

文章编号 1004-924X(2011)11-2630-06

高频正交大面阵焦平面快门设计

冷 雪*, 张洪文, 刘 明, 李文明

(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:针对 1 000 mm 焦距透射式光学系统面阵相机,设计了一种高频大面阵焦平面快门。为了满足长焦距航空成像系统高分辨率和宽覆盖的要求,新设计的焦平面快门结构采用单帘幕多缝式设计,通过两个快门正交布置,电机带动齿轮同步驱动,使得两片光学拼接的面阵 CCD 同时曝光。数字信号处理器(DSP)根据编码器反馈的帘速信号来控制电机转速,保证 CCD 均匀曝光。实验结果表明,快门曝光时间在 1/200~1/1 000 s 连续可调,拍照帧频最大可达 4 frame/s,快门寿命大于 20 万次,曝光均匀性在±8%以内,满足大面阵 CCD 相机成像要求。

关键词:CCD 相机;焦平面快门;成像系统;曝光时间;单帘幕;曝光均匀性

中图分类号:V248.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111911.2630

Design of large format focal-plane shutter with high frame-frequency and orthogonality

LENG Xue*, ZHANG Hong-wen, LIU Ming, LI Wen-ming

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

* Corresponding author, E-mail: kramer@126.com

Abstract: A new large format focal-plane shutter with high frame frequency is designed to the space camera with a transmission optical system and a focal length of 1 000 mm. The focal plane shutter adopts a single curtain with multiple slits in structure, and two shutters are orthogonal layout and are driven synchronously by a motor with gears. The design allows to exposure of two stitched area CCD simultaneously. A Digital Signal Processor (DSP) is used to control the motor velocity according to the curtain encoder, so as to ensure the exposure uniformity of the CCD. The experiment results show that this new shutter has a higher stability of movement, a long life span more than 2×10^5 operating times, a wide range of exposure time in 1/200 s to 1/1 000 s and a exposure error within 8%. Moreover, the max frame frequency can be 4 frame/s. The performance of this shutter is fully satisfied with the requirements of area scan CCD aerial cameras.

Key words: CCD camera; focal-plane shutter; imaging system; single curtain; exposure uniformity

收稿日期:2011-05-03;修订日期:2011-06-09.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA06A208);中科院知识创新领域前沿项目(No. 070Y32R070)

1 引 言

长焦距大面阵 CCD 相机像面尺寸较大,一般都采用焦平面式快门。焦平面快门具有曝光均匀性好,结合相机扫描镜补偿机构还能进行渐变像移补偿的特点,因此得到广泛应用。目前,国内的航空相机焦平面快门技术还相对比较落后,现有技术采用的是一种双帘幕式快门,快门画幅尺寸为 $114\text{ mm} \times 114\text{ mm}$,拍照帧频最高为 2 frame/s ,工作每 4 万次需更换一次帘幕,曝光均匀性为 $\pm 10\%$ 。国外航空相机发展历史悠久,如美国 RECON/OPTICAL 公司,其最新快门技术是一种长寿命焦平面航空相机快门,最高帧频可达 7.5 frame/s ,画幅尺寸为 $70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$,双帘幕式,使用寿命大于 100 万次。本文研究的快门是针对 $1\ 000\text{ mm}$ 焦距透射式光学系统的面阵相机而设计的,为了在减小相机外形尺寸的条件下,增大相机的画幅尺寸,采用了两个面阵 CCD 棱镜拼接的方法,每个 CCD 像面尺寸为 $48\text{ mm} \times 36\text{ mm}$,并利用 CCD 最大输出帧频为 3.6 frame/s 的特点,来保证设计覆盖宽度要求。新快门有如下特点:(1)采用单帘周向运动形式,快门帘均匀布置 3 个相同缝宽的狭缝,单帘运动一周曝光 3 次,通过改变帘运动速度调整曝光时间,从而保证快门高频的动作;(2)对应棱镜拼接的两个面阵 CCD 探测器位置,采用两个快门的组合结构,每个快门画幅尺寸为 $48\text{ mm} \times 36\text{ mm}$,两个快门帘相互正交垂直布置,一个电机同时驱动两个快门,通过 DSP 控制电机转动保证两个快门帘的同步精确运动,从而保证两个 CCD 的同步曝光。

2 快门工作原理和结构

2.1 快门工作原理

两个快门相互正交布置,结构完全一样,由一个快门电机驱动,以保证两个 CCD 同步曝光。每个快门由单独的快门帘、辊轴、减速齿轮等组成,两个快门由公共的快门电机、增量式编码器和离合器构成。快门位于 CCD 传感器焦平面前面,快门帘为一个环形帘,帘上均匀分布 3 个宽度相等的狭缝,沿一个方向运动,相机照相时每拍照一幅图片快门帘转 $1/3$ 周停在一个位置,完成一次曝

光过程,如此循环完成拍照。无需返回即可连续进行,因此增加了快门动作频率。图 1 是单个快门动作示意图。

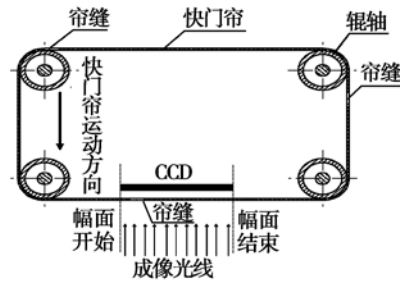


图 1 单个快门动作示意图

Fig. 1 Sketch map of single shutter

在曝光过程中,快门帘的运动速度保持恒定,快门曝光时间的大小由帘缝宽度除以快门速度得到,帘缝宽度固定,这样可以通过控制帘的运动速度来实现曝光时间的调节。这种快门结构简单,外形尺寸小,帧频可以做得很高。拍照时依据测光元件实测的地面照度,根据最佳像面曝光量,计算出快门帘的运动速度,保证图像合适的灰度值。

2.2 快门结构设计

快门帘由齿皮带构成,每个快门帘通过 4 个辊轴支撑,快门帘长 420 mm ,平均分有 3 个缝,缝宽 3 mm ,缝与缝间隔为 140 mm 。快门帘转动一周曝光 3 次,每次曝光由快门离合器控制,离合器吸合,电机带动快门帘一起运动并曝光,曝光结束,离合器松开,快门帘脱离电机。每次曝光开始,凸轮压住微动开关产生幅面信号,如此循环运动进行拍照。离合器输入轴由电机驱动,电机一直连续转动,借助电磁制动器控制精密扭簧收缩、放开,实现力矩传递。由于凸缘与输出轴相对位置恒定,因此可实现离合器每转 1 周后都能准确停在同一位置,保证每次曝光帘启停的位置保持不变。离合器每动作一次,快门帘缝通过幅面实现一次曝光。快门结构如图 2 所示,当快门工作时,电机连续转动,一周离合器断开,此时无力矩输出。当快门接到拍照脉冲指令时,一周离合器通电,快门电机通过速比为 $1:2$ 的 1 对齿轮带动一周离合器转动,一周离合器通过速比为 $7:3$ 的 1 对齿轮将力矩传递到快门辊轴上,快门辊轴带动快门帘做高速运动实现曝光,快门由安装在辊轴上的编码器反馈控制快门电机转速。当快门帘旋转 $1/3$ 周,限位开关接通,一周离合器断电,快门帘停止转动,电机无力矩输出,电

机空转等待下一次曝光。当快门曝光时间需要改变时,控制系统通过改变电机电压来改变电机转速,达到调整曝光时间的目的。

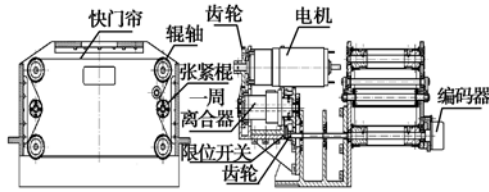


图 2 快门结构图

Fig. 2 Drawing sheet of shutter structure

2.3 主要技术指标

设计的快门主要技术指标如下:

- 曝光均匀性 ±8%
- 曝光时间 1/200~1/1 000 s(连续可调)
- 快门寿命 ≥2×10⁵次
- 最大帧频 ≥3.6 frame/s

3 快门控制原理

3.1 数学模型

曝光均匀性主要通过曝光过程中控制电机转速来保证。为使曝光过程稳速进行,同时达到一定的稳速精度,系统采用速度闭环控制,速度反馈利用增量式编码器对电机转速进行 1 ms 采样 1 次获得,而速度给定值则根据外界光照条件,结合 CCD 最佳曝光量计算得到,像面曝光量计算公式如下:

$$t = \frac{W}{v_c} \tag{1}$$

式中 t 为曝光时间,单位为 s; W 为帘缝宽度,设为 3 mm; v_c 为快门帘速度,单位 mm/s。

快门控制系统的数学模型如图 3 所示:

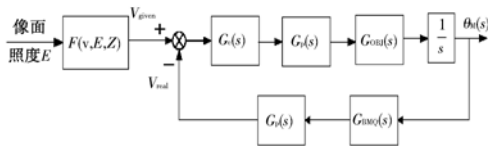


图 3 快门控制数学模型

Fig. 3 Mathematical model

式中 $G_c(s)$ 为速度校正环节的传递函数, $G_p(s)$ 为 PWM 功率放大环节的传递函数, $G_{obj}(s)$ 为是被控对象(即直流电机)的传递函数, $G_{enc}(s)$ 为增量

式编码器的传递函数, $G_F(s)$ 为是数字滤波器的传递函数, $F(v, E, Z)$ 为光照度变换帘速函数。

3.2 转速的测量

快门电机速度信息是增量式编码器通过 DSP 的 QEP 单元 4 倍频后获得的,电机选用 Maxon 公司的 RE35 直流高速电机,额定转速为 7 000 r/min,编码器选用 Encoder MR 系列 3 通道增量式光电编码器,500 line/circle,最大工作频率为 200 kHz。电机的给速度定是由外界光照度决定的,而电机速度反馈通过快门帘轴上安装的增量式编码器获得。常用在闭环伺服控制系统中编码器测速方法有 3 种:M 法,T 法,M/T 混合法,对应曝光时间设计为 1/200~1/1 000 s,并根据快门帘与电机的传动比,计算出电机转速应工作在 1 200~6 000 r/min 之间,属于高速区,故采用 M 法测速。其原理为:在规定的的时间间隔 t 内,测量所产生的脉冲数来获得被测速度值。设脉冲发生器每转 1 圈发出的脉冲数为 P ,且在规定的的时间 t 秒内,测得的脉冲数为 m ,则电机转数为: $n = \frac{60 \times m}{P \times t}$,并进行了 4 倍频。根据 1 ms 采样

一次的电机转速,在最低转速 1 200 r/min 时,可以反馈获得脉冲数 40 个,相对误差为 $1/40 \times 100\% = 2.5\%$,由于设计要求的曝光量误差为 ±8%,可见反馈精度满足设计要求。

3.3 数字滤波器设计

在利用光电编码器进行速度闭环控制时,速度值是通过编码器的前后两次采样值进行差分获得的,然而这种处理会放大高频噪声,设计中采用一阶低通滤波器来滤除这种高频噪声。滤波器传递函数是:

$$G_F(s) = \frac{1}{T_f \cdot s + 1} \tag{2}$$

经过离散化得到传递函数为:

$$u(k) = \frac{T_f}{2T_s + T_f} \cdot e(k) + \frac{2T_s}{2T_s + T_f} \cdot u(k-1) \tag{3}$$

式中 T_f 为截止频率, T_s 为采样周期,化简为:

$$u(k) = (1 - a) \cdot e(k) + a \cdot u(k-1) \tag{4}$$

这里 $u(k)$ 为本次滤波结果, $e(k)$ 为本次采样结果, $u(k-1)$ 为上次滤波结果。其中 $0 \leq a \leq 1$, a 越大滞后也越大,通过实验取 $a=0.4$ 比较合适。

3.4 数字校正器设计

为使校正后的系统有较好的动态和稳态性

能,速度回路采用二阶超前滞后校正,滞后校正的作用是加大低频段的增益,保证稳态精度要求;超前校正的作用是增大系统的相位裕度,使中频段占据充分宽的频带,以保证动态精度要求和系统的稳定性。传递函数为:

$$G(s) = K \cdot \frac{(1+T_a s)}{(1+T_c s)} \cdot \frac{(1+T_b s)}{(1+T_d s)} \quad (5)$$

对上式进行双线性变换进行离散,并取:

$$s = \frac{2}{T_s} \cdot \frac{(1-Z^{-1})}{(1+Z^{-1})} \quad (6)$$

其中 T_s 为采样周期,本系统定为 1 ms(采样频率为 1 kHz),得到的离散化校正函数如下:

$$u(k) = K \cdot e(k) + K \cdot (A+B) \cdot e(k-1) + K \cdot A \cdot B \cdot e(k-2) - (C+D) \cdot u(k-1) - C \cdot D \cdot u(k-2) \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} A = \frac{T-2T_a}{T+2T_a} & B = \frac{T-2T_b}{T+2T_b} \\ C = \frac{T-2T_c}{T+2T_c} & D = \frac{T-2T_d}{T+2T_d} \end{cases} \quad (8)$$

式中 u 为控制量, e 为偏差, k 为采样时刻。

经过试验得到校正环参数为: $K_s = 1\ 500$, $T_a = 0.999\ 76$, $T_b = 14.25$, $T_c = 14.996\ 4$, $T_d = 0.95$, $T_s = 0.001$ 。

3.5 快门缓冲设计

缓冲的目的是为了延长快门寿命,快门的寿命主要取决于离合器的冲击情况,当曝光结束时,一周离合器开关卡住,离合器与电机脱开,保证快门帘停在固定位置,这个动作导致了离合器结构受到电机带动负载的冲击,影响了离合器的使用寿命。解决办法是,当快门帘缝刚离开 CCD 曝光区域,立刻停止电机转动,这时,电机依靠快门机构负载的惯性缓慢撞击离合器,从而保证了离合

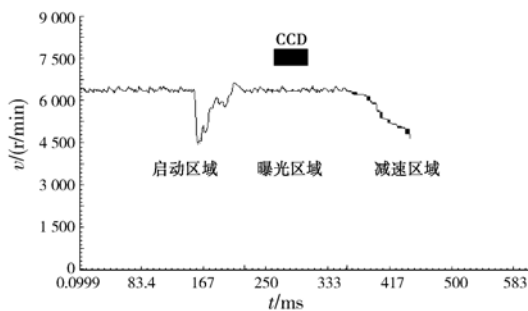


图 4 快门曝光过程中电机的转速

Fig. 4 Rotation speed of motor in exposure process

器的使用寿命。图 4 为实测的快门电机在曝光过程中的转速变化情况,启动区域对应快门接到摄影脉冲命令,离合器带动快门帘开始曝光,电机转速会有短时间突降,然后到稳速的过程。在曝光区域电机转速不变,稳速曝光。曝光一结束,进入减速区域,即快门帘缝后沿通过 CCD 后,马上停止电机转动,依靠负载惯性,缓慢冲击离合器开关使快门帘停在曝光结束位置,从而保证快门寿命。

4 实验结果

4.1 拍照频率测试

在给定 4 frame/s 的摄影脉冲驱动下,测定快门动作频率,测试如图 5 所示:

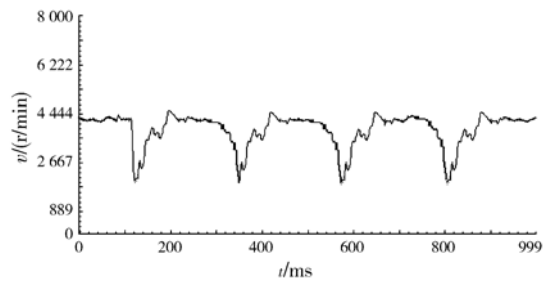


图 5 快门以 4 frame/s 曝光

Fig. 5 Exposure process of 4 frame/s

结果表明,快门动作频率达到 4 frame/s,满足快门设计要求。

4.2 快门稳速实验

通过 DSP 调试软件 CCS 实时采集电机转速,当电机的转速给定为 1 800 r/min 时,快门帘运动速度为 900 mm/s,曝光时间为 1/300 s。快门帘稳速情况下,测试结果如图 6 所示,快门电机稳速误差 δ 计算公式如下:

$$\delta = \frac{U_{fluctuation}}{U_{motor}} \quad (9)$$

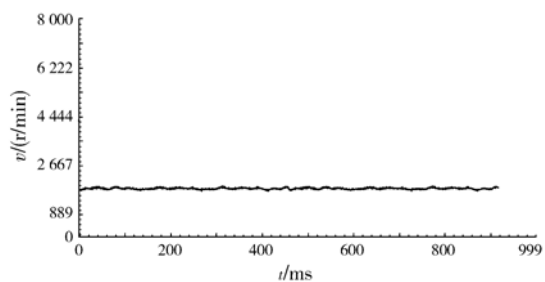


图 6 快门稳速精度试验图

Fig. 6 Steady velocity test for shutter

通过测量,在电机转速 v_{motor} 为 1 800 r/min 时, $v_{\text{fluctuation}}$ 为 ± 80 r/min,由式(9)得,快门电机稳速误差 δ 为 $\pm 4.4\%$ 。

4.3 曝光均匀性实验

实验时,在快门帘 CCD 位置均匀布置 3 个光电池,在快门帘另一侧用平行光照射。快门曝光时间及曝光均匀性检测原理图如图 7 所示。

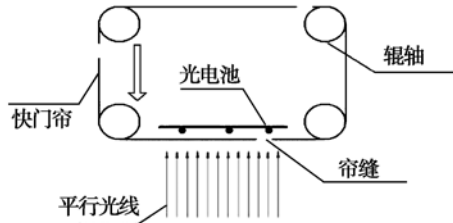


图 7 快门曝光时间及曝光均匀性检测原理图

Fig. 7 Schematic plan of exposure time and exposure uniformity

表 1 快门曝光时间测试结果

Tab. 1 Test results of exposure time

目标曝光时间/s	目标电机转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	预期曝光时间/ms(误差 $\pm 8\%$)	实测曝光时间/ms
1/200	1 200	4.60~5.40	4.62~5.37
1/300	1 800	3.06~3.60	3.07~3.54
1/500	3 000	1.84~2.16	1.88~2.09
1/800	4 800	1.15~1.35	1.15~1.34
1/1 000	6 000	0.92~1.08	0.94~1.08

参考文献:

- [1] 李威,李朝晖,颜昌翔,等. 胶片型空间相机的快门设计和研究[J]. 光学 精密工程, 2005, 14(S1): 9-14.
LI W, LI ZH H, YAN CH X, *et al.*. Design and study on the shutter in a film-space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 14(S1): 9-14. (in Chinese)
- [2] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所研究生部教材, 1998.
WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design* [M]. Changchun: Teaching Material of Department of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 1998. (in Chi-

nese) 检测时,快门每工作 1 次,快门帘曝光狭缝依次略过光电池,通过示波器测量光电池响应方波的宽度,每个方波的前沿和后沿的时间差即为该光电池对应快门帘位置的曝光时间。改变快门驱动电机转速,测得快门的曝光时间段的均匀性,每个电机转速经 10 次测试结果如表 1 所示。

由以上检测结果可以看到,各个曝光时间快门曝光均匀性误差均在 $\pm 8\%$ 以内,满足设计指标要求。

4.4 快门寿命实验

快门的寿命实验主要检验快门机构的连续运转情况及快门帘布的使用寿命。快门在跑合实验和联试过程中,快门电机转速控制在 3 000 r/min,通过安装快门上的计数器记录曝光次数,快门的工作循环次数累计已超过 2×10^5 次,而且机构运转灵活,离合器切换正常,快门帘布没有损伤,满足快门的设计指标要求。

5 结 论

针对 1 000 mm 焦距透射式光学系统面阵相机设计了新的焦平面快门,该快门的设计提高了拍照帧频,使其从现有的 2 frame/s 提高到 4 frame/s。采用正交布置实现了两片 CCD 的光学拼接,使工作寿命达到 2×10^5 次,曝光均匀性在 $\pm 8\%$ 以内,各项指标均超过了国内现有的快门技术水平。该快门通过改变尺寸可以应用到各种尺寸的大面阵航空成像系统中。

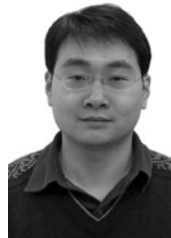
- [3] 赵建华. 电磁控制式纵走单幕焦平面快门技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
ZHAO J H. *Electromagnetism controlled vertical walking single curtain focal-plane shutter* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [4] 李威. 一种航空/航天摄影相机快门的结构设计及其精度分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2001.
LI W. *Structural design and precision analyzed on shutter in a aerial/space camera* [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2001. (in Chinese)
- [5] RUCK R C, MILWEE J F, QUINN J P., *et al.*. Long-Life focal plane shutter for reconnaissance

- cameras; US, 6510 282 B1 [P]. 2003-01-21.
- [6] JULIAN B J, SMITH A M. Large-aperture focal plane shutter; US, 7604 422 B2 [P]. 2009-10-20.
- [7] TAKAHASHE S. Focal-plane shutter for digital still cameras; US, 6795 122B2 [P]. 2004-09-21.
- [8] 侯涛, 范多旺. 基于增量式光电编码器的高精数字测速应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2010(6):9-11.
HOU T, FAN D W. The applied study of high accuracy digital velocity measurement on photoelectric encoder [J]. *Automation & Instrumentation*, 2010(6):9-11. (in Chinese)
- [9] 张雷, 丁亚林, 蒋贵德. 帘幕式快门曝光精度数学建模及计算[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(9):2098-2105.
ZHANG L, DING Y L, JIANG G D. Mathematical modeling and calculation on exposure time of curtain-type shutter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2098-2105. (in Chinese)
- [10] 杨平, 董国威. 典型滞后超前控制器的频域法工程设计技术[J]. 自动化与仪器仪表, 2010(6):61-64.
YANG P, DONG G W. The engineering design technique of a typical lead/Lag controller with frequency domain method [J]. *Automation & Instrumentation*, 2010(6): 61-64. (in Chinese)

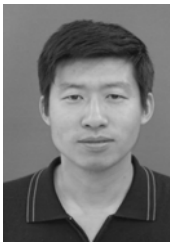
作者简介:



冷 雪(1976—),男,吉林长春人,助理研究员,1999 年于大连海事大学获得学士学位,2006 年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事航空成像与测量技术方面的研究。E-mail: kramer@126.com



刘 明(1977—),男,江西丰城人,博士,副研究员,2005 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空成像与测量技术方面的研究。E-mail: jxlium@163.com



张洪文(1974—),男,吉林长春人,副研究员,1997 年于吉林大学获得学士学位,2003 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事航空航天相机的研制工作。E-mail: zhw_sohu@sina.com



李文明(1978—),男,吉林长春人,助理研究员,2002 年于吉林大学获得学士学位,2008 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,主要从事遥感测绘相机技术方面的研究。E-mail: snow_79@163.com