

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

光电稳定跟踪装置的控制系统设计

张智永, 范大鹏, 范世珣

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:给出了一类光电稳定跟踪装置的框架伺服控制方案,重点研究了速率稳定环的设计过程,使用 dSPACE 半实物仿真系统进行了速率回路开环特性的模型辨识和高阶滞后超前控制器设计,对于数字化频率特性测试时产生的相位滞后现象进行了理论上的推导,并提出了相位补偿公式。对于经典控制器所可能遇到的精度不足的问题,介绍了相应的非线性补偿方法。针对伺服系统的位置跟踪环和速度稳定环在频域存在的耦合现象,深入分析了产生频域耦合的原因和相应的解耦设计方法,提出了此类系统位置跟踪环和速度稳定环的理想设计模型。在此基础上讨论了姿态干扰隔离度的概念,推导了隔离度的计算公式。对系统工作过程中可能遇到的 5 种典型情况进行了仿真试验,仿真结果验证了有关概念的正确性。

关键词:光电稳定跟踪装置;伺服系统;位置跟踪;陀螺稳定;隔离度

中图分类号:V241.5 文献标识码:A

Servo system design for E-O stabilization and tracking devices

ZHANG Zhi-yong, FAN Da-peng, FAN Shi-xun

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of
Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The typical structure of the servo system of a E-O Stabilization and Tracking (EOSTD) was introduced. Based on dSPACE hardware-in-the-loop simulation system, the common design process of velocity stabilization was researched. Aiming at the phase lag phenomena caused by digital frequency characteristic test, the phase compensation formula was proposed and some non-linear compensation methods were discussed to achieve high stabilization precision. Analyzing deeply on the frequency coupling of the position tracking loop and the velocity stabilization loop, the corresponding de-coupling method and the ideal model of the position loop and the velocity loop above were presented. Based on that model, the conception of the isolation degree was discussed. Five typical instances were simulated, the position tracking and line of sight stabilization results were provided in the end. The results show the validity of the concerned conception.

Key words: E-O Stabilization and Tracking Devices (EOSTD); servo system; position tracking; gyro stabilization; isolation degree

收稿日期:2003-04-22;修订日期:2003-11-18.

基金项目:

1 引言

用于光电吊舱或各种导引头的光电稳定跟踪装置(EOSTD)既要能跟踪瞄准线位置指令,又要能隔离载体姿态运动和其他干扰力矩所造成的光电传感器的瞄准线在惯性空间内的抖动。但是实现光电传感器的瞄准线高精度跟踪位置指令,控制瞄准线角度的系统位置跟踪环便不能响应载体的姿态扰动,系统也无法获得稳定的图像;另一方面,如果要完全隔离载体的姿态变化对传感器瞄准线指向的影响,则不能使框架随动瞄准线指令,显然这两项要求存在某种程度的耦合,必须进行解耦分析和设计^[1-2]。

本文介绍了 EOSTD 中速率稳定环的设计过程,讨论了系统中位置跟踪环和速度稳定环在频域的耦合关系、产生原因及解耦方法,并提出这种情况下扰动隔离度的概念。仔细分析了系统工作过程中指令信号输入和姿态干扰的实际情况,运用 MATLAB / SIMULINK 作为工具,对伺服单轴设计的结果进行了仿真;在考虑轴间耦合的情况下,建立了整个系统的模型,并进行了仿真验证。

2 EOSTD 单回路伺服系统设计

2.1 EOSTD 伺服系统的设计过程

速率稳定回路的设计是光电稳定跟踪伺服装置设计的重点^[3-9],由于在速率稳定回路中,陀螺既作为普通的测速元件,又作为载体耦合到平台的惯性空间角速率敏感元件,因而回路的设计必须从跟随指令输入,克服摩擦等干扰力矩和隔离载体耦合扰动三个方面考虑。

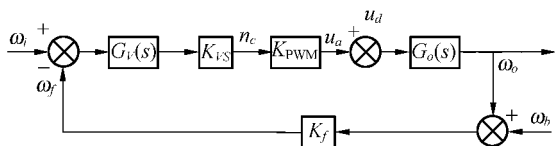


图 1 光电稳定装置速率稳定回路典型控制框图

Fig.1 Typical block diagram of control scheme of velocity-stabilized loop

通常,速率稳定回路可以简化到图 1 所示的形式。图中,ω_i和ω_o分别表示速率回路的指令输

入和速度输出,ω_f表示由陀螺测量得到的惯性角速率,ω_b表示姿态干扰耦合到平台输出轴的角速率,K_f表示陀螺增益(因为陀螺带宽比回路带宽宽,等效为比例环节,考虑ω_f和ω_o单位统计的关系,一般将K_f化为1),G_V(s)和G_O(s)分别表示速率校正器和电机传函,K_{VS}表示指令放大系数,K_{PWM}表示PWM放大系数,u_d表示干扰力矩。摩擦力矩对输出转速的影响由于反电势的存在可以等效为对电枢电压的扰动u_d。

由图 1 可以得出输出角速度相对于 ω_i、载体耦合运动角速度 ω_b 和扰动 u_d 的传递函数为:

$$\omega_o = \frac{K_{vs}K_{PWM}G_V(s)G_O(s)}{1+K_{vs}K_{PWM}K_fG_V(s)G_O(s)}\omega_i + \frac{G_O(s)}{1+K_{vs}K_{PWM}K_fG_V(s)G_O(s)}u_d + \frac{K_{vs}K_{PWM}K_fG_V(s)G_O(s)}{1+K_{vs}K_{PWM}K_fG_V(s)G_O(s)}\omega_b, \quad (1)$$

式中,G_O(s) = 1/K_e / (T_ms + 1)(T_es + 1)。校正环节设计时,在所需频带内可以保证 |K_{vs}K_{PWM}G_V(s)G_O(s)| = 1,则式(1)可以近似为

$$\omega_o = \frac{1}{K_f}\omega_i + \frac{1}{K_{vs}K_{PWM}K_fG_V(s)}u_d + \omega_b, \quad (2)$$

可见,无论从隔离载体姿态耦合运动,抵抗摩擦力矩扰动,还是提高跟随能力均需要提高系统的开环增益或无差度。权衡考虑系统的稳定性、稳态误差与动态性能之间的关系,是进行校正环节设计的主要内容。在速率稳定回路校正环节设计时,常常采用的设计方法是基于频域的设计,即根据测量得到的被控对象开环频率特性(Bode图),根据期望的系统动态和稳态性能指标,设计环节的结构和参数。

Step1: 基于 dSPACE 的开环频率特性测量

假设噪声为零,离散系统激励 u(k) 为一个幅值为 A, 频率为 ω₀ 的离散正弦信号,则 u(k) 为:

$$u(kT) = A\sin(\omega_0 kT), \quad (3)$$

此时输出的一个抽样能够描述如下

$$y(kT) = B\sin(\omega_0 kT + \phi_0), \quad (4)$$

其中

$$B/A = |G(e^{j\omega_0 T})|, \phi_0 = \angle G(e^{j\omega_0 T}), \quad (5)$$

由此可知,只要在适当的频带内,取足够多的频率点,使用正弦信号激励系统,并计算输入信号与输出信号的幅度比和相位差,依据式(5)便可得到系统的频率响应特性,这就是工程中普遍使用

的“扫频法”。如果系统输出的测量不包含测量噪声和系统非线性的影响,直接使用双踪示波器观察系统的输入输出信号便可得到该幅度比和相位差。但是,在实际测量中,实验得到的数据往往反映了一些系统非线性因素的影响,包含了一些噪声,同时由于机电系统存在瞬态过程,必须对测得的响应数据进行适当的信号处理。同时,目前广泛使用的数字化频率测试仪输出的离散正弦信号实际上是标准正弦信号的一组抽样值 $u(kT)$,如图 2 所示。该信号实际上可以看作是由一系列阶跃信号组成的,如果考虑以该信号的平均值作为系统的输入(如图 2 中虚线所示),可以看出被测系统的实际驱动信号比期望值滞后了半个采样周期($T/2$)。运用频率响应分析的方法可知:

$$F[u(kT - T/2)] = e^{-j\omega T/2} F[u(kT)], \quad (6)$$

即该延迟导致驱动信号频域中的一个相移,在频响函数的计算过程中,需要对相位计算值进行补偿,以减小在高频段的测试误差。

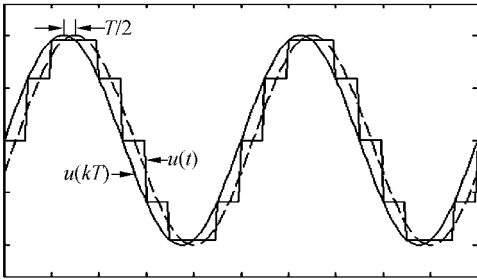


图 2 零阶保持作用下的正弦激励信号

Fig. 2 Zero-hold based sine wave signal

Step2: 滞后超前校正设计

为使校正后的系统有较好的动态和稳态性能,速率稳定回路常采用的校正结构形式为滞后超前校正。滞后校正的作用是加大低频段的增益,保证稳态精度要求,超前校正的作用是增大系统的相位裕度,使中频段占据足够宽的频带,以保证动态精度要求和系统的稳定性。高频段的特性决定系统过渡过程的启示形状。实际系统的高频段,由于附加小时间常数的存在,其形状往往比较复杂。同时,在工程上,希望对数幅频特性尽可能快的下降,以便降低噪声对系统的干扰。一般来说,控制系统的噪声频带在高频段比较集中,系统对高频信号的增益越小,噪声对系统的影响也越小。但是,高频段特性下降过快,又将减小中频段

相角裕量,从而影响系统的稳定性。

对于 EOSTD,这里给出其典型的速率稳定回路的校正后的开环频率特性,如图 3 所示。

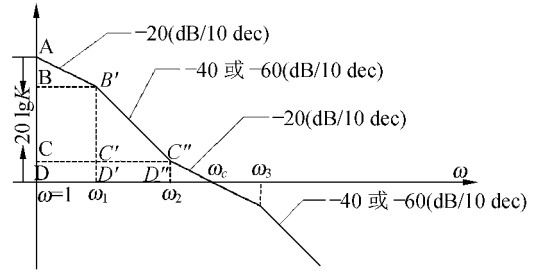


图 3 速率稳定回路校正后的理想开环频率特性

Fig. 3 Ideal frequency characteristic of velocity stabilized loop after compensation

对于 EOSTD 来说,速率稳定回路的开环剪切频率(图 3 中 ω_c)一般要求大于 90 rad/s,这样能使闭环后的带宽大于 20 Hz,使系统具有良好的快速性能。进行速率稳定回路设计时,绘制系统预期开环频率特性的步骤如下:

- ① 根据系统对稳态性能的要求,确定低频段的形状(或开环增益);
- ② 根据系统的动态指标要求,画出简化模型,决定预期中频段的形状;
- ③ 考虑附加参数的影响,将其累加到对系统相角裕量的改变上,据此修正简化模型,使系统的相角裕量基本保持不变。

从稳定回路的预期开环频率特性可以看出,在低频段,为了提高精度需要设计很高的开环增益,在高频段为了抑制高频干扰,系统的带宽不能设计得过高。为了达到此目标,需要在低频段引入一个或两个滞后校正环节,但滞后校正会在低频部分的相位滞后可能会使系统的开环相角特性超过 -180° 线。这里潜在的问题是当偏差信号比较大时(比如通过系统位置环产生比较大的方位调转指令),由于控制器的实际限制会使校正环节进入饱和工作区,此时会引起系统的开环增益骤然下降并在低频段穿过 0 dB 线,导致系统进入不稳定状态。即在大偏差的情况下系统会成为一个条件稳定系统,此时,系统的特性会明显变差,超调增大,过渡过程时间变长。解决此问题的一般措施是系统在大偏差和小偏差两种状态下采用不同的控制器以克服控制器饱和时对系统性能的影响。

响^[8-10]。这是一个比较复杂的设计问题,限于篇幅,此处不再展开讨论。

Step3: 非线性补偿

前面两个步骤介绍了经典的频域设计在 EOSTD 速率稳定回路设计时的应用。虽然在设计过程中考虑了系统对幅值裕量和相位裕量的要求,可以保证系统在一定范围内具有相对的稳定性,但由于被控对象的模型不可能精确测量,且系统本身的特性由于受外界环境、条件的变化也将发生变化,因此,传统的基于固定校正环节的控制算法不能保证系统始终具有最优的性能。特别是在机载设备中,当载体处于不同的姿态时,会导致平台的重心发生变化,轴系之间的摩擦力矩也要发生变化,另外,系统的动密封的存在会大大增加系统的摩擦力矩,载体机动时产生的过载和风阻力矩也会产生相当大的干扰力矩,上述因素均会导致对象的特性与校正环节设计时所依赖的特性有所不同。设计非线性加速度补偿环节可以有效减少由于摩擦等干扰力矩导致的系统换向时的尖峰误差,基于各种摩擦模型的模型参考自适应控制可以有效增加系统低速和换向时的速度平稳性,其他各种先进的控制算法也在 EOSTD 中得到了研究和应用^[4-7]。

3 EOSTD 位置跟踪和速率稳定双回路解耦设计

3.1 跟踪 LOS 位置指令的 EOSTD 控制结构

某 EOSTD 系统的框架伺服系统由两轴转动机构、惯性敏感单元、驱动单元、通信和故障处理单元构成,整个系统采用动密封的球形结构,可以有效减轻风载荷的影响。方位和高低轴均由直流力矩电机直接驱动,使用高精度旋转变压器作为角度反馈。惯性敏感单元由两个单轴光纤陀螺及其信号处理单元构成,安装在高低内环上。以框架的俯仰环为例,其控制方块图如图 4 所示。

其中 $U(s)$ 是瞄准线(Line of Sight, LOS)指令俯仰角信号输入, $\omega(s)$ 和 $\theta(s)$ 分别是框架俯仰轴的输出角速度, $\omega_b(s)$ 是载体姿态变化耦合在框架俯仰轴上形成的姿态干扰; $F_p(s)$ 是位置环前馈补偿器, $G_p(s)$ 是位置环补偿器, $H_p(s)$ 表示位置环反馈; $G_v(s)$ 表示速度环补偿器, $H_v(s)$ 表示速

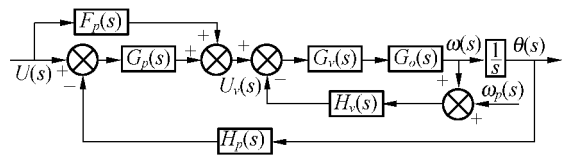


图 4 框架位置伺服系统方块图

Fig. 4 Diamonds chart of the gimbal position servo system

度环反馈, $G_o(s)$ 表示电机速度开环的传函。

运用梅逊增益公式,可以得到输出 $\theta(s)$ 对瞄准线指令输入 $U(s)$ 和姿态干扰 $\omega_b(s)$ 的响应分别为:

$$\theta(s) = \theta_1(s) + \theta_2(s) = G_1(s)U(s) + G_2(s)\omega_b(s), \quad (7)$$

其中,

$$G_1(s) = \frac{C_p(s)C_v(s)G_v(s) + F_p(s)C_v(s)G_v(s)}{s + sH_v(s)C_v(s)G_v(s) + H_p(s)C_p(s)C_v(s)G_v(s)}, \quad (8)$$

$$G_2(s) = -\frac{H_v(s)G_v(s)G_o(s)}{s + sH_v(s)G_v(s)G_o(s) + H_p(s)C_p(s)G_v(s)G_o(s)}, \quad (9)$$

设 $D(s)$ 是姿态变化角度, $R(s)$ 是姿态变化角速率, $D(s) = R(s)/s$, 则 $\omega_b(s)R(s)$ 到的传递函数:

$$G_3(s) = -\frac{H_v(s)G_v(s)G_o(s)}{s + sH_v(s)G_v(s)G_o(s) + H_p(s)C_p(s)G_v(s)G_o(s)}, \quad (10)$$

瞄准线指令坐标系相对于机体坐标系的方位关系用三个欧拉角 (Ψ, θ, Φ) 表示, 框架坐标系相对于机体坐标系的方位关系用三个欧拉角 $(\theta_a, \theta_f, \theta_r)$ 表示, 根据 EOSTD 系统应用的实际情况, 假设瞄准线指令坐标系的横滚角 $\Phi, \dot{\Phi}$ 均为零。在 EOSTD 的瞄准线指令随动模式下, 框架要跟踪瞄准线指令方位角 θ_a 和高低角 θ_f , 即要求: $\theta_a = \Psi, \theta_f = \theta$; 所以 $G_1(s)$ 的带宽应设计在能有效跟踪瞄准线运动的范围内, 经过查阅有关文献^[4], 可以确定, 比较合适的频率是 1.0~2.0 Hz 之间的一个值^[12]。同时系统要隔离飞机机体的高频振动所耦合过来的吊舱瞄准线在惯性空间内的扰动, 所以, $G_3(s)$ 的带宽应设计在能有效隔离直升机机身高频振动的范围内, 同时, 系统在低频段必须保证对瞄准线指令信号的响应, 考虑到机械系统和陀螺的实际情况, $G_3(s)$ 的频响应设为带通模式, 下限截止频率取 $G_1(s)$ 的上限截止频率, 通频

带设计为 2.0~20.0 Hz。

EOSTD 的速度环有两个作用。首先,它是框架位置环的内环,起到增加位置环的阻尼,从而改善其特性的作用;同时,要响应陀螺敏感到的载体角速度信号,起到抑制姿态扰动的作用。考虑这两个闭环传递函数,即 $G_{\omega U_V}(s) = \omega(s)/U_V(s)$ 和 $G_{\omega \omega_b}(s) = \omega(s)/\omega_b(s)$,

$$G_{\omega U_V}(s) = \frac{G_V(s)G_O(s)}{1+H_V(s)G_V(s)G_O(s)}$$

$$G_{\omega \omega_b}(s) = -\frac{H_V(s)G_V(s)}{1+H_V(s)G_V(s)G_O(s)}, \quad (11)$$

陀螺的带宽一般较宽,故可将 $H_V(s)$ 近似为 1,上式变为

$$G_{\omega U_V}(s) = \frac{G_V(s)G_O(s)}{1+G_V(s)G_O(s)},$$

$$G_{\omega \omega_b}(s) = -\frac{G_V(s)G_O(s)}{1+G_V(s)G_O(s)}, \quad (12)$$

如果只考虑作为位置内环进行设计, $G_{\omega \omega_b}(s)$ 应具有低通特性。但是前面已经指出 $G_3(s)$ 即 ω_b 到 ω 的传递函数应具有带通特性,这时两个控制目标对 $G_{\omega \omega_b}(s)$ 的要求是否一致成为了这种控制结构能否达到控制目的关键。

继续将 $G_3(s)$ 的表达式进行变形处理(在不引起混淆的情况下省略‘(s)’):

$$G_3(s) = -\frac{H_V G_V G_O s}{s + H_V G_V G_O s + H_p G_p G_V G_O} =$$

$$-\frac{G_V G_O}{1 + G_V G_O} \frac{1}{1 + \frac{H_p G_p G_V G_O}{(1 + G_V G_O) s}}$$

$$G_{\omega \omega_b}(s) \cdot G_3'(s), \quad (13)$$

$$\text{其中 } G_3'(s) = 1 / \left[1 + \frac{H_p G_p G_V G_O}{(1 + G_V G_O) s} \right].$$

式(13)中 H_p 为位置传感器的传递函数,可简化为一个比例环节 K_p 。 C_p 为位置环控制器,一般可设计为二阶滞后超前校正器的形式,故可

设为 $C_p(s) = \frac{K_c (s+z_1)(s+z_2)}{s}$, 其中 $z_1 < \omega_{c1} <$

z_2, ω_{c1} 为位置环开环过零频率。而 $G_{\omega U_V}(s)$ 按照位置环内环的设计要求,一般应该具有二阶低通

特性,可设为 $\frac{K_v}{(s+p_1)(s+p_2)}$, 若其截止频率为

ω_2 , 则一般有 $p_1 < \omega_2 < p_2$ 。从而:

$$G_3'(s) = \frac{s^2(s+p_1)(s+p_2)}{s^2(s+p_1)(s+p_2) + K_p K_c K_v (s+z_1)(s+z_2)}, \quad (14)$$

根据前面的条件, $z_1 < \omega_{c1} < z_2 < p_1 < \omega_2 < p_2$ 时,当输入信号频率 $\omega_0 \rightarrow \infty$ 时,该传递函数的放大倍数趋近于 1,而且其截止频率在 ω_{c1} 附近,说明 $G_3'(s)$ 具有高通特性。

因为 $G_3(s)$ 的幅频特性为 $G_{\omega \omega_b}(s)$ 与 $G_3'(s)$ 的幅频特性之积,所以其具有带通特性,且其通频带在 ω_{c1} 到 ω_2 之间,与设计目标一致。

3.2 有关隔离度的探讨

EOSTD 对载体干扰的隔离度是指稳像装置伺服系统抵消载体姿态扰动、稳定光电传感器瞄准线指向的能力,用一定载体姿态变化角和框架指向剩余(误差)角之比的分贝数表征^[13]。一般来说惯性平台隔离度的概念是指对某个频率以下的姿态扰动全部隔离,而且特别强调对低频信号的隔离度^[4]。通过上文对 $G_3(s)$ 的频率特性的讨论可知,EOSTD 的框架伺服系统对于小于 ω_{c1} 的姿态干扰信号不具有隔离的效果,所以 EOSTD 的框架伺服系统对姿态干扰信号其实是带通隔离的,隔离度的大小取决于 $G_3(s)$ 通带的幅频特性。

在跟踪方式下,速率稳定环作内环,外环是以可见、红外跟踪传感器作为跟踪误差检测元件,并通过光闭合构成的位置环。而在系统实际应用和稳定精度检测时均是在跟踪状态下,因此研究在跟踪状态下,伺服系统对载体角运动的隔离问题具有实际意义。

在跟踪状态下,具有稳定回路的伺服系统可以简化成如图 5 所示的结构:

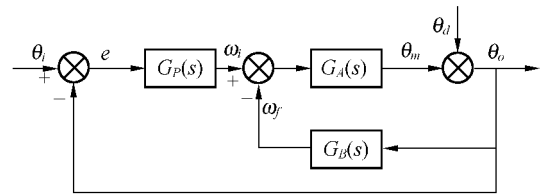


图 5 具有稳定回路的指令视线跟踪系统简图

Fig5 Block diagram of command LOS tracking system

图中, $G_A(s)$ 为速率稳定回路前向通道传递函数,满足:

$$G_A(s) = \frac{K_1 K_{PWM} C_m F_1(s)}{J_{zR} s}, \quad (15)$$

$G_B(s)$ 为速率稳定回路反向通道传递函数,满足:

$$G_B(s) = K_f K_{eS}, \quad (16)$$

$G_p(s)$ 为位置补偿器; θ_d 表示因载体角运动

和其他干扰力矩引起的视轴空间角位置的变化; θ_o 表示扰动后视轴相对惯性空间的角位置; θ_c 为给定角位置。

$e(s)$ 为位置跟踪误差。根据图 5 可以推出 $e(s)$ 相对 θ_i 和 θ_d 的传递函数为:

$$e(s) = \frac{1 + G_A(s)G_B(s)}{1 + G_A(s)G_B(s) + G_A(s)G_P(s)}\theta_i + \frac{1}{1 + G_A(s)G_B(s) + G_A(s)G_P(s)}\theta_d = e_i(s) + e_d(s) \quad (17)$$

其中, $e_i(s)$ 为系统对动目标跟踪产生的滞后误差, $e_d(s)$ 为由于载体运动产生的误差。视轴指向误差相对载体运动的误差传递函数为:

$$\frac{e_d(s)}{\theta_d(s)} = \frac{1}{1 + G_A(s)G_B(s) + G_A(s)G_P(s)} = \frac{1}{(1 + G_{go}(s))(1 + G_{po}(s))} \quad (18)$$

式中, $G_{go}(s)$ 为速率稳定回路的开环传递函数, $G_{po}(s)$ 为位置跟踪回路的开环传递函数。

$$G_{go}(s) = G_A(s)G_B(s) \quad (19)$$

$$G_{po}(s) = \frac{G_A(s)G_B(s)}{1 + G_A(s)G_B(s)} \quad (20)$$

一般定义载体运动的角度与由于载体运动而引起的视轴晃动角度之比为隔离度,它表示平台系统对载体角运动的衰减程度,在数值上,隔离度通常用分贝值表示。

$$D_{isolate}(s) = \frac{\theta_d(s)}{e_d(s)} = 20 \lg(1 + G_{go}(s))(1 + G_{po}(s)) = 20 \lg(1 + G_{go}(s)) + 20 \lg(1 + G_{po}(s)) \quad (21)$$

令

$$D_{isolate1}(s) = 20 \lg(1 + G_{go}(s))$$

$$D_{isolate2}(s) = 20 \lg(1 + G_{po}(s))$$

称 $D_{isolate1}(s)$ 为系统对载体运动的隔离度,该参数体现了速率稳定环的隔离效果, $D_{isolate2}(s)$ 则体现了位置回路本身所起的隔离作用。

4 伺服系统设计结果及仿真

为了进行速率伺服系统的设计,首先在 dSPACE 半实物仿真系统进行系统频率特性测试,该半实物仿真系统由 DS1103 硬件和与 MATLAB/SIMULINK 有机集成的 RTI 软件和虚拟仪器界面设计软件 CONTROLDESK 构成。

根据扫频测试辨识的速度环开环频率特性和系统隔离度要求,选取开环剪切频率在 20 Hz 附近,采用滞后超前校正器,考虑低频段提供足够的增益,控制器可设计为 $C_V(s) = 0.0123(s + 31.2)(s + 73.3)/s$,此时闭环截止频率为 30.0 Hz。位置跟踪环的应设计为截止频率为 2 Hz 的低通环节。根据扫频测试结果进行设计,控制器的形式为 $C_p(s) = 28.6(s + 2.23)/s$ 。

分析 EOSTD 的工作原理,可以确定其正常的信号输入条件可以分为以下 5 种:

- (1) $F_{Umax} \leq \omega_{c1}, F_{Rmax} = 0 : \theta = f(u, t)$;
- (2) $F_{Umax} = 0, F_{Rmax} < \omega_{c1} : \theta \approx 0$;
- (3) $F_{Umax} = 0, \omega_{c1} \leq F_{Rmax} \leq \omega_2 : \theta = f(r, t)$;
- (4) $F_{Umax} \leq \omega_{c1}, F_{Rmax} < \omega_{c1} : \theta = f_1(u, t) + f_2(r, t)$, 其中第二项影响较小;
- (5) $F_{Umax} \leq \omega_{c1}, \omega_{c1} \leq F_{Rmax} \leq \omega_2 : \theta = f_1(u, t) + f_2(r, t)$

按照以上条件,仿真分成五种情况:

(1) 姿态干扰为零,视线指令输入频率为 2 Hz、幅度为 1°的正弦信号;此时系统的输出见图 6,可见其对视线指令信号的跟踪良好,满足跟踪精度要求;

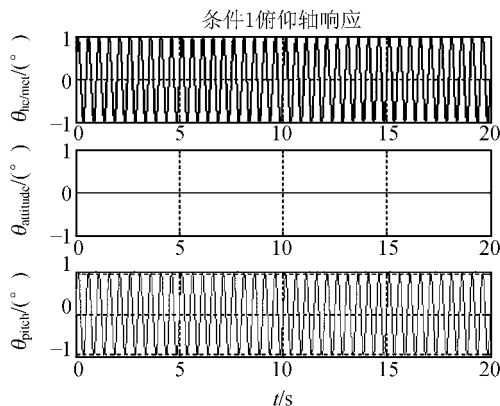


图 6 框架俯仰对头盔和姿态的响应 1

Fig. 6 Response of gimbals to helmet and attitude signal-1

(2) 视线指令输入信号为零,姿态干扰信号为频率为 0.25 Hz、幅度为 1°正弦信号;此时系统的输出见图 7,可见其为满足跟踪精度要求的小幅正弦信号;

(3) 视线指令输入信号为零,姿态干扰信号为频率为 7.16 Hz、幅度为 1°正弦信号;此时系统

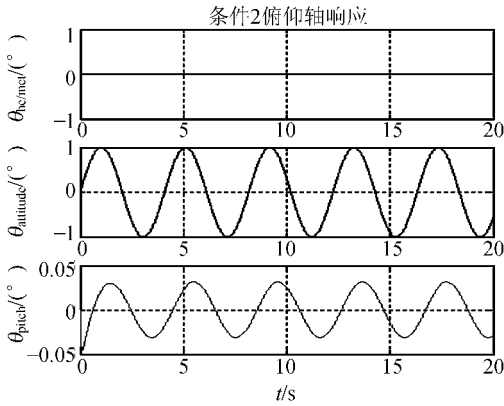


图 7 框架俯仰对头盔和姿态的响应 2

Fig. 7 Response of gimbal pitch to helmet and attitude signal-2

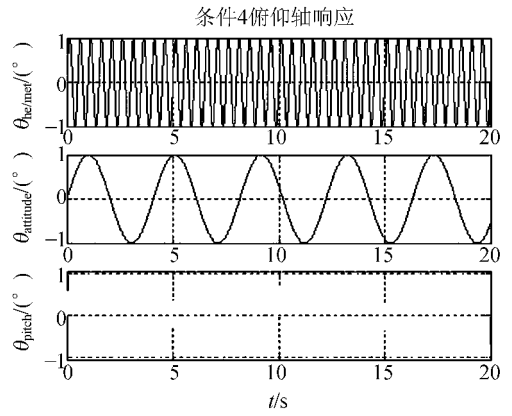


图 9 框架俯仰对头盔和姿态的响应 4

Fig. 9 Response of gimbal pitch to helmet and attitude signal-4

输出见图 8,可见其能有效隔离姿态扰动所带来的图像抖动;

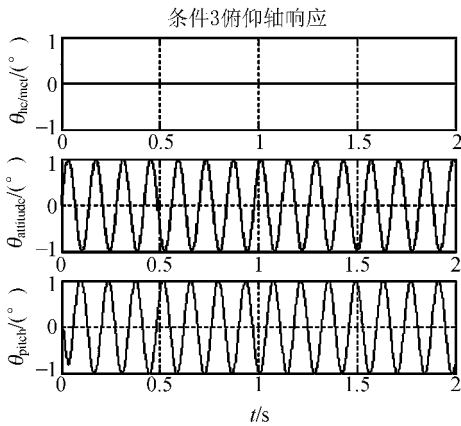


图 8 框架俯仰对头盔和姿态的响应 3

Fig. 8 Response of gimbal pitch to helmet and attitude signal-3

(4) 视线指令输入频率为 2 Hz、幅度为 1° 的正弦信号,姿态干扰信号为频率为 0.25 Hz、幅度为 1° 正弦信号;此时系统的输出见图 9,可见其为对视线指令信号的良好跟踪,可满足对视线指令信号的跟踪精度要求,姿态干扰仅以很小的分量反映在系统的输出;

(5) 视线指令输入频率为 2 Hz、幅度为 1° 的正弦信号,姿态干扰信号频率为 7.16 Hz、幅度为 1° 正弦信号;此时系统输出见图 10,可见其能有效隔离姿态扰动所带来的图像抖动,且同时基本满足视线指令跟踪精度要求。

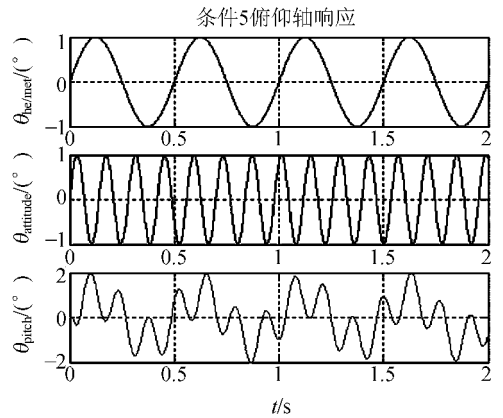


图 10 框架俯仰对头盔和姿态的响应 5

Fig. 10 Response of gimbal pitch to helmet and attitude signal-5

5 结论

文章介绍了 EOSTD 系统的伺服系统结构,重点分析了 EOSTD 框架伺服系统的随动瞄准线指令和陀螺速率稳定两个控制目标之间的关系,提出了位置跟踪环的频率特性应该具有低通性质,而对姿态干扰的响应应该具有带通特性,即在位置跟踪环的截止频率和系统所能承受的振动频率之间。文章通过理论推导和分析,指出在位置跟踪环的速率内环设计成具有较高截止频率的条件下,通过速率内环和位置外环的共同作用,系统对姿态干扰的响应必将具有带通性质。在此基础上,文章进一步分析了 EOSTD 系统对姿态干扰

隔离度的概念,指出其同样具有带通隔离的效果。仿真结果表明,理论分析是正确的。实际的EOSTD伺服系统存在陀螺噪声、框架耦合、摩擦力矩和其它非线性干扰力矩,系统存在一定的非线性特性,在低速时尤为严重。本文只是基于线性模型,重点阐述了稳像装置伺服系统的通用设计

方法。若要达到更高的图像稳定精度,必须研究各种智能和鲁棒控制器诸如自适应摩擦补偿、 H_{∞} 、实时神经网络控制器等来实现上述目标,或采取粗糙两级稳定等结构来减小非线性环节的影响。

参考文献:

- [1] Haessig, David Jr. DeCotiis, James. Modern control methods applied to a line-of-sight stabilization and tracking system[C]. *Proceedings of the American Control Conference*, 1987;1491-1498.
- [2] XIE D L, YUAN J H, YANG H. Stabilization of line-of-sight for airborne O-E tracking and imaging system[J]. *SPIE*, 1998, 3365:191-201.
- [3] COUDRAIN C, SACLEUX B, BRUYANT J P. Design and realization of the line of sight control for one or several airborne optical imaging instruments[J]. *SPIE*, 2005, 5810:35-44.
- [4] HILKERT J M. A comparison of inertial line-of-sight stabilization techniques using mirrors[J]. *SPIE*, 2004, 5830:13-22.
- [5] HILKERT J M, DAVID A. Adaptive control system techniques applied to inertial stabilization systems[J]. *SPIE*, 1990, 1306:190-206.
- [6] LI B. Nonlinear induced disturbance rejection in inertial stabilization systems[J]. *SPIE*, 1996, 2739:242-250.
- [7] LI B, HULLENDER A. Self-tuning controller for nonlinear inertial stabilization systems[J]. *SPIE*, 1996, 2739:229-241.
- [8] 李东明, 党纪红, 郝颖. 惯性平台稳定回路的双闭环控制[J]. *应用科技*, 2003, 30(8):48-50.
LI D M, DANG J H, HAO Y. Double closed-loop control of inertial platform servo loop[J]. *Applied Science and Technology*, 2003, 30(8):48-50. (in Chinese)
- [9] 毕永利, 刘洵. 机载多框架陀螺稳定平台速度稳定环设计[J]. *光电工程*, 2004, 31(2):16-18.
BI Y L, LIU X, GE W Q, LI J. Design of a velocity-stabilized loop for airborne multi-frame gyroscope-stabilized platform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(2):16-18. (in Chinese)
- [10] 毕永利. 多框架光电平台控制系统研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003. 10.
BI Y L. *Study on control system of multi-frame photoelectric platform*[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. 2003. 10. (in Chinese)
- [11] 刘向, 王连明, 葛文奇. 用线性加速度计实现无陀螺平台稳定的理论研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1):21-25.
LIU X, WANG L M, GE W Q. Application of linear accelerometer for stabilization of non gyroscopic platform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(1):21-25. (in Chinese)
- [12] 王永年, 祝梁生, 孙隆和. 头盔显示/瞄准系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1994.
WANG Y N, ZHU L SH, SUN L H. *Helmet display/pointing system*[M]. Beijing: National Defence Industry Publishing House, 1994. (in Chinese)
- [13] 郭富强. 惯导平台的隔离度研究[J]. *西北工业大学学报*, 1993, 2.
GUO F Q. On degree of base-motion isolation of inertial navigation platform[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 1993, 11(2):218-222. (in Chinese)

作者简介:张智永(1970—),男,国防科学技术大学机电工程与自动化学院博士研究生,研究方向为军用光电稳定跟踪装置设计,军用机电测控系统设计。zynihao@126.com.