



# 红外导引头视线角速率精度测试方法研究

周永恒, 崔少辉, 方丹

(陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄 050003)

**摘要:** 该文针对红外成像导引头试验评估的测试要求, 结合半实物仿真思想, 提出一种红外成像导引头视线角速率精度的测试方法。利用半实物仿真系统为导引头提供一个接近战场条件的测试环境, 实时采集仿真数据, 计算出视线角速率精度; 对某型号导引头进行仿真测试, 并分析其测量误差。结果表明: 该方法可在实验室条件下实现红外导引头视线角速率精度的准确测试, 为考核红外导引头实战性能提供有效的测试方法。

**关键词:** 红外导引头; 视线角速率精度; 半实物仿真; 误差分析

中图分类号: TJ765.4

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)09-0039-05

## Research on accuracy test method of line of sight angle rate for infrared seeker

ZHOU Yongheng, CUI Shaohui, FANG Dan

(Shijiazhuang Campus of the Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In this paper, according to the test requirements of the infrared imaging seeker test and evaluation, combined with the semi-physical simulation idea, an accuracy test method of line of sight angle rate for infrared seeker is proposed. The semi-physical simulation system is used to provide the seeker with a test environment close to the battlefield conditions. The simulation data is collected in real time to calculate the line of sight angle rate accuracy. Then, a simulation test of a certain seeker is carried out and the measuring error is analyzed. The results show that the proposed method can accurately measure the line of sight angle rate accuracy via the infrared seeker under laboratory conditions and provide an effective measuring method for performance evaluation of the infrared seeker in an actual combat.

**Keywords:** infrared seeker; line of sight angle rate accuracy; semi-physical simulation; error analysis

## 0 引言

红外导引头是精确制导武器的核心部件, 能够接收目标红外热辐射, 完成对目标的搜索、识别与跟踪, 并将光信号转换为电信号, 实时输出制导率所需要的视线角速率等信息<sup>[1]</sup>。导引头输出视线角速率精度的高低直接决定了导弹是否能够稳定地跟

踪目标, 因此保证导引头的视线角速率精度是导弹完成其作战任务的前提<sup>[2]</sup>。目前其主要测试方法是室外挂飞试验和实验室测试<sup>[3]</sup>。室外挂飞试验不仅成本大, 且受试飞条件限制, 难以满足导引头大角度机动的测试条件。传统实验室测试方法主要通过两轴转台来实现, 但不能客观反映出导弹姿态扰

收稿日期: 2018-01-27; 收到修改稿日期: 2018-02-28

作者简介: 周永恒 (1994-), 男, 四川资阳市人, 硕士研究生, 专业方向为装备仿真测试、分析。

动、外部干扰等因素对视线角速率精度的影响,无法准确评估红外成像导引头性能。因此建立一套准确、可靠、有效的实验室测试方法尤为重要。

目前,国内导弹半实物仿真技术已经趋于成熟<sup>[4]</sup>。樊金明等<sup>[5]</sup>采用分布式交互仿真构建的闭环仿真测试系统,可实现人与仿真系统的自由交互,但系统建模难度大,其稳定性与可靠性低。符文星等<sup>[6]</sup>基于 RT-LAB 开发半实物仿真系统,可以方便快捷地将 Simulink 模型应用于仿真系统,减小了构建系统的难度,提升了系统灵活性与可靠性,但该系统主要用于导弹仿真,用于导引头性能测试还存在困难。刘光辉等<sup>[7]</sup>在 RT-LAB 实时仿真平台基础上建立了一个包含测试环境设定、转台运动控制等功能的仿真测试系统,实现了导引头仿真测试一体化,但降低了系统的稳定性,成本较高。

本文直接利用半实物仿真试验所得数据,通过计算机解算出视线角速率精度,完成测试。该方法不仅保证了仿真系统的稳定性和可靠性,且在模拟战场环境下考核导引头的输出视线角速率精度,使测试结果更能反映红外导引头的实战性能。

## 1 测试原理

### 1.1 传统实验室测试

红外成像导引头输出视线角速率的传统实验室测试方法是通过红外点源目标模拟器和两轴仿真转台实现的。测试中,转台与导引头处于同一坐标系下,初始时刻使导引头锁定目标,控制转台的目标台分别以 2, 5, 10°/s 的角速率匀速运动;实时接收导引头输出视线角速率的反馈数据,绘出曲线,计算其与转台运动角速率的差值,取其中最大值 $\bar{\omega}$ 作为导引头的不同角速率下的视线角速率精度<sup>[8]</sup>,其表达式为

$$\bar{\omega} \in \max \left\{ \sum_{i=1}^n (\theta_i - \varphi_i) \right\} \quad (1)$$

其中 $\theta_i$ 为导引头输出的视线角速率, $\varphi_i$ 为转台的角速率。

### 1.2 半实物仿真测试

在实战中,红外导引头的大角度机动、导弹的姿态扰动、外部环境等干扰因素势必会对导引头的输出视线角速率精度产生影响,从而影响红外导引头的制导精度。显然,传统实验室测试方法忽略了外界因素对红外成像导引头的影响,无法真实地反映出导引头在实战中的输出视线角速率精度的高低,难以满足导引头性能评价的测试要求,因此该

方法主要用于导引头设计研发阶段。而挂飞试验是将试验成件、模拟弹和战斗弹挂在机上作各种战术飞行或模拟攻击,以检验导弹及其分系统在实际高度及运动速度情况下的工作可靠性和安全性,以及部分性能参数的稳定性<sup>[9]</sup>。其测试数据虽然最真实有效,但普遍存在试验环境条件复杂、不可控因素多、费用高、效率低的问题<sup>[10]</sup>,且自然环境通常无法满足在极限条件下考核导引头性能的条件,该方法通常只在导引头验收定型阶段采用。

半实物仿真测试系统是将导引头接入仿真回路,形成闭环仿真。通过五轴仿真转台模拟导弹大角度机动以及姿态运动,红外目标模拟器对导引头所探测到的图像进行实时红外视景仿真,从而为导引头提供一个与战场环境相同或相近的测试环境<sup>[11-12]</sup>。仿真过程中,通过实弹目相对运动信息,计算出理论视线角速率,与导引头输出的视线角速率进行对比分析,可实现导引头视线角速率精度的测试。该方法最大程度还原了红外成像导引头的真实工作性能,具有传统测试方法不可比拟的优势,可用于导引头生产研发、验收定型、试验评估等各个阶段。

视线角速率精度测量原理如下:以发射点为坐标原点  $O$ , 建立惯性坐标系,  $Ox_g$  轴指向目标初始位置,  $Oy_g$  轴沿垂线向上,  $Oz_g$  轴与其他两轴垂直并构成右手坐标系。如图 1 所示,  $t$  时刻导引头和模拟目标在惯性坐标系下的位置为  $S(x_s, y_s, z_s)$ ,  $T(x_T, y_T, z_T)$ 。  $\Delta v_x$ ,  $\Delta v_y$ ,  $\Delta v_z$  分别为  $t$  时刻下弹目相对运动速度  $\Delta v$  在惯性坐标系 3 个轴向上的分量。  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  分别为弹目相对距离在惯性坐标系 3 个轴向上的分量。

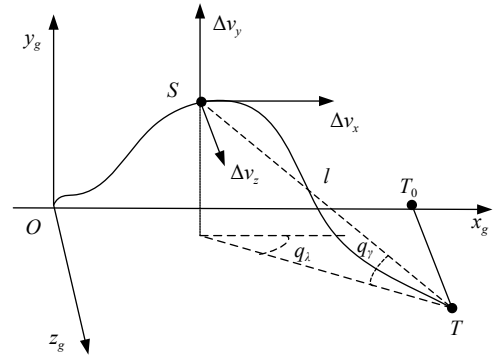


图 1 理论视线角速率计算原理图

由图中几何关系可以推算出:

$$\begin{cases} \Delta x = x_T - x_s \\ \Delta y = y_T - y_s \\ \Delta z = z_T - z_s \\ l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \end{cases} \quad (2)$$

则仿真过程中  $t$  时刻的理论方位角速率  $q_{\lambda}$  和俯仰角速率  $q_{\gamma}$  分别为

$$\begin{cases} q_{\lambda} = \frac{\Delta v_x \cdot \Delta z - \Delta v_z \cdot \Delta x}{\Delta x^2 + \Delta z^2} \\ q_{\gamma} = \frac{\Delta v_y \cdot (\Delta x^2 + \Delta z^2) - (\Delta x \cdot v_x + \Delta z \cdot \Delta v_z) \cdot \Delta y}{l^2 \cdot \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}} \end{cases} \quad (3)$$

设  $q_{\theta}$ 、 $q_{\beta}$  为  $t$  时刻红外成像导引头输出的方位视线角速率和俯仰视线角速率, 则  $t$  时刻理论值与导引头输出值的误差为

$$\begin{cases} \Delta q_{\lambda} = |q_{\theta} - q_{\lambda}| \\ \Delta q_{\gamma} = |q_{\beta} - q_{\gamma}| \end{cases} \quad (4)$$

对被测导引头进行多次弹道仿真, 对测得数据求取均方差即为视线角速率精度:

$$\begin{cases} \sigma_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta q_{\lambda i} - \overline{\Delta q_{\lambda}})^2}{n-1}} \\ \sigma_{\gamma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta q_{\gamma i} - \overline{\Delta q_{\gamma}})^2}{n-1}} \end{cases} \quad (5)$$

## 2 半实物仿真测试系统搭建

红外成像导引头半实物仿真测试系统框图如图 2 所示。红外导引头安装于五轴转台的内框, 模拟导弹飞行过程中俯仰、偏航、滚转 3 个自由度的运动; 红外目标模拟器架设于外框, 模拟弹目相对运动, 红外图形生成计算机根据飞行参数以及弹目相对位置信息实时生成红外图像并注入到红外目标模拟器; 仿真计算机实时解算六自由度弹道模型和导弹控制模型, 解算结果实时控制五轴转台和图像生成计算机, 实现整个回路的闭环仿真; 综合控制台用于仿真系统的控制、管理和集成, 闭环仿真实

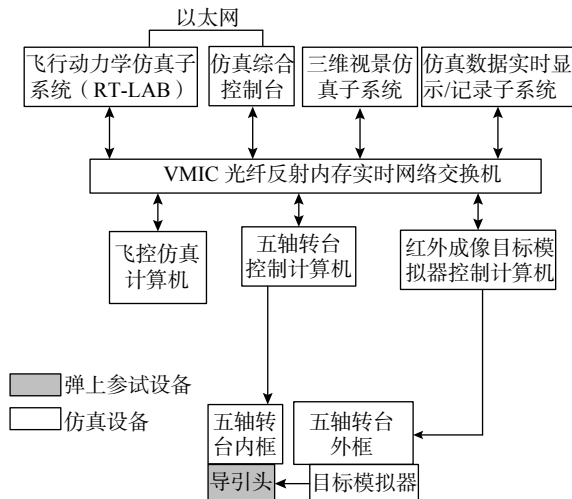


图 2 导引头半实物仿真测试系统框图

时数据的传输采用 VMIC 光纤反射内存网构造实时通信网络, 数据传输速度大于 40 MB, 延时小于 1  $\mu$ s, 保证了系统的时统性<sup>[13]</sup>。

系统仿真测试分为 4 个阶段, 分别为仿真初始化、准备、仿真运行、仿真中止和仿真结束, 仿真测试流程如图 3 所示。综合控制台完成仿真模型的编译和加载, 并将综合控制台初始数据写入仿真网络, 完成仿真初始条件设定; 当各个节点完成初始化之后, 综合控制台向各个节点发送仿真准备消息, 各个节点收到准备消息, 完成相关操作; 当仿真模型运行开始后, 动力学仿真模型按照仿真步长发送同步时钟消息, 驱动仿真的进行, 各个节点收到消息后执行数据的读取操作, 并完成相关任务, 执行完毕将数据进行上传; 当仿真模型判断到仿真结束标志后, 发送结束消息, 各个节点按照预定方案执行相关操作。将仿真数据代入式 (2)~式 (5) 即可得到红外导引头视线角速率精度。

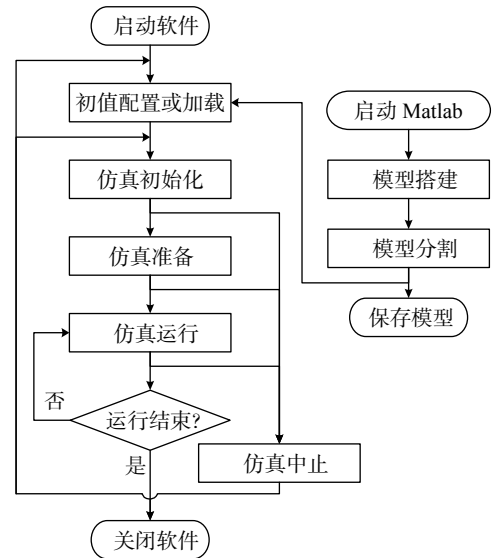


图 3 仿真测试流程图

## 3 测试数据处理

基于上述理论, 使用半实物仿真系统对某型号红外成像导引头视线角速率精度进行测试。模型中设定弹目相对距离为 2.5 km, 目标在  $Ox_y$  平面内垂直于  $Ox_x$  轴以 17 m/s 的速度做匀速直线运动。由于该型号红外导引头存在制导盲区且发射初始阶段视线角速率几乎为零, 因此在测试中只提取中末制导的数据进行解算。得到偏航、俯仰方向的视线角速率精度曲线如图 4 所示。

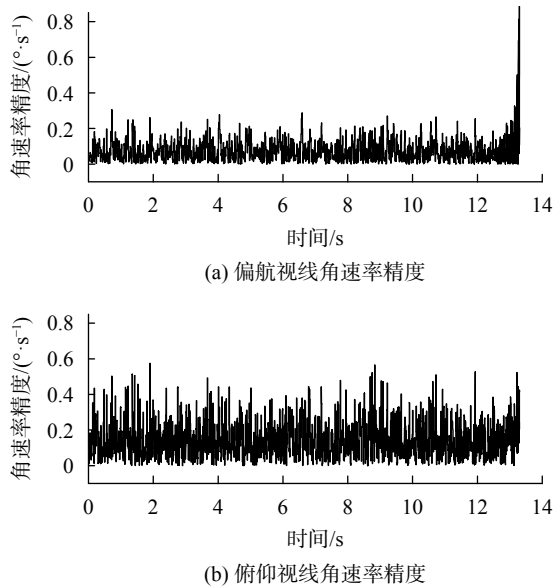


图4 偏航、俯仰视线角速率精度曲线

由图可知,偏航、俯仰视线角速率测量误差均值为:  $\overline{\Delta q_\lambda}=0.0748^\circ/\text{s}$ ,  $\overline{\Delta q_\gamma}=0.1473^\circ/\text{s}$ 。均方根误差为:  $\sigma_\lambda=0.068^\circ/\text{s}$ ,  $\sigma_\gamma=0.1102^\circ/\text{s}$ 。 $\sigma_\lambda$ 、 $\sigma_\gamma$ 即为红外成像导引头偏航和俯仰方向的视线角速率精度。

当视线角速率超过该型号导引头最大跟踪角速度时,测量数据开始发散,测量结果不可靠。因此,从测量数据中分别提取出视线角速率分别为 2, 4, 6, 8, 10°/s 时的测量数据(在  $\pm 0.1^\circ/\text{s}$  范围内提取),求其视线角速率精度,结果如表 1 所示。

表 1 导引头视线角速率精度  $^\circ/\text{s}$

偏航角速度	均方根误差	俯仰角速度	均方根误差
2	0.0208	2	0.1080
4	0.0313	4	0.1678
6	0.0394	6	0.2023
8	0.0446	8	0.2042
10	0.0690	10	0.2492

测试结果表明弹目相对视线角速率越大时,导引头的输出视线角速率误差越大,与静态测试误差变化规律相符,且当最大角度为  $10^\circ/\text{s}$  时,均方根误差为  $0.16^\circ/\text{s}$ ,相对于该型号导引头视线角速率精度指标而言,可认为测试结果是准确的。

#### 4 误差分析

在利用半实物仿真系统进行仿真测试时,由于安装精度的影响,实际导引头回转中心与转台中心

间有一定偏移,这将会直接导致理想弹目视线与实际弹目视线不符合,造成测量误差,从而难以对导引头性能进行准确评价。大量研究表明,仿真转台自身性能和机械误差对仿真试验精度影响很小并可忽略,而红外导引头轴向位置安装误差影响较明显<sup>[14-15]</sup>。因此,本文主要分析导引头轴向位置安装误差对视线角速率精度测量带来的影响。

轴向安装误差示意图如图 5 所示。定义导引头实际位置在惯性坐标系下的坐标为  $S'(x_r, y_r, z_r)$ , 导引头理想安装位置在惯性坐标系下坐标为  $S(x_s, y_s, z_s)$ , 安装偏差  $r$  可通过实际测量得到,  $\theta$ 、 $\varphi$  为导弹  $t$  时刻下的俯仰角与偏航角。

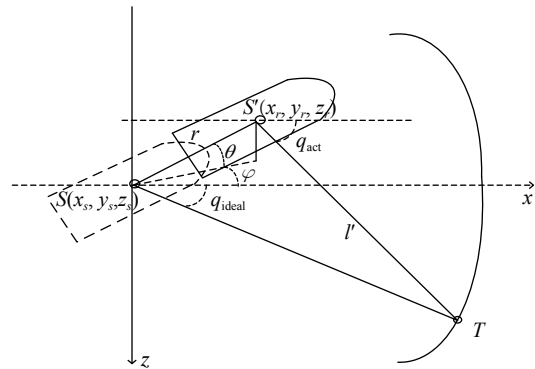


图 5 轴向安装误差示意图

则由欧拉公式可得导引头实际位置坐标  $S'$ :

$$\begin{cases} x_r = x_s + r \times \cos \theta \times \cos \varphi \\ y_r = y_s + r \times \sin \theta \\ z_r = z_s + r \times \cos \theta \times \sin \varphi \end{cases} \quad (6)$$

将式(2)中导引头的理想位置坐标替换为导引头实际位置坐标,可计算出测试过程中  $t$  时刻的导引头实际视线角速率  $\dot{Q}_\lambda$ 、 $\dot{Q}_\gamma$ 。则由轴向位置安装误差引起的视线角速率测量误差为

$$\begin{cases} \Delta \dot{Q}_\lambda = |\dot{Q}_\lambda - \dot{q}_\lambda| \\ \Delta \dot{Q}_\gamma = |\dot{Q}_\gamma - \dot{q}_\gamma| \end{cases} \quad (7)$$

将轴向安装误差加入到仿真模型中,可得到由导引头轴向位置安装误差引入的系统测量误差,如表 2 所示。

仿真结果表明,导引头轴向安装误差对视线角速率精度的测量影响随轴向安装误差的增大而增大。当轴向安装误差小于 20 mm,该设备测试精度远远高于被测设备 3 倍以上,因此该半实物仿真测试系统能够满足视线角速率测试的精度要求。但当轴向安装误差达到 50 mm 时,测试精度低于被测设

表 2 轴向安装位置误差影响仿真结果

位置安装 误差/mm	偏航视线角速率 误差/( $^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ )	俯仰视线角速率 误差/( $^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$ )
10	0.002	0.004
20	0.006	0.009
50	0.017	0.024
100	0.032	0.047
150	0.048	0.073

备精度 3 倍, 难以满足测试精度要求, 因此安装导引头时应将误差控制在 2 cm 以内。

同时, 通过以上方法求得的精度误差, 也可用于其他轴向安装误差的情况, 并通过误差补偿的方式增加测试系统精度。

## 5 结束语

本文结合红外成像导引头静态测试原理以及半实物仿真方法, 提出了一种动态视线角速率精度测试方法, 在实验室内有效地实现了模拟真实作战条件下导引头的视线角速率精度测试。该方法与传统实验室测试方法相比, 测试结果更能反映导引头实战性能, 可用于导引头的试验鉴定以及上弹前的性能测试。与挂飞试验相比, 该方法不仅成本低, 且能够设置不同的测试环境, 弥补了挂飞试验测试环境单一的情况, 能充分考核不同战场环境下导引头的性能。

采用该方法对某型号红外成像导引头输出视线角速率精度进行了测试, 得到最大视线角速率误差为  $0.1102^{\circ}/\text{s}$ , 满足  $0.5^{\circ}/\text{s}$  的指标要求, 给出了准确的评价结果, 同时验证了该方法的可行性。本测试方法测试精度高、重复性好、试验效率高, 可应用于

红外导引头的视线角速率精度测试, 为在实验室条件下红外导引头关键战技性能指标的测试评价提供应用借鉴。

## 参考文献

- [1] 张义广, 杨军, 朱学平, 等. 非制冷红外导引头成像导引头[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009: 1-4.
- [2] 李丽娟, 白晓东, 刘珂. 空空导弹双色红外成像制导关键技术分析[J]. 激光与红外, 2013, 43(9): 1036-1039.
- [3] 李慧, 吴军辉, 陈前荣, 等. 红外导引头注入式闭环试验的边界能力及一致性[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 913-921.
- [4] 于秀萍, 刘涛, 吴新锋, 等. 导弹制导控制半实物仿真实验系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(2): 94-97.
- [5] 樊金明, 袁莉莎, 孙锐. 一种分布式交互导引头仿真测试系统[J]. 测控技术, 2015, 34(z1): 242-245.
- [6] 常晓飞, 符文星, 闫杰. 基于 RT-LAB 的某型导弹半实物仿真系统设计[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18): 5720-5723.
- [7] 刘光辉, 朱翔, 吕镛, 等. 导引头仿真测试一体化设计方法与研究[J]. 测控技术, 2017, 36(6): 155-158.
- [8] 杨旭. 一种机载红外跟瞄器动态跟踪精度测试方法[J]. 电光与控制, 2014, 21(2): 73-76.
- [9] 王新甫. 某雷达挂飞试验测控设备研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [10] 刘宇. 挂飞试验航迹规划系统研究与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- [11] 迟小斐. 某型红外导弹对抗及半实物仿真平台研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [12] 谢燕舞. 红外成像寻的导弹半实物仿真系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(2): 394-396.
- [13] 苏建刚, 黄艳俊, 王志生. 机载光电稳瞄吊舱半实物仿真试验系统[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(5): 991-995.
- [14] 赵世明. 红外制导半实物仿真误差分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 1-6.
- [15] 范世鹏, 林德福, 王靳然, 等. 激光制导武器半实物仿真的误差分析与校正[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 904-908.

(编辑: 商丹丹)