

红外成像导引头复杂环境适应性评估技术

张晓阳^{1,2}, 王炜强¹, 付奎生^{1,2}

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2. 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要:针对红外成像空空导弹的复杂环境适应性评估需求,研究确定了复杂环境的内涵和构成要素。认为复杂环境是种类众多、数量众多的事物及其交互因素构成的难以被导引头分析和理解的场景。定义了因素复杂度和对抗复杂度来量化描述作战环境的复杂程度,提出了建立导引头指标体系的方法,研究了复杂环境指标和导引头指标的体系对应关系。确立了评估导引头复杂环境适应性的概率准则和效率准则,制定了仿真方案和评价指标体系。基于此建立了包括目标干扰模型、背景模型、红外成像导弹模型、仿真结果统计评价等模块的红外成像空空导弹环境适应性仿真评估平台,实现了从靶试条件、仿真结果到劣化指标的快速准确定位,能够评估导引头的环境适应能力,并为其设计改进提供依据。

关键词:红外成像导引头;复杂环境;性能评估;抗干扰

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.12.006

Adaptability evaluation of IR seeker in complicated environment

ZHANG Xiao-yang^{1,2}, WANG Wei-qiang¹, FU Kui-sheng^{1,2}

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China)

Abstract: Focusing on the evaluation requirements of IR Imaging Air-to-Air Missile's adaptability to complex environment, the concept and compositions of complex environment are established and discussed. The complex environment means the composition of different kinds of things and their interacting factors which are difficult to be analyzed and understood by the IR seeker. Factor complexity and countermeasure complexity are defined to describe the complex environment. The seeker's index system is established, and the correlation between complex environment's indexes and seeker's performance indexes is also researched. Furthermore, the evaluation rules including Probability Rule and Efficiency Rule are given. Simulation scheme and evaluation index system are also proposed. One simulation and evaluation platform for IR Imaging Air-to-Air Missile including typical target and decoy module, background module, missile module and simulation evaluation module is established. This platform realizes fast and accurate adaptability evaluation and provides basis to improve the design of IR imaging seeker.

Key words: infrared imaging seeker; complex environment; adaptability evaluation; countermeasure

1 引言

为降低或克服红外制导导弹的威胁,各种反制手段迅速发展起来,主要包括红外诱饵、红外干扰机、激光干扰等^[1-4]。在诱饵干扰弹的使用方面,文献[5]论述了质心干扰中泊条弹、红外弹发射间隔不当的危害,给出了计算发射间隔的方法。文献[6]提出了精确控制红外诱饵弹的发射时机、方

向和速度,诱使引信工作主动引爆来袭导弹来保护本机的干扰方法。文献[7]研究了诱饵弹多组间隔

基金项目:航空科学基金(No. 2008ZC12005)资助。

作者简介:张晓阳(1975-),男,博士,高级工程师,主要从事红外成像导弹仿真及性能评估方面的研究工作。E-mail: fieldzhang@tom.com

收稿日期:2012-04-18;修订日期:2012-05-05

发射情形下,导弹脱靶量和诱饵强度、发射速度、发射间隔的关系。同时由于红外制导弹作战任务的扩展及应用范围的外延,一些非人为的自然干扰也在影响着导弹性能发挥,比如对地攻击时的复杂地物背景及高速攻击时的气动热等。这就要求红外制导弹必需具备一定的环境适应能力,因此近年来武器装备的环境适应性能力日益受到重视,成为衡量其作战效能的重要指标之一。

把环境适应性定义为导弹在复杂的空战环境或作战要求下完成既定作战目标和任务的能力。不仅包括自然环境,还包括人为环境和导弹使用方式等。对空空导弹而言,后二者的影响更为重要。导引头作为导弹多个关键战技指标的落脚点,评估和衡量其在复杂空战环境下的适应性已经成为设计、试验及使用人员共同关心的问题。本文结合考核需求,研究复杂环境的内涵及要素,构建仿真评估平台,建立复杂环境指标和导引头指标间的对应关系,为导引头性能判定和设计改进提供依据。

2 复杂环境内涵及构成要素

复杂环境定义为种类、数量众多的事物及其交互因素构成的难以被导引头分析和理解的场景,包括目标特性、人为因素、自然环境、弹目作用等因素。

2.1 目标特性

目标特性是导弹必须适应的环境因素之一,包括红外辐射特性和运动特性。目标机的红外辐射特性与其发动机的工作状态、导弹的观察视角有关。运动特性包括飞行高度、速度、机动能力及方式等。在攻防对抗过程中,目标机会进行各种机动飞行,随着目标运动特性的变化,其辐射特性也会发生较大的变化,因此导引头必须适应这种辐射变化。

2.2 对抗模式

现代飞机一般会根据空战中的弹目态势来选择合适的对抗模式,以获得最大的对抗效率。对红外成像导弹而言,当前和未来所面对的人为对抗手段主要是红外诱饵弹和定向干扰机,定向干扰机以激光干扰为主要研究方向,可能会造成导引头眩晕或失效。

红外诱饵包括欺骗式诱饵与伴飞式红外诱饵,其辐射特性与高度、速度有关,高度越高,速度越快,辐射强度越弱。红外诱饵弹是一种主要的欺骗式诱饵,干扰模式的不同会形成不同的目标干扰辐射比和相对位置关系,影响因素包括辐射特性、投射方向、投射速度、投射数量、投射时机、投射间隔等。

2.3 自然环境

自然环境会导致导引头视场中的辐射背景更加

复杂,有太阳辐射、云层辐射、大地背景辐射等。所处地理经纬度、季节、云和雨模型、气溶胶模型等因素的差异会导致大气透过率不同。自然环境因素的复杂度及其与目标特性的对比关系决定导引头是否能够快速、准确地理解场景图像并识别出目标。

2.4 弹目作用

弹目作用过程特性主要包括发射条件和导弹飞行过程中的气动热特性。发射条件主要是指作战高度、发射速度、弹目距离、相对方位等。作战高度不同,对目标机的机动能力和红外辐射特性有影响。作战速度不同,会影响到导弹的攻击区。弹目距离和相对方位不同,导引头所观测的飞机、诱饵图像差异很大,对导弹攻击区有影响。气动热特性与导弹的飞行速度有关,速度越高,气动热越厉害,极端情况下可能造成信噪比过低而使导引头丢失目标。

3 复杂环境的复杂度度量

为刻画环境的复杂性,定义因素复杂度(factor level, FL):构成环境的各因素处于不同状态时对红外成像导引头工作性能的影响程度,影响程度越大,复杂性越高。

对抗复杂度(countermeasure level, CL):攻防过程中,红外成像导引头所观察到的环境中各因素共同构成场景的复杂程度,复杂性越高表明劣化导引头工作的能力越强。

因素复杂度和对抗复杂度满足:

$$CL = \sum_i FL_i \quad (1)$$

各因素复杂度和对抗复杂度如表1和表2所示。

表1 红外成像导引头环境因素复杂度水平

因素名	复杂层级及描述		FL
天空背景	Level1	净空背景	0.0
	Level2	少云背景	0.4
	Level3	多云背景	0.6
目标机机动	Level1	无机动	0.0
	Level2	水平急转	0.2
	Level3	斜半扣	0.3
	Level4	滚转机动	0.5
目标机方位	Level1	尾后	0.2
	Level2	侧向	0.3
	Level3	迎头	0.5
对抗模式	Level1	单颗	0.0
	Level2	连续	0.3
	Level3	分组	0.3
	Level4	齐射	0.4

续表

因素名	复杂层级及描述		FL
发射距离	Level1	远	0.3
	Level2	中	0.3
	Level3	近	0.4
气动热背景	Level1	弱	0.4
	Level2	强	0.6

表2 对抗复杂度水平

复杂水平	CL 值域	描述
Level1	$0 < CL < 1.0$	不复杂
Level2	$1.0 \leq CL \leq 2.0$	较复杂
Level3	$2.0 < CL \leq 3.0$	很复杂

基于上述两个表格,可以得出不同作战条件组合的 CL 值,即作战条件的复杂度,考核时依据复杂度的水平值来选取作战环境条件。

4 复杂环境适应性评估方法

4.1 指标体系

对设计人员来说,要从劣化的总体指标定位到具体劣化部位,需了解与总体指标关联的子系统或部件指标、甚至是软件算法中的一些表征量,确定出真正影响总体性能的因素。通常来说,高层次的目标定义了低层次的需求,不同层次的需求定义不同层次的性能,直到最后为每个对象定义性能指标。反过来,导引头的性能提供导引头环境适应性的输入,并最终反馈到其适应性的度量中。导引头指标体系主要包括两个层次:一是导引头总体层次指标对作战环境条件的适应性描述;二是导引头的各子系统技术指标对作战环境条件的适应性描述。通过上述自动关联后,不仅能回答导引头性能的好坏,而且可具体到各子系统的技术指标。

在开展具体评估活动时,通常划分为不同的层级进行,如图1所示。层次1是对零件的输出信号或特征进行评价和预测。层次2是对导引头部件或算法的状态属性进行评价和预测,即将部件作为一个单独的实体进行评价。层次3是对导引头算法或真实结构部件间的关系或影响进行评价

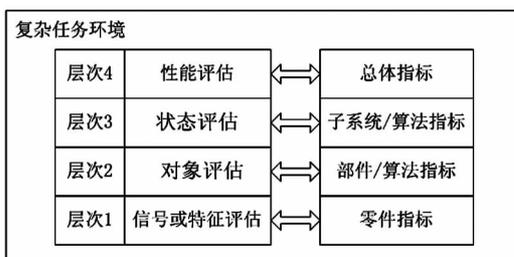


图1 环境适应性评估层级

和预测。层次4是对导引头的系统级性能进行评价和预测。

上述各层次的评估中,性能评估是最困难的,它需要一个系统级的、功能充分的平台来完成复杂环境的适应性仿真,还需要有足够的知识来建立导引头的指标体系,并将其与环境复杂度结合起来。

4.2 评估准则

评估是面向一定目的的,导引头适应环境的目标定位于:能在复杂环境中正确地识别出目标,具有较高的跟踪精度,并输出品质良好的导引信号。从该意义上可以把环境适应性的评估分为能力评估和影响评估两部分。在导引头层面上,主要进行能力评估,影响评估主要放在导弹层面,以脱靶量为指标。

能力评估也可以分为两个方面,一是是否能够完成作战目标,对应的评估准则是概率准则,衡量大量仿真试验中的成功次数;二是完成作战目标情况下,完成状态的好坏,如跟踪过程中丢失过目标又重新正确识别的、跟踪误差较大的等,对应的准则是效率准则。评估的指标可以从识别目标的正确性和快速性、跟踪的平稳性和准确性等方面进行考虑。

5 复杂环境适应性的仿真评估

5.1 仿真评估平台总体结构

仿真模型的总体结构如图2所示,其核心是红外成像空空导弹和导弹的外部工作环境模型两部分。

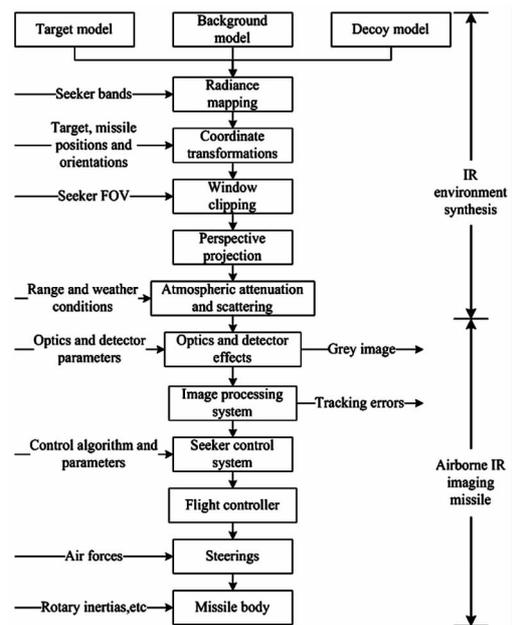


图2 系统总体结构

5.2 目标运动模型

在主要考虑目标飞行性能和机动性能情况下,

可把目标视为质点,其运动学方程为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_t}{dt} &= V_t \cos\theta_s \cos\psi_s \\ \frac{dy_t}{dt} &= V_t \sin\theta_s \\ \frac{dz_t}{dt} &= -V_t \cos\theta_s \cos\psi_s \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, x_t, y_t, z_t 为质心坐标; V_t 为目标飞行速度; θ_s 为航迹倾斜角; ψ_s 为航迹偏转角。

视目标为一个质点时,不考虑飞机的迎角和侧滑运动,作用到飞机上的力为空气动力、重力和发动机推力,用切向过载和法向过载的形式表示质点动力学方程在目标航迹坐标系中的形式为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_t}{dt} &= g(n_x - \sin\theta_s) \\ V_t \frac{d\theta_s}{dt} &= g(n_y \cos\gamma_s - \cos\theta_s) \\ -V_t \cos\theta_s \frac{d\psi_s}{dt} &= gn_y \sin\gamma_s \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, V_t 为飞行速度; θ_s 为航迹倾斜角; ψ_s 为航迹偏转角; γ_s 为航迹滚转角; n_x 为切向过载; n_y 为法向过载。目标机的机动是通过改变切向过载、法向过载和滚转角实现的,典型的机动动作包括平飞加(减)速、俯冲、跃升、筋斗、盘旋、蛇形机动等。

5.3 干扰运动模型

典型的机载红外干扰弹在空中仅受空气阻力和重力作用,其阻力与速度的平方成正比。把刚体质心运动方程投影到干扰轨迹坐标系得其动力学方程为:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dV}{dt} &= F_x = -D - mg \sin\theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} &= F_y = -mg \cos\theta \\ -mV \cos\theta \frac{d\psi}{dt} &= F_z = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中, F_x, F_y, F_z 为三个方向上的作用力; D 为阻力; m 为质量; θ 为轨迹倾角和 ψ 为轨迹偏角。

干扰的质点运动学方程形式与目标一致。

5.4 目标干扰的辐射模型

目标干扰的红外辐射模型是构成复杂场景的关键要素,构建红外场景的方法通常包括理论计算生成法和实测数据生成法。理论计算生成法是直接利用理论物理模型,采用数值计算方法解方程计算的方法来得到红外图像,因计算量太大而往往不能满足仿真的实时性要求。考虑到红外场

景仿真的难点在于难以获得目标准确的体元分布、热源分布、热传递关系以及外界环境条件等因素的影响,因此采用实测数据生成法。红外成像系统实测数据并非物体表面的真实辐射值,而是经过大气衰减和其他效应扰动后的灰度值。利用该数据获得场景辐射值是数据测量的逆过程,须先在测量数据和与之对应的辐射值之间进行映射,然后将对应出来的辐射数据进行修正,从而得到真实辐射值。将这些真实值制作成红外纹理,并将其映射到三维的场景模型上去,用场景驱动软件实现场景。

5.5 云背景红外辐射模型

天空背景模型是通过生成云天空背景纹理映射方法实现的。其过程先是利用 Multigen Creator 创建一个 Billboard,作为天空背景的模式;再使用其中的 Modify UVs 纹理映射方法对三维模型进行纹理映射,并保存为 flt 格式文件,通过调用 flt 文件实现场景的驱动。

5.6 气动热模型

导弹在大气中高速飞行时,会产生气动加热,整流罩外气体流场会形成一个弓形激波,温度、密度和压力会发生很大梯度的变化。产生的效应可分为气动热辐射效应和气动光学传输效应两类。前者的危害是受热整流罩及其周围的高温气流的辐射导致图像信噪比下降和图像品质劣化,甚至造成成像系统饱和。后者的危害是整流罩外流场及其受热后的物性变化,导致图像模糊、抖动、偏移和能量衰减。相比而言,气动热辐射效应是主要因素,气动热辐射源主要包括外部流场辐射和高温整流罩的辐射,需在建模时考虑。

5.7 仿真方案及结果评估

除弹道条件外,红外成像导引头环境适应性评估需要考虑的其他主要因素如表 1 所示,将其中相互独立的各因素划分为 3 水平,可构成正交试验方案。方案中的因素组合为不同的对抗复杂度场景,则 n 个因素的试验条件总数为 3^n ,如果每种条件进行 5~10 次重复,则需要进行的次数为 $5 \times 3^n \sim 10 \times 3^n$ 。在具体实施时可根据目的,对因素进行取舍。

导引头适应环境能力的评估,可以分解为探测性能、跟踪性能以及抗干扰性能三个子目标的评估。其中抗干扰性能包括抗自然背景干扰以及抗人工干扰性能,在仿真平台中配置目标机、弹道条件、诱饵干扰弹、气动热以及自然背景等要素,形成正交实验

方案如表3所示。

表3 环境适应性综合仿真评估方案

序号	特性	因素	仿真维度	
			独立	联合
1	目标运动特性	机动能力(过载)	3	3
2		机动方式	3	
3	目标辐射特性	目标辐射强度	3	3
4		目标大小(类型)	3	
5	气动热特性	气动热背景均值	3	3
6		气动热背景标准差	3	
7	干扰辐射特性	干扰辐射强度	3	7
8		干扰辐射强度闪烁	3	
9		干扰大小	3	
10	干扰投放特性	投放模式	3	7
11		起投时间	3	
12		投放间隔	3	
13	背景特性	背景辐射不均匀性	3	3
综合仿真维度			3 ¹³	1701

仿真结果显示,失败次数占试验总次数的14%,成功但存在问题的占4%。其中48%涉及抗干扰性能,34%涉及探测性能,18%涉及跟踪性能。通过关键因素分析可知,主要影响因素有诱饵弹、气动热和目标能量闪烁等。

6 结论

随着光电对抗技术的不断进步及武器装备作战任务和范围的扩展,对其在复杂环境中完成既定作战目标和任务的能力提出了较高要求,环境适应性必将成为研究武器装备作战效能的一个长期话题。本文以红外成像导弹为对象,研究了其复杂作战环境的含义及要素,定义了因素复杂度和对抗复杂度来描述导引头作战环境的复杂程度,提出了描述成败的概率准则和描述优劣的效率准则,研究了进行环境适应性仿真评估的方案,为定量评估导引头的环境适应性打下基础。

参考文献:

- [1] D H Titterton. A review of the development of optical countermeasure [C]. Proceedings of SPIE, Technologies for Optical Countermeasure, 2004, 5615: 1 - 15.
- [2] D H Titterton. A consideration of the requirements for laser devices used in countermeasure applications [C].

Proceedings of SPIE, 2007, 6451: 64511Q1 - 14.

- [3] Fang Youpei, Qian Jianping. Jamming technology research to the imaging IR guidance missile [J]. Infrared and Laser Engineering, 2000, 29(3): 7 - 14. (in Chinese)
方有培, 钱建平. 对红外成像制导导弹的干扰技术研究 [J]. 红外与激光工程, 2000, 29(3): 7 - 14.
- [4] Wang Jun, Jiang Peng, Gao Jiaobo, et al. Study on the spectral radiation characteristics of airborne infrared decoy [J]. Laser & Infrared, 1999, 29(3): 170 - 172. (in Chinese)
王军, 蒋鹏, 高教波, 等. 机载红外诱饵弹光谱辐射特性研究 [J]. 激光与红外, 1999, 29(3): 170 - 172.
- [5] Zhao Enqi, Niu Jitao. The discussion of the airboard IR flare dispensed interval time in the centroid jamming [J]. Electro-optics & Passive Countermeasures, 2002, (3): 19 - 22. (in Chinese)
赵恩起, 牛继涛. 质心干扰中机载红外弹、泊条弹投放间隔时间的讨论 [J]. 光电对抗与无源干扰, 2002, (3): 19 - 22.
- [6] Tong Zhongxiang, Liu Pengfei, Wang Xiaodong, et al. Research optimal jamming method of IR decoy [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(1): 69 - 72. (in Chinese)
童中翔, 刘鹏飞, 王晓东, 等. 红外诱饵弹最佳干扰方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(1): 69 - 72.
- [7] Hu Yifan, Song Bifeng, Wang Xu, et al. Method of evaluating the effect of airborne infrared decoy [J]. Infrared Technology, 2009, 31(3): 136 - 140. (in Chinese)
胡一繁, 宋笔锋, 王旭, 等. 机载红外诱饵弹干扰效果评估方法 [J]. 红外技术, 2009, 31(3): 136 - 140.
- [8] Zhang Xiaoyang, Meng Weihua, Fu Kuisheng, et al. Simulation model for countermeasure test of IR imaging missile [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4): 569 - 572. (in Chinese)
张晓阳, 孟卫华, 付奎生, 等. 用于红外成像导弹抗干扰测试的仿真模型 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 569 - 572.
- [9] Zhang Xiaoyang, Fu Kuisheng, Meng Weihua, et al. Modeling and simulation of infrared imaging seeker for air-to-air missiles [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(22): 5133 - 5136. (in Chinese)
张晓阳, 付奎生, 孟卫华, 等. 空空导弹红外成像导引头建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(22): 5133 - 5136.