

doi:10.3788/gzxb20174609.0923004

平板型太阳能聚光器的无漏光设计

尹鹏,徐熙平,姜肇国,吕家祺,高少华

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要:针对平板型太阳能聚光器中出现的漏光问题,提出了无漏光聚光器的设计方法.该方法结合简单的数学计算与折射定律、反射定律推导出光线在光波导板中无漏光传播的最大距离理论公式,建立了无漏光聚光比与空气隙结构张角角度、主聚光器高度和宽度之间的数学模型,利用控制变量法分析了无漏光聚光比与各参数之间的关系.运用光线追迹软件对所设计的平板型无漏光太阳能聚光器进行光线追迹模拟,结果表明:在模拟光源选择存在 0.27° 的发散半角的太阳光源条件下,考虑光线在透射面处的菲涅耳损失和光学材料的吸收,在无漏光范围内实际最大聚光比达到 $698\times$ 、 $857\times$ 和 $1\ 032\times$ 时的聚光效率分别为 88.2%、85.3% 和 80.2%;超过无漏光范围后随着聚光比进一步增大聚光效率下降较平缓.

关键词:光学设计;聚光光伏系统;非成像光学;光波导板;太阳能;几何光学;聚光特性

中图分类号:140.3010

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)09-0923004-11

Design and Analysis of Planar Solar Concentrator in Ray-leakage-free Respect

YIN Peng, XU Xi-ping, JIANG Zhao-guo, LV Jia-qi, GAO Shao-hua

(College of Photoelectrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Planar solar concentrator can provide dynamic concentration ratio, which has attracted researchers' attention. However, the decrease of the optical efficiency is not improved because of the ray-leakage from the lightguide. In order to hinder the decrease of optical efficiency from ray leakage, a new design method of the ray-leakage-free planar solar concentrator is proposed in this paper. According to the mathematical computation, refraction law and reflection law, the theoretical formula of the maximal ray-leakage-free propagating length in lightguide is derived. Furthermore, the mathematical model among the values of the parabola arbitrary coefficient, the vertex angle of air gap structure, the collector width, the collector height and the ray-leakage-free concentration ratio is established. The model of the proposed ray-leakage-free planar solar concentrator is simulated by the ray-tracing software. In consideration of Fresnel loss and material absorption, the concentration ratios of the proposed concentrators reach $698\times$, $857\times$ and $1\ 032\times$ with the corresponding optical efficiencies 88.2%, 85.3% and 80.2%, respectively, when the sunlight possess 0.27° divergence half angle; the concentration ratio increases further while the optical efficiency decreases slowly when the length of the lightguide exceeds the ray-leakage-free range.

Key words: Optical design; Concentration photovoltaics system; Non-imaging optics; Lightguide; Solar energy; Geometric optics; Characteristics of concentration

OCIS Codes: 230.5480; 230.4040; 220.0220; 220.2740; 220.4298; 250.5460

基金项目:国家自然科学基金青年基金(No.61605016)资助

第一作者:尹鹏(1988—),男,博士研究生,主要研究方向为太阳能聚光热发电、光伏发电、LED照明自由曲面设计等.Email:2013100182@mails.cust.edu.cn

导师(通讯作者):徐熙平(1969—),男,教授,博士,主要研究方向为光电信号检测、图像处理.Email:xxp@cust.edu.cn

收稿日期:2017-03-20;录用日期:2017-05-09

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着人类赖以生存发展的化石能源的日渐消耗,开发与利用可再生能源迫在眉睫.太阳能作为一种取之不尽用之不竭的清洁可再生能源,受到越来越多的关注^[1].太阳能聚光器作为主要接收并聚集太阳能量的器件引起了国内外学者的广泛关注,由于聚光器接收太阳能量的方式不同导致聚光比也不尽相同,因此太阳能聚光器的设计显得尤为重要^[2-4].

太阳能聚光器分为反射式和透射式两类.反射式聚光器包括槽式、碟式、塔式聚光器等,陈飞^[5]等针对太阳能槽式系统反射镜中玻璃厚度对聚光特性的影响进行了实验研究,结果表明,平行光下反射镜玻璃越厚,入射光线距离光轴越远,聚光特性越差.王云峰^[6]等设计了多碟共焦聚光器,用低聚光比聚光器组合达成高倍聚光效果,应用光线追迹法模拟分析了存在太阳张角时,相同开口采光面积、不同形状的聚光器分别在相同焦距、相同边缘角情况下的聚光特性,但是该聚光器设计完成后无法调节聚光比和聚光光斑面积.文献^[7]设计制作了一种新的多平面镜线性组合太阳能聚光器,该聚光器由小平面镜组合而成,容易实现均匀高倍聚光和聚光面积的调节.塔式太阳能聚光系统是通过地面上的定日镜反射太阳辐射到中心塔的热接收器,达到聚光目的.此外,郭苏^[8]等研究了塔式太阳能热发电站镜场的设计;荆雷^[9]等在不增加二次匀光器件的前提下设计了径长比小、聚焦光斑相对均匀、聚光比高的聚光光伏系统.透射式聚光器主要以菲涅耳透镜以及部分平板型聚光器为主.李望^[10]等提出了一种基于分布式焦点法设计线聚焦菲涅耳聚光器,与传统共焦法相比,对聚光光斑的辐照度均匀性得到改善.王进军^[11]等提出一种分区多焦点叠加方形光斑均匀聚光菲涅耳透镜的设计方法,解决了传统点聚焦菲涅耳透镜聚光分布均匀性差的问题,采用该方法设计的透镜聚焦的方形光斑均匀度达90%以上.平板式聚光是近年提出的一种新颖的太阳能聚光方式,其最大的优点在于能够提供动态的聚光比,而且体积紧凑可以满足不同聚光场合的需要.Karp^[12]等提出了平板型聚光器的设计与优化方法,利用球面透镜阵列收集太阳光线,并通过光波导板最终将能量传递给光电池.在此基础上,Hallas^[13]等设计了二维追踪平台,并对透镜阵列和光波导板的相对位置进行了对准,有效提升了光学效率.Bouchard^[14]等利用柱面镜阵列取代球面镜阵列,利用柱面镜的聚焦性质节省了俯仰方向的追踪,但是该系统的不足之处在于获得的聚光效率十分有限.文献^[15]提出了全内反射型太阳能聚光器,利用内全反射(Total Internal Reflection, TIR)聚光模组和光波导板对太阳光线进行聚焦与传输,最终被光电池吸收.该设计实现了动态聚光比的同时可获得较高的辐照度值,但是随着光线传输距离的增加,系统中漏出的光线增多,导致光学效率急剧下降.因此,如何实现高聚光比的同时保证尽可能少的光线漏出成为了目前亟待解决的问题.

本文对光波导板添加了半球耦合结构和空气隙结构保证光线无漏光传输,通过结合主聚光器和光波导板中的相关参数推导出光线无漏光传输的理论公式,并建立了传输距离与空气隙结构张角角度、主聚光器高度和宽度之间的数学模型.

1 工作原理

主聚光器修改步骤见图1(a),外表面抛物线方程为

$$y = az^2 \quad (z \geq 1/2a) \quad (1)$$

式中 a 为抛物线任意系数.为避免光线从抛物面底部漏出,将主聚光器修改后得到双抛物面结构,如图1(b),该结构中两个抛物面之间的距离 $1/2a$;为了防止光线直接从双抛物面结构的下平面漏出,计算得到双抛物面结构高度的下限为

$$h_{\min} = 3/4a \quad (2)$$

同时,光线在光波导板上的入射角须大于临界角,计算得到双抛物面结构高度的上限^[15]为

$$h_{\max} = \frac{2\sqrt{(n_1 + \sqrt{n_1^2 - 1})/(n_1 - \sqrt{n_1^2 - 1})} - 1}{4a} \quad (3)$$

式中 n_1 为光波导板的折射率.为便于将双抛物面结构阵列化,将主聚光器宽度修剪为 D ,如图1(c).为避免主聚光器与光波导板接触导致漏光,将主聚光器下表面修剪为球面,球心位于外抛物面焦点处,如图1(d),

球面半径最大值可以表示为

$$R_{\max} = \sqrt{h^2 - \frac{h + \sqrt{4h/a + a^{-2}}}{2a} + \frac{17}{16a^2}} \quad (4)$$

式中 h 为主聚光器高度.修剪后得到主聚光器的设计结构,如图 1(e).需要注意的是,文中主聚光器的高度并非修剪后的真实高度,而是从主聚光器上表面到焦平面的距离.

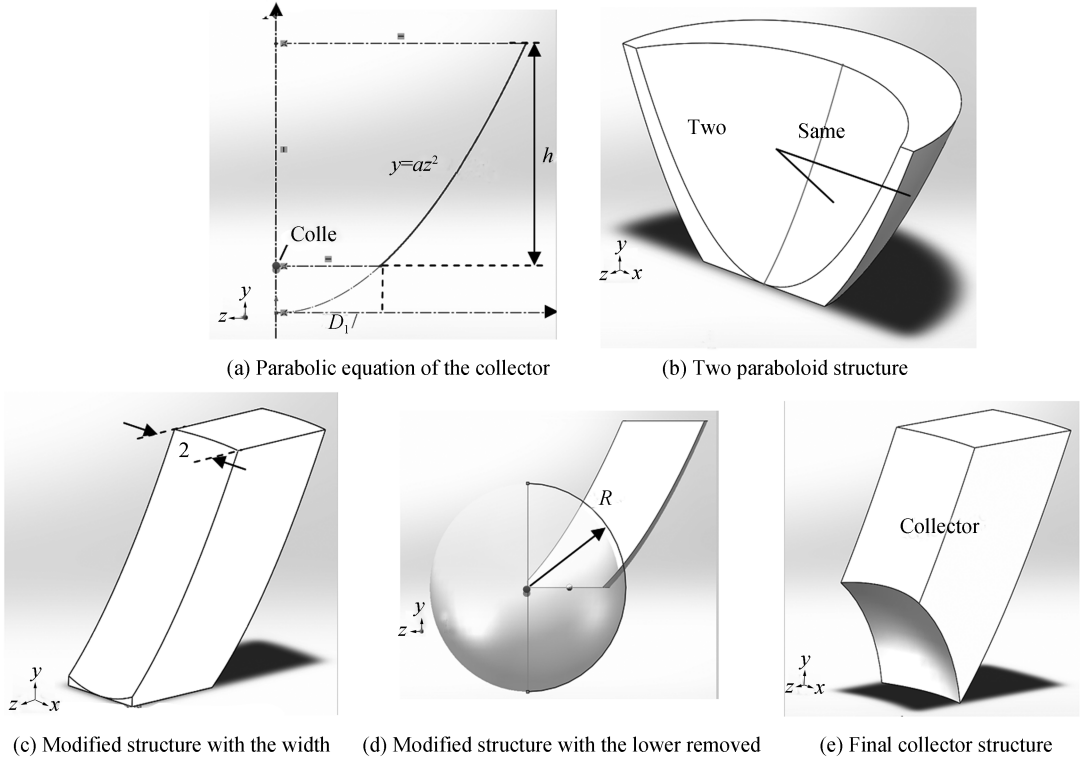


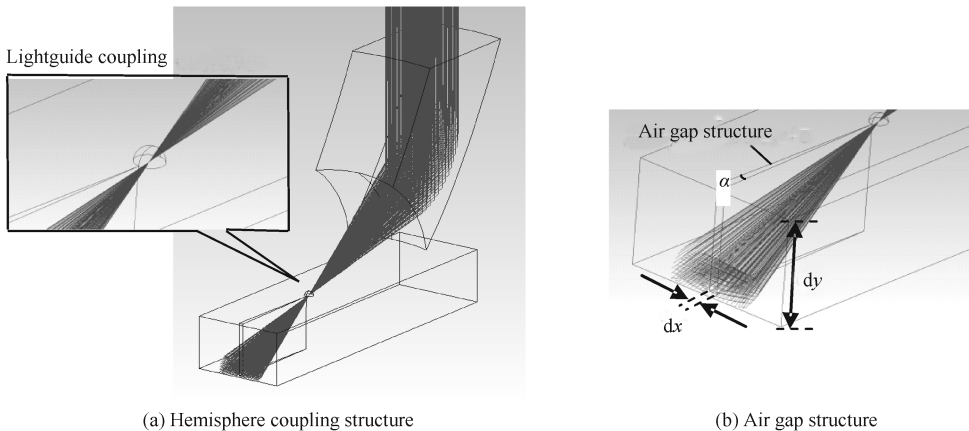
图 1 主聚光器的修剪过程示意图

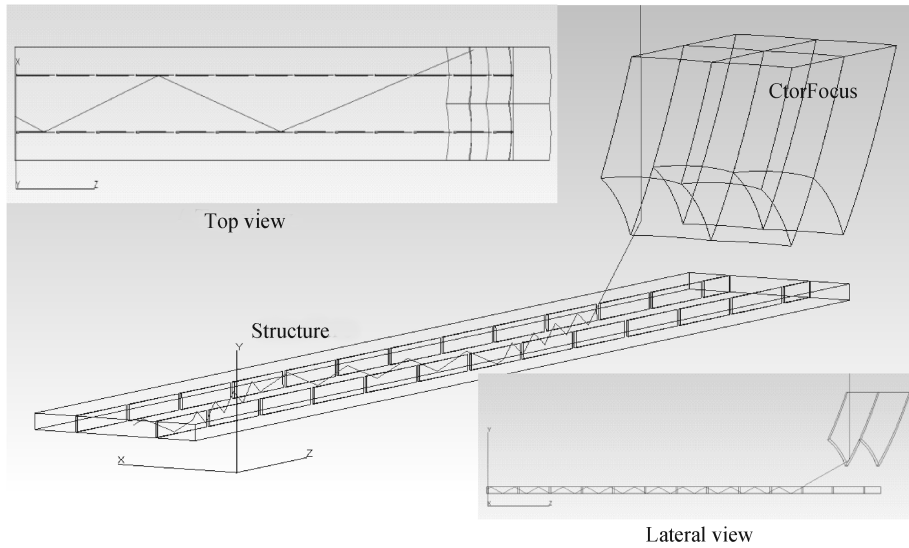
Fig.1 The schematic diagram of the changing collector

由于光线进入光波导板时折射角变小导致光线从光波导板下表面出射,因此为使光线进入光波导板时的方向不改变,在光波导板上表面添加半球耦合结构,如图 2(a)所示,球心位于主聚光器外抛物面焦点处,球体半径可忽略不计.但是,这就意味着有部分光线会通过半球耦合结构透射出光波导板,从而发生漏光.因此,在半球耦合结构前方设计空气隙结构,如图 2(b)所示,该结构是嵌于光波导板中的空气三棱柱,目的是将光线分成两部分从而避免在下一个半球耦合结构处漏光.设三棱柱的底面等腰三角形底边长度为 dx ,则空气隙结构张角的表达式为

$$\alpha = 2 \arctan(a \cdot dx) \quad (5)$$

但是,随着传播距离的增加,光线与空气隙结构表面的入射角度不断减小,当小于临界角时,漏光现象就





(c) The ray propagating path in the collector and the lightguide

图2 无漏光波导板的设计及光线传播路径

Fig.2 Design of the ray-leakage-free lightguide and the ray propagating path

会发生,因此,光波导板的最大长度取决于光线首次发生漏光的位置,即无漏光传播的最大距离.将主聚光器、半球耦合结构以及空气隙结构分别阵列后可以得到光线在其中的传输情况,如图2(c)所示.容易看出,光线经主聚光器抛物面反射后进入光波导板中并继续传播,从俯视图可以看出,光线经半球耦合结构进入光波导板时并未发生偏折,且光线在两列空气隙结构中被多次全反射而向前传播;侧视图则反映出光线被光波导板上下表面多次全反射而向前传播.为了能够清晰地看到光线的传播情况,图2(c)给出了部分主聚光器以及部分光波导板示意图.

由于光线在 $y-z$ 平面上的投影始终处于全反射状态而不会漏出,因此本文主要分析光线在 $x-z$ 平面上的传播轨迹.从主聚光器上表面入射的光线中,两条沿着内抛物面入射的边缘光线在 $x-z$ 平面上的投影与 z 轴夹角最大,如图3所示.可以计算出该光线在 $x-z$ 平面上的投影与 z 轴夹角的表达式为

$$\beta = \arcsin(a \cdot D / (\sqrt{4a \cdot h + 1} - 1)) \quad (6)$$

该光线从进入耦合结构到第一次与空气隙结构表面发生全反射时的距离为 L_0 的表达式为

$$L_0 = D / \tan \beta \quad (7)$$

当光线在空气隙结构表面发生第 n 次全反射后,设出射光线在 $x-z$ 平面的投影与 z 轴夹角为 δ_n ,在发生第 $n+1$ 次全反射之前所传播的距离为 L_n ,可以得到

$$\delta_n = n \cdot \alpha + \beta \quad (8)$$

$$L_n = D \cdot \cot(\delta_n) \quad (9)$$

设入射光线与空气隙结构表面法线之间的夹角为 Φ_{in} ,则需要满足条件

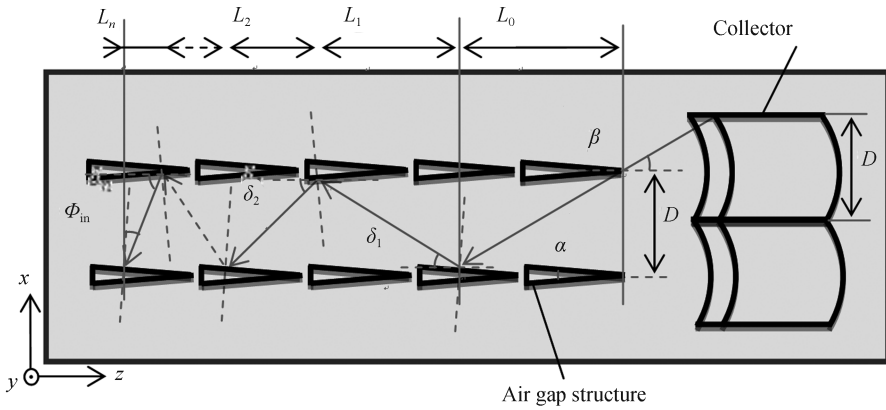
$$\Phi_{in} = \frac{\pi}{2} - \delta_n - \frac{\alpha}{2} \geq \theta_c \quad (10)$$

式中 θ_c 是全反射临界角.根据式(8)和式(10)可以得到光线在光波导板中传播时与空气隙结构发生全反射的最大次数 N 为

$$N \leq \frac{\pi - \alpha - 2\beta - 2\theta_c}{2\alpha} \quad (11)$$

则光线在光波导板中无漏光所能传播的最大距离 L 由两部分组成:一部分是光线从进入耦合结构到第一次与空气隙结构表面发生全反射时的距离,另一部分是光线发生第一次全反射后到发生第 N 次全反射之间的距离,即

$$L = L_0 + \sum_{n=1}^N L_n = \frac{D}{\tan \beta} + \sum_{n=1}^N D \cdot \cot(n \cdot \alpha + \beta) \quad (12)$$

图3 $x-z$ 平面边缘光线无漏光传播距离示意图Fig.3 The schematic diagram of the edge-ray propagating length in $x-z$ plane

2 无漏光最大聚光比的分析与讨论

通过上述公式可以看到,无漏光最大传播距离与空气隙结构张角、主聚光器高度和宽度有关,将平板型聚光器聚光效率定义为进入光电池的能量与接收全部太阳能的比值^[17-18],即

$$\eta = \frac{\text{进入光电池的能量}}{\text{接收太阳能}} \quad (13)$$

由于光电池放置在光波导板的末端,因此进入光电池的能量与从光波导板出射的光能量相等.将平板型聚光器的聚光比定义为聚光器长度与光波导板厚度的比值^[17-18],即

$$C_{\text{geo}} = L/d_y \quad (14)$$

式中 d_y 代表光波导板的厚度,由于光波导板厚度不受聚光器长度影响,因此可以通过调整光波导板长度或厚度改变平板型聚光器的聚光比,从而实现聚光比的动态调控,适应不同程度的聚光需求.通常来讲,光波导板的厚度应该与太阳能电池的受光宽度保持一致,本文只给出对于无漏光聚光器的光学设计原理,未对光波导板厚度做详细讨论.通常将光波导板厚度设计在0.2 mm到1 mm之间^[16-18],本文光波导板厚度设置为0.5 mm,需要说明的是该厚度只看作设计参考,具体设计厚度尺寸应该参照实际太阳能电池的尺寸决定.为了能够得到无漏光聚光比最佳值,本文采用控制变量法逐一对空气隙结构张角、主聚光器高度和宽度等因素对聚光比的影响进行分析与讨论.

图4表示在无漏光条件下系统的聚光比和反射次数随空气隙结构张角角度变化的情况,图中星号点代表系统聚光比,空心点代表反射次数.此时将主聚光器高度宽度均设置为定值.由图4可知,随着空气隙结构张角角度的增加,聚光比的总体趋势下降,反射次数下降;在相等的反射次数下,聚光比随着空气隙结构张角角度的增大而减小;但是随着空气隙结构张角角度的增加,同一反射次数持续的时间越长,因而聚光比下降

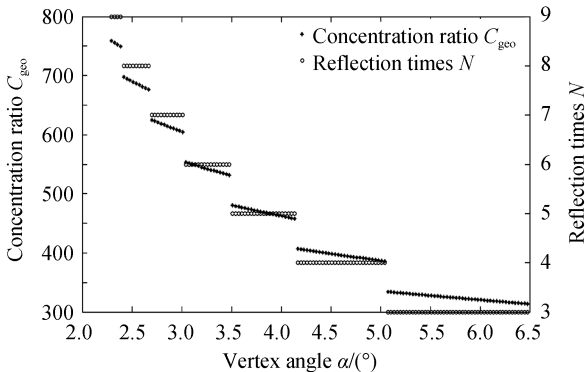


图4 聚光比和反射次数与空气隙结构张角角度之间的关系
Fig.4 The relationship between the concentration ratio, reflection times and the vertex angle

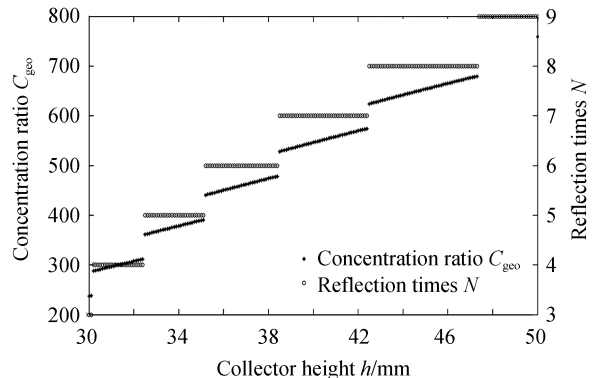


图5 聚光比和反射次数与主聚光器高度之间的关系
Fig.5 The relationship between the concentration ratio, reflection times and the collector height

的速度越慢;在反射次数发生变化处聚光比的变化不再连续,出现了明显断层,这说明相比于同一反射次数中不同的空气隙结构张角角度,不同的反射次数对于聚光比的影响更大。

图 5 表示在无漏光条件下系统的聚光比和反射次数随主聚光器高度变化的情况,图中星号点代表系统聚光比,空心点代表反射次数.此时将空气隙结构张角角度和主聚光器宽度均设置为定值.由图 5 可知,随着主聚光器高度的增加,聚光比和反射次数均呈现上升趋势;在相等的反射次数下,聚光比随着主聚光器高度的增大而增大;随着主聚光器高度的增加,同一反射次数持续的时间变长而聚光比上升的速度不变,因而聚光比上升的幅度变大;在反射次数发生变化处聚光比的变化不再连续,出现了明显断层,这说明相比于同一反射次数中不同的主聚光器高度,不同的反射次数对于聚光比的影响更大.需要注意的是,图 5 中主聚光器高度的取值范围根据抛物线任意系数决定,因此可以说明在给定抛物线任意系数时,更大的主聚光器高度将有利于得到更大的聚光比。

图 6 表示在无漏光条件下系统的聚光比和反射次数随主聚光器宽度变化的情况,图中星号点代表系统聚光比,空心点代表反射次数.此时将空气隙结构张角角度和主聚光器高度设置为定值.如图 6 所示,随着主聚光器宽度的增加,反射次数逐渐下降,聚光比呈现先上升后下降的趋势,同一反射次数持续的时间几乎没有变化;在相同的反射次数下,聚光比随着主聚光器宽度的增大而增大,但是随着主聚光器宽度的不断增大,聚光比增大的速度逐渐变慢,甚至在主聚光器宽度较大时出现了聚光比负增长的情况;在反射次数发生变化处聚光比的变化不再连续,出现了明显断层,聚光比的最大值往往出现在断层处.为了进一步分析模组宽度和反射次数对于聚光比的影响,研究了光线在光波导板中的传播距离与反射次数之间的关系,如图 7 所示。

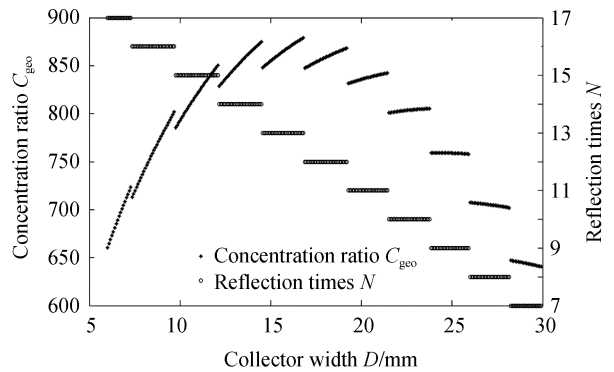


图 6 聚光比和反射次数与主聚光器宽度之间的关系
Fig.6 The relationship between the concentration ratio, reflection times and the collector width

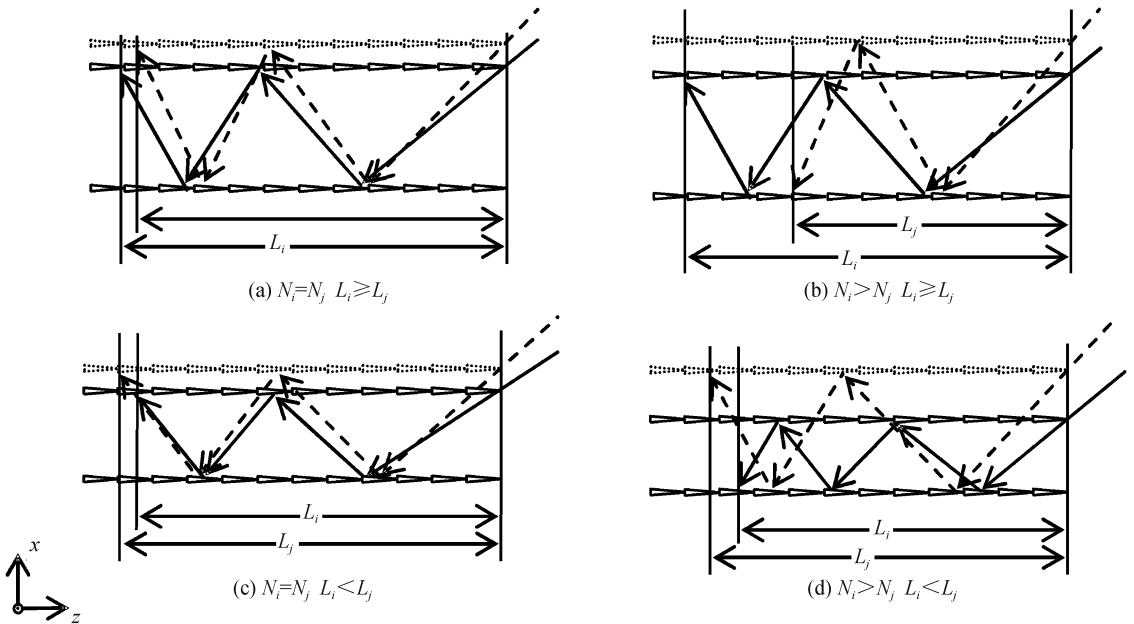


图 7 光线在光波导板中的传播距离与反射次数关系

Fig.7 The schematic diagram of the relationship between the propagating length and the reflection times in the lightguide

设聚光模组宽度 D 取两不同值 D_i 和 D_j ($\Delta D = D_j - D_i > 0$) 时相应的光线在光波导板中无漏光传播距离分别为 L_i 和 L_j , 此时光线与两列空气隙结构的最大反射次数分别为 N_i 和 N_j , 则有四种关系成立。

1) $N_i = N_j, L_i \geq L_j$

N 值不变, L 随着 D 值增大单调递减或者保持不变, 如图 7(a) 所示, 这种情况较多发生在 D 值较大 ΔD 值较小时, 首先 ΔD 的存在会从两方面影响光线在波导板中的传播距离: D 值变大导致光线在两列空气隙结构之间传播的路径变长, 意味着主聚光器宽度变大, 最边缘入射光线与 z 轴的夹角 β 值变大, 导致光线在每个空气隙结构上的入射角度变小, 但是由于 ΔD 值很小, 两次最边缘入射光线的 β 值相差不多, 在每个空气隙结构入射的位置、入射角度和出射角度也相差不多, 因此两次光线传播的路径几乎是相同的, 所以导致第 N 次反射时两种情况的入射角均大于临界角。虽然 D 值的增加使得光线在同等入射角度情况下沿 z 方向传播的距离增大, 但是由于 D 值的增大导致光线进入波导板的入射角 β 也有所增大, 这使得光线在空气隙结构上的入射角度变小从而限制了光线在 z 方向的传播距离。当 β 增大对于传播距离的抑制作用大于 D 值增大对于传播距离的增加时, 同样的反射次数下传播距离减小, 即 $L_i > L_j$; 当 β 增大对于传播距离的抑制作用等于 D 值增大对于传播距离的增加时, 同样的反射次数下传播距离相同, 即 $L_i = L_j$ 。

$$2) N_i > N_j, L_i \geq L_j$$

随着 D 值增大, 反射次数减小而引起的 L 值减小或者相等。这种由于反射次数 N 的不同所导致的传播距离 L 的不同在图中比较常见, 但多发生在图 6 中星号点曲线的后半段。如图 7(b) 所示, 与第 1) 种情况不同, 由于 ΔD 值相对较大, 光线进入波导板的入射角 β 较大, 因此光线在空气隙结构的入射角度就更小, 这就导致破坏全反射的现象更容易发生, 反射次数 N 减少, 因而无漏光传播距离减少, 即 $L_i > L_j$ 。值得注意的是, 这种情况反射次数 N_j 对于传播长度 L 的影响显然要大于 D 值增大对于 L 的影响。在图 6 中星号点曲线的下降段, 反射次数 N 对于 L 的影响很大, 是 L 在曲线下下降段减少的主导因素。在图 6 中星号点曲线的中段, 随着 D 值增大, 反射次数减小, 而在不同的反射次数下会出现两个 L 值相等的情况, 即 $L_i = L_j$ 。

$$3) N_i = N_j, L_i < L_j$$

在图 6 中星号点曲线 L 在上升段以及部分下降段, 在反射次数 N 相等时 L 随着 D 值得增大而变大。如图 7(c) 所示, 首先若满足反射次数 N 值相等, 说明 ΔD 值较小, 但是与 1) 中情况不同的是, 该情况下 D 值相对较小, 此时 β 增大对于传播距离的抑制作用小于 D 值增大对于传播距离的增加, 因此无漏光传播距离增大, 即 $L_i < L_j$ 。需要注意的是, 在每给定 N 值情况下 L 均能取得极大值, 而最终 L 的最大值就出现在这些极大值里面。

$$4) N_i > N_j, L_i < L_j$$

随着 D 值增大, L 值也增大。这种情况一般发生在图 6 中星号点曲线 L 的上升段和顶点附近, 此时 D 值相对较小而 ΔD 值相对较大, 导致反射次数 N 的下降, 如图 7(d) 所示。此时最边缘入射光线与 z 轴的夹角 β 增大, 但是 D 值增大后增大了光线在两空气隙结构间传播的距离, 夹角 β 对于传播距离的抑制作用小于 D 值增大对于传播距离的增加, 因此无漏光传播距离增大, 即 $L_i < L_j$ 。

由分析知, 除了主聚光器的宽度, 聚光比与其他两个变量均为单调变化关系。为了方便起见, 将空气隙结构底面三角形的高宽比设定为 $1/25$, 即空气隙结构张角角度约为 2.29° 。这样, 可以最终得到聚光比与主聚光器宽度和抛物线任意系数之间的关系, 如图 8 所示。

由图 8 可以清晰地看出聚光比在不同主聚光器宽度和抛物线任意系数下的分布情况, 与文中分析一样, 聚光比随抛物线任意系数的增大而单调递减, 随主聚光器宽度的增大而先增后减; 除此之外, 在抛物线任意系数较小时等高线越密, 说明当抛物线任意系数取较小值时, 数值变化对于聚光比的影响较大; 在主聚光器宽度值较小时, 等高线上升趋势较急促, 而主聚光器宽度值较大时, 等高线下降趋势较平缓, 由此可见, 选取较大的主聚光器宽度值对聚光比的影响较小; 而且较大的主聚光器宽度可以减少反射次数, 进而降低因过多的反射次数导致能量的损失。另外, 图中出现部分空白区域代表反射次数不足一次, 因此该区域图形缺失。

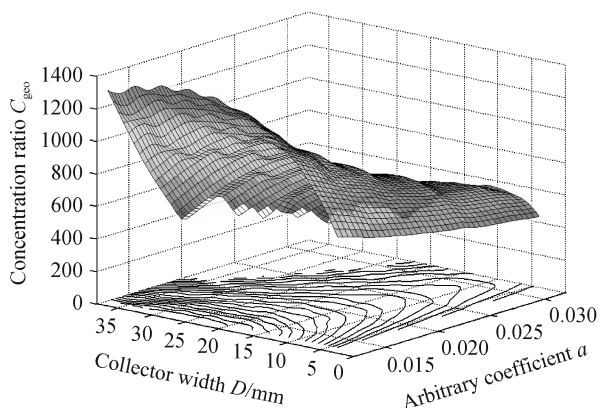


图 8 最大无漏光聚光比与主聚光器宽度和抛物线任意系数之间的关系

Fig.8 The relationship between the maximal concentration ratio, collector width and the arbitrary coefficient

3 软件仿真

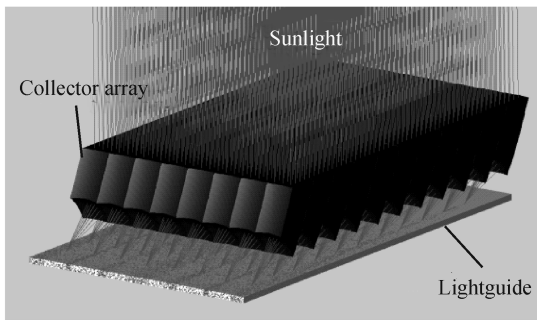
3.1 无漏光实验仿真

对于文中所提出的平板型无漏光太阳能聚光器而言,其无漏光属性无疑是需要重点关注的,因此需研究平板型无漏光聚光器在没有任何光线漏出系统的前提下所得到的最大聚光比.根据平板型无漏光太阳能聚光器的设计方法以及对于最大无漏光聚光比的分析讨论,设计了用于软件仿真的平板型无漏光太阳能聚光器,聚光结构的初始条件参数见表 1.对于正入射太阳光线,仿真示意图如图 9(a)所示.由于光线在主聚光器以及光波导板中均通过全反射改变光线的传输方向,因此本聚光器在复色宽波段太阳光正入射时也不会产生漏光.如图 9(b)所示,利用光线追迹软件对不同抛物线任意系数下的聚光比仿真,图中实线为仿真实际聚光比,虚线代表聚光比理论计算值.可以看到,无论是理论值还是实际的仿真结果,无漏光聚光比随着抛物线任意系数的增大均有所减小;仿真结果始终小于理论计算值,这是由于空气隙结构存在宽度,导致两列空气隙结构之间的距离小于主聚光器宽度 D .

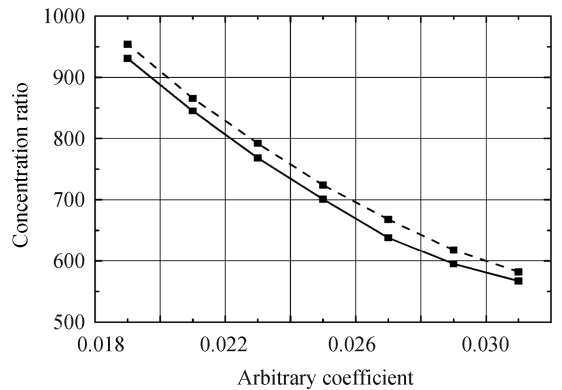
表 1 平板型无漏光太阳能聚光器的初始条件参数

Table 1 The initial condition parameters of the planar ray-leakage-free solar concentrator

Arbitrary coefficient	Collector height/mm	Collector width/mm	Vertex angle/°	Lightguide length/mm	Lightguide width/mm	Lightguide depth/mm
0.02	40	20	2.29	350	160	0.5



(a) Ray tracing of the planar ray-leakage-free solar concentrator



(b) Different concentration ratios changing with arbitrary coefficients

图 9 平板型无漏光太阳能聚光器光线追迹及聚光比变化曲线

Fig.9 Ray tracing of the planar ray-leakage-free solar concentrator and different concentration ratio curves

3.2 聚光比与聚光效率的关系

由分析知,主聚光器宽度的取值会影响聚光比和反射次数,反射次数同时也会影响聚光效率.由于光学材料选择便于注塑成型的树脂材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),折射率为 1.493 86,在可见光波段对光的吸收较少,具有较高的光学效率,本文在光谱范围 400~800 nm 内对该聚光器的聚光效率进行分析,采用分立光谱局部测量方法模拟存在 0.27° 的发散半角的太阳光源下聚光器的聚光性能.首先根据主聚光器的数量划分受光面积,设聚光器主聚光器阵列上表面的面积为 S ,第 i 个主聚光器上表面的面积为 S_i ,主聚光器的数量为 M ,则可以计算出在某单色光下聚光器聚光效率的平均值为

$$\bar{\eta} = \sum_{i=1}^M \eta_i \cdot S_i / S \quad (15)$$

式中 η_i 为通过第 i 个主聚光器收集光线得到的聚光器的聚光效率.将各种单色光在所选光谱范围内所占的权重 ω_j 与各单色光下聚光器模拟聚光效率平均值相乘,可以得到聚光器聚光效率的估计值 η' 为

$$\eta' = \sum_{j=1}^N \bar{\eta}_j \cdot \omega_j \quad (16)$$

式中 N 为光谱范围内所选取的单色数量,当 N 取值越大,与连续光谱拟合程度越高,相应的聚光效率估计值越接近真实值.本文选取 7 种波长的单色光替代全光谱用来对聚光器的聚光效率进行仿真,各单色光在全光谱中的权重 ω_j 为各单色光的辐照度在该波长附近区域内的积分值与光波辐照度函数在全光谱范围内积

分值的比值,不同波长的单色光所占权重如表 2 所示.在仿真过程中,考虑光线在透射面处的菲涅耳损失和光学材料的吸收.选取三种不同高度的主聚光器分别进行光线追迹,仿真结果如图 10 所示.

表 2 不同波长的单色光所占权重

Table 2 The different normalized weights of different wavelengths

Wavelength/nm	424	491	512	526	614	702	788
Normalized weight	0.064 8	0.166 1	0.232 7	0.331 9	0.181 8	0.022 3	0.000 4

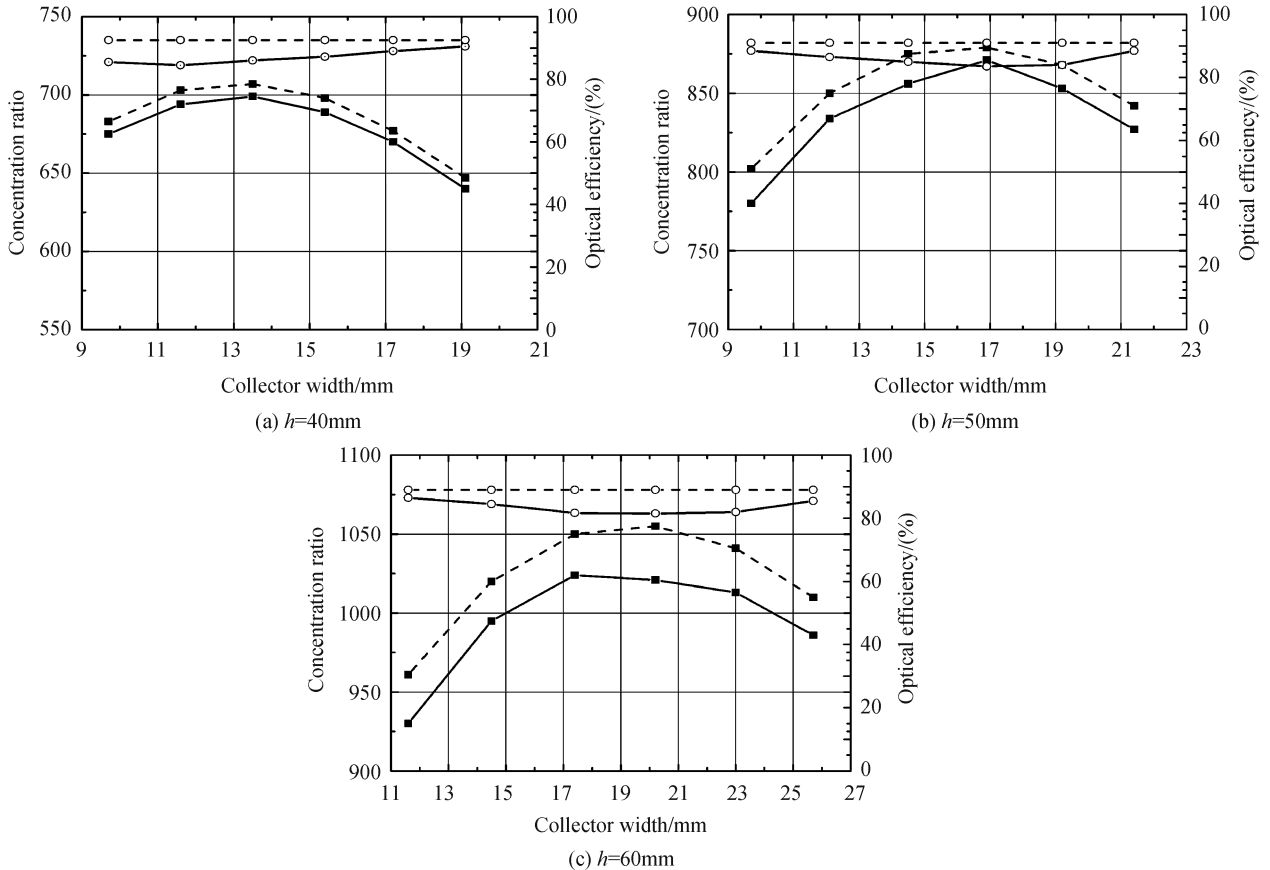


图 10 不同主聚光器高度下,聚光比和聚光效率随着主聚光器宽度的变化

Fig.10 The concentration ratios and the optical efficiencies varying with the collector width in different collector heights

图中方形点虚线代表无漏光聚光比理论值,在主聚光器高度分别为 40 mm、50mm 和 60 mm 时无漏光最大聚光比理论值分别达到 $707\times$ 、 $879\times$ 和 $1\ 055\times$;方形点实线代表软件仿真得到的实际聚光比,在主聚光器高度分别为 40 mm、50 mm 和 60 mm 时实际最大聚光比分别达到 $698\times$ 、 $857\times$ 和 $1\ 032\times$;需要注意的是,由于两列空气隙结构之间的实际距离小于主聚光器宽度,因此实际的光线无漏光传播的距离将比理论值小,导致实际的聚光比小于无漏光聚光比理论值.图中圆形点虚线代表无漏光聚光效率理论值,在主聚光器高度为 40 mm、50 mm 和 60 mm 时聚光效率理论值分别达到 92.0%、91.2% 和 89.1%,此时影响聚光效率的因素主要来自菲涅耳损失和材料吸收两方面;圆形点实线代表软件仿真得到的实际聚光效率,在主聚光器高度为 40 mm、50 mm 和 60 mm 时,所能取得最大聚光比时的实际聚光效率分别达到 88.2%、85.3% 和 80.2%,此时影响聚光效率的因素除了菲涅耳损失和材料吸收,主要来自实际太阳光源发散角度导致的部分光线溢出所携带的能量损失.在比较实际聚光比和聚光效率后发现在聚光比最大值出现时聚光效率最低,这是由于大的聚光比需要更大的无漏光传播长度,光线将更多的被空气隙结构表面反射,从而产生更多的菲涅耳损失以及材料吸收损失.但是随着主聚光器宽度的增加,光线在光波导板中的反射次数逐渐下降,光线在空气隙表面的菲涅耳损失被有效改善,聚光效率明显提高.因此,从实际应用角度考虑,在满足聚光比需要的同时应尽量选择主聚光器宽度较大的聚光器结构设计,这样可以获得较大聚光效率.

3.3 超出无漏光范围后聚光效率的下降

在实际的使用过程中,为了在有限空间获得更大的聚光比,通常会以损失聚光效率为代价.为了便于对

比,将之前设计的全内反射型太阳能聚光器^[15]的仿真结果曲线与该聚光器仿真所得结果曲线共同绘制,如图 11 所示.

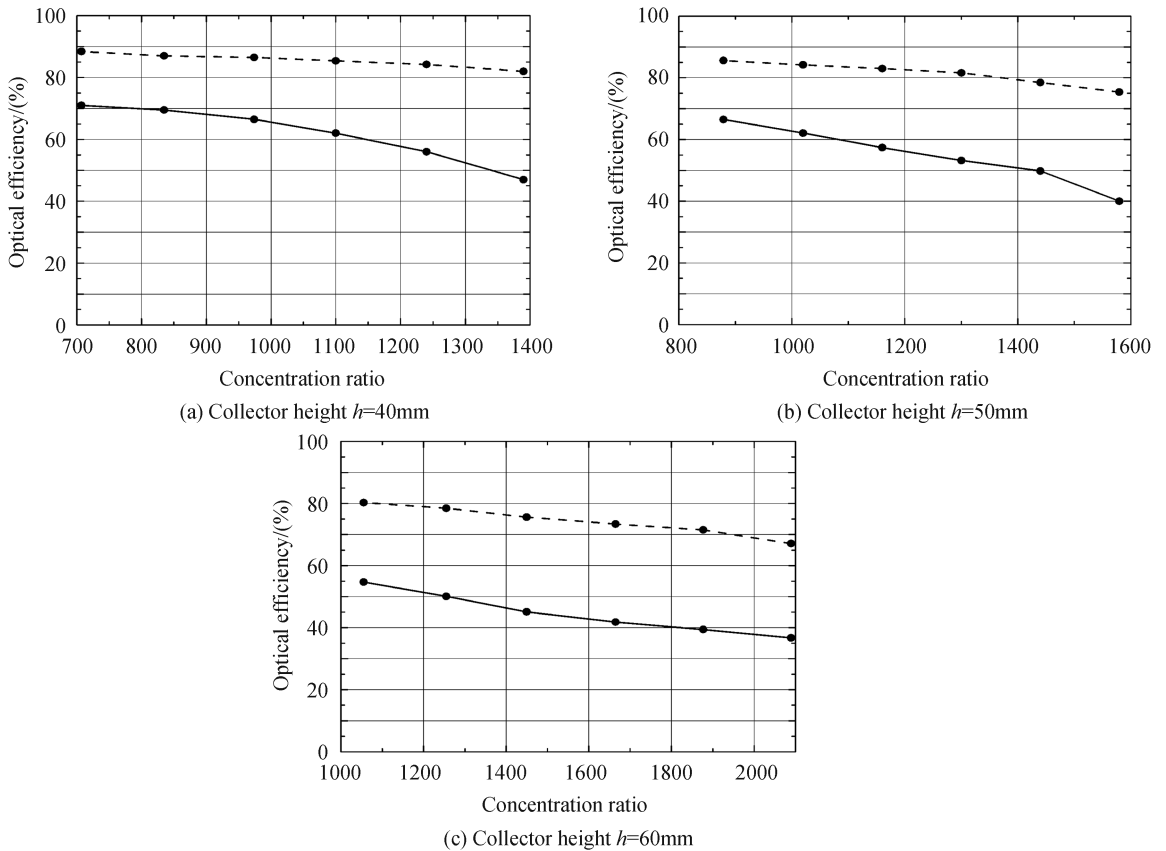


图 11 不同主聚光器高度下,两种平板型聚光器超出无漏光范围后的聚光效率分布

Fig.11 The optical efficiency distribution of two kinds of planar concentrators out of the ray-leakage-free range in different collector heights

在仿真过程中,两种聚光器的光波导板厚度均为 0.5 mm,分别模拟三种主聚光器高度情况下的聚光效率分布.图中虚线代表所提出聚光器在超出无漏光范围后的聚光效率变化情况,可以看出在三种主聚光器高度下聚光效率均有不同程度的下降,其中主聚光器高度为 50 mm 情况的聚光效率下降幅度最大,达到 11.49%.图中实线代表全内反射型太阳能聚光器^[15]在相同聚光比数值下的聚光效率变化情况,三种主聚光器高度下聚光效率下降幅度均超过 20%;事实上,由于全内反射型太阳能聚光器主聚光器与光波导板相互接触,始终有光线从光波导板中溢出,因此可以看到,图 11 中三种情况里面的全内反射型太阳能聚光器的聚光效率始终低于本文所提出的平板型无漏光聚光器的聚光效率值;随着聚光比的不断增加,两种聚光器的聚光效率差值不断增大,说明全内反射型太阳能聚光器漏光现象严重,导致大部分能量损失在漏出的光线上.

4 结论

本文针对聚光器的漏光现象提出了平板型无漏光太阳能聚光器的设计方法,推导出无漏光传输距离的理论公式,建立了无漏光聚光比与空气隙结构张角、主聚光器高度和宽度之间的数学模型,运用控制变量法分析讨论了无漏光聚光比在上述参数下的最大值,通过光线追迹软件对无漏光聚光器的聚光性能进行了仿真实验,模拟分析了无漏光聚光器的无漏光属性、聚光比以及聚光效率等光学性能参数,研究结果说明平板型无漏光太阳能聚光器在无漏光范围具有良好的无漏光属性并能够获得较高的聚光效率,在超出无漏光范围后,聚光效率下降平缓.该无漏光聚光器设计方法的提出为平板型太阳能聚光器在无漏光的设计上提供了一个有效的解决途径.

参考文献

[1] XUE Ji-yuan, FENG Wen-lin, ZHAO Fen, *et al.* Output characteristic and application for solar panel [J]. *Infrared and*

- Laser Engineering*, 2015, **44**(1): 176-181.
- 薛继元, 冯文林, 赵芬, 等. 太阳能电池板的输出特性与实际应用[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(1): 176-181.
- [2] WHANG A J W, CHEN Y Y, YANG S H, *et al.* Natural light illumination system [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(35): 6789-6801.
- [3] NING Duo, LIU Fei-hang, WU Yan-rui, *et al.* Non-tracking transmission solar concentrators [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2284-2287.
- 宁铎, 刘飞航, 吴彦锐, 等. 免跟踪透射式太阳聚光器的设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2284-2287.
- [4] WANG Yi-ping, LI Wen-bo, ZHU Li, *et al.* Research progress of concentrator photovoltaic cells and systems [J]. *Acta Energetiae Solaris Sinica*, 2011, **32**(3): 433-438.
- 王一平, 李文波, 朱丽, 等. 聚光光伏电池及系统的研究现状[J]. *太阳能学报*, 2011, **32**(3): 433-438.
- [5] CHEN Fei, LI Ming, JI Xu, *et al.* Influence of glass thickness of reflector on the concentrating characteristics in the solar-energy trough system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 111-115.
- 陈飞, 李明, 季旭, 等. 太阳能槽式系统反射镜玻璃厚度对聚光特性的影响[J]. *光学学报*, 2012, **32**(12): 111-115.
- [6] WANG Yun-feng, JI Jie, HE Wei, *et al.* Performance analysis and design of paraboloidal dish solar concentrators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 206-213.
- 王云峰, 季杰, 何伟, 等. 抛物碟式太阳能聚光器的聚光特性分析与设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 206-213.
- [7] WANG Yun-feng, JI Jie, LI Ming, *et al.* Performance analysis and design of multi-plane mirrors linear combination solar concentrator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(4): 244-253.
- 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): 244-253.
- [8] 郭苏. 塔式太阳能热发电站镜场和 CPC 及屋顶 CPV 的设计[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [9] JING Lei, WANG Yao, ZHAO Hui-fu, *et al.* Design of uniform-irradiance concentrator for concentration photovoltaics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(2): 80-85.
- 荆雷, 王尧, 赵会富, 等. 实现均匀照度光伏聚光镜设计[J]. *光学学报*, 2014, **34**(2): 80-85.
- [10] LI Wang, XU Xi-ping, SONG He-lun, *et al.* Design and analysis of the line focus Fresnel concentrator based on the diffused focal points method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(4): 721-726.
- 李望, 徐熙平, 宋贺伦, 等. 分布式焦点法线聚焦菲涅耳聚光器设计及性能分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(4): 721-726.
- [11] WANG Jin-jun, WANG Xia, NING Duo. Design of the sub-region multi-focus superposition square spot uniform concentration Fresnel lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(03): 288-295.
- 王进军, 王侠, 宁铎. 分区域多焦点叠加方形光斑均匀聚光菲涅耳透镜设计[J]. *光学学报*, 2017, **37**(03): 288-295.
- [12] KARP J H, TREMBLAY E J, FORD J E. Planar micro-optic solar concentrator [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(2): 1122-1133.
- [13] HALLAS J M, BAKER K A, KARP J H, *et al.* Two-axis solar tracking accomplished through small lateral translations [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(25): 6117-6124.
- [14] BOUCHARD S, THIBAUT S. Planar waveguide concentrator used with a seasonal tracker [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(28): 6848-6854.
- [15] WANG Xiao, CAO Miao, AN Zhi-yong, *et al.* Design and research of total-internal-reflection solar energy concentrating module [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(10): 115-120.
- 王骁, 曹秒, 安志勇, 等. 全内反射型太阳能聚光模块设计与研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(10): 115-120.
- [16] UNGER B L, SCHIMIDT G R, MOORE D T. Dimpled planar lightguide solar concentrators [C]. *OSA International Optical Design Conference*, 2010: ITuE5P.
- [17] WU H Y, CHU S C. Ray-leakage-free sawtooth-shaped planar lightguide solar concentrators [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(17): 20073-20089.
- [18] TENG T C, LAI W C. Planar solar concentrator featuring alignment-free total-internal-reflection collectors and an innovative compound tracker [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(S7): 1818-1834.