

# 光学学报

## 太阳能真空管作为吸收体的复合抛物聚光器的 无间隙漏光损失研究

陈飞<sup>1,2\*</sup>, 桂青华<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>昆明理工大学化学工程学院, 云南 昆明 650500;

<sup>2</sup>昆明理工大学化学工程学院太阳能工程研究所, 云南 昆明 650500

**摘要** 基于非成像光学边缘光线原理与几何光学反射定律, 针对圆形吸收体构建了无间隙损失复合抛物聚光器 (CPC) 面形结构的数学模型, 并通过程序计算获得了等长反射面的数值解。采用可见激光实验装置对无间隙损失 CPC 模型进行了验证, 结果表明, 数值计算的光线路径与激光实验光线路径吻合。此外, 单对等长反射面的无间隙损失 CPC 具有最大的单个等长反射面长度, 且恰好为吸收体的半径。当等长反射面对数从单对增加到 6 对时, 单个等长反射面长度从 23.50 mm 降低至 7.65 mm。在实际应用过程中, 等长反射面的对数不宜过多。

**关键词** 几何光学; 太阳能; 复合抛物聚光器; 无间隙损失; 数学模型; 接收半角

中图分类号 O435.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0208001

## Non-Gap Loss of Compound Parabolic Concentrator with Solar Vacuum Tube as Absorber

Chen Fei<sup>1,2\*</sup>, Gui Qinghua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;

<sup>2</sup>Institute of Solar Energy Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Kunming University of  
Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

**Abstract** Based on the principle of non-imaging optical edge light and the law of geometric optical reflection, the mathematical model of the surface structure of compound parabolic concentrator (CPC) without gap loss is constructed for circular absorber, and the numerical solution of the equal-length reflector is obtained by program calculation. The CPC model without gap loss is verified by a visible laser experimental device, and the results show that the light path calculated by numerical method is consistent with that of laser experiment. Moreover, the CPC without gap loss of a single pair of equal-length reflectors has the largest length of a single equal-length reflector, which is exactly the radius of the absorber. When the number of equal-length reflectors increases from single pair to 6 pairs, the length of a single equal-length reflector decreases from 23.50 mm to 7.65 mm. In the process of practical application, the number of pairs of equal-length reflectors should not be too much.

**Key words** geometric optics; solar energy; compound parabolic concentrator; non-gap loss; mathematic model; receive half angle

收稿日期: 2021-07-15; 修回日期: 2021-07-22; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(51866005)、云南省“万人计划”青年拔尖人才专项(YNWR-QNBJ-2019-173)、云南省科技计划项目重大科技专项(2019ZE002)。

通信作者: \*solarcf@163.com

# 1 引言

世界能源短缺问题日益严重,当前的能源供应和使用模式难以实现可持续发展<sup>[1]</sup>。有限的化石能源和与之相关的环境问题迫使人们寻找新的能源替代方案,其中可再生能源具有显著的环境友好特性进而备受关注。可再生能源主要有太阳能、水能、风能、生物质能、地热能和潮汐能等,其中太阳能已被广泛应用于家庭供热、工业干燥以及大规模发电等领域中<sup>[2]</sup>。

由于到达地面的太阳能辐射能流密度不高,多数情况下不超过  $1000 \text{ W/m}^2$ ,因此其难以满足工业中的用热需求<sup>[3]</sup>。采用聚光作用收集太阳能是一种直接有效地提高能流密度的方法,常见的非成像太阳能聚光器有复合抛物聚光器(compound parabolic concentrator, CPC)、腔体式聚光器、V 型槽聚光器等。CPC 具有不需要跟踪装置、系统静态运行、接收半角可调等优点,进而受到科研人员的青睐,并且在太阳能集热、采光和照明等系统中发挥着重要的作用。

Winston<sup>[4]</sup>提出了利用圆形吸收体 CPC 收集太阳辐射能的技术方案,描述了该聚光器的几何构造原理,并对 CPC 的光热转换性能进行了深入的探索研究,如研究了吸收体直径、选择性吸收涂层以及接收半角对集热性能的影响等<sup>[5]</sup>。为了验证 CPC 的性能,Rabl<sup>[6]</sup>提出了一种基于对流传热原理的太阳能集热器性能评价公式,并给出了相关 CPC 的辐射、对流、传导损失及集热效率等例子。

能量分布均匀性、光学效率等是评价和设计 CPC 的重要指标<sup>[7]</sup>。为了解决能量分布不均的问题,Li 等<sup>[8]</sup>对反射式 CPC 和透镜壁 CPC 的通量分布进行了初步研究,结果发现透镜壁 CPC 通量分布更均匀。Yan 等<sup>[9]</sup>采用优化布置各镜面单元的改进方法设计了一种新型非成像碟式聚光器,有效改善了平面接收器的能流均匀性。为了提升 CPC 的聚光性能,Gao 等<sup>[10]</sup>提出了一种高增益圆形真空管吸收体 CPC,研究发现所构建的 CPC 面形结构相对标准复合抛物聚光器(standard-CPC, S-CPC),其平均光学效率和接收半角实现了同步提升。

由于 S-CPC 面形的渐开线起点是与吸收体连在一起的,因此在实际应用中吸收体表面温度会持续升高,并且热量会通过热传导的方式从吸收体表面传递到 CPC 面形上,这一方面会导致吸收体表面能量的损失,另一方面会导致 CPC 面形受到热应力

作用产生变形甚至损坏。上述效应的出现将显著降低 CPC 面形的聚光效率,进而导致整个 CPC 系统性能的下降。为了避免反射器与吸收体接触,Rabl 等<sup>[11]</sup>提出了三种形式的 CPC 间隙方法,包括减小吸收体尺寸、截断吸收体两边反射面边缘和修改吸收体形成辐射腔。随后,Wu 等<sup>[12]</sup>对这三种间隙存在的形式进行了理论分析和间隙损失率的计算,进一步验证了文献[11]中方法的有效性。为了避免间隙造成的损失,McIntire<sup>[13]</sup>用 V 型和 W 型反射面代替渐开线,实现了吸收体吸收率的增强,使光学效率得到了提升。基于文献[13]中 V 型反射器的设计,Korres 等<sup>[14]</sup>对 V 型反射器的形状进行了优化,使其获得了更宽的入射角。Chen 等<sup>[15]</sup>针对太阳能集热器吸收体之间存在间距辐射损失的问题,构建了一种全玻璃真空管太阳能集热器,并通过数学模型证明了该集热器可提升热效率。Xia 等<sup>[16]</sup>提出了一种非对称型无间隙损耗的改进 CPC,相比 S-CPC 其增加了太阳能总吸收量,并且真空管吸收体表面的能量分布更均匀。为了提高聚光系统性能,Yin 等<sup>[17]</sup>设计了扇形无漏光太阳能聚光器,提出的锯齿形无漏光波导板能够有效提高系统的几何聚光比和聚光效率。

已报道的关于太阳能 CPC 间隙损失和间隙结构优化的研究工作促进了无间隙损失太阳能 CPC 的持续发展,且为太阳能 CPC 的工程应用提供了技术支持,故继续深入开展关于无间隙损失太阳能 CPC 的研究有益于实现其更广泛的工业应用<sup>[18]</sup>。本文构建了针对太阳能真空管吸收体的无间隙损失 CPC,采用等长反射面实现了本应从真空夹层间隙中穿越逃逸的光线的二次反射,使反射光线全部到达吸收体。此外,具有对称设计结构的等长反射面更有益于降低制造成本和提高应用性,为实际安装及维护提供了便利。

## 2 无间隙损失复合抛物聚光器模型

### 2.1 标准复合抛物聚光器模型

圆形吸收体 S-CPC 的面形结构<sup>[19]</sup>如图 1(a)所示,由曲线 AB 和 BC 组成。边缘光线  $S_0B$  与 y 轴的夹角为接收半角  $\theta_a$ ,曲线 AB 的参数方程为

$$\begin{cases} x_{AB}(\theta) = r \sin \theta - r \theta \cos \theta \\ y_{AB}(\theta) = -r \theta \sin \theta - r \cos \theta \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\theta$  表示半径 OM 与 y 轴负半轴之间的夹角,且  $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \theta_a$ ;  $r$  为吸收体半径。曲线 BC 的参数方

程为

$$\begin{cases} x_{BC}(\theta) = r \sin \theta - u(\theta) \cos \theta \\ y_{BC}(\theta) = -r \cos \theta - u(\theta) \sin \theta \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $\frac{\pi}{2} + \theta_a < \theta \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a$ ;  $u(\theta)$  表示弧长, 其表达式为

$$u(\theta) = \frac{r[\theta + \theta_a + 0.5\pi - \cos(\theta - \theta_a)]}{1 + \sin(\theta - \theta_a)}. \quad (3)$$

由于图 1(a) 中的圆形吸收体在集热时, 表面温度较高, 容易产生较多的对流热损失, 故通常在其外

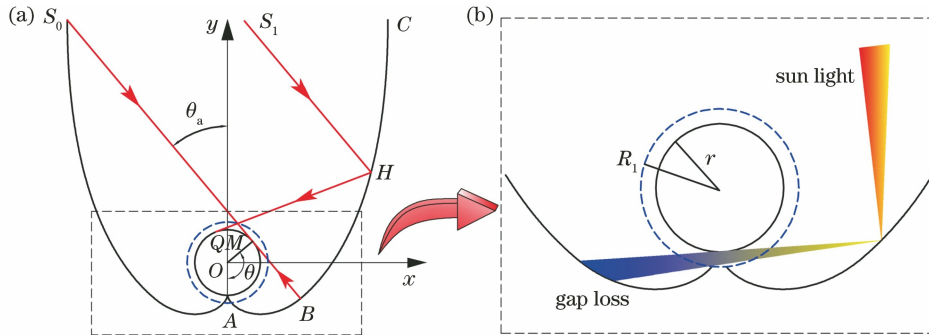


图 1 S-CPC 的模型图与间隙损失。(a) 物理模型截面图; (b) S-CPC 的间隙损失

Fig. 1 Model diagram and gap loss of S-CPC. (a) Cross-sectional view of physical model; (b) gap loss of S-CPC

## 2.2 无间隙损失复合抛物聚光器的构建

### 2.2.1 等长反射面的构建

真空管吸收体 CPC 中无间隙损失多段等长反射平面的构建如图 2 所示。要实现 CPC 的无间隙损失, 就必须满足真空管吸收体真空夹层中的太阳光线被反射后依然能够被圆形吸收体表面捕获。

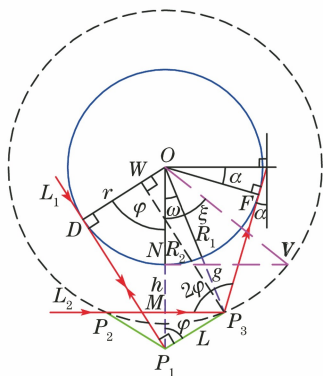


图 2 等长反射面的构建

Fig. 2 Construction of equal-length reflector

基于非成像光学边缘光线原理, 图 2 中边缘光线  $L_1$  与圆形吸收体相切于  $D$  点, 沿着  $DP_1$  到达反射面  $P_1P_3$  的边缘  $P_1$  点处, 并在  $P_1$  点处沿着  $P_1D$  方向原路返回, 这样才能实现无光线逃逸。由几何光学反射定律可得

部套装同轴圆形透明玻璃管, 且圆形吸收体与同轴玻璃管之间为真空状态, 相应的典型结构为太阳能全玻璃真空管, 如图 1(b) 所示, 其中  $R_1$  为真空玻璃管外管外半径。

通常真空管自身的真空夹层内部无聚光器, 因为安装 CPC 将使真空管的生产成本显著增加。然而, 被图 1(b) 中 CPC 面形反射后的部分光线会从真空夹层中逃逸, 这会降低 CPC 系统的光学效率。因此, 需要对 CPC 反射面结构进行优化设计, 使得真空夹层的存在不会导致间隙损失。

$$\varphi = \arccos \frac{r}{R_2}, \quad (4)$$

式中:  $R_2$  为  $OP_1$  的长度。

经过边缘点  $P_2$  的边缘光线  $L_2$  沿着水平方向照射到反射面  $P_1P_3$  的边缘  $P_3$  点处, 在  $P_3$  点反射后需与圆形吸收体相切于  $F$  点, 这样才能满足边缘光线要求。图 2 中反射面  $P_1P_3$  的法线也是入射光线  $L_2$  与反射光线  $P_3F$  形成的平面角的角平分线, 因此有

$$\alpha = 2\varphi - 0.5\pi. \quad (5)$$

反射面长度一致有益于 CPC 的加工制造、装箱运输、安装和破损更换等, 此时图 2 中的  $\omega$  和  $\xi$  需满足

$$\xi = n\omega, \quad (6)$$

式中:  $n$  为所需等长反射面的对数, 是一个正整数, 对于只有单对等长反射面的情况,  $n$  的值为 1。  $\omega$  的计算公式为

$$\omega = \arctan \left| \frac{x_{P_3}}{y_{P_3}} \right|. \quad (7)$$

式中:  $x_{P_3}$  和  $y_{P_3}$  分别为  $P_3$  点的横纵轴坐标值。

$\xi$  的计算公式为

$$\xi = \arccos \frac{r}{R_1}. \quad (8)$$

### 2.2.2 反射曲面的构建

在底部采用等长反射面的无间隙损失真空管吸

收体 CPC 中,  $P_4C'$  段曲线的构建如图 3 所示。文献[16]中已用微分几何的方法获得了采用非等长反射面(对应图 3 中底部反射平面的长度不相等情况)的无间隙损失 CPC 曲线段的一般方程。

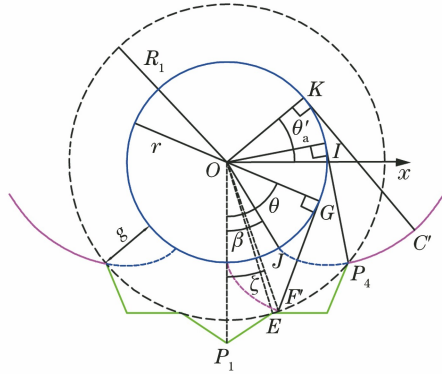


图 3 反射曲面的构建

Fig. 3 Construction of reflective surface

在底部采用等长反射面后,图 3 中  $P_4C'$  段的曲线方程为

$$\begin{cases} x_{P_4C'}(\theta) = r[\sin(\theta + \beta) - \theta \cos(\theta + \beta)] \\ y_{P_4C'}(\theta) = -r[\theta \sin(\theta + \beta) + \cos(\theta + \beta)] \end{cases}, \quad (9)$$

式中:  $\sqrt{\frac{R_1^2 - r^2}{r^2}} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \theta_a - \beta$ ;  $\beta$  的计算公式为

$$\beta = \xi - \zeta, \quad (10)$$

此处  $\zeta$  的值为

$$\zeta = \arctan \left| \frac{x_{F'}}{y_{F'}} \right|, \quad (11)$$

式中:  $x_{F'}$  和  $y_{F'}$  分别为  $F'$  点的横纵轴坐标值。 $F'$  点为图 3 中 S-CPC 与半径为  $R_1$  圆的交点,其坐标可由该圆的方程与 S-CPC 方程联立解得。

$C'D$  段曲线结构如图 4 所示,在底部采用等长反射面后,  $C'D$  曲线的参数方程为

$$\begin{cases} x_{C'D}(\theta) = r \sin(\theta + \beta) - \kappa(\theta) \cos(\theta + \beta) \\ y_{C'D}(\theta) = -r \cos(\theta + \beta) - \kappa(\theta) \sin(\theta + \beta) \end{cases}, \quad (12)$$

式中:  $\frac{\pi}{2} + \theta_a - \beta < \theta \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a - \beta$ ;  $\kappa(\theta)$  的计算公式为

$$\kappa(\theta) = \frac{r \left[ \theta + \frac{\pi}{2} + \theta_a - \beta - \cos(\theta - \theta_a + \beta) \right]}{1 + \sin(\theta - \theta_a + \beta)}, \quad (13)$$

(13)式满足从图 4 中光口  $S_0D$  任意位置  $S_1$  且以接收半角入射的太阳光线照射到  $C'D$  曲线面形上动

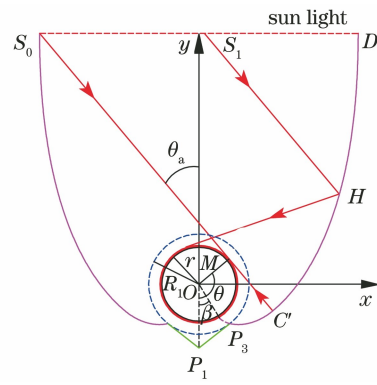


图 4 无间隙损失 CPC 物理模型

Fig. 4 Physical model of CPC without gap loss

点  $H$  处,入射光线被反射后与圆形吸收体相切。

### 3 无间隙损失复合抛物聚光器的程序设计

在设计真空管吸收体无间隙损失 CPC 时,等长反射面的结构由真空管吸收体的半径和真空夹层的厚度决定,反射曲面的结构由接收半角确定。然而,在设计等长反射面结构时,当且仅当只有单对等长反射面时,(6)式才有确定的理论解。当有多对等长反射面时,理论上难以获得确定的反射面长度,故需采用程序求解反射面长度。真空管吸收体无间隙损失 CPC 程序设计流程如图 5 所示。

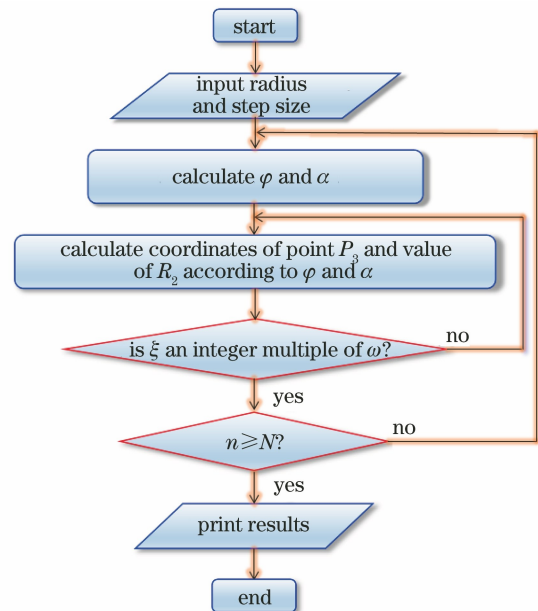


图 5 程序计算流程图

Fig. 5 Calculation flow chart of program

当图 5 中的程序采用 VC/C++ 数值计算时,首先输入圆形吸收体半径  $r$  与计算步长,确定(4)式中逐渐增加的半径  $R_2$  和步长,从而获得  $\varphi$  的大小。

然后,计算出  $\alpha$  的数值。通过  $\varphi$  和  $\alpha$  可确定图 2 中  $P_3$  点的唯一位置坐标,进而获得  $R_2$  的值。当  $\xi$  不等于  $\omega$  的整数倍时,继续增加半径  $R_2$  的值,以重新计算  $P_3$  点坐标。当  $\xi$  为  $\omega$  的整数倍时(误差不超过  $10^{-6}$ ),此时程序记忆并存储过程参数,当达到最大等长反射面对数  $N$  时,程序停止运行。

## 4 实验验证

### 4.1 模型制造与激光实验

在如图 4 所示的常用全玻璃太阳能真空管集热器(内管外半径  $r$  为 23.50 mm,外管外半径  $R_1$  为 29.00 mm)中耦合单对等长反射面的无间隙损失 CPC(曲面旋转角  $\beta$  为  $31^\circ$ ,接收半角  $\theta_a$  为  $40^\circ$ )。无间隙损失 CPC 模型的 3D 打印如图 6 所示。

构建了激光验证实验平台对所构建的无间隙损失 CPC 面形结构的聚光特性进行了验证。构建的激光验证实验平台原理图如图 7(a)所示,验证实验平台中采用平行激光模拟太阳光线,实验平台主要由无间隙损失 CPC 模型、激光发射器(MT168-12W)、升降平台、角度仪、刻度尺和气泡水平仪等构

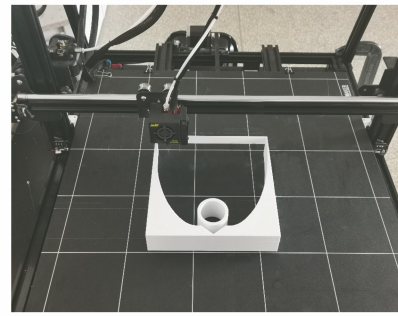
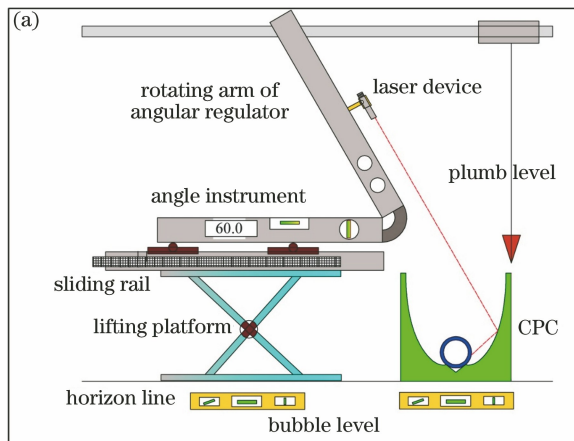


图 6 无间隙损失 CPC 模型 3D 打印

Fig. 6 3D printing of CPC model without gap loss

成。气泡水平仪用于标定集成平台的水平基准。可移动的单轴滑轨模块用于保证无间隙损失 CPC 模型、激光发射器和角度仪处于同一条铅垂线上,可有效减少无效方向的激光分量。将激光发射器固定在角度仪的旋转臂上,以确保激光发射器与旋转臂保持水平。调整升降平台的位置和高度,使得单色激光束按照指定位置和角度发射,并准确照射在 CPC 反射面或吸收体上。模型和吸收体表面覆有柔性反射膜和刻度尺,便于激光到达反射面和吸收体位置的记录。激光验证实验平台的实物图如图 7(b)所示。

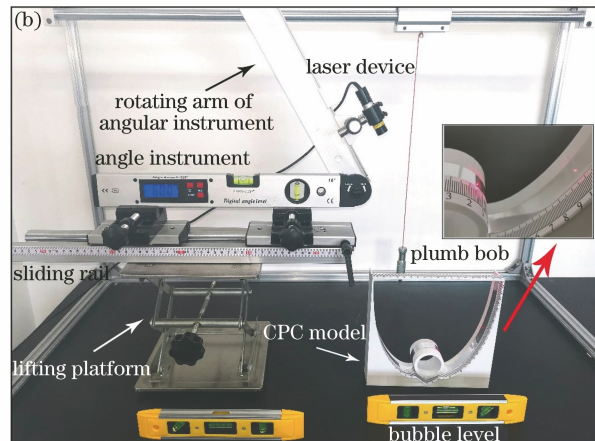


图 7 激光验证实验平台。(a) 实验平台原理图;(b) 实验平台实物图

Fig. 7 Laser verification experimental platform. (a) Schematic diagram of experimental platform;  
(b) physical picture of experimental platform

### 4.2 激光验证实验结果

为了验证无间隙损失 CPC 的聚光特性,在入射角为连续整数变化且不超过接收半角的条件下,在固定光口位置对 41 个人射角进行激光验证。入射激光到达吸收体表面位置的实验值、计算值以及误差值如图 8 所示。由于激光发射器发射出的光线在柔性反射膜上呈现的光斑直径约为 2.0 mm,因此记录值取光斑圆心位置。实验结果显示,激光到达

吸收体上位置的计算值与实验值的最大绝对误差为 2.7 mm,平均绝对误差为 0.5 mm。从图 8 中可以看出,入射角在接收半角内所有的入射光线经反射后,最终都落在了圆形吸收体上,这是因为吸收体的周长为 147.7 mm。图 8 中得到的结论与理论设计的无间隙损失 CPC 对入射光线应有的会聚特性是一致的,即没有光线从间隙中逃逸。

让激光发射器分别以  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$  的入射角

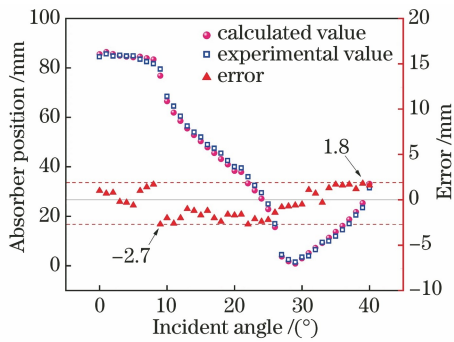
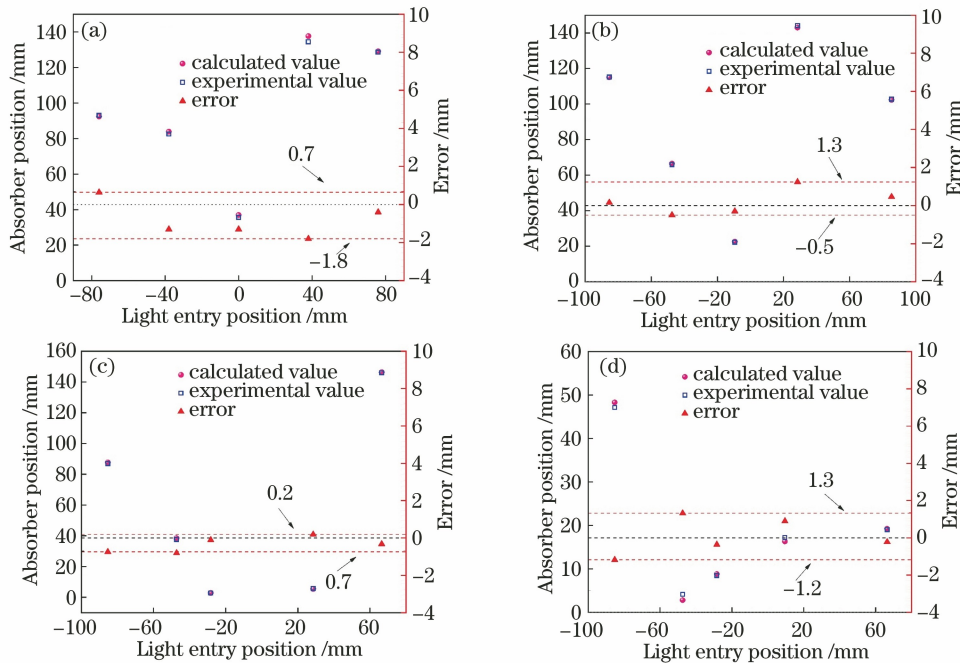


图 8 不同入射角的误差分析图

Fig. 8 Error analysis diagram of different incident angles

图 9 不同入射位置的误差分析图。(a)入射角为  $0^\circ$ ; (b)入射角为  $10^\circ$ ; (c)入射角为  $20^\circ$ ; (d)入射角为  $30^\circ$ Fig. 9 Error analysis diagram of different incident positions. (a) Incident angle of  $0^\circ$ ; (b) incident angle of  $10^\circ$ ; (c) incident angle of  $20^\circ$ ; (d) incident angle of  $30^\circ$ 

激光到达吸收体上位置的计算值与实验值的误差来源:1)激光发射器发射出的激光束具有一定的发散角,光程的增加引起激光的发散,到达圆形吸收体表面的光斑直径会增加,这会显著降低数据读取的精准性;2)在无间隙损失 CPC 面形 3D 打印时存在一定的制造误差;3)柔性高亮反射膜的厚度约为 0.1 mm,增加了数据读取误差。虽然上述误差一般具有累计效应,往往难以相互抵消,但是从采光口发射的激光束到达圆形吸收体表面位置的计算值与实验值的误差依然在合理区间内,这表明了所构建的集成激光实验装置的可靠性。

再次从无间隙损失 CPC 不同光口位置处进行入射且每组实验重复 5 次,以研究不同入射位置下 CPC 对光线的反射与吸收情况。该组入射激光到达吸收体表面位置的实验值、计算值以及误差值如图 9 所示。实验结果显示,激光到达吸收体上位置的计算值与实验值的最大绝对误差为 1.8 mm,平均绝对误差为 0.4 mm,最大不确定度<sup>[20-21]</sup>为 0.6 mm。图 8 和图 9 表明在所构建的无间隙损失 CPC 面形中,理论计算的光线路径与实际的光线路径相吻合。

## 5 结果分析与讨论

### 5.1 等长反射面结构

基于内管外半径  $r$  为 23.50 mm 的全玻璃太阳能真空管集热器的无间隙损失 CPC 等长反射面结构的理论计算结果如图 10 所示。当只有单对等长反射面时, $\omega$  与  $\xi$  相等,此时图 2 中  $W$  点将与圆心  $O$  点重合,四边形  $P_1P_3WD$  为矩形,故反射面的长度恰好与全玻璃太阳能真空管集热器内管的外半径相等,这与图 10(a)所示的程序计算结果吻合。在图 10 中还可以发现,当采用单对等长反射面时,单个等长反射面的长度最长。

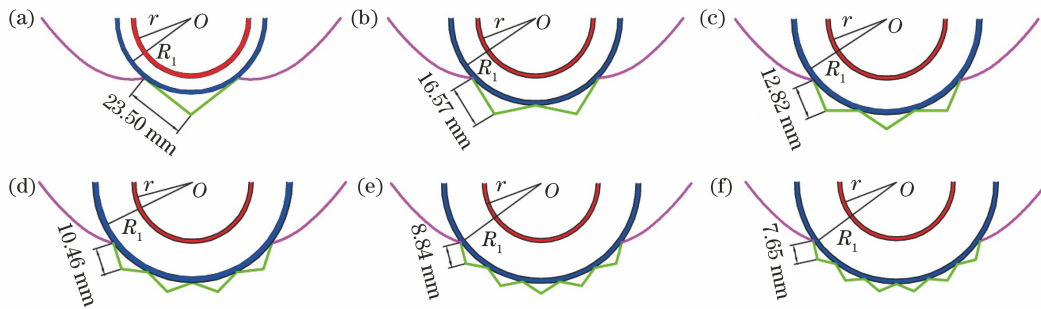


图 10 等长反射面结构。(a) 单对反射面；(b) 两对反射面；(c) 三对反射面；(d) 四对反射面；(e) 五对反射面；(f) 六对反射面  
Fig. 10 Structure of equal-length reflector. (a) Single pair of reflectors; (b) two pairs of reflectors; (c) three pairs of reflectors; (d) four pairs of reflectors; (e) five pairs of reflectors; (f) six pairs of reflectors

等长反射面对数与单个等长反射面长度的关系如图 11 所示。可以看出,随着等长反射面对数的增加,单个等长反射面长度逐渐减小。还可以发现,等长反射面的对数在未达到 7 以前,单个等长反射面长度的值减小较快,这一点也可从图 10 中发现;当等长反射面对数从单对增加到 6 对时,单个等长反射面长度从 23.50 mm 降低至 7.65 mm。随着等长反射面对数持续增加,单个等长反射面长度减小幅度趋于缓慢,当等长反射面对数达到 50 对时,单个等长反射面长度也只是下降到了 1.11 mm。

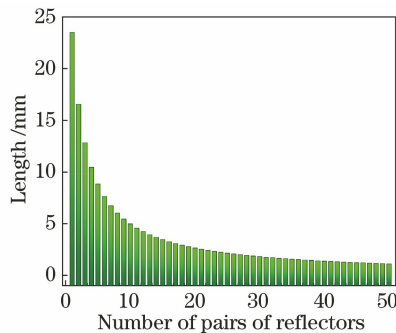


图 11 等长反射面的单面长度

Fig. 11 Single side length of equal-length reflector

然而,一方面,反射面对数过多、等长反射面长度过短会增大等长反射面实际生产时的相对制造误差,不益于无间隙损失 CPC 的实际应用。另一方面,当多而短的等长反射面连接在一起时,等长反射面容易形成光栅效应,此时光的波动性将占据主导作用,进而等长反射面不能将到达的太阳光线反射至圆形吸收体表面。因此,在实际应用中,等长反射面对数不宜过多。

## 5.2 吸收体与间隙尺寸

基于太阳能真空管的无间隙损失 CPC 吸收体半径与间隙尺寸之间的关系如图 12 所示。可以看出,随着等长反射面对数的增多,半径  $R_1$ 、 $R_2$  与  $r$  之间的间隙  $g$ 、 $h$  都增加,且  $g$ 、 $h$  增加的趋势越来越

缓慢。对于  $r$  和  $R_1$  分别为 23.50 mm 和 29.00 mm 的全玻璃太阳能真空管,当等长反射面为单对时, $R_1$ 、 $R_2$ 、 $g$  和  $h$  的值分别为 29.89 mm、38.02 mm、6.39 mm 和 14.52 mm。因此,常规的全玻璃太阳能真空管仅需利用单对等长反射面设计即可实现无间隙损失。

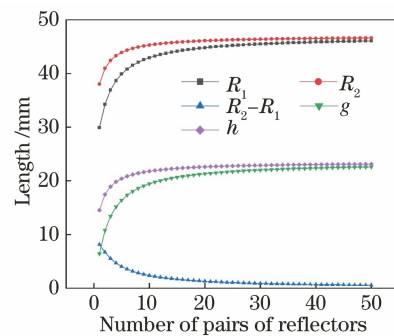


图 12 吸收体半径与间隙尺寸间的关系

Fig. 12 Relationship between absorber radius and gap size

从图 12 中还可以发现,随着等长反射面对数的增多, $R_2$  与  $R_1$  的差值越来越小, $R_1$  与  $R_2$  的值逼近于同一值(47.00 mm),其值为  $r$  的两倍。随着  $R_2$  与  $R_1$  差值的减小,单个等长反射面长度也在减小,这与图 11 所示的现象是一致的。

## 5.3 角度之间的关系

等长反射面对应的圆心角  $\omega$  与  $\xi$  以及两者之间的比值和角度  $\beta$  的变化规律如图 13 所示。由(6)式可知,在单对等长反射面情况下, $\omega$  和  $\xi$  是相等的。随着等长反射面对数的增加, $R_1$  的值也在增加,故从(8)式可知图 13 中  $\xi$  的值也在增大。从图 13 中还可以看出, $\xi$  值的增加幅度逐渐减小,这是反三角余弦函数的性质决定的。图 13 中  $\beta$  随等长反射面对数的增加,呈现先增大后逐渐减小的趋势,这是因为  $\xi$  值最快增长速率发生在单对等长反射面与双对等长反射面之间,此时  $\zeta$  值的净增量小于  $\xi$ ,此后随着  $R_1$  值的增加, $\zeta$  值的净增量比  $\xi$  大。

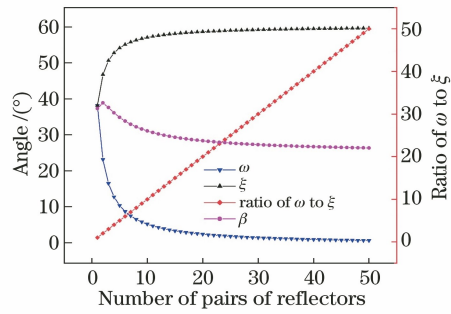


图 13 不同角度间的关系

Fig. 13 Relationship between different angles

随着等长反射面对数的增加,  $\xi$  值的增加幅度逐渐减小。此外, 等长反射面对数是线性增加的,  $\xi$

值的增加倍率不及等长反射面对数的增加倍率, 故随着等长反射面对数的增加,  $\omega$  逐渐减小, 并趋近于零。随着等长反射面对数的不断增多,  $\xi$  和  $\zeta$  值的净增量都趋于零, 故作为  $\xi$  与  $\zeta$  差值的  $\beta$  也趋近于一个定值。当(6)式中  $n$  的值为无穷大时,  $\beta$  的值为  $20.76^\circ$ , 这与图 13 中所呈现的趋势是吻合的。

#### 5.4 无间隙损失复合抛物聚光器的可视化聚光过程

为了能够直观地显示无间隙损失 CPC 中等长反射面对到达太阳光线的会聚特性, 采用蒙特卡罗光线追迹法<sup>[22]</sup>对入射的太阳光线进行跟踪计算, 入射光线与聚光面和吸收体间所发生的可视化聚光过程如图 14 所示。

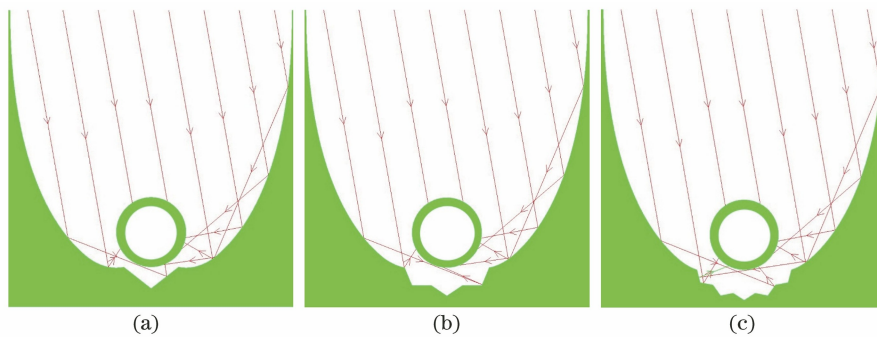


图 14 无间隙损失 CPC 等长反射面的聚光特性。(a)单对反射面;(b)三对反射面;(c)五对反射面

Fig. 14 Concentrating characteristics of equal-length reflector of CPC without gap loss. (a) Single pair of reflectors; (b) three pairs of reflectors; (c) five pairs of reflectors

从图 14 中可以看出, 从 CPC 采光口直接或间接到达等长反射面的太阳光线被反射后, 都到达了圆形吸收体的表面。此外, 图 14 中还显示, 到达等长反射面的太阳光线只需一次反射就能够直接到达吸收体, 这有益于提升 CPC 系统的采光性能。

接收半角为  $40^\circ$ 、共有 6 对等长反射面的无间隙损失圆形吸收体 CPC 可视化的光学性能如图 15 所示。可以看出, 当入射光角度为  $15^\circ$  时, 入射光线在

经过曲面反射面或等长平面反射面反射后都会会聚到圆形吸收体上。当入射光线角度为接收半角  $40^\circ$  时, 入射光线经曲面反射面或等长平面反射面反射后会与吸收体相切。当入射光角度为  $50^\circ$  时, 入射光线在被曲面反射面或等长平面反射面反射后会从光口逃逸。

所构建的无间隙损失圆形吸收体 CPC 的聚光特性表明, 在没有超过接收半角时, 所有入射光最终

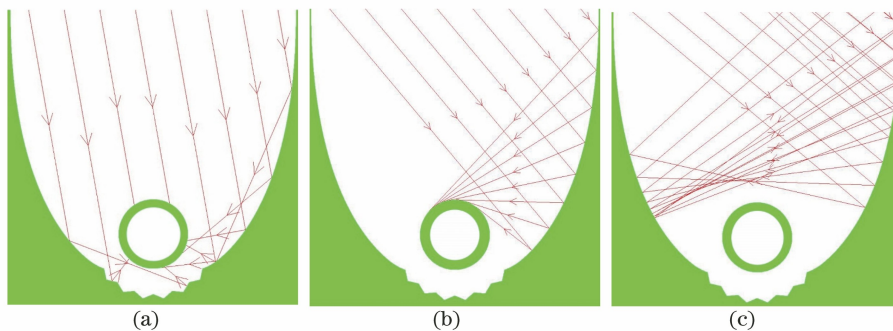
图 15 无间隙损失 CPC 可视化光学性能。(a)入射角为  $15^\circ$ ;(b)入射角为  $40^\circ$ ;(c)入射角为  $50^\circ$ 

Fig. 15 Visual optical performance of CPC without gap loss. (a) Incident angle of  $15^\circ$ ; (b) incident angle of  $40^\circ$ ; (c) incident angle of  $50^\circ$



都能够达到吸收体,超过接收半角以后入射光则会从采光口处逃离聚光器,这说明所设计的无间隙损失 CPC 与 CPC 的光学特性是一致的,表明了所构建的无间隙损失 CPC 结构的正确性。

## 6 结 论

针对圆形吸收体,构建了面体(聚光面和吸收体)分离无间隙漏光损失的太阳能 CPC,其适用于太阳能真空管集热器。所构建的无间隙损失太阳能 CPC 数学模型及数值计算方法的验证结果表明,等长反射面能够让到达其表面的太阳光线经反射后被吸收体捕获。当等长反射面对数从单对增加到 6 对时,单个等长反射面的长度从 23.50 mm 降低至 7.65 mm。由于光具有波粒二象性,故在实际应用中,等长反射面对数不宜过多。采用对称等长反射面可有效降低无间隙漏光损失 CPC 的制造成本,并便于安装与维护。

### 参 考 文 献

- [1] Abbott D. Hydrogen without tears: addressing the global energy crisis via a solar to hydrogen pathway [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(12): 1931-1934.
- [2] Sharma A. A comprehensive study of solar power in India and world [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(4): 1767-1776.
- [3] Kabir E, Kumar P, Kumar S, et al. Solar energy: potential and future prospects [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 894-900.
- [4] Winston R. Principles of solar concentrators of a novel design[J]. *Solar Energy*, 1974, 16(2): 89-95.
- [5] Winston R. Thermodynamically efficient solar concentrators[J]. *Journal of Photonics for Energy*, 2012, 2(1): 025501.
- [6] Rabl A. Optical and thermal properties of compound parabolic concentrators[J]. *Solar Energy*, 1976, 18(6): 497-511.
- [7] Lee C J, Lin J F. High-efficiency concentrated optical module[J]. *Energy*, 2012, 44(1): 593-603.
- [8] Li G Q, Pei G, Su Y H, et al. Experiment and simulation study on the flux distribution of lens-walled compound parabolic concentrator compared with mirror compound parabolic concentrator [J]. *Energy*, 2013, 58: 398-403.
- [9] Yan J, Nie D Z, Peng Y D, et al. Design of solar dish concentrator for improving flux uniformity on planar receiver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0922002.  
颜健, 聂笃忠, 彭佑多, 等. 可改善平面接收器能流均匀性的太阳能碟式聚光器设计 [J]. *光学学报*, 2020, 40(9): 0922002.
- [10] Gao C, Chen F. Model building and optical performance analysis on a novel designed compound parabolic concentrator [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 209: 112619.
- [11] Rabl A, Goodman N B, Winston R. Practical design considerations for CPC solar collectors [J]. *Solar Energy*, 1979, 22(4): 373-381.
- [12] Wu M G, Tang R S, Cheng Y B, et al. Gap design and optical losses of compound parabolic concentrators[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(1): 308-312.  
吴茂刚, 唐润生, 程艳斌, 等. CPC 空隙设计及光能损失 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 308-312.
- [13] McIntire W R. New reflector design which avoids losses through gaps between tubular absorbers and reflectors[J]. *Solar Energy*, 1980, 25(3): 215-220.
- [14] Korres D N, Tzivanidis C. Numerical investigation and optimization of an experimentally analyzed solar CPC[J]. *Energy*, 2019, 172: 57-67.
- [15] Chen F, Xia E T, Bie Y. Comparative investigation on photo-thermal performance of both compound parabolic concentrator and ordinary all-glass evacuated tube absorbers: an incorporated experimental and theoretical study[J]. *Solar Energy*, 2019, 184: 539-552.
- [16] Xia E T, Xu J T, Chen F. Investigation on structural and optical characteristics for an improved compound parabolic concentrator based on cylindrical absorber [J]. *Energy*, 2021, 219: 119683.
- [17] Yin P, Xu X P, Jiang Z G, et al. Design method of fan-shaped ray-leakage-free solar concentrator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0208002.  
尹鹏, 徐熙平, 姜肇国, 等. 扇形无漏光太阳能聚光器的设计方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0208002.
- [18] Sabiha M A, Saidur R, Mekhilef S, et al. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 51: 1038-1054.
- [19] Baum H P, Gordon J M. Geometric characteristics of ideal nonimaging (CPC) solar collectors with cylindrical absorber[J]. *Solar Energy*, 1984, 33(5): 455-458.
- [20] Kaya H, Eltugral N, Kurukavak A, et al. Efficiency assessment of an evacuated U-tube solar collector using silver nanofluid [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2019, 141(6): 1-27. [LinkOut]
- [21] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, 1(1): 3-17.
- [22] Ward G J, Rubinstein F M, Clear R D. A ray tracing solution for diffuse interreflection [J]. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1988, 22(4): 85-92.