

分类号: TM74

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210330118

安徽工程大学

题 目 基于双层模型与需求响应的微电网多目标优化调度

题 目 Multi-objective optimal scheduling of microgrids
based on two-model and demand response

论文作者: 王煜

校内导师: 孙驷洲副教授

校外导师: 柳士江

专 业: 电子信息

研究方向: 微电网优化调度

论文答辩日期: 2024/05/31

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后果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 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：

指导教师签名：

孙细洲

日期： 年 月 日 日期： 年 月 日

基于双层模型与需求响应的微电网多目标优化调度

摘要

风电和光伏是目前最主要的清洁能源，但风光具有随机波动性，如何高效地利用风光可再生能源发电以及合理的能源调度成为了需要解决的难题。微电网作为消纳可再生能源发电的主要形式，能够有效地降低风力和光伏发电并网给大电网带来的不良影响。在具有多个发电装置和存储系统的微电网中，科学合理的能源管理和优化调度至关重要，这有利于在微电网中的每个发电装置之间实现最佳功率分配，从而实现微电网高效、可靠和经济的运行。本文针对微电网能源优化调度开展研究，主要工作总结如下：

（1）针对传统微电网优化调度只考虑系统运行的经济效益而忽视环境效益以及用户端负荷需求响应的问题，本文新建了基于双层模型和需求响应的微电网多目标优化调度。双层模型包括包含上层模型和下层模型，上层模型以微电网系统运行的整体经济效益和环境效益为目标进行优化调度，下层模型基于用户负荷需求响应的经济效益为优化目标。

（2）为了合理地求解微电网多目标优化调度，本文提出基于虚拟实时电价策略的需求响应。通过更新下层用户端的电力负荷需求和上级微电网的虚拟实时电价，以获得最优的调度解决方案。

（3）针对微电网多目标优化调度模型的求解方法麻雀搜索算法容易陷入局部最优和迭代后期搜索效率低下的问题，本文对传统的多目标

优化麻雀搜索算法进行改进。将正弦搜索策略、柯西变异多样性引入到传统的多目标优化麻雀搜索算法，减小麻雀搜索算法陷入局部最优的可能性。此外，引入外部档案更新机制来存放算法的局部最优解，有利于更好地求解出目标函数的最优解以及提高算法搜索的效率，从而优化上层和下层模型的目标函数，以确保负荷需求和各发电单元出力的合理分配。

最后，通过多种运行场景的仿真实验，验证了本文新建的微电网调度模型能够有效处理风光可再生能源发电的不确定性，虚拟实时电价策略可以更加合理地调整负荷需求和各发电单元的输出功率，双层模型调度策略为微电网和用户提供了更佳的能源供应方案，有助于提高微电网的整体经济性能和降低环境污染问题。

关键词：微电网优化调度，双层模型，虚拟实时电价，多目标优化，需求响应

Multi-objective optimal scheduling of microgrids based on two-model and demand response

Abstract

Wind and solar energy are currently the most prominent forms of clean renewable energy. However, they exhibit random fluctuations, posing challenges in efficiently harnessing renewable energy generation and conducting rational energy scheduling. Microgrids, as a primary means of integrating renewable energy generation, can effectively mitigate the adverse impacts of wind and photovoltaic power generation units on the main grid. In microgrids equipped with multiple generation units and storage systems, scientifically sound energy management and optimal scheduling are crucial to achieve optimal power distribution among each generation unit, thus ensuring efficient, reliable, and economically viable microgrid operation. Researches on the optimization scheduling of energy in microgrids are executed, summarized as follows:

(1) Addressing the issue that traditional microgrid optimization scheduling only considers the economic benefits of generation units while overlooking environmental benefits and demand response from users, this paper proposes a new multi-objective optimization scheduling approach for microgrids based on a lower-level model and demand response. The two-level model consists of an upper-level model optimizing the overall economic and environmental benefits of microgrid generation units and a lower-level model optimizing the economic benefits based on user load demand response.

(2) To solve the multi-objective optimization scheduling problem in microgrids reasonably, this paper adopts the demand response based on virtual real-time pricing strategy to realize load shifting. By updating the

power load demand of lower-level users and the virtual real-time pricing strategy of the upper-level microgrid, the optimal scheduling solution is obtained.

(3) In response to the issues of local optima and low search efficiency that the traditional sparrow search algorithm may encounter in solving the multi-objective optimization scheduling model of microgrids, this paper improves the traditional multi-objective optimization sparrow search algorithm by introducing the sine search strategy and Cauchy mutation diversity. This reduces the likelihood of the sparrow search algorithm falling into local optima. Additionally, introducing an external file update mechanism to store the local optimal solutions of algorithms is conducive to better solving the objective function's optimal solution and improving the efficiency of algorithmic search. This optimization helps to optimize the objective functions of upper and lower-level models to ensure a reasonable allocation of load demands and output power of each power generation unit.

Finally, through simulation experiments in various operating scenarios, it is verified that the newly proposed microgrid scheduling model in this paper can effectively handle the uncertainty of wind and solar renewable energy generation. The virtual real-time pricing strategy can more reasonably adjust the load demand and output power of each power generation unit. The two-layer model scheduling strategy provides a better energy supply solution for microgrids and users, contributing to improving the overall economic performance of microgrids and reducing environmental pollution issues.

Key Words: Microgrid optimization scheduling, two-level model, virtual real-time pricing, multi-objective optimization, demand response.

目录

摘 要	I
Abstract	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 微电网优化调度研究现状	2
1.2.2 需求响应研究现状	3
1.2.3 微电网调度模型求解算法研究现状	4
1.3 微电网优化调度研究现状分析	5
1.4 本文的主要研究内容	6
第 2 章 微电网的发电单元模型和特征分析	8
2.1 微电网系统架构	8
2.2 微电网发电单元模型	9
2.2.1 风力出力的概率模型	10
2.2.2 光伏出力的概率模型	11
2.2.3 柴油发电机模型	12
2.2.4 燃料电池模型	13
2.3 储能单元数学模型	13
2.4 随机变量的序列化建模	15
2.5 本章小结	16
第 3 章 基于需求响应的微电网双层模型	17
3.1 微电网能源管理系统	17
3.1.1 能源管理系统原理分析	17
3.1.2 能源管理系统功能分析	17
3.2 需求侧能源管理	19
3.2.1 需求侧负荷特征	20
3.2.2 需求响应机理	23

3.3 微电网能源管理方法	24
3.3.1 信誉度权重	25
3.3.2 虚拟实时电价	26
3.4 微电网双层模型构建	26
3.4.1 双层优化理论	26
3.4.2 上层优化模型	27
3.4.3 下层优化模型	29
3.5 本章小结	30
第 4 章 微电网多目标优化调度模型求解方法	31
4.1 群体智能算法求解最优问题	31
4.2 麻雀搜索算法仿生原理	32
4.2.1 传统麻雀搜索算法	32
4.2.2 麻雀搜索算法的不足	34
4.3 改进型多目标麻雀搜索算法	34
4.3.1 正弦扰动策略	35
4.3.2 多样性变异处理	36
4.4 外部档案更新机制	36
4.5 个体的非支配排序	37
4.6 测试结果对比与分析	40
4.7 多目标折衷解的确定	42
4.8 本章小结	43
第 5 章 基于 EMOSSA 的微电网优化调度	44
5.1 最优调度方案确立	44
5.2 微电网双层模型求解步骤	44
5.3 算例分析	47
5.3.1 微电网系统参数设置	47
5.3.2 需求响应的微电网优化调度模型研究	48
5.3.3 微电网双层模型求解分析	53

5.3.4 不确定性因素分析	54
5.4 本章小结	56
第 6 章 结论与展望	58
6.1 研究工作结论	58
6.2 后续工作展望	59
参考文献	60
攻读硕士期间取得的学术成果	65
致谢	66

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

中国是世界上煤炭资源消耗量最大的国家，以煤炭为主的火电已成为我国最重要的能源。2022 年，全国总用电量 86369 亿千瓦时，其中 72% 以上来自煤电。煤炭等化石能源是我国温室气体排放的主要来源，由于过度使用化石燃料发电，给环境问题带来了巨大的挑战。因此，发展清洁能源（如风能和光伏发电）以取代化石燃料的火力发电，对于节约能源、减少温室气体排放至关重要。

世界各国需要从当前电力系统对传统化石能源的依赖过渡到包含可再生能源的能源系统^[1]。近年来，随着可再生能源（主要为风能和太阳能）的快速发展和能源消费结构转型的推进^[2]，清洁可再生能源的开发和使用日益成为确保可持续发展的有效解决方案^[3]。

国际能源署预测，从 2023 年到 2028 年这五年间，全球的可再生能源储量将达到 7300 兆瓦。预计到 2025 年，可再生能源发电量将占全球总发电量的 35%。报告中提出在未来的五年，风能和太阳能发电总量将占新增可再生能源发电量的 95%。到 2024 年，风能和太阳能发电的总容量将超过水力发电，风能和太阳能发电分别将在 2025 年和 2026 年超过核能。到 2028 年，风能和太阳能发电的发电总功率将翻一番，达到总量的 25%。因此，促进风电（WT）和光伏（PV）发电的发展对于取代以煤为主的火电发电具有重要意义。

大规模可再生能源发电并网严重影响电力系统的安全稳定性，随着可再生能源发电渗透率的增加，会在电网的有功功率、谐波、潮流、短路电流、电压闪变以及动态和瞬态稳定性等方面影响电力系统的运行^[4,5]。电力可靠性技术解决方案联盟（CERTS）利用分布式发电系统解决消纳可再生能源发电的问题^[6]。微电网（MG）是根据可再生能源的地理分布特点和用户位置而设计的分布式发电系统。

微电网系统包括负载和微电源的互联，能够作为一个单一系统提供电力和能量。基于可再生能源的 MG 设立在靠近终端负荷的位置，有助于减少温室气体排放，消除运输损耗，电力系统的经济效益、电能质量和运行稳定性，在并网或孤岛模式下

灵活地运行，能够在主要电网断电时确保电力供应^[7,8]。同时，MG 还可以作为大型电网系统的受控单元，因为它具有可变的运行模式和可调度的性能，但其调度的复杂性可能会使安全经济的电力供应更加困难^[9]。

微电网能源优化调度可以优化配置可再生能源发电、发电装置的输出、混合储能系统充放电以及调整负载大小，提高 MG 消纳可再生能源发电量的能力^[10]。通过微电网优化调度可以保障微电网内重要负荷的供电可靠性，还能降低 MG 的运行成本以及减小环境污染。

1.2 国内外研究现状

随着环保问题的日趋严峻以及新能源技术与控制技术的迅猛发展，基于需求响应的 MG 多目标优化是当前国际上的研究热点。国内外许多学者都进行了相关的理论研究和实际的工程应用。本论文将围绕需求响应参与微电网系统多目标优化调度这一关键科学问题进行研究。

1.2.1 微电网优化调度研究现状

微电网优化调度通过合理的规划和控制 MG 内部的能源资源、负载，提高 MG 的运行效率、经济性和可靠性。世界各国在 MG 领域的研究和实践一直处于积极发展的阶段，在城市、乡村和工业园区等不同场景部署了 MG 项目。这种实际应用使得世界各国在微电网系统集成和应用方面积累了丰富的经验。目前的研究侧重于如何优化 MG 内部各个组件的协同工作，从而最大程度的提高能源利用率。通过制定合理的能源管理策略和优化方法解决 MG 中能源波动、负荷不确定性等问题，提高微电网系统的自适应性和鲁棒性，以确保微电网能源系统的安全可靠性。文献[11]建立的微电网多目标优化调度模型时考虑到经济、环境和可再生能源的消纳情况，在降低了 MG 运行成本，提高了可再生能源消纳的同时，减少了污染物的排放。文献[12]建立了包含源-储-荷的 MG 模型，并引入博弈论对经济性、环境效益和用户满意度进行了优化，兼顾了多方的利益。文献[13]建立了不同鲁棒调整参数的 MG 自适应鲁棒最优调度模型。实验表明，此模型可有效解决可再生能源的不确定性并且适用于孤岛模式和并网模式。文献[14]为了减少 MG 运行时温室气体的排放，采用机会约束规划对不确定环境下的多微电网进行日前的调度。文献[15]考虑到用户和

MG 的经济效益，提出了一种考虑多个利益相关者的孤立微电网双层调度模型，并将 Jaya 算法和内点法相结合，提出了一种混合分析-启发式求解方法 Jaya-IPM 求解含有风电和光伏的 MG 的双层调度模型。文献[16]解决可再生能源和负载的不确定性问题，利用机会约束规划并构建了面向互联 MG 系统的双层分布式优化模型来求解 MG 的最小运行成本的问题。但是这些模型都只针对 MG 的经济效益或环境效益这一单目标进行了研究，并未同时考虑到经济最优和环境污染的问题。文献[17]基于分时电价建立了包含风-光-储的 MG 模型，并将微电网中各种分布式发电单元的运行成本和环境效益作为目标函数，在多种约束条件下，通过改进的算法求解模型，通过多个场景实验来验证微电网负荷平抑程度衡量模型的可行性。

1.2.2 需求响应研究现状

需求响应是一种有效的能源管理策略，它通过激励电力用户在特定时间段内调整其用电行为，以平衡供需之间的差异，减轻电力系统负荷压力，从而提高电力系统的稳定性、经济性和可持续性，同时为用户和运营商提供了更大的灵活性和选择权。在 MG 运行过程中，对于可再生能源和负荷这类不确定变量，可以通过基于价格激励的需求响应来控制，这对 MG 的稳定性有着重要影响。因此，通过需求响应来调整负荷对 MG 优化调度至关重要^[18]。近年来，最新的研究表明需求响应在应对可再生能源波动性方面起到重要作用。可再生能源的随机性和间歇性可能会影响 MG 的安全性和稳定性。研究表明，需求响应的参与是抵消可再生能源波动的有效方法^[19,20]。文献[21]中的实验结果显示，减少或增加负载可以使 MG 的工作频率保持在稳定的范围内，此外，需求响应的实施还可以降低 MG 的运营成本。文献[22]提出了发电调度和需求响应的组合，以降低发电机组的运营成本。文献[23]提出了基于激励的需求响应策略，使用 C-mean 算法根据客户的消费量对客户进行聚类，然后通过负载转移提高可再生能源利用率，旨在降低 MGs 的运营成本和污染物排放。文献[24]提出了一种混合需求响应机制，该机制考虑了三方：电网运营商、零售商和客户，然后使用三层 Stackelberg 博弈对该机制进行建模，并给出了三方最优决策的折中解。文献[25]研究了含光伏发电和电动汽车充放电行为的微电网系统的问题，提出了包含分布式发电和电动汽车可转移负荷的 MG 多目标调度模型。该模型考虑了 MG 的运行成本、光伏能源利用率以及 MG 与主电网之间交互式时的功率波动问

题。采用导引头优化算法和模糊隶属函数方法获得最优结果。文献[26]将需求响应引入 MG 的储能系统, 稳定了可再生能源装置的产出, 促进了可再生能源的消纳, 并降低了 MG 的运营成本。文献[27]提出了一种新的需求响应策略, 考虑了 MG 中可再生能源的不确定性, 并使用需求响应来实现微网的最优调度。上述研究表明, 需求响应在处理可再生能源波动方面具有良好的能力。因此, 在本研究中, 需求响应策略也被用于 MG 的调度。

1.2.3 微电网调度模型求解算法研究现状

微电网多目标优化调度模型需要在多个约束条件下优化求解多个变量。因此, 在微电网调度模型建立后需要合适的优化算法求出调度模型的可行最优解集^[30]。文献[31]以孤岛微电网系统为研究对象, 以最小旋转储备成本和一次调频性能为优化目标, 考虑到满足柴油机组的调差系数及不同置信区间的风电减载比例, 对其与储能设备进行最优配置。文献[32]提出了一种考虑不确定性下 MG 风险指数的混合需求响应计划的两阶段优化方法利用需求响应弹性降低运营成本和不确定性因素的影响, 同时考虑了预期的运营成本和不确定性的风险费用, 文献[33]建立了广义需求响应互动优化模型, 同时考虑了综合能源系统和多种能源在价格和消耗等方面的差异以及冷热电联产机组的输出功率特性。研究表明, 基于多能互补的广义需求响应策略也传统的需求响应机制相比在经济性方面有着显著提高。文献[34]通过研究供需侧的各自特性, 构建了合理的调度策略, 实现了 MG 在确保稳定性的前提下实现了运行费用最小和环境污染物排放最少。

智能算法在 MG 的优化运行中发挥着很大的优势, 文献[35]提出多 MG 优化电力调度的综合经济模型, 并考虑源-网-荷-储, 采用改进的布谷鸟搜索 (CS) 算法来优化多 MG 的电力调度。文献[36]构建一个关于优化规划问题的多目标函数, 并结合微电网社区系统 (MCS) 的相关经济成本和环境收益, 采用改进的阿基米德优化算法 (IAOA) 提高了 MG 运营规划问题的最佳性能。文献[37]为了解决 MG 电力系统中的调频问题, 该文提出一种改进的线性主动抗扰控制算法 (ILADRC), 该算法可以通过改变反馈控制律来提高系统性能, 从而降低扩展状态观测者的扰动估计误差。然后, 将所提算法应用于 MG 电力系统调频问题, 验证了其有效性。文献[38]为了降低独立 MG 的综合电力成本, 提高环保和供电可靠性, 建立了考虑不确定性

和需求响应的电动汽车 MG 双层电力容量优化模型，提出了改进的鹌鹑优化算法（IPOA）求解模型。以独立 MG 为例，验证了所提模型和改进算法的有效性。文献[39]为保证 MG 的适用性，综合考虑环境效益和经济成本，对并网运行模式下 MG 的优化运行进行综合建模，提出了一种改进的基于生物地理学的优化算法，论文提出的电力调度方案能够有效降低系统总成本。此外，适当考虑可中断负荷转移、有效负荷管理、引导用户用电行为，能优化可再生能源利用、提高系统效率和经济性。文献[40]利用改进的 PSO 算法求解，构建单位风险-经济效益比筛选方案集，进而制定 MG 内部调度候选策略，同时提出了一种针对微电网集群的双层能源优化调度策略，旨在协调 MG 的经济效益和运营风险，同时减少微电网集群与配电网之间的交互功率和波动，降低线损。文献[41]提出一种基于粒子群优化和反对的混合学习引力搜索算法（PSO-OGSA），对提出的基于日前调度和实时调度的两阶段调度（TSD）模型进行求解，以优化 MG 调度，降低 MG 运行总成本。

综上所述，目前的研究表明基本的微电网调度问题已经得到了解决。然而，先前的研究在处理微网中可再生能源输出的不确定性方面仍存在差距。此外，结合微网中可再生能源输出的不确定性和需求响应策略的研究还存在不足。对于 MG 及用户的考虑较少。因此，对于需求响应和多种可再生能源（即 WT 和 PV）的不确定性之间的协调优化问题仍需要进一步的研究。

1.3 微电网优化调度研究现状分析

通过综上文献所述，国内外许多科研工作者针对包含风光新能源发电和需求响应的微电网优化调度开展了大量的有价值的研究工作，但相关微电网优化调度研究仍然存在不足之处：（1）构建微电网优化调度模型时只考虑发电装置发电的经济效益而忽视环境效益以及用户端负荷需求响应的问题；（2）微电网调度分别针对供需两侧进行“源荷协调”调度，较少将“源荷协调”调度建立统一的模型；（3）传统的优化算法对微电网优化调度求解时容易陷入局部最优，需要对传统优化算法进行改进，提高优化算法求解能力。

根据上述分析，合理虚拟实时电价的需求响应策略、综合考虑微电网运行经济效益和环境污染和改进的智能优化算法对包含新能源发电的微电网优化调度和提高

新能源发电利用率具有重要意义。因此，本文从风光发电的不确定性、虚拟实时电价的需求响应策略和“源荷”双层模型出发，研究风光发电的不确定性、虚拟实时电价的需求响应和“源荷”双层供需平衡对微电网多目标优化调度的影响，建立基于双层模型和需求响应的微电网多目标优化调度模型，为含新能源发电和需求响应的微电网系统优化配置各发电单元出力和需求负荷提供了一种新方案。

1.4 本文的主要研究内容

本文构建考虑可再生能源不确定性和需求响应的微电网多目标优化调度模型，包括可再生能源发电、其余分布式发电机组和用户端负荷需求响应微电网系统。为了求解新建的微电网调度模型，采用改进的麻雀搜索算法优化上层模型的经济效益和环境效益以及下层模型的经济效益。同时，在调度模型中引入基于虚拟实时电价和电力可信度的负荷平移需求响应策略，充分利用可再生能源情况下，最终实现平滑负荷曲线的目的，减轻 MG 的压力，研究内容和主要章节如下：

第 1 章 绪论：首先，阐述了微电网优化调度的研究背景及研究意义。然后，通过查阅文献，对国内外微电网优化调度、负荷需求侧需求响应方法和微电网调度模型求解方法的研究现状进行了阐述和评述。最后，确定了论文的主要研究内容和论文框架。

第 2 章 微电网的发电单元模型和特征分析：首先，通过分析各种分布式电源的工作机理，描述了 MG 中的分布式电源数学模型，针对风电和光伏可再生能源的不确定性，本章节建立了风电和光伏的概率模型，采用序列运算理论对其进行处理，为后续微电网优化调度提供理论基础。

第 3 章 基于需求响应的微电网双层模型：对需求响应策略和负荷的分类进行分析，针对基于需求响应策略的调度问题，建立了一种虚拟实时电价机制，通过虚拟实时电价机制更新下层模型的负荷需求响应计划和上层模型的实时价格，来获得最优的 MG 调度方案。

第 4 章 微电网多目标优化调度模型求解方法分析：首先分析了传统麻雀多目标搜索算法的工作原理，指出了传统麻雀多目标搜索算法存在不足，并针对传统麻雀多目标搜索算法迭代初期易陷入局部最优的问题以及迭代后期种群多样性不足的问题

题进行改进，通过引入正弦搜索策略和种群柯西变异处理等，获得增强型麻雀多目标搜索算法（EMOSSA）。最后利用 ZDT 系列测试函数测试改进 EMOSSA、多目标粒子群优化算法和多目标麻雀搜索算法，验证 EMOSSA 的有效性。

第 5 章 基于 EMOSSA 的微电网优化调度：构建双层模型，上层将 MG 作为研究对象，以 MG 的经济效益和环境效益作为优化目标。下层以用户负荷需求作为研究对象，考虑了用户的经济效益建立了优化目标函数，采用第 4 章提到的 EMOSSA 进行求解。最后通过仿真实验新建微电网调度模型的有效性。

第 6 章 结论和展望：对论文研究内容进行总结，并针对论文存在的不足进行分析，展望今后研究的方向。

第 2 章 微电网的发电单元模型和特征分析

MG 是一种小型、独立的电力系统，它可以独立运行或与主要电力网络相互连接，以满足特定区域或社区的电力需求。MG 的出现缓解了全球能源危机加剧的问题，推进了可再生能源发电和先进技术的融合，推动了能源行业的可持续发展^[42-44]。MG 相比于其他大型供电系统有着很大的区别，对于风电、光伏等具有很强的不确定性的可再生能源的消纳，MG 显然更有优势。本文研究的 MG 主要包含风力发电机组、光伏发电机组、储能单元以及在应对可再生能源不确定性的柴油发电机组。

众所周知，MG 在孤岛和并网运行时，系统中的分布式发电单元的输出功率和负荷之间有着密切的切合关系，要实现整个系统的经济性就必须对 MG 中的发电单元进行相应的经济调度。因此，本章节阐述分布式发电单元的数学模型，为后续微电网优化调度建模提供了理论基础。

2.1 微电网系统架构

MG 的基本结构如图 2-1 所示，MG 的结构可以根据不同的设计和应用需求有所变化，但通常包括以下几个具体内容：

发电单元：MG 可以利用多种电源资源来满足电力需求，包括太阳能、光伏、风能、水能等可再生能源。这些发电单元可以通过光照、风速等自然条件的变化来发电。其次包含如燃气发电、柴油发电等不可再生能源发电。

能源存储系统：为了在可再生能源不稳定或电力需求高峰时提供稳定的电力供应，MG 通常会配备能源存储系统，如锂离子电池、流电池等，用于储存多余的电力，并在需要时释放。

能源管理系统：MG 的智能控制中枢，用于监测电力需求、能源生产、能源储存和电力流动情况。能源管理系统会根据实时数据做出决策，以优化能源的分配和利用，确保稳定的供电。

负荷：MG 为其服务的电力消耗设备，如家庭、工业设施、商业建筑等。MG 需要安全可靠地向这些负荷提供电力需求。

电力转换系统：由于 MG 中可能有多种电源和负载，电力转换系统用于将不同

电源输出的电能转换为适当电压和频率以供给负载使用。

控制与通信系统：MG 的各个发电单元需要实时交流信息以实现协调工作。控制系统通过传感器、执行器和通信网络来监测和控制 MG 内部的能源流动和电力负载。

安全措施：由于 MG 是一个独立的能源系统，必须考虑安全性，包括火灾、电气故障等风险。安全措施包括防火设备、电气保护装置等。

MG 可以是一个单一的建筑物内的小规模系统，也可以是一个覆盖整个社区或工业园区的大型网络。MG 的灵活性和可定制性使其成为应对能源供应不稳定性、提高能源使用效率和推动可再生能源发展的重要系统。

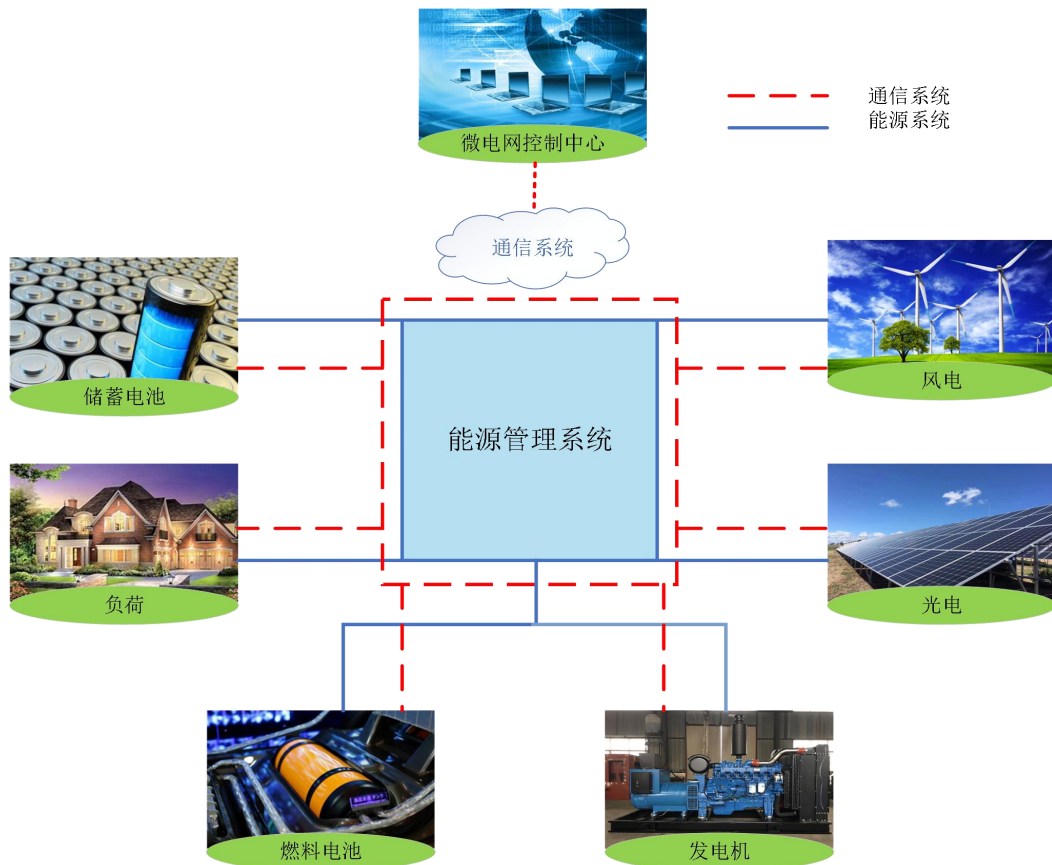


图 2-1 MG 经典结构图

2.2 微电网发电单元模型

MG 中的分布式发电单元包含风力发电单元、光伏发电单元、柴油发电机组和燃料电池发电机组，其中风力发电和光伏发电属于可再生能源发电和不可控的发电单元，柴油发电机组属于可控单元，本节建立了相应的模型。

2.2.1 风力出力的概率模型

风力发电机也称为风力涡轮机或风力涡轮发电机，是一种利用风能将其转化为电能的设备。风能是一种清洁的可再生能源，使用风力发电机生产的电力不会产生二氧化碳排放或其他污染物，有助于减少环境污染和气候变化。其次，风是地球上不断存在的自然资源，因此风能属于可再生能源不会耗尽。相比于有限的化石燃料，风能具有持久的供应。与此同时，风力资源在全球范围内都是可轻松获得的，尤其是在海岸线、山地和平原等地区，都具有潜在的风能资源。最后，风力发电机的输出功率也有一定的可调性，可以通过调整叶片角度或切入风速来控制，这种可调节性使其适用于电网的需求响应，能够在需求高峰时提供更多电力。

(1) 风力发电机工作原理：风力发电机是将风能转化为机械能，然后再将机械能转化为电能。风力发电机通常由塔架、叶片、转子、发电机和控制系统组成。当风吹过风力发电机的叶片时，叶片会受到风力的作用开始旋转。叶片的设计和形状旨在最大程度地捕获风能。旋转的叶片会转动连接在其上的主轴，主轴通常与一个称为齿轮箱的装置相连接。齿轮箱会增加旋转速度并转换为更适合发电机的转速。齿轮箱传递的旋转运动将进一步传递到发电机。它通过磁场与导体之间的相对运动产生电压从而生成电流。生成的电流经过电缆输送到变电站或电网中，经过适当的变压器等设备进行处理和分配，最终供应给家庭、工业和商业用途。风力发电机配备了控制系统，可以监测风速、方向、叶片的转速等参数。基于这些参数，控制系统可以自动调整叶片的角度和风轮的转速，以最大限度地提取风能并保护设备。

(2) 风力发电机输出功率概率模型：风力发电受许多因素的影响，影响风力发电机输出的主要因素是风速^[45]。但是风速总是不确定的，所以对于风速的描述使用威布尔概率密度函数（PDF）更为贴切^[46]，如式（2-1）所示。

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad 0 < V < \infty \quad (2-1)$$

式中， V 表示实际风速， k 和 c 分别表示形状因子和比例因子。

依据风速的PDF理论，风力发电机输出功率如式（2-2）所示。

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & 0 \leq V \leq V_{\min}, V_{\max} \leq V \\ P_r \frac{V - V_{\min}}{V_r - V_{\min}} & V_{\min} \leq V \leq V_r \\ P_r & V_r \leq V \leq V_{\max} \end{cases} \quad (2-2)$$

式中, $V_{\min}$ 和 $V_{\max}$ 分别表示风力发电机的切入和切出风速, P_r 表示风力发电机的额定输出功率。

风力发电机输出 $f_o(P_{WT})$ 的 PDF 表示式如式 (2-3) 所示^[47]。

$$f_o(P_{WT}) = \begin{cases} (khV_{\min}/cP_r)[((1+hP_{WT}/P_r)V_{\min})/c]^{k-1} \times \exp\{-[((1+hP_{WT}/P_r)V_{\min})/c]^k\} & P_{WT} \in [0, P_r] \\ 1 & otherwise \end{cases} \quad (2-3)$$

式中, $h=(V_r-V_{\min})-1$ 。

2.2.2 光伏出力的概率模型

太阳能作为另外一种可再生能源, 是一种绿色无污染的自然资源。光伏发电和风力发电相同, 都具有发电成本低, 污染物排放少的优点。除此之外, 光伏发电相较于风力发电的优势是在发电工程中不会产生噪声污染。同时, 光伏板的放置位置受地形区域影响较小, 节省了不小的费用^[43]。在 MG 的运行工程中, 一般争取光伏的发电功率达到最大功率输出, 这对 MG 的经济效益有着巨大的贡献。

(1) 光伏发电机的发电原理: 光电直接变换模式, 这种模式是通过光生伏打效应, 将太阳光直接转化为电能。光生伏打电池的原料一般是半导体, 例如硅等材料。在太阳光照射下, 半导体材料吸收了太阳光中的光。在半导体中, 光子的能量将使其电子激发到更高的能级。这导致了电子从价带向导带的跃迁, 形成了一对电子空穴对, 激发的电子和留下的空穴开始在晶格结构中移动。由于半导体中的电场, 电子将沿导带流动, 而空穴则沿着价带流动。这种电子和空穴的运动产生了电流。通过在半导体上放置金属电极, 可以形成一个电势差, 从而使电流在电路中流动。通过将光伏电池组成光伏发电阵列, 可以生成足够的电流和电压, 将其连接到电网或用于充电设备从而输出直流电能。单个光伏电池的输出电流较小, 因此通常需要将多个电池组合成光伏电池板, 将多个电池组串联或并联, 组成一个具有较高发电能力的太阳能电池组。太阳能电池具有持久性、清洁性和柔性等特点, 被认为是一种极具应用前景的新能源。太阳能电池具有很长的生命周期, 在有阳光的情况下, 它

可以一次投入就能持续很长时间。与燃煤和核电相比，太阳能发电对环境没有任何污染。光伏发电通过利用太阳能，实现了一种清洁、可再生、分布式的电力生产方式，是可持续能源发展中的关键技术之一。

(2) 光伏发电输出功率概率模型：光伏发电通常受到光照、温度和其他天气条件等因素的影响^[48]。以往文献表明，太阳光强度服从 β 分布，光伏发电量与太阳辐照度呈线性关系。它的 PDF 在数学上可以表示如式 (2-4) 和 (2-5) 所示。

$$f_p(P_{PV}) = \frac{\Gamma(\alpha_{PV} + \beta_{PV})}{\Gamma(\alpha_{PV})\Gamma(\beta_{PV})} \left(\frac{P_{PV}}{R_{PV}}\right)^{\alpha_{PV}-1} \left(1 - \frac{P_{PV}}{R_{PV}}\right)^{\beta_{PV}-1} \quad (2-4)$$

$$R_{PV} = B \cdot \eta \cdot r_{\max} \quad (2-5)$$

式中， Γ 是 Gamma 函数，具体表达式为 $\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$ ， α_{PV} 和 β_{PV} 是 β 分布的形状参数， R_{PV} 表示光伏阵列的最大输出功率。 β 、 η 和 $r_{\max}$ 分别代表光伏阵列的总面积、光伏转换效率和最大太阳辐照度。

2.2.3 柴油发电机模型

柴油发电机作为一种灵活的发电装置，以柴油作为燃料，通过柴油的燃烧带动发电机做功，从而将化学能源转化为电能。因为其出色的灵活性，技术相对成熟，常被用于 MG 中的备用电源，来应对可再生能源的不确定性给 MG 带来的影响。当用户的负荷需求过大，微电网中的可再生能源无法提供足够的功率输出时，柴油发电机可以弥补功率不足的部分。

(1) 柴油发电机发电机理：柴油发电机的工作始于将柴油燃料从燃油箱输送到发动机的燃油系统，燃油通过滤芯进行过滤，确保进入发动机的燃油是清洁的没有杂质，燃油被注入到发动机的燃烧室中。这通常是通过喷油器，喷油器会将燃油雾化成微小的颗粒，以便更好地与空气混合。在气缸内部的喷油器将燃油喷入压缩的空气中，形成可燃的燃油-空气混合物。火花塞点火后，燃烧产生的高温高压的气体，这使得活塞向下运动。活塞运动将活塞连杆转动曲轴，将机械能转换为旋转运动。曲轴通过连接到发电机的发电机部分，将机械能转换为电能。

(2) 柴油发电机的成本消耗模型：正常情况柴油发电机是在规定运行功率内运行，同时也不大于最大的运行功率。柴油发电机的发电成本和燃料的消耗量会随着

输出功率的增加而增加。柴油发电机具有发电稳定可靠的特点，并能快速响应负荷的波动^[49]。由于它将化石燃料燃烧成电力，成本相对较高，并且无法避免环境污染，因此，它通常被用作应急备用电源，其发电成本如式（2-6）所示。

$$C_{DI} = \sum_{i=1}^{N_{DI}} (a_i P_{DI_i}^2 + b_i P_{DI_i} + c_i) \quad (2-6)$$

式中， P_{DI_i} 表示柴油发电机的输出功率。 a_i 、 b_i 、 c_i 分别为燃料成本系数。

2.2.4 燃料电池模型

燃料电池（FC）的工作原理类似于电池，但不同于传统电池，它可以持续地从外部提供燃料和氧气以产生电能。燃料电池具有高效、低排放、可再生等优势，被认为是未来清洁能源的一种重要形式。燃料电池中的关键是电化学反应，其中燃料和氧气在阳极和阴极之间发生氧化还原反应。燃料电池的燃料是氢气（ H_2 ），但也可以使用甲醇、乙醇等。

（1）燃料电池工作原理：在燃料电池中，通常使用氢气作为燃料。氢气从燃料电池的阳极（负极）输入，氧气通过阴极（正极）输入。氧气通过氧化还原反应与氢气发生反应，从而在电解质中产生水。通常使用质子交换膜或碱性电解质来促进离子的传导。在电解质中，氢气和氧气发生氧化还原反应。在阳极处，氢气释放出质子和电子。质子穿过电解质，而电子则通过外部电路流动，产生电流。燃料电池通过氢气和氧气的氧化还原反应，在电解质中产生电流，从而实现了将化学能转化为电能的功能。它是一种清洁的能源技术，因为其主要排放物是水。而且其电能转化效率高，并拥有清洁可靠的特点。

（2）燃料电池的成本消耗模型：燃料电池的发电成本如式（2-7）所示。

$$C_{FC} = \frac{C_{NG} \cdot P_{FC}}{Q_{LHV} \cdot \eta_{FC}} \Delta t \quad (2-7)$$

式中， C_{NG} 是燃料的价格， Q_{LHV} 是燃料的低热值， P_{FC} 和 η_{FC} 分别是燃料电池的输出功率和发电效率。

2.3 储能单元数学模型

在电力系统中，因为可再生能源也具有间歇性。例如，有可能出现完全多云或无风的天气，这将会影响光伏（PV）阵列和风力发电站的能源输出。此外，大量可

再生能源发电与当地电力系统的连接可能会导致稳定性问题。

为了充分发挥可再生能源的潜力，同时规避能源波动、间歇性以及电力不稳定性带来的挑战，需要在本地电力系统中引入储能系统，以便更好地利用大量小规模可再生能源。这种方式在技术上或经济上完全可以与化石燃料或核技术的能源利用相竞争^[49]。

由于不同的可再生能源具有不同的特性以及 MG 中混合能源的可能性，因此需要设计能够在较宽范围的功率密度和能量密度下运行的存储系统。由于没有单一储能技术具备这种能力，电力系统需要结合储能技术来满足电力的供应。

能源存储系统的容量取决于所需要提供补偿的特性，相应地选择所用储能装置的类型和容量。在短时间电压骤降的情况下，尽可能地释放较高的电流，可以采用具有较小存储量的能源存储元件。但是，如果电压骤降持续较长时间，导致供电中断，则可采用额外的备用电源，具体取决于临界负荷。在谐波消除和无功功率补偿的情况下，可采用合适的无源滤波器，从而降低储能系统的额定值。

储能系统在 MG 中主要有以下三点作用：

(1) 提供短时间的供电。因一些突发情况例如夜间无光照，光伏发电满足不了用户负荷需求时，MG 中的分布式发电单元无法满足用户负荷功率时，在 MG 偶遇强风暴雨等突发情况时储能设备可以为其提供短暂的电力供应。

(2) 用作能量缓冲装置。采用电力电子器件的逆变电源普遍具有较小的惯性，而在 MG 中这种类型的电源占据了绝大部分，因而其自身也具有很强的脆弱性。此外，风电、光伏等能源对外界环境的依赖性很强具有很大的随机性。这些因素都会导致 MG 中的电能质量下降，而具备削峰填谷功能的储能系统，能够极大地减轻上述问题。

(3) 优化 MG 的运行。首先，在其他微型电源无法提供电力的情况下，利用能量存储设备对 MG 进行短暂的供电，保证 MG 的稳定运转。其次，在分时电价下，MG 可在配网价格低时向配网采购电能，并将其存储于蓄能设备中。在配网电价高时，利用蓄能设备释放电能给配电网，既可以帮助配电网削峰填谷，又可以减少 MG 的运营费用，实现 MG 的优化运行。储能系统的状态和储能功率关系如式 (2-8) 所示：

$$SOC_t = \begin{cases} (1-x)SOC_{t-1} - \frac{\eta_c P_{bat,c} \Delta t}{C_{BE}} \\ (1-x)SOC_{t-1} - \frac{P_{bat,d} \Delta t}{\eta_d C_{BE}} \end{cases} \quad (2-8)$$

式中， SOC_t 和 SOC_{t-1} 分别是电池在 t 和 $t-1$ 时的相应充电状态。 x 代表电池的自放电率。 $P_{bat,c}$ 和 $P_{bat,d}$ 分别是充电功率和放电功率。 η_c 和 η_d 表示充电和放电效率。 SOC_t 和 SOC_{t-1} 设置为0.90。

2.4 随机变量的序列化建模

序列运算理论是数字信号处理领域在序列卷积基础上发展起来的数学理论，已成为工程领域处理负荷不确定性的有效方法^[50]。概率序列的概念是在序列运算的基础上提出的，它可以描述随机变量的总体概率分布，提高运算精度和速度。以PV为例，其序列化建模生成一个概率序列，如式（2-9）所示。

$$F(i_{PV}) = \begin{cases} \int_0^{q/2} f(P_{PV}) dP_{PV} & i_{PV} = 0 \\ \int_{iq-q/2}^{iq+q/2} f(P_{PV}) dP_{PV} & 0 < i_{PV} < N_F \\ \int_{iq-q/2}^{iq} f(P_{PV}) dP_{PV} & i_{PV} = N_F \end{cases} \quad (2-9)$$

式中， $N_F = P_{PVmax}/q$ 表示序列长度， P_{PVmax} 是PV的最大输出， q 是离散化步长。

使用序列运算理论离散处理PV、WT和负载的值，得到风电出力、光伏出力和负荷的概率序列分别为 $F(i_{PV})$ 、 $F(i_{WT})$ 和 $F(i_{Load})$ ，序列长度分别为 $N_F = P_{PVmax}/q$ 、 $N_{WT} = P_{WTmax}/q$ 和 $N_{Load} = P_{Loadmax}/q$ ，然后通过机会约束将结果转换为确定性约束。

假设 P_{PV} 和 P_{WT} 的概率序列分别为 $a(i_{at})$ 和 $b(i_{bt})$ 。通过加法型卷积运算，PV和WT联合输出 $c(i_{ct})$ 的概率序列如式（2-10）所示。

$$c(i_{ct}) = \sum_{i_{at}+i_{bt}=i_{ct}} a(i_{at})b(i_{bt}) \quad i_{ct} = 0, 1, \dots, N_{at} + N_{bt} \quad (2-10)$$

假设通过减法型卷积运算，负载的概率序列是长度为 N_{dt} 的 $d(i_{dt})$ ，则等效功率的概率序列如式（2-11）所示。

$$u(i_{ut}) = \begin{cases} \sum_{i_{dt}-i_{ct}=i_{ut}} d(i_{dt})c(i_{ct}) & 1 \leq i_{ut} \leq N_{ut} \\ \sum_{i_{dt} \leq i_{ct}} d(i_{dt})c(i_{ct}) & i_{ut} = 0 \end{cases} \quad (2-11)$$

长度 N_{ut} 和 $u(i_{ut})$ 之间的对应关系如表 2-1 所示。

表 2-1 等效功率的概率序列

功率(kW)	0	q	$m_{ut}q$	...	$N_{ut}q$
概率	$u(0)$	$u(1)$	$u(m_u)$	...	$u(N_{ut})$

在表 2-1 中，功率 $m_u q$ 总是具有相对应的概率 $u(m_u)$ 。

2.5 本章小结

本章节阐述了含风光柴储的微电网系统中各个发电单元的运行原理，通过对风力发电机组、光伏阵列、储能系统、柴油发电机、燃料电池等模块的分析，并完成了系统模型的构建。通过序列运算理论将风电、光伏和负荷进行离散化序列求得概率序列，为后续章节的研究奠定了理论基础。

第 3 章 基于需求响应的微电网双层模型

在实际的微电网系统中，为了满足最终的目标，通过对需求侧电力负荷的调度来响应需求响应策略。本章分析了用户负载和需求响应的类型并阐述了对用户负荷的管理方法，为家庭用电负荷调度提供了可能。所以按照电网给予的电力价格以及需求响应策略，对需求侧负荷进行调度，从而取得较好的经济效益。并在此基础上建立了微电网双层优化模型以及多个约束条件，为后续模型求解打下了基础。

3.1 微电网能源管理系统

能源管理的目标是减少供给侧的供电成本，提高电网各组成部分的积极效益，实现最大的社会效益。微电网能源管理相对于常规能源管理系统而言，在调度资源、监控对象等方面均存在显著差异，具有广阔的可操作空间。MG 中以风、光等为代表的分布式新能源的出力具有很大的不确定性。另外，由于新能源对 MG 的扰动抑制能力不足，导致 MG 不稳定运行。所以，相对于传统的电能管理系统，微电网能源管理系统有必要采取相应的措施来减少新能源对电网的负面影响。此外，为了提高新能源利用效率，降低发电成本，降低对环境的污染，需要尽量消纳光伏、风电等新能源发电。

3.1.1 能源管理系统原理分析

能源系统的需求响应是指电能使用者通过对微电网发出的电价或激励信号，自觉地对其用能行为进行调节。在保证客户基本用电需求的前提下，通过电价来鼓励用户主动参与冷热负荷调度。电力企业对电力市场在不同时期的用电需求进行了合理定价。参与者将基于奖励性定价来确定是否参加能源企业所制订的能源需求战略，这样一来用户就能够拥有自由控制参与的权利，能源供需双方在实时互动中自由交易，该系统的灵活性为能源市场和系统运行带来了明显的综合效益。

3.1.2 能源管理系统功能分析

能源管理系统作为 MG 中各种发电装置、储能系统和用户数据的集成和调度中心。在此基础上，提出微电网能源最优调度方案，实现对 MG 中各类发电装置、储

能系统的出力的合理配置。微电网能源管理系统由人机交互、数据分析、功率预测、节能优化四大功能模块组成^[51]，微电网能源管理系统如图 3-1 所示。

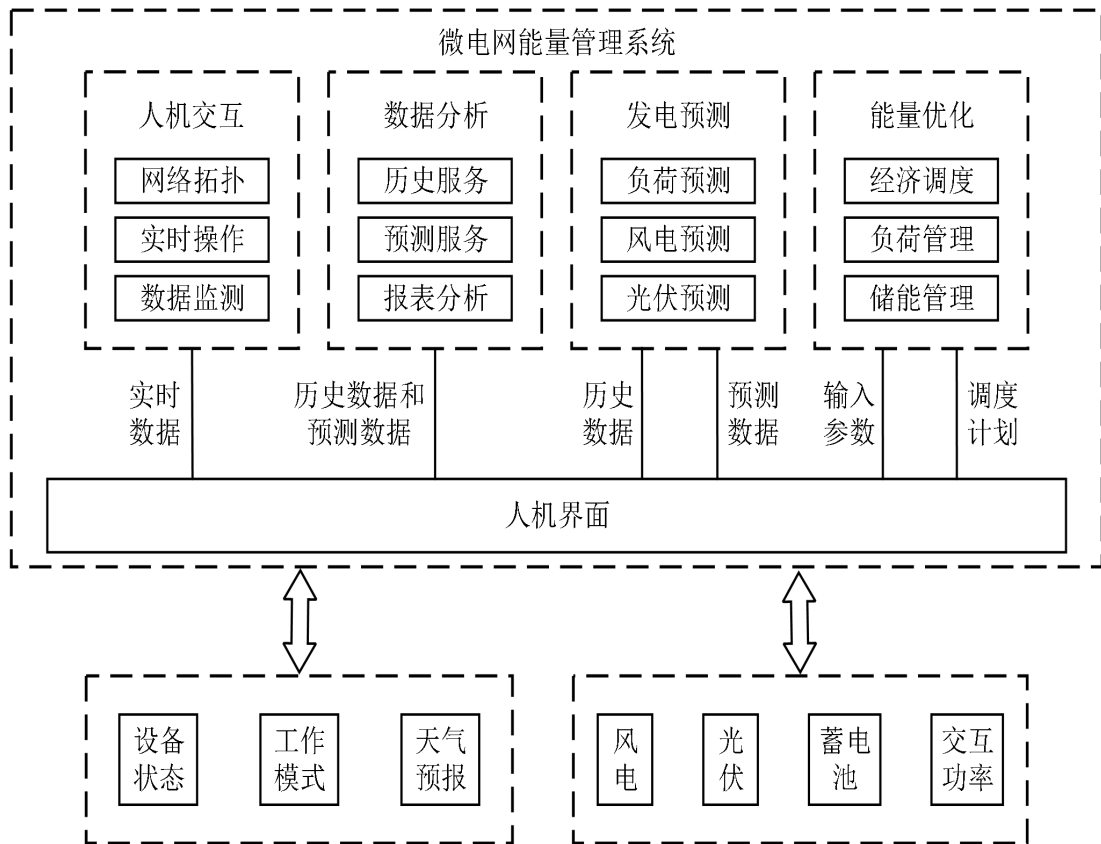


图 3-1 能源管理系统原理图

该系统是管理者与能源管理系统平台之间进行信息、数据及指令传输的中介^[52]，管理者除了能透过人机互动介面，随时观测 MG 内各个发电装置和储能系统的动态工作状态，也能根据所监测到的各个发电装置和储能系统的实际工作状态，对其进行调节，从而提高 MG 的运行状态。该系统具有历史服务、预测统计、报告分析三大功能^[53]。首先是对历史资料进行集成，然后根据一定的统计规律进行统计分析。然后，通过系统中的数据分析，对历史数据及预测结果进行汇总，形成数据报告，以便对能源管理系统进行分析。然而，考虑到新能源的间歇性和不确定性，使得新能源的输出功率很难准确地确定，为此，在优化调度之前需综合利用数据分析模块获取的历史资料以及实时监测的气象信息，来预测用电需求以及可再生能源出力情况，并将预报结果反馈给能源管理系统的下一模块，以实现电网的整体优化。

3.2 需求侧能源管理

需求响应是电力用户改变某时段电力使用模式或方法，目的是达到电力系统稳定运行且降低用电费用。随着智能控制技术快速发展，实时调整需求侧用电模式和方法的需求响应在配电网系统中应得到广泛应用。

用电需求侧能源管理就是通过多种方式，在用电时段、用电规模等方面，通过多种方式，实现错峰用电，优化用电模式^[54]。用户用电量随时间的变化用负荷曲线表示，改变负荷曲线的需求侧能源管理策略主要包括：峰值削减、山谷填充、负荷转移、战略保护、战略负荷增长、柔性负荷曲线^[55]，如图 3-2 所示。

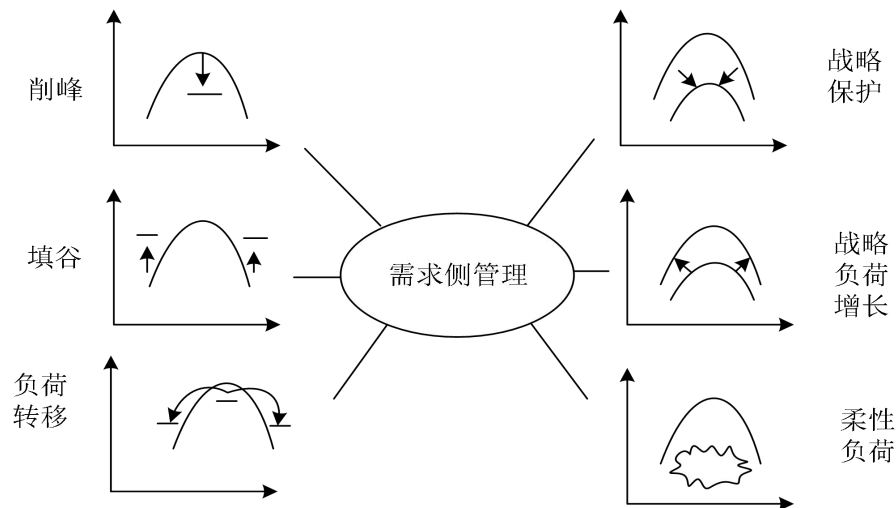


图 3-2 需求侧能源管理策略示意图

峰谷补偿法通过对负荷的扰动和对负荷的直接控制，降低了峰谷差，减轻了电力尖峰，改善了电网的安全运行；负载转移作为一种最高效的负载管理方式，通过对特定负载的时间相关性，使其由高峰向低谷转变，从而达到“削峰填谷”的目的。策略性保护是通过降低电网总用电量来保证电网的安全稳定，而降低用电负荷对电网的长远发展是不利的。战略性负载增长在满足需求和经济增长的情况下，具有广泛的市场需求。弹性负载曲线使客户可以以比平时更低的价格购买一定数量的电能，并根据执行可靠度的要求，使客户的负载曲线具有弹性。削峰填谷、策略保护等是传统的负载管理方式，它可以通过激励、补偿等方式来改变用户的负载曲线。与前三种方案相比，策略性负载增长、负载转移和灵活负载曲线能够实现更加系统性和大范围的负载变动，其目的不仅仅是改变峰谷结构，更重要的是改变消费者的用电行为。

3.2.1 需求侧负荷特征

根据负荷的不同响应特性，MG 中的负荷大致可分为三种类型分别为：可转移负荷，不可转移负荷和可中断负荷。

（1）可转移负荷：可转移负荷指的是系统中的负荷能够在不影响正常运行的前提下，在不同部分之间进行移动的能力。这在电力系统和能源管理中具有重要的意义。可转移负荷是指在一个系统内能源需求，包括家庭、工业和商业用电等负荷能够根据需求从一个时间段移动到另一个时间段。在 MG 或分布式能源系统中，可转移负荷可以根据能源产生的变化而灵活调整，更具有灵活性，可以更好地适应新的负荷需求或突发状况。电力系统中通常使用先进的通信技术，确保系统中各个部分之间能够实时交换信息，可转移负荷通常需要智能控制系统来监测系统的状态，判断何时以及如何实现负荷的转移。在 MG 中，可转移负荷可以是移动式电池存储单元，可以根据需要移动到不同的区域，以满足负荷需求。以电动汽车为例，电动车的充电需求也是一种可转移的负荷，可以通过智能充电设施根据系统的需要进行调整。可转移负荷有助于实现系统内的负荷平衡，避免过载或能源浪费。在紧急情况下，可转移负荷也可以作为一种应急响应机制，使系统更具有弹性。随着智能城市的发展，可转移负荷将成为更为重要的能源管理手段，以实现高效、可持续的能源使用。可转移负荷的概念体现了在能源系统中灵活性和可调性的需求，有助于提高系统的可靠性和效率。在不同场景下的实现方式和应用场合可以根据具体的系统要求进行调整。

（2）不可转移负荷：不可转移负荷指的是系统中的负荷无法在不影响正常运行的情况下从一个地方移动到另一个地方。这可能是由于负荷与特定的设备或场地紧密关联无法脱离，或者由于技术、安全或其他限制而无法转移。例如有些负荷可能与特定的设备直接相关，例如重型机械的运行需要特殊的工作场地。这些负荷的性质可能导致其无法在短时间内转移。同时，移动某些负荷可能涉及到安全问题，有的甚至受到法规和规定的限制，因为其运行可能受到环境、周围设备等因素的制约，导致这类负荷的操作限制了其在系统内的自由转移。在系统设计过程中，不可转移的负荷通常要求系统在设计阶段就充分考虑其所需的环境和资源。固定的负荷有助于确保系统稳定性，因为其运行条件是已知的，可以进行充分的优化和调整。随着技术的发展，某些原本不可转移的负荷可能会受益于新技术，变得更为灵活。对于可再生能源而言，部分能源需求可能仍然依赖于固定的设备，但随着可再生能

源技术的发展，也许有机会改变这一情况。总体而言，不可转移负荷是系统中一些固定且难以移动的能源需求，其存在可能受到技术、物理和法规等多方面因素的制约。

(3) 可中断负荷：可中断负荷指的是系统中的某些负荷可以在需要时被中断或停止，减少释放能源或资源，确保资源的有效利用，以便更好地适应系统需求或应对紧急情况。这种能力对于电力系统和其他需要动态调整的系统至关重要。在电力系统中，某些负荷，如一些非关键的工业设备，可以被中断以满足系统的需求。在生产线上，一些非关键工序的设备可能会被中断，以便更灵活地调整生产计划。可中断负荷通常需要智能控制系统，能够迅速、准确地识别和中断特定负荷。先进的通信技术有助于系统实时地通知相关部件，以实现负荷的中断。在紧急情况下，可中断负荷的能力可以用于释放能源，确保关键负荷得到满足。通过中断非关键负荷，备用能源可以更有效地供应到关键负荷上。智能电网中，非关键用户的负荷可以被中断以应对电力供应的波动。工业设施中，一些冷却系统可能在繁忙时被中断，以释放电力资源。这类场景通过中断负荷，系统可以更灵活地管理电力成本，根据需求动态调整。可中断负荷有助于提高系统的可持续性，确保关键负荷在资源有限的情况下得到优先满足。随着城市的智能化，可中断负荷的能力将更为普遍，以提高能源的灵活利用。它强调了在系统设计中灵活性和实时调整的重要性，有助于提高系统的适应性和资源利用效率。

不同类型的可平移负荷工作时间长短不同，同一类型可平移负荷在不同时段大小也可能不同，因此，在某调度时段需要考虑转入负荷 L_{sin} 和转出负荷 L_{sout} ，同时还需要该时段之前的转入负荷和转出负荷对该时段的负荷影响。转入负荷 L_{sin} 和转出负荷 L_{sout} 如式 (3-1) 所示。

$$\begin{cases} L_{sin}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{t'=1 \\ t' \neq t''}}^T \sum_{h=1}^{h_{max}} X_{it't''} L_{(h+1)i}(t) \\ L_{sout}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{t'=1 \\ t' \neq t''}}^T \sum_{h=1}^{h_{max}} X_{it't''} L_{(h+1)i}(t) \end{cases} \quad (3-1)$$

式中， N 表示平移负荷数量，表示可平移负荷的最大功率， $X_{it't''}$ 表示从 t' 到 t'' 的可平移负荷数量， $X_{it't'}$ 表示从 t'' 到 t' 的可平移负荷数量，表示在时段内可平移负荷。负荷平移约束条件包括平移时段约束和平移量约束。

(1) 平移时段约束

$$\begin{cases} X_{ktt'} = 0 & \forall t' < s_k(t) \\ X_{ktt'} = 0 & \forall t' > d_k(t) \end{cases} \quad (3-2)$$

式中, $s_k(t)$ 和 $d_k(t)$ 分别为最早可能转入时段和最迟可平移时段。

(2) 平移负荷量约束

$$\begin{cases} \forall t, t', k \quad x_{ktt'} \geq 0 \\ x_k(t) = \sum_{t=1}^T x_{ktt'} \end{cases} \quad (3-3)$$

式中, $x_k(t)$ 表示 t 调度时刻 k 类可平移负荷数量。

在 MG 运行时, 能源管理系统首要任务是收集各分布式发电装置和储能装置信息, 利用智能优化算法预测各分布式发电装置和储能装置输出功率, 优化调度方案, 使系统尽可能持续可靠地向各类负荷提供电能。为了保证孤岛微电网系统稳定运行, 需要在电源侧配置一定容量的柴油发电机组或储能电池组, 来消除新能源发电的随机性造成系统电压和频率波动等问题, 当 MG 出现较大功率不平衡时则实施弃光弃风或切除可中断负荷。显然这种调度策略没能挖掘用户侧负荷参与系统调度的潜能。在制定微电网能量管理策略时, 应有针对性地考虑用户侧需求响应, 对不同类别负荷采取相应的平移策略, 削峰填谷, 提高 MG 运行经济性和可靠性。

在 MG 运行前, 对调度周期内所有分布式电源输出功率 $P_{DG}(t)$ 、电池输出功率 $P_{ESS}(t)$ 和荷电状态 $S_{OC}(t)$ 及负荷需求进行预测。依据 $P_{DG}(t)$ 、 $P_{ESS}(t)$ 、 $P_L(t)$ 和 $S_{OC}(t)$ 参数, 实现负荷平移, 如图 3-3 所示。

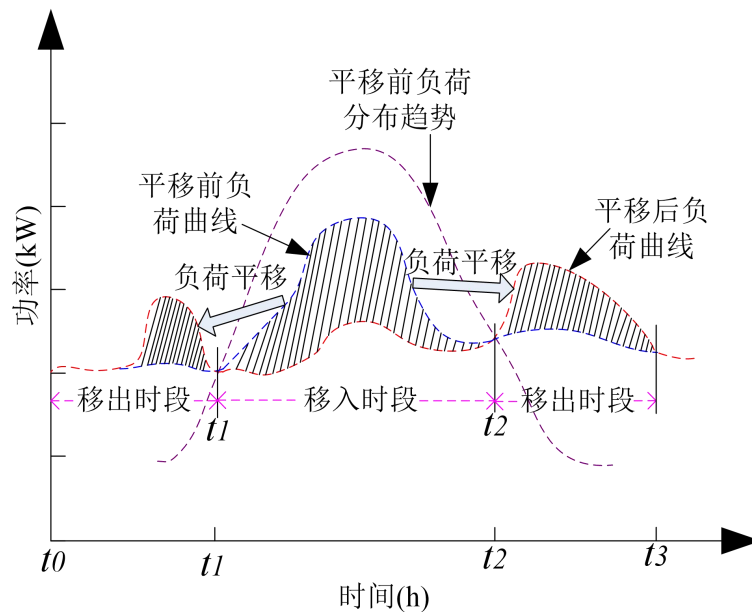


图 3-3 负荷平移过程意图

由图 3-3 可知，从 t_1 到 t_2 时负荷处于高峰期，公共电网供电价格高，依据负荷平移时段和平移量规则进行负荷平移，将负荷从高峰期平移到低谷时段，实现削峰填谷，提高 MG 的经济效益。在 MG 运行期间，可能存在风电和光伏发电量波动较大，MG 通过燃气轮机发电机组、燃料电池机组、储能电池装置及公共电网优化配置来跟踪新能源波动，实现系统电压和频率稳定，保障微电网系统的正常可靠运行。

3.2.2 需求响应机理

需求响应一般可以分为两类：基于价格的需求响应和基于激励的需求响应^[56]。以电价为基础的电力需求反应，是指在电力市场中，用户依据所接收到的电价信息，对其用电量调节。实质上是通过市场机制对资源进行配置，从而实现供需均衡。该方法按价格形式可分为分时定价、临界峰谷定价和实时定价。以价格为基础的需求响应，可以被理解为充分利用市场机制来实现资源的自由分配。第二种是以激励形式为基础的需求响应，它可以被视为发挥监管的作用。用户可以通过在电力短缺期间减少用电量来获得直接补偿或其他时间折扣率。基于激励的方法包括直接负荷控制（DLC）、需求侧竞价（DSB）、可中断负荷（IL）、紧急需求响应（EDR）等^[57]。两种需求响应方案相辅相成，具体内容如图 3-4 所示。

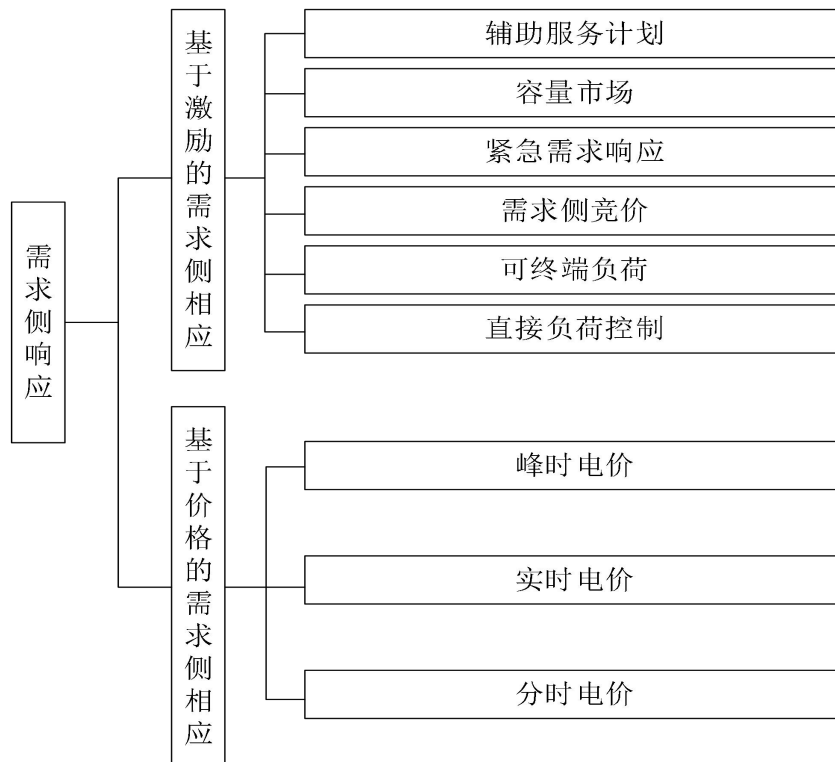


图 3-4 需求响应分类图

3.3 微电网能源管理方法

由于传统的电价体系缺乏弹性，电力市场尚未引入电力市场的发电平衡机制。缺乏长期、稳定和可靠的需求响应来影响用户的负荷潜力。目前价格与激励是实现需求响应的两大要素，二者互为补充、互相促进。设计一种激励机制可以成为帮助实现需求响应有效性的激励措施。我国的一些地区已经制定了统一的响应补偿标准，以促进需求响应计划的实施。虽然这些补偿取得了一定的激励效果，但是并没有考虑到用户的响应意愿。因此，制定一个公平、公正、公开的激励机制，既能保护电力公司的利益，又能充分发挥用户的自主权，这可以帮助用户更好地适应电网的需求策略，促进家庭用户积极参与需求响应计划。为此，本文提出了一种基于电力信誉度的虚拟实时电价方案，旨在确定用户响应 RTP 的用电行为。本研究能为 RTP 在不久的将来的需求响应提供参考。通过实例验证了该模型在现有电力系统下的可行性和有效性。

随着经济和社会的不断发展，传统过时的电力管理方案已经难以满足用户日益严格的供电要求。电网公司迫切需要找到一种兼顾电网和用户利益的运行机制来解决高峰问题和挑战。目前，我国的电价由政府控制，很难直接反映电力供需价格。一方面，电价相对稳定，电网公司的采购成本与峰谷时段的关系较小，而另一方面，电网公司在紧急状态下通过订单为商业用户提供电力。所以从某种程度上来说，电网公司实施需求响应的愿望并不强烈。即使实施需求响应也会带来自身收益的减少，直接影响实施需求响应的积极性，在相关政策尚未明确、激励来源难以确定的电力环境下，为了保证电网经济、安全、稳定的发展，如何设计一套适应电力国情的需求响应机制是一个亟待解决的问题。

尽管分时电价计划已被广泛实施，但其定价目标仍远未达到预期的目的。因此，有必要寻找一种新的电价方案，能够实时调整用户的消费行为，帮助用户以最佳方式管理用电情况，以确保电网的可持续性和安全性，并方便生产商提供可靠的电力。现在实行的是峰谷分时电价，但所制定的价格远远不能满足需求响应的目的。因此，文献[58]首次提出了一种以动力得分为核心的需求响应概念的激励机制设计。在综合考虑用户类型、外部环境和信用等级等影响因素的基础上，基于信用评分理论，提出了考虑消费信用、奖惩信用的电力信用模型。文献[59]提出了基于电力信用激励的需求响应机制。在这种电力信用机制下，用户可以根据自己的选择安排日常负荷。根据文献[60]从电网、终端用户和社会三方利益的角度，对交易和交换电量进

行评分。

上述文献对智能电网环境下的需求响应方案进行了有效研究，但存在不足之处为终端用户的参与度一直不高。在此基础上，本文提出了一种基于智能电网的新型电力系统定价模型，旨在通过对电力系统进行有效的调控，使其能够更多地参与到电网的运行与管理中来。引用电力信用机制细化到每个时间段，并提出了虚拟实时电价的概念，每个时段获得的电力信用与虚拟实时电价挂钩，最终建立虚拟实时电价的电力信用激励机制模式。

3.3.1 信誉度权重

虚拟实时电价是基于用户在每个时间段的用电量获得的，而最终激励电价是根据通过实施需求响应策略而评估的用户电力可信度来设定的。这种方法可以考虑用户实施用电计划的意愿，更符合实际。在此模型中作为电力激励的电力信用的公式包括三个部分，用户电力可信度的评估如式（3-4）和（3-5）所示。

$$Credit_i(h) = \phi \cdot [d_{oi}(h) - d_i(h)] \cdot [\sum_{i=1}^N d_i(h) - \bar{D}], \phi \in \{0,1\} \quad (3-4)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{24} \cdot \sum_{c=1}^N \sum_{h=1}^{24} d_{oc}(h) \quad (3-5)$$

式中， ϕ 代表用户是否参与可信度评估，设置为0或1，它分别指示用户何时不吸引信用和吸引信用。 $d_{oi}(h)$ 和 $d_i(h)$ 分别表示用户在时间段 h 内的初始功耗和执行相应需求响应策略后的功耗。 $d_{oi}(h)-d_i(h)$ 表示用户对应的需求响应策略做出的负载调整。 $\bar{D}$ 是指所有用户在时间段 t 内的用电量与初始平均用电量之差，用于衡量用户所需的用电负荷调整程度。

任何消费者 c 在时隙 h 获得的信用由消费者 c 和该方案在该时隙 h 的所有用户确定。在高峰期间，信用函数的 $\bar{D}$ 通常是正的，并且期望用户减少需求以获得正的信用或被授予信用。相反，在非高峰或低谷期间，信用函数的 $\bar{D}$ 通常是负的，如果用户继续减少需求，用户将获得负信用，这意味着用户在此时没有获得任何降低电价的激励，因此用户支付使用更高的电力的全部成本费用。在非高峰时段减少负荷对用户来说是一种抑制因素。如果用户增加负荷，电力的单位时间内的成本将会降低，因为负荷的增加将会吸引刺激因素，即在此时电力价格会降低。因此，需求响应计划中的用户在非高峰时段将会增加需求。

3.3.2 虚拟实时电价

虚拟实时电价与每期获得的电力信用与虚拟实时电价直接相关，最终有助于建立虚拟实时电价的电力信用激励机制模式。价格变化 $\Delta P_i(h)$ 定义如式（3-6）所示：

$$\Delta P_i(h) = \begin{cases} \frac{Credit_i(h)}{\sum_{i=1}^N |Credit_i(h)|} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N d_i(h) - \bar{D}}{\sum_{\tau_1}^N (\sum_{i=1}^N d_{oi}(h) - \bar{D})} \cdot \frac{\theta_1}{d_i(h)} & \sum_{i=1}^N d_{oi}(h) \geq \bar{D} \\ \frac{Credit_i(h)}{\sum_{i=1}^N |Credit_i(h)|} \cdot \frac{\bar{D} - \sum_{i=1}^N d_i(h)}{\sum_{\tau_2}^N (\bar{D} - \sum_{i=1}^N d_{oi}(h))} \cdot \frac{\theta_2}{d_i(h)} & \sum_{i=1}^N d_{oi}(h) < \bar{D} \end{cases} \quad (3-6)$$

式中， θ_1 和 θ_2 分别是用户在时间 t 在高峰和非高峰时段可用的总激励。信用 $Credit_i(h)$ 表示用户在时隙 h 获得的电力激励信用。 $d_{oc}(h)$ 和 $d_c(h)$ 表示初始负荷和最佳负荷， τ_1 和 τ_2 分别表示峰谷时隙的集合。符号 $\bar{D}$ 表示该方案中所有用户在每个时隙使用的平均功耗。如果该方案中所有用户的初始负荷大于 $\bar{D}$ ，则该时间段被定义为峰期，否则被认为是谷期。

根据这个信用模型，每个用户的最优价格是使用用户在每个时间段获得的信用来计算的，如式（3-7）所示：

$$\rho_i(h) = P_{tou}(h) - \Delta P_i(h) \quad (3-7)$$

式中， $\rho_i(h)$ 为优化的虚拟实时电价， $P_{tou}(h)$ 代表测试样本地区实施的初始分时电价， $\Delta P_i(h)$ 表示引入电力激励信贷后产生的价格变化。

3.4 微电网双层模型构建

3.4.1 双层优化理论

双层优化理论是一种优化方法，主要用于解决包含两个层次决策的问题。通常存在一个上层的优化问题和一个下层的优化问题，二者相互影响。上下层的决策相互依赖，上层的决策会影响到下层的问题求解，而下层的解决方案又会反过来影响到上层的决策。通过协调上下层之间的决策，使得整体系统的性能达到最优水平。因此，需要实现上下层之间的合作与协调，使得整体系统达到最优解。

双层优化理论被广泛应用于供应链优化、交通调度、能源管理、城市规划等领

域并提供了一种有效的方法来解决包含多个层次决策的问题，通过协调上下层之间的决策，实现整体系统的最优化。双层优化问题的数学如式（3-8）和（3-9）所示。

$$\begin{cases} \min F(x, y) \\ s.t. \quad G(x, y) \leq 0 \\ \quad \quad H(x, y) = 0 \end{cases} \quad (3-8)$$

$$\begin{cases} \min f(x, y) \\ s.t. \quad g(x, y) \leq 0 \\ \quad \quad h(x, y) = 0 \end{cases} \quad (3-9)$$

式中， $F(x,y)$ 和 $f(x,y)$ 分别表示上层目标函数和下层目标函数， $G(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 是上下层的约束条件， x 、 y 为优化问题的决策变量。

综上所述，本文基于双层优化理论建立了 MG 和用户端的双层优化模型，通过上下层模型之间的迭代优化实现系统最优运行的目的。

3.4.2 上层优化模型

（1）上层目标函数

上层模型以 MG 的经济效益和环境效益为优化目标。MG 由多个分布式发电机组和储能系统构成，并需要构建发电机组建立合理的模型。上层模型以 MG 的经济效益和环境效益为适应度函数进行优化，具体如式（3-10）所示：

$$\min F_{up} = F_1(t) + F_2(t) \quad (3-10)$$

式中， $F_1(t)$ 和 $F_2(t)$ 分别表示 MG 的运行成本和污染物排放目标函数。

1) MG 的经济效益目标函数，表示如式（3-11）所示：

$$F_1(t) = F_{WT}(t) + F_{PV}(t) + F_{DI}(t) + F_{FU}(t) + F_{BA}(t) + F_{GR}(t) \quad (3-11)$$

式中， $F_{WT}(t)$ 、 $F_{PV}(t)$ 、 $F_{DI}(t)$ 、 $F_{FU}(t)$ 、 $F_{BA}(t)$ 分别代表风力发电、光伏发电、柴油发电机、燃料电池和储蓄电池的运营成本和维护成本。 $F_{GR}(t)$ 表示出售给上游电网或从上游电网购买的电力成本。

2) MG 的污染排放目标函数，表示如式（3-12）所示：

$$F_2(t) = E_{DI}(t) + E_{FU}(t) + E_{GR}(t) \quad (3-12)$$

式中， $E_{DI}(t)$ 、 $E_{FU}(t)$ 、 $E_{GR}(t)$ 分别是柴油发电机、燃料电池和公共电网的排放量。

$$\begin{cases} E_{DI}(t) = (\eta_{CO_2} + \eta_{SO_2} + \eta_{NO_2}) \times P_{DI} \\ E_{FU}(t) = (\xi_{CO_2} + \xi_{SO_2} + \xi_{NO_2}) \times P_{FU} \\ E_{GR}(t) = (\varsigma_{CO_2} + \varsigma_{SO_2} + \varsigma_{NO_2}) \times P_{GR} \end{cases} \quad (3-13)$$

式中, η_{CO_2} 、 η_{SO_2} 、 η_{NO_2} 、 ξ_{CO_2} 、 ξ_{SO_2} 、 ξ_{NO_2} 、 ς_{CO_2} 、 ς_{SO_2} 、 ς_{NO_2} 表示每种污染物的排放因子。

(2) 上层约束条件

上层模型以 MG 的经济效益和环境效益为优化目标。MG 中的不同发电机组和储蓄电池需要在不同的技术约束下正常工作。

1) 供需平衡约束

分布式发电单元、储蓄电池和公共电网供应的总功率需要满足运行期间的负荷需求, 如式 (3-14) 所示:

$$P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{DI}(t) + P_{FU}(t) + P_{ESS}(t) + P_{GR}(t) = P_{Load}(t) \quad (3-14)$$

式中, $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 、 $P_{DI}(t)$ 、 $P_{FU}(t)$ 、 $P_{ESS}(t)$ 、 $P_{GR}(t)$ 分别表示 MG 中各个发电单元输出功率, $P_{Load}(t)$ 表示负荷的功率。

2) 输出功率限制

每个单元都必须在其功率范围内工作, 功率范围如式 (3-15) 所示:

$$P_{DGi\min}(t) \leq P_{DGi}(t) \leq P_{DGi\max}(t) \quad (3-15)$$

式中, $P_{DGi}(t)$ 表示每个输出单元的功率, $i \in \{PV, WT, DI, FU\}$ 。

3) 储蓄电池的充放电约束

储蓄电池的充电状态不应超过其容量限制。时间 t 的每小时充电状态通过以下公式计算^[61], 如式 (3-16) 所示:

$$SOC_t^{ESS} = SOC_{t-1}^{ESS} \cdot (1 - \eta^{ESS,d}) + \frac{P_t^{ESS,c}}{W^{ESS}} - \frac{P_t^{ESS,d}}{W^{ESS}} \quad (3-16)$$

式中, SOC_t^{ESS} 和 SOC_{t-1}^{ESS} 表示储蓄电池在时间 t 和 $t-1$ 的充电状态, $\eta^{ESS,d}$ 表示 ESS 的能量损失, W^{ESS} 是储蓄电池的装机容量。

为了服务于下一个周期, 能量释放状态应该在前一个周期结束时返回到初始值, 该初始值如式 (3-17) 所示:

$$SOC_{24}^{ESS} = SOC_D^{ESS} \quad (3-17)$$

储蓄电池的每个周期时间 t 的最大工作极限充电/放电率，表示为方程式分别如式 (3-18) 和 (3-19) 所示：

$$0 \leq P_t^{ESS,c} \leq X_t^{ESS} \gamma_{\max}^{ESS,c} W^{ESS} \quad X_t^{ESS} \in \{0,1\} \quad (3-18)$$

$$0 \leq P_t^{ESS,d} \leq Y_t^{ESS} \gamma_{\max}^{ESS,d} W^{ESS} \quad Y_t^{ESS} \in \{0,1\} \quad (3-19)$$

式中， $\gamma_{\max}^{ESS,c}$ 和 $\gamma_{\max}^{ESS,d}$ 分别为储蓄电池的最大充放电比。

储蓄电池不能同时充电和放电，如式 (3-20) 所示：

$$X_t^{ESS} + Y_t^{ESS} \leq 1 \quad (3-20)$$

式中 X 和 Y 分别表示在第 t 时间储蓄电池每小时的充电和放电标记。

4) 旋转储备约束

在无光照和无风速等极端情况下，需要为 MG 提供足够的旋转储备，以减少随机因素对系统的影响^[62]。因此，对于这种类型的随机模型，柴油发电机、燃料电池、公共电网和储蓄电池需要有助于平衡系统电力，这可以表示为机会约束，如式 (3-21) 所示：

$$P_r \left\{ \sum_{n=1}^{MG} R_{n,t} + P_{\text{Recs},t} \geq (P_{L,t} - P_{WT,t} - P_{PV,t}) - E(P_{EL,t}) \right\} \geq \alpha \quad \forall t \quad (3-21)$$

式中， α 表示置信水平， $E(P_{EL,t})$ 是 P_{EL} 的期望值， P_{EL} 表示等效负荷功率，

$$P_{EL} = P_L - P_{PV} - P_{WT}。$$

3.4.3 下层优化模型

(1) 下层目标函数

需求响应是一种典型的方法，可以根据电力用户的实际可转移负荷和经济效益实现负荷转移。下层以最小化用户的经济利益为目标进行优化。同时，下级模型根据用户的实际用电量制定新的用电计划并及时反馈给上级模型，然后 MG 更新电价并反馈给下级模型，重复迭代优化过程。下层模型以经济成本最小化为目标进行优化，如式 (3-22) 所示：

$$\min F_{down} = \rho_i(h) \sum_{t=1}^T (P_t^{shift} + P_t^{unshift}) \quad (3-22)$$

式中， P_t^{shift} 和 $P_t^{unshift}$ 分别是时移和非时移负载功率。 $\rho_i(h)$ 表示虚拟实时电价。

(2) 下层约束条件

1) 功率平衡约束

在需求响应之前和之后，负载总量是恒定的，对于可时移和不可时移负载，需要满足以下约束条件，如式（3-23）和（3-24）所示：

$$P_t^{shift} + P_t^{unshift} = P_t^{user} \quad \forall t \quad (3-23)$$

$$P_t^{shift} = \vartheta P_t^{user} \quad \forall t \quad (3-24)$$

式中， P_t^{user} 表示用户的总负荷，式中 ϑ （ $0 < \vartheta < 1$ ）表示时移负载与总负载的比率。

2) 可移动负荷的上下限约束

时移负载的输出功率需要满足以下条件，如式（3-25）所示：

$$P_{t,min}^{shift} \leq P_t^{shift} \leq P_{t,max}^{shift} \quad \forall t \quad (3-25)$$

3.5 本章小结

本章节对微电网能源管理系统进行了分析，对 MG 中用户的负荷进行了划分，分为可转移负荷、不可转移负荷和可中断的负荷。同时，分析了需求响应策略的类型，主要有基于激励的需求响应和基于价格的需求响应，然后构建了基于虚拟实时电价的需求响应，此方案优先对用户的用电习惯和用电计划的响应程度进行评估，然后计算出实时电价。虚拟实时电价引导的需求侧能源管理策略不仅可以有效改善净负荷特性、降低分布式风、光伏发电单元并网对配电网的冲击，还能在很大程度上减少系统的综合运行成本，为用户带来显著的经济效益。最后，利用虚拟实时电价及双层优化理论，建立了基于需求响应的微电网双层模型。

第4章 微电网多目标优化调度模型求解方法

群体智能算法是一种生物启发式方法，广泛应用于解决优化问题。智能算法为解决实际工程问题提供了新的思路和方法，在组合优化、任务调度、过程控制、工程预测、图像处理等领域取得了积极的进展。麻雀搜索算法（SSA）是一种新的基于麻雀觅食行为的种群智能优化方法，它模拟了麻雀的捕食与反捕食行为，进行局部解与全局解的搜索。由于传统的 SSA 容易陷入局部最优，迭代后期收敛速度较慢，收敛精度较低，因此，需要科学家们对其进行了多种改进，本文首先介绍了麻雀搜索算法的基本原理，分析了影响算法优化性能的因素，最后，利用基准函数对传统麻雀搜索算法进行改进，并与多目标粒子群优化算法（MOPSO）、多目标麻雀搜索算法（MOSSA）、改进多目标麻雀搜索算法（EMOSSA）进行测试、比较和性能分析。

4.1 群体智能算法求解最优问题

最优化问题在给定一组可能的解决方案的情况下，同时需要在数学问题上满足某些约束条件，在众多待求解中寻找使得目标函数值达到最大或最小的变量值，其中，这个目标函数为求解问题的适应度函数，而变量则是问题的决策变量。最优化问题在工程、经济学、物理学、计算机科学等领域中都有广泛的应用，最优化问题主要由三种因素构成，即决策变量、目标函数和约束条件。

（1）决策变量 x : $x=(x_1, x_2, \dots, x_d)^T \in R^n$ ，决策变量是实际问题中需要求解的变量。

（2）目标函数 F : 表示在求解过程中需要优化的表达式。

（3）约束条件 c_i : 表示在优化的同时需要满足的不等式条件。

最优化问题一般形式为：

$$\min F(x) \quad (4-1)$$

$$s.t. c_i \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (4-2)$$

$$c_i(x) = 0, i = m + 1, \dots, m + l \quad (4-3)$$

式中， $F(x)$ 表示最小化目标函数，约束条件表示为公式（4-2）和（4-3）。

4.2 麻雀搜索算法仿生原理

SSA 是一种元启发式的群智能优化算法，SSA 算法中个体由三种类型的麻雀组成：探索者、追随者和侦察者^[63]。探索者通常具有较高的适应值，负责为追随者提供觅食区域和方向^[64]。追随者跟随体能值最好的侦察者寻找食物来增加能量储备，增加体能值。它们会不断地追逐探索者，以获取更多的食物，为了确保它们的捕食效率。侦察者一旦发现有天敌，就会立刻报警，而全局的麻雀则会采取反捕食行动^[65]。模拟麻雀的上述行为，得到了一种新的函数优化算法。在 SSA 算法中，个体的适应值越大，则越有可能进行食物的选择。另外，因为探索者要为整个雀群搜寻食物，为其他的追随者提供指引，因此探索者能得到的猎食距离要远大于追随者。对追随者来说，在搜寻食物时，有几个追随者会一直盯着探索者。也可能是为了寻找新的猎物而与探索者们竞争，或者是为了寻找食物。处于边缘地带的雀鸟更易受食肉动物的威胁，因此经常改变自己的位置，寻找一个更加安全的地方。而居中的雀鸟，则会向附近的同类靠拢，以缩小威胁区域。

4.2.1 传统麻雀搜索算法

SSA 的数学模型可以通过上述的方式原理得出。为了使算法更加简洁，理想化了麻雀的如下行为，并制定了相应的规则^[66]。

(1) 探索者往往拥有更高的能量，它的任务就是在群体中找到一个蕴含丰富食物的区域，并且为其它的个体提供指引。在自适应进化算法中，根据个体的适合度来决定其储存能量的大小。

(2) 如果麻雀察觉到天敌的存在，它会马上发出警报。如果警报值超出了安全范围，探索者就会把它的同伴带到另一个安全的地方去寻找食物。

(3) 探索者与追随者的身份会不断改变。任何一只麻雀都有可能是探索者，如果有更好的食物资源，探索者和追随者将会互换身份，但其在种群中的占比保持不变。

(4) 在搜寻过程中，追踪者通常都能找到已经找到最佳食物的探索者。与此同时，一些追随者可能会继续跟踪探索者，以提高其捕猎的成功几率，并为获得更多的食物。

(5) 一旦感知到潜在的威胁或危险信号, 那些居于群体边缘的麻雀便会逃离到更安全的地带, 相反, 位于群体中心的麻雀则表现得更加灵活和自由, 它们不会固守一处固定的位置, 随机走动增加了群体成员之间的接触机会^[67]。

在 SSA 算法中, 通过模拟麻雀的觅食过程来获得优化问题的解。假设一个 d 维搜索空间中有 n 只麻雀, 第 i 只麻雀在 d 维搜索空间中的位置为 $X_i=[x_{i1}, x_{id}, x_{iD}]$, $i=1, 2, \dots, N$, 参数 x_{id} 代表第 i 只麻雀在 d 维中的位置^[68]。

探索者通常占总个体数的 10–20%, 探索者在种群中存在一定的能量储备, 且健康值越高的优势种群, 其寻优能力就越强。在无捕食者时, 其探索范围较大, 以获取更多的食物, 位置更新公式如式 (4-4) 所示:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \times \exp(-\frac{1}{\alpha \times it}) & R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + QL & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (4-4)$$

式中, t 代表当前次数。参数 α 是均匀分布于 (0,1) 的随机数。 Q 服从标准正态分布。而 L 是一个尺寸为 $1 \times d$ 的全 1 矩阵。 R_2 取值范围在 [0,1], ST 的取值范围在 [0.5,1] 它们分别代表警告值和安全值。当 R_2 小于 ST 时, 表明种群未发现捕食者或其他危险存在, 搜索环境是安全的, 发现者可以广泛搜索, 引导种群获得更高的适合度。

当 R_2 不小于 ST 时, 麻雀探测到捕食者, 立即释放危险信号。种群立即执行反捕食行为, 调整搜索策略并向安全区域靠拢^[69]。除了探索者, 其余麻雀都是追随者, 按照公式 (4-5) 更新位置。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \times \exp(\frac{X_{worst}^t - X_{i,j}^t}{\alpha \times it}) & i > \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| A^+ L & i \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (4-5)$$

式中, n 为麻雀种群数量, X_{worst}^t 表示种群中适应度最差的个体位置, X_p^{t+1} 表示算法在 $t+1$ 次迭代时的最有位置。 A 表示一个 $i \times j$ 的矩阵, 并且每个元素随机赋值 1 或 -1。并且 $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。

用于侦察和预警的麻雀位置更新如式 (4-6) 所示:

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{best}^t + \beta |X_{i,j}^t - X_{best}^t| & f_i > f_g \\ X_p^t + K \frac{|X_{i,j}^t - X_{best}^t|}{(f_i - f_w) + \varepsilon} & f_i = f_g \end{cases} \quad (4-6)$$

式中，参数 β 是步长控制参数， f_i 是第 i 只麻雀的适应值。参数 f_g 和 f_w 分别是当前麻雀种群的最佳和最差适应值。当侦察者意识到了捕食者的威胁，为了避免被捕食者攻击，它及时接近其他麻雀以调整搜索策略^[70]。

4.2.2 麻雀搜索算法的不足

由于传统的雀鸟搜索算法所有探索者和追随者的位置都是相同的，传统的麻雀搜索算法中的各个个体更新无法针对每一个个体的特点做出最优的搜索，因此很难提高搜索速度^[71]。同时，这些食物的位置也是随机的，无法提前得知，但所有的麻雀都会分散地寻找食物。在这个过程中，探索者们是以精英为中心的，而追随者们依附于探索者，当一只麻雀找到了一个有足够食物的地方，其他的追随者就会在这个地方游荡，而当追随者们集中到某个局部区域，很难跳出局部区域。算法未能充分探索搜索空间，而是在找到一个局部最优解后就停止局部区域外空间的搜索，即这样算法就陷入局部最优，从而导致无法寻找到求解问题的全局最优解。局部最优解通常对初始解非常敏感，如果算法在不同的初始条件下收敛到不同的局部最优解，那么其鲁棒性就会变差。与此同时，算法在面对特定类型的问题时无法有效求解问题，尤其对那些复杂、高维或存在大量局部最优解的问题求解时。在搜索空间非常大或复杂的情况下，难以跳出当前局部最优解，可能导致算法收敛速度过慢。

4.3 改进型多目标麻雀搜索算法

传统的麻雀算法采用单一的定位更新策略，难以根据每个个体的特征，选取最合适的搜索模式，从而限制了搜索速度的提升。但是，随着时间的推移，个人的位置会不断地聚集，使得群体的多样性很难得到改善，且易陷入局部极小的困境。基于以上的分析，本文给出了一种改进的麻雀搜索算法：

(1) 正弦波的搜索策略：正弦搜索策略的引入可以增加最优解的权重，提高算法的收敛速率，并在全局与局部优化之间取得一个均衡。

(2) 生物聚集程度的概念：在聚类程度高的情况下，利用柯西变异增强群体的

多样性，使其避免陷入局部最优。

4.3.1 正弦扰动策略

由于该算法只将探索者和追随者分成两类，因此，不管个体的位置是好是坏，它们都是以同样的方式更新，而不能针对自己的位置制定相应的更新策略。为了解决这个问题，本文引入了一种基于正弦搜索的方法，该方法在每个个体的不同位置上设置不同的权值，可以使原种群中具有良好适应度的个体向原始位置靠近，从而提高了算法的局部寻优能力。原群体中存在的适应度值差的个体，可以在更远的地方继续探索，从而提高了算法的全局寻优能力。

在 SSA 迭代开始时，探索者在解空间进行搜索，但如式（4-4）所示，当 $R_2 < ST$ 时，探索者的每个维度都呈指数下降，导致种群多样性下降，容易陷入局部最优，造成搜索精度差的问题。针对这一问题，本文引入了正弦扰动策略。在麻雀搜索算法中引入正弦扰动策略来更新探索者的位置，从而提高探索者的全局搜索能力，使得原种群中适应度值较好的个体在原位置的不同区域间受到扰动，提高了麻雀种群间的信息交流。正弦扰动权重如式（4-7）所示。

$$\omega = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \left(\sin\left(\left(\frac{f_i^t - f_{best}^t}{f_{worst}^t - f_{best}^t} + 1\right) \frac{\pi}{2} + \pi\right) + 1 \right) \quad (4-7)$$

式中， $\omega_{\min}$ 、 $\omega_{\max}$ 分别表示权重变化范围的最小值和最大值。 f_i^t 表示麻雀种群迭代到第 t 次时，麻雀种群中第 i 个麻雀的适应度值。 f_{best}^t 和 f_{worst}^t 分别表示第 t 次迭代后种群的最优适应度值和最差适应度值。

通过正弦扰动策略改进的探索者和追随者方程如式（4-8）和（4-9）所示：

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \times \exp\left(-\frac{1}{\alpha \times it}\right) & R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + \omega QL & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (4-8)$$

式中， t 表示当前迭代次数， $X_{i,j}$ 表示第 i 个麻雀在第 j 维中的位置信息， R_2 表示预警值， ST 表示安全值。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \times \exp\left(\frac{X_{worst}^t - X_{i,j}^t}{\alpha \times it}\right) & i > \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + \omega |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| A^+ L & i \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (4-9)$$

式中, X_P 表示探索者最优位置, X_{worst} 表示麻雀种群中追随者最差位置。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{best}^t + \omega\beta |X_{i,j}^t - X_{best}^t| & f_i > f_g \\ X_p^t + \omega K \frac{|X_{i,j}^t - X_{best}^t|}{(f_i - f_w) + \varepsilon} & f_i = f_g \end{cases} \quad (4-10)$$

式中, X_{best}^t 表示全局最优个体的位置, f_i 表示当前麻雀个体的适应度值, f_g 表示最佳目标函数, f_w 表示最差目标函数。

随着正弦扰动策略的引入, 算法搜索早期的权重因子提高了探索者探索未知区域的能力, 从而使算法在更大的范围内依然具备搜索能力。在算法优化后期, 权重因子减小, 算法的局部搜索能力增强。同时, 该方法还具有避免陷入局部极值的可能, 从而加快了收敛速度。

4.3.2 多样性变异处理

在 SSA 的迭代过程中, 麻雀个体的快速迭代容易导致陷入局部最优解的问题。为了解决这个问题, 本文采用自适应柯西变异策略并引入了生物学中的密度指标 A 。

$$A = \frac{\delta - \bar{x}}{\bar{x}^2} \quad (4-11)$$

式中, δ 表示种群的适应度方差, $\bar{x}$ 表示适应度的平均值。当 A 趋近于 0 时, 种群容易展现出随机状态, 为了防止种群搜索初期出现这种情况本文采用柯西变异对种群进行处理。

$$X = X_{best} \cdot [1 + N_t \cdot \text{Cauchy}(0, 0.5)] \quad (4-12)$$

$$N_t = \frac{T_{\max} - t}{T_{\max}} \quad (4-13)$$

式中, X 是变异后个体在最优位置的位置, N_t 是变步步长, $\text{Cauchy}(0, 0.5)$ 是由 Cauchy 分布函数产生的随机数, X_{best}^t 是具有当前最优适应度的个体。

从公式 (4-13) 中可以看出, 随着迭代次数 t 的增加, 突变步长 N_t 自适应地减小。在迭代初期, 变步步长相对较大, 算法容易跳出局部最优, 在迭代后期, 变步步长较小, 加快了算法的收敛速度。它可以平衡麻雀最优位置的探索和发展, 使算法跳出局部最优。

4.4 外部档案更新机制

外部档案是一种简单的外存储器空间, 用来存放每一次迭代所得到的非支配解。

该算法在运行时，通过存储库中现有方案的 Pareto 支配关系，对该算法产生的非支配解和存储库中现有的解决方案进行对比，从而使外部档案持续更新。在此过程中，有三个条件。

(1) 当外部存储库中存在一种或多种解支配新的可行解时，则新的可行解将不被加入外部存储库。

(2) 当新产生的可行解控制了外部档案中的一种或多种解时，将会用新的支配解来更新外部档案中的其他解。

(3) 新生成的解集与外部档案中的所有解并不相互影响，并将其存储在外部档案中。

在实际的运行过程中，可能非支配解的数目不断增长，外部存档文件中的非支配解数目也将不断增长，为此，需要对外部存档进行最大内存限制，以保证外部存档中非支配解的数目不会超出其上限。同时，为了防止在外部档案中存在多个相似的非支配解的情况发生，保持非支配解集的多样性，采用了 NSGA-II 中根据解的拥挤度淘汰相似个体的方法^[72]，具体描述如下。

(1) 计算外部档案 $F(x)=[f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)]$ 中每个个体的目标函数，找出每个目标函数 $f_{min}(x)$ 和 $f_{max}(x)$ 的极值。

(2) 计算群体中每个个体的拥挤距离，如式 (4-14) 所示：

$$D_c(j) = \sum_{i=1}^N \frac{f_i(j+1) - f_i(j-1)}{f_{i\max} - f_{i\min}} \quad (4-14)$$

式中， $f_i(j-1)$ 和 $f_i(j+1)$ 是第 i 个目标函数中第 j 个个体的两个相邻个体的适应值。

(4) 所有可能的解集都具有一定的密度性质。在存储外存储量超出给定存储容量时，为保证存储空间外存储个体的上限以及存储空间中存在的非劣解的多样性，对存储空间中的高密度存储空间进行筛选，从中选出密度较高的个体并将其余的个体剔除外部档案。

4.5 个体的非支配排序

单目标麻雀搜索算法中适应度函数值的评估方法不适用于多目标优化的情况。多目标优化问题有两个或两个以上的目标需要优化，不能用单一指标直接评价。因

此，非支配排序用于对群体进行排序，以确定多目标麻雀搜索算法中的适应度函数值。

在排序过程中，种群中的每个个体有两个参数，即 $N(i)$ 和 $S(i)$ ，其中 $N(i)$ 是种群中支配第 i 个个体的解的个体数， $S(i)$ 是其解被第 i 个个体支配的个体的集合。根据帕累托支配关系，个体受支配越少，个体越好。非支配排序过程的步骤如下：

- (1) 计算群体中每个个体的两个参数 $N(i)$ 和 $S(i)$ 。
- (2) 将 $N(i)=0$ 的所有个体存入当前集合 $F(1)$ 。
- (3) 假设当前集合 $F(1)$ 中的第 j 个个体，考察由第 j 个个体支配的个体 $S(j)$ ，集合 $S(j)$ 中第 k 个个体的解个体数减 1。
- (4) 如果 $N(k)-1=0$ ，则个体被放入另一个集合 h ，最后， $F(1)$ 被取为非支配个体集合的第一级，集合中的个体具有相同的非支配秩 I （秩）。然后，在集合 H 上继续上述分类操作，并给出相应的非支配顺序 I （秩+1）和 I （秩+2），直到群体中的所有个体被重新排序和排序。

改进的 EMOSSA 的优化过程如下所示。

步骤一：初始化种群数量 N ，维数 D ，设置外部档案的最大大小 M ，最大迭代次数 T ，发现者的初始比例 w ，警告麻雀数量 SD ，警告值 R_2 ，初始解的非支配排序，更新外部档案。

步骤二：对种群个体进行非支配排序，确定最佳个体和最差个体。

步骤三：根据排名结果确定探索者和追随者。

步骤四：更新探索者的位置，确定变异概率，对部分探索者进行变异操作。

步骤五：更新探索者的位置。

步骤六：更新观察者的位置。

步骤七：获得更新种群的非支配解后，计算适应值。根据上述策略，计算拥挤值，将非支配解添加到外部档案中，并删除外部档案中的一些相似的支配解。

步骤八：如果达到最大迭代次数或满足终止条件，则获得帕累托最优解。如果条件不满足，则再次执行步骤二至步骤七，直到满足结束条件。

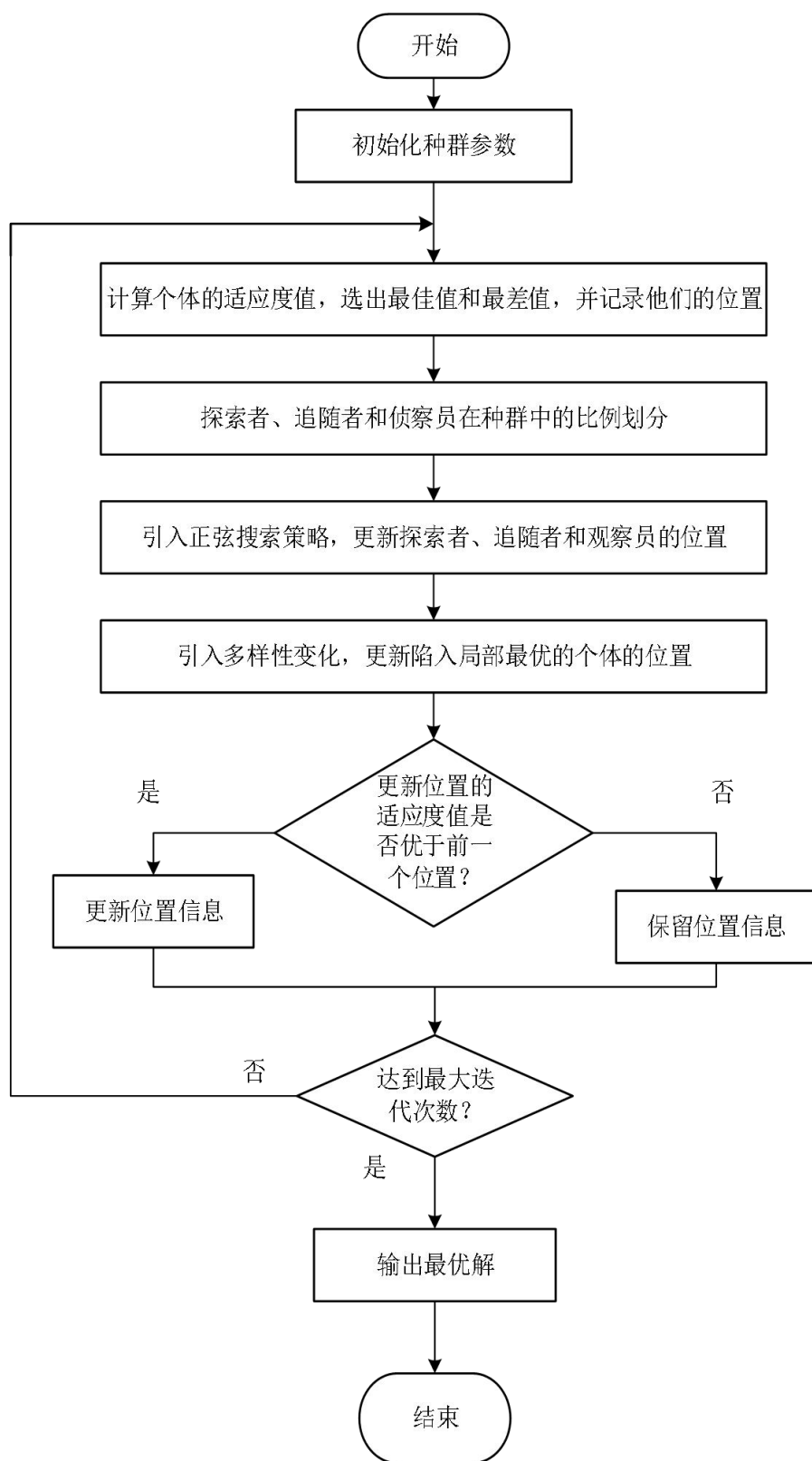


图 4-1 EMOSSA 算法逻辑框图

4.6 测试结果对比与分析

为了对改进的 EMOSSA 算法进行评估, 本文使用了表 4-1 中所示的四个多目标测试基准函数对 EMOSSA 的优化性能进行了测试, 即 ZDT1、ZDT2、ZDT3 和 ZDT4 (具有线性波前的 ZDT1) [73], 为了说明改进的 EMOSSA 算法的优越性, 采用两个典型的优化算法 MOPSO 和 MOSSA 对四个基准算法进行了测试。

表 4-1 测试基准函数

ZDT1	Type	ZDT3	Type
$f_1(x) = x_1$ $f_2(x) = g(x)[1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g(x)}}]$ where $g(x) = 1 + 9 \sum_{i=2}^n x_i / (n-1)$ $0 \leq x_i \leq 1$ and $1 \leq i \leq 30$	Convex	$f_1(x) = x_1$ $f_2(x) = g(x)[1 - \sqrt{\frac{f_1(x)}{g(x)}} - (\frac{f_1(x)}{g(x)}) \sin(10 \pi f_1(x))]$ where $g(x) = 1 + 9 \sum_{i=2}^n x_i / (n-1)$ $0 \leq x_i \leq 1$ and $1 \leq i \leq 30$	Convex and discontinuity
ZDT2	Type	ZDT4	Type
$f_1(x) = x_1$ $f_2(x) = g(x)[1 - (\frac{f_1(x)}{g(x)})^2]$ where $g(x) = 1 + 9 \sum_{i=2}^n x_i / (n-1)$ $0 \leq x_i \leq 1$ and $1 \leq i \leq 30$	Non-convex	$f_1(x) = x_1$ $f_2(x) = g(x)[1 - \frac{f_1(x)}{g(x)}]$ where $g(x) = 1 + 9 \sum_{i=2}^n x_i / (n-1)$ $0 \leq x_i \leq 1$ and $1 \leq i \leq 30$	Non-convex

模拟实验被独立执行 30 次, 并且反世代距离评价指标 (IGD) 如式 (4-15) 所示, 用于评估由多目标优化算法 [74] 获得的 Pareto 前沿解集的收敛性和多样性。

$$IGD = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (4-15)$$

式中, N 表示帕累托最优解的总量。 d_i 表示由元启发式算法获得的最优解和真实最优解之间的最小欧几里德距离。

优化结果如图 4-2 和表 4-2 所示, 在图 4-2 中, EMOSSA 的 IGD 值比 MOSSA 和 MOPSO 小, 说明 EMOSSA 得到的解更接近帕累托前沿。可以得出结论, EMOSSA 比 MOSSA 和 MOPSO 具有更好的收敛性。换句话说, EMOSSA 花费更少的时间来获得相同的收敛。结果表明, 所引入的正弦搜索策略、多样性变化方法和外部文档更新机制是有效的, 显著提高了 EMOSSA 的准确性和搜索能力。综上所述, 可以认为 EMOSSA 具有优秀的解决方案性能。因此, EMOSSA 可用于求解的多目

标优化调度模型。

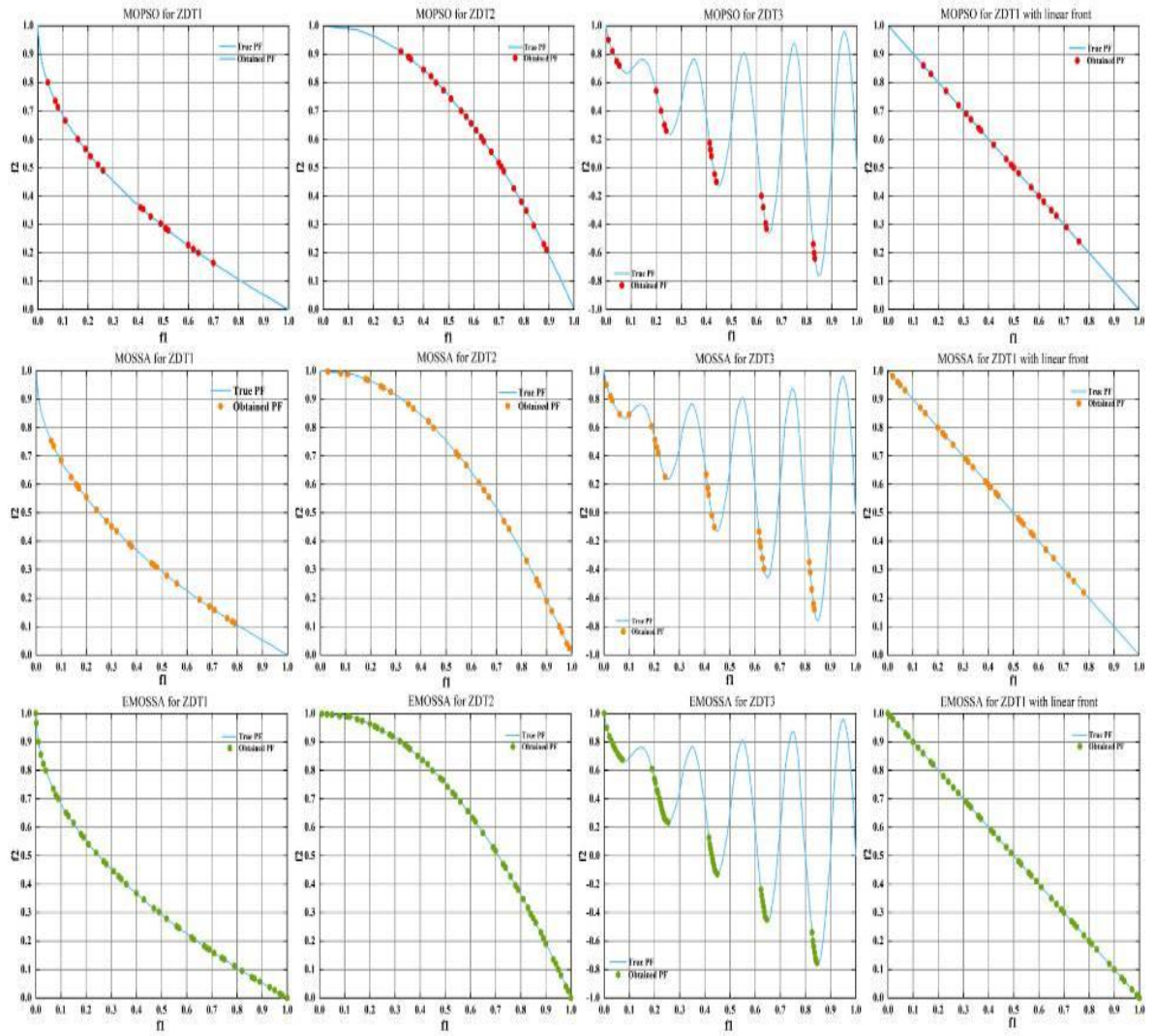


图 4-2 MOPSO、MOSSA 和 EMOSSA 对测试功能的最优解决方案

表 4-2 对 IGD 值进行多目标优化算法的测试函数

算法	Min	Mean	Max	Std.
ZDT1				
MOPSO	0.001678	0.003202	0.01685	0.002023
MOSSA	0.002173	0.003381	0.01782	0.002203
EMOSSA	0.000931	0.001115	0.001538	0.000141
ZDT2				
MOPSO	0.001755	0.003235	0.007633	0.00127
MOSSA	0.002237	0.004672	0.03258	0.00617
EMOSSA	0.000732	0.001366	0.004258	0.0004957
ZDT3				
MOPSO	0.02477	0.02511	0.02632	0.000519
MOSSA	0.02507	0.02627	0.02547	0.000611
EMOSSA	0.02311	0.02458	0.02517	0.000234
ZDT4				
MOPSO	0.001854	0.003724	0.007523	0.001187
MOSSA	0.002237	0.006924	0.02878	0.004974
EMOSSA	0.0008893	0.001579	0.003766	0.0005107

4.7 多目标折衷解的确定

模糊集理论（FST）是一种典型的多属性决策方法，用于计算 Pareto 最优前沿（POF）^[75]的模糊隶属度，并从 POF 集中确定最优折衷解，使 POF 的属性量化，避免决策者根据个人直觉和经验知识确定最优折衷解。隶属函数主要有双曲线、反双曲线、幂指数和分段线性函数。在这些隶属函数中，可以为决策者提供直观隶属度的分段线性函数应用最为广泛。因此，分段线性函数也被用于计算帕累托最优解和目标函数之间的模糊关系，其如式（4-16）所示：

$$\mu_n = \begin{cases} 1 & f_n \leq f_{n\min} \\ \frac{f_{n\max} - f_n}{f_{n\max} - f_{n\min}} & f_{n\min} \leq f_n \leq f_{n\max} \\ 0 & f_n \geq f_{n\max} \end{cases} \quad (4-16)$$

式中， f_n 、 $f_{n\max}$ 和 $f_{n\min}$ 分别代表第 n 个目标函数，即第 n 个目标函数的最大值和最小值。

从上面的公式（4-16）模糊隶属度 μ_n 表示管理者对调度目标函数的满意度，其值在（0,1）范围内。模糊隶属度可以解释为图 4-3， $\mu_n=0$ 表示满意度为 0，即完全不满意。 $\mu_n=1$ 表示满意度为 1，即完全满意。

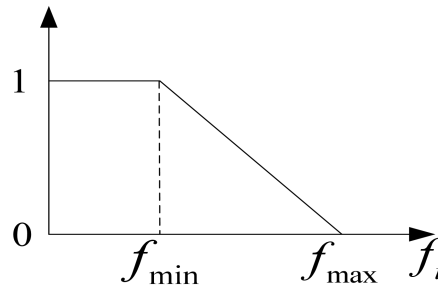


图 4-3 隶属度分布的分段线性函数

应用标准化满意度 μ^k 用于描述调度目标函数与期望值之间的差异，如式（4-17）所示：

$$\mu^k = \frac{\sum_{n=1}^N \mu_n^k}{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \mu_n^k} \quad (4-17)$$

式中， K 代表帕累托最优解的数目，最大标准化满意度值可被确定为最优折衷

解。

上层模型的解如图 4-4 所示，应用 EMOSSA 对 MG 调度模型进行优化，得到 Pareto 最优前沿解集，再用模糊理论集确定折衷解。

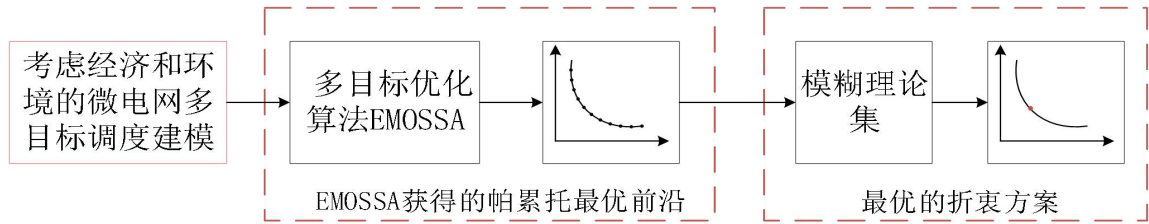


图 4-4 微电网多目标优化调度的求解

4.8 本章小结

本章首先分析了单目标优化 SSA 算法和多目标优化 MOSSA 算法的工作原理，以及算法存在的不足。针对不足将正弦扰动、多样性变异、外部档案更新机制和个体非支配排序策略引入到传统多目标优化麻雀搜索算法中，获得增强型多目标优化麻雀搜索算法。最后，利用四个多目标测试基准函数（ZDT1、ZDT2、ZDT3 和 ZDT4）验证 EMOSSA 算法的有效性；与多目标粒子群算法和多目标麻雀搜索算法相比较，EMOSSA 算法优化性能更优。

第 5 章 基于 EMOSSA 的微电网优化调度

通过分析 MG 与用户之间多目标搜索最优解问题的特点，建立了包含可再生能源和需求响应策略的微电网双层模型。上层模型以经济效益和环境效益为优化目标，下层模型以用户经济效益为优化目标，并利用增强型的麻雀搜索算法对上下层模型进行求解。双层模型之间通过上层模型向下层模型提供虚拟实时电价，下层用户侧将用电计划的反馈给上层模型，并相互迭代更新，最终获得符合上下层模型优化目标的最优解。

5.1 最优调度方案确立

为了从通过求解所提出的双层模型而获得的所有解决方案中确定最终调度方案，上层模型和下层模型的联合优化的目标函数如下：

$$F^{JO} = \min \sqrt{(F_1^{JO} - F_1^{IO})^2 + (F_2^{JO} - F_2^{IO})^2} \quad (5-1)$$

式中，上标 IO 表示不考虑需求响应的独立优化，上标 JO 表示考虑需求响应的联合优化； F_1^{JO} 是同时考虑上下层模型的上层模型目标最优情况； F_1^{IO} 是仅考虑上层模型的上层模型目标最优情况； F_2^{JO} 是同时考虑上层模型和下层模型的联合优化结果； F_2^{IO} 是仅考虑用户利益的用户成本。

公式（5-1）是用于得出最终调度方案的联合优化公式。通过上层和下层的交替迭代，可以获得多个调度方案以及每个方案的 F_1^{JO} 、 F_1^{IO} 、 F_2^{JO} 和 F_2^{IO} 。根据公式（5-1）， F^{JO} 最小时微电网多目标优化调度获得最优解。

5.2 微电网双层模型求解步骤

受文献[76]中双层规划求解方法的启发，本文构建了 MG 和用户的双层模型，利用双层迭代策略实现上下层模型的信息交换，上层模型以 MG 运营的成本和环境效益为目标，下层模型以用户成本为目标。优化后从上层模型计算虚拟电价信息传递给下层模型。如果下层模型无法获得最优解，则将用电计划返回到上层优化模型，上层模型将重新计算并生成新的虚拟实时电价。最终获得可行的上下层模型的最优

解。基于双层模型和需求响应的 MG 多目标优化调度模型如图 5-1 所示，MG 多目标优化调度模型求解过程分为：

- 步骤一：构建上下层优化调度模型，
- 步骤二：使用序列运算理论处理可再生能源的概率模型，
- 步骤三：预设分时电价，根据需求响应得出负荷转移结果，
- 步骤四：计算虚拟实时电价，
- 步骤五：输入上下层模型约束条件，
- 步骤六：为调度模型设置运行约束、负载和电价，
- 步骤七：使用 EMOSSA 求解 MG 的上层多目标优化调度模型，
- 步骤八：检查是否满足终极条件。如果找到，继续下一步；否则，更新负载和置信水平，然后转到步骤五，
- 步骤九：获得多目标优化解集，即 Pareto 前沿解集，
- 步骤十：构建低层模型以确定负载需求，
- 步骤十一：使用 EMOSSA 算法求解下层模型，
- 步骤十二：获取耗电量并制定电力需求计划，
- 步骤十三：使用模糊理论集从 Pareto 前沿解集中确定最佳折衷解，
- 步骤十四：产生最终的调度方案。

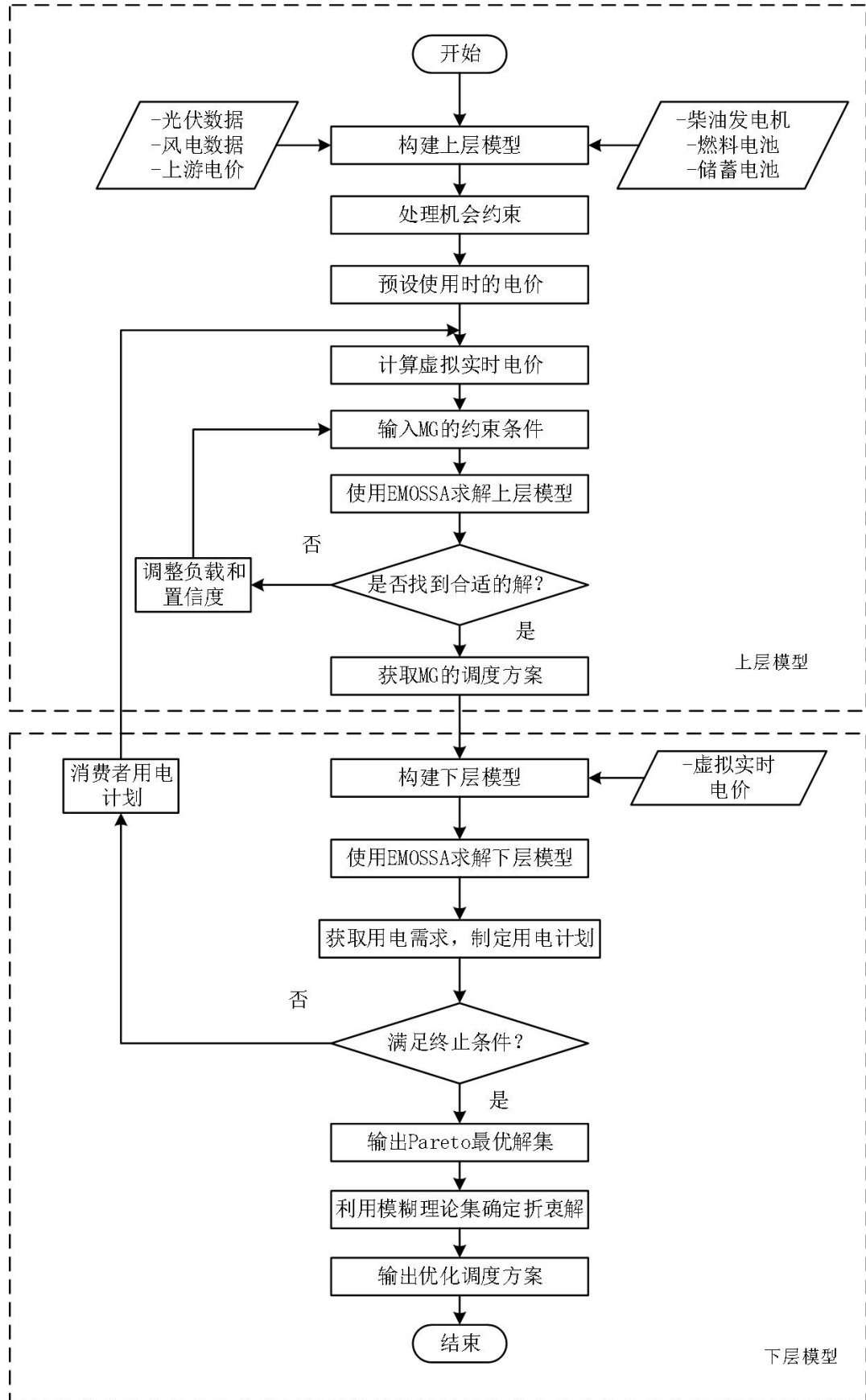


图 5-1 基于双层模型和需求响应的微电网优化调度

5.3 算例分析

设计了六种典型的 MG 运行场景，即场景 I~VI，以评估考虑不同运行约束的 MG 多目标优化调度方法。在场景 I 和场景 II 中，分别只考虑单一运行成本和单一污染排放作为目标函数。将运行成本和污染排放作为多目标优化函数，设计改进的 EMOSSA 算法求解多目标优化最优解，并利用模糊理论集方法获得场景 I 下的折中解。除了需求响应之外，场景 IV、V 和 VI 的运行条件分别与运行场景 I、II 和 III 相同。

5.3.1 微电网系统参数设置

风电、光伏和负荷的值由 HOMER soft 生成，如图 5-2 所示，作为输入变量用于模拟分析和验证所提出的优化调度模型。首先，基于预测值和优化目标获得日前调度计划，然后将其应用于实时情况进行验证。

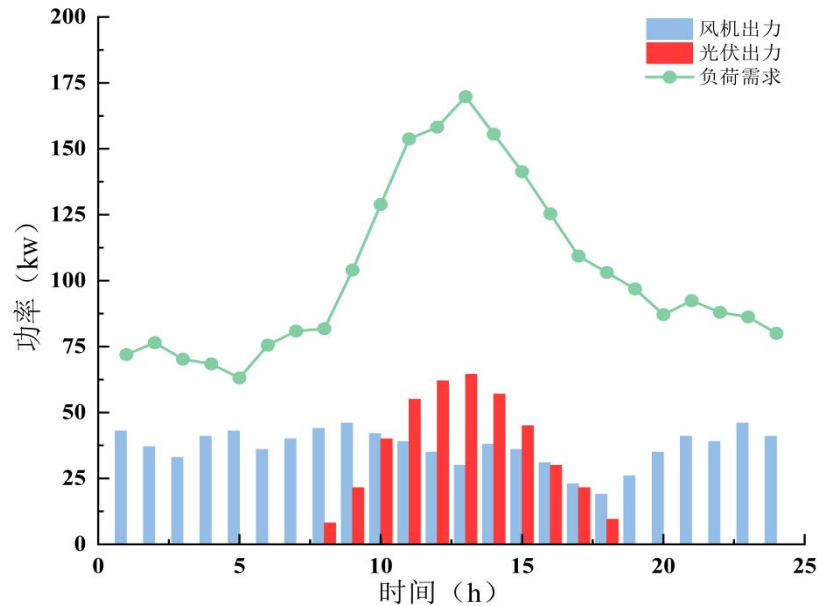


图 5-2 风电、光伏和负荷功率图

调度预测步骤为一小时。切入风速 v_i 为 4m/s，额定风速 v_r 为 12m/s，切出风速 v_o 为 20m/s，风机额定功率为 50kW。光伏阵列的主要参数为：光伏发电的发电效率 η_{pv} 为 12%。柴油发电机的最小输出功率和额定功率分别为 10kW 和 80kW，升降速分别为 30kW/h。燃料电池的最小输出功率和额定功率分别为 5kW 和 50kW，升降速分别为 20kW/h。储能系统的最大容量为 160kW/h，最小容量为 32kW/h，最大充放电功率均为 50kW，使用范围为 20%~90%。三种污染物氮氧化物、二氧化碳和二

氧化硫的处罚系数分别为 0.25 元/千克、0.00125 元/千克和 0.125 元/千克。其他参数根据参考文献^[77,78]设置。

5.3.2 需求响应的微电网优化调度模型研究

(1) 实施需求响应前的运行结果

在场景 I 中，仅在不同的运行约束条件下优化 MG 运行成本，并且最小运行成本被采用作为 MG 的最佳能量设定点。场景 I 的 MG 最佳能源调度如图 5-3 所示。从图 5-3 中可以看出，运营成本为 1973.5 元人民币，而污染物排放量为 976.4 千克。此外，MG 在不同的调度时间从公共电网购买电力或向公共电网供电。同样，储蓄电池充电或放电。从上图可以看出，在负荷低谷期间，MG 向公共电网购买电力，储蓄电池充电，而在负荷高峰期期间，MG 向电力系统供电，储蓄电池始终放电，从而可以提高系统经济效益。

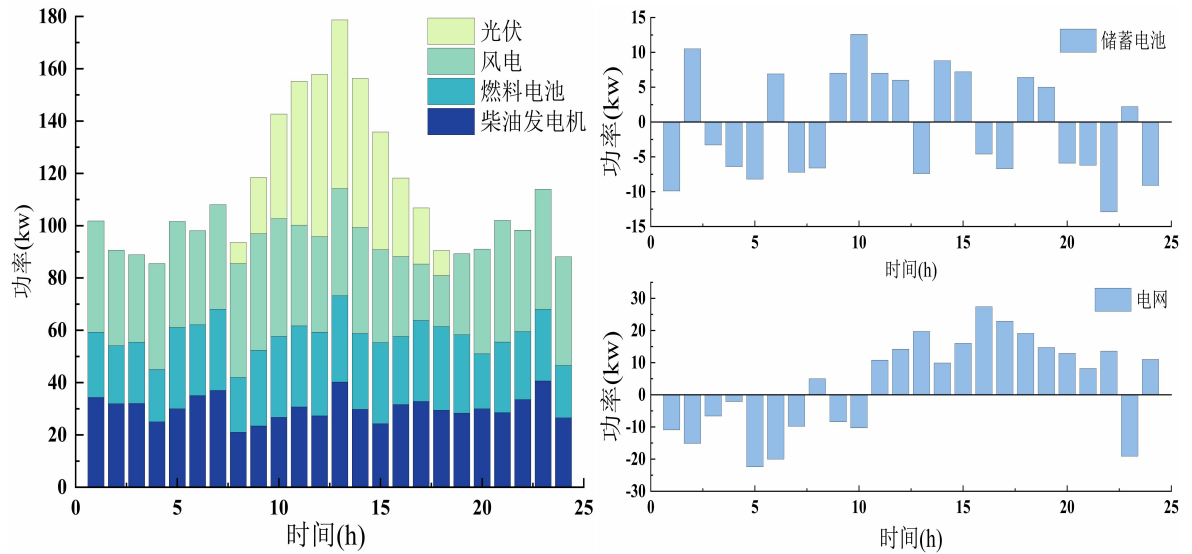


图 5-3 场景 I 下微电网的最优能源调度（运营成本：1973.5RMB，污染排放量：976.4kg）

在场景 II 中，除了优化目标函数不同之外，其他运行条件和约束条件与场景 I 相同。场景 II 的微电网能源优化调度结果如图 5-4 所示。仅使用污染物排放目标作为评估标准来选择 MG 中不同分布式电源和储蓄电池的最佳能源设置点。因此，总污染物排放量为 780.3 千克，而运行成本为 2145.8 元人民币。

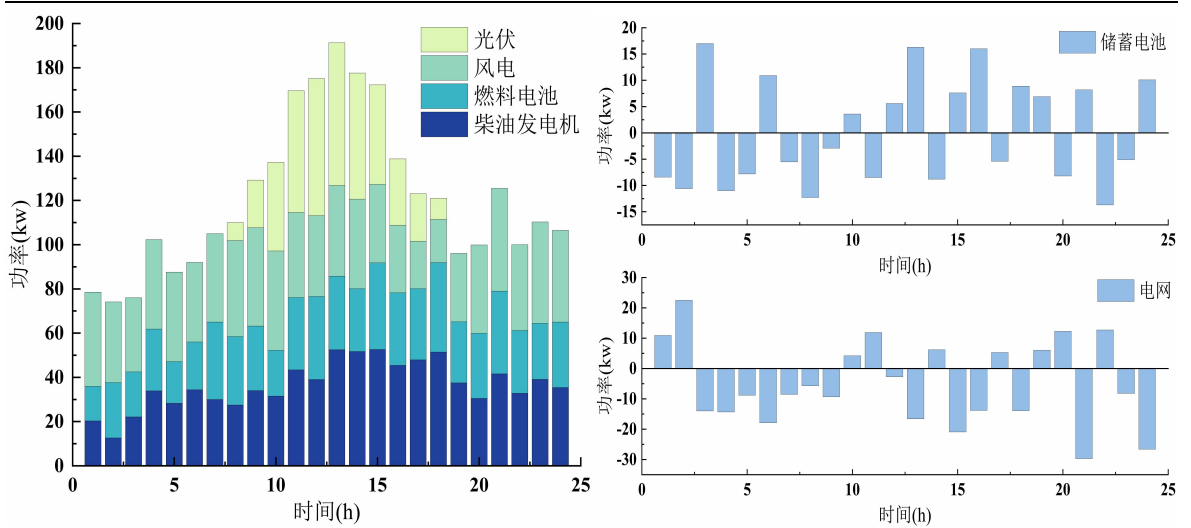


图 5-4 场景 II 下微电网的最优能源调度（运行成本：2145.8RMB，污染排放量：780.3kg）

在场景 III 中，除了优化目标函数不同之外，其他运行条件和约束条件与场景 I 相同。运行成本和污染物排放均被用作优化 MG 调度模型的目标函数。EMOSSA 算法得到的多目标优化解如图 5-5 所示。

如图 5-5 所示，仅考虑最佳运行成本时，污染排放最高。随着污染排放的减少，所需的运行成本不断增加。最后，仅考虑最优污染排放时，运行成本最高。因此，运行成本和污染物排放是两个相互冲突的变量通过多目标优化调度实现污染物排放量和经济成本同时最优，MG 系统可以更好地处理污染物排放问题并减少实时运行中的经济损失，通过模糊理论集从 Pareto 前沿解集获得的最佳折衷解如图 5-5 所示。

如图 5-6 所示，污染物排放总量为 849.9 千克，运行成本为 2049.1 元人民币。

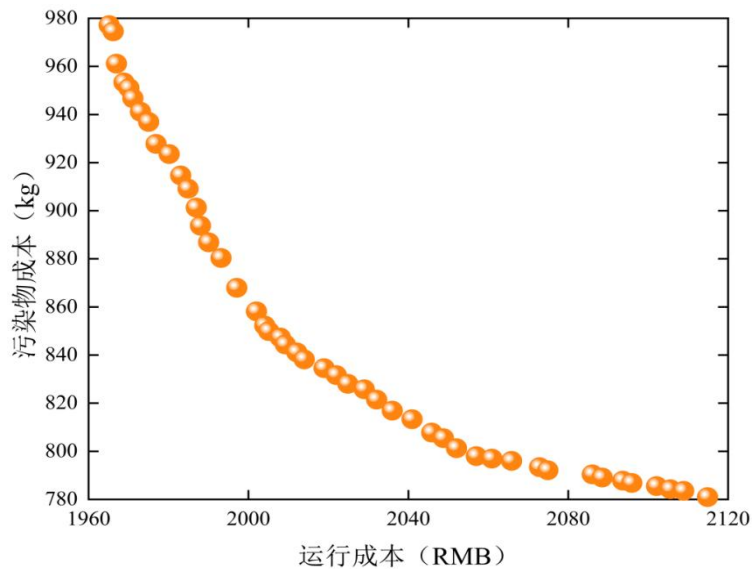


图 5-5 EMOSSA 获得的帕累托前沿解集

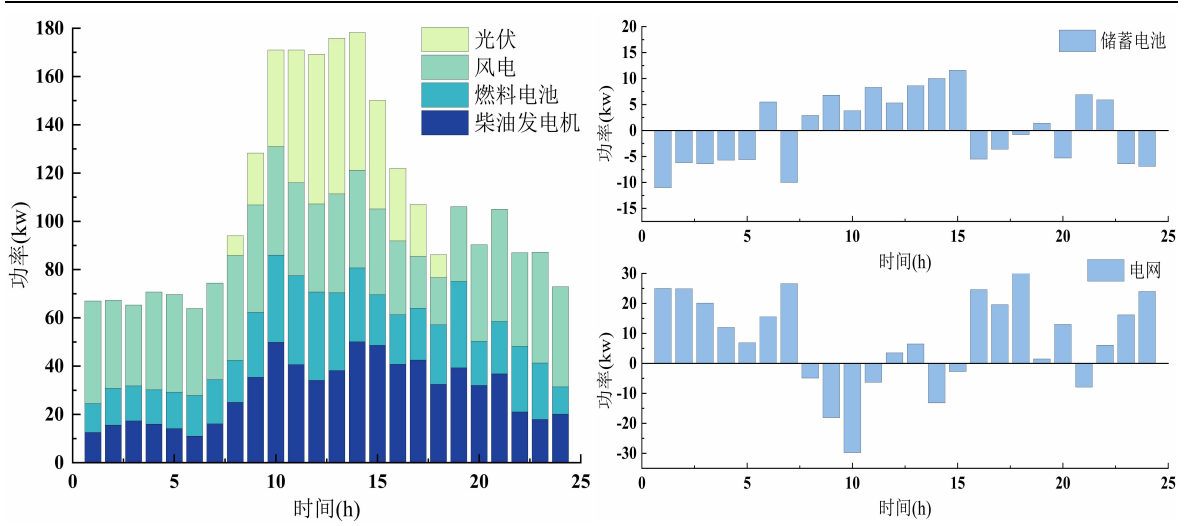


图 5-6 场景 III 的最佳折衷方案（运行成本：2049.1RMB，污染排放量：849.9kg）

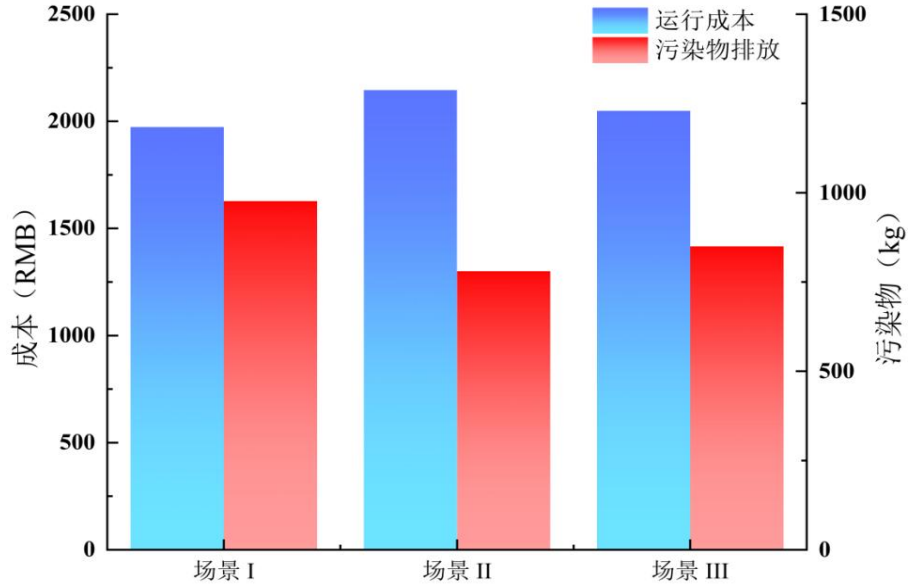


图 5-7 不同运营方案的污染排放和运营成本

不同运行场景的优化结果获得污染排放量和经济成本如图 5-7 所示。在场景 I 中，仅以运营成本为优化目标，因此，MG 的运行成本最低，但污染物排放量最大；场景 II 与场景 I 相反，仅以污染物排放量为优化目标，因此，MG 的污染物排放量最低，但微电网运行成本最大；场景 III 采用以经济成本和污染物排放量为优化目标，通过模糊理论集从 Pareto 前沿解集获得的经济成本和污染物排放量的最佳折衷解，在上层能源供应和下层能源需求之间实现平衡。

（2）实施需求响应后的运行结果

基于虚拟实时电价和客户电力可信度的需求响应，以实现削峰填谷。虚拟实时电价、用户电力信誉和电价优惠程度之间的关系如图 5-8 所示

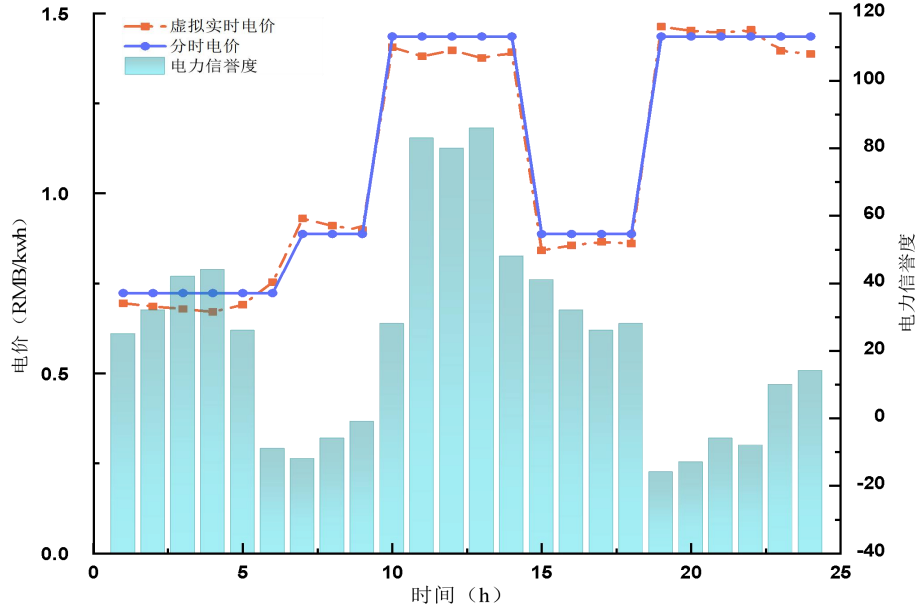


图 5-8 电价变化与电力信誉度的关系

从图 5-8 可以看出，虚拟实时电价由客户的电力信誉决定，电价优惠程度也与电力信誉密切相关。信誉度越小，虚拟实时电价与初始分时电价的偏差越小。图 5-8 右侧坐标是电力信誉度，可以清楚地看到，当电力信誉度为负时，虚拟实时电价将大于初始分时电价，这与电价模型的初衷是一致的。在这一方案实施过程中，通过在高峰时段转移电力负荷来激励客户获得经济效益。相反，在用电高峰期增加用电负荷将受到更高电费的惩罚。

实施需求响应策略前后的负荷曲线如图 5-9 所示。从图 5-9 可以看出，在实施需求响应之后，负荷可以部分转移到非高峰时段，并且负荷曲线更加平滑。

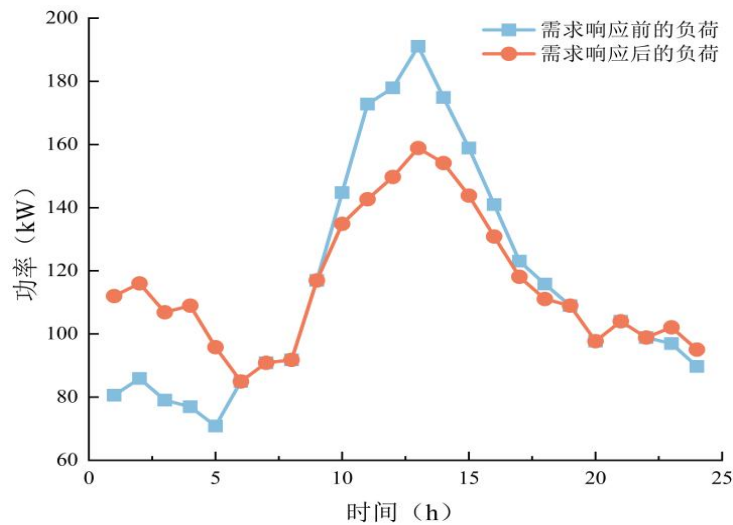


图 5-9 需求响应前后的负荷曲线

在场景 IV 中，除了实施需求响应之外，其他运行条件和约束与场景 I 相同。仅

在不同的运行约束下优化运行成本，并采用最小运行成本作为 MG 的最佳能源设定点。场景 IV 下的最佳能源调度如图 5-10 所示。从图 5-10 中可以看出，运行成本为 1715.3 元人民币，而污染物排放量为 816.5 千克。

在场景 V 中，除了实施需求响应之外，其他操作条件和约束与场景 II 相同。场景 II 下发电机组的最佳能源调度如图 5-10 所示。仅使用污染物排放目标作为优化目标来选择最佳能源设定点的分布式发电单元和储能系统，如图 5-11 所示。因此，总污染物排放量为 733.8 千克，而运营成本为 1866.5 元人民币。在场景 VI 中，除实施需求响应外，其他运行条件和约束与场景 III 相同。运营成本和污染物排放量作为目标函数，对 MG 调度模型进行优化。EMOSSA 算法优化求解的结果如图 5-12 所示。污染物排放总量为 768.2 千克，运行成本为 1765.1 元人民币。

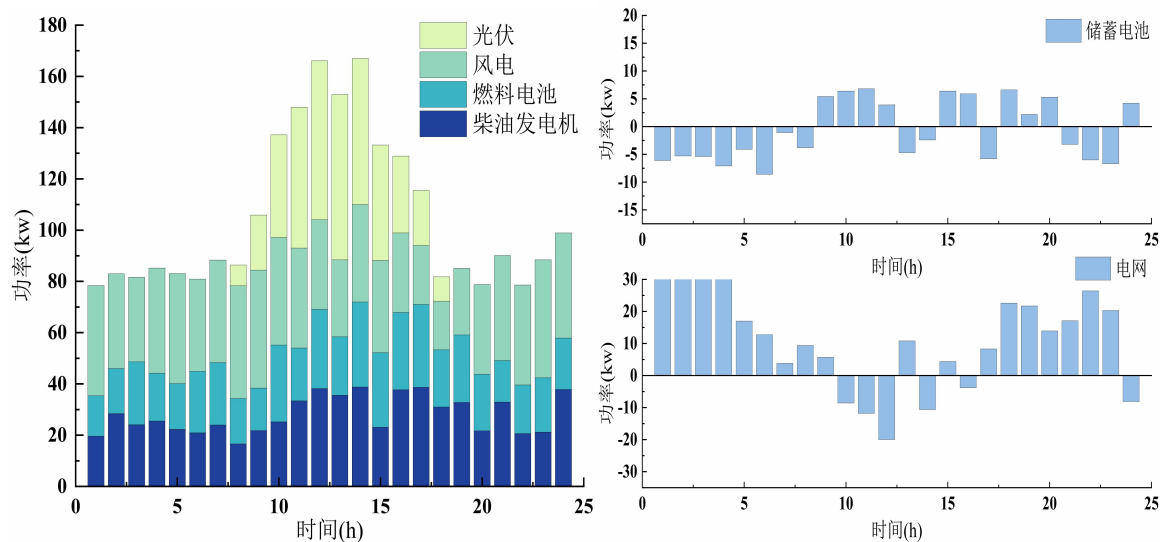


图 5-10 场景 IV 下微电网的最优能源调度（运行成本：1715.3RMB，污染排放量：816.5kg）

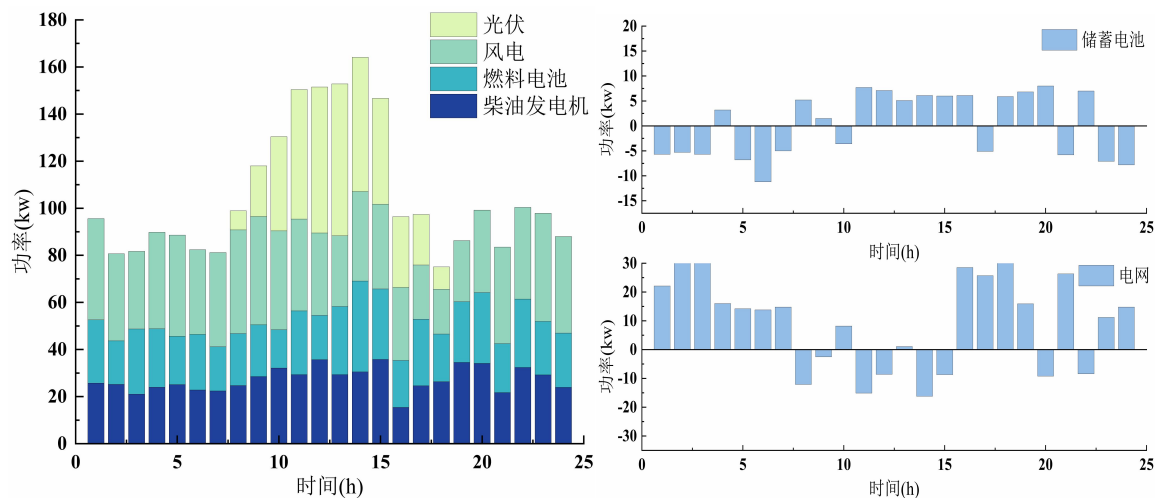


图 5-11 场景 V 下微电网的最优能源调度（运行成本：1866.5RMB，污染排放量：733.8kg）

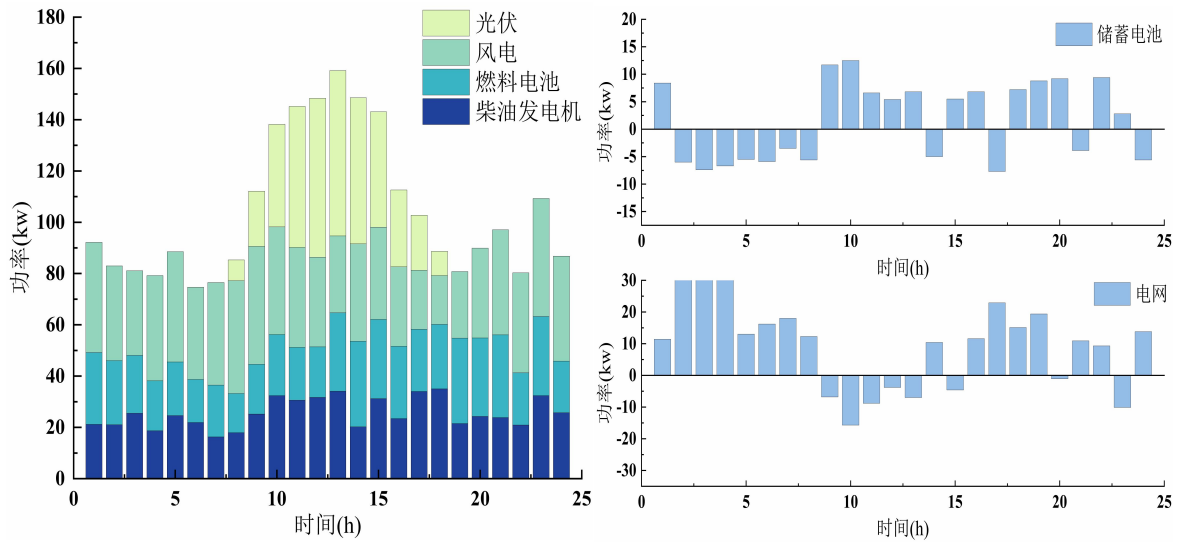


图 5-12 场景 VI 的最优折衷方案（运行成本：1765.1RMB，污染排放量：768.2kg）

表 5-1 不同运行场景的运行成本和污染物排放

场景	I	II	III	IV	V	VI
运营成本(RMB)	1973.5	2145.2	2049.1	1715.3	1866.5	1765.1
污染物(kg)	976.4	780.3	849.9	816.5	733.8	768.2

从上表和图中可以看出，它可以如下获得。

（1）比较场景 I 和场景 IV 可以发现，在实施需求响应策略时，场景 IV 的运行成本比场景 I 低 258.2 元，污染排放量比场景 I 低 159.9 公斤。比较场景 II 和场景 V 可以发现，在实施需求响应策略时，场景 V 的运行成本比场景 II 低 278.7 元，污染排放量比场景 II 低 46.5 公斤。对比场景 III 与场景 VI 可以发现，在实施需求响应策略时，场景 VI 的运营成本比场景 III 低 284 元，污染排放量比场景 III 低 81.7 千克。

（2）引入需求响应可以实现调峰，从而有效降低运营成本和污染排放，最大限度地提高系统应对可再生能源不确定性的能力，从而提高可再生能源的利用率。

5.3.3 微电网双层模型求解分析

为了正确评估所提出方法的优势，采用了以下策略：（1）策略 1：仅考虑 MG 利益的最优调度，只优化上层模型。该策略指导下层模型中的用户在虚拟实时电价下制定用电计划，从而确保上层模型中 MG 的净运营成本最小化。（2）策略 2：需求响应策略下 MG 与用户的协调调度，策略 2 优化了双层模型。为了平衡微电网和用户之间的利益，该策略利用设计的虚拟实时电价机制，通过上下层之间的迭代交替来获得调度方案，其中电价和用户的用电计划作为两层之间的纽带。（3）策略 3：

只考虑用户利益的最优调度，策略 3 只优化了下层模型。这种策略允许用户在分时电价下的最低电价时段尽可能多地使用电力，而不超过 MG 提供的电量，从而最大限度地降低较低级别模型中的用户成本。三种优化策略中 MG 和用户的成本如图 5-13 所示。

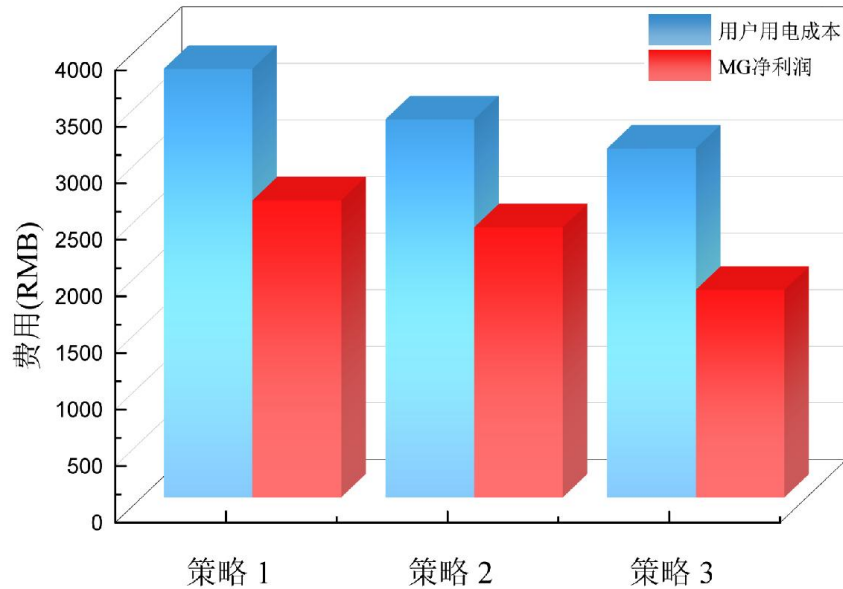


图 5-13 三种策略中 MG 和用户的成本

图 5-13 说明了从三种策略获得的结果具有差异性。具体来说，策略 1 中获得的方案给出了最高的 MG 净利润和最高的用户电费；在策略 3 中，获得的方案产生最低的用户成本，而 MG 净利润最低。与策略 1 和策略 3 相比，策略 2 的解决方案能够综合考虑 MG 和用户的利益，降低了用户的用电成本，增加了 MG 的净利润。因此，上述结果表明，所提出的方法能够通过实施需求响应策略来平衡 MG 和用户的利益。

5.3.4 不确定性因素分析

在 MG 中，不确定性因素包括天气变化和季节性变化等，这将直接影响可再生能源发电的输出功率。同时，负荷需求的波动性也是影响微电网稳定运行的重要原因。这些因素会增加微电网的运行不稳定性，可能导致电压波动或频率偏离期望值，进而影响微电网的正常运行。储能系统作为旋转储备的常见装置，在微电网中发挥重要作用。通过储能系统，可以储存和释放电能，以应对分布式能源资源输出的波动性，帮助微电网维持电压和频率的稳定。

(1) 旋转备用容量与置信水平的关系

旋转备用的合理配置是确保电网主动平衡的最重要手段之一。增加旋转储备费用将导致 MG 运营成本增加,这将对 MG 运营的经济性产生严重影响。基于置信水平函数的旋转储备容量费用如图 5-14 所示。

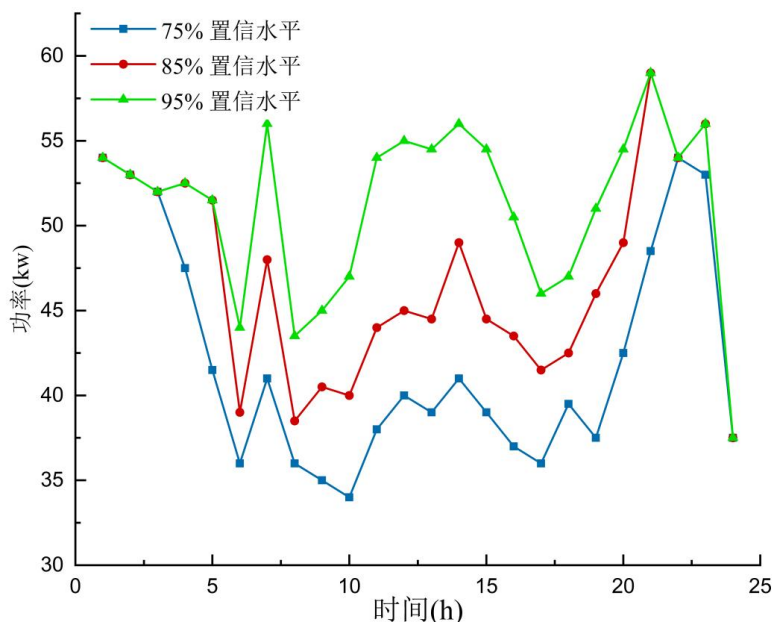


图 5-14 不同置信水平下的 MG 旋转储备容量

从图 5-14 可以看出,置信水平的适当选择本质上是关于系统运行的可靠性和经济性的综合决策问题。具体来说,随着置信水平的增加,可靠性将相应增加,但经济性将不可避免地降低;相反,在可靠性将降低,经济性将提高。因此,选择合理的置信水平以平衡经济性和可靠性至关重要。同时,机会约束也被证明是处理多个可再生能源发电和负荷不确定性的有效手段。

(2) MG 运营成本与置信水平的关系

在 MG 运行过程中,可以使用置信水平来量化不确定性因素。例如,对于太阳能和风能的输出波动,可以通过置信水平来表示预测结果的可信程度。置信水平可以作为决策制定的依据之一用于评估和管理风险,通过对不确定性因素进行置信水平的评估,可以更好地了解潜在的风险,管理者可能需要根据不同的置信水平来做出决策,并采取相应的风险管理措施以应对不确定性因素带来的影响。

为了合理评估 MG 运营成本随置信水平上升的变化,在 3 种置信水平(75%、85%、95%)下进行了模拟实验,结果如下图 5-15 所示。

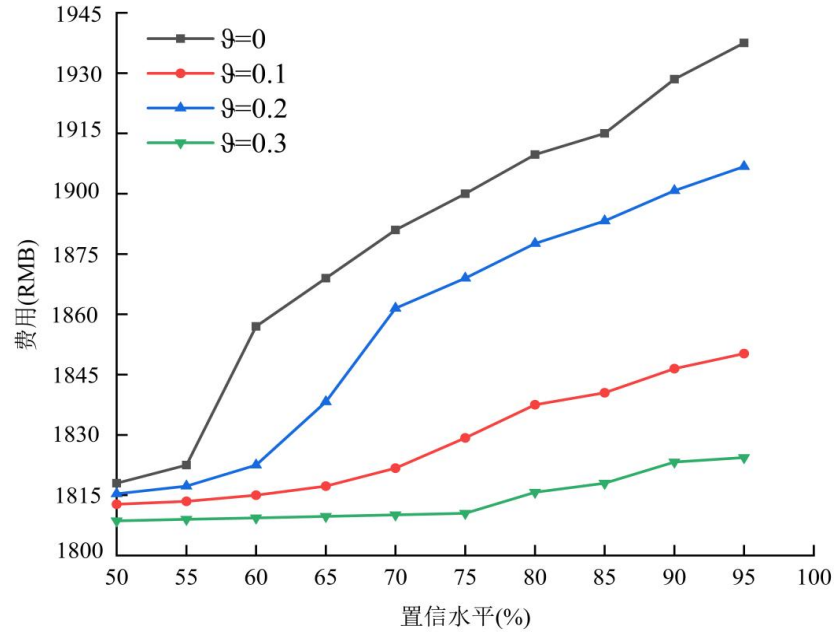


图 5-15 基于不同置信水平的 MG 运行成本

从图 5-15 可以看出, MG 的运营成本与置信水平密切相关。具体来说, 对于给定的时移负荷比 θ , MG 运行成本随着置信水平的增加而增加; 而当置信水平固定时, MG 运行成本随着时移负荷率的增加而逐渐降低。因此, 选择合适的置信水平在平衡经济性和可靠性方面非常重要。

5.4 本章小结

本章使用 EMOSSA 分别对以经济效益和环境效益为优化目标的上层微电网系统模型优化求解和以用户的经济效益为优化目标的下层模型优化求解, 利用多个运行场景进行测试基于双层模型和需求响应的微电网多目标优化调度模型, 主要结论如下:

(1) 微电网下层模型实施需求响应策略后微电网整体的经济效益和环境效益得到有效提高;

(2) 微电网下层模型优化调度时, 当仅以经济成本为目标进行优化求微电网调度模型时, 微电网系统的运行经济费用最低, 而污染物排放量最大; 当仅以污染物为目标进行优化求微电网调度模型时, 微电网系统的污染物排放量最低, 而经济成本最大; 当以污染排放量和经济成本同时为目标进行优化调度, 则能够获得微电网经济成本和污染物排放量同时最优;

(3) 将基于虚拟实时价格的需求响应策略参与 MG 优化调度，根据电力可信度确定虚拟实时电价来激励客户自主调动负载，实现微电网系统上层模型和下层模型同时优化，有效改善净负荷特性、降低分布式风光发电单元并网对电网的冲击，为用户带来显著的经济效益和环境效益；

(4) 微电网运行时，需要设置合理的置信水平以提高系统应对不确定因素的能力。

因此，通过多个运行场景实验验证了新建的基于两层模型和需求响应的对微电网多目标优化调度的有效性。

第 6 章 结论与展望

6.1 研究工作结论

实现风电和光伏为主的再生清洁能源发电，成为 MG 重要的发电单元，以降低化石能源发电量，以提高电力系统的经济效益和降低环境污染。但风电和光伏为主的再生清洁能源发电具有的较大波动性和不稳定性，给 MG 安全运行带来严重的挑战。MG 各分布式发电单元的优化调度对保障系统稳定运行起重要作用，因此，微电网优化调度问题是近年来电力系统研究的热门研究领域。

本文构建了基于双层模型和需求响应的微电网多目标调度模型，分别考虑 MG 上层模型的经济与环保效益两个目标，研究 MG 发电和供电双方两层优化问题。采用改进型 EMOSSA 算法对上层模型与下层模型分别进行求解。同时，引入需求响应策略来引导用户调整用电负荷，并以虚拟价格通过迭代，实现微电网双层模型调度。通过上文的实验比较和分析可以得出以下结论。

(1) 双层模型能够通过实时电价信息交互实现 MG 和用户供需平衡。通过实施需求响应策略，用户可以参与优化调度，从而降低可再生能源对 MG 的负面影响，达到调峰填谷的目的，最大限度地提高系统应对可再生能源不确定性的能力，提高可再生能源的利用率和微电网系统的经济效益和环境效益。

(2) 本文构建了基于虚拟实时电价的需求响应策略，采用的基于电力信誉度虚拟实时电价间接激励客户自主调动负载，从而在用电高峰期间减轻 MG 的负担，该方法能有效地提高发电机组的净负荷特性，减小发电机组接入给配电网造成的影响，大幅降低系统综合运营费用，具有重要的经济价值。

(3) 改进的 EMOSSA 算法在标准 MOSSA 算法中引入正弦搜索策略、多样性变异融合正弦搜索策略、柯西变异多样性变异处理、外部档案更新机制和个体非支配排序，避免了陷入局部最优，提高了优化性能。实验仿真验证了该方法对 MG 和用户多目标优化具有显著效果。

6.2 后续工作展望

本文通过构建双层迭代优化模型结构，利用智能算法来研究供给端和用户端的各自效益。但由于本文学术能力的限制，对于问题的研究还不够深入，本工作也存在一定的局限性，具体表现在以下几个方面：

（1）本文没有考虑储蓄电池容量的损失和电源的传输损耗，所以 MG 运行成本方面不够精确，在接下来的研究过程中需要对此进行更为详细的研究。

（2）本文研究的时较为常见的 MG 模型，内部分布式发电单元也比较单一，接下来可以考虑冷热电联产的微电网系统，使 MG 的运行场景更为贴近实际，研究结果更加有效。

（3）本文研究的需求响应仅考虑了用户负荷的调度情况，对于用户自身的满意情况及舒适度并未考虑。因此，后续还需要针对不同类型用户对需求响应策略的参与度和满意度的进一步研究。

参考文献

- [1] Doost D M, Buffa A, Brunetta G, et al. Mainstreaming energetic resilience by morphological assessment in ordinary land use planning. the case study of Moncalieri, turin (italy)[J]. Sustainability, 2020, 12: 4443.
- [2] Cergibozan R. Renewable energy sources as a solution for energy security risk: empirical evidence from OECD countries[J]. Renewable Energy, 2021, 183: 617-626.
- [3] Sleszy N P, Nowak M, Brelik A, et al. Planning and settlement conditions for the development of renewable energy sources in Poland: conclusions for local and regional policy[J]. Energies, 2021, 14: 1935.
- [4] Karunarathne E, Pasupuleti J, Ekanayake J, et al. The optimal placement and sizing of distributed generation in an active distribution network with several soft open points[J]. Energies, 2021, 14: 1084.
- [5] Saleem M, Choi K, Kim R. Resonance damping for an LCL filter type grid-connected inverter with active disturbance rejection control under grid impedance uncertainty[J]. International Journal of Power and Energy Systems, 2019, 109: 444-454.
- [6] 姜文冬. 基于事件驱动一致性的微电网协调控制方法研究[D]. 兰州理工大学, 2023, 000645.
- [7] Jayaram J, Srinivasan M, Prabakaran N, et al. Design of decentralized hybrid microgrid integrating multiple renewable energy sources with power quality improvement[J]. Sustainability, 2022, 14: 7777.
- [8] Parag Y, Ainspan M. Sustainable microgrids: economic, environmental and social costs and benefits of microgrid deployment[J]. Energy for sustainable development, 2019, 52: 72-81.
- [9] Kumar R S, Raghav L P, Raju D K, et al. Impact of multiple demand side management programs on the optimal operation of grid-connected microgrids[J]. Applied Energy, 2021, 301: 117466.
- [10] Kharrich M, Mohammed O H, Kamel S, et al. Development and implementation of a novel optimization algorithm for reliable and economic grid-independent hybrid power system[J]. Applied Sciences, 2020, 10: 6604.
- [11] 杨军伟, 杜露露, 刘夏, 等. 高风电渗透率下考虑需求侧管理策略的智能微电网调度方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(03): 32-39+110.
- [12] 王侨侨, 曾君, 刘俊峰, 等. 面向微电网源-储-荷互动的分布式多目标优化算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(05): 1421-1432.
- [13] Yang J, Su C, Wang Z. Adaptive robust optimal dispatch of microgrid based on different robust adjustment parameters[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2021, 15, 3360-3371.
- [14] Aghdam F H, Kalantari N T, Mohammadi-Ivatloo B, et al. A stochastic optimal scheduling of multi-microgrid systems considering emissions: A chance constrained model[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275, 122965.
- [15] Li, Y, Li, K, Yang Z, et al. Stochastic optimal scheduling of demand response-enabled microgrids with renewable generations: An analytical-heuristic approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 330, 129840.
- [16] Kong, X, Liu, D, Wang, C, et al. Optimal operation strategy for interconnected microgrids in

- market environment considering uncertainty[J]. *Applied Energy*, 2020, 275, 115336.
- [17] 李星辰, 袁旭峰, 李沛然, 等. 基于改进 QPSO 算法的微电网多目标优化运行策略[J]. *电力科学与工程*, 2020, 36(12): 22-29.
- [18] Astriani Y, Shafiullah G M, Shahnian F, et al. Additional controls to enhance the active power management within islanded microgrids[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 2780-2786.
- [19] Hajiamoosha P, Rastgou A, Bahramara S, et al. Stochastic energy management in a renewable energy-based microgrid considering demand response program[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 129: 106791.
- [20] Wei C, Xu J, Liao S, et al. Aggregation and Scheduling Models for Electric Vehicles in Distribution Networks Considering Power Fluctuations and Load Rebound[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11: 2755-2764.
- [21] Liu Z., Chen Y., Zhuo R., et al. Energy storage capacity optimization for autonomy microgrid considering CHP and EV scheduling[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 1113-1125.
- [22] Marzband M, Azarinejadian F, Savaghebi M, et al. An optimal energy management system for islanded microgrids based on multiperiod artificial bee colony combined with Markov Chain[J]. *IEEE Systems Journal*, 2017, 11: 1712-1722.
- [23] Aliasghari P, Mohammadi-Ivatloo B, Alipour M, et al. Optimal scheduling of plug-in electric vehicles and renewable micro-grid in energy and reserve markets considering demand response program[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 186: 293-303.
- [24] Xu B , Wang J , Guo M ,et al.A Hybrid Demand Response Mechanism Based on Real-time Incentive and Real-time Pricing[J].*Energy*, 2021, 231(1): 120940.
- [25] Hou H, Xue M, Xu Y, et al. Multi-objective economic dispatch of a microgrid considering electric vehicle and transferable load[J]. *Applied Energy*, 2020, 262: 114489.
- [26] Li C, Jia, X, Zhou Y, et al. A microgrids energy management model based on multi-agent system using adaptive weight and chaotic search particle swarm optimization considering demand response[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121247.
- [27] Wang X, Song W, Wu H, et al. Microgrid operation relying on economic problems considering renewable sources, storage system, and demand-side management using developed gray wolf optimization algorithm[J]. *Energy*, 2022, 248: 123472.
- [28] Judge M A, Manzoor A, Maple C, et al. Price-based demand response for household load management with interval uncertainty[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 8493-8504.
- [29] Cioara T, Antal M, Mihailescu V, et al. Blockchain-based decentralized virtual power plants of small prosumers[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 29490-29504.
- [30] Zhao C, Sun W, Wang J, et al. Distributed robust secondary voltage control for islanded microgrid with nonuniform time delays[J]. *Electrical Engineering*, 2021, 103: 2625-2635.
- [31] Wu Y K, Tang K T, Lin Z K, et al. Flexible power system defense strategies in an isolated microgrid system with high renewable power generation[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(9): 3184.
- [32] Ryu H S, Kim M K. Two-stage optimal microgrid operation with a risk-based hybrid demand response program considering uncertainty[J]. *Energies*. 2020, 13(22): 6052.
- [33] 姜子卿, 郝然, 艾芊. 基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(06): 260-267.
- [34] 姜伟.基于改进 ASAGA 的微电网多目标优化调度研究[D]. 沈阳农业大学, 2023.
- [35] Du X, Wang L, Zhao J, et al. Power dispatching of multi-microgrid based on improved CS aiming

-
- at economic optimization on source-network-load-storage[J]. *Electronics*, 2022, 11(17): 2742.
- [36] Nguyen T T, Dao T K, Nguyen T T T, et al. An optimal microgrid operations planning using improved archimedes optimization algorithm[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 67940-67957.
- [37] Qi X, Bai Y. Improved linear active disturbance rejection control for microgrid frequency regulation[J]. *Energies*, 2017, 10(7): 1047.
- [38] Li J, Chen R, Liu C, et al. Capacity optimization of independent microgrid with electric vehicles based on improved pelican optimization algorithm[J]. *Energies*, 2023, 16(6): 2539.
- [39] Li B, Deng H, Wang J. Optimal scheduling of microgrid considering the interruptible load shifting based on improved biogeography-based optimization algorithm[J]. *Symmetry-Basel*, 2021, 13(9): 1707.
- [40] Zhang Z, Wang Z, Cao R, et al. Research on two-energy optimized dispatching Strategy of microgrid cluster based on IPSO algorithm[J]. *IEEE Access*, 2021: 3108830.
- [41] Wu X, Cao W, Wang D, et al. A multi-objective optimization dispatch method for microgrid energy management considering the power loss of converters[J]. *Energies*, 2019, 12: 2160.
- [42] Wang Y, Hu Q, Li L, et al. Approaches to wind power curve modeling: A review and discussion[J]. *Pergamon*, 2019: 109422.
- [43] Dai Q, Duan S, Cai T, et al. Short-term PV generation system forecasting model without irradiation based on weather type clustering[J]. *Proceedings of the Csee*, 2011, 31(34): 28-35.
- [44] Youli S, Litifu Z, Nagasaka K. Efficiency of microgrid with storage battery in reliability, economy and environment assessments[J]. *International Journal of Electrical & Power Engineering*, 2009, 3(3): 154-162.
- [45] Wei D, Wang J, Li Z, et al. Wind power curve modeling with hybrid copula and grey wolf optimization[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13: 265-276.
- [46] Campisi-Pinto S, Gianchandani K, Ashkenazy Y. Statistical tests for the distribution of surface wind and current speeds across the globe[J]. *Renewable Energy*, 2020, 149: 861-876.
- [47] Liu X, Xu W. Economic load dispatch constrained by wind power availability: A here-and-now approach[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, 1: 2-9.
- [48] Malheiro A, Castro P M, Lima R M, et al. Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery isolated systems[J]. *Renewable Energy*, 2015, 83: 646-657
- [49] Marqusee J, Jenket D. Reliability of emergency and standby diesel generators: Impact on energy resiliency solutions[J]. *Applied Energy*, 2020, 268: 114918.
- [50] Yin G, Zhang X, Cao, D. et al. Determination of optimal spinning reserve capacity of power system considering wind and photovoltaic power affects[J]. *Power System Technology*, 2015, 39: 3497-3504.
- [51] 茆美琴, 丁明, 张榴晨, 等. 多能源发电微电网实验平台及其能量管理信息集成[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(1): 106-111.
- [52] 丁明, 杨为, 张颖媛, 等. 基于 IEC61970 标准的微电网 EMS 平台设计[J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(10): 16-20.
- [53] 丁明, 解添, 毕锐. 微网实时数据库系统研究[J]. *电网技术*, 2010, 34(11): 31-37.
- [54] Sarker E, Seyedmahmoudian M, Jamei E, et al. Optimal management of home loads with renewable energy integration and demand response strategy[J]. *Energy*, 2020, 210: 118602.
- [55] Sarker E, Halder P, Seyedmahmoudian M, et al. Progress on the demand side management in smart grid and optimization approaches[J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(01): 36-

- [56] Poudineh R, Jamasb T. Distributed generation storage, demand response, and energy efficiency as alternatives to grid capacity enhancement[J]. *Energy Policy*, 2014: 222-231.
- [57] Chunyan L, Zhong X, Zhiyuan M. Optimal time-of-use electricity price model considering customer demand response[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2015, 27: 3969.
- [58] Chen L, Yang Y, Yao J, et al. Incentive mechanism design for demand response based on power score[J]. *Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(18): 82-87.
- [59] Han Y, Shen B, Hu H, et al. Optimizing the performance of ice-storage systems in electricity load management in a credit mechanism: analytical work in Jiangsu, China[C]. *International Conference on Applied Energy*, 2015, 2876-2879.
- [60] Ouyang C, Zhu D, Wang F. A learning sparrow search algorithm[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021: 3946958.
- [61] Guo L, Liu W, Cai J, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 74: 433-445.
- [62] Hemmati M, Mohammadi-Ivatloo B, Abapour M, et al. Optimal chance-constrained scheduling of reconfigurable microgrids considering islanding operation constraints[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14: 5340-5349.
- [63] Xue J, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.
- [64] Gai J, Zhong K, Du X, et al. Detection of gear fault severity based on parameter-optimized deep belief network using sparrow search algorithm[J]. *Measurement*, 2021, 185(11): 110079.
- [65] Abdulhammed O Y. Load balancing of IoT tasks in the cloud computing by using sparrow search algorithm[J]. *Journal Of Supercomputing*, 2021, 21(7): 1-22.
- [66] Yan P, Shang S, Zhang C, et al. Research on the processing of coal mine water source data by optimizing BP neural network algorithm with Sparrow search algorithm[J]. *IEEE Access*, 2021, 9(1): 108718-108730.
- [67] Xu L, Cai D, Shen W, et al. Denoising method for fiber optic gyro measurement signal of face slab deflection of concrete face rockfill dam based on sparrow search algorithm and variational modal decomposition[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 331(11): 112913
- [68] Zhou J, Chen D. Carbon price forecasting based on improved CEEMDAN and extreme learning machine optimized by Sparrow search algorithm[J]. *Sustainability*, 2021, 13(9): 4896
- [69] An G, Jiang Z, Chen L, et al. Ultra short-term wind power forecasting based on Sparrow search algorithm optimization deep extreme learning machine[J]. *Sustainability*, 2021, 13(18): 10453
- [70] Jiang F, Han X, Zhang W, et al. Atmospheric PM_{2.5} prediction using deep AR optimized by sparrow search algorithm with opposition-based and fitness-based learning[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(7): 894-903
- [71] Yang L, Li Z, Wang D, et al. Software defects prediction based on hybrid particle swarm optimization and Sparrow search algorithm[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 60865-60879
- [72] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6 (2): 182-197.
- [73] Tian C S, Hao Y, Hu J M. A novel wind speed forecasting system based on hybrid data preprocessing and multi- objective optimization[J]. *Applied Energy*, 2018, 231: 301-319.
- [74] Zhang L F, Wang J Z, Niu X S, et al. Ensemble wind speed forecasting with multi-objective

-
- archimedes optimization algorithm and sub-model selection[J]. Applied Energy, 2021, 301: 117449.
- [75] Sun S Z, Wang C X, Wang Y, et al. Multi-objective optimization dispatching of a micro-grid considering uncertainty in wind power forecasting[J]. Energy Reports, 2022, 8: 2859-2874.
- [76] Li Y, Li K, Yang Z, et al. Stochastic optimal scheduling of demand response-enabled microgrids with renewable generations: An analytical-heuristic approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 330: 129840.
- [77] Sun S Z. Wang C X. Wang Y, et al. Multi-objective optimization dispatching of a micro-grid considering uncertainty in wind power forecasting[J]. Energy Reports, 2022, 8: 2859-2874.
- [78] Sideratos G, Hatziaargyriou N D. Probabilistic wind power forecasting using radial basis function neural networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27: 1788-1796.

攻读硕士期间取得的学术成果

- [1] Sun S, Wang Y, Meng Y, et al. Multi-step wind speed forecasting model using a compound forecasting architecture and an improved QPSO-based synchronous optimization[J]. Energy Reports, 2022, 8: 9899-918.
- [2] Meng Y, Wang Y, Sun S, et al. Multi-objective optimal dispatching of demand response-enabled microgrid considering uncertainty of renewable energy generations based on two- iterative strategy[J]. Energy Reports, 2023, 9: 1842-58.
- [3] Sun S, Wang C, Wang Y, et al. Multi-objective optimization dispatching of a microgrid considering uncertainty in wind power forecasting[J]. Energy Reports, 2022, 8: 2859-74.
- [4] Meng Y, Sun S, Wang Y, et al. A new compound structure combining DAWNN with modified water cycle algorithm-based synchronous optimization for wind speed forecasting[J]. Energy Reports, 2022, 8: 12255-71.

致谢

写至此处，当敲下“致谢”二字时，代表着我的十九年的求学生涯将要结束了。我与安工程的故事始于 21 年金秋，终于 24 年盛夏，研究生三年时光转瞬即逝，回首三年光阴，满是精彩，皆是回忆。

爱子心无尽，三生报答轻。感谢我的父母二十余载的培养，给我无尽与无私的温暖与爱，让我暖衣饱食，无后顾之忧。愿今后的几十年，时光能慢一些，我长大的快一些，尽我所能成为你们的骄傲，让你们幸福平安、健康快乐。

饮水思其源，学成念唔师。感谢我的恩师孙驷洲老师三年来对我的悉心指导和关怀，孙老师的严格要求以及对待科研求实的态度，使我在研究生三年始终对科研保持着一颗敬畏之心。“经师易得，人师难求。鸿儒硕学，润物无声”感谢孙老师给予的耐心与包容，也感谢您在科研和人生道路上对我的帮助与鼓励，我将永远感激。

人来人往，遇见皆缘。感谢在研究生期间的室友华峰、张陈、杨子昊，我们来自天南地北，但相聚在此，皆是缘分。感谢这一路上的相遇相识的同学和朋友，你们的出现为我增添了太多惊喜与美好，感谢给予我的帮助与关心。相遇一场，皆是缘分，花开花落总无穷，唯有友情藏心中。祝愿我们保持热爱，奔赴山海，我们高处相见。

平时感知己，方寸岂悠悠。感谢我的同门王陈曦，同窗三载，朝夕相处，一起努力搞科研的日子弥足珍贵，必将终身难忘。山水一程，三生有幸，祝我们保持热爱，一起奔赴星辰大海。此去前程似锦，再相逢依然如故。

写尽千山，落笔是你。感谢我的女友才心悦女士，相逢恰喜，相识亦相知。感谢你的包容和体贴让我在枯燥的科研中更进一步，感谢你的耐心和鼓励让我在进退维谷时能够砥砺前行，感谢你的真诚和专一让我坚信所爱隔山海，山海皆可平！希望我们未来能够相濡以沫，相伴到老。

“愿山野浓雾都有路灯，风雨飘摇亦可归舟。”谨以此文，献给我沸腾而又热烈的青葱岁月，献给我的学生时代，献给我的 25 岁。我的研究生时代，用了三年时间，落幕了，散场了，只愿往后的日子里，我们都能光芒万丈，熠生辉，再见！