

文章编号 1004-924X(2011)03-0587-06

单帘正交组合式焦平面快门的设计与性能测试

张洪文^{1,2}, 冷雪², 张继超², 亚林², 曹国华¹

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130025;

2. 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: 针对焦面空间尺寸小, 两个 CCD 成像面由于棱镜拼接而成正交垂直分布的航空相机设计了一种焦面帘幕式快门。该快门采用齿形带作为快门帘幕, 齿形带上开合适宽度的长条形孔作为曝光帘缝, 通过改变帘缝运动速度调整曝光时间。采用两个快门帘幕正交布置、同步驱动的方法实现了两片面阵 CCD 同时曝光。通过编码器反馈, 控制快门驱动电机转速, 使 CCD 曝光时快门帘保持稳速, 从而保证 CCD 曝光均匀性。实际测试显示, 快门曝光可实现 1/300~1/1000 s 连续可调, CCD 曝光均匀性优于 10%。另外, 通过更换快门帘, 改变曝光帘缝宽度, 可进一步拓宽曝光时间调节范围。实验结果表明, 此种快门能够满足面阵 CCD 航空相机的成像要求。

关键词: 航空相机; 焦面帘幕式快门; 曝光均匀性; 曝光时间

中图分类号: V475.3 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111903.0587

Design of focal plane-curtain shutter and its performance test

ZHANG Hong-wen^{1,2}, LENG Xue², ZHANG Ji-chao², DING Ya-lin², CAO Guo-hua¹

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130025, China;

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

Abstract: A type of focal plane-curtain shutter was designed for a small focal plane aerial camera whose CCD image was orthogonal and vertical distribution due to the prism splicing. By taking the cog belt as the shutter curtains and the appropriate strip-shaped slit on the curtain as exposure slit, the exposure time of the shutter was determined by the velocity of the shutter curtains. The simultaneous exposure of two pieces of CCDs was implemented by the orthogonal layout and synchrodriving of two shutter curtains. According to the feedback of an encoder, the velocity of shutter motor was controlled by a DSP. Therefore, the shutter curtain ran at a steady speed and offered the exposure uniformity of CCD. Experiment results demonstrate that the shutter has a higher movement stability and a long life span in the range of continuous stepless adjustment exposure time (1/300–1/1000 s), and its exposure error is less than 10%. Furthermore, by changing the shutter curtain and the slit width, the exposure time range can be extended. Obtained result shows that the performance of this shutter

收稿日期: 2010-06-01; 修订日期: 2010-08-05.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA06A208); 中国科学院知识创新领域前沿项目(No.

070Y32R070)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

fully satisfies the requirements of area CCD aerial cameras.

Key words: aerial camera; single curtain shutter; exposure uniformity; exposure time

1 引言

航空侦察是军事侦察的重要组成部分,航空侦察的关键在于大面阵 CCD 相机的发展。快门作为面阵 CCD 相机的关键部件也随着相机的发展而不断发展。快门形式多种多样,按工作原理分有纯机械快门、机械电子快门和电子快门;按快门帘形式分有焦面帘幕式快门和焦面钢片式快门^[1-3]。

焦面帘幕式快门常见的形式是采用上、下两个帘,两个帘开口部分相互错开一个位置形成曝光狭缝,帘幕材料为超薄钢带或涂胶黑布。比较有代表性的焦面帘幕式快门有美国 Recon/optical 公司 60 年代研制的应用在 KS-87 相机上的焦面帘幕式快门;美国 Recon/optical 公司 80 年代研制的应用在 KS-147 相机上的新型焦面帘幕式快门^[4-5]。快门帘的运动速度恒定,一次拍照结束后,快门辊轴反卷,使快门帘回到初始位置等待下一次拍照。快门通过改变上、下两个帘的相互位置关系改变狭缝大小,进而调整曝光时间。这种快门在结构上比较复杂,占用空间尺寸较大。

焦面钢片式快门也是采用上、下两个帘的结构形式,每个帘由一组钢片构成,通过钢片的展开、收缩实现快门上、下两个帘的运动,比较有代表性的有日本 Nikon 公司 90 年代研制的应用在尼康相机上的焦面钢片式快门;瑞士 Heerbrugg 公司 2008 年研制的应用在 Leica RCD105 数字相机上的焦面钢片式快门^[6-7]。快门帘由电磁驱动,快门一个帘打开后开始曝光,另一个帘关闭时结束曝光,通过每个帘启动的时间差改变帘缝宽度,从而改变曝光时间。此种快门结构紧凑,外形尺寸较小,比较适用于焦面空间尺寸较小的相机。

目前,国外焦面帘幕式快门的发展已趋于成熟,而国内快门发展比较落后,现阶段还没有较成熟的高性能焦面帘幕式快门。本文研究的快门针

对某型透射式光学系统的面阵相机,采用两个面阵 CCD 棱镜拼接,面阵 CCD 探测器焦面与棱镜面仅为 20 mm,且要求两个面阵 CCD 前的曝光狭缝精确同步。针对相机的上述特点,提出了一种结构简单,外形尺寸较小的焦面帘幕式快门,并通过实验测试其性能。本快门具有如下特点:其一,快门采用单帘周向运动形式,狭缝宽度固定,通过改变帘幕运动速度调整曝光时间;其二,对应两个面阵 CCD 探测器位置关系,采用主、副快门的组合结构,主、副快门帘采用相互正交垂直布置,通过 DSP 控制一个电机同时驱动,保证两个帘同步运动精度。

2 焦面帘幕式快门的结构及原理

2.1 焦面帘幕式快门原理

本文提出的焦面帘幕式快门采用一个帘的形式,快门帘为环形,周向均布有宽度相等的 3 个狭缝,单向运动。相机照相时,每拍照一幅图片快门帘转三分之一周停在一个位置,等待下一次拍照。由于快门帘为环形,因此快门帘只需向一个方向运动,无需返回即可连续拍照,结构示意图如图 3 所示。在曝光时,快门帘的运动速度恒定,快门曝光时间的大小通过调整快门帘运动速度来实现,

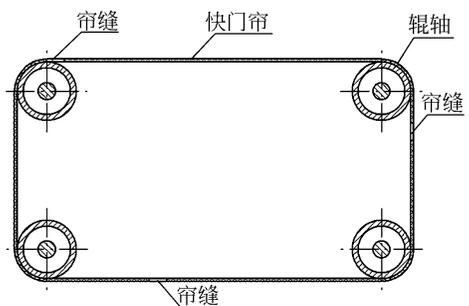


图 3 环形帘的焦面帘幕式快门帘形式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of focal-plane curtain shutter with ring-shaped curtain

不同曝光时间对应不同的快门帘运动速度。使用这种快门, 需将 CCD 探测器放置在环形帘内, 曝光结束时, 快门帘无需反卷, 不需要另外增加一个帘或机构遮挡住光线防止 CCD 探测器继续曝光。这种快门结构简单, 外形尺寸也较小, 自动化程度高, 拍照时依据测光元件实时测得的地面照度调整快门帘运动速度, 从而改变快门曝光时间。

2.3 焦面帘幕式快门结构

快门为焦面帘幕式正交组合结构形式, 电机同时驱动主、副两个独立的多缝式快门帘, 保证两片 CCD 曝光一致性。快门组件主要由主快门、副快门、驱动电机、减速器、编码器、离合器、框架、快门帘、固定辊组件、张力辊组件等组成^[7], 结构如图 4 所示。

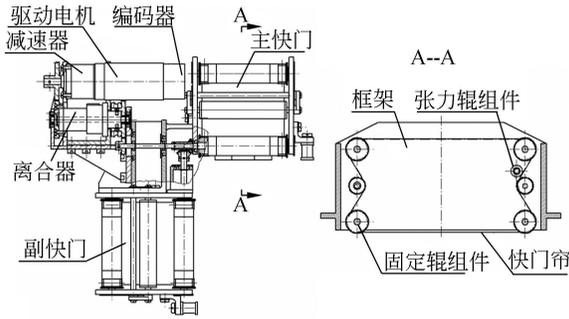


图 4 快门组件结构简图

Fig. 4 Schematic drawing of shutter mechanism

快门组件驱动电机采用高速力矩电机, 电机前端联接速比为 5/24 的减速器, 电机后端联接增量式编码器。快门采用一种弹簧离合器, 前端通过一对速比为 1:1 的齿轮与减速器相连, 后端通过一对速比为 7:3 的齿轮与快门固定辊组件相联。快门帘安装在 4 个固定辊上, 通过张力辊张紧。快门帘周向均匀分布 3 个 2.5 mm × 42 mm 的长条形开口作为快门帘缝, 帘缝间隔为 140 mm, 如图 5 所示。

快门驱动电机、减速器、编码器构成快门的驱动组件, 快门工作时电机连续转动, 离合器断开, 此时无力矩输出。相机开始拍照时, 相机控制器发出摄影脉冲, 离合器通电, 快门电机通过一对齿轮带动离合器转动, 离合器通过齿轮及锥齿轮同

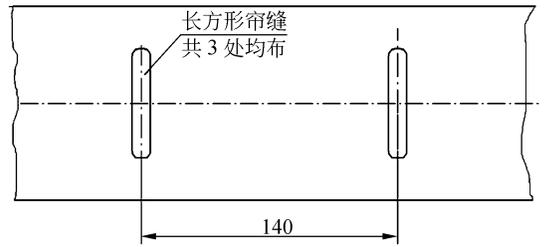


图 5 快门帘缝示意图

Fig. 5 Schematic plan of shutter slit

时驱动主、副快门的固定辊组件转动, 带动主、副快门的快门帘高速同步匀速运动, 快门由安装在电机轴上的传感器反馈实现快门电机的稳速控制。当帘缝运动到进入幅面时, CCD 探测器曝光, 当帘缝离开曝光幅面时, CCD 探测器曝光结束, 进入初始位置等待下一次曝光。

2.4 快门曝光时间的调节范围

快门曝光是快门的一项重要性能指标, 本相机要求快门曝光时间可在 1/300~1/1000 s 调节。快门曝光时间的调节是通过改变快门驱动电机转速来改变帘缝运动速度实现的, 快门驱动电机转速 R_{motor} 为 1028~5142 r/min, 快门曝光时间由公式(1)计算:

$$t = \frac{b}{i_1 i_2 d_{rol} R_{motor}} \quad (1)$$

其中, b 为帘缝宽度 2.5 mm; i_1 为快门驱动电机到离合器之间的传动比, 取 5/24; i_2 为离合器到快门固定辊轴之间的传动比, 取 7/3; d_{rol} 为快门固定辊轴直径, 取 19.1 mm。由上式可知, 快门曝光时间为 1/200~1/1000 s, 满足使用要求。通过更换快门帘, 改变帘缝宽度, 可以进一步拓展曝光时间范围, 如帘缝宽度为 2 mm 时, 快门曝光时间为 1/250~1/1250 s; 帘缝宽度为 12.5 mm 时, 快门曝光时间 1/40~1/200 s。

3 测试结果及分析

快门帘运动速度的均匀性是快门的又一项重要性能指标, 本相机要求快门帘运动速度均匀性不大于 10%。快门工作时, 在帘缝通过 CCD 焦

面过程中,快门电机转速和带动快门帘运动的齿轮、辊轴的间隙以及快门帘的颤动都会引起快门帘运动速度不均匀,使 CCD 焦面各点处的曝光时间不同,导致 CCD 曝光不均匀,因此需要通过实验进一步分析以上因素产生的影响。

3.1 快门电机转速测试结果

下图是帘缝宽度为 2.5 mm,曝光时间为 1/360 s 时快门帘稳速情况,此时对应的快门帘运动速度应为 900 mm/s,对应的电机转速为 1 800 r/min,示波器测试结果如图 6 所示。

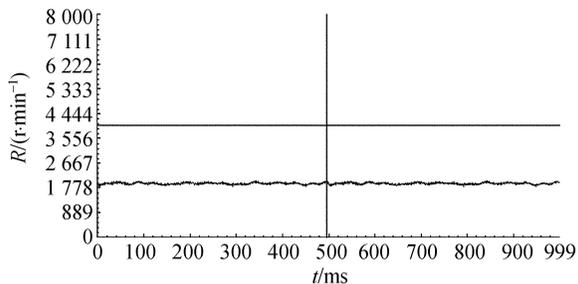


图 6 电机转速测试结果

Fig. 6 Test result of motor velocity

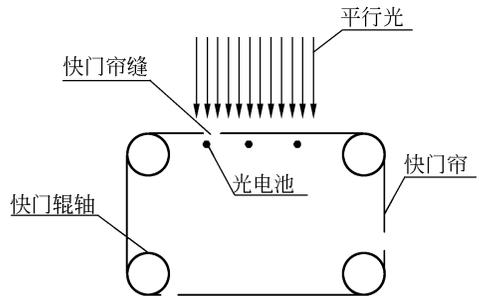
快门电机稳速误差 计算公式如下:电机转速的波动 R_{wave} 为 80 r/min,电机转速 R_{motor} 为 1 800 r/min,由此可知快门电机的稳速误差。

$$\varepsilon = \frac{R_{\text{wave}}}{R_{\text{motor}}} \cdot 100\% = \frac{80}{1800} \cdot 100\% = 4.4\% \quad (2)$$

3.2 快门曝光时间及快门帘运动速度均匀性测试结果分析

实验时,采用帘缝宽度为 2.5 mm 的快门帘,在快门帘一侧选取任意 3 个位置布置 3 个光电池,在快门帘另一侧用平行光照射。快门曝光时间及快门帘运动速度均匀性检测原理图如图 7 所示。

检测时,快门每工作一次,快门帘曝光狭缝依次略过光电池,通过示波器测量光电池电压,每个光电池形成一个方波,测得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范围,测试结果如表 1 所示。



7 快门曝光时间及快门帘运动速度均匀性检测原理

Fig. 7 Schematic diagram of test of exposure time and curtain velocity uniformity

表 1 快门曝光时间测试结果

Tab. 1 Test results of shutter exposure time

次数	电机转速 $/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	快门帘运动 速度 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	快门帘缝 宽度/mm	检测曝光 时间/s
1	950	0.475	2.5	1/202
2	1 800	0.9	2.5	1/360
3	2 100	1.05	2.5	1/415
4	3 200	1.6	2.5	1/658
5	4 200	2.1	2.5	1/829
6	5 500	2.75	2.5	1/1179

由表 1 可知,帘缝宽度为 2.5 mm 时,快门曝光时间为 1/202 ~ 1/1 179 s,满足 1/300 ~ 1/1 000 s 的曝光时间要求。

快门电机不直接驱动快门帘运动,快门电机保证稳速并不能说明快门帘也同样稳速运动,而快门帘运动又不易测量,那么,如何测量快门帘运动速度均匀性呢。由于快门帘运动速度均匀性是导致面阵 CCD 上不同位置的曝光时间不同的唯一因素,因此通过测量面阵 CCD 上不同位置的曝光时间可以间接测量快门帘运动速度均匀性。测量方法与测量快门曝光时间调节范围方法相同,测量时,电机转速不变,多次测量任意 3 点位置的曝光时间,取实测曝光时间与理论计算曝光时间差值的最大值作为曝光时间最大误差,即为快门帘运动速度均匀性误差^[8]。测试结果如表 2 所示。

表2 快门帘运动速度均匀性测试结果

Tab.2 Test result of curtain velocity uniformity

次数	电机转速 $/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	快门帘运动速度 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	快门帘缝宽度/mm	计算曝光时间/ms	检测点1曝光时间		检测点2曝光时间		检测点3曝光时间	
					实测值/ms	与计算曝光时间差值/ms	实测值/ms	与计算曝光时间差值/ms	实测值/ms	与计算曝光时间差值/ms
1	2100	1.6	2.5	2.38	2.52	0.14	2.43	0.05	2.45	0.07
2	2100	1.6	2.5	2.38	2.31	-0.07	2.54	0.16	2.47	0.09
3	2100	1.6	2.5	2.38	2.45	0.07	2.59	0.21	2.51	0.13
4	2100	1.6	2.5	2.38	2.30	-0.08	2.41	0.03	2.39	0.01
5	2100	1.6	2.5	2.38	2.27	-0.11	2.48	0.10	2.40	0.02
6	2100	1.6	2.5	2.38	2.25	-0.13	2.41	0.03	2.47	0.09
7	2100	1.6	2.5	2.38	2.51	0.13	2.47	0.09	2.39	0.01
8	2100	1.6	2.5	2.38	2.38	0	2.54	0.16	2.29	-0.09
9	2100	1.6	2.5	2.38	2.49	0.11	2.34	-0.04	2.20	-0.18
10	2100	1.6	2.5	2.38	2.55	0.17	2.42	0.04	2.55	0.17

由表2可知,实测与理论计算曝光时间的最大差值为0.18 ms,快门帘运动速度均匀性最大误差^[9]为:

$$\delta = \frac{\max}{\min} 100\% = \frac{0.18}{2.38} = 7.6\% \quad (3)$$

由以上检测结果可知,快门帘运动速度均匀性误差为7.6%,满足相机指标要求。快门帘是由快门电机驱动的,理想条件下,快门电机稳速误差即为快门帘运动速度均匀性误差,但传动链内的空回、运动中齿形带颤动都会对快门运动速度均匀性产生影响。由前面检测可知,快门电机转速误差为4.4%,快门帘运动速度均匀性误差为7.6%,可知传动链内的空回、运动中齿形带颤动给快门帘运动速度均匀性造成3.2%的误差影响。因此,若进一步提高快门运动速度均匀性,需采取措施提高快门电机稳速精度,减小传动链内的空回,限制齿形带颤动。

4 结束语

本文针对大面阵 CCD 相机棱镜拼接的特点,提出了一种单帘正交组合式快门的结构形式,并介绍了快门的结构和工作原理,对快门的曝光时间进行了计算、检测。实验结果表明:快门曝光时间可在1/200~1/1000 s调节,快门帘运动速度均匀性优于8%,基本满足了相机的成像要求。本快门具有结构简单,尺寸小的优点,通过更改快门帘的尺寸,快门可以适应各种尺寸焦面相机的要求,但由于快门帘为环行结构,使用时 CCD 探测器需放置在快门帘环行结构内,这样导致了在维修快门时需将 CCD 探测器取下才能装拆快门,操作烦琐且不易保证每次安装 CCD 探测器的位置精度。另外,在地面照度低时,由于需要较长的曝光时间,必须降低快门帘的运动速度,导致相机拍照一幅照片的时间较长,因此本快门不适合在摄影周期较短的航空相机上使用^[10]。

参考文献:

- [1] BROWN E B. V/H image motion in aerial cameras [J]. *Photogrammetric Engineering*, 1965(1): 308-323.
- [2] MARCKMANN G, VERRON E, GORNET L, et al.. A theory of network alteration for the Mullins effect [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2002, 50: 2011-2028.

- [3] BOYCE M C, ARRUDA E M. Constitutive models of rubber elasticity: a review [J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 2000, 73(3): 504-552.
- [4] TRELOAR L R G. The elasticity of a network of long chain molecules [J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1943, 16(4): 746-751.
- [5] RIVLIN R S. Large elastic deformation of isotropic materials: I. Fundamental concepts, II. Some uniqueness theories for pure homogeneous deforma-

- tions[J]. *Philos Trans Roy Soc Lond Ser A*, 1948, 240: 459-508.
- [6] MOONEY R. A theory of large elastic deformation [J]. *J Appl Phys*, 1940, 11: 582-592.
- [7] 李威, 李朝晖, 颜昌翔, 等. 胶片型航空相机的快门设计和研究[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(增): 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, 13(supp.): 9-14. (in Chinese)
- [8] 张雷, 亚林, 蒋桂德. 帘幕式快门曝光精度数学建模及计算[J]. *光学 精密工程*, 2009, 9(9): 98-105.
- ZHANG L, DING Y L, JIANG G D. Mathematical modeling and calculation on exposure time of curtain-type shutter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 9(9): 98-105. (in Chinese)
- [9] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- MAO Y T. *The Theory of Errors and Analysis of Accuracy* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982. (in Chinese)
- [10] 刘明, 吴宏圣, 匡海鹏, 等. 航相机的像移补偿方法及应用[J]. *光学 精密工程*, 2004, 12(4): 30-34.
- LIU M, WU H SH, KUANG H P, *et al.*. Method and application of image motion compensation in aerospace camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 30-34. (in Chinese)

作者简介:



张洪文(1974-), 男, 吉林长春人, 副研究员, 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



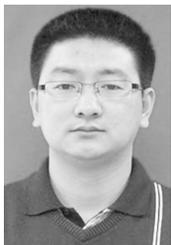
丁亚林(1964-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事航空遥感相机稳定成像技术的研究。E-mail: dingy11964@sohu.com



冷雪(1976-), 男, 吉林长春人, 助理研究员, 主要从事航空航天相机的研制工作。E-mail: kramer@126.com



曹国华(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测、机电系统控制理论与技术等方面的教学和研究工作。E-mail: zhw_sohu@sina.com



张继超(1981-), 男, 辽宁清原人, 助理研究员, 2003 年于吉林大学获学士学位, 2008 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, 主要从事航空相机结构设计的研究。E-mail: zhangjichao@sohu.com