

分类号：TM615

单位代码：10363

密 级：公 开

学 号：2220320181

题 目 复杂工况下光伏发电系统效率提升方法研究

题 目 Research on Efficiency Improvement Methods for
Photovoltaic Power Generation Systems under Complex
Operating Conditions

学生姓名：杨海挺

校内导师：汪石农

校外导师：程志军

专业学位类别：电子信息

研究方向（领域）：控制工程

论文答辩日期：2025 年 5 月 8 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名： 杨海挺

日期： 2025 年 5 月 12 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：杨海挺

指导教师签名：



日期：2025 年 5 月 12 日

日期：2025 年 5 月

复杂工况下光伏发电系统效率提升方法研究

摘要

随着能源短缺和环境污染问题加剧，太阳能光伏发电技术被视为应对能源危机和降低碳排放的重要解决方案之一。然而，光伏发电存在效率低下、环境敏感性高、复杂阴影分布引发的多峰功率特性等不足。其中，阴影遮挡问题尤为突出：局部遮蔽会引发热斑效应，造成局部过热从而导致组件损耗甚至永久损伤；复杂阴影分布的多峰功率特性则会显著影响最大功率点跟踪精度。因此，提升复杂工况下光伏系统的发电效率已成为该领域的研究重点。

本文首先介绍了光伏电池的基本原理，基于 MATLAB/Simulink 平台建立了光伏阵列的仿真模型，重点分析光照强度、环境温度和拓扑结构对输出特性的影响。仿真结果表明：在恒温工况下，光伏阵列输出功率受阴影区域光照强度和拓扑结构的共同影响。通过对比不同工况下的输出特性曲线发现，采用全连接（TCT）结构均能表现出较好的输出性能。因此，本文重点研究 TCT 结构阵列的效率提升方法。

其次，阐述了光伏阵列最大功率点跟踪技术（MPPT）的基本原理，并对单峰传统算法与多峰智能 MPPT 算法进行了分析对比。针对传统算法易陷入局部最优、收敛速度慢以及跟踪精度低的问题，提出一种基于改进灰狼优化（IGWO）和扰动观察（PO）的光伏多峰 MPPT 混合算法，能够有效解决功率振荡与效率损失等问题。通过引入基于余弦函数的非线性收敛因子，替代灰狼算法（GWO）中传统线性收敛因子，提高了算法全局搜索能力，并加快了算法收敛速度；同时采用变步长扰动观察法，初期通过较大的扰动量快速接近最大功率点，当成功跟踪到最大功率点附近后，功率变化量的降低使扰动量相应减小，从而提高了跟踪精度。在均匀光照、静态阴影和动态阴影三种条件下对该算法进行仿真，仿真结果表明，IGWO&PO 算法有效避免了传统 MPPT 算法易陷入局部最优的情况，

在提升跟踪精度和收敛速度的同时，减少了优化过程中的振荡幅度，从而提高了光伏发电系统的能量利用效率。

最后，针对局部阴影下光伏系统的失配问题，提出一种将模拟退火（SA）与 Ken-Ken 算法相结合的混合算法（SA-KenKen），用于光伏阵列重构。该算法结合了 SA 算法的全局搜索能力与 Ken-Ken 算法在结构化约束处理上的能力，能够将局部阴影均匀分布到光伏阵列中，从而减少失配损耗。对 Zig-Zag、Ken-Ken、MS 和 SA-KenKen 四种重构算法在相同条件下进行仿真与性能对比，结果证明 SA-KenKen 算法能够有效改善光伏阵列的输出特性，验证了其在复杂工况下提升光伏发电功率的有效性和适用性。

光伏多峰 MPPT 算法与光伏阵列重构的研究在提升发电效率和适应复杂工况方面具有重要的价值。本文的研究成果在后期通过算法优化和系统集成后，有望应用到实际的光伏发电系统中，为光伏发电的效率提升提供有力的技术支撑。

关键词：光伏阵列，全连接结构，最大功率点跟踪技术，重构，复杂工况

Research on Efficiency Improvement Methods for Photovoltaic Power Generation Systems under Complex Operating Conditions

ABSTRACT

With the worsening of energy shortage and environmental pollution, solar photovoltaic power generation technology is regarded as one of the important solutions to deal with the energy crisis and reduce carbon emissions. However, photovoltaic power generation has shortcomings such as low efficiency, high environmental sensitivity, and multi-peak power characteristics caused by complex shadow distribution. Among them, the shadow occlusion problem is particularly prominent: local occlusion will cause heat spot effect, resulting in local overheating, and component loss, and even permanent damage; The multi-peak power characteristics of complex shadow distribution will significantly affect the tracking accuracy of maximum power point. Therefore, improving the power generation efficiency of photovoltaic systems under complex working conditions has become the focus of research in this field.

This article first introduces the basic principle of photovoltaic cells, and establishes a simulation model of photovoltaic array based on MATLAB/Simulink platform, focusing on the impact of light intensity, ambient temperature and topology structure on output characteristics. The simulation results show that the output power of PV array is influenced by the light intensity and topology of shadow region under constant temperature condition. By comparing the output characteristic curves under different working conditions, it is found that the fully connected (TCT) structure can show better output performance. Therefore, this article focuses on the efficiency improvement of TCT array.

Secondly, the basic principle of the maximum power point tracking

technology (MPPT) for photovoltaic arrays is described, and the traditional single-peak algorithm and multi-peak intelligent MPPT algorithm are analyzed and compared. Aiming at the problems of local optimization, slow convergence and low tracking accuracy, a hybrid PV MPPT algorithm based on improved Grey Wolf optimization (IGWO) and perturbation observation (PO) is proposed, which can effectively solve the problems of power oscillation and efficiency loss. By introducing a nonlinear convergence factor based on cosine function to replace the traditional linear convergence factor in GWO, the global search ability of the algorithm is improved and the convergence speed of the algorithm is accelerated. At the same time, the variable step size perturbation observation method is used to quickly approach the maximum power point through a large disturbance quantity at the initial stage. When the power variation is successfully tracked to the vicinity of the maximum power point, the disturbance quantity is reduced accordingly, and the tracking accuracy is improved. The simulation results show that the IGWO&PO algorithm can effectively avoid the situation that the traditional MPPT algorithm is easy to fall into the local optimal, improve the tracking accuracy and convergence speed, and reduce the oscillation amplitude during the optimization process, thus improving the energy utilization efficiency of the photovoltaic power generation system.

Finally, a hybrid algorithm (SA-KenKen) combining simulated annealing (SA) and Ken-Ken algorithm is proposed to solve the mismatch problem of PV system under local shadow. This algorithm combines the global search capability of SA algorithm with the structured constraint processing capability of Ken-Ken algorithm to evenly distribute the local shadows to the PV array, thereby reducing the mismatch loss. Four reconstruction algorithms, Zig-Zag, Ken-Ken, MS and SA-KenKen, are simulated and compared under the same conditions. The results show that SA-KenKen algorithm can effectively improve the output characteristics

of photovoltaic arrays, and verify its effectiveness and applicability in improving photovoltaic power generation under complex conditions.

The research of PV multi-peak MPPT algorithm and PV array reconstruction has important value in improving power generation efficiency and adapting to complex working conditions. The research results of this article are expected to be applied to actual PV power generation systems after algorithm optimization and system integration in the later stage, and provide strong technical support for the efficiency improvement of PV power generation.

Haiting Yang (Electronic information)

Supervised by Prof. Shinong Wang

KEY WORDS: photovoltaic array, fully connected structure, maximum power point tracking technology, reconstruction, complex conditions

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 光伏阵列 MPPT 研究现状	4
1.2.2 光伏阵列重构研究现状	5
1.3 本文主要研究内容	6
第 2 章 光伏发电模型结构及输出特性研究.....	8
2.1 光伏发电模型	8
2.1.1 光伏电池发电原理	8
2.1.2 光伏电池仿真模型	8
2.1.3 光伏组件等效电路	9
2.1.4 光伏阵列拓扑结构	10
2.2 光伏电池输出特性研究	12
2.3 光伏阵列输出特性研究	14
2.3.1 标准条件下光伏阵列输出特性	14
2.3.2 复杂工况下光伏阵列输出特性	15
2.4 本章小结	18
第 3 章 光伏阵列 MPPT 算法研究	19
3.1 光伏阵列 MPPT 基本原理.....	19
3.2 单峰传统 MPPT 算法.....	20
3.2.1 电导增量法	20
3.2.2 恒定电压法	21
3.2.3 扰动观察法	22
3.3 多峰智能 MPPT 算法.....	24
3.3.1 粒子群优化算法	24
3.3.2 细菌觅食优化算法	26
3.4 基于 IGWO&PO 的多峰 MPPT 算法.....	27
3.4.1 传统灰狼优化算法	27
3.4.2 改进型灰狼优化算法	29
3.4.3 变步长扰动观察法	30
3.4.4 IGWO&PO 算法的实现	31
3.5 MPPT 算法仿真建模及参数设置.....	32
3.5.1 光伏阵列模型	32
3.5.2 boost 变换器模型.....	33
3.5.3 完整模型搭建	33
3.6 不同工况下的 MPPT 仿真与分析.....	34
3.6.1 均匀光照下的 MPPT.....	34
3.6.2 静态阴影条件下的 MPPT.....	35
3.6.3 动态阴影条件下的 MPPT.....	36

3.6.4 MPPT 算法性能评估标准及性能比较	36
3.7 本章小结	37
第 4 章 光伏阵列重构方法研究	39
4.1 Zig-Zag “之” 字形重构	39
4.2 MS 幻方重构	40
4.3 Ken-Ken 拼图重构	42
4.4 SA-KenKen 重构	44
4.5 光伏阵列重构算法仿真与分析	47
4.5.1 光照均匀的阴影遮挡仿真	47
4.5.2 光照不均匀的阴影遮挡仿真	52
4.5.3 光伏阵列重构算法评估标准及性能比较	59
4.6 本章小结	63
第 5 章 总结与展望	64
5.1 总结	64
5.2 展望	64
参考文献	66
攻读学位期间发表的学术论文	72
攻读学位期间获得的奖励	72
致 谢	73

第1章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

自工业革命以来，化石能源的广泛应用促进了文明发展，但也引发了资源枯竭、气候变化和地缘政治冲突等问题。因此，推动新能源转型已成为解决能源危机、应对气候变化和促进可持续发展的必由之路。太阳能光伏发电技术作为新能源发电的主要形式，凭借其清洁环保特性、零排放优势及经济高效的运行特征，在可再生能源领域发挥着关键作用^[1]。该技术兼具能源供给灵活性和系统可持续性，被普遍视为推动全球能源体系向低碳化转型的核心技术路径。

自 19 世纪法国科学家贝克勒尔发现光电效应以来，光伏发电技术逐步演进。20 世纪中叶，美国贝尔实验室成功制造出第一块硅太阳能电池，标志着技术的重要突破。随着工业化生产技术的提升，光伏发电的成本显著下降，经济性得以增强。进入 21 世纪，全球对可再生能源的关注推动了光伏发电的迅速发展，使其成为替代化石燃料的重要选项。近年来，中国光伏产业也取得显著进展，刷新了硅太阳能电池的效率纪录。自 1978 年至 2005 年，国家通过扶持光伏应用示范项目，推动了光伏技术在工农业及农村地区的普及应用，典型实例包括小型户用系统和村落供电系统等^[2]。2000 年后，国家在西部偏远地区启动了一系列电力基础设施建设项目，如无电区域供电计划和光明工程。其中，太阳能光伏技术成为改善当地农牧民生活用电难题的重要解决方案。据能源部门统计数据显示，截至 2005 年末，全国光伏发电装机总量已累计达到 7 万千瓦，标志着可再生能源在民生供电领域取得突破性进展。自 2006 年起，国家通过施行《可再生能源法》逐步完善光伏产业政策框架。2009 年启动实施金太阳示范工程和光电建筑应用示范项目，并在 2009 至 2010 年间分两期开展光伏特许权招标工作，通过政策引导加速光伏电站建设与全产业链技术升级。自 2013 年起，为促进光伏产业发展，国务院发布了相关政策意见，中国光伏行业进入了快速发展阶段，逐步成为全球光伏装机容量增长的重要推动力。全国光伏装机容量从 2015 年的 4,318 万千瓦增长到 2023 年的 60,891.8 万千瓦，年均复合增长率达到 38.88%^[3-4]。2015-2023 中国光伏装机规模情况如图 1-1 所示。

由此可以看出，我国光伏产业正迅速增长，光伏发电技术将在未来能源转型中发挥重要作用。

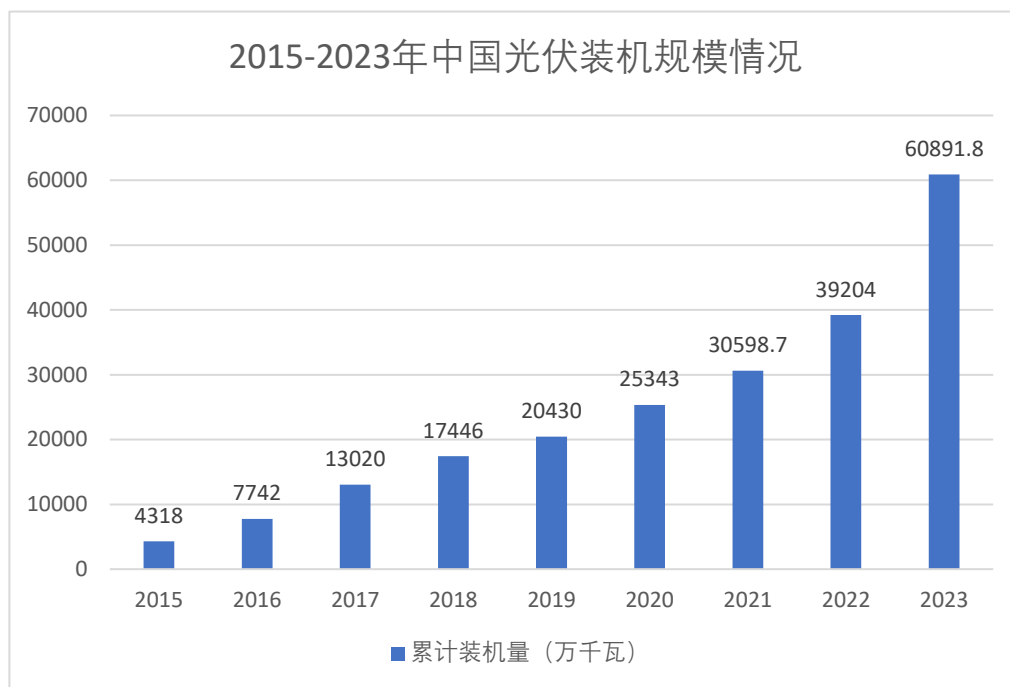


图 1-1 2015-2023 中国光伏装机规模情况

光伏发电技术虽具备显著优势，但其实际应用仍面临多重制约：系统发电效率易受环境因素（如光照强度波动、温度变化）影响，同时光伏组件的能量转换效率偏低，以及阵列表面的局部阴影遮挡效应，均会对系统整体输出功率产生显著限制^[5]。在布置光伏阵列时，应尽量远离高层建筑、大型植被或山丘等可能产生阴影的区域以提高光伏发电效率。然而，在家庭太阳能系统日益普及的背景下，光伏组件在运行过程中面临多种环境因素的制约，如女儿墙（建筑结构部件）、鸟粪和灰尘^[6]等问题。局部持续遮蔽会导致光伏组件的输出特性失配，显著降低系统发电效率^[7]。此外，这些因素还可能腐蚀光伏电池表面，降低组件的可靠性，增加漏电流，缩短使用寿命，甚至在严重情况下引发热斑，导致光伏组件损坏。当前，提高光伏发电系统效率的常见方法包括提升光伏电池的光电转换效率、光强跟踪、光伏阵列重构和最大功率点跟踪技术等^[8]。

1.提升光伏电池光电转换效率

在标准条件下（大气质量 AM1.5，光照强度为 1000 W/m^2 ，温度为 25°C ），光电转换效率是单位面积产生的电功率与太阳辐射功率之比。提高光伏电池光电转换效率可以通过以下几个途径：（1）在材料创新方面，可通过开发新型半导体材料体系，例如构建聚合物多层电极结构和优化纳米晶体光伏材料，以增强光吸收与载流子传输效率；（2）在制造工艺优化层面，重点突破单晶硅等高效电池的量产技术瓶颈，通过生产工艺革新实现规模化降本增效；（3）在器件

结构设计上，采用光聚集技术方案，通过透镜阵列或反射结构实现入射光强度倍增，从而提升单位面积发电功率。

2. 光强跟踪

当光伏组件表面与太阳光线呈垂直入射状态时，其光电转换效率可达到峰值。为此，采用光强跟踪装置对光伏组件进行动态角度调节，以维持入射光线与组件表面持续垂直。该技术通过实时监测太阳运行轨迹实施精准定位，有效提升光伏电池的发电效能。根据控制信号的生成方式，跟踪技术可以分为主动式、被动式和混合式三类^[9-11]。

主动式跟踪系统通过内置控制器预置的太阳轨迹算法结合实时时钟数据，动态计算太阳高度角及方位角参数。该方法虽然能提升光伏系统能量捕获效率，但其机械结构设计较为复杂且成本显著高于被动式系统。被动式跟踪系统采用光强反馈机制，通过光敏传感器阵列实时生成调控信号实现太阳跟踪。由于系统完全依赖光学传感信号，在持续阴雨或云层遮挡条件下易出现跟踪失效现象。同时，光敏组件存在表面污染、热斑效应等干扰因素，容易导致检测信号产生偏差进而影响跟踪稳定性。

3. 光伏阵列重构

光伏阵列重构通过改变光伏组件的电气接线方式来实现系统拓扑优化。该过程能够使电流-电压特性曲线变得更加平缓，同时有效降低功率-电压曲线的多峰现象^[12]。这样的优化不仅有助于降低光伏阵列输出功率的损失，还能提升发电系统的最大输出功率。

4. 最大功率点跟踪技术（MPPT）

最大功率点跟踪技术（MPPT）通过实时监控光伏电池的工作状态，动态调整工作点至最大功率点^[13]，确保电池在各种复杂环境条件下都能输出最大功率。

由于提升光伏电池光电转换效率和光强跟踪技术存在成本高、周期长的问题，且需要突破物理极限或解决复杂工程难题，因此本文重点研究更具应用前景的光伏阵列重构与 MPPT 技术，以降低复杂工况对系统发电效率的影响。该研究对提高光伏系统发电效率具有重要的理论价值和实际应用意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 光伏阵列 MPPT 研究现状

研究表明,光伏阵列的输出电压、电流和最大功率受光照强度和环境温度的显著影响^[14]。尤其是在局部遮蔽条件下,光伏组件容易出现失配效应,导致功率-电压特性曲线呈现多峰特性,从而影响光伏系统对最大功率点的持续跟踪能力。因此,如何在复杂工况下提升光伏系统 MPPT 的效率并维持最大功率输出,已成为国内外学者广泛关注的研究课题。

近年来,MPPT 技术已成为光伏发电系统效率提升的关键技术,其通过实时调节工作点实现最大功率输出。在均匀光照条件下,传统 MPPT 算法能有效跟踪单峰特性曲线的最优工作点。然而实际运行中,光伏阵列受局部遮荫现象(树木遮挡、建筑物阴影或云层移动等因素)的影响,表面光照强度呈现非均匀分布,导致系统功率-电压特性曲线出现多峰值特征。在此工况下,传统算法因缺乏全局寻优能力而陷入局部极值点,难以实现全局最大功率点跟踪。

现阶段,国内外研究人员在 MPPT 控制方法领域开展了广泛研究。为解决传统电导增量法^[15-17]、扰动观察法^[18-21]存在的稳态振荡与误判问题,学者们引入了狮群算法^[22]、麻雀算法^[23]、细菌觅食算法^[24-26]、萤火虫算法^[27]等智能优化方法。尽管这些智能算法的全局寻优能力优于传统方法,但实验研究表明其仍存在收敛速度慢、抗干扰能力弱等缺陷。目前,智能算法在光伏系统 MPPT 中的研究已取得阶段性成果。针对传统粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)参数设置复杂、调整困难等问题,文献[28-29]通过自适应调节机制动态调整惯性权重和学习因子,有效克服了局部极值收敛问题,但其收敛速度和跟踪精度仍需进一步提升。文献[30]采用细菌觅食优化算法(Bacterial Foraging Optimization Algorithm, BFOA)进行系统控制,该算法虽具有较好的全局寻优能力,但优化过程中存在显著振荡现象。文献[31]通过引入自适应策略改进灰狼优化算法(Grey Wolf Optimization, GWO),其改进后的算法收敛速度显著提升,但在复杂工况下仍易陷入局部最优。为突破单一算法的性能局限,当前研究聚焦于开发混合控制算法,其核心思路在于整合不同算法的优势特性,进而提升最大功率点跟踪的整体效能。文献[32]提出一种结合细菌觅食与粒子群算法的混合策略(BFOA-PSO),采用两阶段优化机制:首先采用粒子群算法进行全局空间搜索,再通过细菌觅食算法的趋向性操作实现局部寻优。该策略显著

提升了算法的收敛速度，但在功率跟踪精度方面仍有不足。文献[33-34] 提出将粒子群算法与遗传算法融合的协同搜索策略，先通过全局搜索快速定位最大功率点邻近区域，再引入模糊控制实现精确跟踪。该方法在提升最大功率点跟踪精度的同时，仍面临算法模型复杂度高、收敛速度待优化等问题。文献[35-36]提出了一种结合 PSO 算法和电导增量法（INC）的多峰值 MPPT 算法，该算法在局部阴影遮挡等非均匀光照条件下展现出良好的全局寻优能力。然而，INC 算法对步长参数要求较高，尤其是在动态工况下，过大的步长设置会加剧功率振荡，而过小步长则会影响跟踪速度。文献[37-39]将 PSO 算法与扰动观察法（P&O）结合实现光伏系统的 MPPT 控制。与独立算法相比，混合算法在动态响应速度与跟踪精度方面均取得显著提升，但定步长 P&O 算法在系统稳定运行阶段仍存在功率振荡现象，尚未得到有效改善。文献[40]优化了传统的定步长扰动观察法，同时将其与模型预测控制（MPC）融合，用于实现光伏系统的最大功率点跟踪。仿真研究表明，该算法在跟踪速度与精度之间实现了有效平衡，但在实际应用中，其计算复杂度较高，并对系统和硬件性能提出了更高的要求。

1.2.2 光伏阵列重构研究现状

在实际运行过程中，光伏阵列常常受到建筑物、树木及云层等遮挡影响，这会降低光伏发电系统的稳定性^[41]，导致阵列内各组件间工作特性失配，从而显著降低发电效率。针对光伏阵列部分遮挡导致的失配问题，可采用重构技术对组件布局进行优化，使阴影遮挡的影响分布均匀，进而提高系统发电效率^[42]。该方法不仅能延长设备使用寿命，还可减少因功率损耗造成的经济损失。根据运行方式的不同，光伏重构主要分为静态重构与动态重构两种类型。

静态重构是在保持电气连接结构不变的前提下，通过调整光伏组件之间的物理排布方式，实现阴影分布的优化。数独重构方法基于数独谜题的求解算法，对光伏组件进行重组布局，该方法可以有效应用于 TCT 拓扑结构的光伏阵列系统。文献[43]提出了一种基于“数独拼图”原理的 TCT 阵列重构方法。该方法根据阴影遮蔽程度对受影响的光伏组件进行类型划分，并利用数独原理将这些组件均匀分配到各行各列中，避免重复排列。然而，该方法的缺点在于未充分考虑硬件电路的复杂性和组件调整所需的时间成本。文献[44]提出了一种新型阴影优化配置方法，该方法在不改变光伏阵列原有拓扑结构的前提下，从第二列组件开始实施梯度递增的倒置排列策略。这一重构策略简单有效，能够缓解因

行遮挡所造成的块状阴影。然而，由于大多数光伏阵列无法拆解，各组件的位置调整受到限制。文献[45]提出了一种新颖的锯齿形布置方案，用于光伏组件的总交叉连接互连，以减少部分遮阴损失并提高发电量。然而，该方法在实际应用中存在线缆用量增多引起的附加传输损耗问题，同时由于重构算法中约束条件冗余，导致阴影分布优化过程中存在能量耗散现象。文献[46]提出了一种光伏阵列插空列循环静态重构方法，融合列循环与插空策略，实现同列光伏组件的均匀分布。但由于重新排列组件可能需要调整电气连接，从而增加了系统的复杂性。文献[47]将光伏阵列的行列划分为奇数组和偶数组，并按照四种预设规则进行重组。该方法规则简单，适用于各种尺寸的光伏阵列，但在处理特殊阴影时，其阴影分散能力存在一定局限性。

动态重构是指在不改变光伏组件物理布局的前提下，实时调整其电气连接，以适应大面积或复杂阴影的情况。相较于静态重构，动态重构通过实时光照情况自适应调整组件间的电气连接方式，从而显著增强系统的灵活性与运行效率。文献[48]提出了一种基于 MATLAB 的全局重构系统，该系统依据光伏阵列阴影分布的最优原则，设计了交叉开关矩阵电路，用于重构光伏阵列结构，从而提升输出功率。然而，该方法仅适用于小规模光伏阵列，在大规模阵列中效果不佳。文献[49]提出了一种基于遮荫度模型的自适应重构方法，用于减轻光伏阵列的遮荫效应。该方法通过控制算法实时评估遮荫程度，并基于动态重构补偿机制，实时配置开关矩阵，实现补偿电池组与固定光伏组件的智能连接，从而有效提升系统在局部遮荫条件下的发电效率。然而，补偿电池组的增设导致了额外的设备成本，造成资源浪费。文献[50-55]提出了基于启发式算法的光伏阵列重构策略，该方法因其灵活性强且无需精确系统模型，能够提高重构的精度和速度。然而，在光伏阵列受到大面积遮挡时，该算法容易陷入局部最优解，导致难以确保找到全局最优解。文献[56]提出了一种结合开关控制与静态重构的方法，将大规模光伏阵列划分为多个子模块，并对各子阵列进行独立的开关调控，从而实现电气拓扑结构的动态优化。该方法在提升光伏系统发电效率的同时，显著减少了所需开关器件的数量。

1.3 本文主要研究内容

本文主要研究复杂工况下光伏发电系统效率提升的方法，共分为六个章节。

第一章为绪论。首先系统阐述了光伏发电的研究背景及意义，接着围绕光

伏阵列重构技术和最大功率跟踪技术两大领域，分析国内外研究现状。

第二章为光伏发电模型结构及输出特性研究。首先，系统阐述了光伏系统发电的基本原理，构建了光伏电池数学模型并研究其输出特性。接着，基于 MATLAB/Simulink 平台，分别建立了 TCT、BL、SP 和 HC 四种典型拓扑结构的仿真模型。随后，分析了不同拓扑结构的光伏阵列在复杂工况下的输出特性。结果表明，TCT 型结构具有较好的输出性能，适合进一步研究。

第三章为光伏阵列 MPPT 算法研究。基于第二章的理论基础，对 MPPT 算法进行了分析。首先介绍传统的单峰 MPPT 算法（电导增量法、恒定电压法和扰动观察法），随后探讨多峰智能 MPPT 算法（粒子群算法和细菌觅食优化算法）。针对传统算法的不足，提出了一种基于 IGWO&PO 的多峰 MPPT 算法。最后，基于标准条件与复杂工况下的仿真结果表明，所提 IGWO&PO 算法能有效提升复杂工况下光伏发电的效率。

第四章为光伏阵列重构方法研究。首先介绍了 Zig-Zag“之”字形重构、MS 幻方重构和 Ken-Ken 拼图重构算法的原理与步骤。随后，分析了 Ken-Ken 拼图重构算法的优缺点。针对其局限性，提出了一种结合模拟退火算法全局搜索能力和 Ken-Ken 算法结构化约束处理能力的 SA-KenKen 重构算法。最后，通过搭建 5×5 光伏阵列仿真模型，对比不同阴影遮挡条件下各重构算法的性能。仿真结果表明，SA-KenKen 重构算法在复杂工况下均表现出较好的重构效果。

第五章为总结与展望。

第2章 光伏发电模型结构及输出特性研究

当前太阳能技术主要分为两类：直接利用光热资源的被动式太阳能技术，以及通过能量转换实现的主动式太阳能技术。光伏发电属于后者，其核心原理是将太阳辐射转换为电能。然而，光伏发电系统的输出效率和特性会随着环境条件的变化而改变。环境变化显著影响发电系统的工作，可能影响系统的效率和稳定性。本章将系统地研究光伏发电模型结构，分别搭建光伏电池和光伏阵列的仿真模型，并分析其发电原理与输出特性，为后续深入探究复杂工况下光伏阵列发电效率的提升奠定理论基础。

2.1 光伏发电模型

2.1.1 光伏电池发电原理

光伏电池以硅为主要半导体材料，利用光伏效应实现光能向电能的转换^[57]。当光照射到 P-N 结时，半导体材料吸收光子能量，内部产生电势差。具体而言，纯净半导体导电性差，但通过掺杂工艺，可在同一硅片的不同区域掺入硼（形成 P 型半导体，富含空穴）和磷（形成 N 型半导体，富含自由电子），从而形成 P-N 结。光照条件下，光子能量激发半导体内部产生大量电子-空穴对^[58]。在内建电场作用下，电子向 N 区迁移，空穴向 P 区迁移，导致 N 区积累负电荷、P 区积累正电荷，从而形成电势差（光伏电压）。当外部电路连接到光伏电池的两端时，这种电势差推动电子流动，从而实现太阳能向电能的转换^[59]。光生伏特效应的原理图如图 2-1 所示。

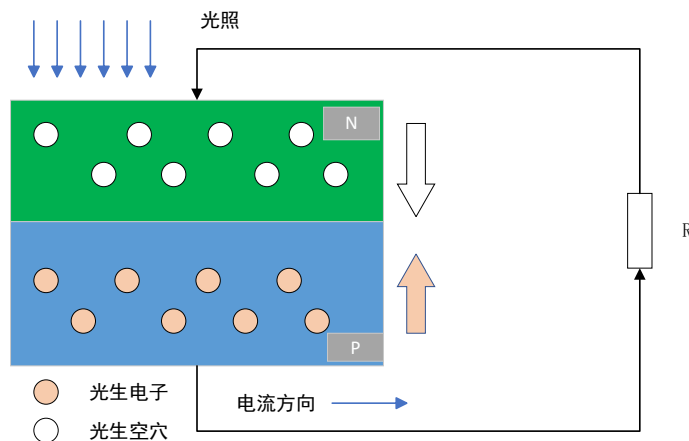


图 2-1 光生伏特效应的原理图

2.1.2 光伏电池仿真模型

在光伏发电系统中，光伏电池作为输入端起着至关重要的作用。为了通过

提升光伏电池的输出功率来提高系统工作效率，需要对其主要性能参数进行分析。这可以通过研究输出功率与其影响因素之间的关系来实现。基于电池在常规工作状态下的数学建模方法，利用 Simulink 软件搭建光伏电池模型，如图 2-2 所示。

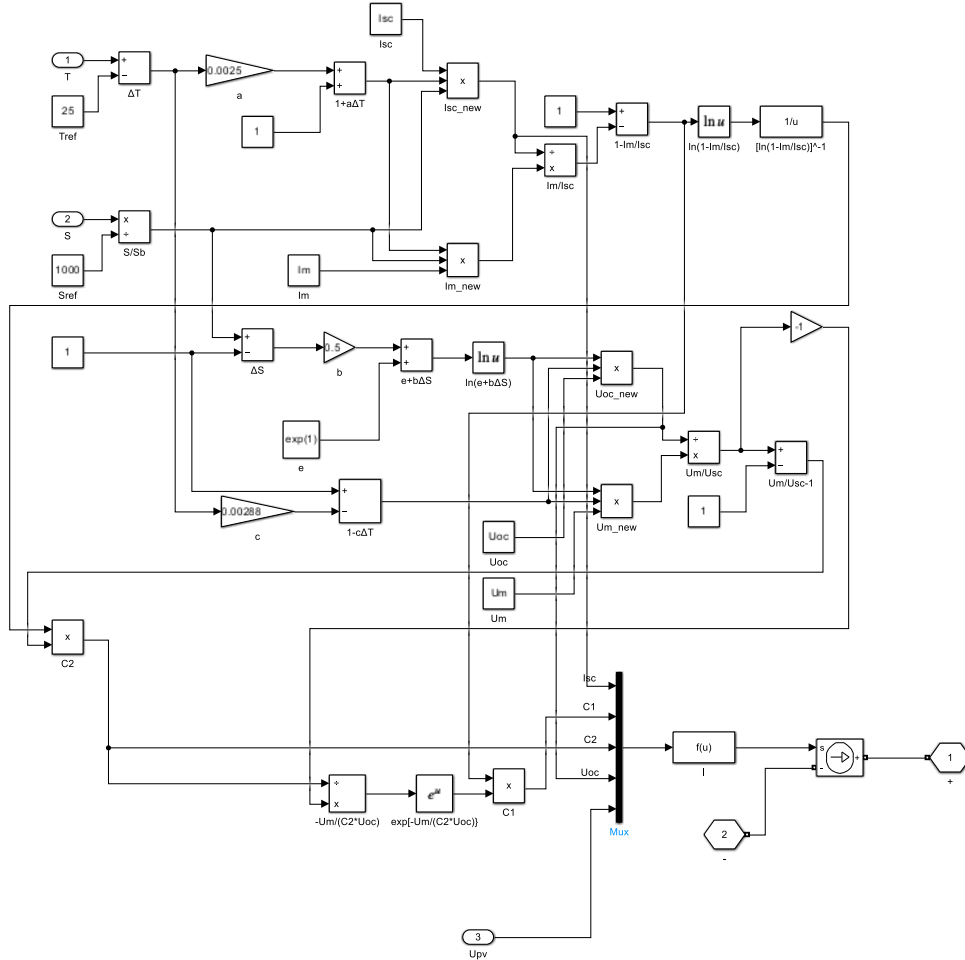


图 2-2 光伏电池仿真模型

光伏电池共 8 个主要性能参数，分别为开路电压（光伏电池能够输出的最大电压）、短路电流（光伏电池能够输出的最大电流）、最大功率点电压（最大功率点工作时的电压）、最大功率点电流（最大功率点工作时的电流）、最大功率（最大功率点工作时的电压与输出电流的乘积）、填充因子（光伏电池的实际功率与理论最大功率之比）、转换效率（光伏电池的输出功率与光照强度之比）、温度系数（衡量温度变化对电流输出影响的参数）^[60]。

2.1.3 光伏组件等效电路

本文在建模时，将多块光伏电池通过串联和并联组成光伏组件，并将其等效为一个稳定的电流源。基于光伏组件的基本原理进行分析，如图 2-3 所示。

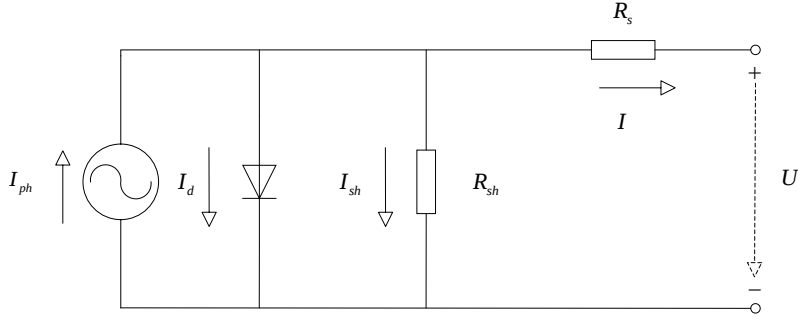


图 2-3 光伏组件等效电路

电流源提供的光生电流 I_{ph} 分为三部分：流经二极管的电流 I_d 、流经并联电阻 R_{sh} 的电流 I_{sh} ，以及流经串联电阻 R_s 的输出电流 I [61]。根据基尔霍夫电流定律，可以推导出输出电流 I 的表达式为：

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2-1)$$

其中，光生电流 I_{ph} 的表达式为：

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \times (T - T_r)] \times \frac{G}{G_r} \quad (2-2)$$

式中， I_{sc} 为在标准条件温度 25°C 、光照强度 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 下电路内部的短路电流， K_i 为温度系数， T 为光伏组件表面温度， T_r 为标准条件下的温度， G 为当前光照强度， G_r 为标准条件下光照强度。

流经二极管的电流 I_d 表达式为：

$$I_d = I_0 \left\{ \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{nKT} \right) \right] - 1 \right\} \quad (2-3)$$

式中， I_0 为反向饱和电流， q 为单电荷量， U 为光伏组件输出电压， n 为光伏组件理想因数， K 为玻尔兹曼常数。

流经并联电阻 R_{sh} 的电流 I_{sh} 表达式为：

$$I_{sh} = \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (2-4)$$

2.1.4 光伏阵列拓扑结构

由于单个光伏电池的输出功率较低，通常需要将多个光伏电池通过串联和并联方式组成光伏组件，再将多个光伏组件按照特定拓扑结构连接形成光伏阵列，从而提高整体输出功率。光伏阵列拓扑结构主要包括：串联（S）、并联（P）、串并联（SP）、蜂巢式连接（HC）、桥式连接（BL）和全连接（TCT）

等^[62]。如图 2-4 所示。

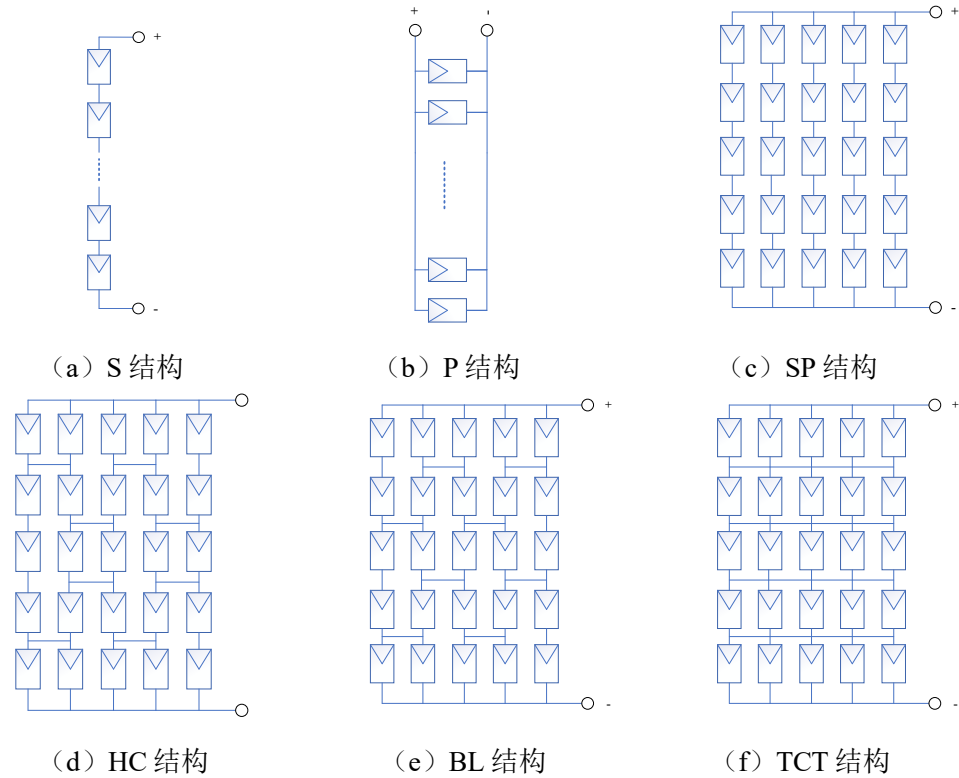


图 2-4 光伏阵列拓扑结构示意图

图 2-4 中 (a) 表示 S 型结构的连接方式。S 型结构中，流经所有电池的电流相同，总输出电压为各电池电压的总和。尽管 S 型结构具有成本优势，但在复杂工况下，系统整体效率易受影响：当单个电池被遮挡或发生故障时，会导致系统输出功率显著下降。为了避免 S 型结构的影响，可以采用 P 型结构，如图 2-4 中 (b) 所示。P 型结构对局部阴影效应具有较强鲁棒性，但由于其输出电压水平偏低，实际应用场景中可能存在适用性不足的问题。

传统且广泛应用的光伏阵列结构是 SP 型结构，如图 2-4 (c) 所示。该结构通过将一定数量的光伏组件串联构成支路，再将多个串联支路进行并联连接，从而构成完整的光伏阵列系统。SP 结构的优势在于结构简单、维护便利且控制流程简化。然而，在阴影或不均匀光照条件下，该结构易出现组件失配现象，导致光伏阵列整体发电效率下降。虽然并联旁路二极管可缓解这一问题，但会带来两个负面影响：一是产生显著的功率损耗，二是使输出特性呈现多峰形态，这大幅增加了光伏 MPPT 的技术难度。

图 2-4 中 (d) 和 (e) 分别为 HC 型结构和 BL 型结构，这两种结构通过分散电流路径，使不同光照条件下的组件能够独立工作，从而减少因组件失配导

致的效率损失。然而，由于电路连接结构较为复杂，仍会造成部分效率损失。

TCT 结构基于 SP 结构派生而来，其方式是将每一行电池并联后，再将这些并联行串联起来，从而构成完整的 TCT 结构，如图 2-4（f）所示。该结构输出电压是所有行电压的总和，每行的电压来自单个光伏电池，而输出电流则是每行所有电池电流的总和。相较于其他结构，TCT 结构在复杂工况下表现出更强的适应性，并且具有最低的电能传输损耗。

2.2 光伏电池输出特性研究

本文研究选取型号为 Aavid Solar ASMA-180M 的光伏电池为对象，其标准条件下主要参数如表 2.1 所示。

表 2.1 标准条件下光伏电池主要参数

参数	单位	数值
开路电压	V	36.3
短路电流	A	7.84
最大功率点功率	W	213.15
最大功率点电压	V	29
最大功率点电流	A	7.35

为了简化仿真模型，将光伏电池封装成 PV 模块。该模块选择温度和光照强度两个变量作为输入信号，通过更改这两个输入信号的数值来模拟不同的工作环境。此外，PV 模块并联了一个控制电压源（CVS）模块以模拟负载，负载信号为斜坡信号，使光伏电池的电压从 0 V 仿真到开路电压。最后，添加了一个示波器模块，用于观察光伏电池的 P-U 和 I-U 曲线。光伏电池输出特性仿真如图 2-5 所示。

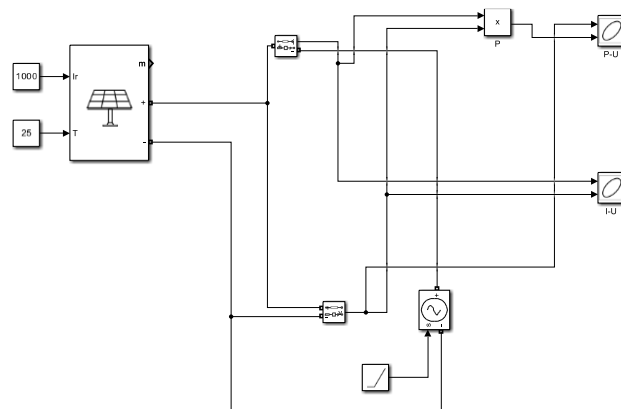


图 2-5 光伏电池输出特性仿真图

在保持其他参数不变的情况下，构建光照强度和温度变化的对比环境。图 2-6 展示了在环境温度为 25°C 时，光伏电池在 400 W/m^2 、 600 W/m^2 、 800 W/m^2 和 1000 W/m^2 四种光照强度下的输出特性曲线。

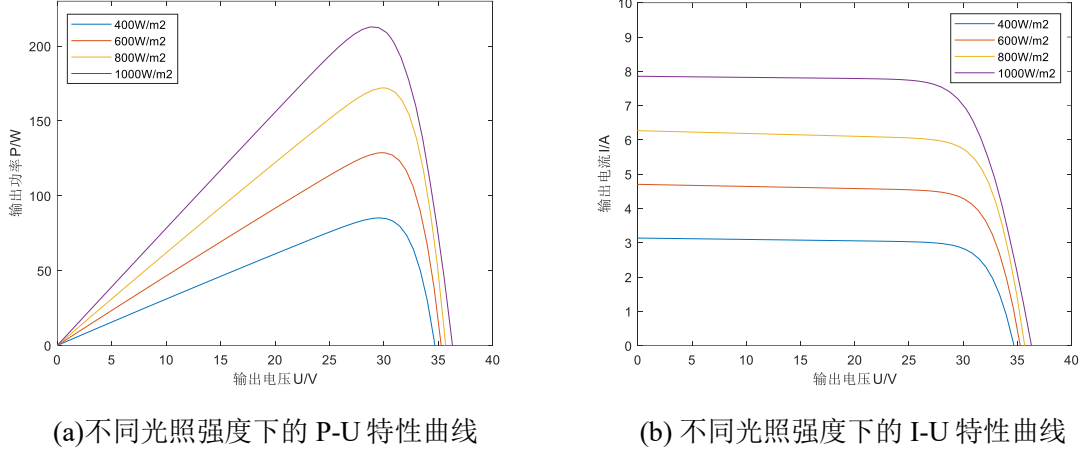


图 2-6 不同光照强度下的输出特性曲线

从图 2-6 (a) 所示的 P-U 特性曲线可以看出，在恒定温度条件下，随着光照强度的增强，光伏电池的最大输出功率 P_{max} 显著增大。当工作点位于最大功率点左侧时，输出电压与输出功率之间基本呈正相关；而当工作点超过最大功率点后，输出功率急剧衰减，同时开路电压 U_{oc} 随光照强度增强略微增大。由图 2-6 (b) 可以看出，随着光照强度逐渐增强，I-U 特性曲线整体向上移动，输出电流显著增大，横轴坐标交点也发生小幅偏移。

为探究温度变化对输出特性的影响，图 2-7 展示了在光照强度为 1000 W/m^2 时，光伏电池在 15°C 、 20°C 、 25°C 和 30°C 四种环境温度下的输出特性曲线。

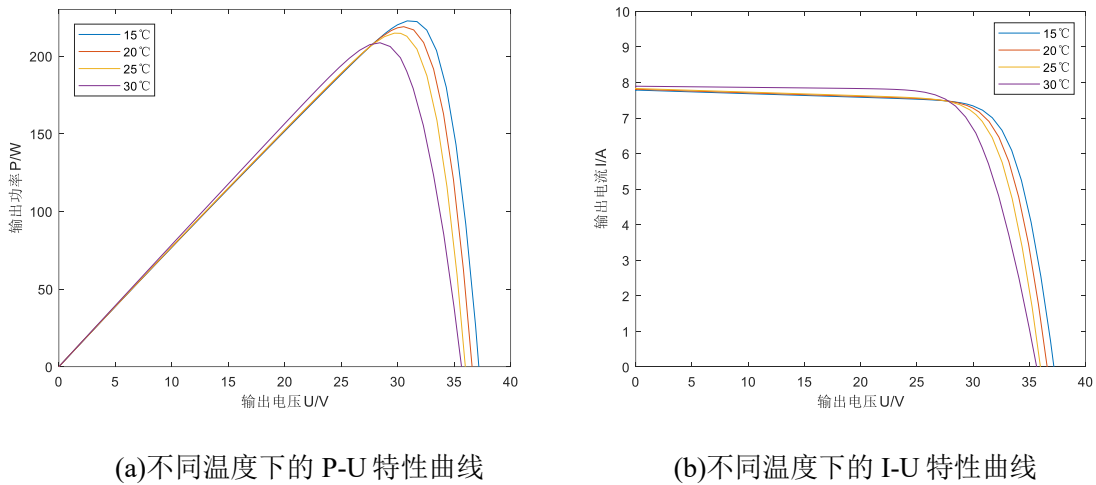


图 2-7 不同温度下的输出特性曲线

从图 2-7 (a) 所示的 P-U 特性曲线可以看出，在光照强度保持不变时，随

随着温度逐渐升高，P-U 特性曲线中的最大功率值逐渐减小，但其降幅远小于光照强度变化引起的功率降幅，这表明温度变化对输出功率造成的影响较小。由图 2-7（b）可见，随着温度升高，I-U 特性曲线中的输出电流略有增加，同时横轴交点也略微向左偏移。

研究结果表明，尽管环境温度与光照强度均会影响光伏电池的输出特性，但最大输出功率值主要受光照强度的影响，而环境温度的波动对其影响相对较弱。

2.3 光伏阵列输出特性研究

2.3.1 标准条件下光伏阵列输出特性

为研究不同光伏阵列结构在标准测试条件（光照强度 1000 W/m^2 ，温度 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ）下的输出特性差异，本文构建了如图 2-8 所示的 5×5 光伏阵列仿真模型，并对比分析了不同光伏阵列的 P-U 输出特性，如图 2-9 所示。

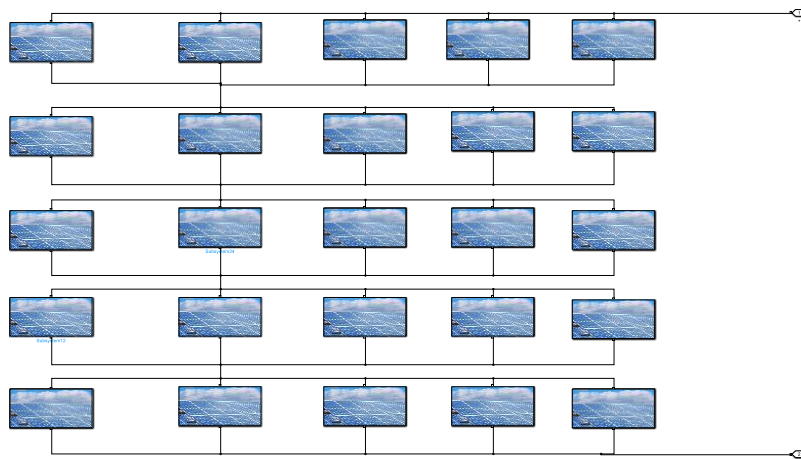


图 2-8 5×5 光伏阵列仿真模型

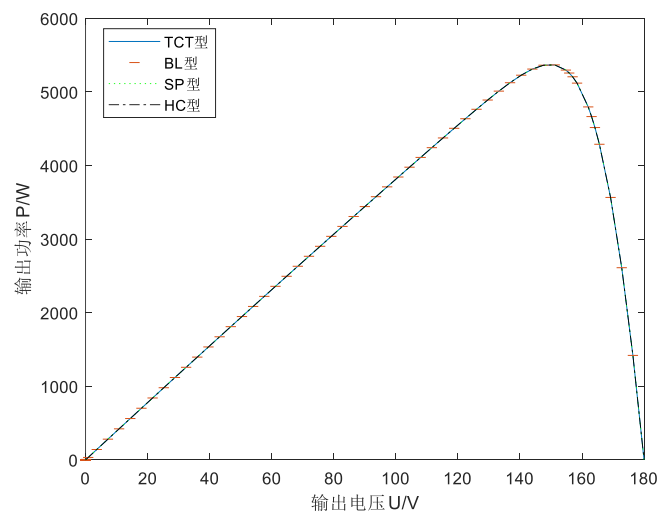


图 2-9 标准条件下光伏阵列 P-U 输出特性

从图 2-9 中的 P-U 输出特性曲线可以看出，在标准测试条件下，TCT、BL、SP、HC 型结构的输出只有一个峰值，且输出特性曲线基本重合。因此，不论采用哪种结构的光伏阵列，都能够实现精准跟踪。

2.3.2 复杂工况下光伏阵列输出特性

在复杂工况下，光伏阵列的输出功率会受到光照强度、温度等因素的影响。实际中，树木、建筑物、云层及污垢等因素常导致光照不均。为降低“热斑效应”的影响，光伏组件通常采用并联旁路二极管的方法，但这可能导致光伏阵列的输出特性曲线出现多峰现象。为模仿实际环境中的复杂工况，本研究设计了四种典型的阴影遮挡方式。其中方格代表光伏组件，颜色的深浅反映遮挡程度的不同，如图 2-10 所示。针对 TCT、BL、SP 和 HC 四种不同的拓扑结构，进行遮挡模式下的阵列仿真分析。通过对比不同结构在复杂工况下的输出特性曲线，确定最佳的光伏阵列拓扑结构。

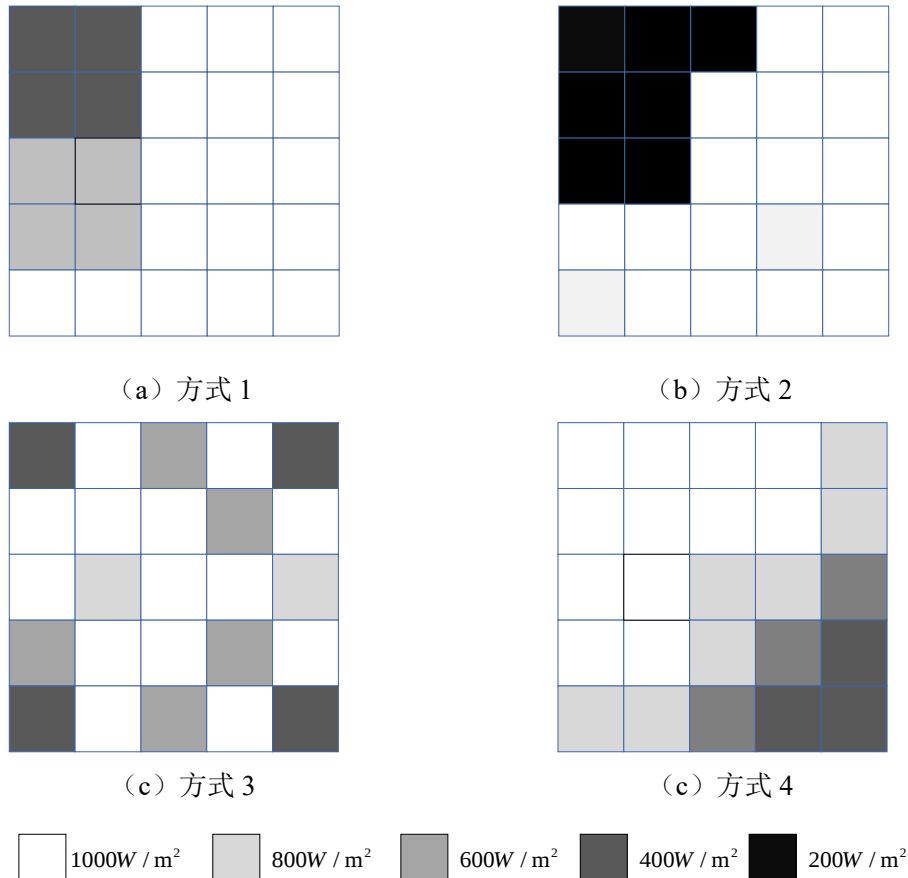


图 2-10 光伏阵列阴影遮挡方式

方式 1 代表透光遮挡物的遮挡情况，模拟了集中式光伏阵列在移动积云遮挡下的情况。该阴影方式下的输出特性曲线如图 2-11 所示。

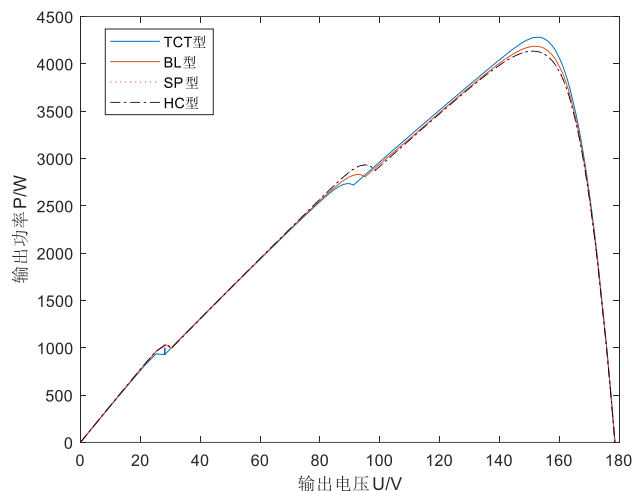


图 2-11 方式 1 输出特性曲线图

从图 2-11 中可以看出，在阴影方式 1 下，TCT、BL、SP、HC 型四种结构的输出特性曲线均呈现三峰特征，其中 TCT 型结构在第三个峰值（即全局最大功率点）处的输出功率最高。因此，TCT 型结构在阴影方式 1 下的发电效率更高。

方式 2 代表不透光遮挡物的遮挡情况，模拟了分布式光伏阵列受高楼建筑遮挡的情况。图 2-12 展示了阴影方式 2 下各阵列输出特性曲线。从图 2-12 中可以看出，SP 型结构在前两个峰值点处的输出功率最高，但在全局最大功率点处，其输出功率显著低于其他三种结构。其中，TCT 型结构的最大输出功率最高。因此，阴影方式 2 下，TCT 型结构更有利于实现 MPPT。

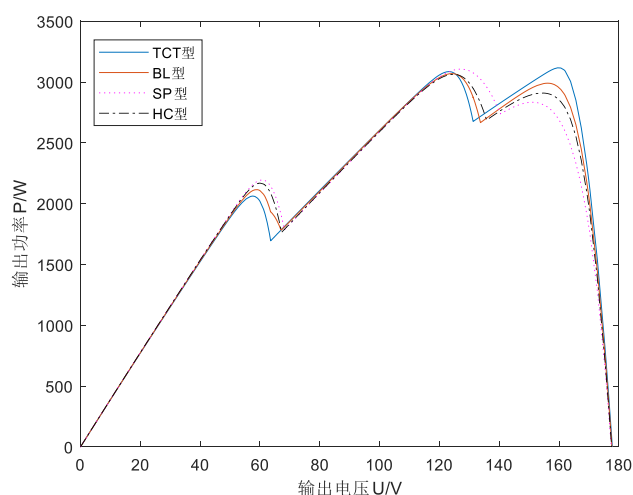


图 2-12 方式 2 输出特性曲线图

方式 3 代表灰尘、污渍等遮挡，模拟光伏阵列受到树荫遮挡的情况，输出

特性如图 2-13 所示。从图中可以看出，在阴影方式 3 下，SP 型输出曲线的峰值数最多，且最大功率值最低；BL 型和 HC 型的输出曲线较为平滑，其中 HC 型的最大功率值高于 BL 型；TCT 型输出曲线表现出明显的优势，峰值数最少，输出最大功率值最高。因此，在阴影方式 3 下，TCT 型结构仍能保持显著优势，其发电效率较其他拓扑结构更为突出。

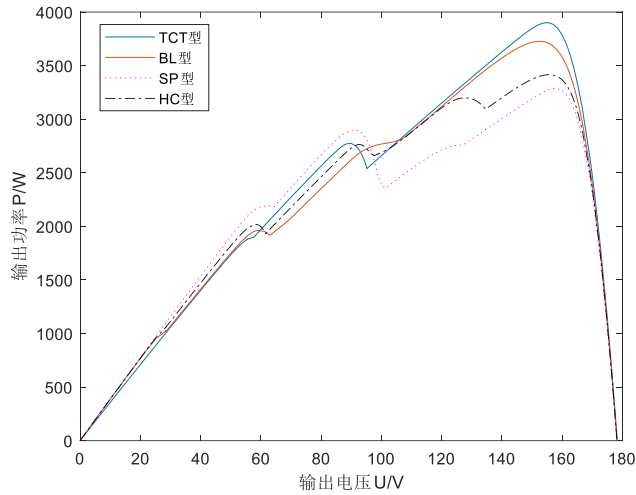


图 2-13 方式 3 输出特性曲线图

方式 4 代表两种不同透光遮挡物遮挡情况，模拟光伏阵列受浮云移动和树荫遮挡的情况，输出特性曲线如图 2-14 所示。从图 2-14 中可以看出，在阴影方式 4 下，四种结构的特性曲线前半段输出功率差异不大，曲线较为平滑；在全局最大功率点处，TCT 型结构的输出功率显著优于其他结构；在特性曲线后半段，HC 型和 BL 型结构的输出特性曲线几乎重合，此时 TCT 结构仍保持最高的输出最大功率值。

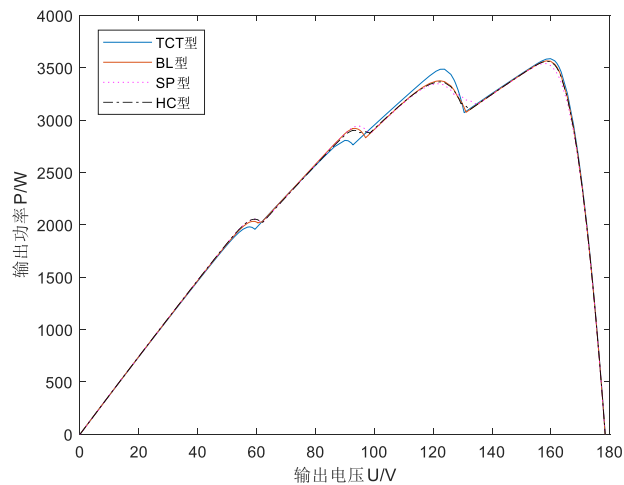


图 2-14 方式 4 输出特性曲线图

为对比分析 TCT、BL、SP 和 HC 四种拓扑结构在 4 种阴影方式下的输出特性，表 2.2 列出了各结构的最大功率值。

表 2.2 四种结构在 4 种阴影方式下的最大功率值

阴影方式	最大功率值 P_m/W			
	TCT	BL	SP	HC
方式 1	4277	4186	4136	4136
方式 2	3110	3063	3105	3060
方式 3	3901	3724	3286	3414
方式 4	3583	3566	3540	3564

由表 2.2 数据及图 2-11、图 2-12、图 2-13、图 2-14 可知，SP 型结构的功率输出水平相对有限，而 TCT 型结构则在最大功率输出方面表现更为突出。特别是在方式 3（树荫遮挡）下，TCT 型结构的输出特性展现出明显的性能优势。综上所述，TCT 结构在复杂工况下相较于其他三种结构具有显著优势，能够有效减少失配损失并提升全局最大功率点跟踪性能。然而，在实际运行中，由于局部阴影、温度波动等复杂工况的影响，光伏发电系统仍存在额外的功率损失。

本文将围绕 TCT 结构光伏阵列展开研究，重点分析其在复杂工况下的输出特性及功率提升策略。

2.4 本章小结

本章首先阐述了光伏电池的发电原理，并构建其仿真模型。在此基础上，通过串并联将多块光伏电池组成光伏组件，同时建立其等效电路。接着，对光伏阵列的传统拓扑结构进行对比分析，最终选择 TCT 结构阵列作为研究对象。最后，基于 Simulink 仿真平台，分别搭建光伏电池和 TCT 光伏阵列的仿真模型，并通过模拟局部遮阴等复杂工况，深入分析其输出特性，为后续研究奠定基础。

第3章 光伏阵列 MPPT 算法研究

上一章分析了在复杂工况下光伏阵列的 P-U 曲线容易出现多峰现象。为确保光伏系统稳定运行于最大功率点状态，需采用最大功率点跟踪（MPPT）算法进行有效调控。本章将介绍单峰传统 MPPT 算法和多峰智能算法，分析其优势和局限性，并在此基础上引入灰狼算法（GWO）作为新型智能优化算法。通过对 GWO 算法进行改进，以提升 MPPT 的跟踪速度和精度，从而提高光伏阵列的发电效率。

3.1 光伏阵列 MPPT 基本原理

光伏系统通常由光伏阵列、Boost 电路、MPPT 控制器和负载组成^[63]。如图 3-1 所示。

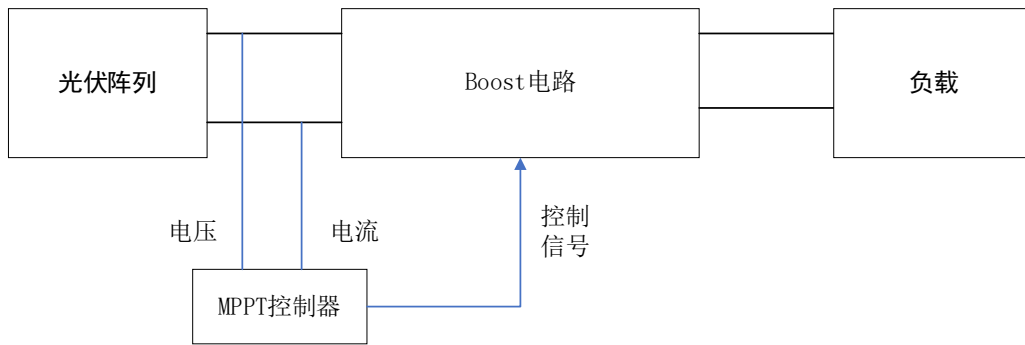


图 3-1 光伏发电系统

光伏阵列 MPPT 的基本原理是通过实时调整光伏电池的工作状态，以保持其输出功率在最大值点。系统通过实时监测光伏阵列的电压和电流，判断是否处于最大功率点。若不是，系统会根据 MPPT 控制算法，将电压和电流转化为控制信号，调节 DC/DC 变换器的占空比，确保光伏阵列在最大功率点稳定运行。

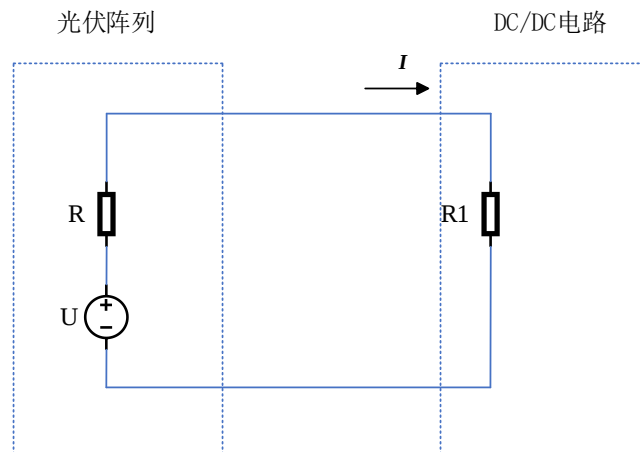


图 3-2 光伏阵列等效电路图

由图 3-2 可知，光伏阵列等效成阻抗为 R 的直流电源 U ，DC/DC 转换电路等效为负载电阻 R_1 。当阻抗与负载电阻相等时，光伏阵列在最大功率点工作。原理如下：

假设负载电阻的功率为 P ，则

$$P = I^2 R_1 = \left(\frac{U}{R + R_1} \right)^2 R_1 \quad (3-1)$$

将功率 P 对 R_1 进行求导，得

$$\frac{dP}{dR_1} = U^2 \frac{R - R_1}{(R + R_1)^3} \quad (3-2)$$

当 $\frac{dP}{dR_1} = 0$ 即 $R = R_1$ 时， P 值为最大值。

3.2 单峰传统 MPPT 算法

当前有多种方法可以实现最大功率跟踪，其中电导增量法、恒定电压法和扰动观察法因其实现简单、适应性强以及成本较低，成为传统 MPPT 算法中最常用的方法。

3.2.1 电导增量法

电导增量法是一种通过电压扰动实现的 MPPT 算法。该算法基于全微分方程 $dP = IdU + UdI$ ，推导了电导与电导变化率之间的关系，从而实现最大功率点跟踪^[64]。推导原理如下：

对输出功率公式 $P = U \times I$ 两边进行求导，则有：

$$\frac{dP}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} \quad (3-3)$$

当光伏阵列输出功率最大时，功率对电压的倒数为零，此时有：

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \quad (3-4)$$

在实际问题中以 $\frac{\Delta I}{\Delta U}$ 近似代替 $\frac{dI}{dU}$ ，具体跟踪方向如下：

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta U} > -\frac{I}{U} & \text{最大功率点左侧} \\ \frac{\Delta I}{\Delta U} < -\frac{I}{U} & \text{最大功率点右侧} \\ \frac{\Delta I}{\Delta U} = -\frac{I}{U} & \text{最大功率点} \end{cases} \quad (3-5)$$

图 3-3 为电导增量法的流程图。

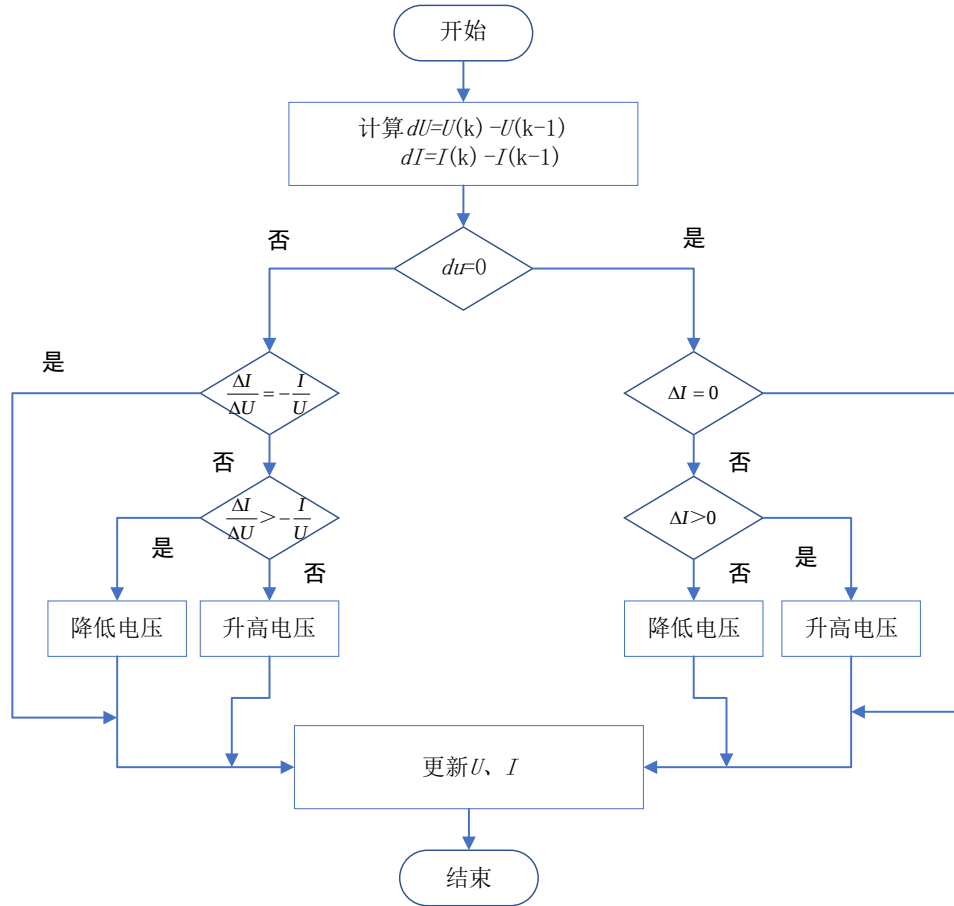


图 3-3 电导增量法流程图

通过分析光伏阵列电导增量法的原理图可知：当功率对电压的导数为正时，电压应增大以接近最大功率点；当导数为零时，电压应保持稳定；当导数为负时，电压应减小以避免过度减少功率。

然而，电导增量法需要实时高精度捕捉光伏系统端电压和输出电流的微分变化量来完成计算，这对模数转换模块的动态响应性能与分辨率提出了过高的要求。

3.2.2 恒定电压法

恒定电压法是一种开环的 MPPT 算法。这种方法通过调节光伏阵列的开路电压 U_{oc} 与最大功率点处电压 U_m 之间的近似比例关系，从而实现对光伏系统最大功率跟踪^[65]。关系式如下：

$$U_m = KU_{oc} \quad (3-6)$$

式中， K 是比例系数，一般在实际工程中将其设置为 0.8。

恒定电压法的优势在于简单实现，通过采样输入电压并与参考电压对比调整，即可使光伏系统运行在最大功率点。恒定电压法流程图如图 3-4 所示。

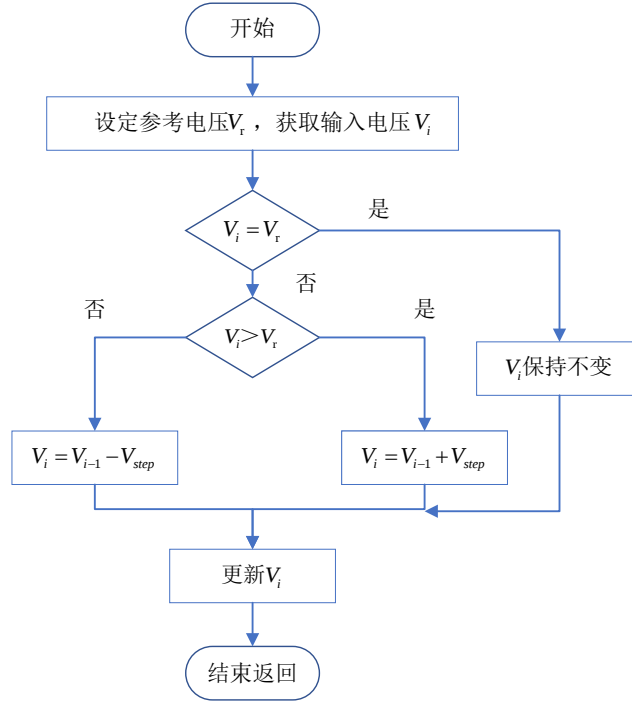


图 3-4 恒定电压法流程图

光伏电池的开路电压受光照强度和温度变化影响而呈现波动特性，当光照突然变化时，恒定电压法设定的参考电压可能与当前的开路电压不匹配，这可能导致光伏电池受损。此外，这种方法的最大功率点跟踪精度较低，从而显著降低光伏系统的工作效率。因此，目前在实际工程中几乎不再使用该方法。

3.2.3 扰动观察法

相较于电导增量法和恒定电压法，扰动观察法（P&O）在现代 MPPT 控制算法中较为成熟且应用广泛。该方法通过不断扰动光伏系统的电压，并观察功率变化来进行控制。首先，检测电压和电流以计算功率，随后对电压进行小幅扰动并观察扰动后的功率变化：如果功率增加，说明扰动方向正确；如果功率减少，说明需要改变扰动方向。通过这种方法，系统能够在最大功率点附近运行。然而，该方法需要频繁的功率计算和对比，因此依赖大量输出参数的检测。

在实际应用中，对输出电压进行扰动非常复杂，通常采用调整占空比的方式来实现，其公式如下：

$$\begin{cases} D_{i+1} = D_i + \Delta D (P_{i+1} > P_i) \\ D_{i+1} = D_i - \Delta D (P_{i+1} < P_i) \end{cases} \quad (3-7)$$

式中， D_{i+1} 表示更新后占空比， D_i 表示当前占空比， ΔD 表示占空比的扰动步长， P_{i+1} 表示当前时刻功率， P_i 表示前一时刻功率。

当 P_{i+1} 大于 P_i 时，对占空比增加固定扰动步长；当 P_{i+1} 小于 P_i 时，对占空比减小固定扰动步长。具体流程图如图 3-5 所示。

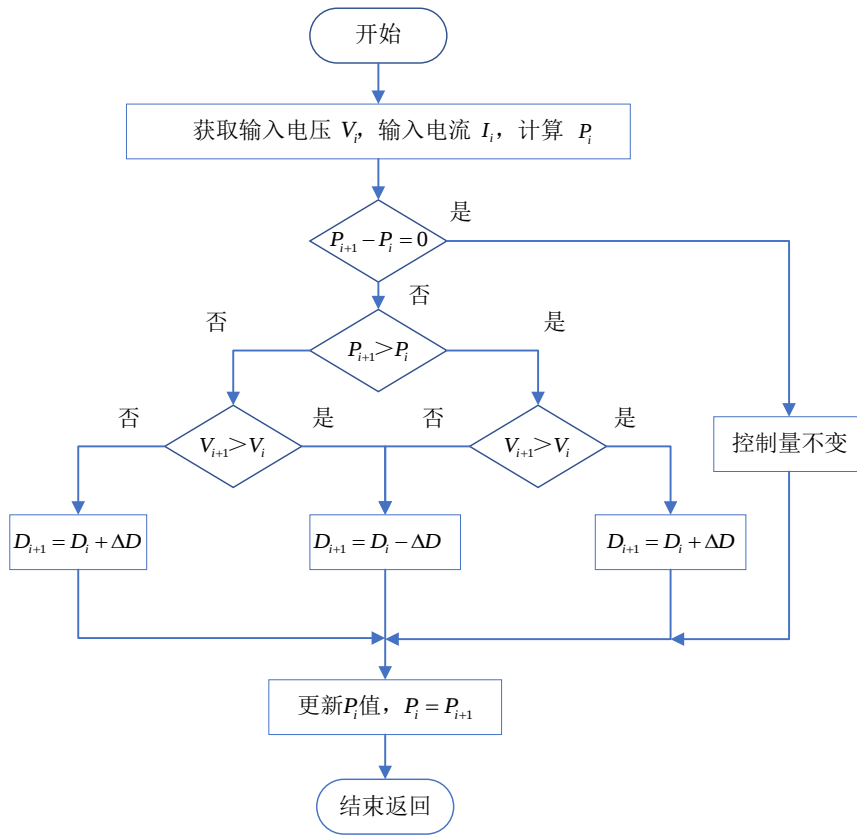


图 3-5 扰动观察法流程图

在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建基于 P&O 法的 MPPT 模型，并分析其输出特性，如图 3-6 所示。

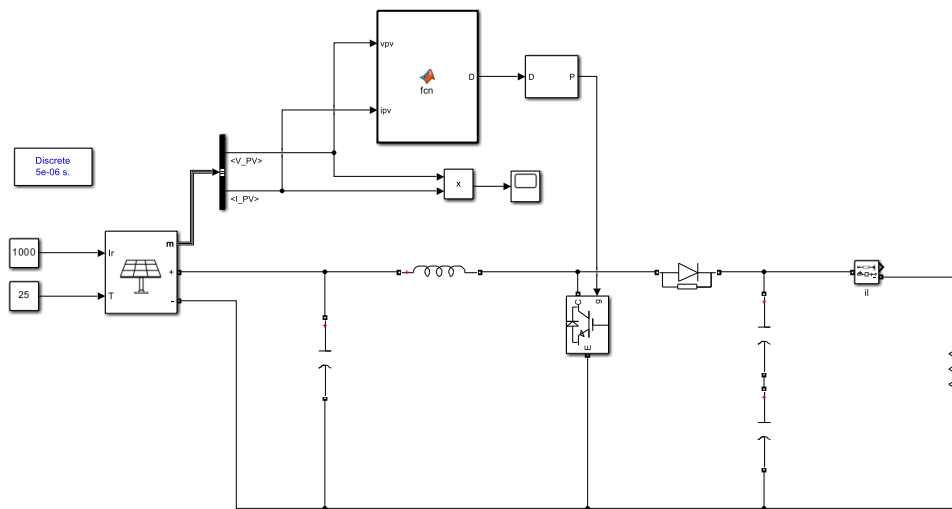


图 3-6 基于 P&O 法的 MPPT 仿真模型

运行 P&O 法的 MPPT 仿真模型，输出特性如图 3-7 所示。

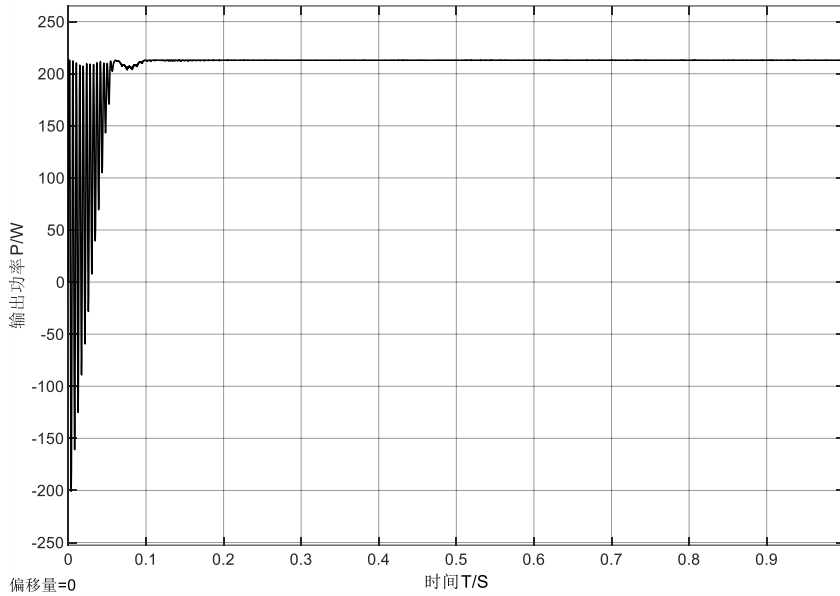


图 3-7 P&O 法输出特性曲线

由图 3-7 可知，P&O 法的收敛速度很快，在 0.1s 处跟踪到最大功率点。然而，在最大功率点附近出现了周期性的稳态振荡，导致工作点持续偏离最优位置。这种振荡不仅造成额外的功率损失，还加剧了功率波动，从而降低光伏系统的整体发电效率。

3.3 多峰智能 MPPT 算法

在复杂工况（如局部阴影、组件老化）下，光伏发电系统的 P-U 特性曲线常呈现多峰特征，导致传统单峰 MPPT 算法易陷入局部最优，难以准确跟踪全局最大功率点。而多峰智能 MPPT 算法可以有效处理多峰最优问题，如粒子群优化算法和细菌觅食算法，因其操作简单，适用性强等特点，已成为 MPPT 控制领域的研究热点。

3.3.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法（PSO）启发于鸟群与鱼群等群体行为，模拟鸟群觅食的行为^[66]，将鸟群视作一个整体系统。在这一系统中，鸟类会根据猎物、地点和时间等因素做出整体判断和决策。粒子在算法中代表个体，初始时具有随机的位置和速度，通过不断迭代更新以寻找最优解。每个粒子的历史最佳位置称为个体极值，而整个种群的最佳位置称为全局极值^[67]。粒子通过与其他粒子共享信息并感知其最佳位置，不断调整自身的速度和方向。经过多次迭代，粒子们会逐渐收敛到接近全局最优解的区域。

每次粒子更新位置信息时，都需要计算适应度，并与更新前的适应度值进

行比较，从而确定最优适应度值。这为个体极值（ P_{best} ）、整体极值（ G_{best} ）以及位置更新提供了依据。

在每次更新粒子位置时，通过比较各个粒子的 P_{best} 和 G_{best} 来调整位置和速度函数。公式如下：

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (P_{best} - x_i^k) + c_2 r_2 (G_{best} - x_i^k) \quad (3-8)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (3-9)$$

式中， v_i^{k+1} 表示第 i 个粒子的运动速度， x_i 表示第 i 个粒子的空间位置， c_1 、 c_2 表示学习因子， r_1 、 r_2 表示 $(0, 1)$ 内的随机值。 ω 表示惯性权重，是一个非负数，当 ω 较大时，粒子群优化算法的全局搜索能力增强，但局部搜索能力下降；当 ω 较小时，则全局搜索能力下降，局部搜索能力增强。粒子群优化算法流程图如图 3-8 所示。

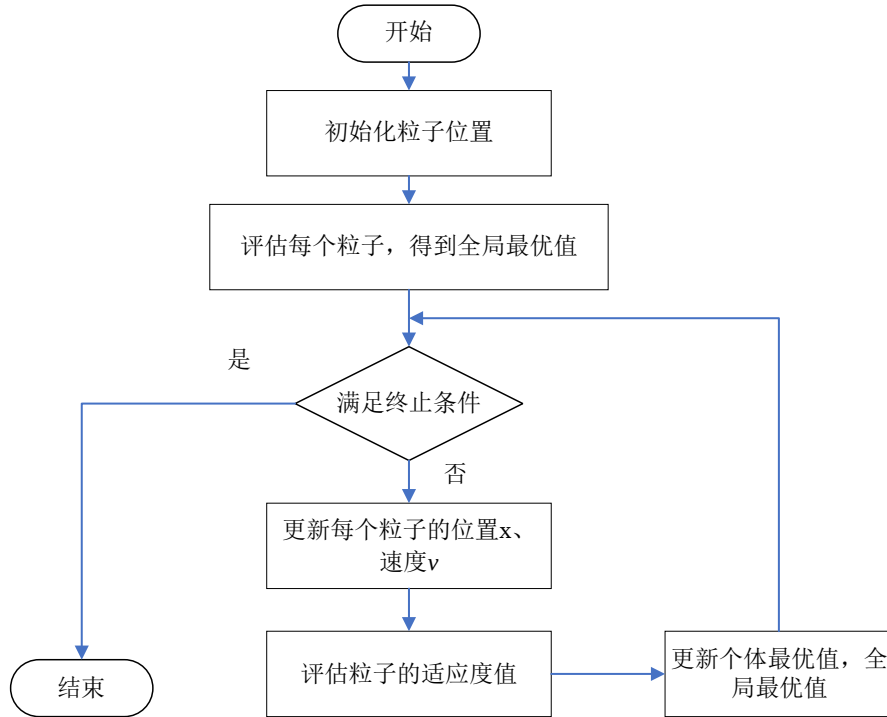


图 3-8 粒子群优化算法流程图

粒子优化算法具体步骤如下：

- (1) 初始化粒子群参数。假设种群规模为 n ， v_i^k 为粒子的初始速度， x_i 为粒子的初始位置，并初始化学习因子以及 P_{best} 和 G_{best} 等参数值。
- (2) 评估粒子适应度值，判断是否为全局最优值。
- (3) 更新适应度、个体极值和全局极值。
- (4) 根据式 (3-8) 和式 (3-9) 来更新粒子的位置与速度。

(5) 算法终止判断。更新个体最优解和全局最优解，若搜索误差足够小或迭代次数达到最大值，则停止；否则，返回步骤(4)。

3.3.2 细菌觅食优化算法

细菌觅食优化算法(BFOA)是一种新型的群体智能优化算法，它借鉴了大肠杆菌在人体内寻找食物的行为，通过趋化、复制、消亡和迁移等操作进行迭代和优化^[68]。其中，趋化算子最为关键，模拟了细菌的翻转和游动。

(1) 趋化

细菌的趋化过程通过趋向运动实现，即细菌迁移到更适合生存的区域。趋向运动包括两个步骤：翻转(细菌向随机方向移动一个单位步长)和游动(细菌在固定方向上移动一个单位步长)。在不适宜的环境中，细菌通过频繁翻转来寻找更好的生存条件；而在适宜的环境中，则减少翻转，更多进行游动。细菌通过这两种运动方式寻找最佳生存环境。

趋化公式为：

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}} \quad (3-10)$$

式中， i 表示细菌 i ， N_c 表示最大迭代次数， j 表示此刻趋化次数， k 表示此刻复制次数， l 表示此刻迁移次数。 $\theta^i(j+1, k, l)$ 、 $\theta^i(j, k, l)$ 分别表示更新前和更新后的位置， $C(i)$ 表示细菌每次游动的步长， $\Delta(i)$ 表示随机变量。

(2) 复制

根据达尔文的生物进化论，生物的生存遵循优胜劣汰的法则^[69]。在细菌种群的趋向性操作中，那些向不适合环境方向移动的细菌会被淘汰，从而保留能找到最佳食物环境的细菌。这些优胜的细菌将进行复制，以保持种群规模的稳定，这就是细菌觅食算法中的复制操作。

$$J_{health}^i = \sum_{i=1}^{N_c+1} J(i, j, k, l) \quad (3-11)$$

该公式为细菌的健康度函数，用于评估细菌所获得的能量。

细菌的觅食能力与 J_{health}^i 值呈正相关。将 S 个细菌按 J_{health}^i 值从低到高的顺序排列，淘汰前 $S_1 = S/2$ 个觅食能力弱的细菌，复制觅食能力强的 S_1 个细菌，并生成数量相同的 S_1 个新细菌。

(3) 消亡及迁移

当细菌的生存环境发生变化（如营养供给下降或温度波动）时，细菌种群向适宜区域进行空间迁移或进入消亡状态。迁移操作通过概率 P_{ed} 将细菌随机重新分配到其他区域，原有个体死亡，同时在解空间的随机位置生成新个体^[70]。这些新个体可能更接近全局最优解，有助于跳出局部最优，进行全局优化。

细菌觅食优化算法步骤如下：

步骤一：参数初始化。

步骤二：构建适应度评估模型，并筛选群体最优解。

步骤三：进化种群。

- (1) 细菌趋化
- (2) 细菌复制
- (3) 细菌迁移

步骤四：终止算法，得到全局最优值。整个算法流程图如图 3-9 所示。

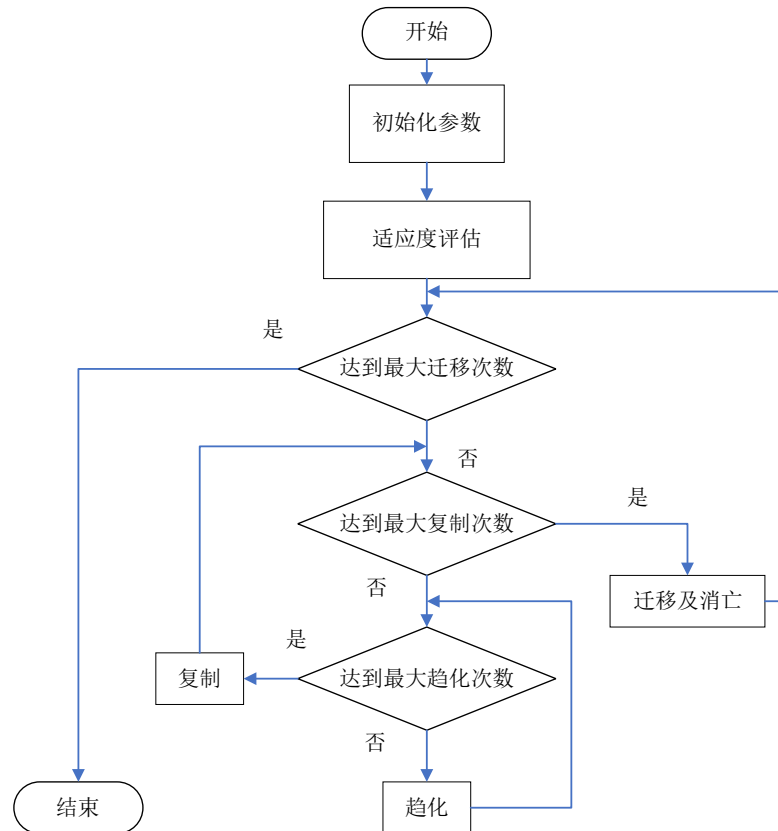


图 3-9 细菌觅食优化算法流程图

3.4 基于 IGWO&PO 的多峰 MPPT 算法

3.4.1 传统灰狼优化算法

灰狼优化算法由 Mirjalili 等人^[71]于 2014 年提出，其灵感来源于灰狼种群在

捕食行为中展现的社会等级结构与协作机制。该算法通过模拟灰狼的社会等级制度和群体狩猎策略，将优化问题求解过程建模为群体智能的搜索过程。在此过程中，每个灰狼个体对应一个候选解，而整个种群则作为解空间中的候选解集合参与搜索。算法的迭代优化过程主要包含以下三个关键阶段^[72-74]：

（1）社会等级划分

如图 3-10 所示，根据适应度值将种群个体划分为 α 、 β 、 δ 和 ω 四个等级。不同层级的灰狼对应差异化的适应度指标与解集质量，其中 α 狼作为头狼具有全局最优适应度值及其对应的解向量位置， β 狼和 δ 狼的适应度水平依次递减， ω 狼则作为基础解集的跟随群体。该仿生层级结构通过模拟灰狼群体捕食行为中的社会分工机制，在算法寻优过程中实现解空间探索与开发的动态平衡，其中等级划分策略有效协调了局部搜索与全局优化的迭代关系。

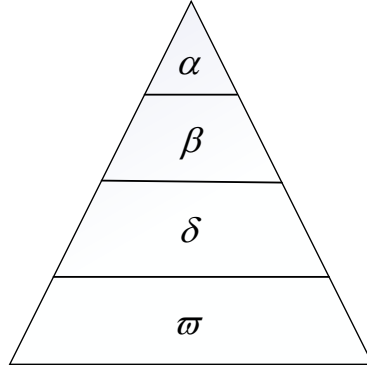


图 3-10 社会等级划分

（2）包围猎物机制

在围猎行为实施阶段，灰狼群需通过持续计算与目标猎物之间的空间距离，并据此动态更新自身坐标，从而实现跟踪定位及包围猎物。该过程表达式为：

$$\bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X}_p(t) - \bar{X}(t)| \quad (3-12)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}_p(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (3-13)$$

式（3-12）和式（3-13）中， $\bar{D}$ 代表灰狼和猎物的距离； t 代表当下迭代的次数； $\bar{X}_p(t)$ 代表迭代次数是 t 时猎物所处的位置； $\bar{X}(t)$ 代表迭代次数为 t 时灰狼个体所处的位置； $\bar{X}(t+1)$ 表示更新后的位置； $\bar{A}$ 、 $\bar{C}$ 代表协作向量，表达式为：

$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{r}_1 - \bar{a} \quad (3-14)$$

$$\bar{C} = 2\bar{r}_2 \quad (3-15)$$

式 (3-14)、式 (3-15) 中, 随着迭代过程的推进, 收敛因子按照线性规律由 2 逐步递减至 0; $\vec{r}_1$ 、 $\vec{r}_2$ 是 [0, 1] 区间内的随机向量参数。

(3) 捕猎过程

在狼群完成包围后, 灰狼个体会根据其与其猎物之间的距离参数及群体最优位置坐标之间的空间关系进行位置迭代更新。该过程通过动态缩小包围范围的策略来完成对猎物的围捕, 具体如式 (3-16) — 式 (3-18) 所示:

$$\begin{cases} \vec{D}_\alpha = |\vec{C} \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta = |\vec{C} \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}| \\ \vec{D}_\delta = |\vec{C} \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \end{cases} \quad (3-16)$$

$$\begin{cases} \vec{X}_1 = |\vec{X}_\alpha - \vec{A}_1(\vec{D}_\alpha)| \\ \vec{X}_2 = |\vec{X}_\beta - \vec{A}_2(\vec{D}_\beta)| \\ \vec{X}_3 = |\vec{X}_\delta - \vec{A}_3(\vec{D}_\delta)| \end{cases} \quad (3-17)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{(\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3)}{3} \quad (3-18)$$

式 (3-16) — 式 (3-18) 中, $\vec{D}_\alpha$ 、 $\vec{D}_\beta$ 、 $\vec{D}_\delta$ 分别表示灰狼 α 、 β 、 δ 与其他灰狼之间的距离; $\vec{X}_1$ 、 $\vec{X}_2$ 、 $\vec{X}_3$ 表示狼群逐步向灰狼 α 、 β 、 δ 靠近且动态更新位置。

3.4.2 改进型灰狼优化算法

在传统 GWO 中, 线性收敛因子 $\vec{a}$ 通过调节协作向量 $\vec{A}$ 的值来调控种群狩猎行为。当 $\vec{a}$ 的值超过阈值 1 时, 灰狼群体进入猎物搜索阶段; $\vec{a}$ 的值低于阈值 1 时, 则触发攻击行为进入围捕状态。然而, 该线性收敛因子在应对非线性优化问题时存在局限性, 难以实现全局搜索与局部搜索间的动态平衡。针对这一缺陷, 学者们普遍采用非线性收敛因子进行算法优化。在文献[75]中, 通过引入指数型收敛因子 a_1 对算法进行改进, 表达式如下:

$$a_1 = a_{ini} - (a_{ini} - a_{fin}) \times \frac{1}{1 - e^{-k\left(\frac{itr}{T_m}\right)}} \quad (3-19)$$

式 (3-19) 中, a_{ini} 表示收敛因子起始值; a_{fin} 表示收敛因子终值; k 表示调节系数; itr 表示当前迭代次数; T_m 表示最大迭代次数。式 (3-19) 所示的非线

性收敛因子虽然加快了算法收敛速度，却导致全局搜索阶段过早终止，致使算法在解空间的全局寻优能力下降，并易陷入局部极值。

为提升算法全局搜索能力与收敛速度，本研究提出一种基于余弦函数的非线性收敛因子 $\vec{a}_k$ 。通过解空间分布特征分析和适应度梯度变化监测，该收敛因子能够实现算法收敛速度的动态调节。具体而言，其调节机制根据搜索阶段的迭代需求，结合解空间分布离散程度和目标函数适应度梯度，对收敛因子进行自适应调整。 $\vec{a}_k$ 表达式如下：

$$\vec{a}_k = 2 \times \cos\left(\mu \frac{itr}{T_m} + \varphi\right) \quad (3-20)$$

式（3-20）中， μ 和 φ 为相关参数， $\mu = 0.5$ ， $\varphi = 0$ 。

图 3-11 展示了 IGWO 和 GWO 算法的收敛因子曲线特性。在 IGWO 算法中，收敛因子在迭代初期呈现较平缓的变化趋势，这有利于维持算法的全局搜索能力；而后期曲线斜率显著增大，有效加快了算法的收敛速度。相较于采用线性收敛因子的传统 GWO 算法，该非线性调整策略通过动态平衡不同迭代阶段的搜索强度，使算法在全局最优解定位过程中表现出更优的收敛性能。

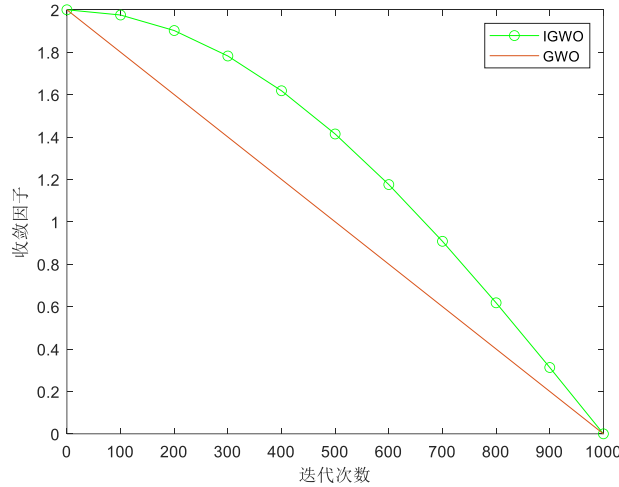


图 3-11 IGWO 和 GWO 算法的收敛因子比较

3.4.3 变步长扰动观察法

传统 PO 算法在应用中存在一些缺陷，如光伏系统工作点的振荡、最大功率点的稳态精度不足及动态跟踪响应速度慢。针对上述不足，本研究提出一种改进型变步长扰动观察法，其变步长表达式如下：

$$\Delta D = \left(1 - \frac{1}{e^{\Delta P}}\right) \cdot D_{\text{step}} \quad (3-21)$$

式 (3-21) 中, ΔP 为功率变化量; D_{step} 为基准步长。扰动步长变化规律如图 3-12 所示。

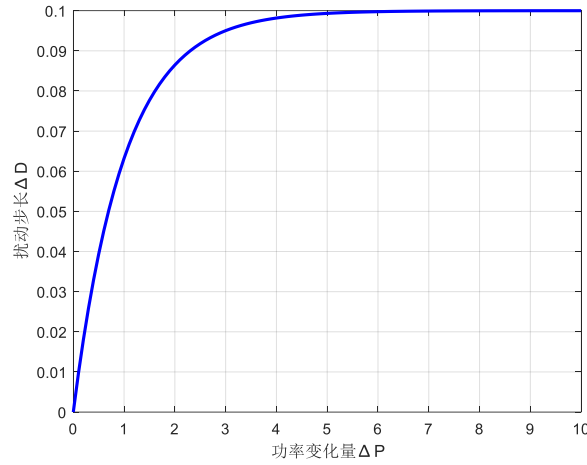


图 3-12 扰动步长变化规律图

变步长扰动观察法初始阶段采用较大扰动量来提高收敛速度, 更快靠近最大功率点。当接近最大功率点时, 扰动量随 ΔP 的降低而减小, 跟踪精度得到提高。因此, 该算法不仅加快了收敛速度, 还提高了跟踪精度和系统稳定性。

3.4.4 IGWO&PO 算法的实现

本文采用 IGWO 算法进行全局搜索并生成初始种群。在完成全局搜索阶段后, 引入变步长扰动观察法对种群个体进行局部搜索。通过动态调整扰动步长更新个体位置, 并计算当前适应度函数值, 从而判断是否找到最大功率点。其中种群个体位置代表 MPPT 算法中的占空比, 省去了传统比例积分控制环节, 从而降低了控制器的运算复杂度^[76]。

IGWO&PO 算法执行流程如下:

- (1) 设定狼群初始位置, 灰狼个体位置对应占空比。
- (2) 确定光伏阵列功率 $P = U \times I$ 作为适应度函数, 筛选适应度最好的狼, 引导其他狼向其靠近。
- (3) 根据式 (3-16) 一式 (3-18) 执行包围和捕猎行为, 不断更新灰狼个体坐标, 逐步接近最大功率区域。
- (4) 在达到预设迭代次数并锁定最大功率区域后, 采用变步长扰动观察进行局部搜索, 实现全局最大功率点的准确定位。
- (5) 当功率波动 $\Delta P \leq 0.01$ (终止条件) 或达到最大迭代次数时, 输出最优占空比 (α 狼所在的位置坐标)。

该算法设置种群规模为 8，最大迭代次数为 5，占空比区间为[0.1, 0.95]。

图 3-13 展示了 IGWO&PO 算法的完整流程。

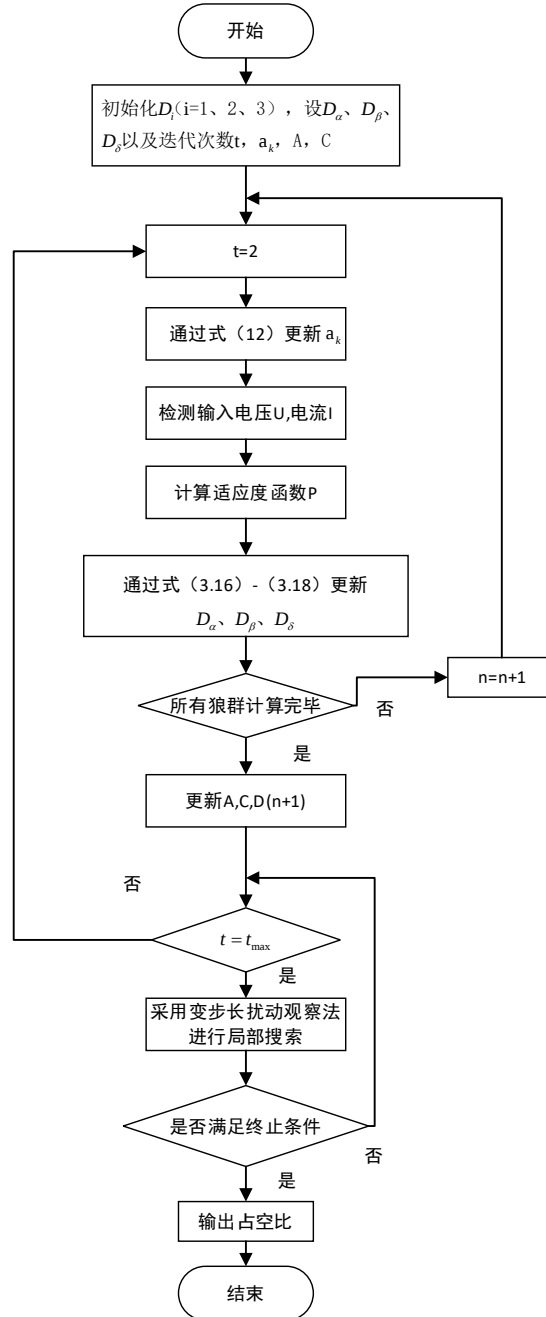


图 3-13 IGWO&PO 算法流程图

3.5 MPPT 算法仿真建模及参数设置

3.5.1 光伏阵列模型

根据第二章光伏电池的发电原理，将五块电池模块串联搭建，电池参数为 $P_{\max} = 213 \text{ W}$ ， $V_{\text{oc}} = 36.3 \text{ V}$ ， $I_{\text{sc}} = 7.84 \text{ A}$ ， $V_{\text{m}} = 29 \text{ V}$ ， $I_{\text{m}} = 7.34 \text{ A}$ 。光伏阵列模型如图 3-14 所示。

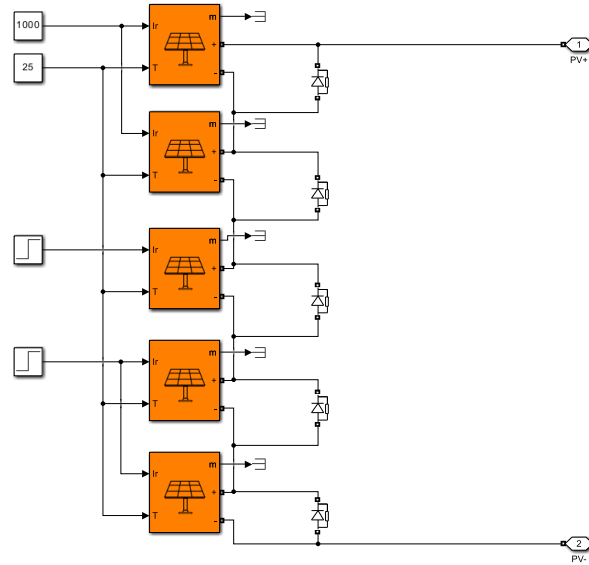


图 3-14 光伏阵列模型图

为了模拟复杂工况下光照强度和温度的变化，在输入端添加信号阶跃模块，并在预设的阶跃时间点进行突变。

3.5.2 boost 变换器模型

根据第三章关于光伏阵列 MPPT 基本原理的介绍，直流斩波器作为 MPPT 组件接入发电系统^[77]。常见的直流斩波器拓扑结构包括升压型、降压型和升降压型^[78]。基于升压型（Boost）变换器在能量转换效率方面的显著优势，本文优先采用该类型斩波电路。Boost 电路的仿真模型如图 3-15 所示。

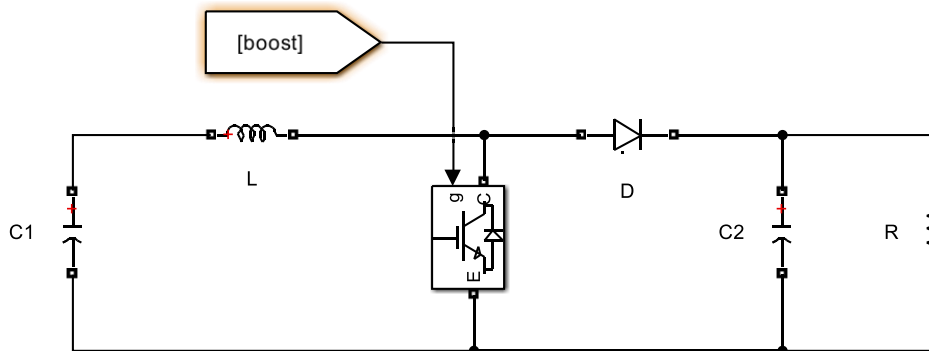


图 3-15 Boost 电路仿真模型图

Boost 变换器的参数为 $C_1 = 200 \mu\text{F}$ ， $C_2 = 200 \mu\text{F}$ ， $L = 0.15 \text{ mH}$ ， $R = 20 \Omega$ 。

3.5.3 完整模型搭建

为验证 IGWO&PO 算法的有效性，利用 Simulink 搭建了完整的 MPPT 仿真模型如图 3-16 所示。

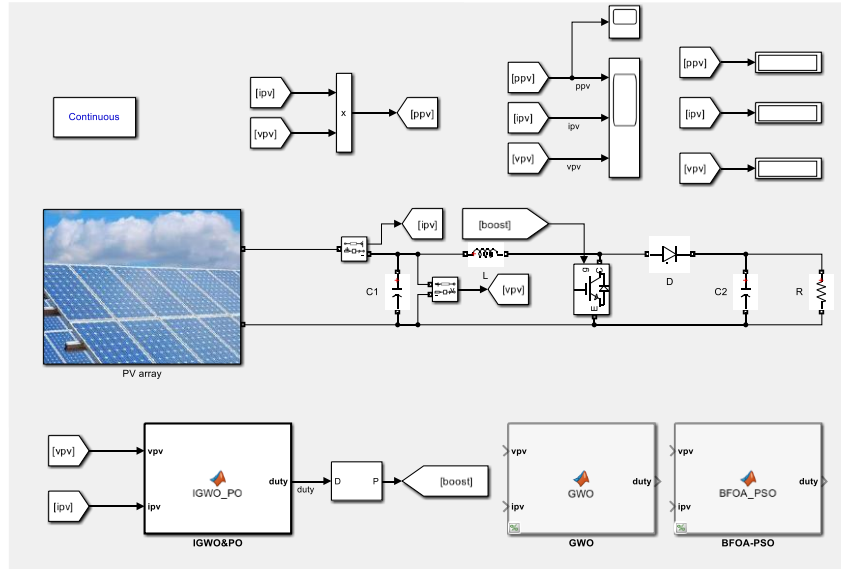


图 3-16 MPPT 仿真模型图

由于光伏阵列在复杂工况下的输出特性各异，本文设置了三种不同的工况，如表 3.1 所示。在温度为 25℃的环境下，分别对光伏阵列进行以下三种条件下的仿真：工况一、工况二以及工况二突变至工况三（动态阴影）。对比同工况下的 BFOA-PSO、GWO 算法，分析各算法在收敛速度与跟踪精度方面的性能差异。

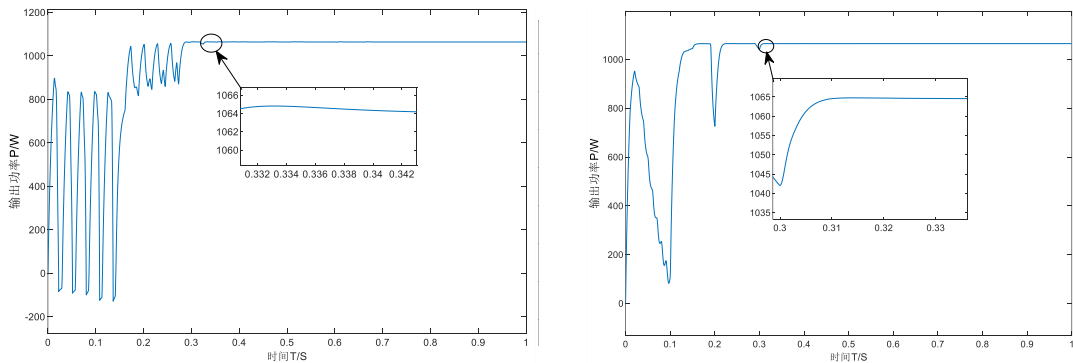
表 3.1 三种工况及实际最大功率

工况	$S_1/W \cdot m^{-2}$	$S_2/W \cdot m^{-2}$	$S_3/W \cdot m^{-2}$	$S_4/W \cdot m^{-2}$	$S_5/W \cdot m^{-2}$	最大功率/W
工况一	1000	1000	1000	1000	1000	1065
工况二	1000	1000	400	800	800	717.8
工况三	1000	1000	500	900	900	790.3

3.6 不同工况下的 MPPT 仿真与分析

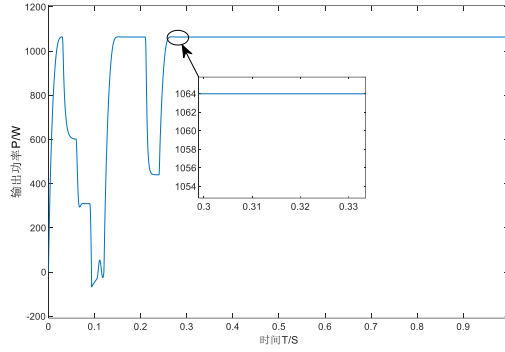
3.6.1 均匀光照下的 MPPT

在工况一即均匀光照条件下对三种算法进行仿真，结果如图 3-17 所示。



(a) BFOA-PSO 算法

(b) IGWO&PO 算法



(c) GWO 算法

图 3-17 工况一（均匀光照）下三种算法的仿真波形

由图 3-17 可知，BFOA-PSO 算法在 0.32 s 时跟踪到最大功率点，值为 1064 W，但寻优过程中存在显著的振荡现象；IGWO&PO 算法在 0.3 s 时成功跟踪到实际最大功率值 1065 W；GWO 算法在 0.3 s 时跟踪到最大功率点，值为 1064 W。在均匀光照条件下，三种算法都展现出较高的跟踪精度，但 IGWO&PO 算法在收敛过程中的振荡幅度较小，且稳定后功率波动幅度趋于零。

3.6.2 静态阴影条件下的 MPPT

在工况二即静态阴影条件下对三种算法进行仿真，如图 3-18 所示。

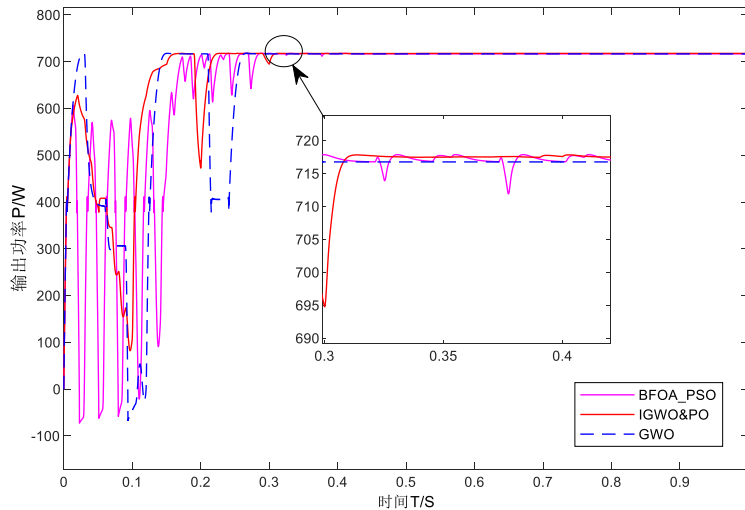


图 3-18 工况二（静态阴影）下三种算法的仿真波形

由图 3-18 可知，BFOA-PSO 算法在 0.31 s 时跟踪到最大功率 716.5 W，跟踪效率达到 99.9%，但是从图中可以看出，0.31 s 后该算法波形仍存在振荡现象；IGWO&PO 算法在 0.3 s 时跟踪到最大功率 717.6 W，跟踪效率达到 99.98%，且在跟踪到最大功率点后保持稳定；GWO 算法同样在 0.3 s 时跟踪到最大功率点 716.8 W，跟踪效率仅为 99.91%。因此，在静态阴影条件下，相较于 GWO 算法

和 BFOA-PSO 算法，IGWO&PO 算法的收敛速度最快，跟踪精度最高。

3.6.3 动态阴影条件下的 MPPT

为了模拟现实动态阴影，本文设置如下：在 0~2 s 阶段，三种算法在工况二下进行仿真测试；当进入 2~4 s 阶段时，工况二在 2 s 处突变为工况三，仿真结果如图 3-19 所示。

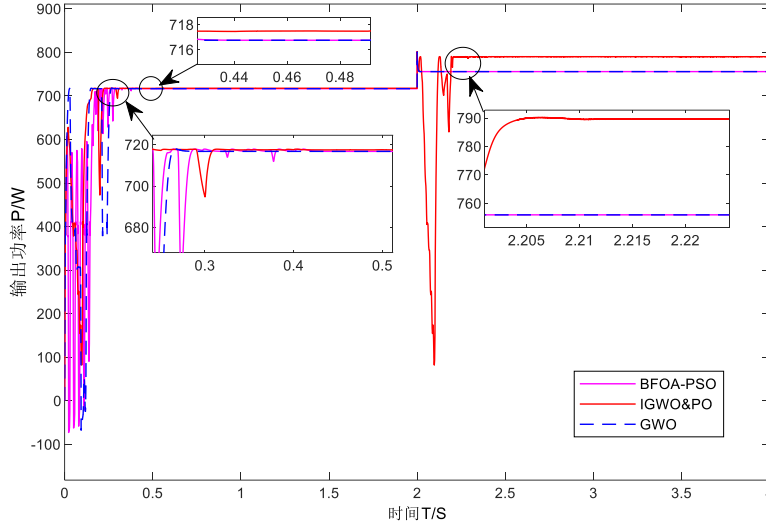


图 3-19 工况二突变到工况三（动态阴影）下三种算法的仿真波形

由图 3-19 可知，BFOA-PSO 算法在 0.42 s 时跟踪到最大功率 716.5 W，但在突变后陷于局部最优，跟踪到的最大功率仅为 756 W，且收敛速度相对较慢；IGWO&PO 算法在 0.31 s 时快速跟踪到最大功率 717.6 W，并在突变后成功跟踪到最大功率 790.2 W；GWO 算法虽然在 0.3 S 时跟踪到最大功率 716 W，但在突变后同样陷入了局部最优。因此，在动态阴影条件下，IGWO&PO 算法具有较强的全局寻优能力，以更快的收敛速度与更高的跟踪效率找到全局最大功率点。

3.6.4 MPPT 算法性能评估标准及性能比较

在光伏系统中，MPPT 算法的选择至关重要。尽管存在多种算法和逻辑，核心目标都是使系统能够在复杂工况下迅速、可靠地定位最大功率点。因此，在光伏发电系统设计阶段，必须根据具体需求选择合适的 MPPT 算法，并相应地选择评估标准来衡量其性能。

（1）稳态跟踪精度

控制算法的跟踪精度反映了 MPPT 算法在稳定状态下精确定位最大功率点的效能，这对提升光伏系统的发电效率具有决定性影响。不论使用何种算法，输出效率始终是评估的关键标准。较高的稳态跟踪精度有助于减少功率损耗，

进而有效提高光伏系统的整体效率。

(2) 跟踪速度

跟踪速度是指控制算法在光照条件变化时，迅速找到最大功率点的能力。高跟踪速度意味着系统能够及时响应外部环境的变化，如云层遮挡或光照强度的波动，从而最大限度地提高光伏系统的能量输出。

(3) 抗干扰能力

光伏系统在正常运行中会受到外界条件变化的影响，抗干扰能力反映了系统应对这些不确定性时的及时性和准确性，从而避免误判等问题。当外界光照强度突变时，控制算法可能会错误判断最大功率点的跟踪方向，严重时甚至可能导致电压崩溃。因此，MPPT 控制算法必须具备强大的抗干扰能力。各种算法在控制逻辑和硬件需求上存在区别，实际应用中，除了性能比较，还需权衡成本、实施复杂度以及环境条件等因素，从而结合实际需求做出最佳选择。

表 3.2 复杂工况下三种算法对比

工况	MPPT 算法	实际最大功率/W	跟踪到的功率/W	收敛时间/t	跟踪效率/%	振荡程度
工况一	BFOA-PSO		1064	0.32	99.91	较大
	IGWO&PO	1065	1065	0.3	100	较小
	GWO		1064	0.3	99.91	较小
工况二	BFOA-PSO		716.5	0.31	99.9	较大
	IGWO&PO	717.8	717.6	0.3	99.98	较小
	GWO		716.8	0.3	99.91	一般
工况二突变 变工况三	BFOA-PSO		716.5/756	0.42/2.05	95.6	较大
	IGWO&PO	717.8/790.3	717.6/790.2	0.31/2.24	99.8	较小
	GWO		716.8/756	0.3/2.06	95.6	较大

从图 3-17、图 3-18、图 3-19 的仿真波形和表 3.2 的性能比较可以看出，IGWO&PO 算法在不同工况下都能准确地跟踪到最大功率点。与 GWO 算法相比，IGWO&PO 算法收敛更快，跟踪效率提升了 4.1%。与 BFOA-PSO 算法相比，其寻优过程中振荡程度较小，且在跟踪到最大功率点后几乎无振荡现象。由上述分析可知，IGWO&PO 算法在复杂工况下均表现出更高的稳态跟踪精度、更快的跟踪速度及更强的抗干扰能力。

3.7 本章小结

本章首先阐述了光伏阵列 MPPT 的基本原理，并详细介绍了多种单峰传统 MPPT 算法和多峰智能 MPPT 算法。接着，针对 GWO 算法的不足进行了改进，将其与变步长扰动观察法相结合，在保证全局寻优能力的同时，加快了算法的收敛速度。最后，通过仿真对比 IGWO&PO、BFOA-PSO 和 GWO 三种算法在不同工况下的性能，验证了 IGWO&PO 多峰 MPPT 算法的优越性。

第4章 光伏阵列重构方法研究

在第二章中指出，传统拓扑结构的 TCT 光伏阵列在性能上具有显著优势。然而，在复杂工况下，TCT 光伏阵列也会受到不同程度的影响。光伏阵列重构可以通过优化光伏组件的空间排列或改变其电气连接方式，进而改进系统的拓扑结构，减轻局部阴影对阵列输出特性的影响，提高光伏阵列的发电效率。

因此，本章将系统介绍多种光伏阵列重构方法，并研究其如何优化 TCT 结构。其中，Zig-Zag “之”字形重构、MS 幻方重构、Ken-Ken 拼图重构通过物理布线优化实现电流均衡，无需额外的开关矩阵或控制设备，具有低成本、易实现的优势；而模拟退火算法（SA）凭借其全局搜索能力与强适应性，在复杂工况下的光伏阵列重构中广泛应用。为进一步提升算法性能，本文提出一种将 Ken-Ken 拼图与 SA 相结合的 SA-KenKen 重构算法。

4.1 Zig-Zag“之”字形重构

Vijayalekshmy 等人在 2017 年提出了 Zig-Zag“之”字形重构法^[79]。“之”字形静态重构法（也称为“蛇形重构法”）是一种用于优化光伏阵列布局的方法，通过调整太阳能电池板的排列方式，减少阴影覆盖并最大化光照接收，以最大程度地提高太阳能的收集效率。如图 4-1 所示，以 6 行 7 列的 TCT 结构光伏阵列为例进行说明。

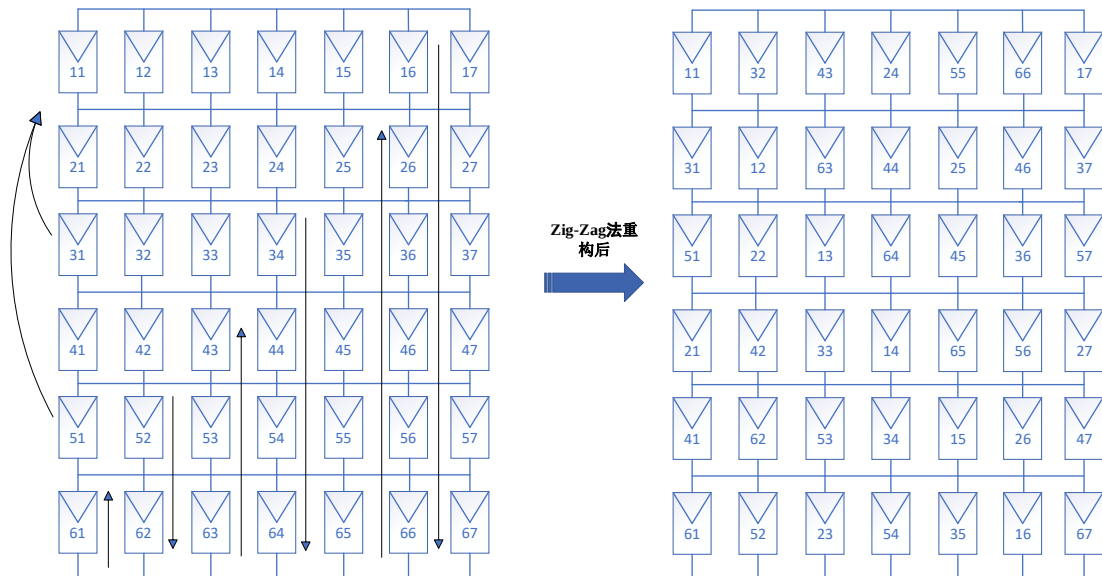


图 4-1 Zig-Zag“之”字形重构过程

重构过程分三个步骤：

- （1）将 6 行 7 列光伏阵列的第 1 列光伏电池分为奇数电池与偶数电池，奇

数在上偶数在下，即 1、3、5 在上，2、4、6 在下，并按顺序连接。

(2) 对其余六列进行相同处理，并将第 2 列电池都向上平移 1 行，第 3 列电池向下平移 2 行，第 4 列电池向上平移 3 行，第 5 列电池向下平移 4 行，第 6 列电池向上平移 5 行，第 7 列电池向下平移 6 行，进行重新连接。

(3) 执行完第二个步骤后，需要将原 TCT 光伏阵列矩阵第 1 行电池分布在重构后的对角线上。在图 4-1 右图中，电池 11、13、14、15 在执行完步骤二后都在阵列对角线上，因此不用对其调整。将电池 12 与电池 52 互换位置，保证电池 12 在对角线上，使优化后第 2 列电池的行顺序为 3、1、2、4、6、5。电池 16 与电池 46 交换位置，则第六列电池行顺序为 6、4、3、5、2、1。第 7 列电池行顺序与第 1 列相同，为 1、3、5、2、4、6。

4.2 MS 幻方重构

MS 重构法是一种基于逻辑的数字布局方法。MS 通常是正方形网格，包含从 1 到 n^2 的整数。因为每行、每列和对角线加起来都是同一个数字，这些常数和称为魔术常数或魔术和。4×4 MS 重构的基本属性如图 4-2 所示。从图中可以看出，每一列、每一行和每一条对角线的总和为 10。此外，中心方阵元素总和也是 10。4×4 MS 规则如下^[80]：

(1) 逐行加法

逐行加法规则由图 4-2 (a) 示出，并通过等式 (4-1) 表示

$$\sum_{j=1}^{j=4} n_{ij} = \text{行和}(i=1,2,3,4) \quad (4-1)$$

(2) 逐列加法

逐列加法规则由图 4-2 (b) 示出，并通过等式 (4-2) 表示

$$\sum_{i=1}^{i=4} n_{ij} = \text{列和}(j=1,2,3,4) \quad (4-2)$$

(3) 对角加法

两种不同类型的对角加法规则由图 4-2 (c) 示出，并通过等式 (4-3) 表示

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{j=4} n_{ij} &= \text{对角线和}(j=i) \\ \sum_{i=1}^{i=4} n_{ij} &= \text{对角线和}(j=i_{\max}-i-1) \end{aligned} \quad (4-3)$$

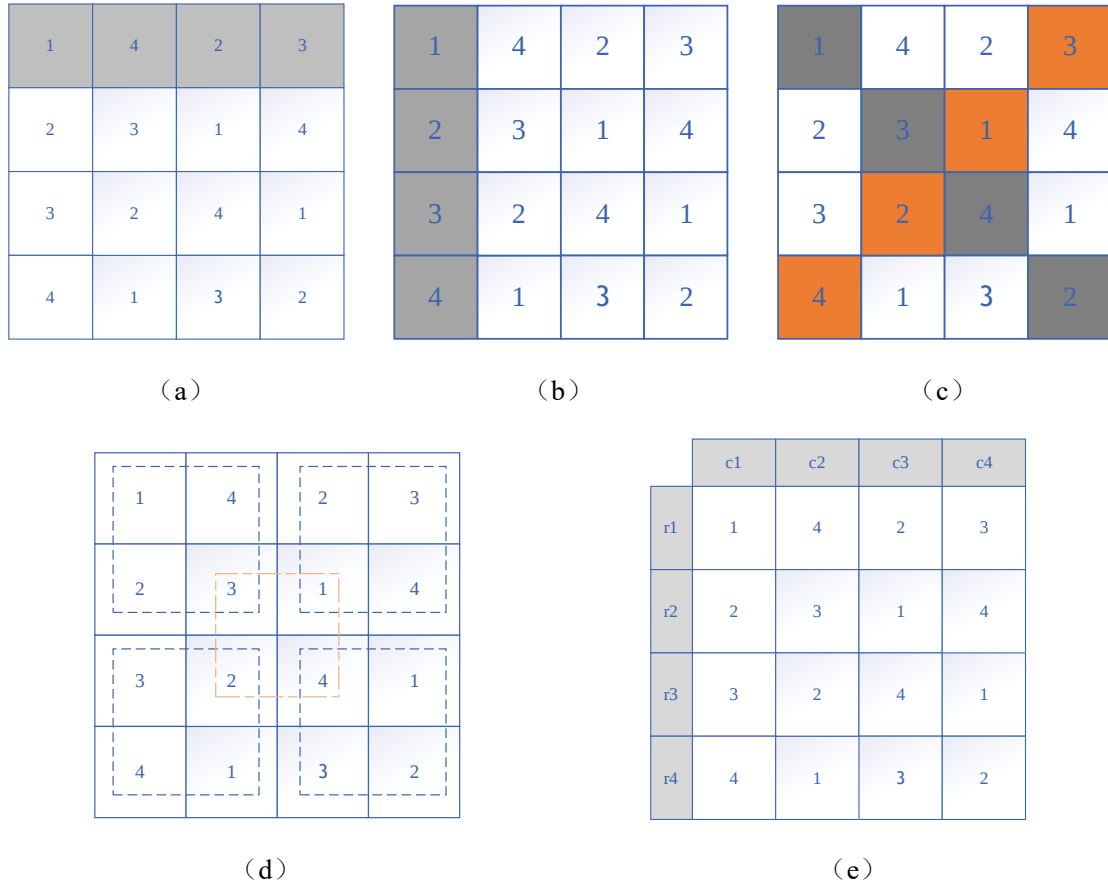


图 4-2 4×4 MS 重构的基本属性

基于 MS 重构的 4×4 TCT 光伏阵列如图 4-3 所示。模块编号第一位数字表示光伏阵列行数，第二位数字表示光伏阵列列数。其中，图 4-3 (c) 是经过拼图 MS 图案重构后 TCT 阵列的布局。该重构法只需在安装光伏电池时，按 MS 图案进行布局调整，而无需改变部分遮蔽条件下 PV 模块的电连接。从图 4-3 中可以清楚地看出，模块 42 (第 4 行，第 2 列) 与模块 12 (第 1 行，第 2 列) 互换；模块 32 (第 3 行，第 2 列) 与模块 22 (第 2 行，第 2 列) 互换；模块 23 (第 2 行，第 3 列) 与模块 13 (第 1 行，第 3 列) 互换；模块 43 (第 4 行，第 3 列) 与模块 33 (第 3 行，第 3 列) 互换；模块 34 (第 3 行，第 4 列) 与模块 14 (第 1 行，第 4 列) 互换；模块 44 (第 4 行，第 4 列) 与模块 24 (第 2 行，第 4 列) 互换。

所提出的 MS 光伏阵列重构将遮荫效果分散到整个阵列上，从而增加光伏发电量。通过研究系统在不同阴影模式下的性能，发现 MS 重构在阵列中定位模块的性能优于传统结构。TCT 光伏阵列之间的电气连接如图 4-3 (a) 所示。MS 重构阵列 (图 4-3 (c)) 的模块互连保持与 MS 拼图图案 (图 4-3 (b)) 相同。

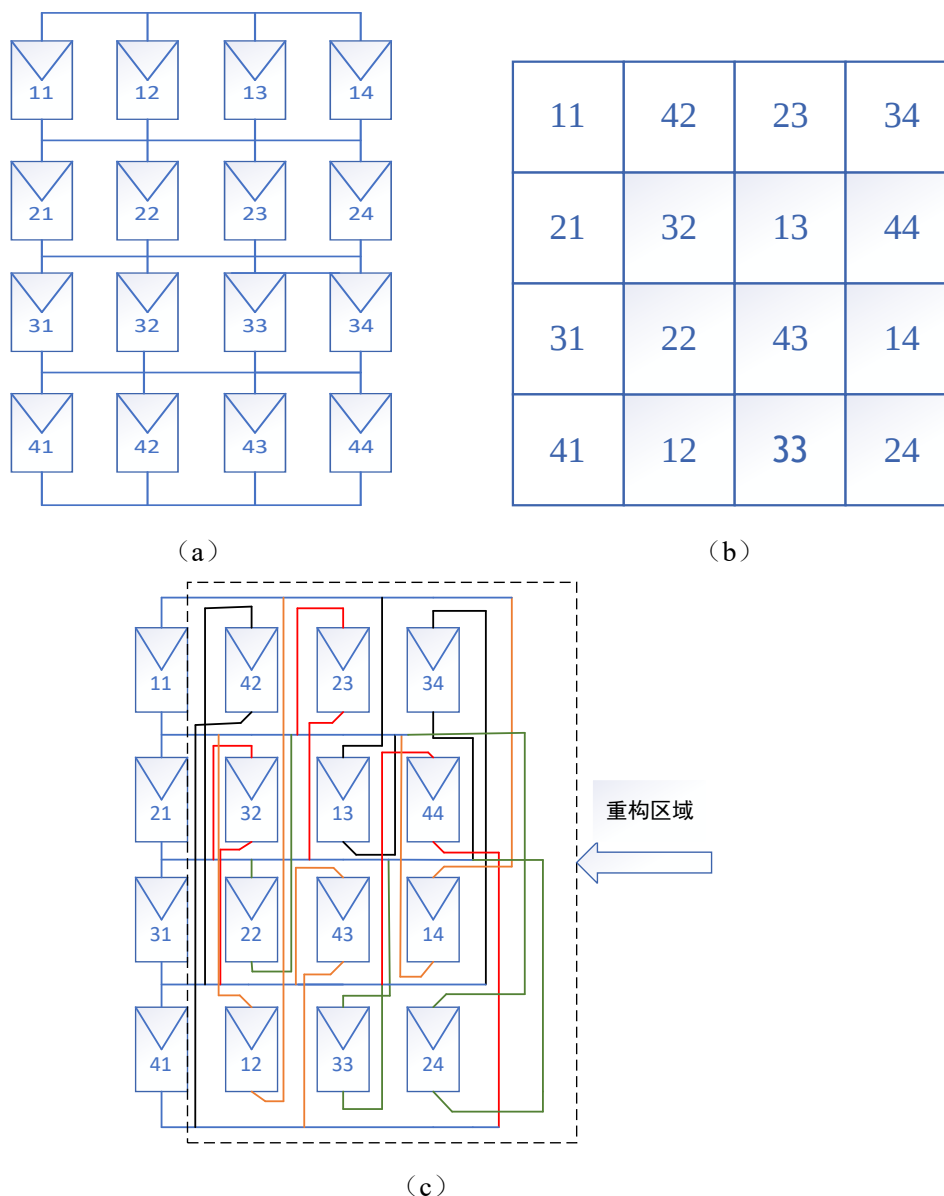


图 4-3 基于 MS 重构的 4×4TCT 光伏阵列图

4.3 Ken-Ken 拼图重构

Ken-Ken 是属于数独家族的逻辑谜题。Ken-Ken 拼图由 $m \times n$ 个网格构成，网格被分成不同行和列的多个笼子或笼子组。网格的大小决定了拼图中使用的逻辑数。对于 4×4 的网格，需要通过加、减、乘、除等算术运算将 1 到 4 的数字填入笼子中。每个笼子都会分配到一个数字和算术运算。如果笼子只有一个方格，则数字本身应该放在方格中。每个数字在行或列中不可重复。图 4-4 (a) 显示了 4×4 的网格拼图。解决难题的规则如下。

(1) 在第二行第二列中，由数字 2 组成的笼子被分配到一个方格，因此这个方格分配的数字为 2。

(2) 在第三行第三列中，通过加法运算为笼子分配数字 6，因为数字 2 已存在于该列中，因此该列填充有数字 1、3，剩余的方格填充数字 2，如下所示图 4-4 (b)。

(3) 在第一行第一列中，笼子由带有乘法运算符的数字 48 组成，第一列填充数字 4，其余方格填充 1 和 3，如图 4-4 (c) 所示。

(4) 类似地，使用加法运算为笼子分配数字 10 填充第三列和第四列，如图 4-4 (d) 所示。

48×		10+	10+
2+ 2			
6+			

(a) 算术运算

48×		10+	10+
2+ 2			
6+ 1			
3	2		

(b) 通过加法运算填充块 2 和 6

48× 4	1	10+	10+
2+ 2	3		
6+ 1	4		
3	2		

(c) 通过乘法运算符填充块 48

48× 4	1	10+ 3	10+ 2
2+ 2	3	4	1
6+ 1	4	2	3
3	2	1	4

(d) 用算术运算填充两个块 10

图 4-4 4×4Ken-Ken 拼图的形成

通过获得的 4×4 Ken-Ken 网格拼图，进一步分析拼图的图案排列，如图 4-5 所示。在拼图排列中，第一个数字代表模块的行号，第二个数字代表列号。

4	1	3	2
2	3	4	1
1	4	2	3
3	2	1	4

(a) ken-ken 拼图

41	12	33	24
21	32	43	14
11	42	23	34
31	22	13	44

(b) ken-ken 拼图排列

图 4-5 ken-ken 拼图排列过程

Ken-Ken 拼图重构采用全局优化技术，可以在更广泛的解空间中寻找最优解，避免陷入局部最优解，从而提高整体系统性能。图 4-6（a）显示了 TCT 配置中模块的位置，而图 4-6（b）展示了在不改变电气连接的情况下，基于 Ken-Ken 拼图图案的 TCT 配置的重新排列。

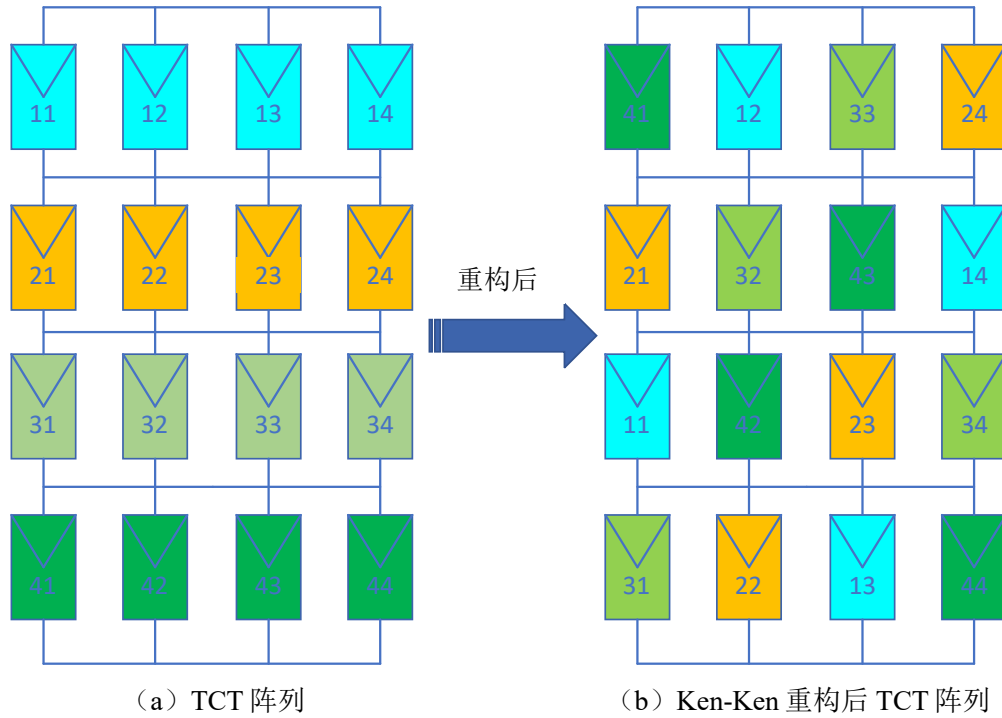


图 4-6 TCT 重新排列的物理位置

4.4 SA-KenKen 重构

Ken-Ken 算法有固定的规则和框架，而光伏阵列重构则可能需要动态调整，以灵活应对不同的环境条件和光照变化等因素。因此，Ken-Ken 算法在这方面的灵活性可能不足，难以应对实际应用中的多变情况。相比之下，模拟退火算法在优化问题中展示了较强的全局搜索能力和灵活性。然而，在光伏阵列重构的应用中，算法的初始解对最终结果有较大影响。如果初始解选择不当，可能需要更长时间才能找到满意的解，甚至可能无法找到全局最优解。

因此，本文提出将模拟退火与 Ken-Ken 算法结合，形成一种新的混合算法，称为 SA-KenKen 重构算法。该算法将模拟退火算法的全局搜索能力与 Ken-Ken 算法的结构化约束处理能力结合，可以有效探索光伏阵列的最优排列方案。模拟退火提供了跳出局部最优的机制，而 Ken-Ken 则保证了解的合法性和满足约束条件，从而实现高效的光伏阵列重构。如图 4-7 所示为 SA-KenKen 重构方法流程框图。

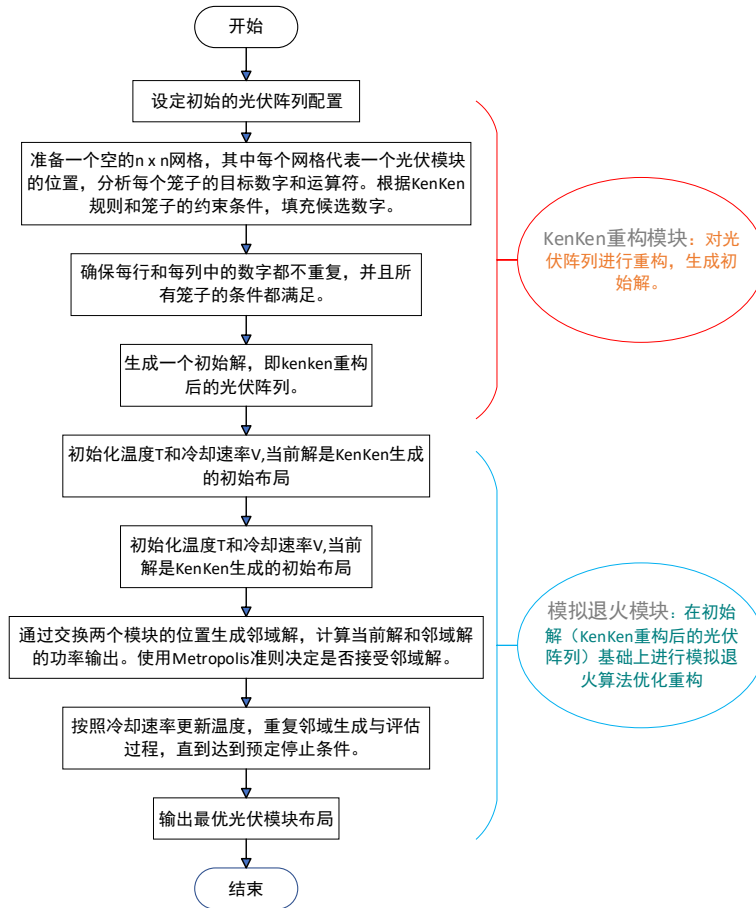


图 4-7 SA-KenKen 重构方法流程框图

下面对 SA-KenKen 重构算法进行详细讨论介绍, 为了更好的理解该算法, 本文将以 5×5 光伏阵列为例。具体步骤如下:

步骤一: 将光伏阵列布局问题建模为 KenKen 拼图中的谜题过程。如图 4-8 所示。

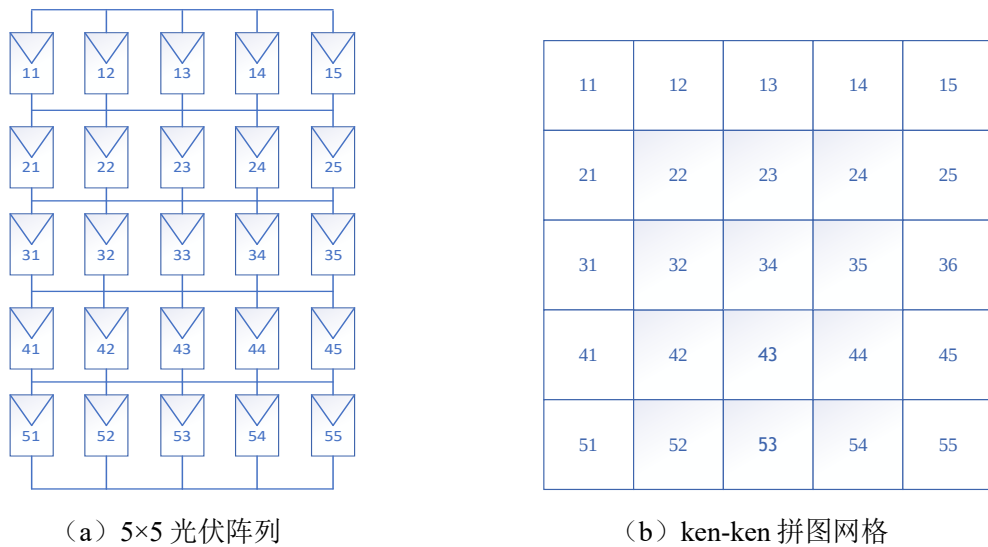


图 4-8 KenKen 拼图中的谜题过程

步骤二：初始化 5×5 网格，分析每个笼子的目标数字和运算符。根据 KenKen 规则和笼子的约束条件，填充候选数字。逐步使用逻辑推理来排除不可能的数字组合，直至找到唯一解。确保每行和每列中的数字不重复，并且所有笼子的条件都得到满足。根据约束条件生成一个初始解（重构后网格图），如图 4-9 所示。

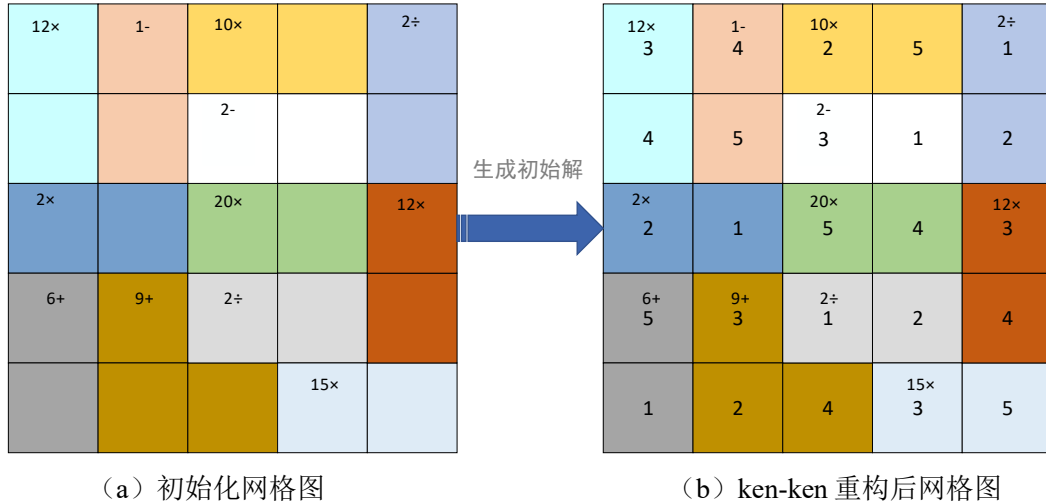


图 4-9 初始解形成过程

步骤三：Ken-Ken 法重构后光伏阵列如图 4-10 所示。

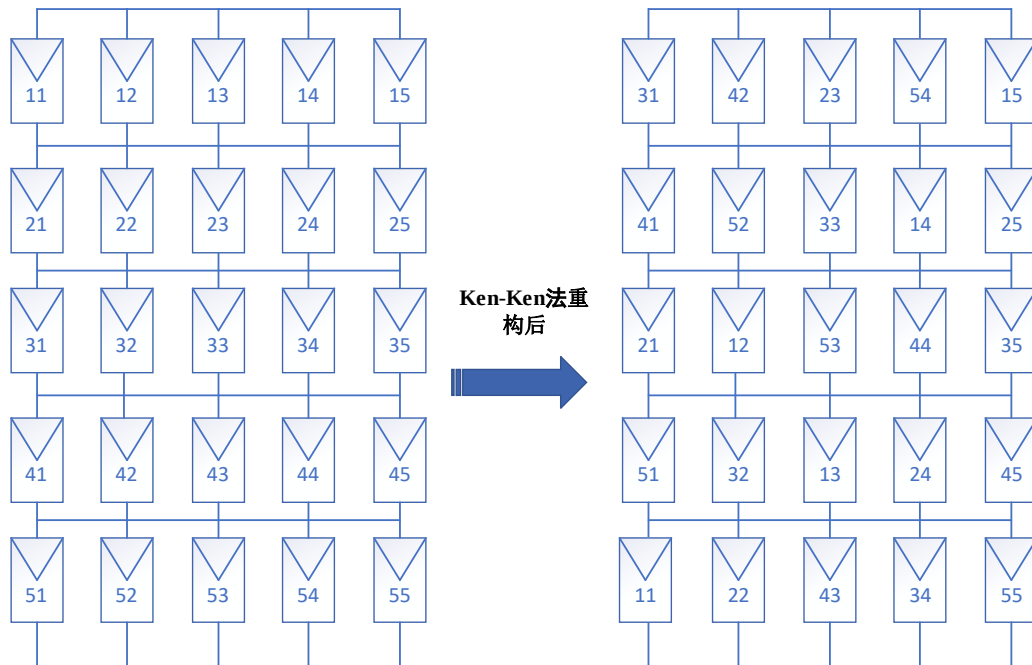


图 4-10 Ken-Ken 法重构后 5×5 光伏阵列

计算当前布局每行光伏电池电流，将每行电流之和的差异最小值作为目标函数评估初始解。目标函数为：

$$F = \min \left(\sum_{i=1}^5 I_{row_max} - I_i \right) \quad (4-4)$$

其中, I_{row_max} 为每行光伏电池电流之和; I_i 为第 i 行电流。 F 的值越小, 代表每行电池电流差越小, 即光伏阵列所接受到的光照强度分布越均匀。

步骤四: 设定初始温度和降温策略, 这是模拟退火算法的关键参数。初始温度决定了在开始时允许接受较差解的概率, 而降温策略则控制着如何逐渐减小温度, 以便在优化过程中逐渐减少接受较差解的概率。在每个温度下, 对当前的光伏阵列布局进行调整, 生成新的解。评估新解的适应度值, 依据 Metropolis 准则判断是否接受新解^[81]。若新解优于当前解, 则直接采纳; 若非最优解, 则以特定概率接受该解。Metropolis 准则公式为:

$$P(dE) = \exp(dE / (kT)) \quad (4-5)$$

式中, dE 为当前状态和新状态之间的能量差; $P(dE)$ 为接受新状态的概率; k 为一个常数; $\exp$ 为自然指数; T 为当前的温度参数。

步骤五: 根据设定的降温策略更新温度, 通过减小温度来减少接受较差解的概率。降温函数如下^[82]:

$$T = T_s \alpha \left(\cos(\pi / 2(1 - t / K)) \right) + \cos(\pi / (2T_s(1 - t / K))) \quad (4-6)$$

式中, T_s 为温度初始值; α 为衰减因子; t 为迭代次数; K 为总降温次数。

当算法满足最大迭代次数或最低温度阈值的终止条件时, 停止算法运行, 输出优化后的光伏阵列布局。

4.5 光伏阵列重构算法仿真与分析

4.5.1 光照均匀的阴影遮挡仿真

光照均匀的阴影遮挡通常是由光伏板间距设置不合理所导致。当光伏板之间的间距过小, 特别是在低太阳高度角的情况下 (如早晨或傍晚), 前排的光伏板可能会遮挡后排光伏板。因此, 大多数的阴影遮挡发生在光伏阵列的底部区域。为模拟这种遮挡情况, 在 Simulink 仿真中搭建了 5×5 TCT 模型, 并依次构造了如图 4-11、图 4-13 和图 4-15 所示的 3 种工况。仿真对比过程如下:

工况 1: 在光伏阵列底部构造了小面积的阴影遮蔽。如图 4-11 (a) 所示, 正常光照强度为 1000 W/m^2 , 遮荫处光照强度为 400 W/m^2 , 图 4-11 (b) 为 Zig-Zag 法重构后阴影分布图, 图 4-11 (c) 和图 4-11 (d) 分别为 Ken-Ken 和 MS 最

终重构结果，图 4-11 (e) 为 SA-KenKen 重构后的阴影分散图。

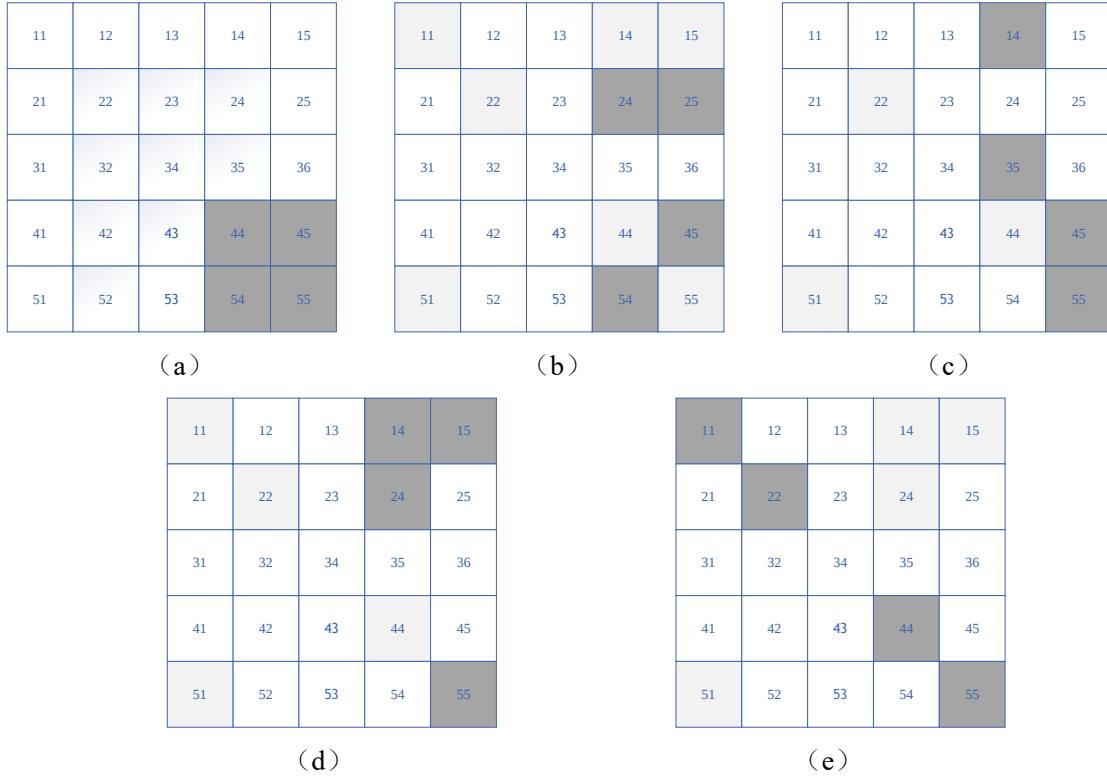


图 4-11 工况 1 下 (a) TCT, (b) Zig-Zag, (c) Ken-Ken, (d) MS, (e) SA-KenKen 重构后阴影分布图

为验证重构算法的有效性，进行行电流计算以定位 GMPP。下面以原 TCT 阵列和 SA-KenKen 算法重构后阵列的行电流计算过程为例进行介绍：

原 TCT 阵列行电流计算：如图 4-11 (a) 所示，由于阵列右下角阴影遮挡，从而对第 4、5 行电流产生影响，第 5 行的行电流为：

$$I_{row5} = 3 \times \frac{G_{\text{正常}}}{G_{\text{正常}}} \times I_m + 2 \times \frac{G_{\text{阴影}}}{G_{\text{正常}}} \times I_m = 3 \times \frac{1000}{1000} \times I_m + 2 \times \frac{400}{1000} \times I_m = 3.8I_m \quad (4-7)$$

第 4 行的行电流为：

$$I_{row4} = 3 \times \frac{1000}{1000} \times I_m + 2 \times \frac{400}{1000} \times I_m = 3.8I_m \quad (4-8)$$

其余行无阴影遮挡，所以行电流均为：

$$I_{row1,2,3} = 5 \times \frac{1000}{1000} \times I_m = 5I_m \quad (4-9)$$

SA-KenKen 算法重构后阵列行电流计算：如图 4-11 (e) 所示，重构后的 1、2、4、5 行阴影分布相同，因此行电流均为：

$$I_{row1,2,4,5} = 4 \times \frac{1000}{1000} \times I_m + 1 \times \frac{400}{1000} \times I_m = 4.4I_m \quad (4-10)$$

第 3 行无阴影遮挡，行电流为：

$$I_{row3} = 5 \times \frac{1000}{1000} \times I_m = 5I_m \quad (4-11)$$

Zig-Zag、Ken-Ken、MS 重构后阵列行电流的计算也都遵循以上计算步骤。如表 4.1 所示，将重构阵列的各行电流值按升序排列，同时计算并降序排列各电流对应的电压值及理论 GMPP 值。

从表 4.1 中可以看出，在工况 1 下，原 TCT 阵列 GMPP 值为 $79V_mI_m$ ，Zig-Zag 和 MS 重构后阵列 GMPP 值为 $82.2V_mI_m$ ，而 Ken-Ken 和 SA-KenKen 重构后阵列 GMPP 值为 $93V_mI_m$ ，可见在工况 1 下 Ken-Ken 和 SA-KenKen 的重构效果最好。

表 4.1 工况 1 下行电流、电压和功率理论计算值

	TCT				Zig-Zag				Ken-Ken				MS				SA-KenKen			
	A	V	W	I_{ri}	A	V	W		A	V	W		A	V	W		A	V	W	
I_{r5}	3.8	5	17	I_{r2}	3.8	5	19	I_{r5}	4.4	5	22	I_{r1}	3.8	5	19	I_{r5}	4.4	5	22	
I_{r4}	3.8	5	17	I_{r4}	4.4	4	17.6	I_{r4}	4.4	5	22	I_{r2}	4.4	4	17.6	I_{r4}	4.4	5	22	
I_{r3}	5	3	15	I_{r5}	4.4	4	17.6	I_{r3}	4.4	5	22	I_{r5}	4.4	4	17.6	I_{r2}	4.4	5	22	
I_{r2}	5	3	15	I_{r1}	5	2	10	I_{r1}	4.4	5	22	I_{r3}	5	2	10	I_{r1}	4.4	5	22	
I_{r1}	5	3	15	I_{r3}	5	2	10	I_{r2}	5	1	5	I_{r4}	5	2	10	I_{r3}	5	1	5	

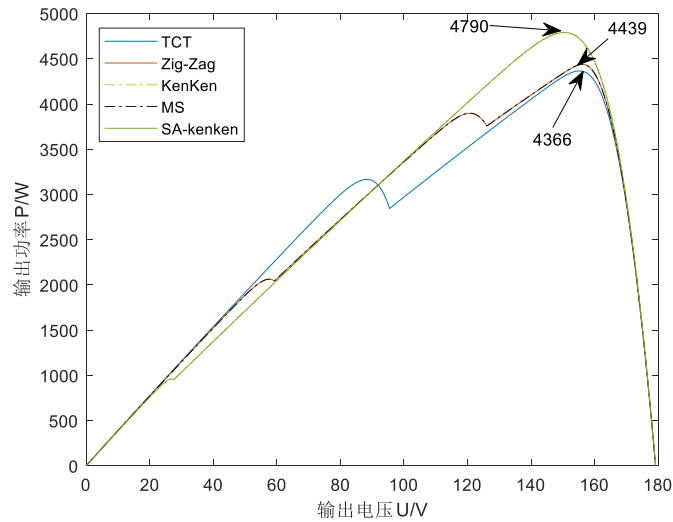


图 4-12 工况 1 下的 P-U 特性曲线

本文基于 Simulink 仿真平台构建了光伏阵列的 P-U 特性模型，并进行了对比分析。如图 4-12 所示，原 TCT 的 P-U 曲线有两个峰值点且最大功率值为 4366 W。Zig-Zag 和 MS 的 P-U 曲线有三个峰值点，但最大功率提高为 4439 W，而 Ken-Ken 和 SA-KenKen 的 P-U 曲线上峰值点只有一个，最大功率为 4790 W。显

然，Ken-Ken 和 SA-KenKen 重构后的光伏阵列输出更高且更稳定。

工况 2：随着太阳照射角度的变化，阴影遮挡也随之变化，仿真阵列底部的阴影遮蔽面积扩大。如图 4-13 所示，分别给出原 TCT 与 4 种重构算法下的阴影分布图，阴影部分光照强度仍为 400 W/m^2 。同工况 1 中的电流理论计算步骤，工况 2 下的电流、电压与功率值由表 4.2 给出。

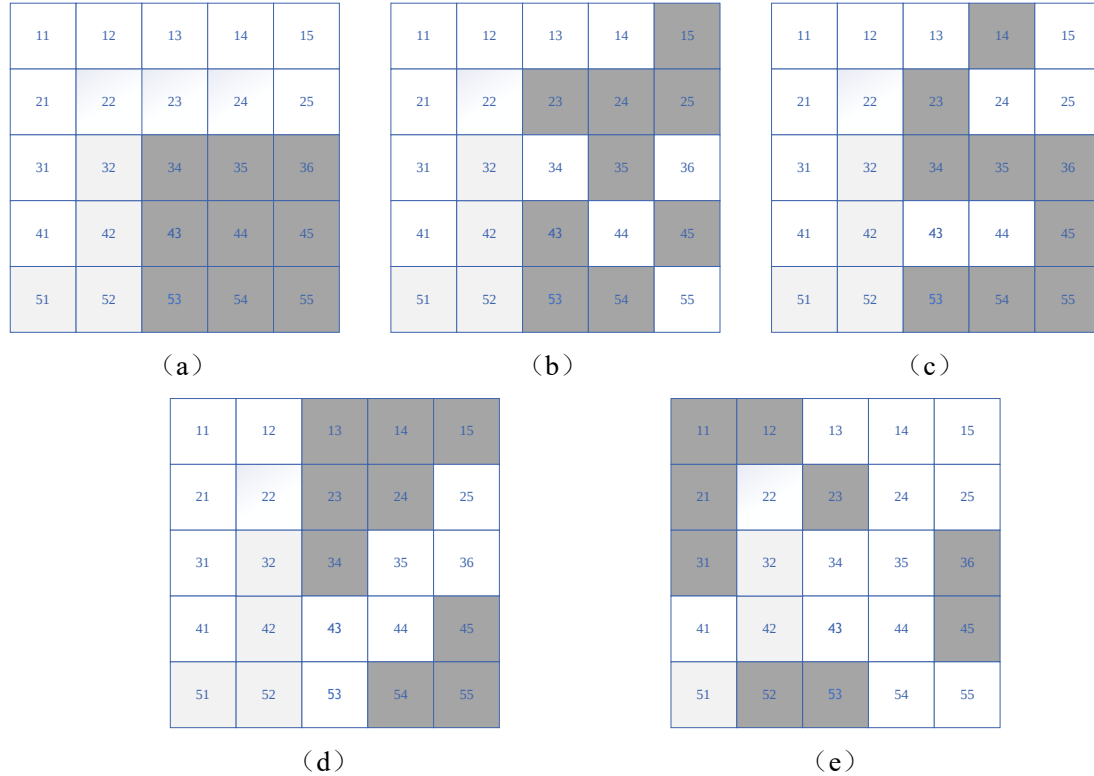


图 4-13 工况 2 下 (a) TCT, (b) Zig-Zag, (c) Ken-Ken, (d) MS, (e) SA-KenKen 重构后阴影分布图

表 4.2 工况 2 下行电流、电压和功率理论计算值

	TCT			Zig-Zag			Ken-Ken			MS			SA-KenKen		
	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W
I_{t5}	3.2	5	16	I_{t2}	3.2	5	16	I_{t5}	3.2	5	16	I_{t1}	3.2	5	19
I_{t4}	3.2	5	16	I_{t4}	3.8	4	15.2	I_{t3}	3.2	5	16	I_{t2}	3.8	4	15.2
I_{t3}	3.2	5	16	I_{t5}	3.8	4	15.2	I_{t4}	4.4	3	13.2	I_{t5}	3.8	4	15.2
I_{t2}	5	2	10	I_{t1}	4.4	2	8.8	I_{t1}	4.4	3	13.2	I_{t3}	4.4	2	8.8
I_{t1}	5	2	10	I_{t3}	4.4	2	8.8	I_{t2}	4.4	3	13.2	I_{t4}	4.4	2	8.8

由表 4.2 可知，在工况 2 下 TCT、Zig-Zag、Ken-Ken、MS 和 SA-KenKen 重构后的阵列 GMPP 值为 $68V_mI_m$ 、 $71V_mI_m$ 、 $71.6V_mI_m$ 、 $71V_mI_m$ 、 $80.4V_mI_m$ ，其中 SA-KenKen 的 GMPP 值最高。如图 4-14 所示，从 P-U 特性曲线中可以看出各阵

列的最大功率分别为 3617 W、3755 W、3779 W、3755 W、4137 W，且 SA-KenKen 的 P-U 曲线只有一个峰值点。分析显示，在工况 2 下，由于 SA-KenKen 算法对阴影的分散更均匀，重构后的阵列输出更加平稳。

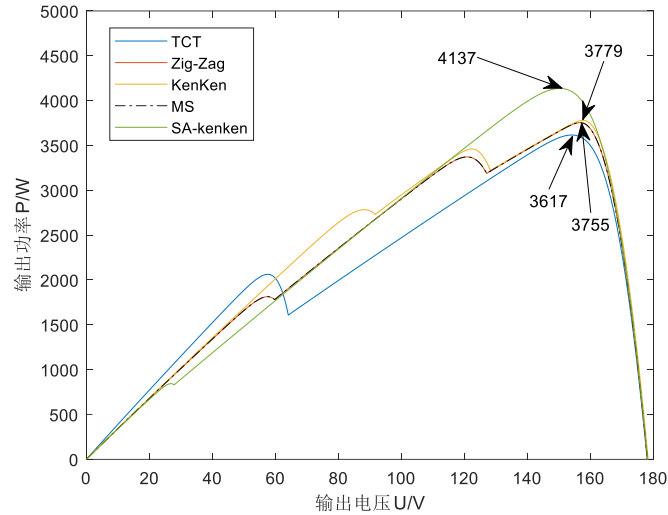


图 4-14 工况 2 下的 P-U 特性曲线

工况 3：阴影遮挡在工况 1 和 2 的基础上左移，各算法重构下的阴影分布如图 4-15 所示。工况 3 下各阵列的电流、电压和功率的理论计算值由表 4.3 给出。

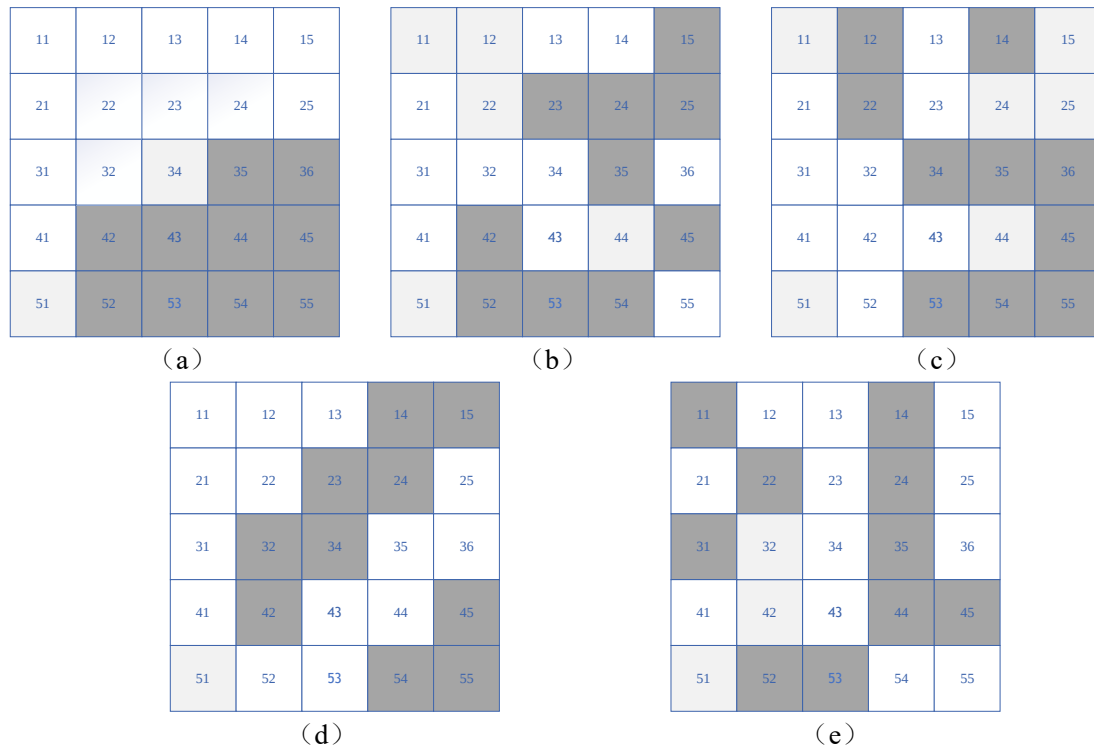


图 4-15 工况 3 下 (a) TCT, (b) Zig-Zag, (c) Ken-Ken, (d) MS, (e) SA-KenKen 重构后阴影分布图

由表 4.3 可知，MS 和 SA-KenKen 重构后阵列的理论输出功率值均为 $95V_m I_m$ ，

而 TCT、Zig-Zag、Ken-Ken 的输出功率值分别为 $57.4V_mI_m$ 、 $61V_mI_m$ 、 $61V_mI_m$ 。

表 4.3 工况 3 下行电流、电压和功率理论计算值

	TCT			Zig-Zag			Ken-Ken			MS			SA-KenKen		
	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W
I_{t5}	2.6	5	13	I_{t5}	3.2	5	16	I_{t5}	3.2	5	16	I_{t1}	3.8	5	19
I_{t4}	2.6	5	13	I_{t2}	3.2	5	16	I_{t3}	3.2	5	16	I_{t2}	3.8	5	19
I_{t3}	3.8	3	11.4	I_{t4}	3.8	3	11.4	I_{t1}	3.8	3	11.4	I_{t3}	3.8	5	19
I_{t2}	5	2	10	I_{t1}	4.4	2	8.8	I_{t4}	4.4	2	8.8	I_{t4}	3.8	5	19
I_{t1}	5	2	10	I_{t3}	4.4	2	8.8	I_{t2}	4.4	2	8.8	I_{t5}	3.8	5	19

通过图 4-16 的 P-U 曲线图可以看出，MS 和 SA-KenKen 的最大功率值存在差异。SA-KenKen 的 GMPP 值为 4075 W，而 MS 的 GMPP 值为 3916 W；TCT、Zig-Zag、Ken-Ken 的 GMPP 值分别为 3044 W、3663 W、3755 W。由此可见，SA-KenKen 算法重构后的光伏阵列阴影分布更为均匀，P-U 曲线也更加光滑，输出功率表现更为优越。

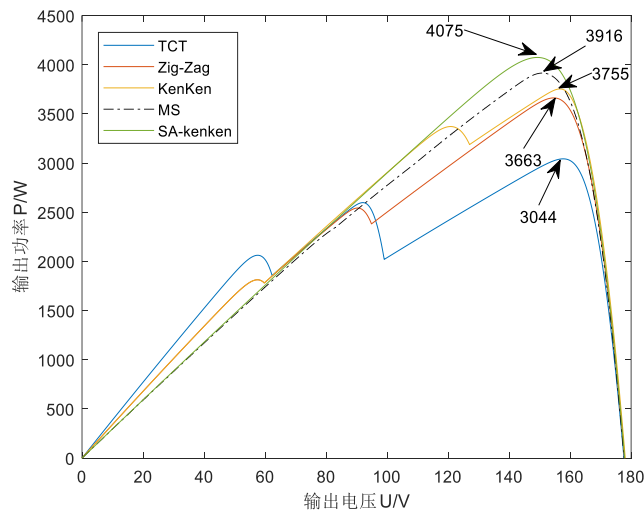


图 4-16 工况 3 下的 P-U 特性曲线

4.5.2 光照不均匀的阴影遮挡仿真

光照不均匀的阴影遮挡通常由建筑物、树木、山脉等大型物体遮挡、云层的移动或密度变化等原因导致。本文针对光照不均匀阴影遮挡构造了长窄、长宽、短窄和短宽 4 种模式来进行测试。具体内容如下：

长窄模式：长窄阴影遮挡指分布在阵列一侧的竖向遮挡。如图 4-17 所示为 TCT、Zig-Zag、Ken-Ken、MS 和 SA-KenKen 重构后的阴影分布图，其中包含不同光照强度： 900 W/m^2 、 700 W/m^2 、 400 W/m^2 、 300 W/m^2 。

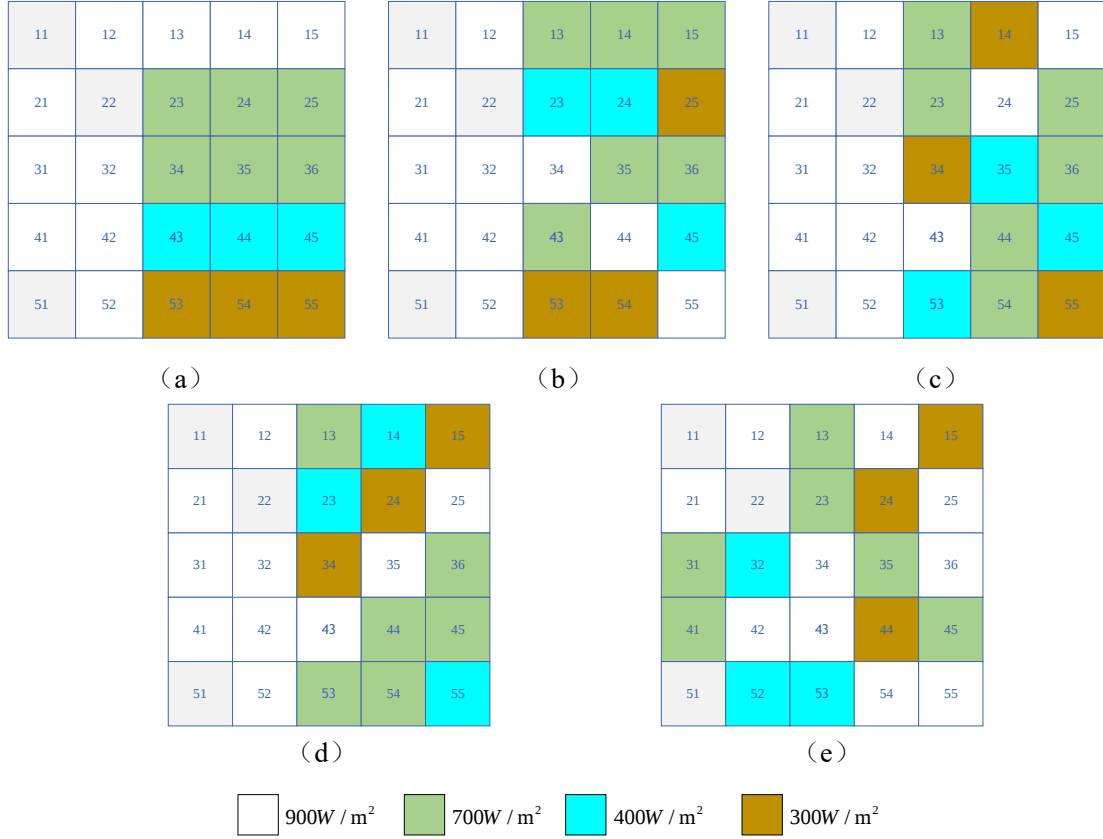


图 4-17 长窄模式下 (a) TCT, (b) Zig-Zag, (c) Ken-Ken, (d) MS, (e) SA-KenKen 重构后阴影分布图

为了更加清晰地了解算法重构后阵列的输出功率情况，同样进行了行电流的理论计算，并将各算法重构后阵列的理论电流、电压和功率值整理在表 4.4 中。以 TCT 阵列和 SA-KenKen 重构后阵列为例，计算过程如下：

原 TCT 阵列行电流计算：由于 2、3 行阴影遮挡相同，所以它们行电流也相同：

$$I_{row2,3} = 2 \times \frac{900}{1000} + 3 \times \frac{700}{1000} = 3.9I_m \quad (4-12)$$

第 4 行的行电流为：

$$I_{row4} = 2 \times \frac{900}{1000} + 3 \times \frac{400}{1000} = 3I_m \quad (4-13)$$

第 5 行的行电流为：

$$I_{row5} = 2 \times \frac{900}{1000} + 3 \times \frac{300}{1000} = 2.7I_m \quad (4-14)$$

第 1 行无阴影遮挡，行电流为：

$$I_{row1} = 5 \times \frac{900}{1000} = 4.5I_m \quad (4-15)$$

SA-KenKen 重构后阵列行电流计算：第 1、2 行阴影遮挡相同，行电流为：

$$I_{row1,2} = 3 \times \frac{900}{1000} + 1 \times \frac{700}{1000} + 1 \times \frac{300}{1000} = 3.7I_m \quad (4-16)$$

第 3 行的行电流为:

$$I_{row2,3} = 2 \times \frac{900}{1000} + 2 \times \frac{700}{1000} + 1 \times \frac{400}{1000} = 3.6I_m \quad (4-17)$$

第 4 行的行电流为:

$$I_{row2,3} = 2 \times \frac{900}{1000} + 2 \times \frac{700}{1000} + 1 \times \frac{300}{1000} = 3.5I_m \quad (4-18)$$

第 5 行的行电流为:

$$I_{row2,3} = 3 \times \frac{900}{1000} + 2 \times \frac{400}{1000} = 3.5I_m \quad (4-19)$$

Zig-Zag、Ken-Ken、MS 重构后阵列行电流的计算也都遵循以上计算步骤。

表 4.4 长窄模式下行电流、电压和功率理论计算值

	TCT			Zig-Zag			Ken-Ken			MS			SA-KenKen		
	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W
I_{r5}	2.7	5	13.5	I_{r2}	2.9	5	14.5	I_{r5}	3.2	5	16	I_{r1}	3.2	5	16
I_{r4}	3	4	12	I_{r5}	3.3	4	13.2	I_{r3}	3.2	5	16	I_{r2}	3.4	4	13.6
I_{r3}	3.9	3	11.7	I_{r4}	3.8	3	11.4	I_{r1}	3.7	3	11.1	I_{r5}	3.6	3	10.8
I_{r2}	3.9	3	11.7	I_{r1}	3.9	2	7.8	I_{r4}	3.8	2	7.6	I_{r3}	3.7	2	7.4
I_{r1}	4.5	1	4.5	I_{r3}	4.1	1	4.1	I_{r2}	4.1	1	4.1	I_{r4}	4.1	1	4.1

由表 4.4 可知，在长窄模式下 SA-KenKen 重构后的阵列理论输出功率为 $60.6V_mI_m$ ，TCT、Zig-Zag、Ken-Ken、MS 的输出功率值分别为 $48.4V_mI_m$ 、 $51V_mI_m$ 、 $54.8V_mI_m$ 、 $51.9V_mI_m$ 。其中，SA-KenKen 重构后的理论输出功率最高，而最低的仍为 TCT 阵列。理论计算表明，光伏阵列输出功率在各重构算法下均得到了显著提升，SA-KenKen 算法表现最佳。

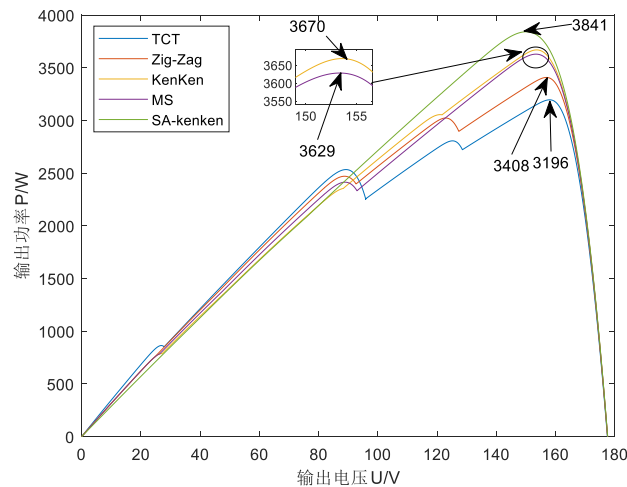


图 4-18 长窄模式下的 P-U 特性曲线

从图 4-18 的长窄模式 P-U 输出特性曲线可以看出，TCT 阵列的 P-U 特性曲线呈现三峰值特征，最大功率点值为 3196 W。Ken-Ken、Zig-Zag 和 MS 重构阵列虽仍存在两至三个峰值点，但其最大功率值分别提升至 3670 W、3408 W 和 3629 W。相比之下，SA-KenKen 算法的重构效果最佳，其输出特性曲线呈现单峰值特征，且最大功率点值最高，达到 3841 W。

长宽模式：在这种模式下，光伏阵列中的行和列大部分被遮挡，受 900 W/m^2 、 600 W/m^2 、 500 W/m^2 、 400 W/m^2 、 200 W/m^2 5 种不同光照强度等级的影响。如图 4-19 所示，显示了 TCT、Zig-Zag、Ken-Ken、MS 和 SA-KenKen 重构后的阴影分布图。长宽模式下光伏阵列的理论电流、电压、功率计算数值由表 4.5 给出。

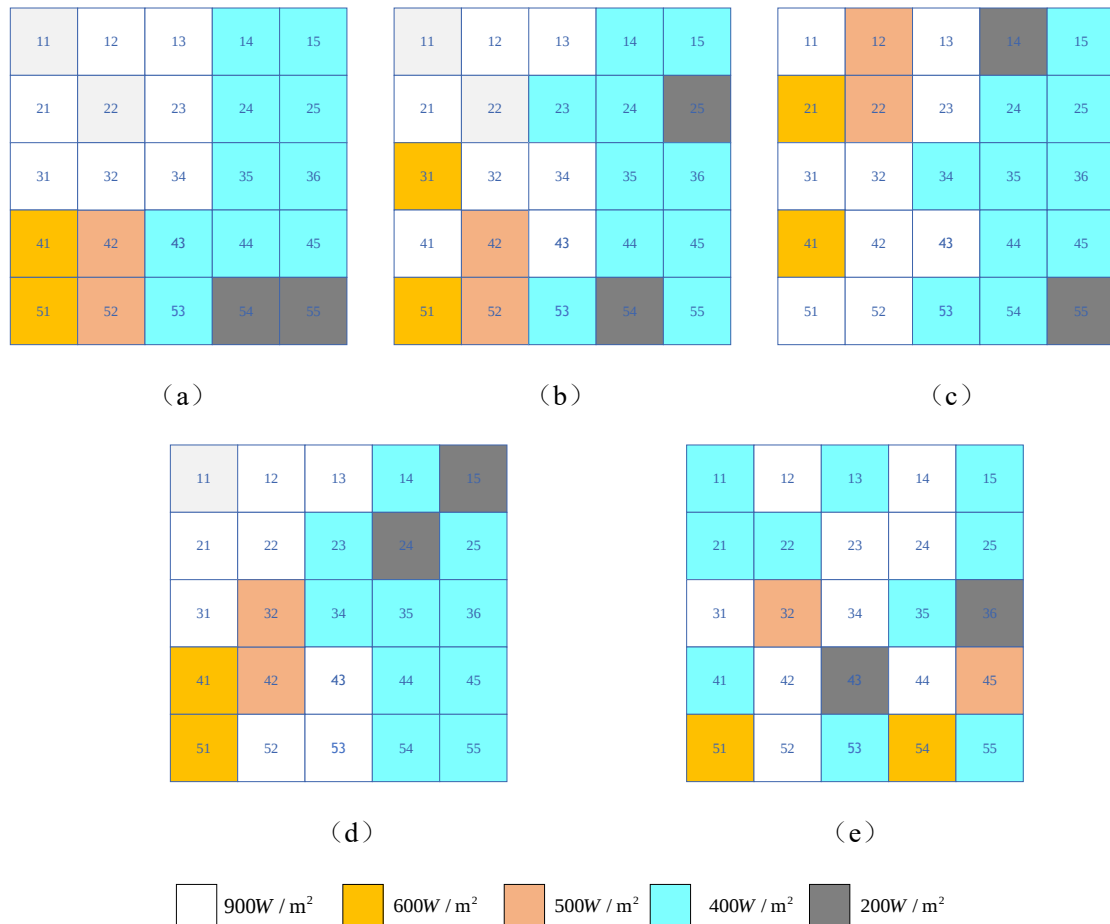


图 4-19 长宽模式下 (a) TCT, (b) Zig-Zag, (c) Ken-Ken, (d) MS, (e) SA-KenKen 重构后阴影分布图

由表 4.5 可知，在长宽模式下，SA-KenKen 重构后阵列的理论输出功率仍是最高的，达到 $55.5V_m I_m$ ；而 TCT 阵列的输出功率值最低，仅为 $30.2V_m I_m$ 。其

余三种算法重构的阵列输出功率值按表格所列顺序依次为 $40.9V_mI_m$ 、 $45.9V_mI_m$ 、 $45.1V_mI_m$ 。

表 4.5 长宽模式下行电流、电压和功率理论计算值

	TCT			Zig-Zag			Ken-Ken			MS			SA-KenKen						
	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W				
I_{t5}	2.1	5	10.5	I_{t5}	2.1	5	10.5	I_{t5}	2.8	5	14	I_{t3}	2.6	5	13	I_{t3}	2.9	5	14.5
I_{t4}	2.3	4	9.2	I_{t2}	2.8	4	11.2	I_{t2}	2.8	5	14	I_{t2}	2.8	4	11.2	I_{t4}	2.9	5	14.5
I_{t3}	3.5	1	3.5	I_{t4}	3.1	3	9.3	I_{t1}	2.9	3	8.7	I_{t4}	2.8	4	11.2	I_{t5}	2.9	5	14.5
I_{t2}	3.5	1	3.5	I_{t3}	3.2	2	6.4	I_{t3}	3	2	6	I_{t5}	3.2	2	6.4	I_{t1}	3	2	6
I_{t1}	3.5	1	3.5	I_{t1}	3.5	1	3.5	I_{t4}	3.2	1	3.2	I_{t1}	3.3	1	3.3	I_{t2}	3	2	6

长宽模式下各光伏阵列的 P-U 输出特性曲线由图 4-20 给出。由于长宽模式下的光伏阵列存在大面积阴影遮挡，TCT 阵列的输出功率显著低于其他重构阵列。其中，SA-KenKen 阵列展现出最佳综合性能，其最大输出功率达到 3139 W，且输出特性曲线仅呈现单峰值特征。而 Zig-Zag、KenKen 和 MS 阵列的输出特性曲线仍保持双峰值特征，对应的最大功率值分别为 2543 W、3093 W 和 2975 W。而 MS 阵列的输出特性曲线仍保持双峰值特征，对应的最大功率值分别为 2543 W、3093 W 和 2975 W。

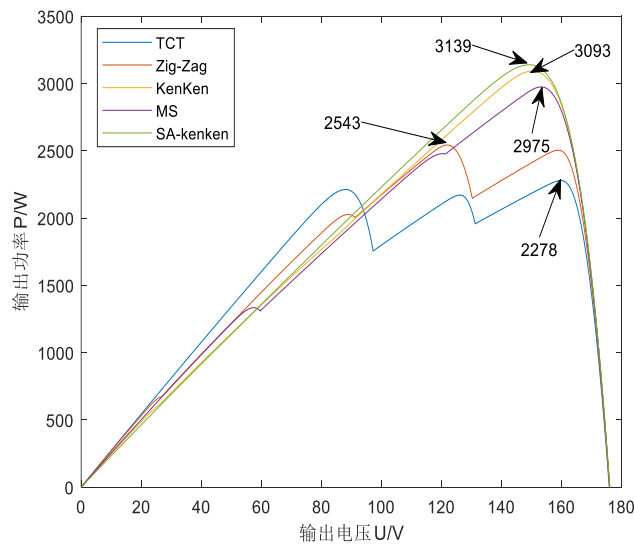


图 4-20 长宽模式下的 P-U 特性曲线

短宽模式：短宽阴影遮挡一般发生在光伏阵列的底部，是一种常见的阴影遮挡。如图 4-21 所示，TCT、Zig-Zag、Ken-Ken、MS 和 SA-KenKen 重构阵列在 900 W/m^2 、 600 W/m^2 、 400 W/m^2 三种遮挡强度下的阴影分布图。短宽模式下光伏阵列所对应行电压、电流和功率的理论计算值由表 4.6 给出。

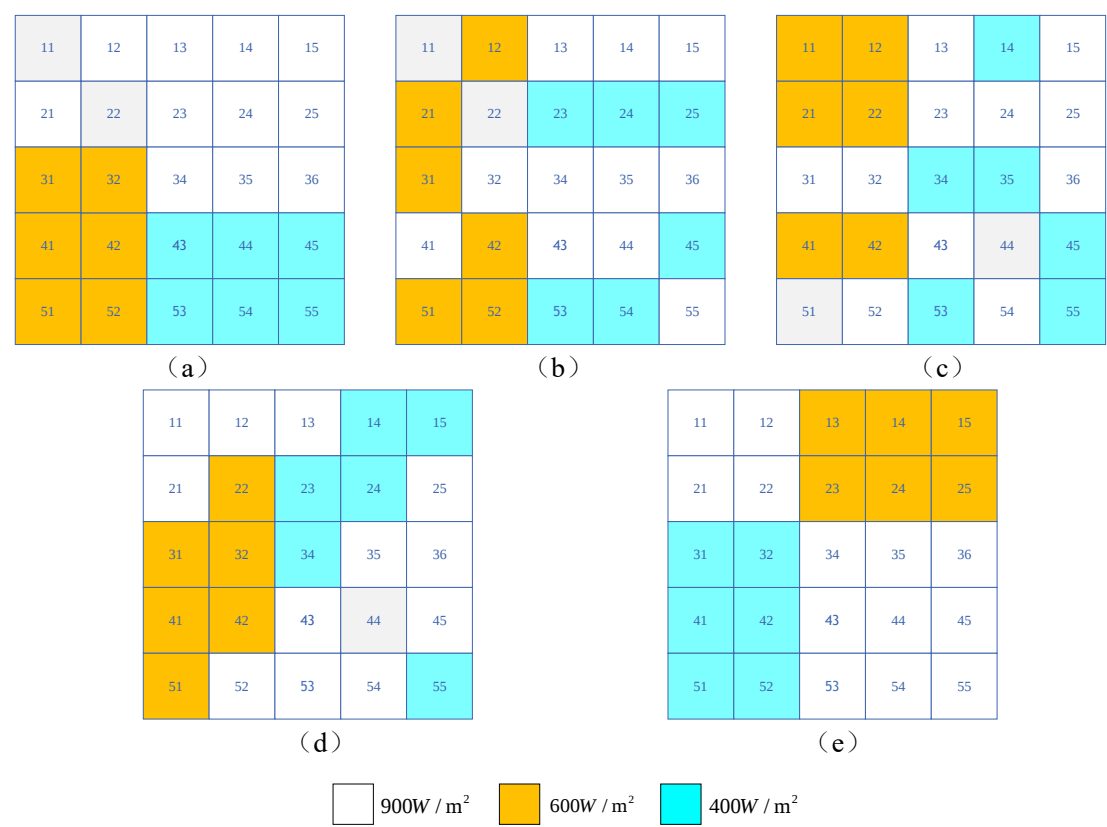


图 4-21 短宽模式下 (a) TCT, (b) Zig-Zag, (c) Ken-Ken, (d) MS, (e) SA-KenKen 重构后阴影分布图

表 4.6 短宽模式下行电流、电压和功率理论计算值

	TCT			Zig-Zag			Ken-Ken			MS			SA-KenKen						
	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W	A	V	W				
I_{t5}	2.4	5	12	I_{t2}	2.7	5	13.5	I_{t1}	3.4	5	17	I_{t2}	3.2	5	16	I_{t3}	3.5	5	17.5
I_{t4}	2.4	5	12	I_{t5}	2.9	4	11.6	I_{t4}	3.4	5	17	I_{t3}	3.4	4	13.6	I_{t4}	3.5	5	17.5
I_{t3}	3.9	3	11.7	I_{t4}	3.7	3	11.1	I_{t3}	3.5	3	10.5	I_{t1}	3.5	3	10.5	I_{t5}	3.5	5	17.5
I_{t2}	4.5	1	4.5	I_{t3}	4.2	2	8.4	I_{t5}	3.5	3	10.5	I_{t5}	3.7	2	7.4	I_{t1}	3.6	2	7.2
I_{t1}	4.5	1	4.5	I_{t1}	4.2	2	8.4	I_{t2}	3.9	1	3.9	I_{t4}	3.9	1	3.9	I_{t2}	3.6	2	7.2

由表 4.6 可知，在短宽模式下，TCT 阵列的输出功率值最低，仅为 $44.7V_m I_m$ 。Zig-Zag 和 MS 重构阵列输出功率值较为接近，分别为 $53V_m I_m$ 和 $51.4V_m I_m$ 。相比之下，SA-KenKen 重构的阵列输出功率值达到 $66.9V_m I_m$ ，为最高值；其次是 Ken-Ken 重构阵列，其值为 $58.9V_m I_m$ 。

短宽模式下各光伏阵列的 P-U 输出特性曲线由图 4-22 给出。由图可知，TCT 阵列呈现三峰值特征，其最大功率值最低，为 2814 W。Zig-Zag 与 MS 重构阵列分别表现出双峰值特征，对应的最大功率值为 3268 W 和 3653 W。相比之下，Ken-Ken 和 SA-KenKen 的输出曲线更光滑，仅有一个峰值点。其中，SA-

KenKen 的最大功率输出最高为 3793 W，而 Ken-Ken 的最大功率值为 3744 W。

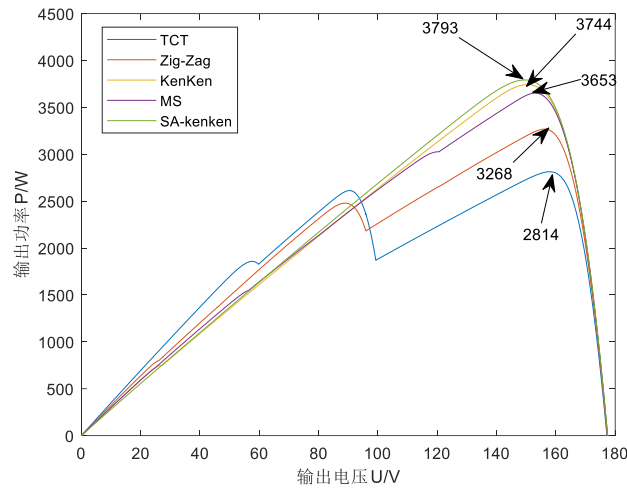


图 4-22 短宽模式下的 P-U 特性曲线

短窄模式：短窄阴影遮挡通常发生在光伏阵列底部的一角，遮挡面积较小，因此只有三种光照强度等级：900 W/m²、600 W/m²、400 W/m²。如图 4-23 所示，TCT、Zig-Zag、Ken-Ken、MS 和 SA-KenKen 在短窄模式下重构阵列的阴影分布图。光伏阵列的行电流、电压和功率的理论计算值与长窄模式下的计算步骤相同，并由表 4.7 给出。

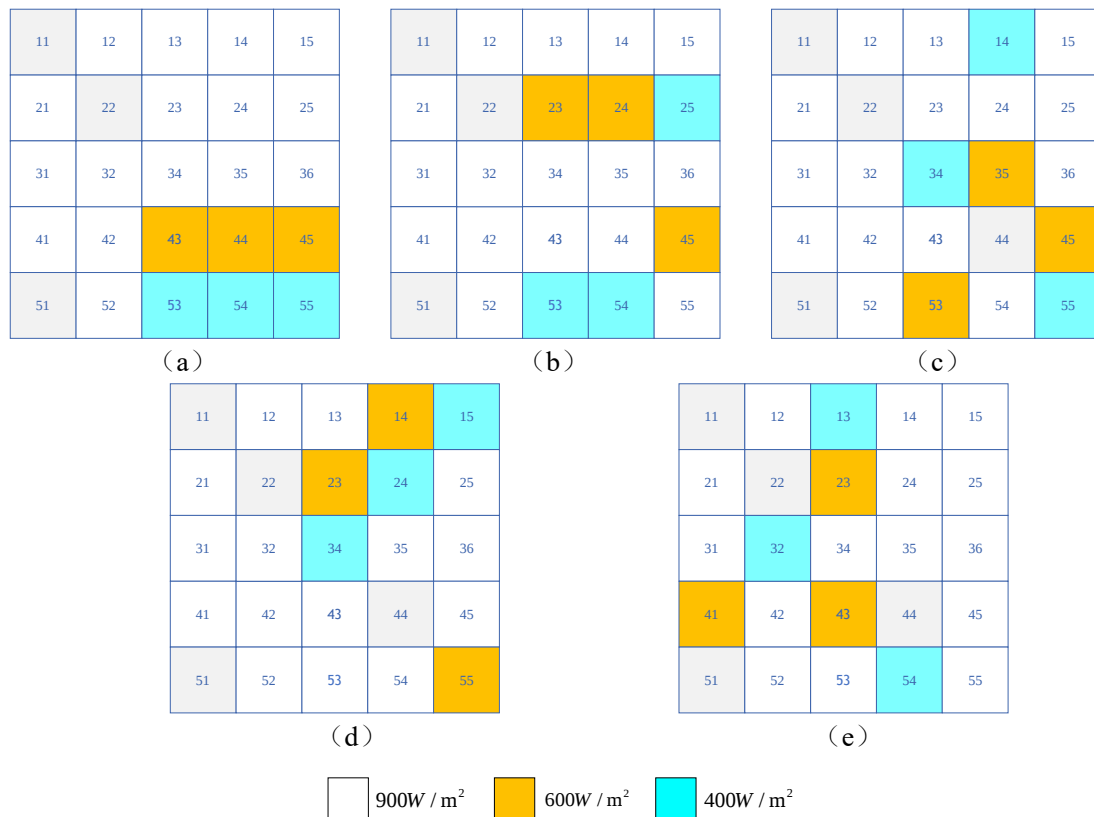


图 4-23 短窄模式下 (a) TCT, (b) Zig-Zag, (c) Ken-Ken, (d) MS, (e) SA-KenKen 重构后阴影分布图

由表 4.7 可知，MS 和 Ken-Ken 重构阵列的理论输出功率值最接近，分别为 $61.9V_mI_m$ 和 $59.9V_mI_m$ 。相比之下，TCT 阵列的理论输出功率仍然最低，为 $42.9V_mI_m$ 。Zig-Zag 阵列的理论输出功率为 $55.6V_mI_m$ ，而 SA-KenKen 重构阵列的输出功率显著高于其他阵列，达到 $71.7V_mI_m$ 。

表 4.7 短窄模式下行电流、电压和功率理论计算值

	TCT				Zig-Zag				Ken-Ken				MS				SA-KenKen		
	A	V	W		A	V	W		A	V	W		A	V	W		A	V	W
I_{r5}	3	5	15	I_{r2}	3.4	5	17	I_{r3}	3.7	5	17.5	I_{r1}	3.7	5	18.5	I_{r4}	3.9	5	19.5
I_{r4}	3.6	4	14.4	I_{r5}	3.5	4	17	I_{r5}	3.7	5	17.5	I_{r2}	3.7	5	18.5	I_{r1}	4	4	16
I_{r3}	4.5	1	4.5	I_{r4}	4.2	3	12.6	I_{r1}	4	3	12	I_{r3}	4	3	12	I_{r3}	4	4	16
I_{r2}	4.5	1	4.5	I_{r1}	4.5	1	4.5	I_{r4}	4.2	2	8.4	I_{r5}	4.2	2	8.4	I_{r5}	4	4	16
I_{r1}	4.5	1	4.5	I_{r3}	4.5	1	4.5	I_{r2}	4.5	1	4.5	I_{r4}	4.5	1	4.5	I_{r2}	4.2	1	4.2

为了进一步验证各种算法在光伏阵列重构中的优越性，在 Simulink 中进行了光伏阵列的 P-U 输出特性曲线仿真，具体结果如图 4-24 所示。

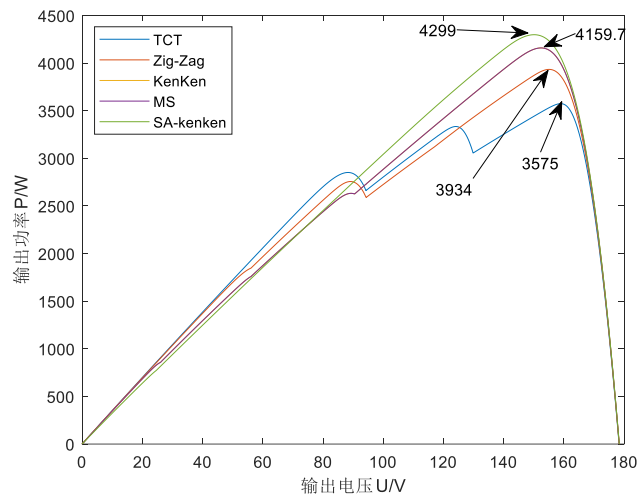


图 4-24 短窄模式下的 P-U 特性曲线

从图 4-24 中可以看出，TCT 阵列的实际输出最大功率值最低，为 3575 W。虽然 MS 和 Ken-Ken 重构阵列在理论输出功率值上有所不同，但它们的实际输出曲线几乎相同，最大功率值均为 4359.7 W。Zig-Zag 重构阵列的特性曲线表现出双峰值特征，最大输出功率为 3575 W，而 SA-KenKen 重构阵列的输出特性曲线仍然只有一个峰值点，最大输出功率为 4299 W。

4.5.3 光伏阵列重构算法评估标准及性能比较

1. 功率损耗 (%)

功率损耗是正常光照与遮挡情况下的最大功率差值同正常情况下 GMPP 的比值。其表达式为：

$$P_{\text{损耗}}(\%) = \frac{GMPP_{\text{正常}} - GMPP_{\text{遮挡}}}{GMPP_{\text{正常}}} \quad (4-20)$$

式中， $GMPP_{\text{正常}}$ 为正常光照下光伏阵列最大功率值， $GMPP_{\text{遮挡}}$ 为遮挡情况下最大功率值。功率损耗比值越小，说明阴影分布效果越好，输出功率越高。

2. 填充因子 (FF)

填充因子是衡量光伏阵列转换效率的指标，是由光伏阵列实际输出最大功率 (P_{max}) 与理论功率之比组成。其中，理论功率为光伏阵列的开路电压 (V_{oc}) 和短路电流 (I_{sc}) 的乘积。表达式为：

$$FF = \frac{P_{\text{max}}}{V_{\text{oc}} * I_{\text{sc}}} \quad (4-21)$$

3. 性能比 (PR)

性能比是最终产量 (Y_{final}) 与参考产量 (Y_{ref}) 的比率。PR 的值越高，太阳能光伏利用效率越好。表达式为：

$$PR = \frac{Y_{\text{final}}}{Y_{\text{ref}}} \quad (4-22)$$

式中，最终产量 Y_{final} 表示光伏阵列输出总能量 (EA) 与光伏阵列产生的绝对功率 (P_{dc}) 的比率。表达式为：

$$Y_{\text{final}} = \frac{EA}{P_{\text{dc}}} \quad (4-23)$$

参考产量 Y_{ref} 为给定时间内光伏阵列接收到的总光照量 (HA) 与正常光照下光照强度的比率。表达式为：

$$Y_{\text{ref}} = \frac{HA}{G} \quad (4-24)$$

(1) 光照均匀的阴影遮挡

为了更直观地显示不同算法重构后光伏阵列的功率损耗情况，本文基于图 4-12、图 4-14 和图 4-16 的仿真结果，通过柱状图呈现了不同工况下各算法重构后光伏阵列的理论最大功率值、实际最大功率值、功率损耗和功率损耗百分比。如图 4-25 所示，SA-KenKen 算法在三种工况下功率损耗均最低，直观地展示了

该算法的优越性。

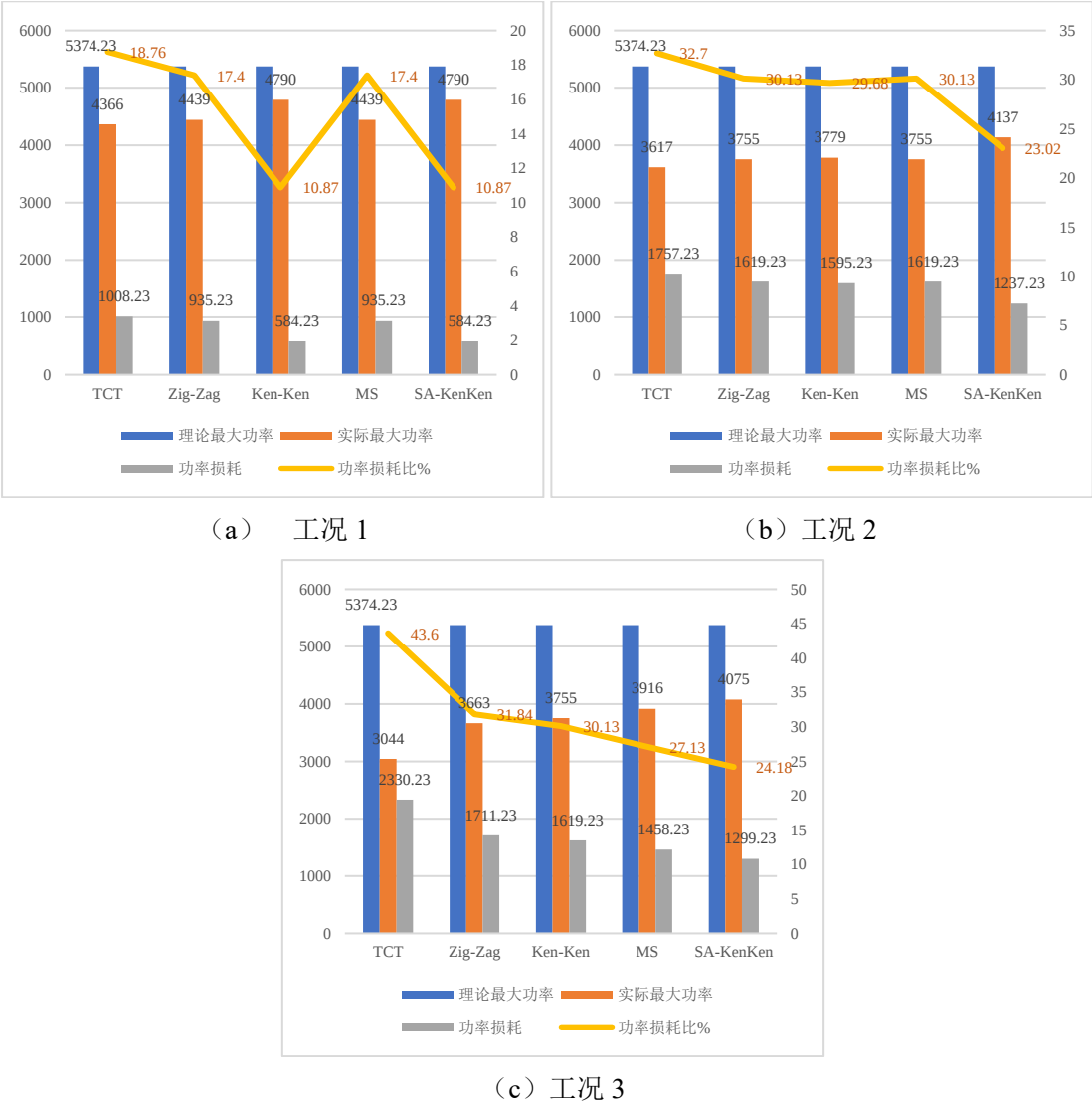


图 4-25 (a) 工况 1 (b) 工况 2 (c) 工况 3 下性能参数计算

填充因子和性能比是评估光伏阵列发电效率的两个关键参数，通过式（4-20）一式（4-24）得出各个算法在不同工况下的参数值，结果如下表 4.8 所示。

表 4.8 三种工况下填充因子、性能比参数值

	工况 1		工况 2		工况 3	
	FF	PR(%)	FF	PR(%)	FF	PR(%)
TCT	0.62	89	0.51	85	0.43	75
Zig-Zag	0.63	92	0.53	88	0.51	89
Ken-Ken	0.68	100	0.54	89	0.53	92
MS	0.63	92	0.53	88	0.56	96
SA-KenKen	0.68	100	0.59	100	0.58	100

从表 4.8 可以看出,无论在何种工况下,SA-KenKen 算法的填充因子值均为最大。随着阴影遮挡面积逐渐增大,尽管 SA-KenKen 算法的填充因子值逐渐减小,但其性能比始终稳定在 100%。这表明,相较于其他重构算法,SA-KenKen 在处理阴影遮挡问题上效果最佳。

(2) 光照不均匀的阴影遮挡

根据图 4-18、图 4-20、图 4-22 和图 4-24 的仿真结果,SA-KenKen 重构算法在 4 种阴影模式下均有效提升了光伏阵列的输出功率。通过统计各算法的光伏阵列输出数据并结合性能评估公式,对算法进行了评估。具体结果在图 4-26 和表 4.9 中显示。

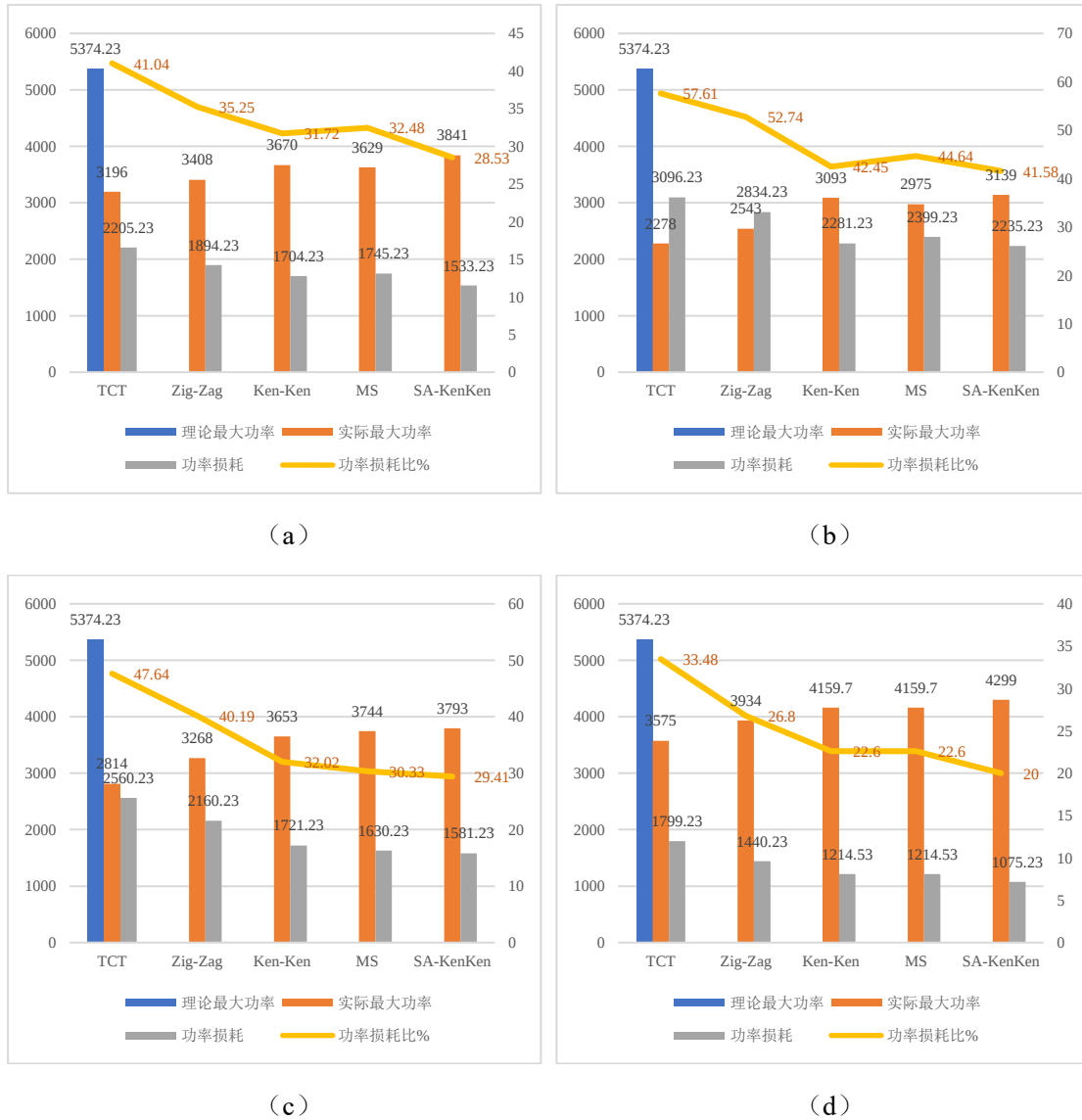


图 4-26 (a) 长窄 (b) 长宽 (c) 短宽 (d) 短窄模式下性能参数计算

表 4.9 长窄、长宽、短宽、短窄模式下填充因子和性能比参数值

	长窄		长宽		短宽		短窄	
	FF	PR(%)	FF	PR(%)	FF	PR(%)	FF	PR(%)
TCT	0.59	82	0.42	71	0.52	74	0.67	83
Zig-Zag	0.63	88	0.47	79	0.61	86	0.73	91
Ken-Ken	0.68	94	0.57	96	0.68	96	0.77	96
MS	0.68	94	0.55	93	0.7	98	0.77	96
SA-KenKen	0.71	100	0.58	100	0.71	100	0.8	100

在短窄模式下，TCT、Zig-Zag、Ken-Ken、MS 和 SA-KenKen 重构阵列的功率损耗相对较低，尤其是 SA-KenKen 算法，其功率损耗比降低到了 20%。在长窄和短宽模式下，这些重构算法同样表现出色，其中 SA-KenKen 重构阵列的填充因子均为 0.71，性能比达到 100%。Ken-Ken 和 MS 重构阵列的性能比均超过 90%，优化效果显著。相比之下，TCT 阵列和 Zig-Zag 重构阵列的填充因子和性能比相对较低。在长宽模式下，TCT 阵列显示出明显的性能下降，其功率损耗比达到 57.61%，填充因子仅为 0.42，性能比为 71%。然而，SA-KenKen 重构阵列的性能比仍保持在 100%，显著优于 Zig-Zag、Ken-Ken 和 MS 重构阵列。

综上所述，通过对性能参数的分析可知，Zig-Zag、Ken-Ken、MS 和 SA-KenKen 算法均能有效提升光伏阵列的功率输出。其中，SA-KenKen 算法优化性能最佳。

4.6 本章小结

本章首先介绍了几种静态重构算法，并分析了它们在光伏阵列重构中的应用原理。接着，对 Ken-Ken 拼图算法进行深入研究，重点探讨了其在光伏阵列重构中的优缺点，并针对其灵活性不足的问题进行了优化改进。最后，将 Ken-Ken 拼图算法与模拟退火算法相结合，提出了 SA-KenKen 重构算法，并在复杂工况下对各重构算法进行仿真。仿真结果表明，SA-KenKen 算法能有效提升光伏系统的发电效率。

第5章 总结与展望

5.1 总结

针对复杂工况下光伏发电系统的效率提升问题，本文以 TCT 型光伏阵列为例，从两个方面提出解决方案：一是采取 IGWO&PO 多峰 MPPT 算法实现精确跟踪，二是利用 SA-KenKen 算法进行光伏阵列重构优化，从而提升系统的整体发电性能。本文结论如下：

（1）使用 MATLAB\Simulink 软件搭建 TCT、BL、SP 和 HC 四种常见拓扑结构的光伏阵列仿真模型。通过标准条件和复杂工况下的光伏阵列对比仿真，证实了 TCT 结构在输出性能上优于其他三种拓扑形式。

（2）通过比较传统的单峰 MPPT 算法和智能多峰 MPPT 算法，提出基于 IGWO&PO 的多峰 MPPT 算法。基于 Simulink 仿真环境，分别在均匀和非均匀光照条件下进行仿真测试。仿真结果表明，该算法有效解决了 GWO 算法易陷入局部最优和搜索能力受限的问题，以及 PO 算法跟踪时间较长的缺陷，兼顾速度性与精确性，能够在复杂工况下准确实现最大功率点跟踪。

（3）对 SA-KenKen 重构算法的性能评估采用理论验证与仿真分析相结合的方法：在理论验证层面，基于阴影分布特征和行电流特性分析进行算法有效性验证；在仿真验证环节，通过 MATLAB/Simulink 平台搭建光伏阵列仿真模型，模拟了光照均匀及长窄、长宽、短宽、短窄四种典型阴影遮挡模式。仿真结果表明，经重构后的光伏阵列在功率输出方面获得显著改善，同时输出特性曲线的峰值数量明显减少，这充分验证了 SA-KenKen 重构方法的有效性和实用价值。

5.2 展望

光伏发电系统是一个复杂的整体，由于本人研究水平限制，仍有许多不足之处，需要进一步探索和完善，主要体现在以下几个方面：

（1）本文模拟的阴影模式以常规遮挡为主，但在复杂工况下阴影情况更加复杂，因此功率优化效果可能会有所不同。今后的阴影模拟可以更加注重非规则阴影遮挡的真实情况。

（2）本研究采用的 25 块光伏组件规模较实际电站显著偏小，这一简化设计存在一定局限性。后续研究可基于真实电站规模开展系统优化设计，以提高研究成果的实用价值。

（3）受限于实验条件，本研究提出的方法目前通过仿真模型完成了初步验

证，后续需结合实证研究进一步检验其实际场景下的有效性和适用性。

参考文献

- [1] 杨博文. 能源转型中未来主力能源发展方向探析[J]. 能源与节能, 2020, (06): 49-50+91.
- [2] 司俊龙, 艾琳, 邱辰. 2023 年中国光伏发电发展现状与展望[J]. 水力发电, 2024, 50(11): 1-4.
- [3] 王青, 江华, 李嘉彤, 等. 中国及全球光伏产业发展形势分析[J]. 太阳能, 2022, (11): 5-10.
- [4] 王青, 江华, 张天宇, 等. 2022 年上半年中国光伏产业发展现状及面临的问题分析[J]. 太阳能, 2022, (10): 5-12.
- [5] 张雪莉, 刘其辉, 马会萌, 等. 光伏电站输出功率影响因素分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(05): 75-81.
- [6] 刘富光, 张臻, 赵远哲, 等. 光伏组件表面积灰对性能影响[J]. 电源技术, 2019, 43(04): 727-730.
- [7] 伊纪禄, 刘文祥, 马洪斌, 等. 太阳能电池热斑现象和成因的分析[J]. 电源技术, 2012, 36(06): 816-818.
- [8] 刘进峰, 刘振永, 冯栓良. 提高光伏发电系统效率的一般方法[J]. 科技创新导报, 2015, 12(34): 96-97.
- [9] 高亮, 蔡世俊, 高鹏, 等. 跟踪式光伏发电系统的性能分析[J]. 半导体技术, 2010, 35(09): 932-938.
- [10] 柴亚盼. 光伏发电系统发电效率研究[D]. 北京交通大学, 2014.
- [11] 王魏. 光伏发电双轴跟踪系统的轨迹设计与控制[D]. 上海交通大学, 2013.
- [12] 吴宏泽. 光伏发电系统中光伏阵列重构与功率优化研究[D]. 安徽理工大学, 2023.
- [13] 袁庚豪. 基于优化 CNN 的光伏逆变器故障诊断方法研究[D]. 临沂大学, 2024.
- [14] 蒋坤坪. 局部阴影下光伏发电系统最大功率点跟踪控制策略研究[D]. 广西大学, 2022.
- [15] 刘祚松, 王红艳, 周蒙恩, 等. 基于电导增量法的全局最大功率点跟踪算法[J]. 电气工程学报, 2023, 18(02): 245-253.
- [16] Wellawatta R T, Choi S. Regulated incremental conductance (r-INC) MPPT algorithm for photovoltaic systems[J]. JOURNAL OF POWER ELECTRONICS: JOURNAL OF POWER ELECTRONICS, 2019, 19(6): 1544-1553.
- [17] Singh P, Shukla N, Gaur P. Modified variable step incremental-conductance MPPT technique for photovoltaic system[J]. International Journal of Information Technology, 2020, 13(6): 1-8.
- [18] Özçelik Mehmet Ali, Yilmaz Ahmet Serdar. Improving the performance of MPPT in PV

- p>systems by modified perturb-and-observe algorithm[J]. Journal of Engineering Research, 2015, 3(3): 24-24.
- [19] Deshmukh R N. Comparision of perturb and observer and incremental conductance MPPT based solar tracking system[J]. International Journal of Engineering Research, 2015, 4(5): 222-223.
- [20] Zhani N, Mahmoudi H. Comparison of the performance of MPPT control techniques (fuzzy logic, incremental conductance and perturb & observe) under MATLAB/Simulink[J]. IFAC PapersOnLine, 2024, 58(13): 617-623.
- [21] 郭世初, 尹航帅, 刘冬冬. 基于扰动观察法的光伏电池 MPPT 控制算法优化[J]. 无线互联科技, 2022, 19(21): 152-155.
- [22] 韩鸿雁, 李田泽, 苑文续, 等. 多峰值光伏 MPPT 改进狮群算法的研究[J]. 现代电子技术, 2021, 44(23): 171-174.
- [23] 方奇文, 刘海鹏, 王蒙, 等. 改进麻雀搜索算法在光伏阵列 MPPT 中的应用[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(07): 87-94+103.
- [24] 陈育虎, 侯涛. 基于改进细菌觅食算法的光伏阵列 MPPT 研究[J]. 电源技术, 2021, 45(06): 797-800.
- [25] 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(01): 1-8.
- [26] 高迎迎, 朱武, 董艺, 等. 基于改进细菌觅食算法的光伏最大功率点跟踪[J]. 信息与电脑(理论版), 2022, 34(06): 43-46.
- [27] 于新, 夏庆月, 杨筱凡, 等. 局部阴影下变步长萤火虫算法的光伏 MPPT 控制策略[J]. 东北电力大学学报, 2019, 39(05): 53-58.
- [28] 王豪, 王宏华. 基于改进 PSO 的局部阴影下光伏阵列 MPPT 控制[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(01): 198-201.
- [29] 韩思鹏, 蒋晓艳, 罗意, 等. 遮阴条件下光伏 MPPT 自适应粒子群算法优化[J]. 太阳能学报, 2022, 43(06): 99-105.
- [30] 刘春娟, 郑丽君, 孙赟赟, 等. 基于改进型细菌觅食算法的 MPPT[J]. 太阳能学报, 2021, 42(09): 83-89.
- [31] 张巧杰, 王凯丽, 房雪晴. 基于 GWO 算法光伏阵列多峰值的 MPPT[J]. 吉林大学学报(理学版), 2018, 56(06): 1526-1532.

- [32] 支昊, 张建德, 黄陈蓉, 等. 粒子群与细菌觅食混合算法在光伏阵列 MPPT 中的应用[J]. 电工电气, 2021(06): 14-19.
- [33] Li H, Yang D, Su W, et al. An overall distribution particle swarm optimization MPPT algorithm for photovoltaic system under partial shading [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2019, 66(1): 265-275.
- [34] 郭昆丽, 刘璐雨, 蔡维正. 基于混合算法的光伏多峰值 MPPT 研究[J]. 电源技术, 2021, 45(08): 1040-1043.
- [35] 杨海柱, 岳刚伟, 康乐. 基于粒子群优化算法和电导增量法的多峰值 MPPT 控制[J]. 电源学报, 2019, 17(06): 128-136.
- [36] 朱志国, 刘国巍. 粒子群-电导增量混合算法的光伏 MPPT[J]. 激光杂志, 2019, 40(03): 144-147.
- [37] 马昊, 张庆超. 基于粒子群优化算法和变步长扰动观察法的局部阴影情况下 MPPT 控制[J]. 电源学报, 2016, 14(03): 94-101.
- [38] Wang S, Hao J, Jin Y, et al. Simulation of MPPT basing on the improved perturbation and observation method[J]. International Journal of Hybrid Information Technology, 2015, 8(10): 339-350.
- [39] 李山, 李科娜, 陈艳, 等. 基于改进粒子群和变步长扰动的复合 MPPT 算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(07): 207-213.
- [40] 李恒杰, 李治廷, 陈伟, 等. 基于改进 P&O 与 MPC 算法的光伏 MPPT 控制研究[J]. 电源技术, 2019, 43(11): 1843-1846.
- [41] 丁明, 徐志成, 赵波, 等. 考虑云层影响的大型光伏发电系统辐照强度计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4291-4299.
- [42] 王龙, 陈卓, 黄文力, 等. 基于秃鹰搜索算法的部分遮蔽条件下光伏阵列重构方法[J]. 电力建设, 2022, 43(03): 22-30.
- [43] Rani, B.I., Ilango, et al. Enhanced power generation from PV array under partial shading conditions by shade dispersion using Su Do Ku configuration[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2013, 4(3): 594-601.
- [44] Sahu, Sekhar H, Nayak, et al. Extraction of maximum power from a PV array under nonuniform irradiation conditions[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63(12): 4825-4831.

- [45] Krishna Sai G, Moger Tukaram. Optimal sudoku reconfiguration technique for total-cross-tied PV array to increase power output under non-uniform irradiance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 1973-1984.
- [46] 李峰, 孟少飞. 局部阴影条件下的光伏阵列插空列循环静态重构方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(08): 82-88.
- [47] Nasiruddin I, Khatoon S, Jalil F M, et al. Shade diffusion of partial shaded PV array by using odd-even structure[J]. Solar Energy, 2019, 181: 519-529.
- [48] 王志刚, 姚秀萍. 基于 Matlab 的光伏阵列全局重构系统的研究[J]. 电源技术, 2016, 40(03): 628-630.
- [49] 刘艳莉, 庞志超, 程泽. 基于遮荫度模型的光伏阵列自适应重构系统[J]. 电力电子技术, 2010, 44(06): 48-50.
- [50] Babu T S, Ram J P, Dragičević T, et al. Particle swarm optimization based solar PV array reconfiguration of the maximum power extraction under partial shading conditions[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 9(1): 74-85.
- [51] Rajan A N, Shrikant D K, Dhanalakshmi B, et al. Solar PV array reconfiguration using the concept of Standard deviation and genetic algorithm[J]. Energy Procedia, 2017, 117: 1062-1069.
- [52] Ganesh S, Kanimozhi R. Meta-heuristic technique for network reconfiguration in distribution system with photovoltaic and D-STATCOM[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(20): 4524-4535.
- [53] 邵瑞凝, 杨博, 束洪春, 等. 基于改进蜉蝣算法的光伏阵列最优重构方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 142-150.
- [54] 吴鹏宇, 杨博. 部分阴影遮蔽条件下基于遗传算法的光伏系统动态重构设计[J]. 云南电力技术, 2023, 51(06): 3-6.
- [55] 王龙, 陈卓, 黄文力, 等. 基于秃鹰搜索算法的部分遮蔽条件下光伏阵列重构方法[J]. 电力建设, 2022, 43(03): 22-30.
- [56] 夏永洪, 李梦茹, 曾繁鹏, 等. 基于 TCT 结构及开关控制的光伏阵列重构[J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2797-2802.
- [57] 张正言, 高翔, 孙耀杰, 等. 局部遮挡条件下的最大功率点跟踪[J]. 信息与电子工程, 2012, 10(06): 759-764.

- [58] 杜梅芳,姜志进. 光电池非线性区 PN 结光生伏特效应的研究[J]. 上海理工大学学报, 2002, (01): 65-67+72.
- [59] 肖颖, 梁耕源, 雷博文, 等. 用于能量收集的离子热电材料研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(04): 5-13.
- [60] 郭长兴, 沈娜, 韩凤琴, 等. 太阳能光伏电池多参数输出特性的研究[J]. 新能源进展, 2017, 5(02): 136-140.
- [61] 林洪, 袁红波. 光伏电池工作原理与物理建模方法分析[J]. 机电信息, 2020, (36): 3-4.
- [62] 章文龙, 肖文波, 郁纪, 等. 局部遮荫下 12 种光伏阵列结构的输出特性研究[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(03): 70-79.
- [63] 董密, 胡佳盛, 杨建, 等. 基于改进黏菌优化算法的光伏多峰 MPPT 控制策略[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(08): 1440-1448.
- [64] 蒋俊祁. 基于非奇异快速终端滑模控制光伏并网逆变器最大功率跟踪研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(07): 1022-1026.
- [65] 党润芸. 光伏系统多峰 MPPT 算法与逆变器研究[D]. 南京航空航天大学, 2017.
- [66] 凌海峰, 杨善林, 刘业政. 基于群体智能的蚁群算法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, (06): 682-685.
- [67] 张丽红, 赵鸣博, 王晓凯. 基于粒子群算法的彩报印刷墨量计算方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(03): 651-653+657.
- [68] 吴进, 周昊. 细菌觅食优化算法研究[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(06): 73-74.
- [69] 施鹏程. 光伏发电系统的最大功率点跟踪研究[D]. 南京邮电大学, 2021.
- [70] 李娜, 雷秀娟. 细菌觅食优化算法的研究进展[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(08): 39-44.
- [71] 杨俊华, 熊锋俊, 吴丹琦, 等. 基于傅氏分析和改进灰狼算法的波浪发电系统最大功率点跟踪[J]. 太阳能学报, 2021, 42(01): 406-415.
- [72] 毛明轩, 许钊, 崔立闯, 等. 基于改进灰狼优化算法的光伏阵列多峰 MPPT 研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(03): 450-456.
- [73] Guo K, Cui L, Mao M, et al. An improved gray wolf optimizer MPPT algorithm for PV system with BFBIC converter under partial shading [J]. IEEE Access, 2020, 103(8): 476-490.
- [74] 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(07): 75-81.
- [75] 赵超, 王斌, 孙志新, 等. 基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J]. 太阳能学报,

2022, 43(01): 256-262.

- [76] 沈磊, 徐岸非, 黄晴宇, 等. 基于 GWO-P&O 算法的局部阴影光伏 MPPT 研究[J]. 湖北工业大学学报, 2022, 37(02): 25-29+43.
- [77] 徐旭, 杨向宇. 一种改进的新型 MPPT 控制策略[J]. 电源技术, 2017, 41(09): 1353-1355.
- [78] Martin D A, Vazquez R J, Cano J. MPPT in PV systems under partial shading conditions using artificial vision[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 162: 89-98.
- [79] Vijayalekshmy S, Bindu G, Iyer R S. A novel Zig-Zag scheme for power enhancement of partially shaded solar arrays[J]. Solar Energy, 2016, 135: 92-102.
- [80] Yadav S A, Pachauri K R, Chauhan K Y, et al. Performance enhancement of partially shaded PV array using novel shade dispersion effect on magic-square puzzle configuration[J]. Solar Energy, 2017, 144: 780-797.
- [81] 吴永忠, 刘华威, 侯诗文, 等. 模拟退火遗传算法在风力提水机翼型优化设计中的研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(06): 385-390.
- [82] 宁德圣, 曾光, 雷莉, 等. 基于模拟退火算法的改进型退火策略研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2016, 39(03): 298-300.

攻读学位期间发表的学术论文

- [1] 杨海挺,吴宏伟,汪石农.复杂工况下光伏多峰 MPPT 研究[J/OL].重庆工商大学学报(自然科学版),1-8.

攻读学位期间获得的奖励

- [1] 获得 2022~2023 学年安徽工程大学研究生一等奖学金
[2] 获得 2023~2024 学年安徽工程大学研究生二等奖学金
[3] 获得 2024~2025 学年安徽工程大学研究生二等奖学金

致 谢

时光飞逝，三年的研究生生涯即将画上句点。站在安徽工程大学的校园里，回想这段求学时光，心中充满感激。在此，我想向所有帮助过我的老师、同学和家人致以最真挚的感谢。

首先，衷心感谢我的导师汪石农副教授。您严谨的治学态度、深厚的学术造诣让我受益匪浅。无论是课题方向的把握，还是论文写作的细节，您总是耐心指导，一次次为我拨开迷雾。实验室里无数个共同研讨的日夜，文档中密密麻麻的批注建议，都让我深刻体会到一名学者的责任与热忱。

特别感谢实验室的每一位伙伴：师兄师姐耐心指导我实验方法，同窗陪我反复调试程序到深夜，师弟师妹们主动帮忙处理杂务，还常送来零食和咖啡为我加油。那些一起熬夜改论文、互相鼓励的日子，是这三年最温暖的回忆。

最深沉的谢意献给我的父母。二十多年来，你们省吃俭用供我读书，电话里从不说家里的难处，每次回家都把我的背包塞满爱吃的家乡菜。你们的支持是我最坚强的后盾，未来我会继续努力，成为你们的骄傲。

最后，感谢参与论文评审和答辩的各位老师，感谢你们在百忙中抽出时间审阅指正并给予宝贵意见。

山水一程，三生有幸。母校的教诲将始终激励我在未来的道路上脚踏实地、勇敢前行。愿带着母校的馈赠，继续书写人生的新篇章。