

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.06.003

基于弹道仿真的杀伤区计算

赵建军, 李万宝, 桑德一, 张帅

(海军航空工程学院 兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001)

摘要: 以预定制导规律飞向设定目标的导弹弹道仿真入手, 定量分析出满足拦截命中约束条件的弹目遭遇点, 并建立杀伤区数据库。分析防空导弹飞行弹道特性与杀伤区指标的相关性, 基于 simulink 模拟典型目标运动, 以满足命中条件的导引段弹道轨迹为主体进行系统建模。并以比例导引率弹道为例进行攻防对抗仿真演练, 得到具体目标的杀伤区指标体系, 对武器效能评估有重要意义。

关键词: 防空导弹; 弹道特性; 杀伤区

中图分类号: N945.13 **文献标识码:** A

Calculating Killing Zone Based on Trajectory Simulation

ZHAO Jian-jun, LI Wan-bao, SANG De-yi, ZHANG Shuai

(Dept. of Weapon Science & Technology, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Starting with the missile trajectory simulate for prearranged guidance rule targets supposed, analyze rationally killing points of missile versus target which satisfy killing factors, and then establish the killing zone database. Analyze the relativity between the trajectory characteristics of anti-aircraft missile and killing zone of the weapon, simulate some representative targets movements, model the missile guide contrail systematically which to hit the target. Taking the proportion guide trajectory as an example to simulate the process, receive a group of killing zone data suitable to a given target, which is important to the weapon effectiveness evaluation.

Keywords: Anti-aircraft missile; Trajectory characteristics; Killing zone

0 引言

对于不同的空袭目标, 防空导弹武器系统对应存在不同的杀伤区指标。在接收雷达送来的目标一次和二次信息后, 指挥控制系统必须及时推算出这些对应于每一具体目标的杀伤区数据并及时调入内存, 以供武器系统实时决策。不论是在单舰防空时, 还是在进行舰舰协同和构筑防空体系时, 都需要定量分析各型武器的杀伤区指标, 以提高单舰或编队武器系统立体防空的整体作战效能; 同时, 在对具体武器进行指控仿真和效能评估时也需要用到杀伤区数据。文献[1-6]采用表格函数插值计算和解析法计算并建立杀伤区指标, 文献[7]给出了一种基于BP神经网络计算杀伤区的方法。故尝试通过对以预定制导规律飞向设定目标的导弹弹道的仿真, 定量分析出满足拦截命中约束条件的弹目遭遇点, 并建立杀伤区数据库。

1 杀伤区与弹道特性的相关性分析

杀伤区是基于地面参量坐标系的空间点集合, 在这个区域中, 导弹能以给定概率杀伤以给定速度等速平直飞行的空中目标^[8]; 即导弹以既定的导引律经历一定的弹道轨迹飞向来袭目标, 并以给定的

概率拦截命中它, 那么, 该导引段弹道所在的空域就是杀伤区。相应地, 弹道特性与导弹的飞行弹道和机动能力, 导引方法和制导规律, 目标特性及其对抗手段等因素密切相关, 而这些因素正是影响杀伤空域外形和尺寸的主要因素^[9]。因此, 模拟各种来袭空中目标, 对构成命中条件的导弹弹道进行建模仿真并记录命中点, 这个过程就是对限定杀伤区指标的主要因素进行定量分析的过程。这样做能规划建立起各种类型目标的杀伤区理论数据库。

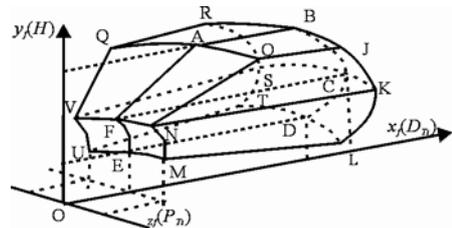


图1 防空导弹武器系统杀伤区立体示意图

图1中坐标系 $ox_f y_f z_f$ 为地面参量坐标系, JRTL 为远界, OMQ 为近界。对于一个具体的目标来说, 垂直杀伤区只有一个为 ABCDEF, 而水平杀伤区与目标飞行高度平面一致, 可以有多个, 如 VFNKCS。不论是垂直杀伤区还是水平杀伤区, 最重要的指标就是杀伤区远界点和近界点数据, 在计

收稿日期: 2010-01-06; 修回日期: 2010-03-29

作者简介: 赵建军 (1965-), 男, 江苏人, 教授, 博士, 海军航空工程学院火力与指挥控制教研室, 从事火力与指挥控制研究。

算杀伤区纵深、判断目标可拦截次数、安排防空武器拦截接力、部署编队目标分配等指控决策实施过程中, 迫切需要的也是这些数据。

结合图2防空导弹拦截目标的攻防对抗直观示意图, 分析导弹的弹道轨迹在怎样的约束条件下才能以给定概率命中目标。这些都是对杀伤弹道进行系统建模的基础。

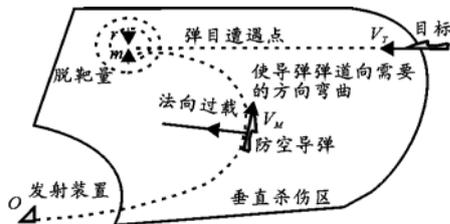


图2 防空导弹拦截目标示意图

一方面, 为实施有效拦截确保最大作战效能, 防空导弹首次拦截命中点应设在杀伤区远界上, 应以预定制导律飞行到该远界点上实施杀伤。这就要求: 导弹弹道必须处于警戒和制导雷达的探测跟踪距离范围内^[10], 特别是对于指令制导导弹, 其杀伤远界必须处于雷达精跟距离之内; 导弹可用过载须大于制导方法需用过载的某个值, 惟其如此, 才能保证导弹按预定制导律飞行, 特别是对于采用被动段在高空远界实施拦截的导弹^[11]; 导弹射程和弹目遭遇速度比对弹道的约束等。另一方面, 若目标已突入防空区域腹地, 那么防空系统能够组织的最后一次拦截命中点就位于杀伤区近界上。这要求: 导弹的引入结束距离^[11]要尽可能地小, 以缩小近界值, 满足导弹弹道多次遭遇目标的杀伤区纵深要求; 导弹转弯飞向目标的最大需用过载必须小于可用过载某个值, 超出或等于可用过载就无法击中目标; 制导雷达跟踪目标的高低角或方位角的限制等。

另外, 在弹目遭遇点还需满足脱靶量、导弹有效杀伤半径、引战配合等指标要求。目标类型对杀伤区指标影响很大, 杀伤区的形状尺寸有着目标特性的明显印记。如, 同一防空武器系统拦截反舰导弹的杀伤区尺寸要比轰炸机的小许多。在目标特性中, 目标的类型、雷达反射截面积 RCS、高度和速度等属性对杀伤区影响最大。建模过程中需收集武器性能指标数据, 细化和完善各级子模块, 这样构建出的全系统才能运行得到合理可信的仿真结论。

2 数学模型

2.1 假设条件

为便于建模分析并不失其科学性, 在对目标运

动模拟、导弹的控制与运动 2 个方面进行了一些合理的假设。一方面, 仿真中把目标看作一个运动的质点, 诸元设定都是基于地面参量坐标系的, 设定目标按一定的规律运动, 按固定步长向前推进。另一方面, 也把导弹看作一个可操纵的质点, 并且对导弹的运动有如下假设:

导弹控制系统的理想工作状态是既无误差, 也无时间延迟; 导弹导引头的理想工作状态是不会丢失目标; 不考虑飞行中的随机干扰对导弹运动的影响; 导弹的运动只包括质心的移动, 而无绕质心的转动; 导弹起控导引速度指向与目标视线角重合, 即不考虑射入散布^[9]。在整个有控飞行期间, 导弹时刻处于平衡状态, 即导弹运动参数的变化是瞬时完成的。控制外力的作用结果瞬时实现, 不考虑控制系统工作过程的延时。

2.2 模型结构

基于 simulink 构建仿真程序, 仿真系统实现的逻辑简图如图 3。为便于分析, 仅开列了主要的子系统模块和信号流向。用户通过雷达跟踪信息模块设定不同目标的运动轨迹(在大地坐标系), 经坐标转换并满足跟踪条件后送入制导系统; 导引律结合导弹位置、速度及其指向等初始信息解算出弹目视线角及其角速率等导引头指向信息, 并送入导弹质心运动模块进行导弹三自由度运动方程推算; 推进一个步长, 系统根据相应模块导出的弹目距离、过载余量等数据进行命中判断, 多次推演即可得到具体目标的垂直或水平杀伤区指标。

其中, 制导系统是整个仿真系统的中心, 决定着弹道的形状, 负责接收目标运动实时位置与速度信息、导弹的初始信息, 实现导弹速度方向角、目标视线角、相对距离等导引诸元解算, 这些诸元是命中计算和判断的必要元素。以常系数比例导引律为例进行了仿真, 图 3 中的 X_{me} 、 V_{me} 、 X_{te} 、 V_{te} 均为地面参量坐标系中导弹与目标的位置和速度向量。则相应地得到下列诸元:

弹目相对距离向量为:

$$D_m = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_t - X_m \\ Y_t - Y_m \\ Z_t - Z_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

相对速度向量为:

$$V_{tm} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{tx} - V_{mx} \\ V_{ty} - V_{my} \\ V_{tz} - V_{mz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

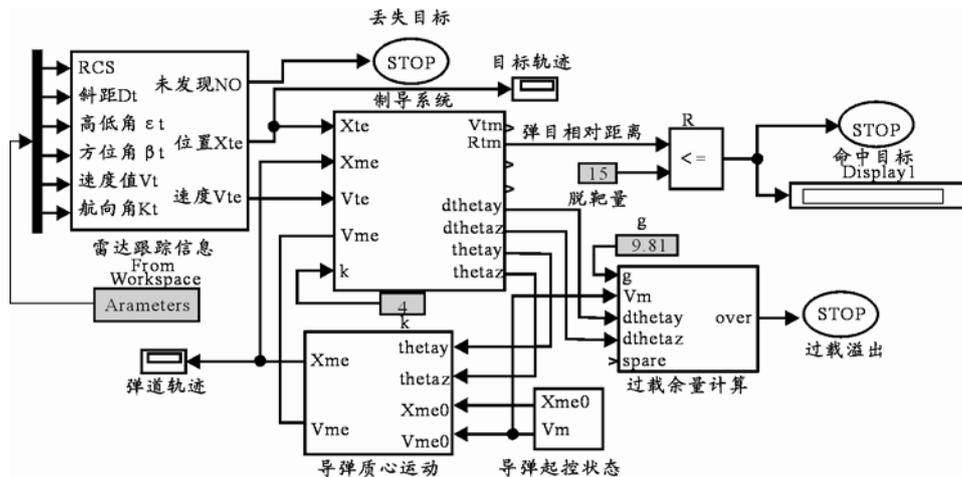


图 3 基于 simulink 的杀伤区计算示意

考虑地面参量坐标系中垂直杀伤区和水平杀伤区计算的相对独立性，把导弹和目标的轨迹分解为垂直方向和水平方向（即为图 1 y_f 轴和 z_f 轴方向），基于导引律方程分别进行仿真判断，则有：

高度方向上目标视线角为：

$$q_y = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \tag{3}$$

水平方向上目标视线角为：

$$q_z = \arctan\left(\frac{-Z}{X}\right) \tag{4}$$

高低方向上目标视线角速度为：

$$\dot{q}_y = \frac{XV_y - YV_x}{X^2 + Y^2} \tag{5}$$

水平方向上目标视线角速度为：

$$\dot{q}_z = \frac{ZV_x - XV_z}{X^2 + Z^2} \tag{6}$$

设定导引系数 k ，分别从这 2 个方向运用比例导引律方程解算导弹速度指向角速率为：

$$\begin{cases} \dot{\theta}_y = k \cdot \dot{q}_y \\ \dot{\theta}_z = k \cdot \dot{q}_z \end{cases} \tag{7}$$

引用积分环节推出导弹下一步长的速度指向，由导弹质心运动模块求出该步长时的坐标位置。

3 仿真结果

查阅并引用某型防空导弹武器系统的各项指标，运行基于弹道仿真的杀伤区计算 simulink 模型，得到一些杀伤区理论指标，下面给出一部分仿真图形并作出相应分析（注：各坐标轴指标均经过相应缩小处理，非实际装备数据）。

基于上节垂直和水平杀伤区内导弹和目标运动轨迹的分解办法，得到这两个方向的投影图如图 4，

目标从点 (160,50,30) 处，以高度 50 和航路捷径 30 向发射阵地方向俯冲，导弹从起控点 (0,0,0) 进入导引段拦截目标。两者在作战空域的某处遭遇，经仿真判断，满足杀伤命中条件，则该点即属于杀伤区。这样就完成了一次攻防对抗的推演仿真过程，得到了杀伤区的一个指标点。

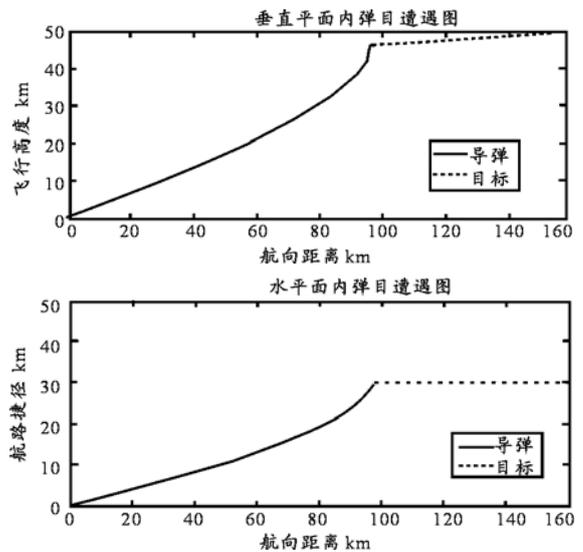


图 4 垂直面和水平面内弹目遭遇轨迹投影图

通过多次改变目标的水平距离（目标位置在 ox_f 轴的投影点），其他属性保持不变，多次对抗演练，可得到导弹首次命中目标位置点（即杀伤区远界点）和最后一次拦截目标的位置点（即杀伤区近界），2 个位置点间的距离就是导弹武器对该型目标在给定高度和航路捷径下的杀伤区纵深指标。同时，查阅导弹武器的最小发射间隔，不考虑其他因素的时间损耗，以此间隔单发导弹起控多次拦截目标，可得到导弹拦截该目标的最多可能拦截次数。图 5 仿真结果验证了上述结论的合理性。

（下转第 15 页）

机数, 而

$$\begin{cases} x = t_1 \times \sigma_x + \mu_x \\ z = t_2 \times \sigma_z + \mu_z \end{cases} \quad (28)$$

为 2 个分别服从 $N(\mu_x, \sigma_x)$, $N(\mu_z, \sigma_z)$ 分布的随机数。

上述模拟所得的 (x, z) 即为不考虑系统误差对目标射击时, 投影平面上—发射弹弹着点位置坐标。

3 结束语

实际应用证明: 该方法实现方便, 结果精确, 其计算模块运行时间在 10~20 ms (可以将此运行时间计入到火炮发射延迟时间的仿真中, 火炮发射延迟时间按电点火式发射装置算约为 65 ms), 而且可以方便地求出弹道上任一点的弹道诸元。求出弹着点后, 还可以依据射弹入射方向、命中点以及目标的空间姿态, 进一步求解出目标的被命中部件。

(上接第 10 页)

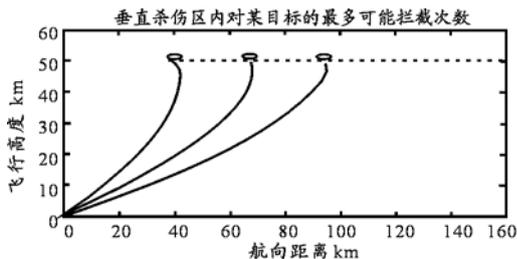


图 5 垂直杀伤区内对某目标的最多拦截次数仿真

更改目标的飞行高度, 其他目标属性保持不变, 多次仿真即可得到垂直杀伤区内对该目标的拦截远界。受导弹低空反导特性、探测或制导雷达的低空探测性能等因素制约, 防空武器杀伤区远界随着目标飞行高度的降低而有较大缩小。如图 6。

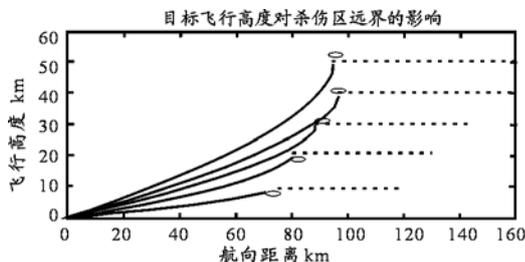


图 6 垂直杀伤区内对某目标的拦截远界仿真

4 结束语

基于弹道仿真进行杀伤区计算的建模过程是对防空武器系统尤其是导弹发控等作战原理、战技指标及各项风洞测试样本进行梳理研究的过程, 采用的数据越准确全面, 仿真子模块设置越细致, 得到

同时可以根据被命中部件的性质, 计算或仿真目标毁伤情况。因此, 该方法可以满足实时仿真的要求, 而且可以推广到坦克等类似系统上使用。

参考文献:

- [1] 郭锡福, 赵子华. 火控弹道模型理论及应用[M]. 北京: 军事科学出版社, 1999: 30-31.
- [2] 李向东. 目标毁伤理论及工程计算[M]. 南京: 南京理工大学, 1997: 110-112.
- [3] 中国人民解放军总参谋部兵种部. 作战模拟基础[M]. 北京: 解放军出版社, 1994: 87-90.
- [4] 王靖君, 赫信鹏. 火炮概论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 65-67.
- [5] 尹健, 王忠义等. 一种现代主战坦克武器系统综合评价的灰色方法[J]. 兵工自动化, 2009, 28(8): 15-17.
- [6] 朱琳, 李备, 崔国恒. 基于应急条件下潜艇自导鱼雷连续射击仿真[J]. 四川兵工学报, 2009(1): 26-30.

的理论杀伤区指标也越具有现实意义。但由于该模型结构在一定的假设条件下才能成立, 同时因为个别模块得不到具体数据而采取了简化或插值等处理, 最后的仿真结论还存在一定的误差。

参考文献:

- [1] 陈久生, 李向林. 垂直发射低空超低空防空导弹杀伤区近界研究[J]. 现代防御技术, 2004, 32(5): 21-24.
- [2] 汤善同. 地空导弹弹道设计和杀伤区特性分析. 航天部科技报告, HT-860107J[R]. 1986.
- [3] Shun-Wen Cheng. Very Long Range Anti-Air Missile Systems Design. 2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings[C].
- [4] 罗文义. 地空导弹杀伤区低界决定因素[J]. 防空武器, 1985(3): 16-18.
- [5] 周明安. 地空导弹武器杀伤区分析[J]. 凯山科技, 1990(3): 25-28.
- [6] 李云, 柳世考, 殷业飞. 某小型地空导弹杀伤区仿真研究与分析[J]. 弹箭与制导学报, 2006(2): 881-884.
- [7] 曹泽阳, 李为民. 防空导弹杀伤区的 BP 神经网络解算模型研究[J]. 弹箭与制导学报, 2003(1): 24-26.
- [8] 徐品高. 防空导弹武器系统的杀伤区、作战区、拦截区和发射区[J]. 现代防御技术, 1994(1): 11-17.
- [9] 滕克难, 王国田. 舰空导弹系统原理与分析[M]. 北京: 解放军出版社, 2003.
- [10] 徐品高. 地空导弹武器杀伤区远界确定方法[J]. 战术导弹技术, 1990(3): 25-30.
- [11] 徐品高. 关于地空导弹的杀伤区近界问题[J]. 现代防御技术, 1992(1): 1-10.
- [12] 高桂清, 向进, 董承博. 基于遗传算法的常规弹道导弹火力分配[J]. 四川兵工学报, 2009(11): 9-11.