

文章编号 1004-924X(2018)01-0105-09

航空摄影镜间快门机构的设计

于春风^{1*}, 李 辉², 贾 平¹, 丁亚林¹

(1. 中国科学院 航空光学成像与测量重点实验室
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. 长春设备工艺研究所, 吉林 长春 130012)

摘要: 本文设计了一种应用于测绘型数字航空摄影相机的新型镜间快门, 该快门具有结构紧凑、布局合理及可靠性高等特点, 快门采用双叶片结构形式实现了五叶片快门同样高的快门效率。快门通过小型化设计, 实现同轴轮系按不同传动比驱动双叶片旋转实现控制曝光的目的。控制电机转速连续调节叶片转速, 可获得合适曝光量。对快门进行了模拟和实验分析, 实验结果表明, 快门的曝光时间范围达到 $1/100\text{ s} \sim 1/1000\text{ s}$, 效率达到 85%, 快门对光学畸变影响小, 具有曝光时间范围广、快门效率高和刚度较大等优点, 同时刚度和强度满足相机的使用要求。

关键词: 镜间快门; 快门效率; 曝光时间; 畸变; 快门叶片

中图分类号: TP73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182601.0105

Lens shutter for aerial photography

YU Chun-feng^{1*}, LI Hui², JIA Ping¹, DING Ya-lin¹

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Changchun Equipment and Technology Research Institution, Changchun 130012, China)

* Corresponding author, E-mail: hou791016@163.com

Abstract: In this study, a novel type of lens shutter with compact structure, reasonable layout and high reliability was designed for use in digital aerial photography mapping cameras. The double-blade shutter achieved the same shutter efficiency as a five-blade shutter. A coaxial gear train with different transmission ratios drives the double-blade rotation by miniaturized design, thereby controlling exposure. The speed of the blade is varied continuously by controlling motor speed, which helps attain the appropriate exposure. Simulation and experimental analysis of the shutter indicates that the range of shutter exposure time reaches $1/100\text{ s} \sim 1/1000\text{ s}$, and the shutter efficiency can increase to 85%. The shutter with wide exposure time and high shutter efficiency is found to have small effects on optical distortion, and sufficient stiffness to meet the camera requirements.

Key words: lens shutter; shutter efficiency; exposure time; distortion; shutter-blade

收稿日期: 2017-04-18; 修订日期: 2017-06-22.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFC0803000)

1 引言

航空遥感摄影是获取目标信息的一种重要侦察手段,包括目标的探测、监视及测绘等,航空相机的应用环境特殊,例如飞机、气球及飞艇等,这些载体始终处于运动且速度变化范围广,导致摄影距离变化范围宽以及经纬度不同,这些因素都会影响曝光量,因此,航空摄影相机快门无论是工作原理、工作方式还是工作条件等都需要特殊设计。随着快门技术的发展,航空摄影相机逐渐实现了自动化、小型化及智能化。在航空摄影相机发展初期,胶片的感光度很低,因此,曝光时间相对很长,系统通过拆装镜头盖的方式来控制曝光量。自从 CCD 光电耦合器件出现后,航空摄影的要求不断提高,发展形成了现代意义上的快门。在航空摄影过程中,如果不能正确控制成像介质的曝光量^[1],将无法获得高分辨率的图像,曝光过度或曝光不足都会导致目标信息的丢失,相机性能及功能便无从发挥,因此,快门是相机极其重要的部件。

目前,随着 CCD 探测器技术的日益成熟,航空摄影相机在高分辨率、宽覆盖、低畸变和实时传输等方面发展迅速。本文依托数字航空摄影相机的研制,结合相机技术指标要求以及快门的工作特性,研制了一种航空镜间快门机构。本文根据数字航空摄影相机的研制要求,充分考虑快门机构的工作方式及工作原理,满足相机的空间尺寸需求,同时快门具有曝光时间调节范围宽、快门效率高以及曝光量可调等特性,从而保证相机能够获得高分辨率的清晰图像。

2 航空相机快门的基本类型

航空相机快门的种类有很多,根据快门在航空相机中的安装位置,可分为物镜快门和焦面快门^[2]。根据快门在物镜中的安装位置又可以分为镜前快门、镜间快门和镜后快门三种类型。其中,镜前快门是早期胶片感光度低、曝光时间长时使

用的一种快门,快门效率低下,现已很少使用。镜后快门容易出现形变、积沉和垢损等问题,从而引发故障。在航空摄影中基本不采用这两种类型的快门。镜间快门位于物镜的前、后镜组中间光束最细的地方,主要分为中心和百叶窗两种类型。焦面快门安装于焦面附近并紧靠感光元件前面,主要分为卷帘和狭缝两种类型^[3]。除此之外还有电子快门,通过自身电路控制 CCD 感光。根据航空相机快门的特点,不同类型的航空遥感相机选择安装不同类型的航空快门。

2.1 帘幕快门

帘幕式快门是通过带缝隙的不透光帘幕打开和关闭物镜的通光孔径,帘幕位于焦平面前侧,紧靠感光元件。帘幕式快门遮断的每一个像点的光束很细,可实现很短的曝光时间,并获得很高的快门通光效率,但帘幕狭缝是使整个像面逐条依次曝光,沿狭缝推扫方向上的像点不能同时曝光时间,容易引起图像畸变,降低分辨率。通常航空相机在航拍时,为保证相机具有较高的成像分辨率,航空相机都设计有像移补偿机构,来补偿由于飞机前向飞行产生的前向像移和飞机姿态变化产生的俯仰、横滚、偏航方向上的像移,但由于存在像移补偿残差,快门引起的像面分时曝光仍会产生成像畸变^[4],因此无法应用到航空测绘型相机上。

2.2 百叶窗快门

百叶窗快门有单向运动和反复运动两种^[5]。叶片布置形式分辐向和平行排列。百叶窗式快门可应用于具有较大面积通光孔径的光学成像系统。航空相机采用的百叶窗快门主要是单向连续运动方式,可以减少振动和缩短曝光时间,但最短曝光时间也只能达到 $1/300$ s,快门通光效率低,通常不会超过 0.5。该快门通常应用于夜间工作的航空遥感相机,利用炸弹照明目标。

2.3 中心快门

根据中心式快门具有的叶片数量,将快门分为单叶片快门、双叶片快门、三叶片快门以及五叶片快门等。快门叶片的数量越多,曝光时间越短,快门效率越高,但五片以上的快门已经无法提高

快门的性能,最具代表性的是泼朗特型和康盘型两种快门。中心式快门的工作方式是通光孔径由视轴处开启,逐渐扩大,然后再逐渐缩小,直至通光孔径完全闭合。快门可保证像面上各个像点的曝光时间都相同^[6],这是中心式快门的一大优点;缺点则是快门机构复杂,占用空间大,前、后镜组间需要有较大的空气间隔。

2.4 电子快门

随着 CCD 控制技术的深入发展,产生了电子快门,一般的电子快门曝光时间都可以达到 1/2 000 s,甚至达到 1/15 000 s 或者更高。电子快门的最大优点是可以获得足够短的曝光时间;缺点则是易受环境影响,在温差变化大时曝光会产生迟滞,导致目标信息丢失。通常电子快门需同机械快门配合使用,避免 CCD 长时间被照射。面阵 CCD 现阶段还无法控制入射光激励电荷结束时刻,所以必须结合机械快门使用。部分 CMOS 传感器可以实现,但读出噪声很大,对图像质量有影响。此外,还有克尔快门,该快门应用于高速摄影,利用电场脉冲控制克尔盒内的液体呈各向异性,引起偏振光的偏振面^[7]旋转,快门具有很短的曝光时间,但通光效率却很低,同时存在漏光现象,还无法应用于航空摄影,因此,机械快门仍是航空相机必不可少的机构。

3 镜间快门的结构设计

数字航空摄影相机属于测绘型相机,图像畸变量需小于 0.04%,快门不能影响内方位元素的标定精度,同时满足物镜前后镜组的空气间隔只有 4 mm 的尺寸要求。综合考虑相机的曝光时间范围、快门效率以及快门强度等性能指标要求,本文设计了一种新型航空镜间快门,快门主要由两片叶片(快叶片和慢叶片)、快门壳体、传动轮系、一周离合器以及驱动电机等组成,其实物如图 1 所示。

快叶片和慢叶片分别通过精密轴承安装在各自的转轴一端,且两转轴同心,两转轴的另一端分别安装了传动齿轮,与离合器输出端的锥齿轮啮

合,两对齿轮副以固定传动比传动。相机拍照一次,离合器旋转一圈,快叶片和慢叶片上的扇形孔同时通过光学系统的孔径光阑时相机曝光成像一次,快叶片保证相机得到所需的曝光时间,慢叶片保证相机每成一次像只将光栏孔径打开一次,相当于光阑。



图 1 快门实物照片

Fig. 1 Photograph of shutter

3.1 快门轮系传动比计算

镜间快门的轮系为定轴轮系,其传动关系如图 2 所示。

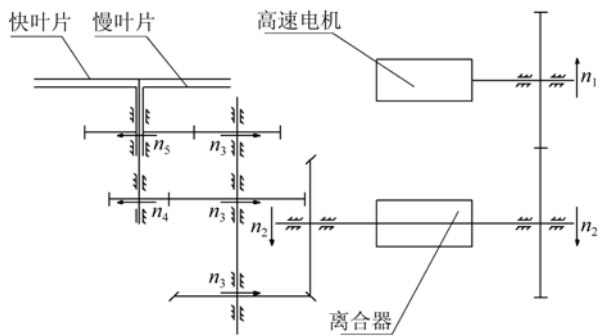


图 2 镜间快门轮系图

Fig. 2 Schematic diagram of gear train of lens shutter

根据定轴轮系传动的传动关系可得快叶片与电机的速比为:

$$\frac{\omega_k}{\omega_e} = i_e \times i_{12} \times i_{23} \times i_{34} = \frac{31.9}{20}, \quad (1)$$

式中: ω_e 为快门电机转速; ω_k 为快叶片转速。

同理,可得慢叶片与电机的速比为:

$$\frac{\omega_s}{\omega_e} = i_e \times i_{12} \times i_{23} \times i_{35} = \frac{127.6}{20}, \quad (2)$$

式中 ω_s 为慢叶片转速。

3.2 镜间快门的叶片设计

相机光学系统的前透镜组和后透镜组之间的空气间隔只有 4 mm,并且在空气间隔的中间位置还要放置 0.2 mm 厚的孔径光阑,叶片与孔径光阑和透镜组的距离只有 0.4 mm,为确保快门结构的可靠性和寿命等要求,必须减小叶片和转轴等零部件的转动惯量,所以快门叶片材料选择具有高弹性模量的碳纤维复合材料,该材料的力学性能优异,比重不到钢的 1/4,叶片的三维模型如图 3 所示。



图 3 叶片三维模型图

Fig. 3 Three-dimensional model of shutter-blade

3.2.1 静态分析

对叶片力学性能进行有限元分析^[8],有限元网格采用 QUAD4、HEX8、TRIA3 和 WEDGE6 单元相结合的方式划分,快门叶片模型共划分为 1 584 个单元,2 322 个结点。边界条件定义为转轴端部全约束,叶片和转轴材料属性定义见表 1。

表 1 快门叶片组件的材料属性

Tab. 1 Material properties of blade module

主要构件	材料	密度(ρ) /($10^{-6}\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$)	弹性模量 (E)/MPa	抗拉强度 (σ_b)/MPa	泊松比/ μ
叶片	M50	1.92	287 000	800-890	0.29
转轴	1Cr17Ni2	7.74	211 000	754($\sigma_{0.2}$)	0.26

根据航空标准(HB. 6167. 6-2014)以及快门工作环境工况进行静力学分析,沿坐标系-Y方

向施加 1 g 的重力载荷,叶片组件的变形云图如图 4 所示。由图可见叶片的扇形切口处变形最大,即结点 Node 646 处,变形量为 3.05×10^{-5} mm。

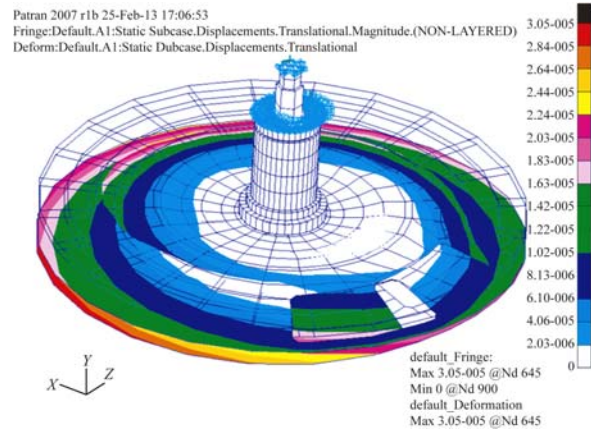


图 4 叶片组件的变形云图

Fig. 4 Deformation contours of blade module

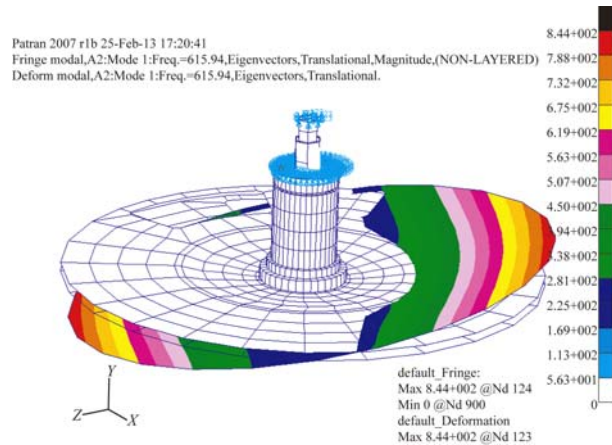
3.2.2 模态分析

对叶片组件进行了模态分析,考核其动态刚度,提取了结构的前 4 阶模态,其前 4 阶固有频率见表 2,前四阶模态如图 5 所示。

表 2 叶片组件结构前 4 阶模态

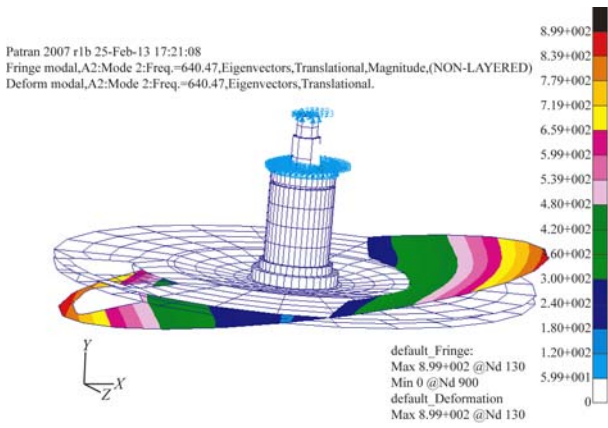
Tab. 2 First 4 order modes of blade module

阶数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
固有频率/Hz	615	639	719	770



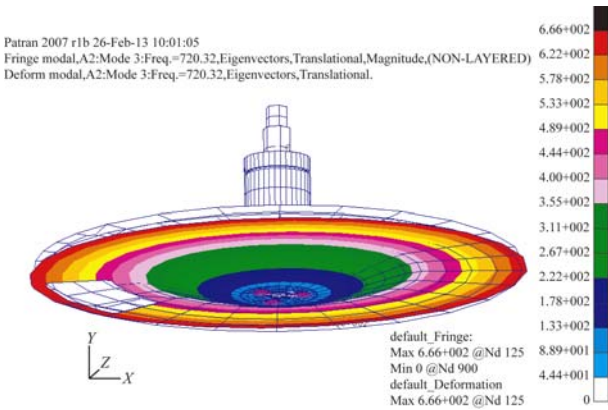
(a)1 阶模态云图

(a)First-order modal contours



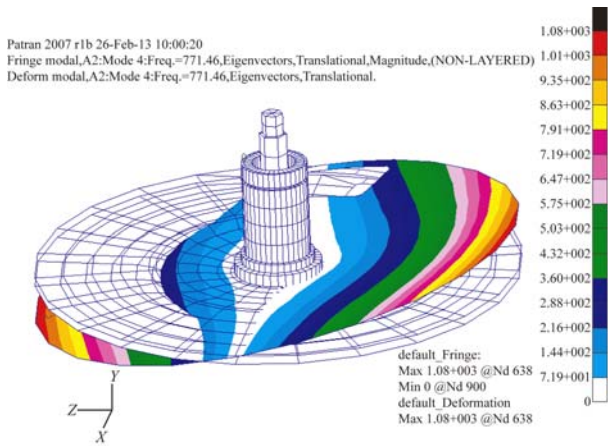
(b)2 阶模态云图

(b)Second-order modal contours



(c)3 阶模态云图

(c)Third-order modal contours



(d)4 阶模态云图

(d)Fourth-order modal contours

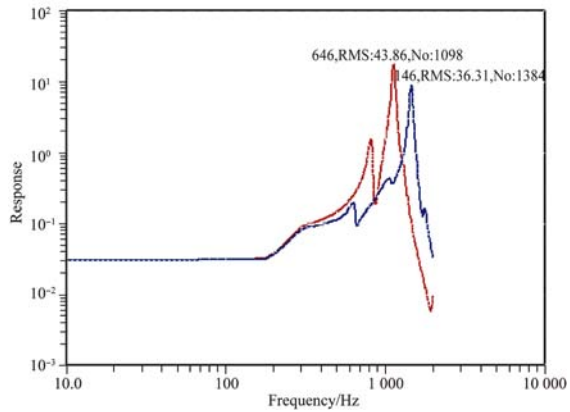
图 5 叶片组件前 4 阶模态云图

Fig. 5 First 4 order modal contours of blade module

3.2.3 随机振动分析

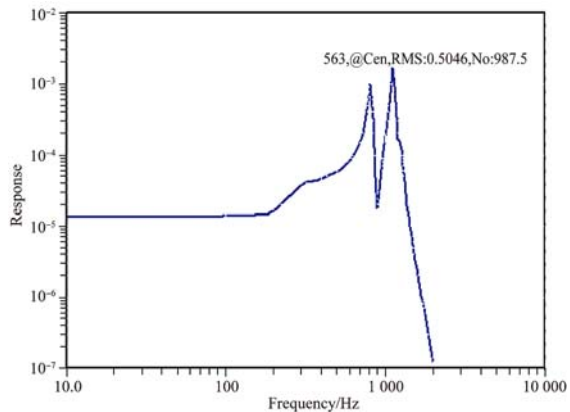
对叶片组件进行随机振动分析,考核快门叶

片组件在随机振动条件下的响应情况,叶片组件结构为轴对称形式,因此只对组件在 X 向和 Y 向的随机振动响应情况进行分析。图 6 为叶片组件在 Y 向和 X 向受随机激励作用下,叶片边缘处的加速度和应力响应曲线。



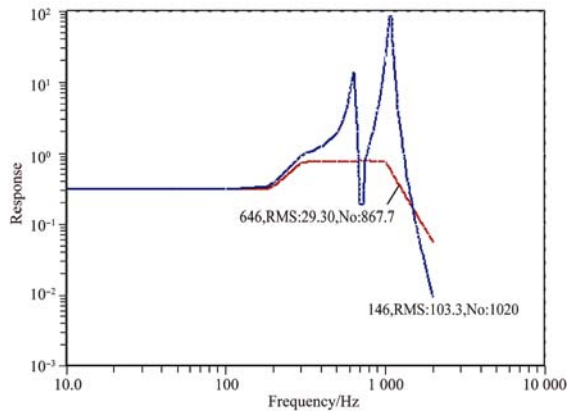
(a)Y 向加速度响应

(a)Corresponding acceleration in Y direction



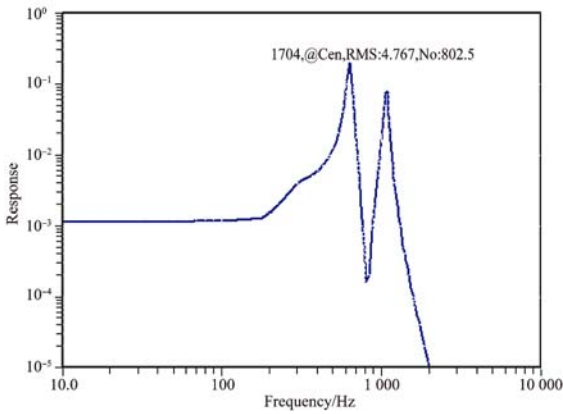
(b)Y 向应力响应

(b)Corresponding stress in Y direction



(c)X 向加速度响应

(c)Corresponding acceleration in X direction



(d) X 向应力响应

(d)Corresponding stress in X direction

图 6 Y 向和 X 向随机激励下加速度及应力响应

Fig. 6 Response of acceleration and stress to Y and X directional random motivation

通过分析可知,叶片组件在 Y 向随机激励下,叶片边缘的加速度响应最大达到 47 grms,应力响应最大达到 0.03 MPa;在 X 向随机激励下,叶片边缘的加速度响应最大达到 33 grms,应力响应最大达到 0.3 MPa。

经过静力学、模态和随机振动响应分析可知,叶片组件的最大变形位置发生在叶片扇形区域边缘处,最大变形量为 3.05×10^{-4} mm,满足静态刚度要求;结构基频达到 615 Hz,因此叶片组件具有足够高的动态刚度;随机振动响应远小于材料屈服强度,所以叶片组件能够经受随机激励载荷环境的冲击。

4 镜间快门的参数分析

快门效率和快门曝光是快门的两个重要参数,较高的效率和较宽的曝光时间范围是相机获得高质量图像的必要条件。

4.1 快门效率

快门效率即快门光学有效系数,必须具有较高的效率才能保证相机的图像质量。快门在整个曝光时间内可分为开启阶段、全开阶段和关闭阶段。由快门效率的定义可知,其计算公式如下:

$$\eta = \frac{\int_{T_0}^{T_1} E(t)dt + \int_{T_1}^{T_2} E(t)dt + \int_{T_2}^{T_3} E(t)dt}{Et_\varphi} = \frac{t_0 \eta_0 + t_1 \eta_1 + t_2 \eta_2}{t_\varphi} = \frac{t_e}{t_\varphi}, \quad (3)$$

式中: η 为快门效率; E 为焦平面处的光照度; t_φ 为实际曝光时间; t_e 为有效曝光时间; η_0, η_1, η_2 分别为打开阶段、全开阶段和关闭阶段的快门效率; t_0, t_1, t_2 分别为打开阶段、全开阶段和关闭阶段的时间。

镜间快门全开阶段的通光效率为 1,开启阶段和关闭阶段的运动方式对称,所以快门效率公式(3)转换为:

$$\eta = 1 - 2(1 - \eta_0) \frac{t_0}{t_\varphi}. \quad (4)$$

感光器件的曝光过程可以转换为快门工作特性曲线,直观描述镜间快门控制光学系统曝光过程中光通量随时间的变化情况。假定目标亮度是均匀不变的,快门控制通光孔径曝光的过程中,用孔径面积随时间的变化代替通光量的变化,镜间快门工作周期内通光孔径的面积变化情况如图 7 所示。图中,O为坐标系原点,也就是叶片回转轴心,R是通光孔径的半径。

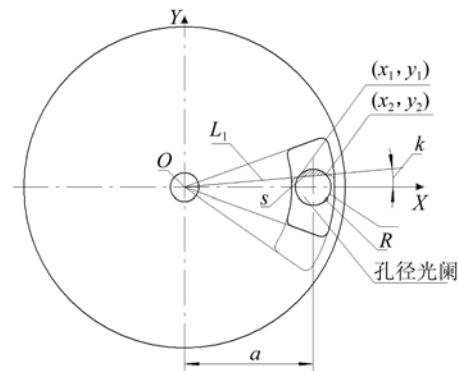


图 7 叶片扫描通光孔径

Fig. 7 Schematic diagram of blade scanning aperture

由图 7 可知,叶片切口直线方程 L_1 :

$$y = x \tan(\omega t), - \left[\frac{R}{\sqrt{a^2 - R^2}} \right] \leq k \leq \left[\frac{R}{\sqrt{a^2 - R^2}} \right], \quad (5)$$

式中: ω 为叶片角速度; t 为旋转时间。

孔径光阑在坐标系内的方程 L_2 为:

$$(x - a)^2 + y^2 = R^2. \quad (6)$$

由式(5)和式(6)确定的边界条件可知,当 $0 \leq k \leq \tan \left[\frac{R}{\sqrt{a^2 - R^2}} \right]$ 时,快门扫描通光孔径过程中的通过面积为:

$$S = \int_{x_1}^{x_2} (\sqrt{R^2 - (x-a)^2} - kx) dx =$$

$$\frac{R^2}{2} \arcsin \frac{(x-a)}{R} + \frac{(x-a)}{2} \sqrt{R^2 - (x-a)^2} - \frac{kx^2}{2} \Big|_{x_1}^{x_2} =$$

$$\arcsin \left[\frac{\sqrt{(R^2 + (R^2 - a^2)k^2)(1+k^2)}}{(1+k^2)R} \right] R^2 -$$

$$ak(1+k^2)^{(-\frac{3}{2})} \sqrt{(R^2 + (R^2 - a^2)k^2)(1+k^2)}. \quad (7)$$

同理,当 $-\frac{R}{\sqrt{a^2 - R^2}} \leq k < 0$ 时,通光孔径的面积:

$$S = \pi R^2 - \arcsin \left[\frac{\sqrt{R^2 + (R^2 - a^2)k^2}}{(1+k^2)R} \right] R^2 -$$

$$ak(1+k^2)^{(-\frac{3}{2})} \sqrt{(R^2 + (R^2 - a^2)k^2)(1+k^2)}. \quad (8)$$

式(7)和式(8)描述了叶片扇形区域扫描通光孔径的过程中,通光孔径的面积 S 随时间 t 的变化情况,根据计算可直接绘出快门的工作特性曲线,如图 8 所示。从 0 到 T_0 是镜间快门准备曝光阶段。

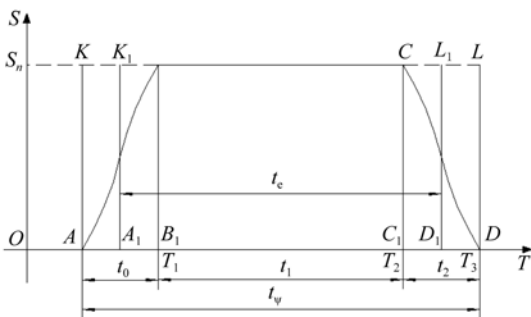


图 8 镜间快门特性曲线

Fig. 8 Characteristic curve of lens shutter

从镜间快门特性曲线可以看出,镜间快门在整个曝光周期中开启阶段和关闭阶段对称,由式(4)~式(8)计算得镜间快门的效率为 85%。

4.2 曝光时间

相机采用镜间快门的最大优点是像面上各个像点的曝光时间相同^[9]。快门曝光时间可由电机转速、机构传动比以及叶片切口的相对回转轴角度等参数确定。叶片切口与孔径光阑的结构关系如图 9 所示。

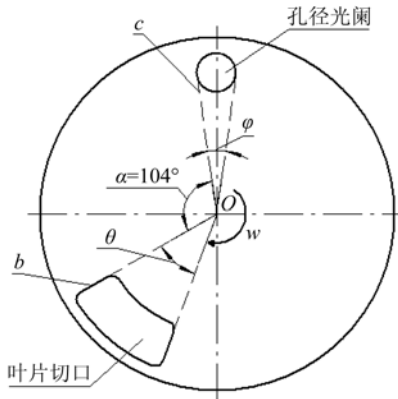


图 9 叶片切口与孔径光阑的相对关系

Fig. 9 Relative relationship of blade kerf and aperture diaphragm

图中 θ 为叶片切口的夹角, φ 为孔径光阑的夹角,叶片的角速度为 ω ,可得快门的实际曝光时间为:

$$t = \frac{\varphi}{\omega} + \frac{\theta - 2\varphi}{\omega} + \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\theta}{\omega}. \quad (9)$$

由式(9)可知,叶片切口夹角一定的情况下,镜间快门的实际曝光时间与孔径光阑的夹角无关,只与叶片的旋转角速度有关,叶片转数与曝光时间的典型值如表 3 所示。

表 3 曝光时间与叶片转数典型值

Tab. 3 Typical values of exposure time and blade revolution

序号	实际曝光时间/s	有效曝光时间/s	快叶片 / (r · min ⁻¹)
1	1/100	1/81	663.15
2	1/125	1/101.25	828.93
3	1/250	1/202.5	1 657.87
4	1/300	1/242	1 988.44
5	1/500	1/404	3 314.73
6	1/700	1/566	4 641.02
7	1/1000	1/809	6 630.46

5 试验与结果

为评定镜间快门在预期使用环境中的抗振能力,其强度等参数能否满足相机的性能指标要求,对快门进行随机振动试验,随机振动谱线的详细参数见表 4,试验曲线如图 10 所示。

表 4 随机振动参数

Tab. 4 Parameters of random vibration

频率/Hz	幅值
10~191	0.033 g^2/Hz
191~300	+6 dB
300~1 000	0.078 g^2/Hz
1 000~2 000	-12 dB

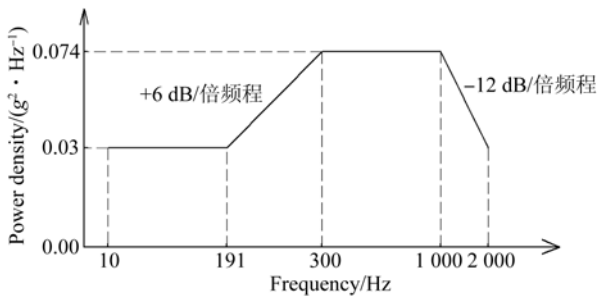


图 10 随机振动谱线

Fig. 10 Spectrum line of random vibration

样机借助于夹具紧固于振动台的台面上,以台面中心作为控制点,控制点的测量功率谱密度与规定功率谱密度相差不允许超过 ± 3 dB,试验过程见图 11。



图 11 随机振动试验

Fig. 11 Random vibration testing

用窄带分析仪测量激励功率谱密度时,在规定频率范围内,由低限频率扫描至高限频率,再由高限频率返回至低限频率。扫描方式为对数连续扫描,传感器处获得的频谱如图 12 所示。

由测量结果可知,控制点的测量功率谱密度与规定功率谱密度相差在规定误差范围内,由于相机安装减振器^[10],输出信号会有所衰减。通过试验验证了快门叶片的刚度和强度满足使用要求。

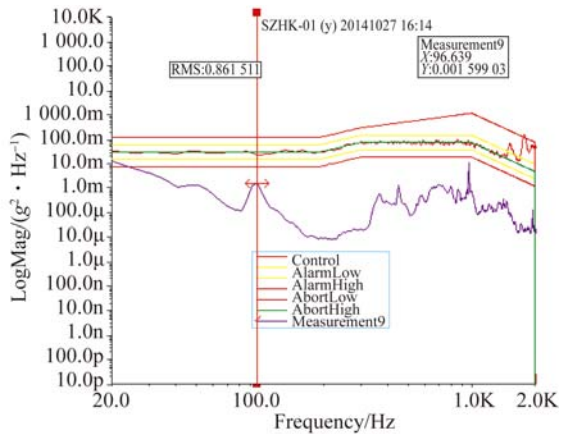


图 12 随机振动测试谱线

Fig. 12 Spectrum line of random vibration testing

数字航空摄影相机进行了多次飞行成像试验,获得的图像分辨率满足指标要求。图 13 是相机在飞行测试中拍摄的辐射状靶标图像。



图 13 不同快门效率下辐射状靶标图像对比

Fig. 13 Comparison of radial drone image with difference shutter efficiencies

由图可见,具有较高快门效率的快门对图像质量影响很大,快门效率越高,图像获得的光能量越多,对比度越高。此外,通过对辐射状靶标图像分辨率的分析,证明快门工作稳定可靠,能够完全满足数字航空摄影相机的性能指标要求。

6 结 论

为满足数字航空摄影相机的研制指标需求,本文设计了一种航空遥感镜间快门。镜间快门能够在 $1/100 \sim 1/1\ 000$ s 的曝光时间内连续调节,使像面上各像点的曝光时间相同,镜间快门效率可达到 85%;结合相机尺寸空间要求对快门结构进行小型化设计,通过有限元分析证明快门具有足够的刚度和强度。飞行试验表明,相机可获得符合要求的高质量图像,快门满足各项指标要求。

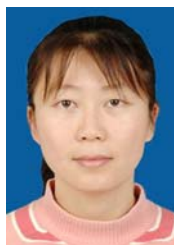
参考文献:

- [1] 谢尔巴科夫. 航空照相机的设计与计算 [M]. 孙振洲, 周桂琴, 译. 吉林: 吉林省科技翻译协会, 1985. SIERBAKOV. *Design and Calculation of Aerial Camera* [M]. SUN ZH ZH, ZHOU G Q, Trans. . Jilin: The Association of Science and Technology Translation in Jilin, 1985. (in Chinese)
- [2] 王之卓. 摄影测量原理 [M]. 北京: 测绘出版社, 1979. WANG ZH ZH. *Photogram Metry Principle* [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1979. (in Chinese)
- [3] 张雷, 丁亚林, 张洪文. 基于单帘快门的数字相机调光系统 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1265-1271. ZHANG L, DING Y L, ZHANG H W. Adjustable exposure system for digital camera based on single curtain type shutter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1265-1271. (in Chinese)
- [4] 张洪文. 一种航摄相机纵走式焦平面快门研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2016. ZHANG H W. *Studies on Aerial Camera Vertical-travel Focal Plane Shutter* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [5] 张雷, 丁亚林, 张洪文, 等. 基于正时带的帘幕式快门设计与精度分析 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 380-387. ZHANG L, DING Y L, ZHANG H W, *et al.*. Design and precision analysis of curtain type shutter based on timing belt [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 380-387. (in Chinese)
- [6] 于春风. 新型航空镜间快门的研究与光学特性分析 [D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2013. YU CH F. *Research and Analysis of Optical Characteristic on New Type Aerial Lens Shutter* [D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2013. (in Chinese)
- [7] 于春风, 丁亚林, 惠守文, 等. 新型航空镜间快门对光学传递函数的影响分析 [J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1112005. YU CH F, DING Y L, HUI SH W, *et al.*. Analysis of influence on the new type aviation lens shutter to the optical transfer function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1112005. (in Chinese)
- [8] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 Abaqus 的有限元分析和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009. ZHUANG ZH, YOU X CH, LIAO J H, *et al.*. *Finite Element Analysis and Application Based on Abaqus* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [9] 胡家升. 光学工程导论 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2006. HU J SH. *Introduction to Optical Engineering* [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 杨剑锋, 徐振邦, 刘宏伟, 等. 光学有效载荷在轨隔振器的设计 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3294-3302. YANG J F, XU ZH B, LIU H W, *et al.*. Design of vibration isolator for optical payload on orbit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3294-3302. (in Chinese)

作者简介:



于春风(1979—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2013年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事航空成像与测量技术方面的研究。E-mail: hou791016@163.com



李辉(1977—),女,吉林长春人,硕士,高级工程师,2005年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事旋压设备设计与制造方面的研究。E-mail: li_hui1220@163.com