

文章编号 1004-924X(2007)08-1300-05

# 航空光电成像消旋电视数字控制器

孙丽娜,汪永阳,戴明,郎小龙

(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:**介绍了消旋电视摄像系统的工作原理,通过对系统的分析,得出了消旋系统保证像质所允许的最大旋转角速度。根据消旋速度要求,设计了消旋系统的电视数字控制器。该控制器以 DSP 为核心微处理器;以测速机为速度敏感元件,作为系统速度环的反馈;速率陀螺测得飞行器的扰动速率,用作速度环的前馈。系统采用了传统的超前滞后补偿方法,并加入了积分环节以减小稳态时的漂移角速度。实验结果表明,在消旋拍摄过程中,消旋速度满足设计要求,拍摄图片清晰,消旋速率精度为  $14.3(^{\circ})/s$ 。理论分析和实验结果都证明了该消旋摄像系统的可行性。

**关键词:**光电成像;消旋控制;电视摄像系统;速率陀螺

中图分类号:V248.3 文献标识码:A

## Digital controller for aerial camera with despun control

SUN Li-na, WANG Yong-yang, DAI Ming, LANG Xiao-long

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

**Abstract:** The principle of the despun digital control of a CCD camera is introduced, and a maximum rotational speed for assuring an ideal image in despun control system is obtained by analyzing the system. According to the speed of the despun control, a digital controller of camera for despun control system is design by taking a DSP as its core, a velocimeter as speed sensitive element to offer feedback for velocity loop in the system, and perturbation frequency measured by rate gyroscope as a feedforward function. The experiment results show that the velocity meets the demand of despun control for its good image quality and the precision standard of  $14.3(^{\circ})/s$ . Theoretical and lab researches both prove the feasibility of the despun control system.

**Key words:** photoelectric imaging; despun control; CCD camera; rate gyro

## 1 引言

消旋成像系统是与通信中继设备一起安装在飞行器的腹内,随飞行器一起发射,在飞行器到达

目标上空前脱离飞行器,跟在飞行器后面飞行一定距离,拍摄并传回目标状态信息的设备。

各国对消旋成像系统的研究可追溯至 20 世纪 80 年代,至今已在多种飞行器上配备了消旋成像系统。这些消旋成像系统共有的特点是:采用

带光电成像或雷达成像的伴随飞行器或专门发射的飞行器,随飞行器一起飞行,在距预定目标点一定高度时弹出,实时传输目标的状态信息。其特点是减少延时,可有效提高目标检测的时效性。

但从国内来看,消旋系统的研究几乎是零,所以开展消旋系统的研究工作十分必要。本文主要利用目前国内比较成熟的伺服稳定平台技术,利用测速机作为系统反馈元件,隔离载体角运动对视轴的影响,使视轴相对于空间静止,从而提高消旋 CCD 的成像质量,取得了非常满意的结果。

## 2 消旋系统分析

### 2.1 工作过程

如图 1 所示,飞行器在 1 km 高度时,开始将消旋系统抛出,抛出后的消旋装置的运动轨迹用 2 表示(垂直向下),飞行器的运动轨迹用 1 表示,飞行器是一直在旋转的,在飞行器下落过程中只要 CCD 的视场角设计大于  $\theta$  角,就能够拍摄飞行器的下落情况以及目标的状态信息。

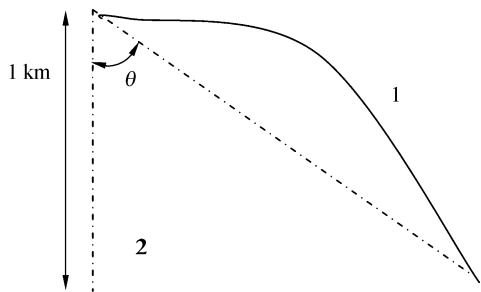


图 1 工作示意图

Fig.1 Sketch of motion trace

### 2.2 消旋系统允许的最大旋转速度

由于飞行器是旋转的,消旋系统在脱离飞行器一定时间内也是旋转的,在曝光时间内 CCD 摄像机的旋转会造成图像模糊,而且产生最大图像模糊的部位在 CCD 摄像机靶面边缘。因此,使图像清晰,不产生模糊的条件是:消旋系统的残余旋转速度与曝光时间的乘积在 CCD 摄像机靶面上最边缘位置的位移小于半个像元。即:

$$\frac{R}{2} \times \omega \times \frac{\pi}{180} \times t \leq \frac{p}{2}, \quad (1)$$

整理得出:

$$\omega \times t \leq \frac{180 \times p}{\pi R}$$

式中, $R$ : CCD 摄像机靶面对角线长度,  $R = 60$  mm;

$\omega$ : 消旋系统残余旋转速度;

$t$ : CCD 摄像机曝光时间;

$p$ : CCD 摄像机像元尺寸,  $p = 9 \mu\text{m}$ 。

当像机曝光时间为 0.6 ms (1/1570 s) 时,可以算出消旋系统允许的最大旋转角速度为 14.3 ( $^{\circ}$ )/s。

### 2.3 消旋系统的工作原理

消旋系统为单轴(方位轴)稳定系统,其机械主体由一个旋转刚体和负载框架(CCD 相机)组成。CCD 摄像机系统安装在飞行器方位稳定轴系(中心轴)上,系统结构示意图如图 2 所示。

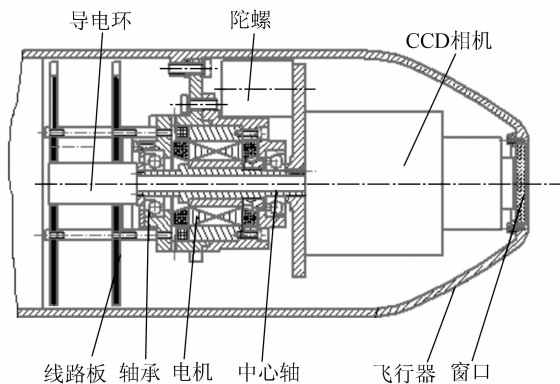


图 2 消旋系统示意图

Fig.2 Sketch of despin control system

工作原理为:由安装在飞行器上的陀螺来测量飞行器的旋转速率,测速机作为消旋系统速度环的反馈元件,当飞行器旋转时,由安装在飞行器上的陀螺测得飞行器相对于惯性空间的角速率,然后将其作为伺服系统的输入,此时负载框架便以相同的速率相对其中心轴做反向旋转,从而起到消旋的效果。

## 3 消旋系统伺服控制设计

消旋电视摄像系统为单轴稳定系统,由直流力矩电机驱动,测速机为速度敏感元件。由图 2 的示意图可知,当飞行器旋转时,消旋电视摄像系统与飞行器一同转动,由陀螺检测飞行器相对于空间的角速度,并输出电压信号,该信号作为电机速度环的输入,同时测速机检测到电视摄像系统相对于电机驱动轴的旋转速度作为速度环的反

馈。若反馈速度与输入速度大小达到一致,则能使摄像系统视轴在惯性空间保持稳定。

### 3.1 电机速度环

电机速度环以测速机作为反馈元件,因为测速机对空间变化率不敏感,只对与其连接的电机轴速率变化敏感,所以用速率陀螺测得飞行器的扰动角速率并作为电机速度环的前馈信号。

消旋电视摄像系统的设计方法是,将陀螺安装在飞行器上测量旋转速率,测速机作为消旋系统速度环的反馈元件。采用电机速度环的工作原理是当飞行器旋转时,由安装在飞行器上的陀螺测得飞行器相对于惯性空间的角速度,然后将其作为伺服系统的输入,此时把负载相对于电机轴的转速作为伺服系统的反馈输入(负载的旋转方向定义与飞行器的旋转方向定义相反),伺服系统框图如图 3 所示<sup>[1]</sup>。

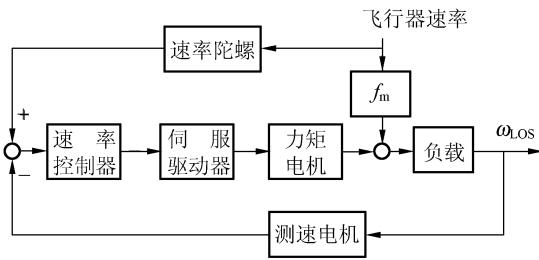


图 3 伺服系统框图

Fig. 3 Block diagram of servosystem

### 3.2 消旋伺服系统数字控制器的设计

消旋系统的传递函数框图如图 4 所示。由测速机反馈构成的稳定系统,如果只采用超前滞后补偿<sup>[2]</sup>,在干扰力矩作用下,稳态时会有漂移角速度,系统稳定效果差,从理论上分析,残差也是存在的。由于采用超前滞后矫正本身没有积分环节,对于常值干扰力矩的稳态误差不可能为零。图 5 为只采用超前滞后补偿的误差输出曲线,从误差曲线可以看出误差最大值达到 0.06,从而可知最大残余旋转速度为  $1\ 080\ (^{\circ})/s \times 0.06 = 64.8\ (^{\circ})/s > 14.3\ (^{\circ})/s$ ,不能保证图像成像质量,要使系统实现真正的稳定,必须在超前滞后校正里引入积分环节。

图 4 中,  $\frac{1}{Js}$ : 负载;  $K_g$ : 测速机增益;  $K_p$ : 功放增益;  $G_m$ : 电机增益;  $G_c(s)$ : 补偿器;  $f_m$ : 粘性摩擦系数;  $\omega_{base}$ : 载体扰动角速度。

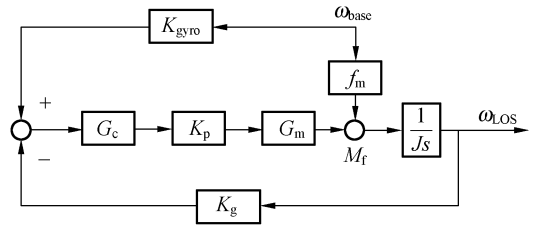


图 4 数字控制器方框图

Fig. 4 Block diagram of digital controller

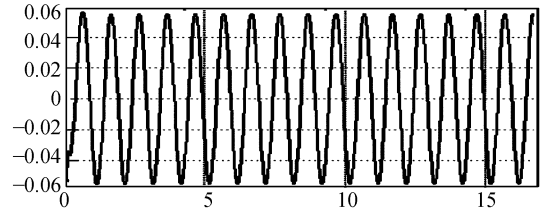


图 5 误差输出曲线

Fig. 5 Curve of error

在实际应用中因为电机反电势系数及电机电气时间常数都很小<sup>[3]</sup>,经常可以略去,因此电机传递函数简化为  $G_m = \frac{K_t}{R}$ ,其中  $K_t$  为直流量矩电机的力矩系数,  $R$  为电枢电阻。

未补偿时,系统的开环传递函数为:

$$G_A(s) = \frac{K_g K_p G_m}{Js}$$

在超前滞后校正里引入积分环节:

$$G_c(s) = \frac{K_c(\tau s + 1)}{s(Ts + 1)}$$

补偿后系统的开环传递函数为:

$$G_B(s) = \frac{K_g K_p G_m K_c (\tau s + 1)}{Js^2 (Ts + 1)}$$

所用测速机  $K_g = 9\text{ mV}/(^{\circ})/s$ ,经基准电压为  $\pm 10\text{ V}$  的 16 bit A/D 变换后,

$$K_g = 1690\text{ 码}/(\text{rad}/s)$$

伺服功率放大器采用 PWM 控制,其  $K_p = 4.8 \times 10^{-4}\text{ V}/\text{码}$

电枢电阻  $R = 2.66\ \Omega$

电机力矩系数  $K_t = 0.033\text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$

$$\text{电机增益 } G_m = K_t/R = \frac{0.033\text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}}{2.66\ \Omega} =$$

$0.0124\text{ N} \cdot \text{m}/\text{V}$

负载转动惯量  $J = 4 \times 10^{-3}\text{ kg} \cdot \text{m}^2$

选取系统开环截频  $\omega_c = 80$

$$\text{补偿器 } G_c(s) = \frac{511(0.06s+1)}{s(0.004s+1)}$$

在超前滞后校正里引入积分环节进行补偿后,系统 Bode 图如图 6 所示。由于引入积分环节,使系统由原来的‘I 型’系统变为‘II 型’系统,从而使系统的刚度增加,抗干扰能力增强<sup>[3]</sup>,在理论上可实现摄像系统的完全补偿。由于引入积分环节,使得系统的带宽有所下降,但这并不影响系统设计带宽 20 Hz,通过图 6 可以看出,交接频率 >31.4 rad/s,且相角裕度为 60°,完全符合设计要求。

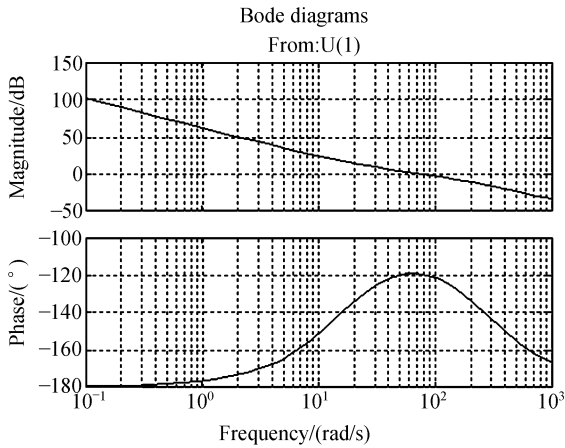


图 6 PI 补偿后稳定回路开环 Bode 图

Fig. 6 Bode diagrams of stable loop after PI compensation

补偿后系统的闭环输出:

$$\omega(s) = M_f(s) \frac{1/Js}{1 + \frac{K_c K_g K_p G_m (0.06s+1)}{Js^2 (0.004s+1)}} =$$

$$M_f(s) \frac{s}{Js^2 + K_c K_g K_p G_m (0.06s+1)/(0.004s+1)},$$

$$\theta(s) = \omega(s)/s =$$

$$M_f(s) \frac{1}{Js^2 + K_c K_g K_p G_m (0.06s+1)/(0.004s+1)}.$$

根据终值定理<sup>[4]</sup>,稳态时

$$\omega(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s\omega(s) = 0,$$

$$\theta(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s\theta(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s\omega(s)}{s} = \frac{M_f}{K_c K_g K_p G_m}.$$

式中,  $S_\phi^N(O) = K_c K_g K_p G_m$ , 为系统的静态力矩刚度。

飞行器下落时的旋转角速度为  $\omega_i = 3r/s = 18.85 \text{ rad/s}$ ,

系统基座角运动产生的干扰力矩  $M_f = \frac{G_m K_c \omega_i}{R} = 2.895 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ ,

$$\text{则 } \theta(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s\theta(s) = \frac{2.89 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}}{5.13 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}} =$$

0.032 3°。

由上述分析计算可知:

(1)采用超前滞后校正后,系统在干扰力矩作用下使  $\omega(\infty) = 0$ , 无长期漂移角速度;

(2)在常值干扰力矩下,稳态时系统输出轴有 0.032 3°的偏差角。

消旋系统基座以 3 r/s 角速度旋转时,摄像机相对于惯性空间的理论角速度为零,即使把摩擦力矩、负载不平衡力矩以及陀螺的滤波器时间常数等加以考虑<sup>[4]</sup>,消旋系统残余角速度也不会大于摄像机稳像所必需的 14.3(°)/s,所以消旋系统的成像质量可以得到保证。

## 4 实验结果

在速度校正环节中引入积分环节,提高了系统的力矩刚度,克服了干扰力矩对视轴位置的影响,并做了验证实验。图 7 和图 8 分别是未经过消旋控制拍摄的图像和经过消旋控制的消旋摄像系统拍摄的图像,从两幅图像的对比可以明显看出经过消旋控制后的图像清晰,通过实验过程中的数据记录可知,经过消旋后的图像相对于原始视轴的偏差实测为 1°。



图 7 未经过消旋控制拍摄的图象

Fig. 7 Image before despun control

通过实验,测得的 1°偏差与理论分析的 0.032 3°偏差角不一致,这是由于做实验的载体旋转速度不是恒定的 3 r/s,而是在 3 r/s 左右波动,因而二阶无差度系统不能长期地使系统的稳态误差为零,另外,  $M_f$  也不是恒定的常值干扰力矩,因而校正环节也并不能使干扰力矩产生的角速度为零。

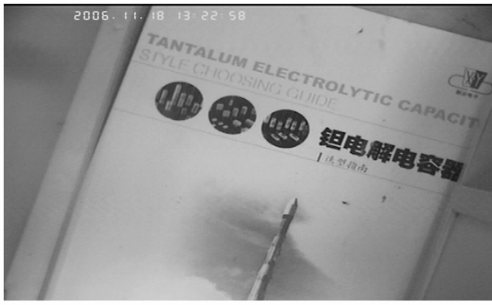


图 8 经过消旋控制的拍摄图象

Fig. 8 Image after despun control

## 5 结 论

为了满足消旋电视成像的要求,本文在分析了消旋系统的工作原理和消旋控制速率的要求后,采用了经典的位置速率双环控制结构<sup>[5]</sup>和电机速度环作为消旋摄像系统的设计方案,详细阐述了数字控制器的设计,并为了克服残余旋转速率在应用中引入积分环节。通过实验证明,该数字控制器在消旋控制中是有效的,设计合理,达到了预期的设计结果,拍摄图像清晰。

## 参考文献:

- [1] 秦继荣,沈安俊.现代直流伺服控制技术及其系统设计[M].北京:机械工业出版社,1999.  
QIN J R, SHEN A J. *Modern DC Servo Control Technology and System Design* [M]. Beijing: Mechanics Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [2] 张智永,范大鹏,范世洵.光电稳定跟踪装置的控制系统设计[J].光学精密工程,2006,14(4):681-688.  
ZHANG ZH Y, FAN D P, FAN SH X. Servo system design for E-O stabilization and track devices[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 681-688. (in Chinese)
- [3] 黄令龙,郭阳宽,蒋培军,等.高精密切服转台控制系统的设计[J].清华大学学报(自然科学),2004,44(8):1054-1056.  
HUANG L L, GUO Y K, JIANG P J, *et al.*. Control system for high-precision turn table[J]. *J. Tsinghua Univ.*, 2004, 44(8): 1054-1056. (in Chinese)
- [4] HUSSEIN F S, ATTIA A A, BADRM A L. Fuzzy logic controller for electric motor driving the astronomical telescope[J]. *SPIE*, 1998, 3351: 415-424.
- [5] 冯国楠.现代伺服系统的分析与设计[M].北京:机械工业出版社,1990.  
FENG G N. *Analysis and Design of Modern Servo System* [M]. Beijing: Mechanics Industry Press, 1990. (in Chinese)

作者简介:孙丽娜(1973—),女,吉林省长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员,从事计算机软件开发与开发工作,研究领域为伺服控制与数字信号处理。E-mail:sunlina0431@sina.com