

DOI: 10.7672/sgjs2025230061

# 城市更新背景下既有建筑零碳改造关键技术\*

苑立彬

(北京住总集团有限责任公司,北京 100120)

[摘要] 结合零碳示范工程的要求,确立“双零”城市更新改造项目的边界条件、技术措施和实施方向。通过诊断既有建筑结构的安全性、运行节能性、可再生能源性,评估项目节能减碳的潜力,以确定适合本项目的开源节流技术策略。根据能耗模拟计算结果,逐步优化并确定技术参数,通过研判和评估项目自身特点,以“双零”目标为最终导向,匹配适宜的零碳技术方案,采用优选高性能围护结构体系、增加地面保温、使用高性能玻璃幕墙、封闭南侧外廊窗等方案,保证项目最终实现运行零碳、示范性强、经济成本可控等目标。同时根据现场条件,对常规光储直柔方案进行针对性设计、优化,保证了自发自用、余电上网,并实现与市政电网的柔性互动,完成零碳改造的目标。

[关键词] 城市更新;改造;零碳;能耗

[中图分类号] TU984

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)23-0061-06

## Key Technologies of Zero-carbon Renovation for Existing Buildings Under Background of Urban Renewal

YUAN Libin

(Beijing Uni-Construction Group Co., Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** Combined with the requirements of the zero-carbon demonstration project, the boundary conditions, technical measures and implementation directions for “double zero” urban renewal and renovation project are established. By diagnosing the safety of the existing building structure, the energy efficiency of operation and the potential for renewable energy, the potential for energy conservation and carbon reduction is evaluated to determine the appropriate open-source and cost saving technical strategies. According to the results of energy consumption simulation, the technical parameters are gradually optimized and determined. By analyzing and evaluating the characteristics, with the “double zero” goal as the ultimate orientation, the appropriate zero-carbon technical solutions are matched. High-performance envelope systems, ground insulation, high-performance glass curtain walls, and the enclosure of the south-facing corridors are adopted, to ensure that the project ultimately achieves the goals of zero-carbon operation, strong demonstration effect, and controllable economic costs. At the same time, based on the on-site conditions, the conventional photovoltaic storage direct flexible scheme is designed and optimized in a targeted manner to ensure the principle of self-generation and self-consumption, and the surplus electricity is fed into the grid, and the flexible interaction with the municipal power grid is achieved, to complete the goal of zero-carbon renovation.

**Keywords:** urban renewal; renovation; zero-carbon; energy consumption

### 0 引言

为适应我国建筑业节能、减碳的发展趋势,推进零碳建筑发展,积极响应住房和城乡建设部对零

碳建筑试点示范项目的推广,对光熙门北里29号楼示范项目进行既有公共建筑的零碳改造研究,通过前期调研分析,对其开展零碳建筑示范项目建设,以引领行业发展。

既有建筑零碳改造项目应满足建筑安全性、抗灾性、耐久性等基本要求,保证建筑使用人员和财产安全。故改造前,对建筑结构、抗震性能等进行

\* 国家重点研发计划:住宅工程质量提升标准-检测-认证技术体系(2021YFF0602002)

[作者简介] 苑立彬,正高级工程师,E-mail:yuanlibin\_ki@163.com

[收稿日期] 2025-05-14

第三方诊断和评估,以确保满足结构要求,并对部分调整使用功能的房间实施局部加固措施。

为明确该改造项目的节能减碳潜力,改造前通过资料查阅、现场查勘和测试等方式对围护结构、能源应用方式进行节能诊断,并根据节能诊断结果评估节能减碳潜力。此外为确定项目的零碳方案,对周边可再生能源利用的可行性进行研判,以确定可再生能源利用目标。

根据项目改造前的结构安全诊断结果、节能减碳潜力评估结果和可再生能源利用可行性,综合考虑技术难度与成本,最终确定建筑改造目标,并制定初步的改造方案,通过逐步优化零碳建筑方案,使其满足“双零”目标。

### 1 零碳建筑改造技术

#### 1.1 保温系统

该项目围护结构保温做法如表 1 所示。

表 1 围护结构保温做法

Table 1 Insulation methods for envelope structures

类型	保温做法	传热系数设计值 W/(m <sup>2</sup> ·K)	GB/T 51350—2019 《近零能耗建筑技术标准》传热系数限值 W/(m <sup>2</sup> ·K)	
			限值 W/(m <sup>2</sup> ·K)	限值 W/(m <sup>2</sup> ·K)
屋面	300mm 厚挤塑聚苯板	0.107	0.10~0.30	
外墙	300mm 厚石墨聚苯板	0.128	0.10~0.30	
东向外墙	60mm 厚真空绝热板	0.112	0.10~0.30	
地面	300mm 厚挤塑聚苯板	0.107	0.25~0.40	

#### 1.2 无热桥处理

由于既有建筑结构无法更改,热桥节点无法完全按照设计图纸进行处理,往往出现大量热桥。故在设计图纸基础上,根据现场实际情况优化关键热桥,以保证围护结构无明显热桥产生,热成像检测围护结构整体热工均匀。无热桥处理包括挑檐、檐沟、外墙、内墙、外窗、玻璃幕墙、屋面天窗基础、屋面光伏基础。外门外侧墙采用塑料断热桥、光伏幕墙牛腿等金属构件,穿过外墙保温与屋面光导管部位,穿外墙及屋面光导管在管道与墙体和屋面交界处等细部节点也需进行无热桥处理。挑檐无热桥节点如图 1 所示。外墙基础无热桥节点如图 2 所示,穿墙线盒断热桥做法如图 3 所示,光伏幕墙牛腿无热桥做法如图 4 所示,光导管做法如图 5 所示,风管穿外墙无热桥做法如图 6 所示。

#### 1.3 气密性处理

将外门窗、穿外墙与穿屋面管道、屋面板、砌筑外墙等气密性薄弱部位,分别采用防水隔汽膜、防水透汽膜、气密性抹灰、气密性部品部件等材料进

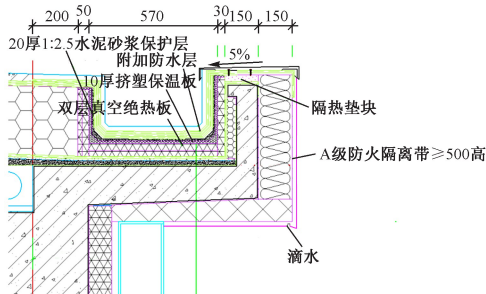


图 1 挑檐无热桥节点

Fig. 1 Construction joints of the overhanging eave without thermal bridge

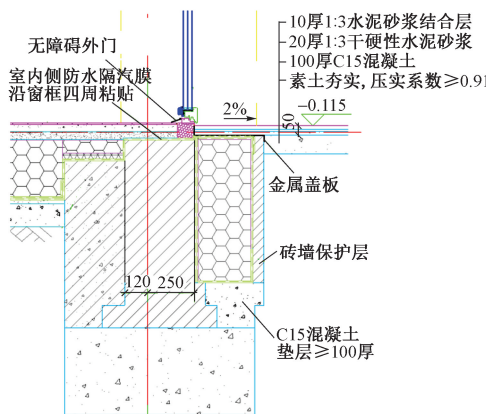


图 2 外墙基础无热桥节点

Fig. 2 Construction joints of exterior wall foundation without thermal bridge

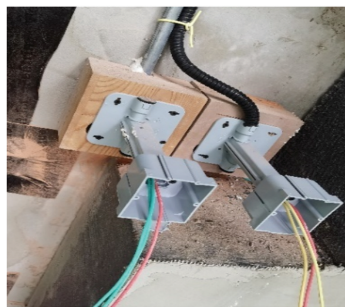


图 3 穿墙线盒断热桥做法

Fig. 3 Construction method of breaking thermal bridges through wall-penetrating junction boxes

行处理,保证建筑整体气密性在满足±50Pa 压差下的换气次数<1.0h<sup>-1</sup>。该项目为砖混结构,外墙红砖存在开裂、漏气等现象,砖墙与梁间存在缝隙。在现浇混凝土圈梁、柱与砖墙交界处的室内侧粘贴防水隔汽膜,粘贴长度超出交界处 50mm,粘贴宽度均为 50mm。完成室内侧气密膜粘贴后,采用水泥砂浆对砌筑外墙整体进行压网抹灰,将抹灰层覆盖防水隔汽膜和填充墙。

采用预埋套管方式处理电线管,套管与外墙内



图4 光伏幕墙牛腿无热桥做法

Fig. 4 Construction method of photovoltaic curtain wall corbels without thermal bridges



图5 光导管做法

Fig. 5 Construction method of optical guide tubes



图6 风管穿外墙无热桥做法

Fig. 6 Construction method of passing air ducts through exterior walls without thermal bridges

侧粘贴防水隔汽膜。安装完线缆后,采用防火泥封堵严实线孔。

#### 1.4 空调冷热源

根据专家意见,最终取消市政热力供暖,采用多联式空调(热泵)机组作为冷热源。因为该项目1,2层使用时间、使用功能不尽相同,因此该多联机室外机选择2套系统,分别控制首层和2层,若首层不使用可关闭首层空调系统,降低能耗。同时,考虑室外机可能对周边居民产生影响,故将室外机置于钢梯平台下,并在靠近居民一侧安装吸声板,以保证室外机噪声满足要求。为避免降噪措施影响室外机的散热效率,对室外机进行气流模拟,以保证室外机高效运行,同时避免室外机气流组织不良导致的频繁化霜问题。室外机气流组织模拟如图7所示。

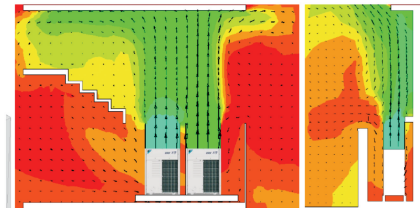


图7 室外机气流组织模拟

Fig. 7 Simulation of outdoor unit airflow organization

#### 1.5 高效热回收新风系统

本项目采用高效热回收新风系统。为进一步降低新风系统能耗,保证室内新风送风温度,选择全热回收效率较高的CAQ600ST新风机组,新风量为 $600\text{m}^3/\text{h}$ 、显热回收效率为80%、湿回收效率为68%、单位风量耗功率为 $0.22\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。新风量基本按照 $30\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{p})$ 的标准进行设置,以保证室内空气质量。因为首层展厅人员较多,采用3台 $600\text{m}^3/\text{h}$ 的壁挂式热回收新风机组。室内风口根据其吊顶形式选用侧送风形式,侧送风口贴近顶棚布置,由于附壁效应作用,促使空气沿壁面流动,形成自由射流,利于室内空气整体循环。

北京冬季室内湿度通常较低,故在新送风主管上额外配置湿膜加湿段,实现室内温度、湿度可控,保障湿度适宜,提高舒适度。额外配置PM2.5过滤箱,过滤受污染空气的效率高达99%。

#### 1.6 电气

根据住房和城乡建设部零碳建筑示范工程要求和本项目特点,结合设计方案,最终落地光储直柔技术,其中“光”指分布式光伏,为建筑配电系统提供用电来源;“储”指直流充电桩,通过电车实现储能,同时预留储能接口,方便增加储能电池;“直”指建筑配电网形式由传统交流配电网改为低压直流配电网;“柔”指建筑用电设备或建筑本体的可调节能力,使建筑用电需求从刚性转为柔性。根据模拟测算结果可知,光伏系统最优配置为40,10kW的光伏并网逆变器,共4台,每串光伏组件串接对应并网逆变器,经逆变后交流输出接入并网柜。

该项目预留的储能接口,使用直流充电桩替代。通过电车的充放电功能实现电车与建筑的直流交互,从而实现建筑柔性调节。在公共区采用直流照明系统实现局部直流供电,使光伏发电产生的750V直流电通过变压器转为48V直流电,为直流照明设备供电。

最大限度利用建筑立面,在主楼和裙房屋面安装太阳能光伏板,在主楼西立面安装单晶硅太阳能光伏幕墙,在主楼南向屋檐安装铜钢镭晒光伏瓦,

总装机容量约 91.5kW,其中主楼屋面光伏板约 71.7kW、裙房屋面约 17.3kW、光伏幕墙约 7kW、光伏瓦约 1.5kW。通过光伏系统为建筑主体供电,实现即发即用、余电上网。自光伏系统正式投入使用后,1年内共发电 66 934.06kW·h。

## 2 运行数据分析与调试

### 2.1 项目运行数据

1)改造后,光熙门 29 号楼换气次数 N50 为  $0.27\text{h}^{-1}$ ,符合《近零能耗建筑技术标准》中,寒冷地区近零能耗公共建筑气密性  $N50 < 1.0\text{h}^{-1}$  的要求。

2)施工后的围护结构传热系数与设计值差值 < 10%,满足设计要求,施工效果良好,且围护结构无明显热工缺陷。

3)经检测,本项目冬季、夏季室内舒适度均达到 GB/T 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》中 I 级热舒适度的要求。

4)本项目实测年度供暖、空调和照明能耗为 28 696.41kW·h/a,相当于  $22.43\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,相比按照 GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》模拟计算得到参照建筑  $47.9\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$  的基础上降低 53.17%,优于设计阶段的模拟本体节能率 51.94%,项目运行阶段的节能效果显著。

5)由 2022 年 8 月 17 日—2023 年 8 月 16 日的监测运行数据可知,可再生能源光伏产能为 66 934.06kW·h,大于建筑实测全年用能 47 150.57kW·h,满足零能耗建筑要求。

6)本项目光伏发电量相当于每年共计可减少碳排放量  $34.21\text{kgCO}_2/\text{m}^2$ ,建筑全年用能产生的碳排放量为  $24.1\text{kgCO}_2/\text{m}^2$ ,在抵消该建筑用能碳排后,还额外减少碳排放量  $10.11\text{kgCO}_2/\text{m}^2$ 。

### 2.2 能耗及碳排放对比

改造项目运行满 1 年的能耗及碳排放数据对比如表 2 所示。改造前的空调供暖包含除热力外的其他能耗,能耗计算中的新风能耗合并于空调供暖

中,因生活热水能耗计入插座计量,因此能耗计算结果中合并生活热水与插座。

由表 2 可知,不论是能耗计算还是实际运行结果,建筑全年碳排放均达到零碳建筑要求,相比建筑改造前除减少碳排放约 101.31tCO<sub>2</sub> 外,还额外减少约 11.95tCO<sub>2</sub>。实际运行过程中,建筑能耗比能耗模拟值降低约  $7.19\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,光伏发电量增加约  $7.36\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,与能耗模拟值相比,综合电耗降低  $14.55\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。

对比分析建筑能耗计算结果与实际能耗分项结果可知,空调供暖+新风的计算能耗为  $10.51\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,实际能耗为  $16.44\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ;照明计算能耗为  $12.51\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,实际能耗为  $7.84\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ;插座计算能耗为  $22.96\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,实际能耗为  $15.62\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。

1)由能耗计算与实际用能对比可知,实际用能与能耗计算结果有一定差别,实际总用能小于能耗计算结果。

2)根据分项结果可知,实际照明、插座与采暖供冷能耗均有差别。其中,实际运行中的空调供暖能耗高于能耗模拟值约  $6\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。因为能耗计算中,多联机设备的能效数值较理想,而实际运行未将冬季低温导致的系统能效折减考虑在内。同时,由于人员加班等原因导致运行时间延长,也是供暖空调能耗大于模拟数值的原因之一。

3)实际运行的照明和插座能耗均小于能耗计算值,插座能耗相差约  $7\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,照明能耗相差约  $5\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ,主要因为设备实际使用工况与模拟设计情况不同。能耗计算中的设备效率及电器使用率设定工况较固定单一,而实际使用过程中,照明自动控制、定时插座、下班关闭电源等均优化建筑照明与插座用能。由此可知,用户自主节能在零碳建筑运行中扮演重要角色。

表 2 不同改造阶段建筑能耗及碳排放数据对比

Table 2 Comparison of building energy consumption and carbon emission data at different renovation stages

项目	改造前	计算能耗	改造后
空调供暖/ $[\text{kW}\cdot\text{h}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}]$	137.94(仅供暖)	10.51	14.49
照明/ $[\text{kW}\cdot\text{h}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}]$	—	12.51	7.84
新风/ $[\text{kW}\cdot\text{h}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}]$	51.52	—	1.95
插座、热水/ $[\text{kW}\cdot\text{h}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}]$	—	22.96	15.62
能耗合计(电耗)/ $[\text{kW}\cdot\text{h}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}]$	116.25	47.09	39.90
光伏发电量/ $[\text{kW}\cdot\text{h}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}]$	—	49.29	56.65
综合能耗(电耗)/ $[\text{kW}\cdot\text{h}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}]$	116.25	-2.20	-16.75
建筑整体综合碳排放/tCO <sub>2</sub>	101.31	-1.57	-11.95
节碳率/%	—	101.49	112.00

## 2.3 建筑运行与调适

为验证改造方案的可行性,根据建筑改造前的全年能耗与碳排放值进行相应能耗及碳排放计算,该项目前3年年平均用电量 $60\ 878\text{kW}\cdot\text{h/a}$ 、供暖能耗为 $162\ 990\text{kW}\cdot\text{h/a}$ ,可知建筑改造前的全年碳排放为 $101.31\text{tCO}_2$ 。

项目正式运行后,由2022年供暖季的室内温度、湿度(见图8)可知,2022年11月—2023年3月,建筑室内平均温度 $>20^\circ\text{C}$ 且维持稳定,其中12月份时因建筑内只有必要的值守人员,主要采取分房间的间歇式供暖,因此12月份温度有较明显波动与下降,同时室内相对湿度 $>30\%$ ,满足《近零能耗建筑技术标准》中对冬季室内湿度的要求。

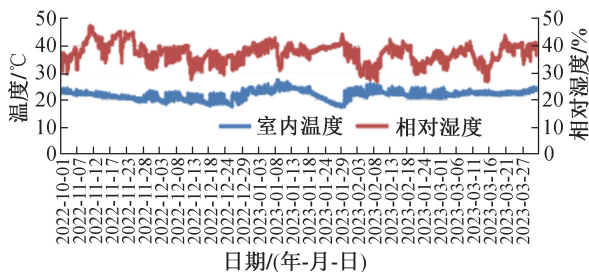


图8 供暖季室内温度与湿度

Fig. 8 Indoor temperature and humidity during the heating season

为实现建筑零碳运营,使用期间实时监控建筑自身的温降、温升情况,运行1年内,其空调、照明、新风及插座等设备全部用电量为 $47\ 150.57\text{kW}\cdot\text{h}$ 、光伏发电量为 $66\ 934.06\text{kW}\cdot\text{h}$ ,全年光伏发电量大于建筑用电量,达到全年运行零碳指标。根据不同运行工况下的室内温度以及耗电情况进行深度分析研究,以逐步调整和确定建筑运行模式,最终实现建筑全年零碳运营目标,并将最终的零碳建筑运行策略整理成《零碳建筑运维手册》。

## 3 零碳建筑改造成本增量与经济效益分析

### 3.1 改造成本增量分析

1) 本项目用于零碳改造的成本合计 $5\ 145.39$ 元/ $\text{m}^2$ ,包括既有建筑屋面拆除、外墙基层处理等费用。根据GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》,对比该零碳建筑所用技术产生的增量成本可知,其节能成本增量为 $3\ 146.48$ 元/ $\text{m}^2$ 。

2) 该项目施工成本增量主要为能耗管理系统研发、玻璃幕墙与多种光伏产品的使用。因为该结构无法承载玻璃幕墙,玻璃幕墙需独立承重,导致幕墙横竖龙骨尺寸远超常规设计,导致玻璃幕墙成本远高于常规建筑。

3) 本项目独立研发能源管理系统,用于监测、

分析零碳建筑运行数据,同时,增加智能化控制系统,导致该能源管理系统架构复杂,同时研发软件的性能成本较高,导致能源管理系统成本极高。但本系统研发后,后期可标准化推广。

4) 该项目为示范工程,采用光伏幕墙和光伏瓦展示该光伏产品多样性,由于光伏幕墙为定制产品,导致成本较高,但光伏发电量较少,推广性不高。

综合优化项目成本后可知,该零碳建筑最终成本增量为 $1\ 130.14$ 元/ $\text{m}^2$ 。

### 3.2 经济效益分析

光照门北里29号楼实测的年度供暖、空调和照明能耗为 $28\ 696.41\text{kW}\cdot\text{h/a}$ ,相当于 $22.43\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。相对于《公共建筑节能设计标准》使用软件模拟计算得到的参照建筑 $47.9\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 基础上降低 $53.17\%$ ,并优于设计阶段的模拟计算本体节能率 $51.94\%$ 。同时取消了市政热力供暖,免去市政供暖 $45$ 元/ $(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 费用,总计每年节约市政热力供暖费用 $53\ 145$ 元。

通过查询该楼2017年的用电账单,结合光伏系统1年累计发电量与市政供暖费用可知,该零碳建筑每年节约 $110\ 951.73$ 元。

对标优化后的施工成本,静态回收期约 $32.4$ 年。若改造为近零碳建筑,静态回收期将进一步缩短。

## 4 推广应用前景

作为北京首个零碳建筑城市更新改造工程,对建筑改造方案设计、施工技术、施工管理、经济效益、社会效益、环境效益等方面进行研究、探索、尝试,并取得丰富的经验,提炼出零碳建筑的设计、施工技术要点,并根据项目全过程经验论证零碳建筑技术的可行性、可靠性。同时,本项目总结出的工程经验、研究结果,已成功应用于博鳌近零碳示范区改造项目、二七剧场路3号西楼项目、榆树庄构件厂零能耗办公楼等项目中。

## 5 结语

我国既有居住建筑改造经历了抗震鉴定与结构加固、建筑抗震节能改造、老旧小区改造及功能提升发展阶段,在节能改造方面,我国首先从北方采暖地区起步,逐步向南方推进。我国既有居住建筑在改造内容、难度上相比国外有明显差异。在我国城市更新行动与“碳达峰、碳中和”目标的新背景下,既有居住建筑单项改造已不适应我国发展需求,以节能绿色化、功能化改造为重点的综合改造成为必然的发展趋势。

### 参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change [M].

- Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [ 2 ] 曾韩军,严晓东. 基于 LCA 预制管片物化阶段的碳足迹测算与应用研究 [J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(17): 89-93.  
ZENG H J, YAN X D. Research on carbon footprint measurement and application based on the physical and chemical stage of LCA prefabricated segments [J]. Construction technology, 2025, 54(17): 89-93.
- [ 3 ] 杨子艺,胡姗,徐天昊,等. 面向碳中和的各国建筑运行能耗与碳排放对比研究方法及应用 [J]. 气候变化研究进展, 2023,19(6):749-760.  
YANG Z Y, HU S, XU T H, et al. Method and application of global building operation energy use and carbon emissions comparison in the context of carbon neutrality [J]. Climate change research, 2023,19(6):749-760.
- [ 4 ] 周杰. 碳中和目标下零碳建筑标准体系研究 [J]. 中国质量与标准导报, 2021(3):21-23.  
ZHOU J. Research on zero carbon building standard system under the carbon neutrality target [J]. China quality and standards review, 2021(3):21-23.
- [ 5 ] 董恒瑞,刘军,秦砚瑶,等. 从绿色建筑、被动式建筑迈向零碳建筑的思考 [J]. 重庆建筑, 2021,20(10):19-22.  
DONG H R, LIU J, QIN Y Y, et al. Thoughts on steps from green building and passive building to zero-carbon buildings [J]. Chongqing architecture, 2021,20(10):19-22.
- [ 6 ] 李预江. 欧盟建筑物节能管理法规解读及节能管理行为分析 [J]. 上海节能, 2023(12):1832-1838.  
LI Y J. Interpretation of EU building energy conservation management regulations and analysis on energy efficiency management behavior [J]. Shanghai energy saving, 2023(12): 1832-1838.
- [ 7 ] 张强. 建筑“光储直柔”配电系统设计要点浅析 [J]. 现代建筑电气, 2023,14(12):17-24,28.  
ZHANG Q. Analysis of the key points in the design of the “photovoltaics, energy storage, direct current and flexibility” distribution system in buildings [J]. Modern architecture electric, 2023,14(12):17-24,28.
- [ 8 ] 卢昱杰,王娜,朱彤,等. “双碳”背景下我国绿色建造技术发展策略研究 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(17): 77-84,106.  
LU Y J, WANG N, ZHU T, et al. Research on development strategy of green construction technology in China under the background of “dual carbon” [J]. Construction technology, 2024, 53(17): 77-84,106.
- [ 9 ] 高唯芷,孙菁芬,褚英男,等. 拱辰零碳社区中心——低碳建筑原型与围护结构的系统性探索 [J]. 建筑技艺(中英文), 2024,30(8):54-64.  
GAO W Z, SUN J F, CHU Y N, et al. Gongchen ZEB Community Center: a systematic investigation of the low-carbon building prototype and envelope [J]. Architecture technique, 2024, 30(8):54-64.
- [ 10 ] 司琪,徐非凡,马瑞江,等. 国内建筑碳排放研究可视化分析 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(15): 138-143.  
SI Q, XU F F, MA R J, et al. Visualization analysis of domestic building carbon emissions research [J]. Construction technology, 2023, 52(15): 138-143.
- [ 11 ] 蔡爽,张筠之,查金荣. 启迪设计大厦可持续建筑设计策略研究 [J]. 建筑技艺(中英文), 2025,31(3):44-55.  
CAI S, ZHANG Y Z, ZHA J R. Research on the sustainable architectural design strategies of Tus-Design Building [J]. Architecture technique, 2025,31(3):44-55.
- [ 12 ] 张湘苹,鲍莉. 居住类地段城市更新项目的全生命周期碳排放测算方式初探 [J]. 建筑技艺, 2023,29(6):36-42.  
ZHANG X P, BAO L. Preliminary study on carbon emission accounting throughout the whole life cycle of urban regeneration projects in residential areas [J]. Architecture technique, 2023,29(6):36-42.

## (上接第26页)

- [ 9 ] 周文豪. 射频识别 VS 无线互联:哪个更“泛在”——谈射频识别在我国的纵深发展 [J]. 中国电子商情(RFID技术与应用), 2008,3(3):9-10.  
ZHOU W H. RFID VS wireless connection: witch one of them more ubiquitous—development of RFID in China [J]. Radio frequency identification technologies and applications, 2008, 3(3): 9-10.
- [ 10 ] 张成英,姜涌,官名昊,等. 建设工程数字化管理的建筑信息模型构件编码标准及应用 [J]. 建筑技术, 2025,56(1):4-7.  
ZHANG C Y, JIANG Y, GUAN M H, et al. Component coding standard and application of building information model for digital management of construction engineering [J]. Architecture technology, 2025, 56(1):4-7.
- [ 11 ] 胡芸浩. BIM 模型一致性检查及构件智能化识别研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2023.  
HU Y H. Research on BIM model consistency check and intelligent component recognition [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.
- [ 12 ] 乔磊. 基于机器视觉的复合材料自动铺丝缺陷检测算法研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2020.  
QIAO L. Research on automatic filament laying defect detection algorithm for composite materials based on machine vision [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [ 13 ] 赵言. 基于区块链的装配式建筑构件信息协同管理系统架构优化 [D]. 哈尔滨:哈尔滨商业大学, 2024.  
ZHAO Y. Architecture optimization of information collaborative management system for prefabricated building components based on blockchain [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2024.