DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.168 **中图分类号**：TM92 **文献标志码**：A

多峰值热电系统下改进启发式MPPT方法研究

李 鹏[1]，李 浩[1]，朱文超[1,2,3]，谢长君[1,3]
(1.武汉理工大学自动化学院，武汉 430070；2.材料复合新技术国家重点实验室，武汉 430070；
3.现代汽车零部件技术湖北省重点实验室(武汉理工大学)，武汉 430070)

摘要：非均匀温度分布NUTD(non-uniform temperature distribution)情况下集中式热电系统呈现出多峰值特性，基于传统最大功率点跟踪MPPT(maximum power point tracking)方法易陷入局部最大功率点LMPP(local maximum power point)，以及现有的元启发式算法因探索和开发阶段的搜索能力不均衡导致搜索时间较长所造成的系统能量损失的问题，提出了一种改进的猎人猎物优化IHPO(improved hunter-prey optimization)算法。该算法依托于标准猎人猎物优化HPO(hunter-prey optimization)算法所具有的明确的探索和开发阶段的搜索能力机制，对原有机制进行了适用于多峰值特性的改进，在减弱算法本身频繁随机跃动导致的大幅振荡的同时，能够快速追踪到全局最大功率点GMPP(global maximum power point)。基于集中式热电系统模型，将IHPO算法与扰动观察法P&O(perturbation and observation)、粒子群优化PSO(particle swarm optimization)算法、改进的粒子群优化IPSO(improved PSO)算法和标准HPO算法在不同工况下进行仿真对比。结果表明，所提算法可以在非均匀温度分布的情况下快速且准确地追踪到GMPP，并大幅减小追踪过程的振荡，能量产出的提升最高可达21.8%，IHPO算法能够有效解决集中式热电系统的多峰值问题。

关键词：热电发电机；最大功率跟踪；猎人猎物优化算法；终止机制和重启机制

Research on Improved Heuristic MPPT Method in Multi-peak Thermoelectric System

LI Peng[1], LI Hao[1], ZHU Wenchao[1,2,3], XIE Changjun[1,3]
(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan 430070, China; 3. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070, China)

Abstract: The centralized thermoelectric system exhibits multi-peak characteristics under non-uniform temperature distribution (NUTD). Based on the problem that traditional maximum power point tracking (MPPT) methods are prone to falling into local maximum power point (LMPP) and existing metaheuristic algorithms suffer from energy loss due to long search times caused by imbalanced search capabilities during exploration and exploitation phases, an improved hunter-prey optimization (IHPO) algorithm is proposed. This algorithm relies on the clear exploration and exploitation phases search capability mechanism of standard hunter-prey optimization (HPO) algorithm, and improves the original mechanism for multi-peak characteristics, reducing the large amplitude oscillation caused by frequent random jumps of the algorithm itself while quickly tracking the global maximum power point (GMPP). Based on the centralized thermoelectric system model, IHPO algorithm is simulated and compared with perturbation and observation (P&O) method, particle swarm optimization algorithm (PSO), improved PSO (IPSO) and standard HPO under different operating conditions. The results show that the proposed algorithm can quickly and accurately track GMPP under NUTD, significantly reduce the oscillation of the tracking process, and improve energy output by up to 21.8%. The IHPO algorithm can effectively solve the multi-peak

收稿日期：2024-01-04；**修回日期**：2024-03-01，2024-04-01，2024-04-24；**录用日期**：2024-05-01；**网络首发日期**：2024-06-20
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51977164)
This work is supported by General Program of National Natural Science Foundation of China under the grant 51977164

problem of centralized thermoelectric systems.

Keywords: Thermoelectric generator; maximum power point tracking; hunter-prey optimization algorithm; termination mechanism and restart mechanism

近年来，化石燃料的滥用引发了严重的能源短缺问题，因此可再生能源的探索成为了研究重点[1-2]。其中，热电发电机 TEG(thermoelectric generator)可以直接将热能转化为电能，且具备体积小、可靠性高等特点，已作为一种可靠的辅助能源用于生产生活[3]。TEG 通常处于有不断变化的温度差的动态环境中，其内阻 R_{TEG} 及功率会随着冷热端之间的温差进行非线性变化。因此，需要构建热电发电能量回收电路并使用具有最大功率点跟踪 MPPT (maximum power point tracking)的 DC-DC 转换器完成实时阻抗匹配，从 TEG 系统中提取最大功率[4-5]。

传统的 MPPT 技术，如扰动观察 P&O(perturbation and observation)法[6]、增量电导 IC(incremental conductance)法[7]因结构简单、易实现的特点，已广泛应用于热电系统。然而，上述方法由于固定步长的更新方式在最大功率点 MPP(maximum power point)附近会出现明显的稳态功率振荡，因此易造成能量损失。文献[8]中提出了一种改进的变步长 P&O 法，该方法能够有效减少稳态振荡，但会导致跟踪时间过长；考虑到热电系统的线性特性，文献[9]提出了一种开路电压法，该方法通过断开电路采集开路电压计算 MPP，有效提高了跟踪精度，但却造成了能量损失；文献[10]提出了一种线性外推的热电 MPPT 方法，利用系统的 2 个工作点即可推出系统的 MPP，该方法操作简单且跟踪速度更快。通过将多个 TEG 进行串联、并联，配备不同数量的电力电子转换器，形成集中式、组串式和模块化 3 种不同的集成热电系统，能够有效提升功率输出，但也增加了实施成本。选择仅包含 1 台转换器的集中式热电系统，可以平衡成本和功率需求[11]。然而，集中式热电系统在非均匀温度分布 NUTD(non-uniform temperature distribution)的情况下，系统的功率−电压(*P-U*)特性曲线将会呈现多峰值特性，有 1 个全局最大功率点 GMPP(global maximum power point)和多个局部最大功率点 LMPPs(local maximum power points)[12]。上述传统方法及改进方法易失效，容易陷入 LMPP，造成功率损失[13]。

新兴的元启发式算法，如粒子群优化 PSO(particle swarm optimization)算法[14]、灰狼优化 GWO (grey wolf optimization)算法[15]因灵活性高、全局搜索能力强的特点已成功应用于部分遮光条件下光伏发电系统的 MPPT。它们通过模拟生物群体的随机移动，扩大了搜索范围，实现了对系统 GMPP 的搜索[16]。受此启发，热电领域也与元启发式算法进行了结合。文献[17]提出了一种基于自适应罗盘搜索 ACS(adaptive compass search)的 MPPT 控制策略，该策略采用自适应的探测方向序列，有效解决了集中式热电系统在 NUTD 下的 MPPT；文献[18]提出了一种基于算术优化算法的 MPPT 控制方法，该方法在全局探索和局部开发之间取得适当平衡，显示出强大的全局搜索能力。然而，现有的元启发式算法需要设置多个控制参数，全局搜索能力在探索和开发阶段分布不均衡，且仅在达到最大迭代次数后才能停止搜索，导致跟踪时间延长，跟踪效率降低。

近年来，随着互联网技术的发展，以人工智能为代表的数据驱动控制逐渐应用于热电系统的 MPPT 控制。文献[19]提出了一种基于动态代理模型的优化方法来进行 NUTD 下热电系统的 MPPT；文献[20]提出了一种基于自适应快速神经网络优化算法的数据驱动方法，该方法采用回归神经网络实现对 TEG 系统 MPP 的有效搜索。相较于元启发式算法，该类方法能够依据数据库信息快速追踪到 GMPP 并降低功率波动，但该类方法需要完善的数据库作为支撑。

为了减少搜索过程中的稳态振荡，平衡元启发式算法在探索和开发阶段各自的搜索能力，并降低对数据库的依赖，本文提出改进的猎人猎物优化 IHPO(improved hunter-prey optimization)算法。该算

法依赖于标准猎人猎物优化 HPO(hunter-prey optimization)算法具备的明确的探索和开发机制，能够高效完成全局搜索任务。而且，该算法通过强大的随机跳跃能力，能够有效克服 LMPP 陷阱。此外，通过对算法机制进行改进，提升全局搜索能力的同时抑制了标准 HPO 算法频繁的随机跃动。将 IHPO 算法用于搭建的集中式热电系统的 MPPT 控制模型中，通过在复杂环境温度工况下的仿真数据分析，验证了 IHPO 算法优越的 GMPP 跟踪能力。

1 热电模块和系统建模

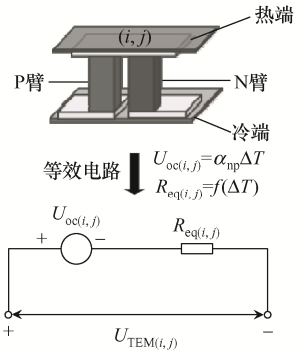
1.1 热电模块的建模

热电模块 TEM(thermoelectric module)由包含 P 型和 N 型电臂的多个最小构建单元热电元件串联组成。在温度差的影响下，这些元件促进电子定向流动，从而实现将热能转化为电能。

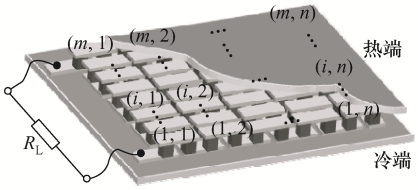
当与外部负载接口连接时，热电模块可以等效为图 1 所示的带内阻的电压源串联负载的等效电路形式。图中：R_{eq} 为热电模块的等效电阻；R_L 为外接负载；U_{TEM} 和 I_{TEM} 分别为 TEM 负载端电压和电流；I_{sc} 为 TEM 的短路电流；U_{mpp} 和 I_{mpp} 分别为最大功率点对应的电压和电流；m 和 n 分别为热电元件的并联和串联数量；i、j 分别为阵列中热电元件的位置。热电模块的开路电压直接与冷热两端的温差成正比，其值可表示为

$$U_{oc} = \alpha_{np}\Delta T \tag{1}$$

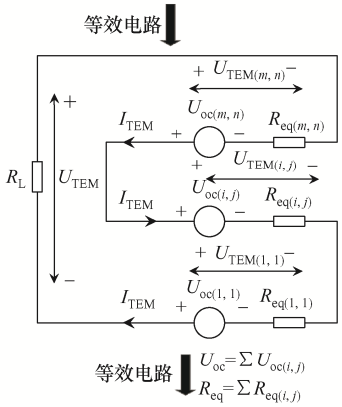
式中：U_{oc} 为开路电压；α_{np} 为塞贝克系数；ΔT 为冷热两端的温差。

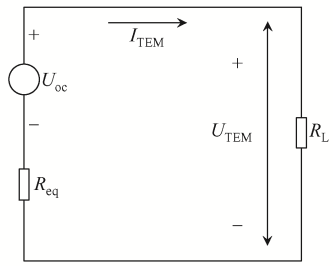


(a) 热电元件及其等效电路

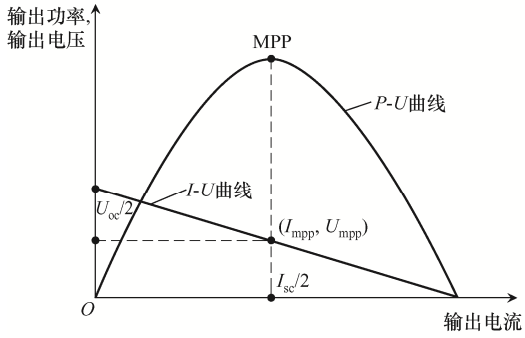


ΔT为热端和冷端的温差





(b) 热电模块及其等效电路



(c) 热电模块输出特性曲线

图 1 热电模块及其构成元件的等效电路和特性曲线

Fig. 1 Equivalent circuit and characteristic curves of the TEM and its constituent elements

热电模块的输出电流−电压(I-U)特性曲线呈线性，而其功率−电压(P-U)特性曲线呈抛物线形状。根据最大功率传输定理，对负载的 MPP 传输发生在 R_{eq}=R_L 时，峰值功率出现在 U_{mpp}=U_{oc}/2 处。

在 NUTD 的情况下，相对塞贝克系数 α_{np} 是随汤姆逊系数的变化而变化的非恒定常数[21]。通过二

阶多项式拟合出温差与 α_{np}、R_{eq} 的关系，当温差给定时，可获得对应的 α_{np} 和 R_{eq} 分别为

$$\begin{cases}\alpha_{np}=a\Delta T+b+c/\Delta T\\ R_{eq}=d\Delta T^2+e\Delta T+f\end{cases}\tag{2}$$

式中：a=−7×10^{-5} V/K^2；b=0.063 9 V/K；c=−0.853 6 V；d=−9×10^{-6} Ω/K^2；e=0.006 2 Ω/K；f=1.197 2 Ω[22]。

由式(1)和式(2)可推得 TEM 负载端电压和电流分别为

$$\begin{cases}U_{TEM}=U_{oc}-R_{eq}I_{TEM}=(a\Delta T^2+b\Delta T+c)-\\ \qquad (d\Delta T^2+e\Delta T+f)I_{TEM}\\ I_{TEM}=\dfrac{U_{oc}}{R_{eq}+R_L}\end{cases}\tag{3}$$

1.2 集中式热电系统的建模

通常 TEG 的等效内阻与负载并不能实现完全匹配，系统无法达到最大输出功率。因此，在 TEG 与负载间接入一定数量的电力电子转换器形成集成热电系统以保证最大功率输出。常见的集成热电系统有集中式热电系统、组串式热电系统和模块化热电系统。为了提升功率输出同时降低实施成本，本研究采用仅具备 1 台电力电子转换器的集中式热电系统。由 N 个 TEMs 串、并联所形成的集中式热电系统的总输出功率 P_{TEG} 可表示为

$$I_{TEM(i)}=\begin{cases}(U_{oc(i)}-U_{TEM(i)})\cdot\dfrac{I_{sc(i)}}{U_{oc(i)}}=I_{sc(i)}-\dfrac{U_{TEM(i)}}{R_{eq(i)}}\\ \qquad 0\leqslant U_{TEM(i)}\leqslant\dfrac{I_{sc(i)}}{U_{oc(i)}}\\ 0\qquad \text{其他}\end{cases}$$

$$i=1,2,\cdots,N\tag{4}$$

$$P_{TEG(i)}=\begin{cases}U_{TEM(i)}I_{TEM(i)}=I_{sc(i)}U_{TEM(i)}-\dfrac{U_{TEM(i)}^2}{R_{eq(i)}}\\ \qquad 0\leqslant U_{TEM(i)}\leqslant\dfrac{I_{sc(i)}}{U_{oc(i)}}\\ 0\qquad \text{其他}\end{cases}$$

$$i=1,2,\cdots,N\tag{5}$$

$$P_{TEG}=\sum_{i=1}^{N}P_{TEG(i)}\tag{6}$$

通过设置不同温差(ΔT_1、ΔT_2、ΔT_3、ΔT_4、ΔT_5)进行仿真实验，得到不同温度分布下集中式热电系统的 P-U 特性曲线如图 2 所示，在均匀温度分布 UTD(uniform temperature distribution)下呈现单峰值特性，仅存在 1 个 MPP；NUTD 下呈现多峰值特性，仅存在 1 个 GMPP 和多个 LMPP。通过在热电系统和负载之间接入电力电子转换器，MPPT 控制算法实时更新数值驱动开关形成对应的占空比，从而保证系统达到最大功率输出。

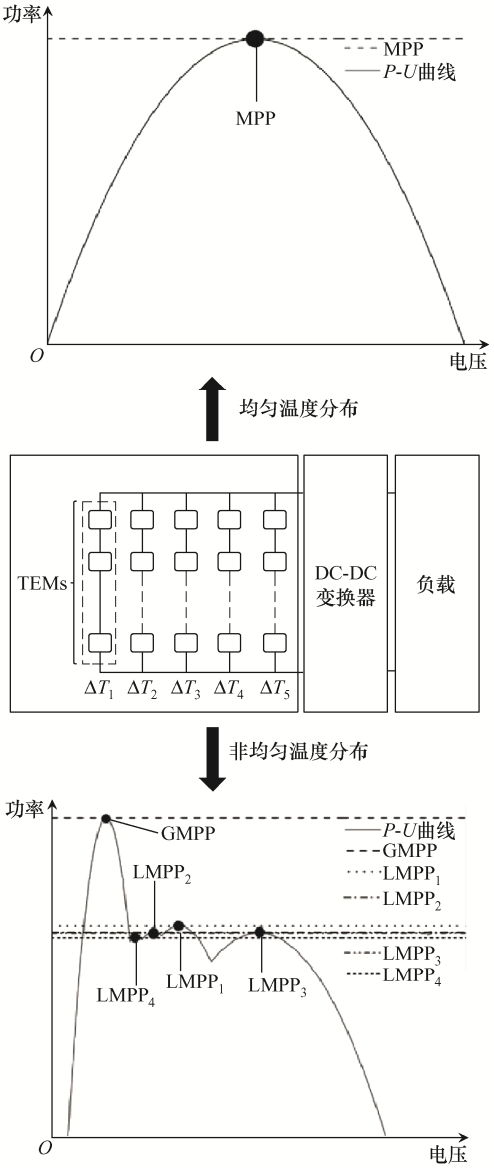


图 2　不同温度分布下集中式热电系统的特性曲线

Fig. 2 Characteristic curves of centralized TEG system under different temperature distributions

2 基于 IHPO 的 MPPT 控制算法

HPO 算法是 Naruei 等[23]于 2021 年提出的基于群体的元启发式算法，其灵感来源于大自然中猎人追捕猎物的过程，粒子可以是猎人或猎物。标准 HPO 算法包含 3 个部分：位置初始化、猎人搜索机制和猎物避险机制。其中，猎人搜索机制和猎物避险机制可分别表示为

$$\begin{cases} d_i^0 = \text{rand}(1) \\ d_i^{k+1} = d_i^k + 0.5\{(2CZP_{\text{pos}} - d_i^k) + \\ \quad [2(1-C)Z\mu - d_i^k]\} \end{cases} \quad \text{rand}(1) < \beta \tag{7}$$

$$\begin{cases} d_i^0 = \text{rand}(1) \\ d_i^{k+1} = d_i^k + CZ\cos(2\pi R_4)\cdot(G_{\text{best}} - d_i^k) \end{cases} \quad \text{其他} \tag{8}$$

式中：d_i^0、d_i^k、d_i^{k+1} 分别为第 $i(i=1, 2, \cdots, N_{\text{p}})$ 个猎人(猎物)的初始位置、k 次迭代后的位置和 k+1 次迭代后的位置，k 为迭代次数，N_{p} 为猎人(猎物)的数量；C、Z 为自适应参数[23]；P_{pos} 为最远的猎物的位置；μ 为猎物的平均位置，猎人以 P_{pos} 和 μ 为依据进行更新，更好地接近猎物；β 取值 0.1，用于判定粒子是作为猎人还是猎物；R_4 为[−1, 1]之间的随机数；G_{best} 为猎物群里最安全的位置，猎物以此为依据从而向安全位置避险。

2.1 位置初始化

粒子初始位置采取随机分布会导致粒子分布集中，从而使算法陷入局部最优。因此，将 HPO 算法中粒子的随机分布改进为均匀分布，且最小占空比 $d_{\min}$ 和最大占空比 $d_{\max}$ 分别取 0.1 和 0.9，即

$$\begin{cases} d_i^0 = 1/(N_{\text{p}}+1)\cdot i \quad i = 1, 2, \cdots, N_{\text{p}} \\ d_{\min} \leqslant d \leqslant d_{\max} \end{cases} \tag{9}$$

式中，d 为对应占空比。

2.2 具备判定能力的猎人搜索机制

对于标准 HPO 算法，猎人搜索机制过剩的搜索能力导致粒子频繁地随机跳动，产生巨大的功率振荡。为了降低粒子随机更新的频率，对猎人搜索机制引入判定条件，使猎人有选择性地追捕偏离群体较远猎物的位置，带有判定条件的猎人搜索机制为

$$\begin{cases} d_i^{k+1} = d_i^k + 0.5\{(2CZP_{\text{pos}} - d_i^k) + [2(1-C)Z\mu - \\ \quad d_i^k]\} \\ \quad |P_{\text{pos}} - G_{\text{best}}| > r \ \ \&\& \ \text{rand}(1) < \beta \\ r = r\cdot\left(1 - k\cdot\dfrac{0.98}{k_{\max}}\right) \end{cases} \tag{10}$$

式中：r 为以猎物群体中心为全局最优位置的安全位置的半径，初始值设置为 0.25，其值随着迭代过程逐渐减小，从而降低了重复探索同一位置的可能性，使得向 GMPP 收敛得更加准确；$k_{\max}$ 为最大迭代次数。

2.3 定向猎物避险机制

当猎人存在时，安全区外的猎物向群体位置中心的随机移动变为定向避险，改进的避险机制为

$$d_i^{k+1} = G_{\text{best}} + CZ\cos(2\pi R_4)\cdot(G_{\text{best}} - d_i^k) + \text{rand}(0, r) \tag{11}$$

其中，cos 函数可以使下一个粒子位置定位在全局最优的不同径向和角度，从而提高在局部搜索阶段的精准性。

2.4 终止机制和重启机制

传统 MPPT 算法固有步长的设置会导致算法的运行过程出现稳态功率振荡，元启发式算法采用最大迭代次数 $k_{\max}$ 消除了这部分功率损失。然而，$k_{\max}$ 的选取需要平衡算法的跟踪精度和跟踪时间，不当的 $k_{\max}$ 值可能会导致 MPPT 提前终止。为提高算法跟踪精度，缩短收敛时间，引入终止机制用以改善追踪到全局 MPP 后的持续搜索。初始粒子位置均匀分布在区间[0, 1]中，伴随着迭代的进行，粒子位置逐渐向最优解的位置靠拢。该算法已经达到收敛并稳定输出 G_{best} 的判断条件为所有粒子位置 $d_i(i=1, 2, \cdots, N_{\text{p}})$的标准差满足

$$\begin{cases} d_{\text{avg}} = (d_1 + d_2 + d_3 + \cdots + d_n)/N_{\text{p}} \\ \sigma = \sqrt{\dfrac{1}{N_{\text{p}}}\sum_{i=1}^{N_{\text{p}}}(d_i - d_{\text{avg}})^2} < 0.01 \end{cases} \tag{12}$$

式中：d_{avg} 为粒子所有位置的平均值；σ 为所有粒子位置的标准差；N_{p} 为粒子的总数。

在实际情况下，集中式热电的全局 MPP 会随

环境温度的改变而变化。现有的元启发式算法会在达到终止条件后停止继续搜索，导致跟踪失效。引入重启机制，使 IHPO 算法具有应对环境变化重新搜索 GMPP 的能力。重启算法搜索新的 GMPP 需满足

$$\frac{|P'_{\mathrm{TEG}}-P_{\mathrm{TEG}}|}{P_{\mathrm{TEG}}}>0.05 \tag{13}$$

式中：P'_{TEG} 为环境变化后 TEG 新的输出功率。

IHPO 算法流程如图 3 所示。图中：U 为系统输出电压；I 为系统输出电流；P 为系统输出功率；D 为最优位置对应的占空比。

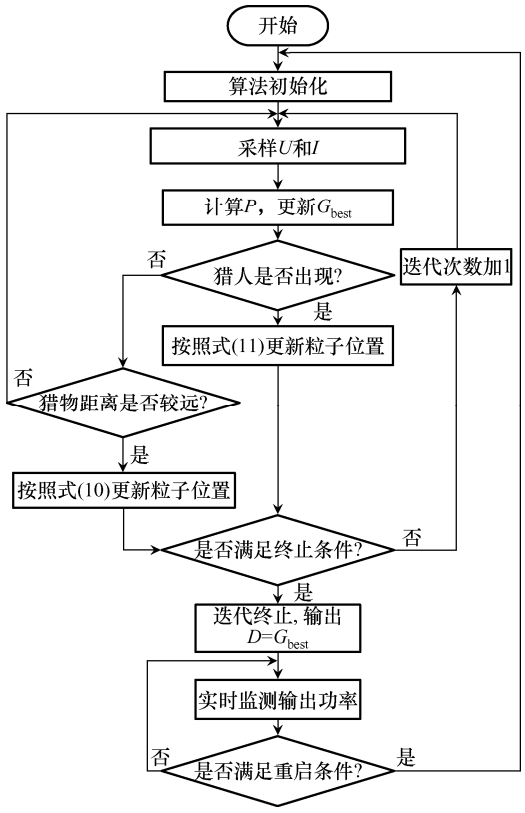


图 3　IHPO 算法流程

Fig. 3 Flowchart of IHPO algorithm

3　实验与讨论

本节利用 MATLAB/Simulink 仿真软件对基于 IHPO 算法的集中式热电系统进行了建模，并在特定工况下进行了算法的性能检验。本文采用集中式 TEG 系统模型，整体热电模块由 5 个单独的热电模块支路并联形成，每条支路由 10 个 TEM 串联形成，ΔT_1、ΔT_2、ΔT_3、ΔT_4、ΔT_5 表示 5 个热电模块支路上设置的温差。仿真实验通过设置不同的温差模拟了 3 种工况：工况 1 为 UTD，此时ΔT_1=ΔT_2=ΔT_3=ΔT_4=ΔT_5=230 ℃；工况 2 为 NUTD，此时ΔT_1=230 ℃、ΔT_2=85 ℃、ΔT_3=60 ℃、ΔT_4=50 ℃、ΔT_5=35 ℃；工况 3 为工况 1 到工况 2 的阶跃变化。

3.1　参数设置

利用 MATLAB/Simulink 2021a 搭建如图 4 所示的整体集中式热电系统仿真模型。该模型包括由 5 个热电模块并联形成的整体热电模块、Boost 升压转换器、电压和电流采集模块、MPPT 控制器、脉宽调制 PWM(pulse width modulation)模块和阻性负载。图中：C_{in} 为 Boost 电路的输入电容；C_{out} 为输出滤波电容；L 为储能电感；R 为阻性负载；D 为续流二极管。Boost 变换器各元件的具体参数按照本文的研究数据代入文献[24]中的公式得出：C_{in}=100 μF，C_{out}=100 μF，L=300 mH，开关频率 f=20 kHz。

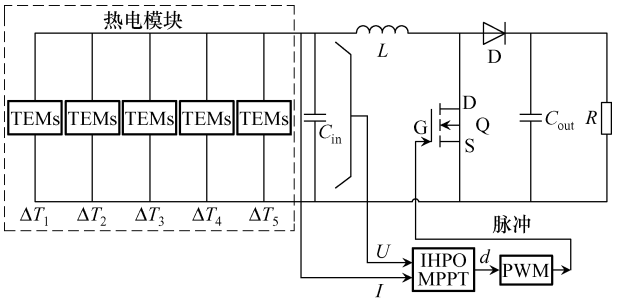


图 4　集中式热电系统的模型

Fig. 4 Model of centralized TEG system

为了验证基于 IHPO 的 MPPT 算法的全局跟踪性能，将其与基于 P&O、PSO、IPSO(配备重启机制和终止机制)和 HPO 的 MPPT 算法进行了对比。其中，元启发式算法 PSO、IPSO、HPO 和 IHPO 的粒子个数 N_{p}=4，最大迭代次数 $k_{\max}$=10。P&O 的固定步长设置为 0.01；PSO 和 IPSO 算法的参数设置为：惯性权重 ω=0.3，个人学习因子 c_1=1.2，社会学习因子 c_2=1.8。P&O、PSO、IPSO、HPO 和 IHPO 算法的控制时间周期均设置为 0.01 s，即 MPPT 控制器每 0.01 s 就会控制 Boost 变换器执行当前最新的占空比。

MPPT 算法的性能指标由稳态输出功率、跟踪时间、稳态跟踪效率等参数进行评估，其中稳态跟

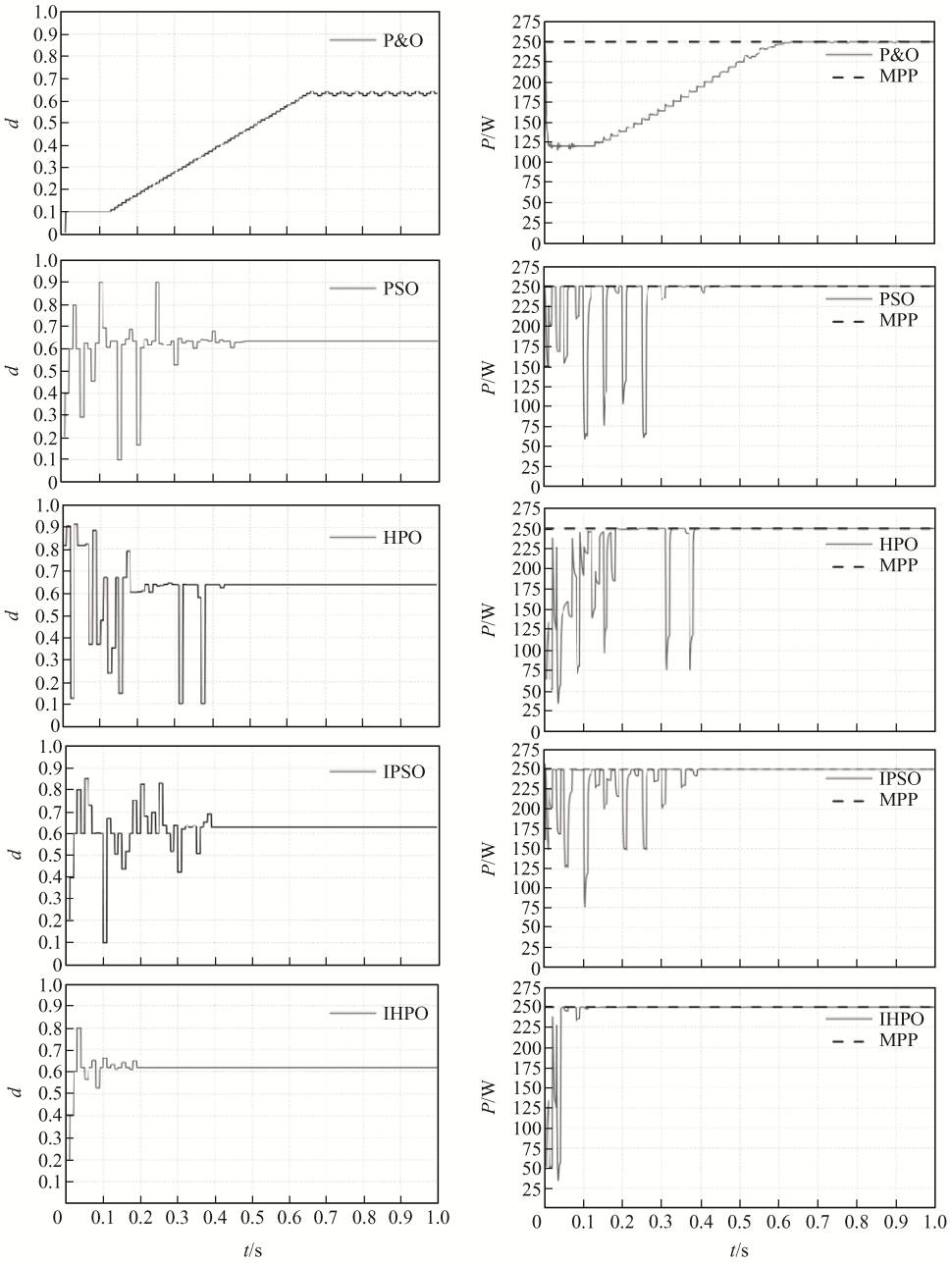
踪效率=算法运行得到的稳态输出功率/系统理论最大输出功率。引入功率振荡系数 δ，以此评估跟踪过程中功率的振荡情况，可表示为

$$\begin{cases}\delta_{\text{avg}}=\dfrac{1}{T-0.01}\displaystyle\sum_{t=0.02}^{T}\dfrac{\left|P_{\text{TEG}}(t)-P_{\text{TEG}}(t-1)\right|}{P_{\text{TEG}}(t-1)}\\ \delta_{\max}=\max\limits_{0.02\sim T}\dfrac{\left|P_{\text{TEG}}(t)-P_{\text{TEG}}(t-1)\right|}{P_{\text{TEG}}(t-1)}\end{cases}\tag{14}$$

式中：δ_{avg} 和 $\delta_{\max}$ 分别为集中式 TEG 系统在追踪周期内功率振荡系数 δ 的平均值和最大值；T 为追踪周期；t 为系统处于当前占空比的运行时间(0.01 s, 0.02 s…)；$P_{\text{TEG}}(t)$为在追踪时间内集中式 TEG 系统的输出功率，每 0.01 s 取值 1 次。

3.2 UTD 下的性能分析

将集中式热电系统运行于UTD下，系统的 *P-U* 曲线呈现单峰特性，MPP 位于 *P-U* 曲线的中心，理论值为 249.97 W。如图 5 所示，所有算法均收敛



(a) 占空比 (b) 功率

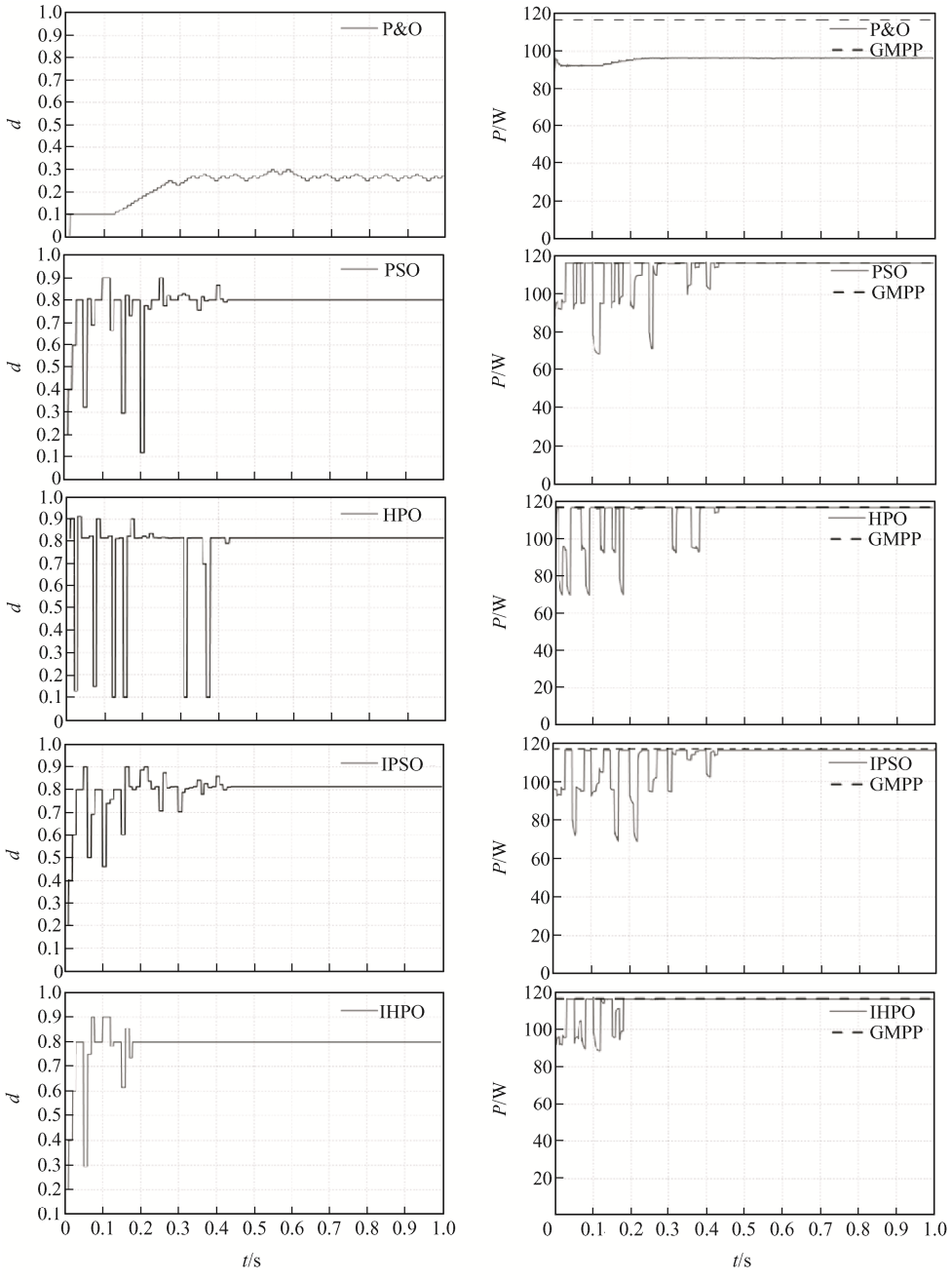
图 5 UTD 下各算法的跟踪结果

Fig. 5 Tracking results of various algorithms under UTD

于 249.96 W。然而，IHPO 算法仅用了 0.14 s 即可跟踪到最大功率，稳态跟踪效率达到 99.99%。相较于 HPO，IHPO 缩短了 63.16%的跟踪时间，表明引入终止条件可以有效缩短跟踪时间。

3.3 NUTD 下的性能分析

将集中式热电系统运行于 NUTD 下，该系统的 *P-U* 曲线呈现出多峰特性，其中包括 1 个 GMPP 和 4 个不同的 LMPP，GMPP 的理论值为 116.70 W。不同算法的跟踪结果如图 6 所示。P&O 算法在 NUTD 情况下跟踪失败，仅收敛至 96.30 W，而其他算法则收敛至 116.70 W。特别地，IHPO 算法在 0.19 s 内实现了对 GMPP 的跟踪，并呈现出最小的振荡，与 HPO 算法相比，跟踪时间缩短了 54.76%，这种显著的提升表明，IHPO 中引入的定向猎物避



(a) 占空比　　(b) 功率

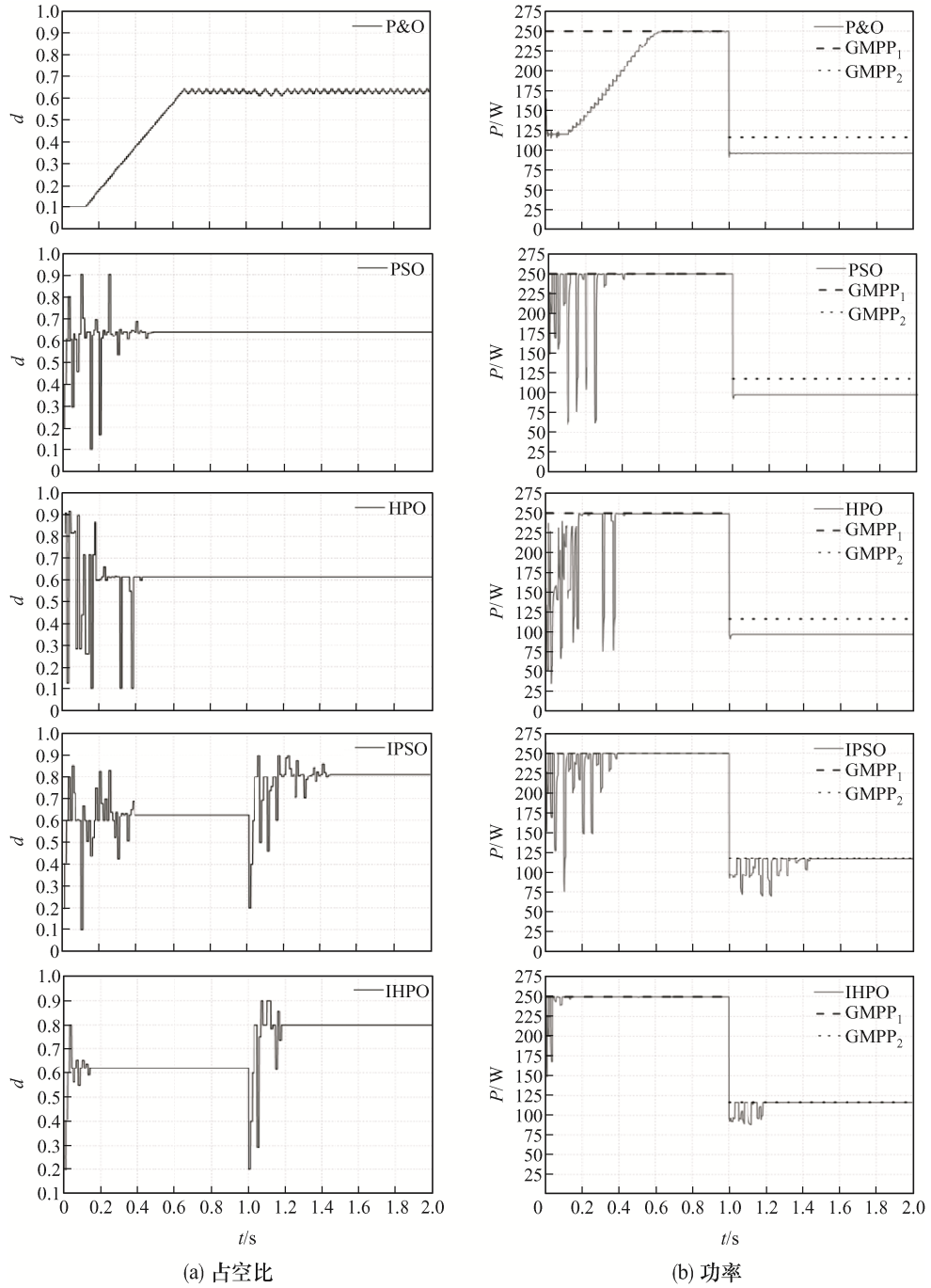
图 6　NUTD 下各算法的跟踪结果

Fig. 6 Tracking results of various algorithms under NUTD

险机制减少了算法在同一位置进行多余探索的倾向，从而有效缩短了跟踪时间。

3.4 阶跃变化下的性能分析

突发的开路或短路在系统运行中任何热电模块 TEMs 内发生时，系统的 *P-U* 曲线和工作点会发生显著变化。本节详细介绍了集中式热电系统突变情况下的模拟，在最初的 1.00 s 内稳定地在 UTD 下运行；在 1.00 s 时，模拟引入了不同程度的热电模块短路故障，导致系统工作点突然变化。各算法的跟踪性能如图 7 所示。配备重启机制的元启发式算法展示了对工作点突然变化的重新启动能力，最终收敛至 116.51 W 的功率输出。同时，P&O、HPO、PSO 算法维持与均匀状态一致的占空比，最终分别收敛至 96.41、97.00 和 96.41 W。IHPO 算法在突



(a) 占空比 (b) 功率

图 7 阶跃变化下各算法的跟踪结果

Fig. 7 Tracking results of various algorithms under step variation

变发生后 0.23 s 内跟踪到最新的 GMPP，平均振荡率仅为 5.02%。这表明 IHPO 算法中安全半径的引入有效避免了对同一位置的重复搜索，减少了不必要的功率波动。

3.5 结果分析

3 种工况下各算法的跟踪结果见表 1。对于具备重启和终止机制的 IPSO 和 IHPO 算法，阶跃情况下能量收集方面的提升是 PSO 和 HPO 算法的 4.53%和 11.94%，表明重启和终止机制的引入有效提升了能量收集能力。特别地，IHPO 算法收集到的能量为最高的 364.36 J，相较于 P&O、PSO、HPO 和 IPSO 算法，能量提升分别为 21.80%、8.00%、11.94%和 3.31%，表明 IHPO 算法在探索和开发阶段具有良好的搜索能力，能够高效完成全局搜索任务。

表 1　各算法的跟踪结果

Tab. 1　Tracking results of various algorithms

算法	工况	追踪时间/s	最大功率/W	输出功率/W	能量/J	跟踪效率/%	最大振荡/%	平均振荡/%
P&O	1	0.63	249.97	249.76	202.87	99.99	3.80	2.40
	2	0.36	116.71	96.41	95.62	82.60	9.65	6.16
	3	—	116.71	96.41	299.22	82.60	9.00	3.44
PSO	1	0.48	249.97	249.96	239.88	99.99	287.69	62.82
	2	0.41	116.71	116.51	112.70	99.98	143.46	42.49
	3	—	116.71	96.41	337.39	82.60	68.14	17.15
HPO	1	0.38	249.97	249.96	231.26	99.98	168.08	60.69
	2	0.42	116.71	116.51	112.83	99.98	145.60	45.05
	3	—	116.71	97.00	325.50	83.11	48.66	19.34
IPSO	1	0.39	249.97	249.76	240.91	99.99	109.40	58.53
	2	0.43	116.71	116.51	111.78	99.98	59.72	43.67
	3	0.43	116.71	116.51	352.69	99.98	109.40	50.58
IHPO	1	0.14	249.97	249.96	248.95	99.99	16.14	7.17
	2	0.19	116.71	116.51	115.73	99.98	27.11	8.05
	3	0.21	116.71	116.51	364.36	99.98	15.93	5.02

此外，IHPO 算法在各种工况下总能以最快的速度和最小的振荡收敛至全局 MPP，相较于 PSO、HPO 和 IPSO 算法，功率振荡情况的改善分别可达 88.59%、88.19%和 87.75%，跟踪速度的提升分别可达 70.83%、63.16%和 64.10%，表明对 HPO 算法原有机制的改进能够有效提升全局搜索能力，精准且快速地追踪到 GMPP。特别地，相较于随机分布的 HPO 算法具备均匀分布的 PSO、IPSO 和 IHPO 算法，均展现出较低的功率振荡情况，表明均匀分布的引入有效避免了 HPO 算法本身易陷入局部最优和随机大范围跃动的缺点。

4　结论

为了应对集中式热电系统在变工况和 NUTD 下的多峰值特性，本文提出了一种改进的猎人猎物优化算法，主要的贡献如下。

(1)对标准 HPO 算法的猎人搜索机制和猎物避险机制进行了适用于多峰值特性的改进，所得到的 IHPO 算法抑制了 HPO 算法频繁的随机跃动，优化了搜索范围，功率振荡最多减少了 88.59%。

(2)通过引入终止机制和重启机制，有效解决了以往算法在跟踪结束阶段所伴随的稳态振荡和搜索能力过剩的问题，仅以 0.19 s 即可完成对 GMPP 的追踪，能量产出的提升最高可达 21.80%。

(3)将 IHPO 算法分别应用于 UTD、NUTD 和阶跃工况，验证了该算法在跟踪速度、功率振荡、能量收集方面均优于其他算法。

参考文献：

[1] Wang Jizhe, Liu Shuang, Li Liangliang. Experiments and

modeling on thermoelectric power generators used for waste heat recovery from hot water pipes [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 1052-1058.

[2] Wang Jun, Li Yilin, Zhao Chuang, et al. An optimization study of structural size of parameterized thermoelectric generator module on performance [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 160: 176-181.

[3] Zhang Xiaoshun, Tan Tian, Yang Bo, et al. Greedy search based data-driven algorithm of centralized thermoelectric generation system under non-uniform temperature distribution [J]. Applied Energy, 2020, 260: 114232.

[4] Gopinath M, Marimuthu R. PV-TEG output: Comparison with heat sink and graphite sheet as heat dissipators [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 45: 102935.

[5] Khan N M, Mansoor M, Mirza A F, et al. Energy harvesting and stability analysis of centralized TEG system under non-uniform temperature distribution [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102028.

[6] 罗宇强, 王江伟, 谢锡锋. 基于改进扰动观察法的光伏 MPPT 控制[J]. 红水河, 2023, 42(6): 42-46, 51.
Luo Yuqiang, Wang Jiangwei, Xie Xifeng. Photovoltaic MPPT control based on improved perturbation and observation method [J]. Hongshui River, 2023, 42(6): 42-46, 51. (in Chinese)

[7] 刘聘凭, 程若发, 许立斌, 等. 基于光伏 MPPT 采样电流的自适应变步长 INC 算法[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 58-66.
Liu Pinping, Cheng Ruofa, Xu Libin, et al. Adaptive variable-step INC algorithm based on PV MPPT sampling current [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 58-66. (in Chinese)

[8] 王思敏. 基于改进型变步长扰动观察法的光伏最大功率控制策略[J]. 集成电路应用, 2023, 40(6): 382-385.
Wang Simin. Analysis of photovoltaic maximum power control strategy based on improved variable step disturbance observation method [J]. Application of IC, 2023, 40(6): 382-385. (in Chinese)

[9] Montecucco A, Knox A R. Maximum power point tracking converter based on the open-circuit voltage method for thermoelectric generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 828-839.

[10] 王喆伟, 朱文超, 黄亮, 等. 基于线性外推的汽车尾气热电发电系统最大功率跟踪算法[J]. 汽车技术, 2021(8): 14-19.
Wang Zhewei, Zhu Wenchao, Huang Liang, et al. MPPT algorithm of vehicle exhaust thermoelectric power generation system based on linear extrapolation [J]. Automobile Technology, 2021(8): 14-19. (in Chinese)

[11] 郭轩成, 陈逸峰, 朱文超, 等. 启发式热电发电多峰值 MPPT 方法研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(12): 84-92.
Guo Xuancheng, Chen Yifeng, Zhu Wenchao, et al. Heuristic multi-peak MPPT method for thermoelectric power generation [J]. Computer Simulation, 2022, 39(12): 84-92. (in Chinese)

[12] 郭伟欣, 张志东. 基于 Jaya 算法的遮阴条件下光伏 MPPT 控制研究[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 105-111.
Guo Weixin, Zhang Zhidong. Research on photovoltaic MPPT control under shading conditions based on Jaya algorithm [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 105-111. (in Chinese)

[13] 肖义平, 赵云峰. 基于混沌映射和高斯扰动的改进粒子群优化算法 MPPT 控制策略研究[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 96-104.
Xiao Yiping, Zhao Yunfeng. Research on MPPT control strategy based on improved PSO algorithm using chaotic mapping and gaussian perturbation [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 96-104. (in Chinese)

[14] 赵玫, 赵君, 左思承, 等. 横向磁通永磁直线电机电磁振动特性分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 168-181.
Zhao Mei, Zhao Jun, Zuo Sicheng, et al. Analysis of electromagnetic vibration characteristics of transverse flux permanent magnet linear motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 168-181. (in Chinese)

[15] Aguila-Leon J, Vargas-Salgado C, Chiñas-Palacios C, et al. Solar photovoltaic maximum power point tracking controller optimization using grey wolf optimizer: A performance comparison between bio-inspired and traditional algorithms [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 211: 118700.

[16] 刘帼巾, 刘达明, 缪建华, 等. 基于变分模态分解和改

进灰狼算法优化深度置信网络的自动转换开关故障识别[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1221-1233.
Liu Guojin, Liu Daming, Miao Jianhua, et al. Fault identification of automatic transfer switching equipment based on VMD-WPE and IGWO optimized DBN [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1221-1233. (in Chinese)

[17] Yang Bo, Wang Junting, Zhang Xiaoshun, et al. MPPT design of centralized thermoelectric generation system using adaptive compass search under non-uniform temperature distribution condition [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 199: 111991.

[18] Zhang Rui, Yang Bo, Chen Nuo. Arithmetic optimization algorithm based MPPT technique for centralized TEG systems under different temperature gradients [J]. Energy Reports, 2022, 8: 2424-2433.

[19] Zhang Xiaoshun, Yang Bo, Yu Tao, et al. Dynamic surrogate model based optimization for MPPT of centralized thermoelectric generation systems under heterogeneous temperature difference [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 966-976.

[20] Li Fusheng, Lin Dan, Yu Tao, et al. Adaptive rapid neural optimization: A data-driven approach to MPPT for centralized TEG systems [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 199: 107426.

[21] 陈逸峰, 朱文超, 谢长君, 等. 基于动态温变特性的全局温差发电 MPPT 方法[J]. 电源技术, 2023, 47(3): 377-381.
Chen Yifeng, Zhu Wenchao, Xie Changjun, et al. Global thermoelectric power generation MPPT method based on dynamic temperature difference characteristics [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(3): 377-381. (in Chinese)

[22] 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.

[23] Naruei I, Keynia F, Sabbagh Molahosseini A. Hunter-prey optimization: Algorithm and applications [J]. Soft Computing, 2022, 26(3): 1279-1314.

[24] 陈璇. 动态热源下温差发电器响应特征与功率跟踪研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
Chen Xuan. Research on response characteristics and power tracking of thermoelectric generator under dynamic heat source [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)



李鹏

作者简介：

李鹏(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：温差发电技术。E-mail：1160042032@qq.com。

李浩(1971—)，男，博士，副教授。研究方向：智能控制理论与应用。E-mail：lihao@whut.edu.cn。

朱文超(1993—)，男，通信作者，博士。研究方向：温差发电技术。E-mail：zhuwenchao@whut.edu.cn。

谢长君(1983—)，男，博士，教授。研究方向：高效热电发电及应用。E-mail：jackxie@mail.whut.edu.cn。

(责任编辑：耿越)