工业园区打造零碳园区的关键技术与保障机制

宋义超　刘　隔　谢育波
机械工业第六设计研究院有限公司　河南　郑州　450000

摘　要：本文围绕工业园区零碳建设，系统梳理其理论基础与碳排放特征，明确核算边界以范围一、范围二为主，核心指标以单位能耗碳排放为刚性约束。在此基础上，从多能互补能源供给、工业过程减碳与负碳技术、数字化能碳管控、基础设施低碳化四方面构建关键技术体系，并提出组织协同、政策标准、市场投融资及人才技术风险防控四类保障机制，形成"技术—机制"双轮驱动的零碳园区建设路径，为园区低碳转型提供系统参考。

关键词：工业园区；打造零碳园区；关键技术；保障机制

引言：工业园区是工业碳排放的集中载体，其零碳转型对实现"双碳"目标具有关键意义。当前园区面临能源结构偏煤、间接排放占比高、核算计量基础薄弱等现实挑战，单一技术或末端治理难以奏效。本文立足园区碳排放特征，系统归纳零碳园区建设的关键技术路线，并配套组织管理、政策标准、市场激励与风险防控等保障机制，力求为工业园区从"减碳"迈向"零碳"提供可操作的技术框架与制度支撑。

1 工业园区零碳园区理论基础与碳排放特征

1.1 相关概念界定与理论基础

（1）零碳园区内涵、边界与核算范围。零碳园区是以实现温室气体净零排放为最终目标，通过能源结构转型、产业绿色升级与系统化治理，推动园区从“减碳”向“零碳”乃至“负碳”范式跃迁的复合型空间单元。其核算边界通常覆盖范围一（直接排放）与范围二（外购电热间接排放），部分前瞻性标准逐步将范围三（价值链间接排放）纳入考量，但现行政策实践仍以能源活动与工业过程的二氧化碳排放为核心核算对象。（2）能源系统理论与循环经济理论。能源系统理论强调源网荷储协同与多能互补，为零碳园区构建高比例可再生能源供给体系提供分析框架；循环经济理论则聚焦物质代谢网络的闭合化，指导园区通过产业共生与废物资源化实现资源投入减量化与碳排放协同削减[1]。（3）系统协同治理理论。该理论要求突破单一主体与末端治理局限，构建政府、运营方、企业及第三方机构的多主体协作机制，统筹技术、政策与市场工具，实现减污降碳在规划、建设与运营全流程的嵌入与协同。

1.2 工业园区碳排放核算方法与指标体系

（1）园区温室气体核算边界与核算方法。核算边界需明确地理与行政管辖范围，涵盖燃料燃烧、工业生产过程、购入电力热力及废弃物处理等排放源，方法上以排放因子法为主，鼓励采用实测值与物料平衡法提升数据准确性。（2）零碳园区核心评价指标构建。核心指标以“单位能耗碳排放”为刚性约束（如 ≤ 0.2吨/吨标准煤），辅以清洁能源消费占比、工业固废综合利用率等引导性指标，形成“强度控制+结构优化”的双维评价体系。（3）碳排放基线与减排潜力评估思路。基线设定需基于园区历史排放趋势与行业先进值，结合情景分析法识别能源替代、能效提升与循环链接等路径的边际减排贡献，为目标制定与路径排序提供量化依据。

1.3 工业园区碳排放来源与典型特征

（1）工业生产直接碳排放。来源于化石燃料作为原料或还原剂的过程排放（如水泥、钢铁行业），其排放与工艺原理深度绑定，受产品产量与原料特性主导，属难减排领域。（2）能源消费间接碳排放。外购电力与热力是多数园区最大排放源，占比常逾70%，其特征受区域电网因子与园区产业结构双重影响，电力低碳化进度直接决定间接排放下降速率。（3）废弃物、交通及配套设施碳排放特征。废弃物填埋与废水处理产生甲烷等非二气体，交通排放随园区物流强度与通勤规模波动，配套设施（如供热站、污水处理厂）则呈现小而散的分布特征，三者虽总量占比有限，但监测计量基础薄弱，构成核算盲区与边缘减排空间。

2 工业园区零碳园区核心关键技术

2.1 多能互补能源供给技术体系

（1）分布式可再生能源开发技术（光伏、风电）。依托园区厂房屋顶与闲置空地规模化部署分布式光伏，结合分散式风电形成就地消纳的绿色电力基底。北京金风智慧园区以4.8MW分散式风电与1.81MW分布式光伏构建负荷侧清洁供给，年碳排总量降低4260吨。技术重点在于提升自发自用比例，缓解分布式新能源并网与消纳瓶颈。（2）源网荷储一体化与微电网调控技术。通过协调控制

器打通源、网、荷、储信息壁垒，实现分布式电源出力调度、储能充放电优化与可调负荷需求响应的协同。平高电气园区示范应用表明，微电网协调控制器可支撑并网/离网无缝切换与故障快速恢复，显著提升高比例新能源接入下的系统稳定性。核心功能涵盖功率平衡、削峰填谷与柔性扩容[2]。（3）氢能、余热回收等多能联供技术。电解水制氢与燃料电池热电联供构成“电—氢—热”耦合路径，余热回收则通过热泵或热电池技术将低品位废热升级利用。陕西榆林科创新城零碳园区集成光伏、电解水制氢与燃料电池，实现“电、冷、热”零碳供能，单位能源成本较传统模式降低45%。工业余热跨企业梯级回收亦为园区能效提升的关键补充。

2.2 工业过程减碳与负碳技术

（1）工业工艺节能改造与能效提升技术。针对钢铁、水泥、化工等高耗能环节，推广高效预热器、富氧燃烧、余热余压回收及电机风机等通用设备更新。重点行业节能降碳改造攻坚行动明确要求钢铁行业实施余热回收与氢冶金探索，水泥行业推广六级预热器与替代燃料，从源头削减过程排放。（2）CCUS碳捕集利用技术、资源化固碳技术。燃煤锅炉全烟气碳捕集系统捕集率可超90%，捕集二氧化碳供给化工企业作为原料，形成“捕碳—用碳—收益”闭环。资源化固碳路线还包括利用碱性工业废渣矿化固定二氧化碳，实现“以废固碳”的协同效益。（3）园区固废、废水循环利用低碳技术。构建“废弃物—资源—能源”循环链条，污泥与有机废弃物厌氧发酵产沼气热电联产，中水回用于生产或生态补水。苏州工业园区通过污水厂光伏走廊与污泥协同厌氧发酵，实现资源回收与碳减排联动[3]。

2.3 园区数字化能碳管控技术

（1）园区能碳一体化监测平台搭建。集成物联网传感与数据中台，实时采集电、水、气、热及煤炭等多品类能源数据，建立覆盖主要排放源的数字化监管体系。甘泉堡经开区“甘泉云”平台接入32家规上企业数据，采集准确率达98%以上，支撑碳排放趋势分析与结构透视。（2）碳排放实时核算、负荷预测与智能调度。基于监测数据开展碳排放动态核算与超排预警，结合负荷预测优化储能充放与可调负荷响应策略。数字化能碳管理中心应具备能耗查询、能效对标、用能与碳排放预算管理等功能，实现从计量到决策的闭环。（3）碳足迹数字化追溯技术。依托计量模型与物联网实时采集，打通原料投入、生产工序到产品产出的全链条碳数据，替代人工填报以提升溯源性。福建计量院研发的碳足迹评价系统可实现动态长周期追踪与误差分量量化，支撑企业应对碳壁垒与绿色认证需求。

2.4 园区基础设施低碳化技术

（1）超低能耗建筑、绿色管网改造技术。新建厂房与办公设施按超低能耗标准设计，既有建筑实施节能门窗与高效照明改造。管网方面推进集中供热供气管道优化与余热输送专用管线建设，减少输配损耗。（2）园区绿色交通与低碳配套技术。完善充电基础设施并推广新能源公务车与物流车，有条件园区可引入氢能共享单车与氢能大巴。大丰港零碳产业园投放氢能单车与续航250公里的氢能大巴，配套光伏充电桩，形成多层次绿色出行体系。（3）园区生态碳汇提升技术。利用园区绿地、湿地与周边农地增强生态固碳能力，通过土壤改良与固碳作物种植提升碳汇增量。盐城环保科技城搭建“土壤碳汇”计量系统，累计减碳3000吨，为园区碳汇的可测量与可管理提供示范。

3 工业园区零碳园区建设保障机制

3.1 组织管理与协同治理机制

（1）园区管委会+入园企业多方协同管理架构。构建政府统筹引导、园区平台要素赋能、龙头企业引领、中小微企业嵌入配套的协同架构。明确园区管委会承担顶层设计、基础设施统筹与监管职责，入园企业落实主体责任，能源服务商与第三方机构提供技术支撑。按照“谁产生、谁负责”原则厘清责任界面，形成权责清晰、联动高效的管理格局。（2）目标责任分解、考核与动态监管机制。将零碳园区核心指标与引导性指标逐级分解至园区层面与企业层面，建立常态化碳工作推进与监督考核机制。依托能碳管理平台实施能耗排名公示、黄牌预警与红牌整改的闭环约束，对指标下滑园区实施动态清退，确保建设实效而非“重申报、轻运营”[4]。（3）多方主体沟通会商机制。建立政府、园区运营方、企业、金融机构及第三方服务机构之间的定期会商与信息共享渠道。针对跨企业能源梯级利用、绿电交易协调、碳配额分配等需多方协同的事项，通过联席会议与专题协商形成共识，破解单一主体难以解决的系统性问题。

3.2 政策标准与制度保障机制

（1）零碳园区地方配套政策、准入约束制度。各地在国家纲领文件框架下出台省级实施方案与地方指标细则，形成差异化落地路径。建立入园企业准入评审机制，从能耗强度、碳排放水平、工艺清洁度等维度综合评审，配套负面清单管理，从源头把控园区低碳品质。（2）园区碳排放评价、节能审查创新机制。在零碳园区范围内创新节能审查与碳排放评价模式，探索区域审批或项目备案制，替代逐个项目的传统审批流程。将碳

排放评价嵌入项目准入与退出全流程，对多能互补、多能联供项目实行“一个窗口”审批，提升行政效率[5]。（3）零碳园区标准体系与认证机制。针对地方标准指标体系不统一、互认困难等问题，推动构建国家层面统筹、地方适配的标准体系。依托《零碳园区评价技术规范》等团体标准先行先试，逐步过渡至统一的国家认证程序，实现“一套指标管全国”，解决评价结果跨区域互认难题。

3.3 市场化投融资与激励机制

（1）多元化资金投入渠道（财政、专项债、绿色信贷）。按资产属性匹配资金来源：道路管网与公共能碳平台等纯公共品由财政资金与专项债统筹；新能源、储能等收益性资产由发电企业或综合能源服务商以项目收益为基础配置绿色信贷；企业节能改造则以节能收益为还款来源适用合同能源管理融资。国家层面明确统筹现有资金渠道，鼓励政策性银行提供中长期信贷支持。（2）碳市场、绿电交易、用能权联动激励机制。支持园区以虚拟电厂或负荷聚合商身份参与电力市场，通过绿电交易与绿证认购获取环境权益收益。将碳配额履约与企业减碳绩效挂钩，对超额完成减排目标的企业给予碳资产结余激励，形成“减碳即收益”的正向循环。（3）降碳项目收益共享与风险分担机制。针对氢能、长时储能等技术与商业模式尚未成熟的项目，引入产业基金与风险共担安排，降低单一主体的投资风险。对园区公共平台类项目，探索“政府引导投入+服务收费反哺”的可持续运营模式，避免过度依赖一次性财政补贴。

3.4 人才、技术创新与风险防控机制

（1）专业人才引育、第三方技术服务机制。针对复合型碳管理人才短缺的瓶颈，推动政企校研协同，建立“企业下单、学校接单”的人才定向培养闭环。支持园区引入外部专业机构，为企业提供节能诊断、碳核算辅导、碳足迹认证等一站式技术服务。（2）低碳技术示范、成果转化机制。依托园区与企业、高校共建创新联合体，围绕CCUS、绿氢冶炼、长时储能等前沿技术开展场景化示范。将园区建设运营中的真实问题转化为研究课题，推动实验室成果在园区完成中试与首台套应用，加速技术从验证到推广的跨越。（3）建设过程技术风险、经济风险防控机制。技术风险方面，对集成度高、成熟度低的技术路线设置分阶段验证与退出预案，避免大规模投资锁定于未成熟方案。经济风险方面，建立政策资金预算长效机制，防范低碳招商优惠政策因财政波动而不可持续；对碳价波动与绿电溢价收益不确定性进行压力测试，在项目财务模型中预留风险缓冲空间。

结束语

零碳园区建设是一项覆盖能源、产业、数字与治理的系统工程，既依赖多能互补、CCUS、能碳管控等关键技术的集成突破，也离不开协同管理、标准认证、绿色金融与人才引育等机制的有力保障。技术与机制须协同推进、动态迭代，避免"重申报、轻运营"。未来应结合园区实际分类施策，强化数据核算基础与市场化激励，推动零碳园区建设由示范走向规模化推广，为工业绿色低碳转型提供坚实支撑。

参考文献

[1]陈梅,张龙江,苏良湖.国家生态工业示范园区建设进展及成效分析[J].环境保护,2021,49(20):259-261.

[2]拜冰阳,吕文魁,孙丽慧,等.推进我国园区生态文明示范的思考与建议[J].环境保护,2022,50(16):165-169.

[3]张宁,王强.零碳工业园区综合能源系统关键技术研究[J].电力工程技术,2023,42(02):112-118.

[4]李丽,刘军.基于数字孪生的园区能源管理系统设计[J].自动化与仪表,2024,39(01):245-249.

[5]鲍颖群,王一竹,石庄岩.上海市绿色低碳特色园区创建路径分析[J].上海节能,2023,41(11):1580-1584.