

文章编号: 1001-3806(2013)05-0651-05

新型二自由度 Smith 预估控制在 ATP 伺服系统中的应用

汪蓉蓉, 方安安*, 冯 庆

(南昌大学 信息工程学院, 南昌 330031)

摘要: 为了提高空间光通信的捕获、跟踪与瞄准系统的跟踪精度, 提出了一种新型二自由度 Smith 预估控制的实现方法。首先对捕获、跟踪与瞄准伺服系统和新型二自由度 Smith 预估控制系统进行结构分析, 然后通过讨论传递函数建立仿真模型, 利用 MATLAB 仿真软件进行仿真, 并与多种传统的比例-积分-微分(PID)控制系统进行比较。结果表明, 新型控制方法不但具有 Smith 预估器对时滞有效控制的优点, 更显现出不完全微分先行 PID 控制和比例-积分控制的良好匹配效果, 能够很好地解决纯时滞造成的不稳定性, 而且具有较好的鲁棒性和抗干扰性。

关键词: 光通信; ATP 伺服系统; 二自由度 Smith 预估控制; 鲁棒性; 抗干扰性

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.05.019

Application of novel two degree-of-freedom Smith predictive control in ATP servo systems

WANG Rong-rong, FANG An-an, FENG Qing

(College of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: In order to improve the tracking accuracy of acquisition, tracking, pointing(ATP) control system for space optical communication, a novel two degree-of-freedom Smith predictive control was presented. Firstly, the ATP servo control system and novel two degree-of-freedom Smith predictive control system were analyzed. Then the simulation model was established by discussing the transfer function. Simulation was carried out with MATLAB software. Finally, the obtained result was compared with that of some conventional proportion-integral-derivative(PID) controllers, and the anti-interference and robustness of the method were measured. The simulation results show that the novel control method not only has the advantage of Smith predictor delay effective control, but also show the good match effect of incomplete derivative forward PID control and proportion-integral(PI) control. This method is a good solution to the instability caused by pure time delay, it also has better robustness and immunity.

Key words: optical communication; ATP servo system; two degree-of-freedom Smith predictive control; robustness; anti-interference

引 言

空间光通信是以激光作为传输信息载体, 在空间实现数据传输的技术。它具有通信容量大、安全保密性好、实施控制灵活以及传输带宽高等特点, 已经得到很好的应用和研究^[1-2]。但是信号光束窄、通信传输距离长、加上外界环境等因素的影响, 就会使得伺服系统的控制技术面临很大的困难, 其关键技

术之一是捕获、跟踪与瞄准(acquisition, tracking, pointing, ATP)复合控制^[3]技术。复合控制系统包括粗、精跟踪控制回路, 而精跟踪控制是复合控制回路的关键, 则在 ATP 伺服系统中, 精跟踪回路上的控制技术是其关键难点之一。自适应 Smith 预估器可以很好地解决传统 Smith 预估器必须基于稳定的对象模型和模型匹配问题, 加上对扰动可以有效抑制的比例-积分-微分(proportion-integral-derivative, PID)控制, 而这里采用的是效果更好的不完全微分先行^[4]PID 控制和对定值跟踪可以很好控制的比例-积分(proportion-integral, PI)控制所组成的新型二自由度 Smith 预估控制, 这种新型的控制技术在 ATP 伺服系统中可以达到很好的控制精度。

作者简介: 汪蓉蓉(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信领域、控制技术。

* 通讯联系人。E-mail: 1583972375@qq.com

收稿日期: 2012-12-31; 收到修改稿日期: 2013-02-28

1 系统描述

ATP 伺服系统是光电机一体化的复合系统, ATP 复合跟踪控制系统的原理如图 1 所示。信标光进入伺服系统, 经过光学主线反射进入粗跟踪系统, 通过粗跟踪 CCD 将光信号转为电信号, 然后再进入粗跟踪控制器, 而粗跟踪控制器同时要接收光电编码器探测到的视轴的位置而转换成的信号, 且将这些信号转换成指令输入到 D/A 转换器中, D/A 转换器将得到的指令转换成模拟信号输入到电机中, 用来驱动光学天线转动, 这是粗跟踪过程, 主要用来实现捕获和粗跟踪。粗跟踪完成之后, 将信标光引入精跟踪视场, 通过精跟踪 CCD 将光信号转为电信号, 进入精跟踪控制器, 精跟踪控制器把信号转换成指令传输到 D/A 转换器来驱动压电陶瓷 (piezoelectric, PZT), 对快速倾斜镜 (fast steering mirror, FSM) 进行精校正完成精跟踪, 使得跟踪误差达到最小。

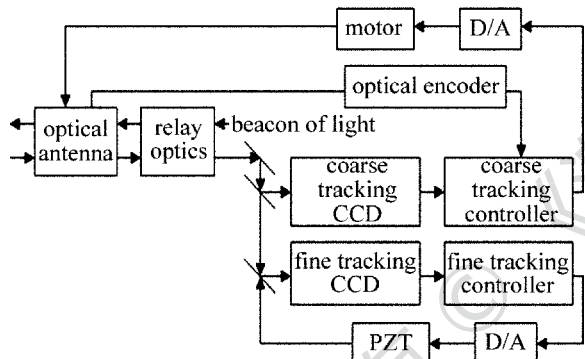


Fig. 1 Block diagram of ATP multiple control system

2 新型二自由度自适应 Smith 控制

Smith 预估器^[5]可以使得跟踪控制器提前工作, 加速调节的过程, 然而它必须依赖于准确的预估模型, 且具有鲁棒性^[6]和抗干扰性低的特点, 所以提出新的自适应 Smith 预估控制是非常有必要的。传统的控制器是用同一个控制器同时控制系统的定值响应和扰动误差, 但是控制器的设计很难满足对这两个性能折中的指标。不完全微分先行 PID 控制和 PI 控制都有很好的控制优点, 改进的控制器是将 PID 控制器与 PI 控制器组成二自由度控制器, PI 控制器是对 PID 控制进行性能补充, 不完全微分 PID 控制算法进行抑制扰动, PI 控制算法进行定值跟踪控制, 对重参量进行很好的配置, 就可对偏差进一步收敛, 所以, 采用新型二自由度自适应 Smith 预估控制可以达到很好的控制精度。

2.1 Smith 预估控制

改进的 Smith 预估器的结构图如图 2 所示, 虚线框内是对 Smith 控制实行自适应能力的结构, 可以很好地解决模型失配时的缺陷。其中 $E(s)$ 为控制误差, $C(s)$ 是 PID 控制器的传递函数, $U(s)$ 是控制误差经过 PID 控制器后的输出函数, $D(s)$ 是 PI 控制器的传递函数, $Y_p(s)$ 是输入信号依次进入 PID 控制器和 PI 控制器后输出的传递函数; $Y_j(s)$ 经过自适应控制后得到 $Y_j(s)$; $G_0(s)$ 是标称模型中不含滞后的部分, $G(s)e^{-\tau s}$ 是控制对象的传递函数, $e^{-\tau s}$ 表示对象纯滞后部分的传递函数, τ 为被控对象纯滞后时间; $G_f(s)$ 是主反馈通道上的传递函数, 相当于一个滤波器; $Y_n(s)$ 是被控对象经过 Smith 预估控制的输出函数, 再经过主反馈通道上滤波器的输出为 $Y_m(s)$, 输入信号经过 PID 控制器和标称模型后与 $Y_m(s)$ 进行叠加的传递函数为 $Y_e(s)$; $e^{-\tau_m s}$ 是反馈通道上部分网络延迟, 其中 τ_m 为网络延迟的纯滞后时间。

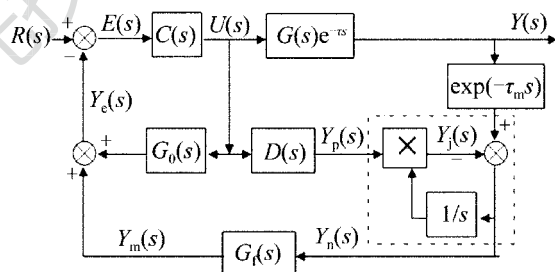


Fig. 2 Block diagram of novel two degree-of-freedom adaptive Smith forecast control

在一般的 Smith 预估控制中, 主反馈通道上的传递函数 $G_f(s) = 1$, 即 $Y_m(s) = Y_n(s)$ 。

从图 2 中可得:

$$\begin{cases} Y_n(s) = Y(s) \exp(-\tau_m s) - Y_j(s) \\ Y_j(s) = Y_n(s) \cdot \frac{1}{s} \cdot Y_p(s) \end{cases} \quad (1)$$

由(1)式可得:

$$Y_n(s) = \frac{Y(s) \exp(-\tau_m s)}{1 + \frac{1}{s} Y_p(s)} \quad (2)$$

在 τ_m 趋近于无穷大时, $Y_n(s)$ 趋近于 0。

同样从图 2 中可得:

$$\begin{cases} Y_e(s) = U(s)G_0(s) + Y_n(s) = U(s)G_0(s) \\ E(s) = R(s) - Y_e(s) \\ U(s) = E(s)C(s) \end{cases} \quad (3)$$

$$Y(s) = U(s)G(s)e^{-\tau s} \quad (4)$$

由(3)式可得:

$$U(s) = \frac{R(s)C(s)}{1 + G_0(s)C(s)} \quad (5)$$

由(4)式和(5)式可得:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)e^{-\tau s}}{1 + G_0(s)C(s)} \quad (6)$$

在(6)式中,当 $G_0(s) = G(s)$ 时,可以看出系统转化为开环 Smith 预估控制系统的等效模型。在控制对象延迟比较大时,自适应结构是主要的控制,但是在延迟相对较小时,通过在 Smith 预估器的主反馈通道上引一个惯性调节器,即滤波器进行延缓误差干扰速率;同样在暂态时自适应结构和不完全微分 PID 控制发挥主要作用,而在稳态时 PI 控制器和滤波器进一步控制微小的延迟而发挥主要的作用,其中滤波器中传递函数^[7]为 $1/(t_h s + 1)$ (t_h 为滤波器时间常数),有效地提高了系统的鲁棒性以及稳定性。这里的自适应结构改变了参量变化过大时的控制,同时 PID 控制采用不完全微分先行的 PID 控制更是对自适应结构的一种补充。

2.2 不完全微分先行 PID 神经元控制

神经网络算法^[8]能够很好地克服控制系统参量变化时所产生的干扰,而且针对传统的 PID 控制,微分信号的引入可以改善系统的动态特性,但是同时也可能会引进高频干扰,所以在误差扰动时显得微分项的缺陷,而不完全微分先行很好地解决了这一问题。不完全微分先行 PID 控制系统结构如图 3 所示,其中不完全微分系数 $\gamma = 0.1$ 。

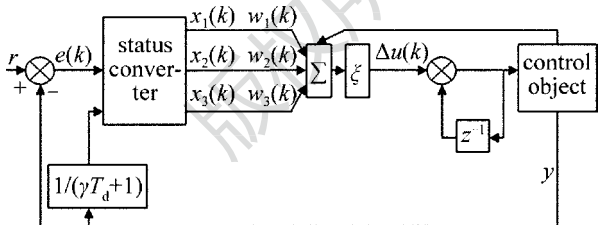


Fig. 3 Block diagram of incomplete derivative-forward PID control system

图 3 中, r 为给定值, y 为输出值, $x_1(k)$, $x_2(k)$, $x_3(k)$ 为不完全微分先行 PID 神经元控制器的输入, $e(k)$ 为控制器输入信号的偏差信号,其中 k 为采样序号, $\Delta u(k)$ 为第 k 次、 $k-1$ 次采样时刻输出值之差,图中差分方程满足:

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) - e(k-1) = \Delta e(k) \\ x_2(k) = e(k) \\ x_3(k) = y_1(k) - 2y_1(k-1) + y_1(k-2) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $w_1(k)$, $w_2(k)$, $w_3(k)$ 为对应于 $x_1(k)$, $x_2(k)$, $x_3(k)$ 的加权系数(其中 η_p , η_i , η_d 分别为比例、积分、微分的可调节的学习速率),则不完全微分先行 PID 神经元控制器(神经元采用增量型算法, ξ 为比例系数)第 k 次采样时刻输出值 $u(k)$ 为:

$$\begin{cases} w_1(k+1) = w_1(k) + \eta_p e(k) x_1(k) \\ w_2(k+1) = w_2(k) + \eta_i e(k) x_2(k) \\ w_3(k+1) = w_3(k) + \eta_d e(k) x_3(k) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + \xi \sum_{i=1}^3 w_i(k)' x_i(k) \\ w_i(k)' = \frac{w_i(k)}{\sum_{i=1}^3 w_i(k)} \end{cases} \quad (9)$$

微分时间常数 T_d 、采样周期 T 、神经元学习算法加权系数的关系满足:

$$T_d = \frac{w_3(k)}{w_1(k)} T \quad (10)$$

3 系统模型

ATP 复合控制系统是在粗跟踪的基础上引入精跟踪控制系统,粗跟踪系统由粗跟踪探测器和光电编码器得到的视轴误差来调节电机控制的光学天线以实现捕获和粗跟踪,并且将信号光引入精跟踪视场,由精跟踪探测器探测视轴误差,由精跟踪系统的精跟踪控制器对压电陶瓷驱动的快速倾斜镜进行精校正。由此可得 ATP 系统的系统结构图如图 4 所示。

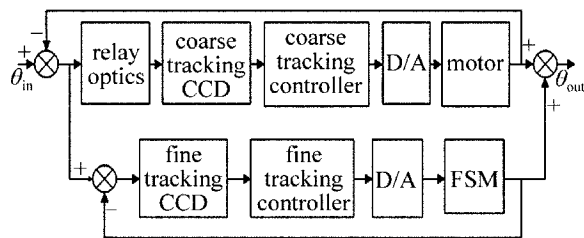


Fig. 4 Block diagram of ATP multiple control system

CCD 探测器是一个光敏图像传感器,可由几何传递函数和扩散传递函数组成,经过分析可以等效为一个比例和延迟环节,即 $k_{\text{CCD}} e^{-\tau s}$,其中粗、精跟踪回路 CCD 探测器的比例系数分别为 $k_{c,\text{CCD}}$, $k_{f,\text{CCD}}$;帧频取值分别为 118Hz 和 768Hz,则相应的传递函数 $G_{c,\text{CCD}}(s)$, $G_{f,\text{CCD}}(s)$ 可表示为:

$$G_{c,\text{CCD}}(s) = k_{c,\text{CCD}} \frac{-s + 236}{s + 236} \quad (11)$$

$$G_{f,\text{CCD}}(s) = k_{f,\text{CCD}} \frac{-s + 1536}{s + 1536} \quad (12)$$

D/A 转换器是一个比例环节,这里采用 16 位的 D/A 转换器,设置工作方式为单极性输出,信号传输范围为 0V ~ 10V。其传递函数可表示为:

$$H_{DA}(s) = k_{DA} = \frac{10}{2^{16}} = 0.000153 \quad (13)$$

粗跟踪控制对象为电机,电机的传递函数^[9]一般建立在输出转速相对于输入电压上的单输入单输出的线性系统,在电机的电气方程和机械方程基础上进行拉普拉斯变换,得到传递函数模型:

$$H(s) = \frac{1786}{0.0022s^2 + 0.17s + 1} \quad (14)$$

快速倾斜镜响应速率快、闭环带宽高,而且可通过调节快速倾斜镜的角度来稳定空间望远镜的光轴,所以建立参考模型以及传递函数至关重要。通过理论、实验建模的方法得到 1 阶传递函数模型,快速倾斜镜的传递函数 P_{FSM} 为:

$$P_{FSM}(s) = \frac{0.4}{0.0001592s + 1} \quad (15)$$

4 系统仿真

粗、精跟踪系统的控制精度要有较好的匹配^[10],而且由于粗跟踪的带宽一般小于 10Hz,而精跟踪的带宽达到几百至上千赫兹,加上粗跟踪本身的特性,系统对粗跟踪精度要求不高,对采用的控制技术影响不大,这里只采用校正器来进行补偿:采用 SISO 设计器,基于电机的传递函数,使用根轨迹和开环系统的波特图来观察补偿后的阶跃响应,从而进一步调整补偿器(电机)的零极点以及增益,即用数学模型来设计补偿去逼近输入输出。校正后的根轨迹和波特图如图 5 所示(这里限于篇幅,不列出校正后的阶跃响应图),得到校正器的传递函数为:

$$C(s) = 0.0016 \frac{1 + 0.024s}{1 + 0.032s} \quad (16)$$

对于精跟踪系统的控制对象压电陶瓷驱动的快速倾斜镜所存在的滞后^[11],采用上述的 Smith 预估控制。基于 ATP 复合控制系统的控制框图、各模型的传递函数进行仿真,模型匹配和模型失配在有脉冲干扰的条件下的阶跃响应^[12]曲线分别如图 6 所示,图 6 中可以看出简单的 PID 稳定性和动态性差,出现严重的超调和振荡,最大超调量为 50%,调节时间为 15s,同时抗干扰能力差;基于 Smith 预估的 PID 的稳定性和抗干扰能力有些提高,最大超调量为 23%,调节时间为 10s;分别由 PID 和不完全微分

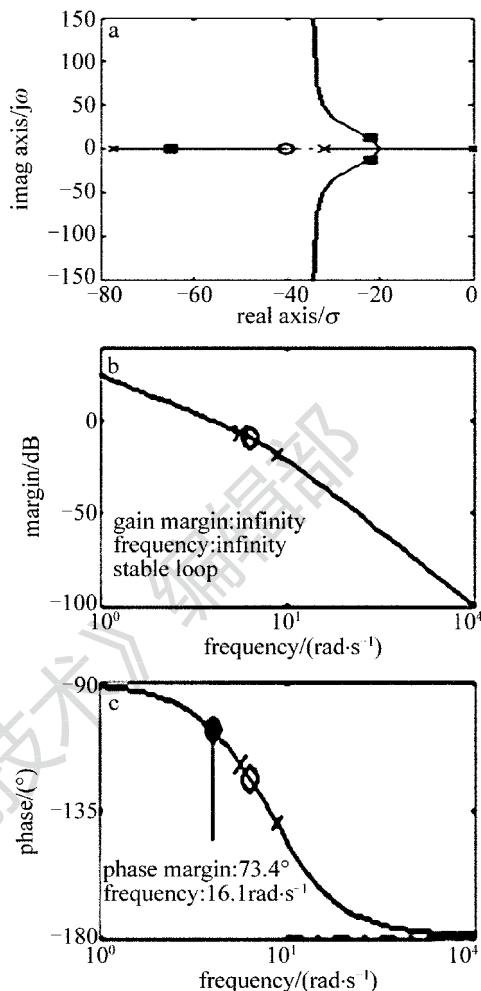


Fig. 5 Diagram of root locus, bode plots after correct

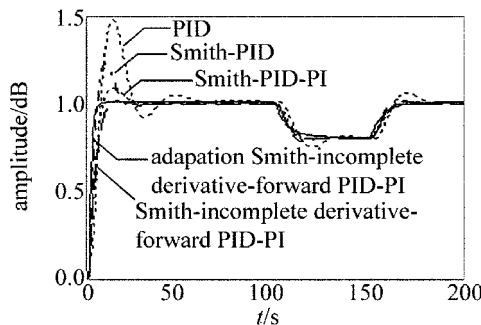


Fig. 6 Diagram of model match plus interference

先行 PID 组成的二自由度 Smith 控制的控制能力都有很好的改善;相比以上控制方法,由不完全微分先行 PID 组成的新型二自由度自适应 Smith 预估控制达到了最大超调量最小(为 1.28%)、调节时间值最短(为 4s)、抗干扰能力最强的优点。

模型失配在有脉冲干扰条件下的阶跃响应曲线如图 7 所示,从图 7 中可以看出 PID 控制超调时间大,最大超调量为 90%,调节时间为 18s,鲁棒性差;而基于 Smith 预估的 PID 控制性能有一些改善,但是超调量还是比较大,最大超调量为 40%,调节时

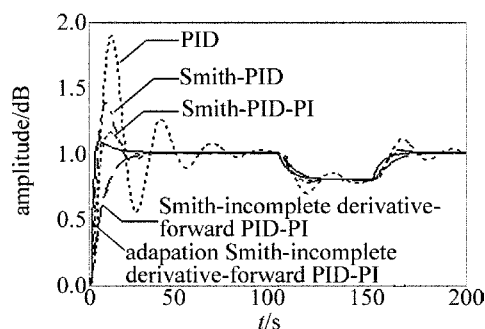


Fig. 7 Diagram of model mismatch plus interference

间为 12s;两种二自由度 Smith 预估控制效果相对于 Smith 预估的 PID 控制性能加强很多,但是相对新型的二自由度自适应 Smith 预估控制的最大超调量为 2.4%、调节时间值为 4s,抗干扰性还是比较差。

由上述可知,新型二自由度自适应 Smith 控制在 ATP 伺服系统中能达到很好的跟踪性能、抗干扰性以及鲁棒性

5 结论

通过介绍 ATP 伺服系统的结构,针对系统中不可避免的网络延迟、基于稳定对象、抗干扰性以及跟踪回路精度要求的不同,在系统中分别采用校正器和新型的二自由度 Smith 预估控制对 ATP 伺服系统的粗、精跟踪进行有效的控制,通过理论推导和仿真结果分析表明取得了很好的控制效果。

参 考 文 献

[1] PAN Y Zh, ZHANG J, HU G J, *et al.* Photonic crystal fiber and laser[J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 48-51(in Chinese).

[2] SUN A X, WANG J, HE H X. Testing precision analysis of centrobaric of laser facula[J]. Laser Technology, 2004, 28(6): 667-672(in Chinese).

[3] ZUO T, AI Y, HUANG H B, *et al.* Multiple control method of ATP system for space optical communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1): 107-111(in Chinese).

[4] ZHANG H T, ZHENG L. Simulation of networked control system based on smith compensator and single neuron incomplete differential forward PID [J]. Journal of Networks, 2012, 48(8): 243-245(in Chinese).

[5] CUENCA A, SALT J, CASANOVA V, *et al.* An approach based on an adaptive multi-rate smith predictor and gain scheduling for a networked control system: implementation over profibus-DP[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2010, 8(2): 473-481.

[6] LIN R Q, YANG F W, QIU G W. Realization of a class of neuron controller based on smith predictor[J]. Information and Control, 2004, 33(2): 137-140(in Chinese).

[7] AN L X, MA H M, LIU Y G, *et al.* A 2th order time delay system based on improved fuzzy smith predictor[J]. Computer Simulation, 2011, 28(1): 198-233(in Chinese).

[8] LI M, AI Y, CAO Y. Research of fine tracking servo system for FSO terminal[J]. Laser Technology, 2009, 33(3): 262-265(in Chinese).

[9] KANG K. Realization of digital PID DC motor speed control system based on the MATLAB[J]. Computer Knowledge and Technology, 2010, 6(22): 6372-6374(in Chinese).

[10] LUO T. Technology of acquisition, tracking in satellite laser communication [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004: 21-29 (in Chinese).

[11] FAN W, YU X F, XI L. Research on driving system and controlling means of PZT [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 6(22): 368-371 (in Chinese).

[12] HU L W, WANG Q Z, TENG D. Analysis for control methods based on time-delay object [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2010, 37(5): 23-25(in Chinese).