

建筑全生命周期碳足迹评估与减碳设计路径

郭京琦 王金凤

中国五洲工程设计集团有限公司 北京 100053

摘要：随着全球气候变化问题日益严峻，建筑行业作为高耗能、高碳排放领域，其碳减排任务迫在眉睫。本文基于建筑全生命周期视角，构建了科学的碳足迹评估体系，系统分析建筑从原材料获取、建造施工、运营维护到拆除回收各阶段的碳排放特征与影响因素。通过量化各环节碳排放量，精准识别建筑碳减排关键节点，并针对性地提出涵盖绿色建材选用、节能高效建造工艺、智能运维管理、循环利用设计等多维度的减碳设计路径，为建筑行业实现低碳转型与可持续发展提供理论依据与实践指导，助力达成“双碳”目标。

关键词：建筑；全生命周期；碳足迹评估；减碳设计

引言：在全球“碳中和”“碳达峰”目标的驱动下，建筑行业作为能源消耗与碳排放的重要领域，面临着前所未有的挑战与机遇。据统计，建筑全过程的能耗与碳排放约占全球总量的30%-40%，其不仅包括建筑运营阶段的能源消耗，还涵盖原材料生产、运输、建造施工以及拆除后的废弃物处理等环节产生的隐含碳排放。传统的建筑设计与运营模式往往仅关注运营阶段的节能减碳，忽视了建筑全生命周期的碳排放问题，导致碳减排效果存在局限性。因此，开展建筑全生命周期碳足迹评估，系统、全面地掌握建筑各阶段碳排放情况，进而探索科学合理的减碳设计路径，对于推动建筑行业低碳发展、应对气候变化具有重要的现实意义。

1 全生命周期视角对建筑碳管理的必要性

建筑行业的碳排放贯穿从原材料开采到最终拆除回收的全过程，传统碳管理仅聚焦运营阶段，导致隐含碳排放被长期忽视，难以实现深度减排。以混凝土生产为例，其烧制过程产生的二氧化碳排放，以及运输、施工环节的能源消耗，在建筑全生命周期中占比可观。全生命周期视角能够系统性梳理各阶段碳排放链条，精准定位高碳环节，例如发现部分建筑因材料过度加工、建造工艺粗放，在前期阶段就产生大量碳排放。通过统筹规划各阶段减碳策略，从源头选用低碳材料、优化建造流程、创新运维模式，能够打破传统管理的局限性，有效降低建筑整体碳排放量，为实现建筑行业“双碳”目标提供科学路径。

2 建筑全生命周期碳足迹评估理论框架

2.1 评估方法与标准体系

第一作者简介：郭京琦（1994年—），女，汉族，山东省宁阳县人，大学本科，工程师。

第二作者简介：王金凤（1987年—），女，汉族，陕西省榆林市人，大学本科，工程师。

国际主流评估标准为建筑碳足迹核算提供规范，ISO14040环境管理生命周期评价框架，系统性指导评估流程，IPCC指南则明确温室气体量化方法。实际操作中，常采用过程分析法、投入产出法构建动态评估模型。过程分析法通过追踪各环节物质流与能量流核算碳排放；投入产出法从经济系统层面分析产业关联碳排放。但数据获取存在难点，如部分材料生产企业缺乏详细能耗数据，老旧建筑运营阶段能源消耗记录缺失，不同地区能源结构差异大，影响评估精度与通用性，需建立统一数据采集平台与动态更新机制。

2.2 关键影响因素分析

材料选择、能源结构与设计策略是影响建筑全生命周期碳排放的核心要素。材料方面，选用再生骨料混凝土、竹木等低碳材料可显著降低生产阶段碳排放；能源结构中，建筑采用可再生能源替代传统火电，能大幅削减运营阶段碳排放；设计策略上，优化建筑体型系数、增强自然通风采光，可减少后期设备运行能耗。经研究，材料生产阶段碳排放占比约20%-30%，运营阶段占比达50%-70%，而合理设计策略可使建筑全生命周期碳排放降低15%-30%，凸显三者协同优化对建筑减碳的重要意义。

3 建筑全生命周期碳排放特征解析

3.1 各阶段碳排放贡献率

建筑全生命周期中，不同阶段碳排放贡献率差异显著。隐含碳在材料与建造阶段占比突出，约占全生命周期碳排放总量的20%-35%，其中水泥、钢材等高耗能材料生产过程产生大量碳排放，建造阶段施工机械能耗与临时设施搭建也不容忽视。运营阶段虽单次碳排放量相对较低，但持续时间长，碳排放占比达50%-70%，成为建筑碳排放的“主力军”。拆除与回收阶段则具备碳补

偿潜力，合理的废弃物回收再利用，可通过减少新材料开采与加工，抵消部分拆除作业产生的碳排放，如再生骨料的使用能降低建材生产阶段10%-15%的碳排放量，展现出循环经济在建筑减碳中的重要价值。

3.2 现有评估模型的局限性

现有建筑碳足迹评估模型在实际应用中存在诸多局限。数据精度方面，由于部分企业能耗数据不完整、监测手段落后，导致输入参数存在误差，影响评估结果准确性。区域适配性不足，不同地区能源结构、建材生产工艺差异大，现有模型难以精准反映区域特征，如在可再生能源占比高的地区，仍沿用传统评估标准会高估碳排放。多尺度协同问题突出，从单体建筑到城市建筑群，评估模型在数据整合、尺度转换上缺乏有效衔接，难以支撑宏观政策制定与微观项目设计的协同，亟需构建更完善、灵活的评估体系。

4 建筑减碳设计路径的逻辑原则

4.1 减碳目标与原则

在碳中和目标驱动下，需制定分级减碳策略。短期聚焦运营阶段能耗优化，中期推进材料与建造阶段低碳化转型，长期实现全生命周期碳中和。同时遵循“被动式优先、主动式优化”的设计原则，优先通过优化建筑朝向、增强围护结构保温隔热性能等被动式设计手段，降低建筑对主动设备的依赖，减少基础能耗；在此基础上，运用高效节能设备、智能控制系统等主动式技术进一步提升能效。这种双管齐下的策略，既能从源头减少碳排放，又能通过技术创新实现深度减排，确保建筑减碳目标分阶段、系统性达成。

4.2 多维度减碳路径

建筑减碳需从技术、管理、政策多维度协同推进。技术维度上，推广低碳材料如新型保温材料、可降解建材，应用太阳能、地热能等可再生能源，借助智能运维系统实时监测与调控能耗。管理维度中，实施全生命周期协同设计，打破各阶段信息壁垒，优化资源配置；引入碳交易机制，激励企业主动减排。政策维度方面，通过征收碳税增加高碳行为成本，利用绿色金融为低碳项目提供资金支持，完善绿色建筑标准体系，引导行业向低碳化、绿色化发展，形成多维度合力，推动建筑行业低碳转型。

4.3 减碳路径的优先级排序

基于成本效益分析构建减碳路径选择模型，以确定不同措施的实施优先级。通过量化各减碳路径的初期投入、长期运营成本及碳减排量，计算成本效益比，优先选择成本低、见效快的路径，如优化建筑设计、加强运

维管理等，此类措施可在短期内以较低成本实现显著减排。对于成本较高但减排潜力大的技术革新，如大规模应用可再生能源系统，则需结合企业承受能力与政策支持，分阶段推进。同时考虑区域经济发展水平、能源结构等差异，动态调整路径优先级，确保减碳策略兼具经济性与可行性。

5 基于碳足迹评估的减碳设计策略

5.1 材料与结构优化

(1) 低碳材料选型与循环利用设计

低碳材料选型与循环利用设计是建筑减碳的重要基础。在材料选型上，再生混凝土利用工业废渣、建筑垃圾等作为骨料，相比传统混凝土可减少约30%的水泥用量，显著降低生产阶段碳排放；秸秆纤维板以农作物秸秆为原料，生产能耗低且具备良好的保温隔音性能。循环利用设计则强调建筑构件的可拆卸性与可回收性，例如采用螺栓连接的钢结构节点，便于建筑拆除时构件的完整拆卸和二次利用；模块化墙板设计可在建筑功能改变时重复使用，减少材料浪费。通过从源头控制碳排放和提升资源循环利用率，有效降低建筑全生命周期的碳足迹。

(2) 轻量化结构与模块化建造技术

轻量化结构与模块化建造技术从结构和建造方式上助力建筑减碳。轻量化结构采用钢结构、铝合金结构等轻质高强度材料，相比传统混凝土结构，可减少材料运输重量，降低运输过程中的能耗与碳排放；同时，较轻的结构自重使基础工程规模减小，进一步节约材料与施工能源。模块化建造技术将建筑构件在工厂预制完成后运输至现场组装，标准化生产减少了现场施工的材料损耗与能源浪费，缩短施工周期达30%-50%，大幅降低施工阶段碳排放。此外，模块化建筑便于后期局部改造和维护，延长建筑使用寿命，减少重建带来的碳排放，实现建筑全生命周期的低碳目标。

5.2 能源系统集成

(1) 零碳能源供应

零碳能源供应是建筑能源减碳的核心路径。光伏系统通过太阳能电池板将光能转化为电能，在光照充足地区，一座安装500平方米光伏板的建筑，年发电量可达5万度以上，基本满足中小型商业建筑的部分用电需求，有效替代火电，减少碳排放。地源热泵系统利用地下浅层地热资源，冬季从地下取热供暖，夏季向地下排热制冷，能效比可达传统空调系统的3-4倍，且不直接消耗化石能源。此外，风力发电、生物质能等零碳能源在建筑中的应用也逐渐增多，多种零碳能源的协同供应，可构

建稳定、清洁的建筑能源体系，从源头实现建筑用能的低碳化甚至零碳化。

(2) 建筑能源柔性调控与需求响应

建筑能源柔性调控与需求响应技术通过智能化手段优化能源使用。借助智能电表、传感器等设备实时监测建筑内各区域的能源消耗数据，结合天气、时间等因素，利用算法模型预测能源需求。当电网处于用电高峰或电价较高时，系统自动调节非关键设备（如公共区域照明、部分空调机组）的运行状态，降低用电负荷；在电价低谷时段，启动储能设备进行充电，储存电能用于高峰时段使用。通过这种动态调节，不仅能降低建筑整体能耗，还可减少对传统能源的依赖，参与电网需求响应，缓解电力供应压力，实现建筑能源消耗与碳排放的精准控制。

5.3 空间与形态设计

(1) 自然采光与通风的被动式设计

自然采光与通风的被动式设计以低成本方式实现建筑节能减碳。在自然采光设计中，根据建筑功能和空间布局，合理确定开窗面积和位置，采用导光管、反光板等装置将自然光引入室内深处，减少白天人工照明使用时间。研究表明，良好的自然采光设计可使建筑照明能耗降低30%-50%。自然通风设计则通过优化建筑平面形状、设置通风口和中庭等方式，利用风压和热压原理促进空气流通。例如，穿堂风设计可有效降低夏季室内温度，减少空调开启频率；夜间通风策略利用低温空气置换室内热空气，降低次日空调负荷。这些被动式设计充分利用自然条件，减少对机械设备的依赖，降低建筑运行阶段的碳排放。

(2) 建筑布局与微气候调节

建筑布局与微气候调节通过改善建筑外部环境实现节能减碳。在建筑群体布局上，根据当地主导风向，合理规划建筑间距和朝向，形成通风廊道，增强自然通风效果，减少机械通风能耗。例如，在炎热地区，行列式布局有利于夏季通风散热；在寒冷地区，围合式布局可阻挡冬季寒风，减少建筑热损失。同时，通过种植高大乔木、设置水体景观等方式调节建筑周边微气候，树木的遮荫作用可降低夏季建筑表面温度，水体蒸发吸热可改善局部热环境，减少空调使用。此外，合理设计建筑屋顶绿化，既能隔热保温，又能吸收二氧化碳，降低建筑整体碳排放，实现建筑与自然环境的和谐共生。

5.4 数字化技术赋能

(1) BIM+LCA协同设计平台

BIM+LCA协同设计平台为建筑减碳提供了强大的技术支撑。BIM技术可整合建筑从设计、施工到运营的全生命周期信息，构建三维可视化模型，实现各专业协同设计。将LCA技术融入其中，可在设计阶段对建筑材料选择、结构形式、设备选型等方案进行碳排放量模拟分析。例如，通过平台对比不同墙体材料（如加气混凝土砌块与传统黏土砖）在全生命周期的碳排放量，直观呈现方案优劣，辅助设计师选择低碳设计方案。同时，平台还能实时更新数据，随着设计的推进动态评估碳排放，及时调整优化设计，避免后期因设计不合理导致的高碳排放，从源头保障建筑的低碳性能。

(2) 人工智能在碳足迹预测中的应用

人工智能凭借强大的数据处理和分析能力，在建筑碳足迹预测中发挥重要作用。通过收集建筑历史能耗数据、气象数据、设备运行参数等海量信息，利用机器学习算法构建碳足迹预测模型。该模型能够准确预测建筑在不同设计方案、运营策略下各阶段的碳排放趋势，如预测不同季节空调系统的能耗变化及对应的碳排放。基于预测结果，可为建筑管理者提供优化建议，如调整设备运行时间、优化能源分配方案等，实现精准减碳。此外，人工智能还可结合政策变化、技术革新等外部因素，动态更新预测模型，使碳足迹预测更贴合实际情况，为建筑全生命周期的碳管理提供科学、可靠的决策依据。

结语

建筑行业作为碳排放的重要领域，实现全生命周期的低碳转型迫在眉睫。本文围绕建筑全生命周期碳足迹评估与减碳设计路径展开研究，通过构建系统的评估理论框架，精准识别各阶段碳排放特征，针对性提出多维度减碳策略。从材料与结构优化到能源系统集成，从空间形态设计到数字化技术赋能，各环节紧密配合，形成了一套完整的减碳体系。这些措施不仅能够显著降低建筑全生命周期的碳排放量，也为推动建筑行业绿色发展提供了可行方案。

参考文献

- [1]张伟,李明.基于LCA的建筑碳排放核算模型与减排策略研究[J].建筑科学,2022,38(5):12-19.
- [2]陈静,王磊.碳中和目标下建筑低碳设计技术体系构建[J].城市规划学刊,2023(2):45-52.
- [3]赵阳,周志强.数字化技术驱动的建筑碳足迹动态优化方法[J].土木工程学报,2023,56(8):1-10.