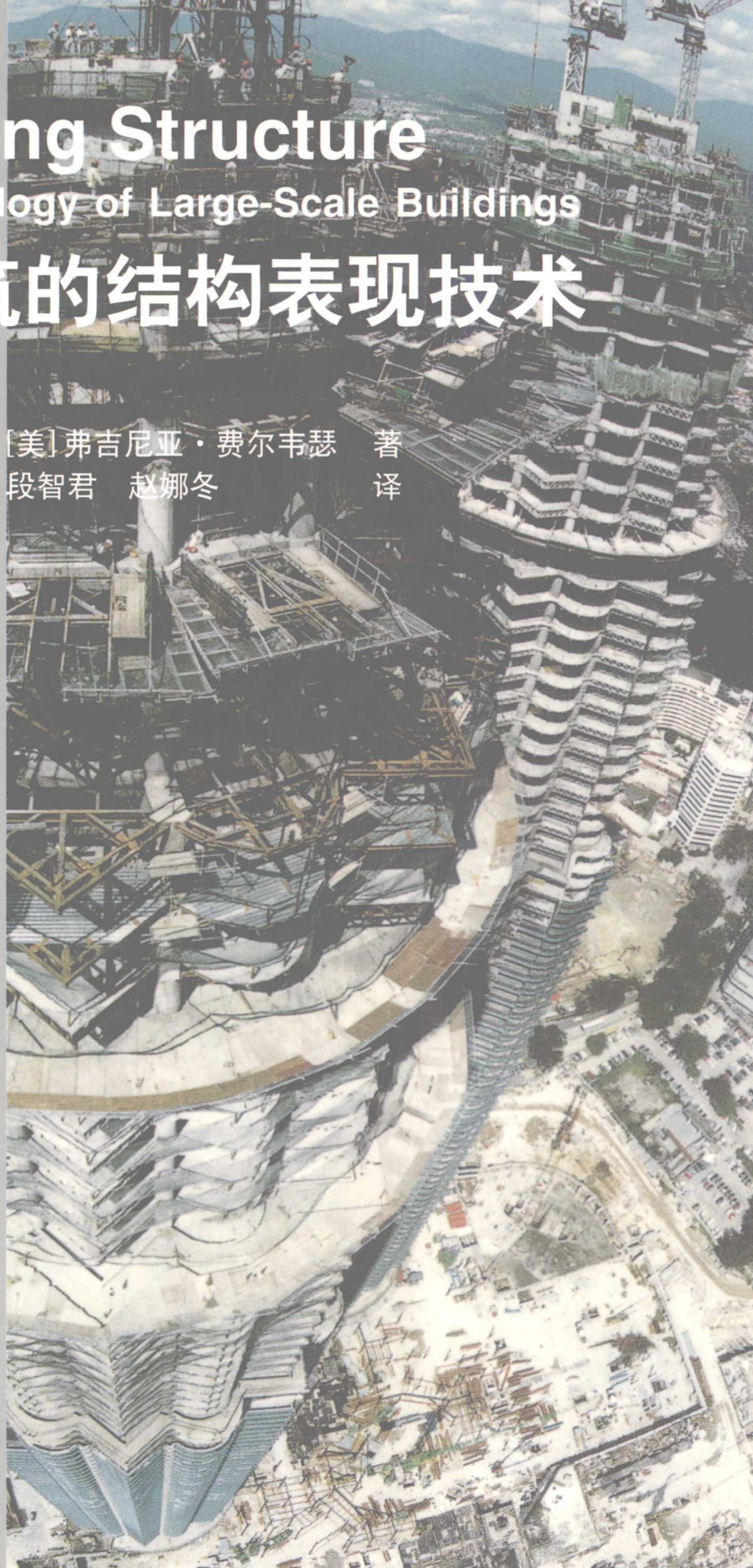
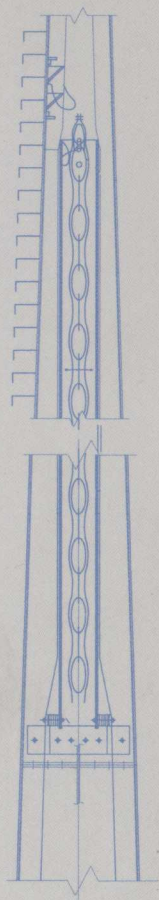


Expressing Structure

—The Technology of Large-Scale Buildings

大型建筑的结构表现技术

[美] 弗吉尼亚·费尔韦瑟 著
段智君 赵娜冬 译



中国建筑工业出版社

Expressing Structure

—The Technology of Large-Scale Buildings

大型建筑的结构表现技术

[美] 弗吉尼亚·费尔韦瑟 著
段智君 赵娜冬 译

中国建筑工业出版社



大型建筑的结构表现技术

著作权合同登记图字：01-2005-2846号

图书在版编目(CIP)数据

大型建筑的结构表现技术/(美)费尔韦瑟著;段智君,赵娜冬译. —北京:中国建筑工业出版社,2008

ISBN 978-7-112-09984-9

I.大… II.①费…②段…③赵… III.建筑结构—结构设计 IV.TU318

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第038214号

Expressing Structure: The Technology of Large-Scale Building/Virginia Fairweather

Copyright © 2004 Birkhäuser Verlag AG (Verlag für Architektur), P.O.Box 133, 4010 Basel, Switzerland

Chinese Translation Copyright © 2008 China Architecture & Building Press

All rights reserved.

本书经 Birkhäuser Verlag AG 出版社授权我社翻译出版

责任编辑:孙 炼 率 琦

责任设计:郑秋菊

责任校对:孟 楠 刘 钰

Expressing Structure

—The Technology of Large-Scale Buildings

大型建筑的结构表现技术

[美] 弗吉尼亚·费尔韦瑟 著

段智君 赵娜冬 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京盛通印刷股份有限公司印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:11 $\frac{1}{2}$ 字数:400千字

2008年8月第一版 2008年8月第一次印刷

定价:69.00元

ISBN 978-7-112-09984-9

(16787)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

目 录

具有表现力的结构和设计中的建筑技术	6
创新型工程模式	12
摩天大楼	14
国家石油公司双子塔, 马来西亚吉隆坡	18
米格林-贝特勒大厦, 芝加哥	40
兰登大厦, 纽约	42
《纽约时报》大厦, 纽约	50
时代广场大厦, 纽约	58
第一银行企业中心, 芝加哥	66
恒隆广场一号大厦, 上海	72
伊利大厦, 芝加哥	80
巨型室内空间	84
UBS投资银行, 斯坦福	86
肯尼迪国际机场第一航站楼, 纽约	92
现代艺术博物馆, 沃斯堡	100
奥黑尔国际机场联合航线航站楼, 芝加哥	108
音乐艺术中心, 麦迪逊	116
朗讯科技大厦, 芝加哥	124
世界金融中心冬季花园, 纽约	134
大跨结构	144
盖洛德圆形剧场, 纳什维尔	146
飞利浦中央剧场, 亚特兰大	154
百事中心, 丹佛	160
士兵运动场, 芝加哥	168
福特体育场, 底特律	174
致谢	182
授权声明	183

具有表现力的结构和设计中的建筑技术

一种顺应时代发展的观念必然具有强大的生命力。在建筑设计领域内，历史上印证这一说法的是这样三个理念：具有表现力的结构、协作和可建造性。在古代，建筑设计和这些方面是自然而然密不可分的。一个成功的工程可能仅仅产生于一位大师的构思，而这个构思同时兼顾了功能、结构和施工方法。

工业革命促成了科学知识的爆炸，潜在实用的施工工具、材料和方法的涌现，以及更高效的劳动分工。由此产生的设计和施工之间的区分，以及在设计和施工各自领域内部的进一步细分，使得对于任何具有象征性尺度的现代工程来说，营造商 (Master Builders) 制度并不现实。相比于个人，一支拥有设计和施工专业人才的团队将能为这样的项目带来更为深厚的技术支持。另一方面，明确的责任分工也带来了相对独立的思路和目标，而不是向最优设计发展。

近些年来，越来越多的工程已经开始应用具有表现力的结构、协作和可建造性这些概念，以再次从共享和相互关联的知识中获益。本书以斯通-托马塞特工程咨询公司为例，展示了一些工程范例，同时强调了以上三要素是如何在设计中得以体现并在施工中反映出来的。本书还研究了参与工程的每个人对于这一过程的看法以及协作对于成功的工程项目的重要贡献。

什么是“具有表现力的建筑”？

“具有表现力的建筑”描述了一种结构体系与建筑形式相协调的设计。建筑历史有助于我们对这一较为抽象的概念进行详细的定义。数百年来，建筑界的著述者们 (writers) 发展出一套用于建筑理论和评判的语汇，设计中的诸如诚实、真实、直接、清晰和经济之类的术语对具有表现力的结构具有了积极的参

考价值。长期以来，它在建筑著述中一直受到赞同，甚至以一种区别于美学和尺度而更近乎于苛刻的道德尺度来衡量也同样受到好评。逐渐地，“具有表现力的建筑”就意味着要通过遵循支承结构的设计指导原则，使建筑设计简洁明了、合乎逻辑、经济实惠。即使结构被隐藏也不能妨碍人们明白建筑是如何矗立于此的。

具有表现力的结构是形成建筑美学的一个关键方面。人类对结构形式直觉的反应是“看上去就应该如此”，正如他们被音乐打动是因为音调的组合恰到好处。具有表现力的结构在感官和精神上都是令人愉悦的。举例来说，对拱形结构之所以存在一个内在的需求，正是因为它是一种美学和效率的近乎理想的结合。在任何一个独具特色的建筑结构中，观者都能够想像出建筑裸露的骨架，以及那些构件如何在整个结构框架内起作用的。追溯到一座建筑的本质，其结构核心营造出典雅的气质和戏剧性的效果，这是对物理学要求的清晰反映。早期希腊和罗马神庙为具有表现力的结构提供了极端到几近苛刻程度的典范。立柱和横梁证明了简洁至上的道理。后期教堂建筑的穹顶 (vaulted arch) 也着意在表现结构，例如环绕着巴黎圣母院的著名的拱式扶垛 (flying buttress)。

更新的一些著名建筑也借鉴了那些扶壁结构，将结构体系依附或包裹在表层之外。大部分设计师都非常熟悉香港中银大厦，这座建筑就是由贝聿铭 (I. M. Pei) 与莱斯利·E·罗伯逊事务所 (Leslie E. Robertson Associates) 的结构工程师共同设计的。暴露的 X 形钢支撑，包裹着这座建于 1986 年的塔，使这座精妙绝伦的建筑免受海上台风的侵袭。具有里程碑意义的结构体系是另一个香港建筑实例，其前庭内外均清晰可辨，该工程是由诺曼·福斯特与结构工程师阿鲁普工程咨询

公司(Ove Arup & Partners, 又译阿鲁普及其合伙人事务所)在1985年共同设计的香港上海汇丰银行(Hong Kong and Shanghai Bank)。

福斯特曾经说过:“建筑必然是产生于合乎逻辑并且充满表现欲的结构中的。”

位于纽约市的冬季花园(Winter Garden)以玻璃和钢结构为特征,由建筑师西萨·佩里与斯通-托马塞特工程咨询公司合作设计,其融表现性和暴露性于一体的结构堪称为优雅的典范。拱形的构架体系在结构上是合理的、生动的,并且视野开阔。这项建于1985年的工程在2001年9月11日世贸中心被袭后重新进行了修建。原始设计和虽经修改但同样精彩的现有设计均是斯通-托马塞特工程咨询公司的工程实例,在本书中将加以详尽介绍。

具有表现力的结构并不总是完全暴露的结构,而暴露式的结构却总是具有表现力的。由建筑师皮亚诺和福克斯携福克斯与弗勒事务所设计的新《纽约时报》大厦(New York Times Building),其可见的外部支撑结构细部赢得了对于表现其功能的正确解读。纽约的另外一座建筑是由SOM(Skidmore, Owing & Merrill)设计的时代广场大厦,隐藏于金属面层之下的巨型X形支撑仅在室外的几个位置给予了暗示。这种结构体系只是具有部分表现性。引用斯通-托马塞特团队的联合主席查尔斯·斯通(Charles Thornton)的一句话,那就是“结构的表现不需要是明显的”。据他说,由西萨·佩里设计的位于马来西亚吉隆坡的国家石油公司双子塔,尽管其建筑外部完全被金属面层附着,但是人们通过循着它的悬臂、柱子以及空间观察其外观,仍旧能够看清楚其结构体系。建筑理论界和评论界一直很关注近年来涌现的与以往不同的设计手段。到20世纪末直至进入21世纪后,功能主义以及由此产生的独具表现力的结构已经具有了高度的哲学意义。

历史

在美国的建筑界,根本的规则可以上溯到芝加哥建筑师路易斯·沙利文(Louis Sullivan),他的主要工程集中在19世纪晚期。他的思想可以简化为下面这句名言:“形式追随功能。”沙利文确实说过:“形式在任何时候都服务于功能,这就是法则……”。对于高层写字楼而言,外形、形式、外部表现、设计或是任何我们可能选择的东西,都应该以一种恰如其分的自然状态反映建筑的功能。”[《高层写字楼的艺术性思考》(The Tall Office Building Artistically Considered),《利平科特杂志》(Lippincott's Magazine),1896年3月号]。尽管沙利文的格言在过去的数十年间得到了广泛的使用和解读,但其含义逐渐用来说明:一座建筑内部的运作暗示了其外部的形式。沃尔特·格罗皮乌斯(Walter Gropius)和密斯·凡·德·罗(Ludwig Mies van der Rohe)是沙利文哲学的拥护者,他们在美国建筑界具有特殊的影响力。早先的建筑焦点集中于比例协调和古典的韵律,而现在已经演变为对结构、材料和功能的“本质”表现上。

多年以来,这些观念一直体现于“国际风格”中,这种风格已经被定义为不加装饰的建筑类型,它们通过不加掩饰地广泛使用玻璃、钢和铝材等现代建材来表现结构。这一理念经历了后继诸多建筑阶段的考验,如现代主义、后现代主义,或者“救世主现代主义”,它由评论家罗伯特·休斯(Robert Hughes)提出,主张摒弃一切装饰。然而,现代主义者主张没有必要暴露结构自身,而是经常通过采用金属涂层的处理手法来暗示隐藏其后的结构。另一种手法是采用高效、具有表现力,甚至是暴露的结构,同时又以一种更容易理解的方式说明了它对建筑设计的贡献。斯通-托马塞特团队的联合主席理查德·托马塞特(Richard Tomasetti)讲述了宾夕法尼亚州匹兹堡(Pittsburgh, Pennsylvania)的

一个独具表现力结构的发展情况，该结构是由他的公司为韦尔顿·贝克特事务所 (Welton Becket & Associates) 设计的。以博瑞那·比尔·佐曼事务所 (Brennan Beer Gorman Architects) 署名的第一梅隆银行中心 (One Mellon Bank Center)，由戴维·比尔设计，现在已经成为匹兹堡的标志性建筑。由于能效的需求限制了玻璃窗的设置，同时也出于要与附近的一座石材面层的地标性建筑——法院相呼应，工程师们建议使用墙面的均质作为结构上的优势，使一面暴露钢的正立面能够成为这座八角塔楼抵御风荷载的关键因素。这种理念对于钢材制造商具有不可抗拒的吸引力。结构设计和建筑设计的完美结合充分发挥了材料性能的优势。被窗户穿透的钢板形成了一个承力表皮式管状物 (stressed skin tube)，就好像一个飞机的机身那样发挥作用。这座建筑的结构完全暴露在其立面中，确实增强了建筑的表现力，与之相反，其结构本质对于观者却并不明显。

所有这些设计手段的根本原则就是经济和功效。单纯就设计而言，建筑应该表现出结构的体系和作用、材料的恰当使用以及施工的可行性。结构通过功效和轻盈的视觉印象与美学产生了联系。理论上，将结构体系的重量降到最低，并且尽可能少地使用材料以减少整体重量和缩减建设投资，才能建成一流的建筑。19 世纪，芝加哥建筑师威廉·勒·巴伦·詹尼 (William Le Baron Jenney) 曾说：“设计师应该用‘充分但不多余的材料’。”这个观念至今仍然是一条真理。20 世纪的建筑师路易斯·康 (Louis I. Kahn) 在其言论中将“尊重材料”视为设计过程的一个重要环节。设计的核心是为结构体系选择恰当的材料并且以最适宜的方式利用这些材料。具有表现力的结构并不仅仅是基于功能至上的设想。具有这样结构的建筑也可以同样具有更好的功能和更大的经济性。

协作

实现一个“非理性”的设计可能要花费大量金钱。协作是避免非理性设计的关键。每一个阶段，建筑和工程的各个方面都必须合情合理，进而使整个建造体系合理。先进的设计工作要求团队中的所有成员都应该对其他人考虑的问题保持敏感。

结构工程专业的学生学习了柱、梁及其连接，但是，更高的目标是要学会在一个设计团队创造出最有效的结构形式。如果建筑师和工程师在设计伊始便形成了良好的合作关系，那么最终成果不仅应该是合理的，而且看上去也是典雅而有魅力的。一些理论家总结出一条规律：建筑的表达来源于整体形式和面层，而结构的表现力则直接脱胎于其骨架的固有形式。

结构设计师们追求高效的结构体系。该体系排除了不必要构件。他们努力寻找途径以减少承载构件，缩减其尺寸和费用。在建筑师设计的允许范围内，结构应尽可能地以最少且最合乎逻辑的方式承担荷载。这种努力使得支撑建筑的结构构件和表现设计意图的非结构构件之间存在着明确区别。

具有表现力的结构有赖于建筑师与结构工程师之间的交流合作。这种交流也有益于设计过程的其他部分及其承包者们。逐渐意识到设计过程前期的高层次协作是非常有益的，但这也绝不是具有普遍意义的。一些建筑师愿意一开始就与结构工程师合作，因此设计自然而然地就会符合结构需求。而另外一些建筑师则视外界的建议和意见为侮辱，愿意根据个人的判断进行设计而不采纳建议，他们更愿意说：“这是我的原创设计，去建造它吧！”公平地说，协作水平也可以改变对工程项目本质的依赖。如果没有及早考虑结构要求，则建造高层建筑和大跨度厅堂就会异常昂贵。马来西亚吉隆坡的国家石油公司双子塔在建设过程中，西萨·佩里曾宣称：没有查尔斯·斯通的工程设计支持，就不可能建成这座大厦。该公司的工程师们能够理解建筑的创意，并且为了能够以一种

最优的方式实现设计意图而不懈努力。他们是天才的工程师。

规模较小的建设项目可能具有较为固定的设计模式，并且仍然是可实现的。尽管如此，这样的工程也将从早期的协作中获益。

建筑与结构工程的完美结合取决于设计者彼此之间灵感与创造精神的一种契合。西萨·佩里事务所的建筑师安妮·海因斯 (Anne Haynes) 与斯通-托马塞特工程咨询公司一起合作过建于威斯康星州麦迪逊的音乐艺术中心项目。在她看来，该公司的工程师们把每一个工程项目看作是一个设计问题，而不是静力学问题。她说：“他们试图站在建筑师的角度去进行设计，因此，在造型和空间表现等方面（与建筑设计）具有一脉相承的关系。”

斯通-托马塞特工程咨询公司的一位管理负责人约瑟夫·伯恩斯 (Joseph Burns) 既是一位工程师也是一名建筑师。他认为，两个不同专业的专业人员可以相互取长补短。有时候，公司也会有幸遇到那些建筑师们乐意与工程师们分享创意的工程项目。举例而言，诺曼·福斯特设计得克萨斯州达拉斯 (Dallas, Texas) 的一个歌剧院时，斯通-托马塞特工程咨询公司很早就参与到设计团队的会议中了，这个项目在本书中另有详述。伯恩斯谈到，在最成功的工程合作案例中，设计师们懂得把结构框架作为其正在进行设计的空间秩序中的一部分来考虑，他们试图了解有哪些可供选择的方案以及怎样才能将解决方案贯彻到整个设计中。

据另一位管理负责人托马斯·斯凯瑞格罗 (Thomas Scarangelo) 所说，公司愿意与这样的建筑师合作，他们“已经意识到在设计前期坐下来讨论的重要性并且喜欢这样的讨论过程，同时乐于接纳工程师的建议”。尽管“只要你投入足够多的钢材和混凝土，任何方案都可能实现”，但是他认为，如果工程师能较早介入设计，将有助于做出“物美价廉”的设计。公司所从事的大多数业务在某种程度上都是不寻常的，甚至是惟一的。有些工程师

会为复杂问题而兴奋不已，而有些则追求以简单优雅的设计方案来解决复杂问题。例如，田纳西州纳什维尔的盖洛德 (Garlord) 娱乐中心的结构设计极为复杂，结构工程师们发现，只要做出一些微妙的改动就能够使设计更为优化，HOK 事务所的设计师也肯定了他们的设计贡献。

工程师的作用

“结构工程师的作用是实现建筑功用，我们是建筑师与业主之间的联系纽带。”斯通-托马塞特工程咨询公司的主管里伦纳德·约瑟夫 (Leonard Joseph) 这样说道。他认为，结构工程师们应该充满热情地参与到设计过程中，同时要严格地审视工程造价和施工工艺。工程师们能够也应该提供多种备选方案，这样能够将初始设计控制在业主所能接受的造价范围之内。例如，设计伊利诺伊州芝加哥附近的朗讯科技大厦工程时，凯文·洛奇与约翰·丁克路建筑事务所 (Kevin Roche John Dinkeloo and Associates) 的菲利普·金赛拉 (Philip Kinsella) 深有感触地说：“结构体系与建筑融为一体，通过对斯通-托马塞特工程咨询公司建议的设计方案与备选方案的比选，使这一目标最终得以实现。”他们注重施工的可行性和结构的耐久性。

对于斯通-托马塞特集团的执行副总裁罗伯特·德赛扎 (Robert DeScenza) 来说，将建筑设计想和结构工程上的可能性结合成一体，牵涉了观念和实践两个方面。一些工程师“能迅速掌握结构原理和建筑师观念”，并能够很快触及其本质。以佐治亚州亚特兰大 (Atlanta, Georgia) 的飞利浦中央剧场为例，Arquitectonica 的伯纳多·福特·布雷西亚 (Bernardo Fort-Brescia) 注意到了“工程师们对设计问题的敏感”。LCG 建筑事务所 (Lohan Caprile Goettsch Architects) 的建筑师约瑟夫·卡普芮尔 (Joseph Caprile) 为工程师们对创造性解决方案的追求所感动。对

于管理主管艾妮·布拉齐尔(Aine Brazil)来说,了解建筑师的意图是很重要的,但是她进一步扩展了这一观念:建筑师必须具备洞察业主的真正意图和需要的才能。

这样的工程师对于设计团队来说是无价之宝,但是同时拥有具备了丰富经验的天才工程师对于充实这个观念也是至关重要的。每个人都应该具有优秀的沟通能力,特别是与承包方的沟通。既有建筑设计师又有实施设计的工作团队的建筑公司也存在类似的情况。

理论上,所有工程的早期设计例会都是以业主、建筑师和工程师之间交换想法开始的。而事实上,建筑文化能够影响建筑的设计和施工方式。各个国家和城市常常有一套联系网络,用以沟通以某种特定方式共事的设计师和建造商。有时,设计的努力方向集中在灵活性方面。如果不能找到一种“造价最优”的建造方式,那么工程也就不会实施了。动力学是复杂的,也是灵活的。设计团队的成员们经常提出一套具有争议的成员部署。只有依靠施工组织,工程师才有可能去为那些使这一过程复杂化的建筑师、业主或承包人工作。建筑师希望自己的观点变为现实。业主因为担心长期的经济危机,希望获利并且吸引潜在的买主和承租人。承包人更是一方面关注施工进度,另一方面关心造价。既然处于工程中的每个成员都有其不同的利益,因此提出参与到这个具有创造性的过程中确实是一项艰难的工作。工程方方面面之间存在的一些矛盾是在所难免的,而且参与到设计团队中的每个个体必须经验丰富且勇于冒险探索未知领域。无论这些为特定工程而形成的关系是什么,也无论设计师的想法是什么,结构工程师对公共安全都负有极大责任。以上事实引发了一些关于设计或施工领域的革新以及经济灵活性的讨论。

最新一期《纽约时报》的一篇论文特别强调了建筑师与工程师协同工作方式的一种变革以及工程师对最终设计成果所作出贡献的增长趋势。有些设计专家评论道:“越年轻的建筑师,越可能愿意坐下来与工程师和业主

一起商讨。”普林斯顿大学工程学院的首席工业观察家戴维·比林顿(David Billington)曾说:“工程师正在对设计进行彻底改革,以创造在技术和美学上均突破建筑学边界的新形式。”

设计的经济性

设计-施工工程的到来可能也已经加剧了工程师作用的这种改变。如果合同约定给予工程师们更大的风险及其相应工程收益中更大的分成,那么就意味着他们为最终成果贡献了力量。承包人也认为他们确实为预测施工的突发事件以及造价和进度提供了有益的意见。由于越来越多的分工加入到一个工程前期的各个阶段,设计团队的组成逐渐变得越来越均衡。这种多学科的成果输出对业主和公众都是有益的。

负责康涅狄格州斯坦福 UBS 投资银行工程的 SOM 项目主管穆斯塔法·阿法丹(Mustafa Afadan)发现,结构的支承部分是“构成建筑学这个整体所必需的”。对设计师来说,主要目标就是“创造一个巨大的无柱空间,这个空间兼具强烈的美学特性和施工经济性”。

经济学会以各种不同方式影响着建筑设计。在芝加哥的the Erie on the Park建筑中,设计时出于对当地建筑造价的考虑,没有选择混凝土结构体系,而是选择了钢结构。对于一个钢框架结构来说,支撑体系是建成一座实用建筑的关键。正如 LLA 建筑事务所(Lucian Lagrange Architects)的建筑师蒂莫西·希尔(Timothy Hill)所说,最终设计成的“建筑是结构体系的忠实表达”。突出的外部 V 形构件既支撑了建筑物,又显示出美学特质,是整合设计的一个范例。对于商业性的建筑,经济性从根本上决定了一个结构是否适建,经验丰富的建筑师会与工程师一起提出高功效的设计方案。纽约时代广场大厦的外部支撑充分考虑了结构的必需性和建筑空间规划。据建筑师克里斯托弗·福格蒂(Christopher Fogarty,

后转至 SOM 事务所) 所述,“没有任何多余的成分,建筑必须要严格设计。”

投资者、开发商和业主的意见也是重要的。开发商波士顿房地产公司 (Boston Properties) 的罗伯特·E·塞尔萨姆 (Robert E Selsam) 懂得经济的运作问题。在他看来,利益来自于那些善于解决问题的工程师和接受委托人商业目标并以此为目标进行建造的工程师。他们努力工作以实现建筑意图,而不是对建筑师的观点强加约束。协作程度和施工能力也关系到设计成果的好坏。以《纽约时报》大厦为例,正如这个工程的共同所有者和开发者、FCR 公司 (Forest City Ratner) 的副总裁罗伯特·威利斯 (Robert Willis) 所说的,暴露在框架之外的钢结构节点的作用远远超出了一个典型建筑。这就降低了建造过程中美学、工程和造价方面意外情况的发生。

建筑师和工程师的合作包括对建造能力的考虑。它们是设计过程的具体细节,有时,建造的制约条件能够激发结构设计的灵感。设计协作逐渐增加了施工方的参与。斯通-托马塞特坚信结构体系的设计可以使建筑以最有效、造价最优的方式实现。查尔斯·斯通 (Charles Thornton) 说工程师和承包方之间不存在“隔阂”。公司要努力倾听各方意见。

纽约开发商海因斯 (Hines) 的首席副总裁汤米·克雷格 (Tommy Craig) 指出,在一个用钢量巨大的工程中,公司与施工方和钢材制造商会“钢材建立合作关系”并一起工作。这种创新方法涉及到详细的设计文件,这些文件使得提前获得授权的投标人能够知道最优估价。这样不仅能够加速施工进度,还能节省资金。在工程的初期设计阶段,应考虑施工费用。但有时候,造价最低的结构体系可能带来其他

方面费用的增长。有一种荒唐的观点认为,就建筑高度而言,与其通过节约面层和其他建材花费补偿结构造价,还不如选择造价低的结构解决方案。其他时候,在设计初期,缩减一根独立柱能够节省出建设中其他方面的花费。从一个更为基本的层面讲,许多工程已经使用斯通-托马塞特设计的框架形式,它不仅装运方便,而且易于安装。承包人或者施工管理者也能够为设计团队的初期想法提供建议。以佩重纳斯大厦为例,高空人行连廊的结构设计和复杂的施工方案要求工程师和施工方紧密协同合作。

结语

概括而言,具有表现力的结构能够并且应该自然而然产生于工程师和建筑师之间的协作。他们两方在综合考虑形式与结构以及研究空间逻辑性方面处于领导地位。但他们并不是惟一的参与者。传统的划分方法是根据他们各自的业务将设计领域分为业主、承包人、发展商、设计师和城市规划师,这种划分方式正在转变,以重新获得一些古代营造商的综合性观念。日益广泛和多学科的观念交流只能是一件好事情。本书的主题——具有表现力的建筑结构,促进了不同设计专业间的建设性交流。自由交流观点有助于各成员之间的创新,并且会使设计和施工更经济。这样,包括业主和广大群众,每个人都会从中获利。

理查德·托马塞特将公司的态度归纳为:“工程师们追求对整个建筑贡献最大的结构体系。结构体系不可能不考虑整体。最重要的是它对建筑以及建筑的功能和造价效率整体的贡献。”

创新型工程模式

斯通－托马塞特团队的核心哲学已经经受住了数十年增长和变迁的考验。当协作文化还仅仅是一个抽象概念时，它对一个公司的工作、客户以及其自身长远规划的影响就非常现实。成功的设计公司有一套可以吸引和留住人才的企业文化，这些人既是独立的思考者又是团队的建立者。

对于一个公司，目标的连续性始于20世纪60年代，那时，两位年轻的工程师查尔斯·斯通(Charles Thornton)和理查德·托马塞特(Richard Tomasetti)加入了纽约的一个40人规模的LZA事务所(Lev Zetlin Associates)。列夫·泽特林(Lev Zetlin)的实施设计与与业主交流的方式给这对伙伴留下了难以磨灭的印象，他们就是从泽特林的公司发展成现在这个拥有400名雇员的国际工程设计公司——斯通－托马塞特团队的联合主席，理维的观念在所有的主管和职员中都得以贯彻。

在20世纪50年代纽约的结构工程界，泽特林代表着一种现象，他是一个特例独行的人。公司创立仅仅6年后，泽特林就以小规模团队签订了1946年纽约世界展览会14个大展篷的设计合约，这是一个受到高度关注且享有很高声望的工程。他以其个性和大胆保持着优势。理查德·托马塞特回忆说：“他是一个有胆识的工程师，常常给业主提供创新的设计选择。虽然还没有真正设计出来，但是 he 对自己的设计团队找到答案很有信心。”事实上，他们也的确做到了，就这样确立了其领先地位。查尔斯·斯通说，泽特林能够使业主相信他的公司比其他公司更具有创造性，并且“让人不由自主地对他产生好感”。他从来不会对一个想法感到满意，认为“每一天都会有更好的”。泽特林也赋予年轻的工程师以巨大的设计和管理责任。

这种具有超凡魅力的管理在斯通和托马

塞特身上留下了深刻的印记，1977年他们成立自己的公司，并将其发展为自己公司的文化。亚伯拉罕·加特曼(Abraham Gutman)、杰伊·帕拉塞德(Jay Prasad)、丹尼尔·科科(Daniel Cuoco)和约瑟夫·朱利安尼(Joseph Zuliani)作为主管加入了该公司，扩充了公司的管理层，创造了一种多专业协同工作的哲学，构建了未来发展的平台。

自20世纪90年代以来，公司一直稳步发展，并且陆续兼并了一些规模较小但具有良好声誉的外地设计公司。现在，斯通－托马塞特团队在全美拥有10个分公司，另外在香港和上海也设有相应的办事处。公司下设三个不同的部门，分别专攻三个不同的市场。一是LZA事务所，为复杂系统的特殊设施提供全程的建筑设计服务；二是LZA技术部，负责多专业建筑调研、修复设计和减灾工程；三是斯通－托马塞特工程部，为较为特殊的建筑提供结构工程设计，这一部分正是本书的主题。

公司始终保持着一一种企业文化，以衡量结构设计中根据自身特性进行的自主创新。斯通－托马塞特团队的执行副总裁罗伯特·德塞扎认为，团队有助于“业主以一种创新的且经济的方式实现其梦想。我们提供的是——一种适建的设计方案”。芝加哥分公司是在德塞扎的基础之上建立的，是斯通－托马塞特团队成功并购的一个案例。该公司由著名的芝加哥工程师艾黎·科恩(Eli Cohen)在1956年创立，这个15人规模的公司于1993年并购，至今已经发展成一个超过70人的分公司。

20世纪90年代，出现了一个以管理主管的创造为主的连续计划，德塞扎是其中的一部分。他和其他10个管理主管在后来的几十年内决定着公司的文化和发展。他们的观点反映了联合主席斯通和托马塞特的主旨和价值观，

并形成了现在公司结构工程的运作方式。

斯通-托马塞特是通过成功的管理模式实现增长的一个非比寻常的例子。主管们一直致力于慢慢灌输公司的历史和风格,同时保持其在巨大变革中的连贯性。德塞扎说,在雇佣和挽留那些愿意从事尖端工程并始终保持动力的人才方面,公司有一个良好的传统。工程师愿意因其独特的自由度和他们所承担的责任而自愿留下来。

斯通-托马塞特团队的总裁和管理主管丹尼尔·科科说:“任何人都不可能隐藏密室中。许多公司有一个或两个目光长远的主管,而该公司却有许多这样的人一直在努力工作,鼓励年轻的工程师去提交会议文件、参加业主设计会议、展示自己的主动性。”管理主管安妮·布拉齐尔(Aine Brazil)补充道,公司没有严格的等级观念。工程团队的组成是依据能力而不是职位,因此,公司热衷于吸收那些具有良好的沟通能力和热情同时又有专业技术的年轻人。通过在大学办讲座、在会议上发言以及在专业协会中任职,公司在整个行业中拥有了较高的知名度。主管们与最好的、最聪明的年轻工程师进行交流,许多教授也经常为斯通-托马塞特推荐他们最有才能的毕业生。新雇员刚刚加入时,有经验的工程师引导并培养他们具备有创造力的独立思想。在商业方面,斯通-托马塞特工程咨询公司也是如此知名,因此大多数委托人都认可他们的能力。他们经常应邀参加为同一个工程投标的几个不同的设计团队。

公司追求一种工程类型上的均衡发展。管理主管托马斯·斯卡瑞格罗(Thomas Scarangelo)说:“我们喜欢做具有创新意义的工作,但是我们的工程师并不追求复杂的设计。”公司的另一个主管里伦纳德·约瑟夫详细地阐述道:“我们不想为未能建造的工程积累复制品,但是也不愿意做一个相同的设计。我们愿意享受我们自己的工作。”通过挑战和成就感实现的职业满意度是留住人才的关键。

强大的责任感在结构设计中是绝对必需的,在具有创新意义的结构设计中更是如此。越是创新的设计,对其进行回顾就越具有重要意义:检查计算,思考需要分析的每一个因素。公司的工程师勇于自我挑战和相互挑战,考虑被忽视的可能性和不可预见的结果。在内部的平级总结过程中,有经验的工作小组不参加某一特定工程,而是检测设计师们的思考过程。

职业生涯的发展也是重要的。斯卡瑞格罗强调,主管们坚持从事实际工程、技术课题和团体发展,以证明高品质的设计服务,但是也同样关注管理问题,如:地产、多样化、市场以及经济。并不是每个有才华的工程师都愿意从事管理。公司的规模和不同的工作量允许那些在技能和兴趣方面具有广泛多样性的员工发挥最有效的作用,并且使他们的贡献具有价值。管理主管丹尼斯·普恩(Dennis Poon)说,在斯通-托马塞特团队不同分部的工作机会提供了一种在其他地方很难发现的学习经验,同时也在知识和经验储备上保持有很大的优势。他还补充道,许多来自世界各地的年轻工程师都想加入到公司,他们不同的文化背景也增强了公司的创造力。公司承接令职员感兴趣的工程,使“每个人愿意为之献身,气氛也同样是和谐的”。

正如任何一家服务公司那样,客户关系是至关重要的。作为协作者,工程师们超越可预见的技术问题并尊重客户的需要。他们努力将自己的想法与其他问题结合考虑,以显示他们满足客户意愿的方法和能力。客户满意度是一个不变的目标,因此要求主管们雇佣的工程师兼具诚信和坦率的品质。

理查德·托马塞特总结出公司惟一的精神:“我们鼓励自己的员工发挥主动性和经验。我们的成员有办法和能力去创新,有信心去坚持、达到并努力争取一种艺术境界,但是我们从来不会脱离造价和适建性。”在斯通和托马塞特的积极培养和强调下,管理主管和职员中继承了这些品质。它们是公司的遗产和未来。

摩天大楼

自人类开始建造之日起，高塔就成为了有力的象征。高塔的历史可以上溯到千年以前，经过数百年的发展，其作用已经从防卫和崇拜演变为现代都市生活和商业的日常必需。高塔的建造方式也已经改进了。21世纪初，摩天大楼遍布世界各地，新技术和新材料的出现允许工程师和建筑师用前所未想方式去建造。

大多数高层建筑都是依赖梁柱的一种基本系统。除此以外，当结构设计师和建筑师合作创造一座高效经济的建筑时，他们会提出无穷无尽的选择。在所有建筑工程中，工程师必须考虑风载和自重荷载，一般情况下，在建议一种结构体系时，还要考虑火灾和地震的影响。强度和性能也必须考虑：坚固的高塔仍旧可能具有难以接受的可塑性，并且在使用上也不舒适。

高层建筑要求进行广泛的分析，包括重力荷载、风和地震荷载、倾覆作用的拉拔力因素、建筑动力性能等。抵抗横向荷载的基础体系，诸如支撑核心、悬臂梁、管形桁架、拉杆和束管等，以此作为出发点，设计师会综合考虑建筑高度与其面宽、核心尺寸、角柱处理，以及其他柱子的位置和间距等多种关系。最终选择的体系将会影响荷载传递途径和构件尺寸，反之，荷载传递途径和构件尺寸也会影响到体系的最终确定。在管道支撑设计中，每个角点上的巨大柱子都会通过庞大的斜撑与其他角点相连接，在这些点上集中承载着全部荷载。对于一个框架体系而言，密集分布着许多小尺寸的柱子，它们通过梁连接在一起，因此，荷载也是由许多构件共同分担的。一个支撑核心可以保证周边空间宽阔无阻，但是其长细比会产生过度的柔性。通过引入承力外伸支架，使其具有足够的刚性，但是它们阻碍了层与层之间的通视，因此通常会限定在设备层中使用。建筑

形状、开窗方式、平面用途以及可用的施工方法之间的相互影响意味着单独的最佳设计是不存在的。每个工程都必须综合考虑其自身的多种特征进行分析研究。

地基状况提出了更多的限制条件。支撑基础的土壤特征会影响建筑的布局和容许荷载的传递路径及其数值。而对于人口密集的城区,则可能存在其他的限制因素。恶劣的风环境增加了实现空间舒适性的难度。有时,可以利用质量调谐阻尼器来控制风响应。对于高层建筑而言,柱网排布方式是另外一种可以利用的因素。绝大多数业主都希望可用的空间尽可能不被柱网妨碍,同时,结构框架也应该适应这种需求,正如对开窗的要求一样。

设计师权衡工程中可供使用的各种适当的材料,一般来说,主要是钢材和混凝土,或者是两者的综合。然后决定哪一种是结构设计中的最佳选择。钢框架比混凝土质量轻,但是它的柔性可能使建筑更容易发生摆动,这是在高层建筑设计中应该给予考虑的一个因素。相对较重的混凝土框架增加了基础的荷载,但却比钢的刚度大,而对于现代混合结构而言,它的这些性质会得到提高。实用性、建筑的用途和运输的因素也都将出现在设计的平衡范围内。

在接下来的部分中,我们将介绍8个高层建筑结构及其设计中所采用的协作方式。每个都是一个生动的例子,说明了如何将一个图纸或是电脑屏幕中的设想变成一座真实的建筑,这无疑是一个挑战。寻找最佳的设计方案要求设计团队中所有成员既要创造也要不断地相互妥协。这8座建筑表明,由于实际条件和需求的多样性。由单个建筑类型发展出的多学科结构解决方案涉及了相当广泛的领域。

马来西亚国家石油公司双子塔创造了世纪之交世界上最高的建筑记录。不管今后打破纪录的建筑如何,这个建筑都代表了一个特殊的工程成就。其结构体系或多或少受

到了以前的米格林-贝特勒大厦(Miglin-Beitler Tower)的启发,这座未建成的建筑原计划要建在芝加哥城中。1989年建筑师西萨·佩里与斯通-托马塞特工程咨询公司合作设计时,就已经有2000ft(609.6m)之高了。精选了芝加哥项目的几个主要方法,并应用于随后合作的国家石油公司双子塔,该项目正好也选择了相同的设计公司。这对塔楼的结构体系包括了一个特别坚硬的混凝土核心筒和一个相对柔性大些的外围混凝土框架,堪称米格林-贝特勒大厦的一个更为成熟的版本。应用于芝加哥建筑的高强度混凝土也曾在国家石油公司双子塔使用,那是该材料首次在东南亚应用。

选择合适的结构材料是设计的一个关键方面。合适的材料可以是具有地域特点的,也可以以一个合理的成本进行生产。同时,还应该是当地建筑工人所熟悉的材料,并且能够用当地可用设备进行施工安装。就马来西亚的主要的建筑因素而言,混凝土比钢材能够更好地满足以上这些要求,因为那里没有建造和搭设大型钢柱所需的专门装配厂和重型起重设备可供利用。混凝土则带来了更为微妙的作用。混凝土的刚度能够随着强度的增长而增加,相反,不同强度的钢材其刚度都是相同的。相比于钢材,混凝土有较大的内部阻尼,可以减轻摆动从而提高风环境下居住者的舒适度。同时,对于复杂形状的连接,用混凝土连接比用钢材更容易实现,配筋在混凝土中的搭接近胜于钢材之间的连接。

综上所述,生产高强度混凝土是实现佩重纳斯大厦设计的基本要素。设计中也综合考虑了钢材的优势:大跨度梁支撑典型的办公层。这些钢构件必须很轻才能用普通的起重机进行吊装,而且结构要简单才能进行现场装配。更为重要的是,钢梁和金属楼板所构成的楼层的建造速度很快,足以跟上混凝土核心筒和柱网搭建的进度。进度,尤其是完成一层所需的时间,是摩天大楼设计的另一个关键方面。

人行天桥受高层建筑特殊条件影响,也是另一个设计重点。建筑之间的人行天桥并不少见,但是作用于上层的巨大摆动仍然是另外一个挑战。据预测,天桥所在高度每个塔的移动量都将达到 1ft (0.3m)。天桥允许和建筑之间存在多于 2ft 的空隙以承受挤压和拉伸,同时也可扭转,以适应塔身移动对其所产生的某一转角。为了保持桥体居中并且利用(天桥)两端的伸缩接头,采用了一个弓形结构。其建造方法也必须允许建筑运动,同时将巨型的组装体搭设在超过 500ft (152.4m) 的高空。

佩重纳斯大厦与其他在这一地区的工程都是设计团队协作模式和满足特殊要求的成功典范。在这里着重阐述的两个建筑中,具有表现力的斜撑是一个主要建筑特征。在芝加哥的伊利大厦,一座 24 层的住宅塔楼工程中,工程技术和建筑设计实际上是密不可分的。结构以暴露于室外的支撑表现出来。这个设计是由建筑师卢西恩·拉格朗日(Lucien Lagrange)和工程师们的协作完成的,主要问题有不规则基地、与之相应的不规则建筑形状以及对不同尺寸的公寓平面空间的需求,工程师协作克服了这些问题,找到了所引发的解决方案。这个工程也说明高科技的计算机性能能够提高结构设计的水平,并能促进施工的进步。斯通-托马塞特工程咨询公司创造了一个三维的 X 形钢结构模型,它可以把规律的外形形状和构件尺寸提供给钢材构件厂家,使这一过程大大简化,同时降低了建造过程的差错。

曼哈顿中心区的新时代广场塔楼工程中,由于基地被严格限定,因此必须选择一种周边支撑的管状体系。这座纤细的塔楼每个面都由垂直的横撑固定于各个角上。SOM 的建筑师和斯通-托马塞特工程咨询公司发现,在一个极为狭窄的梯形基底中,为了增加可利用的空间,X 形支撑是一种积极的解决方案。当庞大的 X 形支撑模块出现在建筑的各面时,它们仅仅由图案化的彩色玻璃幕墙暗

示出来。另一方面,沿着立面的 Z 字形设计在这座塔楼表皮下复制了半数的 X 形支撑,给人一种戏剧性的触动,这种触动正好契合了傲慢的时代广场之上的特殊位置。将 49 层建筑的结构体系与地基下迷宫般的地铁紧密联系是另一个协力完成的工程成就。

原来的建筑基础,尽管最初被认为是芝加哥第一银行企业中心(Bank One Corporate Center)工程的一个障碍,但是随着设计的深入,它逐渐成为独特解决方案的组成部分。托马斯-斯通的工程师们发明出一种方法,可以从一个现代建筑网格中转移重力荷载,从而使基于特殊网格系统上的 20 世纪以前的基础得以再度利用。这个设计方案使得城市中心基地的利用在经济上更具有可行性。地面以上,采用斜柱体系允许建筑设计在公共的可通行空间之上,同时也增加了无柱的空间。这种钢结构转换体系涉及了大量的节点设计,但是事实证明:相比于工程师和建筑师——DeStefano 及其合伙人和里卡多·博菲尔(Ricardo Bofill)设计的其他方法,这种方法更经济。

建筑材料的有效利用是一个常用的设计目标。在纽约市新建的 50 层的兰登大厦(Random House)中,建筑师 SOM 利用混凝土和钢结构将居住楼层从出版社的办公楼层中区分出来。公寓层有一个全玻璃的幕墙,而办公区则由石材和钢材幕墙覆盖。在室内,工程师们提出 25 层以下采用钢结构框架,而之上的楼层则采用了混凝土结构框架。在这两种建筑材料之间是一套复杂但成本不高的转换体系,这套体系利用了钢梁和一系列桁架构件充当重力转换构件和侧向荷载的突出支架。还安装了一对柱式液态阻尼器,降低了风摆对使用者舒适度的影响。

另一个高层建筑是中国的恒隆广场,设计师们利用了多种施工材料和结构体系,以实现业主的意图。委托人要在多风的基地和不良的地基之上建造一座高大、纤细的建筑。由于其基地狭窄,因而对于这座 963ft