

柱形腔面光源的计算与设计

李 芳

(浙江大学光学仪器工程系)

提 要

本文从光的互反射原理出发提出了理想柱形腔面光源的计算方法。实验表明这种计算方法的精确性,计算值与实验值的吻合说明分割误差在允许范围之内。用这种方法设计与制作的面光源的均匀度可达97%以上。

一、引 言

光度测量中的高均匀面扩散光源常采用积分球窗口或用漫射法、多光束法获得。近年来,不少国家已开始利用光的互反射来获得均匀面光源,如七十年代初出现的柱形腔面光源^[1]。

关于腔内多次反射问题, Moon^[2] 和 O'Brien^[3] 分别用积分法及网络法作过计算,获得了腔内光互反射后一个表面上的近似平均数值解。对于柱形腔面光源的计算,除了须确定光出度大小之外,还要确定其详细分布,且要求有较高的计算精度。因此,从光的互反射原理出发采用以相同光度性质表面划分面元的有限面元分割法,确定面元的分割形式及合理的面元分割数,获得了腔内光互反射后详细的光出度分布。计算值与实测值之间的差异在5%之内。同时,本文还提出在相同光度性质表面上的面积比算法,简化了计算,在具体设计中获得了良好的效果。

二、柱形腔内光的互反射原理

具有完全漫反射表面的柱形腔内任一点的最终光出度可用下面积分式表示:

$$M(s) = M_0(s) + \int_A \rho(s) \cdot E(s, t) \cdot M(t) \cdot d\sigma, \quad (1)$$

式中, $M(s)$ ——腔内某 s 点的最终光出度, $M_0(s)$ ——该点的起始光出度; $\rho(s)$ —— s 点的漫反射率; $E(s, t)$ —— t 点处单位面积、单位光出度的表面在 s 点所产生的照度; $M(t)$ ——腔内 t 点的最终光出度; $d\sigma$ —— t 点处小面元面积; A ——腔体内表面。由于积分核本身是未知的最终光出度的复杂函数,对于不规则表面来说,这个积分式十分复杂以致无法获得精确解。为解决(1)式计算上的困难,可将柱形腔分割成许多有限大小的面元,假设每一个面元上光出度是均匀的,根据照度叠加原理,积分运算可简化为代数运算。只要合理地分割面元,就能保证必要的计算精度。

$$M_i = M_{0i} + \rho_i \cdot \frac{1}{A_i} \cdot \sum_{j=1}^n F_{j \rightarrow i} \cdot M_j \cdot A_j, \quad (2)$$

式中,

$$F_{j \rightarrow i} = \frac{1}{\pi A_j} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j}{r_{j \rightarrow i}^2} dA_i \cdot dA_j,$$

$F_{j \rightarrow i}$ ——形状系数,表示从面元 A_j 发出的漫射光通量中被面元 A_i 所直接接受的部分;
 M_{0i} —— i 面元的起始光出度; M_i —— i 面元的最终光出度; ρ_i —— i 面元的漫反射率; A_i —— i 面元的面积; $r_{j \rightarrow i}$ —— i 面元和 j 面元之间的距离; $\cos \theta_i, \cos \theta_j$ ——两面元连线与各面元法线的夹角的余弦; n ——腔的面元分割数。

根据互易原理: $A_j F_{j \rightarrow i} = A_i F_{i \rightarrow j}$, 则式(2)可改写成:

$$M_i = M_{0i} + \rho_i \cdot \sum_{j=1}^n M_j F_{i \rightarrow j}. \quad (3)$$

移项后得: $\frac{M_i}{\rho_i} - \sum_{j=1}^n M_j F_{i \rightarrow j} = \frac{M_{0i}}{\rho_i}$ 。至此,对于由 n 个面元组成的柱形空腔内光互反射后各面元的最终光出度可用下列光通量传递基本方程组表达:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{1}{\rho_1} - F_{1 \rightarrow 1} \right) M_1 - F_{1 \rightarrow 2} M_2 - F_{1 \rightarrow 3} M_3 - \dots - F_{1 \rightarrow n} M_n &= \frac{M_{01}}{\rho_1}, \\ -F_{2 \rightarrow 1} M_1 + \left(\frac{1}{\rho_2} - F_{2 \rightarrow 2} \right) M_2 - F_{2 \rightarrow 3} M_3 - \dots - F_{2 \rightarrow n} M_n &= \frac{M_{02}}{\rho_2}, \\ \vdots & \\ -F_{n \rightarrow 1} M_1 - F_{n \rightarrow 2} M_2 - F_{n \rightarrow 3} M_3 - \dots + \left(\frac{1}{\rho_n} - F_{n \rightarrow n} \right) M_n &= \frac{M_{0n}}{\rho_n}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

只要知道腔内起始光出度分布 M_{0i} (不包括互反射) 及组成空腔各有限大小面元的漫反射率和相互之间的形状系数,用(4)式即可解得互反射后最终光出度 M_i 。

对于有输入、输出窗(作面光源)的柱形腔,假设为理想柱形腔,即满足:

(1) 表面为余弦辐射体(如不透明面喷涂氧化镁或硫酸钡涂料;半透明的输入、输出窗用乳白玻璃或乳白塑料,这可看成是低漫反射率的余弦辐射体)。

(2) 表面是灰体。

(3) 从一面元投射到另一面元上的光通量是均匀分布在此面元上。

(4) 腔内不含吸收或散射介质。

(5) 表面是平面时无自身互反射。

这种理想腔内光的互反射可用式(4)计算。

若用非完全扩散性材料(如毛玻璃)作输入窗,入射光线透过毛玻璃后带有强烈的方向性,在互反射作用显著时,可根据毛玻璃的扩散特征曲线,将输入光通量分配到相应面元,从各面元第一次反射出来的光通量作为起始分布,再由(4)式获得互反射后最终光出度分布。

三、柱形腔内光的互反射计算

Moon^[2] 积分式的解表明,对各种几何尺寸和横截面的柱形腔,其最终光出度分布只与腔的室指数 K_r 有关($K_r = Ph/4S$; P ——柱形腔横截面的周长; h ——柱形腔的高度; S ——柱形腔横截面面积)。本文只讨论在对称光输入时截面为圆形(简称圆筒)和矩形(简称矩柱

筒)的柱形腔内光的互反射计算,其他形状的计算方法类同。

用(4)式计算时,面元分割越细,解也愈精确,但随之计算量也急剧增加。因此首先必须考虑面元的划分及合理的面元分割数。

我们认为可将有相同光度性质的表面划作一个面元,即使它们并不处在同一平面上,(因式(4)已考虑自身的互反射)。相同光度性质的表面是指它们的光出度相同时,对其他划分的面元的光贡献相同的点的集合。实测表明,在对称光输入时,顶面离开对称中心相同距离的光出度微小变化及侧面上同一高度的光出度微小变化对底面影响并不显著。因此,圆筒可作图 1 分割。对矩柱筒可用图 3 分割替代图 2 那样的细分割,二者计算结果比较见图 4。以相同光度性质划分面元具有下述优点:

- (1) 计算结果能反映腔内光出度大小与分布。
- (2) 在相同计算精度下,大大减少面元的分割数,缩短计算时间。
- (3) 在相同光度性质面元上,可按面积比计算法计算各种输入花样时最终光出度(第五节)。

对于面元分割数,总的来说,设计精度要求高的,光出度变化剧烈的表面上的分割面元数要多。计算表明,顶面、底面及侧面的分割数均影响计算精度。在顶面光输入、 $K_r=1$ 的

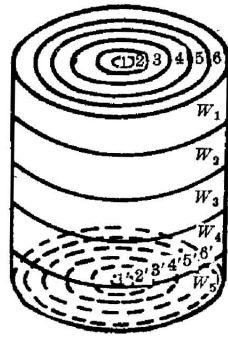


图 1

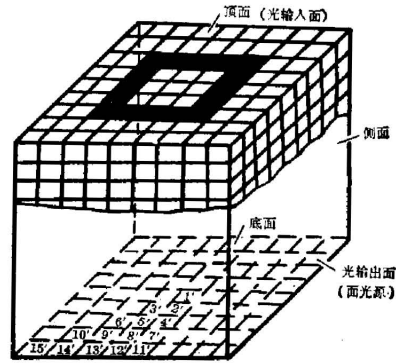


图 2

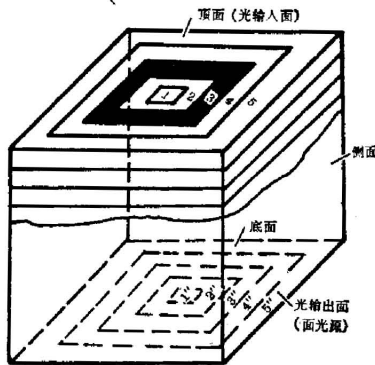


图 3

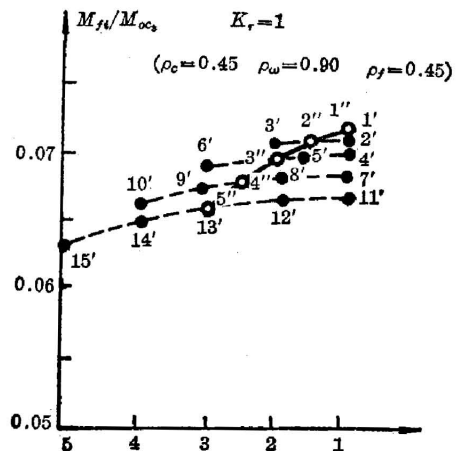


图 4

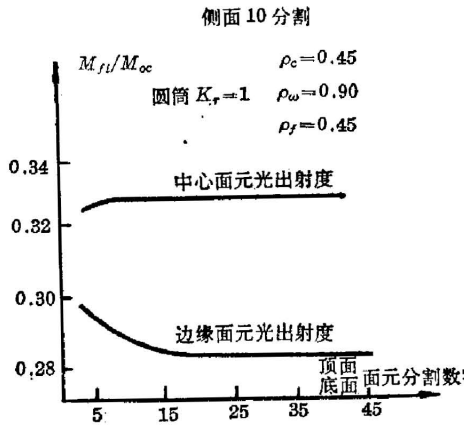


图 5

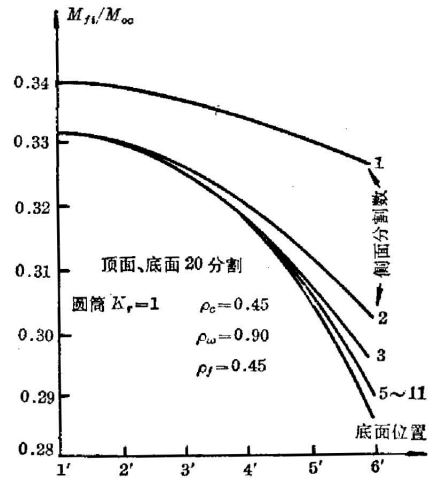


图 6

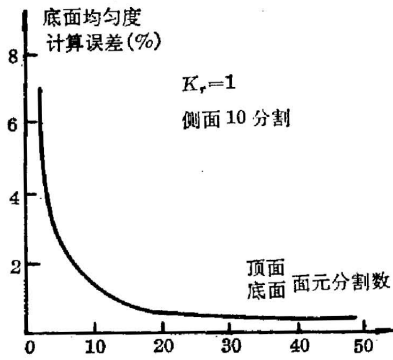


图 7

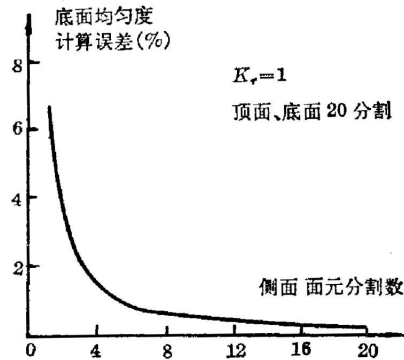


图 8

情况下,二端面均匀 20 分割、侧面均匀 9 分割时的计算值与稳定值比较,底面光出度最大误差为 0.5%,均匀度误差约 0.4%(图 5、图 6),这样的分割数对互反射计算已经足够。计算时,可根据设计要求及面元分割误差曲线(图 7、图 8)选取合理面元分割数。对于室指数大于 1 的柱形腔,分割数应适当增加。

两个漫反射表面之间的形状系数已由 D. C. Hamilton 和 W. R. Morgan 作过一些计算^[4],在此基础上,作者导出各种类型面元之间的形状系数计算通式,若二端面和侧面分别分割成 N 、 M 个面元,则构成 $2N + M$ 阶线性方程组,将柱形腔的几何尺寸、表面分割数、表面漫反射率及光输入场分布送入编好的程序即可获得最终光出度分布。

四、几个重要结论

理想柱形腔内光互反射后最终光出度分布取决于:(1)空腔的几何形状,(2)光输入场分布,(3)腔内壁漫反射率。由计算可得出以下结论。

1. 顶面光输入时(底面作为面光源)

(1) 在光输入场不变情况下,柱形腔内光出度主要由它的室指数 K_r 决定,相同室指数

的圆筒与方柱筒有相似性质。 K_r 增大时, 底面光出度减少而均匀度提高, 利用互反射来获得均匀面光源的最佳室指数为 $K_r \approx 1$ 。

(2) 腔体确定后, 光输入位置决定光出度分布。要在底面获得均匀照明, 最佳光输入位置在顶面边缘部位, 如在 $K_r = 1$ 柱形腔顶面边缘照明, 可在底面获得均匀度为 92% 的面光源。侧面是重要的二次光源, 改变侧面上光出度分布可在底面获得各种光场分布。

(3) 提高顶面、底面的漫反射率将降低面光源的亮度, 但有利于均匀度提高。侧面是主要的互反射器, 提高其漫反射率对面光源的亮度和均匀度都有利。

2. 侧面光输入时(图 9)

(1) 底面光出度随着室指数 K_r 增加而上升。相同室指数的圆筒与方柱筒有相似性质。

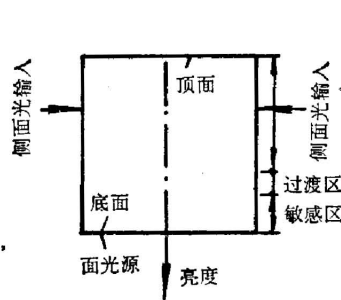


图 9

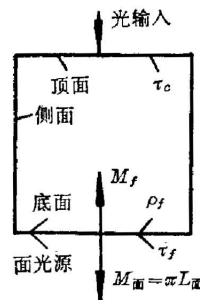


图 10

(2) 侧面可分敏感、过渡与正常三个区域。敏感区光输入会使底面边缘部分光出度高, 此区域约为底面直径的 0.2; 过渡区约为底面直径的 0.1, 此区的光输入将使底面中间环带光出度高; 其余是正常区, 对中心光出度影响最大。在 $K_r \approx 1$ 的柱形腔侧面照明, 使三个区域的不同作用互相补偿, 可获最佳效果。

(3) 在相同条件下, 侧面光输入比顶面光输入获得的面光源亮度低一半, 但面积约大四倍。

我们曾对十六种不同室指数的圆筒与方柱筒在不同光输入时进行实测, 实测的光出度和均匀度与计算值的误差分别在 5% 和 1% 以内。

五、面光源亮度计算

面光源出射面的亮度可由底面的最终光出度来换算(图 10):

$$L_{\text{面}} = \frac{M_{\text{面}}}{\pi} = \frac{\tau_f}{\pi \cdot \rho_f} \cdot M_f,$$

式中 τ_f 、 ρ_f 分别为底面的漫透过率和漫反射率。

面光源亮度分布应是光输入场各组成部分单独照明时面光源亮度之和, 因此

$$L_{\text{面}j} = \frac{M_{\text{面}j}}{\pi} = \frac{\tau_f}{\pi \rho_f} \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\frac{M_{fj}}{M_{\text{oc}i}} \right] \cdot M_{\text{oc}i} + \sum_{k=1}^M \left[\frac{M_{fj}}{M_{\text{ow}k}} \right] \cdot M_{\text{ow}k} \right\}, \quad (5)$$

式中 $L_{\text{面}j}$ ——面光源出射面上 j 面元的亮度; $\left[\frac{M_{fj}}{M_{oci}}\right]_{i=1,2,\dots,N}$ ——顶面不同面元上光输入时底面 j 面元上光出度比; $\left[\frac{M_{fj}}{M_{o\omega k}}\right]_{k=1,2,\dots,M}$ ——侧面不同面元上光输入时底面 j 面元上光

出度比,由(4)式求出。

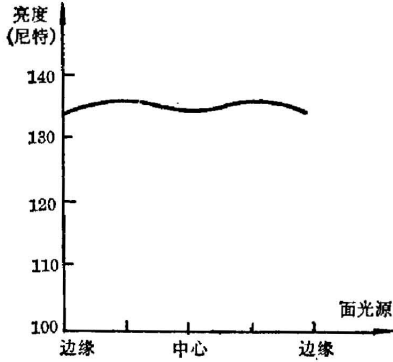


图 11

实际上,在以相同光度性质划作一个面元的输入表面上,不一定都被照明,可以有各种照明花样,此时可用面积比计算法以避免繁复的计算。因为在腔体确定后,光输入位置决定了各面元上入射光的直射分量和漫射分量,因而也决定了腔内光互反射后的最终分布。在以相同光度性质划分的同一面元上,只要各种光输入花样保持对称分布,它们输出的相对分布也保持不变,输出量与输入花样的面积成正比(在 $K_r > 0.5$ 情况下)。因此可把式(5)中各对应项乘以实际光输入

面积与该面元面积之比 K 即得实际的最终亮度分布。

$$L_{\text{面}j} = \frac{M_{\text{面}j}}{\pi} = \frac{\tau_j}{\pi \rho_j} \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\frac{M_{fj}}{M_{oci}} \right] \cdot M_{oci} \cdot K_i + \sum_{k=1}^M \left[\frac{M_{fj}}{M_{o\omega k}} \right] M_{o\omega k} \cdot K_k \right\}. \quad (6)$$

利用此原理,只要改变输入花样的面积,就可方便地调节输出的亮度。

我们选择 $K_r = 1$ 的方柱筒(用毛玻璃作光输入面),设计并制成了十二级亮度箱,改变挡光板上通光孔来改变面光源亮度(0.14~18350 尼特)。同时,利用毛玻璃对入射光漫射的方向性,调节入射光方向,使均匀性达到最佳。经调试,最终均匀度可达 97% 以上(图 11)。

最后,感谢吴敏达、孙扬远、王兆远副教授的指导。

参 考 文 献

- [1] 京立电机株式会社: 电动式辉度箱定电压直流点灯(MODEL LB-2023 仕様書 1980 年)
- [2] Parry Moon; *J. O. S. A.*, 1941, **31**, No. 223.
- [3] P. F. Obrien; *J. O. S. A.*, 1955, **45**, No. 419.
- [4] D. C. Hamilton, W. R. Morgan; *National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Notes 2836* (1957), (Radiant-Interchange Configuration Factors).

The calculation and design of a plane light source obtained by a prismatic or cylindrical cavity

LI FANG

(Dept. of Optical Instrument Engr. Zhejiang University, Hangzhou)

(Received 6 July 1982, revised 7 July 1983)

Abstract

The calculation and design methods of a uniform plane light source obtained by a prismatic or cylindrical cavity having various cross sections and perfectly diffusing surfaces are proposed from the fundamental principal of light flux interreflection. The accuracy of this method has been justified by experiments which indicate that truncation errors can be confined to an acceptable level. The illuminance boxes designed and built according to this method have proved their uniformity up to 97%.

全国激光工业应用技术交流会

中国光学学会激光专业委员会委托西北大学和中国科学院西安光机所共同筹备的“全国激光工业应用技术交流会”于1983年10月27~31日在古都西安举行。参加这次会议的有来自全国廿三个省市、114个单位的150名代表。

会议收到论文报告157篇,经论文评审小组审定,选出其中102篇在会议期间宣讲、交流。其中激光热处理16篇,激光切割焊接和打孔等20篇,全息应用10篇,激光检测与计量等20篇,其它应用24篇,激光器件12篇,此外,还有5篇特邀报告。

从论文的质量、数量以及广度上看,我国激光技术在工业上的应用,近年来又取得了新的进展。例如,激光热处理方面的报告与过去相比有明显地增加,而且工作有一定深度。一批应用成果在生产上发挥了作用,取得了一定的经济效益。还有一些论文,报告了开发性工作,预计不久也将在生产上收到效益,与会代表对我国激光技术今后的发展充满了信心。

此外,会议还就如何进一步促进激光技术在工业上的应用展开了讨论:如何加快科研成果向生产力的转化问题;注意经济效益的分析;建议对激光元、器件的技术指标分等级,定期对市场销售(或用户使用)的产品进行抽样评比,并公布评比结果,以促进激光产品质量的提高;加强技术咨询和情报工作;呼吁重视激光安全防护工作,制订激光使用安全标准。

会议建议激光专业委员会今后每两年召开一次全国激光工业应用技术交流会。

(黎 风)