均匀照明和照度分布计算

杜温钖　李福田　周秀良

一些复杂的照明系统，对光能利用效率，照明均匀性、照度等要求较高。为实现这些要求，在光学系统结构形式、光学设计、质量评价等方面，提出了一些新问题。本文介绍一种均匀照明元件——光学积分器，并讨论一个通用的照度分布计算。

一、均匀照明

尽管照明光学系统结构形式多种多样，但均匀照明的方法主要有两个：

1）被照面和聚光系统的出瞳重合或共轭。

2）采用均匀照明元件，如光学积分器等。

当光源亮度没有方向性，即使亮度不均匀，照射在光瞳面上任一点的光束的平均亮度也是相等的。那么，光瞳面上任一点的照度是：

$$E' = E'_0 \cos^4 U',$$

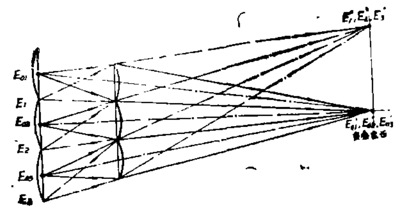
U',就是聚光系统像方孔径角，一般都不大。

所以，$E' \doteq E'_0$

这就是一般照明光学系统照明均匀的原因。

通常光源只能在不大的角度范围内，亮度没有方向性，所以这种照明系统的光能利用效率不高。

当光能利用效率较高，例如，采用气体放电灯的大孔径反射式聚光镜，由于光源电极遮拦等原因，亮度方向性不好，而亮度更不均匀，在光路任何位置，都找不到较均匀的照明面。为保证均匀照明，常采用一种组合光学元件——光学积分器，如图一，它由前、后两组小透镜组成。前组透镜把聚光镜出瞳



图一　光学积分器原理图

（或光源像）成像到对应的后组小透镜上，以避免光能损失。后组透镜把对应的前组小透镜成像并重叠到被照面上同一位置。因为前组小透镜上的照明均匀性显著地好于正个所在面的均匀性，而且透镜像重叠时，均匀性误差能相互补偿，重叠像面的均匀性显著地变好了，这就是积分器的原理。

显然，均匀性 ε 和聚光镜在积分器前表面的照度分布 $E\ (y,z)$、积分器的通道数目 k，以及积分器的象差有关。若不考虑象差影响，按照高斯光学，我们可以建立积分器重叠像面的理想照度分布关系式：

$$E'(y',z') = \frac{\sum_{i=1}^{k} E(y_i,z_i)}{\beta'^2}$$

β' 是积分器重叠像的线放大率。

点(y_i,z_i)是点 (y',z') 在积分器第 i 个通道的共轭点。$E'(y',z')$、$E(y_i,z_i)$ 是这一对任乙的共轭点的照度。

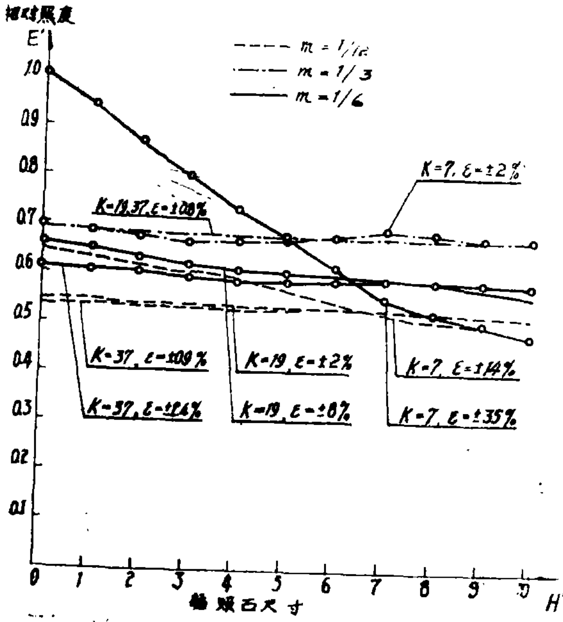
由此可计算理想均匀性：

$$\varepsilon = \frac{E'(y',z')}{\overline{E'}} - 1 = \frac{1}{\overline{E'}\cdot\beta'^2}\cdot\sum_{i=1}^{k} E(y_i,z_i) - 1$$

$\overline{E'}$ 是重叠像面上照度的平均值。

有了这个定量的关系式，已知 ε、k、E

(y,z) 的任两项，可以确定另一项，或者计算理想均匀性，或者确定聚光镜的理想照度分布，或者确定必要的积分器通道数目，避免了积分器和聚光镜设计的盲目性。



图二　理想照度分布

图二是这一计算的实例，采用后面图八的聚光镜照度分布，积分器通道数 k =7、19、37。由图二可以看到：光源在聚光镜的位置对重叠像面的照度和均匀性影响较大。

当光源处于 $m=1/3$ 位置时，有较高的照度和很好的均匀性，只要19个通道的积分器，就可以达到±0.8%的均匀性，而当积分器通道数目 $k=37$时，无论光源在哪个位置，均匀性误差不会大于 ±2.4%。积分器通道数目过多没有实际意义，因为那时的均匀性误差主要是光学系统象差造成的。

增加积分器数目还可以使气体放电灯发光体绕轴飘动产生的照度波动减小。可以证明，这种照度波动和积分器通道数目成反比，这对于减小均匀性测量的误差是有利的。

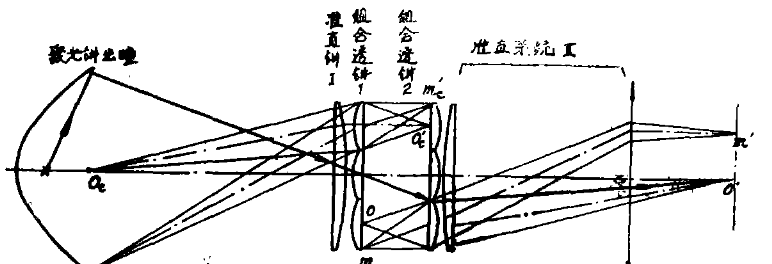
光学积分器的结构型式可以按它在聚光系统光路中位置、成像关系进行分类：

1　光源像面的光学积分器

当光源发光体是轴对称的，并和聚光系统同轴，尽管光源像的照度很不均匀，但照度是中心对称分布的。利用积分器对称通道均匀性误差的相互补偿，只要很少的通道数目，均匀性就会很好。例如，美国 JPL SS15B 太阳模拟器，只用19个通道光学积分器，均匀性是±5%[1]。

它还有一个优点，是径向尺寸较小。

这种积分器常用于高效率、高均匀性的照明系统，如大规模集成电路制版设备的均匀照明系统。



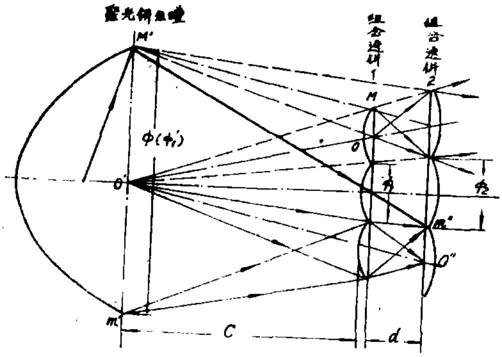
图三　对称式光学积分器

这类积分器有两种型式：

a. 对称式

图三是对称式光学积分器。组合透镜1、2完全相同。聚光镜的出瞳在准直镜Ⅰ的焦面上，那么在组合透镜 1 的每个小透镜焦面上都有出瞳的像，而组合透镜 2 的每个小透镜刚好放在此处。反之，组合透镜 1 的每个小透镜被组合透镜 2 的对应小透镜和准直系统Ⅱ成像并重叠到准直系统Ⅱ焦面上。利用准直镜（或系统）实现了光瞳重合、像的重叠。

为使光学积分器机械结构简单，常把准直镜和小透镜做成一体（胶合或压铸）。



图四　虚像式光学积分器

b．虚像式

图四是虚像式光学积分器，与前一种积分器不同，重叠像在聚光镜出瞳。由于对应透镜中心连线交于聚光镜的出瞳中心，实现了像的重叠、光瞳的重合。重叠的虚像再经过其它元件（准直系统等）成像到被照面上。

它省去了光学积分器的准直镜，光学系统简单。

可以证明，当出瞳像充满小透镜时，重叠像刚好和聚光镜出瞳相等：

由　$\Phi_1/\Phi_2 = C/(C+d)$

$\Phi/\Phi_2 = C/d$

得　$\Phi = \Phi_1 \dfrac{d+C}{d}$

而　$\Phi'_1 = \Phi_1 \dfrac{d+C}{d}$

故　$\Phi'_1 = \Phi$

它的外形尺寸如下：

由组合透镜 2 成像关系得到

$$\beta'_2 = \frac{\Phi}{\Phi_1}$$

$$d = C\frac{1}{\beta'_2 - 1}$$

$$f'_2 = -\frac{d\cdot\beta'_2}{1-\beta'_2}$$

由组合透镜 1 成像关系得到：

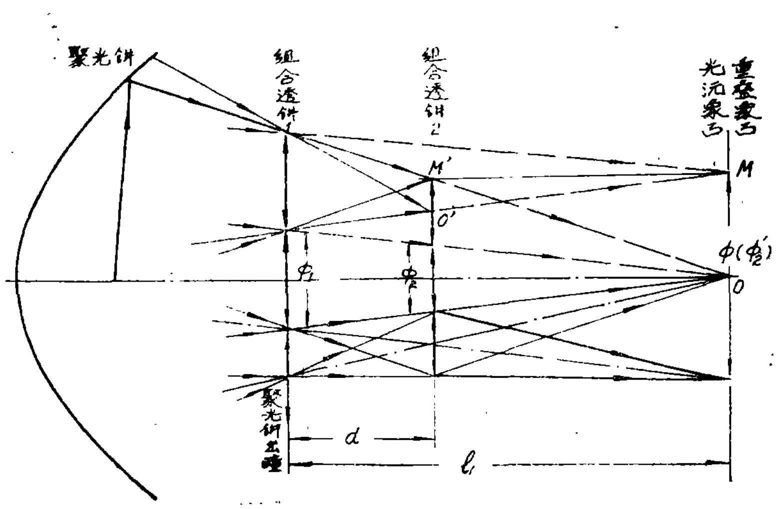
$$\beta'_1 = -\frac{d}{C}$$

$$\Phi_2 = -\Phi\cdot\beta'_1$$

$$f'_1 = -\frac{C\beta'_1}{1-\beta'_1}$$

2．出瞳的光学积分器

光学积分器放在聚光镜的出瞳，可使照明系统纵向尺寸小，但径向尺寸大，聚光镜口径也大，且积分器前表面处照度分布对称性不好，所需光学积分器通道数目较多。这种光学积分器常用于投影照明系统。



图五　出瞳的光学积分器

图五是这种光学积分器。对应透镜中心连线交于聚光镜光源像中心，组合透镜1将光源像成在对应组合透镜2的小透镜上，组合透镜2把对应的组合透镜1的小透镜成像在光源像面处，重叠在一起。同样可以证明，聚光镜光源像和重叠像的尺寸相同。

这种积分器的外形尺寸是：

$$\beta'_2 = -\frac{\Phi}{\Phi_1}$$

$$d = \frac{l_1}{1-\beta'_2}$$

$$f'_2 = -\frac{d\beta'_2}{1-\beta'_2}$$

$$\beta_1 = \frac{l_1}{d}$$

$$\Phi_2 = \frac{\Phi}{\beta'_1}$$

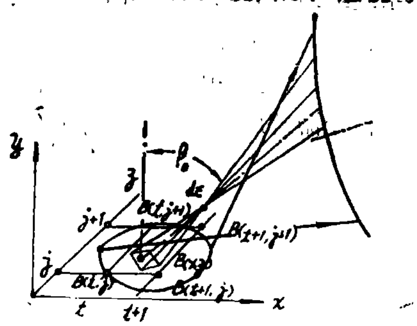
$$f'_1 = \frac{l_1\beta'_1}{1-\beta'_1}$$

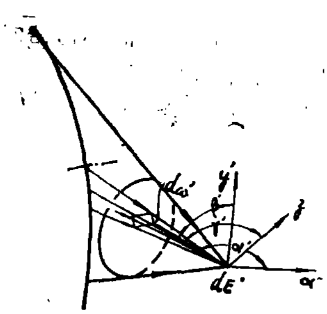
应当指出，光学积分器只能改善理想均匀性，而由象差产生的均匀性误差，要靠对照明系统的光学设计（聚光镜面形，透镜弯曲形势……）来改进，这类问题要用照度分布计算来讨论。

二、照度分布计算

照明系统的主要性能指标之一是照明均匀性，也就是照度分布。它和象差或其它象质评价方法还没有建立起定量关系，即使定性评价有时也困难。例如，通常认为聚光镜应消球差，但是，对于一大孔径反射式聚光镜，光源是短弧氙灯，采用消球差的椭球面，它的光能利用效率和均匀性都不是最佳的[2,3]。

这就促使我们采用照度分布计算，评价照明系统质量、指导光学设计。有关的一些照度分布计算[2,3,4,5]，只能计算聚光镜或同轴系统的照度分布，脱离实际的一些假设，使照度分布计算不够准确。为了符合这类复杂照明系统的真实情况，准确地计算光学元件或照明系统的照度分布，我们将讨论光源亮度的二元插值表示和逆光路照度分布计算。





图六　照度计算示意图

照明系统象空间任一点的照度，如图六，可以看做是许多微光束对这点照度的总和：

$$E' = \sum_{i=1}^{k} dE'_i$$

当微光束的立体角 $d\omega'_i$ 足够小，光束内的亮度是均匀的，那么，

$$dE'_i = \rho\cdot\left(\frac{n'}{n}\right)^2\cdot B_{x_i z_i}(\beta_0)\cdot\cos\alpha'_i\cdot d\omega'_i$$

其中：

ρ——光学系统透过率。

$B_{x_i z_i}(\beta_0)$——微光束中心线在光源面上的交点(x_i, z_i)和β_0方向的亮度。

为计算方便，取构成各微光束立体角的两个方向余弦改变量是定值，并事先给定，那么每一个微立体角都是：[5]

$$d\omega_i = d\cos\beta'\cdot d\cos\gamma'/\cos\alpha'_i$$

于是

$$E' = \left(\frac{n'}{n}\right)^2\cdot d\cos\beta'\cdot d\cos\gamma'\sum_{i=1}^{k}\rho\cdot B_{x_i z_i}(\beta_0)$$

公式中的未知数 ρ、$B_{x_i z_i}(\beta_0)$ 可以用

构成微立体角的空间光线逆光路追迹和光源亮度特性求出。求和范围k在空间光线追迹过程中由电子计算机自行确定，只对通过光学系统通光尺寸和光源的光线，进行照度求和。利用电子计算机，用上述公式计算照度分布是可行的。

在建立上述公式时，我们没有对光源、光学系统、计算照度分布的位置进行任何限制。只要空间光线追迹和光源亮度特性的表示是可能的，就可以计算任意情况下的照度分布。由于这个优点，我们称它是通用的照度分布计算。

透过率ρ的计算是容易的：

$$\rho = T_1 \cdot T_2 \cdot \cdots \cdot T_k \cdot P_{\lambda 1} \cdot P_{\lambda 2} \cdot \cdots \cdot P_{\lambda_k}^{l_k} \cdot P_{\lambda_{k+1}}^{l_{k+1}}$$

T，P_λ，l的下标数表示它们是第几个光学介面的。

T是光学介面的透过率，与光线在介面上的入射角I和折射角I'有关，对于任一介面i有：

$$T_i = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\sin^2(I_i - I'_i)}{\sin^2(I_i + I'_i)} + \frac{\mathrm{tg}^2(I_i - I'_i)}{\mathrm{tg}^2(I_i + I'_i)}\right)$$

P_λ是光学介质对波长λ的光谱透明系数。光程长l由空间光线追迹得到。

$B_{x_i z_i}(\beta_0)$的计算值得讨论。问题在于实际光源的光度特性表示和准确地计算光源上任一点亮度$B_{x_i z_i}(\beta_0)$，特别是轴对称立体光源。这种光源（氙灯，汞氙灯……等）是一种普遍使用的光源。它的光度特性可用“法向亮度分布”和“配光曲线”来表示。配光曲线表示光源的亮度方向特性，“法向亮度分布”是表示光源亮度在法向亮度面随坐标x，z变化的分布。

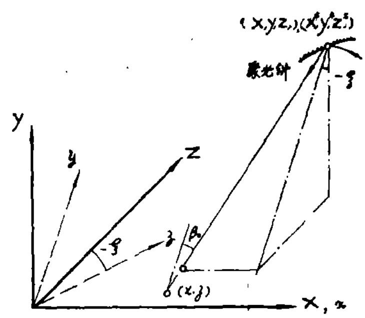
法向亮度面是包括光源对称轴并垂直于亮度测量光学系统光轴的光源截面。由于只能对这一截面有限点测量并规化出亮度，这一面上任一点(x_i, z_i)的亮度$B_{x_i z_i}$的确定关系到照度计算的准确度。为了给出$B_{x_i z_i}$方便，有的文献把法向亮度分布当做是阶跃的[3]，有的文献给出一个法向亮度分布近似方程[4]，这样做都与光源的真实情况不符，肯定误差较大，更不用说把光源当成郎伯光源的做法了[5]。

因此，我们采用二元插值方法，确定亮度$B_{x_i z_i}$。由点(x_i, z_i)周围给出点的亮度，可列出$B_{x_i z_i}$的二元插值亮度多项式，只要周围点取得足够多，$B_{x_i z_i}$就会有足够的准确度。但亮度测量误差较大，可以略去二元插值多项式的差分高次项，只写成周围四点亮度的关系式。

如图六所示，微光束中心线和光源法向亮度面交于(x_i, z_i)点，且$x_i = i + \Delta x$，$z_i = j + \Delta z$，于是：

$$B_{x_i z_i} = B_{i+\Delta x, j+\Delta z} = B_{i,j} + (B_{i,j+1} - B_{i,j}) \cdot \Delta z + (B_{i+1,j} - B_{i,j}) \cdot \Delta x + (B_{i+1,j+1} - B_{i+1,j} - B_{i,j+1} + B_{i,j}) \cdot \Delta x \cdot \Delta z$$

计算光线在法向亮度面交点坐标x_i，z_i比较麻烦，因为法向亮度面并不固定。对于任一穿过光源发光体的光线，法向亮度面坐标系的yox平面一定平行于该光线。当光源对称轴和聚光镜光轴重合，由图七可导出法向亮度而和聚光镜坐标系XOZ面的夹角：



图七　法向亮度面交换

$$\xi = -\mathrm{arc\ tg}\left(\frac{\cos\gamma}{\cos\beta}\right)$$

α，β，γ是光线经聚光镜反射后，分别与聚光镜坐标系x，y，z轴夹角。

由 Eular 变换，得光线对法向亮度面坐标系方向系弦：

$\cos\alpha_0 = \cos\alpha$

$\cos\beta_0 = -\sin(\xi)\cdot\cos\gamma + \cos(\xi)\cdot\cos\beta$

$\cos\gamma_0 = 0$

光线和聚光镜面交点坐标是(X, Y, Z)，变换到法向亮度坐标系时：

$Z^* = Z\cdot\cos(\xi) + Y\cdot\sin(\xi)$

$Y^* = -Z\cdot\sin(\xi) + Y\cdot\cos(\xi)$

光线和法向亮度面zox交点坐标是：

$z_i = Z^*$

$$x_i = X - \frac{y^*\cdot\cos\alpha}{\cos\beta_0}$$

当光源各点亮度方向特性相同时：

$B_{x_i z_i}(\beta_0) = B_{x_i z_i}\cdot e(\beta_0)/\cos\beta_0$

$e(\beta_0)$是由配光曲线插值得到的。

上述照度分布计算已经编成电子计算机程序，它适用于：

1）轴对称立体光源，面光源或郎伯光源也可以。

2）任意不同轴光学系统，包括有多个聚光镜并有积分器、准直镜的复杂照明系统。

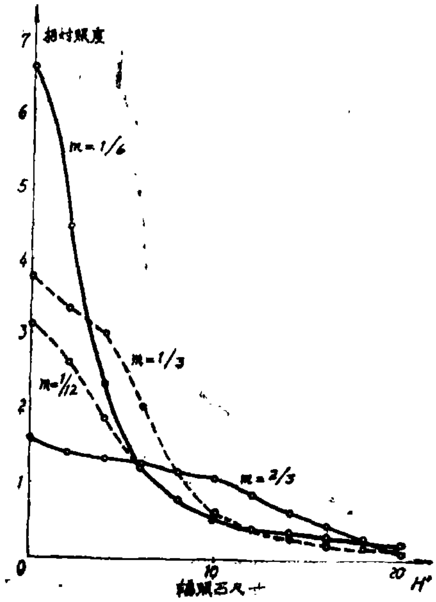
3）任意位置的照度分布计算。

此外，程序设计还满足了一些其它实用要求：自动充满光瞳计算照度分布，一次计算能得出八个光源位置的照度分布……。

这个照度分布计算可用于评价照明系统质量，论证方案、指标，计算加工、装校公差；也可以指导光学设计，确定对照度分布有利的弯曲透镜弯曲形势或非球面；对于大视场摄影物镜的像面照度分布准确计算也是有用的。

这里只列出一个简单的计算结果，如图八。它是氙灯做光源的椭球面聚光镜的照度分布曲线，m是焦点到阴极距离与极间距离之比。当光源位置适当时，如m＝1/3，可以得到较好的均匀性，较高的聚光效率。

这项工作是在一些同志的建议和帮助下开展的，韩云杰同志指导了程序设计。



图八　聚光镜照度分布

参 考 文 献

〔1〕Eddy k, Helilig M "Design and construction of the JPL SS15B solar simulator" IES.AIAA.ASTM Space simulation conference, september 16—18 1968

〔2〕Leo F polak "High efficiency collectors for high energy radiant sources" I.E.S 1966 proceedings P 635

〔3〕Leo F polak "Designg a collector to obtain maximum uniformity" I.E.S 1966 proceedings P457

〔4〕Koji Tsojimoto "High intensity radiotion for space simulation testing" proceedings of the tenth international symposium on space technology and science Tokyo 1973

〔5〕И.В.Пейсахсон, ОМП, 1971№10 Стр22