

分类号：TM73

密 级：公开

学校代码：10363

学 号：2210320124



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 计及碳排放的虚拟电厂经济
优化调度研究

论 文 作 者 汪鹏程

指 导 教 师 葛愿 教授

学 科（专业） 控制科学与工程

研 究 方 向 系统工程理论与方法

论文提交日期： 2024 年 5 月 31 日

分类号: TM73

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210320124

题 目 计及碳排放的虚拟电厂经济
优化调度研究

题 目 RESEARCH ON ECONOMIC OPTIMIZATION
DISPATCHING OF VIRTUAL POWER PLANTS
CONSIDERING CARBON EMISSIONS

学 生 姓 名 : 汪鹏程

指 导 老 师 : 葛愿 教授

专业 (领域) : 控制科学与工程

研究方向 (领域) : 系统工程理论与方法

论文答辩日期 : 2024 年 5 月 19 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：汪鹏程

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：汪鹏程

指导教师签名：李飞

日期：2024年5月31日

日期：2024年5月31日

计及碳排放的虚拟电厂经济优化调度研究

摘要

“双碳”战略推动着可再生能源的发展，但大量无序并网会对电网的运行造成巨大冲击。虚拟电厂作为独特的分布式能源聚合与管理技术，使得其更好地参与到电网调度运营中，但由于可再生能源的随机性及成本缺乏竞争力等弊端，在实际调度中存在弃风弃光问题，阻碍了虚拟电厂充分发挥低碳减排的潜能。在此背景下，如何科学合理地优化碳市场运营机制或建立更为可靠的模型变得极为重要。为此，本文通过分析影响虚拟电厂低碳减排的因素，优化碳交换机制和建立新型碳排放模型分析验证，并搭建县域虚拟电厂调度系统在芜湖市繁昌区进行应用。具体内容如下：

(一)、基于分时阶梯式碳排放权交换机制的虚拟电厂低碳经济调度。针对弃风弃光和碳排放等问题，在功率平衡的前提下，考虑到风光消纳的同时必然会减少火力发电量，且在分时电价的影响下，不同时刻下可再生能源消纳电量与火电的比例不同，对应的度电碳排放也出现不同等现象，提出了分时阶梯式碳排放权交换机制，在此基础上构建了含“风-光-气-储”的低碳经济优化调度模型。模型以虚拟电厂日调度收益最大为目标函数，采用 CPLEX 优化求解，得到最优经济下的虚拟电厂调度策略，并与弃风弃光惩罚场景和阶梯碳交易场景进行对比。仿真结果验证了所提碳交换机制的有效性，能有效提升虚拟电厂的调度收益和对可再生能源消纳的积极性，并有效降低了碳排放。

(二)、基于新型碳排放模型的虚拟电厂经济优化调度。针对现有碳排放模型只考虑到电量单一因素，无法反映真实碳排放的问题，考虑到爬坡和环境因素均会改变燃烧效率，从而影响碳排放。通过皮尔逊系数对参数进行相关性分析，建立了含爬坡和环境因素的新型碳排放模型。采用均方根误差和决定系数对所建模型进行回归分析，选取最优的碳排放模型，并验证其有效性。以上述模型为基础，虚拟电厂日调度收益最大为目标函数，构建了含“风-光-气-储”的经济优化调度模型。针对所建模型具有高维非线性、强约束性和求解运算难度大等问题，采用乌鸦正余弦搜索算法进行求解，通过仿真验证所提碳排放模型和求解策略的有效性，能有效提升虚拟电厂的调度收益和可再生能源的消纳比例。

(三)、县域虚拟电厂调度系统。县域虚拟电厂调度系统依托于高可用、高性能以及高度可扩展的 Web 服务架构，采用并行处理与列式存储技术构建的数据仓库，旨在实现对海量业务数据进行高效整合、实时更新与深度挖掘；采用 Netty 高性能异步事件驱动的网络通信框架，旨在实现对分布式能源产生的庞大数据流进行实时、高效和低延迟的采集与精细化处理；同时，通过深度整合和定制化 Netty 的通讯机制，有效赋能设备间的数据交互和智能调度；通过集成规约引擎技术，实现了对不同设备协议的无缝适配与接入兼容。核心应用涵盖数据分析预测、储能规划与优化调度等多个维度。系统已成功在芜湖繁昌区试点运营，有效管理 84 个屋顶分布式光伏和 13 个变电站。

关键词：虚拟电厂，经济调度，低碳调度，碳兑换，碳排放模型，调度系统

RESEARCH ON ECONOMIC OPTIMIZATION DISPATCHING OF VIRTUAL POWER PLANTS CONSIDERING CARBON EMISSIONS

ABSTRACT

The "dual carbon" strategy promotes the development of renewable energy, but a large amount of unorganized grid connection can significantly impact grid operations. As a unique distributed energy aggregation and management technology, virtual power plants (VPP) enable better participation in grid dispatching operations. However, due to the randomness of renewable energy and lack of cost competitiveness, there are issues of wind and solar curtailment in actual dispatching, hindering the full potential of virtual power plants in low-carbon emission reduction. In this context, scientifically and reasonably optimizing the carbon market operation mechanism or establishing more reliable models becomes extremely important. Therefore, this paper analyzes the factors affecting the low-carbon emission reduction of VPP, optimizes the carbon exchange mechanism, and establishes the new carbon emission model for analysis and verification. Additionally, a county-level virtual power plant dispatching system was implemented in the Fanchang District of Wuhu City. The details are as follows:

- (1) Low-carbon economic dispatching of virtual power plants based

on time-of-use ladder carbon emission rights exchange mechanism. Addressing issues such as wind and solar curtailment and carbon emissions, under the premise of power balance, the consumption of wind and solar inevitably reduces thermal power generation. Considering the impact of time-of-use electricity prices, the proportion of renewable energy absorbed at different times varies, as does the corresponding carbon emission per unit of electricity. The time-of-use ladder carbon emission rights exchange mechanism is proposed. Based on this, a low-carbon economic optimization dispatch model including "wind-solar-gas-storage" is constructed. The model aims to maximize the daily dispatch revenue of the VPP, using CPLEX for optimization, resulting in the optimal economic dispatch strategy for the VPP. Comparisons are made with the scenarios of wind and solar curtailment penalties and ladder carbon trading. Simulation results validate the effectiveness of the proposed carbon exchange mechanism, demonstrating an improvement in the dispatch revenue of the VPP and increased enthusiasm for renewable energy absorption, effectively reducing carbon emissions.

(2) Economic dispatching of virtual power plants based on the new carbon emission model. Addressing the issue that existing carbon emission models only consider the single factor of electricity, which cannot reflect real carbon emissions, the model takes into account that climbing and environmental factors can alter combustion efficiency, thus affecting

carbon emissions. Correlation analysis of parameters is conducted using the Pearson coefficient, and a new carbon emission model including climbing and environmental factors is established. Regression analysis of the established model is performed using root mean square error and coefficient of determination, selecting the optimal carbon emission model and verifying its effectiveness. Based on the above model, an economic optimization dispatch model including "wind-solar-gas-storage" is constructed, aiming to maximize the daily dispatch revenue of the VPP. Addressing the issues of high-dimensional nonlinearity, strong constraints, and computational complexity in the established model, the Crow Search Algorithm is used for solving. Simulations verify the effectiveness of the proposed carbon emission model and solving strategy, demonstrating an improvement in the dispatch revenue of the VPP and the consumption ratio of renewable energy.

(3) County-level virtual power plant dispatching system. The county-level virtual power plant dispatching system relies on a highly available, high-performance, and highly scalable Web service architecture. It uses parallel processing and columnar storage technologies to build the data warehouse, aiming to efficiently integrate, update in real-time, and deeply mine massive business data. The system employs Netty, a high-performance asynchronous event-driven network communication framework, to achieve real-time, efficient, and low-latency collection and

fine-grained processing of the massive data streams generated by distributed energy. Additionally, by deeply integrating and customizing Netty's communication mechanism, it effectively empowers data interaction and intelligent dispatch between devices. By integrating protocol engine technology, seamless adaptation and access compatibility with different device protocols are achieved. Core applications cover multiple dimensions such as data analysis and forecasting, energy storage planning, and optimized dispatching. The system has been successfully piloted in Fanchang District, Wuhu City, effectively managing 84 rooftop distributed photovoltaic units and 13 substations.

Pengcheng Wang (Control Science and Engineering)

Supervised by Prof. Yuan Ge

KEY WORDS: virtual power plants, economic dispatching, low-carbon dispatching, carbon exchange, carbon emission model, dispatching system

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 虚拟电厂研究现状.....	3
1.2.2 虚拟电厂经济优化调度研究现状.....	5
1.2.3 虚拟电厂低碳优化调度研究现状.....	6
1.3 本文的创新点.....	7
1.4 本文的章节安排.....	9
第 2 章 基于分时阶梯式碳排放权交换机制的虚拟电厂经济优化调度研究.....	12
2.1 分时阶梯式碳排放权交换机制.....	12
2.2 虚拟电厂经济优化调度模型.....	15
2.2.1 目标函数.....	15
2.2.2 约束条件.....	16
2.2.3 求解策略.....	18
2.3 算例分析.....	18
2.3.1 场景设定.....	18
2.3.2 结果分析.....	19
2.4 本章小结.....	26
第 3 章 基于新型碳排放模型的虚拟电厂经济优化调度研究.....	28
3.1 燃气轮机新型碳排放建模与验证.....	28
3.1.1 燃气轮机碳排放的影响因素.....	28
3.1.2 相关性分析及建模.....	29
3.1.3 回归分析.....	30

3.2 基于新型碳排放模型的 VPP 经济优化调度模型	32
3.2.1 目标函数.....	32
3.2.2 约束条件.....	33
3.3 乌鸦正余弦搜索算法.....	34
3.3.1 乌鸦搜索算法.....	34
3.3.2 乌鸦正余弦搜索算法.....	35
3.4 算例分析.....	36
3.4.1 场景设定.....	36
3.4.2 结果分析.....	37
3.5 本章小结.....	40
第 4 章 县域虚拟电厂调度系统.....	41
4.1 系统架构与功能.....	41
4.1.1 数据仓库.....	42
4.1.2 物联通信.....	45
4.1.3 规约引擎.....	46
4.1.4 储能控制.....	48
4.2 系统核心应用.....	49
4.2.1 数据分析与预测.....	50
4.2.2 储能规划.....	51
4.2.3 优化调度.....	52
4.3 本章小结.....	53
第 5 章 总结与展望.....	55
5.1 总结.....	55
5.2 展望.....	56
参考文献.....	58
攻读硕士学位期间成果.....	64
致谢.....	65

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

随着我国经济发展对能源需求的日益提高,面临的环境污染、化石能源日渐枯竭以及气候变化等问题日趋严重^[1-3],对此,习总书记于 2020 年 9 月 22 日在第七十五届联合国大会上宣布,中国力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和目标^[4],“双碳”应运而生^[5]。能源燃烧是我国主要的二氧化碳排放源,占全部二氧化碳排放的 88%左右,而电力行业作为能源消耗的主体,其碳排放量约占能源行业排放的 41%^[6],推动电力行业绿色转型是实现“双碳”目标的重中之重,充分利用分布式可再生能源(Distributed Renewable Energy, DRE)和提高能源使用效率等方法成为最佳解决方案。

以风能和太阳能为主的 DREs 因资源丰富、可持续利用、环境影响极小、分布广泛和不受地域限制等优势得到广泛关注,“欧盟能源路线图”中指出,预计到 2050 年, DREs 将满足全球 50%以上的能源需求^[7],提升 DREs 的占比已经成为广泛共识。国际可再生能源署于 2023 年 3 月 21 日发布的《2023 年可再生能源装机容量统计报告》^[8]显示,截至 2022 年底,全球已安装的电力产能中, DREs 占比达到 40%,且仍在持续增长。中国 DREs 总装机容量达到了 1160.8GW, 占据全球 34.43%的比例, 占据亚洲 71.2%的比例, 位居世界容量榜第一。2022 年间,中国 DREs 装机容量实现了 140.57GW 的新增, 位居世界新增榜第一。在 2022 年,全球新增的可再生能源发电容量创历史新高,其中风能和太阳能贡献巨大,在 2022 年,全球太阳能新增装机容量达到创纪录的 191.58GW, 约占当年全球总可再生能源新增量的三分之二,全球风能新增 74.65GW 的装机容量。

但由储能(Energy Storage, ES)、DREs 和可控负荷组成的分布式能源(Distributed Energy Resources, DER)具有位置分散、随机性强、难于管理等特点,大量无序并网会对电网的运行造成巨大冲击^[9]。虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)作为一种独特的 DERs 聚合与管理技术^[10],通过先进的通信技术,将 DERs

进行集中调度,不仅能够降低其出力波动性对电网造成的冲击,同时能够降低调度难度,使 DERs 更好地参与到电网调度运营中。

由于 DREs 出力的随机性及成本缺乏竞争力等弊端,在实际调度中存在弃风弃光现象,阻碍了 VPP 充分发挥低碳减排的潜能。全国新能源消纳监测预警中心发布的《2022 年一季度全国新能源电力消纳评估分析》中指出:一季度全国弃风电量约 60 亿千瓦时,弃光电量约 24 亿千瓦时^[11]。若能充分利用,必能加速实现我国“双碳”目标。《电力发展“十三五”规划》指出,DREs 消纳已成为现在的主要任务,而能源间多能互补是提高 DREs 消纳的重要手段^[12]。《“十四五”现代能源体系规划》进一步提出开展工业可调节负荷、楼宇空调负荷、大数据中心负荷、用户侧储能、新能源汽车与电网能量互动等各类资源聚合的虚拟电厂示范^[13]。

在全球能源转型和智能电网发展的大背景下,发展 VPP 对促进电网供需平衡、实现 DREs 低成本并网、充分消纳清洁能源发电量、推动绿色能源转型具有重要的现实意义^[14]。VPP 作为新型市场主体可以通过参与电力市场交易来推动电力市场机制创新,提高电力资源优化配置效率,促进清洁能源消纳,助力低碳经济转型及可持续发展目标的实现,对于现代电力系统的转型升级具有战略意义,是解决当前电力系统面临的新挑战、推进能源结构优化、保障电力供应安全以及实现“双碳”目标的重要途径。

1.1.2 研究意义

(1) 碳交易机制的研究意义

碳交易机制作为应对全球气候变化和实现低碳经济转型的关键政策工具,其研究意义体现在多个维度。首先,通过建立市场化的碳排放权交易体系,可以有效刺激技术创新与能源结构调整,推动高能耗行业向低碳、高效方向发展,从而达到节能减排的目的。其次,碳交易机制能够在全球范围内形成一个对温室气体排放进行定价的市场化机制,使得污染成本内在化,激励各方参与者在经济效益和环保责任之间寻找平衡点。此外,研究碳交易机制有助于国家和地区的政策制定者优化资源配置,促进环境治理从行政手段向市场手段转变,提高环境保护工作的效率和可持续性。最后,鉴于碳交易对电力系统的深远影响,深入探究该机

制也有助于催生电力系统的革新，为绿色经济发展注入动力，并在全球气候治理合作中发挥重要作用。

(2) 虚拟电厂的研究意义

虚拟电厂的研究意义在于其对现代电力系统智能化、灵活化和低碳化转型的重要推动作用。在当前全球能源结构深度调整的背景下，虚拟电厂通过先进的信息技术与调控手段将分布式能源如风能、太阳能、储能设备以及可控负荷等进行有效整合与协同优化管理，实现了从单一发电单元到综合能源系统的跨越。这一研究有助于解决可再生能源出力波动性大、电网消纳能力有限的问题，增强电力系统的运行稳定性和电能质量，同时也能通过参与电力市场交易和提供辅助服务提高整体资源配置效率，并为电力系统适应大规模可再生能源并网创造有利条件。此外，虚拟电厂技术的发展对于促进节能减排、实现国家“碳达峰”和“碳中和”目标具有直接且深远的意义。

(3) 虚拟电厂经济优化调度的研究意义

虚拟电厂经济优化调度的研究意义在于实现电力系统资源的高效利用、成本节约和市场竞争力提升。随着分布式能源的大规模应用，以及电力市场机制的不断深化，如何在满足电能质量、供电可靠性和电网安全约束的前提下，通过智能调度技术对虚拟电厂内部各类能源资源进行综合优化配置，以最大化经济效益，成为当前研究的重要方向。通过对虚拟电厂实施精细化的经济优化调度，可以有效应对新能源出力波动性大、供需不匹配等问题，降低运行成本，提高整体运营效率，并为参与电力市场交易提供灵活策略支持。此外，这一研究对于推动能源结构绿色转型、促进电力行业可持续发展、响应国家节能减排及助力“双碳”目标的实现具有显著的战略价值和社会效益。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 虚拟电厂研究现状

VPP 的概念起源于 1997 年 Awerbuch S 等学者提出的虚拟公用事业框架^[15]，它被定义为公共事业单位之间的一种灵活协作模式，通过虚拟分享各自私有资产的方式，使得每个参与者能够为客户提供高效优质的电力服务，这不仅提升了个

体资产的利用率,而且避免了重复建设带来的浪费。在拓宽虚拟公用事业原始定义的基础上,VPP理念着重于DERs的虚拟聚合,通过在DERs之间建立信息连接,并协调制定其发电计划,从而改变了传统电力系统的拓扑结构。通过这种方式,VPP实现了对各类DERs的有效管理和优化配置,以促进整个电力系统的灵活性与可靠性。尽管自VPP首次提出至今已有几十年的时间,但对于VPP的公认定义仍未达成统一。Asmus P学者^[16]将VPP定义为一种依赖于远程控制的自动分配储能和需求响应的能源互联网,通过利用现有的电网网络,为客户提供定制化的电力供需服务,最大化终端用户和配电公司的利益;Lombardi P等学者^[17]将VPP定义为先进的能源管理系统,它通过集成信息和通信技术,对DERs集中控制与优化调度,使其如同单一大型发电厂般协同运行,实现对电力供需的灵活调节和高效利用;Zhou K等学者^[18]将VPP定义为依赖于远程控制和中央优化技术的能源互联网集线器,通过VPP的理念,分布式能源都可以被视为可控的聚合单元,以便在批发市场签订合同并向系统运营商提供服务;Khodr H M学者^[19]将VPP定义为微电网中的分布式能源管理系统,它通过实时监控将不同技术、不同地理位置的分布式能源整合,实现优化调度;Bignucolo F等学者^[20]将VPP定义为分散在中压配电网和热力网不同节点的DERs的集合,其运行特性是DERs特征的整合,且各网对DERs影响的叠加可等效为各网对此VPP的影响;Zamani A等学者^[21]将VPP的概念仅限于相同类型的能源之间的松散联盟,VPP为聚合一些分散的DERs的集合,为在热电联产系统中协调运营,参与能源和储备市场;Mashhour E等学者^[22]基于欧盟FENIX项目,将VPP概念化为一种整合机制,它集中管理和协调多种规模不一的DERs,全面体现了这些资源的多元特性和互动效应。VPP不仅涵盖了DERs对电力网络的动态影响,而且具备在电力市场框架内缔结交易协议的能力,并且能够向系统运营商提供一系列多样化的电力服务,从而扮演着重要的系统参与者角色;姜海洋等学者^[23]提出了将VPP作为一种需求响应的实施手段,通过调动用户积极参与需求侧管理活动,有效调整终端用电负荷,进而模拟并实现类似于传统实体发电厂对电力供需平衡的调节作用;刘东等学者^[24]主张VPP不宜局限于定义为一种分布式资源的集合体,而是利用先进的监控技术把分散在四处、与不同层级的电网相连的DERs和热电联产系统等设备集合起来,通过能量管理系统的协调优化控制完成市场运营,在实现

电能交易的同时优化资源利用、提高供电可靠性的一种综合体。

1.2.2 虚拟电厂经济优化调度研究现状

VPP 经济优化调度是现代电力系统中一种先进而复杂的决策过程，它基于先进的信息技术和优化理论，致力于实现 VPP 内多样化、分散的 DERs 的最优化配置与协同控制。在非管制电力市场环境下，此类调度策略既要充分考虑电力市场价格信号、市场规则以及相关政策法规的影响，又要严格遵循物理与经济双重约束。VPP 经济优化调度指在预定的时间尺度上（包括日前、日内乃至实时调度层次），在实现电力系统整体经济效率提升的同时，助力可持续能源体系的建设和运行。目前国内外已有大量学者对其进行了深入的研究，周亦洲等学者^[25]建立了多区域分布式冷热电联供型 VPP 的优化调度模型，旨在实现不同区域间的冷热电交互及区域内的冷、热、电互补的同时，降低 VPP 调度成本；袁桂丽等学者^[26]以各时段内收益最大为目标函数，构建了基于分时电价的 VPP 经济性优化调度模型，以期分析可控 DERs 出力系数和不可控 DERs 预测误差对 VPP 调度收益的影响；Xie J 等学者^[27]综合考虑了分布式发电机存在的阈值负荷效应、禁止运行区以及多燃料选择等特点，建立了 VPP 经济优化调度模型，由于模型的非凸特性，采用了分布式随机无梯度算法对其进行求解，以期提升 VPP 调度收益；Lin L 等学者^[28]提出了一种针对 VPP 最优在线经济调度策略的深度强化学习算法，同时考虑到分布式发电的随机特性导致的大规模连续状态空间，设计了边缘计算框架，降低了计算复杂性，旨在学习 DERs 的特性和工业用户需求，实现最优化 VPP 的调度成本；Zheng Y 等学者^[29]提出了 VPP 分布式两阶段经济调度策略，日前阶段进行分布式经济优化调度，实时阶段进行分布式 VPP 调度曲线跟踪，并采用改进的精确扩散算法进行求解，以期平抑风光的波动性，并增强系统对于局部通信故障的鲁棒性；陆敏安等学者^[30]提出了不同备用付费机制下 VPP 参与能量-旋转备用市场的经济优化调度模型，通过对能量市场和旋转备用市场的电价预测，对 DERs 进行优化调度，旨在最大化 VPP 的经济效益；孙国强等学者^[31]提出了基于非合作博弈的 VPP 优化调度模型，将风、光和电价的不确定性纳入考量，以期最大化 VPP 经济效益的同时，保证配电网的安全性；Gao Z 等学者^[32]提出了将 VPP 经济调度问题表述为一个部分可观测马尔科夫决策过

程问题，并根据 VPP 的时间序列特性提出了一种基于门控循环单元近端策略优化的 VPP 最优经济调度方法，旨在降低 VPP 调度成本和平抑供需不确定性；Liu W 等学者^[33]提出了一种基于潜在博弈理论的 VPP 最优调度策略，通过利用潜在博弈的有限改进特性来平衡全局收入和个人收入，并采用纳什均衡的收敛性来协调和优化多个 VPP 之间的电力调度，以期在多主体收入均衡的条件下获得更高的经济效益，提高能源利用率；袁桂丽等学者^[34]提出了含热电解耦的 VPP 运行模式，并建立了经济优化调度模型，并采用自适应免疫遗传算法进行求解，实现了虚拟电厂内部热电负荷的优化调度，旨在减少出力偏差与环保代价，提高经济效益。

1.2.3 虚拟电厂低碳优化调度研究现状

在全球可持续发展观念与环境保护意识不断深化的时代背景下，以往仅依赖于能源资源的高效配置以实现成本最小化或经济效益最大化的传统调度模式已无法完全契合日渐强烈的生态诉求。因此，VPP 的优化调度范式正经历着一场深刻的变革，逐步从经济效益导向转向涵盖低碳在内的多重目标优化，其中，关键举措是提升 DREs 的消纳比例。目前国内外已有大量学者对其进行了深入的研究，主要分为三个方面：

一是通过引入弃风弃光惩罚、弃风弃光约束或碳排放惩罚等方式来提升 VPP 对 DREs 的消纳能力：张高等学者^[35]构建了主网和 VPP 的双层优化调度模型，通过引入弃风惩罚提升 VPP 对风电的消纳能力；艾欣等学者^[36]提出了长时间尺度下含风电的 VPP 用户侧分时电价定价方法，用基于价格的需求响应方式来提升风电的消纳比例；赵洪山等学者^[37]构建了含“风-光-气-储”的 VPP 的优化调度模型，通过引入弃风弃光惩罚来促进 VPP 对风光的消纳；董文略等学者^[38]构建了含“风-光-水”的 VPP 与配电公司利益分配模型，通过弃风弃光约束来促进 VPP 对风光的消纳；Jie Y 等学者^[39]构建了含“火-光-风-水-储”的 VPP 优化调度模型，通过将碳排放成本纳入目标函数来促进 VPP 对风光的消纳；

二是通过多能互补来促进 DREs 的消纳，Guo W 等学者^[40]构建了以热电联产、风机、光伏、P2G 设备、碳捕集装置和储气装置构成的 VPP，以热电联产的形式来实现多能互补，减少碳排放的同时实现对风光的充分消纳；Cao Z 等学者

^[41]将电转气、碳捕获以及电动汽车相结合，构建了一套一体化电力-燃气协同系统结构，以系统总运行成本和碳排放最小为目标函数，同时考虑了碳处理成本和弃风惩罚，旨在最小化调度成本的同时提高风电的消纳比例；Zhao H 等学者^[42]提出了一种考虑源荷协调和综合需求响应的多能源 VPP 低碳经济优化调度模型，通过结合有机朗肯循环余热发电和综合能源需求响应的特点，以解耦热电联产机组的“热基电”约束，旨在提高风光的消纳比例和 VPP 的碳捕获水平，兼顾了系统的经济性和低碳性；Tan Y 等学者^[43]提出了一种考虑碳捕获和电改气的热电联产 VPP 调度框架，将随机动态优化问题建模为马尔可夫决策过程，并采用改进的基于深度强化学习的多级回溯优先体验重放双延迟深度确定性策略梯度算法进行求解，旨在提升 VPP 调度收益的同时，提高风光的消纳比例，从而降低了碳排放；

三是通过结合碳交易市场约束碳排放；陈登勇等学者^[44]提出了一种基于阶梯碳交易机制的 VPP 优化调度策略，通过建立阶梯碳交易模型对碳排放进行约束，旨在提升风电的消纳比例，以期 VPP 的低碳调度；苏志鹏等学者^[45]提出了一种考虑阶梯碳交易及综合需求响应的 VPP 低碳优化调度模型，通过将需求响应分为价格型和替代型，分别建立响应模型，旨在提高 VPP 调度收益的同时，提高风光的消纳比例；Xie T 等学者^[46]提出采用“储氢-电锅炉”解耦方法来解决热电联产调峰能力受限和高碳排放的问题，加强了电氢负荷和热氢负荷之间的耦合关系，并考虑了阶梯碳交易机制，构建了 VPP 低碳经济调度模型，实现提升风光的消纳水平，降低碳排放的同时提高了调度收益；Yan Q 等学者^[47]提出了一种考虑碳交易和绿色证书的 VPP 低碳优化调度模型，建立了含风、光、电转气、碳捕集和基于价格需求响应的 VPP 系统结构，以 VPP、碳交易和绿色认证市场之间的双向互动交易来提升风光的消纳比例，最小化碳排放和调度成本。

1.3 本文的创新点

本文旨在解决虚拟电厂经济优化调度的问题，着重研究了碳交易市场下的新型交易机制、新型碳排放模型和县域虚拟电厂调度系统。本文的主要创新点和工作如下：

(1) 新型碳交易机制

针对弃风弃光和碳排放等问题,在功率平衡的前提下,考虑到可再生能源消纳的同时必然会减少火力发电量,对此采用了碳排放权兑换机制,通过可再生能源的消纳,来兑换相应的碳排放配额,从而进一步促进可再生能源的消纳,减少碳排放。其次,在分时电价的影响下,电网在不同时刻下的可再生能源消纳电量与火电的比例也不同,对应的度电碳排放也不同,对此优化了电网度电碳排放因子:通过整合火电与可再生能源的分时平均用电量,火电机组的碳排放基准值(0.8729 吨二氧化碳/MWh)和电网的平均度电碳排放(0.6101 吨二氧化碳/MWh),最终得到分时度电碳排放因子。最后,针对谷时和平时电价较低,达不到风光消纳成本,故存在大量弃风弃光的现象,对此采用了阶梯兑换策略,随着可再生能源消纳比例的增加,进而兑换更多的碳排放配额。结合以上内容,形成了分时阶梯式碳排放权兑换机制。

(2) 新型碳排放模型

针对现有碳排放模型只考虑到电量这一因素,无法反映真实碳排放的问题,考虑到爬坡和环境因素均会改变燃烧效率,从而影响碳排放,通过土耳其燃气轮机排放公开数据集进行等效分析,采用皮尔逊系数分析碳排放与爬坡和环境因素间的相关性,并建立了含爬坡和环境因素的新型碳排放模型,采用均方根误差和决定系数来对所建模型进行回归分析,选取最优的碳排放模型,并验证了其有效性。针对所建模型具有高维非线性、强约束性和求解运算难度大等问题,通过实验发现乌鸦搜索算法具有很好的求解特性,但固定参数使得算法的搜索能力受限,为进一步协调该算法全局探索与局部开发的能力,对其搜索策略进行优化。

(3) 县域虚拟电厂调度系统

县域虚拟电厂调度系统作为构建高效能源管理的关键一环,在虚拟电厂架构中扮演着核心角色。该系统依托于高可用、高性能以及高度可扩展的 Web 服务架构,采用先进的并行处理与列式存储技术构建的数据仓库,旨在实现对海量业务数据进行高效整合、实时更新与深度挖掘,以支持复杂查询的快速响应及大数据分析需求;采用 Netty 高性能异步事件驱动的网络通信框架,旨在实现对分布式能源产生的庞大数据流进行实时、高效和低延迟的采集与精细化处理,同时,通过深度整合和定制化 Netty 的通讯机制,有效赋能设备间的数据交互和智能调度,实现对储能的精准控制与精细化管理;通过集成规约引擎技术,实现了对不

同制造商设备协议的无缝适配与接入兼容。核心应用涵盖数据分析预测、储能规划与优化调度等多个维度，其中运用深度学习算法实现数据的分析及预测，通过随机搜索算法指导储能的选址与容量配置决策，采用乌鸦正余弦搜索算法实现优化调度。本系统已成功在芜湖繁昌区进行试点运营，有效管理 84 个屋顶分布式光伏和 13 个变电站。

1.4 本文的章节安排

本文主要围绕新型碳交易机制、新型碳排放模型和县域虚拟电厂调度系统三方面展开研究。本文一共包含五个章节，各章节概括内容如下所示：

第一章：绪论。重点介绍了本课题的研究背景与意义，分析了当前虚拟电厂、虚拟电厂经济优化调度和低碳优化调度的研究现状和方法，同时对本文各章节的内容进行了概括。

第二章：基于分时阶梯式碳排放权交换机制的虚拟电厂经济优化调度研究。本章针对弃风弃光和碳排放等问题，提出了分时阶梯式碳排放权交换机制：首先，在功率平衡的前提下，考虑到风光消纳的同时必然会减少火力发电量，采用了碳排放权交换机制，通过可再生能源的消纳，来兑换相应的碳排放配额，从而促进可再生能源的消纳，减少碳排放；其次，在分时电价的影响下，电网在不同时刻下风光消纳电量与火电的比例也不同，对应的度电碳排放也不同，对此优化了度电碳排放因子，通过整合火电与可再生能源的分时平均用电量，火电机组的碳排放基准值和电网的平均度电碳排放，最终得到分时度电碳排放因子；最后，针对谷时和平时电价较低，达不到风光消纳成本，故存在大量弃风弃光的现象，对此提出了阶梯兑换策略，随着可再生能源消纳的增加，从而兑换更多的碳排放配额。结合以上内容，形成了分时阶梯式碳排放权交换机制。本章以虚拟电厂日调度收益最大为目标函数，构建了基于分时阶梯式碳排放权交换机制的含“风-光-气-储”的优化调度模型，并与弃风弃光惩罚场景和阶梯碳交易场景进行对比，分析不同场景下的碳排放、碳减排、调度收益和风光消纳比例，验证所提碳交换机制的有效性。

第三章：基于新型碳排放模型的虚拟电厂经济优化调度研究。在虚拟电厂优化调度中，燃气轮机碳排放模型作为重要考虑因素之一，其准确性直接影响着调

度结果的有效性和可靠性。本章通过实验分析发现现有碳排放模型无法反映真实的碳排放情况,可能会出现偏离调度预期的结果,在某些极端场景下甚至完全背离。鉴于上述问题,本章采用土耳其燃气轮机排放公开数据集进行等效分析,通过皮尔逊相关系数分析碳排放与爬坡和环境因素间的相关性,并建立了含爬坡和环境因素的新型碳排放模型,采用均方根误差和决定系数来对所建模型进行回归分析,选取最优的碳排放模型,并验证其有效性。以上述所建模型为基础,虚拟电厂日调度收益最大为目标函数,采用罚函数法将约束条件引入到目标函数中,构建了含“风-光-气-储”的经济优化调度模型。针对所建模型具有高维非线性、强约束性和求解运算难度大等问题,本章通过实验发现乌鸦搜索算法具有很好的求解特性,但固定参数使得算法的搜索能力受限,为进一步优化算法协调全局探索与局部开发的能力,采用乌鸦正余弦搜索算法来对模型求解,通过仿真验证了所提新型碳排放模型和求解策略的可行性和优越性,能有效提升虚拟电厂的调度收益和可再生能源的消纳比例。

第四章:县域虚拟电厂调度系统。县域虚拟电厂调度系统作为构建高效能源管理的关键一环,在虚拟电厂架构中扮演着核心角色。本章深度介绍了系统四个架构与功能,分别为基于 Hadoop 的数据仓库、基于 Netty 的物联通讯、规约引擎和储能控制,其中数据仓库实现了对海量业务数据进行高效整合、实时更新与深度挖掘;物联通讯实现了对分布式能源设备的数据采集和远程控制;规约引擎则通过软件定义协议和规约的思想,统一数据采集的规范,标准化感知设备的接入,实现了统一的设备连接管理,多协议适配,屏蔽众多规约的复杂性,灵活接入不同厂家不同协议的设备;通过深度整合和定制化 Netty 的通讯机制,有效赋能设备间的数据交互和智能调度,实现对储能的精准控制与精细化管理。本章还继续介绍了系统的三个核心应用,分别为数据分析与预测,储能规划和优化调度,数据预测部分采用的是基于自适应加权的 LSTM 神经网络,提出了随机搜索算法来实现储能的规划,优化调度部分则采用第三章中提出的乌鸦正余弦搜索算法。系统已成功在芜湖繁昌区进行试点运营,有效管理 84 个分布式屋顶光伏和 13 个变电站。

第五章:总结与展望。综合本文研究内容和实验结果,分析并进行总结形成研究成果,同时指出了在分析过程中尚未涉及的一些重要因素以及现有研究的局

限性，并基于此为未来的研究提供了具有针对性的改进措施和策略建议，有望更进一步验证研究成果的有效性。

第 2 章 基于分时阶梯式碳排放权交换机制的虚拟电厂经济优化调度研究

本章针对弃风弃光和碳排放等问题，在功率平衡的前提下，考虑到可再生能源消纳的同时必然会减少火力发电量，且在分时电价的影响下，不同时刻下可再生能源消纳电量与火电的比例不同，对应的度电碳排放也不同等现象，提出了分时阶梯式碳排放权交换机制，在此基础上构建了含“风-光-气-储”的经济优化调度模型。模型以虚拟电厂日调度收益最大为目标函数，采用 CPLEX 优化求解，得到虚拟电厂最优经济下的调度策略，并与弃风弃光惩罚场景和阶梯碳交易场景进行对比，分析不同场景下的碳排放、碳减排、调度收益和风光消纳比例，验证所提碳交换机制的有效性。

2.1 分时阶梯式碳排放权交换机制

碳交易机制是通过建立合法的碳排放权，并允许生产商到市场进行碳排放权交易进而达到控制碳排放的目的^[48]。每个碳排放源的碳配额由监管部门分配，碳源要根据配额来调节排放，若实际碳排放量未超过配额，则余碳可通过碳交易市场交易，反之则需要购买，目前主要交易标的为碳配额和国家核证自愿减排量 (Chinese Certified Emission Reduction, CCER)，采用的配额方法主要为无偿配额。

在功率平衡的前提下，考虑到可再生能源消纳的同时必然会减少火力发电量，对此采用碳排放权交换机制，通过可再生能源的消纳，来兑换相应的碳排放配额，从而进一步促进可再生能源的消纳，减少碳排放。其次，在分时电价的影响下，电网在不同时刻下的可再生能源消纳电量与火电的比例也不同，对应的度电碳排放也不同，对此优化了电网度电碳排放因子：通过整合火电与可再生能源的分时平均用电量，火电机组的碳排放基准值（0.8729 吨二氧化碳/MWh）和电网的平均度电碳排放（0.6101 吨二氧化碳/MWh），最终得到分时度电碳排放因子。最后，针对谷时和平时电价较低，达不到风光消纳成本，故存在大量弃风弃光的现象，对此提出了阶梯兑换策略，随着可再生能源消纳比例的增加，进而兑换更多的碳排放配额。结合以上内容，形成了分时阶梯式碳排放权交换机制。

VPP 兑换的碳配额主要包括两部分，即其自身 DREs 消纳获得的 CCER 和

与电网(Power Grid, PG)交互获得的电网减排量(Power Grid Emission Reduction, PGER), 其中 CCER 配额的最大抵消率不超过 6%^[49]。原理图如图 2-1 所示。

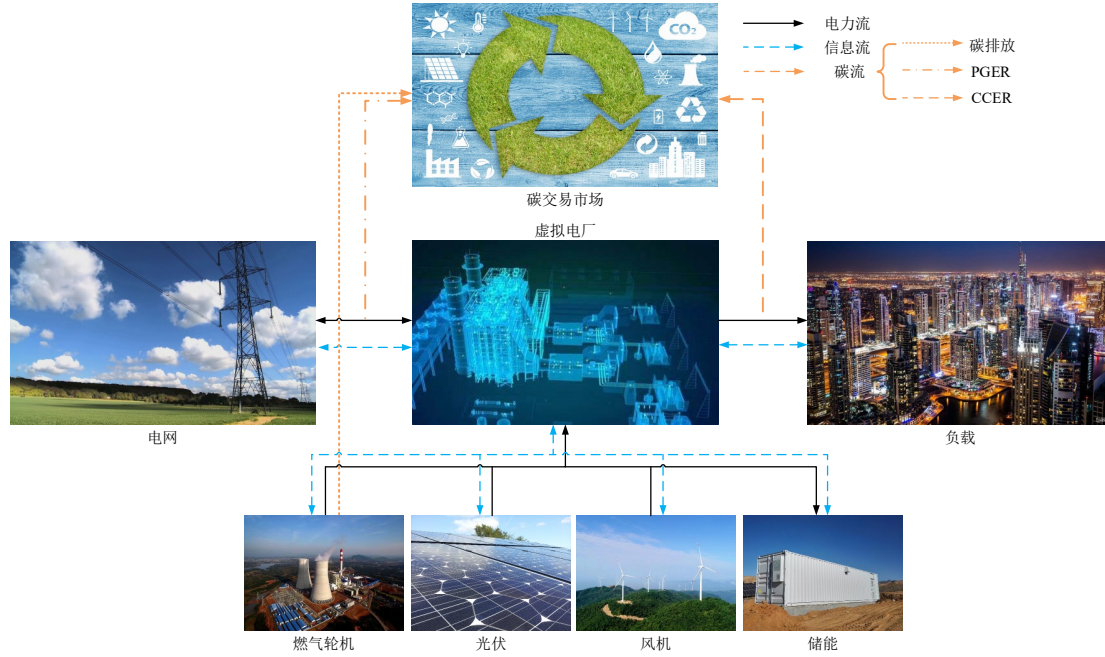


图 2-1 机制原理图

所提机制的详细步骤如下所示：

S1: 分配基础碳配额, 根据分时度电碳排放因子和负荷需求功率计算 VPP 日总碳排放量, 并分配给 VPP 作为基础碳配额;

S2: 计算 CCER 最大碳配额, 根据 CCER 最大抵消率和 VPP 日总碳排放量计算 CCER 最大碳配额;

S3: 兑换碳配额, 根据 DREs 的消纳情况兑换碳配额。当 DREs 出力用于满足 VPP 内部负荷需求, 并且 CCER 的总抵消碳配额未超过其最大碳配额限制时, 可用于兑换 CCER 的碳配额, 超过时 CCER 的碳配额应设为 0。当 DREs 发电量出售给 PG 时, 可用于兑换 PGER 的碳配额;

S4: 将 PGER 和 CCER 引入目标函数;

S5: 使用 CPLEX 优化求解最优调度策略;

S6: VPP 调度 DERs 和燃气轮机(Gas Turbine, GT)以满足负荷功率需求。

流程图如图 2-2 所示。

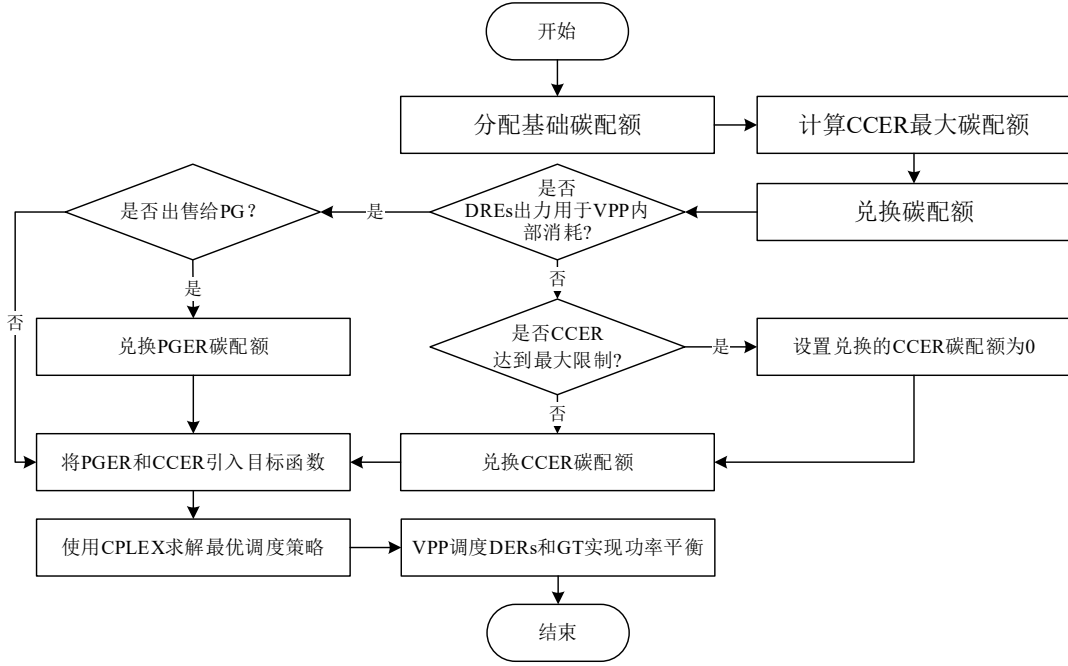


图 2-2 机制流程图

模型如下所示：

$$Q_t^* = \begin{cases} S_t P_t & P_t \leq \omega P_t^S \\ S_t (1 + \lambda)(P_t - \omega P_t^S) + S_t \omega P_t^S & \omega P_t^S < P_t \leq 2\omega P_t^S \\ S_t (1 + 2\lambda)(P_t - 2\omega P_t^S) + (2 + \lambda)S_t \omega P_t^S & 2\omega P_t^S < P_t \leq 3\omega P_t^S \\ S_t (1 + 3\lambda)(P_t - 3\omega P_t^S) + (3 + 3\lambda)S_t \omega P_t^S & P_t > 3\omega P_t^S \end{cases} \quad (2-1)$$

$$\sup\{Q^{CCER}\} = \sum_{i=1}^T \alpha S_i N_i^{LOAD} \quad (2-2)$$

$$Q_t^* = 0 \quad \text{when} \sum_{i=1}^T Q_i^* > \sup\{Q^*\} \quad (2-3)$$

式中： Q_t^* 为 t 时刻 DREs 消纳兑换的 CCER 或 PGER 配额； S_t 为 t 时刻度电碳排放因子； λ 为配额增长率； P_t 为 t 时刻 DREs 的消纳电量，当 P_t 用于内部消耗时，* 代表 CCER，当 P_t 出售给 PG 时，* 代表 PGER； ω 为 DREs 的出力区间； P_t^S 为 t 时刻 DREs 的实际发电量； α 为 CCER 配额的最大抵消率，取 6%； N_t^{LOAD} 为 t 时刻负载需求电量。

2.2 虚拟电厂经济优化调度模型

2.2.1 目标函数

经济优化调度模型以 VPP 日调度收益最大为目标函数，包含 DERs 出力成本，GT 出力成本，碳排放成本和 VPP 从电网购电成本，而 VPP 收益来自碳交易市场，与 PG 交互和内部供电，目标函数为：

$$\max F^{VPP} = F^{CTM} + F^{GRID} + F_{IN}^{VPP} \quad (2-4)$$

除了 VPP 基础碳配额外，DREs 的消纳可以兑换对应的碳配额，GT 的出力会消耗碳配额，多余的碳配额可用于在碳市场上交易获得收入。

$$F^{CTM} = \sum_{t=1}^T [p_t^{CTM} (Q_t^{CCER} + Q_t^{PGER} + Q_t^{BASE} - Q_t^{GT})] \quad (2-5)$$

VPP 可同 PG 交互来满足自身的需求，当 PG 购电价格较高或 VPP 电量过剩时向 PG 售电获得收益，当 PG 售电价格较低或 VPP 不能满足负载需求时从 PG 购电来降低成本。

$$F^{GRID} = \sum_{t=1}^T (p_t^{GB} N_t^{GB} - p_t^{GS} N_t^{GS}) \quad (2-6)$$

VPP 的内部收益包括向负载售电的收入和供电成本。供电成本包括光伏 (Photovoltaic, PV) 出力成本、风机 (Wind Turbine, WT) 出力成本、ES 充电成本和 GT 运营成本。

$$F_{IN}^{VPP} = \sum_{t=1}^T (p_t^{VPP} N_t^{LOAD} - c^{WT} N_t^{WT} - c^{PV} N_t^{PV} - c^{ES} N_t^{ES} - C_t^{GT}) \quad (2-7)$$

GT 运营成本由三部分组成，即启动成本、运行成本和爬坡成本。GT 启动时产生一次性费用，运行期间持续消耗燃气，爬坡时根据爬坡的电量情况折算其爬坡成本。

$$C_t^{GT} = C_t^{GTs} + C_t^{GTTr} + C_t^{GTu} \quad (2-8)$$

$$C_t^{GTs} = c_s^{GT} T_t^R (1 - T_{t-1}^R) \quad (2-9)$$

$$C_t^{GTTr} = c^G N_t^{GT} / B^{GTP} \quad (2-10)$$

$$C_t^{GTu} = U | N_t^{UAD} (T_t^{UP} - T_t^{DOWN}) | \quad (2-11)$$

式中： F^{VPP} , F^{CTM} , F^{GRID} 和 F_{IN}^{VPP} 分别为 VPP 日调度收益，碳交易收益，VPP 与 PG 交互收益和 VPP 内部供电收益； p_t^{CTM} , p_t^{GB} , p_t^{GS} 和 p_t^{VPP} 分别为 t 时刻碳交易单价，PG 购电单价，PG 售电单价和 VPP 内部售电价； Q_t^{CCER} , Q_t^{PGER} , Q^{BASE} 和 Q_t^{GT} 分别为 t 时刻 DREs 消纳兑换的 CCER 配额与 PGER 配额，监管部门分配的基本碳配额和 GT 出力碳排放； N_t^{GB} , N_t^{GS} , N_t^{LOAD} , N_t^{WT} , N_t^{PV} , N_t^{ES} 和 N_t^{UAD} 分别为 PG 购电量，PG 售电量，VPP 内部负载需求电量，WT 消纳电量，PV 消纳电量，ES 充放电量和 GT 爬坡电量； c^{WT} , c^{PV} , c^{ES} 和 c_s^{GT} 分别为 WT 度电成本，PV 度电成本，ES 充放电成本和 GT 启停成本； C_t^{GT} , C_t^{GTs} , C_t^{GTr} 和 C_t^{GTu} 分别为 t 时刻 GT 出力成本，启停成本，运行成本和爬坡成本； T_t^R 为 t 时刻 GT 的运行状态（ $T_t^R \in \{0,1\}$ ，当 $T_t^R = 1$ 表示 GT 运行中）； c^G 为天然气单价； B^{GTP} 为气转电的转换率； U 为 GT 爬坡成本。

2.2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$P_t^{LOAD} = P_t^{WT} + P_t^{PV} + P_t^{ES} + P_t^{GRID} \quad (2-12)$$

式中： P_t^{LOAD} , P_t^{WT} , P_t^{PV} 和 P_t^{ES} 分别为 t 时刻 VPP 内部负载需求功率，风机出力，光伏出力和储能出力，当 $P_t^{ES} > 0$ 时表示储能放电，反之则为充电； P_t^{GRID} 为 t 时刻 VPP 与 PG 的交互功率，当 $P_t^{GRID} > 0$ 时表示 VPP 从 PG 购电，反之则 VPP 售电给 PG。

(2) VPP 与 PG 交互约束

由于输电线路输送功率有限，故 VPP 与 PG 的功率交互有一定的上限。

$$-P_{\max}^{GRID} \leq P_t^{GS} \leq 0 < P_t^{GB} \leq P_{\max}^{GRID} \quad (2-13)$$

式中： P_t^{GB} 和 P_t^{GS} 分别为 t 时刻 PG 购电功率和售电功率； $P_{\max}^{GRID}$ 为传输线路的最

大传输功率。

(3) GT 约束

GT 的出力有着一定的限制，且 GT 有着一定的爬坡速率。同一时刻 GT 的状态只能是启动、关闭、爬坡、降坡和静置中的一种。为了保证 GT 的寿命，设定了最大出力时长。

$$0 \leq P_t^{GT} \leq P_{\max}^{GT} \quad (2-14)$$

$$-\eta P_{\max}^{GT} \leq P_t^{GT} - P_{t-1}^{GT} \leq \eta P_{\max}^{GT} \quad (2-15)$$

$$T_t^{ON} + T_t^{OFF} + T_t^{UP} + T_t^{DOWN} + T_t^{STAND} = 1 \quad (2-16)$$

$$\text{count}(N_t^{GT} > 0) \leq R_{\max} \quad (2-17)$$

式中： P_t^{GT} 和 $P_{\max}^{GT}$ 分别为 t 时刻 GT 出力和 GT 出力最大限制； η 为 GT 爬坡速率；

$T_t^{ON}, T_t^{OFF}, T_t^{UP}, T_t^{DOWN}$ 和 T_t^{STAND} 表示 GT 的状态，依次分别为启动、关闭、爬坡、降坡和静置； $R_{\max}$ 为 GT 最大运行时长。

(4) ES 约束

ES 能够弥补 DREs 出力的随机性和波动性，有利于 VPP 的稳定出力和可靠运行。为保障 ES 的使用寿命，对其最大充放电量进行了限制，同时 ES 的荷电状态(State of Charge, SOC)需要保持在一定范围内。为保证调度的可持续进行，ES 的 SOC 在开始和结束时应该相等（等效为调度周期内的充放电量相等），且同一时刻 ES 只能是充电，放电和静置三种状态中的一种。

$$-P_{\max}^{ESdis} \leq P_t^{ES} \leq P_{\max}^{EScha} \quad (2-18)$$

$$SOC_{t+1} = SOC_t + P_t^{ES} \Delta t / M_{\max}^{ES} \quad (2-19)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_t \leq SOC_{\max} \quad (2-20)$$

$$SOC_1 = SOC_T \Rightarrow \sum_{t=1}^T (P_t^{ES} \Delta t) = 0 \quad (2-21)$$

$$\begin{cases} T_t^{CHA} = 1 & P_t^{ES} > 0 \\ T_t^{STA} = 1 & P_t^{ES} = 0 \\ T_t^{DIS} = 1 & P_t^{ES} < 0 \end{cases} \quad (2-22)$$

$$T_t^{CHA} + T_t^{STA} + T_t^{DIS} = 1 \quad (2-23)$$

式中： P_t^{ES} , $P_{\max}^{ESdis}$ 和 $P_{\max}^{EScha}$ 分别为 t 时刻 ES 的出力，ES 的最大放电功率和最大充电功率； SOC_t , $SOC_{\min}$ 和 $SOC_{\max}$ 分别为 t 时刻 ES 的 SOC 值，最小值和最大值； Δt 为调度周期，取 1h； $M_{\max}^{ES}$ 为 ES 的最大容量； T_t^{CHA} , T_t^{DIS} 和 T_t^{STA} 为 ES 在 t 时刻的状态，依次分别为充电、放电和静置。

2.2.3 求解策略

本章构建的 VPP 优化调度模型为混合整型线性规划模型，可通过 IBM 商业求解器 CPLEX 进行优化求解。

2.3 算例分析

2.3.1 场景设定

为验证所提策略的有效性，本文选取由 1 个 250kW 风机、1 个 100kW 光伏，1 个 200kW 储能，1 个 250kW 燃气轮机和 500kW 负荷组成的 VPP。分时阶梯式碳排放权兑换机制参数，分时度电碳排放因子和分时电价分别如表 2-1 至表 2-3 所示。

表 2-1 分时阶梯式碳排放权兑换机制参数

配额增长率	DREs 出力区间	碳交易单价 (元/kg)	基础碳配额 (kg)	CCER 最大碳配额 (kg)
10%	25%	0.27	3331.57	199.89

表 2-2 分时度电碳排放因子

时段	分时度电碳排放因子 (kg/kWh)
00:00-07:00 (谷)	0.770
08:00-10:00;16:00-18:00;22:00-00:00 (平)	0.550
11:00-15:00;19:00-21:00 (峰)	0.506

表 2-3 分时电价

时段	电网购电价 (元/kWh)	电网售电价 (元/kWh)	VPP 内部售电价 (元/kWh)
谷	0.22	0.25	0.23
平	0.42	0.53	0.45
峰	0.65	0.82	0.70

为验证所提碳交换机制的有效性,通过选取典型日场景数据,分别在弃风弃光惩罚场景(场景 1)、阶梯式碳交易场景(场景 2)和本文所提碳交换机制的场景(场景 3)进行对比验证。VPP 内部负载需求功率、风机与光伏的实际发电功率情况如图 2-3 所示。

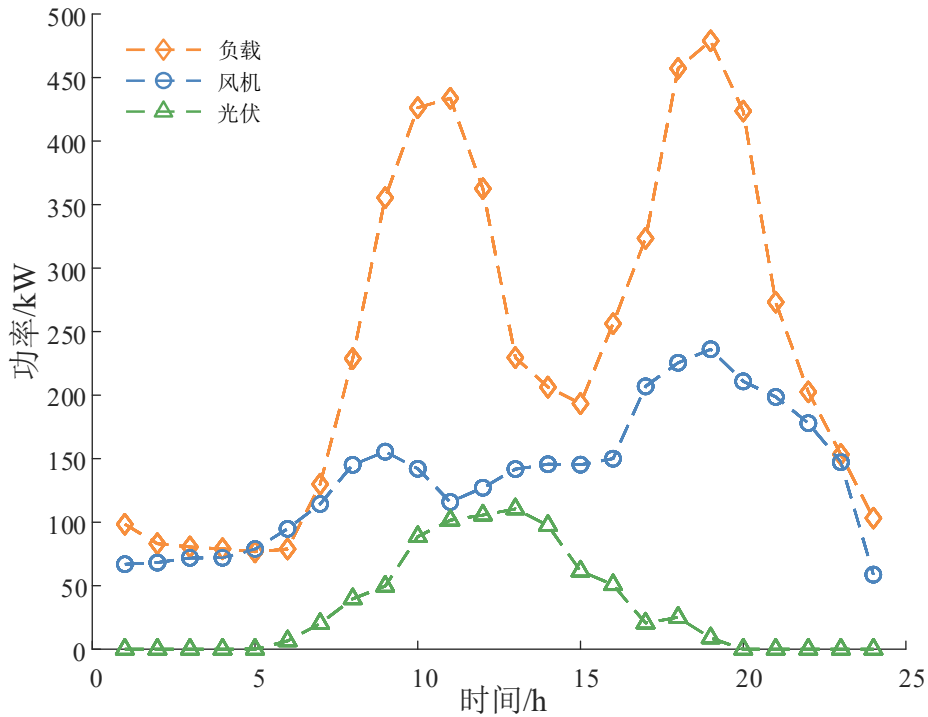


图 2-3 典型日场景数据

2.3.2 结果分析

三种场景下的调度策略分别如图 2-4 至 2-6 所示,依次分别为场景 1 至场景 3,风电消纳和光电消纳情况分别如图 2-7、图 2-8 和表 2-4 所示。

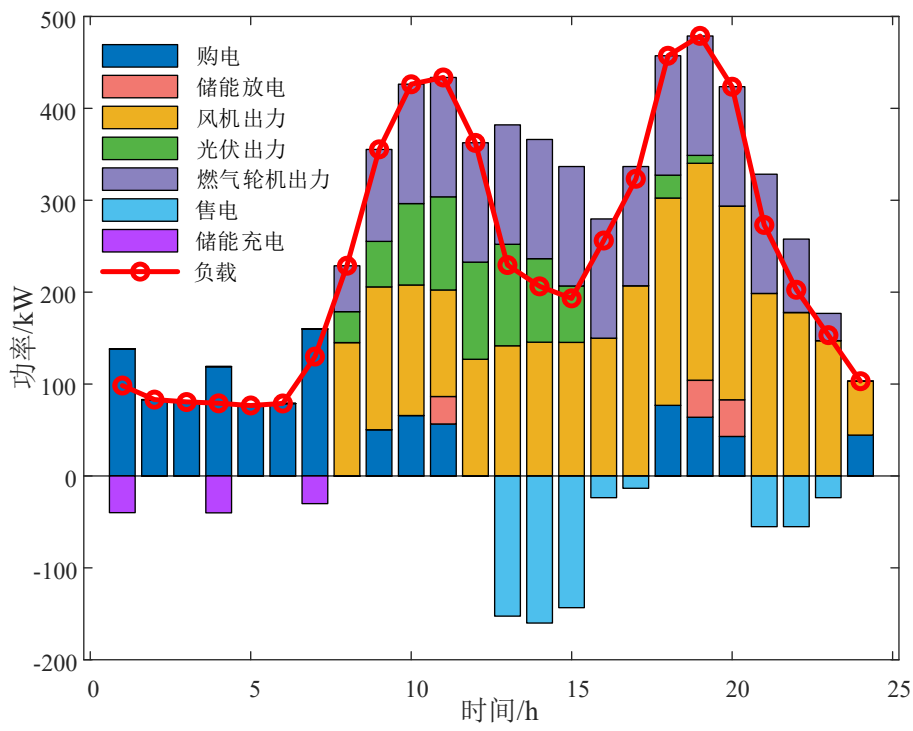


图 2-4 场景 1 调度策略

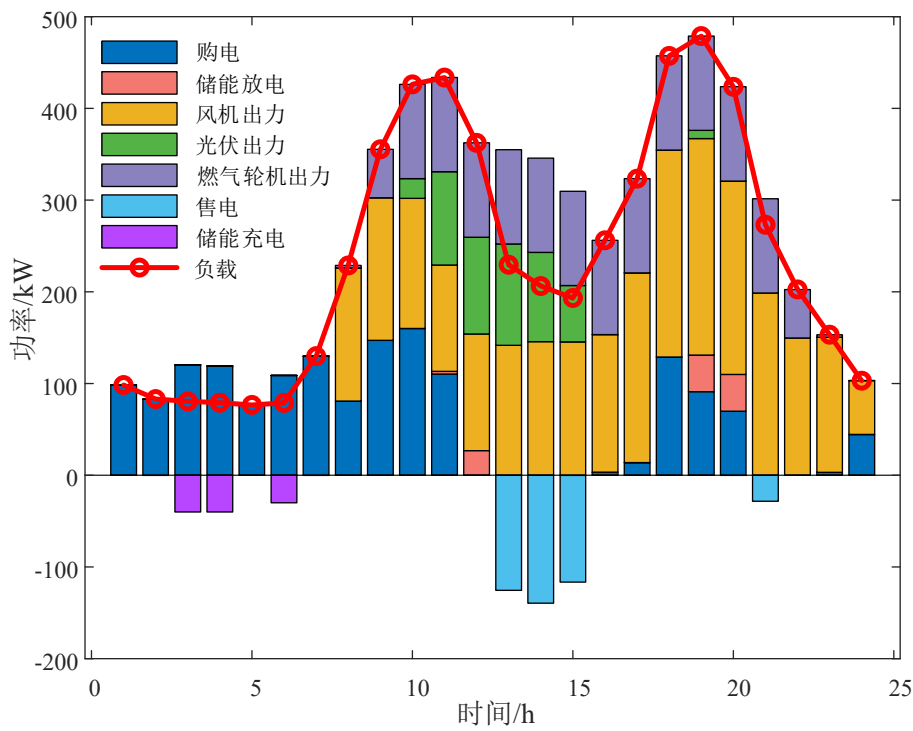


图 2-5 场景 2 调度策略

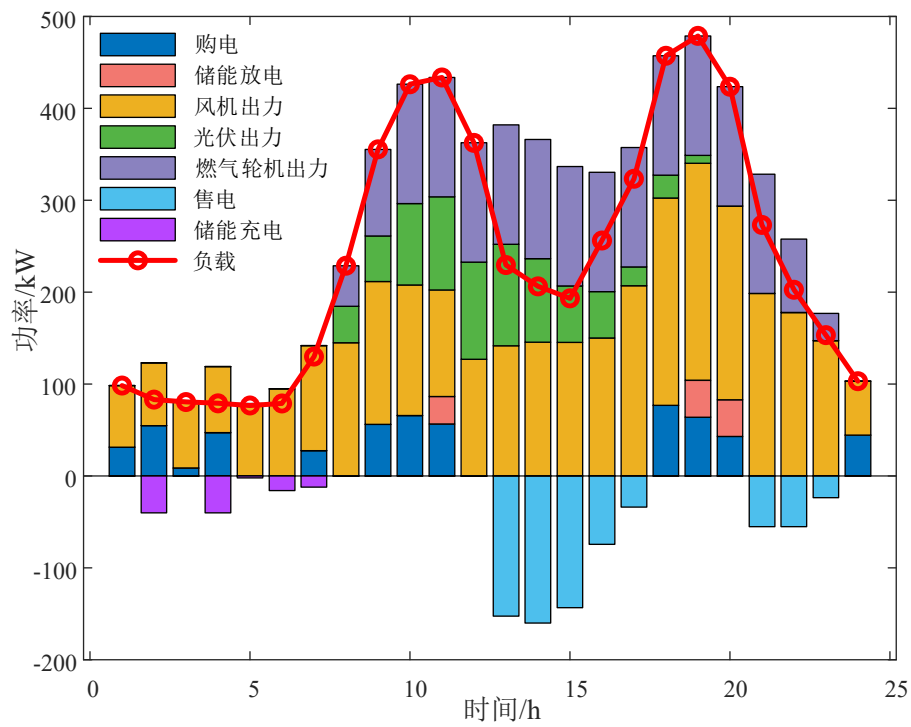


图 2-6 场景 3 调度策略

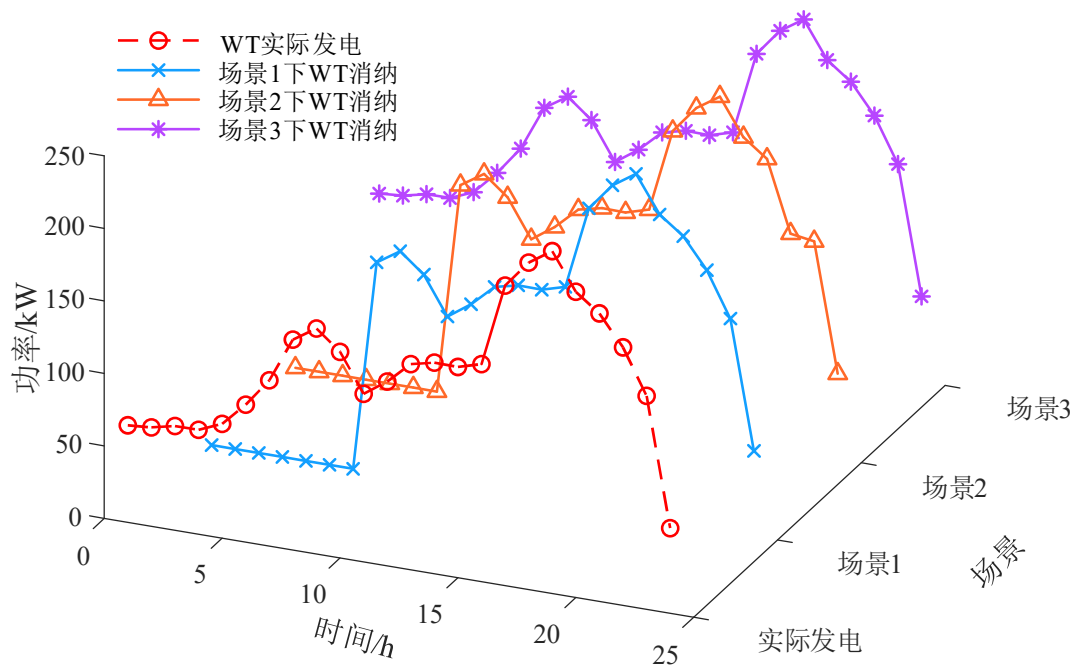


图 2-7 风电消纳情况

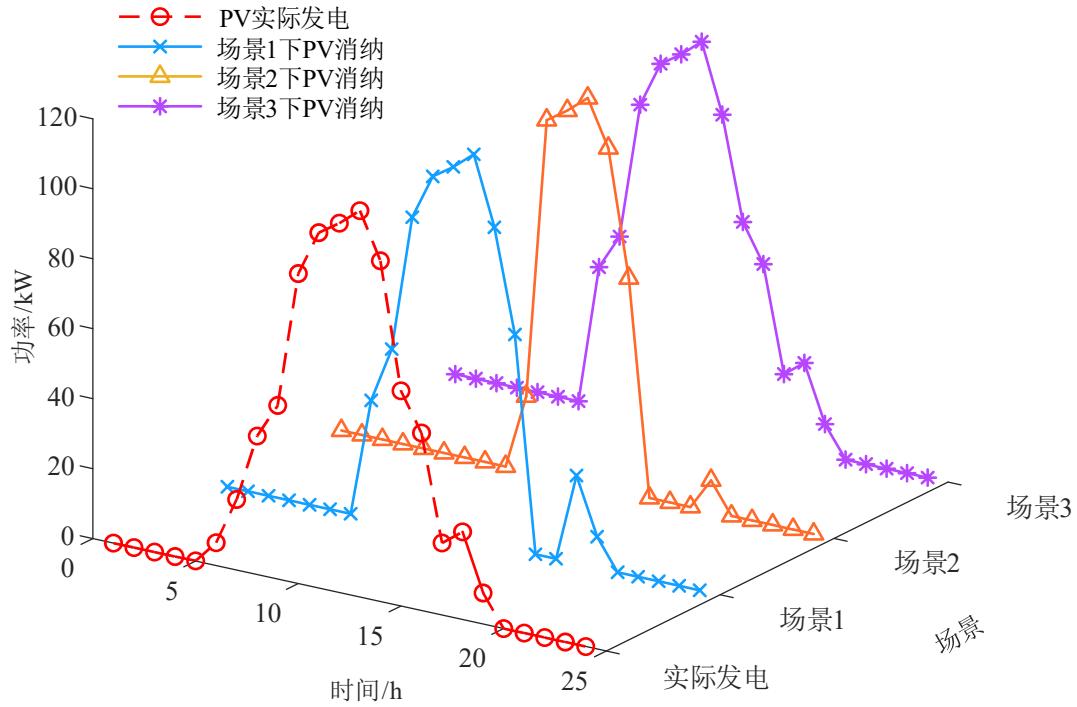


图 2-8 光电消纳情况

表 2-4 风光消纳情况

时段	场景 1		场景 2		场景 3	
	风电	光电	风电	光电	风电	光电
谷	0%	0%	0%	0 %	100%	0%
平	100%	71.83%	98%	7.79%	100%	100%
峰	100%	98.66%	100%	100%	100%	98.66%
总	82.81%	85.94%	81.95%	85.94%	100%	95.77%

从以上结果可以看出，在场景 1 下，谷时的电网售电价为一天的最低价，加上风光惩罚后仍低于风光的出力成本，故此时 VPP 优先从电网购电来满足内部负荷的需求，接受弃风弃光惩罚，同时对储能进行充电，从而导致谷时风光全弃（风光消纳：0%）。在平时电网售电价高于风机出力成本，低于光伏出力成本，燃气轮机运行成本低于风光出力成本，但燃气轮机加上弃风惩罚后高于风机出力成本，加上弃光惩罚后仍低于光伏出力成本，电网售电价加上弃风弃光惩罚后高于风光的出力成本，故 VPP 优先选择风电消纳，其次是燃气轮机，再到光电消纳，最后是从电网购电，因燃气轮机爬坡有着一定的上限，故在燃气轮机和风光出力后出现不足以满足负荷需求的情况时，VPP 选择从电网购电，满足负荷需求

后 VPP 则会将剩余的光电全弃，为了满足周期性调度的持续性，在最后放电时刻选择将储能恢复成初始状态，这部分主要由风电、燃气轮机和光电进行出力（风电消纳：100%，光电消纳：71.83%）。在峰时情况下，电网购电价超过风光出力成本，VPP 选择对风光进行全面消纳，VPP 考虑负荷的两个用电高峰时，对燃气轮机进行爬坡，因爬坡降坡需要一定的成本，故在峰时燃气轮机都是满出力状态，储能充分放电，满足内部负荷需求的同时，将多余电量出售给电网赚取利润，但超出输电线路输送功率时，VPP 选择弃光（风电消纳：100%，光电消纳：98.66%）。在场景 1 下总风电消纳：82.81%，总光电消纳：85.94%。

在场景 2 下，与场景 1 类似，谷时的电网售电价低于风光的出力成本，VPP 选择风光全弃（风光消纳：0%），从电网购电来满足负荷需求，并对储能进行充电操作直至达到 。在平时电网售电价和燃气轮机运行成本高于风机出力成本，并低于光伏出力成本，VPP 考虑到燃气轮机爬坡约束和阶梯式碳排放机制，会极大地限制燃气轮机的出力，将其碳排放限制在第二阶段，此时 VPP 优先选择燃气轮机出力，其次是风电出力，再到从电网购电，最后是光电出力，在燃气轮机和风电出力满足负荷需求时，VPP 选择弃风（风电消纳：98%，光电消纳：7.79%）。在峰时与场景 1 类似，不同的是限制了燃气轮机的出力后风光全部消纳（风光消纳：100%）。在场景 2 下总风电消纳：81.95%，总光电消纳：64.44%。

在场景 3 下，因风光的消纳可以兑换成碳排放配额，可通过碳交易市场获取额外的碳收益，VPP 选择对风光进行充分消纳。在谷时和峰时，VPP 考虑到分时电价，碳交易收益，风机光伏出力成本燃气轮机出力成本，启停成本和爬坡成本时，选择放弃部分光电。在谷时考虑碳兑换机制后，电网售电价高于的风电成本，低于光电成本，此时 VPP 选择风电优先消纳，不满足负荷需求的部分通过从电网购电来弥补，光电全弃（风电消纳：100%，光电消纳：0%）。在平时考虑碳兑换机制后，电网售电价高于风光的出力成本，VPP 选择风光全面消纳，不满足负荷需求的部分优先通过燃气轮机弥补，其次通过从电网购电（风光消纳：100%）。在峰时，同场景 1 类似（风电消纳：100%，光电消纳：98.66%）。在场景 3 下总风电消纳：100%，总光电消纳：95.77%。

三种场景下的日调度收益和碳排放情况如表 2-5 所示。

表 2-5 收益和碳排放情况

场景	收益 (元)	GT 碳排放 (kg)	风电消纳碳减排 (kg)	光电消纳碳减排 (kg)	PGER (kg)
场景 1	647.27	810.53	1338.69	329.67	/
场景 2	716.86	600	1374.08	235.17	/
场景 3	942.89	805.26	1826.2	375.55	338.91

在本章所提机制下 VPP 兑换到 199.89kg 的 CCER 和 338.91kg 的 PGER，日调度收益为 942.89 元，较场景 1 的 647.27 元提升了 295.62 元，提升了 45.67%，较场景 2 的 716.86 元提升了 226.03 元，提升了 31.53%，且风电的消纳从场景 1 的 82.81%和场景 2 的 81.95%提升到了 100%，分别提升了 20.76%和 22.02%，光电的消纳从场景 1 的 85.94%和场景 2 的 64.44%提升到了 95.77%，分别提升了近 11.44%和 48.62%。可见本章提出的碳兑换机制能够在提升 VPP 调度收益的同时，进一步实现风光的消纳。

场景 1 相较场景 2，在风光消纳上有了小幅度的提升，可见弃风弃光惩罚能在一定程度上促进风光消纳，但还不能解决谷时弃风弃光的问题。

三种场景下各时段的碳排放情况如图 2-9 至 2-11 所示，依次分别为场景 1-3。其中大于 0 的为碳排放，反之为碳减排。

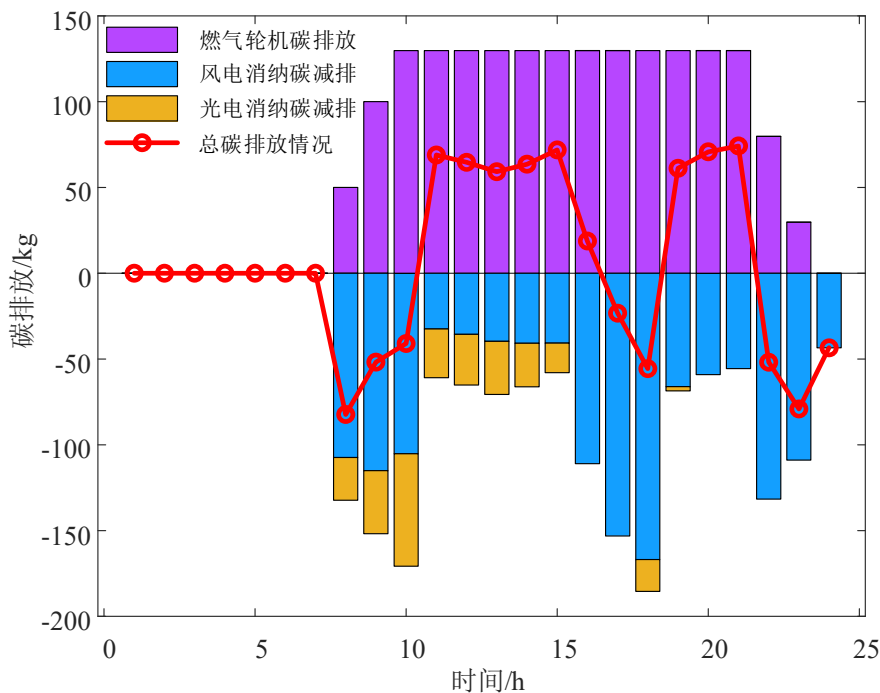


图 2-9 场景 1 碳排放情况

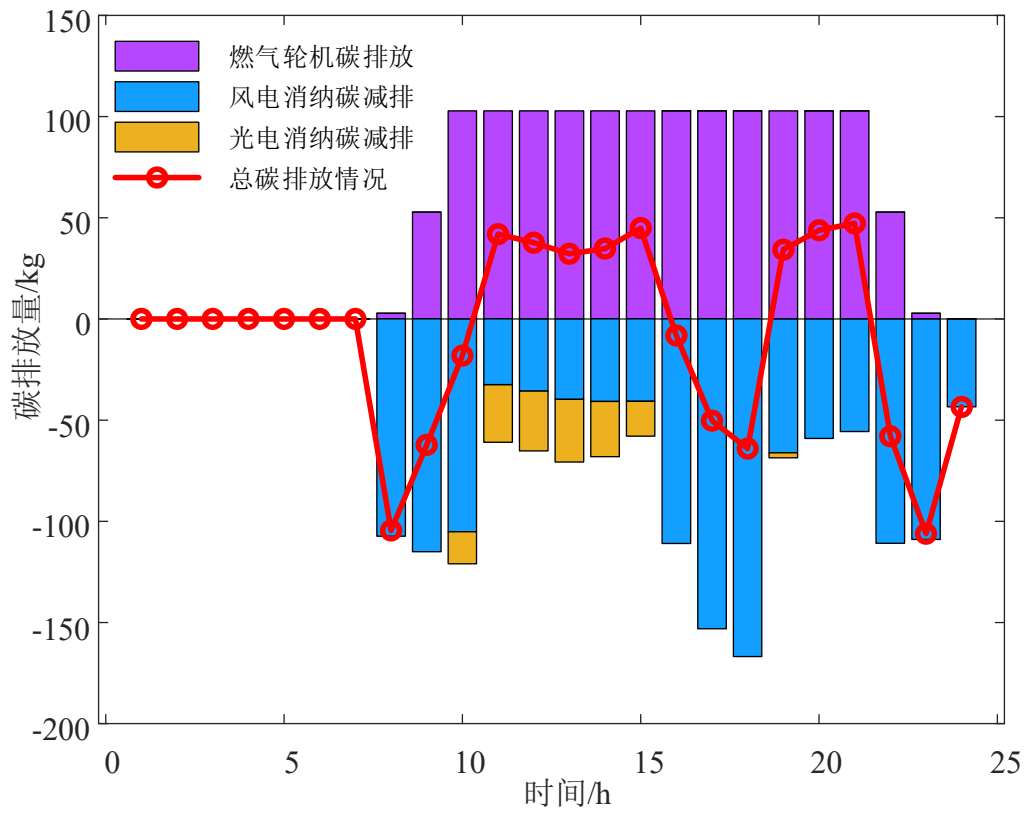


图 2-10 场景 2 碳排放情况

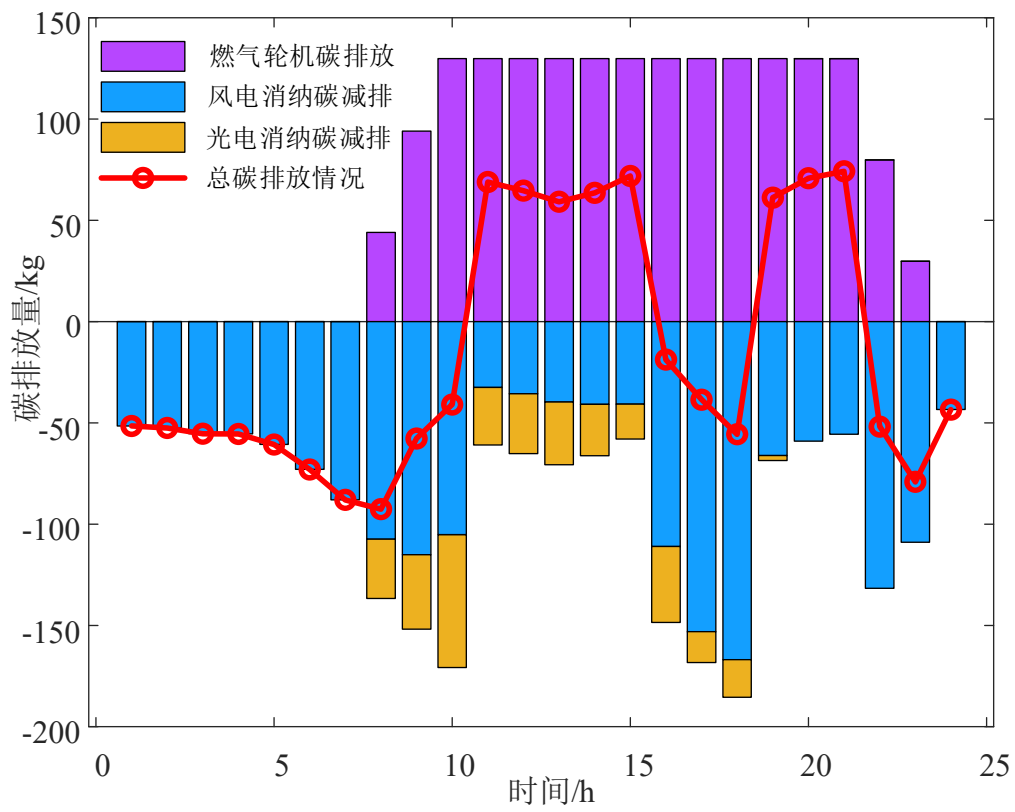


图 2-11 场景 3 碳排放情况

在场景 1 下 VPP 在其调度周期内的碳排放量为 810.53kg，在场景 2 下为

600kg, 场景 3 下为 805.26kg, 可见阶梯式碳交易机制可有效降低 VPP 实际碳排放, 但还是不能解决谷时弃风弃光的问题。在场景 3 下风光消纳带来的碳减排量为 2201.75kg, 相较场景 1 的 1668.36kg 提升了 533.39kg, 相较场景 2 的 1609.25kg 提升了 592.5kg。场景 3 下的总碳减排量为 1396.49kg, 相较场景 2 的 1009.25kg 提升了 387.24kg, 提升了近 38.36%, 相较场景 1 的 857.83kg 提升了 538.66kg, 提升了 62.79%。可见本章提出的机制还能进一步达到减排的目的。

针对场景 3 中谷时和峰时仍存在的弃光现象, 本章通过修改分时阶梯式碳排放权兑换机制中配额增长率 λ 进行验证, 不同 λ 下的光电消纳情况如表 2-6 所示。

表 2-6 不同 λ 参数下的光电消纳情况

时段	$\lambda=10\%$	$\lambda=12.4\%$	$\lambda=13.2\%$
谷	0%	100%	100%
峰	98.66%	98.66%	100%
总	95.77%	99.17%	100%

从表 2-6 可以看出, 随着 λ 从 10% 增加到 12.4% 时, 谷时 VPP 从全面弃光转向光电全面消纳; 随着 λ 从 12.4% 增加到 13.2% 时, 峰时 VPP 从部分弃光转向光电全面消纳。

2.4 本章小结

针对弃风弃光和碳排放等问题, 考虑到可再生能源消纳的同时必然会减少火力发电量, 且在分时电价的影响下, 不同时刻下可再生能源消纳电量与火电比例也不同, 对应的度电碳排放也不同; 谷时和平时电价较低, 达不到风光消纳成本, 存在大量弃风弃光的现象, 本章提出了分时阶梯式碳排放权兑换机制, 并设置场景进行对比分析, 得出以下结论:

(1) 弃风弃光惩罚能在一定程度上促进风光消纳, 阶梯式碳交易通过控制碳排放来限制燃气轮机的出力, 从而达到促进风光消纳的目的, 但这两种方法都不能解决谷时和平时电价达不到风光消纳成本的问题, 故还是存在弃风弃光现象。

(2) 本章提出的机制解决了上述问题, 因谷时电价较低, 电网主要以火力发电为主, 通过促进风光消纳, 降低了火电量, 减少了碳排放, 兑换了碳配额, 再

通过碳交易市场获取收益,提升了风光消纳比例,验证了本文提出机制的有效性。

(3) 对于仍存在的弃光现象,通过修改兑换机制中的配额增长率参数,发现到一定程度时,即可促进风光消纳。结果表明本章提出的机制不仅能大幅提升 VPP 的调度收益,提高 VPP 对风光消纳的积极性,还验证了低碳 VPP 的可行性与实用性,为 VPP 低碳经济调度和风光消纳提供新的方法和途径。

第3章 基于新型碳排放模型的虚拟电厂经济优化调度研究

在虚拟电厂经济优化调度中，燃气轮机碳排放模型作为重要考量因素之一，其准确性直接影响着调度结果的有效性和可靠性。这意味着通过准确的碳排放模型，虚拟电厂能够更精确地评估和优化燃气轮机的运行方案，从而最大限度地降低碳排放并提高能源利用效率。因此，燃气轮机碳排放模型在虚拟电厂调度中的应用不仅仅是一种考量，更是确保虚拟电厂运行符合环保标准和经济效益的重要手段。本章通过实验分析发现现有模型无法反映真实的碳排放情况，可能会出现偏离调度预期的结果，在某些极端场景下甚至完全背离。

鉴于上述问题，本章通过土耳其燃气轮机排放公开数据集进行等效分析，通过皮尔逊相关系数(Pearson Correlation, PCO)分析碳排放与爬坡和环境因素间的相关性，并建立了含爬坡和环境因素的新型燃气轮机碳排放模型，采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和决定系数(Coefficient of Determination, R^2)来进行回归分析，选取最优的碳排放模型，并验证有效性。以上述模型为基础，虚拟电厂日调度收益最大为目标函数，采用罚函数法将约束条件引入到目标函数中，构建了含“风-光-气-储”的经济优化调度模型。针对所建模型具有高维非线性、强约束性和求解运算难度大等问题，本章通过实验发现乌鸦搜索算法(Crow Search Algorithm, CSA)具有很好的求解特性，但固定参数使得 CSA 的搜索能力受限，为进一步优化 CSA 协调全局探索与局部开发的能力，本章采用乌鸦正余弦搜索算法(Crow Sine Cosine Search Algorithm, CSCSA)来对模型求解，通过仿真验证了所提新型碳排放模型和求解策略的可行性和优越性，能有效提升虚拟电厂的调度收益和可再生能源的消纳比例。

3.1 燃气轮机新型碳排放建模与验证

3.1.1 燃气轮机碳排放的影响因素

影响燃气轮机碳排放的因素众多，因此对影响因素进行分析总结。影响因素简单阐述如下：

(1) 出力

燃气轮机的功率输出水平对其碳排放水平有显著影响,较高的出力通常会导致更高的碳排放。

(2) 爬坡

当燃气轮机需要应对负载的突然增加,其燃烧效率可能会下降,从而导致碳排放增加。

(3) 温度

燃气轮机的运行温度会影响其燃烧效率和碳排放水平。较高的温度通常会导致更高的碳排放。

(4) 湿度

空气中的湿度水平会影响燃气轮机的燃烧过程,进而影响碳排放。高湿度条件下,燃烧效率可能会下降,从而导致碳排放增加。

(5) 大气压强

大气压强的变化也会影响燃气轮机的燃烧过程和性能,从而对碳排放产生影响。高大气压条件下,燃烧效率可能会提高,而低大气压条件下则可能导致燃烧效率下降,进而影响碳排放水平。

3.1.2 相关性分析及建模

考虑到燃气轮机的爬坡会改变其燃烧效率,从而影响碳排放,并且在不同的环境因素下,同一燃气轮机在相同出力下的碳排放也不同等现象,提出了一种考虑爬坡和环境因素的新型碳排放模型。由于缺少燃气轮机碳排放公开数据集,故采用土耳其燃气轮机排放数据集^[50]进行等效建模分析。该数据集包含 2011 年至 2015 年土耳其西北地区燃气轮机在一小时内(通过平均值或总和)汇总的 11 个传感器测量的 36733 个数据实例。通过 PCO 来度量该数据集中排放与出力、爬坡、环境因素间的相关程度,其数学模型如下所示:

$$\rho_{xy} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (3-1)$$

$$Cov(X,Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n-1} \quad (3-2)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3-3)$$

式中： X 表示出力、爬坡、环境因素样本数据； Y 表示排放样本数据， $Cov(X,Y)$ 表示 X 与 Y 间的协方差； X_i 和 Y_i 为第 i 个样本数据； $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 为样本均值； n 为样本容量； σ 表示标准差。其中 $\rho_{xy} \in [-1,1]$ ，当 $|\rho_{xy}|$ 越接近 1，样本间越具有相关性，否则无相关性。

排放与出力、爬坡、环境因素（如温度、湿度和大气压强）间的 PCO 如表 3-1 所示。

表 3-1 排放与参数间的皮尔逊相关系数

排放类型	参数				
	出力	爬坡	温度	湿度	大气压强
CO	-0.5698	0.2067	-0.1743	0.1066	0.0671
NO _x	-0.4033	0.2148	-0.1936	0.0654	0.1646

3.1.3 回归分析

回归分析是一种统计学方法，用于研究两个或多个变量之间的关系。它主要用于了解和预测一个或多个自变量如何影响一个因变量。回归分析的基本思想是建立一个数学模型，该模型可以描述自变量和因变量之间的关系。

从表 3-1 可以很清晰的看出，排放与出力有着中等程度的相关性，与爬坡间有着弱相关性，与环境因素间有着极弱的相关性，在环境因素中，与温度的相关性最高。为了刻画出这一关系，依次考虑出力，爬坡，温度，湿度和大气压强后，建立了如下的六个模型来进行回归分析，从式(3-4)至式(3-9)依次记为 M1, M2, ..., M6。

$$E = aP \quad (3-4)$$

$$E = aP^2 + bP + t \quad (3-5)$$

$$E = aP + bC + cP \times C + dP^2 + eC^2 + t \quad (3-6)$$

$$E = aP + bC + cT + dP \times C + eP \times T + fC \times T + gP^2 + hC^2 + iT^2 + t \quad (3-7)$$

$$E = aP + bC + cT + dH + eP \times C + fP \times T + gP \times H + hC \times T + iC \times H + jT \times H + kP^2 + lC^2 + mT^2 + nH^2 + t \quad (3-8)$$

$$E = aP + bC + cT + dH + eAP + fP \times C + gP \times T + hP \times H + iP \times AP + jC \times T + kC \times H + lC \times AP + mT \times H + nT \times AP + oP^2 + pC^2 + qT^2 + rH^2 + sAP^2 + t \quad (3-9)$$

式中： E 为二氧化碳排放； P 为出力； C 为爬坡电量； T 为温度； H 为湿度， AP 为大气压强； $a, b, \dots, t$ 为常数系数。

建立模型后，对模型进行回归分析，并通过 RMSE 和 R^2 指标来检验模型的可行性，结果如图 3-1 所示。

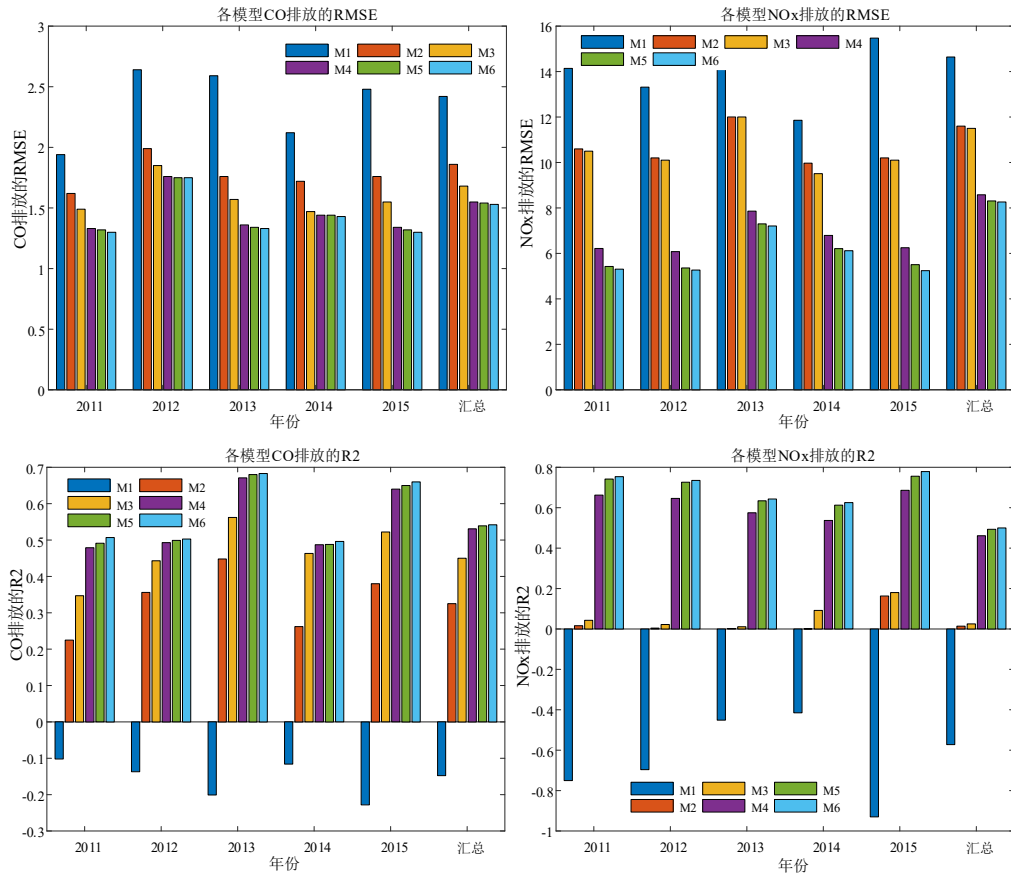


图 3-1 各模型 RMSE 和 R^2 指标结果图

据统计学理论“RMSE 越小，模型越精准； R^2 越接近 1，模型越能代表真实的排放情况；且当 R^2 小于 0 时，表示模型预测的结果差于样本均值。”可以看出，传统只考虑到出力因素的模型无法真实反映排放情况，且随着考虑因素的增加，模型的 RMSE 越小， R^2 越接近 1，模型越精准，越能等效成碳排放模型，考虑爬坡、温度因素后，RMSE 和 R^2 指标变动幅度较大；继续考虑湿度、大气压强因素后，RMSE 和 R^2 指标有着微量的提升，但此时模型变的极为复杂，综合考虑后选择式(3-7)作为等效碳排放模型，最终的碳排放模型如式(3-10)所示。

$$E = aP + gP^2 + \lambda(bC + cT + dP \times C + eP \times T + fC \times T + hC^2 + iT^2 + t) \quad (3-10)$$

3.2 基于新型碳排放模型的 VPP 经济优化调度模型

3.2.1 目标函数

经济优化调度模型以 VPP 日调度收益最大为目标函数，包含 DERs 运行成本、碳排放成本、VPP 与电网交互收益和其内部供电收益，目标函数如下所示：

$$\begin{aligned} \max B_V &= \sum_{t=1}^T (B_t^G + B_t^I - C_t^D - C_t^E) \\ &= \sum_{t=1}^T [(p_t^S D_t^S + p_t^B D_t^B) + (p_t^V D_t^L) - (p^{ES} | D_t^{ES} | \\ &\quad + p^{WT} D_t^{WT} + p^{PV} D_t^{PV}) - (p^G D_t^{GT} + p^E E)] \end{aligned} \quad (3-11)$$

式中： B_V 为 VPP 日调度收益； B_t^G 和 B_t^I 分别为 t 时刻 VPP 与电网交互收益和其内部供电收益； C_t^D 和 C_t^E 分别为 t 时刻 DERs 的运行成本和燃气轮机的碳排放成本； p_t^S , p_t^B 和 p_t^V 分别为 t 时刻电网售电价，电网购电价和 VPP 内部电价； p^{ES} , p^{WT} , p^{PV} , p^G 和 p^E 分别为储能运行成本，风机出力成本，光伏出力成本，燃气轮机运行成本和碳交易单价； D_t^S , D_t^B , D_t^L , D_t^{ES} , D_t^{WT} , D_t^{PV} 和 D_t^{GT} 分别为 t 时刻 VPP 从电网购电量，VPP 向电网售电量，VPP 内部需求电量，储能充放电量，风机消纳电量，光伏消纳电量和燃气轮机出力电量，其中 P_t^* 为 t 时刻*对应设备的功率，如 P_t^S 为 t 时刻 VPP 从电网购电功率，且 $P_t^* \Delta t = D_t^*$ ， Δt 调度周期，取 1h。

3.2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$P_t^L = P_t^{WT} + P_t^{PV} + P_t^{GT} + P_t^G + P_t^{ES} \quad (3-12)$$

式中： P_t^G 为 t 时刻 VPP 与电网交互的功率，当 $P_t^G > 0$ 时 $P_t^G = P_t^S$ ，否则 $P_t^G = P_t^B$ ；当 $P_t^{ES} > 0$ 时表示储能充电， $P_t^{ES} < 0$ 时表示放电。

(2) VPP 与电网交互约束

$$-P_{\max}^G \leq P_t^B < 0 < P_t^S \leq P_{\max}^G \quad (3-13)$$

式中： $P_{\max}^G$ 表示调度周期内输电线路共输送的最大功率限制。

(3) 燃气轮机约束

燃气轮机的出力有着一定的限制，且燃气轮机有着一定的爬坡速率。为了保证燃气轮机的寿命，设定了其最大出力时长；为了调度的可持续性，燃气轮机的出力在调度开始和结束时应相等（设定初始时燃气轮机不工作）。

$$0 \leq P_t^{GT} \leq P_{\max}^{GT} \quad (3-14)$$

$$\Delta P_t^C = P_{t+1}^{GT} - P_t^{GT} \quad (3-15)$$

$$-\eta P_{\max}^{GT} \leq \Delta P_t^C \leq \eta P_{\max}^{GT} \quad (3-16)$$

$$P_1^C = P_T^C = 0 \quad (3-17)$$

式中： $P_{\max}^{GT}$ 为燃气轮机最大出力限制； ΔP_t^C 为 t 时刻燃气轮机的爬坡功率； η 为爬坡速率； T 为调度周期结束。

(4) 储能约束

储能能够弥补 DREs 出力的随机性和波动性，有利于 VPP 的稳定出力和可靠运行，为保障储能的使用寿命，对其最大充放电电量进行了限制，同时储能的荷电状态(State of Charge, SOC)需要保持在一定范围内。为保证调度的可持续进行，储能 SOC 在调度周期开始和结束时应相等（等效为调度周期内的充放电电量相等）。

$$-P_{\max}^{ESdis} \leq P_t^{ES} \leq P_{\max}^{EScha} \quad (3-18)$$

$$SOC_{t+1} = SOC_t + \frac{P_t^{ES} \Delta t}{P_{\max}^{ES}} \quad (3-19)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_t \leq SOC_{\max} \quad (3-20)$$

$$SOC_1 = SOC_T \Rightarrow \sum_{t=1}^T (P_t^{ES} \Delta t) = 0 \quad (3-21)$$

式中： $P_{\max}^{EScha}$ ， $-P_{\max}^{ESdis}$ 和 $P_{\max}^{ES}$ 分别为储能最大充、放电功率和储能的装机容量；

$SOC_{\min}$ ， $SOC_{\max}$ 和 SOC_t 分别为储能 SOC 最小值，SOC 最大值和 t 时刻 SOC 值。

3.3 乌鸦正余弦搜索算法

3.3.1 乌鸦搜索算法

乌鸦搜索算法(Crow Search Algorithm, CSA)^[51]是一种基于自然界中乌鸦觅食行为的启发式优化算法，用于解决优化问题。该算法模拟了乌鸦群体在寻找食物时的协作与竞争过程：乌鸦的聪明行为之一是它们把多余的食物藏在特定的隐蔽处，并在需要时回忆食物的位置。此外，乌鸦有一个贪婪的习惯，它们会跟着其他乌鸦去寻找它们的藏食之处。如果找到了其他乌鸦的藏食之处，便会偷走隐藏的食物。CSA 则是通过模仿该行为，以此为基础设计了一种搜索策略，能够有效地搜索解空间并找到近似最优解。

在 CSA 中，第 i 只乌鸦的位置用向量 $X_{it}^i (i=1,2,...,N; it=1,2,...,M_{it})$ 表示，其中 $X_{it}^i = [P_{it}^{WP,i}, P_{it}^{PV,i}, P_{it}^{GT,i}, P_{it}^{ES,i}, P_{it}^{G,i}]$ ， N 为乌鸦数量， M_{it} 为最大迭代次数。每只乌鸦都记住它们的藏食之处 F ，在每次迭代 it 中，乌鸦 i 的藏食之处为 F_{it}^i ，对应的 X_{it}^i 是乌鸦 i 至今获得的最好位置。乌鸦试图搜索或跟踪其他乌鸦来发现比现有更好的食物来源。

在 CSA 的每一次迭代中，为更新乌鸦 i 的位置，乌鸦 i 随机选择另一只乌鸦（例如 j ），试图跟随乌鸦 j 接近它的藏食之处，根据感知概率 AP ，将有如下两种情况：

- (1) 未察觉跟踪：若乌鸦 j 未察觉跟踪，则乌鸦 i 跟随乌鸦 j 接近其藏食之处。
- (2) 察觉跟踪：若乌鸦 j 察觉跟踪，则乌鸦 j 会随机进入空间来愚弄乌鸦 i 。

结合以上两种情况，表达式如下所示。

$$X_{it+1}^i = \begin{cases} X_{it}^i + r_i \times fl \times (X_{it}^j - X_{it}^i) & r_j \geq AP \\ rand & otherwise \end{cases} \quad (3-22)$$

式中： r_i 和 r_j 是 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机数； fl 为飞行距离； $rand$ 为随机更新个体的位置。

3.3.2 乌鸦正余弦搜索算法

本文构建的 VPP 经济优化调度模型为混合整型高阶非线性规划模型，通过罚函数法将约束条件添加到目标函数中。因存在严格约束(3-21)，采用常规优化算法在寻优深度和精度上难以满足需求，甚至无法满足该约束，本章通过实验发现 CSA 具有很好的求解特性，但固定参数使得 CSA 搜索能力受限，为优化 CSA 算法协调全局探索与局部开发的能力，故提出了随机动态飞行距离，在算法初期较长的飞行距离用于乌鸦全局探索，随着迭代次数的增加，乌鸦逐渐从全局探索转向局部开发，且各乌鸦的随机动态飞行距离还可帮助算法逃脱局部最优，如下所示：

$$Q_{it}^i = fl - r_i \times fl \times \frac{it}{M_{it}} \quad (3-23)$$

式中： Q_{it}^i 为第 it 次迭代中乌鸦 i 的动态飞行距离。

为进一步优化 CSA 算法局部开发的能力，融合了正弦余弦搜索策略，提出了乌鸦正余弦搜索算法(Crow Sine Cosine Search Algorithm, CSCSA)来对搜索策略进行优化，如下所示：

$$I = M \circ X_{it}^j - X_{it}^i \quad (3-24)$$

$$X_{it+1}^i = \begin{cases} X_{it}^i + I \times Q \sin(r_2) & r_j \geq AP \ \& \ r_1 \geq 0.5 \\ X_{it}^i + I \times Q \cos(r_2) & r_j \geq AP \ \& \ r_1 < 0.5 \\ rand & otherwise \end{cases} \quad (3-25)$$

式中： I 为影响因子矩阵； r_1 是 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机数； r_2 是 $[-2\pi, 2\pi]$ 间均匀分布的随机数； M 为随机数矩阵，其中 $M, X^i \in \mathcal{R}^{T \times 1}$ ， $i \leq N$ ； $\circ$ 为哈达玛积。

伪代码如下所示：

算法：乌鸦正余弦搜索算法

初始化 N, fl, it, M_{it}, AP 和 $B_V^{\max}$;

随机初始化第一代乌鸦种群:

$$P_1^{*,i} = P_{1,\min}^{*,i} + r \circ (P_{1,\max}^{*,i} - P_{1,\min}^{*,i}), * \in \{WP, PV, GT, ES\}$$

while $it \leq M_{it}$ **do**

 根据(3-12)计算 $P_t^{G,i}$;

$$X_{it}^i = [P_{it}^{WP,i}, P_{it}^{PV,i}, P_{it}^{GT,i}, P_{it}^{ES,i}, P_{it}^{G,i}]$$

 根据(3-11)计算 B_V^{it} , 约束惩罚 P_C ;

$$F = P_C - B_V^{it}$$

if $B_V^{\max} < \max(-F)$ **then**

$$B_V^{\max} = \max(-F)$$

end

for $i = 1 : N$ **do**

 随机初始化 j 和意识概率 r_j

if $r_j \geq AP$ **then**

 随机初始化搜索策略 r_1 和 r_2

if $r_1 \geq 0.5$ **then**

 正弦搜索:

$$P_{it+1}^{*,i} = P_{it}^{*,i} + Q \sin(r_2)(M \circ P_{it}^{*,j} - P_{it}^{*,i})$$

else

 余弦搜索:

$$P_{it+1}^{*,i} = P_{it}^{*,i} + Q \cos(r_2)(M \circ P_{it}^{*,j} - P_{it}^{*,i})$$

else

 随机初始化:

$$P_1^{*,i} = P_{1,\min}^{*,i} + r \circ (P_{1,\max}^{*,i} - P_{1,\min}^{*,i})$$

end

end

$it = it + 1$

end

3.4 算例分析

3.4.1 场景设定

为验证所提模型和求解策略的有效性,本章构建了由1个250kW风机、1个200kW光伏、1个200kW储能、1台200kW燃气轮机和800kW用电负荷组成的VPP。以24h为一个周期进行优化调度,使用改进前后的算法在传统碳排放模型下(场景1,SO1)和新型碳排放模型下(场景2,SO2)进行分析验证。图3-2为

VPP 场景数据。

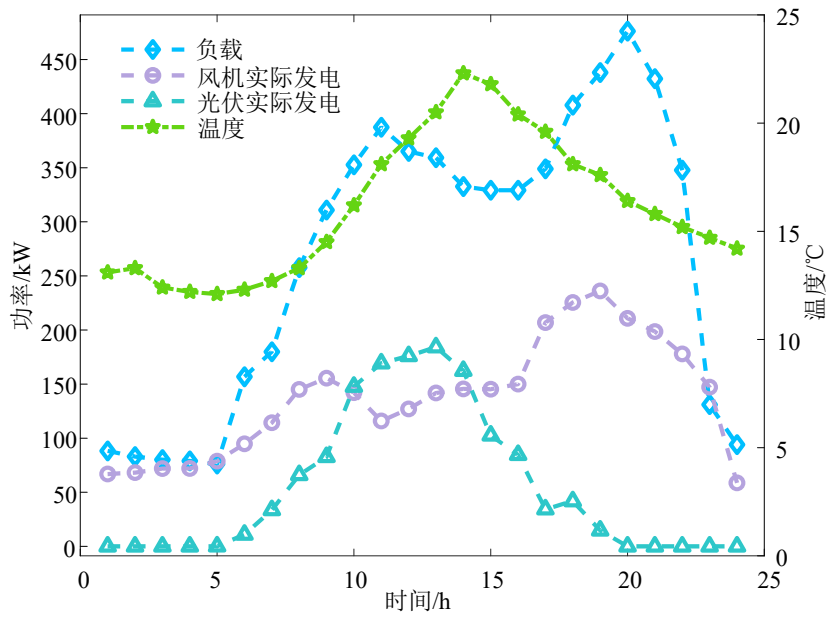


图 3-2 VPP 场景数据

电网购售电价，VPP 内部电价如表 3-2 所示。

表 3-2 分时电价

时段	电网购电价 (元/kWh)	电网售电价 (元/kWh)	VPP 内部电价 (元/kWh)
00:00-06:00 (谷)	0.22	0.25	0.24
07:00-10:00;16:00-18:00;22:00-23:00 (平)	0.42	0.53	0.50
11:00-15:00;19:00-21:00 (峰)	0.65	0.82	0.75

3.4.2 结果分析

求解结果如图 3-3 所示，由于采用罚函数将约束条件添加到目标函数中，将罚函数减去目标函数作为适应度函数，此时将最大化问题转为最小化问题，且当适应度值小于 0 的部分则为满足约束条件的目标函数。

为验证所提算法的有效性，本章将 CSCSA 与其他一些智能优化算法进行了对比，如粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[52]、差分进化算法(Differential Evolution, DE)^[53]、灰狼优化算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)^[54]和闪电连接过程优化算法(Lightning Attachment Procedure Optimization, LAPO)^[55]。结果如图 3-3 所示，可以清晰地看到，与其他算法相比，CSCSA 仍然具有更好的收敛速度和求解精度。

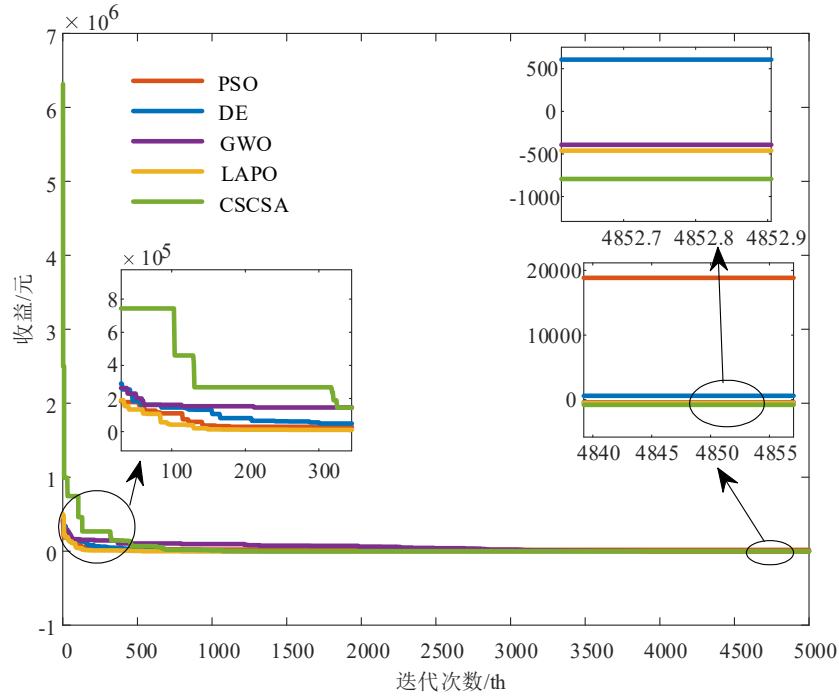


图 3-3 算法对比结果图

各场景下的求解结果图如图 3-4 所示。风机，光伏的消纳情况分别如图 3-5 和图 3-6 所示。

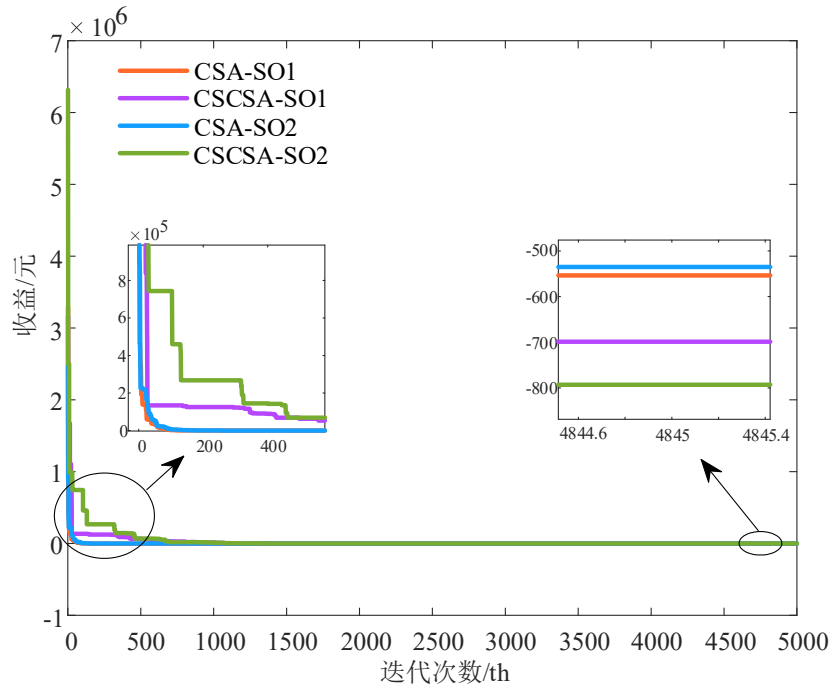


图 3-4 求解结果

从图 3-4 可以直观的看出，在本章设置的两种场景下，CSCSA 比 CSA 有着更优的速度与精度，且更精准的碳排放模型能给 VPP 带来更多调度收益：在场景 1 下，CSCSA 在第 4597 代求得最优收益 699.04 元，相较 CSA 在第 4672 代

的 553.75 元提升了近 26.24%；在场景 2 下，CSCSA 在第 4733 代求得最优收益 793.10 元，相较 CSA 在第 4845 代的 535.14 元提升了 48.20%；由于场景 2 中存在高阶非线性模型，导致 CSA 求解效果差，但 CSCSA 仍具有较好的效果。

新型碳排放模型不仅能提升 VPP 的调度收益，还能进一步提升 DREs 的消纳比例，两种场景下 CSCSA 求解出的风光出力情况分别如图 3-5 和 3-6 所示，在场景 2 下，风电消纳电量 2251.12kWh（消纳比例为 68.28%），相较场景 1 下的 2054.33kWh（消纳比例为 62.31%）提升了 196.79kWh，提升了 9.58%，消纳比例提升了 5.97%；光电消纳电量 996.65kWh（消纳比例为 76.03%），相较场景 1 下的 989.71kWh（消纳比例为 75.5%）提升了 6.94kWh，提升了 0.7%，消纳比例提升了 0.53%，可见新型碳排放模型能进一步激发 VPP 低碳减排的潜能。

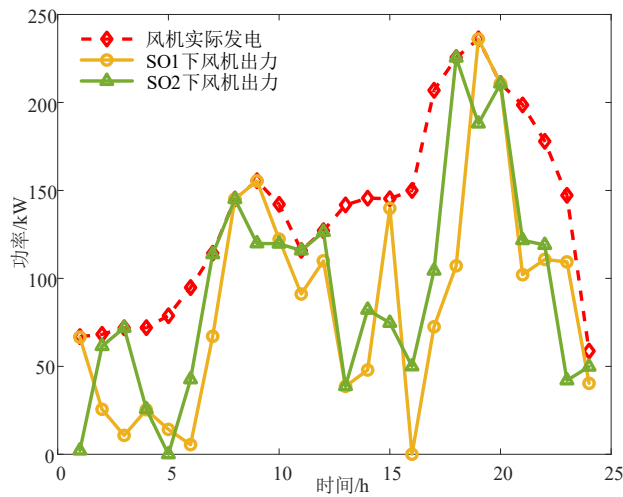


图 3-5 各场景下风机消纳结果

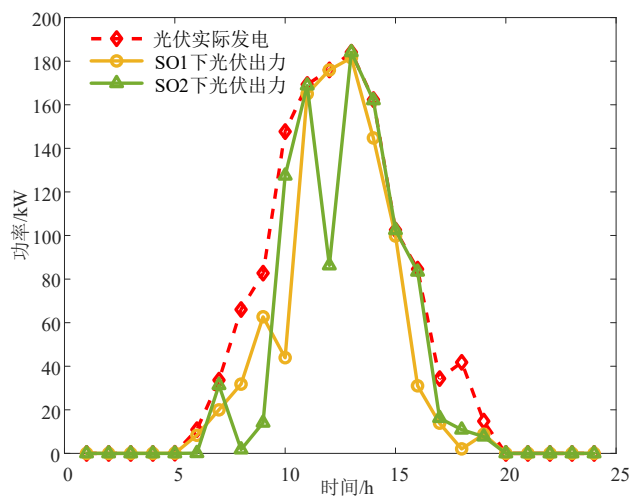


图 3-6 各场景下光伏消纳结果

3.5 本章小结

本章通过统计学理论验证了传统碳排放模型无法反映真实碳排放的问题,为解决这一问题,通过皮尔逊相关系数验证并提出了考虑了爬坡和环境因素的新型碳排放模型,并通过回归分析挑选最优模型,并验证了其有效性。本章以上述模型为基础, VPP 日调度收益最大为目标函数,采用罚函数法将约束条件引入到目标函数中,构建了含“风-光-气-储”的虚拟电厂经济优化调度模型,最后通过 CSCSA 进行优化求解,仿真结果表明:

- (1) CSCSA 比 CSA 有着更优的速度与精度,更适合用于高维非线性、强约束模型的求解,确保了其在实践中的可行性;
- (2) 更精准的碳排放模型能给 VPP 提供更精细化的调度策略,不仅能带来更多调度收益,还能进一步提升 DREs 消纳比例,激发 VPP 低碳减排的潜能。

第 4 章 县域虚拟电厂调度系统

县域虚拟电厂调度系统作为构建高效能源管理的关键一环,在虚拟电厂架构中扮演着核心角色。该系统依托于高可用、高性能以及高度可扩展的 Web 服务架构,采用先进的并行处理与列式存储技术构建的数据仓库,旨在实现对海量业务数据进行高效整合、实时更新与深度挖掘,以支持复杂查询的快速响应及大数据分析需求;采用 Netty 高性能异步事件驱动的网络通信框架,旨在实现对分布式能源产生的庞大数据流进行实时、高效且低延迟的采集与精细化处理,同时,通过深度整合和定制化 Netty 的通讯机制,有效赋能设备间的数据交互和智能调度,实现对储能的精准控制与精细化管理;通过集成规约引擎技术,实现了对不同制造商设备协议的无缝适配与接入兼容。核心应用涵盖数据分析预测、储能规划与优化调度等多个维度,其中运用深度学习算法实现数据的分析及预测,通过随机搜索算法指导储能的选址与容量配置决策,采用乌鸦正余弦搜索算法实现优化调度。本系统已成功在芜湖繁昌区进行试点运营,有效管理 84 个屋顶分布式光伏和 13 个变电站。

4.1 系统架构与功能

本系统作为一款高可用、高性能、易扩展、可伸缩的 Web 系统,由前端,接口层,应用层,基础服务层,数据层,持久层和运行环境层等部分组成,其详细架构如图 4-1 所示。

运行环境层为本系统提供其正常运行所需的最小环境;持久层,即把数据保存到可永久保存的存储设备中,其中需要持久化的数据为:本系统运行产生的数据,各物联网设备传输到 Netty^[56]中的数据,Python 分析产生的数据和本系统保存的文件数据。本系统中使用的是 MySQL 数据库;数据层的目的是构建面向分析的集成化数据环境,它出于分析性报告和决策支持目的而创建,是面向主题的、集成的、非易失的和时变的数据集合;基础服务层为系统提供通用服务、解耦系统组件、提供抽象接口,以促进系统的模块化、可维护性和可扩展性;应用层主要负责具体的业务逻辑处理;接口层为系统提供了与外部系统的交互能力;前端为系统提供了用户界面和与用户交互的能力。

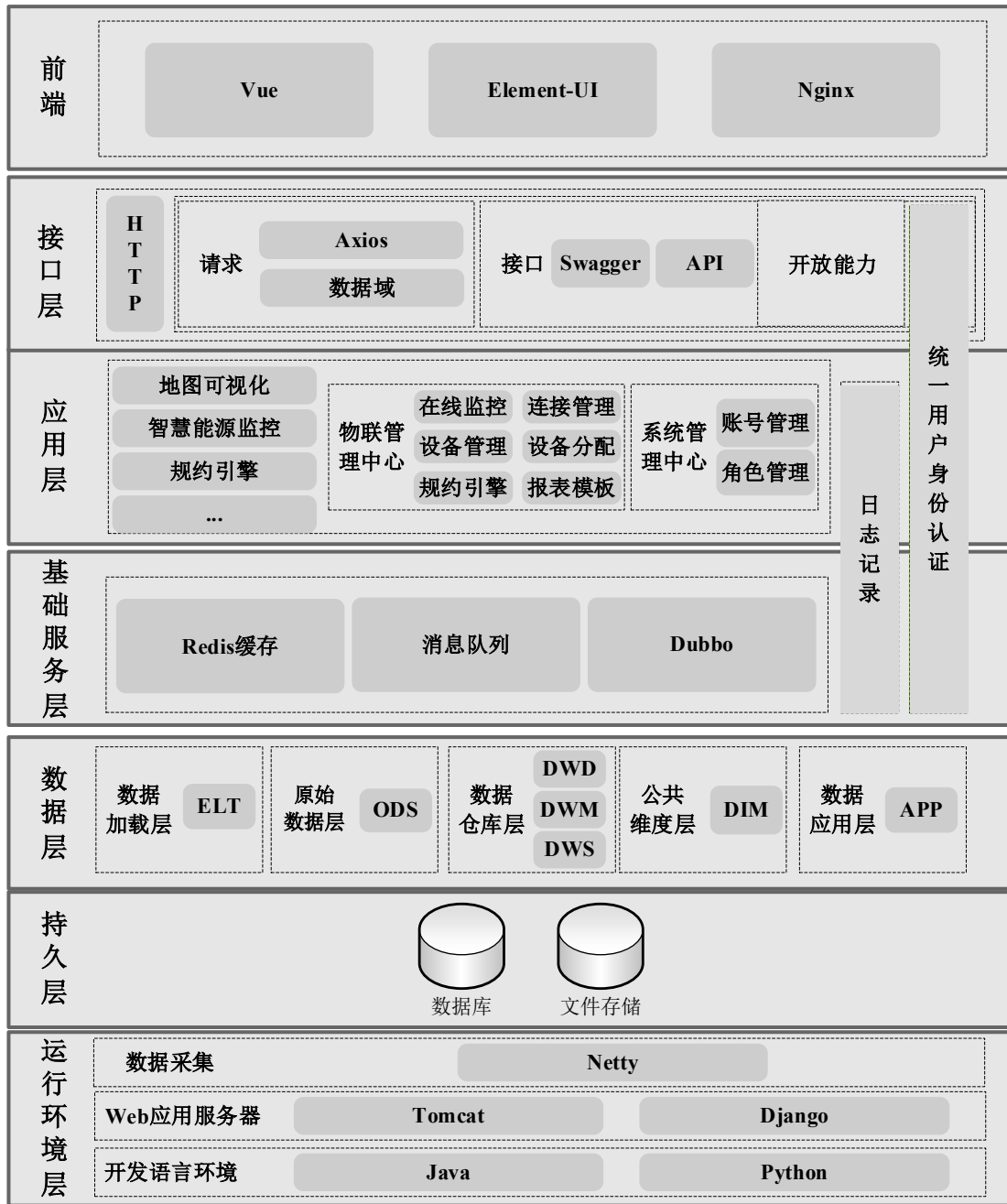


图 4-1 系统架构图

4.1.1 数据仓库

数据仓库的概念是由比尔恩门于 1990 年提出的^[57]，相较于结构化数据库，数据仓库专注于探究和解决如何有效地从底层数据库中抽取、转化并整合信息以服务于高层次的分析性查询与决策支持过程^[58]。它从多个不同的业务系统中抽取、清洗、转换和整合数据，形成一个面向主题的、历史可追溯的、相对稳定的数据集合。数据仓库是基于持久层保存的原始数据信息，通过大数据的手段来对

数据进行处理，由四个部分组成，分别为数据加载层，数据仓库层，公共维度层和数据应用层：

(1) 数据加载层(Extract-Transform-Load, ETL)是指将数据从数据源（持久层）经过抽取(Extract)、转换(Transform)、加载(Load)至原始数据层的过程。原始数据层(Operational Data Store, ODS)是最接近数据源中数据的一层，数据源中的数据经过 ETL 后即可称为 ODS 层，本层的数据大多是按照源头业务系统的分类方式而分类的。

(2) 数据仓库层(Data Warehouse, DW)是数据仓库中最为核心的一层，它接收来自 ODS 层的数据，并围绕特定主题构建多种数据模型。DW 层的内部又进一步划分为多个子层，分别为明细数据层(Data Warehouse Detail, DWD)，数据中间层(Data Warehouse Middle)和汇总数据层(Data Warehouse Service, DWS)：DWD 层一般保持和 ODS 层一样的数据粒度，并提供一定的数据质量保证，同时为了提高 DWD 层的易用性，该层会采用一些维度退化手法，将维度退化至事实表中，减少事实表和维表的关联。另外，该层也会做一部分的数据聚合，将相同主题的数据汇集到一张表中，提高数据的可用性；DWM 在 DWD 层的数据基础上，对数据做轻度的聚合操作，生成一系列的中间表，提升公共指标的复用性，减少重复加工，即对通用的核心维度进行聚合操作。DWS 又称数据集市或主题宽表。按照业务划分，如设备、用户等，生成字段比较多的宽表，用于提供后续的业务查询，OLAP 分析，数据分发等。该层的数据表会相对比较少，但每张表都会涵盖比较多的业务内容。

(3) 公共维度层(Dimension, DIM)是一个专门用于存储和管理业务分析所需的一致性、共享的维度信息的数据库结构。在维度建模中，维度是与事实表相对的概念，它们提供了描述业务实体属性和分类的标准框架。DIM 层的目的是确保不同来源的数据在经过整合后，其对应的维度定义是一致且准确无误的，从而支持跨业务领域的多维分析、报表生成以及决策支持。通过统一维护和提供维度数据服务，该层能够极大地提高数据仓库的整体性能和数据质量，并促进业务理解和洞察力的提升。

(4) 数据应用层(Application, APP)负责将经过整合、清洗和分析的数据转化为实际的应用场景和服务，一般存放在 Redis 中供系统直接使用。

建立数据仓库有着如下的优势：有着清晰的数据结构，每一个数据分层都有它的作用域和职责，在使用数据表的时候能更方便地定位和理解；统一数据口径：通过数据分层，提供统一的数据出口，统一对外输出的数据口径；复杂问题简单化：将复杂的任务分解成多个步骤来完成，每一层只处理单一的步骤。本系统中数据仓库的结构如图 4-2 所示。

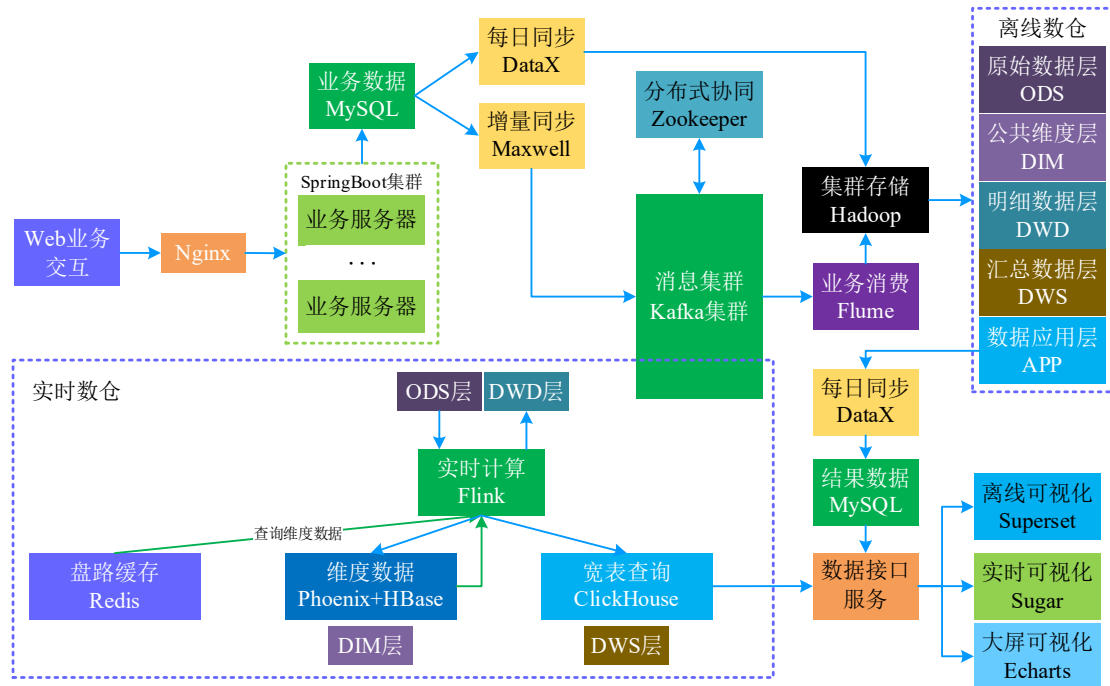


图 4-2 数据仓库结构图

Hadoop 提供了一种分布式的管理技术，其核心 HDFS 是一种基于 MapReduce 的分布式文件系统^[59]。HBase 是一个开源、分布式的、面向列的 NoSQL 数据库，设计用于处理海量数据。在架构上，它将数据存储于 HDFS 之上，利用了 HDFS 的高容错性、高可用性和水平扩展能力。HBase 利用 HDFS 进行底层的数据存储，同时提供了实时读写访问功能以及对大规模数据集的随机访问能力。Flink 是当前主流的分布式流计算引擎，它提供了两个核心 API，一个是适用有界或无界数据流的 DataStream API，另一个是类似标准 SQL 的关系流和批处理形式的 SQL API^[60]。DataX 作为离线数据同步框架，不需要实时保持与数据库的链接，根据实际需要启动同步数据任务就可以完成异构数据同步^[61]。Maxwell 是一个开源的 MySQL 数据变更捕获工具，通过实时读取并解析 MySQL 的二进制日志 binlog，将数据库的增删改操作转换为 JSON 格式的数据，并发布到各种消息队列、流处理平台等。Kafka 是由 Apache Software Foundation 开发的一个分布式流处理平

台,是一种高吞吐量、低延迟、可扩展的消息队列系统,通常用于大规模数据的实时处理和分析^[62]。在本系统中搭建了 Hadoop 集群实现分布式存储, HBase 用于搭建分布式数据库, Kafka 用于搭建消息队列,在数据量很大的情况下用于解耦, DataX 用于将 MySQL 数据每日同步到 Hadoop 集群, Maxwell 用于 MySQL 数据增量同步至 Kafka 集群,通过 Flink 的 SQL API 实时读取存放在 Kafka 消息集群中的数据。

4.1.2 物联通信

在本系统中,我们采用 Netty 框架以 TCP/IP 协议接收 DERs 设备传输的自定义协议数据或下发调度指令进行远程控制。基于 Netty 物联通信流程如图 4-3 所示。

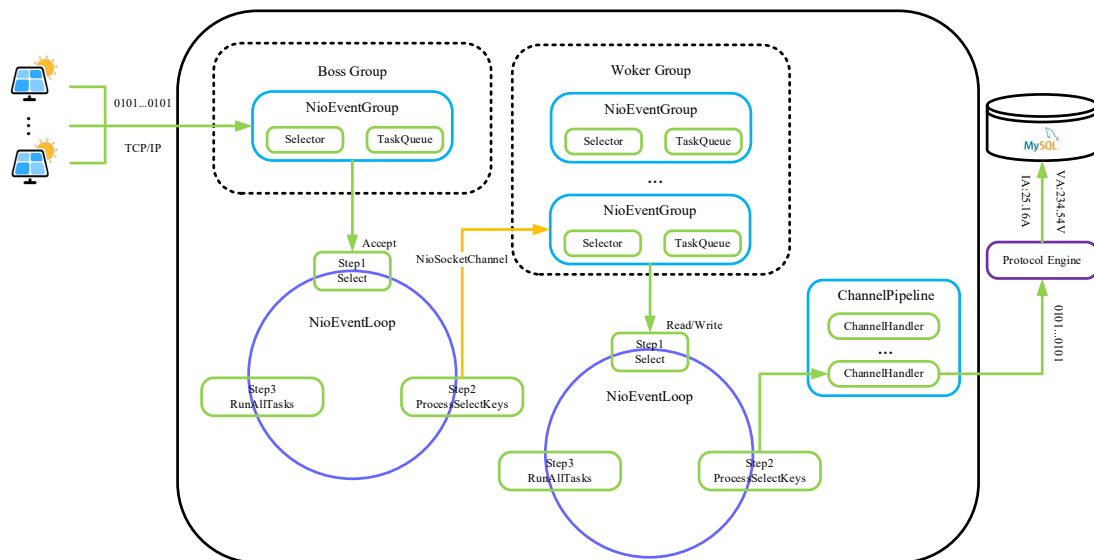


图 4-3 Netty 物联通讯流程图

Netty 工作始于创建两个 NioEventLoopGroup(Non-blocking I/O), 即 Boss Group 和 Worker Group。Boss Group 专注于接收客户端连接请求, 而 Worker Group 负责处理已建立连接的数据传输。NioEventLoopGroup 可以包含多个线程, 即包含多个 NioEventLoop, 每个 NioEventLoop 表示一个循环处理连接或任务的线程, 配有一个 Selector, 用于监听绑定在其上的 Socket 网络通讯。每个 Boss NioEventLoop 循环接受入站连接请求, 主要有三步:

1、轮询 Accept 事件, Boss NioEventLoop 在其事件循环中通过轮询等待接收客户端的连接请求, 使用底层的 Selector 来监听 ServerSocket 的 Accept 事件;

2、处理 Accept 事件，一旦有客户端连接请求到达，Boss NioEventLoop 负责处理 Accep 事件，包括接受客户端的连接请求和创建一个新的 NioSocketChannel 来表示这个连接。一旦新连接创建成功，Boss NioEventLoop 会通过负载均衡算法选择一个 Worker NIOEventLoop。

3、处理 TaskQueue 中的任务，NioEventLoop 维护了一个 TaskQueue，其中包含了待处理的任务，runAllTasks 方法会从 TaskQueue 中依次取出任务，并执行；

每个 Worker NioEventLoop 用于处理已建立连接的数据传输的事件循环，主要有三步：

1、轮询 Read/Write 事件，Worker NioEventLoop 通过底层的 Selector 在其事件循环中轮询等待已建立连接的 Socket 上发生的读写事件。

2、处理 Read/Write 事件，其过程包括数据的读取、解码、业务逻辑的处理等。当有 Read/Write 事件发生时，触发相应 ChannelHandler（ChannelPipeline 中的处理器链），ChannelHandler 中的业务逻辑（可能包括协议解析、数据处理、业务计算等）将被调用执行。

3、处理 TaskQueue 中的任务，流程与 Boss NioEventLoop 类似。

4.1.3 规约引擎

针对电力系统中设备终端种类众多，厂商不一，存在着众多的接入协议与规约的问题，本平台遵循泛在电力物联网的基本理念，研制出了规约引擎。如图 4-4 所示，通过软件定义协议和规约的思想，统一数据采集的规范，标准化感知设备的接入，实现了统一的设备连接管理，多协议适配，屏蔽众多规约的复杂性，灵活接入不同厂家不同协议的设备。

本系统中共接入了两种类型电表，其中 SE-2000 电表采用的是 HEX 解析方式，而 SMS0078 电表则采用的是 IEEE 754 协议，两种电表的规约分别如图 4-5 和图 4-6 所示。

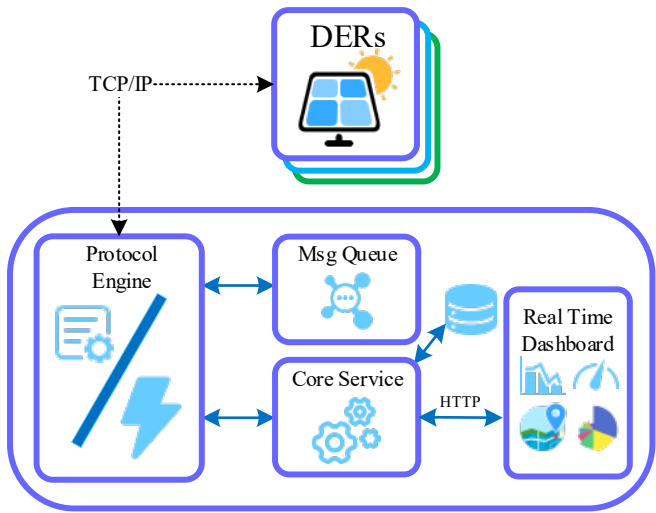


图 4-4 规约引擎

6.1.3相关参数地址映像表

注: 地址号相当变量数组的索引
定值类数据地址

序号	地址映像	变量名称	默认值	字长	取值范围	读 / 写 允许	系数
1	0x0000	相电压Ua	0.000	2	0-9999	R	0.001
2	0x0002	相电压Ub	0.000	2	0-9999	R	0.001
3	0x0004	相电压Uc	0.000	2	0-9999	R	0.001
4	0x0006	线电压Uab	0.000	2	0-9999	R	0.001
5	0x0008	线电压Ubc	0.000	2	0-9999	R	0.001
6	0x000A	线电压Uca	0.000	2	0-9999	R	0.001
7	0x000C	相电流Ia	0.000	2	0-9999	R	0.001
8	0x000E	相电流Ib	0.000	2	0-9999	R	0.001
9	0x0010	相电流Ic	0.000	2	0-9999	R	0.001
10	0x0012	A相有功功率Pa	0.000	2	0.000-9999	R	1
11	0x0014	B相有功功率Pb	0.000	2	0.000-9999	R	1
12	0x0016	C相有功功率Pc	0.000	2	0.000-9999	R	1

图 4-5 SE-2000 电表规约

MODBUS-RTU通讯地址信息表									
4PE	4PEF	7P-1EF	7P-05EF	地址	数据格式	单位	读/写	数据长度	说明
一次电网数据 (Float)									
*	*	*	*	0x0A	Float	V	R	2	一次A相电压
		*	*	0x0C	Float	V	R	2	一次B相电压
		*	*	0x0E	Float	V	R	2	一次C相电压
		*	*	0x10	Float	V	R	2	一次AB线电压
		*	*	0x12	Float	V	R	2	一次BC线电压
		*	*	0x14	Float	V	R	2	一次CA线电压
*	*	*	*	0x16	Float	A	R	2	一次A相电流
		*	*	0x18	Float	A	R	2	一次B相电流
		*	*	0x1A	Float	A	R	2	一次C相电流

图 4-6 SMS0078 电表规约

规约引擎界面如图 4-7 所示, 点击各规约后的解码按钮即可实现数据的解析操作, 两种电表的解析效果如图 4-8 和图 4-9 所示。



图 4-7 规约引擎界面

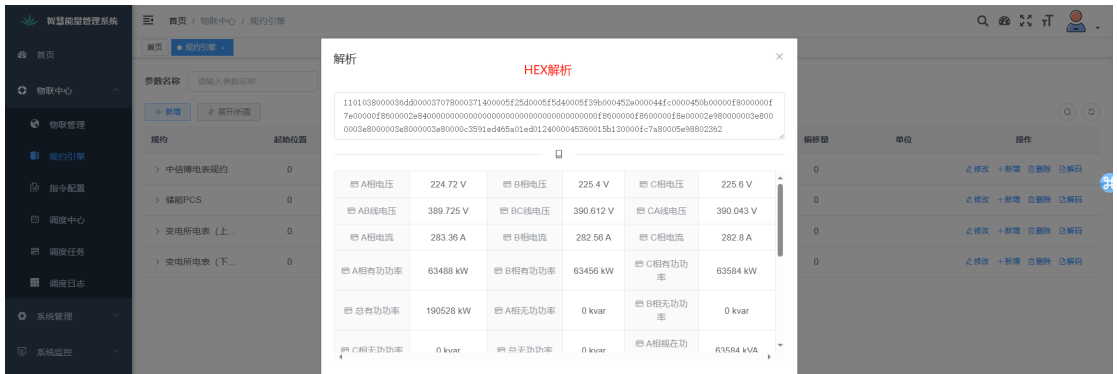


图 4-8 HEX 解析结果



图 4-9 IEEE 754 解析结果

4.1.4 储能控制

本系统对接入的储能也实现了远程控制操作，如图 4-10 所示，在 2023-12-15 12:00:35 储能正处于充电状态，进入到调度指令界面对储能下发了“默认充放电配置 1”，即每日 9:45 至 13:00，使储能以 100%的功率进行放电操作，如图 4-11 所示，下发指令后返回界面，通过有功曲线界面发现在 2023-12-15 12:01:25 储能响应了调度指令，开始放电，如图 4-12 所示。



图 4-10 储能充电图

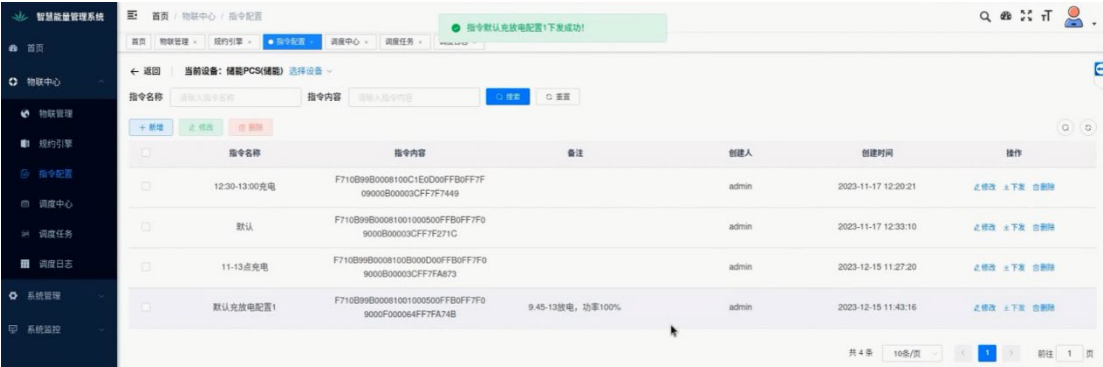


图 4-11 下发调度指令



图 4-12 储能响应调度指令

4.2 系统核心应用

本系统接入了繁昌区 84 个屋顶光伏共计 70610.545kW 和 35kV 至 220kV 共计 13 个变电站的电力与地理数据，核心应用有：数据分析与预测、储能规划和

优化调度。

4.2.1 数据分析与预测

通过采集到的光伏和变电站数据，分析可得到整区的实时与预测功率、各镇的电量及其排行、周电量统计、设备实时与预测数据，设备的拓扑情况，如图 4-13 所示。其中数据预测采用的是基于自适应加权的 LSTM 神经网络[63]。



图 4-13 数据分析与预测界面

点击变电站会弹出对话框，点击拓扑按钮会显示整个设备的拓扑结构，若其下存在光伏，则会出现光伏按钮，点击即可在查看该变电站下的光伏设备地理信息，或点击变电站按钮回到变电站界面，如图 4-14 所示。



图 4-14 变电站拓扑界面

4.2.2 储能规划

储能规划，即储能的选址定容，在于确保储能系统的建设和运营能够最大程度地满足需求、提高能源系统的可靠性，并在经济和环境方面取得最佳效益。本系统中储能规划的流程如下所示：

S1.光伏聚合，根据距离的远近按设定的组内个体数进行光伏的聚合，形成光伏组，分别计算各个组内的最大最小经纬度，形成封闭区间。

$$a_1^2 = \sin^2\left(\frac{\Delta lat^2}{2}\right) + \cos(lat_1) \cdot \cos(lat_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta lng}{2}\right) \quad (4-1)$$

$$c_1^2 = 2 \operatorname{atan}2(\sqrt{a_1^2}, \sqrt{1-a_1^2}) \quad (4-2)$$

$$d_1^2 = R \cdot c_1^2 \quad (4-3)$$

$$\begin{cases} lng_{\max}^i = \max(\{lng_1^i, lng_2^i, \dots, lng_n^i\}) \\ lng_{\min}^i = \min(\{lng_1^i, lng_2^i, \dots, lng_n^i\}) \end{cases} \quad (4-4)$$

式中： lat_1 和 lat_2 分别是设备1和2的纬度， Δlng 和 Δlat 分别为经度和纬度差， R 为地球半径， d_1^2 为设备1和2之间的距离， $lng_1^i, lng_{\max}^i$ 和 $lng_{\min}^i$ 分别为第 i 组第1个光伏的经度、封闭区间的最大和最小经度，维度计算与经度类似； $\{lng_1^i, lng_2^i, \dots, lng_n^i\}$ 为第 i 个光伏组。

S2.优化选址，由于地理信息缺乏相关型，本系统中采用随机搜索的方式，根据设置的种群个体数随机在封闭区间内生成经纬度数据，计算适应度，迭代次数加1，循环S2，直至达到设定的最大迭代次数，选取每组中适应度最小的经纬度作为储能的选址。

$$lng_{r1}^i = r(lng_{\max}^i - lng_{\min}^i) + lng_{\min}^i \quad (4-5)$$

$$fit_{r1}^i = \sum_{x=1}^n d_{r1}^x P_x \quad (4-6)$$

式中： lng_{r1}^i 为第 i 组第1个个体的经度， d_{r1}^x 为第1个个体与第 x 个光伏间的距离， P_x 为 x 个光伏的功率。

S3.容量配置，计算组内光伏的总容量，根据配置的光储容量配比即可得到储能的容量，如图4-15所示。



图 4-15 储能规划界面

4.2.3 优化调度

电力系统优化调度问题是指在给定负荷预测功率和新能源预测功率的条件下,在满足负荷的供应和系统的安全运行的前提下,通过制定各种发电机组的出力计划,以满足经济、能量或环境的综合性目标的问题^[64,65]。该问题具有非线性、多约束和多时段等特点,模型维数高、约束复杂,求解难度很大^[66]。本系统建立的目标函数详见第 3 章或文献^[67],采用了乌鸦正余弦搜索算法^[68]来对目标函数进行求解,得到最优适应度,如图 4-15 所示。

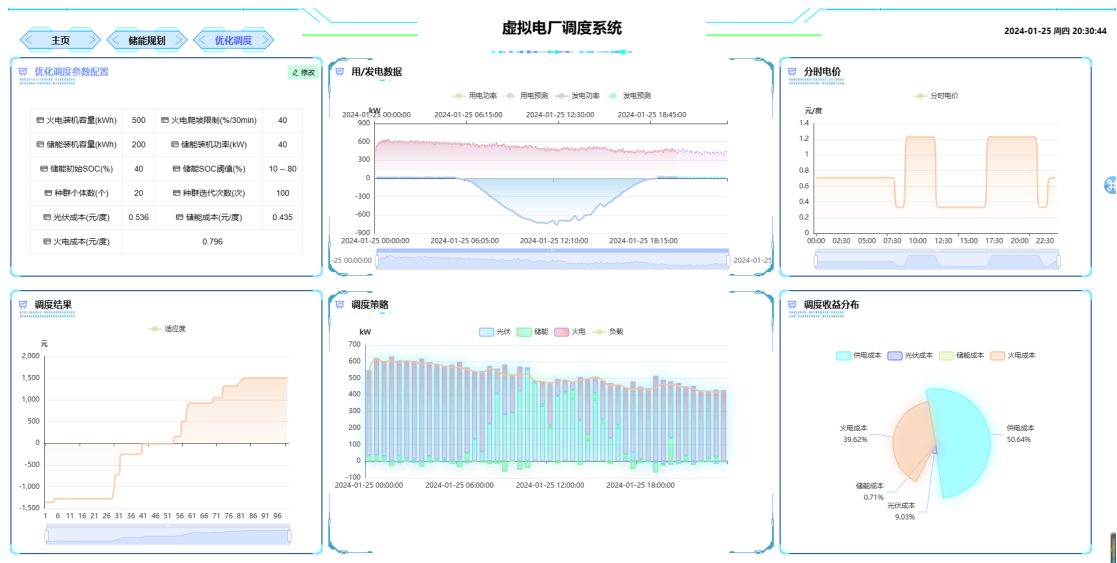


图 4-15 优化调度界面

系统可以对场景数据、优化调度参数和分时电价等参数进行配置,从而得到

不同场景下的优化调度数据，如图 4-16 所示。

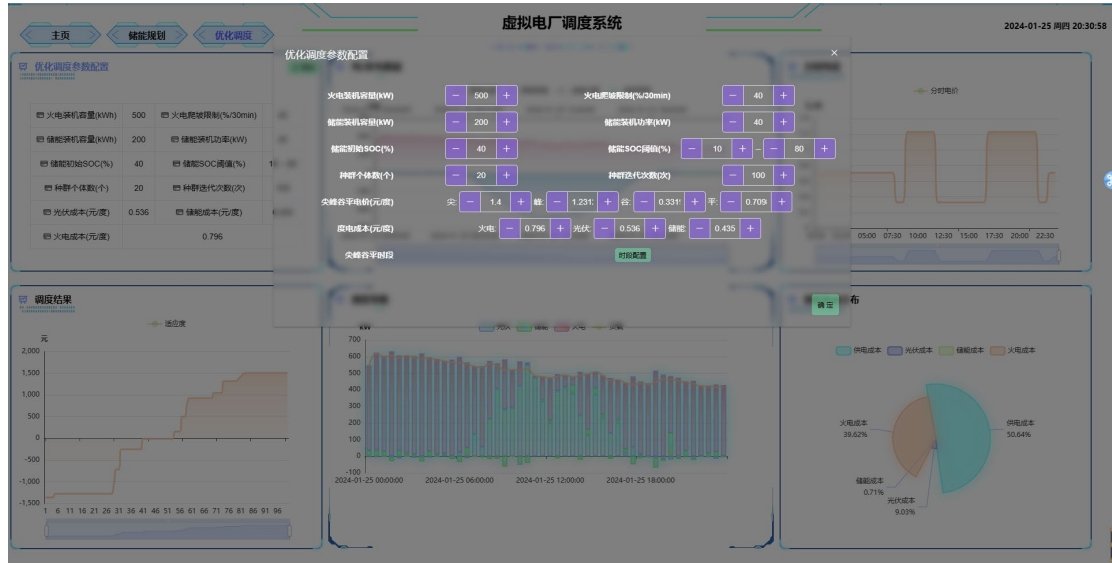


图 4-16 参数配置界面

当点击尖峰谷平时段配置按钮即可自定义分时电价的时段，适配各个省市不同分时电价的场景，如图 4-17 所示。

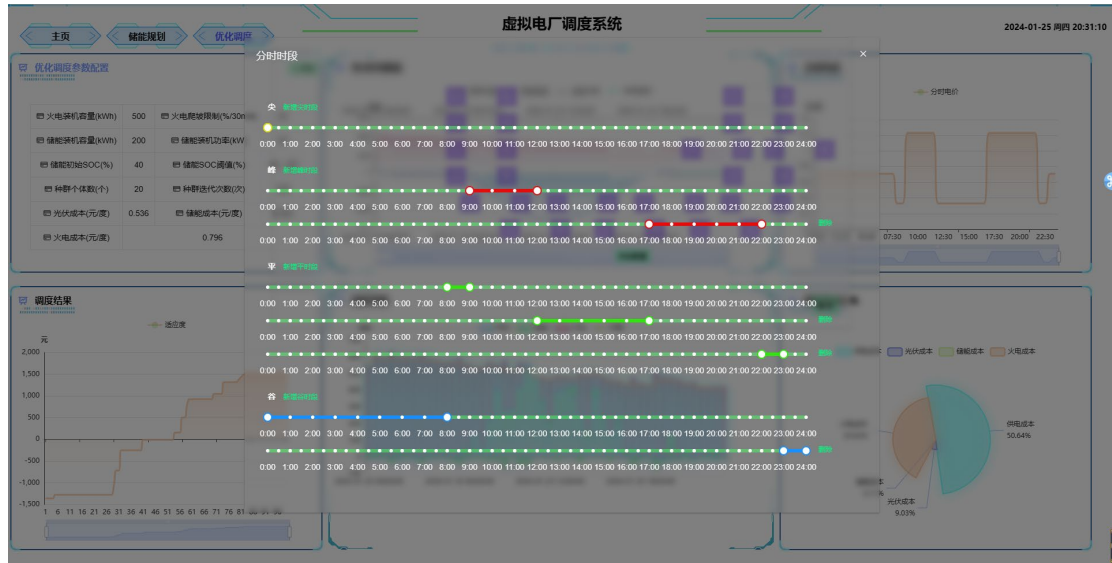


图 4-17 时段配置界面

4.3 本章小结

本章聚焦于县域虚拟电厂调度系统的架构设计、功能模块构成及其核心应用的实现。首先，从宏观层面系统性地概述了该调度系统的整体框架结构；其次，针对系统层次化构建的特点，依次简单阐述了各个层级的核心作用；接着，详细介绍了系统的四大核心功能模块：数据仓库、物联网通信、规约引擎和储能调度，

分别介绍了其结构或原理，最后详细介绍了数据分析与预测、储能规划和优化调度在内的系统三大核心应用的实现：基于自适应加权的 LSTM 神经网络实现的数据预测，基于随机搜索算法的储能规划和基于乌鸦正余弦搜索算法的优化调度，并对其界面进行了展示。

第 5 章 总结与展望

5.1 总结

在“双碳”大背景下，可再生能源因其对实现国家减排目标的决定性贡献和对未来能源格局重构的深刻影响，被赋予了不可或缺的战略高度。但由于可再生能源的随机性及成本缺乏竞争力等弊端，在实际调度中存在弃风弃光的问题，阻碍了虚拟电厂充分发挥其低碳减排的潜能。在此背景下，如何科学合理地优化碳市场运营机制或建立更为可靠的模型变得极为重要。为此，本文通过分析影响虚拟电厂低碳减排的因素，提出碳交换机制和建立新型碳排放模型分析验证，并搭建县域调度系统在芜湖市繁昌区进行应用，取得了一定的成果。具体内容如下：

(1) 针对弃风弃光和碳排放等问题，提出了分时阶梯式碳排放权交换机制：首先，在功率平衡的前提下，考虑到风光消纳的同时必然会减少火力发电量，对此采用碳排放权交换机制，通过可再生能源的消纳，来兑换相应的碳排放配额，从而促进可再生能源的消耗，减少碳排放。其次，在分时电价的影响下，电网在不同时刻下风光消纳电量与火电的比例也不同，对应的度电碳排放也不同，对此优化了度电碳排放因子，通过整合火电与可再生能源的分时平均用电量，火电机组的碳排放基准值和电网的平均度电碳排放，最终得到电网度电碳排放因子。最后，针对谷时和平时电价较低，达不到风光消纳成本，故存在大量弃风弃光的现象，对此采用了阶梯兑换策略，随着可再生能源消纳的增加，可以兑换更多的碳排放配额。结合以上内容，形成了分时阶梯式碳排放权交换机制。通过对仿真结果分析发现所提碳交换机制能在提升虚拟电厂日调度收益的同时，实现对可再生能源的深度消纳。

(2) 通过实验分析发现现有模型无法反映真实的碳排放情况，可能会出现偏离调度预期的结果，在某些极端场景下甚至完全背离。对此，通过土耳其燃气轮机排放公开数据集进行等效分析，首先通过皮尔逊相关系数分析碳排放与爬坡和环境因素间的相关性，并建立了含爬坡和环境因素的新型燃气轮机碳排放模型，采用均方根误差和决定系数来对所建模型进行回归分析，选取最优的碳排放模型，并验证有效性。以上述模型为基础，虚拟电厂日调度收益最大为目标函数，采用

罚函数法将约束条件引入到目标函数中,构建了含“风-光-气-储”的经济优化调度模型。针对所建模型具有高维非线性、强约束性和求解运算难度大等问题,通过实验发现乌鸦搜索算法具有很好的求解特性,但固定参数使得乌鸦搜索算法的搜索能力受限,为进一步优化乌鸦搜索算法协调全局探索与局部开发的能力,提出了乌鸦正余弦搜索算法来对模型求解,通过仿真验证了所提模型和求解策略的可行性和优越性,能有效提升虚拟电厂的调度收益和可再生能源的消纳比例。

(3) 本章聚焦于县域虚拟电厂调度系统的架构设计、功能模块构成及其核心应用的实现。首先,从宏观层面系统性地概述了该调度系统的整体框架结构;随后,针对系统层次化构建的特点,依次简单阐述了各个层级的核心作用;接着,详细介绍了系统的四大架构与功能模块:数据仓库、物联通信、规约引擎和储能调度,分别介绍了其结构或原理,最后详细介绍了数据分析与预测、储能规划和优化调度在内的系统三大核心应用的实现原理:基于自适应加权的 LSTM 神经网络实现的数据预测,基于随机搜索算法的储能规划和基于乌鸦正余弦搜索算法的优化调度,并对其界面进行了展示。

5.2 展望

虚拟电厂经济优化调度作为当前能源与电力系统研究领域的热点话题,备受学界和业界的广泛关注。随着全球对能源结构转型、节能减排以及智能电网发展的迫切需求,虚拟电厂凭借其聚合分布式能源资源、优化供需匹配和提升电网灵活性的独特优势,日益成为实现“双碳”目标的关键技术手段之一。本文的研究只是一个初步的探索,还需要进一步完善和深入研究。在未来的研究过程中,需要结合实际情况和更精细的数据进行深入研究,以提升虚拟电厂对可再生能源消纳的积极性。如:

(1) 对于碳交易机制的研究,本文提出的分时阶梯式碳排放权兑换机制中,对出力区间的划分太过简单化,只考虑了固定出力区间下的调度收益和可再生能源消纳情况,未考虑设置多个不同的出力区间对本文的机制进行分析,且未考虑到能量的损耗问题,后续可以进一步研究不同出力区间下机制的有效性,或将出力区间作为变量,优化得出最优的出力区间设置,以进一步分析机制的鲁棒性。

(2) 对于碳排放建模的研究,由于土耳其燃气轮机数据集中未统计爬坡因素,

本文中的爬坡数据根据前后出力残差得来，而数据集是通过一小时内平均值或总和采集的，故得到的爬坡数据不能反映真实燃气轮机的爬坡水平，可能导致得到的碳排放模型可能也不是很准确，还需更为详实的单台燃气轮机运行数据，提高碳排放建模的精度和可靠性。

(3) 县域虚拟电厂调度系统，本文对于规约引擎的研究还处于探索阶段，解析逻辑的暂时定制在源代码内，每增加一种解析方式都需要在源代码中新增解析的逻辑代码。在未来的实践中，可将解析逻辑的代码抽出存入到数据库中，通过 `JavaCompiler` 类动态解析，并可在界面预留数据解析的模板代码以供新增解析逻辑，从而构建更为完善的泛在电力物联网系统。

参考文献

- [1] Cao Y J, Li Q, Tan Y, et al. A comprehensive review of Energy Internet: basic concept, operation and planning methods, and research prospects[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(03): 399-411.
- [2] Pandžić H, Kuzle I, Capuder T. Virtual power plant mid-term dispatch optimization[J]. Applied energy, 2013, 101: 134-141.
- [3] 刘吉臻, 李明扬, 房方等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103-5111.
- [4] 周宗敏. 照亮前行方向的希望之光——记习近平主席出席联合国成立 75 周年系列高级别会议[N]. 新华网, 2020-10-02.
- [5] Zhao F, Liu X, Zhang H, et al. Automobile industry under China's carbon peaking and carbon neutrality goals: challenges, opportunities, and coping strategies[J]. Journal of Advanced Transportation, 2022, 2022(1): 1-13.
- [6] 丁怡婷. 打赢低碳转型硬仗[N]. 人民日报, 2021-04-09.
- [7] Hübler M, Löschel A. The EU decarbonisation roadmap 2050—what way to walk?[J]. Energy Policy, 2013, 55: 190-207.
- [8] Renewable capacity statistics 2023[EB/OL]. <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>.
- [9] Peng F, Hu S, Fan X, et al. Sequential coalition formation for wind-thermal combined bidding[J]. Energy, 2021, 236: 121475.
- [10] Shabanzadeh M, Sheikh-El-Eslami M K, Haghifam M R. The design of a risk-hedging tool for virtual power plants via robust optimization approach[J]. Applied Energy, 2015, 155: 766-777.
- [11] 2022 年一季度全国新能源电力消纳评估分析[EB/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220518/1226078.shtml>.
- [12] 电力发展“十三五”规划（2016-2020 年）[EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2016-12/22/content_5151549.htm.
- [13] “十四五”现代能源体系规划[EB/OL]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengcek>

u/2022-03/23/content_5680759.htm.

- [14] 戴小河. 有效促进电网供需平衡, 虚拟电厂能力不“虚”[N]. 科技日报, 2022-08-27.
- [15] Awerbuch S, Preston A. The virtual utility: Accounting, technology & competitive aspects of the emerging industry[M]. Springer Science & Business Media, 1997.
- [16] Asmus P. Microgrids, virtual power plants and our distributed energy future[J]. The Electricity Journal, 2010, 23(10): 72-82.
- [17] Lombardi P, Powalko M, Rudion K. Optimal operation of a virtual power plant[C]. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2009: 1-6.
- [18] Zhou K, Yang S, Shao Z. Energy internet: the business perspective[J]. Applied energy, 2016, 178: 212-222.
- [19] Khodr H M, El Halabi N, García-Gracia M. Intelligent renewable microgrid scheduling controlled by a virtual power producer: A laboratory experience[J]. Renewable energy, 2012, 48: 269-275.
- [20] Bignucolo F, Caldon R, Prandoni V, et al. The voltage control on MV distribution networks with aggregated DG units (VPP)[C]. 2006 41st International Universities Power Engineering Conference. IEEE, 2006, 1: 187-192.
- [21] Zamani A G, Zakariazadeh A, Jadid S, et al. Stochastic operational scheduling of distributed energy resources in a large scale virtual power plant[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 82: 608-620.
- [22] Mashhour E, Moghaddas-Tafreshi S M. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets—Part I: Problem formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 26(2): 949-956.
- [23] 姜海洋, 谭忠富, 胡庆辉等. 用户侧虚拟电厂对发电产业节能减排影响分析[J]. 中国电力, 2010, 43(06): 37-40..
- [24] 刘东, 樊强, 尤宏亮等. 泛在电力物联网下虚拟电厂的研究现状与展望[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(04): 3-12.
- [25] 周亦洲, 孙国强, 黄文进等. 多区域虚拟电厂综合能源协调调度优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6780-6790+7069.

- [26] 袁桂丽, 陈少梁, 刘颖等. 基于分时电价的虚拟电厂经济性优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(03): 826-832.
- [27] Xie J, Cao C. Non-convex economic dispatch of a virtual power plant via a distributed randomized gradient-free algorithm[J]. *Energies*, 2017, 10(7): 1051.
- [28] Lin L, Guan X, Peng Y, et al. Deep reinforcement learning for economic dispatch of virtual power plant in internet of energy[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(7): 6288-6301.
- [29] Zheng Y, Wang Z, Ju P, et al. A distributed two-stage economic dispatch for virtual power plant based on an improved exact diffusion algorithm[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9: 734801.
- [30] 陆敏安, 范松丽, 张红燕等. 不同备用付费机制下的 VPP 经济调度策略[J]. 电器与能效管理技术, 2014, (21): 53-58+64.
- [31] 孙国强, 钱苇航, 黄文进等. 考虑配电网安全性的虚拟电厂优化调度博弈模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(05): 7-14.
- [32] Gao Z, Kang W, Chen X, et al. Optimal economic dispatch of a virtual power plant based on gated recurrent unit proximal policy optimization[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2024, 12: 1357406.
- [33] Liu W, Xu H, Wang X, et al. Optimal dispatch strategy of virtual power plants using potential game theory[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 1069-1079.
- [34] 袁桂丽, 王琳博, 王宝源. 基于虚拟电厂“热电解耦”的负荷优化调度及经济效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4974-4985+5217.
- [35] 张高, 王旭, 蒋传文等. 采用双层优化调度的虚拟电厂经济性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(08): 2295-2302.
- [36] 艾欣, 周树鹏, 赵阅群. 考虑风电不确定性的用户侧分时电价研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1529-1535.
- [37] 赵洪山, 刘然. 奖惩机制下虚拟电厂优化调度效益分析[J]. 电网技术, 2017, 41(09): 2840-2847.
- [38] 董文略, 王群, 杨莉. 含风光水的虚拟电厂与配电公司协调调度模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(09): 75-81+207.
- [39] Jie Y, Zhang X, Yong T, et al. Low Carbon Power Dispatch Strategy for Regional

- Integrated Virtual Power Plants under the Constraint of Environmental Impact Assessment[J]. *Ekoloji*, 2019, 28(107): 1411-1416.
- [40] Guo W, Mao Y, Zhang X, et al. Internal benefit optimization model of gas - thermal power virtual power plant under china's carbon neutral target[J]. *Energy Science & Engineering*, 2022, 10(4): 1227-1239.
- [41] Cao Z, Wang J, Zhao Q, et al. Decarbonization scheduling strategy optimization for electricity-gas system considering electric vehicles and refined operation model of power-to-gas[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 5716-5733.
- [42] Zhao H, Zhang C, Zhao Y, et al. Low-Carbon Economic Dispatching of Multi-Energy Virtual Power Plant with Carbon Capture Unit Considering Uncertainty and Carbon Market[J]. *Energies*, 2022, 15(19): 7225.
- [43] Tan Y, Shen Y, Yu X, et al. Low - carbon economic dispatch of the combined heat and power - virtual power plants: A improved deep reinforcement learning - based approach[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2023, 17(4): 982-1007.
- [44] 陈登勇, 刘方, 刘帅. 基于阶梯碳交易的含 P2G-CCS 耦合和燃气掺氢的虚拟电厂优化调度[J]. *电网技术*, 2022, 46(06): 2042-2054.
- [45] 苏志鹏, 王莉, 梁欣怡等. 考虑阶梯式碳交易及综合需求响应的虚拟电厂优化调度[J]. *中国电力*, 2023, 56(12): 174-182.
- [46] Xie T, Wang Q, Zhang G, et al. Low-Carbon Economic Dispatch of Virtual Power Plant Considering Hydrogen Energy Storage and Tiered Carbon Trading in Multiple Scenarios[J]. *Processes*, 2023, 12(1): 90.
- [47] Yan Q, Ai X, Li J. Low-carbon economic dispatch based on a CCP-P2G virtual power plant considering carbon trading and green certificates[J]. *Sustainability*, 2021, 13(22): 12423.
- [48] Liu L, Chen C, Zhao Y, et al. China's carbon-emissions trading: Overview, challenges and future[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 49: 254-266.
- [49] Li L, Ye F, Li Y, et al. How will the Chinese Certified Emission Reduction scheme save cost for the national carbon trading system?[J]. *Journal of environmental management*, 2019, 244: 99-109.

- [50] Kaya H, Tüfekci P, Uzun E. Predicting CO and NO_x emissions from gas turbines: novel data and a benchmark PEMS[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2019, 27(6): 4783-4796.
- [51] Askarzadeh A. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm[J]. Computers & structures, 2016, 169: 1-12.
- [52] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. 1995 ICNN'95-international conference on neural networks. IEEE, 1995, 4: 1942-1948.
- [53] Price K V. Differential evolution[M]//Handbook of optimization: From classical to modern approach. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 187-214.
- [54] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in engineering software, 2014, 69: 46-61.
- [55] Nematollahi A F, Rahiminejad A, Vahidi B. A novel physical based meta-heuristic optimization method known as lightning attachment procedure optimization[J]. Applied Soft Computing, 2017, 59: 596-621.
- [56] 庞子皓. 基于 Netty 与 Kafka 的物联网数据采集平台的设计与实现[D]. 南京邮电大学, 2023.
- [57] 缪华, 吴淮北, 张春梅等. Hive 数据仓库加载数据的技术研究[J]. 电脑编程技巧与维护, 2023(12): 58-61.
- [58] 陈新房, 刘义卿. 分布式系统数据仓库工具 Hive 的工作原理及应用[J]. 科学技术创新, 2021(36): 104-107.
- [59] 张鹏飞, 江岸, 熊念. Hadoop 平台下基于优化 X-means 算法的大数据聚类研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 284-289+309.
- [60] 张荣勋. 云呼叫中心大数据综合应用平台设计与实现[D]. 南京邮电大学, 2023.
- [61] 屠增辉, 刘淼, 陈小丽. 基于 DataX 的异构教学数据同步研究和应用[J]. 中国现代教育装备, 2021(19): 114-115+118.
- [62] 余建忠, 谭任深. 基于 Kafka 的海上风电场数据传输系统设计与实现[J]. 科

- 技创新与应用, 2023, 13(31): 26-31.
- [63] Ahmed R, Sreeram V, Togneri R, et al. Computationally expedient Photovoltaic power Forecasting: A LSTM ensemble method augmented with adaptive weighting and data segmentation technique[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 258: 115563.
- [64] 张国荣, 陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(01): 1-7.
- [65] Wang P C, Ge Y, Yu N, et al. Low-carbon optimal dispatch of virtual power plant based on time-of-use ladder carbon emission rights exchange mechanism[J]. Systems Science & Control Engineering, 2023, 11(1): 2180688.
- [66] 潘华, 梁作放, 薛强中等. 基于分时电价的含风-光-气-储虚拟电厂经济调度[J]. 太阳能学报, 2020, 41(08): 115-122.
- [67] Wang P C, Ge Y, Wang Y, et al. Economic Dispatch of Virtual Power Plant Based on New Carbon Emission Model[C]. 2023 35th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2023: 4583-4588.
- [68] Askarzadeh A. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm[J]. Computers & structures, 2016, 169: 1-12.

攻读硕士学位期间成果

- [1] Wang P C, Ge Y*, Yu N, Lin Q Y, Chen R F, Wang J. Low-carbon optimal dispatch of virtual power plant based on time-of-use ladder carbon emission rights exchange mechanism[J]. Systems Science & Control Engineering, 2023, 11(1): 2180688.
- [2] Wang P C, Ge Y*, Wang Y, Lin Q Y, Chen R F, Wang J. Economic dispatch of virtual power plant based on new carbon emission model[C]. 2023 35th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2023: 4583-4588.
- [3] Lin Q Y, Wang P C*, Wang J, Li Y L. Distributed Roof Photovoltaics monitoring system for the whole district[C]. 2024 3rd International Conference on Computer, Artificial Intelligence and Control Engineering (CAICE). In press.

致谢

白驹过隙，忽然而已，岁月匆匆如流水，转瞬即逝的时光即将为我的学生生涯画上句点。回首这段青春年华，我仿佛还能听见琅琅书声回荡在耳畔，看见绿茵场上奔跑的身影，感受那份对知识无尽的渴望和探索的热情。这段旅程中，我从社会的大舞台重返校园的书香之地，以一种全新的身份和视角去体验、去领悟这份独特的美好。心中感慨万分，既有对过去青涩岁月的怀念，也有对当下充实生活的满足；既有对未知挑战的忐忑，更有对未来梦想的执着追求。这段学生生涯让我收获了知识的力量，体验了友情的温暖，磨砺了坚韧的意志，也明白了责任与担当的意义。每一滴汗水，每一次奋斗，都成为了我生命中无法替代的宝贵财富。

首先，我对葛愿教授表示由衷的敬意，在您的带领和指导下，我得以圆满地完成了涵盖多个重要科研领域和工程领域的项目研发工作，顺利完成信义储电的能量管理系统，芜湖港口高压滑环箱监控系统等系统，供电公司的全息质感配电台区，繁昌整区分布式屋顶光伏监控系统和基于异构运算的边缘终端等多个重大科研项目，这些经历不仅助力我个人专业技能和心性的磨砺，更显著提升了我的科研素养与实践能力，为我未来的职业发展提供坚实的基础。我将永远怀着感激之情，珍惜您的教诲和帮助，为自己的成长不断努力，为社会做出自己的贡献。

其次，我需要感谢我的父母，他们无私的付出和坚定的支持为我构筑了温馨的成长环境，无论是在精神上的慰藉还是生活中的关怀，都成为我面对挑战、勇往直前的动力源泉。他们的言传身教塑造了我坚韧不拔的性格，培养了我独立思考和解决问题的能力。这份厚重的亲情始终如一盏明灯，照亮我前行的道路，使我在求知探索的道路上不断取得进步，收获成长。在此，我满怀感激之情，向我亲爱的父母致以最诚挚的谢意。

最后，我还要感激我的同门，是他们在学术探讨时的热情激昂，合作攻关时的同心协力，困难面前的相互扶持，成功背后的共同分享，共同构成了我研究生生涯中最珍贵的记忆。每一次思维碰撞的火花，每一场夜以继日的奋斗，每一次共度难关后的欢笑，都在无形中滋养着我的心灵，这份同门之间的情谊与默契，无疑是推动我不断前行的强大动力。在此，我特别要向王洁同学表达衷心的感谢，

每次在我遇到困难的时候，她都在背后默默地提供支持和鼓励，正是有了王洁同学的陪伴和支持，我才能够顺利完成本论文和诸多项目，并取得如今的研究成果。

此刻，站在硕士生涯的终点回望，既有对未来满怀憧憬的信心，也有对过去点滴付出的珍视。我将继续秉持初心，带着这份感恩与执着，迈向新的征程，以期社会的进步贡献自己的一份力量。

尚德敏学 唯实惟新

