

文章编号 1004-924X(2009)09-2098-08

帘幕式快门曝光精度数学建模及计算

张 雷^{1,2}, 丁亚林¹, 蒋贵德³

(1. 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. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 93313 部队, 吉林 长春 130111)

摘要: 为了确定帘幕式快门各尺寸参数与曝光精度的关系, 结合帘幕式快门的工作原理及快门的曝光时间表达式建立了曝光精度的数学模型。讨论了影响快门曝光时间精度的主要因素, 对曝光时间表达式中的各个参数误差进行了分析, 应用误差合成法计算了各个参数误差对曝光时间的影响程度。最后, 对现有航空相机中应用的快门进行了精度分析和计算。实验表明: 快门的曝光时间精度随着帘缝宽度的增加而提高, 现有航空相机快门的曝光时间最低精度为曝光时间的6.4%, 高于理论计算精度8.59%。在1/1 000~1/100 s, 快门的有效曝光时间与帘缝宽度成正比, 帘缝宽度对曝光精度的影响是帘缝速度对曝光精度影响的3.6倍。

关键词: 帘幕式快门; 曝光时间; 曝光精度; 误差分析

中图分类号: TH703; V248.3 **文献标识码:** A

Mathematical modeling and calculation on exposure time of curtain-type shutter

ZHANG Lei^{1,2}, DING Ya-lin¹, JIANG Gui-de³

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 130039, China*; 3. *No. 93313 Army, Changchun 130111, China*)

Abstract: To determine the relationship between the size parameters and the exposure accuracy of a curtain-type shutter, the expression of exposure time is calculated, and the mathematical model of exposure accuracy is established according to the principle of the curtain-type shutter and its exposure time. Then, the main factors impacting the exposure time accuracy are analysed, and the error for every parameter is calculated with an error synthesized method. Finally, by taking an aerocamera as an example, the exposure accuracy is worked out. The experiment results indicate that the slit width on the curtain-type shutter is proportional to exposure time between 1/1 000~1/100 s, and the exposure time accuracy is increased with the slit width. The minimum exposure time accuracy of the shutter in the camera is 6.4%, which is higher than the accuracy of 8.59% calculated by the theory. The error influenced by the slit width is 3.6 times that influenced by the velocity.

Key words: curtain-type shutter; exposure time; exposure accuracy; error analysis

收稿日期: 2008-09-25; 修订日期: 2008-10-24.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (Grant No. 2007AA701203)

1 引言

航空侦察是战时重要获取信息的渠道之一。随着各种新任务的不断提出,航空侦察相机也在不断更新。国外先进国家的航空侦察相机已经历了好几代的发展历程,相机的功能和性能得到了不断的改善。胶片型航空相机由于其分辨率高而被广泛采用,但分辨率不只取决于胶片,还与光学系统、调焦组件、曝光时间有着密切的关系。快门便是决定曝光时间的一个重要组件。快门有很多种形式,比如中心式快门、百叶窗式快门以及帘幕式快门等;在众多形式的快门中,帘幕式快门由于其在曝光均匀性、曝光时间范围以及曝光准确度方面的优势,已经被美国的很多相机采用,如KS146型号航空相机;国内的某些画幅相机也是采用帘幕式快门。随着科学技术的不断发展,光学系统的加工精度不断提升,为获得高分辨率的航空相片,需要相机的各部件相应指标随之提高,快门也不例外。提高快门的技术指标要通过提高快门的参数指标来实现,而参数指标则取决于机械加工装调精度和电控精度。因此,分析机械加工装调精度和电控精度,对提高快门的技术指标具有重要的意义。

作为胶片型航空相机的主要机构之一,快门的性能直接影响航空摄影的成像质量;同时,由于允许的剩余像移量和曝光量的精度要求,快门也必须是快速高精度的运动机构,它决定曝光时间的精确程度。曝光时间对于得到高质量的航摄相片是十分关键的一个环节。为保证照片达到分辨率的要求,曝光时间必须是均匀精确的,以便保证胶片上各点的曝光量一致,曝光时间对整个像面恒定。在如今的众多形式的快门中,帘幕式快门以其曝光时间均匀以及曝光时间调节范围宽的优势,得到了越来越广泛地应用。帘幕式快门通过调节帘缝宽度调节曝光时间,帘缝越宽,曝光时间越大。目前,关于帘幕式快门曝光时间的资料较少,本文结合帘幕式快门的工作原理对快门曝光时间进行了数学建模和计算,用于为工程设计提供参考。其次,针对由于加工制造、装调以及电控方面的误差,快门在整个曝光过程中会出现曝光时

间不准确的现象,本文还对加工装调以及电控等方面的误差对曝光精度的影响程度进行了分析,并对现有航空相机的帘幕式快门的曝光精度进行了分析计算,以便进一步提高快门的技术指标。

2 帘幕式快门的结构及工作原理

快门由前帘、后帘、前后帘上紧辊轴和反卷辊轴组成,示意图如图1所示。

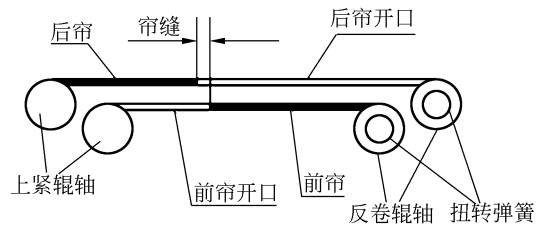


图1 帘幕式快门结构简图

Fig.1 Sketch of curtain type shutter

快门帘是用很薄但强度很高的不锈钢制成的,快门帘分为上下两层,上帘又称后帘,下帘又称前帘,前帘、后帘上均开有开口,它们以相等的速度同向运动。后帘较前帘长,两个帘的一端分别固定在两个上紧辊轴上,另一端分别固定在两个反卷辊轴上。两个反卷辊轴上安装有扭转弹簧,当上紧辊轴旋转卷动快门帘布时即上紧了反卷辊轴内的螺旋弹簧。快门曝光时,快门帘在反卷辊轴内的扭转弹簧的作用下反卷,两个快门帘开口部分形成的曝光帘缝通过焦面,光线通过帘缝落在胶片上,使胶片曝光。上紧快门时,由于机械传动部分中的前、后帘的两个凸轮的转动存在一定的角度相位差,使前帘先运动,后帘后运动,这一先一后将快门帘缝关闭,防止快门在上紧过程中漏光。一个周期结束后,回到初始位置,进行下一次曝光。

帘幕式快门在曝光时,通过帘缝的移动使胶片曝光,胶片则保持不动。由于卷帘与胶片之间产生相对运动,当帘缝依次通过胶片的每一个点时,目标点的光束便能够通过卷帘上的缝隙依次使整个胶片曝光。由于帘缝狭窄,留给每一个像点照射时间很短,因此焦面式快门能够得到很短

的曝光时间。同时,胶片上每个点的曝光时间取决于帘缝的宽度,帘缝越宽,胶片上每个点接收目标传来的光线的的时间越长,曝光时间也越长,反之,曝光时间越短^[1-2]。

3 曝光时间的误差分析

3.1 曝光精度的数学模型^[3]

精度通常用绝对误差或者相对误差来表示,为了方便曝光量在感光特性曲线上的表示,曝光精度通常表示为曝光时间的相对误差,其余精度也均用相对误差来表示。

帘幕式快门有效曝光时间的表达式为

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

式中 Z 为帘缝宽度, v 为帘缝运动速度。

式(1)表明,影响快门曝光精度的因素为快门帘幕运动的速度和帘缝的宽度。曝光精度由快门帘幕运动速度精度、帘缝宽度的尺寸精度决定。由于各参量之间相互独立,由式(1)建立系统的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,帘缝运动速度的误差传递系数为:

$$\frac{\partial t_{\text{eff}}}{\partial v} = -\frac{Z}{v^2}, \quad (4)$$

帘缝宽度的误差传递系数为:

$$\frac{\partial t_{\text{eff}}}{\partial Z} = \frac{1}{v}. \quad (5)$$

将以上式(4)、(5)代入到式(3)化简整理得:

$$\sigma_t = \sqrt{\left(-\frac{1}{v^2} \cdot Z\right)^2 \cdot \sigma_v^2 + \frac{1}{v^2} \cdot \sigma_z^2}. \quad (6)$$

3.2 影响快门曝光时间的各因素分析

3.2.1 影响帘缝速度精度的因素^[3-4]

由结构计算的快门帘缝运动速度的表达式为:

$$v = \frac{2\pi n i R}{60}, \quad (7)$$

式中 n 为快门电机的转速; i 为快门电机到上紧辊轴的速比; R 为上紧辊轴半径。

式(7)说明:影响快门速度精度的因素有结构的传动精度和快门电机的稳速精度。

3.2.1.1 结构的传动精度

传动误差为在齿轮传动机构中瞬时速比对理想速比的偏差,它是评定齿轮传动精度的动态性能指标之一。齿轮机构的传动误差是由齿轮固有位置误差和装置误差引起的。

(1) 齿轮固有位置误差

齿轮固有位置误差在齿轮传递运动时,表现为在啮合线上实际齿廓位置对理想齿廓位置的偏离。齿轮固有位置误差是由齿轮的几何偏心、运动偏心、基节误差以及齿形误差等因素产生的,这是表示齿轮传递运动正确程度的动态性能指标。在齿轮机构中,齿轮固有位置误差在齿轮机构传动误差的总和中占 70% 以上,所以提高齿轮精度对提高齿轮机构精度是极其重要的。本快门的设计中,大多数齿轮均采用了 6 级精度以及与之相匹配的零件精度。

(2) 装置误差

装置的跳动误差是产生齿轮机构传动误差的另一原因。装置的跳动误差来源于齿轮实际旋转中心对理论旋转中心的偏离,相当于使齿轮造成几何偏心。产生装置跳动误差的原因有以下几种:齿轮孔与轴之间的间隙、齿轮安装处轴径跳动和滚动轴承动环偏心。

齿轮速度及位置误差可用以下方法计算,就单个齿轮而言,齿轮固有位置误差曲线为:

$$E_\theta = \frac{1}{2}(F'_i - f'_i) \sin \theta + \frac{1}{2} f'_i \sin(z\theta), \quad (8)$$

其中, E_θ 为齿轮转角误差; F'_i 为齿轮切向综合误差; f'_i 为齿间切向综合误差; θ 为齿轮转角; z 为齿数。

由式(8)求导得到齿轮固有速度误差曲线

$$E_\omega = \omega \left[\frac{1}{2}(F'_i - f'_i) \cos \theta + \frac{1}{2} z f'_i \cos(n\theta) \right], \quad (9)$$

其中, ω 为转速。

独立的径向变量 $\frac{1}{2}(F'_i - f'_i)$ 和 $\frac{1}{2} z f'_i$ 具有瑞利分布形式, θ 在区间 $[0, 2\pi]$ 上满足均匀分布。当置信系数为 99.7% 时,式(9)中的各项均值和方差有如下关系:

$$M \left[\frac{1}{2}(F'_i - f'_i) \right] = \frac{\sqrt{2\pi}}{12}(F'_i - f'_i), \quad (10)$$

$$D[\frac{1}{2}(F_i' - f_i')] = \frac{1}{18}(1 - \frac{\pi}{4})(F_i' - f_i')^2, \quad (11)$$

$$M[\frac{1}{2}zf_i'] = \frac{\sqrt{2\pi}}{12}zf_i', \quad (12)$$

$$D[\frac{1}{2}zf_i'] = \frac{n^2}{18}(1 - \frac{\pi}{4})f_i', \quad (13)$$

$$M(\sin \theta) = 0, \quad (14)$$

$$D(\sin \theta) = \frac{1}{2}, \quad (15)$$

$$M[\sin(z\theta)] = 0, \quad (16)$$

$$D[\sin(z\theta)] = \frac{1}{2}. \quad (17)$$

由均值和方差的性质并由以上各式可得由齿轮固有位置误差引起的齿轮速度误差的均值和方差,如下式:

$$M(E_\omega) = 0, \quad (18)$$

$$D(E_\omega) = \frac{\omega^2}{36}[(F_i' - f_i')^2 + z^2 f_i'^2]. \quad (19)$$

由装置的跳动误差引起的速度传动误差的均值和方差为:

$$M(T_{z\omega}) = 0, \quad (20)$$

$$D(T_{z\omega}) = \frac{\omega^2}{9} \sum_{i=1}^k e_i^2, \quad (21)$$

其中, e_i 为装置跳动量。

由于均值为 0, 因此不予考虑, 则由式(20)、(21)得到单个齿轮传动误差的方差为:

$$D(T_{d\omega}) = D(E_\omega) + D(T_{z\omega}). \quad (22)$$

由误差合成法合成的一对齿轮副的传动比误差为:

$$D(i_{12}) = \frac{1}{\omega_2^2} D(E_{\omega_1}) + \frac{\omega_1^2}{\omega_2^4} D(E_{\omega_2}), \quad (23)$$

将齿轮的速度误差化成如下形式:

$$D(E_{\omega_s}) = c_s^2 \omega_s^2, \quad (24)$$

齿轮系统总传动比的方差为:

$$\sigma_{i\omega} = i_{1n} \sqrt{\sum_{m=2}^k \frac{1}{i_{m-1m}^2} D(i_{m-1m})}. \quad (25)$$

将式(23)、(24)代入式(25), 化简得:

$$\sigma_{i\omega} = i_{1n} \sqrt{\sum_{s=1}^n c_s^2}. \quad (26)$$

以前帘为例计算齿轮的结构传动比误差, 前帘的传动原理图如图 2 所示:

将齿轮的各参数代入到上述各式中, 经过计算, 得到齿轮机构角传动误差并折算得到帘缝速度传动比总误差为 $\pm 1.2\%$ 。

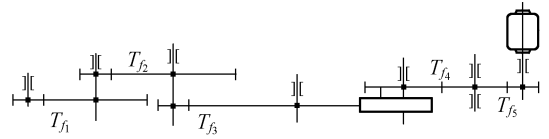


图 2 前帘传动部分

Fig. 2 Mechanic transmission part of forecurtain

3.2.1.2 凸轮机构的精度

影响凸轮机构精度的因素有以下几种:

(1) 凸轮廓线径向误差

凸轮的实际廓线从理论上讲, 是没有误差的。但在实际加工过程中, 凸轮廓线会产生误差, 这样在快门曝光段便会引起摆杆角速度偏离匀速运动, 造成帘缝速度误差, 影响曝光精度。由于凸轮在高精度数控加工中心制造, 因此引起的误差很小, 一般径向误差在 $0.01 \sim 0.02^{[2]}$ 。

(2) 凸轮轴装配误差

凸轮轴在装配过程中, 由于偏心会造成实际廓线的偏移, 进而造成帘缝速度误差, 影响曝光精度。

(3) 摆杆轴跳动误差

由于摆杆在摆转过程中, 摆杆轴存在跳动误差, 因此会引起摆杆摆动角度误差, 影响曝光精度。

根据误差合成法, 由凸轮轮廓曲线计算得到的由凸轮机构的制造误差引起的帘缝宽度误差为 0.056% , 由凸轮引起的帘缝运动误差比齿轮传动的误差小两个数量级, 因此可予以忽略。

3.2.1.3 快门主电机稳速精度

快门主电机的稳速是靠测速机来控制的。其稳速的精度是由系统闭环放大倍数保证, 稳速的精度为 1% 。

表 1 为影响帘缝速度的各因素及其相对误差。

表 1 帘缝速度精度

Tab. 1 Velocity accuracy of slit

影响因素	产生的相对误差
结构传动误差	1.2%
电机稳速精度	1%
合计	2.2%

3.2.2 影响帘缝宽度精度的因素

3.2.2.1 结构传动精度

结构的传动精度分析类似于帘布速度的精度分析。齿轮位置的传递误差计算与速度传递误差计算相似。

单个齿轮位置误差的均值和方差为:

$$M[E_{\theta}] = 0, \quad (27)$$

$$D[E_{\theta}] = \frac{1}{36}[(F_i' - f_i')^2 + f_i'^2]. \quad (28)$$

由装置的跳动误差引起的速度传动误差的均值和方差为:

$$M(T_{\omega}) = 0, \quad (29)$$

$$D(T_{\omega}) = \frac{\omega^2}{9} \sum_{i=1}^k e_i^2. \quad (30)$$

单个齿轮传动误差的均值和方差为:

$$M(T_{d\theta}) = M(E_{\theta}) + M(T_{\omega}), \quad (31)$$

$$D(T_{d\theta}) = D(E_{\theta}) + D(T_{\omega}). \quad (32)$$

一对齿轮副的传递误差的均值和方差为:

$$M(T_{f\theta}) = M(T_{d\theta_1}) + M(T_{d\theta_2}), \quad (33)$$

$$D(T_f) = D(T_{d_1}) + D(T_{d_2}). \quad (34)$$

将弧度单位转化为角度单位,在齿轮 1 上度量时的误差为:

$${}_a T_{f\theta} = \frac{T_{d\theta_1} + T_{d\theta_2}}{R_1}, \quad (35)$$

则在齿轮传动链中,合成误差的均值和方差为:

$$M({}_a T_c) = \sum_{k=1}^n \frac{M({}_a T_{fk})}{i_{k-1}}, \quad (36)$$

$$D({}_a T_c) = \sum_{k=1}^n \frac{D({}_a T_{fk})}{i_{k-1}^2}, \quad (37)$$

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。

在帘缝宽度由最小调到最大的过程中,齿轮机构的传动误差是恒定不变的。以最小帘缝宽度 3 mm 为例,经计算得出齿轮机构角传动误差并折算到帘缝宽度误差为 $\pm 3.3\%$ 。根据误差合成法,由凸轮轮廓曲线计算得到的由凸轮机构的制造误差引起的帘缝宽度误差为 0.007 mm,由凸轮引起的帘缝运动误差比齿轮传动的误差小 2 个数量级,因此可予以忽略,则结构传动精度总计为 $\pm 3.3\%$ 。

3.2.2.2 帘缝反馈电位计的位置精度

作为帘缝宽度位置的检测元件,帘缝电位计的位置精度由系统的闭环放大倍数保证,位置精

度为 5%。

表 2 为影响帘缝宽度的各因素及其相对误差。

表 2 帘缝宽度精度

Tab. 2 Width accuracy of slit

影响因素	产生的相对误差
结构传动误差	0.1 mm(3 mm 的 3.3%)
电位计位置精度	5%
合计	8.3%

3.3 误差比较

表 3 为以上分析的快门各项误差的比较。

表 3 误差计算结果

Tab. 3 Results of errors

参数名	数值	误差传递系数	标准差 σ	误差
v (mm/s)	2 830	-3.83×10^{-7}	61.6	2.36×10^{-5}
Z (mm)	3	3.57×10^{-4}	0.24	8.5×10^{-5}

从表中不难发现,帘缝宽度误差对曝光精度的影响是帘缝速度误差对曝光时间影响的 3.6 倍。

帘缝速度的误差与帘缝速度成线性关系,比例系数为 a_1 ,属于可变误差,因此将其表示成:

$$\sigma_v = a_1 v. \quad (38)$$

由结构导致的帘缝宽度的误差为常量 Δ ,由电控导致的帘缝宽度的误差与帘缝宽度成线性关系,比例系数为 a_2 ,因此将帘缝宽度的误差表示为:

$$\sigma_z = a_2 Z + \Delta. \quad (39)$$

综合表 3 的数据以及式(38)、式(39),代入精度数学模型式(6)整理得:

$$\sigma_t = \sqrt{\left(\frac{Z}{v} a_1\right)^2 + \left(\frac{Z \cdot a_2 + \Delta}{v}\right)^2}. \quad (40)$$

由有效曝光时间公式和式(40)得:

$$\sigma_t = t_{\text{eff}} \sqrt{a_1^2 + \left(a_2 + \frac{\Delta}{Z}\right)^2}. \quad (41)$$

上式表明,曝光精度随着帘缝宽度的增大而提高,因此对于本文研究的快门,帘缝宽度为 3 mm 时对应的曝光精度最低,将表 4 中数据代入式(41)中,计算得曝光时间的最低精度为 8.59%。

经过验证,可以将曝光量控制在胶片感光特性曲线的直线段范围内^[5-6],满足成像要求。

式(41)表明,曝光精度随着帘缝宽度的增大而提高。此外,在快门主电机的稳速精度高于帘缝电位计精度的情况下,帘缝电位计的位置精度对于曝光精度的影响将会比快门主电机的稳速精度对曝光精度的影响显著。因此,提高帘缝电位计的精度将使曝光精度得到大幅度提高。

4 实验与数据

4.1 实验原理

用光电法对快门的曝光时间进行了测量,实验原理如图 3 所示,平行光管发出的光经过快门的帘缝,使快门帘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。

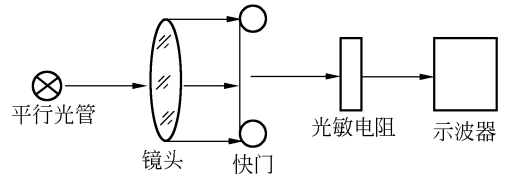


图 3 曝光时间测量实验原理图

Fig. 3 Experiment of exposure time measurement

4.2 曝光时间的测试

快门的主电机转速控制在 2 600 r/min,对快门帘缝宽度分别为 3 mm、6 mm、10 mm、20 mm 和 30 mm 的曝光时间进行测量。为观察快门在一次曝光过程中,曝光时间在幅面内各点的精度,每次测量时,在画幅内均匀地选定 5 个位置,即画幅的 2 个边缘位置和其他 3 个等分的位置,并进行多次测量。对于每一曝光时间挡的每一个位置测量四次曝光时间,然后调整一次帘缝的宽度,并重复上述测量,得到测试结果如表 4 所示。

表 4 曝光时间实验测量结果

Tab. 4 Results of exposure time measurement experiments

Z (mm)	5 个位置的曝光时间(ms)					平均值 (ms)	标准差 (ms)	精度 (ms)
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5	平均值	标准差	精度
3	0.905	1.035	1.075	0.945	0.915	0.982	0.063 4	6.4 %
	0.931	1.045	1.060	0.925	0.945			
	0.902	1.005	1.065	0.965	0.960			
	0.887	0.980	1.040	0.905	0.905			
	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905			
6	2.03	2.19	2.24	2.11	2.12	2.13	0.093 1	4.7 %
	1.92	2.17	2.29	2.08	2.15			
	1.97	2.19	2.20	2.09	2.14			
	2.01	2.22	2.20	2.10	2.15			
	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15			
10	3.22	3.34	3.34	3.24	3.20	3.25	0.050 4	1.5 %
	3.18	3.30	3.32	3.24	3.22			
	3.20	3.30	3.28	3.22	3.24			
	3.24	3.26	3.30	3.22	3.18			
	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25			
20	6.84	6.84	6.82	6.82	6.80	6.79	0.079 0	1.2 %
	6.80	6.88	6.90	6.78	6.78			
	6.76	6.86	6.80	6.76	6.72			
	6.52	6.86	6.80	6.76	6.76			
	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79			
30	10.94	10.80	10.80	10.74	10.55	10.77	0.123 0	1.2 %
	10.90	10.82	10.78	10.75	10.59			
	10.92	10.84	10.77	10.73	10.56			
	10.94	10.88	10.78	10.74	10.57			
	10.77	10.77	10.77	10.77	10.77			

对每一帘缝宽度对应的曝光时间取平均值, x 轴为曝光时间 t , 取 y 轴为帘缝宽度 Z , 图 4 即为帘缝宽度随实验中各点曝光时间平均值的变化情况。

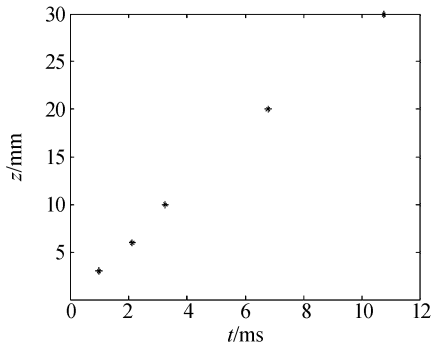


图 4 帘幕式快门的帘缝宽度与曝光时间对应图

Fig. 4 Width vs exposure time of curtain-type shutter

测量发现, 曝光时间与帘缝宽度成线性关系。由图 4 的各点坐标利用最小二乘法进行拟合, 结果如下式:

$$Z = 2.778t + 0.508, \quad (42)$$

上式右端第二项 0.508 为系统误差, 对于 > 2 ms 的曝光时间, 常数项 0.508 少于帘缝宽度一个数量级, 因此可以认为对于 2 ms 以上的曝光时间, 帘缝宽度与曝光时间成正比, 即忽略前后帘间距的影响。

对表 4 进行标准差计算, 图 5 为曝光精度随

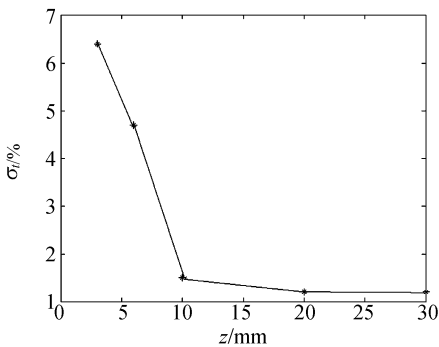


图 5 帘幕式快门的帘缝宽度与曝光精度对应图

Fig. 5 Width vs exposure time accuracy of curtain-type shutter

帘缝宽度变化的曲线。

由图 5 知, 曝光精度随着帘缝宽度的增大明显提高, 在帘缝宽度 > 10 mm 后精度趋于平稳。其原因是结构对帘缝宽度影响的误差为常量, 根据式(41), 便有曝光精度随着帘缝宽度的增大而提高。因此在验证曝光时间是否满足要求时, 只需要对所需要的最小曝光时间进行测量即可。本快门的最小曝光时间为快门帘缝宽度为 3 mm 时, 即曝光时间为 1 ms, 其精度为 6.4%, 高于理论计算精度 8.59%, 经验证, 可以将曝光量控制在感光特性曲线的直线段, 因此满足要求。

5 结 论

本文运用误差理论对快门的曝光时间准确度进行了数学建模, 对制造误差、装调精度以及电控精度进行了分析计算。结合传动机构中的齿轮各项误差、凸轮的加工误差、装调误差以及电控精度从数学模型上进行了分析, 发现由以上误差导致的帘缝宽度的误差对曝光精度的影响比帘缝速度误差对曝光时间影响的显著。对幅面上各点的曝光时间进行了实际测量, 得出如下结论: 在曝光时间为 $1/1\ 000 \sim 1/100$ s 时, 可以认为快门的有效曝光时间与帘缝宽度成正比。帘缝宽度误差对曝光精度的影响是帘缝速度误差对曝光时间影响的 3.6 倍, 提高结构传动精度和帘缝电位计的控制精度对于提高曝光精度十分关键。快门曝光精度随着帘缝宽度的增加而提高, 帘缝宽度越大, 提高越显著, 最后趋于平稳, 本快门的曝光精度从 6.4% 提高到 1.2% 后趋于平稳。

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): 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 Chi-

nese)

- [2] 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]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2001.

LI W. *Structural Design and Precision Analysed on shutter in a Aerial/Space Camera* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2001. (in Chinese)

- [3] 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)

- [4] 张以平,贾耀卿,张金荣,等. 齿轮国家标准汇编

[M]. 北京:中国标准出版社,1990.

ZHANG Y P, JIA Y Q, ZHANG J R, *et al.*. *National Gear Criterion Collection* [M]. Beijing: China Criterion Press, 1990. (in Chinese)

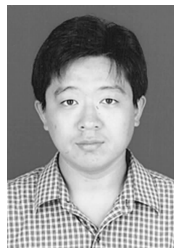
- [5] 金养智,魏杰,刁振刚,等. 信息记录材料[M]. 北京:化学工业出版社,2003.

JIN Y ZH, WEI J, DIAO ZH G, *et al.*. *Material for Recording Information* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese)

- [6] R. G. 麦克金尼. 感光材料和摄影处理[M]. 北京:测绘出版社,1984.

MCGINLEY R G. *Sensitive Material and Resolving* [M]. Beijing: Image Surmap Press, 1984. (in Chinese)

作者简介:



张雷(1982—),男,吉林长春人,2005年于吉林大学获学士学位,现为中科院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要研究方向为航空相机帘幕式快门小型化技术的研究。E-mail: zhangl_1982@163.com



蒋贵德(1964—),男,吉林长春人,工程师,主要从事航空摄影相关技术的研究。E-mail: zhangl_1982@163.com

导师简介:



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: dingyl1964@sohu.com