

# 快门曝光效率与 多光谱摄影的光度规整问题

杨 观 廉

**摘要：** 本文主要分析几种典型快门的曝光效率及其对多光谱摄影光度规整的影响。计算表明：在同一曝光速度下快门的曝光效率与实际曝光时间随光圈值而变化。为此，提出曝光规整系数的计算，并从等效曝光规整出发，得到了圆盘快门扫描窗口的最佳结构形式。

众所周知，在多光谱摄影遥感中地物目标的信息量是通过底片的密度值来获取的，如果在摄影时各波段采用相同透过率的镜头，并取相同的曝光速度与光圈值，则各波段密度值可直接反映地物目标的波段光强关系。如果在摄影时各波段的上述调光条件不一致，则在定量处理时需按照同一规定的条件折算底片的密度值，这就是多光谱摄影中的光度规整（还有一些其它规正不涉及本文讨论内容）。在极大多数的多光谱摄影场合中各波段都取用相同的曝光速度，仅根据波段光强的不同分别装定各波段的光圈值，在这种情况下除了镜头透过率按固定数值规整外，一般只对光圈值进行规整，其它条件则都认为是相同的、所以不再需要别的规整了。但是，作者的分析证明：当各波段取用不同的光圈值时，即使快门取用相同的曝光速度进行摄影，各波段的曝光效率与实际曝光是不同的。所以，除了按光圈值进行规整外，还需要按曝光效率与实际曝光时间进行光度规整。本文主要通过快门曝光效率的分析计算，提供在上述情况下的光度规整数值，并寻求对光度规整有利的最佳快门结构形式。

迄今为止，就已了解到的文献资料来看，对于各种不同的快门结构，尚没有看到曝光效率的具体计算，在文献[1]中对布帘快门的曝光效率与狭缝宽度的关系提出了一个计算公式，但这个公式仅是近似的计算方法。作为定量处理的多光谱摄影机来说，它的光圈值与快门速度常采用较高的精度，例如美国天空实验室S—190多光谱摄影机的光圈与快门精度可达1.5~2.5%[2]，因此必需精确计算曝光效率，以适应精确定量的需要。下面就几种典型的多光谱摄影机的快门进行计算分析。

长春光机所研制的第一台多光谱摄影机，采用单层大圆盘快门的结构形式，在圆盘离中心一定距离的位置上开圆孔，圆孔的直径与镜头的最大光阑直径相当，将此圆盘孔安置在光阑位置上，其平面与光阑平面平行，这样圆盘旋转时，每当圆孔扫过光阑孔时即完成一次曝光。为了区分其它形式的圆盘快门，以下称这种快门为圆孔圆盘快门。

快门曝光效率  $\eta$  按文献[3]定义由下式计算：

$$\eta = \frac{\int_0^T Q(t) dt}{T} \quad (1)$$

式中：  $Q(t)$ —为快门在某一时刻的通光系数，其值在  $0 \sim 1$  之间变化，当快门全开启时该值为 1；

$T$ ——为快门的曝光时间。

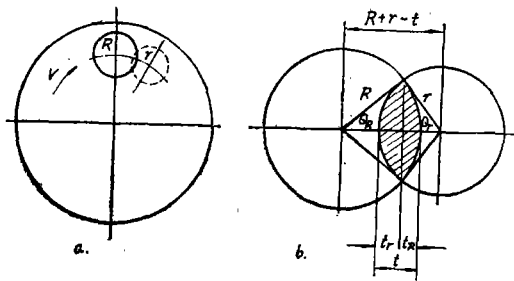


图1 圆孔圆盘快门透光计算原理图

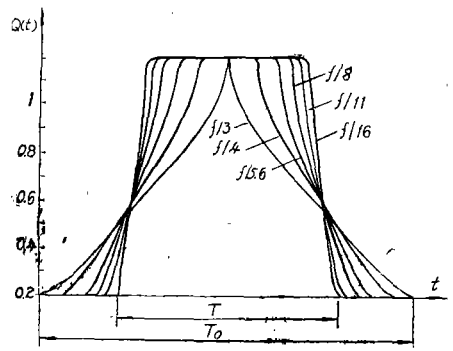


图2 圆孔圆盘快门透光系数曲线

圆孔圆盘快门的透光系数按图1所示的关系（即阴影部份的面积与全口径的面积比）可由下式表达：

$$Q(t) = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \left[ \theta_r + \frac{R^2}{r^2} \theta_R - \left( \frac{R}{r} + 1 - \frac{t}{r} \right) \frac{R}{r} \sin \theta_R \right], & \text{当 } \begin{cases} 0 < t < 2r \\ 2R < t < 2(R+r) \end{cases} \\ 1 & \text{当 } 2r < t < 2R \end{cases} \quad (2)$$

式中：

$$\theta_r = \arccos \left( 1 - \frac{t_r}{r} \right);$$

$$\theta_R = \arccos \left( 1 - \frac{t_R}{R} \right);$$

$$t_r = \frac{2Rt - t^2}{2(R+r-t)};$$

$$t_R = \frac{2rt - t^2}{2(R+r-t)};$$

$R$ —为圆盘上孔的半径；

$r$ —为光阑孔的半径；

$t$ —为某一曝光时刻圆孔所走距离。

在图2中列出了圆孔圆盘快门在各种不同光圈值时的透光系数曲线。由图中的曲线可知，当光圈值的大小变化时，圆孔圆盘快门的实际曝光时间 $T$ 也在变化，由于设计时名义曝光时间是以圆盘孔扫过最大光阑孔的时间计算，即光圈开最大直径时的曝光时间为 $T_0$ ，则在其它光圈值时的实际曝光时间为：

$$T = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{r}{R} \right) T_0 \quad (3)$$

当光圈由最大的 $f/3$ 变到最小的 $f/16$ 时，实际曝光时间仅为名义曝光时间的0.6。从图中各种光圈值时的透光系数曲线可以看出，当光圈逐渐缩小时，曝光时间缩短而曝光效率增高，在表1中列出了圆孔圆盘快门在不同光圈值时的实际曝光时间（用相对值表示）与曝光效率。

表 1

| 系数值 \ 光圈值 | f/3   | f/4   | f/5.6 | f/8   | f/11  | f/16  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T/T_0$   | 1     | 0.876 | 0.765 | 0.688 | 0.632 | 0.594 |
| $\eta$    | 0.373 | 0.543 | 0.634 | 0.716 | 0.785 | 0.839 |
| $K$       | 0.373 | 0.476 | 0.485 | 0.493 | 0.496 | 0.498 |

表 1 中的第三个系数  $K$  为前两个系数的乘积，即  $K = \eta \cdot T/T_0$ ，它反映曝光的综合效果，该值可用百分比表示，即表示实际有效曝光时间为名义曝光时间的百分之几，它是光度规整的数值依据，因此称  $K$  为曝光规整系数。

用同样的原理分析了长春光机所研制的第二台多光谱摄影机，该机采用布帘快门的结构形式，这种快门的曝光工作原理如图 3 所示。

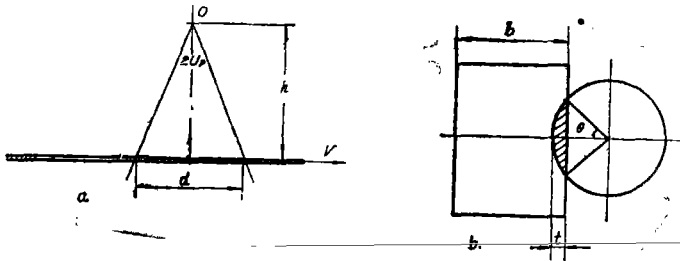


图 3 布帘快门透光计算原理图

图中  $O$  为胶片平面上任意一个曝光点， $2U$  为孔径角， $k$  为布帘离胶片面的距离， $d$  为孔径角在布帘平面上的截面圆直径。当宽度为  $b$  的狭缝以速度  $V$  扫过孔径截面圆时， $O$  点即完成了一次曝光过程。这时  $O$  点的实际曝光时间  $T$  为：

$$T = \frac{b+d}{V} = \left(1 + \frac{d}{b}\right) T_0 \quad (4)$$

式中  $T_0$  为设计时的名义曝光时间，显然宽度  $b$  大于  $d$  时，狭缝中心过象点不发生拦光现象，在所研制的摄影机中，最小狭缝  $b = 5$  毫米，布帘离象面的距离为 13 毫米，最大相对孔径为 1 比 3 由此而算得孔径角在布帘处的截面圆直径为 4.33 毫米，透光圆始终小于狭缝宽度，满足上述不拦光的要求。

布帘快门的透光系数按图 3 所示的关系可由下式表达：

$$Q(t) = \begin{cases} \frac{1}{\pi}(\theta - \sin\theta\cos\theta), & \text{当 } \begin{cases} 0 < t < 2r \\ b < t < 2r + b \end{cases} \\ 1 & \text{当 } 2r < t < b \end{cases} \quad (5)$$

式中：  $\theta = \arccos\left(1 - \frac{t}{r}\right)$ ,

$r$ —为光锥截面圆半径，

$t$ —为某一曝光时刻狭缝所走的距离。

在图 4 中列出了狭缝宽度为 5 毫米的布帘快门透光系数曲线，图中虚线表示当狭缝宽度

小于透光口径截面圆直径 (即  $b < d$ ) 时的情况。从图可知, 由于布帘离开象面使实际曝光时间增加, 当光圈值为最大的  $f/3$  时, 实际曝光时间为名义曝光时间的 1.866 倍, 而曝光效率随着光圈的变小而增加。在表 2 中列出了布帘快门在不同光圈值与不同狭缝宽度  $b$  时的实际曝光时间、曝光效率与曝光规整系数。

由表 2 可知, 在任何光圈值时布帘快门的曝光规整系数为 1, 也就是说: 它的实际有效曝光时间与名义曝光时间完全一致。这个现象可通过图 4 中  $f/3$  曲线上的附加标注加以解说, 如果布帘在象平面上, 则透光系数曲线表现为以  $T_0$  为底、高为 1 的矩形。由于布帘离开象面, 使曝光时间增加而曝光效率降低, 两边各为  $t_1$  的区间即为曝光系数曲线的变动部份, 在这两个区间内曝光时间比原有时间增加 1 倍 (到  $2t_1$ ), 而在这两个区间内曲线下的积分值为  $0.5t_1$  (对各个光圈值都等于  $0.5t_1$ ), 由此可见, 由于布帘离开象面在发生变化的两个区间内曝光时间增加 1 倍, 而曝光效率降低一倍, 最后总的效果不变。

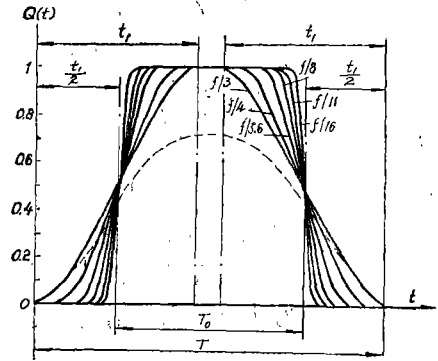


图 4 布帘快门透光系数曲线

表 2

| 系数值                |         | 光圈值   |       |         |       |        |        |
|--------------------|---------|-------|-------|---------|-------|--------|--------|
|                    |         | $f/3$ | $f/4$ | $f/5.6$ | $f/8$ | $f/11$ | $f/16$ |
| $T/T_0$            | $b = 5$ | 1.866 | 1.652 | 1.456   | 1.326 | 1.230  | 1.162  |
|                    | 10      | 1.433 | 1.326 | 1.228   | 1.163 | 1.115  | 1.081  |
|                    | 20      | 1.217 | 1.163 | 1.114   | 1.082 | 1.058  | 1.041  |
| $\eta$             | $b = 5$ | 0.536 | 0.605 | 0.686   | 0.735 | 0.813  | 0.860  |
|                    | 10      | 0.698 | 0.754 | 0.813   | 0.860 | 0.897  | 0.925  |
|                    | 20      | 0.822 | 0.860 | 0.897   | 0.924 | 0.945  | 0.961  |
| $K(b = 5, 10, 20)$ |         | 1     | 1     | 1       | 1     | 1      | 1      |

由上述分析可知, 快门曝光效率主要取决于曝光扫描窗口的形状, 因此在一些高性能的多光谱摄影机中, 对曝光扫描窗口形状作了专门的设计, 例如 S-190 多光谱摄影机的快门[4]就是采用特殊的设计, 该快门采用多层圆盘的结构方式, 曝光扫描由第二层圆盘上的窗口完成, 其窗口形状如图 5 所示, 该窗口实质上为一长圆形的挡板, 在挡板的不遮拦部份进行曝光, 其不遮拦缺口的宽度等于最大光阑孔的直径, 我们称这种快门为长圆板快门。这种快门的透光系数按图 5 所示的关系可由下式表达:

$$Q(t) = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \left[ \theta_r - \frac{R^2}{r^2} \theta_x + \left( \frac{R}{r} - 1 + \frac{t}{r} \right) \frac{R}{r} \sin \theta_x \right], & \text{当 } \begin{cases} 0 < t < 2r \\ 2R < t < 2(R+r) \end{cases} \\ 1, & \text{当 } 2r < t < 2R \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\theta_r = \arccos\left(1 - \frac{t_r}{r}\right);$

$\theta_R = \arccos\left(1 - \frac{t_R}{R}\right);$

$t_r = \frac{2Rt + t^2}{2(R - r + t)};$

$t_R = \frac{2rt - t^2}{2(R - r + t)};$

$R$ —为窗口的凸圆半径;

$r$ —为光阑孔的半径;

$t$ —为某一曝光时刻圆缺口所走距离。

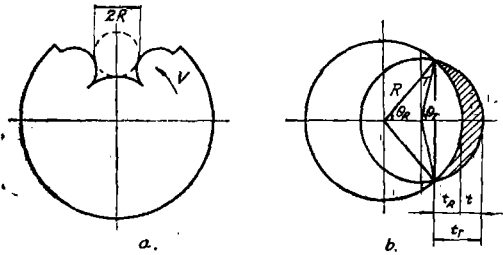


图5 长圆板快门透光计算原理图

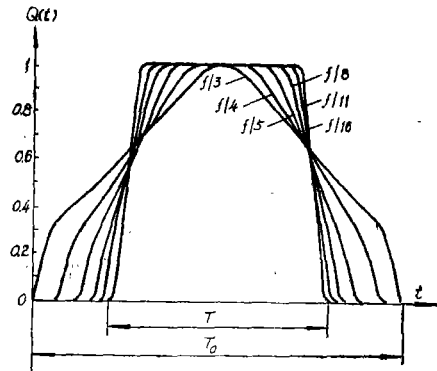


图6 长圆板快门透光系数曲线

在图6中列出了长圆板快门的透光系数曲线。

根据上述公式同样可以得出各种不同光圈值时的透光系数曲线, 实际曝光时间, 曝光效率和曝光规整系数, 其中实际曝光时间的计算公式与(3)式相同。在表3中列出了长圆板快门的上述有关系数。

表3

| 系数值 \ 光圈值 | $f/3$ | $f/4$ | $f/5.6$ | $f/8$ | $f/11$ | $f/16$ |
|-----------|-------|-------|---------|-------|--------|--------|
| $T/T_0$   | 1     | 0.876 | 0.765   | 0.688 | 0.632  | 0.594  |
| $\eta$    | 0.632 | 0.599 | 0.674   | 0.738 | 0.797  | 0.845  |
| $K$       | 0.632 | 0.525 | 0.516   | 0.508 | 0.504  | 0.502  |

对于圆盘形的快门扫描窗口可以有三种不同的结构形状, 这三种形状如图7所示, 第I

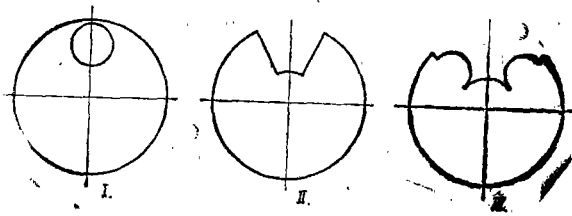


图7 圆盘快门窗口的三种形式

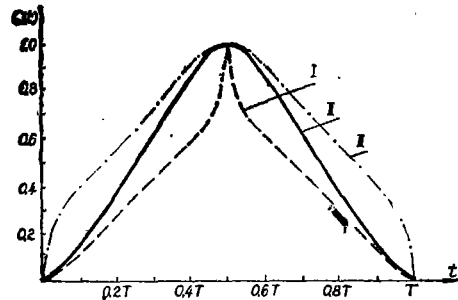


图8 三种快门窗口的透光系数曲线

种为圆孔形，第Ⅲ种为长圆板形，第Ⅱ种为扇形，这种窗口形式在双层多圆盘的快门中常采用，它的扇形缺口宽度与最大光阑直径相当。扇形窗口的曝光工作原理与通光系数的计算方法同布帘快门，实际曝光时间按(3)式计算，具体计算在此不再重复了。在图8中列出了这三种快门窗口形式在最大光圈值时的通光系数曲线。图9为这三种快门窗口形式在不同光圈值时的曝光规整系数曲线，由图可知：在Ⅰ、Ⅲ两种快门窗口情况下，如果不进行曝光效率的光度规整，定量处理时最大误差可达26%，在此情况下百分之几的调光精度已失去意义，从中也发现了S-190多光谱摄影机的快门设计中为提高曝光效率而带来的严重弊病。而对于扇形快门来说，在任何光圈值时其曝光规整系数不变，它对曝光的贡献是等效的，所以说在圆盘快门的多光谱摄影机中扇形扫描窗口是最佳的结构形式。

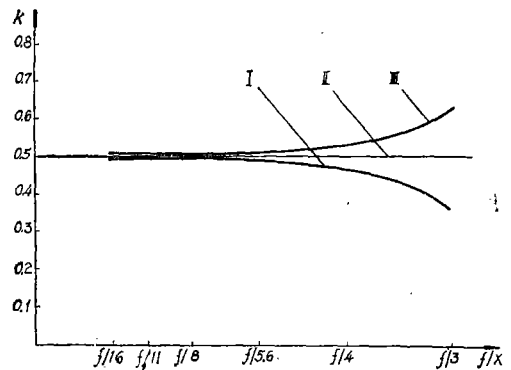


图9 三种快门窗口的曝光规整系数曲线

从光度规整的角度来看，布帘快门也是属于等效规整的，它的曝光规整系数等于1，曝光效果比其它快门高一倍左右，应该说它是最好的快门结构形式，但是布帘快门的工作方式是通过狭缝对象面的扫描而完成曝光，这种快门的速度误差给画面本身带来的曝光不均匀性可达10%以上，因此它仍然不如扇形快门优越。

本文所计算的各类曝光规整系数的数值可作为多光谱定量处理的依据，文中所提出的问题与计算方法可对其它型式多光谱摄影机的快门提供参考。

#### 几点结论：

1. 由分析计算表明：在同一曝光速度下快门的曝光效率与实际曝光时间随光圈值而变化，因此在定量处理时应该用上述三个因素进行光度规整。
2. 圆盘快门的多光谱摄影机中扇形快门窗口在任何光圈值时对曝光的贡献是等效的，它是这类摄影机快门窗口的最佳结构形式。
3. 本文所提出的曝光规整系数及其计算方法可作为多光谱摄影光度规整的依据或参考。

本文在数据计算中承韩之杰同志帮助审改计算机程序，特此致谢。

#### 参 考 文 献

- [1] H. II. 扎卡兹诺夫等，李德熊译，航空摄影机的快门，科学出版社，1974年。
- [2] Manual of Remote Sensing, 1975, 1.
- [3] 杨观廉、韩昌元，《全国高速摄影会议论文集》，科学出版社，1978. p.90~104.
- [4] 和達清夫等編著；リモートセンシング，朝倉書店，昭和51年。