

# 基于杀伤区的超声速巡航导弹对抗 PAC-3 拦截弹突防效能分析\*

范玉珠<sup>1,2</sup>, 张为华<sup>2</sup>

(1 63620 部队, 兰州 732750; 2 国防科学技术大学航天与材料工程学院, 长沙 410073)

**摘要:**建立超声速巡航导弹设计参数与突防能力间定量关系成为突防能力分析的难点和关键环节。传统导弹突防力量化分析采用概率参量, 这一方法已难以满足超声速巡航导弹总体方案论证中的突防能力分析需求。文中从突防对抗的机理出发, 提出采用地空导弹杀伤区概念定量描述超声速巡航导弹对抗防御系统 PAC-3 拦截弹的突防效能。在此基础上, 结合地空导弹杀伤区计算原理, 建立了超声速巡航导弹对抗 PAC-3 拦截弹的突防效能指标量化计算模型和流程。仿真算例表明, 飞行高度和飞行速度等性能参数是影响杀伤区大小的主要因素, 同时验证了基于杀伤区分析方法能够较好的满足超声速巡航导弹总体方案论证需求。

**关键词:**超声速巡航导弹; 拦截弹; 杀伤区; 突防效能

**中图分类号:** TJ761.6      **文献标志码:** A

## The Analysis on Penetration Effectiveness of Supersonic Cruise Missile Countering Interceptor Based on Killing Zone

FAN Yuzhu<sup>1,2</sup>, ZHANG Weihua<sup>2</sup>

(1 No. 63620 Unit, Lanzhou 732750, China;

2 College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Identify the quantificational relationship between supersonic cruise missile performance parameters and penetration effectiveness is a key part in analyzing penetration effectiveness. Traditional statistic penetration effectiveness analyzing measures have difficulty in satisfying the requirements of penetration effectiveness analysis in integrated scheme demonstration. Based on penetration mechanism, it was proposed to describe the SCM penetration by kill-zone concepts of air missile. The mathematical model and programmer for penetration effectiveness indexes of supersonic cruise missile countering interceptor were built based on the computational model of air missile system kill ranges mathematical principle. Based on the simulation results, it is concluded that the method for penetration analysis proposed in this paper is capable of fully meeting the requirements for SCM scheme demonstration.

**Keywords:** supersonic cruise missiles; interceptor; killing zone; penetration

### 0 引言

为充分挖掘总体设计方案设计潜力, 以期从设计角度提高导弹突防效能, 在超声速巡航导弹总体方案论证中, 需衡量和分析导弹某种总体设计方案下的突防效能。使用概率指标作为描述导弹突防效能指标的通常做法已得到广泛应用<sup>[1-7]</sup>。例如导弹对抗拦截导弹突防效能分析时, 采用了拦截概率指标建立仿真模型, 该方法将导弹突防过程看作是一个统计概率事件, 从突防战术角度对突防效能指标进行量化, 存在的问题是突防效能指标不能完全反映出攻防双方武器的突防对抗机理和本质。其次, 从统计的角度进

行导弹突防效能分析, 不能很好实现导弹总体设计过程与突防效能分析的有机结合。

杀伤区是表征拦截弹作战效能最基本的综合性指标。超声速巡航导弹与 PAC-3 拦截弹间攻防对抗能力是相对的, 基于此, 文中从突防对抗机理出发, 提出以杀伤区相关量概念描述超声速巡航导弹对抗 PAC-3 拦截弹的突防效能指标, 建立了超声速巡航导弹对抗 PAC-3 拦截弹的突防效能指标计算流程和模型, 并通过仿真算例证明其有效性。为进一步建立超声速巡航导弹设计参数与其突防效能间的定量关系奠定基础。

导弹突防效能分析的核心任务是建立突防效能

\* 收稿日期: 2011-05-30

作者简介: 范玉珠(1972-), 女, 山东牟平人, 博士研究生, 研究方向: 飞行器总体与设计。

指标及量化突防效能指标。建模与仿真是当前导弹突防效能分析最有效的方法。以下首先给出杀伤区的一般数学描述,基于 PAC-3 拦截弹过载计算原理,建立超声速巡航导弹对抗 PAC-3 拦截弹突防效能的指标计算流程和模型。

### 1 杀伤区一般的数学描述

导弹杀伤区是指目标等速  $v_t$  不机动飞行,以不小于某一概率杀伤空中目标的区域,是衡量导弹对目标拦截能力的一个重要方面,一般在地面参量坐标系中表示<sup>[8]</sup>,杀伤区空间大小形状取决于远界、近界、高界、低界、最大极限高低角和最大航向角边界包络。航路捷径  $P$  为零的垂直平面杀伤区,如图 1 所示,曲线  $BC$  为远界,曲线  $AB$  为高界,曲线  $AED$  段为近界,曲线  $CD$  为低界。 $v_t$  为目标飞行速度。迎面拦截某高度下水平平面杀伤区如图 2 所示。

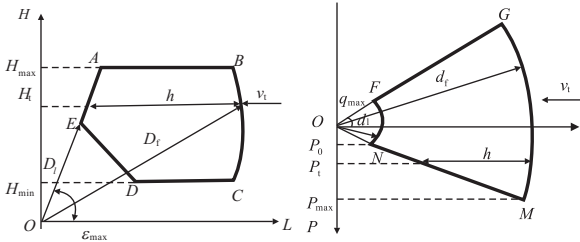


图 1 垂直平面杀伤区 图 2 水平平面杀伤区

由杀伤区描述可以看出,对于在大气中巡航飞行的超声速巡航导弹,如采用杀伤区描述对抗拦截弹的突防效能,则易于定量分析超声速巡航导弹不同设计性能下的突防效能,还可较好的服务于超声速巡航导弹总体方案的突防效能评估。

### 2 突防效能指标计算流程及模型

#### 2.1 指标计算流程

杀伤区传统分析方法需大量导弹靶试数据和仿真数据,确定杀伤区原理及流程<sup>[8]</sup>如图 3 所示。对敌方防御系统的拦截弹,无法获得足够的拦截仿真试验数据和靶试数据,需重新建立杀伤区仿真计算模型获得突防效能指标数据。本节借鉴传统地空导弹杀伤区确定方法,综合拦截弹飞行特点,通过 PAC-3 拦截弹的弹道过载仿真,获得拦截弹抗击超声速巡航导弹杀伤区计算方法。可确定 PAC-3 拦截弹的杀伤区计算流程如图 4 所示。

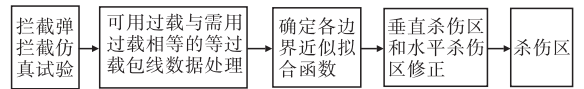


图 3 传统导弹杀伤区确定原理图

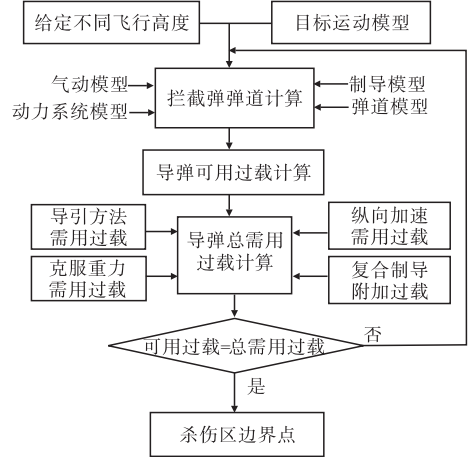


图 4 对抗拦截弹突防效能指标计算流程图

#### 2.2 指标计算模型

由拦截弹杀伤区计算流程可知,杀伤区的边界取决于拦截弹的可用过载和需用过载间关系。拦截弹在飞行过程中,为实现按给定的导引规律飞行所需要的法向过载和侧向过载,称为需用过载。弹道坐标系下拦截弹过载分量(轴向过载  $n_{x2}$ 、法向过载  $n_{y2}$  和侧向过载  $n_{z2}$ ) 形式的弹道方程<sup>[9]</sup>如下:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{g} \frac{dv}{dt} \\ \frac{v}{g} \frac{d\theta}{dt} \\ -\frac{v}{g} \cos\theta \frac{d\psi_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{x2} - \sin\theta \\ n_{y2} - \cos\theta \\ n_{z2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由上式可知,需用过载表达式:

$$n_{y2} = \frac{v}{g} \frac{d\theta}{dt} + \cos\theta \quad (2)$$

$$n_{z2} = -\frac{v}{g} \cos\theta \frac{d\psi_c}{dt} \quad (3)$$

式中: $\theta$  为弹道倾角; $\psi_c$  为导弹航向角; $v$  为导弹飞行速度; $g$  为重力加速度。需用过载计算时,选定不同拦截高度、速度以及不同遭遇点的目标进行拦截导弹飞行弹道计算,根据计算所得的弹道参数获得需用过载。

拦截弹在飞行过程中形成的攻角  $\alpha$  和侧滑角  $\beta$  依赖于舵面偏转角,由舵面偏转角极限值形成的过载称为可用过载。可用过载计算依拦截弹空气舵提供过载效能。拦截弹飞行若不考虑转动,并处于力矩平衡状态,则有:

$$\alpha = -\frac{m_z^{\delta} \delta_{z, \max}}{m_z^{\alpha}} \quad (4)$$

$$\beta = -\frac{m_y^{\delta_y} \delta_{y, \max}}{m_y^\beta} \quad (5)$$

又知,过载向量  $\mathbf{n}$  在弹道坐标系下的投影为:

$$\begin{bmatrix} n_{x2} \\ n_{y2} \\ n_{z2} \end{bmatrix} = \frac{1}{G} \begin{bmatrix} P \cos \alpha \cos \beta - X \\ (P \sin \alpha - Y) \cos \gamma_c + (P \cos \alpha \sin \beta + Z) \sin \gamma_c \\ (P \sin \alpha - Y) \sin \gamma_c - (P \cos \alpha \sin \beta - Z) \cos \gamma_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $G$ 为重力; $P$ 为推力; $X$ 、 $Y$ 和 $Z$ 为空气动力分量。取倾斜角  $\gamma_c = 0$ ,即可得到过载  $\mathbf{n}$  在速度坐标系下的投影:

$$\begin{bmatrix} n_{xv} \\ n_{yv} \\ n_{zv} \end{bmatrix} = \frac{1}{G} \begin{bmatrix} P \cos \alpha \cos \beta - X \\ P \sin \alpha - Y \\ -P \cos \alpha \sin \beta + Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

拦截弹攻角和侧滑角均为小量,由式(7)可得:

$$n_{yv} = \frac{P \alpha + Y}{G} \quad (8)$$

$$n_{zv} = \frac{-P \beta + Z}{G} \quad (9)$$

拦截弹所受气动力在线性范围内时,其升力和侧向力为:

$$Y = Y^\alpha \alpha + Y^{\delta_z} \delta_z \quad (10)$$

$$Z = Z^\beta \beta + Z^{\delta_y} \delta_y \quad (11)$$

于是:

$$n_{yvc} = \frac{1}{G} \left[ \frac{P}{57.3} - \left( \frac{m_z^{\delta_z}}{m_z^\alpha} Y^\alpha - Y^{\delta_z} \right) \delta_{z, \max} \right] \quad (12)$$

$$n_{zvc} = \frac{1}{G} \left[ \frac{P}{57.3} - \left( \frac{m_y^{\delta_y}}{m_y^\beta} Z^\beta - Z^{\delta_y} \right) \delta_{y, \max} \right] \quad (13)$$

式中: $n_{yvc}$ 为法向可用过载; $n_{zvc}$ 为侧向可用过载; $\delta_{z, \max}$ 为升降舵最大偏角; $\delta_{y, \max}$ 为方向舵最大偏角。

需用过载计算取决于目标的方位角速度和高低角速度,当目标做等速直线飞行时,目标方位角速度  $\dot{\beta}$  和高低角速度  $\dot{\epsilon}$  可用下式表示:

$$\dot{\beta} = \frac{v_m p}{d_m} = \frac{v_m p}{p^2 + L^2} \quad (14)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_m HL}{(p^2 + H^2 + L^2) \sqrt{p^2 + L^2}} \quad (15)$$

式中: $v_m$ 为目标飞行速度; $d_m$ 为从发射点到目标的水平距离; $p$ 为目标飞行的航路捷径; $L$ 为目标在地面参量坐标系上纵坐标的投影值; $H$ 为给定高度。

计算杀伤区远界和低界所需的跟踪雷达最大探测距离模型、拦截弹气动模型、拦截弹动力系统模型、

拦截弹制导模型和拦截弹弹道模型详见文献[9-10]。用等过载包线来粗略描述杀伤区的形状,然后再考虑其他影响杀伤区边界的因素进行修正,可以得到杀伤区。

### 3 算例及分析

设引入概率为90%,一般取引入结束时间  $t_g \approx 3s$ ,拦截弹单发杀伤概率不小于65%,最大舵偏角为 $15^\circ$ 。超声速巡航导弹目标等速直线平飞的飞行速度为 $2Ma$ 和 $3Ma$ ,飞行高度在5~20km等间隔变化,航路捷径为3km。计算得到拦截导弹拦截迎面抗击的超声速巡航导弹目标

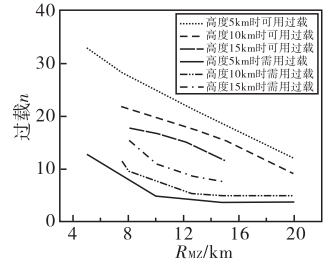


图5 拦截弹与目标遭遇时可用过载与弹道需用过载随遭遇斜距变化曲线

时,拦截弹可用过载和需用过载的变化如图5所示。比较可用过载和需用过载得到拦截弹的垂直平面杀伤区包络如图6所示。从过载计算结果可看出,拦截弹可用过载的变化决定于目标运动参数(即目标飞行高度、速度以及纵向加速度)。拦截弹需用过载的变化取决于目标运动参数(目标飞行高度、速度和航路捷径)

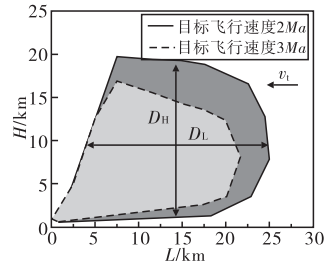


图6 目标在不同飞行速度下拦截弹垂直杀伤区计算结果

和拦截弹制导设计参数。目标飞行高度越高,可用过载相对于需用过载的余量减小。从某个时刻起,拦截弹可用过载开始下降,与需用过载相等,可用过载与需用过载相等的点对应于杀伤区一边界点。

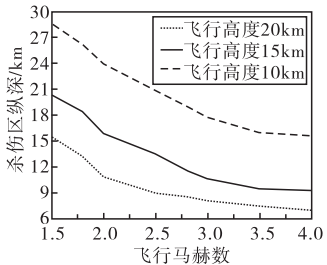


图7 杀伤区纵深随目标运动参数变化

从杀伤区计算结果可看出,杀伤区是由杀伤区随目标飞行速度的不同而不同,杀伤区远界和高界变化较大,低近界和低界变化不大,低界基本目标飞行状态参数改变的影响,侧近界飞行目标速度的改变减小。为了更加直观的表述杀伤区的大小,可用杀伤区高度和纵深的概念来综合描述杀伤区的大小,分别对应图中 $D_H$ 和 $D_L$ 。杀伤区高度 $D_H$ 为杀伤区高界与

低界的差,杀伤区纵深  $D_L$  为杀伤区远界与侧近界之差。改变超声速巡航导弹运动参数(飞行高度和飞行速度),得到杀伤区  $D_L$  和  $D_H$  指标随目标运动参数变化曲线,如图 7 和图 8 所示。观察曲线变化可知,目标飞行速度增大,杀伤区纵深减小,当目标飞行速度增大到一定数值时,杀伤区的改变就不再明显。

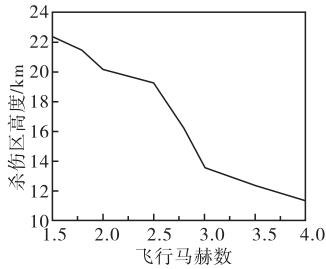


图 8 杀伤区高度随目标运动参数变化

## 4 结束语

仿真算例表明,杀伤区各边界在不同高度和航路捷径上都不同,并随超声速巡航导弹飞行速度、机动过载以及制导规律和反射面积的不同而不同。与采用传统方法得到的杀伤区影响规律相一致,验证了基于过载模型的杀伤区计算模型的正确性。此外可得出的结论是:通过合理选择超声速巡航的飞行速度和高度,尽量压缩拦截导弹杀伤区,是提高超声速巡航导弹对抗拦截导弹突防效能的有效途径。

相比采用拦截概率指标分析导弹对抗拦截弹突防效能,文中提出的基于杀伤区的突防效能分析方法,能够方便服务于建立超声速巡航导弹某种设计方案下的设计性能参数与其突防能力大小间的定量关系,较好的满足超声速巡航导弹总体方案论证需求,

可为超声速巡航导弹突防能力评估及优化提供支持 and 指导,其应用作者随后将进一步研究。

### 参考文献:

- [1] D L McCraith. A computer aid for ballistic missile defense analysis, ADA727045 [R].
- [2] L J Levy. Role of confidence in T&E of strategic defense systems, ADA406504 [R].
- [3] S J Song. Probability models for assessing the value of battle damage assessment in the defense against sequential theater missile attacks, ADA311138 [R].
- [4] M S Johnston. Analysis of the survivability of land attack missiles (LAM), ADA387374 [R].
- [5] D D Diehl. How to optimize joint theater ballistic missile defense, ADA422226 [R].
- [6] 张毅,何念念,马清华. 防空导弹防御系统中的 TBM 突防能力研究[J]. 飞行力学, 2001, 19(3): 49-55.
- [7] 齐照辉. 战略导弹突防效能评估方法及其应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [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): 1-11.
- [9] 范玉珠,张为华,谢道成. 巡航弹飞行环境对跟踪照射雷达探测性能影响仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(15): 3927-3930.
- [10] 张有济. 战术导弹飞行力学设计(上、下)[M]. 北京: 宇航出版社, 1998.
- [11] 聂勃库也夫. 地空导弹射击[M]. 空军第五研究所, 译. 苏联: 苏联军事出版局, 1980.

(上接第 31 页)

时,对人的特性必须进行充分的试验和分析。利用虚拟样机技术建立末制导性能评估试验系统,将人的作用与实际系统相同的方式引入制导回路,通过人在回路中的闭环试验,使得末制导系统的性能评估结果更具有可信性,制导与控制系统的的设计更符合实际。利用该试验系统进行试验,对不同设计参数条件下的目标识别与跟踪性能进行直观高效的评估与验证,并有针对性的及时改进系统设计,优化参数,具有其它试验不可比拟的方便性和经济性。为研究图像制导导弹的目标搜索、识别、跟踪和人在回路中的行为特性以及与制导系统参数的匹配性等关键技术问题提供了一个有效途径。

### 参考文献:

- [1] 费锦东,刘鹏. 凝视红外成像末制导系统应用研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 253-257.
- [2] 陈澄,石静. 凝视红外成像制导系统数学建模与仿真技术[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 18-22.
- [3] 费锦东,梁波,魏宇飞,等. 凝视红外成像末制导系统性能测试评估方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 589-592.
- [4] 钱杏芳,林瑞熊,赵亚男. 导弹飞行力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000.
- [5] 付宏明. 红外成像末制导系统指标评价方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 796-797.