基于蒙特卡洛法的战斗部破片毁伤仿真①

雷 灏, 尉广军, 姚志敏

(军械工程学院导弹工程系, 石家庄 050003)

摘 要: 建立了战斗部破片对目标关键部件的毁伤计算的蒙特卡洛仿真模型, 将破片的毁伤能力指标加以量化. 以防空导弹打击空中目标为例, 验证了方法的有效性, 可为导弹武器打击目标的毁伤效果计算提供决策依据.

关键词: 蒙特卡洛法; 破片; 毁伤效果

Fragmentation Warhead Damage Simulation Based on Monte Carlo Method

LEI Hao, YU Guang-Jun, YAO Zhi-Min

(Department of Missile Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The damage calculation model of the target key components by the warhead fragmentation was set up with Monte-Carlo method. The damage ability index of the fragmentation was estimated. Taking the air-defense missile attack on the target as an example, the effectiveness of this method was shown. It was of help to the decision making in calculating the target damage effect.

Key words: Monte-Carlo method; fragmentation; damage effect

随着现代战争的发展, 地空导弹已经成为地面防空体系的骨干力量, 破片战斗部是防空导弹中最常见的战斗部种类之一, 其特点是利用爆炸方法产生高速破片群, 利用破片对目标的高速碰击、引燃和引爆作用杀伤目标. 由于战斗部的起爆方位、破片束的形成和飞散过程, 不仅受某些确定性因素的影响, 而且受到很多随机性因素的影响[1], 所以可以在计算机上应用蒙特卡洛算法模拟破片战斗部毁伤过程, 得到战斗部对目标的毁伤概率.

本文以便携防空导弹打击空中目标为例, 在对目标关键部件合理简化的基础上, 通过理论分析和数值仿真对导弹战斗部的毁伤能力加以量化, 建立目标易损性模型, 得到有效毁伤破片数量, 为研究目标的毁伤概率奠定基础.

1 战斗部毁伤能力量化

由于防空导弹战斗部的炸点分布是由一系列随机干扰因素引起的, 这些干扰因素之间彼此独立, 并且每个干扰因素对整体散布作用微小, 依据概率论中的中心极限定理可知, 这些随机干扰因素产生变量的总和近似服从于正态分布[2].

在射击中, 假设以瞄准点为中心, 认为横向和纵向的弹着点独立, 则对期望的弹着点(散布中心)在原点的圆散布概率密度函数为:

$$f(y,z)=\frac{1}{2\pi\sigma^{y}\sigma^{z}}\exp\{-\frac{1}{2}[\frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2}+\frac{(z-\mu_z)^2}{\sigma_z^2}]\} \quad (1)$$

其中, μ_y、μ_z 和 σ_y^2、σ_z^2 分别为 OY、OZ 方向弹着点的数学期望和方差.

对于上式, 导弹落入以目标(质心)为圆心, 以 R 为半径的圆域 $\Omega(\Omega=\{(y,z)\,|\,Y^2+Z^2\le R^2\})$ 内的概率为:

$$P=P\{(y,z)\in R\}=\iint\limits_{\Omega} f(y,z)dydz \quad (2)$$

当导弹命中圆域时, $\sigma_y=\sigma_z=\sigma$、$\mu_y=\mu_z=0$, 因此在无系统偏差情况下, 导弹命中圆域的概率:

$$P=P\{(y,z)\in R\}=1-\exp(-\frac{R^2}{2\sigma^2}) \quad (3)$$

① 收稿时间:2012-12-26;收到修改稿时间:2013-02-04

令 $R_{1/2}$ 表示有 50%弹着点包含于其中的散布圆半径, 则

$$P = P\{(y,z) \in R\} = 1 - \exp(-\frac{R_{1/2}^2}{2\sigma^2}) = 0.5 \tag{4}$$

对上式进行变换可得:

$$R_{1/2} = \sqrt{2\ln 2}\sigma = 1.1774\sigma \tag{5}$$

由此可知,圆概率偏差 $R_{1/2}$ 是一个方向的标准误差的 1.1774 倍.

导弹战斗部在预定炸点起爆后, 形成动态破片飞散锥, 为了分析命中目标关键部件的破片数目, 将破片束在目标靶面上的投影简化为圆面, 目标关键部件简化为小幅圆目标, 如图 1 所示.

设定战斗部性能和目标简化模型, 各相应参数为: 战斗部爆炸形成的破片数量 n;破片束投影圆面圆心 O, 半径 R_m; 目标关键部件圆面圆心 A,半径 r; 投影圆心与部件圆心距离 L; 部件被破片覆盖的面积 S_f.

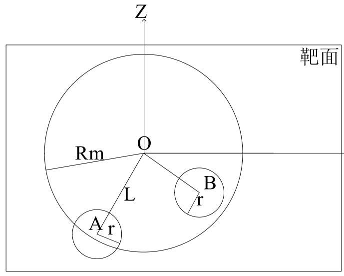

图 1 破片靶面散布示意图

由上图可知, 目标关键部件被毁伤的概率与与其被破片束投影覆盖的面积 S_f 关系密切, 因此, 首先考察 S_f 与 L 的关系.

对于确定的 R_m 、r, S_f 是 L 的函数, 则

$$S_f = \begin{cases} \pi r^2 & L \le R_m - r \\ \pi r^2 - r^2 \arccos\dfrac{R_m^2 - r^2 - L^2}{2rL} + R_m^2 \arccos\dfrac{R_m^2 - r^2 + L^2}{2R_m L} - 2\Delta_S & R_m - r < L \le R_m \\ r^2 \arccos\dfrac{r^2 - R_m^2 + L^2}{2rL} + R_m^2 \arccos\dfrac{R_m^2 - r^2 + L^2}{2R_m L} - 2\Delta_S & R_m < L \le R_m + r \\ 0 & L > R_m + r \end{cases} \tag{6}$$

其中

$$\Delta_S = \frac{1}{4}\sqrt{(R_m + L + r)(R_m + r - L)(R_m - r + L)(r + L - R_m)} \tag{7}$$

可知, 破片的总覆盖面积:

$$S = \pi R_m^2 \tag{8}$$

由于破片在投影圆面中按面积均匀分布且相互独立, 所以当破片数目为 n 时, 命中关键部件的有效破片期望值为

$$n' = n \times \frac{S_f}{S} \tag{9}$$

2 破片散布蒙特卡洛仿真

蒙特卡洛(Monte-Carlo)法, 是一种利用统计抽样理论近似地求解数学物理问题的数值模拟方法. 此方法首先建立一个与待解问题相似的概率模型, 并利用这种相似性把概率模型和待解决问题进行模拟, 或者统计抽样, 并对得到结果进行数学统计处理, 将统计结果转化为该问题的近似解[3]. 在国内外的相关文献中, 蒙特卡洛方法已被广泛应用于子母弹的毁伤效能评估中, 与此同时, 在战斗部破片的毁伤研究中, 国内主要基于理论推导与靶场数据结合研究的方法, 建模过程复杂, 计算繁琐. 因此, 由相似性理论以及防空导弹战斗部破片毁伤机理可知, 利用蒙特卡洛法建立破片束散布模型, 可以免去解析法不得不采取的简化措施, 是高效可行的.

1) 战斗部爆点坐标模拟

假设不考虑系统误差, 战斗部爆点在目标靶面上的投影(Y', Z')服从参数为($\mu_y, \mu_z, \sigma_y, \sigma_z, \rho$)的二维正态分布[4], μ_y, μ_z 为投影点的均值, 即(Y, Z), σ_y, σ_z 为标准偏差, $\sigma_y = \sigma_z = \dfrac{R_{1/2}}{1.1774}$, 则由随机抽样公式可得:

$$\begin{aligned} Y' &= Y + (1/1.1774) \times R_{1/2} \times \alpha \\ Z' &= Z + (1/1.1774) \times R_{1/2} \times \beta \end{aligned} \tag{10}$$

其中, α 、 β 为正态分布的随机数, 由下式产生,

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{-2\ln\lambda_1}\cos(2\pi\lambda_2) \\ \beta &= \sqrt{-2\ln\lambda_2}\cos(2\pi\lambda_1) \end{aligned} \tag{11}$$

其中, λ_1 、 λ_2 是相互独立的[0-1]区间均匀分布的随机

数.

2) 破片散布点坐标模拟

如果战斗部爆炸形成 m 枚破片, 可以假定破片在投影圆中按面积均匀分布且相互独立, 则破片着点的坐标(Y_{pq}, Z_{pq})可由下式确定:

$$\begin{aligned} Y_{pq} &= Y_p' + R_m \xi_1 \cos(2\pi\xi_2) \\ Z_{pq} &= Z_p' + R_m \xi_1 \sin(2\pi\xi_2) \end{aligned} \tag{12}$$

式中,(Y_{pq}, Z_{pq})为第 p 枚战斗部 q 枚破片落点坐标; (Y_p', Z_p')为第 p 枚战斗部爆点在目标靶面上的投影坐标; (ξ_1, ξ_2)为均匀分布的一组离散随机数.

3 实例分析

假设某型地空导弹战斗部武器数据为: 射击精度圆概率偏差$R_{1/2}$为 1m, 破片数为 2000 枚, 有效杀伤半径为 5m. 按照上述步骤和计算模型用 MATLAB 编程求解. 主要通过改变关键目标半径以及圆心距 L, 得到不同条件下的仿真结果, 通过与理论计算结果的对比, 验证方法的可行性.

表 1 5000 次模拟数值计算结果

L	R	r	n	命中破片数理论值	实验平均值
4.2	5	0.5	2000	20.0000	19.1622
3.5	5	1	2000	80.0000	76.2624
4.8	5	0.5	2000	14.7852	14.1784
4.5	5	1	2000	66.3798	64.0636
5.4	5	0.5	2000	0.9976	1.0452
5.5	5	1	2000	14.6131	14.0250
6.0	5	0.5	2000	0	0
6.5	5	1	2000	0	0

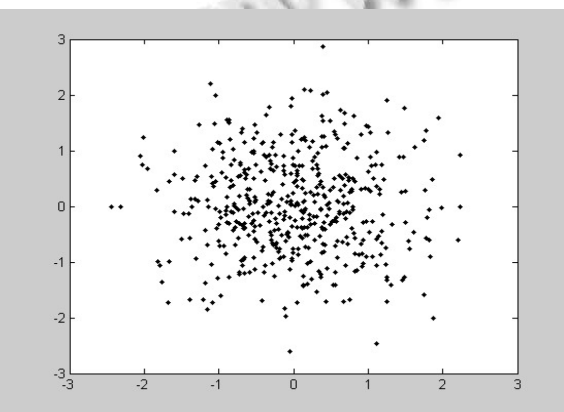

图 2 单次仿真实验战斗部爆点靶面投影效果图

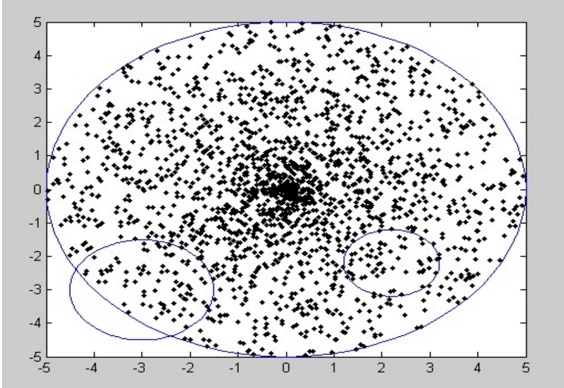

图 3 单次仿真实验破片散布效果图

从表中可以看出, 理论与仿真实验结果基本一致, 所述方法可行. 算例证明, 将蒙特卡洛方法引入战斗部爆炸破片毁伤研究, 可以合理简化毁伤模型, 有效避免复杂的计算过程, 弥补解析方法的不足, 为毁伤概率的高效精确计算奠定基础.

4 结束语

本文通过理论分析和建模仿真验证了蒙特卡洛法对研究地空导弹战斗部破片毁伤计算方法这类随机性问题有比较好的实用价值: 为实现高精度的毁伤效能评定打下了坚实基础, 不仅减少了十分昂贵而且复杂的实物打靶试验, 也可以在战斗部的设计、研制、定型等方面提供帮助.

参考文献

1 王正明,卢芳云,段晓君,等.导弹试验的设计与评估.北京:科学出版社,2010.220–237.

2 王世强,李宏伟,卢厚清,等.子母弹对航空母舰毁伤效果的仿真计算.火力与指挥控制,2011,6.

3 陈超,王志军.蒙特卡洛法在武器系统毁伤概率计算中的应用.弹箭与制导学报,2002.

4 史宏亮,齐少军,刘忠仕,等.基于数值仿真的面杀伤战斗部对面目标成爆弹量计算方法.战术导弹技术,2010,5.