

基于导光板型聚光器的自然光光纤采光系统设计

吕家祺, 徐熙平*, 张宁, 尹鹏, 张恒溢

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 为实现太阳能利用最大化, 提出一种基于导光板型聚光器的自然光光纤采光系统。通过分光模块, 将不可见光波段的能量转换成电能, 进而驱动补偿系统中的 LED 阵列, 实现各种天气条件下的照明能量稳定输出。利用仿真软件对光线进行追迹, 结果表明, 在室内面积为 100 m², 照明 12 h 的情况下, 太阳能可以供应约 60% 的总光通量。为进一步验证所设计系统的可行性和准确性, 搭建了用于光纤采光系统的导光板型聚光系统, 并对其进行聚光实验测试。当光线收集模块数量从 10 增加到 100 时, 聚光器的聚光效率从 83.6% 降低至 65.1%。在室外对光纤采光系统进行双轴跟踪测试, 光纤输出的照度和太阳输入的辐照度变化趋势基本一致, 说明光纤采光系统具有良好的聚光性能。

关键词 光学设计; 太阳能; 非成像光学; 照明系统; 聚光器; 导光板

中图分类号 TK51

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1422001

Design of Natural Optical Fiber Illumination System Based on Lightguide Plate Concentrator

Lü Jiaqi, Xu Xiping*, Zhang Ning, Yin Peng, Zhang Hengyi

*College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130012, China*

Abstract In this study, a natural optical fiber illumination system is proposed based on a lightguide plate concentrator to maximize the utilization of solar energy. Further, the energy in the invisible band is converted into electricity using the spectral module for driving the LED array in the compensation system. Thus, a stable lighting energy output can be obtained under various weather conditions. A simulation software is used for light tracing, and the obtained results denote that approximately 60% of the total luminous flux in case of an indoor area of 100 m² and lighting for 12 h can be supplied by solar energy. Subsequently, a lightguide plate concentrator system is developed and tested via concentration experiments for developing a natural optical fiber illumination system to further verify the feasibility and accuracy of the proposed system. When the number of light collection modules increase from 10 to 100, the optical efficiency of the concentrators decreases from 83.6% to 65.1%. The variation trend of the output illuminance of the optical fiber is consistent with the input irradiance of the solar during the biaxial tracking test for optical fiber illumination system at outdoor, indicating the good light gathering performance of the proposed system.

Key words optical design; solar energy; non-imaging optics; illumination system; concentrator; lightguide plate

OCIS codes 220.1770; 220.2945; 230.7390

1 引 言

可再生能源取之不尽用之不竭, 且对环境无污染, 因此在人类社会起着至关重要的作用。随着现代社会低碳理念和绿色照明理念的提出, 太阳能光纤采光系统作为一种新型的照明方式受到广泛关

注^[1], 关于照明系统的光学设计更是成为各国的研究热点。Sedki 等^[2]发明了一种室内照明系统, 该系统采用一个定日镜来收集太阳光, 太阳光经棱镜管进入房间。Song 等^[3]设计了一种含有菲涅耳透镜的光纤采光系统, 该系统利用双轴跟踪装置实现对自然光线的高精度追踪。Obianuju 等^[4]提出了

收稿日期: 2020-02-12; 修回日期: 2020-03-18; 录用日期: 2020-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(61605016)

* E-mail: xxp@cust.edu.cn

一种新型的具有高接收角的光纤采光系统,太阳光经两级反射式碟形聚光器会聚到目标位置处,再经光纤束进入到建筑内部。作为自然光线收集部分,太阳能聚光器的设计直接决定了自然光照明系统的性能^[5]。

依据聚光原理,太阳能聚光器可以分为反射式、透射式、混合式聚光器^[6]。槽式聚光器是迄今为止最成熟的太阳能聚光器^[7],虽然可以实现对太阳光高度角和方位角的高精度追踪,但是光学效率容易受积尘等外界因素影响^[8]。王云峰等^[9]设计了一种新型的基于多平面镜线性组合太阳能聚光器的聚光光伏系统,该系统采用 450 个子反射镜实现了 450 倍的几何聚光比,但是占地面积较大,无法用于工业生产。透射式聚光器主要以菲涅耳透镜^[10-11]为光学元件。Kim 等^[12]对比了采光系统中两种不同的太阳能聚光器的光学性能,评估了工作平面随时间和太阳高度变化的亮度值。祝子夜等^[13]利用聚碳酸酯注塑成型材料加工了一种圆柱面线聚焦菲涅耳聚光器,该聚光器成本低,但是跟踪精度低,注塑成型加工会带来一定的制造误差。在这两类聚光器中,反射式聚光器对外界风载极为敏感,透射式聚光器中的菲涅耳透镜对太阳能光谱敏感,同时其结构难以实现大规模阵列,因此不适用于自然光照明系统。基于混合式聚光方法(透射、反射及全内反射相结合的聚光方式)的聚光器被称作混合式太阳能聚光器,李桂强^[14]将折射材料与复合抛物面聚光器(CPC)内壁材料相结合,设计出了一种带有空气夹层的非跟踪型太阳能聚光器,其接收半角大于传统的镜面复合抛物面聚光器,同时光强均匀分布得到明显的改进。在混合式聚光器的下方,含有作为传输结构的不同形状导光板的聚光器被称为导光板型聚光器^[15]。Karp 等^[15]对导光板型聚光器进行了优化,太阳光经球面透镜阵列后被聚焦到光波导板上对应的焦点,最终传输到光波导板末端的光电池上。Bouchard 等^[16]将球面透镜阵列替换为柱面镜阵列,避免了太阳光沿俯仰方向的追踪,但是聚光效率低,因此需要进一步优化。Nithyanandam 等^[17]介绍了一种基于导光板的太阳能聚光器和接收器的设计方案,并对系统中的几何参数和操作参数进行了深入研究。因此,设计一种具有较高聚光比、易于制造且聚光效率较高的太阳能聚光器作为照明系统的光线收集模块,成为了目前亟待解决的问题。

本文设计了一种基于导光板型太阳能聚光器设计方法的室内照明系统,建立了太阳光从光线收集

模块到光线传输模块的数学模型。所设计的聚光器具有很高的设计自由度,能够满足太阳能聚光器不同程度的聚光需求。将聚光器直接与光纤相连,提高了太阳能利用率,减小了不必要的能量损失。在照明系统中,利用基于太阳光线不可见波段的聚光器收集能量并为照明补偿组发光二极管(LED)供电,既解决了太阳能收集时的散热问题,同时将能量再利用,为变化天气下的稳定照明能量输出提供了保障。

2 设计方法

该室内照明系统主要包括光线收集模块、光线传输模块、照明模块三部分,如图 1 所示。其中,光线收集模块采用导光板型太阳能聚光器来捕捉室外太阳光,然后太阳光经光纤传输模块中的光纤束高效传输,最后光线发散器均匀地将太阳光发散到室内需要光线的地方。为了将太阳光中的可见光与不可见光区分并利用,在光线收集模块中增加了分光片(PBS)。可见光经分光片后从耦合结构进入到导光板,经多次全内反射(TIR)后,再从导光板出口离开并进入到光纤;非可见光被分光片反射到侧面的光伏电池上,为导光板入口处的 LED 提供电能。

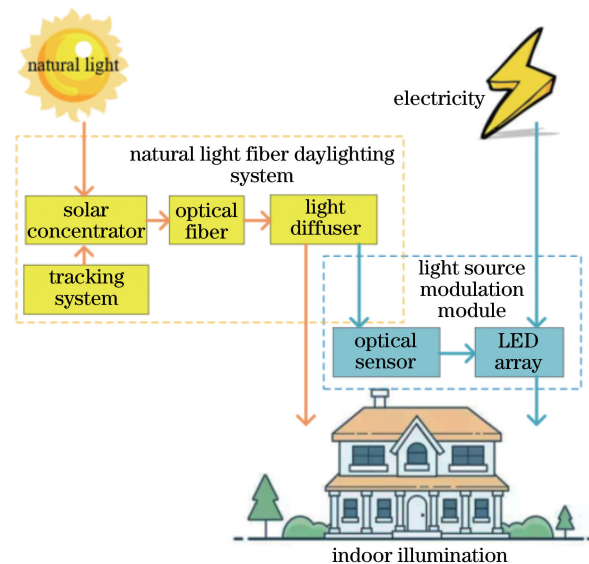


图 1 室内自然光照明系统结构图

Fig. 1 Structure of indoor natural light illumination system

2.1 聚光器设计

光线收集模块的设计参考本课题组之前的工作^[18]。图 2(a)、(b)为光线收集模块的修剪过程,其中,光线收集模块的宽度为 D 、高度为 h ,导光板的折射率为 n_1 ,光线收集模块下半部分被切除的球体的半径为 R 。值得注意的是,被切除的球体半径 R

会对光线收集模块的高度带来一定的影响,如图 2(c)所示,虚线区域代表光线收集模块被半径为 $1/2a$ 球体切除的部分,其中 a 为光线收集模块抛物面的抛物线系数。当被切除的球体半径大于 $1/2a$ 时,聚光器的高度将相应减小。假设光线收集模块外抛物的最低点坐标为 $(\frac{1}{2a} + \Delta z, \frac{1}{4a} + \Delta h)$,其中, Δz 和 Δh 分别为光线收集模块剪裁后沿着 z 轴和 y 轴移动的距离,将坐标代入抛物线方程 $y = az^2$ 中,得到

$$y = a \cdot \left(\frac{1}{2a} + \Delta z\right)^2. \quad (1)$$

切除双抛物面外边缘结构后,剩余结构的纵坐标 y_R 等于焦点的纵坐标加上光线收集模块沿着 y 轴移动的距离 Δh ,即

$$y_R = \Delta h + \frac{1}{4a}, \quad (2)$$

再根据三角形勾股定理,得

$$\Delta h^2 + \left(\frac{1}{2a} + \Delta z\right)^2 = R^2. \quad (3)$$

由(1)~(3)式,可以推导出 Δz 和 Δh 的表达式,即

$$\Delta z = \frac{2\sqrt{Ra - \frac{1}{4}} - 1}{2a}, \quad (4)$$

$$\Delta h = \frac{2Ra - 1}{2a}. \quad (5)$$

根据折射定律可知,同一条光线在导光板下表面上的入射角小于上表面的入射角,所以更容易发生光线泄漏。为了使光线的方向不发生改变,在导光板上表面增加半球耦合结构。

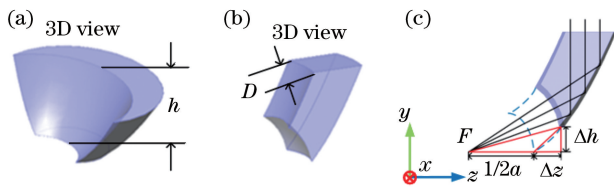


图 2 光线收集模块的剪裁过程。(a)双抛物面结构;(b)切除双抛物面结构外边缘并从下表面移除球体部分后的结构;(c)光线收集模块的高度变化

Fig. 2 Clipping process of light collection module. (a) Double paraboloid structure; (b) structure is obtained by removing outer edge of double paraboloid structure and spherical part from lower surface; (c) height change of light collection module

2.2 其他光学元件的设计

对于所设计的照明系统,采用 DiYPRO 有限公司生产的 PBS 来分离可见光与非可见光。PBS 是一种含有多层介质涂层的光谱选择性热反射镜,可以传输可见光并反射紫外光和近红外光,大大减小了太阳光聚焦在电池上的能量^[19],解决了光伏电池和光纤的散热问题。PBS 被倾斜放置在导光板和光线收集模块之间,将不可见光反射到侧面($y-z$ 平面)焦点处的光伏电池上,如图 3(a)所示。光伏电池选取 CuInSe_2 薄膜太阳能电池(CIS)来接收不可见光能量,CIS 具有高效、稳定及低成本加工的优势,功率转换效率高达 12.2%^[20],其中 CIS 薄膜的接收光谱为 280~1300 nm。可见光(400~700 nm)用于室内光纤照明,非可见光(280~400 nm,700~1300 nm)用于电力供给 LED 照明^[21]。

照明系统采用太阳光与 LED 光源相结合的混合式照明方法,利用光学环氧树脂,将含有 5 个 LED 光源的基片与导光板入口粘接,同时将光纤束直接耦合到导光板的出口区域,如图 3(b)、(c)所示。当太阳光提供的光通量发生变化时,打开 LED 光源(作为补偿),实现均匀的室内照明。由于 LED 的发射角约为 120° ,如果在导光板入口处直接耦合,边缘的入射光线会打破 TIR 条件,因此在导光板的入口处增加一种 CPC 结构来减小 LED 的发射角。LED 光源发射的光线路径如图 3(d)所示,CPC 会聚的光线在导光板中传输,没有任何光线逸出。

3 系统仿真

利用商业光学系统建模软件 LightTools 对导光板型太阳能聚光器进行仿真,光线收集模块阵列、半球耦合结构及导光板都采用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料。自然光照明系统由 30×30 个光线收集模块阵列、耦合结构、导光板、太阳追踪系统、LED 阵列、PBS 阵列、光伏电池及光纤束组成,如图 4 所示。

3.1 大范围系统的自然光

为了评价大型自然光照明系统,实验测试了在不同时间下导光板厚度对室内照明的影响,结果如图 5(a)所示。随着导光板厚度的增加,光通量略微有所增加。产生这一现象的原因是对于同一条光线而言,导光板的厚度增加,光线在导光板中传输时在上、下表面全反射的次数减少,而导光板上表面的耦合结构数量不变,因此光线从耦合结构漏出的概率减

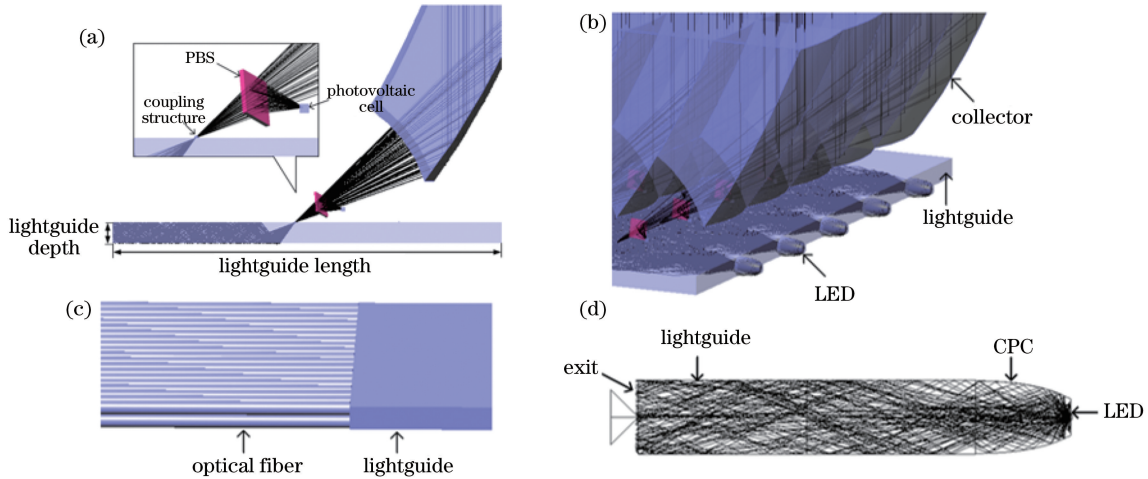


图 3 系统中其他光学元件。(a) PBS 传输可见光、反射不可见光到光伏电池上;(b) 5 个 LEDs 粘接于导光板入口处;
(c) 光纤束耦合进导光板出口处;(d) LED 发出的光线经 CPC 会聚

Fig. 3 Other optical elements in the system. (a) Visible light are transmitted and invisible light are reflected to photovoltaic cell by PBS; (b) five LEDs are bonded with lightguide plate entrance; (c) fiber beam are coupled into lightguide plate exit; (d) light emitted from LED converge through CPC

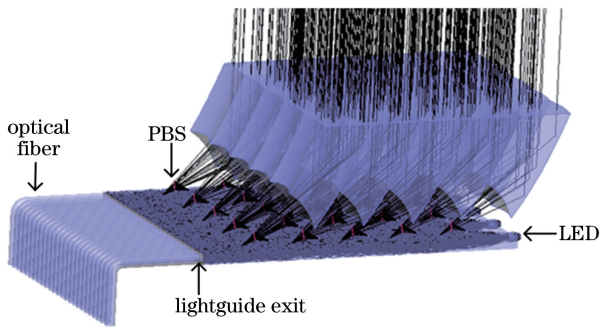


图 4 自然光照明系统的总体结构图

Fig. 4 Overall structure of natural light illumination system
小,更多的光线从导光板的端面出射,进而增加了光通量。但是导光板厚度增加的同时,导光板的端面面积也会增加,进而限制了单位面积上光线的辐照度。聚光器位于东经 127.0°,北纬 37.5°,在下午 13:00 时太阳光强度达到最大。太阳能聚光器的接收面积为 1.25 m²。照明系统中光通量^[19]的计算公式为

$$F = E \times S, \quad (6)$$

式中: E 为测得的太阳光照度; S 为聚光器接受太阳光的区域面积; F 为输入的光通量。表 1 列出了一天中不同时间的太阳光照度,其中 F_{sun} 为太阳能照明的光通量。

一般来说,商业建筑每平方米需要 500 lx 的照明。当在下午 13:00 光照最强时,假设聚光器导光板厚度为 2 mm,那么可以输出约 5×10^4 lm 的光通量,自然光照明系统可以照亮约 100 m² 的区域。在其他时刻,阳光提供的光通量不足 5×10^4 lm 时,打

开 LED 光源,作为照明补偿,不同时间太阳光和 LED 光源可提供的光通量及系统接收的总光通量如图 5(b) 所示。在一天中,太阳光和 LED 光源提供的总光通量的计算公式为

$$T = \int F_{\text{sun}} dt + \int F_{\text{LED}} dt, \quad (7)$$

式中: t 为时间; F_{LED} 为 LED 照明输入的光通量。由(7)式、表 1 及图 5(b)可得,太阳光在一天中可以提供的总光通量约为 3.59×10^5 lm,同时 LED 光源需要补偿的光通量为 2.41×10^5 lm。显然在系统工作的 12 h 中,太阳光供应了 3/5 以上的总光通量,大大节省了电能。

表 1 不同时刻的太阳光照度和计算的室内光通量

Table 1 Solar illuminance and calculated indoor luminous flux at different times

Time	$E / (10^4 \text{ lx})$	$F / (10^4 \text{ lm})$	$F_{\text{sun}} / (10^4 \text{ lm})$
6:00 AM	2.0	2.500	0.58
7:00 AM	4.5	5.625	1.28
8:00 AM	8.0	10.000	2.32
9:00 AM	11.0	13.750	3.14
10:00 AM	13.0	16.250	3.78
11:00 AM	14.0	17.500	4.01
12:00 PM	15.5	19.375	4.43
13:00 PM	17.5	21.875	5.00
14:00 PM	16.0	20.000	4.56
15:00 PM	11.5	14.375	3.39
16:00 PM	7.5	9.375	2.14
17:00 PM	3.5	4.375	0.99
18:00 PM	1.0	1.250	0.28

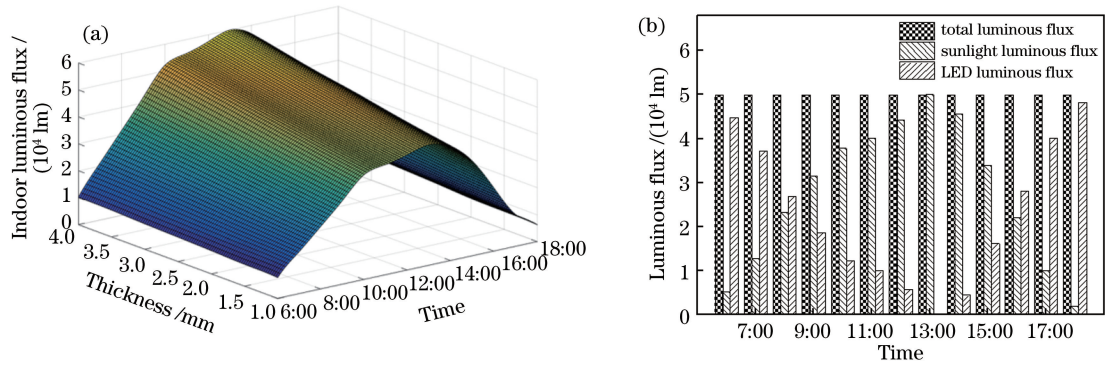


图 5 光通量变化。(a)不同时刻及导光板厚度对室内光通量的影响;(b)由太阳光和 LED 光源分别提供的光通量及接收的总光通量

Fig. 5 Changes of luminous flux. (a) Effect of different times and lightguide plate thickness on indoor luminous flux; (b) luminous flux provided by sunlight and LED light source and received total luminous flux

3.2 光线收集模块宽度和抛物线系数对光学聚光比的影响

聚光比是评价自然光照明系统性能的一个重要参数,分为几何聚光比 C_g 和光学聚光比 C_o [15]。它们的表达式分别为

$$C_g = \frac{S_1}{S_2} = \frac{l}{d}, \quad (8)$$

$$\eta = \frac{E_{in}}{E_{out}}, \quad (9)$$

$$C_o = C_g \times \eta = \frac{S_1}{S_2} \times \eta, \quad (10)$$

式中: S_1 为光线收集模块阵列上表面的接收面积; S_2 为导光板出口处的面积; η 为聚光器的光学效率; E_{input} 为太阳能向系统输入的能量; E_{output} 为导光板处接收到的能量; l 为导光板的长度; d 为导光板的厚度。

光线收集模块的宽度与抛物线系数对光学聚光比的影响如图 6 所示。随着光线收集模块宽度的增加,光学聚光比先增大后减小,如图 6(a)所示。宽度增加代表着 x 方向上相邻半球耦合结构之间的距离增加,减小了光线从耦合结构漏出的可能性,进而光学聚光比先增加;随着宽度逐渐增加,外抛物面的边缘光线进入导光板时在 $x-z$ 平面上的投影与 z 轴之间的夹角变大,光线在 x 方向上的分量增加,光线从耦合结构漏出的可能性增加,导致光学聚光比降低。当聚光器的宽度确定时,光学聚光比随着抛物线系数的增大而减小,如图 6(b)所示。抛物线系数越大,光线收集模块越细长,光线进入导光板后在 $x-y$ 平面上的投影与 y 轴之间的夹角越小,光在 y 方向上的分量增加,更容易漏光,导致光学聚光比降低。

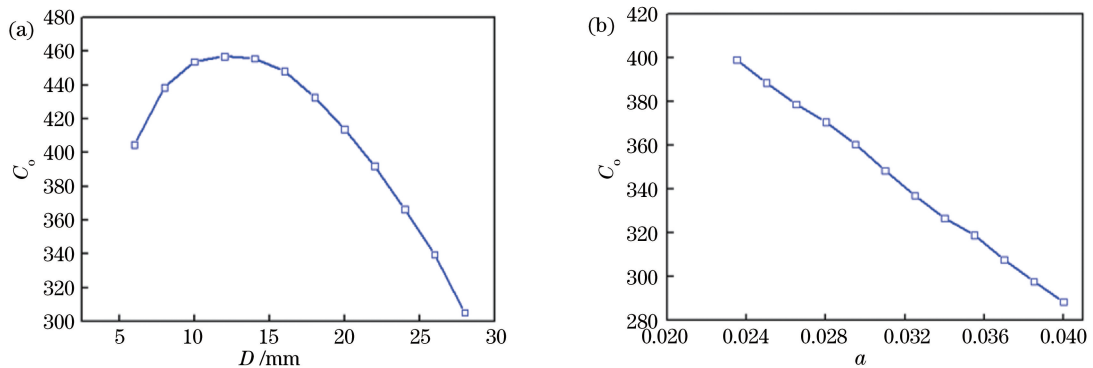


图 6 不同参数对光学聚光比的影响。(a)光线收集模块宽度;(b)抛物线系数

Fig. 6 Effect of different parameters on optical concentration ratio. (a) Light collection module width; (b) parabolic coefficient

将导光板的长度设置为 500 mm,厚度设置为 1 mm,不同光线收集模块宽度和抛物线系数下的光

学聚光比分布情况如图 7 所示。抛物线系数较小处等高线密集,此时宽度变化对光学聚光比影响较大;

抛物线系数较大处等高线稀疏,此时宽度变化对光学聚光比影响较小。当宽度较小时等高线陡峭,抛物线系数对光学聚光比影响较大;当宽度增大时等高线平缓,抛物线系数对光学聚光比影响较小。

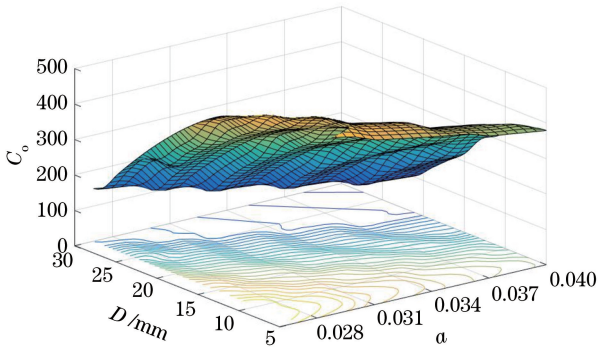


图 7 光线收集模块宽度和抛物线系数对光学聚光比的影响
Fig. 7 Effect of light collection module width and parabolic coefficient on optical concentration ratio

3.3 几何聚光比-接收角乘积

当太阳能聚光器的光学效率从最大值衰减到最大值的 90%时,聚光器此时的接收角被称为接收角 α 。对于自然光照系统,几何聚光比-接收角乘积 (CAP) 也是评价聚光器性能的一个重要参数。CAP 的计算公式为

$$C_{CAP} = \sqrt{C_g} \sin \alpha \quad (11)$$

在光学设计中,CAP 值高的聚光器其聚光性能往往更好^[22]。选取三种不同半径的耦合结构,测试不同光线收集模块高度对光学聚光比和 CAP 的影响,结果如图 8 所示。

仿真得到 CAP 的最大值为 0.266,最小值为 0.056,随着光线收集模块高度的增加或耦合结构半径的增大,光学聚光比与 CAP 值同时减小。当光线收集模块的高度增加时,从外抛物面反射的边缘光线与导光板上表面的夹角增大,光更容易从上表面

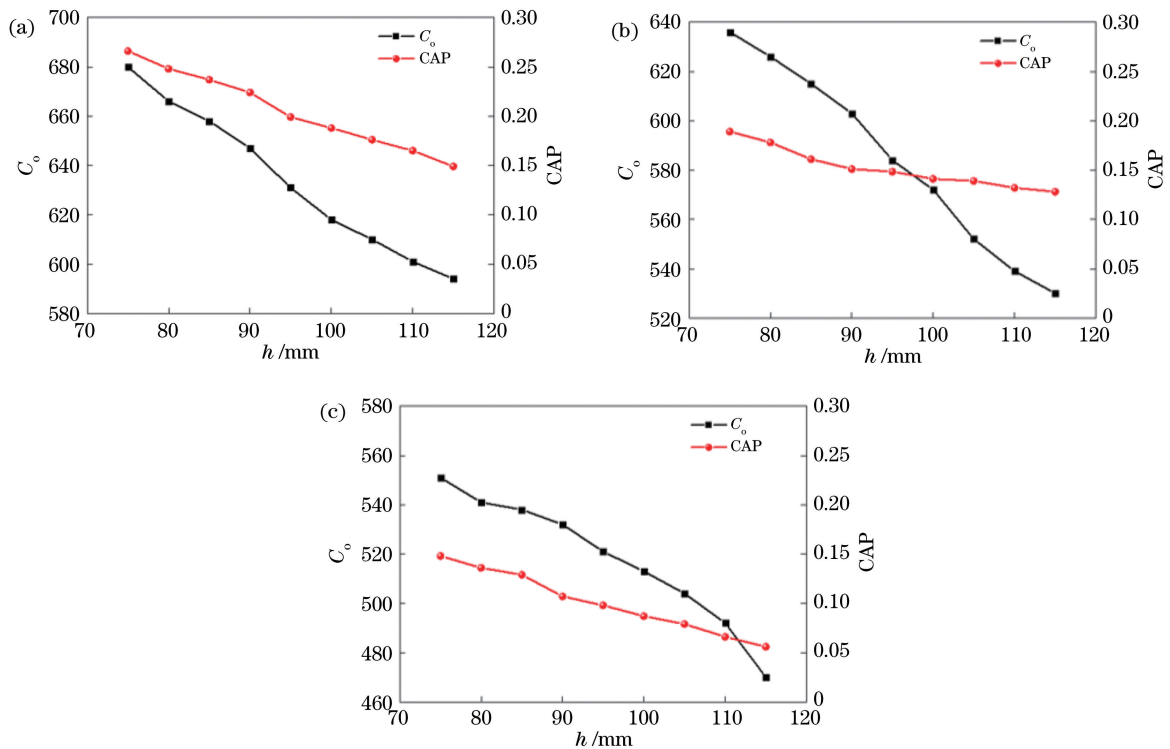


图 8 耦合结构半径不同时,光线收集模块高度对光学聚光比和 CAP 值的影响。(a) 0.1 mm;(b) 0.2 mm;(c) 0.5 mm
Fig. 8 Effect of height of light collection module on optical concentration ratio and CAP value when coupling structure radius are different. (a) 0.1 mm; (b) 0.2 mm; (c) 0.5 mm

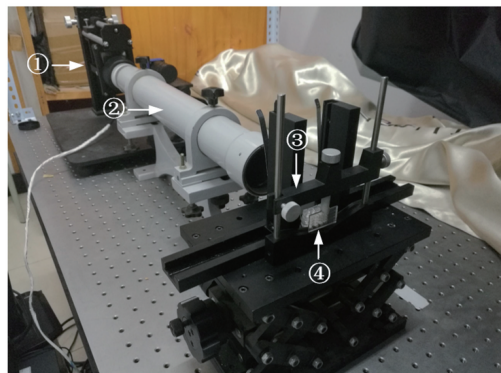
的耦合结构中漏出,使得聚光效率下降,进而影响光学聚光比和接收角。当耦合结构半径增大时,导光板上的耦合面积随半径的平方呈比例增大,导致更多的光从导光板的上表面漏出。在实际应用中,应尽量选取高度较低、耦合结构较小的聚光器,以提高光学聚光比和 CAP 值。此外,利用高宽比更小的聚

光器或者高反射率涂层,可进一步增大导光板型太阳能聚光器的接收角。

4 实验分析

搭建了一个用于自然光照的导光板型太阳能聚光器实验平台,如图 9 所示,实验平台主要由宽光

谱的 LED 光源、窄带滤光片、平行光管、光阑、待测样品及探测器组成。为节省制造成本,考虑到本设计中光线收集模块需求量大且形状单一等特点,选取 PMMA 材料,并通过高精度模具注塑成型的方式加工光线收集模块,利用五轴数控机床对导光板及上表面的半球耦合结构进行加工。LED 的光谱范围为 300~800 nm,通过调节 5 个滤光片可以产生不同波段的单色光。对平行光管进行调整,可使其产生发散角为 0.27° 的模拟太阳光线。



1: LED light source; 2: parallel light tube; 3: diaphragm; 4: sample

图 9 聚光器测试系统

Fig. 9 Test system of concentrator

将含有光线收集模块的导光板型聚光器置于距离平行光管出口处 15 mm 位置处,探测器贴近导光板端面出口处测量聚焦光斑能量,最后利用光功率计测量平行光管处的光斑能量 E_i 和导光板端面出口处的光斑能量 E_F 。则导光板型聚光器的聚光效率 η_0 的表达式为

$$\eta_0 = \frac{E_F}{E_i} \quad (12)$$

调节滤光片得到单色光,调节光线收集模块的数量,使几何聚光比为 100~1000,并分析单色光源的聚光效率,实验结果如图 10 所示。正方形实线表示不同光线收集模块数量下聚光器对应的几何聚光比,圆形实线表示不同光线收集模块数量下总体的聚光效率。

由图 10 可以看出,随着光线收集模块数量的增加,导光板型聚光器的聚光效率及 5 种单色光下的聚光效率均相应降低;当光线收集模块数量为 10 时,导光板型聚光器的聚光效率最大为 83.6%,当光线收集模块数量增加至 100 时,导光板型聚光器的聚光效率下降到 65.1%。容易看到,由于滤光片对光线能量的削弱,单色光照条件下的聚光效率急剧减小,但聚光效率随光线收集模块数量改变的变化

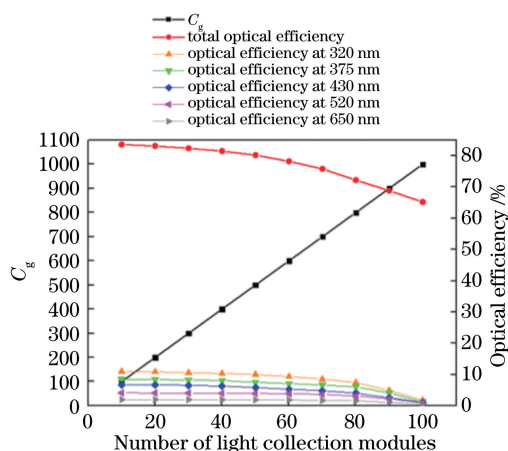


图 10 光线收集模块数量对几何聚光比和聚光效率的影响

Fig. 10 Effect of number of light collection modules on geometrical concentration ratio and optical efficiency

趋势大致相同,说明在较大几何聚光比条件下,由于光线收集模块阵列的位置误差、光线收集模块与导光板之间的对准误差、加工误差、材料对光线能量的吸收等因素,聚光效率降低。但是,在光线收集模块数量增加至 100 时,聚光效率依然高于 60%,说明所设计的太阳能光纤采光系统的效率较高。此外,在添加滤光片后,在小几何聚光比条件下,聚光效率随着波长增加而减小,这可能是由长波段光线能量易被材料吸收引起的。

为了使研究更具有实际意义,在室外对光纤采光系统进行双轴跟踪测试。将导光板型聚光器的输出光线耦合到 5 根光纤中,并转移到暗室中,以保护测试结果不受外界光线的影响,照度计距离光纤出口 0.5 m。在不同的天气条件下,光纤输出的照度和太阳输入的辐照度随当地时间的变化如图 11 所示,两者的变化趋势基本一致。在平静、无云的环境中测试 4 h,光纤输出照度和太阳辐照度在波动中上升,太阳的平均辐照度为 640 W/m²,光纤输出的平均照度约为 210 lx,如图 11(a)所示。在多云的环境中同样测试 4 h,光纤输出照度和太阳输入辐照度在波动变化,太阳的平均辐照度为 790 W/m²,光纤输出的平均照度为 320 lx,这意味着光纤采光系统具有良好的聚光性能。

5 结 论

设计一种基于导光板型太阳能聚光器的自然光室内照明系统,基于全反射和边缘光线原理建立了具有双抛物面结构的光线收集模块的数学模型。仿真结果表明,当室内面积为 100 m²,照明 12 h 时,太阳能可以供应约 60% 的总光通量,聚光比最大可以

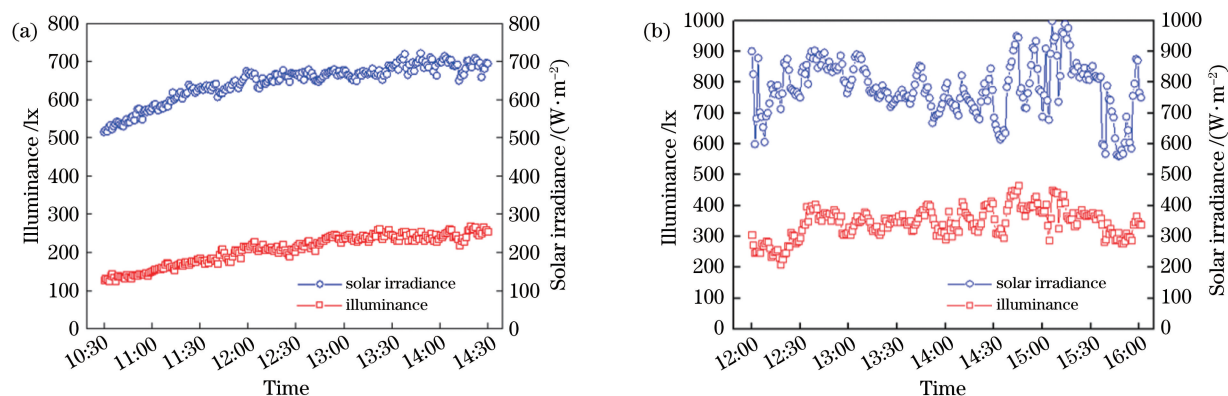


图 11 不同天气条件下, 光纤输出照度和太阳辐照度随时间的变化。(a) 平静天气; (b) 多云天气

Fig. 11 Fiber output illuminance and solar irradiance versus time in different weather conditions.

(a) Calm weather; (b) cloudy weather

达到 500。分析光线收集模块高度对光学聚光比和 CAP 的影响, 通过仿真得到 CAP 的最大值为 0.266, 最小值为 0.056。搭建了一套用于自然光照明系统的导光板型聚光器实验平台, 利用宽光谱 LED 光源、窄带滤光片及平行光管模拟太阳光。最后分析不同天气下光纤输出照度与太阳输入辐照度的关系, 在室外对光纤采光系统进行了双轴跟踪测试。由于实验条件等因素限制, 本研究存在一定的局限性, 在未来的研究中可以围绕以下几个方面展开, 例如给出关于系统散热的设计方案, 对系统的跟踪误差进行分析等。

参 考 文 献

- [1] He K Y, Chen Z Q, Zhong S, et al. A solar fiber daylighting system without tracking component [J]. *Solar Energy*, 2019, 194: 461-470.
- [2] Sedki L, Maaroufi M. Design of parabolic solar daylighting systems based on fiber optic wires: a new heat filtering device [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 152: 434-441.
- [3] Song J F, Luo G, Tong K, et al. A note on dispersion phenomenon in the fiber daylighting system with the Fresnel lens [J]. *Solar Energy*, 2018, 161: 6-8.
- [4] Obianuju O N, Chong K K. High acceptance angle optical fiber based daylighting system using two-stage reflective non-imaging dish concentrator [J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 498-504.
- [5] Song J F, Jin Z, Zhu Y, et al. Development of a fiber daylighting system based on the parallel mechanism and direct focus detection [J]. *Solar Energy*, 2015, 115: 484-493.
- [6] Chong K K, Lau S L, Yew T K, et al. Design and development in optics of concentrator photovoltaic system [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19: 598-612.
- [7] Bellos E, Tzivanidis C. Alternative designs of parabolic trough solar collectors [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 71: 81-117.
- [8] Yan S Y, Chang Z, Wang F, et al. Effect of dust accumulation on focal energy flux density distribution of trough solar concentrator and concentration optimization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0722002.
闫素英, 常征, 王峰, 等. 积尘对槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的影响及聚光优化 [J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0722002.
- [9] Wang Y F, Ji J, Li M, et al. Performance analysis and design of multi-plane mirrors linear combination solar concentrator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0422002.
王云峰, 季杰, 李明, 等. 多平面镜线性组合太阳能聚光器的设计和聚光特性 [J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0422002.
- [10] Perini S, Tonnellier X, King P, et al. Theoretical and experimental analysis of an innovative dual-axis tracking linear Fresnel lenses concentrated solar thermal collector [J]. *Solar Energy*, 2017, 153: 679-690.
- [11] Wu G, Zheng H F, Ma X L, et al. Experimental investigation of a multi-stage humidification-dehumidification desalination system heated directly by a cylindrical Fresnel lens solar concentrator [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 143: 241-251.
- [12] Kim Y, Jeong H J, Kim W, et al. A comparative performance analysis on daylighting for two different types of solar concentrators: Dish vs. Fresnel lens [J]. *Energy*, 2017, 137: 449-456.
- [13] Zhu Z Y, Tang Z F, Ma Y Q, et al. A kind of

- cylindrical line-focused Fresnel solar energy medium-temperature collector system [J]. *Solar Energy*, 2017, 274(2): 33-37.
- 祝子夜, 唐智锋, 马雨晴, 等. 一种圆柱面线聚焦菲涅尔式太阳能中温集热系统的研究 [J]. *太阳能*, 2017, 274(2): 33-37.
- [14] Li G Q. Optimization analysis and experimental research of stationary solar concentrator [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 83-94.
- 李桂强. 非跟踪型太阳能聚光器的优化分析和实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 83-94.
- [15] Karp J H, Tremblay E J, Ford J E. Planar micro-optic solar concentrator [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1122-1133.
- [16] Bouchard S, Thibault S. Planar waveguide concentrator used with a seasonal tracker [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(28): 6848-6854.
- [17] Nithyanandam K, Deshpande J, Pitchumani R. Coupled thermal and optical analysis of a planar waveguide concentrator-receiver [J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 1576-1589.
- [18] Yin P, Xu X P, Jiang Z G. Ray-leakage-free planar solar concentrator featuring achromatic hybrid collectors and innovative secondary optical elements [J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 678-689.
- [19] Vu N H, Shin S. Optical fiber daylighting system combined with LED lighting and CPV based on stepped thickness waveguide for indoor lighting [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2016, 20(4): 488-499.
- [20] Liu W, Mitzi D B, Yuan M, et al. 12% efficiency CuIn(Se, S)₂ photovoltaic device prepared using a hydrazine solution process [J]. *Chemistry of Materials*, 2010, 22(3): 1010-1014.
- [21] Chen H Y, Yu S M, Shin D W, et al. Solvothermal synthesis and characterization of chalcopyrite CuInSe₂ nanoparticles [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2010, 5(1): 217-223.
- [22] Wu H Y, Chu S C. Ray-leakage-free sawtooth-shaped planar lightguide solar concentrators [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20073-20089.