文章编号:1001-5078(2009)05-0518-03

·光电技术与系统·

光电跟踪仪目标捕获过程控制技术研究

李 楷,姚红萍
(中国电子科技集团公司第二十七研究所,河南 郑州 450015)

摘 要:在分析光电跟踪仪性能特点的基础上,探讨了目标捕获过程控制技术,基于自适应原理提出了相对速度截止控制方法,经实验验证,效果明显,具有工程实用价值。还介绍了基于位置预计的过程控制方法,并对两种方法及其应用环境进行了比较。

关键词:光电跟踪;目标捕获;相对速度截止;伺服控制
中图分类号:TN216 **文献标识码**:A

Study on capture process control technology of opto-electronic tracker

LI Kai, YAO Hong-ping
(No. 27 Research Institute, China Electronic Technology Corporation, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: Based on the analysis of opto-electronic tracker, capture process control technology is discussed. A relative velocity cut-off control is introduced according to adaptive principle, which is proved effective by experiment. A capture process control based on position prediction is introduced too and compared with the first one.

Key words: opto-electronic tracking; capture; relative velocity cut-off; servo control

1 引 言

光电跟踪仪作为高精度光电火控设备,能探测跟踪低空或超低空飞行的武装直升机、飞机、巡航导弹等,具有布置灵活、便于组网、隐蔽性好、跟踪精度高、抗干扰能力强等优点,能有效弥补现有雷达装备的不足,具有广阔的应用前景。

光电跟踪仪视场角较小,特别是对远距离目标进行跟踪时,视场角通常只有几度的范围,因此,对目标的发现较为困难,通常需要指挥镜、搜索或跟踪雷达等外部设备的引导,或进行自动/半自动空域搜索。在目标进入视场后,切换为自动跟踪模式,实现对目标的高精度自动跟踪。目标进入视场后转入自动跟踪的这一切换过程,是对运动目标的阶跃响应过程,对这一过渡过程的控制是光电跟踪仪跟踪系统设计中的关键技术和难点之一。

2 自动跟踪动态切换控制的工程设计

根据光电跟踪仪不同的结构设计方式和光电传感器、图像取差器的特点,动态切换过程控制通常采用连续动态跟踪和位置动态预计两种方法。

连续动态跟踪控制方法就是在切换过程中保持光学传感器对目标的跟踪状态,根据图像取差器实时输出的脱靶量数据完成切换控制,过渡到稳定跟踪状态。

用于火控的光电跟踪系统的动态跟踪精度指标一般要求小于0.5mrad,因此系统设计时要求在稳态跟踪时响应速度快,扰动恢复时间短。光电平台的加速度通常应大于120°/s^2,有些平台为了缩短大角度调转时间,甚至要求加速度达到(200 ~ 300)°/s^2。而电视跟踪对图像的提取要求有一个相对稳定的条件,通常情况下,目标和光轴之间的相对速度不允许超过10°/s,否则会造成目标提取困难。这样,在目标捕获过程中,如果仍按照典型Ⅱ型系统进行设

作者简介:李 楷(1972 -),男,高级工程师,工学硕士学位,长期从事控制系统设计技术及工程应用研究,曾获部级科技进步一等奖一项,二等奖两项。E-mail:likai2007@yahoo.com.cn

收稿日期:2008-11-30;修订日期:2009-01-13

计,就必然要求操作人员只有在目标与光轴较为接近时才能进行自动跟踪的切换,否则易造成目标丢失。为解决这一问题,我们利用自适应控制的基本原理,设计了基于相对速度截止算法的动态跟踪切换控制方法。

2.1 基于相对速度截止控制的动态跟踪切换控制方法

2.1.1 相对速度截止控制原理

理想切换过程是在保证相对速度小于极限值的前提下尽可能快地完成切换,即相对速度截止控制。其原理如图1所示。

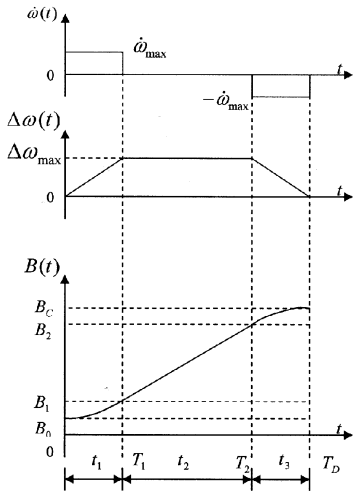

图1 基于相对速度截止控制的动态跟踪切换方法

目标进入视场后,与光轴中心存在着一定的角偏差,以方位角为例,目标位于 B_C 点位置,光轴处于 B_0 位置,切换的过程就是要把这个位置偏差在最短时间内减小到自动跟踪精度范围内,系统转为自动跟踪工作状态,而且速度差不超过允许值。由图1可知,速度差 $\Delta\omega(t)$ 曲线由速度增大段、最大相对速度保持段及速度减小段等三部分组成,呈等腰梯形。设目标速度为 ω_1,在外部设备引导搜索目标时,可直接由引导数据微分得出,则可求出当前速度控制给定值 $\omega(t)$ 为:

$$\omega(t)=\omega_1+\Delta\omega(t) \tag{1}$$

动态切换控制过程是:在光电跟踪系统接收到切换命令后,立即使伺服机构在最大加速度力矩作用下加速,在最短时间内,使系统达到最大相对速度,并保持最大相对速度不变;当系统到达某个合适的位置时,再以最大负加速度减速,使系统以一定精度到达目标指示位置时,伺服机构的速度正好与目标速度一致,完成对目标的捕获过程。

这一过程实际上是一种自适应的控制方法。设加速段(或减速段)系统方位所走过的相对角度为 $\lambda\approx B_1-B_0\approx B_C-B_2$,系统监控确定目标方位后,计算判断出捕获路径,当行程较大,即 $|\Delta B_0|>2\lambda$ 时,采用等腰梯形的速度控制模式;而当行程较小,即 $|\Delta B_0|\leqslant 2\lambda$ 时,采用等腰三角形的速度控制模式。

切换过程各阶段的速度差值分别为:

$$\Delta\omega(t)=\begin{cases}\dot{\omega}_{max}\cdot t & 0\leqslant t\leqslant T_1\\ \Delta\omega_{max} & T_1\leqslant t\leqslant T_2\\ \Delta\omega_{max}-\dot{\omega}_{max}\cdot(t-T_2) & t\geqslant T_2\end{cases} \tag{2}$$

调转各阶段所需时间分别为:

$$\begin{cases}t_1=\Delta\omega_{max}/\dot{\omega}_{max}\\ t_2=(B_2-B_1)/\Delta\omega_{max}\\ t_3=t_1=\Delta\omega_{max}/\dot{\omega}_{max}\end{cases} \tag{3}$$

如图2所示,光电跟踪仪设置在 A 点位置,当目标飞行到 B 点位置时被捕获,则在空中作匀速直线运动的目标在切换点的方位角速度为:$\omega=\omega_m\sin^2\alpha$,角加速度为:$\dot{\omega}=2\omega_m^2\sin^3\alpha\cos\alpha$。其中,$\omega_m=V_t/R$,为目标在最近渡越点位置相对于光电跟踪仪的方位角速度。在目标进近过程中,方位角加速度将在 $\alpha=60°$ 时达到最大值,$\dot{\omega}_{max}\approx 0.65\omega_m^2$[1]。当目标飞行速度为0.8马赫,航路捷径为400m时,可求出目标相对光电跟踪系统最大角速度为39°/s、最大角加速度为17°/s^2。

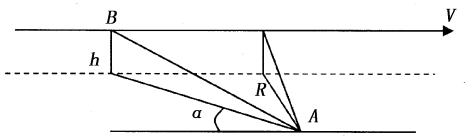

图2 空中机动目标瞄准跟踪示意图

光电跟踪仪伺服系统设计时,根据工程实际经验,速度一般选取航路捷径速度的2~3倍,加速度取航路最大加速度的4~6倍,因此,系统角加速度远大于目标加速度,能够迅速捕获目标。按照光电跟踪仪最大角加速度100°/s^2,视场宽度6°,目标和光轴之间允许的相对速度最大值 $\Delta\omega_{max}=10°/s$,在 $\alpha=10°$ 位置发现目标,则可计算出系统捕获时间约为400ms。其中加速和减速段各需约100ms。

2.1.2 控制实现

图3为系统控制结构图,在目标捕获过程中,前两段基本上采用开环速度控制方式。软件根据实时的 $\Delta\omega(t)$ 数据进行判断与计算。将图1所对应的速度数据 $\omega(t)$ 经DAC变换后送至速度环路 $G_2(S)$ 输入端,使系统方位按 $\omega(t)$ 的规律运动。此时,位置差值 $\Delta B(t)$ 不送给伺服系统作误差控制信号,即位

置环路不闭合。否则,由于整个捕获过程中Ⅱ型系统的积分作用,会使 $G_1(S)$ 饱和或接近饱和[2],同时造成速度 $\omega(t)$ 的控制规律紊乱。

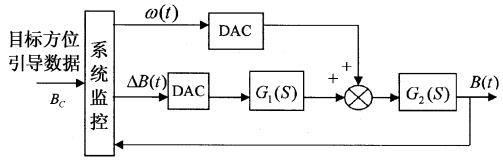

图 3 目标捕获控制结构图

当光轴与目标的差值缩小,进入精度范围以内时,立即由开环速度控制转入闭环位置控制。此时令速度控制信号 $\omega(t)$ 为零,而送给 $G_1(S)$ 的 $\Delta B(t)$ 则为实际值,从而使系统锁定目标在光轴位置上,完成对目标的捕获并转入自动跟踪。

2.1.3 试验验证

在某型光电跟踪仪上采用上述控制方法进行实际验证,测得捕获时间在 450 ~ 550ms 范围内,大于理论计算值。产生上述差别的原因在于,伺服系统速度回路虽然具有良好的速度响应特性,但由于伺服带宽有一定的限度(被测系统方位速度环路带宽约为 15Hz),因而对于图 1 中所示等腰梯形的输入信号不能完全复现,必然要产生某种滞后和平滑作用。而且,系统数字控制是根据每个采样周期(被测系统为 20ms)开始时的系统光轴与目标差 $\Delta B(t)$ 来确定速度控制信号 $\omega(t)$ 的,形成阶梯状控制曲线,因此,实际所用的调转时间肯定比理论计算值要大一些。伺服系统速度回路对等腰梯形速度曲线的响应特性如图 4 所示。

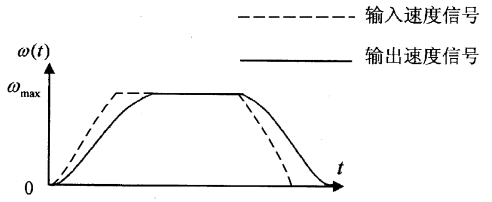

图 4 伺服系统速度回路对等腰梯形速度曲线的响应特性

通过实际验证:原先需要把目标引入半个视场以内才能进行自动跟踪的切换,对模拟目标切换成功率统计约为 70%,切换过程目标绕光轴中心有回转;采用上述自适应切换方法后,在整个视场范围内均可进行切换,对模拟目标切换成功率统计约为 90%,切换过程目标基本沿直线靠近光轴。

2.2 基于位置动态预计的切换控制方法

基于位置动态预计的切换控制方法是在引导过程中建立目标运动轨迹模型,对目标运动轨迹进行外推,控制光轴全速调转,并在预计位置与目标重合,完成捕获控制过程。

对目标运动轨迹的外推在工程上通常采用曲线拟合的方法,由于切换时间较短,用二次曲线,例如抛物线,就能取得较好的效果。曲线拟合算法的核心是求解拟合曲线中待定参数的问题,用最小二乘法完成是简单实用的选择[3],限于篇幅,不再详细讨论。

2.3 两种动态切换控制方法的比较

相对速度截止控制方法在捕获过程中有效结合了速度前馈和位置控制,在整个切换到自动跟踪状态的动态过程中,保持了光学传感器对目标的有效提取,目标脱靶量数据没有间断,因此捕获成功率较高。同时,由于可始终结合测角数据计算出目标的精确角度位置,从而为自动跟踪控制采用诸如复合控制、动态高型等复杂算法提供了依据,缩短了整个火控系统计算出有效诸元的时间,使系统响应较快。

位置动态预计控制方法更为简单,捕获过程可采用系统最大加速度和最大速度进行,但由于动态目标运动轨迹模型的建立约需要 1s 的时间,延长了捕获前的准备时间;由于这一过程是位置预计,捕获后还要有一个速度调节过程,而且由于对机动目标角位置外推数据的误差,使切换不够平滑等,这些原因都会使系统在捕获瞬间产生明显抖动。

但在系统自动搜捕目标,自主切换自动跟踪状态的情况下,就必须采用位置动态预计控制完成搜索和自动跟踪状态的切换。这是因为系统在采用一维、二维扫描进行空域搜索的过程中角速度较高,发现目标后需要记忆目标角位置,然后再进行调转[4]。此外,在目标背景较为复杂的场合,也应采用位置动态预计的切换控制方法。

3 结 论

自动跟踪是光电跟踪仪的主要功能,改善由目标搜捕状态向自动跟踪状态切换的过程控制方法,能有效提高系统性能,减小系统响应时间,提高目标捕获成功率。上述两种方法的计算都不复杂,很适合工程应用,并经某型光电系统验证,试验效果突出。

参考文献:

[1] D K Barton. Radar system analysis [M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1992: 27 - 30.

[2] 陶波. 一种减小伺服系统动态滞后的控制算法[J]. 现代雷达, 2003, 25: 42 - 45, 56.

[3] 史维, 陈文吾, 何勤奋. 自适应控制导论[M]. 第 3 版. 南京: 东南大学出版社, 2006: 17 - 21.

[4] 李连学, 曹秋生. 光电跟踪仪的自主捕获技术研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(12): 1142 - 1145.