

# 现代井干式建筑界面重构设计方法研究

## Research on the Reconstruction Design Method of Interface of Modern Log-construction Building

赵亚敏 | ZHAO Yamin

中图分类号: TU201.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-6740(2023)02-0102-11 DOI: 10.12285/jzs.20220320001

**摘要:** 文章以井干式建筑的现代创新设计为视角,研究其界面重构方式。首先剖析井干式界面调控的传统方式,明晰既有设计模式局限性;进而提出“段状构件介入”“格构化编织”“透明性调节”三种针对井干式界面的重构设计方法,并结合相关典型案例论述相应的关键构造技术及其应用注意问题;揭示出该木构类型突破传统固有模式上的可能性,以期为我国现代井干式建筑的多元化创新设计提供参照。

**关键词:** 井干式、层叠界面、重构、设计方法、建造技术

**Abstract:** From the perspective of modern innovative design of Modern log-construction building, the paper studies the reconstruction design method of its interface. Firstly, the traditional design methods of log-construction interface are summarized. Then, three reconstruction design methods, segmented member intervention, lattice weaving, transparency adjust are proposed, and specific structural technical characteristics and application attention issues are discussed. The research reveals the innovative design method of log-construction interface, provides a reference for the modern innovation practice of log-construction in my country.

**Keywords:** Log-construction, Laminated interface, Reconstruct, Design method, Construction technology

### 一、研究背景

井干式,作为木构建筑的主要类型,曾在传统营建体系中发挥重要作用。井干式在当前仍具有市场,一方面在于其传统文化性及自然感突出的形式,另一方面也在于该木构类型易于实现模块化设计与建造。然而,传统井干式结构形式塑造单一,突破界面的固有模式是对其创新设计的路径之一。目前我国木构建筑逐渐复兴,井干式得到一定规模应用,然对其研究多聚焦于构造优化层面;在设计层面,如何突破传统井干式单一界面形式的探索则相对较少。事实上,随着木工业技术的发展、国外先锋建筑师的探索,现代井

干式在界面重构方面衍生出一系列创新作品,并广泛应用于中小型的住宅建筑、展览建筑、景观建筑等类型中。文章针对井干式界面提出了三种重构方法,同时论述其关键构造技术与应用注意问题,以期为我国现代井干式建筑设计的多元创新提供思路。

### 二、传统井干式界面塑造方式

以森林为主要建筑材料来源的地域,基本形成以木杆件为主的结构体系。在生产工具落后的时代,用原木水平堆叠形成围护结构要比用其竖向搭接形成框架结构容易,因而井干式广泛存在

#### 作者:

赵亚敏,重庆大学建筑城规学院助理研究员、博士后。

基金:中央高校基本科研项目(2022CDJXY-014)。

录用日期:2022-7

于世界各地早期木建造之中，并一直延续至今。忽略井干式在不同地域上的风格差异，其建造本质具有相似性。首先，构件组织方式：该结构类型将线性构件视作砌体材料，通过“水平叠压”与“端头互锁”的构法自下而上逐层搭建而成，一层界面兼具围护、支撑、表现多重功能。构件截面大小适中，制作工具较为简单、施工快捷。其次，细部互锁方式：由于井干式建造过程较为简易，因此采用“二维榫卯”<sup>①</sup>（如凹凸榫、燕尾榫）便能完成端头连接。此外，井干式的构件叠压可根据端头榫卯的开口方式进行调节，进而形成“平层”“错半层”等搭接效果。

传统井干式层叠界面的塑造常通过改变木构件截面形式进行（表1）。

(1) 截面为圆形、鼓形的木构件叠压时端头互锁相对简单，形成的界面外观具有很强的线条感，清晰的纹理有一定装饰作用。例如我国南方传统井干式多采用原木，加工制作粗放。又因构件相交伸出的端头长短不一，使结构形式不呆板，如同国画一样表现出写意手法，风格豪放（表2-a、表2-b）。

(2) 截面为三角形、六边形的木构件叠压时端头互锁相对复杂，界面形成尖锐内凹的缝，外观上看棱角分明，具有鲜明的层次与阴影关系。例如日本东大寺“本坊经库”采用三角形截面的木构件进行建造，尖角朝上放置并依次层叠，形成了锯齿状外立面和平整的内表面（表2-c、表2-d）。从工程学角度看，尽管三角形截面细边之间的叠压并不是十分稳妥，但在干燥的环境中，构件之间会产生狭小裂缝，这样可保证空气能穿透裂缝起到通风透气效果；而在潮湿环境中，木材膨胀使得裂缝闭合，防止了外部湿气对建筑内部的影响<sup>②</sup>。

(3) 若采用矩形截面的构件，垒叠后接缝的“消隐”使得界面平整，犹如一体。在瑞士现代井干式住宅中，常采用机械预制板片构件，加工精细，故而层叠形成的界面较为平整光滑，更能体现出现代木结构的精致性。

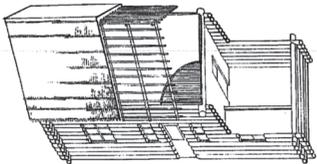
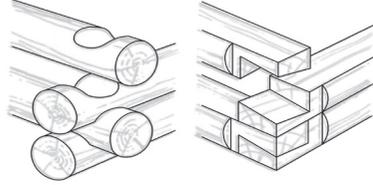
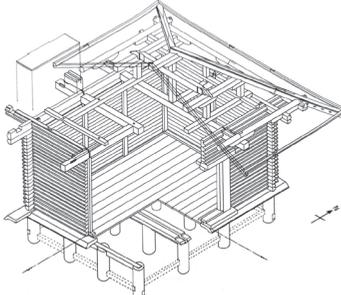
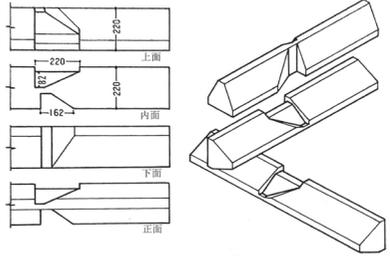
传统与现代井干式常用构件截面形态与尺寸范围

表1

类型		截面形式与尺寸				
现代方木		 70mm ≤ b ≤ 120mm	 90mm ≤ b ≤ 150mm	 90mm ≤ b ≤ 150mm	 90mm ≤ b ≤ 150mm	 90mm ≤ b ≤ 150mm
现代胶合原木	一层组合	 95mm ≤ b ≤ 150mm	 70mm ≤ b ≤ 150mm	 95mm ≤ b ≤ 150mm	 150mm ≤ Φ ≤ 260mm	 90mm ≤ b ≤ 180mm
	二层组合	 95mm ≤ b ≤ 150mm	 150mm ≤ b ≤ 300mm	 150mm ≤ b ≤ 260mm	 150mm ≤ Φ ≤ 300mm	—
南方传统原木		 130mm ≤ Φ	 150mm ≤ Φ	 150mm ≤ Φ	—	—
日本传统校仓造		 正仓院北仓 长宽290mm	 唐招提寺宝库 长宽212mm	 日吉神社宝库 长197mm 宽130mm	 多家神社宝库 长宽172mm	—

不同截面构件塑造的井干式

表2

截面	结构整体	细部节点
圆形或鼓形		
三角形		

此外，界面肌理的表现与构件截面大小也密切相关。截面较小的细长构件叠压可形成密集的网络间缝布局，具有细腻的视觉效果；当采用宽度较大的板片时，间缝网络就变得相对稀疏。层状肌理的精致度又与构件加工相关联，例如采用精细加工的构件将形成笔直的间缝网格，建构表

现较为精致；构件越粗糙，间缝越参差不齐，显示出粗犷自然之感。总之，传统井干式通过改变截面形状对界面肌理进行调控，但无论截面形状如何变化，均生成坚实且单一的水平线性层状肌理。在现代传承中，对界面肌理的重塑是创新设计的重要方向。

### 三、层叠界面的段状构件介入

从立面上看,传统井干式构件的交接节点呈现于界面的两个端部,中间夹着横向连续的水平纹路,形成“点——线——点”固定而单一的节奏。重构设计中,在横向构件间嵌入点状构件,或是将横向构件全部打断并进行重组,将改变传统井干式单一的节奏。

#### 1. 段状构件与线性构件混叠

该重构方式将紧密叠压的构件通过密度调节形成一定宽度的间隔,继而在间隔处以一定的规律嵌入大量“点式”段状构件。具体操作中,段状构件间隔的疏密程度、构件尺寸、相对位置等对肌理的表现效果影响较大。如图1所示,当段状构件均匀地嵌入,且宽度与线性构件接近时,立面上的点线分布效果较为均质化;若水平间隔加大,嵌入的段状构件高度也较大,界面就越通透;当段状构件截面越小,嵌入间距越小,立面将呈现密集点状的特征,更显精致。嵌入方式可分为对位式嵌入和交错式嵌入。

(1) 对位式嵌入——在横向接缝中将段状构件以上下对位方式嵌入,在立面上形成正交网格的肌理。例如,由卒姆托(Peter Zumthor)设计的汉诺威世博会瑞士馆“共鸣箱”,其层叠墙体采用了对位式嵌入的设计手法。在每组层叠墙面中,使用截面为100mm×200mm的预制长木梁模块以双层平行装配建

造形成9m高的墙体,同时用规格为45mm×45mm×544mm的预制短木等间距嵌入每层构件间,并向外出挑一定长度,上下层短木构件严格对位,从正立面上看形成点线交织的正交网格(图2a)。

(2) 交错式嵌入——在横向接缝中将段状构件以上下错位的方式嵌入,在立面上形成点线错动的肌理。相比于“共鸣箱”,由吉翁·A·卡米纳达(Gion A. Caminada)设计的“弗林村仓谷”将构件进行错位式嵌入的方式,使界面肌理的塑造更为有趣(图2b)。该结构采用方形截面木材通过端头间隔式叠压形成接缝,继而在接缝处以上下层相互交错的方式叠加短木构件,在立面上形成有趣的点、线、面构成。

该构法的关键构造技术在于段状构件与线性构件间的锚固处理,操作方式分为三类。

其一,段状构件不开榫卯,将其与线性构件直接叠合。为了加强构件叠压的稳定性,可在其预制时预留孔洞,在组装过程中使用螺钉或是钢筋将相互层叠的构件进行串联。该构法刚性强、制作简约。需要注意的是,贯穿金属构件可使结构整体更稳固、变形更小。按此原理,锚固金属构件越多越能提供更大的刚性。但实际上应根据构件截面的大小确定使用金属的数量。例如段状构件若为截面较小的木材,穿透的金属构件过多反而会破坏木材,因而单筋(单螺钉)起到的效能优于多筋(多螺钉)。

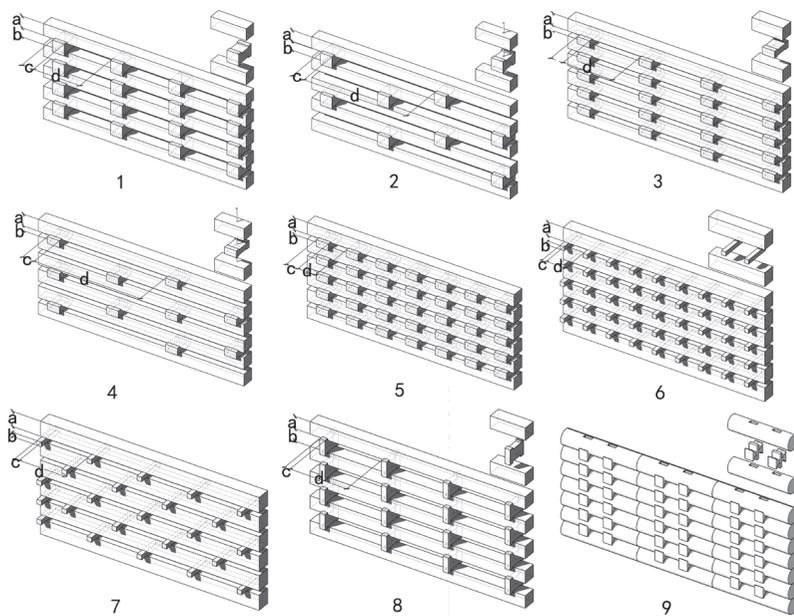
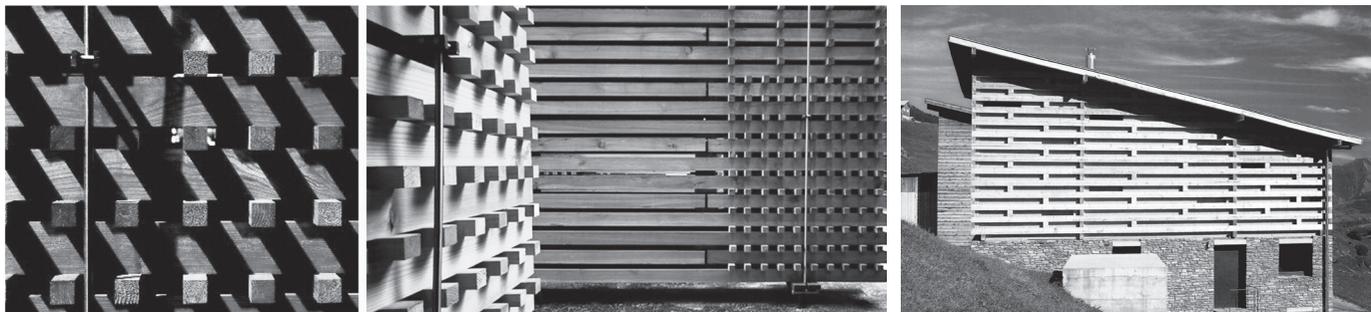


图1: 段状构件与线性构件混叠方式示例



a) 汉诺威世博会瑞士馆——共鸣箱

b) 弗林村仓谷建筑

图2: 界面肌理重塑的实践

其二，在段状构件上下面切开与线性构件等宽的槽口，通过槽口进行卡接。为了提高结构稳定性，可采用螺钉或钢筋进行加强锚固。此外，对段状构件上所开槽口深度的调节可形成“封闭”与“半封闭”的界面：槽口越深，构件交接越紧密，界面越封闭；槽口越浅，构件交接越松弛，界面越开放。需要注意的是，开槽深度不宜过大，否则木材容易开裂。

其三，在界面之外介入钢索拉结体系，从外部施加约束力，形成复合墙体构造（图3）。例如上文提到的汉诺威世博会瑞士馆设计时在线性构件间介入大量段状构件，纵横交叠的构架未采用榫卯进行稳固，而是在木垛底部设置混凝土基础与30mm厚沥青层、顶部设置钢板，之后在外贯穿直径为16mm的不锈钢拉竿与弹簧将其加压束缚在一起。该创新的构造在墙体收缩变形的情况下，可通过拉竿上的弹簧构件进行适应性微调（图4）。

需要注意的是，针对不同形态的线性构件，需采用适宜形状的段状构件进行匹配。例如，截面为方形（矩形）、鼓形的线性构件间嵌入的段状构件可采用方形

（矩形）；若是采用榫卯卡接，则段状构件截面为倒“工字形”；若线性构件截面为圆形，嵌入的段状构件可处理成“蝴蝶形”短木，以便贴合上下层构件（表3）。

### 2. 段状构件错动交叠

该方式将井干式原本叠压的通长杆件打断为大量段状构件，继而将其进行有规律的错动扭转与交叠，连接成线性构件后再进行层叠。段状构件交叠的方式较为多元，例如可将其扭转一定角度，以同一维度将构件首尾交接，形成“波纹状”

或“折叠状”肌理，再加上木质纹理的变化，界面的肌理效果十分丰富（图5）。由Galletti & Matter 事务所设计的“瓦莱斯农庄”（Satarma Valais Grange）系旧建筑改造，原建筑为传统井干式，粗糙的构件形成横向线性肌理。在局部改造中，建筑师采用大量小尺度板片，将其旋转一定角度后首尾相接形成线性构件，继而再层层叠叠，最后创作出如竹篮编织般的新型井干式建筑。重构的界面与原界面形成鲜明对比，十分富有趣味（图6）。

“段状构件错动交叠”的关键构造技术在于大量离散构件间的交接。该构法

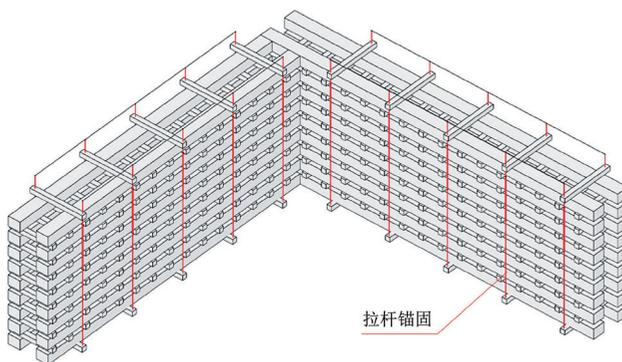


图3：拉杆外侧锚固示例

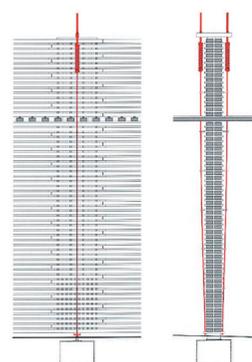
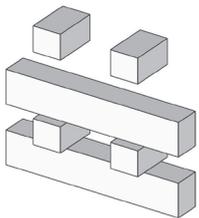
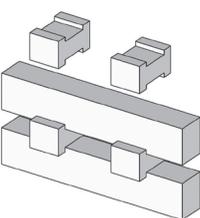
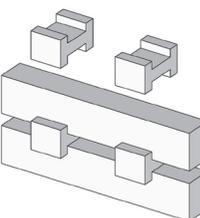
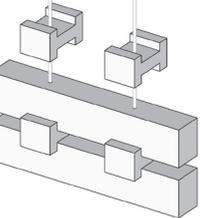
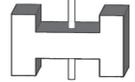
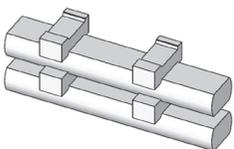
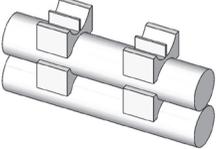
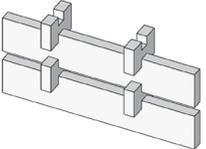
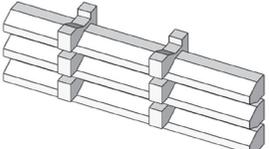


图4：瑞士馆共鸣箱墙体

不同截面的线性构件匹配的段状构件示例

表 3

截面	a 方形截面	b 方形截面	c 方形截面	d 方形截面
线性与段状构件交叠				
匹配的段状构件形态				
截面	e 鼓形截面	f 圆形截面	g 矩形截面	h 三角形截面
线性与段状构件交叠				
匹配的段状构件形态				

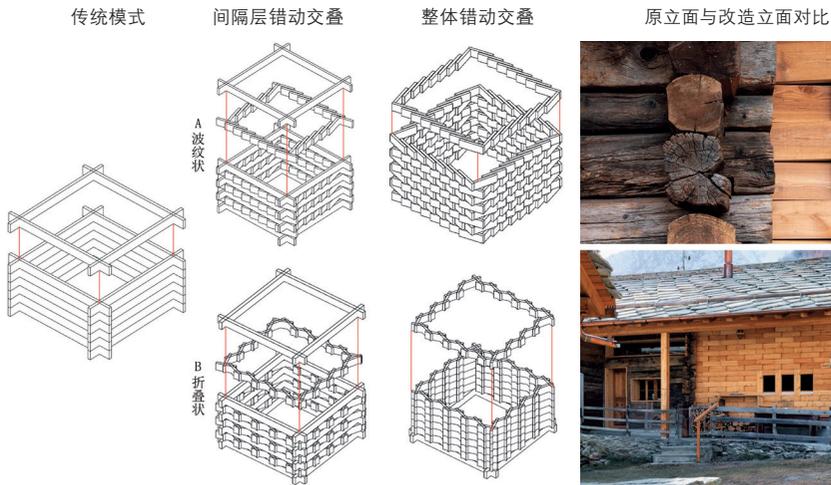


图 5: 段状构件错动交叠

中,多采用小尺度板片,其锚固需要通过水平与垂直维度互锁相互配合。首先,水平维度锚固:根据段状构件错动交接的方式适宜地选择互锁机制,例如构件首尾叠合,可在其接触面通过射钉锚固;若构件成“V”形组合,可在其首尾交叠处开槽口相互卡接。其次,垂直维度锚固:结构中横向或纵向均由大量较短的构件组合,单纯依靠端头互锁无法进行结构整体稳固,故而需要在垂直向进行强化。第一种

方式可在界面内侧的构件交接处增加竖向木条进行辅助支撑,通过螺栓将其与层叠的构件锚固,从而加强结构的整体性。第二种方式可在段状构件制作时预留孔洞,在相互卡接过程中插入钢筋或拉杆,将离散的构件拉结为整体(表4)。

此外,段状构件的交叠虽然在外立面取得一定的表现效果,但是在室内一侧无法形成平整的界面。若将该构法应用于居住建筑中,为了满足对内界面平整度的

需求,可在墙体内侧再增加一层界面,形成具有空腔的双层表皮。建造中可在空腔内设置保温层、电线绝缘层、防潮层、管道等,从而形成“能量交换层”。该做法对于居住建筑具有较好的适用性,例如上文提到的瓦莱斯农庄便是对该构法的应用(图7)。

#### 四、层叠界面的格构化编织

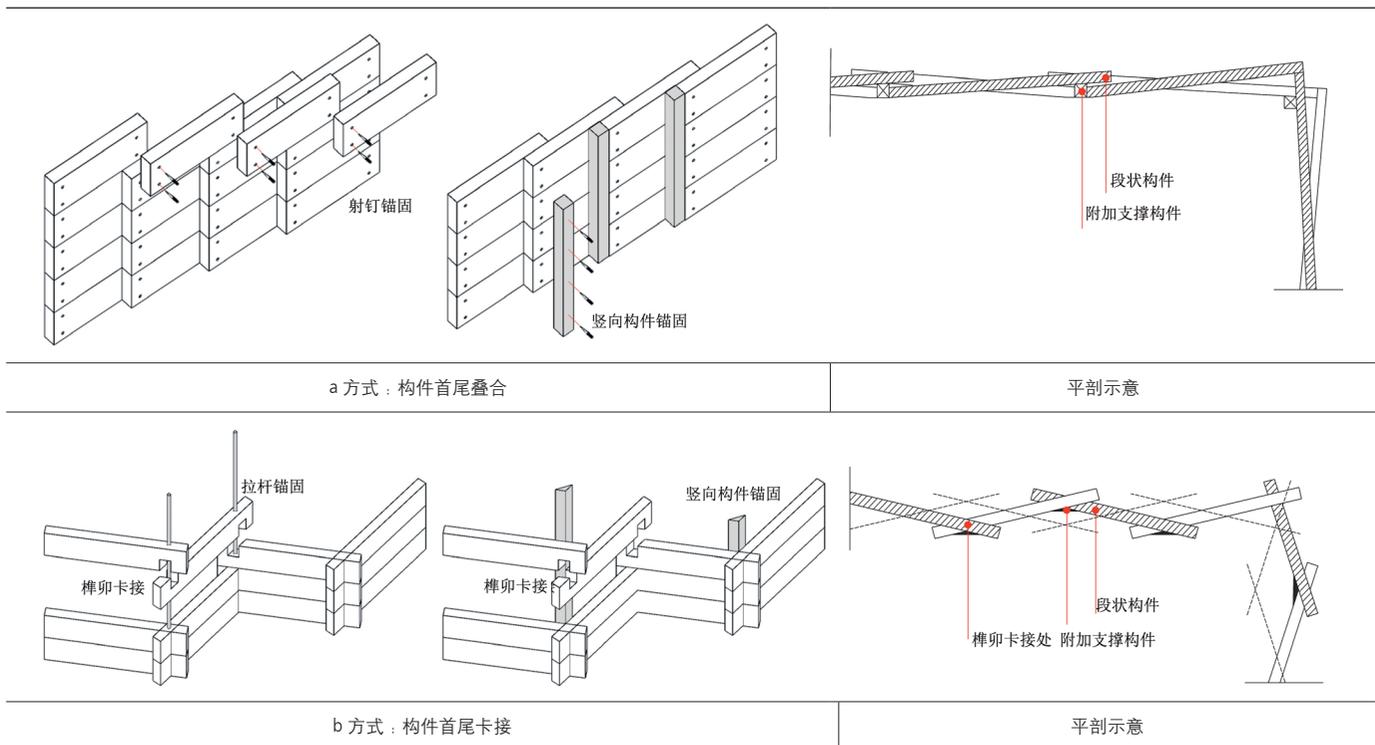
传统并干式由线性构件叠压形成二维界面,层化效果明显、统一,具有高度的结构“自明性”。“格构化编织”构法则是改变构件单一维度的叠压,转而通过错位穿插、多向交叠进行建构。该构法将传统并干式二维界面推向三维网格格式结构。操作时既可以纵横正交叠压形成规则的格构形态,又可进行多角度斜向叠压,进而塑造出更加错综复杂的结构。

##### 1. 规则型格构化界面

构件按照规则网格体系相互叠压形成结构,建造时底面横向并置多层构件(通

段状构件交叠的锚固

表 4



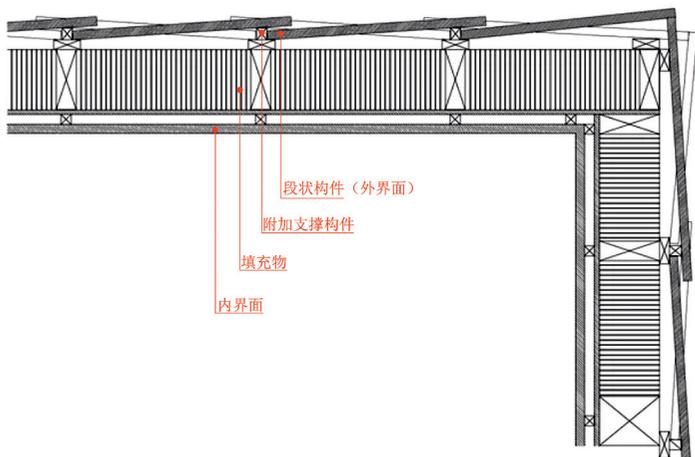


图 7: 瓦莱斯农庄的双层界面

规则正交格构化		规则斜交格构化	
平面	构件截面 150mm x 150mm	平面	构件截面 150mm x 150mm
规则斜交格构化		不规则斜交格构化	
平面	构件截面 300mm x 150mm	平面	构件截面 150mm x 150mm

图 8: 格构化编织操作示例

常两层), 在其上纵向叠压较短构件, 继而以此逻辑逐层向上建构。短构件与长构件可正交叠压, 亦可斜向叠压 (图 8); 构件可采用线性构件, 亦可采用板片构件; 上下层构件间可通过槽口互相耦合, 亦可直接叠压后通过金属锚固。该层叠组合方式尽管逻辑十分简单, 规则的坐标体系也显示出建造的便捷性, 但仍可形成多元的结构形式。

事实上, 板片构件具有良好的形态可塑性, 对其进行形态异化再进行组构, 将生成更具创新性的层叠箱式结构。对此, 可以引借由柯瑞、何坤团队创作的“科拱之方”的设计方法<sup>③</sup>。在构件要素设计上, 设计师将“斗拱”构件的形态进行抽象简化, 形成大量较薄的异形小尺度板片, 继而在其上相应部位切出槽口。建造时, 板片以纵横正交叠压为基本构法, 在水平向与垂直向不断组合交叠, 最后形成理性但复杂格构化界面 (图 9)。

规则的格构化结构在微观层面有着合理的应力分布, 具有良好的稳定性, 因而可以形成局部挖空的界面模式。如图 10 所示的推演, 可在界面底端两侧将构件通过格构式交叠形成“基座”, 在层叠过程中横向构件长度不断变长进行悬挑, 形成悬臂式层叠结构; 两端的构件不断交叠直至顶部汇合, 最终形成局部挖空的格构式界面。实践中, 由隈研吾设计的“积木咖啡屋”(Café Kureon) 便是采用上述方法形成创新的结构 (图 11)。



图 9: 科拱之方

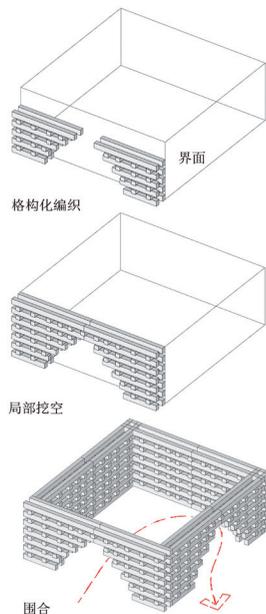


图 10: 挖空处理

## 2. 曲态型格构化界面

界面的格构化编织使木构件的叠压维度具备较大灵活性, 可基于一定的规则将构件进行错位、扭转、悬挑, 继而使界面呈现出复杂的曲态。目前的实践中形成“穹顶式”“扭转式”结构模式。

(1) 穹顶式格构化结构。通常将圆形平面切分为多边形作为基底 (边数需按照构件长度与建筑面积等因素确定), 建造时可在多边形底面的每条边上并置两层构件, 继而在两层之间斜向叠压构件, 以拐点处相互拉结形成三角结构。随着结构层数的不断增加, 每层构件逐渐向内收拢直至顶点处聚合, 最终形成穹顶式格构化结构 (图 12)。例如, 由手冢贵晴事务所 (Tezuka

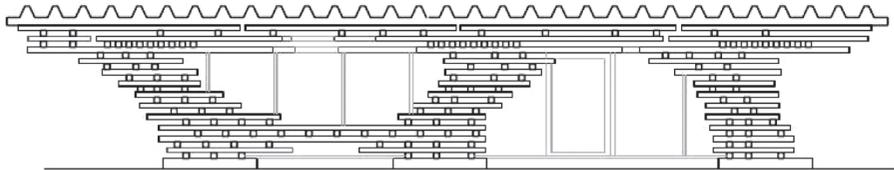


图 11: 积木咖啡屋 (Café Kureon) 界面

Architects) 设计的“箱根露天博物馆”突破传统井干式规则的几何模式, 塑造了类似于穹顶的结构。建筑以十六边形为平面, 采用 589 根木构件进行建造, 截面尺寸较为多样, 边长控制在 220~360mm、高度控制在 360~520mm 之间。建造过程中, 随着结构层数不断的增加, 聚合程度越来越大, 结构将出现不稳定现象。为了使得结构稳定, 设计师在外层界面内侧再增加一层, 同时在两层构件之间通过榫卯斜向叠压构件, 形成复杂的网格体系, 继而逐渐向上收分聚合。得益于格构化结构

的稳定性, 最终形成了底面积为 529m<sup>2</sup> 的穹顶式井干式, 营造内部开阔的大空间 (图 13、图 14)。

(2) 扭转型格构化结构。井干式可视作“层”的垂直叠加, 结构的层层细分加上格构化具有的稳定性, 为构件的扭转提供了条件。建造时, 将构件相互交叠形成基底, 继而在层叠发展过程中, 构件以一定的角度连续扭转, 形成具有韵律感的曲态界面。例如在“当代青瓷艺术馆”中, 隈研吾采用大量“重竹”作为材料<sup>④</sup>, 建筑师汲取传统井干式的建构逻辑, 通过错

位斜向交叠的方式形成底层结构, 继而在叠压过程中, 构件交叉扭转的角度连续变化, 最终新的建筑突破了原型的方正单一, 形成了优美的曲态界面 (图 15)。在该建筑中, 构件层层旋转的角度与间隙设计得十分微妙得体, 富于变化的网格结构显示出复杂的建构特点。

值得注意的是, 在曲态型格构化结构中, 由于构件叠压的维度自下而上均在发生变化, 若采用榫卯进行互锁, 将会生成大量形式各异的槽口。例如上文所述“箱根露天博物馆”采用凹凸榫进行节点锚固, 由于构件层层斜交, 导致大量槽口形式均不相同, 因而加工制作工作量非常大。为了实现快速建造, 可不通过榫卯互锁, 而是在构件预制时预留孔洞, 建造时依靠金属或拉杆将叠压的构件串联锚固。

(3) 构件定位方式。传统井干式构件叠压的定位十分简易, 然而在曲态型格构

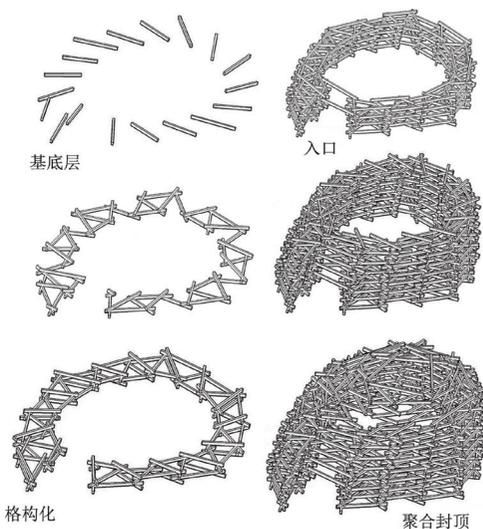


图 12: 穹隆型格构化建构过程



图 13: 箱根露天博物馆

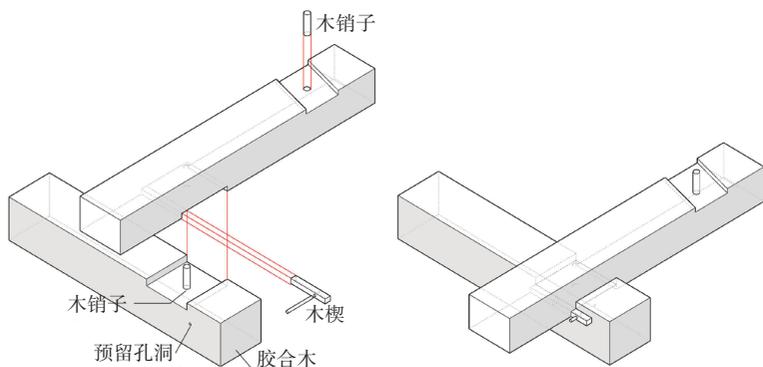


图 14: 箱根露天博物馆细部



图 15: 当代青瓷艺术馆

化编织操作中，构件层叠的维度会持续发生变化，其在空间位置中的定位、旋转角度的调控将面临很大的挑战。对此，有两种基本方式可进行构件定位。

其一，放线定位与人工标注。该方式预先通过计算机解析出构件的坐标位置与扭转角度，在建造时依据数据放线，从而进行构件定位。在垂直叠压过程中，构件继续发生扭转，可配合人工标注的方式。即按照图纸中的数据，将构件间对位的刻度线标注出来，在建造时便可以通过对位线快速地寻找到构件间的叠合位置。放线定位与人工标注相对简便，工具成本较低。但是该方式存在着一定的误差，且建造消耗时间长，需要人工进行细致的调控，因而适用于曲态相对简单的结构中。

其二，机械臂搭建。此种方式能够精确地进行构件搭建，且快速高效。在建造过程中，将建构信息参数化，而后的拾取、切割、摆放等一系列动作均由机械臂完成。此外，若采用榫卯进行互锁，虽然曲态型格构化结构中各个槽口的形状与位置不相同，但是机械臂可以严格按照预定的参数设置对构件进行加工制作，同时也使得结构在短时间内高效建构。机械臂的建造精度与速度是其他方式所不能相比的，但是工具成本较高，且定制模块尺寸受到较大限制，搭建过程基本只能在10m×10m×10m空间内进行，故而只适用于由小尺度构件建造的小规模结构中。

总之，放线定位与人工标注方式普适性较好，但面临着施工调整烦琐、精度控制较难等问题；机械臂则能控制加工精度与建造进度，然而该方式对操作者技术要求高且成本昂贵，建筑规模受到一定限制。为了实现快速、简便、精准、经济的建造，构件定位方式仍然是未来需要继续探讨的问题。

### 五、层叠界面的透明性调节

传统井干式通常形成密实墙体，除界面上所开小尺度窗洞外，外部环境与内部空间较少发生联系。在现代建筑空间营造观念中，极力追求内与外的相互渗透，因此突破传统井干式结构的封闭性是重构设计的目标之一。“透明性”对于建筑而言具有重要意义，其不仅属于建筑空间，亦属于结构。在现代结构设计中，普遍存在以“透明的结构”<sup>⑤</sup>来探寻结构与空间的关系。对传统井干式界面的透明性转变可通过“间隔点状透空”“竖向密度调节”实现。

#### 1. 间隔点状透空

该方式采用“减法”操作，在密实层叠的墙体上进行大量点状构件移除。可以按照一定规律进行挖空，也可以进行不规则挖空。该构法不仅能保证室内空间的私

密性，同时还能将室外景观、光线、空气引入室内，亦能形成较为丰富的立面表达。

坐落于东京大学的“空间实验室”（Space Lab）便是“间隔点状透空”操作的典型代表，该建筑由平沼孝启（Kohki Hiranuma）创作。建造过程中，建筑师使用了两种规格的雪松木集成材模块，截面尺寸分别为38mm×89mm和51mm×89mm、长度为900mm，两两模块通过螺钉固定为L形组件，继而将两个L形组件正反互相咬合，中间预留13mm的空隙，可保证木材具有一定的伸缩空间。最后，大量的模块进行叠压组合形成结构。由于采用短木构件互相拼合叠压，建筑师可以在界面局部以不规则的方式移除木材从而形成大量点状空隙，使光线透入室内形成丰富光影（图16、图17）。

值得注意的是，大量的点状透空破坏了层叠界面的整体性，为了加强结构稳定性，可通过以下几种方式强化。其一，若是采用相对短的构件拼接成较长构件，可在相邻构件中央切开槽口，后通过连接件将两段短木进行拉结。其二，可使用拉杆或钢筋将构件自下而上全部串联，但要注意穿透的位置应避开透空部位。其三，可将构件截面设计为“凹”字形，继而在凹槽间填入胶合物质、防腐材料等，该做法可以加强构件之间的粘性，延长使用期限（表5）。



图 16：空间实验室 (Space Lab)

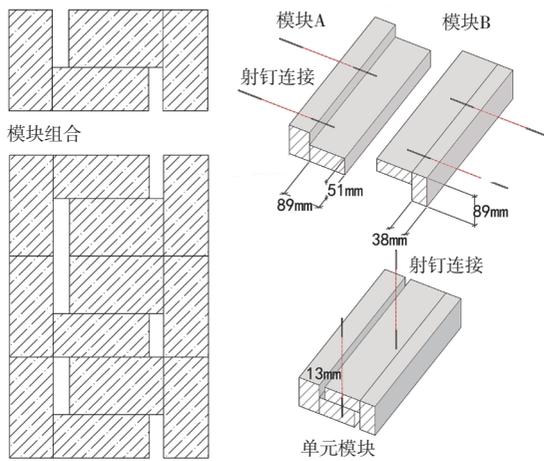


图 17：空间实验室的间隔点状透空建构过程示意

## 2. 竖向密度调节

正如前文指出，在构件组合时，若端头直接叠压或采用较浅的榫卯叠合，将使得界面留出通透的缝隙，原本密闭的箱体结构将具有一定的透明性。缝隙的宽度与构件端头交接方式、构件形态相关（表6）。例如，在端头处将构件交替叠压，缝隙与构件宽度一致；若采用榫卯叠压，

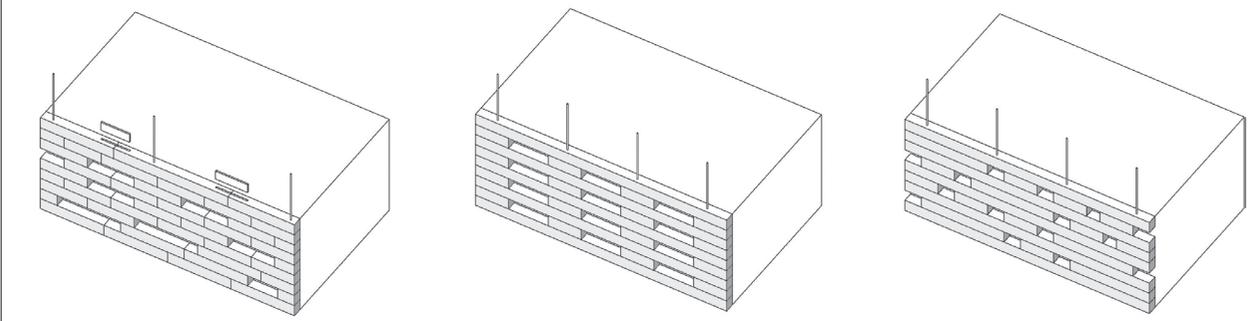
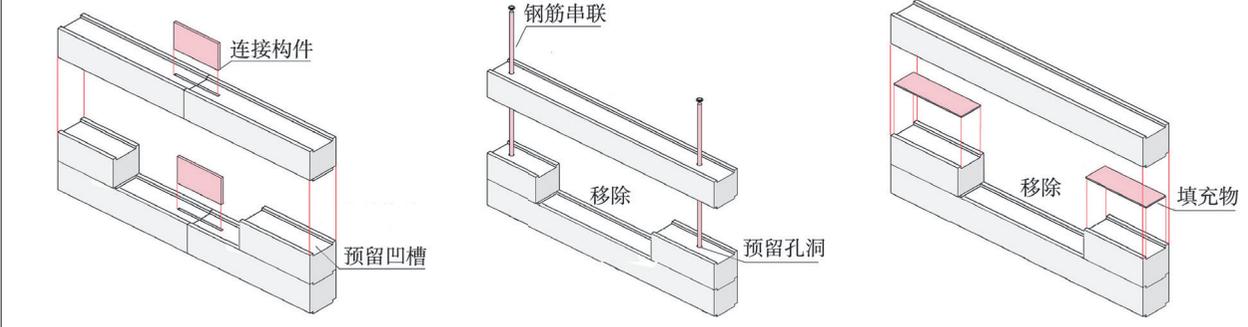
缝隙的宽度便可通过槽口深度进行调节。实践中，诸多建筑师通过该方式创作了多样的创新结构（表7）。例如由隈研吾设计的“OMM 博物馆”外立面，构件通过端头间隔式叠压形成大量空隙，界面较为通透；由 Davide Macullo 工作室创作的“太空馆”（iSpace Pavilion）将构件通过端头间隔搭接并进行结构形态异化，创作出了半透明的球状井干式。在众多实践中，杆系

要素既承担着结构作用又作为空间界面的限定要素，层化的水平间隙使得光线在其间穿梭。

传统井干式一层界面兼具支撑、围护、表现功能，然而结构透明性的转变使得界面失去热稳定性围护作用。若要使其既保持透明性又具有围护功能，就需配合其他透光材质形成复合结构。一种方式是在界面内侧介入玻璃层，形成双层表皮。

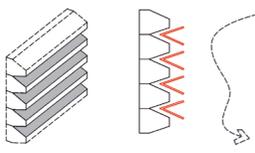
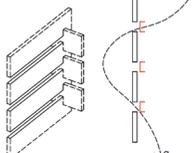
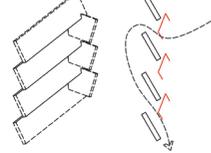
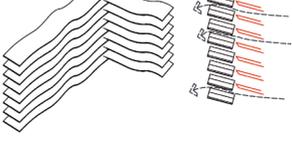
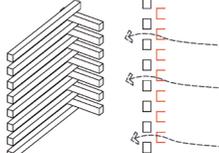
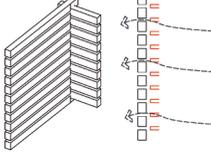
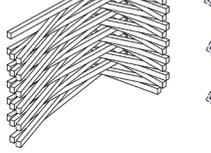
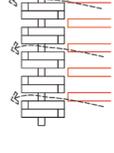
点状透空与细部互锁优化方式

表 5

点状透空方式	
	方式 a                      方式 b                      方式 c
细部建造构法	
	细部构法 a：短板连接                      细部构法 b：钢筋连接                      细部构法 c：胶合物连接

不同截面形成的缝隙类型

表 6

图示				
类型	封闭三角内凹接缝	开敞间隔缝	开敞间隔缝	开敞曲线间隔缝
图示				
类型	开敞间隔缝	开敞间隔缝	开敞间隔缝	

透明性转变下的创新结构

表 7

名称	a) OMM 现代博物馆	b) 太空馆	c) 拉脱维亚火焰亭
构法	间隔式叠压	间隔式叠压 + 格构化编织	间隔式叠压 + 格构化编织 + 扭转
图例			

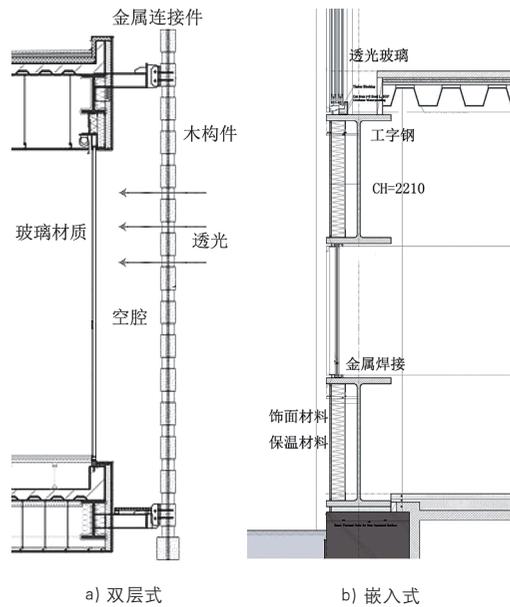


图 18: 两种介入玻璃材质方式

例如图 18a 所示做法，在间隔透空的界面内侧采用钢架支撑玻璃，并通过金属连接件将其与层叠界面上下两端进行接合，形成具有空腔的双层表皮。

此外，建筑师可通过材料置换方法，采用工字钢梁进行建构。巨型工字钢通过间隔层叠形成的间隙较大，在其间嵌入条状玻璃的焊接构造工艺也较为容易。例如富士山建筑事务所 (Mount Fuji) 设计的“铁木屋住宅 (Log H)”，以新材料对传统并干式进行了重新演绎。出于建筑的安全性、稳定性与使用年限考虑，设计师采用了 H 型钢 (700mm × 350mm × 16mm × 25mm) 以间隔式进行层叠。设计师在 H 型钢槽口嵌入饰面材料与保温材料，使结构具有良好的保温隔热效果；而在间隙处焊接金属细框，并在框内嵌入磨砂玻璃，使光线能穿透的同时亦起到围护室内作用 (图 18b、图 19)。



图 19: 铁木屋住宅 (Log H)

## 六、结语

井干式建构逻辑简单,建造快速,适用性较好,但其界面模式固化,结构表现力受限。随着技术的发展,设计与建造方式不断地更迭,传统井干式界面的固有模式得到突破,产生多元的新形式。本文针对井干式界面的重构,论述了创新思路、具体设计方法与关键构造技术。①层叠界面的段状构件介入——通过在横向构件间嵌入点状构件,或将横向构件全部进行段状解构重组,将改变传统井干式单一的肌理。②层叠界面的格构化编织——通过层叠构件的穿插、错位、扭转,将传统井干式二维界面推向三维的“网格结构”,从而塑造多元复杂的结构模式。③层叠界面的透明性调节——通过构件的“间隔点状透空”“构件竖向密度调节”,使得传统井干式封闭的界面具有结构透明性。最后需要提到的是,相比于其他结构模式,井干式在模块化“设计—建造”方面具有一定的优势。通过全文解析,无论结构形式如何创新,应追求单元模块的类型化、互锁机制的同一与简约化、模块组合多元化、施工简便化,发挥该木构类型优势,拓展其在未来创新的潜力。

总之,井干式是我国传统木构建筑体系中的重要类型,随着木构产业复兴,现代新型井干式在中小型木构建筑中得到越来越广泛的应用,对其设计方法的推演,既可实现形式多样化、提高建构表现力,又可丰富空间营造,使传统既有的木结构类型在现代发展出更多创新的可能性。

### 注释

- ① “二维榫卯”注重相邻构件的固定和定位,以防错位和移动。见参考文献[1]。
- ② 日本“校仓造”普遍采用三角形截面木材,常用于仓储文物。
- ③ 该建筑系设计师从斗拱构件形态与建构逻辑为基础创作的。事实上,在诸多学者研究看来,斗拱的层叠逻辑根源来自井干式的建构逻辑。见参考文献[5]: 51-53。
- ④ 将原竹材料压制成方形的杆件。
- ⑤ 透明性属性分为“物理透明”“现象透明”,这里指的结构透明性为前者。

### 参考文献

- [1] 张十庆.从建构思维看古代建筑结构的类型与演化[J].建筑师,2007(02):168-171.
- [2] 山田宪明,张筠倩,梁冀腾.追寻日本木结构[J].建筑师,2015(02):62-72.
- [3] 乌多·特尼森,尚晋.瑞士木结构建筑:求索于传统与创新之间[J].建筑师,2018(03):88-94.
- [4] 安德烈·德普拉泽斯.建筑建构手册[M].任铮铨,袁海贝贝等译.大连:大连理工大学出版社,2007.
- [5] 张良皋.匠学七说[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [6] 坂田凉太郎,山田宪明.構造設計を仕事にする[M].東京都:学芸出版会,2019.
- [7] 建築研究フォーラム編.図説木造建築事典[M].東京都:学芸出版社,2005.
- [8] 《建筑与都市》中文编辑部,瑞士激情+马清运与达思班机构移动工作平台[M].浙江:宁波出版社,2008:36.
- [9] 赵亚敏,加藤悠希,孔宇航.传统层叠型木建造现代转换设计方法[J].建筑学报,2020(12):84-91.
- [10] 赵妍.现代井干式建筑体系设计方法——以彼得·卒姆托的卢奇住宅及莱斯别墅为例[J].建筑学报,2019(11):18-25.

- [11] 赵妍.吉翁·卡米纳达的井干式建筑设计方法研究——以弗林村枢室为例[J].建筑学报,2018(10):108-114.
- [12] 何坤,吴朝赞,程昆.科拱之方.北京,中国[J].世界建筑,2017(03):69-72.
- [13] Kenneth Frampton.Kengo Kuma, Kengo Kuma: Complete Works[M]. London: Thames & Hudson, 2016.
- [14] 左靖.碧山—建筑师在乡村[M].北京:中信出版集团,2020.
- [15] 2000汉诺威博览会瑞士馆共鸣箱,德国[J].世界建筑,2005(01):80-89.

### 图表来源

- 图2a、图4:参考文献[15]  
图2b:参考文献[8]  
图6、图7:(事务所官网)www.galletti-matter.ch/copie-de-crissier  
图9:参考文献[12]  
图11:参考文献[13]  
图12、图13:(事务所官网)www.tezuka-arch.com/works/museum/choukoku-no-mori-net-no-mori/  
图15:参考文献[14]  
图16:(事务所官网)www.khaa.jp/index\_d.htm  
图18a:www.archdaily.cn/cn/924927/  
图18b、图19:(事务所官网)https://divisare.com/projects/334617-mount-fuji-architects-studio-koji-fujii-toreal-log-h  
表1:作者整理绘制,数据来源于《木结构设计标准》(GB 50005—2017)以及参考文献[7]  
表2-a:汪之力.中国传统民居建筑[M].济南:山东科技出版社,1994:45.  
表2-c/d:整理自参考文献[7]  
表7:www.archdaily.cn/cn/924927/;www.archdaily.com/950678/;www.archdaily.cn/cn/907831/  
其余图表均为作者自绘、整理制作。