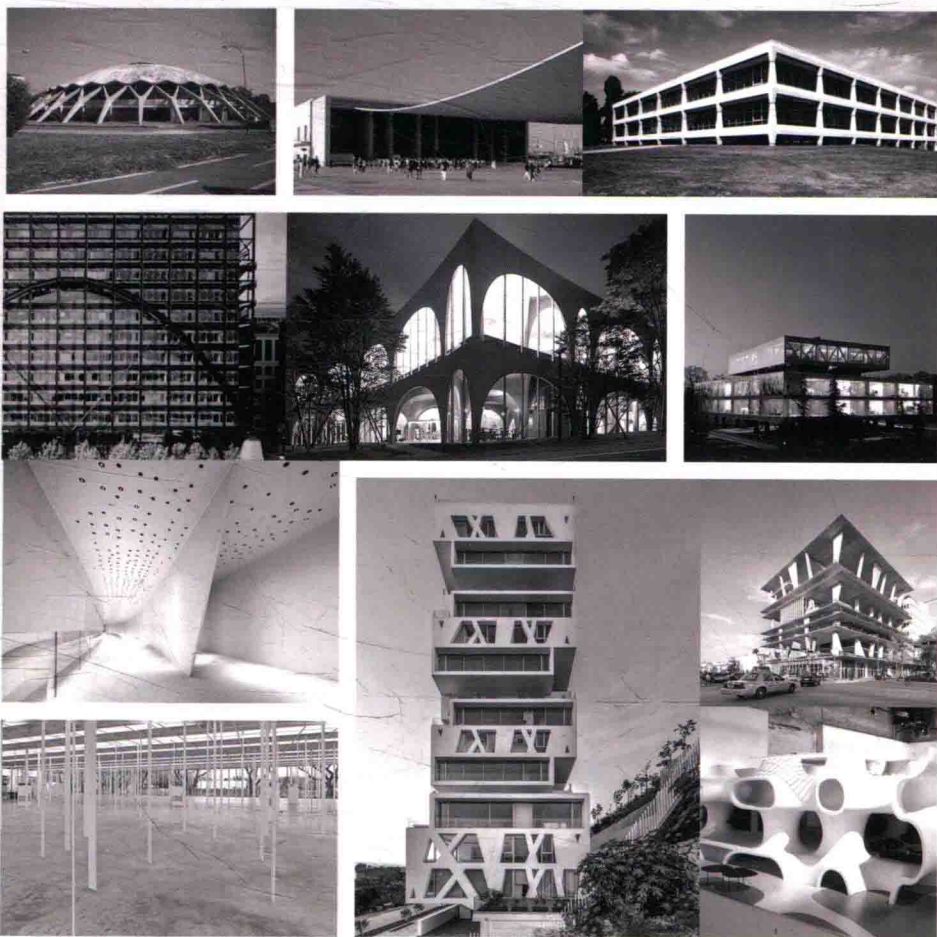


结构·形式·建筑研究丛书



结构·空间·界面的整合设计及表现

戴航 张冰 著

Structure, Space and Interface
Integrated Design and Expression



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

结构·形式·建筑研究丛书

结构·空间·界面的整合设计及表现

戴 航 张 冰 著

东南大学出版社
南京

内容提要

本书从整合设计的角度讨论建筑与结构的专业融合问题。本书强调从传统设计思维向整合设计的思维转换,在建筑的语境下,挖掘和拓展结构承载以外的属性,使结构以及结构技术既是单纯的建筑的骨架支撑,同时又转换为建筑设计的手段和方法。

本书主要内容:建立了建筑与结构整合设计的思维逻辑,详细论述了结构与建筑的整合设计的原则、层次及技术操作路径;对结构子系统的自性整合的要素进行了深入分析;面向结构-空间-界面一体化的整合设计目标,讨论了结构与建筑的功能整合,从空间整合与界面整合的角度,研究了结构属性拓展以及对建筑系统的贡献;四是在实现自性整合与功能整合的前提下,研究了结构与建筑的完形整合设计方法和策略。

本书可供建筑师、结构工程师、高等院校建筑学和结构工程专业师生以及相关科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构·空间·界面的整合设计及表现 / 戴航, 张冰
著. —南京: 东南大学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-5641-6452-2

I. ①结… II. ①戴… ②张… III. ①建筑设计
IV. ①TU2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 075763 号

书 名 结构·空间·界面的整合设计及表现

著 者	戴 航 张 冰
出版发行	东南大学出版社
社 址	南京市四牌楼 2 号 邮编: 210096
出 版 人	江建中
网 址	http://www.seupress.com
责任编辑	戴 丽
责任印制	张文礼
经 销	全国各地新华书店
印 刷	江苏凤凰数码印务有限公司

开 本	787 mm×1092 mm	1/16
印 张	17.5	
字 数	360 千字	
版 次	2016 年 3 月第 1 版	
印 次	2016 年 3 月第 1 次印刷	
书 号	ISBN 978-7-5641-6452-2	
定 价	58.00 元	

经 销: 全国各地新华书店
发行热线: 025-83790519 83791830

* 版权所有, 侵权必究

* 本社图书若有印装质量问题, 请直接与营销部联系。电话: 025-83791830

丛书总序

国内建筑学的教育中，结构是基础课程，通常不在设计教学的序列。以作者长期在东南大学建筑学院的技术教学的授课或设计课程辅导的经历，结构这种自闭性的教学很难建立与建筑设计的联系，在经历本科的技术课程学习后，大多数建筑学的硕士、博士研究生对结构的知识依然是一片茫然。在传统的教学框架下，结构体系被预构，结构构件被模件化，结构问题与设计核心要素（空间、形式、环境等）基本被割裂，建筑设计中的结构问题仿佛一律可以采用机械方式和重复动作（体系选型、柱网复制等）解决，如此，技术的精彩无处可觅，结构的兴奋点荡然无存。

然而，结构作为建筑的承重和建造的基本问题，在当下设计实践中越来越得到重视，一些建筑师对结构的思考和应用已经跨越了专业的界限，与此同时许多建筑作品也重新让我们看到技术无可替代的魅力和结构的价值。事实上，很长时间以来，一些国外高校建筑学设计主线教育中结构问题总是被强化和突出的，在设计中通常对结构与结构技术介入的思考是非常深入的，建筑与结构联合设计教学的方式也是备受推崇的。

无论从建筑学教育还是建筑设计的操作，对结构以及相关技术融入的相关问题的深入思考都是必要和必需的，这也是本系列丛书研究写作的动因。本系列丛书站在建筑学的平台上，讨论结构技术问题，重新审视结构的作为，研究建筑与结构的双向互动关系，在此基础上深入探讨技术对设计的渗透。

本系列丛书的研究基于以下要点：

讨论场景：不在传统的技术与建筑的正交坐标系里研究相互的发展和关联，作者认为在传统的场景中，技术与建筑的交汇是离散和偶然的，不具备典型的意义和普遍价值，在本系列丛书中，建筑与结构技术的关系如同双螺旋染色体结构，在空间和时间上，二者相互支撑，相互促进，并共同呈现。

思维转换：结构=结构+……。本系列丛书在两方面重新讨论结构完整的定义，一方面是结构本身的完整定义，另一方面是结构以外的属性叠加。本研究丛书从更宽泛的角度延伸了结构作为建筑骨架的定义内容，使结构从扁平化的刚性骨架支撑，恢复为立体的形态设计对象，从而使形态多样、灵动鲜活的结构个体设计创作变为可能。此思维旨在研究和挖掘结构的建筑属性，并建立建筑与结构交互的基础。

状态回归：建筑=结构，本系列丛书的研究试图回归到源点状态：就是建筑与结构整合和一体化的状态，在这个整合的状态下，重新思考结构问题，建立对结构系统的关注，并引发建筑设计动作。

设计方法：结构作为建筑设计的起点和策略。结构是建筑的子系统，结构子系统的设计可能是技术自身的闭环操作，也更可能转换为面向建筑的主要问题之一。本系列丛书中，结构始终作为建筑设计问题呈现，结构作为设计手段，技术作为设计方法。

具体操作：结构技术逻辑与建筑形式逻辑的转换，结构设计要素与建筑设计要素的属性关联，结构技术与平面以及空间几何（视觉图像）的相互转换，上述转换的具体操作均在本系列丛书的设计案例研究分析中展现，目的是强化研究策略的可操作性。

本系列研究丛书是基于多年的建筑学的本科、研究生的技术教学，得益和收获于多年研究团队共同努力以及长期研究成果积累，也是对目前国内的建筑学技术教育以及相关建筑设计实践的积极回应，其目的是通过努力挖掘技术内涵，使技术真正体现意义和价值，并本质性助力设计水平的提升。

前言

在人类建筑历史发展的轴线上，从经验时代的一体化营造到科学时代的专业分工协作有清晰的脉络，一体化营造曾创造出建筑的经典，专业协作也在现代愈来愈复杂的建筑系统中体现意义。注意到当今建筑设计中，一方面专业分工越来越精细，另一方面结构却越来越被重视，结构的地位和角色正在发生着某种变化，一个值得关注的趋势是，结构从单纯的支撑体系拓展成建筑组织中主要的构成之一，从无声无息或若隐若现的幕后又重新走到了前台。

需要指出的是，强化合适的结构选型和当今建筑设计中的对结构重视是完全不同的概念，前者限定了结构的体系构成能力，固化了结构的从属和单一的支撑功能，而后者注重结构的潜能和开放性，钟情于与建筑属性相交叉的结构创新和重构塑形能力。结构选型的概念是与建筑关联的结构的单向思维，是结构问题，不是建筑设计的手段和方法。

结构表现是建筑师在建筑创作和设计中建筑结构关注的具体体现，建筑师在视觉上挖掘结构的价值，通过强化结构的某些特征而凸显建筑的特质。建筑师对结构表现的思考和关注是对结构本能以外属性的认同，对激发结构的潜能和价值有非常大的意义，对结构工程师的工作也是莫大的激励。但结构表现就方法和思维而言，和结构语境下的结构选型并没有质的区别，大多数结构表现都是通过部分结构构件形态在建筑表皮和空间中的选择性呈现而达成的，结构表现虽然触动了结构的某些要素，但依然是结构向建筑的单向渗透。结构表现只是思考当今建筑设计中建筑与结构关系的起点。

无论是“艺术+技术（A+T）”还是“结构成就建筑之美”的有关学术研讨，根本问题在于结构与建筑的割裂，“叠加”或“成就”一词暗示了地位，再次强化了结构的从属性。因此所有问题的展开无一例外地会变成传统建筑设计中的结构与建筑如何进行良性专业配合和协作问题。

Archi-neering是一个新造词汇，把建筑与结构工程并置到一起，旨在讨论建筑设计与结构技术的融合问题。虽然Archi-neering关注建筑学与结构专业的交叉点，可是回归到现状，依然是所谓的结构师关注建筑（结构成就建筑之美），或所谓的建筑师重视结构（结构表现），这显然不是Archi-neering的要义，如果Archi-neering的核心架构和支撑是建筑与结构的交汇点，问题是这些交汇在哪里？又如何让交汇发生？

本书的核心观念是，建筑设计中对结构的关注和重视应该从思维方式转变开始，结构是建筑的语言，结构的属性是多重的；技术不单单是设计的支撑，更重要的是技术也是一种设计方法，建筑与结构的交汇和融合是可以在设计的起点发生并贯穿设计全过程的。

本书建立在整合思维逻辑上，整合是当今社会的发展之路和创新之源，建筑可以通过

整合获取效能优化和比原先功能单纯叠加更加强大的功能。通过整合，结构的属性得以拓展，建筑的语言得以丰富。整合思维能提供更高的平台，让我们更加清晰地审视建筑与结构的汇聚，并在设计的源点促成建筑与结构的汇聚和高度融合。

本书的重点是介绍一种建筑与结构的整合设计思维方式，以及在此思维方式下的具体设计操作。凡天下事，合久必分，分久必合，皆规律使然。本书是对这种规律的积极响应，希望对建筑设计中重视结构的设计思维和方法有所启示。

书中若有疏漏和不足之处，敬请读者批评指正。

目 录

丛书总序

前言

第一章 绪论	1
1.1 本书研究背景	1
1.1.1 西方建筑发展中的结构思维和脉动	1
1.1.2 国内建筑界的结构思考	16
1.2 问题的浮现	17
1.3 整合思维的介入	18
1.4 本书的主要内容和目的	19
1.5 本书的脉络和逻辑框架	20
第二章 整合设计的思维逻辑与技术平台	21
2.1 整合思维逻辑	21
2.2 系统论与整合	25
2.3 工业设计的整合操作	28
2.3.1 工业设计整合思维	28
2.3.2 桌椅设计的结构与造型	29
2.3.3 飞机结构设计中的整合策略和工具	31
2.4 整合的概念提取（自性整合、功能整合、完形整合）	34
2.5 建筑的整合设计：思维、平台和操作	36
2.5.1 整合设计思维	36
2.5.2 技术平台与BIM	40
2.5.3 操作路径	45
2.6 小结	47
第三章 建筑与结构整合设计要点、操作及表现	48
3.1 整合设计思维中的建筑与结构	48
3.2 建筑与结构的整合要素	54
3.3 整合中的结构设计要点	55
3.3.1 构形	55
3.3.2 效能	59
3.3.3 清晰	65
3.4 整合设计的操作路径	73
3.4.1 空间诱导：建筑空间要素上结构的契合	74
3.4.2 力诱导：建筑通过力的要素建立秩序和形象	77
3.4.3 几何诱导：建筑 and 结构在共同的几何规则上的投射	79
3.5 整合下的结构表现：消隐与凸显	80
3.6 障碍和突破	95
3.7 小结	97

第四章 构件操作：结构自性整合设计	98
4.1 结构自性整合要素解析	98
4.2 结构自性要素整合	99
4.2.1 Σ （力+材料）（结构仿生；逆吊法轴力找形；极小曲面找形）	100
4.2.2 Σ （力+几何）（整体形效构形；力多边形的向量构形）	108
4.2.3 Σ （力+几何+材料）（内力拟形；材料建造）	118
4.3 基于拓扑优化的结构自性整合	132
4.4 自性整合中的构件及组合	135
4.5 小结	155
第五章 空间与界面：建筑与结构功能整合设计	156
5.1 功能整合的演进	156
5.1.1 整合—分离—再整合	156
5.1.2 由厚重到轻薄	157
5.2 空间的整合：结构的存在	159
5.2.1 整合中的空间与结构	159
5.2.2 基于笛卡尔坐标系的柱网操作	162
5.2.3 高级几何构形操作	173
5.3 界面的整合：结构的感知	177
5.3.1 结构·界面与感知	177
5.3.2 感知强化：材料极少	183
5.3.3 感知强化：几何抽象	187
5.3.4 感知强化：传力转换	195
5.4 从空间到界面：结构的渗透	202
5.5 小结	208
第六章 走向一体化：建筑与结构完形整合与涌现	209
6.1 完形整合：操作和控制要素→涌现	209
6.2 涌现/凸显	218
6.2.1 整合中的跨越结构与涌现	220
6.2.2 整合中的竖向结构及涌现	234
6.3 工程的实践与操作	241
6.4 小结	246
第七章 全文总结	247
7.1 全文总结	247
7.2 几点补充说明	249
7.3 展望与不足	250
附录1	252
附录2	253
附录3	257
附录4	261
参考文献	264

第一章 绪论

1.1 本书研究背景

1.1.1 西方建筑发展中的结构思维和脉动

建筑先驱 马克·安东尼·洛吉耶 (Marc Antoine Laugier, 1713—1769) 提倡理性地使用柱式, 就像哥特式教堂在其结构上表达明晰一样, 并绘制了“原始棚屋” (图 1-1), 被认为是结构理性的萌芽, 从此“建筑在结构方面的理性概念胜过了它的外形形象”¹, “结构应该理性地表达, 而建筑构成应该总是反映建筑物构筑起来的方式”²。

结构理性地位的确立归功于维奥莱·勒·迪克 (Viollet-le-duc, 1814—1879), 声称“建筑只有在严格地运用一种新结构中去寻求形式, 才能给自己配备以新的形式”³, “虽然理性设计的结构可能不一定美观, 但一座建筑中要是没有理性设计的结构, 它是不可能美观的”⁴, 并且绘制了“铁制框架拱顶”方案 (图 1-2)。迪克主张不以美学原理为设计条件, 而应是结构、建造、装饰的逻辑统一, 直接影响了现代建筑运动, 被认为是真正的

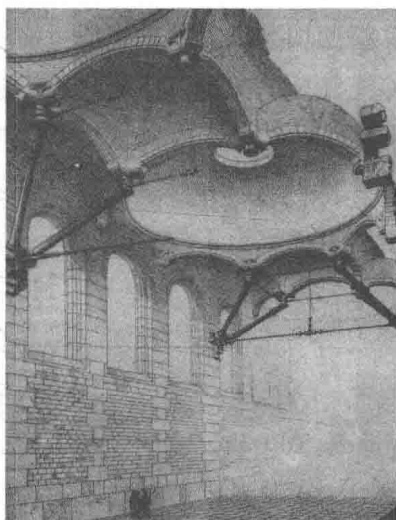


图 1-1 原始棚屋, 洛吉耶 图 1-2 铁制框架拱顶, 勒·迪克 图 1-3 富兰克林路 25 号公寓, 佩雷
图片来源: 图 1-1, 图 1-2, 《现代建筑设计思想的演变》; 图 1-3, <https://www.google.com.hk/>

1 (美) 菲儿·赫恩. 塑成建筑的思想 [M]. 张宇, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 6

2 (美) 菲儿·赫恩. 塑成建筑的思想 [M]. 张宇, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 30

3 (英) 彼得·柯林斯. 现代建筑设计思想的演变 [M]. 英若聪, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 210

4 (美) 菲儿·赫恩. 塑成建筑的思想 [M]. 张宇, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 145

现代建筑理论之父。

奥古斯特·佩雷 (Auguste Perret, 1874—1954) 深受迪克的理性主义影响, 进行了一系列混凝土框架结构的建造实践, 其建筑观主要是古典延续、经济需要、技术赞美。富兰克林路 25 号公寓 (图 1-3, 1903) 清晰地表现了框架与填充墙的差异。佩雷认为框架具有本质意义, “框架赋予建筑永恒的元素和形式, 它是自然规律的体现, 是现在与历史之间的桥梁, 使建筑经久不衰”⁵。

密斯·凡·德·罗 (Ludwig Mies van der Rohe, 1886—1969) 把建筑师从形式的关注引向对建造的关注, “从本质上讲, 我们的任务就是要将建筑实践从纯美学思维的掌控中解放出来, 使它回归初衷: 建造”⁶。与佩雷相比, 密斯更加注重了空间的纯粹性, 而不是真实地表现结构的受力大小与梁柱关系, 结构的秩序、比例是首要准则, 并提出了“皮+骨” (Skin and Bone Construction) 结构系统, 作为“艺术形式”的表皮外挂或内嵌。路易斯·康 (Louis Isadore Kahn, 1901—1974) 更加重视了纪念性的表达, 主张“应该保留揭示事物如何制成的痕迹”, 结构更多的是表达厚重感、体量性、几何性。康重视服务功能与被服务功能的区分, 尽量把交通、机电设施布置在结构构件之内。康认为建筑形式的创造主要依赖两种途径: 一是结构构件的组合, 二是几何形式的运用。

结构先驱 与这些现代建筑先驱可相提并论的是一些现代结构先驱, 他们同样对结构发展及形式探索做出了杰出贡献, “任何对现代建筑文化的思考都必须承认结构工程的关键作用”⁷。瑞士的罗伯特·马亚尔 (Robert Maillart, 1872—1940) 的主要贡献是改进了混凝土拱桥的设计, 发明了三铰拱和桥面加劲拱。“首先, 桥面梁与拱共同受力, 因此拱可以更加纤细; 其次, 直接暴露混凝土结构的美感, 而不再用石头覆盖; 最后, 是拱、桥面、竖向桥墩三者共同作用, 并连成流线式有机整体”⁸。结构合理性的直接结果是经济, 如 1929 年建成的萨尔吉纳峡谷桥 (图 1-4) 梁拱组合突破了结构单一受力的局限性, 是结构效能的极大提升。为了改善节点受力与力的传递, 马亚尔在阿尔特多夫粮仓中 (图 1-5) 设计了“蘑菇柱” (Mushroom Slab, 柱帽)。马亚尔从结构设计入手创造了形式, “他认为结构不仅仅是功能性的, 还是艺术创造”⁹。马亚尔的贡献在于提出了不同受力构件的组合 (图 1-6), 重视节点的传力设计, 以提高结构效能。

西班牙的爱德华多·托罗哈 (Eduardo Torroja, 1899—1961) 是混凝土结构设计的先驱, 1926 年就设计了斜拉索式的水槽 (图 1-7), 这已经是对梁结构的极大改进。托罗哈还对

5 (美) 肯尼斯·弗兰姆普敦. 建构文化研究: 论 19 世纪和 20 世纪建筑中的建造诗学 [M]. 王骏阳, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 155

6 转引自 (美) 肯尼斯·弗兰姆普敦. 建构文化研究: 论 19 世纪和 20 世纪建筑中的建造诗学 [M]. 王骏阳, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 165

7 (美) 肯尼斯·弗兰姆普敦. 建构文化研究: 论 19 世纪和 20 世纪建筑中的建造诗学 [M]. 王骏阳, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 345

8 <http://mcis2.princeton.edu/swisslegacy/engineers>

9 BILLINGTON D P. Robert Maillart: Builder, Designer, and Artist [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997



(左)图 1-4 萨尔吉纳峡谷桥 (Salginatobel Bridge), 1929, 罗伯特·马亚尔, 图片来源: <https://www.google.com.hk/>; (右)图 1-5 阿尔特多夫粮仓中“蘑菇柱” (Mushroom Slab, Grain storage of the Swiss Confederation in Altdorf), 1912, 罗伯特·马亚尔, 图片来源: http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Maillart

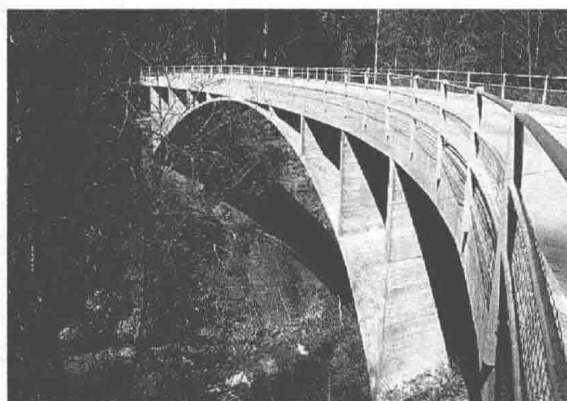


图 1-6 施瓦布齐桥 (Schwandbach Bridge) 1933, 罗伯特·马亚尔。图片来源: <https://www.google.com.hk/>



图 1-7 水槽, Tempul Aqueduct, 1926, 托罗哈

图 1-8-1 Zarzuela Hippodrome, 1935, 托罗哈

混凝土壳进行了设计探索,马德里萨苏埃拉体育场看台筒壳悬挑雨棚跨度达到了 12.67 m,悬挑的尾部设有平衡拉索,力的拉压平衡体现得淋漓尽致(图 1-8)。混凝土壳作为封闭实体结构,必然存在采光口问题,托罗哈用三角形网格结构实现壳结构的连续性,如图 1-9 (Algeciras Market Hall, 1933)、图 1-10 (Salle de Sport des Recoletos, Madrid, 1935) 所示。托罗哈的作品体现了“每一种材料都具有特定的、明确的个性,

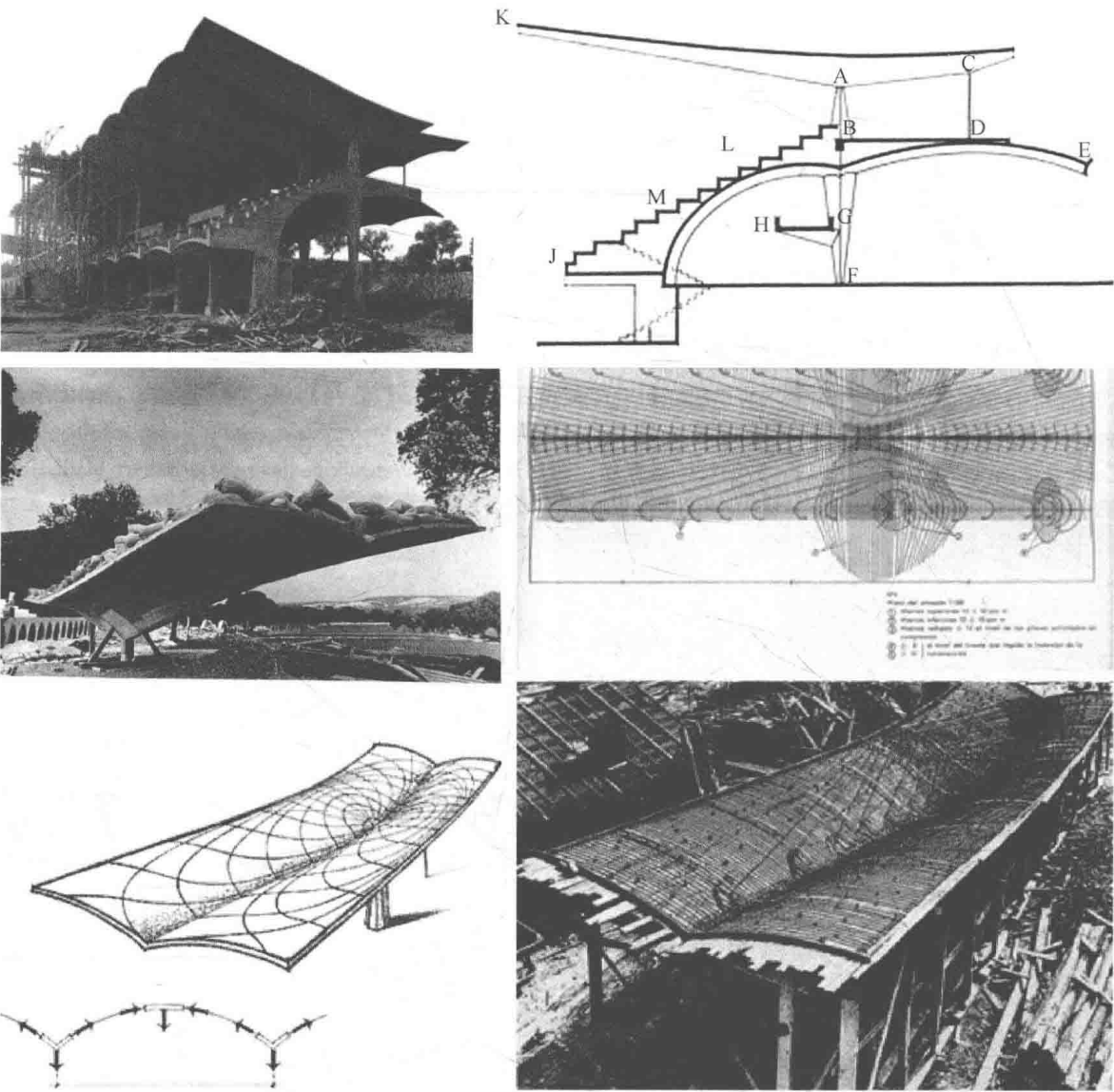


图 1-8-2 Zarzuela Hippodrome, 1935, 托罗哈

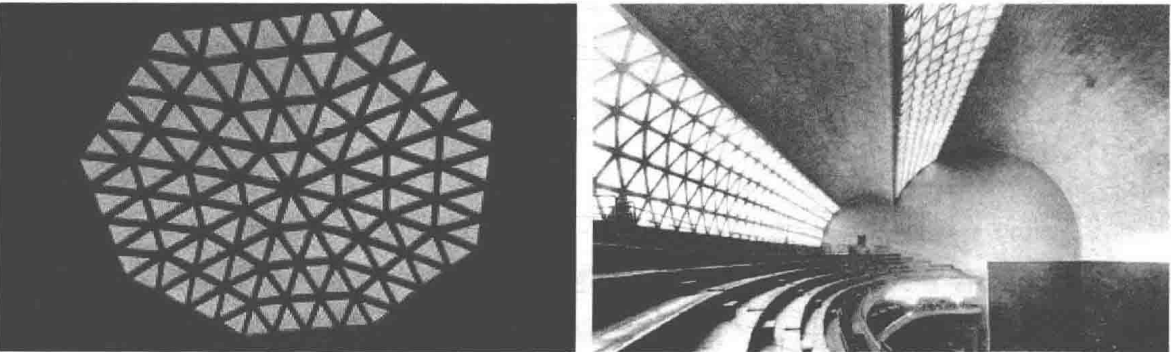


图 1-9 三角形网格结构实现壳结构的连续性 图 1-10 三角形网格结构实现壳结构的连续性, 托罗哈

图 1-7~ 图 1-10 图片来源: <https://www.google.com.hk/>; <http://commons.wikimedia.org/>

每一种形式都展现了独有的应力方式”¹⁰。托罗哈的贡献在于研究了不同结构形式的合理性,运用斜拉索改善梁的受力、运用三角形网格解决混凝土实体壳的采光,这既是传力方式的改变又是结构效能的提升。

皮埃尔·奈尔维(Pier Luigi Nervi, 1891—1979)挖掘了钢筋混凝土在创造新形式和空间方面的潜力。不同于托罗哈,奈尔维“对减轻结构自重的努力取得了极大地进展,无论从艺术角度还是技术角度,这都是他毕生所追求的目标,……通过形式获得强度,研究了贝壳、昆虫和花托的波形表面,通过表面的波折得到强度”¹¹。因此,奈尔维对于结构的经济性(效能)极大关注,从而影响并决定了结构形式的产生。奈尔维认为“事实上,古代所有特征性的建筑细部都是产生于技术上的需要,然而很快又得到一种精确的艺术形式,似乎这才是它们自身的归宿”¹²。奈尔维大量运用了密肋梁,减少了混凝土板的厚度,极大地减轻了结构自重。此外,非常重视支撑形式的设计,随应力大小分布而变截面,创造了雕塑化的结构形式,如图1-11、图1-12所示。

西班牙的费利克斯·坎德拉(Felix Candela, 1910—1997)主要贡献也在于混凝土薄壳

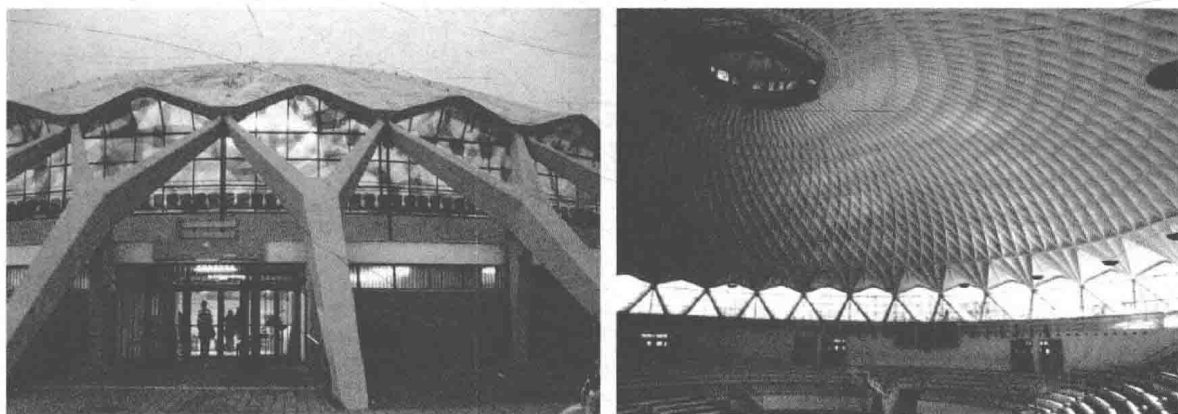


图1-11 罗马小体育宫, 1956—1957, 奈尔维。图片来源: <http://www.mimoo.eu/projects/>

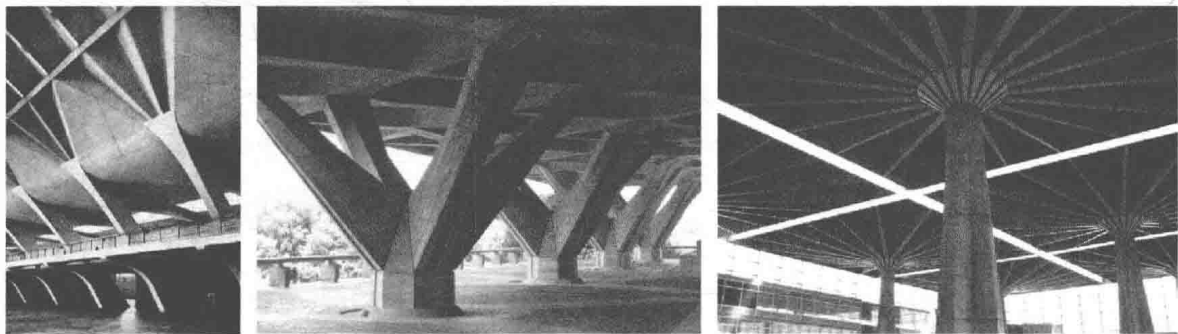


图1-12 奈尔维设计的各种结构支撑形式。图片来源: <https://www.google.com.hk/>

10 <http://www.ietcc.csic.es/index.php/en/general-information/brief-chronicle/eduardo-torreja>

11 (意)奈尔P.L. 建筑技术与艺术[M]. 黄运昇, 译, 周卜颐, 校. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981: 178

12 (意)奈尔P.L. 建筑技术与艺术[M]. 黄运昇, 译, 周卜颐, 校. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981: 2

屋盖，其主要的设计法则是：“最小的材料消耗来保护自然资源，结合建造的设计来降低造价，优雅形式的创造”¹³。如宇宙射线馆（图 1-13）中设计了落地拱支撑与壳屋面的组合。坎德拉最主要的设计是墨西哥花园餐厅（图 1-14），“几何形式是四组落地的双曲抛物线拱，壳的交界处是隐藏的 V 形梁，应对应力集中并提供了刚度”¹⁴。

瑞士的海恩兹·伊斯勒（Heinz Isler，1926—2009）受到托罗哈、坎德拉等结构前辈的影响，致力于混凝土壳体的设计和建造（图 1-15），很多工程的设计都是用缩尺模型进行研究。“托罗哈（Torroja）担心伊斯勒对于模型的随意使用，伊斯勒解释道：首先模型仅是方案设计的第一阶段，还有小模型的荷载试验，及建好后的长期监测。关于双曲面壳的定位问题，伊斯勒提到：所有形式被仪器精确测量，并提供一系列截面曲线数据。伊斯勒还认为所有曲面形可以综合运用圆柱面、球面、圆锥面来近似实现，但是圆柱面与圆

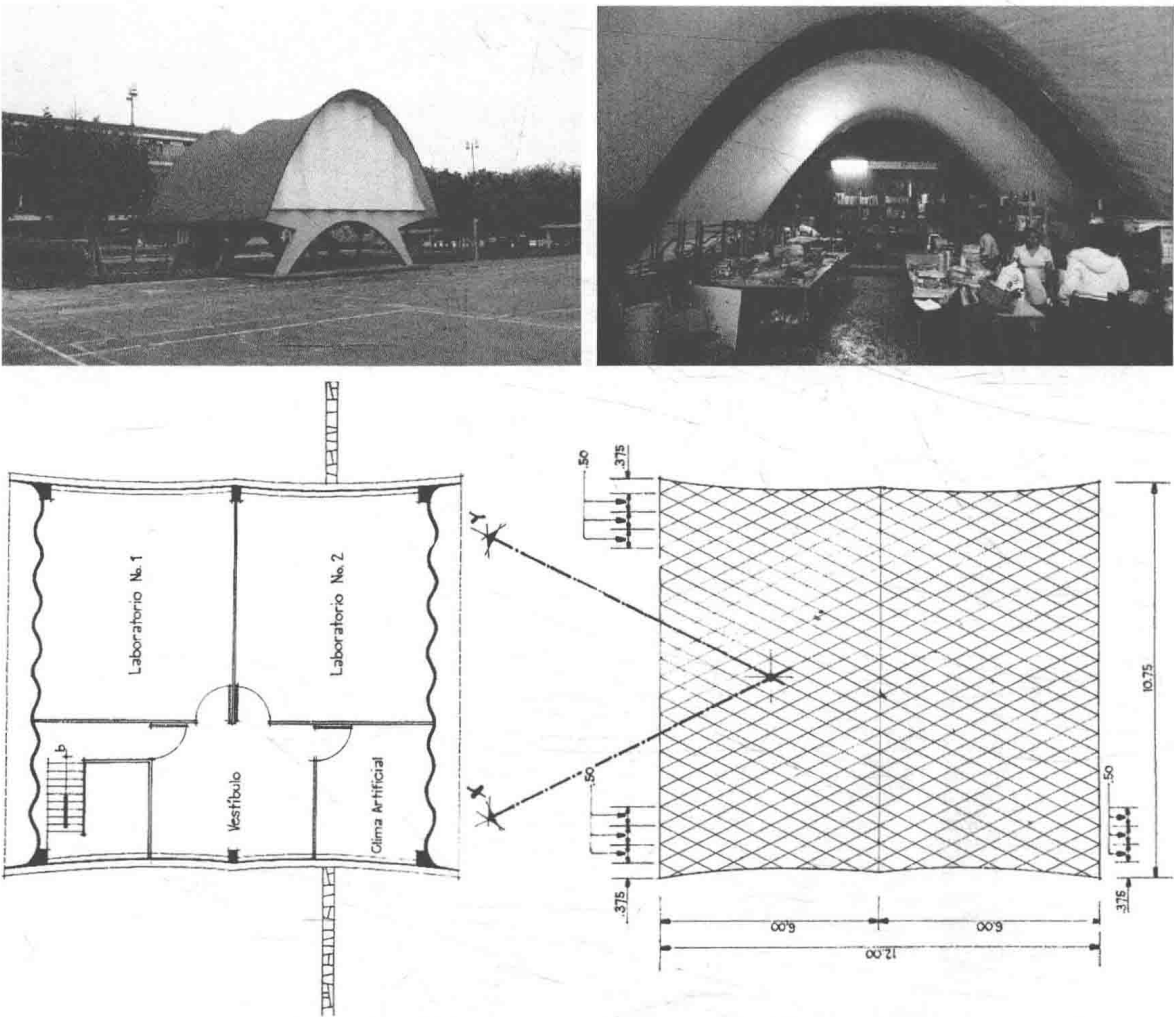


图 1-13 宇宙射线馆（Cosmic Rays Pavilion），1951，坎德拉。图片来源：<https://www.google.com.hk/>

13 GARLOCK M E M, BILLINGTON D P. Felix Candela: Engineer, Builder, Structural Artist [M]. Yale University Press, 2008
14 <http://architectuul.com/architecture/los-manantiales-restaurant>

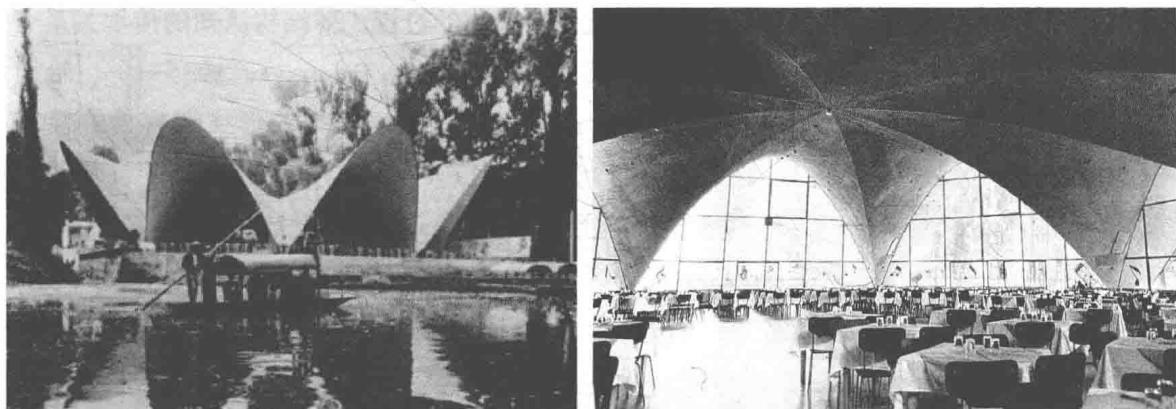


图 1-14 墨西哥花园餐厅 (Los Manantiales Restaurant), 1958, 坎德拉。图片来源: <https://www.google.com.hk/>

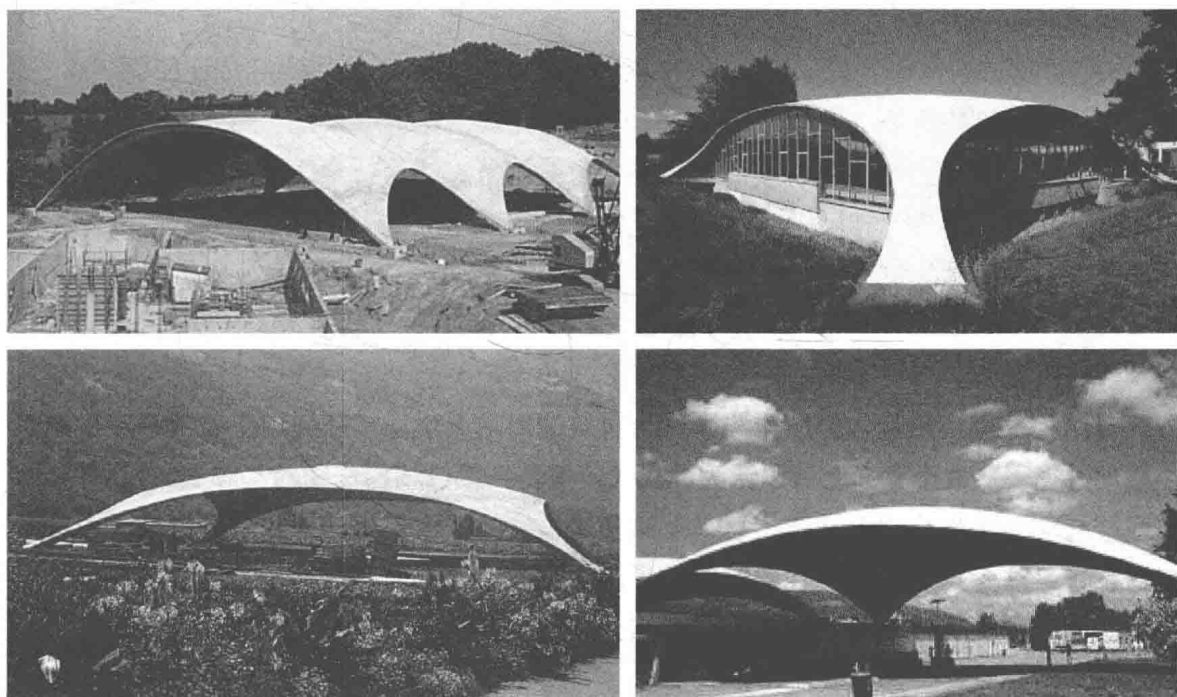


图 1-15 海恩兹·伊斯勒设计的各种薄壳。图片来源: <https://www.google.com.hk/>, <http://web.media.mit.edu/>

锥面的抵抗压曲能力非常弱,他设计的形式提高了抗压曲能力,比圆柱面提高了 7%–10%,比圆锥面提高了一倍”¹⁵。“伊斯勒主要用物理模型来结构找形 (Form-Finding), 一个纯受拉模型翻转后可以纯受压”¹⁶。

由上可以看出,西方建筑界对于结构的倾心具有悠久的传承关系,从建筑师勒·迪克的结构理性地位的确立,到佩雷的框架与填充墙建造实践,再到路易斯·康对结构与建筑“整合”的关注,是对结构与建筑关系的认识提升过程;从工程师马亚尔的“梁拱共同作用”,到托罗哈的薄壳,到奈尔维的密肋梁壳,再到伊斯勒的双曲薄壳,是结构用料逐渐减少,

15 John Chilton, Heinz Isler. The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture [M]. London: Thomas Telford, 2000:17

16 CHILTON J, ISLER H. The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture [M]. London: Thomas Telford, 2000:1

经济性和结构性能逐渐提升，结构“构形”逐渐合理化的过程。对结构认知的传承关系一直持续到今天的西方建筑界，比如建筑师福斯特（Santiago Calatrava，1935—）、哈迪德（1950—）、卡拉特拉瓦（Santiago Calatrava，1951—），设计的形式语言始终没有脱离和放弃结构拱、壳等构件的运用。结构师奥托（Frei Otto，1925—2015）、罗伯森（Leslie E. Robertson，1928—）、法兹鲁尔·汗（Fazlur Khan，1929—1982）、施莱希（Jorg Schlaich，1934—）、巴尔蒙德（Cecil Balmond，1943—）则一直延续着对精妙结构的创造。

从上述西方建筑师与结构师们所持有观点或工作重心可以看出，结构与建筑至少在两个层面密切有关：一是形式需求，结构是建筑生成的依据，结构表达本身就是建筑形式的获得，结构的建造应是形式的理性回归；二是效能提升，结构的经济性（效能）提升是结构自身发展的内在动力，不同构件组合（梁、拱、拉索）或结构构形改变（薄壳、网格支撑）既是结构形式的创造也是效能的提升，结构经济性是建筑经济性的主要体现。

结构与建筑的抗争 尽管建筑诸要素中结构要素在建筑形式、功能方面具有优先决定权，但并不意味着建筑师就必须把结构作为最乐意表达的要素，恰恰相反，建筑师总试图摆脱结构规则对于建筑设计的束缚。然而，作为自然法则主导的结构，是建筑无法彻底摆脱和逾越的，这就导致了建筑师在有意和无意间通过夸大某种建筑要素而弱化结构要素的存在，引发了结构与建筑的抗争，这场抗争的开端是从以功能主义为核心的现代建筑诞生之日开始的。与古典时期对于结构的忠实服从不同，现代建筑从空间、形式方面对结构发起了挑战，但结构法则作为建筑的内在属性，在任何历史时期都应被建筑小心地遵循，从这个意义上可以认为：现代建筑是在遵循结构法则的基础上的重新组合。

“强柱弱墙”是现代建筑从结构意义上的开始，柱的结构作用加强而墙的结构作用逐渐削弱，正是这一点赋予了现代建筑新的可能与意义。一方面是借助于力学和数学的发展对于结构有了更精确的控制，用更少的结构面积可以覆盖更多的建筑面积，结构面积的

平面占比逐渐减少；另一方面是作为空间界面的墙因为剥离了结构功能而得到了释放，在建筑中可以更加自由地展示其空间能力。这两方面的结合构成了现代建筑的早期特征：结构约减下的纤细与空间流动下的多义交织在一起。强柱弱墙的变换更迭在密斯的设计中尤为明显，1923年的乡村砖宅方案（图1-16）率先强化了墙的空间性而弱化了其结构性，这一点对比古典建筑墙体的封闭性是显而易见的，墙的意义更多地指向空

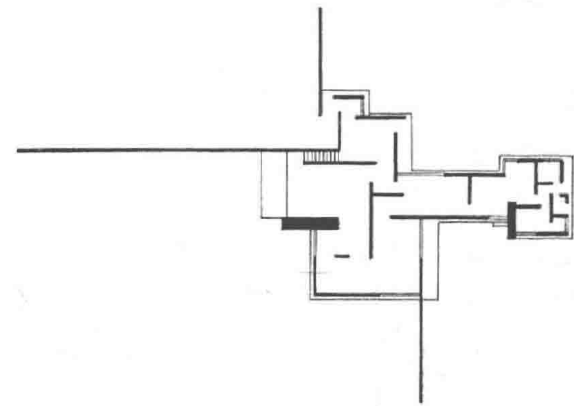


图 1-16 强化墙的空间性而弱化其结构性，1923 年的乡村砖宅方案，密斯。图片来源：<http://welt-als-garten.de/>