



轻型钢结构房屋 新技术与新产品的应用

中国建筑金属结构协会钢结构专家委员会

中国建筑工业出版社

轻型钢结构房屋新技术 与新产品的应用

中国建筑金属结构协会钢结构专家委员会



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

轻型钢结构房屋新技术与新产品的应用/中国建筑金属结构协会钢结构专家委员会. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 3

ISBN 978-7-112-13015-3

I. ①轻… II. ①中… III. ①轻型钢结构: 房屋结构 IV. ①TU392.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 041413 号

本书共分 7 大部分, 从门式刚架轻型钢结构、金属屋面及墙面、轻型钢结构住宅、组合房屋、轻型钢结构设计软件等方面, 汇总了国内近年轻型钢结构建筑研究开发、设计施工中的新材料、新产品、新技术。

本书对于轻型钢结构设计研究、施工安装人员会有所帮助和启发, 对钢结构专业的师生具有参考价值。

* * *

责任编辑: 郇锁林 万 李

责任设计: 赵明霞

责任校对: 王金珠 王雪竹

轻型钢结构房屋新技术与新产品的应用

中国建筑金属结构协会钢结构专家委员会

*

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

北京红光制版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 880×1230 毫米 1/16 印张: 27¼ 插页: 8 字数: 844 千字

2011 年 4 月第一版 2011 年 4 月第一次印刷

定价: 86.00 元

ISBN 978-7-112-13015-3

(20385)

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)

《轻型钢结构房屋新技术与新产品的应用》

编写委员会

主 编：尹敏达

副主编：弓晓芸 张跃峰

编 委：（按姓氏笔画排序）

丁大益 丁芸孙 弓晓芸 王元清 王仕统 王明贵

王赛宁 刘子祥 李少甫 沈祖炎 张跃峰 陆赐麟

陈有泉 周观根 郝继平 蔡益燕 薛 发

秘书处：顾文婕 张立楠

前 言

现在我国建筑钢结构的用钢量占总钢产量只有 4%，与我国产钢大国很不相称，也与发达国家钢结构的应用比率相差甚远；另一方面，单体建筑用钢量又很大，钢结构的效能发挥不高，涉及在建筑中如何合理使用钢材问题。建筑钢结构的设计原则历来是适用、经济、美观、制作安装方便。适用当然又包含安全，适用是满足功能上的需要，经济合理，而安全是适用的重要前提。本书就包括了在汶川地区设计学校校舍的经验介绍，在那里抗震安全成为头等重要问题。设计中的经济要求主要表现在降低单位建筑面积用钢量，降低工程造价，是体现钢结构效能的主要指标，也是业主和行业专业技术人员最关注的问题。

轻型房屋钢结构的特点是钢结构的效能发挥得充分，能有效地节约钢材和降低造价，制作安装也简便。在大城市，预应力钢结构、屈曲约束支撑、钢板剪力墙等先进技术手段有很大的应用潜能，因为大型建筑比较集中。但在大量中小城市，设计施工人员接触最多同时也是最关心的是门式刚架、多层住宅、轻钢围护结构等轻型钢结构房屋，这些结构用钢量较低，却能解决大问题，但目前在技术上还不是很完善，在纵深方面问题还不少，有待大家贡献智慧和经验，交流切磋。

在门式刚架方面，抗风灾和雪灾是非常急迫的问题。今年气候异常，很多地方出现了大雪，使人想起 2007 年沈阳百年一遇的大雪，我们目睹了这种房屋遭遇的巨大灾难，专家估计，仅沈阳市就被雪压倒近 180 幢大型厂房。昔日的铁西区今日是成片的门式刚架大型厂房，但雪灾造成的损失是令人痛心的。今年，在强风猛吹之时则令人想起 2008 年的台州风灾，门式刚架屋顶都刮没了，给商家的财产造成多大的损失！但也有完好无损的，巴特勒公司设计的就是如此，本书列入了他们的经验介绍。门式刚架轻型房屋抗震是大家关心的问题，在支撑合理设计方面，巴特勒和精工都介绍了好经验。同济大学、欧本桁架檩条公司等共同研发了梯形腹板 H 型钢门式刚架梁构件，使钢材用量进一步显著降低，书中有很好的介绍。单跨达 53m 的大跨度多跨大型煤棚，横梁最大截面高度 1.8m，总长 1616m，在国内并不多见，在设计上出现一些新问题，值得关注。

金属屋面和墙面现在应用很广，已是钢结构房屋围护结构的主要形式。在该专题下有一些全面介绍的文章，包括工程应用实例。直立缝锁边屋面板的应用，给檩条设计和拉条设置带来新问题，有专题讨论。彩钢夹心聚苯板在墙体的应用中出现不少问题，对于彩钢聚氨酯夹芯板、彩钢岩棉夹芯板的应用，书中可给读者提供一些信息。

住宅钢结构在我国的发展前景虽然是广阔的，但步伐较慢，有专家中肯地指出，缺少工业化是重要原因。但在住宅产业化方面非常成功的例子也不是没有，杭萧钢结构公司就是其中的佼佼者。杭萧钢结构公司的 CCA 板灌浆墙和钢筋桁架叠合板，以及书中未作介绍的冷弯型钢柱，技术水平高，产品性能优越，在国内独树一帜，已经实现成片开发。他们高瞻远瞩，着眼于高质量、工业化生产和产品配套，早有规划和预期，目前看来对行业的贡献特别大。我国钢结构住宅，如能吸取杭萧钢构公司的经验，采用“杭萧模式”，将大有可为。钢结构住宅在我国的前景无限，有志者现在借鉴其经验，仍为时不晚。

组合房屋是工业化产品，雅致的拆装式房屋也有类似性质，只是比住宅简单些，同样有良好前景。

本书列入了钢结构设计软件在轻型钢结构房屋设计中的应用。最后还介绍了世博会、体育馆及车站大跨度钢结构等建筑的加工制作、施工安装的新技术。

本书对于轻型钢结构设计研究、施工安装人员会有所帮助和启发，对钢结构专业的师生有参考价值。

蔡益燕

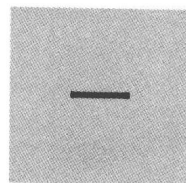
2011年1月28日

目 录

一、综述	1
必须还钢结构轻、快、好、省的本来面目	2
把握钢结构属性特征 建造健康钢结构工程——兼谈建筑钢结构工程的若干设计理念	13
精心设计——促使钢结构行业健康发展的关键	20
轻型钢结构设计常见“误区”的探讨	25
提高我国全钢结构的结构效率 实现钢结构设计与施工的和谐发展	35
钢结构设计若干问题探讨	44
二、门式刚架轻型钢结构	53
门式刚架轻型房屋钢结构抗震问题浅谈	54
《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》CECS 102 在 2003 年评奖答辩会上的汇报	56
门式刚架钢结构设计理念与工程实践的若干问题	59
抵抗风灾雪灾的轻钢结构设计	68
低层金属建筑屋面雪荷载分析	80
钢结构震害分析与厂房钢结构抗震设计	92
带有转臂吊的钢柱受扭转作用的分析设计	102
轻钢结构的支撑系统若干设计问题探讨	108
X 形柱间支撑失稳因素的探讨及处理方法	112
轻钢结构檩条间连接设计探讨	115
波纹腹板结构在实际工程中的应用	118
大跨度门式刚架在工程中的应用	124
欧本桁架檩条在重型吊车钢构厂房屋面的应用	130
沈阳中科天道钢结构厂房设计	134
三、金属屋面及墙面	137
金属压型板屋面防水等级及渗漏原因探讨	138
轻钢结构围护系统设计	149
金属压型板屋面抗风吸力性能试验研究	155

装配式金属板围护系统防水性能研究·····	162
钢结构建筑装配式外墙系统设计·····	167
浅谈直立锁边屋面系统在国内的发展应用·····	171
聚氨酯节能夹芯板在建筑中的应用·····	175
轻钢结构收边节点构造的改进·····	181
昆明新机场航站楼金属屋面工程施工新技术·····	185
360°直立锁缝温度可变屋面系统节点构造·····	198
大型体育场馆屋面工程施工新技术·····	201
浅谈金属屋面新技术在大型建筑中的应用·····	214
大型轻钢彩板金属屋面系统之防水刚性化设计与创新·····	224
围护体系紧固件的选材及应用·····	235
轻钢结构屋面系统温度应力的研究及应用·····	241
多维新型玻璃丝棉复合板在航天煤化工项目中的应用·····	246
改性酚醛泡沫材料在围护结构中的应用·····	253
四、轻钢结构住宅·····	257
中国的住宅产业化与钢结构住宅·····	258
钢结构抗震校舍设计研究·····	264
低层冷弯薄壁型钢住宅体系中组合构件的应用·····	270
冷弯薄壁型钢住宅体系在社会主义新农村建设中的应用和分析·····	276
钢筋桁架混凝土叠合板在钢结构住宅中的应用·····	281
CCA 板灌浆墙性能研究·····	285
CCA 板灌浆墙体中考虑面板支撑作用的抗弯承载力分析·····	289
开发新型墙体材料 促进住宅建筑节能·····	294
回收安置板房在低层钢结构住宅中的再利用·····	298
浅谈农村低层住宅结构形式·····	303
钢结构住宅建筑的发展前景·····	307
钢结构住宅发展缓慢的原因·····	314
五、组合房屋·····	319
国内集成房屋行业发展情况·····	320
拆装式活动房屋·····	329
六、轻钢结构设计软件·····	339
钢结构设计软件 STS 在轻钢结构房屋设计中的应用·····	340
门式刚架设计 CAD 软件 PS2000 简介及应用·····	357
YJCAD 系列软件介绍及在钢结构设计中的应用·····	363
Xsteel 软件在轻钢结构房屋中的应用·····	367
TEKLA 软件在轻钢结构房屋中的应用·····	371

七、其他钢结构·····	375
北京奥运会火炬塔改移工程施工技术·····	376
上海世博会西班牙馆空间异型钢结构施工技术·····	382
南昌国际体育中心体育场大悬挑钢桁架施工关键技术·····	388
厦门火车西站钢结构深化设计技术·····	394
厦门火车西站屋面钢结构施工关键技术·····	402
超高工业厂房钢结构施工新技术·····	410
火车站无站台柱雨棚钢结构施工技术·····	418
金属轻型结构在艺术领域中的拓展·····	423



综 述

必须还钢结构轻、快、好、省的本来面目

沈祖炎

(同济大学建筑工程系, 上海 200092)

摘 要 介绍了钢结构“轻、快、好、省”的特点, 并通过阐述高层钢结构、大跨度屋盖钢结构和轻型钢结构的发展历程说明了钢结构的这些优异性能, 针对我国当前建筑钢结构发展中存在的问题予以分析, 并对如何使钢结构做到“轻、快、好、省”提出了建议, 以期扩大钢结构的应用范围和钢结构产业的可持续发展。

关键词 建筑钢结构; 可持续发展; 钢结构体系; 设计理念; 设计人才; 设计环境

1 引言

随着我国钢产量的快速增长和国家实行合理利用钢材和积极采用钢结构的政策以来, 我国建筑钢结构的发展日新月异, 取得了令世人瞩目的成就, 但也凸显了一些引人思考的问题。一方面我国是产钢大国, 但建筑钢结构用钢占总钢产量的比例非常小, 只有 4% 左右, 同时建筑钢结构在整个建筑行业所占比例还不到 5%; 另一方面, 一些重要的单体建筑钢结构用钢指标又非常的大。这些现状使人们对现代建筑钢结构的发展方向和发展理念产生了困惑, 为了促进钢结构产业健康持续的发展, 本文对这些问题作一探讨, 以期对工程建设提供参考和建议。

2 钢结构轻、快、好、省的本来面目

全世界至 2006 年已建成的 101 幢超高层建筑中, 钢筋混凝土结构 16 幢, 纯钢结构 59 幢, 不同形式的钢-混凝土混合结构 27 幢^[1]; 大跨度屋盖空间结构更是钢结构的世界。钢结构的发展促使了建筑业、冶金工业、机械工业、汽车工业、农业、石油工业、商业、交通运输业等得到迅速发展。为什么钢结构的生命力越来越强大, 这要归功于它优异的性能, 本文简要概况为“轻、快、好、省”四个特点。

2.1 轻

钢结构具有轻质高强性。钢材与混凝土、木材相比, 其重力密度与强度的比值最小, 因此, 就同类建筑结构形式而言, 钢结构自重轻、构件截面小、能够承受更大的荷载、可以跨越更大的跨度、便于运输和安装。例如, 在同等荷载条件下, 钢屋架重量只有同等混凝土屋架的 $1/3 \sim 1/4$, 若采用冷弯薄壁型钢屋架则只有 $1/10$ 左右。钢结构住宅的重量是钢筋混凝土住宅的 50% 左右, 使用面积比钢筋混凝土住宅提高 4% 左右^[2]。

2.2 快

钢结构的工业化程度高, 工期短。钢结构都为工厂制作, 具备成批大件生产和成品精度高等特点, 采用工厂制造、工地高强度螺栓安装的施工方法, 有效地缩短工期, 为降低造价、发挥投资的经济效益创造条件。在同等条件下, 钢结构与钢筋混凝土结构施工工期相比, 前者仅是后者的 $1/3 \sim 1/2$ 。

2.3 好

钢结构材性好, 可靠性高。钢材质地均匀、各向同性、弹性模量大、有很好的塑性及韧性、为理想

的弹性-塑性体。因此,钢结构不会因为偶然的超载或局部超载而突然断裂破坏;能够适应振动荷载;计算模型能很好地反映钢材的力学性能,因而分析准确可靠。

钢结构抗震性能好。钢材具有较高的抗拉和抗压强度以及较好的塑性和韧性,它的材质均匀使设计易于符合实际受力情况,加上连接构造的耗能、维护材料的蒙皮效应、耗能组件的使用,使结构体系能够抵御强烈地震作用并表现优异。因此,在国内外的历次地震中,钢结构是损坏最轻的结构,已公认为是抗震设防地区特别是强震区的最合适结构。

钢结构密封性好。钢材组织非常密实,通过焊接连接,完全适用于对气密性或水密性要求高的特种建筑物。

钢结构耐热性好。温度在 250℃ 以内,钢材性质变化很小,钢结构可用于温度不高于 250℃ 的场合。当温度达到 300℃ 以上时,强度逐渐下降,在这种场合,对钢结构必须采取防护措施。

钢结构耐久性好。在正常的防腐维护下,建筑钢结构不会因为日常温度的变化、日晒、雨淋及一般大气介质的作用而老化,具有很好的材料耐久性。

钢结构易于拆卸。采用螺栓连接的已建成钢结构易于拆卸、加固和改建。

2.4 省

单纯从目前材料的价格上看,钢结构比混凝土结构的造价要高,但钢结构比混凝土结构建设速度要快 50% 左右,这会节省很多时间成本,而且房屋整体重量也比混凝土结构轻 50% 以上,这样基础处理、运输量的成本都会下降。建造房屋是一个系统工程,包括设计、制造、运输、安装、维修和管理等诸多环节,因此,从整体上看,钢结构更“省”。

钢材具有可回收再利用的特点,相对于目前普遍使用的其他建筑材料,其最有利于节能、节材、节水和节地。

当然,钢结构也存在着一些不足,诸如耐火性能及耐腐蚀性能较差的问题,但通过进行结构抗火设计以及采用正确的防火措施和防腐处理完全能够达到使用要求。并且,随着新型耐火钢和耐候钢的使用,这些缺点正逐步得到弱化^[3]。另外,钢结构低温脆断的问题,通过正确的设计也可以防患于未然。

我国建筑行业近年来一直是能源、材料、水和其他资源的使用“大户”,发展推广应用钢结构完全符合国家着力提倡建立节约型社会的倡议,符合当前国家对建筑业提出的可持续化发展的要求。

3 钢结构发展历程中轻、快、好、省的一些实例

20 世纪以来,随着科学技术的飞速发展及人们对物质和文化生活要求的不断提高,对各类建筑提出了更新、更高的要求。建筑钢结构由于钢材的优异性能,制作安装的高度工业化以及结构体形的新颖和灵巧,已越来越广泛地得到应用^[4]。下面以近几十年来发展比较活跃的高层钢结构、大跨度屋盖钢结构和轻钢结构为例进行说明。

3.1 高层钢结构

城市人口集中,用地紧张以及商业竞争的激烈化,促使了现代多、高层建筑的出现与发展。随着建筑高度的增加,在风荷载和地震作用下,结构的抗侧力问题逐渐成为关键因素。为了提高结构的侧向刚度,高层结构的体系不断创新和发展。以下是高层钢结构发展中一些有代表性的工程,每一个工程的建成,都形成了一种新的高层钢结构体系,并在以后的高层钢结构中广泛应用。

1885 年建成的世界上第一幢现代钢结构高层建筑——10 层高的家庭保险大楼 (Home Insurance Building),采用框架结构体系。这种结构体系一直被采用,到 1931 年建成了 381m 高的美国纽约帝国大厦 (Empire State Building)。1968 年,100 层高的约翰·汉考克中心 (John Hancock Center) 的建成使结构上形成了一个新概念——对角支撑桁架型锥形筒体结构体系,结构抗侧能力显著提高。1973 年建成的美国纽约世界贸易中心创新性地采用密柱深梁的钢框架筒体作为结构的主要抗侧力体系。1974 年,当时的世界第一高楼西尔斯大厦 (Sears Tower) 又将筒体结构发展为束筒体系。筒中筒和束筒结

构体系减小了框筒结构的剪力滞后效应,整体结构的侧向刚度得到进一步的增强。钢-混凝土混合结构有:1988年建成的香港中国银行大楼采用由杆系结构组成的巨型空间结构体系,使得高层建筑具有更大的侧向刚度。1998年建成的上海金茂大厦使用伸臂钢桁架系统将混凝土筒体和巨型柱组合在一起,形成创新的钢-混凝土混合结构体系。这种结构体系已经在目前的超高层建筑结构中得以广泛应用。2008年建成的上海环球金融中心采用了创新的巨型框架-伸臂桁架-核心筒结构体系,形成多重抗侧力体系。

这些不断出现的创新高层结构体系无论在建筑、技术、材料、设备和施工等方面都体现了钢结构轻、快、好、省的特点,反映了当时世界最先进的水平。表1列举了这些代表性工程的概况,从中可以看出高层钢结构随着其结构抗侧力体系的高效发展,结构用钢指标也在降低。因此,用钢指标也应成为衡量一种结构体系和一个结构工程优劣的重要指标^[5]。

不同高层钢结构体系及用钢指标

表 1

建筑名称	国家	建成时间	层数	高度(m)	结构体系		用钢指标(kg/m ²)
帝国大厦	美国	1931年	102	381	框架结构	全钢结构	206
约翰·汉考克大厦	美国	1970年	100	344	外斜撑框架筒体结构		146
世界贸易中心	美国	1973年	110	412	外框筒结构		186
西尔斯大厦	美国	1974年	110	443	9成束框筒结构		161
香港中国银行大厦	中国	1989年	70	367.4	空间刚架结构	钢-混凝土混合结构	140
金茂大厦	中国	1998年	88	420.5	巨型柱-伸臂桁架-核心筒结构		66
上海国际环球金融中心	中国	2008年	101	492	巨型框架-伸臂桁架-核心筒结构		175

3.2 大跨度钢结构

大跨度钢结构的发展中,采用了大量新材料、新工艺、新技术,结构体系不断创新,成为结构方面近50年来最活跃的研究领域。有以刚性杆件组成的网架、网壳等刚性结构体系,有以索膜等柔性材料为特征的悬索结构、薄膜结构、张拉集成体系等柔性结构体系。还有杂交结构体系,以及可展开结构和可折叠结构。

1975年建成的上海体育馆,采用网架结构,它的平面为直径110m的圆形,用钢指标仅49kg/m²。这是我国早期网架结构的杰出代表,它使这种具有整体工作性能好、抗震性能好、用钢指标省、施工技术成熟方便等优势的结构体系在我国得到了迅猛发展,应用范围普及体育建筑、公共建筑、工业厂房以及飞机维修库等,使我国在网架结构的覆盖面积达到世界第一,在设计、制作和安装技术等方面处于世界先进行列。1997年建成的日本名古屋体育馆,采用网壳结构,它是当前世界上跨度最大的单层网壳结构,其结构施工时采用了整体提升的方法将重13000t的屋盖提升到位,仅30个月的时间便施工完毕。柔性结构如1953年建成的美国雷里体育馆,它被认为是世界上第一座优秀的现代大跨度索网屋盖结构,它对传统建筑设计理念产生了深远的影响,随后,悬索结构如雨后春笋般地出现在世界各地。又如1967年加拿大蒙特利尔世博会的德国馆,它是一个被公认为最早的、真正意义上的现代索膜结构体系,在建筑、结构和景观上实现了良好的融合,无论是对建筑还是结构都极具创新价值。又如1996年亚特兰大奥运会主场馆——佐治亚索穹顶,其平面为240m×192m的椭圆形,而用钢指标还不到30kg/m²,这是因为它采用结构效率极高的索穹顶结构体系,这种体系突出的优势就是随着跨度的增加,结构用钢指标的增加并不明显,因而在大跨度建筑中极具应用前景。杂交结构中的张弦梁、张弦桁架和弦支穹顶由于充分发挥刚柔两种材料的优势,受力明确、结构形式多样,并且制造、运输、施工简便,目前在我国得到了广泛的应用。如1998年建成的上海浦东机场一期航站楼是最早采用大跨度单向张弦梁结构体系的建筑,最大跨度82.6m。2008年北京奥运会国家体育馆为144.5m×114m的双向张弦桁架。2008年北京奥运会羽毛球馆和2009年建成的济南奥体中心体育馆分别为跨度93m和122m的张弦网壳。开启结构具有回归自然和多功能综合利用的特点,能节约能源,降低整个建筑的造

价,产生了非常好的社会经济效益。我国 2006 年建成的最大跨度达 254m 的南通体育会展中心主体育馆,其固定屋盖和开启屋盖均为网壳结构。它是世界上首次将机电液压技术、移动台车多点支撑用于巨型开合结构的工程。表 2 显示了这些代表性大跨度钢结构的概况。

大跨度钢结构在整体上出现从较重向轻型体系发展,从刚性体系向柔性体系发展,并出现由单一的结构形式发展到各种结构形式的合理组合。这种组合旨在集中两种或几种结构的优点,充分发挥材料强度,使结构受力更加明确合理,体系更加经济有效。

不同大跨度钢结构体系及用钢指标

表 2

建 筑 名 称	国家	建成时间	形 状 尺 寸	结构体系	用钢指标 (kg/m ²)
上海体育馆	中国	1975 年	平面直径 110m	网架结构	49
名古屋体育馆	日本	1997 年	平面直径 187.2m	单层网壳结构	300
雷里体育馆	美国	1953 年	平面直径 91.5m	索网结构	30
德国大帐篷	德国	1967 年	外形蜿蜒变化,覆盖面积达 8000m ²	索膜结构	18.8
佐治亚穹顶	美国	1992 年	平面椭圆形, 240m×192m	索穹顶	30
北京奥运会国家体育馆	中国	2008 年	平面矩形, 144m×114m	双向张弦桁架	118
济南奥体中心体育馆	中国	2009 年	平面圆形, 直径 122m	张弦网壳	180.6

3.3 轻型钢结构

始于 20 世纪初的轻型钢结构体系,在第二次世界大战期间得到了快速发展,主要用于对可拆卸性和施工速度要求很高的战地机库、军营等。20 世纪 40 年代出现了门式刚架结构,60 年代开始大量应用由彩色压型板及冷弯薄壁型钢檩条组成的轻质围护体系。目前轻型钢结构已成为发达国家的主要建筑结构形式,英国新建的非居住类房屋建筑中,90%的单层和 60%的多层建筑都采用了轻型钢结构,美国在轻钢结构体系的分析、设计、制作上也实现了高度的标准化及工厂化^[6]。我国自 20 世纪 80 年代的宝山钢铁公司一期工程开始应用轻型钢结构。该工程采用热轧 H 型钢作为主承重骨架,并首次采用彩色压型钢板作为围护结构,建设的过程显现了这种体系轻型、快速和高效的特点,给我国建筑业带来了革新。目前国内常用的轻钢结构承重体系包括:焊接门式刚架结构体系、冷弯薄壁型钢结构体系、多层房屋钢结构体系、金属拱形波纹屋盖体系等。其中轻型门式刚架结构由于结构构件和围护结构的高度系列化和定型化、结构设计合理、用钢量省、制作工业化、安装实现全部机械连接、施工迅速而周期短、以及经济效益高等特点,自 20 世纪 90 年代以来在我国得到了迅速的发展。应用范围在单层轻型厂房、仓库、大型商场、体育馆和展览厅等。

3.4 发展历程总结

从上述钢结构的发展历程我们可以总结出这样的规律:那些新颖、轻巧、受力明确又便于施工,经济效益高,节省自然资源的钢结构,也就是能够凸显“轻、快、好、省”特点的钢结构一经建成,便具有极大的示范性和推广性,形成了钢结构发展史上每一个阶段的里程碑。它们既有革新意义,同时还具有普遍的适用性,因此能够不断扩大钢结构的应用范围,并推动钢结构不断向前发展。

4 目前我国钢结构的发展现状

我国自 1978 年实行改革开放以来,经济建设有了突飞猛进的发展,建筑钢结构也有了前所未有的发展,而且应用领域有了较大的扩展。高层和超高层房屋、多层房屋、单层轻型房屋、体育场馆、会展中心、机场候机楼、车站,大型客机检修库、自动化高架仓库等都有采用钢结构的。尽管我国建筑钢结构有了飞跃的发展,但无论从钢结构的用钢量、应用范围和结构体系等方面看还都存在着一些问题。

4.1 钢结构的应用有待拓宽

根据世界钢铁协会的统计数据显示^[7],1996 年,我国粗钢材产量为 10124 万 t,超过 1 亿 t,跃居世界第一,2005 年达到 35579 万 t,2006 年达到 42266 万 t,2007 年达到 48924 万 t,2008 年达到

50031 万 t, 2009 年达到 56784 万 t。我国钢产量逐年增加, 连续 14 年位居世界第一, 成为世界的产钢大国。同时有资料研究表明^[8], 从 1997 年到 2007 年的 10 年间, 中国粗钢产量增长了 3.49 倍, 平均年增长速度达到了 16.2%。这一速度是德国的 20 倍, 日本的 11.6 倍、韩国的 8.5 倍、俄罗斯的 4 倍、意大利的 2.2 倍; 是发达国家(日本、美国、德国和意大利)平均年增长速度的 7 倍; 是世界平均年增长速度的 3 倍。美国 10 年间粗钢产量没有增长反而下降。这表明我国钢铁工业的发展速度已远远快于世界其他主要钢铁生产国和地区。但我国钢结构的应用却远远落后于发达国家。以下一些方面有待加强。

4.1.1 钢结构用钢占钢材产量比应不断提高

钢结构(统计包括工业与民用建筑、铁路与公路桥梁、水电与火电建设、城市建设等)用钢占钢材产量 2002 年为 4.3%, 2004 年为 4.8%, 2005 年为 4.26%, 2006 年为 4.12%, 2007 年为 4.28%, 预计 2010 年为 5.5%^[2]。而其中建筑钢结构用钢占钢材总产量的比例更小。国家“十五”计划是每年建筑钢结构用钢材占总钢材产量的 3%, 2015 年建筑钢结构的发展目标是争取每年建筑钢结构用钢占总钢材产量的 6%。而发达国家目前这一比例已达 10% 以上, 美国、日本等国家更达到 30% 左右。从这些数据可以看出, 我国建筑钢结构用钢量严重偏低, 与钢产量的快速增长形成了巨大的反差, 这也是造成我国钢材总体供大于求的一个主要原因。但同时也说明, 中国钢结构发展具有极大的空间和潜力。

4.1.2 高性能钢材的研究应认真加强

我国目前钢材的质量和规格基本满足建筑结构的要求, 但随着建筑钢结构的快速发展, 建筑钢结构对钢材的性能提出了更高的要求。如高层钢结构今后将大量需要高强度、高韧性、低屈强比、抗层状撕裂能力、高焊接性、耐火性等高性能钢材。对于冷弯钢材, 需开发 Q345 以上的高强冷弯钢以及厚度在 6~25mm 的厚壁冷弯型钢。钢材质量和规格的提高, 高性能钢材的生产, 必将有利于降低钢结构的成本, 扩大其应用范围。从总体上讲, 我们应该从追求钢铁产品的数量转为提高钢材产品的质量、优化产品的结构, 创新钢材的品种, 以适应建筑钢结构用钢的需求, 同时也促使钢铁产业的持续发展。

4.1.3 钢结构的应用范围亟须扩大

我国房屋建筑中, 混凝土结构占到 90% 以上, 钢结构还不到 5%, 而日本等地震高发地区的建筑中钢结构占 38%, 木结构占 35%, 混凝土结构只占 20% 多^[9]。我国建筑钢结构还仅集中使用于高层、超高层建筑、大空间公共建筑与工业建筑中, 普通办公楼, 学校、医院建筑等多高层建筑应用钢结构的少; 低层、多层及高层住宅中钢结构应用的少。我国每年竣工 6 亿 m² 的城镇住宅建设, 却只有 5% 采用钢结构^[2]。我国即使是在 2008 年汶川震后灾区的重建工作中, 新建的住宅中仍然是砖混和钢筋混凝土结构的传统住宅一统天下的局面, 抗震性能优异的钢结构住宅的贡献仍然微不足道^[10]。而日本在 20 世纪 90 年代末, 预制装配住宅中钢结构比例就已达到 71%^[11]。

4.2 网架和门式刚架结构在我国发展的经验值得推广

在大跨度建筑中, 以网架和网壳结构为代表的网格结构 50 多年来成为我国发展最快, 应用最广的结构, 无论在使用范围、结构型式、安装施工等方面均具有中国建筑结构的特色。据中国钢结构协会空间结构分会统计: 网架和网壳的生产 2005~2008 年已趋于平稳状态, 每年建造 1500 座, 约 250 万平方米。

门式刚架轻型钢结构体系自 20 世纪 80 年代在我国采用以来, 迅速发展, 每年建造约 800 万 m², 在单层轻型工业厂房和仓库建筑中几乎都采用这种结构体系。

这两种结构体系之所以能够得到迅猛发展和推广, 主要是充分体现了钢结构轻、快、好、省的特点。这两种结构体系都采用了轻屋面, 结构构件都经过千方百计的优化, 使结构的自重减到极轻, 体现了钢结构轻的特点。这两种都是体系化结构, 具有高度的工厂化、标准化和模数化, 现场施工几乎不用焊接, 因此施工速度极快, 体现了钢结构快的特点。有专用设计规范和商用软件, 能够保证设计质量, 高度工厂化生产, 构件形式标准化, 可以在自动生产线上加工, 能够保证制作质量, 体现了钢结构质量好的特点。结构用钢指标优异, 以门式刚架钢结构为例, 用钢指标可降低到 10~30kg/m²。结构体系化以后, 可以形成批量生产, 产生规模效应, 明显降低生产成本, 门式刚架钢结构的造价可降低到 400~

600 元/ m^2 ，因此体现了钢结构省的特点。

为什么在当前巨大的住宅市场中，钢结构没有推广应用开来，这中间有很多问题需要研究和解决。从技术层面上来讲，可以借鉴网架结构和门式刚架结构在短期内迅速发展成为建筑业中新兴专门行业的经验，也就是一定要走体系化的道路。要开发成套的钢结构住宅产品，使钢结构住宅的建造实现标准化、模数化；还要开发新型的围护材料，使这些维护材料既适用于钢结构，又符合我国居住者的使用习惯，而且还具有良好的保温隔热、隔声、防潮、防渗性能，从而提高建筑的使用舒适度。

4.3 近年来涌现的与轻、快、好、省理念背道而驰的技术现状令人担忧

近 20 年来，随着我国国民经济的高速发展，大型公共建筑的建设也得到了空前的发展，涌现出了像金茂大厦，上海大剧院等一批体现中国民族特色和时代气息，结构设计和施工技术体现科技和工程新发展，并具有强烈先进示范性的钢结构建筑，但也涌现出了与国际上倡导的可持续发展理念背道而驰、与国家基本建设原则背道而驰、与钢结构“轻、快、好、省”理念背道而驰的工程。

2007 年建成的国家大剧院（图 1），为了追求建筑效果，竟在歌剧院、音乐厅和戏剧场三幢独立的建筑上用具有装饰功能的椭圆形半球壳体覆盖，用钢指标达 $263\text{kg}/\text{m}^2$ ，建成后维护也较不方便。

2008 年建成的鸟巢（图 2），建筑师为了实现杂乱无规律的外表图像，忽略结构受力合理性，采用交叉平面桁架结构体系，致使交汇于菱形内柱腹杆的数量多达 13 根，被迫采用非常复杂的空间扭曲构件，受力最大的部位不得不采用 Q460、厚度达 110mm 的厚钢板，用钢指标达 $712\text{kg}/\text{m}^2$ 。

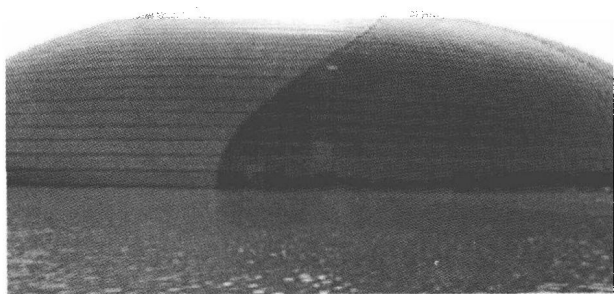


图 1 国家大剧院

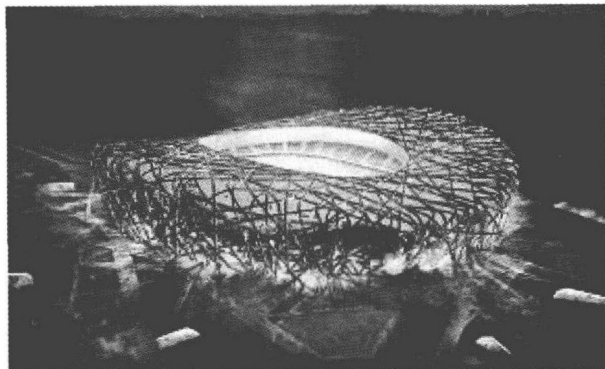


图 2 鸟巢

2008 年建成的水立方（图 3），独特的网架构件布置，使 2 万根构件、1 万个节点各不相同，施工图纸达 3 万多张，绘制费时 1 年，大大增加了制作难度和制作费用。

2009 年建成的 CCTV 主楼（图 4），建筑方案为高空大悬挑 75m 的倾覆性不平衡体型，结构设计则要扶其不倒，用钢指标达 $296\text{kg}/\text{m}^2$ 。该设计所追求的整体前倾且在高空悬臂外伸 75m 的奇特建筑造型给人以震撼的视觉。

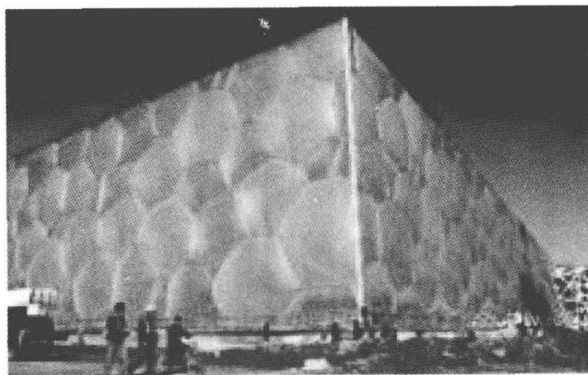


图 3 水立方

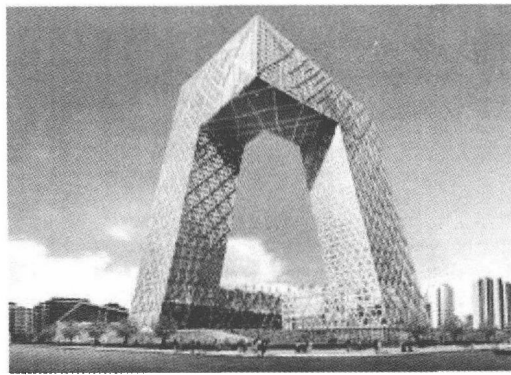


图 4 CCTV 主楼

2010年5月建成的广州歌剧院（图5），造型为圆润双砾的大石头，由64个面、41个转角、104条棱线倾斜交错组成不规则折面，形成没有面对称，没有一个节点相同的异型形体。所采用的空间折板式三向斜交单层网格结构体系力学性能和经济性都不优越，杆件任意交错，节点极其复杂，全部采用铸钢节点，单个节点最大重量达到39t。整个结构总用钢量约1.2万t。由于设计是完全无规律的组合，所以每一个节点从制造到安装都要空中三维定位，每一个杆件都要分段铸造再现场拼接，施工难度比起鸟巢“有过之而无不及”。

2010年6月封顶的深圳证券交易所营运中心（图6），高245m，由塔楼和“漂浮平台”两部分组成。立柱型大厦的底座被抬升至30多米高，形成巨大的“漂浮平台”，其东西向悬挑36m，南北向悬挑22m，是世界上最大的悬挑结构，成为“世界上最大空中花园”。“漂浮平台”单个节点最大重量达171t，总用钢量2.8万t，整个工程用钢量约4.2万t，比深圳地王大厦多1.75万t。为了解决在30多米高空悬空建造奇特建筑造型的施工难题，使用了国内最大的两台塔式起重机，并首次在国内民用钢结构工程采用砂箱卸载技术。

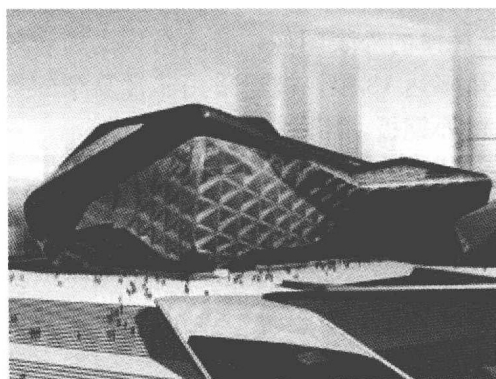


图5 广州歌剧院

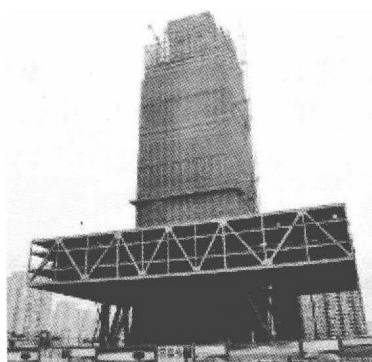


图6 深圳证券交易所营运中心

2010年8月封顶的大连国际会议中心（图7），形似一只大海龟。建筑设计追求解构主义，导致结构方案极其复杂而无规律，形成了多支撑筒体大悬挑大跨度复杂空间体系，其特点为“二大、三多”——大悬挑：平台桁架周边（长700m）均为悬挑结构，最大悬挑长度40m。大跨度：由17个分布不均匀的竖向筒体支撑平台和屋盖层，屋盖跨度最大达110m。竖向承载构件转换多；钢结构类型多，包括箱形结构，管桁架结构，大悬挑桁架结构，大跨度桁架结构，空间倾斜柱，空间方管柱等。形式各异的节点数量多，达8.5万个。钢结构的用钢量达3.5万t。整个工程设计、制作和施工难度超过“鸟巢”和“水立方”，被称为“在桌面上建房子”。

将于2010年年底竣工的合肥创新展示馆（图8），设计创意来自游戏棒，由346根长短不一的钢管岸形成乱向自由分布的交叉杆棚罩，被称为“合肥版鸟巢”。钢结构杆件无一相同，分布复杂，最多处

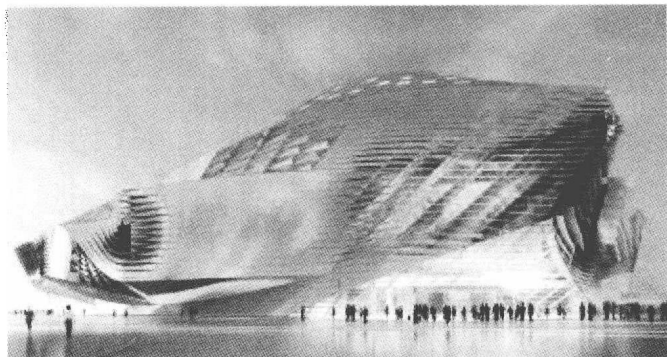


图7 大连国际会议中心

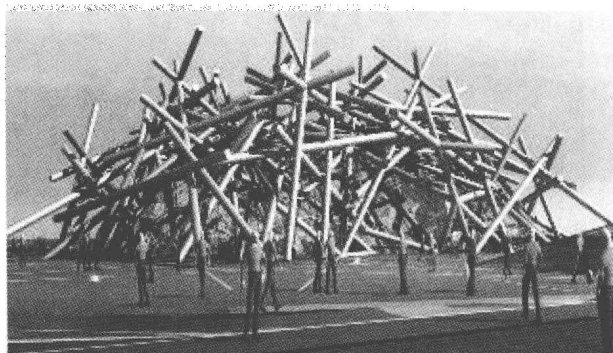


图8 合肥创新展示馆