

棱台型二次镜非旋转轴对称性对光线全内反射的影响研究

高俊 袁爱谊 郝国强 李红波

(上海太阳能工程技术研究中心, 上海 200241)

摘要 聚光光伏发电系统中,通常用一个棱台型光学元件作为聚光二次镜。设计棱台型二次镜时,通常在设计截面内考虑光线能够满足两次全反射条件。而棱台型二次镜相对于光轴是非旋转轴对称的,光线在非设计截面内的传播情况与在设计截面内有很大区别。采用向量法对棱台型二次镜非旋转轴对称性对光线全反射的影响进行研究,结果证明如果某光线在设计截面内满足两次全反射条件,则在非设计截面内与该光线相对应的与光轴夹角相同的光线,以棱台型二次镜相对的侧壁为一组,在任意一组侧壁中,均能满足两次全反射条件。为聚光系统中棱台型二次镜的设计给出了理论依据。

关键词 光学设计;几何光学;二次镜;向量;非设计截面;全反射

中图分类号 O435 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.022202

Study on the Influence of the Truncated Pyramid's Non-Rotating Axisymmetry on the Light TIR

Gao Jun Yuan Aiyi Hao Guoqiang Li Hongbo

(Shanghai Solar Energy Research Center, Shanghai 200241, China)

Abstract A truncated pyramid is usually used as a secondary optical element in the concentrated photovoltaic system. Usually, the total internal reflection (TIR) condition should be met twice in the design section when designing the truncated pyramid. However, the truncated pyramid is non-rotating axisymmetric relative to the optical axis. The propagation situation of the light in the non-design section is different with the one in the design section. The influence of the truncated pyramid's non-rotating axisymmetry on the light TIR is studied with the vector method. It is proved that if a light in the design section meets the TIR condition twice, then setting the opposite sidewalls as a group, the light which has the same included angle with the axis in the non-design section meets the TIR condition twice in both groups. This provides a basis for the design of the truncated pyramid secondary optical elements.

Key words optical design; geometric optics; secondary mirror; vector; non-design section; total internal reflection

OCIS codes 220.2740; 080.2740; 080.3620; 080.4295

1 引言

聚光光伏发电(CPV)技术旨在用相对比较廉价的聚光元件来代替昂贵的太阳能电池,减小电池面积,从而降低整个系统的成本^[1~3],提高光伏发电的经济竞争力;同时,CPV发电系统常采用高效率的 III-V 三结 GaAs 电池,相比于常规的硅基太阳能电池,效率较高^[4,5],可减少系统占地面积,节约土地资源。因此,CPV 技术具有广阔的应用前景^[6]。

CPV 系统包括聚光光学系统、接收器以及跟踪系统 3 个主要部分。聚光光学系统收集太阳光,将太阳光汇聚到接收器的电池片上,是整个系统中一个极其重要的部分。聚光光学系统的优劣常常决定了整个

收稿日期: 2012-10-10; **收到修改稿日期**: 2012-11-22; **网络出版日期**: 2013-01-11

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划(10XD1422500)资助课题。

作者简介: 高俊(1988—),男,硕士研究生,主要从事聚光光伏系统方面的研究。E-mail: gaojun@solarcell.net.cn

导师简介: 李红波(1973—),男,研究员,主要从事光伏技术方面的研究。E-mail: lihongbo@solarcell.net.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

CPV 系统的性能。聚光光学系统通常由一个菲涅耳透镜及二次镜组成^[7]。电池面上的光照均匀性对系统的发电性能有着重要的影响^[8],因此在系统中加入二次镜以改善光照均匀性^[9]。

Zamora 等^[10]介绍了多种二次镜并进行了一些比较,其中棱台型二次镜是一种比较常用的二次镜。棱台型二次镜主要依靠光线的全反射原理,使光线在其内部通过多次全反射到达出射面而被接收器接收。Fu 等^[11]给出了棱台型二次镜参数的设计思路。通常在设计棱台型二次镜时,入射面的尺寸由在一定入射偏差角下入射面上的光斑尺寸决定,出射面尺寸由接收器电池尺寸决定。为了保证出射面上较高的均匀度,二次镜的长度需要足够长,以保证光线能在二次镜侧壁发生多次弹射。但光线经多次弹射后容易打破全反射条件而从侧壁出射^[11]。因此,综合考虑下,可取光线在设计截面内(设计截面为过光轴、并且与入射面的交线为入射面对边中点连线的截面)能够满足两次全反射条件,从而确定二次镜长度参数。

然而,棱台型二次镜相对于光轴来说,显然是非旋转轴对称的,文献中均没有对设计截面内光线与非设计截面内光线的传播情况加以区分。而非设计截面内的光线在二次镜内部的传播情况比较复杂,特别是非设计截面内的光线在二次镜内部能否满足全反射条件,对系统的效率有着非常重要的影响。因此,需要对棱台型二次镜非旋转轴对称性对光线全反射的影响进行研究。本文采用向量法对这一问题进行研究,为棱台型二次镜的设计提供理论依据。

2 向量法研究棱台型二次镜非旋转轴对称问题

2.1 光线在棱台型二次镜侧壁处全反射的向量法表示

假设入射光线用向量 \mathbf{a}_1 表示,全反射界面法向量用 \mathbf{b} 表示,入射光线与侧壁界面的夹角可由向量 \mathbf{a}_1 和 \mathbf{b} 求出。

如图 1 所示,将入射光线 \mathbf{a}_1 分解为与法向量 \mathbf{b} 相垂直与相平行的两个向量 \mathbf{x} 及 \mathbf{y} ,根据反射规律可知,将平行分量 \mathbf{y} 反向、垂直分量 \mathbf{x} 保持不变,合成后的向量 $\mathbf{x} - \mathbf{y}$ 即可表示经界面反射后的反射光线。

设 $\mathbf{a}_1 = (a_1, a_2, a_3)$, $\mathbf{b} = (b_1, b_2, b_3)$; $\mathbf{y} = k\mathbf{b}$, $k \neq 0$;
 $\mathbf{x} + \mathbf{y} = \mathbf{a}_1$, $\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} = 0$,求得

$$k = \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3}{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2}. \quad (1)$$

为了计算方便,取侧壁法向量 \mathbf{b} 的模为 1,则

$$k = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3, \quad (2)$$

即可求得反射光线

$$\mathbf{a}_2 = \mathbf{x} - \mathbf{y} = \mathbf{a}_1 - 2\mathbf{y} = \mathbf{a}_1 - 2k\mathbf{b}. \quad (3)$$

通过上述计算可求得反射光线 \mathbf{a}_2 ,而反射光线 \mathbf{a}_2 即为下一次入射到侧壁界面时的入射光线,计算其与侧壁的夹角,即可判定是否满足全反射条件。

2.2 设计截面内的光线在侧壁处的全反射情况

设棱台型二次镜侧壁倾角为 ϵ ,从菲涅耳透镜出射的某条光线与光轴的夹角为 β ,其经过二次镜入射面折射后,该角度变为 β' ,光线与侧壁夹角为 Ψ_0 。如图 2 所示,在设计截面内,入射到二次镜侧壁上的光线与侧壁夹角满足以下关系:

$$\begin{cases} \Psi_{01} = \beta' + \epsilon \\ \Psi_{02} = \beta' + 3\epsilon \end{cases}$$

2.3 非设计截面内光线在侧壁处的全反射情况

考虑在非设计截面内相对应的光线,该光线与光轴

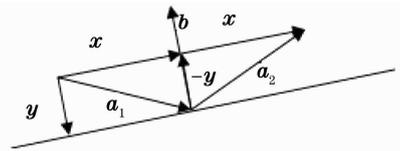


图 1 光线在界面处反射的向量分解示意图

Fig. 1 Vector decomposition of ray at the reflection interface

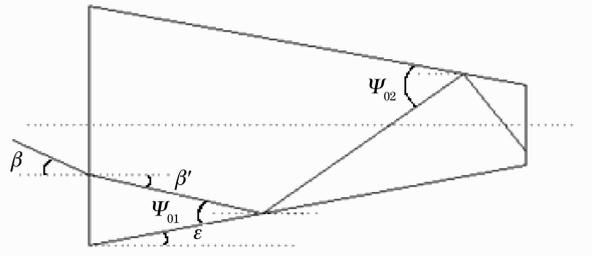


图 2 设计截面内各角度关系图

Fig. 2 Relation among angles in the design section

夹角同样为 β ，经二次镜入射面折射后，角度同样变为 β' ，该光线所在截面与设计截面夹角设为 θ ，如图 3 所示， $0^\circ < \theta < 45^\circ$ 。

从菲涅耳透镜往棱台型二次镜方向看，将二次镜的 4 个侧壁分别记为上、下、左、右 4 个侧壁。将棱台型二次镜的上、下、左、右 4 个侧壁的法向量设为 \mathbf{b}_1 、 \mathbf{b}_2 、 \mathbf{b}_3 和 \mathbf{b}_4 ，为了方便计算，法向量模取为 1，根据侧壁倾角 ϵ ，可得

$$\mathbf{b}_1 = (0, -\cos \epsilon, -\sin \epsilon), \mathbf{b}_2 = (0, \cos \epsilon, -\sin \epsilon),$$

$$\mathbf{b}_3 = (-\cos \epsilon, 0, -\sin \epsilon), \mathbf{b}_4 = (\cos \epsilon, 0, -\sin \epsilon).$$

对于非设计截面内的光线，也用向量方式进行表示，如图 4 所示。此时有

$$a_1 = -\rho \sin \beta' \sin \theta, \quad a_2 = -\rho \sin \beta' \cos \theta,$$

$$a_3 = \rho \cos \beta'.$$

取 $\rho=1$ ，得入射光线

$$\mathbf{a}_1 = (-\sin \beta' \sin \theta, -\sin \beta' \cos \theta, \cos \beta'). \quad (4)$$

由于二次镜的上下、左右及中心对称，非设计截面内光线在二次镜内部的传播情况可总结为 3 种不同情况，光线依次弹射到：1) 下、右、左、上；2) 下、右、上、左；3) 下、上、右、左。下面对这 3 种情况分别进行研究。

首先讨论下、右、左、上的情况。

入射光线 $\mathbf{a}_1 = (-\sin \beta' \sin \theta, -\sin \beta' \cos \theta, \cos \beta')$ ，

求 \mathbf{a}_1 与下侧壁的夹角

$$\begin{aligned} \sin \Psi_1 &= -\mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{b}_2 = \sin \beta' \cos \theta \cos \epsilon + \cos \beta' \sin \epsilon \leq \\ &\sin \beta' \cos \epsilon + \cos \beta' \sin \epsilon = \sin(\beta' + \epsilon), \end{aligned}$$

即证得

$$\Psi_1 \leq \beta' + \epsilon. \quad (5)$$

(5) 式表示对于在非设计截面内的光线，照射到第一个侧壁面时，与侧壁面的夹角要小于与其相对应的在设计截面内的光线与侧壁的夹角，即说明如果设计截面内的偏折角为 β 的光线照射到第一个侧壁时能发生全反射，则与其对应的在非设计截面内偏折角同样为 β 的光线，一定同样满足全反射条件。

下面继续计算光线接下来在各侧壁的弹射情况。

根据 (2)、(3) 式可求得 \mathbf{a}_1 的反射光线 \mathbf{a}_2 ：

$$\mathbf{a}_2 = (-\sin \beta' \sin \theta, 2\cos \beta' \sin \epsilon \cos \epsilon + \sin \beta' \cos \theta \cos 2\epsilon, \cos \beta' \cos 2\epsilon - 2\sin \beta' \cos \theta \sin \epsilon \cos \epsilon). \quad (6)$$

求 \mathbf{a}_2 与右侧壁的夹角：

$$\begin{aligned} \sin \Psi_2 &= -\mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{b}_4 = \sin \beta' \sin \theta \cos \epsilon + \cos \beta' \sin \epsilon \cos 2\epsilon - 2\sin \beta' \cos \theta \sin^2 \epsilon \cos \epsilon = \\ &\sin \beta' \sin \theta \cos \epsilon + \cos \beta' \sin \epsilon - 2\cos \beta' \sin^3 \epsilon - 2\sin \beta' \cos \theta \sin^2 \epsilon \cos \epsilon \leq \\ &\sin \beta' \cos \epsilon + \cos \beta' \sin \epsilon = \sin(\beta' + \epsilon), \end{aligned}$$

即证得

$$\Psi_2 \leq \beta' + \epsilon. \quad (7)$$

这说明经过下侧壁弹射后到达右侧壁的光线，与右侧壁的夹角同样小于 $\beta' + \epsilon$ ，即与光线在下侧壁上的弹射情况相类似。由此可知， Ψ_2 并没有因为光线经过了下侧壁的弹射而相对于 Ψ_1 有明显增大。

同理求得 \mathbf{a}_2 的反射光线 \mathbf{a}_3 ：

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_3 &= (-\sin \beta' \sin \theta \cos 2\epsilon + \cos \beta' \cos 2\epsilon \sin 2\epsilon - \sin \beta' \cos \theta \sin^2 2\epsilon, \cos \beta' \sin 2\epsilon + \sin \beta' \cos \theta \cos 2\epsilon, \\ &\cos \beta' \cos^2 2\epsilon - \sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon \cos 2\epsilon - \sin \beta' \sin \theta \sin 2\epsilon), \end{aligned} \quad (8)$$

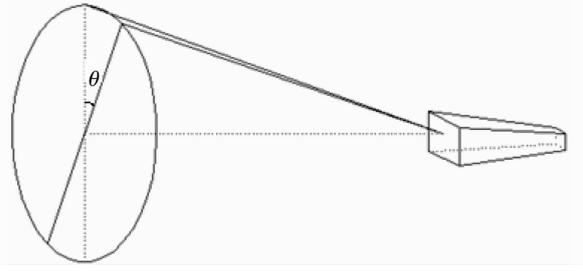


图 3 非设计截面与设计截面夹角示意图

Fig. 3 Included angle between the non-design and design sections

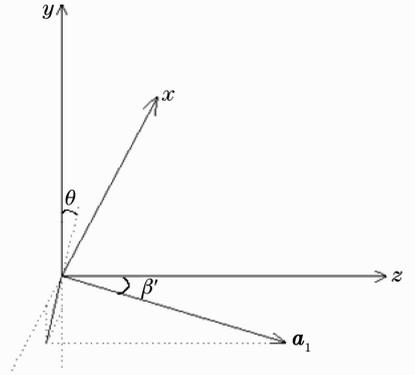


图 4 非设计截面内入射光线的向量表示

Fig. 4 Vector representation of the incident light in the non-design section

求 \mathbf{a}_3 与左侧壁的夹角:

$$\begin{aligned}\sin \Psi_3 &= -\mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{b}_3 = \sin \beta' \sin \theta \cos 2\epsilon \cos \epsilon + \cos \beta' \cos 2\epsilon \sin \epsilon \cos \epsilon + \cos \beta' \cos^2 2\epsilon \sin \epsilon - \\ &\sin \beta' \cos \theta \sin^2 2\epsilon \cos \epsilon - \sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon \cos 2\epsilon \sin \epsilon - \sin \beta' \sin \theta \sin 2\epsilon \sin \epsilon = \\ &\sin \beta' \sin \theta \cos 3\epsilon + \cos \beta' \cos 2\epsilon \sin \epsilon \cos \epsilon + \cos \beta' \cos^2 2\epsilon \sin \epsilon - \\ &\sin \beta' \cos \theta \sin^2 2\epsilon \cos \epsilon - \sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon \cos 2\epsilon \sin \epsilon < \\ &\sin \beta' \sin \theta \cos 3\epsilon + \cos \beta' \cos 2\epsilon \sin \epsilon \cos \epsilon + \cos \beta' \cos^2 2\epsilon \sin \epsilon < \\ &\sin \beta' \cos 3\epsilon + \cos \beta' \cos 2\epsilon \sin \epsilon (\cos \epsilon + \cos 2\epsilon) < \sin \beta' \cos 3\epsilon + \cos \beta' \cos 2\epsilon \sin 2\epsilon < \\ &\sin \beta' \cos 3\epsilon + \cos \beta' \sin 3\epsilon = \sin(\beta' + 3\epsilon).\end{aligned}$$

即证得

$$\Psi_3 \leq \beta' + 3\epsilon. \quad (9)$$

(9)式表示对于在非设计截面内的光线,经过下面、右面后弹射到左侧壁时,其与左侧壁面的夹角要小于与其相对应的在设计截面内的光线第二次弹射到侧壁时与侧壁的夹角,即说明如果设计截面内的偏折角为 β 的光线能在第二次弹射到侧壁时发生全反射,则与其对应的在非设计截面内偏折角同样为 β 的光线,经过下、右侧壁后,弹射到左侧壁时,同样满足全反射条件。

同理求得 \mathbf{a}_3 的反射光线 \mathbf{a}_4 :

$$\begin{aligned}\mathbf{a}_4 &= (\sin \beta' \sin \theta \cos 2\epsilon + \cos \beta' \cos 2\epsilon \sin 2\epsilon - \sin \beta' \cos \theta \sin^2 2\epsilon - 2\sin \beta' \sin \theta \cos 2\epsilon \cos^2 \epsilon - \\ &2\cos \beta' \cos 2\epsilon \sin 2\epsilon \cos^2 \epsilon + 2\sin \beta' \cos \theta \sin^2 2\epsilon \cos^2 \epsilon - 2\cos \beta' \cos^2 2\epsilon \sin \epsilon \cos \epsilon + \\ &2\sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon \cos 2\epsilon \sin \epsilon \cos \epsilon, \cos \beta' \sin 2\epsilon + \sin \beta' \cos \theta \cos 2\epsilon, \cos \beta' \cos^2 2\epsilon - \\ &\sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon \cos 2\epsilon - \sin \beta' \sin \theta \sin 2\epsilon - 2\sin \beta' \sin \theta \cos 2\epsilon \sin \epsilon \cos \epsilon - 2\cos \beta' \cos 2\epsilon \sin 2\epsilon \sin \epsilon \cos \epsilon + \\ &2\sin \beta' \cos \theta \sin^2 2\epsilon \sin \epsilon \cos \epsilon - 2\cos \beta' \cos^2 2\epsilon \sin^2 \epsilon + 2\sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon \cos 2\epsilon \sin^2 \epsilon + 2\sin \beta' \sin \theta \sin 2\epsilon \sin^2 \epsilon),\end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}\sin \Psi_4 &= -\mathbf{a}_4 \cdot \mathbf{b}_1 = \cos \beta' \sin 2\epsilon \cos \epsilon + \sin \beta' \cos \theta \cos 3\epsilon + \cos \beta' \cos^2 2\epsilon \sin \epsilon + \\ &2\sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon \sin^3 \epsilon - \sin \beta' \sin \theta \sin 2\epsilon \sin \epsilon - 2\sin \beta' \sin \theta \sin^2 \epsilon \cos 3\epsilon - \\ &2\sin 2\epsilon \sin^2 \epsilon \cos \epsilon (\cos \beta' \cos 2\epsilon - \sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon) - 2\cos 2\epsilon \sin^3 \epsilon (\cos \beta' \cos 2\epsilon - \sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon) < \\ &\cos \beta' \sin 2\epsilon \cos \epsilon + \sin \beta' \cos \theta \cos 3\epsilon + \cos \beta' \cos^2 2\epsilon \sin \epsilon + 2\sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon \sin^3 \epsilon.\end{aligned} \quad (11)$$

下面证明(11)式小于 $\sin(\beta' + 3\epsilon)$:

$$\begin{aligned}\sin(\beta' + 3\epsilon) &- \cos \beta' \sin 2\epsilon \cos \epsilon - \sin \beta' \cos \theta \cos 3\epsilon - \cos \beta' \cos^2 2\epsilon \sin \epsilon - \\ &2\sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon \sin^3 \epsilon = \sin \beta' \cos 3\epsilon (1 - \cos \theta) + \cos \beta' \sin \epsilon \cos 2\epsilon - \cos \beta' \cos^2 2\epsilon \sin \epsilon - \\ &2\sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon \sin^3 \epsilon < \cos \beta' \sin \epsilon \cos 2\epsilon (1 - \cos 2\epsilon) - 2\sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon \sin^3 \epsilon = \\ &\cos \beta' \sin \epsilon \cos 2\epsilon \cdot 2\sin^2 \epsilon - 2\sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon \sin^3 \epsilon = \sin \epsilon \cdot 2\sin^2 \epsilon (\cos \beta' \cos 2\epsilon - \sin \beta' \cos \theta \sin 2\epsilon) > \\ &\sin \epsilon \cdot 2\sin^2 \epsilon \cos(\beta' + 2\epsilon) > 0,\end{aligned} \quad (12)$$

即证得

$$\Psi_4 < \beta' + 3\epsilon. \quad (13)$$

这说明经过下、右、左侧壁弹射后到达上侧壁的光线,与上侧壁的夹角小于 $\beta' + 3\epsilon$,即说明如果设计截面内的偏折角为 β 的光线能在第二次弹射到侧壁时发生全反射,则与其对应的在非设计截面内偏折角同样为 β 的光线,经过下、右、左侧壁弹射后,弹射到上侧壁时,同样满足全反射条件。 Ψ_4 并没有因为经过了左侧壁的弹射而相对于 Ψ_3 有明显增大。

同理可求得在下、右、上、左弹射情况下光线在二次镜内部各侧壁弹射时与该侧壁的夹角满足

$$\Psi'_1 < \beta' + \epsilon, \quad \Psi'_2 < \beta' + \epsilon, \quad \Psi'_3 < \beta' + 3\epsilon, \quad \Psi'_4 < \beta' + 3\epsilon.$$

在下、上、右、左的情况下光线在二次镜内部各侧壁弹射时与该侧壁的夹角满足

$$\Psi''_1 < \beta' + \epsilon, \quad \Psi''_2 < \beta' + 3\epsilon, \quad \Psi''_3 < \beta' + \epsilon, \quad \Psi''_4 < \beta' + 3\epsilon.$$

通过对上面3种情况的研究可以发现,将上、下、左、右4个侧壁分为两组,上、下侧壁和左、右侧壁各为一组,光线在这两组侧壁之间弹射时,具有一定的独立性,即光线弹射到某一侧壁时与该侧壁的夹角主要与光

线在该组侧壁上弹射的次数有关,而与其在另一组侧壁上的弹射情况没有直接关系;如果设计截面内的偏折角为 β 的光线满足两次全反射条件,则与其对应的在非设计截面内偏折角同样为 β 的光线也满足两次全反射条件,并且这时的“满足两次全反射条件”是指在上述两组侧壁中的任意一组侧壁中均能各自保证两次全反射。

2.4 Lighttools 仿真验证

采用 Lighttools 光线追迹的方法,对前述结论进行仿真验证。仿真验证模型中,棱台型二次镜材料设为 K9 玻璃,其几何尺寸根据光线经过菲涅耳透镜后的最大偏折角 $\beta_{\max}=30.78^\circ$ 而进行设计,入射面尺寸为 $17\text{ mm}\times 17\text{ mm}$,出射面尺寸为 $5.5\text{ mm}\times 5.5\text{ mm}$,长为 33.65 mm ,光线追迹时的光线波长为 550 nm 。为了方便观察,将二次镜进行了一定角度的旋转。图 5 中红色光线在设计截面内,其与水平方向夹角 β_{\max} 为二次镜设计时依据的最大偏折角,蓝色光线在非设计截面内,取两截面夹角为 40° ,蓝色光线与水平方向夹角同样为 β_{\max} 。由图 5 仿真结果可以看出,在设计截面内的红色光线,在二次镜内部满足两次全反射条件;与其对应的蓝色光线,与二次镜侧壁发生四次弹射,均满足全反射条件,以相对的侧壁为一组,即蓝色光线在任意一组侧壁中,均能各自保证两次全反射,与前述的证明结果相一致。

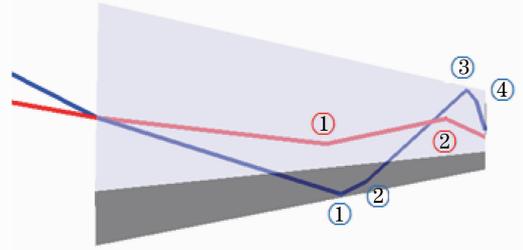


图 5 设计截面内光线与非设计截面内光线在二次镜内部的传播情况比较

Fig. 5 Light propagation in the design section and the non-design section in the secondary optical element

3 结 论

根据前述证明及仿真结果可以得到如下结论:在 CPV 聚光光学系统棱台型二次镜的设计时,以最大偏折角 β_{\max} 作为计算依据,保证偏折角为 β_{\max} 的光线在设计截面内能满足两次全反射条件,从而确定二次镜的长度参数,即可保证在一定入射偏差角情况下,以棱台型二次镜相对的侧壁为一组,所有光线在二次镜内部任意一组侧壁中,均能满足两次全反射条件。该结论为聚光系统中棱台型二次镜的设计给出了理论依据。

参 考 文 献

- 1 A. Gombert, I. Heile, J. Wullner *et al.*. Recent progress in concentrator photovoltaics[C]. *SPIE*, 2010, **7725**: 772508
- 2 Kwangsun Ryu, Jin-Geun Rhee, Kang-Min Park *et al.*. Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system[J]. *Solar Energy*, 2006, **80**(12): 1580~1587
- 3 Zhao Huifu, Liu Hua, Jing Lei *et al.*. Study of Indoor concentration Test System[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622006
- 4 赵会富, 刘 华, 荆 雷等. 室内聚光测试系统的研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 235~241
- 5 Ralf Leutz, Hans Philipp Annen, Ling Fu. Optical design for reliability and efficiency in concentrating photovoltaics[C]. *SPIE*, 2010, **7773**: 777304
- 6 Wang Wenbo, Li Ming, Ji Xu *et al.*. Investigation of the output characteristics of GaAs solar cell based on Fresnel concentrating system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 198~204
- 7 王文博, 李 明, 季 旭等. 菲涅耳聚光系统下砷化镓电池输出特性研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0716003
- 8 Du Chunxu, Wang Pu, Wu Yuting *et al.*. Concentration ratio analysis of linear Fresnel reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0808001
- 9 杜春旭, 王 普, 吴玉庭等. 线性菲涅耳聚光装置的聚光比分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0808001
- 10 M. Victoria, C. Dominguez, I. Anton *et al.*. Comparative analysis of different secondary optical elements for aspheric primary lenses[J]. *Opt. Express*, 2010, **17**(8): 6487~6492
- 11 Wang Yunfeng, Ji Jie, He Wei *et al.*. Performance analysis and design of paraboloidal dish solar concentrators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0122002
- 12 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): 0122001
- 13 Zhang Li, Chen Zhiming, Dong Qianmin *et al.*. Design and analysis of ring-shaped-focus Fresnel concentrator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(9): 092201
- 14 张 丽, 陈志明, 董前民等. 一种环面焦斑菲涅耳聚光器的设计与分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(9): 092201
- 15 Pablo Zamora, Pablo Benitez, Juan C. Minano *et al.*. High performance Fresnel-based photovoltaic concentrator[C]. *SPIE*, 2010, **7785**: 778504
- 16 Ling Fu, Ralf Leutz, Hans Philipp Annen. Secondary optics for Fresnel lens solar concentrators[C]. *SPIE*, 2010, **7785**: 778509