

文章编号: 1001-2486 (2001) -0028-05

基于有限单元的导弹攻击目标的毁伤模型*

王宏伟, 贺汉根, 黄柯棣

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙, 410073)

摘要: 首先提出目标的毁伤准则、目标的结构、毁伤树, 采用有限元法对目标进行有限划分, 建立破片式战斗部导弹对目标的毁伤模型。以导弹发射车为例, 进行仿真研究, 并给出仿真结果。从仿真结果来看, 采用该仿真方法能够描述导弹攻击地面目标的毁伤过程。

关键词: 有限元; 目标; 毁伤模型; 系统仿真

中图分类号: O383 **文献标识码:** A

Damage Model of Air-to-Surface Missile Target Based on Finite Elements

WANG Hong-wei, HE Han-gen, HUANG Ke-di

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Damage rules, target structure and damage trees are proposed first. Finite elements are utilized to partition the shape of target. A vulnerability model of missile with fragmentation warhead damaging the target is built. With the validity of the simulation algorithm, the vulnerability model of the missile-launching vehicle is researched into and its result is given. From the result of the simulation, the damaging course of the missile attaching the targets on the ground can be depicted.

Key words: finite elements; target; damaging model; system simulation

1 目标的易损性分析

1.1 毁伤等级

一个军事目标的价值, 在于其完成所预定的军事任务, 因而必须以其各项功能的正常发挥为前提。毁伤目标的目的在于使目标丧失主要战术功能, 不能完成作战任务。导弹发射车是一种机动打击空中目标、地面目标和水上目标的现代化作战武器。为了提高其防御能力, 很多国家为其安装了装甲。因此导弹发射车可以看作轻型装甲车辆。对于装甲车辆, 可以将毁伤等级划分三个级别^[2]:

(1) “M”级毁伤——坦克无机动力。即坦克没有可操纵和运动的能力, 并且乘员不能在战地修复。

(2) “F”级毁伤——坦克被击倒。即坦克主要武器丧失功能, 并且乘员不能在战地修复。

(3) “K”级毁伤——坦克被摧毁。即坦克失去效能, 无机动力并且破坏到不能修复。

由于导弹发射车系统其外形比较大, 重量大, 所以将导弹发射车看成大型的轻型装甲车。

1.2 部件的毁伤准则

部件的毁伤准则是指构成目标的要害部件在遭受既定的毁伤元素下, 其功能失效或者完全被破坏, 以致不能正常工作。部件毁伤准则是判断部件是否被毁伤或者被毁伤程度的依据。对不同类型的目标要害部件和不同的毁伤元素, 毁伤准则不同。对于破片式战斗部来说, 构成毁伤部件的主要元素为破片。一般来说, 破片对目标部件的作用方式一般包括三种: 侵彻作用, 引燃作用, 引爆作用。

侵彻作用是依靠破片的动能击穿部件, 对不同的部件的击穿概率可根据其等效硬铝板厚度和破片动能来确定。当破片的杀伤参量大于导致部件毁伤的临界值时, 部件的毁伤概率 $f(e)$ 为 $0 < f(e) <$

* 收稿日期: 2000-09-10

基金项目: 国家预研基金资助

作者简介: 王宏伟 (1969-), 男, 博士后。

1, 否则为 0。一般来讲, 单枚破片对部件的击伤概率需要通过大量实验获得。但是在计算方法中, 往往根据部件的受弹面积 S_i , 破片面分布密度 λ_i , 和破片杀伤动能等参数, 根据经验公式得到破片对部件的杀伤概率。由于经验公式从大量实验中获得, 并且经过模型的检验和校核, 因此这样得出的计算杀伤概率是可信的。

引燃概率是在破片贯穿轻型装甲目标内部的燃油箱、输油泵之后, 引燃除润滑油之外的各种油料的概率, 单枚破片在贯穿的前提下引燃油料的条件概率依据贯穿破片比冲量来确定。有时还需要考虑战斗部炸点海拔高度的影响。破片引燃作用是指破片冲击目标内部的弹药舱内的弹药使其引爆。单枚引爆条件概率取决于引爆物的壳体材料性质、厚度以及炮弹装药密度等因素。

冲击波和爆炸也是毁伤目标的一种方式, 碰撞和爆炸所产生的冲击波, 由于缺乏定量的分析, 并且对于导弹发射车这样大的轻型装甲系统, 其毁伤程度不大, 因此这里不予考虑。

1.3 目标的毁伤树

对于不同的导弹发射车辆来说, 其内部机构和仪器设备的布置是不同的。无论是哪一种类型, 作为一个目标系统无论多么复杂, 总可以按照一定方法划分成多个子系统。各个子系统通常又是由许多部件构成。有些部件的毁伤直接影响着整个系统的正常工作, 甚至会导致整个目标毁伤。因此, 在分析目标的毁伤效率时, 主要考虑目标要害部位的毁伤, 而忽略非要害部件的毁伤。目标要害部位的分析可以先对目标各个子系统进行分析, 确定出各个子系统的要害部件, 而后对其分类, 再对不同类型的要害部件进行结构、功能及特性分析。导弹发射系统按功能分为机动系统、发射系统、控制系统和供电系统。在子系统分析和要害部件特征分析的基础上, 构造出如图 1 的毁伤树。

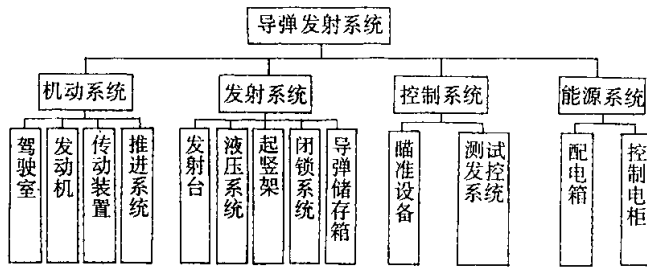


图 1 导弹发射系统毁伤结构图

Fig. 1 The structure diagram of missile damaging system of launching vehicle

2 弹体坐标系和目标坐标系

对于以破片式战斗部导弹攻击目标的形式, 其目标的运动速度与破片的飞行速度相比要小很多, 因此认为目标是静止的, 为此建立两个坐标系, 分别为弹体坐标系、目标坐标系。

目标坐标系 $O-XYZ$ 的定义为: 以目标的中心 O 为坐标原点, Z 轴垂直地面, 向上为正, X 轴为水平方向, 其正方向朝向目标的运动方向, Y 轴由右手螺旋准则确定。

弹体坐标系 $O_T-X_T Y_T Z_T$ 的定义为: 以战斗部中心为坐标原点 O_T , 以弹朝前方向为 Z_T 轴的方向, 以战斗部的竖直对称平面内垂直 Z_T 轴向上的方向为 Y_T 轴的正方向, X_T 轴由右手螺旋准则确定。

坐标系 $O_T X_T, O_T Y_T, O_T Z_T$ 在坐标系 $O-XYZ$ 的方向余弦分别为

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= -\cos\theta_1 & m_1 &= \sin\theta_1 & n_1 &= 0 \\ l_2 &= \sin\theta_2 \sin\theta_1 & m_2 &= \sin\theta_2 \cos\theta_1 & n_2 &= \cos\theta_2 \\ l_3 &= \cos\theta_2 \sin\theta_1 & m_3 &= \cos\theta_2 \cos\theta_1 & n_3 &= -\sin\theta_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据式 (1), 两个坐标系之间的坐标变换关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{OT} \\ y_{OT} \\ z_{OT} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 A 为坐标转换矩阵

$$A = \begin{bmatrix} -\cos\theta_1 & \sin\theta_2\sin\theta_1 & \cos\theta_2\sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \sin\theta_2\cos\theta_1 & \cos\theta_2\cos\theta_1 \\ 0 & \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 目标的有限元划分

建立目标的毁伤树后,还要用一套数据对目标总体及零部件外形特征、物理特征和易损性特征进行全面描述,根据各个部件的形状以及相互位置建立其目标结构实体的三维图形。由于目标模型的外形多种多样,可以根据其外形特征分别将其简化成长方体、椭球体和圆柱体。再将其外形表面划分成有限面元。这里将车看作长方体,每个面都是长方形。采用有限元思想,将车的正面、后面、两个侧面、顶部进行有限元划分,并映射到长方体各面中。

有限元这个概念来自于静力学、动力学的数值计算分析方法,这里采用有限元可以将目标的外形根据结构进行划分,有限元可多可少,根据计算精度而定。有限单元越多,计算精度越高。

4 破片与目标要害部位的交汇

4.1 动态空间破片场的确定

对破片战斗部来说,在弹体坐标系下,动态空间破片场为空间锥形区域,如图2所示。

相对弹体坐标系,空间破片场可以用两个参数描述,即破片平均飞散方向角 $\bar{\varphi}$ 和飞散角 σ 。 $\bar{\varphi}$ 和 σ 满足 $\bar{\varphi} = (\varphi_1 + \varphi_2) / 2$; $\sigma = \varphi_1 - \varphi_2$ 。

破片在空间的面分布密度为

$$\lambda = \frac{n_R}{2\pi R^2} \cdot \frac{\Delta f_\lambda(\varphi)}{\Delta\varphi \sin\varphi} \quad (5)$$

式中 R 为破片飞行距离, n_R 为距离 R 处的有效破片数, $\Delta f_\lambda(\varphi)$ 为动态时在 $\Delta\varphi$ 内的破片分布概率,可以采用文献[3]给出的公式计算。

4.2 目标模型简化和破片与目标要害部位的交汇

根据导弹发射车的毁伤情况,将其要害部位按照位置划分成机动系统、发射系统、控制系统和能源系统。

在弹体坐标系下来讨论目标与要害部位的交汇情况。通过坐标转换确定在弹体坐标系下要害部位的空间描述。图2中给出了面元 i 的中心点 O_i 在弹体坐标系下的坐标为 (x_{Ti}, y_{Ti}, z_{Ti}) 。破片与该面元的交汇条件为

$$\varphi_1 \leq \varphi_i \leq \varphi_2 \quad (6)$$

式中 φ_i 为面元 i 中心点与弹体坐标系原点 O_T 的连线与坐标轴 $O_T Z_T$ 的夹角,其大小有下式确定

$$\varphi_i = \arccos \frac{z_{Ti}}{\sqrt{x_{Ti}^2 + y_{Ti}^2 + z_{Ti}^2}} \quad (7)$$

在忽略破片重力对飞行的影响条件下,破片的飞行轨迹为直线。于是命中面元 i 的破片的轨迹为

$$\bar{L}_i = x_{Ti}\mathbf{i} + y_{Ti}\mathbf{j} + z_{Ti}\mathbf{k} \quad (8)$$

其单位方向矢量为

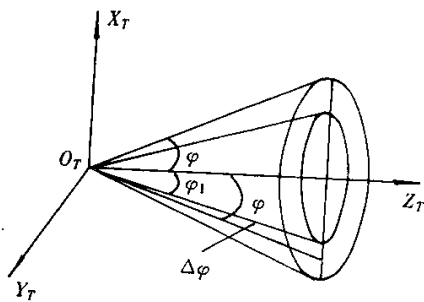


图2 动态空间破片场示意图

Fig.2 The illustration of field of dynamic space

$$\mathbf{n}_{pi} = \frac{x_{Ti}}{\sqrt{x_{Ti}^2 + y_{Ti}^2 + z_{Ti}^2}} \mathbf{i} + \frac{y_{Ti}}{\sqrt{x_{Ti}^2 + y_{Ti}^2 + z_{Ti}^2}} \mathbf{j} + \frac{z_{Ti}}{\sqrt{x_{Ti}^2 + y_{Ti}^2 + z_{Ti}^2}} \mathbf{k} \quad (9)$$

面元 i 的法线方向也可求出为

$$\mathbf{n}_{si} = n_{si1} \mathbf{i} + n_{si2} \mathbf{j} + n_{si3} \mathbf{k} \quad (10)$$

面元 i 在导弹入射方向的投影面积为

$$S_{it} = S_i \cos \theta_i \quad (11)$$

式中 S_i 为面元的几何面积, θ_i 为矢量 \mathbf{n}_{pi} 和 \mathbf{n}_{si} 的交角。

这样, 与面元 i 交汇的破片数 (即击中面元 i 的破片数) 由下式确定

$$n_i = \lambda \cdot S_{it} \quad (12)$$

式中 λ 为该面元处的破片分布密度, 由式 (5) 计算可得。

5 目标毁伤计算模型和模糊模型应用

导弹发射车系统的毁伤计算, 根据不同的毁伤等级来进行。对于像导弹发射车一类的轻型装甲车辆, 采用前面描述的坦克毁伤等级划分方法: M 级, K 级, F 级。不同级别的毁伤概率要根据要害部件的毁伤概率来确定。

经过分析, 破片式战斗部导弹在目标坐标系下一定位置爆炸时, 对目标造成 j 级毁伤的要害部件有 N_j 个, 而这 N_j 个要害部件中第 k 个要害部件的毁伤对目标造成 j 级毁伤的加权因子为 C_k , 则目标 j 级毁伤概率计算模型为

$$P_j = 1 - \prod_{k=1}^{N_j} (1 - C_k P_k) \quad (13)$$

式中 $C_k \in (0, 1]$, P_k 为要害部件 k 的毁伤概率。

导弹在一定位置以一定的姿态爆炸时命中目标要害部件的破片常常不只是一个, 而是有多个。在假定各个破片对相同部件的毁伤效应和毁伤能力都相同的条件下, n_k 个破片命中目标要害部件 k 的毁伤模型为

$$P_k = 1 - e^{-n_k P_{k1}} \quad (14)$$

式中 P_{k1} 为单枚破片对要害部件 k 的毁伤概率。前面述及单枚破片对部件的作用包括三种情况: 贯穿作用、引燃作用、引爆作用。单枚破片的贯穿概率 P_{pi} 、引爆概率 P_{di} 和条件引燃概率 P_{ci} 可根据文献 [2] 计算。当单枚破片对某一要害部件的毁伤效应存在两种或两种以上时, 要根据这些效应发生事件之间关系 (和事件或积事件) 来确定对部件的毁伤概率。

在上述研究中, 我们采用了大量的经验公式。由于经验公式往往随着各种实验条件的变化, 其结果有很大的不同, 有时并不能反映实际系统的真实变化。而且, 系统中存在着大量的不确定性、随机性、非线性等因素, 这样使得经验公式有时是错误的。在研究中发现, 破片对于装甲的击穿, 其侵彻程度和破片的速度构成一个非线性的关系, 我们采用模糊建模方法通过实验确立破片击穿装甲模型。由于篇幅限制不能详细介绍。

6 算例与仿真

现以某破片式导弹攻击某导弹发射系统为例说明。破片式战斗部导弹指标如下:

弹长: 3.0 m, 弹径: 100 mm, 翼长: 445 mm, 发射质量: 53.9 kg, 战斗部: 高爆破片式杀伤战斗部 19.6 kg。

导弹发射系统指标如下:

导弹运输车 (长, 宽, 高): 10 000 mm × 4000 mm × 4000 mm

架体 (长, 宽, 高): 6000 mm × 2650 mm × 2100 mm

利用本文建立的计算模型, 将战斗部爆炸产生的破片场对目标的毁伤概率进行了计算。计算条件

如下：导弹在目标顶部爆炸，炸高 1.1 m，导弹末速度为 950 m/s，方向角 30° ，着靶角 50° 。在具体计算时，将导弹发射车的正面、后面、两个侧面和顶部进行了有限元的划分，其中正面采用 160 个面元，后部采用了 160 个面元，两个侧面和顶部分别采用了 400 个面元。经过计算得出，目标的控制系统、发射系统、机动系统、能源系统的毁伤概率分别为 0.35, 0.65, 0.45, 0.3。F 级和 K 级的毁伤概率分别为 0.67, 0.32。

7 结论

在攻防对抗仿真中，空地导弹对地面目标的攻击以及目标的毁伤估计是一个非常重要的问题。该仿真模块的建立能够提供地面防御系统的毁伤程度。在提出的目标的毁伤准则、目标的结构、毁伤树之后采用有限元法对于目标进行有限划分，建立破片式战斗部导弹攻击目标的毁伤模型。通过仿真很好地建立了毁伤模型。

参考文献：

- [1] 李建明, 徐航. 穿甲弹对主战坦克毁伤的计算分析方法 [J]. 弹道学报, 1998, 10(1): 85-88.
- [2] 赵国志, 高森烈, 魏惠之. 终点弹道学 [M]. 上海: 华东工学院, 1984.
- [3] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应 [M]. 北京理工大学, 1993.

