

复合抛物面型集光器与多模光纤的耦合*

李 劬 虞秀琴 屈 刚 朱亚军

(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

摘 要 分析讨论了复合抛物面型集光器与多模光纤的耦合效率和集光器设计之间的关系, 提出了采用截底法和截顶法提高集光器与多模光纤耦合效率的方案。

关键词 复合抛物面型集光器, 集光率, 耦合效率。

1 引 言

近20年来, 随着人们对太阳能领域和高能物理领域的研究, 兴起了一门新的光学分支学科——非成像光学^[1, 2]。复合抛物面型集光器是应用非成像光学原理而设计的, 它的最终要求是在单位面积上获得最大强度的光。这种集光器国外文献上称之为复合抛物面型集光器(CPC), 它已在太阳能装置中得到应用。人们还可以用这种复合抛物面型集光器来接收远距离信号, 它与多模光纤组成的光学系统可以应用在光学传感和某些特殊用途的光通讯中。这里所谓的多模光纤是指芯径为1 mm左右的导光光纤, 它适用于较大能量但较短距离的光传输。这种光纤已有商品出售。关于复合抛物面型集光器的设计已有文献报道^[1, 2], 但是复合抛物面型集光器与多模光纤的耦合效率问题则尚未见文献报道。本文将在数值计算的基础上先对复合抛物面型集光器的设计进行简单的讨论, 然后再对复合抛物面型集光器与多模光纤的耦合效率问题进行探讨。

2 复合抛物面型集光器的设计及集光性能

2.1 设计原理

复合抛物面型集光器所关注的是能量的“集中度”, 它要求大面积上的入射光经过集光器器壁反射后通过一块小得多的面积而集光。基于边缘光线原理^[1, 2], 用边缘-射线法可以设计这种集光器。此法的设计原则是: 在二维情况下, 先根据使用要求定出一个最大入射角 θ_{\max} , 要求以最大角度 θ_{\max} 入射于集光器的光线或者直接从出射端射出, 或者最多经过一次反射后从出射端边缘射出。而以小于 θ_{\max} 的角度入射的光线反射后都从出射口内射出。根据理论计算, 其器壁为复合抛物面型。如果建立坐标系如图1所示, 其抛物面满足以下方程:

$$[(\sqrt{x^2 + y^2} + a') \cos \theta_{\max} + z \sin \theta_{\max}]^2 = 4a'(1 + \sin \theta_{\max}) \times$$

* 中国船舶工业总公司船舶系统工程部资助项目。

收稿日期: 1997-03-20; 收到修改稿日期: 1997-07-25

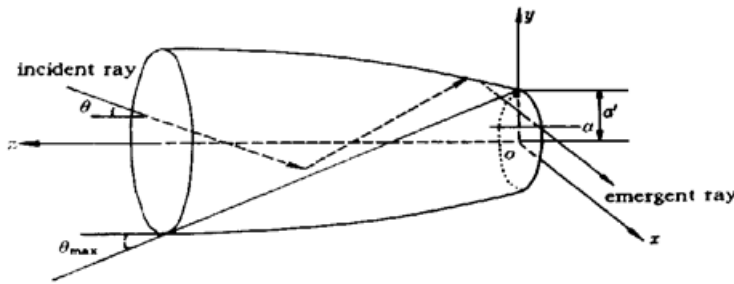


Fig. 1 Path of a ray through a CPC

$$(z \cos \theta_{\max} - \sqrt{x^2 + y^2} \sin \theta_{\max} + a')$$

此式与文献[2]中(4.6)式是等价的。

如果最大角度 θ_{\max} 和出射口径 $2a'$ 确定, 那么集光器形状大小确定, 入射口径为:

$$2a = 2a' / \sin \theta_{\max} \tag{2}$$

集光器长度为:

$$L = (a + a') \cot \theta_{\max} \tag{3}$$

如图2所示, 在三维情况下, 集光器是上述抛物线绕集光器对称轴 Z (注意, 不是抛物线对称轴) 旋转产生的。众所周知, 集光器最重要的性质是输出端面积与输入端面积之比, 把这个面积比记作 C , 并称它为集光率。假设有一理想集光器, 光线入射口面积为 A , 让所有进入的光线全部出去的最小孔面积为 A' , 则它的集光率为 $C_{\max} = A/A'$ 。在三维情况下 $C_{\max} = A/A' = a^2/a'^2$ 。在二维情况下, 反射面为垂直于图面的柱面, 这时 $C_{\max} = A/A' = a/a'$ 。由(2)式可得:

$$C_{\max} = 1/\sin \theta_{\max} \tag{4}$$

在三维情况下为:

$$C_{\max} = 1/\sin^2 \theta_{\max} \tag{5}$$

以上两种情况都是在输入介质和输出介质折射率相同的条件下得出的。

2.2 孔径比与 θ_{\max} 的关系

假设复合抛物面型集光器是按出射口半径为 a' , 最大入射角为 θ_{\max} 而设计的。那么经过理论计算, 它的入射口半径为:

$$a = a' / \sin \theta_{\max} \tag{6}$$

孔径比为:

$$S = a/a' = 1/\sin \theta_{\max} \tag{7}$$

可以看出, θ_{\max} 越小, 孔径比越大, 集光率 C 也就越大, 就更能达到集光的目的。尤其应用在远距离接收信号上, 远距离发送信号, 损耗很大, 集光器的集光能力就更显重要。但是, 增大孔径比是以减小入射角 θ_{\max} 为代价的。而 θ_{\max} 的减小会使可接收光信号的角范围明显减小。在设计集光器时必须根据使用要求权衡利弊, 选取适宜的孔径比。

2.3 对给定的 θ_{\max} , 集光器对以不同的入射角 θ 入射的光束的集光能力

在三维情况下, 由于偏射线损失, 对某一 θ_{\max} 角设计的复合抛物面型集光器, 并非所有入射角小于或等于 θ_{\max} 的入射光线均能经反射后由出射端射出。有一部分光线会经过二次或多次反射后返回入射端。以 $\theta_{\max} = 10^\circ$ 的情况为例, 采用光线追迹法对入射角 $\theta = 10^\circ, 9^\circ, 8^\circ, 6^\circ$ 分别进行计算, 计算结果示于图3。图中的圆为入射端面, 标有 0、1、2、... 等等的区域表示由该区域入射的光线经 0, 1, 2, ... 次反射后从出射端射出, 而标有 F_2, F_3, \dots 的区域由表示由该区域入射的光线经 2, 3, ... 次反射后又从入射口返回。由图可见, 对于按 $\theta_{\max} = 10^\circ$ 设计的复合抛物面型集光器, 只有当 $\theta \leq 8^\circ$ 时, 所有光线才能从出射端射出。在设计集光器时必须注意这一点。

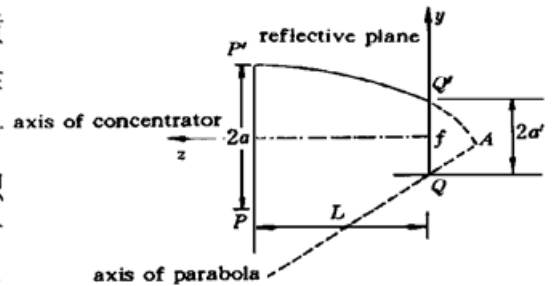


Fig. 2 Design of the CPC

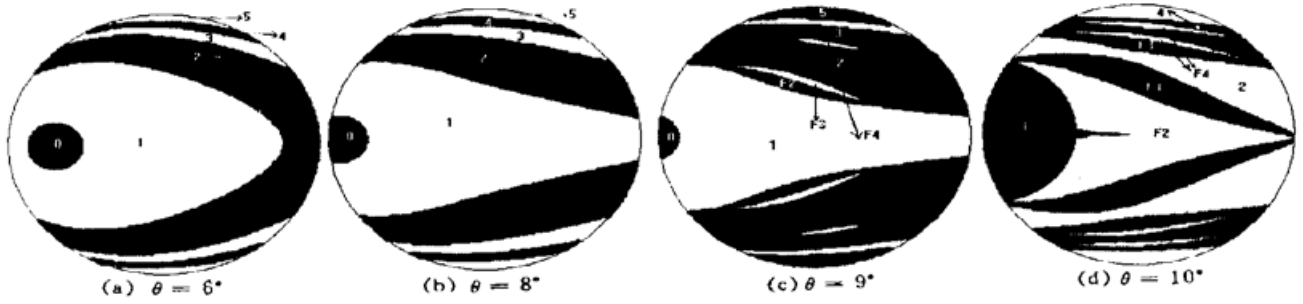


Fig. 3 Patterns of accepted and rejected rays at the entry face of a 10° CPC

3 复合抛物面型集光器与多模光纤的耦合

当考虑复合抛物面型集光器与多模光纤耦合时, 出射光的角分布尤为重要。多模光纤有一定的数值孔径, 从集光器出射的光束的发散角必须尽可能地与光纤的数值孔径匹配, 以达到高的耦合效率。本实验考虑芯径为1 mm 的石英多模光纤, 其数值孔径(N.A.)的典型值为0.5左右。光纤可接受的最大入射角 φ_{max} , 可根据下式算出:

$$n_0 \sin \varphi_{max} = N.A. \tag{8}$$

$n_0 = 1$ 为空气的折射率。设 $N.A. = 0.51$, 则

$$\varphi_{max} = 30.7^\circ \tag{9}$$

以 $\theta_{max} = 10^\circ$ 为例, 图4给出 θ 分别为 $10^\circ, 8^\circ, 6^\circ, 4^\circ, 2^\circ$ 时出射光线的角分布。光线追迹中所用的光线数为 7804。为了考察光线追迹中所取的光线数是否合理, 对 $\theta_{max} = 10^\circ, \theta = 6^\circ$

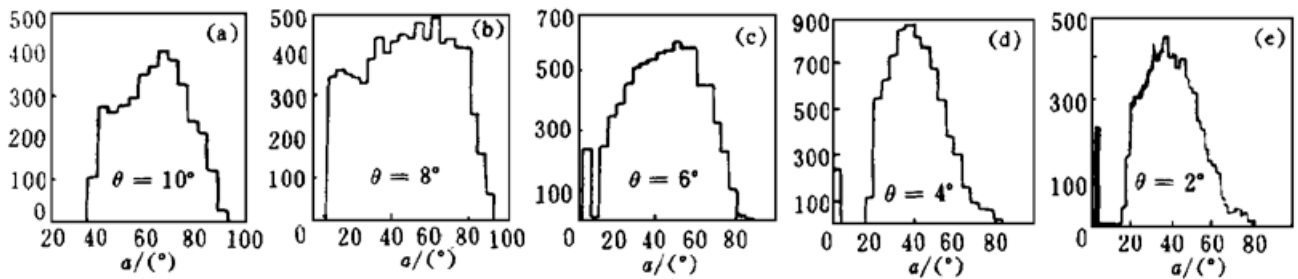


Fig. 4 The angular distribution of the emergent rays for a 10° CPC

的情形[图4(c)], 用31192根光线进行追迹。计算结果示于图5。图5与图4(c)中光线角分布一致, 可见光线数取为7804已足够。使用 i486/50 PC, 两者所对应的计算时间分别为20 min 和78 min。为了与光纤芯径匹配, 集光器的出射端直径均取为 $2a' = 1$ mm。由图4可以看出, $\theta = 10^\circ$ 时, 入射光线中仅47.5% 的光线从出射端面出射, 而其中出射角 $\alpha \leq 30.7^\circ$ 的则仅占入射光线的0.13%。当 $\theta \leq 8^\circ$ 时, 100% 的入射光线均能从出射端面出射, 这从图3所示的结果也可看出。但是在 θ 分别为 $8^\circ, 6^\circ, 4^\circ, 2^\circ$ 时出射光线中 $\alpha \leq 30.7^\circ$ 的光线仅分别占 28.5%、30.3%、32.9%、31.8%。可见从出射端出射的光线中, 小角度的所占比例较小, 而且

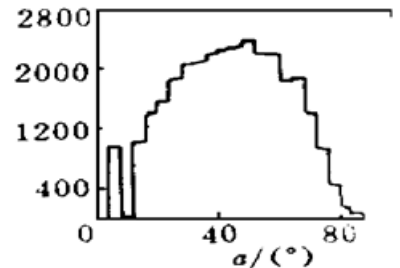


Fig. 5 The angular distribution of the emergent rays for a 10° CPC. $\theta = 6^\circ$, number of rays = 31192

随着 θ 角度的减小, 小角度出射的光线并没有显著增加。复合抛物面型集光器的这种性质对它与光纤的耦合是不利的。为了提高与光纤的耦合效率, 作者提出两种设计方法, 称为截底法和截顶法, 利用这两种方法可以在保持集光率不变的条件下, 大大提高小角度出射光的比

例,因而大大提高集光器与光纤的耦合效率。

下面为了使集光器与多模光纤很好的匹配,保持集光器出射端口径为1 mm不变,利用截底法和截顶法分别进行讨论。

3.1 截底法

所谓截底法,其设计过程为:设取定 a' 及 θ_{\max} ,则可设计标准复合抛物面型集光器。其入射端孔径为 $2a$, $a = a'/\sin \theta_{\max}$ 。另取 $\theta_{1\max} < \theta_{\max}$,并保持 a 不变,按相同的方法设计标准的复合抛物面型集光器。此时得到的出射口孔径为 $a'_1 = a \sin \theta_{1\max}$,显然 $a'_1 < a'$ 。然后从出射端把集光器截短(截底),直到其口径等于 a' 。这种截短的集光器与前一种标准设计的集光器具有相同的孔径比,因而在小角度入射时,其集光能力相同,但从这种截短的集光器出射的光线中小角度光线的比例却大大增加。表1给出标准集光器(按 $\theta_{\max} = 10^\circ$ 设计)及截底的集光器(按 $\theta_{\max} = 8^\circ, 6^\circ, 4^\circ$ 设计)在不同的入射角下,小角度($\alpha \leq 30.7^\circ$)出射光线所占的比例,也就是集光器与多模光纤耦合时可以达到的耦合效率。从表1可以看出,采用截底法使小角度出射光的比例大大增加,从而可以大大地提高集光器与多模光纤的耦合效率。

Table 1. The coupling efficiency of a bottom-truncated concentrator

$\theta \backslash \theta_{\max}$	10°	8°	6°	4°
8°	28.5%			
6°	30.3%	39.6%	40.0%	
4°	32.9%	43.4%	54.7%	67.2%
2°	31.8%	47.9%	65.5%	83.3%

但是截底法存在一个缺点,根据(3)式可知,随着 θ_{\max} 的减小,集光器长度大幅度地增加。例如按 $\theta_{\max} = 10^\circ$, $a' = 0.5$ mm设计时,标准集光器长度为 $L = 19.2$ mm。采用截底法,取 $\theta_{\max} = 8^\circ$,根据计算得 $L = 31.8$ mm;而当 $\theta_{\max} = 4^\circ$ 时, L 增加到109.7 mm。为了缩短集光器的长度,可以采用截顶法。

3.2 截顶法

所谓截顶法,就是首先取定 a' 及 θ_{\max} ,按同样的方法设计标准复合抛物面型集光器。然后另取 $\theta_{1\max} < \theta_{\max}$,并保持 a' 不变设计。此时得到的入射口孔径为 $2a_1$, $a_1 = a'/\sin \theta_{1\max}$,显然 $a_1 > a$ 。然后从入射端把集光器截短(截顶),直到其口径等于 a 。可以看出,按这种方法设计的集光器与标准集光器具有相同的孔径比。表2列出了标准集光器与采用截顶法设计的集光器与光纤耦合获得的耦合效率。

Table 2. The coupling efficiency of a top-truncated concentrator

$\theta \backslash \theta_{\max}$	10°	8°	6°
8°	28.5%		
6°	30.3%	32.6%	
4°	32.9%	39.0%	39.6%
2°	31.8%	41.0%	41.3%

由表2可以看出, 截顶法对于提高与光纤的耦合效率, 其效果不如截底法显著。但是它可以大大地缩短集光器的长度。仍取 $\theta_{\max} = 10^\circ$, $a' = 0.5 \text{ mm}$, 标准集光器长度为 19.2 mm 。而采用截顶法, 取 θ_{\max} 分别为 8° 、 6° , 截顶后集光器长度分别为 9.6 mm 、 7.7 mm 。可见集光器的长度大大缩短了。

3.3 结合截底法和截顶法

为了既可以大大提高集光器与光纤的耦合效率, 又不至于过多增加集光器长度, 可以把截底法和截顶法结合起来, 以满足实际需要。以 $\theta_{\max} = 6^\circ$, $\theta = 4^\circ$ 的集光器为例进行讨论。为了与 $\theta_{\max} = 10^\circ$, $2a' = 1 \text{ mm}$ 的标准集光器保持相同的集光率, $\theta_{\max} = 6^\circ$ 的集光器的出射口径应为 0.6 mm 。取 $2a'$ 分别为 0.7 mm , 0.8 mm , 0.9 mm , 结合截底法和截顶法, 可以得到相应的集光器的长度与耦合效率的关系, 如表3所列。从表3可以看出, 若以耦合效率为主, 则取第一栏(单纯截底法)为好; 若以集光器最小长度为主要要求, 则取最后一栏(单纯截顶法)为好; 若欲两者兼顾, 由取第二栏(截底加截顶)较好。

Table 3. The relation of a' , L and η for top-and/or bottom-truncated concentrators

a' (mm)	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
L (mm)	29.7	14.1	10.7	8.9	7.7
η (%)	54.7	47.2	43.7	41.5	39.6

结 论 本文结合数值计算, 对复合抛物面型集光器的集光能力以及集光器与多模光纤的耦合问题进行了讨论, 并首次提出采用截顶法和截底法可在保证集光能力的前提下提高集光器与多模光纤的耦合效率。

参 考 文 献

- [1] W. T. Welford, R. Winston, *The Optics of Nonimaging Concentrators*. New York: Academic Press, 1978
 [2] W. T. Welford, R. Winston, *High Collection Nonimaging Optics*. New York: Academic Press, 1989

The Coupling of Compound Parabolic Concentrators to Multimode Optical Fibers

Li Qu Yu Xiuqin Qu Gang Zhu Yajun

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(Received 20 March 1997; revised 25 July 1997)

Abstract The relation between the coupling efficiency of the compound parabolic concentrators (CPC) to multimode optical fibers and the design of the concentrators are discussed. Two methods, the bottom-truncation and the top-truncation, are proposed to increase the coupling efficiency between the concentrators and the fibers.

Key words compound parabolic concentrator, concentration ratio, coupling efficiency.