

文章编号: 1003-501X(2008)12-0009-04

基于步进凝视控制策略的告警系统

陈兆兵^{1,2}, 郭 劲¹, 苗用新^{1,2}, 姜伟伟^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 针对近程导弹告警设备目前采用的连续扫描型存在成像质量不高和固定凝视型成本过高的问题, 对一种面阵红外 CCD 探测器的探测方法进行了研究。提出将先进的非等速步进准凝视图像采集控制方法用于一种复合式小型导弹告警系统中。对常规控制方法和步进准凝视控制方法进行了比较, 重点解决了该控制技术在红外探测系统中的应用。此方案在某型在研告警设备中进行了实验, 方位误差限定在 0.4 mrad 条件下其分辨力可达 0.01°。该控制方法可应用到其他告警探测设备的设计中。

关键词: 步进凝视; 图像采集; 复合告警; 控制方案

中图分类号: V556

文献标志码: A

Warning System Based on Step-stare Control

CHEN Zhao-bing^{1,2}, GUO Jin¹, MIAO Yong-xin^{1,2}, JIANG Wei-wei^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In view of the two disadvantages of current short-range missile warning equipment—one is that the scanning system can't get high quality image and the other is that the cost of staring system is too much, a scanning method about a kind of staring IRCCD detector was studied. The non-constant step-stare control method was applied to a small compound missile warning system. We compared conventional control means and step-stare control means, and focused on solving the application problem of the control technology in the IR scanning system. This project was used for a warning system. The distinguishing rate is 0.01° when the azimuth error is limited at 0.4mrad. The control method can be also applied to other warning detection equipments.

Keywords: step-stare; image collection; compound warning; control project

1 引言

红外告警系统中所采用的探测器件主要有线阵和面阵两种。目前的告警设备基本采用成像型面阵器件进行研制。国内外此类设备主要有连续回转扫描和凝视固定方向探测两种探测方式。连续回转扫描控制方法是目前应用的主流, 其优点是控制方案简单、成本低廉, 但在成像质量方面远不如第二种方法。凝视固定方向探测由于采用多个面阵 IRCCD 进行凝视探测, 因此可以达到很高的探测频率, 其成像质量和分辨率非常高, 但多个 IRCCD 用于一种设备, 成本非常高。

本文提出采用非等速准凝视间歇扫描来满足系统的高成像质量和低成本设计的要求。设计中采用单个 IRCCD 通过非等速光机运动进行准凝视探测。本方案在某型近程导弹复合告警系统中进行了实验性应用。该告警系统在探测扫描过程中采用本控制方法; 在跟踪过程中采用双闭环自动跟踪控制方法, 其基本原理为将目标相对跟踪轴的角度偏差送至伺服控制部分, 然后根据偏差的大小及方向控制伺服电机驱动跟踪轴,

收稿日期: 2008-05-22; 收到修改稿日期: 2008-07-20

基金项目: 国防武器装备预研项目

作者简介: 陈兆兵(1980-), 男(汉族), 山东日照人, 博士研究生, 主要研究领域是光电对抗。E-mail: chenchaobing999@163.com

减小偏差^[1]。本文以系统的探测扫描过程控制为研究重点。

2 步进凝视控制原理

步进凝视控制应用于告警系统的周向探测过程。其基本原理为运动部件采用不等速运动,使系统在图像采集的瞬间使扫描运动装置低速运行,完成积分图像采集后,运动装置迅速加速,在到达下一个图像采集位置前即开始减速,速度降低后开始下一幅图像的采集,如此周期步进可以得到接近于凝视型探测器的成像质量。作为一种先进的导弹光电告警装置运动控制方法,步进凝视控制具有参数整定直观明了、成像质量高、鲁棒性强等优点,目前正成为各国研究的热门^[2]。告警运动控制策略中连续回转扫描运动与步进凝视型运动的对比效果如图 1 所示。

从图 1 可以看出在常规连续回转扫描过程中,系统在采集图像的过程中匀速运动,这样必然会使光轴不稳定,成像质量差;而在步进凝视探测方式中,系统的运动是间歇性的,在图像采集的积分瞬间系统是以极低的速度运动的,以期通过这种控制策略实现高精度告警。

本控制策略应用于一小型光电复合告警系统,总质量为 11.6 kg,通光孔径为 $\Phi 100$ mm,系统焦距为 160 mm。方位和俯仰均采用力矩电机带动。其中方位系统转动惯量为 $0.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,俯仰系统转动惯量为 $0.02 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。系统所采用的 IRCCD 所设定的视场为 3° 水平 4° 俯仰,探测频率为 50 Hz。装置上部为红外告警,下部为紫外告警。本文对系统的控制设计以方位运动控制为重点。系统方位步进凝视的控制速度/位置曲线与常规连续扫描型控制方法曲线对比如图 2 所示。

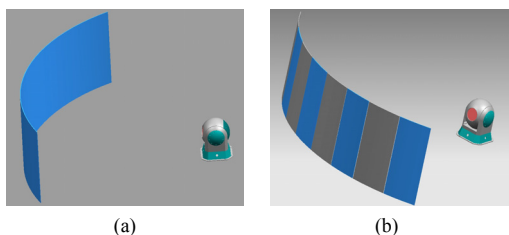


图 1 告警系统连续回转扫描(a)和步进凝视扫描(b)控制示意图

Fig.1 Warning system series circumgyrate scanning (a) and step-stare scanning (b) control

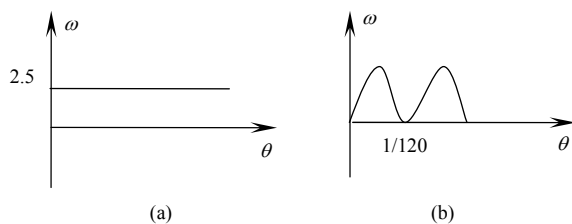


图 2 方位运动常规控制方法(a)与非匀速步进凝视控制方法(b)速度/位置曲线比较

Fig.2 Comparison of azimuth movement rate/place curve between routine control (left) and unequal step-stare control

系统采用步进凝视图像采集控制方案,为实现在红外镜头运动速度最低的周期瞬间完成图像采集,主要做好对 PWM 输出的合理控制,即在系统的扫描过程中实现 PWM 脉冲占空比的周期性脉动变化。这样就能实现控制的高精度、快速、无超调、无抖动等要求^[3]。

3 系统控制器设计

本告警探测系统是一个带有速度环和位置环的双闭环伺服控制系统^[4],如图 3 所示。其中光电探测器由可周向与俯仰运动的红外系统和固定凝视型的紫外系统以及信号处理系统三大系统组成。

系统数学模型包括一个比例环节、一个时滞环节和采样保持环节,速度控制器为 PI 控制器。采用光电编码器进行速度反馈环节的的输出,因此可以用一个惯性环节来等效整个速度回路^[5]。

取直流伺服电动机的一阶数学模型进行设计,设 K_e 为反电势系数, T_m 为机电时间常数,如式(1)所示:

$$G_a(s) = \frac{1/K_e}{T_m s + 1} \quad (1)$$

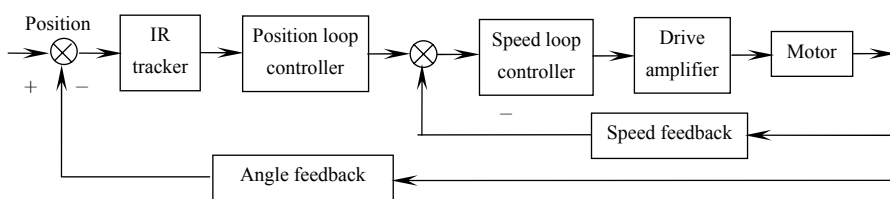


图 3 告警探测系统红外部分控制结构图

Fig.3 IR control structure of the warning system

由图 3 的控制结构可得系统的速度环传递函数为式(2):

$$G_v(s) = \frac{K_2 / K_e}{T_m s + K_2 s + 1} \quad (2)$$

式中: K_2 为速度调节器增益, K_s 为速度传感器增益。

由此可得系统的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_1 K_2}{T_m K_e s^2 + (K_2 K_s + K_e) s + K_1 K_2 K_p} = \frac{\omega_n^2}{K_p (s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3)$$

其中: K_1 为位置调节器增益, K_p 为位置传感器增益,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_1 K_2 K_p}{K_e K_m}} \quad (4); \quad \zeta = \frac{K_2 K_s + K_e}{\sqrt{K_1 K_2 K_p K_e T_m}} \quad (5)$$

在系统校正的过程中位置调节器采用 PI 控制串联校正, 这样能够提高系统的稳态误差性能, 但这个过程使系统的闭环特征方程阶数增加, 为避免由此导致的不稳定在参数取值方面进行合理选择, 如在系统响应的起始阶段增加开环增益 K 值, 加快响应速度, 而在系统响应接近稳态值时, 减小 K 值, 以增加系统的平稳性; 而阻尼比 ζ 按系统允许的最大超调量来确定; 系统驱动部件的固有频率取为位置调节环谐振频率的 3 倍, 以防止发生系统谐振^[6]。

本系统采用力矩电机进行驱动。由直流力矩电机的稳态方程式(6)可以看出, 对电机进行调速可以通过改变电枢回路电阻、改变磁场磁通和改变电枢电压三个途径实现。本系统中, 采用目前最为流行的改变电压的 PWM 调速方法。

$$n = \frac{U_a}{K_e \phi} - \frac{R_a}{K_e K_n \phi^2} M \quad (6)$$

式中: U_a 为电枢电压, K_e 为反电动势常数, ϕ 为电机定子磁通, R_a 为电枢绕组, K_m 为转矩常数, M 为系统转矩。

通过控制输入电压 V_c 来控制 PWM 的波形, 从而最终实现系统在扫描过程中的步进运动。电枢电压的平均值由式(7)确定:

$$U_a = \frac{T_1 - T_2}{T} V_p = (2 \frac{T_1}{T_2} - 1) V_p = (2\alpha - 1) V_p \quad (7)$$

式中: α 为占空比, V_p 为经过比较器和开关功率放大器的输入电压^[7]。

步进凝视控制系统主要体现于对 PWM 起控制作用的 V_c 的控制。本系统在探测实验过程中是单方向旋转的, 在跟踪过程中采用的是随动控制策略。为简化控制方案, 仅在方位运动中采用这种控制方法, 由于在探测阶段方位方向运动一周俯仰方向才进行一次位置变换, 因此俯仰运动采用常规匀速控制方法并不会对系统的精度构成影响。由于控制系统所采用的 DSP 的 PWM 发生频率为 40 MHz, 而系统图像采集频率为 50 Hz, 因此在周向运动的两幅图像采集中间有 1.6M 个半波周期。图 4 显示的是 V_t 、 V_c 、 V_s 、 V 的变化规律。其中前三项为电压, 第四项为速度(将运动角速度转换为线速度 V)。 $V_s = V_t + V_c$ 决定 PWM 的正负分量占空比比例。

4 仿真与实验结果分析

采用上述控制函数以及 V_c 电压控制策略, 能够实现预定的步进准凝视扫描控制图像采集。从图 4 可以看出, V_c 是时变的, 扫描运动启动开始时, 即在零位首先完成一幅图像的采集, 同时 V_s 的正向电压逐渐加大负向电压逐渐减小, 力矩电机开始加速, 在到达下一幅图像采集位置之前的 2.5° 周向空间内, V_s 输出为

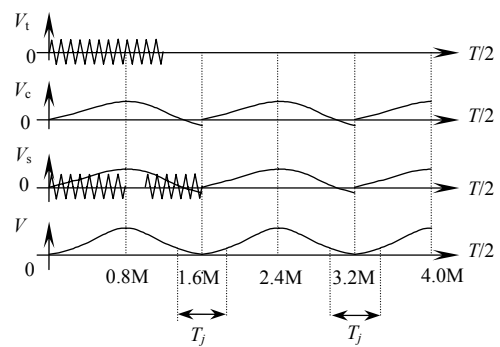


图 4 步进凝视图像采集控制中 V_t 、 V_c 、 V_s 、 V 的变化关系

Fig.4 Variation relationship among V_t 、 V_c 、 V_s 、 V in step-stare control

全正向电压;在 2.5° 空间位置处 V_s 输出的正向电压逐渐减小,负向电压逐渐加大,直至正负相等;在接下来的一段时间,负向电压仍不断加大,以致负向电压大于正向电压,这样设计的目的是采用反向电压使力矩电机减速,因为力矩电机的摩擦阻力很小,单靠电机及负载自身的阻尼无法迅速降低转速;在力矩电机速度接近零并有反向旋转的趋势后, V_s 开始新的加速周期,当完成图像采集后系统即以较高的速度向下一个目标采集位置(5.5° 处)移动。而图像采集的积分时间在图 4 中是 T_f 阶段,在运动周期中的这个时间段,红外镜头的旋转速度是最慢的,光轴相对比较稳定。即从系统加了一段时间的反向电压电机速度大大降低到下一个周期电机已经加速但速度还很低的这段时间中,实现图像的采集。由于在图像的采集过程中力矩电机的旋转速度接近于零,因此所采集到的图像质量会大大提高。又因为电动机在图像采集的积分时间以外的大部分时间都是在高速旋转,所以系统的探测频率可以较以往需要取兼顾探测质量与扫描速度的一般频率更高。这样,采用非等速步进准凝视探测,既可以提高扫描速度,又可提高成像质量,这种在常规控制中存在的矛盾在这种控制策略下得到了缓解,为系统的高精度、快速、无超调、无抖动伺服提供了条件。

将本文提出的非等速步进准凝视探测控制设计方法应用于某小型光电复合告警系统中。对系统进行仿真与实验评估,系统在实现探测距离为 7 km 条件下分辨率力可达 0.01° ,而常规控制方法用在该告警设备中要实现这样的精度,其探测距离最远为 5 km。同时系统能够较平稳、准确地完成步进运动。系统的最大加速度可达 $80^\circ/\text{s}^2$,通过调整 V_c 参数值,可以得到较为理想的探测效果,方位误差可以限定在 0.4 mrad 下。从仿真与实验评估结果来看,这种步进准凝视控制策略应用于光电告警系统中在不增加硬件成本的情况下能大大提高设备的探测精度。

结束语

本文针对光电告警的探测过程控制策略进行了分析,提出了将非等速步进准凝视探测控制设计方法应用于小型光电复合告警系统中,重点解决了该控制技术在红外扫描系统中的应用,应用上具有较大的先进性。在完成控制模型的建立后对设计方法进行了仿真与实验评估,证明该方法可以有效提高探测分辨率,效果较好。这种控制策略除了可以应用于系统的扫描探测阶段,还可以用在系统由探测转到跟踪阶段的控制中,这样就能大大提高系统的响应能力。本文所提出的这种新型控制方法可以应用于各种光电探测与跟踪系统中,能够大大提高系统的成像质量,为高性能光电系统的控制提供了一种新方法。

参考文献:

- [1] 王连明,葛文奇,李杰.跟踪系统中跟踪器延迟的自适应预测补偿方法[J].光电工程,2002,29(4):13-16.
WANG Lian-ming, GE Wen-qi, LI Jie. Adaptive prediction and compensation method for delay of tracker in tracking System [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(4): 13-16.
- [2] Neele F P, Schleijpen H M A. Electro-optical missile plume detection [J]. *SPIE*, 2003, 5075: 270-280.
- [3] Valerie Lavigne, Paul Chevette. Step-stare Technique for Airborne High Resolution Infrared Imaging [J]. *SPIE*, 2004, 5409: 277-286.
- [4] 赵志诚,贾彦斌,张井冈,等.光电跟踪系统内模控制器的设计[J].光电工程,2005,32(1):27-30.
ZHAO Zhi-cheng, YAN Bin, ZHANG Jing-gang, et al. Design of an internal model controller for the electro-optical tracking system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(1): 27-30.
- [5] 刘胜,彭侠夫,叶瑰昀.现代伺服系统设计[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2005.
LIU Sheng, PENG Xia-fu, YE Gui-yun. *Modern Servo System Design* [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2005.
- [6] 孙丽娜,宋悦铭,戴明.采用复合控制提高机载光电平台的数引跟踪精度[J].光学精密工程,2008,16(2):265-269.
SUN Li-na, SONG Yue-ming, DAI Ming. Improving digital-leading photoelectric platform tracking precision for by complex control [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(2): 256-269.
- [7] 朱喜林,张代治.机电一体化设计基础[M].北京:科学出版社,2004.
ZHU Xi-lin, ZHANG Dai-zhi. *Mechatronics Design foundation* [M]. Beijing: Science Press, 2004.