

广角均匀照明效果的灯具设计¹

顾伟¹ 雷威¹ 张晓兵¹ 杨国栋² 吴永强² 方庆华²

1 东南大学电子工程系显示技术中心 210096

2 华东电子集团 210028

摘要: 为了在自然光线不足的场所通过人造光源满足摄影及照明的要求,理想光源在物平面上的广角内应具有类似日光照射度的均匀照度分布。经分析得出人造光源前射光线照度在正前方最大并随着张角增大而减小,因而需要构造镜面使得反射光线照度随张角增大而增大,以补偿前射光线照度的衰减。设计了圆环型的灯心结构,通过在期望张角处布置反射光线照度峰值的办法,得到了表达所期望镜面的一阶二次微分方程。经过数值求解和函数拟合,确定了球冠结构的反射侧面。当在球冠下方加装圆锥型镜面之后,可以进一步提高广角内的照度均匀度。设计方案将90度张角内的照度不均匀度从设计前的65%改善到了±15%之内。

关键词: 均匀照度分布 灯具 镜面

1. 引言

人们最适应的视觉环境是晴天下的室外环境,此时以阳光作为照明光源。由于阳光可以视为平行光,因此各物平面上接收到的照度呈均匀分布。人们对各物体的认识也是基于该情况下的视觉感知。当自然光线不足时,人们发明了在不同场合下适应不同需要的照明光源。在其中相当多的场合,对光源的要求都是尽可能的重现物体在白昼时的自然状态。这就要求人造光源也能在物平面上形成均匀的照度分布。当然,其视角必须达到自然视角的范围,这一视角通常要求不小于90°^[1]。这一要求对用于摄像、广角观察等用途的照明灯具尤其重要。满足这一要求的灯具可以广泛应用于阅读用台灯、摄像装置闪光灯、展览馆顶灯和巡逻直升机底盘灯等众多场合^[2,3]。

在上述场合中,各人造光源的发光部分,如钨丝和放电气体,其本身尺度较照明距离来说可以忽略不计,进而视为点光源看待。而点光源在某一平面形成的照度如图1所示^[4]:

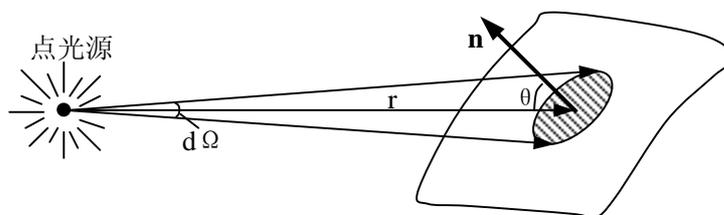


图1 点光源在面元上的照度

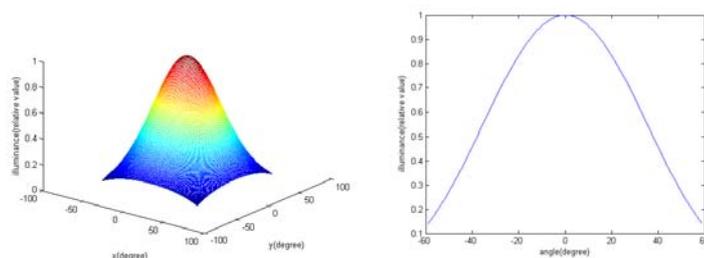
其数值满足

$$E = \frac{I \cos \theta}{r^2} \quad (1)$$

其中 I 是点光源的发光强度, θ 是面元法线与两者连线之间的夹角, r 为两者之间的距离。

对物平面上的各位置分别进行计算,可以得到景物平面上的照度分布图如图2所示。图中照度是当取中心照度为基准值时的相对值(下同)。

¹本文得到教育部博士点基金的资助(No. 20030286003)



(a) 物平面照度分布图

(b) 物平面中心径向照度分布图

图 2 点光源照明时物平面上及其任一直径方向的照度分布

由图可见景物平面上的照度在 $\pm 45^\circ$ 张角处下降至中心照度的 35%，而在 $\pm 60^\circ$ 张角处下降至中心照度的 12%。因此点光源本身无法实现广角均匀照度分布。

实用中的灯具很多都配有反射镜面，一方面是为了把光线约束在期望的照明区域内，另一方面通过对发光体和镜面的精细设计，还可以控制照明区域内的照度分布，文献^[5]提出了一种基于逐段平面近似的镜面设计方法——填充法。常用灯具如汽车前大灯常采用发光体过焦点的抛物面来增大正前方远方照度。然而对于广角均匀照度的灯具，尚极少见诸报道。本文通过光路分析、镜面方程推演和计算模拟，实现了在 90° 视角内具有均匀照度分布的照明灯具。

2. 灯具设计

2.1 发光体设计

本文针对圆形照明区域进行设计，这样设计出来的灯具具有良好的旋转对称性。发光体可以选用钨丝也可以选用放电气体，统一设计为圆形或圆环型的结构，如下图所示：

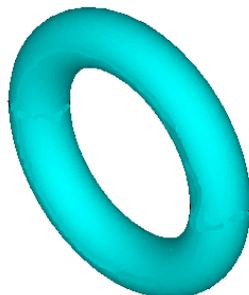


图 3 广角照明灯发光体结构

若为钨丝，则只在发光体表面发光；若为气体空间，则为体光源。本文依据气体放电型发光体进行灯具设计。

2.2 反射镜面设计

2.2.1 光线定向反射

根据前述的照度分布图 2 可以看出，若要实现广角区域内照度的均匀分布，则要求镜面反射光线所形成的照度沿半径方向逐渐增大，并且在达到指定张角后迅速衰减。如此来和直接出射光线所形成的照度互为补偿，从而达到预期的效果。并且最需要补偿的，是期望照明区域的边界即最大张角处。为此本文将构造一个反射镜面使之在 $\pm 45^\circ$ 度张角附近形成一个照度峰值。理想情况下的照度分布如下图所示，总照度在 90° 张角内均匀分布。

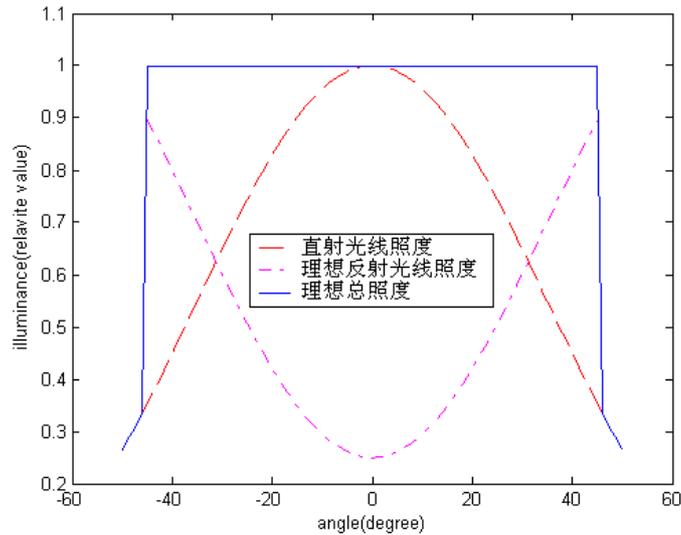


图4 理想照度分布曲线

假设照明方向为竖直向下，由灯具的旋转对称性，可以任取其一个子午面进行分析。此时发光体呈两个圆面，而镜面方程待定。并建立如下图所示的坐标系：

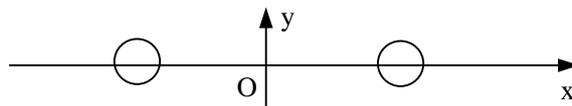


图5 灯具子午面

为了把反射光线定向到指定的张角位置，有两种可能的途径，即发光体发出的光线向同侧张角反射和向对侧张角反射，分别如下图所示：

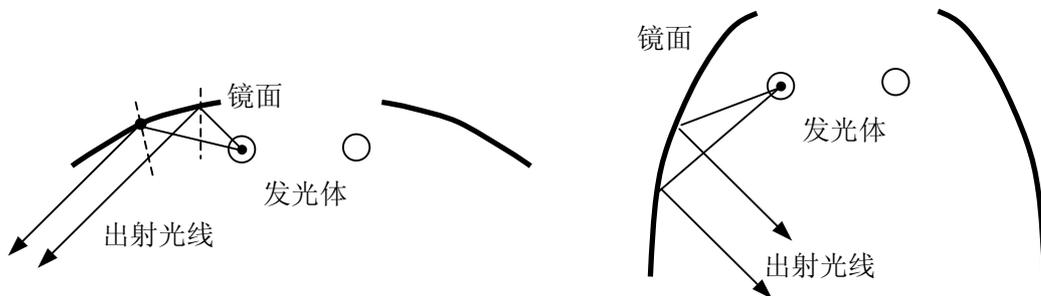


图6 定向反射方式

这两种方式的特点为：向同侧张角反射的方式，占用的镜面深度浅，半径大，逸散到期望照明区域外的光通量多；而向对侧张角反射的方式，占用的镜面深度深，半径小，逸散到期望照明区域外的光通量少。这里深度和半径的关系显然可见，光通量逸散可以如下图所示：

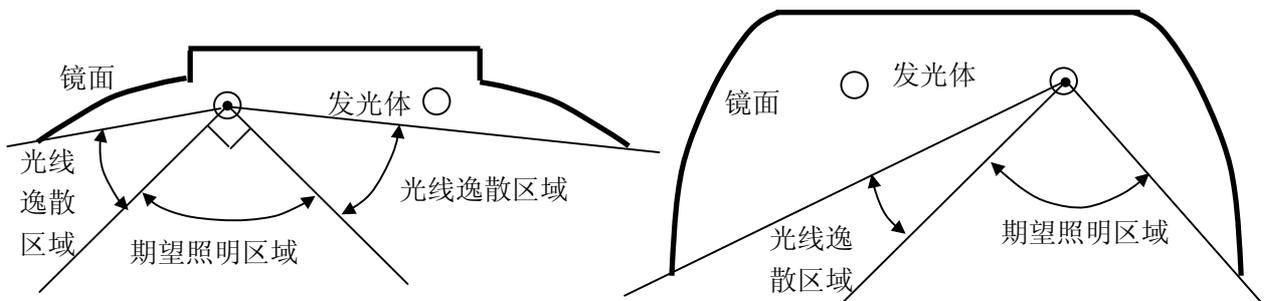


图7 不同反射方式下的光通量逸散程度

2.2.2 镜面方程推演

一般而言，期望灯具具有更小的半径和更高的效率，因此本文向对侧指定张角进行光线定向反射。在只知道发光体位置的情况下，要求构造符合要求的反射镜面，如下图所示：

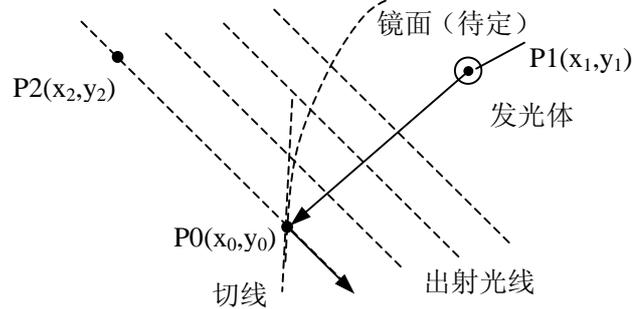


图 8 能够定向对侧反射的镜面构造

图中将发光体集中于 P1 点，P0 是镜面上任意一点。P2 是 P1 关于过 P0 点的切线的镜像点。

设定向后的反射光线斜率为 k_0 ，则出射光线上任一点 (x_r, y_r) 满足：

$$y_r = k_0(x_r - x_0) + y_0 \quad (2)$$

设 P0 处镜面切线的斜率为 k ，则切线上任一点 (x_t, y_t) 满足：

$$y_t = k(x_t - x_0) + y_0 \quad (3)$$

P2 位于出射光线的反向延长线上，满足：

$$y_2 = k_0(x_2 - x_0) + y_0 \quad (4)$$

P1 和 P2 关于法线对称，要求两点连线的中点位于切线上，即：

$$\frac{y_1 + y_2}{2} = k\left(\frac{x_1 + x_2}{2} - x_0\right) + y_0 \quad (5)$$

另外也要求过 P1 和 P2 的直线与法线正交，即：

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = -\frac{1}{k} \quad (6)$$

由方程 (2) - (6) 化简得到：

$$(k_0 x_1 - k_0 x_0 - y_0 + y_1)k^2 + 2(x_1 - x_0 + k_0 y_0 - k_0 y_1)k + k_0 x_0 - k_0 x_1 + y_0 - y_1 = 0 \quad (7)$$

考虑到式中 k_0 和发光体坐标 $P1(x_1, y_1)$ 均为已知常数，而 k 是镜面函数的导数，因此上式在改写后可以用来表达镜面方程：

$$(k_0 x_1 - k_0 x - y + y_1)y'^2 + 2(x_1 - x + k_0 y - k_0 y_1)y' + k_0 x - k_0 x_1 + y - y_1 = 0 \quad (8)$$

这是一个一阶二次常微分方程，但是由于形式复杂所以没有解析解。在给定任意一个初始条件的情况下，可以对其进行数值求解。当指定照明区域为 90 度张角时，式中的 k_0 等于 -1。

2.2.3 镜面方程求解及拟合

对于微分方程的数值求解，需要指定一个初始条件，即镜面始端坐标 $P0(x_0, y_0)$ 。这一

坐标可以根据制造要求确定。本文针对半径 1.5mm 的圆环气体灯心，22mm 的灯具开口半径，数值求解上述方程，得到镜面如下图左图所示：

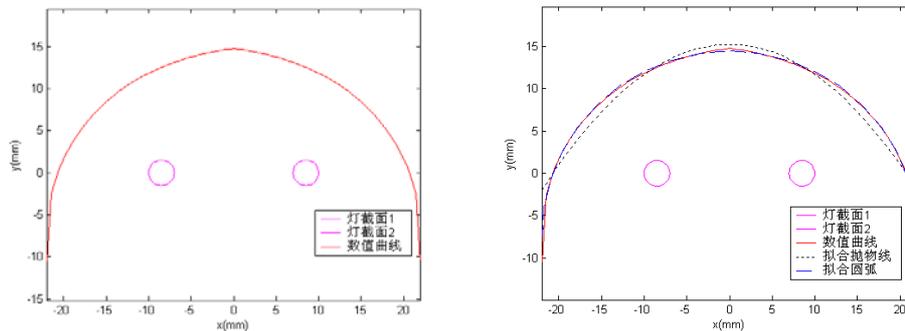


图 9 数值求解的镜面及其拟合曲面

对于镜面的数值表示，无论在设计分析还是在工艺制造上都是不便的。因此期望对数值表格进行函数模拟。同时拟合后的函数应该具有较为简易的形式，以便在旋转后形成易于加工的旋转曲面。本文用二次曲线和双二次曲线分别对镜面进行了函数拟合，其中抛物线拟合和圆弧拟合的结果如图 8 所示。显然的，由于数值曲面在下端斜率过大，因此抛物线拟合出现了较大的误差，而圆形拟合则呈现了相当好的拟合一致性。因此本文选用圆弧作为灯具截面的侧面。在旋转之后，镜面呈球冠形。

拟合后的侧面方程形如：

$$x^2 + y^2 = R^2, \quad y \geq y_0 \quad (9)$$

变换到三维的情形，则得到镜面方程为：

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2, \quad z \geq z_0 \quad (10)$$

3. 照度分析

为了计算灯具前方照度，将光源离散化，分为若干个光源。每个光源以球面方式向外发出光线。对于各条光线，跟踪其光路。对于到达镜面的光线，有可能发生多次反射。此时需要逐次进行光路推演，直至该光线离开灯具为止。关于光源分割以及物平面上的照度计算，可以参考^[6]。

对上述的球冠结构进行计算，得到物平面上的照度沿张角的分布如下：

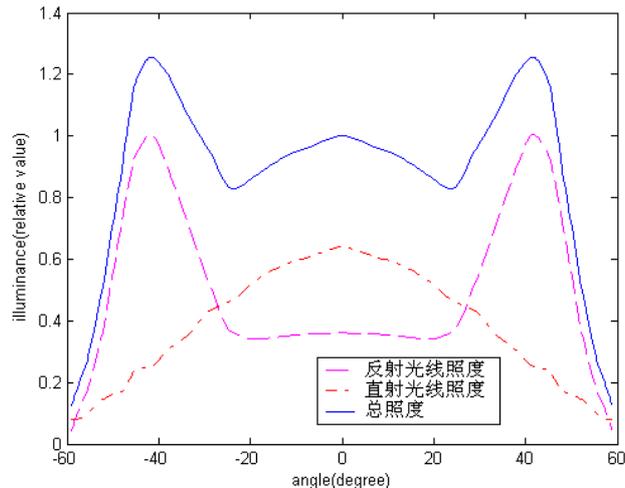


图 10 带有球冠镜面的灯具照度分布

由上图可见，镜面成功的在 ± 45 度边界处形成了一个照度峰值。反射照度与直射照度叠加后，在 90 度视角范围内的照度不均匀度从设计前的 65% 改善到此时的 $\pm 20\%$ 。

4. 锥面设置

前述镜面所带来的反射光线照度在照明区域中心位置附近呈均匀分布，只是在边缘处构造了一个峰值。而直射光线所带来的照度是随着张角增大连续下降的。因此叠加后总照度在 35 度张角附近出现了一处低谷，并且紧接着在 45 度张角附近出现一个尖峰。为了继续提高区域内的照度均匀度，我们希望对峰值照度进行适度削减，同时对低谷照度进行补偿。

削减峰值照度，只需减小球冠高度即可。这样起定向反射作用的反射面少了，峰值自然就会降低。对于低谷照度的补偿，可以在上述球冠的下方另行衔接一段曲面，该衔接曲面设计为向 35 度低谷张角处定向反射光线。在进行这一曲面设计时，采用的是图5中左图所示的同侧反射方式。因为此时若继续采用对侧反射方式，求解所得的曲面将在向下延伸的同时向中心延伸，进而遮挡自球冠反射到期望照明区域内部的光线。由于对谷值补偿属于修正性质的微调，同时受到灯具开口尺寸的限制，衔接曲面的尺度不大。对于通过(8)式数值求解得到的理论曲线，将直接用直线拟合以利于加工。旋转后形成圆锥面。

最终得到的镜面结构及照度分布如下：

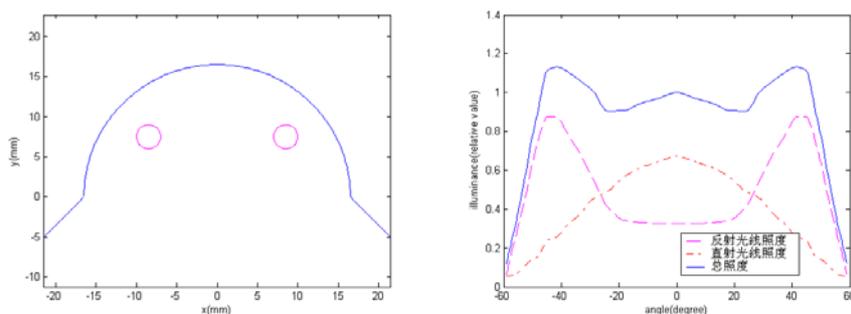


图 11 镜面结构及径向照度

其三维图景如下：

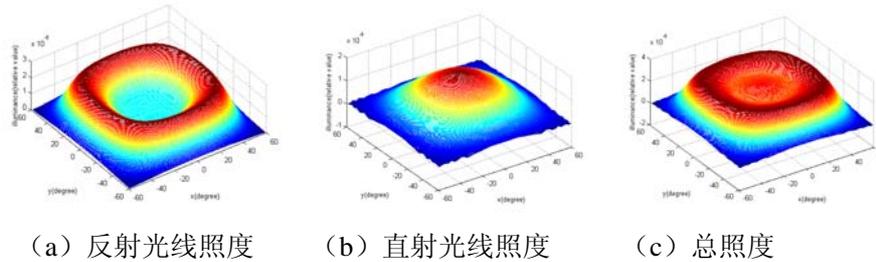


图 12 方案照度效果三维图

可见最后的设计方案使得 90 度视角内的不均匀度位于中心值附近 $\pm 15\%$ 之内, 很好的实现了指定视角内照度的均匀分布。

5. 结论

光源通常在其正前方形成最大的照度峰值。为了在物平面上指定视角内形成均匀的照度分布, 需要设计合理的镜面结构, 使得反射光线形成的照度与之互补, 从而使得叠加之后的照度均匀分布。本文从旋转对称性出发, 设计了圆环型的灯心结构。进而通过对同侧和对侧两种定向反射方式的比较, 确定采用对侧定向反射方式作为镜面反射方式。光路分析表明, 为了将反射光线指向指定张角位置, 反射镜面满足某一阶二次常微分方程。对此常微分方程进行数值求解后再进行函数拟合, 结合拟合精度和工艺要求, 最后确定了球冠结构的主体镜面。此镜面成功的在期望照明区域边缘, 即直射光线照度衰减最严重的位置形成了一个照度峰值。为了进一步提高规定视角内的照度均匀度, 在上述球冠下方衔接了一段圆锥曲面。最后设计所得的镜面使得 90 度视角内的照度处于中心照度的 $\pm 15\%$ 之内, 足以使得观测者或者摄像装置能够获得类似于白昼日光照射时的感受或感光度。

致谢

本文的工作受到教育部博士点基金的赞助 (No. 20030286003), 作者在此表示感谢。

参考文献

- [1] Chen, K.; Design applications in lighting retrofits[J]; Industry Applications Society Annual Meeting, 1992.
- [2] 冯明哲 体育场的照明设计[J] 低压电器 1998.5
- [3] 李大友 艺术体育照明用泛光灯的创新经验[J] 灯与照明 1998.4
- [4] 郝允祥 陈举 张保渊 光度学[M] 北京师范大学出版社 1988
- [5] 林燕丹 参照光源尺寸进行旋转对称反射器设计的一种综合方法[J] 中国照明电器 2000.9
- [6] 严详 张歆华 黄亮 车灯光源优化问题的探讨[J] 工程数学学报 2003.3

Lamp with Uniform Illuminance within Large Angle Area

Gu wei¹, Lei wei¹, Zhang xiaobing¹, Yang guodong², Wu yongqiang², Fang qinghua²

1 Department of electronic engineering, Southeast University, nanjing, 210096

2 East China Electronic Group, Co., nanjing, 210028

Abstract

To get a natural view of an object by lamp in the dark environment, the lamp should produce a uniform illuminance in a large view angle, as the sunshine does. But illuminance produced by a lamp reaches its maximum value in the right front and decreases rapidly sideways. Then a mirror is required to produce an illuminance that increases sideways, to compensate the sideways illuminance. A torus illuminant is used for symmetry. To produce a peak illuminance on the edge area where illuminance drops most, we gives the equation that express the wanted mirror. By numeric calculation and function-fit, a cap sphere is chosen as the mirror. When a cone mirror is added to the bottom of the cap sphere, the illuminance uniformity can be even improved. The warp within 90° view angle is $\pm 15\%$ after design compared with 65% before design.

Keywords: uniform illuminance, lamp, mirror

作者简介: 顾伟, (1979—) 男, 博士生, windwing@seu.edu.cn