



超高层建筑施工

(第二版)

胡玉银◎著

中国建筑工业出版社

超高层建筑施工

(第二版)

胡玉银 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

超高层建筑施工/胡玉银著. —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 5
ISBN 978-7-112-15349-7

I. ①超… II. ①胡… III. ①超高层建筑-工程施工 IV. ①TU974

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 076065 号

本书是在第一版的基础上进行了修订, 补充了第 13 章“工程案例——东京晴空塔”。本书全面地反映了作者在超高层建筑施工技术理论研究和工程实践方面的经验和成果, 系统介绍超高层建筑施工技术的各个方面。全书共 13 章, 主要内容包括: 超高层建筑的起源、发展与未来, 超高层建筑基础与结构, 超高层建筑施工组织, 超高层建筑施工垂直运输体系, 超高层建筑施工测量, 超高层建筑深基坑工程施工, 超高层建筑基础筏板施工, 超高层建筑模板工程施工, 超高层建筑混凝土工程施工, 超高层建筑钢结构安装, 超高层建筑结构施工控制, 超高层建筑自动化施工, 工程案例——东京晴空塔。本书具有系统性强、结构严谨、技术先进、实践性强等特点, 可供从事超高层建筑施工技术理论研究和工程实践的工程技术人员学习参考, 也可作为高等院校相关专业师生阅读学习。

* * *

责任编辑: 范业庶

责任校对: 肖 剑 王雪竹

超高层建筑施工

(第二版)

胡玉银 著

*

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

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19½ 字数: 470 千字

2013 年 5 月第二版 2013 年 5 月第二次印刷

定价: 50.00 元

ISBN 978-7-112-15349-7

(23464)

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)

序

超高层建筑是现代城市文明的标志。自 1894 年美国纽约曼哈顿生命保险大厦落成至今，超高层建筑的发展历经百年风雨而长盛不衰。如美国纽约帝国大厦、世贸中心和芝加哥西尔斯大厦；中国上海金茂大厦、环球金融中心和台北 101 大厦；马来西亚吉隆坡石油大厦以及迪拜哈利法塔，无不见证了不同时代的进步和一个城市的繁荣。

超高层建筑也是现代科学技术的结晶。超高层建筑的发展有赖于科技进步，其中就包括建筑施工技术的创新。与其相辅相成，超高层建筑的大量兴建又为建筑施工技术的创新提供了广阔的舞台，许多建筑施工新技术，如深基础工程技术、高性能混凝土技术、模板工程技术等的发展都与超高层建筑有着密不可分的联系。我们可以看到，在超高层建筑 100 多年的发展历程中，超高层建筑施工技术的理论研究与工程实践均积累了丰硕成果。《超高层建筑施工》一书比较全面地反映了这些经验和成果，具有系统性强和简明扼要的特点，可供从事超高层建筑施工技术理论研究和工程实践的工程技术人员借鉴。

当前，发展超高层建筑依然是人类的强烈愿望，较之人类发展的各个时期，社会需求更加迫切、经济技术基础日益牢固，世界各地都掀起了兴建超高层建筑的新高潮，上海中心、纽约世界贸易中心、东京天空树等相继兴建预示着超高层建筑将拥有更加美好的发展前景。《超高层建筑施工》的出版不仅是作者从事超高层建筑施工技术研究的新起点，也是建筑行业进步和科技创新的一个阶段性缩影，我相信，《超高层建筑施工》的内容一定会随着超高层建筑的发展而不断丰富。

中国工程院院士



2011 年 2 月于上海

第二版前言

《超高层建筑施工》第一版面世以来，国内外超高层建筑施工技术又取得许多新进展，美国世贸中心1号楼和中国上海中心顺利建设、特别是日本东京晴空塔竣工，向我们全面展示了超高层建筑施工技术研究的最新成果。

与第一版相比，《超高层建筑施工（第二版）》除部分作了修订外，主要是增加了第13章即工程案例——东京晴空塔，以及时反映超高层建筑施工技术的新进展，供国内同行参考借鉴。该章主要根据东京晴空塔工程设计单位日建设和总承包商日本大林组株式会社发布的技术资料编写，编写过程中得到了施玉芾同志的帮助，在此致以诚挚谢意！

发展永无止境，创新永无止境。随着工程实践不断发展，超高层建筑施工技术可谓日新月异。限于作者精力和学识，本书难免存在不足之处，真诚希望广大读者批评指正！

胡玉银

2013年4月于上海

第一版前言

超高层建筑的出现是人间一大奇迹，许多工程技术人员都为她魂牵梦萦，被其高大挺拔、直插云霄的建筑形象所倾倒，自愿为她的发展贡献自己的聪明才智，作者就是其中之一。1996年，作者刚从事建筑施工即有幸参加了上海金茂大厦建设，开始了超高层建筑施工技术的工程实践与理论探索，从此一发而不可收，与超高层建筑结下了不解之缘。2003年，在上海市科学技术委员会交叉领域创新团队专项资助下，作者主持了《超高层建筑建造技术》研究项目，比较系统地研究了超高层建筑施工技术。2007年至2010年，在上海市领军人才专项基金资助下，作者的超高层建筑施工技术研究得以继续深化。为普及和推动超高层建筑施工技术的创新与进步，自2006年以来，作者陆续在《建筑施工》杂志发表超高层建筑施工技术研究成果，受到许多同行的关注和鼓励。正是在他们的热情支持下，作者才得以在紧张的工作之余，历时五年多完成了本书。

《超高层建筑施工》共分12章，第1章，在阐述超高层建筑起源和发展规律的基础上，展望了超高层建筑发展的美好前景和技术趋势。第2章介绍了超高层建筑基础与结构。第3章则从超高层建筑施工特点分析入手，提出了超高层建筑施工技术路线以及施工组织设计。第4章介绍了超高层建筑施工垂直运输体系构成及配置原则。第5章以竖向测量为重点介绍了超高层建筑施工测量。第6章针对超高层建筑深基坑工程施工特点，提出了施工技术路线，并全面总结了各种施工工艺原理、特点及适用范围。第7章以施工组织和裂缝控制为重点介绍了超高层建筑基础筏板施工。第8章以加快竖向结构施工为目标系统地介绍了当前主流的模板工程新技术及选择原则。第9章以超高程泵送为重点介绍了超高层建筑混凝土生产、泵送施工以及质量实时监控技术。第10章就框架、桁架和塔桅等关键部位介绍了超高层建筑钢结构安装工艺。第11章介绍了超高层建筑结构施工控制原理、目标和技术。第12章总结了日本等发达国家在超高层建筑自动化施工方面所作的积极探索。比较系统和概要地总结了当今超高层建筑施工组织和施工工艺理论研究与实践成果。

在本书出版之际，作者首先要感谢孙钧院士、叶可明院士、李永盛教授和范庆国先生，是他们将作者引入科学的殿堂，是他们热情鼓励和悉心指导，激励作者在超高层建筑施工技术领域努力跋涉。本书编写还得到了吴欣之、朱骏、陆云、崔晓强、伍小平、李琰、张晶、吴德龙、许永和等诸多同仁的鼎力相助。上海市科学技术委员会、上海市人力资源和社会保障局、上海建工集团股份有限公司为作者从事超高层建筑施工技术研究提供了良好条件，在此一并表示诚挚谢意。作者还要特别感谢曹鸿新编审，他为本书的出版付出了艰辛劳动！

在本书编写过程中，作者力求将系统总结与宏观把握相结合、理论研究与工程实践相结合，希望能对从事超高层建筑施工技术与工程实践的工程技术人员有所借鉴。但超高层建筑施工技术是一门综合性非常强的应用技术，涉及的学科门类非常多，积累的研究成果极为丰富，远非作者一人在一书中可以穷尽，不当之处在所难免，真诚希望广大读者批评指正！

目 录

第 1 章 超高层建筑的起源、发展与未来	1
1.1 超高层建筑的起源	1
1.1.1 古代高层建筑	1
1.1.2 现代高层建筑的起源	5
1.1.3 超高层建筑的诞生	6
1.2 超高层建筑的发展	7
1.2.1 世界第一峰	7
1.2.2 世界超高层建筑发展简史	8
1.2.3 我国超高层建筑发展简史	13
1.3 超高层建筑的未来	13
1.3.1 超高层建筑的优越性	13
1.3.2 超高层建筑的发展前景	15
1.3.3 超高层建筑发展趋势	17
第 2 章 超高层建筑基础与结构	20
2.1 超高层建筑的定义	20
2.2 超高层建筑基础工程	20
2.2.1 基础形式	20
2.2.2 基础埋深	22
2.3 超高层建筑结构类型	23
2.3.1 钢结构	23
2.3.2 钢筋混凝土结构	24
2.3.3 混合结构与组合结构	26
2.4 超高层建筑结构体系	28
2.4.1 结构体系简介	28
2.4.2 结构体系发展简史	31
2.4.3 结构体系发展趋势	33
第 3 章 超高层建筑施工组织	35
3.1 施工特点	35
3.2 施工技术路线	36
3.2.1 突出塔楼	36
3.2.2 流水作业	36
3.2.3 机械化施工	36
3.2.4 总承包管理	36
3.3 施工组织设计	36
3.3.1 施工组织设计的任务和作用	36

3.3.2 施工组织设计的分类	37
3.3.3 施工组织设计的内容	38
3.3.4 施工组织设计的重点	39
3.4 施工程序	39
3.4.1 施工程序研究的重要意义	39
3.4.2 施工总体流程	39
3.4.3 塔楼施工程序	42
3.5 施工进度计划	44
3.5.1 施工总进度计划	44
3.5.2 塔楼施工进度计划	46
3.6 施工平面布置	46
3.6.1 施工平面布置内容	46
3.6.2 施工平面布置原则	47
第4章 超高层建筑施工垂直运输体系	48
4.1 垂直运输体系的重要地位	48
4.1.1 超高层建筑施工垂直运输任务重	48
4.1.2 超高层建筑施工垂直运输投入大	48
4.1.3 超高层建筑施工垂直运输效益高	49
4.2 垂直运输体系的构成与配置	49
4.2.1 垂直运输体系的构成	49
4.2.2 垂直运输体系的配置	50
4.3 塔式起重机	50
4.3.1 塔式起重机发展概况	50
4.3.2 塔式起重机分类	51
4.3.3 塔式起重机选型与配置	52
4.3.4 塔式起重机布置与安装	55
4.4 施工电梯	57
4.4.1 施工电梯发展概况	57
4.4.2 施工电梯分类	57
4.4.3 施工电梯选型与配置	57
4.4.4 施工电梯布置	58
4.5 混凝土泵	59
4.5.1 混凝土泵发展概况	59
4.5.2 混凝土泵分类	59
4.5.3 混凝土泵选型与配置	60
第5章 超高层建筑施工测量	61
5.1 施工测量的作用与任务	61
5.1.1 超高层建筑施工测量的作用	61
5.1.2 超高层建筑施工测量的任务	61
5.2 施工测量特点	61
5.2.1 超高层建筑施工测量技术难度大	61
5.2.2 超高层建筑施工测量精度要求高	61

5.2.3 超高层建筑施工测量影响因素多	62
5.3 测量仪器	62
5.3.1 经纬仪	62
5.3.2 水准仪	62
5.3.3 测距仪	63
5.3.4 全站仪	63
5.3.5 垂准仪	63
5.4 施工控制测量	64
5.4.1 平面控制测量	64
5.4.2 高程控制测量	65
5.5 竖向测量	66
5.5.1 外控法	66
5.5.2 内控法	66
5.5.3 综合法	67
5.6 高程测量	68
5.7 GPS 测量原理及工程应用	68
5.7.1 GPS 测量原理	68
5.7.2 工程应用	70
第 6 章 超高层建筑深基坑工程施工	74
6.1 深基坑工程施工特点	74
6.1.1 深基坑工程特点	74
6.1.2 深基坑工程施工特点	74
6.2 深基坑工程施工技术路线	75
6.2.1 深基坑工程施工技术路线	75
6.2.2 深基础工程施工工艺	75
6.3 深基础工程顺作法施工工艺	76
6.3.1 工艺原理与特点	76
6.3.2 工程应用	76
6.4 深基础工程逆作法施工工艺	79
6.4.1 工艺原理与特点	79
6.4.2 工程应用——深圳赛格广场	81
6.5 深基础工程顺—逆结合法施工工艺	82
6.5.1 工艺原理与特点	82
6.5.2 工程应用	82
第 7 章 超高层建筑基础筏板施工	86
7.1 基础筏板施工特点	86
7.1.1 引言	86
7.1.2 施工特点	86
7.2 基础筏板施工工艺	87
7.2.1 施工工艺	87
7.2.2 施工技术	88
7.3 基础筏板裂缝控制	90

7.3.1	裂缝形成机理	90
7.3.2	裂缝控制技术	90
7.4	基础筏板施工案例	93
7.4.1	北京中央电视台新台址工程主楼	93
7.4.2	上海金茂大厦	96
第8章	超高层建筑模板工程施工	101
8.1	超高层建筑模板工程特点	101
8.2	液压滑升模板工程技术	101
8.2.1	发展简介	101
8.2.2	工艺原理及特点	102
8.2.3	系统组成	104
8.2.4	关键技术	106
8.2.5	工程应用	108
8.3	液压自动爬升模板工程技术	116
8.3.1	发展简介	116
8.3.2	工艺原理及特点	117
8.3.3	系统组成	121
8.3.4	关键技术	124
8.3.5	工程应用	125
8.4	整体提升钢平台模板工程技术	140
8.4.1	发展简介	140
8.4.2	工艺原理及特点	140
8.4.3	系统组成	142
8.4.4	关键技术	144
8.4.5	工程应用	145
8.5	电动整体提升脚手架模板工程技术	154
8.5.1	发展简介	154
8.5.2	工艺原理及特点	155
8.5.3	系统组成	156
8.5.4	关键技术	157
8.6	超高层建筑模板工程技术选择	159
8.6.1	超高层建筑模板工程技术特点分析	159
8.6.2	超高层建筑模板工程技术选择	160
第9章	超高层建筑混凝土工程施工	162
9.1	混凝土工程施工特点	162
9.1.1	工程特点	162
9.1.2	施工特点	163
9.2	混凝土生产	164
9.2.1	原材料选择	164
9.2.2	配合比设计	165
9.2.3	混凝土生产	167
9.3	混凝土超高程泵送	168

9.3.1	泵送工艺	168
9.3.2	泵送设备	168
9.3.3	施工技术	170
9.4	混凝土成熟度无线实时监控	170
9.4.1	工艺原理	171
9.4.2	系统组成	171
9.4.3	工程应用——美国纽约世界贸易中心 1 号楼	172
第 10 章	超高层建筑钢结构安装	173
10.1	钢结构安装特点	173
10.1.1	工程特点	173
10.1.2	施工特点	173
10.2	钢结构框架安装工艺	174
10.2.1	施工特点	174
10.2.2	安装工艺	174
10.2.3	工程应用	175
10.3	钢结构桁架安装工艺	183
10.3.1	施工特点	183
10.3.2	安装工艺	183
10.3.3	工程应用	183
10.4	钢结构塔桅安装工艺	193
10.4.1	施工特点	193
10.4.2	安装工艺	194
10.4.3	工程应用	195
第 11 章	超高层建筑结构施工控制	206
11.1	施工控制的意义	206
11.2	施工控制原理	207
11.2.1	控制论原理	207
11.2.2	施工控制原理	209
11.3	施工控制目标	210
11.3.1	施工控制总目标	210
11.3.2	施工控制目标分解	211
11.4	施工控制技术	213
11.4.1	平面位置控制	213
11.4.2	标高控制	216
11.4.3	转换桁架施工控制	217
11.4.4	外伸桁架附加内力控制	222
第 12 章	超高层建筑自动化施工	226
12.1	概述	226
12.2	工艺原理与系统组成	226
12.2.1	工艺原理	226
12.2.2	工艺特点	228
12.2.3	系统组成	228

12.3 钢结构建筑自动化施工	229
12.3.1 施工工艺	229
12.3.2 施工设备	229
12.3.3 工程应用	231
12.4 钢筋混凝土建筑自动化施工	234
12.4.1 施工工艺	234
12.4.2 系统组成	235
12.4.3 预制和组装	238
12.4.4 工程应用	238
第13章 工程案例——东京晴空塔	242
13.1 工程概况	242
13.1.1 工程概况	242
13.1.2 施工特点	245
13.1.3 施工历程	246
13.2 施工总体部署	246
13.2.1 指导思想	246
13.2.2 施工流程	247
13.3 关键施工技术	252
13.3.1 桩基础工程	252
13.3.2 钢结构工程	257
13.3.3 心柱结构工程	285
13.3.4 玻璃幕墙工程	292
参考文献	296

第 1 章 超高层建筑的起源、发展与未来

1.1 超高层建筑的起源

超高层建筑隶属于高层建筑，追溯超高层建筑的起源不能不涉及高层建筑。高层建筑的出现是人类美好愿望、社会需求、科技进步和经济发展的完美结合。

1.1.1 古代高层建筑

尽管高层建筑是现代文明的成果，但是人类追求更高、更远的美好愿望早已有之。追求更高是人类的天性和宗教情结，高大雄伟历来是权力、地位的象征。高大建筑从来都是神圣的，人们也一直希望通过高大的庙宇、教堂、高塔来架起通往天堂（神、上帝）的桥梁。

(1) 我国古代高层建筑^[1]

我国古代劳动人民在高层建筑建造方面表现出高超的智慧。早在 6 世纪，中国就开始修建多层塔，如河南嵩岳寺塔，15 层，高达 40m，建于公元 523 年。陕西西安大雁塔，初建于公元 652 年，高 5 层，唐武则天长安年间（公元 701~704 年）重修，后来又经过多次修葺，现为 7 层，高 64m（图 1-1）。

中国古塔，是我国古代的高层建筑，在工程技术上早就达到了很高的成就。我国大陆最高的塔，要数河北定县开元寺塔。开元寺塔建于北宋咸平四年（1001 年），从底到塔刹尖部高度有 85.6m，是我国现存最高佛塔（图 1-2）。这座塔全部用砖砌筑，做工十分精美。塔砖砌楼阁式，八角 11 层，内部双层套筒，梯级设于塔心。

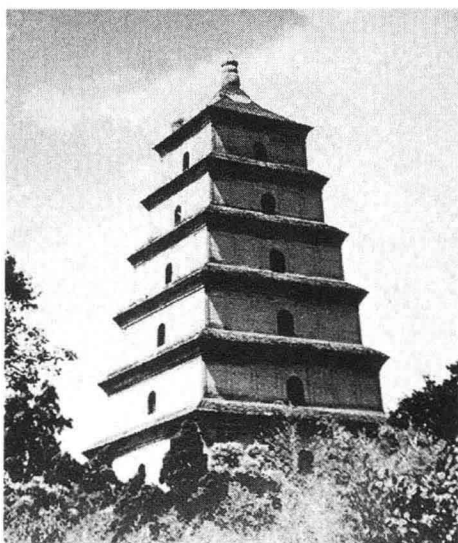


图 1-1 陕西西安大雁塔

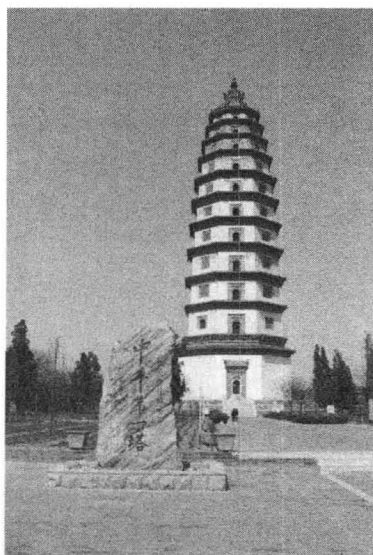


图 1-2 河北定县开元寺塔

在山西省境内的应县佛宫寺木塔则是世界上现存的最高大的古代木结构建筑。应县木塔高 67.31m，建成于公元 1056 年（图 1-3）。这座仅使用砖石、木料、黄土等简单材料的高塔已经经受了近千年雁北风雪的袭击，七次强烈地震，以及战争的洗礼，至今依然安然无恙，成为中华民族的骄傲。对照现代建筑技术，稍加分析可以发现力学知识在中国古代建筑营造中的应用已经达到了很高的水平。应县木塔横梁与柱之间完全采用斗拱连接，全塔有五十多种不同形式的斗拱。斗拱连接既能使支点接触面增大，从而减小挤压应力，又能使木梁的跨度减小，从而降低弯曲应力。斗拱还是一种柔性连接节点，在受到巨大外力作用时，构件间可以产生一定错动，当外力解除时又能恢复原状。这正与现代地震工程学者为改善房屋抗震性能而提出的种种设想不谋而合。另外，应县木塔采用了桁架为基本单元所组成的筒体结构体系，这既扩大了中部空间，便于放置佛像，也提高了抗水平荷载作用的能力，使塔身更坚固。这种结构体系是高层建筑中抗震性能最好的结构体系之一，已经在现代高层建筑中得到广泛应用。应县木塔以其科学、合理的结构体系，经受住了风雨和时间的考验。这座历经千年沧桑的古代建筑是我国古代木结构建筑体系的典范，是中华民族聪明、才智的最好证明。



图 1-3 山西应县木塔

位于青藏高原拉萨市红山上的布达拉宫殿宇叠砌，巍峨耸峙，红宫白宫，鳞次栉比，金顶高耸入云，壮丽辉煌，是中国古代高层建筑成功的范例，也是世界著名的古建筑之一。布达拉宫始建于吐蕃王朝第 32 代赞普松赞干布时期（公元 7 世纪），当时称“红山宫”，后来随着吐蕃王朝的没落而逐渐毁弃。公元 17 世纪时，五世达赖喇嘛在红山宫的旧址上重新修建了宏伟的宫殿，称“布达拉宫”（图 1-4）。此后这里一直作为西藏政治和宗教的中心。布达拉宫海拔 3700 多米，占地总面积 36 万余平方米，建筑总面积 13 万余平方米，主楼高 117m，共 13 层，是世界上海拔最高、规模最大的宫堡式建筑群。布达拉宫采用石木作为结构材料，宫墙全部用花岗岩砌筑，最厚处达 5m，墙基深入岩层，外部墙体还灌注了铁汁，以增强建筑的整体性和抗震能力，同时配以金顶、金幢等装饰，巧妙地解决

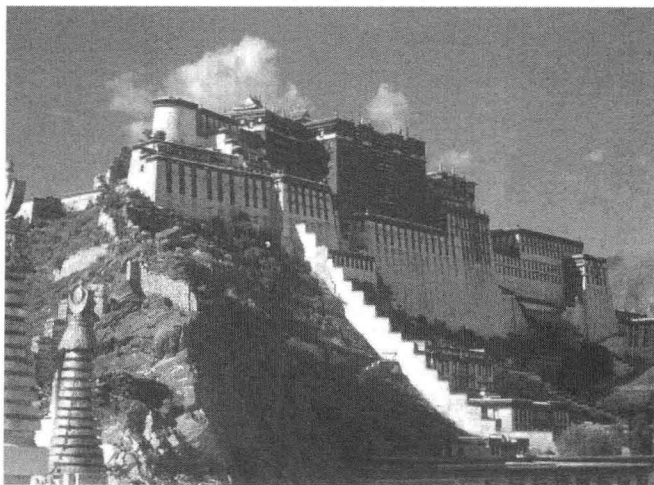


图 1-4 西藏布达拉宫

了建筑的防雷问题。数百年来，布达拉宫经历了雷电轰击和地震的考验，仍巍然屹立。

(2) 外国古代高层建筑

历史传说中的古代高层建筑，最著名的莫过于《圣经》故事中提到的一座通天塔——巴比伦塔。据说，古时候天下人都说一种语言。为了显示力量和团结，他们计划修一座高耸入云，直达天庭的高塔。塔很快就建起来了，这惊动了天庭的耶和华。他见到塔越建越高，心中十分嫉妒，担心神无法统治团结一心的人类，便施魔法，变乱了人们的语言，使他们无法沟通，高塔建设无法顺利进行，最终半途而废，这就是关于“通天塔”的传说。尽管巴比伦塔倒塌了，但是人类架起通天之塔的努力一刻也未停止过。

金字塔是世界古代高层建筑建造技术的杰出成就。古埃及所有金字塔中最大的一座，是第四王朝法老胡夫的金字塔（图 1-5）。这座大金字塔底面呈正方形，每边长 230 多米，原高 146.59m，经过几千年来风吹雨打，顶端已经剥蚀了将近 10m。胡夫金字塔，除了以其规模的巨大而令人惊叹以外，还以其高超的建筑技艺而著名。塔身的石块之间，没有任何水泥之类的粘着物，而是一块石头叠在另一块石头上面的。每块石头都磨得很平，以致时至今日再锋利的刀刃也无法插入石块之间，所以能历数千年而不倒，这不能不说是建筑史上的奇迹。

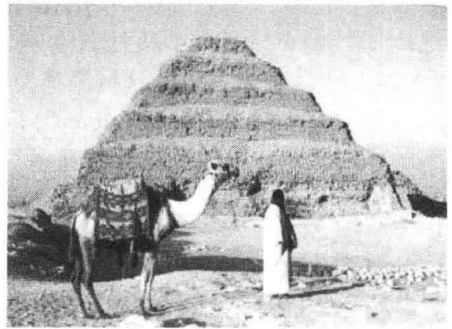


图 1-5 埃及金字塔

金字塔是古代埃及劳动人民智慧的结晶，是古代人类文明的象征。如果说关于金字塔大胆而奇妙的设计的传说还能现代人所接受，那么它的规模如此巨大的建造过程就难以令人想象了。胡夫金字塔是用上百万块巨石垒起来的，每块石头平均有 2000 多公斤重，最大的有 100 多吨重。这些巨石是从尼罗河东岸开采出来，既无吊车装卸，也无轮车运送。时至今日人们仍然没有找到金字塔建造过程的完满答案。我们怎能不佩服埃及人民的伟大力量和智慧！



图 1-6 意大利比萨斜塔

谈及外国古代高层建筑，就不能不说到意大利。意大利著名古代文化遗产，被认为是世界建筑史上的奇迹。意大利的古代高层建筑也是举世闻名的，其中最为著名的是比萨斜塔（图 1-6）。它是意大利中部比萨城内一组古建筑群的组成部分，属于比萨大教堂的一座钟楼，1174 年动工，1350 年完成。为 8 层圆柱形建筑，塔高 54.5m，全部采用大理石建造，重达 1.42 万 t。造型古拙而又秀巧，为罗马建筑的范本。但由于基础处理不慎，建造过程中塔楼即发生倾斜，建成之时，塔顶中心点即偏离垂直中心线 2.1m，后来塔身一直缓慢地向外倾斜，故称“斜塔”。比萨斜塔“巍巍峨峨”，历数世而不倒，堪称神奇。

意大利还拥有以高塔众多而闻名于世的古

镇——圣吉米亚诺 (San Gimignano)。圣吉米亚诺位于意大利佛罗伦萨，最初作为农场镇，后来发展成为商业贸易镇。高塔首先是为了满足防卫需要而建造，当地人们为了保护生命财产而就地取材建造高塔，但后来演化为权力的象征。贵族统治者为了显示至高无上的权力，竞相建造高塔。在公元14世纪修建了72座高塔，其中13座仍然完好无损 (图1-7)。这些高塔采用石材砌筑，最高的达到52m。

古代高层建筑的竞赛主要发生在宗教领域，人们为了不断接近上帝，竞相修建高大的教堂，大大促进了高层建筑及建造技术的发展。公元9世纪，欧洲一些教堂的塔楼高度，已经接近100m。如意大利威尼斯圣马可广场上的钟楼 (Piazza San Marco Bell Tower)，始建于9世纪，后多次加高，塔尖大理石完工于1477年，塔高98.6m，挺拔秀丽 (图1-8)。12世纪，法国建设了高107m沙特尔教堂 (Chartre) 的塔楼，英国建设了高124m索尔兹伯里教堂 (Salisbury) 的主塔楼。建于1337年的德国乌尔姆教堂 (Ulm, 14~16世纪)，以161m的建筑高度超过了埃及“胡夫金字塔”的高度，成为当时世界第一高塔 (图1-9)。欧洲教堂塔楼的这种高度竞赛一直持续到工业革命到来之际，1863年意大利的安托内利尖塔 (Mole Antonelliana) 以164m的高度，打破了德国乌尔姆教堂保持了200多年的高度记录，而成为迄今为止最高的砖石结构建筑 (图1-10)。



图1-7 意大利圣吉米亚诺高塔



图1-8 意大利威尼斯圣马可广场的钟楼



图1-9 德国乌尔姆教堂



图1-10 意大利安托内利尖塔

尽管人们追求高远的热情丝毫未减，但是当时的科学技术难以支撑高层建筑进一步发展，砖石结构建筑的高度超过 100m 以后，已将材料特性和当时的建造技术推向了极致。因此高层建筑发展在达到一个巅峰以后，出现了短暂的沉寂。这是高层建筑发展进入新阶段的转折关头，高层建筑的发展行将取得重大突破。

1.1.2 现代高层建筑的起源^[2,3]

一言以蔽之，最终催生高层建筑的还是社会需求，社会需求是高层建筑产生、发展最强大的动力。如果说人类早期发展高大建筑纯粹出于宗教欲望，那么到 19 世纪 80 年代，社会发展迫切需要建造高层建筑。随着经济发展、城市化程度的提高，在美国芝加哥和纽约，城市人口急剧增加，土地供应紧张，价格上扬，促使人们向高空发展，拓展生存空间，在极为有限的土地上建造更大面积的建筑，这是高层建筑及超高层建筑产生和发展的原动力。现代高层建筑的产生也有赖于科学技术的进步和飞跃。为了实现美好理想，满足社会发展需要，工程技术人员进行了艰苦努力，为现代高层建筑的产生和发展提供了有力的科技支撑。

发展高层建筑需要解决的第一个技术难题是建筑结构材料和结构体系。传统建筑主要采用砖石作为承重材料，采用承重结构与围护结构合而为一的砌体结构体系。由于砖石材料强度比较低，难以形成整体性比较高的结构，因此以砌体结构为特征的建筑进一步向高空发展受到限制。一方面随着建筑高度的增加，结构整体性下降，这是砌体材料抗拉强度低的力学性质决定的；另一方面宝贵的建筑空间（底层）被结构消耗，经济性迅速下降。1891 年美国芝加哥建造了一栋 16 层的以砖承重的大楼——蒙拉诺克大厦。按照当时通行的做法，单层砖房墙厚 12 英寸（300mm），上面每加一层，底部墙厚要增加 4 英寸（100mm），16 层高的大厦底层墙厚近 2m，既费工费料，又浪费了宝贵的空间。为了建造更高的建筑，工程技术人员积极进行建筑材料和结构体系的创新。19 世纪初，英国出现铸铁结构的多层建筑（多为矿井、码头建筑），但铸铁框架通常是隐藏在砖石表面之后。1840 年以后，美国开始用锻铁梁代替脆弱的铸铁梁。熟铁架、铸铁柱和砖石承重墙组成笼子结构，是迈向高层建筑结构的第一步。19 世纪后半叶钢铁制造技术取得突破，能够生产型钢和铸钢。结构材料创新为建筑形式和结构体系创新创造了先决条件。美国威廉·詹尼（William LeBaron Jenney）在总结前人成果的基础上，借鉴菲律宾竹屋的灵感，发明了一种全新的建筑结构体系——钢框架（骨架）结构体系。该结构体系最显著的创新是以钢铁作为承重材料，承重结构与围护（分隔）结构分离。

发展高层建筑需要解决的第二个技术难题是建筑防火。1871 年芝加哥发生大火，使人们认识到城市建筑防火的重要性。由于当时消防设施还比较落后，消防的合理高度在 5 层楼以下，因此高层建筑的防火主要依赖建筑自身——建筑材料的防火性能。钢铁材料具有不可燃性，为解决高层建筑的防火问题创造了良好条件。

发展高层建筑需要解决的第三个技术难题是垂直运输。1845 年奥的斯在纽约举办安全电梯展览。奥的斯令人信服地演示他的发明，切断缆绳，电梯箱仍安全地悬挂在半空中。1857 年在纽约百货公司安装了第一台蒸汽驱动安全电梯。18 世纪 70 年代，蒸汽电梯被更快的水力电梯取代。1890 年奥的斯发明了现代电力电梯。由于乘客电梯的出现，建筑突破 5 层的高度限制（徒步可行的登高距离）成为可能。

发展高层建筑需要解决的第四个技术难题是远距离通信。1876 年 3 月 10 日贝尔发明