doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.09.015

# 两级热电单偶输出性能的三维有限元分析

何勇灵[1,2], 周岷峰[1,2]

(1.北京航空航天大学 交通科学与工程学院,100191 北京;2.北京市清洁能源与高效动力工程中心,100191 北京)

**摘 要**: 针对以往研究中热电单偶一维传热模型的不足,提出了一种新型的两级热电单偶,对传统热电单偶和两级热电单偶分别建立三维有限元模型,确定模型的温度,对流换热和电势边界面,设定合理的边界条件,在 ANSYS Workbench 环境中进行仿真分析.应用控制变量法,研究不同输入变量对两种热电单偶各自输出性能的影响并进行比较分析.结果表明:负载值大小影响输出电压和电流,当负载值小于某个临界值时,两级热电单偶的输出电压和电流优于传统热电单偶,而最大输出功率始终大于传统热电单偶.

**关键词**: 两级热电单偶;传统热电单偶;三维有限元模型;控制变量法;输出性能;仿真

**中图分类号**: TM913 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2015)09-0079-05

# 3-D finite element analysis on the output performance of two-stage thermoelectric couple

HE Yongling[1,2], ZHOU Minfeng[1,2]

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, 100191 Beijing, China;
2. Beijing Engineering Center for Clean Energy and High Efficient Power, 100191 Beijing, China)

**Abstract**: A new two-stage thermoelectric couple (TE couple) is proposed in this paper. In order to overcome the disadvantages of 1-D heat transfer model mentioned in the previous research, 3-D finite element models are established based on the conventional thermoelectric couple and the two-stage thermoelectric couple separately, the temperature, convention and electric potential boundaries are defined and reasonable boundary conditions are set to simulate the models in ANSYS Workbench environment. Controlling variable method is used to study the influences of different input variables on the output performance of thermoelectric couples. Simulation results show that the load resistance influence the output voltage and current. The two-stage TE couple are better than the conventional one when load resistance is smaller than one critical value, but the maximum output power of the two-stage TE couple is always larger than the conventional TE couple.

**Keywords**: two-stage thermoelectric couple; conventional thermoelectric couple; 3-D finite element model; controlling variable method; output performances; simulation

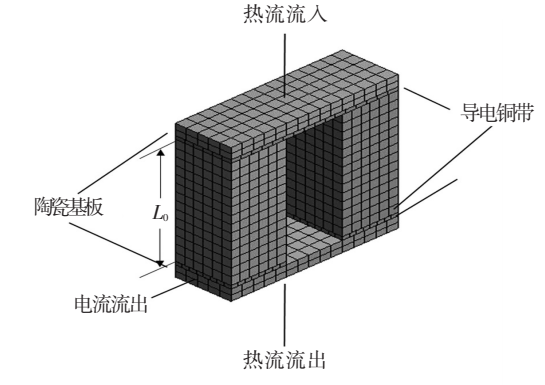
热电技术作为一种能直接将热能转化为电能的新型的能量回收技术,具有无传动部件、无污染、无噪声、工作可靠以及使用寿命较长等优点[1-3].热电单偶(thermoelectric couple,TE couple)作为热电发电系统的核心部件,对其输出性能的研究一直是国内外学者研究的重点[4-9].传统的热电单偶结构简单,但是热转换效率不高,难以适应不同发电场合的需要.文献[9-12]对两级热电偶(two-stage TE couple)进行了一维传热和热电分析,并得出了一定的结论.然而由于热电单偶在工作过程中热流方向与电流方向并不一致,导致温度场和电势场呈现三维分布情况.针对以往文献中一维传热模型的不足,本文针对两级热电单偶建立三维有限元分析模型,在 ANSYS Workbench 环境下对其输出性能进行仿真研究,通过与传统热电单偶进行比较得出相关结论,对两级热电单偶的下一步分析与实验研究具有一定的意义.

## 1 模型建立与边界条件

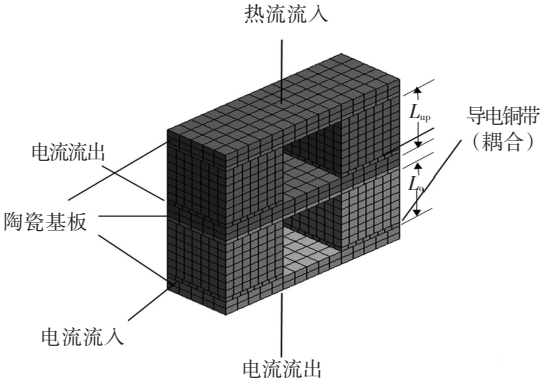
传统热电单偶和两级热电单偶的三维有限元模型分别如图1(a)、1(b)所示.从图1(a)中可以看出,传统热电单偶模型两个电偶臂由不同的P型和N型半导体单独制成,导电铜带连结两个电偶臂,构成完整的回路.图1(b)中用陶瓷基板将上下两对热电单偶隔开,在上下两级子热电电偶的电偶臂与陶

**收稿日期**: 2014-05-04.
**作者简介**: 何勇灵(1963—),男,教授,博士生导师.
**通信作者**: 何勇灵,xkbhe@buaa.edu.cn.

瓷基板的接触面上都布置有铜片,作为导电连接元件,上级子热电单偶的 N 极和下级子热电单偶的 P 极相连接,使得电流能够流经上下两级子热电单偶,构成完整的回路.由于要进行对比分析,所有模型的高度均设为相等,其电偶臂截面尺寸也相同.




(a)传统热电单偶




(b)两级热电单偶

**图 1 热电单偶的三维模型示意图**

对热电材料作如下假设[13]:1)材料各向同性,其物性参数与温度有关,P、N 型半导体以及铜带的赛贝克系数、电阻率和热导率与温度有关,陶瓷的热导率和负载电阻的电阻率为常数.2)忽略陶瓷基板与铜带以及铜带与热电半导体之间的接触电阻和接触热阻.

在图 1 中,电流流入界面上,电流密度 $J$ 和温度边界条件分别为

$$\begin{cases} J = \dfrac{I}{A_n} = \dfrac{V_S}{A_n(R + R_L)}, \\ \dfrac{\partial T}{\partial n} = 0. \end{cases} \tag{1}$$

其中:$I$ 为电流值;$V_S$ 为赛贝克电压;$R_L$ 为负载电阻值;$A_n$ 为界面面积;$R$ 为热电单偶内阻,$R = \dfrac{\rho_P L_P}{A_P} + \dfrac{\rho_N L_N}{A_N}$;$L$、$A$ 分别为对应电偶臂的长度和横截面积.

在图 1 中,电流流出界面上,有

$$\begin{cases} V = 0, \\ \dfrac{\partial T}{\partial n} = 0. \end{cases} \tag{2}$$

在图 1 中,在热流流入界面,有

$$\begin{cases} T = T_h, \\ \dfrac{\partial V}{\partial n} = 0. \end{cases} \tag{3}$$

在图 1 中,在热流流出界面,有

$$\begin{cases} T = T_c, \\ \dfrac{\partial V}{\partial n} = 0. \end{cases} \tag{4}$$

对热电单偶中其他与空气接触的外表面,其热平衡方程为

$$q^* = h(T - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_\infty^4). \tag{5}$$

式中:$\sigma$ 为 Stefan-Boltzmann 常数;$\varepsilon$ 为发射率,高度抛光的铜和热电半导体的发射率分别为 0.45、0.03[13];$T_\infty$ 为周围环境温度,$T_\infty$ 为常量;$h$ 为自然对流换热系数.

在热电半导体与导电铜带,以及导电铜带与陶瓷基板的各接触面上,热流、温度和电流密度连续.热电单偶的输出功率、热端吸热量以及热转换效率分别为

$$P_o = I^2 R_L, \tag{6}$$

$$Q_h = \alpha T_h I + \left(\frac{\kappa_P A_P}{L_P} + \frac{\kappa_N A_N}{L_N}\right)(T_h - T_c) - 0.5 I^2 R, \tag{7}$$

$$\eta = \frac{P_o}{Q_h}. \tag{8}$$

## 2 数值仿真处理过程及模型验证

对两种热电单偶的仿真在 ANSYS Workbench 环境中进行.利用 DesignModuler 模块建立实体模型,并使用 ICEM CFD 模块进行网格划分.网格单元采用六面体模型,最小边界尺寸为 0.3 mm.负载使用单独的块体模型,并通过电压耦合使负载与热电单偶串联形成闭合回路.除了热电单偶冷热端,其他表面设置对流换热边界条件以及不同的辐射换热边界条件,对流换热系数为 13.8 W·(m² · K)⁻¹,陶瓷的辐射率为 0.9,环境温度均设置为 300 K.在结果分析中添加温度、电势、热流密度以及电流密度的三维显示,并在热电单偶的上下表面增加 reaction probe 检测,用以得出热端吸收的热量以及冷端释放的热量.

热电单偶的冷端温度 $T_c$ 设置为 300 K,两种热电单偶电偶臂截面积尺寸均为 4 mm×4 mm,传统热电单偶电偶臂长 $L_0$ = 10 mm.两种热电单偶冷热端的陶瓷基板尺寸为 12 mm×4 mm×1 mm.

本文所建立的热电单偶的三维有限元模型在其他条件一致情况下，针对两种不同情况（材料物性参数为常数，材料物性参数为温度的函数），与已发表文献[14－15]的结论进行比较（参数均与文献[15]相同），结果见表 1，所得的数值仿真结果符合得较好，其中 $T_h$ = 700 K，$T_c = T_\infty$ = 300 K.

**表 1　与已发表文献的模型输出参数对比**

| 对应模型 | $P_o$/W | $Q_h$/W | $\eta$ |
|---|---|---|---|
| 1-D 模型分析解[14] | 1.44 | 13.04 | 0.11 |
| ANSYS(1)[15] | 1.43 | 13.03 | 0.11 |
| ANSYS(2)[15] | 1.05 | 11.07 | 0.095 |
| 本文模型(1) | 1.44 | 13.01 | 0.11 |
| 本文模型(2) | 1.07 | 10.73 | 0.10 |

为了进一步验证热电单偶三维有限元模型的准确性，利用实验条件搭建简易测试装置，对HZ－14热电发电模块进行输出性能的实验.加热装置采用数控加热器，冷却装置采用恒温循环器 HX1005. HZ－14 的横截面积为 40 mm$^2$，高为 5 mm，热端温度最大值为 250 ℃，冷端温度为 30 ℃，塞贝克系数为3.57×$10^{-4}$ V/℃，电阻率为 1.22×$10^{-2}$ Ω · mm.图 2 为实验装置原理图，图 3 为热电模块最大输出功率的理论仿真值和实验值的对比.由于热辐射情况边界条件和接触热阻的影响，随着温度的升高实验值和仿真值差别增大.

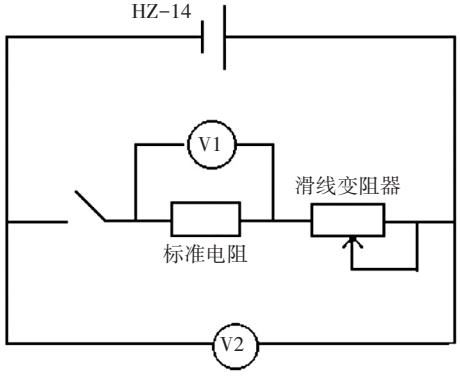



**图 2　HZ－14 热电发电模块实验装置原理**

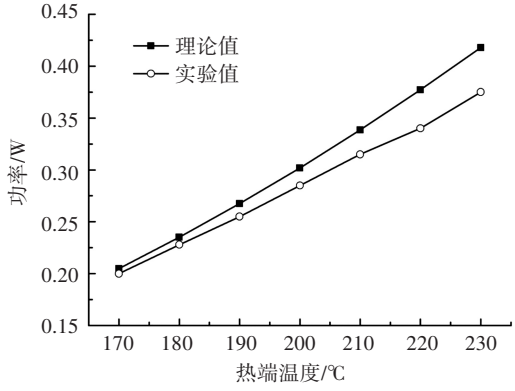



**图 3　HZ－14 热电发电模块最大输出功率理论仿真值与实验值对比**

## 3　仿真结果及讨论

图 4、5 分别为传统热电单偶 1-D 和 3-D 模型及两级热电单偶 3-D 模型的输出电压 $V_o$ 和输出电流 $I$ 在不同热端温度 $T_h$ 条件下随负载阻值 $R_L$ 增大的变化情况.通过传统热电单偶 1-D 模型和 3-D 模型输出特性的对比，在计算精度上两模型符合较好.从图 4 中可以看出，$V_o$ 随 $R_L$ 的增大而增大，但增加速度越来越慢，到最后趋于热电单偶的赛贝克电压 $V_S$.图 5 说明 $I$ 随着 $R_L$ 增大的变化情况与 $V_o$ 正好相反，当 $R_L$ 增大到一定程度后，$I$ 趋于零.随着 $T_h$ 增大，赛贝克效应增强，$V_o$ 与 $I$ 都一定程度增大.

两级热电单偶的 $V_o$ 和 $I$ 在某 $R_L$ 值之前大于传统热电单偶，当 $R_L$ 大于该值后，传统热电单偶的 $V_o$ 和 $I$ 超过两级热电单偶，这个值被称为负载临界点 $R_{L,cri}$.这是由于两级热电单偶中间陶瓷基板导热系数相对较低，两端产生了一定的温差，在总温差一定的条件下，减少了上下两级热电单偶的有效温差，进而影响到了 $V_o$ 和 $I$ 的值.

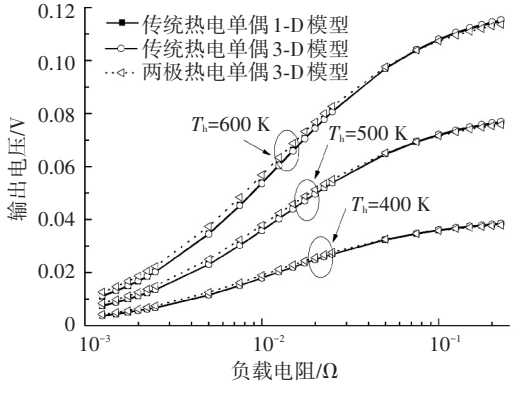



**图 4　两级热电单偶输出电压随负载增大的变化**

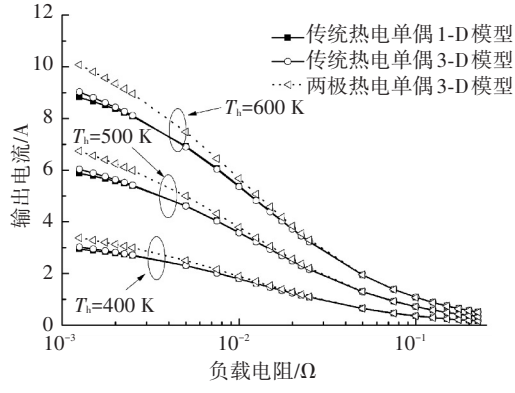



**图 5　两级热电单偶的电流随负载增大的变化情况**

若要保证在相同的温度差和 $R_L$ 条件下，两种热电单偶的 $V_o$ 和 $I$ 相等，则有

$$\frac{V_{S,con}}{R_{con} + R_L} = \frac{V_{S,2st}}{R_{2st} + R_L}. \tag{9}$$

两种热电单偶的赛贝克电压分别为

$$V_{S,con} = \alpha(T_h - T_c), \tag{10}$$

$$V_{S,2st} = \alpha[(T_h - T_{ce,up}) + (T_{ce,lo} - T_c)]. \tag{11}$$

其中：$T_{ce,up}$、$T_{ce,lo}$ 分别为两级热电单偶中间陶瓷基板上下表面的温度.

两种热电单偶的内阻值分别为

$$R_{con} = \frac{\rho_P L_0}{A_P} + \frac{\rho_N L_0}{A_N}, \tag{12}$$

$$R_{2st} = \rho_P\left(\frac{L_{up} + L_{lo}}{A_P}\right) + \rho_N\left(\frac{L_{up} + L_{lo}}{A_N}\right). \tag{13}$$

可以得出

$$R_{L,cri} = (A_N\rho_P + A_P\rho_N)((L_0 - L_{up} - L_{lo})(T_c - T_h - L_0(T_{ce,lo} - T_{ce,up}))/(A_P A_N(T_{ce,lo} - T_{ce,up})). \tag{14}$$

由于两级热电单偶中间陶瓷基板传热方向距离相对于热电偶臂长较短，可以近似认为沿导热方向陶瓷基板为一维稳态导热，有

$$\Phi = \frac{A_{n,cer,int}\lambda_{cer,int}}{t_{cer,int}}(T_{ce,up} - T_{ce,lo}). \tag{15}$$

联立式(14)、(15)，考虑两种电偶沿导热方向上高度相，可以得出

$$R_{L,cri} \propto \left(\frac{2t_{cop}}{t_{cer,int}} + C_0\right). \tag{16}$$

其中 $C_0$ 为相关常数.

可以看出 $R_{L,cri}$ 随着中间陶瓷基板厚度 $t_{cer,int}$ 的增大而减小.图 6 给出了不同 $t_{cer,int}$ 条件下两级热电单偶的 $V_o$ 随 $R_L$ 的变化情况，验证了该结论.

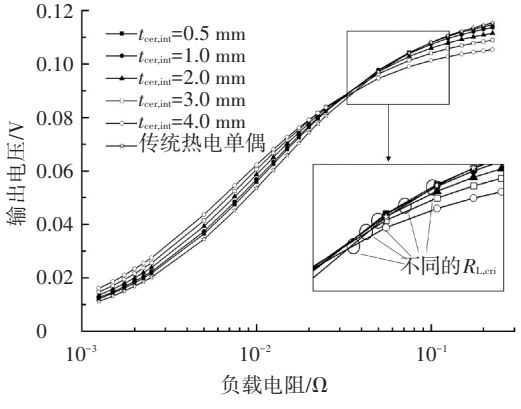



**图 6 不同 $t_{cer}$ 条件下两级热电单偶的输出电压随负载增大的变化**

图 7、8 分别为两种热电单偶的输出功率 $P_o$ 和热转换效率 $\eta$ 在不同热端温度 $T_h$ 条件下随电流 $I$ 增大的变化情况，$t_{cer,int}$ = 1 mm. 可以看出，$P_o$ 和 $\eta$ 分布均成类抛物线型，存在最大值 $P_{max}$ 和 $\eta_{max}$，温度差越大，$P_{max}$ 和 $\eta_{max}$ 越高.由于有效电偶臂长减小导致内阻减小，两级热电单偶的 $P_{max}$ 大于传统热电单偶，但是热电单偶结构的变化导致在相同温差下两种热电单偶热端吸热量 $Q_h$ 不同，所以 $\eta_{max}$ 相差无几.从两图中还可以看出，两级热电单偶的 $I$ 与 $P_o$ 以及 $\eta$ 的变化范围更大，在实际应用过程中可选择性更强.

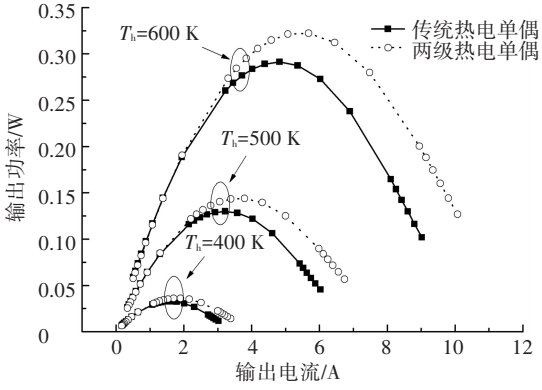



**图 7 两种热电单偶的输出功率随电流增大的变化**

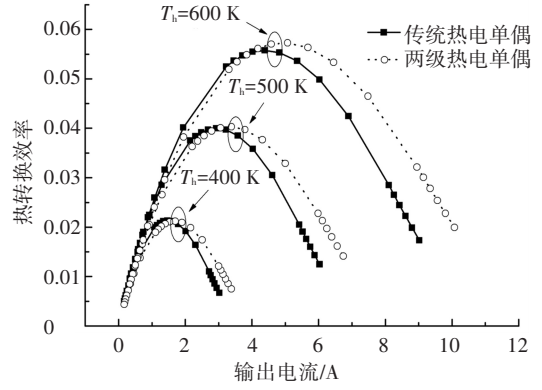



**图 8 两种热电单偶的热转换效率随电流增大的变化**

## 4 结 论

1)提出一种新型的两级热电单偶，并针对传统热电单偶和两级热电单偶分别建立三维有限元模型.在 ANSYS Workbench 环境中，应用控制变量法，就不同输入变量对两种热电单偶各自输出性能的影响进行仿真分析和对比研究，发现随着负载值的增大，传统热电单偶和两级热电单偶的输出电压增大而电流减小.

2)存在某个临界负载值，使得传统热电单偶的输出电压优于两级热电单偶的输出电压.

3)随着输出电流的增大，传统热电单偶和两级热电单偶的输出功率和热转换效率均成类抛物线分布，两级热电单偶的最大输出功率优于传统热电单偶的最大输出功率.

## 参考文献

[1] BELL L E. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems [J]. Science, 2008, 321(5895): 1457-1461.

[2] STOBART R, MILNER D. The potential for thermo-electric regeneration of energy in vehicles [J]. SAE papers, 2009, 2009-01-1333.

[3] POUDEL B, HAO Qing, MA Yi, et al. High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys [J]. Science, 2008, 320(5876): 634-638.

[4] GOU X L, XIAO H, YANG S. Modeling experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system [J]. Applied Energy, 2010, 87(10): 3131-3136.

[5] HSIAO Y Y, CHANG W C, CHEN S L. A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine [J]. Energy, 2010, 35(10): 1447-1454.

[6] CHEN M, ROSENDAHL L A, CONDRA T J, et al. Numerical modeling of thermoelectric generators with varying material properties in a circuit simulator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 112-124.

[7] YANG L N, YANG N, LI B. Extreme low thermal conductivity in nanoscale 3D Si phononic crystal with spherical pores [J]. Nano Letters, 2014, 14 (4): 1734-1738.

[8] JIANG J W, YANG N, WANG B S, et al. Modulation of thermal conductivity in kinked silicon nanowires: phonon interchanging and pinching effects [J]. Nano Letters, 2013, 13 (4): 1670-1674.

[9] CHEN L G, LI J, SUN F R, et al. Performance optimization of a two-stage semiconductor thermoelectric-generator [J]. Applied Energy, 2005, 82(4): 300-312.

[10] CHEN J C, ZHOU Y H, WANG H J, et al. Comparison of the optimal performance of single- and two-stage thermoelectric refrigeration systems [J]. Applied Energy, 2002, 73(3/4): 285-298.

[11] XUAN X C. Analyses of the performance and polar characteristics of two-stage thermoelectric coolers [J]. Semiconductor Science and Technology, 2002, 17 (5): 414-420.

[12] XUAN X C, NG K C, YAP C, et al. Optimization of two-stage thermoelectric coolers with two design configurations [J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(15): 2041-2052.

[13] REDDY B V K, BARRY M, LI J, et al. Mathematical modeling and numerical characterization of composite thermoelectric devices [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 67: 53-63.

[14] ANGRIST S W. Direct energy conversion [M]. 4th ed. Boston: Allyn and Bacon Inc, 1982: 252-253.

[15] ANTONOVA E E, LOOMAN D C. Finite elements for thermoelectric device analysis in ANSYS [C]// Proceedings of 24th International Conference on Thermoelectric. Clemson: IEEE, 2005: 215-218.

（编辑　魏希柱）