

文章编号 1004-924X(2009)09-2247-08

光电跟踪系统鲁棒自调整内模控制设计与分析

姬伟¹, 李奇², 许波¹, 赵德安¹

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 东南大学自动化研究所, 江苏南京 210096)

摘要:针对光电成像跟踪器信号处理、传输造成的测量时滞和系统模型不确定的特性,设计了一种鲁棒自调整内模控制算法。首先,给出基于相位裕度和幅值裕度的系统控制器参数整定方程。然后,分析得到了模型失配情况下的系统鲁棒稳定条件以及参数的设计准则。最后,引入基于二次型性能指标的优化方法在线自适应调整控制滤波器参数来提高系统的控制性能和鲁棒性。在四轴光电跟踪转台上的实验结果表明,所设计算法可有效地克服光电图像跟踪器测量时滞所造成的跟踪偏差,跟踪精度 <1 mil,保证了成像传感器对目标的快速准确跟踪。

关键词:光电跟踪系统;内模控制;鲁棒稳定性

中图分类号:V556;TP273 文献标识码:A

Analysis and design of robust self-tuning IMC for opto-electronic tracking system

Ji Wei¹, Li Qi², Xu Bo¹, Zhao De-an¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
2. Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In consideration of the measurement time-delay and plant model uncertainty from signal processing and transmissiances in an imaging tracker, a robust Internal Model Control (IMC) strategy is designed for the opto-electronic tracking system. Firstly, the equations for designing the IMC controller based on the gain and phase margin specifications are given in detail. Then, the robust stability condition and the design criterion of parameters under plant/model mismatch are derived. Finally, a optimization method based on a quadratic cost function is introduced to adjust controller's parameters adaptively for improving the controlling ability and robust performance for the system. The experimental results in a four-axis opto-electronic tracking servo turntable indicate that the tracking precision is less than 1 mil, which is effective to overcome tracking errors caused by measurement time-delay and to ensure fast tracking for targets.

Key words: opto-electronic tracking system; Internal Model Control(IMC); robust stability

收稿日期:2008-07-25;修订日期:2008-10-27.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA10Z254);江苏大学校基金资助项目(No. 07JDG071)

1 引言

光电跟踪系统广泛应用于制导武器、航空航天观测设备以及靶场光电测量仪器等领域。光电成像跟踪器测量的时滞对跟踪系统的带宽、精度等造成严重的影响,使系统动态响应变差,导致丢失和跟踪不上目标。文献[1]研究了跟踪器延迟和帧频对不同跟踪任务中跟踪精度的影响;文献[2]针对数字测速滞后问题,采用了与 e^σ 高阶近似形式的补偿方法;文献[3]从信号预测滤波的角度,提出采用卡尔曼滤波进行外推来克服电视脱靶量滞后的问题;文献[4-5]详细分析了采样频率、系统延迟对跟踪系统稳定性能的影响,提出了基于横向滤波器结构和最小均方差(LMS)算法的自适应预测延迟补偿方法。但上述方法均过于复杂,难于应用在实时性要求很高的跟踪系统中。内模控制(IMC)是在 Smith 预估控制基础上发展起来的一种实用性很强的解决时滞问题的有效方法^[6-7],它具有控制器结构简单,设计直观、在线调节参数少等特点,克服了 Smith 预估器依赖精确模型的弱点,对时滞系统的控制和提高系统鲁棒

性及抗扰性,效果尤为显著。文献[8]将 IMC 应用于光电跟踪系统,但仅给出了精确模型情况下的控制器形式,其控制器参数的选取规则和稳定范围都没有讨论。

本文提出采用鲁棒自调整内模控制算法来补偿时滞造成的跟踪误差,推导了基于相位裕度和幅值裕度指标的系统控制器整定方程,对模型失配情况下的系统鲁棒稳定条件以及参数设计准则进行了分析,基于二次型性能指标的优化方法能在线自适应调整控制滤波器参数。并通过实验验证算法的有效性。

2 系统描述

运动光电跟踪控制系统结构如图 1 所示,系统采用串级控制结构,包括速度稳定内环和位置跟踪外环。首先稳定环利用具有空间测速功能的速率陀螺测量部载体扰动,通过速度控制器实现视轴瞄准线的空间稳定,保证光电传感器获取稳定清晰的目标图像,然后位置跟踪控制器根据图像跟踪器给出的目标脱靶量信号来驱动执行机构实现对目标的准确跟踪瞄准。

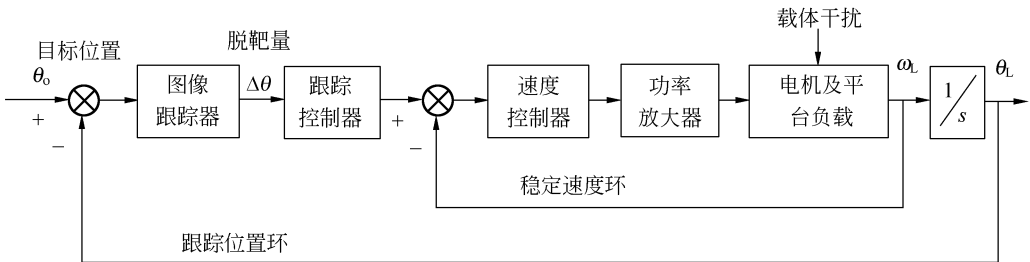


图 1 运动光电跟踪控制系统框图

Fig. 1 Diagram of opto-electronic tracking control system

在跟踪系统中,光电成像传感器通常采用 CCD 电视摄像机或红外热像仪,图像跟踪器模块按照标准制式逐场提取与分离视场中的运动目标,根据目标亮度与结构特征,测量目标中心相对与视轴中心的方位和俯仰偏差(即目标脱靶量),再送给控制系统。对伺服系统而言,其所获得的目标脱靶量是经过图像跟踪器处理后的结果,信号测量与处理的时滞主要存在于跟踪系统的两个环节:光电传感器成像组件和图像处理跟踪器。其中成像组件时滞包括光机扫描和视频合成;图

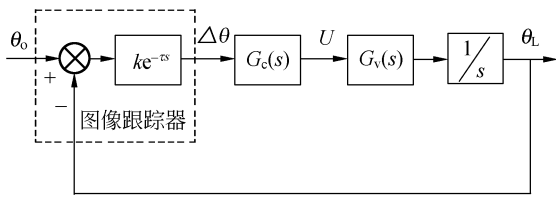
像跟踪器的时滞包括积分时间产生、A/D、D/A 转换、帧存数据存取、脱靶量图像处理计算等环节。脱靶量测量时滞的存在,为跟踪控制回路的设计带来了相当大的难度,在跟踪快速运动目标时,滞后量的存在必然影响控制系统的稳定性和跟踪精度。

3 光电跟踪系统鲁棒自调整内模控制

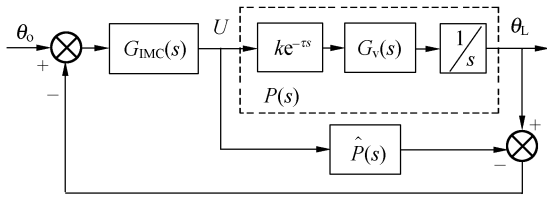
3.1 基于频域指标的内模控制器设计

图 2(a)为考虑光电跟踪器测量时滞,并忽略

小时间常数影响的系统结构框图,图 2(b)为对应的内模控制结构。其中图像跟踪器为目标脱靶量



(a) 一般控制结构形式
(a) Common control structure



(b) 内模控制结构形式
(b) IMC structure

图 2 光电跟踪时滞系统结构

Fig. 2 Structure of opto-electronic tracking time-delay system

检测元件,其数学模型包括比例环节和时滞环节, $\Delta\theta$ 为图像跟踪器提供的目标脱靶量信号, $G_c(s)$ 为跟踪控制器, $G_v(s)$ 为速度闭环传递函数。在实际设计中,由于速度内环截止频率(带宽)高,响应速度快,可近似等效为一阶惯性环节。因此,整个位置跟踪系统为积分加一阶惯性和纯滞后环节(IFOPDT),其过程模型表示为:

$$P(s) = Ke^{-\tau s} / s(Ts + 1), \quad (1)$$

其中, K 为静态增益, T 为速度闭环等效时间常数, τ 为图像跟踪器测量脱靶量滞后时间,且 $K > 0, T > 0, \tau > 0$,被控对象为一非自衡加纯滞后的非最小相位系统。其标称模型定义为:

$$\hat{P}(s) = K_m e^{-\tau_m s} / s(T_m s + 1), \quad (2)$$

根据内模控制原理^[6],则内模控制器为:

$$G_{IMC}(s) = \hat{P}^{-1}(s)f(s), \quad (3)$$

其中: $\hat{P}^{-1}(s) = K_m / s(T_m s + 1)$ 为最小相位部分; $f(s)$ 为内模控制器可实现因子,采用如下低通滤波器形式: $f(s) = 1 / (\lambda s + 1)^n$,此处选 $n = 1, \lambda$ 为滤波器调整时间常数。则公式(3)为:

$$G_{IMC}(s) = \frac{s(T_m s + 1)}{K_m(\lambda s + 1)}. \quad (4)$$

考虑时滞环节采用一阶pade'近似展开,即 $e^{-\tau_m s} \approx (2 - \tau_m s) / (2 + \tau_m s)$,则等效反馈控制器为:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{\Delta\theta(s)} = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - G_{IMC}(s)\hat{P}(s)} \approx \frac{(T_m s + 1)(2 + \tau_m s)}{K_m(\lambda \tau_m s + 2\tau_m + 2\lambda)}. \quad (5)$$

根据幅值裕度和相位裕度的基本知识^[9-10],则有

$$\arg\{G_c(j\omega_g) \cdot \hat{P}(j\omega_g)\} = -\pi, \quad (6)$$

$$A_m = \frac{1}{|G_c(j\omega_g) \cdot \hat{P}(j\omega_g)|}, \quad (7)$$

$$|G_c(j\omega_p) \cdot \hat{P}(j\omega_p)| = 1, \quad (8)$$

$$\varphi_m = \pi + \arg\{G_c(j\omega_p) \cdot \hat{P}(j\omega_p)\}, \quad (9)$$

这里, ω_g 和 ω_p 为相应的穿越频率。将式(2)、(5)分别代入式(6)~(9)整理得:

$$\arctan\left(\frac{\tau_m \omega_g}{2}\right) + \arctan\left[\frac{\lambda \tau_m \omega_g}{2(\lambda + \tau_m)}\right] = \frac{\pi}{2}, \quad (10)$$

$$\frac{1}{A_m} = \frac{1}{\omega_g \sqrt{4 + (\tau_m \omega_g)^2} \sqrt{4(\tau_m + \lambda)^2 + (\lambda \tau_m \omega_g)^2}}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{\omega_p \sqrt{4 + (\tau_m \omega_p)^2} \sqrt{4(\tau_m + \lambda)^2 + (\lambda \tau_m \omega_p)^2}} = 1, \quad (12)$$

$$\varphi_m = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\tau_m \omega_p}{2}\right) - \arctan\left[\frac{\lambda \tau_m \omega_p}{2(\lambda + \tau_m)}\right]. \quad (13)$$

由式(10)~(13)解得:

$$\varphi_m = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{B}{\sqrt{2}(A_m - 2)}\right) - \arctan\left(\frac{B}{\sqrt{2}A_m}\right), \quad (14)$$

其中 $B = \sqrt{\sqrt{A_m^4 + 2A_m^2 - 16A_m + 17} - (A_m^2 - 1)}$,

$$\lambda = \tau_m \cdot \left(\frac{A_m}{2} - 1\right). \quad (15)$$

式(14)、(15)给出了系统频域指标与控制器调节参数的关系,根据系统要求的幅值裕度和相位裕度范围,就可以求出模型匹配情况下控制器的调节参数。

3.2 模型失配鲁棒稳定性分析

在光电跟踪系统中,受电机特性、机械结构的影响,被控对象的特性在大范围内快速运行和小范围内低速运行时,参数是不完全相同的,系统为参数时变过程,因此分析控制对象参数变化情况下的鲁棒稳定性对于控制器的设计具有重要的理论指导意义。在跟踪系统过程模型中主要参数有

静态增益 K , 速度环等效时间常数 T , 图像跟踪器脱靶量测量滞后时间 τ , 由于采用同一种图像处理算法所需时间相对保持固定, 即 τ 不变。因此下面主要分析增益失配和时间常数失配情况的鲁棒稳定性。

3.2.1 增益失配

当系统标称模型与对象模型存在增益失配时, 即 $K = \Delta k \cdot K_m, \tau = \tau_m, T = T_m$, 其中 $\Delta k > 0$, 有如下定理:

定理 1: 对于近似二阶加纯滞后模型的光电跟踪内模控制系统, 假设模型增益失配为 $K = \Delta k \cdot K_m, \tau = \tau_m, T = T_m$ 时, 系统保持稳定的条件为:

$$0 < \Delta k < 2 + \frac{2\lambda}{\tau_m}.$$

证明: 根据内模控制原理可得在增益失配时闭环系统的特征方程

$$D(s) = 1 + G_{IMC}(s)(P - \hat{P}) = 1 + \frac{(\Delta k - 1)e^{-\tau_m s}}{\lambda s + 1} = 0. \tag{16}$$

便于分析, 时滞环节采用一阶 padé' 近似展开, 则有 $\lambda \tau_m s^2 + (2\tau_m + 2\lambda - \Delta k \tau_m)s + 2\Delta k = 0$.

根据 Routh 稳定判据^[10], 系统稳定的充要条件为

$$\begin{cases} \lambda \tau_m > 0 \\ 2\lambda + 2\tau_m - \Delta k \tau_m > 0 \\ \Delta k > 0 \end{cases} \tag{18}$$

因此, 稳定条件下的模型增益失配与滤波器参数的关系为

$$0 < \Delta k < 2 + 2\lambda/\tau_m. \tag{19}$$

$$\begin{cases} \Delta T \cdot T_m \tau_m \lambda > 0 \\ 2\Delta T \cdot T_m \lambda + 2\Delta T \cdot T_m \tau_m + \lambda \tau_m - T_m \tau_m > 0 \\ 2\lambda + 2T_m + \tau_m - \frac{2\Delta T \cdot T_m \tau_m \lambda}{2\Delta T \cdot T_m \lambda + 2\Delta T \cdot T_m \tau_m + \lambda \tau_m - T_m \tau_m} > 0 \\ \Delta T > 0 \end{cases}, \tag{22}$$

整理得:

$$\begin{cases} \Delta T > 0 \\ \Delta T > \frac{\tau_m(T_m - \lambda)}{2T_m \lambda + 2T_m \tau_m} \\ \Delta T > \frac{\tau_m(T_m - \lambda)(2\lambda + 2T_m + \tau_m)}{2T_m(2\lambda^2 + 2\lambda \tau_m + \tau_m^2 + 2T_m \tau_m + 2T_m \lambda)} \end{cases}, \tag{23}$$

注释 1: 定理 1 表明, 控制滤波器参数决定系统模型增益失配的鲁棒稳定性。当控制对象数学模型实际增益小于标称模型增益或实际增益大于模型增益 2 倍以内时, 滤波器参数 λ 取大于零的任何值, 系统均保持稳定; 当实际增益大于模型增益 2 倍时, 滤波器参数 λ 取值满足 $\lambda > (\Delta k - 2)\tau_m/2$, 则系统稳定, 并且 λ 越大, 系统保持稳定允许的增益失配范围越大。

3.2.2 时间常数失配

当系统标称模型与对象模型存在时间常数失配时, 设对象时间常数 $T = \Delta T \cdot T_m, K = K_m, \tau = \tau_m$, 其中 $\Delta T > 0$, 则有如下定理:

定理 2: 对于近似二阶加纯滞后模型的光电跟踪内模控制系统, 假设系统时间常数失配为 $T = \Delta T \cdot T_m, K = K_m, \tau = \tau_m$ 时, 系统保持稳定的条件为:

$$\begin{cases} \Delta T > 0 & \lambda \geq T_m \\ \Delta T > \frac{\tau_m(T_m - \lambda)(2\lambda + 2T_m + \tau_m)}{2T_m(2\lambda^2 + 2\lambda \tau_m + \tau_m^2 + 2T_m \tau_m + 2T_m \lambda)} & \lambda < T_m \end{cases}$$

证明: 在时间常数失配时闭环系统的特征方程为

$$D(s) = 1 + G_{IMC}(s)(P - \hat{P}) = 1 + \frac{e^{-\tau_m s}}{\lambda s + 1} \cdot \frac{(1 - \Delta T)T_m s}{\Delta T \cdot T_m s + 1} = 0. \tag{20}$$

将 $e^{-\tau_m s}$ 采用一阶 padé' 近似展开, 整理可得 $\Delta T \cdot T_m \tau_m \lambda s^3 + (2\Delta T \cdot T_m \lambda + 2\Delta T \cdot T_m \tau_m + \lambda \tau_m - T_m \tau_m)s^2 + (2\lambda + 2T_m + \tau_m)s + 2 = 0$.

根据 Routh 稳定判据^[11]得

当 $T_m \leq \lambda$ 时, 系统稳定充要条件为: $\Delta T > 0$ 。

当 $T_m > \lambda$ 时, 由于

$$0 < \frac{\tau_m(T_m - \lambda)}{2T_m \lambda + 2T_m \tau_m} = \frac{\tau_m(T_m - \lambda)(2\lambda + 2T_m + \tau_m)}{(2T_m \lambda + 2T_m \tau_m)(2\lambda + 2T_m + \tau_m)} < \frac{\tau_m(T_m - \lambda)(2\lambda + 2T_m + \tau_m)}{2T_m(2\lambda^2 + 2\lambda \tau_m + 2T_m \tau_m + 2\lambda \tau_m + \tau_m^2)} < 1, \tag{24}$$

因此, 稳定条件下的时间常数失配与滤波器参数的关系为:

$$\begin{cases} \Delta T > 0 \\ \Delta T > \frac{\tau_m(T_m - \lambda)(2\lambda + 2T_m + \tau_m)}{2T_m(2\lambda^2 + 2\lambda\tau_m + \tau_m^2 + 2T_m\tau_m + 2T_m\lambda)} \end{cases} \begin{matrix} \lambda \geq T_m \\ \lambda < T_m \end{matrix} \quad (25)$$

注释2:定理2表明,标称模型时间常数失配时系统的鲁棒性由控制滤波器调节参数 λ 决定。当 $\lambda \geq T_m$ 时,系统稳定性不受对象模型时间常数失配的影响。当 $\lambda < T_m$ 时,若过程模型时间常数大于标称模型时间常数, λ 取小于 T_m 的任意值,系统均保持稳定,且 λ 越小,系统动态响应越快;若过程模型时间常数小于标称模型时间常数,则 λ 取值必须满足式(25),系统才保证稳定,且随着 λ 增加,系统稳定允许的时间常数失配增益范围增大。

3.3 参数自整定设计

在上述控制器中只有一个可控制参数 λ ,因此具有结构简单、易实现的特点。由内模控制理论可知^[6,12],控制参数 λ 的选择是在满足该控制闭环的鲁棒稳定及抗扰性与调节响应的快速性和伺服控制性能之间折衷,固定的 λ 以及文献^[12-14]中的改进方法所能达到的性能有限。为获得满意的动态跟随性能,本文引入基于二次型性能指标的参数在线自调整优化方法,选择输出误差和控制量加权平方和最小为目标函数,从而间接实现对输出误差和控制量加权的约束控制。设其性能指标为

$$E(k) = \frac{1}{2} [a_1(\theta_o(k) - \theta_L(k))^2 + a_2 U^2(k)], \quad (26)$$

式中 a_1, a_2 分别为权值,参数 λ 的调整采用梯度下降法修正,并附加使搜索快速收敛于全局极小的惯性项,即

$$\lambda(k) = \lambda(k-1) + \Delta\lambda(k), \quad (27)$$

$$\Delta\lambda(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial \lambda} + \alpha \Delta\lambda(k-1), \quad (28)$$

其中 η 为学习速率, α 为惯性项。其中

$$\frac{\partial E(k)}{\partial \lambda} = -a_1 \Delta\theta(k) \frac{\partial \theta_L}{\partial U} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + a_2 U(k) \frac{\partial U}{\partial \lambda}, \quad (29)$$

这里, $\Delta\theta(k)$ 为第 k 时刻光电跟踪器提供的目标脱靶量信号,即 $\Delta\theta(k) = \theta_o(k) - \theta_L(k)$, $\partial \theta_L / \partial U$ 和 $\partial U / \partial \lambda$ 可根据式(2)、(5)离散化后分别得出。

4 系统实验和结果

系统实验装置为图3所示的陀螺稳定光电跟踪转台,跟踪光电传感器采用CCD摄像机,其

视频信号为PAL制式正极性黑白电视信号,信号帧频为50 Hz。基于TMS320C31 DSP的电视跟踪器模块采用相关跟踪算法提取目标脱靶量送给控制系统,实验测试可得电视脱靶量的时滞为2 frame,即40 ms。伺服控制系统采用数字信号处理器控制下的脉宽调制驱动,控制器选用以Motorola的DSP56001数字信号处理器为核心的PMAC2A-PC运动控制模块,伺服算法更新率达10 kHz,系统采样周期为5 ms。驱动器采用开关速度快、压降小的IGBT功率模块构成双路四相限全桥电路的GDS系列脉宽调制(PWM)系统,其驱动频率为16 kHz。将所设计的控制算法在实验装置上进行验证,对运动目标进行跟踪测试。



图3 光电跟踪转台装置

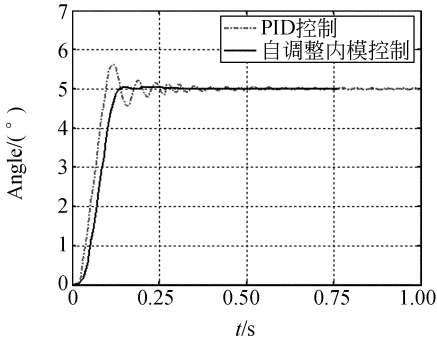
Fig. 3 Opto-electronic tracking turntable layout

实验一:控制系统动态性能测试实验

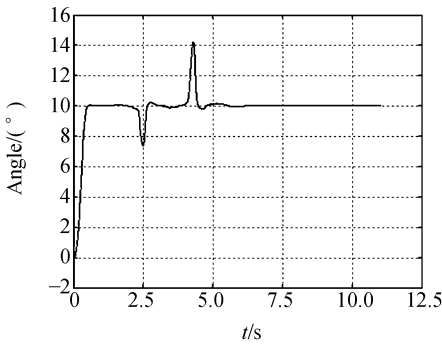
由自控原理频域分析理论可知^[11],为保证满意的过渡过程,要求系统相角裕度在 $45 \sim 70^\circ$,根据所推导的系统频域指标与控制器调节参数的关系式(14)、(15),在内模控制器设计中,取 $A_m = 3$, $\varphi_m = 64^\circ$,则 $\lambda_0 = 0.5\tau_m$ (其中 $\tau_m = 0.04$ s为电视脱靶量测量时滞时间),根据经验选择优化参数为加权系数 $a_1 = 2, a_2 = 1$,学习速率 $\eta = 0.28$,惯性系数 $\alpha = 0.04$ 。图4(a)为位置输入指令信号 $r(k) = 5^\circ$ 时,采用不同控制器时的阶跃响应曲线,可以看出,采用所设计的自调整内模控制相对PID控制虽然上升时间相对较长,但运动平稳,几乎无超调,故调整时间反而较短;图4(b)为随机加入外部干扰后,采用自调整内模控制的系统动态抗扰性能响应曲线,可以看出,该控制算法对于外部的突加干扰也显示出快速的抑制能力。

实验二:对机动目标进行跟踪性能测试实验

目标在满足系统要求的速度和加速度范围内随机运动,先通过操纵杆手动扫描摄像机视场来



(a) 阶跃响应性能
(a) Step responses



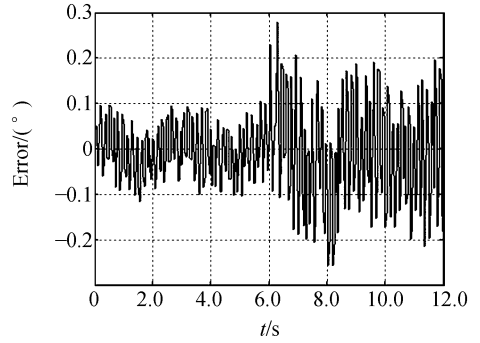
(b) 自调整 IMC 抗干扰性能
(b) Anti-jamming of SIMC

图 4 位置跟踪动态响应曲线

Fig. 4 Dynamic response of position tracking

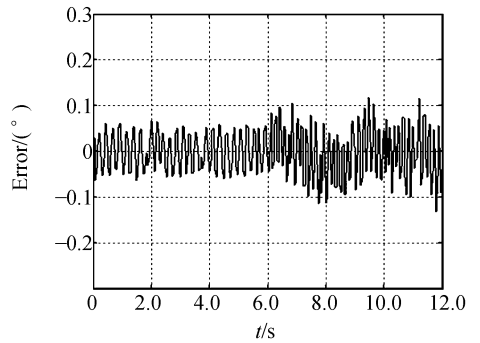
捕获目标,在发出锁定目标信号之后,系统进入电视图像自动跟踪模式,在 $t=6\text{ s}$ 时刻开始加入外部摇摆台正弦扰动信号(振幅 $A=8^\circ$ 、频率 $f=1.0\text{ Hz}$)。

当采用传统 PID 控制时,监视器内图像抖动相对较大,系统在方位和俯仰方向的跟踪误差曲线如图 5 所示,曲线波动变化较大,在无干扰时最

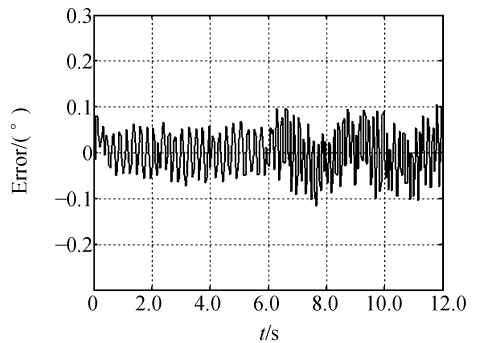


(b) 方位方向跟踪误差
(b) Tracking error in azimuth
图 5 PID 控制跟踪误差曲线

Fig. 5 Tracking error of PID



(a) 俯仰方向跟踪误差
(a) Tracking error in pitch

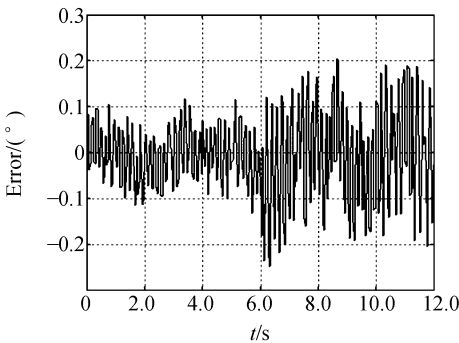


(b) 方位方向跟踪误差
(b) Tracking error in azimuth

图 6 自调整内模控制跟踪误差曲线

Fig. 6 Tracking error of self-tuning IMC

大跟踪误差在 0.1° 以内,而在加入外部摇摆台扰动时,其最大跟踪误差将近 0.3° ,统计其跟踪精度分别为 0.0947° 和 0.0992° ;采用所设计的鲁棒自调整内模控制器进行自动跟踪时,电视监视



(a) 俯仰方向跟踪误差
(a) Tracking error in pitch

器内目标图像始终能保持在波门中间,图像无明显抖动(图7),图6为在该控制方式下,系统在方位和俯仰方向的自动跟踪误差曲线,可以看出在无扰动时最大跟踪误差基本控制在 0.05° 以内,在加入外部摇摆台扰动时,其最大跟踪误差在 0.1° 以内,而且运动过程平稳,波动小,统计其跟踪精度分别为 0.0540° 和 $0.0558^\circ (<1\text{ mil})$ 。



图7 机动目标电视跟踪效果

Fig. 7 TV tracking results of maneuvering target

图7为采用上述方法对运动目标跟踪时,电视监视器中不同帧数的电视图像序列,每帧图像的大小为 $256\text{ pixel}\times 256\text{ pixel}$,跟踪波门窗口大小为 $64\text{ pixel}\times 64\text{ pixel}$ 。图像跟踪结果显示,目标在一定范围内进行随机运动时,电视跟踪系统能够始终将目标锁定在十字波门中间,实现了对目标的连续、稳定地跟踪。

5 结 论

针对光电跟踪系统中的测量时滞和模型不确定性特点,设计了一种鲁棒自调整内模控制算法。分析得出了模型失配情况下的系统鲁棒稳定条件以及参数的设计准则,采用基于二次型性能指标的优化方法在线自适应调整控制滤波器参数。实验结果显示,该方法易实现,参数调节简单,可使系统获得良好的跟踪特性,具有较高的跟踪精度($<1\text{ mil}$),有效地克服了时滞造成的影响,为高性能光电跟踪系统的控制提供了一种新方法。

参考文献:

- [1] STEVEN L C. Track loop bandwidth, sensor sample frequency, and track loop delays [C]. *SPIE Conference on Acquisition, Tracking and Pointing* Ⅻ, 1998, 3365: 69-76.
- [2] KICHUL H, KWANGHEE N. A load torque compensation scheme under the speed measurement delay[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998, 45(2): 283-290.
- [3] 李文军, 陈涛. 基于卡尔曼滤波器的等效复合控制技术[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 279-284.
LI W J, CHEN T. Equivalent combined control technique based on Kalman filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 279-284. (in Chinese)
- [4] 王连明, 葛文奇, 谢慕君. 采样频率、系统延迟对跟踪系统稳定性的影响[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(4): 369-372.
WANG L M, GE W Q, XIE M J. Influences of sample frequency and delays on tracking system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(4): 369-372. (in Chinese)
- [5] 王连明, 葛文奇, 李杰. 跟踪系统中跟踪器延迟的自适应预测补偿方法[J]. *光电工程*, 2002, 29(4): 13-16.
WANG L M, GE W Q, LI J. Adaptive prediction and compensation method for delay of tracker in tracking system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(4): 13-16. (in Chinese)
- [6] CARLOS E G, MANFRED M. Internal model control. 1. a unifying review and some new results[J]. *Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1982, 21(2): 308-323.
- [7] 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)
- [8] 赵志诚, 贾彦斌, 张井岗, 等. 光电跟踪系统内模控制器的设计[J]. *光电工程*, 2005, 32(1): 27-30.
ZHAO ZH CH, JIA Y B, ZHANG J G, *et al.*. Design of an internal model controller for the electro-optical tracking system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(1): 27-30. (in Chinese)
- [9] HO W K, LEE T H, HAN H P, *et al.*. Self-tun-

ing IMC-PID control with interval gain and phase margins assignment [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, 9(3):535-541.

- [10] KAYA I. Two-degree-of-freedom IMC structure and controller design for integrating processes based on gain and phase-margin specifications[J]. *IEEE Proceeding Control Theory and Application*, 2004, 151(4):481-487.
- [11] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 3版. 北京:国防工业出版社, 1994.
HU SH S. *Principle of Automatic Control (3rd Edition)*[M]. 3rd ed. Beijing: National Defense

Industry Press, 1994. (in Chinese)

- [12] WANG Q G, HANG C C, YANG X P. Single-loop controller design via IMC principles[J]. *Automatica*, 2001, 37(12):2041-2048.
- [13] IAN G H, JEFFERY R A, CHRISTOPHER J G. Improved filter design in internal model control [J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 1996, 35(10):3437-3441.
- [14] KAYA I. IMC based automatic tuning method for PID controllers in a Smith predictor configuration [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, 28(3):281-290.

作者简介:



姬 伟(1974—),男,四川绵阳人,工学博士,2002年于中国矿业大学获得硕士学位,2007年于东南大学获得博士学位,主要从事智能控制、精密光电跟踪伺服系统研究。E-mail: jwhxb@163.com



李 奇(1963—),男,江苏苏州人,教授,博士生导师,分别于1986年、1992年在东南大学获得硕士和博士学位,主要从事系统优化、智能控制和综合自动化等方面研究。E-mail: liqi@seu.edu.cn

许 波(1977—),女,江苏徐州人,博士研究生,主要从事电视跟踪图像处理、DSP控制技术研究。E-mail: xubo@ujs.edu.cn

赵德安(1956—)男,江苏常州人,教授,博士生导师,主要从事运动控制、机器人控制等方面研究。E-mail: dazhao@ujs.edu.cn