科学通报 2019 年 第 64 卷 第 18 期: 1943 ~ 1952
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

聚光和非聚光光伏-热电耦合系统的优化

冯利佳, 殷二帅, 李强*

南京理工大学能源与动力工程学院, 南京 210094

* 联系人, E-mail: liqiang@njust.edu.cn

2018-11-04 收稿, 2018-12-04 修回, 2018-12-14 接受, 2019-06-18 网络版发表
国家自然科学基金(51590903)和教育部科学技术研究项目(413079)资助

摘要 基于能量平衡建立了光伏-热电(PV-TE)耦合发电系统的一维稳态导热模型, 研究了在不同的光伏电池效率温度系数和热电优值系数条件下PV-TE耦合发电系统的性能. (1) 对于非聚光PV-TE耦合系统, 分析了热聚焦因子、热电引脚长度和TE模块的负载电阻与内阻之比对系统发电效率的影响. 结果表明: 在TE模块的优值系数$Z=4\times10^{-3}$ K^{-1}, 电池效率温度系数$\beta_{ref}=0.001$ K^{-1}的情况下, 系统总效率相对较好. 此时总效率随着热聚焦因子、热电引脚长度、TE模块的负载电阻与内阻之比的增加, 均是先增大后减小. 因此, 可选择最佳的热聚焦因子、热电引脚长度、负载电阻的值, 使系统总效率达到最大值. (2) 对于聚光PV-TE耦合系统, 研究了热电引脚对数和热扩散因子对系统性能的影响. 结果表明在$Z=2.545\times10^{-3}$ K^{-1}, $\beta_{ref}=0.001$ K^{-1}; $Z=4\times10^{-3}$ K^{-1}, $\beta_{ref}=0.001$ K^{-1}; $Z=4\times10^{-3}$ K^{-1}, $\beta_{ref}=0.0015$ K^{-1}情况下, 总效率随着热扩散因子的增加而减小. 当热扩散因子从0.32上升到5.12时, 对于其他β_{ref}和Z的情况, 总效率会显著增加. 当热扩散因子继续增大时, 由热扩散因子增加引起的效率变化非常平缓, 原因在于热扩散因子足够大时, 热传递非常快, PV电池和TE热侧的温度随热扩散因子变化很小. 基于研究结果, 可以发现当聚光系统的热扩散因子在3.0左右时, 耦合系统具有相对高的效率.

关键词 光伏-热电耦合系统, 热聚焦因子, 热电引脚长度, 热扩散因子

光伏发电可以将太阳能直接转换为电能, 是利用太阳能的重要手段. 然而目前光伏电池的效率较低, 只能将小部分的太阳能(部分波长0.5~1.2 μm的太阳能)转换为电能, 其余部分的太阳能被光伏电池反射走或转变成了废热, 提高太阳能发电的效率是太阳能发电领域最主要的研究方向. 近年来, 光伏-热电(PV-TE)耦合系统因其利用全光谱太阳能的潜力而引起了广泛关注[1], Vorobiev等人[2]和Chávez-Urbiola等人[3]理论分析得出加入热电器件, 可以有效维持耦合系统的稳定性, 并弥补光伏电池由于温升而导致的效率下降. 同时他们也指出耦合系统应选用温度系数较小的光伏电池. Beeri等人[4]指出, 随着PV电池和热电材料的进一步发展, PV-TE耦合系统的转换效率具有超过50%的潜力. Park等人[5]对耦合发电系统进行了理论和实验研究, 结果发现, 热电模块内阻对系统的性能具有显著影响. Hashim等人[6]研究了PV-TE耦合系统中热电器件的几何优化模型, 并分析了在几何优化中还需要考虑热电材料的最大输出功率与最小材料消耗之间的权衡. Dallan等人[7]实验研究了耦合系统的性能. 实验结果表明: 在AM1.5条件下, 光伏-热电耦合系统的输出功率比单纯的光伏电池的输出功率提高了39%.

PV-TE耦合系统有两种代表性的耦合方法. 一种耦合方法是分频法, 即在PV-TE耦合系统中引入波长分离器[8~11], 波长分离器可以将不能被PV电池吸收的太阳能量分离到热电模块以降低光伏电池的温度, 光伏电池的效率随着温度的降低而增加. 热电模块可以将光

引用格式: 冯利佳, 殷二帅, 李强. 聚光和非聚光光伏-热电耦合系统的优化. 科学通报, 2019, 64: 1943–1952
Feng L J, Yin E S, Li Q. Optimization of the photovoltaic-thermoelectric hybrid system with and without optical concentrator (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 1943–1952, doi: 10.1360/N972018-01205

© 2019《中国科学》杂志社

伏发电过程中产生的废热转化为电能，从而提高了太阳能的发电效率. PV-TE耦合系统的另一种耦合方法是串联PV, TE和散热器. 由于TE模块温差小, TE的输出功率通常远小于PV的输出功率. 为了提高热电温差, 一些研究人员选择使用光聚焦[12~15]，由于光伏电池和太阳光跟踪系统的复杂度和成本都很高，另一研究者选择了热聚焦而不是光聚焦，以增加TE模块的热流密度[16~19]. 然而，对于这两种PV-TE耦合系统，都存在着光伏电池和TE模块的相互制约. 这是因为光伏电池的效率随着温度的升高而降低，而TE模块的性能在恒定的冷侧温度条件下随着热侧的温度升高而增加. 如果效率温度系数大且TE模块的ZT值小，则耦合系统的整体效率可能低于没有安装TE模块的PV电池效率. 所以有必要找出耦合装置的优化模式.

1 理论模型

1.1 几何模型

图1(a)和(b)分别示出了非聚光和聚光PV-TE耦合系统的结构. 光伏电池、TE模块和散热器串联, 光伏电池和TE模块的面积不同. 在PV电池和TE模块之间插入铜板以实现热扩散或热聚焦. 光伏电池吸收的热能通过铜板传递到TE模块，然后通过塞贝克效应产生电能. 两种PV-TE耦合系统的冷却方法都选择了水冷法. 两种PV-TE耦合系统的区别在于CPV-TE耦合系统具有聚光器，菲涅耳透镜用于将太阳光聚焦到PV电池上. 因此, PV电池的面积小(小于TE模块的面积)，并且热流密度很大, 热扩散元件和良好的冷却条件是必不可少的. 仿真的参数在表1中.

1.2 热力学模型

光伏电池将部分撞击在上表面的太阳能转化为电能, 其余部分转化为热能. 一些热能通过热传导到玻璃盖上而损失, 然后通过对流或辐射散热到环境中. 大部分热能输送给温差发电器, 然后, TE模块基于塞贝克效应吸收一小部分热量，剩余的热能将被冷却系统吸收. 耦合系统内部的传热可以看成一维稳态导热，可基于能量平衡建立的下列方程来计算:

$$CGA_{\mathrm{PV}} = Q_{\mathrm{conv}} + Q_{\mathrm{rad}} + P_{\mathrm{PV}} + \frac{T_{\mathrm{PV}} - T_{\mathrm{cu,up}}}{R_{\mathrm{c1}}}, \tag{1}$$

$$\frac{T_{\mathrm{PV}} - T_{\mathrm{cu,up}}}{R_{\mathrm{c1}}} = \frac{T_{\mathrm{cu,up}} - T_{\mathrm{cu,down}}}{R_{\mathrm{cu}}} = \frac{T_{\mathrm{cu,down}} - T_{\mathrm{h}}}{R_{\mathrm{c2}}}, \tag{2}$$

$$\frac{T_{\mathrm{cu,down}} - T_{\mathrm{h}}}{R_{\mathrm{c2}}} = s_{\mathrm{m}} T_{\mathrm{h}} I_{\mathrm{TE}} + K_{\mathrm{TE}}(T_{\mathrm{h}} - T_{\mathrm{c}}) - \frac{I_{\mathrm{TE}}^2 r_{\mathrm{TE}}}{2}, \tag{3}$$

$$s_{\mathrm{m}} T_{\mathrm{c}} I_{\mathrm{TE}} + K_{\mathrm{TE}}(T_{\mathrm{h}} - T_{\mathrm{c}}) + \frac{I_{\mathrm{TE}}^2 r_{\mathrm{TE}}}{2} = \frac{T_{\mathrm{c}} - T_{\mathrm{m}}}{R_{\mathrm{c2}} + R_{\mathrm{w}} + R_{\mathrm{b}}}, \tag{4}$$

$$\frac{T_{\mathrm{c}} - T_{\mathrm{m}}}{R_{\mathrm{c2}} + R_{\mathrm{w}} + R_{\mathrm{b}}} = \dot{m}_{\mathrm{w}} C_{\mathrm{P,w}}(T_{\mathrm{out}} - T_{\mathrm{in}}), \tag{5}$$

式中, C是聚光比, G是太阳辐照度, A_{PV}是PV电池的面积, Q_{conv}和Q_{rad}分别是对流和辐射热损失, P_{PV}是PV电池的输出功率, T_{PV}是光伏电池温度, $T_{\mathrm{cu,up}}$和$T_{\mathrm{cu,down}}$分别是铜板顶部和底部的温度, R_{c1}和R_{c2}分别是PV电池、铜板和TE模块之间的接触热阻, R_{cu}是铜板的热阻, T_h和T_c是TE模块的热侧和冷侧的温度, s_{m}是热电模块的塞贝克系数, I_{TE}是TE模块的输出电流, K_{TE}是TE模块的电导率, r_{TE}是TE模块的电阻, T_{m}是冷却水的平均温度, 它可以通过T_{m}=(T_{in}+T_{out})/2来计算, R_{w}和R_{b}分别是冷却水对流传热的热阻和散热器前盖的热阻, $\dot{m}_{\mathrm{w}}$是冷却水的质量流量, $C_{\mathrm{P,w}}$是水的比热容, T_{in}和T_{out}是冷却水的入口温度和出口温度. 方程(1)是PV电池的能量平衡方程. 方程(2)是铜板的能量平衡方程. 方程(3)和方程(4)分别是TE模块热端和冷端的能量平衡方程. 方程(5)是冷却水的能量平衡方程.

对流热损失Q_{conv}为[20]

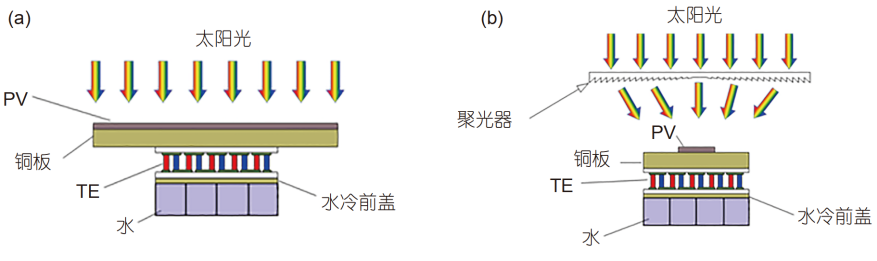


图 1 (网络版彩色)PV-TE耦合系统(a)和CPV-TE耦合系统(b)
Figure 1 (Color online) The structure diagram of the PV-TE hybrid system (a) and the CPV-TE hybrid system (b)

表 1　PV-TE系统参数[17,18,20,21]

Table 1　Parameters of PV-TE hybrid system[17,18,20,21]

	参数	符号	单位	数值
非聚光PV-TE耦合系统	光伏电池标准效率(AM1.5, 298 K)	η_{ref}	%	16
	光伏电池效率温度系数	β_{ref}	K^{-1}	1×10^{-3} ~ 4×10^{-3}
	光伏电池面积	A_{PV}	mm^2	$2C_{th}NA_{p/n}$
	TE模块面积	A_{TE}	mm^2	40×40
	热电引脚对数	N	–	128
聚光PV-TE耦合系统	聚光比	C	–	100
	光伏电池标准效率(AM1.5, 298 K)	η_{ref}	%	25
	光伏电池效率温度系数	β_{ref}	K^{-1}	1×10^{-3} ~ 3×10^{-3}
	光伏电池面积	A_{PV}	mm^2	10×10
	TE模块面积	A_{TE}	mm^2	$6.25A_{PV}D_{th}$
	热电引脚对数	N	–	16 ~ 256
通用参数	热辐射损失率	ε	–	0.05
	自然对流换热系数	h_{conv}	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$	5
	太阳辐照度	G	$W\ m^{-2}$	1000
	热电优值系数	Z	K^{-1}	2.545×10^{-3}, 4×10^{-3}
	热电引脚长度	$l_{p/n}$	mm	1.6
	热电引脚电阻率	$\sigma_{p/n}$	Ωm	7.23×10^{-6}
	热电引脚热导率	$k_{p/n}$	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$	1.82
	热电引脚横截面积	$A_{p/n}$	mm^2	1
	铜板厚度	δ_{cu}	mm	2
	铜板面积($A_{PV} \geq A_{TE}$)	A_{cu}	mm^2	A_{PV}
	铜板面积($A_{PV} < A_{TE}$)			A_{PV}
	铜的热导率	k_{cu}	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$	398
	水冷块面积	A_w	mm^2	40×40
	水冷通道数	n_{ch}	–	4
	通道高度	a_{ch}	mm	8
	通道宽度	b_{ch}	mm	8
	通道长度	l_{ch}	mm	40
	水冷前盖厚度	δ_{fc}	mm	1
	进水温度	T_{in}	K	293
	冷却水流速	u_f	m/s	0.1
	接触热阻	R_c	$km^2\ W^{-1}$	20×10^{-6}
	环境温度	T_a	K	293

a) C_{th}是热聚焦因子; D_{th}是热扩散因子

$$Q_{conv} = h_{conv}A_{PV}(T_{PV} - T_a), \tag{6}$$

式中h_{conv}是对流热损失的对流换热系数. 辐射热损失Q_{rad}为[20]

$$Q_{rad} = \varepsilon A_{PV}(T_{PV}^4 - T_a^4), \tag{7}$$

ε是辐射热损失的发射率. 总热损失率表示为

$$\eta_{loss} = \frac{Q_{conv} + Q_{rad}}{CGA_{PV}}. \tag{8}$$

接触表面的热阻定义为

$$R_{ci} = \frac{R_c}{A_i}, \tag{9}$$

式中, R_c是接触面的单位面积热阻, i=1,2.

铜板的热阻为[20]

$$R_{cu}=\frac{\delta_{cu}}{k_{cu}A_{cu}}, \tag{10}$$

式中δ_{cu}为铜板的厚度, k_{cu}为铜的热导率.

TE模块的热导率[21]:

$$K_{TE}=\frac{NA_{p/n}(k_p+k_n)}{l_{p/n}}, \tag{11}$$

N是热电引脚对数, p和n分别是p型和n型热电引脚, $A_{p/n}$是热电引脚的截面面积, k是热导率, l是热电引脚长度.

散热器前盖的热阻如下:

$$R_{fc}=\frac{\delta_{fc}}{k_{cu}A_{fc}}, \tag{12}$$

式中δ_{fc}和A_{fc}是前盖的厚度和面积. 冷却水的对流传热阻力R_w为[22]

$$R_w=\frac{1}{2h_w(a_{ch}+b_{ch})n_{ch}l_{ch}}, \tag{13}$$

式中a_{ch}, b_{ch}, l_{ch}, n_{ch}分别是水冷系统的高度、宽度、长度和通道数量. 对流换热系数h_w为[20,23]

$$h_w=\frac{k_wNu_w}{l_{ch}}, \tag{14}$$

$$Gz=\frac{D_{ch}}{l_{ch}}\mathrm{Re}_w\mathrm{Pr}_w, \tag{15}$$

$$Nu_w=3.66+\frac{0.0668Gz}{1+0.04Gz^{2/3}}\ (\mathrm{Re}_w<2300), \tag{16}$$

$$Nu_w=0.023\mathrm{Re}_w^{0.8}\mathrm{Pr}^{0.4}\left[1+\left(\frac{D_{ch}}{l_{ch}}\right)^{0.7}\right] \tag{17}$$

$(\mathrm{Re}_w>2300)$,

式中k_w是水的热导率, Gz是Graetz数, $D_{ch}=2A_{ch}/(a_{ch}+b_{ch})$是通道的有效直径, A_{ch}是通道的流动横截面积, $Re_w=u_wD_{ch}/v_w$是雷诺数, u_w和v_w分别是水的速度和黏度, Pr_w是水的普朗特数. 考虑到水的性质取决于温度, 可通过插值获得冷却水的性质[20].

1.3 电学模型

PV电池输出功率P_{PV}为[24]

$$\begin{aligned}P_{PV}&=CGA_{PV}\eta_{PV}\\&=CGA_{PV}\eta_{ref}(1-\beta_{ref}(T_{PV}-298.15)),\end{aligned} \tag{18}$$

式中η_{PV}是标准条件(AM1.5, 298 K)下的PV电池效率, β_{ref}是PV电池效率温度系数.

TE模块的输出功率可以表示为[25]

$$P_{TE}=s_mI_{TE}(T_h-T_c)-I_{TE}^2r_{TE}, \tag{19}$$

式中$s_m=N(s_p-s_n)$是TE模块的塞贝克系数, r_{TE}是温差发电器的内阻, 其计算公式为[21]

$$r_{TE}=\frac{Nl_{p/n}(\sigma_p+\sigma_n)}{A_{p/n}}, \tag{20}$$

式中σ是电阻率, r是TE模块的负载电阻. TE模块的输出电流可以通过下式[21]来计算:

$$I_{TE}=\frac{s_m(T_h-T_c)}{r_{TE}+r}. \tag{21}$$

耦合系统的总效率定义如下:

$$\eta=\frac{P_{PV}+P_{TE}-P_{Pump}}{CGA_{PV}}, \tag{22}$$

式中P_{pump}是水泵的消耗电力, 它给出如下计算公式[22]:

$$P_{Pump}=f\times\frac{l}{D_{ch}}\times\frac{u_w^2}{2}\times\rho_w\times A_{ch}\times u_w\times n_{ch}, \tag{23}$$

式中D_{ch}, A_{ch}和n_{ch}分别为有效直径, 横截面积和水冷通道的数量, u_w是冷却水的流速, ρ_w是水的密度, 摩擦系数f可以通过[20,26]计算:

$$f=\frac{64}{\mathrm{Re}_w}\ (\mathrm{Re}_w<2300), \tag{24}$$

$$f=(0.79\ln\mathrm{Re}_w-1.64)^{-2}\ (\mathrm{Re}_w>2300). \tag{25}$$

2 结果与讨论

2.1 理论模型验证

为了验证理论模型的正确性, 把仿真结果与参考文献[17]的实验结果对比, 模拟的参数来自该文献. 文献中PV-TE耦合系统运行80 min后处于稳定状态. 文献实验结果中, TE模块热端和冷端温度分别为353.0和301.5 K, PV电池和TE模块的功率分别为20.0和3.9 W, 耦合系统总功率23.9 W. 本文仿真结果中, TE模块热端和冷端温度分别为353.3和300.9 K, PV电池和TE模块的功率分别为19.8和3.9 W, 系统总功率23.7 W. 可以看出, 仿真结果与文献中的实验结果非常吻合. 因此, 得出结论: 本模型能准确模拟PV-TE耦合系统的稳态运行状况.

2.2 非聚光PV-TE耦合系统的优化

对于非聚光PV-TE耦合系统, 研究了不同光伏电池效率温度系数和热电优值系数时的热聚焦因子、热电

引脚长度和TE模块的负载电阻与内阻之比对系统性能的影响. 与光伏电池相比, TE模块的输出功率占总发电量的比例较小, 通常PV电池的输出功率是TE模块的几十倍. 对于非聚光PV-TE耦合系统, 可增大热聚焦因子以提高TE模块的发电能力. 热聚焦因子是一个无量纲值, 定义如下:

$$C_{\mathrm{th}}=\frac{A_{\mathrm{PV}}}{2NA_{\mathrm{p/n}}}. \tag{26}$$

在TE模块上, 增加热流密度将增大热电模块温差并增加温差发电器输出功率. 但是太阳能电池的温度也会上升, 效率会因冷却条件差而下降. 而且, 由于PV电池和环境之间存在对流和辐射, 耦合系统的顶部会损失更多的热能. 图2(a)和(b)分别表示, 光伏电池效率温度系数为0.002 K^{-1}, TE模块的热电优值系数为4×10^{-3} K^{-1}时, 热聚焦因子对PV电池和TE模块的影响. 当热聚焦因子从6.25变为250时, PV电池的温度从296.1 K上升到361.9 K, 效率从16.07%下降到13.96%, 如图2(a)所示. 温差发电器的温差从2.8 K增加到63.5 K, 效率从0.18%增加到3.75%, 如图2(b)所示.

热聚焦因子对耦合系统总效率的影响如图3所示. 图3(a)和(b)分别表示当温差发电器热电优值系数分别为2.545×10^{-3}和4×10^{-3} K^{-1}时, 在PV电池4个效率温度系数(从0.001~0.004 K^{-1})下, 热聚焦因子(从6.25变化到250)对系统总效率的影响(热电引脚长度为1.6 mm, 负载电阻等于TE内阻). 其中$Z=2.545\times10^{-3}$ K^{-1}是商用碲化铋温差发电器的热电优值系数, $Z=4\times10^{-3}$ K^{-1}是实验室所用碲化铋温差发电器的热电优值系数. 图3(a)所示, 在$\beta_{\mathrm{ref}}=0.001$ K^{-1}和$\beta_{\mathrm{ref}}=0.002$ K^{-1}时, 耦合系统的总效率都会随着热聚焦因子的上升而下降. 耦合系统效率下降的原因是温差发电器输出功率的增加无法抵消PV电池输出功率的下降, PV电池的效率温度系数越大, 总效率下降越快. 当PV的效率温度系数为0.001 K^{-1}时, 随着热聚焦因子的增加, 总效率先增大后减小. 当热聚焦因子接近100时, 耦合系统达到最高效率16.50%. 当

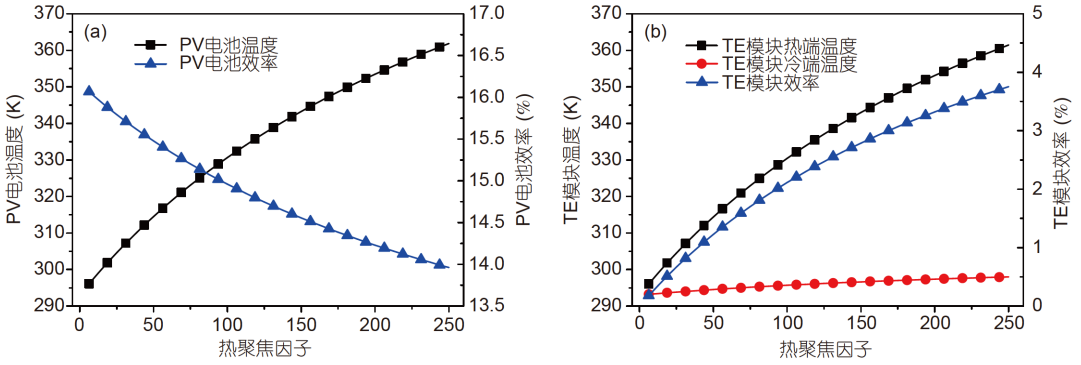


图 2 (网络版彩色)热聚焦因子对PV电池(a)和TE模块(b)的影响
Figure 2 (Color online) The influence of thermal concentrating ratio on the PV cell (a) and TE (b) module

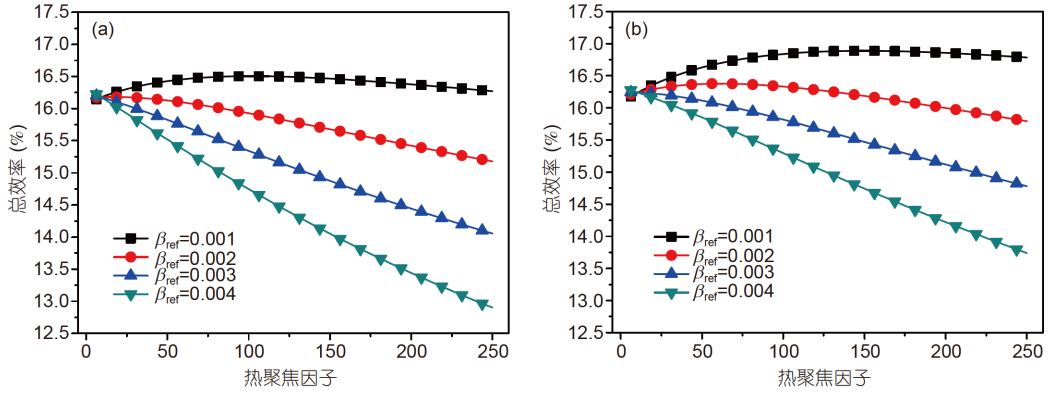


图 3 (网络版彩色)$Z=2.545\times10^{-3}$ K^{-1}(a)和$Z=4\times10^{-3}$ K^{-1}(b)时, 热聚焦因子对PV-TE耦合系统总效率的影响
Figure 3 (Color online) The influence of thermal concentrating ratio on the total efficiency of PV-TE hybrid system when $Z=2.545\times10^{-3}$ K^{-1} (a) and $Z=4\times10^{-3}$ K^{-1} (b)

PV的效率温度系数为0.002 K^{-1}且C_{th}=18时，总效率达到最大值16.18%. 当TE模块的优值系数Z为4×10^{-3} K^{-1}时，耦合系统的效率图与图3(a)相似. 在β_{ref}=0.001 K^{-1}的情况下，当C_{th}=150时，总效率达到最大值16.89%. 在Z=4×10^{-3} K^{-1}，β_{ref}=0.002 K^{-1}的情况下，当C_{th}=60时，耦合系统可以实现最大总效率16.38%. 因此，在设计非聚光PV-TE耦合系统时，应选择具有较小效率温度系数、较大热电优值系数的温差发电器. 此外，应采用最佳的热聚焦因子来实现最高的耦合系统总效率.

TE模块中热电引脚长度与热聚焦因子对耦合系统性能的影响相似. 增大热电引脚长度不仅可以增加温差发电器的温差，还会提高PV电池的温度. 因此，当热电引脚长度增加时，PV电池的效率下降并且温差发电器效率增大. 当PV电池的效率温度系数较大且温差发电器的Z值较小时，耦合系统的总效率随着热电引脚长度的增加而减小. 当热电引脚长度合适时，耦合系统也可以达到最高总效率. 热电引脚长度对耦合系统性能的影响如图4所示(此时热聚焦因子为125，负载电阻等于TE内阻). 图4(a)中，当Z=2.545×10^{-3} K^{-1}，β_{ref}=0.001 K^{-1}时，热电引脚长度为1.6 mm时，最高效率为16.49%；当Z=2.545×10^{-3} K^{-1}，β_{ref}=0.002 K^{-1}时，热电引脚长度为0.4 mm时，最高效率为16.06%. 图4(b)中，当Z=4×10^{-3} K^{-1}，β_{ref}=0.001 K^{-1}时，热电引脚长度为2.3 mm时，最高效率为16.92%；当Z=4×10^{-3} K^{-1}，β_{ref}=0.002 K^{-1}时，热电引脚长度为1.0 mm时，最高效率为16.31%；当Z=4×10^{-3} K^{-1}，β_{ref}=0.003 K^{-1}时，热电引脚长度为0.2 mm时，最高效率为16.04%.

负载电阻与温差发电器的内阻之比定义如下:

$$\gamma=\frac{r_L}{r_{TE}}, \tag{27}$$

其中r_L是温差发电器的负载电阻. 当负载电阻等于内阻(γ=1)时，温差发电器可以获得最大的输出功率. 但是，当温差发电器的性能提高时，PV电池的效率不可避免地降低. 这意味着温差发电器的最优γ值可能不是PV-TE耦合系统的最佳γ值. 因此，有必要研究负载电阻与温差发电器内阻之比对耦合系统性能的影响. 图5给出了负载电阻与内阻之比对耦合系统性能的影响(此时热聚焦因子为125，热电引脚长度为1.6 mm). 结果表明，使用不同效率温度系数的PV电池和具有不同Z值的温差发电器的耦合系统，总效率先增加后减小. 当Z=2.545×10^{-3} K^{-1}，β_{ref}从0.001增加到0.004 K^{-1}时，负载电阻与温差发电器内阻的最佳比值分别为1.3,1.2,1.1和1. 当Z=4×10^{-3} K^{-1}时，最佳比值分别为为1.6，1.5，1.3和1.1. 这可以通过能量平衡方程来解释，当温差发电器的负载电阻增加时，温差发电器的电流减小，这会阻止珀耳帖效应传递热能. 因此，PV电池和TE模块热端的温度不可避免地升高，并且TE模块的性能将得到提高. PV-TE耦合系统的最高总效率是通过优化温差发电器的负载电阻获得的，是PV电池的温度、温差发电器的温度差以及负载电阻与TE内阻之比相互作用的结果.

2.3 聚光PV-TE耦合系统的优化

对于聚光PV-TE耦合系统，由于热流密度非常大，导致PV电池的温度升高. 通常温差发电器的面积大于PV电池的面积以实现热扩散. 热扩散因子D_{th}定义为

$$D_{th}=\frac{2NA_{p/n}}{A_{PV}}, \tag{28}$$

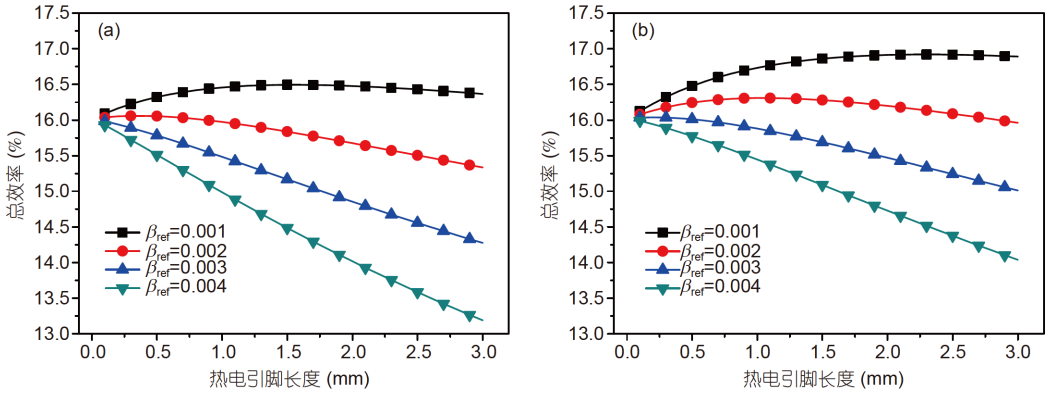


图 4 (网络版彩色)Z=2.545×10^{-3} K^{-1}(a)和Z=4×10^{-3} K^{-1}(b)时，热电引脚长度对PV-TE耦合系统总效率的影响

Figure 4 (Color online) The influence of length of TE legs on the total efficiency of PV-TE hybrid system when Z=2.545×10^{-3} K^{-1} (a) and Z=4×10^{-3} K^{-1} (b)

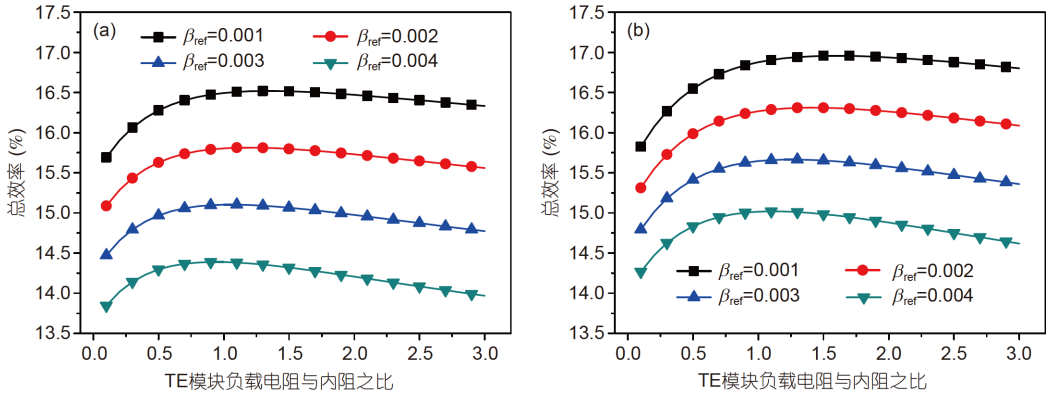


图 5 (网络版彩色)Z=2.545×10^{-3} K^{-1}(a)和Z=4×10^{-3} K^{-1}(b)时, TE模块的负载电阻与内阻之比对PV-TE耦合系统总效率的影响

Figure 5 (Color online) The influence of ratio of loading resistance to the internal resistance of TE module on the total efficiency of PV-TE hybrid system when Z=2.545×10^{-3} K^{-1} (a) and Z=4×10^{-3} K^{-1} (b)

TE模块的面积用于计算接触面积和热阻, 并给出:

$$A_{\mathrm{TE}} = 6.25 \times 2NA_{\mathrm{p/n}}. \tag{29}$$

图6所示为TE模块面积和热扩散因子随热电引脚对数变化的关系图, 当热电引脚对数从16增加到256时, TE模块面积从2 cm^{2}增加到32 cm^2, 热扩散因子从0.32增加到5.12. 图7(a)和(b)分别表示: 当PV电池的效率温度系数为0.002 K^{-1}, 热电优值系数为4×10^{-3} K^{-1}时(热电引脚长度为1.6 mm, 负载电阻等于TE内阻), 热电引脚对数从16变化到256(此时热扩散因子从0.32变化到5.12)时, 热电引脚对数对温度和输出功率的影响. 随着热电引脚对数的增加, PV电池和温差发电器热端的温度首先急剧下降, 然后缓慢下降. 当N = 16时, PV电池的温度接近422 K, 当N大于200时, 温度降至约306 K. 由于良好的冷却条件, TE模块冷端的温度变化很小. 如图7(b)所示, 随着热电引脚对数的增加, 光伏电池的输出功率显著增加, 温差发电器的输出功率下降较大, 总输出功率变化不大. 当热电引脚对数从16增加为256时, 光伏电池的输出功率从1.88 W增加到2.47 W(增加31.43%), 温差发电器的输出功率从0.56 W下降到0.04 W(减少93.28%), 总输出功率从2.44 W增加到2.51 W(增加2.64%).

图8展示了当PV电池的效率温度系数和TE模块的热电优值系数不同时, 热扩散因子对PV-TE耦合系统的总效率的影响. 研究了温差发电器Z值不同(图8(a)中Z=2.545×10^{-3} K^{-1}, 图8(b)中Z=4×10^{-3} K^{-1})时, 在PV电池5个效率温度系数(0.001, 0.0015, 0.002, 0.0025, 0.003 K^{-1})下, 热扩散因子对PV-TE耦合系统总效率的影响. 当PV电池的效率温度系数和温差发电器的Z值

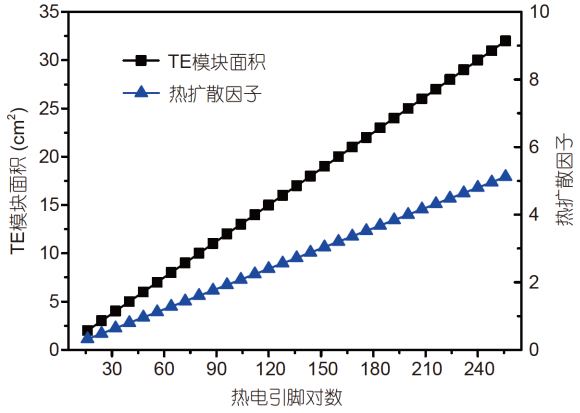


图 6 (网络版彩色)TE模块的面积和热扩散因子随热电引脚变化曲线

Figure 6 (Color online) The area of TE module and the thermal diffusion ratio as functions of the number of pairs of TE legs

变化时, 热扩散因子的影响存在两种完全相反的结果. 当Z=2.545×10^{-3} K^{-1}, β_{ref}=0.001 K^{-1}; Z=4×10^{-3} K^{-1}, β_{ref}=0.001 K^{-1}; Z=4×10^{-3} K^{-1}, β_{ref}=0.0015 K^{-1}时, 总效率随着热扩散因子的增加而减小. 当热扩散因子从0.32上升到5.12时, 对于其他β_{ref}和Z的情况, 总效率显著增加. 图8中由热扩散因子变化引起的效率变化率首先很大, 然后很小. 原因在于热扩散因子足够大时, 热传递非常快, PV电池和TE热侧的温度随热扩散因子变化很小. 考虑到半导体材料的成本, 热扩散因子不应该越大越好. 因此, 可选择合适的热扩散因子(建议3.0左右)以保持耦合系统具有相对高的效率.

3 结论

在本文中, 基于能量平衡建立了PV-TE耦合系统的

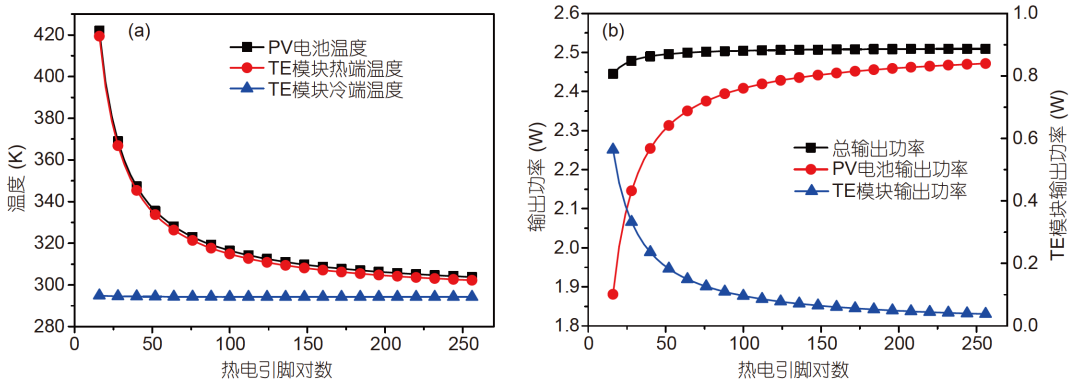


图 7 (网络版彩色)热电引脚对数对温度(a)和输出功率(b)的影响

Figure 7 (Color online) The influence of number of pairs of TE legs on the temperatures (a) and output powers (b)

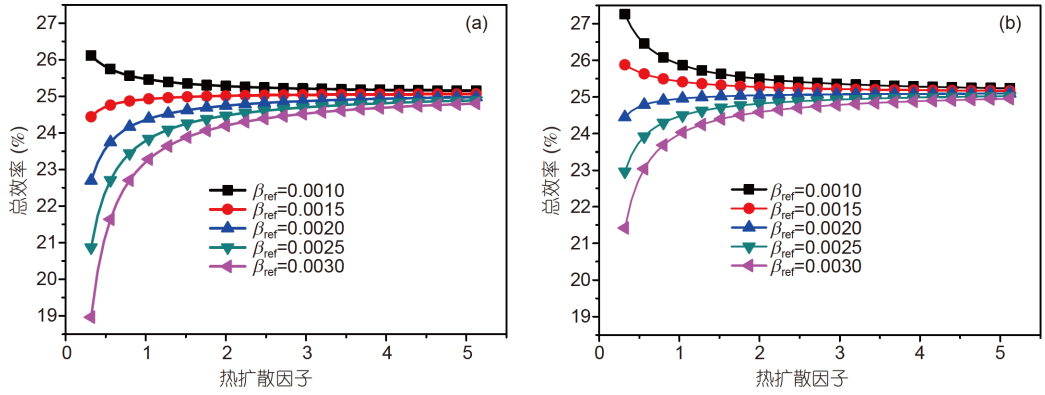


图 8 (网络版彩色)Z=2.545×10^{-3} K^{-1}(a)和Z=4×10^{-3} K^{-1}(b)时, 热扩散因子对PV-TE耦合系统总效率的影响

Figure 8 (Color online) The influence of thermal diffusion ratio on the total efficiency of PV-TE hybrid system when Z=2.545×10^{-3} K^{-1} (a) and$Z$=4×10^{-3} K^{-1} (b)

一维热力学模型. 仿真侧重于耦合系统的结构优化以实现总效率提高. 结果表明, 非聚光PV-TE耦合系统存在最佳热聚焦因子、热电引脚的最佳长度以及负载电阻与温差发电器内阻的最佳比值. 通过优化, 耦合系统的效率可以得到很大的提高. 对于聚光PV-TE耦合系统, 当PV电池的效率温度系数和温差发电器的Z值变化时, 热扩散因子的影响存在两种完全相反的结果. 但是, 当热扩散因子足够大时, 由热扩散因子增加引起的变化非常小. 考虑到半导体材料的成本, 建议选择合适的热扩散因子(3.0左右).

参考文献

1 Nelson J. The Physics of Solar Cells. London: Imperial College Press, 2003

2 Vorobiev Y, González-Hernández J, Vorobiev P, et al. Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion. Sol Energy, 2006, 80: 170–176

3 Chávez-Urbiola E A, Vorobiev Y V, Bulat L P. Solar hybrid systems with thermoelectric generators. Sol Energy, 2012, 86: 369–378

4 Beeri O, Rotem O, Hazan E, et al. Hybrid photovoltaic thermoelectric system for concentrated solar energy conversion: Experimental realization and modeling. J Appl Phys, 2015, 118, doi: 10.1063/1.4931428

5 Park K T, Shin S M, Tazebay A S, et al. Lossless hybridization between photovoltaic and thermoelectric devices. Sci Rep, 2013, 3: 2123

6 Hashim H, Bomphrey J J, Min G. Model for geometry optimisation of thermoelectric devices in a hybrid PV/TE system. Renew Energy, 2016, 87: 458–463

7 Dallan B S, Schumann J, Lesage F J. Performance evaluation of a photoelectric-thermoelectric cogeneration hybrid system. Sol Energy, 2015, 118:

276–285
8 Ju X, Wang Z, Flamant G, et al. Numerical analysis and optimization of a spectrum splitting concentration photovoltaic-thermoelectric hybrid system. Sol Energy, 2012, 86: 1941–1954
9 Hajji M, Labrim H, Benaissa M, et al. Photovoltaic and thermoelectric indirect coupling for maximum solar energy exploitation. Energy Convers Manage, 2017, 136: 184–191
10 Kraemer D, Hu L, Muto A, et al. Photovoltaic-thermoelectric hybrid systems: A general optimization methodology. Appl Phys Lett, 2008, 92: S15
11 Elsarrag E, Pernau H, Heuer J, et al. Spectrum splitting for efficient utilization of solar radiation: A novel photovoltaic-thermoelectric power generation system. Renewables, 2015, 2: 1–11
12 Vorobiev Y V, Gonzalez-Hernandez J, Kribus A. Analysis of potential conversion efficiency of a solar hybrid system with high-temperature stage. J Sol Energy Eng, 2006, 128: 258–260
13 Zhang J, Xuan Y, Yang L. Performance estimation of photovoltaic-thermoelectric hybrid systems. Energy, 2014, 78: 895–903
14 Liao T, Lin B, Yang Z. Performance characteristics of a low concentrated photovoltaic-thermoelectric hybrid power generation device. Int J Thermal Sci, 2014, 77: 158–164
15 Lamba R, Kaushik S C. Modeling and performance analysis of a concentrated photovoltaic-thermoelectric hybrid power generation system. Energy Convers Manage, 2016, 115: 288–298
16 Da Y, Xuan Y, Li Q. From light trapping to solar energy utilization: A novel photovoltaic-thermoelectric hybrid system to fully utilize solar spectrum. Energy, 2016, 95: 200–210
17 Zhu W, Deng Y, Wang Y, et al. High-performance photovoltaic-thermoelectric hybrid power generation system with optimized thermal management. Energy, 2016, 100: 91–101
18 Makki A, Omer S, Su Y, et al. Numerical investigation of heat pipe-based photovoltaic-thermoelectric generator (HP-PV/TEG) hybrid system. Energy Convers Manage, 2016, 112: 274–287
19 Yang D, Yin H. Energy conversion efficiency of a novel hybrid solar system for photovoltaic, thermoelectric, and heat utilization. IEEE Trans Energy Convers, 2011, 26: 662–670
20 Bergman T L, Incropera F P, DeWitt D P, et al. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2011
21 Gomez M, Reid R, Ohara B, et al. Influence of electrical current variance and thermal resistances on optimum working conditions and geometry for thermoelectric energy harvesting. J Appl Phys, 2013, 113: 174908
22 Yin E, Li Q, Xuan Y. Thermal resistance analysis and optimization of photovoltaic-thermoelectric hybrid system. Energy Convers Manage, 2017, 143: 188–202
23 Mills A F. Heat Transfer. 2th ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999
24 Skoplaki E, Palyvos J A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. Sol Energy, 2009, 83: 614–624
25 Khattab N M, El Shenawy E T. Optimal operation of thermoelectric cooler driven by solar thermoelectric generator. Energy Convers Manage, 2006, 47: 407–426
26 John A D, William A B. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th ed. New York: Wiley, 2013

Summary for “聚光和非聚光光伏-热电耦合系统的优化”

Optimization of the photovoltaic-thermoelectric hybrid system with and without optical concentrator

Lijia Feng, Ershuai Yin & Qiang Li*

Nanjing University of Science & Technology, Energy and Power Engineering Institute, Nanjing 210094, China
*Corresponding author, E-mail: liqiang@njust.edu.cn

The photovoltaic-thermoelectric coupled system has drawn widespread attention in recent years due to its potential of utilization of full-spectrum solar energy. The output power of thermoelectric (TE) is usually much less than that of photovoltaic (PV), because the temperature difference of TE module is usually very small. Thus, the optical concentrating method has been used to increase the temperature difference, but it increases complexity of the structure and extra cost for the sunlight tracking system. Another practical way is using the thermal concentrating method to increase the heat flux of the TE module. However, for there two PV-TE coupled systems i.e. optical and thermal concentrating systems, there exists a confrontation between the PV cell and the TE module. The efficiency of PV cell decreases with the increasing temperature, while the performance of the TE module increases with the increasing temperature difference. In some conditions, the total efficiency of the PV-TE coupled system may be even lower than that without TE module. Therefore, it is necessary to investigate the optimal combination mode of PV cell and TE module for the coupled system.

In this paper, a thermodynamic model based on energy-balanced equation is established to investigate the structural optimization and efficiency improvement of PV-TE coupled power generation system, which considers the effects of the thermal concentration factor, the length of thermocouples, the loading resistance of TE module and thermal diffusion factor. The influence rules of these factors on power generation efficiency of PV-TE coupled system without and with concentrator are also theoretically analyzed.

(1) For the PV-TE coupled system without concentrator, the influences of thermal concentration factor, the length of thermocouples and the ratio of loading resistance to the internal resistance of TE module on the total efficiency of PV-TE coupled system are analyzed under four efficiency temperature coefficients of PV cells (β_{ref} =0.001, 0.002, 0.003, 0.004 K^{-1}). It is found that, when the figure of merit of TE module Z is 4×10^{-3} K^{-1} and β_{ref} is 0.001 K^{-1}, the total efficiency increases initially and then decreases with the increases of the thermal concentration factor, the length of thermocouples and the ratio of loading resistance to the internal resistance of TE module. Therefore, there exist optimal values of thermal concentration factor, length of thermocouples and loading resistance of TE module to maximize the total efficiency.

(2) For the PV-TE coupled system with concentrator, the influence of thermal diffusion factor on the total efficiency of PV-TE coupled system under five efficiency temperature coefficients of PV cells (β_{ref}=0.001, 0.0015, 0.002, 0.0025, 0.003 K^{-1}) is studied for the figure of merit of TE module Z=2.545×10^{-3} K^{-1} and Z=4×10^{-3} K^{-1}. The results shown that, for the cases of Z=2.545×10^{-3} K^{-1}, β_{ref}=0.001 K^{-1}; Z=4×10^{-3} K^{-1}, β_{ref}=0.001 K^{-1}; Z=4×10^{-3} K^{-1}, β_{ref}=0.0015 K^{-1}, the total efficiency decreases as the thermal diffusion factor increases. While for other cases, the total efficiency increases significantly as the thermal diffusion factor increases. It has also shown that the increases of efficiency caused by the increase in thermal diffusion factor becomes small when the thermal diffusion factor is over 5.12. The reason is that the heat transfer becomes fast when the thermal diffusion factor becomes larger, which leads to the increase of temperature of the PV cell and the hot side of the TE becomes small as the thermal diffusion factor is over 5.12. Based on the above results, it is suggested that an optimal thermal diffusion around 3.0 can have a better balance of both cost and total efficiency of the PV-TE coupled system with concentrator.

photovoltaic-thermoelectric, thermal concentration factor, the length of thermocouples, thermal diffusion factor concentrator

doi: 10.1360/N972018-01205