

## 动力陀螺式导引头跟踪能力分析

刘俊辉, 单家元, 刘永善

(北京理工大学 飞行器动力学与控制教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 动力陀螺式导引头(下文中简称导引头)的跟踪能力是影响制导精度的主要因素之一。为分析导引头跟踪能力,定义了导引头跟踪能力性能指标。通过建立导引头的耦合动力学模型,对稳像及跟踪能力的传递函数及动力学模型稳定性进行解析和频域分析。从动力学稳定性的角度得出了限制导引头跟踪能力的根本原因。通过对比导引头半实物仿真与数学仿真结果,验证了动力学模型的精确性。为减小稳态失调角,提高导引头的跟踪能力,提出了 PI 校正,仿真分析发现通过调整比例积分系数可以达到减小失调角并且不降低其他性能指标的目的。进一步探讨了在导引头失调角为 0 时目标视线角速度信息的提取方法。此文可以为导引头动力学及控制系统设计提供指导。

**关键词:** 动力陀螺式导引头; 稳定性; 跟踪能力; PI 校正

**中图分类号:** TJ765    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2209-07

## Tracking performance of gyro-stabilized seeker

Liu Junhui, Shan Jiayuan, Liu Yongshan

(Key Laboratory of Dynamic and Control of Flight Vehicle, Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Tracking performance of gyro-stabilized seeker (following called seeker for short) is a main factor of the guidance precision. To analyze the tracking performance of seeker, seeker's tracking performance index  $Q$  was defined. Coupled dynamics model of seeker was established, and transfer functions of the image stabilization and tracking performance and the stability of dynamics model were analyzed. The fundamental reason to the limits of seeker's tracking performance was derived from the point of view of dynamics stability. Seeker's dynamic model was proved correct when compared the Hardware-In-Loops simulation with the mathematical simulation results. In order to reduce boresight and improve tracking performance of seeker, PI compensation was proposed. The simulation results show that boresight can be reduced as well as other performance is not deteriorated by adjusting the proportion and integration parameters. It is discussed further that how to extract line of sight rate when boresight is 0. It can provide guidance to design the dynamics and control system of seeker.

**Key words:** gyro-stabilized seeker; stability; tracking performance; PI compensation

收稿日期: 2012-12-10; 修订日期: 2013-01-25

作者简介: 刘俊辉(1990-), 男, 博士生, 主要从事导引头, 导弹制导控制方面的研究工作。Email: [ljh0023@bit.edu.cn](mailto:ljh0023@bit.edu.cn)

导师简介: 单家元(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事飞行器制导控制与仿真方面的研究工作。

## 0 引言

动力陀螺式导引头是寻的制导回路中的测量敏感元件,主要用于稳定探测器在空间的指向,跟踪目标并输出与目标视线角速度成比例的电信号<sup>[1]</sup>。导引头的跟踪能力决定了导引头的使用范围,在跟踪高机动目标时导引头的跟踪能力决定了导弹是否会丢失目标。

一般情况下导引头的动力学模型有两种。大部分文献<sup>[1-5]</sup>对于导引头的描述是基于将进动角作为状态量进行的。这种模型能较好描述导引头各物理环节,但对于描述导引头动力学本质不是很有效。在参考文献[6]中,通过坐标系间的关系,以目标视线与导引头光轴之间的失调角作为状态量来对导引头进行建模。所得出的模型对于进入自动驾驶仪的信号获取及对导引头动力学本质(力矩作用下的自由陀螺)的描述较为直观,便于分析。基于这个模型,通过分析直观地得到了导引头跟踪能力的限制因素,并且对导引头回路进行了PI校正,仿真得到了较好的效果。

## 1 导引头跟踪能力的概念

现有的大部分导引头光轴跟随目标视线方向,并且导引头光轴滞后目标视线方向的失调角与目标的视线角速度成比例。通过产生与失调角成比例的修正力矩(比例控制)以使导引头光轴跟踪目标视线方向,并且通过提取与失调角成比例的信号来形成自动驾驶仪的控制信号。失调角大小由探测器线性区限制,可见失调角是影响导引头跟踪能力的关键因素之一。因此可以定义导引头的跟踪能力为:

$$\text{导引头跟踪能力 } Q = \frac{\text{目标视线的角速度}}{\text{目标视线在探测器上的失调角}} = \omega/a(1/s)$$

式中: $\omega$ 为跟踪角速度,单位为 $(^\circ)/s$ ;  $a$ 为跟踪状态下导引头光轴指向相对于目标视线的滞后角度 $(^\circ)$ ,通常称为跟踪失调角。

## 2 导引头动力学模型分析

结合实际导引头的动力学结构(无阻尼器),参考文献[6]建立以失调角为状态量的实际导引头的模型为公式(1):

$$\begin{aligned} J_r \ddot{\alpha} + C \dot{\alpha} + H \omega_x \alpha + H \dot{\beta} + k \beta \cos \varphi_{ry} \cos \varphi_{rz} = & \\ -H \omega_{\lambda z} - C Q_y - J_r \dot{\omega}_{\lambda y} - M_{gm} \text{sign}(\dot{\varphi}_{ry}) + R_y(t) \cdot & \\ J_r \ddot{\beta} + C \dot{\beta} + H \omega_x \beta - H \dot{\alpha} - k \alpha \cos \varphi_{ry} \cos \varphi_{rz} = & \\ H \omega_{\lambda y} - C Q_z - J_r \dot{\omega}_{\lambda z} - M_{gm} \text{sign}(\dot{\varphi}_{rz}) \cos \varphi_{ry} + R_z(t) & \\ Q_y = \omega_{\lambda y} + \omega_{0x} \cos \varphi_{ry} \sin \varphi_{rz} - \omega_{0y} \cos \varphi_{rz} - \omega_{0z} \sin \varphi_{ry} \tan \varphi_{rz} & \\ Q_z = \omega_{\lambda z} - \omega_{0x} \sin \varphi_{ry} - \omega_{0z} \cos \varphi_{ry} & \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\omega_{0x}, \omega_{0y}, \omega_{0z}$ 分别表示导弹的绝对角速度在弹体坐标系  $Ox_0y_0z_0$  坐标轴上的投影; $\omega_x, \omega_y$  和  $\omega_z$  表示目标视线的绝对角速度在目标视线坐标系上的投影; $\alpha$  和  $\beta$  为目标在探测器垂直平面上的失调角;导引头光轴坐标系是由弹体坐标系绕  $Oy_0$  轴转  $\varphi_{ry}$  然后绕光轴坐标系  $Oz$  轴转  $\varphi_{rz}$  后形成的; $C$  为转子与定子相对运动中产生的比速度摩擦阻尼系数; $J_r$  为陀螺转子相对于框架轴的转动惯量,忽略内环及外环框产生的转动惯量; $M_{gm}$  为框架干摩擦力矩;忽略质量不平衡及弹性等干扰力矩; $R(t)$  为高阶小量; $H$  为转子动量矩; $k$  为导引头失调角到进动力矩的总传递比。

忽略公式(1)中的高阶小量,所描述的系统的传递函数框图的形式如图1所示。

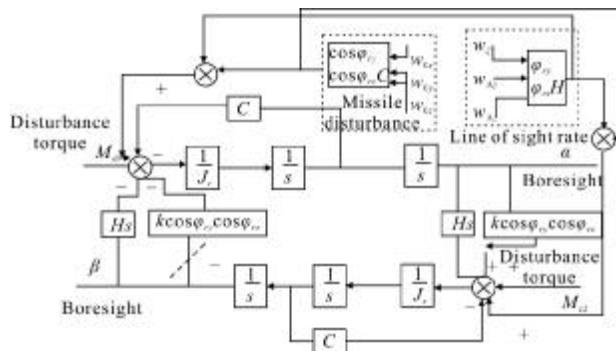


图1 简化的动力学框图

Fig.1 Block diagram of simplified dynamic equations

随着方位角  $\varphi_{ry}, \varphi_{rz}$  的增大,方位角效应将使导引头跟踪能力下降,在参考文献[6]中对导引头方位效应的减小有详细介绍,文中不考虑方位角效应,将  $k \cos \varphi_{ry} \cos \varphi_{rz}$  看作  $k_1$ 。

### 2.1 导引头稳像性能及跟踪能力分析

稳像性能分析:假定视线角速度为零,而且视线的角速度分量  $\omega_x$  及弹体角速度  $\omega_{0x}$  很小可以忽略,忽略高阶小项的影响。由于量值  $J_r$  和  $C$  相对于  $k_1$  和

H 很小,在弹体扰动频率不是很高的情况下利用克莱姆法则求解方程组(1)可以得到:

$$|\alpha(s)| \approx \left| \frac{-M_{gm} \text{sign}(\dot{\varphi}_{rz}) \cos \varphi_{ry} - C \omega_{oz}(s)}{k_1 + Hs} \right| \quad (2)$$

$$|\beta(s)| \approx \left| \frac{M_{gm} \text{sign}(\dot{\varphi}_{ry}) + C \omega_{oy}(s)}{k_1 + Hs} \right| \quad (3)$$

分析可知,随着陀螺动量矩 H 及 k<sub>1</sub> 的增大,导引头稳像性能增强。由于实际导引头中值较小,弹体扰动对失调角的影响主要是干摩擦力矩。在实际中,可以测试获得干摩擦力矩或通过干扰观测器方法获得导引头进动过程中的干摩擦力矩<sup>[7]</sup>,来对干扰力矩引起的失调角进行补偿,以减小干扰力矩对导引头稳像性能的影响。

跟踪能力分析:假定无弹体扰动,而且视线的角速度分量 ω<sub>z</sub> 很小可以忽略,考虑目标视线机动的频率不大,根据方程组(1)同理可以得到:

$$|\alpha(s)| \approx \left| \frac{H \omega_{ly}(s) - M_{gm} \text{sign}(\dot{\varphi}_{rz}) \cos \varphi_{ry}}{k_1 + Hs} \right| \quad (4)$$

$$|\beta(s)| \approx \left| \frac{H \omega_{lz}(s) + M_{gm} \text{sign}(\dot{\varphi}_{ry})}{k_1 + Hs} \right| \quad (5)$$

干摩擦力矩对失调角的影响较小可以忽略,并且当目标视线相对导引头光轴的角速度的频率不大于转折频率时,稳态时得到

$$|\alpha| \approx \left| \frac{-H}{k_1} \right| |\omega_{ly}(s)|, |\beta| \approx \left| \frac{-H}{k_1} \right| |\omega_{lz}(s)| \quad (6)$$

跟踪能力

$$Q = \left| \frac{\omega_{ly}}{\beta} \right| = \left| \frac{\omega_{ly}}{\alpha} \right| = \left| \frac{-k_1}{H} \right| \quad (7)$$

### 2.2 导引头稳定性及模态分析

引头系统的特征多项式为

$$\Delta(s) = [s(J_r s + C)]^2 + (k_1 + Hs)^2 \approx J_r^2 s^4 + 2J_r s^3 + H^2 s^2 + 2k_1 Hs + k_1^2 \quad (8)$$

根据劳斯判据得到稳定性条件

$$0 < \frac{k_1}{H} < \frac{C}{J_r} \quad (9)$$

假设四次多项式的根分为模值较大 s<sub>1,2</sub> 的与模值较小的 s<sub>3,4</sub> 两组,依据近似求根法<sup>[8]</sup>得到:

$$s_{1,2} = -\frac{C}{J_r} \pm i \frac{H}{J_r}, s_{3,4} = -\frac{k_1}{H} \quad (10)$$

实际中,|s<sub>3,4</sub>| < |s<sub>1,2</sub>| 满足假设条件。其中 s<sub>1,2</sub> =

-C/J<sub>r</sub> ± iH/J<sub>r</sub> 代表陀螺转子的章动运动,-C/J<sub>r</sub> 为陀螺的阻尼比,H/J<sub>r</sub> 为陀螺章动频率。通过上式可知增大陀螺的阻尼比可以加速快陀螺章动的衰减。s<sub>3,4</sub> 项为陀螺瞬态量,为保证系统进入稳态收敛,k<sub>1</sub> 必须大于 0;同时衰减的快慢会影响系统的响应时间,因此希望|k<sub>1</sub>/H| 越大越好。由导引头稳定性的限制,k<sub>1</sub>/H < C/J<sub>r</sub>。综合以上分析,系统的性能最终由这个量决定,提高 C/J<sub>r</sub> 可以提升导引头性能。

### 3 导引头动力学模型仿真分析及校正

#### 3.1 导引头动力学频域分析

导引头动力学参数为:陀螺转子动量矩 H = 1 350gf·cm·s,转子绕赤道轴的转动惯量 J<sub>r</sub> = 2gf·cm·s<sup>2</sup>,相对运动摩擦阻尼系数 C = 1.12 gf·cm·s,干摩擦力矩 M<sub>gm</sub> = 10g·cm。

如图 1 所示,在虚线处断开得到导引头动力学开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{k_1 (Hs + k_1)}{(J_r s^2 + Cs)^2 + H^2 s^2 + k_1 Hs} \quad (11)$$

满足前面分析的稳定性的条件下,取相同的 k<sub>1</sub> = 0.75 HC/J<sub>r</sub>。在不同阻尼系数下,系统的波特图如图 2 所示。

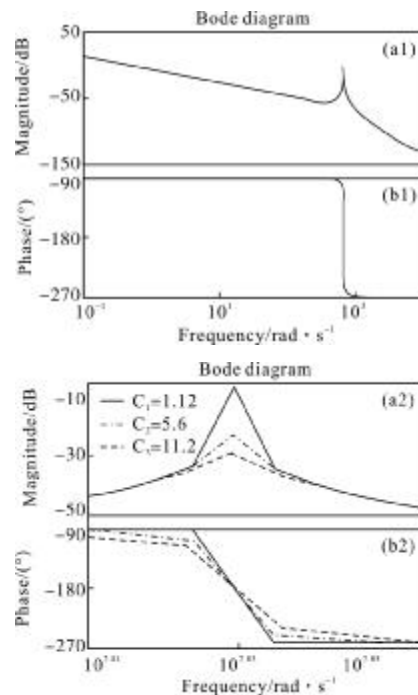


图 2 不同阻尼系数下的系统波特图

Fig.2 Bode diagram of different damping coefficient

由图 2 可知,增益穿越频率处导引头的相位裕量为  $90^\circ$ ,但相位穿越频率处谐振尖峰增益很大。当增大系统开环增益  $k_1$  时,谐振峰值穿过  $0\text{ dB}$ ,导引头失稳。增大导引头的阻尼可以减小导引头的谐振峰值,进而有更大的幅值裕度。

而实际系统中的阻尼系数很小,但导引头的跟踪性能仍比较好。一方面,由于导引头回路中含有一阶惯性环节等延时环节(如图 3 所示),另一方面回路离散化将产生相位滞后,从而使相位穿越频率减小与谐振频率分离,使导引头在谐振峰值穿越  $0\text{ dB}$  时不会失稳。从而可以增大系统增益  $k_1$  提高系统响应速度及跟踪性能。

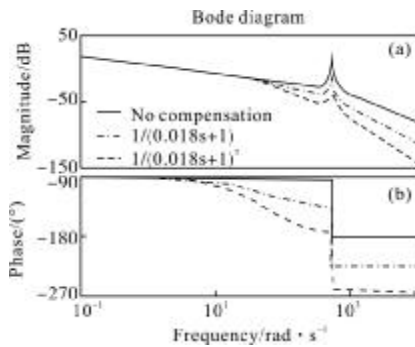


图 3 不同校正环节下的系统波特图

Fig.3 Bode diagram of different compensator

### 3.2 导引头动力学仿真验证

实际导引头在总传递比后存在功率放大器一阶惯性环节,并考虑实际导引头是离散控制回路,激光脉冲周期为  $0.1\text{ s}$ 。将惯性环节并入  $k_1$  中,在满足稳定性条件下可以取  $k_1=30 \times 0.75 \times \text{HC}/[J_r(0.018\text{ s}+1)]$ ,并加入与实际相符的高斯白噪声电压,对导引头回路进行仿真。下面将数学仿真和半实物仿真结果进行对比。

评价导引头动力学性能一般通过两个重要的性能指标——跟踪性能和隔离度。导引头的跟踪性能主要指导引头的响应时间和超调量。导引头的隔离度是指导引头输出幅值与弹体扰动幅值的比值。耦合度为导引头交叉通道的输出幅值与导引头输入信号幅值之比。按照以上分析可以分为以下 2 种情况来综合验证导引头的数学模型。以下分析中角速度单位均为  $(^\circ)/\text{s}$ 。

(1) 目标视线角速度  $\omega_{Ay}=0, \omega_{Az}=10$ , 不考虑弹体的扰动。此时导引头跟踪特性如图 4 所示。图(a1),

(b1)为数学仿真结果,图(a2),(b2)是半实物仿真结果,对比可知导引头动力学模型响应时间和超调量基本符合实际系统。导引头的跟踪能力为  $Q=11(1/\text{s})$ ,耦合度为  $5\%$ ,失调角为  $0.9^\circ$ ,符合真实系统。

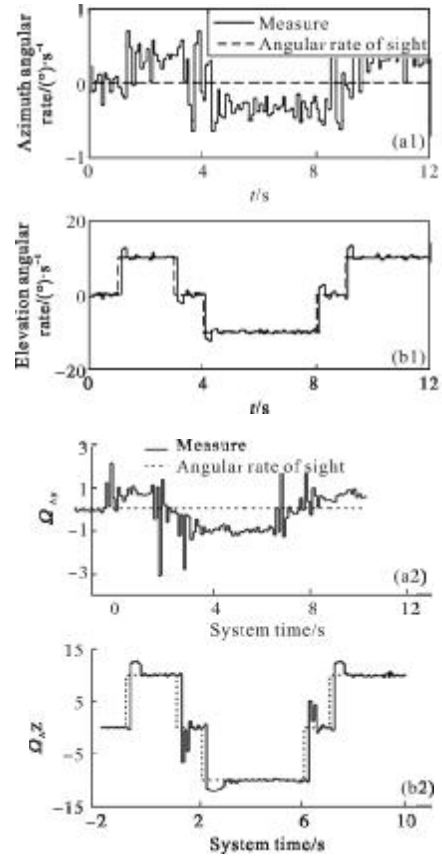


图 4  $\omega_{Ay}=0, \omega_{Az}=10$  条件下,系统响应

Fig.4 System response when  $\omega_{Ay}=0, \omega_{Az}=10$

(2)  $\omega_{Ay}=\omega_{Az}=0$ ,弹体扰动  $\omega_{Ax}=\omega_{Az}=0, \omega_{Ay}=6\pi$ ,频率为  $\pi\text{ rad/s}$  的余弦扰动。此时导引头稳像特性如图 5、图 6 所示。图 5 为数学仿真结果,图 6 为半实物仿真结果。

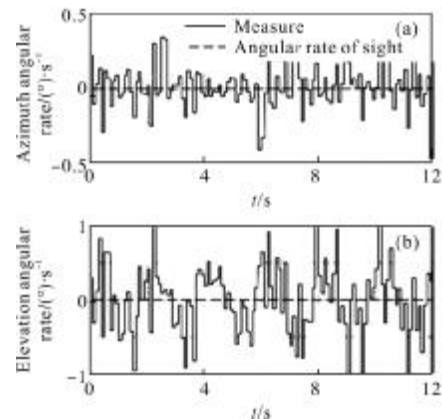


图 5 弹体扰动下数字仿真结果

Fig.5 Simulation result with disturbance of missile

从图中可以看出数学模型隔离度分布较好,符合实际系统。零偏及幅值误差是由于摩擦力矩不精确及实际系统存在其他干扰力矩及噪声特性复杂造成的。

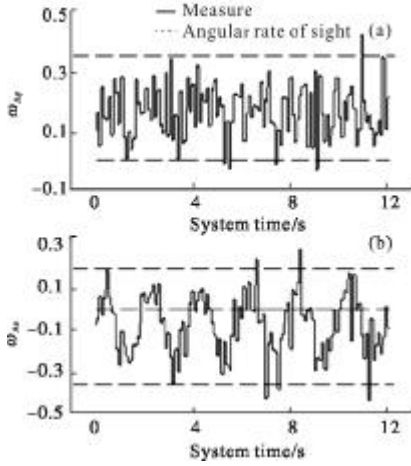


图 6 弹体扰动下的半实物仿真结果

Fig.6 Semi-physical simulation with disturbance of missile

### 3.3 导引头跟踪能力校正

分析系统的结构框图可知,对于外力力矩输入,系统为 0 型系统,因此对于常值角速度(对应常值力矩)输出成比例的失调角(误差信号)。目标视线角速度作为力矩进入系统时,将由转子动量矩放大  $H/57.3$  倍,而其他干扰引起的力矩是未经过放大直接进入系统的,相对于目标机动角速度引起的力矩缩小了  $H/57.3$ 。因此通过增大转子动量矩可以减小由定子和转子之间的摩擦系数引起的干扰(其中包含弹体扰动及目标机动引起的干扰)和目标视线角加速度引起的干扰。

以失调角为输入端,导引头跟踪系统可以看作是输入为 0,抑制干扰而使导引头光轴与目标视线重合的系统(即输出失调角为 0)。并且需要提取进入自动驾驶仪的控制信号正比于目标视线角速度。可以考虑将目标视线的稳定与角速度信息提取分离,即不必使失调角与目标视线角速度成比例。

比例-积分校正  $k_1+k_2/s$  可以达到消除常值扰动的目的,使系统成为 1 型系统,这样可以使光轴与目标视线重合,而从综合控制信号中提取与视线角速度成比例的信号。从而可以消除对导引头失调角的依赖,而且不容易丢失目标。根据公式(4)得到简化的目标视线跟踪框图如图 7(a)所示,在满足稳定性条件下,简化系统可以代替实际系统。PI 校正后得到目标视线跟踪框图如图 7(b)所

示,从图中可以看出校正前后失调量的位置没有变化而控制量的提取变为从综合控制信息中提取。控制量、失调量与目标视线角速度的传递关系如公式(12)所示:

$$\frac{\text{误差量}}{w_{ly}(s)} = \frac{Hs}{Hs^2 + k_1s + k_2} \times \frac{k_1s + k_2}{Hs} = G_1(s) + G_2(s)$$

$$G_1(s) = \frac{k_2}{Hs^2 + k_1s + k_2}, G_2(s) = \frac{k_1s}{Hs^2 + k_1s + k_2} \quad (12)$$

式中:  $G_1(s) + G_2(s)$  为控制量传递关系;  $G_2(s)$  为失调量传递关系。

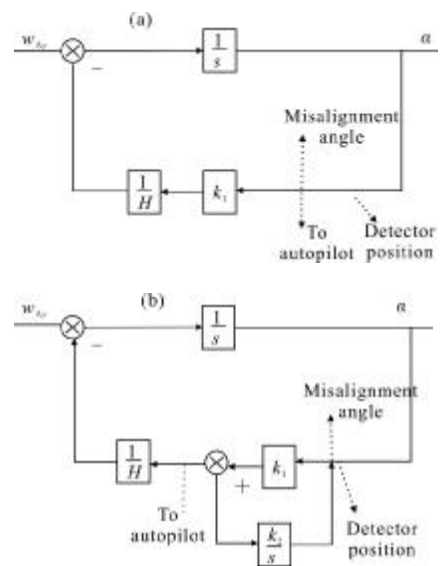


图 7 PI 校正前后失调量与控制量的关系

Fig.7 Misalignment angle and the amount of control before and after PI

取  $k_2$  分别为  $0.3k_1$  和  $2.5k_1$ , 弹体无扰动, 目标视线角速度都为常值  $w_{ly}=5, w_{lx}=10$ , 仿真得到控制量和失调角如图 8 所示。图 8(a)中积分项系数为  $0.3k_1$ , 图 8(b)为  $2.5k_1$ 。从图 8 中可以看出积分项系数越大越有利于消除失调角提高跟踪能力。P-I 校正改变了导引头比例控制及通过成比例的失调角、提取信息的方式。当然也可以通过其他办法来改变导引头控制方式(自抗扰或非线形控制)使导引头光轴与目标视线重合,并通过映射关系得出目标视线角速度。

与 3.2 节(2)中的仿真条件相同,PI 校正后导引头的隔离度如图 9 所示。图 9(a1)~(a4)中积分项系数为  $0.3k_1$ , 图 9(b1)~(b4)为  $2.5k_1$ 。PI 校正积分项系数增大会使隔离度稍变差,因此在设计积分项系数时应综合考虑系统的跟踪能力与隔离度需求。

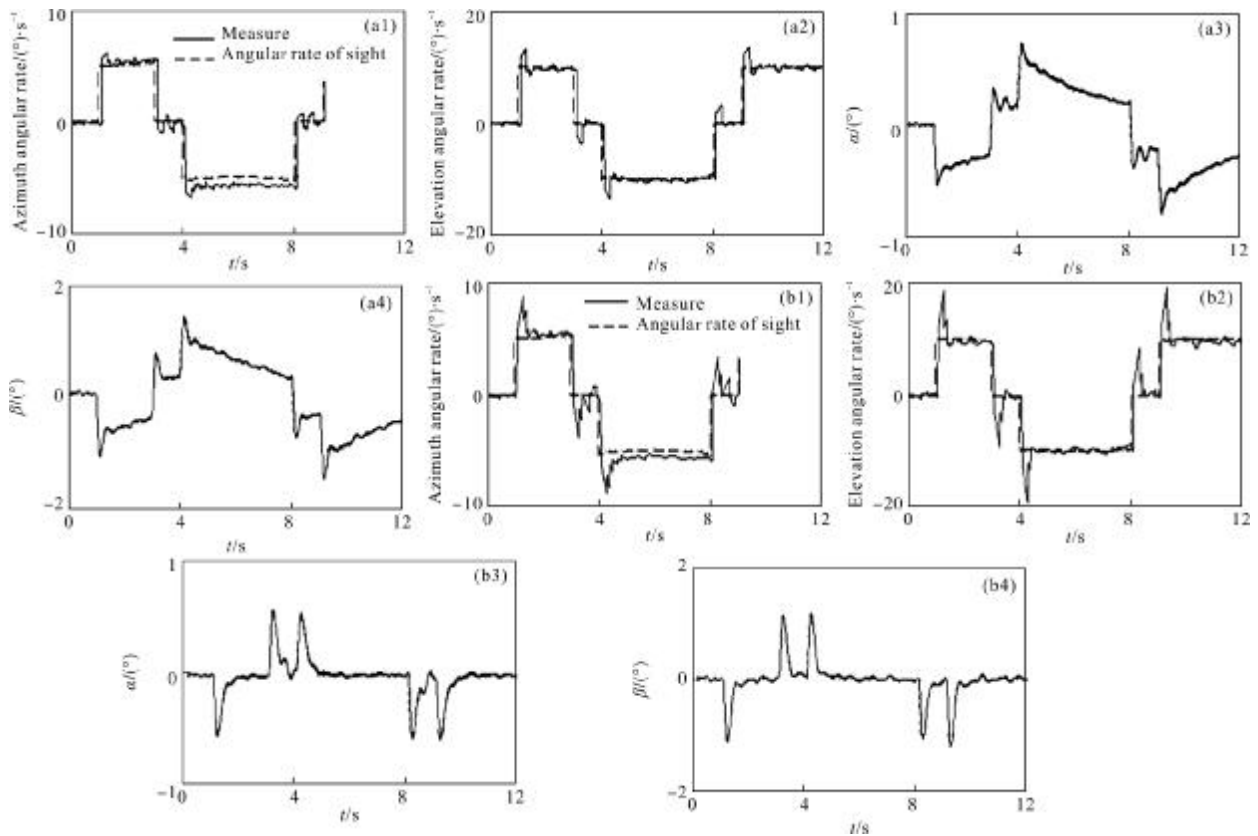


图 8 PI 校正后控制量及失调角

Fig.8 Amount of control and misalignment angle before and after PI

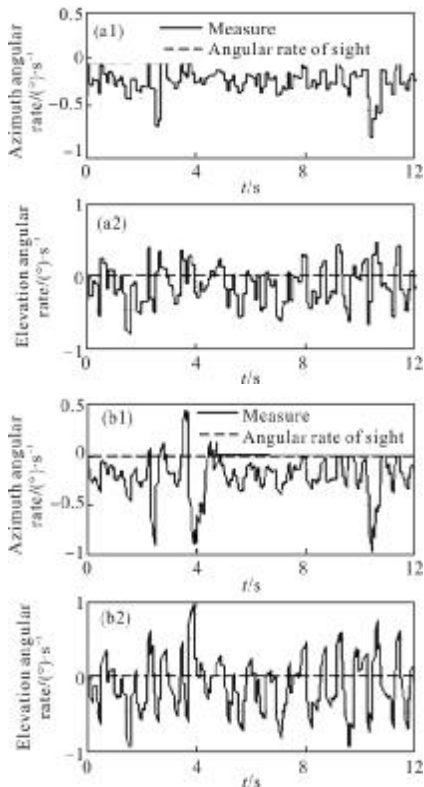


图 9 PI 校正后隔离度

Fig.9 Isolation after PI compensation

### 4 结论

通过对导引头模型的稳定性及模态分析，得到通过调节参数获得导引头高性能工作的本质。并通过分析得到在导引头阻尼很小情况下依然有较好性能的理论依据。

在通过半实物仿真验证导引头动力学模型正确的基础上，进一步提出动力陀螺导引头可以通过 PI 校正来根本地改变导引头获取控制信息的方式。这样既可以在减小失调角甚至为 0 的同时，获得与目标视线角速度成比例的控制信号，减小对探测器线性区大小的依赖。这意味着也可以选择其他控制方式使动力陀螺式导引头光轴与目标视线重合，并通过一定的映射方式获得目标视线角速度信息。这为动力陀螺式导引头的控制校正提供了新的思路。

### 参考文献:

[1] Chen Jiashi. Analysis and Design of Missile Guidance and Control Systems [M]. Beijing: Astronautics Press, 1989. (in

- Chinese)  
陈佳实. 导弹制导与控制系统的分析与设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1989.
- [2] Stanley A. White. Dynamics of a Solenoidal-Torqued Gyro-Stabilized Seeker Assembly for Guidance and Tracking [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1974, 10(1): 113-122.
- [3] Yu Yingjie, Liu Zaozhen. Modeling and simulation research of laser seeker [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(2): 158-159. (in Chinese)  
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): 158-159.
- [4] Wei Wenjian, Qin Shiqiao, Zhan Dejun, et al. Research on the gyro's steady control of some laser simulation seeker[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37: 299-300. (in Chinese)  
魏文俭, 秦石乔, 战德军, 等. 激光导引头陀螺稳定控制的仿真研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37: 299-300.
- [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)  
李慧, 吴军辉, 朱震, 等. 速率陀螺式激光导引头稳定跟踪原理分析与仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1337-1341.
- [6] Неусыпин А К. Гироскопическиеприводы [M]. Translated by Liu Chengguang, Li Hongfu. Beijing: National Defence Industry Press, 1981. (in Chinese)  
(苏) 聂乌锡平 А К. 陀螺传动装置 [M]. 刘承光, 李鸿福, 译. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [7] Sun Gao, Zhu Mingchao, Jia Hongguang, et al. Optical axis stabilization of semi-strapdown seeker [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 490-494. (in Chinese)  
孙高, 朱明超, 贾宏光, 等. 半捷联导引头光轴稳定性[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 490-494.
- [8] Qian Xingfang, Lin Ruixiong, Zhao Yanan. Missile Flight Dynamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2000. (in Chinese)  
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.