

文章编号 1004-924X(2009)09-2191-08

加速度在控制系统扰动补偿中的应用

刘晶红¹, 朱志强^{1,2}, 沈宏海¹, 韩松伟¹, 宋玉龙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 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了提高直流力矩电机速度控制系统的伺服性能, 使精密光电稳定平台具有更好的动态性能和更强的抗干扰能力, 提出了一种基于加速度信号的扰动补偿控制方法。该方法建立了标称控制器, 并利用加速度信号构造扰动观测器, 快速、精确地补偿外界扰动及由模型误差造成的影响, 从而提高系统的响应速度及抗扰动能力。实验结果表明, 该控制方法显著地改善了电机控制系统的动态性能, 使电机响应迅速而且没有超调; 对于阶跃型外界扰动, 系统的速度仅出现了宽度为 0.1 s 的脉冲型波动, 且幅度比 PID 控制至少减小 50%。此外, 控制系统对于电机模型的不确定性具有鲁棒性。本文所述控制方法容易实现, 适于工程应用。

关键词: 电机控制; 伺服系统; 扰动补偿; 加速度

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A

Application of control system based on acceleration to disturbance compensation

LIU Jing-hong¹, ZHU Zhi-qiang^{1,2}, SHEN Hong-hai¹, HAN Song-wei¹, SONG Yu-long¹

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A new control method of disturbance compensation based on acceleration signals is proposed to enhance the servo function of speed control system of a DC torque motor in a precise photoelectric stabilized-platform and to make the system have better dynamical functions and stronger abilities of disturbance rejection. In this method, a nominal controller is established and a disturbance observer is created using acceleration signals to compensate quickly and precisely the external disturbance and to reduce the effect of the model error. Thus, the dynamical function and disturbance rejection ability of the system are enhanced. The experiment result shows that this control method can improve the dynamic performance of the motor control system, which accelerates motor responds and restrains overshoots. For the step external disturbance, the system speed only shows a pulse fluctuation with a width of 0.1 s, and the amplitude is one half of that of PID controller. Besides, the control system is robust towards the uncertainty of the motor model. These results show that the method has magnifi-

收稿日期: 2009-04-29; 修订日期: 2009-06-01.

基金项目: 国防科技预研基金资助项目 (No. 10406003)

cent effects and good applications and is very suitable for engineering.

Key words: motor control; servo system; disturbance compensation; acceleration

1 引言

从时域角度来说,传统的运动控制器的设计着眼于如何尽快减小跟踪误差,而对于系统所受到的扰动,则是以被动的反馈方式进行抑制^[1-2]。这样设计出来的控制方法往往较为复杂,而且动态响应存在超调,不能很好地抑制系统所受到的外界扰动,从而难以使运动控制系统不同方面的性能同时达到高指标要求。

为了减小外界扰动对系统造成的影响,国内外的伺服工程师提出将加速度反馈引入到控制系统设计中^[10-11]。然而,在这些应用了加速度信号的控制方法中,加速度多单纯地被用于抑制扰动,而且其实现方式为简单的加速度反馈,这样做实际上相当于增大了系统的等效惯量。也就是说,这种方法一方面提高了系统抗扰动性,另一方面却降低了系统的响应速度,而补偿响应速度的方法是提高增益,但提高增益既降低了系统的稳定性,又放大了加速度环之外的扰动。所以,缺乏合理的应用方式是加速度信号在常见的运动控制器中很少得到应用的原因之一。

滑模控制可使系统严格地按照某一运动方式(临界阻尼方式)运动,具有较好的动态性能^[3-5]。然而,其良好的性能需要控制信号的高频颤振,从而导致实际控制器难以正常工作,而降低振颤频率或消除振颤的代价是跟踪误差的迅速增大^[7-8]。

为了有效地利用加速度信号的抗扰动特性,同时使系统具有滑模控制所具有的动态特性,本文提出了基于加速度信号的补偿控制方法。该方法以连续的控制信号实现滑模控制所寻求的,使系统严格地按照某一运动方式运动的目的,具有良好的动态性能,即与 PID 控制器相同的响应速度,却没有任何超调。而对于外界扰动,则具有较强的抑制能力,对系统模型的不确定性,具有较强的鲁棒性。此外,本文提出了一种利用速度信号

获取小延迟、低噪声加速度信号的方法,该方法具有很好的实时性,能够使运动控制器很好地工作;而且该方法原理简单明了,用于实现相应算法的计算机程序编写简单,具有很好的实时性。文中所述各结论都是通过实验直接验证而得出的,具有很强的工程实用性。

2 原理简介

本文所述控制方法将电机模型分为两部分:标称模型与等价扰动,后者包括了与标称模型的模型误差等价的扰动。由标称控制器与标称模型组成标称系统,而等价扰动则由补偿器予以补偿。

2.1 标称控制系统的构造

图 1 所示为标称控制系统。其中,虚线框内的环节代表标称控制器。

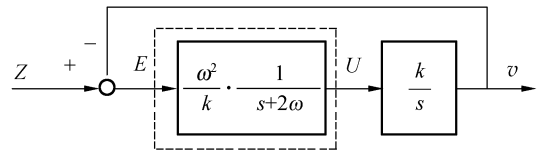


图 1 标称控制系统

Fig. 1 Nominal control system

图中, Z, E, U, v, k 分别为参考输入、误差变量、控制器输出、电机转速和电机传函增益。

在没有任何外界扰动及被控对象模型误差的理想情况下,标称控制系统的运动方程如(1)式所示:

$$\ddot{v} + 2\omega\dot{v} + \omega^2 v = \omega^2 Z(t), \quad (1)$$

式中, ω 为控制系统自然频率,其数值由控制器程序设定。通过对参数 ω 的调节,可以改变标称控制系统的带宽。其中,只要不超过电机的响应带宽,并满足抑制噪音的需要,可以尽可能地增大 ω ,以提高系统的响应速度。

2.2 补偿器对等价扰动的补偿

要实现标称控制器所确定的期望运动方式,首先需要对外界扰动及模型误差所组成的等价扰

动进行精确补偿。本文利用加速度信号构造扰动观测器来实现扰动补偿。图 2 所示为基于加速度信号对扰动进行精确补偿的补偿器示意图。图中虚线框内的部分为补偿器。

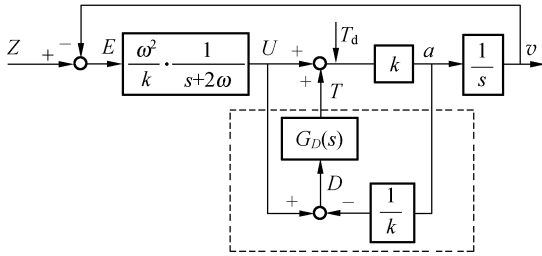


图 2 基于加速度信号的扰动补偿器

Fig. 2 Disturbance compensator based on acceleration signal

通过加速度信号来构造扰动观测器的一个显著的优点是该观测器所涉及的各变量之间都是线性关系,几乎不需要微积分环节,因此能够实现扰动观测的快速性与准确性。

在图 2 所示系统中, T 作为补偿器的输出,能够对外界扰动 T_d 予以补偿,而 D 为实时观测的补偿误差。为了实现 T 对 T_d 迅速而精确的补偿,由 D 通过一个比例积分环节 $G_D(s)$ 对 T 进行矫正,其中, $G_D(s)$ 满足式(2):

$$G_D(s) = \frac{k_0}{s} + 1 \tag{2}$$

式(2)右侧的积分环节用于保证扰动补偿的稳态误差为零,其增益系数由调试而定。

2.3 将模型误差等效为等价扰动

对于驱动系统带有电流环的直流力矩伺服电机,其传递函数取为积分环节。而不带电流环的电机伺服系统,以简单的积分环节作为标称模型,该模型具有较大误差。本文所述扰动补偿控制方法将这类模型误差等效为系统所受的外界扰动,即等价扰动。以常见直流力矩电机伺服系统为例,系统的动态方程为^[9]:

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + K_e v, \tag{3}$$

$$M = iK_m, \tag{4}$$

$$M = J\alpha + T_0, \tag{5}$$

其中, $u, i, M, J, v, \alpha, K_e, K_m$ 以及 T_0 分别为输入电压、线圈电流、电机输出力矩、转动惯量、转速、角加速度、反电动势常数、转矩常数和负载力矩(包含摩擦力)。

由式(3)做拉氏变换可得:

$$i(s) = [u(s) - K_e v(s)] \frac{R}{\frac{L}{R}s + 1} \tag{6}$$

由于 $\frac{L}{R}$ 是一个非常小的数, $\frac{1}{\frac{L}{R}s + 1}$ 只是起到了滤除高频信号的作用,因此式(6)可以近似为:

$$i(s) = [u(s) - K_e v(s)] R, \tag{7}$$

将(4)、(5)两式做拉氏变换,并与式(7)合并,可得:

$$u(s) - [K_e v(s)RK_m + T_0] \frac{1}{RK_m} = \frac{J}{RK_m} \alpha(s), \tag{8}$$

令:

$$T_d = -[K_e v(s)RK_m + T_0] \frac{1}{RK_m}, \tag{9}$$

$$\frac{1}{K} = \frac{J}{RK_m}, \tag{10}$$

带入式(8)可得:

$$a = K(u(s) + T_d). \tag{11}$$

通过上述变换,将模型结构误差转化为了等价扰动 T_d ,其中 T_d 是速度 v 的线性函数。

同理,模型的参数误差也可以转化为等价扰动。设系统的标称模型为:

$$a = Ku(s), \tag{12}$$

实际系统为:

$$a = K'[u(s) + T'], \tag{13}$$

令:

$$T_d = T' + a \frac{K' - K}{KK'}. \tag{14}$$

将式(14)带入式(13),仍然得到式(11)。此时 T_d 是加速度的函数,注意到补偿器输出 T 与 T_d 反号,因此当 $K > K'$ 时, T 中含有 a 的正系数项。但由于 T 只是对 a 进行调节,使其满足式(12),而不是简单的正反馈,因此不影响系统的稳定性。

总之,这种基于加速度进行扰动补偿的速度调节控制系统的设计分为两个部分:1、确定系统所要遵循的期望运动形式,可以设置为临界阻尼或过阻尼,并以此设计标称控制器,标称控制器用于确定系统的频带宽度;2、利用被控对象的加速度信号及标称控制器的输出建立扰动补偿器。

2.4 控制系统的稳定性与鲁棒性分析

对于标称控制系统,其开环传函为:

$$G(s) = \frac{\omega^2}{s(s+2\omega)}, \quad (15)$$

令:

$$|G(s)| = 1, \quad (16)$$

可得其截止频率为:

$$\omega_n = \omega\sqrt{\sqrt{5}-2}, \quad (17)$$

同时可得其相角裕度为 $\gamma = 76.3^\circ$ 。显然,标称控制系统具有理想的稳定性。

由于不存在模型误差时,补偿器的加入不改变系统的传递函数,因此,从理论上来说,补偿器并不影响系统的稳定性。

考察系统的鲁棒性。系统的非结构不确定性仅仅存在于高频未建模部分,这种模型误差所造成的影响可以通过系统开环传函的低通特性予以滤除。影响系统鲁棒性的关键因素在于实际物理系统的传函增益,即参数 K 。考虑该参数的测量误差,假设实际值为 K' ,测量值为 K , $K - K' = \Delta K$,则加入补偿器后,系统开环传函如式(18)所示:

$$G(s) = \frac{\omega^2}{s(s+2\omega)} \cdot \frac{\frac{2}{K_0}s+1}{\frac{K+K'}{K'K_0}s+1}. \quad (18)$$

可见,加入补偿器后,参数 K 的测量误差使系统的开环传函增加了一对零极点。这对零极点导致开环相频特性在某一频率处出现凸起或凹陷。然而,一方面这对零极点相距较近,因此这种凸起或凹陷的幅度很小;另一方面, K_0 可以设得较大,使这种凸起或凹陷处于高频区,从而消除其影响。

以 $K_0 = 50$ 为例,当 $\Delta K = K/2$ 时,这对零极点在 20 Hz 处产生幅值为 11.5° 的相位凹陷,但同时使高于 20 Hz 的频段的幅值降低约 3.5 dB;当 $\Delta K = -K/2$ 时,这对零极点在约 30 Hz 处产生幅值为 5° 的相位凸起,同时使高于 30 Hz 的频段的幅值提高约 1.5 dB。相对于 76.3° 的相角裕度来说,上述相位变化是很小的。可见,当 K_0 较大时,即使参数 K 有较大的辨识误差,也仅仅对系统稳定性产生较小的影响。而当 K_0 较小时,这对零极点所引起的相位凸起或凹陷处于低频段,对系统的稳定性不构成影响。

因此,这种基于加速度进行扰动补偿控制系统具有较高的鲁棒性。

3 实验结果

3.1 系统介绍

图 3 所示为实际实验系统的结构图。

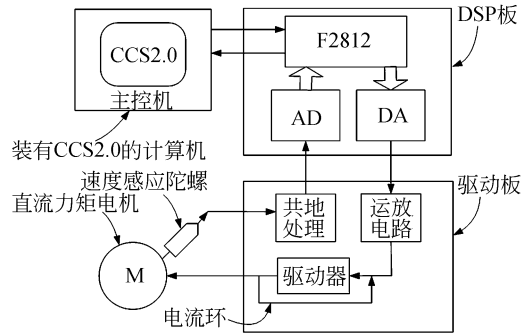


图 3 实验系统结构图

Fig. 3 Structure of experimental system

该系统采用 TI 公司的运动控制专用 DSP 芯片 F2812 作为控制器,与其配套的调试软件 CCS2.0 能够实时记录由速度感应陀螺测得的速度信号^[6]。所采用的 AD 与 DA 转换器都是 16 位的,所采用速度传感器为速度感应陀螺。

直流力矩电机的驱动系统具有一个负反馈的电流环,该电流环将驱动器的输出,即电机线圈中的电流反馈给驱动器的输入,通过该电流环抑制电机由转速引起的感应电动势以及线圈自感应电动势引起的电流变化,使电机中的线圈电流正比于 DA 输出而与电机转动速度无关。

3.2 加速度信号的获取

本文实验采用速度信号来获取加速度信号,具体方法为:

在程序中设置大小为 $2n$ 的一维数组 $v[2n]$,用于记录 $2n$ 个连续的速度采样信号。设 $v[i]$ 记录第 $k+i$ 个采样值 ($k > 0, 0 \leq i < 2n$)。在每个计算周期中,按 i 由小到大的顺序依次将 $v[i+1]$ 赋给 $v[i]$,然后将新采到的速度信号记录在 $v[2n-1]$ 中。最后,将后 n 个元素值之和减去前 n 个元素值之和,将差除以 n^2 即得到相邻两个采样周期的速度之差的平均值。实验证明,采样周期为 1 ms 时,取 $n=2$ 即可获得较为理想的加速度信号,而此时的滞后仅为 2 ms。

3.3 被控电机传函增益的获取

被控电机传函增益 K 是一个重要的参数,它直接应用于补偿器的设计,因此需要一种有效的方法对其进行辨识。

本文所述辨识方法的基本思想是通过施加适当的控制信号,使电机以幅值恒定的加速度做往返匀加减速转动,通过计算加速度值与控制信号之比来获取参数 K 。具体实现如下:

1) 通过简单的比例控制,获取使电机匀速转动所需的控制信号。电流环的使用,使电机的线圈电流只是正比于控制信号而与转速无关,因此该控制信号的数值为摩擦力的补偿值。实验测得当电机正向转动时该补偿值为 $+0.3^\circ/\text{s}$,当反向转动时,该补偿值为 $-5.7^\circ/\text{s}$ 。

2) 使电机在 $\pm 20\ 000$ 个码 ($\pm 60^\circ$, $1\ \text{码} = 0.003^\circ/\text{s}$) 的最大转速之间做加速度大小恒定的匀加减速转动。此时,控制信号由两部分相加而成。一部分为摩擦力的补偿值,在电机转向变化时对它予以切换,其作用为补偿摩擦力的影响;另一部分是大小为 $60^\circ/\text{s}$ 的有效值,其符号在电机转速达到最大幅值 ($+60^\circ/\text{s}$ 或 $-60^\circ/\text{s}$) 时切换。获取的速度曲线如图 4 所示。

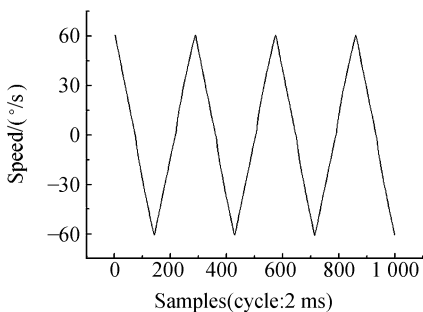


图 4 用于电机传函增益辨识的速度曲线

Fig. 4 Speed curve for measuring the gain of motor transfer function

3) 所获取速度曲线的斜率与控制信号的有效值之比,即为电机传函增益参数 K 。由图 4 知,当控制信号有效值为 $6^\circ/\text{s}$ 时,速度曲线的斜率为 $420^\circ/\text{s}^2$ 。因此, $K = 70\ \text{s}^{-1}$ 。

这种方法所获得的增益参数值,其相关物理量以码为单位,因此可以直接用于控制器程序的编写。

3.4 动态特性

图 5 与图 6 分别为原有完善的 PID 控制方法与基于加速度的扰动补偿方法的动态响应实验曲线。

由两图对比可见,两种方法具有相同的速度快的特点,但后者符合临界阻尼运动方式,没有超调。

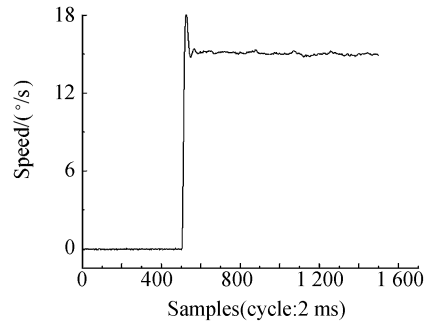


图 5 PID 控制方法的动态响应曲线

Fig. 5 Dynamical response curve with PID control method

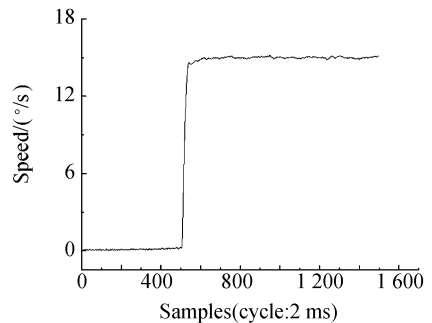


图 6 基于加速度的扰动补偿方法的动态响应曲线
Fig. 6 Dynamical response curve with disturbance compensation control method based on acceleration signal

3.5 抗扰动性

为了验证该方法的抗扰动性能,做了两个实验,分别验证该方法的抗力矩扰动性能(实验 1)与抗速度扰动性能(实验 2)。

在实验 1 中,以编程的方式加入扰动。即,在控制器的输出信号,即 DA 的输入中,叠加幅值为 1000 个码的方波扰动信号。由于该信号与控制程序没有任何的信息交换,因此可以看成是外界扰动。即相当于另一台完全相同的电机在该方

波信号的驱动下运转,并将输出力矩施加在原电机上。方波信号如图 7 所示。图 8 与图 9 分别为两种控制方法的控制系统在加入扰动信号后的速度曲线。

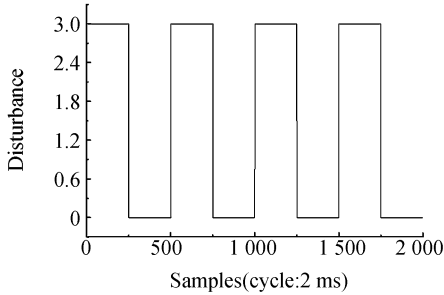


图 7 方波扰动信号

Fig. 7 Disturbance square signal

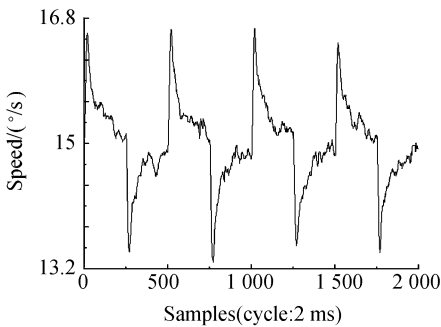


图 8 加入方波力矩扰动后 PID 控制系统的速度曲线

Fig. 8 Speed curve with square moment disturbance in PID control system

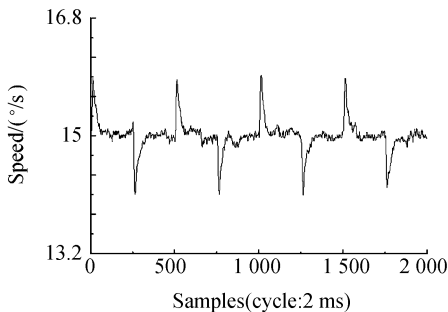


图 9 加入方波力矩扰动后基于加速度扰动补偿控制系统的速度曲线

Fig. 9 Speed curve with square moment disturbance in control system of disturbance compensation based on acceleration signal

可见,基于加速度的扰动补偿控制系统,仅仅出现了峰值 $<1^\circ/\text{s}$ 的速度波动,且在 0.1 s 内消失,而 PID 方法的速度波动,幅值接近前者的两倍,而且在 0.5 s 时仍然存在残余误差。显然,基于加速度的扰动补偿控制系统无论是在速度波动幅度上,还是在响应速度上,都明显地优于 PID 控制。

在实验 2 中,将光电稳定平台基座固接在某大惯量转台上,让转台以 1 Hz 的频率做摆动,摆动幅值为 $6^\circ/\text{s}$,如图 10 所示。光电稳定平台控制器的参考输入为 $15^\circ/\text{s}$ 的恒值。图 11 为 PID 控制系统的速度曲线,图 12 为基于加速度扰动补偿控制系统的速度曲线。

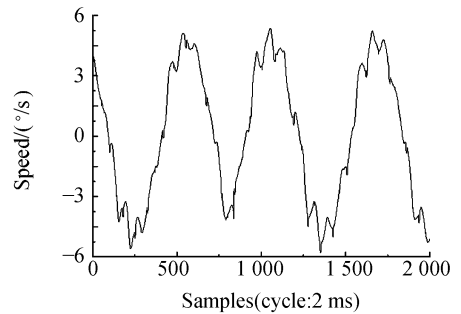


图 10 摆动转台的速度曲线

Fig. 10 Speed curve of revolving table in swinging

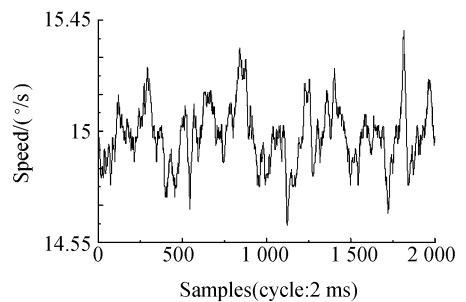


图 11 加入速度扰动后 PID 控制系统的速度曲线

Fig. 11 Speed curve with speed disturbance in PID control system

对比图 11 与图 12 可见,在光电稳定平台基座以 1 Hz 的频率做摆动时,若采用 PID 控制方法,台体转速会出现相应频率的波动,幅度约为基座幅度的 5%,而采用基于加速度扰动补偿控制方法时,台体转速波动幅度大为减小,可见,该方法对速度扰动具有极强的抑制能力。

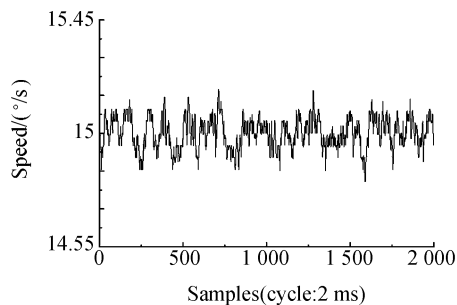


图12 加入速度扰动后基于加速度扰动补偿控制系统的速度曲线

Fig. 12 Speed curve with speed disturbance in control system of disturbance compensation based on acceleration signal

4 结 论

相对于传统的PID控制方法,基于加速度的

参考文献:

- [1] ZHU G C, DESAINT L A, AKHRIF O. Speed tracking control of a permanent-magnet synchronous motor with state and load torque observer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(2):346-355.
- [2] LAI C K, SHYU K K. A novel motor drive design for incremental motion system via sliding-mode control method[J]. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2005, 52(2):499-507.
- [3] 程维明,孙麟治,章海涛. 利用补偿提高精密定位平台的定位精度[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(5):884-888.
- CHENG W M, SUN L ZH, ZHANG H T. Improvement of positioning precision for precise stage with compensation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5):884-888. (in Chinese)
- [4] 张文博,范大鹏,朱华征. 基于采样控制理论的光电跟踪伺服系统内模控制[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2):221-228.
- ZHANG W B, FAN D P, ZHU H ZH. Internal model control for electro-optical tracking servo system based on sampled-data control theory[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):221-228. (in Chinese)
- [5] 刘岩,李友一,陈占军,等. 模型参考自适应滑模控制方法在前向像移补偿中的应用[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6):983-987.

扰动补偿控制能够显著地提高伺服电机控制系统的伺服性能,在不改变系统响应速度的前提下,消除了阶跃响应的超调;并且使控制系统具有更强的抗扰动性能,使由扰动造成的速度波动无论是幅值还是持续时间都显著地减小。该方法原理简单,性能可靠,非常适合于伺服系统的实际工程应用。

此外,本文提出了利用速度信号来获取加速度信号的有效方法,可以使该方法的应用不依赖于加速度传感器,从而无需额外成本。

本文所述方法是以速度控制系统为例提出的,事实上,只需对标称控制器做简单的补充修改,该方法对位置控制系统也同样适用。

- LIU Y, LI Y Y, CHEN ZH J, *et al.*. Application of model reference adaptive sliding mode control to forward compensation system in camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):983-987. (in Chinese)
- [6] 范大鹏,张智永,范世珣,等. 光电稳定跟踪装置的稳定机理分析研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4):673-680.
- FAN D P, ZHANG ZH Y, FAN SH X, *et al.*. Research of basic principles of E-O stabilization and tracking devices[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):673-680. (in Chinese)
- [7] 李军红,陈潮填,唐忠平. 交流永磁同步电动机伺服系统的变结构控制[J]. *微特电机*, 2004, 15(1):26-28.
- LI J H, CHEN CH T, TANG ZH P. Variable structure control of AC servo system for permanent magnet synchronous motor [J]. *Small&Special Machines*, 2004, 15(1):26-28. (in Chinese)
- [8] SLOTINE J E, LI W P. *Applied Nonlinear Control*[M]. Beijing:China Machine Press, 2006.
- [9] ELLIS G. *Control System Design Guide*[M]. 3th ed. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [10] MONCEF H M, PETER B S, ROBERT D L. Implementation of a DSP-based, acceleration feedback robot controller; practical issues and design limits

[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1991:435-437.

[11] PETER B S, ROBERT D L. Design principles and

implementation of acceleration feedback to improve performance of DC drives[J]. *IEEE, IAS*, 1990: 422-427.

作者简介:



刘晶红(1967—)女,吉林长春人,研究员,主要从事机载光电成像测量设备方面的研究。E-mail: liu1577@126.com



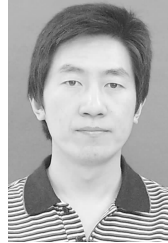
朱志强(1986—)男,山东日照人,硕士研究生,主要从事光电稳定平台振动隔离度方面的研究。E-mail: oucxiaozhu@yahoo.com.cn



沈宏海(1976—),男,江苏人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员,从事机载光电成像测量设备方面的研究工作。E-mail: shenh@ciomp.ac.cn



韩松伟(1980—),男,吉林蛟河人,2005年毕业于北京航空航天大学电子工程学院,现为中科院长春光学精密机械与物理所的硕士研究生,主要从事动基座光电设备的电子设计,通信及伺服控制。E-mail: hsw2109@sina.com



宋玉龙(1980—),男,山东济宁人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员,从事机载光电成像测量设备方面的研究工作。E-mail: yls1721@126.com

●下期预告

1 m 望远镜四通变形对俯仰轴系精度的影响分析

赵勇志^{1,2},张景旭¹,吴小霞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. 中国科学院研究生院,北京 100039)

工程实践中 1 m 望远镜俯仰轴系检测精度未达到系统指标,而系统运转性能优异。为解决此问题,本文通过对影响 1 m 望远镜俯仰轴系精度主要因素—中间体(四通)进行了有限元分析和运算,得出四通在不同俯仰角度的变形曲线,并与实际检测结果进行对比,找出两者的相同特征进行补偿。按此方法使得望远镜俯仰轴系晃动误差 PV 值从 2.42" 降到 0.95",RMS 值从 0.7" 降到了 0.3",提高了系统精度模型的准确性。推理出设计过程中的检测指标,为更大口径望远镜轴系的设计和检测提供了理论依据。