

分类号：TM391

密 级：公开

单位代码：10363

学 号：2210320120

题 目 基于多目标优化算法的电力系统优化调度研究

题 目 Research on Power System Optimization Dispatch Based
on Multi Objective Optimization Algorithm

学 生 姓 名： 阚绪状

指 导 导 师： 瞿成明 副教授

专 业 学 位 类 别： 控制科学与工程

研究方向（领域）： 模式识别与智能系统

论文答辩日期：2024 年 5 月 23 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： 阙绪状

日期：2024 年 5 月 31 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： 阙绪状

日期：2024 年 5 月 31 日

指导教师签名： 程成明

日期：2024 年 5 月 31 日

基于多目标优化算法的电力系统优化调度研究

摘 要

随着能源危机和环境问题的日益加剧，传统能源已难以满足人们持续增长的能源需求，清洁丰富的可再生能源成为未来能源发展的重要方向，分布式可再生能源发电技术正处于快速发展阶段。作为新能源发展的重要平台，微电网因其在能源配置中的灵活性而受到广泛关注。微电网可以融合多种分布式电源，然而，分布式电源的加入使得微电网系统变得更加复杂，供需不平衡问题更加突出，给微电网的优化调度带来了新的挑战。鉴于此，研究如何应用智能优化算法来提高微电网调度的经济性和稳定性，具有重要实际意义。

为了解决这一问题，本文首先建立了微电网的优化调度模型，随后采用经过改良的非支配排序遗传算法（Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA2/3）对微电网的经济性和可靠性进行了有效的优化调度。本文主要研究内容概括如下：

（1）本文首先对微电网系统中常见发电设备的工作原理、输出特性进行了概述，并根据风电、光伏、柴油发电机、微型燃气轮机和蓄电池的输出特性构建了数学模型。在此基础上，以优化微电网调度提升效益为研究目标，考虑日总投资成本和运行成本两个方面，构建了微电网优化调度模型，并针对系统中发电机组的输出功率平衡进行了约束，形成了完整的微电网优化调度模型。此外，本文结合分时电

价提出了需求侧响应优化策略，实现微电网优化配置。

(2) 针对 NSGA2 算法在寻优精度、计算复杂度和解的分布均匀性方面的局限性，融入了多种群遗传策略和外部档案维护机制，以增强全局搜索能力和确保种群进化方向的多样性。引入高斯变异改进 NSGA3 算法，以提高算法收敛效果，获得全局最优解。通过在 ZDT 系列多目标测试函数进行仿真分析，结合 SP 和 GD 两个评价指标，验证了改进后的 NSGA2/3 算法的收敛性和分布性效果有所提升。

(3) 利用园区的微电网数据作为研究对象，对本文构建的微电网调度模型分别采用改进的 NSGA2/3 算法进行求解，通过对比分析传统 NSGA2/3 算法与改进后的 NSGA2/3 算法在微电网调度模型中的仿真结果，验证了改进算法在求解微电网优化问题上的有效性和优越性。研究进一步探讨了储能设备和基于分时电价的需求响应优化策略对微电网优化调度的影响。

关键词：微电网，分布式电源，多目标建模，NSGA2，优化调度

RESEARCH ON POWER SYSTEM OPTIMIZATION DISPATCH BASED ON MULTI OBJECTIVE OPTIMIZATION ALGORITHM

ABSTRACT

With the increasing energy crisis and environmental problems, traditional energy is no longer able to meet people's sustained growth in energy demand. Clean and abundant renewable energy has become an important direction for future energy development, and distributed renewable energy generation technology is in a rapid development stage. As an important platform for the development of new energy, microgrids have received widespread attention due to their flexibility in energy configuration. Microgrids can integrate multiple distributed power sources. However, the addition of distributed power sources makes the microgrid system more complex, and the problem of supply-demand imbalance becomes more prominent, bringing new challenges to the optimization and scheduling of microgrids. In view of this, studying how to apply intelligent optimization algorithms to improve the economy and stability of microgrid scheduling is of great practical significance.

To address this issue, this article first establishes an optimization scheduling model for microgrids, and then uses an improved Non-

Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA2/3) to effectively optimize the economy and reliability of microgrids. The main research content of this article is summarized as follows:

(1) This article first provides an overview of the working principles and output characteristics of common power generation equipment in microgrid systems, and constructs a mathematical model based on the output characteristics of wind power, photovoltaics, diesel generators, micro gas turbines, and batteries. On this basis, with the research goal of optimizing microgrid scheduling to improve efficiency, a microgrid optimization scheduling model was constructed considering two aspects: daily total investment cost and operating cost. Constraints were imposed on the output power balance of generator units in the system, forming a complete microgrid optimization scheduling framework. In addition, this article proposes a demand side response optimization control strategy based on time of use electricity prices to achieve optimized configuration of microgrids.

(2) In response to the limitations of the NSGA2 algorithm in terms of optimization accuracy, computational complexity, and distribution uniformity, multiple population genetic strategies and external file maintenance mechanisms have been integrated to enhance global search capabilities and ensure diversity in population evolution directions. Introducing Gaussian mutation to improve the NSGA3 algorithm, in order

to improve the convergence effect and obtain the global optimal solution. By conducting simulation analysis on the multi-objective testing functions of the ZDT series and combining SP and GD evaluation indicators, it was verified that the improved NSGA2/3 algorithm has improved convergence and distribution effects.

(3) Using microgrid data from a certain park as the research object, an improved NSGA2/3 algorithm was used to solve the microgrid scheduling model constructed in this paper. By comparing and analyzing the simulation results of the traditional NSGA2/3 algorithm and the improved NSGA2/3 algorithm in the microgrid scheduling model, the effectiveness and superiority of the improved algorithm in solving microgrid optimization problems were systematically verified. After confirming the effectiveness of the improved algorithm through comparative testing, the study further explored the impact of energy storage devices and demand response mechanisms based on electricity prices on microgrid optimization scheduling.

KEY WORDS: microgrid, distributed power supply, multi-objective modeling, NSGA2, optimal dispatch

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题的背景及其意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 微电网调度模型研究现状.....	3
1.2.2 微电网优化算法研究现状.....	5
1.3 主要研究内容.....	7
第 2 章 微电网分布式电源数学模型.....	10
2.1 微电网的结构.....	10
2.2 发电单元原理与分析.....	11
2.2.1 风力发电.....	11
2.2.2 光伏发电.....	12
2.2.3 柴油发电机.....	14
2.2.4 微型燃气轮机.....	14
2.2.5 储能电池模型.....	15
2.3 本章小结.....	17
第 3 章 微电网系统优化调度模型.....	18
3.1 微电网多目标优化调度模型.....	18
3.1.1 微电网优化调度目标函数.....	18
3.1.2 微电网优化调度约束条件.....	21
3.2 微电网优化调度策略分析.....	22
3.3 本章小结.....	23
第 4 章 NSGA2/3 算法的研究与改进.....	24
4.1 多目标优化问题.....	24
4.2 NSGA2 算法及改进.....	25
4.2.1 NSGA2 算法简介.....	25
4.2.2 NSGA2 算法的优点和局限性.....	28
4.2.3 NSGA2 算法改进.....	29
4.3 NSGA3 算法及改进.....	32
4.3.1 NSGA3 算法简介.....	32
4.3.2 NSGA3 算法的优点和局限性.....	33
4.3.3 NSGA3 算法改进.....	33
4.4 算法性能测试.....	35
4.4.1 性能评价指标.....	35
4.4.2 性能结果分析.....	36
4.5 本章小结.....	39
第 5 章 微电网多目标优化调度.....	40
5.1 算例及算法参数.....	40
5.2 仿真结果分析.....	41
5.2.1 算法改进对比分析.....	42

5.2.2 储能对微电网调度影响分析.....	45
5.2.3 需求侧响应对微电网调度影响分析.....	46
5.3 本章小结.....	47
第 6 章 总结与展望.....	48
6.1 总结.....	48
6.2 展望.....	49
参考文献.....	50
攻读学位期间发表的学术论文.....	54
致谢.....	55

第 1 章 绪论

1.1 课题的背景及其意义

当前社会能源短缺问题日益突显，特别是在偏远地区，传统化石燃料供应可能会面临困难，这可能导致能源供给的不稳定性和无法满足用电需求^[1]。其次，由于通过燃烧化石燃料发电导致产生了大量有害气体，加剧了环境污染和气候变化等问题。在追求碳中和的大背景下，利用新型可再生能源并将其转化为电力是当务之急。这样的举措不仅可以避免对传统化石燃料的过度依赖，还能有效减少温室气体的排放，降低环境负荷。新型可再生能源的利用不仅仅是为了解决能源供应的问题，还可以增加能源利用的多样性，提高整个能源系统的稳定性和韧性。尽管中国目前的电力系统主要依赖于化石燃料，但随着环保意识的提升和技术的进步，零碳新能源如风能和太阳能正逐渐成为主流，其在能源结构中的地位和作用将逐步增强^[2]。

长期以来，传统的电力系统为社会发展带来了巨大的经济效益，为工业生产、商业活动和日常生活提供了必要的电力支持。这种高效率的能源利用有助于推动经济增长和社会发展^[3]。然而，尽管传统电力系统在提供电力方面有着显著优势，但其建设、运营和维护成本相对较高。此外，复杂的操作流程和系统管理也增加了管理和维护的难度，导致传统电力系统的效率低下和一定的资源浪费。随着社会的不断发展，人民生活用电和工业用电需求的进一步增长，导致传统电力系统无法满足用电需求，多次发生停电事件，影响人民生活和经济发展。鉴于传统电力系统的局限性和伴随的问题，人们开始积极探索更为可靠和灵活的电力系统开发模式。这些新模式可能涉及更加智能化的电网技术、可再生能源的广泛利用、能源存储技术的创新等方面，以提高供电的稳定性、可持续性和适应性，满足不断增长的电力需求。

分布式发电技术是利用多种容易获得的可再生能源和化石燃料进行发电的一种方式^[4]。这种技术带来了诸多优势，包括环境污染小、能源利用率高、发电设备安装位置灵活等。通过多元化能源的利用，分布式发电系统能够降低对于单一能源的依赖，提高能源供给的灵活性和可靠性。与传统的发电系统相比，分布

式发电技术在保护输电和配电资源等方面更具优势。通过在能源需求点附近直接发电，减少了输电过程中的能量损耗和电力负载，从而提高了能源利用效率。此外，分布式发电系统的运营成本通常较低，因为其构建和维护相对简单。然而，尽管分布式发电技术具有诸多优势，但可再生能源的不确定性和间歇性仍然是其面临的主要挑战之一。

针对分布式发电系统的可靠性和高效集成等问题，微电网技术成为了一种备受关注的解决方案。微电网通过将柴油发电机、微型燃气轮机、光伏发电、风能发电、储能设备和智能控制系统进行整合，形成一个相对独立的小型电网，从而提高了能源供应的可靠性和稳定性^[5-10]。微电网具有以下几个优点：

(1) 微电网在大电网故障时能够独立运行，即使外部电力供应中断，微电网仍能继续为用户提供稳定的电力。特别是对于偏远地区而言，可以极大地提高供电的可靠性，确保用户的生活用电和工业用电需求。

(2) 微电网具备调峰填谷功能，不仅可以调节负荷与发电机组之间的功率，而且可以根据电力系统波动情况进行灵活调整，确保供电的稳定性。这项功能在电力需求波动较大的情况下尤为重要，例如在用电高峰期满足高负荷需求，在用电低谷期充分利用清洁能源发电^[11]。

(3) 微电网利用风能和太阳能等清洁能源，有助于减少污染物的排放，降低对化石燃料的需求和环保成本的投入。降低环境治理成本意味着在长期运行中，微电网系统可以节省维护和监管清洁能源设施所需的成本，有益于经济可持续性。

(4) 微电网的互联互通性意味着可以与其他分布式能源系统进行交流和合作，共享能源资源和信息。不仅有助于优化能源利用，还可以提高能源系统的效率和弹性，从而推动能源行业向智能化和可持续发展的方向发展。

然而，微电网将多种资源整合，包括光能、风能、化石燃料以及用户需求侧资源，使得其能源调度变得更加复杂^[12]。由于这些资源的随机性，微电网面临着更大的不确定性，需要更加灵活和智能的能源调度系统来应对。因此，如何有效应对资源随机性是微电网发电行业急需解决的核心问题之一。考虑到各种能源的波动性和用户需求的变化性，需要提出一套适用于微电网的灵活、智能的能源调度和管理机制，以最大程度地提高供电安全性和降低发电成本。通过优化微电网系统中各发电单元的功率配置，能够提升资源的使用效率，减少发电过程中的成

本开支，确保电力供应的稳定性，并推动社会经济的持续健康发展。使用风能、太阳能等清洁能源，可以减少污染气体的排放，减轻对环境的负面影响，从而维护生态平衡，促进环境的可持续性。

1.2 国内外研究现状

目前，许多国家将微电网视为 21 世纪的主要发展趋势，作为解决各种用电问题的辅助能源。随着可再生能源发电设备不断增加，分布式发电系统的数量不断上升，这导致了电力市场负荷的增加，也带来了一系列问题。

1.2.1 微电网调度模型研究现状

随着可再生能源，特别是风能和太阳能，在微电网中的广泛应用，能源调度问题逐渐成为研究和实践中的一个热点。由于可再生能源具有清洁、低碳的特点，能够有效减少对化石燃料的依赖，降低环境污染，同时也有助于实现能源结构的优化和可持续发展。然而，由于风能和太阳能等可再生能源的间歇性和不可预测性，给微电网的稳定运行和能源管理带来了新的挑战，需要开发和实施更加高效和智能的调度策略。

为了应对这些挑战，构建微电网优化调度模型以实现经济效益、环保性和电力供应安全性的有机结合。经济效益体现在通过优化资源配置和运行策略，降低能源成本，提高能源利用效率；环保性则关注于减少污染物排放，促进清洁能源的使用，保护生态环境；电力供应安全性则确保微电网在面对各种不确定性和潜在风险时，能够稳定可靠地提供电力，满足用户的用电需求。

合理配置分布式能源容量是实现这些目标的关键。这包括对风电、太阳能光伏、储能设备等各类分布式能源资源的规模、位置和类型的综合考虑。通过精确的预测模型和高效的调度算法，可以实现能源的最优分配和利用，最大程度地减少微电网的运行费用，同时确保电力供应的稳定性和可靠性。这不仅能够提升微电网的经济性能，还能够促进环境保护，实现能源的可持续发展。

文献[14]针对微电网中碳排放流特性缺乏精确刻画的问题，构建了电-氢一体化运行框架，以解决低碳和经济之间的矛盾。提出了双层优化调度模型，上层以风光储氢一体化工业园区为典型场景，以协调低碳性和经济性为目标，充分挖掘微电网的低碳-经济协同运行方式；下层则建立了低碳需求响应模型，通过激励

信号和碳排放责任转移,引导用户参与碳减排策略。模型验证表明,能有效兼顾微电网系统的低碳性和经济性。文献[15]为了提高微电网群的调度效率并降低运行成本,首先建立了考虑分布式储能的微电网群优化调度模型。该模型以包括风能、光能和储能的三个子微网以及网侧储能构成的交流微电网为研究对象。通过遗传算法求解调度模型,实现了经济成本的优化效果。文献[16]对于可再生能源出力不稳定的问题,以微电网运行成本和污染物处理成本为目标建立多目标调度模型,利用排序交叉算法对模型进行求解,对各发电机组出力实现优化调度。实验结果表明,微电网采用设计的调度方法后,运行成本和污染物处理成本都有所降低,具有良好的经济和环保效益。

文献[17]建立了一个含有风光储能的并网型微电网调度模型,模型采用双层优化结构,上层是购电成本和用户满意度,下层以经济调度为目标,利用动态的负荷和电价为上下层的桥梁,在需求侧响应的基础上进行仿真分析。仿真结果表明,该模型可以降低微电网的运维成本和用户的用电成本,提高风光消纳量。文献[18]针对外部电源中断的情况,对微电网作为应急供电资源的运行策略进行了研究。在供电正常时,以购电成本最小为目标;供电中断时,以运行成本最小和资源利用率最大为目标。建立了包含光伏、储能等调控资源的微电网模型,通过负荷中断进行仿真实验,验证了策略的有效性。文献[19]引入停电成本,以停电损失与储能投资成本最小化为目标,建立了微电网储能优化配置模型。研究结果表明,该方法能够更加合理地配置储能容量,发挥储能装置在微电网中的重要作用。

文献[20]提出了一种基于多点改进灰狼算法的双层优化策略。内层使用分时电价优化负荷曲线,外层算法实现对最优解的快速搜索,防止陷入局部最优,对灰狼算法进行了显著的改进。利用伯努利映射随机生成初始种群,在 Sin 函数的基础上修改衰减因子,进而更新位置的精确权重因子,合理选择最佳位置,提高优化效率。最后,采用改进的基于维度学习的围捕搜索策略确定最优解。算例分析表明,所提出的双层优化策略能够在实现分布式电源动态调度的同时,可以显著降低经济运行和环境保护成本。针对交直流混合微电网的日优化调度问题,文献[21]以经济性和储能设备健康性为主要目标函数,提出了交直流混合微电网的调度模型。为了克服传统算法的局限性,文章提出了一种集成学习和选择策略的

多目标改进脑风暴优化算法。此外,采用模糊决策实现日优化调度,并选择最合适的折衷解。通过实验验证了所提多目标优化调度方法的有效性,展示了该方法在实际应用场景中的实用性和有效性。文献[22]以净现值成本和收敛速度为目标,采用比例-积分-微分控制和模糊逻辑控制器两种先进的控制方法来管理电压和频率,建立了孤岛混合微电网系统模型,并对优化方法进行分析。结果表明该模型可有效维持电压和频率,能够作为偏远地区和孤岛微电网运行的有效工具。文献[23]讨论了高速公路附近的可再生资源,以运行成本、投资成本和碳交易成本的综合成本最小为目标,建立了高速公路微电网设计模型。该模型指定了高速公路微电网的最优建设模式,即并网或孤岛、交流或直流,并通过不同场景下的案例分析验证了模型的有效性。

综上所述,微电网的优化调度不再局限于单一目标,而是综合考虑经济性、环保性和可靠性等多重目标,采用多目标优化策略来实现多目标的平衡。微电网优化调度包含经济调度、多目标优化、孤岛混合调度、灵活性供需匹配、双层能量管理以及容量优化配置等多种调度方案。微电网优化调度模型正朝着更加智能化、集成化和实用化的方向发展,以适应不断增长的能源需求和对环境友好型能源系统的追求。

1.2.2 微电网优化算法研究现状

在微电网优化调度问题的研究领域,智能优化算法因其独特的搜索策略和处理复杂问题的能力而成为求解相关模型的首选工具。主要包括进化算法、自然模拟优化算法和群体智能优化算法等,通过模拟自然界中生物的进化、社会行为和群体协作等现象,以寻找最优解或近似最优解。

进化算法,如遗传算法,通过模拟生物进化过程中的遗传、变异和自然选择等机制,迭代地优化问题的解;自然模拟优化算法,例如模拟退火和粒子群优化,借鉴物理或化学过程中的自然现象,以概率性的方式探索解空间;群体智能优化算法,如蚁群算法和蜂群算法,则模拟动物群体的社会行为,通过集体协作来解决问题。

研究结果表明,智能优化算法在处理目标众多、约束条件复杂且解空间巨大的优化问题时,表现出了强大的搜索能力和适应性。能够有效地处理微电网优化调度中的多目标冲突,如成本最小化、能效最大化、环境影响最小化等,并在满

足一系列技术、经济和环境约束的前提下，找到满足系统运行要求的最优或近似最优解。智能优化算法的成功应用不仅提高了微电网的经济性和可靠性，也为微电网的可持续发展和能源管理提供了有力的技术支持。

文献[28]针对微电网中弃风光的能源浪费问题，在传统风光火发电系统中加入制氢系统和氢燃料电池系统，将满足符合需求的多余的风光电能制氢，建立了新型电力系统调度模型。此外，针对 NSGA2 算法的拥挤度，提出了一种基于方差的新型拥挤距离计算方法，利用测试函数验证改进后的算法提高了算法的分布性和收敛性。通过模拟仿真验证了所提出的电力调度模型和改进的算法在解决电力系统经济调度问题方面的有效性。文献[29]针对配电网中能量利用效率低和运行成本高的问题，利用抽水蓄能，提出了一种包含风光火的联合优化调度模型，并使用引入自适应惯性因子改进的粒子群算法进行求解。文献[30]通过引入粒子突变机制，对多目标粒子群优化算法进行改进。针对某个园区的微电网项目，根据各类发电设备的特性，以日运营成本和环境污染处理成本最小为目标，建立了一个双目标优化模型，并进行仿真实验分析。结果表明，改进的算法有效地增强了其优化性能，能够更好地处理多目标优化问题中的冲突问题。文献[31]在 NSGA2 算法中融入信息熵交叉因子，对算法进行改良，有效地克服了原始 NSGA2 算法在搜索过程中可能陷入局部最优的缺陷，以提升其在微电网多目标优化问题中的性能。为验证改进算法的实际效果，采用了测试函数对改进前后的算法进行了对比实验。

文献[32]为了解决混合微电网系统在规模优化方面的问题，设计了一种双档案多目标进化算法，并融合了模糊决策原理加以改进。在构建的微电网模型中，目标函数综合考虑了成本、功率损耗概率、环境污染排放以及功率稳定性等因素，建立的微电网系统，采用两种差异化的分集选择机制，有效的平衡了算法的收敛速度与分集性。文献[33]从技术和经济两个角度出发，采用布谷鸟搜索算法对光伏、风能、柴油和电池混合能源系统进行求解。研究结果显示，该算法具有较快的搜索速度，证明其在优化过程中的有效性。

综合以上情况可以发现，研究微电网优化调度问题的核心目标在于达到最优的经济效益和最大程度的环境保护。在微电网系统的设计和运行中，合理地进行分布式电源的容量分配是至关重要的。这一过程需要综合考虑各种分布式电源，

如风力发电、太阳能光伏和储能设备的输出特性，包括其输出稳定性、可预测性和响应时间等，以确保在不同的环境和负荷条件下，微电网能够稳定、高效地运行。在此基础上，运用优化算法对微电网的调度问题进行深入分析和处理，旨在实现能源的最优分配、降低运营成本、提高供电可靠性，并最大化整个系统的能源利用效率。

尽管优化算法在提升微电网效能方面发挥了重要作用，但在微电网的模型构建和算法开发方面，研究者们仍需面对一系列挑战。

(1) 可再生能源如风能和太阳能的不稳定性是微电网调度中的一个重要问题。由于这些能源的产出受天气条件和季节变化等多种因素的影响，可能导致供电与需求之间的不匹配，从而引发能源浪费。为了解决这一问题，需要在微电网调度中引入需求响应机制，通过激励用户在电力供应充足时增加用电或在供应紧张时减少用电，实现负载的动态平衡。这种策略不仅有助于提高能源利用效率，还能减少因供需不平衡导致的能源浪费，同时提升微电网的经济性和可靠性。

(2) 微电网的优化配置是一个复杂的多目标优化问题，涉及经济效益、环境保护、供电安全性等多个方面的目标。随着目标函数的增加，找到满足所有目标的最优解变得更加困难。现有的单一模型往往难以全面地反映不同配置方案对经济运行的具体影响，导致在实际应用中难以做出最佳决策。因此，需要开发更加先进的优化模型和算法，能够综合考虑多个目标，并清晰地揭示最优配置与经济运行之间的内在联系，以实现微电网的高效配置和运行。

(3) 在处理微电网优化调度模型时，尽管现有的算法如粒子群优化和遗传算法等在某些情况下取得了一定的成功，但其在面对多目标优化问题时仍存在局限性。这些算法在全局搜索方面的能力有限，容易在解空间中陷入局部最优解，而无法找到全局最优解。因此，需要研究和开发新的优化算法，以提高算法的全局搜索能力，避免陷入局部最优，并有效处理多目标优化问题中的冲突和权衡，从而为微电网的优化调度提供更加可靠和有效的解决方案。

1.3 主要研究内容

本文深入探讨了微电网系统中发电单元的出力策略和储能设备的充放电管理问题，通过优化这些关键环节来提升微电网的整体性能。本文的主要内容：构

建一个全面的微电网系统优化调度模型,该模型综合考虑了系统中各种发电单元的技术特性、负荷需求的变化以及储能设备的工作机制。首先,分析和确定微电网系统中各种发电单元的出力特性,建立一个综合考虑经济效益、环境影响和供电安全性的微电网优化模型,确保模型能够反映微电网运行的实际复杂性。利用改进的 NSGA2、NSGA3 算法对微电网模型进行求解,寻找满足多重目标的最优解或帕累托最优解集,以指导实际的微电网设计和运行。通过仿真实验,验证所提出优化模型和算法的有效性,并分析不同运行策略下微电网的性能变化,为微电网的优化调度提供了理论和实践依据。通过这些研究任务的完成,本文期望为微电网的设计、运行和优化提供一套科学的方法论,推动微电网技术的发展,促进能源系统的绿色转型。

具体章节的主要安排如下:

第一章:介绍了本文的研究背景,讨论了微电网发展的必要性,及其存在的优势和需要解决的问题。接着,讨论了国内外有关微电网调度模型和求解算法的研究现状。针对微电网所面临的问题,引出本文的研究内容。

第二章:介绍了微电网的组成部分和其运行方式,分别说明了各分布式电源的构成和工作原理,以及其存在的优势、局限性和在微电网系统中的运用策略,并对发电单元的输出特性进行了数学建模和分析。

第三章:根据微电网发电单元的特性,建立了以日总投资成本和运行成本两个目标函数的微电网优化调度模型,并对微电网系统中发电机组输出功率的平衡进行约束。另外还提出了考虑需求侧响应的微电网调度策略。

第四章:介绍了多目标优化问题的数学表达方式以及在求解过程中存在的问题。接着,详细阐述了 NSGA2、NSGA3 算法的基本原理和操作流程,并探讨了该算法的优势与不足。针对 NSGA2 算法在寻优精度、计算复杂度和解的分布均匀性方面的局限性,融入了多种群遗传策略和外部档案维护机制,以增强全局搜索能力和确保种群进化方向的多样性。引入高斯变异改进 NSGA3 算法,以提高算法收敛效果,获得全局最优解。通过在 ZDT 系列多目标测试函数进行仿真分析,结合 SP 和 GD 评价指标,验证了改进后的 NSGA2、NSGA3 算法的收敛性和分布性效果有所提升。

第五章:利用园区的微电网数据作为研究对象,对本文构建的微电网调度模

型采用改进的 NSGA2、NSGA3 算法进行求解，通过对比分析传统 NSGA2、NSGA3 算法与改进后的 NSGA2、NSGA3 算法在微电网调度模型中的仿真结果，系统地验证了改进算法在求解微电网优化问题上的有效性和优越性。通过对比测试，在确认了改进算法的有效性之后，研究进一步深入探讨了储能设备和基于电价的需求响应机制对微电网优化调度的影响。

第六章：总结本文的研究内容，并指出本课题的进一步研究计划和未来的研究方向。

第 2 章 微电网分布式电源数学模型

本章对微电网系统中几种典型发电单元和储能装置的工作原理、运行模式，以及实际应用中所展现出的优势和存在的局限性进行了分析，建立发电单元和储能装置的数学模型。通过对模型的应用和分析，可以更好地理解微电网的运行机制，为微电网的优化调度和可持续发展提供科学依据。

2.1 微电网的结构

微电网是一种高度集成的小型电力系统，由多个分散的分布式电源单元和储能元件构成，这些单元通过智能管理和控制，形成一个协调一致的电力供应网络。微电网通过共享连接点与外部电网相连，使其在正常运行时可以与主电网进行互动，共享电力资源；而在主电网出现问题时，又能够迅速断开连接，独立运行，为用户提供稳定的电力供应，保障微电网不受外界影响。

微电网的这种特殊架构，使得分布式电源如光伏阵列、风力发电机等能够直接向附近的负载提供电力，不仅提高了能源利用效率，还减轻了传统大型电网在电力传输和分配过程中的负担，降低了能源损耗和运营成本。此外，微电网的独立运行能力在面对自然灾害、设备故障或其他紧急情况时显得尤为重要，能够确保关键设施如医院、通信基站等在主电网失效时仍能继续运行，从而保障社会经济活动的正常进行和人民生活的安全稳定。

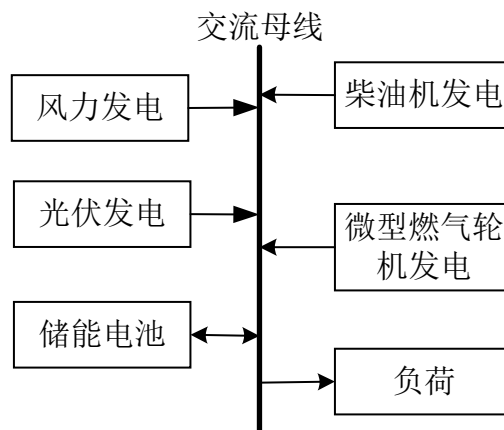


图 2-1 微电网模型图

如图 2-1 所示，本文构建的独立微电网系统是一个典型的多源电力系统，整合了多个分布式电源模块，包括利用可再生能源的光伏发电模块、风力发电

模块，以及作为电力补充的柴油发电机和微型燃气轮机模块。此外，为了平衡供需关系和提高系统的整体稳定性，系统中还包含了高效的储能电池模块。通过对各分布式电源和储能装置进行协调管理，以实现微电网在经济性、可靠性和环境友好性等多个方面的最优化目标。通过综合的系统设计和运行策略，微电网能够为用户提供一个稳定、高效和可持续的电力供应方案。

2.2 发电单元原理与分析

2.2.1 风力发电

风能，作为全球增长最快的可再生能源之一，因其清洁无污染的特性，在发电行业中得到了广泛的应用和推崇。风力发电机（Wind Turbine, WT）作为一种将风能转换为电能的装置，其工作过程涉及几个关键步骤。首先，当风吹过风力发电机的叶片时，叶片受到风力的作用而开始旋转，这一过程中，风的动能被转化为叶片的旋转机械能。随后，这些机械能通过连接到发电机轴上的齿轮箱进行加速，以满足发电机产生交流电的需求。最后，由感应发电机产生的交流电通过电力电子设备进行整流和逆变，转换成适合电网传输的电压和频率。通过这一系列复杂的能量转换过程，风力发电机最终将清洁的风能转换为可用的电能，并输送到电网中，为社会提供可持续的电力资源。

风能的利用率受目标地区的风力密度和风力发电时常的影响。将目标地区的风能转换为电网所需电能的设备称为风能系统。风力发电模型如图 2-2 所示。

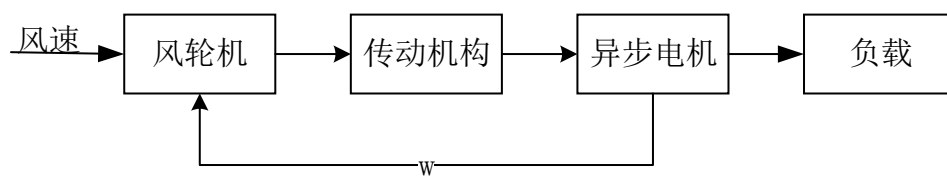


图 2-2 风力发电模型框图

风力发电机的运行依赖于不同的风速级别，主要包括三个关键速度：切入风速、额定风速和切出风速。当实际风速超过切入风速时，风力发电机便开始运转；在风力发电的系统中，风速达到额定值时产生的功率被称为额定功率；而当风速达到或超过最大风速，为防止损坏，风力发电机会停止工作，这一风速阈值被称作切出风速。风力发电机的输出功率与风速之间的关系如式（2-1）所示。

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & \text{else} \\ \frac{P_r(V - V_{ci})}{V_r - V_{ci}} & V_{ci} < V < V_r \\ P_r & V_r < V < V_{co} \end{cases} \quad (2-1)$$

式（2-1）中， V 为输入发电机的风速； V_{ci} 、 V_r 、 V_{co} 分别表示发电机的切入风速、额定风速和切出风速； P_{WT} 、 P_r 分别是风力发电机的输出功率和额定输出功率。

在建立风力发电机组的数学模型时，通常会对一些实际操作中的复杂因素进行简化处理，以便更容易地进行分析和优化。例如，风力发电机的安装高度和实际风速与测量风速之间的差异等，这些因素实际上会对风力发电机的性能产生显著影响，但在模型构建过程中往往被忽略。

通过准确预测特定时刻的风速，并结合风速与风力发电机输出功率之间的函数关系，可以估算出风力发电机在该时刻的理论功率输出。然而，风力发电机的运行特性受到风速的直接影响。在低风速条件下，风力发电机的叶片可能无法达到足够的旋转速度，导致发电机无法产生有效的电力。如果风速过高，超过了风力发电机设计的承受能力，不仅可能导致发电机组受损，还可能引发机械故障，影响整个系统的稳定性和运行效率。因此，在风力发电机的设计和运行中，必须考虑到风速变化对发电机性能的影响，并采取相应的措施来保护设备，确保其在安全的风速范围内稳定运行。

2.2.2 光伏发电

太阳能，作为一种无穷无尽且对环境友好的清洁能源，因其可再生性和无污染的特点，在光伏电站中得到了广泛的应用和推广。在我国，尤其是在广阔的西部地区和阳光充足的南方地区，太阳能资源极为丰富，年辐射总量在 930 至 2330 千瓦时之间。利用太阳能进行发电不仅有助于减少对化石燃料的依赖，降低环境污染，而且在长期运营中，由于太阳能资源的免费和可持续性，光伏发电的经济效益极为显著，可以为投资者和运营者带来可观的回报。

在光伏发电（Photovoltaic Cell, PV）系统中，电池控制单元是整个系统运行的关键，不仅负责管理电池的充放电过程，还负责监控和优化电池的性能，确保系统的稳定和高效运行。电池控制单元通过与安装在光伏并网板上的太阳能电池相连，利用集成化的光伏并网组件和智能控制技术，实现太阳能向电能的高效转

换。这种转换过程直接而高效，无需复杂的机械运动或化学变化，就能够将清洁的太阳能转化为可用的电能。逆变器负责将直流电能转换为交流电能，并将其与电网同步，以便为家庭、企业和其他电力用户供电。光伏发电系统的结构和工作原理如图 2-3 所示。

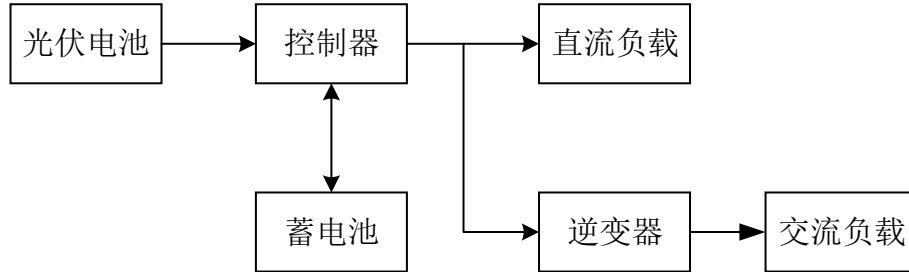


图 2-3 光伏发电模型框图

光伏发电系统的性能和输出功率受到多种环境因素的影响，其中光照强度和温度是最为关键的两个因素。光伏发电输出模型如式（2-2）所示。

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_n}{G_s} [1 + k(T_c - T_i)] \quad (2-2)$$

式（2-2）中， P_{PV} 为光伏发电机的输出功率； P_{STC} 为在标准条件下的光伏发电系统最大输出功率； G_n 为太阳能电池板表面的光照强度； G_s 是标准条件下太阳能电池板的光照强度； k 为太阳能电池板的温度系数； T_c 为当前太阳能电池板的工作温度； T_i 为标准太阳能电池板的参考温度。

根据光伏电池的数学模型，可以了解到，光伏电池将太阳能转换为电能的效率和能力与其接收到的光照强度有着直接的关系。在光照充足的条件下，光伏电池能够产生较高的输出功率；而在阴天或者夜间，由于光照强度的降低，光伏电池的输出功率也会相应减少。此外，温度也对光伏电池的性能有着显著的影响。一般来说，光伏电池的效率随着温度的升高而降低，因此在高温环境下，即使光照强度较高，光伏电池的输出功率也可能不如预期。

由于光伏电池的输出功率受到环境因素的直接影响，且温度和光照在实际环境中是不断变化和难以预测的，这就导致了光伏发电的功率输出具有不确定性和波动性。在微电网系统中，这种不确定性和波动性给系统的调度和管理带来了挑战。为了维持光伏发电量与电力需求之间的平衡，在光伏发电系统中引入一定规模的蓄电池组是必要的。这样的配置能够确保即使在环境条件变化时，光伏发电仍能满足负荷需求。

2.2.3 柴油发电机

柴油发电机（Diesel generator, DE）作为一种历史悠久且技术成熟的发电设备，被广泛应用于多个领域，属于传统的发电方式。其工作原理是通过燃烧柴油来释放出大量的热能驱动发电机。在这个过程中，柴油在发电机的燃烧室内与空气混合并被点燃，产生高温高压的燃气，推动发电机内部的活塞进行往复运动，活塞的运动通过连杆转化为曲轴的旋转运动，进而驱动发电机转子旋转。在紧急状况下能够迅速启动和停止，发电过程稳定，且较少受外界环境的干扰，可靠性较高。然而，柴油发电机也存在一些不足，如运行过程中需要不断地补充燃料，运行成本较高，同时在处理排放的污染气体方面存在困难。因此，柴油发电机主要被用于紧急情况，通常不会长时间运行。

柴油发电机的输出功率与每小时油耗的关系如式（2-3）。

$$F(t) = aP_{DE}(t) + bP_{DER} \quad (2-3)$$

式（2-3）中， $F(t)$ 为柴油发电机的油耗； $P_{DE}(t)$ 为柴油发电机的输出功率； P_{DER} 为柴油发电机的额定功率； a 和 b 为燃料成本系数。

2.2.4 微型燃气轮机

微型燃气轮机（Microturbine, MT）是一种小型热力装置，主要包括燃烧室、气体压缩机、发电机等设备组成。微型燃气轮机的工作原理：首先，压气机将空气吸入并逐步压缩，并将压缩后的空气在回热室中进行预热；然后，高压空气与燃料混合燃烧，推动涡轮机转动，最终驱动发电机产生电力。与传统的发电设备相比，微型燃气轮机具有维护需求少、污染物排放量低、易于调控和安装等多种显著优点。

微型燃气轮机发电的输出功率与天然气消耗关系表达式如式（2-4）。

$$A_{na} = \frac{P_{MT}}{\eta H_{MT}} \quad (2-4)$$

式（2-4）中， P_{MT} 为微型燃气轮机的输出功率； A_{na} 、 H_{MT} 为天然气的消耗量和热值； η 为微型燃气轮机的发电效率。

在微电网系统调度过程中，微型燃气轮机可以根据负荷的实际需求来调整其发电量，确保系统的高效运行。这种调节能力使得微型燃气轮机成为微电网中重要的调峰资源，能够在可再生能源供应不足时迅速补充电力，或在可再生能源供

应过剩时减少其输出，从而维持微电网的供需平衡。

然而，微型燃气轮机的这种调节能力也带来了一定的约束。在微电网的优化调度模型中，微型燃气轮机的出力调整不仅受到燃料供应量的限制，还需要考虑到设备的启动和停机成本、运行和维护成本以及环境排放标准等因素。这些约束条件要求微电网运营商在制定调度策略时，必须综合考虑微型燃气轮机的技术特性和经济性，以及其他电源和负载的特性，以实现微电网系统的整体优化和高效运行。

2.2.5 储能电池模型

在微电网系统中，储能单元（Storage Battery, SB）扮演着至关重要的角色，通过提供能量存储和释放的功能，显著提升了微电网的适应性和稳定性。当微电网中的可再生能源发电，如风能或太阳能，产生的能量超过当前负载需求时，储能单元能够迅速吸收这些额外的能源，将其以化学能的形式存储在电池中。这种能量存储能力使得微电网能够捕捉并利用那些本来可能因无法即时消费而浪费的能源。在另一方面，当可再生能源的产出因天气变化或其他原因而减少，无法满足系统的用电需求时，储能单元则可以及时地将存储的能量转换回电能，并通过逆变器释放到电网中，以满足用户的电力需求。

通过这种方式，储能单元可以有效的平衡微电网的供需关系，确保电力供应的连续性和稳定性。在供需不平衡的情况下，储能单元的介入可以防止电压和频率的波动，从而保障了电网的电压稳定性和电力质量。此外，储能单元还有助于减少对传统大型发电设施的依赖，提高了微电网对可再生能源的利用率，并为微电网提供了更大的运行灵活性和可靠性。

储能设备根据其储能原理和物理形态，大致可以分为化学储能、机械储能和电磁储能三大类别，每一种类别都有其独特的特点和适用场景。

化学储能是目前最常见且成熟的储能方式之一，利用化学反应来存储和释放能量。在化学储能设备中，铅酸蓄电池因其成本较低、技术成熟而被广泛应用；不间断电源（UPS）则常用于紧急电源供应和电力质量控制；镍铬电池因其长寿命和高能量密度而受到青睐；锂硫电池则因其高理论能量容量和环境友好性而备受关注。

机械储能则通过物理方式进行能量的存储和释放，其中抽水蓄能是一种利用

水的重力势能进行储能的技术,在电力需求低时通过多余的电力将水抽至高位水库,在电力需求高峰时释放水流进行发电;压缩空气储能则是通过压缩空气来存储能量,同样可以在需要时释放能量。机械储能技术通常适用于大规模储能,且具有较长的使用寿命和较低的运行成本。

电磁储能则是利用电磁场来存储能量,大容量电容器和超级电容器因其快速充放电能力和较高的功率密度而被广泛应用于需要快速响应的场合;超导磁能存储则利用超导材料在低温下无电阻的特性来存储能量,适用于电网调节和稳定。这些电磁储能设备通常具有较高的能量转换效率和较长的循环寿命。

在本文构建的微电网系统框架内,经过综合考虑成本效益和性能指标,选择了性能优越、可靠性高、维护简单且环境友好的蓄电池作为储能设备。通过合理配置和优化运行策略,蓄电池储能设备可以在微电网的运行调度和能源管理中发挥关键作用。蓄电池的主要参数如下:

(1) 蓄电池容量

蓄电池容量指的是其在充满电的情况下,可以完全放出的电能,即蓄电池的额定容量,用 C 表示,单位为 Ah 。不同的蓄电池拥有不同的电池容量,应根据不同的应用场景选择合适的蓄电池,避免资源浪费。

(2) 荷电状态 (SOC)

蓄电池的当前剩余电量与蓄电池的额定容量的比值被称为荷电状态,其数学模型如式 (2-5) 所示。

$$SOC = (C_r / C_N) \times 100\% \quad (2-5)$$

式 (2-5) 中, C_r 、 C_N 分别为蓄电池中当前容量和额定容量。

SOC 作为蓄电池的重要的参数,可以准确反映蓄电池的剩余电量。其数学模型表达式如式 (2-6) 所示。

$$SOC(t) = \begin{cases} SOC(t-1) + \frac{1}{\eta^-} P_{BS}(t), & P_{BS}(t) \leq 0 \\ SOC(t-1) + \eta^+ P_{BS}(t), & P_{BS}(t) > 0 \end{cases} \quad (2-6)$$

式 (2-6) 中, $SOC(t)$ 为蓄电池当前剩余容量; $P_{BS}(t)$ 为蓄电池的充放电功率,大于零表示充电,小于零表示放电; η^+ 、 η^- 分别为充放电效率。

(3) 蓄电池的充放电深度

放电深度 (DOD) 指在放电过程中,放出的电量与额定容量的比值。充电深

度（DOC）指在充电过程中，接收的电量与额定容量的比值。过度的充放电会造成蓄电池内部发生损坏，因而避免过度的充放电可以延长蓄电池的使用寿命。蓄电池的充放电深度数学模型如公式（2-7）和（2-8）所示。

$$DOD = Q_- / C_N \quad (2-7)$$

$$DOC = Q_+ / C_N \quad (2-8)$$

式（2-7）和式（2-8）中， Q_- 、 Q_+ 是分别表示蓄电池放出总电量和接受的总电量。

2.3 本章小结

本章首先对微电网系统的核心组成进行了概述，接着详细分析了微电网系统内各种分布式电源的发电原理、优缺点和输出特性。基于各分布式电源的功率输出特性，构建了包括风力发电、光伏发电、微型燃气轮机、柴油发电机和蓄电池在内的发电单元的数学模型，为微电网的有效调度和优化输出配置提供了坚实的理论支撑。

第3章 微电网系统优化调度模型

随着社会发展对电力需求的持续增长,以及可再生能源技术的不断进步和大规模应用,微电网面临着越来越多的挑战。传统的发电单元控制策略已不足以应对这些问题,因此,对微电网系统进行优化配置,以实现微电网中各分布式电源和储能装置的最佳组合和协调运行,成为确保良好经济效益和维持微电网系统长期稳定运行的关键。

3.1 微电网多目标优化调度模型

3.1.1 微电网优化调度目标函数

微电网的运营成本是多方面的,不仅包含分布式电源的日常运维费用,还涉及到因用户断电而可能引发的损失费用。在微电网与主电网并网运行的模式下,电力交易也成为运营成本的一部分,交易费用可能会随着电价的波动和电力市场的供需关系而发生变化,从而影响微电网的经济效益。

微电网的运维成本主要源于各发电单元的燃料消耗、设备维护和日常管理等方面。对于使用化石燃料的发电单元,如微型燃气轮机和柴油发电机,燃料成本是一个重要的开支项目。此外,这些设备的维护成本和折旧费用也不容忽视,因为随着使用时间的增长,设备的磨损和老化会导致设备维修和更换的需要,进而增加运营成本。这些成本与发电单元的实际发电量紧密相关,发电量越大,相应的成本也会越高。

与此相对,风能发电和光伏发电作为可再生能源发电的代表,其运行过程中不需要燃料消耗,因此在燃料成本方面具有明显优势。同时,由于这两种发电方式在运行过程中几乎不产生污染物排放,环境污染程度较低,因此在计算发电成本时可以忽略环境成本。这使得风能和光伏发电在环境 and 经济双重层面上具有较高的吸引力。

然而,对于微型燃气轮机和柴油发电机这类需要消耗燃料的发电单元,除了要考虑燃料成本,还必须考虑到因发电产生的污染物处理和环境保护的费用。因此,在微电网的优化调度和管理中,必须综合考虑这些成本因素,以确保微电网的经济性和环境可持续性。

通过深入研究微电网中各种电源的数学模型，以实现微电网效益最优。本文所构建的微电网模型涵盖了五种常用类型的分布式电源，微电网调度模型的建立主要从经济效益和环境保护两个方面出发，其具体内容如下：

(1) 目标函数一：日总投资成本

日总投资成本主要由发电单元的日固定投资成本、停电损失成本以及能量损失成本构成。

$$\min C_d = C_f + C_e + C_l \quad (3-1)$$

式(3-1)中， C_d 、 C_f 、 C_e 、 C_l 分别为日总投资成本、日固定投资成本、停电损失成本和能量损失成本。

日固定投资成本是指发电单元的必要投资费用，如式(3-2)表示。

$$C_f = \frac{1}{365} \sum_{i=1}^n C_i \frac{d_i(1+d_i)^{L_i}}{(1+d_i)^{L_i} - 1} \quad (3-2)$$

$$C_i = N_i C_{li} \quad (3-3)$$

式(3-2)和式(3-3)中， n 为微电网电源的种类； C_i 为安装第 i 种微电网电源的投资成本； N_i 为安装第 i 种微电网电源的数量； C_{li} 为安装单个微电网电源的投资成本； d_i 为发电设备的折旧率； L_i 为发电设备的计划使用年限。

在微电网系统的运营和管理中，通常会优先考虑利用风能和太阳能等可再生能源进行发电。当可再生能源的供应不足以满足系统中的电力需求时，蓄电池作为储能单元就会介入，通过放电来补充电力供应的不足，以满足实时的负荷用电需求。然而，蓄电池的充放电能力受到其容量、状态和使用寿命等多种因素的影响，这可能会限制其在电力需求高峰期间的供电能力。在极端情况下，如果所有发电单元均无法满足电力需求，可能需要采取负荷切除措施，即有选择地关闭部分负载，以减轻电网的供电压力，保持系统的电力供应平衡。此外，发电设备的故障和恶劣天气条件等不可预见因素也可能导致计划外的停电。因而引入停电损失成本，如式(3-4)。

$$C_e = \alpha \left\{ \sum_{i=1}^N [P_{\text{Load}}(t_j) - (P_{WT}(t_i) + P_{PV}(t_i) + P_{BS}(t_i) + P_{DE}(t_i) + P_{MT}(t_i))] \Delta t \right\} \quad (3-4)$$

式(3-4)中， $P_i(t)$ 为第 i 种分布式电源的输出功率和负荷功率； N 表示微电网对各分布式电源的采样时间； Δt 为采样间隔； α 为停电损失系数。

当风能和太阳能等可再生能源充裕时，这些可再生能源首先用于满足系统负

载的需求，而超出部分的电能则通常会被存储于蓄电池内。但是，蓄电池的储能容量是有限的，一旦产生的电力超出了蓄电池的存储能力，就可能造成能源的损失，这不仅不利于自然资源的有效利用，也不符合节能原则。因此，在追求可再生能源高效利用过程中，减少能源损耗变得尤为重要。引入能量损失成本，如式（3-5）。

$$C_l = \beta \left\{ \sum_{i=1}^N [P_{WT}(t_i) + P_{PV}(t_i) + P_{BS}(t_i) + P_{DE}(t_i) + P_{MT}(t_i) - P_{Load}(t_i)] \Delta t \right\} \quad (3-5)$$

式（3-5）中， β 为能量损失系数。

（2）目标函数二：经济运行成本

微电网的运行目标是通过整个运行周期内的维护费用、燃料开支和污染物排放所带来的治理成本最小化，来实现经济效益与环境保护的双重目标。

$$C = \min(C_1 + C_2 + C_3) \quad (3-6)$$

式（3-6）中， C 为微电网的经济运行总成本； C_1 为微电网的运维成本； C_2 为污染物治理成本； C_3 为燃料成本。

微电网系统包括各种分布式发电机组，在使用一段时间后，发电机组将经历磨损和老化，这将不可避免地产生维护成本。这主要包括材料成本、维护人员成本、运输成本以及分布式电源发生故障或损失时产生的其他维护成本。

$$C_1 = n_i \sum_{i=1}^N P_i(t) \cdot \mu_i \quad (3-7)$$

式（3-7）中， n_i 为第 i 种发电单元的安装数量； N 为发电单元的类型；为第 i 种发电单元的输出功率； μ_i 为第 i 种发电单元的维护系数。

与常规的大型电力系统相比，微电网得益于可再生能源的融入，其发电过程中排放的污染物较少，显得更加环保。在微电网系统中，微型燃气轮机和柴油发电机作为传统的发电方式，仍然需要燃烧柴油、天然气等化石燃料来产生电力，不可避免地会产生一定量的有害气体和污染物，对环境造成影响。为了降低环境污染，对这些发电单元排放的污染物进行有效处理显得尤为重要。由此产生的污染物处理成本如下。

$$C_2 = \int_0^T \sum_{i=1}^M (C_{e \cdot DE} \gamma_i \cdot P_{DE}(t) + C_{e \cdot MT} \gamma_i \cdot P_{MT}(t)) dt \quad (3-8)$$

式（3-8）中， $C_{e \cdot DE}$ 、 $C_{e \cdot MT}$ 分别表示柴油发电机和微型燃气轮机污染物治理成本； γ_i 表示污染物排放系数。

(3) 燃料成本

在微电网系统中，柴油发电机和微型燃气轮机的运行需要燃料。燃料成本的主要来源也是柴油发电机和微型燃气轮机。

$$C_3 = \int_0^T \sum_{i=1}^M (K_{CF \cdot DE} \cdot P_{DE}(t) + K_{CF \cdot MT} \cdot P_{MT}(t)) dt \quad (3-9)$$

式 (3-9) 中， $K_{CF \cdot DE}$ 、 $K_{CF \cdot MT}$ 分别表示柴油发电机和微型燃气轮机燃料消耗系数。

3.1.2 微电网优化调度约束条件

(1) 功率平衡约束

为了确保微电网系统中产生的电力与用户负载之间的平衡，避免出现供电短缺或能量过度的情况，建立电力功率平衡约束是必要的。电力功率平衡的实现意味着在微电网运行的整个周期内，输入系统的电力与发电机输出的电力保持一致。功率平衡约束如式 (3-10) 所示。

$$P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{DE}(t) + P_{MT}(t) + P_{BS}(t) = P_{Load}(t) \quad (3-10)$$

(2) 柴油发电机出力约束

柴油发电机运行功率需要满足其上下坡速率限制，以确保系统稳定。爬坡率，即柴油发电机在规定运行时间内输出功率允许的最大变化率，其约束条件如式 (3-11) 和 (3-12) 所示。

$$P_{DE}^{\min}(t) \leq P_{DE}(t) \leq P_{DE}^{\max}(t) \quad (3-11)$$

$$|P_{DE}(t) - P_{DE}(t-1)| \leq r_{DE} \quad (3-12)$$

式 (3-11) 和 (3-12) 中， $P_{DE}^{\max}(t)$ 、 $P_{DE}^{\min}(t)$ 为柴油发电机出力的上限和下限； r_{DE} 为微型燃气轮机的爬坡功率上限。

(3) 微型燃气轮机出力约束

微型燃气轮机运行功率需要满足其上下坡速率限制，以确保系统稳定。其约束条件如式 (3-13) 和 (3-14) 所示。

$$P_{MT}^{\min}(t) \leq P_{MT}(t) \leq P_{MT}^{\max}(t) \quad (3-13)$$

$$|P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1)| \leq r_{MT} \quad (3-14)$$

式 (3-13) 和 (3-14) 中， $P_{MT}^{\max}(t)$ 、 $P_{MT}^{\min}(t)$ 为微型燃气轮机出力的上限和下限； r_{MT} 为微型燃气轮机的爬坡功率上限。

(4) 储能装置约束

为了尽可能延长蓄电池的使用时间,需要设定蓄电池的荷电状态限制和充电放电限制。约束条件如下式所示。

$$SOC^{\min}(t) \leq SOC(t) \leq SOC^{\max}(t) \quad (3-15)$$

$$0 \leq P_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{dis}}^{\max} \quad (3-16)$$

$$0 \leq P_{\text{cha}}(t) \leq P_{\text{cha}}^{\max} \quad (3-17)$$

式中, $SOC^{\min}(t)$ 、 $SOC^{\max}(t)$ 分别表示为蓄电池的最小荷电状态和最大荷电状态; $P_{\text{dis}}(t)$ 是蓄电池的放电功率; $P_{\text{dis}}^{\max}$ 是蓄电池放电时的最大功率; $P_{\text{cha}}(t)$ 是蓄电池的充电功率; $P_{\text{cha}}^{\max}$ 是蓄电池充电时的最大功率。

3.2 微电网优化调度策略分析

通过对微电网系统的调度策略进行深入分析,并对其能量流动进行有效控制,可以实现降低整体成本、提升微电网系统运行效率的目标。为了同时实现环境和经济的双重效益,通过蓄电池的充放电来补充和平衡负载与分布式电源之间的功率差异。

需求侧响应是指用户端根据电价变化或激励政策,主动调整其用电行为,以帮助实现电力供需的平衡,增加微电网系统电力供应的可靠性,确保微电网可以平稳运行。根据一天中负荷的显著波动,将用电时段划分为高峰、低谷和平时三个不同阶段。在用电高峰时段,将电价增加,而在用电低谷时段,电价则相对降低。此外,通过减少高峰时段的用户电力消耗,可以更多地利用电池储备的电力。在负载较低的时段,多余的电能可用于为电池充电,进而提升能源的使用效率。

针对独立微电网系统的运行特点,本文采取了一种融合价格驱动的需求响应的微电网运行策略。由于构建的微电网模型中含有环境保护的目标,因而系统优先利用可再生能源发电来满足用户端的负荷需求。

在用电高峰期,例如白天的工作时段或晚上的用电高峰,系统的电力需求会显著增加。此时,应优先使用蓄电池储备的电能来供电,因为蓄电池能够提供快速响应的电力支持。如果蓄电池的电量无法完全满足高峰时段的电力需求,为了避免供电不足,就需要启动柴油发电机和微型燃气轮机作为补充电源,以产生额外的电力来满足剩余的负荷需求。

在用电低谷时段,如深夜或清晨,系统的电力需求会相对减少。这时,柴油

发电机和微型燃气轮机可以作为主要电源来供电，同时还可以利用这一时段相对较低的电力需求，将多余的电力用于为蓄电池充电，从而储备能量以备高峰时段使用。

在电力需求相对平稳的时期，电力需求不会有太大的波动。在这种情况下，可以直接通过柴油发电机和微型燃气轮机来满足系统的负荷需求，这样可以保持系统的高效运行，并减少对蓄电池的依赖，延长其使用寿命。

通过这种灵活的调度策略，微电网系统能够有效地平衡电力供需，提高能源利用效率，降低运营成本，并确保电力供应的稳定性。同时，这种策略也有助于减少对环境的影响，因为其鼓励在电力需求较低时使用更多的可再生能源，并在必要时使用柴油发电机和微型燃气轮机，从而减少化石燃料的消耗和温室气体的排放。

3.3 本章小结

本章对微电网的经济与环境成本进行调度，以实现一个运行周期内日总投资成本、运营维护费用、污染排放费用以及燃料开支的最小化。在此过程中，综合考虑了包括发电机组功率平衡、蓄电池容量限制、柴油发电机和微型燃气轮机的爬坡速率等多种约束因素。此外，提出了基于分时电价的需求响应优化调度策略，并对求解该策略的具体方式进行了详细阐释。

第 4 章 NSGA2/3 算法的研究与改进

在寻求某些目标的最优解集时，仅依靠人工计算是难以达成的。为了更加系统科学地处理多目标优化问题，通常需要识别出多目标问题中的目标，并阐明这些目标之间的相互关系，建立各个目标的数学表达式，然后选择合适的多目标优化算法，利用计算机技术进行求解。在本文中，关注的是微电网系统中日总投资成本和运行成本最小化问题，问题的最优解集由多个目标构成。因此，本文分别采用改进的 NSGA2 和 NSGA3 算法对所建立的微电网优化调度模型进行求解。

4.1 多目标优化问题

在实际应用中，面临的许多问题往往不是单一维度的，而是多方面的、多层次的。多目标优化问题含有多个目标函数，在给定的约束框架内，多目标优化问题的常见解决方法是寻找能够最大程度满足所有目标的最优解。可以用式 (4-1) 来表述多目标优化问题。

$$\begin{aligned} \min y = F(x) &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)], n = 1, 2 \dots N \\ \text{s.t.} \begin{cases} g_i \leq 0, i = 1, 2 \dots m \\ h_i \leq 0, i = 1, 2 \dots k \\ X = [x_1, x_2, \dots, x_d \dots x_D] \\ x_{d\min} \leq x_d \leq x_{d\max}, d = 1, 2 \dots D \end{cases} \end{aligned} \quad (4-1)$$

式 (4-1) 中， $f(x)$ 为目标函数， N 个目标函数组成多目标问题的目标函数向量 $F(x)$ ；向量 X 为 D 维的决策向量， $x_{d\min}$ 和 $x_{d\max}$ 为决策向量中的上下限； g_i 为 m 个不等式约束的集合， h_i 为 k 个等式约束的集合；满足约束条件的一组变量成为一个可行解。

多目标优化问题与单目标优化问题的主要区别在于目标函数的个数不同，因而解的数量也不同。单目标优化问题通常能够求得一个明确的最优解。与之相比，在多目标优化问题中，不同目标间存在相互制约、相互影响的复杂关系。在特定的约束条件下，对某一子目标的优化可能会牺牲另一子目标的最优性，很难找到一个单一的解同时优化所有目标。

传统的方法往往通过给不同的目标赋予权重，把多目标问题中的多个目标转化为单目标进行求解。这种方法不仅增加了主观判断的成份，而且随着计算过程

的复杂化，增加了计算时间和规模，通常只能得到单一的解。若要获得多个解，需要调整权重并重新计算，不仅降低了求解的正确性，也影响了算法的效率。

为了全面理解和有效处理多目标问题，需要采用多角度、多维度的分析方法。多目标优化算法正是为了应对这种复杂问题而发展起来的。多目标优化算法通过模拟生物进化、社会行为或其他自然现象，能够在多个目标之间寻找最优或近似最优的解集，而不是单一的最优解。多目标优化算法的优势在于能够提供一系列的解决方案，这些解决方案在不同目标之间提供了不同的权衡，从而为决策者提供了更多的选择和灵活性。

求解多目标优化问题可以得到一组解，每个解在某种程度上都优于其他解，所有解构成的解集被称为 Pareto 解集。在众多的优化问题实例中，Pareto 解往往呈现出数量众多的特点。通常情况下，所得到的最优解集合在解空间中具有良好的分布均匀性，有助于决策者在优化问题中做出选择。

4.2 NSGA2 算法及改进

遗传算法（Genetic Algorithm, GA）是一种模仿生物界遗传和自然选择过程的搜索算法，借鉴了生物进化过程中的机制，如物种的繁殖、基因的遗传和变异等现象，将这些原理应用于解决复杂的优化问题。遗传算法通过模拟自然界中的选择、交叉和变异等操作，促进解决方案种群的进化，从而在多代迭代过程中逐步优化解决方案。遗传算法的随机性和自适应性使其特别适合处理具有多个局部最优解的复杂非线性问题，能够通过其全局搜索能力和多样性保持机制，探索更广泛的解空间，有更大的机会找到全局最优解。

4.2.1 NSGA2 算法简介

在 1994 年, Deb 等人提出了一种基于非支配排序和 Pareto 理想前沿的 NSGA 算法, 为多目标优化问题提供了一种新的解决方案。这种算法在初始阶段通过分析种群中个体间的相对优势关系来确定每个个体的等级, 然后利用小生境技术来评估个体间的相似性, 为个体提供了一个综合的评价和选择标准, 能够有效地识别并保留优秀的个体, 同时促进种群的多样性和解的分布均匀性。

随着多目标问题的复杂度不断增加, 为了克服 NSGA 算法收敛速度慢和收敛质量差的问题, Deb 等研究者在 2002 年对算法进行了重要的改进, 引入了快

速非支配排序的概念，显著降低了 Pareto 前沿排序的时间复杂度，并通过拥挤度距离和精英策略，确保优秀的个体能够被保留并传承到下一代种群中，使得 NSGA2 算法在解决多目标优化问题时更加高效和可靠。

NSGA2 算法的核心在于模拟自然界中的优胜劣汰机制，通过选择种群中最优秀的个体来形成新一代种群。在这个过程中，每个问题的解决方案被编码为一个个体，问题的控制变量被视作基因，这些基因按照一定的规则线性排列在染色体上。通过这种方式，算法可以将优化问题的解空间转化为遗传算法可以操作的搜索空间。这种编码机制使得 NSGA2 算法能够广泛应用于工程设计、资源分配、调度问题等多种优化问题，其在处理复杂问题时的有效性和灵活性得到了广泛的认可和验证，在理论研究和实际应用中发挥着重要作用。

在 NSGA2 算法中，有快速非支配排序法、拥挤度算子和精英策略算子三个重要操作算子。

（1）快速非支配排序法

在传统的 NSGA 算法基础上，NSGA2 进行了进一步的改良优化。对于种群中的每个个体 i ，设定了个体 i 所能支配的个体解组成的集合 $S(i)$ 和集合中的个体数量 $n(i)$ 两个参数。其算法为：

首先在种群中找出所有 $n(i) = 0$ 的个体，并将其保存到集合 $F(1)$ 中，其非支配等级为 1；对于集合 $F(1)$ 中的每个个体 j ，其可支配的个体集合为 $S(j)$ ，考察集合 $S(j)$ 中每个个体 k ， $n(k) = n(k) - 1$ ，若 $n(k) = 0$ ，则将个体 k 保存到集合 H ，其非支配等级为 2。以集合 H 为当前集合，重复上述操作，直到整个种群中所有个体完成分级操作。

（2）拥挤度比较算子

为了克服传统 NSGA 算法中因使用人为设定的共享函数而带来的主观性问题，引入了拥挤度的概念以增强种群的多样性。拥挤度用 i_d 表示个体 i 周围区域内种群的密集程度， i_d 值越大代表越密集。在遗传进化过程中，通常会选择合适的拥挤度比较算子来确保种群的多样性，以实现解集上的点可以实现均匀趋近理想 Pareto 前沿的效果。

（3）精英策略算子

采用精英策略能够确保父代种群中的优质个体得到保留，从而强化种群的整

体优势，提高发现最优解的几率，并有助于缩短模型的计算时间，进而提升算法的整体效能。精英策略计算步骤如下：

将父代种群 P_i 与子代种群 Q_i 组合形成大小为 $2N$ 的新种群 R_i 。然后，根据 Pareto 对新种群 R_i 进行快速非支配排序和拥挤度计算。根据 Pareto 等级，将等级最低的优先放入新的父代种群 P_{i+1} ，如果种群数量小于 N ，则选取种群 R_i 中下一级的非支配解中的个体；如果种群数量大于 N ，则按照拥挤度从大到小选取 N 个个体放入到种群 P_{i+1} 中。

NSGA2 算法流程如图 4-1 所示。

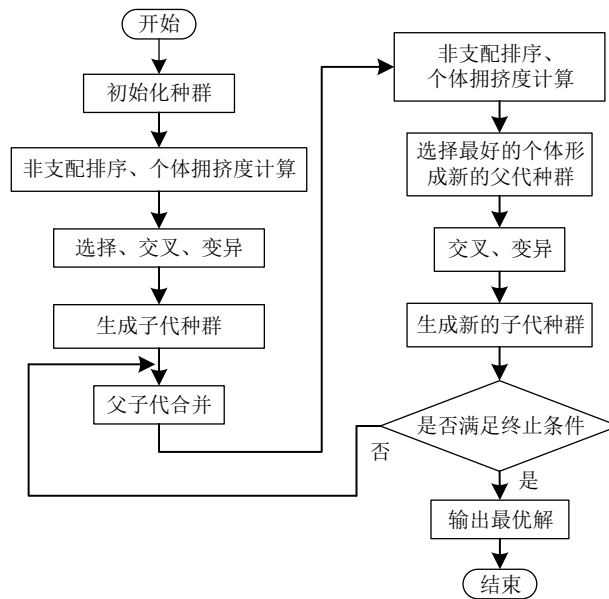


图 4-1 标准 NSGA2 算法流程图

NSGA2 算法求解过程如下：

步骤 1：设定迭代次数、种群规模等相关算法参数，初始化种群。

步骤 2：迭代产生第一代父代种群，计算种群个体的拥挤度，利用快速非支配排序对父代种群进行排序和分层，种群通过选择、交叉和变异操作，获得第一代子代种群。

步骤 3：将步骤 2 中新生成第一代子群与父代种群合并组成种群规模为 $2N$ 的新一代父代种群。

步骤 4：计算新父代种群中个体的拥挤度，利用快速非支配排序对新父代种群进行排序和分层，并通过精英保留策略选择合适个体组成新的种群。

步骤 5：当满足设定的迭代次数时，循环结束，输出取得的最优解。

4.2.2 NSGA2 算法的优点和局限性

(1) NSGA2 算法的优点

与传统的 NSGA 算法相比, NSGA2 算法降低了 NSGA 算法的复杂度, 减少了计算机处理数据的负担; 同时, NSGA2 算法提高了解集的收敛性, 可以更快的获得解集, 实现算法收敛。

NSGA2 算法提出快速非支配排序策略, 增强了其寻优效率; 同时, 实施精英策略以在进化过程中选取优良个体, 从而提升了种群的整体优势; 此外, 拥挤距离的计算不仅降低了主观性对解集分布的干扰, 还将其作为种群内个体间距离的一种衡量, 确保解在理想帕累托前沿上均匀而广泛地分布, 维护了种群中个体的多样性。

(2) NSGA2 算法的局限性

由于 NSGA2 算法具有良好的收敛性和适用性, 被广泛用于多目标问题的求解。然而, 随着多目标问题越来越复杂以及智能优化算法的快速发展, NSGA2 算法在收敛速度和计算复杂度方面相较于其他算法表现出了一些局限性。主要体现在:

1. 收敛性较差

在算法的初始阶段, 对种群进行初始化时, 未能充分考虑个体在解空间中的分布均匀性, 导致了算法收敛性不佳的问题。为了解决这一问题, 许多研究者引入了搜索算子来提升算法的收敛性能; 同时, 也有研究者通过引入小区域搜索策略来弥补收敛性不足。

2. 计算复杂度较高

在快速非支配排序过程中, 每个个体都会被赋予两个重要的属性: 非支配等级值和拥挤度距离值。非支配等级值反映了个体在 Pareto 意义下的优越性, 即一个个体如果在所有目标上都不被其他任何个体支配, 则其等级值较低, 表示该个体较为优秀。而拥挤度距离值则用于衡量解在目标空间中的分布密度, 一个较大的拥挤度距离值意味着该解在其周围的区域内较为稀少, 即解的多样性较好。然而, 随着个体所处的非支配等级的提高, 该等级内包含的个体数量可能会显著增加, 这会导致计算复杂度的提高, 因为需要处理和比较更多的个体。这种增加的计算负担不仅增加了内存的使用量, 也延长了计算时间, 从而可能降低了算法的

整体处理效率。

3. 淘汰个体存在盲目性

通过采用快速非支配排序对上一代种群中的每个个体进行排序,促进了个体间的学习交互,然后将新生成的种群与原有种群进行合并,利用拥挤度进行快速非支配排序,从中选取优秀个体构成新的种群。虽然这一过程确保了种群规模始终保持在 N 个个体,但存在一定的盲目性,因为被淘汰的 N 个个体在未来的进化过程中可能有机会获得更优的位置,却在此阶段被直接排除了。

4.2.3 NSGA2 算法改进

NSGA2 算法经过两次迭代改进,在求解速度上相比以往有了显著提升。然而,在当前的研究背景下,随着多目标优化问题的复杂性与种群规模不断增加,算法的求解速度会减缓,迭代次数也会随之增加,从而导致整体求解时间的延长。尽管该算法在若干次的迭代求解过程中, Pareto 解集中可能已经存在满意的解决方案,但这些解在筛选过程中可能会被忽略,增加了算法陷入局部最优的风险。此外,NSGA2 算法在求解过程中可能会产生规模达到 $2N$ 的种群,这可能导致个体解的重复,减少了父代种群与子代种群的多样性。

(1) 外部档案维护

在传统 NSGA2 算法的基础上,加入了外部存档的维护机制,将搜索过程中发现的非劣解存储于外部文件中。随着算法迭代的进行,新的非劣解将不断被生成。

当非劣解的数量未达到外部文件存储设定的上限时,新生成的非劣解将直接被存储至外部文件中。

当非劣解的数量达到外部文件存储设定的上限时,若新的非劣解支配了外部文件中原有解,则这些被支配的解将被移除,而新的非劣解将被存入到外部文件中;若新的非劣解与外部文件中的解并无支配关系,则原有的解将保持不变并继续保留。

在执行上述步骤时,新产生的非劣解会持续地更新外部文件,进而增强文件中解的多样性。

(2) 多种群遗传策略

多种群遗传算法是一种先进的遗传算法变种,允许多个子种群在同一个解空

间内并行搜索，每个子种群都能够独立地发现并优化解，提高了算法的搜索效率和解的质量。移民策略通过定期将一些个体从一个种群迁移到另一个种群，增加了种群间的遗传多样性，减少了遗传退化的风险，并且提高了算法对解空间的全局搜索能力。在每次迭代后，通过人工筛选，将各个子种群中表现最佳的个体选入精英种群，使得算法能够保持优秀的解，加速收敛过程。

多种群遗传算法的具体流程如图 4-2 所示。

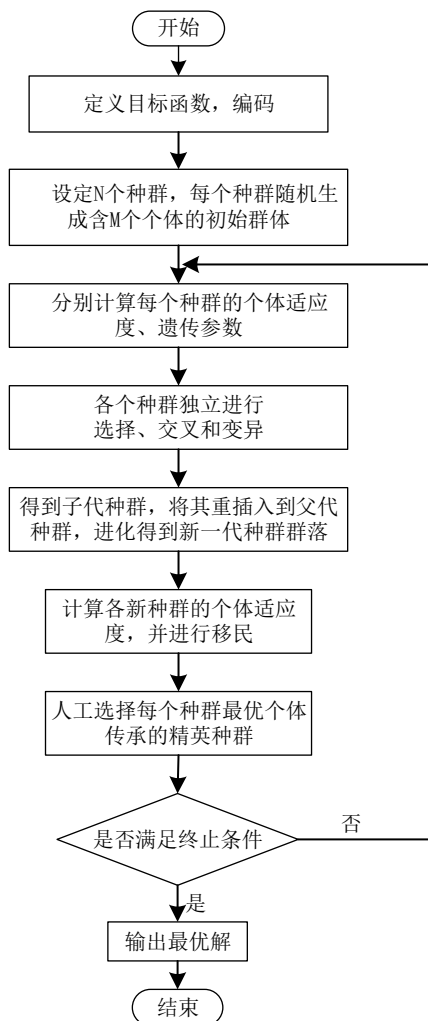


图 4-2 多种群遗传算法流程图

多种群遗传算法的求解方法如下所示：

步骤 1：初始化染色体，对目标函数中的变量编码，设置算法参数。设定 N 个种群，随机产生含有 M 个个体的种群。

步骤 2：计算各个种群的个体适应度，选择种群中的最优个体，通过交叉、变异，产生各个新的子代种群。

步骤 3：计算各个种群的个体适应度，根据移民策略在各种群之间进行移民，

将当前种群的最优个体与相邻种群的最差个体进行替换。

步骤 4：将每代各个种群中的最优个体通过人工选择保存到精英种群中。

步骤 5：当满足设定的迭代次数时，输出求解的最优解。

(3) 算法实现

改进后的算法流程图如图 4-3 所示。

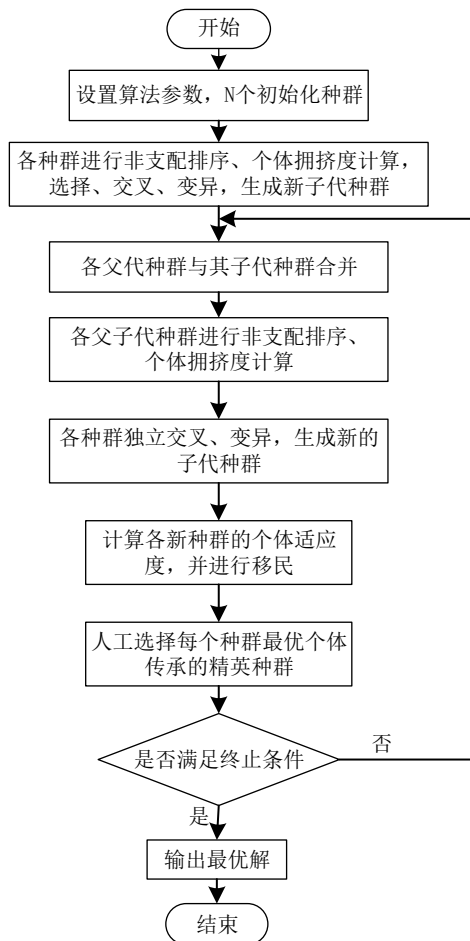


图 4-3 改进 NSGA2 算法流程图

改进后的算法实现步骤如下：

步骤 1：设置算法的目标函数、迭代次数，设置 N 个初始种群，随机产生含有 M 个个体的种群。

步骤 2：通过迭代产生第一代父代种群，计算种群个体的拥挤度，利用快速非支配排序对父代种群进行排序和分层，种群通过选择、交叉和变异操作，获得第一代子群。

步骤 3：将步骤 2 中新生成各第一代子群与其父代种群合并组成种群规模为 $2N$ 的新一代父代种群。

步骤 4: 计算各新父代种群中个体的拥挤度, 利用快速非支配排序对新父代种群进行排序和分层, 并采用精英策略选择优秀个体组成新的种群。

步骤 5: 计算各个种群的个体适应度, 根据移民策略在各种群之间进行移民, 将当前种群的最优个体与相邻种群的最差个体进行替换。

步骤 6: 将每代各个种群中的最优个体通过人工选择保存到精英种群中。

步骤 7: 当满足设定的迭代次数时, 输出求解的最优解。

4.3 NSGA3 算法及改进

在工业生产实践中, 许多工程问题都需要对多个性能指标进行综合优化, 这使得多目标优化成为了一个日益受到重视的领域。探索如何有效地同时处理和优化这些目标, 是多目标进化算法研究中的一个重要议题。

4.3.1 NSGA3 算法简介

在 2012 年, 学者 Deb 等人首次提出了 NSGA3, 即第三代非支配排序遗传算法。这一算法迅速成为解决多目标优化问题的先进工具之一。NSGA3 的设计初衷是为了克服 NSGA2 在处理三个或更多优化目标时的局限性, 特别是针对高维模型的适应性问题。NSGA3 通过引入预先设定参考点的选择策略, 有效解决了 NSGA2 中因高拥挤度选择策略可能导致的种群陷入局部最优的问题。NSGA3 算法在 NSGA2 算法的基础上保留了原有的精英策略, 在算法选择阶段使用参考点机制代替拥挤度进行排序。主要包含以下改进方面:

(1) 设置参考点

NSGA3 利用预定义的参考点集指导算法对个体的挑选, 并保证解的分布多样性。参考点的设计可以选择结构化的方式, 或通过用户根据偏好自定义设计。缺乏偏好信息时, 算法可以采用预定义的结构化参考点集。

(2) 自适应归一化

归一化的目的就是为了使不同量纲或者范围的值能够进行对比, 对于多个目标函数的个体选择操作来讲, 需要进行去量纲操作后才能进行个体的保留和淘汰。而个体保留和淘汰的依据是种群个体与参考点之间的关联关系, 参考点的生成又是在标准超平面建立的基础上, 而标准超平面与超平面的空间映射关系需要根据超平面与坐标轴的截距来确定, 因此可以通过种群个体的各目标函数值除以各目

标坐标轴与超平面的截距实现去量纲化,也就是将种群个体归一化到了标准超平面的空间内。

(3) 关联种群参考点

让种群中的 K 个个体分别关联到相应的参考线。首先定义参考线,即在目标空间中原点与参考点的连线,其次计算种群中的每个个体到与其最近参考线的垂直距离,最后将种群个体与和它最近的参考线关联起来。

4.3.2 NSGA3 算法的优点和局限性

(1) NSGA3 算法的优点

1. NSGA3 算法特别针对目标维数较高的优化问题进行了改进,能够处理目标维数大于 3 的问题,而传统的 NSGA2 算法在目标维数增加时会面临性能下降的问题。

2. NSGA3 算法采用了基于参考点的非支配排序方法,这种方法可以更有效地对个体进行排序,尤其在目标维数较多时,相比 NSGA2 算法中的拥挤度距离方法,可以更好地维持种群多样性。通过预定义的参考点来指导选择过程,这有助于在保持多样性的同时,提高算法的全局搜索能力和收敛性能。

3. NSGA3 算法通过关联操作和个体保留操作,能够更好地保持解集的分布性和多样性,对于找到广泛的 Pareto 前沿至关重要。

(2) NSGA3 算法的局限性

1. 随着维数的增加,参考点的个数远大于种群数量,导致算法计算复杂度快速增大;除此之外, Pareto 选择压力也会减弱,导致算法收敛速度缓慢。

2. NSGA3 中参考点的数目过多、过少都不利于临界非支配层的选择,过少,参考点筛选效果不好;过多,算法复杂度增加。

3. 在种群进化阶段,人为设定的交叉变异算子不具有普遍性,在交叉变异过程中会导致概率不均,减小种群多样性等问题。

4.3.3 NSGA3 算法改进

高斯变异是一种优化策略,其使用服从正态分布的随机数作用于原始位置向量,从而生成新的位置。大多数变异算子分布在原始位置周围,相当于在小范围内进行邻域搜索。高斯概率密度如式(4-2)所示。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4-2)$$

式(4-2)中, μ 表示分布的平均值或期望值, σ 表示标准差。特别地, 标准高斯概率密度种的 μ 和 σ 分别设置为 0 和 1。为了充分考虑当前种群的特征, 随机选择种群中的两个位置, 并利用二者的差值与高斯分布算子进行交互, 以形成所提出的高斯变异算子。高斯变异的表达式如式(4-3)所示。

$$O = G(\zeta) \cdot (X_{\text{rand},1}^D - X_{\text{rand},2}^D) \quad (4-3)$$

式(4-3)中, $G(\zeta)$ 是由式(4-2)的概率密度形成的高斯分布, $X_{\text{rand},1}^D, X_{\text{rand},2}^D$ 分别表示在群体中随机选择的两个位置信息, O 表示上述提出的高斯变异算子, 每个算子包含 D 维。

引入高斯变异改进 NSGA3 算法, 这样的突变不仅可以提高优化器的优化精度, 而且有助于原始算法跳出局部最优区域。同时, 少数算子远离当前位置, 增强了种群的多样性, 有利于更好地搜索潜在区域, 从而提高搜索速度, 加速优化器的收敛趋势。具体流程如下。

步骤 1: 设置算法参数, 如种群规模 N , 迭代次数, 交叉率, 变异率等。

步骤 2: 初始化种群, 生成归一化的参考点。

步骤 3: 计算种群中每个个体的适应度值。

步骤 4: 通过交叉、变异操作产生子代种, 并计算子代种群中每个个体的适应度值。

步骤 5: 对组合种群进行快速非支配排序。

步骤 6: 更新超平面, 个体关联参考点, 计算参考点关联的个体数量数。

步骤 7: 基于小生境保留操作选择个体, 选取符合算法规则的个体填充种群, 直至种群规模为 N 。

步骤 8: 判断是否达到预先设定的迭代次数, 满足条件, 输出最优解。

改进的 NSGA3 算法流程如图 4-4 所示。

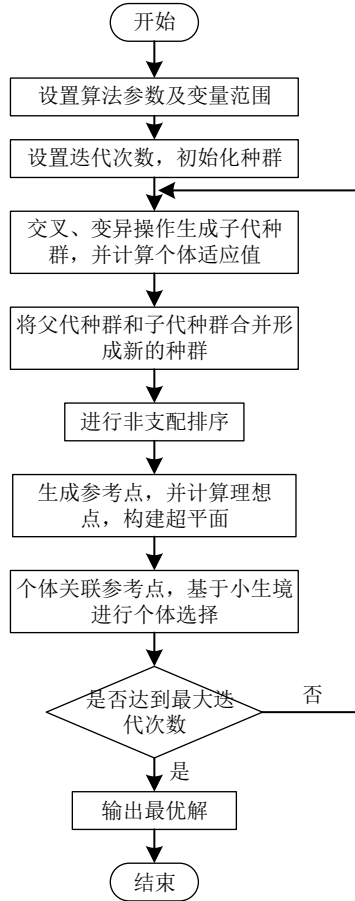


图 4-4 改进 NSGA3 算法流程图

4.4 算法性能测试

算法测试函数是一种能够有效评估算法性能的函数。针对传统 NSGA2 算法和 NSGA3 算法的不足, 本文对其进行了改进, 以便更好地应用于多目标优化问题。本节通过科学的手段来验证改进算法的有效性。

4.4.1 性能评价指标

为了验证本文中改进算法的性能, 将其与传统算法进行比较, 从解的分布特性和收敛特性两个维度对改进后的算法进行评估。

(1) 世代距离 (GD)

利用世代距离来评价算法的收敛性, 世代距离的数学表达式如式 (4-4)。

$$GD = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (4-4)$$

式(4-4)中, d_i 为算法所求得的 Pareto 前沿与真实的 Pareto 之间的距离。根据数学表达式可以看出, GD 值越小, 表明所求解集越趋近真实的 Pareto 最优前沿,

(2) 分布性 (SP)

采用空间评价 SP 来检验算法的分布性, 空间评价的数学表达式如式(4-5)和式(4-6)。

$$SP = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d' - d_i)^2} \quad (4-5)$$

$$d_i = \min(|f_1^j(x) - f_1^i(x)| + |f_2^j(x) - f_2^i(x)|), i, j = 1, \dots, n \quad (4-6)$$

式(4-5)和(4-6)中, d' 为 d_i 的平均值, n 为 Pareto 最优前沿所解的个数。根据数学表达式可以看出, SP 的值越小, 表明求得的 Pareto 前沿与真实的 Pareto 之间的距离越小, 则 Pareto 解集的分布更均匀。

4.4.2 性能结果分析

使用改进前后的 NSGA2 和 NSGA3 算法分别对表 4-1 中 ZDT1~ZDT3 测试函数进行仿真实验。对于 ZDT 测试函数, 设置初始化种群规模为 100, 外部档案规模为 100, 最大迭代次数为 500。

表 4-1 标准测试函数

测试函数	函数表达式	变量范围
ZDT1	$\min f_1(x) = x_1,$	
	$\min f_2(x) = g(x)[1 - \sqrt{f_1(x)/g(x)}],$	$0 \leq x_i \leq 1$
	$g(x) = 1 + \frac{9 \left(\sum_{i=2}^n x_i \right)}{(n-1)}$	$1 \leq i \leq 30$
ZDT2	$\min f_1(x) = x_1,$	
	$\min f_2(x) = g(x)[1 - (\frac{f_1(x)}{g(x)})^2],$	$0 \leq x_i \leq 1$
	$g(x) = 1 + \frac{9 \left(\sum_{i=2}^n x_i \right)}{(n-1)}$	$1 \leq i \leq 30$
ZDT3	$\min f_1(x) = x_1,$	

$$\min f_2(x) = g(x)[1 - \sqrt{x_1/g(x)} - \frac{x_1}{g(x)} \sin(10\pi x_1)],$$

$$g(x) = 1 + \frac{9\left(\sum_{i=2}^n x_i\right)}{(n-1)}$$

$$\begin{aligned} 0 \leq x_i &\leq 1 \\ 1 \leq i &\leq 30 \end{aligned}$$

图4-5~图4-7分别表示改进前后的NSGA2和NSGA3算法对测试函数ZDT1、ZDT2和ZDT3的算法仿真结果。

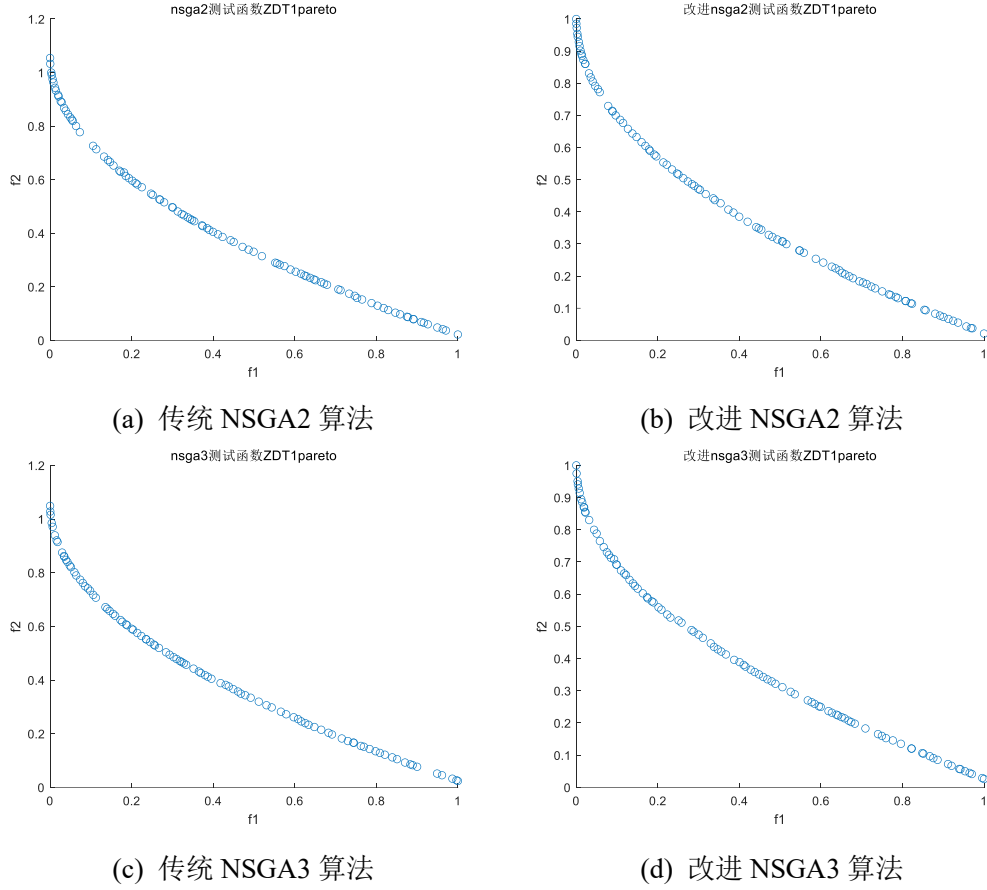
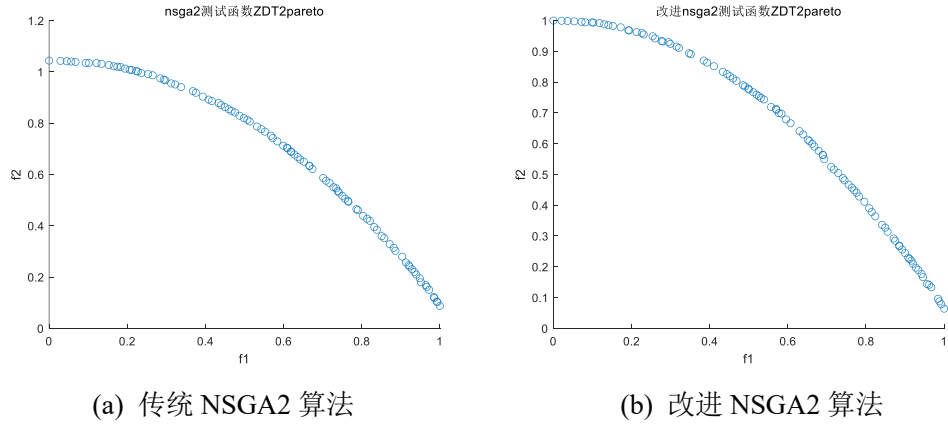
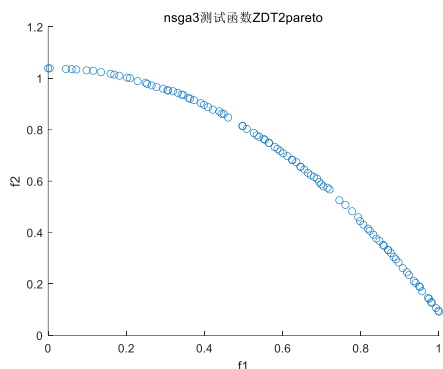
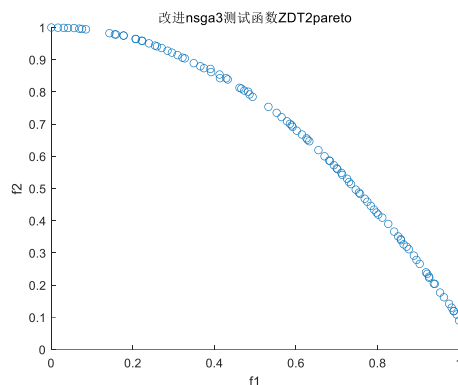


图 4-5 ZDT1 的优化结果



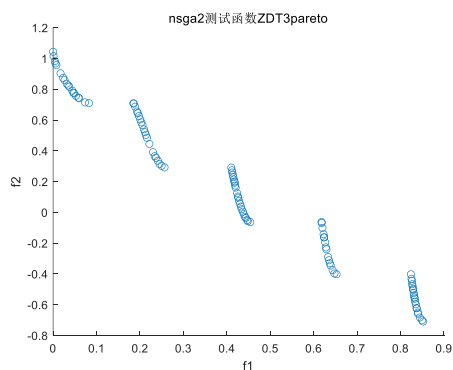


(c) 传统 NSGA3 算法

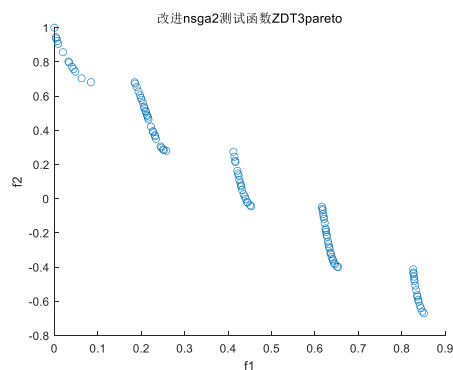


(d) 改进 NSGA3 算法

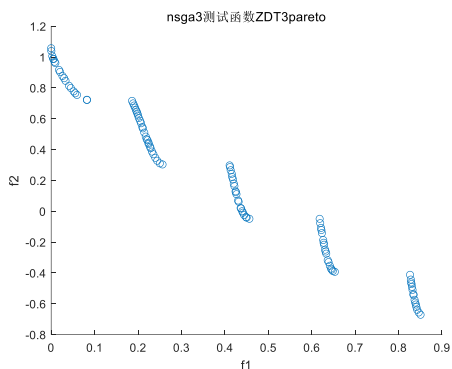
图 4-6 ZDT2 的优化结果



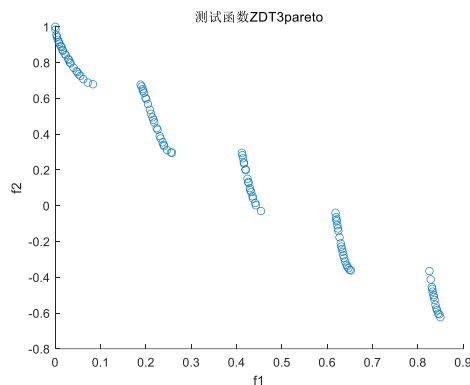
(a) 传统 NSGA2 算法



(b) 改进 NSGA2 算法



(c) 传统 NSGA3 算法



(d) 改进 NSGA3 算法

图 4-7 ZDT3 的优化结果

对比图 4-5~图 4-7，可以观察到改进后的 NSGA2 算法 Pareto 前沿比传统的 NSGA2 算法更趋近真实 Pareto 前沿；改进后的 NSGA3 算法 Pareto 前沿比 NSGA3 算法更趋近真实 Pareto 前沿。

在保持算法改进前后参数设置相同的情况下，分别对 ZDT1~ZDT3 测试函数运用两种算法各执行 10 次运行，根据所得的解结果，获取改进前后算法在收敛性和多样性两个指标上的表现。评价指标 GD 和 SP 运行 10 次结果的平均值如

表 4-2 和表 4-3 所示。

表 4-2 测试函数的 GD 评价

对比算法	ZDT1	ZDT2	ZDT3
NSGA2	0.026332	0.04637	0.02124
改进 NSGA2	0.025025	0.03733	0.02063
NSGA3	0.025508	0.04383	0.02264
改进 NSGA3	0.024159	0.035235	0.01993

表 4-3 测试函数的 SP 评价

对比算法	ZDT1	ZDT2	ZDT3
NSGA2	0.56392	0.46681	0.68921
改进 NSGA2	0.55391	0.45513	0.56188
NSGA3	0.42895	0.49735	0.54925
改进 NSGA3	0.41592	0.44132	0.51413

对比表 4-2 和 4-3，可以发现改进后 NSGA2 算法的 GD 和 SP 的均值相比于传统的 NSGA2 有所减小，说明改进后 NSGA2 算法的收敛性和分布性有所提高。改进后 NSGA2 算法的 GD 均值相比于 NSGA3 算法有所减小，说明改进后算法的收敛性有所提高，但 SP 均值不是都有所减小，说明改进后的 NSGA2 算法与 NSGA3 算法相比分布性没有显著提升。改进后 NSGA3 算法的 GD 和 SP 的均值相比于传统的 NSGA3 有所减小，说明改进后 NSGA3 算法的收敛性和分布性有所提高。

4.5 本章小结

本章首先介绍了多目标优化问题的数学模型和解集情况，接着详细阐述了 NSGA2 和 NSGA3 算法的核心原理和操作流程，探讨了该算法的优势与不足。针对 NSGA2 算法在寻优精度、计算复杂度和解的分布均匀性方面的局限性，融入了多种群遗传策略和外部档案维护机制，以增强全局搜索能力和确保种群进化方向的多样性。引入高斯变异改进 NSGA3 算法，以提高算法收敛效果，获得全局最优解。通过在 ZDT1、ZDT2、ZDT3 测试函数上的仿真分析，结合 SP 和 GD 两个评价指标，验证了改进后的 NSGA2 和 NSGA3 算法在收敛性和分布性方面相较于传统算法均有显著提升。

第 5 章 微电网多目标优化调度

本章选取了一个特定园区内的独立微电网作为研究案例, 跟据前文所构建的微电网系统配置调度模型, 运用改进前后的 NSGA2 和 NSGA3 算法进行问题求解。收集了风光发电输出和负荷需求等相关数据, 并设定了多种仿真情景, 在 MATLAB 软件环境下开展仿真实验, 随后对所得结果进行了细致的比较和分析。

5.1 算例及算法参数

(1) 园区风光负荷数据

选取一个园区内的独立微电网系统作为研究目标, 通过网络搜索和地方部门的信息搜集, 获取了该园区代表日的负荷需求、风力发电输出以及光伏发电输出的数据。风光负荷数据如图 5-1 和图 5-2 所示。

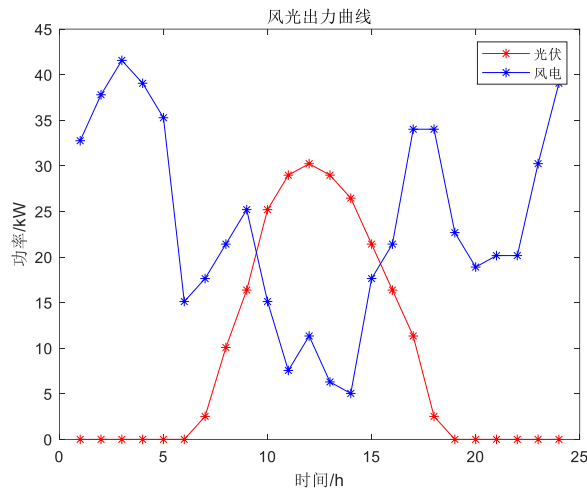


图 5-1 风光出力曲线

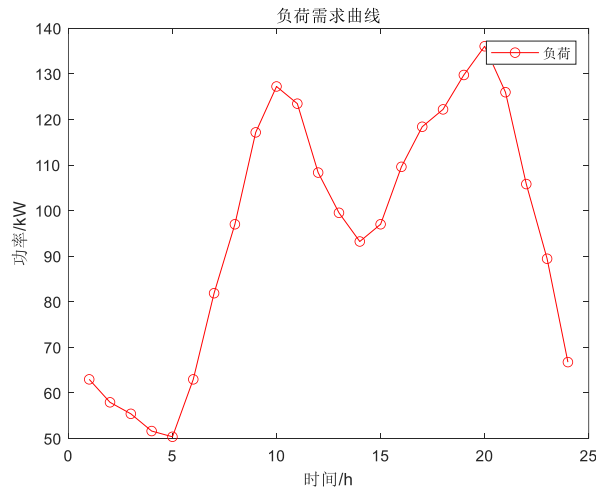


图 5-2 负荷需求曲线

(2) 各分布式电源设备参数

在微电网系统中，分布式电源的参数与系统运行效率和环境成本紧密相连，因而这些参数在系统的优化调度过程中显得格外关键。表 5-1 列出了系统中各类分布式电源的相关参数，表 5-2 提供了各分布式电源污染排放的相关系数，表 5-3 则展示了蓄电池的参数配置。

表 5-1 微电网中各分布式电源参数

类型	单机容量 (KW)	使用年限 (年/台)	年折旧率 (%)	运行管理系数 (元/KWh)
风力发电机	15	20	4	0.02
光伏阵列	0.3	20	6	0.01
柴油发电机	25	30	9	0.06
蓄电池	1	5	5	0.03
微型燃气轮机	8	20	10	0.09

表 5-2 污染处理参数

污染物类型	治污费用 (元/kg)	污染物排放系数	
		微型燃气轮机	柴油发电机
NO _x	14	0.1	10
CO ₂	0.1	725	625
SO ₂	6	0.3	0.5

表 5-3 蓄电池参数

参数	数值
使用年限 (年)	10
SOC _{max} (%)	85
SOC _{min} (%)	10

(3) 园区电价信息

依据城市用电负荷的特性，可将其划分为高峰时段、平段以及低谷时段。具体的电价策略包括分时电价和固定电价，详情如表 5-4 所示。

表 5-4 分时电价信息

类型	时间 (h)	价格 (元/KWh)
谷时	0:00-7:00	0.2
平时	8:00-10:00, 16:00-18:00, 22:00-24:00	0.5
峰时	11:00-15:00, 19:00-21:00	0.8

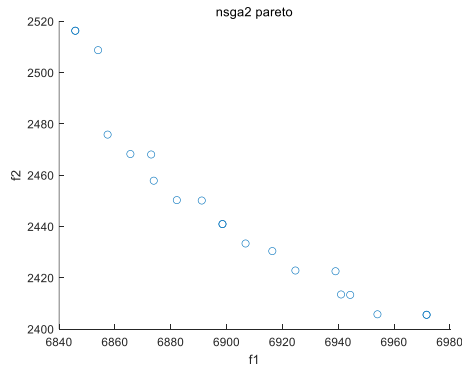
5.2 仿真结果分析

微电网优化调度的核心在于全面考虑系统内分布式电源的输出特性，满足用户负荷需求，确保微电网系统可以稳定安全的运行。为达成既定目标，对分布式

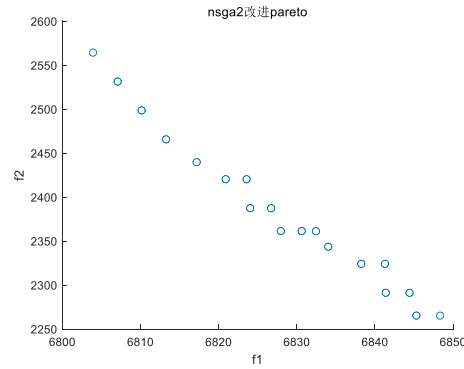
电源进行了优化配置。在对考虑需求侧响应的微电网系统配置进行优化时，除了要考虑微电网自身的结构与运行特性，还须纳入分时电价和用户负荷变化等外部因素。在综合考虑微电网优化配置的相关因素，微电网运行应当优先利用风能和太阳能等绿色可再生能源，尽可能地充分利用其发电能力。当可再生能源的产出不足以满足负荷需求时，使用能源利用率较高、污染小的微型燃气轮机作为首选来补充所需的额外电力。蓄电池的充放电特性有助于平衡微电网中的负载波动。

5.2.1 算法改进对比分析

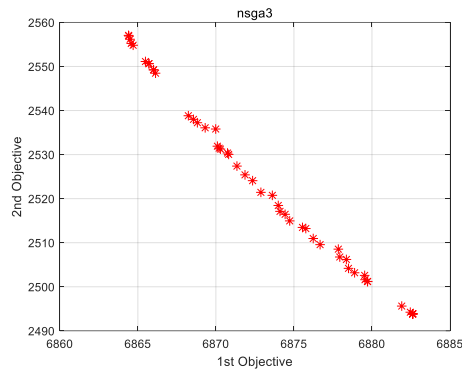
为了验证所构建微电网调度模型的准确性，采用改进前后的 NSGA2 和 NSGA3 算法分别求解微电网调度模型，以 24 小时为运行周期，每小时作为一个时间步长，最大迭代次数设定为 100 次进行仿真实验。采用改进前后的 NSGA2 和 NSGA3 算法仿真得到的 Pareto 解集如图 5-3 所示。



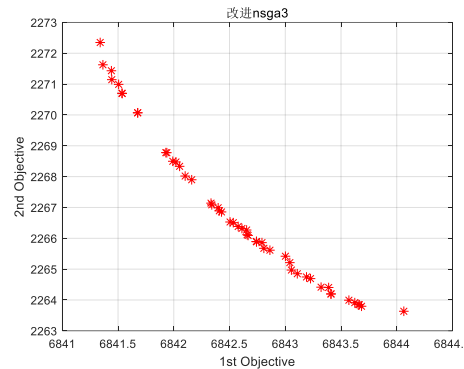
(a) 基于 NSGA2 算法的 Pareto 前沿解集



(b) 基于改进 NSGA2 算法的 Pareto 前沿解集



(c) 基于 NSGA3 算法的 Pareto 前沿解集



(d) 基于改进 NSGA3 算法的 Pareto 前沿解集

图 5-3 算例的 Pareto 解

通过对比图 5-3 中的(a)和(b)，可以观察到，在采用改进的 NSGA2 算法进行调度的微电网中，其日总投资成本和经济运行成本均低于使用 NSGA2 算法进行

调度的成本。对比图 5-3 中的(c)和(d)，采用改进的 NSGA3 算法进行调度的微电网，其日总投资成本和运行成本均低于使用 NSGA3 算法进行调度的成本。

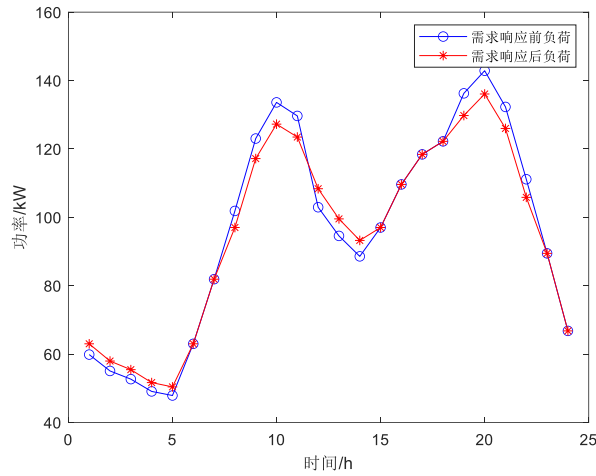


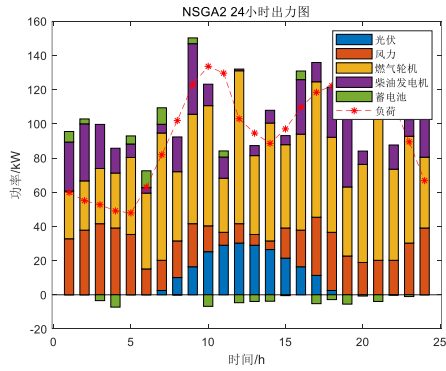
图 5-4 需求侧响应前后负荷曲线

图 5-4 表示在考虑和不考虑需求侧响应情况下负荷需求的变化对比情况。从图中可以明显看出，当考虑需求侧响应时，高峰和低谷负荷之间的差异性减小，相较于未考虑需求侧响应时的情况有所改善。通过实施分时电价策略，用户倾向于在电价较低的时段增加用电，而在高峰时段减少用电需求。这进一步证实了需求侧响应对于微电网系统调峰和填谷具有积极作用。

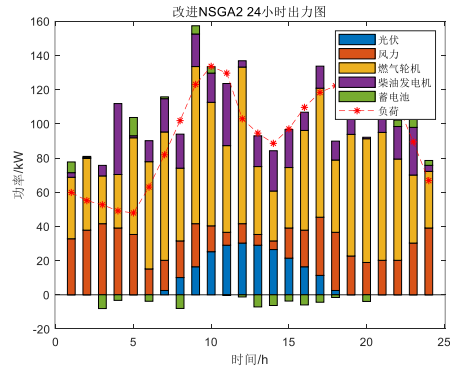
表 5-5 最优调度结果

	日总投资成本（元）	运行成本（元）
NSGA2	6882	2450
改进 NSGA2	6820	2420
NSGA3	6853	2473
改进 NSGA3	6824	2267

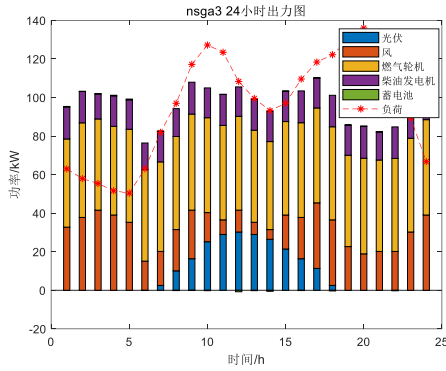
由表 5-5 可知，与传统的 NSGA2 算法相比，采用改进的 NSGA2 算法求解构建的微电网模型，日总投资成本和运行成本均有所减少。与传统的 NSGA3 算法相比，采用改进的 NSGA3 算法求解，模型中的日总投资成本和运行成本均有所减少。



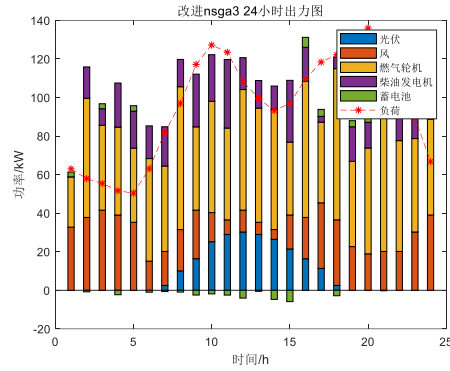
(a) 使用 NSGA2 算法的调度策略



(b) 使用改进 NSGA2 算法的调度策略



(c) 使用 NSGA3 算法的调度策略



(d) 使用改进 NSGA3 算法的调度策略

图 5-5 微电网调度策略对比

从图 5-5 中可以观察到，由于引入了缺电损失和弃电损失，导致负载需求与光伏、风电、微型燃气轮机、柴油发电机以及电池的充放电功率之和存在些许出入。由于实施了基于电价的需求侧响应，负载需求会根据电价的波动而调整。在高峰负荷时段，由于电价较高，负载需求相应减少；而在负荷低谷期，电价较低，导致负载需求增加；在平稳时期，电价波动不大，因此负载需求曲线基本保持稳定。总体来看，通过需求侧响应，负载曲线变得更加平滑，峰谷差异得到有效缩小。

通过对比图 5-5 中的(a)和(b)，可以看出在使用 NSGA2 算法的调度策略中，各类分布式电源的出力普遍较高，这不仅增加了成本，也提高了能源浪费的风险。因此，从综合效益角度考虑，利用改进的 NSGA2 算法对微电网的发电单元进行调度，能够带来更高的效益。对比图 5-5 中的(c)和(d)，可以看出在使用改进 NSGA3 算法的调度策略中，各类分布式电源的出力较为均匀，可以更好的满足负荷需求。

5.2.2 储能对微电网调度影响分析

为验证储能装置在微电网系统中的关键作用，在先前案例分析的基础上，排除了蓄电池输出效应的影响，并采用改进的 NSGA2 算法进行了仿真研究。仿真所得到的结果维持了 Pareto 前沿的最优解，其中日总投资成本与经济运行成本之间的 Pareto 关系如图 5-6 所示。

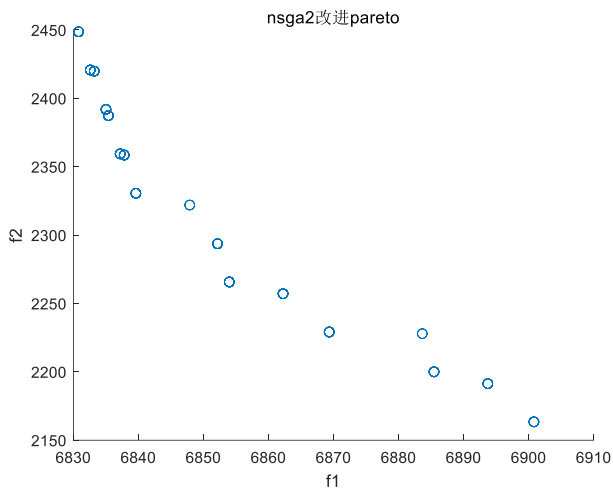


图 5-6 不考虑储能的 Pareto 前沿解集

表 5-6 有无储能对比最优调度结果

	日总投资成本（元）	运行成本（元）
储能不参与	6853	2465
储能参与	6820	2420

由表 5-6 可知，与加入储能相比，去掉储能装置，日总投资成本和运行成本均有所增加。

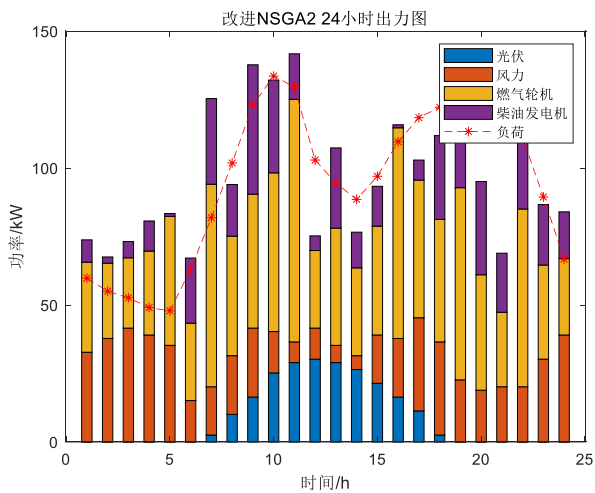


图 5-7 不考虑储能的调度策略

从图 5-7 中可以观察到,由于在微电网的调度策略中未考虑储能系统的参与,导致在某些时段,尤其是可再生能源如风能和太阳能产出较低的时候,柴油发电机和微型燃气轮机不得不以高输出状态运行,以满足系统的电力需求,不仅增加了燃料消耗,还可能导致更高的运维成本和环境污染。

5.2.3 需求侧响应对微电网调度影响分析

为了确保微电网运行的安全性,不仅需要保障发电侧的稳定供电,还必须考虑负荷侧对微电网可能产生的影响。通过合理规划用户端的用电模式,可以有效减少负荷的波动性。为了探讨用户需求侧响应对微电网调度带来的影响,本文基于先前计算的案例,采用改进的 NSGA2 算法,对未考虑用户需求侧响应进行仿真分析。仿真结果显示了 Pareto 前沿的最优解集,其中日总投资成本与运行成本之间的 Pareto 关系如图 5-8 所示。

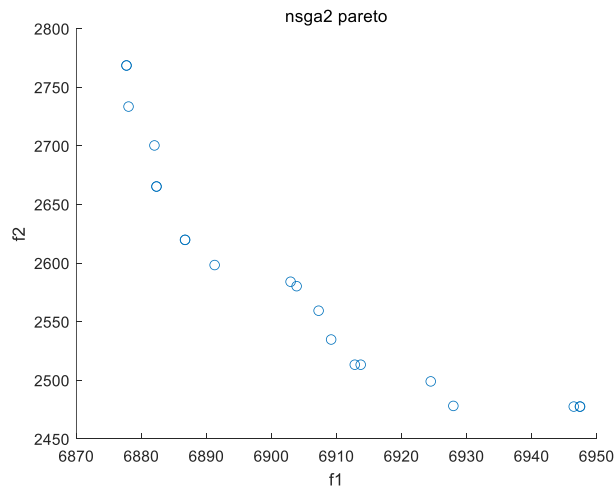


图 5-8 不考虑需求侧响应的 Pareto 前沿解集

表 5-7 有无需求侧响应对比最优调度结果

	日总投资成本 (元)	运行成本 (元)
不考虑需求侧响应	6891	2598
考虑需求侧响应	6820	2420

由表 5-7 可知,与考虑需求侧响应相比,不考虑需求侧响应的日总投资成本和运行成本均有所增加。

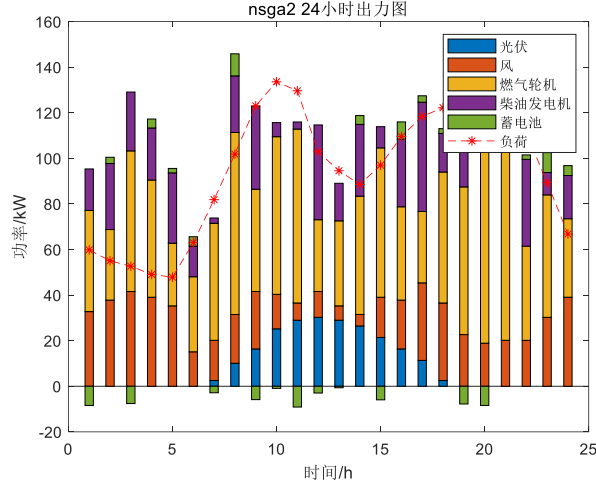


图 5-9 不考虑需求侧响应的调度策略

微电网的调度策略如图 5-9 所示。从图中可以观察到，在可再生能源如风能和太阳能发电量充沛的时段，蓄电池系统需要积极参与调峰操作，储存过剩的电能，以备后续使用，有助于减少可再生能源的浪费，为微电网提供额外的调节能力。

由于没有对需求侧响应机制的考虑，用户的电力消费习惯未能根据电价变化做出适应性调整。在电力消耗的高峰期间，用电需求的激增可能引起供电不足的情况，增加了负荷损失的风险。正如第三章中提出的微电网综合优化调度模型所指出的，考虑需求侧响应对于微电网的有效调度极为关键，不仅增强了微电网的供电稳定性，也验证了将需求侧响应纳入调度策略的合理性和有效性。

5.3 本章小结

本章利用园区的微电网数据作为研究对象，对本文构建的微电网调度模型分别采用改进前后的 NSGA2、NSGA3 算法进行求解，通过对比分析传统算法与改进后算法在微电网调度模型中的仿真结果，系统地验证了改进算法在求解微电网优化问题上的有效性和优越性。此外，研究进一步深入探讨了储能设备和基于电价的需求响应机制对微电网优化调度的影响。通过引入储能设备，微电网能够更好地应对可再生能源的波动性，实现能源的高效存储和利用，从而提高系统的稳定性和经济性。同时，基于电价的需求响应策略能够激励用户在电价较低时增加用电，在电价高时减少用电，这不仅有助于用户节约电费，也有助于微电网实现负荷的平衡，降低整体的运营成本。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

本文在详细介绍微电网的结构框架和各分布式电源输出特性的基础上,构建了微电网优化调度模型,并采用改进的 NSGA2、NSGA3 算法对建立的微电网调度模型进行求解,以实现微电网安全稳定的运行。取得的成果可以概括如下:

(1) 概述了微电网系统中各种常见发电设备的特性和运行机制,详细分析了风力发电机、太阳能光伏板、柴油发电机、微型燃气轮机和蓄电池等设备的工作原理、各自的技术优势和存在的局限性,以及在微电网系统中的应用方法和策略。根据各自的输出特性,建立了数学模型,进一步构建了一个以最小化日总投资成本和运行成本为目标的微电网优化调度模型。该模型不仅考虑了微电网的经济性能,还对系统中各发电机组的输出功率进行了平衡约束,确保了微电网在满足电力需求的同时,能够有效地控制运行成本,形成了一个全面而系统的微电网优化调度框架。此外,本文提出了在需求侧响应条件下微电网系统的优化控制策略。

(2) 为了克服 NSGA2、NSGA3 算法在精确寻优、解的分布均匀性等方面的不足,本文在原有 NSGA2 算法的基础上引入了多群体遗传策略和外部存档维护机制,以提高算法的全局搜索效率,确保种群在进化过程中保持多样性。引入高斯变异改进 NSGA3 算法,以提高算法收敛效果,获得全局最优解。通过在 ZDT1、ZDT2、ZDT3 等多目标测试函数上进行的仿真实验,以及利用 SP 和 GD 两种评价指标的分析,证实了改进后的 NSGA2、NSGA3 算法在解的收敛性和分布性方面较传统 NSGA2、NSGA3 算法有了明显的改进。

(3) 利用园区的微电网数据作为研究对象,对本文构建的微电网调度模型采用改进的 NSGA2、NSGA3 算法进行求解,通过对比分析在微电网调度模型中的仿真结果,系统地验证了改进后的算法在微电网的配置优化方面具有更显著的效益。此外,还深入探讨了储能设施和需求侧响应机制在微电网优化调度中的影响。分析结果显示,储能技术在微电网运行中发挥着关键作用,能够有效平滑电力波动,提升系统的灵活性和经济效益;基于电价的需求侧响应策略被证实具有削峰填谷的作用,有助于微电网实现负荷的平衡,降低整体的运营成本。

6.2 展望

本文对经典 NSGA2 和 NSGA3 算法进行了改良，并对微电网系统中各类分布式电源和储能设备的输出进行了优化处理。尽管在这两个方面都取得了一定的成果，但仍有待改进之处，未来的研究需要进一步探讨以下问题：

（1）微电网将会越来越智能化和数字化，利用先进的监测、控制和通信技术，实现对能源资源的优化管理和高效利用。这包括使用物联网、人工智能、大数据分析等技术，以实现对微电网系统各部分的实时监测和响应。

（2）未来微电网将更加侧重于整合可再生能源，如太阳能、风能、生物质能等，以减少对传统化石燃料的依赖，降低碳排放，并实现能源的可持续发展。

（3）随着能源储存技术的不断成熟和普及，微电网将更多地利用储能设备（如电池、超级电容器等）来平衡可再生能源的波动性，提高微电网系统的稳定性和可靠性。

（4）微电网将继续与主电网保持互联互通，实现双向能量流动。这样的互联互通可以在微电网内部和主电网之间实现能源的优化分配和共享，提高整个能源系统的效率。

（5）随着极端天气事件频率的增加和电网的脆弱性暴露，微电网的弹性和韧性将成为重点发展方向。微电网能够在灾难发生时独立运行，为社区提供可靠的电力供应，减少对中央电网的依赖，提高社区的抗灾能力。

综上所述，未来微电网的发展将更加智能化、可持续化、弹性化，并与主电网实现更加紧密的互联互通，以应对能源系统的挑战和需求。

参考文献

- [1] 刘妍,赵晶,李晨.经济政策不确定性对中国碳排放的对称与非对称影响[J].资源科学,2022, 44(06):1091-1104.
- [2] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022, 42(08):2806-2819.
- [3] Bin Zho, Jianting Zou, Chi Yung Chung, et al. Multi-microgrid Energy Management Systems:Architecture, Communication, and Scheduling Strategies[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(03): 463-476.
- [4] Zhang Yu, Wang Peng, Yang Hongwan, Cui Qi. Optimal dispatching of microgrid based on improved moth-flame optimization algorithm based on sine mapping and Gaussian mutation[J]. Systems Science & Control Engineering, 2022, 10(1): 115-125.
- [5] Abbasi Maysam, Abbasi Ehsan, Li Li, et al. Review on the Microgrid Concept, Structures, Components, Communication Systems, and Control Methods[J]. Energies, 2023, 16(1): 484-484.
- [6] Prasant Kumar Mahapatra, Spardha Sethi, Amod Kumar. Comparison of Artificial Immune System and Particle Swarm Optimization Techniques for Error Optimization of Machine Vision Based Tool Movements[J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 2015, 96(4): 363-372.
- [7] 徐斌,刘红新,马骏,等.基于需求响应的区域微电网优化调度[J].电力科学与技术学报,2018, 33(1):132-140.
- [8] 朱旭磊.基于改进粒子群算法的微电网多目标优化调度[D].安徽工程大学,2023.
- [9] 李含怡.考虑电动汽车的微电网经济调度策略研究[D].南京师范大学,2016.
- [10] 袁华骏,叶筱怡,耿宗璞.考虑经济成本的微电网调度运行[J].电气自动化,2021,43(5):48-50.
- [11] Davison A K, Lansley C, Costen N, et al. SAMM: A Spontaneous Micro-Facial Movement Dataset[J]. IEEE Transactions on Affective Computing, 2018, 9(01): 116-129.
- [12] 张红斌,金强,王宁,等.计划孤岛下考虑停电成本的微电网增配储能优化策略[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(8):145-150.
- [13] 李咸善,邹芳,李鑫燕,等.独立微电网微源多目标分层优化配置方法研究[J].高压电器,2018, 54(10):170-178.
- [14] 谭玲玲,汤伟,楚冬青,等.考虑电-氢一体化的微电网低碳-经济协同优化调度[J].中国电力, 2024,57(05):137-148.
- [15] 何玉灵,王博,孙凯,等.计及分布式储能的微电网群经济调度[J].电力科学与工程,2024,40(02):1-8.
- [16] 张中超.基于排序交叉优化算法的智能微电网调度研究[J].电工技术,2024,(02):45-47+51.

- [17] 陈浩悟,林声宏,朱建全.考虑需求侧响应的微电网经济调度双层优化[J].电气自动化,2023,45(02):79-81+84.
- [18] 李先锋,胡晨刚,卜莉敏,等.考虑应急电源功能的住宅小区微电网运行策略[J].浙江电力,2024,43(03):104-113.
- [19] 张红斌,金强,王宁,等.计划孤岛下考虑停电成本的微电网增配储能优化策略[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(08):145-150.
- [20] Zhang Kai, Tang Zi. An Improved Multi-Objective Brain Storm Optimization Algorithm for Hybrid Microgrid Dispatch[J]. International Journal of Swarm Intelligence Research (IJSIR), 2024, 15(1): 1-21.
- [21] Li Fei, Guo Guangsen, Zhang Jianhua, et al. Double-layer optimal microgrid dispatching with price response using multi-point improved gray wolf intelligent algorithm[J]. Electrical Engineering, 2023, 106(3): 2923-2935.
- [22] Shezan Sk. A., Ishraque Md. Fatin, Shafiullah GM., et al. Optimization and control of solar-wind islanded hybrid microgrid by using heuristic and deterministic optimization algorithms and fuzzy logic controller[J]. Energy Reports, 2023, 10: 3272-3288.
- [23] Doagou-Mojarrad H, Gharehpetian G B, Rastegar H, et al. Optimal placement and sizing of DG (distributed generation) units in distribution networks by novel hybrid evolutionary algorithm[J]. Energy, 2013, 54: 129-138.
- [24] 高岳林,杨钦文,王晓峰,等.新型群体智能优化算法综述[J].郑州大学学报(工学版),2022,43(03):21-30.
- [25] Abd Allah A M. Hybrid ant optimization system for multiobjective economic emission load dispatch problem under fuzziness[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2014, 18: 11-21.
- [26] 刘皓明,柴宜.基于 GA-PSO 的微电网电源容量优化设计[J].华东电力,2013,41(02):311-317.
- [27] 孔爱良,梁硕,李春来,等.基于改进粒子群算法的微电网优化运行[J].河海大学学报:自然科学版,2017,45(06):550-555.
- [28] 王盼宝,徐殿国,谭岭玲,张大禹,王卫.基于改进 MOPSO 的多能互补型微电网多元优化运行策略[J].南方电网技术,2022,16(10):130-140.
- [29] 张军,任豪,刘廷章.基于改进 NSGA-II算法的微电网多目标优化研究[J].计算机应用研究,2019,36(12):3760-3763.
- [30] 杨国华,朱向芬,周鑫,等.基于遗传算法的风电混合储能容量优化配置[J].电气传动,2015,45(02):50-53.
- [31] 杨国华,朱向芬,马玉娟,等.基于改进粒子群算法的混合储能系统容量优化[J].电测与仪表,2015,52(23):1-5.
- [32] Cao B, Dong W, Lv Z, et al. Hybrid microgrid many-objective sizing optimization wi

- th fuzzy decision[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 28(11): 2702-2710.
- [33] 甘阳.考虑需求响应的独立微电网多目标优化配置研究[D].郑州大学,2018.
- [34] 薛金花,王德顺,郁正纲,等.基于风电可调节不确定代价的风光柴储联合优化调度[J].郑州大学学报(工学版),2019,40(05):73-79.
- [35] Ye Yujiang, Shi Ruifeng, Gao Yuqin, et al. Two-Stage Optimal Scheduling of Highway Self-Consistent Energy System in Western China[J]. Energies, 2023, 16(5): 2435-2435.
- [36] Zhi-sheng Z. Quantum-behaved particle swarm optimization algorithm for economic load dispatch of power system[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(02): 1800-1803.
- [37] 王子龙,于东立,门向阳,等.含压缩空气储能的能源互联微电网型系统优化配置[J].电力需求侧管理,2018,20(6):40-45.
- [38] 李国庆,翟晓娟,李扬,等.基于改进蚁群算法的微电网多目标模糊优化运行[J].太阳能学报,2018,39(8):2310-2317.
- [39] 郁翰文,刘婷婷.基于改进 NSGA-II算法的微电网优化调度研究[J].电子产品世界,2023,30(6):62-67+88.
- [40] 孔爱良,梁硕,李春来,等.基于改进粒子群算法的微电网优化运行[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(06):550-555.
- [41] 李楠,顾洁,刘波,等.基于改进粒子群算法的多能互补微电网系统优化配置与运行策略研究[J].电器与能效管理技术,2017(18):23-31.
- [42] 王凌云,徐嘉阳,丁梦.基于混沌的多 Agent 粒子群算法在微电网并网调度中的优化研究[J].电网与清洁能源,2017,33(08):1-7.
- [43] 王凌云,徐嘉阳,丁梦.基于自然选择-杂交 PSO 算法的微电网并网多目标优化调度[J].电气应用,2017,36(16):50-56.
- [44] Yang Lin, Gao Guige. Microgrid optimal scheduling based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2354(1): 1742-6596.
- [45] Zhang Qian, Wei Lisheng, Yang Benben. Research on Improved BBO Algorithm and Its Application in Optimal Scheduling of Micro-Grid[J]. Mathematics, 2022, 10(16): 2998-2998.
- [46] Ma Xiaoyan, Mu Yunfei, Zhang Yu, et al. Multi-objective microgrid optimal dispatching based on improved bird swarm algorithm[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(2): 154-167.
- [47] 孙毅,赵佳,李彬,等.考虑信息价值的需求侧用户响应潜力评估方法[J].电力科学与技术学报,2017,32(1):3-10.
- [48] Sorknæs Peter. Hybrid energy networks and electrification of district heating under diff

- erent energy system conditions[J]. *Energy Reports*, 2021, 7(S4): 222-236.
- [49] KhorramNia Reza, BahmaniFirouzi Bahman, Simab Mohsen. Optimal scheduling of reconfigurable microgrids incorporating the PEVs and uncertainty effects[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2022, 16(16): 3531-3543.
- [50] Cheng Wenlong, Han Bingchuan, Nian Yongle, et al. Theoretical analysis of a wind heating conversion and long distance transmission system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 137: 21-33.
- [51] Ali Sefidgar-Dezfouli, Mahmood Joorabian, Elahesh Mashhour. A multiple chance-constrained model for optimal scheduling of microgrids considering normal and emergency operation[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2019, 112: 370-380.
- [52] Mei Yu, Li Bin, Wang Honglei, Wang Xiaolin, et al. Multi-objective optimal scheduling of microgrid with electric vehicles[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 4512-4524.

攻读学位期间发表的学术论文

- [1] 阚绪状,瞿成明.基于多目标改进粒子群算法的微电网优化调度[J].模型世界
(已录用)

致谢

在完成这篇硕士学位论文之际，我满怀感激之情，向所有在这段学术旅程中给予我帮助和支持的人表达我的诚挚感谢。

首先，我要向我的导师瞿老师致以最深的敬意和感谢。您不仅在学术上给予了我严谨的训练和宝贵的指导，更在心灵上给予了我鼓励和启迪。在我遇到困难和挑战时，您的智慧和耐心帮助我找到了克服困难的勇气和解决问题的方法。能在您的指导下学习和成长，我感到非常荣幸和幸运。

其次，我要感谢我的室友和同学，感谢他们在我需要帮助时伸出援手。每当我遇到难以解决的问题时，我就会与同学之间相互讨论，提出自己对问题的看法，听取同学的想法，一起研究可能的解决方案。正是通过我与同学之间的相互研讨，为我提供了解决问题的多个角度，帮我克服了困难。我们的友谊和共同度过的时光，将成为我人生中宝贵的记忆。

此外，我还要感谢我的家人，感谢他们无条件的支持。在我忙于学术研究，无法经常回家的日子里，是家人的理解和鼓励让我能够专心致志于我的学业。每当我遇到挫折和压力时，家人的一句问候、一声鼓励，总能给我带来无尽的力量和温暖。

在这段学术旅程中，我学到了很多，也成长了很多。我深知，没有大家的鼓励、支持和帮助，我无法完成这篇论文。在未来的道路上，我将继续努力，不断学习和进步，以回报所有帮助过我的人。

阚绪状

安徽工程大学电气工程学院

二〇二四年五月