

文章编号 1004-924X(2006)02-0279-06

基于卡尔曼滤波器的等效复合控制技术研究

李文军^{1,2}, 陈 涛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: 等效复合控制技术是一种比较理想的高精度跟踪技术手段。阐述了复合控制及等效复合控制技术的基本原理, 分析了机动目标的随机加速度模型, 给出了卡尔曼滤波预测算法的实现过程, 并在假定目标满足随机加速度模型的基础上, 建立了基于卡尔曼预测滤波技术的光电经纬仪的等效复合控制系统。针对脱靶量滞后问题, 提出了一种人为将编码器延迟再和脱靶量合成, 而后采用卡尔曼滤波进行外推来克服该问题对系统影响的新方法。仿真结果表明, 所建立的等效复合控制系统, 可以对 $60^\circ \sin 0.573 t$ 的等效正弦目标达到 $0.2'$ 的跟踪精度, 相对于传统的速度滞后补偿方法, 精度提高了 10 倍。最后实验验证了等效复合控制系统的有效性。

关键词: 光电跟踪; 等效复合控制; 随机加速度模型; 卡尔曼滤波

中图分类号: V556 **文献标识码:** A

Equivalent combined control technique based on Kalman filter

LI Wen-jun^{1,2}, CHEN Tao¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China; 2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Equivalent combined control is an ideal tracking measure with high tracking precision. The basic principles of the combined control and equivalent combined control were described, the random acceleration model of maneuvering object was also analysed and how to realize the Kalman filtering was given in the paper. An equivalent combined control system was constructed on an optoelectronic theodolite based on Kalman filter by assuming the object maneuvers with random acceleration model. Aiming to the problem of delay of tracking error, a new method of predicting the right maneuvering parameter of object from the synthesized value of the tracking error and delayed encoder data was put forward to eliminate the effect of the problem. The results of simulation show that the equivalent combined control system has only $0.2'$ when tracking the equivalent sine object of $60^\circ \sin 0.573 t$, it is 10 times better than that of the traditional velocity delay method. In the end, the validity of the equivalent combined technique is testified by experiment.

Key words: photoelectric tracking; equivalent combined control; random acceleration model; Kalman filtering

1 引言

随着光电经纬仪应用范围的不断扩展,对其跟踪精度的要求也越来越高。目前工程上主要采用速度滞后补偿来提高跟踪精度,但是这种方法提高精度有限,越来越难以满足高精度跟踪的要求。因此寻找能够提高跟踪精度的新的控制方法成为当务之急,其中复合控制是一种比较理想的方法,也是今后技术发展的一个趋势。复合控制的优点是既能大幅度提高跟踪精度,同时还对系统稳定性没有影响。国内有些学者已经针对该技术做了很多探索,并取得了一定的成果,典型的如文献[9]中采用的将由编码器值计算出的速度量通过一校正环节馈入速度回路的方法和文献[10]中提出的基于 7.2 阶一步滤波预测方法的等效复合控制等,但是这些方法的结果尚不尽人意。本文探索了一种采用随机加速度模型和卡尔曼滤波预测技术构成等效复合控制系统的方法,同时对如何克服电视脱靶量滞后的问题也进行了相应的理论探讨,为国内同行进行相关研究及最终复合控制技术的工程实现提供了参考。

2 复合控制及等效复合控制技术的基本原理

复合控制系统是在闭环控制系统增加一开环支路,用以提供输入信号的导数。如图 1 所示。其中 $G_1(s)$ 为位置回路校正, $G_2(s)$ 为速度回路闭环传递函数, $G_f(s)$ 为前馈传递函数。

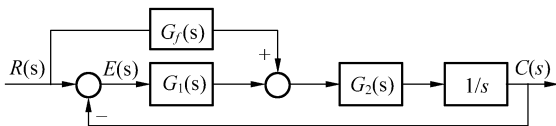


图 1 复合控制原理图

Fig. 1 Principle diagram of combined control system

在无前馈时,系统的闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)/s}{1+G_1(s)G_2(s)/s}, \quad (1)$$

加前馈以后的闭环传递函数为

$$\Phi_d(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{[G_1(s)+G_f(s)]G_2(s)/s}{1+G_1(s)G_2(s)/s}, \quad (2)$$

可见,前馈不影响系统闭环传递函数的特征方程,所以对系统的稳定性没有影响。

加前馈后系统的等效开环传递函数为:

$$G_{ad}(s) = \frac{C(s)}{E(s)} = \frac{\Phi(s)}{1-\Phi(s)}, \quad (3)$$

一般 $G_1(s)$ 为二阶双滞后超前校正,可表示为 $\frac{k_0(T_2s+1)(T_3s+1)}{(T_1s+1)(T_4s+1)}$, $G_2(s)$ 可用二阶振荡环节近似,表示为 $\frac{1}{(T_5s+1)(T_6s+1)}$ 。在无前馈时,系统的开环传递函数为

$$G_c(s) = \frac{k_0(T_2s+1)(T_3s+1)}{s(T_1s+1)(T_4s+1)(T_5s+1)(T_6s+1)}, \quad (4)$$

此时系统为一型系统,位置误差为零,速度误差为常数,加速度误差为无穷大。电视跟踪系统一般都采用一型系统。当采用速度前馈,即取 $G_f(s) = s$,代入式(1)、(2)得到系统的等效传递函数为:

$$G_{ad}(s) = \frac{T_1T_4s^3 + (k_0T_2T_3 + T_1 + T_4)s^2 + (k_0T_2 + k_0T_3 + 1)s + k_0}{s^2(T_5T_6s + T_5 + T_6)(T_1s + 1)(T_4s + 1)}, \quad (5)$$

此时系统变为二型系统,位置误差和速度误差都为零,加速度误差为常数。可见,速度前馈可以在不影响原系统稳定性的前提下提高系统的无差度,消除速度滞后误差,从而提高跟踪精度。由于红外、电视等跟踪系统只能提供目标与传感器视轴之间的偏差,即脱靶量,而无法给出目标的空间直角坐标信息,也就无法得到目标在直角坐标系内的实际运动速度及加速度,故直角坐标系中的复合控制无法实现。但是通过将仪器的角位置与脱靶量相加得到目标的空间角位置,可以求得目标的角速度作前馈,称为等效复合控制,如图 2 所示,即:

$$\theta_i = \theta_o + \Delta\theta, \quad (6)$$

$$\dot{\theta}_i = d(\theta_o + \Delta\theta)/dt. \quad (7)$$

但是这样做有两方面的问题,首先是探测器惰性及数据处理会造成延时,造成脱靶量和编码器的采样不同步问题;其次直接用微分求输入信号导数是不可以的,因为合成的信号附有随机干扰,直接微分后将更加严重,必须采用滤波预测技术对合成后的位置进行滤波并预测出目标的角速

度。常用的滤波方法有最小二乘法、 $\alpha\beta\gamma$ 滤波、维纳滤波及卡尔曼滤波,其中卡尔曼滤波精度最高,故本文采用了卡尔曼滤波的方法。

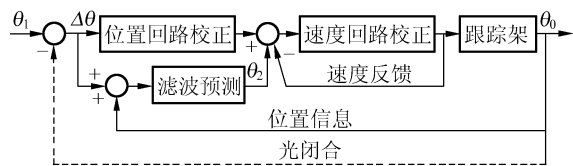


图2 等效复合控制原理图

Fig. 2 Principle diagram of equivalent combined control system

3 机动目标的随机加速度模型

随机加速度目标模型是在二阶导数多项式模型的基础上发展而来的,又叫辛格模型。该模型考虑到了空中目标的快速性和机动性,以及目标在大气中受到各种干扰而产生的无意识机动等客观事实,采用非确定性的模型来建立目标运动方程,即在等速直线运动的基础上,附加一个状态干扰,它使目标偏离等速运动的轨迹。这个状态干扰一般是随机的,它的统计特性可用一个衰减指数相关函数来表示。该模型假设目标加速度是一个随机变量,符合一阶马尔可夫过程。其状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = -\frac{1}{\tau_M}x_3 + J(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: τ_M —目标机动时间;

$J(t)$ —白噪声干扰

设 $J(t) = bu(t)$, 其中 $u(t)$ 为单位白噪声,且 $E[u(t)u^T(t+T)] = \delta(T)$, 则

$$E[J(t)J^T(t+T)] = b^2\delta(T), \quad (8)$$

令 $b^2 = 2\sigma_M^2/\tau_M$, 其中 σ_M 为加速度均方值, 则加速度的自相关函数为:

$$R_{x_3}(T) =$$

$$E[x_3(t)x_3(t+T)] = \frac{b^2\tau_M}{2}e^{-\frac{|T|}{\tau_M}} = \sigma_M^2e^{-\frac{|T|}{\tau_M}}, \quad (9)$$

可见,目标加速度的机动性可用 σ_M 和 τ_M 两个参数表示,其中 τ_M 决定着目标的机动频率,根据不同的目标可以取 3~20 s,这里取 $\tau_M = 15$ s。

求解状态方程(2)式,并设系统采样周期为 T ,得

到该模型的状态转移矩阵下:

$$\Phi_{k/k-1} = \begin{bmatrix} 1 & T & \alpha(T) \\ 0 & 1 & \beta(T) \\ 0 & 0 & \gamma(T) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中, $\gamma(T) = e^{-T/\tau_M}$, $\beta(T) = \tau_M[1 - \gamma(T)]$, $\alpha(T) = \tau_M^2[\gamma(T) + T/\tau_M - 1]$ 。可见,在该模型下,目标的状态转移矩阵只与 τ_M 有关,而与目标的随机加速度均方值 σ_M 无关。

4 卡尔曼滤波算法描述

4.1 坐标系及状态变量的选择

一般来说,在直角坐标系中处理目标的位置、速度和加速度会得到最佳的滤波效果,但光电经纬仪的测量是在极坐标下完成的,只能提供目标的方位角和高低角,无法提供距离信息,故无法完成坐标的转换,从而无法实现直角坐标系中的滤波。采用极坐标系,输入参数直接在该坐标系测量,不必进行坐标转换,故本文采用极坐标系进行滤波预测。

选取目标角位置 θ 、角速度 $\dot{\theta}$ 及角加速度 $\ddot{\theta}$ 作为状态变量,即:

$$X(k) = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [\theta(k) \quad \dot{\theta}(k) \quad \ddot{\theta}(k)]^T, \quad (11)$$

4.2 卡尔曼滤波算法的实现

由式(10)得到系统的状态方程为:

$$X_K = \Phi_{K/K-1}X_{k-1} + \Gamma_{k-1}W_{k-1}, \quad (12)$$

式中 W_{k-1} 代表 t_{k-1} 时刻的系统噪声, $\Gamma_{k-1} = [\alpha \quad \beta \quad \gamma]^T$, 为系统噪声转移矩阵。设 $\{W_K\}$ 为白噪声序列, $E(W_k) = 0$, 且有:

$$E[W_k W_j^T] = Q_k \delta_{kj}, \quad (13)$$

式中 Q_k 为系统误差阵。

$$\delta_{kj} = \begin{cases} 1 & (k=j) \\ 0 & (k \neq j) \end{cases}, \quad (14)$$

跟踪系统的测量方程为:

$$Z_k = H_k X_k + V_k, \quad (15)$$

$$E[V_k V_j^T] = R_k \delta_{kj}, \quad (16)$$

其中 $H_k = [1 \ 0 \ 0]^T$, V_k 为测量噪声, $E[V_k] = 0$ 。由状态方程(12)和测量方程(15),可得到卡尔曼滤波公式系:

$$\hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \hat{X}_{k-1/k-1}, \quad (17)$$

$$\hat{X}_{k/k} = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1}), \quad (18)$$

$$P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} P_{k-1/k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T, \quad (19)$$

$$P_{k/k} = (I - K_k H_k) P_{k/k-1}, \quad (20)$$

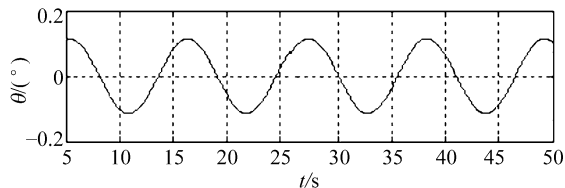


图 4 卡尔曼滤波器对等效正弦目标的速度预测误差曲线

Fig. 4 Velocity predicting error curve of Kalman filter to equivalent sine object

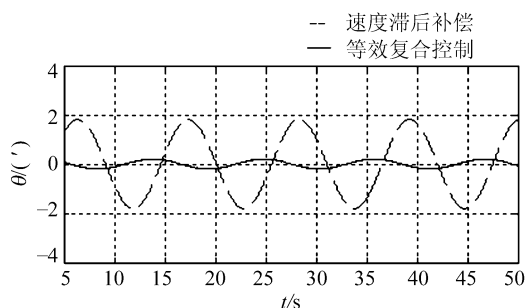


图 5 等效复合控制和速度滞后补偿对等效正弦目标的跟踪精度对比

Fig. 5 Tracking precision contrast between the equivalent combined control and velocity delay compensation to equivalent sine object

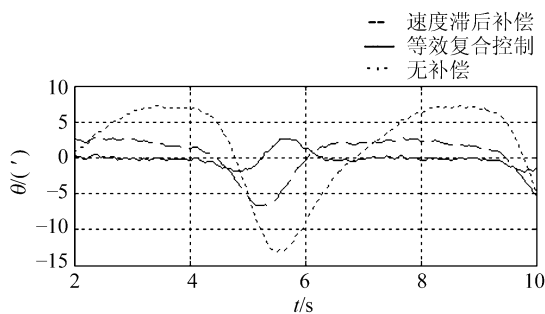


图 6 光学动态靶标实验结果对比

Fig. 6 Contrast of experiment results for optical dynamic target

5.2', 而采用等效复合控制后,系统的最大跟踪误差仅为 2.7', 等效复合控制技术明显提高了系统的跟踪精度。图 7 是等效复合控制系统对该动态靶标的仿真精度, 试验结果与图 7 中 2.1' 的仿真精度接近。

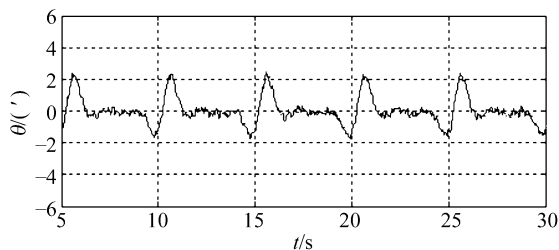


图 7 等效复合控制系统对光学动态靶标的理论跟踪精度

Fig. 7 Theoretical tracking precision of equivalent combined control system to optical dynamic target

7 结 论

等效复合控制的目的是实现近似复合控制, 因此对目标速度量估计的准确度是其关键。只要速度量估计得准确, 跟踪精度就高。采用常增益的卡尔曼滤波器, 通过适当选择卡尔曼滤波器的带宽, 同时选择恰当的目标运动模型, 可以实现对快速等效正弦目标速度量预测精度达到 $0.1^\circ/\text{s}$ 左右, 在这样的预测精度下, 理论上可以达到对快速等效正弦目标的跟踪误差小于 $1'$ 。在实际应用中, 如何克服电视脱靶量滞后对系统的影响是一个决定等效复合控制技术成败的关键因素。在编码器和电视之间加同步采样信号, 可消除两者提供的数据在时间上的随机性, 对克服电视脱靶量滞后对系统的影响至关重要。通过本文的分析还说明, 采用随机加速度模型来描述等效正弦目标的机动性, 对其速度量来说是可以接受的。

参考文献:

- [1] 胡寿松. 自动控制原理(第三版)[M]. 国防工业出版社, 1994.
HU SH S. *Principle of automatic control (the third edition)*[M]. National Defense Industrial Publishing Company, 1994. (in Chinese)
- [2] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪[M]. 国防工业出版社, 1991.
ZHOU H R, JING ZH L, WANG P D. *Tracking of maneuvering target*[M]. National Defense Industrial Publish-

- ing Company, 1991. (in Chinese)
- [3] CHAN Y T, PLANT J B, BOTLLOMLEY J R T, A Kalman tracking with a simple input estimator[J]. *IEEE Trans on AES*, 1982, 18(2): 235-241.
- [4] CHAN Y T, HU A G C, PLANT J B. A Kalman filter based tracking scheme with input estimation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1979, 237-244, AES-15.
- [5] 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. *光学工程*. 1989, 3: 1-42.
MA J G. Basic technologies of the acquisition, tracking and pointing systems[J]. *Optic Engineering*. 1989, 3: 1-42. (in Chinese)
- [6] 杨秀华, 吉桐伯, 陈涛. 卡尔曼滤波器在光电经纬仪中的应用[J]. *测试技术学报*, 2003, (4): 324-328.
YANG X H, JI T B, CHEN T. Application of Kalman filter on optoelectronic theodolite. [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2003, (4): 324-328. (in Chinese)
- [7] MANCINI D. Italian National Galileo Telescope(TNG) control system; hardware, software and methods adopted to improve the performance of the fully digital drive system[J]. *SPIE*, 1995, 2479: 245-252.
- [8] MANCINI D. The Galileo National Telescope(TNG) drive system components methods and performance[J]. *SPIE*, 1994, 2199: 352-363.
- [9] 黄永梅, 傅承毓, 尹义林. 光电经纬仪中的等效复合控制技术[J]. *光电工程*. 1998, 25: 116-120.
HUANG Y M, FU CH Y, YIN Y L. An equivalent combined control technique for photoelectric theodolite[J]. *Photoelectric Engineering*. 1998, 25: 116-120. (in Chinese)
- [10] 马佳光. 复合控制及等效复合控制原理及应用[J]. *光学工程*. 1988, 15(5): 1-16.
MA J G. Principle and application of combined control and equivalent combined control[J]. *Optic Engineering*. 1988, 15(5): 1-16. (in Chinese)
- [11] 刘利生, 主编. 外弹道测量数据处理[M]. 国防工业出版社, 2002.
LIU L SH. *Data processing of outer ballistic trajectory*[M]. National Defense Industrial Publishing Company, 2002. (in Chinese)
- [12] 王建立. 光电经纬仪电视跟踪伺服系统捕获跟踪快速运动目标技术的研究[D]. 长春光机所博士论文. 2002.
WANG J L. *Study on TV tracking system of O-E theodolite to track and acquire fast moving targets*[D]. Ph. D. thesis, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. March, 2002. (in Chinese)
- [13] 王毅. 260A 激光电视电影经纬仪跟踪伺服系统的工程研制[J]. *光学 精密工程*, 1993, 1: 37-46
WANG Y. Research and manufacturing of the servo system of the 260A theodolite with TV, laser and film[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1993, 1: 37-46. (in Chinese)

作者简介:李文军(1978—),男,2000年3月毕业于吉林大学动力机械与工程系,获硕士学位,现为中科院长春光机所博士生,主要研究方向为伺服控制及数字信号处理技术。