

DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2016.04.008

中远距空空导弹射后效能动态评估^{*}

孙兆雨^{1,2}, 张安柯²

(1 光电控制技术重点实验室, 河南洛阳 471000;

2 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南洛阳 471000)

摘 要: 针对中远程空空导弹发射后的效能评估问题, 文中提出了基于导弹射后攻击区的动态效能评估方法, 阐述了动态评估的方案、原理和模型。并基于某型中距空空导弹数学模型, 验证了在典型空战态势下该评估方法的作用。仿真表明, 基于射后攻击区的动态评估技术能够为飞行员提供更多态势信息, 有利于提高作战效能。

关键词: 动态效能评估; 态势感知; 射后攻击区

中图分类号: TJ765.4 **文献标志码:** A

Dynamic Effectiveness Evaluation of Intermediate-long-range Air-to-air Missile After Being Launched

SUN Zhaoyu^{1,2}, ZHANG Anke²

(1 Science and Technology on Electro-optical Control Laboratory, Henan, Luoyang 471000, China;

2 Luoyang Institute of Electro-optical Equipment, AVIC, Henan Luoyang 471000, China)

Abstract: Dynamic effectiveness evaluation based on attack zone of air-to-air missile (AAM) was presented to evaluate effectiveness after AAM being launched. Based on mathematic model of an AAM which comprises pneumatic model and kinetic model and so on, the effect of effectiveness evaluation method was verified under typical condition. The simulation results indicate the dynamic effectiveness evaluation based on attack zone of AAM after being launched can provide more situation awareness (SA) for pilot so as to improve combat efficiency.

Keywords: dynamic effectiveness evaluation; situation awareness; attack zone of AAM after being launched

0 引言

超视距空空导弹^[1]的研制和使用,使得超视距(beyond visual range, BVR)空战已经成为现代空中作战的主要打击形式之一^[2]。但目前仍存有两个问题:

问题一: 超视距空空导弹发射所使用的三线攻击区由最大可攻击区、最小可攻击区、不可逃逸攻击区级成。而不可逃逸攻击区和最大可攻击区之间存在几十公里的空档,在此之间发射导弹,飞行员在几十秒内都无法得到关于导弹的效能信息,只能盲目等待。

问题二: 超视距空空导弹的中制导过程通常采用指令+惯导的制导方式^[3],这需要载机发射导弹以后仍然对目标进行跟踪直到导弹进入末制导阶段。在中制导段,载机机动受到限制。同时实战表明,由于目标机动、电子干扰以及其他误差因素,中远距导弹命中概率较低。这就造成在某些情况下,导弹已经不能击中目标,但载机还需要对其进行中制导,从而限制了载机机动,增加了作战风险,降低了作战效能。

目前对导弹效能的研究都集中在目标逃逸机动的效果^[4]。针对上述问题,文献[3]提出一种基于导弹射后截获概率和命中概率来评估导弹效能的方法。文中将详细介绍中远程空空导弹射后动态评估的概念、目的,并提出了一种动态评估方案,分析其在空战中的实际作用。

1 空空导弹射后动态效能评估

1.1 空空导弹射后动态效能评估

空空导弹射后动态效能评估是指: 在空空导弹发射以后,根据导弹、目标的状态信息,动态的评估导弹能否命中目标,完成作战使命。

空空导弹射后动态效能评估的目的是为了: 1) 在导弹不能命中目标的情况下给飞行员信息提示,放弃中制导,减少被动等待时间; 2) 减少超视距导弹最大和不可逃逸攻击区之间存在的信息盲区。

1.2 评估方案

基于动态效能评估的概念和目的,空空导弹动态

* 收稿日期: 2015-10-19

作者简介: 孙兆雨(1981-)男,吉林四平人,工程师,硕士,研究方向: 系统工程。

效能评估方案思想如下:

建立一个独立的评估系统模块,将其加载到火控计算机(FCC)中,该模块对发射后的导弹进行动态评估;该模块在导弹发射时刻启动;该模块的输入为周期更新的目标、导弹状态信息,输出为周期更新的评估信息;并将评估信息处理以后通过总线发送到平视显示器(HUD)上。飞行员根据平视显示器上信息进行判断是否继续对该枚导弹进行制导。

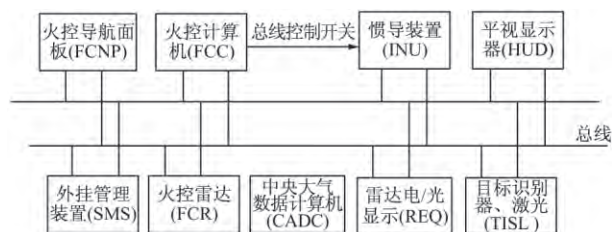


图1 某型综合火控系统结构

1.3 评估原理和模型

1.3.1 评估原理

评估系统的运行原理是采用机载火控计算机对导弹攻击目标过程进行弹道模拟,根据评估时刻的导弹目标和状态信息,利用导弹、目标三自由度运动模型,导弹推力、制导、气动运动等数学模型,对该时刻之后的导弹攻击过程进行弹道模拟,根据导弹命中约束条件判断是否满足命中条件。

导弹攻击目标过程如图2所示, t_0 时刻载机(红色)发射导弹后,评估系统开始启动,根据 t_0 时刻导弹和目标状态信息,模拟 t_0 时刻之后导弹攻击目标的运动轨迹,根据导弹命中约束条件,判断得到导弹命中有效性评估信息; t_1, t_2, \dots, t_k 时刻到来时,评估系统的工作原理与 t_0 时刻相同,每经过一个评估周期 T ,评估系统都按上述方法进行评估。直到评估信息显示导弹不能命中目标或者中制导段结束。

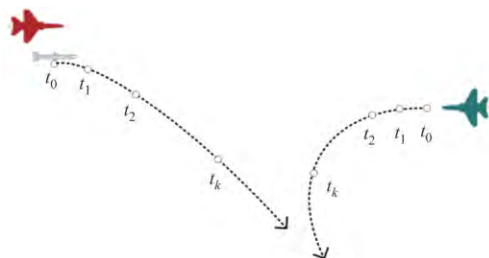


图2 导弹攻击目标过程

1.3.2 评估模型

导弹和目标数学模型是评估系统的关键。六自由度导弹运动模型精度高,但过于复杂,不能满足评估系统实时性要求,所以文中采用三自由度导弹运动方程。导弹运动模型、弹目相对运动模型、大气模型、

制导律模型、发动机推力模型等数学模型在文献[6-7]中已有详细介绍,此处不再赘述。

1.3.3 目标运动假设

在实际空战中,目标将采取的机动是不可预测的,如果利用目标机动估计值来评估导弹有效性可能会出现错误信息。所以在效能评估时,对目标进行一个假设:假设目标将来的机动为做匀速直线运动。该假设的思想是:如果在当前评估时刻,导弹不能击中一个直线运动的目标,那么导弹更不可能命中一个智能体操纵的飞机。

1.4 评估信息

选择哪种物理量作为评估系统的评估信息非常重要,评估信息既用于导弹有效性评估,也作为评估结果反馈给飞行员。综合考虑导弹攻击过程和飞行员的决策可行性及可靠性,作为评估信息的物理量选取分为两种情况。导弹能够命中目标时:①导弹截获概率;②导弹杀伤概率;③导弹射后可攻击距离与弹目距离的比值。导弹不能命中目标时:①导弹不能命中目标的起始时间;②累计不能命中时间。

导引头截获概率的详细计算方法可以参考文献[8-9],导引头截获概率按下式计算:

$$P_c = P_a P_r P_v \quad (1)$$

式中 P_a 、 P_r 、 P_v 分别为角度截获、距离截获、速度截获概率。

导弹杀伤概率计算方法可以参考文献[10],导弹单发杀伤概率计算公式为:

$$P_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(y, z) \Phi_1(x/y, z) \times \Phi_2(y, z) G(x, y, z) dx dy dz \quad (2)$$

式中: $f(y, z)$ 为制导误差概率密度; $\Phi_1(x/y, z)$ 为引爆点沿 x 轴散步的概率密度; $\Phi_2(y, z)$ 为引信起爆概率; $G(x, y, z)$ 为战斗部在 (x, y, z) 点目标坐标杀伤概率。

导弹射后可攻击距离的概念和计算方法可见文献[11],射后可攻击距离与弹目距离的比值为:

$$K = D_{gj}/D_{TM} \quad (3)$$

式中: D_{gj} 为射后可攻击距离; D_{TM} 为导弹和目标距离。 K 值是判断导弹有效性的重要指标。

导弹不能命中目标的起始时间可由 K 值确定,如果在 t_k 时刻起, $K < 1$,则导弹不能命中目标的起始时间为 t_k 。累计不能命中时间 T_{no} 可由下式得出:

$$T_{no} = nT \quad (4)$$

式中: n 是指导弹不能命中目标的累计的评估周期数; T 为评估周期。

1.5 评估系统要求

1) 评估系统须实时获取目标、导弹信息

评估系统必须实时获取目标、导弹信息才能对导弹效能进行评估。目标状态信息可由机载雷达获取。导弹状态信息可通过载机和导弹间的双向数据链路获取;也可通过模拟导弹飞行来获得导弹状态信息,但其存在较大误差。

2) 评估系统必须能够同时评估多枚导弹效能。

3) 评估系统需兼顾准确性和过程快速性。

上面介绍了评估系统的方案、原理、要求等。下文将分析在典型空战情况下,利用射后攻击区评估导弹效能的作用。

2 仿真分析

在超视距空中拦截作战中,第一波攻击发生在几十甚至一百公里以外,评估系统在空战拦截的典型应用如下。

表1 初始状态参数

仿真对象	状态参数			
	R_0/km	$V_0/(\text{m/s})$	飞行偏角/ $^\circ$	机动方式
目标	(80 8 ρ)	300	180	左转弯机动
载机	(0 8 ρ)	400	0	按需机动

在超视距拦截作战中,假设我方飞机挂载超视距空空导弹,载机和目标初始状态信息如表1所示。此时目标已经进入我机超视距空空导弹最大可攻击区内,我机锁定目标并发射一枚超视距空空导弹进行拦截,评估系统开始工作并持续计算导弹对目标的射后可攻击距离。10 s后敌机发现我方发射导弹后进行左转弯机动,机动加速度为4 g。机载评估系统通过雷达传感器和弹载数据链获得更新后的目标和导弹的速度、角度和位置等信息,近实时地解算发射后的导弹对该目标的射后攻击距离,解算得出的导弹射后攻击距离和弹目相对距离变化趋势(如图3所示),导弹飞行轨迹(如图4所示)。

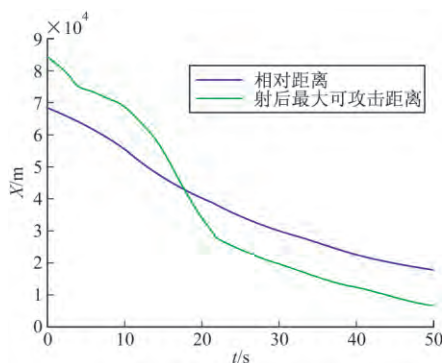


图3 弹目距离和射后最大可攻击距离变化趋势

从图4可以看出,虽然发射时刻目标处于我机导弹的最大攻击区范围内,但是由于目标采取规避机

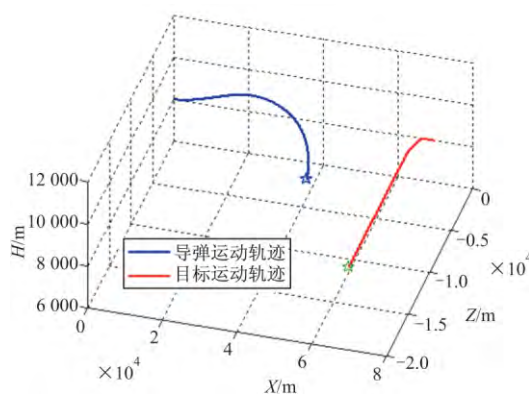


图4 导弹拦截轨迹

动,导弹并没有击中目标;从图3中更能直观的得出已发射导弹的命中效能信息,从弹目距离以及射后可攻击区的变化趋势可以看出:当我机发射导弹时刻,相对距离小于射后最大可攻击距离;当我机发射导弹17 s以后,导弹的射后最大攻击距离小于弹目距离, $K < 1$,据此评估系统将反馈飞行员已发射的导弹不能命中目标的提示信息,飞行员因此可选择放弃中制导。而在此次超视距拦截过程中,导弹中制导阶段需要耗时1 min左右,也就是说在本次拦截作战中评估系统能够为飞行员节约40 s的宝贵时间,这在瞬息万变的空中交战中至关重要。上述实例说明,采用射后攻击距离做评估信息的评估系统,能够为飞行员提供更多空中态势信息,及时采取措施,降低作战风险,提高作战效能。

3 结束语

文中首先阐述了一种中远程空空导弹动态效能评估方案,分析了评估原理和评估信息的选择,研究了评估系统的要求;最后利用一个空战实例验证了该动态效能评估方法的有效性。

超视距空空导弹射后动态效能评估能够为飞行员提供更多信息,克服超视距作战中导弹飞行过程中的信息盲区,减少被动等待时间,更好地实现“杀伤敌方,保卫自己”的目的。空空导弹射后动态效能评估涉及到载机导弹、目标等状态和运动信息,该方案需要研究的内容包括,导弹状态信息的获取方式、评估系统的运算效率以及评估系统与当前火控系统的融合问题。

参考文献:

- [1] 樊会涛. 空战制胜“四先”原则[J]. 航空兵器, 2013(1): 3-7.
- [2] 吴文海,周思羽,高丽,等. 超视距空战过程分析[J]. 飞行力学, 2011, 29(6): 45-47.

- [3] 高晓光,罗鹏升,田省民,等. 空空武器射后有效性分析 [J]. 火力指挥与控制, 2010, 35(12): 86-89.
- [4] AKDAG Remzi. A comparative study on practical evasive maneuvers against proportional navigation missiles: AIAA 2005-6352 [R]. 2005.
- [5] RAIVIO T, RANTA J. Optimal missile avoidance trajectory synthesis in the endgame [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 2002.
- [6] 樊会涛. 空空导弹方案设计原理 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 182-197.
- [7] 周志刚. 机载火力控制系统分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 260-272.
- [8] 樊会涛. 复合制导空空导弹截获目标概率研究 [J]. 航空学报, 2010, 31(6): 1225-1228.
- [9] 秦玉亮, 李宏, 王宏强, 等. 复合导引头交接班成功概率的建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4736-4738.
- [10] 潘旺华, 杨希祥, 廖英, 等. 远程空空导弹单发杀伤概率研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(3): 1-3.
- [11] 吴胜亮, 南英. 空空导弹射后动态可攻击区计算 [J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(5): 49-54.

(上接第28页)

将上述计算结果与数学计算结果进行对比, 搜索算法计算结果与数学计算结果基本吻合, 搜索算法计算的精度可以满足射击指挥的使用需求。

4 结束语

综上所述, 文中提出的搜索算法能够很好解决地空导弹对机动目标射击时机的确定问题。与数学计算结合图上作业的方法相比, 该算法具有以下优点。

1) 通用性。该算法适用于不同的作战模式、目标机动方式、地空导弹武器系统。算法如果采用模块化设计, 不同的作战模式、目标机动方式。地空导弹武器系统只影响算法的部分模块, 甚至只影响部分参数设置。这就使算法具有普遍的适用性和很高的开发效率。

2) 简便性。搜索算法用搜索过程代替计算过程, 能有效降低算法的复杂性。目标在水平机动过程中, 如果进行匀加速, 或者进行蛇形机动, 用数学计算的方法将十分复杂^[10], 而用搜索算法则能化繁为简。

3) 实用性。现有的可靠发射区理论主要用于确定目标实施机动与不机动的共同发射区, 其基本假设是在地空导弹发射前目标保持平直等速飞行。对于目标实施机动早于地空导弹发射的情况, 用可靠发射区理论来确定射击时机将是困难的。而搜索算法直接求解不同作战模式下, 指挥员对机动目标射击时机关注的重点。因此, 算法具有很强的实用性。

搜索算法不可避免地会带来运行效率较低的问题。上述算例中, 求解平台中心战模式下制导雷达开

天线区和网络中心战模式下地空导弹对机动目标的发射区, 在硬件配置为 CPU 主频 2.94 GHz、内存容量 2 GB 的计算机下, 分别耗时 7.625 s 和 7.266 s。因此, 该算法更适合用于指挥信息系统中的辅助决策系统或任务规划系统。如需提高算法的实时性, 一方面可以采用分布式计算的方法, 一方面可以对搜索算法进行深层次的优化。这正是下一阶段的研究方向。

参考文献:

- [1] 马栓柱, 刘飞. 地空导弹射击学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2012: 240-245.
- [2] 陈辉亭. 中国地空导弹部队作战实录 [M]. 北京: 解放军文艺出版社, 2008: 216-230.
- [3] 段立波, 李伟, 张大鹏. “全球鹰”航空侦察对地面防空兵抗击行动的影响 [J]. 空军工程大学学报(军事科学版), 2014(2): 30-31.
- [4] 姜寿春. 地空导弹射击指挥控制模型 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 147-151.
- [5] 毛昭军, 李云芝. 网络化防空反导体系一体化火力控制问题 [J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(6): 5-9.
- [6] 马雷挺, 方立恭, 金钊, 等. 舰空导弹对飞机目标近快战发射区研究 [J]. 现代防御技术, 2008, 36(3): 17-21.
- [7] 武思军. 防空反导网络化作战发展研究 [J]. 现代防御技术, 2012, 40(1): 55-59.
- [8] 程明阳, 路学荣. 机载导弹逼近告警系统分析 [J]. 航空兵器, 2007(4): 49-53.
- [9] 张洁. 机载导弹逼近告警技术发展分析 [J]. 舰船电子工程, 2007, 34(11): 19-23.
- [10] 王立军, 周家杰. 机动目标对舰空导弹发射区的影响 [J]. 论证与研究, 2014, 30(2): 43-47.