

两级透射 - 反射聚光分频电热联产系统设计和分析*

王刚 胡芑[†] 陈则韶 程晓航

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 合肥 230027)

(2011年12月1日收到; 2012年3月13日收到修改稿)

在传统聚光条件下的太阳能光伏发电系统中, 由于太阳光中存在所有波段的光子, 而其中只有一部分能够被太阳电池用来发电, 其余的部分进入太阳电池之后非但不会被用于发电, 反而会变成热量使太阳电池升温, 从而使电池光电转换效率下降. 本文设计了一种聚光且具有分频功能的太阳能电热联产系统, 利用线聚焦菲涅尔透镜和光谱选择性透过涂层改善太阳电池表面的入射光环境, 在聚光的同时将不利于光伏发电的太阳光波段反射并加以收集利用. 分析结果表明, 与相同条件下传统的只进行聚光的光伏系统相比, 两级透射 - 反射聚光分频电热联产系统具有更高的太阳能利用效率.

关键词: 太阳能, 聚光, 菲涅尔透镜, 电热联产系统

PACS: 42.79.Ek, 88.40.fc, 41.85.Ct, 81.70.Pg

1 引言

随着化石能源的枯竭, 可再生能源在世界能源利用中的重要性逐步上升. 太阳能储量丰富, 洁净无污染, 是很有开发和应用前景的可再生能源之一. 太阳能光热利用和光伏发电是解决日益严重的能源问题的有效途径. 但由于光伏电池价格昂贵, 使得太阳能光伏发电成本较高. 为了降低发电成本, 通常采用聚光技术以节省光伏电池的使用量^[1,2].

相对于只进行聚光发电的太阳能光伏系统来说, 同时具有聚光和分频、从而能将入射太阳能进行光伏和光热两方面利用的分频电热联产系统的总体效率要更高. 其优点是: 1) 将入射太阳辐射进行光谱分离后, 一部分进行发电, 另一部分进行热利用, 对太阳能的整体利用更充分; 2) 将对太阳电池无效的部分红外和紫外辐射反射离开太阳电池之后, 同等聚光和散热条件下, 太阳电池的温升会减小, 太阳电池的光电转换效率将会提高.

本课题组之前提出并设计了两级反射聚光分

频电热联产系统^[3], 主要包括聚光器、分频器、太阳电池和太阳能集热管. 其中, 聚光器是碟式反射聚光面, 而分频器的具体设计可以参见我们之前的工作^[4]. 其工作原理为: 入射光经反射器反射后会聚到分频器表面, 光线经分频器作用后, 一部分反射到太阳电池表面进行发电, 另一部分通过分频器被太阳能集热管接收, 分频器的优化设计采用的是 Needle 法^[5-7]. 由于聚光器是碟式反射聚光面, 因此系统的实际应用受到了一定的限制. 为了可以对太阳能进行较大规模的聚光分频电热联产利用, 本文提出一种新的聚光分频电热联产系统.

2 两级透射 - 反射电热联产系统原理

图 1 是本文提出的电热联产系统, 主要由线聚焦型菲涅尔透镜、凹透镜、分频器、太阳电池和太阳能集热管五个部分组成, 各部分的作用如下.

1) 线聚焦型菲涅尔透镜: 电热联产系统的聚光器, 作用是对入射的平行太阳光进行会聚.

2) 凹透镜: 是用来将被聚光器会聚的太阳光重新变成平行光, 为此, 凹透镜的焦点必须与线聚焦

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 50736005) 资助的课题.

[†] E-mail: hupeng@ustc.edu.cn

菲涅尔透镜的焦点重合.

3) 分频器: 采用光谱选择性透过涂层, 并将其镀在太阳电池表面, 用以对光进行分频.

4) 单晶硅太阳电池: 是光伏发电元件, 对经过分频器处理的入射光进行利用.

5) 太阳能集热管: 经分频器作用后反射到太阳能集热管的其余太阳能被集热管吸收进行热利用.

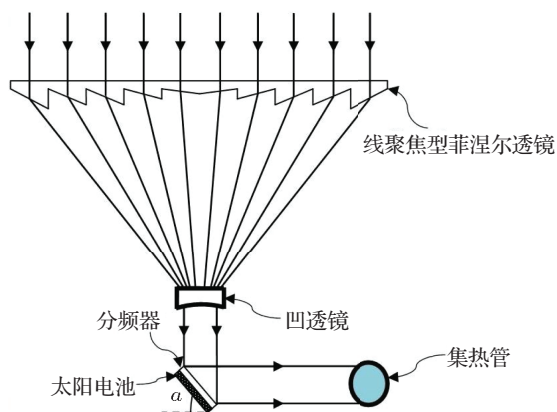


图1 两级透射-反射电热联产系统示意图

3 电热联产系统的数学模型

两级透射-反射聚光分频电热联产系统的数学模型如图2所示. 线聚焦菲涅尔透镜的宽度假设为 D , 焦距为 f , F 为菲涅尔透镜和凹透镜共同的焦点, 太阳电池长为 w , 倾角 α 值应为 45° , 太阳能集热管的半径为 R .

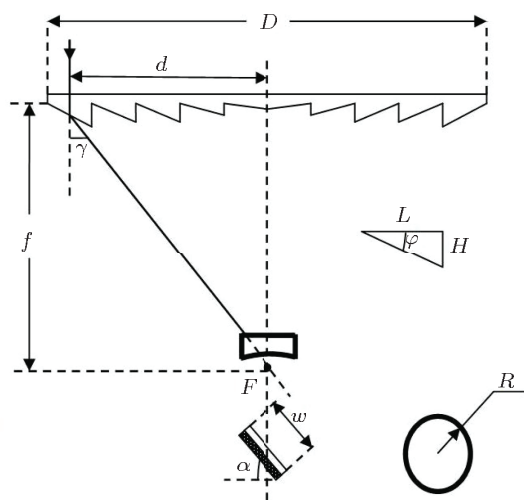


图2 电热联产系统的数学模型

根据第2节的介绍, 可知集热管的半径需满足

下列要求:

$$2R \geq w/\sqrt{2}. \quad (1)$$

线聚焦菲涅尔透镜是由许多个尖劈元对称排列构成的, 这里假定每个尖劈元的齿宽都相等, 用 L 表示, 而距离菲涅尔透镜中心线的长度不同, 每个尖劈的齿高 H 和尖劈角 φ 就有所不同. 如果某尖劈元中心点距线聚焦菲涅尔透镜中心线的距离为 d , 则此尖劈元的偏向角 γ 的值为

$$\gamma = \arctan\left(\frac{d}{f}\right). \quad (2)$$

尖劈角大小则可由(2)式得到:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\sin \gamma}{n - \cos \gamma}\right), \quad (3)$$

此处, n 为线聚焦菲涅尔透镜材料的折射率. 再由图2中尖劈元的齿高齿宽关系可知:

$$H = L \tan \varphi. \quad (4)$$

由(2)~(4)式, 线聚焦菲涅尔透镜的具体尺寸就可以确定下来. 透镜的理想光学效率为

$$\eta_1 = T_1 \sum_i T_{2-i}, \quad (5)$$

式中, T_1 为菲涅尔透镜光线入射面的能流透射率, T_{2-i} 为各尖劈元底面的能流透射率. 假设线聚焦菲涅尔透镜的焦距 f 为 300 mm, 宽度为 601 mm, 透镜材料为 PMMA, 理论几何聚光倍数为 20; 太阳电池宽度为 38 mm (也是分频器的宽度), 入射太阳光能流密度为 1000 W/m^2 . 那么入射太阳光经线聚焦菲涅尔透镜和凹透镜作用后在分频器表面的能流密度分布如图3所示.

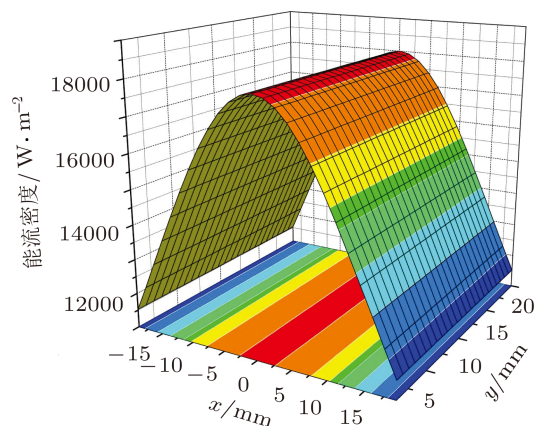


图3 分频器上的能流密度分布情况

4 分频器的设计

作为分频器,理想的光谱选择性透过涂层应该具有如下性质:

$$\tau_\lambda = \begin{cases} 1 & (0.38 \mu\text{m} < \lambda \leq 1.1 \mu\text{m}), \\ 0 & (\lambda > 1.1 \mu\text{m}), \end{cases} \quad (6)$$

$$\rho_\lambda = \begin{cases} 0 & (0.38 \mu\text{m} < \lambda \leq 1.1 \mu\text{m}), \\ 1 & (\lambda > 1.1 \mu\text{m}), \end{cases} \quad (7)$$

其中, τ_λ 为光谱选择性透过涂层的光谱透射率,而 ρ_λ 为涂层的光谱反射率. 利用 Nb_2O_3 和 TiO_2 作为高折射率材料, SiO_2 作为低折射率材料, 利用 Needle 法进行优化设计, 最终得到的光谱选择性透过涂层结构如下:

A 0.0023H₁ 0.3644L 0.0886H₂ 0.016L 0.134H₁
 0.5043L 0.1314H₁ 0.0764L 0.1015H₂ 0.8861L
 0.0008H₂ 0.1421H₁ 0.1356L 0.2417H₂ 0.0383L
 0.0289H₁ 0.8956H₂ 0.0834H₁ 0.0371L 0.1553H₂
 0.1370L 0.0612H₂ 0.7611L 0.0884H₂ 0.1017L
 0.0867H₁ 0.5431H₂ 0.0805H₁ 0.1438H₂ 0.1611L
 0.1153H₂ 0.2557L 0.1321H₂ 0.0916L 0.1085H₁
 0.5535H₂ 0.1476H₁ 0.065L 0.0664H₂ 0.7487L
 0.0904H₂ 0.0718L 0.1152H₁ 0.4664L 0.1309H₁
 0.0149L 0.1067H₂ 0.3509L G

这里, A 为入射介质(空气), G 为基底材料(即单晶硅电池), H₁ 代表 Nb_2O_3 , H₂ 代表 TiO_2 , L 代表 SiO_2 . 光线入射角为 0° 和 45° 时分频器的透射率和反射率曲线如图 4 和图 5 所示.

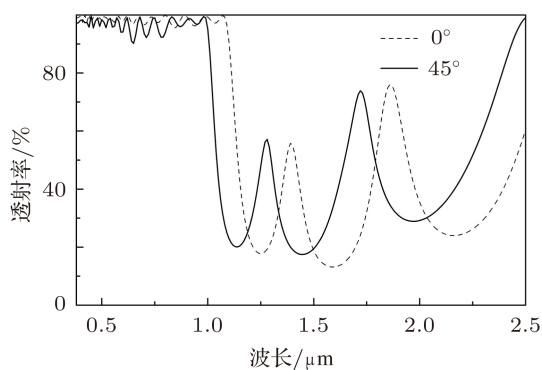


图 4 分频器的光谱透射率

图 6 和表 1 则给出经分频器作用后太阳辐射能在太阳电池和太阳能集热管上的光谱分布情况(对

应于光线入射角为 45°). 利用表 1 中的数据计算可知, 约 92.59% 的有效辐射进入到了太阳电池中, 而约 59.29% 的无效辐射被分频器反射离开太阳电池. 总的太阳辐射能中, 约 18.08% 被分频器反射到太阳能集热管上进行热回收.

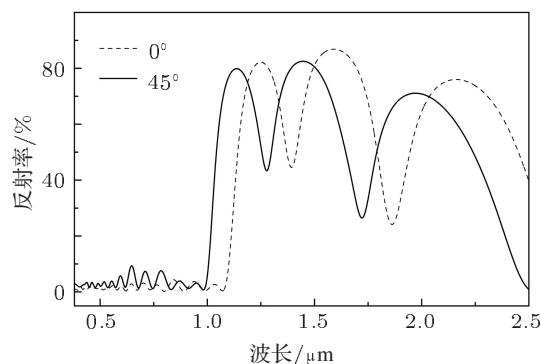


图 5 分频器的光谱反射率

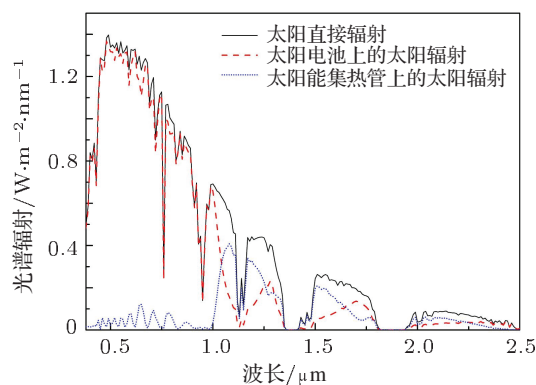


图 6 分频器作用后的太阳辐射能流密度分布

表 1 太阳辐射能流密度分布统计

入射辐射/ μm	集热管/%	太阳电池/%
0.38—1.1	5.85	73.06
> 1.1	12.23	8.40

5 电热联产系统的效率分析

根据 Planck 定律, 温度为 T 的黑体的光谱辐射力为

$$E_{b,\lambda,T} = c_1 \lambda^{-5} / (e^{c_2/\lambda T} - 1), \quad (8)$$

式中, c_1 和 c_2 分别为第一、第二辐射常数. 如果线聚焦菲涅尔透镜的理论几何聚光比为 N , 平均光学

效率为 η_1 , 凹透镜的光学效率为 η_2 , 那么分频器表面的入射光线能流密度就可以表示为

$$I_1 = \eta_1 \eta_2 N \int_0^\infty E_{b,\lambda,T} d\lambda. \quad (9)$$

太阳电池表面的入射能流密度为

$$I_2 = \eta_1 \eta_2 N \int_0^\infty \tau_\lambda E_{b,\lambda,T} d\lambda, \quad (10)$$

式中, τ_λ 为分频器的光谱透射率. 而被分频器反射到太阳能集热管上的能流密度可以表示为

$$I_3 = \eta_1 \eta_2 N \int_0^\infty \rho_\lambda E_{b,\lambda,T} d\lambda, \quad (11)$$

其中, ρ_λ 为分频器的光谱反射率. 如果未分频的太阳电池光电转换效率为 η_{s1} , 分频器作用下的太阳电池光电转换效率为 η_{s2} , 太阳能集热管的效率为 η_t , 那么两级透射反射聚光分频电热联产系统的总太阳能利用效率 η_{T-R} 可以表示为

$$\eta_{T-R} = \frac{\eta_1 \eta_2}{\sigma T^4} \left(\eta_{s2} \int_0^\infty \tau_\lambda E_{b,\lambda,T} d\lambda + \eta_t \int_0^\infty \rho_\lambda E_{b,\lambda,T} d\lambda \right), \quad (12)$$

而只利用线聚焦菲涅尔透镜进行聚光而不进行分频的光伏系统的太阳能利用效率 η_c 应为

$$\eta_c = \eta_1 \eta_{s1}. \quad (13)$$

通常情况下, 太阳能集热管的效率是远大于太阳能电池的效率的, 而由于分频条件下的太阳电池温度较相同情况下未分频的太阳电池温度更低, 其效率就更高, 因此应该有 $\eta_{s1} < \eta_{s2} < \eta_t$. 假设有如下关系:

$$\eta_t = \eta_{s2} + \Delta\eta, \quad (14)$$

其中, $\Delta\eta$ 大于 0, 那么 (12) 式可以表示为

$$\eta_{T-R} = \eta_1 \eta_2 \eta_{s2} + \frac{\eta_1 \eta_2 \Delta\eta}{\sigma T^4} \int_0^\infty \rho_\lambda E_{b,\lambda,T} d\lambda. \quad (15)$$

通常情况下, 集热管的效率 η_t 为 80% 左右甚至更高, 凹透镜的透光率 η_2 一般不小于 90%. 如果取菲涅尔透镜效率 η_1 为 0.9, 凹透镜效率 η_2 取为 0.9—0.95, 未分频电池的效率 η_{s1} 为 0.14, 集热管效率 η_t 为 0.8—0.9, 分频器的相关参数就取第 4 节中优化

设计得到的涂层参数, 假设聚光倍数为 30, 利用表 1 计算出分频后的太阳电池效率大约提高 20%, 即 η_{s2} 为 0.168. 将以上各数据代入 (13) 和 (15) 两式, 可求出 η_c 为 0.126, η_{T-R} 的大小为 0.229—0.257, 即两级聚光分频电热联产系统的总效率要比相同聚光条件下的光伏系统总效率理论上高出 81.8%—104.0%.

在投入成本方面, 如果假设聚光倍数为 30, 入射太阳光为 1000 W/m^2 , 太阳电池取 $20 \text{ cm} \times 500 \text{ cm}$ 规格 (即 1 m^2), 那么电热联产系统中与之对应的太阳能集热管和凹透镜造价约 4000 元, 聚光光伏系统效率取 0.126, 电热联产系统总效率取最大值和最小值的平均值 0.243, 平均每天日照时间取 8 h, 那么每天电热联产系统产生的高出光伏系统的热能为 $30 \times 1000 \times (0.243 - 0.126) 8 \times 3600 = 101.088 \times 10^6 \text{ J}$, 这相当于 3.45 kg 标准煤产生的热量, 约合 5.2 元. 据此估计, 约 $4000/5.2 \approx 769 \text{ d}$ (约 2.1 y) 可收回增加的成本. 而太阳能集热管的使用寿命约为 15 y, 凹透镜使用寿命则更久, 从整体来看, 电热联产系统相对于光伏系统效率的提高所带来的利益, 远大于成本的提高.

6 结论

对两级透射 - 反射聚光分频电热联产系统的工作原理和各组成部分功能进行了介绍, 并对其数学模型进行了分析, 同时分析了分频器表面的会聚光能流密度分布情况. 设计了适用于电热联产系统的分频器, 并对分频器作用下的太阳辐射能流密度分布进行了计算和分析, 结果显示, 约 92.59% 的有效辐射进入到了太阳电池中, 约 59.29% 的无效辐射被分频器反射离开太阳电池. 总的太阳辐射能中, 约 18.08% 被分频器反射到太阳能集热管上进行热回收. 对两级透射 - 反射聚光分频电热联产系统的总效率的分析结果显示, 其效率值高出相同情况下的聚光光伏系统效率约 81.8%—104.0%. 而电热联产系统相对于光伏系统效率的提高所带来的利益, 也远大于投入成本的提高.

- [1] Swanson R M 2000 *Progress in Photovoltaics* **8** 93
[2] Luque A, Sala G, Luque-Heredia I 2006 *Progress in Photovoltaics* **14** 413
[3] Jiang S L, Hu P, Mo S P, Chen Z S 2009 *APPEEC* Wuhan, March 27–31 2009 p84
[4] Jiang S L, Wang G, Hu P, Chen Z S, Jia L 2011 *APPEEC* Wuhan, March 25–28, 2011 p1
[5] Tikhonravov A V, Trubetskov M K, Debell G W 1996 *Appl. Opt.* **35** 5493
[6] Tikhonravov A V, Trubetskov M K, Debell G W 2007 *Appl. Opt.* **46** 704
[7] Tikhonravov A V 1997 *Optical Thin Films V: New Developments* **3133** 2

Design and analysis of two-stage transmitted-reflected concentration PV/thermal system with spectral beam splitter*

Wang Gang Hu Peng[†] Chen Ze-Shao Cheng Xiao-Fang

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

(Received 1 December 2011; revised manuscript received 13 March 2012)

Abstract

For the traditional photovoltaic (PV) system which is under a full spectral concentrating condition, only a part of solar energy can be used by solar cells for PV power generation, the other part is not effective for the PV power generation and can result in temperature of solar cells increasing. High temperature can reduce the PV transformation efficiency of solar cells. In this study, a concentration PV/thermal system with beam splitter is proposed, which is composed of a linear Fresnel lens, a concave lens, a beam splitter, solar cells and a thermal receiver. The selective transmission coating on the splitter is designed to improve the incident condition of the sunlight on the surface of solar cells and reflect the noneffective part of sunlight to the thermal receiver for recycling. Theoretical analysis of the PV/thermal system is made and the results show that compared with the traditional concentration PV system, the two-stage transmitted-reflected concentration spectral beam splitting PV/thermal system has a high efficiency.

Keywords: solar energy, spectral concentration, fresnel lens, PV/thermal system

PACS: 42.79.Ek, 88.40.fc, 41.85.Ct, 81.70.Pg

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50736005).

[†] E-mail: hupeng@ustc.edu.cn