

基于 MATLAB 的导弹毁伤效能数值 计算效率优化方法

肖师云, 陈 文

(重庆红宇精密工业集团有限公司, 重庆 402760)

摘 要: 为解决蒙特卡洛仿真法评估导弹毁伤效能计算时间长、效率低的问题, 研究了一种基于 MATLAB 的导弹毁伤效能仿真计算效率优化方法。在建立一体化目标易损性模型和战斗部威力场模型的基础上, 应用包围球相交检测法实现破片射击线与目标部件相交的快速检测, 并建立了交点求解优化算法; 基于 MATLAB 编制了导弹毁伤效能快速数值计算程序。实例结果表明: 与常规线面相交求解算法相比, 优化方法的计算效率提高了约 16 倍。

关键词: 杀伤概率; 目标易损性; 战斗部威力场; 蒙特卡洛仿真; 包围球相交检测

中图分类号: TJ760.1

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)03-001-008

Optimization on Numerical Computation Efficiency of Missile Damage Effectiveness Based on MATLAB

XIAO Shiyun, CHEN Wen

(Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co. Ltd., Chongqing 402760)

ABSTRACT: During the evaluation of missile damage effectiveness, Monte Carlo simulation computation was usually time consuming and of low efficiency. To optimize the computational efficiency of damage effectiveness simulation, the MATLAB was introduced. First, an integrated target vulnerability model and a warhead power field model were constructed. Based on the two model, the bounding sphere intersection detection method was applied to realize the fast detection of the intersection between fragment shooting line and target components. Accordingly, an optimized way of calculating the intersection point coordinates was developed. Furthermore, a fast numerical computation procedure for missile damage effectiveness was programmed based on MATLAB. Moreover, a practical computation was conducted. Results showed that compared to the conventional line-surface intersection solution algorithm, the computation efficiency was increased by about 16 times after optimization.

KEYWORDS: kill probability; target vulnerability; warhead power field; Monte Carlo simulation; bounding sphere intersection detection

计算效率是衡量计算机程序性能的重要标准之一^[1]。MATLAB 作为数学建模的强大工具和编

程平台^[2], 应用其平台开展导弹毁伤效能评估计算具有显著优势。但是, MATLAB 是一种解释

收稿日期: 2023-12-11

第一作者: 肖师云 (1969—), 男, 正高级工程师, 主要从事毁伤与评估技术研究。E-mail: joonkyy@126.com

引用格式: 肖师云, 陈文. 基于 MATLAB 的导弹毁伤效能数值计算效率优化方法[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (3): 1-8.

性语言,与C++等语言编制的程序相比,其计算速度相对较慢。

导弹攻击并毁伤目标是一个复杂的随机事件,其毁伤效能受制导误差、引战配合特性、弹目交会条件、目标易损性、引信与战斗部参数等因素影响^[3],蒙特卡洛仿真法已成为导弹毁伤效能评估的重要方法之一。为精确描述战斗部破片威力场,近年来基于计算机技术发展了破片射击线仿真方法^[4]。在同时采用射击线仿真和蒙特卡洛仿真方法时,计算量巨大,特别是在破片总数高达数千乃至上万、数十万的情况下^[5],计算效率是必须考虑的重要因素,否则难以达到快速评估的目的,制约毁伤评估的应用范围。本文基于MATLAB编程平台,研究毁伤效能数值计算效率的优化方法,以期实现毁伤效能评估兼具“工程计算的速度”与“有限元仿真的精细度”,为毁伤效能快速量化评估提供支撑。

1 导弹毁伤效能量化计算模型

1.1 单发导弹杀伤概率模型

单发导弹杀伤概率是导弹武器系统重要的毁伤效能指标之一,也是计算各种射击效率指标必不可少的基础数据。通过毁伤效能量化评估不仅可以得到毁伤概率,还能获得武器系统参数对毁伤概率的影响规律^[6-7]。在目标无对抗且导弹武器系统无故障的条件下,单发导弹对目标的毁伤概率主要取决于以下因素:目标易损性;战斗部和引信的类型、参数及引战配合特性;制导精度;导弹与目标的遭遇条件。在目标相对速度坐标系下,单发导弹对单个目标的毁伤概率可用相对速度坐标系中的圆柱坐标 (x_r, ρ, θ) 表示为^[8]

$$P_1 = \int_0^{+\infty} \int_0^{2\pi} f_g(\rho, \theta) P_{df}(\rho, \theta) d\theta d\rho \quad (1)$$

式中: f_g 为脱靶参数分布函数; P_{df} 为在给定脱靶参数 (ρ, θ) 条件下的引信战斗部联合条件杀伤概率,有

$$P_{df} = P_f(\rho, \theta) \int_{-\infty}^{+\infty} f_i(x_r|\rho, \theta) P_d(x_r|\rho, \theta) dx_r \quad (2)$$

式中: $P_f(\rho, \theta)$ 为脱靶条件 (ρ, θ) 下的引信启动概率; $f_i(x_r|\rho, \theta)$ 为脱靶条件 (ρ, θ) 下引信启动点沿一维坐标 x_r 的分布密度函数; $P_d(x_r|\rho, \theta)$ 为给定脱靶条件和引信启动点 (x_r, ρ, θ) 下的战斗部条件杀伤概率。

1.2 目标易损性模型

基于“目标毁伤虚拟模型”的一体化目标易损性描述及建模方法,适用于不同类型的目标易损性建模,可为毁伤效能评估提供详细的目标信息^[9]。一体化目标易损性模型的特点是:将毁伤律模型数据赋予目标部件,将等效硬铝厚度等毁伤特性参数赋予构成部件的几何形状,从而将毁伤律与部件关联起来;采用直六面体、球体、三角形/平面四边形、圆柱/圆台及弧面回转体等标准形状的组合来构建复杂目标几何模型,每个目标拥有唯一的一体化模型数据文件。数据文件结构如图1所示。

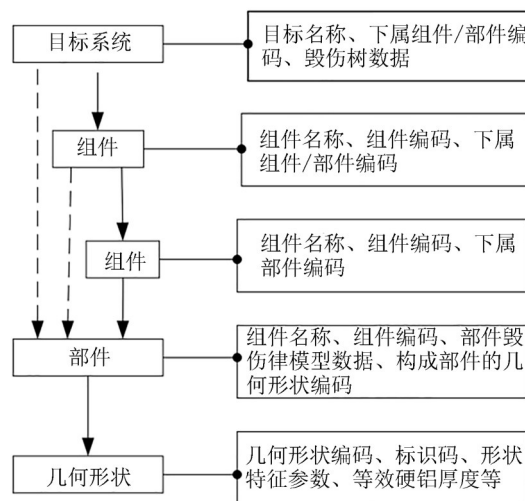


图1 一体化模型数据结构

Fig. 1 Data structure of the integrated model

一体化目标易损性模型既包括目标结构信息、要害件信息,又包括毁伤树和毁伤律等信息,构成了一个完备的虚拟模型,可为高精度毁伤评估提供详细的目标信息。采用标准几何体和四边形面元的组合创建目标几何模型,既可提高计算效率,又能保证必要的模型精度。如图2所示为某巡航导弹的一体化模型。

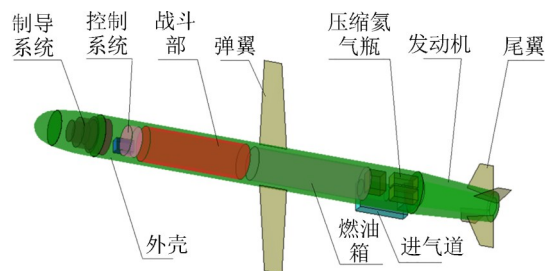


图2 某巡航导弹一体化模型

Fig. 2 The integrated model of a cruise missile

1.3 战斗部威力场模型

采用离散化描述的破片射击线模型可实现战斗部破片威力场的高精度建模。在射击线模型中, 每个破片的弹道用相应的射击迹线来模拟, 具有确定的标志数、指定的质量、速度、起点和方向。射击线在空间方位上是根据一指定的基准点、基准方位和一小区域内的分布特征来确定的, 恰好反映了破片的“宏观”可控性和“微观”随机性, 因此, 该方法对战斗部威力仿真和毁伤评估具有较好的实用性和合理性^[10-11]。

对于任意杀爆战斗部, 破片在弹体坐标系中的位置按照行和列排布, 则可采用以下 11 个参数对每一枚破片的射击线进行数学描述: 破片编号、单粒质量、材料密度、迎风面积、衰减系数、起点 xyz 坐标、 xyz 轴速度分量。采用等效 TNT 当量作为表征爆破威力的参数, 根据以上参数构建杀爆战斗部威力场模型。

以导弹战斗部端面中心为原点、以导弹纵轴为 x 轴、垂直向上为 y 轴, 按右手定则建立弹体坐标系, 如图 3 所示。

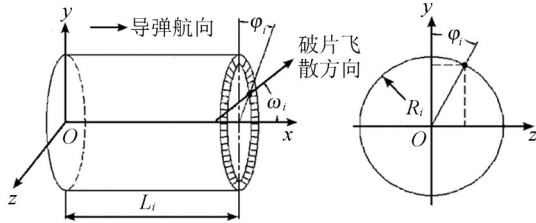


图 3 弹体坐标系

Fig. 3 The coordinate system of missile body

图 3 中: L_i 为破片 i 在弹体坐标系中的 x 坐标; R_i 为破片 i 的装填半径; φ_i 为破片 i 在战斗部径向剖面的方向角; ω_i 为破片 i 在战斗部轴向剖面的飞散方向。破片 i 的初速可根据修正的格尼公式进行计算, 破片的质量和尺寸为已知参数。

对于回转体结构战斗部, 可得到破片的起点坐标为

$$W_i = (L_i, R_i \cos \varphi_i, R_i \sin \varphi_i) \quad (3)$$

破片射线的方向向量为

$$S_i = [\cos \omega_i, \sin \omega_i \cos \varphi_i, \sin \omega_i \sin \varphi_i] \quad (4)$$

假设战斗部的破片总数为 N , 则可以用 N 行 11 列的二维矩阵表征破片威力场参数。以射击线模型重构的战斗部破片威力场如图 4 所示。

1.4 单发导弹杀伤概率蒙特卡洛仿真

采用高精度的目标模型和破片射击线模型进

行毁伤效能评估具有较好的通用性和精度, 但是该方法难以简单利用解析计算获得毁伤概率, 多采用实验统计的方法 (即蒙特卡洛方法) 解决该类问题。

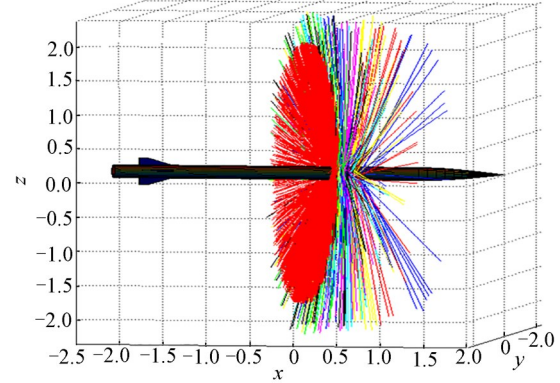


图 4 破片威力场

Fig. 4 The power field of fragments

导弹单发杀伤概率主要受 2 类因素的影响: 一类可视为常数, 如弹道参数、引信和战斗部的部分参数等; 另一类为具有一定概率分布的随机变量, 如脱靶参数、引信作用距离、引信启动点等。简单随机变量可直接通过蒙特卡洛抽样获得, 复杂随机变量可由上述多个简单随机变量的抽样值获得。单发导弹杀伤概率蒙特卡洛仿真涉及的随机变量抽样主要包括: 脱靶量及脱靶方位抽样、引信启动点抽样。仿真流程如图 5 所示^[12]。

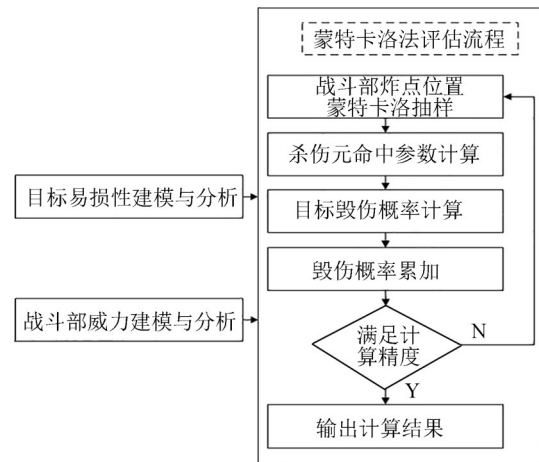


图 5 杀伤概率蒙特卡洛仿真流程

Fig. 5 Monte Carlo simulation flow of kill probability

蒙特卡洛方法的收敛效率取决于 $\sigma/\sqrt{N}$ (σ 为抽样误差), 若想提高仿真精度, 则仿真次数需大幅增长。仿真过程中, 在脱靶点和引信启动点参数抽样确定之后, 战斗部条件杀伤概率的计算

需要先进行破片射击线与目标命中问题求解, 然后才能计算破片对目标部件的击穿、引燃、引爆概率。由于破片杀伤战斗部的破片数量较大, 采用遍历循环计算耗时长、效率较低。

2 计算效率优化方法

2.1 MATLAB 程序计算效率常用优化方法

(1) 矢量化计算。MATLAB 变量的基本类型是矩阵, 当对矩阵的每个元素循环处理时, 运算速度很慢。利用 MATLAB 提供的用于矢量化操作的函数, 将循环矢量化, 既可以提高编程效率, 也可以提高程序的执行效率。

(2) 预先定义数组或矩阵维数。若变量在使用之前未明确定义和指定维数, 当需赋值的元素下标超出有维数时, MATLAB 就为该数组或矩阵扩维一次, 这将大大降低程序的执行效率。因此, 在使用数组或矩阵之前, 预定义维数可以提高程序的执行效率。

(3) 应用内部函数。每次调用 MATLAB 的脚本文件都需要将不必要的中间变量加载到内存中, 每执行一次, 就加载一次; 函数在调用时被编译成了伪代码, 只需要加载到内存一次。因此, 尽量多使用函数文件而少使用脚本文件, 也是提高执行效率的一种方法。

(4) 应用 Mex 文件。MATLAB 提供了与 C 和 C++ 的接口, 可使用 C 或 C++ 语言编写耗时的循环代码, 然后通过接口程序在 MATLAB 中转换成 dll 文件 (即 Mex 文件), 在 MATLAB 环境下直接执行, 可极大提高计算速率。

(5) 并行计算。MATLAB 推出了并行计算工具箱和并行计算服务, 用户可以实现基于多核平台、多处理器平台和集群平台的多种并行计算任务, 而无需关心多核、多处理器以及集群之间的底层数据通信, 可将主要精力集中于并行算法的设计。此外, 并行计算工具箱还增加了对 GPU 的支持^[13]。

2.2 毁伤效能蒙特卡洛仿真计算效率优化

2.2.1 包围体相交检测法减少计算量

通常情况下, 对空导弹战斗部命中目标的破片数量较少, 一般不超过破片总数的 1/8。因此, 对可能命中目标的破片进行预判, 剔除其中不可能命中的破片, 以减小计算量, 提升程序的计算效率。常用的包围体有轴对齐包围盒、有向包围

盒、包围球以及 k-离散有向多面体。由于包围球的创建较为简单, 且射线与球体的相交判断算法计算量小, 因此优先采用包围球法。

破片射击线与球体的关系如图 6 所示。设破片射击线的参数方程为 $L(t) = P + td$, 其中: P 为射击线起点; d 为射击线向量单位长度; t 为方程中间转换参数。图 6 中: C 为球心; R 为半径; l 为向量 a 沿 d 方向的投影; m 为点 C 到射击线的距离。

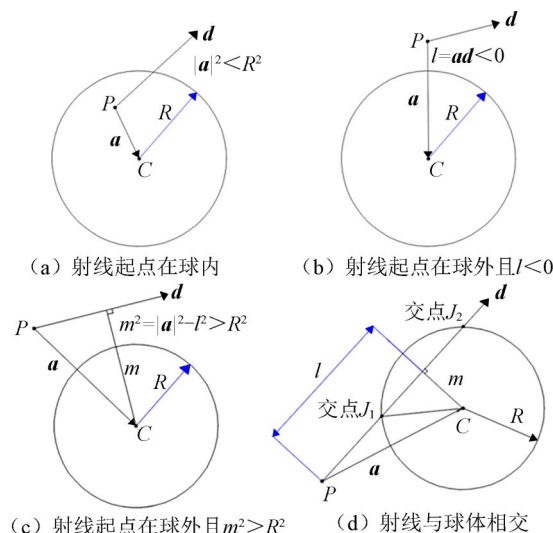


图 6 破片射击线与球体相交检测

Fig. 6 Intersection detections of fragment shot lines and the sphere

破片射击线与球体的相交检测步骤如下:

(1) 先计算破片射击线起点到球心的距离 $\|a\|$ 并与球半径 R 比较, 若该距离小于球半径, 则破片射击线起点在球内部, 必然与球体相交, 如图 6 (a) 所示;

(2) 否则, 计算向量 a 沿 d 方向的投影 $l = ad$, 若 $l < 0$ 则一定不相交, 完成第 1 次排除测试, 如图 6 (b) 所示;

(3) 若 $l > 0$, 则进一步计算球心到破片射击线距离的平方 $m^2 = \|a\|^2 - l^2$, 若 $m^2 > R^2$, 则可判定破片射击线与球体一定不相交, 完成第 2 次排除测试, 如图 6 (c) 所示;

(4) 在经过以上 2 次排除测试之后, 则可判定破片射击线一定与球体相交, 如图 6 (d) 所示。

应用包围球相交检测法首先筛选出与整个目标可能相交的破片数据, 然后进一步对目标的各个部件进行相交检测, 最终筛选出可能相交的破片与部件数据, 可大幅度减少后续计算量。采用以上方法, 对典型破片式战斗部与巡航导弹目标

进行相交检测。破片数量为 9 000 枚, 双束破片聚焦中心方向角为 90° , 每束聚焦带宽度为 2° , 破片初速 2 000 m/s, 在典型弹目交会条件下采用包围球法筛选可能相交的破片, 计算数据见表 1。

表 1 典型条件下破片相交检测计算结果

Tab. 1 Computation results of fragments and targets intersection detection under typical conditions

战斗部爆炸 时弹目中心 距离/m	导弹速 度/(m· s ⁻¹)	目标速 度/(m· s ⁻¹)	弹目交 会角/ ($^\circ$)	筛选破 片数量/ 枚	破片数 据量降 幅/%
10	800	300	10	1 178	86.9
10	800	300	30	1 300	85.5
15	1 000	500	20	740	91.8
15	1 000	500	40	631	93.0

结果表明, 与遍历射击线与目标部件的求解法相比, 采用包围球法进行快速相交检测, 将可能相交的破片筛选出来, 可使破片计算量减少 80% 以上。

2.2.2 循环矢量化计算

MATLAB 程序是解释执行的, 比编译执行的速度慢。由于破片数量较多, 采用 for 循环对每一破片射击线进行相交检测、命中点计算等的耗时较长、效率较低。采用矢量化计算即是采用 MATLAB 编译后的库函数执行运算, 省去了采用 for 循环解释执行 n 次的额外开销, 能有效提高程序执行效率。相交检测矢量化计算的关键是构造合适的数据矩阵并采用逻辑矩阵进行数据筛选, MATLAB 程序关键代码如下:

```
a= repmat (crd, size (std, 1), 1) -std;
%构造矩阵
a2=dot (a, a, 2); R2=SRadius*SRadius;
Rno1=a2<=R2; Rno2=a2>R2;
```

$$\frac{[p(y-y_0)-n(z-z_0)]^2 + [m(z-z_0)-p(x-x_0)]^2 + [n(x-x_0)-m(y-y_0)]^2}{m^2 + n^2 + p^2} = R^2 \quad (5)$$

破片射击线参数方程为

$$\begin{cases} x = x_t + m \cdot t \\ y = y_t + n \cdot t \\ z = z_t + p \cdot t \end{cases} \quad (6)$$

式中: (x_t, y_t, z_t) 为射击线起点坐标; (m, n, p) 为射击线的方向向量。

联立式 (5) 与式 (6), 可得直线与无限长圆柱面的交点坐标 $J(x_2, y_2, z_2)$ 。设 $K(x_c, y_c, z_c)$ 为

```
if sum (Rno2) > 0
    a2=a2 (Rno2);
    Mv=dot (Drv (Rno2,:), Drv (Rno2,:),
    2) .^0.5;
    Dv=Drv (Rno2,:) ./ repmat (Mv, 1, 3);
    L=dot (Dv, a (Rno2,:), 2);
    Rno3=L>0;
    Rno2 (~Rno3)=false (size (Rno2 (~
    Rno3))) );
    if sum (Rno3) > 0
        M2=a2 (Rno3) -L (Rno3) .*L (Rno3);
        Rno4=M2<=R2; Rno2 (Rno3) =Rno4;
    else
        Rno2= false (size (Rno2) );
    end
end
Num=sum (Rno2|Rno1); %相交射线的总数
```

2.2.3 交点求解算法优化

破片射击线与部件交点计算包括与球面、圆柱面/圆锥面、平面等的交点计算, 通常应用射线与面/体的一般方程或参数方程进行联合求解。采用标准几何体进行交点求解可避免大量离散面元建模导致计算量剧增的现象, 从而减少计算量。以射击线与圆柱的交点求解为例, 方法如下。

首先, 建立空间圆柱面的一般方程, 再联合破片射击线方程进行交点求解; 然后, 判断交点是否位于该圆柱段。设圆柱面的底面中心坐标为 $V(x_0, y_0, z_0)$, 底面半径为 R , 矢量 $H(m, n, p)$ 确定轴线方向及圆柱高度。由圆柱面上任意一点 (x, y, z) 到轴线的距离相等, 可得空间任意圆柱面的一般方程。由圆柱面上任意一点 (x, y, z) 到轴线的距离公式可得

过交点 J 且与矢量 $H(m, n, p)$ 垂直相交的垂点坐标, 有

$$\begin{cases} (x_c - x_0)/m = (y_c - y_0)/n = (z_c - z_0)/p \\ (x_c - x_2)^2 + (y_c - y_2)^2 + (z_c - z_2)^2 = R^2 \\ m(x_c - x_2) + n(y_c - y_2) + p(z_c - z_2) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

按方程组 (7) 求得垂点 K 坐标后, 再求得 K 点分别到圆柱底面中心点与顶面中心点的距离 L_1 、 L_2 , 如果 L_1 与 L_2 之和等于圆柱段轴线长度 (即矢

量 H 的模), 则破片射击线命中该圆柱段, 否则未命中。圆锥面、弧面回转体与射线的交点坐标仍然可采用上述方法进行求解。

在 MATLAB 中采用 solve 或 roots 函数进行符号计算可获得交点的解析表达式, 使用 Function 函数自动生成交点的 MATLAB 求解表达式函数并保存为 m 函数文件。

对于平面与射线的交点求解, 先将平面四边形转换为三角形, 再使用 Möller 和 Trumbore 提出的 MT 算法^[14], 通过将交点坐标用三角形重心坐标的形式表示, 并运用克莱姆法则求解。该方法可极大降低计算交点坐标的时间复杂度, 并以高度量化的 MATLAB 代码实现。对于具有大量平面面元的目标模型, 该算法具有较高的效率。MATLAB 关键代码如下:

```
intersect=false (size (orig, 1), 1);
%初始化交点
t=inf+zeros (size (orig, 1), 1); u=t; v=t;
xcoor=nan+zeros (size (orig) );
cossita=nan+zeros (size (orig, 1), 1);
ed1=vert1-vert0; ed2=vert2-vert0;
tvec=orig-vert0; pvec=cross (dir, ed2, 2);
det=sum (ed1.*pvec, 2);
det (~angleOK) =nan;
u=sum (tvec.*pvec, 2)./det;
qvec=cross (tvec, ed1, 2);
v=sum (dir.*qvec, 2)./det;
t = sum (ed2.*qvec, 2)./det;
ok= (angleOK & u>=-zero & v>=-zero &
u+v<=1.0+zero); ok = intersect;
xcoor (ok, :) =vert0 (ok, :) +ed1 (ok,
:).*repmat (u (ok, 1), 1, 3) +ed2 (ok, :).
*repmat (v (ok, 1), 1, 3); %相交点坐标
```

2.2.4 Mex 文件加速计算

通过使用 MATLAB Coder App 或命令行中使用 codegen 命令, 可从 MATLAB 代码生成一个 MEX 函数。在 MATLAB 环境内工作时, 使用 MEX 函数可加快 MATLAB 代码计算密集型部分的执行速度。

将上述三角形与射线相交算法编译为 Mex 文件, 采用编译文件对 500 个三角形面元与 900 枚破片射击线的交点进行求解, 计算时间为 1.56 s, 未编译代码的计算时间为 5.98 s。表明采用 Mex 文件的计算速度提高约 3 倍。

2.2.5 循环矢量化单机多核并行计算

MATLAB 中用 parfor 函数代替 for 循环实现单机多核并行计算。基本步骤为: (1) 使用 parpool 函数配置和开启并行计算池; (2) 将串行循环中的 for 关键字改为 parfor, 并注意是否要修改循环体, 以满足特定要求, 如循环变量的类型要求等; (3) 执行完毕后若不再进行并行计算, 使用 delete 关闭并行池。

应用 parfor 函数的一个基本前提是循环可以被等效分解, 即分解后循环的执行顺序不会影响最终结果。parfor 函数的用法与 for 类似, 其语法为: parfor (loopvar = initval: endval, M), state-ments, end。其中: initval 和 endval 必须为正整数, 或者是一个包含连续递增的整数行矢量。使用 M 指定执行循环体的 MATLAB worker (核心处理器) 的最大数量, M 为非负整数, 如果 M=0, 则在 client 上串行执行。

根据导弹制导精度对脱靶参数进行蒙特卡洛抽样, 然后对每一条弹道进行杀伤概率计算。由于每条弹道的杀伤概率结果互不影响, 因此, 可以使用 parfor 函数进行单机多核并行计算。以破片总数为 1 000 枚的单聚焦战斗部对巡航导弹的毁伤效能仿真为例, 设置 M 为 6, 使用 parfor 完成 100 次仿真的计算时间为 0.43 s, 相同条件下使用 for 循环的计算时间为 1.32 s, 单机多核并行计算的时间约为单核计算的 1/3, 计算效率提升约 2 倍。

3 程序计算实例验证

按图 5 流程建立了完整的防空导弹毁伤效能蒙特卡洛仿真方法, 采用上述计算效率优化方法, 基于 MATLAB 编制了优化计算程序。以某防空战斗部对某巡航导弹的毁伤为例。战斗部破片威力场采用射击线技术建模, 为破片三束聚焦式战斗部, 破片总数 9 352 枚, 三束破片飞散宽度 30°; 巡航导弹目标综合采用平面四边形、圆柱、圆锥、弧面回转体、直六面体等进行建模; 仿真条件见表 2。

采用计算程序进行 1 000 次蒙特卡洛仿真, 脱靶量和脱靶方位抽样结果如图 7 所示, 弹道编号 12 的破片命中情况如图 8 所示。

采用优化后的程序仿真, 计算得到战斗部对巡航导弹目标的 C 级杀伤概率为 0.933, K 级杀伤概率为 0.581, 计算消耗时间为 18.65 s。相同条件

下, 未采用包围球相交检测且计算效率未优化的常规线面相交求解算法的计算时间为 324.68 s。计算结果表明, 优化算法的计算时间仅为优化前的 1/17, 计算效率提高了近 16 倍。

表 2 蒙特卡洛仿真条件
Tab. 2 Monte Carlo simulation conditions

类型	参数	取值
遭遇点参数	遭遇点高度/km	20
	导弹速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1 000
	弹道偏航角/ $(^\circ)$	0
	弹道倾角/ $(^\circ)$	20
	目标速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	400
	目标偏航角/ $(^\circ)$	180
蒙特卡洛抽样参数	制导误差期望/m	15
	制导误差标准差/m	2
	引信启动角期望/ $(^\circ)$	70
	引信启动角标准差/ $(^\circ)$	2
	引信延迟时间期望/ms	4.5
	引信延迟时间标准差/ms	1

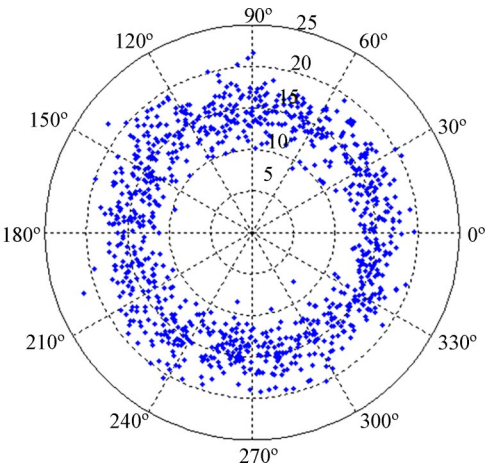


图 7 脱靶参数抽样结果

Fig. 7 Sampling results of miss parameters

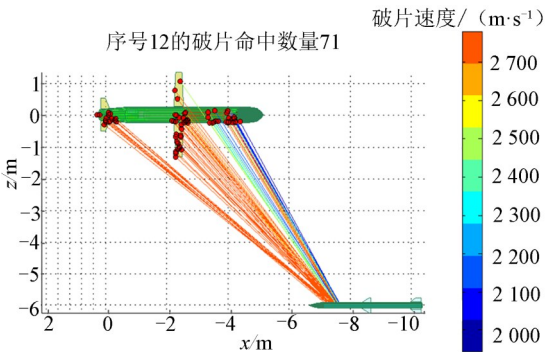


图 8 弹道序号 12 的破片命中结果

Fig. 8 Hitting results of fragments of No.12 ballistic

4 结论

通过基于 MATLAB 的毁伤效能仿真计算效率优化方法研究, 建立了适用于破片射击线模型与一体化目标模型的包围球相交检测法以及交点求解优化算法, 应用 Mex 文件和单机并行计算方法加速计算。优化后的导弹毁伤效能数值计算效率得到大幅度提升, 为毁伤效能评估的实时应用奠定了基础。

参考文献:

[1] 王森. 氧化铝物料平衡计算软件的计算效率分析与改进[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 20-21.
WANG S. Analysis and improvement of computational efficiency based on alumina material balance calculation software[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009: 20-21.

[2] 尹泽明, 丁春利. 精通 MATLAB 6[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 1-13.

[3] 张志鸿, 周申生. 防空导弹引信与战斗部配合效率和战斗部设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1994: 38-40.

[4] 卢永刚. 基于虚拟模型的动能杆反导战斗部毁伤效率评估方法[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004.

[5] 肖师云, 李万富, 华绍春, 等. 基于 MATLAB 的破片战斗部快速设计[J]. 兵工自动化, 2019, 38(6): 43-46.
XIAO S Y, LI W F, HUA S C, et al. Fast design of fragment warheads based on MATLAB[J]. Ordnance Industry Automation, 2019, 38(6): 43-46.

[6] 王树山, 马峰, 郭勋成, 等. 武器弹药终点毁伤评估[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019: 24-28.

[7] 傅常海, 黄柯棣, 童丽, 等. 导弹战斗部对复杂目标毁伤效能评估研究综述[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(19): 5971-5976.
FU C H, HAUNG K D, TONG L, et al. Assess damage effectiveness for warhead to complex targets[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(19): 5971-5976.

[8] 王树山, 马晓飞, 李园, 等. 坦克主动防护系统弹药毁伤效能评估[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(12): 1042-1044, 1049.
WANG S S, MA X F, LI Y, et al. Evaluation of damage effectiveness for tank active protection defense system ammunitions[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(12): 1042-1044, 1049.

- [9] 肖师云, 冯成良, 陈文, 等. 目标易损性一体化建模[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(5): 217-222.
XIAO S Y, FENG C L, CHEN W, et al. Integrative modeling of target vulnerability[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(5): 217-222.
- [10] 蒋建伟, 卢永刚, 钱立新. 射击迹线技术在战斗部破片场仿真中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2001, 21(1): 29-34.
JIANG J W, LU Y G, QIAN L X. Application of shot-line model in simulation of fragment warhead[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2001, 21(1): 29-34.
- [11] 应国森, 董桂旭, 肖师云. 基于射击线技术的杀爆战斗部杀伤面积计算[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(11): 20-23.
YING G M, DONG G X, XIAO S Y. Lethal area calculation of blast-fragmentation warhead based on firing line technology[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(11): 20-23.
- [12] 肖师云, 冯成良, 刘俞平, 等. 导弹战斗部终端毁伤效能评估研究[C]//全国毁伤评估技术学术研讨会论文集. 北京: 中国兵器科学研究院, 2015: 152-160.
- [13] 蔡勇, 李胜. Matlab 的图形处理器并行计算及其在拓扑优化中的应用[J]. 计算机应用, 2016, 36(3): 628-632, 652.
CAI Y, LI S. Graphics processor unit parallel computing in Matlab and its application in topology optimization[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(3): 628-632, 652.
- [14] MÖLLER T, TRUMBORE B. Fast, minimum-storage ray-triangle intersection[J]. Journal of Graphics Tolls, 1997, 2(1): 21-28.

通信作者及其研究团队介绍

肖师云, 男, 1969年6月出生, 重庆红宇精密工业集团有限公司正高级工程师。现为重庆市兵工学会弹箭引信专委会委员, 战斗部与毁伤技术专委会委员, 军标委通用弹药标准化技术委员会委员。发表论文41篇, 授权专利23项、软件著作权7项; 获部级科技进步一等奖2次、二等奖3次、三等奖5次, 部级技术发明三等奖1次; 获国务院政府特殊津贴、重庆市第五届劳动模范称号。主要从事弹药战斗部与毁伤技术研究, 在多束破片高效率聚焦、多模复合定向、动态威力优化、多源数据融合的威力场建模、目标易损性一体化高精度建模、毁伤效能快速量化评估等方面取得了多项创新成果。

研究团队45人, 其中硕士/博士研究生35人, 正高级/高级工程师20人, 主要从事防空反导战斗部技术与毁伤评估技术研究, 获得部级科技进步三等奖50余项, 授权专利80余项、软件著作权20余项, 发表论文120余篇。