

分类号: TM73

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220320136



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 计及需求响应的虚拟电厂集
群优化运行研究

论 文 作 者	苗婉
校 内 导 师	刘世林（教授）
校 外 导 师	马龙鹏
专业学位类别	电子信息
研究方向（领域）	控制工程

论文提交日期: 2025 年 5 月 13 日

目 录

Research on Optimal Operation of Multiple

Virtual Power Plants Considering Demand

Response

研究方向：控制工程

论文答辩日期： 2025 年 5 月 8 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：苗婉

日期：2025 年 5 月 8 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：苗婉

指导教师签名：[Signature]

日期：2025年5月8日

日期：2025年5月8日

计及需求响应的虚拟电厂集群优化运行研究

摘 要

能源短缺、环境恶化、资源匮乏等全球性问题持续加剧，已成为当今人类社会亟待解决的重要课题。分布式能源（Distributed Energy Resources, DER）凭借低能耗、环境友好、资源丰富、开发运行成本低等显著优势，得到日益广泛的应用与推广。然而，大规模 DER 并网导致电网运行的复杂性与不确定性显著提升。为了提升 DER 的并网消纳能力，并缓解 DER 出力波动性对电网稳定运行带来的不利影响，虚拟电厂（Virtual Power Plant, VPP）作为一种新型能源集成与管理模式应运而生。VPP 通过聚合地理位置分散的 DER，能够有效平抑 DER 的出力波动，从而为缓解高渗透率 DER 并网所面临的技术挑战提供可行方案。

本文在国内外已有 VPP 研究成果的基础上，研究计及可再生能源出力不确定性与需求响应的虚拟电厂集群（Multiple Virtual Power Plants, MVPP）优化调度。主要研究内容如下：

（1）建立了考虑不确定性与多类型灵活性资源互补的单个 VPP 优化调度模型。首先采用蒙特卡罗模拟法对风电、光伏出力场景进行随机抽样，生成典型的风光预测场景。在此基础上，结合分时电价机制，以实现 VPP 运行成本最小化为目标函数，构建了涵盖风光、储能系统、空调机组（Air Conditioning, AC）以及电动汽车（Electric Vehicles, EV）等多类型灵活性资源共同参与需求响应（Demand

Response, DR) 的 VPP 优化调度模型。研究表明, 相较于单一灵活性资源, 多类型灵活性资源协同参与可显著降低 VPP 运行成本。

(2) 针对 MVPP 内部各个 VPP 以及 MVPP 与电网之间功率互济, 研究多个 VPP 组成的 MVPP 协调优化运行模型。首先, 构建 MVPP 分布式能源协调互补的联合调度框架; 其次, 通过协调 MVPP 内部 VPP 及 MVPP 与电网之间的交换功率, 实现系统总运行成本的最小化, 并深入分析 DR 机制对 MVPP 成本的影响; 最后, 选取包含 4 个 VPP 的 MVPP 进行仿真实验。实验结果表明, 本文所研究的方法可有效降低 MVPP 的总运行成本。

(3) 为了研究 MVPP 对社会福利带来的影响, 构建以社会福利最大化为目标的 MVPP 优化运行模型。以社会福利最大为优化目标, 即最大化用户购电效益, 在满足能源供需平衡及其他约束条件的基础上, 将 MVPP 的交换功率作为基础数据, 在保障交易结果现实可行的基础上实现最优求解。通过 MATLAB 平台进行仿真实验, 结果表明, 本文所研究的方法不仅能够降低 MVPP 的运行成本, 还可以有效提高用户侧总体收益, 促进市场活力的提升。

关键词: 虚拟电厂集群, 优化运行, 需求响应, 不确定性, 社会福利

RESEARCH ON OPTIMAL OPERATION OF MULTIPLE VIRTUAL POWER PLANTS CONSIDERING DEMAND RESPONSE

ABSTRACT

Global issues such as energy shortages, environmental degradation, and resource depletion are intensifying, becoming critical challenges that human society urgently needs to address. With their distinctive merits of low energy consumption, eco-friendliness, resource abundance, and cost-effective operation, Distributed Energy Resources (DER) have gained expanding application and widespread deployment. However, large-scale DER integration has significantly increased the complexity and uncertainty of power grid operations. To enhance DER hosting capacity and mitigate the adverse impacts of DER output fluctuations on grid stability, Virtual Power Plant (VPP) have emerged as a novel energy integration and management paradigm. VPP provides a viable solution to address the technical challenges of high-penetration DER integration by aggregating geographically dispersed DERs to effectively mitigate output fluctuations.

Building upon existing VPP research worldwide, this paper investigates the optimal dispatch of Multiple Virtual Power Plant (MVPP) clusters considering renewable energy output uncertainty and demand response.

The main research contents are as follows:

1. An optimization dispatch model for individual VPPs was developed, incorporating uncertainty and the complementarity of multiple flexible resources. First, the Monte Carlo simulation method was employed to perform stochastic sampling of wind and PV output scenarios, generating typical renewable generation forecast scenarios. Building upon this foundation and incorporating time-of-use electricity pricing, we developed a VPP optimal dispatch model with the objective function of minimizing operational costs. The model integrates multiple flexible resources—including wind/PV generation, energy storage systems, air conditioning (AC) units, and electric vehicles (EV)—to collectively participate in demand response (DR). The results demonstrate that the coordinated participation of diverse flexible resources can significantly reduce VPP operating costs compared to relying on a single flexibility resource type.

2. To address the power mutual assistance among various VPP within an MVPP and between the MVPP and the power grid, this study investigates a coordinated optimization operation model for an MVPP composed of multiple VPP. Firstly, a joint dispatch framework for the coordinated complementarity of distributed energy in the MVPP is constructed. Secondly, by coordinating the exchange power among VPP within the MVPP and between the MVPP and the power grid, the minimization of the total system operating cost is achieved, and the impact of the DR mechanism on the MVPP cost is thoroughly analyzed. Finally, a simulation

experiment was conducted on an MVPP containing four VPPs. The experimental results show that the method studied in this paper can effectively reduce the total operating cost of the MVPP.

3. In order to study the impact of MVPP on social welfare, an MVPP optimal operation model with the goal of maximizing social welfare was constructed. The optimization goal is to maximize the benefits of electricity purchase for users. On the basis of satisfying the balance between energy supply and demand and other constraints, the exchange power of MVPP is taken as the basic data to achieve the optimal solution on the basis of ensuring the feasibility of transaction results. Simulation experiments were carried out on the MATLAB platform. The results show that the method studied in this paper can not only reduce the operating cost of MVPP, but also effectively improve the overall income of the user side and promote the improvement of market vitality.

KEY WORDS: Multiple virtual power plants, Optimal operation, Demand response, Uncertainty, Social welfare

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 虚拟电厂发展现状.....	3
1.2.2 虚拟电厂分类及控制方式.....	4
1.2.3 虚拟电厂优化调度研究现状.....	9
1.2.4 虚拟电厂集群研究现状.....	10
1.3 论文主要研究内容及章节安排.....	12
第 2 章 虚拟电厂基本原理及运行模型.....	14
2.1 引言.....	14
2.2 虚拟电厂概述.....	14
2.2.1 虚拟电厂概念与结构.....	14
2.2.2 虚拟电厂特性.....	15
2.3 虚拟电厂组成单元模型.....	16
2.3.1 常规可控机组.....	16
2.3.2 储能装置.....	17
2.3.3 柔性可控负荷.....	17
2.4 风光出力预测模型.....	19
2.4.1 风光发电特性.....	19
2.4.2 蒙特卡罗模拟原理.....	20
2.4.3 多场景削减与典型场景集构建.....	21
2.4.4 算例分析.....	24
2.5 本章小结.....	26
第 3 章 考虑不确定性和多灵活性资源互补的虚拟电厂优化调度方法.....	27
3.1 引言.....	27
3.2 虚拟电厂柔性优化调度模型.....	27
3.2.1 目标函数.....	27

3.2.2 约束条件	28
3.3 算例分析	32
3.3.1 基础数据	32
3.3.2 结果分析	33
3.4 本章小结	35
第 4 章 面向电能共享的虚拟电厂集群柔性优化调度模型	36
4.1 引言	36
4.2 虚拟电厂群电能共享策略	36
4.2.1 虚拟电厂集群电能共享框架	36
4.2.2 虚拟电厂集群电力交易模式选择	38
4.3 虚拟电厂集群优化模型	39
4.3.1 目标函数	39
4.3.2 约束条件	40
4.4 算例分析	42
4.4.1 参数设置	42
4.4.2 结果分析	43
4.5 本章小结	47
第 5 章 考虑社会福利最大化的虚拟电厂集群优化运行	48
5.1 引言	48
5.2 虚拟电厂群中社会福利最大化策略	48
5.2.1 社会福利最大化预备知识	48
5.2.2 用电效用函数	49
5.2.3 供电商的成本函数	50
5.3 虚拟电厂集群社会福利最大化模型	50
5.3.1 目标函数	50
5.3.2 约束条件	51
5.4 算例分析	52
5.4.1 参数设置	52
5.4.2 结果分析	53
5.5 本章小结	55
第 6 章 总结与展望	56
6.1 全文总结	56

6.2 展望	57
参考文献.....	58
攻读硕士期间取得的学术成果.....	65
致谢.....	66

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

第二次工业革命以来，世界工业化的水平持续提升，世界各国对化石能源的需求日益增加，导致各个国家能源短缺和环境污染等问题日益突出^[1]。因此，如何既能摆脱各国对化石能源的依赖性，又能高效、稳定的使用可再生能源，一直是各国专家学者在积极探索的热点话题^[2-3]。

特别是进入 21 世纪后，全球范围内迅速掀起了一场关于新能源的革命，其显著标志是新能源的大规模开发与利用。能源产业的清洁化和低碳化转型已成为未来发展的必然趋势^[4]。目前，根据《中国能源大数据报告》统计数据显示，2024 年全国发电量约为 94181.1 亿千瓦时，其中风力发电量总计达 9916 亿千瓦时，光伏发电量总计达 4400.7 亿千瓦时，2015-2024 年能源发电总量及增速如下图所示 1-1 所示。

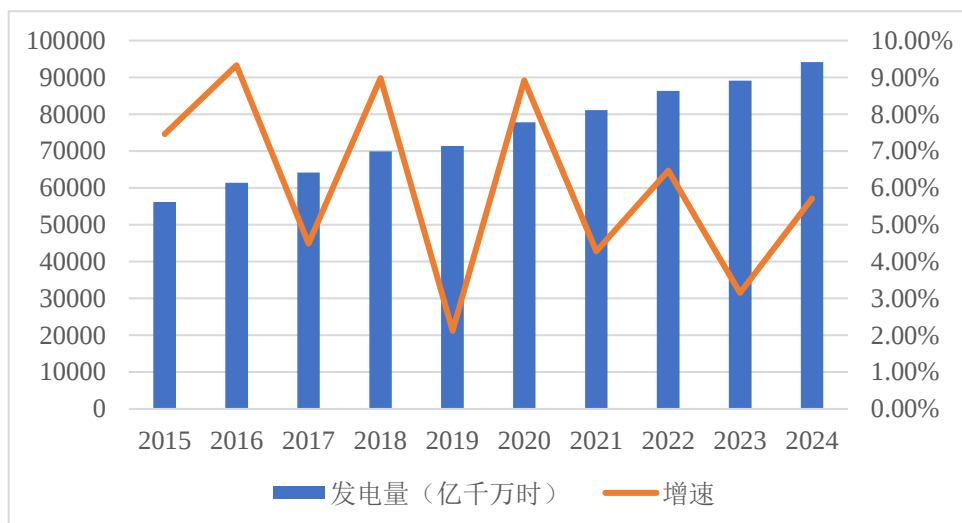


图 1-1 发电量及增速

根据最新发布的电力供需分析报告显示，2024 年全国新增发电装机规模突破 3.73 亿千瓦，同比 2023 年增加投产 23%，其中，新增太阳能发电装机容量为 2.78 亿千瓦。综上所述，我国的能源与生态环境友好性已经显著提升，能源节约型社会的构建步伐正在稳步加快。然而，2024 年我国全社会用电量约为 9.22 万亿千瓦时，同比 2023 年增长仅有 6.7%，下图 1-2 为我国 2015-2024 年能源消

费总量及增速。

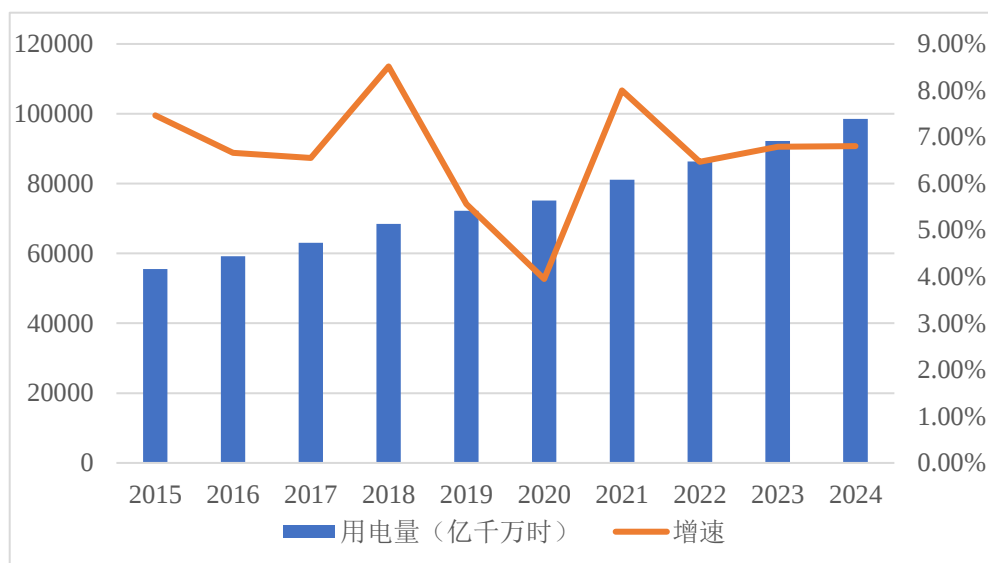


图 1-2 能源消费总量及增速

从上图 1-2 可以看出，能源消费量总体呈现出低速增长的趋势。随着能源消费的低速增长和可再生能源装机容量的大幅增加，将会导致能源供应侧和需求侧逐渐呈现出“供大于需”的局面，同时这也为传统电力系统的安全稳定运行提出了更为严格的要求：

(1) 在高比例可再生能源并网的场景下，DER 固有的出力不确定性已经成为制约电力系统可靠供电的关键因素^[5-6]。随着需求侧中 DER 占比的不断提高，电力系统运行面临的不确定性也逐渐增大。虽然新能源出力预测在模拟实验中具有较高的精确度，但实际生活环境与实验模拟环境仍存在一定的差距。因此，在实际应用中，新能源出力预测的精准度有待进一步提高。

(2) 近年来，DER 装机容量大幅增长，但由于传统电网的 DER 接入能力有限，导致弃风、弃光等一系列问题频发，能源利用效率有待进一步提高。

为此，我国积极推动电力市场化改革，旨在通过建立健全发展机制和市场结构来提高电力系统的灵活调节能力和稳定运行能力，促进可再生能源开发利用^[7]。以互联网、通讯等智能信息技术的深度发展为基础，为 DER、分布式储能系统（Distributed Energy Storage, DES）、EV 等新型能源大规模接入电网提供有利条件^[8-10]。因此，传统的能源系统与当前互联网技术、通信技术等先进的信息技术逐渐相互融合。VPP 作为能源系统未来的重要前沿方向之一，具有广阔的发展前景。

VPP 是一种特殊的电厂，可以参与到电力市场运营和电网管理的电源协调系统中^[11]。VPP 技术已成为全球能源互联网建设中的重要一环，并且在优化调度“源-荷-储”等供给侧资源协同参与能源交易方面，VPP 发挥着不可或缺的作用。一方面可以通过 VPP 实现新能源消纳利用，在清洁能源替代和环境友好程度方面展现出明显优势。另一方面在实现一定经济效益的同时，VPP 还能够辅助电网平抑波动、提升电力系统运行的灵活性与稳定性，最终实现整个 VPP 的协调优化运行。

随着“双碳”目标的进一步推进，MVPP 共存于某一区域将是重要的发展趋势。鉴于 VPP 间的电能资源在时空上存在优势互补，因此，针对同一区域的 MVPP 进行功率互济协同优化调度研究，能够实现各 VPP 间的利益均衡与优化，降低 MVPP 总运行成本。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 虚拟电厂发展现状

VPP 的概念于 1997 年一经提出就广泛吸引了众多国家的关注。在 2017 年 10 月份，中国向国际电工技术委员会（IEC）提交了有关 VPP 领域的提案。2018 年 9 月 21 日，经 IEC 联合技术委员会审议通过，由国家电网主导的 VPP “资源聚合-市场交易”双核技术标准（IEEE P2815/P2816）正式发布，这是全球首个覆盖 VPP 全过程管理的标准指标，为构建新型电力系统提供了中国方案，填补了该行业在 VPP 领域的空白^[12]。

VPP 领域的发展得益于全球在可再生能源领域的快速发展。2018 年 9 月，中国风光发电机组的累计装机容量呈现明显的上升趋势，其装机容量的年均同比增长率分别高达约 44%与 191%，显著超越了全球范围内的平均增长水平。然而，由于风光资源自身固有的随机性以及波动性等特征，电力系统的供需平衡以及安全稳定运行将会受到大规模可再生能源并入电网的影响^[13]。

除此之外，VPP 示范项目因国家和地区不同，其建设目的也具有较大的差异性。以推动清洁能源并网和消纳为主要目标的国家主要集中在清洁能源渗透率较高的欧盟地区。在需求响应机制构建过程中以开发负荷侧可调节资源的技

术路径为建设目的，已经在电力需求旺盛的美国地区形成成熟范式。该领域的国际实践对我国 VPP 体系构建具有重要参考价值。在 2023 年 9 月份，成都高新西区 VPP 已正式上线运行，这是我国西部首座上线运行的 VPP。2024 年 5 月，宜宾市 VPP 进入试运行阶段，并且该项目已接入宜宾市工业企业、商业综合体、公共机构、充电桩等多类场景共 50 多家重点用户。下表 1-1 为梳理的我国部分 VPP 示范项目。

表 1-1 我国部分虚拟电厂示范项目

地区	项目主体	建设主体	覆盖范围	运维特征	电厂类型
广东	广州市 市级 VPP	南方电网	负荷聚合商其他 需求侧响应主体	削峰填谷	需求侧 VPP
深圳	网地一体 VPP 运营管理平台	深圳供电局	可调节负荷 500MW、 分布式光伏 210MW	电网辅 助服务	混合型 VPP
山东	山东 VPP 平台	国家电投山东分公司	国家电投开发的能源 站、储能等可控负荷	参与电力 市场交易	供给侧 VPP
安徽	合肥电网 VPP	合肥市能源 大数据中心	光伏、电站、电动 汽车、储能系统	削峰填谷	供给侧 VPP
浙江	温州储能电站 +源荷一体的 能量管理平台	国家能源集团浙江公司	实现接入采暖、电动汽车 充电站、分布式能源发电	直接收益	混合型 VPP

1.2.2 虚拟电厂分类及控制方式

VPP 没有统一的形态，能够在特定时空下根据自身需求确定所处的形态，下面从三个维度分析 VPP 的典型形态。

(1) 按照 VPP 涵盖的内部主体资源类型，VPP 主要可以分为基于需求响应的虚拟电厂、基于供应侧的虚拟电厂，以及融合了供应侧与需求侧的混合资产虚拟电厂^[14-17]。

需求响应虚拟电厂主要由柔性负荷、用户侧储能设施及自用型分布式发电资源等要素构成。根据响应机制的不同,可控负荷被划分为基于电价变化的可转移负荷与基于激励措施的可中断负荷,这两类负荷的调控主要受用户个人决策的影响^[18-19]。

在新型电力系统框架下,供应侧虚拟电厂主要通过聚合公用分布式发电设施、电网侧储能设施以及发电侧储能系统实现资源整合。其主要运行机制为:当系统处于用电高峰或低谷时段的情况下,供应侧虚拟电厂通过适当调整发电机的输出功率或调控储能设备的充放电状态,以应对需求侧的电力需求变化。

混合资产虚拟电厂,融合了前两类的特点,旨在提升能源的利用效率,并实现供电与用电综合效益的最优化,能够提供更加安全、可靠、清洁的供电模式。

(2) 依据 VPP 内部含有的能源种类, VPP 可以分为单一能源型虚拟电厂与多能源型虚拟电厂。

单一能源型虚拟电厂仅具备单一能源供应能力,其中主要包括电源型、负荷型与储能型虚拟电厂^[20]。电源型虚拟电厂是应用中最常见的单一能源型虚拟电厂,内部仅存在电能量的流动。

多能源型虚拟电厂主要集供冷、热、电、气为一体,能够实现不同种类能源之间的转换,提高能源的利用率^[21]。

(3) 依据功能进行分类,可以将 VPP 划分为技术型虚拟电厂 (Technical VPP, TVPP) 和商业型虚拟电厂 (Commercial VPP, CVPP) 两大类^[22]。

TVPP 由在同一地理位置的 DER 构成,侧重于系统管理,此时 VPP 与传统电厂类似^[23]。TVPP 的核心价值体现在实现三层级电网服务,配电网络实时监控、跨区域功率协调、辅助服务市场参与 (含调频、旋转备用等)。该架构在 PJM 市场 2022 年运营报告中验证了其技术经济性。图 1-3 为 TVPP 整体架构的示意图,TVPP 中的每个 DER 将其测量数据整合后发送至控制单元,控制单元基于外部环境因素及相关数据构建各 DER 模型,通过线性规划方法优化 DER 出力,最终形成 VPP 整体对外发电功率并生成发电计划。

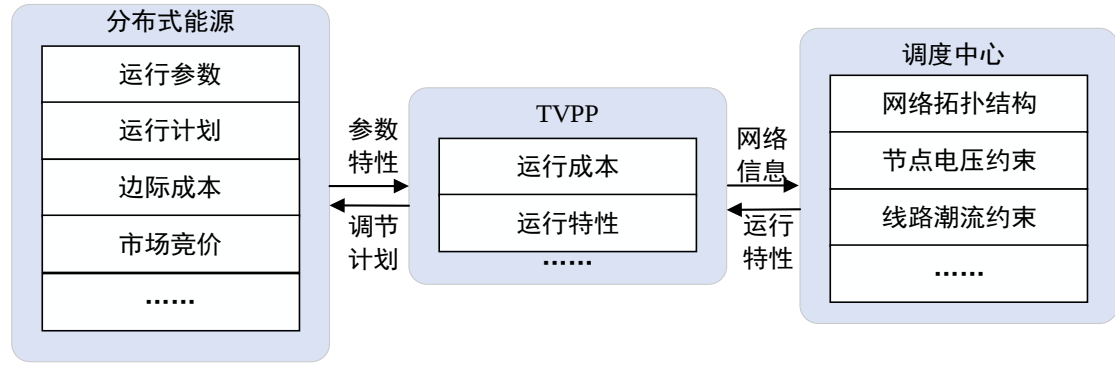


图 1-3 TVPP 运行架构

CVPP 侧重于电力市场交易，通过将 VPP 内的 DER 进行优化整合，根据电力市场规则制定 VPP 交易策略，在充分消纳可再生能源的基础上实现额外的经济效益和环境效益^[24]。CVPP 架构示意图如下图 1-4 所示，其中每个 DER 将各种数据经过整合后发送至 CVPP 控制单元，依据接收到的数据信息以及电力市场相关规则，CVPP 控制单元确定 DER 的能量流和数据流的走向以及交易策略，实现市场交易。

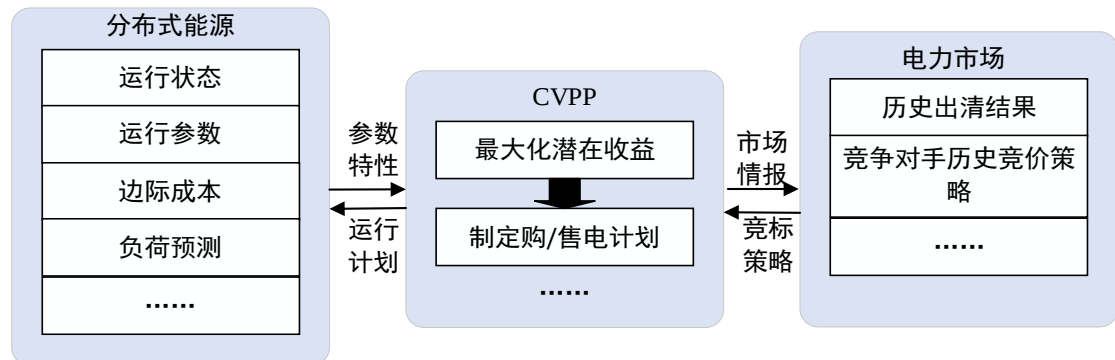


图 1-4 CVPP 运行架构

TVPP 与 CVPP 是相互支撑的，TVPP 是 CVPP 存在的技术基石，缺少这一技术支撑，CVPP 的模式便无从谈起^[25]。反之，CVPP 为 TVPP 的推广提供了必要的经济激励，缺乏这样的激励，TVPP 仅能停留在理论层面而难以进行实际应用。其次，VPP 的组成结构可以根据自身的实际情况，灵活地进行双向选择。同时，一个 VPP 兼备 TVPP 和 CVPP 的功能，接入 TVPP 后，用户可选择与其对应的 CVPP，也可选择加入其它更感兴趣的 CVPP^[26]。图 1-5 为 TVPP 与 CVPP 之间的基本结构与关系。

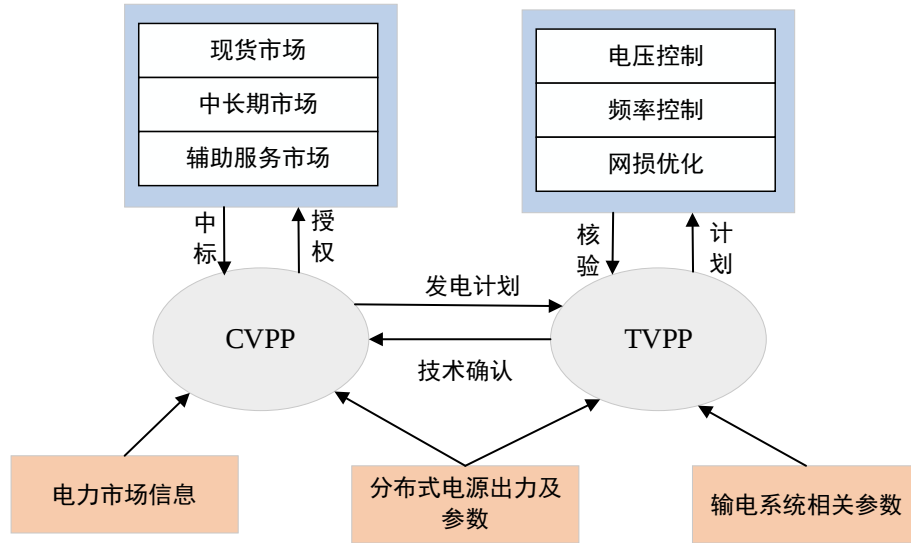


图 1-5 CVPP 与 TVPP 的基本结构与关系

此外，VPP 还可以根据参与电力市场的角色不同进行分类：

- （1）负荷聚合商：主要由电力大用户构成，这些用户不仅具有较强的需求响应能力与明显的可中断负荷特性，而且还拥有参与电力市场的资格。
- （2）综合能源服务商：一般具有能效管理、节能减排与碳排放交易等功能。
- （3）智慧园区：一般需要具备一定的发电规模，同时拥有需求响应能力，并具备参与批发和零售市场的资格。

VPP 的控制架构主要分为三种，分别为集中控制架构、集中-分散控制架构和完全分散控制架构^[27]。

在集中控制方式中，VPP 控制中心是整个系统的核心，掌握 VPP 内所有发用电单元的信息，以便能够对辖区内所有 DER 进行准确的调度和管理，并且制定每个单元的发用电方案^[28]。结构如下图 1-6 所示。

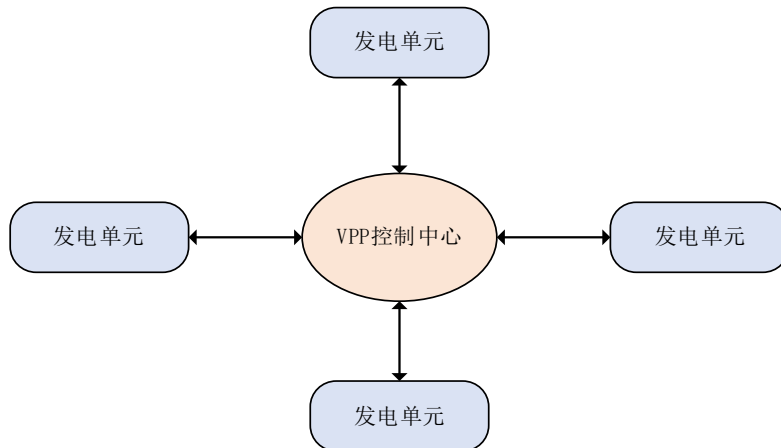


图 1-6 集中控制方式

集中控制方式的显著优势在于，每个发用电单元都能够得到优化，从而更好的满足市场需求，但由于 VPP 控制中心需要在实时处理大量数据的同时，与所有单元进行双向通信，因此制约了 VPP 的可扩展能力和系统兼容能力。

在集中-分散控制方式中，VPP 被划分为两个层级，总控制中心以及本地控制中心^[29]。总控制中心负责先将总体的优化调度任务进行分解，再将分解后的任务分配至本地控制中心。本地控制中心根据接收到的分配任务制定发用电具体实施策略，以保证 VPP 内各个单元可以正常运行，满足用户用电需求和市场规则。这种控制方式有效的解决了集中控制方式中存在的兼容性和可扩展性不足的问题，集中-分散控制方式结构如下图 1-7 所示。

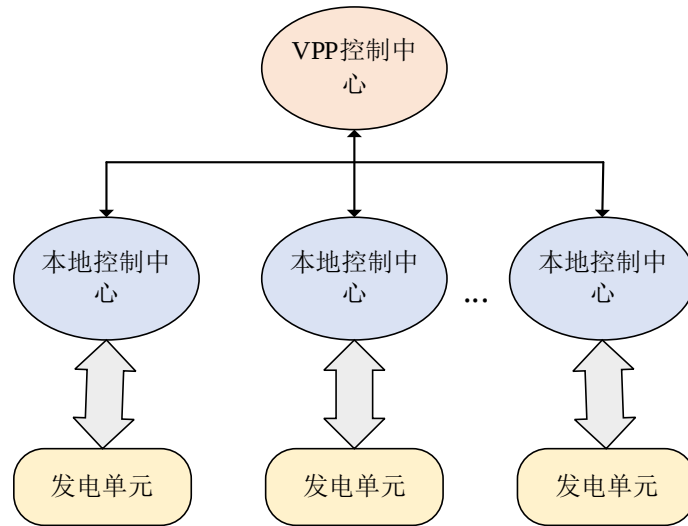


图 1-7 集中-分散控制方式

在分散控制方式中，VPP 控制中心的功能被数据交换和处理中心取代^[30]。每个独立的小系统均具备一个智能代理单元。智能代理主要借助网络通信从其它系统中获取信息，进而优化自身的运行状态。相比集中控制方式与集中-分散控制方式，完全分散控制具有更好的兼容性和可扩展性，但该种控制方式对 VPP 内部各单元及其组成的独立系统具有更高的要求，需要系统具备更复杂的功能，比如故障诊断、日常运行和响应管理等^[31]。分散控制方式结构如下图 1-8 所示。

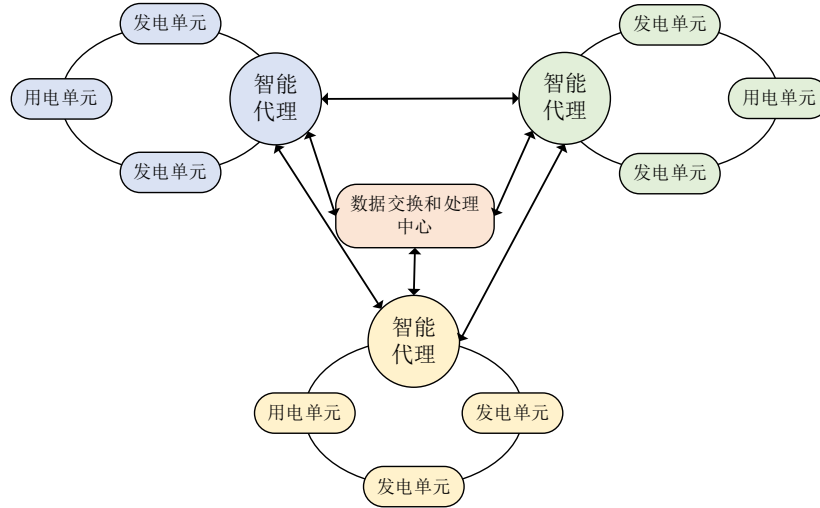


图 1-8 完全分散控制方式

1.2.3 虚拟电厂优化调度研究现状

国内外学者在 VPP 优化调度方面开展了大量的研究工作，总体上可分为确定性优化模型和不确定性优化模型两大类。

在确定性优化模型方面，文献[32]以 VPP 的收益最大以及电力公司热电负荷补偿成本最小为优化目标，研究了多能互补的 DR 互动优化模型。文献[33]构建了计及“源-网-荷-储”的 VPP 运行机制，提出以低碳经济为目标的多能互补优化模型。文献[34]提出了 VPP 在电能量市场与辅助服务市场中的协同优化调度策略；文献[35]以日前阶段需求响应净收益最大，日内运行成本最小为优化目标，提出一种考虑碳排放成本的园区 VPP 日前-日内两阶段优化调度模型，结果表明，所提策略可在计及碳排放成本前提下，最大化园区 VPP 的净收益。文献[36]考虑了聚合可再生资源、燃气轮机、储能和灵活需求互补优势，提出一种多时间尺度的 VPP 滚动优化方法。结果表明，所提方法能够在多时间尺度内获得最优的调度计划，并且具有更好的经济性和安全运行性能。

在不确定性优化模型方面，文献[37]以降低 VPP 的运营成本为优化目标，考虑光伏输出和电力负载的不确定性，采用 C&CG 算法求解两阶段模型。文献[38]为应对灵活的资源预测和响应带来的多重不确定性，提出一种多能源 VPP 的两阶段经济调度方法。结果表明，所提方法在降低参数偏差引起的平衡成本、提高 VPP 运行效率和经济性方面具有优越性。文献在[39]在 Nash 讨价还价博弈理论的基础上，构建了“源-荷”不确定性模型来解决 VPP 内部的波动。结果表

明, 所提模型能够有效应对 VPP 的内外部干扰, 并且可以显著提高系统应对不确定性风险的能力, 降低其运营成本。文献[40]提出一种考虑备用不确定性的 VPP 最优运行机制, 构建考虑日前市场报价策略与实时调度模型。结果表明, 该方法能够显著降低运行决策的保守性。文献[41]以运行成本最小为优化运行目标, 建立了考虑风电、光伏等不确定性场景的 VPP 优化调度模型。文献[42]构建了以 VPP 收益最大化为核心目标的两阶段随机鲁棒优化模型。文献[43]基于风电和价格不确定性, 构建 VPP 参与电能量与需求响应市场的日前两阶段鲁棒优化模型。

关于 VPP 自身控制的方面, 重点包括对 VPP 中不同种类的 DER 互补运行策略的研究。文献[44]以最小化运营成本、碳排放和运营风险为目标, 构建含有风电、光伏、热电联产机组、电锅炉和可控负载的 VPP, 通过不确定性情景生成法和风险条件值理论量化 VPP 实时调度的风险。结果表明, 该方法能够更合理地规划风光发电和备用计划, 使 VPP 在降低实时调度风险的同时获取更多收益。文献[45]以最大化 VPP 的净利润为优化目标, 构建了包含光伏、风电、燃料电池、储能系统、电动汽车以及热电联产装置的 VPP, 并提出一种基于动态定价的策略。文献[46]以实现日间运营收益最大化为目标, 通过统筹内部分布式新能源、燃煤发电机组、储能装置及碳捕集设施, 协同外部电网侧与用户侧形成双向交互机制, 开展低碳化电力调度优化。文献[47]针对包含风光、广义储能、中央空调、电动汽车、灵活性负荷和传统火电机组的 VPP, 构建了 3 层优化调度模型, 从而达到减少弃风弃光、碳排放并提高经济效益的目标。文献[48]针对电-氢-火电的分布式能源的 VPP, 根据不同层次的需求响应特性提出了“源-荷”协调响应机制的 VPP 优化模型, 从而达到提升 VPP 经济效益的目标。

1.2.4 虚拟电厂集群研究现状

当前, 一些文献对 MVPP 的协同优化调度进行了探索性研究, 针对 MVPP 经济性方面: 文献[49]在“信息分离、决策协同”理论的基础上, 提出了融合拉格朗日对偶松弛原理的 MVPP 分布式协调优化调度模型。研究结果表明, 相较于各个 VPP 独立调度, 基于内部 VPP 间功率互济的 MVPP 协调优化调度具有

更高的经济性。文献[50]构建一种整合网络约束条件的 MVPP 日前随机博弈框架，同时引入实时可变时间尺度的优化机制，促进了 VPP 直接交易的实施。但文献[49-50]并未考虑需求响应对 MVPP 成本的影响。文献[51]以运营收益最大化为目标，构建了一种整合非合作博弈理论和鲁棒优化算法的 MVPP 日前市场竞争策略模型。研究结果显示，所有参与市场竞标的 VPP 均能通过组建联盟的方式来提升自身的经济收益。但文中仅考虑了 MVPP 经济效益的变化，并未提及 MVPP 中各 VPP 的功率流动变化情况。

针对 MVPP 之间功率流动方面，文献[52]构建计及过网费的 MVPP 点对点能量交易框架，有利于配电网网架建设的回收并降低其运营成本。但文中并未结合需求响应完善 MVPP 间的端对端电能交易。文献[53]提出了一种针对 MVPP 的两阶段鲁棒调度优化模型与改进的基于 Shapley 的 MVPP 利益分配策略。结果表明，MVPP 两阶段调度优化模型和收益分配策略可以提高新能源消纳率。文献[54]提出考虑区域负荷特性的两阶段 MVPP 分布式协调优化调度模型。结果显示，该模型有利于进一步提高 VPP 内部就近平衡的积极性。文献[55]构建了运营商和 MVPP 之间的双层主从博弈模型，采用粒子群算法迭代求解博弈模型，有效提高运营商收益并降低 VPP 运行成本。但文献[54-55]中并未考虑 MVPP 内的功率分布与相互流动情况。文献[56]针对 VPP 中新能源功率输出不稳定问题，提出基于温控负荷参与的 MVPP 联合调度策略。研究结果显示，该策略能够有效降低新能源功率输出波动引起的供需偏差。

有关电力系统中社会福利水平度量的研究由来已久。文献[57]提出了一种在条件风险价值和纳什谈判模型的基础上考虑综合能源微网群的优化策略。结果表明，该策略在实现社会福利最大化的同时，还确保了收益分配的合理性。文献[58]基于经济效益和环境效益的社会福利函数，提出了一种产消者联盟对社会福利贡献值的合作剩余分配机制。结果表明，该机制不仅可以激励产消者之间合作的积极性，又可以确保产销者联盟的稳定性。文献[59]建立多微网 P2P 电能交易模型，确保合作收益的公平分配，但未分析风光出力与负荷不确定性对多主体协同运行的影响。文献[60]探讨了在不同评估框架下电力系统经济效益的情况，并据此提出了旨在实现社会福利最大化的电力系统构建与评价策略。文献[61]通过剖析江苏省 2018 年春节期间开展的需求响应实际案例，证实了需

求响应在我国电力系统调度领域所产生的社会福利优化效能。

基于上述文献,本文研究了考虑不确定性与多类型灵活性资源互补的单个 VPP 与 MVPP 优化调度模型,并引入考虑社会福利最大化的 MVPP 优化模型,通过仿真实验对其经济性进行分析。

1.3 论文主要研究内容及章节安排

基于上述研究背景与该领域当前的发展动态,为了促进 DER 的大规模消纳,并减轻风能和太阳能等分布式能源出力不确定性对 VPP 稳定运行和运营成本的不利影响,本文研究考虑风光不确定性因素以及需求响应的单个 VPP 与 MVPP 优化调度方法,并在考虑 MVPP 电能共享的机制下,引入考虑社会福利最大化模型,研究在 MVPP 电能共享下对市场收益的影响。论文各章节构成如下所示:

第 1 章为绪论。在本章节中,首先介绍了 VPP 的研究背景以及研究意义,随后详细梳理了现阶段国内外学者关于 VPP 发展现状、VPP 分类与控制方式,以及 MVPP 及社会福利最大化的研究现状。最后,对本文所研究的内容与章节结构做了简要的介绍。

第 2 章为虚拟电厂基本原理及运行模型。在本章节中,首先介绍了 VPP 的概念、组成结构与特性;接着,针对储能装置与各类柔性可控负荷的特性进行说明;最后,针对风力、光伏的场景进行预测,为后续的 VPP 优化调度工作做好铺垫。

第 3 章为考虑不确定性和多灵活性资源互补的虚拟电厂优化调度策略。在本章节中,以最小化 VPP 的总运行成本为优化调度目标,综合考虑需求侧响应以及风光、EV、AC、微型燃气轮机与储能设备的出力,构建了含多个场景的 VPP 柔性优化调度模型,并通过对比实验,对不同 VPP 场景的优化结果进行分析,验证模型有效性。

第 4 章为虚拟电厂集群柔性优化调度。在本章节中,通过选取由 4 个 VPP 组成的 MVPP 作为仿真分析对象,建立了 MVPP 电能共享决策模型,通过协调优化 MVPP 内的 VPP 之间以及 MVPP 与电网之间的功率交互,达到 MVPP 总运行成本最小化的优化目标。结果验证了所研究的模型能够有效促进 MVPP 内部的电能消纳能力,并减少 MVPP 的日运行成本。

第 5 章为考虑社会福利最大化的虚拟电厂集群优化运行。在本章节中，首先对社会福利的基础知识进行阐述；接着，在 MVPP 优化调度的基础上，以社会福利最大化为优化调度目标，对考虑社会福利最大化的 MVPP 进行建模研究，并对仿真运行结果进行分析；最后，通过将仿真结果进行对比，验证了所研究的内容能够提高收益。

第 6 章为总结与展望。在本章中，主要对本文所研究的内容以及工作进行分析与总结，同时明确各章节存在的不足之处，并寻求后续的改进方法和策略，为今后的研究提供更加明确的方向。

第 2 章 虚拟电厂基本原理及运行模型

2.1 引言

在实际应用中，微网运行受地理位置的限制，而 VPP 汇聚“源-荷-储”于一体，可跨越地域界限并打破资源种类限制，整合分散在多地域、多层级的 DER、储能设备和可控负荷等，为 DER 大规模并网消纳并参与到市场竞争提供了有效的解决路径。因此，本章节对 VPP 的概念、结构及特性进行了简要阐述，且完成了 VPP 内部各组成单元的建模，为下文考虑需求响应的 VPP 优化调度提供理论支撑。

2.2 虚拟电厂概述

2.2.1 虚拟电厂概念与结构

1997 年，Averbuch 博士在《The Virtual Utility: Accounting, Technology & Competitive Aspects of the Emerging Industry》一书中提到了与 VPP 相关的模式，该模式能够促进不同独立实体之间的灵活合作，为用户带来高质量的电力服务，且无需实体资产支持。因此，这一理念自提出以来便获得各国的高度关注。

与传统电厂相比，VPP 依托智能化测控系统、高效数据处理体系与高速通信网络搭建能量管理系统。因此，VPP 可以聚合不同空间分散的 DER、可控电源、用电负荷以及灵活性资源，形成一种类似于电厂的虚拟整体。VPP 作为能源机组参与电力市场运营的一种新形式，能够有效促进“源-网-荷”互动运行。

本文 VPP 采用“集中-分散”控制方式。结构通常由分布式电源、储能装置、可控负荷和控制中心等组成。其中，各 DER、负荷与 VPP 运行控制中心之间设有双向通信渠道。这意味着 VPP 运行控制中心不仅能实时获取各 DER 的运行特性和状态信息，还能向各个控制单元发出指令。因此，VPP 能够将各类分布式能源高效整合为一个整体参与到电网调度和电力市场交易中，其外部表现类似于传统发电厂。VPP 的结构如下图 2-1 所示：

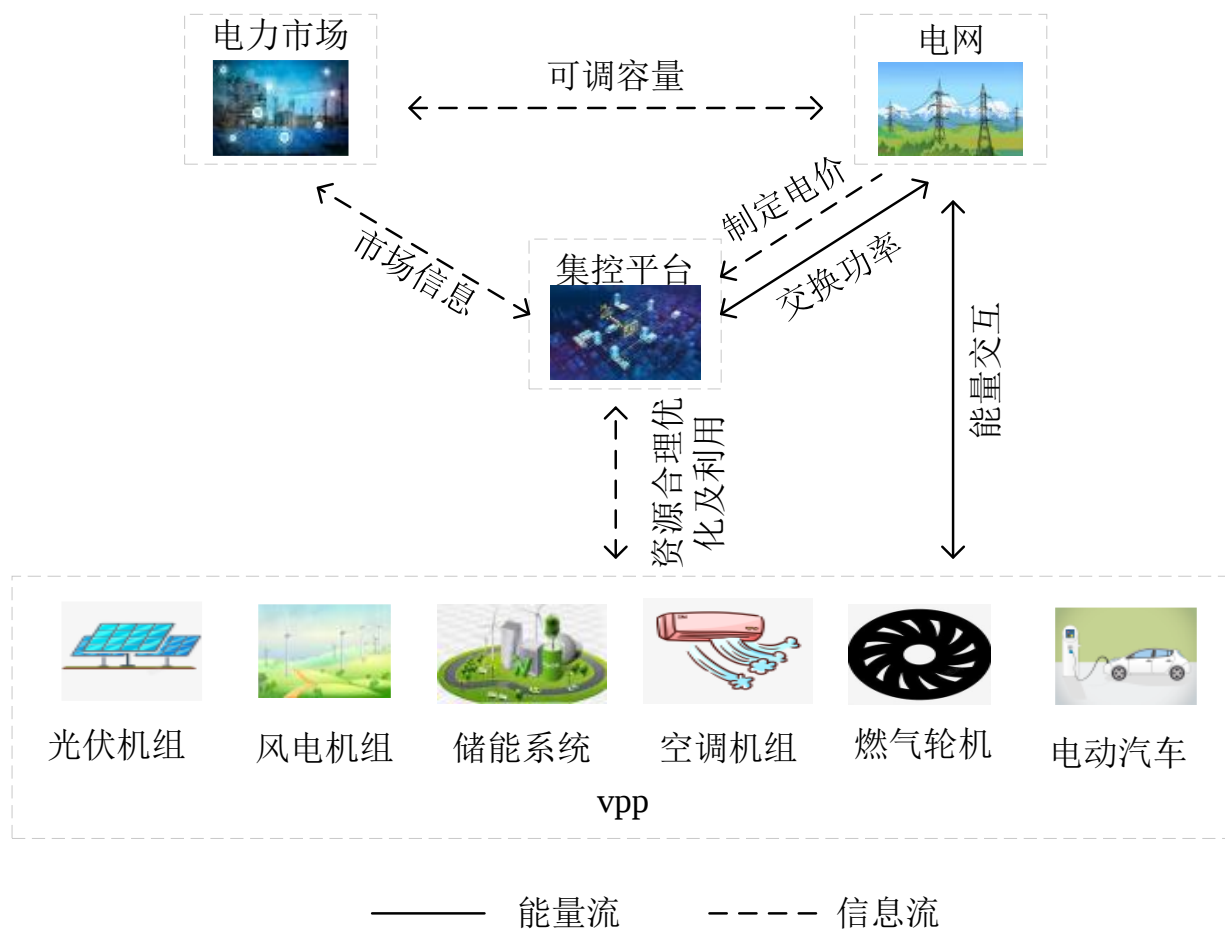


图 2-1 VPP 结构示意图

上图 2-1 中主要包括风光机组、燃气轮机、空调负荷、电动汽车以及储能系统等分布式灵活性资源。VPP 运行的核心思想在于依托互联网技术，将多种灵活性资源进行整合，同时通过协调运行控制策略与市场交易模式，构建电源侧资源协同和负荷侧动态交互的双向机制，可以为电网提供调峰、调频以及旋转备用等服务。

2.2.2 虚拟电厂特性

VPP 在电网和其内部资源之间充当“中间人的角色”，因此，相比于传统电厂，VPP 特点十分明显^[62]。首先，VPP 能够有效应对高比例可再生能源并网带来的电网峰谷差剧增和 DER 输出功率不确定性的问题，为电网提供必要的调峰与调频辅助服务，减轻 DER 接入对电力系统造成的影响。VPP 还可以解决 DER 单元数量多、大规模调度困难等问题。其次，VPP 不仅可以独立参与电力市场运行交易，还能够与其他发用电单元共同参与电力系统的优化调度。此外，

VPP 仅依赖于软件和技术，仅需具备通信条件，就可以突破地理上的限制。

VPP 对外呈现出的特性被称为外部特性，其中主要包括随机性、可调度性、独立性与可扩展性等。

（1）随机性

VPP 的随机性主要来自于聚合的风光等 DER 的随机性。VPP 出力因 DER 难以准确预测和控制而具有较大不确定性，这导致其在参与市场交易时面临较高的惩罚成本风险。为了有效减少风光出力随机性给电网和 VPP 造成的影响，VPP 通过整合并灵活调度各种 DER，以实现多种分布式能源之间的协调互济，提高 VPP 运行稳定性与可靠性。

（2）可调度性

VPP 的可调度性主要体现在 VPP 中聚合了多样化的可调度资源。在实际运行中可根据市场需求和价格，对可调度资源进行集中管理与优化。

（3）独立性

VPP 的独立性体现在组织与交易维度。在组织层面，VPP 作为一个独立的个体能够实现独立运行。在交易层面，VPP 既能够独立地参与电力市场的交易与竞争，也可以和其他市场主体开展合作以获取收益。

（4）可扩展性

VPP 可扩展性主要体现为 VPP 能够根据自身情况和市场需求，灵活地调整分布式能源的规模。同时，DER 也可凭借自身需求，灵活地做出加入或退出 VPP 的选择。在多变的市场环境中，这种灵活的扩展方式使 VPP 展现出强大的适应性。

2.3 虚拟电厂组成单元模型

2.3.1 常规可控机组

燃气轮机（Gas Turbine，GT）、柴油机等为主要的常规可控机组。其中，燃气轮机具有使用寿命长、污染小、易于安装和控制便捷等优点，但运行维护成本较高。因此，在 VPP 架构中，燃气轮机主要承担电源侧的动态功率支撑与削峰填谷的功能。其参与 VPP 优化调度的成本函数建模如式（2-1）所示。

$$C_{GT,t}^s = \sum_{t=1}^{24} aP_{GT,t}^s \quad (2-1)$$

式中， a 为 GT 的成本系数； $P_{GT,t}^s$ 为 GT 在场景 s 下 t 时刻的输出功率。

GT 的输出功率应需满足功率上下限的约束条件，如下式（2-2）所示。

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

式中， $P_{GT,\min}$ 为燃气轮机的最小输出功率； $P_{GT,\max}$ 为燃气轮机的最大输出功率。

2.3.2 储能装置

储能系统既能够将多余电能转化为其他能源暂存，又可在负荷出现高峰等紧急情况下将存储的电能释放出来。换言之，储能系统具备充放电两种工作模式，并根据系统的需求予以实时调节。例如：当风电、光伏的实际输出功率低于预测值时，储能系统放电；而当实际输出功率高于预测值时，储能系统充电。除此之外，储能系统还能够依据市场电价灵活的选择充放电。

在一个调度周期内，为了确保储能设备的使用寿命，并保障在下一个运行周期内能够正常运行，储能的荷电状态不仅需要遵循既定的上下限约束，还要确保调度周期始末的荷电状态一致。

$$SOC_{ES,t_0} - SOC_{ES,t} = 0 \quad (2-3)$$

$$SOC_{ES,\min} \leq SOC_{ES,t} \leq SOC_{ES,\max} \quad (2-4)$$

$$SOC_{ES,t} = SOC_{ES,t-1} + P_{ES,c,t}\eta_c / E - P_{ES,d,t}\eta_d E \quad (2-5)$$

式中， SOC_{ES,t_0} 为储能系统的初始荷电状态； $SOC_{ES,t}$ 为储能系统末时段的荷电状态； $SOC_{ES,\min}$ 和 $SOC_{ES,\max}$ 分别为储能系统荷电状态的最小值与最大值，分别取值为 0.1 和 0.9； E 为储能系统的额定容量。

2.3.3 柔性可控负荷

柔性负荷是能源互联网中一种具有双向互动能力的负荷类型，用电模式可随系统状态及用户偏好进行动态调整。其运行策略依据控制理论可以分为两类核心范式：

(1) 价格方式：指在电价的基础上，用户依据不同负荷特点来改变自身用电行为的方式，从而达到削峰填谷的目的。

(2) 激励方式：指负荷根据调度机构发出的调度指令以及自身的特点进行调整的一种方式。

负荷根据自身调整特点的差异性，可将柔性负荷分为 3 种不同的类型：

1) 可平移负荷：即负荷能够在不同的时间段进行转移操作，在此过程中需要确保一个调度周期内的负荷总量保持不变。负荷转移量须满足下式 (2-6) 的约束条件。

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta P_t^{sh,in} \leq \Delta P_{t,max}^{in} \\ 0 \leq \Delta P_t^{sh,out} \leq \Delta P_{t,max}^{out} \\ 0 \leq \mu_t^{in} + \mu_t^{out} \leq 1 \\ \sum_{t=1}^{24} P_t^{sh} = \sum_{t=1}^{24} P_t^{sh,0} \end{cases} \quad (2-6)$$

式中， $\Delta P_{t,max}^{in}$ 与 $\Delta P_{t,max}^{out}$ 为负荷转入量与转出量的上限； P_t^{sh} 为可转移负荷响应后的用电量； $P_t^{sh,0}$ 为初始用电量； $\Delta P_t^{sh,in}$ 与 $\Delta P_t^{sh,out}$ 分别为转入的电量与转出的电量； μ_t^{in} 与 μ_t^{out} 均为布尔变量。其中， μ_t^{in} 为 1 表示有负荷转入， μ_t^{out} 为 1 表示有负荷转出。

2) 可削减负荷：指用电功率可动态调整但不中断的一类负荷。此类负荷能够缓解电网压力、提升可再生能源消纳，具有经济性、低碳化的特点。

3) 可中断负荷：负荷可以在特定的时间段内进行削减，但在此过程中需要确保每个时段的负荷削减量符合下式 (2-7) 至 (2-9) 的约束条件，并且满足规定时段的要求。

$$P_{IL,t} = P_{IL,0,t} - \Delta P_{IL,t} \quad (2-7)$$

$$0 \leq \Delta P_{IL,t} \leq \Delta P_{IL,max} \quad (2-8)$$

$$t \in T_{IL} \quad (2-9)$$

式中， $P_{IL,t}$ 代表在 t 时刻可中断负荷削减后值； $P_{IL,0,t}$ 代表 t 时刻可中断负荷的原始值； $\Delta P_{IL,t}$ 为在时刻 t 的削减量； $\Delta P_{IL,max}$ 为在时刻 t 允许削减的上限值； T_{IL} 表

示为运行削减时段。

2.4 风光出力预测模型

2.4.1 风光发电特性

由于风速、风向等具有较强的随机性，因此，电能的质量也受到了显著的影响。其中，风电机组的出力稳定性很大程度上受到风速大小的显著影响^[63-64]。文献[65-67]证明了可以使用正态分布函数对风速的分布进行描述。

风力与太阳能都是一种十分优越的清洁能源，具有低碳、清洁、安全等特点。光伏输出功率的大小受到太阳能辐射强度大小的影响^[68]。光伏发电技术本质上实现了从太阳光能到电能的转换。文献[69]证明了可以使用正态分布函数对太阳能辐射强度进行描述，如下式（2-10）所示。设一维随机变量 X 的密度函数为：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2-10)$$

式中， μ 与 σ 为常数，且 $\sigma > 0$ ，则称随机变量 X 服从参数为 (μ, σ^2) 的正态分布，记作 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ，其中， μ 为总体均数； σ 为总体标准差。特别地，当 $\mu = 0$ ， $\sigma = 1$ 时，正态分布 $N(0,1)$ 称为标准正态分布，其密度函数为：

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}, x \in (-\infty, +\infty) \quad (2-11)$$

本文假设风力与光伏发电出力不确定性符合正态分布，风力与光伏出力服从的正态分布如下所示：

$$P_{pw,t} \sim N(\overline{P_{pw,t}}, \sigma_{pw,t}^2) \quad (2-12)$$

$$P_{pv,t} \sim N(\overline{P_{pv,t}}, \sigma_{pv,t}^2) \quad (2-13)$$

式中， $P_{pv,t}$ 为 t 时刻的光伏出力值； $\overline{P_{pv,t}}$ 为 t 时刻的光伏发电机组出力平均值； $\sigma_{pv,t}^2$ 为 t 时刻的光伏发电机组出力方差； $P_{pw,t}$ 为 t 时刻的风力出力值； $\overline{P_{pw,t}}$ 为 t 时刻的风力发电机组出力平均值； $\sigma_{pw,t}^2$ 为 t 时刻的风力发电机组出力方差。

2.4.2 蒙特卡罗模拟原理

蒙特卡罗模拟，是计算数学领域的一个重要分支。蒙特卡洛模拟通过建立问题与概率模型之间的关联，借助计算机进行统计仿真或随机采样，运用随机数序列开展模拟实验，从而获取问题的近似数值解。

由于传统的实验方式难以精确地对真实物理过程进行模拟，因此，难以获取理想的实验结果。然而，通过蒙特卡罗模拟，实际的物理过程能够被相对真实地模拟出来，从而确保问题的解决与实际情况相符合，并最终得到精确性较高的结果。虽然蒙特卡洛的应用无需依赖复杂的数学模型，但可以相对真实地对各地光照、风速等随机变量进行模拟，具有较高的真实性。然而，在使用蒙特卡罗时，需要对大量数据进行抽样。因此，为了准确刻画随机变量的不确定性特征，运用该方法时需要依赖大量的场景样本数据。这种传统方法在实际应用中可能会出现样本聚集现象，特别是在模拟迭代次数有限的情况下，这一问题尤为明显，其本质源于随机模拟的收敛特性。当采样空间受限时，随机数生成器的遍历性缺陷会引发采样偏差，使得高概率测度区域占据样本输出的主导地位。然而，当蒙特卡洛采样深度达到收敛阈值时，该现象可通过输入空间的概率测度动态重构实现渐进式修正，其理论依据为重要性采样中的自适应权重调整机制。

根据上述的一般过程，其基本步骤可以表示为下图 2-2 所示：

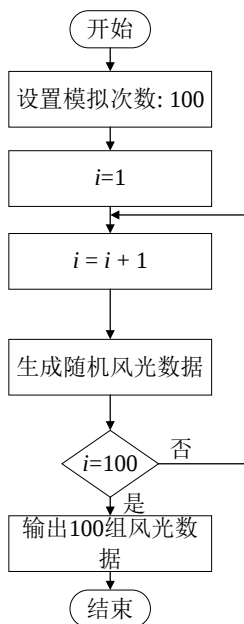


图 2-2 蒙特卡洛模拟流程图

步骤 1：采用正态分布函数对风光场景进行模拟。

步骤 2：调用距离场景筛选方法。

步骤 3：估计模拟次数并运行。

步骤 4：处理相关数据，呈现问题的模拟结果与统计性检验结果。

2.4.3 多场景削减与典型场景集构建

由于风光渗透率呈现出日益增长的态势，VPP 中长期规划运行与短期运行调度中都必须考虑风光出力的各种特性。场景分析法既是一种通过构建确定性场景对不确定性问题进行研究的有效方法，同时也是处理 DER 优化运行难题的重要策略。在实际问题中，基于场景分析的期望值可以由下式（2-14）凸优化问题的期望值模型表示：

$$\min_{x \in \mathcal{X}} E_p f(\omega, x) P(d\omega) \quad (2-14)$$

式中， P 是 ω 在空间 Ω 上的概率测度。

为了求解式（2-14），现研究设计出针对不同实际问题的近似模型。其中 ζ 结构概率测度是一种主流的近似方法，数学表达式如下：

$$d_F(P, Q) = \sup_{f \in F} \left| \int_{\Omega} f(\omega) P(d\omega) - \int_{\Omega} f(\omega) Q(d\omega) \right| \quad (2-15)$$

式中， $\sup$ 表示上确界。

通过 ζ 结构概率测度， $\int_{\Omega} f(\omega) P(d\omega)$ 的最优期望值即为 $\int_{\Omega} f(\omega) Q(d\omega)$ 的最优期望值。因此，当式（2-14）的规模较大并且难以完全描述时，可采用 Q 来求解模型。为了进一步化简概率测度，将对 ζ 结构概率测度进行进一步分析。

$$\hat{\mu}_c(P, Q) := \inf \left\{ \int_{\Omega \times \Omega} c(\omega, \hat{\omega}) \eta(d(\omega, \hat{\omega})) \right\} \quad (2-16)$$

如果 P 与 Q 的关系满足公式（2-14），则“ Q 求得 SO 模型的最优值公式（2-15）”与“ P 求得凸优化模型的最优值公式（2-14）”是最接近的。即当原始模型因其概率测度规模过大而难以求解时，可以通过寻找满足公式（2-14）的简化概率测度，将原来的凸优化问题进一步简化为下式（2-17），并且公式（2-17）经过计算所得到的结果与原模型十分接近。

$$\min_{x \in \mathcal{X}} E_Q f(\omega, x) = \int_{\Omega} f(\omega, x) Q(d\omega) \quad (2-17)$$

在电力系统优化的现实问题中， P 通常是遵循某种概率分布的连续随机变量，无法直接求解公式 (2-14)，因此，需要对 P 进行离散化处理，即使用大量有限的离散样本来近似表示，这些离散样本即为场景，如何依据连续的概率分布函数获取大量有限样本以进行近似表示，这一问题正是场景生成所要解决的问题。可以表示为如式 (2-18) 所示。

$$(\zeta_s, \rho_s), s = 1, 2, \dots, S \quad (2-18)$$

式中， ζ_s 为一个场景； ρ_s 为对应场景的概率。

考虑到计算复杂程度的限制，需采用一个包含少量典型场景构造的 Q 来近似概率测度，由此获取最佳场景集的过程即为场景削减过程。过多的场景集合不仅会使运行时间增大，还会将更多的不可控因素引入到系统运行过程中，从而降低决策效率，因此，场景筛选技术显得尤为重要。

为应对蒙特卡洛模拟生成的风光场景数据量过大、相似性过高的问题，并筛选出符合风光特征且具有规划价值的场景集合，需要对生成的大量场景进行筛选与削减。风光场景筛选技术的基本原理是根据风速和光伏辐射在预测值范围内的相似程度，对原始风光场景进行聚类分析，并将风速和太阳辐射强度的平均值作为集群的中心点。在风光场景缩减方面，场景缩减方法主要有场景树构建法、后向削减法与快速前向选择法。

(1) 后向削减法：假设所有的场景均包含在原始场景集中，并进行顺序编号，计算各场景之间的概率距离。将概率距离最小的场景 a 放置到废弃场景集中。找出原始集与废弃集之间概率距离最小的场景 b ，并将场景 a 的概率与场景 b 的概率相加，保证原始场景集中的概率距离和始终为 1。重复上述步骤，直到原始集中的场景数量达到目标要求为止。

(2) 快速前向选择法：与后向削减法相反。首先，将全部场景归入废弃场景集并进行顺序编号；接着，计算废弃场景集内各场景与剩余场景之间的概率距离，并将概率距离最小的场景 a 放置在原始场景集中；最后，重复上述步骤，直到废弃集中的场景数量达到目标要求为止。

(3) 场景树构建法：基于后向削减法，构建树状场景集，并将所有场景划

分为不同分支，其中每个分支均表示为在同一时刻的相似值。

本文选取的场景筛选方式为后向消减法，基本步骤可以表示为图 2-3 所示：

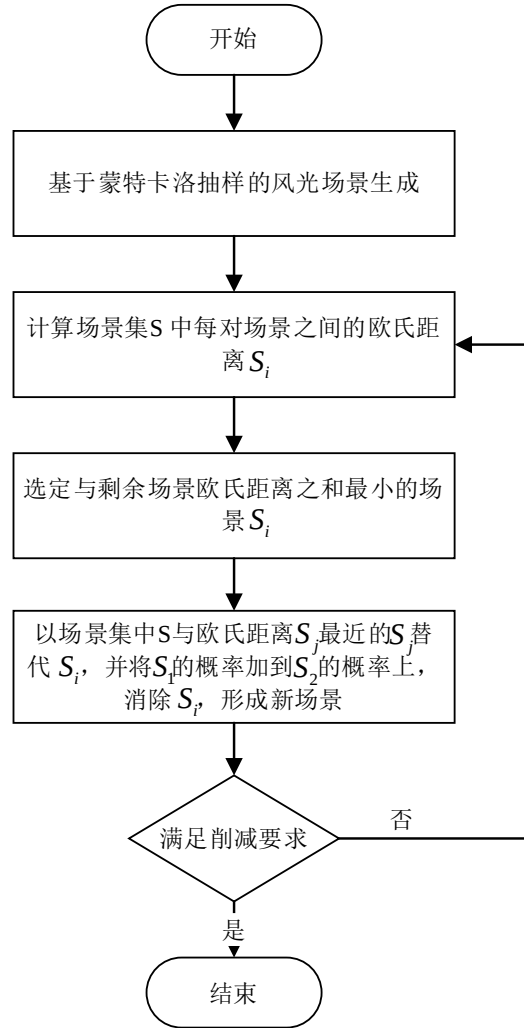


图 2-3 场景缩减流程图

选定某簇的场景集合为 $S = \{S_1, \dots, S_i, S_j, \dots, S_n\}$ ，包含场景数目为 n ，将需要删减的场景弃用至场景集合 S' ，具体的步骤如下：

步骤 1：设置场景集合 S' 为空集。

步骤 2：根据下式计算每个场景的概率距离。

$$\sum_{i \in S'} p_i \min d(S_i, S_j), j \notin S' \quad (2-19)$$

式中， p_i 表示场景 S_i 发生概率的大小； $d(S_i, S_j)$ 表示两个场景集之间的欧式距离。

步骤 3：选择上式最小的场景 S_i 作为弃用场景添加至 S' ，同时更新原场景

集合数目 $n = n - 1$ 。

步骤 4：用场景 S_j 替代更新后的场景 S_i ，同时更新场景概率 $p_j' = p_j + p_i$ 。

步骤 5：返回步骤 2，直至 S 中剩余场景数目到达给定目标值，立即停止迭代。

经过上述步骤，能够获得各类簇的典型场景集，在后向削减时，所计算的概率仅表示典型场景出现在 S 中的概率，应与初始场景集合中出现的概率相乘得到实际的概率。保留 100 个场景，可保证覆盖 95% 以上的概率分布；结合后向削减，进一步压缩至 5 个场景，误差控制在 10% 以内。

2.4.4 算例分析

本文所设置的风光出力额定功率最大为 10MW。假设日调度时段数 $T=24$ ，时间间隔 $\Delta t = 1h$ ，设定 σ_{pw} 与 σ_{pv} 取值均为 0.1。具体分布参数如下表 2-1 所示。

表 2-1 风光功率概率分布

时段	风电/MW	光伏/MW	时段	风电/MW	光伏/MW
0:00~01:00	$N(3.5, 0.1^2)$	0	12:00~13:00	$N(2.6, 0.1^2)$	$N(7.4, 0.1^2)$
01:00~02:00	$N(3.8, 0.1^2)$	0	13:00~14:00	$N(1.7, 0.1^2)$	$N(7.2, 0.1^2)$
02:00~03:00	$N(4.3, 0.1^2)$	0	14:00~15:00	$N(3.2, 0.1^2)$	$N(7.4, 0.1^2)$
03:00~04:00	$N(4.9, 0.1^2)$	0	15:00~16:00	$N(5.9, 0.1^2)$	$N(6.5, 0.1^2)$
04:00~05:00	$N(5.1, 0.1^2)$	0	16:00~17:00	$N(3.9, 0.1^2)$	$N(5.5, 0.1^2)$
05:00~06:00	$N(4.1, 0.1^2)$	0	17:00~18:00	$N(5.1, 0.1^2)$	$N(4.8, 0.1^2)$
06:00~07:00	$N(2.6, 0.1^2)$	$N(3.8, 0.1^2)$	18:00~19:00	$N(8.8, 0.1^2)$	0
07:00~08:00	$N(2.4, 0.1^2)$	$N(3.9, 0.1^2)$	19:00~20:00	$N(8.1, 0.1^2)$	0
08:00~09:00	$N(3.6, 0.1^2)$	$N(4.5, 0.1^2)$	20:00~21:00	$N(5.4, 0.1^2)$	0
09:00~10:00	$N(4.6, 0.1^2)$	$N(5.2, 0.1^2)$	21:00~22:00	$N(5.6, 0.1^2)$	0
10:00~11:00	$N(4.6, 0.1^2)$	$N(6.5, 0.1^2)$	22:00~23:00	$N(8.4, 0.1^2)$	0
11:00~12:00	$N(4.3, 0.1^2)$	$N(7.3, 0.1^2)$	23:00~24:00	$N(4.3, 0.1^2)$	0

运用场景生成与后向削减法处理之后的风力、光伏场景如图 2-4 至图 2-7 所示。选取其中风光场景出现概率最大的一组为最终出力，如图 2-10 至图 2-11 所示。

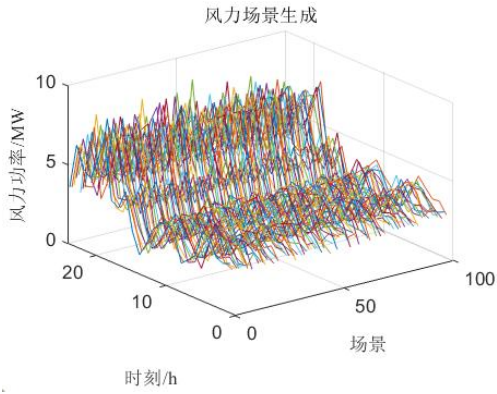


图 2-4 风力场景

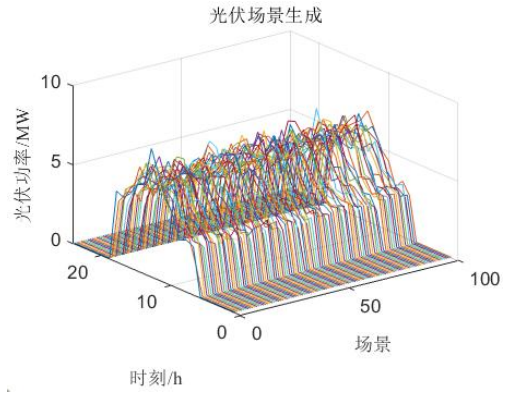


图 2-5 光伏场景

如下图所示，图 2-6 与图 2-7 分别为经过后向削减得到的 5 组风光出力场景。

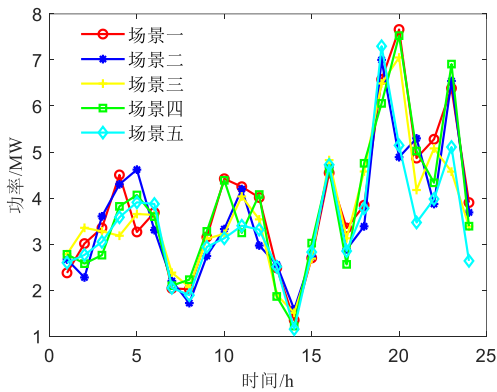


图 2-6 风电场景

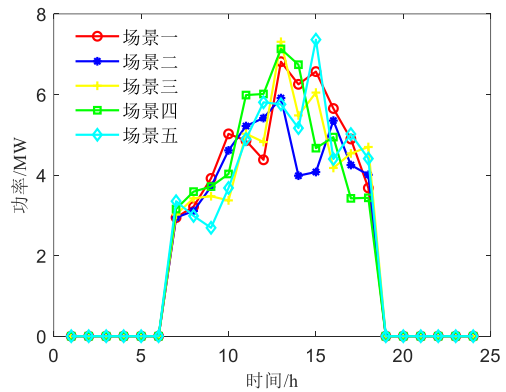


图 2-7 光伏场景

图 2-8 与图 2-9 分别为上述 5 组风光出力场景中每组场景出现的概率分布图。分别取风光出力概率最大的一组数据作为下文的基础数据。从下图中可以看出，风力发电场景选取出现概率为 24% 的场景 2，光伏发电场景随机选取出现概率为 24% 的场景 3 或者场景 5。

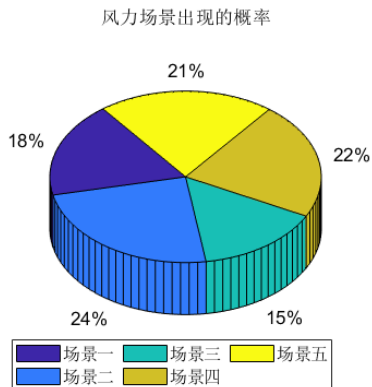


图 2-8 风力场景概率

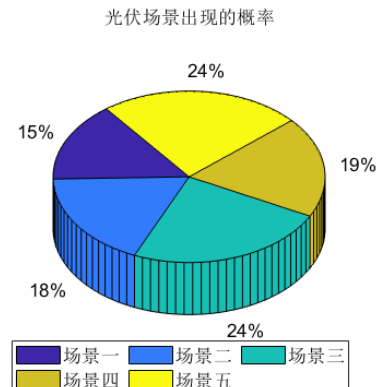


图 2-9 光伏场景概率

图 2-10 与图 2-11 分别为风光场景发生概率最大的一组数据，此数据作为下文的基础数据。

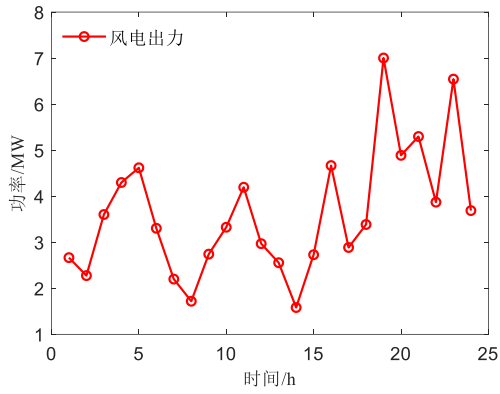


图 2-10 风电预测数据

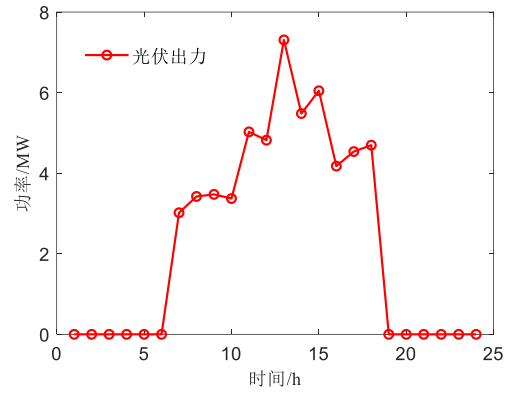


图 2-11 光伏预测数据

由图 2-10 和图 2-11 可见，一般夜间的风电出力大于白天，主要集中在 19:00-次日 6:00。由于光伏出力受太阳辐照强度的影响，光伏出力主要集中于 7:00-18:00，因此，日内风电、光伏出力存在良好的互补性。

2.5 本章小结

本章首先介绍了 VPP 的基本概念结构与特性，并明确本文所使用的 VPP 控制策略为集中-分散控制策略；接着，确定了本文 VPP 所包含的单元并完成了内部各单元的特性建模；最后，对风光场景进行概述，在随机抽样方法的选择上，选取蒙特卡洛模拟。在场景缩减方面，选用后向削减法。并基于蒙特卡洛模拟进行了风光预测的算例分析，由此得到的风光数据为下文提供了数据支撑。

第 3 章 考虑不确定性和多灵活性资源互补的虚拟电厂优化调度方法

3.1 引言

由于 VPP 作为能源信息物理系统的核心枢纽，能够实现发电单元、储能单元及需求侧资源的时空协同优化，最终形成分布式光伏、风电等能源的协调互补效应，并为解决风电出力的各种问题提供了全新的方法。

在此背景下，为应对不确定性和多种灵活性资源的随机波动性，本章节考虑不确定性和多灵活性资源的互补性，以 VPP 多场景运行成本最小为优化目标，设计并验证了燃气轮机、风光发电单元、EV、AV 及需求侧可调资源的柔性优化调度模型，并以此为基础研究了一种考虑不确定性和多灵活性资源互补的单个虚拟电厂优化调度策略。

3.2 虚拟电厂柔性优化调度模型

3.2.1 目标函数

本文旨在构建单个 VPP 的内部调度模型，其核心目标是实现 VPP 内部运行成本的最小化，从而为后续章节的研究奠定坚实基础。该模型的目标函数具体表述为：

$$F = \max \sum_{t=1}^{24} (I - C_{GT,t}^s - C_{EV,t}^s - C_{AC,t}^s - C_{buy,sell,t}^s) \quad (3-1)$$

式中， F 表示 VPP 的净收益； I 表示 VPP 的收益； $C_{GT,t}^s$ 表示在场景 s 下的 GT 的运行成本； $C_{EV,t}^s$ 表示在场景 s 下的电动汽车充电成本； $C_{AC,t}^s$ 表示在场景 s 下的空调负荷运行成本； $C_{buy,sell,t}^s$ 表示购售电成本。上式中各单元运行成本可具体表示为：

(1) GT 运行成本

$$C_{GT,t}^s = \sum_{t=1}^{24} a P_{GT,t}^s \quad (3-2)$$

式中， a 为 GT 的成本系数； $P_{GT,t}^s$ 为在 t 时刻场景 s 下 GT 的输出功率。

(2) 虚拟电厂的购电成本与售电收益

$$C_{buy,sell,t}^s = \sum_{t=1}^{24} [\alpha_t P_{buy,t}^s - \beta_t P_{sell,t}^s] \quad (3-3)$$

式中， α_t 与 β_t 分别为 t 时刻的 VPP 购售电电价； $P_{buy,t}^s$ 与 $P_{sell,t}^s$ 分别为 VPP 在场景 s 下 t 时刻的购售电电量。

(3) 电动汽车充电成本

$$C_{EV,t}^s = \sum_{t=1}^{24} c_{EV} P_{EV,t}^s M_{EV,t}^s \quad (3-4)$$

式中， $C_{EV,t}^s$ 表示的是 EV 在 t 时刻的充电价格； $P_{EV,t}^s$ 表示在 t 时刻场景 s 下 EV 的充电功率； $M_{EV,t}^s$ 表示的是 EV 的充放电状态，取值为 0 或 1。电动汽车在充电状态下相当于为 VPP 提供收益，因此，此部分的成本为负值，相应放电状态下的成本为正值。

(4) 空调负荷运行成本

$$C_{AC,t}^s = \sum_{t=1}^{24} c_{AC} P_{AC,t}^s \quad (3-5)$$

式中， c_{AC} 表示在场景 s 下 t 时刻的空调负荷能源单位价格； $P_{AC,t}^s$ 表示在场景 s 下 t 时刻的空调负荷输出功率。

3.2.2 约束条件

本章节考虑了燃气轮机的出力与爬坡约束、风光出力的不确定性约束、电动汽车与空调负荷出力约束、储能系统运行约束以及电功率平衡约束等。

(1) 电功率平衡约束

用户侧接入的负载总和必须与系统中可再生能源发电、储能系统、柔性负荷以及燃气轮机的总出力保持平衡。

$$P_{GT,t}^s + P_{EV,t}^s + P_{PV,t}^s + P_{PW,t}^s + P_{ess,t}^{s,ch} + P_{ess,t}^{s,dis} = P_{pload,t}^s + P_{AC,t}^s \quad (3-6)$$

(2) 燃气轮机运行约束

微型燃气机组在时刻 $t-1$ 至时刻 t 的出力变化受到向上、向下爬坡速率的约束。

$$P_{GT,\min}^s \leq P_{GT,t}^s \leq P_{GT,\max}^s \quad (3-7)$$

$$-R_g^A \Delta t \leq P_{GT,t}^s - P_{GT,t-1}^s \leq R_g^B \Delta t \quad (3-8)$$

式中, $P_{GT,\min}^s$ 为 GT 在 t 时刻场景 s 下输出功率的最小值; $P_{GT,\max}^s$ 为 GT 在场景 s 下 t 时刻输出功率的最大值; R_g^A 、 R_g^B 分别为 GT 的向上与向下爬坡速率。

(3) 风光发电运行约束条件

对于可再生能源发电机组, t 时刻的出力值应当大于 0 小于时刻 t 出力预测的最大值。

$$0 \leq P_{PW,t}^s \leq P_{PW,\max}^s \quad (3-9)$$

$$0 \leq P_{PV,t}^s \leq P_{PV,\max}^s \quad (3-10)$$

式中, $P_{PW,t}^s$ 表示风力出力值; $P_{PV,t}^s$ 表示光伏出力值; $P_{PW,\max}^s$ 与 $P_{PV,\max}^s$ 分别表示风光出力预测的最大值。

(4) 荷电状态约束

$$S_{ess}^s(t) = S_{ess}^s(t-1) + \eta^{ch} P_{ess}^{ch}(t) - \frac{1}{\eta^{dis}} P_{ess}^{dis}(t) \quad (3-11)$$

$$S_e = 2.5 P_{ess}^{\max} \quad (3-12)$$

$$S_{ess}(0) = 0.2 S_e \quad (3-13)$$

$$0.1 S_e \leq S_{ess}^s(t) \leq 0.9 S_e \quad (3-14)$$

$$0 \leq S_{ess}^{\max} \leq S_e \quad (3-15)$$

式中, $S_{ess}^s(t)$ 为场景 s 下 t 时刻的储能电池的容量; $S_{ess}^s(t-1)$ 为在场景 s 中上一时刻的储能电池容量; η^{ch} 为储能系统的充电效率; η^{dis} 为储能系统的放电效率; $P_{ess}^{ch}(t)$ 为在 t 时刻储能系统的充电功率; $P_{ess}^{dis}(t)$ 为在 t 时刻储能系统的放电功率; S_e 为储能系统的容量。

(5) 储能功率约束

由于储能系统自身具有充放电能力，其出力不受外界环境的影响，在储能的充放电功率中需要满足的约束条件为：

$$0 \leq P_{ess}^{ch}(t) \leq U_{ch}(t) P_{ess}^{\max} \quad (3-16)$$

$$0 \leq P_{ess}^{dis}(t) \leq U_{dis}(t) P_{ess}^{\max} \quad (3-17)$$

$$U_{ch}(t) + U_{dis}(t) \leq 1 \quad (3-18)$$

$$U_{ch}(t) \in \{0, 1\} \quad (3-19)$$

$$U_{dis}(t) \in \{0, 1\} \quad (3-20)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (3-21)$$

式中， $U_{ch}(t)$ 为在 t 时段场景 s 下储能系统的充电状态变量； $U_{dis}(t)$ 为在 t 时段场景 s 下储能系统的放电状态变量， $U_{ch}(t)$ 与 $U_{dis}(t)$ 取值为 0 或 1； $SOC_{\min}$ 与 $SOC_{\max}$ 分别为储能系统荷电状态的最大与最小值。

(6) 电动汽车运行约束

电动汽车正日益成为人们日常出行的选择，逐步取代燃油汽车，这一趋势既满足了出行需求，也体现了对低碳环保理念的践行。

在电动汽车的运行约束中需要保证电动汽车的蓄电量、充电功率和放电功率都在特定的约束范围内进行。

$$S_t^{EV, \min} \leq S_t^{EV} \leq S_t^{EV, \max} \quad (3-22)$$

$$0 \leq P_t^{vc} \leq P_t^{vc, \max} \mu_t^{vc} \quad (3-23)$$

$$0 \leq P_t^{vd} \leq P_t^{vd, \max} \mu_t^{vd} \quad (3-24)$$

$$\mu_t^{vc} + \mu_t^{vd} \leq 1 \quad (3-25)$$

$$S_0^{EV} = S_{EVi} \quad (3-26)$$

$$S_{24}^{EV} = S_{EVf} \quad (3-27)$$

$$S_t^{EV} = S_{t-1}^{EV} + \eta^{vc} P_t^{vc} - \frac{P_t^{vd}}{\eta^{vd}} - E_v d_t^{tr} \quad (3-28)$$

式中， S_t^{EV} 表示为 EV 在 t 时刻的蓄电量； $S_t^{EV, \min}$ 表示为 EV 在 t 时刻的最小的蓄

电量值； $S_t^{EV,max}$ 表示为 EV 在 t 时刻的最大蓄电量； P_t^{vc} 为 EV 在 t 时刻的充电功率； P_t^{vd} 为 EV 在 t 时刻的放电功率； $P_t^{vc,max}$ 与 $P_t^{vc,min}$ 分别为 EV 在 t 时刻的最大与最小充电功率； $P_t^{vd,max}$ 与 $P_t^{vd,min}$ 分别为 EV 在 t 时刻最大与最小的放电功率； μ_t^{vc} 为 EV 在 t 时刻的充电状态变量； μ_t^{vd} 为 EV 在 t 时刻的放电状态变量； μ_t^{vc} 与 μ_t^{vd} 取值为 0 或 1，且只有处于接入电网状态才能完成充放电过程； S_{EVi} 表示为 EV 初始的蓄电量； S_{EVf} 表示为 EV 在末时段的蓄电量； η^{vc} 表示为 EV 的充电效率； η^{vd} 表示为 EV 的放电效率； E_v 表示为 EV 行驶所需的能量需求； d_t^r 表示为 EV 的行驶里程。

(7) 空调负荷运行约束

在 VPP 背景下，空调负荷策略的研究和应用成为提高电力系统运行能效的重要途径。在确保用户舒适度的条件下，也为电网运行提供了大量的可调容量。在空调负荷运行约束中，需要保障室内温度在人体的最适温度范围内，制冷量与蓄冷量等也需要确保在一定的范围内。

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \quad (3-29)$$

$$0 \leq C_{coldch,t} \leq C_{coldch,t}^{\max} \quad (3-30)$$

$$0 \leq C_{cold,t} \leq C_{cold,t}^{\max} \quad (3-31)$$

$$0 \leq C_{colds,t} \leq I_s C_{colds,t}^{\max} \quad (3-32)$$

$$0 \leq C_{coldr,t} \leq I_r C_{coldr,t}^{\max} \quad (3-33)$$

$$C_{cold,t} = C_{coldch,t} - C_{colds,t} + C_{coldr,t} \quad (3-34)$$

$$I_s + I_r \leq 1 \quad (3-35)$$

$$P_{AC,t}^s = \frac{C_{coldch,t}}{U_{ch}} + C_{colds,t} U_s + C_{coldr,t} U_r \quad (3-36)$$

式中， T 表示室内温度； $T_{\min}$ 与 $T_{\max}$ 分别代表最低舒适室温与最高舒适室温，此处最低舒适温度为 24°C ，最高舒适温度为 26°C ； $C_{coldch,t}$ 表示空调机组制冷机的制冷量； $S_{cold,t}$ 表示空调机组的蓄冷槽容量； $C_{cold,t}$ 表示为总冷量； $C_{colds,t}$ 表示在 t 时段的空调蓄冷槽容量； $C_{coldr,t}$ 表示在 t 时段的空调蓄冷槽的释冷量； I_s 与

I_r 分别表示空调机组在 t 时段蓄冷与释冷状态变量，取值为 0 或 1； U_{ch} 、 U_s 与 U_r 分别表示空调机组的制冷机能效比、蓄冷槽蓄冷能效比与释冷槽释冷能效比。

(8) 购售电量约束

为了避免 VPP 不受限制地向电网出售电力而增加电网负担的问题，VPP 需要对同一时段的电力交易量进行约束。

$$P_{\min}^G \leq P_t^G \leq P_{\max}^G \quad (3-37)$$

式中， P_t^G 表示的是 VPP 在 t 时段向电网进行交易的电量； $P_{\min}^G$ 与 $P_{\max}^G$ 分别表示的是 VPP 向电网购售电量的最小值与最大值。

3.3 算例分析

3.3.1 基础数据

本章节选取一个商业小区 VPP 作为研究对象，小区中含有电动汽车、空调机组以及燃气轮机。由于研究季节选取为夏季，因此本章节中的空调机组只考虑空调制冷。

空调机组数量为 100 台；人体的舒适温度范围为 24°C-26°C；蓄冷槽的蓄冷能效比为 0.008，释冷能效比为 0.007，蓄冷效率为 0.95，蓄冷槽释冷效率为 0.92，制冷机能效比为 5.6，额定出力功率为 1MW；储能系统的额定容量为 1MW，储能系统荷电状态的最大值与最小值分别为 0.9 与 0.2；电动汽车数量为 100 辆，每一台 EV 的充放电功率均为 11.4kW，充放电效率均为 0.95；燃气轮机的出力上限值为 1.3MW，出力下限值为 0，爬坡率为 1.5。

本文依据电网的分时电价对 VPP 进行定价。分时电价机制是根据日负荷变化特点，将全天划分为高峰、平段和低谷三个时段，并通过设置差异化的电价，引导用户优化用电时间安排，从而达到削峰填谷的效果。中国《关于进一步完善分时电价机制的通知》明确要求，峰谷电价价差原则上不低于 3:1，尖峰时段电价上浮不低于 20%，以覆盖高峰负荷的边际成本。电网分时电价参数如表 3-1 所示：

表 3-1 电价参数

时段	时间段划分	售电价 元/ (MW·h)	购电价 元/ (MW·h)
峰时段	14:00-17:00、 19:00-22:00	800	1520
平时段	08:00-14:00、 17:00-19:00、 22:00-24:00	380	1020
谷时段	00:00-08:00	100	630

3.3.2 结果分析

为了研究多种类型灵活性资源参与需求响应时的互补作用，根据本文所述 VPP 中的灵活性资源配置情况，定义 4 种典型的运行场景进行对比分析。

场景 1：只考虑风电、光伏、燃气轮机与基础负荷，无负荷参与需求响应；

场景 2：考虑风电、光伏、燃气轮机与电动汽车，电动汽车参与需求响应；

场景 3：考虑风电、光伏、燃气轮机与空调负荷，空调参与需求响应；

场景 4：考虑风电、光伏、燃气轮机、电动汽车与空调负荷，电动汽车与空调参与需求响应；

下列 4 种场景中的基础数据保持一致，图 3-1 为分时电价下的储能优化的结果。在典型日场景下，结合给定变量与资源优化配置结果，能够生成 VPP 内各柔性资源的日出力调度计划。图 3-2 分别对应场景 1-4 的出力结果。最后对 4 种不同的场景进行 VPP 综合成本的比较。

从图 3-1 与图 3-2 中可以看出，在 1:00~6:00 时段，电价处于最低的时段，因此储能系统充电，为后续在用电高峰期的放电使用而进行能量储备。在 6:00~14:00 时段，电价逐步增长，风力发电功率降低，但光伏的输出功率增长，因此，为了减小 VPP 的运行成本，空调机组在电价高峰时段的出力值低于低谷时段的出力值，EV 与储能系统将在此时段进行放电操作。在 14:00~17:00 时段，电价略有下降，电动汽车将不再进行放电，储能系统开始充电。在 17:00~20:00 时段，电价逐步增长，光伏的出力逐渐降为 0，但风电出力增加，此时电

电动汽车与储能系统进行放电，空调负荷逐渐减小。在 20:00~24:00 时段，电价逐渐降至最低，此时电动汽车不再放电，可确保 VPP 成本最小。

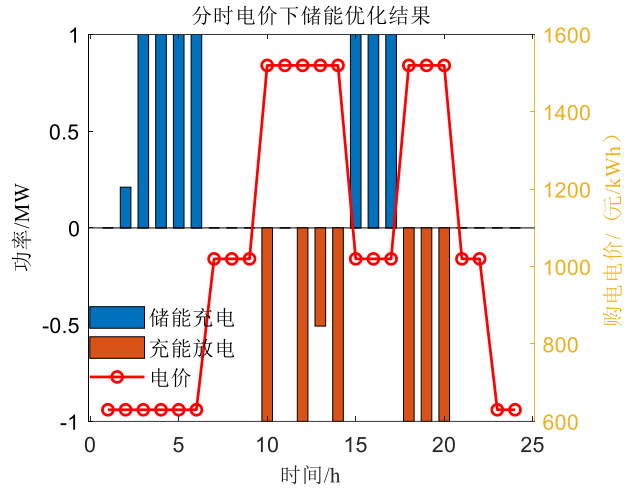


图 3-1 分时电价下的储能优化结果

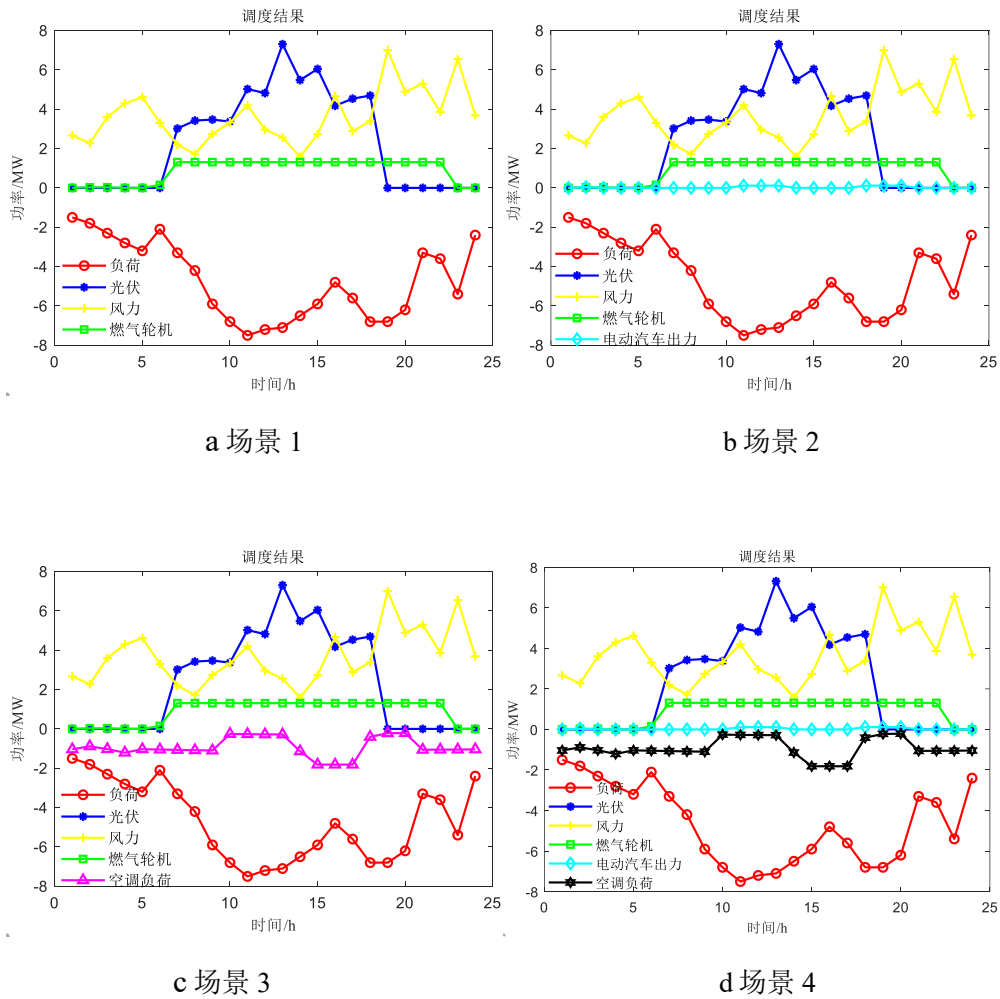


图 3-2 4 种典型运行场景优化结果

综上所述，在电价处于较低时，储能系统充电，在电价较高时段，储能系

统放电，在充分利用分时电价减小运行成本的同时，提高了削峰填谷的能力。在分时电价机制的引导下，电动汽车在电价低谷阶段选择进行充电或者不充电，在电价高峰阶段可以对电动汽车进行放电来弥补此阶段其他能源的出力不足。空调负荷在电价高峰阶段的出力要小于电价低谷阶段的出力，证明了 VPP 在情景 4 下可以最小化其运行成本。表 3-2 为 VPP 在上述 4 种情景下的成本及净收益情况。

表 3-2 成本与收益

场景	成本/元	净收益/元
场景 1	31841.610	15208.47
场景 2	31663.118	15744.40
场景 3	25179.777	15354.63
场景 4	25001.285	15890.56

对比图 3-2 中的 4 种典型运行场景优化结果，并结合表 3-2 给出的 4 个不同调度场景下的目标函数值可以得出，场景 1 考虑的分布式能源的种类较少，所以其从电网的购电量较多，成本较大，净收益较小；场景 4 考虑的分布式能源的种类较多，所以从电网的购电量较少，成本较小，净收益较大；场景 1 的成本比场景 4 的成本高出了 6840.325 元，说明新能源的接入可以减小 VPP 发电成本。

3.4 本章小结

本章节聚焦于单个 VPP 面临的不确定性问题，探讨如何利用多种灵活性资源与需求响应实现互补。考虑基于不同预测场景，每个情景都对应一种最优运行方案。在动态调度过程中，可调度发电单元与弹性负荷的功率再分配将产生机会成本损耗，基于此，VPP 以总运行成本最小化为优化目标，构建基于不同运行策略下的 VPP 柔性优化调度模型。算例结果表明，所建模型在情景 4 下可以得到运行成本的最小化，即新能源的接入可以减小发电成本，基于灵活调度策略，VPP 系统整体在面对多样化灵活性资源与需求响应时，展现出了良好的运行适应性和弹性。

第 4 章 面向电能共享的虚拟电厂集群柔性优化调度模型

4.1 引言

于中国新一轮电力体制改革的大背景之中，VPP 作为一种新型的售电主体参与到电力市场的竞争中，这一举动对于提高市场的活跃度、进一步推动市场开放具有激励作用。目前对 VPP 的研究已经相当成熟，然而，在面向 MVPP 集群参与调频辅助服务市场的多主体协同优化研究方面尚存在明显空白。在电力现货交易机制下，市场主体的资源整合与市场博弈需系统评估跨 MVPP 间及个体间的竞争与合作互动关系，才更契合实际情况。该现实需求直接驱动了 MVPP 优化理论体系的形成与发展。因此，需对该部分内容予以深入研究并进一步完善。

4.2 虚拟电厂群电能共享策略

4.2.1 虚拟电厂集群电能共享框架

能源局在《分布式发电市场化交易试点工作通知》中，系统的构建了包含项目容量标准、市场化交易体系、电力交易管理模式及输配电价计费规则的政策框架。特别明确指出：对于 10 千伏电压等级下实现自发自用，且电能处于同一台区变压器范围内消纳的分布式发电项目，实施过网费豁免政策。

基于上述背景，本章节通过聚合的方式，将位于同一变压器范围内的多个 VPP 整合为一个整体，构建 MVPP 电能共享框架，如下图 4-1 所示。由于本文所研究的 MVPP 电能共享架构是由地理位置相邻的 VPP 构成，电能传输损耗量级高于模型精度要求，因此可以忽略各 VPP 之间电能传输过程中的损耗。基于 MVPP 地理邻近特性，其所在区域风光出力并无太大差异，故而各 VPP 发用电行为差异的形成机制主要体现在内部可再生发电单元的不同、储能与负荷需求规模的差异以及用户侧需求响应特征的多样性等方面。因此，可以依据电能供需端的差异性，在维持 MVPP 内电能互济最优化的约束条件下，建立与主网的双向功率交互机制，通过购电补偿功率缺口或售电消纳富余能源。

作为 MVPP 协同调度中枢的第三方虚拟电厂集群服务商，构建多边协调控制架构实现各 VPP 的运营协同。服务商收取一定的代理费用，同时主导集群内分布式能源交易市场的结算流程，主要包括各个 VPP 之间的信息传递与电能交易、VPP 与大电网之间的电能交易等，其中各 VPP 需在日前向虚拟电厂集群服务商提供次日各时段的 DER 出力预测和负荷预测数据。各个 VPP 所配备的能量管理系统（Energy Management System, EMS）可以为储能单元提供最大电能与成本等技术类参数。基于各 VPP 提供的发用电参数和电网电价信息，虚拟电厂集群服务商确定 MVPP 次日各时段与外部电网的电力交互计划并建立内部电能协同共享机制。

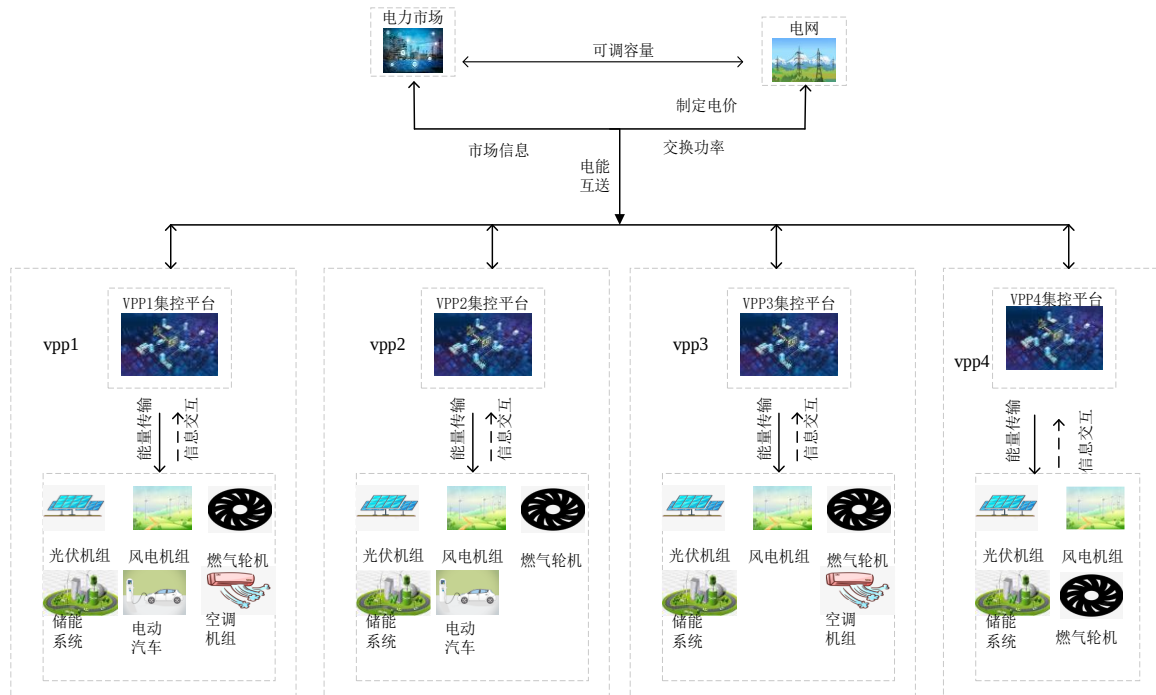


图 4-1 MVPP 互动机制

在虚拟电厂集群运营体系中，运营商承担着双向协调的职责。一方面汇总各参与方的电力交易意向，另一方面向各参与方传递电价和运营参数等信息。基于上述信息，VPP 通过自主管理与协调控制实现运行优化。对上以实现 MVPP 整体运行成本最小为目标，MVPP 根据内部功率的平衡情况选择是否与电力市场进行交易，并在考虑内部柔性负荷需求响应和偏差电量互补策略的基础上，考虑各 VPP 中风光机组出力的波动性和不可调节性对 MVPP 运行的影响，保障对 MVPP 做出最优的决策判断。对下 VPP 基于收集的数据，对风光出力和负荷需求等进行预测，由 EMS 对燃气轮机、柔性负荷等进行协调统一管理，并

控制各个聚合单元的运行。

4.2.2 虚拟电厂集群电力交易模式选择

(1) 虚拟电厂集群内部电价模型

为激励 MVPP 中各个 VPP 之间积极开展电能交互活动，需要针对性地制定更具吸引力的电价机制，如式（4-1）所示。

$$p_{ex} = \begin{cases} p_s = [p_s^1, p_s^2, \dots, p_s^T] \\ p_b = [p_b^1, p_b^2, \dots, p_b^T] \end{cases} \quad (4-1)$$

式中， p_s 、 p_b 分别表示为在一个运行周期之内，MVPP 内部的售电价格与购电价格。

在经济学领域，商品的市场价格受到供需规律的支配，基于这一理论，通过整合电力系统分时电价的定价机制，可以确定 MVPP 内部的电力价格交易体系。

$$P_{VPP,b,n,t} = \begin{cases} \frac{\lambda_{VPP,n,gb} \lambda_{VPP,n,gs}}{(\lambda_{VPP,n,gb} - \lambda_{VPP,n,gs}) \gamma^t + \gamma_{VPP,n,gs}}, & 0 \leq \gamma^t \leq 1 \\ \lambda_{VPP,n,gb}, & \gamma^t > 1 \end{cases} \quad (4-2)$$

$$P_{VPP,s,n,t} = \begin{cases} P_{VPP,b,n,t} \gamma^t + \lambda_{VPP,n,gs} (1 - \gamma^t), & 0 \leq \gamma^t \leq 1 \\ \lambda_{VPP,n,gs}, & \gamma^t > 1 \end{cases} \quad (4-3)$$

$$\gamma^t = \frac{\sum_{i=1}^N p_i^t}{\sum_{i=1}^N Q_i^t} \quad (4-4)$$

式中， γ^t 代表 MVPP 电能的供应与需求比值。其中，当 $\gamma^t = 0$ 时，代表 MVPP 内部无多余的电能，因此各 VPP 将以 $\lambda_{VPP,n,gb}$ 向电网购入电能；当 $0 \leq \gamma^t < 1$ 时，表示为内部的电价处在 $\lambda_{VPP,n,gb}$ 与 $\lambda_{VPP,n,gs}$ 之间，并且会随着 γ^t 的增加而降低；当 $\gamma^t \geq 1$ 时，表示为 MVPP 内部存在富余的电能，因此，将以电价 $\lambda_{VPP,n,gs}$ 出售至电网。

(2) 虚拟电厂集群的电力交易模式

当 MVPP 内部电力供应不足时，虚拟电厂集群服务商需从主网采购差额电

力；反之，当 MVPP 内部出现电能富余时，MVPP 服务商可将多余电能出售给电网。鉴于运营方的主要职能是提供代理服务，其收入来源仅限于固定服务费的收取，而非电力交易产生的利润。因此，在进行电力交易的过程中，必须实现 MVPP 在收入与支出方面的动态平衡。

4.3 虚拟电厂集群优化模型

4.3.1 目标函数

MVPP 协调优化调度以 MVPP 日运行成本最小为优化目标，同时考虑功率平衡及储能充放电等约束条件，优化调度 MVPP 的功率。在 MVPP 中 VPP 之间电量交易过程中，由于售电方所获得的收益与购电方所承担的成本在数值上相等，在此过程中所产生的各项费用可以进行互相抵消。因此，MVPP 协调优化的目标函数可写为：

$$\min F^n = C_{GT}^n + C_{trade}^n + C_{EV}^n + C_{AC}^n \quad (4-5)$$

式中， C_{GT}^n 、 C_{trade}^n 、 C_{EV}^n 、 C_{AC}^n 分别为第 n 个燃气轮机成本、向其他 VPP 购售电成本及电动汽车与空调的运行成本。其具体表达式分别为：

$$C_{GT,t}^n = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} a P_{GT,t}^n \quad (4-6)$$

$$C_{EV,t}^n = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} c_{EV} P_{EV,t}^n M_{EV,t}^n \quad (4-7)$$

$$C_{trade}^n = k_{VPP,t} (P_{VPP,n,s,t} - P_{VPP,n,b,t}) \Delta t \quad (4-8)$$

$$C_{AC,t}^n = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^{24} c_{AC} P_{AC,t}^n \quad (4-9)$$

式中， a 为 GT 的成本系数； $P_{GT,t}^n$ 表示的是在 t 时刻 GT 的输出功率； $C_{EV,t}^n$ 表示的是 MVPP 中 EV 在 t 时刻的充电价格； $P_{EV,t}^n$ 表示 MVPP 在 t 时刻 EV 的充电功率； $M_{EV,t}^n$ 表示的是 EV 的充放电状态，取值为 0 或 1； c_{AC} 表示 MVPP 在 t 时刻的空调负荷能源单位价格； $P_{AC,t}^n$ 表示 MVPP 在 t 时刻的空调负荷的输出功率。

4.3.2 约束条件

(1) MVPP 间交易电量平衡约束

MVPP 之间的内部直接交易的本质是多电 VPP 与少电 VPP 之间进行能量互通与互补。其中，在内部直接交易场景下，购电总功率须与售电总功率维持动态平衡。因此，在 MVPP 中，电力的流出与流入应始终保持相等。

$$\sum_{n=1}^N P_{VPP,b,n,t} = \sum_{n=1}^N P_{VPP,s,n,t} \quad (4-10)$$

式中， $P_{VPP,b,n,t}$ 与 $P_{VPP,s,n,t}$ 分别表示第 n 个 VPP 联络线流入与流出的功率。

(2) MVPP 交易约束

为防止某一 VPP 在同一调度周期内进行低买高卖的套利行为，本章节设置了 MVPP 的交易约束，如式 (4-11) 所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{VPP,s,n,t} \leq D_{s,n,t} P_{VPP}^{\max} \\ 0 \leq P_{VPP,b,n,t} \leq D_{b,n,t} P_{VPP}^{\max} \\ D_{s,n,t} + D_{b,n,t} \leq 1 \end{cases} \quad (4-11)$$

式中， $P_{VPP}^{\max}$ 表示为 MVPP 中某一 VPP 与其他 VPP 的最大交互功率； $D_{s,n,t}$ 与 $D_{b,n,t}$ 为 0-1 变量，表示为第 n 个 VPP 的购售电状态，其中，1 表示为参与交易，0 表示为不参与交易。

(3) 需求响应约束

本章节所研究的需求响应包括可削减负荷和可平移负荷两类。其模型表达式为：

1) 可削减负荷

可削减负荷是指对电网中某些非关键用电设备进行削减或暂时停用，以适应 MVPP 需求。

$$0 \leq P_{\omega,t}^{cut} \leq \Delta P_{t,\max}^{cut} \quad (4-12)$$

式中， $\Delta P_{t,\max}^{cut}$ 为负荷削减量的上限； $P_{\omega,t}^{cut}$ 为参与需求响应后的用电量。

2) 可平移负荷

可平移负荷是指根据 MVPP 的负载情况，将某些用电需求从高负载时段调

整至低负载时段。

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta P_t^{sh,in} \leq \Delta P_{t,max}^{in} \\ 0 \leq \Delta P_t^{sh,out} \leq \Delta P_{t,max}^{out} \\ 0 \leq \mu_t^{in} + \mu_t^{out} \leq 1 \\ \sum_{t=1}^{24} P_t^{sh} = \sum_{t=1}^{24} P_t^{sh,0} \end{cases} \quad (4-13)$$

式中， $\Delta P_{t,max}^{in}$ 与 $\Delta P_{t,max}^{out}$ 为负荷的转入量与转出量的上限； P_t^{sh} 为可转移负荷响应后的用电量； $P_t^{sh,0}$ 为初始用电量； $\Delta P_t^{sh,in}$ 与 $\Delta P_t^{sh,out}$ 分别为转入的电量与转出的电量； μ_t^{in} 与 μ_t^{out} 均为布尔变量， μ_t^{in} 为 1 表示有负荷转入， μ_t^{out} 为 1 表示有负荷转出。

(4) 其他约束

$$\begin{cases} P_{GT,min}^n \leq P_{GT,t}^n \leq P_{GT,max}^n \\ 0 \leq P_{PW,t}^n \leq P_{PW,max}^n \\ 0 \leq P_{PV,t}^n \leq P_{PV,max}^n \\ 0 \leq P_{ess,n}^{ch}(t) \leq U_{ch}(t) P_{ess,n}^{max} \\ 0 \leq P_{ess,n}^{dis}(t) \leq U_{dis}(t) P_{ess,n}^{max} \\ S_t^{EV,min,n} \leq S_t^{EV,n} \leq S_t^{EV,max,n} \\ P_{AC,t}^{n,min} \leq P_{AC,t}^n \leq P_{AC,t}^{n,max} \end{cases} \quad (4-14)$$

式中， $P_{GT,min}^{s,n}$ 与 $P_{GT,max}^{s,n}$ 分别为 MVPP 中 GT 的最小与最大输出功率； $P_{PW,max}^n$ 与 $P_{PV,max}^n$ 表示 MVPP 中风光出力的上限； $U_{ch}(t)$ 表示在 t 时段 MVPP 中储能系统充电的状态变量； $U_{dis}(t)$ 表示在 t 时段 MVPP 中储能系统的放电状态变量， $U_{ch}(t)$ 与 $U_{dis}(t)$ 取值为 0 或 1； S_t^{EV} 表示为 EV 在 t 时刻的蓄电量； $S_t^{EV,min}$ 表示的是电动汽车在 t 时刻的最小的蓄电量值； $P_{AC,t}^{n,min}$ 与 $P_{AC,t}^{n,max}$ 分别表示 MVPP 中空调的最小与最大输出功率。

4.4 算例分析

4.4.1 参数设置

本文调度周期设置为 24 小时，优化时间尺度 $\Delta t = 1h$ ，通过构建由 4 个 VPP 组成的 MVPP 仿真实验验证上述模型的有效性。其中，MVPP 联合调度含有 4 个不同聚合单元的 VPP，如表 4-1 所示。

表 4-1 不同 VPP 的内部结构

VPP	风光机组	微型燃气轮机	储能	可削减负荷	可平移负荷
VPP ₁	√	√	√	√	√
VPP ₂	√	√	√	×	√
VPP ₃	√	√	√	√	×
VPP ₄	√	√	√	×	×

注：“√”表示聚合该类资源；“×”表示不聚合该类资源。

在 VPP₁ 中：聚合单元为风光机组、微型燃气轮机、储能系统、可削减负荷与可平移负荷；

在 VPP₂ 中：聚合单元为风光机组、微型燃气轮机、储能系统与可平移负荷；

在 VPP₃ 中：聚合单元为风光机组、微型燃气轮机、储能系统与可削减负荷；

在 VPP₄ 中：聚合单元为风光机组、微型燃气轮机与储能系统；

MVPP 中各设备参数与需求响应参数如表 4-2 与表 4-3 所示。

表 4-2 各设备参数

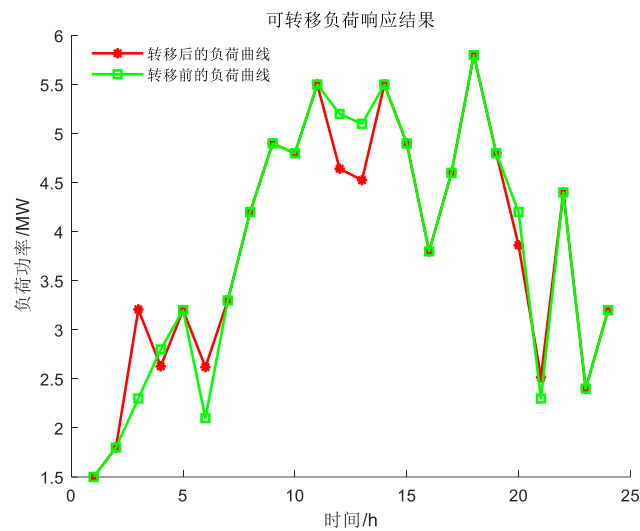
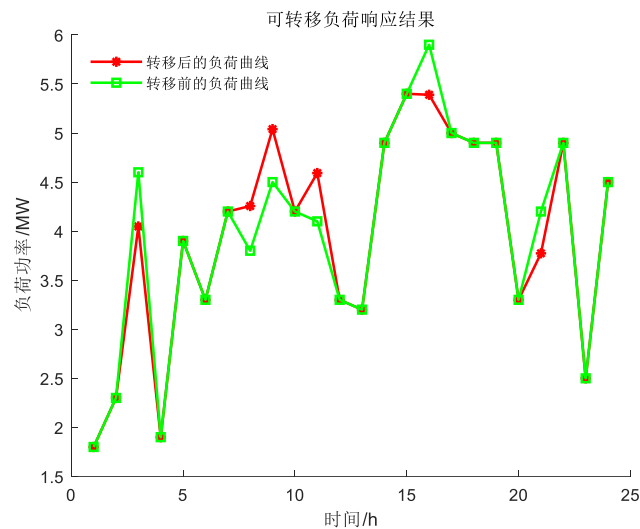
VPP	燃气轮机 出力上下 限/MW	EV 最大充放 电功率/MW	EV 充放电 效率	空调额定 功率/MW	储能系统充 放电效率	储能系统额 定容量/MW
VPP ₁	3/1	11.4	0.95	1	0.95	4
VPP ₂	1.4/1.2	11.4	0.95	/	0.95	4
VPP ₃	1.5/1.1	/	/	1	0.95	4
VPP ₄	3.3/1.3	/	/	/	0.95	4

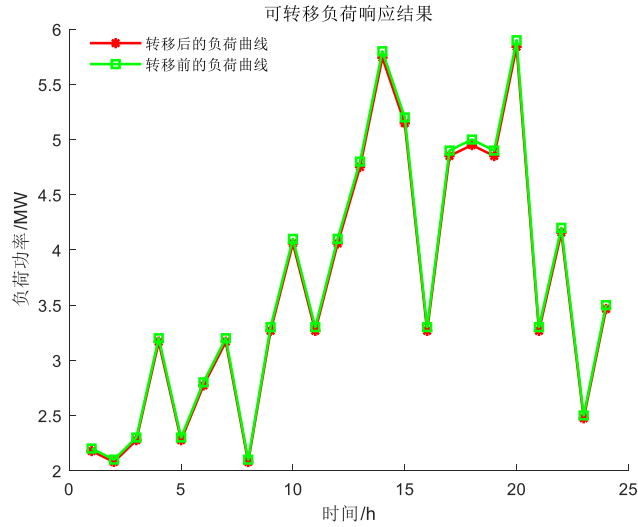
表 4-3 需求响应参数

负荷削减量上限/MW	负荷转入量上限/MW	负荷转出量上限/MW
0.5	0.12	0.12

4.4.2 结果分析

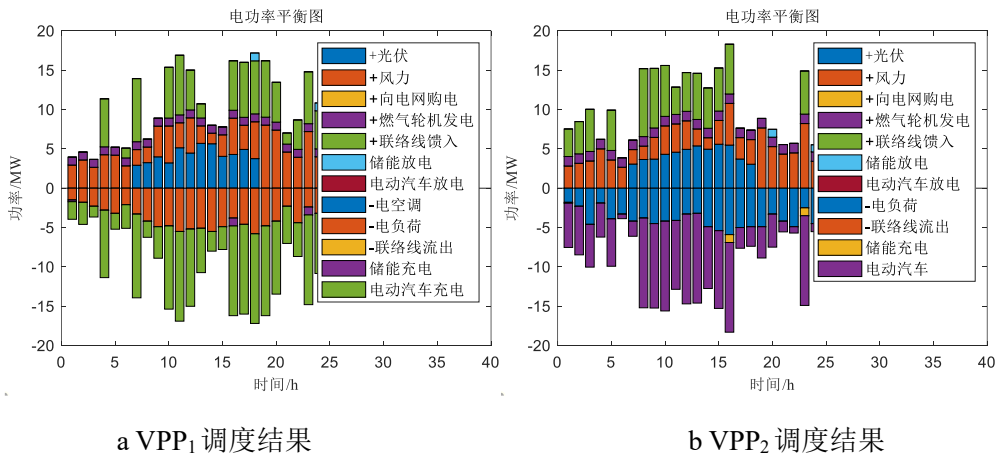
本章节选用 4 个 VPP 所组成的 MVPP 进行研究。其中 VPP₁-VPP₄所聚合的各类资源如上表 4-2 所示，下图 4-2 至图 4-4 为初始负荷与考虑需求响应后的结果图。

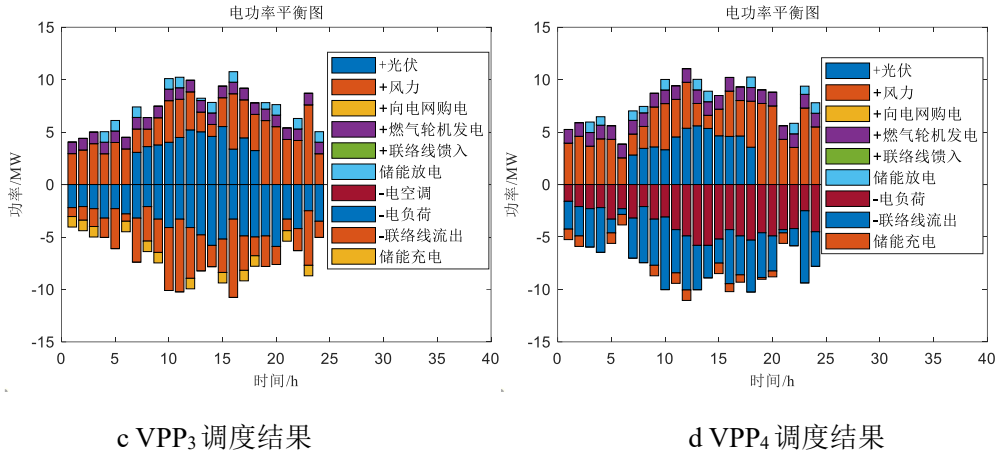
图 4-2 VPP₁ 初始负荷与需求响应图 4-3 VPP₂ 初始负荷与需求响应

图 4-4 VPP₃ 初始负荷与需求响应

由上图 4-2 至图 4-4 可以看出，在考虑需求响应的方式下，VPP₁ 将时段 11:00—14:00 与时段 19:00-20:00 的负荷削减并转移到了时段 02:00-07:00，VPP₂ 将时段 15:00-17:00 的负荷转移到时段 07:00-12:00，VPP₃ 将时段 17:00-19:00 的负荷进行削减。从总体上看，基于需求响应机制，MVPP 通过负荷转移，主要将电价高峰时段的用电负荷转移至电价低谷时段，只有少量负荷调整至平时段。当负荷转移量满足 TL 约束条件时，系统将呈现峰谷偏差系数趋于零的最优工况，响应量较大且响应效果较好。

在考虑需求响应的基础上，MVPP 内部的 DER、常规机组以及储能系统相互配合出力，满足运行需求。本章节设置调度步长时间为 1h，调度周期为 24h，MVPP 中各 VPP 的调度结果如图 4-5 中 a-d 所示。



图 4-5 VPP₁-VPP₄的调度结果

从图 4-5 中 a-d 可以看出：在 VPP₁ 中，VPP₁ 为少电 VPP。若内部资源未能满足电力需求，或者调度内部资源所需费用超出了从外部购电的成本，那么，将优先考虑从其他 VPP 购买电力来填补电力缺口。因此，VPP₁ 将在整个调度周期内作为购电方向多电 VPP 及电网购电。在时段 05:00、07:00—13:00、14:00—15:00 与 16:00—24:00 内，VPP₁ 向 VPP₃、VPP₄ 购电，由于 VPP 间直接交易的电价低于电网购电电价，因此，MVPP 应在优先满足内部其他 VPP 需求的前提下，再将剩余电量投入到电力市场当中，以最大化减少 VPP 的运行成本。

在 VPP₂ 中，VPP₂ 属于少电型 VPP。因此，VPP₂ 在整个调度周期内作为购电方，向多电 VPP 和电网购电。在时段 01:00-04:00、06:00、08:00、10:00-12:00、14:00-17:00、18:00 与 22:00 内，VPP₂ 向 VPP₃、VPP₄ 购电，以最大化减少 VPP 的运行成本。

在 VPP₃ 中，VPP₃ 属于多电 VPP。因此，VPP₃ 在整个调度周期内作为售电方，向电网及少电型 VPP 进行售电。在时段 01:00-03:00、05:00-19:00、21:00 与 23:00 内，VPP₃ 向 VPP₁、VPP₂ 售电，以最大化减少 VPP 的运行成本。

在 VPP₄ 中，VPP₄ 属于多电 VPP。因此，VPP₄ 将在整个调度周期内作为售电方，向多电 VPP 和电网购电，以最大化减少 VPP 的运行成本。

除此以外，储能系统在 DER 出力不足时段放电以满足负荷需求，实现源-荷双侧的动态平衡使 VPP 功率输出平滑，又能够更好的减小可再生能源并网时产生的不利影响，并且各 VPP 能源的充电功率与放电功率在整个调度周期内始终保持平衡。

由于 MVPP 的电量交互始终保持平衡，下图 4-6 为 MVPP 中各虚拟电厂的

交互电量结果图。

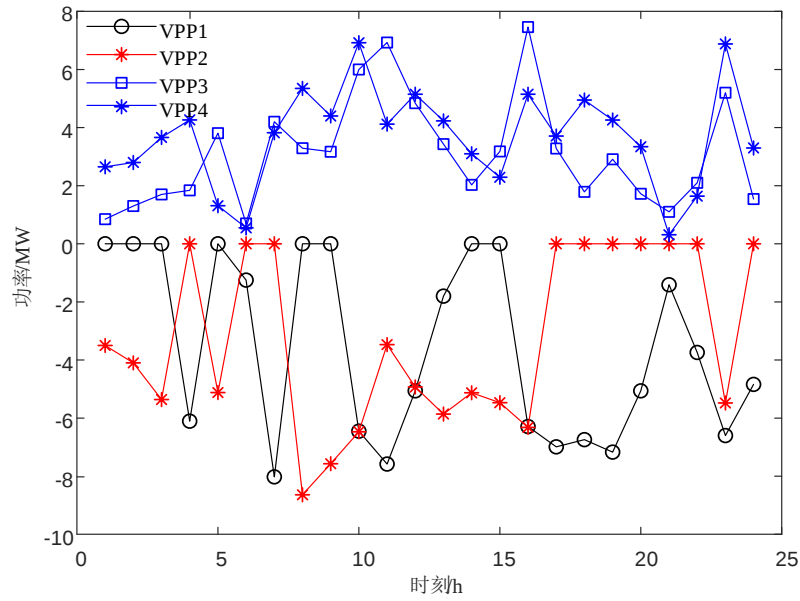


图 4-6 MVPP 交互电量

从图 4-6 可以看出：VPP₃-VPP₄ 的功率流入总量与 VPP₁-VPP₂ 的功率流出量保持平衡，即 MVPP 内的总功率保持平衡。

表 4-4 为考虑需求响应与不考虑需求响应下的 MVPP 的成本结果。

表 4-4 MVPP 的成本

需求响应	不考虑需求响应	考虑需求响应
成本/元	43442	29278

由表 4-4 可知，不考虑需求响应的 MVPP 的成本为 43442 元，考虑需求响应的 MVPP 的成本为 29278 元，有效的降低了 MVPP 的成本，这是由于将峰时段的大部分负荷削减或转移到了谷时段，少部分转移到了平时段或削减平时段的负荷，若峰时段的转出量与谷时段的转入量相等，则峰谷转移偏差系数为 0，响应量较大且响应效果较好。

由表 4-4 与表 3-2 的成本对比可知，MVPP 的总成本低于 VPP 独立运行的总成本，这是由于 MVPP 间的交易电价低于电力市场价格，因此，各 VPP 在电价激励下优先开展功率互补交易，从而减少与电网的电力交易量。在协调优化运行模式下，VPP 间交易收益相互抵消，仅保留与电网的购售电收益，因此，MVPP 总运行成本较独立优化模式更低。

4.5 本章小结

本章节针对 MVPP 内部各个 VPP 以及 MVPP 与电网之间功率互济进行研究。分布式能源、储能系统和柔性负荷的集成，为需求侧带来了灵活的调控能力，使 VPP 能够以产消者的身份参与到电能的共享与调配中，从而促进了 MVPP 的优化配置。在决策时刻以降低 MVPP 的运行成本为优化目标，构建了基于电能共享的 MVPP 分布式交易策略。算例结果表明，储能系统可以快速灵活的充放电能，在可再生能源发电过量时吸收电能，发电不足时放出电能，使其功率输出平滑，能够较好地减小可再生能源并网产生的不利影响，且各 VPP 能源的充电功率与放电功率始终保持平衡，有效的降低了各 VPP 的运行成本。

第 5 章 考虑社会福利最大化的虚拟电厂集群优化运行

5.1 引言

在能源结构低碳化转型与新型电力系统建设的双重驱动下，社会福利最大化已成为现代能源系统发展的核心命题。有助于实现能源系统高质量发展与社会整体福利提升的有机统一。社会福利最大化模型是指在当前的发电能力下，实现全社会效益的最大化。从个体的角度出发，其代表个人能够实现幸福感与满足感的最大化；从整个社会的角度出发，社会福利最大化代表某种资源在分配时所能达到一种最优的效率状态。本文构建的社会福利最大化模型是基于全社会视角，旨在最大化用户效用函数，并充分反映供需双方的利益。目前大量文献对 VPP 中的经济效益或环境效益进行了深入研究，但以社会福利最大化为目标进行 VPP 交易的研究较少。

5.2 虚拟电厂群中社会福利最大化策略

5.2.1 社会福利最大化预备知识

本章节主要研究内容是建立以社会福利最大化为目标的 MVPP 优化调度模型。电力消费用户通常可分为家庭、工业与商业用户。假定在某个国家或特定的区域内共有 N 个相同类型的电力用户，Mohsenian-Ra 以用户总效用与电能提供者成本的差最大化为目标建立如下的优化调度模型^[71-73]：

$$\begin{cases} \max \sum_{k=1}^K (\sum_{i=1}^N U_i(x_i^k, \omega_i^k) - C_k(G_k)) \\ \sum_{i \in N} x_i^k \leq G_k, k=1, 2, \dots, K, \\ x_i^k \geq 0, k=1, 2, \dots, K \end{cases} \quad (5-1)$$

式中， $i \in N = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示用户数；用电周期设为 24h，并划分为 K 个时段，其中每个时段至少为 15 分钟。因此， $k \in K = \{1, 2, \dots, K\}$ ； x_i^k 为第 i 个用户在第 k 个时段的用电量，范围为 $x_i^k \in [m_i^k, M_i^k]$ ，其中， $m_i^k \geq 0$ 为用户 i 在时刻 k 的最

小用电量； $M_i^k \geq 0$ 为用户 i 在时刻 k 的最大用电量。 $C_k(G_k)$ 为第 k 个时段生产 G_k 的成本。 $U_i(x_i^k, \omega_i^k)$ 为第 i 个用户消费电量 x_i^k 的效用。其中， ω_i^k 表示用户的弹性系数； $U(x, \omega)$ 代表用户的效用函数； $\omega > 0$ 为已知参数。

5.2.2 用电效用函数

用电效用能够反映用户在用电过程中所获得的满足程度以及行为表现，是有效配置电力系统资源并优化定价策略的关键因素。根据现有电力系统的资源配置及定价模型，本文使用二次函数作为用户的效用函数。该效用函数可描述为用户效用随用电量的增加而增长，边际效用随用电量的增加而减少。当用电量达到某一阈值后，效用达到饱和状态，此时用电量增加不会带来额外效用，即边际效用为零。

在微观经济学中，效用函数通常被用来刻画用户的满意程度。效用模型的输出值可映射出用户用电后的满意程度。其中，电力市场中各用户作为独立决策主体，其负荷需求可通过不同参数进行量化表征，且该需求特征与用户属性存在强关联性。其中，参数 ω 直接反映用户的用电喜好，在相同的条件下， ω 的取值越大，用户的最佳用电量越高。其中，效用函数的选取需要满足以下两个基本条件：

(1) 非递减函数，且 $U(0, \omega) = 0$ ；

(2) 边际效用递减， $\partial^2 U(x, \omega) / \partial x^2 \leq 0$ ，即效用函数为凹函数。通常选取二次函数。

$$U(x, \omega) = \begin{cases} \omega x - \frac{\alpha}{2} x^2 & 0 \leq x \leq \frac{\omega}{\alpha} \\ \frac{\omega^2}{2\alpha} & x \geq \frac{\omega}{\alpha} \end{cases} \quad (5-2)$$

式中， x 为用户的用电量，不同用户在不同的时间段彼此独立； α 为预先给定的参数， $\alpha \geq 0$ ；当 ω 越大，用户对用电量的偏好程度越大，给用户带来的效用越大；当 $x = \frac{\omega}{\alpha}$ ，代表用电量处于该点时，边际效用恰好为零，此时用户将不

再继续增加用电量。

或者选取对数函数进行表示：

$$U(x, \omega) = \beta \ln(\omega x + 1), \forall x \geq 0 \quad (5-3)$$

式中， $\alpha > 0$ 且 $\beta > 0$ 。

5.2.3 供电商的成本函数

由于 MVPP 集成了大量的灵活性资源而兼具生产者与消费者的双重身份，因此，MVPP 通常能够满足边际成本递增和边际效用递减的规律。MVPP 的状态如下图 5-1 所示。

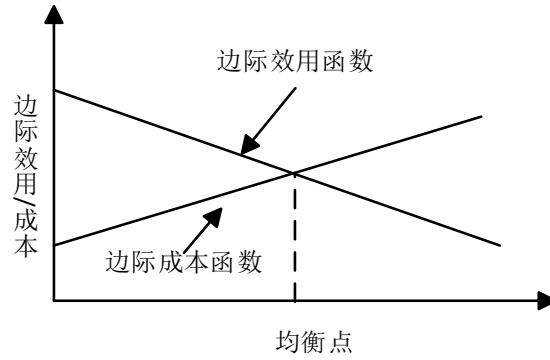


图 5-1 MVPP 状态

MVPP 在参与共享交易后，作为共享市场中的供给侧，可以通过减少自身负荷增加共享电量，向用户出售电能，用户可以从电能共享市场中获得收益。基于凸优化理论，供电商的电力生产成本函数为严格凸的二次函数：

$$C(G) = aG^2 + bG + c \quad (5-4)$$

式中， $G \in [G^{\min}, G^{\max}]$ ， $a > 0$ 、 $b > 0$ 及 $c > 0$ 为事先给定的参数。

5.3 虚拟电厂集群社会福利最大化模型

5.3.1 目标函数

考虑社会福利最大化的 MVPP 优化调度模型能够有效调动用户参与电力运行与管理的积极性。考虑社会福利最大化的 MVPP 优化调度模型能够在实现用户总体效用最大化的同时，确保 MVPP 供电成本的最小化。这意味着可以通过

整合 MVPP 的生产与消费计划，实现电力资源的优化调度。在 MVPP 电能共享的机制下，以社会福利最大化作为优化调度目标。

$$\max_{D_i, S_i, E_i} \sum_{i \in N} U_i \quad (5-5)$$

式中， i 表示为 VPP 的个数， $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ ； U 表示为 VPP 创造的社会福利； D_i 表示为第 i 个 VPP 的电力需求； S_i 表示为第 i 个 VPP 的发电量； E_i 表示为 MVPP 的共享电量。

5.3.2 约束条件

在 MVPP 的实际运行中，效用函数单调递增，在确保生产相同电量的条件下，随着用户用电量的增加，其效用和社会福利也会相应提升。因此，在时刻 k ，用户的总用电量和与 MVPP 的总生产电量保持一致。

(1) 电量平衡约束

由于 MVPP 的电量交互需要始终保持在平衡的状态，所以 MVPP 的电量平衡约束为：

$$\sum_{i \in N} E_i = 0 \quad (5-6)$$

式中， E_i 表示 MVPP 的共享电量。

(2) 其他约束

根据实际市场运营的要求设置相关运行约束条件，既有利于确保 MVPP 中发电侧具有充足激励、市场运营机构收支平衡，同时又能够进一步提高用户侧总收益，优化社会福利的分配方式，从而实现社会福利最大化的优化调度目标。约束条件为总用电量不超过总发电量，即在现有的发电能力下，合理用电以实现社会福利的最大化。并考虑了供电量与负荷量的上、下界，由上一节中 MVPP 的交互电功率所决定。电力需求由 MVPP 的发电量与共享电量共同决定。

$$\max_{D_i, S_i} (a_i D_i - 0.5 b_i D_i^2 - \alpha_i S_i - 0.5 \beta_i S_i^2 - \lambda_i E_i) \quad (5-7)$$

$$0 \leq D_i \leq D_{i, \max} \quad (5-8)$$

$$0 \leq S_i \leq S_{i, \max} \quad (5-9)$$

$$D_i = S_i + E_i \quad (5-10)$$

$$\forall i \in N \quad (5-11)$$

$$\lambda_i = a_i - b_i S_{i,\max} \quad (5-12)$$

$$\lambda_i = a_i + \beta_i D_{i,\max} \quad (5-13)$$

式中，式（5-7）的含义是追求社会福利最大化。以电力消耗量和生产量为决策变量，构建社会福利最大化模型，目的是实现 MVPP 用电和供电的最优化。 D_i 表示第 i 个 VPP 的电力需求； S_i 表示第 i 个 VPP 的发电量； a_i 、 b_i 分别表示为第 i 个 VPP 的消费偏好； α_i 、 β_i 分别表示为第 i 个 VPP 的生产系数； λ_i 表示为第 i 个 VPP 的边际价格，由 D_i 与 S_i 共同决定：当发电量不足时，产消者的运作方式由发电容量决定，此时运行点与边际价格可以通过上式（5-12）进行计算；当生产过剩时，产消者的运作方式由最大负荷量决定，此时运行点与边际价格可以通过上式（5-13）进行计算； $D_{i,\max}$ 表示第 i 个 VPP 的最大负荷量； $S_{i,\max}$ 表示第 i 个 VPP 的最大发电容量。

基于上文 MVPP 优化调度结果，本章节研究通过构建以社会福利最大化为目标的优化调度模型。将上一节中 MVPP 内电能交互功率的约束上限嵌入到上述的目标函数与约束条件求解框架中。

5.4 算例分析

5.4.1 参数设置

本章节将一天 24h 看作一个运行周期，分为 T 个时段，即 $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ ， $T = 24$ 。VPP₁ 的消费偏好 $a_1=0.64$ 、 $b_1=0.001$ ，生产系数 $\alpha_1=0.4$ 、 $\beta_1=0.0017$ ；VPP₂ 的消费偏好 $a_2=0.14$ 、 $b_2=0.0015$ ，生产系数 $\alpha_2=0.35$ 、 $\beta_2=0.0005$ ；VPP₃ 的消费偏好 $a_3=0.75$ 、 $b_3=0.0016$ ，生产系数 $\alpha_3=0.15$ 、 $\beta_3=0.0015$ ；VPP₄ 的消费偏好 $a_4=0.14$ 、 $b_4=0.0017$ ，生产系数 $\alpha_4=0.3$ 、 $\beta_4=0.0016$ 。各个 VPP 的 $D_{i,\max}$ 与

$S_{i,\max}$ 根据上一节 MVPP 中的交互电功率进行设置。

5.4.2 结果分析

下图 5-2 所示为各时段最大输出功率曲线，揭示了 MVPP 各时段交互功率的最大值在社会福利最大化目标协同优化调度下的动态边界特征，高峰负荷时期交互功率达到 13MW 的阈值；而在低谷时段，功率下限值调整至 1.3MW。下图 5-2 为 MVPP 中各个时段的交互功率阈值，即 $D_{i,\max}$ 。

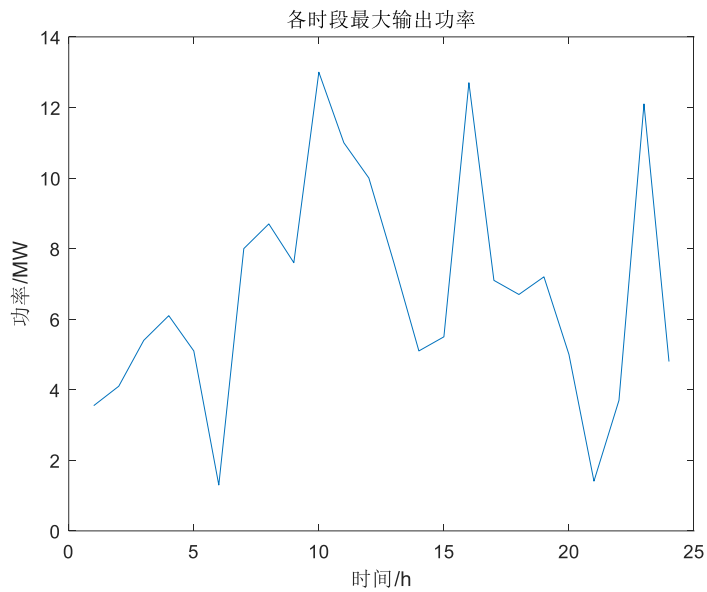


图 5-2 各时段最大输出总功率

如上图 5-2 所示，MVPP 在全天各时间段的功率输出最大值分布情况可以通过时序曲线完整呈现，具体展示了在一天中不同时间段内的系统出力峰值边界，即 $D_{i,\max} \leq 13$ 。基于上述公式构建的社会福利最大化的目标函数与约束条件，通过 MVPP 的协同优化调度模型推导得出：在同时兼顾经济性目标与约束条件下，MVPP 系统内部总发电量的出力区间被严格限定在 0-13MW。该功率限值既反映了分布式能源的多能耦合特性对各种 DER 出力灵活性的正向促进作用，也体现了 MVPP 安全运行边界对社会福利最大化优化目标的动态约束作用。进一步分析表明，13MW 的出力上限是系统在满足需求响应成本约束条件下得出的最优解。

由于电力能源具有易损性且难以存储的特点，电力市场的供电侧与需求侧

必须时刻保持在平衡的状态，以确保可以实现能源利用的最优化。为深入研究以社会福利最大化为目标的 MVPP 对总体收益的影响，本章节基于 4.2 节构建的多目标优化框架下 MVPP 运行结果，通过构建“社会福利约束-收益响应”评估模型展开对比研究。下图 5-3 至图 5-4 为 MVPP 的共享电量与社会福利的结果图。

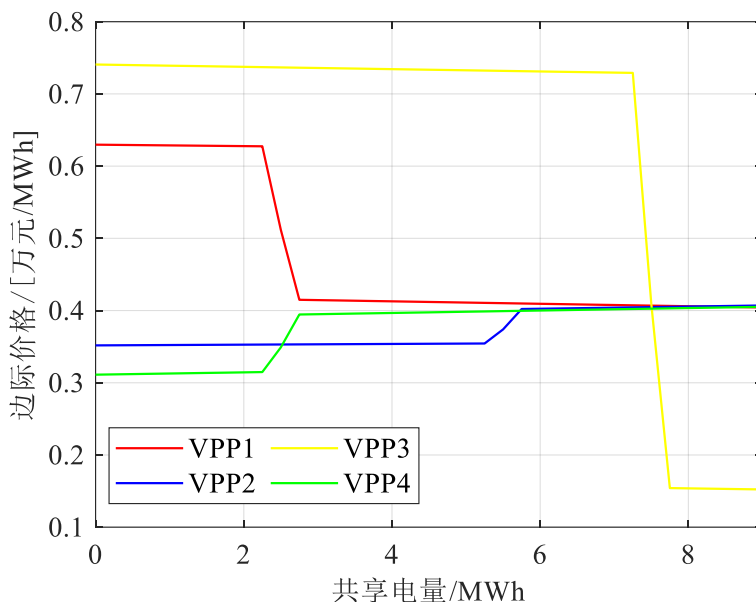


图 5-3 MVPP 共享电量

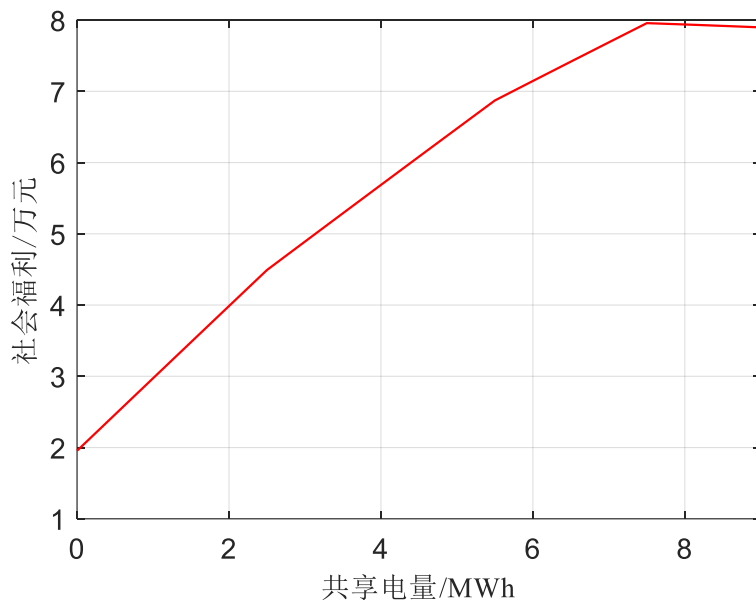


图 5-4 社会福利

从图 5-3 与图 5-4 可以看出处于不同共享电量下的社会福利和产消者边际价格。在共享电量位于 7.5MW 时，达到了 MVPP 的最优反应点，此时 MVPP 达成

价值认同，由此能够有效防止 MVPP 之间的无序竞争，进而促进 MVPP 的优化配置，最终实现 MVPP 电能共享市场的社会福利最大化。由图 5-4 可以看出：在 MVPP 达成价值认同时，社会福利达到最大 79950 元。

如下表 5-1 所示，本章节对以社会福利最大化为优化目标的 MVPP，与传统形式下仅以经济收益为导向的 VPP 的优化调度，进行了系统性的收益对比分析。

表 5-1 收益结果对比

场景	收益/元
未考虑社会福利的 VPP	62196
考虑社会福利的 MVPP	79950

由表 5-1 可知，不考虑社会福利的 VPP 收益为 62196 元，考虑社会福利的 MVPP 的社会收益为 79950 元，收益提升了 25.6%，有效的提高了 MVPP 的社会福利，这是由于 VPP 对电价的响应行为影响着总社会福利，在不考虑社会福利的 VPP 中，并未进行 MVPP 之间的功率交互，导致 VPP 间的缺额电量全部从电网购入，购电价格越高，VPP 的购电需求量越小，售电价格越高，将会导致社会总体福利减小，而在社会福利的 MVPP 中，MVPP 中各 VPP 的缺额电量可以从其他的多电 VPP 中购入，减少了直接从电网购入的电量，向社会的售电价格降低，社会总体福利提升。

5.5 本章小结

针对市场效益的提升以及 MVPP 成本降低的问题，本章节研究了一种在 MVPP 电能共享的机制下引入社会福利最大化的模型。首先，介绍了社会福利最大化的概念；然后将社会福利最大化引入到 MVPP 中；最后，利用 MATLAB 软件进行模型仿真，算例结果表明，考虑社会福利的虚拟电厂集群联合优化调度策略不仅能够降低虚拟电厂群的运行成本，还可以有效提高市场的收益。

第 6 章 总结与展望

6.1 全文总结

VPP 运用通信技术,将广泛分布于不同地域、涵盖诸多种类的 DER、储能系统以及多种可控负荷进行整合,实现 VPP 的协同优化调度,为 DER 大规模并网、融入电力市场交易及竞争提供了新的研究路径。因此,论文构建一种考虑风光出力不确定性以及需求响应的 VPP 柔性优化调度模型,以及研究了一种基于能量供需平衡的 MVPP 优化运行策略。MVPP 之间的能量交互可以通过该策略实现,有效地减少了各 VPP 之间的运行成本。论文主要的研究工作和取得的研究成果如下:

(1) 针对风光出力的不确定性,在随机抽样方法的选择上,运用蒙特卡罗模拟法对风电与光伏的出力场景进行模拟。在场景缩减方面,选用后向削减法进行风光场景的削减。并基于蒙特卡洛模拟进行了风光预测的算例分析,为后续 VPP 与 MVPP 的研究提供场景支撑。

(2) 针对 VPP 中分布式能源出力波动性问题,论文首先构建了 VPP 中风光机组联合互补出力模型;其次,由于分布式发电单元出力受多重不确定性影响,具有强随机性,通过研究多种灵活性能源之间的相互转化,并结合储能系统的特性,能够有效提升 VPP 的能源利用效率和调节灵活性;最后,利用 MATLAB 软件进行模型仿真,算例结果表明,所研究的方法可以有效降低 VPP 的运行成本。

(3) 设计了 MVPP 优化调度模型,以各成员 VPP 日运行总成本最小为优化目标,研究 MVPP 电能共享模式。构建了 MVPP 分布式交易模型,通过协调内部 VPP 间功率交换及 MVPP 与电网间输电计划,实现系统总运行成本最小化。最后,通过算例仿真实验验证了论文所研究的方法能够显著降低 MVPP 内部各 VPP 的日运行成本。

(4) 针对市场效益的提升以及 MVPP 成本的降低,论文研究了一种基于 MVPP 电能共享机制下引入社会福利最大化的优化调度模型。首先,介绍了社会福利最大化的概念;然后将社会福利最大化引入到 MVPP 中;最后,利用

MATLAB 软件进行模型仿真。算例结果表明，考虑社会福利的 MVPP 联合优化调度策略不仅降低了 MVPP 的运行成本，还有效提高了市场的收益。

综上所述，论文所研究的策略能够有效降低其运营成本，提高系统运行收益。

6.2 展望

论文主要研究内容为计及可再生能源出力不确定性的 VPP、MVPP 协调优化调度以及考虑社会福利最大化的 MVPP 优化调度研究。结果表明，论文的研究有利于促进分布式能源的就地消纳与并网消纳，并通过 MATLAB 仿真平台进行了仿真验证，但受限于个人的学术能力和研究时间，仍存在很多相关问题亟待进一步深入研究和探讨。主要包括以下 2 点：

（1）论文在构建 VPP 系统框架时，对于负荷的种类，仅划分可平移负荷与可削减负荷，参与 MVPP 内部的能量交互，而将负荷种类进行进一步的细化，MVPP 收益和能源利用率是否会进一步提升，优化结果是否会更为理想，值得继续展开研究。

（2）论文在研究 MVPP 运行优化策略时，仅考虑到了电能之间的传递关系，VPP 类型也受到限制，如果可以扩展更多能源的种类，使 VPP 参与到主网的调节中，丰富能源耦合传递关系，在主网的调节需求增大时，是否可以进一步提升 MVPP 的调节能力，值得展开进一步的研究。

参考文献

- [1] Xiong S ,Yingfu G ,Wenxian Y , et al. Life-cycle assessment of the environmental impact of the batteries used in pure electric passenger cars [J]. Energy Reports, 2021, 7 2302-2315.
- [2] Arutyunov V S, Lisichkin G V. Energy resources of the 21st century: problems and forecasts. Can renewable energy sources replace fossil fuels[J]. Russian Chemical Reviews, 2017, 86(8): 777.
- [3] Kalair A, Abas N, Saleem M S, et al. Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables[J]. Energy Storage, 2021, 3(1): e135.
- [4] Zhu, J., Li, S., Borghetti, A., Lan, J., Li, H., & Guo, T. (2023). Review of demand-side energy sharing and collective self-consumption schemes in future power systems. IEnergy, 2023,2(2), 119–132.
- [5] Yu C, Yang X, Xie D, et al. Review on reserve configuration for large-scale renewable energy integration[C]//2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). IEEE, 2020: 585-591.
- [6] Ma Q, Sun J, Du C, et al. Research on grid-planning methods for the integration of high-permeability renewable energy[C]//2021 IEEE Sustainable Power and energy conference (iSPEC). IEEE, 2021: 67-72.
- [7] Yu Y, Chen L, Wang J, et al. Implications of power industry marketization for sustainable generation portfolios in China[J]. Journal of cleaner production, 2022, 378: 134541.
- [8] 沈鑫,曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (S1): 346-351.
- [9] 陶琼,桑丙玉,叶季蕾,等. 高光伏渗透率配电网中分布式储能系统的优化配置方法 [J]. 高电压技术, 2016, 42 (07): 2158-2165.
- [10] 王育飞,蔡传高,薛花. 基于改进NSGA-II的社区电动汽车充电站优化充电策略 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37 (12): 109-115.
- [11] Khalil G ,Behnaz B ,Ali A , et al. Grid-forming virtual power plants: concepts,

- technologies and advantages [J]. *Energies*, 2022, 15 (23): 9049-9049.
- [12] 卫志农,余爽,孙国强,等. 虚拟电厂的概念与发展 [J]. *电力系统自动化*, 2013, 37 (13): 1-9.
- [13] Rouzbahani H M, Karimipour H, Lei L. A review on virtual power plant for energy management[J]. *Sustainable energy technologies and assessments*, 2021, 47: 101370.
- [14] 陈畅. 光储型虚拟电厂优化划分及协调调度[D]. 东南大学, 2023.
- [15] Ma K, Lin Z, Jiao R, et al. Flexible load virtual power plant operation strategy for peak shaving demand response[J]. *IEEE Access*, 2025 .3533579.
- [16] Gao Y, Gao L, Zhang P, et al. Two-stage optimization scheduling of virtual power plants considering a user-virtual power plant-equipment alliance game[J]. *Sustainability*, 2023, 15(18): 13960.
- [17] Naughton J, Riaz S, Cantoni M, et al. Comprehensive optimization-based techno-economic assessment of hybrid renewable electricity-hydrogen virtual power plants[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2022, 11(2): 553-566.
- [18] 刘东奇,钱奕衡,张曦. 含虚拟惯量的虚拟电厂 Nash-Q 强化学习调度策略 [J]. *太阳能学报*, 2024, 45 (11): 15-24.
- [19] 张扬,叶萌,史云鹏,等. 基于运行包络线的虚拟电厂日前-实时响应能力量化研究 [J]. *供用电*, 2024, 41 (12): 2-12+32.
- [20] 王文悦,刘海涛,季宇. 虚拟电厂可调空间统一建模及其参与调峰市场的优化运行策略 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46 (18): 74-82.
- [21] Hou L, Yi Z, Xu Y, et al. Robust economic dispatch approach for the multi-energy virtual power plant considering multiple uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2025 .3544151.
- [22] Kaiss M, Wan Y, Gebbran D, et al. Review on virtual power plants/virtual aggregators: Concepts, applications, prospects and operation strategies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 211: 115242.
- [23] Krstevska M C, Srbinoska M, Andova V, et al. Energy production forecast for the purpose of a technical virtual power plant[C]//*IET Conference Proceedings CP904*.

- Stevenage, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2024, 2024(29): 721-726.
- [24] Zhang S, Ye F, Xiao Q, et al. Research on business model of virtual power plant for new power system[C]//Proceeding of the 2024 International Conference on Diversified Education and Social Development (DESD 2024). Springer Nature, 2024: 196.
- [25] 刘浩文,刘东,陈张宇,等. 多级协同虚拟电厂环境下的无功辅助服务优化出清[J]. 电网技术, 2021, 45 (07): 2533-2541.
- [26] 张扬,牛振勇,陈皓勇,等. 分区聚合、分层调度的市场化虚拟电厂调控架构设计[J/OL]. 南方电网技术, 1-10[2025-03-05].
- [27] Song X, Wang S, Shan C. Study on coordination control methods of VPP[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 2005(1): 012229.
- [28] 吕一农. 基于虚拟电厂的储能电站设计研究[J]. 电工技术, 2024, (07): 8-12. DOI:10.19768/j.cnki.dgjs.2024.07.003.
- [29] Lazaroïu G C, Dumbrava V, Leva S, et al. Virtual power plant with energy storage optimized in an electricity market approach[C]//2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). IEEE, 2015: 333-338.
- [30] Li X, Zhao D, Guo B. Decentralized and collaborative scheduling approach for active distribution network with multiple virtual power plants[J]. Energies, 2018, 11(11): 3208.
- [31] Zhang Y, Chen Z, Ma K, et al. A decentralized iot architecture of distributed energy resources in virtual power plant[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 10(10): 9193-9205.
- [32] 王哲,杨鹏,刘思源,等. 考虑需求响应和多能互补的虚拟电厂协调优化策略[J]. 电力建设, 2017, 38 (09): 60-66.
- [33] 张宁,朱昊,杨凌霄,等. 考虑可再生能源消纳的多能互补虚拟电厂优化调度策略[J]. 发电技术, 2023, 44 (05): 625-633.
- [34] 陈继明,徐乾,李勇,等. 计及源荷不确定性和碳捕集虚拟电厂的电-气互联系统

- 优化调度 [J]. 太阳能学报, 2023, 44 (10): 9-18.
- [35] 魏春晖,单林森,胡大栋,等. 面向需求响应的园区虚拟电厂优化调度策略 [J/OL]. 中国电力, 1-10[2025-02-26].
- [36] Shi X ,Bai X ,Wang P , et al. Multi-time-scale rolling optimal scheduling of virtual power plants in energy and flexible ramping product markets [J]. Energies, 2023, 16 (19).
- [37] Pan L ,Zhang C ,Yan W , et al. Two-stage robust economic and carbon emission optimal scheduling of multi-energy virtual power plant[C]// 2024: 8.
- [38] Hou L, Yi Z, Xu Y, et al. Robust economic dispatch approach for the multi-energy virtual power plant considering multiple uncertainties[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025.
- [39] Chu T ,Wang T ,Li M , et al. Research on the collaborative management of internal and external fluctuations and optimization of power trading in multi-virtual power plants [J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 11
- [40] Wang, H., Jia, Y., Lai, C. S., & Li, K. Optimal virtual power plant operational regime under reserve uncertainty. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4), 2973–2985.
- [41] 包哲,李薇,张潇方,等. 计及“源荷”双侧多重不确定性的虚拟电厂运行优化研究 [J]. 动力工程学报, 2023, 43 (12): 1665-1674.
- [42] Fang, F., Yu, S., & Xin, X. Data-driven-based stochastic robust optimization for a virtual power plant with multiple uncertainties. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1), 456–466.
- [43] 王宇绅,陈皓勇,黄宇翔,等. 多重不确定性下的虚拟电厂参与电能量和需求响应市场鲁棒优化调度策略 [J]. 发电技术, 2024, 45 (06): 1173-1185.
- [44] Yang H, Tian X, Liu F, et al. A multi-objective dispatching model for a novel virtual power plant considering combined heat and power units, carbon recycling utilization, and flexible load response[J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 11: 1332474.
- [45] Kumar A P ,Kumar V J ,N.S. J , et al. Multi-objective price based flexible reserve scheduling of virtual power plant [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,

2024, 192 114218-.

- [46] 李军祥,陈鸣,邵馨平. 基于信息间隙决策理论的虚拟电厂低碳需求响应调度模型 [J/OL]. 中国管理科学, 1-13[2025-02-26].
- [47] 魏晓钢,李兆泽,张继红,等. 考虑多元柔性负荷的虚拟电厂分层优化调度 [J]. 电器与能效管理技术, 2024, (11): 73-81.
- [48] Cao W ,Yu J ,Xu M . Optimization scheduling of virtual power plants considering source-load coordinated operation and wind-solar uncertainty [J]. Processes, 2023, 12 (1).
- [49] 李翔宇,赵冬梅. 分散架构下多虚拟电厂分布式协同优化调度 [J]. 电工技术学报, 2023, 38 (07): 1852-1863.
- [50] 葛晓琳,曹旭丹,李侗玲. 多虚拟电厂日前随机博弈与实时变时间尺度优化方法 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43 (11): 150-157.
- [51] 宋嘉启,杨永标,徐青山,等. 多虚拟电厂参与日前电力市场的鲁棒竞标博弈方法 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43 (05): 77-85.
- [52] 高璐瑶,李华强,臧天磊,等. 配电网下多虚拟电厂间计及过网费的端对端电能交易方法 [J]. 电力建设, 2024, 45 (09): 164-177.
- [53] Ju L ,Lv S ,Li Y , et al. Two-stage scheduling optimization model and benefit allocation strategy for virtual power plant clusters aggregated by multidimensional information indicators [J]. Renewable Energy, 2025, 240 122245-122245.
- [54] 谢宏伟,严强,李扬,等. 市场模式下兼顾区域负荷特性的多虚拟电厂分布式协调优化 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43 (05): 199-209.
- [55] 栗然,王炳乾,彭湘泽,等. 基于主从博弈的多虚拟电厂动态定价与优化调度 [J]. 可再生能源, 2024, 42 (07): 986-994.
- [56] 陈梓楠,杨秀,卢炜. 基于温控负荷参与的多虚拟电厂联合调度研究 [J]. 上海电力大学学报, 2024, 40 (04): 300-308.
- [57] 周霜,章瑶易,戴玉艳. 包含电车的虚拟电厂热电联合优化调度 [J]. 自动化与仪器仪表, 2024, (11): 125-129.
- [58] 吴锦领,楼平,管敏渊,等. 基于非对称纳什谈判的多微网电能共享运行优化策略 [J]. 电网技术, 2022, 46 (07): 2711-2723.

- [59] 胡健,于娣,张晓杰. 电力 P2P 交易中计及社会福利的产消者合作联盟 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44 (03): 960-971.
- [60] 田廓. 不确定条件下输电投资经济学分析及决策规划方法研究[D]. 华北电力大学（北京）, 2011.
- [61] 马璘劼,徐正安. 江苏电网“填谷”需求响应的探索与实践 [J]. 电力需求侧管理, 2018, 20 (06): 50-52.
- [62] Aboelhassan, I., Almetwally, R, Cardenas- Barrera, J. L., & Chang, L. Review on virtual power plant for hierarchical control techniques. 2024 IEEE 12th International Conference on Smart Energy Grid Engineering, SEGE 2024, 115–122.
- [63] Teferi T G, Tella T G, Hampannavar S. Impact of large-scale renewable energy integration on the grid voltage stability[J]. Results in Engineering, 2024, 23: 102398.
- [64] Ozbak M, Ghazizadeh-Ahsaei M, Ahrari M, et al. Improving power output wind turbine in micro-grids assisted virtual wind speed prediction[J]. Sustainable Operations and Computers, 2024, 5: 119-130.
- [65] 张泽,贾燕冰,张国基,等. 考虑参与者贡献的虚拟电厂收益分配方法研究 [J/OL]. 现代电力, 1-13[2025-03-24].
- [66] 郭向伟,阿斯楞,张曼,等. 基于分布式 MPC 的微电网控制策略 [J]. 智慧电力, 2025, 53 (02): 41-48+64.
- [67] Wang Z, Wang S, Ni H, et al. A configuration and scheduling optimization method for integrated energy systems considering massive flexible load resources[J]. Frontiers in Energy Research, 13: 1556000.
- [68] Fan ,M. ,Vittal , et al. Probabilistic power flow studies for transmission systems with photovoltaic generation using cumulants [J]. IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society, 2012, 27 (4): 2251-2261.
- [69] Nagarajan K, Rajagopalan A, Bajaj M, et al. Enhanced wombat optimization algorithm for multi-objective optimal power flow in renewable energy and electric vehicle integrated systems[J]. Results in Engineering, 2025, 25: 103671.
- [70] Ye, Y., Zhu, S., Ouyang, B., & Ma, R. Research on generation and reduction of

typical operation scenarios in virtual power plants. 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference, CIEEC 2023, 2667–2671.

- [71] Samadi P ,Rad M H A ,Schober R , et al. Advanced demand side management for the future smart grid using mechanism design. [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2012, 3 (3): 1170-1180.
- [72] Rad M H A ,Wong S W V ,Jatskevich J , et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2010, 1 (3): 320-331.
- [73] Tan G . Solving the optimal real-time pricing of smart grid to maximize utility based on distributed and particle swarm algorithms [J]. Scientific Journal of Intelligent Systems Research, 2024, 6 (3).

攻读硕士期间取得的学术成果

发表的学术论文：

- [1] 以第一作者在安徽工程大学学报发表期刊论文一篇
- [2] 以第三作者在发电技术期刊发表一篇 CSCD 期刊论文
- [3] 以第四作者在四川轻化工大学学报发表期刊论文一篇

参与的基金项目：

- [1] 安徽省重点研究与开发计划项目（202004a05020014）
- [2] 安徽未来技术研究院企业合作项目（2023qyhz32）

致谢

光阴荏苒，岁月如梭，距离第一次迈入校园，已有二十余年。现如今读研的三年又转眼即逝，心中不由感慨万分。借此论文完成之际，向这一路走来所有支持我和帮助我的人致以最真挚的感谢！

首先我要感谢我的导师，刘世林教授。十分庆幸能够加入这个课题组，三年来，老师给予我无限的帮助，让我收获颇多。本课题能够顺利完成，离不开刘老师的悉心指导。三年来，刘老师不仅教会我如何做好科研，而且还教会了如何做人做事。刘老师在科研上的严谨态度和生活做事的态度，将使我受益终生。师恩之情，铭记于心。

感谢实验室的兄弟姐妹们，是他们的热情温暖着我，感谢他们在科研上给予我的帮助，大家互相探讨，互相学习，互相鼓励，一起度过美好的三年。

感谢我的父母及家人，他们是我坚强无比的后盾，他们给予我爱的港湾，是他们始终如一的支持让我能够安心的在学校学习，追随自己的梦想。面对父母满头的白发心中也无比惭愧，惭愧于养育我这么多年却无以回报，我铭记于心这二十多年的无私付出与包容。

感谢我的男朋友孙世豪同学，你既是朋友，又是伴侣，异地四年，虽千里之遥，心却相连。在人生的后半程中，让我们继续携手迎接美好的未来。

最后，由衷感谢评审专家在百忙之中对我的论文进行审阅！