

木建筑系统的当代分类与原则

[朱竞翔] Zhu Jingxiang

作者单位
香港中文大学建筑学院

收稿日期
2014/03/19

摘要

介绍了木建造系统的当代分类，并由此探讨了建造系统所蕴含的议题、当代分类准则。这一分类的清晰性与合理性对教学、研究以及创新活动十分重要。

关键词

木建造系统；当代分类；材料与建造；原则；合理性

Contemporary Classification and Rationality of Timber Construction Types

ABSTRACT

The article introduces contemporary classification of timber construction systems after a discussion on principle, issue and rationality of classification. A clear and articulated classification is vital important to teaching, research and design innovation.

KEY WORDS

timber construction system; contemporary type; materials and construction; principle; rationality

1 分类的需要

笔者对建造系统分类的兴趣始于2007年，起因是需要教授香港中文大学建筑学院的必修课程——材料与建造 (building technology I: materials and construction, 中大课程代码 arc 2422)。在这门课程有限的模块学时中 (约5次讲座形成一个模块，课时共约10~15h)，笔者希望帮助学生建立起建造系统的框架性认知，并能够理解而非强记知识要点。

笔者同时希望在此框架的帮助下，学生能够进一步延展去理解后续阶段的构造知识：例如建造时不同材料的处置，围护的防水及隔热议题，以及房屋与加工方式的关联等。由于课时不可能穷尽所有建造系统，笔者希望这一认知框架也可以被用来延伸去理解那些尚未被覆盖到的、甚至未来才出现的建造系统。

在更先进的教育模式中，材料与建造授课应该将讲座与小型练习整合成为独立的工作室教学模式。它将着重训练学生在多重现实约束中寻觅有限空间设计自由。这样一种工作方式是绝大多数建筑师日常工作的模式。与之相反的，则是如同艺术家那样，或者像思想家那样：优先构想空间形态或者意义，而将建造当作实现理想的

支持手段。

建造涉及很多材料与知识，建筑由很多构件组成。而它们是互相关联，互相反映，并且互为依靠的，它们最终能够形成一个非常复杂的整体——我们称之为系统。系统可以是真实的，也可以是抽象的；系统有人工的，也有自然的。所有人造系统都是设计过的系统，伴有一个目的和目标的；而自然的系统和人造系统的差别主要在于它看上去没有明显目的。所有系统都处在演化中，由于建筑是人工系统而非自然系统，它的变化周期与自然演化相比非常之短。随着近现代科技的长足进步，建筑系统的演化也在提速。已知的系统发明者代表过去或者传统，每一代发明者对可能的系统的探索丰富着原有世界，但各类系统被发明之后，并不都能成为常用的、广为接受的系统。然而这种主动探索却缩短了过往分类的有效时间，带来既有分类的不稳定性，或者是对既有分类的重新思考。

2 议题与标准

既然分类的是建筑系统，人们可以先看清需求端的影响：作为人类生活在野生自然中的遮蔽物，房屋初始的能力应该是结构稳定，

能够有效隔离野生自然与室内环境，提供安全与屏蔽。在寒冷地区，住房需要提供遮风避寒的基本热物理性能。随着家庭的逐步扩大与聚居合作劳动或者交易的需求，房屋将以各种方式扩展：平面上的或者高度上的，建筑物将会从单层走向多层，从单体走向群体。这些组织性的要求也决定了绝大部分建筑会采用基本几何形状——矩形、基本六面体。这些需求来自自然环境、人体生理以及社会的自然发展，工匠乃至当代设计师无法自主选择它们，而只能去实现它们。系统的有效传播受制于很多力量：材料供应、节点处理、工具易用性、可扩展性、劳动力水平、经济、政策等。

而从物质供给端审视，工匠与设计师还有其它无法选择、只能适应的因素。它首先是底层的材料供给。这在古代各地区地理上相对隔离时，工匠可使用的材料局限很大。即使在当代，材料供应已是相当丰富，可对于大量性的建造，由于受到经济性的基本考量限制，工匠要么采用最唾手可得的材料，如农村建屋时用到的土木，要么是供给最为便利的成为主要的选择，它往往也是最廉价或者性价比相对高的材料，如城市中的砖、混凝土。另一个制约因素是工具，加工工具、运输工具以及连接工具构成了建筑工具主要的大类，它们有时可以一物多用，例如在偏远地区的建造，一把斧子就可以做到材料获得、构件加工、接点加工乃至连接等多种功能。而在稳定的大量性建造条件下，工匠有机会发展出专用的高效工具。

建筑通常不是一个人的劳作。对于施工组织者而言，工人的基本素质以及建造的组织也会是需要适应或者克服的条件：高素质工人效率高、会动脑，但培养耗时、工价高。一般工人的优缺点正好与之颠倒。施工组织水平还有正、反变化的可能。工业化国家的工人的基本素质会逐步提升，并伴随着人力成本的升高，现场施工效率与精度也会有越来越多的要求。而在拓展疆土以及快速发展时期，却可能有很多未经严格培训的工人进

入建筑领域。这些条件并非一成不变的，当材料趋于多样，供应趋于标准化，工具的能力与精度不断提升，它们都会引发建筑系统的改变，或者激发新式建筑系统的出现。

在上述社会需求与物质供给的双重条件制约下，系统演化基本上是工匠与设计者能动性的自然体现。工匠或与设计者发展出的建筑物都需要有安全的结构和可靠的围护应对用户的需求，合理的连接与构造逻辑来安排制造、建造，乃至日后改装、维护，在此之上不同的设计自由度会决定它能否为大众接受，并最终以数量形成区域景观上的文化表达。

在建筑系统的创造中，结构组织具有枢纽的地位，它同时也是识别建造系统的核心依据。当材料的因素被过滤走，或者一种材料可以被其它材料替换，建筑系统就变成结构系统，它通过材料的几何组织安排，例如网格、方向或者密度等，进而暗示房屋定向受力时的不同特性。当结构系统与特定材料挂钩时，就意味着具体的完成方式——包括材料准备、连接、工序、技术乃至附加系统，从而成为建造系统，当建造中的层数、最大跨度、围护系统也受到规限时，建造系统便指向建筑系统了，这时可能的、适合的功能及场地气候的条件都会得到指示。这也说明了材料系统、结构系统、建造系统与建筑系统的分类时常会有含义重叠，而建筑系统会因为包括前三者的因素而最为常用，但也会因为这种综合而产生误用、混用的情形。

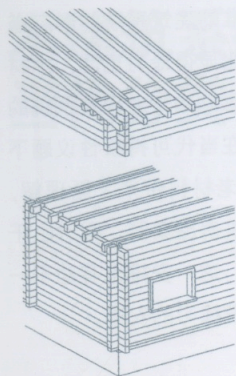
根据上述课程目的以及原则的理解，笔者决定在有关课程中使用木建造系统来讲解基本的建造系统分类，并辅助以砖石建造系统予以说明。木建造系统与近当代的钢铁建造乃至钢筋混凝土建造系统有相当的关联性，天然木材内部为纤维结构，材料承压、抗压以及抗剪切的能力都具备，建筑材料可以堆叠、起拱，或者跨越、叠涩。这种对材料的力学性能与建造方式关联性的理解，也很容易迁移到其他建筑材料上。当代的胶合木材与板材更拓展了基本材料的形态。这些

演化使得以木材为基准的建筑系统的形态谱系与其它建筑材料相比显得最为宽泛，木材所跨越的长久历史也容易带来对建筑系统的历史性变迁的认识。在当代可持续性议题下的深入研究为这一古老材料带来了新理解，帮助出现了新式木建筑房屋案例。同时由于木材易于加工的特性，这一安排也有助于一系列可动手操作的课程练习的安排。

3 分类参考

两本书提供了木建造系统分类的原始依据。第一本是《建构建筑手册：材料·过程·结构》(Constructing Architecture: Materials, Processes, Structures, A Handbook)，作者安德烈·德普拉泽斯 (Andrea Deplazes)^[1]。这本书是他在负责苏黎世高等理工学院 (ETH) 建筑系一年级材料与建造课程时期编撰，本书因而呈现了强烈教学架构，他在前言中也希望此书能成为学生的自学用书。另一本书是《木材工程中的系统：承重结构与构件层次》(Systems in Timber Engineering: Loadbearing Structures and Component Layers)，作者约瑟夫·考伯 (Josef Kolb)^[2]，两本书都由 Springer 出版社出版，时间分别在2005年和2008年。

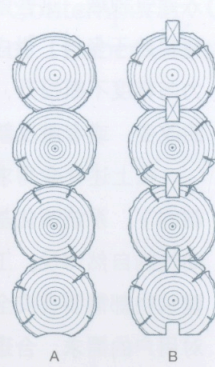
从两本书中，笔者选择了6类不一样的木建造系统在课程中介绍与分析：井干建造系统 (Log Construction)、(早期)木框架建造系统 (或者半木框架建造系统，Timber Frame Construction, or Half-timber Frame Construction)、气球框架建造系统 (或者木杆框架建造系统，Ballon Frame Construction, or Timber Stud Construction)、(现代)框架建造系统 (Frame Construction)、平台框架建造系统 (Platform Construction)、以及板式建造系统 (Panel Construction)。它们的名称各有侧重：“(树)干 (log)”从材料供应定义，“板式 (panel)”从材料形态定义，“框架 (frame)”从结构模式定义，“平台 (platform)”从施工模式来定义，“半木框架 (half-timber)”呈现了木材在系统中的角



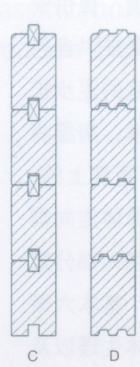
1 井干建造系统图解



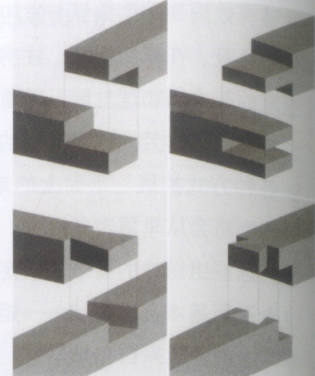
2 云南丽江地区的牲畜房



3 常用木干断面

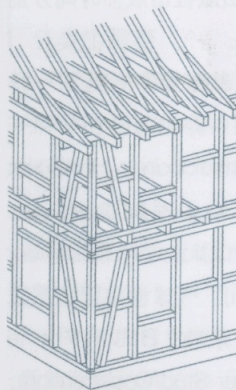


4 搭接式的接点



色，“气球框架 (Balloon)”只是个系统昵称。这看上去似乎很混乱。

在对建造系统进行学术整理时，系统的命名的确是一个难题。当复杂的、包含多重考虑的现实系统仅被浓缩为一个词语时，词语强调的是空间形态、材料，还是建造方式、结构逻辑或者连接构造？名字对一个系统某方面的强调能够直截了当地强化它与其它系统的差异并突出其特征。但当它们并列开来，似乎容易带给信息接收方分类标准不对等的印象，进而造成理解上的困惑与混乱。这需



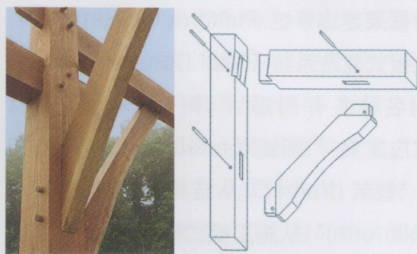
5 (早期) 木框架建造系统图解



6 (早期) 木框架建造系统框架完成场景



9 云南民居中被砖墙稳定的木框架



7 榫卯接点案例示意



8 墙体填充材料示意

要对不同的建造系统用描述性文字、图解、案例乃至实施过程加以联合说明。而通过图解以及精细的介绍，人们不难发现这6类木建造系统和前述系统分类标准及背后议题的密切关系。

4 木建造系统的简述

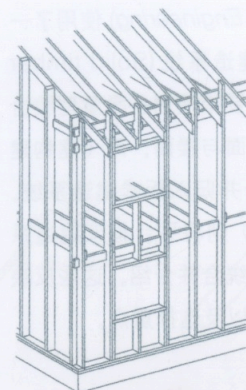
井干建造系统采用原木粗加工，再嵌接成长方形的水平框，然后逐层叠置，制成墙体。墙体之上再制作屋顶 (图1)。图2反映了云南丽江地区的牲畜房，木干所构造的围

合墙体，很像一个围栏，墙体有很多间隙，屋顶需要檩条来形成一个人字架，因为荒置而拆下屋顶瓦呈现了基本结构。木干一般呈圆形，也可以使用削去一块的圆形，或者使用矩形、梯形或者六边形断面 (图3)。粗加工主要包括去树皮以及切削连接位置形成搭接式的接点 (lap joint, 图4)。这种建造方式需要准备大量尺寸相近的笔直原木干。而工匠可以仅凭斧头这一简单工具就可完成所有的加工连接步骤。

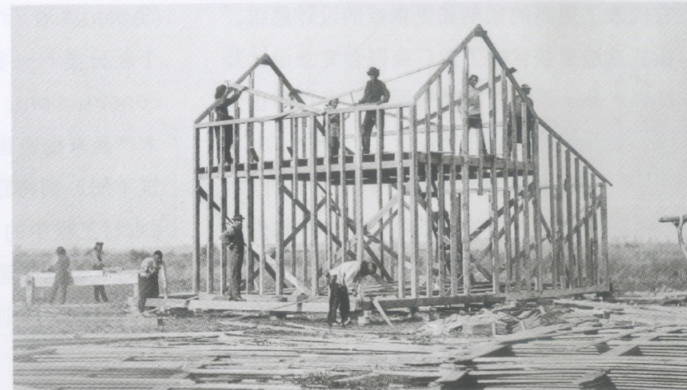
井干建造系统消耗大量原木，树木砍伐后的小型、弯曲枝叉相对无用，系统涉及的工具与堆叠方式都比较简单。因此当工匠能够竖起木框架时，它无疑代表着显著的技术进步。(早期)木框架建造系统 (图5) 能够使用大小不同的材料形成框架，贯穿的斜撑或者角部连接提供了框架基本稳定性 (图6)。木头端部需要开凿榫卯 (tongue and groove joint) 来提供连接，榫卯接点的销钉暗示了内部的复杂 (图7)。这一系统减少了原木消耗，可以使用多种木材尺寸，开凿榫卯需要不同尺寸的斧子，也带来使用凿子和锯子的

必要性。由于工匠需要想象榫卯的内部联接与控制加工精度，并且还需要在单榫桁架起立时精心安排，避免失稳翻倒，这都需要有能力的受过训练的木匠的协同。由于宽尺度的木板难以从自然界获得，墙体常常使用填充材料，从板条抹灰、夯土墙到砖石填充料，不一而足 (图8)。由于木材需要其它材料配合来形成完整围护，有时重质材料还会参与到维持侧向稳定性这一结构工作之中，例如中国与日本的木结构 (图9)。半木框架这一名称贴切地反映了木材的角色。这一复合构造模式也赋予这一建造系统丰富的地域性、表现性以及一定的设计自由度。

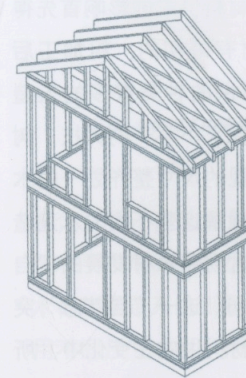
气球框架建造系统 (或者木杆框架建造系统, 图10) 只能在近现代发展出来¹⁾，因为它有两个必要条件——供应充沛的、尺寸统一的、平价的木杆以及大量供应的铁钉。前者只有在使用非人力或者畜力驱动的机械帮助下才能取得²⁾，铁钉的机器加工更是19世纪中叶之后的事情³⁾。这两个条件带来了一项好处，建筑物的兴建不再是受过训练的木匠的垄断行业。只要能够抡起榔头将铁钉砸入木头，就能将木杆连接成框架⁴⁾⁵⁾。由于木杆尺寸远小于木干，难以加工榫卯，而且承载力也弱，这样不可避免需要缩小框架垂直构件的间隔，并且需要使用窄面朝向跨度方向。在北美，它逐渐形成了较为统一的标准——木杆最常使用约4cm×9cm (2inch×4inch) 左右的断面，间距基本上在450mm~600mm左右。当梁架需要使用大构件来形成大空间时，木杆高度可以采用6 inch、8 inch等尺寸。由于木材的商业供应长度常常不超过6m，因而气球框架建造系统最为适合二层的房屋建造，通常木杆无需切割，直冲向屋檐位置，楼面梁构件通常会与垂直木杆在侧面接触，通过铁钉/射钉来连接 (图11)。杆件还可以被制作成桁架或者组合梁来支撑更大跨度的楼面，或者帮助在立面上形成大开口以方便汽车出入。在欧洲，木杆的尺寸与间隔会有更多选择与变化，标准化程度不如北美地区，



10 气球框架建造系统图解



11 建造中的气球框架



12 平台框架建造系统图解



13 建造中的平台框架

不过细密的、等间距的木杆仍是这一系统建造时的主要特征。

平台框架建造系统演化自木杆框架建造系统 (图12)，但解决了木杆框架系统的一个缺陷：由于木材商业供应长度常不超过6m，因而气球框架系统不太适合2层以上的房屋建造。为此平台框架建造系统中的垂直木杆会先切断成所需的楼层高度，再与上下楼面梁联合成一个笼状结构，当它的顶面基本被地板覆盖，它就成为更上层施工的平台，以此类推。这一系统因而可以盖到4、5层，但材料供应却无需长过6m。它的明显施工特征是分隔开上下垂直墙面的水平楼面侧缘。由于构件不会跨越楼层，因而构件可以预制成墙体再运送到平台上安装 (图13)，这一可能性在胶合板的发明之后被变为现实，并且成为平台框架建造系统的突出优点：因为保温绝缘材料、内外饰面都可以在工厂预先安装，从而获得远高于现场施工

的品质。

胶合板的使用为密集の木杆框架带来了结构上的蒙皮效应，它使得蒙皮后面的木杆间距布置不再拘泥于等距布置。而当制造、运输、现场吊装能够更多地采用机具时，预制墙体可以变得更大更重。这样墙体预制可以追随建筑展开面来规划，而非受制于材料供应与加工建造空间尺度。这导致了20世纪末板式建造系统 (图14) 的诞生。板式建造系统每侧建筑立面划分为不多的预制构件，墙面、窗洞、肋条和保温材料联合成一个预置的板块，垂直板块与水平板块通过边缘联合成一体，最后像一个纸箱子一样成型。这一系统由于空间性的转角而获得坚固性。这种施工方法大大压缩了现场拼装的时间，设计与制造也有极多的自由，盖房子就像搭积木一样简单和有趣。复合的板材构造掩盖了后面的木杆布局，表面开口也可以做得很大 (图15)。和平台框架建造系统相比，

它代表了更高的预制和更集成的设计思维。板式建造系统常由工业厂商联合专业设计师提供产品、系统以及建造服务,各厂商也无统一的几何标准(图16)。

(现代)框架建造系统不同于(早期)木框架建造系统。它的典型特征是水平构件的数量、密度远远超过垂直构件,或者说垂直构件的数量已被压缩到最少(图17)。围护构件无需承担荷载,因此获得形状、材料以及位置的高度自由。切分空间的隔断也可使用多种材料与布置原则,由于只有很少数的垂直杆件在传递荷载至地面,这一类结构的安全性不像其他系统可由工匠经验加以判断与保证,它的建造需要经受过严格训练的结构工程师的设计与批准。木构件的连接也不可以使用实木接点(true wood joint),而需要使用金属连接件,如螺栓、钉板或者型钢等(图18)。如果仅靠平行的垂直构件和刚性节点,结构的侧向稳定性还存疑,斜撑就可以出场。它们会被布置于角部及转折位置,单向斜撑或者双向金属拉索能够为框架建造带来足够的稳定性(图19)。

2008年出版的《木材工程中的系统》

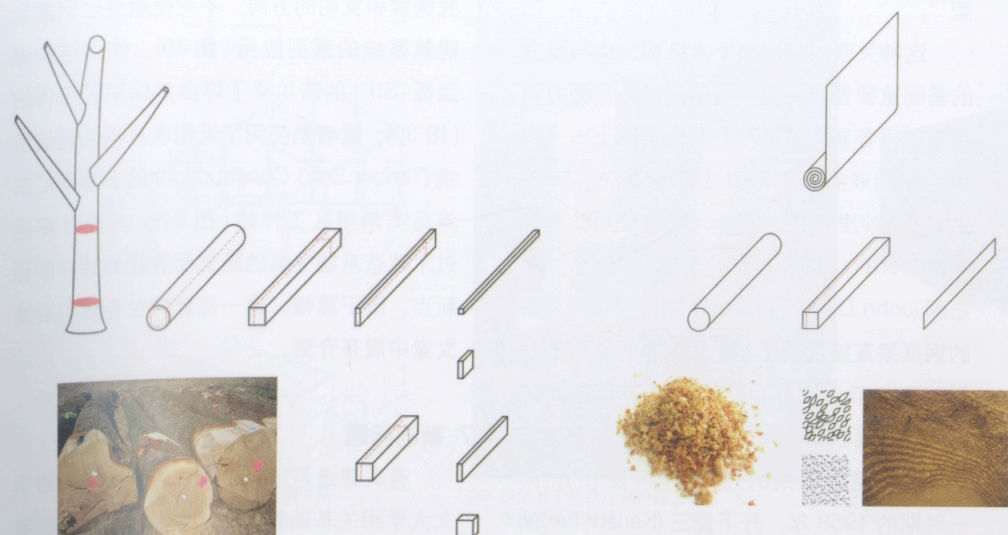
(Systems in Timber Engineering)使用了一个新分类——实木建造系统(Solid timber construction)。它主要指使用各类重型胶合木产品来构造建筑墙面与楼面,而《建构建筑手册》则将它们一并归入板式建造系统。《木材工程中的系统》则将平台框架建造系统与气球框架建造系统合并介绍。这些反映了撰写者的原则差异以及选择重点。

5 分类价值

在以上分类中,材料供应的影响首先得到了清晰反映:木材有最初的、粗加工后的木干,也有工业提供的种类繁多的人造板材。木材拣选有古代大小不一的树枝、树干,也有工业时期出现的尺寸整齐划一的木杆供应。因而伴随着理解这些不同的木建造系统,也就理解了自古到今木材发展的“自然志”(Natural History)。这一“自然志”突出呈现底层因素——材料供应在变化中,所有建造系统不是同时出现,而是伴随着材料供应的变化有着非常合理、自然的时序。

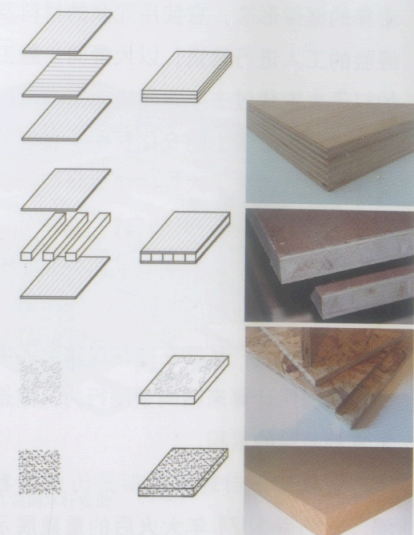
一棵树上可用的部分先是原木(可以用来建造井干系统),把周边小的突出部分切

掉可以得到方木(可以用来建造半木框架系统),方木再切可以得到厚板,厚板再切可以得到木杆(大量供应可以建造气球与平台框架),方木还可以切成更短的方木,再切到小型的木砖和木块(图20)。当代工业还通过高级的切削工具和高切削精度发展出复杂的切法:木头一边转一边切,如同卷笔刀一样,切下像纸一样薄的木皮(veneer),厚度可以小过1mm(图21)。木头的切割也产生副产品:木屑与刨花。这些不同尺寸的木材加工产品和副产品与当代化学工业产生的粘结剂结合,从而诞生了非常多样的胶合木产品:例如常见的密度板(Medium-Density Fibre Board, MDF)、定向刨花板(Oriented Strand Board, OSB,即欧松板),都由刨花压制而成,有一定的方向性,所以它的结构性能会比密度板要强)、木工板(blockboard,两面是相对薄一点的板材,中间由木块,它很多时候也是家具制作的基础板材)、多层夹板(plywood,它由质地优良的木皮双向贴合构造,所以它的性能最强,图22)。胶合木板是革命性的概念,因为在过去用原木做板材极为困难:为了做一扇门,只能通过使



20 木材加工及其阶段产品

21 木材加工中薄片及副产品的获得



22 胶合木产品

用插销将厚板联合在一起。而由于有了化学工业的贡献,木基材材以及大尺寸的结构方材获得可能,它们不仅能克服原木因为干燥收缩带来的尺寸不稳定性,也很容易通过加工回避天然材料自身的缺陷或者加工失误。这正是(现代)框架建造系统和板式建造系统的基础。

在上述演化中,另一个来自于连接的重要影响也得以呈现:人类在相当长的时期只能使用真木节点——如搭接式的连接或者榫卯连接,近代工业革命提供了廉价供应的金属,机械性接点如钉子得到广泛运用,当代则使用了更多样的金属连接件,如螺栓、钉板(图23)或者金属托件。甚至因为现代胶水的局部强度会强过机械节点而成为机械节点的补充。机械节点的好处则在于易于拆装,可以将系统拆回到构件的层级去。而粘结剂则使得材料可以成为一个整体进行工作。没有材料与连接件的变化,工匠的开拓将主要停留在“形态”上。既使能工巧匠努力做出一次与众不同的建造,它也无法变成具备推广价值的类型。

上述分类也足以反映工匠与设计者(或者工匠中的设计者)的能动性。它们出现在材料选择、材料尺寸、材料使用方向、结构层次、围护系统、预制程度等诸多方面。在

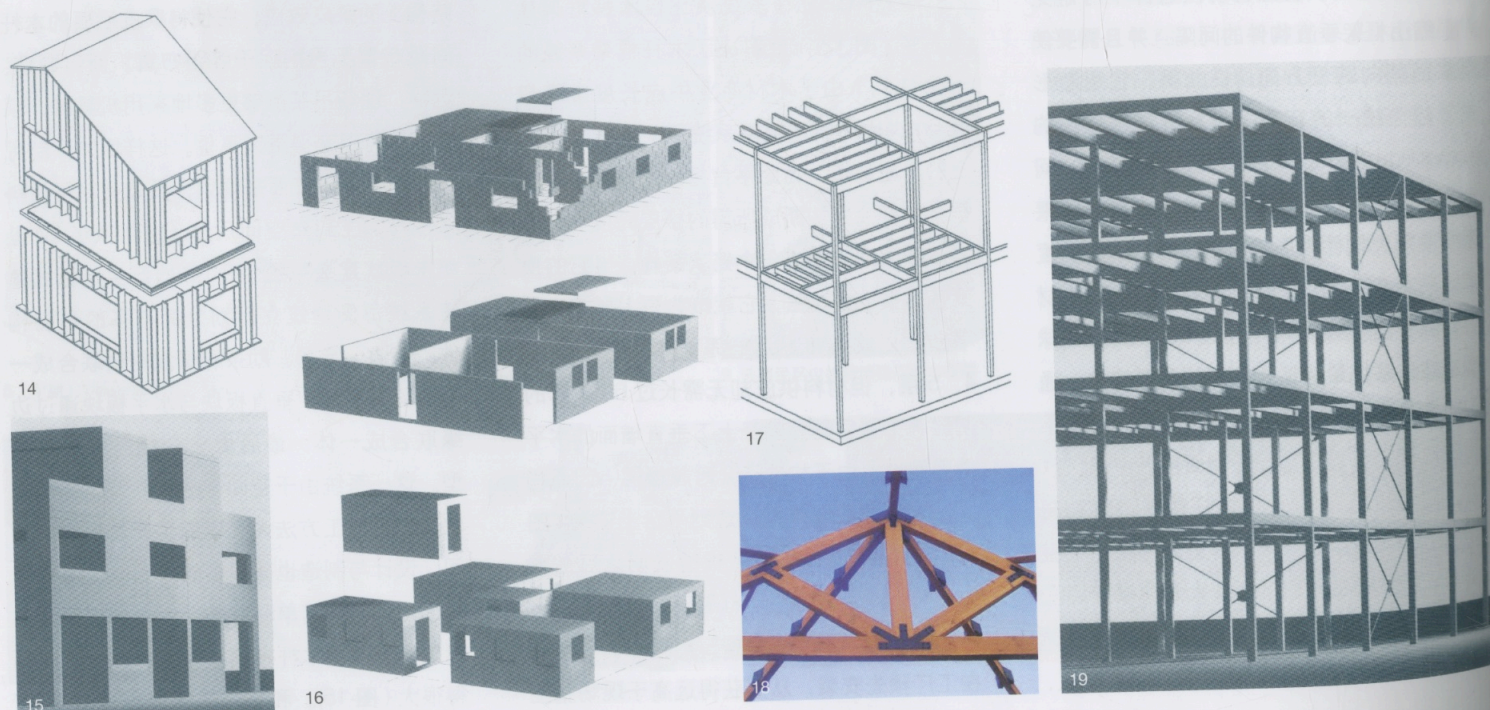
古代,井干建造系统的木材需要同一尺寸,呈水平布局,因而也不受地震威胁。(早期)木框架建造系统则解放了这一限制,可以使用不同尺寸木材,形成框架,并在垂直方向竖起,但工匠需要控制初始竖立时框架倾覆的风险。气球框架建造系统可以由普通人建造,速度大为提高。平台框架建造系统发展了预制能力,建造高度与层数得以突破。(现代)框架建造系统能够获得大空间,并由工程师通过计算来掌握安全性。板式建造系统则高度压缩了现场建造时间,却带来很大结构与空间设计的自由度。(现代)框架建造系统中的结构与围护系统分成两件事,需要设计者分别构想。古老的井干建造系统和现代的板式建造系统结构与围护系统融合成一件事,结构既带来空间限定也形成室内外的气候边界。很明显,系统演化一方面反映了提升了的各方面的精密程度,另一方面也反映了空间、形态设计中更大的自由度。

6 轻型建筑

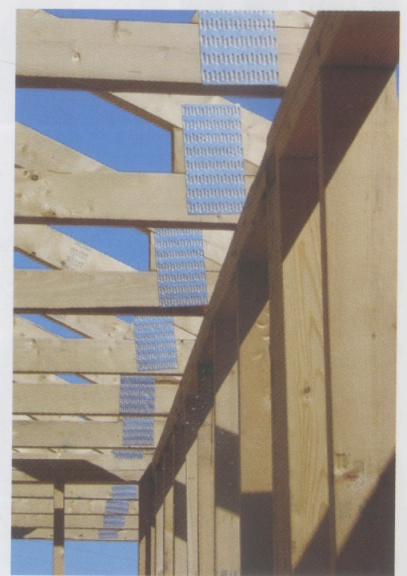
对木结构系统的深入探讨自然引入系统的轻重议题。工匠在古代能够使用的结构性建材非常有限。它们或者来自土地,如土、石、砖,或者来自于树木。木材因其纤维组成而抗弯能力卓越,即使土石房屋也常需要木材

作为水平跨越构件。两者相比,土石自重很大,代表着重型建筑系统的一端,而木材则代表着轻结构的一端。这自然分化了不同材料所导致的建筑系统的性质⁵⁾。

在19世纪逐步演化而成的气球框架建造系统具有非凡的意义,因为它分化了木材的使用模式,使得轻木也就是小断面木材能够被独立发展成建筑系统。而在过去,它们仅仅是屋面檩条或者是填充构件(如灰板条墙)的用材。尺寸统一的木杆当然易于运输与搬运,小断面的木杆和散布的钉子带来了



14 板式建造系统图解
15 板式建造系统的渲染
16 几种典型的板式建造系统产品示意
17 框架建造系统图解
18 框架建造系统接点
19 框架建造系统的斜拉杆布置



23 气球框架建造中使用的钉板

密集的框架形态，它使用冗余的材料及缺乏经验的工人进行建造，以大量的、施工简单的钉子去取代过去半木系统上高难度的实木接点。这一数量上的变化获得了可靠的结构质量，并且带来了大规模快速建造以及结构形式、乃至社区更新的自由(图24)。无论从材料供应、接点方式、系统资源配置还是设计自由度上比较，气球框架建造系统都区别于古典系统，尽管在结构逻辑上两者一样地没能利用计算来精确预测行为，建造也非常依赖经验的累积。

钢框架来自轻木框架是历史学者的猜测，芝加哥1871年大火后的重建展示了转化的实例。而纽约的铸铁建筑先驱者将铸铁框架和木框联系起来，他们形象地表明：无论以何种材料来制作，这种源于美国的框架，完全不同于历史上已有过的任何框架类

型^[4]。

这种关联的确反映了木结构分类与研究的基础重要性，因为木材的形式乃至受力特征可以很容易地被迁移到其他材料上——例如钢结构或者钢筋混凝土建筑系统。1964年由埃罗·沙里宁(Eero Saarinen)使用的耐候钢材(corten steel)建造的美国的约翰·狄尔总部(John Deere Headquarters, 1963)，它的钢框架直接反映了与木框架系统雷同的材料分布与节点细节(图25、26)。而在美国民间也不难找到使用轻钢龙骨建造的房屋与气球框架建造系统的几何雷同(图27)。同一时期的1958年，丹下健三(Kenzo Tange)建造的香川县厅舍(Kagawa Prefectural Government Hall)使用了钢筋混凝土来模拟木框架系统的构件关系(图28)。

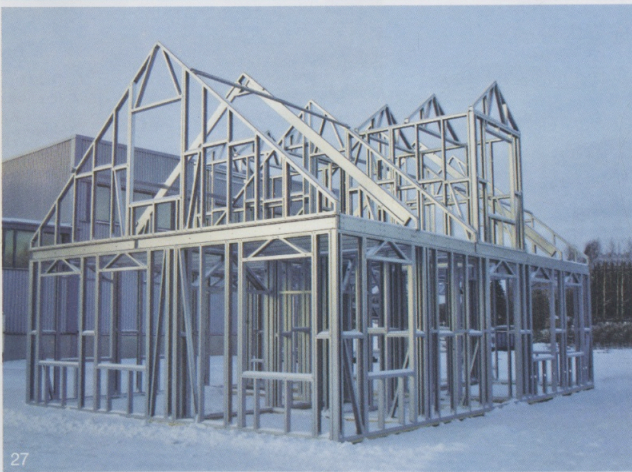
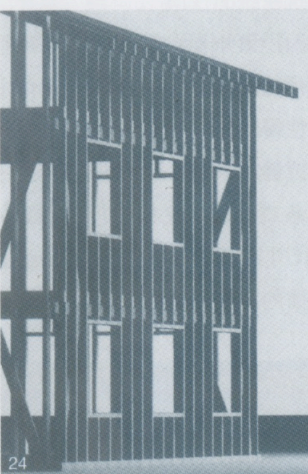
对木建造系统的分类也能指示出新的研

究探索和发明的方向，不论是新芽轻钢复合建筑系统的系列应用(图29)，使用结构保温板(SIP)的四川栗子坪自然保护区工作站(图30)，或者是使用了近似木杆框架建造系统(Timber Stud Construction)的上海南汇东滩鸟类禁猎区工作站(图31)，其设计都通过木建造系统分类的研究而寻找到独特的创新点。限于篇幅，这一部分将在专题的后续文章中展开介绍。

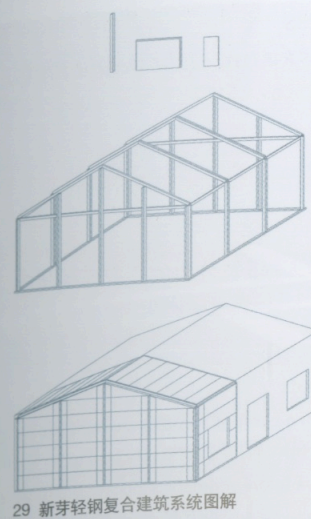
7 新的问题

有关建造系统分类的议题帮助了香港中文大学相关基础教学的开展。它也激发笔者回顾国内建筑教育中的经历，并且提出一些中国木构系统分类中的底层问题：

1) 传统中国木建筑的分类被定义为——井干建造系统、穿斗式构架系统以及抬梁式



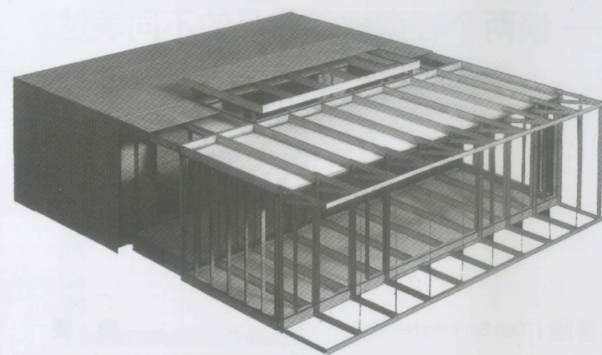
24 气球框架建造系统的渲染
25 美国约翰·狄尔总部外观
26 美国约翰·狄尔总部内部
27 轻钢龙骨建造的房屋框架
28 模仿木结构的日本香川县厅舍



29 新芽轻钢复合建筑系统图解



30 四川栗子坪自然保护区工作站使用了板式系统



31 上海南汇东滩鸟类禁猎区工作站的木杆框架

构架系统。它们是相互平行的3种系统？还是穿斗式、抬梁式构架应该归属于(早期)木框架建造系统(或者半木框架建造系统)这一大类？

2) 欧洲的(早期)木框架建造系统在木框架中广泛使用短斜撑，木框架为方形断面，它固然加工费时，但易于和填充材料连接，并且可以建造多层房屋。相比之下，中国传统木构系统无论是穿斗式构架系统或者抬梁式构架系统，都很难形成多层居住空间(某种程度上也就是围护严密的空间)。从物质端看，这是受限于加工工具与工艺、受限于材料尺寸、还是受限于木框架与土墙的结合方式？

对这些问题的回答需要中国以及东亚木建筑研究者的介入。对这些问题的有效讨论，无疑将通过一个更加当代的、国际的以及动态的视角，重新理解我们自身的建造传统。^[1]

注释

1) 气球系统的命名来源有不同说法，有的说这表达了这一建造系统的快速建造特征，能够很快满足美国西部大开发时导致的住房需求。另一种说法则指出它易于为龙卷风摧毁的特性。历史学家们还制作了下面这个故事：1833年，奥古斯丁·泰勒(Augustine Taylor, 1796-1891年)修建圣玛丽天主教堂(St. Mary's Catholic

Church in Chicago)。熟练木匠看相对薄的框架构件被全部用钉子固定在一起，嘲笑这房屋不比一个气球更充实，下次刮大风时它肯定会被吹走！批评者名字不详，批评后来也被证明毫无根据。详细说明请参考http://en.wikipedia.org/wiki/Balloon_framing#Balloon_framing

2) 标准尺寸锯木的大量供应需要工具机械的进步，如长锯、更坚硬的齿峰。另一个必要条件是对自然能源的利用——如风力、水力。标准尺寸锯木的大量供应最先满足了商业船只的建造与损耗，曾经帮助了海洋争霸的例如16、17世纪的荷兰。

3) 古代木匠将木制的榫卯加工当作检验水平的一个尺度，因而常以不用钉子为荣。很多中国人习惯把钉子称为“洋钉”——进口的钉子，古代钉子为手工锻造，尺寸不一，供应少并且昂贵。切钉的工艺时期大约自1800-1914年，丝钉的工艺时期开始于1860并使用到现在。请参考[http://en.wikipedia.org/wiki/Nail_\(fastener\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Nail_(fastener))

4) 气球框架作为木结构方法在19世纪曾被称为“芝加哥建造”(chicago construction)。

5) 由于重与轻可以是不同材料之间的比较，也可以是同类材料不同系列的比较。分类重结构与轻结构在工程界尚无统一、绝对的标准。而在设计流程中，重与轻可以是预先的材料选择，也可以是建成后的指标判断，基本也是有伦理的设计者、工程师的改良目标。有经验的设计师或项目管理者因此会以一些初始要求、数据综合考虑后，再加以选择或相对判断。这些要求包括每 m^2 造价、最大构件重量、最大跨度、结构形式、建筑高度、乃至防火能力等。而在钢结构中，最重要的两个数据是每 m^2 用钢量以及使用的钢材厚度：钢结构厂房用钢量通常为 $30\sim 100kg/m^2$ ，大于等于 $50kg$ 可被认为是重钢结构，而北京国家体育场达到了恐怖的 $160kg/m^2$ 。这些反映了结构设计的效率和优化程度。

从材料端来看，如果主要构件钢板厚度大于等于 $10mm$ ，则可认定为重钢结构。轻钢结构的钢板厚度常见为 $2\sim 7mm$ 左右。由于材料较薄，因而可以使用薄板冷轧或热轧成型。而新芽复合结构中的薄壁轻钢C型构件厚度基本为 $2mm$ 。结构的荷载能力是另一个有意思的维度：例如

厂房仓库需要使用行车来起吊重物，如果起吊重量大于等于 $20t$ ，结构工程师通常会认定为重钢结构。而如果所承受的围护(包括屋盖与外墙)材料为重质材料如砖石、混凝土，结构体必然需要采用重钢结构。倘若围护使用轻质材料，结构体采用重钢结构的必要性就需要深究了。

在中国国家规范和技术文件中有轻钢一说，但并不重钢。后者被称之为一般钢结构，或称“普钢”。但普通钢结构范围很广，包含不同荷载，甚至包括轻钢结构的一些内容。

由此可见，轻与重之分可以在结构本身，可以在承担的荷载上，也可以在自身的材料选择上，以及所承受的围护材料的轻重上。不过由于占据建筑物巨大的表面积，围护材料的体积与重量都影响巨大，因而很多时候也只有围护材料变得轻质时，主体结构才有成为轻质的可能。

参考文献

- [1] Andrea Deplazes. Constructing Architecture[M]. Springer, 2005.
- [2] Josef Kolb. System in Timber Engineering[M]. Springer, 2008.
- [3] McPherson, James M. Battle Cry of Freedom[M]. New York: Ballantine Books, 1989: 17.
- [4] 汤姆·福·彼得斯·营造文化与技术思维[J]. 建筑与设计, 2001(3): 71.

图片来源

- 图1、5、10、12、14、17：参考文献[1]。
图3、4、15、16、19、24：参考文献[2]。
图11：<http://www.neh.gov/divisions/public/featured-project/house-and-home>
图13：http://www.jandmcontractors.com/gallery2/v/hillcrest/hillcrest_19/hillcrest_19_construction/DSC03022.jpg.html
图25：<http://www.panoramio.com/photo/34929968>
图26：HYPERLINK "https://www.flickr.com/photos/faasant/3036897538/in/photostream/" <https://www.flickr.com/photos/faasant/3036897538/in/photostream/>
图28：<http://www.wikiartis.com/en/kenzo-tange/works/kagawa-prefectural-gover-nment-hall/>
其它均由作者提供。