

摩擦自适应补偿在导引头稳定平台控制系统中的应用

孙 高^{1,2}, 朱明超¹, 贾宏光¹, 刘 慧¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为提高两轴双框架导引头稳定平台的隔离度, 设计了导引头控制系统。在惯性空间基础上, 建立了导引头的隔离度模型, 分析了影响系统隔离度的主要因素。根据对系统摩擦性质的分析, 建立了系统的摩擦模型, 并确定了摩擦补偿算法。采用极点配置和超前滞后的方法设计了控制器, 并通过仿真和实验的方法验证了摩擦自适应补偿算法的可行性。俯仰单通道仿真结果表明, 摩擦自适应补偿算法能准确估计出模型参数, 且在弹体扰动幅值为 1° , 频率为 2 Hz 时, 系统在摩擦自适应补偿后, 俯仰框隔离度提高了 97.14%。实验结果显示, 在弹体扰动幅值为 1° , 频率为 2 Hz 时, 导引头俯仰框和偏航框的隔离度分别为 1.58% 和 1.81%; 在弹体扰动幅值为 3° , 频率为 3 Hz 时, 导引头俯仰框和偏航框的隔离度分别为 2.84% 和 2.15%。

关键词: 摩擦自适应补偿; 隔离度; 导引头; 极点配置

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1316-06

Adaptive friction compensation in seeker stabilized platform servo control system

Sun Gao^{1,2}, Zhu Mingchao¹, Jia Hongguang¹, Liu Hui¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve the disturbance rejection of seeker stabilized platform, the servo control system was designed. The disturbance rejection model was proposed based on inertia space and the main factors that influence the disturbance rejection were shown. Then, the friction model was established based on the characteristic of friction and the friction adaptive compensation algorithm was proposed. The velocity controller was designed based on the pole-placement method while the lead-lag compensator was used as position controller. Simulation result indicated that the disturbance rejection of pitch frame improved 97.14 percent while the missile disturbance was 1° and 2 Hz. Experimental results showed that the disturbance rejection of two frame were 1.58%、1.81% and 2.84%、2.15% while the missile disturbance were 1° and 2 Hz and 3° and 3 Hz. The disturbance rejection of seeker stabilized platform

收稿日期: 2012-09-10; 修订日期: 2012-10-15

基金项目: 中国科学院“三期创新”平台资助项目

作者简介: 孙高(1985-), 男, 博士生, 主要从事光电稳定平台伺服控制方面的研究。Email: gao_sun@163.com

导师简介: 贾宏光(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事精确制导控制技术、微机电一体化技术方面的研究。

Email: jiahg@ciomp.ac.cn.

was improved by using friction adaptive compensation.

Key words: adaptive friction compensation; disturbance rejection; seeker; pole-placement

0 引言

为了适应现代化战争的需要,精确制导技术逐渐成为武器系统核心研究领域,导引头^[1-2]是精确制导的关键部分,它的主要作用是对目标进行快速捕获和精确跟踪。导引头平台通过高增益角速度稳定回路使探测器光轴在惯性空间保持稳定,但由于稳定平台安装于弹体基座之上,弹体在飞行过程中由发动机及空气阻力等因素引起的弹体扰动会通过平台轴系之间的摩擦耦合到平台框架上,从而引起光轴的晃动,甚至会使导引头无法实现对目标的捕获与跟踪。

隔离度^[3-4]是衡量导引头稳定系统好坏的一个重要标准,也是实际工程中的一个重要指标。隔离度的本质是导引头平台对弹体扰动的去耦能力。为了提高导引头平台的稳定精度及视线角速度精度,必须要提高系统隔离度以有效减小弹体扰动引起的光轴在惯性空间的抖动。为了提高隔离度,必须对影响隔离度的诸多因素加以分析,针对其主要影响因素提出合理可行的解决方法。

文中在惯性空间的基础上,确定了合适的隔离度模型,对影响系统隔离度的主要因素摩擦力矩采用了自适应补偿算法,并通过仿真和实验说明了该方法的可行性。

1 导引头隔离度模型

隔离度是指由弹体扰动引起的导引头平台在惯性空间转动的角度与弹体相对惯性空间扰动的角度的比值。表达式为:

$$I = \frac{\delta}{\vartheta} \times 100\% \tag{1}$$

式中: I 为隔离度; δ 为平台相对惯性空间转动的角度; ϑ 弹体相对惯性空间的角度。

隔离度数值越小,说明导引头平台伺服系统的隔离能力越强,其所能达到的稳定精度也越高。

导引头隔离度模型的建立是以惯性空间为建模基础,认为电磁转矩与干扰力矩的合力矩生成导引

头稳定平台相对惯性空间的角加速度,即:

$$T_e + T_d = J \frac{d\dot{\varphi}}{dt} \tag{2}$$

而电枢反电势 E_a 是由平台相对于基座转动的相对角速度生成,角速率陀螺测量的是平台相对惯性空间的速度。由此,可以确定导引头隔离度模型如图 1 所示。

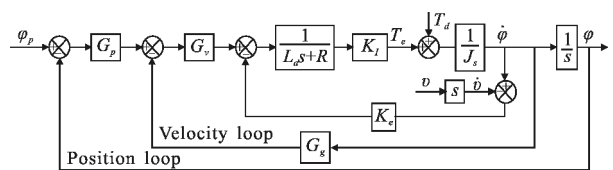


图 1 导引头隔离度模型

Fig.1 Disturbance rejection model of seeker stabilized platform

图中, φ_p 为位置环指令, G_p 为位置环控制器, G_v 为速度环控制器, G_θ 为陀螺传递函数, L_a 电机电枢回路总电感, R 为电机电枢回路总电阻, T_e 为电磁转矩, T_d 为干扰力矩, J 为平台转动惯量, φ 为平台转动角度, $\dot{\varphi}$ 为平台角速度, ϑ 为弹体扰动角度, $\dot{\vartheta}$ 为弹体扰动角速度, K_t 为电机力矩系数, K_e 为电机反电势系数。

根据隔离度模型可知,导引头稳定平台的隔离度与干扰力矩、弹体扰动和传感器精度等因素有关,而干扰力矩是影响隔离度的最主要因素^[5-6]。所以,为了提高系统的隔离度,必须减小干扰力矩的影响。

2 摩擦自适应补偿

通过对导引头结构的分析可知,干扰力矩主要包括轴系间的摩擦力矩、导线的拖拽力矩、偏心力矩及弹性力矩。合理布线可以有效地减小导线拖拽力矩对隔离度的影响,偏心力矩和弹性力矩可通过结构设计中心校准、配平及提高结构刚度有效解决,而摩擦力矩的影响必须通过其他途径有效解决,文中采用摩擦自适应补偿的方法解决此问题。

2.1 摩擦模型的确定

摩擦^[7]是一个普遍现象,基于摩擦模型的摩擦补偿方法,其补偿结构能直观准确地描述摩擦,且易于

实现^[8-9]。根据对系统的理论分析和测试,可以采用粘滞摩擦和库伦摩擦模型近似系统的摩擦模型,如图 2 所示,摩擦力的大小与框架相对角速度有关。

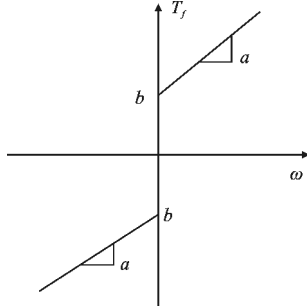


图 2 系统摩擦模型
Fig.2 Friction model

由此可得,摩擦力的数学模型可表示为:

$$T_f(\omega) = a\omega + b \quad (3)$$

式中: ω 为框架相对角速度; a 为与角速度相关的粘滞摩擦系数; b 为库伦摩擦力矩。

2.2 摩擦补偿原理

为了提高系统刚度,系统采用永磁直流力矩电机直接驱动方式,将系统所有转动部件的惯量都反映到电机轴上,则电机系统的整体模型为:

$$J \frac{d\varphi}{dt} = K I(t) - T_f(t) + T_l(t) \quad (4)$$

式中: J 为系统等效到电机轴上的总的转动惯量; K 为电机的力矩系数; I 为电机电枢电流; T_f 为系统的摩擦力矩; T_l 为负载干扰力矩。

为了直观地了解摩擦对系统的影响及对摩擦的补偿效果,在忽略负载干扰力矩的前提下,可将电机系统描述为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = K I(t) - T_f(t) \quad (5)$$

假设:

$$I(t) = u(t) + \frac{\hat{T}_f(\omega)}{\hat{K}} \quad (6)$$

式中: $u(t)$ 为控制变量; $\hat{T}_f(\omega)$ 为估计的摩擦力; \hat{K} 为估计的电机力矩系数。

由此可得:

$$J \frac{d\omega}{dt} = K u(t) + \left(\frac{K}{\hat{K}} T_f(\omega) - \hat{T}_f(t) \right) \quad (7)$$

由此可知,可通过对电机力矩系数和摩擦力矩的估计来补偿摩擦对系统控制的影响。在该系统中,

电机的力矩波动较小,故可将电机力矩系数视为常数。所以,摩擦补偿效果的好坏完全取决于对系统摩擦力矩的估计。

2.3 摩擦自适应补偿算法

根据摩擦模型可知:

$$J \frac{d\omega}{dt} = K I(t) - T_f(t) = K I(t) - a\omega(t) - b \quad (8)$$

在该系统中,转动惯量和电机力矩系数都可视为固定常数。因此,对摩擦的补偿可通过对 a 和 b 的实时估计来实现。

$$T_f(\omega) = \varphi^T(t) \theta(t) \quad (9)$$

令

$$\varphi^T(t) = [\omega(t) \quad 1]^T \quad (10)$$

$$\theta(t) = [a \quad b] \quad (11)$$

估计误差为:

$$\varepsilon(t_i) = f(t_i) - \varphi^T(t_i) \theta(t_i) \quad (12)$$

令

$$Y = \varepsilon^T \varepsilon \quad (13)$$

满足 Y 为最小的 θ 即为系统摩擦的最优估计。

2.4 控制律设计

假设系统摩擦已经完全被补偿,则系统可描述为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = K u(t) \quad (14)$$

若将控制律设计成如下形式:

$$u(t) = K_r \left[-\omega(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t (\omega_r(\tau) - \omega(\tau)) d\tau \right] \quad (15)$$

其中, $K_r = \frac{2\xi\omega_0 J}{K}$, $T_i = \frac{K}{J\omega_0^2}$ 。

那么,系统的闭环传递函数为:

$$\phi(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (16)$$

对于离散系统,控制律可写成:

$$u(t) = u(t-1) + s_0[\omega_r(\tau) - \omega(t-h)] + s_1[\omega_r(t-h) - \omega(t-h)] \quad (17)$$

由于文中系统是采用计算机控制的采样系统,所以其导数的方程可用前向差分方程代替:

$$\omega(t+1) = \omega(t) + h/J[K I(t) - a\omega(t) - b] \quad (18)$$

系统控制律的设计采用传统的极点配置的方法。系统表述如下:

$$\omega(t+1) = A\omega(t) + B I(t) + q(t) \quad (19)$$

其中,

$$q(t) = \tilde{A}\omega(t) + \tilde{B} I(t) + \delta \quad (20)$$

根据公式(18)可得,令 $A=1, B=hK/J, \tilde{A}=-ha/J, \tilde{B}=0, \delta=-hb/J$,则摩擦对系统隔离度的影响得以补偿。

3 仿真结果

为了验证摩擦自适应补偿算法的可行性,对该算法在 MATLAB-simulink 模块下进行计算机仿真。

仿真参数: $L_a=2.7\text{ mH}, K_1=0.046\text{ Nm/A}, R=6.4\ \Omega, J=0.008\text{ kgm}^2, K_e=0.046\text{ V}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$ 。

仿真时,采用标准的库伦粘滞摩擦模型,具体形式如下:

$$F = \text{sing}(\omega) \times (\alpha \times \text{abs}(\omega) + \beta) \quad (21)$$

式中: F 为摩擦力; $\alpha=0.1; \beta=0.2$ 。

通过摩擦补偿算法对系统摩擦在线实时计算并加以补偿。通过对估计参数 a 和 b 的提取并与理论值进行比较,从而确定算法的可行性。为了使仿真尽量贴近实际,在系统速度输出端引进了与陀螺测速噪声等效的方差为 0.02 的高斯噪声。

通过仿真,对模型参数的实时估计如图 3 和图 4 所示。根据仿真结果可知,对 α 的估计迅速收敛于 0.1,而对 β 的估计也较快收敛于 0.2,与所给理论模型相符。

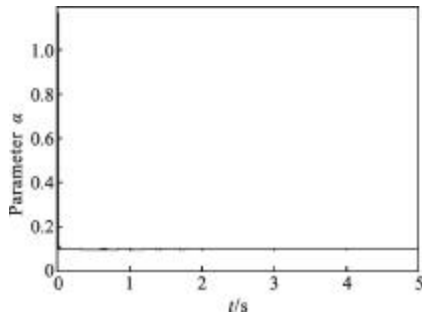


图 3 参数的 α 实际估计值

Fig.3 Estimation of parameter α

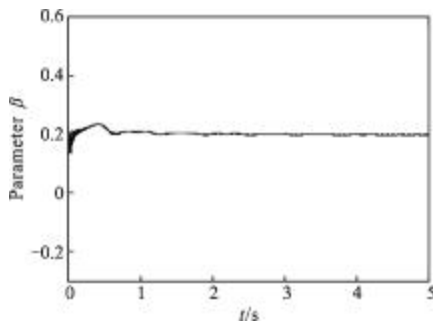


图 4 参数 β 的实际估计值

Fig.4 Estimation of parameter β

为了比较补偿前后系统隔离度的变化,以俯仰通道为例,给定弹体扰动幅值为 1° ,频率为 2 Hz,在补偿前后,角位置误差仿真结果如图 5 所示,在通过补偿之后,系统隔离度提高了 97.14%。因此,此算法能准确地估计出摩擦模型中的参数,虽然初始阶段的值相对较大,但其收敛速度相当快,且对系统隔离度有明显提高。

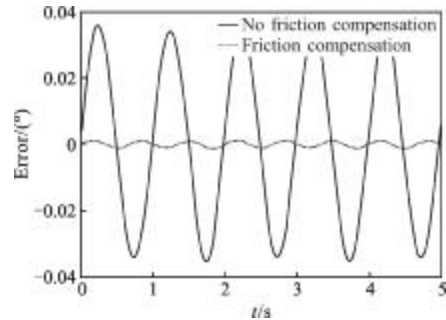


图 5 系统角位置误差比较

Fig.5 Comparison of angle error

4 实验结果

根据公式(16)可知,速度闭环可以等效为一个典型二阶系统,根据实测数据可以得到速度闭环的频率特性曲线如图 6 所示。

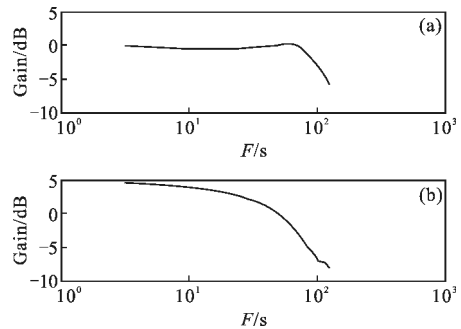


图 6 速度闭环频率特性曲线

Fig.6 Bode of velocity closed loop

在此基础上,为了提高系统的瞬态及稳态响应,位置环控制器的设计采用常规的超前滞后的方法,具体控制器参数为:

$$G_p(s) = 15 \times \frac{z-0.679}{z-0.349} \times \frac{z-0.95}{z-0.995} \quad (22)$$

由于所采用的探测器帧频的限制,位置环采样周期选择为 40 ms。

由上述分析可知,在加入摩擦自适应补偿后,导引头稳定平台双通道控制原理如图 7 所示。

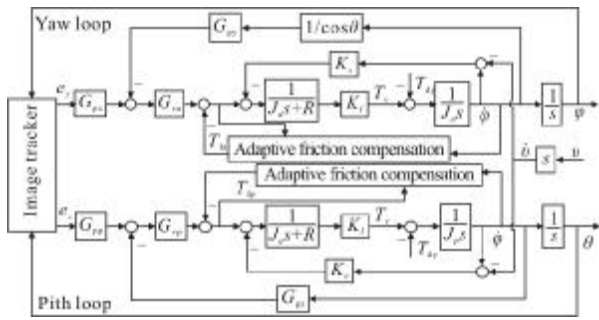


图 7 导引头双通道控制原理图

Fig.7 Seeker stabilized platform control principle with adaptive friction compensation

图中, e_y 和 e_z 分别为偏航和俯仰方向的脱靶量, 分别由图像跟踪器给出, T_{fa} 和 T_{fp} 分别为对系统偏航和俯仰摩擦力的估计, 其余符号均与图 1 相同, 脚标 a 和 p 分别表示偏航通道和俯仰通道。

为了验证摩擦自适应补偿算法的工程可行性, 设计了测试实验。将导引头安装于三轴速率转台滚框内, 初始状态时使导引头锁定一个固定目标, 三轴转台模拟弹体扰动角位置信号, 考虑到滚转控制弹, 将三轴转台滚框锁死, 偏航框俯仰框均按给定正弦模拟弹体扰动。导引头伺服控制系统位置环采用光学图像闭环, 由图像处理板直接给出脱靶量。

在给定弹体角位置扰动幅值为 1° , 频率为 2 Hz 时, 系统输出的脱靶量分别如图 8 和图 9 所示, 通过计算可得俯仰框和偏航框的隔离度分别为 1.58% 和 1.81%; 在给定弹体角位置扰动幅值为 3° , 频率为 3 Hz 时, 系统输出的脱靶量分别如图 10 和图 11 所示, 通过计算可得俯仰框和偏航框的隔离度分别为 2.84% 和 2.15%。

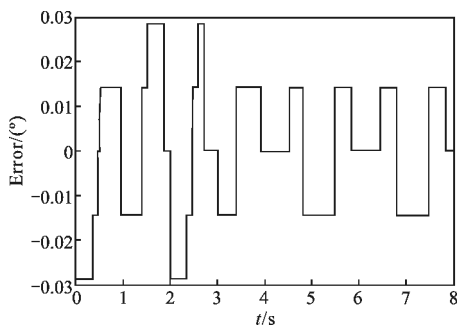


图 8 弹体扰动为 1° , 2 Hz 时俯仰框脱靶量

Fig.8 Pitch stabilization error while missile disturbance is 1° and 2 Hz

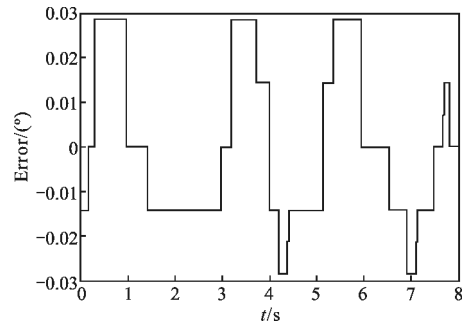


图 9 弹体扰动为 1° , 2 Hz 时偏航框脱靶量

Fig.9 Azimuth stabilization error while missile disturbance is 1° and 2 Hz

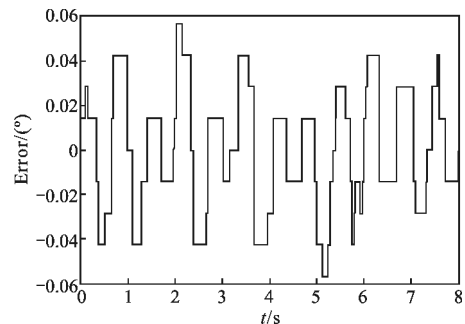


图 10 弹体扰动为 3° , 3 Hz 时俯仰框脱靶量

Fig.10 Pitch stabilization error while missile disturbance is 3° and 3 Hz

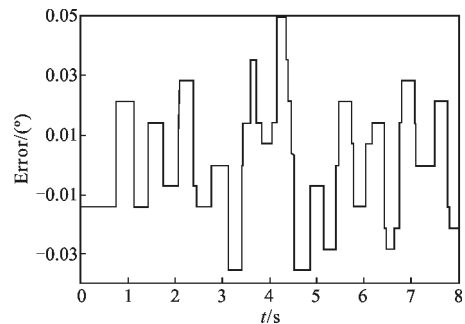


图 11 弹体扰动为 3° , 3 Hz 时偏航框脱靶量

Fig.11 Azimuth stabilization error while missile disturbance is 3° and 3 Hz

5 结论

文中以惯性空间导引头隔离度模型为基础, 采用摩擦自适应补偿的方法对影响导引头稳定平台隔离度的主要因素摩擦力矩进行补偿, 并根据补偿后的系统设计了速度环和位置环的控制器。仿真结果显示, 当摩擦模型采用设计模型的情况下, 算法具有较高的精度; 实验结果则证明了算法在实际系统中

应用的有效性,在补偿之后系统具有较高的隔离度。

参考文献:

- [1] Zhang Zhiyong, Zhou Xiaoyao, Fan Dapeng, et al. Design and analysis of control system for seeker servo mechanism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 494-499. (in Chinese)
张智永, 周晓尧, 范大鹏, 等. 导引头伺服机构的控制系统分析与设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 494-499.
- [2] Zhu Mingchao, Wang Tao, Jia Hongguang. Seeker kinematic analysis and calibration based on POE formula [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1556-1562. (in Chinese)
朱明超, 王涛, 贾宏光. 基于指数积公式的导引头运动学分析与标定[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(8): 1556-1562.
- [3] Zhu Huazheng, Fan Dapeng, Ma Dongxi, et al. Disturbance isolation index of seeker servo system and its test [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(8): 1993-1998. (in Chinese)
朱华征, 范大鹏, 马东玺, 等. 导引头伺服系统隔离度与测试[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(8): 1993-1998.
- [4] Lin Chunliang, Hsiao Yihsing. Adaptive feedforward control for disturbance torque rejection in seeker stabilizing loop [J]. *IEEE*, 2001, 9(1): 108-121.
- [5] Cui Yingying, Xia Qunli, Qi Zaikang. Seeker platform disturbance rejection mathematical model [J]. *Journal of Projectiles, Rockets Missiles and Guidance*, 2006, 26(1): 22-25. (in Chinese)
崔莹莹, 夏群力, 祁载康. 导引头稳定平台隔离度模型研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2006, 26(1): 22-25.
- [6] Zhao Chao. Study on disturbance rejection rate of a seeker servo system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(7): 78-82. (in Chinese)
赵超. 导引头稳定系统隔离度研究[J]. *光电与控制*, 2008, 15(7): 78-82.
- [7] Phyoo San, Ren Beibei, Sam Shuzhi, et al. Adaptive neural network control of hard disk drives with hysteresis friction nonlinearity [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(2): 351-358.
- [8] Tong Heng Lee, Kok K T, Sunan Huang. Adaptive friction compensation with a dynamical friction model [J]. *IEEE*, 2011, 16(1): 133-140.
- [9] Xiang Hongbiao, Qiu Zurong, Li Xingfei, et al. Nonlinear friction modeling and compensation of high-precision experimental platforms [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(5): 1119-1127. (in Chinese)
向红标, 裘祖荣, 李醒飞, 等. 精密实验平台的非线性摩擦建模与补偿[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(5): 1119-1127.