

太阳能光伏-温差发电驱动的新型冰箱 模型设计与热力学分析*

刘永生^{1)†} 谷民安¹⁾ 杨晶晶¹⁾ 石奇光¹⁾ 高 湑¹⁾ 杨金焕¹⁾ 杨正龙²⁾

1) (上海电力学院太阳能研究所, 上海 200090)

2) (同济大学功能高分子材料研究所, 上海 200092)

(2010 年 4 月 18 日收到; 2010 年 6 月 13 日收到修改稿)

结合太阳能电池温度特性和温差发电特点, 设计了一套新的太阳能光伏发电-温差发电驱动的冰箱模型, 该模型包括太阳能光伏电池、半导体温差发电模块、电源控制系统等. 根据负载用电需求, 做出了光伏发电系统的设计方案. 采用热力学基本理论, 对该模型进行了工作效率及焓效率的分析. 结果发现: 能效比 COP 达到了 2.73 (一般冰箱 COP 为 2 左右), 焓效率也达到 42.5%. 同时, 该系统模型环境效益明显, 可以减排 CO_2 1394.2 kg, SO_2 27.2 kg, 氮氧化物 21.0 kg. 这对可再生能源的应用具有理论指导意义.

关键词: 光伏发电, 温差发电, 热力学分析

PACC: 7865, 8630J, 4280Y

1. 引 言

随着石油、煤、天然气等不可再生能源的消耗及资源的衰竭, 人们希望通过对太阳能等新能源的开发利用来解决由于不可再生能源资源枯竭所导致的日益严重的能源危机, 而光伏发电是当前利用太阳能的主要方式之一^[1-4]. 目前投入大规模商业化应用的主要是硅系太阳能电池. 硅系光伏电池输出特性随着温度变化, 开路电压变小而短路电流略微增大, 导致转换效率的降低^[5-10]. 在一般情况下, 太阳能电池温度与环境温度相差 5—30 °C, 夏季温度高时温差能达到 40 °C 以上, 这无疑直接影响到电池的使用效率和寿命, 必须采取适当的措施降低电池板的温度.

伴随着半导体工艺及材料技术的进步, 较高转换效率的热电材料迅速发展^[11-15], 它在超导、航空航天、电子设备及食品储存等领域的作用也越来越明显^[16], 取得了良好的经济效益. 在半导体热电制冷方面的研究也加大了投入. 基于非平衡的热力

学, Chen 等^[17]建立了一套单循环模式及双循环模式的半导体热电制冷系统, 温差发电模块内部结构得到了优化, 一些参数在合理的范围内得到确定. Luo 等^[18]利用有限时间热力学理论分析和优化半导体冰箱的性能.

实际上, 半导体温差发电技术利用 Seebeck 效应将热能转化为电能, 也是太阳能热发电技术的一种, 它可以利用的太阳能光谱更宽, 更能有效地利用太阳光. 基于此, 本文设计了一套太阳能光伏-温差发电驱动的新型冰箱模型, 同时采用热力学基本理论, 对该模型进行工作效率及焓效率的分析, 发现通过半导体温差发电模块可有效降低电池板温度, 从而提高光伏发电和半导体温差发电效率, 为该类冰箱的设计和应用提供了理论依据.

2. 模型简介

本模型包括太阳能光伏电池、半导体温差发电模块、电源控制系统等. 半导体温差发电模块贴在太阳能电池板的背部. 具体原理如图 1 所示.

* 国家自然科学基金(批准号: 10804072, 50703029)、上海市基础研究重点项目(批准号: 08JC1410400)、上海市纳米科技专项(批准号: 0952NM02700, 0752NM012)、上海市青年科技启明星计划(批准号: 07QA14026, 09QA1406300)、上海市节能减排科技支撑项目(批准号: 09DZ1202500)、上海市教育委员会科研创新项目(批准号: 11ZZ168)和浙江大学教育部重点实验室(批准号: 2009MSF05)资助的课题.

† E-mail: ysliu@shiep.edu.cn

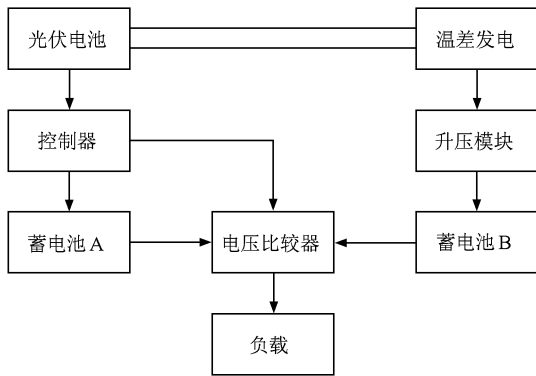


图1 模型原理

在实验中,100 W 的电池板中有 8 块温差发电模块串联,每天发电量约为 30 Wh. 为了降低散热器的温度,每四个散热器设有一个风道,在风道口安装一个 2 W 风扇. 当电池板温度达到 40 °C, 风扇开启,风扇每天工作 6 h,耗电量约为 12 Wh.

该模型充分利用了太阳能光伏发电这种清洁能源,也解决了光伏电池背温过高影响发电效率的电池散热问题,为半导体温差发电开辟了新的应用空间.

3. 光伏发电系统的设计方案

3.1. 计算负载平均日耗电量 QL

负载每天耗电量 0.6 kWh, 冰箱 24 h 全天运行,工作电压为 24 V, 蓄电池维持天数为 4 天(d), 则

$$QL = \frac{0.6 \times 1000 \text{ Wh/d}}{24 \text{ V}} = 25 \text{ A} \cdot \text{h/d}$$

3.2. 确定方阵最佳电流、蓄电池的容量

上海地区纬度是 31.17°, 根据文献[19], 计算出上海当地的最佳方阵倾角 β 为 44°, 计算出各月份方阵面上的太阳辐照量 H_t , 可得到全年太阳辐照量平均值 $\bar{H}_t = 3.440684 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 并找出一月份最小的太阳辐照量 $H_{t \min} = 2.67802 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$.

选取参数 $\eta_1 = \eta_2 = 0.9$ 得到

$$I_{\min} = \frac{Q_t}{\bar{H}_t \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} = 8.97 \text{ A}, \quad (1)$$

$$I_{\max} = \frac{Q_t}{H_{t \min} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} = 11.53 \text{ A}. \quad (2)$$

经过理论计算,按照蓄电池维持的时间,则蓄电池的容量为

$$B = \frac{\sum |-\Delta Q_j|}{DOD \eta_2} = 145 \text{ A} \cdot \text{h}. \quad (3)$$

最佳电流 $I_m = 10.34 \text{ A}$, 选择 150 A·h 的蓄电池.

3.3. 确定方阵的最佳功率 P_m

经过计算,得出

$$P_m = \kappa I_m V_m = 299.6 \text{ W}. \quad (4)$$

最终选择太阳能电池方阵容量为 300 W.

4. 温差发电效率分析

4.1. 温差发电工作效率及焓效率理论计算

温差发电机的工作效率为^[20]

$$\varphi = \frac{P}{Q_h} = \frac{I^2 R_1}{\alpha T_h I + \kappa(T_h - T_c) - \frac{1}{2} I^2 R}. \quad (5)$$

若 $R_1/R = M$, 则温差发电机的工作效率为

$$\varphi = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot M \times \left[(1 + M) - \frac{T_h - T_c}{2T_h} + \frac{(1 + M)^2}{ZT_h} \right]^{-1}. \quad (6)$$

其中温差材料的品质因数 $Z = \alpha^2 / \kappa R = \alpha^2 / (\sqrt{\lambda_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2})^2$; R 为半导体器件的内阻; R_1 为负载电阻和回路电流; I 为回路电流; T_h, T_c 分别为温差发电模块的热、冷端温度; α 为半导体器件两臂温差电动势率之和; κ 为温差发电冷热段的总热导率.

温差发电的热量焓为

$$E_{xQ} = \left(1 - \frac{T_c}{T_h} \right) Q, \quad (7)$$

温差发电的收益焓

$$E_x = P = I^2 R_1, \quad (8)$$

温差发电的焓效率

$$\eta_{ex} = \frac{E_x}{E_{xQ}} = \frac{\varphi}{1 - T_c/T_h}. \quad (9)$$

4.2. 温差发电工作效率及焓效率分析

n 型和 p 型元件的 Seebeck 系数 $\alpha = 2.4 \times 10^{-4}$

V/K; 导热系数 λ 为 $1.5 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$; 电导率为 $80 \text{ kS}/\text{m}$, 则品质因数为

$$Z = \frac{\alpha^2}{\kappa R} = \frac{\alpha^2}{\lambda \rho} = 3.072 \times 10^{-3}. \quad (10)$$

根据冷热端温差的不同, 模拟实验分为多个工况进行, 每个工况下记录负载电阻 R_1 , 热端温度 T_h , 冷端温度 T_c , 分别由以上公式求出输出功率 P , 工作效率 φ , 焓效率 η , 结果见图 2 及图 3. 从图中可见, 随着负载电阻 R_1 的增大, 工作效率 φ 和焓效率 η 存在一个最大峰值. 当负载电阻 R_1 等于半导体器件内阻 R 时, 工作效率 φ 和焓效率 η 都达到最大值, 这与 Xi 等^[20] 得到的研究结果一致. 在峰值附近, 随着负载电阻 R_1 的变化, 焓效率 η 下降得更快, 即焓效

率 η 对负载电阻 R_1 的变化更为敏感. 在该系统中, 空载冰箱电阻 R_1 与半导体器件的内阻非常接近, 温差发电能达到焓效率及工作效率的最大值. 随着冰箱负载的增加, 电阻 R_1 逐渐增大, 如图 2 所示, 温差发电的焓效率及工作效率都会有不同程度地降低. 从图 2(b) 还可以看出, 在冰箱负载一定的前提下, 温差越大, 其焓效率越大, 但是增加的幅度很小, 焓效率基本稳定. 如图 3 所示, 负载电阻 R_1 一定时, 随着温差 ΔT 的增大, 工作效率和焓效率也相应地增大, 而工作效率增长幅度较大, 焓效率变化较为缓慢; 当温差 ΔT 一定时, 负载电阻 R_1 在接近温差模块内阻时达到最大值, 这均与图 2 的结论一致.

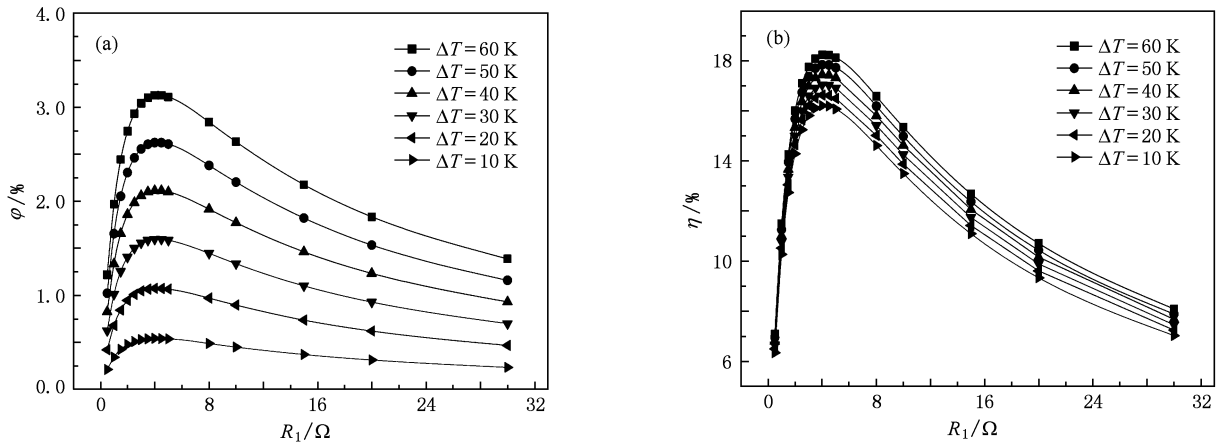


图 2 不同工况下工作效率(a)和焓效率(b)随 R_1 的变化

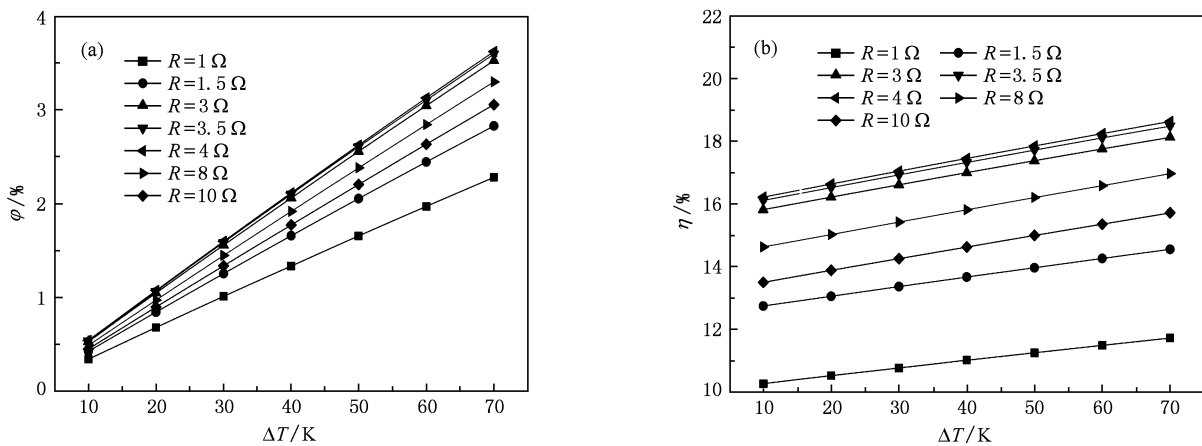


图 3 不同工况下工作效率(a)和焓效率(b)随 ΔT 的变化

4.3. 系统最大输出功率分析

理论上总输出功率为

$$P_t = 8P_\alpha + P_0(1 + \gamma\Delta T) = \frac{8M\alpha^2 \Delta T_1^2}{(1 + M)^2} \cdot R_1 + P_0(1 + \gamma\Delta T_2), \quad (11)$$

其中功率温差系数 $\gamma = -0.378\%/^\circ\text{C}$; P_0 为标准条件下太阳能电池输出功率; ΔT_1 为温差发电模块的冷热段温差, $\Delta T_{1\text{max}} = (T - T_c)$ K; ΔT_2 为太阳能电池温度 T 与标准温度之差, 即 $\Delta T_2 = (T - 25)$ K.

令 $\partial P_t / \partial T = 0$, 则系统能取得最小的发电量. 此时, $16M\alpha^2 / (1 + M)^2 \cdot R_1 [T - (T_c + 3)] + P_0\gamma = 0$, 则

$$T = \frac{-P_0\gamma(1 + M)^2}{16M\alpha^2 R_1} + T_c + 3. \quad (12)$$

由(12)式可知, 温差达到几千度以上时系统才能取得最小的发电量. 这将意味着太阳能光伏发电量在整个系统中占很大比重, 温差发电模块的发电量甚至可以忽略不计. 在实际工作当中, 温差发电模块的工作温度要求要低于 70°C , 太阳能电池板温度在最为恶劣的情况下, 温度为 80°C 左右^[21], 此时温差发电模块的冷热端温差也仅为 $30\text{—}45^\circ\text{C}$ 之间. 由(11)和(12)式可知, 在太阳能电池温度为 25°C 时, 系统的发电量为最大值, 温差发电模块的加入, 主要是降低太阳能电池板温度, 提高太阳能电池的发电效率, 增长太阳能电池的寿命.

5. 系统性能分析

计算中的主要参数选取如下: 取压缩机的轴效率(包括指示效率和机械效率)为 0.56 , 功率为 30 W ; 冰箱工作环境温度为 30°C , 冷冻室温度为 -12°C , 蒸发温度为 -17°C , 制冷系统的过冷度、过热度均为 2°C , 绝热系数为 0.8 , 压缩机工质为 R134a.

根据已知工况条件, 表 1 中给出了各个点的状态参数, 则压缩机耗功为

$$\omega_{\text{net}} = h_2 - h_1 = 49.73 \text{ kJ/kg}. \quad (13)$$

每千克工质的制冷量

$$q_c = h_1 - h_5 = 135.791 \text{ kJ/kg}. \quad (14)$$

能效比 COP 为

$$COP = \frac{q_c}{q_0 - q_c} = \frac{q_c}{\omega_{\text{net}}} = 2.73. \quad (15)$$

一般冰箱的 COP 在 $1.5\text{—}2.5$ 之间, 由于直流冰箱的耗功量小, 所以 COP 有所提高, 制冷效果较为明显.

表 1 各点状态参数

状态点	温度/ $^\circ\text{C}$	压力/ bar	焓/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	熵/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
0	-17	1.511	387.738	1.733
1	-15	1.511	388.970	1.7402
2	58	10.164	438.698	1.7707
2'	40	10.164	419.340	1.710
3	40	10.164	256.440	1.189
4	38	10.164	253.179	1.181
5	-17	1.511	253.179	1.211

图 4 为该系统中各部件的相对焓损失. 可以看出, 由于温差发电模块的加入, 使太阳能电池的温度降低, 提高了太阳能电池的发电效率, 并且自身还能发电, 从而系统的冷量焓达到 42.5% , 高于一般太阳能直流冰箱的 40% .

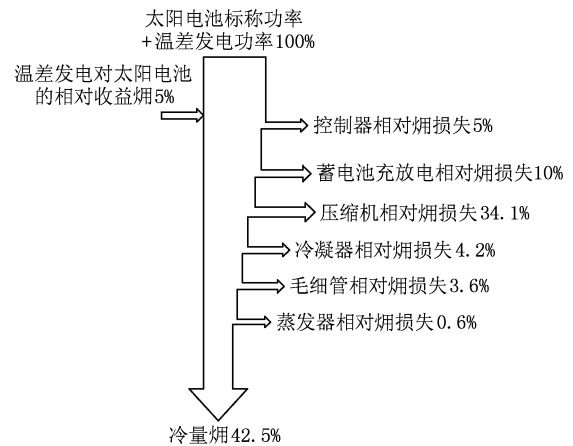


图 4 系统焓分析

6. 系统经济效益及环境效益分析

从上面已知, 太阳能光伏发电、温差发电模块等都已经是比较成熟、商品化的产品, 建立在此基础上的太阳能光伏及温差发电系统完全能正常运行, 达到设计目的. 但是性价比如何, 还需要与太阳能光伏单独运行的系统相对比. 为了使结果具有可比性, 以 100 Wp 电池板作为比较的基础.

表 2 太阳能光伏与温差发电系统经济性能分析

类型	比较项目	
太阳能光伏与 温差发电系统	电池板功率	100 Wp
	电池板价格	1100 元
	控制系统	120 元
	蓄电池	300 元
	温差发电系统	680 元
	系统效率	15.70%
	电池板温度	< 45 °C
	温差发电量	9 kWh/year
	系统年节省电量	12 kWh/year
		总计 2200 元
太阳能光 伏系统	系统总成本	1520 元
	系统效率	14.18%
	电池板温度	50—70 °C

由表 2 可知,在温差为 30 °C 时,电池太阳系统效率降为 14.18%,如果加上温差发电及风扇通风系统后,电池板温度能控制在 45 °C 以内,电池太阳系统效率降为 15.70%,也就是说,电池太阳系统效率相对提高 1.52%. 100 W 的电池板每年节省电量 10 kWh 左右,扣除风扇通风系统的耗电量外,温差发电模块发电量仅为 2 kWh 左右,也就是说,整个 100 W 的系统,每年节省电量只有 12 kWh,但是却增加系统成本 680 元,由此可见,温差发电模块的发电成本目前来讲还是非常高的(由于很小的 Seebeck 系数).但是利用温差发电模块后能利用低品位热能,更能解决光伏电池温度过高而影响发电性能的问题,提高了发电效率,延长了光伏电池的使用寿命.另外,如果我国对新能源发电补贴政策能惠及小发电系统(对于 1 MW 以上的光伏发电系统,国家给予最高每瓦补贴 20 元),则本系统将可在一定范围内实现盈利.

在我国,分布式发电以其发电方式灵活、能源利用效率高、环境污染小等优点日益成为传统电网的重要补充,并最终将代替一些效率低下、污染严重的传统发电方式.然而分布式发电所带来的环境效

益至今没有得到价值体现,主要原因就是长期以来,我国发电公司的发电成本一般只包括建设、安装成本(包括利息等),运行成本(含人力、燃料、管理、维修等),而不包括环境成本.这样不仅导致部分电源的环境价值被无偿占有,影响市场对资源的优化配置,还会造成清洁与非清洁电厂建设的不平衡发展,常规(非脱硫)燃煤电厂过度发展,而清洁能源、可再生能源的开发利用受到了限制^[22].我们根据污染物排放计算方法和单位污染物的环境损害成本^[23],得出表 3 结果.可见,该系统可以减排 CO₂ 1394.2 kg, SO₂ 27.2 kg, 氮氧化物 21.0 kg, 节省成本 7233 元,经济和社会效益明显.

表 3 污染物的环境成本分析

污染物		NO _x	CO ₂	SO ₂
发电	燃煤发电/kg·(kWh) ⁻¹	0.003	0.2323	0.004
方式	光伏发电/kg·(kWp) ⁻¹	6	1392.1	11
	减排量/kg	21.0	1394.2	27.2
	污染物控制成本/元每吨)	3000	5000	5000
	系统环境成本	63	6971	136

7. 结 论

结合太阳能电池温度特性和温差发电特点,通过建立太阳能光伏-温差发电驱动冰箱系统数学模型,运用热力学基本理论,针对该模型冰箱性能进行了工作效率及焓效率的分析.该系统在环境温度为 30 °C 时,冰箱蒸发温度可以达到 -17 °C;随着温差的减小,可用能不断减少,半导体温差发电器的工作效率明显下降,但焓效率则基本稳定.系统耗功量减少, COP 有所增加,达到 2.73;由于温差发电模块的加入,从而增加了系统的收益焓,焓效率达到 42.5%,均大于一般冰箱相应的性能参数.可见该模块对提高系统焓效率有着重要作用.该系统可以减排 CO₂ 1394.2 kg, SO₂ 27.2 kg, 氮氧化物 21.0 kg, 节省成本 7233 元,节能减排效果明显.这些结果均对相关可再生能源的应用具有理论指导意义.

[1] Liu Y S, Yang W H, Zhu Y Y, Chen J, Yang Z L, Yang J H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4992 (in Chinese) [刘永生、杨文华、朱艳燕、陈静、杨正龙、杨金焕 2009 物理学报 **58** 4992]

[2] Huang Y, Dai S Y, Chen S H, Hu L H, Kong F T, Kou D X,

Jiang N Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 643 (in Chinese) [黄阳、戴松元、陈双宏、胡林华、孔凡太、寇东星、姜年权 2010 物理学报 **59** 643]

[3] Sasitharanuwat A, Rakwichian W, KetjoyShe N, Yammen S

- 2007 *Renew. Energy* **32** 1288
- [4] Cai X S 2005 *Adv. Technol. Electric. Engng. Energy* **24** 69
- [5] Skoplaki E, Boudouvis A, Palyvos J 2008 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **92** 1393
- [6] Jones A, Underwood C 2001 *Sol. Energy* **70** 349
- [7] Trinuruk P, Sorapipatana C, Chenvidhya D 2009 *Renew. Energy* **34** 2515
- [8] Skoplaki E, Palyvos J 2009 *Sol. Energy* **83** 349
- [9] Skoplak E, Palyvos J 2009 *Renew. Energy* **34** 23
- [10] Rodriguez D M, Horley P P, Hernández J G, Vorobiev Y V, Gorley P N 2005 *Sol. Energy* **78** 243
- [11] Deng S K, Tang X F, Tang R S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3084
- [12] Stevens J W 2001 *Energy Convers. Manage.* **42** 709
- [13] Cantato E, Ouwerkerk M 2006 *Microelectron. J.* **37** 1584
- [14] Thomas J P, Qidwai M A, Kellogg J C 2006 *J. Power Sources* **159** 1494
- [15] Deng S K, Tang X F, Tang R S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3084
- [16] Li K Z, Liang R S, Wei Z J 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1349
- [17] Chen J C, Zhou Y H, Wang H J, Wang J T 2002 *Appl. Energy* **73** 285
- [18] Luo J, Chen L G, Sun F R, Wu C H 2003 *Energy Convers. Manage.* **44** 3197
- [19] Yang J H, Yu H C, Ge L 2009 *Application of Solar PV Technology* (Beijing: Electronic Industry Press) p182 (in Chinese) [杨金焕、于化从、葛亮 2009 太阳能光伏发电应用技术(北京:电子工业出版社)第182页]
- [20] Xi H X, Luo L G, Fraise G 2007 *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **11** 923
- [21] Trinuruk P, Sorapipatana C, Chenvidhya D 2009 *Renew. Energy* **34** 2515
- [22] Qian K J, Yuan Y, Shi X D, Zhou C K, Ju P 2008 *Proceed. Chin. Soc. Electric. Engng.* **28** 11 (in Chinese) [钱科军、袁越、石晓、Zhou Chengke、鞠平 2008 中国电机工程学报 **28** 11]
- [23] Liu Y S, Gu M A, Zhao C J, Yang Z L, Yang J H 2009 *The IASTED International Conference on Modelling, Simulation and Identification (MSI2009)* Beijing, October 12—14, 2009 pp658—230

Design and thermodynamical analysis of a new refrigerator model driven by photovoltaic and thermoelectric power generation *

Liu Yong-Sheng^{1)†} Gu Min-An¹⁾ Yang Jing-Jing¹⁾ Shi Qi-Guang¹⁾ Gao Tian¹⁾ Yang Jin-Huan¹⁾ Yang Zheng-Long²⁾

1) (Institute of Solar Energy, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

2) (Institute of Functional Polymer Materials, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(Received 18 April 2010; revised manuscript received 13 June 2010)

Abstract

According to solar cell's temperature properties and thermoelectric power properties, a refrigerator model is newly designed, which is driven by solar photovoltaic and thermoelectric power generation. It includes solar cells, thermoelectric power modules, power control system, etc. Based on the load demand for electricity, a photovoltaic power generation system is designed. The operating efficiency and exergy efficiency of the model are analyzed by thermodynamic theory. We find that the *COP* (coefficient of performance) achieves 2.73 (*COP* is about 2 for general refrigerators) and exergy efficiency achieves 42.5%. By using the model, the emissions of carbon dioxide 1394.2 kg, sulfur dioxide 27.2 kg and nitrogen oxides 21.0 kg are reduced, which can provide an interesting direction to the applications of renewable energy.

Keywords: photovoltaic power generation, thermoelectric power generation, thermodynamical analysis

PACC: 7865, 8630J, 4280Y

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10804072, 50703029), the Shanghai Committee of Science and Technology, China (Grant Nos. 0952NM02700, 08JC1410400, 09DZ1202500), the Shanghai Rising-Star Program (Grant Nos. 07QA14026, 09QA1406300), the Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (Grant No. 11ZZ168) and the Key Laboratory of Macromoleculr Synthesis and Functionalization, Ministry of Education, Zhejiang University, China (Grant No. 2009MSF05).

† E-mail: ysliu@shiep.edu.cn