

# 全生命周期视角下的构件护照系统设计

## 一、设计背景和必要条件

### 1.1 设计背景：从装配式建筑到全生命周期管理

在“双碳”目标与建筑工业化并行推进的背景下，传统以“竣工”为终点的建筑设计与管理模式，已经难以满足以下需求：建筑全生命周期碳排放精细化核算与持续减排；建筑功能与性能在运营期的动态优化与升级；建筑拆除阶段的资源高效回收与材料再利用。

装配式建筑的大规模推广，为此提供了结构性机遇：构件高度标准化、生产工厂化、施工装配化、管理信息化，使单件构配件在其全生命周期各阶段产生的数据——从原材料、生产、运输到安装、运维、报废与回收——具备被系统化采集、存储与利用的现实基础。

在此背景下，“构件护照”系统被提出——即为每一个建筑构配件建立一套**唯一标识+完整数据履历+性能指标+回收价值**的数字档案，实现构件在其设计、制造、施工、使用、退役全阶段的数字孪生与可追溯管理。

### 1.2 构件护照系统的内涵

表1 构件护照系统的内涵

数据维度	模型维度	生命周期维度
材料与制造信息	在 RHINO 模型中，每一构件具有明确的参数化族定义与唯一 ID	从“设计 → 生产 → 运输 → 安装 → 使用 → 维护 → 拆除 → 回收”的全过程，以护照为载体进行信息贯通与闭环控制
施工与安装过程信息	与传感器、能耗计量、结构监测等系统建立数据联接	
运营与维护记录	理论性能（设计/仿真）	
退役与回收信息	与实测性能双向标注	

### 1.3 实现构件护照的必要条件

第一，装配式设计与标准化构件体系；第二，预制构件工厂化生产；第三，可选配构配件及多方案组合；第四，数字化基础设施与编码体系。

## 二、系统整体运行框架

### 2.1 设计初期：基本模块与护照模板设定

#### 2.1.1 基本模块的设定

设计方在项目策划阶段，结合建筑功能与工业化程度，定义若干个**标准基本模块**（数量留空，后期替换），如：标准开间结构-围护模块；外墙-窗组合节能模块；标准卫生间整体装配模块；幕墙单元模块；机电综合管廊模块等。每个基本模块在 RHINO 中建模为可重复调用的装配式子系统，内部由多个构配件组成。

#### 2.1.2 护照字段模板的定义

表 2 护照字段模板的定义

基础信息 字段	材料与环保 字段	生产与质控 字段	性能字段	运维与寿命 字段
构件类型、规格型号、唯一ID；所属项目、楼栋、楼层、轴线位置。	材料种类及标准号；导热系数 $\lambda$ 、比热容 $c$ 等物理参数；环保认证（绿色建材标识）、材料含再生成分比例；单位质量/单位面积/单位体积碳排放因子	生产厂家、生产线号、生产日期与批次；生产环境温湿度区间；抽检强度、尺寸偏差、外观质量评级；特殊工艺参数（如混凝土养护时间、预应力张拉数据）。	热工：U 值、热惰性指标、节点热桥修正系数 $\psi$ ；光学：可见光透射比 $\tau_v$ 、太阳得热系数 $g$ 、反射率；声学；结构；防火。	设计使用年限；推荐维护周期与关键维护点；易耗构件清单及更换周期建议；可拆卸性等级、可回收材料比例。

## 2.2 构配件生产阶段：数据自动写入与质量追踪

构件自生产启动时即生成护照实例：系统生成唯一 ID，并通过二维码/RFID 附着在构件上；生产管理系统实时采集的信息（原材料批次、配比、工艺参数、抽检记录等）通过接口自动写入该 ID 对应的护照条目。这一阶段完成护照的“制造履历”段落，为后期质量问题追溯提供依据。

## 2.3 用户端选配阶段：多方案技术 - 美学综合选择

构件进入“选配平台”后，设计与业主可在可视化界面中进行配置：每个可选构配件或模块方案，在护照中具备完整属性：性能、环保、造价、美学。通过该平台，可实现在保证接口、尺寸兼容性的前提下，对立面材料、窗型、保温厚度等进行替换；利用护照中既有的模拟/实测数据，对多个组合方案的能耗、光环境、舒适度和碳排放进行快速比较；选定方案后，系统将构配件实例化到具体项目的 BIM 模型中，并将护照实例与其模型 ID 绑定。

## 2.4 施工与装配阶段：物流 - 安装 - 质检信息的闭环

在构配件从工厂到现场、从堆放到安装的过程中，护照记录继续完善：装车时间、运输路线、到场时间；在途环境（如对高敏感构件可记录温度/振动情况）；现场卸货检查记录（破损等级、缺件情况）。安装班组、时间、施工负责人；关键节点施工参数；隐蔽构造照片/视频，通过移动端扫码上传并自动挂接到该构件护照。质量问题与整改记录等等。至此，构件护照完成“出厂前 - 安装后”的全信息链条记录。

## 2.5 使用与运维阶段：构件级运营履历

建筑投入使用后，运维阶段的重点在于：构件性能的实际运行表现监测；日常维护与故障处理记录；与设计阶段性能预测的对比校核。漏水修补、更换玻璃、重打密封胶等维护事件被完整记录；频发问题可追溯到具体批次与生产厂商，实现闭环改进。

## 2.6 拆除与回收阶段：残余价值评估与减碳闭环

当构件达到设计寿命或因功能变更被拆除时，构件护照提供：**残余性能与再利用**

**等级判断**，根据材料衰减模型、维护履历和现场检测结果，判断构件是否可整体再利用，或仅作材料回收；记录进入二次使用市场的构件数量、再利用项目等信息。**可回收材料清单与碳减排核算**，按护照中的材料类型与质量数据，结合回收利用率，计算因材料回收与替代原生材料而产生的“回收阶段减碳量”；将本项目构件从生产到回收的碳排放进行闭环核算，为地区/企业碳资产管理提供基础数据。通过这一流程，构件护照系统完成全生命周期的信息与碳流的闭合回路，实现从“线性的建造-报废”向“循环的建造-再利用”转变。

## 再模块化

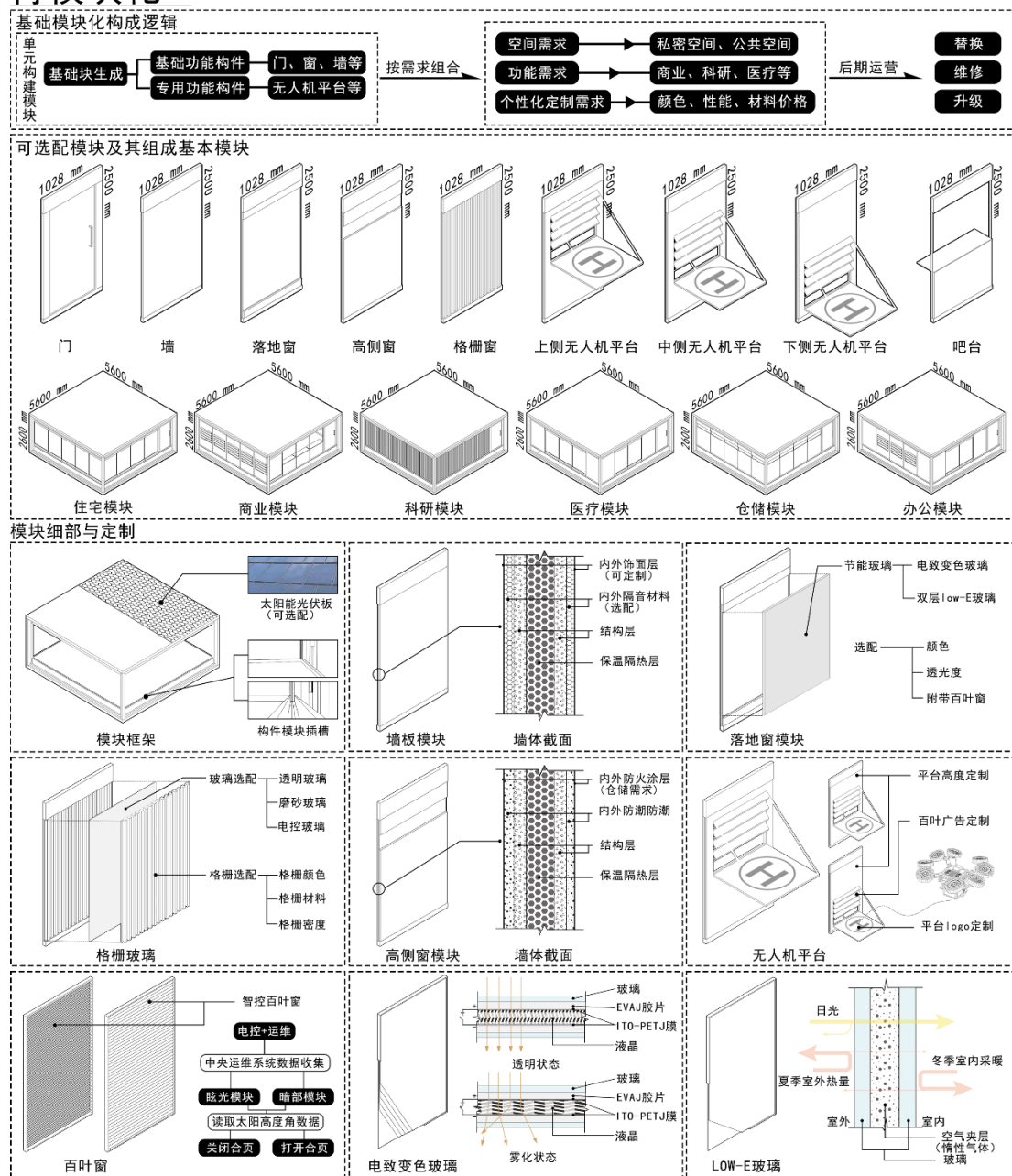


图1 再模块化设计

# 全生命周期的构件数字孪生

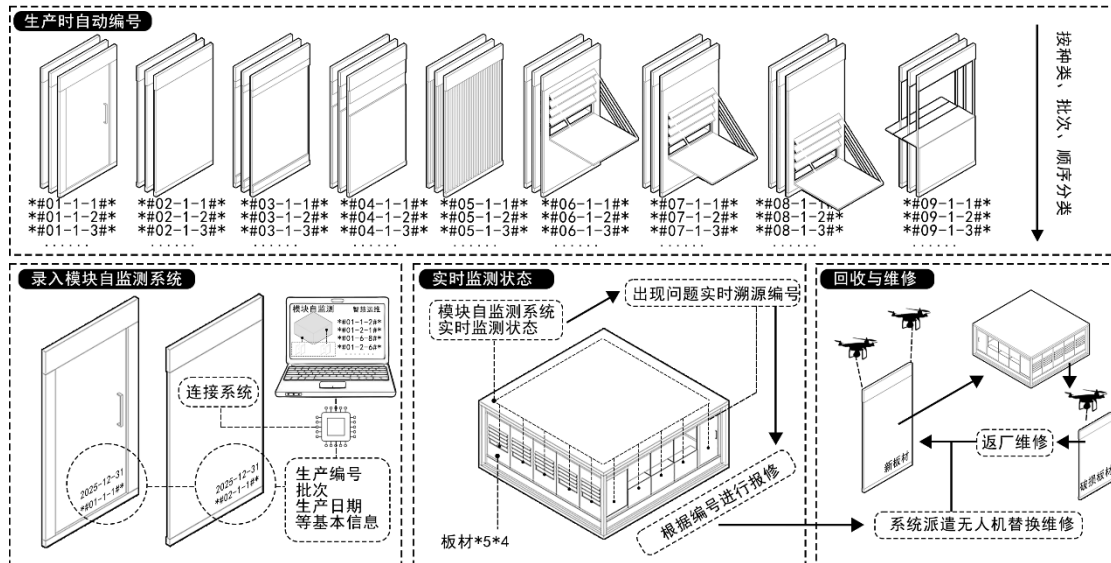


图 2 全生命周期视角下的构件护照系统设计

## 三、减碳数据模拟验算

### 3.1 对比对象

选择居住模块外墙-窗节点，外墙面积 1 m<sup>2</sup>，对应窗墙比 30%（即 0.7 m<sup>2</sup> 墙体 + 0.3 m<sup>2</sup> 窗）。设定两个方案：

表 3 对比对象

方案 A（传统做法，无护照支撑的粗放方案）	方案 B（基于构件护照体系优化的装配式外墙-窗节点）
240 mm 实心粘土砖墙；50 mm EPS 板外保温；内外普通砂浆抹面；单层普通玻璃窗，普通铝框，无断热；材料选配以成本为导向，缺乏精细化节能与低碳优化。	150 mm 预制混凝土外墙板（工厂预制）；100 mm 岩棉外保温 + 抹面层；外饰面陶板或清水混凝土挂板；断热铝合金框 + 6+12A+6 Low-E 中空玻璃；

### 3.2 碳排放对比

#### 3.2.1 生产阶段碳排放对比

方案 A 生产阶段碳排放： $\approx 175.8 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ ；方案 B 生产阶段碳排放： $\approx$

158.7 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>。方案 B 在生产阶段碳排放略低，减排约 17.1 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>（约 9.7%）。

### 3.2.2 运行阶段碳排放对比

方案 A 运行阶段排放： $4250 \text{ kWh/m}^2 \times 0.55 \approx 2338 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ ；方案 B 运行阶段排放： $2600 \text{ kWh/m}^2 \times 0.55 \approx 1430 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ ；运行阶段减排量： $2338 - 1430 \approx 908 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ （50 年）。运行阶段减排约 908 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>；

### 3.2.3 全生命周期减碳综合评价

阶段	方案 A (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )	方案 B (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )	B - A 差值(kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )
生产阶段	175.8	158.7	-17.1 (减排)
运行阶段	2338	1430	-908 (减排)
回收阶段	-20 (视为减排)	-70 (视为减排)	-50 (额外减排)
合计	2493.8	1518.7	约 -975.1

注：回收阶段以“负值”表示减排； B - A 差值为 B 相对 A 的净排放变化量，负值表示减排。

## 3.2 结论

在装配式建筑和建筑全生命周期管理的框架下，构件护照系统具备明确的技术基础与实施路径。通过：在设计阶段嵌入标准化的护照字段；在生产 - 施工 - 运维 - 回收各阶段持续写入真实数据；利用这些数据进行节点级、构件级及建筑级的动态性能与碳排放分析，可以在保证建筑艺术表达和多专业协同的前提下，实现对围护节点等关键部位的可量化、可追溯、可优化的减碳管理。以典型外墙 - 窗节点为例，50 年周期内每 1 m<sup>2</sup> 节点约 975 kgCO<sub>2</sub>e 的减排潜力，充分证明了构件护照系统在绿色低碳建筑实践中的技术逻辑与落地可能性。