

红外成像对抗中导引头伺服系统建模与分析

李 慧

(中国洛阳电子装备试验中心,河南 洛阳 471003)

摘 要: 红外成像制导武器对抗是光电对抗的重点领域。在红外成像制导对抗数字图像注入式闭环半实物仿真试验时,由于红外导引头传感器被图像生成和图像注入计算机取代不参与工作,需要建立准确的导引头伺服控制系统的传递函数模型,进行仿真实验和实际工作两种情况下导引头控制回路性能的等效性分析。基于此,结合某型红外成像导引头的结构组成特点,将导引头划分为七个不同的功能模块,提出了导引头伺服控制系统建模的总体设计方法。采用机理建模和实验测试结合的方法建立了该型导引头完整的伺服系统模型,导引头在幅值 5° , 频率 2 Hz 弹体正弦扰动下的光轴能够保持稳定,经过测试,导引头实际输出弹目视线角和角速率能够高精度稳定跟踪真实的弹目视线角和角速率,结果验证了伺服控制系统数学模型的准确性。研究成果为同类设备伺服系统的建模和红外成像制导武器对抗图像注入式闭环仿真测试实验提供了方法和模型支持。

关键词: 红外成像对抗; 红外成像导引头; 图像注入式仿真; 伺服系统建模

中图分类号: TN977 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2603-05

Modeling and analysis of servo system on countermeasure of IR imaging seeker

Li Hui

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: Infrared imaging guidance weapon countermeasure was the important fields of opto-electronic countermeasures. The detector of IR imaging seeker was replaced by image emulation and injection computer in the hardware-in-the-loop simulation test of digital image injection, it was necessary to consider the equivalence of control capability for the servo system under the simulation test and actual conditions by means of building the accurate transfer function of servo system for the IR imaging seeker. Based on this, the entire servo system of the seeker was divided into seven different function module according to the configuration of the seeker, and the total design method about the modeling of the servo system was proposed. Then the integrated mathematic model of the servo system was set up

收稿日期:2013-02-13; 修订日期:2013-03-07

基金项目:总装预研基金(51303040203)

作者简介:李慧(1980-),男,博士,主要从事光电对抗仿真技术研究。Email:liimingj12@163.com

by adopting the mechanism modeling combined with the experimental test method. Light axis of the seeker remained in a state of stabilization with 5° amplitude and 2 Hz disturbing of bomb. Line of sight and line of sight velocity between target and bomb of simulation output could precisely track the actual line of sight and line of sight velocity by testing the model. Simulation analysis validates the correctness of the model of the servo control system. The results of research provide theoretical method support for the modeling of the servo control system for the same type device, and also give the model for the feasibility of the new digital image injection simulation test on the infrared imaging guidance weapon.

Key words: IR imaging countermeasure; IR imaging seeker; image injection simulation; servo system modeling

0 引言

由于红外成像制导武器具有发射后不管的优点,是敌方军事力量突破远程防空火力对我重要军事目标实施防区外打击的首选武器。为应对这种威胁,如何采用中波或长波激光干扰装备对红外成像制导武器进行损伤压制干扰已称为光电对抗的重要研究领域,而评估激光干扰装备的干扰效果主要采用内场构建红外成像制导武器对抗闭环半实物仿真试验系统进行仿真试验和外场实装实弹对抗试验相结合的试验手段^[1-3]。红外成像对抗半实物仿真试验,具有辐射式和数字图像注入式两种实现方式,其中注入式仿真测试时,根据战情生成的含有目标、场景和干扰激光的红外数字图像被直接注入到导引头的图像信息处理机中,由于红外导引头传感器被取代不参与工作,仿真计算得到的失调角误差和失调角的时间延迟等将发生改变,导致实际和仿真情况下导引头伺服控制回路的性能也发生变化^[4]。要使红外成像导引头对抗闭环注入式仿真测试可信,从实际和仿真试验情况下红外成像导引头伺服系统性能等效考虑,需要建立准确的红外成像导引头伺服控制系统数学模型。

文中根据某型空地红外成像导引头的结构特点,在分析其伺服系统工作原理的基础上,设计了伺服系统模型的总体结构,并采用机理建模和实验测试相结合的方法建立了该导引头伺服系统的数学模型,经过大量仿真分析对模型进行了准确性验证,为红外成像制导武器对抗图像注入式闭环仿真测试实验提供了模型支持。

1 某型红外成像导引头结构特点及伺服系统模型总体设计

红外成像导引头是一种接收目标、背景和干扰的辐射信号,在光轴稳定的基础上,对目标进行探测和自动跟踪的光机电一体化伺服装置。根据实现空间稳定特性的物理方法的不同,导引头稳定装置可分为动力陀螺稳定式、速率陀螺稳定平台和捷联(半捷联式)三种方式^[5-6]。当目标视线偏离导引头光轴时,探测系统检测该偏差,由伺服机构驱动位标器光轴指向目标,对锁定后的目标进行自动跟踪,并输出实现导引规律所需要的信息。某型红外成像导引头伺服装置由陀螺组件、直流力矩电机、角位置传感器、红外传感器以及两轴框架平台构成^[7]。外框架为俯仰框架,内框架为方位框架,并通过轴承连接在一起,使环架之间能相互转动。安装在内框架上的速率陀螺敏感弹体干扰运动和外界干扰力矩耦合给光轴的角速度,并依靠伺服系统对干扰角速度和干扰力矩进行平衡,来消除弹体角运动对光轴指向稳定所造成的影响,在光轴稳定基础上,通过跟踪回路保证光轴始终跟踪目标视线。两轴速率陀螺稳定平台导引头的代表型号有国内的某空地导弹,美国的 GBU-15, AGM-130 以及空空导弹“麻雀”。

典型两框导引头伺服控制数学仿真模型框图如图 1 所示。按模块间的主要作用,导引头伺服控制模块主要包含了误差角解算模块、探测器模块、导引头控制器模块、电机模块、平台框架模块、干扰力矩模块和速率陀螺模块。其中,目标、弹体模块和弹目视线角解算模块是为导引头伺服控制模型的验证而设计的。

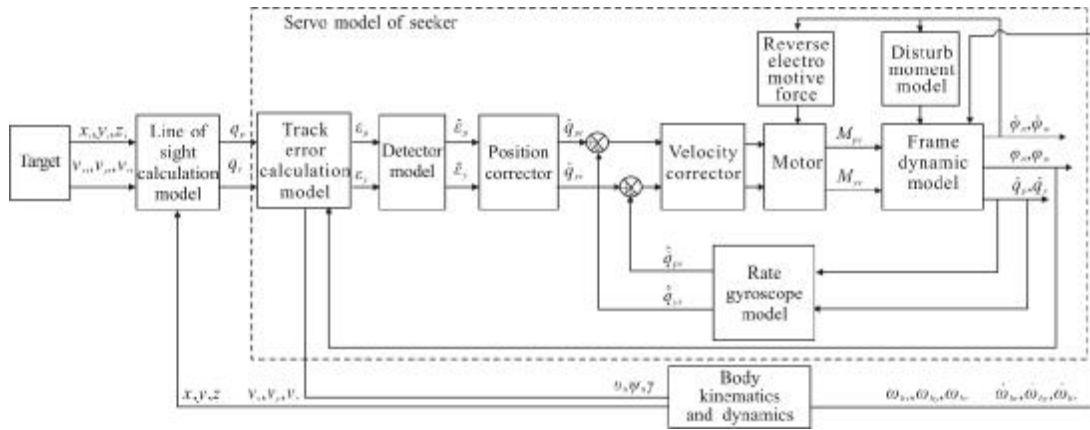


图 1 导引头伺服控制模型总体框图

Fig.1 Total frame of servo control model of seeker

2 导引头伺服系统模型的建立

2.1 坐标系的建立

为建立描述红外成像导引头伺服运动规律的数学模型,并将数学模型变换成标量方程形式,以方便模型的解算,需要定义一些坐标系,如图 2 所示^[8]。

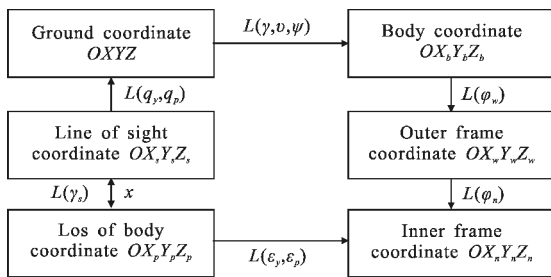


图 2 各坐标系相互关系

Fig.2 Relationship of several coordinates

图中, $L(\gamma, \vartheta, \psi)$ 、 $L(\varphi_w)$ 、 $L(\varphi_n)$ 、 $L(\varepsilon_y, \varepsilon_p)$ 、 $L(\mathbf{q}_y, \mathbf{q}_p)$ 为各坐标系之间的坐标变换矩阵; φ_n 和 φ_w 分别是导引头方位、俯仰框架角; φ_w 是俯仰框相对于弹体的转角; φ_n 是内框相对于俯仰框的转角; $\mathbf{q}_y, \mathbf{q}_p$ 为俯仰和偏航方向的弹目视线角; $\varepsilon_y, \varepsilon_p$ 分别为光轴与弹目视线之间在俯仰和偏航方向上的真实误差角(失调角)。

2.2 伺服系统模型中主要模块的建立

2.2.1 误差角解算模型

误差角解算模块作用是模拟导引头的功能,解算出导引头量测到的误差角。可采用坐标变换的方法得到:对于沿弹目线方向的单位矢量 \mathbf{u} , 其在 $Ox_s y_s z_s$ 系和 $Ox_p y_p z_p$ 系中的坐标均为 $[1, 0, 0]^T$, 该坐标从 $Ox_s y_s z_s$ 经 $L(\mathbf{q}_y, \mathbf{q}_p)$ 、 $L(\gamma, \vartheta, \psi)$ 、 $L(\varphi_w)$ 、 $L(\varphi_n)$ 转到内

框系 $Ox_n y_n z_n$ 得到的坐标,应与由 $Ox_p y_p z_p$ 经 $L(\varepsilon_y, \varepsilon_p)$ 转到内框系 $Ox_n y_n z_n$ 得到的坐标相同,即:

$$L(\varphi_n)L(\varphi_w)L(\gamma, \vartheta, \psi)L(\mathbf{q}_y, \mathbf{q}_p)[1 \ 0 \ 0]^T = L(\varepsilon_y, \varepsilon_p)[1 \ 0 \ 0]^T \quad (1)$$

由公式(1),可得误差角 ε_y 与 ε_p 的计算公式。

2.2.2 探测器模型

探测器模块主要模拟探测器的探测功能,探测识别出目标在图像中的位置坐标,进而可转换成光轴与弹目视线之间的失调角大小。它主要由延时环节 e^{-s} 和采样保持环节 $\frac{1-e^{-\tau_0 s}}{s}$ 组成,其中, τ_0 为采样保持时间,即红外探测器的帧周期。由控制原理,系统的相位滞后与延时环节 e^{-s} 的时间常数 τ 关系为:

$$\varphi = -\omega \cdot \tau \quad (2)$$

采样保持环节带来的相位滞后为:

$$\varphi = -\omega \cdot \tau_0 / 2 \quad (3)$$

式中: ω 为系统位置开环的剪切频率。

进行仿真试验时探测器模型中还要加入影响失调角生成的误差环节,仿真计算不同的失调角误差和失调角的延时对导引头伺服系统稳定性和跟踪性能的影响。

2.2.3 校正网络模型

在位置回路和稳定回路均采用滞后校正网络,位置回路的滞后校正网络是为了降低角度跟踪偏差,改善稳态精度;稳定回路滞后校正网络的目的是提高剪切频率处的开环增益,提高稳定回路的抗干扰能力。

滞后校正网络为:

$$G = \frac{\beta(Ts+1)}{\beta Ts+1} \quad (\beta < 1) \quad (4)$$

式中: β 为滞后校正分度系数; T 为时间常数。

2.2.4 框架平台模型

导引头两轴框架平台作为被控对象, 为描述其在伺服控制下的运动学和动力学变化规律需建立准确的框架动力学模型。要建立框架平台的动力学模型一般采用机理建模法和实验辨识建模相结合的方法^[9-10]。文中以内框为例详细阐述了建立内框架动力学模型的完整过程。对于内框, 由欧拉动力学定理得:

$$\sum \mathbf{M}_n = \frac{d\mathbf{H}_n}{dt} + \omega_n^{n/i} \times \mathbf{H}_n + \rho_n \times \mathbf{a}_n m_n \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_n = \mathbf{J}_n \times \omega_n^{n/i} \quad (6)$$

式中: $\omega_n^{n/i}$ 为内框相对于惯性空间的旋转角速度在内框坐标系下的投影; \mathbf{H}_n 为内框架的角动量; \mathbf{J}_n 为内框架的转动惯量; $\rho_n \times \mathbf{a}_n m_n$ 为质量不平衡力矩; ρ_n 为内框质心到转动支点的距离; \mathbf{a}_n 为内框加速度; m_n 为内框架的质量; $\sum \mathbf{M}_n$ 为内框架受到的合外力矩。

$$\omega_n^{n/i} = [\omega_n^{n/i} x \quad \omega_n^{n/i} y \quad \omega_n^{n/i} z] = \omega_n^{n/b} + \omega_n^{b/i} \quad (7)$$

式中: 内框相对于弹体的旋转角速度在内框坐标系的投影 $\omega_n^{n/b}$ 为:

$$\omega_n^{n/b} = [0 \quad \dot{\varphi}_n \quad 0] + \mathbf{L}(\varphi_n) [0 \quad 0 \quad \dot{\varphi}_w] = [-\dot{\varphi}_w \sin \varphi_n \quad \dot{\varphi}_n \quad \dot{\varphi}_w \cos \varphi_n] \quad (8)$$

$\omega_n^{b/i}$ 为弹体相对于惯性空间的旋转角速度在内框坐标系下的投影:

$$\omega_n^{b/i} = \mathbf{L}(\varphi_n) \mathbf{L}(\varphi_w) \omega_b^{b/i} = \mathbf{L}(\varphi_n) \mathbf{L}(\varphi_w) [\omega_{bx} \quad \omega_{by} \quad \omega_{bz}] \quad (9)$$

合外力矩 $\sum \mathbf{M}_n$ 等于作用于内框上的电机驱动力矩减去内框非线性摩擦力矩、非线性电缆柔性力矩以及库伦力矩, 即有下式:

$$\sum \mathbf{M}_n = \mathbf{M}_n - \mathbf{K}_{sn} \varphi_n - \mathbf{K}_{vn} \dot{\varphi}_n - \mathbf{K}_{cn} \dot{\varphi}_n / |\dot{\varphi}_n| \quad (10)$$

式中: \mathbf{M}_n 为内框驱动力矩; $\mathbf{K}_{sn} \varphi_n$ 为非线性电缆柔性力矩, 由于导引头相对弹体转动时导线的拉扯产生, $\mathbf{K}_{vn} \dot{\varphi}_n$ 为内框的粘滞阻尼力矩, 由导引头平台与基座之间连接部件润滑剂的粘性引起, $\mathbf{K}_{cn} \dot{\varphi}_n / |\dot{\varphi}_n|$ 为非线性库伦摩擦力矩, \mathbf{K}_{sn} 、 \mathbf{K}_{vn} 和 \mathbf{K}_{cn} 为相应的力矩系数, 可由实际导引头样机测试实验得到。

由公式(5)~(10)联立, 可得到导引头内框输出视线角速率 $\omega_y^{n/i}$ 、 \dot{q}_y 与输入转矩的关系式。同理可求得外框架平台的动力学模型。最终得到的导引头框架平台的模型。

3 导引头伺服系统模型的验证及分析

建立导引头伺服控制系统各个模块的模型后, 按照图 1 将各个模块连接成完整的导引头伺服控制系统模型。然后, 通过该模型可对红外导引头的稳定跟踪过程进行测试。测试红外导引头在弹体扰动作用下是否能够保持光轴稳定, 并能稳定跟踪目标。弹体扰动设为偏航方向姿态角摆动幅值 5° , 频率 2 Hz 的正弦扰动, 导引头偏航方向的相关角度输出如图 3 所示。

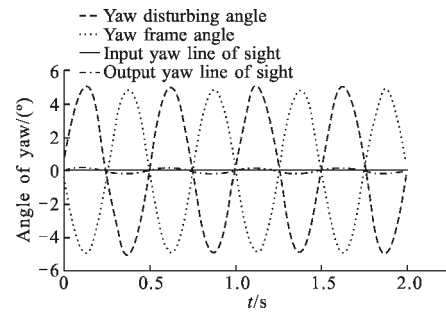


图 3 弹体偏航摆动时偏航方向相关角

Fig.3 Yaw correlative angle with yaw disturbing of bomb

当导引头受到弹体姿态扰动时, 稳定平台会转动相应的框架角以平衡弹体扰动, 稳定光轴指向。弹目视线角输入为常值 0, 导引头实际输出弹目视线角在弹体扰动情况下在 0 值附近摆动, 且摆动幅度不大, 基本为 0, 起稳定弹目视线轴的作用。

然后, 根据战情设置目标和弹体运动参数, 通过弹目视线角和角速度计算模块可以解算出真实的弹目视线角和视线角速度, 通过伺服控制模型计算得到导引头实际输出的视线角和视线角速度后, 通过对比, 可对模型的准确性进行验证。

如图 4 和 5 所示, 实线为导引头伺服系统计算输出的俯仰视线角速率和俯仰视线角, 点化线为真实的弹目视线俯仰角速率和弹目视线俯仰角。图 6 所示实线和点化线分别为考虑探测器输出没有延时和延时 2 帧(40 ms)时, 导引头俯仰方向上的跟踪误差角(失调角)。由图可知, 导引头在经过初始大约 1 s 后, 能够对目标进行高精度稳定跟踪。

图 7 所示是速度稳定回路的闭环阶跃响应曲线, 超调量 $\sigma=21\%$, 过渡过程时间 $t_s=0.006$ s, 导引头速率稳定回路能够达到快速响应输入信号并抑制干扰的目的。图 3~7 仿真分析结果表明建立的导引头伺服控制系统模型的准确性。

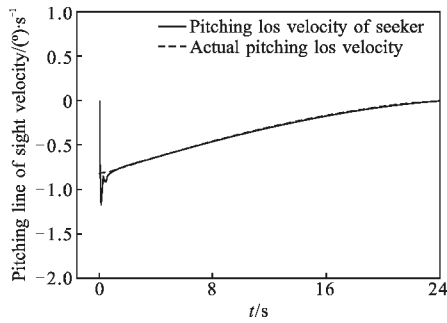


图 4 真实的与仿真输出的俯仰视线角速率曲线

Fig.4 Pitching los velocity of actual and simulation output

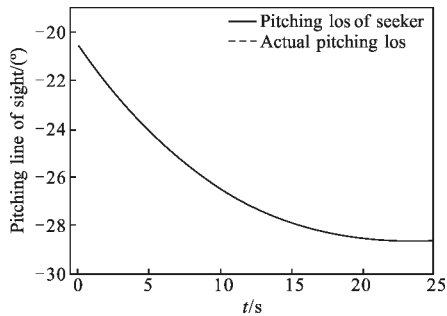


图 5 真实的与仿真输出的弹目视线俯仰角

Fig.5 Pitching los angular of actual and simulation output

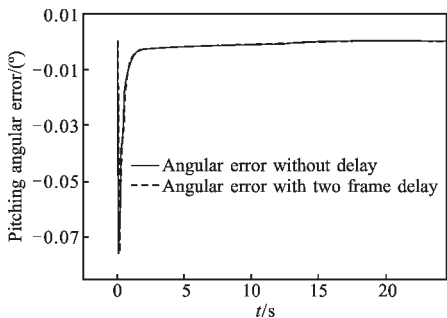


图 6 俯仰方向上误差角(失调角)曲线

Fig.6 Pitching angular error

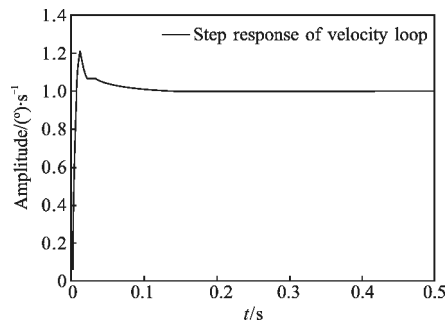


图 7 速率稳定环闭环阶跃响应

Fig.7 Step response of velocity loop

4 结 论

提出了红外成像导引头伺服控制系统建模的总体设计方法。根据该型导引头伺服系统的结构特点

将其划分为七个不同的功能模块，在使用实验建模辨识出导引头负载的传函模型的基础上，设计了位置环和速率稳定环的控制校正网络模块，采用坐标变换方法建立了误差角解算模型和两轴框架平台的动力学模型。

测试了红外导引头在弹体扰动下的光轴稳定过程以及导引头模型输出的弹目视线角和弹目视线角速率对真实的弹目视线角和弹目视线角速率的稳定跟踪过程。分析结果验证了建立的导引头伺服控制系统模型的准确性，同时也为红外成像制导武器对抗图像注入式闭环仿真试验中与实际工作情况下导引头伺服系统控制性能的等效性分析提供了模型支持。

参 考 文 献：

- [1] Fan Huitao, Liu Daijun. Development trends of short-range dogfight IR air to air missile [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(5): 564-568.(in Chinese)
- [2] Zhao Shuang, Fang Youpei. Infrared imaging guidance and its countermeasures[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(10): 197-201. (in Chinese)
- [3] Fang Youpei. Jamming Technology research to the imaging guidance missile [J]. Infrared and Laser Engineering, 2000, 29(3): 17-11. (in Chinese)
- [4] Wu Junhui, Li Hui, Xu Zhenling, et al. Theoretical research on IR capturing and tracking device simulation based on digital image injection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3166-3171. (in Chinese)
- [5] Li Hui, Wu Junhui, Zhu Zhen, et al. Analysis and simulation of stabilization and tracking principle for rate gyroscope laser seeker [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1337-1341. (in Chinese)
- [6] Lin Defu, Wang Zhiwei, Wang Jiang. Singularity analysis of roll-pitch seeker and its control strategy [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(11): 1265-1269. (in Chinese)
- [7] Qi Zaikang, Xia Qunli. Guided Weapon Control System[M]. Beijing: Beijing Institute Technology Press, 2004.
- [8] Li Hui, Wu Junhui, Hu Xin, et al. Dynamic modeling and simulation of dynamic-gyro laser homing head [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(7): 758-762. (in Chinese)
- [9] Dong Yan, Zhang Tao. Identification and design of roll axis servo system in airborne solid mapping camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1580-1587. (in Chinese)
- [10] Han Bangcheng, Ma Jijun, Li Haitao. Modeling and compensation of nonlinear friction in harmonic driver [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1095-1103. (in Chinese)