

分类号: TM464

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220320142



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 考虑需求响应的多目标

微电网优化调度

论 文 作 者 岳君豪

指 导 教 师 娄柯

学 科 (专 业) 电子信息

研 究 方 向 微电网优化调度

论文提交日期: 2025 年 05 月 15 日

分类号：TM464

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220320142

题 目 考虑需求响应的多目标微电网优化调度

题 目 Multi objective optimal dispatch of microgrid
considering demand response

学生姓名： 岳君豪

指导教师： 娄柯 副教授

专 业： 电子信息

研究方向： 微电网优化调度

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后果由本人承担。

学位论文作者签名：岳君毅

日期：2025 年 5 月 10 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：岳昌东

指导教师签名：姜柯

日期：2025 年 5 月 10 日

日期：2025 年 5 月 10 日

考虑需求响应的多目标微电网优化调度

摘 要

随着全球经济的快速发展,传统能源的有限性与环境污染问题愈发严重。如何实现能源与环境的协调发展,成为我国新型能源行业所面临的重大挑战。微电网通过整合多种能源资源可以实现能源的高效利用和优化配置,对降低能源成本以及减少环境污染具有重要意义。而现有的微电网优化研究侧重于经济成本的优化,而忽略了环境成本。为此,本文提出了一种结合改进算法和需求侧响应的优化策略,旨在实现微电网在经济、环境和可靠性方面的综合优化,本文的主要研究内容如下:

(1) 首先,对课题的研究背景和研究现状进行介绍,分别从微电网系统,微电网优化调度和综合需求响应等方面进行阐述。然后对微电网的结构及各设备的数学模型进行了详细分析,包括光电、风电、CHP 机组、燃气锅炉、电锅炉、多源储能装置以及电网交互等设备的数学模型及运行约束。最后针对可再生能源的不确定性进行场景模拟,并提出了相应的解决方法,为后文的研究奠定基础。

(2) 在微电网优化调度领域,传统的 NSGA-III 算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III, NSGA-III)存在收敛较慢和结果多样性不足的缺点,难以高效的应对微电网多目标优化调度的需求。为解决这些问题,提出了一种基于 MOPSO 算法(Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)的改进 NSGA-III 算法。该改进算法先在 MOPSO 算法中引入了适应度共享机制以避免早熟收敛,然后将改进后的 MOPSO 算法的结果作为部分 NSGA-III 的初始种群,提高

了全局搜索能力和搜索速度。再以运行成本、储能充放电量和碳排放量作为优化目标，考虑热力需求的波动性以及风光的不确定性，用改进算法对微电网模型进行求解，结果表明提出的多目标优化算法能够提高目标函数的优化效果，证实了改进算法的有效性。

（3）为应对可再生能源的不确定性和负荷端的管理问题，本研究基于日前调度结果和模型预测控制方法（Model Predictive Control, MPC），建立了日内双时间尺度优化调度策略，并融入考虑疲劳效应的激励型综合需求响应。通过改进算法优化预测数据，并规划微电网运行策略，考虑到不同时间尺度下各能源负荷响应能力的差异，建立双时间尺度日内优化模型。在日内长时间尺度的预测控制调度中，以最小化需求响应补偿成本，购能成本和各设备调整惩罚成本最小为目标函数，每 15 分钟为周期对各设备进行调整，日内短时间尺度调度则以 5 分钟为周期，其优化流程与长时间尺度调度相似。仿真结果表明，所提出的考虑疲劳效应的需求响应策略和双时间尺度调度方法能够有效降低能源预测误差对系统的影响，同时满足用户的需求并确保微电网的稳定运行。

关键词：微电网优化，多目标优化，遗传算法，不确定性，需求响应

MULTI OBJECTIVE OPTIMAL DISPATCH OF MICROGRID CONSIDERING DEMAND RESPONSE

ABSTRACT

With the rapid development of the global economy, the limitation of traditional energy and environmental pollution are becoming more and more serious. How to realize the coordinated development of energy and environment has become a major challenge for China's new energy industry. Micro grid can realize the efficient utilization and optimal allocation of energy by integrating a variety of energy resources, which is of great significance to reduce energy costs and reduce environmental pollution. However, the existing microgrid optimization research focuses on the optimization of economic cost, while ignoring the environmental cost. Therefore, this paper proposes an optimization strategy combining improved algorithm and demand side response, aiming to realize the comprehensive optimization of microgrid in economy, environment and reliability

(1) Firstly, the research background and research status of the subject are introduced, respectively from the aspects of microgrid system, microgrid optimal scheduling and comprehensive demand response. Then, the structure of the microgrid and the mathematical models of each equipment are analyzed in detail, including the mathematical models and operation constraints of photoelectric, wind power, CHP units, gas-fired boilers, electric boilers, multi-source energy storage devices and grid interaction. Finally, the scenario simulation is carried out for the

uncertainty of renewable energy, and the corresponding solutions are proposed, which lays the foundation for the later research.

(2) In the field of microgrid optimal dispatch, the traditional Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III (NSGA - III) has the disadvantages of slow convergence and insufficient diversity of results, which is difficult to effectively meet the needs of microgrid multi-objective optimal dispatch. To solve these problems, an improved NSGA - III algorithm based on Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) is proposed. The improved algorithm first introduces the fitness sharing mechanism into MOPSO algorithm to avoid premature convergence, and then takes the results of the improved MOPSO algorithm as the initial population of part of NSGA - III, which improves the global search ability and search speed. Then, taking the operation cost, energy storage charging and discharging capacity and carbon emissions as the optimization objectives, considering the fluctuation of thermal demand and the uncertainty of scenery, the improved algorithm is used to solve the microgrid model. The results show that the proposed multi-objective optimization algorithm can improve the optimization effect of the objective function, and the effectiveness of the improved algorithm is confirmed.

(3) In order to deal with the uncertainty of renewable energy and the management of load side, based on the day ahead scheduling results and Model Predictive Control (MPC), this study establishes the intra day dual time scale optimal scheduling strategy, and integrates the incentive comprehensive demand response considering the fatigue effect. By improving the algorithm to optimize the forecast data, and planning the microgrid operation strategy, considering the difference of the response ability of each energy load under different time scales, a two time scale intraday optimization model is established. In the predictive control

scheduling of long-time scale within a day, the objective function is to minimize the demand response compensation cost, the energy purchase cost and the adjustment penalty cost of each equipment. Each equipment is adjusted every 15 minutes, while the short-time scale scheduling within a day takes 5 minutes as a cycle. Its optimization process is similar to the long-time scale scheduling. The simulation results show that the proposed demand response strategy considering fatigue effect and dual time scale scheduling method can effectively reduce the impact of energy prediction error on the system, meet the needs of users and ensure the stable operation of the microgrid.

KEY WORDS: Microgrid optimization, Multi-objective optimization, Genetic algorithm, Uncertainty, Demand response

目 录

摘要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 微电网系统的研究现状及发展	2
1.2.2 微电网优化调度的研究现状	4
1.2.3 综合需求响应的研究现状	6
1.3 本文主要内容	7
第 2 章 微电网运行模型	8
2.1 微电网结构	8
2.2 各设备的数学模型及运行约束	8
2.2.1 CHP 机组	8
2.2.2 燃料电池	10
2.2.3 储能装置	11
2.2.4 电网交互	12
2.3 不确定能源建模及其误差预测	12
2.3.1 太阳辐照度模型	12
2.3.2 风速和风力发电输出功率建模	13
2.3.3 场景生成与削减	13
2.4 本章小结	15
第 3 章 基于改进 NSGA-III 算法的微电网多目标优化运行	16
3.1 多目标优化算法介绍	16
3.2 MOSPO 算法	17
3.3 NSGA-III 算法	18
3.4 NSGA-III 改进算法	20
3.5 微电网优化目标及约束	22
3.5.1 优化目标	22
3.5.2 约束	23
3.6 仿真实验	25
3.6.1 算例参数	25
3.6.2 仿真分析	27
3.7 本章小结	30
第 4 章 基于双时间尺度的微电网日前-日内调度研究	31
4.1 MPC 模型控制	31
4.2 长时间尺度下的微电网日前调度研究	32
4.3 双时间尺度下的微电网日内调度研究	33
4.3.1 考虑疲劳效应的激励型 IDR 策略	34
4.3.2 微电网日内长时间尺度调度	36
4.3.3 微电网日内短时间尺度调度	37
4.4 仿真实验	38
4.4.1 算例参数	38
4.4.2 日内双时间尺度调度策略分析	38
4.4.3 用户参与响应程度对微电网优化的影响	41
4.5 本章小结	43
第 5 章 结论与展望	44
5.1 研究成果与结论	44

5.2 展望	45
参考文献	46

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

能源是现代社会发展的基石^[1]，全球能源供应正受到严峻挑战，国际能源署（IEA）统计显示，约 70% 的全球电能依赖化石燃料，这种能源结构对空气污染与气候变化造成重大威胁。二氧化碳排放量持续增加^[2]，不仅推动了全球变暖，也使极端气候事件愈加严峻，为社会持续发展与人类生存环境施以重压，各国政府纷纷出台政策，推动可再生能源和清洁能源的开发以应对能源和环境问题^[3]。而太阳能、风能与水能等可再生能源，因清洁且可再生的特点逐步在能源转型的方向中受到重视^[4-5]，然而电力系统的稳定运行受到可再生能源间歇性波动的影响。如太阳能发电依赖天气条件，风能发电则受风速变化的影响，这些不确定性因素增加了电力系统调度的难度。

微电网能够实现自我调节和优化运行，提高能源供应的可靠性和效率，降低能源消耗和环境污染。通过合理配置不同类型的资源，微电网可以有效应对可再生能源的间歇性和波动性^[6]，增强电网的安全性和稳定性。多能源微电网系统进一步将多种能源形式（如电、热、气、冷）进行耦合和互补，充分利用不同能源的优势以实现能源的高效利用^[7]。如热电联产机组（CHP）能够同时产生电力和热能，提高能源利用效率；储能系统则可以平抑可再生能源的波动，增强系统的稳定性^[8]。通过智能控制技术，微电网能够实现对不同能源的协调调度，优化资源配置，降低运行成本。

微电网技术在当今社会中逐步受到重视，优化调度技术已成为研究的热点，国内外学者对微电网优化调度模型、调度目标和策略进行了大量研究^[9]。传统的优化调度策略常用确定性模型^[10]，假设可再生能源出力和负荷需求是已知且固定的，实际上可再生能源出力存在显著不确定和波动特征，负荷需求也受到多种因素变化的影响，近年来智能电网技术的发展，多种优化算法被引入到微电网调度中，可再生能源的不确定性和负荷波动能够被应对。粒子群优化算法在微电网调度优化中使用广泛^[11]，这种算法是通过模拟鸟群觅食行为寻找最优解，全局搜索能力强且简单易实现，可有效提高微电网运行效率和经济性，遗传算法也经常被

应用于微电网调度^[12],是通过模拟生物进化过程来优化调度方案,使系统的适应性与鲁棒性逐步提升。

需求响应作为一种新兴互动负荷资源^[13],可降低需求侧资源对系统供需平衡的影响,提升电力系统的经济性与可靠性,用户响应电力需求侧资源实现此类结果。价格型和激励型为需求响应的实施形式^[14],价格型通过调整电价引导用户在电价较低时增加用电,较高时减少用电;激励型以补贴或奖励机制鼓励用户参与需求响应计划,用户依据电价信号或激励机制调整用电行为,降低电力系统峰谷差,提高运行效率,需求响应策略增强用户参与感与责任感,促进用户与电力系统之间的互动实现双赢。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 微电网系统的研究现状及发展

全球能源危机逐步加剧,环境污染问题愈加严重,微电网作为一种新型的能源供应形式受到广泛关注,分布式电源,储能系统,负荷和智能控制设备等在微电网中有机整合,为能源问题提供了新的解决思路,资源类型的合理配置助力微电网应对可再生能源的间歇性与波动性,同时电网的安全性和稳定性也通过各种具体举措的落实施逐步增强。

我国微电网系统的研究自上个世纪就逐步开始,在 2008 年之前都处于微电网的理论研究阶段,基本集中在学术探讨和实验室模拟上。到了 2015 年,微电网相关项目都相继启动,示范工程开始建设。从 2017 年到现在,我国对微电网的研究到了持续发展的阶段。随着智能化和大数据等技术的引入,在多能互补和可持续发展方面也得到了长足的进步。下面介绍各个技术应用的推动与微电网普及的具体研究现状:

(1) 智能化与自动化:物联网,大数据和人工智能等提升了微电网的智能化水平^[16],宁波北仑高塘“零碳”数据中心综合能源项目中,光-储-直-柔互动技术在直流微电网应用后^[17],通过调控直流母线电压,数据中心,充电桩,储能和光伏等设备可达到分钟级实时响应状态,这种对设备运行状态自动调整的控制方式,能够对能源供需情况实时响应,确保了微电网高效运行与能源合理化分配。

(2) 多能互补与集成:微电网未来将包含太阳能,风能,燃气,水务和热力等能源形式,形成互补集成的系统,腾讯在河北怀来东园数据中心打造的“风光储”一体化项目^[18],协同使用多种新能源形式,例如风力发电,屋顶光伏,储

能系统以及光储充车棚。风力发电借助风力输出电能，屋顶光伏在白天光照充足时将光能转化为电能，储能系统储存多余的电能，为后续使用做充足供应，多种能源的整合提升了新能源在数据中心能源供应中的比重，传统市电依赖性显著减少，数据中心能源结构逐步过渡到以可再生能源为重要部分的模式。

（3）系统规模扩大与复杂度提升：随着技术的不断进步与应用需求的增加，微电网的规模逐步扩大，系统的复杂度也相应提升，大型工业园区或城市片区的微电网建设规模不断扩大，复杂控制系统在满足能源需求，优化多种能源配置和高效利用中实现。深圳未来大厦全直流配用电建筑项目采用“光储直柔”模式^[20]，在建筑配用电系统中实现全球首个全直流配用电建筑建设，光储直流微电网技术使光伏发电，储能系统，直流配电和柔性交互技术有机结合起来，传统电网依赖减少，同时逐步提升城市能源系统的韧性和可持续性。

（4）与能源互联网的融合：微电网与能源互联网的融合逐步形成广域互联能源系统^[21]，在和大电网兼容互补的过程中，优化调度支持逐步生成，可再生能源高比例接入与用户多样化需求的特点更加明显，多个微电网能够通过公共耦合节点连接配电网，且在并网、孤岛以及集群模式下保持运行^[22]，在极端条件下，集群中一个微电网可为其他微电网供电，关键负荷持续供电的目标同样能够完成。

综上所述，我国微电网领域成果显著，多个示范项目成功应用相关技术，为微电网进一步发展奠定了坚实的基础，但在成本控制、标准制定与市场机制等方面的问题仍有诸多挑战，微电网在未来能源供应体系中有望发挥更大作用，推动能源高效利用与环境保护，助力可持续发展。

在全球范围内，各国政府和机构也都在积极进行微电网的相关研究。下面是各国在微电网方面的研究现状：

美国在微电网领域的研究和示范一直处于领先地位，这与国家投入大量资源相关，例如能源部（DOE）和国家可再生能源实验室（NREL）等机构就表现了对微电网技术的重视。具体项目中像“桑迪胡克”微电网系统，可以用以整合智能控制并储能^[23]，保障了在极端天气下的正常供电，关键基础设施领域的解决方案也提升了能源保障的高效性。同时美国微电网的研发注重与市场需求的整合，这项推动技术在商业与工业场景中广泛应用，例如为数据中心和工业园区构建高效可靠的能源供应^[24]。

欧洲于微电网技术研究同样进展显著。欧盟为“地平线 2020”等科研计划提供

资助^[25]，多个与微电网相关的研究项目包含在内，这些项目为探索能源效率的提高与可再生能源整合以及电网灵活性增强方面做出了很大贡献。并且欧盟对微电网与现有能源市场的融合，以及政策与监管框架的制定相当关注。

日本同样对微电网技术的开发与应用做了很多相关研究，日本政府借助“新能源与工业技术开发组织”等机构，推动众多微电网示范项目。这些项目关注点不只在技术层面的创新，还关注了微电网应对自然灾害的能力^[26]，以及提升能源自给率方面的应用，像日本福岛县的“会津若松”微电网项目，整合了太阳能、风能与储能系统，在地震等自然灾害发生时可独立供电，日本的研究还涉及微电网在智能城市与社区里的应用，进一步探索了用微电网技术实现能源高效利用和环境可持续发展。

德国在欧洲科技领域处于强国地位，技术创新与能源转型政策的紧密结合在相关研究中占据很大比重。德国的“智能电网和微电网”项目整合可再生能源、储能技术和智能控制策略^[27]，研究了分布式能源如何实现高效的能源管理与电网运行的过程，具体展示了微电网在工业和城市能源系统中的应用实例，同时，德国也对提高能源安全和减少碳排放潜力进行探究，这些内容与能源管理和政策应用存在明显的关联。

综上所述，全球微电网研究呈现出多元化与协同发展的特征，各国依据能源需求与技术优势和政策导向，开展了针对性的项目与示范任务，技术进步和国际合作的加强，使微电网在全球能源转型中逐步发挥重要角色，为可持续能源供应和应对气候变化提供了支持。

1.2.2 微电网优化调度的研究现状

微电网的发展中，多目标优化调度重要性不言而喻。对微电网进行优化调度的方法有很多，可以按照目标、时间尺度、控制策略、电源类型、储能配置、网络拓扑结构、运行模式、不确定性因素等进行分类。其中重点探索运行模式和控制策略可以进行内部资源的针对性优化并提高系统的稳定性。文献[28]提出基于NSGA-III的微电网储能系统容量多目标优化配置方法，双层优化模型把储能投资成本最小化，微电网运行成本与负荷缺电率降低。文献[29]针对光储微电网优化配置，从容量和功率两个角度评估分析微电网可靠性与经济性，文献[30]对主网和微网不同的交互方式制定了两种优化策略，文献[31]研究改进鸟群算法的优化方案，因为存在微电网多目标优化调度局部最优与过早收敛问题，自适应选择惯

性权重系数, 线性调整策略与 Lévy 飞行策略, 全局搜索能力和收敛速度在算法里能够提升。文献[32]研究微电网在考虑需求响应与碳排放量时的优化调度问题, 文献[33]对利用改进差分进化算法实现微电网调度的策略进行探讨, 改进后的算法提升微电网运行效率并优化资源配置, 文献[34]的优化模型把系统年成本最低, 负荷停电率最小以及新能源利用效率最大化当作目标, 为微电网平衡经济效益, 供电可靠性和可再生能源利用率提供了指导, 文献[35]提出综合风能和太阳能的储能微电网系统容量协同优化策略。

从算法方面进行探索时可以进一步提高计算的效率, 增强算法在不同环境下的稳定性以及更加精准的提高微电网的综合效益。文献[36]基于鲸鱼优化算法 (WOA) 与非支配排序技术的提出了混合非支配排序鲸鱼优化算法 (NSWOA), NSWOA 结合两种算法的优势, 在优化过程中通过模拟鲸鱼的捕食行为和社交活动, 在群体中进行信息共享和协作, 不断调整搜索方向以快速逼近最优解。文献[37]为解决综合社区能源系统与电动汽车快充站的优化调度问题, 提出一种考虑双储能系统的堆叠电池损耗模型, 并构建包含经济、稳定和环境因素的最优调度模型。针对该模型, 采用相互叠加策略改进 NSGA-III 算法, 以提升多目标优化效果。文献[38]在优化求解中提出一种改进的多目标粒子群优化算法。改进算法针对每次迭代中粒子和全局最优粒子的相似度来调整惯性权重的取值, 使其达到全局最优; 同时采用自适应学习因子增加收敛性和收敛速度。文献[39]为降低混合微电网 (MMG) 总成本, 论文提出一种新型随机动态能源价格管理策略, 对灰狼优化算法 (GWO)、粒子群优化算法 (PSO) 和 JAYA 算法进行定量和定性比较, 旨在最小化净现值和平准化度电成本, 同时优化 MMG 与外部电网间交易能源时 DER 组件的最优尺寸。文献[40]鲸鱼优化算法为主体对高维特性的 MOAPF 问题进行求解。首先, 针对 WOA 算法求解该问题时存在的缺陷, 通过融合布谷鸟算法并引入 Tent 混沌初始化、分段非线性策略和双动态权重模式形成混合改进型鲸鱼优化算法和多目标混合改进型鲸鱼优化算法, 然后采用六个单目标和四个多目标测试函数分别验证上述两种算法的有效性和合理性。文献[41]在传统 NSGA-III 算法中嵌入 Levy 理论和一个区域角度量化机制, 使其更加适用于所提直流微电网储能容量双层优化配置模型的寻优迭代求解, 并结合典型日数据, 仿真验证了所提模型及算法的有效性。

这些研究成果不仅展示了微电网多目标优化调度的前景, 还为微电网进一步

发展提供了理论支撑。

1.2.3 综合需求响应的研究现状

综合需求响应整合了多种能源需求侧的可调控资源，与能源供应系统进行双向互动，用户能源需求满足时，能源系统的运行效率也优化，运行成本降低且能源利用效率和可靠性提升。文献[42]构建双层模型处理复杂供需动态，上下层关系通过该模型协调优化，电力系统供需管理模拟也更好地进行，整体运行效率和稳定性提升，文献[43]开发出分层激励结构对齐电网与用户目标，激励资源合理分配后，需求响应中电网运营商和用户的利益诉求有效对齐，用户参与积极性提高且系统整体效益提升。文献[44]提出 DLIES 低碳经济分布式调度方法，方法中包含隐私保护与需求响应的考虑，为实现互动策略最优，建立双层主从博弈模型，上层领导者为综合能源服务提供商，下层跟随者为能源枢纽运营商和负荷聚合商。文献[45]研究 IES 参与多能源市场时作为价格制定者行为模式，IES 不仅响应市场价格信号，还借助自身的市场影响力影响能源价格，从而实现更优经济收益，理论分析证明所提出的双层 IDR 模型存在唯一解，这一结论为模型在不同场景下的有效性和可靠性提供了理论保障，也能够保障模型的实际应用和求解。文献[46]中提出双层运行框架，针对风能和太阳能的不确定性进行应对，第一层运行基于 24 小时周期的预测管理日前运行，采用统一自适应鲁棒优化（UARO）方法制定跨园区需求响应计划；第二层运行处理日内阶段，借助 GUROBI 求解器对园区间的电力交易进行动态调整，优化能源转换设备以应对小时级波动，文献[47]针对多园区综合能源系统（MPIES）在经济效率提升与可再生能源整合方面的挑战，同时考虑现有研究中对需求响应不确定性研究不足的问题，提出包含共享储能和需求响应不确定性的分布式鲁棒优化方法。引入共享储能与需求响应不确定性处理机制后，分布式鲁棒优化方法在提升 MPIES 经济效率和可再生能源整合能力方面更加突出。该方法考虑系统成本最小化，同时通过可靠性约束使系统运行达到稳定，为多园区综合能源系统优化调度提供了新的视角和解决方案，此类内容在优化调度中非常重要。

综合需求响应技术实现电力系统平衡优化与负荷分配，突发性故障减少，系统失灵现象得以避免，电力系统可靠性与稳定性提升，MG 的经济成本和环境成本降低，它为电力市场优化，节能减排推动，用户利益提升指出了重要技术方向。

1.3 本文主要内容

本文研究对象为微电网，深入探讨了优化调度问题，综合考虑改进算法、需求响应以及多时间尺度的影响，论文的主要研究内容如下：

第一章详细说明了微电网的研究背景及意义，同时对国内外微电网系统、优化调度以及需求响应的研究现状进行分析，明确本文的研究目标与主要内容。

第二章构建包含多种能源设备与储能系统的微电网系统，对光电设备^[48]，风电设备^[49]，热电联产机组，燃气锅炉^[50]，电锅炉^[51]及储能设备等完成数学建模，并分析运行约束。然后针对风光等不确定能源建立了概率模型，并采用场景分析方法创建多个可能的输出场景。再采用拉丁超立方抽样法进行场景生成，场景削减通过考虑 Kantorovich 距离方法进行，提高了模型的鲁棒性与适应性。

第三章提出了基于 MOPSO 算法与 NSGA-III 算法的微电网多目标优化改进算法，将 MOPSO 非支配解集作为初始种群引入 NSGA-III 中，提高了算法的全局搜索能力和收敛效率，同时保持了解的多样性。这种改进策略充分利用了两种算法的优势，克服了传统 NSGA-III 算法收敛速度慢和易陷入局部最优的问题。仿真实验结果表明，改进后的算法在优化微电网运行成本、碳排放量和储能使用等方面表现出色，能够有效降低微电网的综合成本和环境影响，提高其运行效率和经济性。

第四章基于模型预测控制（MPC）和考虑疲劳效应的激励型需求响应，提出了日内双时间尺度调度策略。首先介绍了 MPC 模型控制的基本原理和步骤，然后分别研究了长时间尺度下的微电网日前调度和双时间尺度下的日内调度。在日内调度中，考虑了发电机组出力调度、配电网调度、能源储备调度和需求侧管理等关键要素，并引入了考虑用户响应疲劳特性的改进用户模型。通过仿真实验分析了不同调度策略下的微电网运行情况，结果表明所提策略能够有效降低微电网的总成本和功率波动率，提高系统的经济性和稳定性。

第五章对论文的研究成果进行了总结，指出所提方法和策略在微电网优化调度中的有效性。同时，对未来微电网优化调度的研究方向进行了展望，包括复杂微电网结构的优化模型建立、考虑更多不确定性因素的鲁棒性优化策略、智能化运行管理以及综合能源系统的优化等方面，为后续研究提供了参考。

第 2 章 微电网运行模型

随着全球能源危机的加剧和环境污染问题的日益严重，微电网（Microgrid, MG）作为一种新型的能源供应系统受到了广泛关注。微电网通过整合多种分布式能源如太阳能、风能、储能设备等，实现了能源的高效利用和灵活配置。多能源微电网系统不仅能够提高能源供应的可靠性和稳定性，还能有效降低对传统化石能源的依赖以减少环境污染。因此，深入研究多能源微电网的结构及其各设备的数学模型对于实现微电网的优化运行和可持续发展具有重要意义。

2.1 微电网结构

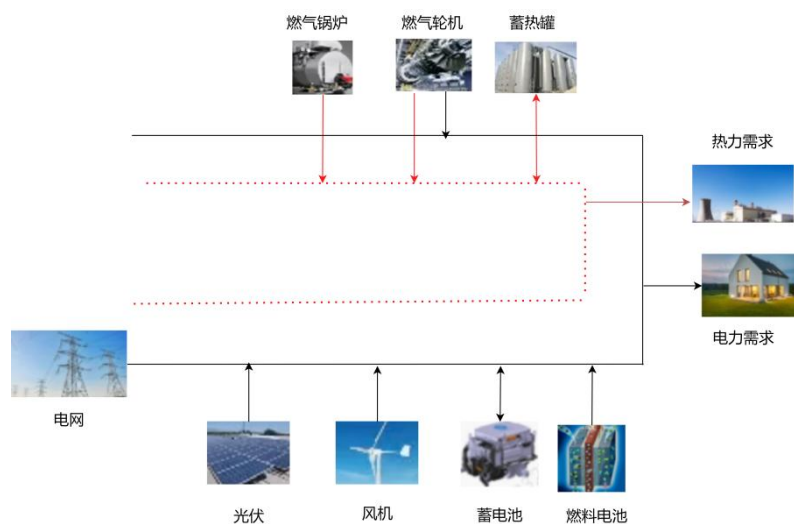


图 2-1 微电网结构图

构建一个综合热电联产的微电网模型，涵盖了太阳能光伏（PV）、风力涡轮机（WT）、电池储能系统、微型燃气轮机（MT）、蓄电池（SB）、蓄热罐（HST）、燃气锅炉（GB）以及燃料电池（FC）。微电网结构图如图 2-1 所示。

2.2 各设备的数学模型及运行约束

2.2.1 CHP 机组

热电联产机组是一种同时生成电力与热能的设备，通过燃料如天然气等在燃烧中产生热能，驱动发电机发电，同时余热回收用于供暖，并满足其他的热能需求，此类设备能源利用效率很高，而且跟传统的供热方式相比更加清洁，在工业、商业和住宅中都广泛使用，热电联产机组不仅高效节能，还能够降低能源成本，提高能源利用效率，同时提供备用电力，用于应对不同场合的能源需求。本文热

电联产机组核心是燃气轮机,通过燃烧天然气等燃料,同时产生电能和热能,显著提高能源利用效率。CHP 机组不仅能够满足电力需求,还能有效利用燃气轮机排放的高温余热,实现能源的梯级利用,减少能源浪费。

2.2.1.1 燃气轮机的数学模型

燃气轮机的输出电功率和热功率可以通过以下公式表示:

$$P_{GT}(t) = \eta_{GT} \cdot Q_{GT}(t) \quad (2-1)$$

$$Q_{GT,heat}(t) = \zeta_{GT} \cdot Q_{GT}(t) \quad (2-2)$$

式中: $P_{GT}(t)$ 为燃气轮机在时间 t 的输出电功率; η_{GT} 为燃气轮机的发电效率; $Q_{GT}(t)$ 为燃气轮机在时间 t 的燃料消耗量; ζ_{GT} 为燃气轮机的余热回收效率; $Q_{GT,heat}(t)$ 为燃气轮机回收的热功率。

2.2.1.2 燃气锅炉

燃气锅炉热功率如下:

$$H_{GB}(t) = P_{GB}(t)\eta_{GB}Q^G \quad (2-3)$$

式中: $P_{GB}(t)$ 为 GB 在 t 时刻的气体输入功率; η_{GB} 为 GB 在 t 时刻的发热效率; Q^G 为天然气低热值。

其输出功率约束为:

$$H_{GB,min}(t) \leq H_{GB}(t) \leq H_{GB,max}(t) \quad (2-4)$$

式中: $H_{GB}(t)$ 是 GT 在 t 时刻的输出功率, $H_{GB,max}$ 、 $H_{GB,min}$ 为 GB 输出功率的上、下限。

2.2.1.3 CHP 机组的总热功率输出

CHP 机组的总热功率输出包括燃气轮机的余热回收部分,可以表示为:

$$Q_{CHP,heat}(t) = Q_{GT,heat}(t) \quad (2-5)$$

式中: $Q_{CHP,heat}(t)$ 为 CHP 机组在时间 t 的总热功率输出; $Q_{GT,heat}(t)$ 为燃气轮机在时间 t 回收的热功率。

本文 CHP 系统中会额外配备 GB 来进一步提高热能供应能力,燃气锅炉的热功率输出为:

$$Q_{GB}(t) = \eta_{GB} \cdot Q_{GB,in}(t) \quad (2-6)$$

其中: $Q_{GB}(t)$ 表示燃气锅炉在时间 t 的热功率输出; η_{GB} 表示燃气锅炉的热效率; $Q_{GB,in}(t)$ 表示燃气锅炉的燃料在时间 t 的输入量。

因此，CHP 机组的总热功率输出为燃气轮机和燃气锅炉的热功率之和：

$$Q_{CHP,heat}(t) = Q_{GT,heat}(t) + Q_{GB}(t) \quad (2-7)$$

2.2.1.4 CHP 机组的运行约束

由于 CHP 的物理限制，CHP 中各机组的实际输出功率将严格限制在上、下限之间。

$$P_{GT,min} \leq P_{GT}(t) \leq P_{GT,max} \quad (2-8)$$

$$Q_{GB,min} \leq Q_{GB}(t) \leq Q_{GB,max} \quad (2-9)$$

式中： $P_{GT,min}$ 为燃气轮机的最小输出电功率； $P_{GT,max}$ 为燃气轮机的最大输出电功率； $Q_{GB,min}$ 表示燃气锅炉的最小输出热功率； $Q_{GB,max}$ 表示燃气锅炉的最大输出热功率。

燃气轮机和燃气锅炉的燃料消耗需满足一定的限制，以确保燃料供应的稳定性和经济性。

$$Q_{GT,in,min} \leq Q_{GT}(t) \leq Q_{GT,in,max} \quad (2-10)$$

$$Q_{GB,in,min} \leq Q_{GB,in}(t) \leq Q_{GB,in,max} \quad (2-11)$$

式中： $Q_{GT,in,min}$ 表示燃气轮机的最小燃料消耗量； $Q_{GT,in,max}$ 表示燃气轮机的最大燃料消耗量； $Q_{GB,in,min}$ 表示燃气锅炉的最小燃料输入量； $Q_{GB,in,max}$ 表示燃气锅炉的最大燃料输入量。

燃气轮机和燃气锅炉的功率变化率需在一定范围内，以避免设备的频繁启停和过度磨损。

$$|P_{GT}(t) - P_{GT}(t-1)| \leq R_{GT} \quad (2-12)$$

$$|Q_{GB}(t) - Q_{GB}(t-1)| \leq R_{GB} \quad (2-13)$$

式中： R_{GT} 表示燃气轮机的功率爬坡率上限； R_{GB} 表示燃气锅炉的功率爬坡率上限。

2.2.2 燃料电池

燃料电池通过电化学反应将燃料(如氢气、天然气等)的化学能直接转化为电能。其输出功率可以表示为：

$$P_{FC}(t) = \eta_{FC} \cdot Q_{FC,in}(t) \quad (2-14)$$

式中： $P_{FC}(t)$ 表示燃料电池在时间 t 的输出电功率； η_{FC} 表示燃料电池的发电效率； $Q_{FC,in}(t)$ 表示燃料电池在时间 t 的燃料输入量。

燃料电池的输出电功率需在一定范围内，以确保设备安全运行：

$$P_{FC,min} \leq P_{FC}(t) \leq P_{FC,max} \quad (2-15)$$

式中： $P_{FC,min}$ 表示燃料电池的最小输出电功率； $P_{FC,max}$ 表示燃料电池的最大输出电功率。

2.2.3 储能装置

2.2.3.1 蓄电池

蓄电池可以在电力需求高峰或可再生能源产量过剩时存储能量，并在需求增加时释放能量，提高供电可靠性。通常蓄电池的充放电状态（SOC）是通过剩余电量和额定电量的比率来评估的^[52]。

$$S(t+1) = S(t) + \frac{\eta \cdot P_c(t) \cdot \Delta t}{C_r} - \frac{P_{disc}(t) \cdot \Delta t}{C_r} \quad (2-16)$$

式中： $S(t)$ 是第 t 时段的荷电状态； $P_{disc}(t)$ 是第 t 时段的放电功率； $P_c(t)$ 是第 t 时段的充电功率； $P_{disc}(t)$ 是第 t 时段的放电功率； η 是充电效率； Δt 是时段长度； C_r 是蓄电池的额定容量。

2.2.3.2 蓄热罐

HST 在 t 时刻剩余热能的数学模型可以表示为^[53]：

$$E_{HST,t+1} = (1 - \delta_{HST})E_{HST,t} + \left(P_{ch,HST,t} \cdot \eta_{ch,HST} - \frac{P_{dc,HST,t}}{\eta_{dc,HST}} \right) \Delta t \quad (2-17)$$

HST 在 t 时刻的输出功率可以表示为：

$$P_{out,HST,t} = P_{ch,HST,t} \cdot \eta_{ch,HST} - \frac{P_{dc,HST,t}}{\eta_{dc,HST}} \quad (2-18)$$

式中： $E_{HST,t}$ 、 $E_{HST,t+1}$ 分别为 t 时刻和 $t+1$ 时刻蓄热罐的储热量； δ_{HST} 为蓄热罐的热损失系数， $P_{ch,HST,t}$ 、 $P_{dc,HST,t}$ 分别为 t 时刻蓄热罐的充热功率和放热功率， $\eta_{ch,HST}$ 、 $\eta_{dc,HST}$ 分别为蓄热罐的充热效率和放热效率； $P_{out,HST,t}$ 为 t 时刻 HST 的输出功率。

2.2.3.3 电-热耦合的储能系统约束

由于 SB 的物理限制，其实际输出功率将严格限制在上、下限之间，HST 同理。

$$\mu_{SB}(t)P_{SB}^{min} \leq P_{SB}(t) \leq \mu_{SB}(t)P_{SB}^{max} \quad (2-19)$$

式中： $P_{SB}(t)$ 是 SB 在 t 时刻的输出功率； P_{SB}^{max} 、 P_{SB}^{min} 为 SB 输出功率的上、下限； $\mu_{SB}(t) = 1$ 表示 SB 在 t 时刻是充电状态， $\mu_{SB}(t) = -1$ 代表其在 t 时刻是放电状态，并且 $\mu_{SB}(t)$ 不能等于 0，表示 SB 不能同时充电和放电。

如公式(2-19)所示，SB 的剩余电量应限制在合理范围内。SB 的剩余电量在调度期开始和结束时应保持一致，如公式(2-21)所示，HST 同理。

$$E_{SB,min} \leq E_{SB}(t) \leq E_{SB,max} \quad (2-20)$$

$$E_{SB,0} = E_{SB,24} \quad (2-21)$$

$$\mu_{HST}(t)P_{HST}^{\min} \leq P_{HST}(t) \leq \mu_{HST}(t)P_{HST}^{\max} \quad (2-22)$$

式中： $P_{HST}(t)$ 是 HST 在 t 时刻的输出功率； $P_{HST}^{\max}$ 、 $P_{HST}^{\min}$ 为 HST 输出功率的上、下限； $\mu_{HST}(t) = 1$ 表示 HST 在 t 时刻是储热状态，而 $\mu_{HST}(t) = -1$ 代表其在 t 时刻是放热状态，并且 $\mu_{HST}(t)$ 不能等于 0，表示 HST 不能同时储热和放热。

$$E_{HST,\min} \leq E_{HST}(t) \leq E_{HST,\max} \quad (2-23)$$

$$E_{HST,0} = E_{HST,24} \quad (2-24)$$

2.2.4 电网交互

式（2-25）~（2-26）的建立表明，MG 向 DN 销售、购买电能的功率不能超过上限^[54]，式（2-27）表示销售和购买电能的行为不能同时发生。

$$0 \leq P_t^{\text{buy}} \times u_t^{\text{buy}} \leq P_{\max}^{\text{buy}} \quad (2-25)$$

$$0 \leq P_t^{\text{sell}} \times u_t^{\text{sell}} \leq P_{\max}^{\text{sell}} \quad (2-26)$$

$$u_t^{\text{buy}} + u_t^{\text{sell}} \leq 1 \quad (2-27)$$

式中： P_t^{buy} 是 t 时刻 MG 从 DN 购买电力的功率； P_t^{sell} 是 t 时刻 MG 向 DN 出售电力的功率； $P_{\max}^{\text{buy}}$ 是 t 时刻 MG 从 DN 购买电力的功率； $P_{\max}^{\text{sell}}$ 是 t 时刻 MG 向 DN 出售电力的功率。

2.3 不确定能源建模及其误差预测

为了更准确地模拟实际运行中的不确定性，本研究对微电网优化模型进行了改进，引入了风电与光伏输出的随机性因素^[55]。通过建立概率模型，考虑风速和太阳辐射的随机变化对微电网运行的影响。再采用场景分析方法生成多个可能的输出场景，每个场景都对应一定的概率。这种改进使得模型能够更好地应对可再生能源的随机性与不确定性时，提高了微电网调度策略的鲁棒性与适应性。

2.3.1 太阳辐照度模型

太阳辐照度是影响光伏发电输出功率的关键因素。太阳辐照度的变化受到天气条件、季节、地理位置等多种因素的影响，具有明显的随机性。为了建模太阳辐照度的不确定性，本研究假设太阳辐照度服从 Beta 分布。Beta 分布是一种灵活的概率分布，能够很好地描述在固定区间内的随机变量，其概率密度函数为：

$$F_{PV}(v) = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{s}{s_m}\right)^{\beta-1} \quad (2-28)$$

式中： α 、 β 分布是 Beta 分布函数的参数； s 和 s_m 分别是实际和最强的光照强度；

Γ 是 Gamma 函数。

通过上述模型，可以生成不同时间尺度下的太阳辐照度预测值，进而计算光伏发电的输出功率。光伏发电的输出功率 P_{PV} 可以表示为：

$$P_{PV} = \lambda \cos(\theta) \eta_v M_v \eta_{vp} \quad (2-29)$$

式中： M_v 为电池板面积； η_{vp} 和 η_v 分别为光伏电池效率系数和太阳能控制器“最大功率点跟踪”的效率系数； λ 、 θ 分别为太阳辐射和太阳入射角。

2.3.2 风速和风力发电输出功率建模

大部分地区风速均近似服从两参数 Weibull 分布，其概率模型可表示为：

$$f(v, \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(v/\lambda)^k} & v \geq 0 \\ 0 & v < 0 \end{cases} \quad (2-30)$$

式中： v 表示实时风速； k 表示形状参数； λ 表示比例参数。

得到风速的概率分布后可以进一步计算风机的输出功率。风机的输出功率 P_{WT} 表示为：

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \\ a_v v^2 + b_v v + c_v, & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_{WT_r}, & v_r \leq v < v_{co} \\ 0, & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (2-31)$$

式中： a_v 、 b_v 、 c_v 为风机输出系数； P_{WT_r} 为风机的额定功率； v_{ci} 、 v_{co} 和 v_r 分别为风机的切入、切出和额定风速。

2.3.3 场景生成与削减

为有效处理微电网优化中的不确定性，采用拉丁超立方抽样法（LHS）进行场景生成，再通过考虑 Kantorovich 距离的场景削减方法进行场景削减^[56]。LHS 通过在每个变量的范围内均匀抽样，确保样本的代表性和多样性。Kantorovich 距离法则用于衡量场景间的差异，以筛选出最具代表性的场景。

2.3.3.1 拉丁超立方抽样法场景生成

在微电网优化中应用拉丁超立方抽样法^[57]，场景生成表示可再生能源出力与负荷需求不确定性的形式，一种输入变量组合可能代表一个场景，这些变量对微电网运行影响显著，LHS 抽样过程把每个输入变量范围分为等概率区间，给定某变量时，每个区间生成一个样本点，样本点于变量范围均匀分布，从而提升抽样的代表性和多样性。

使用 LHS 生成初始场景集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ ，每个场景 s_i 代表一种可能的风

速和太阳辐射强度。每个输入变量 X 的范围被划分为 N 个等概率区间，每个区间内生成一个样本点：

$$X_{ij} = X_i + \left(\frac{X_{i+1} - X_i}{N} \right) \times r_i \quad (2-32)$$

式中： X_{ij} 是第 i 个输入变量在第 j 个场景中的样本点； r_i 是在 $[0, 1]$ 区间内的随机数。

生成数量庞大的初始场景，能够覆盖更广泛的不确定性空间，这使微电网优化运行方案的提升显得尤为重要，把均匀分布的样本点转换到每个场景的实际范围内后，风速，光照强度等参数值在生成时，确保了生成的场景既符合概率分布的假设，又能反映实际的运行条件，LHS 生成的场景有效地应对微电网中的不确定性，为后续优化调度打下坚实的基础。

2.3.3.2 考虑 Kantorovich 距离的场景削减法

微电网优化调度中，初始场景数量生成的复杂性偏强，削减这些场景能够降低计算复杂度并提升优化效率，同时要求保留最具代表性的部分，Kantorovich 距离可衡量概率分布的差异性，用于进行场景削减处理，具体步骤如下：

将均匀分布的样本点转换到每个场景的实际范围，根据转换后的样本点，生成相应的场景数据。假设由 LHS 生成的风电功率预测值场景数为 N ，缩减后的场景数为 n 。计算每个场景 (s_i, s_j) 的 Kantorovich 距离 $d_k(s_i, s_j)$ ，则 Kantorovich 距离为：

$$d_k(s_i, s_j) = \left(\sum_{s=1}^S (P_{i,t} - P_{j,t})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-33)$$

式中： $d_k(s_i, s_j)$ 代表场景 s_i 和场景 s_j 之间的距离度量； $P_{i,t}$ 和 $P_{j,t}$ 代表在 t 时刻场景 s_i 和场景 s_j 的功率。

选择与场景 s_k 的距离最小的场景 s_r ，并计算 Kantorovich 距离与场景概率的乘积：

$$D_k(s_i, s_j) = d_k(s_i, s_j) \cdot \rho_r \quad (2-34)$$

式中： $D_k(s_i, s_j)$ 代表场景 s_i 和场景 s_j 之间的加权距离； ρ_r 代表场景 r 的概率。

对每个场景重复以上步骤，再对加权距离最小的场景进行删除，同时更新减少的场景数和剩余场景的概率分布。重复上述步骤，直到达到预定的场景数量 n 。最终得到一组具有代表性的场景，这些场景能够较好地反映原始场景集的概率分布。通过 Kantorovich 距离的场景削减方法，可以有效减少场景数量，同时保持

优化结果的准确性和可靠性。

2.4 本章小结

本章详细阐述了微电网的结构及其各设备的数学模型，为微电网优化运行提供了基础。涵盖了光电、风电、CHP 机组以及储能装置等设备的模型及其运行约束。并针对太阳辐照度和风速等不确定能源建立概率模型，并采用场景分析方法创建多个可能的输出场景，每个场景对应一定的概率。同时采用拉丁超立方抽样法进行场景生成，再通过考虑 Kantorovich 距离的场景削减方法进行场景削减，以提高模型的鲁棒性和适应性。这些模型和方法为后续微电网优化调度研究提供了理论支持和基础数据。

第3章 基于改进 NSGA-III 算法的微电网多目标优化运行

微电网运行管理中优化调度对经济, 环境和可靠性综合效益最大化的关键性不言而喻, 可再生能源的广泛应用提升了需求侧管理复杂性, 微电网优化调度受到多重挑战, 包含多目标优化, 可再生能源不确定性和需求侧动态变化等, 在这些复杂条件下实现微电网高效运行, 当前研究面临着多重热点与难点问题。

本章提出一种改进的多目标优化运行方法, 应对微电网调度中的多目标优化问题, 结合多目标粒子群优化算法 (MOPSO) 与第三代非支配排序遗传算法 (NSGA-III) 的特征, 试图通过两者的优势提升收敛速度与解的多样性, 为微电网优化提供实用的解决策略, 后文对 MOPSO 和 NSGA-III 的原理, 改进策略以及在微电网调度中的应用进行分析, 通过仿真实验验证改进算法的运行价值, 同时评估其在实际应用时的潜在优势。

3.1 多目标优化算法介绍

多目标优化算法的特征在于同时应对多个存在冲突的目标函数, 这些函数难以同时达到最优, 平衡的处理变得尤为重要, 单目标优化问题生成单一最优解, 而多目标优化问题的解为非支配解的解组, 这些解在多个目标之间形成平衡并生成 Pareto 前沿, 在多目标优化算法中, 找到非支配解并确保解的多样性和分布性, 这是算法的核心任务。

多目标优化算法包含 NSGA2, MOPSO, SPEA2 和 MOEA/D 等, NSGA2 算法借助快速非支配排序与拥挤度计算, 种群的多样性与收敛性能够保持。MOPSO 算法中, 粒子群的协作与信息共享推动最优解寻找的进行, SPEA2 算法维护外部档案保存非支配解^[58], 解的多样性也能够确保, MOEA/D 算法把多目标问题分解为多个单目标问题求解, 效率与效果都提升。多目标优化算法在微电网优化中可对多个目标同时优化, 像运行成本的最小化, 环境污染的降低, 可再生能源利用率的提升等, 这些算法在解空间搜索非支配解, 为微电网优化运行提供决策依据, 借助多目标优化算法, 满足系统约束条件时能够找到最优分布式电源出力方案, 微电网的经济, 环保与可靠运行也能够实现。

3.2 MOPSO 算法

粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization, PSO）是一种基于群体智能的优化算法，其灵感来源于模拟鸟群在寻找食物时的社会行为。PSO 算法通过初始化一群随机分布的粒子，每个粒子代表一个潜在解，粒子在搜索空间中通过跟踪个体最优位置（pbest）和全局最优位置（gbest）来调整自己的速度与位置，从而逐步逼近最优解。粒子的速度与位置更新公式如下：

$$v_i = v_i + c_1 \times r_1 \times (pbest_i - x_i) + c_2 \times r_2 \times (gbest_i - x_i) \quad (3-1)$$

$$x_i = x_i + v_i \quad (3-2)$$

式中： v_i 和 x_i 分别为粒子的速度和位置； $pbest_i$ 和 $gbest_i$ 分别代表粒子个体所找到的最优解和整个种群所找到的全局最优解； r_1, r_2 是在 $[0, 1]$ 中均匀分布的伪随机数； c_1 和 c_2 是学习因子。

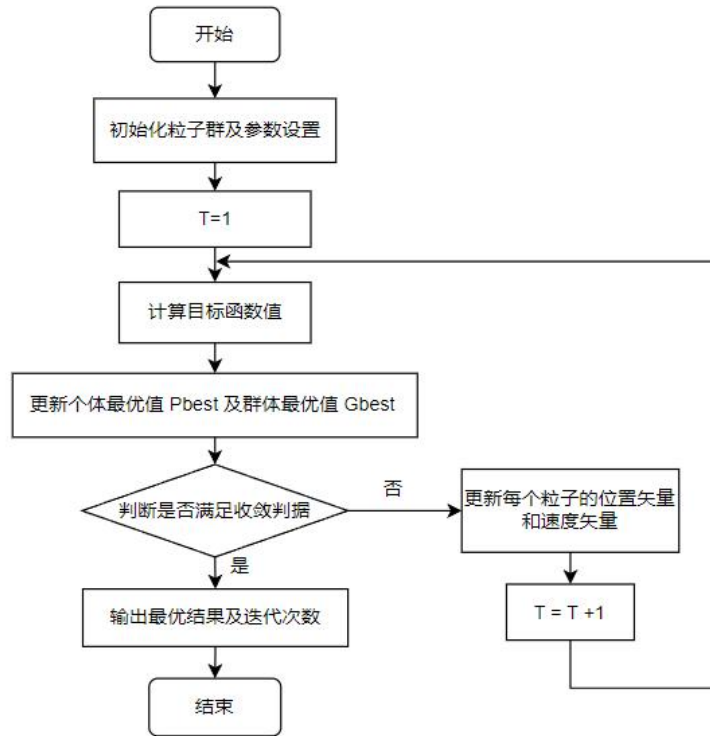


图 3-1 PSO 算法流程框图

PSO 算法因其简单易实现、全局搜索能力强等优点，在单目标优化问题中得到了广泛应用。然而，随着多目标优化问题的日益复杂，传统的 PSO 算法难以直接应用于多目标场景。为此，研究者们提出了多目标粒子群优化算法，将 PSO 算法扩展到多目标优化领域。

MOPSO 算法的难点与重难点在于应对多目标的冲突和权衡关系，通过引入

非支配排序机制，可对粒子群中的粒子进行分层次处理，从而识别出当前的非支配解集。对于粒子 i ，不存在粒子 j 在所有目标上都优于粒子 i 时，粒子 i 就为非支配的，通过这种方式逐步构建 Pareto 前沿，在多目标优化中，适应度共享机制或基于拥挤距离的方法在 MOPSO 算法中使用，完成粒子的适应度评估。适应度共享机制调整粒子适应度，依据为解空间里的粒子分布密度，维持种群多样性时，粒子群搜索的聚集现象也减少，拥挤距离计算测量粒子周围邻域的平均距离，评估粒子拥挤程度之后，种群均匀分布逐步保持。下图 3-2 是 MOPSO 算法的流程框图：

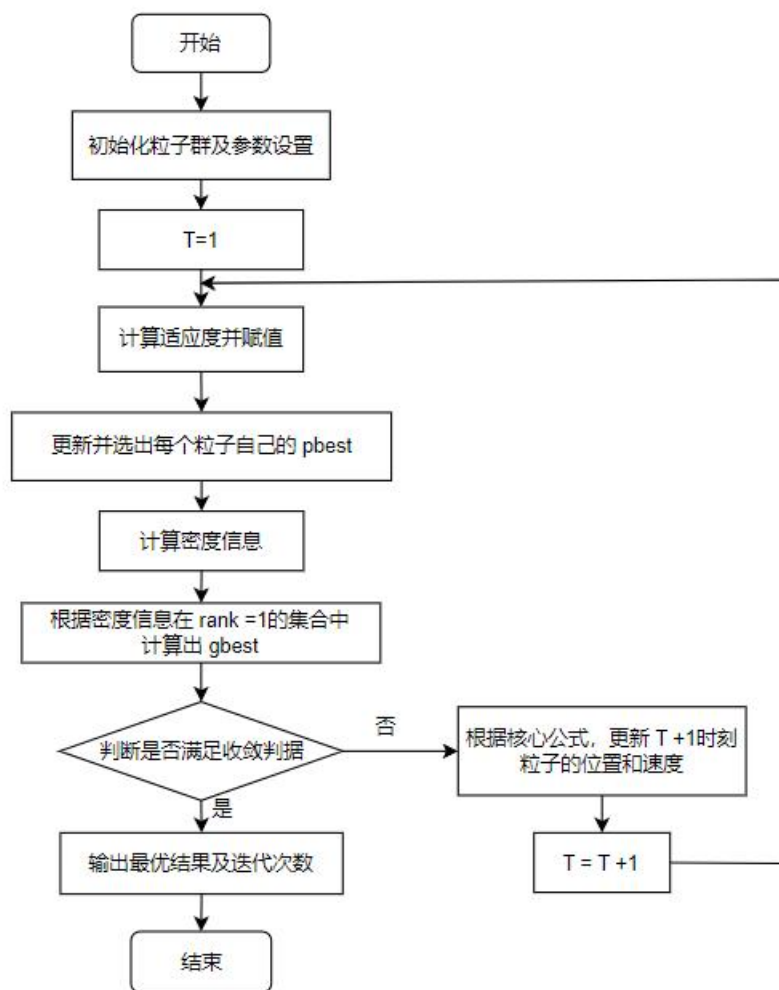


图 3-2 MOPSO 算法流程框图

3.3 NSGA-III算法

多目标优化问题在工程、科学和经济学等广泛领域中广泛存在，此类问题包含多个相互冲突的目标函数，需要在满足约束条件的前提下找到各目标平衡解，随着复杂性提升，特别是目标数量超过三个后，目标空间维数增加令 NSGA-II

逐渐显示局限性。NSGA-II 算法在多目标优化领域取得了广泛的成功，但在高维目标问题中暴露出不完全性能，为应对这类问题，NSGA-III 算法受到各方推动逐渐应运而生^[59]。NSGA-III 算法由 Deb 和 Jain 于 2014 年提出，旨在解决三个或更多目标的多目标优化问题。该算法的核心思想是通过引入参考点（Reference Points）和参考方向（Reference Directions）来引导种群的进化，从而在 Pareto 前沿上均匀分布解。

NSGA-III 算法相比于 NSGA 和 NSGA-II 算法引入了一组均匀分布的参考点用于指导种群的选择，保持种群的多样性和收敛性。参考点的数量和位置可以根据目标个数和种群大小自适应地确定，而不需要人为地设定。

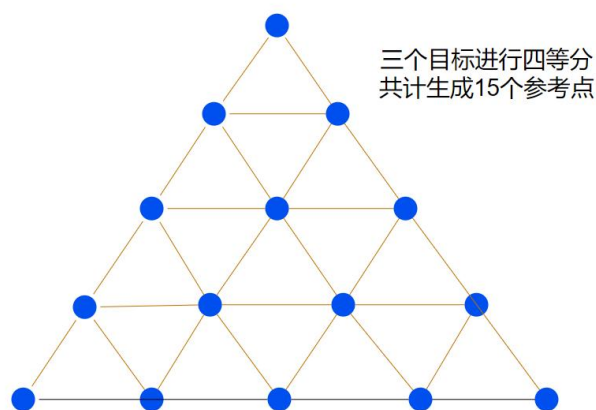


图 3-3 参考点分布

以一个三目标问题为例，这些参考点实际上等间距均匀分布在一个等边三角形平面上，其中这个等边三角形的三个顶点坐标分别为 $(1,0,0)$ 、 $(0,1,0)$ 、 $(0,0,1)$ ，则这些参考点的示意图如图 3-3 所示，其中上图中的 15 个小圈就是参考点：

NSGA-III 算法采用了一种新的归一化方法，即用理想点和截距点将目标空间映射到单位超立方体中，然后计算每个个体与最近的参考点的距离，根据距离和参考点的拥挤度进行选择，这样可以避免目标之间的尺度差异和非均匀分布的影响。

在 NSGA-III 算法选择过程中，不仅考虑了个体的非支配等级，还考虑了个体的参考点关联度，即个体与参考点的距离和参考点的拥挤度，这样可以更好地平衡种群的多样性和收敛性，同时也可以避免过度选择或忽略某些目标。如图 3-4 为 NSGA-III 算法流程框图

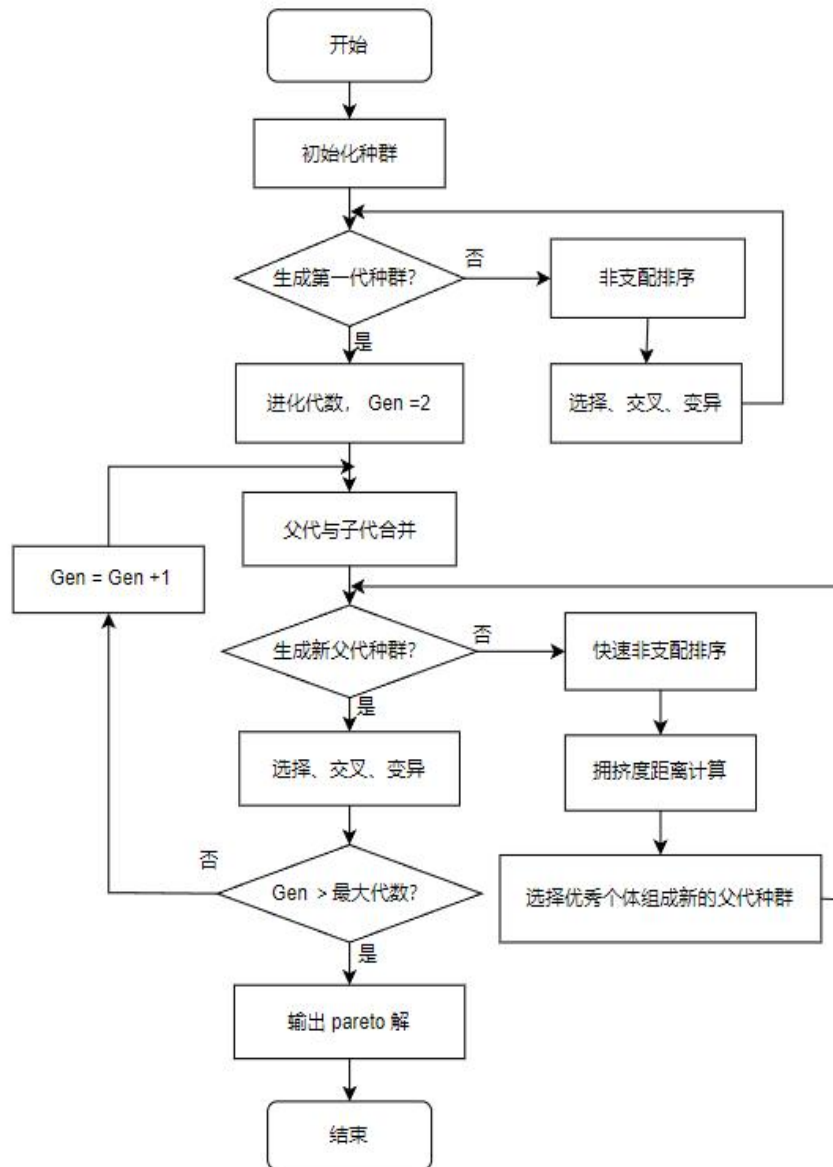


图 3-4 NSGA-III 算法流程框图

3.4 NSGA-III 改进算法

NSGA-III与 MOPSO 算法均为多目标优化算法。NSGA-III的优势在于其通过交叉和变异过程，实现了更广泛的搜索空间，有效避免了局部最优解的陷入，然而收敛速度相对较慢。相对地，MOPSO 算法虽然容易陷入局部最优，但精度高收敛速度更快。

为了结合两种算法的优势并弥补各自的不足，采取了一种创新的策略：首先在 MOPSO 算法中引入了适应度共享机制。这一机制通过调整粒子的适应度，依据粒子在解空间中的分布密度，有效地维持了种群的多样性，减少了粒子群在搜索过程中的聚集现象，从而避免了早熟收敛。

然后进一步将改进后的 MOPSO 的结果作为部分 NSGA-III 的初始种群。这样做可以在保持 MOPSO 解集多样性的同时，为 NSGA-III 提供更广阔的探索空间，实现算法间的互补。同时部分地引入 MOPSO 结果，可以在初期就实现对解空间的广泛探索，避免了传统 NSGA-III 算法在初期可能陷入局部最优的问题。并在此基础上利用 NSGA-III 的遗传操作进行深入挖掘，实现更好的局部搜索。

此外，MOPSO 算法的快速收敛特性使得改进算法在初期能够迅速找到一组较优的解，从而加快了整体算法的收敛速度。而 NSGA-III 算法的参考点机制和拥挤度计算确保了解的多样性，避免了解的聚集现象，使得最终的 Pareto 前沿更加均匀分布。通过混合使用 MOPSO 和 NSGA-III 算法，改进算法减少了对初始种群随机性的依赖，提高了算法的鲁棒性和稳定性。混合使用两种算法开发一种高效而全面的策略，可以更有效地利用计算资源，以解决微电网领域中的多目标优化难题，推动能源管理的创新和优化。

以下是 NSGA-III 改进算法的具体流程：

步骤 1：初始化。初始化粒子群的位置和速度为随机值，确保覆盖解空间的广泛区域。设定 MOPSO 和 NSGA-III 算法的粒子群规模、迭代最大次数、学习因子、交叉率、变异率等。

步骤 2：粒子群算法。对每个粒子计算其原始适应度，通常基于非支配排序和拥挤距离。引入适应度共享机制，计算每个粒子的适应度共享值 S_i ，并调整其适应度。根据适应度共享调整的适应度，更新粒子的速度和位置。重复适应度计算、适应度共享、粒子更新步骤，直到达到预设的迭代次数。在迭代完成后，提取非支配排序后的非支配解集。

$$S_i = \frac{1}{\sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{d_{ij}^2}{\rho^2}} \quad (3-3)$$

式中： S_i 是粒子的适应度共享值， d_{ij} 是粒子 i 和 j 之间的距离， n 是种群中的粒子总数， ρ 是共享参数。

步骤 3：非支配遗传算法。将 MOPSO 得到的非支配解作为 NSGA-III 初始种群的一部分，与随机生成的初始种群整合。对当前种群进行非支配排序、拥挤距离的评估、选择和繁殖操作、环境选择等 NSGA-III 算法步骤，直到达到最大迭代次数。在 NSGA-III 算法迭代完成后，得到最终的 Pareto 最优解集。

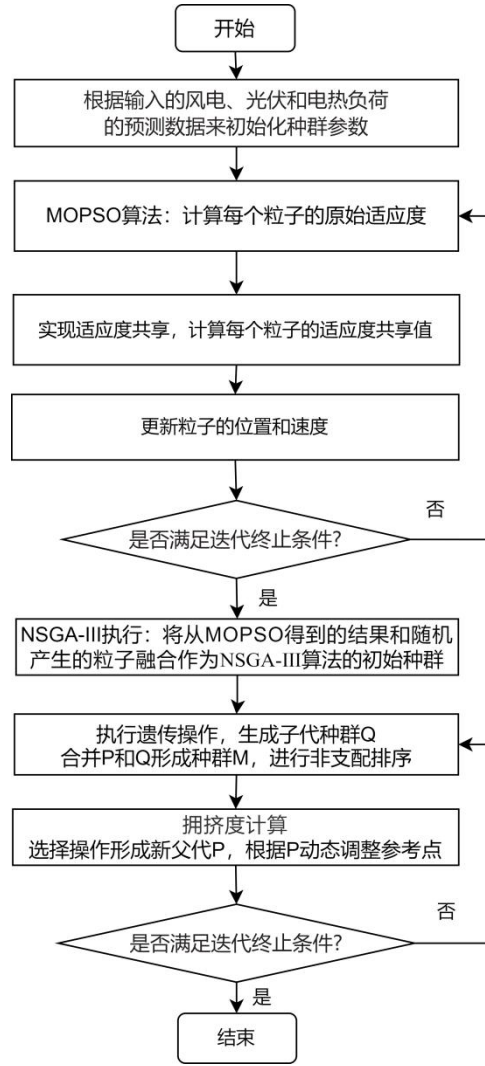


图 3-5 NSGA-III 改进算法流程

3.5 微电网优化目标及约束

微电网作为一种灵活且高效的分布式能源系统，在现代能源网络中发挥着越来越重要的作用。其优化运行不仅关系到系统的经济性、可靠性和环境友好性，还对整体能源系统的可持续发展具有深远影响。因此，构建一个综合考虑多目标的优化运行模型对于微电网的高效管理至关重要。本节将详细阐述微电网多目标函数的设定以及相应的约束条件。

3.5.1 优化目标

微电网优化运行中，多个目标的平衡显得尤为重要，本研究以降低经济成本，减少储能充放电量以及实现总二氧化碳排放量最小为优化目标。这些目标不仅包含经济性的要求，同时对环境和技术也施以重要性，以期在多个特征要求下达到运行平衡，目标之间在不完全对称的逻辑特征下推动系统的优化，经济和环境成

本逐步完成平衡的实现。

目标 1：运行成本最低

微电网的运行成本是衡量其经济性的重要指标，主要包括发电设备的运行成本、燃料成本以及与大电网的交互成本。运行成本的最小化有助于降低微电网的运营负担，提高其经济竞争力。具体目标函数如下：

$$\min F_1(x) = \sum_{t=1}^{T=24} \left[\sum_{i=1}^{n_G} (C_{NG} \cdot P_{NG,i,t} + k_{ur} \cdot P_{NG,i,t}^2) + C_{Grid,t} \right] \quad (3-4)$$

$$C_{Grid,t} = \sum_{t=1}^{T=24} (C_{buy} - C_{sel}) \quad (3-5)$$

式中： $F_1(x)$ 为综合运营成本； n_G 是微电网中发电设备的数量； C_{NG} 为天然气的成本单价； $P_{NG,i,t}$ 是第*i*个发电设备在时间*t*的功率输出； k_{ur} 是发电设备的运行成本系数； $C_{Grid,t}$ 为微网与大电网交互成本； C_{buy} 、 C_{sel} 分别为在*t*时段时微电网从主电网购买电力和向主电网出售电力的成本。

目标 2：储能充放电量最少

储能系统在微电网中起着重要的调节作用，但频繁的充放电操作会缩短储能设备的使用寿命。因此，减少储能充放电量是优化运行的重要目标之一。具体目标函数如下：

$$\min F_2(x) = \sum_{t=1}^{T=24} |P_{discha}(t) - P_{cha}(t)| \quad (3-6)$$

式中： $F_2(x)$ 为储能充放电量； $P_{discha}(t)$ 表示在时间*t*的放电功率； $P_{cha}(t)$ 表示在时间*t* 的充电功率。

目标 3：总二氧化碳排放量最小

随着全球对环境保护的重视，减少二氧化碳排放成为微电网优化运行的重要目标。通过优化发电设备的功率输出，可以有效降低微电网的碳排放，实现环境友好型运行。具体目标函数如下：

$$\min F_3(x) = \sum_{t=1}^{T=24} \left[\sum_{i=1}^n (r_i P_{G,i}(t)) \right] \quad (3-7)$$

式中： $F_3(x)$ 是二氧化碳总排放量； r_i 表示第*i*种发电设备的二氧化碳的排放系数； $P_{G,i}(t)$ 是在时间*t*内第*i*个发电设备（如燃气轮机、燃气锅炉等）的功率输出。

3.5.2 约束

在微电网的运作中，关键的制约因素包括确保电力供需的均衡、遵守各分布式发电资源的输出限制，以及蓄电池的充放电容量约束。

约束 1：电力平衡

电力平衡是微电网运行的基本要求，确保在每个时间段内，微电网的总发电量与负荷需求相匹配。具体约束如下：

$$P_{\text{load}}(t) = \sum_{j=1}^N P_j(t) + P_{\text{Grid}}(t) + P_{\text{SB}}(t) \quad (3-8)$$

式中： N 表示的是分布式电源的总数； $P_{\text{load}}(t)$ 是时间 t 的电力负荷； P_j 是分布式电源 j 在时间 t 的有功功率； P_{Grid} 和 P_{SB} 分别代表在时刻 t 大电网和蓄电池提供的有功功率。

约束 2：热力平衡

为考虑实际运行中的不确定性，在热力平衡添加一个缓冲区来允许热负荷在一定范围内波动。定义一个随机变量 ΔH ，该变量代表热负荷的波动。这个随机变量服从正态分布，均值 μ 设为热负荷值的 10%。在模型的迭代中，在每个时间段开始时重复生成新的 ΔH 值，并更新热负荷需求。

$$H_{\text{load}}(t) = H_{\text{MT}}(t) + H_{\text{GB}}(t) - H_{\text{HST}}(t) + \Delta H \quad (3-9)$$

式中： $H_{\text{load}}(t)$ 是第 t 时段的热负荷需求； $H_{\text{MT}}(t)$ 是燃气轮机提供的热功率； $H_{\text{GB}}(t)$ 是燃气锅炉提供的热功率； $H_{\text{HST}}(t)$ 是储热设备的净热交换量（放电减去充电）； ΔH 是热负荷波动值。

约束 3：蓄电池运行约束

蓄电池的荷电状态（SOC）需要维持在一定的范围内以保证其健康运行并延长使用寿命。

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\max} \quad (3-10)$$

式中： $\text{SOC}_{\max}$ 、 $\text{SOC}_{\min}$ 分别代表蓄电池在时段 t 的荷电状态的最大和最小阈值，当 SOC 达到阈值，相应的充电或放电操作将被中止。通常在整个调度周期开始和结束时蓄电池的 SOC 保持一致，即 $\text{SOC}_{\text{end}} = \text{SOC}_{\text{start}}$ ， $\text{SOC}_{\text{start}}$ 和 SOC_{end} 分别为调度周期开始和结束时的 SOC 值。

约束 4：微源输出功率约束

微源的输出功率需要在一定的范围内，以确保设备不会因为超出其额定能力而损坏。

$$P_{j,\min} \leq P_j \leq P_{j,\max} \quad (3-11)$$

式中： P_j 代表微源 j 的输出功率； $P_{j,\max}$ 、 $P_{j,\min}$ 分别代表微源 j 的输出功率的上、下限。

通过上述多目标函数和约束条件的设定，本研究构建了一个全面且实用的微

电网优化运行模型。该模型能够综合考虑经济性、环境友好性和技术可行性，为下文微电网的运行提供理论支持。

3.6 仿真实验

3.6.1 算例参数

选取图 2-1 中展示的微电网系统作为研究对象，以特定地区微电网的全天(24 小时)数据为基础，分布式发电资源的功率限制、燃料成本和运维管理成本参数详见表 3-1。负荷的预测功率数据如图 3-6 所示，其中热负荷还需考虑热力波动。因微电网运行在并网模式下，所以与主电网会进行能量交换。为展现不同时间段电价的峰谷差异，微电网在购电和售电时采取了时段性电价策略^[60]，具体的价格变化详见图 3-9。

表 3-1 各分布式电源参数

类型	功率上限/ kW	功率下限/ kW	燃料成本/ (元· kWh ⁻¹)	管理成本/ (元· kWh ⁻¹)
光伏	40	0	0.000	0.010
风机	40	0	0.000	0.045
蓄电池	20	-20	0.000	0.045
燃料电池	50	10	0.357	0.029
燃气轮机	50	10	0.721	0.128

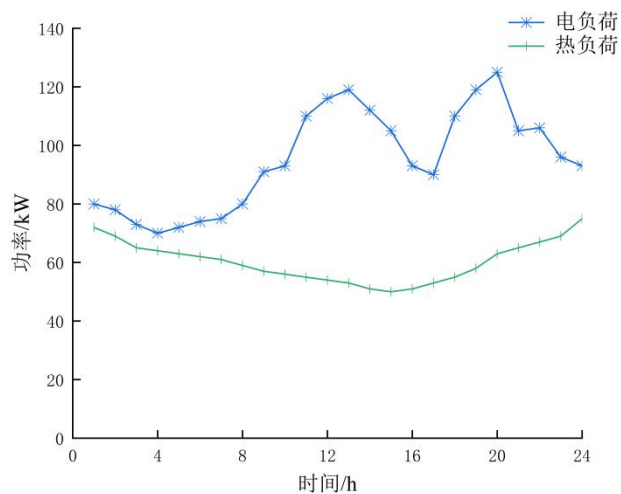


图 3-6 电热负荷预测功率

采用 LHS 生成大量服从概率分布约束的风电出力场景，为了能够准确地反映风机和光伏预测值的波动情况及考虑场景重复和计算量，设置生成的初始场景数量为 1000 如图 3-7。在此基础上通过定义场景距离函数来削减相似场景，最后获得风机和光伏的 10 个代表性场景如图 3-8。

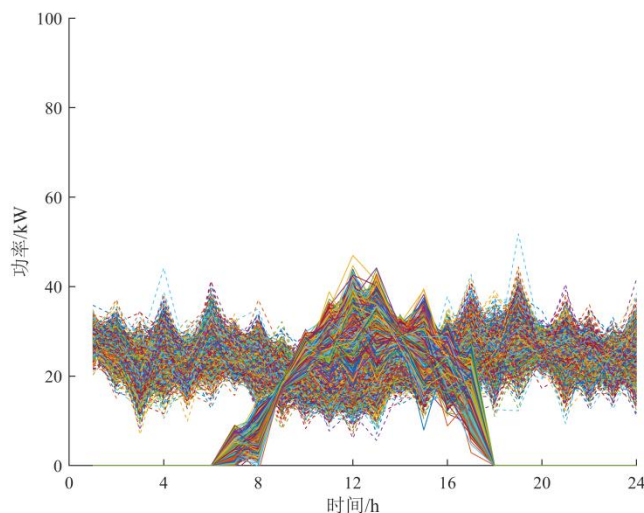


图 3-7 原始风光场景

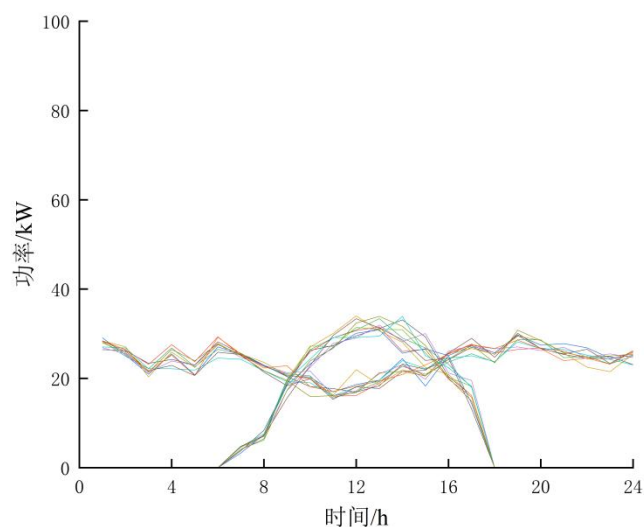


图 3-8 削减后的风光场景

MOPSO 算法和 NSGA-III 算法均设定了迭代次数为 80，且每种算法的种群数量为 30。MOPSO 算法的参数为：惯性因子为 0.9，学习因子 c_1 和 c_2 都为 2；基于改进的 NSGA-III 算法的参数为：交叉概率为 0.9，变异概率为 0.02。

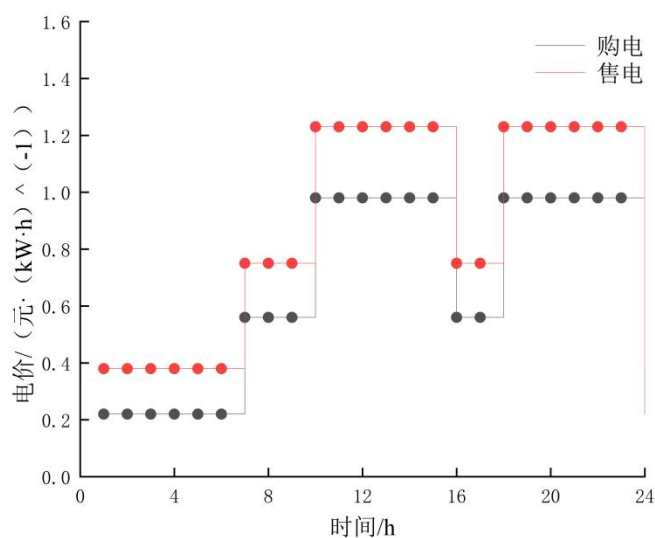


图 3-9 购电售电价格

3.6.2 仿真分析

在对比实验中,改进算法与传统的 NSGA-III 算法均采用了相同的初始种群。通过将前述微源参数和相关数据应用于案例研究,并且每个由 LHS 生成再削减后的风光场景都可得到一组不同的 Pareto 解集,再通过 TOPSIS 得到了最佳的 Pareto 解集,如图 3-10 所示。与标准算法相比,改进后的算法在多个目标函数值上都有一定的降低。

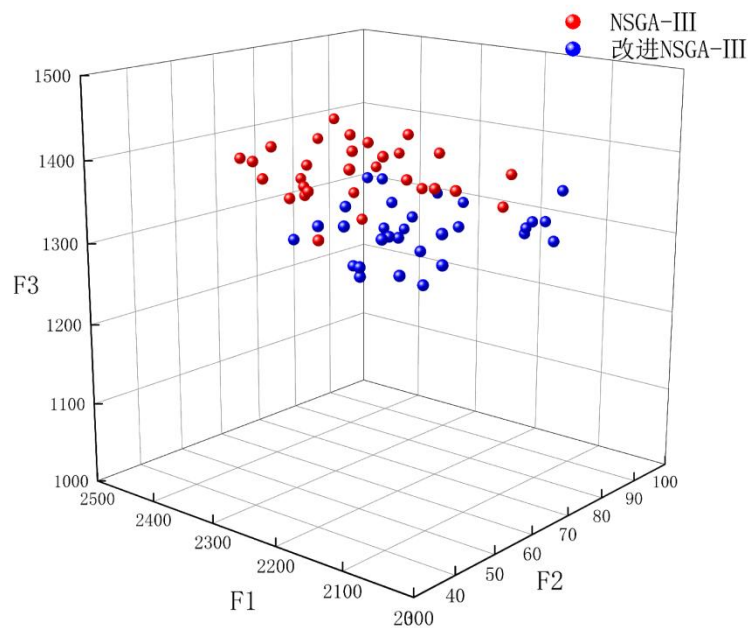


图 3-10 多目标优化前后帕累托前沿

分别运用传统和改进后的算法对三个核心目标执行了综合优化。在得到的

Pareto 解集中，再通过 TOPSIS 方法对各目标函数值进行评估，从而得出了相应的结果。并分别从三目标综合优化，综合运营成本最低，二氧化碳排放量最少以及储能充放电最少这几方面采取不同的权重比，从而得出各目标函数值如表 3-2。图 3-11 为传统算法和改进后算法的适应度收敛曲线。图 3-12 与图 3-13 则展示了应用改进算法后，微电网中各个微源达到的最优运行状态。

表 3-2 标准算法与改进算法下不同目标函数值

目标函数	运行成本目标值	蓄电池充放电目标值	碳排放目标值
三目标优化	2305/2273	85/82	1319/1295
运行成本最低	2225/2133	94/91	1359/1305
蓄电池充放电最少	2429/2384	65/63	1386/1315
碳排放最少	2402/2345	83/80	1280/1268

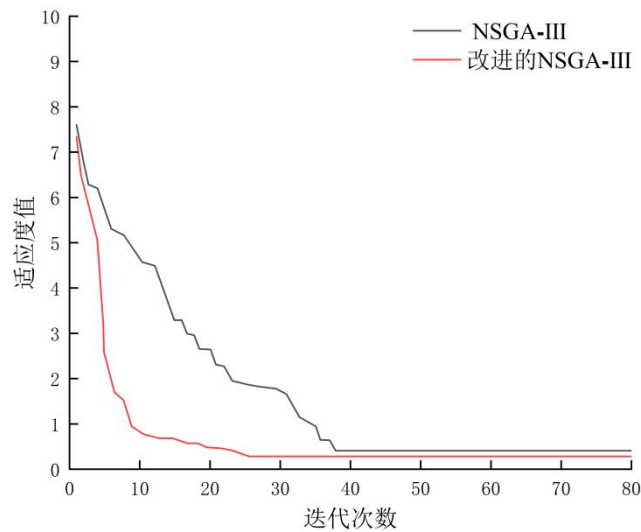


图 3-11 标准算法与改进算法的收敛曲线

由表 3-2 可见，若投资者优先考虑微电网运行的经济性时可以选择运行成本最低方案，此时蓄电池充放电也较少，但碳排放量较高；如果投资者从环境角度出发选择碳排放量最少方案，则运行成本会与之增加；若同时考虑系统运行的经济性、碳排放量和蓄电池充放电三个目标时，则每个目标值都介于各个单一目标值之间，有效地解决了各优化目标间的冲突。在图 3-11 中，传统 NSGA-III 算法与改进算法的适应度都随着迭代次数而下降，由图中可以得出改进算法的收

敛速度更快，收敛时间更短，这证明了改进算法减少了传统 NSGA-III 算法的计算复杂度，相应提升了收敛速度。

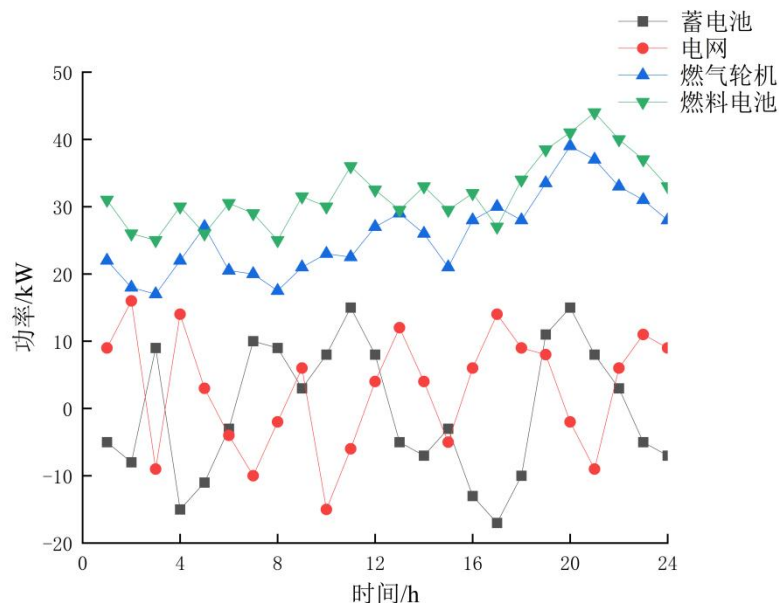


图 3-12 改进 NSGA-III 算法微源输出功率

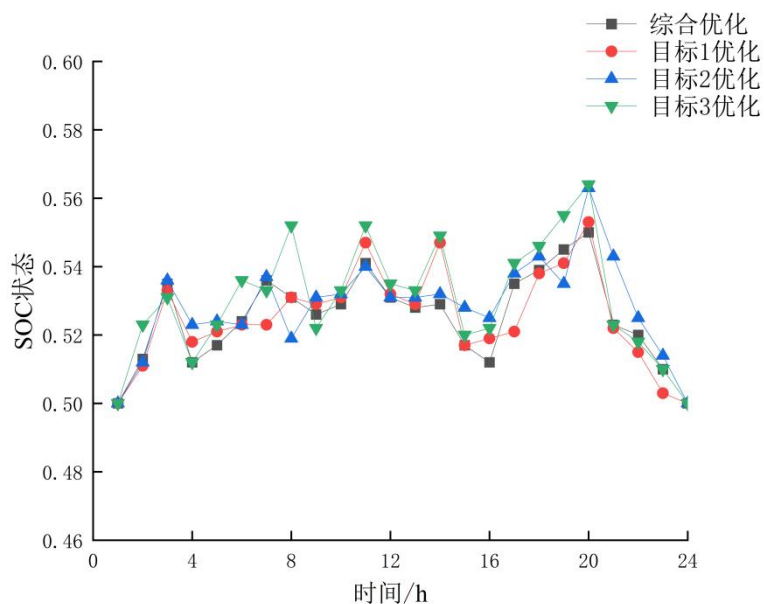


图 3-13 不同目标下储能 SOC 状态变化

图 3-12 为调度综合最优解，从图中可知微电网处于谷时段 1:00-6:00 时，此时无光照，光伏不产生电能，但因此时微电网内需求较少且向电网购电价较低，所以蓄电池在此时进行充电，通过风机、燃气轮机和燃料电池以及从电网购电来满足微电网内负荷。而当微电网处于峰时段 18:00-10:00 时，光伏同样不产生电能，此时是电负荷需求最高时段，但电价也处于最高时段，因此燃料电池及燃气

轮机加大输出功率，为了实现经济效益并降低运营成本，蓄电池在电网需求高峰时释放能量，同时通过向电网售卖额外电力以增加收益；在 10:00-14:00 时段，光伏输出功率较高，此时蓄电池提高输出功率，依靠光伏、风力、燃料电池和蓄电池满足负荷；其余时段，光伏输出功率较低，但微电网的电负荷需求也不高，首先充分利用光伏和风能发电，优化资源配置，当二者无法满足负荷需求时，再依靠燃料电池进行补充。燃气轮机则在其他微源发电不足时才会加大输出功率，实现以最低成本和碳排放最大化满足负荷需求。

通过应用改进后的算法获得的解决方案在性能上有所提高，与原始算法相比，整体运行成本减少了约 1.3%，蓄电池的充放电量减少了约 3.5%，同时碳排放量也降低了约 1.9%，因此采用改进算法在微电网多目标优化运行中有一定的优越性。

3.7 本章小结

本章首先详细介绍了多能源微电网的结构及其各设备的数学模型，本研究以微电网的优化运行为核心，将运行成本、蓄电池的充放电量和碳排放量作为优化目标，考虑热力需求的波动性以及风光的不确定性，构建了一个综合性微电网模型，有效应对了多目标优化过程中的挑战。提出一种对 NSGA-III 算法进行改良的方法，该算法通过整合 MOPSO 算法，显著提升了搜索性能。通过深入分析传统算法与本研究提出的多目标优化算法的结果，证实了所提出的算法能够提高目标函数的优化效果。进一步的案例分析显示，该改进算法在处理存在冲突的多目标时，能够更有效地实现目标间的协调，从而验证了算法的有效性。

第 4 章 基于双时间尺度的微电网日前-日内调度研究

微电网优化调度中，需求响应（DemandResponse,DR）策略是指用户受到需求响应的激励后调整用电行为，降低需求侧资源对系统供需平衡的影响，使电力系统的经济性与可靠性提升。微电网实施需求响应策略可以使用户和电力系统之间的实现互动，促进用户参与能源管理。在第三章的研究之后，为了提升微电网运行效率，降低总成本与功率波动，同时强化系统经济性与稳定性，再进一步提出了结合模型预测控制与考虑疲劳效应的激励型需求响应的双时间尺度调度策略。系统整合 MPC 算法能够更有效地管理系统中的不确定性因素和动态变化，同时完成微电网的实时优化控制。为了管理综合能源系统中的间歇性和分布式发电，综合能源系统的优化调度分为两个阶段：日前调度和日内滚动调整，如图 4-1 所示的模型预测控制结构图。日前调度计划是基于每小时的时间间隔，为实现日综合成本最低从而获得最优的调度方案。而日内长时间尺度调度则以风电、光伏发电和用户需求的滚动预测为依据，每 15 分钟运行一次，同时依据日前优化策略来调整未来 15 分钟内能源设备的功率输出，每次仅实施第一时段的控制指令，以实现电源与负载间的能量最佳匹配，从而减少微电网的网络波动。日内短时间尺度调度则以 5 分钟为周期，优化流程与长时间尺度调度相似。同时激励型 IDR 策略设立奖励和惩罚机制，激励用户积极参与需求响应，进一步优化微电网系统。

本章是对微电网在双时间尺度下的优化调度问题进行探讨，并通过仿真实验验证了所提出策略的有效性，同时进一步分析了用户参与激励型 IDR 的程度对微电网的影响。这些研究成果可为微电网的实际运行提供决策依据，促进了微电网技术的发展和應用。

4.1 MPC 模型控制

模型预测控制 MPC 是基于模型的优化控制方法，在每个控制周期内进行优化问题求解，确定当前最优的控制输入。MPC 借助系统的预测模型预测未来行为，通过目标函数的优化实现控制目标，同时满足系统的约束条件，预测模型在 MPC 中占据了重要的部分。

在每个控制周期中，MPC 实时求解最优控制输入，系统的动态变化为适应过程的实现提升了可调整性，目标函数中的权重系数进行调整，多个优化目标的平衡也同时实现。预测模型不仅提前对系统的未来行为进行预测，还推动了控制策略的优化过程，MPC 的实现可以分为以下几个关键步骤：

步骤 1：状态和输出的测量。在每个控制周期开始时，测量系统的当前状态 x 和输出 y 。这些数据通常通过传感器网络和数据采集系统获得。

步骤 2：预测模型的构建。建立系统的预测模型，通常采用线性或非线性状态空间模型。

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + w_t \quad (4-1)$$

$$y_t = Cx_t + Du_t + v_t \quad (4-2)$$

式中： x_k 是系统在时间 t 的状态向量； u_t 是系统在时间 t 的控制输入向量； y_t 是系统在时间 t 的输出向量； A 、 B 、 C 和 D 是系统矩阵； w_t 和 v_t 是过程噪声和测量噪声，通常假设为零均值白噪声。

步骤 3：控制输入的应用。定义目标函数再求解优化问题，得到当前最优控制输入 u_0 ，将最优控制输入 u_0 应用于系统，更新系统状态。再在下一个控制周期内重复上述步骤，实现对微电网的实时优化控制。MPC 模型控制结构如图 4-1。

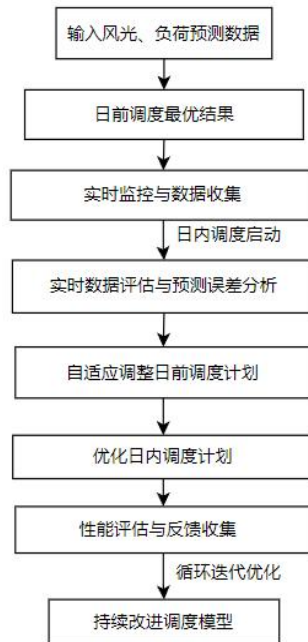


图 4-1 MPC 模型控制结构图

4.2 长时间尺度下的微电网日前调度研究

在第三章中，提出了一种基于 MOPSO 的 NSGA-III 改进算法，用于微电网

的多目标优化运行。该算法有效地结合了粒子群优化和遗传算法的优势，提高了算法的收敛速度和解的多样性。通过仿真实验验证了改进算法的有效性，并得出了综合优化策略下的最优调度结果。这些结果为微电网的日前调度提供了宝贵的数据支持。利用第三章中得到的最优调度结果作为基础，进一步研究微电网的日内调度策略。日内调度的目标是在满足系统运行约束的前提下，通过优化微电网的运行成本和碳排放量，实现微电网的经济、环境和可靠性的综合优化。因此在不考虑储能充放电量的情况下，只以微电网的综合成本和碳排放量为优化目标，具体的优化过程和各目标的最优优化结果在第三章已作出详尽描述，此处不再介绍。日内-日前双时间尺度调度框架图如图 4-2 所示。

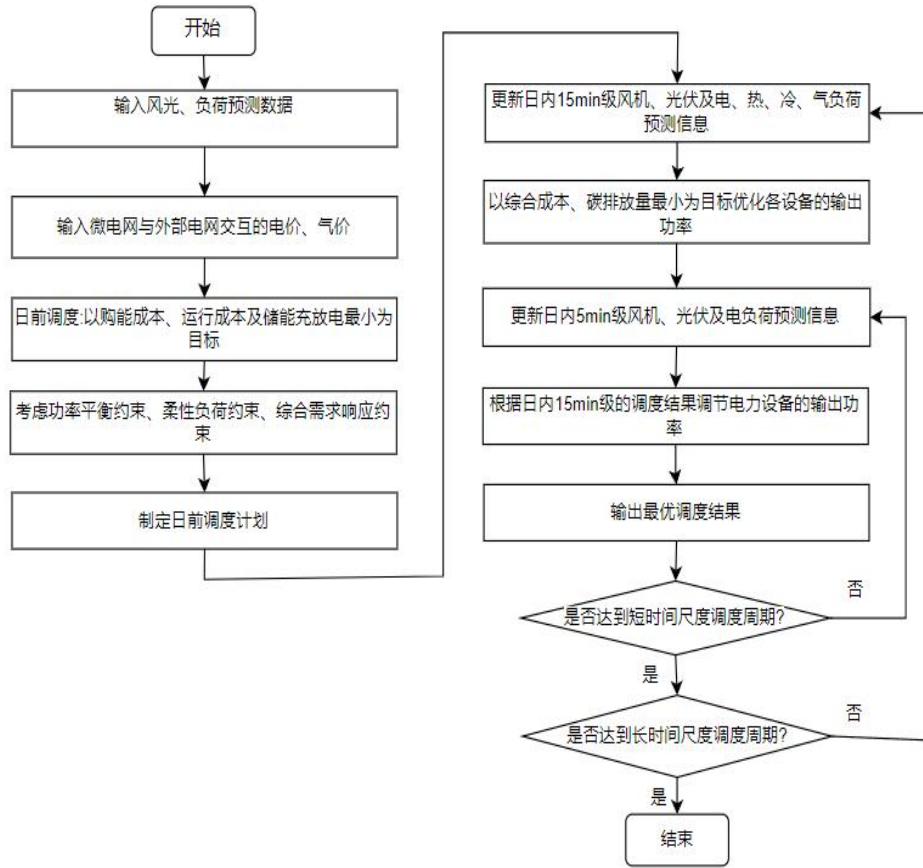


图 4-2 日内-日前双时间尺度调度框架图

4.3 双时间尺度下的微电网日内调度研究

微电网的日内调度研究主要包含不同时间尺度下的能源需求调度，该研究具体包含两个主要时间尺度，分别是日内长时间尺度和日内短时间尺度。在进行日内双时间尺度调度时需要综合考虑下面这些关键要素：

发电机组出力调度：依据碳排放交易结果与各类负荷的动态变化，制定发电

机组出力计划，电力系统的综合成本与碳排放量降低成为重要目标，各机组出力在动态变化中逐步达到计划性降低。

配电网调度：电网调度策略的规划受到各类负荷变动和输电网负荷流量的综合影响，在满足能源需求的前提下，以降低碳排放量与综合成本为重要任务，并对负荷进行分段处理，实现各类能源需求的目标包含在配电网调度的实现过程里，不减少负荷与成本为前提，仅满足负荷结构与碳排放要求中进行调度规划。

能源储备调度：基于 MG 可靠性要求与能源储备现状，制定调度方案以保障 MG 稳定运行。

需求侧管理：基于可中断负荷的调整和负荷预测结果，设计需求侧的调度方案。同时建立奖惩机制，对参与激励型需求响应的用户给予补偿，以此鼓励用户积极参与 IDR 策略。

4.3.1 考虑疲劳效应的激励型 IDR 策略

激励型需求响应 IDR 策略旨在通过经济激励手段，推动用户积极参与 MG 的需求响应活动，以提高系统的运行效率和节能减排效果。MG 通过与用户签订合同，明确参与 IDR 后用户可获得的经济补偿及可能面临的成本，包括各类费用和潜在的负荷削减。

本文在激励型 IDR 策略的基础上，引入了考虑用户响应疲劳特性的改进用户模型^[62]，用户响应疲劳特性是指在连续多个时段参与需求响应（IDR）的过程中，用户的疲劳程度逐步增加，随着参与时段的增加，舒适成本也相应升高，实际响应量受到显著影响，用户在参与 IDR 的过程逐渐产生疲劳现象，从而使响应量出现降低。具体策略如下：

激励机制：MG 对主动响应需求的用户进行经济补偿，计算基准通常为高峰时段减少的用电量，这种激励与用户调整用电行为存在相关性。

$$C_{\text{Enc}} = \sum_{r \in \{e, h\}} \sum_{t=1}^T p_{n,r,t} \cdot x_{i,r,t} \quad (4-3)$$

式中： C_{Enc} 表示用户获得的总激励收益； $r \in \{e, h\}$ 表示能源类型，分别代表电(electricity)、热(heat)； t 表示一天中的不同时间段； $p_{n,r,t}$ 表示第 n 个微电网在 t 时段对 r 类能源的激励价格。这是微电网运营方为了鼓励用户调整用能行为而设定的价格，通常在高峰时段会更高，以鼓励用户减少高峰时段的用能； $x_{i,r,t}$ 表示用户 i 在 t 时段对 r 类能源的响应量。正值表示用户减少了该时段的用能，负值表示

用户增加了该时段的用能。

惩罚机制：微电网设立惩罚机制，这是为推动用户参与响应并履行合同内容，用户未按约定参与需求响应时，将受到经济性惩罚。这可能包括增加的电费或服务限制，从而促使用户遵守合同约定以积极参与需求响应。

$$C_{\text{Pun}} = \sum_{r \in \{e, h\}} \sum_{k=1}^K (\max(0, -x_{i,r,t}) \cdot p_{\text{Pun},r,t}) \quad (4-4)$$

式中： C_{Pun} 表示用户因未按约定参与需求响应而产生的惩罚成本； $r \in \{e, h\}$ 表示能源类型，分别代表电(electricity)、热(heat)； t 表示一天中的不同时间段； $\max(0, -x_{i,r,t})$ 表示取 $-x_{i,r,t}$ 和0中的较大值，如果 $x_{i,r,t}$ 为负值（表示用户增加了用能），则取其绝对值，如果 $x_{i,r,t}$ 为正值或零，则取0。这表示用户在该时段未能按约定减少用能，需要接受惩罚； $p_{\text{Pun},r,t}$ 表示 r 类能源在 t 时段的惩罚价格。这是对用户未按约定调整用能行为的经济惩罚，通常与激励价格相关，但可能更高以确保用户履约。

信息反馈机制：用户在日前优化调度策略中可以得到实时的电热负荷以及价格的信息，并得到未来的电热负荷和价格的预测信息，便于让用户可以调整自己的能源使用行为，从而促进 IDR 策略。

考虑响应疲劳特性的用户模型：改进的用户模型考虑了响应疲劳特性，通过引入响应疲劳函数，对用户响应疲劳特性进行精细化建模，分析用户响应意愿随着响应次数增加的演化规律。响应疲劳函数定义为：

$$\xi_{i,r}(k) = 1 + \alpha \cdot \log(1 + k) \quad (4-5)$$

$$\sigma_{i,r}(k) = 1 + \beta \cdot \log(1 + k) \quad (4-6)$$

式中： $\xi_{i,r}(k)$ 表示用户 i 对能源类型 r 的响应疲劳函数，用于调整用户对用能习惯改变的接受程度； $\sigma_{i,r}(k)$ 表示用户 i 对能源类型 r 的响应疲劳函数，用于调整用户的最低激励价格 $\lambda_{i,r,t}$ ； α 和 β 为疲劳系数，反映用户疲劳程度的增长速率； k 为响应次数，随着 k 的增加， $\xi_{i,r}(k)$ 和 $\sigma_{i,r}(k)$ 逐渐增大，表示用户的疲劳程度提高。

通过这些机制，可以增强用户参与需求响应的积极性，实现 MG 的优化运行目标。改进后的用户参数为：

$$\theta_{i,r,k}^{\text{eq}} = \theta_{i,r,k} \cdot \xi_{i,r}(k) \quad (4-7)$$

$$\lambda_{i,r,k}^{\text{eq}} = \lambda_{i,r,k} \cdot \sigma_{i,r}(k) \quad (4-8)$$

式中： $\theta_{i,r,k}$ 和 $\lambda_{i,r,k}$ 为原始用户参数，反映用户对用能习惯改变的接受程度和最低激励价格。

用户的响应量约束为：

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \quad (4-9)$$

式中， $x_i^{\min}$ 与 $x_i^{\max}$ 分别表示用户全时段对两种能源响应量的上、下限。

个性化激励策略：个性化激励策略的制定依据改进后的用户模型，不同用户响应特征与疲劳程度影响激励力度的调整，这些调整维持用户的参与度与响应效果，用户的历史响应数据可预测其疲劳程度，对于疲劳程度偏高的用户，提升激励价格显得重要，响应积极的用户额外奖励。依据用户的历史响应数据和实时反馈，动态调整激励与惩罚措施变得可进行，用户行为的变化可以适应，系统性能可以优化，在激励与惩罚机制下，MG 不仅降低高峰时段用电需求，还使整体系统运行效率与经济性提升。

4.3.2 微电网日内长时间尺度调度

微电网日内长时间尺度滚动优化策略涉及在电力和热力能源系统中进行实时调度，以适应不断变化的能源需求和供应情况。该优化策略的主要步骤概述如下：

（1）能源需求与供应预测：利用历史数据和日前调度结果，对即将到来的各个时段内的电力和热力需求进行预测。同时预测可再生能源的供应情况，如风能和太阳能的产出。

（2）能源调度规划：通过预测数据与市场信息，运用 MPC 算法并借助激励型需求响应机制安排能源的生产和分配，初始阶段之后，每 15 分钟更新一次 MG 内各发电单元的功率输出与负荷数据。日前调度计划制定完成，以电力交易成本，燃料消耗成本，设备调节成本以及用户激励成本最小化为前提，可再生能源波动性与负荷变化带来的不确定性可以借助模型预测的保守性进行缓解，确保系统的稳定性和经济效益。

（3）能源储备管理：根据系统的可靠性标准和当前的能源储备状态来规划能源储备的调度策略，从而确保能源供应的连续性和可靠性。

（4）能源系统交互优化：根据能源市场动态和供需关系的变化来优化不同能源系统之间的能源流动^[63]，提高整体系统的经济性和可靠性。

（5）用户需求响应激励：通过激励措施和信息反馈来鼓励用户参与需求响应计划，以促进系统的优化运行和实现节能减排目标。

MG 日内长时间尺度调度模型的目标函数为：

$$F_L^{DR} = F_{GRID}^{DR} + F_{Grid,L}^{DR} + F_{sche,L}^{DR} + F_{DR,L} \quad (4-10)$$

式中： F_L^{DR} 为 MG 日内长时间尺度调度上的总调度成本； F_{GRID}^{DR} 表示 MG 与 DN 进行电力交易的调度成本； $F_{Grid,L}^{DR}$ 表示 MG 内部发电设备的燃料成本； $F_{sche,L}^{DR}$ 表示 MG 实施需求响应策略时产生的成本； $F_{DR,L}$ 为日内长时间尺度调度中用户激励成本。

$$F_{Grid,L}^{DR} = \sum_{t=1}^T \left(P_{Buy}^L(t) \lambda_{Buy}(t) - P_{Sell}^L(t) \lambda_{Sell}(t) \right) \quad (4-11)$$

$$F_{Grid,L}^{DR} = \sum_{t=1}^T F_{ng} F_{ng,buy} \left(P_{GB,L}^{DR}(t) + P_{GT,L}^{DR}(t) \right) \quad (4-12)$$

式中： $P_{Buy}^L(t)$ 、 $P_{Sell}^L(t)$ 是日内调度中微电网向电网的购售电功率； $\lambda_{Buy}(t)$ 、 $\lambda_{Sell}(t)$ 是购电价和售电价； $F_{ng,buy}$ 是天然气单价； F_{ng} 是天然气低热值； $P_{GB,L}^{DR}(t)$ 、 $P_{GT,L}^{DR}(t)$ 分别是 GB、GT 在日内调度中输出的功率。

$$F_{sche}^{DR} = \sum_{t=t_0}^{T_1} \left[\sum_{i=1}^m R_{sche,S}^{DR} \left(P_{i,S}^{DR}(t) + \Delta P_{i,S}^{DR}(t) \right) + \mu_{sche,S}^{DR}(t) \left(\Delta P_{i,S}^{DR}(t) \right)^2 \right] \quad (4-13)$$

式中： T_1 为日内长时间调度的周期； $R_{sche,S}^{DR}$ 是天然气的价格； $\mu_{sche,S}^{DR}(t)$ 为设备 i 在日内调度的成本系数； $\Delta P_{i,S}^{DR}(t)$ 为设备 i 在日内调度 t 时刻的调整功率； $P_{i,S}^{DR}(t)$ 为设备 i 在日内调度 t 时刻的输出功率。

$$F_{DR} = \sum_{t=t_0}^{T_1} F_{e,cut}(t) + \sum_{t=t_0}^{T_1} F_{t,cut}(t) + \sum_{t=t_0}^{T_1} F_{g,cut}(t) \quad (4-14)$$

日内长时间尺度调度不仅要满足第二章中 MG 的各类约束，还需满足以下运行状态约束：

$$U_i^{DAD}(t) = U_i^{IRO}(t) \quad (4-15)$$

式中： $U_i^{DAD}(t)$ 和 $U_i^{IRO}(t)$ 为日前和日内分别为第 i 类设备在时间 t 的最小和最大输出功率。

4.3.3 微电网日内短时间尺度调度

微电网日内短时间尺度调度策略依赖于能源预测结果和市场交易数据，利用激励型需求响应（IDR）和模型预测控制（MPC）算法来优化能源分配。该策略从特定时段开始，以五分钟为一个更新周期，根据 MG 内部各发电单元的实时输出功率和负荷需求数据进行调整。目标是减少电力交易成本、燃料消耗，以及设备调节和用户激励的成本，同时监控并更新当前的调度计划。MG 的短时间尺度调度与长时间尺度调度在流程、目标函数和约束条件上相似，不同之处在于短时间尺度调度中的数据更新频率更高，每五分钟更新一次，以实现更精细的能源

管理。在这一过程中，MG 的短时间尺度调度策略旨在通过实时调整各发电单元的输出功率和负荷分配，以适应能源需求的快速变化，从而最小化整体的运营成本并提高系统的运行效率。通过这种高频次的调度，MG 能够更灵活地应对能源市场的波动和需求的变化，确保能源供应的稳定性和经济性。

根据上文得出 MG 日内短时间尺度调度模型的目标函数为：

$$F_L^{DR} = F_{NG,L}^{DR} + F_{Grid,L}^{DR} + F_{sche,L}^{DR} + F_{DR,L} \quad (4-16)$$

各目标具体公式如 (4-17) ~ (4-20) 所示。

$$F_{Grid,L}^{DR} = \sum_{t=1}^T \left(P_{Buy}^L(t) \lambda_{Buy}(t) - P_{Sell}^L(t) \lambda_{Sell}(t) \right) \quad (4-17)$$

$$F_{Grid,L}^{DR} = \sum_{t=1}^T F_{ng} F_{ng,buy} \left(P_{GB,L}^{DR}(t) + P_{GT,L}^{DR}(t) \right) \quad (4-18)$$

$$F_{sche}^{DR} = \sum_{t=t_0}^{T_2} \left[\sum_{i=1}^m R_{sche,S}^{DR} \left(P_{i,S}^{DR}(t) + \Delta P_{i,S}^{DR}(t) \right) + \mu_{sche,S}^{DR}(t) \left(\Delta P_{i,S}^{DR}(t) \right)^2 \right] \quad (4-19)$$

式中： T_2 表示日内长时间调度的周期。

$$F_{DR} = \sum_{t=t_0}^{T_2} F_{e,cut}(t) + \sum_{t=t_0}^{T_2} F_{t,cut}(t) + \sum_{t=t_0}^{T_2} F_{g,cut}(t) \quad (4-20)$$

4.4 仿真实验

为了证明日内双时间尺度调度策略的有效性，本节设计了两个实验进行对比实验。

4.4.1 算例参数

日内调度所需的数据是根据日前提供的数据再按一定的概率生成，假定光伏和风电功率和电热需求的预测都服从正态分布，下表 4-1 为各自的误差范围。

表 4-1 可再生能源和电热负荷预测不确定性水平

误差范围	光伏	风电	电负荷	热负荷
日内长时间尺度	20%	25%	10%	5%
日内短时间尺度	10%	10%	5%	0%

日内调度模型中热负荷的误差范围更低，这是因为热负荷的供应与室内的温度直接相关，而室温会直接影响用户的体验，所以对热负荷的调度精度要求较高。在一天内的双时间尺度调度中， t 时刻的微电网会提供各类能源的价格系数以及设备 i 的调度成本系数。

4.4.2 日内双时间尺度调度策略分析

为验证基于 MPC 和激励型 IDR 的日内双时间尺度调度策略的优越性，安排

了以下 3 组实验进行对比分析：

实验 1：只采用基于 MPC 的日内双时间尺度调度策略。

实验 2：在考虑电负荷参与激励时，采用基于 MPC 和激励型 IDR 日内双时间尺度优化调度策略。

实验 3：考虑电、热负荷参与激励型 IDR 时，基于 MPC 和激励型 IDR 策略的日内双时间尺度优化调度策略。

表 4-2 实验 1-3 的优化调度结果

实验	总成本/元	激励补贴成本/ 元	联络线功率波动 率/%
日前	2354.6	0	0
实验 1	2324.5	0	14.22
实验 2	2206.7	87.86	11.17
实验 3	2054.6	143.64	8.76

表 4-2 呈现了不同方案及日前调度阶段的运行成本。实验 1 只采用基于 MPC 的日内双时间尺度调度策略，因此只由日前调度提供运行模型中所需负荷等各种信息。实验 2 的微电网总成本和联络线功率波动率相较于实验 1 分别减少了 117.8 元和 3.05%，这表明引入激励型 DR 策略能够降低 MG 总成本，增强联络线稳定性，并促进用户参与 DR 计划，实现互利共赢。

实验 2 只考虑电负荷参与激励的调度策略，相比之下，实验 3 综合考虑了电、热耦合的 IDR 策略。实验 3 的 MG 总成本和联络线功率波动率比实验 2 分别降低了 152.1 元和 2.41%，证明了综合能源耦合的 MPC 和激励型 IDR 策略在日内双时间尺度优化调度中更具优势。

在日内调度过程中，鉴于 MG 调整设备输出功率的成本相对较高，为此引入了可中断负荷与用户激励成本以鼓励用户积极参与 IDR 计划。实施 IDR 计划后有效缓解了因微电网供需预测误差所引发的网络波动问题，也成功降低了微电网的总成本，显著提升了用户的满意度。

图 4-3 和图 4-4 分别呈现了采用激励型 IDR 前后电负荷和热负荷的调度情况。由图可得，电负荷和热负荷的减少主要集中在负荷需求高峰时段，实现了电热能源负荷的调峰填谷，确保了此策略的经济性。处于各类能源需求的高峰阶段时，用户参与需求响应虽可获取响应利润，但也会在一定程度上影响用户的舒适感受。

为了保障用户的舒适度和满意度,所以在各类能源需求的平谷时段很少出现负荷中断的情况,而在低谷时段则几乎不会出现。综上所述,实施 IDR 策略能够有效降低微电网和外部配电网的功率波动率,实现各类负荷的调峰填谷,确保微电网运行的经济性和稳定性。

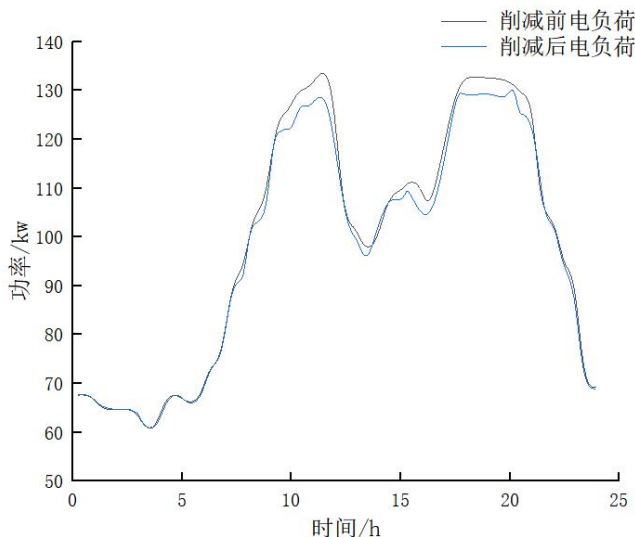


图 4-3 实施激励型 IDR 前后电负荷的调度结果

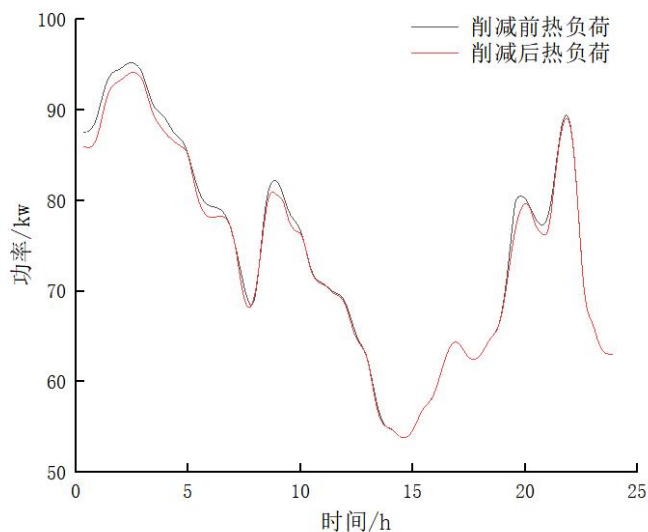


图 4-4 实施激励型 IDR 前后热负荷的调度结果

图 4-5 和图 4-6 表示 GB 和 GT 在日前-日内调度的输出功率,由图可得,因为日前周期相较于日内调度周期时间上长很多,所以日前调度结果相较来说不太准确,而日内结果可以更好的表现出日内负荷需求量和各设备的输出功率,以便减少日前预测的误差和输出微电网的最佳调度结果。

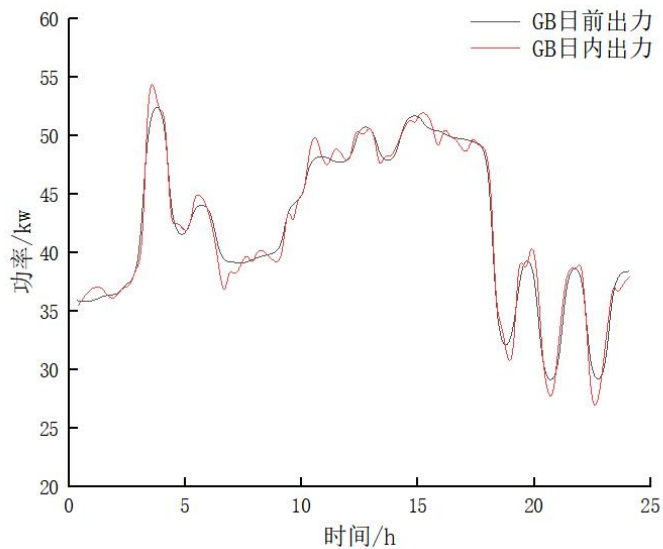


图 4-5 GB 日前日内输出功率

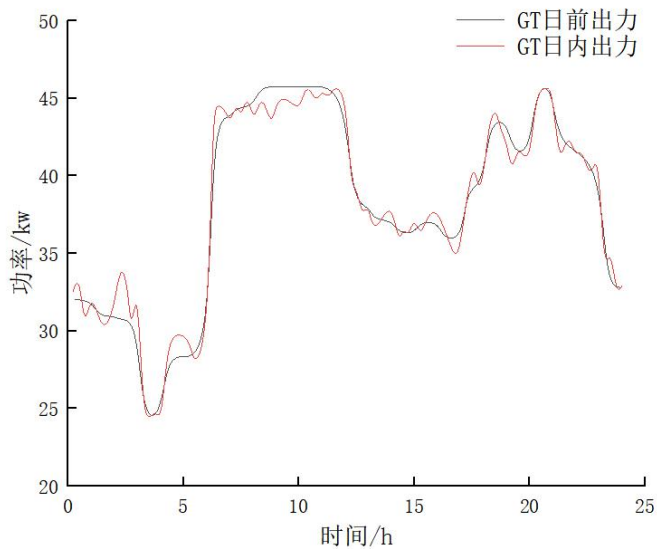


图 4-6 GT 日前日内输出功率

4.4.3 用户参与响应程度对微电网优化的影响

为研究用户参与激励型 IDR 计划的程度对微电网优化有何影响，从而安排了下面 3 个实验。

实验 1：设置全部用户都不参与 IDR 计划

实验 2：让一半的用户参与 IDR 计划，其余参数和条件不变。

实验 3：让所有的用户都参与 IDR 计划，其余参数和条件不变。

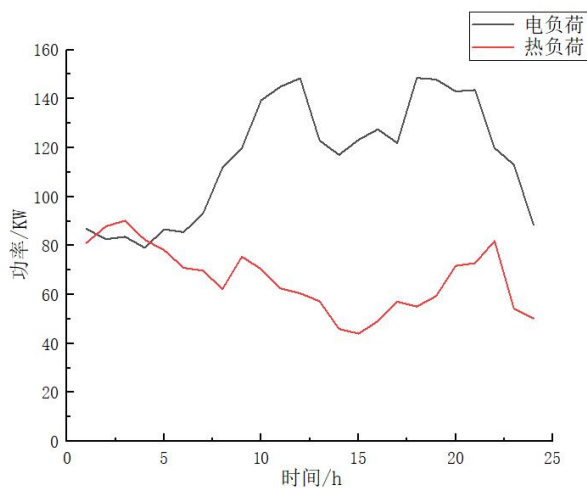


图 4-7 实验 1 的电热负荷功率曲线

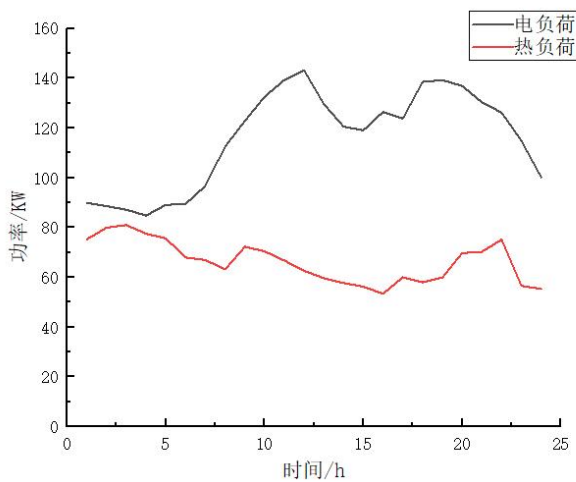


图 4-8 实验 2 的电热负荷功率曲线

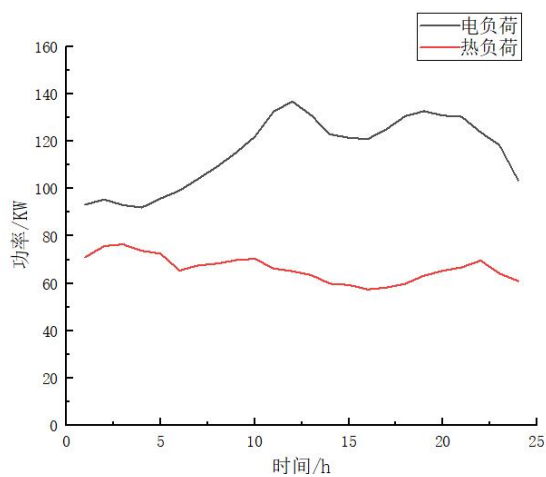


图 4-9 实验 3 电热负荷功率曲线

上图展示了在三种实验下，MG 的电力和热能负载的功率分布情况。在夜间时间（晚 23 时至凌晨 7 时），电力系统通常处于需求低谷，此时的电价相对

更为经济。通过鼓励用户在用电高峰期（上午 7 时至下午 14 时及傍晚 18 时至 22 时）减少非关键电器的使用，并将其转移至电价低廉的低谷时段，能够有效缓解电力供应的峰值压力，达到削峰填谷的目的。而在上午 7 时至下午 14 时和下午 14 时至 18 时处于热能需求的低谷期，通过鼓励用户在用热高峰时段（凌晨 0 时至上午 7 时）减少的热能的使用，并将热能需求转移至热能需求的低谷期，实现热能的削峰填谷。并且通过三次实验可以看出随着用户参与 IDR 计划的程度越高，微电网的电负荷功率曲线波动就越小，系统运行也更加平稳，优化效果更加显著。而热负荷功率曲线在不同实验中均保持稳定，说明用户参与 IDR 计划主要影响电负荷需求，而对热负荷需求的影响较小。

综上所述，采用激励型需求响应策略可以减少微电网电热能源需求的峰谷差，而且随着用户参与程度增加，系统运行也更加平稳，同时总成本也相对减少。

4.5 本章小结

本章提出了一种基于模型预测控制和考虑疲劳效应的激励型需求响应的日内双时间尺度调度策略，以优化微电网的运行效率和经济性。通过引入 MPC 算法和改进的用户模型，本章的策略能够实时响应微电网中的不确定性和动态变化。然后通过对比实验验证了所提策略的有效性。实验结果表明考虑 IDR 策略相较于不考虑 IDR 策略的实验结果减少了 270 元，相较于仅考虑电负荷参与 IDR 的实验结果减少了 152.1 元，并且联络线功率波动率也分别降低了 5.46% 和 2.41%。而且随着用户参与 IDR 计划的程度增加，微电网的电负荷峰谷差在逐渐减小，使系统运行也更加平稳。这些实验结果证明了所提日内双时间尺度调度策略在降低微电网成本与波动率方面的有效性，同时也展示了用户参与 IDR 计划对微电网优化的积极影响。

第 5 章 结论与展望

5.1 研究成果与结论

传统能源供应方式难以应对不断增长的能源需求，供应不稳定，排放与污染等问题愈加突出，微电网研究与应用为能源问题的重要解决方式，本文首先对电-热耦合的微电网进行研究，建立了各设备的数学模型、目标函数和各类约束。再聚焦于微电网多目标优化运行方法的研究，通过提出一种改进的多目标优化算法来解决微电网调度中的多目标优化问题，构建了一个综合考虑运行成本、储能充放电量和碳排放量等多目标的优化运行模型，并通过仿真实验验证了改进算法的有效性。基于改进算法和优化模型，提出了结合模型预测控制和考虑疲劳效应的激励型需求响应的双时间尺度调度策略，旨在应对微电网运行中的可再生能源不确定性和负荷波动问题。通过在日内调度中应用第三章的改进算法，实现了对微电网的实时优化控制，并通过仿真实验分析了用户参与激励型 IDR 的程度对微电网优化的影响，进一步验证了所提策略的有效性。为应对微电网运行中的复杂性和不确定性挑战，本文提出了改进的策略，提升了微电网的经济、环境与可靠性综合效益。本文主要的结论如下：

(1) 提出了一种基于 MOPSO 算法的改进 NSGA-III 算法。首先在 MOPSO 算法中引入了适应度共享机制，然后将改进后的 MOPSO 算法的结果作为部分 NSGA-III 的初始种群，提高了全局搜索能力和搜索速度。考虑运行成本、储能充放电量和碳排放量等多个目标，通过仿真实验验证了改进算法在多个目标函数值上都有降低。在运行成本方面，改进算法比传统 NSGA-III 算法降低了约 1.3%；在储能充放电方面，降低了约 3.5%；在碳排放量方面，降低了约 1.9%，验证了改进算法的有效性。

(2) 提出了一种基于 MPC 和激励型需求响应的日内双时间尺度调度策略，并在 IDR 策略的基础上，引入了考虑用户响应疲劳特性的改进用户模型。通过仿真实验，日内双时间尺度调度策略在降低微电网总成本和功率波动率。实验结果表明，与不考虑 IDR 策略的调度策略相比，引入 IDR 策略的总成本降低了约 117.8 元，功率波动率降低了约 3.05%；进一步考虑电、热耦合的 IDR 策略，总

成本降低了约 152.1 元，功率波动率降低了约 2.41%，证明了通过改进算法的最优调度结果为日前调度策略，再以基于模型预测控制和激励性综合需求响应的日内双时间尺度的策略的有效性。

(3) 用户参与激励型需求响应的程度直接影响微电网的优化效果。用户通过调整资源配置行为，减少高峰时段的负荷需求，可以有效缓解微电网的供需不平衡，降低系统的运行成本。通过三个实验分析用户参与度对微电网优化结果的影响。实验结果表明随着用户参与度的增加，微电网的电负荷峰谷差逐渐减小，系统运行更加平稳。

5.2 展望

本文提出包含需求响应的多目标微电网优化调度方法，实现了微电网经济，环境与可靠性的综合提升，改进后基于 MOPSO 的 NSGA-III 算法在运行成本与碳排放量降低方面提升明显，微电网的经济性与环境友好性显著提升。双时间尺度调度策略借助 MPC 和需求响应，提升了微电网应对可再生能源不确定性和负荷波动的能力，系统的稳定性和经济性同时增强。本文在微电网优化调度研究取得一定成果，但仍有深入研究空间：

(1) 本文研究的微电网系统结构简单，未来复杂微电网中能源设备与储能系统更多，优化模型全面性增加，实际运行中的复杂问题能够应对，优化模型建立后可对复杂结构微电网进行更全面优化。

(2) 本文考虑了可再生能源的不确定性与负荷波动，实际微电网运行时设备故障，市场电价波动等其他不确定性因素同样存在，未来研究可进一步包含设备故障，市场电价波动这些不确定性因素，提出更具鲁棒性的优化策略。

(3) 随着智能电网技术的优化，微电网智能化管理已经成为趋势，将大数据与人工智能等技术的结合将进一步推动微电网调度优化水平的提升，智能化运行在技术推动下逐步实现日常化。

(4) 本文重点研究电能和热能优化调度，未来拓展可包含综合能源系统的优化，考虑电，热，气，冷等多种能源形式的协同优化，高效利用能源以完成综合效益的最大化。

总之，微电网优化调度是一个具有重要理论和实际意义的研究方向，未来的研究可以进一步深化和完善，为微电网的实际应用提供更好的技术支持。

参考文献

- [1] 韩梦瑶,朱沛浩,何则.碳中和背景下清洁能源开发的生态环境规制及冲突困境纾解[J/OL].世界地理研究,2025: 1-16.
- [2] Policy E .Policy interactions and electricity generation sector CO₂ emissions: A quasi-experimental analysis[J].Energy Policy,2025,114434: 0301-4215.
- [3] Yasir Ahmed Solangi, Cosimo Magazzino.Evaluating financial implications of renewable energy for climate action and sustainable development goals.[J]Renewable and Sustainable Energy Reviews,2025,115390:1364-0321.
- [4] EBELL N, HEINRICH F, SCHLUND J, et al. Reinforcement learning control algorithm for a pv-battery-system providing frequency containment reserve power[C]//2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm). October 29-31, 2018, Aalborg, Denmark. IEEE,2018:1-6.
- [5] ZHANG R D, CAO Z, BO C, et al. New PID controller design using extended nonminimal state space model based predictive functional control structure [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2014, 53(8): 3283-3292.
- [6] 范成.考虑分布式新能源波动性的智能电网稳定性控制研究[J].自动化应用,2025,66(05):129-131+134.
- [7] 曾绘宁,朱振东,曾权赋.SFLA 算法下综合能源微电网分布式电能鲁棒优化[J].电子设计工程,2025,33(04):17-20+24.
- [8] 郑正茂,刘建波,樊明,等.燃气热电联产中背压机组改造经济性分析[J].内燃机与配件,2025,(05):125-128.
- [9] Sariki M ,Ravi S ,Prateek S , et al.Assessment of Power System Resiliency with New Intelligent Controller and Energy Storage Systems[J].Electric Power Components and Systems,2024,52(8):1414-1436.
- [10] Elseify A M ,Mostafa R R ,Hashim A F , et al.Optimal scheduling of photovoltaic and battery energy storage in distribution networks using an ameliorated sand cat swarm optimization algorithm: Economic assessment with different loading scenarios[J].Journal of Energy Storage,2025,116116026-116026.
- [11] Alimohammadi M ,T A R M .State-space adaptive exploration for explainable

- p swarm optimization[J].Swarm and Evolutionary Computation,2025,94101868-101868.
-
- [12]Zhang B ,Wang K ,Yang C , et al.Enhancing seismic performance of highway bridges group with laminated rubber bearings via artificial neural networks and multi-objective genetic algorithm[J].Structures,2025,74108470-108470.
-
- [13]Ullah K ,Hafeez G ,Khan I , et al.Energy optimization using hybrid demand response, renewable energy, and storage battery: A tri-objective optimization approach[J].Sustainable Cities and Society,2025,122106145-106145.
-
- [14]Xuan T H ,Duc N T .Unit Commitment in Microgrid Considering Customer Satisfaction in Incentives-Based Demand Response Program: A Fuzzy Logic Model[J].Smart Grids and Sustainable Energy,2025,10(1):10-10.
-
- [15]Suresh R ,Saladi K J ,Datta P S .Energy, exergy and environmental life cycle assessment on the valorization of an ejector integrated CCHP system with six sustainable refrigerants[J].Energy,2025,317134664-134664.
-
- [16]Judge A M ,Franzitta V ,Curto D , et al.A comprehensive review of artificial intelligence approaches for smart grid integration and optimization[J].Energy Conversion and Management: X,2024,24100724-100724.
-
- [17]潘冬喜,宁存岱,杨柳,等.LED 直流集中驱动照明技术在建筑“光储直柔”系统中的应用探索[J].中国照明电器,2025,(02):92-94.
-
- [18]王学申,孙然,许军,等.基于飞轮储能的离网型风光储微电网系统容量优化配置研究[J].热力发电,2025,54(03):43-50.
-
- [19]王秀娜,张咏雯.计及碳成本的园区微电网容量优化配置研究[J].价格理论与实践,2024,(12):217-223.DOI:10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2024.12.337.
-
- [20]张薇.现代建筑中“光储直柔”技术运用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(05):70-72.
-
- [21]Liu B ,Wei X ,Hu H , et al.A Reliable Routing Algorithm Based on Path Satisfaction in the Energy Internet[J].Electronics,2025,14(2):393-393.
-
- [22]M. Y N ,M.S. L H ,Aini H , et al.Island detection for grid connected photovoltaic distributed generations via integrated signal processing and machine learning approach[J].International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2023,154.
-
- [23]Mishra D ,Sahu C P ,Prusty C R , et al.A fuzzy adaptive fractional order-PID controller for frequency control of an islanded microgrid under stochastic wind/solar

- uncertainties[J].International Journal of Ambient Energy,2022,43(1):4602-4611.
- [24]Juntao G ,Shaoqing G ,Jindian X , et al.Low-Carbon Robust Predictive Dispatch Strategy of the Photovoltaic Microgrid in Industrial Parks[J].Frontiers in Energy Research,2022,10.
- [25]Velden D V D ,Debruyne L ,Klerkx L , et al.Participation and co-theorising: How stakeholder interests and scientific outputs clash in the Horizon 2020 multi-actor approach[J].NJAS: Impact in Agricultural and Life Sciences,2024,96(1).
- [26]Anonymous .PG&E Microgrid Powers Coast Guard Air Base Through Natural Disasters, Extreme Weather[J].Electric Perspectives,2023,48(4):38,40-46.
- [27]Yahya M ,Hamed G S ,Aliyeh K .A Multi-Objective Fuzzy Optimization Model for Electricity Generation and Consumption Management in a Micro Smart Grid[J].Sustainable Cities and Society,2022,86.
- [28]亚夏尔·吐尔洪,王小云,常清,等. 基于改进 NSGA-III的微电网储能多目标优化配置[J]. 电工电气, 2024(03): 21-28.
- [29]周京华,翁志鹏,宋晓通. 兼顾可靠性与经济性的孤岛型光储微电网容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(08): 166-174.
- [30]陈深,肖俊阳,黄玉程,等. 基于改进量子粒子群算法的微网多目标优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(02): 41-47.
- [31]孙兵,赵广怀,李金友,等. 基于改进鸟群算法的多目标微电网优化调度研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(06): 46-53.
- [32]周孟然,王旭,邵帅,等. 考虑需求响应和碳排放额度的微电网分层优化调度[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 45-53.
- [33]陈丹凤,赵才,张志飞,等. 基于改进差分进化算法的微电网调度研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2022, 47(04): 1018-1029.
- [34]陈龙. 计及运行策略的微电网多目标优化及可靠性分析[D]. 南昌航空大学学报, 2019: 36-39.
- [35]谢鹏,蔡泽祥,刘平,等. 考虑多时间尺度不确定性耦合影响的风光储微电网系统储能容量协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7126-7136.
- [36]Islam Q N U , Ahmed A , Abdullah S M .Optimized controller design for islanded microgrid using non-dominated sorting whale optimization algorithm (NSWOA)[J].Ain Shams Engineering Journal, 2021.

- [37]Fang N , Ma S , Liao X ,et al.Optimized scheduling of integrated community energy stations based on improved NSGA-III algorithm[J].Journal of Energy Storage, 2024, 99.
- [38]庄俊,王德顺,薛金花,等.基于改进 MOPSO 算法的配电网分布式储能优化配置[J].电气自动化,2024,46(05):47-49+52.
- [39]Aeggegn D B , Nyakoe G N , Wekesa C .Optimal Sizing of Grid Connected Multi-Microgrid System using Grey Wolf Optimization[J].Results in Engineering, 2024, 23.
- [40]赵喜来.基于改进鲸鱼算法的电力系统多目标有功调度研究[D].重庆邮电大学,2022.
- [41]亚夏尔·吐尔洪,王小云,常清,等.基于改进 NSGA-III的微电网储能多目标优化配置[J].电工电气,2024,(03):21-28.
- [42]Wang Z , Liu Z , Huo Y .A distributionally robust optimization approach of multi-park integrated energy systems considering shared energy storage and Uncertainty of Demand Response[J].Electric Power Systems Research, 2025(Jan.):238.
- [43]Dong Y , Wuken E , Zhang H ,et al.Bi-level coordinated operation optimization of multi-park integrated energy systems considering categorized demand response and uncertainty: A unified adaptive robust optimization approach[J].Renewable Energy, 2025, 241.
- [44]Wu B , Zhang S , Yuan C ,et al.IGDT-based demand response strategy for an integrated energy system considering its interactions with multi-energy markets[J].International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2025, 166.
- [45]Yang T , Wang Q , Wang X ,et al.Low-carbon economic distributed dispatch for district-level integrated energy system considering privacy protection and demand response[J].Applied Energy,2025,383.
- [46]Lin W T , Chen G , Li J ,et al.Privacy-preserving incentive mechanism for integrated demand response: A homomorphic encryption-based approach[J].International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2025, 164.
- [47]Shi S , Gao Q , Ji Y ,et al.A supply–demand optimization strategy for integrated energy system considering integrated demand response and electricity–heat–hydrogen hybrid energy storage[J].Sustainable Energy, Grids and Networks, 2025, 42.
- [48]Mustafa O M ,Abbas M N .Harmonic suppression compensation of photovoltaic

generation using cascaded active power filter[J].Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,2021,6(8):60-68.

[49]Michael K ,Hüseyin Ç ,Uwe K , et al.Dynamic modelling and control for assessment of large-scale wind and solar integration in power systems[J].IET Renewable Power Generation,2020,14(19):4010-4018.

[50]Tao C ,Wang Y ,Sun Z , et al.Numerical simulation study on the combustion and emission characteristics of a gas-fired boiler using hydrogen-ammonia binary fuel[J].Thermal Science and Engineering Progress,2025,59103356-103356.

[51]Yuliang D ,Songyuan Y ,Chengbing H , et al.Optimal Multi-Mode Flexibility Operation of CHP Units with Electrode Type Electric Boilers: A Case Study[J].Energies,2022,15(24):9337-9337.

[52]Ullah K ,Hafeez G ,Khan I , et al.Energy optimization using hybrid demand response, renewable energy, and storage battery: A tri-objective optimization approach[J].Sustainable Cities and Society,2025,122106145-106145.

[53]Ismail ,Syahbana L S M ,Rahman A R .Thermal Performance Assessment for an Active Latent Heat Storage Tank by Using Various Finned-Coil Heat Exchangers[J].International Journal of Heat and Technology,2022,40(6).

[54]Mohammadi F ,Nazri G ,Saif M .An Improved Mixed AC/DC Power Flow Algorithm in Hybrid AC/DC Grids with MT-HVDC Systems[J].Applied Sciences,2019,10(1).

[55]Guo Z ,Chenxi W ,Wanqing Z , et al.Research on Multiobjective Optimal Operation Strategy for Wind-Photovoltaic-Hydro Complementary Power System[J].International Journal of Photoenergy,2022.

[56]赵书强,要金铭,李志伟.基于改进 K-means 聚类 and SBR 算法的风电场景缩减方法研究[J].电网技术,2021,45(10):3947-3954.

[57]柳慧娟,柳强.一种基于拉丁超立方抽样和聚类分析的改进 MOPSO 算法[J].国外电子测量技术,2020,39(03):7-11.

[58]Bo L ,Jingwen W .Economic Dispatch Methods for Smart Grid Based on Improved SPEA2 and Improved NSGA2[J].Frontiers in Energy Research,2021,9.

[59]Zhou S ,Gu S ,Wang H , et al.Mooring optimization for net-cage group system based on NSGA-III multi-objective genetic algorithm[J].Ocean Engineering,2025,320120375-120375.

[60]赵峰, 罗鑫, 高峰阳. 考虑网内实时电价的微电网经济优化运行研究[J]. 太

阳能学报, 2020, 41(9): 53-59.

[61]刘桂源.基于 MPC 的风储协调控制调频技术研究[D].长春工程学院,2023.

[62]苏梦.峰谷分时电价下的用户需求响应研究[J].价值工程,2020,39(04):188-195.

[63]Shen Y ,Li Z ,Ma J , et al.Interaction energy-based power coupling oscillation analysis and suppression of grid-forming converter connected system[J].International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2025,166110558-110558.

攻读硕士期间的学术成果

[1]岳君豪,娄柯.基于 MOPSO 的 NSGA-III 改进算法的微电网多目标优化运行[J].
桂林电子科技大学学报

致谢

行文至此，硕士生涯即将画上句号，回首过往，满是收获与成长。我要向每一位伴我走过这段学术旅程的人表达诚挚谢意。特别感谢我的导师娄柯教授。从踏入校园起，您就以渊博的专业知识和严谨的治学态度引领我前行。在研究微电网的路上，是您为我指明方向，耐心解答我的疑惑，对我的论文提出了宝贵的建议，让我的研究不断完善。您的教导不仅提升了我的学术水平，更塑造了我对待科研的态度，让我在探索的道路上更加坚定。

然后我要感谢我的父母和我的恋人韦心悦，是他们在我求学的道路上默默支持，无条件包容我的选择。在我为科研焦头烂额时是他们的鼓励让我重拾信心；在我为实验数据苦恼时，是他们给予我温暖。

我还想对同窗好友和实验室伙伴胡浩然、桑建斌、杨思远同学进行深深的感谢。在那些一起在实验室奋斗的时光里，一起为模型的构建绞尽脑汁，为算法的改进反复推敲，和大家一起相互支持，共同成长。你们的友谊让枯燥的科研生活变得丰富多彩。同时也要感谢那些为我的研究提供帮助的老师 and 同学，你们无私的经验分享、数据支持、建议反馈都如点点星光，照亮了我前行的道路。

最后还要感谢学院的各位领导、老师、同学们一直以来的关心和支持。

在安徽工程大学的这段时光里有太多值得铭记的瞬间，正是有了这些人的陪伴和帮助，才让我在实验室的研究中不断突破自我，取得进步。在未来我将带着这些宝贵的回忆和经验，继续在学术和人生的道路上砥砺前行，努力创造属于自己的精彩。

尚德敏学 唯实惟新

