以结构为共识
——建筑师与结构工程师的设计交融

Structure as Common Ground：On the Design Entanglement Between Architect and Engineer

[德]马里奥·林克 文｜Written by Mario RINKE
韩雨晨 译｜Translated by HAN Yuchen
曹婷 校｜Proofread by CAO Ting

摘要： 在建筑的设计和建造中，技术一直扮演着重要的角色。无论是与建筑需求和可利用资源相关的概念化功能与建造形式，还是建造材料的制造和供应，抑或是最终的建造过程本身，都需要广泛的技术支持。随着技术对于环境的影响日益重要，工程师在整个设计与规划过程中的作用只会变得更加明确。本文探讨了建筑师与工程师之间的互动交流及两者的合作制度关系。首先，从历史的角度论述了设计的过程。随后，以瑞士为例，基于其核心合作制度讨论了建筑师与工程师之间的关系，强调了开展富有成效的跨学科合作的必要性。最后，展望了当结构在资源的可持续利用中起到重要作用时，未来设计师所能扮演的角色。建筑师和工程师可以多样的方式参与建筑的设计与建造，但在建筑设计的决策层面，两者始终不变的结合点正是结构设计。

关键词：跨学科设计、合作、结构、建筑、可持续性

Abstract: Technology always played a key role in the design and construction of buildings. Conceptualizing functions and constructional forms related to the needs and available resources, the fabrication and supply of construction materials and, eventually, the construction itself needed a broad set of skills. With the increasing of importance of technology in our environment, the involvement of engineers in the planning process has only become more differentiated. This article discusses the entanglement between architects and engineers and their institutional relationship. First, a historical view will be taken into the design process. Subsequently, the connection is discussed based on the central institutions of cooperation based on Switzerland highlighting the necessity for encounters for productive interdisciplinary cooperation. The last part looks at future roles of designers when structures play an even greater role for a sustainable use of resources. Architects and engineers have various forms of involvement in building but their meeting in the most permanent in consequential layer of a building, the design of its structure.

Keywords: Interdisciplinary design, Collaboration, Structure, Architecture, Sustainability

作者：
[德]马里奥·林克（Mario RINKE），比利时安特卫普大学建筑系教授。
译者：
韩雨晨，东南大学建筑学院博士后。
校者：
曹婷，苏黎世联邦理工学院建筑系结构设计教席博士后；阿尔托大学艺术设计与建筑学院客座科研员。

DOI: 10.12285/jzs.20210602004

一直以来，建筑设计与建造都需要与多种技艺相结合。各类技术知识需要反复地融入设计与建造的全过程中：从最初的建筑设计，到建筑材料的制造和供应，再到最后的施工建造。支撑结构是建筑物存在的根本，在建筑与建造史中也有多重意义。即使在今天，工程师与其掌握的技术仍以多种不同方式参与到设计建造的过程中。这篇文章的目的在于揭示建筑师和工程师在设计行为与专业知识范围上的交叉互动，并讨论两者在制度层面的关系。下文将从历史的视角诠释技术知识如何协调并整合入建筑设计之中；随后将基于两者核心的合作机构讨论两者的关联性，即教育、专业协会和竞赛；并以瑞士为例详细说明两专业间的交流互动为创新高产的跨学科合作带来的丰富成果。尽早且定期地加入对彼此专业的思考，能为建筑设计与技术的协调互动打造坚实健康的基础。本文的最后一部分，将讨论结构在未来建筑中的角色，旨在更全面地理解结构的含义：结构不仅实现并定义建筑空间，还可以决定建筑的适变性。

一、历史的综述

1. 坚固是建筑的基本原则

结构的坚固与稳定，很早就是建筑设计的基本原则之一。在现存最早的建筑学著作《建筑十书》中，维特鲁威将坚固（Firmitas）与实用（Utilitas）、美观（Venustas）并列 [1]。这三点都是必需的，且最终需由建筑师为三者建立一种适度的关联性。当维特鲁威将其建筑学的观念与彼时的建筑技术一起作为整体记录时，建筑设计往往整合于一人之手。建筑师对于私人、公共建筑与技术性的结构、桥梁的关注是同等的。不过，许多小型建筑的建造也经常由工匠自己设计。居住建筑和农业建筑有着特定的形式和结构，并且一般都基于同样的方案简单地复制，因此，建造安全的建筑结构的知识，往往作为经验与传统代代相传，并基于各地不同的实际情况各自发展，最终导致具有差异性的建造文化。然而，基于对已知材料的丰富经验，材料的可能性和局限性对于建筑师与工匠来说总是不言而明的 [2]。基于已有的建成实例，这些隐含的知识同时根植于建筑师的设计与工匠的执行过程中 [3]。坚固性对应的规则与局限、美学与实用，都是从经验中发展而来，并由此出现了确定性。因此技术知识成为设计和建造实践的一个必要组成部分 [4]。

2. 设计知识的复杂构成

设计和建造知识基于工程实践，因而也深植于专业团体之中。同样地，专业训练也总是在这些团体内通过实践和传授来进行。为此，自中世纪开始，匠人们就组织成立了行会——一个掌控着薪酬、资源和知识的社会系统 [5]。此时，建造知识和在地资源（材料和劳动力）联系的紧密性在整个建筑技术史中达到了顶峰。直至 18 世纪工业化兴起，行会才开始受到冲击。新兴的工业制造机制逐渐肢解了小规模的地方工匠体系。在许多行业中，依托新型机器的大规模生产取代了耗时耗力的手工制造 [6]。作为一次与手工业危机对话的文化运动，丹尼斯・迪德罗（Denis Diderot，1713—1784）和让 - 巴蒂斯特・德阿莱姆伯特（Jean-Baptiste d'Alembert，1717—1783）指导编著的《百科全书》记录下所有的职业和生产方式 [7]（图 1）。作为启蒙运动的焦点，编者想搜集当时所有的知识，并以理性的方式呈现，便于大众获取。至此，工程师作为一种职业已稳固地形成。尤其在法国，分别设立了军事、海事和基础设施建设的工程师 [8]。

3. 作为专家的工程师

技术专家（technical expert）作为公共服务者（civil servant）的角色，显示了正在扩张的机械化和不断成长的行政机构之间的角色交融。彼时，各国政府已经为交通及重要机构筹划了一套集中式架构，并首次根据具体需求设置了对应的专家职位。例如，法国政府 1747 年在巴黎国立土木学校、1794 年在巴黎理工学院开始培养国家的工程师，这标志着高度专业化的兴起。这种专业化的产生，既由现代国家的发展需要所牵引，又受到日益重要的建造科学技术的驱动。随着专业化的巩固，桥梁和其他基础设施的建造艺术逐渐从建筑中分离，成为这个刚兴起的工程领域的核心部分 [9]。因此，建造技术能够自由地发展，而不被建筑背景下的限制条件所束缚 [10]。虽然 18 世纪的行业专著总体阐述了某个特定建筑框架下的各方面技术，但 19 世纪早期的工程手册则进一步把关于承重结构的知识从其他建筑技术中分离出来，并基于抽象的力学将其定义为一个独立的领域 [11]。知识领域的分化与科学性的加深，使原本紧密相连的次级学科不断地分离。

工业化对建筑行业产生了巨大的影响，不仅增加了工程组织的责任，还冲击了传统建造知识的常规运用方式，主要表现在两方面：一方面，生产的不断增长带来了货物和人员的流动，这往往要在短时间内、新尺度下完成，因此需要大量的新型基础设施：除了桥梁和道路，更重要的是仓库、工厂和火车站；另一方面，以铁为代表的新型建造材料的出现，意味着此前已知的建造知识与实践类型，很难用于以铁为材料的建造项目和建造尺度中 [12]。这两方面都是法国技术教育重组中的核心要点，并随后为大多数国家所效仿。工程师的培养不再是带有强烈建筑文化艺术基调的大师培训班，而转变为由自然科学和数学家教授的科学学科 [13]。铁和与之相关的大跨结构及其他新的结构类型开始渗透到建造的各个方面，这在很多情况下都离不开技术专家的参与；在这种新的设计实践中，工程师成为建筑师的日常设计伙伴。随着专业知识日益复杂，专业分化更加普遍，建筑师、工程师及其他领域专家之间的合作日益增加且日渐重要。建筑和工程领域之间实际的文化差异因而需在结构工程这个全新的、基础的科学方向下来讨论 [14]。在此，观念上的现代主义比建筑学中的经典现代主义提前一百多年诞生了：现代工程师希望以完全理性的思维和工作方式在其新的专业领域中有所建树。为了使工程师能够做出更加明确、缜密的推理，以及更精确、易理解的决策，有必要将结构从建筑的文化和传统中严格地分离出来 [15]。

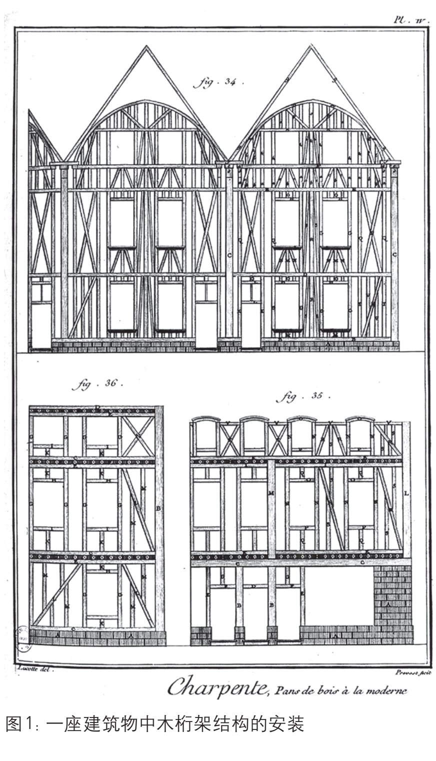


图 1：一座建筑物中木桁架结构的安装

4. 结构作为现代建筑的议题

20 世纪初，“新建筑”的浪潮以包豪斯为教学机构与实验基地，将建筑的焦点转向了功能主义和建造的简明性。这一浪潮首先对居住与生活方式在社会层面进行了重塑。伴随着钢和混凝土的使用，19 世纪的许多结构工程成为理想的由新功能和建造主导的建筑[16]。为了实现合理性与标准化，更好地挖掘工业的潜力，建筑师和工程师共同设计了完全基于当时技术手段的建筑。技术及其对应的结构和建筑材料，不应仅从属于或甚至平等于建筑概念，而应成为建筑概念中一个自然的组成部分。在 1922 年发表的颇具影响力的《走向新建筑》一书中，柯布西耶关注了“工程美学”，并将技术设备（机器）设计的严谨性与建筑进行比较（图 2）。他甚至将帕提农神庙与汽车一同讨论[17]。随着技术参与到建筑的发展历程中，工程师的角色也成为讨论的焦点。诸如尤金・弗奈西奈（Eugene Freyssinet）、皮埃尔・路易吉・奈尔维（Pierluigi Nervi）、罗伯特・马亚尔（Robert Maillart）以及奥雅那・埃拉普（Ove Arup）这些有名的结构工程师，自然而然地会在当代先锋的建筑书刊中有一席之地[18]。

自那时起，建筑师与结构师之间的关系就开始由现代建筑的特殊需求所引导，即运用多变的方式和技术潜力去创造独特的代表性建筑。特别是当结构有助于建筑表达时，如何实现结构（即通过材料与建造）就成了问题的核心。因而建筑结构与设备所固有的特性需要根据不同的建筑情况不断地重新评估。在此过程中，参与设计的人员与学科间的互动成为重新评估的决定性条件。除了建筑师与工程师各自的直接行为，更重要的是两者之间的互动，如今更涌现出了一些重要的制度因素，塑造了合作性的设计与实践。本文将以瑞士为例进行简要的诠释。瑞士建筑在国际享有领先地位，并因与材料紧密关联的建筑设计和以承重结构塑造建筑特性特征而闻名[19]。

二、瑞士的合作制度

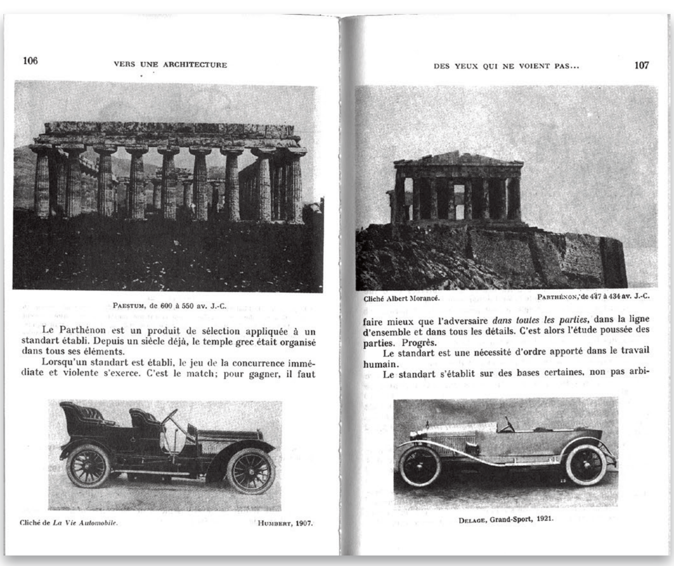
除了国际范围内关于建筑师与工程师合作的讨论，一些瑞士的建筑评论家也对此话题作出了大量有深度的讨论。这些论述较少关注结构在建筑设计中的历史成就，而是描述和分析了由合作引导的设计实践。艾达・弗罗瑞（Aita Flury）关于“合作”的讨论特别值得一提[20]。其中，来自建筑与结构两学科的众多设计团队汇报了各自设计方法的本质；另一些学者则研究了建筑设计中与技术相关的各个方面。总而言之，这些讨论强调了将技术性工程视为建筑设计任务的传统。例如，与公众利益息息相关的桥梁与大坝，除去技术层面的考虑，同样也需要在建筑学层面予以评估。在这一方面，1949 年瑞士艺术家马克思・比尔（Max Bill）出版的关于瑞士工程师罗伯特・马亚尔（Robert Maillart）的同名著作具有里程碑意义[21]。他将现代的形式语言与钢筋混凝土这种新的建筑材料联系起来，根据材料对应的结构功能与建造方法进行论述，并聚焦建筑艺术的需求，将马亚尔的工程项目评定为公共建筑文化的重要组成部分。

1. 以建造为导向的教育

瑞士建筑师与工程师之间的紧密关系并直接未反映在两者不同的基础教育中。其他国家有时会开设诸如“建筑工程”的课程，同时教授两个学科的内容与方法。但并没有学院层面直接以设计为目的跨学院教学内容，如建筑学与结构工程学学生共同参与的设计课。瑞士跨学科的教育主要集中在建筑师的培养上，是通过在建筑设计课中引入结构工程背景的指导老师来实现的，但这类设计课主要存在于本科和硕士的毕业设计中。建造材料是两学科的一个决定性的联系点，这在瑞士一贯非常重要。用什么材料来建造，怎样建造，以及材料在建造与建筑层面上的影响，这些问题奠定了一个建筑项目的基础，并总是会促进跨专业的交流讨论[22]。在理想情况下，对于建造概念的质疑与诠释，应从跨学科的教学团队转交给学生。这种对建筑、建造、结构甚至工程服务的教学需求，深植于以实践为导向的应用技术大学的教学中。建筑学毕业生在从业之前，就已训练了如何衡量和处理技术对建筑的影响，并获得了在实践中进行跨学科对话的能力。因此，在之后的职业生涯中，这就不再是跨越专业边界的问题，而成为专业实践的一部分。

2. 专业协会

强大的专业团体网络是瑞士建筑行业的一大特征。在协调利益与规则的核心



106 VERS UNE ARCHITECTURE

PAESTUM, de 600 à 550 av. J.-C.

Le Parthénon est un produit de sélection appliquée à un standart établi. Depuis un siècle déjà, le temple grec était organisé dans tous ses éléments.

Lorsqu'un standart est établi, le jeu de la concurrence immédiate et violente s'exerce. C'est le match; pour gagner, il faut

Cliché de *La Vie Automobile*. HUMBERT, 1907.

DES YEUX QUI NE VOIENT PAS... 107

Cliché Albert Morancé. PARTHÉNON, de 447 à 434 av. J.-C.

faire mieux que l'adversaire *dans toutes les parties*, dans la ligne d'ensemble et dans tous les détails. C'est alors l'étude poussée des parties. Progrès.

Le standart est une nécessité d'ordre apporté dans le travail humain.

Le standart s'établit sur des bases certaines, non pas arbi-

DELAGE, Grand-Sport, 1921.

图 2：勒・柯布西耶把机器视作理想化的兼具美学与功能的工程产物

过程中，行政、产业和科学等多方面的因素得以通过众多的专业团体汇聚在一起。这种瑞士的社团主义确保了各方势力的长久平衡，在建筑行业中亦是如此。建筑师和工程师都有其各自的专业协会——瑞士建筑师联盟（BSA）或瑞士工程协会（Swiss Engineering）。对于后者而言，除了工程师以外，也有建筑师属于该协会。成立于 1837 年的瑞士工程师与建筑师协会（SIA），是瑞士最古老且最具影响力的联合专业协会[23]。SIA 为建筑行业制定执行规范，并发布说明文件与文献；拟定和修订标准的协会委员具有跨学科的背景。该协会还努力为所有规划与建设过程的参与方制定伦理标准，其中也包括了公平竞争的规则。SIA 的公平竞争规则已发展为一个固定的参考标准，且为许多私人客户所认可，赢得了专业的声誉。SIA 也会参与建筑政策的制定，并且推动对建筑文化的欣赏与保护。除了专业协会，建筑师和工程师也会共同参与许多其他活动。协会出版的杂志是文化交流的主要工具。这些杂志是根据瑞士的语言分区来组织与发表的：德语区的 *TEC21*，法语区的 *TRACÉS*，以及提契诺地区的 *ARCHI*。通过这些刊物，建筑师和工程师得以直面共同的上级议题，以及对方领域内当下的具体问题。

3. 建筑竞赛

建筑竞赛是瑞士专业间交流的最重要媒介。在很多国家，竞赛并非主要委托建筑设计的方式，通常只用于公共项目。然而在瑞士，竞赛是业主、设计师和社会大众集聚的核心平台，因此竞赛是设计与建造文化的重要因素。这种角色定位是伴随着 SIA 自 1877 年成立产生并不断发展的。起初，建筑师与工程师的竞赛是分开管理的，直到 20 年前才合为一体。正如其他国家普遍的实践一样，竞赛也分为不同的种类，例如参赛者的选拔程序可分为公开性、选择性或邀请性几种类型[24]。公开竞赛最为常见，它大多面向公众，对所有感兴趣的建筑师与工程师开放，并允许与任何青年设计事务所签订委托合同，无须他们提供已完成项目的证明。而在选择性或者邀请性的程序中，青年设计事务所对特定项目的申请通常需要满足准入的基本标准。无论如何，两种包容的竞赛形式都在专业团体中引起了关注度与参与度，并不断涌现出新的合作。许多竞赛都需要设计者组队参加，设计团队通常由主创建筑师、工程师、景观建筑师构成。正是这种团队合作使不同的专业网络得以联系与整合。建筑师主动与工程师联系，并尝试建立起持续数年的、非约束性的合作关系。许多高产且具有创造力的建筑师与工程师搭档就是通过此种方式建立的，例如瓦里西奥·奥加提（Valerio Olgiati）与帕特里克·加尔特曼（Patrick Gartmann），纳普切维奇 & 菲柯特 & 吕兴格博士 + 迈耶（Knapkiewicz & Fickert & Dr. Lüchinger + Meyer），赫尔佐格 & 德梅隆（Herzog & de Meuron）与施耐泽·普斯卡什（Schnetzer Puskas），或者梅里·彼得（Meili Peter）与约格·康策特（Jürg Conzett）。即使在不要求工程师组队参加的竞赛中，建筑师也会与工程师联系并邀请其共同参与。依据竞赛规则，获胜者拥有得到项目委托的可能性。因而一些建筑师与工程师事务所主要通过竞赛获得项目合同，也因此维持了一种重要的合作关系网。

建筑师克里斯蒂安·克雷兹（Christian Kerez）和结构工程师约瑟夫·施瓦兹（Joseph Schwartz）是 21 世纪瑞士最著名的设计合作组合之一。两位早期合作过位于瓦杜茨的列支敦士登艺术博物馆（Museum of the Art Liechtenstein，1998—2000 年，与 Morger and Degelo architects 合作），以及位于苏黎世森林大街公寓（Apartment building on Forsterstrasse，1999—2003 年），并于 2001 年入围了苏黎世卢森巴赫（Leutschenbach）学校建筑的设计竞赛——竞赛中他们排名第二，评委要求第一名和第二名都继续深化方案。最终，克雷兹和施瓦兹赢得了项目委托，因为他们创造了一种标志化的空间结构，使得不同的功能体量可以上下堆叠起来，并将体育馆置于顶层。此案例是建筑竞赛成为‘知识发生器’的绝佳例子，设计师重新思考了当代高效的学校建筑同时作为工坊和工厂的可能性，并以其非凡的设计结果给出了与众不同的答案。这种紧密的团队合作促成了由好奇心驱动的结构探索，并产生了独特的空间生成方法——通过制作大量的实物模型来理解建筑和结构间的互动关系（图 3）。从竞赛的两个阶段开始，以及紧随其后的早期项目阶段，设计概念发展的每个阶段都对结构的表达进行了实质性的提炼。整体而言建筑师与结构工程师持久的合作、从根源上衡量设计任务的态度、运用简而有力的结构原理对建筑设计问题的反思，这三点一起为博物馆、办公楼和超高层建筑的设计带来了许多开拓性的方案。竞赛，已经超越了构建创造性合作体系的作用，成为具有高度影响力的建筑作品的发表平台。事实上，许多克雷兹和施瓦茨广为人知的设计项目并未建成，但其仅作为竞赛入围作品就已获得了重要的标志性地位[25]。

然而，竞赛的形式，尤其是公开竞赛，也因其与经济性相背离而屡受批评。在一些特别受欢迎的公开竞赛中，甚至有多达 150 支团队竞争一份合同。这种基于经济效益的抨击，与上文提到的青年事务所的准入标准、公开竞赛的创新力以及活跃的专业团体内交流和碰撞的方式，都形成了鲜明对比[26]。

众多的建筑奖项也是这个平台的一部分。这些奖项由不同的机构颁发——公共机构、城市与州政府、基金会、杂志，以及工业界颁发给混凝土、钢、砖石及木结构建筑的重要奖项。这些获奖的建筑，尤其是得到材料行业奖项的建筑，往往代表了精良的概念与结构，因而也间接地表彰了设计过程中的合作与实施过程中的精细建造。在此，工程师在概念创新与新形式表达中扮演了重要的角色，他们的工作不再单纯是解决技术层面的问题，而是深深根植于建筑的本质之中。

如上文所述，建筑师与结构工程师的合作已制度性地建立在了在诸多层面之上，设计决策是多专业交融的结果，而并

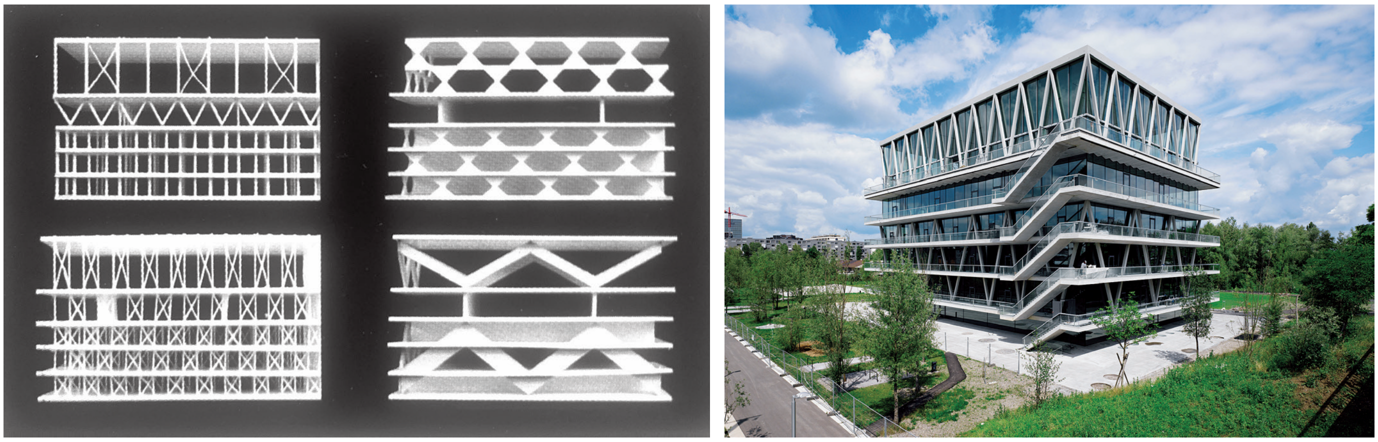


图3：卢森巴赫学校建筑——实物模型的发展与落成后的建筑，苏黎世，2001年

非是单一专业的决定。建筑竞赛成为合作型实践的核心平台，它不仅挑战了长期固化的设计规则，激发了设计创新，更是将技术引入了建筑设计中。专业协会在代表不同专业的共同利益，以及专业标准与规范的交流讨论中都扮演了重要的角色。尤其是通过协会组织的活动，使得建筑师、工程师与其他专业人员可以参与到政治、社会、技术领域的讨论中。建筑师与结构工程师的教育能为促进跨学科的设计思维文化为带来了巨大的潜力。在日益复杂且充满挑战的设计实践中，深入了解对方专业的思维方式与行为模式是增加专业与社交竞争力的核心方式。

三、未来结构的角色

我们能够从古今建筑中结构的地位与角色中学到什么？从以上简要的历史综述中，我们可以看到技术固然是每个建筑最自然的组成部分，但它的重要性却在实现一些现代性的目的中变得越来越突出。随着建筑在结构大跨度与高承载力层面的新需求，以及新材料的运用带给结构安全性上的提升，技术已不仅是现代建筑与结构工程的辅助因素，更成为建筑与结构工程中的重要核心属性。从当今建筑不断呈现出的复杂性中，我们意识到了在设计与建造过程中知识协同的必要性，这也同时展现了建筑师与结构工程师在多个层面上的交流互动。尽管建筑技术，尤其是结构，已经在建筑文化与建造文化中明确了其重要的核心地位，但也不应忘记技术始终不能脱离于具体的设计目标而单独存在。技术已被证实为一种强有力的、不可替代的媒介，但它只能用来解决某个既定的问题。因此，能否很好地洞悉具体的设计状态以及与其相应的本质问题，成为了评价设计作品的关键。回顾建筑史以及当代建筑实践，也许能够帮助我们理解技术作为设计组成部分的重要性。但我们却未必意识到每栋建筑自诞生的所有历程中，设计所产生的影响。

1. 可预见性与永久性

“所有建筑都是对未来的预测，所有预测都是错的。”布兰德在其颇具影响力的关于建筑如何随时间而改变的研究中如此总结道[27]。无论建筑师与结构工程师间的互动多么重要、高质与复杂，都是为了引导建筑回应当今的问题。结构作为建筑的骨骼，不仅要承载即时的容量与空间品质，更应使的建筑能够实现对未来的适应性的改变。结构不仅需要具备承载荷载所需要的刚度，还要能应对功能变化、可达性变化与流线变化。本文的最后一部分讨论将延续前文的时间线索——基于过去结构的角色与如今参与互动的学科，继续描述未来结构的意义。

特别是当下甚至未来的几十年里，工程师将协助建筑师向更加可持续与集约的设计方向转变。因此，作为一个能明确有力地定义建筑空间的概念，“强结构”有必要向新的发展方向转变——这与承重结构的长期使用、设计以及空间的多样化利用息息相关[28]。除了发展智慧与可持续的材料，巧妙地布置结构构件也可以实现建筑的耐久性与可变性——从而延长建筑的寿命。

2. 模拟建筑的寿命

当代社会对建筑与建筑师的需求更加多样，建筑要满足复杂的舒适性与安全性的需求，同时建筑的生态性能也引起了与日俱增的关注与讨论[29]。在这些讨论中，专家们通过众多技术评判标准，例如建造与建筑全生命周期中的能耗，来引导设计决策，从而更好地掌控全局设计。从这一点来看，建筑技术在建筑中再次具有了更重要的意义，不仅可以降低物质资源的消耗，还能够通过复杂的计算机模拟来指引设计决策的过程。但如今，结构工程师在这些可持续设计方法中的作用依然有限。通过利用精制或复合的材料技术、复杂的浇筑或 3D 打印技术，或是对轻型结构体系的关注[30]，结构概念得以明确地与建筑的建造层面联系起来，比如在建造完成前，即建筑落成之前，减少物质资源与能量的消耗。如果轻型结构因为耐久性不足需要翻新，或难以适应新的功能需求，那么最少资源消耗的设计则应更多关注寿命周期较短的建筑，毕竟这类建筑在建成以后就难以再引入提高可持续性的相关措施

了。20世纪60—70年代，很多混凝土壳体结构、充气结构或膜结构以其革命性的节材设计方法著称，但这种设计策略对集约型设计原理的理解太过狭隘。很多轻型结构在其设计寿命的一半就需要付出极高的维护代价，也有很多设计几乎无法适应功能与环境的改变。

支撑结构不能只为实现结构自身的性能，或某个具体的建筑图景、而设计。结构设计只有在特定的语境下才有意义；只有根植于功能的框架内，满足了特定的设计需求时，结构设计才有意义。因为结构比建筑中其他的柔性要素更加耐久，所以在设计时必须对其未来的适变性予以考虑。在这种可预知的多专业互动中，建筑设计与结构设计的相互协调决定了建筑的灵活性与适变性。那么，与承重结构相关的部分如何改变，主结构骨架又如何决定此变化过程？结构骨架在其布局和设计上，都需要包容所有因明显的建筑语境改变而带来的自身变化（图4）。这一要求无疑需要将辅助构件与结构尽可能视作一个中性与抽象的整体。与之相反的是，这些潜在的未来变化可以某种具体的形式出现，这种形式可由当下或未来的结构呈现出的不确定状态叠加或组合而来。在建造实现科学化之前，这种可见的结构冗余曾在设计实践中很常见。在这种解读下，结构既回应了当前的设计需求，与可能回应了过去也许出现过，甚至将来可能还需满足的设计要求。

3. 高于效率的功能有效性

智慧型建筑结构设计的主旨不在于将结构材料的用量最小化，而是将其功能性与应变性最大化——更注重探索可持续策略中的功能有效性而非结构的性能效率。结构工程师与建筑师的合作旨在创造更多的可能性，不仅考虑如何通过与承重结构的互动来展现有趣的空间，也要考虑两者由于内外环境变化而导致的可能发生的改变。当然，内部状态的改变需由业主对需求与功能的预期以及上位规划对周边城市功能的发展定位共同决定[31]。这种对建筑与结构设计过程中的不确定性的思考，应成为未来普遍的设计文化，就像建筑都要做抗震设计一样——尽管也许永远不会遭遇地震。因此，“强结构”不一定是指具有强烈结构表现力的建筑，而是指能够依托坚固且具有包容性的结构而不断变化的建筑。

4. 中国的现实——快速与永恒的变化

随着世界诸多区域大规模的城市化，我们更需要对建成环境中建筑的角色进行重新思考。中国大部分城市的快速变化伴随着大片地区的重新开发，这种大规模重建则使建筑的实际寿命与其基于技术标准的设计寿命产生矛盾。以重建代替改造往往是基于实效与经济利益的决策，但随着资源的合理配置变得日益重要，这一观念受到了新的挑战——可以在未来的城市规划中整合进针对新建筑的规范：结构作为能够包容建筑功能与类型变化的开放性坚固框架。承重结构甚至可以被理解为矗立于街道之上的公共基础设施。通过运用我们在过去数十年间已获得的设计与建造知识，以及更多地借助数字设计工具与数据科学，我们可以要求结构既能营造特定的、高品质的空间与建筑，又能以足够开放与普适的姿态包容其内部以及周围存在的其

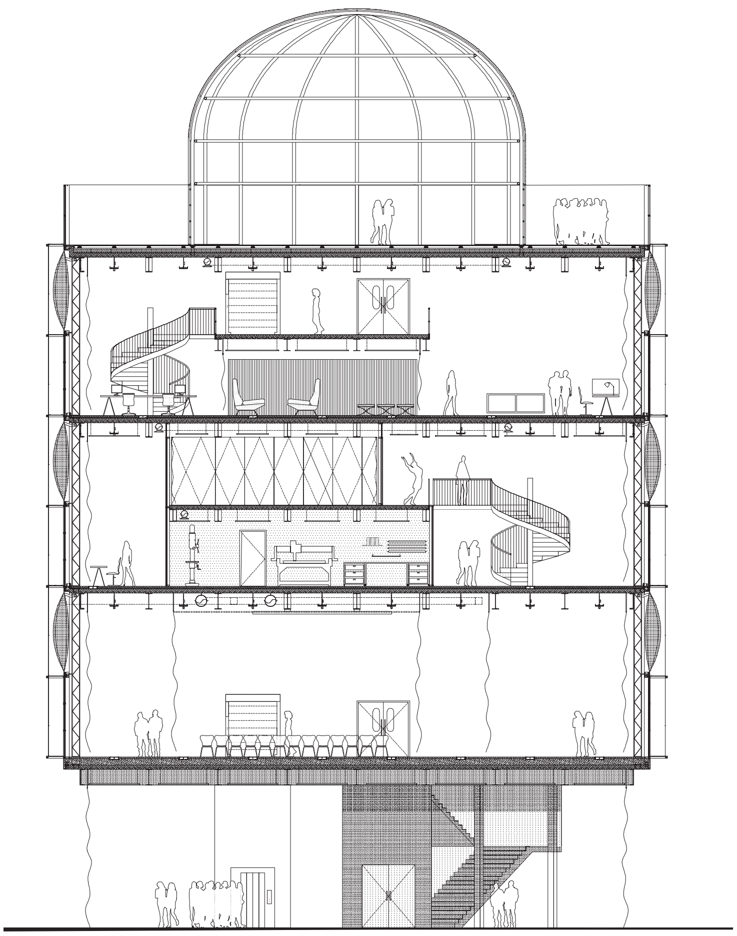


图4：复合功能建筑的适变性设计，新一代研究中心，卡昂（法国），2015年，Bruther建筑设计事务所

Transversal section

他建筑。

特别是在当下，伴随着当代与未来人类生活方式与工作 - 生活场景的剧烈变化，空间功能与使用密度的叠加需要一个更加开放的结构。除了技术的发展，建筑还可以映射城市与社会变革的趋势，今后建筑与结构的互动也许能够实现这样的过程——“一种具有适度灵活的建筑结构体系，它可以反映出当代家庭、工作和娱乐的叠加趋势”[32]。

四、结论

无论何时技术都是建筑与建造固有的组成部分。建筑结构与其特定的技术背景已经成为当代建筑的基本要素，因为结构不仅能够实现大跨空间，更有助于提升建筑的品质。建筑师与结构工程师的互动普遍存在于当代设计实践中。这种互动可以通过多种方式激发，尤其是在制度层面。当人们意识到资源的有限性这个日益迫切的现实问题时，设计师在建筑创作与再创作中的角色将会因此而改变。适应性的概念将扩展建筑结构的意义，同时使得结构的角色得以超越当前的设计概念与设计场景的需求。由于每个时代都有不同的历史环境与相关条件，当代建筑师与结构工程师的互动关系无法与其他历史时期做精准的比较。但终究只有将物质材料转换成合理的、耐久的承重结构，才能设计并建造出一座好的建筑。正是设计师和他们的贡献，才赋予了结构在众多优秀建筑中展示其潜力的机会。

注释

[1] Vitruvius. De architectura, libri decem[M].40 BC.

[2] Tim Ingold. Making[M]//Anthropology, archaeology, art and architecture. Routlegde, 2013：17-32, 47-60.

[3] Paul Nightingale. Tacit knowledge and engineering design[M]// Anthonie Meijers (ed.). Handbook of the Philosophy of Science, Vol. 9. Philosophy of Technology and Engineering Sciences. Elsevier, 2009：351-374.

[4] Lynne C. Lancaster, Roger B. Ulrich. Materials and Techniques[M]// Roger B. Ulrich and Caroline K. Quenemoen （eds.） A Companion to Roman Architecture. Wiley, 2014：157-192.

[5] Klaas Ruitenbeek. Carpentry and Building in Late Imperial China[M]. E.J.Brill, 1993：301.

[6] Amos John Loveday. The cut nail industry, 1776-1890：technology, cost accounting and the upper Ohio Valley[Z]. Ann Arbor, Mich.：University Microfilms International, 1979.

[7] Denis Diderot, Jean-Baptiste d´Alembert. Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers[M]. Paris：Briasson, 1751-1780.

[8] Antoine Picon. French Architects and Engineers in the Age of Enlightenment[M]. Cambridge：Cambridge University Press, 1998.

[9] Building：3, 000 Years of Design, Engineering, and Construction[M]. Phaidon, 2014：237-247.

[10] Antoine Picon. The First Steps of Construction in Iron：Problems Posed by the Introduction of a New Construction Material[M]// Mario Rinke and Joseph Schwartz (eds.). Before Steel. The Introduction of Structural Iron and its Consequences. Niggli, 2010：51-63.

[11] Mario Rinke. Vom Konstrukt zum Typus. Der Wandel der strukturellen Form von Tragwerken im 18. und 19. Jahrhundert[M]. Deutscher Kunstverlag, 2016.

[12] Claude Louis Marie Henri Navier. Résumé des leçons données à l´école des ponts et chaussées sur l´application de la mécanique à l´établissement des constructions et des machines[Z]. Firmin Didot père et fils. Paris, 1826.

[13] Ivor Grattan-Guinness. The Ecole Polytechnique, 1794-1850. Differences over Educational Purpose and Teaching Practice[J].The American Mathematical Monthly, Mathematical Association of America, 2005, 112 (3)：233-250.

[14] Andrew Saint. Architect and Engineers. A Study in Sibling Rivalry[M]. Yale University Press, 2007：131-161.

[15] Berthold Hub. Architect versus Engineer. Monumentality versus Dematerialisation[M]// Mario Rinke and Joseph Schwartz （eds.）. Before Steel. The Introduction of Structural Iron and its Consequences. Niggli, 2010：159-172.

[16] Sigfried Giedion, Bauen in Frankreich, Bauen in Eisen, Bauen in Eisenbeton[M]. Klinkhardt & Biermann, 1928 （Building in France, Building in Iron, Building in Ferroconcrete, Getty Research Institute, 1995）.

[17] Le Corbusier. Vers une Architecture[M]. Éditions Crès, Collection de ˝L´Esprit Nouveau˝. Paris, 1923.

[18] Museum of Modern Art, Twentieth century engineering[G]. 1964.

[19] Anna Meseure, Martin Tschanz, Wilfried Wang （eds.）. Architektur im 20. Jahrhundert, Vol 5[M]. Schweiz, Prestel, 1998.

[20] Aita Flury （ed.）. Cooperation：The Engineer and the Architect[M]. Birkhäuser, 2011.

[21] Max Bill, Robert Maillart[M]. Verlag für Architektur, 1949.

[22] Technik + Architektur 1958-2008. Festschrift Hochschule Luzern - Technik + Architektur, HSLU, 2008.

[23] https：//www.sia.ch/de/der-sia/der-sia/geschichte （2020-08-01）.

[24] Jean-Pierre Wymann.Der Architekturwettbewerb, Modulor, 5, 2011：26-32.

[25] El Croquis 145：Christian Kerez 2000-2009：Basics on Architecture[J]. El Croquis Editorial, 2009.

[26] Fabian Hörmann, Architekturwettbewerbe sind Wissensgeneratoren, www.espazium.ch, 2020-01-06.

[27] Stewart Brand. How Buildings Learn：What Happens After They´re Built[M]. Penguin Books, 1995.

[28] Mario Rinke. Structure as an Organizing Tool for Possibilities[M]// Mario Rinke (ed.). The Bones of Architecture. Triest, 2019：195-199.

[29] Duncan Baker-Brawn. The Re-use Atlas. A designer´s guide towards a circular economy[M]. RIBA Publishing, 2017.

[30] Sigrid Adriaenssens, Philippe Block, et al.. Shell Structures for Architecture. Form Finding and Optimization[M]. Routledge, 2014.

[31] Robert Schmidt III, Simon Austin. Adaptable Architecture：theory and practice[M]. Routledge, 2016.

[32] Alex Lifschutz. Long life, Loose fit, Low energy, in：Loose-Fit Architecture. Designing Buildings for Change[J]. Architectural Design, 2017, 87 (5)：7-17.

图片来源

图1：Denis Diderot, Jean-Baptiste d´Alembert. Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, Plates vol 1[M]. Paris：Briasson, 1751-1780：4.

图2：Le Corbusier. Vers une Architecture, Éditions Crès, Collection de ˝L´Esprit Nouveau˝. Paris, 1923：106-107.

图3：汉斯·亨茨(Hannes Henz) 摄

图4：菲利普·杜雅赫丹(Filip Dujardin) 摄