

文章编号 1004-924X(2014)06-1577-07

光电着舰引导系统的视轴稳定

葛 兵^{1,2*}, 高慧斌², 余 毅²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了提高光电着舰引导系统的视轴跟踪精度和指向精度, 研究了如何隔离舰体运动对光电经纬仪视轴的扰动。对舰载光电经纬仪进行建模, 引入了各种扰动力矩。设计了超前滞后控制、线性二次高斯恢复(LQG/LTR)控制和 H^∞ 控制 3 种控制器来提高系统的性能和稳定性, 详细研究了 Kalman 滤波和 H^∞ 加权矩阵的设计。在 Matlab 中对设计的控制方法进行仿真, 并在摇摆台进行了试验验证。在时域、频域响应和稳定性等方面对 3 种控制器进行的对比实验表明, LQG/LTR 控制和 H^∞ 控制结果满足设计指标要求, 稳定隔离度达到 50 dB 以上。基于提出的方法, 经纬仪可以对舰飞机进行稳定跟踪和精确轨迹测量, 实现着舰引导。

关键词: 着舰引导; 视轴稳定; 线性二次高斯恢复(LQG/LTR)控制; H^∞ 控制

中图分类号: V556; U666.124 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142206.1577

LOS stabilization of optic-electro landing system

GE Bing^{1,2*}, GAO Hui-bin², YU Yi²

(1. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

** Corresponding author, E-mail: gebing1982@163.com*

Abstract: To increase line-of-sight (LOS) tracking and pointing accuracy of an Optic-Electro (O-E) landing guidance system, this work explores how to isolate the LOS tracking and pointing of a O-E theodolite from the carrier motion disturbance. A carrier-based O-E theodolite model was established with various disturbance factors introduced. Three kinds of controllers, Lead-lag, LQG/LTR (Linear Quadratic Gaussian/ Loop Transfer Recovery) and H^∞ were designed to improve the stability and performance of the system. The Kalman filter and H^∞ weighting matrix were investigated in detail. Then, the controllers were emulated in Matlab and verified on a swing bench. The compared experiments for the three kinds of controllers on time domain, frequency response and stability were performed. Obtained results show that both LQG/LTR and H^∞ controllers can satisfy the design specifications, and their decoupling effects are as deep as 50 dB, which can ensure precise tracking and pointing performance of LOSs in O-E landing guidance systems.

Key words: landing guidance; line-of-sight stabilization; Linear Quadratic Gaussian/Loop Transfer Recovery (LQG/LTR) control; H^∞ control

收稿日期: 2013-12-05; 修订日期: 2014-01-20.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2010AA8080202)

1 引言

飞机的起飞和着陆通常是事故的多发期,而舰载机的着舰比陆基飞机着陆更具有危险性和复杂性。目前,舰载机的着舰引导系统主要分为光学助降引导系统、电子着舰引导系统和光电着舰引导系统。

光学助降引导系统典型的应用系统是“菲涅尔”透镜式光学助降系统,属于近程着陆引导系统,最大的缺点是飞行员对进场着舰做出的反应较晚。电子着舰系统主要通过精密雷达和机载设备提供飞机相对大型舰船的位置、速度信息和飞行状态。比较典型的应用是 80 年代末法国“戴高乐”号核动力航空母舰上的“达拉斯”光电着舰引导系统,该系统配备了可见光电视、红外传感器和激光测距仪,能够精确地探测飞机的飞行姿态,可向飞行员和舰上着舰指挥官提供精确的数据和图像信息,以及对飞机进场、着舰的姿态提供系统、实时的评定。因此这种光电着舰引导系统发展迅速,并在航母上得到广泛应用。

目前国内还没有针对舰载机着舰引导研制的光电设备,视轴稳定控制是舰载光电设备的一项关键技术。目前视轴稳定控制的隔离度只能做到 30~40 dB,很难满足光电着舰引导系统对近距离、快速着舰飞机的高精度稳定跟踪的要求,因此必须对视轴稳定控制技术进行研究,提高视轴控制稳定精度和隔离度。

2 视轴稳定方法

目前国内外采用的视轴稳定方法很多。文献

[1]采用了陀螺稳定跟踪平台的方法,陀螺稳定跟踪平台克服载机的姿态变化、振动等因素造成的光测设备视轴晃动。在载机的姿态发生变化或机体振动等情况下,稳定轴上出现干扰力矩,使环架偏离原来的指向。安装在环架上的陀螺感应出该偏差信号,该信号经放大、滤波、解调等,驱动平台轴力矩电机,产生与干扰力矩大小相等、方向相反的控制力矩,从而抵消干扰力矩使平台保持稳定。该方法用于大型光电设备时,平台结构过于复杂。美国空间菲利普实验室的高空气球实验采用了 4 个快速反射镜来完成快速捕获跟踪和瞄准功能,其中 Pseudo IPSRU 反射镜把视轴稳定在惯性空间。该方法反射镜的设计安装很复杂。

本文在不改变陆基光电设备基本结构的情况下,针对方位和俯仰两轴跟踪架结构的光电经纬仪,采用 2 自由度速率陀螺和鲁棒控制的方法进行视轴稳定研究。系统采用稳定回路作为内回路隔离舰体运动,通过控制方位和俯仰力矩电机的运转来实现对空间目标的跟踪测量。建立了舰载光电设备的数学模型,引入了各种扰动力矩。采用超前-滞后、LQG/LTR 和 H_∞ 3 种控制器提高系统的性能和稳定性^[3-4]。在时域、频域响应和稳定性能等方面对三种控制器性能进行对比,并给出了仿真和实验结果。

3 视轴稳定模型^[5-8]

两轴光电跟踪系统如图 1 所示,主要包括跟踪回路、引导回路和稳定回路等,本文主要讨论稳定回路。稳定回路包括控制器、功率放大器、跟踪架、力矩电机和速率陀螺。对控制对象进行建模如图 2 所示。其中 V_1 为电机输入电压, A_0 为功

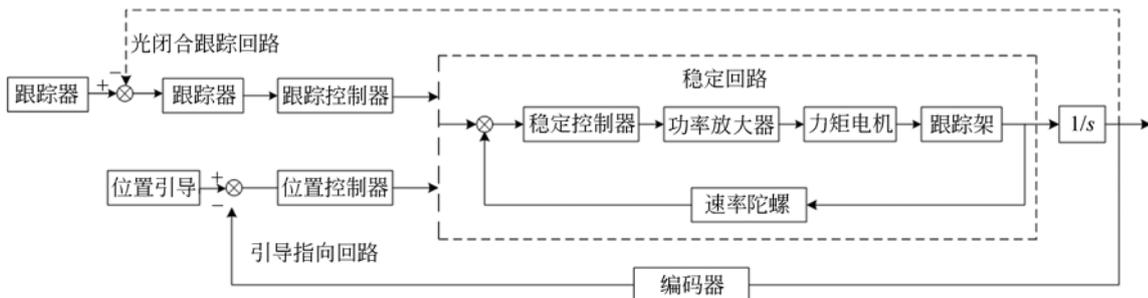


图 1 系统结构图

Fig. 1 Structure of system

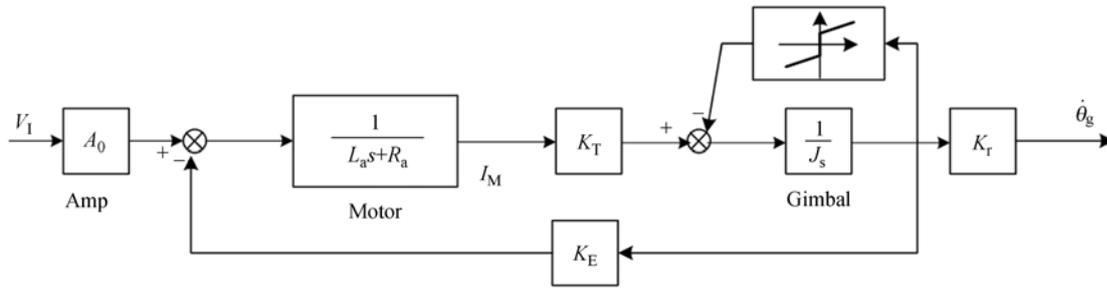


图 2 控制对象模型

Fig. 2 Model of plant

率放大器放大倍数, L_a 为电枢电感; R_a 为电枢电阻; K_E 为电机反电势系数; K_T 为电机力矩系数; J 为负载转动惯量; I_M 为电枢电流; $\dot{\theta}_g$ 为速率陀螺测量的速度输出。为了简化设计,把速率陀螺模型简化为比例环节 K_r 。控制对象模型的仿真幅频特性曲线如图 3 所示,实测的幅频特性曲线

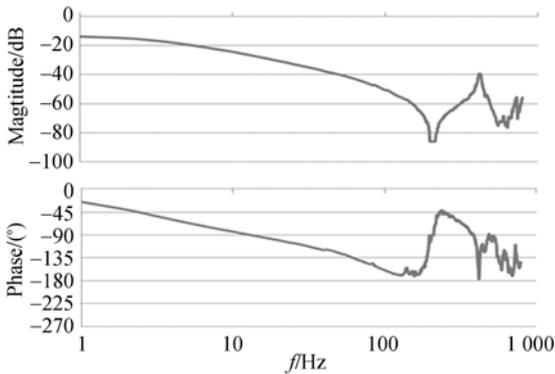


图 3 控制对象频率特性曲线(仿真)

Fig. 3 Frequency characteristics of plant(emulated)

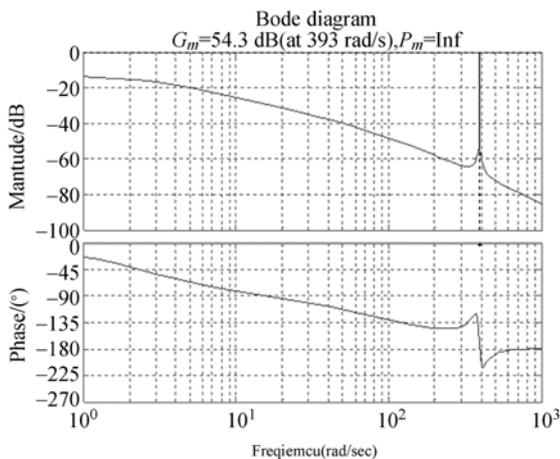


图 4 控制对象频率特性曲线(实测)

Fig. 4 Frequency characteristics of plant(real)

如图 4 所示。系统在 $\omega=400$ rad/s 处有谐振,这是由电机和负载之间连接轴的刚度决定的。在设计控制器时要采用陷波器来消除谐振。从图中可以看出,建立的控制对象模型与实际系统比较存在一定的不确定性,这就要求设计的控制器具有一定的鲁棒性,用来克服对象模型的扰动。

4 控制器设计

4.1 设计指标^[9-11]

伺服稳定系统应隔离舰体的运动和扰动,使光电经纬仪能够稳定跟踪舰载机,并给出惯性空间下舰载机的运动轨迹。考虑到舰体的运动多为低频扰动,所以要求稳定系统在低频有较高的隔离度。综合考虑确定稳定回路的设计指标为:剪切频率 80 rad/s、增益裕度 20 dB,相位裕度 70°。低频稳定隔离度 45 dB 以上。

4.2 超前滞后控制器设计

超前滞后控制器设计是频域设计方法,主要考虑系统的增益和相位裕度指标要求,满足系统剪切频率、增益和稳定隔离度要求。控制器传递函数为:

$$G_c(s) = K_v \frac{(T_3 s + 1)(T_4 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

$$K_v = 6\ 000, T_2 = 0.002, T_4 = 0.006,$$

$$T_3 = \frac{10^{20}}{\omega_c}, T_1 = \frac{K_m \times K_v \times T_3 \times T_3}{T_m \times 10^{20}}, \quad (1)$$

其中: $K_m=0.22$ 是控制对象放大倍数, $T_m=0.4$ 为电机机械时间常数, $C=20$ 。

4.3 LQG/LTR 控制器设计

由于测量系统传感器(编码器、陀螺)和系统

模型存在噪声,所以结合 Kalman 滤波技术,采用线形二次型 Gauss(LQG)方法求解控制器。采用回路传输恢复技术(LTR)弥补 LQG 控制器稳定裕度小的缺点,以使 LQG 结构下的开环传递函数尽可能地接近直接采用状态反馈时的结果。增广控制对象为:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) = \begin{bmatrix} A_p & B_p \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = Cx(t) = [C_p \quad 0]x(t), \quad (2)$$

其中: $A_p \in R^{n \times n}$, $B_p \in R^{n \times m}$, $C_p \in R^{m \times n}$ 是系统模型参数。LQG/LTR 设计先建立 Kalman 滤波矩阵:

$$\dot{\xi}(t) = Ax(t) + \Gamma \xi(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + \theta(t) \quad (3)$$

其中: $\xi(t)$ 、 $\theta(t)$ 是线性无关的白噪声信号,分别表示模型不确定性与输出信号的量测噪声。假设这些信号为零均值的高斯过程,它们的协方差为:

$$E[\xi(t)\xi^T(t)] = I\delta(t-\tau)$$

$$E[\theta(t)\theta^T(t)] = \mu I\delta(t-\tau) \quad (4)$$

Kalman 滤波传递矩阵 G_{kf} 为:

$$G_{kf} = C[sI - A]^{-1}\Gamma K_f \quad (5)$$

其中: K_f 是 Kalman 滤波增益矩阵,由下式得出:

$$K_f = P_f C^T / \mu \quad (6)$$

P_f 满足下面的 Riccati 代数方程:

$$AP_f + P_f A^T + \Gamma \Gamma^T - P_f C^T C P_f / \mu = 0 \quad (7)$$

当 $\alpha_{\min}[G_{kf}(s)] \gg 1$ 时, Kalman 滤波器的频域方程可以表示为:

$$G_{kf}(s) \cong G_{fol}(s) = (1/\sqrt{\mu})C[sI - A]^{-1}\Gamma \quad (8)$$

其中:通过选择参数 Γ 和 μ 设计 Kalman 滤波矩阵 K_f ,公式中参数 Γ 的值影响 $G_{fol}(s)$ 的零点,所以反馈回路的频域特性可以通过 Γ 设计。传统的 LQG/LTR 方法用于设计合适的 Γ 值,使 $C[sI - A]^{-1}\Gamma$ 接近 I/s 。得到的矩阵 Γ 由 2 子矩阵组成:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_L \\ \Gamma_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(C_p A_p^{-1} B_p)^{-1} \\ C_p^T (C_p C_p^T)^{-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

采用以上公式设计参数 Γ ,只能在反馈回路的低频和高频段得到归一化奇异值。经过反复的迭代计算,采用这一方法设计出来的控制器稳定裕度相当小^[3]。由于系统模型不确定性或者施加

一个小小的扰动,都将导致整个系统不稳定。因此采用修正的 LQG/LTR 方法设计参数 Γ :

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_L \\ \Gamma_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(C_p A_p^{-1} B_p)^{-1} \\ A_p^{-1} B_p (C_p A_p^{-1} B_p)^{-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过这一方法可以得到反馈回路在整个频域的归一化奇异值,能够满足系统稳定鲁棒性的要求。合理设计参数 μ 可以增加稳定回路的增益,以提高系统增益,满足系统带宽要求。选择 $\mu = 10^{-7}$,满足带宽和回路传输恢复要求。下一步要调整 LQ 控制器对回路传输矩阵 $G(s)K(s)$ 进行恢复。为了得到 LQ 调节器增益,即 LQG/LTR 补偿器参数,需要解下面的 Riccati 方程:

$$A^T P_c P_c A + C^T C - P_c B B^T P_c = 0 \quad (11)$$

LQ 控制器增益由下式得出:

$$K_c = B^T P_c / \rho \quad (12)$$

矩阵 $K_c, K_f, [A, B, C]$ 构成了 LQG/LTR 控制器。LQG/LTR 控制器由下式给出:

$$K(s) = K_c [sI - A + BK_c + K_f C]^{-1} K_f \quad (13)$$

若用 LQ 调节器设计 LTR 补偿器,并且 $\rho \rightarrow 0$,控制器的极点接近于控制对象的零点。经过反复迭代,选择 $\rho = 10^{-12}$ 。

4.4 H_∞ 控制器设计

图 5 所示为两轴稳定跟踪系统 H_∞ 控制结构图。图中 G 为系统开环传递函数, K 为要设计的 H_∞ 控制器。T_m 是根据超调、调节时间等时域特性要求设计的期望闭环模型,阶次要尽量小。加权函数 W₁、W₂、W₃、W₄ 尽量选择一阶的函数。为了提高系统跟踪精度和抗干扰能力, W₁ 选择高增益低通滤波器。权函数 W₂ 采用高通滤波器可以限制系统带宽; W₃ 采用高通滤波器克服系统控制对象不确定性(输出乘性不确定性); W₄

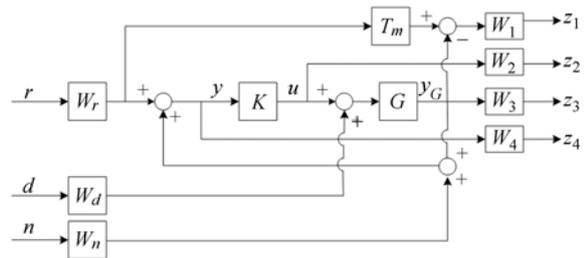


图 5 H_∞ 控制结构图
Fig. 5 Structure of H_∞ control

采用低通滤波器。 W_r 为输入权矩阵, W_d 为干扰输入权矩阵, W_n 为测量噪声权矩阵。从图 5 可以

得到由 $w=[r^T d^T n^T]$ 到 $w=[z_1^T z_2^T z_3^T z_4^T]$ 传递函数矩阵为:

$$T_{zw} = \begin{bmatrix} W_1(T_m - GS_iK)W_r & -W_1GS_iW_d & W_1GS_iKW_n \\ W_1S_iKW_r & -W_2KGS_iW_d & -W_2S_iKW_n \\ W_3GS_iKW_r & W_3GS_iW_d & -W_3GS_iKW_n \\ W_4(I - GS_iK)W_r & -W_4GS_iW_d & -W_4(I - GS_iK)W_n \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中: $S_i=(I+KG)^{-1}$,反映了参考输入对跟踪误差的影响,也是干扰输入对系统输出的传递函数,因此,减小或增大 S_i 的增益等价于减小或增大系统干扰对跟踪误差的影响。将以上提出的 H_∞ 控制问题转换为标准 H_∞ 最优控制结构。系统输入信号向量 w 包括参考输入、干扰和测量噪声;闭环系统的状态变量 z ;控制信号向量 u ;输出信号向量 y 。标准的最优控制问题是设计稳定的控制器 K 满足:

$$\min \| T_{zw} \|_\infty = \min \| F_1(P, K) \|_\infty, \quad (15)$$

其中:

$$F_1(P, K) = P_{11} + P_{12}(I - KP_{22})^{-1}KP_{21},$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix},$$

$$P_{11} = \begin{bmatrix} W_1T_mW & W_1GW_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_3GW_d & 0 \\ W_4W_r & -W_4GW_d & -W_4W_n \end{bmatrix},$$

$$P_{12} = \begin{bmatrix} -W_1G \\ W_2 \\ W_3G \\ -W_4G \end{bmatrix} \quad P_{21} = [W_r \quad GW_d \quad -W_n],$$

$$P_{22} = [-G]. \quad (16)$$

设计的容许控制器 K 应满足:

$$\min \| F_1(P, K) \|_\infty < \gamma, \quad (17)$$

其中:

$$\gamma > \gamma_{\min} = \inf_{\text{stabilizing } K} \| F_1(P, K) \|_\infty. \quad (18)$$

γ_{\min} 未知,所以 γ 是经过反复迭代计算得到的。选择二阶系统作为期望的闭环模型 $T_m, \omega=300 \text{ r/s}, \zeta=0.8$ 。根据设计指标要求,经过反复迭代计算,最后设计权函数:

$$W_1 = 1.5 \frac{12s+180}{10s+0.012}, W_2 = 0.05, W_3 = 0.5 \frac{s+1}{s+1000}, \quad (19)$$

$$W_4 = 2.5 \frac{s+1000}{10s+1}, W_r = 2, W_d = 0.002, W_n = 0.001, \quad (20)$$

得到最优值 $\gamma=7.5$ 。上面的权函数满足两轴稳定系统的性能要求。因为次优控制器比最优控制器更易于描述,所以选择次最优控制器使 $\gamma_{\min}=7.6$ 。

5 仿真结果分析

采用 MATLAB 对以上的设计结果进行频域特性和阶跃响应的仿真,对超前滞后控制器、LQG/LTR 控制器和 H_∞ 控制器的模拟结果进行对比。针对系统中在 $\omega=400 \text{ rad/s}$ 处的谐振,采用陷波器进行处理:

$$X(s) = \frac{1+bs+\omega^2s}{1+cs+\omega^2s} \quad b=0.00005 \times 0.5\omega^2+12, \quad c=0.00105 \times 0.5\omega^2+12. \quad (21)$$

3 种控制器的开环幅频特性如图 6 所示,超前滞后控制器、LQG/LTR 控制器和 H_∞ 控制器的相位裕度分别为 $87.3^\circ, 72.9^\circ$ 和 70.3° ;剪切频率分别为 $81.9, 87.5$ 和 80.2 rad/s 。阶跃响应曲线如图 7 所示。

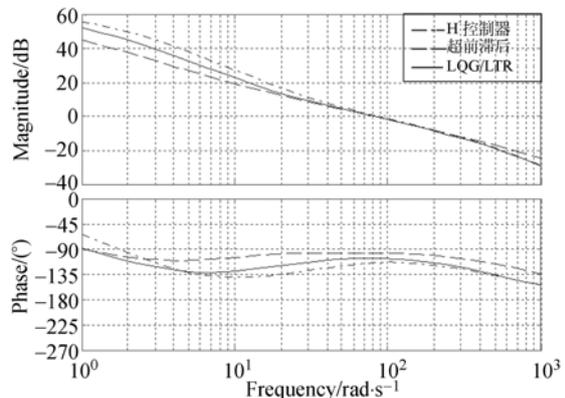


图 6 开环频率特性

Fig. 6 Frequency responses of open-loop system

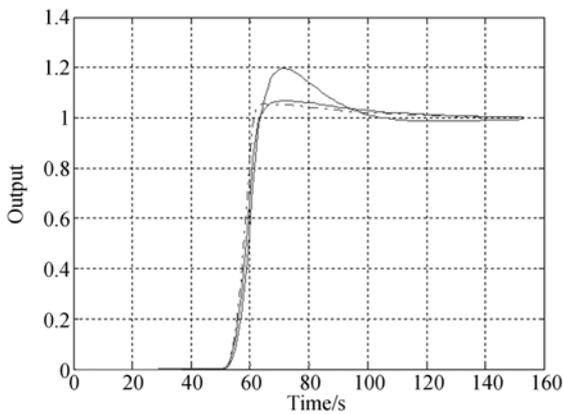


图 7 阶跃响应曲线

Fig. 7 Step responses of open loop system

6 实验结果分析

将某型号光电经纬仪置于图 8 所示的 H/YBT-1A 型试验台上,试验台可以进行横摇和纵摇 2 个自由度的摇摆,用来模拟舰船平台的干扰,对以上提出的视轴稳定方法进行试验验证。摇摆台进行横轴和纵轴 2 个自由度的摇摆,用来模拟舰船行进中的摇摆,用陀螺记录摇摆数据,如图 9 所示,摇摆最大速度为 $5(^{\circ})/s$,周期为 10 s。采用以上的 3 种稳定控制器和相同的位置控制器,对



图 8 H/YBT-1A 型试验台

Fig. 8 H/YBT-1A swing bench

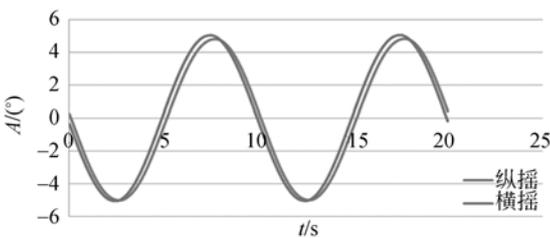


图 9 试验台摇摆曲线

Fig. 9 Curves of setup swaying

同一个目标进行跟踪测量,得到跟踪误差如图 10 所示。计算稳定隔离度分别为 40、51 和 53 dB。

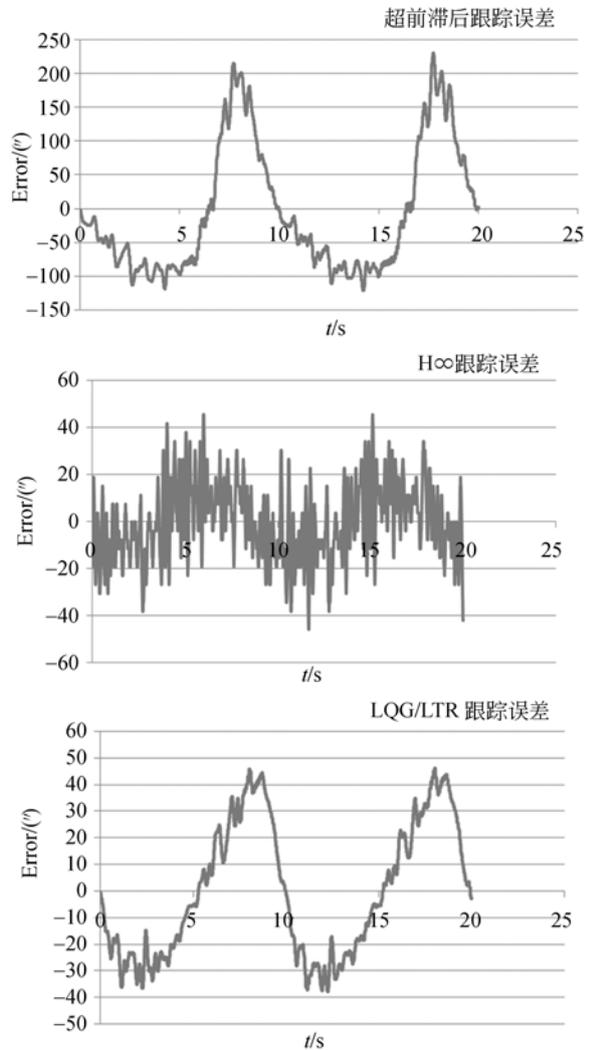


图 10 跟踪误差曲线

Fig. 10 Curves of tracking error

7 结 论

本文建立了两轴光电跟踪伺服系统的模型,提出了舰载经纬仪系统 3 种视轴稳定控制器设计方法。仿真表明 3 种控制器满足剪切频率、相角裕度要求。跟踪结果表明,LQG/LTR 控制器和 H_{∞} 控制器在跟踪性能上要优于超前滞后控制器,稳定隔离度达到 50 dB 以上,在此基础上,经纬仪可以对着舰飞机进行稳定跟踪和精确轨迹测量,实现着舰引导。

参考文献:

- [1] 罗俊萍. 机载光测设备视轴稳定精度分析[J]. 飞行器测控学报, 2001, 20(1): 32-37.
LUO J P. Analyse of LOS stabilization precision of Carrier-based Electro-Optical Equipment[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2001, 20(1): 32-37.
- [2] SHEN G Y, GAYHART A R, KAELBER E E. HABE fast steering mirrors[J]. *SPIE*, 2221: 626-637.
- [3] STEIN G, ATHENS M. The LQG/LTR procedure for multivariable feedback control design [J]. *IEEE Transation on Automatic Control*, 1987, 32(2): 105-144.
- [4] KARISHNA M J A R. H_{∞} control law for line-of-sight stablizing for mobile land vehicles [J]. *Society of Photo-optical Instrumentation Engineers*. 2002, 41(11): 2935-2944.
- [5] 孙辉, 张淑梅. 机载成像系统像移计算模型与误差分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2492-2499.
SUN H, ZHANG SH M. Computation model and error budget for image motion of aerial imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2492-2499. (in Chinese)
- [6] 扈宏杰, 王元哲. 机载光电平台的复合补偿控制方法[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1272-1281.
HU H J, WANG Y ZH. Composite compensation control scheme for airborne opto-electronic platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1272-1281. (in Chinese)
- [7] 王恒坤, 张国玉, 郭立红, 等. 高精度动载体激光发射系统光束控制反射镜[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 336-340.
WANG H K, ZHANG G Y, GUO L H, *et al.*. High performance fast-steering mirror for beam control of vehicular high energy laser system [J]. *Optics and Precision Engineering*. 2012, 20(10): 336-340. (in Chinese)
- [8] 王帅, 李洪文, 孟浩然, 等. 光电望远镜伺服系统速度环的自抗扰控制[J]. 光学精密工程, 2012, 12(11): 2442-2448.
WANG SH, LI H W, MENG H R, *et al.*. Active disturbance rejection controller for speed-loop in telescope servo system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 12(11): 2442-2448. (in Chinese)
- [9] 魏彤, 郭蕊. 自适应卡尔曼滤波在无刷直流电机系统辨识中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2308-2314.
WEI T, GUO R. Application of adaptive Kalman filtering to system identification of brushless DC motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2308-2314.
- [10] 王建立. 光电经纬仪电视跟踪伺服系统捕获、跟踪快速运动目标技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光机所, 2002.
WANG J L. *Study on TV tracking system of O-E theodolite to track and acquire fast moving targets* [D]. Changchun: Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
- [11] 胡浩军. 运动平台捕获、跟踪与瞄准系统视轴稳定技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学.
HU H J. *Line-of-sight stabilization of acquisition, tracking and pointing system on moving bed* [D]. Changsha Naitonal University of Defense Technology, 2002. (in Chinese)

作者简介:



葛兵(1982—),女,吉林桦甸人,博士研究生,助理研究员,2007年于中科院长春光机所获得硕士学位,主要从事光电跟踪和精密控制方面的研究。
Email: gebing1982@163.com

导师简介:



高慧斌(1963—):男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1985年,1990年于吉林工业大学分别获得学士,硕士学位,主要研究方向光电测量和精密跟踪控制技术。Email: gaohuibin1@163.com