

# 适合于全玻璃真空管的 CPC 光学性能分析

王进福 唐润生

(云南师范大学太阳能研究所, 云南 昆明 650092)

**摘要** 利用光线追踪法分析了 6 个适应于全玻璃真空管复合抛物面聚光器(CPC)的光学效率对入射角的依赖关系,在此基础上,根据太阳几何学分析了 6 种东西向 CPC 聚光器对真空管的年聚光量。研究表明:当入射光在全 CPC 的接收角内时,依据“帽形”吸收体设计的、底部配备 V 型反射腔的 CPC,其光学效率高于其他设计方案,但当光线超过全 CPC 的接收角时,其光学效率小于其他设计方案;从各种设计方案的年聚光量来看,依据“冰淇淋”吸收体设计的 CPC 的年采光量最大,为最佳设计方案,而依据真空管外管设计的 CPC 最差。

**关键词** 光学设计;全玻璃真空管;复合抛物面聚光器;光学效率;年聚光量

**中图分类号** TK513.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s116002

## Optical Performance of CPCs Suitable for All-Glass Evacuated Tubes

Wang Jinfu Tang Runsheng

(Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China)

**Abstract** The angular dependence of optical efficiency of six compound parabolic concentrator (CPCs) suitable for concentrating radiation on all-glass evacuated tubes is investigated by ray-tracing method, and the annual radiation concentrating on unit length of solar tubes by means of six CPCs is estimated based on the angular dependence of optical efficiency of CPCs and solar geometry. Results show that the optical efficiency of CPC designed by “hat-shaped” absorber with a V-groove at the bottom of reflectors is higher than that of other CPCs for the case of the incidence solar rays within the acceptance angle of full CPC, otherwise less than that of other CPCs. It is concluded that the CPC designed by “ice-cream shaped” absorber is the optimal design, and the one designed by the cover tube is the most inferior solution in terms of the annual radiation concentration on the solar tube.

**Key words** optical design; all-glass evacuated tube; compound parabolic concentrator; optical efficiency; annual radiation collection

**OCIS codes** 080.2740; 220.1770; 220.4298

## 1 引言

近年来,太阳能的中、高端应用受到国内外研究人员的极大关注<sup>[1]</sup>,然而要获得温度在 150~250 °C 之间的热能,传统的非聚光太阳能集热器难以实现,连续跟踪的太阳能聚光系统很容易获得中高温热能,但系统复杂、价格昂贵<sup>[2-3]</sup>。复合抛物面聚光太阳能集热器(CPC)结构简单、不需要跟踪,适合运行在 200~250 °C,是一种应用前景广阔的中温聚光集热器<sup>[4-5]</sup>。

CPC 是典型的非成像理想聚光器,由 Hinterberger

和 Winston 等发明<sup>[6]</sup>。1974 年,Rabl 等率先设计并制作了非真 CPC 集热器,实验研究发现,当集热器运行温度较高时,热能损失大,系统效率低<sup>[7]</sup>。为减少 CPC 高温下吸收体对环境的散热,研究人员对真空管 CPC 集热器开展了大量的理论和实验研究。真空管 CPC 集热器分内置和外置两类,前者是将 CPC 封装在真空管内,后者则是利用 CPC 对真空管内的吸收体聚光。袁胜利等<sup>[8]</sup>利用内置 CPC 热管太阳能集热器,获得 160 °C 饱和水蒸气。Oommen 等<sup>[9-10]</sup>先后开发出两种全玻璃真空管

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-10-01

基金项目: 国家自然科学基金(51066007)

作者简介: 王进福(1986—),男,硕士研究生,主要从事太阳能热利用方面的研究。E-mail: jinfuwang2008@163.com

导师简介: 唐润生(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事太阳能利用方面的研究。E-mail: kingtang01@126.com

(通信联系人)

CPC 集热器,用于产生高温蒸汽。Lu 等<sup>[11]</sup>最近的实验研究显示,外置 CPC 真空管集热器在运行温度为 125 ℃ 时,其效率可达到 50%。全玻璃真空管在我国有着巨大的市场,2009 年的年产量达到 3.5 亿支,占全球总产量的 95% 以上<sup>[12]</sup>。全玻璃真空管中广泛采用的铝氮-不锈钢(AlN-SS)选择性吸收涂层在 400 ℃ 以下性能稳定<sup>[13]</sup>,因此,CPC 与全玻璃真空管的结合是一种很有市场前景的中温集热器。

CPC 是依据边缘光线原理设计的理想聚光器,其反射面的形状取决于吸收体的形状,且反射面与吸收体连在一起<sup>[6,14]</sup>。而全玻璃真空管的吸热体(内管)位于罩管内,因此,在进行 CPC 设计时必须考虑在反射面与吸收体之间留出空隙。Rabl、Mcintire 和吴茂刚等<sup>[6, 15,16]</sup>曾研究了各种 CPC 空隙设计方案及因空隙所引起的光学损失,分析结果显示,依据“帽形”吸收体设计的 CPC,并底部配置 V 型反射腔,可以完全消除空隙所引起的光学损失,被认为是最优设计方案。然而,基于全玻璃真空管设计的 CPC,其光学损失包括空隙损失和光线在到达吸收体之前多次反射所引起的光学损失,因此,仅以因空隙引起的光学损失的大小来衡量 CPC 的整体光学性能的好坏并不合理,采用 CPC 的目的是对真空管聚光,因此所设计的 CPC 光学性能的好坏应依据其全年聚光量来衡量。由于 CPC 对全玻璃真空管聚光涉及到多次反射所引起的光学损失和因空隙所引起的光学损失,两者均与光线在 CPC 上的入射角有关,光学效率的理论计算极为复杂,同时在计算年聚光量时涉及到复杂的太阳几何学,因而很少有人去研究各种 CPC 设计方案对真空管的年聚光量。本文先利用光线追踪法分析 6 种潜在的 CPC 对全玻璃真空管( $\phi 47/58$ )聚光的光学效率与入射角的关系,然后在此基础上应用太阳几何学研究东西向 CPC 聚光器在固定倾角和三倾角模式下对真空管的年聚光量,找出并比较各种 CPC 的年聚光量,为开发全玻璃真空管中温系统提供理论依据。

## 2 用于对全玻璃真空管聚光的 CPC 设计方案

全玻璃真空管由两同心圆管组成,吸收体位于罩管内,根据全玻璃真空管的结构特点和 CPC 的设计原理,共有 6 种可供选择的设计方案。选择市场上广泛流行的  $\phi 47/58$ ( $R=29$  mm;  $r=23.5$  mm)全玻璃真空管作为案例进行分析。

方案 1: CPC 反射面依据全玻璃真空管外管设计,吸收体为真空管内管(图 1)。

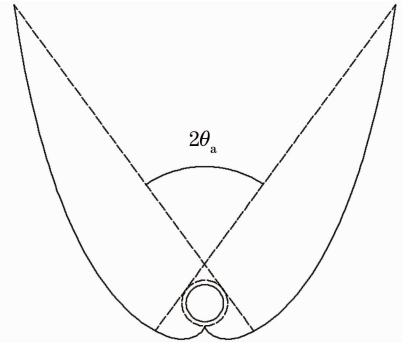


图 1 根据外管设计的 CPC

Fig. 1 CPC designed by the cover tube

方案 2: CPC 反射面依据全玻璃真空管内管设计,但真空管的实际安装位置向上移动  $R-r$ ,即内管由 A 移到 C 的位置(图 2)。

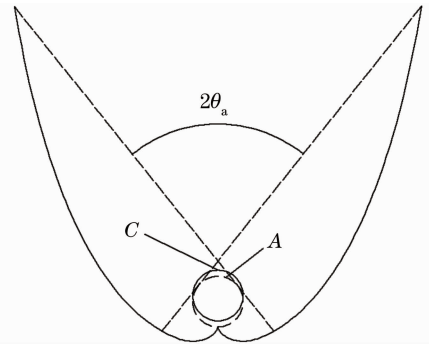


图 2 根据内管设计 CPC,真空管上移  $R-r$

Fig. 2 CPC designed by the inner tube and move the tube up by  $R-r$

方案 3: CPC 反射面依据全玻璃真空管内管设计,剪去靠近内管的反射面(图 3)。

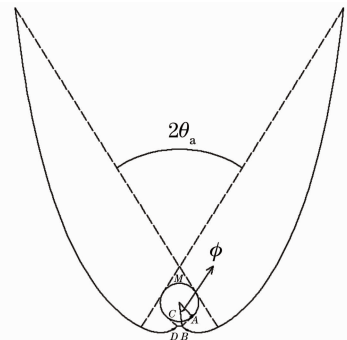


图 3 CPC 依据内管设计,剪去靠近吸收体反射面

Fig. 3 CPC designed by the inner tube with reflectors near the absorber truncated

方案 4: CPC 反射面依据吸收体设计(由圆弧 BMC 和通过 A 点的两条圆切线 AB 和 AC 构成的假想的“冰淇淋”吸收体),而实际吸收体是真空管内

管(图 4)。

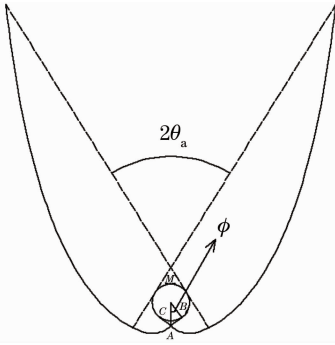


图 4 CPC 依据“冰淇淋”设计,实际吸收体真空管内管  
Fig.4 CPC designed by “ice-cream shaped” absorber, and actual absorber is the inner tube

方案 5: CPC 反射面依据“帽形”吸收体“ADMCB”来设计,而实际吸收体是真空管内管,如图 5 所示,AB 与内管最低点相切。

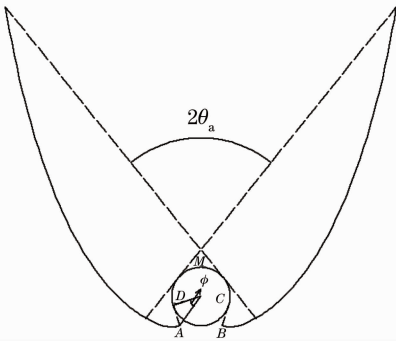


图 5 CPC 依据“帽形”设计,实际吸收体真空管内管  
Fig.5 CPC designed by “hat-shaped” absorber, and actual absorber is the inner tube

方案 6:在方案 5 所设计的 CPC 的底部配备一个“V”型反射腔(图 6)。为消除空隙引起的光学损失,“V”型腔的设计必须满足下面两个条件<sup>[6,15]</sup>:

$$\pi - 2\alpha \leq 2\psi \leq 0.5\pi + \alpha, \quad (1)$$

$$h \leq rc \tan^2 \psi + g(c \tan^2 \psi - 1)/2, \quad (2)$$

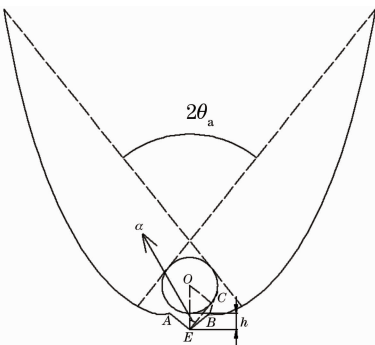


图 6 CPC 依据“帽形”设计,底部配备“V”腔  
Fig.6 CPC designed by “hat-shaped” absorber with a single V-groove at the bottom

式中  $\psi$  为“V”型反射腔的半张角, $h$  为“V”型腔的高度, $\alpha$  为  $OE$  和切线  $EC$  的夹角,其大小满足:  $\sin \alpha = r/(r+h+g)$ ;  $g$  为“V”型腔开口面到圆形吸收体最低点的距离(对于单 V,  $g=0$ )。对于给定规格的真空管,“V”型腔的开口宽度为  $2\sqrt{R^2-r^2}$ ,高度  $h$  是决定“V”型腔几何形状的唯一参数,依据(1)式和(2)式得:  $12.29 \text{ mm} \leq h \leq 14.41 \text{ mm}$ 。

### 3 CPC 光学效率对入射角的依赖关系

光学效率定义为到达吸收体的辐射能与入射到 CPC 的辐射能的比值。基于全玻璃真管设计的 CPC,其光学损失包括空隙损失和反射损失,两者均与入射角有关,因此,光学效率是入射角的函数。当光线以某一入射角进入聚光器时,部分光线将经过一次或多次反射后到达吸收体<sup>[6,17]</sup>,理论上可以计算出空隙损失和经历任意反射次数到达圆形吸收体上的能量比例,从而计算出 CPC 在任意入射角下的光学效率。但对于圆形吸收体,这种理论计算极为复杂,甚至是不可能的。拟采用 TracePro 光线追踪软件分析 CPC 在不同太阳入射角下的光学效率。模拟分析中,CPC 的反射率取 0.92,太阳辐射强度为  $800 \text{ W/m}^2$ ,不考虑真空管外管的吸收和内管吸收层的反射,目的是分析 CPC 的光学效率而不是整个系统的光学效率。

图 7 给出了 6 种全 CPC 光学效率  $\eta$  随入射角的变化曲线。可见,随着入射角的增加,光学效率逐渐增加,这是因为随着入射角的增加,光线在到达吸收体前所经历的平均反射次数减少;当入射角接近接收半角( $17^\circ$ )时,通过空隙的光学损失急剧增大,光学效率急速下降;入射角大于  $\theta_a$  时,除了方案 2 外,所有入射光线在经历多次反射后全部离开 CPC

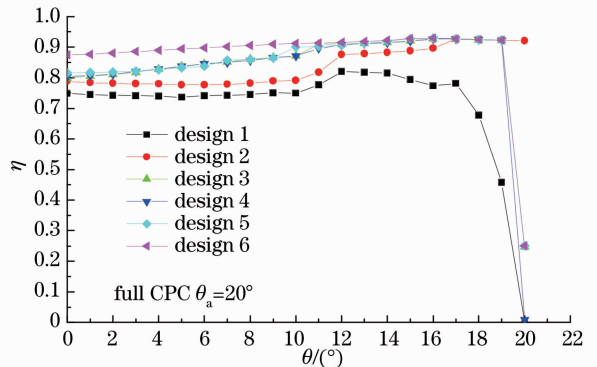


图 7 全 CPC 光学效率与太阳入射角的关系  
Fig.7 Angular variation of the optical efficiency of full CPCs

聚光器,光学效率为零。图 8 为截短后的 CPC 光学效率随入射角的变化曲线,由图可见,几何聚光比  $C_t$  和接收半角一定时,不同的 CPC 设计方案,其有效采光范围( $\theta_t$ )不同,方案 1 的采光范围最大,而方案 5 和 6 最小。

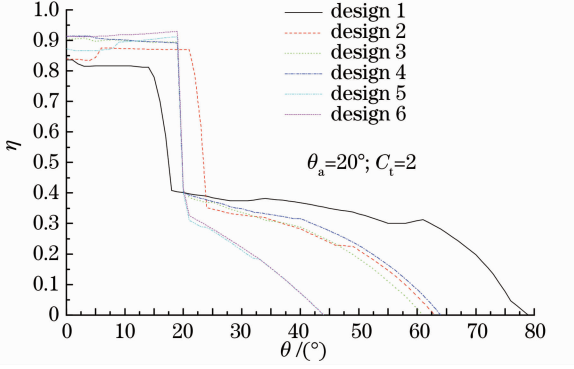


图 8 截短后的 CPC 光学效率与太阳入射角的关系  
Fig. 8 Angular variation of the optical efficiency of truncated CPCs

由图 7 和 8 不难看出,在接收半角内,方案 5 和 6 的光学效率最高,但当入射角大于接收半角后,方案 5 和 6 的光学效率远低于其他设计方案,这说明在接收半角范围内,方案 5 和 6 能有效聚光,但当入射角大于接收半角,方案 5 和 6 聚光效果不如其他设计方案。

#### 4 不同 CPC 设计方案的年采光量

设 CPC 东西放置,倾角为  $\beta$ ,长度为无限长,不考虑地面反射。假设天空散射辐射为各向同性,则单位长度的真空管在任意时刻接收到的太阳辐射为

$$I = A_{ap} I_b \eta(\theta) g(\theta_{in}) \cos \theta_{in} + I_{abs,d}, \quad (3)$$

式中  $A_{ap} = 2\pi r C_t$  为 CPC 采光面的宽度,  $I_b$  为直射辐射强度;  $\theta_{in}$  为太阳在 CPC 采光面上的入射角;  $g(\theta_{in})$  为控制函数,当  $\cos \theta_{in} \geq 0$  时,  $g(\theta_{in}) = 1$ ,反之为 0。任意时刻 CPC 所接收的天空散射辐射  $I_{abs,d}$  为

$$I_{abs,d} = A_{ap} \int_{-\theta_x}^{\theta_t} \eta(\theta) \cos \theta d\theta, \quad (4)$$

式中  $\theta_x = \min(0.5\pi - \beta, \theta_t)$ ,对全 CPC,  $\theta_t = \theta_a$ ;  $i$  为天空散射辐射在聚光器横截面上的方向辐射强度,对于各向同性的天空散射辐射,  $i = 0.5 I_d$  [17,18],这时(4)式变为

$$I_{abs,d} = A_{ap} 0.5 I_d \left[ \int_0^{\theta_t} \eta(\theta) \cos \theta d\theta + \int_0^{\theta_x} \eta(\theta) \cos \theta d\theta \right] = A_{ap} 0.5 I_d (C_{d1} + C_{d2}), \quad (5)$$

$$C_{d1} = \int_0^{\theta_t} \eta(\theta) \cos \theta d\theta, \quad (6a)$$

$$C_{d2} = \int_0^{\theta_x} \eta(\theta) \cos \theta d\theta, \quad (6b)$$

式中  $I_d$  为水平面上天空散射辐射,得知 CPC 光学效率随入射角的变化曲线,依据(6)式可计算出  $C_{d1}$  和  $C_{d2}$ 。对于给定的 CPC,  $C_{d1}$  为常数,而  $C_{d2}$  与安装倾角有关,当  $\theta_t < 0.5\pi - \beta$ ,  $\theta_x = \theta_t$ ,则  $C_{d1} = C_{d2}$ ; 当  $\theta_t > 0.5\pi - \beta$ ,  $\theta_x = 0.5\pi - \beta$ ,  $C_{d1} \geq C_{d2}$ 。太阳在 CPC 上的入射角为  $\theta_{in}$  为 [6]

$$\cos \theta_{in} = \cos \delta \cos(\lambda - \beta) \cos \omega + \sin \delta \sin(\lambda - \beta), \quad (7)$$

而太阳在 CPC 横截面上的投影入射角则为 [6, 19]

$$\theta = |\theta_{xoz} + \beta|, \quad (8)$$

$$\tan \theta_{xoz} = \frac{\sin \delta \cos \lambda - \cos \delta \sin \lambda \cos \omega}{\cos \delta \cos \lambda \cos \omega + \sin \delta \sin \lambda}, \quad (9)$$

式中  $\lambda$  为当地地理纬度,  $\delta$  为一年中第  $n$  天的赤纬角:

$$\sin \delta = -\sin 23.45 \cos [360(n + 10)/365.25]. \quad (10)$$

知道  $I_b$  与  $I_d$  随时间变化的关系,对(3)式积分可求出 CPC 的日聚光量:

$$H_{day} = A_{ap} \int_{-t_0}^{t_0} \eta(\theta) g(\theta_{in}) I_b \cos \theta_{in} dt + 0.5 A_{ap} H_d (C_{d1} + C_{d2}), \quad (11)$$

式中  $H_d$  为水平面上日散射,  $t_0$  为太阳的日落时间,表示为

$$t_0 = \tau_{day} \omega_0 / (2\pi), \quad \cos \omega_0 = -\tan \lambda \tan \delta, \quad (12)$$

式中  $\tau_{day}$  为一天的时长。在太阳辐射计算中,通常以当地多年平均月总辐射作为计算依据,知道水平面月总辐射,月平均日总辐射  $H_b$  和散射辐射  $H_d$  及  $I_b$  的逐时变化可根据 Collares-Pereira 的经验公式算出 [6],进而可计算出 CPC 的日和年聚光量。

在后面的计算中,CPC 的光学效率  $\eta$  与入射角的变化关系由光线追踪法求出,计算间隔为  $1^\circ$ ,任意入射角的  $\eta$  则通过线性内插法求得。在计算 CPC 日聚光量的过程中,先计算某一时刻的  $\theta_{in}$  和  $\theta$ ,进而由  $\eta$  与  $\theta$  的关系算出该时刻 CPC 的光学效率,计算时间间隔为 1 min,水平面的日总辐射和散射辐射取该月的平均值。为了全面比较各种设计方案的年聚光量,计算分两种情况:第一种情况,CPC 的倾角固定(1T-CPC),  $\beta = \lambda$ ,  $\theta_a = 26^\circ$  [17];第二种情况,CPC 采用三倾角调整模式(3T-CPC) [18],即春、秋分

前后 23 天的倾角  $\beta = \lambda$ , 夏天  $\beta = \lambda - 24^\circ$ , 冬天  $\beta = \lambda + 24^\circ$ 。为了分析 CPC 在各种气候条件下的光学性能, 选择 5 个气候特征不同的城市作为案例分析: 北京(太阳资源丰富)、上海(太阳资源一般)、重庆(太阳资源差)、拉萨(太阳资源极为丰富)、昆明(冬季丰富、夏季差)。

表 1、2 分别给出全 CPC 和截短的 CPC 在固定倾角模式下真空管的年聚光量。可见, 无论是全 CPC 还是截断的 CPC, 方案 4 的年聚光量最大; 对于全 CPC, 方案 5 最差, 而对于截短的 CPC, 方案 1 最差。

表 1 全 CPC 固定倾角下的单位真空管长度年聚光量( $\theta_a = 26^\circ$ )

Table 1 Annual radiation on unit length of solar tube by the use of full 1T-CPCs with  $\theta_a = 26^\circ$  unit: MJ/m

Site	Design 1	Design 2	Design 3	Design 4	Design 5	Design 6
Beijing	1322	1252	1288	1327	1075	1106
Shanghai	1004	949	977	1007	816	838
Lhasa	2051	1943	1999	2060	1669	1715
Chongqing	728	683	705	729	589	606
Kunming	1293	1219	1256	1295	1048	1078

表 2 截短的 CPC 固定倾角下的单位真空管长度年聚光量( $\theta_a = 26^\circ, C_t = 1.8$ )

Table 2 Annual radiation on unit length of solar tube by the use of truncated 1T-CPCs with  $C_t = 1.8$  and  $\theta_a = 26^\circ$

unit: MJ/m

Site	Design 1	Design 2	Design 3	Design 4	Design 5	Design 6
Beijing	1013	1161	1151	1166	1069	1101
Shanghai	800	899	888	902	813	836
Lhasa	1558	1786	1773	1796	1656	1704
Chongqing	597	659	649	660	588	605
Kunming	1017	1143	1130	1145	1042	1073

表 3 全 CPC 三个倾角调整模式下真空管的年聚光量( $\theta_a = 20^\circ$ )

Table 3 Annual radiation of solar tube by the use of full 3T-CPCs with  $\theta_a = 20^\circ$

unit: MJ/m

Site	Design 1	Design 2	Design 3	Design 4	Design 5	Design 6
Beijing	1981	1726	1818	1871	1519	1597
Shanghai	1446	1265	1331	1369	1112	1167
Lhasa	3158	2743	2894	2879	2417	2544
Chongqing	996	875	920	946	768	805
Kunming	1891	1650	1738	1789	1452	1526

表 4 截短的 CPC 在三个倾角调整下真空管的年聚光量( $C_t = 2, \theta_a = 20^\circ$ )

Table 4 Annual radiation of solar tube by using truncated 3T-CPCs with  $C_t = 2$  and  $\theta_a = 20^\circ$

unit: MJ/m

Site	Design 1	Design 2	Design 3	Design 4	Design 5	Design 6
Beijing	1328	1384	1426	1442	1341	1398
Shanghai	1008	1046	1071	1085	994	1036
Lhasa	2076	2168	2243	2266	2123	2214
Chongqing	726	746	759	770	696	724
Kunming	1295	1345	1383	1399	1291	1346

## 5 结 论

分析显示,在 CPC 的接收角范围内,依据“帽形”吸收体设计的 CPC(方案 5 和 6)能有效聚光,但当入射角大于接收角,其聚光效果不如其他设计方案。

在固定倾角模式下,依据“冰淇淋”吸收体设计的 CPC(方案 4)的年聚光量最大;对于全 CPC,依据“帽形”吸收体设计的、底部不带 V 型腔的 CPC(方案 5)最差,对于截短的 CPC,依据真空管外管设计的 CPC(方案 1)最差。

在三个倾角调整模式下,对全 CPC,依据外管设计的 CPC 年聚光量最大,其次为依据“冰淇淋”设计的 CPC,而依据“帽形”设计的底部不带 V 型腔的 CPC 最差;对截短的 CPC,依据“冰淇淋”设计的 CPC 年聚光量最大,其次为依据真空管内管设计、剪去靠近吸收体的反射面的 CPC(方案 3),而依据真空管外管设计的 CPC 最差。

由于 CPC 的上端聚光效果差,在实际应用中,CPC 通常被截短以节省材料,依据不同 CPC 对真空管的年聚光量来判断:依据“冰淇淋”吸收体设计的 CPC 为最佳设计方案,而依据真空管外管设计的 CPC 最差。依据“帽形”吸收体设计的 CPC,并在底部配备“V”型反射腔的聚光器虽然在接收角范围内有高的光学效率,但由于截短后聚光效果差,其年聚光量反而小于其他设计方案。

## 参 考 文 献

- 1 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.  
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): 0122002.
- 2 Xu Chengmu, Li Ming, Ji Xu, *et al.*. Frequency statistics analysis for energy-flux-density distribution on focal plane on parabolic trough solar concentrators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0408001.  
许成木,李明,季旭,等. 槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的频数统计分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0408001.
- 3 Zhao Jinlong, Li lin, Cui Zhengjun, *et al.*. Calculation of flux density distribution on focal plane in linear Fresnel reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1208001.  
赵金龙,李林,崔正军,等. 线性菲涅耳反射聚光器聚焦光斑能流密度分布的计算[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1208001.
- 4 Rabl A. Optical and thermal properties of compound parabolic

- concentrators[J]. *Solar Energy*, 1976, 18(6): 497-510.
- 5 Grass C, Schoelkopf S L, Hacker Z. Comparison of the optics of non-tracking and novel types of tracking solar thermal collectors for process heat applications up to 300 °C[J]. *Solar Energy*, 2004, 76(1): 207-215.
- 6 Rabl A. *Active Solar Collectors and Their Applications*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1985. 28-196.
- 7 Rabl A, Ogallagher J, Winston R. Design and test of non-evacuated solar collectors with compound parabolic concentrators[J]. *Solar Energy*, 1980, 25(4): 335-351.
- 8 Yuan Shengli, Yang Congming. Heat pipe solar concentrator used for electricity generation[J]. *Energy Saving*, 2002, 8: 14-17.  
袁胜利,杨从明. 用于发电的太阳能聚光热管集热器[J]. *节能*, 2002, 8: 14-17.
- 9 Oommen R, Jayaraman S. Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses-over sized reflector [J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, 42(11): 1379-1399.
- 10 Oommen R, Jayaraman S. Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses-‘V’ groove reflector [J]. *Renewable Energy*, 2002, 27(2): 259-275.
- 11 Lu Z S, Wang R Z, Xia Z Z, *et al.*. Study of a novel solar adsorption cooling system and a solar absorption cooling system with new CPC collectors[J]. *Renewable Energy*, 2013, 50: 299-306.
- 12 Tang Runsheng, Yang Yuqin, Gao Wenfeng. Comparative studies on thermal performance of water-in-glass evacuated tube solar heaters with different collector tilt-angles [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(7): 1381-1389.
- 13 Zhang Q C, Zhao K, Zhang B C, *et al.*. New cermet solar coatings for solar thermal electricity applications [J]. *Solar Energy*, 1998, 64(1): 109-114.
- 14 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.
- 15 McIntire W R. New reflector design which avoids losses through gaps between tubular absorbers and reflectors[J]. *Solar Energy*, 1980, 25(3): 215-220.
- 16 Wu Maogang, Tang Runsheng, Cheng Yanbin, *et al.*. Gap design and optical losses of compound parabolic concentrators[J]. *Transaction of the CSAE*, 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.
- 17 Tang Runsheng, Wang Jinfu. A note on multiple reflections of radiation within CPCs and its effect on calculations of energy collection[J]. *Renewable Energy*, 2013, 57: 490-496.
- 18 Tang Runsheng, Liu Xinyue. Optical performance and design optimization of V-trough concentrators for photovoltaic applications[J]. *Solar Energy*, 2011, 85(9): 2154-2166.
- 19 Tang Runsheng, Wu Maogang, Yu Yamei, *et al.*. Optical performance of fixed east-west aligned CPCs used in China[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(8): 1837-1841.