

文章编号 1004-924X(2013)02-0380-08

基于正时带的帘幕式快门设计与精度分析

张 雷^{1*}, 丁亚林¹, 张洪文¹, 刘 波^{1,2}, 詹 磊¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与
测量重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:考虑帘幕式快门的曝光精度和面阵 CCD 相机的结构尺寸, 利用正时带在高速运动中能够保证高精度传动的特点, 设计了以正时带为快门帘幕, 以正时带轮为快门辊轴的新型单帘式焦平面快门。分析了影响快门曝光精度的主要因素, 利用系统误差合成法建立了快门曝光精度的数学模型。利用齿轮综合误差组评价了驱动机构的传动误差, 通过分析正时带的传动机理建立了多边形效应的几何模型, 并计算了多边形效应对速度精度的影响。在接入快门负载的情况下测试得到了快门辊轴的稳速精度, 并利用高斯法计算得到了快门的曝光精度 0.067。最后, 利用光电法测试了幅面上均匀五点的有效曝光时间, 测量结果显示幅面内快门的曝光精度达到 0.056, 可实现宽目标照度范围航空摄影的曝光。

关 键 词: CCD 相机; 有效曝光时间; 单帘式快门; 正时带; 曝光精度

中图分类号: V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0380

Design and precision analysis of curtain type shutter based on timing belt

ZHANG Lei^{1*}, DING Ya-lin¹, ZHANG Hong-wen¹, LIU Bo^{1,2}, ZHAN Lei¹

(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. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 130039, China)

* Corresponding author, E-mail: zhang L_1982@163.com

Abstract: In consideration of the exposure precision of a curtain shutter and the dimension of a camera, a new focus-plane single curtain type shutter was designed by using a timing belt with high transmission accuracy as the curtain of shutter and a belt wheel as the roll shaft. The main reason effecting the exposure precision was analyzed, and a mathematic model was created by the system error synthesis method. Then, the series of gear-composited errors was used to evaluate the transmission errors of a driving mechanism. Furthermore, the geometric model of the polygonal effect was established by analysis of the transmission mechanism of the timing belt, and the influence of polygonal effect on the rate errors was calculated. After testing on the shutter, the speed stability of the roll shaft is obtained and the exposure precision achieves 0.067 according to the Gaussian processes. The exposure time at 5 positions on a frame was tested by the photoelectric method, and the result shows that exposure preci-

收稿日期: 2012-10-18; 修订日期: 2012-11-23.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006AA06A208)

sion in the frame achieves by 0.056, which demonstrates that this shutter can exposure on the aerial photographing of large range illuminance.

Key words: CCD camera; effect exposure time; single curtain type shutter; timing belt; exposure precision

1 引 言

众所周知,由于航空摄影的目标照度范围宽,要获得高分辨率的航摄图像,必须要对其曝光量进行控制,以保证其在幅面内各点获得均匀的曝光量。因此,航摄快门不但要有较宽的曝光时间调节范围和较高的效率,还需要保证较高的曝光精度^[1-3]。由于所采用的 CCD 器件没有配置电子快门,因此需要设计焦平面机械快门来完成曝光功能。根据使用要求,焦面式快门可供选择的形势主要有帘幕式快门和钢片式快门。二者的曝光原理类似,都是通过结构在感光介质前产生通光狭缝使感光介质曝光,所不同的是材料和结构形式上的差异。帘幕式快门的曝光执行元件是开有狭缝的帘幕,其制作材料通常为金属薄片;而钢片式快门的曝光执行元件由若干片顺次交错的金属叶片拼接而成。钢片式快门的曝光元件相对复杂,与其相比,帘幕式快门具有更高的稳定性。帘幕式快门又分为单帘式和双帘式快门,两种快门的不同之处在于控制曝光时间的方式,单帘式快门通过控制狭缝速度控制曝光时间,而双帘式快门通过调节狭缝的宽度控制曝光时间。帘幕式快门主要通过带有矩形口的帘幕使快门曝光,曝光方式为线曝光。在曝光时,利用辊轴带动帘幕运动对幅面上各点依次曝光。

相比而言,单帘式快门结构更为简单,但是辊轴的稳速精度不容易达到,双帘式快门调节狭缝宽度相对容易,但结构相对复杂。由于快门要在达到曝光精度的前提下满足小型化和轻量化的需求,本文采用单帘式快门作为控制面阵 CCD 相机曝光量的器件。

2 快门的设计

2.1 快门组件的方案设计

针对 CCD 器件的结构尺寸,并考虑到焦平面

处的空间尺寸约束,快门的设计空间和结构采用了帘幕环绕面阵 CCD 的形式,而快门组件则由快门机构和驱动机构组成^[4]。

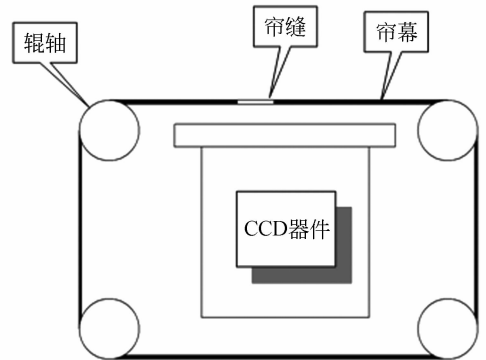


图 1 单帘快门结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single curtain type shutter

单帘快门结构如图 1 所示,快门改变了传统的双辊轴结构,采用了四辊轴形式,快门帘幕具有连续柔性体的特点,并具有一定的抗拉能力,以便在张紧的过程中使曝光区域保持帘幕平整,因此快门帘幕材料的选取直接关系到快门的曝光性能。根据其运动形式和精度要求,选用正时带作为快门的帘幕,辊轴采用正时带轮。正时带具有运动精度高,并具有足够的抗拉强度和耐磨性^[5-6]。快门帘幕如图 2 所示,即用正时带传动的结构形式来完成快门的曝光功能。

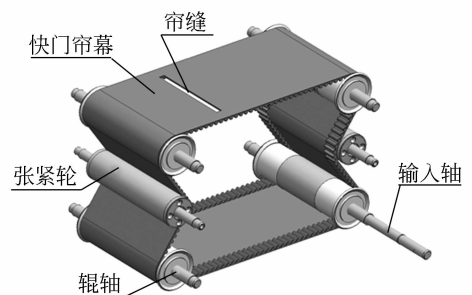


图 2 快门帘幕示意图

Fig. 2 Schematic diagram of curtain

2.2 驱动组件的设计

快门的驱动机构主要由电机、离合器、齿轮传动副组成,图 3 为快门驱动机构的传动原理图,快门电机连续运转,当离合器断开时,无力矩输出,快门狭缝不动。当接到曝光指令时,离合器接通,电机动力通过齿轮副带动辊轴,从而带动帘幕运动使快门曝光。图 4 所示为快门组件的三维模型图。

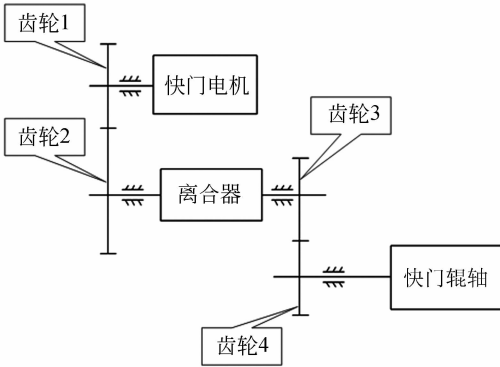


图 3 快门驱动原理图

Fig. 3 Principle of shutter drive

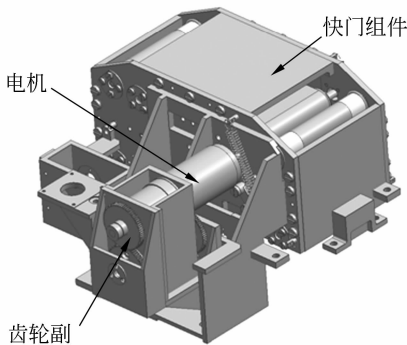


图 4 快门组件三维示意图

Fig. 4 Tridimensional scheme of shutter module

设计后的快门在空间上得到了较大程度的优化,并较好地适应了面阵 CCD 器件和焦平面空间的结构尺寸。

3 快门的曝光精度分析

3.1 快门曝光精度的数学模型

为保证航拍图像的质量,需要快门的曝光精

度高于 0.1。由快门的曝光原理可知,影响快门曝光精度的因素为快门帘幕运动的速度精度和狭缝宽度的尺寸精度。

其有效曝光时间的表达式为:

$$t_{\text{eff}} = \frac{Z}{v} \quad (1)$$

由于各参量之间相互独立,由式(1)建立系统极限误差的数学表达式为:

$$\delta_t = \frac{\partial t_{\text{eff}}}{\partial v} \delta_v + \frac{\partial t_{\text{eff}}}{\partial Z} \delta_z \quad (2)$$

则曝光精度估计模型为:

$$\sigma_t = \sqrt{\left(\frac{\partial t_{\text{eff}}}{\partial v}\right)^2 \cdot \sigma_v^2 + \left(\frac{\partial t_{\text{eff}}}{\partial Z}\right)^2 \cdot \sigma_z^2} \quad (3)$$

其中狭缝速度的误差与狭缝速度成线性关系,设比例系数为 a_1 ,即:

$$\sigma_v = a_1 v \quad (4)$$

对于单帘快门,狭缝宽度尺寸恒定,因此忽略其影响。由有效曝光时间表达式(1)、式(3)和式(4)有:

$$\sigma_t = a_1 t_{\text{eff}} \quad (5)$$

由式(5)可知,快门的曝光精度取决于狭缝稳速精度。影响稳速精度的因素主要是结构引起的传动精度和电机的稳速精度^[7]。

3.2 结构传动误差的计算

在结构的各环节中,影响传动精度的因素主要是驱动组件齿轮的传动精度和正时带的多边形效应引入的速度误差。

由齿轮固有位置误差引起的齿轮速度误差的均值和方差为^[8-9]:

$$M(E_\omega) = 0 \quad (6)$$

$$D(E_\omega) = \frac{\omega^2}{36} [(F_i' - f_i')^2 + z^2 f_i'^2] \quad (7)$$

在齿轮传动链中,合成误差的均值和方差为:

$$M({}_a T_c) = \sum_{k=1}^n \frac{M({}_a T_{jk})}{i_{k-1}} \quad (8)$$

$$D({}_a T_c) = \sum_{k=1}^n \frac{D({}_a T_{jk})}{i_{k-1}^2} \quad (9)$$

式中: ${}_a T_c$ 为齿轮机构传动误差, i_{k-1} 为每一齿轮副传到读数齿轮基准轴之间的传动比。利用齿轮的切向综合误差和齿间切向综合误差,由式(6)~(9)对图 3 中参与传动的各齿轮进行传动误差的计算,各齿轮精度指标和计算结果如表 1 所示。

表 1 齿轮传动精度参数计算

Tab.1 Results of gear transmission precision

参数	传动精度			
	齿轮 1	齿轮 2	齿轮 3	齿轮 4
m	0.5	0.5	0.5	0.5
Z	72	72	70	30
精度等级	6	6	6	6
$F_i' / \mu\text{m}$	30	30	30	26
$f_i' / \mu\text{m}$	10	10	10	10
方差 σ^2	14 411	14 411	13 622	2 507
方差合成 σ	169.8	127		
3σ	509.4	381		
转化为弧度 10^{-3}	14.1	25.4		
在输出轴度量 10^{-3}	32.9	25.4		
总误差	5.83%			

计算结果显示,第二级齿轮啮合对误差略大于第一级齿轮啮合对,这是由于第二级齿轮为加速级;最后结果显示由齿轮结构传递误差引起的曝光精度的误差为 5.83%。

由于快门帘幕是由正时带制作而成,正时带在传动时会产生多边形效应影响运动精度^[10-11]。正时带完全与带轮进入啮合时,带的节线是以圆弧和折线交替连接的形式绕在带轮上的,形成多边形节线。因带节距 P 的周期性,分析一个节距内节线多边形形状与带轮齿形参数间的几何关

$$\begin{aligned}
 0 \leq \theta \leq \alpha, v_{1x} &= R\omega \cos(\alpha - \theta), v_{1y} = R\omega \sin(\alpha - \theta) \\
 \alpha \leq \theta \leq \alpha + \beta/2, v_{1x} &= R\omega \cos(\alpha - \theta), v_{1y} = R\omega \sin(\alpha - \theta) \\
 \alpha + \beta/2 \leq \theta \leq \alpha + \beta, v_{1x} &= R\omega \cos(\theta - \alpha - \beta), v_{1y} = R\omega \sin(\theta - \alpha - \beta) \\
 \alpha + \beta \leq \theta \leq \alpha + \beta + \gamma, v_{1x} &= R\omega, v_{1y} = 0 \\
 \alpha + \beta + \gamma \leq \theta \leq \alpha + 3\beta/2 + \gamma, v_{1x} &= R\omega \cos(\theta - \alpha - \beta - \gamma), v_{1y} = R\omega \sin(\theta - \alpha - \beta - \gamma) \\
 \alpha + 3\beta/2 + \gamma \leq \theta \leq \alpha + 2\beta/2 + \gamma, v_{1x} &= R\omega \cos(\alpha + 2\beta + \gamma - \theta), v_{1y} = R\omega \sin(\alpha + 2\beta + \gamma - \theta) \\
 \alpha + 2\beta + \gamma \leq \theta \leq P/R, v_{1x} &= R\omega \cos(\theta - \alpha - 2\beta - \gamma), v_{1y} = R\omega \sin(\theta - \alpha - 2\beta - \gamma)
 \end{aligned} \tag{10}$$

由于抗拉层的抗拉强度较大,可以忽略其弹性变形,因此从动轮在带与带轮相应切点处的切向速度与主动轮近似相等,即:

$$v_{x2} = v_{x1} \tag{11}$$

快门曝光时间和帘幕的速度有关,即实现快门帘幕功能的正时带的切向速度影响快门的曝光时间,正时带切向速度的波动表达式为:

$$\Delta v = R_1 \omega_1 - v_{x1} \tag{12}$$

本文选用正时带的齿形为双圆弧齿,其齿形

系,并假设带是柔性体,带齿不弯曲,忽略带齿与轮齿的齿侧间隙。如图 5 所示, $A、B、E$ 为带齿齿顶圆圆心, $C、D$ 为带轮齿顶圆圆心。其中, $A_1 B_1$ 段为直线,由于有正时带齿根圆角作用,正时带在 B_1 处发生弯曲, $B_1 C_1$ 段为直线;同样,由于齿根圆角作用, $D_1 E_1$ 段为直线段。分别连接 $A、B、C、D、E$ 和带轮回转中心 O , 并做延长线交带轮分度圆于 $A_1、B_1、C_1、D_1、E_1$ 5 个点,其中,定义 $\angle AOB = \alpha, \angle BOC = \beta, \angle COD = \gamma, \angle DOE = \angle BOC = \beta$, 主动轮节圆半径为 R 。

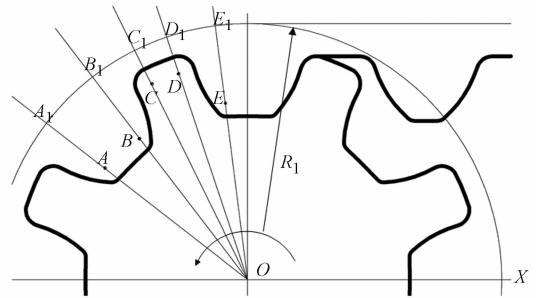


图 5 正时带多边形效应示意图

Fig.5 Polygonal effect of timing belt

当主动轮以角速度转过一个节距对应的转角过程中,由于多边形的效应,带在主动轮切向速度 v_{1x} 及法向速度 v_{1y} , 同该带轮转角 θ 关系表达式为:

参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 带齿参数表

Tab.2 Parameters of belt tooth (mm)

参数	数值	参数	数值
齿高	1.11	节线距齿根距离	0.381
带厚	0.8	抗拉层直径	0.3
齿顶圆角半径	0.15	齿面圆弧半径	1.95
齿根圆角半径	0.28	齿面圆弧中心距	1.975

表 3 带轮参数表

Fig. 3 Parameters of belt wheel (mm)

参数	数值	参数	数值
齿顶圆半径	9.17	齿根圆角半径	0.150
齿根圆半径	8.060	齿面圆弧中心距	1.975
齿顶圆角半径	0.280	齿面圆弧半径	1.95

由正时带和正时带轮的齿形参数得到表达式中的角度参数 α 为 2.65° , β 为 5.1° , γ 为 2.55° 。根据式(10)计算得到有多边形效应引起的快门帘幕运动的运动曲线为:

$$\begin{aligned}
 0 \leq \theta_1 \leq 2.65^\circ, v_{1x} &= V_1 \cos(2.65^\circ - \theta_1) \\
 2.65^\circ \leq \theta_1 \leq 5.20^\circ, v_{1x} &= V_1 \cos(2.65^\circ - \theta_1) \\
 5.20^\circ \leq \theta_1 \leq 7.75^\circ, v_{1x} &= V_1 \cos(\theta_1 - 7.75^\circ) \\
 7.75^\circ \leq \theta_1 \leq 10.30^\circ, v_{1x} &= V_1 \\
 10.30^\circ \leq \theta_1 \leq 12.85^\circ, v_{1x} &= V_1 \cos(\theta_1 - 10.30^\circ) \\
 12.85^\circ \leq \theta_1 \leq 15.40^\circ, v_{1x} &= V_1 \cos(15.40^\circ - \theta_1) \\
 15.40^\circ \leq \theta_1 \leq 20.00^\circ, v_{1x} &= V_1 \cos(\theta_1 - 15.40^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

这样便可以得到正时带的运动仿真曲线,为便于观察其速度曲线,将各段速度的幅值与 V_1 做比值,通过 Matlab 对速度曲线进行了仿真,得到如图 6 所示的运动曲线,其中横轴为正时带在一个节距内的转角。

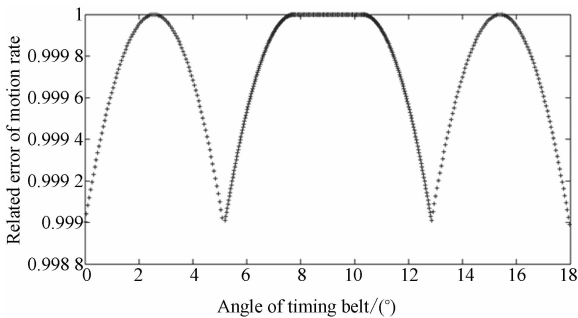


图 6 正时带运动曲线

Fig. 6 Rate curve of timing belt

图 6 表明,由多边形效应引起的正时带速度误差为 0.1%,由于它比机械结构产生的误差低一个数量级,因此不考虑其影响。

4.2 电机稳速精度的测试

快门的结构系统中存在摩擦、结构惯性力矩和转轴的质心几何偏心等不确定因素,这些都会影响电机的稳速精度。为测试电机的稳速精度,分别对系统输入 6 300、4 170 和 1 200 r/min 的单

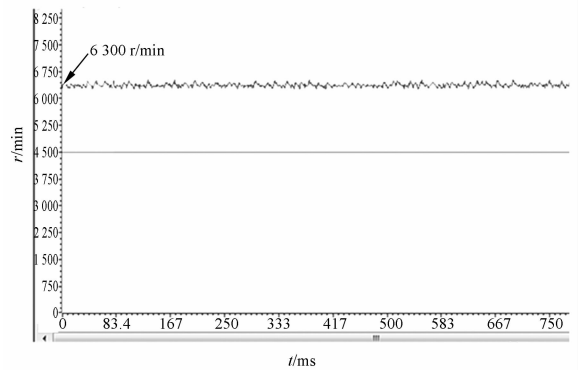
位阶跃输入信号,其对应的曝光时间分别为 0.003 3、0.004 9 和 0.017 s,覆盖了快门的曝光时间 $1/50 \sim 1/250$ s。另外,在电机稳速运行情况下通过离合器加入快门负载,如图 7 所示。

测得电机稳速精度分别为 3.3%,2.8% 和 3%,而且系统在超出曝光时间范围的情况下仍能保证 3.3%的稳速精度,如图 8。对快门的结构精度和电机的稳速精度进行高斯法合成,可得快门



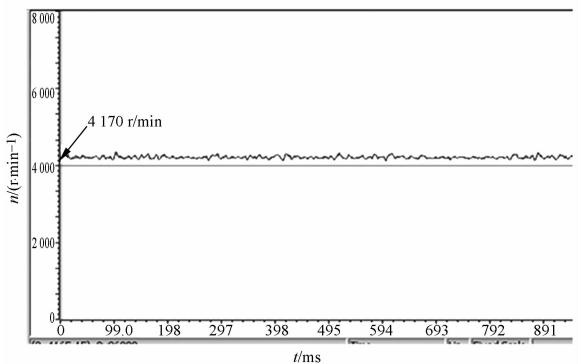
图 7 快门稳速精度的测试

Fig. 7 Test of rate accuracy



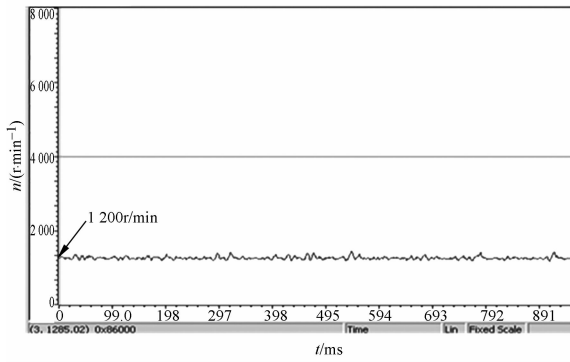
(a) $R=6\ 300$ r/min 系统的阶跃响应曲线

(a) Output curve of system at $R=6\ 300$ r/min



(b) $R=4\ 170$ r/min 系统的稳态输出曲线

(b) Output curve of system at $R=4\ 170$ r/min



(c) $R=1\ 200\ \text{r/min}$ 系统的稳态输出曲线

(c) Output curve of system at $R=1\ 200\ \text{r/min}$

图 8 系统的速度响应曲线

Fig. 8 Response curve of system rate

光管产生的平行光经过透镜通过快门的狭缝,使狭缝后的光敏电阻感光,光敏电阻将光信号转为电信号传给示波器,示波器触发沿的长度即为有效曝光时间。

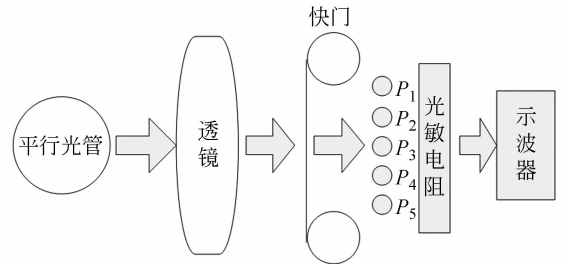


图 9 曝光时间测试实验原理图

Fig. 9 Schematic diagram of exposure time test

的曝光精度:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_{el}^2} \quad (13)$$

将所求得的结构精度 5.8% 和电机稳速精度 3.3% 代入(13)式中,计算得到快门的总体曝光精度为 0.067。

5 实 验

利用光电法对快门幅面上 5 个位置的曝光时间进行了测试,图9为实验原理。光源通过平行

为了对不同曝光时间测量曝光精度,对理论值分别为 4、6、7、10 和 20 ms 的有效曝光时间进行测量。为观察快门在一次曝光过程中的曝光精度,每次测量时,在幅面内均匀地选定 5 个位置,其中幅面的 2 个边缘位置和其他 3 个中间均布的位置,并进行多次测量。对于每一曝光时间档的每一个位置测量 4 次曝光时间,然后调整 1 次电机的速度,并重复上述测量过程,得到测试结果如表 4 所示。

表 4 曝光时间测量结果

Tab. 4 Results of exposure time test

$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ / $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$		5 个位置的曝光时间/ms					平均值	标准差	精度/%
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5			
5 833	2 500	3.81	4.04	4.18	3.85	4.32	3.988	0.224	5.6
		4.11	4.35	4.26	3.93	4.21			
		3.70	4.11	4.07	3.87	3.70			
		3.61	3.98	4.14	3.71	3.81			
3 500	1 500	6.97	6.88	6.42	6.65	7.17	6.765	0.328 8	4.9
		7.14	7.12	6.48	6.15	6.70			
		7.11	6.23	6.79	7.00	6.71			
		6.72	6.35	7.30	6.84	6.56			
2 333	1 000	10.45	9.06	10.37	10.24	10.45	10.023	0.4795	4.8
		9.67	10.45	10.35	10.23	9.27			
		9.53	10.24	10.29	9.54	10.03			
		10.31	10.63	9.52	9.38	10.44			
1 167	500	20.37	19.57	21.16	21.76	18.36	20.280	0.9414	4.7
		20.76	19.38	21.78	20.76	19.16			
		19.95	21.17	21.16	20.55	19.54			
		20.10	19.57	21.16	20.15	19.15			

根据表 4 测得的各点数据形成有效曝光时间与狭缝速度的关系如图 10 所示,为便于观察有效曝光时间与狭缝速度的关系,横坐标取为狭缝速度的倒数。

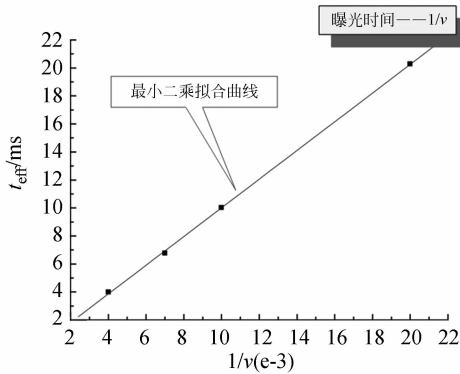


图 10 曝光时间拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of exposure time

由图 10 的各点坐标拟合的曲线可知,曝光时间与狭缝速度的倒数成线性关系。由于测量误差和系统误差的存在,拟合曲线在纵坐标存在一定

的节距,因此在误差允许范围内,可认为曝光时间与狭缝速度为反比关系。由表 4 知,快门的曝光精度高于 0.056,并随着曝光时间的延长而提高,其原因是狭缝的速度精度为可变误差,与曝光时间成比例关系,因此相对误差很稳定。

6 结 论

通过分析帘幕式快门的曝光原理,利用正时带传动精度高,运动平稳的特点,设计了正时带作为快门的帘幕,正时带轮作为辊轴的新型帘幕式快门。根据正时带传动时的啮合原理,结合快门传动系统和控制系统对快门的曝光精度进行了分析计算,结果显示,正时带的传动误差为 0.1%,比结构传动误差低一个数量级,计算后的系统曝光精度为 0.067。利用光电法对幅面各点的曝光时间进行了实验测量,结果显示,幅面上各点曝光精度为 0.056,快门可实现宽目标照度范围航空摄影的曝光。

参考文献:

- [1] 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(增刊):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)
- [2] 张雷,丁亚林,蒋贵德,等. 一种航摄快门帘缝宽度的优化[J]. 光学精密工程,2009,17(1):197-199.
ZHANG L, DING Y L, JIANG G D. The optimization of breath of sew on shutter for aerial camera [J]. *Opt. Presicion. Eng.*, 2009, 17(1):197-199. (in Chinese)
- [3] 李娜,丁亚林,周九飞,等. 基于 TMS320F2812 控制器的自动调光系统设计[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(4):341-344.
LI N, DING Y L, ZHOU J F. Study of automatic exposing control technique for area CCD aerial camera [J]. *China Opt and Application*, 2009, 2(4): 341-344. (in Chinese)
- [4] 张洪文,冷雪,张继超,等. 单帘正交组合式焦平面快门的设计与性能测试[J]. 光学精密工程,2011,

19(3):587-592.

ZHANG H W, LENG X, ZHANG J CH, *et al.*. Design of focal plane-curtain shutter and its performance test [J]. *Opt. Precision. Eng.*, 2011, 19(3): 587-592. (in Chinese)

- [5] 张锡山,徐铁华. 带传动技术[M]. 北京:纺织工业出版社,1986.

ZHANG X SH, XU T H. *Technology of Belt Transmission* [M]. Beijing: Weave Industry Press, 1986. (in Chinese)

- [6] 朱喜林,张代治. 机电一体化设计基础[M]. 北京:科学出版社,2004,51-59.

ZHU X L, ZHANG D ZH. *Design and Base of Mechatronics* [M]. Beijing: Science Press, 2004, 51-59. (in Chinese)

- [7] 冷雪,张洪文,刘明,等. 高频正交大面阵焦平面快门设计[J]. 光学精密工程,2011,19(5):2630-2635.

LENG X, ZHANG H W, LIU M, *et al.*. Design of large format focal-plane shutter with high frame-frequency and orthogonality [J]. *Opt. Precision. Eng.*, 2011, 19(5):2630-2635. (in Chinese)

- [8] 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-

2104.

ZHANG L, DING Y L, JIANG G D. The accuracy analysis on exposure time of a curtain-type shutter [J]. *Opt. Precision. Eng.*, 2009, 17(9): 2098-2104. (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] 郭建华, 谷淑娟, 夏金林. 梯形齿与双圆弧齿同步带传动精度分析[J]. 齐齐哈尔大学学报, 1999, 15

(4): 31-35.

GUO J H, GU SH J, XIA J L. Analysis of transmission precision for trapezoid and double curve synchronous belt [J]. *Journal of Qiqihar University*, 1999, 15(4): 32-35. (in Chinese)

[11] 郭建华, 姜洪源, 潘永阁, 等. 新型同步带多边形效应对运动性能影响的研究[J]. 机械传动, 2009, 33(4): 22-25.

GUO J H, JIANG H Y, PAN Y G. The effect of polygon effect on the performance for a new type synchronous belt [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2009, 33(4): 22-25. (in Chinese)

作者简介:



张雷(1982—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2005年于吉林大学获学士学位,2010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,主要从事航空遥感仪器光机结构优化设计及精度分析的研究。Email: zhangl_1982@163.com



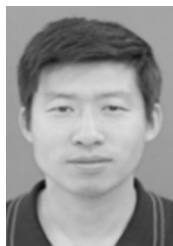
刘波(1985—),男,江西抚州人,博士研究生,助理研究员,2008年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事航空遥感器结构设计方面的研究。E-mail: liubo1985@gmail.com



丁亚林(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1987年于吉林工业大学获学士学位,1994年于东北大学获得硕士学位,主要从事航空遥感仪器光机结构总体技术及载机动态条件下稳定成像技术方面的研究。E-mail: dingyl1964@sohu.com



詹磊(1982—),男,河南信阳人,助理研究员,2004年于吉林大学获学士学位,2009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方面的研究。E-mail: zhanlei1121@sina.com



张洪文(1974—),男,吉林长春人,研究员,1995年于吉林工业大学获得学士学位,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