



摩天大楼结构与 设计

SKYSCRAPERS

STRUCTURE AND DESIGN

【英】马修·韦尔斯 著
杨娜 易成 邢佳慧 译

中国建筑工业出版社

摩天大楼结构与设计

SKYSCRAPERS

STRUCTURE AND DESIGN

美国纽约的世贸中心在2001年因恐怖袭击而倒塌,但这一事件并未影响摩天大楼建设和发展的步伐。近几年,世界范围内的摩天大楼无论在规模和数量上都发展很快。本书介绍了29座当代最新的摩天大楼,并从建筑和结构双重角度对这些摩天大楼进行剖析。作者阐释了这些高层建筑蕴涵的结构原理,描述了它们抗震、抗风以及抗火的设计方法。除了结构的安全度以外,耐久性与环境影响也是当代许多摩天大楼设计者关注的焦点。本书试图从根源上探究摩天大楼得以吸引世人眼光的原因。经济利益的驱使、高层建筑的显著象征意义以及人们对修建世界最高大厦的热切渴望都是使摩天大楼持续蓬勃发展的主要原因。

本书的绪论从建筑艺术和地域文化两个角度简要叙述了摩天大楼的发展历史。摩天大楼的发展史同时也是工程建造发展史,因此,作者通过若干历史工程典故说明了主要工程技术的发展进程以及基本设计种类的多样化。本书的主要内容是对当代世界上最新的29座摩天大楼工程的介绍分析。作者通过文字叙述、建筑效果与示意图、构造详图等多种方式对每个工程的建造过程以及突出的创新点进行剖析,期望读者能够对这些摩天大楼有全方位的认识。作者还特别徒手绘制了一些示意草图来帮助读者进一步了解摩天大楼所蕴涵的主要设计原理。在摩天大楼的设计与发展上卓有贡献的建筑师以及建筑师事务所包括福斯特及合伙人(Foster and Partners)、SOM事务所、伦佐·皮亚诺(Renzo Piano)、让·努韦尔(Jean Nouvel)以及扎哈·哈迪德(Zaha Hadid)等本书均有介绍。

本书共有292个插图,其中156个彩色图片。

SKYSCRAPERS

STRUCTURE AND DESIGN

摩天大楼结构与设计

[英] 马修·韦尔斯 著
杨娜 易成 邢佶慧 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2004-6866 号

图书在版编目(CIP)数据

摩天大楼结构与设计/(英)韦尔斯著;杨娜,易成,
邢侗慧译.——北京:中国建筑工业出版社,2006

ISBN 7-112-08302-8

I.摩... II.①韦...②杨...③易...④邢...

III.①高层建筑—建筑结构②高层建筑—建筑设计

IV.TU973

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第039556号

Copyright © 2005 Laurence King Publishing Ltd.

Text © 2005 Matthew Wells

Translation © 2006 China Architecture & Building Press

This book was designed and produced by Laurence King
Publishing Ltd, London

The moral right of the author has asserted

Skyscrapers — Structure and Design / Matthew Wells

本书由英国 Laurence King 出版有限公司授权翻译出版

责任编辑:程素荣

责任设计:崔兰萍

责任校对:张景秋 王金珠

摩天大楼结构与设计

[英] 马修·韦尔斯 著

杨娜 易成 邢侗慧 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京广厦京港图文有限公司制作

北京方嘉彩色印刷有限责任公司印刷

*

开本:880×1230毫米 1/16 印张:11¾ 字数:400千字

2006年8月第一版 2006年8月第一次印刷

定价:99.00元

ISBN 7-112-08302-8

(14256)

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)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

目录

6	导言	188	图片来源
22	案例研究	188	致谢
186	项目名称		

案例研究

24	格拉斯哥翼塔	80	波茨坦广场的德比斯大楼	138	纽约时代大楼
英国, 格拉斯哥, 1999年		德国, 柏林, 1999年		美国, 纽约, 2004年	
建筑师: 理查德·霍登		建筑师: 伦佐·皮亚诺建筑事务所/		建筑师: 伦佐·皮亚诺建筑事务所/	
结构工程师: 布罗·哈波尔德		克里斯托弗·科尔贝		福克斯-福尔建筑师事务所	
		结构工程师: 博尔及合伙人事务所		结构工程师: 桑顿-托马塞蒂工程师事务所	
30	瑞士再保险总部大厦	86	德国波恩邮政大厦	142	美国在线——时代华纳中心
英国, 伦敦, 2002年		德国, 波恩, 1999年		美国, 纽约, 2003年	
建筑师: 福斯特及合伙人		建筑师: 墨菲/扬建筑师事务所		建筑师: SOM	
结构工程师: 阿鲁普		结构工程师: 维尔纳·索贝		结构工程师: Cantor Seinuk	
36	伦敦桥塔	92	Colorium办公楼	148	高崖
英国, 伦敦, (建设中)		德国, 杜塞尔多夫, 2001年		中国, 香港, 2002年	
建筑师: 伦佐·皮亚诺建筑事务所/		建筑师: 艾尔索普建筑师事务所		建筑师: 刘荣广和伍振民建筑师事务所	
布罗德伟·马良建筑事务所		结构工程师: 阿鲁普股份有限公司		结构工程师: 马格努森-克莱门契奇建筑事务所/	
结构工程师: 阿鲁普				茂盛工程顾问公司	
42	联盟大楼	98	慕尼黑Uptown高楼	154	国际金融中心二期
英国, 伦敦, 2003年		德国, 慕尼黑, 2003年		中国, 香港, 2003年	
建筑师: 理查德·罗杰斯建筑设计事务所		建筑师: 英根霍芬·奥弗迪克建筑设计事务所		建筑师: 西萨·佩里建筑师事务所/	
结构工程师: 佩尔·弗里施曼工程咨询公司		结构工程师: 布格格拉夫、魏欣格及合伙人事务所		许李严建筑师有限公司	
				结构工程师: 阿鲁普香港事务所	
48	Heron塔楼	104	伯吉瑟尔滑雪台	160	地王商业中心(地王大厦)
英国, 伦敦, 2006年		奥地利, 因斯布鲁克, 2002年		中国, 深圳, 1996年	
建筑师: KPF建筑师事务所		建筑师: 扎哈·哈迪德建筑师事务所		建筑师: 张国言设计事务所	
结构工程师: 阿鲁普		结构工程师: 简·韦尼克/克里斯蒂安·阿斯泰		结构工程师: 莱斯利·罗伯逊/	
				茂盛工程顾问有限公司	
54	都柏林尖塔	110	双塔	166	台北金融中心
爱尔兰, 都柏林, 2003年		奥地利, 维也纳, 2001年		中国台湾省, 台北, 2004年	
建筑师: 伊恩·里奇建筑师事务所		建筑师: 马西米里亚诺·富克萨		建筑师: 李祖原建筑师事务所	
结构工程师: 阿鲁普		结构工程师: Thumberger+Kressmeier事务所		结构工程师: 永峻工程顾问股份有限公司	
58	无止境大厦	116	蒙特维德奥大楼	170	石油公司双塔
法国, 巴黎, (未建)		荷兰, 鹿特丹, 2005年		马来西亚, 吉隆坡, 1997年	
建筑师: 阿特利耶·让·努维尔		建筑师: 梅卡诺建筑事务所		建筑师: 西萨·佩里建筑师事务所	
结构工程师: 阿鲁普		结构工程师: ABT		结构工程师: 桑顿-托马塞蒂工程师事务所/	
				Ranhill Bersekutu有限公司	
64	Agbar大厦	120	旋转大楼	176	梅纳拉大厦
西班牙, 巴塞罗那, 2004年		瑞典, 马尔默, 2005年		马来西亚, 槟榔屿, 1998年	
建筑师: 阿特利耶·让·努维尔		建筑师: 圣地亚哥·卡拉特拉瓦		建筑师: T·R·哈姆扎/杨经文建筑师事务所	
结构工程师: 布鲁福/奥维尔股份有限公司		结构工程师: 圣地亚哥·卡拉特拉瓦股份有限公司		结构工程师: Tahir Wong	
70	Habitat 酒店, Hesperia 酒店及办公大厦	126	斯特拉托斯费尔塔(又译: 云霄塔)	182	布尔季阿拉伯大酒店
西班牙, 巴塞罗那, 2005年		美国, 拉斯韦加斯, 1996年		阿联酋, 迪拜, 1996年	
建筑师: 多米尼克·佩罗		建筑师: 加里·威尔逊		建筑师: 阿特金斯及合伙人事务所	
结构工程师: Brufau Associates/		结构工程师: 布伦特·赖特		结构工程师: 阿特金斯及合伙人事务所	
Pamias Industrial Engineering					
74	商业银行大厦	132	孔代·纳斯塔塔楼		
德国, 法兰克福, 1997年		美国, 纽约, 2002年			
建筑师: 福斯特及合伙人		建筑师: 福克斯-福尔建筑事务所			
结构工程师: 阿鲁普		结构工程师: Ysrael Seinuk			

亚历山大时代的大灯塔（又称法罗斯灯塔），是古代最高的建筑结构。当年，亚历山大大帝命令将大灯塔修建在其新建城市港口的入口处，并要求该灯塔要能被50km（35英里）以外的过往船只所见，以便接近的船只可以及时做好重新排列。大灯塔高200m（650英尺），略高于坐落在其南侧320km（200英里）处的基奥普斯大金字塔。尽管基奥普斯大金字塔复杂的砌筑工程仅由两代人就完成了，但以底比斯花岗石饰面的大灯塔似乎更能体现当年令人叹为观止的高超技术。

大灯塔上的火焰日夜不停地燃烧，火光伴随的烟柱不仅可以增加灯塔的可视范围，还可以即时显示当地的风向和风势。塔内回旋的坡道用来运送燃料，同时还兼为塔身细长结构的斜向支撑。灯塔的四边均镶嵌着华丽的白色大理石——这种具有“失重”（weightless）效果的装饰立面在2000年后的今天依然清晰可辨，建筑史学家亨利－拉塞尔·希区柯克（Henry－Russell Hitchcock）称其为“国际风格”的主要特点之一。阳光在这些直角平面反射，使灯塔的可视范围在海面上扩展得更远；观光平台则赋予了这座古老的世界奇迹以现代感。

本书中提及的每一座当代高层建筑（所有在近20年内建造的摩天大楼）似乎都包含有这座古老建筑结构所体现的某些特征。然而，高层建筑物的设计并没有绝对的基本原理可循，保持各自的特色是高层建筑物设计永恒的努力目标。高层建筑物的衡量尺度主要有两个方面，一方面是功能与效用的考虑，如：天线塔、观察平

台和发射台等对高度要求严格的设施；因土地价格的原因而需压缩用地面积；特殊的地基条件；特殊的建筑地点等等。另一方面，由于高层建筑物具有象征意义，因此经常成为公司、国家乃至国际等机构权力或地位的象征。

显而易见，没有任何一部国际法规可以将应用在这些现代摩天大厦上的技术封锁起来，因为它们已经渗透在彼此相通的每一座摩天大厦之中。人们始终关注：摩天大楼中的各种系统如何协同工作？应用在高层建筑结构中的新技术又是怎样受到各种因素的影响？

第一个高层住宅区，古罗马的楼房（insulae），主要采用实用主义形式。然而，它的名字却十分独特，“孤岛”（islands），这个名称使人们从心理上将这些高层建筑物与其临近的公共环境区分开来。这些廉价的住宅公寓首先出现在罗马人口密度高且居民层次较低的彭匈沼地（Pontine），是经济力量推动居住环境改善的早期实例。奥古斯都共和国是建立在它与城市贫民之间的独特联系的基础上的，“面包和马戏”以及这些鸡笼似的多层廉价出租小屋正是这种联系的体现。

正如法罗斯灯塔，还有许多其他古代石工技术一样[如罗马圆形大剧场、古罗马水道桥嘉赫桥(Pont Du Gard)]，“insulae”由多层楼板组成：简单的拱廊结构重复向上形成整个结构；砖和混凝土柱支撑着拱形立面；石制拱顶楼面采用土或混凝土找平，以达到耐火的目。这些大多位于岸边潮湿地区的高层建筑物和其他巨大的纪念性公共建筑一样，在满足其建造目标的

同时，还带来了建筑基础理论的一次飞跃。如何将建筑物的重量分配传递至基础以及怎样避免地基的不均匀沉降是高层建筑物设计必须解决的两个难题，均已载入当时的工程建造手册。

在东方，罗马帝国与波斯王国的战争促成了交融东西方文化的混合技术与管理系统。波斯国王将俘虏的西方人和占领地居民安置在人烟稀少的广阔区域，他们在迁徙过程中带去了改善环境与利用材料的先进工程经验。幼发拉底河三角洲以东，砖的除水干燥靠日光曝晒；而在西方，已经开始使用黏质粉土烧结砖了。由于波斯国王对巨大而高耸的门廊情有独钟，硬砖技术得到了空前大规模使用。这些拱顶门廊(iwan)其实是砖与沙漠居民接待帐篷的设计概念的组合体。在近东地区，沿着河边沼泽地有许多曲顶的灰泥抹面草屋。从罗马借鉴过来的多层重叠连接技术将应用于拱顶门廊的材料和形式与这些草屋的建造方法结合了起来。采用该技术，可以使门廊的拱顶超过30m(100英尺)高。

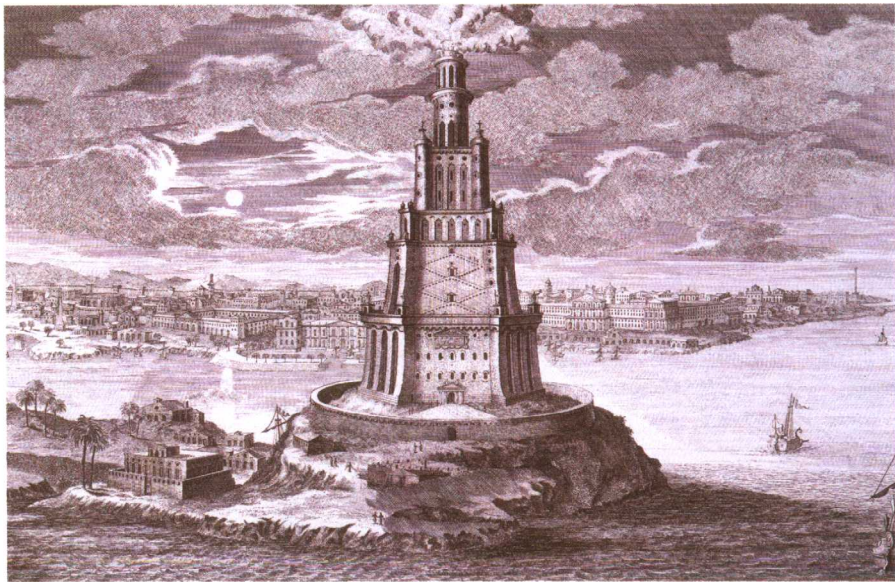
得益于东西方技术的结合，高层建筑物持续兴旺发展。公元6世纪的拜占庭教堂、君士坦丁堡的圣索菲亚大教堂比通常意义的高层建筑物更加高耸，它们是希腊建筑师的智慧与古代整体单元砌筑技术完美结合的作品。它们的结构体系集中了罗马和东方建造技术最复杂的部分，是工程原始理性主义的体现。经济合理的空间围护结构采用迭接工序完成。尽管没有相关的结构理论作指导，米利都的伊索多拉斯(Isidorus)和普罗科皮乌斯(Procopius)两名设计师仅仅通过观察，仍然掌握了结

构体系的基本工作原理并加以实现。比如，从破裂的砌体中辨认出的砌筑图案可以使看出其据此衍生出的叠加形状的等级分类。

与此同时，在大洋彼岸的美洲印第安人(最初是阿兹台克人，后来是印加人)也建造了巨大的假山式寺庙。陡峭的外壁采用紧密啮合的石灰石和软花岗岩护坡，大量劳工花了难以想像的时间，用闪长岩做成的杵将其削凿成所要求的形状。尽管到了公元8世纪，已经有了先是青铜随后是钢等材料制成的工具可以用来切削坚硬的岩石，但当时的劳工们仍然采用古老而笨重的杵切削石料。应该说，来自南美的社会与观念束缚都制约了其在建造形式与材料使用上的根本性转变。

在中世纪的欧洲，砌体结构发展得更快，主要体现在城堡塔楼和钟楼上。由于战争的需要，弓被具有更大威力的弩所取代，同时具有防御功能的塔楼和围墙也随之发展起来。为了抵御共同的敌人，不同的军队往往进行联合，这无形中提高了进攻方围攻的规模和复杂度。反过来，防守方则发展可以处理厚重砌块的施工设备，以更加厚重的防御工程来应对。当时的史料记载表明，起重机与提升设备是建设厚重防御工程的首要装备。

15世纪早期，火药开始在战争中使用，这自然促使建筑物应当具备可以抵御火药袭击的能力。其实，中世纪对高层建筑的影响主要在于：投影学和测量设备的发展使建筑物的高度可以精确控制，从而保证堡垒建筑和城镇防御工程可以抵御火炮的袭击。



亚历山大湾的法罗斯灯塔，大约建于公元前290年，世界七大古代奇迹之一，其与现代摩天大楼的设计有许多异曲同工之处。

意大利城邦之间持续不断的战争以及威尼斯人抵抗土耳其扩张的战争,不仅促进了枪炮铸造技术的发展,同时也推动了对钟的铸造技术的研究。田野乡间星罗棋布的钟楼可以发挥多种功能:发布袭击信号,汇集整顿防守力量,庆祝军事胜利等。采用高超铸造技术打造的新型钟可以无需钟锤敲击就可发出响亮的钟声,这就使得必须对作用在钟楼顶部的水平与动力荷载重新加以考虑。人们通过采用空心墙体、加设圈梁和托梁等措施加强纤细的砖砌塔身的稳定性。当然,现存于威尼斯潟湖的钟楼也如比萨斜塔一样发生了严重的倾斜,这说明土与结构的相互作用和结构的变形失稳类似。改善上述现象的措施在于提高古代的打桩与加固等处理软弱地基的技术。

罗马帝国衰落后濒临消失的希腊思想在与阿拉伯文明接触交融后重新焕发出光彩。穆斯林将它的建筑艺术连同最初的战利品一起融入到伊斯兰清真寺细而高的尖塔中,阿訇每日在其突出的阳台上向朝拜的虔诚信徒布道。撒马拉大清真寺的螺旋形砖石坡道完美展现了一种整体的宇宙观。塞维利亚大教堂的修建则是东西方文明与技术交融的体现:吉拉尔达钟楼 Giralda 就是撤退的摩尔人借鉴清真寺的尖塔而修建起来的。

在北欧,中世纪的黑暗时代逐渐被教堂建筑鼎盛时代所替代。这些高耸的石制结构呈下粗上细的锥形,做工细致,装饰夸张而狂热。借助于基督徒世界广泛的交流网络以及四处游走的技工与石匠,诸如

飞拱、新型拱顶、窗花等先进的建造技术传播得非常迅速,在重复使用过程中,这些技术得到了进一步完善。由于工匠对自己的技术往往保密,因此后学者只有通过正式的学习才能掌握这些技术。建筑布置几何学在交流和传承过程中的神秘色彩在一定程度上限制了日益增高的建筑物的发展规模。

石制结构的发展达到顶峰的代表性建筑则是德国南部乌尔姆大教堂的尖塔与法国北部博韦大教堂的高坛。乌尔姆尖塔采用开口石雕装饰,这种做法不仅可以减少作用在结构上的风荷载,还可以形成带支撑的管作为结构体系的一部分,使其所采用的结构体系趋于完美。而法国教堂高坛则是当时世界上第三个达到如此高度的建筑。筋疲力尽的建设者最后只完成了拱顶和扶垛的铺砌,该建筑的其他部分再也没有继续建造。

除了适当的设置石柱以外,砌体结构主要通过彼此之间压力将单体砌块集集成整体。直到1540年,索尔兹伯里大教堂的八角尖塔一直是800年来英格兰最高的建筑物。它以厚重的木框架结构为基本受力体系,并巧妙地采用了预应力技术。

技术体系的发展主要经历三个循序渐进的阶段:发明、改进和完善至接近完美。直至今日,技术发展所遵循的轨迹依然如此,而反复使用、不断创新和累积经验是推动技术进步的主要动力。伽利略(Galileo Galilei)是正式在推理的基础上进行结构设计的第一人,这种设计思路不仅是建筑技术进步过程中的重大革命,事



乌尔姆大教堂尖顶,建于14世纪晚期,是迄今为止最高的砌体结构。建筑上部的嵌饰石工减轻了风荷载的作用。

实上也正是现代结构设计思想的开始。结构的规模不再受工艺经验与以往成品的限制,而是从安全与经济角度出发,根据建筑环境的特点,设计者合理确定新建筑的尺寸。

当然,现代合理化原则并不能使每一个建筑作品都尽善尽美。雅克斯·海曼一派的作者指出,逆向分析表明有些建筑物在任何年代都不能够安全地加以改进,如,哥特式建筑。相反,根据伽利略的设计思想,有许多积极的措施可以对结构进行巧妙的处理。目前,一般建筑物大多从功能的角度出发进行改进处理。显然,这些改进措施将材料的运用与传承延续下来的建筑规则百科全书式地结合起来,带动了传统技术的巨大发展。18世纪欧洲启蒙运动促使人们开始用理智的目光审视先前已被广泛接受的传统建造技术,其标志性成果便是法国拿破仑建筑法典的诞生。这部法典是编撰21世纪具有普遍意义的全球性设计规范的样本。

人们普遍认为,现代高层建筑体现了工业化巨大发展以及文化与社会变迁。按照“技术决定论”的观点,摩天大楼仅仅只是经济和社会力量的必然产物。建筑评论家西格弗里德·吉迪恩(Sigfried Giedion)阐释的“技术决定论”在目前最具权威性。与“技术决定论”相比,基于随机理论的观点对当前摩天大楼多样性的解释更有说服力,这种观点认为摩天大楼的发展方向和模式没有必然性,它们是前面提及的各种因素的组合与随机选择的产物。基于随机理论的解释表明摩天大楼的发展没有止

境,这一观点将在后文工程案例分析中进行深入讨论。

吉迪恩在他的著作《空间、时间与建筑》中陈述了摩天大楼的发展历程。19世纪末20世纪初的几十年里,钢框架结构、玻璃幕墙、电梯、电话等新技术在芝加哥和纽约汇合交融。而这个时期,恰好美国经济迈入南北战争结束后的大发展阶段。经济的鼎盛带来社会的各个方面飞速发展,如,国家交通与信息系统迅速发展完善,农业和手工业实现工业化、大型集团的开始出现等等。新型铁路与电报系统的发达导致运输价格的急剧下降,新的财富集中与贸易垄断开始产生。随着大型制造商的出现,产品质量容易得到保证,工程师团队的指导制造能力也大幅度提高,因此,生产强度高、坚固耐久的材料成为可能。

战争工业化的结果之一便是钢材的精炼与大批量生产,而这正是现代摩天大楼得以诞生并快速发展的必要条件。除了军事化用途以外,钢铁作为蒸汽锅炉和铁轨的必须材料,其发展还带来了机械制造与铁路运输的巨大进步。

早期的钢结构建筑是应用铸铁或者锻压钢构件建成的仓库和各种工棚等新建建筑。拉索的应用促进了大跨度屋盖的发展。铁路系统的繁荣依赖于高质量的铁轨,即轧制铁轨的材料必须质量均匀、强度高、延性好、易于铆钉连接,同时还不会因构造或制作瑕疵而产生的高应力而导致破坏。摩天大楼采用的就是这种锻压钢材。

大型的新兴集团公司需要集权化的管理。尽管当时的电报已经能够进行远距离的交流,但是,通信业的真正飞速发展却是始于电话的出现,因为这意味着即使在同一座办公大楼里,人们也可以无需面对面地交流了。因此,贝尔在1876年发明了电话以后,立刻被推广开来。以利沙·奥蒂斯(Elisha Otis)发明了一种带有自动制动装置的电梯,这意味着楼高可以不再受到严格限制,5层的楼高也不再是建筑物的最大实用高度。电话与电梯的产生为摩天大楼的发展带来了契机。聚集在繁华昂贵地段的超大办公建筑群,开始崭露头角并蓬勃发展。

早先的美国西部城镇是一片木棚屋区。这些早期用于居住の木结构大多建于中世纪,基础厚重,且需要设置对角支撑以满足结构的稳定性要求。而组装木结构则是采用各种购买的预制构件组装或者用附近锯木厂的木构件进行简单的拼装而成。显然,早期的木结构与组装木结构相比有着明显的劣势,因此,组装木结构一出现,几乎马上将这些中世纪的木结构取代了。组装木结构的通常做法是:构件之间用钉子钉紧,整个墙面沿墙高方向设置轻质木肋,墙面表层木板同时兼作支撑。这种组装木结构又被称为“轻型木构架”,其可以看作是木构件产品工业化生产的第一个表现。轻型木构架发展迅速,但很快就被“平台框架木结构”取代。在平台框架木结构中,单个竖直构件的高度与相应的楼层高度相同,墙和楼面通过钉子彼此连接,这种木结构体系能够形成一个很大的平面空间。现在的大多数木结构房

屋仍旧沿用这种做法。

摩天大楼的结构设计先驱者们抛开传统的设计偏见,将这种轻质木结构体系应用到金属结构中来。这种结构由木结构变换而来,最初采用铁横梁,后来发展到采用钢横梁。这些金属横梁均匀布置,彼此之间用铆钉铆接在一起,同时用薄板进行局部加强。这种结构体系的尺寸和高度几乎可以不受限制,而对于楼高超过5层的结构,则需要着重考虑结构抵抗水平侧向荷载的能力是否满足要求。在这种结构体系中,可以灵活采用对角支撑和肘环套结的构造措施。直到20世纪20年代初,建筑物的层数超过30层以后,人们才开始关注其他类型的结构体系。

美国芝加哥走在了高层建筑发展的前沿。芝加哥地区经济发展的压力以及日益拥挤的空间迫使要求发展高层建筑,而稳定坚固的地基条件使在该地区发展高层、超高层建筑成为可能。1889年由丹尼尔·伯纳姆(Daniel Burnham)和约翰·鲁特(John Root)设计的16层的莫纳德洛克大厦表明,建筑高度的发展并非有赖于金属技术的进步。该建筑采用巨石式的砖墙作为承重墙,底部的墙体约有0.5m(2英尺)厚,并因装饰有流行的埃及风格条纹而显得非常协调美观。

随着钢成为铁实用有效的替代品,铁结构的处理方法也被全盘改进以适用于钢结构。钢在强度和弹性上较铁有重大改进,这是由于在铁中添加碳和其他微量元素,但是要真正做到经济地控制碳和其他微量元素的含量并重复生产却绝非易事。因此,起初的钢材只在武器和特殊的框架结构中采



莫纳德洛克大厦,位于芝加哥,建于1889年,这种功利主义风格的建筑造型使人想起了一种古老的塔杆式寺庙。这类寺庙反映了人们对当时古埃及式建筑的偏好。

用,如快速帆船的船身等。正是在这样的情况下,在1845年的克里米亚战争中,亨利·贝西默(Henry Bessemer)找到了经济可靠的方法来大批量生产钢材,此后钢材开始在桥梁结构中广泛应用:如1867年美国由詹姆斯·伊兹(James Eads)设计的圣路易斯立交桥,英国由约翰·福勒(John Fowler)和本杰明·贝克(Benjamin Baker)设计的军事铁路大桥等。首座具有代表性的钢结构建筑物则是1889年由布拉德福德·吉尔伯特(Bradford Gilbert)设计的位于纽约百老汇大街的塔楼。

接下来要讨论的是与这些新结构规模相适应的基础设计问题,这是由桥梁建造者们首先提出来的。基础设计不仅要考虑其由于结构规模扩大而要承担更大荷载的问题,还要考虑勘察地基条件所需要的各项技术,如钻孔、声测、基坑试验等技术,这些都是保证建筑结构设计经济合理的必需手段。位于港口、河流交叉口以及低洼地区的城镇,其土质大多为地质条件较差的软弱土层,如冲积土、粉土、基本饱和土等。一般来说,一个4层建筑物的上部结构自重可能在基础底部产生每平方米20kN重力(即每平方英尺约0.2吨重力)。大部分卵石土或黏土地基都能够满足这样的应力要求。而对于一幢20层的建筑物来说,其上部结构自重则可能在基础底部产生每平方米100kN重力(即每平方英尺1吨重力),除了最为坚硬的碎石地基外,其他任何地基在这样的应力作用下都将产生下沉。

桩基础历史较悠久,其有两种做法——端承桩基础和摩擦桩基础。最早的桩基是将成片的桩打入到软弱地基中以提高其承载力,然后在桩顶部用夯锤夯击土壤形成桩帽。意大利的威尼斯市就是建造在这种人工处理后的地基上的。这种地基处理技术在19世纪50年代的北美得到了广泛应用,主要用于高层建筑下的基础处理,并在应用过程中不断改进完善,后来称之为砂桩。砂桩具体做法是:首先在地基中用桩打孔,桩孔之间间距很小,然后把桩从桩孔中抽出,回填砂子,形成砂桩,这也是现代复合人工地基加固方法的雏形。桩基的应用对于高层建筑物发展有着重要作用,其传力方法有两种,一种是摩擦桩,即通过桩身与桩孔壁间的摩擦力将上部荷载产生的应力传递给地基,就像巨大的钉子钉入到土层中一样,另一种是端承桩,即通过桩底直接将上部荷载产生的应力向下传递到坚硬的基岩上。气锤的巨大威力以及高强度材料的出现意味着可以将更大尺寸的圆柱

体压入或钻入到地层中。大桥桥墩所产生的集中荷载,恰好可以作为使箱形密封圆柱体下沉的压力。这种箱形密封圆柱体不仅可以依靠其自身重力下沉,还可以在施工以后再次挖掘出来。如果在开挖锥体桩孔的过程中使用高压气流,则能够防止桩孔周围的水流入到桩底部。灌注桩基础则是随着具有更大威力的机械装置的产生而发展起来的,这种桩需要采用护壁措施,如采用泥浆护壁。为了防止开挖基坑时周围土体坍塌,则需要设置地下连续挡土墙,也就是在开挖的一条狭缝中现浇的混凝土墙结构,其能够承受很大的荷载,如果挖出其围合之内的土体,那么它就可以作为地下室的挡水墙。

美国芝加哥城下的地基土层成分从上至下依次为:厚度很大的潮湿沉积岩层、塑性黏土层、密实碎石层、基岩层。在这样的地质条件下,采用加固后的碎石基础(如采用在十字交叉的钢梁网格中间灌注混凝土形成垫层的加固方法),能够满足大多数建筑物的荷载要求。纽约的曼哈顿地区坐落在漂移而来的页岩层上,地质条件较好;而纽约其他地方的地质条件则较差,需要采用桩基础、沉箱基础或者桩箱复合基础。进行曼哈顿生活大楼的基础设计时,第一次碰到了高层群体建筑所特有的问题:即使采用了对建筑物本身而言具有足够强度的基础形式,但一座高的建筑会使周围地基土层下沉并影响到临近其他建筑物的基础。在这种情况下,深埋的箱形基础因其可以避免对周围结构的影响而被广泛采用。

1889年由乔治·波斯特(George B. Post)设计的美国纽约的世界大楼达20层,而10年后由罗伯逊(Robert H. Robertson)设计的纽约公园街大楼(Park Row Building)更是达30层,随着结构变得越来越大,这些建筑的处理方案成为建筑设计争论的焦点。此后,建筑物的外墙不再发挥承重墙的作用,而是仅仅作为依附在钢结构上的外维护结构。在1899年,路易斯·沙利文(Louis Sullivan)宣扬其建筑实用主义的观点,并据此设计了位于芝加哥卢普商业中心的卡森·皮里·斯科特百货公司(Carson Pirie Scott)。该建筑的外墙采用白色的无釉赤陶面板,在建筑物的浅色调的外立面上,比例均匀的挑台和围绕宽大窗户的拱肩显得非常轻盈。卡森·皮里·斯科特百货公司(Carson Pirie Scott)在后来被认为是建筑史上一个重要的转折点。

与卡森·皮里·斯科特百货公司同时期的其他几座建筑物却采用了与其有所不

同的建筑表现和处理手法。在1894年由伯纳姆和鲁特设计的芝加哥的信托大楼就是其中的一例。其外墙采用轻质釉面饰面,并利用凸窗、夸张的飞檐与拱肩进行装饰。伯纳姆是一个充满智慧的设计大师,他并非执着于某种设计理念以将其发挥到极致,而是不遗余力地进行探索和实验。信托大楼设计过程完全突破了传统的设计理念,而且在当时看来似乎还摒弃了其中颇具诱惑力的部分。也正是在这一年,怀特兄弟发明了后来对人类生活产生重要影响的飞机。与此同时,伯纳姆设计并完成了当时世界上最高的摩天大楼——位于纽约的弗拉蒂恩大楼的施工图。弗拉蒂恩大楼的外墙采用幕墙体系,支承在每层的楼面上,幕墙外立面采用厚重的巨型石材饰面。尽管弗拉蒂恩大楼的场地条件较差,但伯纳姆对其设计充满自信,并成功地解决了结构的侧向支撑问题。事实证明,伯纳姆的解决方法非常成功,并在后来的结构设计中得到了广泛应用。弗拉蒂恩大楼成为早期现代化摩天大楼的模式样本。在随后的30年中,摩天大楼飞速发展,结构体系越来越大,承载力越来越高,这种蓬勃的发展随着帝国大厦的建造而达到顶峰。帝国大厦的出现就像1929年股票市场的突然崩溃以及随后国际经济的大萧条一样完全改变了这个世界。

芝加哥和纽约地区这些早期摩天大楼的巨大成功却束缚了当地建筑领域的发展。与此同时,其他地区开始出现许多富有重要意义的建筑创新。众所周知,尽

管建筑物的承载力主要取决于其结构的强度和刚度,但很多建筑物却往往因火灾而破坏。中世纪的大教堂采用石材做拱顶替代以往的木结构屋顶,这种做法就大大减少了因点蜡和焚香而导致的火灾的发生。而工业厂房则是经常采用所谓的防火屋顶来减少可能的火灾破坏,其建造方法是:用砖石砌筑的拱形楼面横跨在锻铁梁上,部分梁还进行外部包装防护处理,楼面和梁一起支承在铸铁柱子上,铸铁柱可以较有效地阻隔热量的蔓延。现代建筑物往往可能遭受更为密集严重的火灾,因此需要采取更多的防火措施。锻铁和轧制钢材在温度超过600℃(1100°F)时会迅速屈服,由锻铁和钢材制成的结构会因此而很快软化,此时从救火车中喷出的凉水则可能引起结构完全失效进而导致整个建筑物发生毁灭性破坏。与钢材相比,铸铁具有较好的耐火性,但承载能力较低。因此未进行外部防护处理的标准铸铁构件仅仅用于早期厂房和仓库建筑中。

陶瓷类的新材料应运而生,如将外涂层与烧结土一起烧铸形成的陶砖。这种材料耐热温度高,但却同时具有易损坏、组装代价昂贵且难于适当密封等缺点。在安装的时候,如果遇到不讲信誉或不守和约的承包商,则还需要进行认真的监督。1904年建造于美国俄亥俄州辛辛那提的16层英戈尔斯办公大楼(Ingalls office Building),是首次采用钢筋混凝土结构建造的高层办公大厦,其成功地解决了上述问题。水泥、石子,并用钢筋来



信托大厦,芝加哥,建于1894年,该建筑物的外部由轻质玻璃幕和琉璃瓦构成。



弗拉蒂恩大厦,纽约,建于1899年,该建筑物在每层钢框架外挑厚重的石材饰面。

增强,就形成了19世纪60年代被广泛推崇的经济结构材料——钢筋混凝土,它就这样被离奇地开发出来,并获得了法国专利,该项专利保护直到20世纪初才被解除。只要钢筋具有足够的保护层厚度,钢筋混凝土材料就自然具有极好的防火性能。但是,对于高层结构而言,钢筋混凝土材料的主要缺点却是时效引起的收缩和荷载作用下的徐变:钢筋混凝土结构会随着时间的推移而稍微变短。针对上述问题所采取的对策通常是采用横截面积较大的构件,这样构件内的应力会相对较小;然而,大截面柱会占据较多来之不易的楼面空间,楼板厚度也需要相应变大,因此楼层高度也就需要相应增加。这种做法直接的结果便是建筑物的造价升高,甚至超过钢结构。

人类不断增加的对生活空间高度的需求推动着高层建筑的发展,而机械化在此进程中功不可没。1889年,古斯塔夫·埃菲尔(Gustave Eiffel)完成了他的著名试验,他用锻铁在巴黎博览会上建造了高度300m(985英尺)的铁塔,埃菲尔铁塔的抛物线外形在形式上体现了数学微分方程的逻辑美,在建造上则体现了其精湛的工艺技巧。铁塔塔身采用四条支腿支承,这比采用三条支腿支承更为稳固,同时也意味着可以将作用在装饰构件上的荷载均匀地分配到各个支腿底座。30年以后,俄国建筑师弗拉基米尔·苏霍夫(Vladimir Suchov)在莫斯科用埃菲尔铁塔所用材料的四分之一建造了一座更高的铁塔,这不仅仅是东方和

工程理论更为发达的西方之间技术竞争的必然结果,而且也是经济上的重大突破,尤其在钢材严重匮乏的斯大林时代,它大大降低了材料使用量以及相应的人工费用。埃菲尔铁塔完美的双曲线外形在海军实验中得到采用,在此实验中,需要一个重量非常轻的观察瞭望平台,以在铁皮船极不稳定的时候可以保持顶部重量的重心始终向下移动。这种铁塔形式还在很多其他方面得到广泛应用,如输电线塔、广播电台发射塔等。首个刚性飞艇,即所谓的齐伯林飞艇的设计研究也带动了高层建筑的发展。在飞艇巨大的飞行结构设计中,其螺旋桨的研究主要集中在对轻质支撑框架构件以及开口薄壁截面的控制。这些研究同时推动了人们对风压和空气动力学的理解,这两方面的工作奠定了后来的高层建筑工程的研究方向。

早期塔式建筑物(摩天大楼和高耸的塔架)的成功吸引着人们认同并吸收他们所体现的文化。反过来,对高层建筑物的理解方式以及他们所象征的意义又对其设计产生影响。芝加哥的高层建筑物与纽约同时代的高层建筑物相比,二者存在很大差异,并非能够采用一个统一的模型进行描述。摩天大楼的发展是持续的,应用前景也相当广阔,这从高层建筑的相互竞争中可见一斑。声势浩大的开放式建筑方案竞标往往会促使建筑革新的产生,他们同时也成为不同时代设计思想的见证。1913年纽约时代大厦的竞标和1922年芝加哥法院大楼



埃菲尔铁塔,法国巴黎,建于1889年,是第一座高度超过300m(985英尺)的标志性建筑,其铸铁框架重达8,560,000kg(9441吨)。

的竞标，均激发了公众强烈的兴趣，当时的报纸更以新闻头条进行相关报道，从而引起世界范围的广泛关注。对于美国中西部的工程项目，北美和欧洲的设计师则展示了全部的设计技巧：从现代主义到古典主义，无一例外全部都被应用到当时的高层建筑中。把年仅24岁的沃尔特·格罗皮厄斯（Walter Gropius）的设计方案与28岁的竞标获胜者雷蒙德·胡德（Raymond Hood）的设计方案相比可以发现，两者在造型以及表面处理上有很大差异，但是这些差异仅仅是表层现象，他们的主体结构体系却是相通的。

在文学作品中，摩天大楼经常被赋以令人震惊的想像力，是未来社会缺乏个性的艺术品象征。艺术家休·费里斯（Hugh Ferriss）在其撰写的《未来都市》一书中，描述了他对现代化的北美城市的感受：这些城市充满表现主义色彩，规模空前，给人印象深刻。在这位广告艺术家的感性中充斥着安东尼奥·圣泰利亚（Antonio Sant'Elia）这位意大利未来派——赞美速度与机械化的艺术运动——创始人的绘画风格和思想理念。

在费里斯的作品中粉笔和木炭代替了涂料和石灰，描绘的对象是无限的表面和空间，而不是某特定光线下的立体模型。这种绘画效果加上城市建筑规划的惊人密度，不禁让人联想起反乌托邦世界的景象。在绘画技术中，可以采用粉笔和木炭来描绘无限的表面和空间。而在现实世界里，平面和空间的色调与亮度只能通过涂料和石灰涂抹的密集立体建筑物来调配。

弗里茨·兰（Fritz Lang）在其创作的影片《大都会》中采用电影处理表现手法描述了高楼林立的都市形象。1982年，里德利·斯科特（Ridley Scott）执导的科幻电影《银翼杀手》上映，这部影片则将美工的画技与导演的意图完美地融合在一起，突出表现了已深深融入客观建筑中的颓废和腐朽以及建筑设计理念所折射出的堕落思想。

这个时期的结构分析水平与建筑设计的发展同步。如，结构侧向稳定性的评估方法非常简单，谓之为“荷载拆除法”，其中的荷载是指建筑物所有重量的总和，显然这种结构侧向稳定性的评估方法非常保守。这些结构设计方法与19世纪80年代比较流行的结构设计理论是相通的。大型制造商不仅提供各种规格的梁柱构件，还提供设计这些梁柱构件的设计图表。在相应的理论和实验研究的基础上，这些设计图表反过来又被政府的检测机构采用。不同的城市所采用的柱子形式

也不相同。卡内基钢铁公司在其1893年的指南手册里加入了关于钢材屈服点的建议。这是一个理论研究相对落后的时期，许多早期理论存在很多错误，也正因为如此，当时梁的设计一直采用的是欠安全的设计方法。

学术理论的发展影响着结构分析理论基础，使它逐渐趋于规范合理。著名的教师哈迪·克罗斯（Hardy Cross）提出了一个可用于框架结构设计的简单自测的方法，正是这个方法推动了横梁式框架结构在建筑设计时被广泛应用，为了保证结构的稳定性，这种结构体系中的柱和梁一般采用刚性连接。横梁式框架结构具有易于实现的优点，因此与其相关的实验研究以及体系类型改进研究相当活跃。针对采用横梁式框架结构体系的高层建筑，有两种较为成熟的保证其稳定性的方法。凯彻姆（M.S.Ketchum）在他的著作《结构工程师手册》里列出了四种抗风支撑：对角支撑，隅撑，门式支撑，托架支撑。

正当关于高层建筑的各种不同观点的辩论似要分出输赢的时候，在欧洲出现与上述观点有着根本性不同的设计理念。1921年由密斯·凡·德·罗（Mies van der Rohe）提出的玻璃摩天大楼的设计方案无疑对当时流行的德国式表现主义产生了不小的影响。这个平面呈三角形的方案采用褶皱状的外围墙，并通过这些褶皱来吸附阳光。该方案建筑模型和素描渲染图向人们展示了完全透明的建筑物，清晰可见其内部极其简捷的结构框架。这个结构体系中的两个部分显然在以后会有广泛的应用前景：其一是无梁楼盖，支承楼盖的柱子圆形布置[在此10年前由著名的瑞士工程师罗伯特·马亚尔（Robert Maillart）提出]；其二是楼板边缘悬挑出去，以支撑外挂的围护幕墙。该建筑方案令人瞩目的现代感与完全古典的简捷比例完美地融合在一起。

正当许多欧洲人还在从理论上研究高层建筑的可行性的时候，1922年，记者约瑟夫·罗特（Joseph Roth）在《柏林新闻》中清楚地写道：摩天大楼代表着一种新的生活方式，新技术代表着进化的人类向原始自然挑战的力量。处于流行先锋的公共工程不断丰富关于这些新形式建筑物的设计思想。法国建筑师勒·柯布西耶提出了一个富有争论性的观点，即将加强的大块连续楼面作为空中路面，这样就可以将节省下来的地面用来娱乐了。正如在1937年德国对西班牙格尔尼卡镇的轰炸中所表现

的一样，牢固的屋顶还能够同时保护居住者免受炮弹的袭击。

第二次世界大战几乎摧毁了整个欧洲，马歇尔计划则确认了美国的全球扩张战略。美国当时已经具备了相当规模的重工业基础，能够自行生产飞机，正是这种能力使盟国得以摧毁轴心国。随后不久，美国即开始利用这些工业基础迅速发展洲际运输、地域扩张，开展冷战期间的军备竞赛。这个时期的食品处理工艺已经开始工业化，大量金属被用来制作储藏罐、罐头、包装箔等。由于铝材具有良好的耐腐蚀性和耐久性，因此在第二次世界大战之前，许多工业建筑物就已经开始使用铝材制作门窗框。随着战后经济的复苏，以及锻压技术的成熟，刚性断面的细长轻型铝构件开始生产，成为高层建筑外围护结构的主要材料。这种能够支撑大片玻璃幕墙的性能良好的金属框架使摩天大楼发生了变革。通过纽约的利华大厦，美国建筑公司的总设计师戈登·邦沙夫特（Gordon Bunschaft）与 SOM 一起对幕墙作了完整而清晰的阐释：幕墙是支承在悬挑铝制框架上的玻璃体系。

由于纳粹的迫害，精通建筑艺术的犹太人大多由欧洲转移到了美国，他们同时也带去了很多宝贵的高层建筑设计经验。密斯·凡·德·罗（Mies van der Rohe）把古老的欧洲起源和美国前卫而成熟的设计经验结合起来，提出了一种特点鲜明的设计模式：细部构造美观考究，古铜色包覆的建筑立体块比例均衡。这个设计模式在

全世界范围内产生了深远影响。由密斯·凡·德·罗（Mies van der Rohe）设计的纽约希格玛大厦（Seagram Buiding）和芝加哥湖滨公寓（Lake Shore Drive）就是这种设计模式的代表。

惯于自我挑战和自我炒作的美国建筑师弗兰克·劳埃德·赖特（Frank Lloyd Wright），在提出了“顷宅城”（Broadacre City）这一平面扩展的城市化构想后，又反其道而行之，提出了纵向扩展的“一英里高塔”（Mile-High tower）计划。其混凝土结构的塔身将极为高耸，高度远远超出与他同时代的其他建筑物，几乎是他们的30倍，即使现代最高的建筑物，高度也只有他的1/5，今天仍有许多人主张将这一计划付诸实践。赖特在其作品中始终宣扬一种被称为“有机组织”的设计概念。“一英里高塔”的体形由下到上逐渐变细，呈锥形，事实上这种体形正是超高层建筑的的首选。一些生物学家，如托马斯·麦克马洪（Thomas McMahon）把结构设计原理应用于树干高度的二次方程曲线，发现树干的理论上的扭曲极限与湿度和养分的限制值相符，且这个极限值正是最高的红杉树的高度。这一特性曲线也适用于塔楼的建造：塔楼的高度也有一个理论上的极限值——随着高度的升高，强度成平方倍地增长，而其重力和风荷载是成立方倍增长。以我们现有的建筑材料为前提，这个理论上的极限值约为18km（11英里）高，这对于我们来说还仍是个体不可及的高度。实际建造过程不可能尽善尽美，其实



利华大厦，纽约，建于1950年，某公司总部。竖向的大型砌块与铝制玻璃窗墙按比例结合，形成间落有致的漂亮外形。



希格玛大厦，纽约，建于1954年，该大厦耸立在一个公共广场的前面，外部采用暴露的钢框架饰面，内部则采用防火钢框架结构。