

光学系统照度分布及软件

徐宏杰

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 对照度计算的常用方法进行了比较, 编制了通用的照度计算程序, 可计算平面、球面、二次曲面、高次轴对称曲面等系统的照度, 考虑了透镜的反射和吸收、中心遮栏、镜面镀膜、光源的光谱分布等情况, 提出并讨论了照度计算在色度方面的应用。

1 引言

照度计算是很有实际意义的, 但由于计算量比较大, 加上一般对照度的精度要求不是很高, 所以长期以来对这一领域的研究比较少。到了本世纪六十年代, 随着太阳模拟器的研制, 人们不满足以往的粗略计算, 提出一些新的算法。同时, 电子计算机的应用, 也为这些算法的实现提供了保障。目前比较常用的方法有: 高斯光学法、正光路法和逆光路法。其中, 逆光路法是比较准确的。目前国内和国外已有一些程序, 可以计算一些特定的光学系统, 但缺少一个通用的软件, 我们编制的这一程序弥补了这个空白。

2 照度计算的基本方法

2.1 高斯光学方法

高斯光学法是照度计算的经典方法, 可以计算一些简单的光学系统的照度。对于郎伯光源, 在理想情况下, 轴上点照度只和象方孔径角有关, 可以给出准确的值:

$$E' = K\pi B \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \sin^2 U'$$

轴外点照度与视场角有关, 近似服从 $\cos^4\omega$ 关系:

$$E'_M = \cos^4\omega E'_A$$

$\cos^4\omega$ 关系只是近似公式, 为此我们推导了一个准确的公式:

$$E'_M = \int_{A_1}^{A_2} 2 \sqrt{1-x^2-y^2} dx = 2 \sum \sqrt{1-x^2-y^2} \Delta x$$

其中
$$y = \frac{x \operatorname{tg} \omega + \sqrt{x^2 \operatorname{tg}^2 \omega + M - \operatorname{tg}^2 \omega}}{M - \operatorname{tg}^2 \omega}$$

$$M = 1 + h^2/L^2$$

$$A_1 = \frac{\operatorname{tg} \omega - h/L}{\sqrt{(\operatorname{tg} \omega - M)^2 + 1}}$$

$$A_2 = \frac{\operatorname{tg} \omega - h/L}{\sqrt{(\operatorname{tg} \omega - M)^2 + 1}}$$

利用这个公式与 $\cos^4 \omega$ 关系进行了比较,当象方孔径角比较小时, $\cos^4 \omega$ 关系还是相当准确的。只有当象方孔径角超过 30° 时,误差才比较明显。

2.2 正光路方法

正光路方法是从光源出发,假设光源上每一微面元在象面上形成一个等照度光环,计算出光环落入考查区域的比例,对微面元积分即可求出象面的照度。

这种方法只适用于轴对称系统。另外,由于光源亮度的不均匀性,计算结果误差较大。

2.3 逆光路方法

逆光路方法是从象面出发,沿光学系统逆光路追迹到光源上,根据光源的亮度及系统透过率,计算出象点的照度。

$$E' = \int K_i B_i \cos i d\omega = \int K_i B_i dA \alpha dA \beta$$

其中, $A\alpha$ 和 $A\beta$ 是光线相对于 x 轴和 y 轴的方向余弦

一般将 $A\alpha$ 和 $A\beta$ 均匀分割成很多等份,象点照度为:

$$E' = \Delta A \alpha \Delta A \beta \Sigma K_i B_i (n'/n)^2$$

其中: $K_i = T_{iG_i} \times T_{iU}$

T_{G_i} ——光线在介质中的透过率

T_{U_i} ——光线在界面的透过率

3 光学系统的亮度传递及能量损失

由于透镜对光的反射和吸收等原因,光束在光学系统中传递时存在能量损失,亮度要降低一些,象面照度也将受到影响。

3.1 透镜对光的反射和吸收

光束由于介面反射在整个系统中的透射率为:

$$T = T_1 \times \dots \times T_i = \prod T_i$$

$$T_i = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{n \cos I - n' \cos I'}{n \cos I + n' \cos I'} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{n \cos I - n' \cos I'}{n \cos I + n' \cos I'} \right)^2$$

其中, $\cos I$ 和 $\cos I'$ 可以根据通过追光线求出。

任何介质对光都有一定的吸收,光束透射率为:

$$T_g = \Pi e^{-aL_i}$$

其中 a 称为该物质的吸收系数。

光学手册中列出了部分玻璃 10mm 厚度的透过率 T 。我们将各种玻璃在各种波长的吸收系数建立了一个数据库。在程序运行时,可以查找数据库得到吸收系数,也可直接从键盘输入。

3.2 透镜镀膜对亮度的影响

因为透镜表面对光的反射,使光线通过光学系统时损失了一部分能量,降低了象面的照度,同时,被反射的光还可能形成杂散光,影响了光学系统的成象质量,所以对于比较复杂的系

统,一般都在透镜表面上镀有增透膜,以提高象面的照度。

我们在程序中对膜系进行了专门的处理,可计算任一膜系对不同波长的光在各个角度的透过率。膜系结构(包括膜层的个数、厚度和折射率)存放在数据文件中。

4 计算精度及误差分析

4.1 轴上点照度

我们用三片照度物镜和折反系统对轴上点照度进行了核对。

如果光源是无穷大郎伯光源,象方轴上点照度为:

$$E' B_0 \pi \sin^2 U'$$

在我们给定照象物镜系统中:光栏在最后面,光栏半孔径为 3.429,被照点到光栏距离为 27.163, $\sin U' = 0.125243$ 。设光源亮为 Int ,则中心照度应为 0.04928x。程序输出结果为 0.04951Lx,相对误差为 0.5%。这里我们计算了 225 条光线,完全可对满足精度要求。

对于折反系统,由于中心遮栏的存在,情况要复杂一些。设遮栏角为 U'_0 ,轴上点照度为:

$$E' = B_0 \pi (\sin^2 U' - \sin^2 U'_0)$$

我们选用的系统中: $\sin U' = 0.0267$, $\sin U'_0 = 0.0065$,该点的照度应为 0.002.7Lx。程序计算结果为 0.00203Lx,相对误差为 2.0%。我们同样计算的是 225 条光线,因为中心遮栏的存在,影响了计算精度。

4.2 轴外点照度

当象方孔径角比较小时,轴外点照度服从 $\cos^4 \omega$ 关系,我们核对了照象物镜(光栏在最后一面)的轴外点照度,误差不到 1%。

一般光学系统对照度精度要求不很高,以上精度可以满足要求。

4.3 误差的来源

误差的大小与计算光线数目 K 有关。 K 越大,精度就越高,但这将导致计算时间增长。另外,随着 K 值的增加,精度的提高也不是特别明显,一般 K 取 100~400 条为宜。

对于非郎伯光源,光源的亮度误差需要考虑。光源的亮度一般是通过测量得到的,测量本身就带来一部分误差,而且只能对光源上有限个点进行测量,其它点的亮度只能通过计算得出。我们一般是采用二元插值法,在插值过程中必然还要带来一些误差。

5 照度计算的应用

5.1 三片照象物镜的照度分布

(1)理想情况下象面的照度

考虑无能量损失的情况,在 36×24 底片上的照度为:

$$c: /data/sys/data33$$

$$E_m = 0.0496$$

$$z = 27.16$$

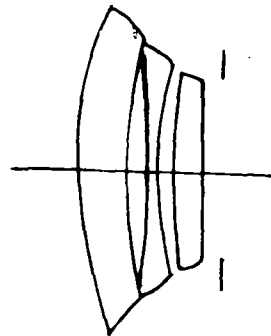
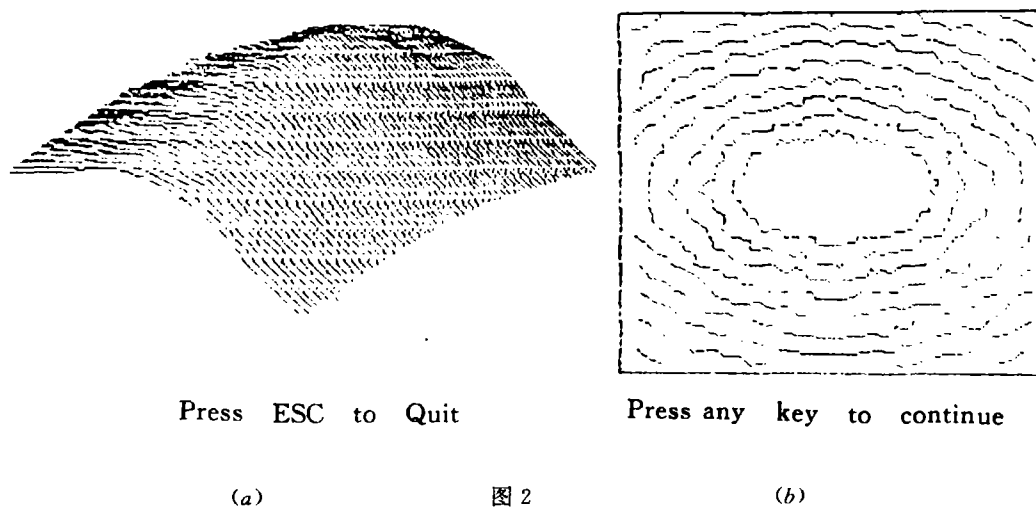


图 1

y/x	-18.0	-14.4	-10.8	-7.2	-3.6	0.0	3.6	7.2	10.8	14.4	18.0
-12.0	0.324	0.415	0.515	0.597	0.696	0.706	0.696	0.597	0.515	0.415	0.324
-9.6	0.359	0.478	0.584	0.702	0.792	0.795	0.792	0.702	0.584	0.478	0.359
-7.2	0.386	0.519	0.649	0.796	0.828	0.876	0.828	0.796	0.649	0.519	0.386
-4.8	0.420	0.546	0.724	0.851	0.889	0.942	0.889	0.851	0.724	0.546	0.420
-2.4	0.449	0.587	0.723	0.842	0.928	0.985	0.928	0.842	0.723	0.587	0.449
0.0	0.440	0.569	0.751	0.876	0.967	1.000	0.967	0.876	0.751	0.569	0.440
2.4	0.449	0.587	0.723	0.842	0.928	0.985	0.928	0.842	0.723	0.587	0.449
4.8	0.420	0.546	0.724	0.851	0.889	0.942	0.889	0.851	0.724	0.546	0.420
7.2	0.386	0.519	0.649	0.796	0.828	0.876	0.828	0.796	0.649	0.519	0.386
9.6	0.359	0.478	0.584	0.702	0.792	0.795	0.792	0.702	0.584	0.478	0.359
12.0	0.324	0.415	0.515	0.597	0.696	0.706	0.696	0.597	0.515	0.415	0.324

中心点照度为 $0.04961lx$, 边缘处均匀度为 0.32 , 满足国家标准。

图 2 显示了底片照度立体图和平面等值曲线。

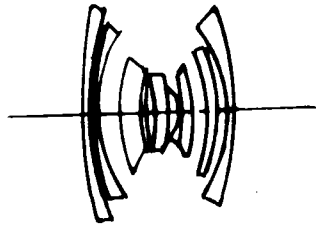


(2) 考虑镜面反射吸收及镀膜时象面的照度

由于透镜的反射和吸收, 底片的照度下降大约 30% , 照度分布变化不大。如果在三片透镜六个面上都镀有 MgF 单层增透膜, 折射率为 1.38 , 厚度为 0.0996μ , 对波长为 0.555μ 的光透过率为 99% , 这时底片上中心点照度为 $0.0488lx$, 接近理想情况, 其照度下降主要是由透镜的吸收引起的。

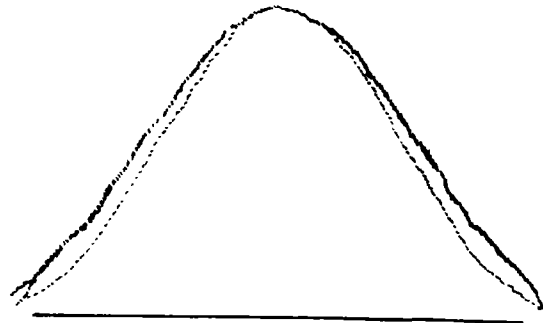
5.2 大视场物镜的照度分布

我们以鲁萨尔镜头为例,这是一种大视场照相物镜,最大视场角为 60° 。这种镜头利用光阑象差,使轴外点照度按 $\cos^3\omega$ 关系变化见图 3。



Press any key to continue

图 3



Press ESC to Quit

图 4

我们将鲁萨尔镜头轴外点照度分布与 $\cos^4\omega$ 和 $\cos^3\omega$ 关系进行了比较。下面曲线为 $\cos^4\omega$ 曲线,上面为 $\cos^3\omega$ 曲线, ω 角为 $0\sim 70^\circ$ 。可以看出,这时轴外点照度非常接近 $\cos^3\omega$ 关系,当 ω 角超过 60° 时,因为受到栏光,照度迅速下降如图 4。

5.3 照度计算在色度方面的应用

光源发出的光大都是连续光谱,通过光学系统后,由于玻璃的吸收系数与波长有关,象面的颜色将发生变化。

镜头的彩色还原特性可以用 C. C. 值来表示,如果摄影镜头的 C. C. 值未达到标准,则需要校正,校正的办法是选择增透膜。

根据光谱透过率的计算可得到 C. C. 值,我们计算出傻瓜相机镜头在未镀膜时 C. C. 值为 $5.24-0.25-0$,基本满足要求。

5.4 照度计算在照明系统设计中的应用

照度分布的计算是照明系统质量评价的可靠依据,常用的象差理论、OTF 对照明系统是不适用的。对于照明系统,最重要的性能指标是聚光效率和照度均匀性。例如,偏轴椭球面聚光镜,虽然有球差,但聚光效率和照度均匀性都经没有象差时好。

我们可以以照度分布为依据,对照明系统进行优化设计,例如,聚光镜的面形、光源的位置,聚光镜的参数等,使聚光镜的聚光效率高,均匀性好。

此外,照度计算可以应用于太阳模拟器中,给出被照面的照度分布等总体参数,为这类太空光学工程总体论证、总体设计提供可靠的依据。

6 结束语

本程序采用逆光路算法,可以准确计算象方任一点的照度,尤其对于大视场和中心遮栏等情况,以前一直采用估算的办法。本程序可以给出照度分布的设计结果,这是现有光学设计软件所不具有的功能。此外,我们把照度计算应用到色度方面,给出了光学系统的彩色还原特性,以此可以选择膜系的结构。

由于时间有限,本程序还有待于进一步完善,对各种光学系统照度计算的适用性有待于考验。今后,本程序应增加对特殊非球面、非轴对称系统的处理,并增加一些新的功能,如照明系统的优化设计等。

参考文献

- [1]林大健、尹燕,通用光线光路计算公式。尖电工程,1989,(2)
- [2]杜温锡、李福田、周秀良,均匀照明和照度分布计算。光学机械,1978,(4)
- [3]翁志成、孙国良,计算机辅助光学设计 CAOD 软件系统。光学机械,1987,(4—5)
- [4]Leo. F. Polak, High efficiency collectors for high energy radiant sources I. E. S. proc. 1966
- [5]Leo. F. Polak, Design a collector to obtain maximum uniformity, I. E. S. proc. 1967

Optical System Illumination Software

Xu Hongjie

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

The methods of illuminance calculation of optical system are systematically analysed in this paper and a valuable program are presented.

The program could be used to calculate the illuminance of such systems as plane, sphere, 2-D curved surface, multi-D axisymmetric curved surface and so on. The lens reflection and absorption, central shade, lense coating, spectrum distribution of light source are all considered in the program.

In addition, the utility of illuminance algorithm in the field of chromaticity is put forward and discussed.