

LED照明与弱光聚集单体双向灯具二次配光设计

林文硕¹,石梦静¹,白莹¹,钟勇²

(1. 福建工程学院 数理学院,福建 福州 350118;

2. 福建工程学院 机械与汽车工程学院,福建 福州 350118)

摘要: 提出利用灯具空间结构双向调控光能、单个体多功能的光学设计新理念,构造矩形复合抛物面作为灯具灯罩、LED反光杯、太阳能聚光杯。在照明方面很好地满足了关于A、AA级的照度和照度均匀度要求;在弱光聚集方面,其太阳能芯片位置的照度是不经聚光情况的1.25倍;在聚光模式下,太阳能芯片的光伏转化效率是非聚光模式下的1.62倍。该矩形复合抛物面的设计双向提升了以往被忽略的灯罩结构的利用率,是对当前市面上非聚光模式收集太阳能产品设计的有效补充。

关键词: 矩形复合抛物面;二次配光;照明节能;弱光聚集;结构多重利用

中图分类号: TN364.2;U463.65 文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2018)06-0578-09

Secondary light distribution design of bi-directionally regulated lamps with LED lighting and weak light collection functions

LIN Wenshuo¹, SHI Mengjing¹, BAI Ying¹, ZHONG Yong²

(1. Mathematics and Physics Institute, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A new concept of optical design was put forward, which uses the space structure of lamps to regulate the light energy bidirectionally and combines several functions into one single lamp. The rectangular composite paraboloid was constructed and used as lampshades, LED reflector cups and solar concentrator cups. In terms of lighting, such a lamp can well meet the requirements of national standard A and AA for illumination distribution and illumination uniformity. In terms of weak energy collection, the illumination of the solar chip position is 1.25 times of that without a concentrator. In the concentrated mode, the photovoltaic conversion efficiency of solar chips is 1.62 times of that of the non-concentrated mode. The design of the rectangular composite paraboloid improves, in a bi-directional way, the previously neglected space utilization ratio of the lampshade structure. It is an effective supplement to the current solar products designed without concentrated light collection.

Keywords: rectangular compound paraboloid; secondary light distribution; lighting energy saving; weak light gathering; space reuse

在全球LED照明跨越式发展大背景下,研发更护眼、更健康环保的LED照明产品,对缓解中小学生学习近视高发的严峻现状有着重要的社会意义。由于LED灯属于朗伯发光体^[1]光强呈余弦

分布,难以满足照明需求,必须对其发散角进行调控,即二次配光设计。目前,LED二次光学设计通用的办法,是增加反光杯或者使用透镜,得到所需的光照度、均匀度分布。

收稿日期: 2018-11-20

基金项目: 福建省科技厅科技项目(2016Y033);福建省中青年教育科研项目(JB14071, JT180332);福建工程学院教育教研项目(GB-K-17-48)

第一作者简介: 林文硕(1983-),女,福建福州人,实验师,硕士,研究方向:光学设计与仪器研究。

对照明系统而言,除了照明目标的照度均匀性、亮度等基本要素外,其系统的能量利用率及生产成本等因素也是设计时必须考虑的。相比投射式自由曲面透镜原件,反光杯元件无需考虑材料内部的吸收和散射等损耗,具有结构简单、加工容易、成本低廉的优点^[2],因此被选用进行二次配光设计。反光杯形式多种多样,有抛物面、球面、椭球面、双曲面、柱面抛物面、复合型、自由曲面反光杯等^[3-4]。

太阳能作为一种取之不尽的清洁能源受到人们的青睐。光伏组件几乎全部以半导体物料(如:硅)制成的固体光伏电池组成,是一种暴露在阳光下便会产生直流电的发电装置。然而,太阳能能流密度低,需要配合聚集与转换设备,才能提高其能源利用率。

现有的太阳能灯具设计多采用非聚光模式收集太阳能,即在灯具外观装饰上加贴太阳能电池板,直接接收太阳能,灯具内部结构未被有效利用。灯具作为生活必备照明工具,其结构若能有效地利用,可衍生出更多的功能。如对灯罩结构的改良设计,不仅辅助提升太阳能芯片的光学效率,还可以节约资源消耗,响应生态文明建设的号召。

复合抛物面聚光器 CPC(Compound Parabolic Concentrator)是非常接近理想聚光器的非成像聚光器^[5-8],其结构相对简单,加工成本较低。把 LED 与 CPC 结合起来,使其优势互补,再与灯具自身结构融合,设计出既符合照度要求,又可以有效聚集周边光能、低成本的读写作业台灯配件结构。

1 设计原理

常见的读写作业面如书桌、书本等多为矩形,因而设计 LED 矩形出光调控,更适于书写作业,也更时尚。设计使用 2 个矩形复合抛物面,分别作为 LED 反光杯、太阳能聚光杯使用,作为 LED 反光杯使用时,可调制 LED 矩形出光;作为周边环境弱光聚光杯使用时候,其出光口转变为弱光聚集进光口,原进光口转变为弱光聚集出光口,周边的太阳光能通过聚光杯聚集,进入太阳能芯片。

1.1 三维立体矩形复合抛物面反光杯模型构造

如图 1 所示,将抛物面 1、2,沿 x 方向,各自反向平移一定距离,得到水平相对的两片凹槽曲

面;旋转 90° ,再沿 y 方向,各自反向平移一定距离,得到垂直相对的另两片凹槽曲面。这 4 片凹槽曲面可组成一个标准的矩形复合抛物面反光杯。在 xz 和 yz 平面内,矩形复合抛物面聚光杯的剖面都是复合抛物线,任意 xy 平面内剖面都是矩形^[10-12]。

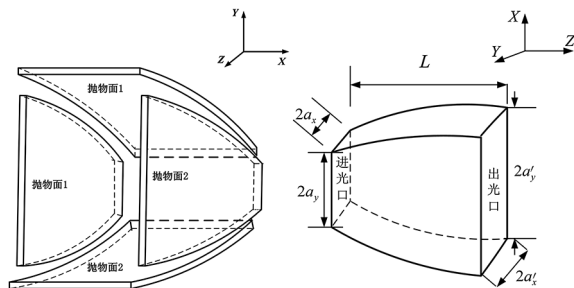


图 1 矩形复合抛物面反光杯构造示意图

Fig.1 Structure diagram of the composite parabolic reflector

以 xz 剖面为例, $2a_x$ 、 $2a'_x$ 分别为焦平面进光口宽度与出光口宽度, $(\theta_{\max})_x$ 为最大出光半角。 $(\theta_{\max})_x$ 的大小与光轴旋转的角度相等。根据抛物线性质:自焦点发出的光线经抛物线反射后,平行射出。通过控制 $(\theta_{\max})_x$ 可控制光斑的大小。若将 LED 光源置于其焦平面处,其光线出射角可控制在 $2(\theta_{\max})_x$ 之内。如图 2 所示。

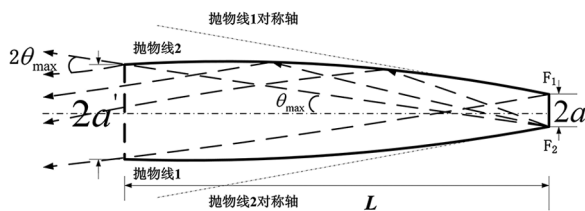


图 2 复合抛物面反光杯剖面光路图

Fig.2 Optical path diagram of the composite parabolic reflector

1.2 矩形复合抛物面反光杯参数计算

在 xz 和 yz 平面内,矩形复合抛物面反光杯的剖面都是复合抛物线,任意 xy 平面内剖面都是矩形。分析反光杯 xz 剖面复合抛物线参数, yz 剖面复合抛物线参数,可以以此类推。

1.2.1 矩形复合抛物面反光杯焦距计算

如图 3 所示,建立直角坐标系 $ox'z'$ 。在直角坐标系 $ox'z'$ 中,做抛物线 OQP(复合抛物线的其中一只), F_x 为焦点,落在 oz' 轴上,焦距 $f_x = \overline{OF_x}$ 。

Q 点为抛物线 OQP 一点,并使 $|F_x Q| = 2a_x$, a_x 为预先设定的 xz 平面内复合抛物线底部进光口半宽度。

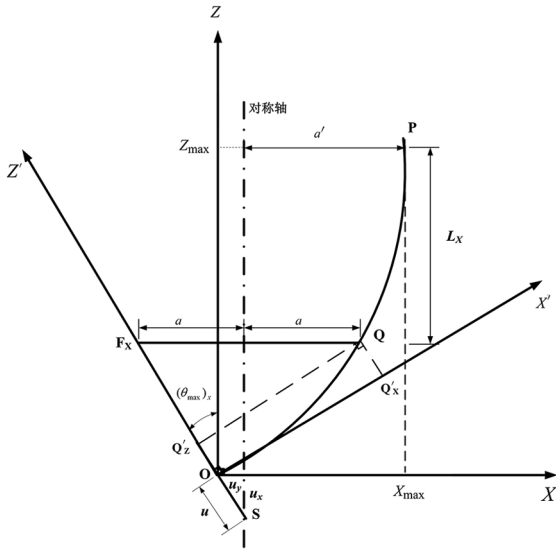


图 3 复合抛物面坐标投影图

Fig.3 Coordinate projection diagram of the compound paraboloid

接着,顺时针旋转直角坐标系 $ox'z'$,直至新 oz' 轴与 xz 平面内复合抛物线对称轴平行,此时新生成一个直角坐标系 oxz 。 oz 轴与 oz' 轴之间夹角为 xz 平面内最大聚光角 $(\theta_{\max})_x$ 。复合抛物线对称轴与 oz' 轴相交于点 S 。

在直角坐标系 $ox'z'$ 中,抛物线 OQP 可以表示为:

$$z' = \frac{x'^2}{4f_x}, \quad (1)$$

点 Q 在在直角坐标系 $ox'y'$ 中的坐标为 (x'_Q, y'_Q) , 则:

$$x'_Q = 2a_x \sin(90^\circ - (\theta_{\max})_x) = 2a_x \cos(\theta_{\max})_x, \quad (2)$$

$$y'_Q = \frac{x'^2_Q}{4f_x} = \frac{a_x^2 \cos^2(\theta_{\max})_x}{f_x}, \quad (3)$$

所以,

$$f_x = \overline{OF} = \overline{OY_Q} + \overline{Y_Q F} = \frac{a_x^2 \cos^2(\theta_{\max})_x}{f_x} + 2a_x \sin(\theta_{\max})_x, \quad (4)$$

解方程(4)得到:

$$f_x = a_x (1 + \sin(\theta_{\max})_x). \quad (5)$$

式(5)给出了 xz 平面上,反光杯焦平面进光

口半宽 a_x 、最大聚光角 $(\theta_{\max})_x$ 、焦距 f_x 的关系。

同理,将式(5)应用于 yz 平面,可得到矩形复合抛物面 yz 剖面复合抛物线焦距:

$$f_y = a_y (1 + \sin(\theta_{\max})_y). \quad (6)$$

1.2.2 矩形复合抛物面反光杯孔径、长度计算

CPC 二维系统的理论聚光比为

$$C_x = \frac{a_x}{a'_x} \leq \frac{1}{\sin(\theta_{\max})_x}, \quad (7)$$

由式(7)可知,当进光口半宽 a_x 给定,出光口半宽 a'_x 越大, C_x 越大。

抛物线 OQP 上的任一点 (x', y') , 在直角坐标系 oxy 中的坐标 (x, y) , 可表示为:

$$x = x' \cos(\theta_{\max})_x - z' \sin(\theta_{\max})_x = x' \cos(\theta_{\max})_x - \frac{x'^2}{4f_x} \sin(\theta_{\max})_x, \quad (8)$$

$$z = x' \sin(\theta_{\max})_x + z' \cos(\theta_{\max})_x = x' \sin(\theta_{\max})_x + \frac{x'^2}{4f_x} \cos(\theta_{\max})_x. \quad (9)$$

$$\text{当 } \frac{dx}{dz} = \frac{dx'}{dz'} = \frac{\cos(\theta_{\max})_x - \frac{x' \sin(\theta_{\max})_x}{2f_x}}{\sin(\theta_{\max})_x + \frac{x' \cos(\theta_{\max})_x}{2f_x}} =$$

0 时,

抛物线 OQP 相对于 oz 轴存在极大值,该点对应复合抛物线的最高点 P 。

此时,

$$x_{\max}' = 2f_x \cot(\theta_{\max})_x. \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)、(9),可得:

$$x_{\max} = f_x \cot(\theta_{\max})_x \cos(\theta_{\max})_x, \quad (11)$$

$$z_{\max} = f_x \cos(\theta_{\max})_x (2 + \cot^2(\theta_{\max})_x). \quad (12)$$

此时, xz 平面内复合抛物线的高度为

$$L_x = z_{\max} - f_x \cos(\theta_{\max})_x = \frac{f_x \cos(\theta_{\max})_x}{\sin^2(\theta_{\max})_x}, \quad (13)$$

$$\text{令 } |\overline{OS}| = u = |\overline{FS}| - f_x = \frac{a_x}{\sin(\theta_{\max})_x} - f_x,$$

$$u_x = u \sin(\theta_{\max})_x, \quad (14)$$

$$u_z = u \cos(\theta_{\max})_x. \quad (15)$$

则, xz 平面内出光口半宽

$$a'_x = x_{\max} - u_x = \frac{f_x}{\sin(\theta_{\max})_x} - a_x. \quad (16)$$

将式(5)代入式(16),可得

$$a'_x = \frac{a_x}{\sin(\theta_{\max})_x}, \quad (17)$$

此时, xz 剖面达到最大理论聚光比 $C_{x\max} =$

$$\frac{a'_x}{a_x} = \frac{1}{\sin(\theta_{\max})_x}.$$

同理,将式(17)(13)应用于 yz 平面,

反光杯 yz 剖面的出光口半径:

$$a'_y = \frac{a_y}{\sin(\theta_{\max})_y}, \quad (18)$$

反光杯 yz 剖面的长度:

$$L_y = \frac{a_y(1 + \sin(\theta_{\max})_y) \cos(\theta_{\max})_y}{\sin^2(\theta_{\max})_y}. \quad (19)$$

由此,只要预先设定复合抛物线底部进光口半宽度 a ,可确定复合抛物线的焦距 f 、长度 L 以及出光口半宽度 a' .

2 目标参数设定

2.1 读写作业台灯最新国标要求

根据中国2018年4月1日起实施的《读写作业台灯性能要求》GB/T 9473-2017(该标准适用于在家庭、教室和类似场所作为读写照明用的台灯和宣称护眼台灯),眼睛距离桌面400 mm,在进行读写作业的中央区域和边缘区域,灯具的照度和照度均匀度至少要达到A级,更好的是达到AA级。A级的照度要求是:中央区域照度至少达到300 lx,边缘达到150 lx。AA级的照度要求是:中央区域照度至少达到500 lx,边缘达到250 lx。A级和AA级照度均匀度(最大值与最小值的比值)的要求均为不超过3^[12]。

表1 照度及照度均匀度要求

Tab.1 Illumination distribution and illumination uniformity requirements

分类	照度/lx		照度均匀度	
	≤300 mm 的120° 扇形区域	>300 mm, ≤500 mm 的120° 扇形环带	≤300 mm 的120° 扇形区域	>300 mm, ≤500 mm 的120° 扇形环带
A级	≥300	≥150	≤3	≤3
AA级	≥500	≥250	≤3	≤3

2.2 计算矩形复合抛物面参数

参照《读写作业台灯性能要求》GB/T 9473-2017,设定台灯距离工作面400 mm高度处,辐照区域为,以灯具出光口的几何中心的垂直投影点

为圆心,在靠近眼睛一侧灯具投射范围内,离圆心的半径距离为500 mm的1/3扇形。设置台灯距离工作面高度为400 mm,辐照区域1100 mm×1100 mm正方形,如图4所示。

当台灯距离工作面高度 $h=400$ mm 时,

$$\tan(\theta_{\max})_x = \tan(\theta_{\max})_y = \frac{550}{400}, \text{求得 } (\theta_{\max})_x =$$

$$(\theta_{\max})_y = 53.97^\circ.$$

设定进光口为正方形,进光口半宽 $a_x = 50$ mm = a_y , 则, $f_x = a_x(1 + \sin(\theta_{\max})_x) = 90.44$ mm = f_y

$$L_x = \frac{f_x \cos(\theta_{\max})_x}{\sin^2(\theta_{\max})_x} = 81.33 \text{ mm}$$

采用对称设计,聚光杯与反光杯选用相同参数。

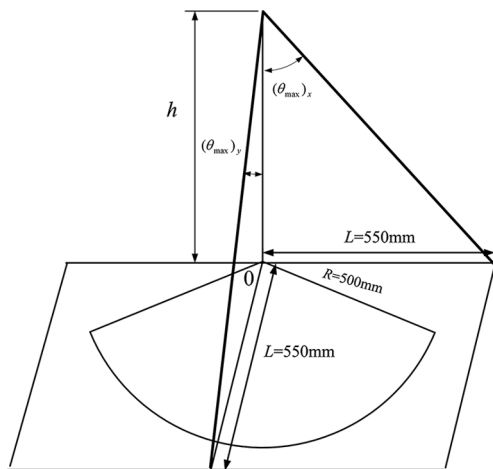


图4 台灯辐照角度示意图

Fig.4 Diagram of a desk lamp's radiation angle

3 矩形复合抛物面台灯二次配光设计

3.1 矩形复合抛物面台灯结构

将灯罩部分与LED反光杯、太阳能聚光杯融合设计,充分利用灯具的自身结构。如此,反光杯聚光杯既有各自实际功能,又具有外观整体装饰效果,将弱光收集与LED照明,互为补充,双向提高了LED灯罩的光能利用率。

可使用2个矩形复合抛物面,一个连接LED照明灯带,用于调制LED矩形出光;一个连接太阳能电池芯片,用于弱光收集,如图5所示。白天,矩形复合抛物面聚集周边光能,辅助太阳能芯

片工作;照明时,矩形复合抛物面调制 LED 发光,使其符合国标照明照度要求。

3.2 不同功率矩形复合抛物面反光杯在不同距离工作面的照度分布

构造矩形复合抛物面:出光口半宽 50 mm,最大出光半角 53.97°,原始长度 81.33 mm,并进行照度测试。

设定光源功率 6.5 W,该矩形复合抛物面在 400、500、600 mm 外的 1 200 mm×1 200 mm 工作平面的光通量情况如图 6 所示。

设定光源功率 10 W,该矩形复合抛物面,在 400、500、600 mm 外的 1 200 mm×1 200 mm 工作平面的光通量情况,如图 7 所示。

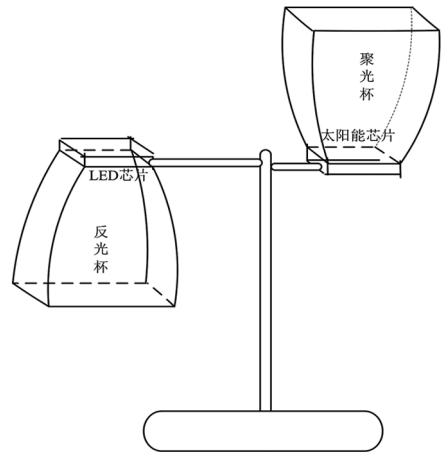


图 5 矩形复合抛物面台灯结构图

Fig.5 Structural design of a desk lamp with a rectangular composite paraboloid

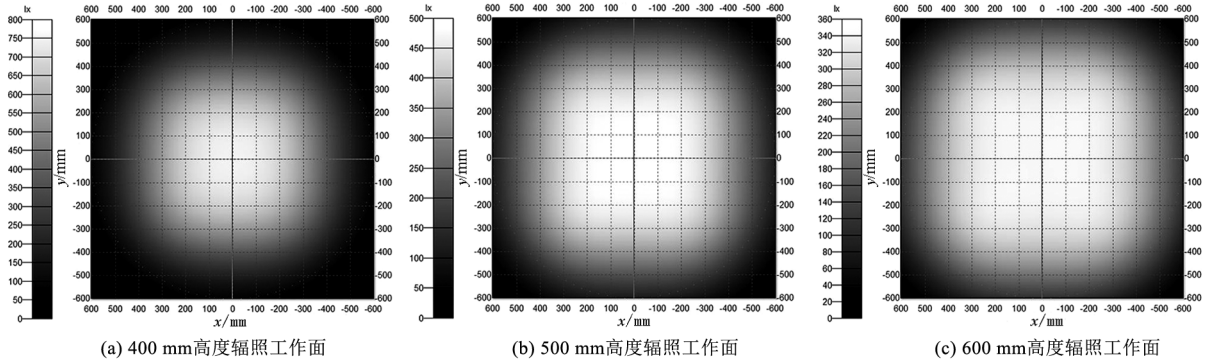


图 6 台灯不同高度辐照工作面光照分布 (6.5 W)

Fig. 6 Illumination distribution of the working face of a desk lamp at different heights, when the lamp power was 6.5 W

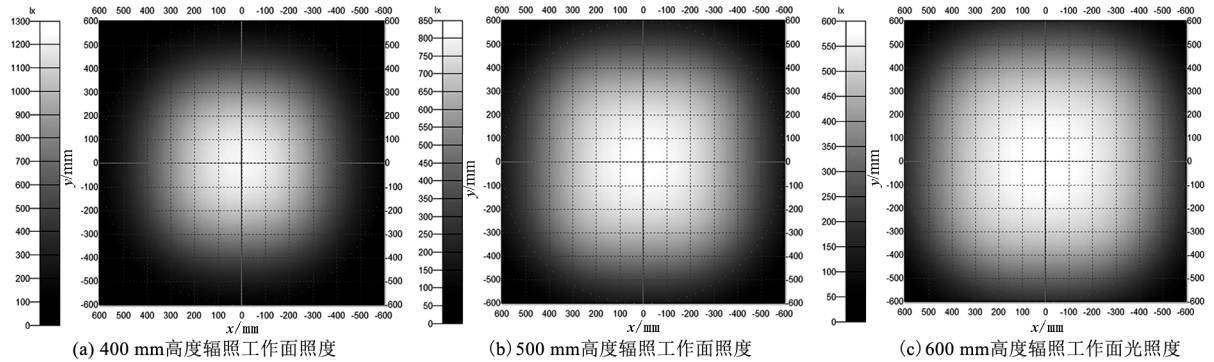


图 7 台灯不同高度辐照工作面光照分布 (10 W)

Fig.7 Illumination distribution of the working face of a desk lamp at different heights, when the lamp power was 10 W

3.3 矩形复合抛物面反光杯照度测试

如图 8 所示,根据《读写作业台灯性能要求》GB/T 9473-2017,以灯具出光口的几何中心的垂

直投影点为圆心,位于眼睛的正前方,在靠近眼睛一侧灯具投射范围内,离圆心的半径距离为 500 mm 的 1/3 扇形内,以 30°为间隔,在半径线上进

行照度测量,测试间隔为 100 mm,包括圆心。测试结果,如图 9、表 2 所示。

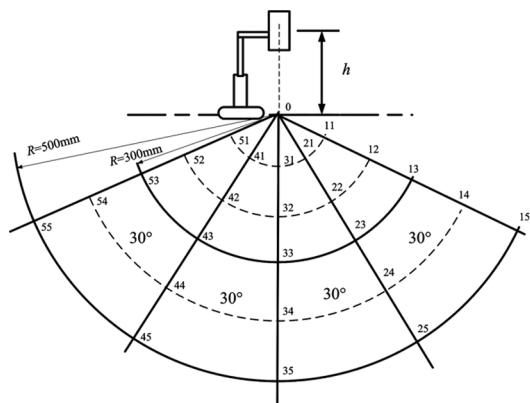


图 8 测试点分布图

Fig.8 Distribution of test points

3.4 矩形复合抛物面反光杯照度分布测试结果分析

距离工作面 400、500、600 mm 高度时,运用该矩形复合抛物面作为 LED 台灯反光杯进行照明发现:

(1)在读写作业的中心(以灯具出光口的几何中心的垂直投影点为圆心)出现照度最大值。当光源功率 10 W 时候,其中心照度值分别为:1 227、826、593 lx,均高于国标要求的 500 lx;当光源功率 6.5 W 时候,其中心照度值分别为:750、488、341 lx,均高于国标要求的 300 lx。

表 2 矩形复合抛物面反光杯照度均匀度测试数值表

Tab.2 Numerical test table of illumination uniformity of the reflector cup with a rectangular composite paraboloid

区域	功率 /W	照度/lx								
		作业面距离 400 mm			作业面距离 500 mm			作业面距离 600 mm		
		最大值	最小值	均匀度	最大值	最小值	均匀度	最大值	最小值	均匀度
≤300 mm 的 120° 扇形区域	10	1 227	837	1.5	826	663	1.2	593	506	1.2
>300 mm, ≤500 mm 的 120°扇形环带	10	837	299	2.8	663	339	2.0	506	306	1.7
≤300 mm 的 120° 扇形区域	6.5	750	545	1.4	488	426	1.1	341	319	1.1
>300 mm, ≤500 mm 的 120°扇形环带	6.5	545	198	2.8	426	224	1.9	319	203	1.6

(2)在读写作业的中央区域(以灯具出光口的几何中心的垂直投影点为圆心,半径小等于 300 mm 的 120°扇形区域内),照度从中心随着作业半径的增加而减小,在半径 300 mm 处达到该区域最小值。当光源功率 10 W 时候,其区域最小值分别为:837、663、506 lx,均高于国标要求的 500 lx;当光源功率 6.5 W 时候,其区域最小值分别为:545、426、319 lx,均高于国标要求的 300 lx。

(3)在读写作业的中央区域(以灯具出光口的几何中心的垂直投影点为圆心,半径小等于 300 mm 的 120°扇形区域内),当光源功率 10 W 时候,照度均匀度(最大值与最小值的比值)分别为:1.5、1.2、1.2;当光源功率 6.5 W 时候,均匀度分别为:1.4、1.1、1.1,如表 3 所示。随着台灯工作

距离升高,中央区域照度均匀度下降,灯光更为均匀柔和。

(4)在读写作业的边缘区域(半径大于 300 mm 小等于 500 mm 的 120°扇形环带区域内),照度从 300 mm 处随着作业半径的增加继续减小,在半径 500 mm 处达到该区域最小值。当光源功率 10 W 时候,其区域最小值分别为:299、339、306 lx,均高于国标要求的 250 lx;当光源功率 6.5 W 时候,其区域最小值分别为:198、224、203 lx,均高于国标要求的 150 lx。

(5)在读写作业的边缘区域(半径大于 300 mm 小等于 500 mm 的 120°扇形环带区域内),当光源功率 10 W 时候,照度均匀度(最大值与最小值的比值)分别为:2.8、2.0、1.7;当光源功率 6.5

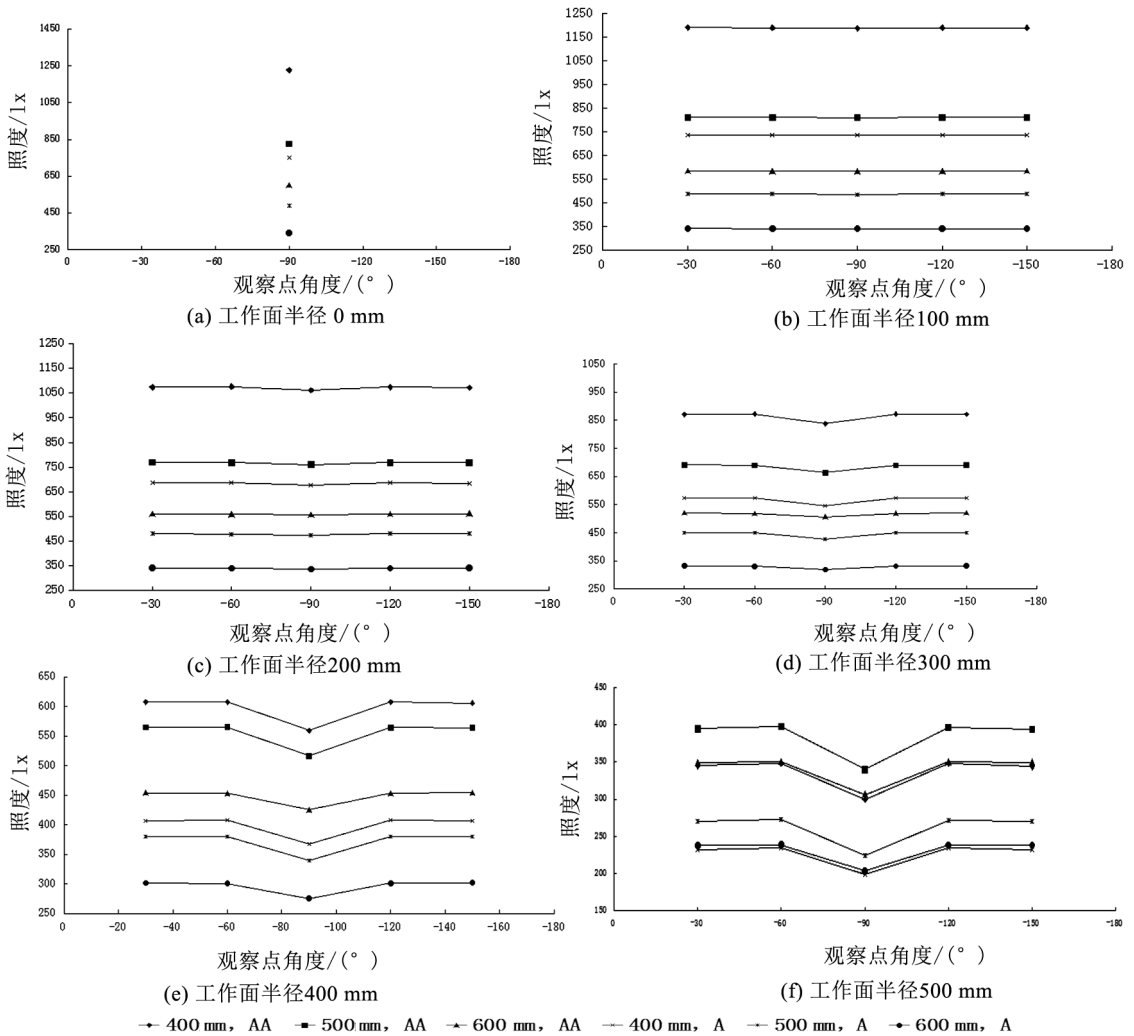


图 9 不同工作面半径下的观察点照度分布图

Fig.9 Illumination distribution of observation points with different working face radius

W 时候,均匀度分别为:2.8、1.9、1.6,如表 2 所示,随着台灯工作距离升高,边缘区域照度均匀度下降,灯光更为均匀柔和。

综上所述:

(1)该矩形复合抛物面台灯有 3 个工作高度(400、500、600 mm),配合选用光源功率(6.5 W 或 10 W),在阅读作业的中央区域,中心照度值均高于国标要求的 300 lx(或 500 lx),照度均匀度均小于 3;在阅读作业的边缘区域,区域照度值均高于国标要求的 150 lx(或 250 lx),照度均匀度均小于 3,较好地满足了国标 A、AA 级的照度分布要求、照度均匀度要求。

(2)在 400 mm 高度,照度最大、最亮。需要高亮度时候,可以调节灯罩在 400 mm 高度,此时

工作面最亮。在 600 mm 高度,照度均匀度最小、出光更均匀。在满足照度要求的基础上,对亮度要求不高时可将灯罩高度调节为 600 mm。在 500 mm 高度时,其照度均匀度较 400 mm 高度时更小、出光更均匀,照度比 600 mm 高度时候更大、工作面更亮,因而综合性能最好,通常选用 500 mm 灯罩高度最为适合。

(3)LED 光源设置在矩形复合抛物面的焦平面上。依据抛物线的光学性质,从焦点发出的光,经抛物线反射后,沿平行于抛物线的对称轴方向射出。该矩形复合抛物面的进光口边缘即抛物面焦点连线,进光口边缘光线,对应着出光口边缘光线,且分别平行于各自抛物面的主轴。由此控制出光口光斑的大小。由于 4 个抛物面构成矩形,

出光口光线形成矩形光斑。

在该矩形复合抛物面调控下,光能重新分配,照度均从作业中心随着作业半径的增加而减小,中央区域的照度均匀度小于边缘区域的均匀度。中央主要书写工作区域的照度变化平稳,入眼光线柔和,适宜书写;又很好地顾及了边缘非主要工作区域(不需要太亮,却也需要适宜的照度保护眼睛),达到了 LED 照明二次配光的目的。

3.5 矩形复合抛物面聚光杯弱光收集照度分布

为了检测该矩形复合抛物面的聚光性能,先观察阳光不经矩形复合抛物面垂直入射太阳能芯片的情况。设置格栅光源,距离太阳能芯片位置 2 m,照度为 1 000 lx,不经过矩形复合抛物面聚光杯,直接入射太阳能芯片位置的照度图,如表 3、图 10(a) 所示。

接着,观察阳光经过矩形复合抛物面,再入射太阳能芯片的情况。同样,设置格栅光源,距离太阳能芯片 2 m,照度为 1 000 lx,垂直入射矩形复合抛物面,经过矩形复合抛物面聚光杯后,观察入射太阳能芯片位置的照度图,如表 3、图 10(b) 所示。

表 3 弱光收集照度对比

Tab.3 Illumination comparison of weak light collection

太阳能芯片位置照度/lx	最小值	最大值	平均值
不经任何抛物面	345.14	1 288.8	1 045.1
经过矩形复合抛物面	884.64	1 654.9	1 306.3

当太阳光不经矩形复合抛物面聚光杯直接入射太阳能芯片上时,最小照度为 345.14 lx,最大照度值为 288.8 lx,芯片上平均照度为 1 045.1 lx;当太阳光经过矩形复合抛物面聚光杯,再照射到太阳能芯片上,最小照度为 884.64,最大照度值为 1 654.9 lx,芯片上平均照度为 1 306.3 lx。经过矩形复合抛物面聚光后,太阳能芯片位置的最小照度值提升了近 2.56 倍,最大照度值提升了 1.28 倍,平均照度值提升了近 1.25 倍。

研究表明,白天光照度为 $(1 \sim 2) \times 10^4$ lx;直射日光照度为 $(1 \sim 1.3) \times 10^5$ lx;在白天阴天的情况下,自然光源在地面形成的照度也有 1 000 lx,太阳能电池的输出功率与太阳光照度,在数值上的关系式近似为: $P = 1.374 \times 10^{-3} E - 0.854$,其中: P 为太阳能电池的输出功率, E 为太阳能电池倾斜面上的太阳光的光照度^[13]。以平均照度值代

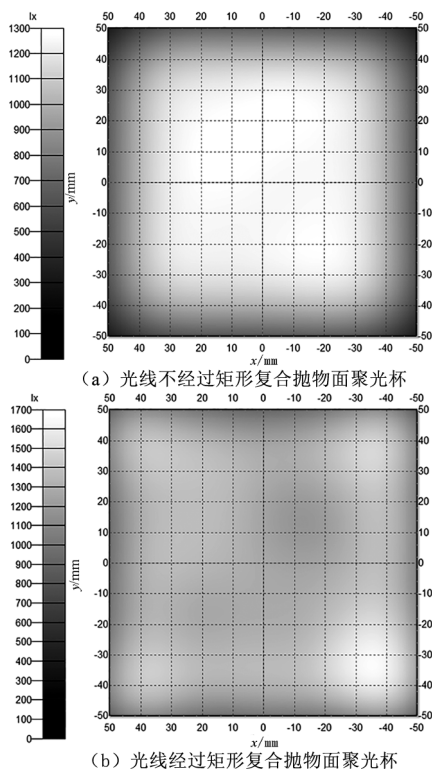


图 10 太阳能芯片照度分布图

Fig.10 Illumination distribution of the solar chip

入测算,即便是白天阴天昏暗,不经聚光的太阳能电池功率约为 0.58 W;经矩形复合抛物面弱光聚集后的太阳能电池的输出功率约为 0.94 W,使用矩形复合抛物面聚光辅助,可使得太阳能芯片光伏转化效率提高约 1.62 倍。若在完全白天光照或者日光直射的情况下,经聚光杯太阳能芯片功率可达 9 W 甚至会更高。

可见,该矩形复合抛物面可以很好的聚集周边弱光,再配合光伏转化模块,可实现光伏转换储能,可为日常小功率用电器供电。

4 结语

提出利用灯具空间结构双向调控光能、单个体多功能的光学设计新理念。创新利用了灯罩结构,根据光学扩展量守恒,借助光路可逆原理与边缘光线原理,结合 LED 与 CPC 构造了矩形复合抛物面,将弱光聚集与 LED 照明,互为补充,双向提高了台灯灯罩的光能利用率;在作为灯罩外观的同时,可作为 LED 反光杯,对 LED 台灯进行二次配光设计;还可作为太阳能聚光杯,收集环境弱光,辅助太阳能芯片聚光。

在照明方面,该矩形复合抛物面,很好地调控了LED的光能,将其聚合在国标要求的主要读写作业区域内。该矩形复合抛物面,在3个工作高度(400、500、600 mm)下,均可搭配2档光源功率(6.5、10 W),能很好的满足国标A、AA级的照度分布要求、照度均匀度要求,特别在中央区域的照度均匀度小于边缘区域的均匀度,且很好地顾及了边缘照度需求。在400 mm工作高度,其照度最大、最亮,可用于高亮度作业需求;在600 mm高度,其照度均匀度最小,出光更均匀柔和;500 mm高度时候,其照度和照度均匀度综合性能最

好。在没有特殊要求时候,选用500 mm台灯高度最为适合。

在符合照度要求的同时,该矩形复合抛物面可以很好地聚集周边环境弱光。使用该矩形复合抛物面聚光辅助,到达太阳能芯片位置的照度,是不经聚光杯情况的1.25倍。该聚光模式下太阳能芯片的光伏转化效率,是非聚光模式下的约1.62倍。这是对当前在灯具外观装饰架上直接贴太阳能电池板,非聚光模式收集太阳能的很好补充。

参考文献:

- [1] CHEN J J, HUANG Z Y, LIU T S, et al. Freeform lens design for light-emitting diode uniform illumination by using a method of source-target luminous intensity mapping[J]. Applied Optics, 2015, 54(28): E146.
- [2] 王洪, 张小凡, 王海宏, 等. 面向大功率LED集成光源的反射器设计方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1 282-1 286.
- [3] Lumileds Holding BV. Secondary optics design considerations for super flux LEDs[Z]. Application Brief, 2015: AB20-5.
- [4] HERKOMMER A M. Advances in the design of freeform systems for imaging and illumination applications[J]. Journal of Optics, 2014, 43(4): 261-268.
- [5] 陈海飞, 金懿豪, 郭晶晶, 等. CPC聚光光导照明系统的应用研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2018, 30(3): 77-83.
- [6] 杨明, 裴刚, 李桂强, 等. 三种低倍聚光比的CPC的实验对比研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(2): 431-437.
- [7] 胡翩, 刘雁, 曾光, 等. 复合抛物面聚光器参数对太阳能激光器聚光效率的影响[J]. 激光杂志, 2017, 38(10): 8-11.
- [8] 段鹏飞, 桂特特, 陈飞, 等. 圆形吸收体复合抛物面聚光器面形模型研究及仿真验证[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0622002-0622008.
- [9] 白莹, 林文硕, 谢国庆. 基于复合抛物面集光杯的LED教室灯具的配光设计[J]. 应用光学, 2014, 35(3): 395-399.
- [10] 白莹, 钟勇, 林文硕, 等. 基于矩形复合抛物面聚光杯LED汽车近光灯设计[J]. 福建工程学院学报, 2013, 11(6): 552-555.
- [11] 林文硕, 石梦静, 白莹, 等. 基于LED照明与弱光收集的节能车灯双向二次配光设计[J]. 应用光学, 2018, 11(6): 908-915.
- [12] 全国照明电器标准化技术委员会. 读写作业台灯性能要求: GB/T 9473-2017 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会, 2017.
- [13] 李义鹏, 刘全桢, 孙立富, 等. 用照度计粗略判断太阳能电池实时功率的方法[J]. 能源技术, 2010, 31(4): 222-223.

(特约编辑: 黄家瑜)