

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212377

基于混合 ICS-PSO 算法的温差发电系统 MPPT 设计*

李成颖¹ 张江¹ 莫思特¹ 李碧雄² 龙西亭³(1. 四川大学电气工程学院 成都 610065; 2. 四川大学建筑与环境学院 成都 610065;
3. 深圳大学深地科学与绿色能源研究院 深圳 518060)

摘要: 针对温差发电系统非均匀温度场条件下,功率电压曲线呈现多峰特性,传统粒子群算法易陷入到局部最优,布谷鸟算法收敛时间慢等问题,提出了改进布谷鸟算法与粒子群算法相混合的最大功率点跟踪控制算法。引入自适应发现概率,扩大种群搜索范围,以最小收敛时间为约束函数,通过参数寻优确定最佳功率区间划分临界点参数,将寻优过程划分为粒子群快速粗寻优与改进布谷鸟稳态精寻优两个阶段,以提升算法的收敛速度和发电效率。仿真结果表明,本算法在均匀温度场条件下,收敛时间 0.24 s,发电效率 99.89%,在非均匀温度场条件下,收敛时间 0.13 s,发电效率 99.92%,均优于其他算法,该算法收敛迅速,跟踪精度高,并通过了基准测试函数测试,验证了该算法的有效性和通用性。

关键词: 温差发电系统;最大功率点跟踪;布谷鸟算法;粒子群算法;非均匀温度场

中图分类号: TP391.9;TM617 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4047

Design of thermoelectric power generation system MPPT
based on hybrid ICS-PSO algorithmLi Chengying¹ Zhang Jiang¹ Mo Site¹ Li Bixiong² Long Xiting³

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Under the condition of non-uniform temperature field in thermoelectric power generation system, the power voltage curve has multi-peak characteristics, the traditional particle swarm optimization algorithm is easy to fall into the local optimum, and the convergence time of cuckoo search algorithm is slow, so a maximum power point tracking control algorithm based on improved cuckoo search algorithm and particle swarm optimization algorithm is proposed. With the minimum convergence time as the constraint function, the optimal power interval is determined by parameter optimization and the critical point parameters is divided. The optimization process is divided into two stages: particle swarm fast coarse optimization and improved cuckoo search steady precision optimization, so as to improve the convergence speed and power generation efficiency of the algorithm. The simulation results show that the proposed algorithm is superior to other algorithms when the convergence time is 0.24 s and the power generation efficiency is 99.89% under the condition of uniform temperature field, and when the convergence time is 0.13 s and the power generation efficiency is 99.92% under the condition of non-uniform temperature field. The algorithm converges quickly and has high tracking accuracy, and has passed the benchmark test function test. The effectiveness and universality of the algorithm are verified.

Keywords: thermoelectric power generation; maximum power point tracking; cuckoo search algorithm; particle swarm optimization algorithm; non-uniform temperature distribution

0 引言

穿戴式医疗传感设备被广泛应用于人体日常健康监测

中,设备体积小、轻便、功耗低,同时也存在频繁充电的缺陷。利用体温发电的自供能电源成为穿戴式传感监测设备供能的新方向。温差发电器件(thermoelectric power

收稿日期:2022-12-12

* 基金项目:国家重点研发计划(2021YFB1507400)项目资助

generation, TEG)能够利用人体与环境之间的温差,将热能转换为电能,是良好自供电电源。为提高温差发电技术的输出效率,需采用最大功率点跟踪技术(maximum power point tracking, MPPT)技术,保持温差发电系统输出功率最优。

目前,MPPT 技术在光伏太阳能发电领域有着广泛的研究与应用。多态蚁群-细菌觅食算法^[1]、改进加速粒子群算法(modified accelerated particle swarm optimization, MAPSO)^[2]、布谷鸟算与扰动观测法混合算法^[3]、DE-GWO 算法^[4]、和改进布谷鸟搜索算法^[5-6]等多种算法的提出,提升了光伏发电在最大功率点跟踪的跟踪速度和精度,提高了光伏发电效率。

MPPT 技术在温差发电领域的研究也正在逐步展开。Quan 等^[7]提出混合扰动观测-二次插值-恒压法,实现了汽车尾气温差发电的 MPPT 技术,但无法针对多功率极值点问题进行全局跟踪。Kanagaraj 等^[8]提出基于自适应神经网络推理系统的 MPPT 技术,能够快速准确跟踪最大功率点,但神经网络参数量大,对功耗要求高,不适用于穿戴式低功率场景。Yahya 等^[9]基于卡尔曼滤波器实现了扰动观测法,旨在克服功率跟踪时出现的噪声干扰。Bijukumar 等^[10]提出的抛物线外推算法,跟踪时间小于扰动观测法,且结构简单,同样无法实现多功率极值点的全局跟踪。吴馥郁等^[11]通过 Simulink 仿真实验,验证了 MPPT 算法在温差发电领域的可行性。周卫琪等^[12]提出改进二分梯度 MPPT 控制算法,对比传统开路电压法和扰动观测法,该算法在跟踪精度和响应速度上有了较大的提升。Tariq 等^[13]针对非均匀温度分布场景下集中式热电电池最大功率点跟踪问题提出了藤壶匹配优化算法,其功率跟踪效率高达 99.93%。杨博等^[14]针对非均匀温差分布下集中式温差发电系统,提出了一种基于贪婪搜索的神经网络算法,该算法能准确区分局部最大功率点和全局最大功率点,其贪婪策略能快速逼近全局最大跟踪点。针对非均匀温度场条件下,功率电压曲线呈现多峰,MPPT 算法依旧存在收敛速度慢,收敛振荡,输入参数多,神经网络模型训练时间长等问题。

布谷鸟算法(cuckoo search, CS)因其参数少,Levy 飞行的重尾随机游走特性,能很好的跟踪到全局最优,且易与其他算法结合,被广泛应用于图像识别^[15]、特征选择^[16]、生物医学^[17]等多领域中。双梅森指数布谷鸟算法^[18](double exponential cuckoo search, DECS)提出的最佳发现概率,加快了算法的收敛速度,改善了布谷鸟算法的收敛速度慢的问题。粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)参数少,寻优前期收敛速度快,易于实现,寻优后期迭代速度慢,易陷入局部最优。

基于现有算法存在的问题,和 TEG 在非均匀温度场条件下,功率电压曲线呈现多峰的特点,本文提出一种改进布谷鸟和粒子群混合算法(improve cuckoo search-PSO, ICS-

PSO)。通过加入自适应控制策略,改进发现概率,规避了固定发现概率种群单一的问题;提出功率区间切分公式,通过参数寻优方式,给定最佳功率切分临界点;临界点作为算法切换标准,PSO 算法用于系统粗寻优,提升算法收敛速度,ICS 算法用于系统精寻优,提升算法全局收敛精度。在 MATLAB R2019b/Simulink 搭建仿真实验平台,对比收敛时间,平均功率和发电效率 3 个参数,基准测试函数验证算法的可行性。

1 建立温差发电模块

1.1 温差发电模块

温差发电技术是利用两种相互接触的 P 型和 N 型半导体,构成闭合回路,当两种半导体两端处于不同温度下时,半导体内的空穴和电子受温度场的作用,从热端移动到冷端,从而在半导体两端形成电动势。温差发电技术利用热能转换成电能,其转换效率有待于进一步提高。图 1 为 TEG 模型图及等效电路图。

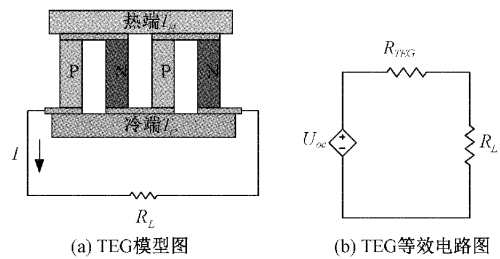


图 1 TEG 模型图及等效电路图

搭建温差输出特性测试平台,温差发电芯片采用两块串联,两块并联的连接结构,得到较大的输出电压和电流,减小测量误差。采用 TEG1-03106 型号的温差发电芯片作为实验对象,测试热端温度初始温度设定为 20 °C,每升高 10 °C,对芯片开路电压及负载电压进行测试。实验测得不同温差下 TEG 系统的输出特性数据,如表 1 所示。

表 1 不同温差下芯片输出特性数据表

温差	开路电压/V	负载电压/V	内阻/ Ω
17.4	0.206	0.123	1.35
18.5	0.394	0.222	1.55
22.6	0.515	0.297	1.47
28.8	0.642	0.342	1.75
32.6	0.741	0.419	1.54
37.7	0.880	0.497	1.54
45.6	1.033	0.548	1.77
52.3	1.164	0.606	1.84
53.6	1.263	0.638	1.96
62.0	1.422	0.695	2.09
65.1	1.484	0.741	2.01
71.4	1.606	0.790	2.07
77.6	1.710	0.836	2.09

由塞贝克效应可得 TEG 输出电动势:

$$\begin{cases} V_{oc} = \alpha(T_H - T_C) \\ \Delta T = (T_H - T_C) \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 为温差发电材料的塞贝克系数, T_H 为 TEG 热端温度, T_C 为 TEG 冷端温度, ΔT 为 TEG 两端温差。

利用 MATLAB/cftool 工具箱, 通过多项式拟合的方式, 对表 1 中数据进行拟合, 得到温差与开路电压和内阻之间的函数关系式, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} V_{oc} = 0.01141\Delta T \\ R_{TEGi} = 2.565e \times 10^{-5}\Delta T + 1.176 \end{cases} \quad (2)$$

利用 MATLAB R2019b/Simulink 仿真软件建立温差发电模型^[19], 输入 TEG 热端温度、冷端温度、塞贝克系数和模块数量等参数, 可得 TEG 模块输出电压。

1.2 集中式 TEG 建模

集中式 TEG, 由多个 TEG 采用先串联, 后并联形式组合成 TEG 模块, 并与一个 MPPT 电路相连, 这种连接方式运行和维护成本较低, 被广泛应用于 TEG 研究中。文献[13]中给出了 N 个串联或并联的集中式 TEG 的电气模型, 其数学表达式如式(3)所示。

$$I_i = \begin{cases} (V_{oc} - V_{Li}) \frac{I_{sci}}{I_{oci}} = I_{sci} - \frac{V_{Li}}{R_{TEGi}}, & 0 \leq V_{Li} < \frac{I_{oci}}{V_{oc}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_{oci} 为第 i 个 TEG 模块开路电压, I_{sci} 为第 i 个 TEG 模块短路电流, V_{Li} 为第 i 个 TEG 模块的 MPPT 输出电压, R_{TEGi} 为第 i 个 TEG 模块内阻。第 i 个 TEG 模块输出功率由式(4)给出。

$$P_{TEGi} = \begin{cases} V_{Li} I_i = I_{sci} V_{Li} - \frac{I_{sci}^2}{R_{TEGi}}, & 0 \leq V_{Li} < \frac{I_{oci}}{V_{oc}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

总输出功率可描述为:

$$P_{TEG} = \sum_i^N P_{TEGi} \quad (5)$$

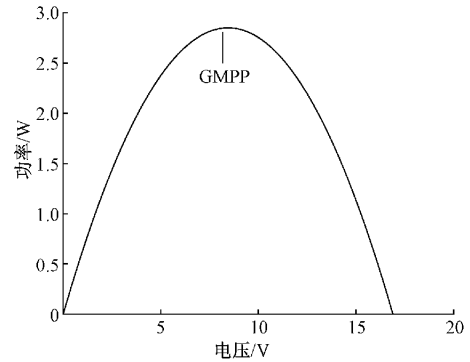
TEG 总输出功率为各个 TEG 输出功率之和。

图 2 所示为均匀温度场与非均匀温度场条件下 TEG 输出功率电压(power voltage, PU)特性, 非均匀温度场呈现一个全局最大功率点(global maximum power point, GMPP)和多个局部最大功率点(local maximum power point, LMPP)的多峰 PU 特性。为获得较高输出特性, MPPT 控制电路需要跟踪到 GMPP。

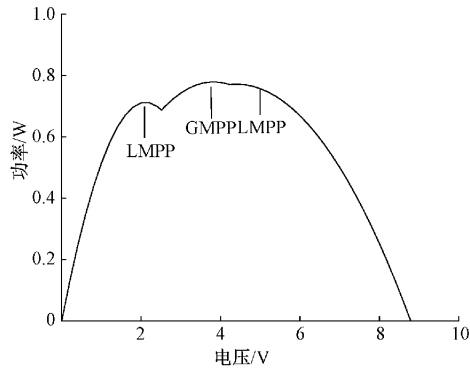
2 基于 ICS-PSO 的 MPPT 方法

2.1 布谷鸟算法

2009 年, 研究学者提出基于 Levy 飞行的启发式算法, 该算法基于鸟群寄生的繁殖行为, 用于解决优化问题。Levy 飞行是模仿昆虫的一种飞行模型, 是典型的重尾飞



(a) 均匀温度场 PU 特性



(b) 非均匀温度场 PU 特性

图 2 均匀温度场与非均匀温度场 PU 特性

行, 短步和长步交替的方式可以最大限度的扩展搜索空间, 扩大种群的多样性, 避免搜索陷入局部最优。传统布谷鸟算法给定固定巢穴数目, 根据 Levy 飞行步长公式获取新巢穴位置并产卵, 若宿主鸟发现了寄生蛋, 则放弃该巢穴并建立新的巢穴; 每一次迭代, 记录最佳巢穴的位置; 通过多次迭代后, 布谷鸟可以寻找到最优巢穴。如图 3 所示, 为典型 Levy 飞行图。

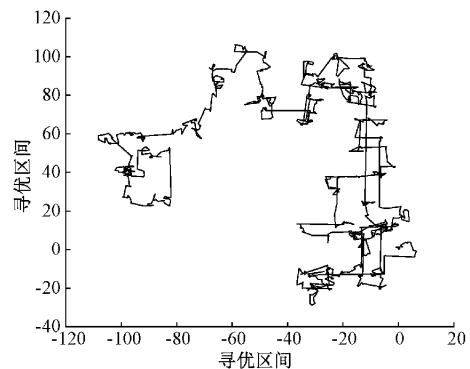


图 3 Levy 飞行

Levy 飞行位置更新公式如式(6)所示。

$$x_{t+1,i} = x_{t,i} + a_0 \otimes \text{levy}(\beta) \quad (6)$$

式中: $x_{t+1,i}$ 表示第 i 个巢穴在第 $t+1$ 次迭代更新后的位置, $x_{t,i}$ 表示第 i 个巢穴在第 t 次迭代的位置, a_0 表示步长缩放因子, \otimes 为卷积运算, β 为 Levy 飞行的控制因子, 一

般取值 1.5, Levy 飞行表达式如式(7)所示。

$$\text{levy}(\beta) = \frac{|u| \Phi}{|v|^{1/\beta}} (\mathbf{x}_{\text{best},i} - \mathbf{x}_{t,i}) \quad (7)$$

式中: u, v 是服从正态分布的随机变量, $u \sim N(0, \sigma_u^2)$, $v \sim N(0, \sigma_v^2)$, $\mathbf{x}_{\text{best},i}$ 为第 i 个巢穴, 第 t 次迭代时, 最佳巢穴的位置:

$$\Phi = \left(\frac{\sin\left(\pi \times \frac{\beta}{2}\right) \times \Gamma(1 + \beta)}{\Gamma\left(\frac{1 + \beta}{2}\right) \times \beta \times 2^{\frac{(\beta-1)}{2}}}\right)^{1/\beta} \quad (8)$$

式中: Γ 为标准的 Gamma 函数。

2.2 改进布谷鸟算法

在传统的 CS 算法中, 寄生蛋的发现概率 P_a 为固定值, 一般取值为 0.25, 这使得整个寻优系统 Levy 飞行游动概率相同。为了克服 P_a 取值固定所带来的 Levy 飞行游动概率相同、算法响应慢、和精度低的问题。本文调整 P_a , 采用自适应发现概率, 改进布谷鸟算法。

迭代前期, 较小的 P_a , 有利于增加 Levy 飞行游动概率, 有利于增加种群的多样性, 避免系统陷入局部最优, 加快算法收敛, 迭代后期, 较大的 P_a , Levy 飞行游动概率降低, 有利于种群在小范围内精确搜索, 提高系统精度。自适应发现概率如式(9)所示。

$$P_a = 0.2 \exp\left(\frac{\text{iter}}{N_{\text{iter}}}\right) \times \text{rand}(1) + 0.1 \quad (9)$$

iter 为当前迭代次数, N_{iter} 为总迭代次数, P_a 在 0.1~0.55 之间非线性振荡, 且保持总体上升趋势, 满足算法的搜寻需要。发现概率随迭代次数的变化曲线如图 4 所示。

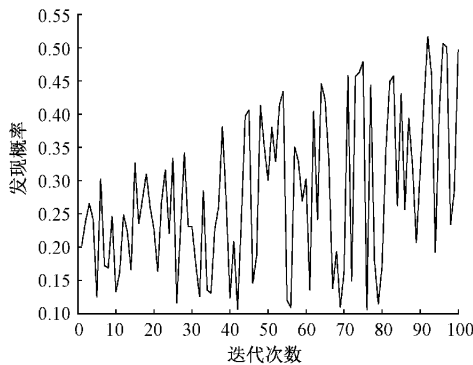


图 4 发现概率变化曲线

2.3 PSO 算法

粒子群是模仿生物界鸟群的一种算法, 通过更新粒子速度与位置, 评估每个粒子的适应度, 更新粒子的历史最优位置, 得到粒子群的全局最优位置。PSO 算法由于每一次迭代更新时, 都带有历史速度及历史惯性, 粒子群前期收敛速度快。

在 D 维搜索空间中有 N 个粒子, 第 i 个粒子在第 k 次迭代时, 位置为 $\mathbf{X} = (X_{k,i1}, X_{k,i2}, \dots, X_{k,iD})$, 速度为 $\mathbf{V}_{k,i} =$

$(V_{k,i1}, V_{k,i2}, \dots, V_{k,iD})$, 第 i 个粒子在第 $k+1$ 次迭代的速度和位置的更新如下:

$$\mathbf{V}_{k+1,i} = \omega_k \times \mathbf{V}_{k,i} + c_1 \times r_1 \times (\mathbf{X}_{k,\text{ipbest}} - \mathbf{X}_{k,i}) + c_2 \times r_2 \times (\mathbf{X}_{k,\text{gpbest}} - \mathbf{X}_{k,i}) \quad (10)$$

$$\mathbf{X}_{k+1,i} = \mathbf{X}_{k,i} + \mathbf{V}_{k+1,i} \quad (11)$$

式中: ω 为惯性权重, c_1 和 c_2 为学习因子, r_1 和 r_2 为 $(0,1)$ 的随机数, $\mathbf{X}_{k,\text{ipbest}}$ 为第 k 次迭代, 第 i 个粒子的最优值, $\mathbf{X}_{k,\text{gpbest}}$ 为第 k 次迭代的全局最优值。

2.4 ICS-PSO 算法

CS 算法由于 Levy 飞行的特点, 使得该算法更能够在局部精确寻优, 同时又能保证算法不会陷入局部最优。由于 Levy 飞行随机游走存在随机性, 导致布谷鸟算法收敛速度慢。为保证收敛速度快且精度高的收敛到功率最大点, 本文采用 ICS-PSO 模型, 引入功率区间划分的方式, 混合 PSO 算法与 ICS 算法。

计算得到当前占空比下最大输出功率 m 与最小输出功率 n , 对功率区间按照下式进行划分, 功率切换临界点参数 P 计算公式如式(12)所示。

$$P = \frac{(m - n)}{m} \quad (12)$$

给定功率切换临界点参数寻优范围 $[0.1, 0.9]$, 寻优步长 0.02, 以最小收敛时间为约束, 通过参数寻优得到最优功率切换临界点参数 P_{best} 。功率区间划分示意图如图 5 所示。参数寻优流程如图 6 所示。 $\mathbf{T} = [t_1, \dots, t_i, \dots, t_{LH}]$ 为时间向量, LH 为向量 \mathbf{Param} 的长度, j 为最小收敛时间所在数组位置。

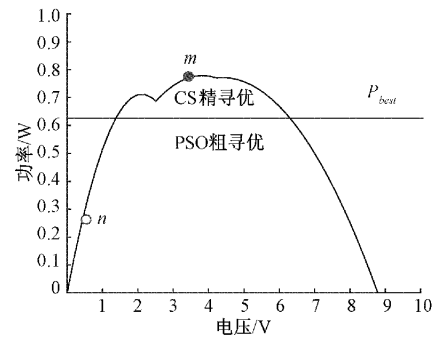


图 5 功率区间划分示意图

当 $P > P_{\text{best}}$ 时, 认为系统处于粗寻优状态, 系统切换到 PSO 算法, 此时保证系统快速收敛, 提高系统响应速度, 当 $P < P_{\text{best}}$ 时, 认为系统处于精寻优状态, 系统切换到 ICS 算法, 此时保证系统的收敛精度, 且能避免系统陷入到局部最优中。算法流程如图 7 所示。

3 仿真结果分析

为模拟穿戴式传感监测设备的体温发电的场景, 设定 TEG 贴合人体表皮较好的均匀温度场条件 1, 部分 TEG 未贴合人体表皮的非均匀温度场条件 2。给定两种不同工况

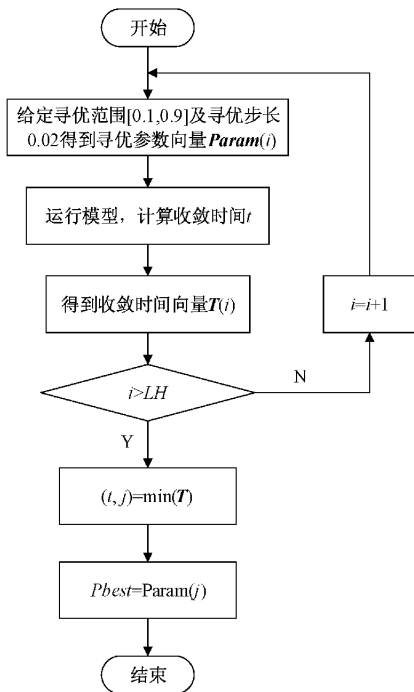


图 6 参数寻优流程

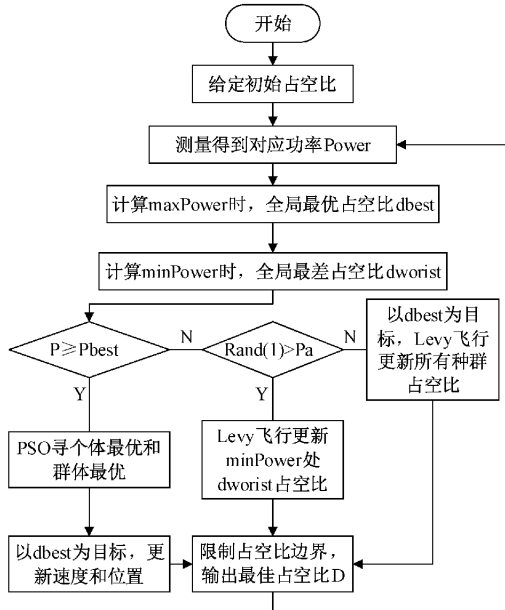


图 7 ICS-PSO 算法流程

条件: 条件 1, 设定热端温度 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷端温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 设置仿真时间为 1 s ; 条件 2, 分别设置热端温度为 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷端温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 设置仿真时间为 1 s 。为了评估 ICS-PSO 算法性能, 本文对比分析了 PSO, MAPSO^[21], CS, ICS, DECS^[18] 和 ICS-PSO 六种算法。

基于表 1 实验测试数据, Matlab R2019b/Simulink 对温差发电 MPPT 系统进行建模仿真, 温差发电模块, 由 4 个 TEG 模块串并联组成, 每个 TEG 模块串由 40 个 TEG

模块串联组成。整体仿真模型如图 8 所示, 模型由 TEG 模块, DC-DC 变换电路, MPPT 模块, PWM 模块, 负载电阻五个部分。DC-DC 电路完成对输入电压的升压; MPPT 模块, 输入温差发电电压和电流数据, 输出为占空比, 实现输出功率最大化; PWM 控制器, 输出对应占空比的 PWM 波形, 实现对开关管的导通和阻断, 调节等效电阻数值的大小实现阻值和 TEG 内阻之间的匹配, 最终实现最大功率的输出。给定参数 $C_1=220\text{ }\mu\text{F}$, $C_2=1\text{ mF}$, $L=25\text{ mH}$, 开关频率 $f=20\text{ kHz}$, 负载电阻 $R_L=13\text{ }\Omega$ 。

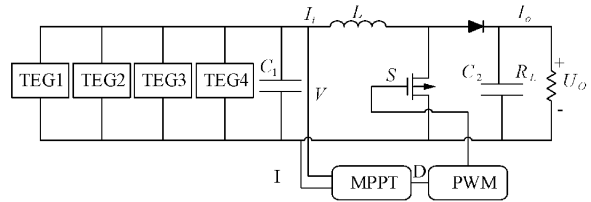


图 8 MPPT 仿真模型

模块, 给定惯性权重 $\omega=0.5$, 学习因子 $c_1=1.2$ 和 $c_2=1.2$, 搜索维度 $D=4$, 种群数目 $N=5$; APSO 给定学习因子 $c=1.2$, 加速度常数边界值 $\beta_{\min}=0.1$, $\beta_{\max}=0.9$, 搜索维度 $D=4$, 种群数目 $N=5$; CS 算法给定步长缩放因子 $a_0=0.8$, 搜索维度 $D=4$, 种群数目 $N=6$; ICS 算法, 步长缩放因子 $a_0=0.8$, 搜索维度 $D=4$, 种群数目 $N=6$; DECS 算法给定步长缩放因子 $a_0=0.8$, 发现概率边界值 $P_{a_{\min}}=0.9$, $P_{a_{\max}}=1$, 搜索维度 $D=4$, 种群数目 $N=6$; ICS-PSO 算法, 步长缩放因子 $a_0=0.8$, 搜索维度 $D=4$, 种群数目 $N=6$ 。综合收敛时间, 平均功率, 发电效率 3 个指标对算法性能进行评估分析。

3.1 均匀温度场

条件 1 为均匀温度场, 经参数寻优后, 此时 ICS-PSO 最优功率切换临界点参数 $P_{best}=0.16$ 。PSO 算法收敛时间 0.59 s , 平均功率 5.48 W , 发电效率 99.74% ; APSO 算法收敛时间 0.54 s , 平均功率 5.48 W , 发电效率 99.51% ; CS 算法收敛时间 0.65 s , 平均发电功率 5.48 W , 发电效率 99.84% ; ICS 算法, 收敛时间 0.54 s , 平均功率 5.48 W , 发电效率 99.81% ; DECS 算法收敛时间 0.34 s , 平均功率 5.48 W , 发电效率 99.91% ; ICS-PSO 算法收敛时间 0.24 s , 平均功率 5.48 W , 发电效率 99.89% 。均匀温度场条件下, ICS-PSO 算法发电效率略低于 DECS 算法, 收敛时间最短, 相比 PSO, MAPSO, CS, ICS 和 DECS 算法, 收敛时间分别缩短了 59% , 56% , 63% , 56% 和 29% 。6 种算法在均匀温度场条件下, 输出波形如图 9 所示。P 为 MPPT 控制电路输出功率, U 为 MPPT 控制电路输出电压, D 为 MPPT 控制电路开关管占空比。

由图 9(a) 功率输出波形可知, PSO 和 MAPSO 算法迭代前期, 收敛速度快于 CS, 迭代后期, CS 由于 Levy 飞行的随机性出现一个大跨步, 占空比出现明显的改变, 导致功率出现变动, 随后又快速跟踪到 GMPP。相比 CS 算法, ICS

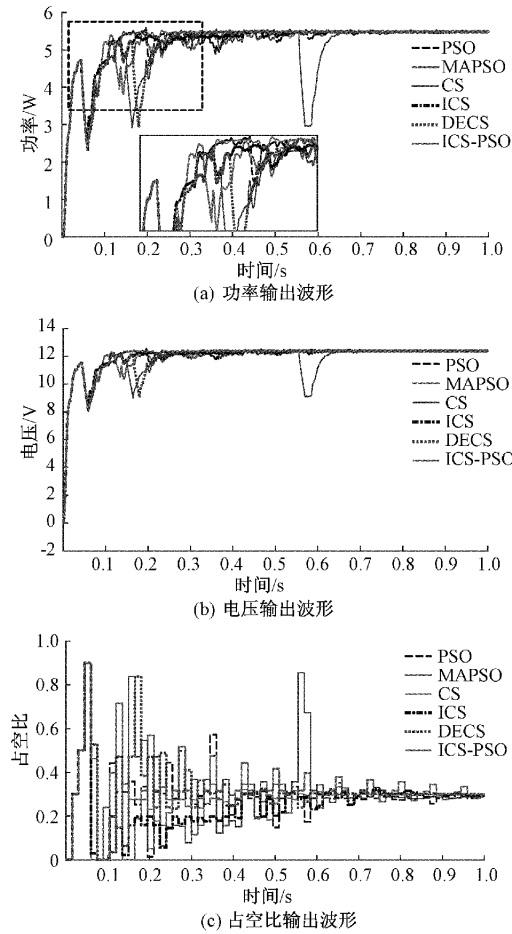


图 9 TEG 均匀温度场输出波形

算法能够快速的跟踪到最大功率点,改进效果明显。DECS 算法迭代前期振荡明显,迭代后期稳定,振荡较小。由占空比输出波形图 9(c)可知,ICS-PSO 迭代前期迅速达到最佳占空比,快速跟踪到 GMPP,且迭代后期占空比变化小,功率振荡小。对 PSO、MAPSO、CS、ICS、DECS 和 ICS-PSO 六种算法结果进行评估,在均匀温度场条件下,ICS-PSO 算法性能明显优于其他算法。实验结果对比如表 2 所示。

表 2 均匀温度场实验结果对比

算法	收敛时间/s	平均功率/W	发电效率/%
PSO	0.59	5.48	99.74
MAPSO	0.54	5.48	99.51
CS	0.65	5.48	99.84
ICS	0.54	5.48	99.81
DECS	0.34	5.48	99.91
ICS-PSO	0.24	5.48	99.89

3.2 非均匀温度场

条件 2 为非均匀温度场,经参数寻优后,此时 ICS-PSO 最优功率切换临界点参数 $P_{best} = 0.1$ 。PSO 算法未收敛,

平均功率 1.469 W,发电效率 97.65%;APSO 算法收敛时间 0.52 s,平均功率 1.497 W,发电效率 99.41%;CS 算法收敛时间 0.58 s,平均功率 1.498 W,发电效率 99.86%;ICS 算法收敛时间 0.13 s,平均功率 1.498 W,发电效率 99.78%;DECS 算法收敛时间 0.23 s,平均功率 1.498 W,发电效率 99.92%;ICS-PSO 算法收敛时间 0.13 s,平均功率 1.498 W,发电效率 99.92%。ICS-PSO 算法表现出较快的收敛特性,与 MAPSO、CS 和 DECS 算法相比,收敛时间分别缩短了 75%、78%和 43%。ICS-SPO 算法拥有较高的发电效率,对比 PSO、MAPSO、CS 和 ICS 分别提高了 2.27%、0.51%、0.06%和 0.14%。相对其他算法,ICS-PSO 算法在收敛时间和发电效率上有明显的优势。6 种算法在非均匀温度场条件下,输出波形如图 10 所示。

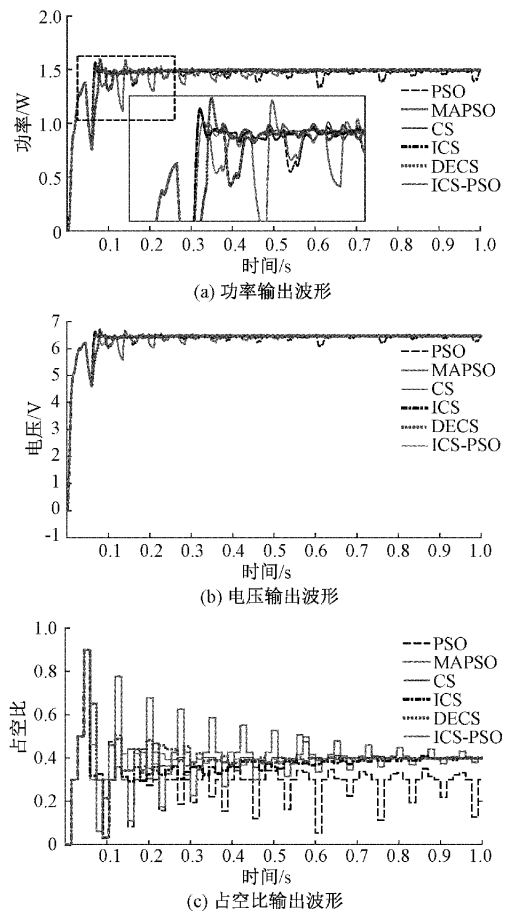


图 10 TEG 非均匀温度场输出波形

由图 10(a)和(c)可知,PSO 算法在 0.2 s 左右陷入 LMPP,在 LMPP 附近振荡,占空比存在明显变化。MAPSO 算法收敛速度慢,迭代后期出现明显的振荡。CS 算法在后期由于随机步长的随机性,在 0.58 s 附近出现小幅振荡。ICS 算法收敛速度明显慢于 ICS-PSO 算法。DECS 算法迭代前期收敛速度慢,振荡明显。综合对比功率输出波形图,电压输出波形和占空比输出波形,ICS-PSO 算法收敛速度快,跟踪后期振荡小,针对非均匀温度场条件

下的 MPPT 技术, ICS-PSO 算法具有明显的优势。非均匀温度场实验结果对比如表 3 所示。

3.3 算法性能验证

为验证算法的通用性, 选取 Rastrigin、Ackley、Schwefel 和 Griewank 四个国际通用基准测试函数对 PSO、MAPSO、CS、ICS、DECS 和 ICS-PSO 算法性能进行性能验证对比测试。表 4 为算法性能验证的基准测试函数。

表 3 非均匀温度场实验结果对比

算法	收敛时间/s	平均功率/W	发电效率/%
PSO	—	1.469	97.65
MAPSO	0.52	1.497	99.41
CS	0.58	1.498	99.86
ICS	0.13	1.498	99.78
DECS	0.23	1.498	99.92
ICS-PSO	0.13	1.498	99.92

表 4 基准测试函数

函数名	表达式	最小值
Rastrigin	$f_1(x) = 10n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i)]$	0
Ackley	$f_2(x) = 20 - 20\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right] + \exp(1)$	0
Schwefel	$f_3(x) = 418.9829n - \sum_{i=1}^n x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	0
Griewank	$f_4(x) = \frac{1}{4000}\sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	0

本次测试给定迭代次数 100 次, 种群数目 30, 寻优维度 20, 为验证算法的通用性, 减小启发式算法随机性带来的影

响, 对算法训练 20 次求取基准测试函数的均值, 最值和方差。表 5 为算法运行 20 次后的基准测试函数的均值, 最值和方差。

表 5 算法通用性测试

测试函数	算法	平均值	最大值	最小值	方差
Rastrigin	PSO	7.6772×10^{-2}	2.633 1	0	9.9161×10^{-2}
	MAPSO	1.1522×10^{-1}	2.633 1	3.8547×10^{-14}	1.3793×10^{-1}
	CS	1.7959×10^{-1}	2.633 1	7.6285×10^{-8}	1.9268×10^{-1}
	ICS	1.8907×10^{-1}	2.633 1	5.3070×10^{-9}	2.0417×10^{-1}
	DECS	4.8651×10^{-1}	2.633 1	9.1440×10^{-2}	3.0785×10^{-1}
	ICS-PSO	5.9736×10^{-3}	2.633 1	0	6.8185×10^{-4}
Ackley	PSO	1.4653×10^{-1}	5.335 9	1.6593×10^{-12}	3.9771×10^{-1}
	MAPSO	5.6214×10^{-1}	5.335 9	1.9007×10^{-14}	1.737 1
	CS	4.2850×10^{-1}	5.335 9	1.7896×10^{-5}	1.041 9
	ICS	4.6021×10^{-1}	5.335 9	7.1918×10^{-6}	1.206 7
	DECS	1.135 7	5.335 9	1.5515×10^{-1}	1.495 2
	ICS-PSO	1.4199×10^{-2}	5.335 9	1.2346×10^{-14}	4.7732×10^{-3}
Schwefel	PSO	7.8378×10^{-1}	5.2539×10^1	2.5455×10^{-5}	2.9371×10^1
	MAPSO	1.8895×10^1	5.2539×10^1	1.6605×10^1	4.7006×10^1
	CS	2.885 2	5.2539×10^1	2.5467×10^{-5}	7.4480×10^1
	ICS	4.470 9	5.2539×10^1	2.5475×10^{-5}	1.1700×10^2
	DECS	8.803 2	5.2539×10^1	2.6553×10^{-1}	2.1964×10^2
	ICS-PSO	2.7496×10^{-1}	1.2809×10^1	2.5455×10^{-6}	2.181 0
Griewank	PSO	2.9166×10^{-2}	8.7638×10^{-1}	1.8490×10^{-3}	9.9851×10^{-3}
	MAPSO	5.2191×10^{-2}	8.7638×10^{-1}	2.2188×10^{-3}	2.1987×10^{-2}
	CS	6.6583×10^{-2}	8.7638×10^{-1}	3.7416×10^{-3}	2.0368×10^{-2}
	ICS	7.8312×10^{-2}	8.7638×10^{-1}	1.9954×10^{-3}	2.5759×10^{-2}
	DECS	1.6334×10^{-1}	8.7638×10^{-1}	4.1616×10^{-2}	3.2446×10^{-2}
	ICS-PSO	1.6562×10^{-3}	2.4590×10^{-2}	1.0458×10^{-14}	1.9791×10^{-5}

观察表 5 数据,表中最大值和最小值体现了算法的求解品质,平均值反应了算法的求解精度,标准差体现了算法的鲁棒性。ICS-PSO 算法在 Ackley 和 Griewank 测试函数下,求解精度和求解品质明显高于其他算法,求解数量级有明显的提高。ICS-PSO 算法在 Rastrigin 和 Schwefel 测试函数下,相对于 PSO 算法,改进效果并不明显,相对于其余算法,在求解精度和求解的鲁棒性上有明显的改进。

ICS-PSO 算法求解精度高,MAPSO、CS、ICS 和 DECS 算法均在不同测试函数条件下表现出较强的随机性。在跟踪 Griewank 函数时,PSO、MAPSO、CS、ICS 和 DECS 算法明显停留在局部最优。ICS-PSO 算法在跟踪不同基准测试函数时,跟踪精度明显优于其他算法,且目标值相对集中,稳态性能好。图 11 为算法基准测试函数线箱

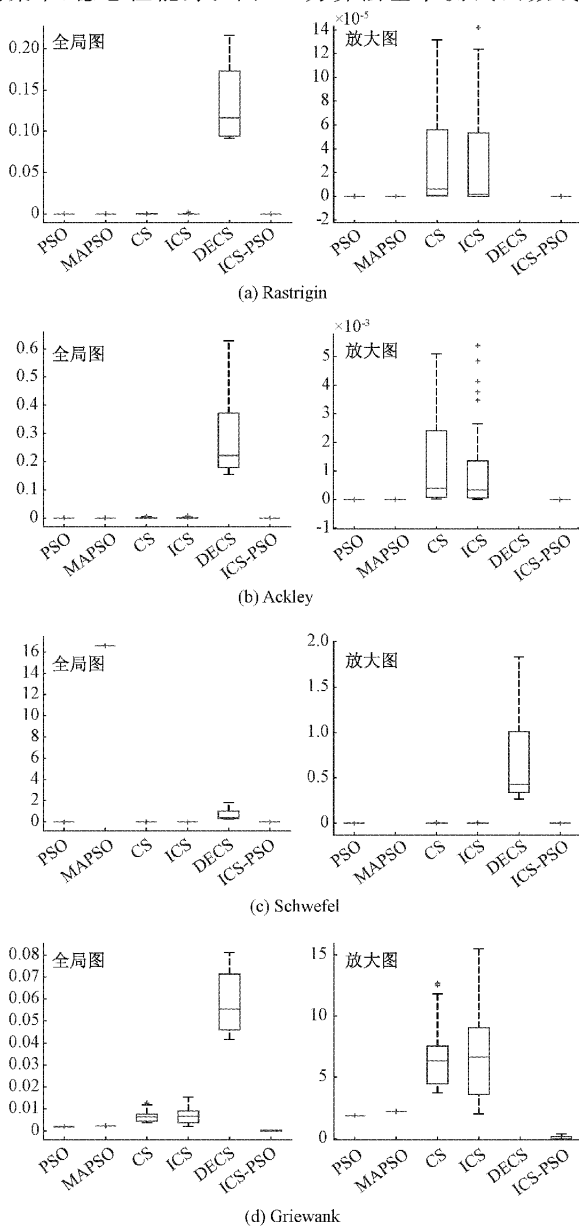


图 11 算法基准测试函数线箱图

图。包括全局图;线箱图的全局总览图;放大图:全局图的放大图,便于更加直观的比较算法的性能。

综上,ICS-PSO 算法的跟踪精度、稳定性及鲁棒性均优于其他算法,有较好的通用性。

4 结 论

本文提出了基于温差发电系统最大功率点跟踪的混合 ICS-PSO 算法,以收敛时间为约束条件,通过参数寻优设定最优功率切换临界点参数,将寻优划分为前期粗寻优和后期精寻优。前期粗寻优切换至 PSO 算法,实现快速收敛,后期精寻优切换至 ICS 算法,改进 CS 算法自适应发现概率,避免固定发现概率导致种群单一的问题,且可避免陷入局部最优。仿真结果表明,该算法在均匀温度场条件下收敛时间 0.24 s,发电效率 99.89%,非均匀温度场条件下收敛时间 0.13 s,发电效率 99.92%,占空比振荡幅值小。基于基准测试函数对比验证,综合分析,该算法在收敛速度、发电效率、跟踪精度及迭代后期的振荡都优于其他算法,为穿戴式传感监测设备在体温自供能场景下的温差发电系统的 MPPT 研究提供了一种收敛速度快、发电效率高的控制方法。

参考文献

- [1] 李云凤,雷勇,杜佳耘,等. 多态蚁群-细菌觅食算法实现部分遮蔽下光伏系统最大功率跟踪[J]. 现代电力, 2022,39(1): 1-8.
- [2] RAJENDRAN S, SRINIVASAN H. Simplified accelerated particle swarm optimisation algorithm for efficient maximum power point tracking in partially shaded photovoltaic systems[J]. Iet Renewable Power Generation, 2016,10(9): 1340-1347.
- [3] 葛传九,武鹏,董祥祥,等. 基于布谷鸟算法的光伏 MPPT 改进[J]. 太阳能学报, 2022,43(10): 59-64.
- [4] 杨永康,缪书唯. 基于 DE-GWO 算法的光伏系统 MPPT 仿真研究[J]. 电子测量技术, 2022,45(7): 75-81.
- [5] ELTAMALY A M. An improved cuckoo search algorithm for maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading conditions [J]. Energies, 2021, 14(4), DOI: 10.3390/en14040953.
- [6] 王洪亮,周于尧,刘志坚,等. 基于改进 CS 算法的光伏系统 MPPT 仿真研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(7): 67-71.
- [7] QUAN R, ZHOU W, YANG G Y, et al. A hybrid maximum power point tracking method for automobile exhaust thermoelectric generator [J]. Journal of Electronic Materials, 2017,46(5): 2676-2683.
- [8] KANAGARAJ N. An enhanced maximum power point tracking method for thermoelectric generator

- using adaptive neuro-fuzzy inference system [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2021,16(3): 1207-1218.
- [9] YAHYA K, BILGIN M Z, ERFIDAN T, et al. Improving the performance of the MPPT for thermoelectric generator system by using kalman filter [C]. 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), 2018.
- [10] BIJUKUMAR B, RAAM A, GANESAN S I, et al. MPPT algorithm for thermoelectric generators based on parabolic extrapolation [J]. *Iet Generation Transmission & Distribution*, 2019,13(6): 821-828.
- [11] 吴馥郁, 胡申华, 马湘蓉, 等. 基于 MPPT 温差发电实验及仿真的研究[J]. *电子器件*, 2019, 42(4): 843-849.
- [12] 周卫琪, 张军波, 罗丁, 等. 基于 MPPT 算法的温差发电回收效率研究[J]. *电源技术*, 2021,45(8): 1066-1069.
- [13] TARIQ M I, MANSOOR M, MIRZA A F, et al. Optimal control of centralized thermoelectric generation system under nonuniform temperature distribution using barnacles mating optimization algorithm [J]. *Electronics*, 2021, 10(22), DOI: 10.3390/electronics10222839.
- [14] 杨博, 王俊婷, 钟林恩, 等. 基于贪婪神经网络的集中式温差发电系统最大功率跟踪[J]. *电工技术学报*, 2020,35(11): 2349-2359.
- [15] 程玉柱, 李赵春, 余伟. 基于布谷鸟搜索的路面裂缝图像检测算法[J]. *传感器与微系统*, 2019,38(8): 136-138.
- [16] 章成旭, 叶绍强, 周恺卿, 等. 基于粗糙集和改进二进制布谷鸟搜索算法的高维数据特征选择[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2022,58(4): 584-593.
- [17] 余梦圆, 叶春明, 赵灵玮, 等. 考虑患者分类的应急手术调度研究[J]. *计算机工程与应用*, 2022,58(22): 246-253.
- [18] REDA M, ELHOSSEINI M, HAIKAL A, et al. A novel cuckoo search algorithm with adaptive discovery probability based on double Mersenne numbers [J]. *Neural Computing & Applications*, 2021, 33(23): 16377-16402.
- [19] MAMUR H, CCOBAN Y. Simulation of maximum power point tracking with buck-boost convertor for thermoelectric generators [J]. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences-Pamukkale Universitesi Muhendislik Bilimleri Dergisi*, 2020,26(5): 916-926.

作者简介

李成颖, 硕士研究生, 主要研究方向为温差发电技术的优化与改进。

E-mail: lcysandra@163.com

莫思特(通信作者), 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为新能源应用、人工智能、仪器科学、医学仪器、电力系统防灾减灾、电力电子、数字图像处理、地质灾害监测。

E-mail: mosite@126.com