

## 积分球光能均匀性的 Monte Carlo 模拟

王高明, 郭 城, 张亮亮, 杨志文

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘 要:**为研究某工程应用的面光源入射积分球光能分布的均匀性,本文采用 Monte Carlo 法,进行大量光子的追迹,把积分球水平的划分为五个面积相等的环带;用 Matlab 编程,对各环带光能分布进行计算机模拟,验证了积分球光能分布的均匀性,可为积分球工程应用提供指导。

**关键词:**积分球;光能均匀;蒙特卡罗;朗伯反射;环带

中图分类号:TN247

文献标识码:A

## Simulation of the Light Energy Uniformity of Integrating Sphere Based on Monte Carlo Method

WANG Gao-ming, GUO Cheng, ZHANG Liang-liang, YANG Zhi-wen

(Changchun University of Science and Technology School of Photoelectric Engineering, Changchun 130022, China)

**Abstract:**In order to study the light energy distribution uniformity of the engineering application integrating sphere which with the lamp-house incident, In this paper, with Monte Carlo method, tracking the large number of photons that incident into the integrating sphere, the integrating sphere is level divided into five zone which area is equal, With matlab program, the light energy distribution of each zone is simulated with computer, the simulation results show that the light energy distribution uniformity of integrating sphere, this simulation can be provide guidance for the engineering application of the integrating sphere.

**Key words:**integrating sphere; light energy uniformity; monte carlo; lambert reflection; zone

### 1 引言

积分球是光度测量中有着广泛应用的仪器。它的一个重要应用是利用本身具有很好匀光特性的优势,提供均匀辐射场,作为良好的均匀光源使用。有不少文献<sup>[1-4]</sup>以解析方法对积分球进行了讨论和分析。美国学者 Blake. G. Crowther<sup>[5]</sup>提出了用蒙特卡罗法(Monte Carlo)模拟积分球。Monte Carlo 法<sup>[6-8]</sup>是通过对大量光子的追迹来获得光能的分布,能够比较直观了解积分球的光能分布情况。某工程应用

积分球就是运用积分球本身所具有的匀光特性,用来提供均匀分布的微光光源,作为对夜天光的模拟。为研究其光能分布的均匀性,本文采用 Monte Carlo 法,提出了通过圆形入口入射的均匀面光源及朗伯反射面来产生概率密度函数的方法,用光子分布表示光能分布,分别建立光源分布模型、光

基金项目:国家自然科学基金(2002AA312060)资助。

作者简介:王高明(1984-),硕士研究生,主要研究方向为光电测控技术及仪器。E-mail:wgm529@126.com

收稿日期:2008-07-20

子反射模型,并通过对大量光子的追迹,把积分球水平划分为五个面积相等的环带,对各环带光能分布的均匀性进行计算机模拟,能够比较直观分析的积分球光能分布均匀性。为实际工程应用的积分球设计提供指导和依据。

## 2 模型建立

### 2.1 光源分布模型的建立

蒙特卡罗 (Monte Carlo) 法<sup>[8]</sup>是一种采用统计抽样理论分析问题的近似求解方法。它通过把确定性的问题与某个概率模型相联系,并对人为构造的随机过程的模拟求得统计试验的统计值,这个统计值就是原问题的近似解。

积分球入口处为均匀分布的面光源,用大量光子的均匀分布模拟光源的均匀分布,若  $R_s$  为入口半径,  $r$  为入口面内任意一点的半径,可得光子的概率分布函数  $f(r) = r^2/R_s^2$ ,  $f(r)$  可用  $[0, 1]$  均匀分布的随机数  $v_1$  表示为  $v_1 = f(r) = r^2/R_s^2$  或  $r = R_s \sqrt{v_1}$ 。

光子入射的方位角  $\varphi$  在  $[0, 2\pi]$  内为均匀分布。若以  $v_2$  表示  $[0, 1]$  均匀分布的随机数,其相应的方位角  $\varphi = 2\pi v_2$ 。则可得光子在积分球入口处的坐标为:

$$\begin{aligned} x_0 &= r \cos(\varphi) = R_s \sqrt{v_1} \cos(\varphi) \\ y_0 &= r \sin(\varphi) = R_s \sqrt{v_1} \sin(\varphi) \\ z_0 &= \sqrt{R^2 - R_s^2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $R$  为积分球的半径。

追踪的光子入射到积分球内表面(朗伯面)遵循朗伯余弦定律反射。光子经过多次漫反射,直至其剩余能量被朗伯面吸收为止。

### 2.2 光子反射模型的建立

从积分球入口处入射到积分球的光可看作大量光子的集合。对于追踪的光子是沿直线传播的,在入口处,待追迹光子的初始位置确定后,它入射到积分球内部的方向是任意的,与球内表面(朗伯面)有唯一的交点,光反射时遵循朗伯余弦定理。光子的反射方向是由光线与球面法线夹角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  唯一确定的。按朗伯余弦定律:若朗伯面沿法线光强为  $I_N$ ,则与法线成  $\theta$  方向的光强  $I_\theta$  为:

$$I_\theta = I_N \cos\theta \quad (2)$$

对应的被朗伯面反射的立体角内的光通量为:

$$\Phi(\theta) = \int_{\varphi'=0}^{2\pi} \int_{\theta'=0}^{\theta} I_N \cos(\theta') \sin(\theta') d\theta' d\varphi' = I_N \pi \sin^2(\theta) \quad (3)$$

积分球相应的总的光通量为  $\pi I_N W$ , 当用光通量除以普朗克常量和频率时,就得到在  $\theta \sim \theta$  立体角范围内单色光子数,再除以整个积分球内的光子数,使得到天顶角  $\theta$  的概率分布函数为:

$$f(\theta) = \sin^2(\theta) \quad (4)$$

若取  $[0, 1]$  内均匀分布的随机数  $u$ , 令  $u = f(\theta) = \sin^2(\theta)$ , 则天顶角  $\theta$  可表示为:

$$\theta = \arcsin(\sqrt{u}) \quad (5)$$

上述分析可知,由天顶角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  可确定光子与积分球内腔朗伯面的交点及反射方向。如图1所示,单个光子从入口任意点  $A$  入射到积分球表面  $A'$  点,并遵循朗伯余弦反射定律反射到积分球  $B$  点,  $B$  点又成为新的漫射反点,依此循环多次,可完成对单个光子运行轨迹的描述,从而获得各个位置的光能量分布。

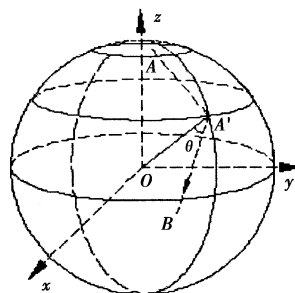


图1 积分球模型

在建立光源分布模型时,由于对随机数开方和引入正弦、余弦函数,存在非线性误差,导致光子从入口第一次入射到积分球内腔面时,呈两极多中间少的不等概率分布。为减少系统误差,提高模拟精度,必须对其进行加权处理,把积分球水平等高划分为10个区域,每个区域分别乘相应的权因子系数,使从入口第一次入射到每个区的光子数都大致相等。

## 3 环带光能的计算

积分球内腔面的漫反射率为  $\rho$ , 即每次经过朗伯面反射后光能损失  $(1 - \rho)$ , 当追迹光子的能量小于10%时,认为被积分球内腔面最终吸收不再参与反射,各环带的光能用  $E_i$  表示(其中  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ),把所追踪的单个光子的能量归化为1,当某个光

子第次入射到第  $i$  个环带时,第  $i$  个环带此次所吸收的光能为  $E_i(j) = (1 - \rho) \times \rho^{(j-1)}$ ,当完成对设定的所有光子的追踪后,第  $i$  个环带所吸收的总的光能为  $E_i = \sum_{k=1}^n E_{k,j}$ ,统计得到各环带的光能  $E_i$ ,便可分析各环带光能是否均匀。

#### 4 计算机模拟结果

依照所建立的模型,运用 Matlab 编程进行模拟。某工程用积分球半径  $R$  为 500mm,其顶端入口半径  $R_s$  为 50mm,积分球按等高划分为 5 个环带(由球台的侧面积公式  $S = 2\pi Rh$  知, $h$  相等则环带面积就相等),环带划分如图 2(a)所示。积分球内腔面的漫反射率为 0.9,可确保各谱线的光经积分球多次漫射后,其光谱成分大致均匀。当光子剩余能量低于 0.1 时,被积分球内腔面最终吸收不再参与反射,由此得  $j \leq 22$ 。追踪的光子数为 10000 个,在同等条件下进行 10 次模拟,得 5 个环带的光能分布,图 2 为环带 2,3,4 光能分布图。图 3 为各环带光能的统计分布图。可见,5 个环带的光能大致均匀。

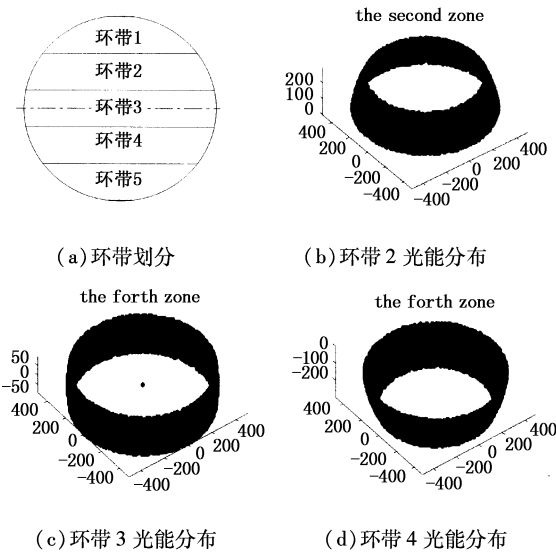


图 2 积分球各环带光能分布

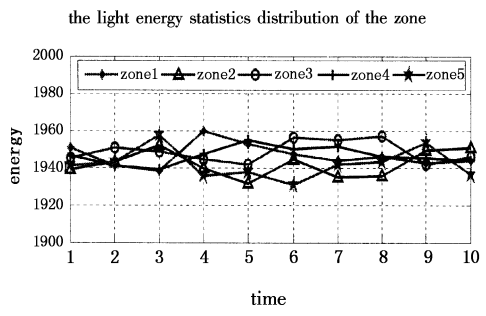


图 3 环带光能统计分布

由于环带 3 以赤道上下对称,光能分布较为均匀,这为某工程应用的多开口积分球出口位置布设方案的选择提供指导和借鉴,此为工程的后续工作奠定了基础。

#### 5 结论分析

以上对积分球入射光子进行 Matlab 编程模拟,所得结果表明,各环带的光能大致均匀,不均匀度小于 2%。由于运用 Matlab 编程模拟时,所用随机数为根据线性同余法生成的伪随机数,存在一定的系统误差;加上模拟光子数较少,模拟精度受到一定的限制。另外,实际进入积分球的光子数极多,如 0.1W 的可见光,若取平均波长为 555nm,由  $E = h\nu$  算得光子数约为  $2.79286 \times 10^{17}$  个,因此,实际积分球各环带光能的均匀性比模拟结果要更好些。

应用蒙特卡罗法模拟积分球内腔面匀光特性可行且直观,与某项目所研制的积分球的实测结果吻合,故该方法对积分球的工程应用有参考价值。

#### 参考文献:

- [1] J A Jacquez, H F Kuppenheim. Theory of the integrating sphere. [J] J. Opt. Soc. Am, 1955, 45(6): 460-470.
- [2] Herbert L Tardy. Matrix method for integrating sphere calculations [J]. J. Opt. Soc. Am, 1991, 8(9): 1411-1418.
- [3] D G Geoble. Generalized integrating-sphere theory. [J] Appl. Opt., 1967, 6(1): 125-128.
- [4] W Budde. Integrating sphere for the photometry of the sky [J]. Appl. Opt, 1964, 3(8): 939-941.
- [5] Blake G Growther. Computer modeling of integrating spheres [J]. Appl. Opt., 1996, 35(30): 5880-5886.
- [6] Wang Jin-jiang, Wang Ye, Yang Zhi-wen. A new application of integrating sphere [J]. SPIE, 2000, 4221: 197-200.
- [7] 王晋疆, 杨志文. 随机变量在积分球设计中的 [J]. 光子学报, 2001, 30(11): 1406-1408.
- [8] 张贵彦, 王成, 袁宏韬, 等. 积分球幅出射度的蒙特卡罗模拟 [J]. 光电工程, 2006, 33(11): 75-78.