

目标速度预测在光电跟踪控制系统中的应用

黄永梅, 马佳光, 付承毓

(中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要:在光电跟踪设备的电视或红外自动跟踪系统中,引入目标的速度信息是提高跟踪精度的一种有效方法。为了得到目标的速度信息,设计了电视或红外脱靶量滞后时间的辨识方法以及目标速度预测的卡尔曼滤波方法,通过对电视或红外脱靶量信息同辨识出的脱靶量滞后时刻的仪器位置信息进行拟合,预测出被跟踪目标的速度信息,从而构成复合控制。仿真和实验结果表明,通过上述方法能够得出较为准确的目标速度信息,所构成的复合控制系统有效地提高了系统的跟踪精度。

关键词:卡尔曼滤波; 滞后时间辨识; 光电跟踪; 伺服控制系统

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)05-0477-05

Application of forecast of moving target velocity in electro-optical tracking control system

HUANG Yong-mei, MA Jia-guang, FU Cheng-yu

(Institute of Optic & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: Inputting the velocity of moving target to the automatic tracking system of TV or infrared is an effective method to improve the tracking accuracy in electro-optical theodolite. In order to obtain the velocity of moving target, the methods of identifying the delay time of TV or infrared off-target and Kalman filter are designed. Fitting the TV or IR off-target for the code position of electro-optical theodolite and forecasting the velocity of being tracked target can compose compound control system. The simulation and test results show that velocity of moving target can be forecasted by fitting the target-missing quantity for instrument position quantity using the methods and tracking precision can be improved in servo-control system.

Key words: Kalman filter; Identify the delay time; Electro-optical tracking; Servo-control system

0 引言

在光电经纬仪的伺服系统中,随着被跟踪目标运动速度的不断提高,控制系统输入信号的速度、加速

度也越来越快,要使仪器高精度地跟随目标运动,也就是减小跟踪控制系统的稳态误差,可在一般的反馈系统中采用高型别的控制系统,或者提高控制系统的开环增益。然而这两种方法都将影响系统的稳定性,降低系统的动态性能。当型别过高或开环增益过大

收稿日期:2003-11-02; 修订日期:2003-12-30

作者简介:黄永梅(1968-),女,四川内江人,副研究员,博士生,主要从事光电跟踪控制系统方面的研究。

时,甚至会使系统不稳定。因此采用一般的反馈校正系统,只能保证在一定的控制精度前提下,满足系统动态性能的要求,很难使经纬仪的伺服系统高精度地平稳跟踪快速飞行的目标。若要使伺服系统在不影响系统动态性能的前提下,提高跟踪精度,只能引进目标的速度和加速度顺馈信号,以构成复合控制系统,从而减轻反馈控制系统的负担,使伺服系统实现高精度地跟踪快速飞行目标的目的。在实际工作过程中,除了数字自动引导跟踪模式外(该工作模式的使用条件有限),伺服控制系统只能通过电视或红外传感器得到目标的脱靶量信息,而不能直接得到目标的速度和加速度信息,因此,对运动目标速度的准确预测,是关系到伺服控制系统能否实现高精度的复合控制,从而提高系统的跟踪精度,改善系统动态性能的关键。

1 运动目标速度预测方法

复合控制是一种按不变性原理进行控制的方式,即在反馈控制的基础上,引进输入信号的微分(一般为一阶、二阶微分)和偏差信号,同时对被控制对象进行控制,可使跟踪系统的精度大大提高(具体表现为速度误差和加速度误差的减小)。由复合控制技术原理可知^[1],若顺馈加入系统的速度或加速度信号有误差,非但不能对系统输入信号的误差进行补偿,反而给系统加入了一个扰动信号,这将会加大系统的跟踪误差,当扰动信号过大时,甚至会引起系统饱和,从而导致系统不稳定。因此实现复合控制的关键是必须知道系统输入信号准确的速度及加速度信息。若跟踪系统的输入信号是由外部引导设备(比如雷达系统)给出的,此时由输入的目标位置信号可得出运动目标的速度及加速度信息,在这种情形下采用复合控制技术进行跟踪控制可得到较高的跟踪精度。但在电视或红外自动跟踪过程中,伺服系统的输入信号只有运动目标的电视或红外脱靶量信息,不能得到目标的位置或速度信号,难以构成复合控制系统。此时,只有利用仪器的位置信息,通过将仪器的位置同目标脱靶量进行拟合,可得到目标的位置信息。由于脱靶

量存在一定的滞后量,该滞后量的不确定将会直接影响拟合出的目标位置和速度信号的精度。假设脱靶量的滞后量为 m 帧,则真实的目标位置和速度信息分别为:

$$\theta_T(n-m) = \theta_O(n-m) + \Delta\theta(n-m) \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_T(n-m) = \frac{\theta_T(n-m) - \theta_T(n-m-1)}{T} = \frac{\theta_O(n-m) - \theta_O(n-m-1) + \Delta\theta(n-m) - \Delta\theta(n-m-1)}{T} \quad (2)$$

式中 θ_T 和 $\dot{\theta}_T$ 分别为目标位置和速度信号; θ_O 为仪器位置信号; $\Delta\theta$ 为脱靶量信号; T 为采样周期。而拟合的目标位置和速度信号分别为:

$$\theta_C(n-m) = \theta_O(n-k) + \Delta\theta(n-m) \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_C(n-m) = \frac{\theta_O(n-k) - \theta_O(n-k-1) + \Delta\theta(n-m) - \Delta\theta(n-m-1)}{T} \quad (4)$$

由公式(2)和(4)可得:

$$\dot{\theta}_C(n-m) = \dot{\theta}_T(n-m) + \dot{\theta}_O(n-k) - \dot{\theta}_O(n-m) \quad (5)$$

由公式(5)可知,由于脱靶量的滞后量不确定,将最新得到的脱靶量信号 $\Delta\theta(n-m)$ 同某一时刻 k 的仪器位置进行拟合所得到的目标位置与真实的目标位置之间存着误差,该误差的大小同公式 k 时刻和 m 时刻的仪器的速度有关。因此,要得到真实的目标位置或速度信息,必须首先确定 k 值的大小。只有 $k=m$ 时,拟合的目标信息才最接近真实的目标信息。 k 可在实验中确定,根据 CCD 传感器的工作原理及处理系统的工作时序,一般有:

$$k \approx 2 \quad (6)$$

拟合出 $(n-m)$ 时刻的目标位置信号 $\theta_C(n-m)$ 后,利用卡尔曼预测滤波器^[2,3],可得到 n 时刻的目标位置信号 $\theta_C(n)$,从而进一步得到当前时刻目标的速度信号 $\dot{\theta}_C(n)$ 。

2 系统仿真

图 1 为复合控制框图,其中,目标速度预测回路

为顺馈回路,采用了目标位置拟合和卡尔曼预测滤波法,脱靶量自动跟踪回路为反馈回路,由速度回路和位置回路构成,采用频率特性校正法。

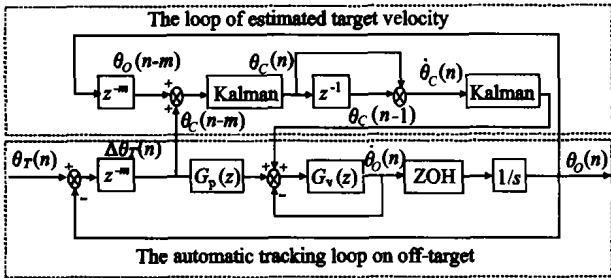


图 1 复合控制框图

Fig. 1 Block diagram for compound control system

设跟踪系统控制对象的传递函数为:

$$G_d(S) = \frac{4.52}{(s + 0.9)(s + 142.8)} \quad (7)$$

采用全数字控制方式,其中位置回路的采样频率为 50 Hz,速度回路的采样频率为 400 Hz。输入信号的最大速度和最大加速度分别为:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{\max} &= 60^\circ/s \\ \theta_{\max} &= 60^\circ/s^2 \end{aligned} \quad (8)$$

因此等效正弦信号为:

$$\theta = 60^\circ/\sin t \quad (9)$$

下面对纯反馈控制方式和复合控制方式进行仿真研究^[4,5]。

2.1 反馈控制方式

不加速度前馈信号,直接将脱靶量信息用于系统闭环控制,当输入信号为公式(9)时,跟踪误差曲线见图 2,其最大误差约为 15'。

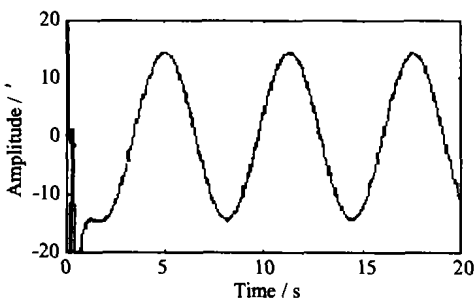


图 2 反馈控制系统误差曲线

Fig. 2 Error curve of feedback control system

2.2 复合控制方式

将公式(9)的一阶微分信号作为前馈信号加到速度回路的输入端,构成复合控制。跟踪误差曲线见图 3,其最大误差为 0.2'。

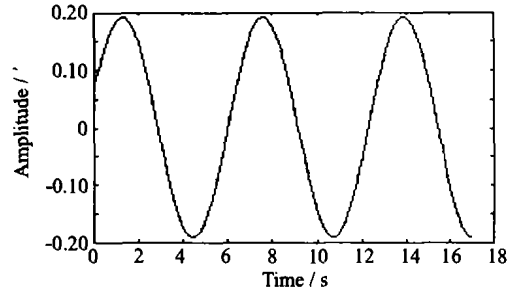


图 3 复合控制误差曲线图

Fig. 3 Error curve of compound control system

2.3 用运动目标速度预测方法^[6]

在仿真试验中,已知误差滞后量为 2 帧,即 $m = 2$,可直接将用于拟合的仪器位置信号的滞后设为 $k = 2$,即将 2 帧前的仪器位置信号 $\theta_0(n-2)$ 同最新得到的脱靶量 $\Delta\theta_T(n)$ 进行拟合得到 2 帧前的目标位置信号 $\theta_T(n-2)$;再通过卡尔曼滤波得到当前的目标速度信号 $\dot{\theta}_T(n)$,从而构成复合控制,极大地提高了原反馈系统的跟踪精度。其误差曲线如图 4 所示。

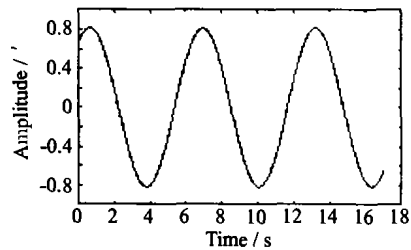


图 4 卡尔曼滤波对 $\Delta\theta_T[(n-2)T]$ 信号进行预测后的跟踪误差曲线

Fig. 4 Tracking error curve of Kalman filter for $\Delta\theta_T[(n-2)T]$

在实际的工程系统中,脱靶量的滞后量不一定为整数。在仿真试验中,当已确定 $m = 2$ 的情况下,也可将 k 设为其他值,以模仿当仪器位置信号的滞后量同误差滞后量之间有误差的情况下,所预测出的目标速度对系统的影响。按照同样的方法进行仿真,结果表明:当 $\Delta t = |k - m| \leq 0.3T$ 时,预测出的目标速度信号较为准确,所构成的复合控制能够提高原系统的

跟踪精度,否则系统将发散。

3 跟踪运动目标实验

3.1 脱靶量的滞后量辨识^[7]

实验用的图像传感器采用工作频率为 50 Hz 的电视 CCD 传感器,跟踪系统采用速度和位置双闭环结构的全数字控制方式,速度回路的采样频率为 400 Hz,位置回路的采样频率为 50 Hz。在该实验中,先辨识电视脱靶量相对于跟踪系统的滞后量。将仪器对准一固定目标,并记下编码器和脱靶量的数值 θ_{O_0} 和 $\Delta\theta_{T_0}$,则目标位置为: $\theta_{T_0} = \theta_{O_0} + \Delta\theta_{T_0}$,用手推动仪器,让目标在电视视场内运动,用 50 Hz 频率记录下电视脱靶量 $\Delta\theta_T(kT_1)$ ($k=1,2,\dots,n, T_1=0.02$ s),用 400 Hz 频率记录下仪器位置量 $\theta_O(lT_2)$ ($l=1,2,\dots,8n, T_2=0.0025$ s)。由于目标静止不动,因此记录下的电视脱靶量 $\Delta\theta_T(kT_1)$ 同某一相应时刻的仪器位置 $\theta_O(kT_1 - mT_2)$ 的和应为一恒定值, m 的大小即为脱靶量的滞后时间。下面将脱靶量同几个时刻的仪器位置进行拟合,公式(10)~(13)为拟合后的目标位置同原目标位置的差值表达式。

$$\Delta\theta_1 = \theta_O(kT_1) + \Delta\theta_T(kT_1) - (\theta_{O_0} + \Delta\theta_{T_0}) \quad (10)$$

$$\Delta\theta_{17} = \theta_O(kT_1 - 17T_2) + \Delta\theta_T(kT_1) - (\theta_{O_0} + \Delta\theta_{T_0}) \quad (11)$$

$$\Delta\theta_{21} = \theta_O(kT_1 - 21T_2) + \Delta\theta_T(kT_1) - (\theta_{O_0} + \Delta\theta_{T_0}) \quad (12)$$

$$\Delta\theta_{30} = \theta_O(kT_1 - 30T_2) + \Delta\theta_T(kT_1) - (\theta_{O_0} + \Delta\theta_{T_0}) \quad (13)$$

图 5~图 8 分别为公式(10)~(13)所表达的误差曲线。从图中可知,当 $m=21$ 时,拟合的目标位置与原始位置之间的误差最小,也就是说,电视脱靶量相对伺服系统的滞后时间约为:

$$\Delta T = 21 \times T_2 = 0.0525 \text{ s} \quad (14)$$

因此,较为准确的目标位置信号为:

$$\theta_T(kT_1 - 21T_2) = \theta_O(kT_1 - 21T_2) + \Delta\theta_T(kT_1) \quad (15)$$

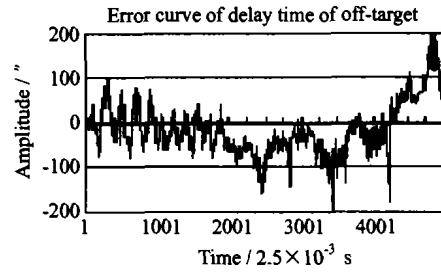


图 5 $m=0$ 时的误差曲线

Fig. 5 Error curve of $m=0$

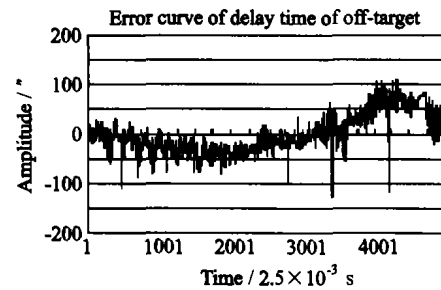


图 6 $m=17$ 时的误差曲线

Fig. 6 Error curve of $m=17$

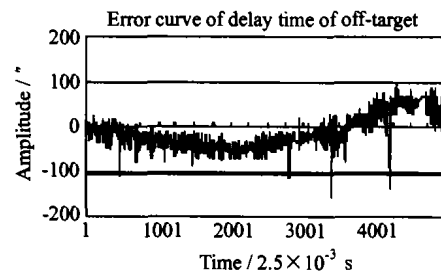


图 7 $m=21$ 时的误差曲线

Fig. 7 Error curve of $m=21$

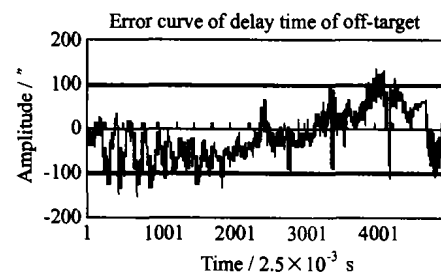


图 8 $m=30$ 时的误差曲线

Fig. 8 Error curve of $m=30$

3.2 实验结果

将跟踪转台对准一匀速旋转的靶标,跟踪转台根据电视 CCD 提供的脱靶量信号闭环跟踪靶标转动。当靶标的旋转速度为 $\dot{\theta} = 0.8$ rad/s 时,相当于仪器

的输入信号为: $\theta_T = 21.37^\circ \sin 0.6805t$ 。此时仅用电视脱靶量进行闭环跟踪, 所得的误差曲线如图 9、图 10 所示。

若将公式(15)拟和出的目标位置信号 $\theta_T(kT_1 - 21T_2)$ 进行卡尔曼预测速度滤波, 可得到较准确的当前速度信号 $\dot{\theta}_T(kT_1)$, 将该信号作为前馈信号引入速度回路, 同原反馈回路构成复合控制回路, 所得的误差曲线如图 11 和图 12 所示。

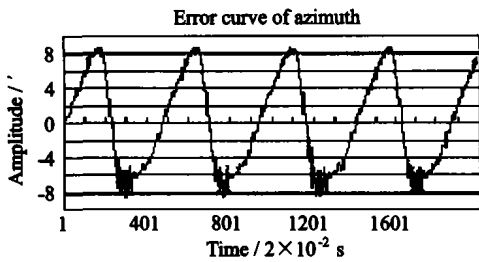


图 9 未加速度预测的方位误差曲线

Fig. 9 Azimuth error curve without inputting target velocity

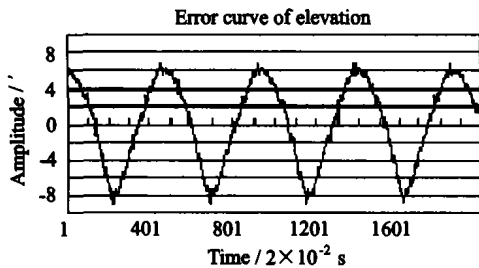


图 10 未加速度预测的俯仰误差曲线

Fig. 10 Elevation error curve without inputting target velocity

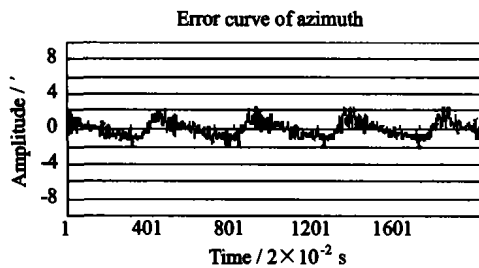


图 11 复合控制的方位误差曲线

Fig. 11 Azimuth error curve of compound control system

4 结束语

从以上仿真结果可知, 在伺服系统中引入较为准确的目标速度信号作为前馈信号, 能够极大地提高伺

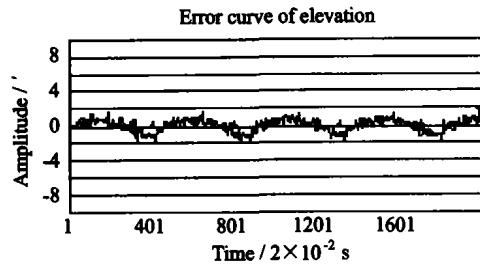


图 12 复合控制的俯仰误差曲线

Fig. 12 Elevation error curve of compound control system

服控制系统的跟踪精度, 若引入的目标速度信号不准确, 则系统发散。而光电经纬仪的伺服系统跟踪运动目标时, 无法得到被跟踪目标的速度或位置信号, 只有将目标的脱靶量同仪器的位置信号进行拟和才能得到目标位置信号的近似值。该拟和值同真实的目标位置之间的误差同电视或红外脱靶量的滞后时间的准确估计密切相关。电视或红外脱靶量的滞后时间估计得越准确, 所拟和出的目标位置信号越准确, 通过卡尔曼滤波所得到的当前目标的速度信号也越准确, 复合控制的跟踪精度就越高。实验证明, 通过离线辨识估计出的脱靶量的滞后时间的方法简单实用, 得到的滞后时间较为准确, 而卡尔曼预测滤波也能够拟和的目标位置信号的基础上预测出准确的目标速度信号。

参考文献:

- [1] 李友善. 自动控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [2] 徐宁寿. 随机信号估计与系统控制[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.
- [3] 刘利生. 外测数据事后处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [4] 徐昕, 李涛, 伯晓晨. Matlab 工具箱应用指南——控制工程篇[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [5] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析——MATLAB 语言应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [6] 黄永梅, 马佳光, 付承毓. 预测滤波技术在光电精微一种的应用仿真[J]. 光电工程, 2002, 2(9): 4-9.
- [7] 黄永梅, 马佳光, 付承毓. 光电经纬仪中传感器数据的滞后量分析及补偿[A]. 全国光电技术学术交流会议论文集[C]. 天津: 红外与激光工程编辑部, 2002. 615-618.