

文章编号 1004-924X(2009)08-1908-07

空间相机偏流角的间歇式实时调整

于涛¹,徐抒岩¹,韩诚山¹,李杨^{1,2},王永成^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130033;

2. 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘要:空间相机摄像时对其偏流角进行实时调整,可以减小偏流角姿态变化对成像质量的影响,延长一次性连续摄像时间并使用较多的 TDI 积分级数进行摄像。本文对偏流角实时调整的需求进行了详细分析并给出了实时调整策略;然后,介绍了偏流角调整系统的构成及实时调整的工作原理;最后,提出了一种间歇式实时调整方案并进行了实验。实验结果表明:摄像过程中偏流角偏差值可以调整在 $4.2'$ 以内,调整后误差 $\leq 72.17''$,一次调整时间 < 1 s,偏流角调整过程中图像的调制传递函数(MTF)值为 99.67%。提出的间歇式实时调整方法可满足摄像过程中对偏流角实时且长时间调整,且对图像无本质影响的要求。

关键词:空间相机;偏流角;实时调整;像移补偿;调制传递函数(MTF)

中图分类号:V475.3 **文献标识码:**A

Batch-type real-time adjustment for drift angle of space camera

YU Tao¹, XU Shu-yan¹, HAN Cheng-shan¹, LI-Yang^{1,2}, WANG Yong-cheng^{1,2}

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

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

Abstract: Adjusting the drift angles of a space camera on real time in photographing could decrease the influence of the attitude change on image quality and could prolong continuous photographic time with more TDI integral progressions. In this paper, the requirements adjusting drift angles on real-time were analyzed in detail and the real-time adjusting tactics were presented. Then, the structure of a drift angle adjusting system and the operating principle of real-time adjusting were introduced. Finally, a batch-type real-time adjusting method was presented and experimented. Experimental results indicate that the partial difference of drift angle can be adjusted to below $4.2'$ with the adjusting error no larger than $72.17''$ and the adjusting time less than 1 s. Moreover, Modulation Transfer Function (MTF) of the image is 99.67%, while the drift angles are adjusted. These results show that the proposed method can meet the requirements for adjusting drift angles on real-time and long period without essential influence on images in photographing process.

收稿日期:2008-11-13;修订日期:2009-01-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

Key words: space camera; drift angle; real-time control; image motion compensation; Modulation Transfer Function(MTF)

1 引言

除地球同步卫星外,其它卫星与地面都有相对移动,装载于此类卫星上的空间相机在轨道上进行摄像时,地面目标的相对移动在相机像面上产生像的移动,称之为像移。对于采用 TDICCD 感光芯片的空间相机,要取得清晰的景物影像,就要在较长的积分时间内使光生电荷包的转移与焦面上图像的运动保持同步,即进行像移匹配,否则一定程度上的失配将导致图像模糊^[1-2]。完成像移匹配可通过像移补偿技术来实现。一般情况下,像移会在两个正交方向上产生分量,一个是飞行器飞行方向上产生的前向像移分量,另一个是在飞行器飞行的垂直方向上产生的横向像移分量,即由偏流角产生的像移分量。进行像移补偿时,首先通过调整偏流角消除横向像移分量,然后再通过补偿前向像移达到清晰成像的目的。

一直以来,空间相机的偏流角都是在照相之前进行一次性调整,在照相期间不再调整偏流角系统,这使得空间相机应用受限。首先,空间相机在轨摄像期间,由于飞行器姿态变化和地球自转等因素,偏流角逐渐变大将导致图像质量下降,使得空间相机的连续摄像时间不能太长^[3];其次,对于偏流角要求较高而飞行器姿态又不是很好的系统,可能根本就无法完成正常的拍摄任务;另外,这种照前一次性调整技术也决定了在飞行器机动情况下不能完成拍照功能。基于以上分析,对空间相机进行偏流角实时调整可延长一次摄像时间,降低飞行器姿态要求,还可以在飞行器机动情况下拍照,从而大大提高空间相机的应用范围及其适应性。

2 偏流角实时调整需求分析和策略

摄像时偏流角实时调整会对成像质量产生影响。对成像质量的影响以成像传递函数 MTF 为考察依据。系统中任一环节都会引起 MTF 下降,摄像时的偏流角实时调整也不例外。对于偏流角实时调整这样的环节,原则应该做到很小,以

至于从肉眼察觉不到。根据分析和观察,MTF 下降 5% 仍可以满足要求,因此可将 MTF 下降 5% 作为实时调整偏角流系统的指标要求。

偏流角与传递函数 MTF 的计算公式^[4]:

$$\text{MTF} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_c}{f_N} \cdot N \cdot \frac{\Delta d}{d}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_c}{f_N} \cdot N \cdot \frac{\Delta d}{d}}, \quad (1)$$

式中取特征频率 $f_c = f_N$, N 为 TDICCD 积分级数, $\Delta d/d$ 为横向匹配的残余误差。在 $N=96$ 的条件下,计算出 MTF 下降 5% 时,允许的偏流角偏差值为 $12'$ 。产生的偏流角偏差值主要由两部分组成,一部分是由飞行器姿态及地球自转引起的姿态偏流角,另一部分则是由相机本身的各项误差引起非姿态偏流角。非姿态偏流角属系统误差,可以事先修正,而姿态偏流角是个动态变化量,随飞行器姿态及位置而变化。也正是由于偏流角的动态变化才产生实时调整的需求。

5% 的 MTF 下降意味着对图像无本质影响,图像总体品质没有变化,对图像的分析判读和测量也无影响。由于引起传递函数下降的因素都具有慢变化特性,传递函数下降 5% 会经历数秒时间,在这段时间内拍摄的图像是一个传递函数连续且缓慢轻微下降的渐变图像,但也正是因为这种渐变,使我们几乎无法用肉眼察觉出来这种变化,这是我们所希望达到的图像效果。但实际上后期传递函数下降 5% 的图像与传递函数没有下降的图像有一定程度的差异,只是这种差异没有被表现出来而已。

拍摄时进行偏流角调整会引起传递函数在极短时间内(数毫秒)产生跳降,尽管这种传递函数的跳降在数值上不是很大,如 1%~2%,并没有达到 5%,但由于这种跳变的突然性会使图像在跳变前后出现图像视觉方面的反差,很容易能够察觉到,给观察者一种图像质量变化较大的感觉,这是成像过程应尽量避免的情形。

考虑到上述情况,在进行较长时间的摄像时,有必要进行偏流角实时调整,但又不宜调整过于频繁,应尽量减少调整次数以使能够被察觉出变化的摄取图像达到最少。

3 偏流角调整系统的构成和实时调整工作原理

偏流角实时调整系统主要由偏流控制电路(偏流控制器和偏流功率放大电路)、偏流执行元件(偏流步进电机)、偏流角测量元件(光电轴角编码器)、偏流调整机构等组成,结构关系如图 1 所示。

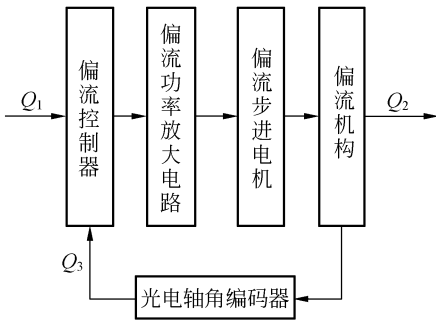


图 1 偏流角实时调整系统框图

Fig. 1 Block diagram of real-time adjusting system of drift angle

图 1 中, Q_1 为偏流角目标值,即计算得出的偏流机构所应到达的角度位置; Q_2 为偏流角当前实际值,即偏流角调整后偏流机构实际的角度位置; Q_3 为偏流角当前测量值,即编码器测量后偏流机构实际的角度位置。

偏流角调整工作原理:相机工作过程中,偏流角调整分为准备和摄像两个阶段。准备阶段相机不摄像,读取偏流角当前测量值 Q_3 ,并与给定偏流角目标值 Q_1 比较,二者差值 Q_{13} 为偏流角偏差值;根据偏流角偏差值计算步进电机运行方向和运行步数,控制步进电机以较高频率按计算方向运行相应的步数,带动偏流机构转动直到偏流角偏差值 Q_{13} 在容许范围内。

在摄像阶段,实时调整偏流角,即在摄像过程中,实时计算偏流角偏差值,并据此实时地通过步进电机进行调整,以保证偏流角偏差值趋于零。实时调整的一个难点是既要进行摄像时调整,又不能影响摄像时成像质量。为减小电机运行过程中偏流机构的颤振对相机输出图像质量的影响,电机应以较低的频率单步运行;为减少相机摄像

过程中偏流角的调整次数,开始调整的偏流角偏差值 Q_{13} 和调整后的误差容许范围与准备阶段相比应较小。

4 偏流角实时调整方案及其实现

根据上述分析,本文提出了一种间歇式实时调整方案。首先根据传递函数下降 5% 计算出允许的最大偏流角偏差值 β_m ,根据 β_m 确定偏流角的开始调整角度 β ,只有当偏流角偏差值达到 β 时,才开始进行偏流角调整。采用较低速度值的匀速调整方案进行调整,当偏流角偏差值接近零时停止调整,完成一次调整过程。当偏流角偏差值再次达到 β 时,开始新一次的调整。偏流角开始调整的偏差角度 β 和调整速度 v' 是决定调整特性的两个关键参数,下文对确定这两个参数进行了讨论。将允许的最大偏流角偏差值作为控制边界进行偏流角调整。

4.1 偏流角开始调整的角度 β

由前面计算可知,传递函数 MTF 下降 5% 时,允许偏流角偏差值为 $12'$,这其中包括相机本身的各项误差引起的非姿态偏流角和姿态角测量误差与偏流角计算误差,一般情况下这些误差可控制在 $7.2'$ 以内,所以允许的实时偏流角调整控制误差为 $4.2'$ 。考虑到偏流角计算所用相关平台参数的更新周期 t_0 和偏流角实时调整软件延迟时间 t_1 对偏流角调整实时性的影响,以及编码器测角误差 e_1 对偏流角计算精度的影响,偏流角开始调整的偏差角度 β 的计算公式为:

$$\beta = \alpha - v \times (t_0 + t_1) - e_1. \quad (2)$$

式中, α 为允许的实时偏流角调整控制误差, $\alpha = 4.2'$; v 为不对偏流角进行实时调整时的偏流角速率, $v = 0.506' / s$ 。

4.2 偏流角停止调整的角度

为减小相机摄像过程中偏流角调整对图像质量的影响,应尽量减少偏流角的调整次数。考虑到偏流角实时调整过程中的误差和飞船姿态变化等因素引起的偏流角的变化量,将偏流角停止调整的角度误差设为上述两个值之和,即经过一次实时偏流角调整后,如果偏流角误差小于等于上述两个值之和,那么停止偏流角调整,否则继续调整。

4.2.1 偏流角调整误差

偏流角调整误差由编码器测角误差 e_1 和电机控制误差 e_2 组成。

(a) 编码器测角误差 e_1

采用 16 位绝对式光电轴角编码器,分辨率为 $19.775''$ 。偏流角当前的实际值 Q_2 与偏流角当前的测量值 Q_3 的差值,即编码器测角误差 e_1 。

$$e_1 = c_1 + c_2, \quad (3)$$

式中, c_1 为编码器精度, $c_1 = 19.775''$; c_2 为编码器测量误差, $c_2 = 19.775''$ 。

(b) 电机控制误差 e_2

已知步进电机控制方式为四相八拍,步距角为 0.9° ,步进电机与偏流机构速度比为 $478:1$ 。电机控制误差 e_2 计算公式:

$$e_2 = F. \quad (4)$$

式中, F 为步进电机运行一步对应偏流机构变化的角度, $F = 6.78''$ 。

4.2.2 飞船姿态变化产生的偏流角变化量

偏流角变化量 e_3 计算公式:

$$e_3 = v \times T. \quad (5)$$

式中, v 为不对偏流角进行实时调整时偏流角速率, $v = 0.506'/s$; T 为偏流角调整时间, $T = D \times T_P$; D 为步进电机运行的步数, $D = \beta/F$; T_P 为电机步进间隔时间。

所以偏流角停止调整的角度误差计算公式为:

$$e = e_1 + e_2 + e_3. \quad (6)$$

将 e 设为一次偏流角实时调整后容许的最大误差。

4.3 调整速度 v'

由于相机摄像过程中偏流角实时调整会带来抖动像移,在一个像元 $1 \sim 96$ 级积分过程中偏流角实时调整次数应 ≤ 1 次,所以步进电机步进间隔时间 T_P 应 $\geq T_{96}$ (T_{96} 为 TDICCD 最高积分级数 96 级时一个像元的积分总时间);另外,一个像元 $1 \sim 96$ 级积分过程中偏流角调整角度应尽量小,使抖动像移量最小,可通过实验确定步进电机单步运行时间 Δt 。基于以上两点分析,在相机摄像阶段步进电机步进间隔时间 T_P 应取 T_{96} 与 Δt 中的较大值;在准备阶段,步进电机以 1.33 kHz 的频

率连续运行,控制偏流角调整误差 $\leq 39.55''$,保证相机开始摄像时偏流角偏差值较小。

5 实验和测试结果

通过两个实验分别对步进电机运行特性以及偏流角调整的实时性和精度进行测试。

5.1 实验一

测试步进电机负载条件下连续运行时步距角的变化情况、单步运行的稳定时间、步距角精度以及步进时间。

试验条件:将步进电机与编码器同轴连接,步进电机输出轴上添加 2 倍偏流机构等效力矩负载,电机启动前读取一次编码器值,启动后每隔 1.8 ms 读取一次编码器值。

步进电机在不同频率下,连续运行过程中时间与角度的对应关系如图 2 所示。

步进电机单步运行过程中时间与角度的对应关系如图 3 所示。

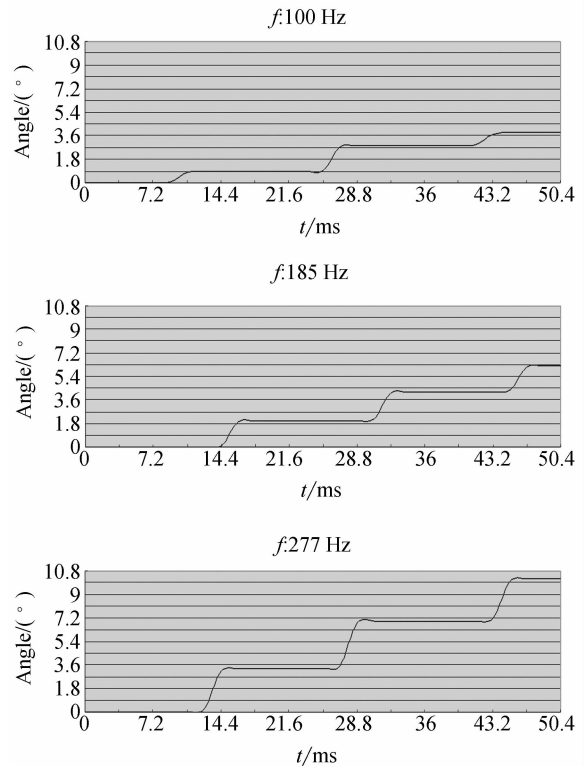


图 2 电机连续运行时间与角度的对应关系

Fig. 2 Time vs angle for motor continuous running

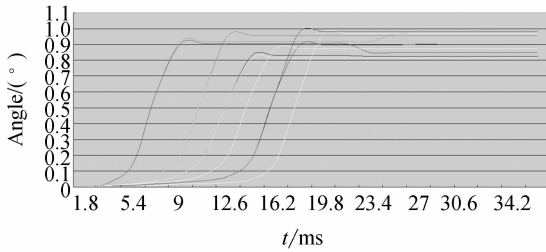


图 3 电机单步运行时间与角度的对应关系

Fig. 3 Time vs angle for motor one step running

实验结果表明:由图 2 可知,不同频率条件下,步进电机运行过程中每次变化的角度不同,并随频率的加快而增加,所以在摄像阶段步进电机应低速平稳运行,即运行一步并稳定后,再运行下一步。图 3 中描绘了步进电机 10 次单步运行曲线,可知步进电机单步最长稳定时间 Δt 接近 30 ms。由于 TDICCD 一行的扫描时间为 0.069 ms,计算 $T_{96} = 6.624$ ms,所以控制步进电机步距间隔时间 T_P 为 30 ms;步距角最大相对误差不大于 10%;步进时间较短,步距角基本在 1.8 ms 时间内调整完成,该时间内 TDICCD 扫描行数约为 26,所以步进电机单步运行过程中,只对 TDICCD 的 26 行图像质量有影响。

5.2 实验二

首先计算偏流角开始调整的偏差角度和偏流角实时调整后允许的最大误差,然后通过设置偏流角的变化速度测试偏流角调整的实时性和精度。

实验条件:偏流角更新周期 $t_0 = 0.512$ s,偏流角实时调整的软件延时 $t_1 = 0.15$ s,因姿态因素偏流角速率为 $1.012' / s$,并以递增和递减交替变化,电机运行频率为 33 Hz。

计算偏流角开始调整的偏差角度 β 和偏流角停止调整的角度 e ,过程如下:

根据公式(2),计算偏流角开始调整的偏差角度 $\beta \cong 192.36''$ 。

根据公式(3)、(4)、(5)、(6),计算一次偏流角实时调整后容许的最大误差 $e \cong 72.17''$ 。

根据公式(1),计算摄像阶段偏流角调整一次后的图像传递函数 $MTF \cong 99.67\%$ 。

相机工作过程中偏流角调整数据如表 1 所示。

序号 1~16 为相机的准备阶段,17~38 为相机的摄像阶段。

实验结果表明:相机准备阶段,偏流角调整误差 $\leq 39.55''$;相机摄像阶段,偏流角偏差值控制在 $4.2'(252'')$ 以内,当偏流角偏差值 $\geq 192.36''$ 时开始调整,调整后误差 $\leq 72.17''$ 。

表 1 偏流角实时调整数据

Tab. 1 Adjusted drift angle data in real time

序号	时间	偏流角值	序号	时间	偏流角值
1	2:39:1.343	2 254.35''	20	2:39:11.359	79.1''
2	2:39:1.859	0''	21	2:39:11.906	118.65''
3	2:39:2.453	39.55''	22	2:39:12.390	158.2''
4	2:39:2.937	79.1''	23	2:39:12.937	177.975''
5	2:39:3.484	19.775''	24	2:39:13.421	217.525''
6	2:39:3.984	39.55''	25	2:39:13.968	118.65''
7	2:39:4.531	79.1''	26	2:39:14.453	39.55''
8	2:39:5.15	39.55''	27	2:39:15.0	19.775''
9	2:39:5.562	79.1''	28	2:39:15.562	39.55''
10	2:39:6.31	0''	29	2:39:16.125	79.1''
11	2:39:6.578	19.775''	30	2:39:16.593	98.875''
12	2:39:7.62	59.325''	31	2:39:17.140	138.425''
13	2:39:7.625	39.55''	32	2:39:17.640	158.2''
14	2:39:8.171	59.325''	33	2:39:18.265	197.55''
15	2:39:8.750	0''	34	2:39:18.734	98.875''
16	2:39:9.234	19.775''	35	2:39:19.312	39.55''
17	2:39:9.796	0''	36	2:39:19.781	59.325''
18	2:39:10.296	19.775''	37	2:39:20.328	98.875''
19	2:39:10.859	59.325''	38	2:39:20.828	138.425''

6 结 论

相机准备阶段偏流角经调整后误差 $\leq 39.55''$;摄像阶段偏流角偏差值可以调整在 $4.2'$ 以内,调整后误差 $\leq 72.17''$,一次调整时间 < 1 s,电机运行过程中相机图像的 MTF 值约为 99.67%。这些数据完全满足相机在摄像过程中偏流角实时调整对图像质量应无本质影响的要求,并可以长时间使用 96 级积分级数连续摄像。下一步将分析和研究电机单步运行过程中,偏流机构颤振对相机输出图像质量的影响。

参考文献:

- [1] 樊超,李英才,易红伟. 颤振对TDICCD相机像质的影响分析[J]. 光子学报,2007,9(36):1714-1717.
FAN CH, LI Y C, YI H W. Influence analysis of buffeting on image quality of TDICCD camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 9(36): 1714-1717. (in Chinese)
- [2] 刘明,刘刚,李友一,等. 航空相机像移计算及补偿分析[J]. 光电工程,2004,31(增):12-14.
LIU M, LIU G, LI Y Y, *et al.*. The effect of image motion on the quality of aerial camera images[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(Supp.): 12-14. (in Chinese)
- [3] 樊超,李英才,易红伟. 偏流角对TDICCD相机像质的影响分析[J]. 光电工程,2007,34(9):70-74.
FAN CH, LI Y C, YI H W. Influence analysis of drift angle on image quality of TDICCD camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(9): 70-74. (in Chinese)
- [4] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春:长春光机所研究生部,2003.
WANG J Q. *System Design of Optical Instrument* [M]. Changchun: Academe of Changchun Institute of Optics and Mechanics, 2003. (in Chinese)
- [5] 李新峰. 轨道姿态误差对TDI-CCD相机行周期及偏流角的影响分析[J]. 空间科学学报, 2008, 28(3):254-259.
LI X F. Effect analysis of orbital and attitude parameter error on TDI-CCDs line-shift frequency and veer angle[J]. *Chin. J. Space Sci*, 2008, 28(3): 254-259. (in Chinese)
- [6] 李友一. 空间相机的偏流角控制[J]. 光学精密工程,2002,10(4):402-406.
LI Y Y. Study of the drift angle control in a space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4): 402-406. (in Chinese)
- [7] SUHAIL A, DAVE D, WILLIAM W, *et al.*. High speed dual output channel, stage selectable, TDI CCD image sensor for high resolution applications [J]. *SPIE*, 1995, 2415:124-133.
- [8] 李兴华. 高分辨力空间摄影相机像移补偿控制技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000.
LI X H. *A study on image motion compensation control system in high-resolution space camera* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000. (in Chinese)
- [9] 吴宏圣,潘凝,翟林培. TDI CCD全景式航空相机的像移补偿误差分析[J]. 光学精密工程,2003,6(11):545-549.
WU H SH, PAN N, ZHAI L P. Image motion compensation error analysis for TDI CCD panoramic aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 6(11): 545-549. (in Chinese)
- [10] HUANG Q L. Application of TDICCD on real-time earth reconnaissance satellite [J]. *SPIE*, 1998, 3558:93-104.
- [11] LAREAU A G. Electro-optical imaging array with motion compensation[J]. *SPIE*, 1993, 2023:66-78.
- [12] 李松,张立平. 空间相机偏流调整旋转轴系的设计与精度分析[J]. 光学精密工程,2004,12(4):141-145.
LI S, ZHANG L P. Design and accuracy analysis for drift adjusting rotary axes of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 141-145. (in Chinese)
- [13] 翟林培,刘明,修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学精密工程,2006,3(14):490-494.
ZHAI L P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 3(14): 490-494. (in Chinese)
- [14] 刘岩,李友一,陈占军,等. 模型参考自适应滑模控制方法在前向像移补偿中的应用[J]. 光学精密工程,2007,6(15):943-947.
LIU Y, LI Y Y, CHEN ZH J, *et al.*. Application of model reference adaptive sliding mode control to forward compensation system in camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 6(15): 943-947. (in Chinese)

作者简介:



于涛(1980—),男,吉林长春人,研究实习员,2006年于吉林大学获得硕士学位,主要研究方向为计算机控制。E-mail: yutao.com@tom.com



李杨(1981—),女,黑龙江安达人,博士研究生,主要研究方向为软件工程和可靠性工程。E-mail: victoria_liy@163.com



徐抒岩(1963—),男,吉林人,研究员,博士生导师,1985年于天津大学获得学士学位,1989年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要研究方向为空间光学遥感器计算机控制和图像处理,曾获得“中国载人航天工程突出贡献者”奖章和“曾宪梓载人航天基金突出贡献奖”。E-mail: xusy@ciomp.ac.cn



王永成(1980—),男,甘肃嘉峪关人,博士研究生,主要研究方向为自动控制。E-mail: wyc_dyy@sina.com



韩诚山(1972—),男,辽宁盖州人,研究员,硕士生导师,1993年于吉林工业大学获得学士学位,2004年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为空间有效载荷电控系统设计。E-mail: xuan_han@yahoo.com.cn

● 下期预告

帘幕式快门曝光精度数学建模及计算

张雷^{1,2},丁亚林²,蒋贵德³

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130033;
2. 中国科学院研究生院,北京 100039; 3. 93313 部队,吉林长春 130111)

为了确定帘幕式快门各尺寸参数曝光精度的关系,推出曝光精度的数学模型。分析了影响快门曝光时间精度的主要因素,用误差合成法对快门曝光时间进行了精度分析,为设计提供了依据。首先,结合帘幕式快门的工作原理及快门的曝光时间表达式建立了曝光精度的数学模型。然后,对曝光时间表达式中的各个参数的误差进行了分析,应用误差合成法对各个参数误差对曝光时间的影响程度做了分析计算。最后,对现有航空相机中应用的快门进行了精度的分析计算。实验表明:曝光时间精度随着帘缝宽度的增加而提高,现有航空相机的快门的曝光时间最低精度为曝光时间的 6.4%,高于理论计算精度 8.59%。在 1/1 000~1/100 s 范围内快门的有效曝光时间与帘缝宽度成正比,帘缝宽度对曝光精度的影响是帘缝速度对曝光精度影响的 3.6 倍,快门曝光时间的精度随着帘缝宽度的增加而提高。