

经纬仪伺服系统快速捕获方法研究

葛 兵^{1,2}, 高慧斌², 张淑梅², 余 毅²

(1. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要:近年来,随着靶场测试目标速度的提高和设备自动化程度的提高,对光电经纬仪电视跟踪伺服系统的跟踪和捕获快速运动目标的能力提出了越来越高的要求。本文分析了通过增加系统带宽方法提高快速捕获跟踪能力的局限性,提出了采用多模控制和速度引导的方法来提高捕获能力和保证稳定精度的方法。通过仿真分析和实验验证,验证了该方法的可行性。

关键词:经纬仪;伺服系统;捕获跟踪

中图分类号:TH761.1

文献标识码:A

DOI: 10.3788/OMEI20112812.0041

Research on Fast Acquisition of Servo-control System

GE Bing^{1,2}, GAO Hui-bin², ZHANG Shu-mei², YU Yi²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract:The high capability of O-E theodolite to track and acquire fast moving targets is required these years because of the rapid advancement of tested targets and automatization of equipments. This paper analysed the limitation of the traditional method by increasing the frequency width. The new theories of multi model control and velocity leading are presented to improve the stabilization precision and the track capability. It is proved efficiently in the simulation and experiment.

Keywords: theodolite; servo-control system; fast acquisition

*基金项目: 国家863高技术研究发展计划资助项目 (2008AA0047)

1 引言

随着靶场测试目标速度的提高和设备自动化程度的发展,跟踪目标速度越来越高,产生了较大的角速度、角加速度和更大的加加速度,快速目标使动态跟踪误差急剧增大,这就对光电经纬仪的跟踪伺服系统快速性和捕获目标的能力要求越来越高。特别在经纬仪静止目标穿越视场时,目标相对于经纬仪的速度和加速度很大,由于传感器视场有限,尤其是对应没有大视场传感器的情况下,目标在视场中停留时间很短,所以发现目标后,要求经纬仪跟踪系统快速做出反应,快速过渡到稳定跟踪目标状态,这个由发现目标到转入稳定跟踪的过渡过程称为捕获跟踪^[1]。捕获跟踪是光电经纬仪进行跟踪测量的前提,捕获跟踪的过渡过程时间越短越好。

2 捕获跟踪问题分析

按照光电经纬仪捕获跟踪自动化程度,可分为自动捕获跟踪和半自动捕获跟踪。

自动捕获跟踪是光电经纬仪发现目标后伺服系统启动自动跟踪完成对目标的锁定和跟踪,整个过程没有人的参与。半自动捕获跟踪是在一般人的参与下实现的。操作手在发现目标后,根据目标在视场中的位置选择合理的时机启动伺服系统对目标进行跟踪。

由于人反应时间的延迟和动作的滞后,半自动捕获的能力远远小于自动捕获的能力。随着靶场测试目标运动速度的加快,穿过视场的时间很短。如何减少捕获时间、提高系统快速自动捕获跟踪能力是对捕获系统的主要技术要求。

从伺服控制原理的角度来看,捕获跟踪过程是一个动态响应过程,系统的动态性能直接决定了系统的捕获跟踪能力。这是因为电视视场有限,运动目标穿过时,在视场内成像的时间很短,如果系统的动态性能不好,很容易因为超调或振荡的原因导致目标逸出视场,捕获跟踪失败。所以在传感器视

场一定的情况下,系统的动态性能决定了经纬仪的快速捕获跟踪能力。

伺服系统的动态性能在时域上主要表现在上升时间、超调量上。上升时间越短,超调量越小,系统的动态性能越好。在频域上主要由频带宽度、相位裕度等决定。设计的伺服系统带宽越快,系统的响应越快,动态性能越好。

系统的超调 σ 、调整时间 t_s 、位置开环剪切频率 ω_c 和系统的相位稳定裕度 γ 以及谐振峰值 M_r 之间满足以下近似关系:

$$\sigma=0.16+0.4(M_r-1) \quad (35^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ) \quad (1)$$

$$t_s = \frac{K\pi}{\omega_c} \quad (s) \quad (2)$$

其中

$$K=2+1.5(M_r-1)+2.5(M_r-1)^2 \quad (3)$$

$$M_r = \frac{1}{\sin \gamma} \quad (35^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ)$$

由式(1)可以看出,系统相位稳定裕度越大,超调量越小。超调量小意味着捕获跟踪时不会因为系统的超调过大目标出视场,导致跟踪失败。分析式(2)得出系统的开环剪切频率 ω_c 越高,稳定裕度 γ 越大,系统的调整时间越短,捕获跟踪的速度越快。

但是,电视跟踪伺服系统是一个离散采样控制系统,传感器曝光时间、脱靶量计算和传输时间都给伺服系统带来了严重的滞后,降低了系统的稳定裕度,限制了系统开环剪切频率增加^[2]。采样控制系统开环剪切频率 ω_c 应满足下式要求:

$$\omega_c \leq \frac{M_r}{(1+M_r) \left(\sum T_i + \frac{T_0}{2} \right)} \quad (4)$$

其中, T_0 是电视采样周期; T_i 是系统小于 $T_0/2$ 的时间常数。可以看出电视采样的频率影响了系统剪切频率的增加。提高电视的采样频率可以提高开环剪切频率,提高系统的快速性,增强电视系统的捕获跟踪能力。

系统的开环剪切频率也受系统速度回路带宽、抑制噪声、机械谐振宽度及系统加速度能力等的限

制,不能盲目增大。系统开环剪切频率和系统角加速度有以下关系:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{\ddot{\theta}}{g_0}} \quad (5)$$

$\ddot{\theta}$ 是系统的角加速度, g_0 是系统线性范围内允许的阶跃幅度。

由以上分析可知,不能靠盲目增加系统带宽的方法提高伺服系统的捕获能力。从伺服控制理论可知系统的动态性能和稳态精度存在矛盾。获得优良的动态性能的同时,可能会损失稳态精度。然而,对于光电经纬仪来说,不但要能快速捕获跟踪上目标,而且跟踪精度要高。当系统的增益和剪切频率

设计得较大时,系统的相位稳定裕度降低,也会影响系统的稳定性。为了解决捕获跟踪和稳态精度、系统稳定性的矛盾,本文提出了多模切换技术方法,达到既能快速捕获、又能稳定跟踪的目的。

3 多模控制原理

多模控制原理框图如图1所示。在电视自动跟踪的位置回路中,事先确定一组性能各不相同的位置调节器,然后按照一定的策略在该组中选择所需的调节器,在目标“迎头”或脱靶量大时选择动态性能好的调节器,在目标“尾追”和脱靶量小时选择稳态精度高的调节器,以保证捕获的稳定性。

在目标出现在视场时,为了快速减小目标和经

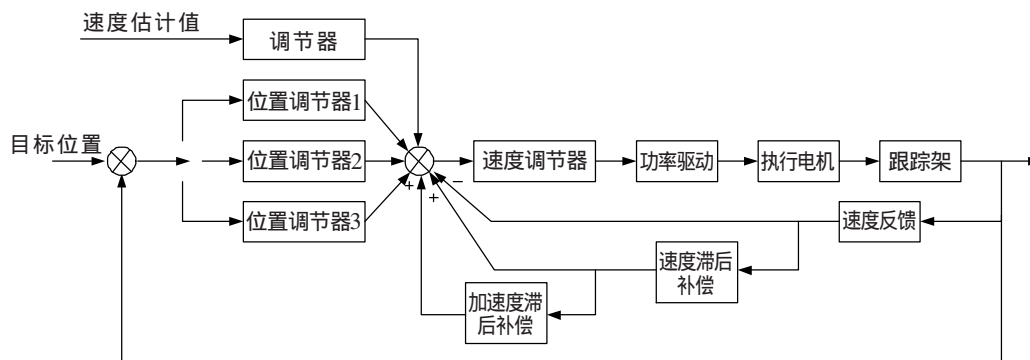


图1 多模控制系统原理框图

纬仪的相对位置,位置回路采用比例调节器:

$$G_{p1}(s) = K_{p1}s \quad (6)$$

当脱靶量减小到某一阈值时,采用一阶调节器:

$$G_{p2}(s) = K_{p2} \frac{T_1s+1}{T_2s+1} \quad (7)$$

当进入稳定跟踪时,采用二阶调节器:

$$G_{p3}(s) = K_{p2} \frac{(T_1s+1)(T_2s+1)}{(T_3s+1)(T_4s+1)} \quad (8)$$

速度回路采用类似引导跟踪方式的复合控制结构,在双闭环串级控制结构基础上引入速度前馈环节。通常在捕获阶段的短时刻内目标在方位和俯仰角方向是匀速直线运动,当目标在视场中出现后,由脱靶量与对应的编码器值合成出目标在方位和俯

仰角方向的位置,其速度则在匀速直线运动的假设前提下通过状态估计的办法估计出来,将该速度前馈到速度回路,使经纬仪的运动速度快速接近目标的运动速度,从而迅速减小经纬仪和目标之间的相对运动速度。本文采用 α - β 滤波方法估计目标的速度。

4 变系数 α - β 滤波

考虑到实际目标的运动情况和算法的复杂性及实时性要求,记忆跟踪采用极坐标系下 α - β 滤波^[3]方法。 α - β 滤波器的滤波方程为:

$$\begin{aligned} \hat{X}(k) &= \hat{X}(k/k-1) + a(k)[X(k) - \hat{X}(k/k-1)]\hat{V}(k) \\ &= \hat{V}(k/k-1) + \frac{\beta(k)}{T}[X(k) - \hat{X}(k/k-1)] \end{aligned} \quad (9)$$

其中:

$$\alpha(k) = \frac{2(2k-1)}{k(k+1)} \quad \beta(k) = \frac{6}{k(k+1)} \quad (10)$$

预测方程为:

$$\begin{aligned} \hat{X}(k/k-1) &= \hat{X}(k-1) + TV(k-1) \\ \hat{V}(k/k-1) &= \hat{V}(k-1) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\hat{X}(k/k)$ 、 $\hat{V}(k/k)$ 表示 $k-1$ 时刻目标的角位置和角速度滤波估值, $\hat{X}(k/k-1)$ 、 $\hat{V}(k/k-1)$ 表示在 $k-1$ 时刻对 k 时刻的预测估值, $X(k)$ 表示 k 时刻目标角位置的观测值。 α - β 滤波方程描述利用观测值修正目标状态(位置、速度)的预测值, 得到误差更小的状态滤波估值。在电视自动跟踪时, 每接收一帧脱靶量就与对应的编码器值合成出目标的位置值, 即观测值, 对观测数据进行 α - β 滤波得到相应时刻目标状态(位置、速度)的滤波估值。以得到的估计速度作为引导速度, 快速减小目标和经纬仪的相对速度。

在 MATLAB 中对 α - β 滤波方法进行仿真, 仿真结果如图 2 所示。X 轴为时间, Y 轴为方位角度值。

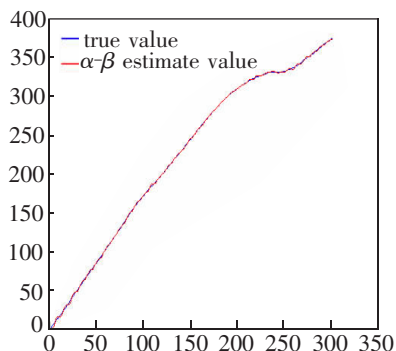


图2 滤波仿真结果

5 实验结果

实验中对穿越视场的靶标进行捕获跟踪。经纬仪不动时, 目标穿越视场时, 传感器输出 9 帧数据以上时, 伺服系统就可以成功捕获到目标。以某型号经纬仪中波红外传感器为例, 其视场为 $30'$, 传感器帧频为 100 Hz, 目标在视场中停留 9 帧, 相当于目标速度为 $30'/60/0.09=5.5^\circ/\text{s}$, 加速度为 $55^\circ/\text{s}^2$ 。如果不采用多模控制方法, 经纬仪是无法捕获到目标的。

图 3 是某型号光电经纬仪采用了多模控制方法对靶标进行捕获时脱靶量的变化曲线。A 点位置是目标在视场中出现, B 点是经纬仪对目标已经成功捕获, 脱靶量不再增加, BC 段开始向红外自动跟踪平稳过渡, C 点以后经纬仪转为自动跟踪方式。经过多次实验验证, 捕获的成功率达到 95% 以上。

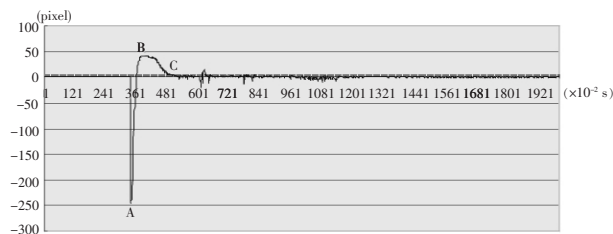


图3 某型号光电经纬仪对靶标进行捕获时脱靶量变化

6 结论

本文针对经纬仪快速目标的自动捕获这一要求, 对多模控制和速度顺馈的方法进行了研究, 理论分析、算法仿真和实验应用证明, 通过使用该方法, 经纬仪对速度为 $5.5^\circ/\text{s}$ 、加速度 $55^\circ/\text{s}^2$ 的目标可以成功捕获, 极大地提高了经纬仪的捕获能力。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘胜, 彭侠夫, 叶瑰钧. 现代伺服系统设计[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005.
- [3] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.

作者简介: 葛兵(1982-), 女, 吉林桦甸人, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事光电跟踪伺服控制研究。

E-mail: gebing1982@163.com