设已给出一组静爆试验数据和一组动爆试验数据, 各有10次试验结果. 建立如式(7)的联合模型, 得到的估计后的各参数的值见表1, 估计后的残差见图1.

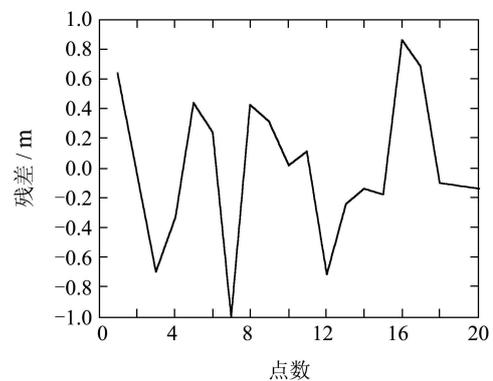


图 1 考虑动静差异时的残差

Fig. 1 Residuals with consideration of difference

该组动静差异的模型可以描述为

$$w(h_i, \theta_i) = -0.8455h_i - 0.3578\theta_i + 2.6801.$$

显然这时得到的动静差异是较大的, 应该考虑动静差异的建模.

若不考虑动静差异也可以得到一组参数估计结果, 见表2, 估计后的残差见图2.

表1 考虑差异时的参数估计结果

Table 1 Results of parameters estimation with consideration of difference

参数	$\hat{\alpha}_1$	$\hat{\alpha}_2$	$\hat{\alpha}_3$	$\hat{\alpha}_4$	$\hat{\alpha}_5$
估计值	-23.7175	-1.0430	1.0510	41.7081	-0.7079
参数	$(\hat{\alpha}_4 + \hat{a}_1)$	$(\hat{\alpha}_5 + \hat{b}_1)$	$\hat{c}_1$	$\hat{c}_2$	
估计值	40.8626	-1.0657	-8.6089	-5.9288	

表2 不考虑差异时的参数估计结果

Table 2 Results of parameters estimation with no consideration of difference

参数	$\hat{\alpha}_1$	$\hat{\alpha}_2$	$\hat{\alpha}_3$
估计值	-23.6163	-0.7103	0.1632
参数	$\hat{\alpha}_4$	$\hat{\alpha}_5$	$\hat{c}_1$
估计值	41.8793	-0.5072	-7.8898

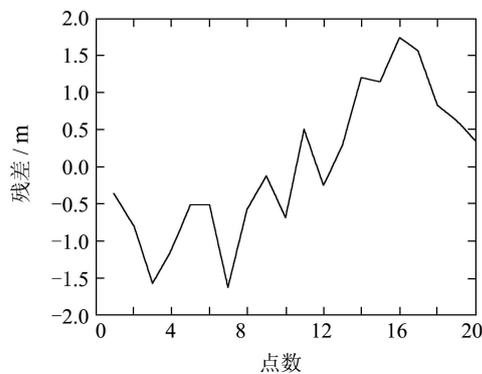


图2 不考虑动静差异时的残差

Fig. 2 Residuals with no consideration of difference

对比表1、表2的参数估计结果可发现,  $\hat{\alpha}_3$ 的估计结果相差很大, 且图1与图2间存在明显的差异, 图2中存在明显的未建模的趋势项, 这表明不考虑动静差异时得到的结果是有偏差的.

## 4 结论(Conclusion)

本文提供了一种分析导弹动静试验差异的参数化方法, 该方法可以在给出导弹动静试验差异的规律性研究成果的同时, 通过融合动、静两类试验数据, 给出毁伤响应函数的更精确的估计结果. 但是, 值得注意的是, 本文的成果主要是这种参数化方法, 给出的毁伤响应模型及动静差异模型只是一种范例, 在实际运用时, 需要结合实际数据及毁伤过程的物理分析, 选用更切合工程背景的模式. 当然, 这种模型的改变并不会影响方法的应用.

**致谢:** 感谢国防科技大学理学院武器系统效能评估课题组全体同志在论文研究过程中所给予的帮助.

## 参考文献(References):

- [1] 荆松吉, 卢芳云, 张震宇, 等. 混凝土复合介质内爆炸毁伤效应的模化方法研究[J]. 火箭与制导学报, 2008, 28(2): 22-25.  
(JING Songji, LU Fangyun, ZHANG Zhenyu, et al. Research on modeling method of damage effect of explosion in concrete composite medium[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28(2): 22-25.)
- [2] 刘云飞, 王天运, 蒋沧如. 弹体侵彻混凝土深度计算公式分析[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(1): 49-52.  
(LIU Yunfei, WANG Tianyun, JIANG Cangru. Analysis on depth calculation of projectiles penetration into concrete[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2004, 26(1): 49-52.)
- [3] 许陈虎, 陈斌, 宋殿义. 一种计算射弹侵彻混凝土深度的半理论半经验公式[J]. 实验力学, 2005, 20(增刊): 95-98.  
(XU Chenhu, CHEN Bin, SONG Dianyi. A semi-empirical formula for penetration depth of concrete[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(Supp.): 95-98.)
- [4] 王正明, 易东云, 周海银, 等. 弹道跟踪数据的校准与评估[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999: 283-290.  
(WANG Zhengming, YI Dongyun, ZHOU Haiyin, et al. *Calibrating and Evaluating of Trajectory Tracking Data*[M]. Changsha: Press of National University of Defense Technology, 1999: 283-290.)

作者简介:

谢美华 (1976—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为武器系统试验分析与效能评估, E-mail: xmhdjh@163.com.