

功能、层级及其映射：产品理论视角下的楼板系统设计方法研究——以轻型结构为例

Function, Hierarchy and Its Mapping: Research on the Design Method of Floor System from the Perspective of Product Theory and Taking Lightweight System as an Example

孙宇璇 | SUN Yuxuan

中图分类号: TU201.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-6740 (2024) 05-0071-08 DOI: 10.12285/jzs.20230711001

摘要: 针对楼板系统功能日益复杂, 而相应建筑产品设计和发展相对滞后的问题, 本文试图发展产品理论视角下的轻量楼板系统设计方法。首先, 依照产品理论, 从功能结构、物理层级、映射关系三个方面建立对建筑产品的分析框架。其次, 在此基础上, 按照上述方法, 以瑞士木楼板产品 Lignatur 和“未来立方”展厅项目为例, 对轻量楼板产品进行详细分析。最后, 总结出设计方法, 从三个方面助力提升建筑产品设计, 并以轻量楼板为例, 指出提升后产生的综合效益, 进一步强化产品应用场景与研究价值。本研究完善了对建筑部品设计的分析框架, 更好地为其模块设计、系统整合、性能提升等方面提供理论依据, 使装配式建筑实践趋向多样化、精细化。

关键词: 楼板系统、产品架构、设计方法、轻结构建筑

Abstract: In view of the increasingly complex functions of the floor system, the design and development of the corresponding building products are relatively lagging behind. The paper attempts to develop a floor system analysis method based on the perspective of building products. First, based on the product theory, an analysis framework for architectural products is established from three aspects: functional structure, physical level, and mapping relationship. Then, on this basis, taking the Swiss wooden floor product Lignatur and the “Future Cube” exhibition hall project as examples, the lightweight floor products are analyzed. Finally, the potential for improving the design of architectural products is summarized based on the analysis results, and taking lightweight floor systems as an example to demonstrate how the enhanced performance leads to comprehensive benefits, further strengthening the application scenarios and research value of the product. This research improves the analytical framework for architectural component design, provides better theoretical basis for its module design, system integration, performance improvement, etc., and contribute to the diversification and refinement of prefabricated building practice.

Keywords: Floor system, Product architecture, Design method, Lightweight construction

作者:

孙宇璇, 重庆大学建筑城规学院助理研究员; 重庆大学建筑城规学院健康人居环境设计研究中心副主任。

国家自然科学基金青年科学基金项目 (52308005);

中央高校基本科研业务费 (2024-CDJXY014);

中国博士后基金面上项目 (2024M753838)。

录用日期: 2023-12

一、议题的产生：系统性发展楼板产品设计方法的必要性

当柯林·罗定义柯布西耶建筑中的楼板实际就是墙时, 他精确地指出了多米诺体系中水平楼板是分隔平板 (Slab) 的单一维度属性, 然而, 令柯布西耶难以预料的是, 伴随着建筑设备技术的进步, 楼板已发展成为复杂的“楼板-天花系统”

(Floor-ceiling System), 横向联系多个建筑子系统, 挑战传统的结构与构造方式。具体来说, 楼板系统的发展主要受两方面推动力作用。第一, 多重功能的复合。除使用者最关心的室内视觉效果与水平承重的基本结构属性外, 多重技术诸如消防喷淋、报警、声音传感器等也在吊顶中持续增加, 更新的技术趋势包括智能化传感设备, 如测定室内温湿度、二氧化碳含量等。可以说, 楼板

早已不再是仅用作分隔的一维平板，而是具备包括视觉、感知觉、承重等多重功能作用的三维服务型空腔 (Cavity)^[1]，是极具复杂性的建筑部分。第二，调控环境的需求。传统楼板天花系统中，调节室内空气湿度的风管占比较大，在构造层面同结构形成冲突。而随着可持续技术与集成构造的发展，调控方式也开始变革。例如，更多公共建筑利用场地冷热源以热辐射的方式调节室内物体表面温度，这种用水替代空气的调控方式不仅极大地提升了能耗效率，更促使在结构与构造设计层面做出改变，以至于被学者盛赞为“范式转变” (Paradigm Shift)^[2]。

然而，与上述楼板系统需求快速发展相矛盾的是相关建筑产品发展的潜在滞后性。20世纪末至21世纪初，预制空心楼板技术快速发展，产生了诸如 Cobiax 等利用塑料作为永久模具降低自重与能耗的预制混凝土楼板产品^[3]；而在整合设备方面，也发展出吸纳设备管线和预留孔洞等不同楼板产品：前者通过在楼板预留的通道内置入热水管，实现均匀的热量辐射，避免了额外风管；后者则通过精益化找形 (Form-finding)，使楼板成为空间形态复杂的构件，管线可自由穿行于其中，以便灵活更换 (表1)。尽管一些产品在欧洲建筑工业发达的地区已广泛应用，但面对日益复杂的技术要求、新兴的材料与工艺、智能化的建造流程，现有针对建筑产品级别的研究依然相对缺乏，其中对以楼板系统为例的重要建筑部件的设计研究更是十分有限。究其原因，在于发展对楼板产品的分析框架与设计方法集成了设计、工程、

管理决策等多个学科的大量知识，且现有研究多数聚焦于结构与性能分析，而未能有效对设计进行深入剖析。

因此，本文主要基于构造知识与产品理论，立足建筑学视角进行设计转译，从功能元素结构构建、物理模块层级划分、两者关系映射这三方面建立解释、分析、发展楼板产品的设计方法。最后，使用上述三种方法深入分析轻量型建筑楼板体系，并探讨该分析框架的外延启示。相关理论能够明确定义产品属性、分析产品功能、发展产品概念，对工业产品设计的成功十分关键，并在机械制造业领域已有较多讨论。而轻量型建筑体系不仅兼具高效与适应特性，还具有很强的建筑产品属性，自然成为介绍该理论体系的最直接切入点，以帮助构建针对预制装配建筑设计方法的建筑学学术话语。本文所讨论的设计方法亦能扩展应用至其他建筑部品，以设计为牵引，提升其性能，以应对日益复杂的建筑技术。

二、概念的综述：产品理论视角下的设计方法

产品理论泛指产品设计中的相关理论，本文所依据的主要是产品架构理论 (Product Architecture Theory) 与产品层级划分理论 (Hierarchical Range of Building Products)。前者是对探索产品功能结构、模块划分、接口设计等一系列产品开发过程中所需设计理论的统称^{[4][5]}；而后者则属于为发展建筑产品所提出的分析方法，主要借鉴荷兰代尔夫特理工大学建筑产品领

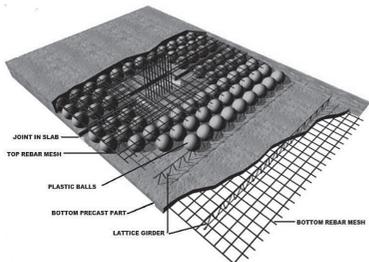
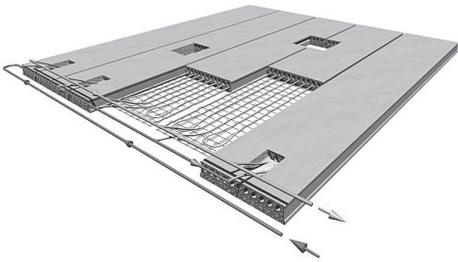
域学者埃克豪特 (Eekhout) 的相关论述^[5]。建立产品架构就是明确系统内模块相互联系的方式^[6]，是产品设计与开发的重要环节。根据对产品理论的梳理总结，本文概括出以下三个角度分析建筑产品：(1) 功能元素的结构构建；(2) 物理模块的层级划分；(3) 前两者之间的联系映射^[2]。选取产品理论解析楼板产品的原因有以下两点：第一，从普适性上而言，楼板作为预制化建筑部品本身具备产品属性，以标准化、模块化的方式在工厂中大量预制生产，后进行在地浇筑组装，类似的部品还有集成幕墙、楼梯等；第二，从特殊性上而言，楼板具有发展成为高度集成体系的潜力，既是建筑水平承重结构，又容纳了诸多设备管线，还影响了室内装修与视觉设计，涉及多专业领域的合作 (结构、给排水、电器、暖通、室内等)，其内部多系统冲突所具备的复杂性与产品中功能的复杂性亦有相似之处。

1. 发展功能结构

功能是产品的主要特征，一个产品身上可能具备很多核心功能，这便需要建立有效的功能结构，以整合产品线并提升产品的市场竞争力。功能建模是产品开发早期中的重要环节，根据产品架构理论中对功能建模的定义。该过程是将产品的整体功能分解为更小的、易于解决的子功能，也称为功能分解，而子功能通过流 (Flow) 相关联，由此发展出功能结构模型^[7]。在一般工业产品中，有三种流：物料流、能量流、信号流。图1以电动螺丝刀的功能

三种集成不同功能的混凝土楼板产品示意

表 1

a. Cobiax 轻质混凝土楼板	b. TCA 热组件楼板	c. HoleDeck 提供管线位置楼板
 <p>Labels: JOINT IN SLAB, TOP REBAR MESH, PLASTIC BALLS, BOTTOM PRECAST PART, LATTICE GIRDER, BOTTOM REBAR MESH</p>		

模型图为例展示这三种流^[8]。建筑产品并不具备上述流的属性，取而代之的是精细化的功能结构，即发展出功能层级，包含首要功能、一级功能、二级功能、支撑功能等层层递进的关系。产品功能结构的建构过程是复杂的，在这个过程中，需要对子功能筛选、排序、再进一步整合的精细化，以至于制造业领域需借助矩阵等数学工具作为决策依据。而建筑产品则因功能与部件种类远小于工业机械产品，常依据包含建造与装配、用户使用两个重要维度组成的全流程需求来分析功能，并以此为基础划分物理模块，确保各模块功能的独立性，合并相似，避免交叉。

2. 明确物理层级

工业产品所涉及的零部件成百上千，构成系统复杂。按照诺贝尔经济学奖得主司马贺 (Herbert Simon) 对复杂系统的论述，层级结构体现出了进化，整合将获得

生存，而缺乏整合的零件随着系统复杂程度的增加，会因相互之间作用过度而导致效率低下^[9]。按照这一思路，实现建筑工业化的关键同样在于对建筑系统的拆分，因此，从产品开发与设计角度而言，如何正向划分物理模块层级是架构理论的核心^[3]，有效的层级结构将在生成、组装、使用环节节省大量成本并保证用户满意度。由此启发的设计方法则是识别产品模块的物理层级，并对其客观描述。

经过对建筑产品理论的梳理发现，荷兰学者埃克豪特最先提出了产品中的物理层级。按照他的定义，建筑产品按照层级从下至上分为：原材料、材料、复合材料、商业材料；次级元素、元素、超级元素、次级构件、构件、超级构件、建筑部件、建筑部分；建筑、建筑综合体^[5] (图2)。在整个过程中，从形成元素到建筑部分接合完成属于建筑产品级别的设计，而前四个属于材料级别，过于底层；后两个涉及空间，过于宏观。层级划分的主要依据则

基于产品的加工场所和材料构成。具体而言，需要在地加工的产品层级更高，而在工厂加工的层级更低，加工地的不同直观反映出产品构件的大小和背后所需工艺的差异。而材料的区分则主要考虑是否由单一材质构成，这种区分能够反映产品的复杂程度。

3. 建立映射关系

当物理层级和功能结构都已经清晰后，就需要将两者有机地联系起来，这就是从功能元素到物理模块的映射。通常而言，映射关系包含三种：一对一、多对一、一对多，且三种关系常混合出现^[4]。对于高度集成的产品而言，通常是多对一的映射关系，也就是多个功能由一个组件实现；而模块化的产品则更多地表现为一对一的映射关系。通过老式电话与智能手机映射关系的对比，我们可以清晰分辨一体化或模块化的差异^[4] (图3)。显而

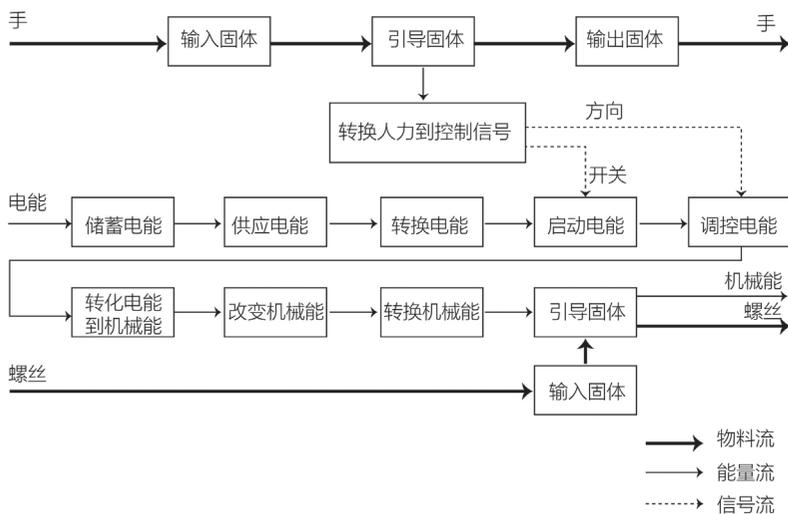


图1: 以电动螺丝刀为例的产品功能结构示意图

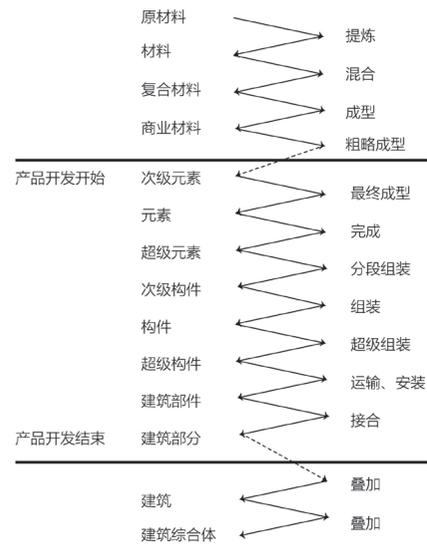


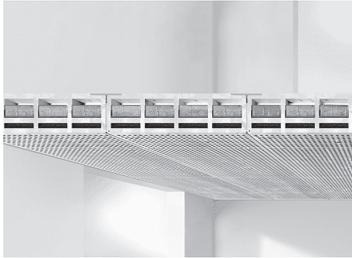
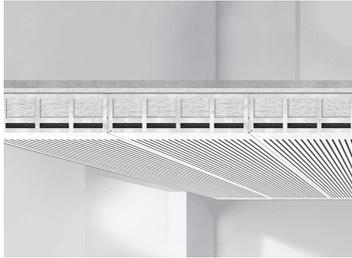
图2: 埃克豪特产品开发理论中的物理层级划分



图3: 老式电话与智能手机从功能元素到物理组件的映射图对比：模块化设计与一体化设计的差异

不同功能下的定制 Lignatur 产品示意图

表 2

类型一：基本原型	类型二：防火隔声类型	类型三：防火保温类型
最基础箱型楼板设置，原木质感，其余性能设置均为空	增加防火层、隔音层、声学混响面 (Type 3)，以及抗剪力链接，楼板整体厚度增加	白色质感，填充变为保温层、混响面 (Type 8)，增加结构地下室防潮层
		

易见地，映射关系的差异同功能和物理组件拆分的精细程度有关，大多数产品呈现为一体化与模块化的混合。通过将功能元素和物理组件以图解形式进行对应，映射不仅可以区分模块化和一体化的产品，展示出产品集成的程度，还为抽象层面的思考提供依据，即评估哪些部件具备整合潜力。

三、分析与结果：以轻量楼板产品为例

在明确了产品理论所提供的设计方法后，下文将主要以轻量楼板系统为例使用上述方法进行实证分析。本文选取两个主要研究对象：一个案例是瑞士楼板产品 Lignatur，该产品最初研发于 1984 年，已有近 40 年历史，投入商业化使用也超过 25 年，楼板使用被动式复合保温层以避免涉及过多复杂的管线设施；另一个案例是建成于 2016 年的“未来立方”展厅项目，它由深圳元远建筑科技团队同香港中文大学朱竞翔教授团队开发设计（以下简称“未来立方”），该项目超越产品本身属性，从空间层面探索了轻量楼板在使用中的高效紧凑性与变更灵活性的双重潜力，并预留主动式调控中管线的位置。从设计方法描述侧重上看，前者以其长期探索下稳定完善的产品性能为分析楼板功能结构提供了良好样本，后者则因设计团队致力于在建筑产品级别创新而为分析物理层级与映射关系提供了参照。

1. 功能细分

楼板产品功能要求日益复杂丰富，基于理论和实践两个方面归纳研究其细分功能。理论研究方面，主要依据瑞士学者约瑟夫·科尔布 (Josef Kolb) 对木结构系统研究给出的悬空楼板 (Suspended Floor Structures) 功能期望：提供足够的承载能力、最小的挠度、高刚度（振动小）、有效的隔声和隔热性能，以及必要的防火性能^[10]。实践中的产品上，依据瑞士发展成熟的木结构楼板产品 Lignatur 中功能选项分类进行总结，涵盖承载力、防火、声学环境、美学、保温几个维度。其中，隔声填充材料和保温材料共享箱型空腔，具有不兼容性，而防火层则是单独一层，随防火性能提升而增厚，最终的楼板厚度为 120~300mm。用户可以通过交互页面选择设定配置，网页中便可自动生成相应预览图，完成产品定制 (表 2)。因此，结合产品理论中对产品层级的划分，轻量楼板系统以分隔上下层垂向空间为基本核心功能，以耐久和环境调控为两个分支主要功能，在此基

础上发展出一系列次级功能与支撑功能，建立详细功能层级 (表 3)。

2. 层级嵌套

依照物理层级划分的方式分析“未来立方”项目中的轻质复合楼板，可识别出多个模块经过聚合而形成整体的过程。这一过程本质是对其内部成分不断拆解，并定位成分相互之间的嵌套关系。首先，原材料（如欧松板、保温石棉等）经过加工处理变成特定尺寸的面板与杆件，可视作基本元素，例如蒙皮面板，其尺寸为 1.2m×2.4m，选取模数化的数值以便生产加工，且减少废料产生。在上下蒙皮面板中间填充保温材料，增加木龙骨，支撑木方使用干燥花旗松木方并由螺栓固定，整个木楼板上表面再涂刷三道防火涂料，使结构具备保温、防火功能，如此处理后形成了产品级别的 SIP (Structural Insulated Panel) 复合木楼板，根据定义可视作构件或次级构件 (图 4)。同时，楼板上层表面预开小圆形送风口，便于下部整合在结构中的风管送风。中间的钢桁架层为主要承

箱型楼板功能细分表

表 3

首要功能	一级功能	二级功能	支撑功能
分隔垂向空间	构造耐久	结构受力稳定	(1) 承受水平荷载；(2) 满足不同跨度要求；(3) 承受自重
		材料安全性	(1) 满足不同等级的耐火需求；(2) 允许材料更换
	调控环境	声音环境调控	(1) 满足不同程度隔声需求；(2) 满足不同类型声学要求
		温湿度调控	(1) 被动：满足材料保温性能；(2) 主动：整合机电管线
		视觉环境调控	(1) 满足颜色要求；(2) 满足不同光线要求

重构件，全部由工厂预制生产，它们整体高度 500mm；相邻两个竖向垂直支撑的间距为 420mm；两个桁架之间的间隔为 1200mm，是上层楼板长度的一半。而下部的铝合金吊顶被连续的白松木条覆盖，形成覆盖层，以保证与室内木楼板等木质构件视觉连续。最后，SIP 木楼板产品协同钢桁架、风管、铝板吊顶等进一步复合而成轻质楼板，具有了承重、环境调控、装饰等综合功能（图 5）。以上构件级别的产品均由工厂加工完成，而整体轻质复合木楼板则需在现场组装，应被视为建筑部件。图 6 展示了复合楼板物理层级划分示意图。

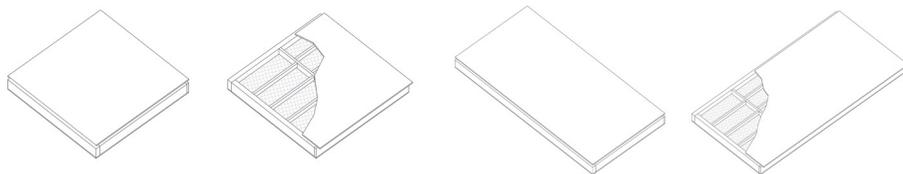


图 4：两种尺寸的 SIP 产品示意

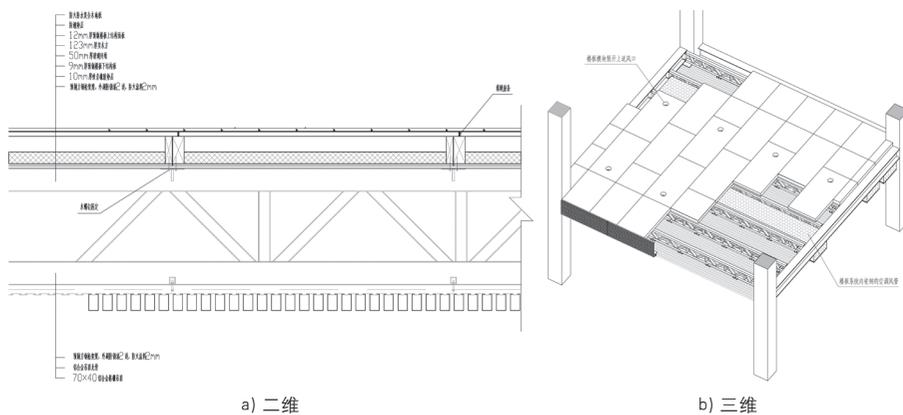


图 5：复合轻结构楼楼层示意图

3. 建立映射

建立映射即划分模块的过程。在轻质复合楼板的设计中，多数功能元素可一对一映射到物理组件，也有部分功能属于多对一的映射，成为独立模块，而功能则可能分布在不同物理组件中，呈现为多对多的功能混合。如果在映射图上以简易的方式暗含空间关系，则更有助于提升产品集成程度。

通过对“未来立方”建筑师构思过程进行深入挖掘，一种集成度更高且更轻盈的楼板可能性呈现在设计过程中（图 7）。实际项目中，SIP 楼板中的玻璃棉具有吸声和保温作用，属被动调控；而钢桁架中的风管则起到主动调控热环境的作用，上层的 SIP 木楼板也起到分隔作用。在方案的早期版本中，建筑师构想取消风管以及上层的复合楼板，利用结构内部的空腔容纳并运送气体；取消附加天花吊顶，利用木楼板排气孔等自身元素的排布组合成图案，兼具装饰作用。构想中的更加一体化做法与现有模块化做法的差异，亦可由映射图解呈现（图 8）。类似构思在重结构楼板体系中已经实现，如克雷兹在劳申巴赫学校中使用了现浇混凝土波折形楼板，它内部依靠凹凸的形态整合了不同尺寸的设备管线，不需要额外的吊顶饰面，同样作为高度集成的楼板，其映射图与轻结构楼

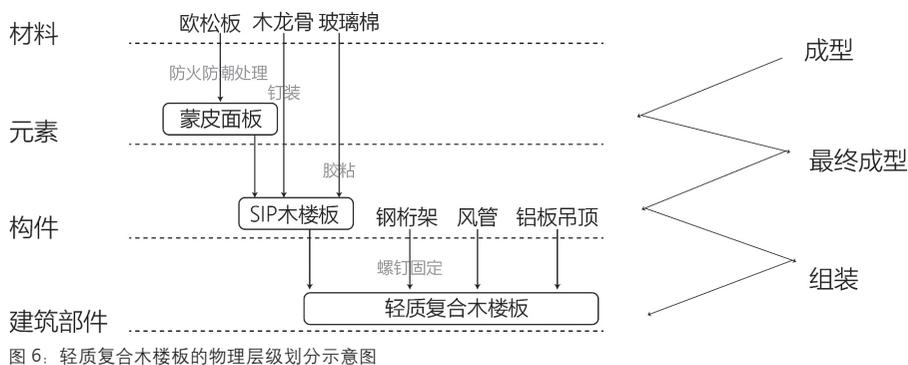


图 6：轻质复合木楼板的物理层级划分示意图

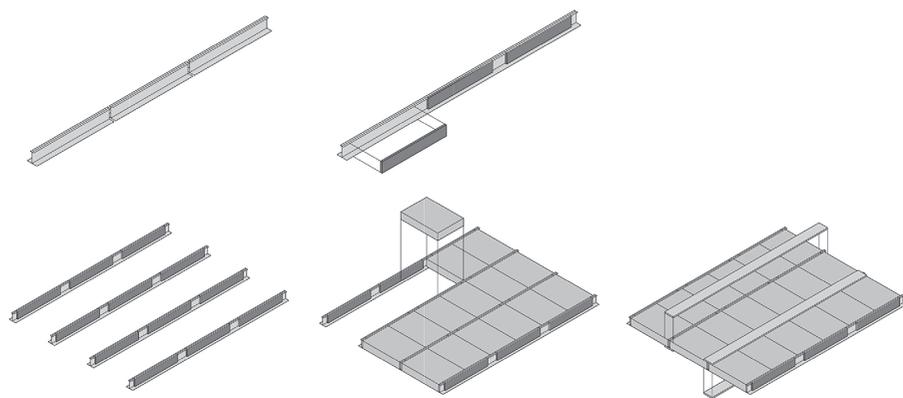


图 7：未来构想进一步整合为更轻盈的预制楼板的示意图

板构想有相似之处^[11]。而轻结构中的集成因构件的轻便易于分隔，不依靠混凝土粘合成整体，兼顾了灵活性，避免了对在地建造条件的较高要求，以及造价高昂、后期维护不易等潜在问题。

四、作用与效益：设计方法推动的建筑产品提升

至此，本文介绍了产品理论视角下的部件设计方法，并将其应用对轻量楼板系

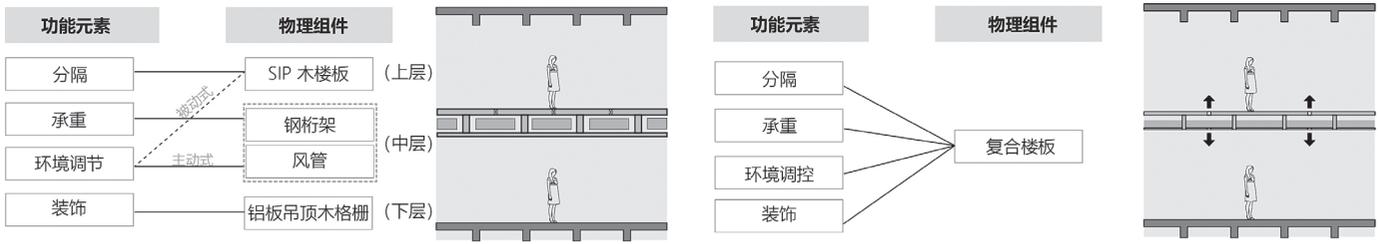


图 8: 现有及进一步整合轻质复合楼板依照产品架构理论的映射图解

统的分析上。接下来, 本文将概述上述提到的方法是如何提升建筑产品设计的, 并继续以轻量楼板系统为例, 讨论产品设计改进后产生的综合效益, 回应前文提到的楼板系统设计与技术提升后对建造行业的推动作用。

1. 设计方法对建筑产品的提升作用

产品理论中针对方法的研究成果为建筑产品设计提供多角度的启示: 不仅贡献了描述语汇, 使建筑产品中基本功能结构得以清晰展示, 辅助提炼产品部件的核心特征; 还提供了解释框架, 解释了整合程度, 并基于此分析哪些功能元素应进一步整合; 也发展了设计方法, 根据功能结构与映射关系的梳理, 以物理构件为操作对象, 发现其内部整合的设计机会, 改善部件的构造设计。这三者之间由浅入深, 层层递进。那么, 下文将深入展开上述三方面在建筑产品设计提升上的作用。

(1) 明确功能主次、指引性能提升。对功能细分的详尽描述从两个方面助推发展楼板产品。一方面, 建立层级化功能结构的过程帮助明确功能的主次。对楼板而言, 有一些功能是通用的, 例如承重和防

火, 而另外一些功能则是个性化的, 例如不同场景下的声学要求。通常而言, 通用的功能具有优先性, 但也不意味着个性化的功能缺乏价值, 在特定场景中, 其价值可能反而超越通用功能的价值。详尽的层级功能结构如同系统化的菜单, 为产品研发提供了操作选项。另一方面, 不同子功能在空间上可能存在潜在冲突, 例如 Lignatur 产品中的隔声与保温材料共享空腔, 这显示出对兼具隔声与保温性能材料的潜在需求, 从而使多个支撑功能合并, 提升整体楼板性能。

(2) 通过内部构件的解构与重构, 发展产品系列。对产品物理层级进行识别并结合不同功能属性, 即可解构出产品模块。这些模块本身具备产品属性, 它们之间亦可重构, 或叠合其他外部需求形成新的产品, 发展出产品家族序列。这些产品共享相同的衔接方式、连接构件等, 以便于标准化管理。类似的例子常见于制造业, 如相同品牌的汽车包含轿车、SUV 等不同系列。而建筑产品中, 以澳洲 TECBUILD 公司生产的楼板产品为例, 该公司研发的楼板构件系列中包含三类产品: 预制轻型梁、预制轻型混合结构楼板(与混凝土混合)、预制轻型箱型楼

板。预制梁产品可单独作为独立构件使用, 也存在于混合楼板或箱型楼板两种产品中(表 4)。独立梁与楼面构件可组合, 从而满足从工业建筑、公共建筑再到居住建筑等不同使用场景的需求。通过聚合相似产品及区分差异产品, 使系列内部功能清晰强大, 在提高建筑产品竞争力的同时拓宽设计的可能性。

(3) 映射结合空间关系暗含整合机会。物理构件常经由复合建造层叠而成, 这反映在映射图解中的右半部分, 便可按照复合建造的次序罗列。常见的产品, 如楼板、幕墙系统等, 前者可按照上下顺序依次罗列, 后者也可按照由室内至室外的逻辑按顺序排列。当映射呈现出多对多的功能混合时, 原本孤立的部分占据不同空间位置, 均成为整合的起点。区别于上述两点作用, 映射图解虽然无法影响建筑产品的功能和物理层级, 但却具备暗示空间关系的潜力, 也更符合设计师的工作习惯。

2. 轻量楼板产品设计提升后的效益

如前文所述, 在功能复合和环境调控需求的共同推动下, 楼板系统及其产品设

澳洲轻结构楼板产品系列示意图

表 4

混合轻型梁	混合轻型楼板	混合轻型箱型楼板
TECBEAM: 轻型镀锌钢板与木结构混合, 节约能耗 75%	TECSLAB: 混凝土与 TECBEAM 复合而成的混合结构	箱型楼板: 由轻型梁排列而成, 中间可贯穿加固构件

计不断发展创新，主要体现在对高度集成的效率层面和易于变更的灵活层面这两极的设计探索。例如，路易斯·康提出满足实验室灵活布局的“间隙空间”（Interstitial Space）和耶鲁大学美术馆的集成楼板、克雷兹设计的高度集成波折型楼板和高度灵活的预制与永久结构相结合楼板系统。然而，不同于上述重型结构，本文将研究重点放在轻量楼板产品上，这类产品具备超越高效与灵活潜在矛盾的可能性，并使两种特质有效兼容，也就是说，轻质复合楼板作为建筑构件兼具灵活性和高效性的双重优势，使其无论在新建还是改扩建项目中，都有广阔的应用前景。而在产品理论设计方法的指引下，建筑产品经过上述三个步骤——明确主次功能，发展产品系列，整合内部构造，轻量楼板系统的产品性能进一步提升，下文从紧凑性与适应性两个角度详细论述性能提升后对设计综合效益的影响。

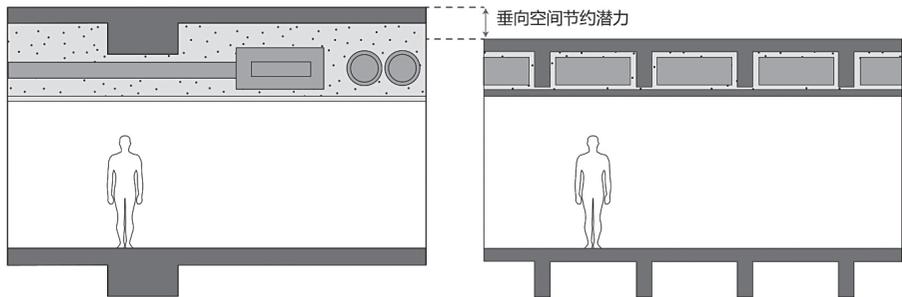


图 9：传统结构垂直空间和新型轻质楼板垂直空间比较示意图

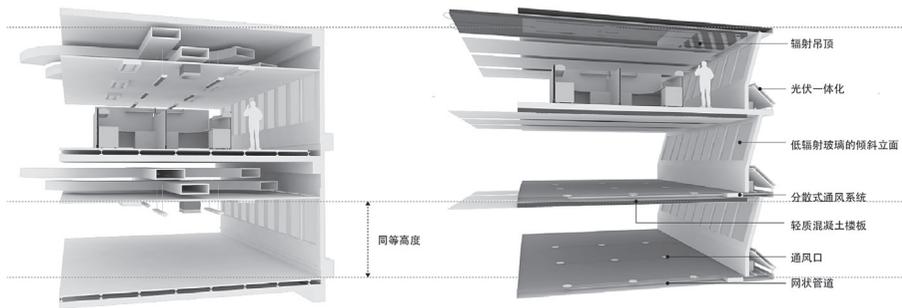


图 10：瑞士苏黎世联邦理工学院（简称 ETH）研发的集成楼板“3for2”案例示意图

(1) 紧凑性：提高空间效率，有效控制建筑层高与体积，助力节能减排。相比于传统楼板布满设备管线的天花板，轻量楼板产品经产品理论设计方法的指引，具备将各部分功能充分集成的潜力。例如，本文提到的“未来立方”项目中，楼板高度仅为 500mm，而传统方式建造中楼板与吊顶天花部分动辄则高达 1m，甚至 1.5m 也是实践中的常见数值（图 9）。对这部分空间的节约将极大地提升建筑垂直向空间使用效率，有效控制建筑层高与体积，从而直接或间接影响能耗、造价、经济收益等方面^[12]。优化楼板系统以提升垂直向空间使用效率的想法，也在工业化程度较高的地区实现。例如，由瑞士苏黎世联邦理工学院（简称 ETH）研发的“3for2”的楼板体系，就将设备管线集成到空心双轴板（Voided Biaxial Slab）里，使用热量密度更高的水代替空气调节环境，在原本只能建 2 层的高度中达到了 3 层，提升了综合效益（图 10）^[13]。

(2) 灵活性：适应租户不同要求，有助于降低改扩建成本，延长建筑使用寿

命。在产品理论设计指引下，轻量楼板功能细分得到完善，产品类型逐步丰富，此外，其自身模数化的构件便于生产与组装，不仅实现了快速拆卸、安置，还可在较短时间内布置出不同高度的室内空间，丰富了应用场景。例如，木结构楼板产品 Lignatur 不仅大量应用于办公室、住宅项目，又因其在设计中对声学混响功能的深入研究，还可应用在剧院等公共建筑上，实现主次功能的置换，保证主要使用场景需求。而在产品灵活置入与组合上，“未来立方”则走得更远，其楼板具备嵌入主体结构而实现灵活划分空间的潜力，在保持主体结构不变的前提下，垂直向空间将有更多可能的组合方式。按照鲍姆（Baum）对灵活性研究的结论，室内空间要素的规格共同构成建筑折旧的决定性因素，对其灵活性设计可有效规避市值大幅缩水^[14]。以用于出售的办公楼为例，充足的净高设置给予轻量楼板介入的可能性，保证使用功能变更的潜力，不仅有助于提升租金、减少房屋空置率，还可延长使用寿命，使其成为存量时代愈发重要的设计考量。

五、结语

从设计目标的构思到设计最终的实现，建筑师往往经历了“黑箱子”的过程，而本文试图通过引入制造业中的产品理论，转译并发展建筑学视角下的分析与设计方法，以交叉学科的方式探索产品设计中的“黑箱子”，为楼板产品设计的提升提供参照。除此之外，本文所提倡的设计方法，亦可应用在以下方面：

(1) 分析其他建筑部品。本文所提出的设计方法与观念亦可延伸至建筑系统其他部分，包括幕墙、楼板、填充墙体等。例如，克莱恩（Klein）借鉴产品理论发展了幕墙设计与施工过程的系统化设计方法，并以多个幕墙产品设计为例实施分析，详尽描述了从细部节点到组装的产品全流程^[15]；而埃克豪特的理论中也大量使用了立面作为例子来解读相关的概念。在建筑部品齐头并进发展的时代，楼板、复合墙体、阳台等构件都应给予充分关注。

(2) 作为教学工具。在设计教学中，同样可借鉴产品理论中的概念对复杂的

建筑系统进行拆分,使学生理解构件设计与建造过程。例如,香港中文大学建筑系朱竞翔团队面向高年级本科生与研究生的选修课《承重构件的超常规布置》(*Extra-ordinary Arrangement of Loadbearing Components*)中,在对给定的案例分析上,建筑系统被拆分成多个层级(主要承重结构、次级承重结构、非承重结构、围护结构、构件等),并发展出一系列动词进行相互连接。其中,结构层级对应产品架构中对物理构件的层级划分,而动词暗含了联系的映射方式。这种拆分与对应,有利于学生首先清晰描述复杂的建筑系统,从而加深理解。

总之,在未来,装配式建筑将成为我国建筑工业化发展的重要环节,而成熟的制造业中对复杂精细工业产品设计方法的长期研究,为建筑产品发展提供了理论上的借鉴。本文所论述的方法有助于从产品视角完善对建筑部品设计的分析框架,更好地为模块设计、系统整合、性能提升等方面提供理论依据,一定程度上改善理论与实践脱节的情况,使装配式建筑实践趋向多样化、精细化。

(感谢香港中文大学朱竞翔教授团队对本文的启发与帮助)

注释

① 根据管理学学者乌尔里希(Karl Ulrich)的定义,产品架构指的是“将功能元素(Function elements)与产品物理组件(Physical component)相互联系的图解(Scheme)”^[5]。

② 产品架构理论在操作层面包含三个主要内容:(1)功能的组织(Arrangement);(2)功能与物理模块之间的映射图解(Mapping);(3)物理模块之间明确的接口。由于接口问题涉及方法较少,故不在本文讨论范围内。而产品层级划分则应置于上述第一点与第二点之间,为两者之间建立关系并奠定基础。

③ 在对建筑系统划分的研究方面,多集中于开放建筑理论(Open Building)所提出的支撑体(Support)与填充体(Infill)概念,SI体系被广泛应用到工业化住宅建筑的设计与建造中。而本文视角则从建筑产品设计出发,更多关注于构件级别的设计。

④ 无论老式电话还是智能手机,核心功能是通话。为便于比较,对其功能简化并统一为接听电话、一定范围的移动性、拨号功能、传输声音功能。尽管内部可以继续拆分为芯片电路电池等元素,但这些已经不是用户可以碰触的部分,故做省略处理。

参考文献

- [1] Banham, R. *The Architecture of the Well-Tempered Environment*[M]. 2nd ed. Chicago: University of Chicago Press, 1984.
- [2] Kiel, M. *Thermally Active Surfaces in Architecture*[M]. New York: Princeton Architectural Press, 2010.
- [3] Churakov, A.A. Biaxial hollow slab with innovative types of voids[J]. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2014 (21) : 70-88.
- [4] Ulrich, K. The role of product architecture in the manufacturing firm[J]. *Research Policy*, 1995 (3) : 419-440.
- [5] Eekhout, M. *Methodology for Product Development in Architecture*[M]. Amsterdam: IOS Press Incorporated, 2008.
- [6] 刘洋, 应瑛. 架构理论研究脉络梳理与未来展望[J]. *外国经济与管理*, 2012, 34 (06) : 74-81.
- [7] Stone, R., Wood, K., Crawford, R. A heuristic method for identifying modules for product architectures[J]. *Design Studies*, 2000 (21) : 5-31.
- [8] Dahmus, J., Gonzalez-Zugasti, J., & Otto, K. Modular product architecture[J]. *Design Studies*, 2001 (5) : 409-424.
- [9] Simon, H. *The sciences of the artificial*[M]. 3rd ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1996.
- [10] Josef Kolb. *Systems in Timber Engineering: Loadbearing Structures and Component Layers*[M]. Basel: Birkhauser Verlag AG, 2008.
- [11] 孙宇璇, 朱竞翔, 翟玉琨, 龙灏. 紧致抑或灵活: 以克雷兹两件作品为例研究设备与结构的整合设计[J]. *建筑师*, 2023 (01) : 97-104.
- [12] 孙宇璇, 陈力然, 龙灏. 效率与感知: 垂向空间综合效益评价探索——以高层住院楼为例[J]. *建筑学报*, 2023 (02) : 58-63.
- [13] 阿尔诺·施吕特, 亚当·雷萨尼克, 韩冬辰. 基于下一代可持续建筑的协同系统设计[J]. *建筑学报*, 2017 (03) : 107-109.
- [14] Baum, A. Quality and property performance[J]. *Journal of Property Valuation & Investment*, 1994 (01) : 31-46.
- [15] Klein, T. *Integral Facade Construction: Towards a new product architecture for curtain walls*[D]. TU Delft, 2013.

图片来源

图 1: 改绘自参考文献 [8]

图 2: 改绘自参考文献 [5]

图 4、图 5、图 7: 深圳由元远建筑设计有限公司提供

表 1: a: <https://theconstructor.org/exclusive/voided-slab-systems/223645/>; b: <https://www.fg-vmm.com/download/Fertigteiljahrbuch%202010%20ClimaDeck.pdf>; c: <https://holedeck.com/>

表 2: <https://www.lignatur.ch/en/product>

图 10: 参考文献 [13]

其余图片由作者自绘或根据相关资料改绘