

# 基于层次分析法的迫击炮弹近弹原因分析

刘超<sup>1,2</sup>, 田晓丽<sup>1</sup>, 黄德雨<sup>2</sup>, 王明琨<sup>2</sup>, 许栩<sup>2</sup>

(1. 中北大学 机电工程学院, 太原 030051; 2. 中国人民解放军 95874 部队, 南京 210022)

**摘要:**针对影响迫弹近弹的主要因素,应用层次分析法建立了迫弹近弹的层次结构模型和判断矩阵,并按判断矩阵计算出单层相对权重系数,完成了目标层的总排序权值计算。计算结果表明,在造成近弹的众多原因中,飞行不稳定是最可能造成近弹的,其次是初速低,最后是迫弹本身以外的问题。

**关键词:**迫击炮弹;近弹;层次分析法;权值

**本文引用格式:**刘超,田晓丽,黄德雨,等.基于层次分析法的迫击炮弹近弹原因分析[J].四川兵工学报,2015(9):34-37.

**Citation format:**LIU Chao, TIAN Xiao-li, HUANG De-yu, et al. Near Reasons of Mortar Shells Based on Analytic Hierarchy Process [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015(9):34-37.

中图分类号:TJ410.1

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2015)09-0034-05

## Near Reasons of Mortar Shells Based on Analytic Hierarchy Process

LIU Chao<sup>1,2</sup>, TIAN Xiao-li<sup>1</sup>, HUANG De-yu<sup>2</sup>, WANG Ming-kun<sup>2</sup>, XU Xu<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. The No. 95874<sup>th</sup> Troop of PLA, Nanjing 210022, China)

**Abstract:** For the major factor that impacts mortar bomb, we established a mortar bomb near hierarchy model and judgment matrix based on the analytic hierarchy process, and calculated monolayer relative weighting factor in accordance with the judgment matrix, and then completed a total ordering of the target layer weight calculation. The results show that in many reasons caused recent bomb, the flight is the most likely cause of instability in recent bomb, and followed by a low muzzle velocity, and finally the problem itself mortar outside.

**Key words:** mortar shells; recent bomb; analytic hierarchy process; weights

迫击炮弹是在近距离作战中使用的一种具有较好曲射性能的武器,它构造简单,使用方便,质量小,轻便灵活,弹道弯曲,死角和死界均小,且阵地容易选择。在发射迫击炮弹时,有时会偶然出现近弹,作战中出现近弹,危害是极大的,它不但不能有效地杀伤敌人,反而会伤害了自己<sup>[1,2]</sup>。因此,人们就在探讨研究迫击炮弹近弹的机理,以及如何避免近弹的产生。不论是过去,还是将来的现代化战争,它仍然是一种十分重要的近战武器。许多单位为了解决近弹问题做了大量地工作,提出了各种看法和观点,但都没有从理论上总结出产生近弹的原因。

近弹是迫击炮弹特有的一种飞行不稳定现象<sup>[3]</sup>。这是

由于迫弹的初速较小,在弹道顶点区的存速更小,因而抗干扰能力差,在相同的干扰条件下,比其他的炮弹可能更容易处于不稳定状态。产生近弹的因素是多方面的,从外弹道学理论可知:在理想的情况下(把弹丸当作质点研究时),弹丸弹道具有初速、射角和弹道系数等3个参数。由于各种扰动因素存在,这3个参数将会发生变化,从而影响弹着点位置,使之偏离射击目标<sup>[4,5]</sup>。

迫击弹的近弹原因是一个多层次、多因素的综合问题,应该根据各因素的属性分不同的考虑原因、因素及要素形成不同的考虑层次,全面综合的分析引起迫击弹的近弹原因<sup>[6,7]</sup>。

## 1 层次分析法的基本原理和步骤

### 1.1 建立层次结构模型

阶梯层次结构模型一般由目标层(顶层)、准则层(中间层)和方案层(底层)等3层组成<sup>[8-10]</sup>。一般情况下系统只有一个目标,如有多个目标时,应在总目标下面在建立一个分目标层。准则层表示实现预定总目标所采取的各项准则或评价标准。方案层表示为解决问题而选的各种方案、措施等。

### 1.2 建立判断矩阵

判断矩阵是层次分析法中的基础和依据,上一层每个单元对临近的下一层单元,均有一个判断矩阵,而判断矩阵中的元素表示针对上一层某单元,本层次与它有关的单元之间相对重要性的比较。如表1所示,一般采用1~9标度和他们的倒数表示重要程度,这些数字只是数值意义上的数字,而不是顺序意义上的数。这些数字是根据分析者进行定性分析的直觉和经验来判断确定的,也可以通过专家函询调查或其他方法获得,标度值是根据两两比较相对重要程度而确定的。

表1 标度取值表

标度	定义	说明
1	同等重要	两单元相比同样重要
3	稍微重要	两单元相比一单元比另一单元稍微重要
5	明显重要	两单元相比一单元比另一单元明显重要
7	很重要	两单元相比一单元在实践中的主导地位已显示出
9	极端重要	两单元相比一单元的主导地位占绝对重要地位
2,4,6,8	上述两判断的折中	表示需要在上述两个标度之间折中时的定量标度
上列各数的倒数	反比较	若单元 <i>i</i> 与单元 <i>j</i> 相比较得 $b_{ij}$ ,而 <i>j</i> 单元与 <i>i</i> 单元相比较的 $1/b_{ij}$

满足矩阵具有完全一致性时,根据矩阵理论,完全一致性矩阵可以从数学上证明*n*阶判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max} = n$ ,其余特征根均为零。当判断矩阵不能保证具有完全一致性时,相应判断矩阵的特征根也将发生变化,这样就可以利用判断矩阵的特征根的变化来检查判断的一致性程度。检查判断矩阵的一致性指标用符号*CI*表示

$$CI = \frac{|\lambda_{\max} - n|}{n - 1} \quad (1)$$

*CI*越大,表明判断矩阵的一致性越差;反之,*CI*越小,表明判断矩阵的一致性越好。一般情况,矩阵的阶数*n*越大,判断矩阵的一致性越差,但并不意味着判断矩阵没有满意的一致性。为了判断矩阵的一致性的满意程度,引进判断矩阵

随机一致性指标*RI*。令*CR*表示随机一致性比率

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵才具有满意的一致性。也就是通过单元两两比较的相对重要性才有意义,否则,必须重新比较,调整标度,在进行随机一致性比率的计算,直到 $CR < 0.1$ 为止。

### 1.3 按判断矩阵计算被比较单元的相对权重

#### 1.3.1 层次单排序

判断矩阵是根据层次结构图中某一层各元素,是针对上一层中的相关元素而进行两两比较的评定数据,而层次单排序就是根据矩阵中的数值,把本层所有各元素对上一层中相关元素按矩阵理论计算出来的排序权值。最常用的计算方法有和积法和方根法。和积法具体步骤如下:

1) 将判断矩阵的每一列元素作归一化处理,表达式为

$$\bar{b}_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{k=1}^n b_{kj}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中:脚标“*i*”和“*k*”表示列;“*j*”表示行。

2) 将每一列经归一化后的判断矩阵按行相加,则有

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

3) 对向量 $\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n]^T$ 归一化

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{k=1}^n \bar{W}_k} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

所得到的 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 即为所求的特征向量。

4) 计算判断矩阵最大特征根 $\lambda_{\max}$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{nW_i} \quad (6)$$

式中 $(BW)_i$ 表示向量*BW*的第*i*个元素。

5) 判断矩阵一致性指标计算

按式(1)计算*CI*,按式(2)计算*CR*,当 $CR < 0.1$ 时,表明判断矩阵有满意一致性。否则,重新调整判断矩阵中的元素的标度值,再进行计算,直到 $CR < 0.1$ 为止。

#### 1.3.2 层次总排序

层次总排序是在层次单排序的基础上进一步计算出对更上一层的排序权值。假设:准则层中的*C*中各单元对目标层*G*的排序权值分别 $a_1, a_2, \dots, a_m$ 。而方案层*P*中各单元对上一层(准则层)某单元*CJ*的排序权值分别为 $W'_1, W'_2, \dots, W'_l$ ,并将排序权值列表,如表2所示。于是根据表2中的排序权值,便可求得方案层*P*中某一方案*Pi*对目标层1.2的总排序权值为

$$P_i = \sum_{j=1}^m a_j W'_j \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

并将式(7)列入表2最右边一栏(总排序权值)各行中。

层次分析法的主要思想是通过将复杂问题分解为若干层次和若干因素,对两两指标之间的重要程度作比较判断,建立判断矩阵,通过计算判断矩阵的最大特征值以及对特征向量,就可以得出不同方案重要性程度的权重,为最佳方

案的选择提供依据。

表2 排序权值表

编号	$C_1$	...	$C_m$	总排序权值 计算公式
	$a_1$	...	$a_m$	
$P_1$	$W_1^2$	...	$W_1^m$	$\sum_{j=1}^m a_j W_1^j$
$P_2$	$W_2^1$	...	$W_2^m$	$\sum_{j=1}^m a_j W_2^j$
$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	
$P_n$	$W_n^1$	...	$W_n^m$	$\sum_{j=1}^m a_j W_n^j$

## 2 影响迫弹近弹因素的层次分析

### 2.1 建立迫弹近弹因素的阶梯层次结构模型

本课题的目标是迫击炮弹的近弹原因分析。顶层(目标层)为炮击炮弹近弹原因,并用符号  $G$  表示。衡量目标的准则为中间层,主要有迫弹初速过低,迫弹飞行不稳定,其他原因,并用符号  $C$  表示。底层为方案层,主要有装药结构,装药量少,定心部尺寸小,全弹质量,稳定装置,飞行姿态,飞行环境,发射炮,出炮攻角,并用符号  $P$  表示。由上而下建立的模型如图1所示。

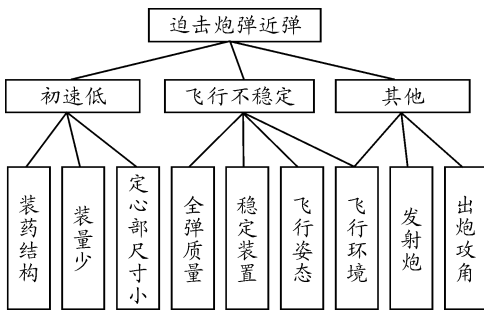


图1 迫击炮弹近弹因素的结构模型

### 2.2 建立迫弹近弹因素的判断矩阵

建立判断矩阵按阶梯层次结构可由上而下,也可以由下而上,常用的是由下而上。

1) 方案层对准则层初速低  $C_1$  的判断矩阵并计算排序权值

迫弹装药量的减少,将直接导致射程偏近的近弹出现。在试验中,也发现与某迫弹药包上窜有相同的现象,且迫弹结构微小的变化会引起初速的很大变化。由某迫弹实验得知,每当附加药包的装药总量减少时,其初速将有相应的降低,其射程减少。在迫弹的射击过程中,由于个别迫弹的定心部直径小于图纸规定的最小直径,从弹与膛间流出的火药气体较多,则迫弹所获的初速相应降低,当初速降至一定值时,就会引起近弹的产生。如某迫弹在生产中,由于过去一度对检验工作的忽视,发现有定心部直径小于规定的最小

值之值。由试验看出,在某迫弹定心部直径减小时,射程降低。由此可见,装药结构最影响迫弹初速,其次是定心部尺寸小,最后是装药量少。通过两两比较,方案层对准则层初速低  $C_1$  的判断矩阵如表3所示。

表3 方案层  $P$  对准则层  $C_1$  的判断矩阵

$C_1$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	单层排序权值
$P_1$	1	1/4	1/2	0.142 85
$P_2$	4	1	2	0.571 43
$P_3$	2	1/2	1	0.285 72

经计算,  $CR = 0.000\ 020$ ,  $CR < 0.1$ , 所以判断矩阵有满意的一致性。单层排序权值(0.142 85, 0.571 43, 0.285 72)是可信的。

2) 方案层对准则层飞行不稳定  $C_2$  的判断矩阵并计算单层排序权值

如果在装配时几种使外形不对称的主要误差,至少其中的某几种,装配时在同一个方向上,这样形成的旋转角速度就比较大,有可能使弹丸发生共振导致飞行不稳定。即合装后弹体整体质量差将造成飞行不稳定。实验证明稳定装置问题有:①翅片严重歪斜;②稳定装置长度小;③翅片分布差;④传火孔下沉;⑤多打或少打传火孔。这些原因均有可能引起迫弹的近弹现象。弹体问题:迫弹弹体分为整体和非整体2种,整体的质量分布的不对称性小,但不论是整体的或是非整体的它的各个零件的各种误差都要控制在一定的范围之内,装配时,几种使外形不对称的主要误差要分布均匀,不能在同一个方向上,这样,由外形不对称而引起的旋转角速度就很低,有可能达不到共振转速;如果几种使外形不对称的主要误差,至少其中的某几种,装配时在同一个方向上,这样形成的旋转角速度就比较大,有可能使弹丸发生共振导致飞行不稳定而产生近弹。弹体加工精度差会大大增加弹体的偏航力矩会引起迫弹的近弹现象。在飞行环境中由于温度、风、湿度等的影响都有可能造成迫弹的近弹现象。在大量实验中发现:全弹质量引起迫弹近弹的可能性最大,其次是稳定装置,最后是飞行姿态与飞行环境相当。通过两两比较,方案层对准则层初速低  $C_2$  的判断矩阵如表4所示。

表4 方案层  $P$  对准则层  $C_2$  的判断矩阵

$C_2$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	单层排序权值
$P_1$	1	1/3	1/4	1/4	0.086
$P_2$	3	1	2	2	0.405
$P_3$	4	1/2	1	1	0.254
$P_4$	4	1/2	1	1	0.254

经计算,  $CR = 0.045\ 865$ ,  $CR < 0.1$ , 所以判断矩阵有满意的一致性。单层排序权值(0.086, 0.405, 0.254, 0.254)是可信的。

3) 方案层对准则层其他问题  $C_3$  的判断矩阵并计算单层排序权值

由于迫弹出炮口时有攻角存在,在尾翼作用下使得弹要呈摆动飞行,则要消耗弹的动能使射程降低,若单发迫弹的攻角过大,引起射程降低很多时,就会出现近弹现象。在迫弹射击过程中,影响较大的是阵风,尤其是在阵风风速大,使弹丸的攻角增大时,则在飞行中将失去稳定性而引起近弹产生。因而在射击过程中,对于每种迫弹而言,对风速是有一定的限制的。在阵风达到一定值时是不允许进行试验的。当迫炮座板安装部位的土壤很松时,火炮后座的速度加大,引起火炮的射角变化,则造成迫弹的散布加大或出现近弹。在专门寻找某迫弹近弹的试验中,曾有意的将安装底板的土壤扒开,并浇上水,每射击一发弹扒松土壤一次,在这样条件下,进行了10组迫弹射击试验,结果有两发近弹产生。其他组的散布密集度也不理想。

由此可见,出炮攻角最影响迫弹初速,其次是发射炮,最后是飞行环境。通过两两比较,方案层对准则层初速低  $C_3$  的判断矩阵如表5所示。

表5 方案层  $P$  对准则层  $C_3$  的判断矩阵

$C_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	单层排序权值
$P_1$	1	2	3	0.539
$P_2$	1/2	1	2	0.297
$P_3$	1/3	1/2	1	0.164

经计算,  $CR=0.008\ 002$ ,  $CR < 0.1$ , 所以判断矩阵有满意的一致性。单层排序权值(0.539, 0.297, 0.164)是可信的。

4) 准则层各单元对目标层  $G$  的判断矩阵并计算单层排序权值

迫击炮弹的近弹原因中,准则层的3个比较指标中,初速造成近弹的影响是最大的,其次是飞行不稳定,最后是其其他问题。通过两两比较,准则层对目标层  $G$  的判断矩阵如表6所示。

表6 准则层对目标层  $G$  的判断矩阵

$G$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	单层排序权值
$P_1$	1	1/2	1/3	0.164
$P_2$	2	1	1/2	0.297
$P_3$	3	2	1	0.539

经计算,  $CR=0.008\ 002$ ,  $CR < 0.1$ , 所以判断矩阵有满意的一致性。单层排序权值(0.164, 0.297, 0.539)是可信的。

5) 方案层对目标层的总排序权值计算

将上面计算的方案层对准则层的单层排序权值和准则层对目标层的单层排序权值列入表7。

将表7的数据代入式(7)中,求得总排序权值已列入表7最右边一栏中。从表7中总排序权值得知,飞行不稳定所

占权值最大为0.374 082 5;其次是初速低所占权值为0.339 490 4;其他问题所占权值最低为0.210 690 4。

表7 总排序表

编号	$C_1$	$C_2$	$C_3$	综合排序权值
$P_1$	0.164	0.297	0.539	0.339 490 4
$P_2$	0.142 85	0.086	0.539	0.374 082 5
$P_3$	0.571 43	0.405	0.297	0.210 690 4
$P_4$	0.285 71	0.254	0.164	0.210 690 4
		0.254		0.075 438 0

### 3 计算结果分析

按方案层对准则层初速低的单层排序权值,装药量少的最大,为0.571 43;其次是定心部尺寸小0.285 71;最后是装药结构0.142 85。这表明造成初速低的最可能原因是装药量少,其次是定心部尺寸小,最后是装药结构,所以为避免初速过低最要避免装药量少。按方案层对准则层飞行不稳定的单层排序权值,稳定装置的最大,为0.405;其次是飞行姿态和飞行环境一样大为0.254;最后是全弹质量0.086。这表明造成迫弹飞行不稳定的最可能原因是稳定装置,所以为避免飞行不稳定造成近弹是最要避免稳定装置出现问题。按方案层对准则层其他问题的单层排序权值,飞行环境最大,为0.539;其次是发射炮0.297;最后是出炮攻角0.164。这表明其他原因中造成近弹的最可能原因是飞行环境,其次是发射炮,最后是出炮攻角。按方案层对目标层的总排序权值,飞行不稳定最大为0.374 082 5;其次是初速低0.339 490 4;最后是其其他问题0.210 690 4。这表明在造成近弹的众多原因中,飞行不稳定是最可能造成近弹的,其次是初速低,最后是其其他问题。所以在生产设计中要特别注意避免的问题有:装药量少,稳定装置的问题,飞行环境中遇到的问题,以尽量减少或避免发生近弹现象。

### 4 结束语

应用层次分析法,建立了影响迫弹近弹因素的阶梯层次结构模型,以及判断矩阵,并按判断矩阵计算出单层相对权重系数,最后进行了目标层的总排序权值计算。从计算结果看,造成近弹的众多原因中,飞行不稳定是最可能造成近弹的,其次是初速低,最后是其其他问题。所以在生产设计中要特别注意避免的问题有:装药量少,稳定装置的问题,飞行环境中遇到的问题。

这里还必须说明,评价准则直接影响到层次分析法的结果,评价准则选择不同,分析结果就不一样,如果评价准则再增加一项可靠性准则,分析结果又不一样了。因本人经验不足,评价准则选择是否准确,有待商榷,所以上述分析作为理论分析,仅供参考,不能作为实际工作的依据。

假定炸点的散布服从正态分布,则可以认为炸点散布在 $[\bar{L}-3\sigma, \bar{L}+3\sigma]$ 范围内。经计算 0.3 m 厚度靶板炸点散布在[4.431, 4.569]范围内,0.5 m 厚度靶板炸点散布在[2.833, 4.567]范围内,0.8 m 厚度靶板炸点散布在[2.30, 5.30]范围内。计算结果表明,0.8 m 厚度靶板炸点散布最大,与预设炸点(靶后 4 m)最大相差 1.7 m,但理论上不影响战斗部的毁伤效果。

综上,仿真计算和外场试验表明设计的双簧片阈值开关可以满足一定范围内炸点自适应起爆控制,炸点可满足战标要求。

## 4 结论

本文提出了由双阈值开关估计出靶速度的自适应延期控制。该方法是引信根据薄、厚双簧片阈值开关侵彻过程中的动态响应信息计算弹丸的出靶速度,根据出靶速度设定引信延时起爆时间。仿真计算和外场试验表明设计的双簧片阈值开关可以满足一定范围内炸点自适应起爆控制,炸点可满足战标要求。不足之处,簧片的弹性会受到加工工艺、装配工艺和储存时间的影响,而且在工程应用时仅采取了两组簧片开关,使得引信对靶板的炸点存在一定的散布。

## 参考文献:

[1] 于润祥,石庚辰.硬目标侵彻引信计层技术现状与展望

(责任编辑 周江川)

(上接第 37 页)

## 参考文献:

- [1] 黄成辉.迫击炮弹的可靠性分析与应用[J].企业技术开发,2001,6(7):8-11.
- [2] 董亮,王宗虎.迫击炮炮弹近弹原因的探讨[J].兵工学报弹箭分册,1984:88-100.
- [3] 王志军,尹建平.弹药学[M].北京:北京理工大学出版社,2005.
- [4] 陆廷孝.可靠性设计与分析[M].北京:国防工业出版社,1996.
- [5] 魏惠之.弹丸设计理论[M].北京:北京理工大学出版社,1964.

[J].探测与控制学报,2013,35(5):1-6.

- [2] 李蓉,陈侃,康兴国,等.硬目标侵彻引信炸点控制方法综述[J].探测与控制学报,2010,32(6):1-4.
- [3] 申延涛,刘孝忠,马宝华.引信侵彻炸点自适应控制算法研究[C].第十届引信学术年会论文集.西安:现代引信出版社,1997.
- [4] 殷群,施坤林,范武杰,等.基于薄/厚目标识别开关的引信自适应延期方法[J].探测与控制学报,2011,33(3):1-5.
- [5] 赵海鸥.LS-DYNA 动力分析指南[M].北京:兵器工业出版社,2003.
- [6] 曾正明.机械工程材料手册[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [7] 杨桂通.弹塑性动力学基础[M].北京:科学出版社,2008.
- [8] ANSYS/LS-DYNA 算法基础和使用方法[M].北京:科学出版社,2005.
- [9] LSTC.LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 940 Non Linear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions [Z]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation,1997.
- [10] 尚晓江,苏建宇.ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2006.

[6] 王玉祥.航空炸弹弹道稳定性[J].弹箭与制导学报,1984,2(2):47-54.

- [7] 王蕾.精确迫击炮弹计划向前推进[J].飞航导弹,2004,6(8):3-4.
- [8] 邓雪,李家铭,曾浩建,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
- [9] 郭金玉,张忠彬,孙庆云,等.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):148-153.
- [10] 廖红强,邱勇,杨侠,等.对应用层次分析法确定权重系数的探讨[J].机械工程师,2012,6(5):22-25.

(责任编辑 周江川)