

基于 GQPSO 算法的光伏系统 MPPT 控制研究

齐云瑞¹ 周庆才¹
QI Yunrui ZHOU Qingcai

摘要

针对光伏组件在局部遮阴工况下输出功率-电压特性曲线存在多个极值点,传统最大功率点跟踪技术因全局搜索能力不足导致追踪失效的问题,文章提出了一种基于高斯概率分布的突变算子的量子粒子群算法用于光伏 MPPT 控制。该算法使用高斯变异算子代替随机序列,有效提升了量子粒子群算法的性能,防止其过早收敛到局部最优。实验对比分析表明,所提算法在追踪速度和准确度上有着显著优势。

关键词

光伏阵列;最大功率点追踪;局部遮阴;粒子群算法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.10.047

0 引言

作为可再生能源体系的重要组成部分,光伏发电技术近年来在能源结构转型中占据关键地位^[1]。研究表明,光伏阵列运行特性易受辐照强度、组件温度等环境参数波动影响,导致最大功率点呈现动态漂移特性^[2]。更为复杂的是,光伏单元固有的强非线性输出特性决定了需采用最大功率点跟踪技术实现有限光照条件下的能量捕获最优化^[3]。然而,经典控制策略如扰动观测法、电导增量法在遮蔽工况下的多峰寻优场景中易发生局部收敛现象^[4],这严重制约了复杂环境下

的发电效率提升。许多研究者针对此问题提出了多种改进算法,如改进人工鱼群算法^[5]、鲸鱼算法等控制方法^[6],但 these 方法计算资源消耗大、参数过多、调整复杂且较敏感,基于此,本文提出一种粒子群优化算法,该算法可以在局部遮阴的条件下快速而精准地跟踪到最大功率点,且收敛性好,鲁棒性强。

1 光伏阵列输出特性

1.1 光伏电池数学模型

基于工程应用需求,光伏发电系统普遍采用模块化设计理念,通过串并联拓扑架构将单体光伏单元集成为阵列化发电单元。该系统中各独立光伏元件的等效电路模型如图 1 所示。

1. 吉林建筑大学 吉林长春 130119

[基金项目] 吉林省科技计划项目(20240304183SF)

并深入较优解区域,有效平衡全局与局部搜索,优化效果显著,能精准规划出低成本路径。CPO 算法起始有一定收敛能力,但搜索机制不稳定,迭代中总成本波动大,稳定性欠佳,难以精准收敛到最优解。SWO 算法前期搜索优质解区域效率低,收敛曲线下降平缓,需更多迭代趋近最优,且因搜索策略局限,累积成本较高。综合来看,DBO 算法在收敛性和优化成本方面优势明显。

4 结语

本文针对水下机器人集群在复杂环境中的协同控制难题,提出一种基于蜣螂优化算法(DBO)的分布式控制框架。通过模拟蜣螂群体的滚球、觅食、繁殖等行为,结合水下环境特性改进水流补偿、信号丢失鲁棒性策略,有效提升了集群在动态环境中的路径规划效率与协同可靠性。实验结果表明,DBO 算法在收敛速度、全局搜索能力及综合成本优化上显著优于对比算法,为解决水下通信受限、流场干扰等挑战提供了新的仿生解决方案。

参考文献:

- [1] 胡桥,赵振轶,冯豪博,等. AUV 智能集群协同任务研究进展[J]. 水下无人系统学报,2023,31(2):189-200.
- [2] 李爱国,覃征,鲍复民,等. 粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用,2002,38(21):1-3.
- [3] 苗润龙. 分布式无人艇集群协同区域搜索与目标定位研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.
- [4] 施宇. 复杂环境 AUV 集群自组织编队协同及避障控制[D]. 长春:吉林大学,2022.

【作者简介】

张训源(1989—),男,山东滨州人,硕士,讲师,研究方向:控制工程。

(收稿日期:2025-04-19 修回日期:2025-10-11)

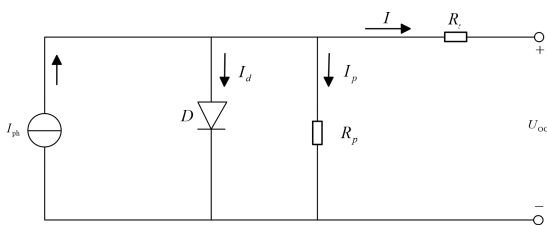


图1 光伏电池等效模型

针对光伏单元的环境敏感性特征，当其运行工况偏离标准测试条件时，需通过补偿机制实现关键参数的校准^[7]。基于此建立的数学模型用公式表示为：

$$\begin{cases} I = I_{SC}(\Delta s + 1)(1 + 0.0025\Delta t)(1 - AB) \\ A = (1 - \frac{I_m}{I_{SC}})e^{\frac{-U_m}{U_{OC}(1 - \frac{I_m}{I_{SC}})}[\ln(1 - \frac{I_m}{I_{SC}})]^{-1}U_{OC}} \\ B = e^{\frac{(\frac{U_m}{U_{OC}} - 1)[\ln(1 - \frac{I_m}{I_{SC}})]^{-1}U_{OC}(1 - 0.0025\Delta t)\ln(e + 0.5\Delta s)}{U_{OC}}} - 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中： I 、 U 为工作电流、工作电压； I_m 、 U_m 为最大功率点电流和电压； U_{OC} 为开路电压； I_{SC} 为短路电流； $\Delta t = t - 2$ ， t 为当前温度； $\Delta s = s/1000 - 2$ ， s 为当前光照强度。

1.2 局部遮阴下的光伏阵列输出特性

因光伏系统具有低效率特性，为提高光伏系统的发电效率，应使光伏电池始终运行在最大功率输出点。当光伏电池不存在局部遮阴时，PV曲线呈现单峰波形且只有一个最大功率点，当光伏阵列有一个或者多个模块被灰尘、飞鸟等因素遮盖产生局部遮阴，输出特性曲线呈现出多峰值的特点，此时存在一个最大功率点和多个局部最大功率点。

用3块相同电池板串联连接组成的光伏阵列，设定外部环境温度为25℃。考虑到实际环境的复杂性，基于表1定义的3个不同光照强度等级，通过仿真实验得到了对应的光伏阵列功率特性曲线如图2所示。

表1 不同局部阴影下模块接收的光照强度

光照强度等级	单位: W/m ²		
	S1	S2	S3
PSC1	1 000	1 000	1 000
PSC2	1 000	1 000	800
PSC3	1 000	800	600

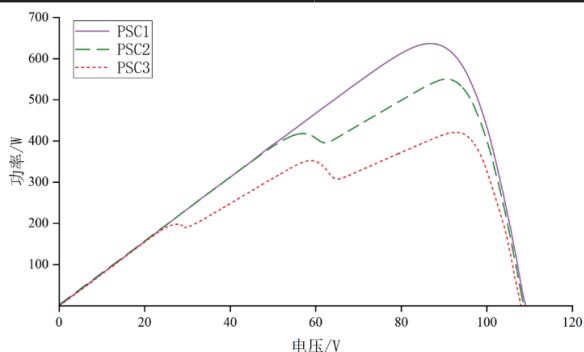


图2 不同光照条件下光伏阵列的PV输出特性曲线

结果表明局部遮蔽工况会导致光伏发电单元的输出特性曲线发生畸变，具体表现为功率电压关系呈现多模态分布特征。

2 基于GQPSO算法跟踪光伏MPPT

2.1 粒子群优化算法

基于群体智能理论框架，粒子群优化（particle swarm optimization, PSO）这一仿生学算法由Eberhart与Kennedy研究团队于1995年首次构建^[8]，算法受鸟群的觅食行为启发而来。粒子群优化算法将候选解抽象为群体中的个体成员（粒子），目标解的搜索过程则对应鸟群的协同觅食。在优化过程中，每个粒子既表现出独立的探索行为，也参与到群体的协作中。它们通过融合同伴的经验和自身的搜索历史，逐步向最优解收敛。PSO算法要先对粒子和速度进行初始化，用公式表示为：

$$\begin{cases} x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}), i = 1, 2, \dots, N \\ v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}), i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

式中： x_i 表示第*i*个粒子在*D*维空间中的位置； v_i 表示第*i*个粒子的飞行速度；生成粒子的位置和速度都在给定的范围内随机生成。

然后计算比较每个粒子的适应度函数，得到个体历史最优值和全局最优值，用公式表示为：

$$\begin{cases} p_{besti} = (p_{besti1}, p_{besti2}, \dots, p_{bestiD}), i = 1, 2, \dots, N \\ g_{besti} = (g_{besti1}, g_{besti2}, \dots, g_{bestiD}), i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

式中： p_{besti} 表示第*i*个粒子经历过的具有最优适应度值的位置，即个体历史最优位置； g_{besti} 表示整个粒子群经历过的最优位置，即全局最优位置。最后通过公式对粒子群的速度和位置进行更新：

$$\begin{cases} v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_1 (p_{bestij}(t) - x_{ij}(t)) \\ \quad + c_2 r_2 (g_{bestj} - x_{ij}(t)) \\ x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \end{cases} \quad (4)$$

式中：下标*j*表示粒子向量的第*j*维； t 表示当前迭代次数； c_1 、 c_2 表示常数，取值在(0,2)内； r_1 、 r_2 表示[0,1]内独立的随机数。

2.2 改进的粒子群算法

2.2.1 引入量子行为

虽然粒子群算法收敛速度较快，但在处理MPPT问题时极易过度收敛而陷入局部最优，故在粒子群更新公式中引入量子行为来扩大搜索范围。引入量子行为的PSO算法（QPSO）中，粒子的位置更新基于概率观测机制，每个粒子在迭代过程中会生成多个随机概率值，并利用蒙特卡罗思想进行观测，得到个体最优值。改进后的迭代公式为：

$$\begin{cases} x_i(t+1) = p + \beta \cdot |M_{best}(t+1) - x_i(t)| \cdot \ln\left(\frac{1}{u}\right) & \text{if } k \geq 0.5 \\ x_i(t+1) = p - \beta \cdot |M_{best}(t+1) - x_i(t)| \cdot \ln\left(\frac{1}{u}\right) & \text{if } k < 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

$$p = \frac{G \cdot p_{besti} + \gamma \cdot g_{besti}}{G + \gamma}$$
(6)

$$M_{best}(t+1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{besti}(t)$$
(7)

式中: β 为收缩膨胀系数, 控制算法的收敛速度; u 和 k 为 (0,1) 范围内使用均匀概率分布函数生成的值; p 为局部吸引因子, 由个体最优位置和全局最优位置决定; M_{best} 为所有粒子最佳位置的平均值^[9]。

2.2.2 高斯变异算子

用均值为零、单位方差的高斯分布序列生成粒子群算法的随机系数, 可以在当前点周围生成具有大概率小振幅和具有小概率高振幅步长, 使粒子远离当前点并逃离局部最大值。结合高斯变异算子后的迭代公式改进为:

$$\begin{cases} x_i(t+1) = p + \beta \cdot |M_{best}(t+1) - x_i(t)| \cdot \ln\left(\frac{1}{G}\right) & \text{if } k \geq 0.5 \\ x_i(t+1) = p - \beta \cdot |M_{best}(t+1) - x_i(t)| \cdot \ln\left(\frac{1}{G}\right) & \text{if } k < 0.5 \end{cases}$$
(8)

$$p = \frac{G \cdot p_{besti} + \gamma \cdot g_{besti}}{G + \gamma}$$
(9)

式中: G 和 γ 是服从高斯概率分布的随机数。

2.3 基于 GQPSO 算法跟踪光伏 MPPT

本文所使用的光伏 MPPT 控制器结构如图 3 所示, 该系统由光伏阵列和 boost 电路组成, 通过基于 GQPSO 算法优化的 MPPT 输出 PWM 脉冲信号控制电路的占空比就能控制光伏阵列输出的电压值, 以达到最大输出功率。

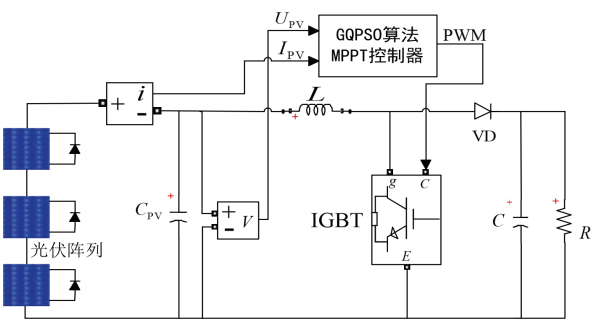


图 3 基于 GQPSO 算法的光伏系统 MPPT 结构示意图

当光照强度发生改变或者光伏组件受到建筑物、云层等遮挡时, 光伏阵列的输出功率会发生变化, 需要重新启动算法来提高发电效率。光伏阵列输出功率变化值 ΔP 为:

$$\Delta P = \frac{|P_n - P_{n-1}|}{P_n} \times 100\%$$
(10)

式中: P_n 为当前输出功率; P_{n-1} 为上一次检测时的输出功率。当 $\Delta P > 5\%$ 时, 算法重启。基于 GQPSO 算法的光伏 MPPT 控制流程如图 4 所示。

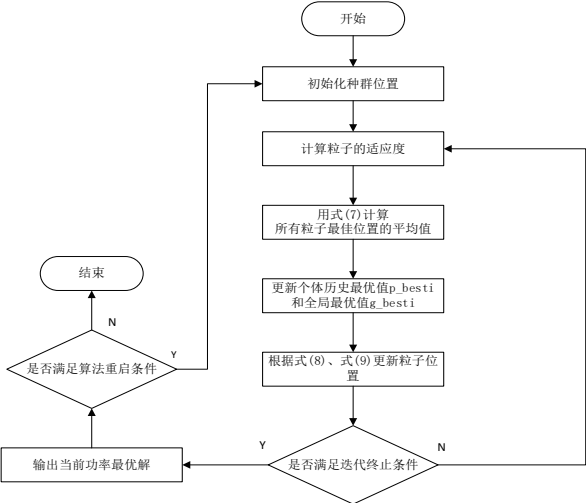


图 4 GQPSO 算法流程

3 仿真分析

本文使用 Matlab/Simulink(R2023a) 软件进行仿真实验, 选用型号为 LSTH-215 的光伏组件, 其标称参数包括, 其峰值功率 $P_{max} = 213.15\text{ W}$, 最大工作电压 $U_{max} = 29\text{ V}$, 开路电压 $U_{OC} = 36.3\text{ V}$, 短路电流 $U_{SC} = 7.84\text{ A}$, 测试环境温度保持为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。为验证 GQPSO 算法在优化精度和收敛速度方面的优势, 将本文的 GQPSO 算法与 PSO 算法、蜣螂 (DBO) 算法进行对比。

3.1 静态光照情况下功率跟踪

在静态无遮阴光照情况下, 光伏阵列呈现单极值特性的 PV 特性曲线。实验设定光照强度为表 1 定义的 PCS1, 所有光伏电池接收的光照强度均为 1000 W/m^2 , 测得光伏阵列的最大输出功率为 640.2 W 。此时 3 种优化算法的输出功率曲线如图 5 所示, 测试结果如表 2 所示。

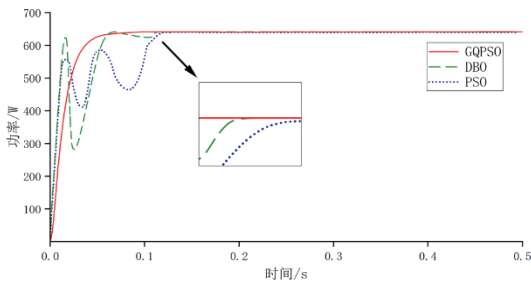


图 5 静态无遮阴下 MPPT 算法控制对比

表 2 静态无遮阴下算法性能对比

算法	追踪功率 /W	追踪时间 /s	寻优精度 /%
PSO	635.56	0.153	99.3
DBO	639.23	0.121	99.8
GQPSO	639.23	0.096	99.8

在静态局部遮阴工况下, 光伏发电单元的功率电压特性曲线呈现多极值输出特性。设置仿真光照强度为表 1

中的 PCS3 方案, 3 块光伏电池所受到的光照强度分别为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 、 800 W/m^2 和 600 W/m^2 , 光伏阵列的最大输出功率为 414.7 W 。在此情况下, 3 种算法的输出功率曲线如图 6 所示, 测试结果如表 3 所示。

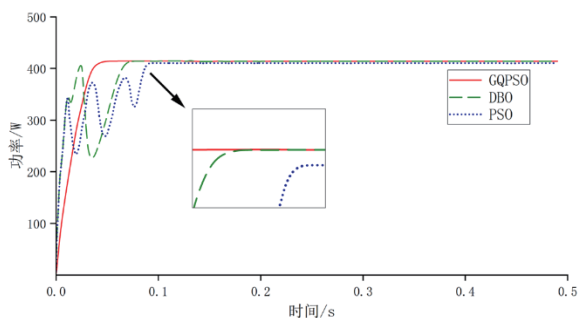


图 6 静态局部遮阴下 MPPT 算法控制对比

表 3 静态局部遮阴下算法性能对比

算法	追踪功率 /W	追踪时间 /s	寻优精度 /%
PSO	410.76	0.100	99.0
DBO	413.45	0.079	99.7
GQPSO	413.45	0.056	99.7

3.2 动态光照情况下功率跟踪

在实际工作环境中, 局部遮阴情况可能随时间发生变化, 光伏电池当前接收的光照强度会与前一刻不同。为验证本文算法在动态情况下的有效性, 设置初始光照强度为表 1 中 PCS1, 在 0.5 s 时改变光照强度为表 1 中 PCS3, 3 种算法的输出功率曲线如图 7 所示。可以看到无论是初始光照强度下还是光照强度发生变化后, 本文算法较两种其他算法在追踪速度和精度上都具有一定的优越性。

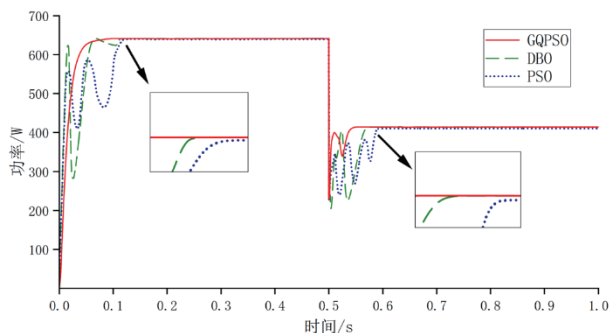


图 7 动态局部遮阴下 MPPT 算法控制对比

通过上述的数据对比可知在静态光照情况下本文算法能够更快、更精准地跟踪到最大功率输出点, 同时在动态情况下也能有效跟踪至最大功率点, 验证了该算法在动态光照情况下的有效性。

4 结论

本文提出了一种基于 GQPSO 算法的光伏 MPPT 跟踪方法, 在 PSO 算法中引入量子行为和高斯分布, 增加了种群分

布的合理性, 增强了算法的全局搜索能力, 避免陷入局部最大功率点。本方法跟踪过程准确, 速度快, 通过实验对比, 验证了在不同的光照条件下本算法对比 PSO 算法和 DBO 算法具有更好的追踪能力。

参考文献:

- [1] LI H, YANG D, SU W Z, et al. An overall distribution particle swarm optimization MPPT algorithm for photovoltaic system under partial shading[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2019, 66(1):265-275.
- [2] BOLLIPO R B, MIKKILI S, BONTAGORLA P K. Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: a review[J]. CSEE journal of power & energy systems, 2021, 7(1): 9-33.
- [3] 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.
- [4] 陈亮, 张永革, 许建奎, 等. 杂食鱼群算法在光伏系统 MPPT 控制中的仿真研究 [J]. 太阳能学报, 2017, 38(2):333-338.
- [5] 翁珏. 扩展记忆优化人工鱼群算法在光伏系统 MPPT 的仿真研究 [J]. 电工技术, 2022(4):65-67.
- [6] 陈斌, 王俊江, 赵明胤, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的光伏发电系统 MPPT 控制研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(2):19-26.
- [7] 王若谷, 刘佳玲, 刘宛菴, 等. 基于 PSO 算法的直流近区光伏发电系统控制参数优化方法 [J]. 电工电能新技术, 2021, 40(12):19-29.
- [8] CHARIN C, ISHAK D, ZAINURI M A A M, et al. A hybrid of bio-inspired algorithm based on levy flight and particle swarm optimizations for photovoltaic system under partial shading conditions[J]. Solar energy, 2021, 217:1-14.
- [9] 孙隽丰, 李成海, 宋亚飞. ACCQPSO: 一种改进的量子粒子群优化算法及其应用 [J]. 信息网络安全, 2024, 24(4): 574-586.

【作者简介】

齐云瑞 (1999—), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向: 新能源发电技术。

周庆才 (1973—), 男, 山东滨州人, 博士, 研究员, 硕士研究生导师, 研究方向: 光电检测技术和新能源领域。

(收稿日期: 2025-04-01 修回日期: 2025-09-28)