

分类号:TM73
密 级: 公开

学校代码:10363
学 号:2220310107



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 风光氢储新能源汽车充能站
优化调度策略研究

论 文 作 者 崔 露
指 导 教 师 刘世林 教授
学 科 (专 业) 电气工程
研 究 方 向 电力系统及其自动化

论文提交日期: 2025 年 5 月 8 日

分类号：TM73

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220310107

题 目 风光氢储新能源汽车充电站优化调度策略研究

题 目 Research on Optimal Dispatch Strategy for
Wind-Solar-Hydrogen-Storage Integrated
New Energy Vehicle Charging Stations

学生姓名： 崔 露

指导教师： 刘世林 教授

专 业： 电气工程

研究方向： 电力系统及其自动化

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：崔露

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：崔露

指导教师签名：孙明

日期：2025 年 5 月 8 日

日期：2025 年 5 月 8 日

风光氢储新能源汽车充电站优化调度策略研究

摘 要

新能源汽车，诸如电动汽车与氢燃料电池汽车，在交通领域向绿色低碳转变的过程中扮演着至关重要的角色。新能源汽车的广泛普及与持续发展，极大地依赖于高效、便捷的能源补给体系的存在。因此，通过构建集成风能、光伏、氢能及电池储能系统的新能源汽车充电站，并开展优化调度研究，不仅可以兼顾电动汽车和氢能汽车的充能需求，还能提高可再生能源的利用率，增强供能经济性与可靠性。本文主要工作如下：

（1）研究并提出了新能源汽车充电站的总体框架，详细分析了其工作原理。在此基础上，对站内风光发电系统、电转氢装置、电池储能装置等关键模块的原理进行了阐述，并建立了相应的数学模型。同时，针对电动汽车充电和氢燃料汽车充氢的需求，分别研究了其充能模型，从而为后续研究工作奠定理论基础。

（2）研究了考虑需求响应的充电站售电价格优化模型。首先，采用基于隶属度函数的分析方法，对峰、平、谷时段进行精确划分，为制定售电价格优化策略提供科学依据。接着，基于 Logistic 函数构建模糊响应模型，用以刻画用户在差异化电价下的响应行为特征，并以此为基础，构建以负荷波动率最小化和用户充电费用最小化为双目标的售电价格优化模型。最后，通过仿真实验对模型进行验证，结果表明所提方案能有效引导用户优化用电行为，实现负荷需求的

合理转移，进而达到负荷削峰填谷的优化目标。

(3) 构建了一种综合考虑电转氢和需求响应的充能站优化调度模型。该模型以最小化充能站日运行成本为目标，并利用 CPLEX 求解器进行求解。算例结果表明，所提出的模型能够显著提高站内风光能源的消纳水平，同时优化充能站运行的经济性和可靠性，为充能站的高效运营提供了理论支持和实践指导。

(4) 构建了一种考虑源荷不确定性的两阶段鲁棒优化模型。该模型采用盒式不确定集对风光出力和负荷需求的不确定性波动进行数学描述，并以 min-max-min 结构为核心，旨在最恶劣场景下实现充能站运行成本的最小化。通过列和约束生成算法 (C&CG) 对模型进行求解，结果表明，所提出的两阶段鲁棒优化模型不仅降低了对不确定性参数统计特性的依赖，还减少了模型的保守性，同时显著提升了充能站运行的经济性。

关键词：新能源汽车充能站，电转氢，需求响应，风光消纳，源荷不确定性，鲁棒优化

RESEARCH ON OPTIMAL DISPATCH STRATEGY FOR WIND-SOLAR-HYDROGEN-STORAGE INTEGRATED NEW ENERGY VEHICLE CHARGING STATIONS

ABSTRACT

New energy vehicles, such as electric vehicles and hydrogen fuel cell vehicles, play a crucial role in the transition towards green and low-carbon transportation. The widespread adoption and sustained development of new energy vehicles heavily rely on the existence of an efficient and convenient energy replenishment system. Therefore, by constructing new energy vehicle charging stations that integrate wind energy, photovoltaic, hydrogen energy, and battery energy storage systems, and conducting optimization scheduling research, it is possible to meet the charging needs of both electric vehicles and hydrogen-powered vehicles while enhancing the utilization rate of renewable energy, improving the economic efficiency and reliability of energy supply. The main work of this thesis is as follows:

Firstly, the overall framework of the new energy vehicle charging station was investigated and proposed, with a detailed analysis of its operational principles. On this basis, the principles of key modules within the station, such as the wind-solar power generation system, power-to-hydrogen conversion device, and battery energy storage system, were introduced, and corresponding mathematical models were established. Simultaneously,

the charging models for electric vehicles and hydrogen refueling models for hydrogen fuel cell vehicles were studied separately, laying a solid theoretical foundation for subsequent research endeavors.

Secondly, a study was conducted on the optimization model of electricity selling prices for charging stations considering demand response. Initially, an analysis method based on membership functions was employed to accurately delineate peak, flat, and valley periods, providing a scientific basis for formulating electricity selling price optimization strategies. Subsequently, a fuzzy response model was constructed based on the Logistic function to characterize user response behaviors under differentiated electricity prices. Building upon this, a dual-objective optimization model for electricity selling prices was established, aiming to minimize load fluctuation rates and user charging costs. Finally, the model was validated through simulation experiments, with results indicating that the proposed scheme can effectively guide users in optimizing their electricity usage behaviors, achieving a rational transfer of load demand, and thereby realizing the optimization goal of load peak shaving and valley filling.

Subsequently, an optimization scheduling model for charging stations was developed, which comprehensively considers power-to-hydrogen conversion and demand response. This model aims to minimize the daily operational costs of the charging station and utilizes the CPLEX solver for

solution derivation. The case study results demonstrate that the proposed model significantly enhances the consumption level of wind and solar energy within the station, while optimizing the economic efficiency and reliability of the station's operations. This provides both theoretical support and practical guidance for the efficient management of charging stations.

Finally, a two-stage robust optimization model considering source-load uncertainty was constructed. This model employs a box uncertainty set to mathematically describe the uncertain fluctuations in wind and solar power output as well as load demand. Centered around a min-max-min structure, it aims to minimize the operational costs of the charging station under the worst-case scenario. The model was solved using the Column and Constraint Generation (C&CG) algorithm. The results indicate that the proposed two-stage robust optimization model not only reduces reliance on the statistical characteristics of uncertain parameters but also decreases the model's conservatism, while significantly enhancing the economic efficiency of the charging station's operations.

Lu Cui (Electrical Engineering)

Supervised by Prof. Shilin Liu

KEY WORDS: new energy vehicle charging station, power-to-hydrogen, demand response, wind and solar consumption, source and load uncertainty, robust optimization

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题的背景及研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 新能源汽车充能站及其优化运行现状	2
1.2.2 价格型需求响应与实施现状	4
1.2.3 考虑不确定性的充能站优化调度研究现状	6
1.3 论文主要研究内容及章节安排	7
第 2 章 风光氢储新能源汽车充能站数学建模.....	9
2.1 引言	9
2.2 总体架构与工作原理	9
2.3 风光氢储充能站组成单元数学模型	10
2.3.1 风力发电	10
2.3.2 光伏发电	11
2.3.3 电池储能	13
2.3.4 电转氢	14
2.4 新能源汽车负荷建模	18
2.4.1 电动汽车充电特性	18
2.4.2 氢燃料汽车充氢特性	19
2.4.3 充电和充氢负荷模拟	19
2.4.4 算例分析	20
2.5 本章小结	22
第 3 章 考虑需求响应的充能站售电价格优化模型.....	23
3.1 引言	23
3.2 基于隶属度函数的峰谷时段划分	23
3.3 基于 Logistic 函数模糊响应机理的售电价格优化模型	26
3.3.1 基于 Logistic 函数的负荷转移率模型	26
3.3.2 充能站售电价格优化模型	28

3.3.3 基于 NSGA-II 算法的售电价格优化模型求解.....	29
3.4 算例分析	32
3.4.1 基础数据	32
3.4.2 结果分析	33
3.5 本章小结	35
第 4 章 考虑电转氢和需求响应的充能站优化调度策略.....	37
4.1 引言	37
4.2 充能站优化调度策略	37
4.3 充能站优化调度模型	38
4.3.1 目标函数	38
4.3.2 约束条件	39
4.4 算例分析	41
4.4.1 基础数据	41
4.4.2 结果分析	42
4.5 本章小结	45
第 5 章 考虑源荷不确定性的充能站鲁棒优化调度.....	46
5.1 引言	46
5.2 鲁棒优化及基本数学模型	46
5.2.1 鲁棒优化模型	46
5.2.2 不确定集	47
5.3 考虑源荷不确定性的两阶段鲁棒优化模型	48
5.3.1 两阶段鲁棒优化模型	48
5.3.2 盒式不确定集合	49
5.3.3 模型求解	50
5.4 算例分析	51
5.4.1 基础数据	51
5.4.2 充能站优化调度方案	51
5.4.3 不确定性调节参数的影响	53
5.5 本章小结	54
第 6 章 总结与展望.....	55
6.1 全文总结	55
6.2 展望	56

参考文献.....	57
攻读硕士期间取得的学术成果.....	63
致谢.....	64

第 1 章 绪论

1.1 课题的背景及研究意义

面对全球温室效应引发的生态挑战，低碳经济转型已成为全球共识。作为最大的发展中国家，我国制定了 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和的长期发展战略。相关研究指出，化石能源的广泛使用是我国温室气体排放的主要成因^[1]。因此，加快能源体系向清洁化、低碳化方向转变，是实现“双碳”目标的必然选择^[2]。随着城市化水平的不断提升，交通运输已成为能源消耗和碳排放的重要领域^[3]，其能源结构优化对双碳目标的实现具有关键作用。在此背景下，以电动汽车和氢燃料电池汽车为代表的新能源交通工具的推广应用，不仅能够促进交通领域的绿色革命，还将大幅减少环境污染和碳排放^[4]。作为国家战略性新兴产业，新能源汽车产业正成为推动交通运输模式转型升级的重要突破口^[5]。

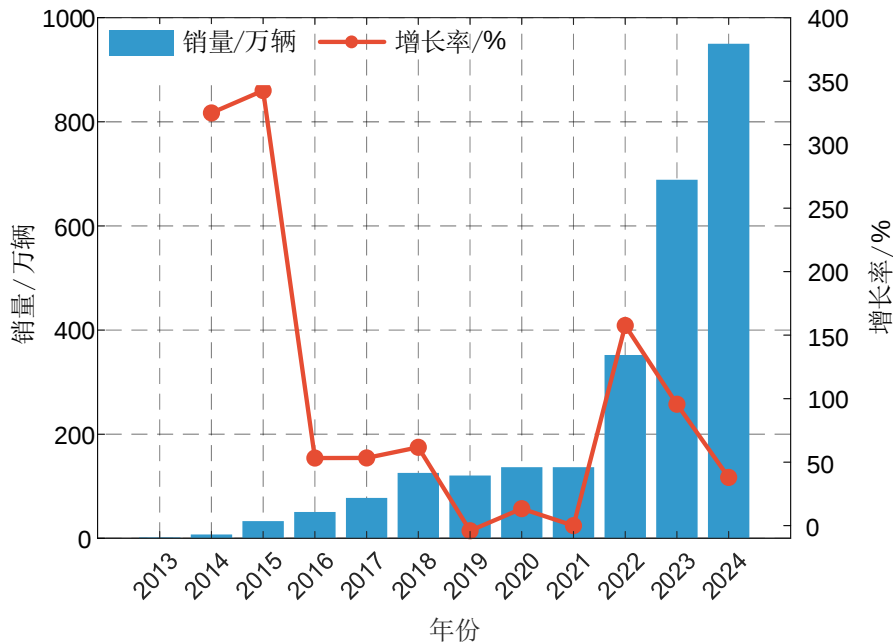


图 1-1 2013—2024 年新能源汽车销量及增长率

在“十一五”规划期间，我国确立了新能源汽车领域的研发与产业化发展策略，成功推动了新能源汽车的市场化应用^[6]。随后的“十二五”时期，该产业实现了从初步探索到快速扩张的转变，产业规模得到显著提升。进入“十三五”阶段，在工业和信息化部等多个部委的协同推进下，通过实施重点专项计划，有

效促进了关键技术的突破与产业化发展。《“十四五”规划纲要》将新能源汽车定位为国家战略性新兴产业，着重强调核心技术攻关和基础设施配套体系的完善^[7]。由图 1-1 所示数据可得，在政策扶持的推动下，新能源汽车产业呈现出持续快速发展的良好态势。

新能源汽车的普及与发展高度依赖于能源补给基础设施的完善程度。因此，科学规划并超前布局新能源汽车充能站建设，对于推动交通运输领域能源结构的清洁化转型具有重要意义。当前，新能源汽车充能站的布局主要聚焦于电动汽车领域，其能源供给模式相对单一，主要依托于传统电网系统，这不仅加剧了电网运行负担，也制约了能源利用效率的优化^[8-10]。根据《新能源汽车产业发展规划（2021—2035 年）》的战略部署，强调构建新能源汽车与可再生能源协同发展的新型体系^[11]。在新能源汽车充能站中配备风光发电系统，可显著提升清洁能源的直接或间接利用率，从而实现零污染运行。然而，风光发电存在间歇性、不稳定性等固有特征，导致弃风弃光现象普遍存在。通过合理的储能方式，可有效提升风光资源利用率，减少可再生能源的浪费^[12]。其中，氢能存储作为一种新型能量储存技术，相较于传统储能方式，展现出存储规模大、便于长期保存和使用寿命持久等突出特点^[13]。在此背景下，结合区域特征规划建设融合光伏发电、氢能制备储存、充换电及加氢等功能的综合性能源补给站，不仅能够有效满足不同类型新能源汽车的能源需求，还可实现土地资源的集约化利用，同时提升分布式可再生能源的就地消纳水平。

伴随新能源汽车产业规模的持续扩张，其配套基础设施的建设不断加快。然而，新能源汽车保有量的快速增长导致其用电负荷与传统电力需求曲线相互叠加，给电力系统的稳定运行带来新的挑战^[14]。此外，充能站面临着建设投资大、运营维护成本高^[15]、可再生能源利用效率不足^[16]等一系列亟待解决的问题。在此背景下，开展新能源汽车充能站的优化调度研究具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 新能源汽车充能站及其优化运行现状

随着新能源汽车产业的快速发展，充能基础设施规划建设与优化运行成为

关键议题^[17]。电动汽车作为主要类型，其充能方式包括直接充电和换电^[18]。大规模充电设施接入电网可能影响电网稳定性，分时电价政策虽可缓解冲击，但无法彻底解决问题^[19]。从电力供应源头分析，电动汽车尚未达成根本性的零碳排放目标。当前，为应对这一现状，可构建可再生能源与新能源汽车基础设施间的直接供给关联，并制定合理的优化运行方案，以促进清洁能源的本地化消纳与高效利用。文献[20]将光伏发电装置与储能技术结合应用于电动汽车充换电站，可有效减少运营成本、减少环境污染，并缓解电网压力。文献[21]提出了一种基于光伏发电利用最大化的电动汽车充电优化策略，并对能源成本及环境因素对系统性能的影响进行了深入分析与评估。文献[22]提出一种分区域动态电价机制引导的电动汽车充电优化策略，根据不同区域内的负荷特点建立不同的动态电价，从而优化对应区域的电动汽车充电。结果表明，所提优化策略能够在保证车主利益的同时，促进风光消纳以及提升配网的经济性。

氢燃料汽车以氢气作为动力来源，其持续运行依赖于加氢站的燃料供给。现阶段，我国氢能制备技术体系主要涵盖化石燃料重整制氢、工业副产品提纯制氢以及水电解制氢等工艺^[23]。其中，电解水制氢与可再生能源发电系统相结合时，不仅可实现全生命周期零碳排放，还能有效降低加氢站的运营成本^[24-26]。电解水制氢根据实际需求可分为两种方式：其一是集中式生产后运输至加氢站，其二是采用分布式站内制氢模式^[27]。考虑到氢气长距离输送的经济性限制，采用站内可再生能源电解制氢方案具有明显优势，这种模式不仅能够降低运输费用和基础设施建设投入，还可有效减少碳排放量。文献[28]引入可再生能源制氢技术并建立消纳率评价体系，可显著提升系统的能源利用率。文献[29]进一步研究了光伏、风能及水电等多能互补系统在电解制氢中的应用，提出余电制氢-绿氢先行的电氢联合运营模式，解决了微网中存在的“弃风”、“弃光”、“弃水”问题。文献[30]以投资、碳排放及运营维护成本最小化为目标，对可再生能源制氢加氢站的规划进行了优化设计。

在“双碳”战略目标驱动下，电-氢耦合能源系统被认为是未来能源供给体系的重要发展方向。电-氢协同技术能够有效平抑可再生能源出力波动与负荷需求之间的功率不平衡，缓解弃风、弃光问题，并实现电力系统的负荷调节功能^[31]。为解决传统加氢站与充电设施独立建设导致的土地资源利用效率低下问题，

同时提升能源系统的运行灵活性与经济效益^[32]，文献[33]通过实证研究表明，电氢系统协同优化可显著降低交通领域的碳排放强度，同时提升系统运行的经济性。

当前，新能源汽车基础设施建设及优化运行仍需进一步深入研究。光储充换电站作为低碳发展的重要基础设施，与基于可再生能源制氢的加氢站协同构建了清洁能源补给网络体系。在新能源汽车基础设施中配备可再生能源发电系统，打造以电、氢为能源载体的综合能源服务站，并制定合理的优化运行方案，不仅能够同时满足不同类型新能源汽车的能源需求，还可提高可再生能源利用率，优化土地资源配置，对加速交通领域的清洁化转型和增强电网的灵活调节能力具有重要的战略意义。

1.2.2 价格型需求响应与实施现状

需求响应策略是一种运用动态电价调整及政策引导，优化用户用电模式的方法。根据用户响应机制可分为激励型和价格型需求响应^[34]。其中，价格型需求响应进一步细分为分时电价、实时电价和尖峰电价三种模式。表 1-1 对这三种模式的具体特点进行了详细对比分析。

表 1-1 价格型需求响应比较

类型	基本思想	时间尺度	响应速度	对象
分时电价	固定价格转变为不同时段的不同价格	日前	慢	大部分用户
实时电价	缩短电价调整周期，缓解短期容量短缺	实时	快	智能楼宇和小区
尖峰电价	预设价格，增强应对突发用电高峰能力	日前	中	大型工商业用户

电动汽车因其兼具移动性与储能特性，能够通过调整充电价格或提供经济补偿等方式，引导用户改变充电行为，从而优化充电站负荷特性，实现电网负荷调控^[35]。本文聚焦于分时电价机制的研究，重点从时段划分与模型构建两个方面展开分析。

（1）峰谷时段划分方法研究

在基于隶属度函数的划分方法方面，文献[36]提出了一种基于模糊半梯形隶属函数的时段划分方法，并采用用户响应度指标评估划分方案的合理性。该方法虽具有科学性与逻辑严谨性，但其主要依赖日负荷曲线差异分析，未充分考虑地理环境、气候条件及季节变化等因素对典型负荷曲线的影响，因此在普适性和实际应用效果方面存在一定局限性。在基于供电成本的划分方法方面，文献[37]通过构建成本函数生成成本曲线，同时以售电企业利润最大化为目标进行时段划分。文献[38]则运用大数据分析技术，建立了负荷特性与成本的关联模型，依据单位负荷电力成本的边际变化确定峰谷时段。该方法虽能反映不同时段负荷的成本特征，但未充分考虑电价对电力供需关系的动态调节作用。在基于用户需求响应的划分方法方面，文献[39]指出，随着可再生能源发电占比的不断提升，传统基于负荷曲线的划分方法已难以适应新型电力系统需求。该研究通过构建净负荷曲线，以供需比值为临界点进行时段划分，使结果更贴近实际运行特征。文献[40]则通过引入价格弹性系数，量化了用户对电价信号的动态响应特性，为构建用户参与的需求侧响应机制提供了理论依据。

（2）分时电价需求响应模型建立

分时电价需求响应模型的构建主要围绕以下三个方向展开，第一，在价格弹性矩阵应用方面，文献[41]提出了电-气耦合需求响应模型，基于弹性系数法提出了分时定价优化方案。文献[42]构建了一种考虑分级价格弹性系数的需求响应潜力评估模型，同时提出电价敏感度指标评估用户对电价变化的响应程度。仿真验证得到，通过引入分级价格弹性系数，可显著提高需求响应量的计算精度。第二，在智能算法应用方面，文献[43]研究了一种扩展型机器学习方法，通过大数据分析负荷变化特征来预测用户对分时电价的响应行为，具有较高的可靠性。然而，上述研究均未考虑用户心理敏感度及响应惰性的影响。为解决这一问题，文献[44]提出了一种考虑电动汽车用户和运营商利益的电动汽车分时电价策略。结合消费者心理学理论，建立用户电价激励参与程度模型，分析了电价对用户参与响应的影响，同时构建了负荷转移率模型，用于量化用户参与响应程度。该模型能够更准确地刻画用户响应行为特征，为分时电价需求响应的深入研究提供了重要方向。

1.2.3 考虑不确定性的充能站优化调度研究现状

当前，多数充能站的优化调度研究将源-荷参数视为确定性变量进行分析。然而，在实际运行过程中，能源供给侧大规模接入的可再生能源具有显著的不确定性特征，导致充能站运行稳定性下降；而在负荷侧，随着电动车辆和氢能车辆等多元化终端设备的接入，负荷呈现出主动性与复杂性交互并存的特性^[45]。源荷两侧的不确定性因素叠加，不仅影响充能站的经济运行，还可能威胁其安全稳定运行^[46]。因此，有必要考虑不确定性风险，开展不确定环境下新能源汽车充能站的优化调度研究。

在不确定性问题的处理方面，随机优化(Stochastic Optimization, SO)和鲁棒优化(Robust Optimization, RO)两种方法应用较为广泛^[47-48]。文献[49]基于场景生成方法构建了综合能源系统随机优化模型，有效解决了负荷侧不确定性问题。文献[50]建立了一种含碳捕集及电转氢设备的低碳园区综合能源系统优化调度模型，采用随机优化方法分析典型日运行成本，在降低运营成本的同时提高了系统鲁棒性。文献[51]建立考虑源荷不确定性的随机优化模型，获得兼顾经济性和鲁棒性的调度策略。文献[52]基于场景随机优化模型处理风光和电动汽车的不确定性，实现了配电系统与充电设施的协同规划，在保证电能质量和系统稳定性的同时，降低了投资和运营成本。

除了随机优化，鲁棒优化方法也被广泛应用于降低可再生能源出力和负荷需求不确定性的影响。文献[53]针对分布式能源站的不确定性，构建了鲁棒优化模型。该方法能够有效降低源荷不确定性对系统的影响，显著提升了能源站的运行稳定性。文献[54]提出一种考虑 IES 与混合充电系统不确定性的运行策略，采用两阶段鲁棒优化方法解决风、光出力及热、电负荷的不确定性问题，并通过算例分析，验证了所提优化调度方案的有效性。文献[55]建立了一种双层鲁棒优化模型，该模型能够根据插电式电动汽车车主的充电决策，优化具有分布式能源的充电站的设计。

通过对比分析可知，随机优化方法存在计算复杂度较高、对概率分布信息依赖程度大等局限性。鉴于此，本文采用鲁棒优化方法来处理不确定性问题，该方法具有可靠性强、适应复杂场景能力强以及对历史数据依赖程度低等优势。然而，鲁棒优化虽能确保充能站在所有可能场景下的可行性，但其优化结果往

往过于保守，导致经济性欠佳。实际上，充能站在整个调度周期内不可能始终处于最劣场景。因此，鲁棒优化的本质是在系统鲁棒性与经济性之间寻求平衡。然而，上述文献中的鲁棒模型难以实现对调度方案保守性的灵活调节，且新能源汽车充能站涉及电、氢两种能源形式，系统运行更为复杂。针对风光出力及电氢负荷不确定性的处理方法，以及风险与成本的权衡机制，仍需进一步深入研究。

1.3 论文主要研究内容及章节安排

本文以新能源汽车充能站为研究对象，重点研究含风、光、氢、储的新能源汽车充能站的组成与数学模型、基于需求响应的售电价格优化模型、考虑需求响应的新能源汽车充能站优化调度方法、考虑源荷不确定性的充能站鲁棒优化调度方法四个方面。研究思路如图 1-2 所示。

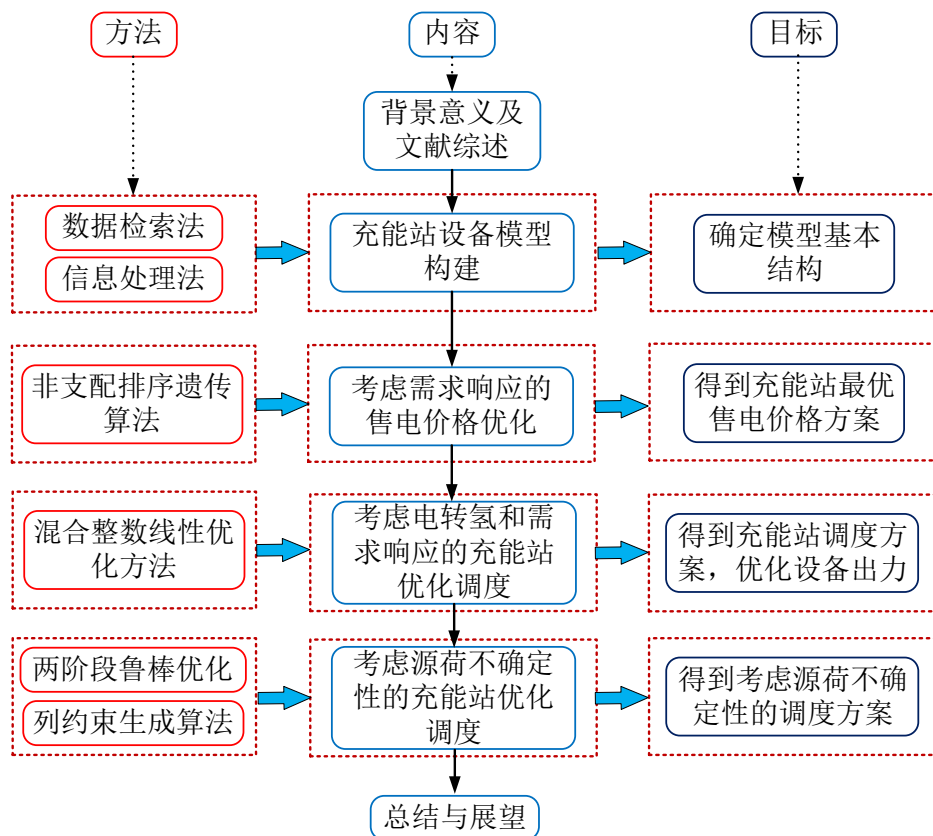


图 1-2 本文研究思路

本文共分为六章，主要内容如下：

第 1 章，阐述了新能源汽车与可再生能源协同发展的研究背景及意义，以

及新能源汽车充电站发展及优化运行、价格型需求响应及考虑不确定性的充电站优化调度的国内外研究现状，并概述了本文的研究思路。

第 2 章，研究了含风光氢储的新能源汽车充电站的系统组成与数学建模。首先介绍其总体架构并分析工作原理，随后分别对风力发电系统、光伏发电系统、电池储能系统及电转氢系统等关键组成单元进行数学建模，最后建立了电动汽车充电模型与氢燃料汽车充氢模型，对新能源汽车的负荷需求进行了仿真。

第 3 章，基于需求响应的充电站售电价格优化研究。首先采用隶属度函数划分峰谷时段，提升划分的科学性与有效性；其次基于 Logistic 函数构建负荷转移率模型，以协调运营商与用户的利益，建立以负荷波动率最小化和用户充电费用最小化为双目标的售电价格优化模型，并采用 NSGA-II 算法进行求解。

第 4 章，考虑需求响应的充电站优化调度研究。本章提出一种考虑电转氢和需求响应的充电站优化调度模型。模型分为两阶段：第一阶段为售电价格优化，制定售电价格并优化充电负荷曲线；第二阶段为充电站优化调度，以日运行成本最小化为目标，协调运行风光发电、电制氢及储能等设备，获得最优调度策略。

第 5 章，考虑源荷不确定性的充电站鲁棒优化调度研究。通过两阶段鲁棒优化方法，分析风力发电、光伏发电及负荷需求的不确定性，制定优化调度策略，并评估不确定性对充电站运行的影响。

第 6 章，本章内容为总结与展望。总结了本文的研究内容与成果，指出了各章节的不足，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 风光氢储新能源汽车充能站数学建模

2.1 引言

随着新能源汽车因其绿色、清洁、低碳及环保等优势逐渐受到广泛关注，为其提供能量支持的充能站的高效运行显得愈发关键。然而，现有新能源汽车充能站主要局限于提供电动汽车充电服务，不能满足燃料电池汽车，尤其是氢燃料汽车的充氢需求，这一局限性严重制约了新能源汽车的规模化推广与普及应用。此外，多数充能站的能源供给模式较为单一，主要依赖大电网供电，未能充分整合风力、光伏等可再生能源，导致运营成本居高不下。同时，现有充能站还存在充电效率低、负荷集中、调度能力不足等问题，难以有效应对新能源汽车充电需求的随机性，易引发负荷高峰叠加现象，进而影响充能站的安全稳定运行。因此，在满足新能源汽车多样化充能需求的基础上，如何构建灵活经济的充能站及对其进行合理地能量优化调度就成为亟需解决的问题。本章提出一个新颖的风光氢储新能源汽车充能站模型，首先深入分析含风光氢储的充能站系统架构与运行机制，其次分别对站内风光发电系统、电池储能系统、电转氢系统、电动汽车充电系统及氢燃料汽车充氢系统等核心组成单元建立数学模型，从而为后续研究奠定理论基础和支撑。

2.2 总体架构与工作原理

相较于传统电动汽车充电站，本文研究的风光氢储充能站还配置了风/光发电、电转氢系统、电/氢存储等装置，从而能够实现电/氢能源供应及存储的互补，有利于充能站更加经济高效运行。充能站总体架构如图 2-1 所示。

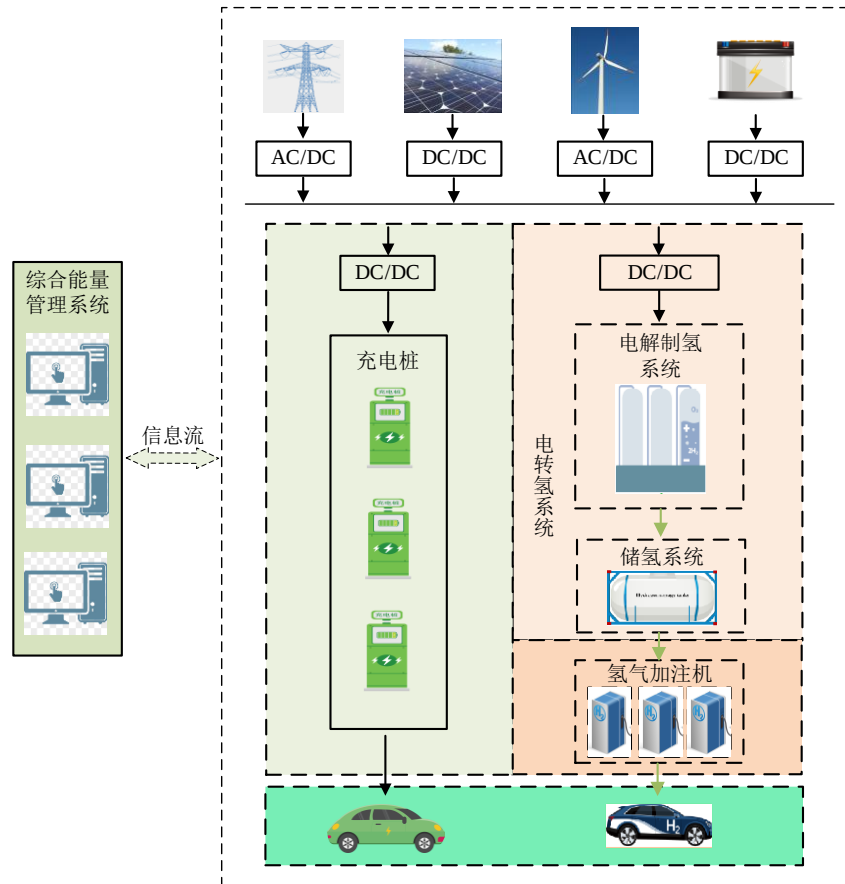


图 2-1 风光储综合充能站结构

充能站通过电力电子能量转换接口将分布式风力发电单元、光伏发电单元、电动汽车与氢燃料汽车充能终端、电转氢系统以及电/氢储能装置接入直流母线，并借助 AC/DC 变换器实现与大电网的互联。综合能量管理系统(Integrated Energy Management System, IEMS)是充能站运行管理的中枢，其能够根据各个模块的状态以及电网电价、氢气价格等相关信息，协调站内各设备优化运行。

充能站的运行遵循以下原则：优先利用风光发电满足电动汽车充电需求，同时通过电转氢系统为氢燃料汽车提供能源补给；当风光发电量超过充能需求时，剩余能量以电能或氢能形式存储于储能装置中；当风光发电及储能装置能量供应不足时，充能站通过从交流配电网购电来保障新能源汽车的充能需求。

2.3 风光氢储充能站组成单元数学模型

2.3.1 风力发电

风力发电系统由风力机、发电机及整流装置等组件构成，其工作原理可描

述为：风驱动风轮旋转，将风能转化为机械能，发电机再将机械能转换为电能，即风能→机械能→电能。

本文所建风力发电系统的核心功能，是将风电机组的输出能量经电力电子能量转换接口接入直流母线以供电动汽车或电转氢装置使用，多余风电以电/氢形式进行存储。当风电机组输出功率波动较大时，储能单元可对充能站进行电能或氢能的补充供应。

风力发电机通过风力带动发电机转动转换成电能，其出力与风速有直接的关系。其关系如图 2-2。

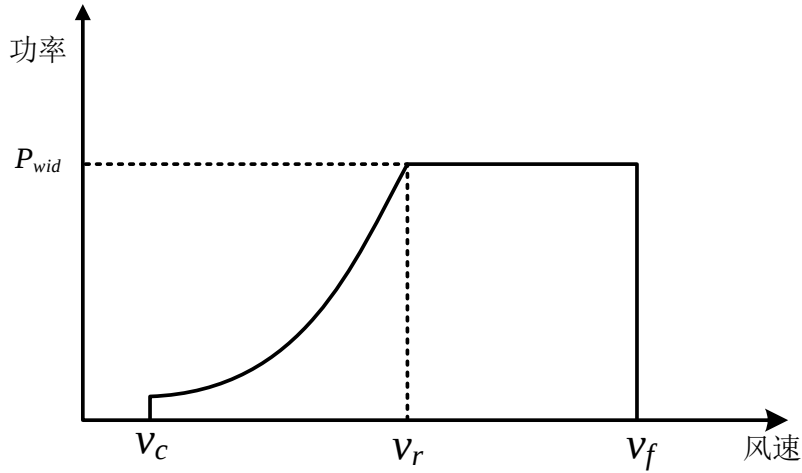


图 2-2 风机输出功率

在风机模型中，风电机组的实际输出功率由切入风速、切出风速和额定风速决定。本文风机的出力模型如下：

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0, & v(t) \leq v_{in}, v(t) \geq v_{out} \\ P_r \frac{v(t) - v_{in}}{v_r - v_{in}}, & v_{in} \leq v(t) \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v(t) \leq v_{out} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中， $P_{WT}(t)$ 是风机在 t 时间节点的实际输出功率； v_r 是标定转速； v_{in} 、 v_{out} 是切入风速、切出风速； P_r 是达到的最大输出功率。

2.3.2 光伏发电

光伏发电系统主要由光伏电池板、整流器等设备组成。该系统的核心功能在于将太阳辐射能转化为电能，并通过能量转换装置实现能量的存储与分配，

同时为充能站中电动汽车、氢燃料汽车和蓄电池进行供能。

光伏电池板主要采用单晶硅和多晶硅半导体材料制造，单体器件输出功率范围为数十至数百瓦级。受限于单机功率容量，需通过多单元并联拓扑实现系统容量的提升。本文充能站设计采用屋顶分布式光伏阵列配置方案，通过空间资源集约化利用实现就地消纳，显著降低外部供电依赖。此外，光伏出力的昼夜特性与日间负荷需求高度契合，其发电高峰集中于白昼时段，有利于实现削峰填谷。

（1）光伏电池建模

从微观结构来看，光伏电池是以光伏电池单元为基本构建模块，通过特定排列方式组装而成的能量转换装置。其结构如图 2-3。

工作原理如下：半导体材料受太阳辐射，光子与价带电子作用，促使电子跃迁至导带。在内建电场作用下，产生电子-空穴对分离，并向 N、P 型半导体区迁移。若在两端电极间建立导电通路，电子将从 N 型区域向 P 型区域定向移动，形成电势平衡，从而产生稳定的电流输出。这一过程实现了光能向电能的持续转换。

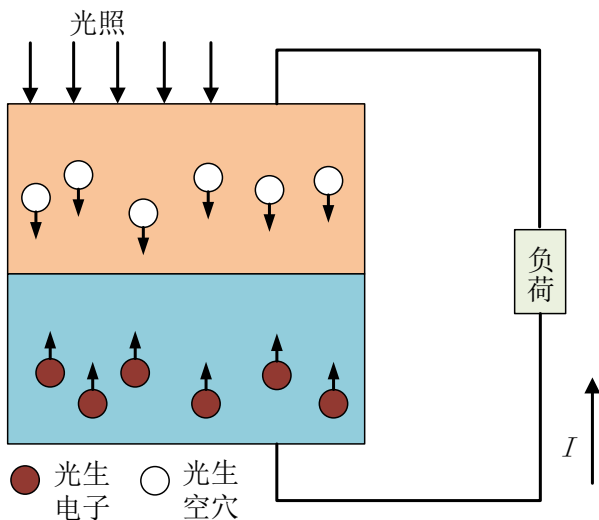


图 2-3 光伏电池基本原理

（2）光伏出力建模

辐射强度和环境温度的变化对光伏电池功率输出特性影响显著。研究表明，其功率输出与环境温度及辐射强度之间存在特定的函数关系，这种关系可通过其输出特性曲线直观反映，如图 2-4 所示。

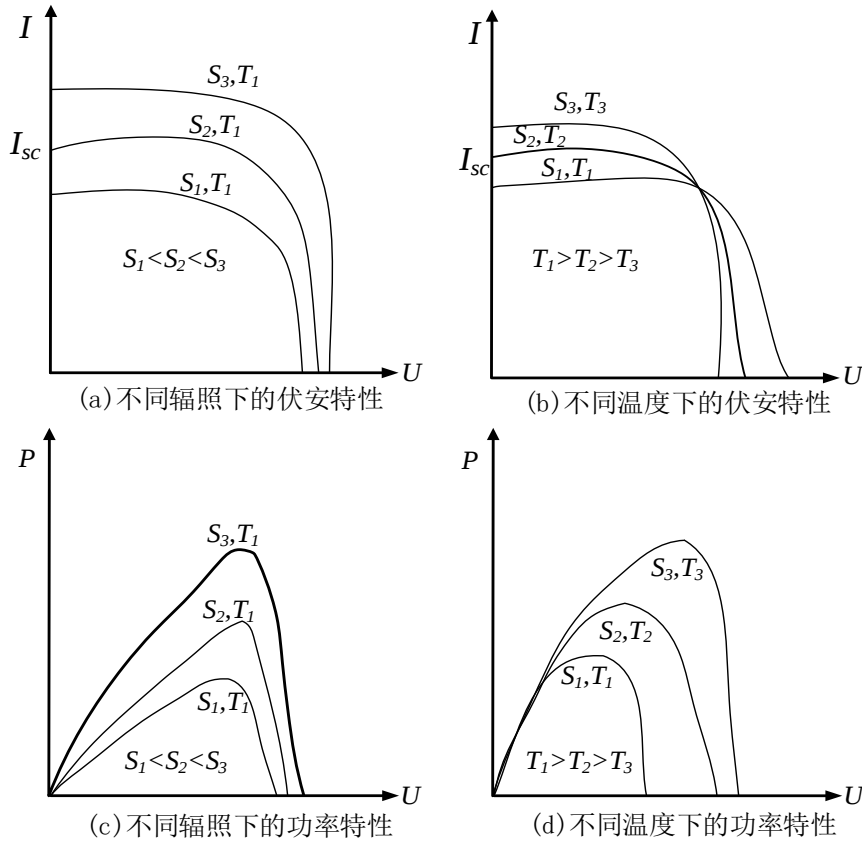


图 2-4 光伏电池输出特性曲线

恒定温度和光照下，光伏电池功率输出呈典型单峰非线性特征。值得注意的是，光伏电池既不属于恒流源也不属于恒压源，在特定环境条件下存在唯一的最大功率输出点。通过进一步分析不同工况下的伏安特性曲线可得，光伏电池的开路电压 U_{oc} 与辐射强度呈正相关，但与温度呈负相关；短路电流 I_{sc} 则随辐射强度和温度的升高而同步增加。光伏发电系统功率输出模型^[56]可表示为：

$$P_{PV} = Y_{pv} \times f_{pv} \times \frac{G_T [1 + \alpha_p (T_C - T_{C,STC})]}{G_{T,STC}} \quad (2-2)$$

式中， P_{PV} 为光伏输出功率； Y_{pv} 为光伏系统标称容量； f_{pv} 为光伏转换效率修正系数，设定为 0.8； G_T 为光强； $G_{T,STC}$ 为辐射强度； α_p 取 -0.0046； T_C 为电池温度； $T_{C,STC}$ 为标况下电池温度。

2.3.3 电池储能

在充能站中，储能装置发挥着关键的调节作用。尽管风光发电具有环境友好、可再生等优势，但其输出功率存在间歇性、波动性及随机性等问题。引入

储能装置不仅有效整合了分布式可再生能源的协同优势，同时显著提升了充电站的供电可靠性和运行稳定性。

作为一种典型的电化学储能装置，铅酸电池因其初期投入较少、经济性突出以及运维便捷等特点，在储能领域占据重要地位。该类型电池不仅表现出优异的电压输出稳定性，还能在不同环境温度条件下保持可靠性能，因而被广泛应用于各类储能场景^[57]。本文采用铅酸蓄电池作为储能装置。

蓄电池在 t 时刻储能总量可表示为^[58]：

$$S_{ES,t} = S_{ES,t-1} + \eta_{ES}^{cha} P_{ES,t}^{cha} - P_{ES,t}^{dis} / \eta_{ES}^{dis} \quad (2-3)$$

式中， $S_{ES,t}$ 为 t 时刻蓄电池的电量； $S_{ES,t-1}$ 为 $t-1$ 时刻蓄电池电量； $P_{ES,t}^{cha}$ 、 $P_{ES,t}^{dis}$ 分别为 t 时刻蓄电池的充放电功率； η_{ES}^{cha} 、 η_{ES}^{dis} 为蓄电池的充放效率。

蓄电池的荷电状态（State Of Charge, SOC）：

$$SOC_t = \frac{S_{ES,t}}{S_{ES,max}} \quad (2-4)$$

式中， $S_{ES,max}$ 表示蓄电池存储最大电量。为保障储能系统安全运行，SOC 需限定在合理区间，标准充放电循环中，SOC 下限通常设置为额定容量的 20%~30%，上限设置为 80%~90%，以避免过充或过放对电池寿命的损害。

2.3.4 电转氢

（1）制氢系统

氢气制备工艺的选择涉及多重技术经济指标，需综合考虑能量转换效率、生产成本、产能规模、产物纯度以及环境温度等关键参数。当前主流制氢技术包括蒸汽甲烷重整制氢、气化煤制氢、电解水制氢三种方式。

蒸汽甲烷重整制氢工艺：在高温环境下，天然气与烃类蒸汽发生重组反应，生成氢气和二氧化碳。该技术可实现 40%-60% 的制氢效率，具有较高的经济性。然而，该方法生产的氢气纯度较低，需通过纯化装置进行处理才能满足氢燃料电池的要求，且过程中会产生二氧化碳排放，对环境造成负面影响。

气化煤制氢技术：在 700℃ 高温环境下，煤与氧化剂发生化学反应，生成氢气和二氧化碳。该方法虽然具有原料成本优势，但同样面临二氧化碳排放问题，

其环境友好性受到质疑。

电解水制氢技术：作为一种重要制氢方法，其原理基于电化学反应和热化学循环分解水分子。电化学反应是通过电场作用使水分子发生解离，产生氢气和氧气；热化学反应则是在高温条件下，从水中分离出氢气。该技术具有环境友好、零碳排放等优势，且可与可再生能源（如太阳能、风能）实现协同耦合，通过调节电解槽工作参数实现产氢速率的精确控制，提高氢气利用效率。基于上述优势，本研究选择电解水制氢技术作为氢燃料电池汽车的供氢方案。

电解槽作为电解水制氢系统的核心装置，其工作原理是通过外加电场驱动电解液中的氧化还原反应实现水分子分解。电解液通常采用酸性（如 HCl ）、碱性（如 NaOH ）或盐类（如 NaCl ）溶液，在电场作用下产生可移动的离子。当外电路接通后，电子在电极间定向移动。其中阴极发生还原反应，阳极发生氧化反应。

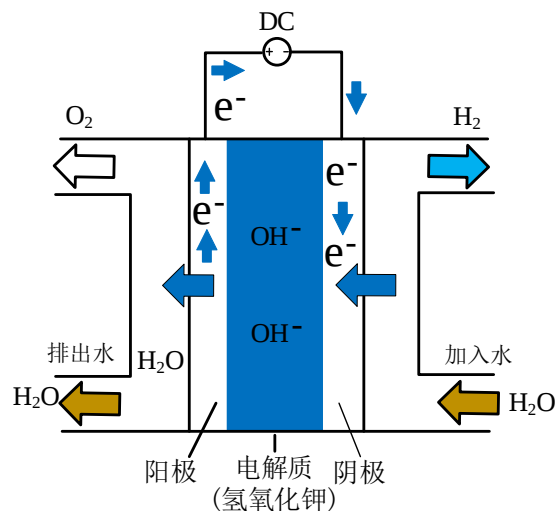


图 2-5 碱性电解槽工作原理

目前，电解槽主要有三种类型：碱性电解槽、质子交换膜电解槽和固体氧化物电解槽^[59]。固体氧化物电解槽因技术尚未完全成熟，目前仍未实现大规模化的商业应用。质子交换膜电解槽虽表现出优异的环境兼容性和可再生能源适配性，但高昂的贵金属催化剂成本限制了其规模化应用。相比之下，碱性电解槽凭借其完善的技术体系、成熟的商业化应用经验，以及显著的成本优势和运行稳定性，在工业领域得到广泛应用。基于技术经济性分析，本研究选择碱性电解槽作为制氢系统的核心装置，其工作原理如图 2-5 所示。

碱性电解槽以氢氧化钾（ KOH ）水溶液作为电解介质，该电解质体系具有

较高的离子导电率。为确保安全性，电解槽结构材料具备良好的抗氢氧化钾腐蚀性能，以防止发生电解质泄漏问题。在电化学反应中，阴极进行还原反应，水分子解离为氢离子（ H^+ ）和氢氧根离子（ OH^- ），氢离子获得电子形成氢气分子（ H_2 ），氢氧根离子在电场驱动下穿过隔膜迁移至阳极；阳极侧发生氧化反应，氢氧根离子释放电子生成水和氧气分子（ O_2 ）。碱性电解槽的电化学反应方程式可表示为：



为简化研究模型，本文暂不考虑温度对电解效率的影响，着重分析基于碱性电解槽的电解水制氢系统。因此，碱性电解槽运行时制氢量与耗电量的关系可简化为下式：

$$P_{EL,t}^h = \frac{P_{EL,t}^e \cdot \Delta t}{\mu_h} \quad (2-8)$$

式中， $P_{EL,t}^h$ 为 t 时刻电解槽产氢量； $P_{EL,t}^e$ 为 t 时段电解槽输入的电功率； μ_h 为电解槽制氢单位耗电量，在标准大气压下，本文取 2.69 kWh/m^3 。

（2）储氢系统

储氢装置的主要功能是将氢气储存于高压储氢罐中，以满足氢能汽车能量需求。鉴于氢气具有低密度、易燃易爆等特性^[60]，发展安全高效的储氢方式是氢能应用的重要环节。高压气态储氢是目前应用最广泛、技术最成熟的储氢方式，已实现规模化商业应用。与其他储氢技术相比，高压气态储氢的设备成本和维护费用较低，经济性较好^[61]。因此，本文选用高压气态储存方式。

t 时刻储氢装置的储氢量为：

$$V_{HS,t} = V_{HS,t-1} + \eta_{HS}^{cha} P_{HS,t}^{cha} - P_{HS,t}^{dis} / \eta_{HS}^{dis} \quad (2-9)$$

式中， $V_{HS,t}$ 为 t 时刻储氢装置的储氢容量； $P_{HS,t}^{cha}$ 、 $P_{HS,t}^{dis}$ 分别为 t 时刻储氢装置的充放速率； η_{HS}^{cha} 、 η_{HS}^{dis} 为储氢装置的充放效率。

借鉴蓄电池荷电状态的建模方法，提出储氢系统储氢状态量化指标，用于

描述 t 时刻储氢罐内氢气存储量与储氢罐设计最大容量的比例关系，具体定义为：

$$SOH_t = \frac{V_{HS,t}}{V_{HS,max}} \quad (2-10)$$

式中， $V_{HS,max}$ 表示储氢罐最大容量。

(3) 充氢系统

氢能车辆配备的燃料电池是一种通过氢气和氧气发生电化学反应的能量转换装置^[62]。其工作原理如图 2-6 所示：

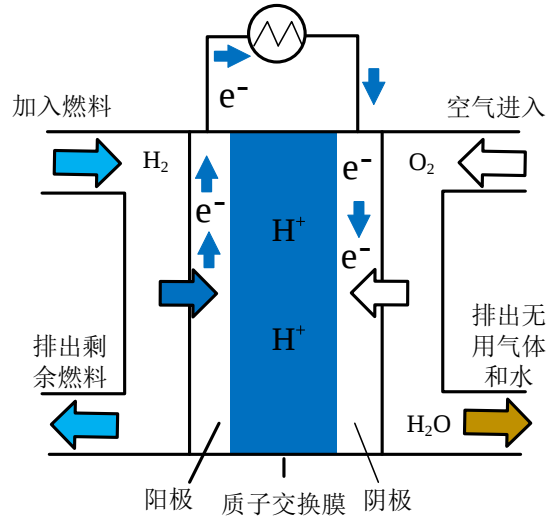


图 2-6 氢燃料电池工作原理

当燃料电池充电时，两电极分别供氢、供氧。在催化剂催化下，氢氧于电解质内结合成水。反应方程如式 (2-11)：



其中，氢气由充氢系统供给，氧气作氧化剂。反应产物为水、电子与热量，全程无污染物排放。

氢燃料电池的简化输出功率为：

$$P_{FC,t}^e = \eta_{FC} P_{FC,t}^h \quad (2-12)$$

式中， $P_{FC,t}^h$ 为 t 时刻输入燃料电池的氢气的量； $P_{FC,t}^e$ 为 t 时刻燃料电池的输出电功率； η_{FC} 为氢燃料电池的转换效率， kWh/m^3 。

2.4 新能源汽车负荷建模

2.4.1 电动汽车充电特性

通过合理的调度控制，电动汽车集群可参与电网辅助服务，实现负荷削峰填谷、频率调节等功能^[63]。本文将私家小型电动汽车作为负荷建模的主要研究对象。基于电动汽车历史运行数据的统计分析，采用蒙特卡洛模拟方法构建电动汽车无序充电负荷模型^[64]。

由美国家庭出行调查数据(NHTS)得，电动汽车日行驶里程 D 近似满足对数正态分布^[63]，即， $D \sim \text{Log} - N(\mu_d, \sigma_d^2)$ ，其概率密度函数为：

$$f_D(x) = \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{\sigma_d \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2} \right] \quad (2-13)$$

式中，标准差 $\sigma_d=1.14$ ，期望值 $\mu_d=2.98$ 。

研究进一步假设电动汽车用户在返程后立即启动充电，其返家时间服从正态分布规律^[64]，即 $T \sim \text{Log} - N(\mu_t, \sigma_t^2)$ ，概率密度函数如式（2-14）所示：

$$f_T(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2} \right], & \mu_t - 12 < x < 24 \\ \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - \mu_t + 24)^2}{2\sigma_t^2} \right], & 0 < x < \mu_t - 12 \end{cases} \quad (2-14)$$

式中，标准差 $\sigma_t=3.41$ ，期望值 $\mu_t=17.47$ 。基于上述两式，可推导出电动汽车的充电时间为：

$$T_e = \frac{DW}{100P_e\eta_e} \quad (2-15)$$

式中， D 表示车辆日行驶路程，km； W 表示电能消耗量，kWh/100km； P_e 为充电功率，kW； η_e 为充电效率。

本文对电动汽车的日充电负荷进行模拟仿真，时间间隔为 1 小时。定义 E_i 为第 i 个时段内所有车辆的充电负荷总量。 $P_{n,i}$ 表示第 n 辆车在第 i 个时段的充电功率，则第 i 个时段的总充电负荷可通过求和计算获得：

$$P_{n,i} = \begin{cases} P_{\text{恒}}, & i = T, T+1, \dots, T+T_e-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2-16)$$

$$E_i = \sum_{n=1}^N P_{n,i} \quad (2-17)$$

2.4.2 氢燃料汽车充氢特性

(1) 充氢特性

氢燃料汽车乃新能源汽车关键部分，将氢气注入燃料电池，经化学反应产生电能，排出尾气仅为水且充氢速率远快于加油，是未来发展趋势。本节以丰田 Miari 轿车为例，简要分析新能源汽车充氢特性，特性如表 2-1。

表 2-1 丰田 Miari 轿车参数

品牌	储氢量/kg	续航里程/km	充氢速率 m ³ /min。
丰田 Miari	5	550	16.8

鉴于氢燃料汽车具备优越的续航能力，在储氢量仅剩余 20%时仍可满足私人用户的日常出行需求。基于此，本文设定其初始储氢水平服从正态分布，即 $N(0.2, 0.05^2)$ 。针对车辆出行数据匮乏且样本规模有限的现状，采用随机模拟方法生成充氢起始时刻参数。

(2) 充氢需求模型

基于前文对氢燃料汽车充氢特性的分析，本研究对充能站在特定时间段内的充氢需求进行预测，通过计算得到氢燃料汽车的日负荷曲线。其计算公式如式 (2-18) 所示。

$$P_{\text{HV}}(t) = \sum_{j=1}^M P_j(t) \quad (2-18)$$

式中， $P_{\text{HV}}(t)$ 为 t 时段车辆所需的总功率； $P_j(t)$ 为第 j 辆汽车的在 t 时段的平均充氢功率。

2.4.3 充电和充氢负荷模拟

为满足 2.4.1 节中电动汽车随机变量的分布规律及 2.4.2 节中氢燃料汽车的分布特性，可通过蒙特卡洛模拟方法生成相关数据，进而实现新能源汽车充能

负荷的精确模拟。

蒙特卡洛模拟作为一种基于概率统计的数值计算方法，通过大量独立重复实验的频率分布来估计目标事件的概率特征。其可通过直接抽样或间接抽样方法获取随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 的值 $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}$ ，同时依据既定函数关系推导出目标变量的数值，即：

$$y_i = f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}) \quad (2-19)$$

式中， i 为抽样次数。依据中心极限定理，若样本数据 $y_1, y_2, \dots, y_m$ 满足正态分布条件，且采样规模达到一定数量时，所得样本的统计特性将趋近于原始概率分布的特征。

蒙特卡洛抽样法的基本逻辑如下：首先，识别车辆类型；其次，随机抽取车辆的基本信息，分别计算其充能时间；最后，通过负荷累加实现对新能源汽车充能负荷的预测。其流程如图 2-7 所示。

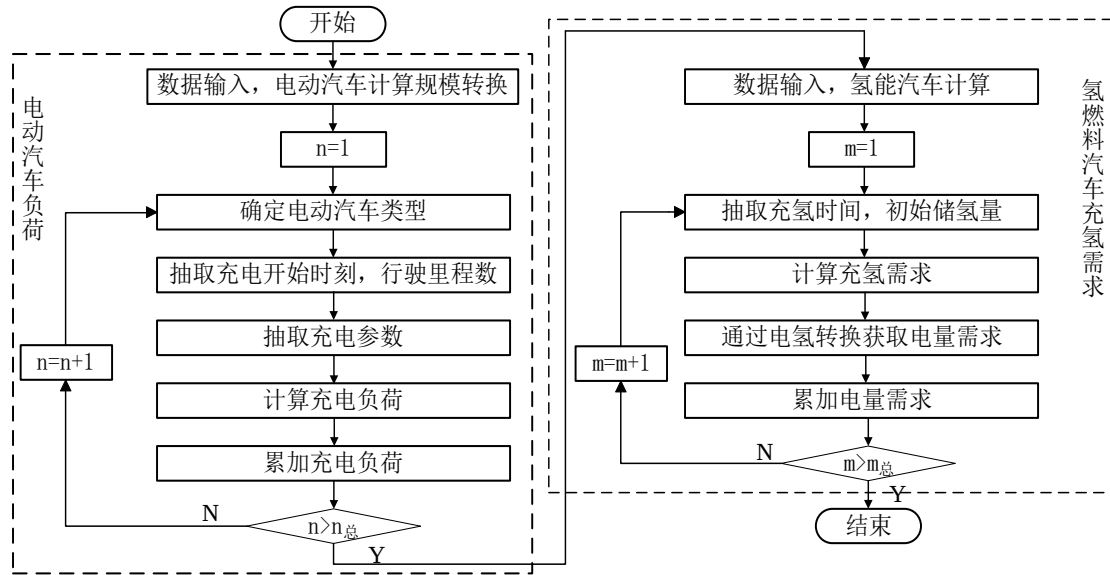


图 2-7 蒙特卡洛模拟充能负荷

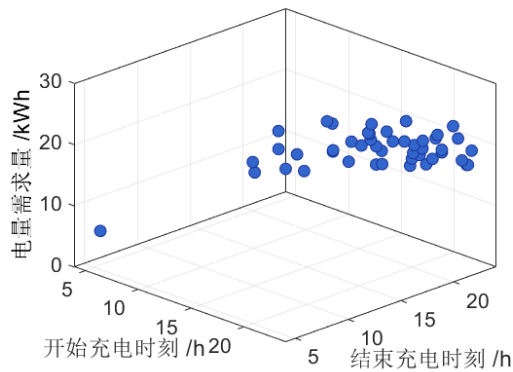
2.4.4 算例分析

基于新能源汽车的充能特性及需求模型，选取某典型充能站开展案例研究。该站配置 20 台充电桩，一台制氢储氢充氢设备，每台充电桩额定功率为 15kW，电解槽的额定功率为 250kW。研究对象包含 70 辆新能源汽车样本，其中电动汽车 50 辆，氢燃料汽车 20 辆。具体参数如表 2-2。假设车辆采用即停即充模式，充能启动时刻与进站时间一致，充能至电池最大容量。运用蒙特卡洛随机抽样

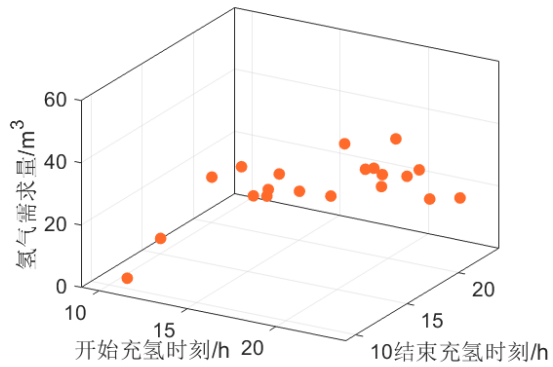
方法，对样本车辆的充能起始时间、初始储氢量（氢燃料汽车）及初始荷电状态（电动汽车）等关键参数进行概率建模，进而预测单车充能负荷需求，如图 2-8 所示。通过负荷叠加计算获得整体充能需求分布曲线如图 2-9 所示。

表 2-2 新能源汽车参数

类型	电池容量	续航里程	百公里耗能量	充能功率/速率
电动汽车	32kW·h	168km	13.2kW·h	15kW
氢燃料汽车	5kg	550km	0.8kg	16.8m ³ /min



(a) 电动汽车充电起止时刻与充电需求



(b) 氢燃料汽车充氢起止时刻与充氢需求

图 2-8 新能源汽车充能起止时刻与充能需求

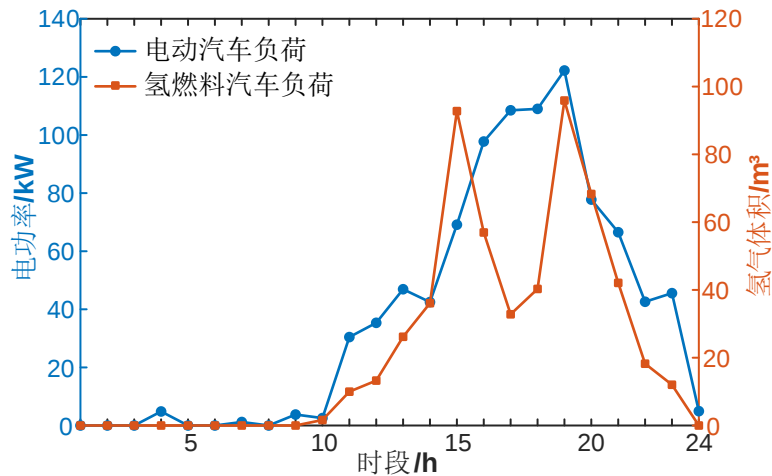


图 2-9 电氢汽车负荷预测曲线

由图 2-9 的负荷分布特征可以看出，电/氢汽车的能源需求曲线存在高度同步性，这将显著影响充能站的供电稳定性。具体而言，在 0~10h 时段的低负荷阶段，主要源于夜间和清晨进站车辆数量较少；而在 14h~21h 时段则出现明显的用能高峰，其中 19h 达到全日负荷峰值，这与日间车辆集中进站的行为特征

相符。该负荷特性分析为后续充能站优化研究提供了关键的数据支撑。

2.5 本章小结

本章首先从组成架构和工作原理两个方面对含风、光、氢、储的充能站的进行介绍分析，接着通过对站内各单元进行数学建模，深入探讨了风光发电系统的能量转换机理，并构建了相应的功率输出模型。同时，对蓄电池储能系统及电解水制氢装置的特性进行了理论分析。最后，针对电动汽车充电和氢燃料电池汽车充氢的需求，分别研究了其充能模型，采用蒙特卡洛模拟方法对新能源汽车的负荷需求进行了仿真。为后续章节的研究工作奠定了扎实的理论基础。

第3章 考虑需求响应的充电站售电价格优化模型

3.1 引言

分时电价的实施效果取决于时段划分及售电价格方案是否合理。科学合理的电价机制能够有效提升用户参与负荷调控的意愿。通过优化峰谷时段划分及售电价格方案，有望进一步提高用户参与响应的积极性，进而有效缓解电动汽车充电需求对充电站运营的冲击。当前充电站在制定峰谷电价方案时，主要参考用电负荷特征进行决策，但在方案制定过程中对用户的消费心理考虑相对不足，导致现有电价制定方案存在局限性。因此充电站运营商有必要对现行峰谷电价方案进行优化调整，从而提升用户参与度，促进充电负荷的有序管理。

本章节着重研究峰谷时段划分及分时电价优化问题。首先，采用基于隶属度函数方法对峰谷时段进行科学合理的划分。其次，基于 Logistic 函数响应机理构建充电站售电价格优化模型，并采用 NSGA-II 算法进行求解。

3.2 基于隶属度函数的峰谷时段划分

电动汽车用户的充电行为不仅取决于充电站售电价格，同时受峰谷时段划分的显著影响。基于充电负荷的周期性波动特征，一般将全天 24 小时划分为三个典型区间，其数学表达如式（3-1）所示：

$$T_v + T_p + T_f = 24 \quad (3-1)$$

式中， T_p 为峰时段集合、 T_f 为平时段集合、 T_v 为谷时段集合。

本研究采用基于半梯形隶属度函数的时段划分方法，该方法具有较强的实用性和可操作性。具体实现过程如下：

（1）首先识别负荷曲线的极值点（包括全局最大值和最小值），并遵循以下划分准则：

- 1) 负荷曲线的全局最大值点必然归属于峰时段，其出现在谷时段的概率为零；
- 2) 负荷曲线的全局最小值点必定属于谷时段，其出现在峰时段的概率为零。

（2）在确定极值点后，通过分析曲线上其余点与极值点的空间关系来判断

其时段归属。具体而言，若某点与全局最大值点的距离较近，则其归属于峰时段的概率较高；若与全局最小值点的距离较近，则其归属于谷时段的概率较大；若某点归属于峰时段和谷时段的概率均较低，则可判定为平时段。

分别采用偏大型和偏小型半梯形隶属度函数对各数据点处于峰谷时段的概率进行计算，如图 3-1 和图 3-2 所示：

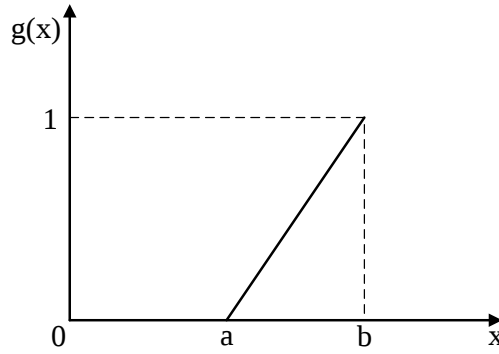


图 3-1 偏大型半梯形隶属度函数

偏大型隶属度函数的分布函数为：

$$g_1(x) = \frac{x-a}{b-a} \quad (3-2)$$

式中， b 为全局最大值点数值， a 为全局最小值点数值。

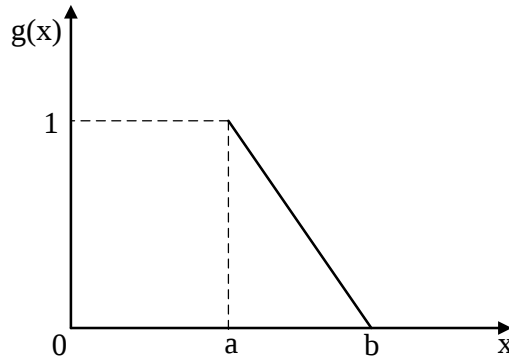


图 3-2 偏小型半梯形隶属度函数

偏小型隶属度函数的分布函数为：

$$g_2(x) = \frac{b-x}{b-a} \quad (3-3)$$

式中， b 为全局最大值点数值， a 为全局最小值点数值。

基于公式(3-2)和(3-3)的计算结果，可确定 2.4 节充能站中电动汽车负荷的峰谷时段分类，具体划分情况如表 3-1 所示。

表 3-1 负荷曲线峰谷时段属性

时刻	峰隶属度	谷隶属度	时刻	峰隶属度	谷隶属度
1:00	0	1	13:00	0.384	0.616
2:00	0	1	14:00	0.348	0.652
3:00	0	1	15:00	0.566	0.434
4:00	0.040	0.960	16:00	0.800	0.200
5:00	0	1	17:00	0.888	0.112
6:00	0	1	18:00	0.892	0.108
7:00	0.010	0.990	19:00	1	0
8:00	0	1	20:00	0.731	0.269
9:00	0.031	0.969	21:00	0.712	0.288
10:00	0.021	0.979	22:00	0.345	0.651
11:00	0.309	0.691	23:00	0.373	0.627
12:00	0.318	0.682	24:00	0.040	0.960

基于表 3-1 的数据，利用峰谷分时电价时段划分函数，对负荷曲线的峰谷时段进行划分，其数学表达式如下所示：

$$f(k) = \begin{cases} k \in T_p, g_1(x) \geq \theta \\ k \in T_f, g_1(x) < \theta \& g_2(x) < \theta \\ k \in T_v, g_2(x) \geq \theta \end{cases} \quad (3-4)$$

式中， θ 表示隶属度判定标准值，当某一时刻的峰时段或谷时段隶属度超过该标准值时，表明该时段负荷具有显著的峰、谷特性，应将其划分为相应的峰时段或谷时段。反之，若某一时刻峰时段或谷时段隶属度均低于阈值，则该时段应归类为平时段。本文采用 0.70 作为隶属度判定标准值^[65]，结合表 3-1 中计算的峰、谷隶属度值，对 2.4 节充能站电动汽车负荷曲线进行峰谷时段划分。划分结果如表 3-2：

表 3-2 峰谷时段划分情况

时间	时段	时间	时段
0:00~11:00	谷时段	15:00~22:00	峰时段
11:00~15:00	平时段	22:00~24:00	平时段

3.3 基于 Logistic 函数模糊响应机理的售电价格优化模型

基于 3.2 节确定的峰谷时段划分方案，本节通过制定充能站售电价格方案引导用户调整充电行为，实现负荷峰谷调节。首先，结合用户电价响应心理因素，依据 Logistic 函数响应机理构建负荷转移率模型，以此精确计算分时电价机制下的负荷转移量。其次，从充能站运营商和电动汽车用户的双重视角出发，以负荷波动率最小和用户充电费用最小为目标函数，建立了双目标电价优化模型。最后，采用 NSGA-II 算法对模型进行求解，获取 Pareto 前沿下的最优售电价格及负荷响应结果，为后续充能站优化调度模型提供数据支撑。

3.3.1 基于 Logistic 函数的负荷转移率模型

消费者心理学理论认为，电价差的过大或过小都会对用户参与响应的程度产生影响^[66]。将消费者心理学理论应用于电动汽车用户的响应行为建模时，负荷转移率即为用户响应，电价差即为价格激励。本节以峰段负荷向谷段转移为例，建立了基于 Logistic 函数需求响应机理模型，如图 3-3 所示。图中 ΔP_{pv} 表示峰谷时段电价差， λ_{pv} 表示峰转谷负荷转移率，即某一时段内峰时段转移到谷时段的负荷量与峰时段平均用电量之比。模型将响应行为分为三个区域：1) “死区”，电价差异较小，用户无响应；2) “响应区”，电价差异增大，用户响应积极性提升；3) “饱和区”，电价差异进一步扩大，但负荷转移率已达上限。当电价差为 0 时，用户响应行为随机性显著，甚至可能出现负转移率。

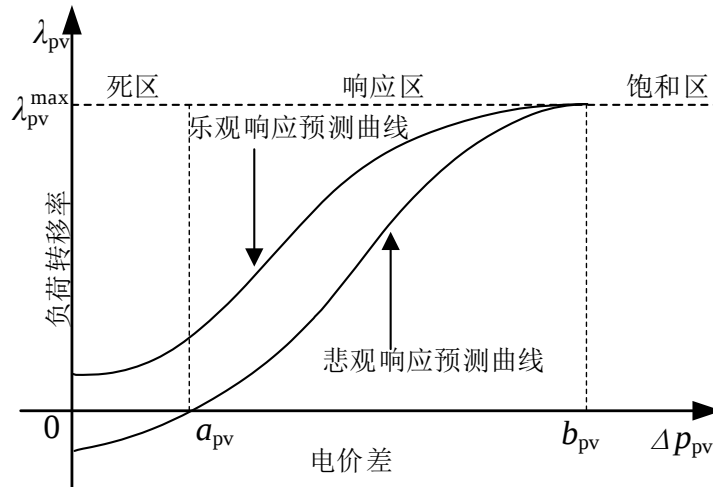


图 3-3 基于 Logistic 函数需求响应机理模型

Logistic 函数通过拓展可变参数量的方法来扩大负荷转移率的变化范围，其数学模型如式（3-5）所示。用户实际需求响应介于乐观响应与悲观响应预测值之间，其实际负荷转移率计算如式（3-6）所示。

$$\lambda(\Delta P) = \frac{a}{1 + e^{-(\Delta P - c)/\mu}} + b \quad (3-5)$$

$$\tilde{\lambda}_{pv} = \begin{cases} \frac{\lambda_{pv}^{\max} + \lambda_{pv}^{\min}}{2} & 0 \leq \Delta P_{pv} \leq a_{pv} \\ \lambda_{pv}^{\min} + \frac{\lambda_{pv}^{\max} - \lambda_{pv}^{\min}}{2}(1+m) & a_{pv} \leq \Delta P_{pv} \leq b_{pv} \\ \lambda_{pv}^{\max} & \Delta P_{pv} \geq b_{pv} \end{cases} \quad (3-6)$$

$$m = \frac{\Delta P_{pv} - a_{pv}}{b_{pv} - a_{pv}} \quad a_{pv} < \Delta P_{pv} < b_{pv} \quad (3-7)$$

式中， a 、 c 、 μ 为已知参数； b 为可变参数，可上下平移函数曲线； $\tilde{\lambda}_{pv}$ 为实际负荷转移率； $\lambda_{pv}^{\min}$ 为悲观响应预测的负荷转移率； $\lambda_{pv}^{\max}$ 为乐观响应预测的负荷转移率； a_{pv} 和 b_{pv} 为电价差划分区域分界点； m 为乐观响应隶属度。

峰转平、平转谷的实际负荷转移率 $\tilde{\lambda}_{pf}$ 、 $\tilde{\lambda}_{fv}$ 可用类似方法求出，则实际负荷转移量计算公式如下：

$$\Delta P_{EV,t} = \begin{cases} -\tilde{\lambda}_{pf} \bar{P}_{EV,t}^p - \tilde{\lambda}_{pv} \bar{P}_{EV,t}^p & t \in T_p \\ \tilde{\lambda}_{pf} \bar{P}_{EV,t}^p - \tilde{\lambda}_{fv} \bar{P}_{EV,t}^f & t \in T_f \\ \tilde{\lambda}_{pv} \bar{P}_{EV,t}^v - \tilde{\lambda}_{fv} \bar{P}_{EV,t}^f & t \in T_v \end{cases} \quad (3-8)$$

$$P_{EV,t} = P_{EV,t0} + \Delta P_{EV,t} \quad (3-9)$$

式中， T_p 为峰时段集合； T_f 为平时段集合； T_v 为谷时段集合； $\bar{P}_{EV,t}^p$ 、 $\bar{P}_{EV,t}^f$ 、 $\bar{P}_{EV,t}^v$ 分别为考虑需求响应前峰、平、谷时段的电动汽车平均负荷值； $\Delta P_{EV,t}$ 为 t 时段需求响应后的电动汽车负荷转移量。 $P_{EV,t0}$ 、 $P_{EV,t}$ 分别为 t 时段需求响应前、后的电动汽车负荷值。

3.3.2 充能站售电价格优化模型

基于 3.3.1 节负荷转移率模型的分析结果，分时电价机制对用户峰谷负荷特性具有明显影响。本节构建的电价优化模型在兼顾充能站运营商与电动汽车用户等双方利益的基础上，通过优化调整负荷分布曲线，探究不同售电价格方案对负荷峰谷特性的影响。

从充能站运营商角度出发，为有效缓解负荷峰谷差异对充能站的冲击，增强充能站运行稳定性，以负荷波动率最小为目标。同时，为优化站内风光资源的利用效率，提高系统经济性，采用负荷波动率指标表征可再生能源利用率，如式（3-10）所示。

$$F_1 = \min \frac{1}{\overline{P_{EV}}} \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{t=1}^T (P_{WT,t} + P_{PV,t} - P_{EV,t})^2} \quad (3-10)$$

式中， $\overline{P_{EV}}$ 表示需求响应后 T 个时段电车充电总负荷的平均值。

从电动汽车用户视角分析，充能站制定的售电价格优化方案对用户充电行为及产生的充电费用有明显的直接影响。若售电价格优化方案未能充分考虑用户经济利益，将可能导致用户参与调控响应的积极性下降，从而难以实现削峰填谷的目标。峰谷电价比值对用户和充能站运营商的利益均具有决定性作用，当用户未能依据峰谷电价比优化用电行为时，充电成本会明显增加。因此，构建以最小化用户充电费用为目标函数的优化模型，如式（3-11）所示。

$$F_2 = \min \sum_{t=1}^T P_{EV,t} \cdot \pi_t \quad (3-11)$$

上述已建立售电价格优化目标函数模型，还需满足以下约束条件：

（1）电价约束

为平衡充能站和用户双方的利益，在制定分时电价时，必须保证电价不低于成本价，且需设定最高电价限制。

$$\pi_{\min} \leq \pi_t \leq \pi_{\max} \quad (3-12)$$

式中， π_t 为充能站 t 时刻售电价格； $\pi_{\min}$ 和 $\pi_{\max}$ 分别为电价上、下限。

（2）峰谷电价比值

为了避免出现峰谷倒置的情况，需要对峰谷电价比值进行限制。

$$\omega_{\min} \leq (\pi_t^p / \pi_t^v) \leq \omega_{\max} \quad (3-13)$$

式中, π_t^p 、 π_t^v 分别表示峰时段和谷时段电价; $w_{\min}$ 和 $w_{\max}$ 分别为峰谷电价比上、下限。

3.3.3 基于 NSGA-II 算法的售电价格优化模型求解

售电价格优化模型涵盖负荷波动率与用户充电费用两个目标函数, 属于多目标优化问题。在求解此类问题时, 需要根据优化解的特征确定有效解集的边界, 并确保各目标函数之间的独立性。本节采用 NSGA-II 算法对售电价格优化模型进行求解。相较于传统遗传算法, 该算法融入了非支配排序、拥挤度计算及精英保留策略, 有效解决了人为权重设置的主观性及多目标量纲不统一的问题, 能够获取高质量的 Pareto 最优解集。该算法不仅提高了求解效率, 还增强了全局搜索性能, 从而显著提升了结果的准确性。具体步骤如下:

(1) 明确优化目标为负荷波动率最小和用户充电费用最小。优化变量涵盖峰谷、峰平及平谷的电价差值。

(2) 确定合理的种群规模和迭代上限。在初始化过程中, 在满足式 (3-12) 和 (3-13) 约束条件的前提下, 计算种群中每个个体的目标函数值。同时, 在目标函数信息后预留两个存储空间, 分别用于记录非支配排序信息及拥挤度信息。

(3) 进行计算非支配排序。对于种群中个体 P , 其具有两个优化目标, 一是最小化负荷波动率, 二是用户充电费用最小。 N_P 表示种群中支配该个体的数量, S_P 表示被个体 P 支配的集合。若 $N_P=0$, 则将该个体归类为第一非支配前沿。随后遍历第一非支配前沿中的每个个体, 若 $N_{P-1}=0$, 则将其归类为第二非支配前沿。循环迭代上述过程, 直至完成种群中所有个体的前沿等级划分。

(4) 计算拥挤度距离。如图 3-4 所示, 图中 f_1 和 f_2 分别代表不同的优化目标。拥挤度距离的计算能够识别个体局部聚集现象, 通过筛选机制可降低算法陷入局部最优的风险, 因此将其作为评估同一非支配层级个体优劣的指标。其计算方法是对同一非支配层中个体在每个目标函数维度上相邻两个解之间距离的绝对值求和, 具体计算如式 (3-14)。对于位于边界位置的个体, 其拥挤度设为无穷大。

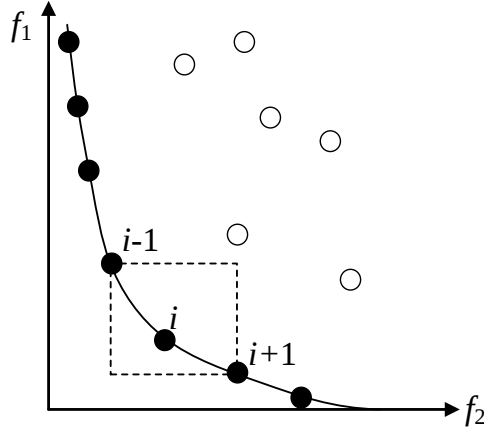


图 3-4 拥挤度示意图

$$d_i = \sum_{k=1}^m |f_k^{i+1} - f_k^i| \quad (3-14)$$

式中， d_i 为拥挤度距离； m 为目标函数数量。

(5) 进入迭代优化过程，采用二元锦标赛选择机制进行个体筛选。优先选择位于较高非支配层级的个体，若个体处于同一非支配层级，则优先选择拥挤距离较大的个体。通过该机制，从种群中筛选出 50% 的优势个体。个体选择流程如图 3-5 所示。

(6) 在满足公式 (3-12) 和 (3-13) 约束条件的前提下，对筛选出的种群按照公式 (3-15) ~ (3-17) 进行模拟二进制交叉和多项式变异操作，生成子代种群。同时，及时更新子代种群的目标函数值。

$$\begin{cases} x_{1,j} = 0.5 \times [(1 + \gamma_j) x_{1,j} + (1 - \gamma_j) x_{2,j}] \\ x_{2,j} = 0.5 \times [(1 - \gamma_j) x_{1,j} + (1 + \gamma_j) x_{2,j}] \end{cases} \quad (3-15)$$

$$x_i = x_i + \beta_i \quad (3-16)$$

$$\gamma_j = \begin{cases} (2\mu_j)^{\frac{1}{\eta_c+1}} & \mu_j \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2(1-\mu_j)} \right)^{\frac{1}{\eta_c+1}} & \text{其他} \end{cases} \quad \beta_i = \begin{cases} (2\mu_i)^{\frac{1}{\eta_m+1}} - 1 & \mu_i \leq 0.5 \\ 1 - [2(1-\mu_i)]^{\frac{1}{\eta_c+1}} & \text{其他} \end{cases} \quad (3-17)$$

式中， $x_{1,j}$ 、 $x_{2,j}$ 、 $x_{1,j}$ 、 $x_{2,j}$ 为在交叉操作中两条染色体上基因交叉前、后的信息； x_i 、 x_i 为在变异操作中第 i 条染色体上基因变异前、后的信息； μ_i 、 μ_j 为 0 到 1 的随机数； η_c 为交叉参数，决定子代与父代基因的相似程度，具有非负性，

数值设定为 20; η_m 为变异参数, 可用于维持种群多样性, 数值设定为 100。

(7) 将父代与子代种群合并, 重新执行非支配排序和拥挤度计算, 如图 3-5 所示。

(8) 基于精英保留策略筛选优势个体, 为下一代种群进化提供基础。具体而言, 基于步骤 (7) 中规模为 $2N$ 的混合种群, 依据非支配排序等级和拥挤度信息, 按照优先级从高到低的顺序选择 N 个个体构成新的父代种群。如果不能满足收敛条件或未达到预设的迭代上限次数, 则返回步骤 (5) 继续进行迭代优化。

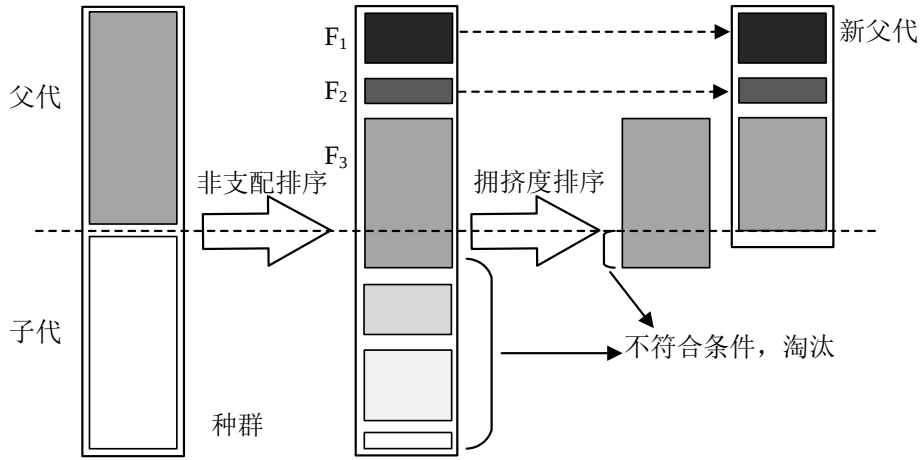


图 3-5 子代个体选择过程图

(9) 基于 NSGA-II 算法获取 Pareto 前沿解集后需从中提取妥协解。首先, 通过构建模糊隶属度函数对 Pareto 前沿解集进行全局遍历, 利用式 (3-18) 量化各非支配解的隶属度指标, 以表征决策者对各目标函数的偏好权重; 其次, 结合实际需求设置权重系数, 计算目标函数集的隶属度综合加权值。本节采用均匀权重分配策略, 依据式 (3-19) 计算各解的加权隶属度指标, 最终选取综合加权值最大的 Pareto 前沿解作为系统最优折衷方案。

$$\lambda_i^k = \begin{cases} 0, & f_i = f_i^{\max} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, & f_i^{\min} \leq f_i \leq f_i^{\max} \\ 1, & f_i = f_i^{\min} \end{cases} \quad (3-18)$$

$$\lambda^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{obj}}} \omega_i \lambda_i^k}{\sum_{k=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_{\text{obj}}} \omega_i \lambda_i^k}, \quad k=1, 2, \dots, N_p \quad (3-19)$$

式中, $f_i^{\max}$ 、 $f_i^{\min}$ 为目标函数的上下限; N_{obj} 、 N_p 为目标函数以及种群个数; w_i 为第 i 个目标函数值权重; λ_i^k 为 Pareto 解集中第 k 个解中第 i 个目标函数的隶属度。

根据上述方案, 将 3.3.2 节所提模型与 NSGA-II 算法相结合, 具体求解流程如图 3-6 所示。

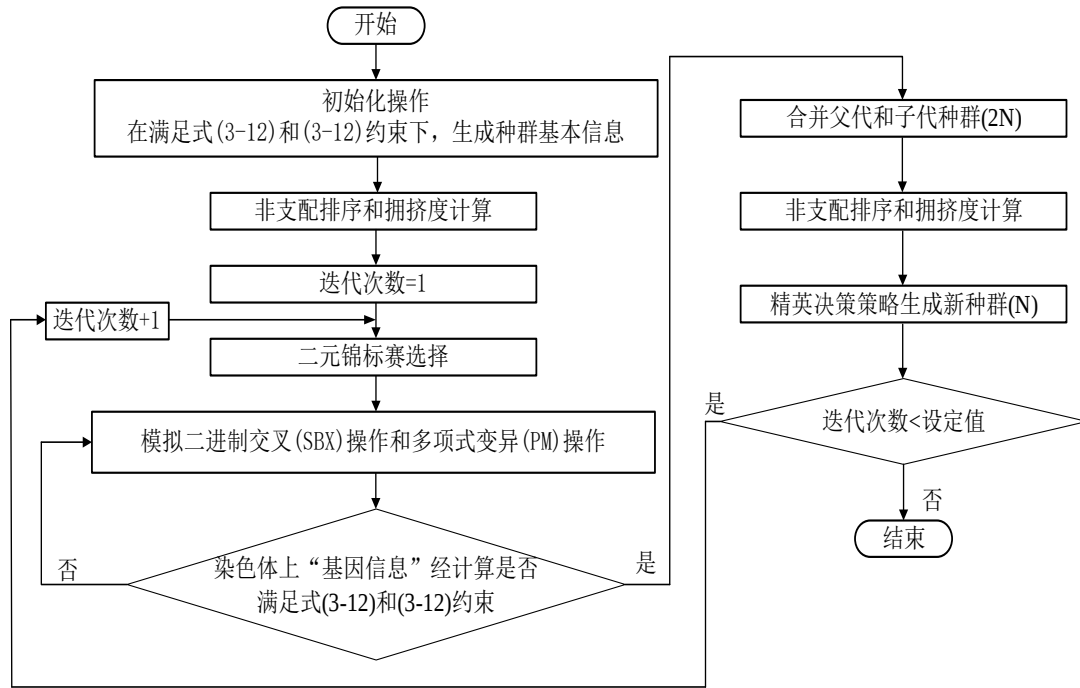


图 3-6 售电价格优化模型操作流程

3.4 算例分析

3.4.1 基础数据

本文基于第 2 章所提充能站为例, 其中站内风电装机容量为 80kW, 光伏装机容量为 160kW; 充能站的风光出力和电/氢负荷预测数据如图 3-7 所示。

本节模型其他数据:

- (1) 负荷转移率模型参数如表 3-3 和表 3-4 所示;
- (2) 采用优化电价前, 充能站售电价格为 1.35 元/(kW·h);
- (3) NSGA-II 算法参数设置: 种群规模 100, 迭代次数 200, 交叉率 90%, 变异率 10%。

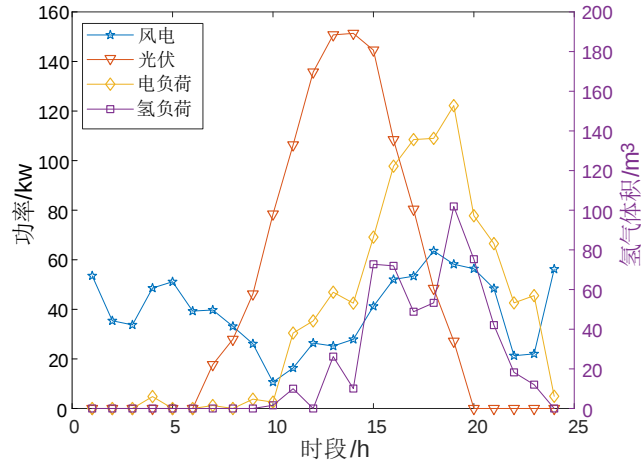


图 3-7 电/氢负荷及预测风光功率

表 3-3 峰谷时段划分情况

Logistic 曲线	a	b	c	μ
乐观响应预测曲线	0.1	0	0.4	0.1
悲观响应预测曲线	0.104	-0.0036	0.4	0.1

表 3-4 负荷转移率模型相关参数表

转移率曲线	“响应区”与“饱和区”分界点	“死区”与“响应区”分界点
峰转谷	1.0	0.4
峰转平	0.60	0.08
平转谷	0.50	0.04

3.4.2 结果分析

通过本章 3.2 节所提方法，得到合理科学的电动汽车负荷峰谷时段划分方案，如图 3-8 所示。

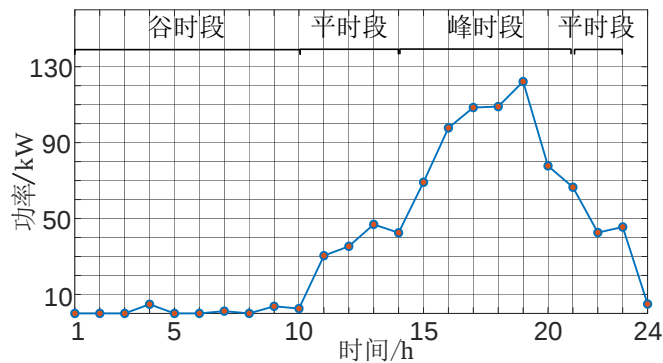


图 3-8 某充能站用户负荷曲线及峰谷时段划分方案图

本节通过 NSGA-II 算法优化后的 Pareto 最优解集如图 3-9(a)所示。实施优化售电价格前后负荷对比情况如表 3-5 和图 3-9(b)所示。

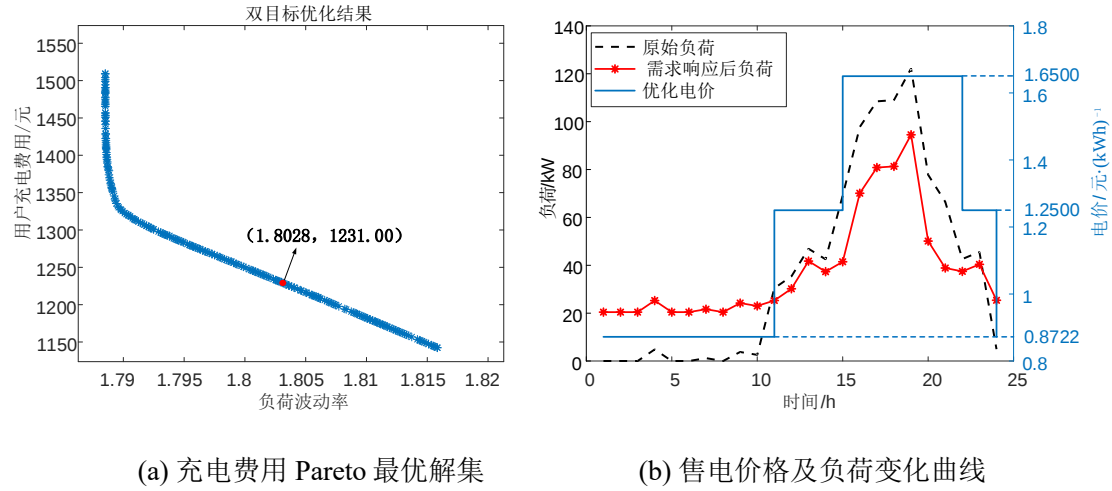


图 3-9 售电价格及充电充电费用 Pareto 最优解集

表 3-5 实施优化电价前后负荷对比情况表

指标	峰时负荷总	平时负荷总	谷时负荷总	峰谷差
	值 (kW)	值 (kW)	值 (kW)	(kW)
采用优化电价前	650.91	243.40	17.34	122.20
采用优化电价后	456.72	212.38	242.07	74.10
负荷变化量	-194.19	-31.02	224.73	48.10

为确保充能站的经济效益，以优化后用户充电费用不低于优化前水平为原则，从 Pareto 最优解集中筛选出适宜的解。在充能站采用统一售电价格策略下，用户充电费用为 1230.73 元，因此选取用户充电费用为 1231.00 元对应的售电价格作为最优分时电价方案。优化后的售电价格及电动汽车充电负荷变化趋势如图 3-9(b)所示。根据表 3-5 和图 3-10 的数据分析表明，通过本文所提的电价机制引导用户参与负荷调度，显著改善了负荷分布特性。高峰时段负荷由 650.91kW 降至 456.72kW，降幅达 29.83%；平时段负荷由 243.40kW 降至 212.38kW，降幅为 12.74%；而谷时段负荷均值则由 17.34kW 显著提升至 242.07kW。峰谷负荷差值从 122.20kW 缩减至 74.10kW，降幅达 39.36%。这一优化结果有效提升了负荷曲线的平缓度，实现了良好的削峰填谷效果，为充能站的发电调度提供了有利条件。

如表 3-6 为售电价格优化结果对比，实施优化电价后，负荷波动率降低了

0.78%，用户平均充电价格由原来 1.35 元/(kW·h)降至 1.19 元/(kW·h)，降低了 11.85%，充能站收益和之前几乎相等，这表明，科学合理的售电价格方案在有效保障充能站利益的同时，还能激励用户积极参与需求响应，从而实现供需双方的利益共赢。

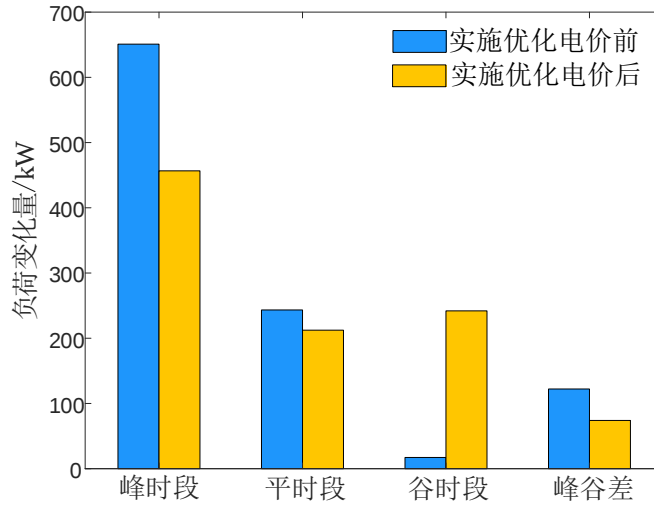


图 3-10 实施优化电价前后负荷变化对比图

表 3-6 售电价格优化结果对比

情景	负荷波动	平均电价 (元/(kW·h))	充能站收益/元
采用优化电价前	1.8170	1.35	1230.73
采用优化电价后	1.8028	1.19	1231.00

3.5 本章小结

本章聚焦于峰谷时段划分与充能站售电价格优化问题，基于科学的峰谷时段划分方案，通过分时电价机制引导用户积极调整用电行为，并对充能站运营商和用户双方利益协调机制进行了分析。首先，在峰谷时段划分研究中，采用隶属度函数方法对各时段进行峰谷特性分类，从而获得合理的时段划分方案。其次，在售电价格优化研究中，构建了基于 Logistic 函数的需求响应模型，综合考虑用户参与分时电价调控的心理行为特征，运用 NSGA-II 算法实现多方利益的优化协调。最后，利用差异电价引导用户优化充电行为。从用户角度，降低了用户的充电费用；从充能站运营角度，实现负荷曲线的削峰填谷，为发电调度提供便利，同时提升风光资源利用效率，提高经济效益；从社会效益角度，

有效提升了社会资源整体利用率。

第 4 章 考虑电转氢和需求响应的充能站优化调度策略

4.1 引言

作为推动新能源汽车产业发展的核心基础设施，充能站为电动汽车和氢能汽车提供了高效、安全且稳定的能源供应服务。现有研究表明，电动汽车的充电行为对充能站的运行安全性和经济性具有重要影响。但针对电动汽车与氢燃料电池汽车协同充能对充能站运行影响的研究尚不充分。本研究在传统充电站架构基础上，集成电制氢系统及电/氢储能装置，以满足电动汽车与氢燃料电池汽车的多元化充能需求。同时，在负荷侧引入用户心理因素，通过实施分时电价调控策略引导用户根据电价差异调整充能行为。这一设计不仅有助于推动氢燃料电池汽车的普及，实现交通领域的零污染排放和高效能源补给，还可通过电制氢模块与需求响应机制有效消纳站内清洁能源，减少弃风弃光现象，从而实现充能站的低碳经济调度。

4.2 充能站优化调度策略

新能源充能站中电/氢汽车负荷的峰谷差异显著。通过在用电低谷时段将剩余电能转化为电/氢形式存储，可实现对充能站用电、用氢等环节的能量流耦合。因此，对充能站而言，精准预测能量需求并优化系统运行是实现调节能力最大化的关键；对新能源汽车用户而言，降低充能成本将显著提升其购买和使用新能源汽车的积极性。本章综合考虑充能站的运行成本，对电动汽车与氢燃料电池汽车的充能需求以及站内设备进行协同优化。

充能站在电源侧可通过电制氢技术实现能源优化利用，同时在负荷侧通过负荷曲线调整实现供能策略的进一步优化，从而提升可再生能源消纳率并增强经济效益。在本文所构建的两阶段优化模型中，第一阶段为第 3 章所提充能站售电价格优化阶段，基于 Logistic 函数的需求响应机制，兼顾充能站运营商与用户双方利益，以负荷波动率最小化和用户充能成本最小化为目标函数，运用 NSGA-II 算法求解，制定最优售电策略并对电动汽车充电负荷曲线进行优化调整。第二阶段为充能站优化调度阶段，将优化后的电动汽车充电负荷数据输入

充能站调度模型，以充能站日运行成本最小化为目标，协调风光发电、电制氢及储能设备的运行策略，最终获得综合充能站的最优调度方案。其优化运行流程如图 4-1 所示。

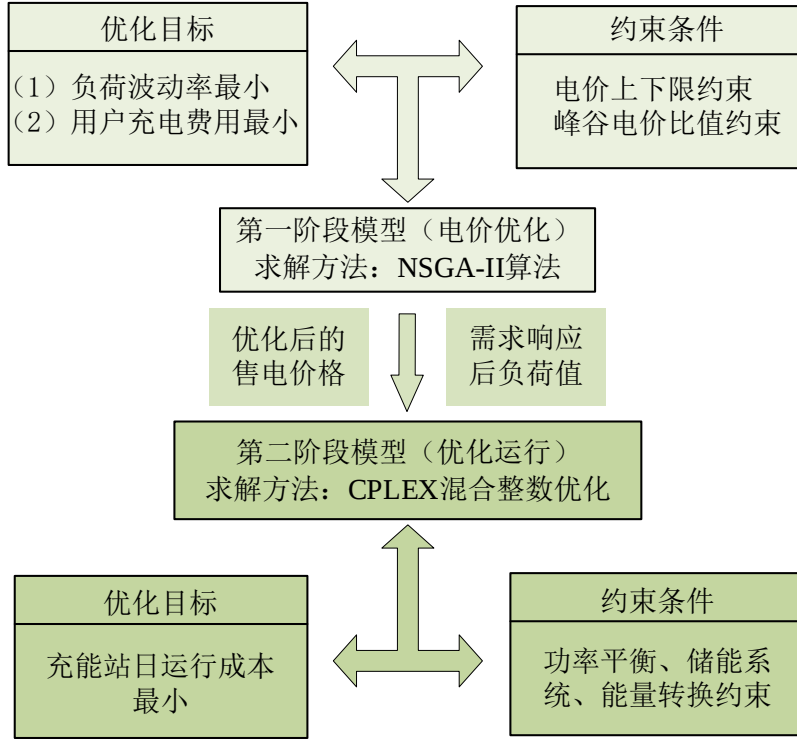


图 4-1 优化运行流程

4.3 充能站优化调度模型

4.3.1 目标函数

风光氢储新能源汽车充能站的优化运行是从运营商的角度出发，以日运行成本最小为目标函数。本文旨在制定日调度运行策略，因此不考虑充能站内部风光发电装置、储电装置及电转氢装置投资建设成本，仅考虑各模块的运行维护成本。同时还需考虑充能站向市场购能费用。具体可表示为：

$$\min C = \min(C_{tr} + C_{op}) \quad (4-1)$$

式中， C 为充能站日运行成本； C_{tr} 为充能站的购能成本； C_{op} 为充能站内部设备的运维成本。

(1) 购能成本。充能站的购能成本可分为 2 类，包括充能站向交流配电网购买电能和充能站从氢能市场购买氢能。

购能成本可以表示为:

$$C_{tr} = \sum_{t=1}^T (P_{e,t}^g \lambda_{e,t}^g + P_{h,t}^g \lambda_{h,t}^g) \quad (4-2)$$

式中, $P_{e,t}^g$ 表示 t 时刻从电网购买的电量; $P_{h,t}^g$ 为 t 时刻向氢能市场购买的氢量;
 $\lambda_{e,t}^g$ 为电网购电价格; $\lambda_{h,t}^g$ 为购氢价格。

(2) 站内运维成本。充能站的运维成本是各个部分的运行维护成本之和, 可以表示为:

$$\begin{aligned} C_{op} &= C_{WT}^{op} + C_{PV}^{op} + C_{EL}^{op} + C_{ES}^{op} + C_{HS}^{op} \\ &= \sum_{t=1}^T \left(P_{WT,t} C_{WT} + P_{PV,t} C_{PV} + P_{EL,t}^e C_{EL} + \right. \\ &\quad \left. P_{ES,t} C_{ES} + P_{HS,t} C_{HS} \right) \end{aligned} \quad (4-3)$$

式中, C_{WT}^{op} 、 C_{PV}^{op} 、 C_{ES}^{op} 、 C_{EL}^{op} 、 C_{HS}^{op} 分别为风力、光伏、蓄电池、电解槽和储氢罐设备运行成本; C_{WT} 、 C_{PV} 、 C_{ES} 、 C_{EL} 、 C_{HS} 分别为风力、光伏、蓄电池、电解槽和储氢罐的单位运行维护成本; $P_{WT,t}$ 、 $P_{PV,t}$ 、 $P_{EL,t}^e$ 、 $P_{ES,t}$ 分别为 t 时刻风力、光伏、电解槽和蓄电池的运行功率, kW; $P_{HS,t}$ 为 t 时刻储氢罐充放量, m^3 。

4.3.2 约束条件

(1) 电功率约束

电功率平衡及相关约束可表示为:

$$\begin{cases} P_{e,t}^g + P_{PV,t} + P_{WT,t} + P_{ES,t}^{dis} = P_{EV,t} + P_{EL,t}^e + P_{ES,t}^{cha} \\ 0 \leq P_{e,t}^g \leq P_{e,max}^g \\ 0 \leq P_{PV,t} \leq P_{PV,t}^{max} \\ 0 \leq P_{WT,t} \leq P_{WT,t}^{max} \\ 0 \leq P_{EL,t}^e \leq P_{EL,max}^e \end{cases} \quad (4-4)$$

式中, $P_{EV,t}$ 为 t 时刻电动汽车充电负荷功率; $P_{e,t}^g$ 为 t 时刻电网购电功率; $P_{ES,t}^{cha}$ 和 $P_{ES,t}^{dis}$ 为 t 时刻蓄电池充放电功率; $P_{e,max}^g$ 、 $P_{WT,t}^{max}$ 、 $P_{PV,t}^{max}$ 、 $P_{EL,max}^e$ 分别为电网购电功率、风光出力功率、电解槽耗电功率的上限。

(2) 氢能约束

氢能平衡及制氢量约束可表示为:

$$\begin{cases} P_{h,t}^g + P_{EL,t}^h + P_{HS,t}^{dis} = P_{HS,t}^{cha} + P_{HV,t} \\ 0 \leq P_{EL,t}^h \leq P_{EL,max}^h \end{cases} \quad (4-5)$$

式中, $P_{EL,t}^h$ 、 $P_{HV,t}$ 、 $P_{HS,t}^{cha}$ 和 $P_{HS,t}^{dis}$ 分别为 t 时刻的电解槽制氢量、氢能汽车充氢需求量和储氢罐的充放量, m^3 ; $P_{EL,max}^h$ 为 t 时刻电解槽制氢量上限。

(3) 储氢系统约束

本文采用广义模型对氢储进行建模, 将能量充放过程等效为蓄电池的充放电过程^[67]。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{HS,t}^{cha} \leq P_{HS,max}^{cha} \\ 0 \leq P_{HS,t}^{dis} \leq P_{HS,max}^{dis}, \\ \mu_{HS,t}^{cha} + \mu_{HS,t}^{dis} = 1 \\ V_{HS,t} = V_{HS,t-1} + \eta_{HS}^{cha} P_{HS,t}^{cha} - P_{HS,t}^{dis} / \eta_{HS}^{dis} \\ V_{HS}^{min} \leq V_{HS,t} \leq V_{HS}^{max} \\ V_{HS,1} = V_{HS,24} \end{cases} \quad (4-6)$$

式中, $\mu_{HS,t}^{cha}$ 、 $\mu_{HS,t}^{dis}$ 分别为储氢罐的充放氢状态; $P_{HS,max}^{cha}$ 、 $P_{HS,max}^{dis}$ 为储氢罐充放速率的上限; η_{HS}^{cha} 、 η_{HS}^{dis} 为储氢装置的充放效率; $V_{HS,t-1}$ 、 $V_{HS,t}$ 为储氢罐中 $t-1$ 和 t 时刻的氢气的容量; V_{HS}^{max} 、 V_{HS}^{min} 分别为储氢罐中氢气容量的上、下限; $V_{HS,1} = V_{HS,24}$ 保证储氢罐一天始末状态相同。

(4) 储电系统约束

电池储能相关约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ES,t}^{cha} \leq P_{ES,max}^{cha} \\ 0 \leq P_{ES,t}^{dis} \leq P_{ES,max}^{dis}, \\ \mu_{ES,t}^{cha} + \mu_{ES,t}^{dis} = 1 \\ S_{ES,t} = S_{ES,t-1} + \eta_{ES}^{cha} P_{ES,t}^{cha} - P_{ES,t}^{dis} / \eta_{ES}^{dis} \\ S_{ES}^{min} \leq S_{ES,t} \leq S_{ES}^{max} \\ S_{ES,1} = S_{ES,24} \end{cases} \quad (4-7)$$

式中, $\mu_{ES,t}^{cha}$ 、 $\mu_{ES,t}^{dis}$ 为蓄电池的充放电状态; $P_{ES,max}^{cha}$ 、 $P_{ES,max}^{dis}$ 为蓄电池充放功率的上限; η_{ES}^{cha} 、 η_{ES}^{dis} 为蓄电池充放效率; $S_{ES,t-1}$ 、 $S_{ES,t}$ 为蓄电池中 $t-1$ 和 t 时刻存储

的能量； $S_{ES}^{\max}$ 、 $S_{ES}^{\min}$ 分别为蓄电池存储电能的上、下限； $S_{ES,1} = S_{ES,24}$ 保证蓄电池一天始末状态相同。

(5) 能量转换约束

电解槽制氢功率为：

$$P_{EL,t}^h = \frac{P_{EL,t}^e \cdot \Delta t}{\mu_h} \quad (4-8)$$

式中， μ_h 为电解槽制氢单位耗电量，在标准大气压下，本文取 2.69 kWh/m^3 ；

$P_{EL,t}^e$ 为 t 时段电解槽输入的电功率。

4.4 算例分析

4.4.1 基础数据

本文基于第 2 章所提充能站为例，充能站的风光出力和电氢负荷预测数据在第 3 章已进行描述，本章将不再进行阐述。新能源汽车充能站内各设备的运维系数及储能设备参数参考文献^[68]，如表 4-1 和表 4-2 所示。电网购电电价参考文献^[69]，如表 4-3。电网购电功率上限为 200kW ，当地市场购氢价格为 2.0 元/m^3 ，充能站售氢价格为 3.10 元/m^3 。

表 4-1 站内各设备的运维系数

运维系数	C_{PV}	C_{WT}	C_{EL}	C_{ES}	C_{HS}
参数值	0.05 元/ (kW·h)	0.07 元/ (kW·h)	0.15 元/ (kW·h)	0.05 元/ (kW·h)	0.05 元/ m^3

表 4-2 各储能设备参数

设备	容量	充放功率 上限	容量下限 约束/%	容量上限 约束/%	充放效率 /%
电储	250 kWh	125kW	20	90	95
氢储	200 m^3	100 m^3/h	20	90	95

表 4-3 电网分时电价

时段	时段划分	价格
谷时段	24:00-7:00	0.3342 元/(kW·h)
	8:00-10:00	
平时段	16:00-18:00	0.6346 元/(kW·h)
	22:00-23:00	
峰时段	11:00-15:00	0.9440 元/(kW·h)
	19:00-21:00	

4.4.2 结果分析

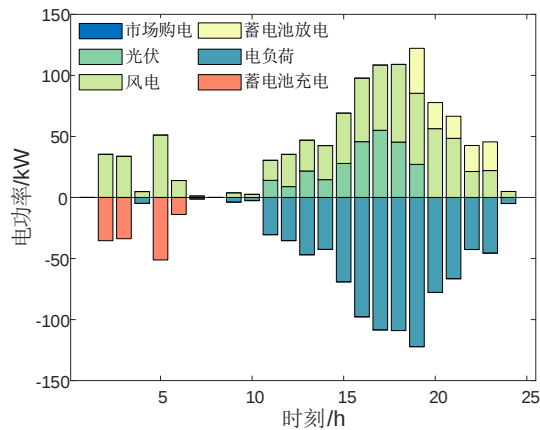
本文以 1h 为单位时间，优化调度周期为 24h。为了分析本文的优化运行策略对充能站的经济性和风光能源消纳能力的影响，定义了以下 3 种不同的场景。

场景 1：不考虑电转氢，采用固定电价。

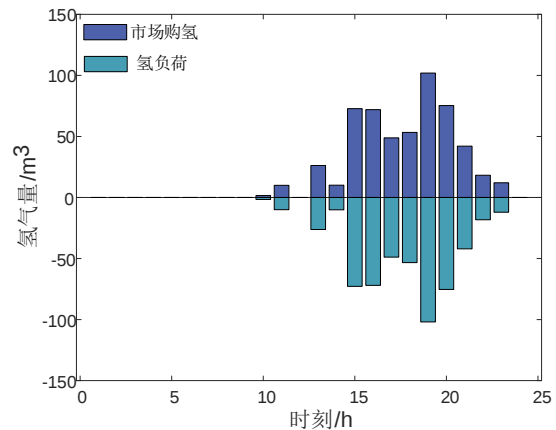
场景 2：在场景 1 的基础上考虑电转氢系统。

场景 3：在场景 2 的基础上考虑价格需求响应。

由于本文构建的数学模型属于混合整数线性优化问题，利用 CPLEX 优化求解器进行求解。在场景 1、场景 2 和场景 3 情况下的优化调度结果分别如图 4-2、图 4-3 和图 4-4 所示。图中，横轴的上半部分和下半部分分别表征各设备功率的输入和输出。由于充能站在运行过程中始终保持功率平衡，因此能量的优化结果关于横轴对称。表 4-4 给出了各运行场景下充能站的日运行成本情况，表 4-5 则为调度周期内各场景的风光资源利用情况。



(a) 电负荷调度结果



(b) 氢负荷调度结果

图 4-2 场景 1 情况下功率优化调度结果

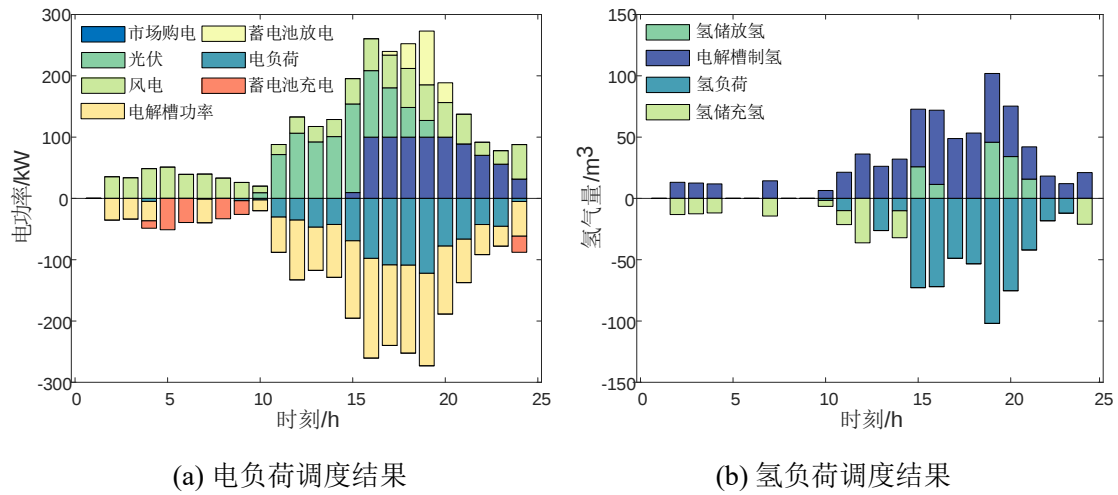


图 4-3 场景 2 情况下功率优化调度结果

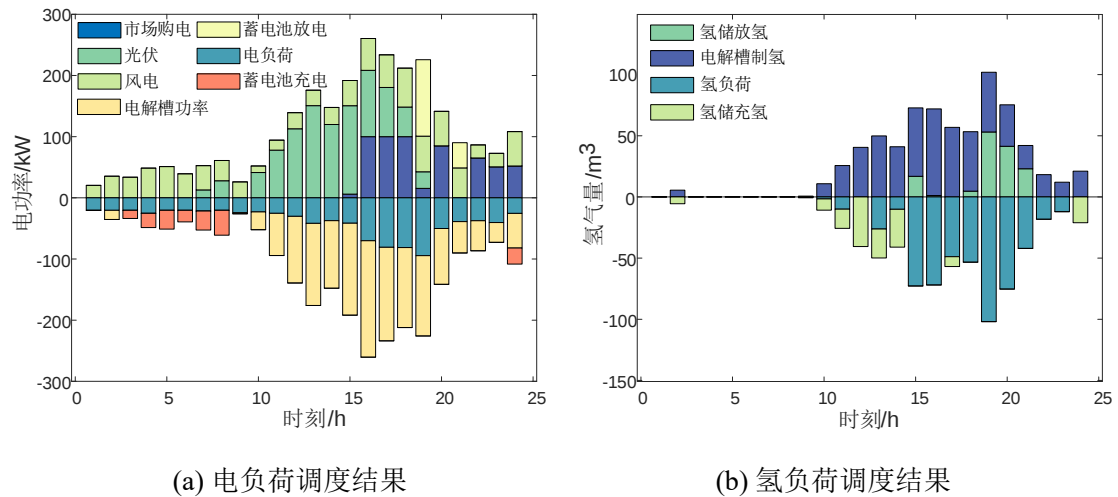


图 4-4 场景 3 情况下功率优化调度结果

表 4-4 各场景下充能站的日运行成本

场景	场景 1	场景 2	场景 3
购电费用/元	0	562.82	382.23
购氢费用/元	1088.66	0	0
设备运维费用/元	64.22	356.57	370.10
售电收益/元	1230.73	1230.73	1231.00
售氢收益/元	1687.42	1687.42	1687.42
日运行成本/元	1152.87	919.39	752.33
售能收益/元	2918.15	2918.15	2918.42

表 4-5 各场景下风光利用情况

场景	场景 1	场景 2	场景 3
风机发电量/kWh	940.20	940.20	940.20
弃风量/kWh	276.04	53.60	33.10
光伏发电量/kWh	1123.50	1123.50	1123.50
弃光量/kWh	862.85	334.02	170.77
风电消纳率/%	70.64	94.30	96.48
光伏消纳率/%	23.20	70.27	84.80

根据图 4-2、图 4-3、图 4-4、表 4-4 和表 4-5，对调度结果分析如下：

场景 1 中，非高峰时段（1:00-10:00）的电动汽车负荷由风机供电，剩余风电存储于蓄电池。然而，由于风光出力与用电负荷存在时间错配性，在负荷高峰期（19:00-23:00），风光出力不足，需依赖蓄电池放电满足负荷需求。由于未配置制氢设备，氢燃料汽车所需氢能完全依赖市场采购，购氢成本为 1088.66 元，充电站日运行成本为 1152.87 元，风电消纳率为 70.64%，光伏消纳率为 23.20%。

场景 2 在引入电转氢技术后，与场景 1 相比，15:00—21:00 时段电氢负荷同时达到峰值，风光出力除满足电动汽车负荷外，还需为电解槽提供额外电能以制氢。因此，风电消纳率提升 23.66%，光伏消纳率提升 47.07%，同时购电量增加 756.36kWh，购电成本增加 562.82 元。通过电解槽制氢实现售氢利润 1687.42 元，显著提升了风光消纳率，从而降低了充电站总运行成本。与场景 1 相比，日运行成本减少 233.48 元。

场景 3 通过实施电价需求响应机制，引导电动汽车充电负荷转移，增强了削峰填谷能力。与未考虑需求响应的场景 2 相比，1:00—10:00 时段电动汽车充电负荷显著增加，光伏出力增加 72.82kWh，用于满足充电负荷和蓄电池储能需求。因此，光伏消纳率提升 14.53%，购电费用减少 180.59 元，降幅达 32.09%。考虑需求响应后，日运行成本降低 167.06 元，降幅约 18.17%，显著提升了充电站运行经济性，同时进一步提高了风光消纳率。

综上所述，电转氢系统的能量时移特性实现了能量的跨时段高效利用，增强了站内设备运行灵活性。考虑用户需求响应后，能够进一步增强充电站的风光资源利用率，减少可再生能源的浪费，同时能够大幅度降低充电站的日运行

成本，有效提高充能站经济效益。

4.5 本章小结

本章针对新能源汽车的充能需求以及分布式可再生能源的消纳问题，提出一种考虑电转氢和需求响应的风光储综合充能站优化调度模型。以最小化充能站日运行成本为目标，综合考虑有序充电、电转氢、储能等调控手段，建立了考虑电转氢和需求响应的充能站优化调度模型。通过 Cplex 求解器对模型进行求解，仿真结果表明建立的优化调度模型可以提高充能站的收益，减少了弃风弃光。此外，通过电转氢装置可以进行灵活的能量转换，实现了站内氢气自给自足，降低了充能站的运营成本，有效提高了充能站运行经济性和稳定性。

第 5 章 考虑源荷不确定性的充能站鲁棒优化调度

5.1 引言

第 4 章以风电出力和光伏出力的精确预测值为基础，提出了考虑电转氢和需求响应的充能站优化调度模型，同时对新能源汽车的充能负荷进行了建模和蒙特卡洛模拟，得到精确的新能源汽车负荷曲线。然而，在实际运行中，由于风光出力的随机性较强，基于精确预测值的调度方法难以准确反映其波动特性；同时，新能源汽车的充能需求也存在显著的不确定性。若忽略这些不确定性因素，优化调度结果可能出现较大偏差。为解决这一问题，本章研究了一种考虑源荷不确定性的充能站鲁棒优化调度模型，模型通过引入不确定性调节参数，可以使充能站的运营商能够根据需求灵活调整调度方案的保守性。

5.2 鲁棒优化及基本数学模型

5.2.1 鲁棒优化模型

鲁棒优化的理论框架起源于 20 世纪 50 年代 Soyster 的开创性研究。随着理论发展，Ben-Tal、Nemirovski 等学者在 20 世纪 90 年代对其进行了系统性扩展^[70-71]。该方法的本质特征在于，在不确定参数的可行域内确保所有约束条件成立，并寻求最恶劣场景下的最优解^[72]。

（1）静态鲁棒优化

单阶段鲁棒优化的核心特征是决策变量需在不确定参数实际发生前确定，且优化过程缺乏动态调整机制。其数学表达形式可定义为：

$$\min f(x) \quad (5-1)$$

$$s.t. g(x, \xi) \leq 0 \quad (5-2)$$

式中， $f(x)$ 为目标函数， $g(x, \xi)$ 为约束条件， x 为决策变量， $\xi \in U$ 表征不确定参数及其可行集合。由于单阶段方法无法进行动态调整，易导致解集保守性过强，限制了其工程应用价值。

（2）动态鲁棒优化

动态鲁棒优化，也称为两阶段鲁棒优化，其将决策过程分解为两个阶段：第一阶段需在不确定参数实现前确定初始决策变量 x ；第二阶段则基于 ξ 的具体信息进行动态调整，形成辅助决策变量 y 。其数学表达式为

$$\min \left[f_1(x) + \max_{\xi \in U} \min_y f_2(y, x, \xi) \right] \quad (5-3)$$

$$s.t. h(x) \leq 0 \quad (5-4)$$

$$g(y, x, \xi) \leq 0 \quad (5-5)$$

式中， $f_1(x)$ 为初始阶段目标函数， $h(x)$ 为第一阶段的约束条件； $f_2(y, x, \xi)$ 为第二阶段目标函数， $g(y, x, \xi)$ 为动态约束条件。

尽管两阶段模型增加了求解复杂度，但通过引入信息反馈机制显著降低了结果的保守性。

5.2.2 不确定集

鲁棒优化的核心机理在于通过设定有界不确定集合表征参数波动范围，并基于集合边界的极端情景求解最优决策。因此，不确定集合的选取直接影响模型的求解精度与计算效率。目前，常用不确定集合包括盒式、椭球、基数约束型及 N-k 准则型等^[73]。

(1) 盒式不确定集

盒式不确定集通过参数上下界定义波动范围，其数学描述为：

$$U = \left\{ \xi \left| \begin{array}{l} e^T \xi = 0 \\ \xi^{\min} \leq \xi \leq \xi^{\max} \end{array} \right. \right\} \quad (5-6)$$

式中， e 为单位向量， $\xi^{\max}$ 和 $\xi^{\min}$ 分别为不确定参数变化范围的上、下界值，此类集合的优化解趋向参数边界，但多参数同时达界的概率极低，导致解集保守性较强。但其优势在于可通过布尔变量实现线性化转换，且求解过程不引入非线性项，计算复杂度较低。

(2) 椭球不确定集

椭球型集合通过调节不确定度参数 Γ 控制保守性，其表达式为：

$$U = \left\{ \xi \left| \left(\xi - \bar{\xi} \right)^T \Sigma^{-1} \left(\xi - \bar{\xi} \right) \leq \Gamma \right. \right\} \quad (5-7)$$

式中, $\bar{\xi}$ 是不确定参数期望值。此类集合可将原问题转化为二阶锥规划或半定规划问题求解, 其优势在于能够刻画参数间的相关性特征, 故在工程领域应用广泛。但椭球集需引入二阶锥规划, 计算复杂度显著增加。

(3) 基数不确定集

基数不确定集合可以通过精确调控参数偏移程度实现波动范围优化, 其表达式为:

$$U = \left\{ \xi \left| \sum \frac{\xi - \xi^{\min}}{\xi^{\max} - \xi^{\min}} (\xi - \bar{\xi}) \leq \Gamma, \xi^{\min} \leq \xi \leq \xi^{\max} \right. \right\} \quad (5-8)$$

式中, $\xi^{\max}$ 、 $\xi^{\min}$ 分别为参数波动范围的上下限。相较于盒式不确定集, 基数不确定集合调优参数难度大且计算复杂度高。

(4) N-k 准则不确定集

上述集合适用于连续参数建模, 而 N-k 准则型集合专用于描述离散非凸集合特性, 尤其适用于系统偶发故障场景建模, 其表达式为:

$$U = \left\{ \xi \in \{0,1\}^N : \|\xi\|_1 \geq N - k \right\} \quad (5-9)$$

式中, k 值决定不确定集的保守程度。

5.3 考虑源荷不确定性的两阶段鲁棒优化模型

5.3.1 两阶段鲁棒优化模型

基于 4.3 节构建的充能站优化调度模型, 本节进一步考虑源荷的不确定性因素, 构建了两阶段鲁棒优化模型。其中, 第一阶段决策变量 x 表示充能站购电功率及其状态; 第二阶段决策变量 y 表示在第一阶段变量确定后可调整的量, 包括各设备的出力等。其矩阵形式表述如下:

$$\begin{aligned} & \min_x a^T x + \max_u \min_y b^T y \\ & s.t. \quad Ax \leq d \\ & \quad \quad By \leq e \\ & \quad \quad Fx + Gy = h \end{aligned} \quad (5-10)$$

式中, $a^T x$ 表示购电成本, $b^T y$ 为运维成本。

5.3.2 盒式不确定集合

风光氢储能系统旨在遵循各类运行约束的前提下，通过设备出力协同优化，进而实现运行费用最低。考虑到风电/光伏出力、电/氢负荷等参数的随机性特征，其预测值与实际值可能产生明显偏差。本文选用盒式不确定集描述源荷不确定性参数，其优势在于可通过 0-1 变量的线性转换提升求解效率。

本文构建的两阶段鲁棒优化模型旨在寻求当不确定变量 u 在不确定集 U 内朝着最恶劣场景变化时，仍能确保经济性最优的调度策略。具体形式如下：

$$U := \begin{cases} u = [u_{PV}(t), u_{WT}(t), u_{EV}(t), u_{HV}(t)]^T \in \mathbb{R}^{(N_T) \times 2}, t \in 1, 2, \dots, N_T \\ u_{PV}(t) \in [\hat{u}_{PV}(t) - \Delta u_{PV}^{\max}(t), \hat{u}_{PV}(t) + \Delta u_{PV}^{\max}(t)] \\ u_{WT}(t) \in [\hat{u}_{WT}(t) - \Delta u_{WT}^{\max}(t), \hat{u}_{WT}(t) + \Delta u_{WT}^{\max}(t)] \\ u_{EV}(t) \in [\hat{u}_{EV}(t) - \Delta u_{EV}^{\max}(t), \hat{u}_{EV}(t) + \Delta u_{EV}^{\max}(t)] \\ u_{HV}(t) \in [\hat{u}_{HV}(t) - \Delta u_{HV}^{\max}(t), \hat{u}_{HV}(t) + \Delta u_{HV}^{\max}(t)] \end{cases} \quad (5-11)$$

式中， $\hat{u}_{WT}(t)$ 、 $\hat{u}_{PV}(t)$ 、 $\hat{u}_{EV}(t)$ 、 $\hat{u}_{HV}(t)$ 分别表示 t 时段风光出力和电/氢负荷的预测值； $u_{WT}(t)$ 、 $u_{PV}(t)$ 、 $u_{EV}(t)$ 、 $u_{HV}(t)$ 为考虑不确定性后引入的风光出力和电/氢负荷功率不确定变量； $\Delta u_{WT}^{\max}(t)$ 、 $\Delta u_{PV}^{\max}(t)$ 、 $\Delta u_{EV}^{\max}(t)$ 、 $\Delta u_{HV}^{\max}(t)$ 分别为风光出力和电/氢负荷功率允许的最大波动偏差，均为正数。

针对本研究中的储能系统，当可再生能源发电量处于预测下限区间且用能需求达到预测上限区间时，储能运营成本显著上升，该情景更贴近“最劣运行条件”的界定标准。基于此，式（5-11）可重新构建为以下表达式：

$$U := \begin{cases} u = [u_{PV}(t), u_{WT}(t), u_{EV}(t), u_{HV}(t)]^T \in \mathbb{R}^{(N_T) \times 2}, t \in 1, 2, \dots, N_T \\ u_{PV}(t) = \hat{u}_{PV}(t) - B_{PV}(t) \Delta u_{PV}^{\max}(t) \\ u_{WT}(t) = \hat{u}_{WT}(t) - B_{WT}(t) \Delta u_{WT}^{\max}(t) \\ \sum_{t=1}^{N_T} B_{PV}(t) \leq \Gamma_{PV}, \sum_{t=1}^{N_T} B_{WT}(t) \leq \Gamma_{WT} \\ u_{EV}(t) = \hat{u}_{EV}(t) + B_{EV}(t) \Delta u_{EV}^{\max}(t) \\ u_{HV}(t) = \hat{u}_{HV}(t) + B_{HV}(t) \Delta u_{HV}^{\max}(t) \\ \sum_{t=1}^{N_T} B_{EV}(t) \leq \Gamma_{EV}, \sum_{t=1}^{N_T} B_{HV}(t) \leq \Gamma_{HV} \end{cases} \quad (5-12)$$

式中, $B=[B_{PV}(t), B_{WT}(t), B_{EL}(t), B_{HL}(t)]^T$ 为布尔变量集合, 当变量赋值为 1 时, 对应时段的不确定参数将被限定至其区间极值; Γ_{WT} 、 Γ_{PV} 、 Γ_{EV} 、 Γ_{HV} 分别为引入的风光出力和电/氢负荷功率的“不确定性调节系数”, 其物理意义表征调度周期内可再生能源出力与负荷需求处于预测区间极值的时段总数, 用于控制优化方案的鲁棒性。具体而言, 调节系数取值越大, 优化方案越倾向于规避不确定性风险; 反之, 方案则更倾向于追求经济效益。

5.3.3 模型求解

本文采用 C&CG 算法进行求解^[74]。C&CG 算法与 Benders 分解法均通过问题分解与交替迭代实现最优解逼近, 但其核心区别在于主问题求解过程中动态引入与子问题相关的约束条件。通过持续增强主问题的约束条件, C&CG 算法能够构造更紧凑的目标函数下界, 从而显著减少收敛迭代次数, 提升计算效率。

具体而言, 主问题基于子问题反馈的极端场景参数, 包括风光出力与电/氢负荷边界值, 优化充能站运行成本并输出上界; 子问题则以初始决策变量为已知条件, 确定最劣运行场景及设备出力方案, 同时计算下界。算法运行流程如下:

步骤 1: 参数初始化, 定义不确定变量初始最恶劣场景 u_q , 设置运行成本初始下界 $LB^0=-\infty$ 、上界 $UB^0=+\infty$, 初始化迭代次数 $k=1$;

步骤 2: 将 u_q 代入, 求解主问题, 获得最优解 x^q , 更新下界 LB^q ;

$$(MP) \min \alpha^T + \psi \quad (5-13)$$

$$\psi \geq \min(b^T y^q) \quad (5-14)$$

步骤 3: 根据主问题的解 x^q , 求解子问题;

$$(SP) \max(b^T y) \quad (5-15)$$

步骤 4: 在不确定集合 U 中确定最大化充能站运行成本的风光出力与负荷参数组合, 同时优化决策变量 y^q , 基于子问题优化结果 $(d^q)^T y^q$ 和主问题的解 $(a^q)^T x^q$ 之和更新上界, 并同步更新最恶劣场景 u_{q+1} 。

步骤 5: 验证收敛条件是否满足, 若 $LB^q - UB^q \leq \varepsilon$, 则终止迭代过程; 否则, 将更新的风光出力与负荷参数作为新的恶劣情景, 返回步骤 2 继续迭代优化,

直至满足收敛条件。

5.4 算例分析

基于第 4 章建立的充能站系统案例，验证两阶段鲁棒优化模型及算法的有效性。仿真研究聚焦于优化调度方案与调节参数的影响分析两部分。

5.4.1 基础数据

设定电/氢负荷功率不确定性调节参数 Γ_L 为 12，风光调节参数 Γ_{WT} 和 Γ_{PV} 均为 8，表示在调度周期内电/氢负荷功率最多有 12 个时段取到预测区间上限，风光出力最多有 8 个时段取到预测区间下限，其余时段参数保持预测基准值。仿真过程中，充能站的运行参数与第 4 章所述一致。

5.4.2 充能站优化调度方案

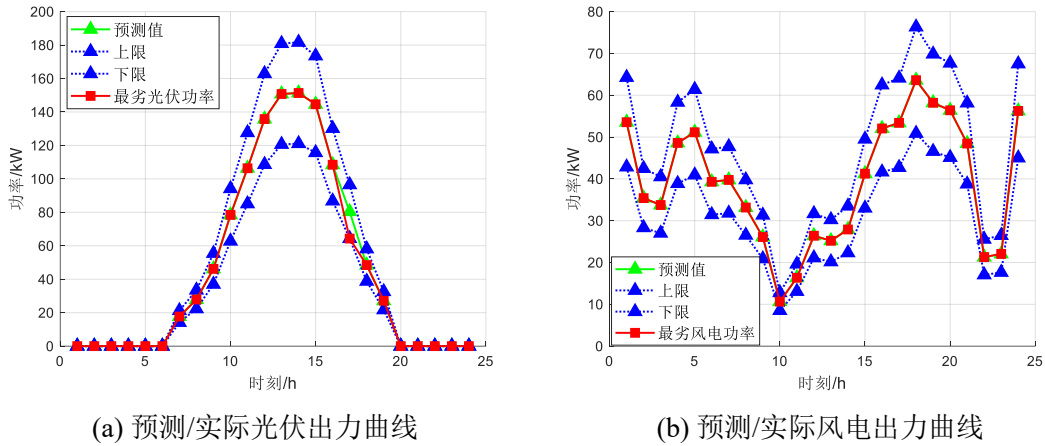


图 5-1 预测/实际风光出力曲线

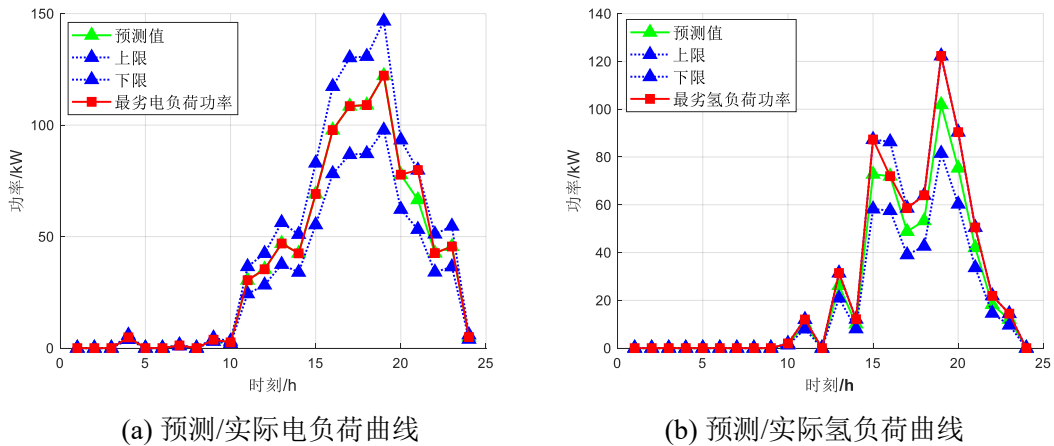


图 5-2 预测/实际负荷出力曲线

在实际应用中，电/氢负荷功率和风光出力允许的最大波动偏差可基于历史预测偏差进行设定。本文中风光出力和电/氢负荷功率的波动偏差均设为预测值的 20%，预测/实际负荷功率曲线及风光出力曲线分别如图 5-1 和图 5-2 所示。

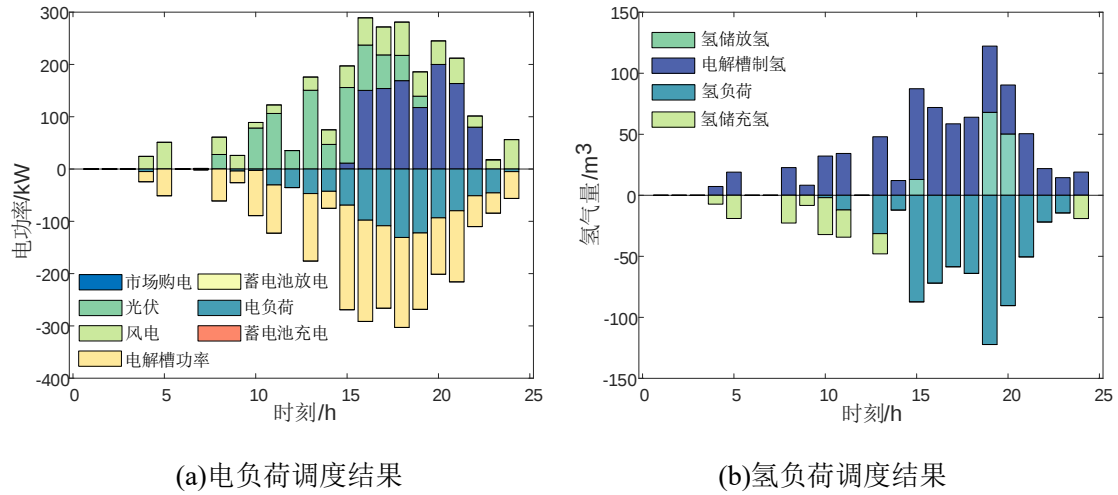


图 5-3 不确定场景下功率优化调度结果

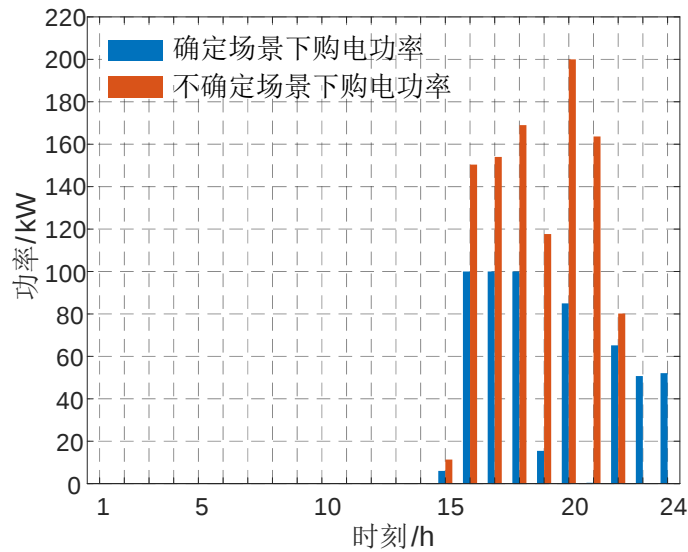


图 5-4 各场景下购电功率对比情况

图 5-3 展示了源荷不确定性场景下充能站调度优化结果。在 1:00—6:00 时段，光伏出力为零，负荷需求完全由风电供应，电解槽负责消纳过剩风电出力；7:00—14:00 时段，随着风光出力逐渐增加，在满足充能站电力负荷需求的前提下，电解槽将多余风光出力转化为氢能并存储于储氢罐中，以供氢燃料汽车使用；14:00—24:00 时段，风光出力不足以满足充能需求，充能站通过向电网购

电补充能量供应。

结合图 5-1、图 5-2 和图 5-4 分析可知，负荷波动对鲁棒优化调度方案具有显著影响。在极端恶劣情景下，新能源汽车充能需求的激增与可再生能源出力不足、储能系统容量受限形成供需矛盾，迫使充能站增加外部电网电能采购量，致使电能采购成本与充能站综合运行费用显著增长。同时，为满足氢燃料电池汽车的能源需求，电解水制氢过程对电网电能的依赖性增强，进一步加剧了充能站运行成本的上升趋势。

5.4.3 不确定性调节参数的影响

风光及负荷的不确定性水平可通过不确定度参数进行调控，其最大取值范围与调度周期总时段数一致，即 24 小时。因此，不确定度参数的设定将显著影响调度方案的优化效果。为验证本文提出的两阶段鲁棒优化模型对源荷不确定性的处理能力，本节设置了 4 种典型场景进行对比验证，具体参数设置和结果详见表 5-1。

表 5-1 不同不确定性调节参数下的结果

不确定度设置	购电成本/元	总运行成本/元
$\Gamma_{PV}=\Gamma_{WT}=\Gamma_{EV}=\Gamma_{HV}=0$	562.82	919.39
$\Gamma_{PV}=\Gamma_{WT}=\Gamma_{EV}=\Gamma_{HV}=4$	771.62	1050.31
$\Gamma_{PV}=\Gamma_{WT}=\Gamma_{EV}=\Gamma_{HV}=8$	820.32	1139.92
$\Gamma_{PV}=\Gamma_{WT}=\Gamma_{EV}=\Gamma_{HV}=12$	847.72	1175.93

不确定度 Γ 表示在一天 24 个时段内，不确定参数在其波动区间内达到上限或下限的时段数量。当 $\Gamma_{PV}=\Gamma_{WT}=\Gamma_{EV}=\Gamma_{HV}=0$ 时，即为确定性优化调度模型。随着不确定度的增加，充能站面临的源荷不确定性增强，导致充能站的总运行成本也随之上升。实验结果表明，当不确定度从 0 增至 8 时，充能站的总运行成本相较于前一场景分别增加了 14.24%和 8.53%。当 $\Gamma_{PV}=\Gamma_{WT}=\Gamma_{EV}=\Gamma_{HV}=12$ 时，充能站的运行成本最大，这是因为随着站内风光和负荷的不确定性的增加，充能站的调度方案保守程度更高。

当不确定度 Γ 超过某一临界阈值后，充能站的总运行成本增长率趋于平缓，即进入边际饱和状态。例如不确定度 Γ 从 0 逐渐增大至 12，充能站经济性降幅

分别为 14.24%、8.53%和 3.16%。

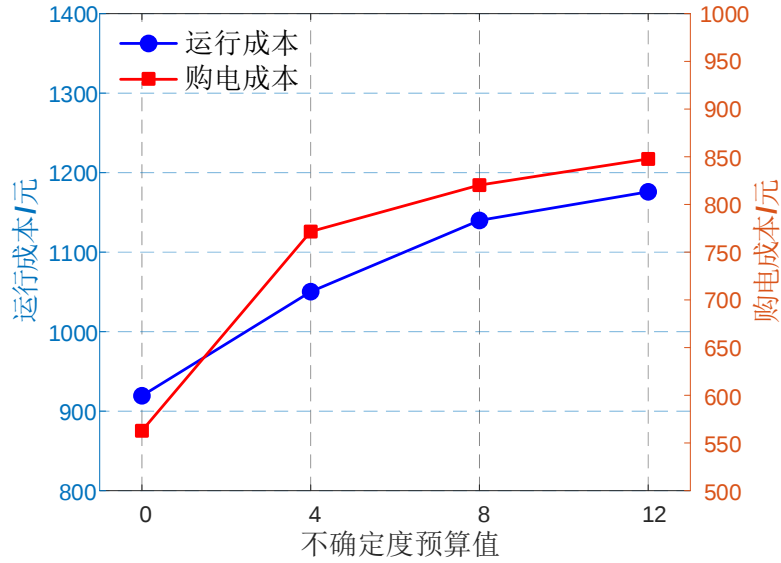


图 5-5 不同不确定性预算值下站内各成本变化

当不确定性 Γ 超过某一临界阈值后，充电站的总运行成本增长率趋于平缓，即进入边际饱和状态。例如不确定性 Γ 从 0 逐渐增大至 12，充电站经济性降幅分别为 14.24%、8.53%和 3.16%。图 5-5 展示了不同不确定性预算值下充电站购电费用和总运行成本变化趋势。在不确定集的“饱和区域”内，进一步增大不确定性调节参数对提升系统的鲁棒性和抗干扰能力效果有限。通过调整不确定性参数的取值，不确定性优化模型能够实现系统运行经济性与风电消纳能力之间的有效权衡。这种调节机制使得决策者能够根据实际需求，灵活选择不同的优化调度方案，从而在系统经济效益与运行稳定之间取得最优平衡。

5.5 本章小结

本章基于前两章的研究成果，引入两阶段鲁棒优化方法以处理充电站不确定性问题。首先，构建了 min-max-min 结构的两阶段鲁棒优化目标函数；其次，采用盒式不确定集描述源荷不确定性参数，并采用 C&CG 算法将优化问题分解为主问题和子问题进行迭代求解；最后，通过仿真实验验证了模型的有效性与可靠性。仿真结果显示，该两阶段鲁棒优化模型能够在有效降低不确定性风险的同时，实现经济性的优化。此外，通过调节不确定性调节参数，可灵活调控系统的保守程度，从而满足不同场景下的决策需求。

第 6 章 总结与展望

6.1 全文总结

新能源汽车拥有广泛的能量供应来源，能源利用效率高。同时，氢燃料汽车凭借其短暂的充电时长、卓越的续航表现及零污染排放等特性，展现出巨大的发展前景。在此背景下，针对多类型新能源汽车充电需求，开展风光氢储充电站的优化调度策略研究意义重大。

论文从新能源汽车充电站的组成与建模、售电价格优化、充电站优化调度以及鲁棒优化调度四个层面展开工作，总结如下：

（1）建立含风光氢储新能源汽车充电站模型

论文构建了集成风能、光伏、氢能与储能系统的充电站架构，阐述了充电站系统的整体框架与运行机理。其次分别对站内风光发电系统、电池储能系统、电转氢系统、电动汽车充电系统及氢燃料汽车充氢系统等核心组成单元建立数学模型，从而为后续研究奠定理论基础和支撑。

（2）研究一种考虑消费者心理因素的充电站售电价格优化方法

论文采用基于隶属度函数的分析方法，精确界定不同时段的分界点，实现了峰谷时段的精准划分。其次，考虑用户消费心理因素建立的基于 Logistic 函数响应机理的负荷转移率模型，有效解决了电价差过大或过小对用户参与响应的影响。在上述模型的基础上，建立了以负荷波动率和用户充电费用为目标的充电站售电价格优化模型，通过 NSGA-II 算法求解验证了售电价格方案不仅能够有效引导电动汽车用户参与调度，还可使充电站内风光消纳率进一步提高，降低运行成本，提高充电站运行经济性。

（3）研究考虑电转氢和需求响应的充电站优化调度方法

论文在源侧构建含有电转氢装置的风光储综合充电站模型，提高了能源利用效率。在荷侧采用考虑消费者心理因素的分时电价方法。在此基础上，以最小化充电站日运行成本为目标，综合考虑有序充电、电转氢、储能等调控手段，实现充电站低碳经济调度。算例分析表明，该方法能够实现站内氢能自产自消，同时可以有效提高风光消纳水平和降低运行成本，具有较高的经济和环境效益。

（4）研究考虑源荷不确定性的两阶段鲁棒优化调度方法

论文在第 4 章基础上建立了两阶段鲁棒优化调度模型，采用盒式不确定集刻画不确定性参数的波动范围，以最劣情景下的运行成本最小化为优化目标。通过 C&CG 算法将原问题分解为主问题和子问题进行迭代求解。研究表明，该两阶段鲁棒优化模型能够有效降低系统不确定性风险，同时实现了系统经济性的优化平衡。

6.2 展望

本文围绕充能站优化调度展开理论探索，取得了阶段性研究成果。然而，要实现工程化应用仍需深化研究，后续工作可聚焦以下方向：

（1）本文采用分时电价作为需求响应引导策略，相较于实时电价存在一定局限性，因其无法准确反映各时段的供电成本差异。后续研究可探索基于实时电价的用户需求响应机制，以更精确地引导用户用电行为。

（2）本文案例研究中，受限于负荷数据缺失，通过蒙特卡洛模拟生成的新能源汽车样本规模较小，可能影响模拟精度。同时，研究仅考虑了电-氢能量转换，未纳入热能传递因素。后续研究应扩大充能站规模，提高模拟精度，并构建电-气-热综合能源管理系统。

（3）本文通过鲁棒优化方法分析了恶劣场景下各不确定性因素对系统优化结果的影响程度，提出了相应的鲁棒优化策略。后续应进一步研究风/光装机容量及储能容量的优化配置，通过合理的容量配置来保障新能源汽车充能站在恶劣场景下的经济稳定运行。

参考文献

- [1] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(05):1663-1672.
- [2] 张智刚, 康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(08):2806-2819.
- [3] Lin B, Benjamin N I. Influencing factors on carbon emissions in China transport industry. A new evidence from quantile regression analysis[J]. Journal of cleaner production, 2017, 150:175-187.
- [4] 杨冬锋, 左圣宇, 杨晶莹, 等. 考虑绿色氢能证书交易机制和新能源汽车碳配额的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2025, 49(02):562-571.
- [5] 陈艳波, 刘镇湘, 田昊欣, 等. 高速公路绿色能源系统研究综述及展望[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-18[2025-03-01] .
- [6] 薛明喆, 师存阳, 刘家宁, 等. 液氢加氢站及其关键装备的发展现状及展望[J]. 同济大学学报(自然科学版) , 2023, 51(12):1959-1971.
- [7] 唐云霓, 闫如雪, 周艳玲. 碳中和愿景下能源政策的结构表征与优化路径[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(01):1-14.
- [8] Li C, Shan Y, Zhang L, et al. Techno-economic evaluation of electric vehicle charging stations based on hybrid renewable energy in China[J]. Energy Strategy Reviews, 2022, 41:100850.
- [9] Mastoi M S, Zhuang S, Munir H M, et al. An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends[J]. Energy Reports, 2022, 8:11504-11529.
- [10] Wu J, Zhang M, Xu T, et al. A review of key technologies in relation to large-scale clusters of electric vehicles supporting a new power system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 182:113351.
- [11] 洪芦诚, 王梓菀, 林今, 等. 电-碳-绿证市场背景下电氢协同典型形态及参与模式研究综述[J/OL]. 电工技术学报, 1-18[2025-03-01].
- [12] 王丰, 杨函煜, 李林溪, 等. 考虑氢能交通运输时空特性的电-氢综合能源

- 系统协同优化方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19):31-43.
- [13] Elalfy D A, Gouda E, Kotb M F, et al. Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends [J]. Energy Strategy Reviews, 2024, 54:101482.
- [14] Xiaolong Y, Dongxiao N, Lijie S, et al. A bi-level optimization model for electric vehicle charging strategy based on regional grid load following [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 325.
- [15] 黄伟, 刘文彬. 基于多能互补的园区综合能源站-网协同优化规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23):20-28.
- [16] 赵楠, 王俊, 黄桦, 等. 计及氢电混合动力车响应的多区域综合能源系统协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12):257-264.
- [17] Li C, Lu X, Liu Y, et al. A study of tripartite strategies for closed-loop charging infrastructure construction of new energy vehicles in china under the expectation of government withdrawal subsidies [J]. Journal of Cleaner Production, 2025:144943.
- [18] 周玮, 徐从明, 杨丹霞, 等. P2P 能源共享下考虑意愿动态调整的电动汽车群需求响应策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21):8217-8230.
- [19] 刘明光.考虑群体行为的电动汽车负荷聚合交易与定价模型研究[D]. 华北电力大学(北京), 2023.
- [20] 王飏, 路捷, 沙爱民, 等. 考虑光伏不确定性影响的高速公路光储换一体化能源管理策略[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(04):14-30.
- [21] Ullah Z, Wang S, Wu G, et al. Optimal scheduling and techno-economic analysis of electric vehicles by implementing solar-based grid-tied charging station[J]. Energy, 2023, 267:126560.
- [22] 邓衍辉, 李剑, 卢国强, 等. 考虑分区域动态电价机制引导的电动汽车充电优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(07):33-44.
- [23] 胡可崴, 李浩, 王创, 等. 电解水制氢的多物理场建模与监控技术综述 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12):3-13.
- [24] 张诚, 檀志恒, 晁怀颇. “双碳”背景下数据中心氢能应用的可行性研究

- [J]. 太阳能学报, 2022, 43(06):327-334.
- [25] 温昶, 张博涵, 王雅钦, 等. 高效质子交换膜电解水制氢技术研究进展[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(01):111-122.
- [26] Yin J, Jia H, Chen L, et al. Optimal scheduling of zero-carbon park considering variational characteristics of hydrogen energy storage systems[J]. Global Energy Interconnection, 2024, 7(05):603-615.
- [27] 洪芦诚, 王梓菽, 林今, 等. 电-碳-绿证市场背景下电氢协同典型形态及参与模式研究综述[J/OL]. 电工技术学报, 1-18[2025-03-02].
- [28] 黄花叶, 陈潇蒙, 王长琼. 基于风光氢的港口能源供应链协同调度研究[J]. 工业工程与管理, 2024, 29(06):1-11.
- [29] 屈柏林, 张雪霞, 陈维荣, 等. 计及微网余电制氢的加氢站设备容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2024, 45(10):11-21.
- [30] Tabandeh A, Hossain M J, Li L. Integrated multi-stage and multi-zone distribution network expansion planning with renewable energy sources and hydrogen refuelling stations for fuel cell vehicles[J]. Applied Energy, 2022, 319:119242.
- [31] 杜易达, 王迺, 谭忠富, 等. 电-碳-气-绿证市场耦合下的电氢耦合系统运行优化研究[J]. 电网技术, 2023, 47(08):3121-3135.
- [32] 高赐威, 王崑, 陈涛. 基于可逆固体氧化物电池的电氢一体化能源站容量规划[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17):6155-6170.
- [33] 袁铁江, 计力, 田雪沁, 等. 考虑燃料电池汽车加氢负荷的电-氢系统协同优化运行[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(05):16-25.
- [34] 肖婷婷. 考虑时空特性与车网互动的电动汽车有序充电方法研究[D]. 浙江大学, 2024.
- [35] 周星月. 市场激励下电动汽车参与需求响应的时空优化调度[D]. 华南理工大学, 2023.
- [36] 程瑜, 翟娜娜. 基于用户响应的分时电价时段划分[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(09):42-46+53.
- [37] Shen M, Chen J. Optimization of peak-valley pricing policy based on a

- residential electricity demand model[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 380:134761.
- [38] Qi H, Wu J, Dong J, et al. Power load peak-valley time division based on data mining method[C]//The 2021 international conference on machine learning and big data analytics for IoT security and privacy:SPIoT-2021 Volume 2. Springer International Publishing, 2022:943-947.
- [39] Liu D, Li H, Wang L, et al. Research on Electric Energy Peak-Valley Time Division Method Based on Supply-Demand Ratio[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 804(3):032038.
- [40] Lin C, Wu W, Zhang B, et al. Decentralized solution for combined heat and power dispatch through benders decomposition[J]. IEEE Transactions on sustainable energy, 2017, 8(4):1361-1372.
- [41] 张新鹤, 黄伟, 刘铠诚, 等. 基于综合需求响应的气—电联合分时定价优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(04):91-98.
- [42] 欧飞, 刘敏, 李震. 基于电价敏感度和价格弹性的地区需求响应潜力评估[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(09):1-7.
- [43] Afzalan M, Jazizadeh F. A machine learning framework to infer time-of-use of flexible loads: Resident behavior learning for demand response[J]. IEEE Access, 2020, 8:111718-111730.
- [44] 周凌锋, 王杰. 考虑用户响应程度的电动汽车分时电价策略[J]. 电测与仪表, 2018, 55(22):67-72.
- [45] 徐潇源, 王晗, 严正, 等. 能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16):2-13.
- [46] 史佳琪, 胡浩, 张建华. 计及多个独立运营商的综合能源系统分布式低碳经济调度[J]. 电网技术, 2019, 43(01):127-136.
- [47] 周焕生. 计及源—网—荷不确定性的综合能源系统扩展规划和鲁棒调度研究[D]. 华南理工大学, 2020.
- [48] 刘一欣, 郭力, 王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14):4013-4022+4307.

- [49] 尚文强, 李广磊, 丁月明, 等. 考虑源荷不确定性和新能源消纳的综合能源系统协同调度方法[J]. 电网技术, 2024, 48(02):517-532.
- [50] 李江南, 程韧俐, 周保荣, 等. 含碳捕集及电转氢设备的低碳园区综合能源系统随机优化调度[J]. 中国电力, 2024, 57(05):149-156.
- [51] 李咸善, 李晨杰, 张磊. 氢耦合区域综合能源系统集群双层博弈随机优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12):238-247.
- [52] Ehsan A, Yang Q. Active distribution system reinforcement planning with EV charging stations–Part II: Numerical results[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 11(2):979-987.
- [53] Lu X, Liu Z, Ma L, et al. A robust optimization approach for optimal load dispatch of community energy hub[J]. Applied Energy, 2020, 259:114195.
- [54] 张献, 丁可浩, 赵黎媛, 等. 计及电动汽车混合充电系统接入的综合能源系统鲁棒优化调度[J/OL]. 电工技术学报, 1-13[2025-05-05].
- [55] Zeng B, Dong H, Sioshansi R, et al. Bilevel robust optimization of electric vehicle charging stations with distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5):5836-5847.
- [56] 樊磊. 分布式光伏电源并网出力概率分布模型的研究[D]. 华北电力大学, 2012.
- [57] Gabriele Z, Paolo R. 太阳能制氢的能量转换、存储及利用系统[M]. 北京: 机械工业出版社. 2015, 10-19.
- [58] 崔露, 刘世林, 苗婉, 等. 考虑电转氢和需求响应的风光储综合充电站优化运行策略[J]. 发电技术, 2025, 46(01):31-41.
- [59] 李欣, 程常剑, 李新宇, 等. 考虑可逆固体氧化物电池的可再生能源电力系统规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(02):131-140.
- [60] 韩利, 李琦, 冷国云, 等. 氢能储存技术最新进展[J]. 化工进展, 2022, 41(S1):108-117.
- [61] 刘超广, 马贵阳, 孙东旭. 氢气管输技术研究进展[J]. 太阳能学报, 2023, 44(01):451-458.
- [62] 刘翠伟, 裴业斌, 韩辉, 等. 氢能产业链及储运技术研究现状与发展趋势

- [J]. 油气储运, 2022, 41(05):498-514.
- [63] 周凌锋, 王杰. 考虑用户响应程度的电动汽车分时电价策略[J]. 电测与仪表, 2018, 55(22):67-72.
- [64] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11):126-130.
- [65] O'Connell A, Flynn D, Keane A. Rolling multi-period optimization to control electric vehicle charging in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 29(1):340-348.
- [66] 张智晟, 于道林. 考虑需求响应综合影响因素的 RBF-NN 短期负荷预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(06):1631-1638+1899.
- [67] 赵振宇, 包格日乐图, 李炘薪. 基于信息间隙决策理论的含碳捕集-电转气综合能源系统优化调度[J]. 发电技术, 2024, 45(04):651-665.
- [68] 陈中, 陈妍希, 车松阳. 新能源汽车一体充能站框架及能量优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24):41-49.
- [69] 薛贵挺, 汪柳君, 刘哲, 等. 考虑碳排放的光储充一体站日前运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(07):103-110.
- [70] Ben-Tal A, Nemirovski A. Robust convex optimization[J]. Mathematics of operations research, 1998, 23(4):769-805.
- [71] Ben-Tal A, Nemirovski A. Robust solutions of uncertain linear programs[J]. Operations research letters, 1999, 25(1):1-13.
- [72] 李咸善, 王苗. 考虑源荷不确定性的多微电网鲁棒优化调度与 VCG 机制竞价策略[J]. 电网技术, 2023, 47(06):2330-2345.
- [73] 邓海晖. 考虑源荷不确定性的主动配电网鲁棒优化调度研究[D]. 东南大学, 2022.
- [74] Zhou S, Sun K, Wu Z, et al. Optimized operation method of small and medium-sized integrated energy system for P2G equipment under strong uncertainty[J]. Energy, 2020, 199:117269.

攻读硕士期间取得的学术成果

发表的学术论文:

- [1] 考虑电转氢和需求响应的风光储综合充能站优化运行策略[J/OL].发电技术,1-11[2025-03-03]. (CSCD, 已见刊, 第一作者)
- [2] 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[J]. (安徽工程大学学报) (已录用, 第三作者)
- [3] 计及EV差异化需求的光储充柔微电网优化调度[J]. (四川轻化工大学学报) (已录用, 第三作者)
- [4] Stability Analysis and Impedance Modeling of Three-Phase Dual Active Bridge with LC Input Filter[C]//The Proceedings of 2024 International Conference of Electrical, Electronic and Networked Energy Systems: Volume III. Springer Nature, 2025: 432. (Best paper 奖项, 第四作者)

致谢

硕士研究生三年时间过得飞快，在毕业论文完成之际向我的老师致以最衷心、最诚挚的感谢！从论文的选题到论文撰写及修改各个阶段都离不开老师的悉心教导！

感谢实验室的同门在三年研究生生活中的陪伴与帮助！

感谢我的母校安徽工程大学和电气工程学院对我本硕七年的培养！

感谢我的父母以及所有家人，对我二十载求学之路的倾力支持和无私关心！

感谢在百忙之中评审、答辩本论文并提出宝贵意见的各位专家和教授！

尚德敏学 唯实惟新

