

超高层建筑 机电工程 施工技术与管埋

〈 中国安装协会 组织编写 〉



中国建筑工业出版社

超高层建筑机电工程 施工技术与管理

中国安装协会 组织编写

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

超高层建筑机电工程施工技术与管理/中国安装协会
组织编写. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 11
ISBN 978-7-112-18605-1

I. ①超… II. ①中… III. ①超高层建筑-机电工程-施工管理 IV. ①TU97

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 250528 号

本书由中国安装协会组织国内知名单位编写, 内容包括: 我国目前超高层建筑的发展概况; 超高层建筑机电工程的前沿技术; 超高层建筑机电工程施工实例; 机电工程常用规范、标准表; 超高层建筑统计表 (2005~2015 年)。

本书适合于从事机电安装工程的人参考使用, 也可供相关专业的大中专院校师生学习使用。

责任编辑: 刘江 岳建光 张磊

责任设计: 董建平

责任校对: 刘钰 刘梦然

超高层建筑机电工程施工技术与管理

中国安装协会 组织编写

*

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

北京君升印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18 字数: 445 千字

2016 年 1 月第一版 2016 年 4 月第二次印刷

定价: 40.00 元

ISBN 978-7-112-18605-1

(27861)

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)

本书编委会

审定委员会

主任：杨存成

副主任：相咸高 徐建东 金卫东 李幼杰

委员：李海兵 陈海忠 王清训 吴小莎 张勤 张春福

编写委员会

主编：杜伟国

副主编：潘健 徐义明 黄伟江 任俊和 胡新余 王晓峰

唐忠赤

编委：徐新 乔培华 王坚安 赵毅 哈昌频 蒋振斌

张正纲 徐海红 汤毅 葛兰英 梅挺 吴军

余智飞 陆丹丹 朱磊辉 林岚 施俊杰 张鹏

张国祥 袁文根 卓轶非 宋子铭 张铭 华磊

尹川德 孙业 董巍巍 庄桂成 谢上冬 苏春虎

周宝贵 杨志 于文杰 程炯 王力 李文华

孟庆礼 张伟 毛俊琦 李报春 金晖 黄斌

崔革 王野 阳建平 黄烨 叶陈琼 高猛

史泽波 王五奇 原福渝 杨建国 韩宝胜 向家胜

靳书平 杜冀科 王晓娟 梁晓奎 董年才 吴飞

许祥荣

序

为了配合注册建造师培训工作，满足我国安装业广大从业者和机电安装企业技术人员补充知识和提高执业能力需求，中国安装协会组织业内专家编写了《超高层建筑机电工程施工技术与管理》、《机电工程创优策划与指导》、《机电工程常用规范理解与应用》三本书。这三本书是当前我国机电工程建设领域超高层建筑机电工程技术、机电安装企业工程质量创优、机电工程常用规范和技术标准的实用参考书，书中内容体现了“大安装”思路。

随着国家行政体制改革和社会主义市场经济的发展，对安装业的理解和定义早已突破了“水、暖、电、卫、通”的传统概念，市场赋予了它内容更加丰富、实用性更加贴近实际、涉及专业更加科学合理的“大安装”内涵。作为安装企业，如果仍然停留在把不同物件连接在一起视为安装，而没有将这一行为的上下游活动通盘去研究，没有按照“上伸下延”思路去面对这个产业，在新一轮建筑市场优胜劣汰竞争中难免处于被动。同时，机电工程又广泛分布于工业、交通、水利和民用工程项目中。可以说，机电安装企业是为各行各业提供服务的企业。

由“大安装”联想到当前机电安装企业面临的困境。国家依靠增加基本建设投资驱动经济发展并取得巨大成绩，这是我国改革开放三十多年经济发展的一个明显特征。近年来，随着国家基本建设规模的逐渐减小和经济下行，施工企业的市场压力不断增大。面对外部压力，企业如何调整内部经营策略，如何发挥自身优势在激烈的市场竞争中处于不败之地，这是每一个企业不得不去认真思考的问题。我想，一是要分析市场，二是要转型升级。国家基本建设规模的减少，并不意味着企业无事可做。既有建筑和工程项目的升级改造，无论是数量和规模将逐年加大，这是今后建筑市场变化的特点之一。既有项目升级改造，是由于已有建筑项目功能或缺失，或老旧损坏，已经不能完全满足现阶段使用需求。升级改造的内容，则多集中在这些项目的设备、管线、装置上，这正是安装企业的用武之地和长处所在，安装企业必须关注这个变化。社会的发展，时代的进步，人们日益增长、变化的需求，无疑对安装行业和安装企业提出了许多新课题，传统的一些管理方式方法、经营理念、施工工艺难以适应这些变化，这就要求企业转变方式，更新观念，创新技术，这是企业转型升级的缘由和动力。

如果说，即将出版的三本书是安装企业应对当前市场变化，提升相关人员素质和能力的一剂良药，那么上述对建筑市场和转型升级的一点思考，希望不是不良药引子，没有产生误导。

杨存成

前 言

近年来，我国超高层建筑的建造规模和数量已跃居世界前列，成为世界上超高层建筑发展最快的国家。而作为超高层建筑重要组成部分的机电工程技术，也随之成熟和发展，形成了一系列具有鲜明特点的施工工艺、工法，促进了我国超高层建筑建设的技术进步。

为了展现当今我国超高层建筑机电工程的先进技术与管理水平，指导机电工程高质量、高效率、高水平的实施，由中国安装协会组织部分国内知名机电工程施工企业，以实施完成或正在实施的部分具有当代鲜明特色的超高层建筑机电工程为实例，编写了《超高层建筑机电工程施工技术与管理》一书。该书结合我国近年来超高层建筑机电工程的施工实践，全面论述了我国超高层建筑的发展过程，总结了超高层建筑机电工程施工技术与管理经验与成果，内容丰富，指导性强。旨在帮助企业学习、了解超高层建筑机电工程的项目管理、施工关键技术和“四新技术”的应用，促进企业技术与管理水平的提高。

《超高层建筑机电工程施工技术与管理》分为四个部分，共三个章节及附录。第一章介绍了我国超高层建筑的发展概况和超高层建筑结构与机电工程的发展过程；第二章介绍了超高层建筑机电工程前沿技术的应用，主要内容为深化设计与 BIM 技术、超高空大型设备与电缆吊装、工厂化建造、减振降噪及先进的绿色节能、信息化技术等；第三章共收录了以上海中心工程为主的十个具有代表性的超高层建筑机电工程实例，主要内容为工程概况、工程难（特）点、主要施工技术方案和施工组织管理等，真实论述了机电工程在技术与管理等方面的具体实施方法和经验。附录 1、2 的内容为机电工程使用的标准规范汇总和我国超高层建筑的统计（2005~2015 年），供查阅参考。

《超高层建筑机电工程施工技术与管理》一书在编写过程中，得到了上海市安装工程集团有限公司、广东省工业设备安装公司、江苏扬安集团有限公司、中建一局集团安装工程有限公司、中建安装工程有限公司、中建七局安装工程有限公司、中建三局总承包公司、南通市中南建工设备安装有限公司等单位领导的高度重视和大力支持，组织人员按分工要求参与编写。还得到了中国安装协会科技委顾问吴小莎、王清训老师的指导，对书稿的编写进行了指导和审核，在此一并表示感谢。

鉴于本书内容丰富，收录大型机电工程项目多，信息量大，且编写人员众多、编写时间有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 我国超高层建筑的发展概况	1
第二章 超高层建筑机电工程的前沿技术	19
第一节 新技术的发展与应用	19
第二节 信息化与 BIM 技术的应用	25
第三章 超高层建筑机电工程施工实例	31
第一节 上海中心大厦	32
第二节 广州珠江城	89
第三节 北京银泰中心	116
第四节 广州新电视塔	137
第五节 周口广播电视多功能发射塔	162
第六节 南京新金陵饭店	186
第七节 卓越皇岗世纪中心 2 号楼	206
第八节 天津 117 大厦	226
第九节 武汉中心大厦	238
第十节 苏州中南中心	251
附录 1 标准规范表	267
附录 2 超高层建筑统计表	273
参考文献	279

第一章 我国超高层建筑的发展概况

1 超高层建筑的特点

20世纪70年代以来,随着我国城市建设的推进,高层及超高层建筑得到迅猛发展,建造水平逐步提高。未来五年,我国超高层建筑的开发将占据世界超高层建筑建成总数的71%。在全球已建成的79座超300m的建筑中有25座在中国,占全球总量的31.6%;在建的125座超300m的建筑中有78座在中国,占了62.4%。

1972年国际高层建筑会议上曾把高层建筑划分为四类:第一类为9~16层(50m以下);第二类为17~25层(75m以下);第三类为26~40层(100m以下);第四类为40层以上(超过100m)。随着社会需求、建筑设计水平、施工水平、建筑材料和设备等配套设施的不断进步,百米建筑开始在许多大中城市普及,超高层建筑的层级尺度也在不断提升,正如美国著名结构师查尔斯·汤顿认为:40层以下(164m以下)为高层建筑;40~100层(164~393m)为中高层建筑;100层以上(393m以上)方为超高层建筑。根据我国目前的《民用建筑设计通则》GB 50352—2005规定:建筑高度超过100m时,不论住宅或公共建筑均为超高层建筑。因此,本文中所指的超高层建筑即定义为高度超过100m的建筑。但事实上,超高层建筑在100m的高度,无论是结构还是设备及施工方面与高层建筑相比,均无明显质的变化。根据理论及经验分析,一般在40层(大约150m)左右,是超高层建筑设计敏感高度,在此高度以上,建筑物的超长尺度特性(绝对高度及巨大规模)将引起建筑设计概念的变化,这种变化促使建筑师必须提出有效的设计对策,调整设计观念,并采用适宜的建筑技术。

一般情况,城市的发展与建筑的发展是一个相互咬合、连接和渗透的过程。但对于某些城市而言,由于设计观念与城市发展形态以及建筑本身功能和规范条件发展步调不一致等原因,造成目前很多超高层建筑与城市公共空间交接生硬,使得诸如消极空间的大量存在、建筑物自身的安全和管理缺陷以及建筑物对周边环境的影响等问题,引发了公众甚至包括当地政府对于超高层建筑的诸多疑虑,给超高层建筑的发展带来了一定的限制影响,但总体上,在建筑高度不断增加的同时,超高层建筑也在向着更加生态化、集群化、功能化、人性化和智能化的方向发展,其独特的优势仍然十分突出,主要特点表现为:

(1) 超高层建筑可以提高土地利用率。一方面,超高层建筑充分利用有限空间开拓和扩大商业、生活空间,大幅缓解城市人口扩张、用地紧张的局面;另一方面可以利用周边环境节约出来的土地实施绿化种植,美化城市居住环境,甚至可以在城市火灾、地震等特殊条件下,有效起到安全带和疏散居民的作用。

(2) 超高层建筑可以节约市政和人防工程的投资。超高层建筑可以使地上、地下的各

种管线相对集中，道路的长度大大缩短，从而降低市政工程的投资，且超高层建筑的地下层可以作为城市的防空避难所，平时作民用，战时作为避难用，有效地节约建造防战设施的投资。

(3) 超高层建筑可以集成工作和生活环境。超高层建筑在为城市居民提供一个多功能配套场所时，一方面服务于商业，为第三产业的发展提供平台，推动高端服务业的聚集，有助于打造立体的天空商业城；另一方面服务于生活，提供能够欣赏城市及周边自然环境的工作和生活场所；再则服务于城市，一定程度缩小城市中心地带的人流和车流规模，有效改善周边的交通和环境质量。

(4) 超高层建筑有效推动了科技的发展和进步。超高层建筑的发展不仅得益于土木工程、材料工程、机械工程、能源与动力工程、电子、通信、自动化、计算机科学和安全工程等一系列相关学科的进步，同时也为这些学科的发展和人才培养提供了巨大动力与展示舞台，与科技的发展同行。

(5) 超高层建筑可以作为城市的重要景观，具有地标性和象征性。超高层建筑因其环境位置优越、造型突出、视觉效果强烈且汇聚建筑、结构、机械设备、材料和施工技术 etc 科技领域成就的独特优势，以及能够丰富城市景观层次、展现城市社会面貌、经济文化层面和现代化建设进程的作用和能力，多数已经发展成为所在城市的名片与象征，甚至成了国家政治、经济和科技实力体现的代表作。

2 我国超高层建筑的建设概况

我国超高层建筑的建设始于 20 世纪 70 年代。1973 年，香港首度建成超高层建筑怡和大厦 (Jardine House)，地处中环，楼高 52 层 179m，是当时香港乃至整个东南亚最高的建筑；1976 年，中国内地第一幢超高层建筑广州白云宾馆落成，楼高 33 层 120m；台湾第一幢超高层建筑东帝士大厦 (Tuntex Tower) 建成于 1990 年，地处台北市，楼高 38 层 143m；澳门第一幢超高层建筑中银大厦于 1992 年建成，楼高 38 层 163m。

自 20 世纪 90 年代开始，随着国家改革开放和市场经济的深入运行，一线城市的发展规模开始凸显，人口急剧增加、城市经济快速崛起推动了超高层建筑的集群化发展，例如香港在 1990 年末共建有超高层建筑 23 幢，但截至 2005 年末则建有超高层建筑 295 幢，15 年间累计增加了 272 幢超高层建筑，增量超过 12 倍；内地则以上海为代表，在 1990 年末只有超高层建筑 1 幢，但到了 2005 年末共建有超高层建筑 42 幢，紧逼日本东京 (1990 年末日本东京有超高层建筑 10 幢，截至 2005 年末共有超高层建筑 46 幢)，在亚洲排名第三位。结合上述超高层建筑的建设数据可见，香港和上海的超高层建筑发展力度明显高于日本东京。

进入 21 世纪以后，现代建筑结构、施工及安全技术体系日渐成熟，超高层建筑开始在全国诸多大中城市兴建，不仅建设数量上增长迅猛，而且建设高度也在不断刷新。依据世界高层建筑和城市住宅委员会 (CTBUH) 的统计数据，针对 1970~2015 年间我国已建成、主体封顶或接近封顶的超高层建筑，就其建造速度、规模和区域分布等进行统计分析，其中不包括已拆除、长期停工或尚处于筹建阶段的超高层建筑，总体建设情况参见图 1-1，图中每一个圆点表示一幢超高层建筑。

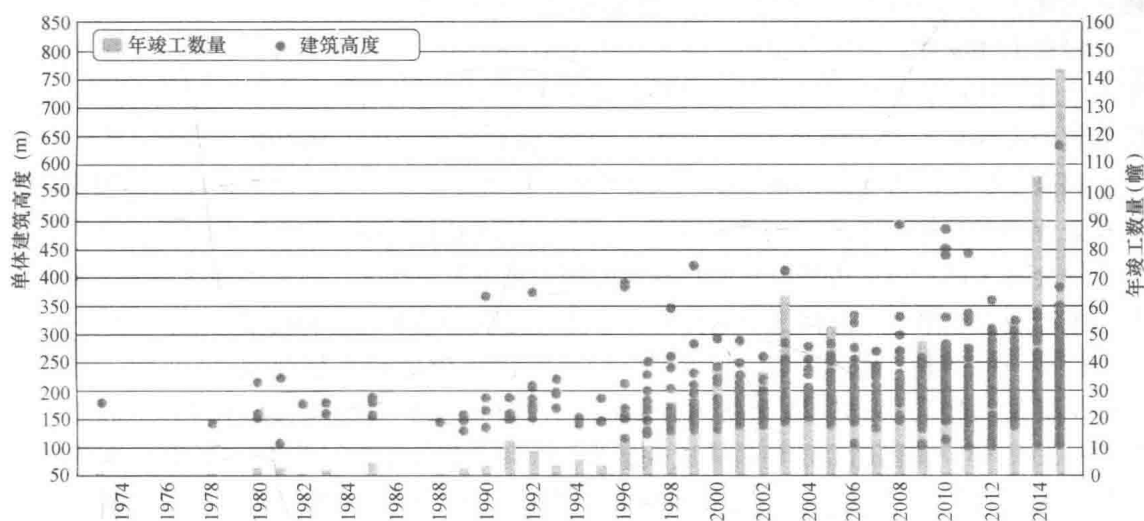


图 1-1 我国超高层建筑建设情况示意图 (截至 2015 年末)

若以超高层建筑的年竣工数量为参考依据,可以将我国超高层建筑的发展大致分为五个阶段:1970~1989年是超高层建筑发展的起步阶段;1990~1997年是超高层建筑发展的低速阶段;1998~2008年是超高层建筑发展的中速阶段;2009~2013年是超高层建筑发展的快速阶段;2014~2015年是超高层建筑发展的高速阶段。参见表 1-1 统计数据,其中包括上述阶段期内的年竣工数量最小值与最大值、竣工总数量,以及阶段期内建成的最高建筑名称、高度及其竣工年份。

我国超高层建筑的发展阶段划分 (截至 2015 年末)

表 1-1

序号	阶段	年竣工数量(幢)	竣工总数量(幢)	最高建筑名称	高度(m)	竣工年份
1	1970~1989	0~5	20	香港合和中心	222	1981
2	1990~1997	4~14	65	广州中信广场	390	1996
3	1998~2008	21~64	401	上海环球金融中心	492	2008
4	2009~2013	47~55	245	香港环球贸易广场	484	2010
5	2014~2015	106~144	250	上海中心大厦	632	2015

注:本表统计数据含中国内地、香港和澳门(不包括中国台湾)已建成、主体封顶或接近封顶的超高层建筑。

若以超高层建筑的高度为参考依据,可以将我国超高层建筑分为以下四个区段:100~199m;200~299m;300~399m以及400m以上,并选取1985年、2000年和2015年三个时间点进行对比分析。

截至1985年末,我国共建成超高层建筑16幢,其中,100~199m超高层建筑14幢,占比88%;200~299m超高层建筑2幢,占比12%;无超过300m以上的超高层建筑。

截至2000年末,我国共建成超高层建筑182幢,其中,100~199m超高层建筑157幢,占比86%;200~299m超高层建筑18幢,占比10%;300~399m超高层建筑为5幢,占比3%;400m以上超高层建筑为1幢,占比1%。

截至2015年末,我国将建成超高层建筑981幢,其中,100~199m超高层建筑596幢,占比61%;200~299m超高层建筑335幢,占比34%;300~399m超高层建筑为34

幢，占比4%；400m以上超高层建筑为8幢，占比1%。

根据上述统计，我国的超高层建筑经过1970~1985年、1986~2000年和2001~2015年三个建设阶段后，100~199m超高层建筑的占比从88%下降至61%；200~299m超高层建筑的占比从12%上升至34%；300~399m超高层建筑的占比逐步提高至4%；400m以上超高层建筑的占比保持在1%。由此可见，超高层建筑的高度比例正在随着国家、城市和企业等多方的协同发展而作适应性变化，其影响因素包括建筑技术水平、地产商实力、社会需求以及诸如市场投资回报在内的相关经济发展状况，还包括地区适用土地情况及国家和地方政策等。总体上，这样的变化过程是趋于经济和科学合理性。

值得一提的是，截至2015年末，全球范围内将建成超高层建筑4930幢（参见表1-2），而我国超高层建筑数量将占比19.9%，数量仅次于美国（1381幢）。但是，从2001~2015年，美国超高层建筑建成数量为533幢，年竣工数量为11~77幢，年平均竣工数量为35幢，而我国超高层建筑建成数量为799幢，年竣工数量为21~144幢，年平均竣工数量为53幢。另外，按照建筑高度层级进行细分，截至2015年末，全球范围内将建成200~299m超高层建筑921幢，其中我国将建成354幢，占比达38%；300~399m超高层建筑92幢，其中我国将建成34幢，占比达37%；400m以上超高层建筑将建成20幢，其中我国将建成8幢（参见表1-3），占比40%。依照目前的情况看，我国已经成为世界上超高层建筑发展最快的国家。

全球范围内100m以上超高层建筑统计数据（截至2015年末）

表 1-2

地区	非洲	中非	亚洲	欧洲	中东	北美	南美	大洋洲	合计
数量(幢)	85	104	1803	505	420	1589	159	265	4930

注：统计数据包括具有明确竣工年份，但不包括已拆除、长期停工或竣工时间不详以及处于筹建阶段的超高层建筑。

我国400m以上超高层建筑名单（截至2015年末）

表 1-3

序号	超高层建筑名称	城市	高度(m)	楼层	竣工年份
1	上海中心大厦	上海	632	128	2015
2	上海环球金融中心	上海	492	101	2008
3	环球贸易中心	香港	484	108	2010
4	紫峰大厦	南京	450	66	2010
5	京基100	深圳	441.8	100	2011
6	广州国际金融中心	广州	438.6	103	2010
7	金茂大厦	上海	420.5	88	1999
8	国际金融中心二期	香港	412	88	2003

对于我国已建成的超高层建筑，遍及30个省、直辖市和特别行政区（不含中国台湾），分布在58个省/地级城市中（见表1-4），且这些城市主要集中在泛珠三角和泛长三角地区。其中，泛珠三角地区城市超高层建筑数量占全国总量的53.7%；泛长三角地区城市超高层建筑数量占比17.7%；泛环渤海地区城市超高层建筑数量占比14.7%；西南部地区城市超高层建筑数量占比12.2%；其他地区占比1.5%。

第一章 我国超高层建筑的发展概况

全国超高层建筑区域及城市分布统计表 (截至 2015 年末)

表 1-4

地区	城市	超高层建筑数量(幢)	地区	城市	超高层建筑数量(幢)
泛珠三角区	香港	365	西南地区	重庆	42
	深圳	40		成都	28
	广州	73		南昌	14
	澳门	14		武汉	10
	福州	10		南宁	6
	厦门	8		长沙	5
	珠海	6		柳州	4
	佛山	4		贵阳	4
	东莞	3		昆明	4
	惠州	2		海口	2
	中山	2		北海	1
	合计	527		合计	120
泛长三角区	上海	80	泛环渤海区	北京	25
	南京	21		天津	33
	杭州	16		大连	25
	苏州	13		沈阳	43
	合肥	12		青岛	9
	无锡	10		烟台	4
	常州	4		济南	2
	湖州	3		哈尔滨	2
	宁波	3		保定	1
	江阴	2		石家庄	1
	温州	2	合计	145	
	上虞	1	其他地区	郑州	4
	绍兴	1		西安	3
	义乌	1		太原	2
	芜湖	1		鄂尔多斯	2
	连云港	1		兰州	1
	南通	2		银川	1
	宜兴	1		三门峡	1
合计	174	乌鲁木齐		1	
		合计	15		

若再对 2015 年末我国超高层建筑各区域城市的建设和分布情况做统计 (见表 1-5), 则能通过表间对照, 进一步说明我国超高层建筑的区域化建设情况。

全国超高层建筑区域及城市分布统计表 (截至 2005 年末)

表 1-5

地区	城市	超高层建筑数量(幢)	地区	城市	超高层建筑数量(幢)
泛珠三角区	香港	295	西南地区	重庆	5
	深圳	8		成都	0
	广州	25		南昌	0
	澳门	1		武汉	1
	福州	0		南宁	0
	厦门	1		长沙	0
	珠海	0		柳州	0
	佛山	1		贵阳	0
	东莞	0		昆明	0
	惠州	0		海口	0
	中山	0		北海	0
	合计	331		合计	6
	泛长三角区	上海		42	泛环渤海区
南京		2	天津	2	
杭州		1	大连	1	
苏州		1	沈阳	0	
合肥		0	青岛	0	
无锡		0	烟台	0	
常州		0	济南	0	
湖州		0	哈尔滨	0	
宁波		0	保定	0	
江阴		0	石家庄	0	
温州		0	合计	5	
上虞		0	其他地区	郑州	1
绍兴		0		西安	0
义乌		0		太原	0
芜湖		0		鄂尔多斯	0
连云港		0		兰州	0
南通		0		银川	0
宜兴		0		三门峡	0
合计	46	乌鲁木齐		0	
		合计	1		

通过表 1-4 和表 1-5 的对比,能够看出我国超高层建筑在近 10 年内不仅建设数量大大增加,而且建设区域的分布也更为广泛,不再局限于一线城市,而是在全国包括很多二线城市范围内迅速发展。该项分析一方面印证我国各地区城市化的高速发展;另一方面也能凸显国内建筑设计和施工技术水平以及建筑市场成熟化方面已经获得了突飞猛进的发展。本章将对我国超高层建筑结构基础、主体结构、建筑系统设备以及关键施工和管理技术的发展概况作简要介绍。

3 我国超高层建筑结构的发展

3.1 结构基础

对于超高层建筑结构而言,基础构型的选择非常关键,不仅受到建筑物自身高度、荷载、结构等因素的限制,还受到建筑场地地质条件的影响。

超高层建筑基础构型的选择与建筑荷载密切相关。由于超高层建筑荷载巨大,造成基底的压力也非常大,这要求地基承载力必须很高,且对于不同地质条件的场地选用的基础结构也有所不同。考虑到我国地域辽阔,各地区的地质条件差异极大,因此超高层建筑采用的基础形式,既要能保证建筑的安全使用,又要能做到经济、合理,满足建筑结构承载、抗震设防和施工条件的要求。一般而言,超高层建筑的基础形式可以采用天然地基,例如等厚板筏基和箱基,或者采用桩基,但基本不会采用高层建筑中常用的梁板筏基或复合地基。超高层建筑基础构型的选择与埋置深度密切相关,当超高层建筑可以设置两层或更多层的地下室时,其基础的埋置深度正常能满足稳定要求;当建筑物基岩埋置较浅无法建造多层地下室以满足埋置深度要求时,则可设置嵌岩锚杆来满足稳定要求。

超高层建筑基础构型的选择与工程地质条件密切相关。在根据场地的岩土工程地质条件确定超高层建筑基础构型时,需要同时考虑基础是否满足地基承载力和沉降变形的要求。一般情况下,对于高度达到150m且楼层达到40层的超高层建筑,当基底砌置在第四纪厚度较大且密实的砂、卵石层时,一般承载力特征值和压缩模量都很高,则可考虑采用天然地基方案;当建筑物基础砌置在第四纪冲、洪积的黏土层或海相沉积土层时,其地基承载力不足且地基刚度不符合变形要求,需采用桩基方案。但是,当基底砌置在中风化或微风化的基岩上时,无论建筑物高度有多大,均可采用天然地基方案。

3.1.1 天然地基基础

对于建筑物基底砌置在砂、卵石层的基础,可采用等厚板筏形基础或箱形基础。等厚板筏基的板厚应具有较大的刚度,以使基底压力均匀分布以及减小建筑物外框(筒)和内筒的沉降变形差异。而对于建筑物基底砌置在中风化或微风化的基岩上,由于基岩承载力特征值很高,则外框柱可采用独立基础,内筒可采用条形基础或等厚板筏形基础。

3.1.2 桩基基础

施工时均采用大直径钻孔灌注桩或有条件的工程场地采用大直径人工挖孔扩底灌注桩,桩端持力层应考虑层厚较大且密实的砂、卵石层或中风化、微风化基岩,以减少桩端的沉降变形。桩的布置原则上应集中布设在墙和柱下,但不同的桩型布桩的方案也各不相同,需要考虑是否采用的是端承桩或摩擦端承桩,因为这样的桩型单桩竖向承载力特征值较高,所需桩数少;若采用的是摩擦桩或端承摩擦桩,由于单桩竖向承载力特征值相对较低,则往往需要在整个基底承台下进行满布桩才能满足建筑物设计承载力和变形控制的要求。

对于桩基础的施工,我国在20世纪80年代后期,为了提高钻孔灌注桩的竖向受压承载力,经过科学试验开始在工程上应用后注浆钻孔灌注桩并取得了很好的效果。

以北京、上海和广东地区为例,结合相关工程地质和建筑设计资料,统计并分析其超

高层建筑的基础构型，特征如下：

北京地区基岩埋深较浅，大部分场地在 30m 以内有承载力很高的卵石层，故超高层建筑很少使用桩基，大部分建筑物直接将箱基埋置于承载力较高的卵石层上。因此，该地区基础的基坑开挖深度大，箱（筏）基底板厚度小，且不用桩基。当然，也有极少数使用桩箱基础的，桩型有人工挖孔桩、混凝土预制桩以及钻孔扩底桩，通常用于基岩埋深大的地区。

上海地区属于软土地基，对超高层建筑的地基承载力严重不足，产生的沉降和变形量问题非常突出。因此，该地区普遍采用桩箱（筏）形基础，基坑开挖深度浅，箱（筏）基底板厚度较厚。桩型可以采用钢管桩、混凝土预制桩和钻孔灌注桩，其中钢管桩主要用于建筑物主楼，混凝土预制桩主要用于裙房，而钻孔灌注桩一般只有在对周围环境影响控制较严地区采用。

广东地区地层以红砂岩为主，珠海、深圳则以花岗岩为主，且基岩埋深较浅，一般均未超过 30m，因此该地区超高层建筑多以桩箱（筏）基础、箱（筏）基础为主，基坑开挖深度较浅，箱（筏）基底板厚度较小。桩型则主要有人工挖孔桩、冲（钻）孔桩和混凝土预制桩。一般情况下，基岩埋深 30m 以内用人工挖孔桩，30m 以上用冲（钻）孔桩，混凝土预制桩只在极个别情况下采用。

3.2 主体结构

3.2.1 主体结构设计及造价

超高层建筑主体结构工程造价的影响因素主要包括：建筑结构体型与平面布置、建筑地域抗震设防烈度和风荷载、结构体系、结构材料以及施工周期等，其中直接经济指标（如结构材料）和间接经济指标（如施工周期）等都可以作为判断建筑结构设计是否经济合理的重要因素。较好的结构设计是要在结构的可靠与经济之间选择一种合理的平衡，力求以最低的代价，使所建造的结构在规定的条件下和规定的使用期限内，能满足预定的安全性、适用性和耐久性等功能要求。按现代观点来看，我国超高层建筑结构的设计思想经历过定值设计法到概率设计法的演进过程。定值设计法：将影响结构可靠度的主要因素（如荷载、材料强度、几何参数、计算公式精度等）看作非随机变量，而且采用以经验为主确定的安全系数来度量结构可靠性的设计方法，即确定性方法。此方法要求任何情况下结构的荷载效应 S （内力、变形、裂缝宽度等）不应大于结构抗力 R （强度、刚度、抗裂度等），即 $S \leq R$ 。在 20 世纪 70 年代中期前，我国和国外主要都采用这种方法进行结构设计。概率设计法：将影响结构可靠度的主要因素看作随机变量，而且采用以统计为主确定的失效概率或可靠指标来度量结构可靠性的设计方法，即非确定性方法。此方法要求按概率观念来设计结构，也就是出现结构荷载效应 S 大于结构抗力 R （ $S > R$ ）的概率应小于某个可以接受的规定值。这种方法是 20 世纪 40 年代提出至 70 年代后期进入实用阶段。我国自 20 世纪 80 年代中期，结构设计方法开始由定值法向概率法过渡。不论是采用何种结构体系，定值设计或是概率设计对任何结构体系进行设计时，要实现结构的经济性，必须从公式两端同时着手，才能取得最佳效果。例如，减小风荷载是进行超高层建筑水平荷载控制的有效措施；提高建筑物抗侧力结构的效率是节约结构材料用量的有效途径；不同结构材料的有机组合能够发挥各自优点，降低结构综合造价。

3.2.2 主体结构体型

随着建筑主体高度不断增加,结构抗侧刚度趋于变柔、阻尼降低,结构对风作用更加敏感,因此建筑结构体型成为超高层建筑结构设计中一个重要的控制因素。

(1) 高宽比

超高层建筑在其他条件相同时,在风荷载作用下,建筑物基底倾覆力矩与建筑高度的平方成正比,而建筑物顶部的侧向位移与其高度的四次方成正比。与多层或高层建筑相比,超高层建筑高度增加几十倍,但建筑进深(宽度)却最多增加几倍,这就使得高宽比要大很多,且建筑物位移控制及顶部舒适度成为主要结构问题。增加建筑的有效宽度可以有效地减小倾覆力矩产生的拉压力,增大超高层建筑抵抗水平力和侧移的能力,从而节省材料,大幅提高结构刚度,减小结构顶点位移中的有害位移。

(2) 空气动力学优化

建筑体型的空气动力学优化,有助于减小结构风荷载和控制建筑舒适度,从而有效降低结构造价。

1) 优化平面形状

一般的高层建筑采用矩形平面,但对于超高层建筑,采用矩形平面不利于结构抗风。相比而言,平面为圆形、椭圆形、三角形、Y形、月牙形的建筑,对横向作用力的敏感性没有矩形平面强。此外,角部修正也是建筑平面形状优化的一项重要措施。角部修正主要包括倒角、削角和圆形化,有助于改变气流剪切层的流动特征,促使分离流再附,减小尾流宽度,从而有效地降低阻力和脉动升力。

2) 优化立面形状

立面形状的优化主要是通过沿建筑物高度变化调整平面构型,大致分为两种形式:一种是采用锥形内收的建筑体型,通过截面沿高度的不断收缩变化,可显著减小风荷载作用下的漩涡脱落和横风向效应,提高结构抵抗倾覆力矩及抗侧力刚度;一种是采用不规则扭转的建筑体型,通过截面沿高度的形状变化,扰乱脉动风荷载沿建筑物高度的相关性,削弱叠加效应,从而降低横风向动力响应。

3) 优化局部形态

超高层建筑高度增加的同时,风荷载以指数级增长,建筑物顶部的风荷载引起的倾覆力矩占基底倾覆力矩的比例较大。因此,在建筑物高区立面开洞、附加扰流翼以及使塔冠形态复杂化等措施有助于减小迎风面面积,从而减小建筑物基底的倾覆力矩,弱化风荷载效应。通常,对于超高层建筑来讲,改变局部形态的优化方法可以与其平面及立面优化方法组合使用。除此以外,在建筑物上设置流线型幕墙、立面导流槽,或者优化建筑物朝向,使得对楼体空气动力响应最不利的风向远离当地主要的强风风向等措施,均能有效降低横风向风载荷,取得一定的经济和社会效益。当然,这些措施的改进需要通过详细风洞试验结果来评估。

3.2.3 主体结构材料

超高层建筑所采用的结构材料主要包括钢筋、钢构件和混凝土,其中钢构件包括型钢和钢管;材料结构则主要包括钢结构、混凝土结构和钢-混凝土混合结构,其中混凝土结构就是指钢筋混凝土结构。由于钢结构强度高、质量轻、抗震性能好、施工速度快,国外早期的

超高层建筑主要是以钢结构为主。但钢结构造价较高、防火性能差等问题的存在，也限制了钢结构在超高层建筑中的广泛应用。混凝土结构可塑性强、用钢量少，取材方便，维护成本低，加上混凝土和钢筋强度等级不断提高，促使混凝土结构在超高层建筑的规模化发展中得到广泛应用。然而，混凝土结构也存在质量超重、结构构件尺寸过大、劳动力成本比例过高等问题，同时，抗拉强度低以及施工周期长等特点，使其在高地震烈度区（抗震设防烈度7度以上地区）、软地基地区以及高宽比较大的超高层建筑中应用受限。随着时代和科技的发展，新型高效抗侧力体系钢-混凝土混合结构应运而生。钢-混凝土混合结构是在同一结构体系中，将钢材与钢筋混凝土两类结构构件并用，充分利用两类结构的优点，发挥钢材的抗拉性能和混凝土的抗压性能，增强结构物的刚度和稳定性的同时，还能够通过如减小柱截面等方法而增大楼层的有效使用面积，从而取得较好的技术经济效果，使建筑物结构用钢量和施工成本得到大幅降低。此外，如型钢混凝土柱、钢管混凝土柱以及钢-混凝土复合梁等组合构件也大量应用在超高层建筑中，使建筑物综合经济效益进一步提高。

截至2015年末，我国已建成及计划建成的超高层建筑中，按照材料结构进行分析，100m以上建筑物以混凝土结构为主，占69%，钢-混凝土混合结构占25%，全钢结构占3%，钢结构、混凝土组合结构占3%；200m以上建筑物混凝土结构和钢-混凝土混合结构占比分别为45%和49%，全钢结构占4%，钢结构-混凝土结构组合结构占2%；300m以上建筑物则以钢-混凝土混合结构为主，占79%，混凝土结构只占17%，全钢结构占4%；400m以上建筑物则全部采用钢-混凝土混合结构。尽管从材料价格来讲，钢-混凝土混合结构的造价高于混凝土结构造价，但结合建筑物结构和环境要求、施工成本及土建周期等因素综合评估，混合结构的实际经济效益要高于混凝土结构。目前，我国在建超高层建筑应用最多的是钢-混凝土混合结构。

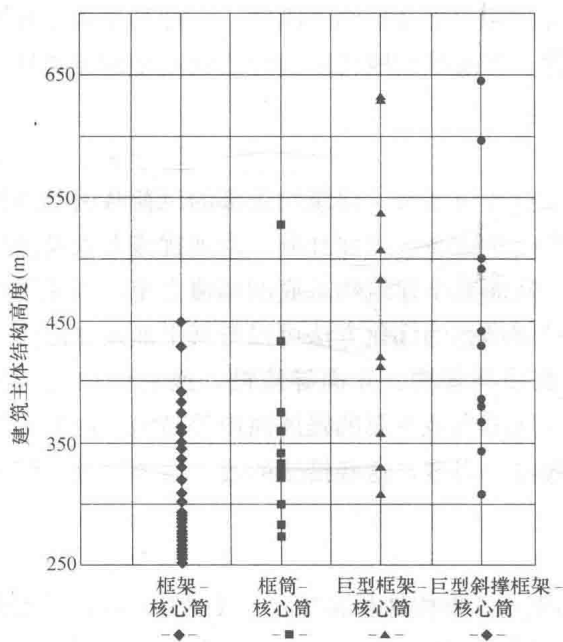


图 1-2 我国超高层建筑结构体系选型情况（截至 2015 年末）

3.2.4 主体结构体系

超高层建筑的高速发展得益于采用的新型高强材料、先进实验方法和更加精密的计算机分析技术，也得益于结构体系的创新和发展。传统的框架、剪力墙或框架-剪力墙体系已经不能满足超高层建筑的最大适用高度要求，尤其是针对高度超高 250m 的超高层建筑结构，一般采用框架-核心筒、框筒-核心筒、巨型框架-核心筒和巨型支撑框架-核心筒等四种结构体系，以适应不同高度的超高层建筑，如图 1-2 所示。

4 我国超高层建筑机电系统的发展

超高层建筑机电系统主要有给水