

文章编号: 0253-2239(2007)02-0335-5

用蒙特卡罗光子追迹方法分析闪光灯的结构设计

赵烈烽 冯华君 徐之海

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 闪光灯反光罩结构设计的目标是使得所拍摄视场内的光能量分布尽量均衡。不同于基于几何光学理论的闪光灯计算和设计方法, 采用了蒙特卡罗光子追迹法来分析闪光灯的结构设计。通过对照相机闪光灯几何结构的分析, 引入余弦随机变量等方法, 建立了闪光灯系统中光源、反光罩、菲涅耳透镜等部件的数学模型。先用蒙特卡罗光子追迹法模拟了单光子在闪光灯中飞行的各种可能状态, 再通过产生大量光子仿真真实的情况。并对一个具体的闪光灯结构进行了计算, 计算得到了光强和光子方向矢量在水平、垂直两个方向的投影角之间的分布曲线图。仿真结果符合设计要求并与实测曲线很接近, 从而验证了蒙特卡罗光子追迹法在闪光灯结构设计中的可行性。

关键词: 发光学; 光子追迹; 蒙特卡罗法; 闪光灯; 建模

中图分类号: TP301 文献标识码: A

Analysis of Structure Design of Flashlight Using Monte Carlo Photon Tracing Method

Zhao Liefeng Feng Huajun Xu Zhihai

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Better distribution of the light energy in the field of view is the aim of the structure design of flashlight. Instead of the geometrical optics approaches, the Monte Carlo photon tracing method was used to analyze the structure design of flashlight. After analyzing and modeling of the camera flashlight structure (such as the light source, reflectors and Fresnel lens), and introducing cosine random number and other methods, we built up the model of a flashlight. At first, a single photon was traced using Monte Carlo method to simulate the behavior of the flights. Then, a large sum of photons were generated to simulate the real situation happened in the flashlight. At last, the light intensity and direction vector of photon distribution in the orthogonal coordinates was achieved. The simulated result meets the requisition and is very close to the measured one. The feasibility of using the Monte Carlo photon tracing method in the design of flashlight is proved.

Key words: luminescence; photon tracing; Monte Carlo method; flashlight; model

1 引 言

变焦闪光灯为大多数的中高档相机所采用, 其工作原理是: 通过移动闪光灯中的菲涅耳透镜, 改变其与发光管的相对位置以获得不同的照射角度, 而在不同的物平面上获得不同的照射范围, 满足拍摄的需求。根据国际标准 ISO 2827/1230 的规定, 闪光灯的有效照射角是指闪光灯边缘发光强度为中心一半时所对应的夹角, 分水平和垂直两个方向分别进行检验, 闪光灯的有效照射角应该大于所对应的摄影镜头视场角。通常闪光灯有四个照射角度,

即 Tele, Std, Wide1, Wide2, 分别对应于摄影镜头的焦距 85 mm, 50 mm, 35 mm 和 28 mm^[1]。

闪光灯的发光能量是由闪光灯的电路决定的, 而能量的空间分布则主要是由闪光灯的光学系统决定的。目前, 国内外光学工作者对闪光灯结构设计及方法的研究报道比较少。作者所在实验室在这方面做了很多工作, 提出了将实际三维空间中的光线降解为两个互相垂直的二维光学系统, 以发光强度为对象进行分析的方法, 实验结果能够较好地符合实际情况^[1~3]。上述方法也存在一定的局限性, 对

作者简介: 赵烈烽(1980—), 男, 浙江富阳人, 博士研究生, 主要从事光学工程的研究。E-mail: zhaoliefeng@zj165.com

导师简介: 冯华君(1963—), 男, 浙江余姚人, 教授, 博士生导师, 主要从事成像技术、图像处理、光电检测方面的研究。

E-mail: fenghj@zju.edu.cn

收稿日期: 2006-03-10; 收到修改稿日期: 2006-08-10

计算结果有一定影响。文献[1]采用了降维处理的方法,在两个互相垂直的二维平面上分别计算有效照射半角,计算的是实际光线在这两个平面上的投影,与实际三维光学系统存在差距,且无法分析复杂非对称结构系统。文献[2]中使用了空间三维仿真的计算方法,但是仍存在程序模拟的光源与实际光源光辐射能量分布不同,且没有考虑光线与光源的碰撞及光线的衰减等问题。闪光灯发出的是非相干光,因此用蒙特卡罗仿真这一在众多理论工程上得到应用^[4,5]的方法来模拟实际闪光灯中光子的行进路线可以非常好地计算出闪光灯光学系统中的光能量分布,克服了上述引文献方法的局限性,能够更加

真实地再现闪光灯光学系统^[6]。

2 闪光灯结构分析

典型的照相机闪光灯结构如图 1(a)所示。为了便于清楚地认识反光罩的几何结构,做了水平方向($x-z$ 直角坐标系所在平面)和垂直方向($y-z$ 直角坐标系所在平面)的剖面图,如图 1(b)、图 1(c)所示。反光罩水平方向口径宽度为 D_1 ,垂直方向口径宽度为 D_2 ,水平方向底边宽度为 D_3 ,高度为 h_2 ;反光罩两侧斜面与 z 轴的夹角为 α ;发光管的长度为 L ,直径为 r_1 ,其中心轴线与反光罩底部距离为 h_1 。

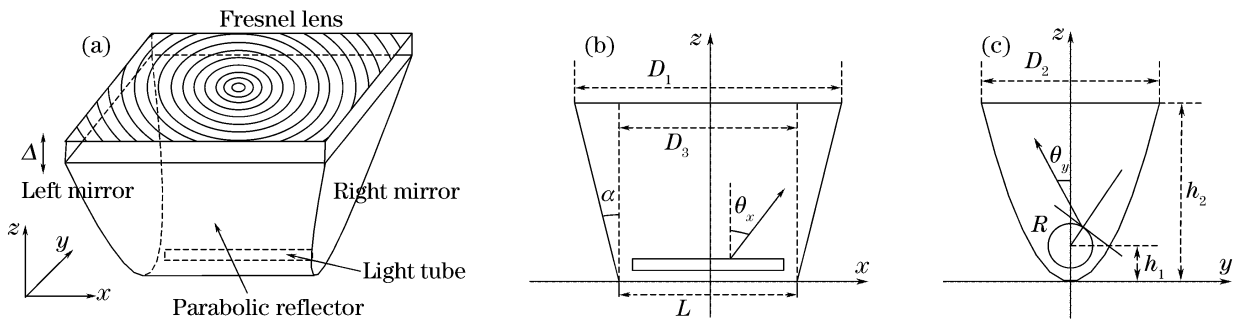


图 1 照相机闪光灯框图。(a)透视图,(b) $x-z$ 剖面,(c) $y-z$ 剖面

Fig. 1 Schematics of a camera flashlight. (a) Scenograph, (b) $x-z$ section, (c) $y-z$ section

闪光灯底部的发光管一般为直管型氙灯,灯管内充入小于一个大气压的氙气,能在极短的时间内发出很强的光。当闪光灯两端加以电压直至击穿电压点时,氙原子被电离,放电发光^[7]。每一个氙原子都可以看作是一个点光源。因此发光管可以看作是一个点光源的柱状集合。根据以上假定,可以得到柱状发光管的解析式为

$$y^2 + (z - h_1)^2 = r_1^2, \quad |x| \leq L/2 \quad (1)$$

反光罩的主体为一母线为二次曲面的柱面,在本文中假设为一抛物面(这也符合大多数实际情况),两侧为平面反射面,它们一般为镀银铝质反光罩,反射系数 ρ 一般在 0.9 以上。

如图 1(b)、图 1(c)所示,得到反光罩抛物面的解析式:

$$\begin{cases} y^2 = 2pz, & 0 \leq z \leq h_2 \\ z \tan \alpha - (x - D_3/2) > 0, \\ z \tan \alpha + (x + D_3/2) > 0, \end{cases} \quad (2)$$

图 1(b)左右两边的反射面解析式:

$$\begin{aligned} z \tan \alpha + (x + D_3/2) &= 0, \\ 0 \leq z \leq h_2, \quad y^2 &< 2pz \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} z \tan \alpha - (x - D_3/2) &= 0, \\ 0 \leq z \leq h_2, \quad y^2 &< 2pz \end{aligned} \quad (4)$$

由以上三个公式可以判断某一个特定的光子是否与其中的一个面发生碰撞。

聚光镜为一菲涅耳透镜,它由许多相互独立的环带组成,如图 2 所示。菲涅耳透镜的一个面是由一系列很窄的球面环带组成的不连续锯齿面,另一个面为平面。它实际上是保留了透镜表面的原有曲率而将中间的多余介质去掉后的结构,这大大减少了透镜的重量和体积。

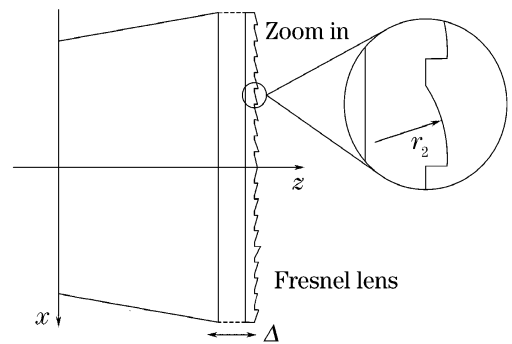


图 2 菲涅耳透镜结构

Fig. 2 Structure of Fresnel lens

理论上讲,菲涅耳透镜的焦距可以沿着环带径向任意变化,但考虑到加工工艺性等各个因素,聚光镜一般设计成两个到三个区域,每个区域对应一个焦距值。平凸透镜焦距与凸面圆半径、材料的折射

率公式如下所述:

$$f = r_2 / (n - 1), \quad (5)$$

由(5)式可知,当菲涅耳透镜在某一特定位置的焦距确定之后,锯齿面上圆弧状锯齿的半径就可以确定下来。

假设菲涅耳透镜为厚度可以忽略的薄透镜,由该透镜和反光罩之间的关系,可以得到菲涅耳透镜所在平面的解析式:

$$z = h_2 + \Delta, \quad |x| \leq D_1/2, \quad y \leq D_2/2 \quad (6)$$

同时可以得到反光罩出射平面的解析式如下:

$$z = h_2, \quad |x| \leq D_1/2, \quad y \leq D_2/2 \quad (7)$$

菲涅耳透镜与反光罩之间有一可调节的距离 Δ ,如图 1(a)所示。闪光灯外壳一般为黑色的工程塑料,光子射到此区域可认为完全被吸收,因此可以把这个区域看作光子的暗区。射入暗区的光子是那些通过了反光罩的出射平面,却没有通过菲涅耳透镜平面出射的光子。

3 蒙特卡罗光子追迹实现

在蒙特卡罗光子追迹法中最基本的过程是追迹单光子的行进轨迹。单光子的状态和行进轨迹的改变可以在每一次与界面碰撞之时通过随机数来判断。其次才是产生大量的光子来仿真真实的情况。一般来说,仿真使用的光子数越多,结果越可靠。但是当光子数达到一定量后,再增加光子将不会对结果的可靠性产生可观的影响。本文中的结果是用 1000000 个光子仿真出来的,得到的结果和测试结果相比已经比较可靠。

首先引入光子的状态 *Live*: 当它的值为 1 时,光子存活;值为 0 时,光子湮没。初始状态的光子被赋值 *Live*=1。

光子在闪光灯底部的发光管内部产生,它可能的位置由图 1(b)、图 1(c)可以知道。由于闪光灯两端电压加至击穿电压点时,并不是所有的氙原子都被电离了,而是在一个很短的时间段内越来越多的氙原子逐渐被电离,最终充满闪光灯发光管腔体,所以在特定的时刻无法明确地知道被电离的氙原子在闪光灯发光管内的分布状况。同时由于实际照相机拍照时曝光总是存在一个时间段的,所以也并不需要关心某一个时刻闪光灯发光管内氙原子的分布状况。因此,实际操作中比较好的处理方法是把发光管视作一个柱状的光源^[1,3],在 $x-z$ 平面内可以看作一个均匀的线光源,在 $y-z$ 平面内可以看作一个圆的光源。计算中光子的起始位置总是在这个柱体表面

上,并用均匀随机数来模拟光子的起始点,保证在光子数量足够大时光子在发光管表面均匀分布。

在图 1(a)所示的笛卡儿坐标系中光子的起始位置矢量和行进方向矢量可以用下式来表示:

$$\mathbf{R}_0 = x_0 \mathbf{e}_x + y_0 \mathbf{e}_y + z_0 \mathbf{e}_z, \quad (8)$$

$$\mathbf{V} = \sin \theta \cos \phi \mathbf{e}_x + \sin \theta \sin \phi \mathbf{e}_y + \cos \theta \mathbf{e}_z, \quad (9)$$

\mathbf{e}_x 、 \mathbf{e}_y 、 \mathbf{e}_z 是笛卡儿坐标系中的单位方向矢量, x_0 、 y_0 、 z_0 是光子起始位置的坐标值, θ 为方位角, ϕ 为平面角。由于线光源在轴向总是可以看作余弦发射体^[8]。如图 1(b)、图 1(c)所示,实际计算时(9)式中的 θ 在 $x-z$ 平面上的投影角 θ_x 是 $[-\pi/2, \pi/2]$ 之间符合余弦分布的随机角度;在 $y-z$ 平面上的投影角是 θ_y 出射点的法线方向角和 $[-\pi/2, \pi/2]$ 之间符合余弦分布的一随机角度之和。

光子的状态量 *Live*、位置矢量 \mathbf{R} 和方向矢量 \mathbf{V} 确定下来后,就可以追迹光子在闪光灯中的行进路线。光子在飞行中任何一个新的位置都可以用下式来表示:

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}t + \mathbf{R}_0, \quad t \geq 0 \quad (10)$$

其中 $\mathbf{R} = (r_x, r_y, r_z)$ 是光子的新位置, $\mathbf{R}_0 = (r_{x0}, r_{y0}, r_{z0})$ 为光子的起点, $\mathbf{V} = (v_x, v_y, v_z)$ 为光子的方向矢量, $\|\mathbf{V}\| = 1$, t 是一个大于零的时间参量。当光子在飞行中碰到界面,如发光管、反射面、菲涅耳透镜平面、暗区时,它会被界面反射、折射或吸收。光子在每一次碰撞时,都必须先判断 *Live* 的值,如果 *Live*=0,则光子湮没,仿真过程结束;反之,则用(10)式计算光子新的起始位置和新的方向矢量,光子继续开始新的飞行,直到湮没或者射出闪光灯。

Live 值的判断有两种情况:光子若在第 n 次飞行中穿过发光管,则计算其在发光管内的行程 l_n ,利用损耗的计算公式 $A_n = \exp(-a_n l_n)$ (其中 a_n 为光子在氙灯中的损耗系数)计算 A_n 的值,同时生成 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机数 rand 与 A_n 比较进行判断 *Live* 值。光子若在第 n 次飞行中碰到了反射面(其反射系数为 ρ),也用相同方法产生随机数 rand 与 ρ 进行比较来判断 *Live* 值。

$$\text{Live} = 1,$$

$$\text{rand} \leq [A_n, \rho] \quad (\text{Photon alive}) \quad (11)$$

$$\text{Live} = 0,$$

$$\text{rand} > [A_n, \rho] \quad (\text{Photon absorbed}) \quad (12)$$

上述两式中为了书写方便将两个不同的判断条件进行了合并,并用中括号表示取两个判断条件之一:光子若穿过了发光管,则取损耗 A_n ;光子若在界面发生了反射,则取反射系数 ρ 。利用第 2 节闪光灯结

作者所在实验室曾为新加坡某公司设计了一款闪光灯,其初始结构参量 $D_1 = 36.5 \text{ mm}$, $D_2 = 23 \text{ mm}$, $L = 26 \text{ mm}$, $\alpha = 20^\circ$, $\rho = 0.95$, $\Delta_{\text{Tele}} = 21 \text{ mm}$, $\Delta_{\text{std}} = 14 \text{ mm}$, $\Delta_{\text{wide1}} = 8 \text{ mm}$, $\Delta_{\text{wide2}} = 4 \text{ mm}$, 菲涅耳透镜设计成三个区域,在菲涅耳透镜不同的半径 D 处有不同的焦距值:

$$f = \begin{cases} 70 \text{ mm}, & D \leq 20 \text{ mm} \\ 90 \text{ mm}, & 20 \text{ mm} < D \leq 24 \text{ mm} \\ 110 \text{ mm}, & D > 24 \text{ mm} \end{cases}$$

在仿真实验中输入上述数据,在 Wide2 水平时得到了出射光子方向矢量在水平方向(即 $x-z$ 平面)的投影角和在垂直方向(即 $y-z$ 平面)的投影角分布情况。图 4 所示的是这两个正交方向的投影角与光强的分布曲线图。Wide2 标准的照射半角设计要求的水平方向 32° ,垂直方向 23° ,可见空间仿真结果完全符合设计要求,且与实测曲线也符合得很好。

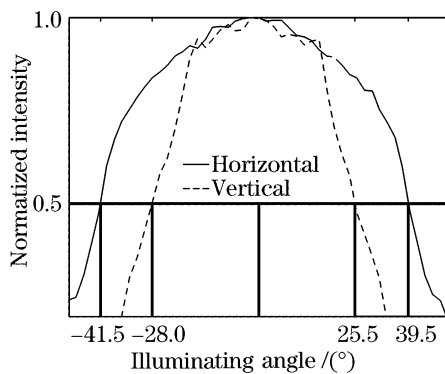


图 4 Wide2 水平下水平、垂直方向的照射角

Fig. 4 Horizontal and vertical illuminating angle at the stand of wide2

4 结 论

蒙特卡罗仿真作为一种应用在很多理论、工程领域的实用工具,能够更真实、更加量化地仿真及分

析闪光灯的发光过程。通过引入余弦随机变量,仿真了发光管;通过对菲涅耳透镜两个面的分析,仿真了光子通过两次折射出射闪光灯的模型。最终程序通过追迹光子在闪光灯中的行进过程,得到了各个方向的照射角。上述实验还可以通过改变结构参量的一项或者几项来得到不同的照射半角,因此也可以应用于反光罩的结构设计。

参 考 文 献

- 1 Feng Huajun. The design of flashlight zoom lens[J]. *Optical Instruments*, 1996, **18**(5): 12~13 (in Chinese)
冯华君. Zoom 闪光灯变焦透镜设计[J]. *光学仪器*, 1996, **18**(5): 12~18
- 2 Ye Tingfeng, Feng Huajun, Xu Zhihai. A design for flash on ray-tracing[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(3): 60~64 (in Chinese)
叶挺峰, 冯华君, 徐之海. 用光线追迹法对闪光灯反光罩的设计分析[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(3): 60~64
- 3 Zhu Zhengcai. The design research of auto-winding/auto-rewinding system and zoom flashlight[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1989. 88~109 (in Chinese)
朱振才. 自动卷片/倒片系统和变焦闪光灯的设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1989. 88~109
- 4 Wang Jiangang, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Monte-Carlo simulation for light propagation in striated scattering medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 346~350 (in Chinese)
王建岗, 王桂英, 徐至展. 光在分层散射介质中传输行为的蒙特卡罗模拟研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 346~350
- 5 Chen Xiaodong, Yu Daoyin, Xie Hongbo *et al.*. Reconstruction of tissue autofluorescence spectra by Monte-Carlo modeling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 612~615 (in Chinese)
陈晓冬, 郁道银, 谢洪波 等. 蒙特卡罗模拟重建组织的自体荧光光谱[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 612~615
- 6 Song Jae Lee. Analysis of light-emitting diodes by Monte Carlo photon simulation[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(9): 1427~1437
- 7 Yan Zengzhuo. Tubular pulse xenon lamp[J]. *Vacuum Electrical Technology*, 1997, (2): 36~41 (in Chinese)
严增濯. 管形脉冲氙灯[J]. *真空电子技术*, 1997, (2): 36~41
- 8 Wu Jizong, Ye Guanrong. *Measurement of Optical Radiation* [M]. Beijing: China Machine Press, 1989. 56 (in Chinese)
吴继宗, 叶关荣. 光辐射测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989. 56