

预制箱式混凝土模块化乡村建筑技术体系研究

吴云涛（哈尔滨工业大学建筑与设计学院，地域建筑与现代木建筑研究所，博士在读，150001，黑龙江省哈尔滨市；沈阳建筑大学建筑与规划学院，地域性建筑研究院，教师，110168，辽宁省沈阳市），徐洪澎（哈尔滨工业大学建筑与设计学院，地域建筑与现代木建筑研究所，150001），高一迪（沈阳建筑大学建筑与规划学院，110168），王光文（辽宁超强防火保温科技有限公司，118300）

摘要：在人口老龄化、环境污染、能源危机、建筑全生命周期能耗大的背景下，建筑业技术更新、降本增效非常必要。随着我国乡村振兴战略的落实，乡村基础设施的改善和人们生活水平的提高，农家乐、民宿、家庭农场、电商、保障房、住宅翻建等乡村建筑的需求增加。本文介绍一种预制箱式装配式混凝土模块化集成式乡村建筑技术体系，以实现“造汽车一样生产房间模块，搭积木似的组装施工，建冷库标准的做围护结构保温，住酒店一样的生活便利”的乡村建筑模式。本文主要内容是论述模块化建筑的理论、设计方法和原则，混凝土模块的形制，房间模块结构和模块之间的连接构造，模块一体化保温系统、装配式装修材质和构造。

关键词：装配式建造和装修；箱式混凝土模块；乡村建筑设计；超低能耗保温

中图分类号：TV334 装配式钢筋混凝土结构；J59 建筑艺术；TU111.4+1 保温（隔热）

文献标志码：B **文章编号：**2096-9422（2024）00-0000-00？

Research on the technical system of Prefabricated Prefinished Volumetric Construction rural building

WU Yuntao (School of Architecture and Design, Harbin Institute of Technology, 150001, Harbin, Heilongjiang province; School of Architecture and Planning, Shenyang Jianzhu University, Research Institute of Regional Architecture, teacher, 110168, Shenyang, Liaoning province, China)

Abstract: Under the background of population aging, environmental pollution, energy crisis and large energy consumption in the whole life cycle of construction, it is very necessary to update the construction industry technology, reduce cost and increase efficiency. With the implementation of China's rural revitalization strategy, the improvement of rural infrastructure and the improvement of people's living standards, the demand for rural buildings such as farmhouse, homestay, family farms, e-commerce, affordable housing and residential reconstruction has increased. This paper introduces a prefabricated box type prefabricated concrete modular integrated rural building technology system, in order to realize the "car production room module, building blocks like assembly construction, building cold storage standard envelope insulation, hotel-like life convenience" rural building mode. The main content of this paper is to discuss the theory, design methods and principles of modular building, the shape of concrete modules, the connection between the room module structure and modules, the module integrated thermal insulation system, assembly decoration material and structure..

Keywords: Assembly construction and decoration; box-type concrete modules; rural architectural design; nearly zero energy building insulation

引言

2024年，中央一号文件将“三个提升”作为推进乡村全面振兴的重点。中央农办负责人表示：“要统筹推进乡村产业发展、乡村建设、乡村治理，建设宜居宜业和美丽乡村。统筹新型城镇化和乡村全面振兴，促进县城城乡融合发展”^[1]。我国乡村建筑的设计、生产、运输、施工、运行和拆除仍然延续传统手工为主的方式运作，远远落后于其他行业的工业化、信息化、智能化发展水平。

乡村建筑设计方面存在无正规设计图、技术水平低、舒适度差、造型单一等问题；建筑施工方面存在施工队技术水平低、乡村建筑劳动力减少和成本增加、工期长、可用材料受所在地市场限制等问题。如果采用现行梁、

板、柱二维装配式混凝土建筑体系，存在现场安装精度要求高、难度大、成本高、不能预制装修的难题。在乡村建筑施工过程中，由于很难找到专门装配式建筑施工队，工程误差和公差大造成节点错位，可能造成巨大的安全隐患。通过对乡村装配式建筑应用情况的调研，发现预制箱式混凝土模块化建筑凭借造价低、施工快、坚固耐久、技术简单的特色在乡村自建房市场中很受欢迎。对比传统别墅约 2 个月的土建工期，模块化建造方式在做好装配式基础后，只需要 2-3 个小时就可以安装好预制的几个房间模块，完成建筑的主体结构，为客户节省了大量时间和减少了监理施工的麻烦。

但是，现有国内预制箱式混凝土模块化集成建筑厂家多以水泥构件形式销售，缺少便于执行的建筑设计标准，对于成本影响较大的钢筋配置没有有效的监督，建筑结构安全性难以保证。由于缺少混凝土模块与装修一体化的技术图集，预制保温和装修工程的通用程度低、集成程度低、预制率低。高层混凝土模块化建筑采用现浇叠合板、叠合墙和现浇梁的工艺，用钢量和现浇混凝土比重较大，成本较高，不适合在乡村低层和多层建筑中应用。乡村建筑市场急需一种低层和多层箱式混凝土模块化建筑设计方法和建造技术的研究。

1 混凝土模块化建筑概念和与传统施工方式的对比

1.1 混凝土模块化建筑概念

预制箱式混凝土模块化建筑是在工厂内利用模具整体翻制出房间大小的带有顶棚、墙体、窗户和保温功能的标准化钢筋混凝土建筑空间模块，现场组装式施工只需要处理好模块之间的连接节点，形成整体式混凝土结构建筑。卫生间和厨房这些现场施工量大的房间，可以在工厂预制地面，让管线、装饰和与模块结构一体化预制成为可能。因此，此建造模式劳动力成本低，材料浪费少，建造效率高。

1.2 施工周期比较

以沈阳市某 2 层 130 平方米乡村民居正房翻建为例：地基、混凝土基础施工及养护 15 天；梁柱楼板施工及养护 20 天；墙体砌筑及屋面防水 10 天；水电安装同时测尺、生产及安装门窗 15 天；装修 30 天。工期总计 3 个月。如果采用箱式混凝土模块化建造技术生产和施工需要：地基施工、安装预制的混凝土独立基础和地梁以及连接节点养护 6 天，同时工厂预制出包含预埋管线套管的混凝土房间模块，再加上安装模块 8 天；砌筑、预制门窗、安装水电及门窗 6 天；装配式装修 20 天。工期总计 1 个半月。比较结果见表 1：装配式箱式混凝土模块化建造比传统施工方式节省工期 90-40=50 天。

1.3 施工成本比较

45 天工期的项目经理兼材料员工资及交通费等成本减少：50 天*400 元/天*1 人=20000 元；场地设施费减少：50 天*100 元/天=5000 元；建筑主体成本减少 700 元/m²-500 元/m²=200 元/m²，200 元/m²*130 m²=26000 元；管线开槽成本减少 10 元/m²*130 m²=1300 元；垃圾清理费减少 1000 元。比较结果见表 2：装配式箱式混凝土模块化建造比传统施工方式节省成本 53300 元，每平方米节省 410 元（不包括甲方 50 天的租房等成本）。

施工周期(天)	总计	基础	主体	砌筑	安装	装修
传统施工	90	15	20	10	15	30
模块化建造	40	6	4	4	6	20

表 1 施工周期比较

与传统建筑 施工比较	项目 经理	设施 费	建筑 主体	建筑 主体	垃圾 清理
模块化建造 节省 53300 元	2000 0 元	5000 元	26000 元	1300 元	1000 元

表 2 施工成本比较

2 设计原则和设计理念

2.1 模块化乡村建筑设计原则

- 2.1.1 遵循当地气候、乡村地域文化、空间机理、场地环境和利用当地资源。
- 2.1.2 满足农业生产需求，营造舒适生活环境，有利于当地经济发展。
- 2.1.3 建筑模块单元标准化，“少规格、多组合”^[2]，建筑室内外设计模数协调，承重结构对位。
- 2.1.4 节能、节地、节水、节材、健康和环境保护，符合当地绿色建筑评价标准的相应要求。

2.2 模块化乡村建筑设计理念

- 2.2.1 模块的工业化生产和标准化设计

混凝土建筑模块单体是第一层级产品，不同功能房间模块为第二层级产品，不同保温、装饰配置为第三层级

产品，建筑模块集成智能和功能性材料是第四个层级产品。模块化集成式设计将复杂建筑整体方案拆分为一系列标准化的建筑模块单元，以便于进行优化和批量生产，实现建筑的高效、快速建造。

模块单体高度有 3m、3.5m、4.2m 的规格；长度有 6m、6.6m、7.2m、8m、9m 的规格；宽度有 3m、3.3m、3.6m、4m 的规格。卫生间和浴室用轻质材料隔墙间隔或是 SMC 整体卫浴产品。如图 1，由五个 7.2mX3.6mX3m 模块构成 2 层的三室两厅户型民居，其中客厅由两个少一面墙的建筑模块合并出所需的大空间。

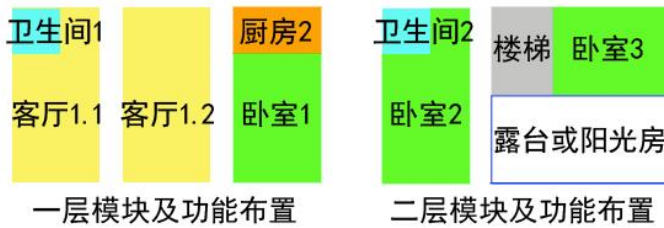


图 1 2 层模块化民居房间模块布置图

2.2.2 交互式 and 参数化设计

基于乡村建筑风格、功能类型等并不复杂，建设 BIM 模型库配合 AI 制图工具可简化设计流程，将设计公司转化为设计软件开发公司。利用 ArchiCAD 软件建设集成功能、模块结构、水暖电、装修构造的箱式建筑 BIM 模型库。将模型库转化为适配现行建筑分析软件的插件，以便进行结构、经济、性能等分析和生成材料采购清单，建设与客户交互式设计的互联网平台。BIM 模型库中建设如居住、办公等不同使用功能的系列标准化的模块。建筑的机电设备、管道、电线等系统划分为一系列标准化的模块，连接处预埋套管，设计通用化、系列化、标准化的接口连接。在具体项目中，只需要在合理的规划和功能布置分析基础上调用现成的模块，组合后软件自动配置各专业系统图。

2.2.3 多样化组合和个性化定制

A. 模块化建筑可以通过不同形状、大小和功能的模块进行设计，以适应不同的用途和需求，在结构方向实现多样性。例如，需要大空间时，利用建筑模块围合出类似庭院的箱间空间，再在上方架设钢结构屋顶封闭为中厅。B. 利用穿插、削切、拉伸、旋转、悬挑、重复、凹凸、叠加等多样化造型手法构成形体的变化。C. 可利用轻钢结构、建筑模块工厂化翻制的生产特点、3D 打印技术，根据工程量制造个性化模块，实现现场很难做出的异形造型。D. 利用文化符号或装饰材料形成丰富的外观效果。E. 应用可再生能源、绿色建筑部品作为提升建筑科技精神的元素。如图 3，选用轻钢结构加仿古金属立体瓦复合板做出坡屋面，加上轻质混凝土仿木门斗、装饰线角等营造出新中式乡村民居的风貌，如图，2。



图 2 模块化民居外观

2.2.4 装饰、绿色建筑技术与模块集成化设计

装饰、保温与建筑模块一体化工业化预制。例如，厨房模块在工厂预埋管线，铺装保温、集成吊顶、墙面和地面瓷砖、安装橱柜和设备。智能控制系统、高效的能源系统和可再生能源系统与建筑模块一体化设计，以便营造舒适、节能的建筑环境。乡村电气化是大势所趋，就地发电就地使用是经济的技术方案。太阳能光伏发电系统

具有智能控制免维护特点，如图 3 结合温室屋面和屋顶一体化设计可节省项目初投资，获得持续的电能回报。

通过被动式太阳能建筑设计，合理利用自然风、光，减少人工照明和空调的使用。夏季和过渡季节，开启阳光房侧窗通风，玻璃屋面下有阻挡阳光直射的遮阳百叶。冬季阳光房具有保温隔热层作业，蓄积阳光带来的热量。玻璃屋面下边的遮阳百叶角度允许冬季太阳高度角照射到室内。严寒和寒冷地区的冬季室外万物凋零，阳光房内的小花园生机盎然、富有生活情趣。

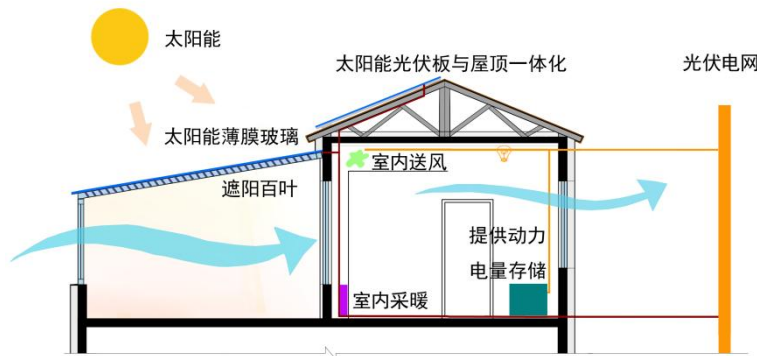


图 3 太阳能建筑一体化系统示意图

3 模块化建筑结构与构造

3.1 建筑模块单体

从建筑结构方面考虑模块化建筑可划分为：带有顶板的混凝土剪力墙箱式模块和混凝土框架箱式模块。一般剪力墙模块采用单层钢筋网，在圈梁和四角柱的位置为双层钢筋网，顶板的四周也是双层钢筋网，洞口附近有斜向加强筋。三维房间模块各个面钢筋连为一体，在各自受力基础上形成蒙皮效应，抗震性能非常好。框架模块的设计需要考虑结构的承载力、稳定性、耐久性和安全性等方面的要求，边缘构件的钢筋配置应符合混凝土结构建筑相关标准。

除了建筑设计要求，脱模吊装时巨大的拉拔力和运输过程中不亚于地震的颠簸对模块单体也是不小的考验。两种模块单体短边的洞口尺寸应小于运输车辆的宽度，框架模块单体底部应保留连续的环状钢筋，运输时应架设临时支撑。

混凝土模块单体生产流程是：自动化切割和编织建筑模块单体墙体和顶板等钢筋网，安装固定预埋的连接件、吊件、管线套管和设备盒等。将空间钢筋网放入模具，浇筑混凝土。混凝土养护完成后出模，再进行安装工作。

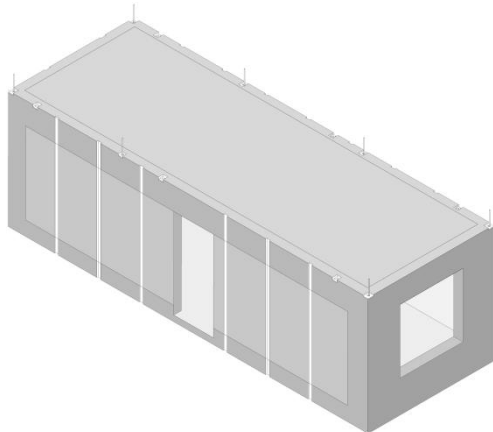


图 4 预制混凝土模块单体



图 5 混凝土模块单体翻制模具

3.2 模块化建筑结构

在地勘分析和结构设计基础上，采用预制钢筋混凝土独立基础和预制地梁。在防线、开槽、降水和垫层工作后，将基础按照设计图放置到位。绑扎地梁和独立基础交接处钢筋，在节点处支模，浇筑混凝土。

在低层和多层建筑中，剪力墙模块采用模块单体的预埋钢板与连接钢板焊接的方法实现模块单体之间的连接；框架模块除了用预埋钢板的连接方式，地梁或模块单体顶面的墙体位置向上伸出预埋连接钢筋，连接钢筋插入上层模块墙体的浆锚孔中保证上下层模块单体的竖向连接。建筑模块在与相邻模块贴合的表面处相对应地设置

了若干个贯通式咬合凹槽构造，凹槽内相对伸出 U 形钢筋，两个凹槽开口相对合拢后形成浇筑砂浆的空腔模具。在凹槽内相对伸出 U 形钢筋中插入贯通上下层模块的连接钢筋，凹槽内浇筑非收缩砂浆实现模块单体之间的水平方向的连接^[3]。砂浆固化后形成条形混凝土咬合在两侧墙体中，从而增加了建筑的整体性、抗侧力和抗剪力功能。



图 6 预制混凝土梁柱和装配式节点构造（图片来源：UIBIM 建筑网）

4 装配式超低能耗保温构造

在严寒和寒冷地区乡村建筑工程中，由于苯板（导热系数 $0.037\text{W/m}\cdot\text{K}$ ）和挤塑板（导热系数 $0.030\text{W/m}\cdot\text{K}$ ）外保温材料性价比高，应用比较普遍。但是，当建筑节能标准提高到被动式超低能建筑时，苯板厚度需要 247mm ，挤塑板厚度需要 210mm ，保温层过厚过重脱落的风险也随之增大。真空绝热板是一种 A 级防火材料，抽真空的板材以及双层金属膜对传热、对流和热辐射阻隔效果良好，导热系数不高于 $0.008\text{W/m}\cdot\text{K}$ ，经过测算达到超低能建筑标准的保温层厚度是 56mm ^[4]。内侧的混凝土墙体的蓄热和热惰性良好，有利于调节室内温度波动的振幅，热工性能良好。

由于真空绝热板规格有限，安装预留的板缝存在热桥问题；真空绝热板外层还存在易破损的风险，将真空绝热板嵌入苯板构成复合板可以解决上述问题。优点是利用苯板厚度的控制易于达到相应标准要求的围护结构传热系数，同时降低了应用真空绝热板引起的成本过高问题。以沈阳为例，可以采用外墙保温系统为 150mm 厚钢筋混凝土墙体、A 级防火苯板 100mm ，其中内侧 30mm 厚度中 60% 面积内嵌真空绝热板的构造。复合板背面用胶泥粘接的同时利用连接挂件固定在镀锌角铁龙骨上。角铁龙骨的主要作用调整墙面因混凝土模块安装误差导致基层墙面不平。如果墙面平整度好，也可以将连接挂件直接固定在墙面上，利用连接件调整复合保温一体板的平整度。每个模块四周预留一条不贴保温，建筑模块在施工现场固定后补贴模块之间缝隙处这条保温板，由此可以杜绝模块之间缝隙引发的后续漏气漏水现象。

结语

本文介绍了一种低成本、超低能耗预制装配式箱式混凝土模块化建筑技术体系的设计理念和关键技术。此箱式模块化建筑技术实现了乡村建筑高质量、高效率、用工量低、工法简单的建造目标，把 90% 以上工作移到工厂加工，让智能建造和机器人等高科技技术更容易应用到建筑产业，利用科技创新把传统建筑手工施工改变为工业化生产和现场安装。节约了现场施工产生的边角废料和木模板的浪费，减少了噪声、空气污染和垃圾排放。以房间为单位的楼板与墙体一体化的钢筋混凝土建筑模块抗震性能更好，用户感觉混凝土墙体材料更结实耐久。

源于箱式混凝土模块化建筑以高预制率特点，其可以集成各种材料、部品和设备，形成贯通上下游建筑产业链的高质量公司，有利于整合资源打造具有国际竞争力的“中国建造”集团。绿色材料、新能源设备和节能设备与建筑模块集成，节省了原安装位置的表面材料，有利于绿色建筑技术在低碳乡村建设中的应用。模块化、集成式、数字化建筑设计和智能建造技术将推动建筑业迭代更新、提质增效，深化建筑业向工业化、数字化、绿色化转型，形成新质生产力^[5]。

参考文献：

- [1] 新华社，推进乡村全面振兴不断取得新成效——中央农办负责人解读 2024 年中央一号文件，[R]. 中华人民共和国农业农村部网，北京，2024；
- [2] 缙毅立，陈俊，宗德新等，装配式轻钢结构乡村住宅模块化设计研究——以重庆为例，[J]. 小城镇建设，2024，42(02)：94-103；
- [3] 周晓光，洪靖，杨志敏，慕童，陈凯杰，混凝土模块化建筑在居住建筑中的应用，[J]. 广东建材，2023：108-111；

[4] 王伟龙, 陈兴涛, 左长安, 马振伟, 超低能耗建筑的真空绝热板复合高性能有机保温板系统构造设计研究, [J]. 新型建筑材料, 2023: 132-134;

[5] 张跃先, “新质生产力”推动建筑业现代化转型 高质量发展, 中国建设新闻网, [R]. 北京, 2024。

作者简介: 吴云涛(1975), 男, 汉族, 沈阳, 副教授, 硕士, 研究方向(绿色装配式建筑技术)(wuyuntao@sjzu.edu.cn)。

作者基本情况表

姓名	吴云涛	性别	男	籍贯或出生地	沈阳
国籍 / 民族	汉	出生年月	1978.7	职称/职务	副教授/教师
毕业院校	英国诺丁汉大学		研究方向	装配式、绿色建筑技术及设计方法	
专业 / 学位	建筑学/硕士			E-mail: wuyuntao@sjzu.edu.cn	便于编辑部 联络, 不要失 联
工作单位	沈阳建筑大学			引用本刊文献数量	1
联系电话	13082428808				
邮编-通信地址	沈阳市浑南区浑南中路 25 号, 沈阳建筑大学地域性建筑研究院, 110168				

另:

(1) 导师简介:

徐洪澎, 哈尔滨工业大学建筑与设计学院教授。地域建筑与现代木建筑研究所负责人; 哈尔滨工业大学中国木材保护工业协会木结构建筑研发基地建筑专业负责人; 中国木材保护工业协会专家委员; 中国木材保护工业协会木结构绿色产业分会副秘书长; 国际木材科学与技术协会(SWST)会员; 黑龙江省绿色建筑委员会委员; 《中国建筑教育》杂志编委。

(2) 属于基金项目资助的论文:

辽宁省教育厅基本科研项目 (Z2624030); 辽宁省科学计划科技攻关项目 (2022JH1/10800017)