

doi: 10.7690/bgzdh.2018.09.010

基于误差投影的着发射击高炮毁歼概率计算方法

史海龙¹, 王晶晶¹, 李文才², 谢杰涛¹, 汪彩玲³

1. 中国人民解放军 63850 部队, 吉林 白城 137001;
2. 中国兵器装备集团自动化研究所武器装备信息与控制技术研发中心, 四川 绵阳 621000;
3. 中国人民解放军 63680 部队, 江苏 江阴 214431)

摘要: 为解决着发射击高炮传统毁歼概率算法在设计定型试验中计算结果偏大的问题, 在建立角度误差时间序列的基础上, 将角度误差转换为炮目垂面上的距离误差, 通过建立误差投影函数, 将炮目垂面上的距离误差投影为目标 3 个截面所在平面上的距离误差, 结合上述误差投影和目标的三向截面图, 给出基于误差投影的高炮系统毁歼概率计算方法。仿真计算与实际试验结果表明, 该方法比传统方法更能表征高炮武器系统的实际性能。

关键词: 高炮; 毁歼概率; 误差投影

中图分类号: TJ35 **文献标志码:** A

A Calculate Method for Kill Probability of Burst Firing Antiaircraft Gun Based on Error Projection

Shi Hailong¹, Wang Jingjing¹, Li Wencai², Xie Jietao¹, Wang Cailing³

1. No. 63850 Unit of PLA, Baicheng 137001, China; 2. Research & Development Center of Weapon Equipment Information & Control, Automation Research Institute of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;
3. No. 63680 Unit of PLA, Jiangyin 214431, China)

Abstract: In order to solve the problem that the results from the traditional method for kill probability are larger than the real results in approval test for the burst firing antiaircraft gun, based on the angle error time series, the angle error was converted to distance error on the plane which was vertical to the line between the gun and the target; the error projection function was established to project the distance error on the vertical plane to distance error on the three sections of the target; combination with the above error projection and the three section graph of the target, a calculate method for kill probability of burst firing antiaircraft gun based on error projection was proposed. The simulation results and the real results from the approval test show that the method in this paper is more suitable to represent the actual performance of the weapon than traditional method.

Keywords: antiaircraft gun; kill probability; error projection

0 引言

毁歼概率是高炮武器系统性能的重要指标, 对于回答研制总要求完成设计定型试验以及对武器系统作战效能进行评估都有重要意义。目前, 从考核角度, 高炮武器毁歼概率可分为 2 种^[1]: 1) 针对着发射击高炮毁歼概率^[2-4]的考核; 2) 射击预制破片弹高炮毁歼概率^[5-6]的考核。在某型高炮武器系统的设计定型试验中, 采用经典算法计算毁歼概率时, 毁歼概率达到 90%以上, 明显高于实际对空射击试验结果, 计算结果难以采信。

目前, 常用的毁歼概率计算方法是把目标向炮目垂面进行投影, 得到目标的不规则投影, 并在此不规则投影上进行积分运算。由于投影不规则, 难以通过数学解析式进行表达, 常将投影简化为正方

形进行积分计算, 由此引起计算误差; 另外, 计算每一个射击距离的毁歼概率时都要计算相应的投影面积, 复杂度高, 计算量大。用数学方式^[7]对目标的 3 维形状进行描述更精确一些, 但需要的 F16 飞机等考核目标的精确 3 维信息又难以获取。

笔者使用射击误差和目标的三向截面信息作为输入, 将炮目垂面上的误差投影到目标三截面上, 通过判定弹丸是否命中目标来计算高炮武器的毁歼概率。

1 算法流程

计算的总体流程为: 通过试验结果和误差模型可以建立点射的角度误差时间序列, 通过角度误差可以计算距离误差, 然后将距离误差投影到目标的 3 个截面上来判断弹丸是否命中目标, 用指数毁伤

收稿日期: 2018-07-09; 修回日期: 2018-07-17

作者简介: 史海龙(1979—), 男, 辽宁人, 硕士, 工程师, 从事防空武器试验鉴定研究。

律来判断一次点射的毁歼概率，最后通过大量的点射仿真来计算高炮的毁歼概率。

1.1 角度误差时间序列

设第 t 次点射第 k 发弹的角度误差为 $z(t, k)$ ，由系统误差 \bar{z} 、强相关误差 $z_q(t, k)$ 、弱相关误差 $z_r(t, k)$ 、不相关误差 $z_b(t, k)$ 组成，见下式^[8-9]：

$$z(t, k) = \bar{z} + z_q(t, k) + z_r(t, k) + z_b(t, k) = \begin{cases} \bar{z} + z_q(t, 1) + z_r(t, 1) + z_b(t, 1); k = 1 \\ \bar{z} + z_q(t, 1) + rz_r(t, k-1) + \\ \text{diag}\{\sqrt{1-r_x^2}, \sqrt{1-r_y^2}\}w(k) + z_b(t, k); k \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} z_q(t, 1) &\sim N(\mu_q, \sigma_q) \\ z_r(t, 1) &\sim N(\mu_r, \sigma_r) \\ z_b(t, k) &\sim N(\mu_b, \sigma_b) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

通过试验可得到相关系数 r 、强相关误差、弱相关误差和不相关误差的期望和方差。

1.2 炮目垂面 Q 上的距离误差

建立基准坐标系(弹丸水平坐标系) D 和炮目垂面坐标系如图 1。

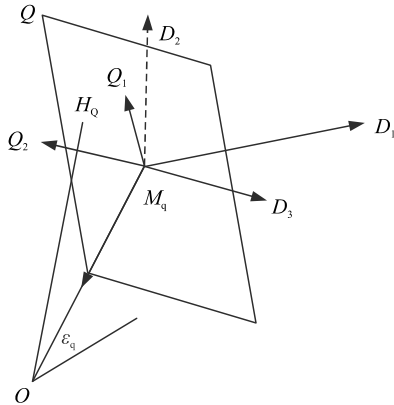


图 1 D 坐标系和 Q 坐标系

图中： O 为火炮位置； M_q 为目标提前点； D_1 平行于水平面，与 M_q 水平距离方向一致； D_2 垂直向上， D_3 与 D_1 、 D_2 构成右手坐标系； Q 为炮目垂面； Q_1 是过 OM_qD_1 面与 Q 的交线，指向上方， Q_3 与向量 M_qO 重合， Q_2 在 Q 上，与 Q_1 、 Q_3 构成右手坐标系。

OM_q 长度为 r ，与水平面夹角为 ε_q 。已知第 t 次射击第 k 发弹的角度误差 $z(t, k) = (\delta_\beta, \delta_\varepsilon)$ ，则在 Q_1 距离误差分量为 $r\delta_\varepsilon$ ，在 Q_2 距离误差分量为

$$r \cos \varepsilon_q \delta_\beta。$$

由 Q_1 和坐标系 D 的定义，可得 Q_1 上的单位向量：

$$\mathbf{n}_{Q1} = \begin{bmatrix} -\sin \varepsilon_q \\ \cos \varepsilon_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由 Q_2 和坐标系 D 的定义，可得 Q_2 上单位向量：

$$\mathbf{n}_{Q2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

则在 D 上，炮目垂面上的误差向量：

$$\Delta = r\delta_\varepsilon \mathbf{n}_{Q1} + r \cos \varepsilon_q \delta_\beta \mathbf{n}_{Q2} \quad (5)$$

1.3 三截面误差计算

计算出距离误差后，计算距离误差向目标三截面投影的误差。目标三截面定义如图 2。

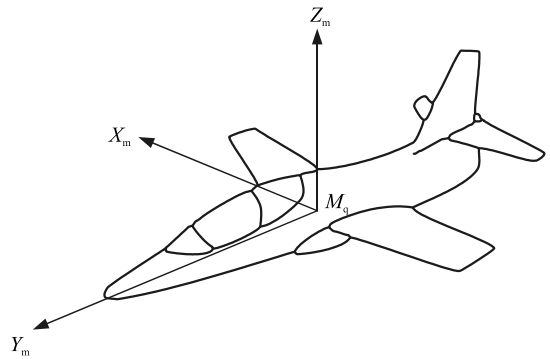


图 2 目标坐标系

图中，原点 M_q 为机身轴线的中点，目标纵轴

$$\mathbf{Y}_m = \begin{bmatrix} -\cos \lambda \cos q \\ \sin \lambda \\ -\cos \lambda \sin q \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： λ 为目标升降角，表示目标速度矢量与炮口水平面的夹角； q 为航路角，表示目标速度矢量在炮口水平面的投影与水平距离的夹角。

目标做直线运动时，横滚角为 0，目标横轴

$$\mathbf{X}_m = \begin{bmatrix} \sin q \\ 0 \\ -\cos q \end{bmatrix} \quad (7)$$

目标垂直轴：

$$\mathbf{Z}_m = \mathbf{X}_m \mathbf{Y}_m = \begin{bmatrix} \sin \lambda \cos q \\ \cos \lambda \\ \sin \lambda \sin q \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： $X_m M_q Y_m$ 为水平截面； $Y_m M_q Z_m$ 为纵截面； $X_m M_q Z_m$ 为横截面。

以纵截面为例计算误差投影过程，见图 3。

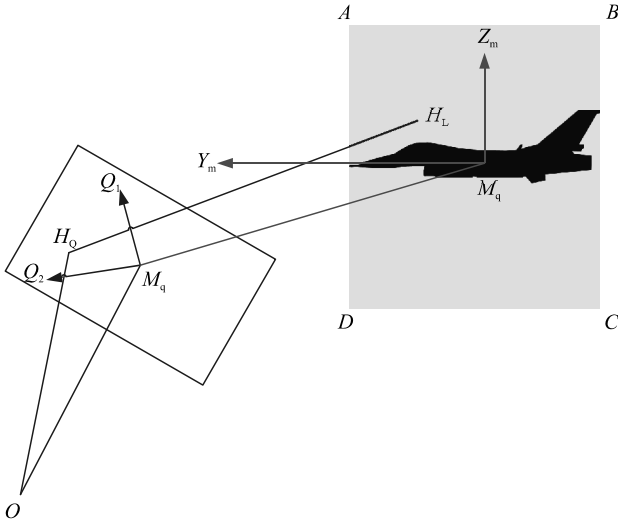


图 3 判定纵截面是否命中

图 3 中将 1 个点 M_q (目标提前点) 表示成 2 个。

将 H_q 沿相对速度方向 n_{xd} 投影到纵截面 $Y_m M_q Z_m$ ，得点 H_L ：

$$M_q H_L = \delta_{L1} \cdot n_{Zm} + \delta_{L2} \cdot n_{Ym} \quad (9)$$

H_L 在 2 维坐标系 $Y_m M_q Z_m$ 中坐标为 $(\delta_{L1}, \delta_{L2})$ ，

用式(10)表示：

$$\Delta_{left} = \begin{bmatrix} \delta_{L1} \\ \delta_{L2} \end{bmatrix} = f_{project}(\Delta, n_{xd}, Z_m, Y_m) \quad (10)$$

从式中可以看出，要计算 Δ_{left} ，需要计算 n_{xd} 和误差投影函数 $f_{project}$ 。

在 D 坐标系中，设 v_{xd} 方向的单位向量的坐标^[10]为：

$$n_{xd} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_d \cos \theta + v_m \cos \lambda \cos q}{v_{xd}} \\ \frac{v_d \sin \theta - v_m \sin \lambda}{v_{xd}} \\ \frac{v_m \cos \lambda \sin q}{v_{xd}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中： θ 为弹道倾斜角，为相对速度的大小； v_m 为目标速度的大小。

为计算误差投影函数 $f_{project}$ ，建立迎弹面坐标系 X 如图 4。

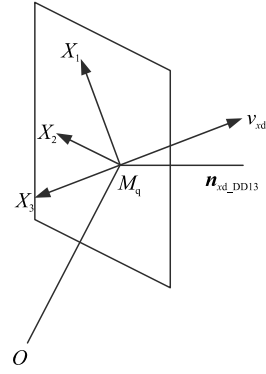


图 4 X 坐标系

图中： X 坐标系原点为目标未来点 M_q ； X_3 轴与相对速度相反； X_1 轴为相对速度法平面与相对射面(过相对速度的铅垂面)的交线，指向上方； X_2 轴在相对速度法平面内，与 X_1 轴垂直，指向目标前进的方向。 X 坐标系可用 X_1 上单位向量 n_{X1} 、 X_2 上单位向量 n_{X2} 和 X_3 上单位向量 n_{X3} 表示。

n_{X3} 与相对速度 v_{xd} 方向 n_{xd} 相反：

$$n_{X3} = -n_{xd} \quad (12)$$

为求 n_{X2} ，建立向量 n_{xd_D1D3} ， n_{xd_D1D3} 为相对射面与水平面 $M_q - D_1 D_3$ 交线，即 n_{xd_D1D3} 为相对速度方向 n_{xd} 在 $M_q - D_1 D_3$ 平面上投影：

$$n_{xd_D1D3} = [v_1 \quad 0 \quad v_3]^T$$

X_2 与相对射面垂直，则 X_2 与 n_{xd_D1D3} 垂直，

X_2 方向为：

$$n = n_{xd} n_{xd_D1D3} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ v_1 & v_2 & v_3 \\ v_1 & 0 & v_3 \end{bmatrix} = v_2 v_3 i - v_1 v_2 k$$

则

$$n_{X2} = \frac{n}{\|n\|} = \begin{bmatrix} \frac{v_3}{\sqrt{v_1^2 + v_3^2}} \\ 0 \\ -\frac{v_1}{\sqrt{v_1^2 + v_3^2}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

则 X_1 上单位向量：

$$n_{X1} = n_{X2} n_{X3} = \begin{bmatrix} -\frac{v_1 v_2}{\sqrt{v_1^2 + v_3^2}} \\ \sqrt{v_1^2 + v_3^2} \\ \frac{v_2 v_3}{\sqrt{v_1^2 + v_3^2}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

建立 X 坐标系后, 根据 Δ 和 $M_q H_L$ 在 X_1, X_2 上投影相等建立方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta \cdot n_{X1} \\ \Delta \cdot n_{X2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_q H_L \cdot n_{X1} \\ M_q H_L \cdot n_{X2} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

可解得:

$$\begin{bmatrix} \delta_{L1} \\ \delta_{L2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{Zm} \cdot n_{X1} & n_{Ym} \cdot n_{X1} \\ n_{Zm} \cdot n_{X2} & n_{Ym} \cdot n_{X2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \cdot n_{X1} \\ \Delta \cdot n_{X2} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

则函数 $f_{project}$ 为:

$$f_{project}(\Delta n_{xd}, n_{S1}, n_{S2}) = \begin{bmatrix} n_{S1} \cdot n_{X1} & n_{S2} \cdot n_{X1} \\ n_{S1} \cdot n_{X2} & n_{S2} \cdot n_{X2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \cdot n_{X1} \\ \Delta \cdot n_{X2} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

n_{X1}, n_{X2} 根据是式(13)、(14)由 n_{xd} 确定。

则左视面的的误差:

$$\Delta_{left} = f_{project}(\Delta, n_{xd}, Z_m, Y_m). \quad (18)$$

同理, 正视面的的误差:

$$\Delta_{front} = f_{project}(\Delta, n_{xd}, Z_m, X_m). \quad (19)$$

上视面上的误差:

$$\Delta_{up} = f_{project}(\Delta, n_{xd}, Y_m, X_m). \quad (20)$$

1.4 一发弹的命中判定

得到三视图上误差后, 可判断弹丸是否命中。判断命中需要目标的三视图和目标长宽高中的 2 个, 并不需要目标的三向截面积。笔者以平面 $M_q Z_m Y_m$ 为例说明计算过程。

在平面 $M_q Z_m Y_m$ 内取一矩形 $ABCD$ 。矩形 $ABCD$ 包含飞机纵截面。如图 3, 调整矩形 $ABCD$ 的大小, 使矩形左右方向上的长度恰好包含目标的纵截面(高低方向上无此要求), 则可认为线段 AB 的长度对应飞机的实际长度 l_{plane} 。

将矩形 $ABCD$ 分成 $m \times n$ 个正方形, 每个正方形边长为 $l = l_{plane} / n$ 。为每个正方形赋值, 在飞机截面内值为 1, 不在飞机截面内值为 0, 则可得 $m \times n$ 的 0、1 矩阵 L 。实际计算时, m, n 可根据图像的像素个数进行选取。0、1 矩阵可将通过将图像二值化的方法得到。

然后将 $(\delta_{L1}, \delta_{L2})$ 转化为矩阵 L 的下标。

$$\begin{bmatrix} i_L \\ j_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{int}(-\frac{\delta_{L1}}{l} + \frac{m}{2}) \\ \text{int}(-\frac{\delta_{L2}}{l} + \frac{n}{2}) \end{bmatrix}. \quad (21)$$

式中 int 函数表示将实数化为整数, 最后判定弹丸

是否命中飞机纵截面:

$$\text{Hited} \left(\begin{bmatrix} \delta_{L1} \\ \delta_{L2} \end{bmatrix}, L, l \right) = \begin{cases} 0; L(i_L, j_L) = 0 \\ 1; L(i_L, j_L) = 1 \end{cases}. \quad (22)$$

式中 $L(i_L, j_L) = 1$ 表示命中飞机纵截面, 否则, 脱靶。

同样方法, 通过设置横截面上小正方形边长 f 可以建立横截面矩阵 F , 水平截面上小正方形边长 u 可以建立水平截面矩阵 U 。

则第 t 次试验第 k 发弹是否命中, 可用下式判定:

$$h'_k = \text{Hited} \left(\begin{bmatrix} \delta_{L1} \\ \delta_{L2} \end{bmatrix}, L, l \right) \vee \text{Hited} \left(\begin{bmatrix} \delta_{F1} \\ \delta_{F2} \end{bmatrix}, F, f \right) \vee \text{Hited} \left(\begin{bmatrix} \delta_{U1} \\ \delta_{U2} \end{bmatrix}, U, u \right) = L(i_L, j_L) \vee F(i_F, j_F) \vee U(i_U, j_U). \quad (23)$$

只要飞机纵截面、横截面、水平截面中有任意一个面被命中, 就认为飞机被命中。

1.5 N 次仿真点射的平均毁歼概率

设一次点射射击 n 发弹, 误差时间序列由式(1)确定, 则第 t 次点射的命中弹数为:

$$n_t = \sum_{k=1}^n h_t^k. \quad (24)$$

设平均命中 ω 发弹可以击毁目标, 则第 t 次射击的毁歼概率为:

$$p_t = 1 - (1 - \frac{1}{\omega})^{n_t}. \quad (25)$$

根据式(1), 随机生成 N 组序列, 当 N 足够大时, N 次射击的平均毁伤概率即为系统的毁歼概率。 N 次射击的平均毁伤概率, 即高炮的毁歼概率为:

$$p = \frac{\sum_{t=1}^N p_t}{N}. \quad (26)$$

2 与目标投影法比较

笔者采用本文方法, 将误差投影到目标的 3 个垂面上进行计算, 并采用经典方法将目标投影到炮目垂面上, 再简化为正方形进行计算。下面比较 2 种方法的计算结果。

例 1: 单门单管高炮, 目标边长为 2 m 的静止正方体, $\omega=1.34$, 点射 33 发弹, 距离 1 000~3 000 m 内统计, 高度 0 m。设命中目标时弹丸速度平行于水平面, 正方体的一个面垂直于弹丸速度。

高低、方位系统误差 0 密位, 弱相关误差高低、

方位随机误差(均方差)4密位, 相关系数 $r=0.86$, 强相关误差和不相关误差为0。此种情况相当于立靶射击试验, 结果见表1。

表1 某型高炮对静态立方体点射的毁歼概率(系统误差为0, 均方差为4 mil) m

方法	提前点斜距离						
	1 000	1 400	1 800	2 200	2 600	3 000	平均
目标投影法	0.595	0.370	0.246	0.184	0.130	0.094	0.270
本文的误差投影法	0.589	0.377	0.266	0.183	0.130	0.100	0.274

从表1可知, 在例1情况下, 本文方法与解析法基本一致。原因在于, 在例1条件下, 采用经典方法, 目标沿相对速度方向投影到炮目垂面上, 得到一个正方形, 为规则图形, 积分时可以直接在正

方形上积分, 没有将不规则图形转换为正方形时引起的误差, 因此与本文的误差投影法结果基本一致。

下面分析2种方法对不同形状运动目标的计算结果。

例2: 单门单管高炮, 目标F-16战机、边长为2 m的正方体和半径为1 m的球体, 航路参数相同: 速度250 m/s 匀速直线飞行、高度200 m、航路捷径500 m, 爆破燃烧弹 $\omega=1.34$, 点射33发弹, 斜距离1 000~3 000 m内统计。

高低、方位系统误差2密位, 弱相关误差高低、方位随机误差(均方差)4密位, 相关系数 $r=0.86$, 强相关误差和不相关误差为0。结果见表2。

表2 某型高炮对动态目标点射的毁歼概率

目标	方法	提前点斜距离						
		1 000	1 400	1 800	2 200	2 600	3 000	平均
F16	目标投影法	0.883	0.705	0.519	0.325	0.264	0.184	0.480
	本文的误差投影法	0.802	0.546	0.393	0.283	0.187	0.146	0.393
正方体	目标投影法	0.516	0.331	0.242	0.137	0.114	0.090	0.238
	本文的误差投影法	0.423	0.249	0.171	0.137	0.081	0.081	0.190
球体	目标投影法	0.430	0.275	0.200	0.107	0.094	0.062	0.195
	本文的误差投影法	0.353	0.205	0.137	0.113	0.068	0.063	0.157

例2中采用了3种目标, F16为不规则目标, 正方体为规则目标, 球体为各向投影均为圆形的目标。从表2可以看出, 本文方法比将目标投影到炮目垂面上进行计算的方法结果更小。

在某型高炮武器系统的设计定型试验中, 采用经典的目标投影法计算毁歼概率时, 毁歼概率结果达到90%以上, 明显高于实际的对空射击试验结果。可见本文算法更符合实际的试验结果。

3 结论

本文方法已用在某型轮式自行高炮武器系统设计定型试验中。应用结果表明:

1) 该方法避免了将目标的不规则投影假设为正方形进行积分运算引起的误差, 提高了计算精度, 更符合实际试验结果;

2) 该方法采用了蒙特卡罗法, 避免了积分, 计算量小, 可在个人电脑上计算;

3) 该方法对目标信息的需求少, 需要目标的三视图, 以及目标的长、宽、高中的2个, 不需要目标的三向面积及3维模型, 需要的信息通常可以在公开资料中找到。

参考文献:

- [1] 陈凯, 房立清, 王宏凯. 现有高炮毁歼特点及改进方向[J]. 兵工自动化, 2012, 31(2): 17-19.
- [2] 潘承泮. 武器系统射击效力分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 137-140.
- [3] 田棣华, 肖元星, 王向威, 等. 高射武器系统效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991: 128-129.
- [4] 肖元星, 张冠杰. 地面防空武器系统效费分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 176-183.
- [5] 张林, 刘建斌, 王宏金, 等. 预制破片弹对巡航导弹命中概率研究[J]. 测试技术学报, 2017, 31(3): 235-240.
- [6] 王保华, 裴益轩, 霍勇谋, 等. 一种求解火箭防空武器毁歼概率的简便方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(4): 751-755.
- [7] 曾前腾, 吴慧中. 着发射击高射武器系统点射毁歼概率仿真[J]. 兵工学报, 2006, 27(1): 126-131.
- [8] 姚志军, 朱凯, 王军, 等. 速射火炮立靶密集度的相关系数分析与检测[J]. 火炮发射与控制学报, 2012(1): 1-4.
- [9] 陶德进, 史慧敏, 王军, 等. 基于共有分量分解的速射火炮毁伤概率计算模型[J]. 兵工学报, 2012, 33(11): 1358-1363.
- [10] 段梦铃, 王建平, 景耀杰, 等. GJBz 20494—1998 高炮武器系统射击效能评定[S]. 北京: 炮兵装备技术研究所, 1998: 8.