

基于速度建模前馈控制方法的研究

The research on forward feedback control based on speed model building

(中国人民解放军空军航空大学) 李万青 金延中

LI Wan-qing JIN Yan-zhong

摘要: 常采用的双闭环控制方法无法解决动机座下的光电跟踪设备其跟踪精度与稳定性的矛盾,而导致跟踪失败。本文对平台罗经角度数据进行速度数学建模,首先通过有限记忆最小二乘滤波得到速度的平滑数据;再进行动机座下的坐标变换和视轴校正;最后将平滑的速度数据通过复合控制前馈到速度回路;试验表明:提高了精度了同时,保证系统的稳定性,其有效隔离度为 13.06,大大提高了设备的跟踪性能。

关键词: 速度建模; 前馈控制; 隔离度

中图分类号: TP316.2 **文献标识码:** A

Abstract: It does not resolve the contradiction of tracking precision and the stability under the optoelectronic tracking system by using the method of double closed loop, and that it leads to tracking failure. First the smooth speed data are get with Limited Memory Least Square filter; then the coordinate transformation and the LOS revising are carried through under the dynamic platform; the end the smooth data are entranced the speed loop by compound control. examination indicated that it improves precision, ensures stability of system, the isolation degree is 13.06dB. The methods enhance the tracking precision of the optoelectronic tracking system.

Key words: speed model; forward feedback; isolation degree

1 引言

在一般的闭环控制系统中,提高精度必须提高增益或增加积分环节以提高无静差度。但提高增益会增大系统带宽,受到机械性能和传感器采样频率的限制,带宽不能随意增大。增加积分环节将影响甚至破坏系统的稳定性。因此,必须探求提高光电设备伺服系统跟踪快速运动目标精度的新方法。

前馈控制是在闭环控制系统增加一开环控制支路,用来提供输入信号的一阶、二阶导数,使系统无静差度提高,较好地解决了精度与稳定性之间的矛盾问题。本文对平台罗经角度数据进行速度数学建模,首先通过有限记忆最小二乘滤波得到速度的平滑数据;再进行动机座下的坐标变换和视轴校正;最后将平滑的速度数据通过复合控制前馈到速度回路;试验表明:提高了精度了同时,保证系统的稳定性,其有效隔离度为 13.06。大大提高了设备的跟踪性能。

2 速度建模的前馈控制原理

前馈控制方法最主要的是如何得到低噪声的速度数据,因此速度滤波建模是关键。

2.1 有限记忆的最小二乘滤波

由于累加格式的最小二乘滤波需要记忆大量的测量数据,计算量相当繁杂,而且采用较长的观察时间,则必然会使滤波计算对目标的机动反映迟钝,造成系统误差。因此实际工程应用中常用到递推格式的最小二乘滤波。

二阶系统即目标做等加速度运动时的滤波公式

$$\begin{cases} \hat{x}_s = (\hat{x}_{s/s-1}) + \frac{3(3n^2 - 3n + 2)}{n(n+1)(n+2)} [z_s - \hat{x}_{s/s-1}] \\ \hat{\dot{x}}_s = \hat{\dot{x}}_{s/s-1} + \frac{18(2n-1)}{n(n+1)(n+2)\Delta t} [z_s - \hat{x}_{s/s-1}] \\ \hat{\ddot{x}}_s = \hat{\ddot{x}}_{s-1} + \frac{60}{n(n+1)(n+2)\Delta t^2} [z_s - \hat{x}_{s/s-1}] \end{cases}$$

式中的 $\hat{x}_{s/s-1} = \hat{x}_{s-1} + \Delta t \hat{\dot{x}}_{s-1} + \frac{\Delta t^2}{2} \hat{\ddot{x}}_{s-1}$ 表示在 t_{s-1} 时刻未接受新的测量值 z_s 前,只根据目标运动规律对 t_s 时刻的位置预测。

$\hat{\dot{x}}_{s/s-1} = \hat{\dot{x}}_{s-1} + \Delta t \hat{\ddot{x}}_{s-1}$, 它表示在 t_s 时刻的速度预测。而 $\hat{\ddot{x}}_{s-1}$ 可以认为它就是对加速度的预测,因为滤波建模是根据二阶系统得到的,所以无法做进一步的预测了。

令 $K_s = \begin{bmatrix} \frac{3(3n^2 - 3n + 2)}{n(n+1)(n+2)} & \frac{18(2n-1)}{n(n+1)(n+2)\Delta t} & \frac{60}{n(n+1)(n+2)\Delta t^2} \end{bmatrix}$ 为观测方程的增益矩阵。

k_1 、 k_2 、 k_3 为观测方程增益矩阵的三个增益系数。

当 n 增大一定数值以后,在计算增益时,所使用的 n 值不再增加,避免了由于 $\lim_{n \rightarrow \infty} k_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} k_2 = \lim_{n \rightarrow \infty} k_3 = 0$, 新的测量值 z_s 在滤波计算中不起作用,滤波值只能依靠假设的目标运动规律自动的外推,这样会导致的滤波计算与实际情况的偏差变的“发散”,因此采用有限记忆处理,即对采样数据 n 做必要的合理处理,它的选取可以根据滤波效果来定,本文采用 20。

2.2 动机座下的坐标变换和视轴校正

H 为俯摇、P 为纵摇、R 为横摇转角数据,选择先俯摇再纵摇最后横摇的转换策略,分别在各个摇摆轴以及摇摆面建立投影关系得到大地直角坐标系-动机座直角坐标系的速度矩阵变换:

$$\begin{bmatrix} \omega_{xc} \\ \omega_{yc} \\ \omega_{zc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -\sin P \\ -\cos P \cos R & \sin R & 0 \\ \cos P \sin R & \cos R & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_H \\ \omega_P \\ \omega_R \end{bmatrix}$$

ω_H 、 ω_P 、 ω_R 分别为大地直角坐标系下的俯摇、纵摇、横摇速度, ω_{xc} 、 ω_{yc} 、 ω_{zc} 分别为转换后的动机座系下的三维角度信息。

最后需要将动机座下三维角度信息进行视轴校正,转换到

方位和水平轴上。

$$\begin{cases} E_{cr} = -(\omega_r \cos R + \omega_H \cos P \sin R) \cos Ac + (\omega_r - \omega_H \sin P) \sin Ac \\ A_r = \omega_r \sin R - \omega_H \cos P \cos R - \tan Ec[(\omega_r - \omega_H \sin P) \cos Ac + \omega_r \cos R + \omega_H \cos P \sin R] \sin Ac \end{cases}$$

Ac 、 Ec 为方位和俯仰的目标角度信息。

2.3 前馈控制的实现

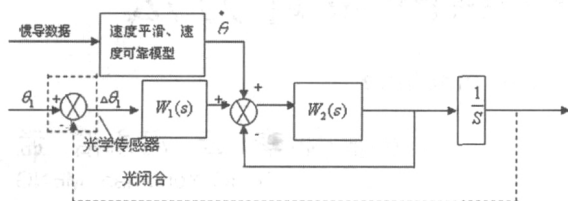


图1 前馈控制图

$\dot{\theta}$ 为惯导数据经过速度模型及坐标变换后的视轴极坐标速度数据。 $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ 为位置和速度调节器。

速度回路多采用滞后超前校正，滞后校正利用滞后校正环节幅频特性的高频衰减特性使系统的剪切频率前移，保证稳定精度；超前校正利用其超前相位增加相角裕度，改善系统稳定性。

3 实验与分析

分别采用加了速度滤波模型的前馈算法以及未加前馈控制的方法进行试验效果分析。

3.1 滤波效果分析

将惯导数据采用有限为 20 的记忆处理方式。采样实际横摇角度、纵摇角度、艏摇角度值、数据大小为 1000 个点，采样周期为 16Hz，预测、滤波得到速度值与真值进行差分后进行比较。可以看出滤除了大部分噪声和杂波，提高了观测采样数据的信噪比。

纵摇的速度滤波幅值在 ± 0.75 度/秒内波动，真值速度噪声在滤波速度曲线以 ± 0.15 度/秒范围内波动叠加。通过滤波将信噪比从 5 提高到了 75，为视轴的复合校正提供了较高精度的纵摇速度信号。见图 2 纵摇滤波图。

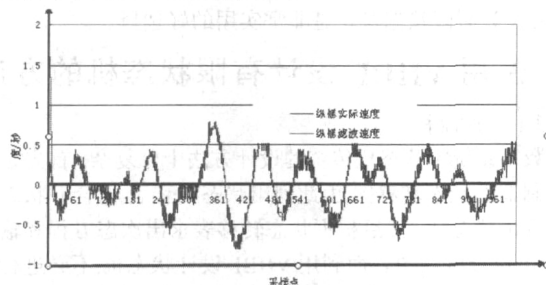


图2 纵摇滤波图

3.2 动机座光电跟踪误差及有效隔离度分析

从图 3 跟踪效果图可以看出方位系统误差： $m=0.1441$ 度，跟踪精度波动范围在 0 到 0.3 度是经过速度模型滤波以及视轴复合校正后的误差曲线。跟踪精度波动范围在 0.12 到 0.65 度是未加前馈的视轴校正后的误差曲线。

当捕获跟踪时，视场 0.88 度，采样周期为 62.5ms，从未加前馈的跟踪误差曲线看出目标于跟踪 16.3s 后从方位丢失。

系统有效隔离度定义为： $E_{\text{mai}} = 20 \lg(\frac{e_2}{e_1})$ ，其中 e_2 和 e_1 分别取反馈控制和通过速度建模视轴校正的复合控制最大有效跟踪误差值。加前馈的复合控制在复杂级别摇摆角下不仅能稳定跟踪目标而且提高了精度，隔离了动机座摇摆对系统的影响。其中 e_2 取 0.63 度、 e_1 取 0.14 度，可以计算出有效隔离度为 13.06dB。

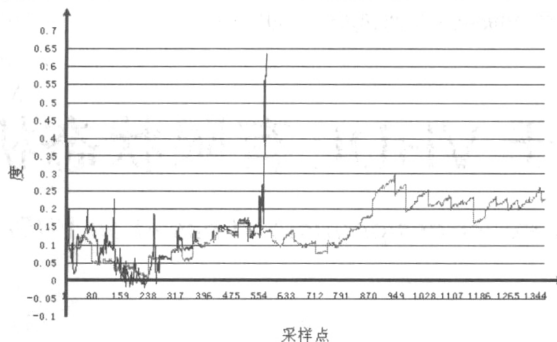


图3 跟踪效果图

4 结论

本文的创新处在于对角度数据进行速度建模，滤波后的数据进行坐标变换及视轴校正，为最后复合控制提供信噪比较高速度信息。在等效 4 级海况下隔离了动机座摇摆对光电跟踪系统的干扰。本文论述的方法大大提高了动机座光电设备跟踪性能和抗干扰能力，数据分析表明恶劣、复杂摇摆下反馈控制不能稳定跟踪，而采用速度建模的视轴校正前馈控制不仅能实现稳定跟踪，而且其有效隔离度也达到 13.06dB。本文的分析内容和分析方法也适用于船载、机载或空间光电跟踪系统。

参考文献

- [1] 黄永梅, 马佳光, 傅承毓. 预测滤波技术在光电经纬仪中的应用[J]. 光电工程, 2002, 29(4): 5-9.
- [2] 金光, 王家琪, 倪伟. 利用坐标变换推导经纬仪三轴误差[J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 89-94.
- [3] 王秋平, 陈娟, 王显利, 等. 电视跟踪系统的复合控制延迟卡尔曼滤波算法[J]. 测试技术学报, 2008, 32(7): 11-14.
- [4] 戴铁, 屈卫东. 单神经元 PID 算法在倒立摆控制系统中的应用[J]. 微计算机信息, 2009, 1(3): 3-5.
- [5] 张琨, 桂卫华. 基于转速补偿的异步电机直接转矩控制[J]. 微计算机信息, 2009, 1(10): 10-11.

作者简介: 李万青(1981-), 男(汉族), 山东省青州市人, 中国人民解放军空军航空大学航空理论系机械教研室, 硕士, 主要从事机械制造、伺服控制研究。

Biography: LI Wan-qing(1981-), male(Han) QingZhou Shandong Province, Aviation University of the Chinese People's Liberation Army Air Force, Mechanical staff Room, master, Major in mechanism manufacture and servo control.

(130000 吉林长春 中国人民解放军空军航空大学) 李万青 金延中

(Aviation University of the Chinese People's Liberation Army Air Force, Changchun, Jilin 130000, China) LI Wan-qing JIN Yan-zhong

通讯地址: (130000 吉林 中国人民解放军空军航空大学) 李万青
(收稿日期: 2009.06.04)(修稿日期: 2009.09.04)

微计算机信息 杂志 旬刊

每册定价: 10 元 一年订价: 360 元

地址: 北京市海淀区中关村南大街乙 12 号天作 1 号楼 B 座 812 室 微计算机信息 邮编: 100081
电话: 010-62132436 010-82168297(T/F)