**商住园区电热氢综合能源系统设计及经济性分析**

第1章 绪论

1. 研究背景与意义
2. 研究背景

为加快实现碳达峰和碳中和的宏伟目标，《2024-2025年节能降碳行动方案》[[[1]](#endnote-0)]明确提出了我国在降碳方面的总体目标，包括在关键领域和行业中通过节能降碳改造，实现节约能量约5000万吨标准煤，同时减少二氧化碳排放量约1.3亿吨等。这一目标的实现将涉及多个重点领域，包括工业、建筑以及能源等关键行业。在建筑领域中，产业园区作为碳排放集中区域，其能源消耗占全国总量30%以上，减排需求大。为此，北京市《2025年能源工作要点》提出“探索氢能在建筑发电、供热等领域多元化应用”，为商住园区电热氢系统提供了政策窗口期。同时，地方实践已先行，如张掖氢能・零碳产业园通过“制储加运”一体化模式，实现园区绿氢自给率超80%，并被评为“零碳中国”标准试点单位。广州、厦门等地亦出台专项政策，将商住园区作为新型储能应用的重点场景，推动“光伏+储能+氢能”的多能互补模式。政策红利与区域战略的叠加，使电热氢系统成为商住园区绿色升级的必然选择。

而电热氢能源系统作为一个综合性极强的系统可以满足商住园区的多元化需求。首先其系统可以提供“电-冷-热-氢”一站式供应，如广州白云区新型储能产业园规划建设冰蓄冷、氢储能等设施，实现区域能源综合成本降低 20%；同时园区内配套加氢站，服务燃料电池物流车及通勤车辆，如保定氢能产业园通过“氢能重卡+加氢站”模式，年替代柴油3.6万吨；此外系统还可以利用工业副产氢或可再生能源制氢，为园区内数据中心、实验室等提供高纯度氢气，拓展氢能应用场景；系统通过数字孪生、AI 算法优化能源调度，如国网湖南经研院开发的智慧能源平台，可实现园区能源利用率提升 15%。

同时传统能源系统依赖化石燃料，难以应对可再生能源的高渗透率和波动性。电热氢综合能源系统通过多能互补和清洁能源替代并结合储能技术，可有效降低碳排放强度，提升能源利用效率，减少对电网的依赖程度，进一步靠近国家战略目标。此外商住园区的能源供应需兼顾可靠性与抗风险能力。传统电网在极端天气下易受冲击，而电热氢系统通过分布式能源+氢储能的组合，可实现“孤岛运行”，保障关键负荷持续供电。例如，北京冬奥会延庆赛区采用氢燃料电池热电联供系统，在电网故障时仍能满足场馆 100% 能源需求。此外，氢能的长周期储能特性可平抑可再生能源波动，提升系统稳定性。

1. 研究意义

就目前商住园区的电热氢综合能源系统的研究而言，各国园区都在进行研究并取得了不少成果，在关键技术领域有所突破，并且完善了国产化和产业链，产业聚集效应明显。这些成果不仅使系统能效跨越式提升，也让成本持续下降。

虽然此研究已经有很多成果，但是其技术瓶颈依然存在，并且由于其系统复杂也需要继续研究。其技术瓶颈表现在电解槽负荷调节范围20%-100%难以匹配风光发电的剧烈波动；PEM电解槽虽支持宽幅调节，但质子交换膜寿命仅3000-5000小时，且铂基催化剂自给率不足10%。动态响应与效率限制导致全流程“电-氢-电”能量损耗高达40%-50%，远低于锂电池储能的90%。而且高压气态储氢碳纤维瓶成本高昂且存在氢脆风险；液态储氢需-253℃超低温环境，能耗占氢气热值的30%；固态储氢材料虽密度达7.6wt%，但尚未突破规模化应用。我国专用输氢管道不足500公里，仅为欧美国家的1/9，天然气管道掺氢改造面临氢脆腐蚀、阀门兼容性等技术难题。其系统的复杂性表现在电热氢系统涉及电、热、氢多能流耦合，现有调度模型多聚焦单一能源形式，缺乏多目标动态优化能力。而且氢能的燃爆特性导致储氢罐安全风险需量化评估。

由此可见，虽然商住园区电热氢综合能源系统已在能效提升、成本优化、碳减排等方面取得显著成果，但其大规模应用仍然受制。所以对商住园区电热氢综合能源系统设计依然有必要进行。

1. 国内外研究现状

近几年商住园区电热氢综合能源系统的优化主要从以下几方面进行。

从多能互补与调度优化的角度看，孔令国等[[[2]](#endnote-1)]基于交替方向乘子法（ADMM）的双层优化调度模型，通过上层分布式算法计算各建筑间能量交互功率，下层利用混合整数规划实现全园区综合成本最小化，解决了多主体并行求解和点对点功率精准调控难题；上海交通大学的张雨曼等[[[3]](#endnote-2)]研究光伏-储能-热电联产系统的分解协调优化，通过利用Benders分解法保护热电系统隐私信息的同时实现全局最优；Fan等[[[4]](#endnote-3)]在Nature Communications对比全球氢生产路径，提出区域化多能互补调度框架，强调了储能与电网支撑能力；CRRC Zhuzhou Institute 在Intersolar Europe2025展示了风光储氢动态沙盘模型并验证多能互补系统的实时交互能力；宋雨薇等[[[5]](#endnote-4)]构建含电热柔性负荷与氢储能的综合能源系统模型，通过混合整数规划优化运行策略，通过引入柔性负荷削峰填谷特性，结合碳交易机制提升经济性。

从经济性和成本优化角度，罗舒钰等[[[6]](#endnote-5)]提出基于阶梯式补偿价格的需求响应模型，结合电、热、氢差异化激励策略，优化调度后系统灵活性提升20%，碳排放成本降低18%；Tao等[[[7]](#endnote-6)]基于分布式能源管理框架，提出多主体协同优化方法，通过动态电价策略和需求响应降低园区购电成本30%，同时提高风光消纳率至85%以上；Mu等[[[8]](#endnote-7)]提出一种含碳能源协同枢纽的园区综合能源系统双层低碳经济规划方法，有效降低碳排放量和总成本；Ali等[[[9]](#endnote-8)]通过利用Nelder-Mead优化方法和EES软件实现了总费用的减少和㶲效率；熊宇峰等[[[10]](#endnote-9)]建立了氢能多能联储联供模型，提出了园区综合能源系统氢储能单位优化配置模型，并对综合成本和碳减排进行分析，验证了通过配置氢储能降低园区供能成本和碳排放的可行性；林顺富等[[[11]](#endnote-10)]通过建立设备故障概率模型、线路故障概率模型、以损失负荷水平建立故障严重度模型、系统功能风险模型，并利用二代非支配排序遗传算法进行求解获得关于成本和风险偏好函数的规划方案；张栋顺等[[[12]](#endnote-11)]从博弈模型验证氢储能配置可降低碳排放强度20%；Dong等[[[13]](#endnote-12)]针对能源成本节约和碳减排之间的权衡问题建立了混合整数规划和水箱组合的HIES的协调可以实现95.44%的减排量；Wu等[[[14]](#endnote-13)]通过建立氢的综合能源系统运行框架并基于Wasserstein度量的分布式鲁棒优化方法解决了风电不确定性的问题，弃风电量减少7.89%，二氧化碳排放量减少了20.19%。

从系统可靠性和安全性角度，陈胜、卫志农等[[[15]](#endnote-14)]分析了绿氢在电热氢耦合系统中的核心作用，提出通过绿氢解决可再生能源间歇性问题并探讨其与天然气管网的兼容性及安全影响；郭峥旭等[[[16]](#endnote-15)]建立了电气热综合能源系统中各子系统模型，同时建立能源集线器模型，然后采用分布求解法计算综合能源系统多能流并识别安全越限节点；Nnadozie等[[[17]](#endnote-16)]基于模糊逻辑的控制系统管理混合可再生能源的能量流，使混合可再生能源系统可以有效且可靠地作为化石燃料的替代品；Wang等[[[18]](#endnote-17)]提出一种基于N-1安全准则的电热冷气综合能源优化调度方法，并研究了设备故障前后设备功率和运行成本的变化；Li等[[[19]](#endnote-18)]出于对明显的季节变化导致的显著能源浪费和碳排放，提出了一种考虑经济性和安全性的季节性储氢的电热氢联产综合能源系统两阶段定容协同优化方法，并证实其可行性，该方法可以保证氢能系统安全的同时实现季节性储氢。

从算法优化和技术创新角度，丁小强等[[[20]](#endnote-19)]基于混合Wasserstein两阶段分布鲁棒的多区域含氢综合能源系统合作运行优化策略并用ADMM求解，改善了传统鲁棒优化的保守性；为提高低碳园区综合能源系统的低碳性和可再生能源消纳，程杉等[[[21]](#endnote-20)]提出考虑电转气、碳捕集装置和氢燃料电池协调运行的RIES低碳经济调度方法，该方法有效降低了碳排放水平；系统效率收到可再生能源的各种因素影响，Ali等[[[22]](#endnote-21)]引入CSRIME算法，其将RIME方法和布谷鸟搜索算法的元素相结合以获得更好的收敛性，有效降低了COE；Ruben等[[[23]](#endnote-22)]提出一种先进的能量管理策略和基于人工神经网络的光伏集成混合UPS系统的控制方法，提高了混合UPS系统的效率和可持续性；为了强调应对环境问题的碳中和，Li等[[[24]](#endnote-23)]建立了IES-HGESS伙伴关系的合作博弈模型并重点考虑碳中和，同时纳入负荷管理程序，提高了能源管理的可持续性；邹鑫等[[[25]](#endnote-24)]考虑到冷热电多种符合需求响应，构建了一个含先进绝热压缩空气储能的冷电热综合能源系统优化运行模型，同时对源荷不确定性采用拉丁超立方采样和K-means聚类相结合的方法处理；为了优化综合能源系统的配置，张泓楷[[[26]](#endnote-25)]基于综合能源的运行规律和负荷不确定性提出模型并采用列和约束生成算法进行求解；Ma等[[[27]](#endnote-26)]提出了一种基于模型预测控制的自适应能量管理策略框架来优化超级电容利用率和延长电池寿命；北京航空航天大学[[[28]](#endnote-27)]研究了热管理优化的高性能光伏-热电耦合系统混合发电，表明PV-TE技术组合可以有效扩大太阳光谱的使用并增加总功率输出；刘霁欧[[[29]](#endnote-28)]等提出一种考虑氢能多元利用的综合能源系统主从博弈优化运行策略，系统碳排放量降低了10.15%；李泽霜等[[[30]](#endnote-29)]针对碳排放、新能源消纳等问题，引入碳捕集-多阶段电转气运行框架并采用含Tent混沌映射与权重因子的改进麻雀搜索算法进行求解；Cheng等[[[31]](#endnote-30)]对于可再生能源的不确定性提出以风险水平和预测误差量化水电灵活性储备的调峰模型，提高了调峰调度的可靠性。

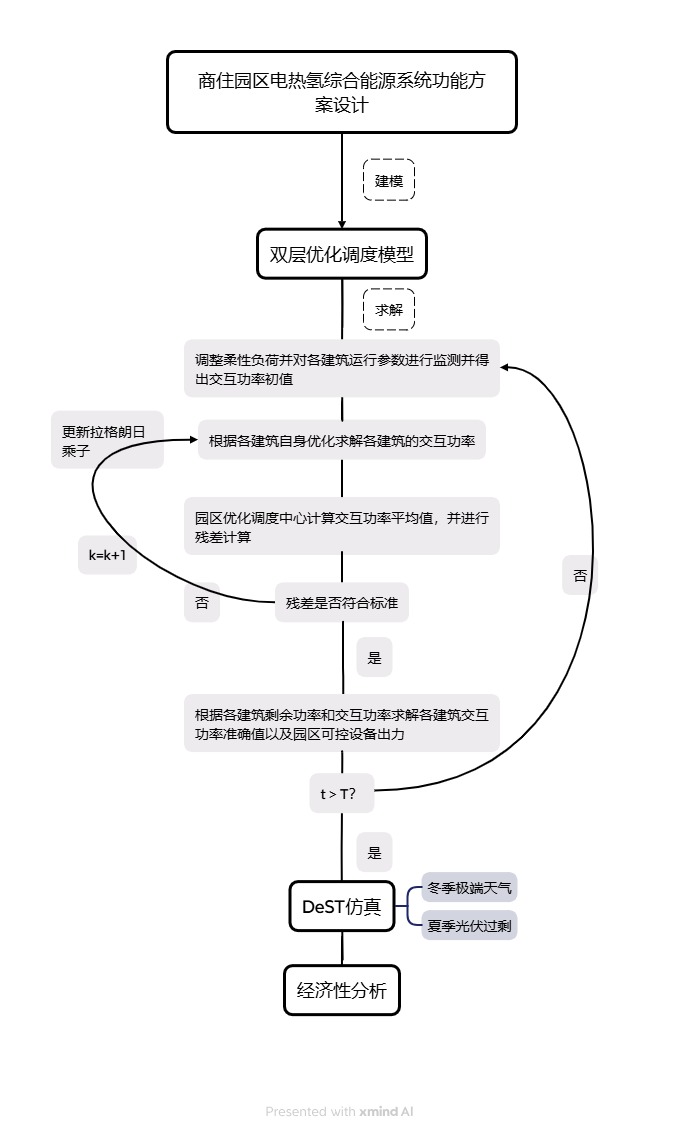
综上所述，现有研究成果中电热氢综合能源系统的优化运行研究都各有侧重，要么聚焦于降碳和系统升级，要么聚焦于成本减少和需求响应，而且其中不乏有些研究进针对于热负荷和电负荷上。

1. 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

本文聚焦于商住园区电热氢综合能源系统的优化设计及经济性分析，以构建多目标协同优化的指标体系为核心，重点围绕系统运行的关键影响因素展开多维度研究。首先，基于可再生能源波动性、柔性负荷动态响应特性、氢能储运效率及多能耦合复杂性等因素，系统分析电、热、氢多能流的交互机理与约束条件，明确能源供需平衡、碳排放强度、经济成本及系统可靠性等核心评价维度。其次，提出光伏消纳率、储氢供电时长、绿氢比例及投资回收期等关键指标。在此基础上，引入交替方向乘子法（ADMM）构建双层优化调度模型，上层通过分布式算法协调园区多主体能量交互，下层采用混合整数规划实现多能流动态优化，并结合柔性负荷的“价格-舒适度”双目标调节策略，设计涵盖光伏融雪增效、储氢容量配置、余热梯级利用及智能控制硬件的技术路线。最终通过DeST仿真验证极端场景下的系统鲁棒性，并依托全寿命周期成本模型与敏感性分析，评估技术经济性与政策适配性，形成一套兼顾低碳性、经济性与可靠性的商住园区综合能源系统优化运行方法。

1.3.2 技术路线



1. 主要创新点

就目前针对商住园区电热氢综合能源系统优化设计的研究要么集中在多目标优化，要么集中在需求响应上，要么集中于碳目标，将三者相结合研究的文献较少。因此本文提出了一个考虑需求响应和碳目标，含ADMM的电热氢综合能源系统双层优化运行模型，同时考虑源荷的不确定性，以运维成本，建筑间以及和电网间的交互功率成本以及碳收益为综合成本最小为目标函数。上层运用ADMM,下层运用混合整数规划进行求解。

1. 基础理论与概念

2.1 能源系统设计基础

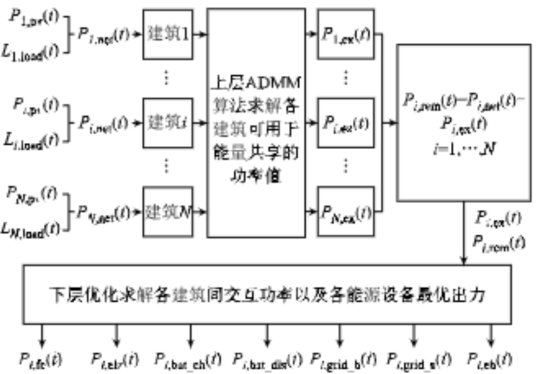
2.1.1 削峰填谷

削峰填谷主要通过柔性负荷的动态调节实现。其中柔性负荷可通过动态调整可平移负荷、可转移负荷、可削减负荷以减少电热氢负荷的峰谷差，从而降低从电网购电成本。

2.1.2 多能耦合

电热氢综合能源系统通过电解槽将富余电能转化为氢能储存，氢燃料电池反向供电。同时氢燃料电池发电产生的余热可以用于供暖或生活热水供应以减少电锅炉的能耗。

2.2 交替方向乘子法（ADMM）



双层优化调度模型流程[2]

双层优化框架通过将各类成本分开计算以达到减小计算成本且削峰填谷的作用。其中，上层以分布式为主，主要通过计算共享功率，其目标为建筑成本最小化，而下层以集中式为主，主要通过混合整数规划计算出园区成本最小值。

2.3 经济分析

2.3.1 全寿命周期

全寿命周期理论指从能源系统规划、设计、建设、运行、维护到最终废弃的全过程中，统筹分析其经济成本、环境影响和社会效益的理论框架。

全寿命周期成本（LCC）：

其中为初始投资，为第t年运维成本，为退役成本，r为贴现率

2.3.2 成本效益分析

通过对比综合能源系统的初始投资成本与运行期的收益，评估项目的经济可行性，包括静态投资回收期，动态净现值，内部收益率等。

2.4 技术验证

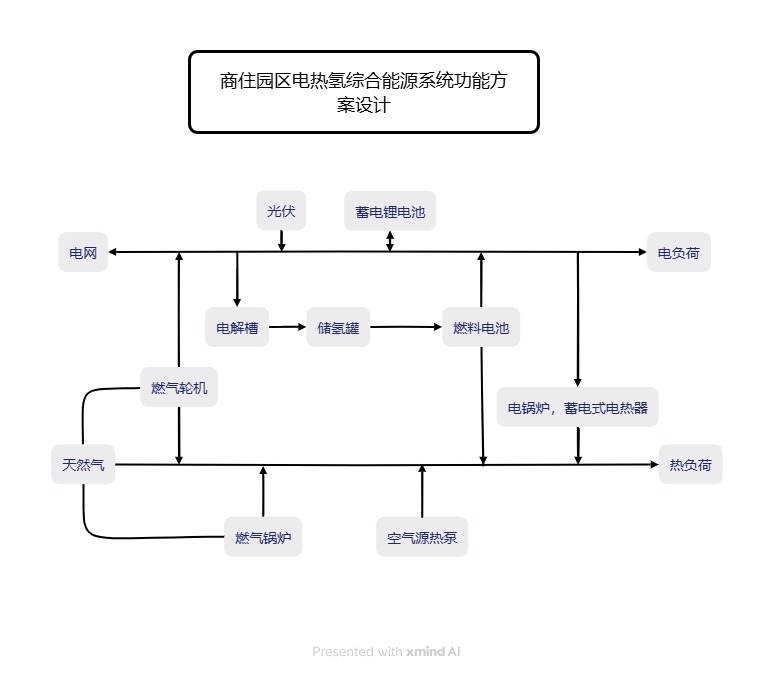
2.4.1 DeST软件

通过输入建筑参数、气象数据以及设备性能曲线，模拟极端天气下的系统可靠性；通过支持柔性负荷的动态调度模拟，优化峰谷电价下的运行策略。同时也可以通过经济性模块对比不同方案以供选择，通过模拟计算综合能效比、可再生能源渗透率等指标以提供数据支持。

2.4.2 敏感性分析

敏感性分析是评估系统模型对参数变化的敏感程度，用于判断关键因素的敏感性，为后续优化设计提供有效参考。包括局部敏感性分析和全局敏感性分析两种，本文采取单因素敏感性分析法，包括对总成本、电价、碳排放量等因素的分析。敏感性分析不仅可以识别关键敏感参数，还可以通过验证模型在极端天气下的情况评价系统鲁棒性，为后续优化设备配置提供参考。

1. A商住园区能源系统供需特性与问题分析

本文所研究的是哈尔滨市某商住园区电热氢综合能源系统，总占地面积为10万平方米，其功能区包括住宅60%、商业30%、能源10%三大区域版块。

该园区电热氢综合能源系统示意图

1. 气象数据

地区冬季极端低温约为-30℃，供暖期室外平均温度-12℃，供暖度日数6000℃·d，年太阳辐射量4500MJ/㎡，其中光伏出力冬季日受积雪遮挡影响均发电数2.8h，夏季3.5h。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

1. A商住园区供能特性分析

整个系统包括发电设备、储能设备、换热设备。发电设备包括光伏板，燃气轮；能量转换设备包括电解槽、燃料电池；储能设备包括储氢罐、蓄电池、蓄热式电暖气，换热设备包括换热器等。其中光伏系统单晶硅组件效率21.5%，装机容量1.8MW，年发电量216万kWh，冬季出力衰减率15%；氢储能系统中电解槽效率70%，氢电转换成本为1.0元/kWh，氢燃料电池热电联供效率85%，储氢罐容量500kg，其工作压力约为35MPa；储能设备中锂电池储能1.5MWh，其充放电效率92%，电蓄热装置2MWh，其释热温度60℃。电热氢综合能源系统以多能耦合为核心，光伏富余电量电解制氢消纳率80%，氢燃料电池余热供热占比40%，热泵承担79%基础热负荷；另设氢储能，可以支撑极端天气4小时供电。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

1. A商住园区用能特性分析

商业区能耗主要集中在白天，包括空调、照明、电梯等，住宅区能耗集中在早晚，包括供暖、家电等，能源设备等能源区域能耗在24小时均匀分布，包括照明、通风等。其中电负荷峰值为150KW/栋，谷值30KW/栋，空调负荷占比35%，柔性负荷可调度潜力25%；冬季供暖需求75W/㎡，生活热水负荷占比20%，夏季空气源热泵制冷COP=3.2；氢燃料车辆日均加注50kg，分布式供热需求20kg/h。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

1. 能源系统缺陷分析
2. 能源供应

由于冬季长期积雪覆盖，光伏系统的出力在冬季会衰减15%。同时，500kg储氢罐的容量不足以支撑超过一天的需求，应急供电能力有限。此外，在极端低温条件下，热泵的效率会降低，其性能系数（COP）可能降至2.5甚至1.5以下。由此可推断，在停电情况下，氢储能系统仅能维持4小时的供电，这表明系统对电网的依赖性较高。同时，热网的温度波动可能会超过±2℃。

1. 能源利用效率

夏季光伏过剩电力未充分利用，其制氢量仅占理论值60%。同时，电解槽余热没有回收装置，导致能量有损失，并且热泵与电锅炉协同调度不足，其调峰时段电锅炉能耗占比高达40%。由此可断，由于设备耦合优化不足，其综合能效仅有75%，低于理论值85%。

1. 碳排放与经济性

从碳排放角度看，由于电力制氢能力不足，导致冬季供热主要还是靠燃气锅炉和燃气轮机，导致其天然气消耗约1000万m³，二氧化碳排放约2.5万吨；同时若采用电网电力制氢，其绿氢比例仅占30%，碳排放强度较高。从经济性角度看，假设电价0.7元/kWh，制氢成本35元/kg，与传统系统相比并没有太大优势，而且投资回收期也比较长。

1. 本章小结

综上所述，该商住园区电热氢综合能源系统冬季存在极低温情况，供暖期长且太阳辐射量丰富。同时系统存在显著缺陷：能源供应稳定性方面，积雪影响光伏出力，储氢罐容量小，极端低温下热泵COP低；能源利用效率方面，夏季光伏过剩电力制氢量少，电解槽余热损失，设备协调性差；碳排放与经济性方面，冬季依赖燃气锅炉与燃气轮机，二氧化碳排放量高，绿氢占比低，电解槽与储氢罐初期投资占比大，氢电转换成本高，投资回收期长。以上问题为后续针对性优化设计指明了方向。

1. A商住园区能源系统供能方案设计

通过分析以上问题，现给出其电热氢综合能源系统的供能优化方案。

4.1综合需求响应建模

为了响应用户在不同时间的需求，现将响应需求的负荷分为三种：可平移负荷、可调整负荷、可削减负荷。

4.1.1 可平移负荷建模

可平移负荷是根据电价的波动，负荷从一个时间段平移到另一个时间段的过程。其平移的负荷与电力需求弹性有关，包括自弹性和交叉弹性。其中交叉弹性是指不同时间段的电价变化对需求变化的影响。

其中：为t时刻可平移的负荷量；为上限；为t时刻负荷平移前的负荷量；e(t,m)为t时刻的电力需求交叉弹性；为负荷平移前的电价；T为运行周期；

4.1.2 可调整负荷建模

可调整负荷是利用人体对温度的模糊感知适当地调整温度的过程。

其中为t时刻可调整的热负荷量；为t时刻可调整的冷负荷量；为建筑的体积热指数；为建筑外围体积；为t时刻供热时温度变化；为t时刻供冷时温度变化；为温度变化最大范围；

4.1.3 可削减负荷建模

可削减负荷是可以削减的负荷。通过激励等方式让用户自行削减负荷，其约束为：

其中为t时刻类能源的可削减的负荷量，为电、冷、热、氢四种能源；为上限。

4.2双层优化调度运行模型

在完成对需求响应的建模后开始建立考虑需求响应，基于ADMM的电热氢综合能源系统的双层优化调度模型。

在进行削峰填谷的同时，利用每个建筑内部的分布式能量控制器对楼内负荷进行监测并计算出其期望交互功率，在向能量集中优化调度中心进行报备。对于每座建筑，其净功率值计算公式为

其中为建筑i在t时间段的净功率；为建筑i在t时段的光伏出力；为建筑i在t时段的电负荷；为建筑i在t时段在功率交互后的剩余功率；为建筑i在t时段与其他建筑的交互功率。

4.2.1 上层优化模型

上层优化调度模型的目标函数为

其中为建筑i的总成本；为建筑i与电网之间的交互成本；为建筑i的运行维护成本；为建筑之间的交互传输成本；为建筑i的碳收益。

式中

其中为t时段电网购电电价；电网购电功率；为电网售电电价；为电网售电功率；

其中为蓄电池充电成本系数；为建筑i与蓄电池之间导线距离；为建筑i与蓄电池之间传输单位功率的损耗系数；为i在t时段蓄电池的充电功率；为蓄电池放电成本系数；为i在t时段蓄电池的放电功率；为电解水制氢成本系数；为i与电解槽之间导线距离；为i与电解槽之间传输单位功率的损耗系数；为电解水制氢功率；为燃料电池发电成本系数；为i与燃料电池之间的导线距离；为i与燃料电池之间传输单位功率损耗系数；为燃料电池的发电功率；为电锅炉运行成本系数；为i与电锅炉之间的导线距离；为i与电锅炉之间传输单位功率损耗系数；电锅炉功率；

其中为建筑之间交换功率的二次项系数；

其中为碳收益系数；为光伏在t时段的出力功率。

4.2.2 下层优化模型

下层优化调度模型的目标函数为

其中为园区总体的成本；为各建筑交互总成本；为建筑i向建筑j传输的功率；为建筑i和j之间传输功率的二次项系数

4.3设计标准及运行约束

4.3.1 设计标准

确保极端天气系统脱离主电网后，储能系统至少维持12小时连续供电；

热网温度波动要控制在±1.5℃以内，保障供暖舒适度；

光伏系统冬季受积雪影响后的出力衰减率降低至10%以下；

夏季光伏过剩电力制氢量提升至理论值90%以上；

电解槽余热回收利用率达80%；

系统综合能效从75%提升至85%，调峰时段电锅炉能耗占比降至20%以下；

绿氢比例30%提升至60%；

天然气年消耗量减少40%（降至600万m³以下）；

二氧化碳年排放量降低至1.5万吨以下；

电解槽与储氢罐投资在初始投资中占比下降，氢电转换成本降低至25元/kWh以下，投资回收期不大于8年。

4.3.2 优化运行约束

1.上层约束

各建筑之间交互功率平衡

单建筑电功率平衡

单建筑热平衡

当＜0时，

其中为i在t时间段的热负荷；为换热器传热效率；为氢气焓变

当＞0时，储热约束为

其中为t时段储热罐的储热量；，为储热量的下上限；为传热效率。

1. 下层约束

除了各运行设备出力的上下限、园区向电网售电功率的的上下限以及电网购电功率的上下限，还包括

电功率平衡

交互功率约束

热约束

储电约束

其中和分别为蓄电池储电下上限；

储氢约束

其中和为储氢罐储氢下上限；

1. 碳约束

绿氢比例

其中为可再生能源制氢量（kg/年）；为园区总氢用量（kg/年）

可再生能源供电比例

其中为光伏、风电年发电量（kWh）；为氢燃料电池年发电量（kWh）；为燃料电池效率（85%）；为园区总用电量（kWh）。

4.4系统供能结构优化

4.4.1 基于ADMM的模型求解

在模型求解过程中，向量为优化变量，为目标函数

采用同步式算法后的最终迭代形式[2]为

其中为罚因子；为第k次迭代的交互功率；为第k次迭代所有建筑交互功率平均值；

基于ADMM原理，用残差作为收敛标准

4.4.2 结果分析

该商住园区电热氢综合能源系统的供能优化设计包括光伏系统、储氢系统、热泵协同调度、余热回收、绿氢生产、电网交互六个方面。其中：光伏系统增设光伏自动融雪装置，并且优化倾角设计，冬季倾角可调至50°；储氢系统新增两组500kg储氢罐，优化氢燃料电池效率至88%，采用碳纤维复合材料降低氢脆风险，储氢罐之间的距离≥2倍罐径且不小于5m，并设置0.5m厚度防爆墙（耐火极限3h），配备高精度氢气泄漏传感器（精度0.05% LEL）和自动喷淋系统（响应时间＜10s）；热泵协同调度引入地源热泵辅助供热，同时优化电锅炉运行时段；余热回收方面新增电解槽余热回收装置（效率≥85%）并与热网耦合；绿氢生产方面新增1MW的PEM电解槽，优先使用光伏制氢；电网交互配置双向智能电表。

4.5 设计结果仿真推演

4.5.1 仿真场景

冬季极端天气-30℃持续降雪，光伏积雪覆盖率50%，电网故障持续12小时。而整个商住园区电负荷峰值为150kW/栋，谷值为30kW/栋；热负荷需求为75W/㎡，氢燃料车辆日均加注50kg。

4.5.2 仿真数据分析

1.优化前光伏板冬季发电时长2.8h/日，衰减率15%；优化增设光伏板自动融雪装置，其效率达95%以上；并调整光伏倾角。仿真结果表明光伏系统发电时长提升至3.2h/日，衰减率8%。

2.储氢罐容量由一组500kg增至三组共1500kg，燃料电池效率优化至88%。供电时长计算：

3.优化前电锅炉调峰能耗占比40%，热泵COP在极低温下降至1.5；优化引入COP=2.8的地源热泵辅助供热；电解槽余热回收效率提升至85%。温度波动计算：

优化后热负荷温度波动将至1.2℃。

1. 优化前余热未回收，综合能效75%，优化新增余热回收装置并加入多能流协同调度算法减少能量损耗，综合能效计算

4.6 本章小结

综上系统功能优化方案协调了各种类型需求响应的比例，建立了针对商住园区电热氢综合能源系统并基于ADMM的模型，同时结合实际考虑各类型能源特性推算出一个合理的比例，有利于提高运行经济性。

1. A商住园区电热氢综合能源系统设计方案经济性分析

优化前后初始投资对比

|  | **优化前** | **优化后** | **新增/调整内容** |
| --- | --- | --- | --- |
| **光伏系统** | 1,200 | 1,500 | 增设自动融雪装置、倾角优化设计 |
| **储氢系统** | 1,000 | 1,800 | 新增2组500kg储氢罐、碳纤维复合材料防氢脆 |
| **氢燃料电池** | 800 | 900 | 效率优化至88%、余热回收装置集成 |
| **热泵与供热系统** | 600 | 1,000 | 引入地源热泵辅助供热、余热回收系统 |
| **电网交互设备** | 300 | 300 | 双向智能电表（无新增成本） |
| **电解槽** | 800 | 1,000 | 新增1MW PEM电解槽（绿氢生产扩容） |
| **其他设备与安装** | 300 | 0 | 原电锅炉部分替换为热泵（成本转移） |
| **总计** | **5,000** | **5,500** |  |

1. 财务评价

总成本费用（万元）

|  | **优化前** | **优化后** |
| --- | --- | --- |
| 初始投资成本 | 5,000 | 5,500 |
| 运维成本（年） | 1,000 | 800 |
| 氢电转换成本（元/kWh） | 35 | 25 |
| 退役成本 | 500 | 500 |
| 全寿命周期成本（LCC） | 15,200 | 13,800 |

现金流量表（万元）

| **年份** | **初始投资** | **运维成本** | **碳收益** | **售氢收入** | **净现金流量** | **累计现金流量** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 0 | -5,500 | - | - | - | -5,500 | -5,500 |
| 1 | - | -800 | 200 | 1,200 | 600 | -4,900 |
| 2 | - | -800 | 220 | 1,300 | 720 | -4,180 |
| 3 | - | -800 | 240 | 1,400 | 840 | -3,340 |
| 4 | - | -800 | 260 | 1,500 | 960 | -2,380 |
| 5 | - | -800 | 280 | 1,600 | 1,080 | -1,300 |
| 6 | - | -800 | 300 | 1,700 | 1,200 | -100 |
| 7 | - | -800 | 320 | 1,800 | 1,320 | 1,220 |
| 8 | - | -800 | 340 | 1,900 | 1,440 | 2,660 |

营业收入表

| **收入项** | **年收入** |
| --- | --- |
| 售氢收入 | 1,200 |
| 售电收入 | 800 |
| 碳交易收益 | 250 |
| 总营业收入 | 2,250 |

5.1.1 经济性对比

|  | **优化前** | **优化后** |
| --- | --- | --- |
| 净现值（NPV, 万元） | 3,200 | 5,800 |
| 内部收益率（IRR） | 12% | 18% |
| 投资回收期（年） | 10 | 7.7 |

5.1.2 环保性对比

|  | **优化前** | **优化后** |
| --- | --- | --- |
| 年碳排放量（万吨） | 2.5 | 1.5 |
| 绿氢比例 | 30% | 60% |
| 可再生能源供能占比 | 45% | 70% |

1. 费用效益分析

|  | **总成本（万元）** | **总收益（万元）** | **成本效益比（CBR）** |
| --- | --- | --- | --- |
| 优化前 | 15,200 | 10,500 | 0.69 |
| 优化后 | 13,800 | 18,900 | 1.37 |

1. 敏感性分析

| **对净现值的影响** | **-20%** | **-10%** | **基准值** | **+10%** | **+20%** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **电价（元/kWh）** | 4,200 | 5,000 | 5,800 | 6,600 | 7,400 |
| **氢气价格（元/kg）** | 4,000 | 4,900 | 5,800 | 6,700 | 7,600 |
| **设备成本** | 6,500 | 6,150 | 5,800 | 5,450 | 5,100 |

1. 本章小结

优化方案通过升级设备、引入算法，虽短期增加初始成本，但显著提升了系统可靠性、能效与低碳性，并通过运维降本和碳收益实现长期经济性平衡，具备较高的综合回报潜力。

第6章 结论与展望

6.1结论

本文针对电热氢综合能源系统，考虑新能源供能的不确定性，引入了多种需求响应，并用基于ADMM的双层优化框架建模。在升级设备的同时进行算法升级，更有利于用最小成本收获最大效益。同时引入碳目标作为约束，使该综合能源系统更加环保、灵活。通过仿真得出以下结论：考虑碳目标，基于ADMM的双层优化调度模型和多种需求响应能够有效降低运行成本和碳排放量，实现园区电热氢综合能源系统的地毯优化调度。

6.2展望

本方案通过多能耦合优化与智能调度，实现了哈尔滨商住园区能源系统的高效、低碳与经济运行，为严寒地区综合能源系统设计提供了技术参考，后续需结合动态政策与技术进步持续迭代升级。同时，此研究并不完整，还可从冬季可再生能源供应、光伏融雪效率、储氢成本、低温热泵效率等方面进行深度研究以推动严寒地区综合能源系统向“零碳”目标迈进。

1. [] 国务院关于印发《2024—2025年节能降碳行动方案》的通知2024—2025年节能降碳行动方案 [↑](#endnote-ref-0)
2. [] 孔令国,史立昊,石振宇,等. 基于交替方向乘子法的园区电-氢-热系统低碳优化调度[J]. 电工技术学报,2023,38(11):2932-2944. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220773. [↑](#endnote-ref-1)
3. [] 张雨曼,刘学智,严正,等.光伏-储能-热电联产综合能源系统分解协调优化运行研究[J].电工技术学报,2020,35(11):2372-2386.DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191468. [↑](#endnote-ref-2)
4. [] Fan, G., Zhang, H., Sun, B. et al. Economic and environmental competitiveness of multiple hydrogen production pathways in China. Nat Commun 16, 4284 (2025). https://doi.org/10.1038/s41467-025-59412-y [↑](#endnote-ref-3)
5. [] 宋雨薇,胡梦月,谢鹏程,等. 考虑电热柔性负荷和氢储能的综合能源系统优化运行研究[J]. 建模与仿真,2024,13(3):3952-3969. DOI:10.12677/mos.2024.133360. [↑](#endnote-ref-4)
6. [] 罗舒钰,李奇,阳洋,等. 计及电-热-氢差异化激励需求响应的园区综合能源系统优化调度[J]. 电力自动化设备,2023,43(12):214-221. DOI:10.16081/j.epae.202310002. [↑](#endnote-ref-5)
7. [] Hai, T., Ali, A.B.M., Agarwal, D. et al. Predictive optimization using long short-term memory for solar PV and EV integration in relatively cold climate energy systems with a regional case study. Sci Rep 15, 16414 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-01519-9 [↑](#endnote-ref-6)
8. [] Mu Y ,Guo H ,Wu Z , et al.A two-layer low-carbon economic planning method for park-level integrated energy systems with carbon-energy synergistic hub[J].Energy and AI,2024,18100435-100435. [↑](#endnote-ref-7)
9. [] Bedakhanian A ,Maleki A ,Haghighat S .Thermo-economic optimization of a hybrid solar-wind energy system for the production of clean hydrogen and electricity[J].Energy Nexus,2025,17100378-100378. [↑](#endnote-ref-8)
10. [] 熊宇峰,陈来军,郑天文,等. 考虑电热气耦合特性的低碳园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):31-38. DOI:10.16081/j.epae.202109016. [↑](#endnote-ref-9)
11. [] 林顺富,应子涵,谭津,等.考虑供能风险的电-气综合能源系统优化规划方法[J/OL].浙江电力,1-11[2025-05-13].https://kns-cnki-net.webvpn.ncepu.edu.cn/kcms/detail/33.1080.TM.20250509.1352.012.html. [↑](#endnote-ref-10)
12. [] 张栋顺,全恒立,谢桦,等.考虑碳交易机制与氢混天然气的园区综合能源系统调度策略[J].中国电力,2024,57(02):183-193. [↑](#endnote-ref-11)
13. [] Dong X ,Zhao Y .An economic way to reduce emissions of industrial parks with hydrogen-based integrated energy systems[J].International Journal of Hydrogen Energy,2025,1061122-1133. [↑](#endnote-ref-12)
14. [] Qunli W ,Chunxiang L .Modeling and operation optimization of hydrogen-based integrated energy system with refined power-to-gas and carbon-capture-storage technologies under carbon trading[J].Energy,2023,270 [↑](#endnote-ref-13)
15. [] 陈胜，张景淳，卫志农，等。迈向可再生能源主导的能源系统：绿氢的作用 [J]. MPCE, 2025. [↑](#endnote-ref-14)
16. [] 郭峥旭.基于灵敏度分析的电-气-热综合能源系统安全控制策略[J].电气应用,2024,43(07):46-57. [↑](#endnote-ref-15)
17. [] Chibuikem E N ,Ukachukwu O O .Fuzzy Logic Based Controller with Dedicated Safety Function for Hybrid Renewable Energy System[J].Journal of Energy Research and Reviews,2018,1-13. [↑](#endnote-ref-16)
18. [] Wang Z ,Hao Y ,Zhao G , et al.Day-ahead optimal dispatch method of integrated electric-heat-cool-gas energy system based on N-1 safety criterion[J].Energy & Buildings,2024,323114800-114800. [↑](#endnote-ref-17)
19. [] Li L ,Sun Y ,Han Y , et al.Seasonal hydrogen energy storage sizing: Two-stage economic-safety optimization for integrated energy systems in northwest China[J].iScience,2024,27(9):110691-110691. [↑](#endnote-ref-18)
20. [] 丁小强,袁至,李骥.基于混合Wasserstein两阶段分布鲁棒的多区域含氢综合能源系统合作运行优化[J/OL].中国电力,1-15[2025-05-13].https://kns-cnki-net.webvpn.ncepu.edu.cn/kcms/detail/11.3265.tm.20250508.1718.002.html. [↑](#endnote-ref-19)
21. [] 程杉,卢渊涛,王灿.考虑P2G-CCS-HFC协调运行的园区综合能源系统分布鲁棒优化调度[J/OL].电力系统保护与控制,1-15[2025-05-13].https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.240607. [↑](#endnote-ref-20)
22. [] Marzougui E A ,Bahsine S ,Oukennou A , et al.Enhanced algorithm for hybrid renewable energy systems, optimized with battery storage: A case study in Dakhla region, Morocco[J].Journal of Energy Storage,2025,120116386-116386. [↑](#endnote-ref-21)
23. [] Boros R R ,Jobbágy M ,Bodnár I .Optimized Real-Time Energy Management and Neural Network-Based Control for Photovoltaic-Integrated Hybrid Uninterruptible Power Supply Systems[J].Energies,2025,18(6):1321-1321. [↑](#endnote-ref-22)
24. [] Li G ,Zhang Z ,Li J , et al.Optimizing hybrid energy storage: A multi-objective approach for hydrogen-natural gas systems with carbon-emission management[J].International Journal of Hydrogen Energy,2024,811003-1019. [↑](#endnote-ref-23)
25. [] 邹鑫,陈丹昊,邹爱孟,等. 考虑多种负荷需求响应的综合能源系统优化运行[J]. 动力工程学报,2025,45(1):154-164. DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2025.230647. [↑](#endnote-ref-24)
26. [] 张泓楷. 电--气综合能源系统优化配置[D]. 山东:山东大学,2020. [↑](#endnote-ref-25)
27. [] Bin M ,Xing G ,Penghui L .Adaptive energy management strategy based on a model predictive control with real-time tuning weight for hybrid energy storage system[J].Energy,2023,283 [↑](#endnote-ref-26)
28. [] Energy Research; Studies in the Area of Energy Research Reported from Beihang University (High-performance photovoltaic-thermoelectric hybrid power generation system with optimized thermal management)[J].Energy Weekly News,2016, [↑](#endnote-ref-27)
29. [] 刘霁欧,魏业文,李艺博,等. 基于主从博弈的含氢综合能源系统优化运行策略[J]. 电子设计工程,2025,33(8):27-32,37. DOI:10.14022/j.issn1674-6236.2025.08.006. [↑](#endnote-ref-28)
30. [] 李泽霜,唐忠,程卓,等. 基于改进麻雀搜索算法的电-热-气-氢综合能源系统优化[J]. 现代电力,2024,41(6):1090-1099. DOI:10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0351. [↑](#endnote-ref-29)
31. [] Cheng W ,Zhao Z ,Cheng C , et al.Optimizing peak shaving operation in hydro-dominated hybrid power systems with limited distributional information on renewable energy uncertainty[J].Renewable Energy,2024,237(PC):121776-121776. [↑](#endnote-ref-30)