

用于轴对称的两级光学聚光器的非成像二次反射镜

陈应天^{1)2)†} 何祚庠¹⁾

1) (中国科学院理论物理研究所, 理论物理国家重点实验室, 北京 100190)

2) (北京应天阳光太阳能技术有限公司, 北京 100085)

(2013年3月29日收到; 2013年5月14日收到修改稿)

本文给出了一种用于轴对称的两级光学聚光器的非成像二次反射镜 (non-imaging secondary, NIS), 的工作原理. 在一般的情况下, NIS 是由并不限于常用的二次曲线或复合抛物线的高次曲线围绕一次反射镜的中心轴旋转而形成. 本文讨论了确定这样一种曲线的待定系数的求解方法. 在举例的计算中, 除了运用常用的二次曲线, 还特别运用了光学中至今从未用过的三次方曲线, 用以说明 NIS 可以由一般的高次曲线给出. 作为一个特例, 我们也讨论了新的光学元件在太阳能聚光方面的应用, 在这些应用中, 本文着重讨论了 NIS 在太阳光的盘面效应的影响下的聚光效果.

关键词: 非成像光学, 二次反射镜, 聚光光伏, 高次多项式

PACS: 42.15.Eq, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.62.134209

1 引言

同遵守费马原理的传统光学不同, 非成像光学仅遵守光线以及所携带的能量的收集最大化的原则, 它仅仅处理光线的矢量的振幅的叠加而不顾及光线之间的相位. 由于在许多应用中, 特别在聚集能量的应用中, 光束中某个粒子到达目标的时间是与能量无关的量, 所以非成像光学不遵守到达目标的光线的等光程差的原理. 非成像光学中的设计重点是研究光线的聚集、分散及目标上的光斑分布.

在非成像光学的设计中, 起到关键作用是 Winston 等^[1] 所提出的边缘光线原理, 此原理有十分严格的表述方式, 在本文所涉及到的简单的例子中, 我们可以理解成: 边缘光线原理是说, 如果我们仅仅考虑一束光线的两条边缘的光线, 这两条边缘光线能够落在给定的目标的两点上, 则本束光线的在边缘光线内的其他所有光线也自然落入由这两点所界定的目标范围之内.

最常用的非成像装置是一种被称为复合抛物面聚光器 (compound parabolic concentrator, CPC)^[2,3]. 这种聚光器如果在二维的情况下来表

示, 它是由两条中心轴相互倾斜的抛物线线段以一定的方式组合在一起而形成, 事实上如果将这两条抛物线的顶点和焦点适当地配置, 这样的双抛物线旋转所形成的复合抛物面聚光器可以提供一定大小的接收角, 在接收角的允许范围之内, 此非成像装置可以将平行入射的光线聚集在底部的目标上, 在不对光源进行跟踪的情况下, 入射角虽有小范围的变化, 而光线仍然可以聚焦在目标上. 为了增大所述聚光器的接收角, 在有些设计中还可以于聚光器中充满高折射率的透明物质, 以增大 CPC 的接收角. CPC 主要的两个缺点是它的有限的接收角 (几度范围) 和有限的聚光倍数 (2—4). 尽管如此, 由于 CPC 在设计简单性 (本身只是一级聚光器) 等方面的优点, 它有许多实际应用^[1,4].

在流量密度相当低的太阳能的应用中, 非成像光学更会显示出它的优越性. 在对太阳能光线的高倍聚光中, 使用非成像光学已经有了非常有趣的讨论. 由于非成像光学在汇聚太阳能的设计中的高效性, 有作者开始提出使用这种更加高效的方法能够将地球上的太阳光汇聚到比太阳表面还要明亮的程度, 并且有人已经宣称, 非成像光学的装置将

† 通讯作者. E-mail: ytichen@ustc.edu.cn

太阳能汇聚以后的光点已经超越太阳表面亮度的15%^[5,6],若这些实验结果是正确的,这是否会引起实验结果和热力学第二定律的矛盾呢?不管最后学术争论的结果如何,起码有一点可以肯定,在光学设计中,非成像光学手段的汇聚能力在某些特定条件下是优于成像光学的。

在由Winston等^[1]所发展出来的非成像光学的道路上,陈等人走了一条与其他作者不尽相同的学术路线,陈等人的工作是将非成像光学和自适应光学结合在一起,提出了一种自适应型非成像光学的分支。自适应光学是主动光学的一种,它是通过对光学镜面的变形来调节聚光的能力,特别是减少传统光学各种元件的固有的光像差。自适应光学一般使用成像光学的理论,对成像元件进行调节和改进。陈等人提出使用自适应手段对非成像元件进行调节和改进。在这样的学术路线上,他们发展了一种使用主动控制方法而使之变形的非成像反射的镜子,成功地制造出聚焦的非成像定日镜^[7]。在这种非成像的装置中,陈等人提出了使用子镜的行列运动代替欧拉运动的新的自适应的方法,提高了非成像定日镜的聚光效率。陈等人发现,使用他们最新发现的自转仰角公式^[8]可以很方便的同子镜的行列运动的主动控制相配合,而实现非成像光学的聚光。由此陈等人制造出一种新型的太阳炉^[9]。由于陈等人同其他作者不尽相同的学术路线,这就使陈等人发现,在非成像光学中所常用到的几何形状,除了CPC以外,还有许多其他形式,这是同其他作者不同之处,这些发展的学术途径可以简述成以下三个步骤:

1) 首先,从主动控制的非成像光学的一般理论出发,陈等人也对不使用自适应控制即固定几何面的非成像光学进行了研究。在这样的情况下,他们发展出一种在偏轴的情况下可以对光像差进行调整的几何曲面^[10],这是一种左右对称、上下不对称的高次曲面,同Ries等人的猜想相符合^[11,12]。新曲面主要是用于将运动目标的光线聚合在一个地球上的固定目标,在这样的情况下,入射角是时间的函数。对于这种新的曲面作者们讨论了一些有趣的应用,特别是一种全天跟踪使用的太阳灶^[13]。

2) 近些年来,作者又发现到关于入射角随时间变化的高次曲面的概念,可以扩展到入射角随位置而变化的情况。在这样的应用中,入射角相对于曲面的各个部分的法线是固定的,而对于不同部分的法线的入射角是变化的,也就是说,入射角的数值

随着曲面的位置变化而变化。作者提出的思考是,这样的曲面是不是也一般地应当是高次曲面呢?研究促使陈等人提出了一种新的非近轴高次柱面组成的平板式反射聚光器^[14],它可以在槽式发电的装置中使用一种近似平板的聚光器代替抛物线形状的曲面。

3) 最近,作者又进一步发展了上文中所提到的物理概念,将相同的思路从轴向的平面扩展到轴对称的旋转曲面。这样的研究也是属于一种入射角随位置变化的情况,作者发现这种轴对称旋转的曲面,在一般的情况下也是高次曲面。而这种高次曲面的应用则可以用来克服轴对称的聚光器原有的一些问题。本文正是在这个课题上进行详细的讨论。

2 传统的轴对称两级聚光器存在的问题

轴对称的两级反射聚光器包括有:一次反射镜,二次反射镜和光接收面。在成像光学中,二次反射镜一般是使用一个比一级反射镜较小的旋转抛物面。这样的传统设计存在两个主要缺点:第一,二次反射镜处在入射光的光路中,反射镜本身会在光接收面上投下阴影,二次反射镜的大小对光的利用效率产生相当影响。第二,一次反射镜的部分面积用于装置光电接收器,这些不能反射的部分会在二次反射镜的光像中形成一个阴影。不管是什么原因,传统光学设计的轴对称的两级反射聚光器所产生的阴影是不可避免的,这不但影响了光接收面接收效率,而且影响光接收面上光斑的均匀性。就太阳能应用而言,在光电装置中,光斑的均匀性是重要的,太阳能光伏发电中的一个重要指标是填充因子,最大输出功率与开环电压短路电流乘积之比。不均匀的光照会增加光电转化器的串联电阻,进而减少输出电流。具有阴影的任何光斑都应该看成是光照的不均匀性。另外,非均匀光照也容易产生许多光照十分集中的热点,而这些热点在很多情况下是会损坏太阳能电池的,特别在高倍聚光的情况下。

在太阳能高倍聚光的光电装置中,我们知道,一般的设计会在二次反射镜和光电池之间装有一种柱形的光耦合器,这种光耦合器使用全反射的原理可以防止光的外溢,同时也将入射光进一步地均匀化,这在某种程度上可以减少上文所述的阴影的效应,然而这样的设计不可避免地会增加装置的

成本和器件的复杂性, 对于阴影的影响只是减少而不是消除.

在本文中, 我们将讨论如何使用非成像二次反射镜 (NIS) 消除阴影以克服以上的困难. 我们并且将介绍用于以上目的的非成像反射镜的各种参数的计算方法. NIS 的应用不但会使聚光效率得到进一步提高, 而且使聚光系统更加简单, 重量更加减少.

3 形成 NIS 的两种光路

由于所研究的光学聚光器具有轴对称, 可以用二维的平面图表示. 在本文讨论中, 我们用 A, B, C, D 等表示点, 用 AB, CD 等表示穿过 A, B 或 C, D 点的线段、直线或曲线. 例如, 在图 1(a) 和 (b) 中我们用 CD 表示一个能够进行反射的曲线段并且用 B 表示位于反射镜边缘的点, 用 A 和 A' 表示一次反射镜和光接收区域的两个结合点, 用 C 和 D 表示从 A 和 B 出发的两条光线同待定的 NIS 的交点. 在图 1 中, 我们给出了两种使用 NIS 的光路, 二次反射曲面是由曲线 CD 围绕一次反射镜的对称轴旋转而产生. 在图 1(a) 和 (b) 中, CD 是所需待定的曲线, 其待定系数的一般求解方法将在本节中给出, 并在第四节中以二次方曲线为例给出待定系数的求解方法, 第 5 节中以三次方曲线为例给出待定系数的求解方法.

为了消除在光电接收器部分的阴影, 我们需要从 C 点反射的光线能够到达 A 点上, 同时还要求, 从点 D 所反射的光线能够到达 A' 点上. 这是消除阴影的基本要求, 由这样的条件, 我们可以决定的曲线线段的参数或者说曲线的形状, 这是本文所研究的主题. 如图 1(a) 所示, 上述的光路方案是将由 CD 反射的光接收面上的光线覆盖在 AA' 的直径上, 这是第一种达到本文所提出的目的的光路方案之一, 我们称之为第一种光线路径方案. 还有第二种光线路径方案如图 1(b) 所示, 在这种方案中, 由 CD 反射在光接收面上的光线不必覆盖在 AA' 的直径上, 只要覆盖在半径上即可以了, 就是说从 C 点所出发的反射光到达 O 点, 即 AA' 直径上的中点, 同时还要求从 D 点出发的反射光到达 A' 点.

不管在第一种或者第二种光线路径方案, 我们都使用了第一节中所述的边缘光线原理, 使用边缘光线原理和以上所述的第一种光路方案即将 C 点的光线投射到 A 点, D 点的光线投射到 A' 点的要

求, 则达到了我们所提出的将反射光线以无阴影和比较均匀的方式投入光电接收器的目的. 实际上这样的做法已经违背了成像光学的费马原理. 我们知道, 根据成像光学的变分原理, 必须要求下列的光程公式是成立的:

$$FC + CA = FD + DA'$$

而按照图 1(a) 所示的光路, 上式显然是不成立的. 所以由此推断, 使用以上要求所形成的曲线 CD, 并由曲线 CD 旋转所成的曲面是非成像曲面.

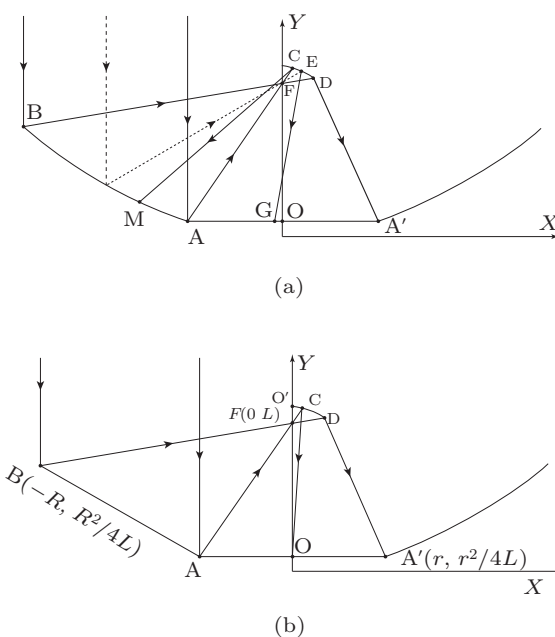


图 1 用于确定非成像反射镜几何形状的第一光线路径方案, 从 CD 反射回的光线覆盖在直径 AA' 上 (图中的 M 点是用来计算斜率所加的“补助点”, 在实践中, M 点与 A 点的位置非常接近); (b) 用于确定非成像反射镜几何形状的第二光线路径方案, 从 CD 反射到光接收区域的光线覆盖在半径 OA' 上

从以上的叙述中, 我们可以明显地体会到传统光学与非成像光学的区别, 在传统光学中, 我们只能使用已知形状的光学元件, 然后再确定可以据此做些什么事情, 如何达到我们的目标 (或者不能达到目标); 而在非成像光学中, 我们可以先确认需要的工作目标, 然后再确定光学元件的新的形状.

由于在非成像光学中我们可以放弃等光程差的要求, 在轴对称两级聚光器中, 可根据光线路径 1 或光线路径 2 的要求确认所需要的曲线, 这种曲线不必是抛物线, 它可以是椭球线, 也可以是双曲线或者其他. 所以在一般的情况下, 曲线的形状应当有如下的一般的高次多项式:

$$y = \alpha + \beta + \chi x + \delta x^2 + \epsilon x^3 + \phi x^4 + \dots, \quad (1)$$

其中 $\alpha, \beta, \chi, \delta, \varepsilon, \phi, \dots$ 为待定系数, 它们可以是常数, 也可以是焦距的函数, 也可以是顶点距离的函数, 也可以是拐点距离的函数等等. 如果这些待定函数的形式能够确定, 那么非成像反射镜的形状也就可以确定了. 在 (1) 式中, 有众多的待定函数需要确定, 那么我们是否有足够的边界条件来确定这些待定函数呢? 这个答案是肯定的, 因为可以理解这样的边界条件是无数的, 我们可以将 CD 线段与 AA' 线段进行任意的一一对应的分割, 在每个已经分割出来的对应的线段上应用边缘光线原理, 再根据反射定律建立相应的方程来求出这些待定函数. 再具体的说明一下, 假设 (1) 式中有 6 个待定函数 $\alpha, \beta, \chi, \delta, \varepsilon, \phi$, 那么我们可以根据对于在光接收面上的光强均匀的要求将 CD 和 AA' 分割成 5 个相对应的线段, 并且利用这 5 个线段的 6 个对应节点, 列出 6 个方程, 在图 1(a) 中, 这 6 个方程分别是代表从 C 到 A 的光路, 从 E 到 G 的光路... 从 D 到 A' 的光路, 在每一段中, 我们都可以使用边缘光线原理.

在图 1(b) 所示的光路 2 中, 我们没有画出这些线段的分割, 然而显然上述同样的方法也可以适用于第二方案.

当然求解以上所讨论的多组方程将会有巨大的计算量, 且在一般应用中也没有多少必要. 我们可以选择 CD 曲线段的函数类型进行本文的讨论, 实际上这样的选择并不会使本文的处理失去一般性. 我们曾经用过一次方曲线, 二次方曲线和三次方曲线对以上要求进行不同的匹配, 在本文中, 对此我们会举例说明. CD 曲线的表达式中的函数或函数的参量的确定, 如图 1(a) 和 (b) 所示可以由 6 条直线的关系根据光线反射定律推导出, 对于 CA 和 DA' 两条直线, 其反射定律组成以下方程组:

$$\left| \frac{k_1 - k_c}{1 + k_1 k_c} \right| = \left| \frac{k_3 - k_c}{1 + k_3 k_c} \right|, \quad (2)$$

和

$$\left| \frac{k_2 - k_d}{1 + k_2 k_d} \right| = \left| \frac{k_4 - k_d}{1 + k_4 k_d} \right|. \quad (3)$$

其中, k_1 是从 A 到 C 入射光线直线的斜率; k_2 是从 B 到 B 入射光线直线的斜率; k_3 是从 C 反射到 A(在第一光路方案中) 或反射到 O(在第二光路方案中) 的光线的斜率; k_4 是从 D 反射到 A' 的光线的斜率; k_c 是 CD 曲线处于 C 点的切线的斜率; 和 k_d 是 CD 曲线处于 D 点的切线的斜率.

为了表达这些斜率, 首先, 我们需要在图 1(a) 和 (b) 所示的 X-Y 坐标系中确定以下坐标: B 点、O 点、A 点、A' 点和 F 点. 当然我们必须事先确认一次反射镜的方程式如下:

$$y = \frac{x^2}{4L}, \quad x \in (-R, R), \quad (4)$$

其中 L 为一次反射镜的焦距, R 为反射镜的半径.

同时, 我们也假设光电接收面的大小为直径 $2r$ 的圆面; 于是按图 1(a) 和 (b) 中所示的直角坐标系中我们写出已知点的坐标如下:

$$\begin{aligned} & B\left(-R, \frac{R^2}{4L}\right), \quad A\left(-r, \frac{r^2}{4L}\right), \quad A'\left(r, \frac{r^2}{4L}\right), \\ & F(0, L), \quad O\left(0, \frac{r^2}{4L}\right). \end{aligned}$$

有了以上所描述的知识, 非成像反射镜的设计过程则可采用以下步骤:

- 1) 选择所需曲线的类型, 并写出它们的一般表达式, 表达式中的系数待定;
- 2) 计算出所需曲线同入射的两条边缘光线 BF 与 AF 的交点 C 和 D 的坐标的表达式;
- 3) 根据不同的光线路径方案, 计算出从 C 和 D 点出发的反射光线直线, 得出 k_3 和 k_4 的表达式;
- 4) 根据曲线的类型和 C, D 的坐标, 给出 k_c 和 k_d 的表达式.

实际上以上所计算出的各种斜率是含有待定函数的表达式, 将它们代入反射定律的 (2) 和 (3) 式, 计算出待定函数以确定曲线的几何形状.

为了举例说明上述的 (1) 式的高次多项式曲线可以用于设计非成像反射镜, 我们分别给出使用二次及三次函数的解. 从这些研究中, 我们会发现在以往的设计中, 设计者基本上使用二次函数的传统是可以改变的.

4 使用二次函数设计 NIS

由于在第三节中, 我们指出了形成 NIS 有两种不同的光路, 在本节及下节的具体的举例中本来应当对于不同的光路给出不同的 NIS 的解, 但这会使本文十分的冗长, 为简明起见, 我们仅使用光路 2 为例做出 NIS 的解, 然而本文作者会在更详细的报告中同时给出光路 1 和光路 2 的解, 有兴趣的读者可以同作者索取更详细的资料.

如图 1(b) 所示, 在没有失去一般性的情况下,

二次函数可假设为

$$y = y_0 - \frac{(x+a)^2}{4l}, \quad (5)$$

其中 y_0, a, l 为待定系数, l 是 NIS 曲线的焦距, $(-a,$

$y_0)$ 是所述二次函数抛物线的顶点的坐标位置.

在第二光线路径方案中, 从 C 点反射的光达到 O 点, 图 1(b) 中的光接收区域的中点, 依据第三节所述的程序, 我们给出“ k ”方程如下:

$$k_1 = \frac{L}{r} - \frac{r}{4L}, \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{L}{R} - \frac{R}{4L}, \quad (7)$$

$$k_3 = \frac{\left(\frac{L}{r} - \frac{r}{4L}\right) \left(\frac{lr}{2L} - \frac{2lL}{r} - a + \frac{\sqrt{\frac{16L^2l^2}{r^2} - 8l^2 + \frac{l^2r^2}{L^2} - 16lL + 16ly_0 + \frac{16alL}{r} - \frac{4arl}{L}}}{2}\right) + L - \frac{r^2}{4L}}{\frac{lr}{2L} - \frac{2lL}{r} - a + \frac{\sqrt{\frac{16L^2l^2}{r^2} - 8l^2 + \frac{l^2r^2}{L^2} - 16lL + 16ly_0 + \frac{16alL}{r} - \frac{4arl}{L}}}{2}}, \quad (8)$$

$$k_4 = \frac{\left(\frac{L}{R} - \frac{R}{4L}\right) \left(\frac{lR}{2L} - \frac{2lL}{R} - a + \frac{\sqrt{\frac{16L^2l^2}{R^2} - 8l^2 + \frac{l^2R^2}{L^2} - 16lL + 16ly_0 + \frac{16alL}{R} - \frac{4alR}{L}}}{2}\right) + L - \frac{r^2}{4L}}{\frac{lR}{2L} - \frac{2lL}{R} - a + \frac{\sqrt{\frac{16L^2l^2}{R^2} - 8l^2 + \frac{l^2R^2}{L^2} - 16lL + 16ly_0 + \frac{16alL}{R} - \frac{4alR}{L}}}{2}} - r, \quad (9)$$

$$k_c = -\frac{\left(\frac{lr}{2L} - \frac{2lL}{r} + \frac{\sqrt{\frac{16L^2l^2}{r^2} - 8l^2 + \frac{l^2r^2}{L^2} - 16lL + 16ly_0 + \frac{16alL}{r} - \frac{4arl}{L}}}{2}\right)}{2l}, \quad (10)$$

$$k_d = -\frac{\left(\frac{lR}{2L} - \frac{2lL}{R} + \frac{\sqrt{\frac{16L^2l^2}{R^2} - 8l^2 + \frac{l^2R^2}{L^2} - 16lL + 16ly_0 + \frac{16alL}{R} - \frac{4alR}{L}}}{2}\right)}{2l}. \quad (11)$$

将 (6)—(11) 式代入方程组 (2) 和 (3) 式中, 使用一个有意义的 y_0 的数值, a 和 l 则可以求出. 以此确定所需要的 NIS 的形状.

5 使用三次函数设计 NIS

为简单起见, 我们仍然使用光路 2 来讨论三次函数的 NIS 的设计. 如图 1(b) 所示, 在没有失去一般性的情况下, 三次函数可由下式表示:

$$y = \alpha + \beta(x + \gamma)^3, \quad (12)$$

其中, $(a, -\gamma)$ 是三次方曲线拐点的坐标位置; β 是曲线 CD 的曲率的度量, 显然, 在图 1(b) 中, β 是负数. 同以上讨论相同, α 可以预先设置.

在执行第三节中所述的计算步骤中, 最关键的部分是求得直线与三次方曲线 (12) 式的交点 C 点

和 D 点的坐标, 此坐标的取得需要求解待定系数作为未知数的两个三次方程:

$$\beta(x_c + \gamma)^3 + \alpha - \left(\frac{L}{r} - \frac{r}{4L}\right)x_c - L = 0, \quad (13)$$

$$y_c = \left(\frac{L}{r} - \frac{r}{4L}\right)x_c + L, \quad (14)$$

$$\beta(x_d + \gamma)^3 + \alpha - \left(\frac{L}{R} - \frac{R}{4L}\right)x_d - L = 0, \quad (15)$$

$$y_d = \left(\frac{L}{R} - \frac{R}{4L}\right)x_d + L. \quad (16)$$

我们知道, 三次方程是有严格解的, 但是由于其在 (13) 和 (15) 式中的未知数是待定系数不是纯粹的数字, 这就给求解带来复杂性. 为计算方便起见, 作者提出了一套逐次逼近的方法, 用数字法求解此问题, 介绍如下.

首先, 我们可以通过其他不严格的方法, 例如作图法等等猜出一对关于 x_0 和 x_d , (同时, 依据 (14) 式和 (16) 式, y_c 和 y_d 也能由此求得) 的数值, 将它们代入下列的“ k ”方程中:

$$k_1 = \frac{L}{r} - \frac{r}{4L}, \quad (17)$$

$$k_2 = \frac{L}{R} - \frac{R}{4L}, \quad (18)$$

$$k_3 = \frac{y_c - \frac{r^2}{4L}}{x_c}, \quad (19)$$

$$k_4 = \frac{y_d - \frac{r^2}{4L}}{x_d - r}, \quad (20)$$

$$k_c = 3\beta(x_c + \gamma)^2, \quad (21)$$

$$k_d = 3\beta(x_d + \gamma)^2. \quad (22)$$

将以上六式代入方程组 (2) 式和 (3) 式, 求出一组 β 和 γ 的数值. 然后用这一组数值代入 (17)—(22) 式, 求出第二轮的 x_c, x_d, y_c 和 y_d 的数值, 将取得的 C, D 的坐标值代入 k 方程 (17)—(22) 式, 并将它们代入 (2)—(3) 式求出第二轮的 β 和 γ 数值... 多次重复以上过程, 直到输入的 β 和 γ 的数值与输出的 β 和 γ 数值尽可能地接近.

设计举例: 设计目标为聚光倍数为 8 的低倍聚光器, 设计数据为 $L = 120 \text{ mm}, R = 225 \text{ mm}, r = 75 \text{ mm}, \alpha = 135 \text{ mm}$, 使用图 1(b) 中所示的光线路径 2, 使用上述的逐次逼近法, 我们有

$$\beta = -0.00004073, \quad \gamma = 46.67.$$

画出一个三次曲线段

$$y(x) = 135\text{mm} - 0.00004073(x + 46.67)^3, \\ [x \in (0, 25\text{mm})].$$

然后, 绕中心轴线 OO' 旋转, 就能获得所要求的用于低倍聚光光伏即 LCPV 的三次曲线的非成像反射镜. 图 2 给出了一个这样设计的样品的照片, 在这种设计中, 三次曲线被第一次用于实践中, 实测结果达到了理论设计的指标.

6 关于使用高次函数设计 NIS 的讨论

本文提出了在 NIS 设计中可使用高于二次的高次函数, 在上节中我们又具体地以三次曲线为例说明此法可行. 本文的工作, 在光学中使用高次函数曲面我们仅仅是迈了第一步. 高次函数的特点在于曲线的二次或以上的导数不为常数, 这就提供了

更多的设计参数使无光像聚光的效果更好. 这些新的设计参数可在实际中使得由于镜片的磨制、目标跟踪、入射光线的平行性 (包括太阳光线的盘面效应) 等不精确性在器件的制造中得到一定的宽容.

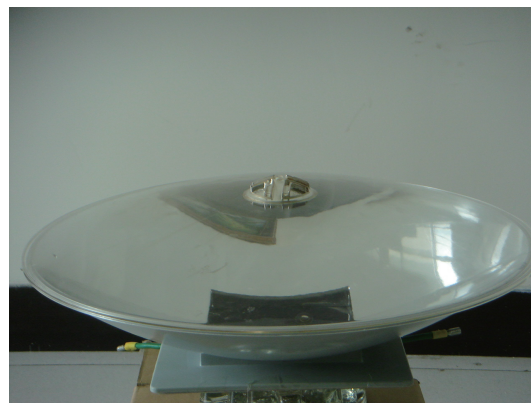


图 2 使用三次曲线作为旋转曲面的非成像反射镜的实验样品照片

另外, 更重要的是, 下面的讨论可以定性地了解使用高次曲线制作 NIS, 不光是由它的优越性所决定, 而实际上, 一般讲来, NIS 的形状必须是高次函数. 我们举例说明这点: NIS 的设计非常复杂, 特别在高倍聚光的情况下, 这种设计的复杂性如同透射式高倍聚光. 在此设计中, 一次反射面的面积远远大于接收面, 由于散热和工业制造等具体原因, NIS 的面积不能过小, 这就造成了 NIS 大于目标面积的情况. 在这样的光学设计中, NIS 反射的光线在到达目标之前就会有交叉的现象, 这种光线的交叉会破坏所述的边缘光线的原理. 这就需要在具体设计中要将 NIS 切割成足够小的反射线段, 使每个反射线段中边缘光线原理成立. 从而设计出能够均匀反射的 NIS, 这样设计出来的 NIS 形状必定是由高次曲线所描述的. 我们将在使用本文的方法设计 1200 倍的高倍聚光的工作中对此进行更加详细讨论.

7 关于 NIS 用于太阳能聚光的讨论

以上讨论是对于一般的光学聚光器而进行的, 将所提出的 NIS 及其光学系统用于太阳能聚光, 特别是聚光光伏, 具有一些特殊之处, 本节简述如下:

1) 以上仅讨论了将光电器件放置在 AA' 面上的情况, 实际上, 沿用相同的方法可以讨论在光伏应用中, 将光电器件放置在不同位置上的情况. 在

这种情况下, k 方程中的 k_1, k_2, k_c, k_d 不变, 仅 k_3, k_4 应作适当的调整.

2) 以上仅讨论了光电器件是圆形的情况, 实际上, 太阳能光伏器件绝大部分不是圆形的, 其他形状的光伏元件例如方形或有圆弧的方形, 可以通过光斑形状整合器来实现, 这种整合器可以用各种形式的透明耦合器或反射器来实现. 对于使用反射式的整合器, 作者已有许多实用的设计, 这种设计更适合 NIS 的应用, 效率高, 重量轻, 我们会在将来的文章中继续发表并讨论.

3) 在以上的讨论中, 文章假设了入射的光线为平行光, 这个假设在太阳能的应用中, 是近似成立的. 太阳并非点光源, 发送到地球表面的太阳光线是具有大约 $32'$ 的锥形光线, 这就形成了太阳光线的盘面效应. 这种盘面效应在本文所讨论的两级聚光器中, 根据聚光倍数的增加会更加放大, 使得聚光效果变得很差, 经过聚光以后的锥形光线的固体角, 在成像光学中可以大致估计为

$$\Delta = 32' \times \sqrt{N},$$

对于一个八倍聚光的系统, 其发射角为 $1^\circ 30'$, 对聚光的影响不大; 对于一个一千倍聚光的系统, 其发散角为 $16^\circ 51'$, 对聚光的影响就会比较大, 会使得光斑的大小达不到一千倍聚光的要求. 对于这样一个问题, 一般的解决方案是使用本节 2 中所述的透明耦合器来减少光线的外溢.

本文所关心的问题是: 这样的盘面效应是如何影响 NIS 系统的. 一般讲来, 在 NIS 系统中, 由于 NIS 相对于一级反射镜的位置是不固定的, 所以其盘面效应很难如同成像光学中那样, 可以有公式来

定量估量, 然而, NIS 系统在太阳能应用中的盘面效应可以方便地使用光线跟踪的方法求得, 光线跟踪已经表明, NIS 系统的盘面效应与参数 y_0 的有关, 在一般的情况下, NIS 系统与成像聚光系统相差不多, 但是, 缩小 y_0 的数值, 可以得到比传统设计更小的盘面效应, 也就是说, NIS 提供了另一个优化聚光系统的因素.

4) 在太阳能聚光器中, 有时设计者会更倾向于将聚光系统设计得更紧凑, 更扁 (compactness), 所以对于二级反射镜的使用, 除了本文所给出的凸形设计外, 还可以用凹形设计, 在成像光学中, 形成一种望远镜中常用的 Cassegrain 系统, 对于 Cassegrain 的设计形式, 只要将本文讨论的 NIS 反转使用就可以了, 我们已经证明, 所有以上讨论完全适用于 Cassegrain 式轴对称两级聚光器的设计.

8 结 论

为了消除成像光学中的轴对称两级反射聚光器的阴影以取得均匀的光斑, 非成像二次反射镜 (NIS) 能够提供一个解决方案. 二次反射面可通过将不同光路中所计算出的曲线线段, 包括一次线段、二次曲线段或三次曲线段等高次曲线绕中心轴旋转而获得. 以边缘光线法为基础, 我们提出了计算这种曲线线段的方法, 在本文的举例中, 在非成像光学中, 我们第一次成功地应用三次曲线进行光学器件的设计, 也说明了目前光学中大多使用二次函数的传统可以不必永远跟随.

感谢庆承瑞教授、陈葆君在本文写作过程中的许多帮助.

-
- [1] Winston R, Minano J C 2004 *Non-imaging Optics* (Academic Press)
- [2] Pinazo J M, Canada J, Arago F 1992 *Solar Energy* **49** 175
- [3] Khonkar H E I, Sayigh A A M 1994 *Renewable Energy* **5** 376
- [4] Chaves J 2008 *Introduction to Non-imaging Optics* (CRC Press)
- [5] Cooke D, Gleckman P, Krebs H 1990 *Nature* (London) **346** 802
- [6] Gleckman P, Gallaguer J O, Winston R 1989 *Nature* (London) **339** (6221) 198
- [7] Chen Y T, Chong K K, Bligh T P 2001 *Journal of Solar Energy* **71** 155
- [8] Chen Y T, Lim B H, Lim C S 2006 *Journal of Solar Energy Engineering* **128** 245
- [9] Chen Y T, He Z X, 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 078104 (in Chinese) [陈应天, 何祚祿 2011 物理学报 **60** 078104]
- [10] Chen Y T, Lim B H, Lim C S 2005 *Journal of Solar Energy* **80** 268
- [11] Igel E A, Hughes R L 1979 *Solar Energy* **22** 283
- [12] Ries H, Schubnell M 1990 *Solar Energy Materials* **21** 213
- [13] Chen Y T *China Patent* 200510200037.X [20060531]
- [14] Chen Y T *China Patent* 201210050545.4 [2012-07-17]

Non-imaging secondary (NIS) for axial symmetrical two-stage optical concentrator

Chen Ying-Tian^{1)2)†} He Zuo-Xiu¹⁾

1) (*Key Laboratory of Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*Beijing Sunco Ltd. Beijing 100085, China*)

(Received 29 March 2013; revised manuscript received 14 May 2013)

Abstract

Non-imaging reflector may present the advantage to eliminate the dark image in beam down 2-stage optical concentrator. The working principle of the non-imaging secondary (NIS) for an axial symmetric concentrator is revealed. The geometrical shape of NIS can generally be high order surface not restricted to the quadratic one in imaging optics or the CPC in non-imaging optics. The article has described the method to determine the parameters of the curve. To break the tradition in optics, we have demonstrated in the article that beside the quadratic curve, cubic curve can be equally used to form NIS. In the respect of solar energy application, we have made the discussion on the behavior of NIS for solar disc effect and how a new parameter can be used to optimize the design.

Keywords: non-imaging optics, secondary reflector, concentrated photovoltaic, high-order polynomial

PACS: 42.15.Eq, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.62.134209

† Corresponding author. E-mail: ytichen@ustc.edu.cn