

# 温差发电模型的热电性能数值计算和分析

王 军, 张超震, 董 彦, 李艺琳, 赵 琛

(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

**摘 要:** 为研究半导体温差发电器的热电性能,利用有限元分析方法分别对由4对、12对和126对p/n结构成的3种温差发电模型进行热电耦合仿真模拟。分析负载电阻、温差、p-n结对数不同时,温差发电模型内阻、开路电压、路端电压、回路电流、功率及效率的变化规律。结果表明:温差发电模型内阻仅随p-n结对数的增大而线性增大,不受其他条件影响;开路电压、路端电压和回路电流均随p-n结对数和温差的增加而增大;功率和效率均随温差的增加而增大,当负载电阻与内阻相等时,温差发电模型的功率和效率最大。当温差由128℃增至218℃时,3种模型的最大功率分别由0.15、0.46和5.7 W增至0.44、1.33和16.5 W,126对模型的最大效率由2.4%增至4%。

**关键词:** 温差发电; 转换效率; 数值模拟; 电压; 电流; 功率

**中图分类号:** TK114

**文献标识码:** A

## 0 引 言

半导体温差发电是回收低品位热能并将其转换为电能的一种有效方法<sup>[1]</sup>。半导体温差发电器利用热电材料在温度差作用下发生的热电效应产生电流,从而将热能转换为电能。热电效应包括温差引起的电效应和电流引起的不可逆热效应,可分为塞贝克效应、帕尔贴效应、汤姆逊效应、焦耳热效应及傅里叶效应5种热电效应<sup>[2]</sup>。半导体温差发电器由于其具有结构简单、体积小、无运动附件、无污染、使用寿命长等优点而得到广泛关注<sup>[3,4]</sup>,在工业废热、汽车尾气余热回收等方面已有相关应用,同时,该技术在深海、航空航天等领域也日益得到关注。半导体温差发电器工作时,p型和n型中的载流子相互交换,p型半导体中空穴和n型半导体中电子在温差作用下运动,从而产生电流。近年来,国内外学者对半导体温差发电工作过程、提升热电材料导电性和导热性、提高优值等方面开展了大量基础研究工作。Montecucco等<sup>[5]</sup>对温差发电器的恒热特性和几何优化做了分析,提出输出功率和效率最大化且可减少使用热电材料的一种模型。蔡永华等<sup>[6]</sup>开展了低温热电器件结构尺寸优化的研究工

作,对热电器件的长度进行优化,改善温差发电器件的功率输出。Meroz等<sup>[7]</sup>阐述了 $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$ 合金在温差发电装置上的应用与发展,通过对合金材料进行处理,可有效提高温差发电装置优值。Admasu等<sup>[8]</sup>研究了温差发电器导热基板温度分布对温差发电器的影响,发现导热基板温度分布均匀时,发电器电学输入特性较好。文献[9]研究发动机排气系统传热装置和内部结构对转换效果的影响,提出较优方案。文献[10]对温差发电器的温度和热应力进行模拟分析,发现增大温差可提高功率输出,但同时导致热应力增大。文献[11]提出一种高效温差发电器,其效率可达3.01%。文献[12]提出一种新的计算温差发电器各项参数的方法,并通过试验进行验证,结果表明该方法在温差较小时,试验结果和理论算法结果较为近似。

本文利用有限元方法,结合热-电耦合理论,通过ANSYS Workbench软件对温差发电特性进行模拟研究,分析不同对数的温差发电模型在添加负载电阻时,内阻、电压、电流、功率和效率随温差的规律,为优化设计温差发电装置、有效提升发电性能提供理论基础。

收稿日期: 2016-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(51776090); 内燃机燃烧学国家重点实验室开放课题(K2018-05); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(18KJA470001); 江苏省“双创计划”

通信作者: 王 军(1980—),男,博士、副教授,主要从事发动机热管理及排放污染物控制方面的研究。qcwjun@ujs.edu.cn

# 1 温差发电

## 1.1 温差发电原理

添加负载的温差发电模块闭合回路如图 1 所示,其中,温差发电模块主要包括 p 型和 n 型半导体、连接 p 型和 n 型半导体的铝合金导体,以及上下导热基板,其材料一般为陶瓷。

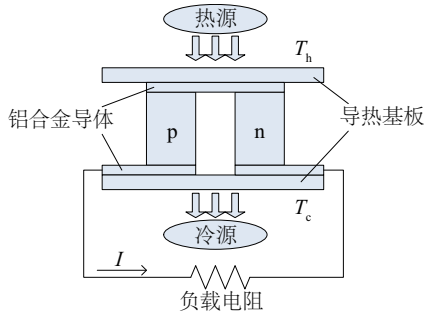


图 1 半导体温差发电模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of semiconductor thermoelectric power generation model

温差发电模块工作时,热量从热源经导热基板及铝合金导体分别流入到 p 和 n 型半导体,再通过底部铝合金导体和导热基板流入低温冷源。当在温差发电模块建立了持续的温度梯度时,由于塞贝克效应,载流子在温度梯度作用下运动产生电流,从而将热能转换为电能。其中,温差发电模块产生的电流方向与冷热端布置方式有关,当 p 型和 n 型半导体以及其他结构保持不变时,将热源和冷源位置变换,将产生反向电流。

## 1.2 温差发电理论

图 1 所示的温差发电器闭合回路可等效为电压源和负载电阻串联连接的闭合电路<sup>[13,14]</sup>,其等效电路图如图 2 所示。

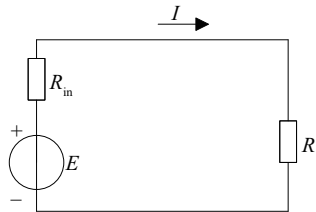


图 2 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit

闭合电路中的电流 \$I\$ 为:

$$I = \frac{E}{R + R_{in}} \quad (1)$$

式中, \$R\$ ——负载电阻, \$\Omega\$; \$R\_{in}\$ ——温差发电器内阻, \$\Omega\$; \$E\$ ——发电器产生的总电势, V。

\$E\$ 分别加载于 \$R\$ 和 \$R\_{in}\$ 上,负载电压 \$U\$ 为:

$$U = I \cdot R = \frac{E}{R + R_{in}} \cdot R \quad (2)$$

温差发电模型对外输出的电功率 \$P\$ 为:

$$P = I^2 \cdot R \quad (3)$$

式中, \$\alpha\_p\$ ——p 型半导体塞贝克系数, V/\$^\circ\$C; \$K\_p\$ ——p 型半导体热导率, W/(m\$\cdot\$ \$^\circ\$C); \$\rho\_p\$ ——p 型半导体电阻率, \$\Omega \cdot\$ m; 对应的 n 型半导体热电参数为: \$\alpha\_n\$、\$K\_n\$ 和 \$\rho\_n\$。温差发电器产生的总电势可表示为:

$$E = \alpha \cdot \Delta T \quad (4)$$

式中, \$\alpha\$ ——温差发电器的塞贝克系数, V/\$^\circ\$C, \$\alpha = \alpha\_p - \alpha\_n\$; \$\Delta T\$ ——温差发电器上下导热基板的温度差, \$^\circ\$C, \$\Delta T = T\_h - T\_c\$, \$^\circ\$C; \$T\_h\$ ——模型热端温度, \$^\circ\$C; \$T\_c\$ ——模型冷端温度, \$^\circ\$C。

则电功率 \$P\$ 可表示为:

$$P = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T^2}{R_{in}} \cdot \frac{a}{(1+a)^2} \quad (5)$$

式中, \$P\$ ——功率, W; \$a = \frac{R}{R\_{in}}\$, 当 \$a = 1\$ 时,即负载电阻等于温差发电器内阻时,温差发电模型的电功率可达最大值:

$$P_{max} = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T^2}{4R} \quad (6)$$

温差发电器效率 \$\eta\$ 可定义为:

$$\eta = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} \quad (7)$$

式中, \$Q\_h\$ ——半导体温差发电器从高温热源吸收的热量, W; \$Q\_c\$ ——传给低温冷源的热量, W。

假定温差发电模块的 p 型和 n 型半导体结构尺寸相同,热端和冷端的导热系数相同,同时假设发电器侧面绝热,内部焦耳热被平均分配到两端,则 \$Q\_h\$ 和 \$Q\_c\$ 可分别表示为<sup>[15,16]</sup>:

$$Q_h = \alpha \cdot I \cdot T_h + K \cdot \Delta T - 0.5 \cdot I^2 \cdot R_{in} \quad (8)$$

$$Q_c = \alpha \cdot I \cdot T_c + K \cdot \Delta T + 0.5 \cdot I^2 \cdot R_{in} \quad (9)$$

式中, \$K\$ ——温差发电器导热系数, W/(m\$\cdot\$ \$^\circ\$C)。

式(8)和(9)中 3 部分分别为帕尔贴热、发电模型导热及内阻焦耳热<sup>[16]</sup>。

故效率 \$\eta\$ 可表示为:

$$\eta = \frac{P}{Q_h} = \frac{\alpha \cdot I \cdot \Delta T - I^2 \cdot R_{in}}{\alpha \cdot I \cdot T_h + K \cdot \Delta T - 0.5 \cdot I^2 \cdot R_{in}} \quad (10)$$

## 2 温差发电模型

### 2.1 热电耦合方程

温差发电过程基于热场和电场的耦合效应,在不考虑外加磁场时,遵循能量守恒方程与电荷守恒方程<sup>[17,18]</sup>:

$$\rho_m C_m \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + \rho J^2 - T J \left[ \left( \frac{\partial \alpha}{\partial T} \right) \nabla T + (\nabla \alpha)_T \right] \quad (11)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (12)$$

式中,  $J$  —— 电流密度,  $A/m^2$ ;  $C_m$  —— 比热容,  $J/(K \cdot kg)$ ;  $\rho_m$  —— 材料密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho$  —— 电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $\alpha$  —— 塞贝克系数,  $V/^\circ C$ 。

$J$  和  $q$  可分别表示为:

$$J = -\sigma \left[ \nabla \left( \frac{\mu}{e} \right) + \alpha \nabla T \right] \quad (13)$$

$$q = \alpha T J - K \nabla T \quad (14)$$

式中,  $\sigma$  —— 材料的电导率,  $S/m$ ,  $\sigma = \frac{1}{\rho}$ ;  $q$  —— 热流密度,  $J/m^2$ ;  $\mu$  —— 费米能级,  $J$ ;  $e$  —— 元电荷,  $C$ 。

在稳态条件下,联合式(11)~式(14)可得温差发电模型的温度场和电场分布。

### 2.2 模型建立

发电机结构参数及塞贝克系数、电阻率、导热系数等组件物性参数均直接影响半导体温差发电器性能。模拟时忽略了各物性参数随温度的变化,取 p-n 热电单偶臂的塞贝克系数为低温和高温的平均值,其他参数也设为定值,具体参数如表 1 所示。

构成温差发电模型热电单偶臂的 p 型和 n 型半导体尺寸相同,其长度、宽度和高度分别为 1.4、1.4 和 2.0 mm,相邻热电单偶臂之间距离为 1.2 mm。温差发电模型上下导热基板厚度为 0.6 mm。

利用 ANSYS Workbench 软件对温差发电模型进行有限元仿真分析。4、12、126 对 p-n 结温差发电模型如图 3 所示,126 对温差发电网格模型如图 4 所示。模型由不同对数 p-n 结通过铝合金导体串联组成,在模型外部串联一个可变负载电阻。模拟热源温度范围为 150~240  $^\circ C$  (10  $^\circ C$  递增),冷源温度设定为环境温度 22  $^\circ C$ 。假定温差发电机侧面绝热,通

表 1 各部件参数

Table 1 Parameters of each component

主要 部件	$\alpha /$ $V \cdot ^\circ C^{-1}$	$K /$ $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	$\rho /$ $\Omega \cdot m$
p 型 半导体	$210 \times 10^{-6}$	1.2	$0.98 \times 10^{-5}$
n 型 半导体	$-165 \times 10^{-6}$	1.3	$1.05 \times 10^{-5}$
导热 基板	0	4.5	0
铝合金 导体	0	144(0 $^\circ C$ )	$2.43 \times 10^{-8}$ (0 $^\circ C$ )
		165(100 $^\circ C$ )	$2.67 \times 10^{-8}$ (20 $^\circ C$ )
		175(200 $^\circ C$ )	$3.43 \times 10^{-8}$ (100 $^\circ C$ )

过改变上导热基板温度,分析温差发电器的电压、电流、功率和效率等输出特性参数的变化规律。

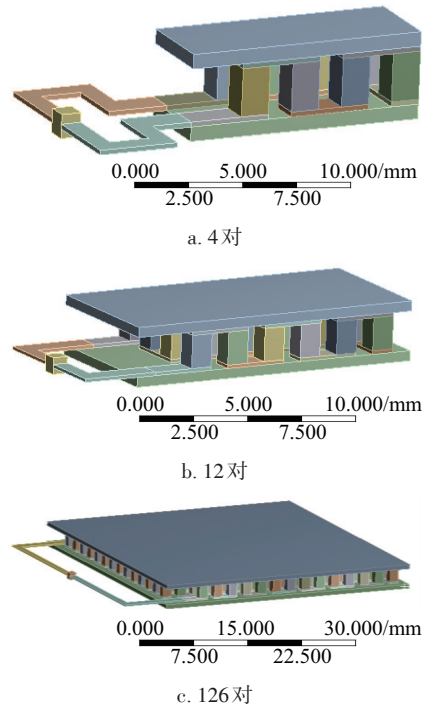


图 3 温差发电模型

Fig. 3 Thermoelectric generation models

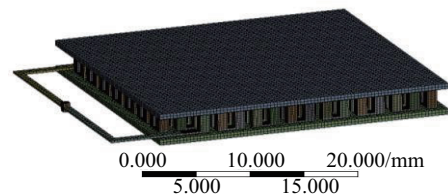


图 4 126 对模型网格图

Fig. 4 Grid graph of 126 pairs model

### 3 结果与分析

#### 3.1 温差发电模型内阻 $R_{in}$ 的特性

温差发电模型内阻可通过图 2 所示的闭合电路欧姆定律初步得出,温差为 128 °C 时,温差发电模型内阻随负载电阻和 p-n 结对数的变化关系如图 5 所示。由图 5 可见,4 对 p-n 结温差发电模型内阻几乎不随负载电阻的变化而改变,通过求取各负载电阻时内阻平均值,可得 4 对 p-n 结温差发电模型的内阻约为 0.05  $\Omega$ ,用此方法可求的 12、126 对 p-n 结温差发电模型的内阻分别为 0.15 和 1.4  $\Omega$ 。另外由图 5 可见,3 种温差发电模型内阻随 p-n 结对数的增加呈线性增大趋势。

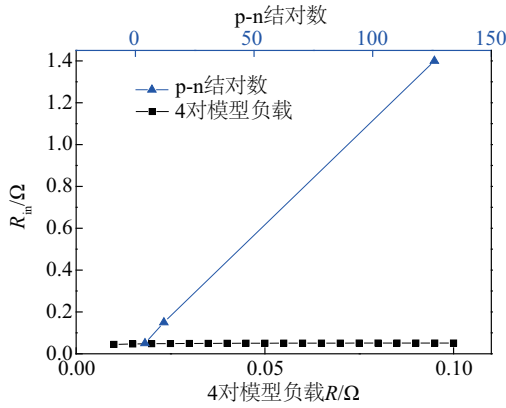


图 5 内阻  $R_{in}$  随负载电阻  $R$  和 p-n 结对数的变化

Fig. 5 Internal resistance  $R_{in}$  changes with load resistance  $R$  and pairs of p-n junction

对 3 种模型分别串联 0.05、0.15 和 1.5  $\Omega$  的负载电阻,温差由 128 °C 增加到 218 °C 时,3 种温差发电模型的内阻随温差  $\Delta T$  的变化关系如图 6 所示。

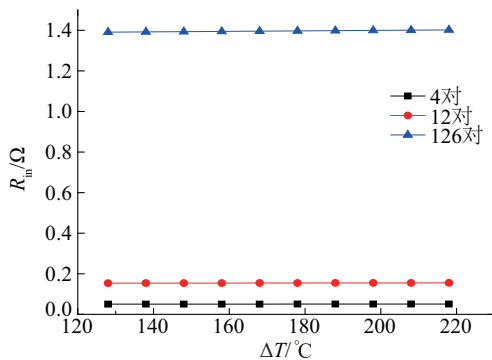


图 6 内阻  $R_{in}$  随温差  $\Delta T$  变化

Fig. 6 Internal resistance  $R_{in}$  changes with temperature difference  $\Delta T$

由图 6 可见,3 种模型的内阻随温差的变化无明显变化,4、12、126 对 p-n 结发电模型内阻分别保持为 0.05、0.15、1.4  $\Omega$ 。这主要是由于构成温差发电模型的 p、n 热电单偶臂的电阻率不随温度变化,且铝合金导体的电阻率很小可忽略而造成的。

#### 3.2 开路电压 $E$ 、路端电压 $U$ 、回路电流 $I$ 随温差 $\Delta T$ 的变化

当模型负载电阻远大于内阻时,可近似认为模型的路端电压等于开路电压<sup>[18]</sup>。当对 4、12 对温差发电模型施加阻值为 1000  $\Omega$  的负载电阻,对 126 对温差发电模型施加阻值为 10000  $\Omega$  的负载电阻时,模型的路端电压随温差的变化关系如图 7 所示。由图 7 可见,开路电压随温差的增大而线性增大,且对数越多,斜率越大,这是由于随着 p-n 结对数的增加,温差发电模型总塞贝克系数随之增大而造成的,由图 7 中 3 条曲线的斜率可知 3 种温差发电模型的总塞贝克系数分别为  $1.5 \times 10^{-3}$ 、 $4.5 \times 10^{-3}$ 、 $0.047 \text{ V/}^\circ\text{C}$ 。

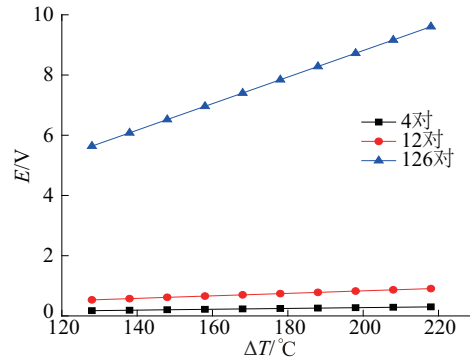


图 7 开路电压  $E$  随温差  $\Delta T$  的变化

Fig. 7 Changes of open circuit voltage  $E$  with temperature difference  $\Delta T$

当模型负载电阻分别等于各自内阻时,路端电压和电流随温差的变化关系如图 8 所示。由图 8 可见,3 种模型路端电压和回路电流随温差增大而线性增大,且对数越多斜率越大。当温差为 218 °C 时,126 对 p-n 结温差发电模型的最大路端电压和回路电流分别可达 4.8 V 和 3.4 A。

#### 3.3 功率 $P$ 、效率 $\eta$ 随温差 $\Delta T$ 的变化

模型负载电阻分别等于各自内阻时,功率和效率随温差的变化关系如图 9 所示。由图 9 可见,功率和效率均随温差的增加而近似线性增大,126 对 p-n 结温差发电模型在温差为 128 和 218 °C 时的功



率分别为 5.7 和 16.5 W,效率分别可达 2.3%和 4%,该数值与文献[19,20]中的实验结果基本相近。

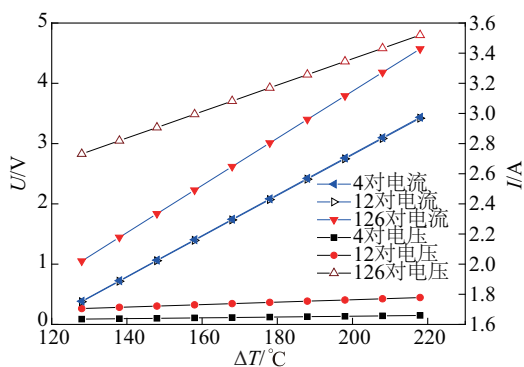


图8 路端电压  $U$  和回路电流  $I$  随温差  $\Delta T$  变化

Fig. 8 Terminal voltage  $U$  and current loop  $I$  changes with temperature difference  $\Delta T$

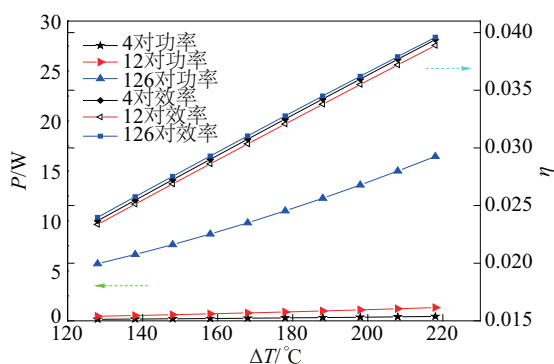
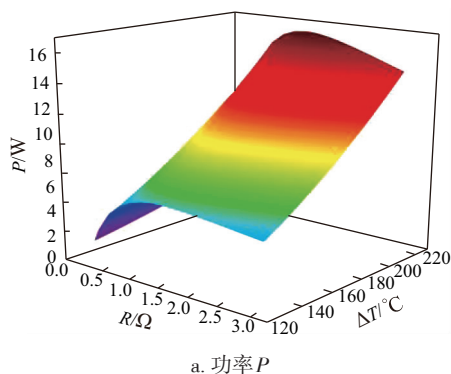


图9 功率  $P$  和效率  $\eta$  随温差  $\Delta T$  的变化

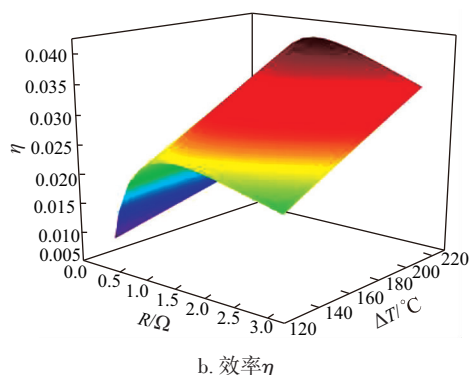
Fig. 9 Changes of power  $P$  and efficiency  $\eta$  with temperature difference  $\Delta T$

### 3.4 功率 $P$ 、效率 $\eta$ 随温差 $\Delta T$ 和负载电阻 $R$ 的变化

不同负载电阻和温差时,126 对 p-n 结温差发电模型功率和效率的变化规律分别如图 10a 和图 10b 所示,由图 10 可见,功率和效率随温差的增加线性增加,随负载电阻的增加而先增大后减小,



a. 功率  $P$



b. 效率  $\eta$

图 10 功率、效率随温差  $\Delta T$  和负载电阻  $R$  的变化

Fig. 10 Power and efficiency changes with temperature difference  $\Delta T$  and load resistance  $R$

功率和效率曲面脊线为一条随温差上升而增大的直线,对应的负载电阻等于内阻。

## 4 结 论

1) 温差发电模型内阻仅随 p-n 结对数的增大而线性增大,与工作状态无关,4、12 及 126 对模型的内阻分别为 0.05、0.15、1.4  $\Omega$ 。

2) 开路电压、路端电压和回路电流均随 p-n 结对数和温差的增加而增大,p-n 结对数增大时,开路电压和路端电压随温差的增加迅速增大。温差为 218  $^{\circ}\text{C}$  时 126 对模型的开路电压为 9.6 V,当负载电阻为 1.4  $\Omega$  时,其路端电压可达 4.8 V,回路电流可达 3.4 A。

3) 功率和效率随温差的增加而增大,随负载电阻的增加呈先增大后减小趋势;p-n 结对数增大时,功率随温差的增加快速增大。负载电阻与内阻相同时,模型功率和效率可达最大。温差为 218  $^{\circ}\text{C}$  时,126 对模型的最大功率和效率分别为 16.5 W 和 4%。

### [参考文献]

- [1] 王长宏,林 涛,曾志环. 半导体温差发电过程的模型分析与数值仿真[J]. 物理学报, 2014, 63(19): 311—316.
- [1] Wang Changhong, Lin Tao, Zeng Zhihuan. Analysis and simulation of semiconductor thermoelectric power generation process[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(19): 311—316.
- [2] 贾 磊,陈则韶,刘晓光,等. 温差发电器件导热系数[J]. 太阳能学报, 2004, 25(6): 816—819.
- [2] Jia Lei, Chen Zeshao, Liu Xiaoguang, et al. Research

- on thermal conductivity of thermoelectric generator[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2004, 25(6): 816—819.
- [3] 崔久春, 何 伟, 侯景鑫, 等. 热管式真空管与热电厂结合的新型太阳能利用装置的电性能模拟[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(5): 1225—1230.
- [3] Cui Jiuchun, He Wei, Hou Jingxin, et al. The oretical simulation on electrical performance of a novel solar energy device combining thermoelectric chips with heat pipe evacuated tube[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2015, 36(5): 1225—1230.
- [4] 刘永生, 谷民安, 杨晶晶, 等. 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[J]. *物理学报*, 2010, 59(10): 7368—7373.
- [4] Liu Yongsheng, Gu Minan, Yang Jingjing, et al. Design and thermodynamical analysis of a new refrigerator model driven by photovoltaic and thermoelectric power generation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10): 7368—7373.
- [5] Montecucco A, Siviter J, Knox A R. Knox. Constant heat characterisation and geometrical optimisation of thermoelectric generators[J]. *Applied Energy*, 2015, 149: 248—258.
- [6] 蔡永华, 肖金生, 翟鹏程, 等. 低温热电器件的结构尺寸优化[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(8): 1073—1078.
- [6] Cai Yonghua, Xiao Jinsheng, Zhai Pengcheng, et al. Structure size optimization for thermoelectric generation at low temperature[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2010, 31(8): 1073—1078.
- [7] Meroz O, Ben-Ayoun D, Beerli O, et al. Development of  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$  alloy for thermoelectric power generation applications[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 679: 196—201.
- [8] Admasu B T, Luo Xiaobing, Yao Jiawe. Effects of temperature non-uniformity over the heat spreader on the outputs of thermoelectric power generation system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 76: 533—540.
- [9] Liu X, Deng Y D, Zhang K, et al. Experiments and simulations on heat exchangers in thermoelectric generator for automotive application[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71(1): 364—370.
- [10] Wu Yongjia, Ming Tingzhen, Li Xiaohua, et al. Numerical simulations on the temperature gradient and thermal stress of a thermoelectric power generator[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 88: 915—927.
- [11] Bensaid S, Brignone M, Ziggotti A, et al. High efficiency thermo-electric power generator[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(2): 1385—1398.
- [12] Orr B, Taglieri J, Ding L C, et al. Validating an alternative method to predict thermoelectric generator performance[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 116: 134—141.
- [13] Rodríguez A, Vián J G, Astrain D, et al. Study of thermoelectric systems applied to electric power generation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(5): 1236—1243.
- [14] Odia A, Ferrellin L, Samarelli A, et al. Finite element modelling to evaluate the cross-plane thermal conductivity and seebeck coefficient of Ge/SiGe[J]. *Heterostructure, Materials Today: Proceedings*, 2015, 2(2): 510—518.
- [15] Ding L C, Akbarzadeh A, Date A. Performance and reliability of commercially available thermoelectric cells for power generation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102: 548—556.
- [16] Andrea M, Andrew R K. Accurate simulation of thermoelectric power generating systems[J]. *Applied Energy*, 2014, 118: 166—172.
- [17] Molina M G, Juanicó L E, Rinalde G F, et al. Design of improved controller for thermoelectric generator used in distributed generation[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(11): 5968—5973.
- [18] Wu Guangxi, Yu Xiong. A holistic 3D finite element simulation model for thermoelectric power generator element[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 86: 99—110.
- [19] Liu Weishu, Jie Qing, Kim Hee Seok, et al. Current progress and future challenges in thermoelectric power generation: From materials to devices[J]. *Acta Materialia*, 2015, 87: 357—376.
- [20] Kossyvakis D N, Vossou C G, Provatidis C G, et al. Computational analysis and performance optimization of a solar thermoelectric generator[J]. *Renewable Energy*, 2015, 81: 150—161.

## NUMERICAL CALCULATION AND ANALYSIS ON PROPERTIES OF THERMOELECTRIC GENERATION MODEL

Wang Jun, Zhang Chaozhen, Dong Yan, Li Yilin, Zhao Chen

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to research the thermoelectric properties of thermoelectric generator, the finite element analysis method was used to simulate the thermoelectric coupling of three different thermoelectric generation models, which are composed of 4 pairs, 12 pairs and 126 pairs of p-n junctions. Analysis the variety regulation of the resistance of thermoelectric generation model, open circuit voltage and the terminal voltage, loop current, power and efficiency when the load resistance, temperature difference and the pairs of p-n junctions are not set carved in stone. Results show that: The internal resistance of the thermoelectric generation model does not change with the variation of other conditions, which only with the pairs of p-n junctions increase linearly; open circuit voltage and the terminal voltage are with the pairs of p-n junctions and difference of temperature increase linearly, loop current and terminal voltage have similar relationships with temperature difference increase linearly; power and efficiency are with the increase of the difference in temperature increasing. Power and efficiency of the thermoelectric generation model could reach the maximum value, when the temperature difference is constant, the load resistance is equal to the internal resistance of thermoelectric power generation model. When the temperature difference is increased from 128 °C to 218 °C, the maximum power of the three models is increased by 0.15, 0.46 and 0.44 to 5.7 W, 1.33 and 16.5 W respectively. The maximum efficiency of the 126 pairs model is increased from 2.4% to 4%.

**Keywords:** thermoelectricity; conversion efficiency; numerical simulation; voltage; current; power