**一、研究背景**

**1.选题背景**

能源是推动人类文明进步与社会经济发展的核心驱动力，其安全与可持续利用关系到国家发展战略和社会长期福祉[1]。在我国，能源相关活动是二氧化碳排放的主要来源，占全社会排放总量的80%以上，其中电力行业的排放占比超过40%[2]。随着工业化和城镇化的加速推进，能源需求持续攀升，导致能源紧缺、环境污染和全球气候变化等问题日益严峻[3]。这表明，能源系统低碳转型已成为应对全球气候变化和保障国家能源安全的核心任务。

在这一背景下，各国纷纷加快能源转型步伐。总体而言，能源清洁化转型主要有两条发展途径：其一，大力发展可再生能源，推动光伏、风电等清洁能源的广泛应用，减少对化石能源的依赖；其二，通过能源效率提升和多能互补利用，构建高效、智能的综合能源系统，以降低碳排放强度。我国在这一方面已做出明确承诺。2020年9月，习近平总书记在第75届联合国大会上郑重宣布，我国将力争在2030年前实现二氧化碳排放达峰，并努力在2060年前实现碳中和目标。这一“双碳目标”不仅是我国应对气候变化的战略举措，也是推动能源系统深度转型的重要引领[4]。2021年4月，在“领导人气候峰会”上，习近平主席进一步指出“十四五”是碳达峰的关键期、窗口期，要构建以新能源为主体的新型电力系统[5]。国家发改委在相关指导意见中明确提出要“增强能源互联、推动能源互济”构建零碳可持续能源体系[6]。

在“双碳”战略目标以及“以新能源为主体的新型电力系统”建设的双重驱动下，工业园区作为能源消费与碳排放的集中承载体，逐渐成为落实低碳转型的重要实践场景[7]。园区内企业类型多样、产业结构复杂，能源需求不仅涵盖电力、热力、冷量、气体等多种形式，还呈现出时序性、区域性和行业性差异[8]。同时，随着分布式光伏、风电、储能系统以及各类能源转换设备的不断接入，园区内部逐步形成了多能互补、灵活耦合的用户侧综合能源系统（User-Side Integrated Energy System, USIES）[9]。这种网络化的能源系统在提高能源利用效率、提升清洁能源消纳能力方面具有显著优势，但也使得园区碳排放路径更加复杂，给碳排放的计量、核算与责任分配带来了新的挑战。

在此背景下，如何在用户侧实现碳排放的精准计量与责任分担，已成为推动园区综合能源系统绿色转型的核心问题。一方面，现有碳排放核算方法多集中于电力生产环节或区域整体排放的总量统计，虽然能够反映宏观水平的碳排放状况，却难以揭示园区内部不同用户节点之间的碳排放差异与责任归属[10]。这种粗放的核算方式不仅削弱了园区企业在低碳管理与能效提升中的自主性与公平性，也制约了碳信息披露和碳交易体系的有效运行。另一方面，在多能互补的综合能源系统中，用户侧能源输入往往依赖分布式光伏、风电、储能及能源转换设备，且整体运行需由主动配电网进行协调与调控，在开展节点碳排放总量核算及责任划分时，必须综合考虑各类能源设备的全生命周期碳足迹，以确保碳排放责任分担的科学性与合理性[11]。

然而，当前工业园区下USIES的碳排放核算仍存在三方面问题：一是传统方法多聚焦电力生产端或区域整体排放，缺乏对园区内部用户节点碳排放差异与责任归属的精准反映；二是分布式光伏、风电、储能及能源转换设备在多能互补系统中广泛应用，但其全生命周期碳足迹缺乏系统评估，难以揭示真实排放水平；三是园区负荷存在波动性与不确定性，若缺乏科学预测与调控，将制约低碳优化与市场机制的有效结合。为此，本文提出三步研究思路：首先构建园区用户侧综合能源系统与负荷模型，建立碳流密度矩阵并分摊节点排放责任；其次依据 ISO 标准开展全生命周期碳足迹分析，优化设备碳排放责任划分；最后结合负荷预测与主动配电网低碳优化，引入混合博弈与改进 Shapley 值分配机制，实现园区碳排放的动态调控与公平分担。

**2.研究目的和意义**

本研究旨在面向工业园区这一能源消费与碳排放的集中区域，构建USIES碳排放责任划分与优化方法。通过建立园区综合能源系统模型，结合碳流追踪与分层混合生命周期评价，形成多能互补条件下的碳排放精准计量与责任分担机制，并在主动配电网的低碳调控下实现园区碳减排路径优化。

在研究意义方面，理论上，突破了传统碳核算偏重电力生产端的局限，推动碳排放责任从宏观统计向园区用户侧精细化分摊转变；方法上，将碳流密度矩阵、生命周期碳足迹与改进的 Shapley 值方法相结合，创新性地提出了用户侧多能互补下的碳责任分配框架；实践上，可为园区低碳运行、碳信息披露及碳交易提供支撑，提升企业绿色竞争力，并增强我国应对国际绿色贸易壁垒的能力。

**二、国内外研究现状**

**1.园区综合能源系统研究**

近年来，全球能源危机与生态环境恶化呈现螺旋式叠加上升态势，各国政府均结合本国国情出台了一系列政策以缓解能源与环境矛盾。在此背景下，能源互联网技术不断发展成熟，推动了USIES在能源供应多元化、系统运行低碳化及能源利用高效化等方面的快速进展。国内外学者也从不同视角对 USIES 的优化运行问题展开深入研究，针对 USIES 的优化运行问题，国内外学者已开展了大量研究并取得重要成果。Jia 等[12]构建了包含可再生能源与储能设备的综合能源系统优化调度模型，以系统运行成本最小化为目标，分析了设备间的整体收益关系，仿真结果表明该模型能够有效降低系统碳排放量与运行成本。Wang等[13] 提出了一种涵盖供电、供热与供冷的综合能源系统优化调度模型，同样以运行成本最小为目标，通过算例验证模型不仅降低了运行成本，还提升了能源利用效率。Zhang 等[14]从用户侧出发，提出了全分布式能源的综合能源系统，并构建了涵盖购能成本与碳交易成本的多目标动态系数指标模型，为用户侧综合能源系统的优化调度提供了示例。另一项研究中，Zhang 等[15]设计了一种包含生物质掺烧的园区综合能源系统模型，通过在天然气中引入不同掺杂比的氨气并结合阶梯碳交易机制，评估了系统运行表现，结果显示该模型提升了可再生能源利用率并显著降低了经济成本与碳排放总量。Wu 等[16]则构建了以光伏、风电、蓄电池和蓄热罐为核心的园区低碳调度模型，优化目标使运行成本与碳排放量最小化，并基于某高层住宅算例验证了该模型在减少运行碳排放方面的有效性。陈龙等[17]则针对包含电力与热能的园区综合能源系统调度模型，提出改进后的近似动态规划算法，以解决传统方法在求解效率方面的不足，结果表明改进方法能够显著提高模型求解效率。

然而，现有研究大多侧重于系统层面的经济性与能效优化，缺乏对用户侧碳排放责任的精细化计量及全生命周期分析的系统探讨。因此，在 USIES 场景下构建兼顾运行优化与责任分配的碳排放核算方法，成为未来研究的重要方向。

**2.综合能源系统的生命周期研究**

**2.1分布式可再生能源系统的生命周期研究**

生命周期评估（LCA）是一种用于识别和评估产品或服务在其整个生命周期内对环境影响的工具[18,19]。目前常用的生命周期评价方法主要有三种，分别为过程生命周期评价法（Process-based, PLCA）、投入产出生命周期评价法（Input-outputLCA, I-OLCA)和混合生命周期评价法（Hybrid-LCA, HLCA）。混合生命周期评价法是指将PLCA和EIO-LCA结合使用的方法。该方法由Bullard等[20]在20世纪70年代第一次石油危机之后提出，主要用于能源投入产出分析。通过将PLCA和EIO-LCA结合，既可以消除截断误差，又可以加强对具体评价对象的针对性，同时还能将产品的使用和报废阶段纳入评价范围[21]。

许多学者基于生命周期评价对分布式可再生能源网络进行了分析。在国内，李新航等[22]对风电系统全生命周期各阶段碳排放进行了识别与分析，建立了碳足迹评估模型。结果显示，在引入回收环节后，风机生产阶段碳排放占比由63.39% 降至18.91%，显著降低了系统整体排放，表明分布式风电系统在全生命周期视角下具备明显减排潜力。高月芬等[23]对分布式光伏系统进行生命周期分析，结果表明单晶硅光伏机组生产环节碳排放量达153.3t，占设备总排放的约95%，为主要排放源。然而，该机组年发电量约 190 万千瓦时，折算替代电网购电可减排1280.6t，年净减排1127.3t，凸显了分布式光伏系统在全生命周期下的显著减排效益。刘莎莎等[24]构建了计及风光储联合运行的全生命周期碳排放核算模型，结果显示碳排放主要集中在材料生产占90.78%和电站建设阶段占59.9%。研究发现，电站碳排放强度与利用小时数显著负相关，配置储能可使碳排放强度降低约1.18gCO2e/kWh，凸显了风光储一体化系统在全生命周期下的减排优势。郭朝泽等[25]基于生命周期评价与成本核算法，对山东某工业园区分布式可再生能源系统进行评估。结果显示，电网购电和集中供暖是主要排放来源，优化方案虽使成本增加3.6%‒5.2%，但整体环境影响降低34%‒67%，其中碳排放减少10.2%‒24.3%，凸显了分布式可再生能源在园区减排中的显著作用。

相比国内，国外在分布式可再生能源网络的研究更为系统深入，尤其在生命周期评价与环境效益分析方面积累了丰富成果。Petrillo等[26]采用过程生命周期法，构建了独立混合可再生能源系统的生命周期评估与成本分析模型，并结合层次分析法（AHP）提出系统化的可持续性评价工具。研究以小型光伏—压缩空气储能电站为案例，满足通信基站能源需求。结果表明，该方法能够动态评估经济、社会与环境绩效，为分布式可再生能源系统的可持续性决策提供有效支持。Li等[27]基于生命周期评价提出由风电、水电、光伏、太阳能热电与沼气电站构成的分布式能源系统。结果表明，该系统单位电量的环境负荷显著低于传统方式，不确定性分析显示通过延长寿命与提升发电量可进一步减排，验证了生命周期方法在分布式能源系统环境效益评估中的有效性。Luo等[28]基于过程生命周期评价方法，对包含太阳能、风能和生物质的多能源系统进行了综合评估，发现其建设阶段成本较高，但在生命周期内初级能源消耗和碳排放显著低于传统独立系统，体现了多能互补的优势。Fang等[29]采用混合生命周期评估法，对风电—氢能耦合综合能源系统进行了模拟与生命周期经济评估，结果表明风电场的经济回收周期约为8.13年，并强调合理配置风电与制氢功率比例对系统经济性的重要作用。Yan等[30]则基于混合生命周期评价法，建立生命周期参数评估框架评估了光伏、锂离子电池与微型燃气涡轮耦合的可再生能源集成系统，结果显示该系统相较于集中式能源系统，可使建筑运行的温室气体排放减少46%，水资源利用减少98%，酸化影响降低93%。这些研究充分表明，分布式可再生能源网络经过生命周期分析后在经济性与环境效益之间具备协同优化潜力，为推动低碳转型提供了重要参考。

**2.2 燃煤电厂的生命周期研究**

生命周期评价（LCA）因其系统性强、包容性高和评价维度广，已成为当前最为主流的环境影响评价方法之一，并被广泛应用于燃煤发电技术的环境与碳排放研究。早在2005年，郝丽芬等[31]便采用LCA方法对660MW超超临界燃煤电厂进行了环境影响分析，结果表明其生命周期排放的SO₂、NOₓ、灰渣和烟尘总量均显著低于常规电厂。周亮亮等[32]进一步将LCA应用于循环流化床、超超临界、整体煤气化及增压流化床联合循环四类清洁燃煤电厂，综合考察了建造、运行和退役阶段的能源、环境、经济与资源效益，验证了清洁燃煤电厂的可持续性优势。然而，该研究主要聚焦于SO₂、NOₓ、CO等常规污染物，环境影响范围仍显局限。Cui等[33]基于欧洲背景数据，比较了中国不同装机容量燃煤电厂的生命周期环境影响，发现NMVOC和NO₂对光化学氧化剂形成有重要贡献。Han等[34]利用SimProv8.5对1000MW超临界燃煤电厂建模，核算NMVOC在内的八类污染物排放，并比较了EDIP2003、ReCiPe2016和CML2001三种LCA方法下的关键影响差异。彭娅等[35]则通过Gabi软件结合实地与文献数据，建立了典型600MW超临界机组的生命周期排放清单，识别了气态有机污染物的关键排放环节与控制技术差异，同时揭示了不同地区燃煤电厂环境影响水平。

综上，现有研究从不同维度证实了LCA在燃煤电厂环境与碳排放核算中的适用性与优势，揭示了关键排放阶段和主要贡献因子。然而，这些研究多集中于发电端的单一能源系统，对综合能源系统中多能耦合、用户侧碳排放责任划分的支撑仍显不足，亟需进一步拓展。

**2.3储能设备的生命周期研究**

目前，国内外学者关于储能设备已进行了多种相关生命周期研究。来鑫等[36]基于生命周期评价，从度电排放和全生命周期碳减排角度分析了风储电站相较于单一风电场的减排效益。结果表明，尽管储能可提升新能源消纳比例，但在高比例新能源装机情景下，磷酸铁锂储能电站对实现95%消纳目标仍存在明显局限性，体现了储能系统在分布式可再生能源低碳转型中的关键约束。熊宇峰等[37]构建了“新能源+氢储能”综合能源系统规划模型，以经济性、低碳化和能效最优为目标，对北方居民社区进行仿真分析。结果表明，氢储能与蓄热罐协同应用相比单一储能形式，可减少7.61%‒43.8%的碳排放，并提高14.44%‒337.14%的综合能效，凸显了分布式可再生能源系统中氢储能的减排潜力与能效优势。Zhang等[38]从生命周期视角出发，深入研究了新型电力系统中混合储能的配置优化与价值度量，结果表明在不同可再生能源渗透率条件下，抽水蓄能与电池的组合能够在特定资源禀赋下展现出更优的系统性能和环境效益。Dong等[39]则将电储能与热储能作为短时储能形式引入综合能源微电网，同时将氢储能作为长时储能配置，实现了多时间尺度下的储能优化与灵活调控。两项研究均表明，合理配置多类型储能不仅能够提升分布式可再生能源系统的运行经济性和调节能力，还能在全生命周期层面显著改善碳排放绩效，为综合能源系统的低碳优化提供了重要参考。

**3. 碳排放预测与主动配电网下的责任分配研究**

**3.1碳排放预测方法研究**

碳排放预测模型主要分为两类：传统模型与机器学习模型[40]。传统方法包括灰色预测模型[41]、时间序列模型[42]、回归模型[43]以及STIRPAT模型[44]，多用于宏观层面的碳排放影响因素分析。然而，由于区域复杂性、工业排放数据的局限性以及可再生能源波动性，这类方法在高时空精度预测方面存在不足，难以满足园区层面的精细化碳排放分析需求。相比之下，机器学习模型在处理复杂数据与提升预测精度方面展现出明显优势。Zhao等[45]综述指出，其预测效果依赖于大规模、高质量数据集。Guo等[46]进一步强调，传统机器学习在处理多特征复杂数据时性能受限，而深度学习模型因具备强大的特征提取与结构学习能力，在碳排放预测的准确性上优于传统方法。

近年来，融合模型逐渐成为研究热点。Hu等[47]指出，传统方法在处理非线性目标时存在滞后性，难以满足工业复杂系统需求，而智能混合算法具备自学习能力，更适合拟合复杂非线性序列[48]。Liu等[49]提出制造业工业园区实时碳排放估算框架，基于AWRG-CNN-BLSTMNILM算法提升设备识别与碳排放估算精度。Xia等[50]将NILM与深度神经网络结合，分解企业用电负荷并实现设备级碳排放推断。Yang等[51]提出结合改进Informer算法与碳排放流模型的非侵入式核算方法，实现了工业企业直接与间接碳排放的实时精准核算，并降低了分布式光伏波动对预测精度的影响，为园区高精度碳排放预测与责任划分提供了参考。Yaniv等[52]梳理了工业场景下NILM的状态基、事件基及深度学习方法，指出多设备并发、数据采集受限及算法泛化不足等问题，并提出结合设备运行周期metadata、强化实时处理与边缘计算适配、构建多行业数据库等优化方向，为工业NILM改进提供框架参考。

综上所述，现有碳排放预测方法虽取得一定进展，但仍存在局限：传统模型难以应对园区多能源交互与可再生能源波动，预测精度不足；机器学习虽具优势，但依赖高质量数据集，泛化性有限；融合模型提升了精度，却难以解决责任划分与可追溯性问题。因此，仅依靠预测模型不足以满足园区低碳管理需求，亟需将预测与综合能源系统建模结合，构建碳流密度矩阵与责任因子，实现园区碳排放精准计量与责任分担。

**3.2主动配电网协调下碳排放责任研究**

在综合能源系统的碳排放责任研究中，博弈论方法被广泛应用于主动配电网协调下的碳排放责任划分与利益分摊。周全等[53]提出基于合作博弈的碳排放分摊模型，能够量化各负荷节点对系统碳排放的实际贡献，从而在需求侧实现系统碳足迹分析。陈丽霞等[54]进一步将发电侧与负荷侧纳入统一框架，构建供需侧共同碳责任分摊模型，并利用Aumann-Shapley方法求解，实现供需两侧的公平分担。Lei等[55]构建了主动配电网与多区域综合能源系统的双层博弈模型，上层采用主从博弈描述主动配电网与区域系统的互动，下层则通过合作博弈协调多区域系统，并结合粒子群算法与Shapley值实现责任与利益分配。文献[56,57]则分别将主动配电网与多微网联盟、多区域系统进行博弈建模，基于Shapley值实现多主体间的利益分配与策略优化。Zhao等[58]将Shapley方法与CatBoost模型结合，高精度识别碳排放驱动因子及其非线性作用，揭示不同排放模式下的关键差异。研究表明，基于Shapley值的解释方法不仅能量化各因素对碳排放的边际贡献，还可为主动配电网下综合能源系统的碳排放责任分摊与差异化低碳优化提供理论支撑。

现有研究多利用博弈论与Shapley值实现主动配电网下的碳排放责任分摊，并结合机器学习提升驱动因子识别精度。但多数工作侧重系统或供需整体，缺乏园区用户侧与全生命周期的细致考量，难以实现节点级碳排放责任精准划分。因此，有必要开展面向园区综合能源系统的主动配电网协调下碳排放责任研究。

**三、研究内容**

本研究聚焦于园区综合能源系统的碳排放责任分担与优化，旨在通过精确的模型与算法，实现碳排放的科学评估与责任分配。具体包括：首先，构建园区综合能源系统模型，涵盖分布式光伏、风电、储能单元及能源转换设备，建立功率平衡模型，并根据各节点的能源来源构建碳流密度矩阵。其次，基于生命周期评价方法，对光伏、风电、储能设备等进行全生命周期碳足迹分析，量化设备生产、运输、运行、维护等阶段的碳排放。第三，通过负荷预测模型，结合历史负荷数据，预测园区能源需求及碳排放，采用回归分析、时间序列方法或机器学习算法提升预测精度。最后，结合博弈论和Shapley值算法，优化碳排放责任的分担机制，并在主动配电网协调下进行低碳优化，为园区实现高效的碳减排目标提供理论支持与实践路径。



图3- 1 研究内容

1. 研究内容一：工业园区综合能源系统模型构建与碳责任分摊

构建工业园区综合能源系统的整体架构与数学模型，包括分布式光伏、风电、储能单元及能源转换设备，建立其功率平衡模型。在用户侧构建负荷模型，划分负荷区域节点，并基于各节点的能源来源构建碳流密度矩阵，提出节点碳排放责任因子分配方法，从而计算园区整体碳排放量。

1. 研究内容二：全生命周期碳足迹分析

开展综合能源系统的全生命周期碳足迹分析，对光伏、风电、储能及能源转换设备在设备生产、运输、运行、维护、报废与回收等阶段的碳足迹进行量化。依据ISO14067和ISO14040标准，建立系统化的生命周期碳足迹分析框架，明确功能单元与系统边界，构建各类设备的碳足迹计算模型，统计全生命周期碳排放总量。结合节点碳排放责任因子，优化综合能源系统中各单元的碳责任分摊机制。

1. 研究内容三：负荷预测与低碳优化

基于园区生产活动与历史负荷数据，构建负荷预测模型，实现不同时间尺度下园区能源需求与碳排放的预测。采用回归分析、时间序列方法或机器学习算法提升预测精度。将园区综合能源系统接入主动配电网，开展低碳协同优化，引入市场交易环境下的混合博弈机制，改进多能互补情景下的Shapley值算法。以主动配电网作为主导者并承担首要碳责任，园区根据实时碳排放因子动态调整设备出力策略，实现系统碳减排目标的优化

**四、研究方法与技术路线**

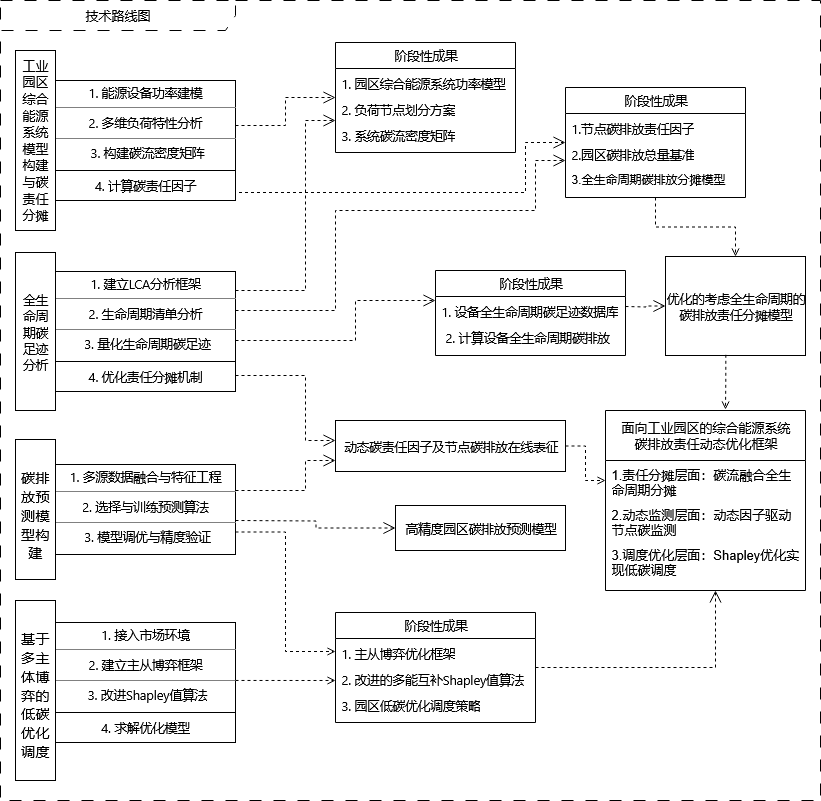
针对上述研究内容，将本研究分解为以下三个部分：1. 工业园区综合能源系统模型构建与碳责任分摊；2.全生命周期碳足迹分析；3. 碳排放预测模型构建；4. 基于多主体博弈的低碳优化调度。具体研究思路如下：

图4- 1技术路线图

**1. 工业园区综合能源系统模型构建与碳责任分摊**

本部分旨在构建园区综合能源系统的物理与数学模型，并基于碳流理论建立静态的碳排放责任分摊基准。研究将首先建立分布式光伏、风电、储能及能源转换设备的功率模型，分析电、热、冷等多维负荷特性并划分负荷节点。随后，基于园区网络拓扑和能量流分布，应用碳流理论构建碳流密度矩阵，精确追踪碳排放的时空分布。最后，计算各负荷节点的碳排放责任因子，明确其碳排放责任，并核算园区整体碳排放总量，形成园区碳排放的静态核算和基准。

**2. 全生命周期碳足迹分析**

本部分旨在将分析边界从运行阶段扩展到设备全生命周期，以更科学地评估系统真实碳影响。研究将依据ISO 14040/14067标准，建立生命周期评价框架，明确系统边界与功能单元。重点对光伏板、风机、储能电池等关键设备，收集其在材料生产、设备制造、运输、运行维护及报废回收各阶段的清单数据，量化其全生命周期碳足迹。最终，将动态的LCA碳足迹数据与静态的碳流分析结果相整合，优化园区内部的碳排放责任分摊机制。

**3. 碳排放预测模型构建**

本部分旨在构建高精度的园区级碳排放预测模型，为后续的优化调度提供前瞻性数据支撑。研究将首先基于历史数据，分析园区生产活动规律、气象条件与能源负荷/碳排放的关联关系，筛选关键特征因子。随后，采用LSTM、XGBoost等机器学习算法或ARIMA时间序列分析方法，训练并优化预测模型，实现对未来不同时间尺度下园区能源需求及间接碳排放量的精准预测。

**4. 基于多主体博弈的低碳优化调度**

本部分旨在基于预测数据，建立市场环境下的低碳优化调度模型，实现碳减排目标。研究将园区综合能源系统接入主动配电网，引入碳交易市场与电力市场的实时价格信号。在此基础上，建立以主动配电网为领导者、园区综合能源系统为跟随者的主从博弈（Stackelberg Game） 模型，模拟双方在追求各自经济与碳减排目标下的互动行为。针对园区内部，改进传统Shapley值算法，使其能公平合理地分摊多能互补系统下的成本、收益及碳责任。最终求解该博弈优化模型，生成园区内各能源设备的最佳出力策略，实现系统经济性与低碳性的协同优化。