

王 乐

(中国计量学院信息工程学院光电子研究所, 杭州 310018)

**摘 要:** 概括了光学软件 ASAP (Advanced System Analysis Program) 所涉及的理论知识包括几何光学、物理光学、数学等方面; 介绍了 ASAP 中从几何体的构建、光源的模拟、光线的追迹到分析结果的输出等一系列功能; 给出了灯具设计中光通量、光强和照度的计算方法; 最后利用一个 LED (Light Emitting Diode) 照明灯具仿真设计的例子, 阐明了运用 ASAP 进行照明设计这一方法的便捷和直观, 以及这一设计思路的可行性。

**关键词:** LED 灯具; 光学设计; 计算机仿真; ASAP

## Computer Simulation and the Luminaire Design of LED Illumination

Wang Le

(Institute of Optoelectronics, China JiLiang University, HangZhou 310018)

### Abstract

The involved knowledge in optical design software ASAP including the geometric optics、physical optics and mathematics and so on are generalized; then how one would create geometries、model sources、trace rays、analyse and output the results in ASAP are introduced; the calculational methods of luminous flux、intensity and illumination in luminaire design are presented. At last, an example of LED luminaire design using ASAP is displayed and discussed, it proves the design method using ASAP is convenient、intuitionistic and feasible.

**Key words:** LED luminaire; optical design; computer simulation; ASAP

ASAP 是 BRO (Breault Research Organization) 的一种商业化软件。它具有强大的机械仿真功能, 可以模拟几乎所有的三维几何模型; 具有很好的互动性, 可以让用户在制作原型系统或者大批量生产前做光学系统的仿真; 它应用优化的蒙特卡罗方法进行非序列性的光线追迹, 即光线可以不按次序、不计次数的经过各个面, 比传统的光线追迹方法而言更快更准确, 可以在短时间内进行数百万条光线的计算分析; 同时 ASAP 可以和其他很多软件共同使用, 通过特定的转换功能来共享图形或者数据文件, 这些软件包括 ZMAX、OSLO、AUTOCAD 等; 尤其在 ASAP 中, 用户不但可以通过 GUI (Guide User Interface) 来定义一些简单的几何体和光源, 还可以通过编写类似与 BASIC 语言的指令代码来定义较复杂的光学系统<sup>[1]</sup>。由于 ASAP 的仿真效果好, 光线

追迹速度快而且准确, 模拟的功能强大, 兼容性比较高, 所以在非成像照明、投影显示、成像等领域应用越来越广泛<sup>[2]</sup>, 引起了越来越多的设计人员的重视, 但是 ASAP 中涉及到很多几何光学、物理光学以及数学等方面的基础知识等, 所以为了能熟练的掌握 ASAP 的应用, 必须对它有更深入的了解。

另一方面, 随着 LED 技术的飞速发展, LED 光源的应该愈来愈广泛, 从显示领域逐渐扩展到照明领域, LED 照明灯具的设计也受到光学设计人员的重视。

基于此, 本文首先对 ASAP 中所涉及的部分理论知识, 包括几何光学、物理光学、数学等方面做了概括; 然后介绍了 ASAP 中从几何体的构建、光源的模拟、光线的追迹到分析结果的输出等一系列功能; 最后通过一个运用 ASAP 进行 LED 照明灯具

仿真设计的例子, 阐明了运用 ASAP 进行设计和分析这一方法的优点和便捷, 使用户对于它的各种功能有更深入的了解。

## 1 ASAP 的计算机仿真

### 1.1 几何体的构建和光源的模拟

模拟光学系统首先要构建出系统的立体图形, 在 ASAP 中有很多种方法可以实现此功能。一种是通过和 Rhinoceros CAD (Computer Aided Design) 软件结合使用, 由于它们都支持 IEGS (Initial Graphics Exchange Specification) 格式, 所以在 CAD 中系统模型用 NURB (Non-Uniform Rational B-Spline) 曲面来数学描述, 再输入到 ASAP 中用 Bezier 曲线来描述<sup>[2]</sup>; 也可以在 ASAP 中通过 GUI (Guide User Interface) 来定义简单的线或者面, 而复杂的几何体必须通过 ASAP 中类似于 Basic 语言的强大的指令集来编程定义。

在 ASAP 中可以通过它本身自带的 light Source Library 来模拟一般的光源, 对于特殊光源的定义可以采取如下的办法:

第一种是通过模拟光源的具体几何形状然后附加光源的特性参数: 在 CAD 里先定义几何体, 然后通过 IEGS 格式转换到 ASAP 中, 而光源的特性参数包括封装材料的折射率、厚度、吸收系数等, 这些特性可以通过 ASAP 的 GUI 和指令集来定义; 第二种是把发光体的二维发光图形 (BMP 格式) 输入到 ASAP 中, 转换为 DIS 格式的文件, 再经过 Abel 反变换为光源发光三维立体分布文件<sup>[3]</sup>; 第三种是直接 ASAP 中通过已经测得的光源的光强分布来定义: 可以定义整个发光体, 定义光线数以及每个光线的起始位置、方向、每个光线代表的光通量大小或者每单位立体角内的光线数量、光源的发散角度, 因为测量的是光源经过封装的折射、反射、吸收后出射光的光强分布, 所以不需要再单独定义几何体。

### 1.2 光线追迹和结果分析

光线追迹是追迹通过三维物理模型的光线, 光线的传播路线是由几何体形状、物体材料和光线经过的面的光学性质 (反射、折射、散射、衍射、吸收等) 所决定。

光线在界面上的反射遵循折、反射定律, 对于相干光分别定义 s 和 p 偏振的吸收和反射系数, 应

用于非成像照明的光源一般定义为非相干光。光线在界面上遵循菲涅尔定律, 从而可以计算出折、反射的光通量和光线的方向以及界面上的反射率  $R$  和透射率  $T$ 。

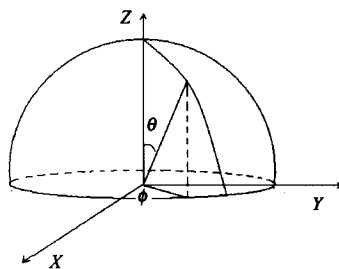


图 1 TIS 在半球面内的分布

散射面的定义<sup>[4]</sup>是建立在 BRDF (Bidirectional reflectance distribution function) 基础上, 其中 BSDF 是描述光如何从一个面上散射, 是关于入射角的函数。而 TIS (Total Integrated Scatter) 表示散射到半球面内的光通量与入射的全部光通量之比。如图 1, 对于光滑的面而言:

$$TIS = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} BSDF(\theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (1)$$

衍射模型<sup>[6]</sup>是建立在 Huygens-Fresnel 原理的基础上, 远场遵循 Fraunhofer 衍射理论, 近场遵循 Fresnel 衍射理论。根据光通量守恒, 在考虑吸收率  $A$  的情况下有:

$$R + T + A + TIS = 1 \quad (2)$$

在光线追迹中运用蒙特卡罗方法, 它是一种数值分析方法, 即随机选取光线位置、方向作为样本, 随机的折射、散射、衍射, 增多样本数量可以提高光线追迹结果的准确性。在进行折、反射光线追迹时候选取反射率  $R$  和透射率  $T$  作为随机变量, 在进行散射光线追迹的时候选取 TIS 作为随机变量<sup>[5]</sup>。

在 ASAP 中可以得到一般的分析结果, 例如模型立体图, 光强、光通量的空间分布, 以及在探测屏上的光照度分布, 同时可以记录入射到任一面上的光通量和被散射光线的光通量。通过改变各个参数的设置来改变结果输出, 不断的模拟, 最终可以达到要求。

## 2 LED 灯具设计

根据以上步骤, 以一个针对 LED 灯具设计的例子来更详细直观的说明如何在 ASAP 中进行光学系

统的模拟和设计。

## 2.1 确定光源

单只 LED 的光能量小,亮度低,无法单独使用,因此为了达到照明的要求,一般由多个发光二极管组合在一起形成点光源或者面光源以及体光源<sup>[6]</sup>,所以为了确定光源必须确定光源中包含的 LED 的个数。

首先根据被照面上光通量的分布来计算总的光通量。把被照面的接受屏划分为  $n$  小块,假设屏上第  $i$  块面元法线方向上的光强为  $I_i$ ,根据光强的定义:在给定方向单位立体角内的光通量大小,则此面元接收到的光通量可以用  $I_i \Delta \Omega_i$  来表示,其中  $\Delta \Omega_i$  是第  $i$  块面元对应的足够小的立体角,故接收屏上总的光通量为<sup>[7]</sup>:

$$\Phi_{\text{source}} = \sum_{i=0}^n I_i (\sin H_{i+\frac{1}{2}} - \sin H_{i-\frac{1}{2}}) \times (V_{i+\frac{1}{2}} - V_{i-\frac{1}{2}}) \quad (3)$$

其中  $H_{i+\frac{1}{2}}$ 、 $H_{i-\frac{1}{2}}$ 、 $V_{i+\frac{1}{2}}$ 、 $V_{i-\frac{1}{2}}$  是第  $i$  块面元的水平角和垂直角的边界。如果反射器件的反射率为  $R$ ,则理想状态下由光源发出的总光通量为  $\Phi_{\text{Total}} = \Phi_{\text{source}} / R$ 。

单个 LED 的光通量可以根据球带光通量的总和来确定,在一定球带内发射的光通量等于球带内的平均光强乘以该球带对 LED 所构成的立体角。如图 2 所示的平面角  $\delta\theta$  对应的立体角等于球带的面积除以球半径的平方<sup>[8]</sup>:

$$\delta\Omega = \frac{2\pi r \sin\theta \delta r \delta\theta}{r^2} = 2\pi \sin\theta \delta\theta \quad (4)$$

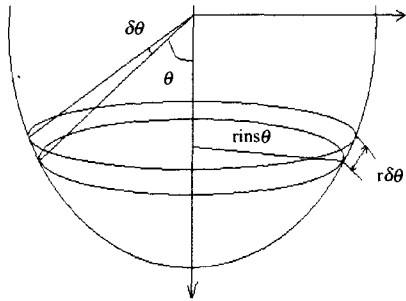


图 2 球带法计算光通量

对于从  $\theta_1$  到  $\theta_2$  的球带,其立体角

$$\Omega = \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\Omega = 2\pi (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (5)$$

球带内的光强平均值可由光强分布曲线,如图

3 来估计,也可以根据函数平均值定理直接计算,得到在从  $\theta_1$  到  $\theta_2$  的球带内的光强平均值:

$$I_{\theta_{\text{ave}}} = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} I(\theta) d\theta}{\theta_2 - \theta_1} \quad (6)$$

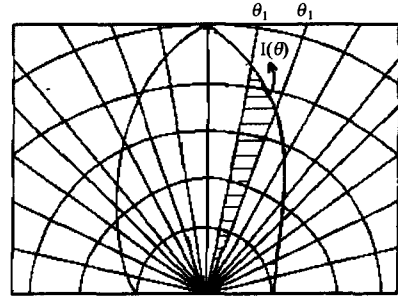


图 3 垂直平面的极坐标光强分布曲线

则在此球带内的球带光通量:

$$\phi_{\text{LED}\theta_{\text{ave}}} = \Omega L g \quad (7)$$

由于 LED 在空间的光强分布一般是轴对称的,故单个 LED 的光通量为<sup>[9]</sup>:

$$\Phi_{\text{LED}} = 2 \sum_{j=0}^n I_{j_{\text{ave}}} g [2\pi (\cos\theta_{j1} - \cos\theta_{j2})] \quad (8)$$

$$n = \frac{\pi}{2} / \theta_{j2} - \theta_{j1}$$

其中  $I_j$  是第  $j$  个球带内的平均光强,  $\theta_{j1}$ 、 $\theta_{j2}$  是第  $j$  个球带区域的上下边界,按等角度法来分割球带,则  $n = n = \frac{\pi/2}{\theta_{j2} - \theta_{j1}}$  表示球带数目,  $(\theta_{j2} - \theta_{j1})$  代表每个球带的度数,则所需要的 LED 大概个数:  $N = \Phi_{\text{Total}} / \Phi_{\theta}$ 。

## 2.2 照度的计算

照度的计算方法通常有:利用系数法、概算曲线法、比率法和逐点计算法,在 LED 的照明设计中,通常采用的是逐点计算法。

逐点计算法是指逐一计算每个 LED 对照度计算点的照度,然后进行叠加,得到其总照度的计算方法。当光源的最大尺寸不超过光源至被照平面的最小距离的五分之一时,就可以将此光源看作“点光源”,如图 4,按照逐点计算法来计算照度<sup>[10]</sup>:

$$E = \frac{l_a \cos\alpha}{l^2} \quad (9)$$

其中:  $E$  为照度计算点的水平照度;  $l_a$  为光源在照度计算点方向的发光强度;  $\cos\alpha$  为光源至照度计算点的连线与光源至照度计算平面的垂线之间夹角的

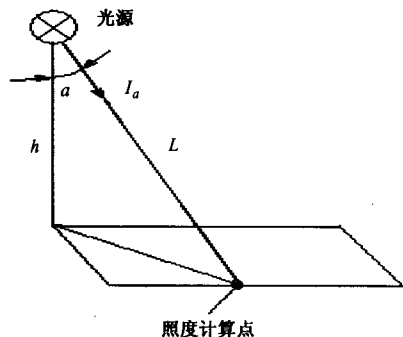


图4 逐点法计算照度

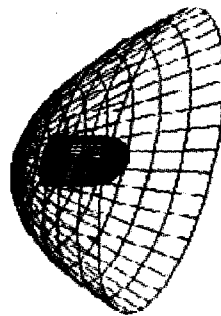


图6 置于反光碗内的几何模型

余弦； $l$ 为光源至照度计算点的距离。逐点计算法可计算任一倾斜面上的照度，但是只计算光源的直射照度（不含反射光通引起的照度），因此适用于带反射罩的灯具。

### 2.3 设计实例

利用以上所阐述的方法和步骤，确定本设计中的光源包含四个LED，要求最后出射光接近平行光。通过在ASAP中定义LED芯片的位置、发光角度、光强分布来模拟光源，通过测量灯具实际的物理尺寸来定义几何体。即采用上面的第一种方法来模拟光源。

图5是未加反射镜前的模型图，四个LED芯片的半发散角均为 $30^\circ$ ，并且分别被置于如图5所示的长方体的四个侧面上。图6表示放置在反光碗内的模型。

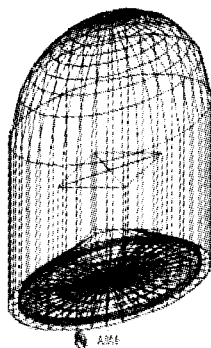


图5 几何模型

在ASAP中对所有的光线进行蒙特卡罗追迹，并根据追迹结果模拟出被照面上的相对光强分布曲线，如图7所示，虚线表示对该照明器件实际测得的相对光强分布曲线，两条曲线基本吻合。由模拟曲线可以得出本设计的半视角约为 $22^\circ$ ，实际测得的约 $20^\circ$ 。图8为在ASAP中模拟得到的光通量分布曲线

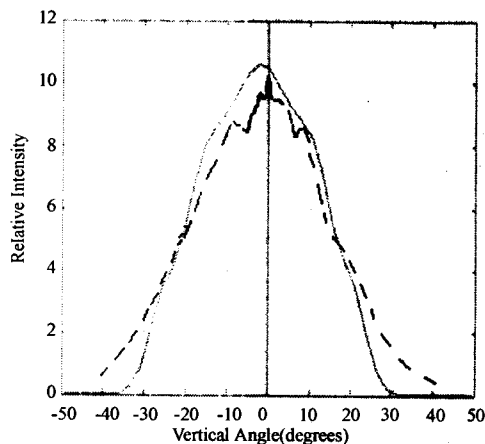


图7 相对光强分布曲线

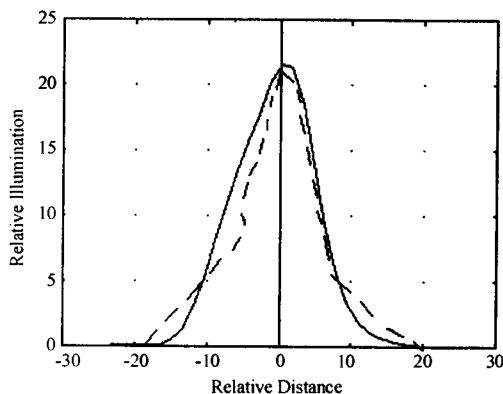


图8 相对光照度分布曲线

线，表示90%的光通量分布在以光轴为中心，顶角为 $22^\circ$ 的圆锥体内。

对于一般的照明器件，其光度数据通常须以照度分布的形式在离开照明器较远的指定平面上体现出来<sup>[11]</sup>。本例中根据实际测得的光强，利用上文提到的逐点计算法得出，计算得到被照面上的相对光照度分布曲线如图8中虚线所示，在ASAP中模拟得到的相同条件下被照面上的相对光照度分布曲线

如图 8 中实线所示。

如图 9 为随机选取的 20 条光线的追迹图。为了使光线以近似于平行光的形式出射到被照射面上，在 ASAP 中通过修改反光碗焦距、球面凸透镜焦距、圆柱形透镜、光源位置等参数来重新模拟此系统，同样随机选取 20 条光线进行追迹，追迹结果如图 10 所示。

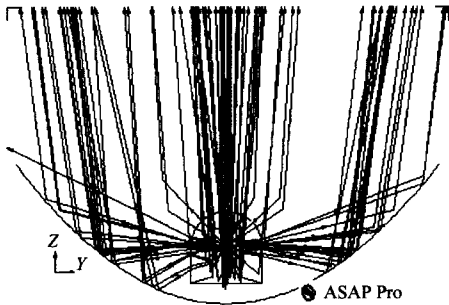


图 9 修改前的系统光线追迹图形

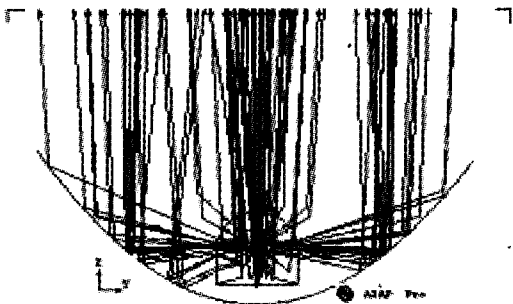


图 10 修改后的系统光线追迹图形

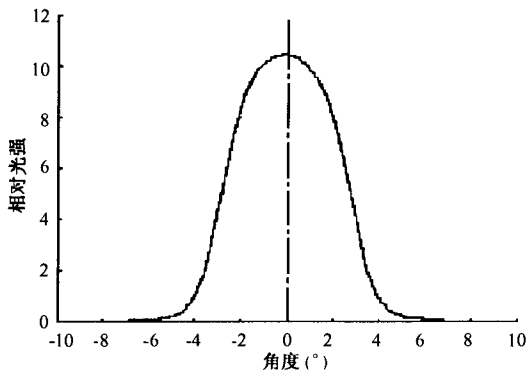


图 11 修改后的系统相对光强分布曲线

修改后的系统相对光强分布曲线如图 11 所示，半视角约为  $3^\circ$ ，表示光线基本以平行光出射，相对光照度分布曲线如图 12 所示，修改后的系统照度分布相对更加均匀和集中。

由以上分析结果可以看出，在一般照明设计的理论上，通过定义光强分布和发光体几何形状在 ASAP 中模拟光源，通过大量光线的蒙特卡罗追

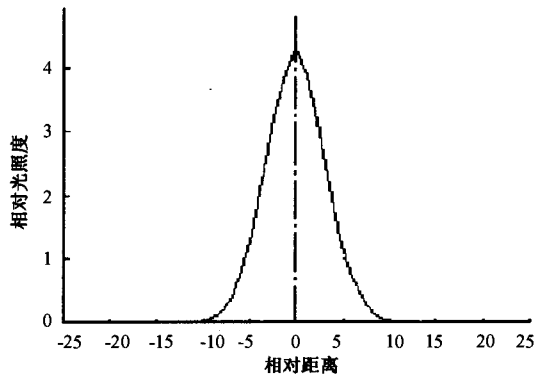


图 12 修改后的系统相对光照度分布曲线

迹结果可以得到光强、光通量和光照度等相关的分布曲线。通过改变设计的参数例如凸透镜的焦距、反光碗的焦距和位置、光源放置的位置等来达到设计要求，即在制作原型系统或者大批量生产前做光学系统的仿真，使设计人员可以更直观快速的看到设计结果，从而缩短了产品市场化的时间，同时减少了材料的浪费。

### 3 结语

LED 光源在照明领域的应用越来越广泛，相应的照明系统的光学和机械设计越来越复杂，借助于诸如 ASAP 等光学软件快速、高效的进行 LED 照明设计是必然的。本文结合实例来说明如何运用 ASAP 进行照明系统的光学设计和模拟分析，使得照明设计更加快速和直观。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Lungershausen A, Eckhardt S K, Holcomb J M, et al. Light design: the software dilemma [J]. SPIE, 1995, 3296: 53 ~ 61.
- [ 2 ] Stevenson M A, Campillo C J Jenkins D G., Advanced optical system simulation in a coupled CAD/optical analysis [J]. SPIE, 1999, 3634: 112 ~ 118.
- [ 3 ] Freniere E R, Tourtellott J. A brief history of generalized raytracing [J]. SPIE, 1996, 3130: 170 ~ 178.
- [ 4 ] Coffe K L. Y, Priestley K J, Mahan J. R., M, et al. Diffraction models of radiation entering an aperture for use in a Monte Carlo ray-trace environment [J]. SPIE, 1998, 3429: 213 ~ 219.
- [ 5 ] Frasch H J. Monte carlo methods in ray-tracing

- software [J]. SPIE, 2000, 4769: 55.
- [6] 王尔镇,王春锋. 白色 LED 的开发和应用 [J]. 光电技术, 2002, 43 (1): 1~9.
- [7] 周军,张继勇,周莉. FFR 汽车前照灯的光学设计 [J] 照明工程学报, 1999, 10 (2): 45~52.
- [8] Henderson S. T, Marsden A. M. Lamps and lighting [M]. London: Edward amold, 1972. 124~125.
- [9] 周太明.光源原理与设计 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993.
- [10] 孙建民. 电器照明技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [11] Henderson S. T, Marsden A. M, Lamps and lighting [M]. London: Edward amold, 1972. 121.

---

## 2007 年广州国际照明展览会同期举办 (2007 年 6 月 8 日 ~ 11 日)

### 中国照明论坛——照明工程设计与实施暨首届 中照照明奖获奖项目报告会

主要内容: 太阳能光伏系统建筑照明设计实践

体育场馆照明工程设计

幻彩咏香江——千变万化的灯光照明系统

大型景观照明工程实施过程中的再设计

商业与办公空间照明——常州南大街照明设计报告

中国古典建筑照明实践

欧式古典建筑的夜景神韵——天津小洋楼照明实践

历史文化街区的照明设计