

· 光电工程系统技术 ·

太阳能光伏/光热综合利用的温控系统设计

何超^{1,3}, 吴晗平^{1,2}, 胡大军¹, 张焱¹

(1. 武汉工程大学理学院, 湖北 武汉 430205; 2. 武汉工程大学光电子系统技术研究所, 湖北 武汉 430205;
3. 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要: 基于薄膜光学和传热学原理, 利用特定光学薄膜滤除紫外线, 以及热循环系统降低太阳能电池工作温度, 设计了光伏/光热综合利用的温度控制系统. 在阐述温控系统工作原理及其设计思路的基础上, 提出系统指标体系, 分析环境温度以及光谱透过率对传热效率的影响, 并提出合理的改进方法. 应用 TFCalc 薄膜设计软件设计特定的光学薄膜, 仿真结果表明, 所设计的薄膜能反射一定带宽的紫外光谱. 该温控系统对于当前广泛使用的太阳能光伏发电系统具有良好的实用价值.

关键词: 光伏/光热; 温控系统; 薄膜设计; 光电转换效率; 传热效率

中图分类号: TM924.14

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)06-0014-05

Design of Temperature Control System with Integrated Utilization of Solar Photovoltaic-Thermal(PV/T) Effects

HE Chao^{1,3}, WU Han-ping^{1,2}, HU Da-jun¹, ZHANG Yan¹

(1. School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
3. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A temperature control system is designed based on the principle of thin film optics and heat transfer theory, it integrates the utilization of solar photovoltaic-thermal effect by using a specific optical thin film to eliminate the ultraviolet radiation and a thermal circulation system to reduce its working temperature. After deducing the operational principle and design ideas of such system, the index are advanced, and the influence factors of ambient temperature and spectral transmittance to the heat transfer efficiency are analyzed. And then, several reasonable improved methods are put forward. A professional thin-film design software named TFCalc is applied to design a particular optical thin film, simulation results show that the film can reflect a certain bandwidth of ultraviolet spectrum. The temperature control system has good practical value for the widely used photovoltaic power system.

Key words: photovoltaic-thermal(PV/T); temperature control system; thin film design; photoelectric conversion efficiency; heat transfer efficiency

太阳能发电技术使用清洁、安全和储量巨大的太阳光作为能源, 具有其他发电方式不可比拟的优点. 随着能源危机加剧, 太阳能的利用受到高度重视, 并得到快速发展, 尤其是太阳能光伏发电技术应

用领域日益广泛, 使得人类对电力资源需求的压力在一定程度上得到了缓解, 同时也减少对自然环境的破坏.

目前安装的太阳能光伏发电系统中, 太阳能电

收稿日期: 2009-11-03

作者简介: 何超(1987-), 男, 湖北汉川人, 硕士研究生, 主要研究方向为太阳能光伏系统技术及应用. 吴晗平(指导教师)(1964-), 男, 湖南澧县人, 教授, 工学博士, 主要研究方向为光电系统总体技术及设计.

池普遍直接暴露于室外,强烈的太阳光线一方面致热升温,使电池温度升高,导致光伏转换效率降低,影响工作性能;另一方面,也会老化设备,缩短其使用寿命,增加使用成本.要解决这一系列问题,采用一种光伏/光热集热器(PV/T collector)回收热量,同时降低了电池温度,也在一定程度上提高了光伏转换效率^[1].但这种集热器未能改变输入光谱,无法减弱紫外线的老化作用,也不能增加可见光的利用率.在以集热器为核心的热循环系统基础上,设计一种集光伏/光热综合利用的温控系统,利用光学薄膜改变太阳光谱输入,实现其优化利用,从而提高太阳能电池转换效率,延长太阳能电池使用寿命.

1 温控系统组成及工作原理

1.1 系统组成

该温控系统由2个部分组成,即光学薄膜系统和热循环系统,如图1所示.分别从光学和传热学角度出发,综合利用太阳能光伏/光热效应,最大限度地利用太阳能资源^[2].

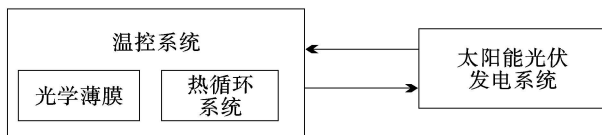


图1 系统结构框图

基于光学设计的光学薄膜,如图2所示,既能有效增透可见光以利于光伏效应,又能反射一定带宽的紫外光谱,减少紫外辐射,从而实现对太阳光的选择性利用.热循环系统利用传热学基本原理,一方面利用流体吸收热量以实现降温,另一方面通过热循环收集热量,提高太阳能利用效率.

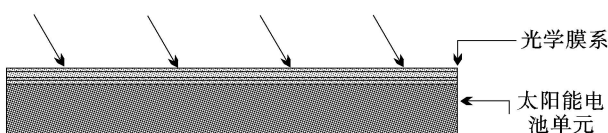


图2 光学薄膜示意图

太阳能光伏发电系统与温控系统组成整个光伏系统.其中,光伏发电系统是主体部分,为用户提供

所需电力;温控系统作用于太阳能电池,使之发挥更好的性能.

1.2 系统工作原理

太阳光携带致热光谱,在太阳能电池受到照射,吸收能量而升温,这就是太阳光的光热效应.尽管这会导致电池效率降低而应避免,但是如果将这种热能转移并储存起来,既能控制太阳能电池在适宜温度,也能提高太阳能利用率.

薄膜光学中,利用光的干涉原理,常用多层折射率高低交错、光学厚度为 $\lambda/4$ (λ 为中心波长)的光学薄膜构成膜系,作为高反膜.要获得高反射率,膜系的两侧最外层均应为高折射率层,因此高折射率膜一定是奇数层,且膜系层数越多,反射率越高.膜系的参量只对一种波长 λ_0 成立,这个波长称为该膜系的中心波长,当入射光偏离中心波长时,其反射率要相应地下降^[3].光学膜系不但起到选择性应用太阳光谱的作用,还可以在表面保护太阳能电池.

热循环系统的核心部分是集热器,主要由太阳能电池板和吸热部件组成,其结构如图3所示.集热器的基本原理是利用太阳能电池与太阳能吸热板对太阳光谱波长吸收范围的不同,采用二者结合的方式使太阳光谱能够在整个波长区得到最大吸收,并且通过能量回收装置有效地利用太阳能^[4].热循环首先应用光热效应有效利用了太阳光谱中的光热波段,更大效率地利用太阳热能,同时应用热循环机制,冷却太阳电池,提高其光电转换效率.

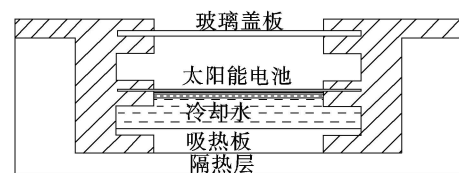


图3 集热器结构示意图

2 设计指标

薄膜指标为:(1)材料:硫化锌 ZnS,氟化镁 MgF_2 ;(2)材料折射率: $n_H = 2.35$ (ZnS), $n_L = 1.38$ (MgF_2),强化玻璃 $n_G = 1.52$ (K9);(3)反射光谱中心波长 λ_0 : $0.9 \mu m$ (红外), $0.3 \mu m$ (紫外);(4)对垂直入射中心波长光线的反射率 R : $R \geq 98\%$;(5)正常工作温度: $-10 \sim 85 \text{ } ^\circ C$;(6)平均透过率 R_{ave} :

$R_{ave} \geq 65\%$.

热循环系统设计指标为:(1)工作温度:0~75℃;(2)有效抑制效率降低程度: $\geq 30\%$;(3)控制温度范围: $\leq 30\text{ }^\circ\text{C}$;(4)传热效率: $\eta_{th} \geq 50\%$.

3 系统设计

3.1 光学薄膜的设计与仿真

3.1.1 光学薄膜设计

根据等效面的概念,对于多层 $\lambda_0/4$ 膜系,正入射情况下的反射率可计算如下.由图4,若在基片G上镀一层 $\lambda_0/4$ 的高折射率膜,其反射率 R_1 为

$$R_1 = \left(\frac{n_A - n_1}{n_A + n_1} \right)^2 \quad (1)$$

式中, $n_1 = n_H^2/n_G$, 是第一层膜厚的等效折射率; n_G, n_A, n_H, n_L 分别为基片、空气、高、低折射率膜层折射率.

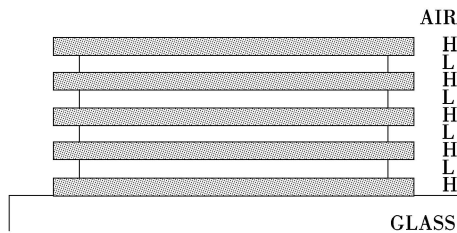


图4 $\lambda/4$ 膜系的多层高反射膜示意图

若在高折射率膜上再镀一层低折射率膜层,其

$$\text{反射率 } R_2 \text{ 为: } R_2 = \left(\frac{n_A - n_{II}}{n_A + n_{II}} \right)^2 \quad (2)$$

$$\text{式中, } n_{II} = \frac{n_L^2}{n_I} = \left(\frac{n_L}{n_H} \right)^2 n_G \quad (3)$$

n_{II} 是镀双层膜厚的等效折射率.依此类推,当膜层为偶数($2p$)层时, $(HL)^p$ 膜系的等效折射率为

$$n_{2p} = \left(\frac{n_L}{n_H} \right)^{2p} n_G \quad (4)$$

相应的反射率为

$$R_{2p} = \left(\frac{n_A - n_{2p}}{n_A + n_{2p}} \right)^2 \quad (5)$$

当膜层为奇数($2p+1$)层时, $(HL)^p H$ 膜系的等效折射率为

$$n_{2p+1} = \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2p} \left(\frac{n_H^2}{n_G} \right) \quad (6)$$

相应的反射率表达式为

$$R_{2p+1} = \left(\frac{n_A - n_{2p+1}}{n_A + n_{2p+1}} \right)^2 \quad (7)$$

根据设计指标,对于高反射膜系,中心波长反射率 $R \geq 98\%$,代入式(7)中,得到

$$R_{2p+1} = \left(\frac{n_A - n_{2p+1}}{n_A + n_{2p+1}} \right)^2 \geq 98\% \quad (8)$$

已知 $n_H = 2.35$ (ZnS), $n_L = 1.38$ (MgF_2), $n_G = 1.52$, $n_A = 1.0$,解析式(8)得到 $p \geq 3.75$,取 $p = 4$,则膜层有 $2p+1 = 9$ 层.此时,由式(6)膜系等效折射率为

$$n_{2p+1} = \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2p} \left(\frac{n_H^2}{n_G} \right) = 256.923 \quad (9)$$

膜系对中心波长的反射率为

$$R_{2p+1} = \left(\frac{n_A - n_{2p+1}}{n_A + n_{2p+1}} \right)^2 = 0.9846 \quad (10)$$

随着膜层数增加,高反射率的波长区趋于一个极限,所对应的波段称为该反射膜系的反射带宽.反射带宽的计算公式为

$$2\Delta g = \frac{4}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) \quad (11)$$

式中, $g = \lambda_0/\lambda$, 为反射系数.由此可见,反射带宽度 $2\Delta g = \Delta\lambda/\lambda_0$ 只与 n_H/n_L 有关, n_H/n_L 越大,带宽就越大.代入数据 $n_H = 2.35$, $n_L = 1.38$,计算得到: $\Delta g = 0.1905$.

反射带宽 $\Delta\lambda$ 最终表示为

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \cdot (2\Delta g) \quad (12)$$

中心波长 $\lambda_0 = 900\text{ nm}$ 处,膜系的反射带宽: $\Delta\lambda = 900 \times 0.381 = 342.87\text{ nm}$; 中心波长 $\lambda_0 = 300\text{ nm}$ 处,膜系的反射带宽: $\Delta\lambda = 300 \times 0.381 = 114.29\text{ nm}$.综合以上计算,薄膜的特性参数列于表1.

表1 薄膜特征参量

特征参量	参 数
功能	高反射膜层
膜材料	ZnS ($n_H = 2.35$), MgF_2 ($n_L = 1.38$)
基底	强化玻璃 ($n_G = 1.52$)
膜层层数	9
中心波长 λ_0/nm	900, 300
最大反射率 R_M	98.46%
等效折射率 n_e	256.932
反射带宽 $\Delta\lambda$	342.87 ($\lambda_0 = 900\text{ nm}$), 114.29 ($\lambda_0 = 300\text{ nm}$)

3.1.2 光学薄膜仿真

根据设计薄膜的综合参数,运用 Software Spec-

tra 公司专业薄膜设计软件 TFCalc 仿真输出薄膜在 200~2 000 nm 波段范围内的反射光谱曲线,如图 5 所示.

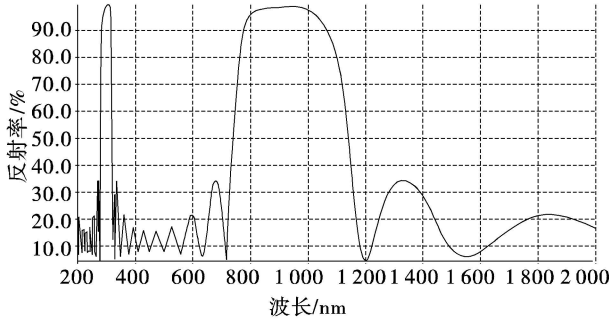


图 5 光学薄膜反射率曲线

由图 5 可以得到以下结论:(1)在中心波长 900 nm,300 nm 处分别有反射率峰值,反射带宽随波长增大而增大;(2)在可见光区域(400~800 nm),反射率普遍很低,这对于增透可见光以提高光伏效应有作用.

通过公式和软件的计算,得到光学薄膜的一系列特征参数,其中在可见光区域不存在反射带宽,这是因为,要提高光伏发电系统的转换效率,一种有效的途径就是增加光伏作用区的光谱输入,即增透可见光谱,尽量避免反射.表 2 列出了所设计的光学薄膜的一系列特性参数.在 200~2 000 nm 范围内,薄膜对太阳光的平均反射率为: $\bar{R} = 35.61\%$.

表 2 设计的高反射膜薄膜特性

波长范围/(nm)	200~400	400~800	800~1 200
波段功能	光热区	光伏区	光热区
中心波长 λ_0 /(nm)	300	—	900
最小反射率 R_{min} /(%)	5.273($\lambda = 277$ nm)	5.270($\lambda = 720$ nm)	5.267($\lambda = 1 200$ nm)
最大反射率 R_{max} /(%)	98.089($\lambda = 300$ nm)	94.660($\lambda = 800$ nm)	98.062($\lambda = 900$ nm)
平均反射率 R_{ave} /(%)	31.863	25.437	39.650
反射带宽 $\Delta\lambda$ /(nm)	114.29	—	342.869 9
起止波长	242.9~357.1	—	728.6~1 071.4

3.2 热循环系统设计

根据集热器设计^[5]的思想,热循环系统在太阳能电池板背部安装了窄条流道,水流经此道吸收电池板的热能,以达到温控的目的.

集热器和循环部件构成整个热循环系统,集热器安装于太阳能电池背面,如图 6 所示.水箱的功能与太阳能热水器类似,既可以太阳能致热,也可以安装辅助加热设备由电加热.水泵以及辅助加热设备的电力可以直接由未逆变的太阳能电池直流提供.太阳能电池表面温度与水箱中水温的智能监测以及水泵转速的智能控制由智能监控系统实现.

3.2.1 循环部件设计

图 6 中,窄条流道中的冷却水需要保持一定的流速以保证能及时带走热量但不至于流速太快,以免效率降低,浪费电能.热循环系统有自然循环和强制循环 2 种类型.自然循环通过水上下温度差而形成密度差从而发生对流,这种方式的装置,只需将水箱置于改进的太阳能电池上方,集热器中的水吸收热量即形成密度梯度.但是自然循环系统水流速较慢,热量不能及时带走会明显影响温控效果.另一种

强制循环方式是在循环系统中安装水泵,从而可以控制水流速度,可随意安置水箱^[6].为了提高循环效率,系统采用强制循环的方式,利用电力带动水泵,加快水流速度.

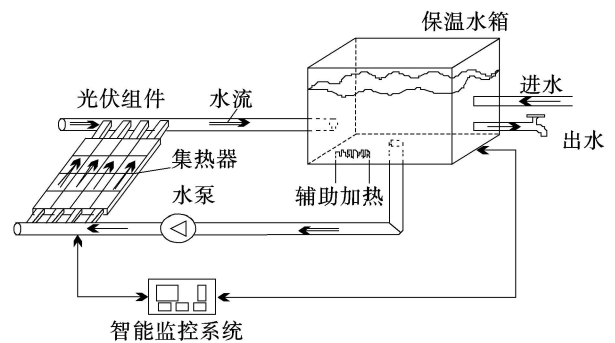


图 6 热循环系统结构示意图

此外,热循环系统也可配备智能监控系统,以实时监测太阳能电池温度、水泵转速、水箱水位、温度等信号,并作出及时反馈.

3.2.2 集热器设计

基于普通集热器的设计原理,对太阳能电池的

外围进行整体设计,如图7所示.镀膜后的封装太阳能电池背后紧贴扁盒流道,扁形可以增加电池背面与水的接触面积,加快热传递,同样在流道下层安装保温层,以减少吸热水流热能的散失.在电池的两侧,同样设计有窄条流道,与盖板直接接触,这样还可以吸收盖板热量,进而降低盖板表面薄膜的工作温度,使之性能稳定.

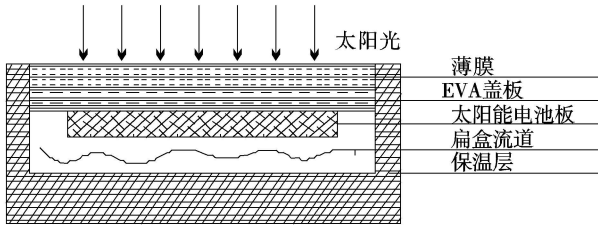


图7 应用于太阳能电池的集热器示意图

3.2.3 传热效率的影响因素

由热循环系统的传热效率公式^[7]

$$\eta_{th} = \tau(\alpha' - \eta_r) - \left(\frac{K}{G} - \tau\beta_r\eta_r\right)(T - T_a) \quad (13)$$

式中, T 是电池板的温度;薄膜对太阳光的平均透过率 $\tau = 1 - \bar{R} = 0.65$; 太阳能电池的吸收系数 $\alpha' = 0.9$; 标称电池工作温度 $T_r = 311 \text{ K}$ ($45 \text{ }^\circ\text{C}$); 标称电池工作温度下的电池效率 $\eta_r = 13.45\%$; 电池的温度系数 $\beta_r = -0.47\%/\text{K}$; 环境温度 $T_a = 298 \text{ K}$; 入射的太阳能能量 $G = 1000 \text{ W/m}^2$; 传热系数 $K = 7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

代入式(13)得到

$$\eta_{th} = 0.4976 - 0.0074(T - 298) = 2.7028 - 0.0074T \quad (14)$$

即热效率与电池板的温度成线性关系,如图8所示.

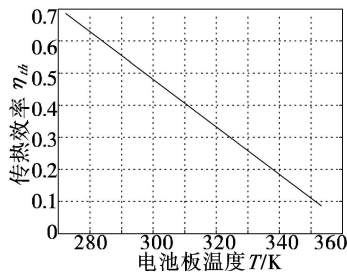


图8 传热效率随温度变化曲线

设计指标中传热效率 $\eta_{th} \geq 50\%$, 则

$$\eta_{th} = 2.7028 - 0.0074T \geq 0.5 \quad (15)$$

$$T \leq 311.2 \text{ K} \quad (16)$$

要使传热效率达到50%, 必须将电池板温度控制在 311.2 K ($38.2 \text{ }^\circ\text{C}$) 以内; 要提高传热效率, 可以从增大透过率、在电池板温度 $T = 303 \text{ K}$ ($30 \text{ }^\circ\text{C}$) 时传热效率与透过率的关系曲线图9看出, 当其他因素一定时, 随着薄膜透过率的增大, 传热系数也随之线性增大.

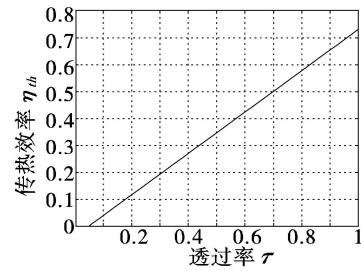


图9 传热效率与透过率变化曲线

4 结束语

太阳能光伏转换效率取决于制作太阳能电池的材料, 但也受应用环境的影响, 改变不利的环境因素(即高温)以及采取可行的温控技术, 有助于保持光伏系统的转换效率, 增加太阳光的利用率和太阳能电池的使用寿命.

提出了一种光伏/光热综合应用的温度控制系统, 较以往有较大改进, 综合了光伏和光热效应的优点, 更高效地利用太阳能, 同时, 可有效地克服太阳能电池因温度升高而导致的光电转换效率降低和紫外线对电池老化的影响.

参考文献

- [1] Zondag H A, de Vries D W, van Helden W G. The yield of different combined PV thermal collector designs[J]. Solar Energy, 2003, 74: 253-257.
- [2] 倪明江, 骆仲泱, 寿春晖, 等. 太阳能光热光电综合利用[J]. 上海电力, 2009(1): 1-2.
- [3] 唐晋发, 顾培夫. 薄膜光学与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [4] 王宝群, 姚强, 宋蕾, 等. 太阳能光伏/光热集热器设计与性能研究[J]. 燃气轮机技术, 2009, 22(1): 69-70.
- [5] 赵军, 秦娜, 段征强. 太阳能电池及光伏热(PV/T)结构的实验研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(3): 327-328.
- [6] 中国电力企业联合会. 热力系统节能[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [7] 王宝群, 姚强, 宋蕾, 等. 光伏/光热(PV/T)系统概况与评价[J]. 太阳能学报, 2009, 30(2): 193-195.