

文章编号 1004-924X(2009)01-0196-06

航摄快门帘缝宽度的优化

张 雷^{1,2}, 丁亚林¹, 蒋贵德³, 张树青^{1,2}, 许永森^{1,2}

(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:介绍了航空侦察相机帘幕式快门的工作原理,分析了胶片感光特性曲线与分辨率的关系。从胶片感光特性曲线确定了使胶片获得高分辨率的最佳曝光量,并由感光材料的性能参数推导出最佳曝光量的表达式。最后,由快门有效曝光时间的表达式计算出能够获得最佳曝光量的快门帘缝宽度的表达式。对 EK3412 胶片进行了测绘,显影速度分别为 10、15、20 和 25 frames/min 时的最佳曝光量分别为 0.073、0.098、0.116 和 0.136 lx·s。飞行实验验证,所获得的照片分辨率可以提高 10%~20%,接近理论分辨率 130 lpm。将曝光量控制在感光特性曲线直线段的中点,可以显著提高照片的分辨率,满足图像判读要求。

关键词:航空相机;快门;最佳曝光量;感光特性曲线;帘缝宽度

中图分类号:V248.3;TB869 **文献标识码:**A

Optimization of slit width on shutter for aerial camera

ZHANG Lei^{1,2}, DING Ya-lin¹, JIANG Gui-de³, ZHANG Shu-qing^{1,2}, XU Yong-sen^{1,2}

(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 100039, China*; 3. *No. 93313 Army, Changchun 130111, China*)

Abstract: The working principle of curtain type shutter in an aerial camera is introduced and the relationship between sensitive characteristics and resolution for a film is analyzed. Then, expression of the best exposure is deduced by the parameters of photosensitive material. Finally, expression of the slit width is worked out by calculated expression of the exposure time. According to mapping EK3412, the best exposure is 0.073, 0.098, 0.116 and 0.136 lx·s, when the image speed is 10, 15, 20 and 25 frames/s. After flying experimental verification, the resolution of the film can be increased by 10%~20%, which is closed to the theoretical resolution of 130 lpm. By controlling exposure amount to the mid-point on straight line of the characteristic curve, the resolution of photo be can significantly improved to meet the requirements of image interpretation.

Key words: aerial camera; shutter; most suitable exposure amount; characteristic curve; slit width

1 引 言

航空侦察照相的根本目的是获得和提取被照相地域的图像信息,从图像信息中判别出所感兴趣的图像信息是判读的任务。如何在一次航空摄影中获取更多,更丰富的图像信息,是航空摄影技术的研究方向之一,而其中的一个重要环节便是使底片获得合适的曝光量。在目标照度和相机的光学系统确定的情况下,胶片的曝光量由快门的曝光时间决定。航空相机的帘幕式快门是通过改变快门的帘缝宽度来改变曝光时间的,因此,调节快门帘缝宽度,便可以使胶片获得最佳的曝光量,从而获得高分辨率的航空照片,为目标信息的判读提供有利条件^[1-2]。

2 帘幕式快门的工作原理

2.1 快门的结构简述

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。

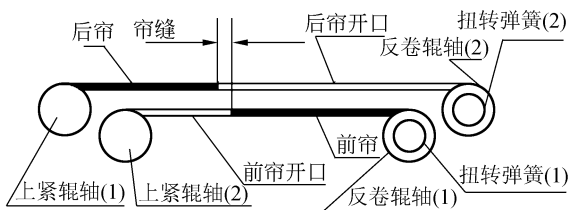


图 1 帘幕式快门结构简图

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^[3]。

2.2 快门的曝光原理

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。

3 最佳曝光量的确定

3.1 感光特性曲线与分辨率的关系分析

感光特性曲线反映感光材料照相性能的基本特性,是曝光量与密度关系的曲线图,如图 2 所示。

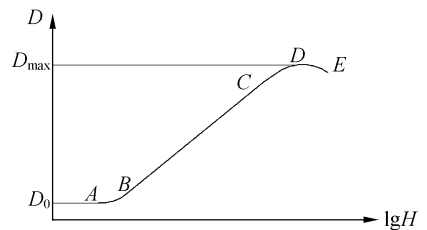


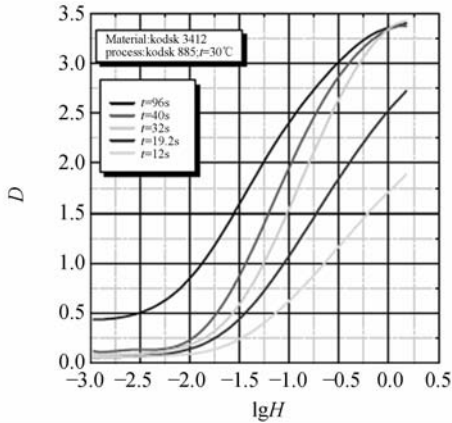
图 2 特性曲线示意图

Fig. 2 Sketch of characteristic curve

一条完整的特性曲线通常分为趾部(AB),直线部分(BC),肩部(CD)和反折部分(DE)。在航空摄影中,感兴趣的是感光曲线的直线段,即 BC 段。这部分密度同曝光量对数成正比关系,密度差保持恒定,成为曝光正确部分,它对测量感光材料的照相性能具有决定性的意义^[4-5]。

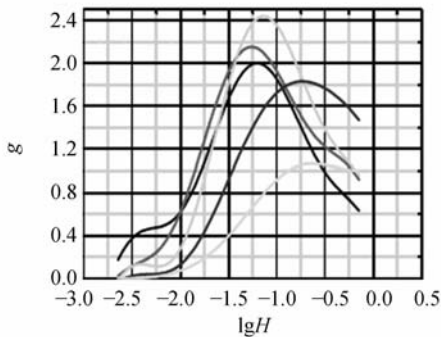
经过大量研究,得出不同显影速度的感光特

性随分辨率变化的曲线,如图 3 所示。图 3(a)为灰度密度随曝光量对数变化的曲线,图 3(b)为成像分辨率和曝光量对数的关系曲线。其中,不同显影速度的特性曲线一一对应。



(a) 灰度密度随曝光量对数变化的曲线

(a) Relation curves of grey densities and logarithms of exposure amounts



(b) 成像分辨率和曝光量对数变化的关系曲线

(b) Relation curves of resolutions and logarithms of exposure amounts

图 3 感光特性曲线和分辨率的关系

Fig. 3 Relation of characteristic curves and resolutions

观察图中显影速度为 96、40、32 s (19.5 s 和 12 s 的特性曲线末端对应的曝光量超出了关心的范围内,因此不予考虑)分别对应的特性曲线,不难发现,对应于每一显影速度的感光特性曲线,在直线段的中点附近,照片具有高分辨率^[6-9]。因此,为了使整张画幅获得高分辨率,应使平均景物亮度产生的曝光量控制在胶片感光特性曲线的直线段的中点附近。

3.2 最佳曝光量的表达式计算

如图 4 所示,在感光特性曲线上取直线部分

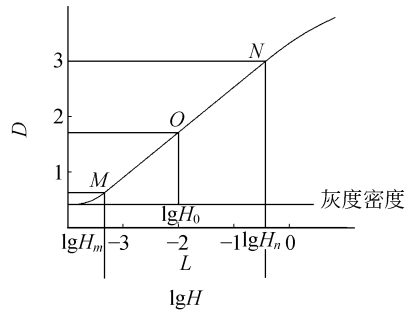


图 4 胶片感光曲线示意图

Fig. 4 Sketch of film characteristic curve

MN 为研究对象, M 点为直线的初始端也称为特性曲线上的基准密度点,在数值上大致等于产生片基密度+灰雾密度+0.1, H_m 为感光度基准点所对应的曝光量,即图中 M 点对应的曝光量;设直线段末端为 N 点,一般来说它是感光特性曲线上片基密度+灰雾密度以上 1.3 所对应的点。 N 点对应的曝光量为 H_n 。在对感光特性曲线的参数要求精确时, M 点和 N 点的选取要通过测绘获得,详见参考文献[10]。 M 点 N 点对应的曝光量的对数差即为感光材料的宽容度。由图(4),感光材料的宽容度为特性曲线直线部分在横轴上的投影,可以表示为

$$L = \lg H_n - \lg H_m \quad (1)$$

线段 MN 的中点 O 所对应的曝光量 H_o 即为高分辨率照片所对应的最佳曝光量。

由图 4 知, MON 3 点对应的曝光量之间的关系为:

$$\lg H_o = \frac{\lg H_m + \lg H_n}{2} \quad (2)$$

设 O 点对应的曝光量为 M 点的 k 倍,即

$$H_o = k \cdot H_m \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得

$$k = \sqrt{\frac{H_n}{H_m}} \quad (4)$$

由式(3)~(4),得

$$k = 10^{\frac{L}{2}} \quad (5)$$

即系数 k 取决于感光材料的宽容度。

航空相机的感光速度(又称感光度)规定为

$$S = 1.5 / H_m \quad (6)$$

式(3)和式(6)得胶片的最佳曝光量,即 O 点对应的曝光量表达式为

$$H_o = \frac{1.5k}{S} \quad (7)$$

4 帘缝宽度的确定

4.1 焦平面的曝光量计算

由几何光学可以知道,像平面上平均景物照度的公式为:

$$E = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{f'}\right)^2 B \tau \cos^4 \beta, \quad (8)$$

式中, D 为镜头的入瞳直径; f' 为镜头的焦距; B 为视场内景物的平均亮度; τ 为镜头的透射比,在航空相机中通常取 0.85; β 为镜头的像方视场角。对于式(8),记:

$$\left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau = \frac{1}{T^2}, \quad (9)$$

式中, T 为将镜头透射比考虑在内的光圈数。

相机前如果加了滤光片,还要考虑滤光片的光能衰减,滤光片的系数 C 定义为

$$C = \frac{\text{加滤光片前的光通量}}{\text{加滤光片后的光通量}}, \quad (10)$$

则经过修正后,像平面景物平均照度的公式应为

$$E = \frac{\pi B \cos^4 \beta}{4CT^2}. \quad (11)$$

胶片在曝光时间内接受的曝光量为

$$H_o = E \cdot t, \quad (12)$$

式中, t 为快门的有效曝光时间。

4.2 帘缝宽度的表达式计算

由式(7)、(11)和(12)得快门的最佳曝光时间表达式为

$$t = \frac{6kCT^2}{S\pi B \cdot \cos^4 \beta}. \quad (13)$$

记

$$K = \frac{6}{\pi} \cdot k, \quad (14)$$

则帘幕式快门有效曝光时间的表达式为

$$t_{\text{eff}} = \frac{Z}{V}, \quad (15)$$

Z 为帘缝的宽度, V 为帘幕的运动速度。

将式(14)、(15)代入式(13)得最佳曝光时间所对应的帘缝宽度为

$$Z = \frac{VKCT^2}{SB\cos^4 \beta}. \quad (16)$$

对于长焦距的航空相机,其视场角较小, $\cos^4 \beta$ 可近似为 1,则式(16)可改写为

$$Z = \frac{VKCT^2}{BS}. \quad (17)$$

5 数据与实验

5.1 EK3412 照相性能参数的测定

EK3412 的感光曲线如图 5 所示,4 个不同的显影速度对应不同的感光特性曲线,特性曲线的改变必然导致特性曲线上的基准点发生变化。

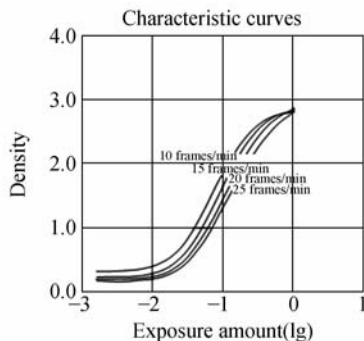


图 5 EK3412 感光特性曲线

Fig. 5 Characteristic curves of EK3412

为了得到 EK3412 的主要照相性能参数,利用模拟图解法^[10]对图 5 的 4 条感光特性曲线的基准点和宽容度进行了测绘计算,结果见表 1。

表 1 EK3412 照相性能参数

Tab. 1 Photographic parameters of EK3412

显影速度 (frames/min)	$\lg H_m$	H_m	S	L	H_o
10	-1.40	0.040	38	0.53	0.073
15	-1.31	0.049	31	0.60	0.098
20	-1.27	0.054	28	0.67	0.116
25	-1.22	0.060	25	0.71	0.136

从表中可以看出,在基准点对应的曝光量、感光速度、宽容度以及直线段中点对应的曝光量方面,显影速度为 10 frames/min 和 15 frames/min 的数据相比显示,基准点对应的曝光的曝光量差别相对较大;而 15 frames/min、20 frames/min 和 25 frames/min 的数据显示其差别不大,因此,显影速度选择 15~25 frames/min 之间可以减小由于显影速度的不同带来的感光材料照相性能的改变。

将表 1 计算的数据分别代入式(3)~(14)中,计算结果和相机光学系统以及快门的各项参数见表 2。

表 2 系统参数

Tab.2 System parameters

显影速度(fpm)	S	C	S/C	L	K	K/S	D/f'	T ²	V(mm/s)
10	38	1	38	0.53	1.84	0.048	1;5.6	36.89	3 280
15	31	1	31	0.60	2.00	0.065	1;5.6	36.89	3 280
20	28	1	28	0.67	2.16	0.077	1;5.6	36.89	3 280
25	25	1	25	0.71	2.26	0.090	1;5.6	36.89	3 280

将表 2 中的常数项代入到式(17),得

$$Z = \frac{1.21 \times 10^5 K}{BS} \quad (18)$$

结合表 2 以及式(18)不难发现,显影速度对帘缝宽度的影响较大,因此,应在预先确定显影速度的前提下对曝光量进行控制,以提高航摄照片的判读效果。

5.2 实验

为了得到高分辨率的航摄相片,必须根据地面目标景物的照度适时调节快门的曝光时间,即调节快门的帘缝宽度,从而使胶片获得的曝光量控制在感光特性曲线直线段的中点附近,提高分辨率。预先确定显影速度,然后将表 2 相应的数据代入式(18)中,通过式(18)控制帘缝宽度以调节胶片的曝光量。

利用画幅相机进行飞行试验。通过光电传感器测得目标照度,以传感器测得的电信号输入控制系统,实现帘缝控制方程,即式(18),按照光敏

元件测得的目标照度控制位于焦平面的快门帘缝宽度。在不同照度下,调整相应的帘缝宽度进行航拍。得到航摄照片分辨率均接近理论分辨率 130 lpm,所获得的照片分辨率较帘缝优化之前可以提高 10%~20%。从拍摄效果来看,拍摄出的照片清晰生动,满足图像判读的要求。

6 结 论

根据不同胶片的感光特性曲线各不相同,本文由感光特性曲线的直线段确定最佳曝光量,通过对不同目标照度的要求确定快门的帘缝宽度,从而确定最佳的曝光时间,将曝光量控制在胶片感光特性曲线直线段的中点处,从而使航摄相片具有更高的分辨率,为图像的判读提供丰富生动的信息。

参考文献:

- [1] 李威,李朝晖,颜昌翔. 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. Design and study on the shutter in a films-space camera[J]. *Opt. Precision. Eng.* 2005,13(supp.):9-14. (in Chinese)
- [2] 修吉宏,翟林培. 影响航空图像质量的主要因素分析[J]. 红外,2005(8):10-15.
XIU J H, ZHAI L P. Main factors affecting of the quality of aerial images[J]. *Infrared*, 2005(8):10-15. (in chinese)
- [3] 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]. 北京:中国科学院研究生院,2001.
LI W. *Structrul design and presicion analysed on shutter in a aerial/space camera* [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2001. (in chinese)

- [4] 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.. *Materal for Recording Information* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in chinese)
- [5] 麦克金尼 R G. 感光材料和摄影处理[M]. 北京:测绘出版社,1984.
MCKINNEY R G. *Senitive Material and Resoving Image* [M]. Beijing: Surmap Press, 1984. (in chinese)
- [6] 蔡俊良. 航空胶片感光度及其应用[J]. 感光材料, 1990(6):29-34.
CAI J L. Sensitization speed and application on aerial-film[J]. *Photo Sensitive Material*, 1990(6):29-34. (in Chinese)
- [7] 朱瑞林. 黑白航空胶片感光度 and 平均标度测量尺[J]. 感光材料, 1991(2): 43-44.
ZHU R L. Sensitive speed and average scale of black-and-white aerial camera films[J]. *Photo Sensi-*

tive Material, 1991(2): 43-44. (in Chinese)

- [8] 何艳玲. 黑白航空摄影胶片 ISO 航空感光度和平均斜率的测定方法[J]. 影像技术, 2001(2): 35-36.

HE Y L. Determination of ISO aerial speed and average gradient of black-and-white aerial camera films [J]. *Image Technology*, 2001(2): 35-36. (in Chinese)

- [9] ZYZNOWSKIA M, DEBSKI W, KLEWSKI B A, *et al.*. Polands experience in acquiring remote sensing

data with in the open skies onternational treaty[C]. *Geo-Imagery Bridging Continents XXth ESPRS Congress, Istanbul, Turkey*, 2004: 79.

- [10] 贾永红. 基于计算机解算感光材料特性数值方法的比较[J]. 武测科技, 1994(4): 34-37.

JIA Y H. The comparison of mathematical method based on computer[J]. *Wu Measure Technology*, 1994(4): 34-37. (in Chinese)

作者简介:



张 雷(1982—),男,吉林长春人,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研究。E-mail: zhangl_1982@163.com

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

张树青(1982—),男,黑龙江东宁人,博士研究生,主要从事航空传感器像移补偿技术研究。E-mail: www. ciom. ac @163. com

许永森(1981—),男,河南信阳人,博士研究生,主要从事航空传感器的研究工作。E-mail: pm13l@sina. co

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

● 下期预告

基于体硅工艺的集成式定位平台特性研究

王家畴¹, 荣伟彬¹, 李昕欣², 孙立宁¹

(1. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点联合实验室, 上海 200050)

针对纳米定位平台的构型和定位精度问题,采用体硅加工技术成功地研制出了一种基于单晶硅并带有位移检测功能的新型二自由度微型定位平台,定位平台采用侧向平动静电梳齿驱动。利用力电耦合原理结合能量守恒原理分析了静电致动器的致动机理,对定位平台的主要失效模型、静态和动态特性进行详细地建模分析,证明了静电梳齿力电耦合所导致的侧壁不稳定以及驱动器的最大稳定输出位移,给出了平台稳定工作条件下梳齿间隙、梳齿初始交错长度以及复合柔性支撑梁的弹性刚度比之间的关系。动态分析时考虑空气阻尼对平台的影响,给出了平台最大运行速度、位移及动态条件下的临界驱动电压并把分析结果应用于平台闭环控制。实验结果表明:驱动电压 30 V 时平台稳定输出位移达 10 μm ,机械稳定时间仅 2.5 ms。