

The Design of a Vertical-travel Electromagnetically Controlled Focal Plane Shutter, and the Study of the Shutter's Test Method

Zhan lei

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

Abstract:

Due to the limitations of the optical systems certain type of high-altitude plane array aerial camera, a suitable narrow space, high-frequency, large format shutter has been needed. The ordinary focal plane shutter which was widely used by aerial camera is unable to meet the requirements. For this purpose, the design of a vertical-travel electromagnetically controlled focal plane shutter, and the study of the shutter prosecutors makes the fine adjustment of the shutter moving parts of the shutter of the camera requirements. The shutter has small size, high frequency and large format, which has broad application prospects in the fields of aerial camera.

Keywords: Aerial Camera; Vertical-Travel Electromagnetically Controlled Focal Plane Shutter; Exposure Control

纵走式电磁控制焦平面快门设计 及测试方法的研究

詹磊

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033

摘要: 由于某型高空面阵航空相机光机系统的限制, 需要一种适用于狭小空间且高频大幅面的快门。而航空相机上普遍使用的普通焦面帘幕式快门已经无法满足其要求。为此设计了一种纵走式电磁控制焦平面快门, 并研究了该快门的检测方法, 实现了对快门作动部件的精细调校。该型快门尺寸小、频率高、幅面大, 在航空相机领域有着广泛的应用前景。

关键词: 航空相机; 纵走式电磁控制焦平面快门; 曝光控制

引言

为准确应对我国不断恶化的周边地区形势, 我军需要获得高质量的情报信息。而高性能的航空侦察相机是圆满完成航空侦察任务的必要保障。为满足我军的实际需求, 在总体单位的协调下, 我部承担了国产第一款面阵 CCD 航空相机的研制任务。

相机要获得高分辨率的图像, 除了采用高传函的光学成像系统和高性能的成像器件外, 还需要对像移补偿和曝光量进行精密的控制^[1]。相机需要一种能满足要求的快门与相关机构、器件配合, 才能完成所需的精确操作。快门作为相机的关键部件, 在国外已经发展到相当成熟的阶段。如由美国 Recon/optical 公司 60 年代研制的焦面帘幕式快门, 应用在 KS-87 相机上; 美国 Recon/optical 公司 80 年代研制的新型焦面帘幕式快门, 应用在 KS-147 相机上^[2-3]。国内快门发展比较落后, 现阶段还没有较成熟的高性能快门。因此, 研制一种适宜狭小空间、较宽幅面、能均匀调整曝光时间、并具备较高工作频率和长时间连续工作能力的快门成为该型相机的研究重点。为此, 设计了一种纵走式电磁控制焦平面快门, 并对其测试方法进行了研究。

1 快门工作原理、设计方案及运动模型

1.1 工作原理

纵走式焦平面快门紧靠安装在相机 CCD 前面，一般由两组运动叶片组成^[4]。两组叶片分别由两个弹簧驱动。快门上紧时，前、后叶片组部分重叠地由一端拉往另一端，此时不漏光。这时与前、后叶片组相连接的驱动弹簧同时被卷紧，积蓄动力。在释放快门时，前叶片组首先开始开启运动，而后叶片组仍被锁止。根据所需的快门曝光时间，设定前、后叶片组的开启时间差，使前、后叶片组运动时形成合适的缝隙，缝隙以一定速度在 CCD 前面扫过，使 CCD 逐步曝光。动作结束后，前、后叶片组又互相重叠，准备下一次上紧再曝光。焦平面快门的曝光时间由前、后叶片组间缝隙的宽度和叶片组运动速度所决定，改变这两个参数就可以改变快门的曝光时间，改变叶片组运动速度将引起结构复杂，动作可靠性差，已不采用。增大缝隙使曝光时间延长，可提高光学有效系数，这对提高快门的工作性能是有利的。

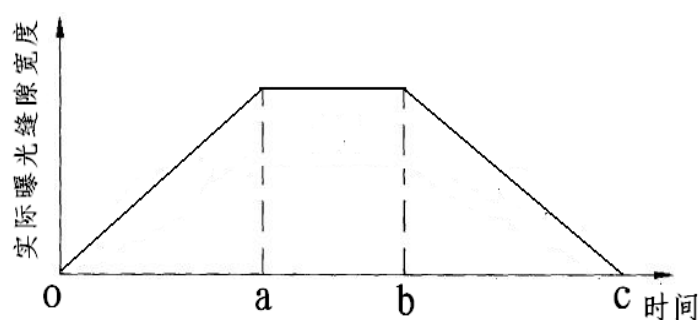


图1 快门曝光时间示意图

所示为快门的曝光过程。oa 段是缝隙逐渐从画框外侧进入画框的过程、ab 段是缝隙完全进入画框后在 CCD 上扫过的过程，bc 段是缝隙逐渐从画框进入画框外侧的过程。在 oa 段和 bc 段存在光能量的损失，只有在 ab 段光能量才能被充分利用。

1.2 设计方案

如图 2 所示，快门主要由画框、前后叶片组、两个驱动和两组曝光信号采集器构成。工作时电机驱动两组叶片组上紧，同时两个驱动弹簧蓄能，到锁紧位置后锁紧电磁铁锁住相应叶片组不动，等待释放信号。先释放前叶片组，此时相应锁紧电磁铁下电，在驱动弹簧的作用下，前叶片组开始运动。在一定时间差后，释放后叶片组，此时相应锁紧电磁铁下电，在驱动弹簧的作用下，后叶片组开始运动。两组叶片的运动状态由分别由两组曝光信号采集器监测。

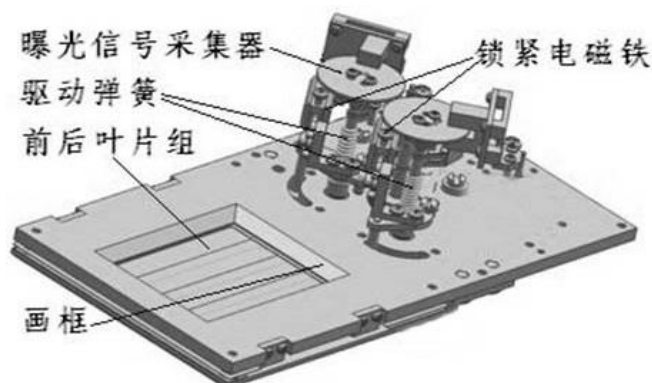


图2 快门结构示意图

1.3 运动模型

快门的前后叶片组在曝光过程中以纵向的直线运动为主。设叶片组质量为 $[m]$ ，叶片的纵向运动为 s ，则存在如下关系：

$$F = [m] \frac{d^2 s}{dt^2} \quad (1)$$

快门中的驱动弹簧的作用力矩 T 可表示为：

$$T = \frac{e d^4 n \phi}{64 D} = Z \cdot \phi \quad (2)$$

式中， e 为弹簧钢丝的弹性模量， d 为钢丝直径， D 为弹簧中径， n 为弹簧圈数， ϕ 为弹簧转角， Z 为弹簧刚度。

驱动弹簧在上紧前需要预紧，设预紧力矩 T_1 ，弹簧相应预紧角为 ϕ_1 ，弹簧上紧后力矩 T_2 ，预紧角为 ϕ_2 ，则弹簧驱动力矩 T 可用下式表示

$$T = T_2 - T_1 = Z(\phi_2 - \phi_1) \quad (3)$$

由于存在 $T = F \cdot r$ ，则根据式（3）得到弹簧驱动力 F

$$F = \frac{T_2}{R} - \frac{ZS}{R^2} \quad (4)$$

设叶片组纵向运动的作用力为 $F' = kF$ ，则由式（1）、（3）得到驱动力矩作用在叶片组的方程为

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{kZ}{[m]r^2} s - \frac{kT_1}{[m]r} = 0 \quad (5)$$

$$\text{令 } A^2 = \frac{kZ}{[m]r^2}, \quad B = \frac{kT_1}{[m]r},$$

则解得方程

$$s = \frac{B}{A^2} (1 - \cos At) \quad (6)$$

利用上式可以计算叶片组运动到任意曝光点的时间，指导快门的实际装调工作。

2 测试方法及结果分析

曝光均匀性和曝光时间是快门的两项重要指标。相机要求快门曝光均匀性和曝光时间误差不大于 10%。曝光均匀性反映在同一次曝光过程中，快门不同点曝光时间的一致程度。曝光时间误差反映快门实际曝光时间与设定曝光时间的偏差程度。快门工作时，叶片组运动特性的匹配会直接影响上述两个指标。

2.1 测试方法

用光电法测量快门的曝光时间，其原理如图 3 所示，平行光经过快门的缝隙后，光电池感光产生电压信号，通过测试电路将信号传给示波器，从而测得曝光时间。

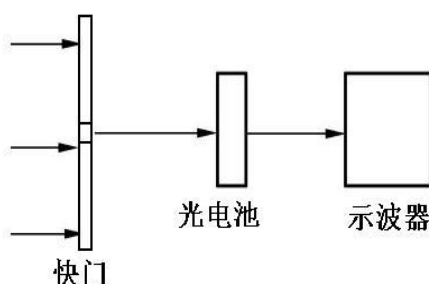


图 3 测试原理示意图

根据测试原理设计了测试仪器。图 4 所示为测试仪器的实体模型，可以看到为了反映整个焦平面的实际曝光状态，在信号接收板上设置了 9 个测试点。

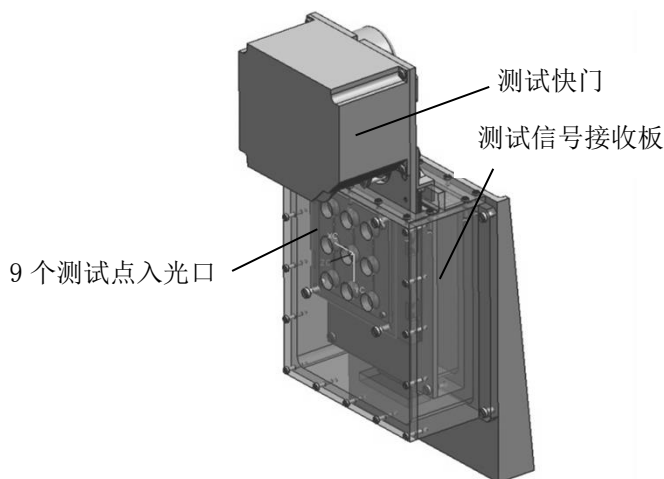


图 4 测试仪器实体模型

表 1 测试数据 (单位 ms)

	测试点1	测试点2	测试点3	测试点4	测试点5	测试点6	测试点7	测试点8	测试点9
1	9.82	9.85	9.84	9.89	9.91	9.92	9.94	9.86	9.88
2	9.83	9.93	9.92	9.87	9.90	9.89	9.90	9.89	9.88
3	9.91	9.92	9.85	9.91	9.88	9.84	9.82	9.83	9.87
4	9.95	9.90	9.89	9.88	9.84	9.86	9.91	9.83	9.94
5	9.89	9.96	9.88	9.89	9.85	9.86	9.83	9.87	9.85
设定值	10	平均值	9.88	曝光时间误差	1.2%	曝光均匀性偏差	0.7%		

表 1 所示为设定值 10ms 的测试数据，可以看到指标满足相机要求。在实际测试中发现，快门曝光均匀性绝对偏差量变化不大，带来的影响是曝光时间愈长，曝光均匀性偏差愈小，反之愈大。当设定值 3ms 时，曝光均匀性偏差已经超过 10%。

3 总结

本文依据某型相机的要求，提出了一种纵走式电磁控制焦平面快门的设计方案，并研究了测试方法。经过实际相机飞行测试，证明该快门基本满足相机要求。同时在快门的实际工作过程中也暴露出一些问题，如快门寿命还低于要求，需要进一步完善设计和加工工艺。

REFERENCES

- [1] 刘明,吴宏圣,匡海鹏,等.航空相机的像移补偿方法及应用[J].光学精密工程, 2004, 12(4): 30-34.
- [2] TRELOAR L R G. The elasticity of a network of long chain molecules [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1943, 16(4):746-751.
- [3] RIVLIN R S. Large elastic deformation of isotropic materials: I. Fundamental concepts, II. Some uniqueness theorems for pure homogeneous deformations [J]. Philos Trans Roy Soc Lond Ser A, 1948, 240: 459- 508.
- [4] 王兆远主编.照相机原理, 结构, 设计基础.北京:机械工业出版社, 1991.

【作者简介】



詹磊，2004 年于吉林大学获得学士学位，2009 年于中国科学院获得硕士学位，现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员，主要研究方向为航空相机光机结构设计。
E-mail: zhanlei1121@sina.com