

激光平台型导引头跟踪控制技术与炮兵火箭应用研究

牛春峰¹, 王荣梅², 王 潇¹

(1. 中国兵器工业导航与控制技术研究所, 北京 100089; 2. 北京国科欣翼科技有限公司, 北京 100190)

摘要: 基于激光平台型导引头的工作机理和控制原理, 分析了导引头视线角速度噪声和隔离度的影响因素并提出提高隔离度的措施; 构建了基于力矩干扰的激光平台型导引头模型、频带模型和隔离度模型, 搭建测试平台, 通过对比分析仿真、测试和某火箭弹飞行试验结果, 验证了上述因素对频带和隔离度的影响, 经测试和飞行试验验证, 提高隔离度和频带的措施合理可行, 达到了降低视线角速度噪声的目的, 可满足野战火箭环境下工程应用的要求。

关键词: 激光平台型导引头; 隔离度; 力矩干扰; 视线角速度噪声; 炮兵火箭

The Application Research of the Laser Platform-type Seeker Tracking Control Technology on Artillery Rocket

NIU Chunfeng¹, WANG Rongmei², WANG Xiao¹

(1. China Weapon Industry Navigation and Control Technology Research Institute, Beijing 100089, China;

2. Beijing Guoke Xinyi Technology Co., Ltd., Beijing 100098, China)

Abstract: Based on the working mechanism and control principle of laser platform seeker, the influence factors of the angular velocity noise and disturbance rejection rate are analyzed, which puts forward the measures to improve the disturbance rejection rate. A seeker model for laser platform and disturbance rejection rate based on torque disturbance is constructed, and a test platform on the frequency band and disturbance rejection rate is built. Through the comparison and analysis of the simulation, test and results of the flying test, the influences of the above factors on the frequency band and disturbance rejection rate are verified, and the effectiveness of measures to improve the frequency band and disturbance rejection rate is achieved, and the angular velocity noise of sight is reduced, which meets the requirements of engineering application in the artillery rocket environments.

Keywords: Laser platform seeker; disturbance rejection rate; disturbing moment; angular velocity noise; artillery rocket

0 引言

激光平台型末制导技术由于制导精度高, 成本低, 抗干扰能力强, 在精确制导弹药中占有重要位置。野战火箭的射程从几千米至几百千米, 大多采用车载贮运发箱式发射, 反应速度快, 火力覆盖范围广, 是火力打击、火力覆盖的重要武器。在火箭弹飞行末段采取激光平台型制导的手段, 可以显著提高火箭弹的命中精度, 可实现对重点工事、指挥所、雷达站、装甲车辆实施精确打击, 大大提高野战火箭武器的效费比。激光平台型导引头的核心装置是精密电机伺服装置, 此伺服装置能使光轴指向稳定并跟随目标视线运动, 并对弹体扰动进行补偿^[7]。激光平台型导引头是专业面宽、系统复杂、技术密集度高的光、机、电紧密结合的弹载末端精确制导部件^[8]。根据实现空间稳定特性的物理方法的不同, 可分为动力陀螺式、速率陀螺稳定平台式和捷联式导引头等三类。

在激光制导武器中, 导引头的跟踪精度直接影响着制导武器的制导精度^[9]。近年来, 由于采用力矩电机、微型陀螺等模块化设计及精密光机电器件成熟, 平台式激光导

引头成为激光导引头的主流。平台导引头角速度精度对末制导系统制导精度有较大影响^[10], 研究视线角速度精度对末制导火箭弹具有现实意义。角速度噪声跟导引头的去耦能力、跟踪速度有直接关系。去耦能力强, 跟踪速度快是衡量导引头控制性能的重要指标。隔离度指标用来评价导引头隔离弹体扰动的能力^[11], 隔离度是衡量导引头稳定系统的重要指标, 高性能的导引头能够隔离弹体扰动, 从而将弹体扰动对导引头光轴指向的影响降到最小^[12]。本文主要通过研究导引头的控制系统来研究导引头频带、隔离度和视线角速度精度等, 达到降低视线角速度噪声的目的。

1 激光平台型导引头设计

平台式激光平台型导引头一般包括光学探测组件、位标器、电子舱、整流罩及壳体等组成。

整流罩位于导引头最前端, 由于飞行速度高达 2~3 Ma, 气动加热导致玻璃球罩温度高, 玻璃球罩材质选用耐高温的红外石英玻璃 JGS3, 耐受温度可达 1 000 °C 以上。光学探测组件收集目标反射的漫反射激光信号, 形成一定大小的弥散圆, 落在四象限光电探测器上。弥散圆的大小

收稿日期: 2022-06-23; 修回日期: 2022-07-13。

作者简介: 牛春峰(1984-), 男, 北京人, 博士, 研究员, 主要从事制导弹箭武器系统方向的研究。

引用格式: 牛春峰, 王荣梅, 王 潇. 激光平台型导引头跟踪控制技术与炮兵火箭应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 125-132.

决定了探测组件线性区的大小。

$$\theta = \frac{d/2}{f} \quad (1)$$

式 (1) 中, d 为弥散圆直径, f 为镜头焦距, $\pm\theta$ 为线性区大小。线性区内线性输出与失调角对应的偏差值。导引头工作在线性区内。

光电探测器为四象限探测器, 分为 ABCD 四个区, 当光斑落在探测器中心附近时, 四个象限输出与光斑面积/能量对应的光电流, 按照下式和差解算, 给出俯仰、偏航方向偏移量^[13]:

$$\Delta X = \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+C+D} \quad (2)$$

$$\Delta Y = \frac{(A+D)-(B+C)}{A+B+C+D} \quad (3)$$

相比传统的双四象限探测器, 单四象限探测器结构工艺更简单。通过软件模拟外区快速进动功能, 留给更多的空间和管脚给探测器前放电路和二级增益控制, 有利于增大探测器的动态范围及动态切换的冗余。

位标器为二轴框架式结构, 内框安装探测组件及两个正交的速率陀螺, 两框相互正交。转轴一端安装力矩电机用于驱动框架运动, 另一端安装旋转变压器, 输出框架角。姿态稳定采用微机械 MEMS 陀螺仪, 它的主要优势是重量轻, 体积小, 信号处理方便, 尤其适用于轻型稳定平台。

电子舱主要对光探测组件输出的光电脉冲进行信号调理, 经过处理后, 形成角度偏差量送给位标器。

2 工作机理和控制原理

激光平台型末制导火箭弹武器系统由外部的激光目标指示器和弹上的激光平台型导引头构成^[14], 位于弹体之外的激光目标指示器照射目标, 激光平台型导引头通过四象限光电探测器组件, 接收目标漫反射激光回波信号, 计算出弹目视线角偏差信息和目标视线角速度, 根据目标视线角速度采用框架式速率陀螺稳定平台实现对目标的实时跟踪, 并将计算出的视线角速度数据和框架角数据传输给弹上制导系统, 实现导弹的自动导引, 直至命中目标。

现代导引头大都采用了陀螺稳定方案来消除弹体扰动对目标光轴的影响, 进而提高目标跟踪精度, 常见的有动力陀螺稳定方案和速率陀螺稳定方案^[15]。激光平台型导引头控制回路采用经典的陀螺速率稳定方式设计, 基于 DSP 的数字控制系统, 控制方式采用 PID 矢量控制方式实现。速率陀螺安装在光轴本体上, 随光轴运动, 感应光轴在惯性空间中运动角速度。目标跟踪回路设计是在陀螺速率稳定回路的基础上, 进行位置跟踪控制器的设计, 利用四象限探测组件给出的目标偏移量, 控制并驱动电机带动框架旋转, 使探测器的视线始终跟踪目标。姿态锁定回路与目标跟踪回路一样, 均位于最外环, 设计目的是为了调整导引头的姿态角。

跟踪控制的框图如图 1 所示。

导引头在稳定跟踪模式下, 位标器接收目标漫反射激光回波信号, 将光信号转换成电信号后, 经过处理后, 传

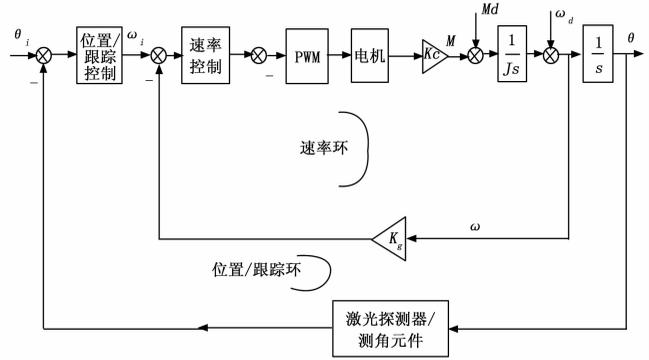


图 1 跟踪控制框图

输给电子舱, 电子舱中光电脉冲进行信号调理, 经 A/D 采样、和差和归一化处理, 形成角偏差量送给位标器。位标器接收角偏差量, 通过跟踪控制回路驱动框架进动, 实现稳定跟踪目标。

3 建模

3.1 导引头控制系统模型

为了研究导引头的控制跟踪性能, 需要建立导引头的数学模型。激光平台型导引头是个复杂的系统, 包含了多种学科及元器件, 如光学器件, 电子元器件、电机伺服系统等^[16]。从图 2 控制框图得出: 导引头采用双稳定回路跟踪策略, 速度环稳定回路, 带宽较高, 提高系统的抗干扰能力, 位置环根据测角系统给出的目标位置误差信息, 形成指令信号, 驱动电机转动, 实现对目标的跟踪。导引头伺服系统为了适应火箭弹反应时间短和制导精度高的特点应具有响应速度快、跟踪精度高的特点^[17]。

本文选用无刷力矩电机, 在同步旋转坐标系 $d-q$ 中建立 PMSM 数学模型^[18], 电机响应最基本的四个方程如下:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \\ T_e = \frac{3}{2} p_n i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \\ J \frac{d}{dt} \omega_m = T_e - T_m - B\omega_m \end{cases} \quad (4)$$

其中: u_d 、 u_q 分别是定子电压的 $d-q$ 分量; i_d 、 i_q 分别是定子电流的 $d-q$ 分量; ψ_d 、 ψ_q 分别是定子磁链的 $d-q$ 分量; L_d 、 L_q 分别是 $d-q$ 电感分量; R 是定子电阻; $\omega_e = p_n \omega_m$ 是电角速度; ω_e 是机械角速度; ψ_f 是永磁体磁链; p_n 是电极对数; J 是转子转动惯量; T_e 是电机负载力矩; B 是电机阻尼系数。

对于激光平台型导引头, 干扰力矩对导引头有一定影响。导引头模型中需加入干扰力矩的影响。平台型导引头的干扰力矩有: 摩擦力矩、偏心力矩、引线阻力矩以及弹性力矩。在结构设计、装配和工艺中一般通过校准中心、系统配平、提高系统强度、合理布线等措施减轻后三种干扰力矩的影响, 所以本文研究的干扰力矩主要为摩擦力矩。

摩擦力矩可以将弹体扰动作用于导引头。摩擦力矩越大, 弹体扰动对导引头的影响越明显, 导引头隔离度也越低。此外, 摩擦还会影响导引头的低速平稳性和精度。

对于平台导引头, 系统的摩擦模型可以近似为粘滞摩擦与库伦摩擦, 摩擦力矩的大小与框架相对角速度 $\dot{\varphi}_r$ 有关, 因此摩擦力矩的数学模型可表述为:

$$M_f(\omega_r) = \alpha \cdot \omega_r + \text{sign}(\omega_r) \cdot \beta \quad (5)$$

其中: α 为与相对角速度相关的粘滞摩擦系数; β 为库伦摩擦力矩。

根据系统控制策略和电机的方程, 考虑摩擦干扰力矩, 建立具有干扰力矩输入的导引头控制系统模型如图 2 所示。仿真中整定相关参数, 通过对比仿真隔离度与实测隔离度, 逐步实现对模型参数的整定, 观察模型下隔离度的变化规律是否符合实测隔离度的变化趋势, 实现对干扰力矩模型的选择及模型参数的整定。

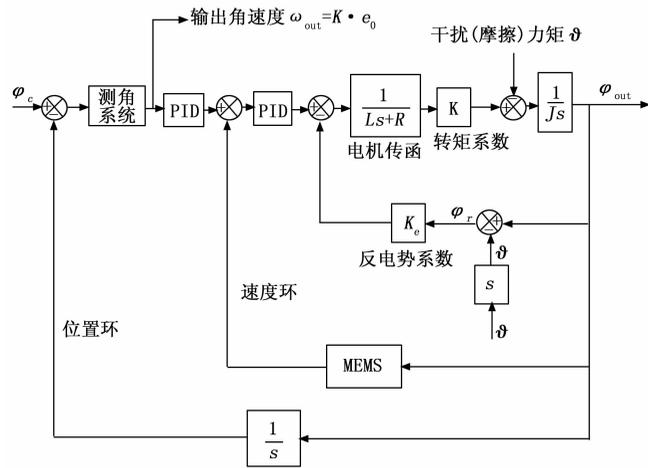


图 2 激光平台型导引头模型

3.2 隔离度模型

激光平台型导引头通过角速度稳定回路使光轴在惯性空间保持稳定, 但由于导引头安装于弹体上, 弹体在飞行过程中自身运动和外部环境等因素引起的弹体扰动通过导引头轴系之间的摩擦耦合到导引头框架上, 从而引起光轴的晃动, 甚至使导引头捕获与跟踪失败。导引头光轴在惯性空间基本运动的几何关系如图 3 所示。

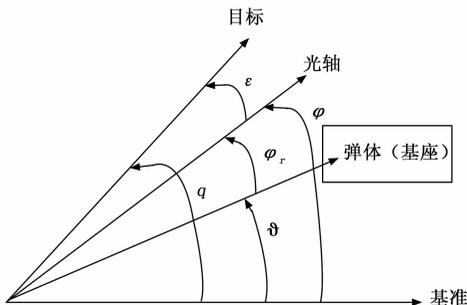


图 3 光轴在惯性空间运动几何关系

其中: φ 为光轴(平台)相对惯性空间的转角; ϑ 为弹体(基座)相对惯性空间的转角; φ_r 为光轴(平台)相对弹体(基座)空间的转角; ε 为目标偏离光轴的误差角; q 为目标的视线角。

由图 3 可见导引头光轴在惯性空间的指向直接受弹体(基座)的影响。隔离度用于评价导引头稳定平台对弹体运动的去耦能力。隔离度数值越小, 表明稳定回路对弹体运动的隔离能力越强。稳定回路对不同频率弹体扰动的隔离能力是不同的^[15]。即令导引头指令信号为零, 将弹体运动作为扰动信号输入, 从而可得隔离度数学模型为:

$$\text{隔离度} = \frac{\varphi}{\vartheta} \times 100\% = \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\vartheta}} \times 100\% = \frac{\dot{\varphi}}{2\pi f A} \times 100\% \quad (6)$$

其中: f 为弹体扰动角速度的频率(Hz); A 为弹体扰动角速度幅值($^\circ$)。

实际工程测试中隔离度的计算公式为:

$$\text{隔离度(ISO)} = \frac{\omega_{\text{out}}}{\vartheta} \times 100\% = \frac{\omega_{\text{out}}}{2\pi f A} \times 100\% \quad (7)$$

其中: ω_{out} 为输出角速度, $\omega_{\text{out}} = \dot{\varphi}$ 。

对上述公式进一步分析可得影响隔离度的主要因素为:

- ① 弹体扰动角运动通过导引头的轴承、电机、电缆和框架等摩擦力矩耦合到导引头平台上, 引起视轴的晃动;
- ② 导引头的偏心力矩也会导致视轴晃动^[10], 进而影响光轴转角;
- ③ 系统带宽: 导引头通过电机控制系统的补偿运动来实现对弹体扰动的隔离。快速的弹体扰动要求导引头有足够的带宽来快速响应并予以补偿^[15]。所以系统带宽对导引头隔离度有较大影响。

弹载激光平台导引头实际应用中一般采用如下措施来提高隔离度: ① 结构设计时提高转动惯量; ② 提高结构件的加工精度; ③ 选用无刷力矩电机; ④ 选用较软、弹性小的导线, 减少干扰, 优化装配工艺, 规定布线顺序, 减少线缆扭力, 保证装配一致性和可靠性; ⑤ 装配中提高框架结构转动的灵活性和静平衡; ⑥ 调整合适的系统带宽: 选择合理的位置环和速度环控制模型和参数, 速度环控制对高频的噪声干扰起到隔离作用, 位置环控制对低频的扰动进行隔离。

3.3 频带

频带反映导引头动态响应能力, 它影响导引头的隔离度和视线角速度跟踪精度。合理调整开环增益和速度环的带宽参数, 既能保证导引头跟踪过程中的动态响应特性, 提高频带特性, 又能对电子系统的噪声有足够的抑制和衰减。

本文通过输出角速度与光源输出角速度对比来考察系统的频带, 要求比例大约 70%。具体测量方法为: 采用角速度输出电压值跟设定光源速度进行比较, 得出测量结果, 测量计算公式:

$$\text{电压} = \frac{\text{输出电压峰值}}{2} = \max(K \cdot e_0) \quad (8)$$

$$\text{比例} = \frac{\text{输出电压峰值}}{2\pi f A} \times 100\% = \frac{\max(K \cdot e_0)}{2\pi f A} \times 100\% \quad (9)$$

3.4 视线角速度噪声

激光平台型导引头由光学系统、机电系统等组成，其测得的弹目视线角速度耦合了含设计、工艺、装配等方面引起的噪声，将这些噪声统称为视线角速度噪声^[17-18]。视线角速度噪声对制导系统性能有较大影响^[19]，研究视线角速度噪声对末制导精度的影响具有现实意义。对于带有伺服系统的平台型导引头由于伺服系统隔离度的存在，增大了视线角速度理论值与测量值之间误差^[20]。

影响视线角速度噪声的几个因素：①系统噪声：探测器噪声、陀螺噪声；②扰动，弹体的扰动，通过传动装置和驱动装置、以及电缆等摩擦力矩耦合到导引头平台上，引起视轴的晃动。

工程上降低角速度噪声可行的措施有：①提高系统隔离度，提高系统的去耦能力；②选用可靠性高得陀螺，通过硬件和软件设计减少噪声干扰。

4 系统仿真和测试

基于 Matlab 搭建仿真模型测试模块，进行频带和隔离度仿真。

4.1 频带

搭建频带测试模型如图 4 所示，对整个导引头仿真系统进行频带测试，频带测试模块如图 4 中所示。

为了研究导引头频带，采用两种方法对控制系统进行参数调整整合和对比：①控制方法一：采用传统的控制策略，调整合适的控制系统参数；②控制方法二：在传统控制策略的基础上，添加补偿网络，提高控制系统带宽。

控制方法一经过参数整定后，对目标角度进行幅值固定为扫频输入，仿真测量位置环的幅频特性如图 5 所示，控制方法二对控制系统调整后的位置环幅频特性如图 6 所示。

从图 5 和图 6 可得，在满足频带比例要求大于 0.7 的基础上，控制方法二的频带为 1.95，控制方法一的频带为 1.34；控制方法二较控制方法一带宽有较大幅度提高。

分别采用控制方法一和控制方法二进行仿真模拟和测试，如表 1 所示。

汇总方法一和方法二的仿真结果，见表 1。

表 1 俯仰轴频带仿真测试表

	频率/Hz	幅值/(°)	电压	比例(%)
	0.8	0.75		
方法一	2.96		1.78	78.6
方法二	3.434		2.08	91.4

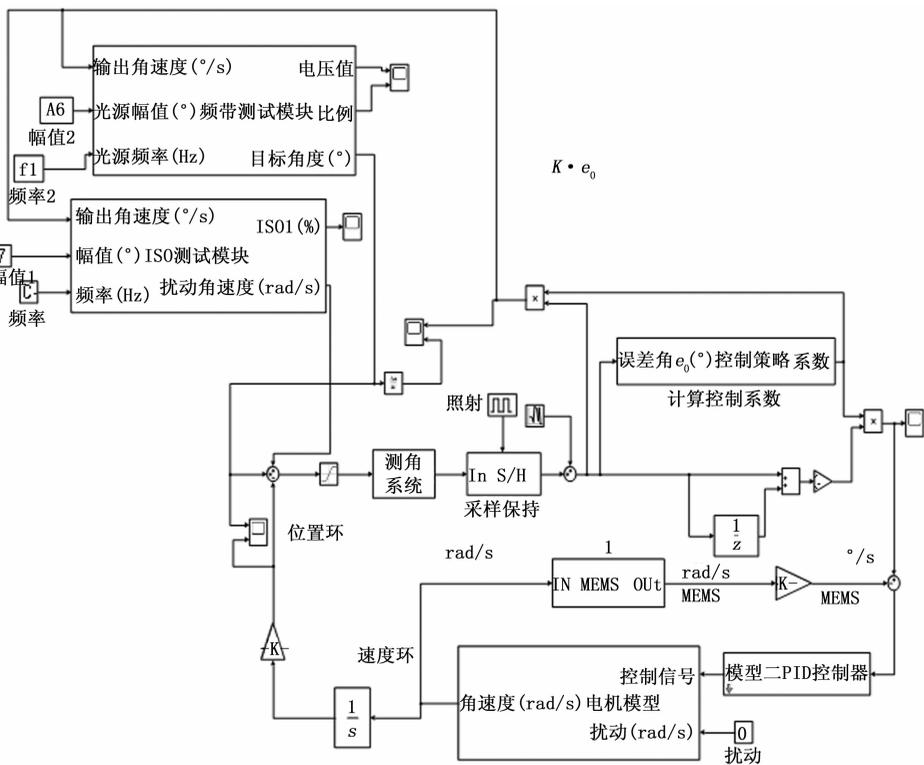


图 4 导引头频带测试模型

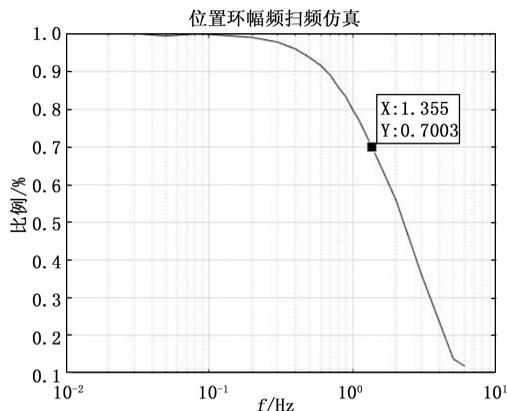


图 5 控制方法一位置环幅频特性图

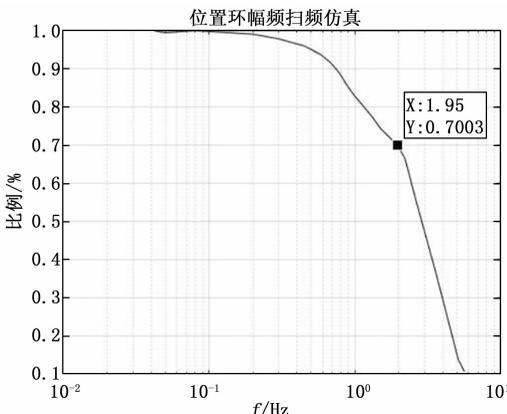


图 6 控制方法二位置环幅频特性图

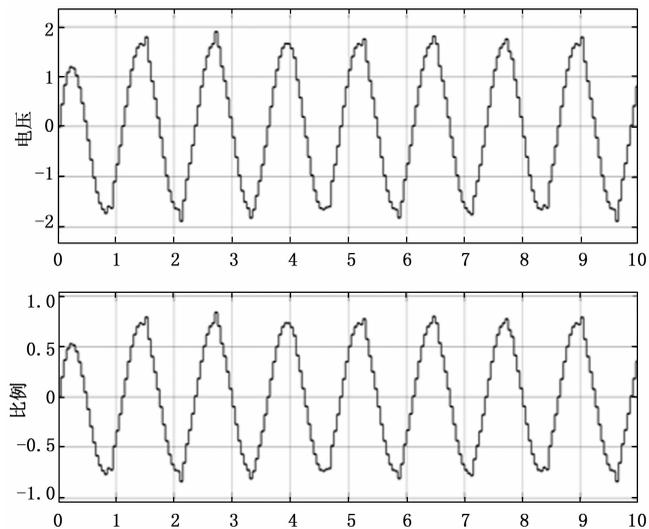


图 7 控制方法一电压和比例仿真图

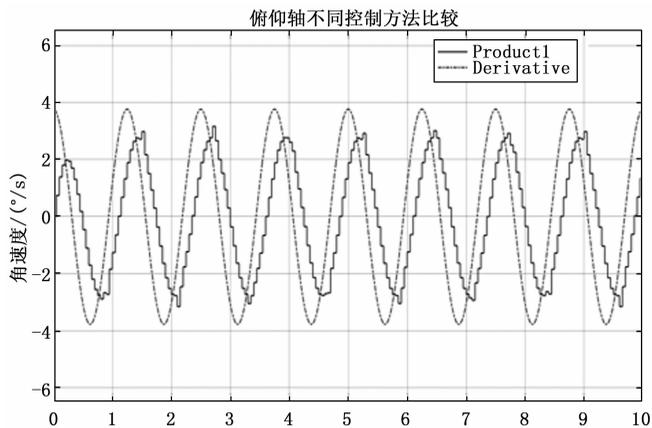


图 8 控制方法一仿真结果

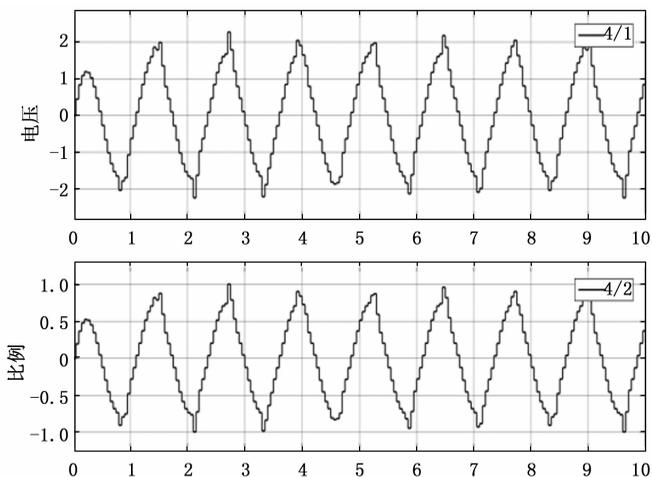


图 9 控制方法二电压和比例仿真图

从上图和表中可知, 方法二的幅值、电压、比例均比方法一大幅度提高, 因此通过改善添加补偿网络可以显著提高系统的频带响应特性。

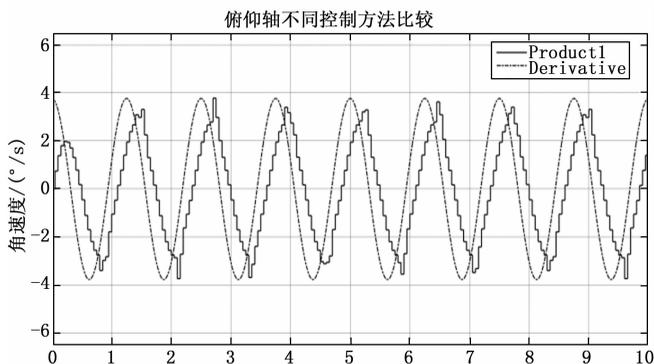


图 10 方法二仿真结果

搭建频带测试系统: 将导引头安装在测试台上, 测试台扰动角速度输出为 0, 操作测试台使模拟光源按照固定频率和幅值的正弦运动进行运动, 用上位机和示波器检测视锥角速度输出信号幅值, 利用式 (8) 和式 (9) 计算电压和比例。分别按照方法一和方法二进行测试, 测试结果与仿真结果见表 2。

表 2 测试与仿真结果表

	频率/Hz	幅值 A/(°)	电压/V	比例/%	
方法一	0.8	0.75	1.8	79.58	测试值
			1.776	78.5	仿真值
方法二	0.8	0.75	2.09	92.3	测试值
			2.08	91.4	仿真值

由测试值与仿真值比较可知, 幅频特性的仿真值符合实际测试值的特性, 因此可以得出通过对控制系统搭建补偿网络的方式达到提高系统带宽的目的。

4.2 隔离度

在进行隔离度仿真时, 需要使模型的响应尽量与实际系统隔离度响应的变化规律吻合。

下面结合某型导引头参数, 对隔离度模型进行理论上的仿真比较, 用于确定隔离度的影响因素。

1) 未考虑干扰力矩的情况, 直接由隔离度定义中角运动的物理关系得到的隔离度仿真框图如下, 搭建隔离度测试 Simulink 方程框架如图 11 所示。

固定目标角度为零, 即 $\varphi_c = 0$, 随着弹体角度不同变化(幅值、频率)的输入, 通过仿真测量光轴角度响应的稳态输出, 根据隔离度的定义, 求解每一个输入下的隔离度。

弹体扰动角度幅值为, 频率逐渐变化, 扫频仿真得到的隔离度如图 12 所示。

由隔离度的定义及仿真可知, 对于一个实际的系统, 其隔离度的幅频特性具有三个主要特点:

(1) 弹体做低频运动时, 导引头动力学能够很快地响应弹体低频段上的运动, 平台能够很好地补偿基座运动带来的角度变化, 此时具有良好的隔离度;

(2) 弹体做高频运动时, 由于整个导引头系统带宽的限制, 无法响应此时扰动的影响, 此时也具有良好的隔离度;

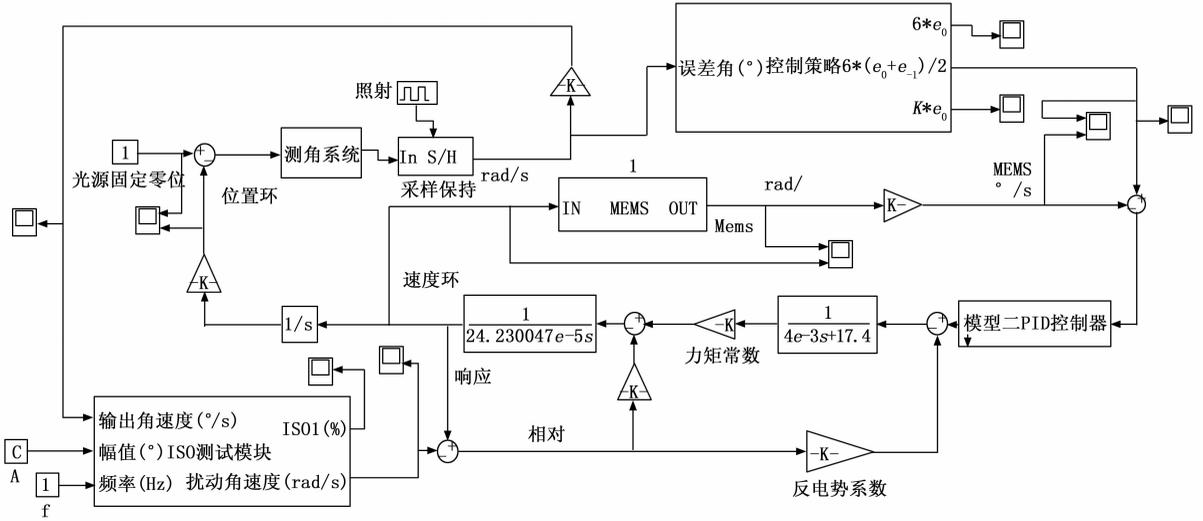


图 11 未加干扰力矩的隔离度测试框架

(3) 弹体在中频段运动时，导引头动力学能够响应弹体的运动带来的扰动，但不能及时补偿弹体运动引起的角度变化，此时导引头对弹体运动的隔离程度变差。

搭建测试平台，将导引头安装在测试台上，保持弹目几何相对运动关系不变，即目标模拟光源运动，导引头与模拟光源光轴夹角为 0° ，目标模拟光源输出激光能量信号，操作测试台使目标模拟光源按照给定幅值、频率正弦运动，记录导引头的数据，并汇总分析。

由以上数据分析得出：

- (1) 相同幅值下，隔离度实测值随着频率增加隔离度值变小，隔离度仿真值随着频率增加隔离度值变大；
- (2) 相同频率下，隔离度实测值随着幅值增加隔离度值变小，隔离度仿真值随着幅值增加隔离度值不变。

仿真得到的隔离度随弹体扰动幅值、频率的变化都与实际测试值不一致，这是因为上述仿真中仅仅是隔离度的理想模型，轴系之间的摩擦力矩的影响是隔离度的重要影响因素，需要加入干扰（摩擦）力矩建立模型。

2) 加入干扰力矩的情况，式 (5) 中取 $\alpha=0.0003$ 、 $\beta=0.00008$ ，可得到加入摩擦力矩的隔离度模型及测试模块如图 4 中 ISO 模块所示；

固定目标角度为零，即 $\varphi_c=0$ ，根据设置的干扰力矩系数，仿真不同幅值、不同频率下的隔离度如图 13~14 和表 4 所示。

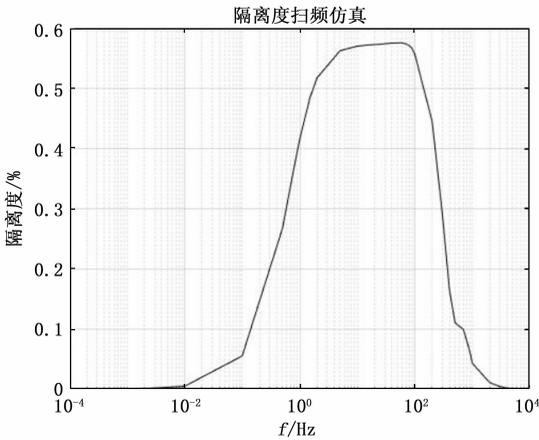


图 12 幅值为，隔离度扫频仿真图

汇总仿真和测试隔离度的结果，见表 3 所示。

表 3 未加干扰力矩仿真和测试结果表

扰动		隔离度/%	
幅值 A/(°)	频率 f/Hz	实测值	仿真值
1	0.5	1.59	0.2907
1	3	0.53	0.4278
2	3	0.36	0.4278
3	0.5	1.01	0.2907
3	2.8	0.29	0.4498
7	1	0.38	0.5002
7	1.5	0.32	0.5692

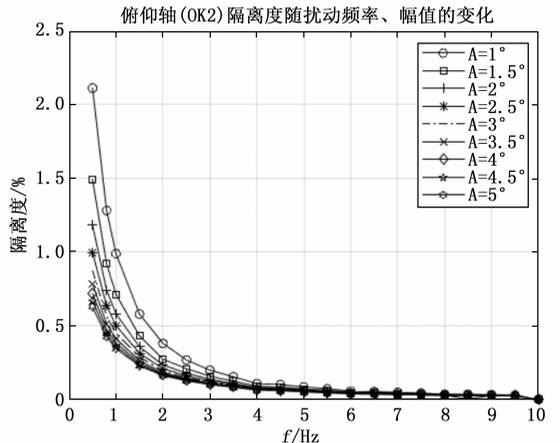


图 13 俯仰轴隔离度随扰动变化图

由上述数据可知：相同幅值下，仿真值与实测值均随着频率增加隔离度值变小；相同频率下，仿真值与实测值均随着幅值增加隔离度值变小。仿真测试的隔离度随弹体扰

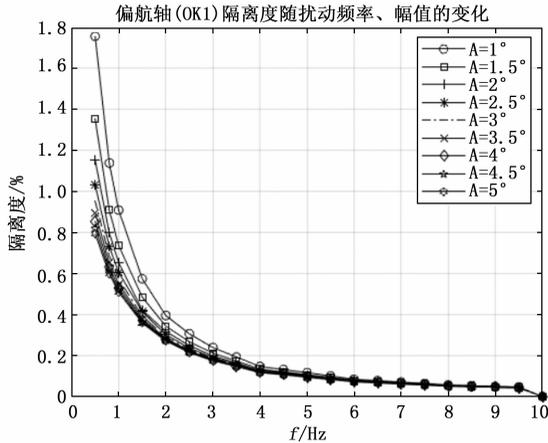


图 14 偏航轴隔离度随扰动变化图

表 4 加入干扰力矩仿真和测试结果表

扰动		隔离度/%	
幅值 A/(°)	频率 f/Hz	实测值	仿真值
1	0.5	1.59	1.687 0
1	3	0.53	0.646 6
2	3	0.36	0.375 1
3	0.5	1.01	0.605 1
3	2.8	0.29	0.311 7
7	1	0.38	0.331 6
7	1.5	0.32	0.319 0

动幅值、频率的变化都符合实测隔离度变化规律。这也说明轴系间的摩擦力矩对导引头的隔离度有较大影响。通过调整轴系间的摩擦力矩可以调高系统隔离度。

4.3 视线角速度噪声

通过对控制系统补偿网络的搭建提高了系统的带宽, 再加上对系统摩擦力矩的控制, 达到了提高隔离度的目的。隔离度的提高对于提高导引头视线角速度精度, 减少视线角速度误差有良好的效果。分别对视线角速度 0.5°/s、1.5°/s 和 2.5°/s 进行测试。

测试方法: 将导引头安装在测试台上, 使导引头处于自动跟踪状态, 以一定的角速度模拟弹与目标之间的相对运动, 记录导引头输出的视线角速度信号, 角速度输出平均值与实际角速度的偏差即为跟踪角速度精度。测试结果见图 15~17 所示。

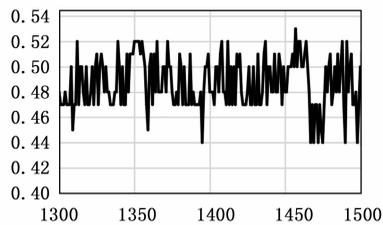


图 15 0.5°/s 视线角速度噪声

通过以上各图可以看出视线角速度噪声在 0.5°/s、1.5°/s 和 2.5°/s 均小于 0.15°/s, 导引头视线角速度噪声在测试时满足野战火箭控制系统要求。

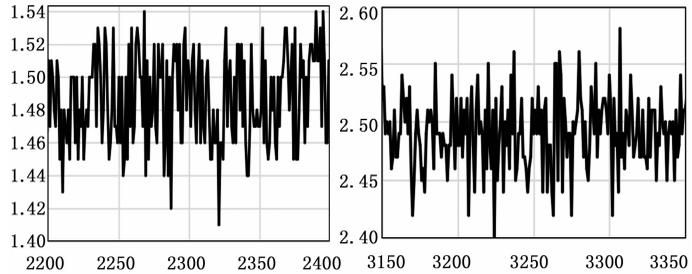


图 16 1.5°/s 视线角速度噪声

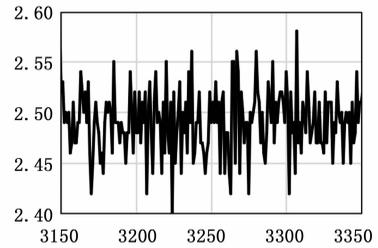


图 17 2.5°/s 视线角速度噪声

5 飞行试验效果

从仿真和测试中可以得出, 通过对系统频带和隔离度的设计优化, 提高了视线角速度精度, 减小了视线角速度噪声。设计后的导引头在某火箭弹飞行试验中进行验证。飞行试验中导引头会受到弹体扰动、大气环境等多种干扰的影响, 是综合干扰的结果。试验当天天气阴, 大气能见度 5 km 左右, 试验结果详见图 18~21 所示。

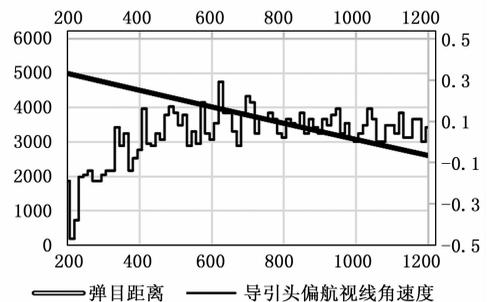


图 18 导引头偏航视线角速度与弹目距离图

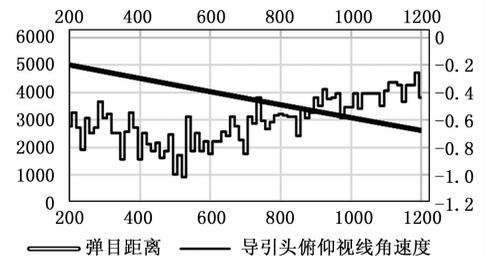


图 19 导引头俯仰视线角速度与弹目距离图

从图 18 和 19 中得出: 俯仰轴和偏航轴的视线角速度噪声均较小, 满足飞控系统精度的要求。俯仰轴和偏航轴随着弹目距离的减小, 视线角速度噪声由±0.2 逐渐缩小为±0.1; 即随着弹目距离的减小, 导引头视线角速度噪声逐渐减小。

从图 20 和图 21 中的得出: 视线角速度噪声受弹体角速

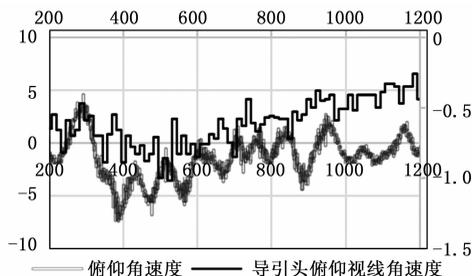


图 20 导引头俯仰视线角速度与俯仰角速度图

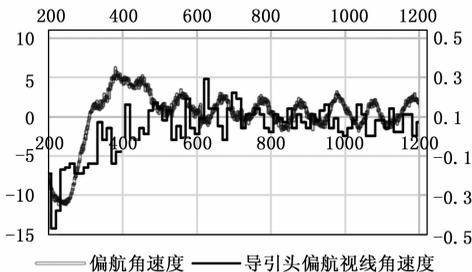


图 21 导引头偏航视线角速度与俯仰角速度图

度影响较小,具有良好的隔离效果。

6 结束语

近年来,平台式激光导引头成为激光导引头的主流。在激光制导武器中,导引头的跟踪精度直接影响着制导武器的制导精度。导引头跟踪精度与导引头去耦能力、跟踪速度有直接关系。激光平台型导引头采用框架本文通过分析导引头工作机理和原理,设计建立了导引头仿真模型、隔离度模型、频带模型,并进行了仿真测试,初步分析了隔离度产生的原因,提出提高频带和改善导引头隔离度的措施,通过仿真和测试验证了通过提高导引头隔离度达到降低导引头视线角速度噪声的目的。经过某野战火箭弹实际飞行试验验证,导引头输出精度满足火箭控制系统的要求,具有一定的工程应用的意义。

参考文献:

[1] 李慧,吴军辉,胡欣,等. 动力陀螺式激光导引头的动力学建模与仿真 [J]. 激光与红外, 2011, 41 (7): 758-762.

[2] 匡冬权. 基于激光导引头的四象限光电探测器检测电路研究 [J]. 装备制导技术, 2012, 2: 220-224.

[14] 王志江,薛坤喜,吴定勇,等. 基于视觉传感的机器人焊缝纠偏控制系统 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (17): 48-55.

[15] 李舒沁,王灏晨,汪寿阳. 人工智能背景下工业机器人发展水平综合动态评价研究——以制造业为例 [J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40 (11): 2958-2967.

[16] 宋亚儒,孙运强. LoRa 自组网的列车制动远程监测系统设计与实现 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20 (3): 81-83.

[17] 李权接,赵延明,张泽瑞,等. 基于 LoRa 无线通信的分布式桥梁监测系统设计与实现 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40 (1): 104-106, 109.

[3] 刘京郊. 光电对抗技术与系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[4] 王伟,吴口,徐平,等. 激光平台型导引头角速度噪声特性及其影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41 (9): 2371-2374.

[5] 王冬,刘琳,陈韵. 基于半实物仿真的视线角速度估计参数设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42 (2): 32-36.

[6] 张永亮,卢焕章. 基于图像局部熵的红外图像分割方法 [J]. 红外技术, 2006, 28 (11): 656-660.

[7] 牟宇,林德福,祁载康. 激光末制导炮弹比例导引律性能研究 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38 (2): 250-255.

[8] 王鹏辉,张云强,游牧. 框架式激光比例导引头隔离度对弹体姿态的影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39 (增): 180-183.

[9] 陈坚. 导弹控制原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2016.

[10] 李慧,梁巍巍,殷瑞光,等. 干扰和噪声对激光制导性能及精度的影响 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46 (2): 0206005-1~0206005-8.

[11] 胡欧磊. 导引头隔离度影响分析及在线辨识与抑制技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.

[12] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男. 导弹飞行力学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000.

[13] 李福巍,张运强,潘国庆. 激光半主动比例导引头光学系统分析与设计 [J]. 应用光学, 2014, 35 (6): 938-942.

[14] 黄义,汪德虎,张明虎,等. 激光半主动寻的制导在舰炮反导中的应用研究 [J]. 激光与红外, 2010, 40 (7): 690-693.

[15] 赵超. 导引头稳定系统隔离度研究 [J]. 电光与控制, 2008, 15 (7): 78-82.

[16] 于英杰,刘藻珍. 某型激光导引头建模与仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2003, 15 (2): 158-160.

[17] 陈宏,雷鸣. 激光寻的制导导引头技术 [J]. 光电子技术, 2002, 22 (1): 53-57.

[18] 袁雷,胡冰新,魏克银,等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.

[19] 侯明善,张金鹏,长青. 视线角速度测量噪声对变结构制导鲁棒性的影响研究 [J]. 西北工业大学学报, 2000, 18 (1): 134-137.

[20] 王秀君,唐勇,陈源. 导引头隔离度对角速度精度评价的影响分析 [J]. 电子信息对抗技术, 2021, 36 (2): 31-35.

[18] 刘传领,陈明,池涛. 基于 LoRa 无线通信的水产养殖监测系统设计及应用 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41 (6): 158-164.

[19] 李伟杰,戴亚文. 基于 LoRa 的工业温度无线采集系统设计 [J]. 自动化与仪表, 2019, 34 (1): 37-40, 49.

[20] 李亚军,吴振强,杨鹏,等. 基于 MOTOMAN 工业机器人系统的结构化程序设计与分析 [J]. 制造业自动化, 2019, 41 (11): 5.

[21] 李俊. 基于 ANSYS 的工业机器人 PMSM 转矩波动抑制技术 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (12): 104-108.

[22] 华丹. 基于区块链技术的工业机器人视觉检测及避障系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 69-73.