太阳能海洋热能转换系统中平板集热器构形设计

石俊朝³, 冯辉君^{1,2,4}, 陈林根^{1,2,4*}, 戈延林^{1,2,4}

1. 武汉工程大学热科学与动力工程研究所, 武汉 430205;

2. 湖北省绿色化工装备工程技术研究中心, 武汉 430205;

3. 海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033;

4. 武汉工程大学机电工程学院, 武汉 430205

* E-mail: lgchenna@yahoo.com; lingench@hotmail.com

收稿日期: 2020-07-05; 接受日期: 2021-01-26; 网络版发表日期: 2021-10-26

国家自然科学基金(批准号: 51779262)资助项目

摘要 集热器是太阳能海洋热能转换系统进行热量收集的重要设备. 本文以平板太阳能集热器为研究对象, 建立考虑海水出口温度和总泵功率的线性加权复合函数, 在吸热板总体积和换热管体积一定的条件下以复合函数最小为目标对其进行构形优化, 得到最小复合函数和换热管最佳内径. 结果表明, 构形优化后的集热器总泵功率和复合函数分别比初始设计点对应值降低了66.89%和5.56%, 海水出口温度降低了8.9%. 这说明复合函数牺牲了一定的传热性能, 使得集热器的流动性能得到很大的改善, 最终使得平板集热器的综合性能得到提高. 随着单板宽度、太阳辐射强度、海水入口温度、吸热板热导率和集热器单元数的增大与总海水质量流率的减小, 最小复合函数减小. 将构形理论应用到平板太阳能集热器的构形优化中, 为其结构优化设计提供了新的指导, 这一方法可进一步推广到太阳能海洋温差发电系统的优化设计中.

关键词 构形理论, 平板太阳能集热器, 海水出口温度, 泵功率, 复合函数, 广义热力学优化

1 引言

伴随着世界能源的日益短缺, 太阳能的开发利用受到越来越多的关注^[1], 而太阳能集热器是太阳能利用的一个重要设备, 常见的太阳能集热器有平板集热器^[2,3]、真空管集热器^[4,5]、热管真空管集热器^[6]等. 一些学者采用经典传热优化方法对各种类型的集热器进行了性能优化.

在平板太阳能集热器的优化研究中, Kazeminejad^[7]采用有限差分方法对平板太阳能集热器传热微分方程

进行了数值求解, 比较了一维和二维模型下的吸热板温度分布. Zhang等人^[8]对6种不同尺寸的蜂窝式平板太阳能集热器进行了实验研究, 发现长宽比越小集热器出口温差越大, 蜂窝式结构可明显提高集热器出口温度. Kundu^[9]分析了吸热板翅片的导热损失随温度变化的影响, 得出了吸热板热性能与其温度之间的变化关系, 提出了优化设计方案. 李秦宜和陈群^[10]在平板太阳能集热器的性能优化研究中引入了焓理论^[11~14], 以吸热板总体积为约束条件优化了吸热板的厚度分布, 发现厚度优化后能大大提升集热器的效率.

引用格式: 石俊朝, 冯辉君, 陈林根, 等. 太阳能海洋热能转换系统中平板集热器构形设计. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 403–414

Shi J C, Feng H J, Chen L G, et al. Constructal design for flat plate collector in a solar ocean thermal energy conversion system (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 403–414, doi: 10.1360/SST-2020-0277

高腾^[15]采用实验研究与理论分析相结合的方式优化了平板集热器的热性能, 并运用不同方法测试了集热器的瞬时效率, 以此来保证所建立的平板太阳能集热器理论模型的正确性. Mints Do Ango等人^[16]采用CFD数值计算方法对聚合物平板太阳能集热器进行了经济性能研究, 并将其与传统平板太阳能集热器进行了对比, 发现使用聚合物作为流体工质可以大大降低太阳能集热器的运行成本. Deng等人^[17]利用电加热膜模拟太阳辐射, 对带有微型热管阵列的平板集热器传热性能进行了实验研究, 发现集热器的换热性能随着流体质量流量和温度的增加而增强. 曾社铨^[18]运用Fluent软件优化了新型热管平板集热器的传热性能, 发现用真空夹层代替空气夹层后集热效率有很大的提升. 孙可亮等人^[19]基于有限容积法对平板太阳能集热器进行了研究, 发现当工质入口温度降低和环境温度升高时, 集热器的综合性能得到很大的改善. Hajabdollahi等人^[20]以效率最大和年总成本最低为目标, 以流体质量流量、隔热层厚度、换热率等为设计变量对平板太阳能集热器进行了热经济性优化, 采用粒子群算法得到了同时考虑两种目标函数的帕累托最优解集. Saffarian等人^[21]研究了不同内部形状的换热管对平板太阳能集热器传热性能的影响, 发现采用波纹管 and 体积分数为4%的CuO/水纳米流体可使传热系数提高78.25%. Elcioglu等人^[22]在层流和湍流条件下研究了不同类型的纳米流体对平板太阳能集热器热效率的影响, 发现湍流条件下采用纳米流体的集热器性能甚至劣于常规流体下的性能.

美国学者Bejan教授对城市街道网络的形成进行了深入研究后, 发现了构形定律, 提出了构形理论^[23-32], 它统一解释了自然界各种结构演化的原因, 也提供了工程界各种结构优化设计问题的解决方案. 构形理论已经在体点导热^[33-36]、电磁体^[37]、肋片^[38-43]、热源^[44,45]、热沉^[46-48]、换热器^[49,50]、蒸汽发生器^[51]、空腔^[52,53]、冷却流道^[54,55]、脉管网络^[56,57]、绝热壁^[58]、连铸过程^[59]、轧钢加热炉^[60,61]、炼钢转炉^[62]、轧后冷却过程^[63]、钢铁生产流程^[64]等的优化设计中得到应用.

构形理论也被引入到太阳能集热器的性能优化研究中. Ojeda和Méndez^[65]建立了平板太阳能集热器的瞬态模型, 构形优化后得到了最小的集热器吸热时间和最佳吸热板宽度. Ojeda和Messina^[66]研究了纳米流体为工质的太阳能集热器传热性能, 得到了热阻最小

的最佳换热管网络结构, 发现增加纳米流体体积分数有助于增加集热器热效率. Jatau和Bello-Ochende^[67]在集热器表面积、换热管体积和散热损失给定的条件下, 以最小熵产率为目标采用CFD数值计算方法对平板太阳能集热器进行了构形优化, 发现最小熵产率随换热管体积的增大而略有减小. Ganjehkaviri和Mohd Jaafar^[68]以热效率和年总成本为优化目标对集热器性能进行了优化, 发现当集热器热效率高于54%时, 优化后的集热器年总成本要明显低于传统集热器的年总成本. 但以上集热器的构形优化研究中还存在一定的不足, 如文献^[65-67]在集热器的研究中未考虑太阳辐射参数、玻璃盖板绝热、隔热层等的影响; 文献^[68]在研究过程中将吸热板假设为一个等温体, 存在较大的误差; 同时文献^[65,66,68]都只考虑了太阳能集热器的传热性能, 而没有考虑流动性能.

综上所述, 目前的平板太阳能集热器研究中存在模型不够完善或没有综合考虑传热和流动性能的问题, 同时等温吸热板模型存在误差大、二维模型存在CFD数值优化计算时间长的问题. 本文将建立考虑太阳辐射参数、玻璃盖板绝热、隔热层等因素影响的二维平板太阳能集热器模型, 采用降阶法求解传热微分方程, 综合考虑其流动和传热性能建立海水出口温度和总泵功率组成的线性加权复合函数, 在吸热板总体积和换热管体积一定的条件下以复合函数最小为目标, 应用构形理论得到复合函数与换热管内径的关系并对内径进行优化, 最后分析海水入口温度、太阳辐射强度和流体质量流率等参数对优化结果的影响. 集热器仅是太阳能海洋热能转换系统中的一个部件^[69,70], 本文的降阶法与文献CFD数值计算方法相比, 前者能简单迅速地预测集热器的性能, 更加适应于下一步对上述系统的集成优化. 与传统优化方法相比, 本文构形优化方法考虑了集热器的总体材料约束, 在这一约束条件下以寻求其最佳结构和最优性能, 因此后者方法更适用于有限换热材料的集热器优化设计. 本文模型考虑了多种因素的影响, 对传热和流动性能进行了综合优化, 所得优化结果能更好地指导实际集热器乃至太阳能海洋热能转换系统的优化设计.

2 平板太阳能集热器模型

图1为平板太阳能集热器示意图, 其中吸热板是吸

收太阳能的主要部件. 太阳光穿透 N 层透明盖板到吸热板, 其表面的涂层吸收太阳光辐射的热能, 通过导热和对流换热来加热流体管道(换热管)中的海水(总质量流率为 $\dot{m}_t$). 图2为单元级吸热板模型, 图中 L 为换热管长度, $2W$ 为换热管间距(W 为单板一半宽度), t_p 为吸热板厚度, T_{in} 为海水入口温度. 考虑到模型对称性为简化问题, 本文只对($0 \leq x \leq W$, $0 \leq y \leq L$)区域内的传热和流动过程进行研究.

对于本文所选取单元级模型, 其长度远大于宽度($2W \ll L$), 可近似认为吸热板上的热流方向垂直于换热管, 因此该导热过程可简化为一维问题来分析, 其导热微分方程如下:

$$\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{S - Q_{\text{loss}}}{k_p t_p} = 0, \quad (1)$$

式中, T_p 为吸热板温度, S 为集热器单位面积实际接受

图 1 平板集热器示意图

Figure 1 Schematic diagram of a flat plate collector.

图 2 单元级吸热板模型

Figure 2 Model of the elemental absorber plate.

的辐射能量, k_p 为吸热板热导率, Q_{loss} 为集热器单位面积散失的热量.

S 的表达式为

$$S = \tau \alpha I, \quad (2)$$

式中, τ 为盖板透过率, α 为吸热板吸收率, I 为太阳辐射强度.

散热损失 Q_{loss} 的表达式为

$$Q_{\text{loss}} = U_L (T_p - T_a), \quad (3)$$

式中, U_L 为总热损失系数, T_a 为环境温度.

总热损失系数 U_L 主要由以下三部分组成^[20]:

$$U_L = U_b + U_c + U_t. \quad (4)$$

吸热板底部热损失系数 U_b 的表达式为^[20]

$$U_b = \frac{k_{in}}{t_{inb}}, \quad (5)$$

式中, t_{inb} 为底部保温层厚度, k_{in} 为保温层热导率.

集热器边缘热损失系数 U_c 的表达式为^[20]

$$U_c = \frac{k_{in}}{t_{inc}} \cdot \frac{A_c}{A_e}, \quad (6)$$

式中, t_{inc} 为侧边保温层厚度, A_c 为集热器有效表面面积, A_e 为集热器侧边传热表面积.

吸热板顶部的热损失系数 U_t 用如下经验公式进行计算^[71]:

$$U_t = \left[\frac{N}{\left(\frac{C}{T_p} \right) \left(\frac{T_p - T_a}{N + f} \right)^{0.252}} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} + \left[\frac{\sigma (T_p^2 + T_a^2) (T_p + T_a)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0.0425N(1 - \varepsilon_p)} + \frac{2N + f - 1}{\varepsilon_c} - N} \right], \quad (7)$$

$$f = \left(\frac{9}{h_w} - \frac{30}{h_w^2} \right) \left(\frac{T_a}{316.9} \right) (1 + 0.091N), \quad (8)$$

$$C = 204.429 (\cos \beta)^{0.252} / L_{sp}^{0.24}, \quad (9)$$

式中, L_{sp} 为盖板之间的间隔距离, N 为盖板数目, σ 为Stefan-Boltzmann常数, ε_p 和 ε_c 分别为吸热板和盖板的发射率, β 为集热器倾斜角度, h_w 为平板集热器表面对

流换热系数.

h_w 采用如下经验公式进行计算^[15]:

$$h_w = 5.7 + 3.8V, \quad (10)$$

式中, V 为风速.

根据式(2)~(10)即可计算式(1)中导热微分方程的源项.

对于导热微分方程的边界条件, $x=0$ 处为对流边界条件, 即

$$\frac{\partial T_p}{\partial x} = \frac{-h_{fe}}{k_p}[T_p - T_f(y)], \quad (11)$$

式中, h_{fe} 为等效对流换热系数, $T_f(y)$ 为海水温度.

$x=W$ 处为对称边界条件, 即

$$\frac{\partial T_p}{\partial x} = 0. \quad (12)$$

忽略换热管处的太阳能辐射和散热损失后, 换热系数 h_{fe} 的表达式为^[7]

$$h_{fe} = \frac{1}{t_p} \left(\frac{\pi d_i h_f}{2} \right), \quad (13)$$

式中, d_i 为换热管内径, h_f 为换热管内的对流换热系数.

h_f 的表达式为^[7]

$$h_f = \frac{k_f Nu_m}{d_i}, \quad (14)$$

式中, k_f 为流体热导率, 换热管和海水之间的混合对流换热过程的平均Nusselt数表达式为^[7]

$$Nu_m = 1.75 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \left[Gz_m + 0.0083 (Gr_m Pr_m)^{0.75} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (15)$$

$L/d_i > 70$,

式中, Gz_m , Gr_m , Pr_m 分别为相应的平均特征数, μ_b 和 μ_w 分别为海水在当地温度和管壁温度下的动力黏度.

平均Gratez数 Gz_m 的表达式为^[72]

$$Gz_m = \dot{m} c_p / (k_f L), \quad (16)$$

式中, $\dot{m}$ 为单管海水质量流率, c_p 为海水定压比热容.

平均Grashof数 Gr_m 的表达式为^[72]

$$Gr_m = \alpha_v (T_w - T_{fa}) d_i^3 g / \nu^2, \quad (17)$$

式中, α_v 为海水的体胀系数, T_w 为管壁温度, T_{fa} 为海水

入口和出口的算数平均温度, g 为重力加速度, ν 为海水运动黏度.

平均Prandtl数 Pr_m 的表达式为^[72]

$$Pr_m = \mu c_p / k_f, \quad (18)$$

式中, μ 为海水动力黏度.

对于换热管, 由热力学第一定律有

$$\dot{m} c_p \frac{dT_f}{dy} - 2 \int_0^W (S - Q_{loss}) dx = 0. \quad (19)$$

对应的边界条件为

$$T_f = T_m, y = 0. \quad (20)$$

对于换热管, 其管程压降可表示为^[73]

$$\Delta P_c = \Delta P_{c,f} + \Delta P_{c,m}, \quad (21)$$

式中, 沿程压降损失 $\Delta P_{c,f}$ 和局部压降损失 $\Delta P_{c,m}$ 分别可采用如下公式计算^[74]:

$$\Delta P_{c,f} = \lambda \frac{L}{d_i} \frac{\rho u^2}{2}, \quad (22)$$

$$\Delta P_{c,m} = 1.5 \frac{\rho u^2}{2}, \quad (23)$$

式中, λ 为沿程阻力系数, ρ 和 u 分别为海水的平均密度和流速.

当 $Re_f < 2000$ 时^[74]

$$\lambda = \frac{64}{Re_f}, \quad (24)$$

当 $Re_f > 2000$ 时^[74]

$$\lambda = 0.01227 + \frac{0.7543}{Re_f^{0.38}}, \quad (25)$$

式中, Re_f 为海水的雷诺数.

不考虑海水重力影响时, 由式(21)~(25)可得集热器的总泵功率为

$$W_c = \frac{\dot{m}_t \Delta P_c}{\rho \eta_p}, \quad (26)$$

式中, $N_c (= \dot{m}_t / \dot{m})$ 为集热器单元数, η_p 为泵效率.

当吸热板总体积 V_{tp} 和换热管体积 V_{tu} 一定时, 有

$$V_{tp} = 2WLN_c t_p, \quad (27)$$

$$V_{tu} = \frac{\pi d_i^2 L N_c}{4}, \quad (28)$$

上两式中 L 和 t_p 可通过 d_i 、 N_c 和 W 求解, 而 d_i 、 N_c 和 W 可视为相互独立的参数。

式(1)的一元二阶微分方程可通过降阶后化简成二元一阶微分方程组求解。根据文献[71], 当 $\dot{m}=0.00243$ kg/s, $T_a=25.0^\circ\text{C}$ 和 $N=2$ 时, 文献[71]中集热器的出口水温为 66.89°C , 数值计算可知在相同条件下本文集热器的出口水温为 66.95°C ; 当 $\dot{m}=0.00208$ kg/s, $T_a=30.0^\circ\text{C}$ 和 $N=2$ 时, 文献[71]和本程序数值计算的集热器出口水温分别为 68.55°C 和 68.42°C ; 当 $\dot{m}=0.00208$ kg/s, $T_a=30.0^\circ\text{C}$ 和 $N=1$ 时, 文献[71]和本程序数值计算的集热器效率分别为 40.6% 和 39.1% 。以上三组比较结果误差较小, 因此本文模型的正确性在一定程度上得到验证。

为了便于进行性能分析, 将海水出口温度 T_{out} 的倒数 $1/T_{\text{out}}$ 和 W_c 进行无量纲化: $1/\tilde{T}_{\text{out}} = T_{\text{out,int}}/T_{\text{out}}$ 和 $\tilde{W}_c = W_c/W_{c,\text{int}}$, 其中 $T_{\text{out,int}}$ 和 $W_{c,\text{int}}$ 分别为集热器初始设计值下对应的海水出口温度和总泵功率。在吸热板总体积 V_{tp} 和换热管体积 V_{tu} 一定的条件下, 图3给出了 $W=0.06$ m, $I=800$ W/m², $\dot{m}_t=16$ kg/s和 $T_{\text{in}}=25.7^\circ\text{C}$ 时, $1/\tilde{T}_{\text{out}}$ 和 $\tilde{W}_c$ 与换热管内径 d_i 的关系。由图可知, $\tilde{T}_{\text{out}}$ 和 $\tilde{W}_c$ 都是随着 d_i 的增大而单调递减的。在优化过程中, 既需要海水出口温度尽量高, 又要求总泵功率尽量小。这两个目标是传热和流动性能优劣的重要反映, 但单目标优化不能同时反映传热和流动性能, 因此采用线性加权法[75-77]建立考虑海水出口温度和泵耗功率性能的复合函数 F_{TP} 。

图3 $1/\tilde{T}_{\text{out}}$ 和 $\tilde{W}_c$ 与 d_i 的关系

Figure 3 Relationships of $1/\tilde{T}_{\text{out}}$ and $\tilde{W}_c$ versus d_i .

$$F_{\text{TP}} = a_0 \frac{T_{\text{out,int}}}{T_{\text{out}}} + (1 - a_0) \frac{W_c}{W_{c,\text{int}}} = a_0 \frac{1}{\tilde{T}_{\text{out}}} + (1 - a_0) \tilde{W}_c, \quad (29)$$

式中, a_0 为加权系数。在换热管内径变化的范围($d_i=0.012\sim0.022$)内, 无量纲泵功率 $\tilde{W}_c$ 和无量纲温度倒数 $1/\tilde{T}_{\text{out}}$ 的变化范围分别为 $2.4\sim0.076$ 和 $0.9\sim1.2$ 。可以看出, 前者的变化范围大约是后者的7.7倍, 根据这一倍数关系从理论上讲, 加权系数 a_0 应该取0.88, 但考虑到 a_0 取0.88时表面上太侧重于考虑集热器的传热性能, 综合考虑后 a_0 取0.8。本文将在后文进一步分析不同 a_0 对优化结果的影响, 从而为不同的需求提供设计指导。将海水出口温度和泵功率进行无量纲化和加权处理的目的是使复合函数中两者的大小相当, 不会因其中一个值过小而被淹没。当吸热板总体积 V_{tp} 和换热管体积 V_{tu} 一定时, 复合函数 F_{TP} 是换热管内径 d_i 的函数, 因此通过优化 d_i 可开展平板太阳能集热器构形优化。

3 平板太阳能集热器构形优化

为开展平板太阳能集热器构形优化, 根据文献[69,71]给定以下初始参数: $T_{\text{in}}=25.7^\circ\text{C}$, $T_a=25.0^\circ\text{C}$, $\dot{m}_t=16$ kg/s, $I=800$ W/m², $W=0.06$ m, $d_i=0.014$ m, $V_{\text{tp}}=1.5$ m³, $V_{\text{tu}}=1.5$ m³, $N_c=6500$, $k_p=385$ W/(m k), $\beta=20^\circ$, $N=2$, $V=3.1$ m/s, $a_0=0.8$ 。如无特殊说明, 以上参数均保持假定值不变。

图4给出了不同海水入口温度 T_{in} 对复合函数 F_{TP} 和换热管内径 d_i 的影响。由图可知, 当 $T_{\text{in}}=25.7^\circ\text{C}$ 时, 复合函数 F_{TP} 存在最小值($F_{\text{TP,m}}=0.9445$), 此时对应的最佳换热管内径为 $d_{i,\text{opt}}=0.017$ m。构形优化后的集热器总泵功率 W_c 和复合函数 F_{TP} 分别比初始设计点对应值降低了66.89%和5.56%, 海水出口温度降低了8.9%。这一原因从图3中显而易见, 即换热管内径的增大必然导致总泵功率和海水出口温度的降低。这说明复合函数牺牲了一定的传热性能, 使得集热器的流动性能得到很大的改善, 最终使得考虑传热和流体性能平板集热器的综合性能得到提高。此外, 最小复合函数随着海水入口温度 T_{in} 的升高而减小, 因此平板集热器的综合性能可通过提高海水进口温度进一步提升。

图5(a)给出了单板一半宽度 W 对最小复合函数 $F_{\text{TP,m}}$

图4 T_{in} 对 F_{TP} 和 d_i 关系的影响

Figure 4 Influence of T_{in} on the relationship of F_{TP} versus d_i .

和最佳换热管内径 $d_{i,opt}$ 的影响。由图5(a)可知,随着 W 的增大, $F_{TP,m}$ 单调递减, $d_{i,opt}$ 整体上减小。这是由于当单板宽度增大时,海水出口温度的增加幅度整体上大于泵耗功率的增加幅度,最终导致最小复合函数减小,集热器综合性能变优。针对设计需求变化的情况,图5(b)给出不同加权系数下的优化结果。由图5(b)可知,随着 a_0 的增大, $F_{TP,m}$ 先增大后略有减小, $d_{i,opt}$ 整体上减小。这是由于随着 a_0 的增大,海水无量纲出口温度的倒数整体上减小,无量纲总泵功率整体上增大,但后者增大幅度更大;当 $a_0 > 0.9$ 时,前者减小幅度更大,最终 $F_{TP,m}$ 减小。在实际设计中,当更需要降低泵功率的消耗时,可选择较小的 a_0 ;当更需要提高海水出口温度时,可选择较大的 a_0 。

图5(c)给出了太阳辐射强度 I 对最小复合函数 $F_{TP,m}$ 和最佳换热管内径 $d_{i,opt}$ 的影响。由图5(c)可知,随着 I 的增大, $F_{TP,m}$ 单调递减, $d_{i,opt}$ 整体上减小。这是由于太阳辐射强度增大使得集热器受热量增加,使得海水出口温度增加,最终提高了集热器的综合性能。图5(d)给出了总海水质量流率 $\dot{m}_t$ 对最小复合函数 $F_{TP,m}$ 和最佳换热管内径 $d_{i,opt}$ 的影响。由图5(d)可知,当 $\dot{m}_t = 4$ kg/s时, $F_{TP,m} = 0.4067$, $d_{i,opt} = 0.012$ m;当 $\dot{m}_t = 32$ kg/s时, $F_{TP,m} = 1.1028$, $d_{i,opt} = 0.022$ m。由此可知随着 $\dot{m}_t$ 的增大, $F_{TP,m}$ 单调递增, $d_{i,opt}$ 整体上增大。这说明总海水质量流率 $\dot{m}_t$ 越大,在受热量不变的条件下将使得海水出口温度降低、泵耗功率增加,最终导致最小复合函数增大,集热器的综合性能变差。

考虑到不同时段、时间和地区的海水温度不一样,图5(e)给出了海水入口温度 T_{in} 对最小复合函数 $F_{TP,m}$ 和最佳换热管内径 $d_{i,opt}$ 的影响。由图5(e)可知,随着 T_{in} 的增大, $F_{TP,m}$ 单调递减, $d_{i,opt}$ 整体上增大。这是由于海水入口温度的升高将使得其出口温度也随之升高,泵耗功率和能耗减小,对集热器综合性能的提升显然是有利的。

图5(f)给出了吸热板热导率 k_p 对最小复合函数 $F_{TP,m}$ 和最佳换热管内径 $d_{i,opt}$ 的影响。由图5(f)可知,随着 k_p 的增大, $F_{TP,m}$ 单调递减, $d_{i,opt}$ 不变。这说明吸热板采用热导率高的材料有利于提高集热器的综合性能。图5(g)给出了集热器单元数 N_c 对最小复合函数 $F_{TP,m}$ 和最佳换热管内径 $d_{i,opt}$ 的影响。由图5(g)可知,当 $k_p = 35$ W/(m·K)时, $F_{TP,m} = 0.9547$, $d_{i,opt} = 0.017$ m;当 $k_p = 435$ W/(m·K)时, $F_{TP,m} = 0.9444$, $d_{i,opt} = 0.017$ m。由此可知随着 N_c 的增大, $F_{TP,m}$ 单调递减, $d_{i,opt}$ 整体上减小。这说明集热器单元数的增加对集热器综合性能的提升是有利的。这是由于此时海水出口温度的降低量远小于泵耗功率的减小量,最终导致最小复合函数减小。

4 结论

本文基于构形理论建立了平板太阳能集热器模型,以海水出口温度和总泵功率的线性加权复合函数为优化目标,在吸热板总体积和换热管体积一定的条件下,对平板太阳能集热器进行了构形优化,得到了最小复合函数和换热管最佳内径,并分析了不同参数对构形优化结果的影响,研究结果如下所述。

当海水入口温度 $T_{in} = 25.7^\circ\text{C}$ 时,复合函数 F_{TP} 存在最小值($F_{TP,m} = 0.9445$),此时对应的最佳换热管内径为 $d_{i,opt} = 0.017$ m。构形优化后的集热器总泵功率 W_c 和复合函数 F_{TP} 分别比初始设计点对应值降低了66.89%和5.56%,海水出口温度降低了8.9%。这说明复合函数牺牲了一定的传热性能,使得集热器的流动性能得到很大的改善,最终使得平板集热器的综合性能得到提高。

随着单板一半宽度 W 、太阳辐射强度 I 、海水入口温度 T_{in} 、吸热板热导率 k_p 和集热器单元数 N_c 的增大,最小复合函数 $F_{TP,m}$ 减小。随着总海水质量流率 $\dot{m}_t$ 的增大,最小复合函数 $F_{TP,m}$ 增大。随着加权系数 a_0 的增大,最小复合函数 $F_{TP,m}$ 先增大后略有减小。此外,随着总

图 5 $F_{TP,m}$ 和 $d_{i,opt}$ 与 W (a), a_0 (b), I (c), m_t (d), T_{in} (e), k_p (f), N_c (g) 的关系

Figure 5 Relationships of $F_{TP,m}$ and $d_{i,opt}$ versus W (a), a_0 (b), I (c), m_t (d), T_{in} (e), k_p (f), N_c (g).

热海水质量流量 $\dot{m}_t$ 和海水入口温度 T_{in} 的增大, 最佳换热管内径 $d_{i,opt}$ 整体上增大. 随着单板一半宽度 W 、太阳辐射强度 I 、加权系数 a_0 和集热器单元数 N_c 的增大, 最佳换热管内径 $d_{i,opt}$ 整体上减小. 随着吸热板热导率 k_p 的变化, 最佳换热管内径 $d_{i,opt}$ 始终不变. 由对比分析可知, 总海水质量流量 $\dot{m}_t$ 对 $F_{TP,m}$ 的影响最大, 而吸热板热导率 k_p 对 $F_{TP,m}$ 的影响最小.

本文基于加权系数法对综合考虑海水出口温度和总泵功率性能的平板太阳能集热器进行了构形优化, 但加权系数取值多采用经验法, 对结果影响较大. 下一步将采用多目标优化方法^[78~80]得到各种设计方案的帕累托解集, 并在海洋热能转换系统的有限时间热力学优化^[81~84]和构形热力学优化^[32,85~87]基础上, 进一步实现太阳能海洋热能转换集成系统的优化设计.

致谢 审稿人对本文提出了细心、无私和充满建设性的意见, 在此致以诚挚的谢意!

参考文献

- 1 Jin H G, Xuan Y M, He Y L, et al. Engineering thermophysics and sustainable energy development (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 1245–1251 [金红光, 宣益民, 何雅玲, 等. 工程热物理学科与能源可持续发展. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1245–1251]
- 2 Zayed M E, Zhao J, Du Y, et al. Factors affecting the thermal performance of the flat plate solar collector using nanofluids: A review. *Sol Energy*, 2019, 182: 382–396
- 3 Fudholi A, Sopian K. A review of solar air flat plate collector for drying application. *Renew Sustain Energy Rev*, 2019, 102: 333–345
- 4 Yurddaş A. Optimization and thermal performance of evacuated tube solar collector with various nanofluids. *Int J Heat Mass Transfer*, 2020, 152: 119496
- 5 Kabeel A E, Abdelgaied M, Elrefay M K M. Thermal performance improvement of the modified evacuated U-tube solar collector using hybrid storage materials and low-cost concentrators. *J Energy Storage*, 2020, 29: 101394
- 6 Chopra K, Pathak A K, Tyagi V V, et al. Thermal performance of phase change material integrated heat pipe evacuated tube solar collector system: An experimental assessment. *Energy Convers Manage*, 2020, 203: 112205
- 7 Kazeminejad H. Numerical analysis of two dimensional parallel flow flat-plate solar collector. *Renew Energy*, 2002, 26: 309–323
- 8 Zhang Z Q, Zuo R, Li P, et al. Thermal performance of solar air collector with transparent honeycomb made of glass tube. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52: 2323–2329
- 9 Kundu B. Analytic method for thermal performance and optimization of an absorber plate fin having variable thermal conductivity and overall loss coefficient. *Appl Energy*, 2010, 87: 2243–2255
- 10 Li Q Y, Chen Q. Application of entransy theory in the heat transfer optimization of flat-plate solar collectors (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 83–90 [李秦宜, 陈群. 平板太阳能集热器传热性能的熵理论优化. 科学通报, 2011, 56: 83–90]
- 11 Guo Z Y, Zhu H Y, Liang X G. Entransy—A physical quantity describing heat transfer ability. *Int J Heat Mass Transfer*, 2007, 50: 2545–2556
- 12 Chen L G. Progress in entransy theory and its applications. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 4404–4426
- 13 Chen Q, Liang X G, Guo Z Y. Entransy theory for the optimization of heat transfer—A review and update. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 63: 65–81
- 14 Chen L G. Progress in optimization of mass transfer processes based on mass entransy dissipation extremum principle. *Sci China Tech Sci*, 2014, 57: 2305–2327
- 15 Gao T. Heat transfer analysis and design optimization of flat plate solar collector (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Tianjin: Tianjin University, 2012 [高腾. 平板太阳能集热器的传热分析及设计优化. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2012]
- 16 Mintsá Do Ango A C, Medale M, Abid C. Optimization of the design of a polymer flat plate solar collector. *Sol Energy*, 2013, 87: 64–75
- 17 Deng Y C, Quan Z H, Zhao Y H, et al. Experimental investigations on the heat transfer characteristics of micro heat pipe array applied to flat plate solar collector. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 1177–1185
- 18 Zeng S Q. CFD simulation on flat plate solar collector with novel heat collecting components (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Guangzhou: South China University of Technology, 2014 [曾社铨. 新型热管平板太阳能集热器及其数值研究. 硕士学位论文. 广州: 华南理

工大学, 2014]

- 19 Sun K L, Zhu Y Z, Yang M C. Numerical simulation of steady-state thermal performance for flat plate solar energy collector (in Chinese). *J Eng Thermal Energy Power*, 2016, 31: 124–133 [孙可亮, 朱跃钊, 杨谋存. 平板式太阳能集热器稳态热性能数值模拟研究. *热能动力工程*, 2016, 31: 124–133]
- 20 Hajabdollahi Z, Hajabdollahi H. Thermo-economic modeling and multi-objective optimization of solar water heater using flat plate collectors. *Sol Energy*, 2017, 155: 191–202
- 21 Saffarian M R, Moravej M, Doranehgard M H. Heat transfer enhancement in a flat plate solar collector with different flow path shapes using nanofluid. *Renew Energy*, 2020, 146: 2316–2329
- 22 Elcioglu E B, Genc A M, Karadeniz Z H, et al. Nanofluid figure-of-merits to assess thermal efficiency of a flat plate solar collector. *Energy Convers Manage*, 2020, 204: 112292
- 23 Bejan A. *Shape and Structure, from Engineering to Nature*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- 24 Bejan A, Lorente S. *Design with Constructal Theory*. Hoboken: Wiley, 2008
- 25 Chen L G. Progress in study on constructal theory and its applications. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 802–820
- 26 Xie G N, Song Y, Asadi M, et al. Optimization of pin-fins for a heat exchanger by entropy generation minimization and constructal law. *J Heat Transfer*, 2015, 137: 061901
- 27 Chen L G, Feng H J. *Multi-objective Constructal Optimizations for Fluid Flow, Heat and Mass Transfer Processes* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017 [陈林根, 冯辉君. 流动和传热传质过程的多目标构形优化. 北京: 科学出版社, 2017]
- 28 Feng H J, Chen L G, Xie Z H. Multi-disciplinary, multi-objective and multi-scale constructal optimizations for heat and mass transfer processes performed in Naval University of Engineering, a review. *Int J Heat Mass Transfer*, 2017, 115: 86–98
- 29 Chen L G, Xiao Q H, Feng H J. Constructal optimizations for heat and mass transfers based on the entransy dissipation extremum principle, performed at the Naval University of Engineering: A review. *Entropy*, 2018, 20: 74
- 30 Chen L G, Feng H J, Xie Z H, et al. Progress of constructal theory in China over the past decade. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 130: 393–419
- 31 Bejan A. *Freedom and Evolution: Hierarchy in Nature, Society and Science*. Cham: Springer, 2020
- 32 Chen L G, Feng H J, Wu Z X, et al. Progress in theoretical study on constructal optimizations of marine steam power plants (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, doi: 10.1360/SST-2020-0393 [陈林根, 冯辉君, 吴志祥, 等. 船海用蒸汽动力装置构形优化理论研究进展. *中国科学: 技术科学*, 2021, doi: 10.1360/SST-2020-0393]
- 33 Wei S H, Chen L G, Sun F R. “Volume-point” heat conduction constructal optimization with entransy dissipation minimization objective based on rectangular element. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2008, 51: 1283–1295
- 34 Feng H J, Chen L G, Sun F R. “Volume-point” heat conduction constructal optimization based on entransy dissipation rate minimization with three-dimensional cylindrical element and rectangular and triangular elements on microscale and nanoscale. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 779–794
- 35 Wu W J, Chen L G, Xie Z H, et al. “Volume-point” heat conduction constructal optimization with nonuniformly distributed high conductivity material (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2016, 46: 302–312 [伍文君, 陈林根, 谢志辉, 等. 基于高导热材料非均匀分布的体点导热构形优化. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46: 302–312]
- 36 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization of a rectangular body with nonuniform heat generation. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 1352–1359
- 37 Wei S H, Chen L G, Sun F R. Constructal multidisciplinary optimization of electromagnet based on entransy dissipation minimization. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52: 2981–2989
- 38 Xie Z H, Chen L G, Sun F R. Constructal optimization of twice Y-shaped assemblies of fins by taking maximum thermal resistance minimization as objective. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53: 2756–2764
- 39 Xiao Q H, Chen L G, Sun F R. Constructal entransy dissipation rate minimization for umbrella-shaped assembly of cylindrical fins. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 211–219
- 40 Xie Z H, Chen L G, Sun F R. Comparative study on constructal optimizations of T-shaped fin based on entransy dissipation rate minimization and maximum thermal resistance minimization. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 1249–1258
- 41 Feng H J, Chen L G, Sun F R. Constructal entransy dissipation rate minimization for leaf-like fins. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 515–526
- 42 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization for helm-shaped fin with inner heat sources. *Sci China*

- [Tech Sci](#), 2015, 58: 1084–1090
- 43 Yang A B, Chen L G, Xie Z H, et al. Thermal performance analysis of non-uniform height rectangular fin based on constructal theory and entransy theory. [Sci China Tech Sci](#), 2016, 59: 1882–1891
- 44 Gong S W, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal study on a cylindrical heat source based on entransy theory (in Chinese). [Chin Sci Bull](#), 2014, 59: 3609–3614 [龚舒文, 陈林根, 谢志辉, 等. 基于熵理论的圆柱体热源构形. 科学通报, 2014, 59: 3609–3614]
- 45 Gong S W, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal optimization of cylindrical heat sources with forced convection based on entransy dissipation rate minimization. [Sci China Tech Sci](#), 2016, 59: 631–639
- 46 Wang L, Xie Z H, Sun F R, et al. Constructal studies on hexagonal microchannel heat sinks based on multi-physics field coupling calculations (in Chinese). [Sci Sin Tech](#), 2019, 49: 741–752 [王亮, 谢志辉, 孙丰瑞, 等. 基于多物理场耦合计算的工质回流式微通道正六边形热沉的构形研究. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 741–752]
- 47 Chen L G, Yang A B, Feng H J, et al. Constructal design progress for eight types of heat sinks. [Sci China Tech Sci](#), 2020, 63: 879–911
- 48 Wang L, Xie Z H, Chen L G, et al. Equivalent thermal resistance minimization for a circular disc heat sink with reverting microchannels based on constructal theory and entransy theory. [Sci China Tech Sci](#), 2021, 64: 111–121
- 49 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal optimization for H-shaped multi-scale heat exchanger based on entransy theory. [Sci China Tech Sci](#), 2013, 56: 299–307
- 50 Feng H J, Wu Z X, Chen L G, et al. Constructal optimization for an organic fluid shell-and-tube heat exchanger based on entransy theory (in Chinese). [Sci Sin Tech](#), 2020, 50: 1577–1587 [冯辉君, 陈林根, 吴志祥, 等. 基于熵理论的有机工质管壳式换热器构形优化. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1577–1587]
- 51 Xiao Q H, Chen L G, Sun F R. Constructal design for a steam generator based on entransy dissipation extremum principle. [Sci China Tech Sci](#), 2011, 54: 1462–1468
- 52 Xie Z H, Chen L G, Sun F R. Constructal optimization for geometry of cavity by taking entransy dissipation minimization as objective. [Sci China Ser E-Technol Sci](#), 2009, 52: 3504–3513
- 53 Xie Z H, Chen L G, Sun F R. Constructal optimization on T-shaped cavity based on entransy dissipation minimization. [Sci Bull](#), 2009, 54: 4418–4427
- 54 Xiao Q H, Chen L G, Sun F R. Constructal entransy dissipation rate and flow-resistance minimizations for cooling channels. [Sci China Tech Sci](#), 2010, 53: 2458–2468
- 55 Chen F, Shao B, Zhai W, et al. Highly sensitive glucose sensor based on hierarchical CuO. [Sci China Tech Sci](#), 2021, 64: 65–70
- 56 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal optimization for “disc-point” vascular networks based on minimum entransy dissipation rate (in Chinese). [Sci Sin Tech](#), 2014, 44: 71–80 [冯辉君, 陈林根, 谢志辉, 等. 基于熵耗散率最小的“盘点”脉管网络构形优化. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 71–80]
- 57 Feng H J, Chen L G, Xie Z H. Constructal entransy dissipation rate minimization for X-shaped vascular networks. [Sci China Tech Sci](#), 2019, 62: 2195–2203
- 58 Xie Z H, Chen L G, Sun F R. Constructal optimization of a vertical insulating wall based on a complex objective combining heat flow and strength. [Sci China Tech Sci](#), 2010, 53: 2278–2290
- 59 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Generalized constructal optimization for the secondary cooling process of slab continuous casting based on entransy theory. [Sci China Tech Sci](#), 2014, 57: 784–795
- 60 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Thermal insulation constructal optimization for steel rolling reheating furnace wall based on entransy dissipation extremum principle. [Sci China Tech Sci](#), 2012, 55: 3322–3333
- 61 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal entransy optimizations for insulation layer of steel rolling reheating furnace wall with convective and radiative boundary conditions. [Chin Sci Bull](#), 2014, 59: 2470–2477
- 62 Chen L G, Liu X, Feng H J, et al. Molten steel yield optimization of a converter based on constructal theory. [Sci China Tech Sci](#), 2018, 61: 496–505
- 63 Feng H J, Chen L G, Liu X, et al. Generalized constructal optimization of strip laminar cooling process based on entransy theory. [Sci China Tech Sci](#), 2016, 59: 1687–1695
- 64 Chen L G, Feng H J, Xie Z H, et al. Interaction mechanism among material flows, energy flows and environment and generalized thermodynamic optimizations for iron and steel production processes (in Chinese). [Sci Sin Tech](#), 2018, 48: 111–135 [陈林根, 冯辉君, 谢志辉, 等. 钢铁生产流程

物流-能流-环境作用机理及广义热力学优化. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 111–135]

- 65 Ojeda J A, Méndez F. Application of Bejan's constructal theory to a solar collector system. Part I: The fundamentals to define the first construction. *Int J Thermodyn*, 2010, 13: 135–141
- 66 Ojeda J A, Messina S. Enhancing energy harvest in a constructal solar collector by using alumina-water as nanofluid. *Sol Energy*, 2017, 147: 381–389
- 67 Jatau T, Bello-Ochende T. Constructal design of flat plate solar collector. *Proc Rom Acad Ser A*, 2018, 19: 160–165
- 68 Ganjehkaviri A, Mohd Jaafar M N. Multi-objective particle swarm optimization of flat plate solar collector using constructal theory. *Energy*, 2020, 194: 116846
- 69 Yamada N, Hoshi A, Ikegami Y. Performance simulation of solar-boosted ocean thermal energy conversion plant. *Renew Energy*, 2009, 34: 1752–1758
- 70 Amyra M Y, Sarip S, Ikegami Y, et al. Simulation study on enhancing hydrogen production in an ocean thermal energy conversion (OTEC) system utilizing a solar collector. *J Teknologi*, 2015, 77: 23–31
- 71 Sukhatme S P. *Solar Energy: Principles of Thermal Collection and Storage*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Co, 2009
- 72 Yang S M, Tao W Q. *Heat Transfer* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2006 [杨世铭, 陶文铨. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 2006]
- 73 Wang Y. The experimental study and numerical simulation of microchannel flat solar collector fluid heat collecting effect (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Jinan: University of Jinan, 2015 [王勇. 平板太阳能微通道集热器流体集热效应研究与模拟. 硕士学位论文, 济南: 济南大学, 2015]
- 74 Qian S W. *Heat Exchanger Design Handbook* (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2002 [钱颂文. 换热器设计手册. 北京: 化学工业出版社, 2002]
- 75 Chen L G, Zhang J M, Wu C, et al. Analysis of multi-objective decision-making for marine steam turbine stage. *Int J Power Energy System*, 1998, 18: 96–101
- 76 Cai C G, Feng H J, Chen L G, et al. Constructal design of a shell-and-tube evaporator with ammonia-water working fluid. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 135: 541–547
- 77 Feng H J, Xie Z H, Chen L G, et al. Constructal design for supercharged boiler superheater. *Energy*, 2020, 191: 116484
- 78 Zhang L, Chen L G, Xia S J, et al. Multi-objective optimization for helium-heated reverse water gas shift reactor by using NSGA-II. *Int J Heat Mass Transfer*, 2020, 148: 119025
- 79 Wu Z X, Feng H J, Chen L G, et al. Performance optimization of a condenser in ocean thermal energy conversion (OTEC) system based on constructal theory and a multi-objective genetic algorithm. *Entropy*, 2020, 22: 641
- 80 Tang C Q, Feng H J, Chen L G, et al. Power density analysis and multi-objective optimization for a modified endoreversible simple closed Brayton cycle with one isothermal heating process. *Energy Rep*, 2020, 6: 1648–1657
- 81 Chen W J, Feng H J, Chen L G, et al. Optimal performance characteristics of subcritical simple irreversible organic Rankine cycle. *J Therm Sci*, 2018, 27: 555–562
- 82 Fontaine K, Yasunaga T, Ikegami Y. OTEC maximum net power output using Carnot cycle and application to simplify heat exchanger selection. *Entropy*, 2019, 21: 1143
- 83 Yasunaga T, Ikegami Y. Finite-time thermodynamic model for evaluating heat engines in ocean thermal energy conversion. *Entropy*, 2020, 22: 211
- 84 Feng H J, Chen W J, Chen L G, et al. Power and efficiency optimizations of an irreversible regenerative organic Rankine cycle. *Energy Convers Manage*, 2020, 220: 113079
- 85 Bejan A. Constructal thermodynamics. *Int J Heat Tech*, 2016, 34: S1–S8
- 86 Wu Z X, Feng H J, Chen L G, et al. Constructal thermodynamic optimization for ocean thermal energy conversion system with dual-pressure organic Rankine cycle. *Energy Convers Manage*, 2020, 210: 112727
- 87 Feng H J, Wu Z X, Chen L G, et al. Constructal thermodynamic optimization for dual-pressure organic Rankine cycle in waste heat utilization system. *Energy Convers Manage*, 2021, 227: 113585

Constructal design for flat plate collector in a solar ocean thermal energy conversion system

SHI JunChao³, FENG HuiJun^{1,2,4}, CHEN LinGen^{1,2,4} & GE YanLin^{1,2,4}

¹ Institute of Thermal Science and Power Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

² Hubei Provincial Engineering Technology Research Center of Green Chemical Equipment, Wuhan 430205, China;

³ College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

⁴ School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Collectors are important components for heat collection in solar ocean thermal energy conversion (OTEC) systems. In the present study, a complex function composed of the linear weighted sum of the seawater outlet temperature and the total consumed pumping power is established. Under the conditions of fixed total volumes of the heat absorption plate and the heat exchange tube, constructal optimization of a flat plate solar collector is conducted by taking the complex function as the optimization objective. The minimum complex function and optimal inner diameter of the heat exchange tube are obtained. The results show that compared with those obtained for the initial design point, the total consumed pumping power and complex function of the solar collector after constructal optimization are reduced by 66.89% and 5.56%, respectively, and the seawater outlet temperature is reduced by 8.9%. This illustrates that although the complex function sacrifices a certain amount of heat transfer performance, the flow performance is greatly improved, as is the overall performance of the flat plate collector. The minimum complex function decreases with increases in the single plate width, solar radiation intensity, seawater outlet temperature, thermal conductivity of the heat absorption plate, and number of collector units, and a decrease in the total seawater mass flow rate. Constructal theory is applied for constructal optimization of the flat plate solar collector, which provides new guidelines for its structural optimization design. This method can be further extended to the optimal designs of solar OTEC systems.

constructal theory, flat plate solar collector, seawater outlet temperature, consumed pumping power, complex function, generalized thermodynamic optimization

doi: [10.1360/SST-2020-0277](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0277)