

DOI: 10.7672/sgjs2026080057

基于动态模拟的高性能低碳建筑外围护结构 施工关键技术

李 傲

(福州海峡文化艺术中心建设开发有限公司,福建 福州 350000)

[摘要] 建筑外围护结构的高性能化是推动绿色建筑能效提升与低碳化发展的关键环节。新区·三江大厦作为福建省首个全幕墙三星级绿色建筑,其高窗墙比、全玻璃幕墙及夏热冬暖气候条件使得外围护结构性能成为建筑节能设计与施工的重要难点。基于动态采光模拟、风环境模拟及全年逐时能耗模拟,对外窗、幕墙、外墙及屋面等外围护结构实施优化设计,并结合工程实际,形成了“模拟驱动设计-构造优化-性能验证”的建造体系。研究表明:通过采用多腔体断桥铝型材、三银 Low-E 中空玻璃、双重密封系统及高性能保温层构造,幕墙综合传热系数降低至 $2.278\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,太阳得热系数下降至 0.18;动态模拟优化使得室内自然采光达标面积达 90%,外窗自然通风压差满足要求,建筑全年总能耗降低 60.7%,空调能耗降低 68.74%。其验证了动态模拟在指导外围护结构高性能与低碳建造中的应用价值。

[关键词] 绿色建筑;围护结构;幕墙;低碳;智能运维;动态模拟;施工技术

[中图分类号] TU74

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0057-06

Key Technologies for High-performance Low-carbon Building Envelope Construction Based on Dynamic Simulation

LI Ao

(Fuzhou Strait Culture and Art Center Construction and Development Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000, China)

Abstract: Enhancing the performance of building envelopes has become a key pathway for improving energy efficiency and promoting low-carbon development in green buildings. The New District · Sanjiang Tower, the first all-curtain-wall three-star green building in Fujian Province, presents significant challenges for envelope performance due to its high window-to-wall ratio, fully glazed façade, and the hot-summer warm-winter climatic conditions. This study conducts optimization of the building envelope—including windows, curtain walls, exterior walls, and roof systems—through dynamic daylight simulation, wind environment simulation, and annual hourly energy-consumption simulation. Based on actual engineering implementation, a simulation-driven design-construction optimization-performance verification technical framework is developed. The results show that by adopting multi-cavity thermal-break aluminum profiles, triple-silver Low-E insulated glazing, a dual-layer sealing system, and high-performance insulation materials, the overall curtain-wall thermal transmittance is reduced to $2.278\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, and the solar heat-gain coefficient decreases to 0.18. Dynamic optimization enables the daylighting-compliant area to reach 90%, operable windows achieve an effective natural-ventilation pressure difference. The building's total annual energy consumption is reduced by 60.7%, and cooling energy consumption decreases by 68.74%. The study confirms the effectiveness of dynamic simulation in guiding high-performance and low-carbon envelope construction.

Keywords: green buildings; building envelope; curtain wall; low carbon; intelligent operation and maintenance; dynamic simulation; construction

0 引言

建筑领域正由高能耗向高性能、低能耗的绿色建筑转型。建筑外围护结构是影响建筑冷热负荷的关键环节,其热工性能直接关系运行能耗水平,是绿色建筑设计与施工中的重点技术对象。

新区·三江大厦位于福州市南江滨东大道,为福建省首个全幕墙三星绿色建筑(见图 1)。项目窗墙比高达 0.72~0.76,立面透明度大,室内自然采光、自然通风与外窗热工性能高度耦合,传统经验式设计难以同时满足节能与舒适性要求。为解决透光与隔热、采光与眩光、自然通风与气密性等多重矛盾,引入动态采光模拟、风环境模拟及能耗模拟,对外围护结构开展全过程优化设计与验证。围绕动态模拟技术在高性能外围护结构优化中的应用展开研究,重点分析动态采光、风环境及能耗模拟对玻璃构造、幕墙隔热构造、外墙保温及屋面热工体系的影响,结合工程实践,总结适用于夏热冬暖地区的高性能低碳外围护结构关键建造技术,以期为同类型建筑施工提供借鉴。



图 1 项目实景

Fig. 1 Project site

1 外围护结构性能需求与技术难点

1.1 外围护结构性能需求

在夏热冬暖地区,大型公共建筑的外围护结构性能在很大程度上决定了建筑运行能耗和室内环境品质。本项目采用大面积玻璃幕墙,外窗面积达 8 274.10m²,窗墙比远高于常规建筑(见表 1)。这一特征在提供充足自然采光的同时,显著增加了太阳辐射得热,尤其在夏季高温高湿气候条件下,大量直射和散射辐射经玻璃进入室内,易导致冷负荷明显上升。若简单依赖降低玻璃透光率或增强遮阳来削减得热,则会抑制自然采光,增加照明能耗,并对视觉舒适性产生不利影响。因此,外围护结构设计需在透光、不透热、眩光控制与视觉舒适之间实现动态平衡。

对于全幕墙建筑,外窗传热系数(K 值)和太阳得热系数(SHGC)是影响能耗的关键参数。 K 值偏高将导致冷量通过围护结构持续向室外散失,SHGC过大则使夏季太阳辐射热增益过高,两者均会推高

表 1 各朝向窗墙比

Table 1 Window-to-wall ratio in each orientation

朝向	外窗面积(包括透明幕墙)/m ²	朝向面积/m ²	朝向窗墙比
东	2 317.49	3 195.74	0.73
南	1 923.97	2 529.32	0.76
西	2 120.85	3 198.51	0.66
北	1 911.79	2 526.80	0.76
合计	8 274.10	11 450.36	0.72

空调能耗。为满足三星绿色建筑评价标准的节能要求,新区·三江大厦的外围护结构必须在玻璃构造、幕墙型材隔热结构及节点密封等方面实现整体高性能,建筑模型如图 2 所示。

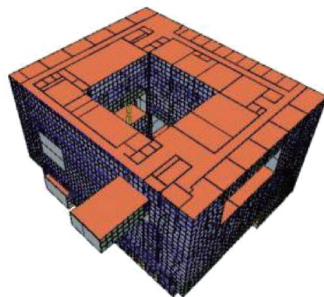


图 2 建筑模型

Fig. 2 Building model

1.2 外围护结构的多目标耦合难点

在上述性能需求约束下,高性能外围护结构的设计与建造呈现明显的多目标耦合特征。

1) 采光、遮阳与隔热间存在天然矛盾。提高可见光透射率有利于利用自然采光,却会增加太阳得热;增强遮阳能力有利于降低冷负荷,却会削弱自然光进入室内。夏热冬暖地区季节性光热需求差异显著,仅依赖静态指标难以保证全年综合性能,需借助动态模拟对不同工况进行统筹优化。

2) 幕墙系统必须兼顾气密、水密和结构安全性。滨江地段风压较大,建筑高度变化进一步加剧各楼层风荷载作用差异。型材截面、连接构造、密封胶条及排水系统均需在复杂工况下保持稳定工作状态。全幕墙立面导致立缝数量多、长度大,如局部气密或水密性能不足,易引发渗漏、冷凝甚至安全隐患。因此,高透明度和轻量化设计对施工精度、材料耐久性节点工艺提出更高要求。

3) 外围护结构应与建筑自然通风策略相协调。不同朝向和高度位置的外窗在风环境作用下形成差异化的正负压分布,只有在外窗两侧形成足够压差时,自然通风才具有实际效果。新区·三江大厦外窗分布广泛、标高跨度大,气流组织复杂,仅依靠经验难以精准判断开启扇布置和通风效果,需通过

风环境模拟识别适宜通风区域,避免无效或过强通风对能耗和舒适性的负面影响。

4) 外围护结构热工设计不仅涉及幕墙系统,外墙及屋面构造同样对整体性能产生重要影响。夏季屋面长期暴晒,构造层的吸热、蓄热与滞后性能直接影响室内热环境;外墙热桥效应、保温层吸湿风险和材料热稳定性也会对能耗控制产生不利影响。新区·三江大厦采用加气混凝土和无机保温砂浆复合体系,构造层次多、热工行为耦合性强,如设计与施工控制不严,易导致实际性能偏离设计预期。

1.3 动态模拟视角下的技术挑战

为应对多目标耦合问题,本工程在设计阶段引入动态采光、风环境和能耗模拟,对外围护结构进行精细化分析和优化。然而,模拟技术本身也存在一定局限性。采光模拟对室内反射率、家具布置和遮挡条件较敏感,参数不确定性会影响结果的准确性;风环境模拟需处理复杂建筑几何和高雷诺数气流,边界条件设定及数值收敛性直接关系模拟可靠性;能耗模拟则依赖外窗热工性能、内部负荷、设备效率等多类参数的准确输入,偏差过大可能导致运行阶段与预测结果不符。

因此,动态模拟在为外围护结构优化提供定量依据的同时,也对设计精度、参数选取、模型校核和结果验证提出更高要求,使外围护结构建造演变为一个高度系统化、跨专业协同的综合技术过程。

2 基于动态模拟的外围护结构关键技术优化

在本项目外围护结构设计中,动态模拟技术在采光、风环境与能耗3个维度发挥了核心支撑作用。通过逐时、逐空间单元的性能计算,模拟技术为立面构造与热工设计提供了定量依据,使设计决策由经验判断转向数据驱动,实现自然采光、自然通风、视觉舒适与能耗控制的综合平衡。

2.1 模拟气象数据与边界条件设定

本研究将福州长乐国际机场近10年典型气象年(TMY)数据作为动态模拟的基础气象输入。该数据能够反映区域长期气候统计特征,避免极端年份对模拟结果的干扰,具有较好的代表性与稳定性。鉴于福州属于夏热冬暖地区,空气湿度高、潜热负荷占比大且太阳辐射季节差异显著,在能耗模拟过程中对相对湿度与太阳总辐射参数进行校核优化,以提高对围护结构太阳得热及潜热负荷响应的模拟精度。

同时,在项目所在地(南江滨东大道)布设微气候监测点,对室外风速与空气温度进行阶段性实

测,并与PKPM及CFD模型边界条件进行对比分析。通过调整地面粗糙度系数、风速剖面指数及近地温度边界参数,使模拟输入与场地实际微气候条件相匹配,从而提升模拟结果的工程可靠性,经校准后,室外温度与风速模拟值和实测值偏差控制在 $\pm 5\%$ (见表2)。

表2 气象参数输入与校准方法

Table 2 Meteorological parameter input and calibration method

参数	数据来源	校准方式	校准目的
室外空气温度	福州长乐机场 TMY 数据	与现场实测数据对比修正边界值	提高冷热负荷预测准确性
相对湿度	TMY 数据	结合区域高湿气候特征进行优化	提高潜热负荷计算精度
太阳总辐射	TMY 数据	与区域多年平均辐射强度校核	提高太阳得热模拟准确性
风速	TMY + CFD 输入参数	修正地面粗糙度与风速剖面指数	提高风压与自然通风模拟精度

2.2 采光模拟驱动的玻璃构造与立面优化

针对高透明幕墙可能引发的光照不均和眩光问题,项目采用PKPM-Daylight对全年8760h的室内光环境进行动态模拟。模型综合考虑建筑几何形态、玻璃光学特性、室内表面反射率和外遮阳条件,通过网格化计算分析不同时段各典型区域的照度分布。

模拟结果表明,原始方案下部分区域存在照度过高或偏低现象,南向立面局部亮度变化剧烈,视觉舒适性不佳。在此基础上,对多种玻璃构造的可见光透射率、反射率及太阳得热系数进行对比研究,最终选用三银Low-E中空玻璃作为主要幕墙材料。该玻璃在保持较高可见光透射率的同时,有效抑制红外辐射透过,使采光与隔热性能得到兼顾。优化后的模拟结果显示,主要功能区域自然采光达标面积接近90%,光照均匀性显著提升,眩光风险得到有效控制。采光模拟不仅指导了玻璃性能的选取,也促进幕墙分格、水平遮阳和挑檐等构件的协同调整,使立面系统在视觉品质与能耗控制之间形成合理平衡。

2.3 风环境模拟支撑自然通风策略与外窗布置优化

为提高自然通风利用率、降低机械冷负荷,项目采用CFD对冬季、夏季及过渡季3种典型工况下的外部风环境进行模拟,建立建筑外表面风压分布与流场特征的精细模型。结果表明,夏季主导风向条件下,多数外窗位置可获得稳定的正负压差,而冬季部分高区窗口压差偏低,不利于自然通风。

基于模拟结果,对需要重点优化的部位进行识别和调整,包括迎风与背风交界区域、立面凹槽区域及高位外窗区域。一方面,调整外窗开启方式,由单一平开形式优化为更符合气流方向的侧向开启,提高压差利用效率;另一方面,对幕墙分格进行局部优化,使可开启扇集中布置在压差条件较优的区域。在总体朝向上,通过适度调整建筑南偏西角度,削弱不利季节冷风直吹效应。经模拟和后续实测验证,夏季有较大比例的可开启窗获得高于 0.5Pa 的有效压差,自然通风得以在运行阶段持续发挥作用,为降低空调能耗提供了有力支撑。

2.4 能耗模拟驱动外围护结构热工性能提升

为评估不同外围护结构构造方案对全年能耗的影响,项目在 PKPM-Energy 平台上构建建筑能耗模型,将幕墙 K 值、玻璃 SHGC、外墙及屋面热工参数、内部负荷及空调系统性能指标集成于同一计算框架中,通过全年逐时模拟分析冷负荷变化与系统能耗水平。

模拟表明,外窗 SHGC 和 K 值对建筑总能耗的影响最为显著。原始参数条件下夏季冷负荷偏高,空调系统部分负荷工况效率不理想。通过参数敏感性分析和方案优化,将玻璃系统 SHGC 调整至约 0.18,并通过断桥型材、多腔体结构等措施降低幕墙综合传热系数,在保证采光条件的同时显著削弱了太阳辐射热输入。结合办公与公共区域分区控制、高效多联机空调系统等运行策略的模拟,结果显示优化后的外围护结构可显著降低全年冷负荷,空调能耗较基准方案减少近 70%。能耗模拟由此成为连接设计、构造和施工质量控制的重要纽带,使外围护结构热工性能目标在工程实施过程中具有清晰的量化依据(见表 3)。

表 3 建筑总能耗分析

Table 3 Total building energy consumption analysis

能耗类型	设计建筑	参照建筑
供暖空调/(kW·h)	398 830.25	1 275 958.39
照明能耗/(kW·h)	193 890.96	233 276.02
电梯能耗/(kW·h)	0	0
生活热水能耗/(kW·h)	0	0
通风机能耗/(kW·h)	0	0
可再生能源能耗/(kW·h)	0	0
总能耗/(kW·h)	592 721.21	1 509 234.41
单位面积全年能耗/ (kW·h)·m ⁻²)	32.38	82.44
能耗降低幅度/%		60.73

3 外围护结构构造与施工关键技术

根据动态模拟成果对新区·三江大厦外围护结构在构造体系与施工工艺方面进行了系统深化,

以确保设计性能稳定转化为工程实体性能。高性能幕墙、外墙保温体系与屋面隔热系统共同构成外围护结构整体,其构造合理性与施工质量直接关系建筑运行阶段的热工表现、气密与水密性能及耐久性。

3.1 幕墙隔热构造关键技术

幕墙构造优化的重点在于型材与玻璃系统的热工性能提升。针对高透明幕墙带来的传热问题,项目将多腔体断桥铝型材作为主框架,通过设置多道 PA66 隔热条并分离内外腔体,有效延长热量传递路径,削弱热桥效应,在满足结构承载与刚度要求的前提下显著提升隔热性能。多腔体构造同时为排水与压力平衡预留了空间,有利于整体水密与耐久性能的提高。

在玻璃系统方面,选用三银 Low-E 中空玻璃,通过多层银膜的选择性辐射特性,使可见光透过同时反射大部分红外辐射。中空层填充高纯氩气进一步降低对流换热,配合暖边 TPS 间隔条有效控制玻璃边缘线性传热,降低表面温度梯度和结露风险。施工阶段通过数控加工保证型材尺寸精度,严格控制隔热条嵌入深度和压紧力(见图 3);在玻璃安装过程中对密封胶、结构胶及橡胶条的搭接、厚度和固化条件实施过程管控,从而在实体幕墙中实现与设计性能相匹配的传热和气密表现。

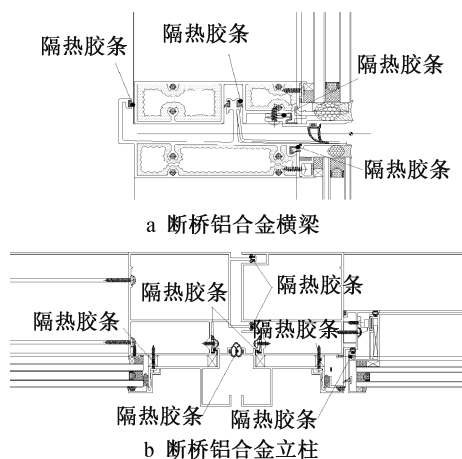


图 3 隔热条分布

Fig. 3 Thermal break layout

3.2 气密与水密系统施工技术

高层幕墙的气密与水密性能是外围护结构长期稳定运行的基础。新区·三江大厦通过密封体系、排水路径和现场安装 3 方面的协同控制来保障性能达标。密封体系采用外侧耐候胶与内侧结构胶及 EPDM 胶条组合的双重密封形式,外道密封抵御环境老化及雨水侵入,内道密封构成连续气密层

并起到部分结构作用,使幕墙在正负压作用下保持良好的空气隔离能力。

水密性能依托分级排水构造实现。幕墙横梁与立柱内部设置独立排水腔体,使渗入雨水沿预设路径逐级排出,腔体间通过均压孔实现压力平衡,避免风压引起倒灌,如图4所示。施工过程中严格控制型材腔体加工精度,确保排水通道顺畅无阻,并根据模拟分析结果优化排水孔位置与数量。在现场安装环节,通过样板段预拼装验证密封胶条连续性和胶体固化效果,对板块拼缝和胶条压紧度进行抽检,使工程实体水密和气密性能均达到或优于规范水平。

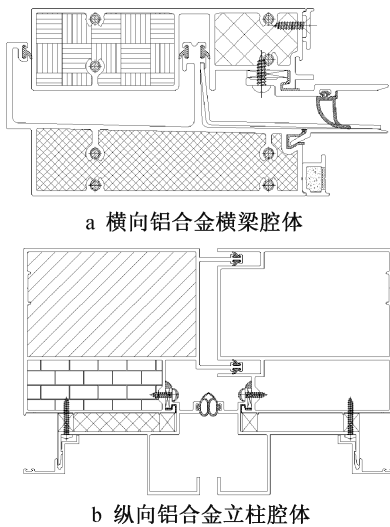


图4 腔体构造

Fig. 4 Cavity structure

3.3 外墙与屋面热工构造的系统化提升

除幕墙系统外,外墙与屋面构造对外围护结构整体热工性能同样具有重要影响。外墙采用加气混凝土砌块配合无机保温砂浆的复合墙体,通过材料的蓄热性和热阻性实现对室内热湿环境的被动调节。在节点设计与施工中加强对板墙交接、窗框周边等易形成热桥部位的绝热处理,保证保温层连续性,降低热桥对整体 K 值的不利影响。结合能耗模拟结果,对不同朝向墙体热流分布进行校核,避免局部热流集中。

屋面在夏季承受强烈太阳辐射,因此在构造中突出隔热能力和热稳定性。系统将适当厚度的挤塑板作为主要保温层,利用其低导热系数和低吸湿性,在高温、高湿环境下保持稳定热工性能。配合轻集料混凝土找坡层和混凝土结构层的蓄热特性,屋面构造获得良好热惰性,有效延缓室外高温向室内传递,削减冷负荷峰值。施工阶段通过分层验收

和保温板铺贴质量控制,避免产生缝隙和脱空等缺陷,确保屋面热工性能在实际运行中保持稳定。

4 性能实测与效果评价

1)在采光性能方面,通过与模拟条件相协调的现场测试,对典型楼层照度进行逐时监测。结果表明,优化后的玻璃构造与幕墙分格使室内光环境稳定且均匀,自然采光达标面积比例接近90%,与模拟结果一致。潜在眩光区域在实测中未出现明显不舒适反应,说明玻璃透光特性、遮阳构件及室内反射控制的组合策略有效。自然采光的改善显著减少了工作时段对人工照明的依赖,间接降低了照明能耗。

2)在气密与水密性能方面,经第三方专业机构检测,幕墙漏风量为 $0.8\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,优于规范对高气密等级的要求。在持续风压和模拟暴雨条件下,幕墙未出现渗漏或倒灌现象,多腔体型材、双道密封及均压排水等构造在实际工况下表现出良好稳定性。抽检显示,密封胶条压紧与固化质量均满足设计要求,各类节点密封连接连续、均匀,为系统长期耐久性提供了保障。

3)在热工性能方面,利用红外热像、表面温度测试及玻璃传热性能实测等方法,对幕墙、外墙与屋面构造的热工表现进行综合评估。实测结果表明,幕墙综合传热系数与设计值基本一致,玻璃系统太阳得热系数稳定在约0.18;外墙热桥部位未见明显热流集中,屋面在高温日照条件下内部表面温度控制在预定范围内,验证了保温体系和隔热构造的有效性。

4)在能耗表现方面,通过对运行初期能耗数据与动态模拟结果进行对比分析,建筑实际能耗与模拟预测整体吻合良好。监测显示,外围护结构优化后,全年空调能耗较基准建筑降低超过60%,单位面积综合能耗明显低于同类公共建筑。夏季高温期间,遮阳与热工构造的优化使空调系统部分负荷运行效率得到提升,冷源负荷显著减轻。基于智能运维平台的持续监测进一步表明,外围护结构的优化对建筑全生命周期节能具有长期正向影响。

5)在经济效益方面,与常规外围护结构方案相比,本项目高性能外围护结构在玻璃构造、型材隔热与密封体系等方面进行了升级,导致初始投资增加。基于工程量清单与市场询价结果,按幕墙/外围护结构单位面积造价差异估算,高性能方案较常规方案的初始投资增量为 ΔC (元/ m^2)。运行阶段节能收益按单位面积年节电量计算:由能耗模拟结果可得建筑单位面积年能耗由 $82.44(\text{kW}\cdot\text{h})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$

降至 $32.38(\text{kW}\cdot\text{h})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 年节电量为 $\Delta E = 50.06(\text{kW}\cdot\text{h})/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。按当地商业电价 p (元/($\text{kW}\cdot\text{h}$))估算, 单位面积年运维节省费用为 $S = \Delta E p$ (元/($\text{m}^2\cdot\text{a}$))。在不考虑电价上涨、设备更新及碳成本等因素的前提下, 静态回收期可表示为 $T = \Delta C/S$ 。根据本项目测算, 静态回收期为 20~30 年。

考虑公共建筑设计使用年限通常 ≥ 50 年, 且未来能源价格存在上行不确定性, 从全生命周期角度, 高性能外围护结构除带来持续节能收益外, 还可在热舒适性、冷负荷峰值削减及围护系统耐久性(渗漏风险降低、维护频次下降)等方面体现综合效益, 具有工程推广价值。

5 结语

通过对新区·三江大厦外围护结构从设计、模拟到施工与实测的全过程研究可看出, 动态模拟技术已从传统意义上的辅助工具上升为高性能低碳建筑设计与建造的核心支撑手段。基于动态采光、风环境和能耗模拟的综合优化方法, 能有效协调高透明幕墙建筑中采光、隔热、通风与气密、水密等多维性能需求, 实现外围护结构在高性能与低能耗之间的合理平衡。

研究结果显示, 采光模拟有力支撑了幕墙玻璃及遮阳构造的选择, 风环境模拟将自然通风从定性判断转变为可量化设计要素, 能耗模拟则为外围护结构热工构造与系统配置提供了明确依据。通过与高精度施工工艺的结合, 模拟成果在工程实体中得以较好体现, 建筑运行能耗显著降低, 室内环境品质得到整体提升, 验证了动态模拟驱动外围护结构优化的工程可行性和推广价值。

随着数字化设计与智能建造技术的深入发展, 动态模拟在外围护结构领域的应用将进一步向集成化与智能化方向演进。一方面, 可借助建筑数字孪生平台实现运行数据对模拟模型的动态校准, 形成“设计-施工-运维-再设计”的闭环优化机制; 另一方面, 与可调光玻璃、智能遮阳装置及新型高性能保温材料结合, 有望赋予外围护结构更强的主动调节能力, 使建筑在复杂气候条件下保持更高的能效水平。此外, 多专业协同下的光热耦合模拟与多场能耗预测将更早介入方案阶段, 为高性能外围护结构提供更加系统、精细的设计支撑。

总体而言, 新区·三江大厦的工程实践表明, 动态模拟在绿色建筑外围护结构设计与建造中的应用具有明确的节能效果与技术优势, 为夏热冬暖地区高透明幕墙建筑的低碳建造提供了可复制的技术路径。

参考文献:

- [1] 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 technologies in China based on carbon peak and carbon neutrality goals [J]. Construction technology, 2024, 53(17): 77-84, 106.
- [2] 王星宇. 绿色建筑围护结构节能技术研究[J]. 工程建设与设计, 2025(15): 29-31.
WANG X Y. Research on energy saving technology for green building envelope structures [J]. Construction & design for engineering, 2025(15): 29-31.
- [3] 谭丽丽. “双碳”目标下绿色建筑围护结构节能技术[J]. 石材, 2024(9): 129-131.
TAN L L. Energy-saving technology of green building envelope under the goal of “double carbon” [J]. Stone, 2024(9): 129-131.
- [4] 葛鑫. 超高层绿色公共建筑围护结构节能优化方法研究[J]. 建筑节能(中英文), 2024, 52(5): 107-114.
GE X. Energy saving optimization of envelope structure of super high-rise green public building [J]. Building energy efficiency, 2024, 52(5): 107-114.
- [5] 朱文浩. 碳排及成本双约束下建筑围护结构设计方案优选研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
ZHU W H. Research on optimal design scheme of building envelope structure under carbon emission and cost constraints [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.
- [6] 董朝阳, 邵亚飞, 朱翔凌, 等. 建筑低碳化施工研究进展与发展方向[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(24): 121-127.
DONG C Y, SHAO Y F, ZHU X L, et al. Research progress and development direction of low carbon construction of buildings [J]. Construction technology, 2024, 53(24): 121-127.
- [7] 刘晓晖, 李志红, 袁朵. 碳中和背景下大学校园建筑设计策略研究[J]. 城市建筑空间, 2024, 31(1): 15-17.
LIU X H, LI Z H, YUAN D. Design strategy of university campus building under the background of carbon neutrality [J]. Urban architecture space, 2024, 31(1): 15-17.
- [8] 刘玉龙. 走向协同的低碳建筑设计[J]. 城市建筑空间, 2024, 31(1): 2.
LIU Y L. Towards collaborative low-carbon building design [J]. Urban architecture space, 2024, 31(1): 2.