

凸多边形目标毁伤面积的一种 解析计算方法

李芯瑶, 陈春梅

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 为了降低凸多边形目标毁伤面积计算的难度, 提高计算速度, 通过对毁伤面积的几何规律进行分析, 利用集合分割与递归思想, 将毁伤面积计算转化为凸多边形和毁伤圆相交面积的计算问题。利用解析方法对凸多边形目标进行分割, 将其按一定分割规则分为三角形分割域和扇形分割域。通过讨论毁伤圆圆心相对位置、多边形顶点情况、圆与目标相交情况, 分析凸多边形与毁伤圆的多种复杂相交情况, 得出多边形毁伤面积的分割规则, 建立毁伤面积的计算模型。最后, 设计 2 个算例对模型和算法进行了验证。结果表明: 当凸多边形边数大于 20 时, 设计的解析算法不仅节省了计算时间, 而且比网格法提高了 2% 的计算精度。

关键词: 凸多边形目标; 毁伤面积; 解析法; 毁伤圆

中图分类号: TM344.1

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)05-009-08

Analytic Calculation of Damage Area of Convex Polygon Targets

LI Xinyao, CHEN Chunmei

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: To reduce the computational complexity and improve the computation speed of damage area calculation of convex polygon targets, the paper converted the damage area calculation into a computation about the intersection area of the convex polygon and the damage circle. The method was based on the analysis of the geometric law of the damage area as well as ideas of segmentation and recursion. By applying analytical method, the polygonal targets were firstly divided into triangular and sector areas according to certain segmentation rules. Then, the intersection of the polygon and the damage circle was discussed by analyzing the relative position of the center of the damage circle, vertexes of the polygon and the intersection of the circle and the target. Accordingly, the segmentation rule was obtained and the damage area calculation model was established. Finally, the proposed model and algorithm were verified by two samples. Experimental results showed that when the number of sides of the polygon exceeds 20, the proposed method not only saves computing time, but also improves the calculation efficiency by 2% compared to the grid method.

KEYWORDS: convex polygon targets; damage area; analytic calculation method; damage circle

收稿日期: 2024-03-11

第一作者: 李芯瑶 (2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事火力指挥与控制研究。E-mail: 1058978011@qq.com

引用格式: 李芯瑶, 陈春梅. 凸多边形目标毁伤面积的一种解析计算方法[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (5): 9-16.

在火力运用中,复杂形状面目标毁伤面积计算是一个重点问题。一般情况下,打击目标常常不能抽象为规则的图形^[1-2],而是转化为凸多边形目标毁伤面积的计算问题。根据毁伤评估的需求,既要求计算结果准确,又要求计算速度快。

目前,面目标毁伤面积计算主要有解析法和网格法两类算法。郝辉等^[3]提出了一种三角形递归计算求解法。温锦辉等^[4]提出了一种求解2个平面凸多边形交集面积的“六步法”,在此基础上,该作者又提出了一种基于集合与递归运算的两凹多边形交集面积的计算方法^[6]。赵启等^[6]提出了区域划分法应用于自相交多边形分解算法。李亚雄等^[7]提出了将多边形划分成三角形计算的方法。鄂翔南等^[8-9]将毁伤面积计算问题转化为矩形与圆形相交面积的计算,并利用差分进化算法进行求解。这些方法都是运用几何学和算法设计求解毁伤面积的解析方法,优点是问题转化为圆与多边形或三角形的几何位置关系,简单直观,分类讨论就可以得到结果。缺点是这些方法不但需要考虑圆与多边形的交点,还需考虑圆心的位置、多边形顶点的位置等复杂情况,模型建立的优劣会在很大程度上影响求解效率。杨奇松^[10]、冯海川等^[11]运用向量网格法评估毁伤面积,分别利用仿真的思想将目标划分为网格,并进行打击效果的统计和计算。网格法有利于编制计算程序,但是其运算量随网格密度和计算精度的提高而迅速增长,无法满足快速解算的需要。

鉴于此,本文采用解析法计算凸多边形目标的毁伤面积,通过几何规律分析将毁伤面积进行合理分割,建立了毁伤面积的分割规则与相应的求解计算模型。在此基础上,设计通用算法计算毁伤面积,该算法考虑了计算毁伤面积时复杂的规律,从而大大简化了毁伤面积的求解难度。下文中的多边形均指凸多边形

1 毁伤面积的几何规律分析

1.1 毁伤圆和目标的均匀性

在弹药对目标打击时,弹药的毁伤效果如冲击波超压、破片密度等可以达到目标毁伤阈值,则该毁伤范围对应的毁伤半径即为毁伤圆的半径,毁伤圆的圆心即为弹药的落点。

目标的均匀性既包括目标实体本身性质的均匀性即密度、材质等均匀分布,还包括目标价值

属性的均匀性,从而使得弹药毁伤范围可以等效为一圆形即毁伤圆。

1.2 毁伤面积几何多样性与分割

毁伤圆与多边形目标的相交面积即为毁伤面积,毁伤圆与多边形目标的几何位置关系的不同,使得毁伤面积有各种复杂的形状,计算毁伤面积需要考虑的主要因素有:1) 毁伤圆圆心与多边形的关系;2) 毁伤圆与多边形目标边界的交点数;3) 多边形顶点在毁伤圆内的个数;4) 多边形在毁伤圆内的顶点与相交点之间的位置关系。

多边形与圆形区域的相交区域可以划分为扇形区域和三角形区域的结合体,从而将不规则的毁伤面积区域分为规则的扇形和三角形区域。

1.3 毁伤圆与多边形目标的交点

在二维空间内一条直线与圆的交点数只可能为0、1、2,对于线段亦是如此,故毁伤圆与多边形目标的同一条边的交点数为0、1、2。由于多边形边数的不同,毁伤圆的相对位置不同,相应地,毁伤圆与不同边的交点总数也总是在变化的。

1) 扇形分割域的形成

不考虑相切的前提下,从几何形状上看,扇形域的产生是由于毁伤圆和多边形目标均为封闭图形,如图1所示。

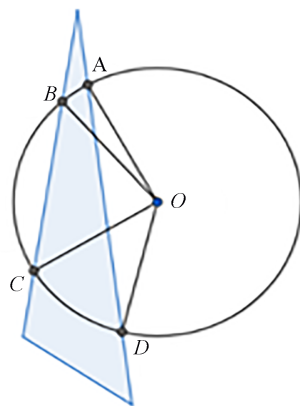


图1 交点导致扇形与三角形域的形成

Fig. 1 Sector and triangular regions formed by intersection points

以逆时针方向旋转毁伤圆的边界,如图1所示,当从多边形目标外穿进目标内1次,就会对应1次从目标内穿出目标外。这样的1次穿进穿出,会与目标边界相交于2点,毁伤圆旋转的这部分边界就会出现在多边形内部,扫过的扇形即形成扇形分割区域,如图1中的扇形OAB和扇形OCD。

2) 三角形分割域的形成

仅由交点原因产生三角形分割域是由于毁伤

圆与多边形的同一条边相交于2点, 即图1中的点B、点C。类比扇形分割域的形成, 逆时针旋转毁伤圆的边界, 当毁伤圆边界穿出穿进多边形目标1次, 就会形成一块三角形分割域, 即图1中的三角形OBC。

1.4 顶点的相对位置

当毁伤圆圆心在目标区域外时, 目标多边形顶点的相对位置是毁伤面积分割计算复杂性的最主要因素。将在毁伤圆内的目标多边形顶点和毁伤圆与目标多边形的交点按逆时针的方向排列, 从而有以下计算规则。

1) 多边形顶点在扇形域内和扇形域外

根据多边形顶点是否在交点形成的扇形分割域内, 会产生两种情况。当顶点在扇形域内时, 将扇形域分为3块分割域, 毁伤区域计算时应减去2块三角形分割域, 如图2所示。毁伤面积为

$$S_{\text{毁}} = S_{\text{扇形}OAC} - S_{\Delta OAB} - S_{\Delta OBC}$$

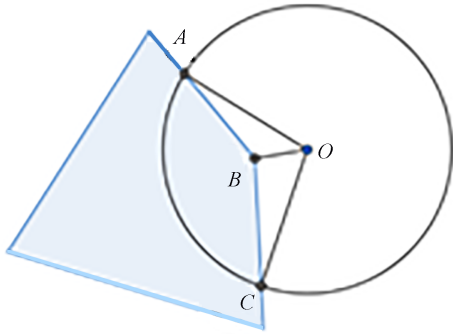


图2 顶点在扇形域内的毁伤区域

Fig. 2 Damage area when vertices are within the sector domain

当顶点不在扇形域内时, 毁伤区域计算时应加上该顶点与逆时针旋转的第一个交点形成的三角形分割域, 减去另一个三角形区域, 如图3所示。此时的毁伤面积为

$$S_{\text{毁}} = S_{\text{扇形}OBC} + S_{\Delta OAB} - S_{\Delta OAC}$$

2) 多边形顶点在三角形分割域内

如图4所示, 顶点在三角形分割域内可以分为顶点在顶点与交点形成的三角形分割域内和顶点与顶点形成的三角形分割域2种情况, 即点B的位置不同。在计算毁伤面积时要先计算平面OACDE和面OACDEF的总面积, 当顶点在三角形分割域内时, 计算总面积时跳过与该顶点相关的扇形或三角形面积, 即

$$S_{\text{总}OACDE} = S_{\Delta OAC} + S_{\text{扇形}OCD} + S_{\Delta ODE}$$

$$S_{\text{总}OACDEF} = S_{\Delta OAC} + S_{\Delta OCD} + S_{\text{扇形}ODE} + S_{\Delta OEF}$$

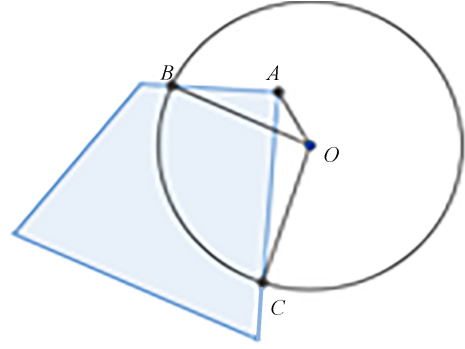


图3 顶点在扇形域外的毁伤区域

Fig. 3 Damage area when vertices are outside the sector domain

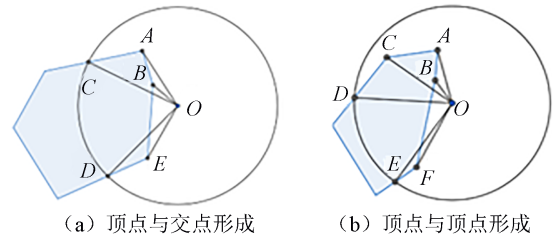


图4 顶点在三角形分割域内的毁伤区域

Fig. 4 Damage area when vertices are within the triangular domain

而计算毁伤面积时要令总面积减去非多边形目标区域面积, 此时, 总面积减去逆时针旋转的首尾点和在三角形分割域内的顶点形成的面OABE和面OABF的面积, 即得图4(a)和图4(b)的毁伤面积分别为

$$S_{\text{毁左}} = S_{\text{总}} - S_{\Delta OAB} - S_{\Delta OBE}$$

$$S_{\text{毁右}} = S_{\text{总}} - S_{\Delta OAB} - S_{\Delta OBF}$$

3) 多边形顶点和交点重合

当顶点与交点重合时, 将该点按顶点记录, 加入后续的计算。

1.5 毁伤圆圆心位置

毁伤圆圆心的位置不同会使得毁伤面积的计算不同。毁伤圆圆心在目标域内与在目标域外的毁伤区域分别如图5和图6所示。

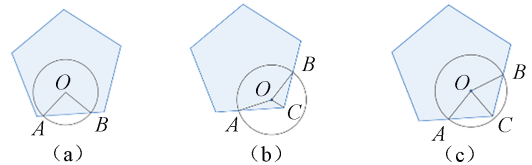


图5 圆心在目标域内时的毁伤区域

Fig. 5 Damage area when the center of the circle is within the target domain

由图5可以看出: 当圆心在目标区域内, 无论

是与交点还是与顶点形成的分割区域，均在毁伤区域内，故而计算过程总为求和；而当圆心在目标域外时，如图 6 中的 3 种情况，会产生不在毁伤区域内的分割区域，在计算过程中要减去这部分分割区域的面积。

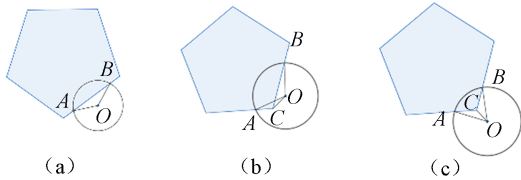


图 6 圆心在目标域外时的毁伤区域

Fig. 6 Damage area when the center of the circle is outside the target domain

2 建立解析计算模型

2.1 模型参数定义

毁伤圆半径为 R_h ，以毁伤圆圆心为坐标原点建立直角坐标系，在毁伤圆内的多边形目标顶点按逆时针方向在该坐标系下的坐标集为

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & \cdots & v_{2n} \end{bmatrix}$$

多边形目标与毁伤圆的交点按逆时针方向的坐标集为

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & \cdots & d_{2n} \end{bmatrix} \quad (n \text{ 为偶数})$$

扇形域的圆心角为 $[\alpha_1 \cdots \alpha_i]$, $i = n/2$ 。将顶点和交点逆时针排序，得所有点的坐标集为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & \cdots & x_{2n} \end{bmatrix}$$

用于求总面积的顶点和交点坐标集为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & \cdots & m_{2n} \end{bmatrix}$$

用于求非毁伤面积的首尾点和顶点坐标集为

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & \cdots & b_{2n} \end{bmatrix}$$

2.2 分割域面积

1) 扇形分割域面积

旋转前后两向量的夹角 β_i 为

$$\beta_i = \arccos \frac{(d_{(2i-1)1}, d_{(2i-1)2}) \cdot (d_{(2i)1}, d_{(2i)2})}{\|(d_{(2i-1)1}, d_{(2i-1)2})\| \|(d_{(2i)1}, d_{(2i)2})\|}$$

由于两向量的夹角范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$ ，而逆时针旋转的圆心角范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$ ，因为正弦

值在 $[0^\circ, 180^\circ]$ 为正， $[0^\circ, 360^\circ]$ 为负，从而判断圆心角 α_i 的大小为

$$\alpha_i = \begin{cases} 360^\circ - \beta_i, & k_i < 0 \\ \beta_i, & k_i \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $k_i = d_{(2i-1)1} d_{(2i)2} - d_{(2i-1)2} d_{(2i)1}$

将式 (1) 代入扇形面积公式，可求出扇形面积 S_{shan_i} 为

$$S_{\text{shan}_i} = \frac{\alpha_i}{360} \pi R_h^2 \quad (2)$$

2) 三角形分割域面积

假设 (x_{1j}, x_{2j}) 、 $(x_{1(j+t)}, x_{2(j+t)})$ 为前后 2 个合法的三角形分割域顶点（顶点和交点、顶点和顶点、前后交点为进出多边形关系），则三角形分割域面积 S_{san_j} 为

$$S_{\text{san}_j} = \frac{1}{2} |x_{1j} x_{2(j+t)} - x_{2j} x_{1(j+t)}| \quad (3)$$

2.3 顶点的分类处理办法

1) 判断顶点是否在扇形分割域时

假设 (x_{1j}, x_{2j}) 、 $(x_{1(j+t)}, x_{2(j+t)})$ 为前后 2 个合法的顶点（前后交点为进出多边形关系）。将介于这 2 个合法顶点之间的所有顶点 $(x_{1(j+1)}, x_{2(j+1)})$, $\cdots$, $(x_{1(j+t-1)}, x_{2(j+t-1)})$ 按角度逆时针的顺序并入到坐标集 B 中，将前后按顺序合法的 2 个顶点并入到坐标集 M 中。

2) 判断顶点是否在三角形分割域时

假设 (x_{1j}, x_{2j}) 、 $(x_{1(j+t)}, x_{2(j+t)})$ 为坐标集 X 内的 2 个点，可以是交点和顶点，也可以均是顶点。而此时 $(x_{1(j+1)}, x_{2(j+1)})$, $\cdots$, $(x_{1(j+t-1)}, x_{2(j+t-1)})$ 点均为顶点，以顶点 (x_{1k}, x_{2k}) 为例进行判断操作：

$$S_0 = \frac{1}{2} |x_{1j} x_{2(j+t)} - x_{2j} x_{1(j+t)}|$$

$$S_{1k} = \frac{1}{2} |x_{1k} x_{2j} - x_{2k} x_{1j}|$$

$$S_{2k} = \frac{1}{2} |x_{1k} x_{2(j+t)} - x_{2k} x_{1(j+t)}|$$

$$S_{3k} = \frac{1}{2} |x_{1j}(x_{2(j+t)} - x_{2k}) + x_{1(j+t)}(x_{2k} - x_{2j}) + x_{1k}(x_{2j} - x_{2(j+t)})|$$

式中: S_0 为以 (x_{1j}, x_{2j}) 、 $(x_{1(j+t)}, x_{2(j+t)})$ 和圆心 3 点所构成三角形的面积; S_{1k} 为以 (x_{1k}, x_{2k}) 为顶点，分别与面积为 S_0 对应的三角形的两顶点所构成三角形的面积。

若 S_0 满足

$$S_0 \geq \sum_{i=1}^3 S_{ik}$$

式中: $k=j+1, j+2, \dots, j+t-1; i=1, 2, 3$ 。则顶点 (x_{1k}, x_{2k}) 并入到坐标集 B 中。若点 $(x_{1(j+1)}, x_{2(j+1)}), \dots, (x_{1(j+t-1)}, x_{2(j+t-1)})$ 满足上式, 则 $(x_{1j}, x_{2j})、(x_{1(j+t)}, x_{2(j+t)})$ 并入到坐标集 M 中。

2.4 毁伤面积计算

由坐标集 M 中的点, 根据式 (2) 和式 (3) 得总面积 $S_{\text{总}}$ 为

$$S_{\text{总}} = \sum_{i=1}^{n-1} S_{\text{shan}_i} + \sum_{j=1} S_{\text{san}_j} \quad (4)$$

通过上文分析可知, 非毁伤面积区域均是三角形区域, 由坐标集 B 中的点, 根据式 (3) 得非毁伤面积为

$$S_{\text{非}} = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{2} |b_{1j} b_{2(j+1)} - b_{2j} b_{1(j+1)}| \quad (5)$$

将式 (5) 与式 (6) 相减, 得毁伤面积 $S_{\text{毁}}$ 为

$$S_{\text{毁}} = S_{\text{总}} - S_{\text{非}} = \sum_{i=1}^{n-1} S_{\text{shan}_i} + \sum_{j=1} S_{\text{san}_j} - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{2} |b_{1j} b_{2(j+1)} - b_{2j} b_{1(j+1)}|$$

3 模型求解与算例

3.1 模型求解步骤与算法流程

采用解析法计算凸多边形目标毁伤面积的算法流程如图 7 所示。

根据建立的解析计算模型, 求解步骤如下。

Step1 判断多边形坐标在毁伤圆内的点, 生成点集 D_1 , 计算多边形与毁伤圆的交点, 生成交点集 D_2 ;

Step2 合并 D_1 和 D_2 , 生成总的点集 D_s , 逆时针排列点集 D_s , 同时生成空的用于计算非毁伤区域的点集 D_3 ;

Step3 逆时针排列交点集并判断每个交点是进入多边形区域的交点还是出多边形区域的交点, 分别生成进入的交点集 D_3 和出的交点集 D_4 ;

Step4 重新排列点集 D_s 后, 按顺序输入点;

Step5 若输入点是交点且属于集 D_3 , 找到点集 D_s 内临近出的交点, 将两交点之间的点添加到点集 D_5 , 计算两交点之间扇形区域面积;

Step6 若输入点是交点但不属于集 D_3 或不是交点, 循环输入 D_s 内 2 个点, 判断下一个点是否在下下一个点构成的三角形内。若是, 继续向下循环; 若不是, 计算下一个点构成的三角形面积,

并且下一个点与原输入点之间的点加入到点集 D_5 ;

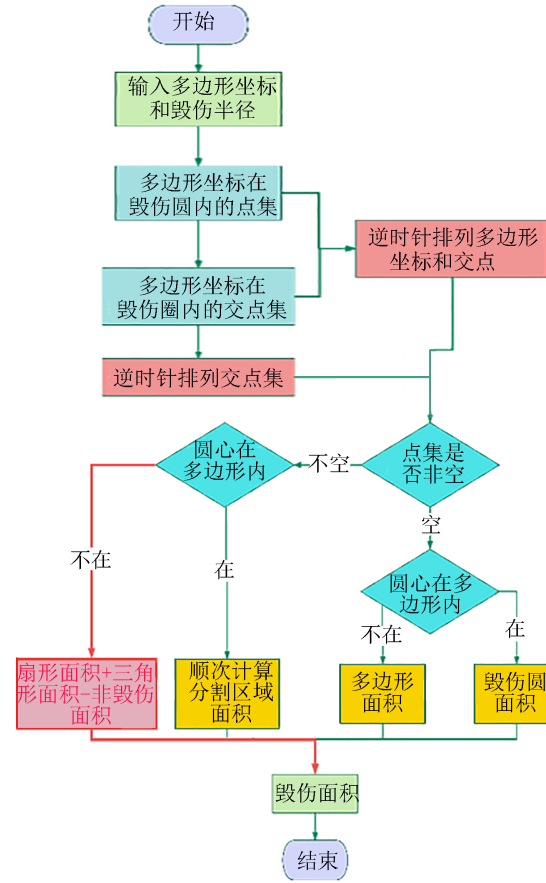


图 7 毁伤面积计算流程

Fig. 7 Calculation process for damage area

Step7 重复 Step4、Step5、Step6, 生成最后的点集 D_5 ;

Step8 计算非毁伤区域面积, 计算毁伤面积。若圆心不在多边形内时, 毁伤面积即为图 7 中的红字红线区域。

3.2 算例

3.2.1 毁伤面积计算

根据以上分析的各种情况, 设计如下算例。已知弹药落点中心坐标为 $(0, 0)$, 毁伤半径 $r=10$ 。根据毁伤圆圆心是否在目标多边形内, 分为 2 种情况讨论毁伤面积计算问题。

1) 毁伤圆圆心位于多边形内

如图 8 所示, 多边形的顶点坐标分别为 $[-4, 6]$ 、 $[6, 10]$ 、 $[8, 0]$ 、 $[6, -10]$ 、 $[-2, -12]$ 、 $[-8, -2]$ 、 $[-8, 2]$, 由于圆心在多边形内, 故而毁伤面积刚好为各分割域面积之和。图 8 中, 红字为扇形分割域面积, 黑字为三角形分割域面积。GeoGebra 软件在保留 3 位小数时, 计算得该毁伤面积约为 229.435。

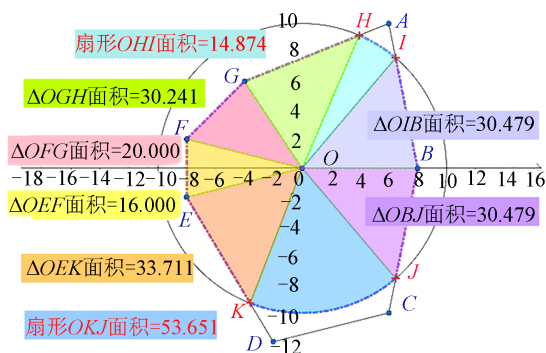


图 8 毁伤圆圆心位于多边形内的情况

Fig. 8 Damage area when the center is within the polygon

2) 毁伤圆圆心不在多边形内

如图 9 所示, 多边形的顶点坐标分别为 [2, 8]、[10, 10]、[12, 8]、[8, 2]、[6, 0]、[2, 2]、[-2, 6], 由于圆心不在多边形内, 此时毁伤面积等于各分割域面积之和减去重复域面积, 即是前文中定义的非毁伤面积。图 9 中, 红字为非毁伤面积, 黑字为分割域面积。GeoGebra 软件在保留 3 位小数时, 计算得该毁伤面积约为 56.244。

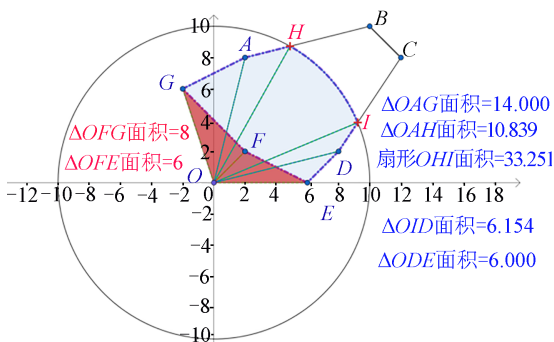


图 9 毁伤圆圆心不在多边形内的情况

Fig. 9 Damage area when the center is outside the polygon

3.2.2 方法计算结果对比

1) 计算精度

本文解析计算方法是基于集合与递归运算思想和切割思想, 通过把各点集判断分类、各区域切割分类后计算不规则毁伤区域面积; 向量网格法^[10]是基于图像处理中像素仿真的思想, 将像素点抽象为向量, 将目标划分为网格进行面积计算, 这里将其划分为 10^6 个网格; 三角形递归法的思想是基于斯特瓦尔特 (Stewart) 定理, 将凸多边形首先化为多个三角形后计算不同情况下的三角形与多边形相交的相交域面积, 求和后得出目标的毁伤面积。这 3 种方法的计算结果如表 1 所示。

表 1 解析法与网格法结果对比

Tab. 1 Comparison between results of the analytical method and the grid method

方法	毁伤面积	
	算例(1)	算例(2)
集合分割 解析法(本文)	229.434 8	56.243 6
向量网格法 ^[10]	227.335 2	55.236 8
GeoGebra (三角形递归法)	229.435 0	56.244 0

通过表 1 可以看出: 集合分割解析法的计算结果精度更高, 由于解析法本身计算的准确性, 所以几乎没有方法误差; 而网格法则由于网格边界处理不准确, 在计算面积时会产生或大或小的误差, 误差的大小与网格的定义方式有关。

2) 运行时间

本文算法与三角形递归计算法的运行时间对比如图 10 所示。

通过图 10 的比较可以看出: 在多边形边数小于 20 时, 2 种解析方法的计算时间几乎一样; 而当大于 20 时, 本文算法的计算时间低于三角形递归计算方法。

在实际运用时, 3 种方法各有优缺点: 集合分割解析法无法计算目标价值非均匀的情况, 但计算耗时短、精度高; 向量解析法的计算速度随着网格数量的增多和定义的复杂性而增大, 但可以处理目标价值非均匀的情况; 而三角形递归计算方法思路简单, 但同样条件下的计算速度较慢。

4 结论

本文从几何关系上总结推导了圆与多边形相交面积的计算方法。利用集合分割与递归思想, 将复杂不规则的相交区域分割成规则的三角形和扇形, 将不规则毁伤区域分为总区域与非毁伤区域, 两者作差求出毁伤面积。通过算例验证了基于解析计算比向量网格法提高了精度。除了毁伤面积的计算之外, 本方法还可以应用到各社会领域中, 例如求某块建筑平面面积、水面面积等。

目标毁伤指标的计算一般不是针对某一次打击的毁伤面积, 而是通过计算毁伤面积达到目标面积一定比例的概率来确定打击的可靠程度。所以, 本文算法还可进一步研究, 利用蒙特卡洛方

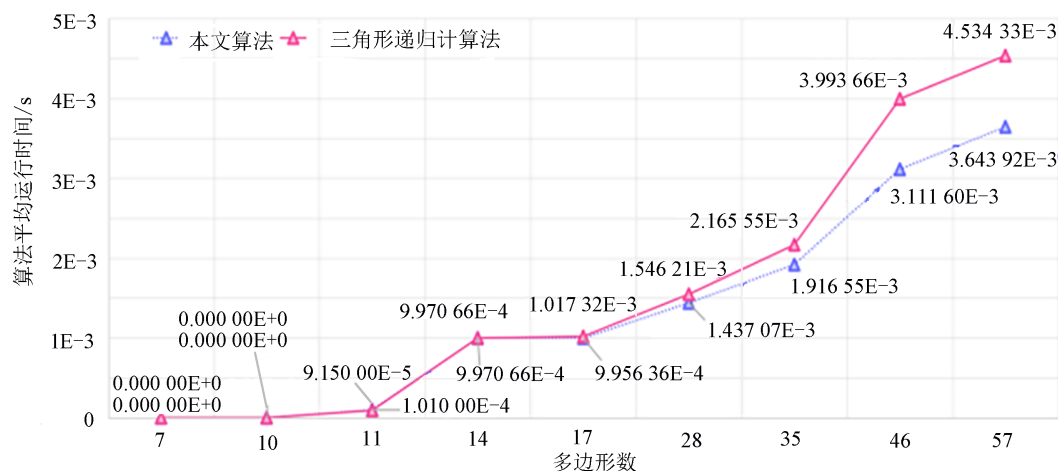


图 10 两种解析计算算法的运行时间对比

Fig. 10 Comparison between running time of two analytic calculation algorithms

法模拟弹药落点^[8], 计算打击均匀多边形目标的平均毁伤面积占比与模拟值之比, 从而量化可靠程度。

本文针对的是凸多边形目标, 实际中会有凹多边形目标出现, 如何将本文的研究思想应用到凹多边形目标中, 是进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 淡鹏, 石峰, 王丹, 等. 再入覆盖区域面积计算的一种球面矢量方法[J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(1): 5-8.
DAN P, SHI F, WANG D, et al. A spherical vector method for landing footprint area[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2022, 42(1): 5-8.
- [2] 陈智江, 张红文, 郝琳. 导弹打击复杂形状面目标毁伤面积解析算法[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(10): 58-61.
CHEN Z J, ZHANG H W, HAO L. Holomorphic algorithm of effective damage area on missile attacking irregular area targets[J]. Fire Control and Command Control, 2022, 42(1): 5-8.
- [3] 郝辉, 李雪瑞, 舒健生, 等. 导弹打击三角形目标毁伤面积的一种解析计算方法[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(6): 143-145, 149.
HAI H, LI X R, SHU J S, et al. An analytical calculation method of damage area on missile attacking triangle targets[J]. Fire Control and Command Control, 2013, 38(6): 143-145, 149.
- [4] 温锦辉, 李坤, 黄江兰, 等. 两凸多边形交集面积的计算机算法[J]. 数学建模及其应用, 2021, 10(2): 44-48.
WEN J H, LI K, HUANG J L, et al. Comput-

er algorithm for intersection area of two convex polygons[J]. Mathematical Modeling and Its Applications, 2021, 10(2): 44-48.

- [5] 温锦辉, 梁尚敏. 基于集合与递归运算的两凹多边形交集面积计算方法[J]. 数学建模及其应用, 2022, 11(1): 16-22.
WEN J H, LUAN S M. Calculation method of intersection area of two concave polygons based on set and recursive operation[J]. Mathematical Modeling and Its Applications, 2022, 11(1): 16-22.
- [6] 赵启, 曾薇, 杨义军. 区域划分在自相交多边形分解算法中的应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2023, 35(12): 1910-1919.
ZHAO Q, ZENG W, YANG Y J. Application of region division in self intersecting polygon decomposition algorithm[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2023, 35(12): 1910-1919.
- [7] 李亚雄, 刘新学. 任意形状非均匀面目标毁伤效果计算方法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(S1): 141-142, 152.
LI Y X, LIU X X. Research on damage effect calculate of random figure face target[J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(S1): 141-142, 152.
- [8] 鄂翔南, 刘泽平, 张子晔. 基于差分进化算法的面目标瞄准点寻优[J]. 计算机与现代化, 2019(12): 27-30.
E X N, LIU Z P, ZHANG Z Y. Optimization of area target aiming point based on differential evolution algorithm[J]. Computer and Modernization, 2019(12): 27-30.
- [9] 鄂翔南. 单目标导弹毁伤模型应用研究与实现[D].

- 北京：中国电子科技集团公司电子科学研究院，2020：23-28.
- E X N. Application research and implementation of single target missile damage model[D]. Beijing: China Academy of Electronics and Information Technology, 2020: 23-28.
- [10] 杨奇松, 王然辉, 王顺宏, 等. 基于向量网格法评估面目标毁伤效果[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(6): 175-178, 182.
- YANG Q S, WANG R H, WANG S H, et al. Evaluating damage efficiency based on vector-grid [J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(6): 175-178, 182.
- [11] 冯海川, 叶志红, 谢文. 图层网格法对混合目标群的毁伤评估[J]. 火炮发射与控制学报, 2023, 44(4): 89-93, 98.
- FENG H C, YE Z H, XIE W. Damage assessment of mixed targets based on the layer-grid method[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2023, 44(4): 89-93, 98.