

红外成像制导空空导弹半实物仿真技术研究

Research of Infrared Imaging Guide Hardware-in-the-Loop(HWIL) Simulation Technology

吴根水 屠宁 赵松庆 陈海燕 / 中国空空导弹研究院

摘要: 红外成像制导半实物仿真技术可用于红外成像制导武器的研制、试验和性能评定。本文介绍了一种红外成像制导半实物仿真技术, 包括半实物仿真系统设计方案以及仿真方法等。

关键词: 红外成像制导; 半实物仿真; 大离轴; 多干扰

Keywords: infrared imaging guidance; HWIL simulation; abaxial; multi-jamming

0 引言

导弹制导控制系统是一个十分复杂的系统, 其性能如果完全由飞行试验来评定, 不仅增加研制经费、延长研制进度, 而且一些边界条件下的测试也很难在外场实现。而仿真技术为这些问题的解决提供了一种有效的技术手段。建立半实物仿真系统, 可以有效地对红外成像制导武器的性能作出评定。美、英、法等国在红外成像仿真方面已进行了多项研究, 如美国 Naval Air Warfare Center 已经建立了红外成像仿真实验室, 采用了五轴转台和基于 MOS 电阻阵列的景像模拟器; 美国 CSA 公司研制的红外景像模拟器 (IRSP) 也已成功地应用于导弹制导半实物仿真系统中, 在红外成像导弹系统的研制中发挥了重要作用。

1 红外成像制导半实物仿真系统设计方案

针对红外成像制导武器动态范围大、智能化程度高、全天候工作、抗干扰能力强等特点, 红外成像制导半

实物仿真系统应实现以下设计目标:

- 实现红外成像导弹大视场角跟踪和发射后截获, 最大模拟视线角速度大于 $90^\circ/\text{s}$, 最大模拟姿态角不小于 $\pm 90^\circ$;
- 采用成像模拟装置, 实现高帧频图像实时生成、红外景象转换和目标高速视线运动, 考核成像制导系统在目标条件下的跟踪及抗干扰能力;
- 实现导弹推进系统和导弹、目标质点运动的实时数学仿真;
- 实现仿真试验过程的自动化控制。

1.1 目标模拟器设计方案

红外成像制导半实物仿真的关

键是要解决目标模拟器的红外景象转换、高帧频的图像生成和目标高速视线运动。为此, 目标模拟器的设计必须采用高分辨率、高帧速红外图像生成的方法。

本设计采用基于 MOS 电阻阵型的红外成像模拟技术, 目标干扰模拟器由图像生成计算机、修正计算机、图像逻辑控制及驱动器、MOS 热电阻面阵等组成。如图 1 所示, 图像生成计算机实时接收仿真计算机解算的弹目相对运动参数, 生成目标和背景的可见光图像, 通过 PCI 总线上的图像数据传输驱动板, 将数据通过高速串行总

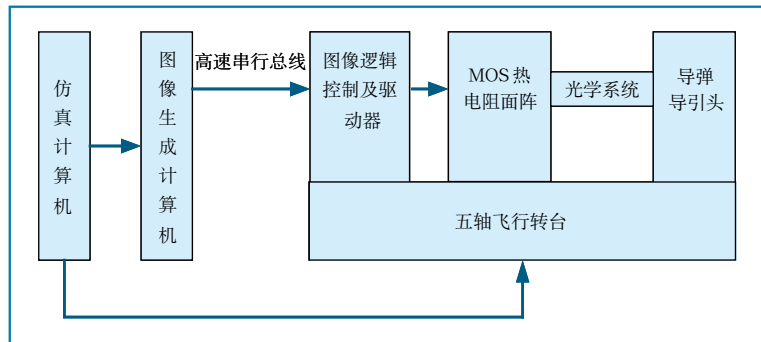


图1 MOS热电阻阵红外目标模拟器仿真试验总体结构框图

线传输给前端的图像逻辑控制及驱动器；图像逻辑控制及驱动器根据图像数据产生驱动MOS热电阻面阵的时序逻辑及灰度信号，由MOS热电阻面阵形成红外热图像，通过光学系统投射给导引头作为图像源。同时，目标模拟器安装在五轴转台的外框上，以五轴转台的两轴框架为载体，带动目标模拟器随动，实现导引头—目标的相对运动。

1.2 惯测信号注入方案

在半实物仿真系统中，位置转台只能复现导弹绕其质心的转动，而无法复现导弹的线运动，即仿真系统无法模拟惯测装置中加速度计探测到的导弹线加速度信息。为了简化仿真系统设计，采用了惯测信号注入的方案，仿真计算机将实时解算出的导弹线加速度信息传

递给惯测模拟器，由惯测模拟器将数字信号转换为脉冲信号，注入导弹惯测接口，实现系统闭合。

1.3 实时网络方案

伴随着仿真技术和计算机技术的发展，以及半实物仿真系统的日趋复杂，分布式控制方案得到广泛应用，而仿真系统各分系统之间的互联方式则成为保证仿真系统稳定性和仿真置信度的关键。虽然半实物仿真网络具有局域网的特征，但局域网的响应时间长且难以预测，并不适合导弹武器系统的半实物仿真。而基于光纤传输介质的实时网络（RTM）则由于传输速度快、延迟小、可靠性高且价格相对低廉等优点而成为必然的选择。

RTM实质上是在各计算机之间建立共享的内存区域，并通过高速光纤

实现不同计算机之间共享内存数据的实时同步。RTM目前具有环形和星形的拓扑结构，数据的传输是软件透明的，没有I/O开销，具有极低的网络响应时间，完全可以满足导弹武器系统仿真对数据更新速率的要求。

1.4 仿真系统实现方案

红外成像半实物仿真系统由红外成像目标模拟器、五轴转台、仿真计算机及仿真模型、负载力矩加载系统、仿真控制台和实时网络组成，如图2所示。

1) 目标干扰模拟器

红外成像目标干扰模拟器为半实物仿真系统产生红外面成像目标和干扰，以及能够代表实际场景的红外辐射特性，是红外成像制导仿真中最关键的子系统。其技术指标如下：

- a) 工作波段：3~12 μm ；
- b) 最大等效黑体温度：200 $^{\circ}\text{C}$ ；
- c) 帧频：150 Hz；
- d) 像元素：128×128；
- e) 灰度等级：256；
- f) 基于PCI图像数据采集卡，传输速率为500MB/s。

2) 五轴转台

五轴转台由三轴飞行模拟转台和两轴目标运动框架组合而成。其中，三轴飞行模拟转台用于模拟导弹在空中飞行时绕自身轴坐标系旋转的姿态运动；两轴目标运动框架用于模拟高低和方位两个方向的目标视线角运动。

五轴转台采用卧式结构形式，指标见表1。

3) 仿真计算机及仿真模型

仿真计算机及仿真模型作为半实物仿真系统的核心，主要承担导弹动力学和运动学方程、目标运动方程及弹目相对运动方程的实时解算、设备驱动等功能。

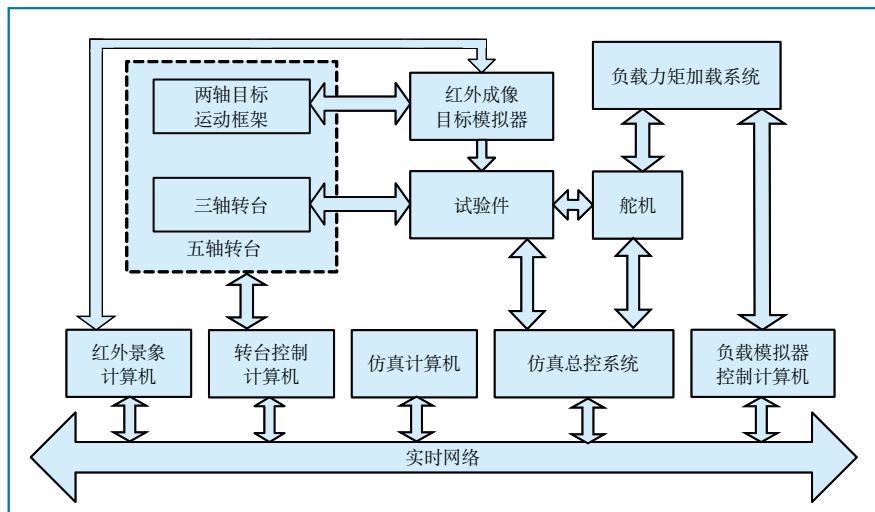


图2 红外成像半实物仿真系统组成简图

表1 五轴转台指标

指标		三轴飞行模拟转台			两轴目标运动框架	
		滚转	偏航	俯仰	高低	方位
转角范围		±360°	±120°	±60°	±60°	±65°
工作 频带 (Hz)	幅值误差≤±10%, 相移≤±10°,A=1.5°	12	8	8	4	4
	幅值误差≤±5%, 相移≤±5°,A=1°	8	5	5	—	—

导弹动力学和运动学方程组如下:

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = P \cos \alpha \cos \beta - X - mg \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} = P(\sin \alpha \cos \gamma_V + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma_V) + Y \cos \gamma_V - Z \sin \gamma_V - mg \cos \theta \\ -mV \cos \theta \frac{d\psi_V}{dt} = P(\sin \alpha \sin \gamma_V - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma_V) + Y \sin \gamma_V + Z \cos \gamma_V \end{cases}$$

$$\begin{cases} J_x \frac{d\omega_x}{dt} + (J_z - J_y) \omega_z \omega_y = M_x \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z = M_y \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x) \omega_y \omega_x = M_z \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V \cos \theta \cos \psi_V \\ \frac{dy}{dt} = V \sin \theta \\ \frac{dz}{dt} = -V \cos \theta \sin \psi_V \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma \\ \frac{d\psi}{dt} = (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma) / \cos \theta \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega_x - \tan \theta (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma) \end{cases}$$

4) 负载力矩加载系统

负载力矩加载系统用来模拟导弹飞行过程中作用在舵面上的气动铰链力矩和推力矢量力矩。为了准确模拟整个飞行控制系统产生的舵面气动力矩和推力矢量力矩,实现对整个飞行控制系统真实气动力和发动机推力的准确跟踪,加载系统必须具备很高的动态跟踪精度和很强的控制鲁棒性。

5) 仿真总控系统

仿真总控系统是半实物仿真系统的控制中心,通过实时网络对系统中各仿真设备集中协调控制,实现产品供电供气控制、发射逻辑控制、飞行任务加载、惯测信号注入、图像信号和遥测数据的采集、仿真系统实时监测与安全保护等功能。

6) 实时网络

在半实物仿真系统中,各仿真设备控制计算机采用仿真实时网络互联,实现数据和指令的传递以及各仿真设备的协调运行。鉴于半实物仿真对数据刷新周期的要求非常苛刻,采用了基于光纤传输介质的实时网络。

2 红外成像仿真试验技术

2.1 仿真试验原理

半实物仿真试验时,红外成像导引头安装在五轴模拟转台的三轴部分,红外成像模拟器安装在五轴转台的两轴目标运动框架上。在仿真计算机的驱动与控制下,红外成像目标模拟器产生导弹所攻击的红外面成像目标、干扰和红外环境的热图像,两轴目标运动框架模拟出目标的空间运动特性。导弹制导系统探测到目标信息后,经过处理形成舵控信号,经舵机系统形成舵偏角信号。仿真设备将采集到的舵偏角信号发送给仿真计算机,经过模型解算,得出导弹姿态角(俯仰角、偏航角和滚动角)以及目标相对视线角,用以控制五轴模拟转台运动。同时,仿真计算机将计算出的导弹加速度信号通过惯测模拟器注入导弹加速度计,完成制导系统半实物仿真系统的闭合。安装在转台上的导弹随三轴飞行模拟转台运动,反映了导弹在空间运动时的姿态角变化;两轴目标运动框架带动目标模拟器,模拟目标相对弹体的运动;控制系统接收注入的惯测信号和导引头传来的导引信号,控制舵系统产生偏转,进而控制导弹飞向并毁伤目标。

2.2 大离轴条件下仿真试验技术

由于受到五轴转台框架的限制,为满足红外成像导弹大离轴发射的需求,可采

用转台预偏的仿真试验技术,在发射初始时刻将五轴转台预先偏置一定的角度,并在此偏置位置上构成实际发射条件,使偏置后的转台框架运动范围满足弹道需要。

转台预偏情况下,五轴转台的驱动方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_z = (\omega_{1y} \sin \gamma_z + \omega_{1z} \cos \gamma_z) / \cos \psi_z \\ \dot{\psi}_z = \omega_{1y} \cos \gamma_z - \omega_{1z} \sin \gamma_z \\ \dot{\gamma}_z = \omega_{1x} + \dot{\theta}_z \sin \psi_z \\ \dot{\alpha}_z = \Omega_{zx} \tan \beta_z \cos \alpha_z + \Omega_{zy} \tan \beta_z \sin \alpha_z + \Omega_{zz} \\ \dot{\beta}_z = \Omega_{zy} \cos \alpha_z - \Omega_{zx} \sin \alpha_z \end{cases}$$

式中: ω_{1x} 、 ω_{1y} 、 ω_{1z} 为弹体角速度在弹体系的分量; Ω_{zx} 、 Ω_{zy} 、 Ω_{zz} 为视线旋转角速度在转台坐标系的分量。

2.3 多干扰仿真技术

抗干扰能力是红外成像制导武器的重要特性之一。为适应基于五轴转台的半实物仿真系统的特点,采用焦平面模板式多干扰仿真技术,按照不同的干扰投放模式设计多干扰模板。利用光闸的开启模拟出干扰的起燃过程,由仿真计算机按照弹道解算参数控制多干扰模板运动,模拟出干扰在视场中的运动过程,能够实现双色、高能量比多个诱饵干扰的同时投放和顺序投放。焦平面模板式多干扰仿真技术原理如图3所示。

3 结束语

红外成像制导空空导弹半实物仿

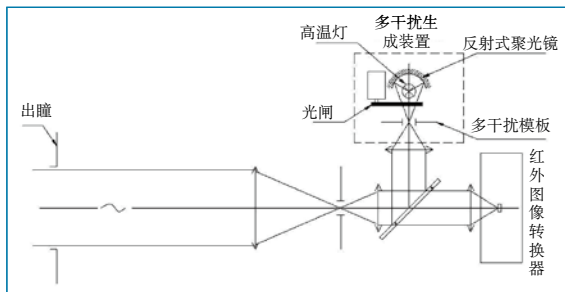


图3 焦平面模板式多干扰仿真技术光学原理图

跳频体制雷达导引头干扰仿真研究

Jamming Research on the Simulation of Hopping Radar Seeker

辛静 李朝伟 高静 / 中国空空导弹研究院

摘要: 针对距离拖引、速度拖引以及拖曳式无源诱饵对跳频体制雷达导引头的影响进行了仿真研究, 具体分析了对不同干扰对导引头产生的影响, 并对部分干扰提出了相应的抗干扰策略。

关键词: 跳频, 相参积累, 干扰, 抗干扰

Keywords: random step frequency, coherent integration, jamming, anti-jamming

0 前言

为了防止敌方轻易地检测到雷达的发射信号, 并且发射压制性的噪声干扰信号影响雷达导引头对目标的检测, 跳频体制雷达应运而生。

与普通的多普勒雷达相比, 跳频体制雷达在一定程度上提高了系统的抗干扰能力和抗遮挡水平。信号的随机跳变难以被侦查到, 可以有效地抵抗部分干扰, 如窄带瞄准式噪声干扰和阻塞式干扰等, 采用合成相参处理、距离—速度解模糊, 不仅可以获

得目标的速度信息, 而且可以获得距离信息。

但随着电子战的日趋复杂, 应对跳频体制雷达的干扰形式也不断出现, 如拖曳式诱饵干扰能逼真地模拟载机的航速、航向及雷达反射特性, 使一般雷达和跟踪系统无法通过运动特性来区分目标和诱饵, 形成对导引头的质心转移干扰。本文针对距离拖引、速度拖引以及拖曳式无源诱饵对跳频体制雷达导引头的影响进行了仿真研究。

1 跳频体制原理

导引头系统工作框图如图1所示。

雷达导引系统的工作流程如下: DDS1和DDS2是两个直接数字频率合成器, DDS1产生发射中频信号, DDS2产生参考中频信号, 二者产生的中频之差即为混频后的中频。DDS1产生的中频信号经过2次上变频和镜频抑制后, 滤除差频部分, 和频部分经过功率放大器后, 由天线开关选通天线进行发射。DDS2产生的中频信号经过2次上变频和镜频抑制后, 产生混频用

真技术已在红外成像制导空空导弹研制中得到应用, 该仿真系统为红外成像制导导弹提供了一个比较真实的运动环境和红外环境, 大离轴仿真技术和多干扰仿真技术的应用满足了红外成像制导导弹大离轴发射和抗红外诱饵干扰的仿真需求。通过空中靶试试验, 靶试结果与半实物仿真结果一致, 验证了红外成像制导半实物仿真系统的可信度和仿真方法的有效性。

AST

参考文献

[1] 吴根水. 基于电阻阵型的红外成像模拟器技术研究[C]. 航空制导

武器航空科技重点实验室论文集. 洛阳: 空空导弹院, 2006.

[2] 屠宁. 红外成像制导半实物仿真系统设计与实现[J]. 测控技术, 2009(增刊).

[3] 赵松庆等. 基于五轴转台红外半实物仿真系统多干扰仿真技术[J]. 测控技术, 2010(增刊).

[4] 刘永昌. 红外成像制导仿真技术分析研究[J]. 红外技术, 1996(1).

[5] 贡学平. 红外成像制导半实物仿真现状与发展[J]. 红外与激光工程, 2000(2).

[6] 姚立新. 飞航导弹红外成像

制导半实物仿真红外场景模拟器[C]. 2003年全国光电技术学术交流会//第十六届全国红外科学技术交流论文集(上), 2003.

作者简介

吴根水, 研究员, 研究方向是系统仿真技术。

屠宁, 高级工程师, 研究方向是仿真建模技术。

赵松庆, 高级工程师, 研究方向是红外仿真技术。

陈海燕, 工程师, 研究方向是红外仿真技术。