

地空导弹攻击 ARM 载机最佳区域仿真研究

张 肃, 曹泽阳, 王颖龙

(空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800)

摘要: 由于 ARM 测角误差对其命中精度和杀伤概率有显著的影响, 因此, 攻击 ARM 载机时对于地空导弹存在最近安全关机距离和最近安全关机时间, 基于此, 文中提出了地空导弹攻击 ARM 载机最佳区域的概念。通过地空导弹攻击 ARM 载机仿真模型的构建, 得出两种不同 ARM 平均飞行速度下垂直最佳区域和水平最佳区域剖面图。

关键词: 地空导弹; ARM; ARM 载机; 最佳区域; 杀伤区

中图分类号: TP391. 9 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2005)05-0018-05

反辐射导弹也叫反雷达导弹(Anti-Radiation-Missile, ARM), 是对地面雷达, 尤其是对制导雷达威胁最大的一种空袭武器。ARM 在攻击过程中若遇雷达突然关机, ARM 上的捷联惯导式导航装置将导引 ARM 攻击目标^[1]。

在载机发射 ARM 后, 指挥员应确立如下准则: 首先在敌发射 ARM 后, 应确保导弹阵地安全为首要准则; 其次在保证导弹阵地安全的前提下, 力争消灭载机。地空导弹杀伤区是一个空间区域, 在此区域内地空导弹武器系统杀伤目标的概率不低于给定值^[2]。但是, 这些杀伤区都是针对典型目标而言的, 对于 ARM 载机这类非典型目标, 必须对原杀伤区进行一定修正。

1 基本理论的说明与定义

1) 测角误差的变化对 ARM 命中精度和杀伤概率的影响

影响 ARM 导弹杀伤概率的主要因素是测角误差。在不计测角误差时, ARM 单发杀伤概率几乎为 1, 加入了测角误差后, ARM 命中精度和杀伤概率大大降低。图 1 为测角误差的变化对 ARM 命中精度和杀伤概率的影响曲线^[3]。其中, CEP 表示 ARM 的圆概率偏差; P_s 表示 ARM 的杀伤概率。

可以看出, 随着导引头测角误差值的增大, ARM 命中精度和杀伤概率逐渐减小。目前 ARM 的“记忆”, 其实就是大量、高速、准确的外推计算, 连续、实时地计算才能达成导弹的“记忆”飞行。一般情况下, 这种外推必然会导致 ARM 定位系统较大的角度误差, 而且随飞行时间的增加而增大, 要命中半径只有数米的天线, 命中概率是不高的。被 ARM 攻击雷达在适当的距离上采取立即关机的方法, 可以增大 ARM 的测角误差, 从而保证安全。

2) 最近安全关机距离 D_{sf}

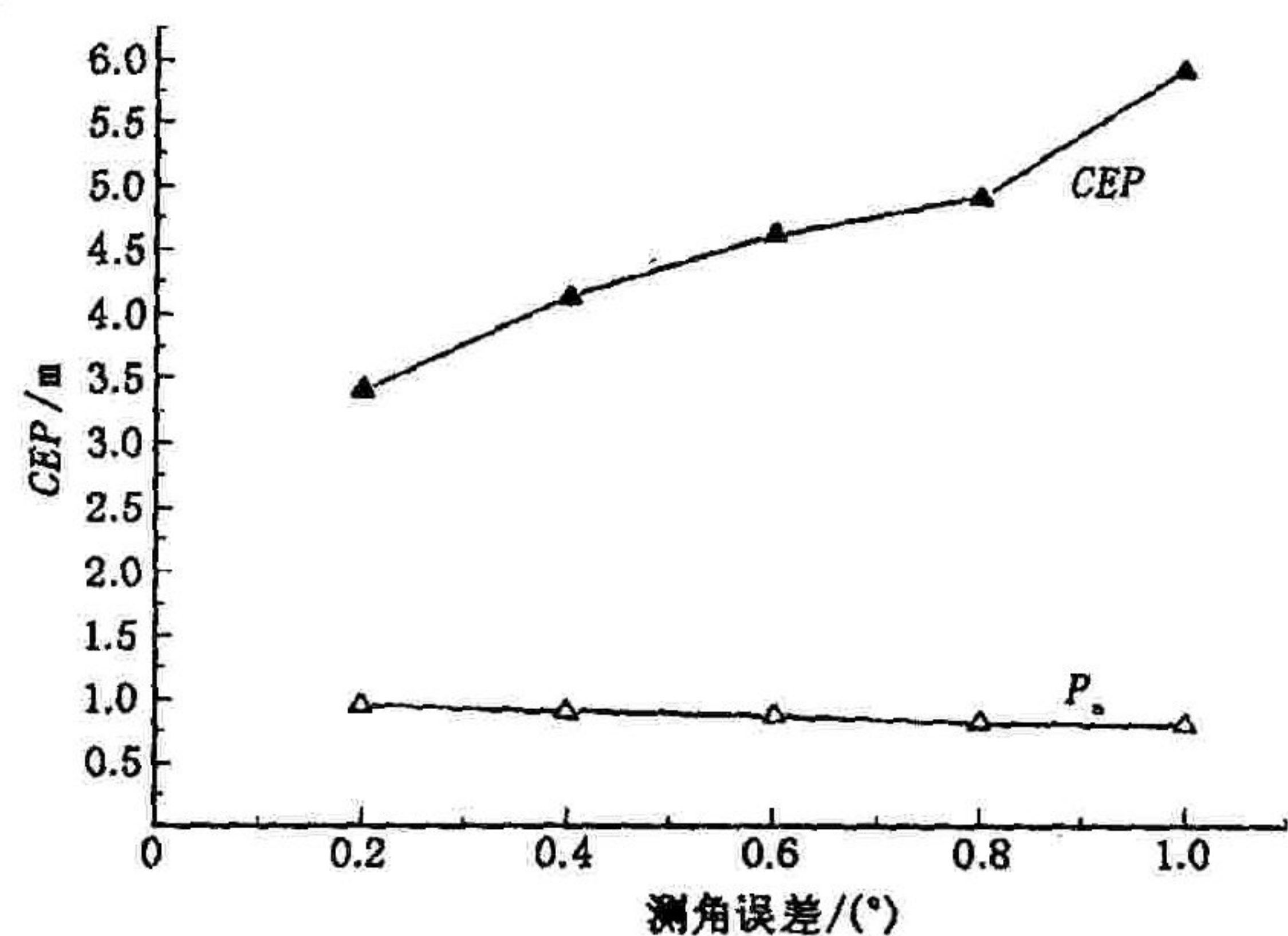


图 1 测角误差的变化对 ARM 命中精度和杀伤概率的影响曲线

收稿日期: 2004-12-8

基金项目: 军队科研基金资助项目

作者简介: 张 肃(1980-), 男, 甘肃天水人, 博士生, 主要从事运筹学与指控系统优化研究。

对大多数 ARM,仍存在一个保证防空雷达安全的最近关机距离,这一距离是指当我制导雷达天线关闭天线后,ARM 在其记忆电路控制下继续飞临制导站,但不能危及导弹阵地安全的最近距离,用 D_{sf} 表示此距离。假设 ARM 的测角误差与关机距离成正比关系,雷达在此距离之外关机,可使 ARM 的 CEP 超出其杀伤半径。这一距离的考虑,尤其对已发射地空导弹后的指挥决策,具有重要意义。

3) 最近安全关机时间 t_{sf}

以地空导弹制导雷达捕获 ARM 载机为统一的时间标准,分别计算 ARM 载机系统反应时间和 ARM 遭遇时间之和、制导雷达开天线到发射导弹的时间与地空导弹遭遇时间之和。则这一安全距离也可以用地空导弹先于 ARM 完成任务的时间差 Δt (两者之差) 表示。当 $\Delta t > 0$, 表示地空导弹先于反辐射导弹完成任务,即地空导弹与载机遭遇时,ARM 距导弹阵地的飞抵时间;当 $\Delta t < 0$, 表示反辐射导弹先于地空导弹完成任务,即 ARM 已落地时,地空导弹与载机遭遇还需飞行的时间;当 $\Delta t = 0$, 表示反辐射导弹与地空导弹同时完成任务。目前 D_{sf} 值难以确定,而且对不同型号的 ARM,其数值亦不相同,为了研究问题方便起见,假设 $D_{sf} = 10 \text{ km}$, ARM 平均速度取为 1000 m/s 。则可定义最近安全关机时间 Δt 应至少保证 $\Delta t \geq 10 \text{ s}$, 满足这一条件的时间差称为“最近安全关机时间 t_{sf} ”。显然: $t_{sf} = D_{sf}/V_{ARM}$, 因此最近安全关机时间和最近安全关机距离描述了同样的概念。

4) 最佳区域

由于 ARM 载机的反射面积多为 2 m^2 左右,且载机飞行速度加快,所以对于原杀伤区的高界、低界、远界也有影响。但这对于非 ARM 载机也有类似的影响,因此论文由于篇幅和突出对抗 ARM 这一特色的考虑,认为攻击 ARM 载机时对地空导弹的杀伤区高界、低界、远界影响较小,可视为基本维持原状。主要对于原杀伤区近界进行修正。使得在最佳区域内,即能保证对于载机的杀伤概率,又可使雷达阵地的安全受到一定程度的保证。最佳区域是对原杀伤区内进行切除所得到的,最终表现是对原杀伤区的近界进行了修正。

在最佳区域内地空导弹杀伤 ARM 载机时满足如下两个约束条件:

$$\begin{cases} P_s \geq P_{\min} \\ t_{zy} \geq t_{sf} \end{cases}$$

其中: P_s 表示地空导弹对 ARM 载机的杀伤概率; $P_{\min}$ 表示可保证地空导弹对 ARM 载机杀伤的最小杀伤概率; t_{zy} 表示地空导弹与 ARM 载机所需遭遇时间; t_{sf} 表示地空导弹攻击 ARM 载机最近关机时间。

实际应用中,应用垂直最佳区域和水平最佳区域两个最佳区域的剖面将较为方便、实用。垂直最佳区域是指用垂直于航路捷径轴的平面切割最佳区域,得到的剖面。水平最佳区域是指用给定高度的水平平面切割最佳区域,得到的剖面^[4]。

2 地空导弹攻击 ARM 载机最佳区域仿真模型的构建

离散事件系统仿真主要用于模拟各类随机事件和管理不规范进程。由于发现 ARM 载机具有一定的随机性,而计算过程中的时间推进亦不规范,因而使用离散事件系统仿真方法来进行计算。

为实现对最佳区域的仿真计算,可使用事件调度法来管理仿真进程。事件调度法是离散事件系统仿真中常用的仿真方法。其基本思想是对系统中将要发生的事件进行预定,然后将仿真钟推进到将来事件集的最早事件发生时刻,并按事件优先级依次处理该时刻所有发生事件;而事件的发生又可能预定出新的将来事件,如此进行下去,直到仿真结束。

利用仿真方法计算时,根据计算需求所产的不同特性目标成为仿真系统中的实体,而计算流程中相邻两次时间推进间的各种计算、条件检验则构成了仿真系统中的各类事件。临时实体在仿真主控程序的作用下,依照计算流程中的时序和逻辑关系依次经历相关事件和时钟推进,直至仿真结束。通过统计系统状态的变化,可以得到结果^[5-10]。

1) 基本说明

图2为地空导弹攻击 ARM 载机示意图,其中: $OHSP$ 表示地面参数直角坐标系; O 为坐标原点,为制导雷达所在点; OS 为在通过 O 点的水平面内,其指向与 ARM 载机目标航路的水平投影平行、反向; OH 为垂直于水平面,指向上方为正; OP 为与 OS 轴和 OH 轴垂直,其指向按右手法则确定; V_m 为 ARM 载机飞向所要攻击的地空导弹阵地水平速度。 t_{bd} 为防空系统从发现载机,将载机数据传递给制导雷达,在截获目标后发射

导弹的时间。

设在 M_0 点载机被发现; M_1 点地空导弹发射; M_2 点处载机发射 ARM; M 点地空导弹与载机遭遇; V_d 为地空导弹的平均飞行速度; V_{ARM} 为 ARM 的平均飞行速度; t_{jf} 为从载机被地空导弹发现到其发射出 ARM 的时间; t_d 为地空导弹拦截载机的时间; t_l 为 ARM 攻击防空雷达的时间。

2) 发现载机距离的计算模型

考虑地球曲率对探测距离的影响^[7], 得发现载机斜距:

$$r_0^{(1)} = 3.57 \sqrt{h_i} + \sqrt{h_r}$$

若考虑遮蔽条件下雷达发现载机距离, 则有

$$r_0^{(2)} \approx -R_0 \sin \varepsilon_s + \sqrt{(R_0 \sin \varepsilon_s)^2 + 2R_0 h_i}$$

其中: R_0 为地球半径, ε_s 为导弹营阵地的遮蔽角。

考虑载机雷达散射截面对探测距离的影响, 得发现载机斜距:

$$r_0^{(3)} = \sqrt{\sigma r^*} / \sqrt{\sigma^*}$$

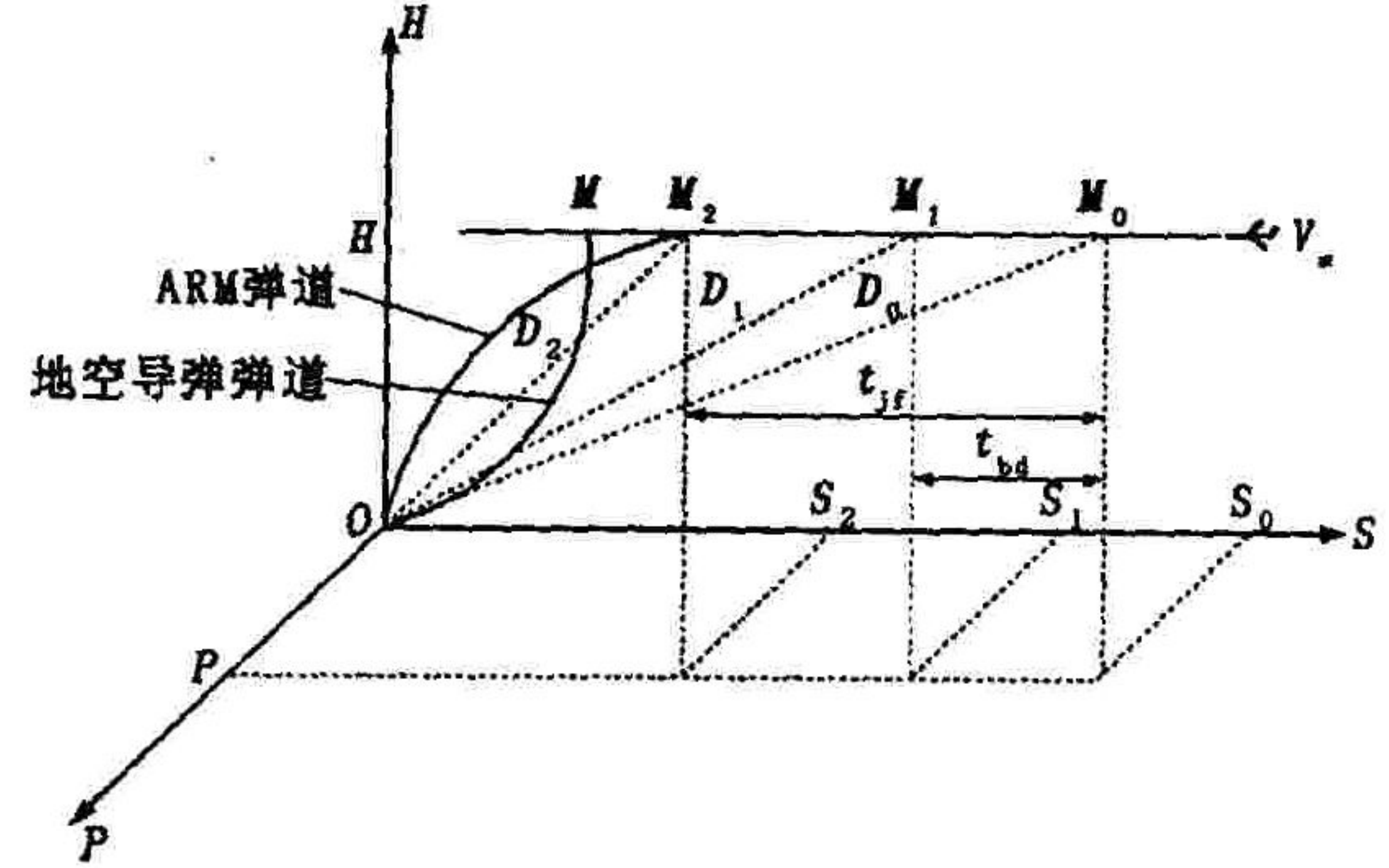


图2 地空导弹攻击 ARM 载机示意图

其中: h_r 为雷达高度, h_i 为载机高度, σ 为载机雷达散射截面, σ^* 、 r^* 为典型目标的雷达散射截面积和发现距离。

在敌施放远距离压制干扰条件下, 防空雷达的最大探测距离为

$$r_0^{(4)} = \left(K_{ds} \frac{K_j P_i G_i^2 \sigma \Delta f_j R_j^2}{r_j^4 \pi G' \Delta f_r P_j G_j} \right)^{\frac{1}{4}}$$

其中: K_{ds} 为具有副瓣对消等抗干扰措施的雷达抗干扰系数, K_j 为压制系数, P_i 为雷达峰值功率, G_i 为雷达天线增益, Δf_j 为干扰机干扰带宽, R_j 为干扰机距雷达距离, r_j 为极化系数, G' 为雷达副瓣增益, Δf_r 为雷达接收机带宽, P_j 为干扰机功率, G_j 为干扰机天线增益。若考虑自卫干扰, 则有

$$r_0^{(4)} = \left(\frac{K_j P_i G_i^2 \sigma \Delta f_j}{r_j^4 \pi \Delta f_r P_j G_j} \right)^{\frac{1}{2}}$$

基于上述考虑, 得最大发现斜距为 $D_0 = \min \{ r_0^{(1)}, r_0^{(2)}, r_0^{(3)}, r_0^{(4)} \}$ 。若来袭载机为超低空进袭, 则 $D_0 = \min \{ r_0^{(1)}, r_0^{(2)}, r_0^{(3)}, r_0^{(4)}, r_0^{(5)} \}$, $r_0^{(5)}$ 为雷达对超低空目标的最大探测距离。从而, 最大水平发现距离为

$$S_0 = \sqrt{D_0^2 - h_i^2 - p_i^2}$$

其中: p_i 为目标航路捷径。

3) 雷达发现载机的模拟

雷达发现载机的概率为

$$P_i 1 - e^{-\alpha P_r / 2Z^2 r^4}$$

其中: P_i 为雷达发现目标的概率, α 为目标有效反射面积, z 为噪声振幅的均方根值, P_r 为发射机功率, r 为载机的距离。仿真实现时, 雷达是否发现载机通过产生 $[0, 1]$ 上均匀分布随机数 u 来模拟。当 $u \leq P_i$ 且目标距离小于最大发现距离时, 雷达发现载机; 当 $u > P_i$ 时, 雷达未发现载机。

4) 遭遇判断模型

首先计算当前时刻 t_i 导弹斜距 D_{di} 。再计算当前时刻载机新的位置及其距雷达的距离。通过计算导弹与载机间距离是否小于弹目遭遇距离, 来判断是否遭遇。

5) 地空导弹与 ARM 谁先到达的时间差计算模型

$$OS_0 = \sqrt{D_0^2 - H^2 - P^2} \quad OS_1 = OS_0 - V_m t_{bd} = \sqrt{D_0^2 - H^2 - P^2} - V_m t_{bd}$$

$$D_1^2 = OS_1^2 + P^2 + H^2 = D_0^2 + 2\sqrt{D_0^2 - H^2 - P^2} V_m t_{bd} + (V_m t_{bd})^2$$

$$D_1 = \sqrt{D_0^2 + 2\sqrt{D_0^2 - H^2 - P^2} V_m t_{bd} + (V_m t_{bd})^2}$$

同理:

$$D_2 = \sqrt{D_0^2 + 2\sqrt{D_0^2 - H^2 - P^2} V_m t_{jf} + (V_m t_{jf})^2}$$

则可得:

$$t_d = t_{bd} + \frac{D_1}{V_m + V_d} = t_{bd} + \frac{\sqrt{D_0^2 + 2\sqrt{D_0^2 - H^2} - P^2 V_m t_{bd} + (V_m t_{bd})^2}}{V_m + V_d}$$

$$t_f = t_{jf} + \frac{D_2}{V_{ARM}} = t_{jf} + \frac{\sqrt{D_0^2 + 2\sqrt{D_0^2 - H^2} - P^2 V_m t_{jf} + (V_m t_{jf})^2}}{V_{ARM}}$$

$$\Delta t = t_f - t_d = t_{jf} + \frac{\sqrt{D_0^2 + 2\sqrt{D_0^2 - H^2} - P^2 V_m t_{jf} + (V_m t_{jf})^2}}{V_{ARM}} -$$

$$t_{bd} - \frac{\sqrt{D_0^2 + 2\sqrt{D_0^2 - H^2} - P^2 V_m t_{bd} + (V_m t_{bd})^2}}{V_m + V_d}$$

6) 最佳区域计算

以 ARM 载机作为临时实体,接受永久实体(地空导弹)的服务。即保证空间区域即为最佳区域,除最佳区域以外的原有杀伤区则是危险杀伤区。在危险杀伤区内则应关闭雷达,保持静默。若地空导弹与载机在最佳区域的遭遇,可保证 10 s 的安全关机时间。即雷达在制导导弹与载机遭遇后,立即采取关机等防护措施,则可以使载机发射的 ARM 命中概率降低,而不足以对雷达产生完全杀伤。

3 地空导弹攻击 ARM 载机最佳区域仿真实例

3.1 垂直最佳区域

仿真作如下设定:载机航路捷径 0 km,飞行速度 400 m/s,反应时间 12 s,地空导弹反应时间 10 s。

1) ARM 的平均飞行速度为 600 m/s 时

保持原杀伤区的高界、低界、远界不变,对近界进行修正,得到垂直最佳区域,如图 3 所示。图 3 中剖面 ABCFGE 为原垂直杀伤区;APQED 为仅考虑最近安全关机时间的近界;AED 为考虑最近安全关机时间和单发杀伤概率的近界,即为垂直最佳区域的近界;剖面 ABCDE 为垂直最佳区域,它是对原垂直杀伤区的近界修正后得到的。

2) ARM 的平均飞行速度为 800 m/s 时

保持原杀伤区的高界、低界、远界不变,对近界进行修正,得到垂直最佳区域,如图 4 所示。图 4 中剖面 ABCDEFG 为原垂直杀伤区;BD 为考虑最近安全关机时间和单发杀伤概率的近界,即为垂直最佳区域的近界;剖面 BCD 为垂直最佳区域,它是对原垂直杀伤区的近界修正后得到的。

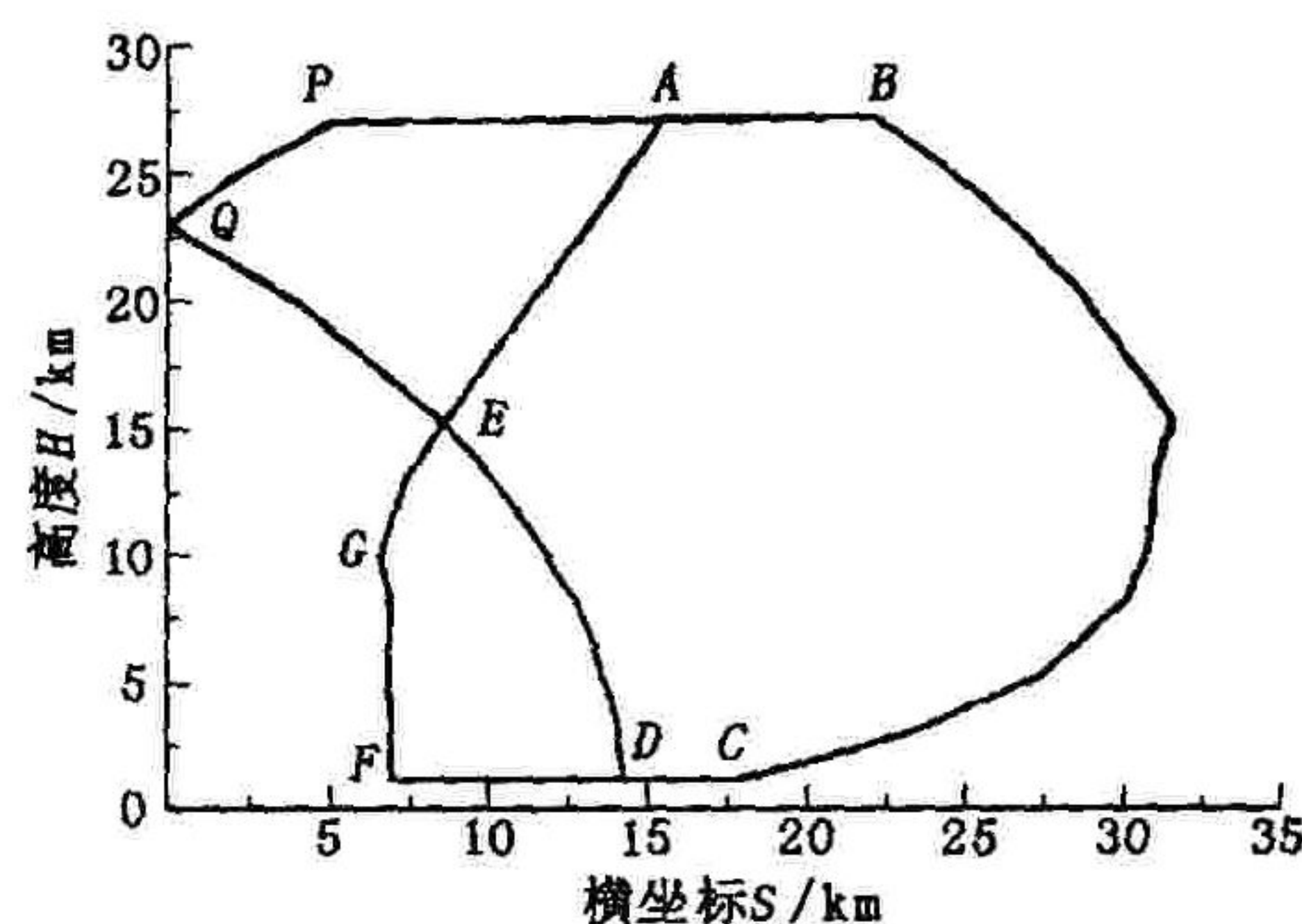


图 3 垂直最佳区域($V_{ARM} = 600$ m/s)

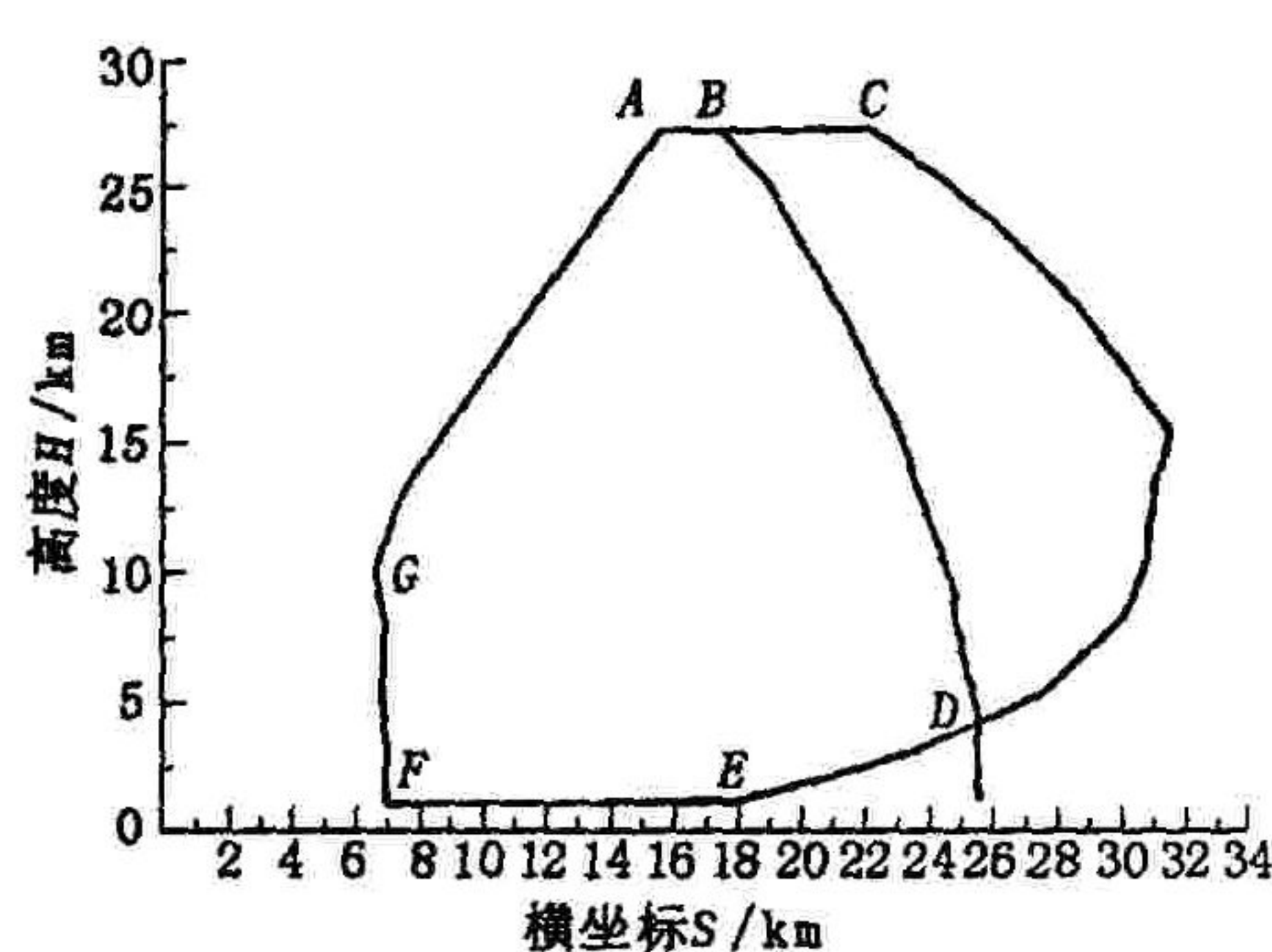


图 4 垂直最佳区域($V_{ARM} = 800$ m/s)

3.2 水平最佳区域仿真

仿真作如下设定:载机的飞行高度为 10 km,飞行速度 400 m/s,反应时间 12 s,地空导弹反应时间 10 s。可以得到水平最佳区域如图 5 所示,其中: d_{sj} 表示水平最佳区域的近界。

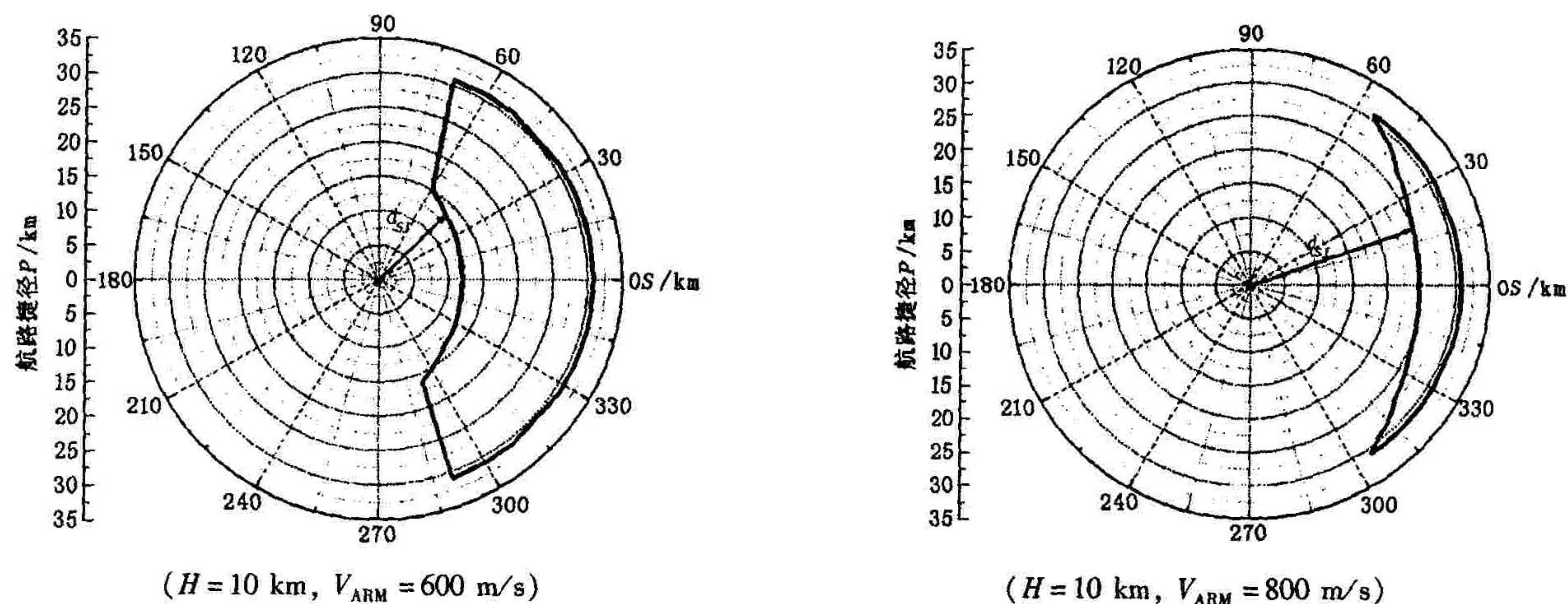


图5 水平最佳区域

4 结束语

随着 ARM 的平均飞行速度的增加,地空导弹杀伤区逐渐减小,所以地空导弹杀伤 ARM 载机的难度较大。一般应尽早发现、识别 ARM 载机,保证充分的准备时间,力争在最佳区域内消灭载机,然后应立即进行各种防护,以减小损失。

鉴于 ARM 对地面雷达的巨大威胁,所以在技术上要进一步研制新的能够反 ARM 的雷达,如无源雷达^[11]。另外,由于 ARM 载机同一时刻只能攻击一部雷达,所以可以采取雷达轮流开关机的方法跟踪载机,这样利于提高效率和自身的安全程度。

参考文献:

- [1] 俞开堂,曹淑信.特种空袭目标与对抗理论研究[M].北京:国防大学出版社,2000.
- [2] 寇占霖.地空导弹射击理论及其应用[M].三原:空军导弹学院,1998.
- [3] 张安,张耀中,王安丽.防区外空地反辐射导弹攻击区及作战效能仿真[J].飞行力学,2002,20(3):66-69.
- [4] 徐品高.防空导弹体系总体设计[M].北京:宇航出版社,1996.
- [5] 王维平.离散事件系统建模与仿真[M].长沙:国防科技大学出版社,1997.
- [6] 张安,周志刚.航空综合火力控制原理[M].陕西:西北工业大学出版社,1997.
- [7] 林象平.雷达对抗原理[M].西安:西北电讯工程学院,1985.
- [8] 刘健.地空导弹对非典型目标拦截能力的仿真计算方法[J].火力与指挥控制,2003,28(4):61-67.
- [9] 张安,李相民.对地攻击航空武器系统突防作战效能研究[J].电光与控制,2004,11(1):6-9.
- [10] 张肃,王颖龙,曹泽阳.战区反导拦截效率模型研究[J].空军工程大学学报(自然科学版),2004,5(4):34-36.
- [11] 崔怀华.提高地空导弹武器系统生存能力的基本途径[J].系统工程与电子技术,1992,14(9):14-18.

(编辑:田新华)

Simulation Study of the Best Region of Ground-to-air Missile Firing

the ARM Attacker

ZHANG Su, CAO Ze-yang, WANG Ying-long

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: Because the measure angle error of ARM greatly affects the hitting precision and killing probability, for the ground-to-air missile there exist the nearest safe distance and time of closing the radar when firing the ARM attacker. Based on this, the paper is the first to put forward the concept of the best-firing region when the ground-to-air missile firing the ARM attacker. The sectional views of the vertical and horizontal best-firing regions under two different speeds of ARM assaulting are obtained through the simulation model.

Key words: ground-to-air missile; ARM; ARM attacker; best region; kill zone; fire; simulation