

基于遗传算法的温差发电系统模块布局优化设计

冯一芒¹, 孔德奎¹, 毕世权², 崔 浩², 张永存^{*1}

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024; 2. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

摘要: 温差发电在航空航天等极端环境供电和汽车余热利用等领域具有重要的应用, 然而低的热电转换效率严重限制了其发展。目前主要从提高材料本身性能和优化热电模块结构两方面提升性能。本文从整体出发, 建立了基于遗传算法的温差发电系统模块布局优化设计方法。融合已有的解析模型, 发展了能够快速获得系统电输出功率的性能评估方法; 通过遗传算法, 以废热气体的热电转换为例, 实现了温差发电系统热电模块的布局(数量与位置)设计; 讨论了废热气体流动速度和温度的影响规律。研究表明, 相比于全覆盖热电模块设计方案, 优化的布局方案以更少的热电模块获得了更高的电输出功率, 从而证实并非布置的热电模块越多越好, 存在最优的热电模块数量和位置。该研究为提升温差发电系统输出功率提供了一种可能的途径。

关键词: 温差发电; 遗传算法; 布局优化; 热电模块

中图分类号: O224

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2022)02-0161-09

1 引言

温差发电是一种利用功能材料的热电特性直接将热能转化为电能的技术, 具有结构紧凑、无运动部件、使用寿命长、无排放物和无需维护等优点^[1]。温差发电(核能提供热源)成为星际探测任务和海底微波中继站等极端环境下供电的唯一选择^[2-4], 同时在航空和汽车等运载装备燃料废热利用中也具有非常好的应用前景^[5-7]。Sajid 等^[8]统计了不同冷却技术条件下 23 种温差发电系统的热电转换效率, 平均仅为 3.52%, 最低不足 1%。因此, 低的热电转换效率成为制约温差发电系统应用的主要因素, 如何提升其热电转换效率成为该领域的研究热点。

提升温差发电系统热电转换效率最直接的方法是研发具有更高热电转换效率的材料。热电材料的能量转换效率与其无量纲热电优值 ZT 呈递增关系, 具有高的 ZT 值才能具有高的热电转换效率。热电材料从发现至今已有 200 多年的历史, 发现具有更高热电转换效率的材料不容易。虽然实验室不断有 ZT 值相对较高的热电材料报道^[9,10], 但若要工程应用仍面临诸多极具挑战性的问题。因此, 如何更合理地使用现有热电材料成为提升整体

热电转换效率的另一主要途径。该方面的研究主要集中于两个方面, 一是在给定热电材料的条件下, 优化冷热两端的传热, 调节冷热两端的温度, 增大冷热两端的温差, 从而提升温差发电模块的热电转换效率^[11,12]; 二是优化发电模块的几何参数和使用材料。已有大量的研究表明温差发电单元个数、热电臂的长度和横截面积等几何参数对热电转换功率和效率有重要影响^[13,14]。材料的热电优值 ZT 对温度变化非常敏感, 相同材料在不同温度区间, ZT 值有较大的不同^[15]。目前已经发展了多种优化方法, 用于优化热电模块的几何参数和不同温区的热电材料在热电臂高度方向的布置^[16,17], 从而发挥每种材料的最大热电转换能力, 提升温差发电模块的热电转换效率。然而, 以上研究多集中于单一模块的优化设计。

单个温差发电模块的发电量很小, 尺寸也很小。实际温差发电系统往往由多个温差发电模块组成。同时, 热源区域的温度(热流)也往往是不均匀的^[18]。在非均匀热源场中合理布置热电模块至关重要。如 Weng 等^[19]通过对汽车废热回收系统数值仿真研究发现, 若排气管道下游去掉部分发电模块, 整体发电量不降反增。Favarel 等^[20]通过实验对比了温差发电系统三种热电模块布局方式在不同冷热端传热条件下的性能, 某些情况下 8 个热电模块的发电量优于 16 个模块的发电量。Huang 等^[21]在温差发电系统中对比分析了不同分布的热电模块, 证实了不同布局设计对发电功率有显著的

收稿日期: 2021-01-22; 修改稿收到日期: 2021-02-19.

基金项目: 国家自然科学基金(11972105; U1808215; 11821202);

中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

作者简介: 张永存*(1976-), 男, 博士, 教授, 博士生导师
(E-mail: ycchang@dlut.edu.cn).

影响。以上研究局限于对已有设计方案的对比分析,缺乏系统的优化方法进行自动寻优设计。

实现温差发电系统模块布局优化,需要一个快速性能分析方法和针对问题模型的优化方法。温差发电系统的性能分析涉及冷热两端的传热分析以及发电模块的热电耦合分析,计算费用较高,且难以获得布局设计参数的解析敏感度信息,基于梯度的优化方法难以应用。文献[22]建立了温差发电系统数值计算模型,并基于遗传算法用于优化4个热电模块的大小与材料选择,然而却不能考虑热电模块布局位置的影响。

鉴于此,本文首先简化温差发电系统物理模型,对模块布局优化问题进行描述;其次,发展数值分析方法,该方法可以快速预测温差发电系统的性能,并能够充分体现出热电模块布局对系统的影响;然后,基于遗传算法对温差发电系统中的热电模块布局自动寻优,找到在给定热电模块尺寸和冷热端条件下的最优布局形式,使系统输出最大的发电功率;最后,讨论热端废热气体流速和温度对布局优化设计的影响,并对结果进行详细分析,相关研究可以为温差发电系统设计提供指导。

2 温差发电系统模块布局 优化设计问题描述

温差发电系统的结构如图1所示。为实现热电转换,热电模块通常布置于含有大量热量输出的热交换器表面(称为热端),用于吸收传递出来的热量。为增大热电模块两端的温差,提高热电转换效率,在热电模块另一端(称为冷端)连接散热器,降低其温度。热电模块之间通过电连接成为一个整体,并连接外部电阻负载,形成完整的回路。调节外部电阻负载的大小,可以调节流经每个热电模块的电流,实现最高的输出电功率。

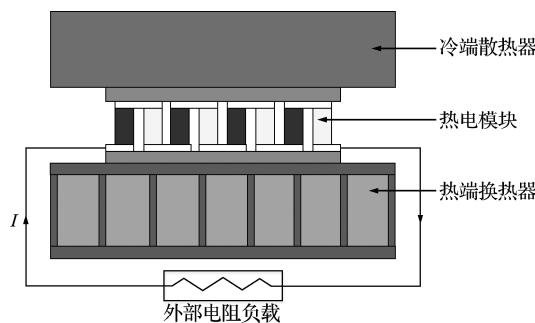


图1 温差发电系统结构
Fig.1 Thermoelectric power system

本文主要目的不是提出一个具体温差发电系统的设计,而是建立热电模块布局设计方法,讨论

热电模块布局对发电功率和效率的影响规律。为此,假设冷端有足够的散热能力,确保冷端保持为恒定的温度 T_c 。温差发电系统的热端为铝制的热交换器,内部为多个流道,物理模型是如图2(a)所示的结构周期模型。换热器可近似视为沿宽度方向的周期性结构,于是采用图2(b)所示单通道部分作为分析模型以提高计算效率。分析单胞的长为 L ,宽为 W ,高为 H ,上下壁厚为 t_1 ,左右壁厚为 t_2 。高温气体的入口温度为 T_o ,速度为 u_o ,且流速较小,处于层流状态。

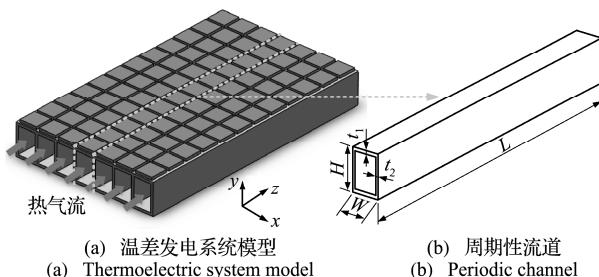


图2 模型简化策略
Fig.2 Model simplification strategy

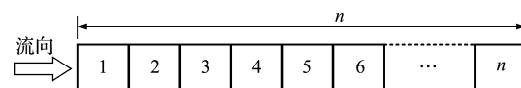


图3 布局优化问题设计变量
Fig.3 Layout optimization problem design variable

在热交换器外表面沿长度方向上最多可布置 n 个热电模块,且各模块间紧密排列。此外,所有热电模块均采用串联的形式连接。于是温差发电系统模块布局优化问题的设计变量即表示为各热电模块的有无,如图3所示。对于温差发电系统,通常希望其可以输出更多电能,所以以温差发电系统输出功率为目标函数,建立问题的优化模型,其数学列式为

$$\text{Find: } x_i \quad (i = 1, \dots, n)$$

$$\max: P(x) = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

$$\text{s.t.: } x_i = 0 \text{ or } 1$$

式中 x 为所有设计变量的集合。当 $x_i = 1$ 时,该区域布置热电模块;当 $x_i = 0$ 时,该区域没有热电模块。这里不考虑热电模块的数量约束,通过优化过程自动寻找最佳的热电模块数量。 P_i 为每个热电模块的输出功率。

3 快速性能评估方法

针对上述的温差发电系统,数值计算主要包括两个方面,一是热交换器的性能分析,其本质是流

固耦合的传热问题;二是热电模块的发电功率和效率的计算,涉及温度场和电场的耦合。热交换器是发电模块的热端,其温度分布直接决定输入到发电模块的热量,而发电模块的热量转换效率也直接影响热端的温度场。因此,这两个方面也深度耦合。直接进行详细的数值分析,会导致计算量过大,优化难以执行。

为减少计算量,提高性能评估效率,本文采用已经广泛应用的等效网络热阻模型^[23-25]计算热电模块的发电功率和效率,并将获得的热电模块热端能量输入作为热交换器的边界条件进一步迭代计算。

3.1 控制方程

换热器的废热气体设置为定常弱可压缩流动,在壁面处无滑移且不考虑辐射换热。于是在流体域遵循的连续方程、动量方程和能量守恒方程分别为

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \\ &\quad \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}] + \mathbf{F} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (4)$$

式中 \mathbf{u} 为速度向量, ρ 为流体密度, p 为流体压力, μ 为动力粘度, \mathbf{F} 为体积力矢量, T 为绝对温度, λ 为导热系数, C_p 为恒压比热容。

对于固体区域则只需满足能量平衡方程

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = 0 \quad (5)$$

在换热器外壁面的绝热边界和对称边界上均满足

$$-\lambda \partial T / \partial n = 0 \quad (6)$$

在换热器与布置热电模块的接触面上,传热可表示为

$$-\lambda \partial T / \partial n = q \quad (7)$$

式中 q 为热流密度,表示热电模块从换热器吸收的热量。

3.2 热电转换计算

热电模块由陶瓷板、铜电极和热电臂构成,其中 $p-n$ 型热电臂由不同掺杂的半导体材料制成,构成一对热电偶,如图 4(a) 所示。本文采用等效的热阻网络模型计算热电模块发电量,如图 4(b) 所示。该方法基于如下假设,(1) 热电模块各部分间的接触热阻和接触电阻忽略不计;(2) 由于铜电极具有相

对较高的热导率和较薄的厚度,其热阻较小,假设热电臂端部温度等于铜电极外侧温度;(3) 忽略模块内部气隙的热传导与热辐射;(4) 热电臂的材料属性随高度方向不变;(5) 汤姆逊效应在热电能量转换过程中产生的贡献较小,于是忽略其影响^[26]。

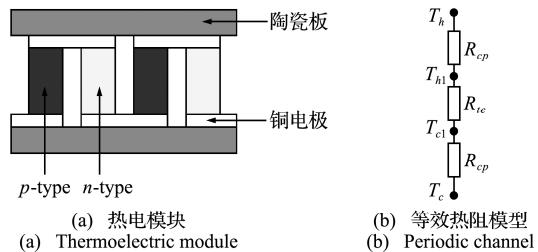


Fig. 4 Simplified thermoelectric module model

根据热阻法可得

$$T_{h1} = T_h - (T_h - T_c)R_{cp}/(2R_{cp} + R_{te}) \quad (8)$$

$$T_{c1} = T_c + (T_h - T_c)R_{cp}/(2R_{cp} + R_{te}) \quad (9)$$

式中 T_h 和 T_c 为两陶瓷板外侧温度, T_{h1} 和 T_{c1} 为两陶瓷板内侧温度, R_{cp} 为陶瓷板热阻, R_{te} 为铜电极和热电臂的热阻, R_{in} 为热电臂的电阻,可以分别表示为

$$R_{cp} = \delta_{cp}/(\lambda_{cp} A_{cp}) \quad (10)$$

$$R_{te} = 2R_{co} + R_{leg} = \frac{2\delta_{co}}{\lambda_{co} N A_{co}} + \frac{\delta_{leg}}{N A_{leg} (\lambda_p + \lambda_n)} \quad (11)$$

$$R_{in} = N(\sigma_p^{-1} + \sigma_n^{-1})\delta_{leg}/A_{leg} \quad (12)$$

式中 δ 和 A 分别为厚度与横截面积。计算时考虑热电材料属性的温度相关性,包括塞贝克系数 $\alpha_{p,n}(T)$ 、导热系数 $\lambda_{p,n}(T)$ 和电阻率 $\sigma_{p,n}^{-1}(T)$,其中温度取热电臂两端的平均值 $T = (T_{h1} + T_{c1})/2$,下角标 p 和 n 分别为 p 型和 n 型热电臂。 N 为热电模块中热电偶对数。

参考标准商业 Bi_2Ti_3 热电模块的材料与几何参数列入表 1,其横截面积为 s_0 ,包含 $N_0 = 127$ 对热电偶。于是按比例计算,本文算例中横截面积为 s 的热电模块中热电偶对数即为 $N = sN_0/s_0$ 。

在热电模块的热端与换热器的接触面上,产生的热包括傅立叶热、珀耳帖热和焦耳热。因此,其吸收的热量可以表示为

表 1 参考热电模块几何与材料参数^[25]

Tab. 1 Reference thermoelectric module geometry and material parameters^[25]

名称	塞贝克系数/ $\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$	电阻率/ $10^{-5}\Omega\cdot\text{m}$	热导率/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	尺寸/mm
陶瓷板			18	$40 \times 40 \times 0.8$
铜电极		1.75×10^{-3}	387.6	$3.8 \times 1.4 \times 0.3$
p 型热电臂	$-0.00424T^2 + 3.01636T - 305.16$	$-1.3348 \times 10^{-5}T^2 + 0.01748T - 2.9564$	$4.8482 \times 10^{-5}T^2 - 0.0322T + 6.949$	$1.4 \times 1.4 \times 1.6$
n 型热电臂	$0.00203T^2 - 1.40396T + 23.98$	$-1.6384 \times 10^{-5}T^2 + 0.01681T - 2.61$	$3.07 \times 10^{-5}T^2 - 0.02031T + 4.722$	$1.4 \times 1.4 \times 1.6$

$$Q_h = N(\alpha_p - \alpha_n)IT_{h1} + \frac{T_{h1} - T_{c1}}{R_{te}} - \frac{1}{2}I^2R_{in} \quad (13)$$

于是得到热流密度为

$$q = Q_h/s \quad (14)$$

热流密度将作为边界条件施加到换热器表面,其大小与所在位置的未知变量 T 相关。

温差发电系统内外电阻匹配(即内外电阻相等)时,存在最佳的回路电流为

$$I = \sum_{i=1}^n N(\alpha_p - \alpha_n)(T_{h1} - T_{c1}) / \left(2 \sum_{i=1}^n R_{in}\right) \quad (15)$$

计算每个热电模块的电功率为

$$P = N(\alpha_p - \alpha_n)I(T_{h1} - T_{c1}) - I^2R_{in} \quad (16)$$

于是热电模块的能量转换效率为

$$\eta = P/Q_h \quad (17)$$

值得注意的是,式(15)中,由于热电臂两端的温度 T_{h1} 和 T_{c1} 是未知的,无法直接确定电流。本文采用迭代法算出最优的电流,详细的计算流程在第 4 节详细介绍。

3.3 有限元模型设置

在有限元软件中建立数值计算模型,详细描述如下。

(1) 边界条件。对称面设置为对称边界条件,通过调用函数在上表面施加热流密度边界条件。忽略下表面与周围环境的自然对流换热,施加绝热边界条件。出口设置为零压力边界条件,计算域的入口设置为法向速度边界条件,如图 5 所示。

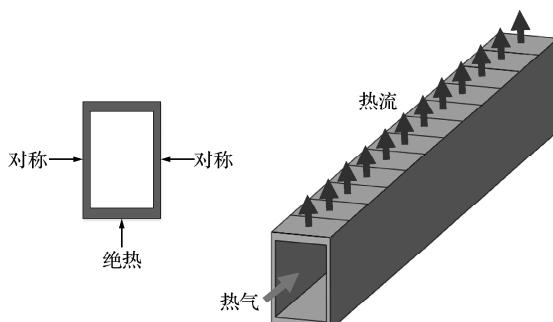


图 5 数值仿真模型

Fig. 5 Numerical simulation model

(2) 网格划分。对于换热器有限元模型,采用属于结构化网格的全六面体单元来离散流体域和固体域。生成靠近壁面的流体域网格以解决边界层问题。使用四种不同数量的网格单元来检查网格依赖性,表 2 列出了预测的各表面平均温度,结果表明,对于最后两种网格,预测值的最大差值在 0.1% 以内。考虑到优化算法需要多次迭代调用有限元计算,因此选择第三种网格划分进行后续的计算以保证计算效率,计算网格如图 6 所示。

表 2 不同网格划分时各段表面平均温度
Tab. 2 Average surface temperature of each segment in different meshes

单元总数	5940	7020	11520	16200
\bar{T}_1/K	406.5561	405.9535	405.3053	405.0270
\bar{T}_2/K	398.1066	397.8930	397.6774	397.4470
\bar{T}_3/K	389.6793	389.7047	389.7340	389.5563
\bar{T}_4/K	381.9928	382.1576	382.3312	382.1959
\bar{T}_5/K	375.1637	375.4122	375.6735	375.5717
\bar{T}_6/K	369.2079	369.5064	369.8202	369.7451
\bar{T}_7/K	364.1099	364.4369	364.7801	364.7264
\bar{T}_8/K	359.8466	360.1883	360.5455	360.5091
\bar{T}_9/K	356.4004	356.7485	357.1094	357.0867
\bar{T}_{10}/K	353.7680	354.1178	354.4765	354.4641
\bar{T}_{11}/K	351.9672	352.3163	352.6702	352.6648
\bar{T}_{12}/K	351.0401	351.3882	351.7379	351.7364

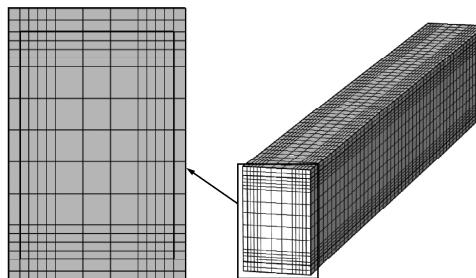


图 6 模型的计算网格
Fig. 6 Meshes of the structure

4 优化计算流程

采用遗传算法^[27,28]对式(1)的热电模块布局优化问题进行求解。整个优化过程是在 Matlab 和 Comsol 的交互环境下进行的。Matlab 控制整个优化流程,而 Comsol 仅提供模型的单次温度场分析结果。整个算法包括两层迭代循环,外循环为基于遗传算法的温差发电模块的布局优化,如图 7 所示;内循环为温差发电模块的性能分析评估,目的是获得当前布局下最高的系统输出电功率,如图 8 所示。

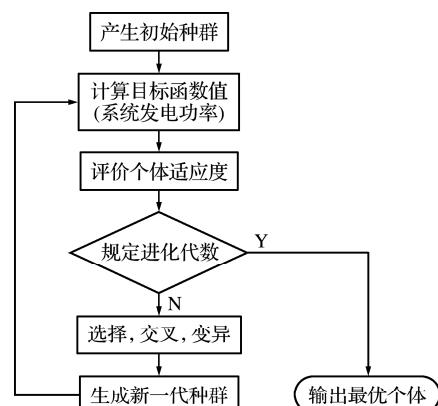


图 7 遗传算法优化流程
Fig. 7 Genetic algorithm optimization process

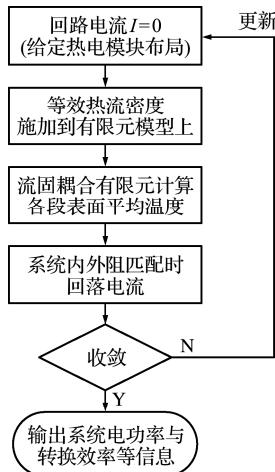


图8 性能快速分析方法迭代流程

Fig. 8 Iterative process for rapid performance analysis methods

外部迭代循环的计算流程如下,首先,由遗传算法给出初始设计变量,即热电模块布局;其次,由快速性能评估方法计算系统总电输出功率,根据目标函数值对个体适应度进行评价;然后,通过三种基本操作(选择、交叉和变异)进化得到更优秀的下一代种群,进行新一轮的评价;最后,在满足规定的进化代数后循环停止,输出最优个体。

内部循环的计算流程如下,首先建立有限元模型,以回路电流 $I = 0$ 作为初始条件;其次,根据热电模块的布局情况,通过调用 Matlab 函数,将式(14)热流密度作为边界条件施加到模型对应位置上,在进行流固耦合传热数值分析得到换热器的温度场后,计算上表面各段的平均温度(即热电模块热端温度) $\bar{T}_i (i = 1, 2, \dots, n)$;再次,根据式(15)计算温差发电系统内外电阻匹配时的回路电流,将得到的结果作为更新的变量重新代入,迭代直至两代电流差值小于 0.01 A 视为收敛;最后,计算热电模块的热通量、能量转换效率和发电功率。

5 结果与讨论

为验证本文提出的布局优化设计方法的有效性,首先通过与热电模块全覆盖(每个位置均布置热电模块)设计方案的对比,证实布局优化设计的效益,并揭示其增强机制;其次,讨论了影响布局优化设计结果的外部可设计条件,如热气体流速和温度,为实际设计提供参考。表 3 给出了模型的计算参数,包括几何参数、热空气流速和温度等。材料选取 Comsol 内置材料库中的铝和空气,且考虑了空气属性的温度相关性。

5.1 结果对比与增强机制分析

设计变量个数直接影响布局优化结果。设计

变量个数越多,设计空间越大,得到的设计结果更优,但计算量也越大。本文的分析是多场耦合问题,并采用遗传算法求解,计算量超大。因此,需要选择可以承受的设计变量个数。遗传算法选取的参数列入表 4,其中六种种群数量对应不同设计变量个数(10~15)。

表 3 计算参数

Tab. 3 Calculated parameters

参数	值
热空气流速 $u_0 / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	5
热空气温度 T_0 / K	700
冷端温度 T_c / K	300
高度 H / mm	24
宽度 W / mm	15
长度 L / mm	180
上下壁厚 t_1 / mm	2
左右壁厚 t_2 / mm	1

表 4 遗传算法参数设置

Tab. 4 Genetic algorithm parameter setting

参数	值
种群数量	25, 27, 30, 34, 42, 50
代数	10
优良数	2
交叉率	0.8

表 5 给出了在不同设计变量个数下热电模块的布局优化结果。浅灰色表示对应位置放置热电模块,深灰色则表示该处未布置热电模块。结果显示,随着设计变量个数的增加,输出功率逐渐增大,且增速基本呈现为下降趋势。那么为了获得接近最优的目标函数值,可适当增加设计变量个数,但同时计算成本会大幅增大。考虑到设计变量个数为 12 和 15 的输出功率相对误差仅为 0.7%,于是本文基于 12 个设计变量进行后续的计算。

表 5 不同设计变量个数下热电模块布局

Tab. 5 Thermoelectric module layout with different number of design variables

设计变量个数	优化布局设计方案	输出功率/W
10		3.1813
11		3.2347
12		3.2358
13		3.2478
14		3.2532
15		3.2583

通常认为热电模块个数越多,发电功率应该越大。为此,本文将布局优化设计方案与全覆盖布局

设计方案进行对比,如图9所示。布局优化后热电模块的数量为5个,分别放置在自左向右1,2,4,7和11号表面,全覆盖方案共12个热电模块。即布局优化结果的模块数量不足全覆盖布局方案的一半。然而,从图10所示的各个热电模块的发电功率来看,全覆盖方案的热电模块最大发热功率为0.39 W,最小的发电功率仅为0.10 W;而优化后的布局设计,虽然数量较少,但每个热电模块的发电功率均较高,最小的发电功率为0.59 W,比全覆盖方案的最大发电模块提高约50%。从总体来看,全覆盖方案的发电功率为2.48 W,优化方案的发电功率为3.24 W,在发电模块数量减少一半的情况下,性能提升了30%。此外,图11为两种设计方案的各热电模块能量转化效率。全覆盖方案的热电模块效率沿流向逐个递减,由最大4.7%降低到最小2.1%。而优化布局设计方案中各热电模块效率均在5.5%左右,和全覆盖方案相比显著提高。这些结果表明,热电模块的布局优化能够获得较大的收益。



图9 两种布局设计方案对比
Fig. 9 A comparison of the two layouts schemes

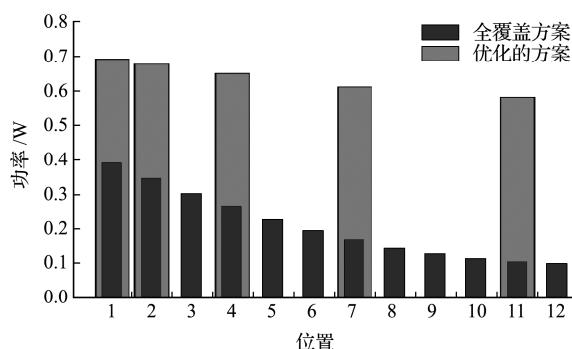


图10 各位置热电模块的发电功率
Fig. 10 Output power of thermoelectric modules at each position

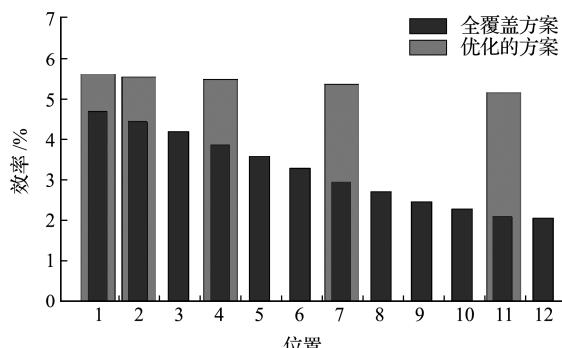


图11 各位置热电模块的效率
Fig. 11 Efficiency of thermoelectric modules at each location

热电模块的性能与所处温度环境密切相关,两端温差越大则输出功率越大。为解释温差发电模块布局优化的增益来源,对温差发电模块热端的温度场进行了详细的分析。

图12给出了温差发电系统两种设计方案热端的温度场分布。相比于全覆盖设计方案,布局优化后设计方案热端的温度场显示出两个显著的特征,一是整体温度大小明显增大,在入口处温度增大最小,约36 K,在出口处温度提升最大,高达80 K;二是温度的均匀性明显提升,全覆盖方案最高温度为406 K,最低为351 K,相差55 K,而优化后的方案最高温度与最低温度相差不足15 K。这些特征也可以从换热器的外表面温度分布(图13)明显看出。

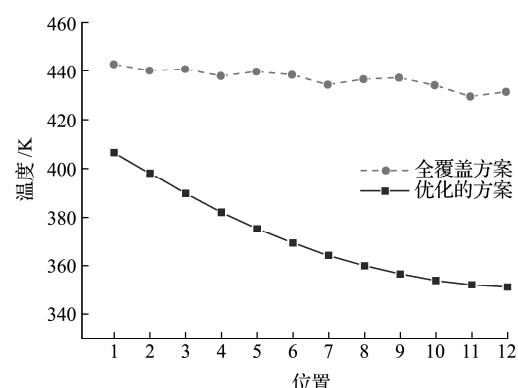


图12 上表面各位置平均温度
Fig. 12 Average temperature at each position on the upper surface

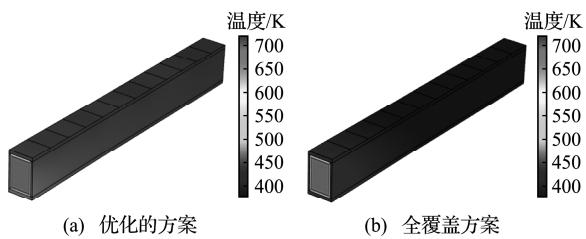


图13 换热器表面温度
Fig. 13 Surface temperature of heat exchanger

显然,热端温度的增大,会使得热电模块冷热两端的温差增大,从而能够提高每个发电模块的换热量,而导致温度明显提升的主要原因是热电模块数量的减少。在相同的外部条件下,热电模块数量减少,意味着从热端到冷端的导热能力下降,即热阻增大,从而导致热端的温度显著提升。虽然每个热电模块的功率提升,但若热电模块数量太少,则会导致总体的发电量减少。因此,确定合适的热电模块数量至关重要。

温度均匀性的提高是温差发电系统发电功率

提升的另一个主要原因^[29]。两种设计方案的各热电模块均以串联的方式连接,即这些在不同温差条件下的热电模块共用一个电流。实际上,针对每一个热电模块,在给定的温差条件下,存在一个最优的电流,使得发电功率最大。而将多个不同温差的热电模块串联在一起,通过寻优可以找到一个最优的电流,使得整体的发热功率最大,但无法使得每一个热电模块都能达到各自的最大发电功率。因此,全覆盖方案热端的温度不均匀性严重影响每个热电模块能力的发挥。布局优化后的设计方案,温度均匀性程度较高,差不多可以找到让每个热电模块最优的电流,从而充分发挥每个热电模块的发电

能力。热端温度的均匀性与热电模块的位置密切相关,因此,确定热电模块的位置也至关重要。

综上,温差发电模块的布局(数量与空间位置)设计直接影响热电模块两端温度场的大小和均匀程度,合理的布局优化设计能够显著提高整体发电功率和发电效率。

5.2 参数对系统发电性能的影响

温差发电系统的主要功能是吸收热端热量转化为电能。在实际使用过程中,往往存在多种可能情况,影响最优的布局设计。本文讨论了不同空气流动速度和入口温度的最优布局设计,结果分别列入表 6 和表 7。

表 6 不同空气流速下热电模块布局(700 K)

Tab. 6 Thermoelectric module layout under different air velocity (700 K)

流速 /m·s ⁻¹	优化布局设计方案	全覆盖方案效率 /%	优化方案效率 /%	全覆盖方案功率 /W	优化方案功率 /W	功率提升 /%
2		2.3157	5.5188	1.1117	1.9804	78.1
3		2.7925	5.3819	1.6288	2.4652	50.8
4		3.1224	5.7024	2.0764	2.8914	39.3
5		3.3911	5.4823	2.4836	3.2358	30.3
6		3.6122	5.6814	2.8598	3.5864	25.2

表 7 不同空气温度下热电模块布局(5 m/s)

Tab. 7 Thermoelectric module layout under different air temperature (5 m/s)

温度 /K	优化布局设计方案	全覆盖方案效率 /%	优化方案效率 /%	全覆盖方案功率 /W	优化方案功率 /W	功率提升 /%
500		1.8880	3.7476	0.7167	1.0404	45.2
550		2.2980	4.4448	1.0790	1.5360	42.4
600		2.6852	5.0405	1.4989	2.0790	38.7
650		3.0497	5.5301	1.9695	2.6525	34.7
700		3.3911	5.4823	2.4836	3.2358	30.3

由表 6 可知,不同情况下优化的热电模块布局方案存在差异,随着空气流速的增大,模块数量由 3 个逐渐增加到 5 个。从温差发电系统性能来看,热电模块全覆盖方案的效率、功率和优化方案的功率均单调递增。在相同条件下,优化布局设计方案的能量转换效率相较全覆盖方案大幅提高。如在 $u_0=2 \text{ m/s}$ 时,全覆盖方案效率仅为 2.3%,优化方案效率为 5.5%,提升多于 1 倍。模块布局优化同时也促进了系统发电功率提升,最小提升为 25.2%,最大甚至可以达到 78%。

改变入口空气温度与改变空气流速有着相似的影响规律,列入表 7。区别在于,改变空气流速的大小,优化方案的效率在 5.5% 上下波动;而随着空气温度的降低,优化方案的效率由 5.5% 逐渐下降至 3.7%。

值得注意的是,布局优化对功率提升的效果随

空气流速及空气温度呈单调递减。这意味着当热源较弱时,各热电模块两端温差很小,导致能量转换效率与功率过低,浪费更多的热量,于是通过热电模块的布局优化就可以取得更大收益。

还可以发现,各优化设计方案均呈现为热电模块梯度分布的形式(即热电模块离散布置,越靠近入口处布置越密集)。由于热空气沿流道流动温度降低,那么在高温区域多布置模块,低温区域少布置模块,就使各热电模块的热端温度接近,促进了模块相互之间的温度均匀性,并且间隔布置的形式保证模块从换热器充分吸热,有利于温差发电系统发电。

以上讨论说明了热源情况对温差发电系统的优化结果有较大影响,本文热电模块的布局优化方法能有效提升系统发电功率,选择全覆盖方案并不合理,对模块的布局优化设计是十分必要的。此

外,优化设计方案中使用热电模块的数量更少,也意味着成本降低,重量减轻。

6 结 论

本文研究建立了基于遗传算法的温差发电系统模块布局优化设计方法,发展了能够快速获得系统电功率输出的性能评估方法。通过遗传算法实现了温差发电系统热电模块的布局(数量与位置)设计,讨论了废热气体流动速度和温度对热电模块布局的影响,主要结论如下。

(1) 在非均匀分布的热源场中布置热电模块,并非热电模块越多越好,而是存在最优的热电模块布局(数量与位置)设计。

(2) 本文建立的设计方法能够获得优化的热电模块布局设计方案,显著提升温差发电系统的性能,从而证实了方法的有效性和布局设计的必要性。

参 考 文 献 (References) :

- [1] Champier D. Thermoelectric generators: A review of applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, **140**: 167-181.
- [2] Matthes C S R, Woerner D F, Hendricks T J, et al. Next-generation radioisotope thermoelectric generator study[A]. IEEE[C]. 2018.
- [3] 张建中,任保国,王泽深,等.放射性同位素温差发电器在深空探测中的应用[J].宇航学报,2008,29(2):644-647. (ZHANG Jian-zhong, REN Bao-guo, WANG Ze-shen, et al. Radioisotope thermoelectric generators in deep space exploration[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, **29**(2): 644-647. (in Chinese))
- [4] 朱安文,刘飞标,杜辉,等.核动力深空探测器现状及发展研究[J].深空探测学报,2017,4(5):405-416. (ZHU An-wen, LIU Fei-biao, DU Hui, et al. Current status and development for deep space nuclear power explorer[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, **4**(5): 405-416. (in Chinese))
- [5] Shen Z G, Tian L L, Liu X. Automotive exhaust thermoelectric generators: Current status, challenges and future prospects [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, **195**: 1138-1173.
- [6] 石蕊,张丽娜,马伟,等.布雷顿循环和半导体温差联合发电技术在飞行器上的应用[J].航天器环境工程,2018,35(1):66-70. (SHI Rui, ZHANG Li-na, MA Wei, et al. Applicability of combined generation technology based on Brayton cycle and semiconductor thermoelectric principle for vehicles[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2018, **35** (1): 66-70. (in Chinese))
- [7] Orr B, Akbarzadeh A, Mochizuki M, et al. A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **101**: 490-495.
- [8] Sajid M, Hassan I, Rahman A. An overview of cooling of thermoelectric devices[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **78**: 15-22.
- [9] He W K, Wang D Y, Wu H J, et al. High thermoelectric performance in low-cost SnS 0.91 Se 0.09 crystals[J]. *Science*, 2019, **365** (6460): 1418-1424.
- [10] Zhao W, Liu Z, Sun Z, et al. Superparamagnetic enhancement of thermoelectric performance [J]. *Nature*, 2017, **549** (7671): 247-251.
- [11] Hatami M, Ganji D D, Gorji-Bandpy M. A review of different heat exchangers designs for increasing the diesel exhaust waste heat recovery[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **37**: 168-181.
- [12] Lü S, He W, Jiang Q Y, et al. Study of different heat exchange technologies influence on the performance of thermoelectric generators[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, **156**: 167-177.
- [13] Ferreira-Teixeira S, Pereira A M. Geometrical optimization of a thermoelectric device: Numerical simulations[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, **169**: 217-227.
- [14] Sahin A Z, Yilbas B S. The thermoelement as thermoelectric power generator: Effect of leg geometry on the efficiency and power generation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, **65**: 26-32.
- [15] LaLonde A D, Pei Y Z, Wang H, et al. Lead telluride alloy thermoelectrics[J]. *Materials Today*, 2011, **14** (11): 526-532.
- [16] Liu Z C, Zhu S P, Ge Y, et al. Geometry optimization of two-stage thermoelectric generators using simplified conjugate-gradient method[J]. *Applied Energy*, 2017, **190**: 540-552.
- [17] Zhu L, Li H Q, Chen S, et al. Optimization analysis of a segmented thermoelectric generator based on genetic algorithm[J]. *Renewable Energy*, 2020, **156**: 710-718.
- [18] He W, Guo R, Liu S C, et al. Temperature gradient characteristics and effect on optimal thermoelectric performance in exhaust power-generation systems [J]. *Applied Energy*, 2020, **261**: 114366.
- [19] Weng C C, Huang M J. A simulation study of automotive waste heat recovery using a thermoelectric power generator[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, **71**: 302-309.
- [20] Favarel C, Bédécarrats J P, Kousksou T, et al. Experimental analysis with numerical comparison for different thermoelectric generators configurations[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, **107**: 114-122.

- [21] Huang G Y, Hsu C T, Fang C J, et al. Optimization of a waste heat recovery system with thermoelectric generators by three-dimensional thermal resistance analysis[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, **126**: 581-594.
- [22] Favarel C, Bédécarrats J P, Kousksou T, et al. Numerical optimization of the occupancy rate of thermoelectric generators to produce the highest electrical power [J]. *Energy*, 2014, **68**: 104-116.
- [23] Kanimba E, Pearson M, Sharp J, et al. A comprehensive model of a lead telluride thermoelectric generator [J]. *Energy*, 2018, **142**: 813-821.
- [24] Meng F K, Chen L G, Sun F R. A numerical model and comparative investigation of a thermoelectric generator with multi-irreversibilities[J]. *Energy*, 2011, **36**(5): 3513-3522.
- [25] Luo D, Wang R C, Yu W. Comparison and parametric study of two theoretical modeling approaches based on an air-to-water thermoelectric generator system [J]. *Journal of Power Sources*, 2019, **439**: 227069.
- [26] 陈立东, 刘睿恒, 史 讯. 热电材料与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2018. (CHEN Li-dong, LIU Rui-heng, SHI Xun. *Thermoelectric Materials and Devices* [M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese))
- [27] 刘晓峰, 阎 军, 程耿东. 采用自动分组遗传算法的频率约束下桁架拓扑优化[J]. *计算力学学报*, 2011, **28**(1): 1-7. (LIU Xiao-feng, YAN Jun, CHENG Geng-dong. Topology optimization of skeletal structures with frequency constraints based on automatic grouping genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2011, **28**(1): 1-7. (in Chinese))
- [28] 刘晓峰, 程耿东. 基于自动分组遗传算法的建筑结构体系与构件尺寸协同优化设计[J]. *计算力学学报*, 2014, **31**(1): 1-7. (LIU Xiao-feng, CHENG Geng-dong. Concurrent optimization of structural systems and size based on automatic grouping genetic algorithms [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2014, **31**(1): 1-7. (in Chinese))
- [29] Montecucco A, Siviter J, Knox A R. The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel[J]. *Applied Energy*, 2014, **123**: 47-54.

Optimization design of thermoelectric system module layout based on genetic algorithm

FENG Yi-mang¹, KONG De-kui¹, BI Shi-quan², CUI Hao², ZHANG Yong-cun^{*1}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2. Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: Thermoelectric generation has important potential applications such as power supply in extreme aerospace environment, waste heat utilization in automobile and others. However, their wide scale applications have been hindered due to low its thermal-to-electrical conversion efficiency. At present, the performance improvement is mainly made from two aspects: improving the material performance and optimizing the thermoelectric module structure. In this paper, a method of module layout optimization of a thermoelectric generator based on a genetic algorithm is proposed. By combining the existing analytical models, a performance evaluation method which can quickly obtain the electricity generation of the system is developed. Through the genetic algorithm, the thermal-to-electrical conversion of waste heat gas is taken as an example to realize the layout (number and location) design of the modules in the thermoelectric generator. The influence of waste heat gas flow velocity and temperature is discussed. Comparing with the fully covered thermoelectric module layout design, the optimized design achieves a higher electric power with fewer thermoelectric modules, which proves that including too many thermoelectric modules can have a negative effect, and that there is an optimal number and location of thermoelectric modules. This study provides a possible way to improve the electric output power in thermoelectric generation.

Key words: thermoelectric generator; genetic algorithm; layout optimization; thermoelectric module

引用本文/Cite this paper:

冯一芒,孔德奎,毕世权,等. 基于遗传算法的温差发电系统模块布局优化设计[J]. *计算力学学报*, 2022, **39**(2): 161-169.

FENG Yi-mang, KONG De-kui, BI Shi-quan, et al. Optimization design of thermoelectric system module layout based on genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, **39**(2): 161-169.