

doi: 10.7690/bgzdh.2025.05.017

# 基于图形分析法的舰空导弹反导能力分析

杨根庆<sup>1,2</sup>, 胥辉旗<sup>1</sup>, 毛廷鏊<sup>1,2</sup>, 周纯祥<sup>1</sup>

(1. 海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 77606 部队, 拉萨 850000)

**摘要:** 为提升反舰导弹突防概率, 对舰艇舰空导弹武器系统的反导能力进行分析。借鉴图形分析法的基本原理, 以“基隆”级舰上的舰空导弹“标准-2”为研究对象, 构建舰空导弹武器系统的反导模型, 并针对该方法存在的不足进行改进, 通过对改进模型的分析, 得出“标准-2”舰空导弹的反导能力。结果表明, 该研究可为反舰导弹突防提供一定的借鉴意义。

**关键词:** 图形分析法; 舰空导弹; 反导能力

**中图分类号:** TJ762.3 **文献标志码:** A

## Analysis of Anti-missile Capability of Ship-to-air Missile Based on Graphic Analysis Method

Yang Genqing<sup>1,2</sup>, Xu Huiqi<sup>1</sup>, Mao Tingliu<sup>1,2</sup>, Zhou Chunxiang<sup>1</sup>

(1. College of Coast Guard, Naval Aviation University, Yantai 264001, China;

2. No. 77606 Unit of PLA, Lhasa 850000, China)

**Abstract:** In order to improve the penetration probability of anti-ship missile, the anti-missile capability of ship-to-air missile weapon system is analyzed. The anti-missile model of ship-to-air missile weapon system is established based on the basic principle of graphic analysis, taking the “Standard Missile-2” of “Keelung” class ship-to-air missile as the research object, and the method is improved according to the shortcomings of the method. Through the analysis of the improved model, the anti-missile capability of the “Standard Missile-2” ship-to-air missile is obtained. The results show that the research can provide some reference for the penetration of anti-ship missile.

**Keywords:** graphic analysis; ship-to-air missile; anti-missile capability

### 0 引言

随着世界军事革命的发展变化, 反舰导弹的更新换代越来越快, 各种突防技术手段层出不穷<sup>[1-2]</sup>, 对舰空导弹的反导防御能力提出了更高的挑战。俄乌冲突中, 俄黑海舰队“莫斯科”号被 2 枚“海王星”反舰导弹击中, 这说明加强对舰空导弹武器系统反导能力分析是至关重要的。

目前, 对舰空导弹武器系统反导作战能力的分析研究, 常用的方法有解析分析法、仿真法、图形分析法和综合分析法等<sup>[3-6]</sup>。由于不同分析方法关注问题的角度不同, 所参考的分析条件也有所不同; 因此, 对舰空导弹武器系统的反导能力, 仍处于广泛研究和讨论当中<sup>[7]</sup>。考虑到图形分析法能够将影响舰空导弹反导能力的机理问题统一到图形当中, 并能清晰地看出舰空导弹和反舰导弹对抗的特点。笔者借鉴图形分析法的基本原理, 并以台湾“基隆级”为研究对象, 构建了舰空导弹武器系统的反导模型, 针对该方法存在的不足进行了改进, 对“标

准-2”舰空导弹反导能力进行分析。

### 1 图形分析法基本原理

使用图形分析法能够很好地将导弹双方攻防态势呈现出来, 主要是将多枚齐射的反舰导弹视为一个群目标<sup>[8]</sup>, 在对反舰导弹进攻态势和舰空导弹武器系统技术性能进行解析分析的基础上<sup>[9-10]</sup>, 在目标交汇点处, 使用图形化的表述方法, 绘制出舰空导弹对群目标的射击态势, 并以此计算舰空导弹对群目标的最大可射击次数。图形分析方法的基本步骤如下<sup>[11]</sup>:

1) 假设来袭的  $m$  个反舰导弹构成目标流, 单舰使用舰空导弹武器系统按照目标进入的先后顺序, 采用“一对一”的射击方式进行依次射击<sup>[12-13]</sup>, 则在上述假设条件下构成的射击态势, 可用如表 1 所示的特征参数进行描述。

2) 假设舰艇探测系统在距离  $d_f$  上发现目标后, 经过舰空导弹武器系统的作战反应时间  $t_{zf}$  后, 发射第 1 发舰空导弹, 则第 1 个射击通道实施第 1 次射

收稿日期: 2024-08-17; 修回日期: 2024-09-25

第一作者: 杨根庆(1995—), 男, 云南人, 硕士。

击时舰空导弹和目标的交汇时间  $t_{(1,1)}$  为：

$$t_{(1,1)} = t_{2f} + (d_f - t_{2f} \cdot V_m) / (V_m + V_d) \quad (1)$$

表 1 舰空导弹武器系统对群目标射击态势特征参数

态势特征	参数定义	表征符号
群目标特征	目标流飞行速度	$V_m$
	目标流飞行高度	$h$
	目标流进入的间隔时间	$\tau_a$
	目标流的航路捷径	$R$
舰空导弹武器系统技战术性能指标	舰艇探测系统可靠发现目标的水平距离	$d_f$
	舰空导弹杀伤区远界的水平距离	$d_{\max}$
	舰空导弹杀伤区近界的水平距离	$d_{\min}$
	舰空导弹飞行平均速度	$V_d$
	舰空导弹武器系统可用的射击通道数量	$k_m$
	舰空导弹武器系统反应时间	$T_f$
	舰空导弹武器系统目指时间	$T_{xmz}$
	舰空导弹武器系统照射服务需求最短时间	$T_{zs}$
	舰空导弹武器系统作战反应时间	$t_{2f}$
	每次发射的导弹数量	$s$
	相邻两个射击通道组织抗击的间隔时间	$\tau$
	任意射击通道转火射击的时间间隔	$t_{zh}$

同时第 1 发舰空导弹和目标交汇时，交汇点与舰艇的相对距离  $d_m(1)$  为：

$$d_m(1) = t_{(1,1)} \cdot V_d \quad (2)$$

3) 来袭目标流中第  $i$  个反舰导弹与舰艇的相对距离  $d_m(i)$  为：

$$d_m(i) = \sqrt{R^2 + \{D_f - V_m[t - (i-1)\tau_a]\}^2} \quad (3)$$

4) 舰艇第  $i$  个射击通道实施第  $j$  次射击时舰空导弹与舰艇的相对距离为：

$$d_a(i, j) = V_d[t - qt_{2f} - t_{(1,j-1)} - (1-q)t_{zh} - (i-1)\tau] \quad (4)$$

式中  $t_{(1,j-1)}$  为第 1 个射击通道第  $j-1$  次射击时弹目交汇时刻，且：

$$q = \begin{cases} 1 & j=1 \\ 0 & j \neq 1 \end{cases}$$

5) 当舰空导弹武器系统和目标特征参数取定之后，根据解析式(1)和(2)可以计算出第 1 发舰空导弹与目标的交汇时间  $t_{(1,1)}$  和交汇点相对舰艇的距离  $d_m(1)$ ，而根据式(3)和(4)，当  $d_m(i) = d_a(i, j)$  时，可以计算出后续舰空导弹与来袭目标的交互时间  $t_{(i, j)}$  和交汇点相对舰艇的距离  $d_m(i)$ 。

6) 将舰载探测系统可靠发现首个目标的时刻作为时间原点，以横轴表示时间  $t$ ，以纵轴表示目标或舰空导弹到舰艇的距离  $d$ ，则可以根据计算得到的  $t_{(i, j)}$  和  $d_m(i)$  为坐标点，绘出舰空导弹对群目标的射击态势分析图。例如，当取群目标航路捷径  $R=0$ 、舰空导弹可用射击通道  $k_m=2$ 、每次发射导弹数量  $s=1$  时，绘成舰空导弹射击态势分析如图 1

所示。

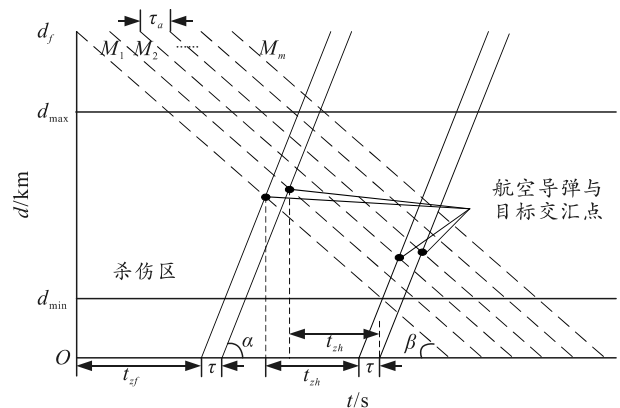


图 1 图形分析法的原理

由图 1 可见，图形分析法可以利用简单的图形，将舰空导弹的射击态势直观地描述出来。其中：图中虚线表示目标流的基本态势，虚线斜率角度  $\beta$  反映了目标流的飞行速度，虚线间距反映了目标流的时间间隔；图中实线表示舰空导弹的射击态势，实线斜率角度  $\alpha$  反映了舰空导弹的飞行速度，实线间距反映了射击通道的转火射击时间间隔  $t_{zh}$ ；图中实线与虚线的交汇点，表示舰空导弹对目标的实际拦截点，而处于舰空导弹杀伤区内的交汇点数量，则表示舰空导弹对群目标的最大可射击次数。

## 2 图形分析法的适用性分析

对于全程半主动制导方式的舰空导弹来说，转火射击时间间隔  $t_{zh}$  是系统反应时间  $T_f$  和重新下目指的时间  $T_{xmz}$  决定的，可表示为：

$$t_{zh} = T_f + T_{xmz} \quad (5)$$

由于  $T_f$  和  $T_{xmz}$  反映的是系统相对稳定的技术性能，因此对于等间隔来袭的反舰导弹群目标来说， $t_{zh}$  通常可取定值。

对于采用“惯导/无线电指令+半主动寻的”复合制导体制的“标准-2”舰空导弹来说，其转火射击可分为 2 种情况：1) 当目标距离较远时，武器系统不需要等待弹目交汇就能进行转火射击，只需本次射击时末段照射雷达能够满足 5~8 s 连续照射的条件；2) 当目标距离较近时，无法保证末制导雷达有效的末段照射时间，则导弹直接采用全程半主动制导方式，必须等待上一次弹目交汇后才可以进行转火射击。转火射击时间间隔可表示为：

$$t_{zh} = \max(T_f + T_{xmz}, T_{zs}) \quad (6)$$

式中： $T_{zs}$  为末段照射服务需求的最短时间； $T_f$  为转火射击时的系统反应时间； $T_{xmz}$  为重新下目指的时间。

由式(6)分析可见：当  $T_f + T_{xzmz} < T_{zs}$  时，照射服务需求时间  $T_{zs}$  成为转火射击时间间隔  $t_{zh}$  的主要约束条件，并且当  $T_{zs}$  满足式(7)条件时，实际上“标准-2”舰空导弹可以提前发射。

$$T_{zs} \leq t_{(i,j)} - t_{(i,j-1)} \quad (7)$$

式中： $t_{(i,j)}$  为第  $i$  个射击通道实施第  $j$  次射击时弹目交汇时间； $t_{(i,j-1)}$  为第  $i$  个射击通道实施第  $j-1$  次射击时弹目交汇时间。

根据上述分析可知：对于采用“惯导/无线电指令+半主动寻的”制导体制的“标准-2”舰空导弹来说，实际上转火射击的时间间隔  $t_{zh}$  是一个随战场态势变化而动态变化的随机变量；因此，基于式(3)和(4)的图形分析方法存在求解困难。为改进图形分析法的适用性，在将式(3)和(4)转换成仿真模型的基础上，设计了转火射击时间间隔  $t_{zh}$  的仿真分析模型，如式(8)所示：

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{发射时间}(i,j)} &= t_{(i,j-1)} + t_{zh} \\ t_{zh} &= \max\{T_f + T_{xzmz}, T_{zs}\} \\ T_{zs} &\leq t_{(i,j)} - t_{(i,j-1)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中  $t_{\text{发射时间}(i,j)}$  为第  $i$  个射击通道实施第  $j$  次射击时的发射时间。当  $T_{zs}=8$  s 时，则转火射击时间间隔  $t_{zh}$  的仿真分析流程如图 2 所示。

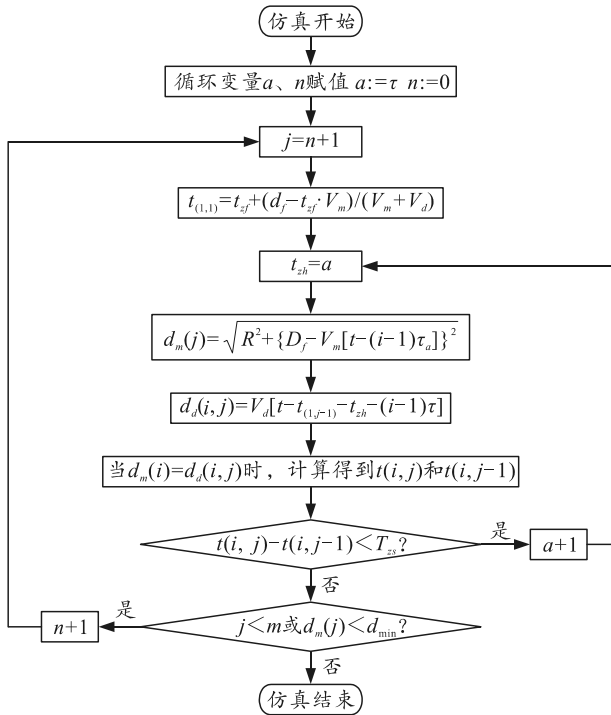


图 2 转火射击时间间隔  $t_{zh}$  的仿真分析流程

### 3 “标准-2”抗饱和攻击能力仿真

利用转火射击时间间隔  $t_{zh}$  的仿真分析流程，按

照图形分析方法的基本原理，提出下列仿真条件：

1) 群目标特征参数的具体定义是：目标的间隔时间， $\tau_a=2$  s；速度矢量， $V_m(t)=300$  m/s；飞行高度， $h=10$  m；航路捷径， $R=0$ 。

2) 以“基隆”级<sup>[14]</sup>为研究对象，在参考文献[15]中对“标准-2”技战术性能参数说明的基础上，并结合经验值，对“标准-2”相关技战术特征参数设定如表 2 所示。

表 2 “标准-2”相关技战术参数指标

参数定义	标量声明
$d_f$ /km	采用 SPS-48E 对空搜索雷达为导弹提供目标指示时约为 28
$d_{\max}$ /km	反导作战时的杀伤区参数，取 $d_{\max}=22$
$d_{\min}$ /km	反导作战时的杀伤区参数，取 $d_{\min}=3.5$
$V_d$ /(m/s)	最大速度 2.5 Ma，反导时采用高抛弹道，水平速度应降低，取 $V_{d(t)}=750$
$k_m$	射击通道数量 $k_m=2$
$T_f$ /s	取 $T_f=5$
$T_{mz}$ /s	取 $T_{mz}=10$
$T_{zs}$ /s	末段照射雷达需满足 5~8 s 连续照射，取 $T_{zs}=8$
$t_{zf}$ /s	取 $t_{zf}=15$
$S$	射击方式可分为“一对一”和“二对一”2种，取 $S=1$
$\tau$ /s	采用双架发射时取 $\tau=2$ ，同一发射架发射时 $\tau=5$ ，重新装弹时 $\tau=10$
$t_{zh}$	由仿真分析计算得到

当对目标采取“一对一”的射击方式、使用 2 个 SPG-51D 火力通道的情况下，对“标准-2”舰空导弹武器系统的抗饱和攻击能力进行仿真分析，仿真结果如图 3 所示。

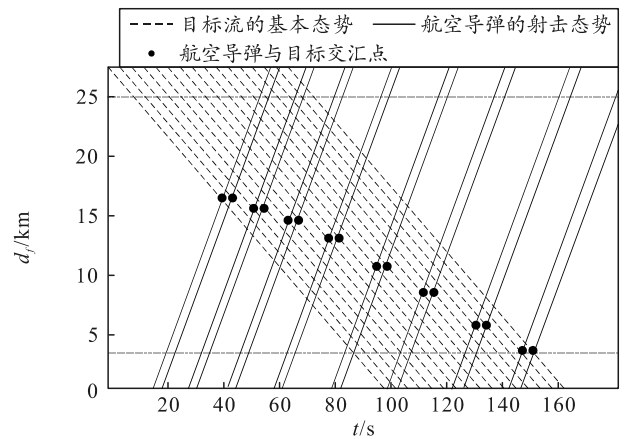


图 3 “标准-2”单射反导作战能力的分析

### 4 “标准-2”反导能力分析

1) 从图 3 中的弹目交汇点可以看出：在采用“一对一”的射击方式时，“标准-2”舰空导弹武器系统可以对亚音速、间隔时间  $\tau_a=2$  s 的反舰导弹群目标进行 16 次射击。同时对比图中的弹目交汇时间和舰空导弹的发射时间可见，第 1~4 发和第

3~6 发舰空导弹可同时制导拦截 4 个目标,第 5~7 发和第 6~8 发舰空导弹可同时制导拦截 3 个目标,第 9~10 发、第 11~12 发、第 13~14 和第 15~16 发舰空导弹可同时制导拦截 2 个目标。由此可见,“标准-2”舰空导弹武器系统足以应付中等强度的亚音速反舰导弹齐射饱和攻击。

2) 从图 3 中的发射时间点间隔变化可以看出:转火射击时间间隔  $t_{zh}$  随着射击批次的增大而逐步增大,根本原因是:随着目标流逐步逼近舰艇,舰空导弹逐步由末端照射制导向全程照射制导转变,照射制导需求时间延长;此外,“基隆”级的“标准-2”采用双臂发射架,需要重新装弹,系统的反应时间也会随着射击次数的增长而延长。由此可见,若采用“数量压制型”伴飞诱饵伴随导弹突防,理论上“标准-2”舰空导弹武器系统不足以应对。

此外,需要说明的是,根据上述分析方法原理,在相同的假设条件下还可以得出以下结论:当“标准-2”舰空导弹武器系统对来袭目标采取“二对一”的射击方式时,最大可射击 8 次。这一结论意味着,当单发舰空导弹的杀伤概率较小时,需要通过牺牲射击效率来保证拦截效果;因此,通过有效的技战术突防手段降低舰空导弹的杀伤概率,是对舰空导弹武器系统进行突防的有效途径。

## 5 结束语

笔者通过对图形分析法的改进,构建了舰空导弹反导作战模型,以“基隆”级上的“标准-2”舰空导弹为例进行了分析,得出“标准-2”舰空导弹武器系统足以应付中等强度的亚音速反舰导弹齐射饱和攻击,在面临“数量压制型”伴飞诱饵伴随导弹突防时难以应对的结论。其结论能在一定程度上反映舰空导弹的反导能力,但是作为复杂的海战场环境,远程预警系统和近程电子对抗因素都没有考

虑进去,对于舰空导弹的综合反导能力是下一步研究的重点。

## 参考文献:

- [1] 张志伟. 基于平台协同的反舰导弹突防概率模型[J]. 兵工自动化, 2014, 33(1): 1-3.
- [2] 沈培志, 王培源. 反舰导弹突防的技术手段与战术措施[J]. 飞航导弹, 2018(1): 25-29.
- [3] 高远, 姜涛. 导弹武器系统作战效能评估方法研究[J]. 国防制造技术, 2017(2): 56-67, 55.
- [4] 夏维, 刘新学, 孟少飞, 等. ADC 改进模型评估导弹武器系统效能[J]. 现代防御技术, 2017, 45(2): 30-39.
- [5] 王慕鸿, 张文娟, 徐圣良. 基于对抗全过程仿真的两栖攻击舰对空自防御作战能力评估[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(11): 132-136.
- [6] 王峰. 基于图形分析的舰空导弹射击效能评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2004(4): 65-67.
- [7] 周斌. 空海作战导弹攻防对抗关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [8] 谭乐祖, 杨明军, 王威. 舰空导弹抗饱和和攻击能力响因素仿真分析[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(6): 49-51.
- [9] 朱传伟. 舰空导弹对群目标的拦截数量效能评估仿真[J]. 计算机仿真, 2019(8): 25-30, 42.
- [10] 张杨. 舰空导弹拦截群目标火力分配作战效能研究[J]. 现代防御技术, 2011(5): 66-70.
- [11] 唐健, 张林, 付哲泉. 基于改进图形分析法的反舰导弹突防方法研究[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(10): 25-29.
- [12] 慎龙. 多通道舰空导弹武器系统射击次数模型研究[J]. 舰船电子工程, 2010(12): 113-115.
- [13] 栗飞. 压制式干扰条件下舰空导弹杀伤区远界的建模方法[J]. 指挥控制与仿真, 2012(3): 82-84, 89.
- [14] 晓强. 台湾“基隆”级导弹驱逐舰[J]. 现代舰船, 2012(7): 61-63.
- [15] 刘峰, 崔超. “金刚”级驱逐舰“标准-2”舰导弹反导作战分析[J]. 现代防御技术, 2018, 46(5): 13-18.