

# 空间热电元件的运行温度与极限电性能预测及结构优化

何源<sup>1</sup>, 董镇蛟<sup>2</sup>, 贾浩洋<sup>1</sup>, 陶于兵<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学 未来技术学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对宇宙空间温差发电装置缺乏有效的安全性和极限性能预测模型的问题, 建立了空间热电元件的热-电-力多场耦合模型, 对比了具有 2 种热电腿结构(宽  $a=1$  mm, 高  $h=1$  mm 和宽  $a=4$  mm, 高  $h=4$  mm)、冷端温度 178~298 K 范围内热电元件的发电效率和热应力大小, 论证了安全温度及其预测对于热电效率提升的重要性; 分析了热电腿宽度  $a$  和高度  $h$  在 1~4 mm 范围内的变化对安全温度及对应极限发电效率和极限功率密度的影响, 并利用拉丁超立方样本采集和人工神经网络方法构建出能够通过热电腿宽度和高度变化准确预测安全温度、极限发电效率和极限功率密度的预测模型; 通过多目标遗传算法给出了权衡极限发电效率和极限功率密度的热电腿宽度和高度参数的最优解集, 其中热电腿宽  $a=1.14$  mm, 高  $h=1.02$  mm 时具有较高的极限电效率(9.48%)和极限功率密度(153.35 W/kg)。兼顾安全温度和极限电性能的预测模型有助于热电元件的优化设计与性能提升。

**关键词:** 热电元件; 安全温度; 极限电性能; 结构优化; 性能预测

**中图分类号:** TM913; TN377; TK121; V57 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2026.03.015

基于热电元件(thermoelectric elements, TE)的温差发电技术具有无额外能耗、体积紧凑等诸多优点<sup>[1-4]</sup>。然而, 热电元件自身转换效率低下的问题限制了其进一步的大规模应用<sup>[5-7]</sup>。热电结构是影响热电转换效率的重要因素<sup>[8-10]</sup>。Wang 等<sup>[11]</sup>发现 X 形腿结构的热电发电机(thermoelectric generator, TEG)输出效率比传统矩形腿结构的热电发电机高。Lin 等<sup>[12]</sup>通过研究得到了热电发电效率和发电功率最大时的热端温度和两级热电腿高度比。蓝云成等<sup>[13]</sup>给出了瘦高型和矮宽型热电臂系统的适用热源温度范围。

调整热电元件的几何结构, 热电元件发电性能和热应力都随之改变, 其中热应力的变化会影响到器件的使用安全。Aljaghtam 等<sup>[14]</sup>对比了 8 种不同热电腿结构的热电元件的热应力。Ge 等<sup>[15]</sup>提出一种新型的内弧型热电支腿结构, 比传统的矩形支腿的输出功率提高 10.82%, 同时热应力下降 3.82%。

然而, 结构的改变还会影响保证应力安全的热电冷热端最大温差极限, 从而影响热电元件的发电潜力。如当操作温度超出了热电结构所对应的安全范围, 则热应力过大导致元件损坏无法工作<sup>[16]</sup>; 如操作温度虽介于安全范围之内, 但数值过于保守, 则热电元件的发电潜力难以发掘<sup>[17]</sup>。因此, 保证热电元件力学安全的温度极限值得关注与研究, 而现有文献缺乏这方面的设计考虑。此外, 宇宙空间温差发电技术运行和维护成本高, 操作温度的设计选取需要恰到好处, 既不超出安全极限, 又能充分发挥热电元件的发电性能, 为此, 亟需有效的安全温度与发电性能预测模型以提供设计便利。

基于此, 本文建立了空间应用的热电元件热-电-力多场耦合模型, 对比了不同结构热电元件的性能差异, 论证了安全温度对于热电元件结构设计与性能提升的重要性; 分析了不同结构的热电元件安全温度与电性能变化, 确定了结构设计变量; 通过人

收稿日期: 2025-09-24; 修订日期: 2025-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A20212)

作者简介: 何源(1995—), 男, 西安交通大学博士研究生, 主要从事光伏系统热管理研究, E-mail: heyuan2855@stu.xjtu.edu.cn。

通信作者: 陶于兵(1979—), 男, 安徽淮南人, 西安交通大学教授, 主要从事相变控温技术与电力系统热管理研究, E-mail: yubingao@mail.xjtu.edu.cn。

工神经网络 (artificial neural network, ANN) 构建了不同结构热电元件安全运行温度的预测模型, 通过多目标遗传算法 (multi-objective genetic algorithm, MOGA) 优化了极限发电性能。本文研究可为空间应用的热电发电装置提供设计参考依据。

## 1 物理及数学模型

### 1.1 物理模型

本文利用 COMSOL 软件建立了热电元件的三维稳态热-电-力耦合模型。模型结构如图 1(a) 和图

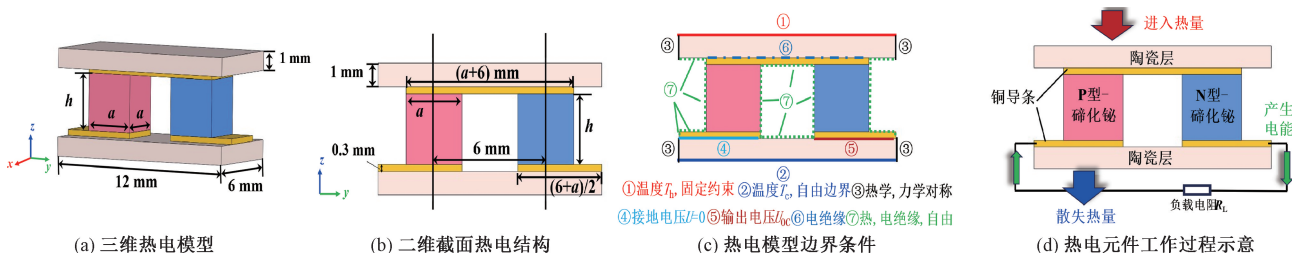


图 1 热电元件模型

Figure 1 The model of thermoelectric element

表 1 热电元件结构和操作参数

Table 1 Structure and operation parameters of thermoelectric elements

参数	取值	参考文献
热电腿宽度 $a/\text{mm}$	1-4	[18]
热电腿高度 $h/\text{mm}$	1-4	[18]
负载电阻 $R_L/\Omega$	0.016	[19, 20]
热电热端温度 $T_h/\text{K}$	316.15	[21]
热电冷端温度 $T_c/\text{K}$	178-298	[22]
陶瓷层抗拉极限/ $\text{MPa}$	300	/
铜导电条屈服极限/ $\text{MPa}$	70	[19]
$\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 屈服极限/ $\text{MPa}$	112	[19]

### 1.2 数学模型

(1) 热-电模型。热电元件中的陶瓷层为热的良导体, 电的绝缘体, 因此只遵守导热微分方程

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T = 0. \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $\text{W}/\text{m}^3$ ;  $c_p$  为比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $k$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

对于铜导电条和  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  热电腿, 同时导电和导热, 其热流和电流守恒方程分别为:

$$\nabla \mathbf{q}_c = \nabla(-k \nabla T + P_e \mathbf{J}) = Q_J = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}. \quad (2)$$

$$\nabla \mathbf{J} = \frac{\partial \rho_c}{\partial t} = 0. \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{q}_c$  为输入热流矢量,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $P_e$  为帕尔贴系数,  $\text{V}$ ;  $\mathbf{J}$  为电流密度矢量,  $\text{A}/\text{m}^2$ ;  $Q_J$  为焦耳热,  $\text{V}/\text{m}^3$ ;  $\mathbf{E}$  为电场强度,  $\text{V}/\text{m}$ ;  $\rho_c$  为电荷密度,  $\text{C}/\text{m}^3$ 。帕尔贴系

数  $P_e$  和电流密度  $\mathbf{J}$  可表示为:

$$P_e = ST. \quad (4)$$

$$\mathbf{J} = -\kappa \nabla V - \kappa S \nabla T. \quad (5)$$

式中:  $S$  为塞贝克系数,  $\text{V}/\text{K}$ ;  $\kappa$  为电导率,  $\text{S}/\text{m}$ ;  $U$  为电压,  $\text{V}$ 。

(2) 力学模型。描述热电元件力学行为的是位移-应变方程<sup>[24]</sup>:

$$\bar{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad \bar{\varepsilon}_{yy} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}, \quad \bar{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}. \quad (6)$$

$$\bar{\varepsilon}_{xy} = 0.5 \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \quad \bar{\varepsilon}_{yz} = 0.5 \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right),$$

$$\bar{\varepsilon}_{xz} = 0.5 \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right). \quad (7)$$

式中:  $\bar{\varepsilon}_{xx}, \bar{\varepsilon}_{yy}, \bar{\varepsilon}_{zz}, \bar{\varepsilon}_{xy}, \bar{\varepsilon}_{yz}, \bar{\varepsilon}_{xz}$  分别为热电元件不同方向的应变, 1;  $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}, \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}, \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}, \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}, \frac{\partial \bar{w}}{\partial y}, \frac{\partial \bar{v}}{\partial z}, \frac{\partial \bar{w}}{\partial x}, \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$  分别为不同方向的位移, 1。

应力和应变的关系由无量纲形式的雅可比矩阵给出<sup>[24]</sup>:

$$\begin{pmatrix} \bar{\sigma}_{xx} \\ \bar{\sigma}_{yy} \\ \bar{\sigma}_{zz} \\ \bar{\sigma}_{yz} \\ \bar{\sigma}_{zx} \\ \bar{\sigma}_{xy} \end{pmatrix} = \frac{\bar{E}}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

表 2 热电元件物性参数

Table 2 Physical properties of thermoelectric elements

物性	陶瓷层 (99.5% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	铜导条	p-Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	n-Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	参考 文献
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3 970	8 930	7 740	7 740	[19, 23]
导热系数 $k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	25	385	$-1.151\text{e-}1+(4.475\text{e-}2) \cdot T-(2.597\text{e-}4) \cdot T^2+(5.448\text{e-}7) \cdot T^3-(3.676\text{e-}10) \cdot T^4$	$9.551-(5.394\text{e-}2) \cdot T+(1.123\text{e-}4) \cdot T^2-(6.667\text{e-}8) \cdot T^3$	[19, 20]
比热容 $c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	800	386	154.4	154.4	[19, 23]
电导率 $\kappa/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	1.00e-12	5.90e7	$1/(2.728\text{e-}5-(2.254\text{e-}7) \cdot T+(7.276\text{e-}10) \cdot T^2-(6.251\text{e-}13) \cdot T^3)$	$1/(1.167\text{e-}5-(9.314\text{e-}8) \cdot T+(3.786\text{e-}10) \cdot T^2-(3.583\text{e-}13) \cdot T^3)$	[19, 20]
塞贝克系数 $S/(\text{V} \cdot \text{K}^{-1})$	0	6.50e-6	$1.483\text{e-}3-(1.391\text{e-}5) \cdot T+(5.396\text{e-}8) \cdot T^2-(8.809\text{e-}11) \cdot T^3+(5.062\text{e-}14) \cdot T^4$	$-1.518\text{e-}2+(1.762\text{e-}4) \cdot T-(8.143\text{e-}7) \cdot T^2+(1.849\text{e-}9) \cdot T^3-(2.065\text{e-}12) \cdot T^4+(9.099\text{e-}16) \cdot T^5$	[19, 20]
杨氏模量 $\bar{E}/\text{GPa}$	340	120	62	62	[19]
热膨胀系数 $\alpha/(\text{K}^{-1})$	0.68e-5	1.70e-5	1.30e-5	1.30e-5	[19, 23]
泊松比 $\nu/1$	0.22	0.30	0.23	0.23	[19]

$$\begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} \bar{\varepsilon}_{xx} \\ \bar{\varepsilon}_{yy} \\ \bar{\varepsilon}_{zz} \\ \bar{\varepsilon}_{yz} \\ \bar{\varepsilon}_{zx} \\ \bar{\varepsilon}_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\bar{\alpha} \bar{E} \bar{T}}{1-2\nu} \quad (8)$$

式中:  $\bar{\sigma}_{xx}, \bar{\sigma}_{yy}, \bar{\sigma}_{zz}, \bar{\sigma}_{yz}, \bar{\sigma}_{zx}, \bar{\sigma}_{xy}$  为不同方向的热应力, MPa;  $\bar{E}$  为杨氏模量, MPa;  $\nu$  为泊松比, 1;  $\bar{\alpha}$  为热膨胀系数, 1/K。

### 1.3 边界条件

对于热场模型, 热端陶瓷的上表面和冷端陶瓷的下表面均为第一类热边界条件, 如图 1(c), 其中热端陶瓷的上表面温度近似为相变材料的相变温度:

$$T_h = 316.15 \text{ K} \quad (9)$$

式中:  $T_h$  为热端温度, K; 而冷端陶瓷的下表面温度  $T_c$  在研究中作变量处理。

热电元件的其他边界为绝热条件:

$$\frac{\partial T(x, y, z)}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{n}$  为表面法线方向矢量。

对于电场模型, 冷端两个铜导条与陶瓷层的接触面为电压边界, 接地或为悬浮电位, 如图 1(c):

$$U = 0, U_{oc} = S\Delta T \quad (11)$$

式中:  $\Delta T$  是施加在热电腿两端的温差, K。

其余表面为电绝缘边界:

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{J}$  为电流密度矢量, A/m<sup>2</sup>;  $\mathbf{n}$  为表面法线矢量。

力学边界条件如图 1(c), 热端陶瓷的上表面为固定约束:

$$\begin{cases} u = 0; \\ v = 0; \\ w = 0. \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向的速度分量。

陶瓷层侧表面以及冷端两个铜导条与陶瓷层侧面共面的侧表面为力学对称边界:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{u}$  为速度矢量, m/s;  $\mathbf{n}$  为表面法向矢量。

其余表面为无约束的力学自由边界。

### 1.4 关键参数定义

定义发电效率  $\eta$  以评价热电元件电输出性能

$$\eta = P/Q_{in} \quad (15)$$

式中:  $\eta$  为发电效率, %;  $Q_{in}$  为进入热流量, W;  $P$  为

输出电功率, W。输出电功率  $P$  计算如下

$$P = I^2 R_L \quad (16)$$

式中:  $I$  为电流, A;  $R_L$  为负载电阻,  $\Omega$ 。

外太空环境下工作的热电元件需考虑发射的重量成本, 定义功率密度  $P_m$  作为权衡发电和成本的指标

$$P_m = P/m \quad (17)$$

式中:  $P_m$  为功率密度, W/kg;  $m$  为热电元件的总质量, kg。

以平均应力  $\bar{\sigma}$  作为各个部件的应力评价指标

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\phi} \int_{\phi} \sigma \, d\phi \quad (18)$$

式中:  $\sigma$  为某点应力, MPa;  $\phi$  为部件体积,  $m^3$ 。

定义在热端温度固定的条件下, 使热电元件中任何一个部件平均应力达到安全极限应力时的热电冷端温度为安全温度  $T_s$ , 采用线性插值计算

$$T_s = T(\bar{\sigma} = \sigma_s) = (T_2 - T_1) \cdot \frac{\sigma_s - \bar{\sigma}_1}{\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_1} + T_1 \quad (19)$$

式中:  $T_s$  为安全温度, K;  $\bar{\sigma}$  为平均应力, MPa;  $\sigma_s$  为任一部件的安全应力极限, MPa;  $T_1$  和  $T_2$  为两个计算点的冷端温度, K;  $\bar{\sigma}_1$  和  $\bar{\sigma}_2$  为两个计算点平均热应力, MPa。

定义当冷端温度为安全温度时, 热电元件发电效率和功率密度分别为极限电效率  $\eta_{lim}$  和极限功率密度  $P_{m,lim}$ :

$$\eta_{lim} = \eta(T = T_s) \quad (20)$$

$$P_{m,lim} = P_m(T = T_s) \quad (21)$$

式中:  $\eta_{lim}$  为极限电效率, %;  $P_{m,lim}$  为极限功率密度, W/kg。

为了保证神经网络变量与响应目标的拟合不受取值范围影响, 对变量和响应目标进行归一化处理

$$X_r = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \quad (22)$$

式中:  $X_r$  为归一化变量或响应目标值;  $X$  为原变量或响应目标值;  $X_{max}$  和  $X_{min}$  分别为原变量或原响应目标的最大与最小值。

## 1.5 模型验证

热电元件热-电-力场耦合模型验证结果如图 2。验证模型参考文献[11], 对于热学模型, 热电元件热端温度的偏差为 0.82%, 如图 2(a); 对于电学模型, 输出功率的偏差为 1.86%, 如图 2(b); 对于力学模型, 热电腿热应力偏差为 1.54% 如图 2(c)。网格无关性验证结果如图 2(d)。当网格数从 67 675 变化到 101 416 时, 热电腿平均温度、输出电压和铜导电条热应力几乎不变。因此网格数 67 675 可以满足精度要求。本文所述安全温度与极限电性能也由

热-电-力三场耦合的热电元件模型计算所得, 因此以上结果说明本文所建的热电模型以及对安全温度和极限电性能的预测结果是准确可靠的。

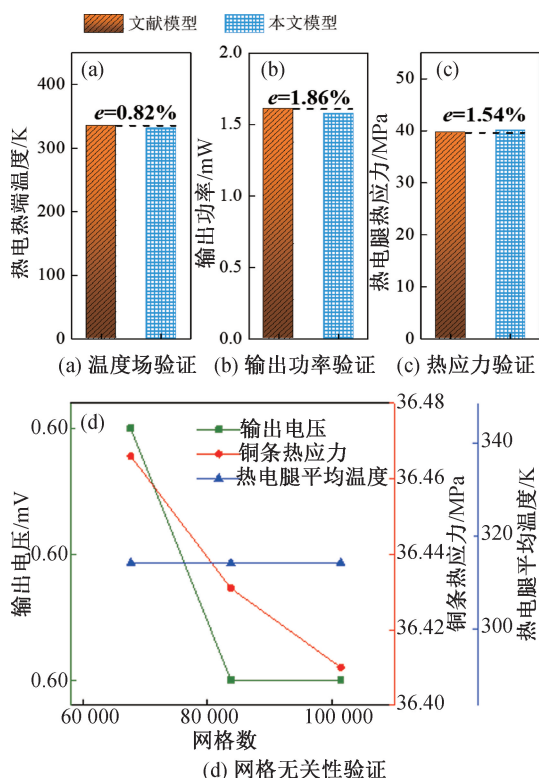


图 2 热电元件模型验证

Figure 2 The model validation results of thermoelectric element

## 2 结果与讨论

### 2.1 安全温度重要性的论证

本节通过对比样例结构 1 ( $a = 1 \text{ mm}$ ,  $h = 1 \text{ mm}$ ) 和 2 ( $a = 4 \text{ mm}$ ,  $h = 4 \text{ mm}$ ) 的性能来说明安全温度对空间热电元件设计的重要性, 结果如图 3。热端温度  $T_h$  恒定时, 随着冷端温度降低, 电效率、功率密度和热应力同时增大。对比样例 1 和 2, 不同的热电腿结构参数, 安全温度和极限电性能也不同, 如图 3 (a) 和 (b), 样例 1 和样例 2 的安全温度  $T_s$  相差 36.7 K, 而极限电效率和极限功率密度相差 5.41% 和  $104.16 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。当热电冷端温度低于安全温度时, 铜条热应力超出了安全极限 (70 MPa), 如图 3 (c) 和 (d), 这会对热电元件整体安全造成威胁。因此, 热电元件的冷端温度不能低于其安全温度。若能提前知晓不同热电腿结构的安全温度将为设计过程提供极大便利。如何提前预测不同结构热电腿对应的安全温度和极限电性能成为了亟待解决的重要问题。

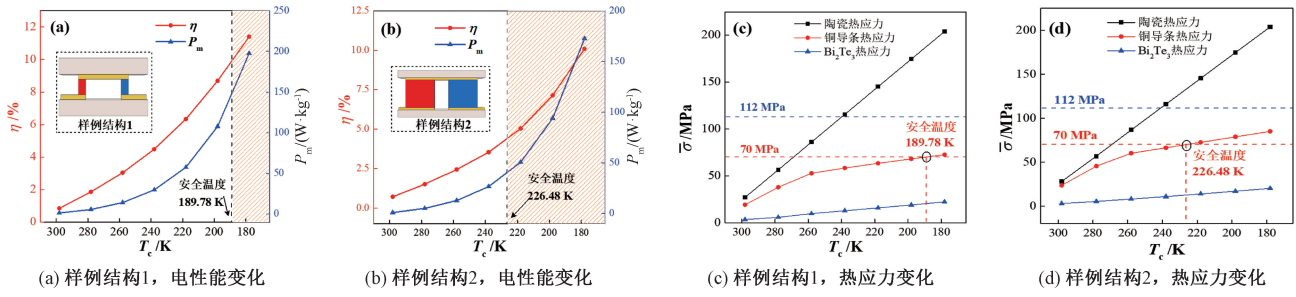


图3 热电元件电性能和热应力随热电冷端温度的变化

Figure 3 The variation of electrical performance and thermal stress with cold side temperature of TE

### 2.2 热电腿结构对安全温度和极限电性能的影响

为了预测不同结构热电元件的安全温度和对应的极限电性能,需要分析热电腿结构参数的影响以确定预测变量。热电腿宽  $a$  的影响如图 4。随着  $a$  的增大,安全温度升高,  $a = 4$  mm 时安全温度 (224.61 K) 比  $a = 1$  mm 时 (191.9 K) 增大了 32.71 K。这导致极限电效率和极限功率密度的改变。极限功率密度随  $a$  的增加存在极大值 105.80 W/kg ( $a = 2$  mm)。随着热电腿变宽后其热阻减小,进入热电腿的热流量增大,因此发电功率有所增大,但是随着  $a$  的继续增大,安全温度的上升,热电两端安全温差减小,极限发电效率减小,同时  $a$  增大也会导致热电腿质量增大,因此极限发电功率和功率密度减小。

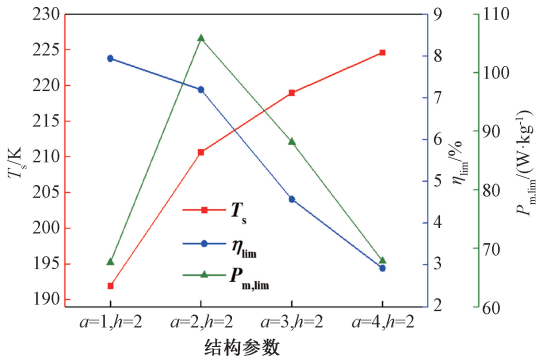


图4 热电腿宽度( $a$ )对安全温度与极限电性能的影响

Figure 4 The effects of width of TE legs ( $a$ ) on safety temperature and electrical performance limit

图 5 是热电腿高  $h$  的影响结果。随着  $h$  增加,安全温度变化不大。极限电效率随着  $h$  的增加存在极大值 7.45%。起初随着  $h$  的增加,热电腿热阻增加,进入热电腿的热流量减少,而电功率的减少速率没有进入热流的减少速率快,因此电效率升高。而随着  $h$  继续增加,安全温度升高,电功率减少的速率更快超过了进入热流的减小速率,电效率下降。极限功率密度随着  $h$  的增加而下降,一方面是由于进入的热流减少导致电功率的减少,另一方面是由于  $h$  的增大导致质量的增加。

以上结果表明,热电腿宽度  $a$  和高度  $h$ ,不仅影

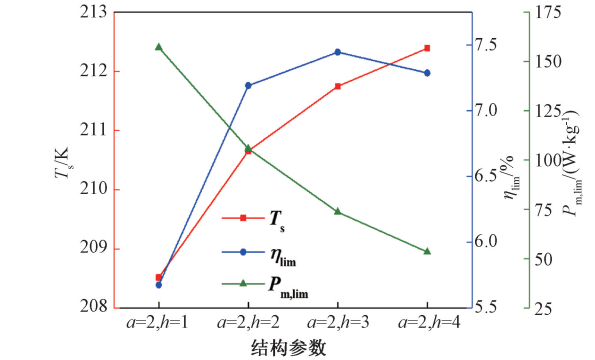


图5 热电腿高度( $h$ )对安全温度与极限电性能的影响

Figure 5 The effects of height of TE legs ( $h$ ) on safety temperature and electrical performance limit

响安全温度,也显著影响极限电效率和极限功率密度,在应用中需要进行优化设计。

### 2.3 热电元件安全温度预测与极限电性能优化

以热电腿宽度  $a$  和高度  $h$  作为设计参数,采用拉丁超立方采样法 (latin hypercube sampling, LHS)<sup>[25]</sup> 对  $a$  和  $h$  采样 30 组,  $a$  和  $h$  的范围见表 1。另外加上样例 1 和 2,以及 2.2 节变参数分析的 8 个参数组合,构成数据样本,其中极限电效率和极限功率密度最大的两个样例如表 3。根据样本数据,利用人工神经网络方法 (artificial neural network, ANN) 对热电结构参数与安全温度、发电性能之间的关系进行拟合。拟合后,安全温度、极限电效率和极限功率密度的拟合优度<sup>[26]</sup> 分别为 0.999 9、0.999 2 和 0.999 7,说明映射函数准确性良好。为了获得更好的发电性能,利用多目标遗传算法优化得到帕累托解集 (pareto front),如表 4 所示。

表3 热电结构参数采样中的两个样例

Table 3 Two samples of TE structure parameters sampling

热电参数	$\eta_{lim}$ 最大的样本	$P_{m,lim}$ 最大的样本
$a$ /mm	1.00	2.00
$h$ /mm	1.00	1.00
$T_s$ /K	189.78	208.52
$\eta_{lim}$ /%	9.81	5.68
$P_{m,lim}$ /(W·kg <sup>-1</sup> )	144.68	157.13

表 4 优化后热电设计参数 Pareto 最优解集

Table 4 Pareto front of TE design parameters after optimization

序号	$a/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$T_s/\text{K}$	$\eta_{\text{lim}}/\%$	$P_{\text{m,lim}}/(\text{W} \cdot \text{kg}^{-1})$	序号	$a/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$T_s/\text{K}$	$\eta_{\text{lim}}/\%$	$P_{\text{m,lim}}/(\text{W} \cdot \text{kg}^{-1})$
1	1.04	1.02	190.96	9.62	145.56	9	1.24	1.02	196.08	9.00	156.24
2	1.53	1.01	202.36	7.85	162.50	10	1.47	1.01	201.29	8.10	162.12
3	1.14	1.02	193.68	9.30	151.75	11	1.19	1.02	194.86	9.15	153.61
4	1.06	1.02	191.44	9.57	146.88	12	1.51	1.01	202.05	7.93	162.29
5	1.42	1.01	200.31	8.31	161.43	13	1.39	1.01	199.51	8.46	160.88
6	1.45	1.01	200.88	8.19	161.86	14	1.31	1.01	197.80	8.75	159.00
7	1.41	1.02	200.06	8.36	160.90	15	1.12	1.02	193.09	9.37	150.64
8	1.08	1.02	191.96	9.51	148.16	16	1.17	1.02	194.40	9.21	152.76

表 4 中 3 号优化结构发电性能较为均衡,因此以 3 号优化结构( $a=1.14 \text{ mm}$ ,  $h=1.02 \text{ mm}$ )为例进行对比验证。选择样例 1(样本中具有最大极限电效率,见表 3),样例 2 和表 3 中极限功率密度最大的结构参数组合( $a=2 \text{ mm}$ ,  $h=1 \text{ mm}$ )作为对比结构,对比结果如图 6。图中计算值为各个结构在 COMSOL 软件中的实际计算结果,预测值为神经网络的输出结果。以计算值来说明,在 4 个对比结构中,样例 2 的极限电效率(4.40%)和极限功率密度(40.52 W/kg)偏低。对于  $a=2 \text{ mm}$ ,  $h=1 \text{ mm}$  的结构,其极限电效率较低,仅有 5.69%。样例 1 的极限

电效率最高(9.81%),但是极限功率密度(144.68 W/kg)却比  $a=2 \text{ mm}$ ,  $h=1 \text{ mm}$  的结构和优化结构 3 都要低。优化结构 3 的极限电效率较高为 9.48%,虽然比样例 1 略低,但是其极限功率密度(153.35 W/kg)比样例 1 高 8.67 W/kg。因此综合考虑发电性能,优化结构 3 更具优势。此外,各指标计算值与预测值偏差均较小,例如 3 号优化结构的安全温度  $T_s$ ,极限电效率  $\eta_{\text{lim}}$  和极限功率密度  $P_{\text{m,lim}}$  的相对偏差分别为  $3.56 \times 10^{-4} \%$ , 1.83% 和 1.05%,再次验证了本文所得性能预测模型的准确预测能力。

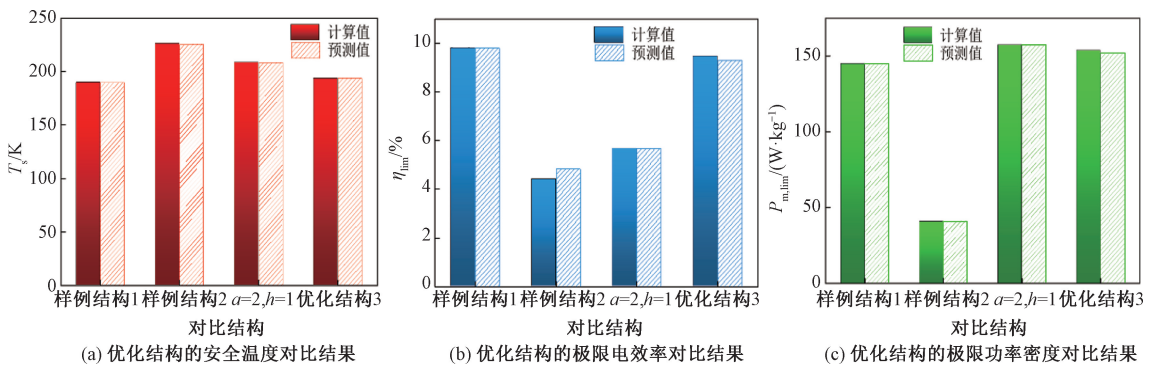


图 6 优化性能对比结果

Figure 6 Optimized performance comparison results

### 3 结论

本文建立了空间应用的热电元件热-电-力多场耦合模型,以构建安全运行温度的预测模型和优化极限发电性能。通过模拟计算,具体结论如下:

1) 热电元件热端温度恒定时,降低冷端温度能显著提升发电效率和功率密度,但也会明显增大热应力。当冷端温度低于安全温度时,热电元件热应力超出安全极限,此时虽然理论上发电性能更好,但实际却因应力过大导致元件变形损坏无法正常工作。因此冷端温度不能低于安全温度。

2) 不同热电腿结构的安全温度不同,对应的极限电性能也不同。热电腿宽度和高度对安全温度、极限电效率和极限功率密度均有明显影响,需作为热电元件性能预测与优化的设计变量。

3) 所构建的热电腿结构到安全温度、极限电效率和极限功率密度的神经网络预测模型准确性良好。预测值与计算值偏差较小。

4) 优化后的热电腿结构在维持较低的安全温度(193.68 K)和较高的极限电效率(9.48%)的同时,还能具有较高的极限功率密度(153.35 W/kg),更具综合性能优势。

## 参考文献:

- [1] Li Guiqiang, Shittu S, Diallo T M O, et al. A review of solar photovoltaic-thermoelectric hybrid system for electricity generation[J]. *Energy*, 2018, 158: 41–58.
- [2] Zhu Hongyu, Su Taichao, Chang Zhiyuan, et al. Preparation and electrical properties of thermoelectric material  $\text{CoSb}_3$  by high-pressure [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2012, 33(1): 43–45. [朱红玉, 宿太超, 常智渊, 等. 热电材料  $\text{CoSb}_3$  的高压制备及电学性质研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2012, 33(1): 43–45.]
- [3] He Jifu, Li Kewen, Jia Lin, et al. Advances in the applications of thermoelectric generators[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121813.
- [4] Zhao Yulong, Fan Yucong, Li Wenjie, et al. Experimental investigation of heat pipe thermoelectric generator[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 252: 115123.
- [5] Xiao Jinsheng, Yang Tianqi, Li Peng, et al. Thermal design and management for performance optimization of solar thermoelectric generator[J]. *Applied Energy*, 2012, 93: 33–38.
- [6] He Hongxi, Xie Yongchuan, Zuo Qingsong, et al. Optimization analysis for thermoelectric performance improvement of biconical segmented annular thermoelectric generator[J]. *Energy*, 2024, 306: 132397.
- [7] Gao Yuanzhi, Chen Bo, Wu Dongxu, et al. Comparative study of various solar power generation systems integrated with nanofluid-flat heat pipe[J]. *Applied Energy*, 2022, 327: 120052.
- [8] Shittu S, Li Guiqiang, Zhao Xudong, et al. High performance and thermal stress analysis of a segmented annular thermoelectric generator[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 184: 180–193.
- [9] Yang Yurong, Wang Shixue, Zhu Yu. Evaluation method for assessing heat transfer enhancement effect on performance improvement of thermoelectric generator systems [J]. *Applied Energy*, 2020, 263: 114688.
- [10] Zhao Huadong, Yang Haonan, Sun Xiashuang, et al. Simulation of thermal layout of multi-TEC thermoelectric cooling module [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2022, 43(4): 30–34. [赵华东, 杨号南, 孙夏爽, 等. 多制冷片热电模组中制冷片热布局仿真研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2022, 43(4): 30–34.]
- [11] Wang Kanning, Yin Ershuai, Long Yingping, et al. Optimization of solar thermoelectric systems operating under non-uniform irradiation[J]. *Energy Reports*, 2025, 13: 1525–1536.
- [12] Lin H, Zhang Xinwen, Liang Yu, et al. Design and optimization of two stage annular thermoelectric generator coupling with high temperature heat pipe application[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 261: 125089.
- [13] Lan Yuncheng, Lu Junhui, Mu Lianbo, et al. The influence of thermoelectric leg and heat exchange structure on the performance of low-temperature thermoelectric power generation system[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2024, 48(5): 954–962. [蓝云成, 鲁军辉, 穆连波, 等. 热电臂与换热结构对低温温差发电系统性能影响[J]. *电源技术*, 2024, 48(5): 954–962.]
- [14] Aljaghtham M. A comparative performance analysis of thermoelectric generators with a novel leg geometries[J]. *Energy Reports*, 2024, 11: 859–876.
- [15] Ge Minghui, Xuan Zhiwei, Zhao Chenyang, et al. Thermoelectric performance and mechanical analysis of inner-arc type leg applied in solar thermoelectric generator[J]. *Solar Energy*, 2023, 263: 111965.
- [16] He Yuan, Yang Chun, Tao Yubing, et al. Structure and operation parameter optimization and performance improvement of thermoelectric generator in outer space[J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 334: 119833.
- [17] Lan Yuncheng, Lu Junhui, Wang Suilin. Multi-objective optimization of a low temperature thermoelectric generation system with variable material properties and air gap heat dissipation based on energy, economic and environmental analysis method[J]. *Energy*, 2025, 330: 136835.
- [18] Cui Tengfei, Xuan Yimin, Li Qiang. Design of a novel concentrating photovoltaic-thermoelectric system incorporated with phase change materials[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 112: 49–60.
- [19] Shittu S, Li Guiqiang, Zhao Xudong, et al. Optimized high performance thermoelectric generator with combined segmented and asymmetrical legs under pulsed heat input power[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 428: 53–66.
- [20] Shen Zuguo, Liu Xun, Chen Shuai, et al. Theoretical analysis on a segmented annular thermoelectric generator [J]. *Energy*, 2018, 157: 297–313.
- [21] Yu X K, Tao Y B, He Y, et al. Temperature control performance of high thermal conductivity metal foam/paraffin composite phase change material: an experimental study [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 46: 103930.
- [22] Zhang T X. Cosmic microwave background radiation of black hole universe[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2010, 330(1): 157–165.
- [23] Gao Junling, Du Qungui, Zhang Xiaodan, et al. Thermal stress analysis and structure parameter selection for a  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -based thermoelectric module[J]. *Journal of Elec-*

tronic Materials, 2011, 40(5): 884-888.

- [24] 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.
- [25] Zhang Shuangsheng, Qiang Jing, Liu Hanhu, et al. Improved multi-chain DRAM algorithm based on Latin hypercube sampling for inverse problems of underground wa-

ter pollution[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(3): 72-78. [张双圣, 强静, 刘汉湖, 等. 基于拉丁超立方抽样的改进型多链 DRAM 算法求解地下水污染反问题[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(3): 72-78.]

- [26] Baby R, Balaji C. Thermal optimization of PCM based pin fin heat sinks: an experimental study [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 54(1): 65-77.

## Prediction of Operating Temperature and Power Generation Performance Limit with Structure Optimization for Thermoelectric Elements in Outer Space

HE Yuan<sup>1</sup>, DONG Zhenjiao<sup>2</sup>, JIA Haoyang<sup>1</sup>, TAO Yubing<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Thermo-fluid Science and Engineering, Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Future Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In response to the lack of effective models for safety and limit performance prediction of thermoelectric devices in outer space, a thermal-electrical-mechanical multi-field coupling model for space thermoelectric elements is established. The power generation efficiency and thermal stress of thermoelectric elements under two kinds of leg structures (width  $a=1$  mm, height  $h=1$  mm and width  $a=4$  mm, height  $h=4$  mm) within cold-side temperature range of 178~298 K are compared, demonstrating the importance of safety temperature and its prediction for enhancing thermoelectric efficiency. The influence of variation of thermoelectric leg width and height within 1~4 mm on the safety temperature, the corresponding limit electrical efficiency and limit power density is analyzed. By collecting Latin Hypercube Samples and employing an artificial neural network, prediction models are constructed to accurately predict the safety temperature, limit electrical efficiency, and limit power density based on variations in the width and height of the thermoelectric legs. Using a multi-objective genetic algorithm, the optimal solution set including thermoelectric leg width and height balancing the limit electrical efficiency and limit power density is derived. Among these, the configuration with the leg width  $a=1.14$  mm and leg height  $h=1.02$  mm achieves a high limit electrical efficiency (9.48%) and a high limit power density (153.35 W/kg). The prediction model that incorporates both safety temperature and limit electrical performance contributes to the optimization design and performance improvement of thermoelectric elements.

**Keywords:** thermoelectric elements; safety temperature; limit electrical performance; structure optimization; performance prediction