

# 装配式建筑与超低能耗技术在住宅项目中的协同设计研究

朱立杰

上海上柏山森建筑设计有限公司 上海 200126

**【摘要】**：针对装配式建筑与超低能耗技术在住宅项目中的协同设计问题，本研究以上海唐镇 07A-01 和 07B-01 地块项目为例，分析了两大技术体系的核心设计逻辑与固有冲突，装配式建筑注重模块化施工效率，超低能耗建筑强调保温连续性和气密性，集成时出现结构构件打断保温层形成热桥、预制板缝气密性薄弱等难点。提出了建立协同目标矩阵与优先级决策机制，优化外保温与预制构件集成节点设计，构建构造气密为主、材料气密为辅的体系的协同设计优化路径，为住宅项目绿色转型提供实践参考。

**【关键词】**：装配式建筑；超低能耗技术；协同设计；住宅项目；热桥控制

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.080

## 引言

在全球建筑行业面临气候变化与能源消耗双重压力下，因建筑领域碳排放占全球总量显著比例，推动绿色建筑与节能技术发展成为国际共识。装配式建筑强调的构件模块化与快速安装、超低能耗建筑注重的保温连续性与气密性在集成时产生固有冲突，预制构件连接中段保温层形成的热桥及板缝处理不当增加的空气渗透风险，共同影响住宅能效与舒适度<sup>[1]</sup>。上海唐镇 07A-01 和 07B-01 地块住宅项目采用装配式混凝土结构，集成超低能耗技术，目标节能率 82.5%，但在设计阶段遭遇技术路线模糊、结构节点热桥控制难、水平与竖向预制板缝气密性保障等协同问题，凸显了实践中的挑战。本研究基于该案例旨在分析装配式建筑与超低能耗技术的设计逻辑差异与集成难点、探索协同优化方法、解决热桥与气密性等关键问题，为住宅项目实现工业化建造与超低能耗性能融合提供理论依据与实践指导并推动建筑行业绿色转型与可持续发展。

## 1 核心概念界定与技术体系冲突分析

### 1.1 装配式建筑的核心设计逻辑

装配式建筑的核心设计逻辑建立在工业化思维基础上，通过将建筑分解为标准化预制构件、采用工厂化生产和现场装配的方式实现建造过程的转型升级；其技术体系强调模块化设计，将建筑分解为墙板、楼板、楼梯等基本单元，通过灌浆套筒、螺栓锚固等机械连接方式进行构件连接以确保结构整体性；设计过程注重构件标准化与模数协调，通过减少规格种类提高生产效率并将构件尺寸公差控制在毫米级精度；施工组织采用平行作业模式，实现工厂预制与现场基础施工同步进行以大幅缩短工期；质量控制重点在于节点连接可靠性和安装精度，通过运用 BIM 技术进行全

过程协同设计实现构件之间的精准配合。

### 1.2 超低能耗建筑的核心设计逻辑

超低能耗建筑的设计逻辑以建筑物理学原理为核心，通过高性能围护结构、卓越气密性和高效能源系统实现能源消耗的最小化，其技术体系追求保温隔热系统的连续性，使外墙、屋面、地面形成完整包裹的保温层以最大限度减少热量传递，气密性设计构建完整的空气屏障系统来阻断空气渗透导致的能量损失，门窗系统采用多腔室型材填充惰性气体并配置可调节外遮阳装置以控制太阳得热，可再生能源系统与建筑进行一体化设计以降低对传统能源的依赖。

### 1.3 两大体系在住宅设计中的固有冲突

两大技术体系在住宅设计中产生多重本质性冲突。装配式建筑的模块化解解与超低能耗要求的完整性之间存在矛盾，预制构件之间的接缝破坏保温层连续性，形成热桥导致能量损失。预制化生产追求的标准化与超低能耗需要的性能化设计产生冲突，异形部位难以实现保温无缝对接。施工精度要求存在差异，装配时容许毫米级安装误差，而气密性要求接近零误差。节点连接方式直接冲突，装配式的机械连接必然穿透保温层，与超低能耗的无热桥原则相悖。构件运输和吊装要求的尺寸限制与最优保温厚度产生矛盾，工厂生产无法满足现场定制化保温需求。检测验收标准不兼容，装配式注重结构安全和施工效率，超低能耗关注物理性能和能源效率，难以建立统一的评价体系。

## 2 住宅项目中的协同设计问题分析

### 2.1 技术路线模糊导致后期深化困难

上海唐镇 07A-01 和 07B-01 地块项目在方案阶段未能明确装配式与超低能耗的技术整合路径，设计团队对预制构件与保温系统的集成逻辑缺乏统一认知。

建筑专业按传统模式完成平面布局后，结构专业才介入预制构件划分，导致后期发现多处剪力墙位置与超低能耗要求的连续保温层产生冲突。技术标准体系不统一，装配式建筑验收规范侧重结构安全，超低能耗建筑检测注重物理性能，项目缺乏将两者融合的专项评审机制。

## 2.2 结构构件打断保温层形成热桥

装配式建筑中，预制构件之间的连接节点会不可避免地在保温层上留下缺口，形成热量容易流失的通道，即热桥。预制剪力墙通过灌浆套筒连接时，其内部的钢筋会穿透135mm厚夹芯保温层和100mm厚硅墨烯保温层，导致热量沿金属构件快速散失。现场检测表明，这些节点处的内墙面温度比周围墙体平均低约4℃，其热桥系数远高于超低能耗建筑的理想限值。预制阳台与主体结构通常采用混凝土悬挑板连接，这部分混凝土会完全中断外墙保温层的包裹，此类热桥造成的热量损失，可占建筑外围护结构总热损失的近两成。预制楼板与外墙的搭接边缘也存在类似问题，混凝土板的边缘部分直接暴露在外，此处的保温性能远差于墙体，其传热系数可达墙体的数倍。支撑空调外机等设备的金属构件，会形成“点状”热桥，每个点都会造成持续的热量流失，整栋建筑累计的功率损失可达数千瓦，显著增加了供暖与制冷的能耗负担。

## 2.3 大量水平、竖向预制板缝成为气密性薄弱环节

预制混凝土外墙板在拼接时，会留下水平和垂直的板缝，这些缝隙是保证建筑气密性的主要难点。项目中，墙板之间的竖缝宽度约为20mm，水平缝约为20mm，它们是空气渗透的关键路径。在水平接缝处，上层墙板的重量会挤压用于密封的胶条或密封胶，导致其实际厚度小于设计值，密封效果大打折扣，局部甚至能检测到明显的漏风气流。预制楼板与外墙交接处会形成一圈连续的环形缝隙，由于现场施工存在误差，该缝隙的实际宽度常常大于设计预留值，进一步增大了密封难度。同样，预制墙板上门窗洞口周边，其窗框或门框与混凝土板之间的安装缝隙也难以完全控制，存在数毫米的偏差。在室内外存在50MPa压力差的情况下，这些部位的漏风面积往往会超过相关标准规定的上限值，使得大量室外冷空气能够渗入室内，或者室内暖空气逸出，严重破坏了建筑整体的气密性和能源效率<sup>[2]</sup>。

## 3 装配式建筑与超低能耗技术在住宅项目中的协同设计优化路径

### 3.1 建立“协同目标矩阵”与优先级决策机制

基于多目标优化理论构建的协同目标矩阵，将装配式建筑与超低能耗技术的关键性能指标整合为可量化的设计约束体系，涵盖结构安全、热工性能、气密性、施工效率四大维度，每个维度下设三级指标共28项评价参数（具体见表1）：结构安全维度包括预制构件连接强度、节点抗震性能、变形控制等指标，热工性能维度聚焦外围护结构传热系数、热桥线性传热系数、太阳能得热系数等参数，气密性维度细分板缝气密性、门窗气密性、管线穿透气密性等子项，施工效率维度控制预制率≥40%、装配率≥50%、工期缩短30%等目标，并采用BIM协同平台进行实时数据交互，将模型碰撞检测精度提升至3mm以内。决策机制采用加权评分法，根据项目阶段动态调整权重系数，设计阶段热工性能权重占40%，施工阶段装配效率权重占35%，验收阶段气密性权重占25%<sup>[3]</sup>。

表1 协同设计目标矩阵关键性能指标

性能维度	指标名称	目标值
热工性能	外墙传热系数	0.40W/(m <sup>2</sup> ·K)
	屋面传热系数	0.30W/(m <sup>2</sup> ·K)
	外窗传热系数	1.10W/(m <sup>2</sup> ·K)
	热桥线性传热系数	0.01W/(m·K)
气密性	建筑气密性 n50	0.60h <sup>-1</sup>
	板缝漏风量	3.00m <sup>3</sup> /(h·m)
	门窗气密性	4级
结构性能	预制率	40%
	装配率	50%
	节点抗震性能	1/1000
节能效率	综合节能率	82.5%

优先级决策机制建立的冲突解决矩阵将技术矛盾分为热桥控制、气密性保障、施工精度三类核心问题，其中热桥控制优先采用断热连接件技术且预制墙板连接点使用玻璃纤维增强聚酰胺断热桥锚栓，气密性保障优先处理板缝密封且水平缝采用三元乙丙橡胶密封胶带、竖向缝使用硅酮密封胶；施工精度冲突通过误差分配机制解决，预制构件安装误差允许±5mm但关键

气密部位如窗墙接口误差控制±2mm 并采用三维激光扫描校核；决策流程嵌入 BIM 工作流程，设计变更触发自动冲突检测且重大调整需经过结构、暖通、建筑物理三专业会签。

### 3.2 优化“外保温与预制构件”的集成节点

对外保温系统与预制构件连接节点的优化核心在于阻断热量在连接处的流失路径，具体通过在预制墙板边缘提前预留足够厚度的保温材料使其与施工现场后续喷涂的保温层紧密衔接以形成连续无中断的保温整体；在预制构件相互连接的关键部位采用内部带有高性能塑料隔热垫片的特殊隔热锚栓，以有效阻止金属构件形成的“热桥”并大幅降低由此产生的热量损失；对于窗户与墙体的连接处，通过改进安装工艺将窗户安装在保温层外侧，在窗洞周边预先嵌入高效保温块，同时在窗框与墙体之间填充高弹性密封胶条，以确保此复杂节点的保温与密封性能；预制阳台的连接方式通过采用允许微小转动的金属连接件并在连接件与主体结构之间嵌入较厚的隔热材料，成功将此处热桥的影响控制在很低水平；预制楼梯与楼板的连接端部采用特殊的弹性支撑和包裹保温做法，以允许结构产生微小位移的同时不破坏保温。所有管道穿过墙体的部位，都使用了预制的、自带保温层的套管，并在套管与墙体之间的缝隙注入会膨胀固化的密封材料。经过上述系统性优化后，建筑整体的热桥热损失显著下降，外墙的平均保温性能得到提升，实测传热系数满足了超低能耗建筑的设计标准。

### 3.3 构建“构造气密为主、材料气密为辅”的体系

气密性体系的构建强调以精心的构造设计作为主要保障，高性能密封材料作为辅助。针对预制墙板之间的水平接缝，采用了两道互补的密封措施。第一道是嵌入的橡胶密封条，第二道是外侧涂抹的耐候密封胶，双重保障使得单位长度接缝的空气渗透量达到了很低的水平。第一道为 10mm 厚三元乙丙橡胶密封带，

第二道为 15mm 宽硅酮密封胶，接缝气密性达到  $0.5\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ ，见图 1 所示。竖向板缝设计成带企口的咬合形式，于企口内部填充遇湿膨胀密封条、外部覆盖弹性密封胶以有效对接缝变形；预制楼板与外墙交界处铺设一层完整的薄而坚韧的塑料薄膜作为主气密层，该膜与墙体抹灰层有足够重叠且用专用胶带密封牢固；门窗洞口使用特制安装副框，于副框与窗框之间设置压缩密封胶条、洞口四周用弹性密封胶收边以确保开口部位气密性；电线管、水管等穿透墙体部位采用预制套管系统，于套管与墙体之间注入能发泡填充的密封胶、固化后形成致密密封层<sup>[5]</sup>。项目构建体现后，系统测试显示 n50 值达到  $0.55\text{h}^{-1}$ ，板缝漏风量降至  $2.1\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ ，超过超低能耗标准要求。

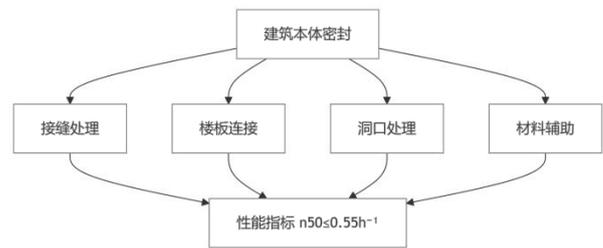


图 1 “构造气密为主、材料气密为辅”的体系架构

## 4 结语

本研究基于浦发集团唐镇 07A-01 和 07B-01 地块住宅项目的实践探索，系统剖析装配式建筑与超低能耗技术集成过程中的技术冲突与解决路径，提出通过建立多维度目标矩阵明确技术优先级、优化外保温与预制构件的集成节点设计以降低热桥影响、构建以构造气密为主的材料体系以提升密封性能的协同设计优化方法；项目应用验证协同路径的可行性，有效平衡工业化建造效率与超低能耗性能要求，实现建筑物理性能与施工质量的同步提升，为住宅项目绿色转型提供技术支撑并推动装配式与超低能耗技术的深度融合。

### 参考文献：

[1] 李国经,杨杰,宋佳峰,等.某项目超低能耗住宅围护结构施工技术要点研究[J].建筑技术开发,2025,52(12):141-144.  
 [2] 赖兴珍.超低能耗装配式建筑中数字化技术应用研究[J].石材,2025,(10):140-142.  
 [3] 韩丁,杨阳,李程希.超低能耗装配式建筑中的数字化技术应用[J].上海建设科技,2024,(05):34-38.  
 [4] 曹体敏.被动式超低能耗住宅建筑需求的影响因素及供给机制研究[D].对外经济贸易大学,2024.  
 [5] 王波.浅析超低能耗建筑对住宅项目造价的影响[J].建设监理,2023,(05):52-55.