

建筑结构新规范系列培训读本

Understanding and application

OF

Technical specification for space frame structures

空间网格结构技术规程 理解与应用

(按JGJ 7—2010)

赵鹏飞 主编 刘 枫 副主编 >>>

中国建筑工业出版社

空间网格结构技术规程 理解与应用

赵鹏飞 主 编

刘 枫 副主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

空间网格结构技术规程理解与应用/赵鹏飞主编. —北京: 中国
建筑工业出版社, 2012. 12
ISBN 978-7-112-14811-0

I. ①空… II. ①赵… III. ①空间结构-技术操作规程-研究
IV. ①TU399-65

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 249166 号

本书针对《空间网格结构技术规程》JGJ 7—2010 编写, 目的是使读者对此规程有比较系统、全面和清晰的了解, 并对设计人员应重点掌握及理解的内容进行详细的解析。

本书涵盖了《空间网格结构技术规程》JGJ 7—2010 的主要内容, 包括网格结构形式、结构选型、网格结构的静力与动力计算、杆件与节点的设计构造、制作与安装等, 最后附上典型算例。对于规程编制过程中所采纳的国内外理论与试验研究成果、先进设计与施工经验等, 结合规程条文进行了详尽的论述, 使读者可以尽快熟悉、运用相关条文, 而且对其产生的背景也有深入的了解与认识。

本书可供建筑结构设计与施工人员、科研人员、高校相关专业师生学习、参考。

责任编辑: 刘瑞霞 赵梦梅

责任设计: 董建平

责任校对: 肖 剑 陈晶晶

空间网格结构技术规程 理解与应用

赵鹏飞 主 编

刘 枫 副主编

*

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

北京科地亚盟排版公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18½ 字数: 460 千字

2013 年 1 月第一版 2013 年 1 月第一次印刷

定价: 48.00 元

ISBN 978-7-112-14811-0

(22869)

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

主 编：赵鹏飞（中国建筑科学研究院）

副主编：刘 枫（中国建筑科学研究院）

编 委：曹 资（北京工业大学）

严 慧（浙江大学）

马 明（中国建筑科学研究院）

汤荣伟（中国建筑科学研究院）

杜义欣（中国建筑科学研究院）

前 言

空间网格结构自 20 世纪 60 年代初在我国开始得到应用。经过几十年的发展,网格结构的形式日趋丰富,应用范围也愈来愈广,已成为钢结构的一个重要分支。

为了规范这种结构形式的应用,我国先后颁布了《网架结构设计施工规定》JGJ 7—81、《网架结构设计施工规程》JGJ 7—91、《网壳结构技术规程》JGJ 61—2003 等规程。这些规程使我国网架、网壳结构的设计与施工有据可依,对我国的空间网格结构发展起了很好的指导与促进作用。

《空间网格结构技术规程》JGJ 7—2010 将《网架结构设计施工规程》JGJ 7—91 和《网壳结构技术规程》JGJ 61—2003 结合起来,并充分反映了近年来网格结构在设计计算方法、节点与构造要求、制造与施工技术等方面的技术进步。

编写本书的目的是为了使广大技术人员了解和掌握《空间网格结构技术规程》JGJ 7—2010 的主要内容和背景资料,包括规程编制过程中所采纳的国内外理论与试验研究成果、先进设计与施工经验。本书对读者应重点理解和实际运用中应注意的一些问题进行了详细阐述。

本书的编排基本按照《空间网格结构技术规程》JGJ 7—2010 章节的顺序,最后附上典型算例。本书第 1 章由赵鹏飞和刘枫执笔,第 2 章由曹资、刘枫和王雪生执笔,第 3 章由严慧、马明、赵鹏飞、刘枫执笔,第 4 章由汤荣伟、杜义欣执笔,第 5 章由杜义欣执笔。全书由赵鹏飞定稿。

中国建筑科学研究院蓝天研究员审阅了本书的一些主要章节稿件,并提出了修改意见,在此表示深深的感谢。在编写过程中,中国建筑科学研究院钱基宏研究员等同志也提供了许多帮助,在此一并致谢。

在本书编著过程中,曾引用了同行专家论著中的成果。由于时间有限,难免有引用而未能详细说明出处的地方,敬请谅解。限于编写者的水平,书中可能存在疏漏或不当之处,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 总论	1
1.1 空间网格结构及其应用	1
1.1.1 平面结构及空间网格结构	1
1.1.2 空间网格结构的发展历史	2
1.1.3 空间网格结构的应用	5
1.1.4 空间网格结构的特点	14
1.2 《空间网格结构技术规程》的编制与修订	16
1.2.1 《空间网格结构技术规程》与网架、网壳规程的关系	16
1.2.2 《空间网格结构技术规程》编制与修订的主要内容	17
1.3 网格结构的形式	19
1.3.1 网架结构的形式	19
1.3.2 网壳结构的形式	28
1.3.3 立体桁架、立体拱架与张弦立体拱架的形式	33
1.4 网架结构的选型	34
1.4.1 周边支承的矩形平面网架	34
1.4.2 三边支承的矩形平面网架	36
1.4.3 多点支承网架	37
1.4.4 周边支承的圆形及多边形网架	37
1.4.5 组合网架结构	38
1.4.6 网格的高度与网格尺寸	39
1.5 网架结构的构造	42
1.5.1 网架屋面排水坡的形成	42
1.5.2 多点支承网架的柱帽设计	43
1.6 网壳结构的选型	44
1.7 立体桁架、立体拱架和张弦立体拱架的选型	45
1.8 空间网格结构挠度的容许值	46
参考文献	46
第 2 章 空间网格结构计算	47
2.1 一般计算原则	47

2.1.1 基本假定与计算模型	47
2.1.2 计算方法分类	48
2.1.3 荷载与荷载效应组合简述	50
2.1.4 网格结构的几何不变性分析	52
2.2 静力计算	54
2.2.1 有限元法	54
2.2.2 连续化分析	71
2.2.3 组合网架计算	85
2.3 稳定性计算	87
2.3.1 网壳结构屈曲类型与计算方法分类	87
2.3.2 网壳结构全过程有限元分析方法简介	90
2.3.3 网壳结构弹塑性稳定性能影响因素分析	92
2.3.4 网壳结构极限承载力安全系数 K 取值	96
2.3.5 单层网壳稳定性实用计算公式	97
2.4 地震作用下的内力计算	101
2.4.1 网格结构动力特性与地震响应分析理论	101
2.4.2 网格结构地震效应分析中的几个问题	124
2.4.3 双层柱面网壳结构地震响应	130
2.4.4 抗震计算原则	136
2.4.5 网格结构抗震简化计算	138
2.5 网格结构与下部支承体系相互作用	142
2.5.1 网壳结构与支承体系静力相互作用	143
2.5.2 网壳结构与支承体系动力相互作用	146
2.5.3 简化计算与结论	147
参考文献	149
第3章 杆件和节点的设计与构造	151
3.1 杆件设计	151
3.1.1 杆件常用材料及截面形式	151
3.1.2 杆件设计原则	151
3.1.3 杆件的计算长度	153
3.1.4 杆件的容许长细比	154
3.2 焊接空心球节点	154
3.2.1 空心球节点的构成	154
3.2.2 焊接空心球节点承载力设计值的计算	156
3.2.3 焊接空心球节点构造要求	159

3.3 螺栓球节点	160
3.3.1 螺栓球节点的构造与材料选用	160
3.3.2 螺栓球节点的设计	165
3.4 嵌入式毂节点	168
3.4.1 嵌入式毂节点的构造特点及材料选用	168
3.4.2 嵌入式毂节点的设计	169
3.5 铸钢节点	172
3.5.1 铸钢材料	172
3.5.2 铸钢节点的设计	175
3.6 销轴式节点	178
3.6.1 设计方法	178
3.6.2 构造要求	180
3.7 组合结构的节点	181
3.8 预应力索节点	183
3.8.1 一般规定	183
3.8.2 张弦立体拱架刚性撑杆与索的连接节点	187
3.8.3 锚固节点	187
3.9 支座节点	188
3.9.1 支座节点的设计原则	188
3.9.2 平板支座节点	188
3.9.3 单面弧形支座节点	191
3.9.4 双面弧形压力支座节点	193
3.9.5 球铰压力支座节点	196
3.9.6 板式橡胶支座	198
3.9.7 抗水平力铰支座	202
3.9.8 支座节点构造要求	202
参考文献	203
第4章 制作、安装与交验	205
4.1 制作与拼装	205
4.2 高空散装法	211
4.2.1 工艺特点	212
4.2.2 技术要点	213
4.3 分条或分块安装法	215
4.3.1 工艺特点	215
4.3.2 技术要点	215

4.4	滑移法	216
4.4.1	单元滑移法	216
4.4.2	滑架法	218
4.4.3	技术要点	219
4.5	整体吊装法	224
4.5.1	工艺特点	224
4.5.2	技术要点	225
4.5.3	工程实例	229
4.6	整体提升法	230
4.6.1	工艺特点	230
4.6.2	技术要点	231
4.6.3	工程实例	234
4.7	整体顶升法	237
4.7.1	工艺特点	237
4.7.2	技术要点	237
4.7.3	工程实例	238
4.8	折叠展开式整体提升法	239
4.8.1	基本原理	239
4.8.2	施工步骤	240
4.8.3	主要施工设备及控制系统	241
4.9	组合空间网格结构施工	243
4.9.1	钢筋混凝土板的施工	243
4.9.2	组合网格结构的安装	243
4.10	交验	243
4.10.1	验收文件	243
4.10.2	几何尺寸的检测	244
4.10.3	挠度控制	244
	参考文献	245
第5章	工程算例	246
5.1	平板网架	246
5.1.1	工程概述	246
5.1.2	结构布置与计算模型	246
5.1.3	荷载及荷载组合	247
5.1.4	动力特性	248
5.1.5	截面优化设计及应力比分布	249

5.1.6	位移校核	253
5.1.7	螺栓球节点设计	253
5.1.8	施工图设计	254
5.2	柱面网壳	261
5.2.1	工程概述	261
5.2.2	结构布置与计算模型	261
5.2.3	荷载及荷载组合	262
5.2.4	动力特性	263
5.2.5	截面优化设计及应力比分布	265
5.2.6	位移校核	269
5.2.7	焊接球节点及支座设计	269
5.2.8	施工图设计	269
5.3	立体桁架	272
5.3.1	工程概述	272
5.3.2	结构布置与计算模型	272
5.3.3	荷载及荷载组合	273
5.3.4	动力特性	276
5.3.5	截面设计及应力比分布	280
5.3.6	位移校核	280
5.3.7	节点、支座设计	280

第 1 章 总 论

1.1 空间网格结构及其应用

1.1.1 平面结构及空间网格结构

平面结构的特征是：在计算时假定它们所承受的荷载以及由此而产生的内力和变形都是两个方向的（力学上称为“二维”），即在一个平面之内。常用到梁、桁架、拱等都属于平面结构。平面结构由于荷载传递路线长，受力不均匀导致不能充分发挥材料的强度。

空间结构是一种具有三维空间形体，且在荷载作用下具有三维受力特性的结构。用一般二维的假设就无法得到准确的解答，计算上也要复杂得多。通过合理的曲面形体，空间结构可以有效地抵抗外荷载的作用。

现在我们通过以下简单的例子来说明空间结构的概念。例如，在一个方形平面的建筑物上需要设计屋盖结构，图 1.1.1 表示了两种不同的做法：（1）是在屋盖上布置了一组平

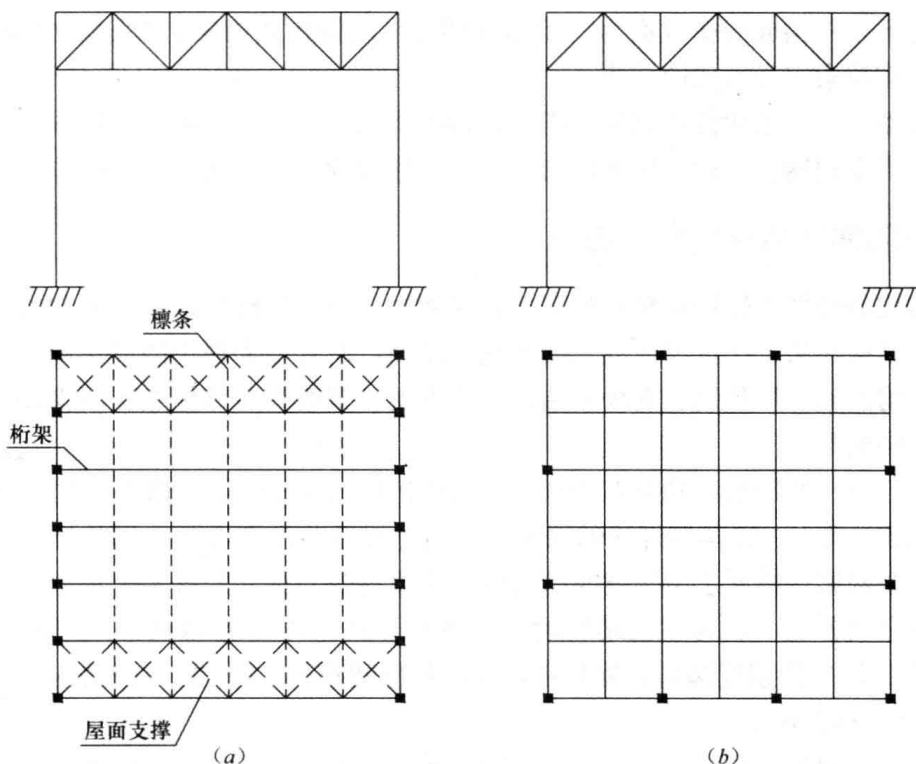


图 1.1.1 平面屋盖结构的不同做法

(a) 平面结构；(b) 空间结构

面桁架,每榀桁架独自承受各自的荷载,并传到两端的柱子上。为了保证屋盖的整体稳定,在桁架之间还要设置檩条和屋面支撑系统。(2)是将桁架互相垂直地放置,形成两向正交正放的网架结构。这时,两个方向的桁架就不是单独受力,而是作为整体共同承受荷载,并将之传到周边的柱子上。由于荷载可以由两个方向的杆件共同分担,网架杆件中的内力一般要比平面桁架中的内力小些,高度也可以降低,从而更为经济。

平面结构和空间结构在荷载传递路径上也有差别。在平面结构中,力是经过次要构件传到主要构件,逐步地有顺序地传到基础:如檩条-次梁-主梁-柱-基础。因此,在平面结构中各种构件的最大特点就是具有一定的“级别”,这不但可以从它们的截面,也可以从它们所承担的荷载大小看出来。

与此相反,空间结构就不存在荷载的传递顺序。按照结构的三维几何状态,所有构件共同分担屋面上的荷载。荷载一旦作用在屋面的一点,所产生的力就扩散到周围的杆件中去。因此,组成空间结构的构件(或杆件)不具有如同平面结构那样的“级别”。

空间网络结构(space frame structures)是空间结构的一种,也是我国空间结构中发展最快、应用最广的结构形式。它是将杆件按一定规律布置,通过节点连接而成的一种空间杆系结构。《空间网络结构技术规程》JGJ 7—2010 中的空间网络结构主要针对网架、网壳(含单、双层)两类形式,也包括组合网络结构(含组合网架和组合网壳结构)、立体桁架(拱架)、张弦立体拱架等形式。

其中,“网架”为按一定规律布置的杆件通过节点连接而形成的平板型或微曲面型空间杆系结构,主要承受整体弯曲内力。“网壳”为按一定规律布置的杆件通过节点连接而形成的曲面状空间杆系或梁系结构,主要承受整体薄膜内力。“立体桁架(拱架)”是由上弦、腹杆与下弦杆构成的横截面为三角形或四边形的格构式桁架。“张弦立体拱架”则是由立体拱架与拉索组合而成的结构。

当平板型网架上弦构件或双层网壳上弦构件采用钢筋混凝土板时,构成了组合网架或组合网壳。当空间网络结构采用预应力索组合时形成预应力空间网络结构。

1.1.2 空间网络结构的发展历史

网架结构的杆件可以用多种材料制成,如钢木、铝、塑料等,而以钢制的管材或型材为主。这种结构在第二次世界大战之前出现在欧洲,而真正大规模的应用则是在战后。当时,网架结构以其工厂预制、现场安装、施工方便、节约劳力等优点在不少场合下取代了钢筋混凝土结构^[1-1]。

在中国,第一个网架结构是在1964年首次用于上海师范学院球类房的屋盖上,这个 $31.5\text{m}\times 40.5\text{m}$ 大小、以角钢焊成的网架,在当时似乎并没有引起人们的注意,谁也未曾料到这样一个网架竟掀起了中国空间结构发展史上新的一页。经过半个世纪的发展,网架结构已遍及全国各地,成为屋盖结构的一种主要形式。1992年以前,网架建成面积与耗钢量每年都以50%的速度递增。近几年,我国每年建成约1800幢网络结构,覆盖建筑面积 300万 m^2 ,耗钢量15万吨^[1-2]。

网架结构的发展一开始就和体育馆建设联系在一起。20世纪60年代中,当北京要酝酿建造新中国成立以来规模最大的首都体育馆时,唯一可供选择的屋盖方案就是钢结构的桁架或拱,而当时建造跨度近百米的钢结构在设计与施工方面也没有什么成熟的经验可资

借鉴。在此之前,美国加利福尼亚大学洛杉矶分校体育馆屋盖采用了 $91\text{m} \times 122\text{m}$ 的网架结构。这个体育馆以造型新颖、结构先进而引起人们广泛的兴趣。在研究了前人的经验之后,建设者们认为完全有可能利用中国自己的技术力量在首都体育馆工程建造第一个大跨度网架结构(图 1.1.2)。首都体育馆的建成证明了在大跨度体育馆中采用网架结构在技术上是成熟的,在经济上是合理的。因此,在以后建造的大跨度体育馆中就不断地采用网架结构,随之在一些中、小跨度的练习馆、田径馆、游泳馆、健身房中也大量地采用了网架结构。

网架结构的施工要比一般平面结构复杂,因为它在拼成整体之前还不能起空间作用,自从网架在大跨度体育馆上逐渐推广后,在施工中曾采用了多种多样的安装方法,并且创造了一系列具有中国特色的安装技术。早在 1970 年上海文化广场以及随之在上海体育馆等工程上曾成功地采用了就地拼装、整体起吊、高空移位的安装方法。在 20 世纪 70 年代,网架的安装技术不断发展提高,陆续采用了分条制作、高空滑移拼装、就地拼装、整体提升或顶升等安装方法,其主要特点是利用现有的提升设备,例如 1975 年在大同矿务局体育馆首先利用了多层建筑中升板用的提升机作为整体提升网架的工具。同年在江西上饶剧院工程采用了滑模提升的施工工艺,在滑升混凝土柱的同时把网架提升到屋顶。这些施工方法的改进与创新,对进一步在大、中跨度屋盖上推广应用网架起了有力的促进作用。

在网架结构发展的进程中,另一件起积极推动作用的事件是技术规范的编制与颁发,早在 1978 年,以中国建筑科学研究院为主的十多个设计、施工与教学单位即着手编制《网架结构设计施工规定》。当时结合规定中存在的问题曾进行了一系列理论、试验与调查研究。经过三年多的工作,这个规定终于由前国家建筑工程总局批准于 1981 年试行。它成为世界上第一个由国家颁发的网架结构技术规范,从此网架的设计与施工有了技术法规可以遵循。

在 20 世纪 80 年代初出现了生产网架结构的工厂。这些工厂分别生产焊接空心球与螺栓球节点的网架,使之逐渐走向专业化生产的道路。随着网架生产规模的不断扩大,网架生产厂家由几家发展为数十家,一些主要工厂的年产量由数百吨发展为数千吨。大多数工厂还能做施工图并到现场进行安装,从而形成了从设计、制作到施工安装的完整生产体系。这样就使网架作为一种产品纳入工业化、商品化的轨道,大大便利了用户,也使网架的生产效率与质量进一步得到提高。目前网架结构及其配套产品(如高强度螺栓、屋面板)已成为建筑业中的新兴行业。

网架结构的进一步发展并将其推向新的高度是在单层工业厂房中的应用。早在 20 世纪 80 年代,当唐山经受地震灾害重建时,考虑到网架具有优于一般平面结构的抗震性能,在唐山齿轮厂联合厂房、唐山机车车辆厂客车总装车间等工程中都采用了上万平方米的网架结构。其后网架结构在机械、化工、冶金、轻工、纺织等工业厂房中均有采用。由于它具有自重轻、柱网间距大、施工速度快等优点,在许多场合取代了传统的钢筋混凝土屋盖或梯形钢屋架。进入 90 年代,工业厂房中大面积的网架结构更是屡见不鲜,其规模也日益增大。如天津无缝钢管厂管加工车间总面积有 6 万多平方米,长春第一汽车厂轿车总装厂房面积达到创纪录的 8 万平方米。由此可见,中国在工业厂房中采用网架的规模在世界上也是罕见的,这也是网架结构久盛不衰的原因之一。

网架结构之所以蓬勃发展是由于它具有一系列的优点。首先是网架能起空间作用,由于所有的杆件都能参与工作而具有良好的受力性能,其刚度和整体性优于一般平面结构,

能有效地承受各种非对称荷载、集中荷载和动荷载。网架中所有杆件的整体受力在地震作用下也显示了它的优异抗震特性。

其次,网架结构的制作安装比较方便。杆件与节点都可以在工厂生产,使现场的工作量降至最低,同时也不需要复杂的技术,这就便于网架进行定型化与工业化的施工。加之,中国在网架施工中还创造了一些简便有效的安装方法,并有专业化的施工队伍进行安装。

网架结构也受到建筑师们的欢迎,它的平面布置灵活,不论是方形、矩形、圆形、多边形的建筑平面都可以用网架组成,并能满足建筑功能与造型的要求,尤其是对建筑功能有特殊要求的大跨度或大柱网的屋盖,其优越性更为突出。网架杆件和节点整齐而有规律的排列,也使设计者乐于将其外露而显示出建筑上美的韵律。近年来,网架还被用来与拱、斜拉索等共同承重,使它的外形更富于变化。

网架结构的代表性工程有北京首都体育馆(图 1.1.2),跨度 $99\text{m} \times 112.2\text{m}$;天津无缝钢管厂加工车间,双向多跨的平面尺寸为 $108\text{m} \times 564\text{m}^{[1-3]}$ 。首都机场四机位机库 $2 \times (90\text{m} \times 153\text{m})$,采用焊接球节点三层斜放四角锥平板网架(图 1.1.3),其跨度规模之大,在国际上也是罕见的。首都国际机场的 T3 航站楼也采用网架结构(图 1.1.4)。



图 1.1.2 北京首都体育馆

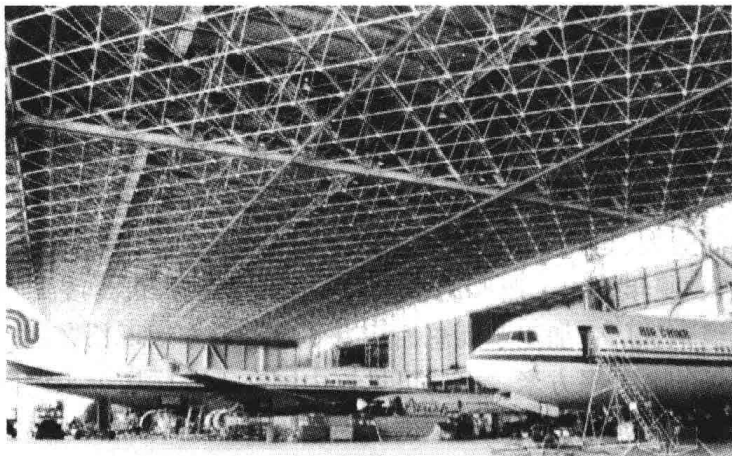


图 1.1.3 首都国际机场四机位机库



图 1.1.4 首都国际机场 T3 航站楼

人类很早就认识到壳体结构受力的合理性，它可以最小的表面封闭最大的空间。网壳结构的发展得力于其相对于混凝土薄壳结构的优越性：后者施工时需要大量的模板，制作困难，劳动量大，高空浇筑和吊装费工费时。值得一提的是，网壳结构不但被广泛应用于屋盖，还被应用于其他建筑物与构筑物上，如蓄水池、油库、水塔等^[1-4]。

在我国，网壳结构从 20 世纪 50 年代早期开始得到应用，最初的形式是跨度 30m 的筒壳，角钢是常用的截面形式。典型工程有扬州苏北农业学院体育馆和南京展览中心。早期的工程有 1956 年建成（1973 年重建）的天津市体育馆比赛厅，平面尺寸约为 $52\text{m} \times 68\text{m}$ ，采用联方型柱面网壳，杆件为角钢，用钢量为 $45\text{kg}/\text{m}^2$ 。网壳结构的飞速发展始于 1987 年，年增长速度最高可达 70%。近年来代表性的工程有：采用双层球面网壳的直径 108m 的天津体育馆（图 1.1.5）、采用双层圆柱面网壳的扬州电厂储煤库（图 1.1.6）、国家大剧院（图 1.1.7，肋环型空腹双层网壳）。

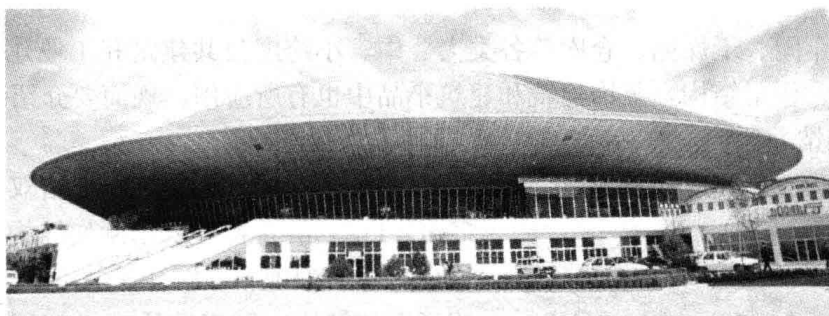


图 1.1.5 天津体育馆

立体桁架、立体拱架以其特殊的优势近年来在大跨空间结构中得到了广泛运用。张弦立体拱架是张弦梁的一种表现形式。张弦梁在我国的工程应用始于 20 世纪 90 年代后期。采用张弦立体拱架的代表性工程有：2002 年建成的广州国际会展中心的屋盖结构（跨度 127m）及哈尔滨国际会展中心屋盖结构（跨度 128m）。

1.1.3 空间网格结构的应用

空间网格结构的应用范围非常宽广，包括体育场馆、展览馆、大型商场、火车站房、

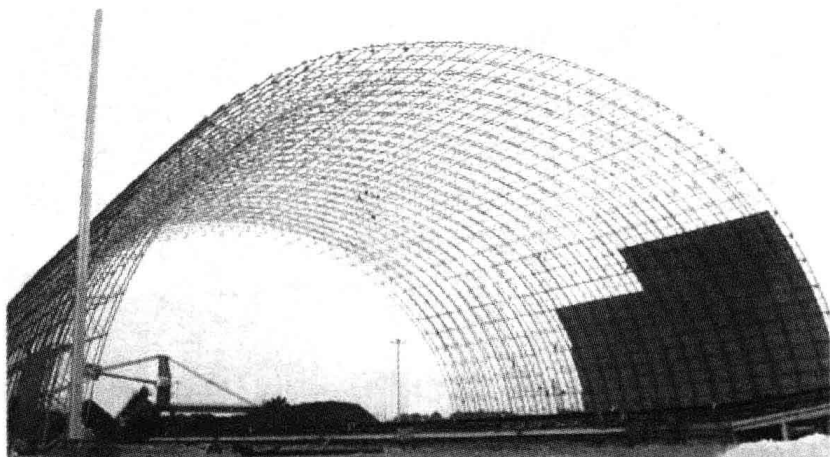


图 1.1.6 扬州电厂储煤库

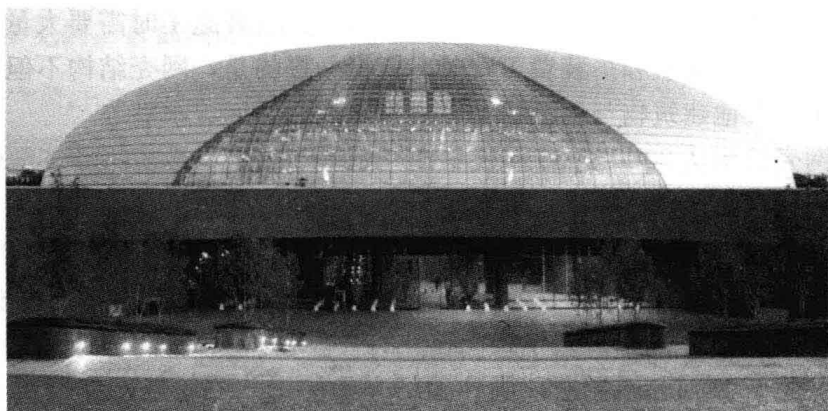


图 1.1.7 国家大剧院

飞机库、工厂车间、干燥棚、仓库等各类大、中、小跨度公共建筑和工业建筑；在楼层结构、墙体结构、桥梁结构，装饰建筑和建筑小品中也有所应用。现简要介绍如下：

1. 体育场馆

自 20 世纪 50 年代后期及 60 年代建成了 94m 直径的北京工人体育馆双层悬索结构和 99m×112.2m 首都体育馆网架结构后，全国各地像雨后春笋似地在大、中跨度体育场馆中广泛采用了网架结构、网壳结构等空间网格结构。如广州新体育馆主馆，采用 160m 跨度纵向立体桁架、径向平面桁架、环向主檩条及索支撑组成的杂交空间结构（图 1.1.8）。



图 1.1.8 广州体育馆

浙江黄龙体育中心体育场挑篷采用斜拉焊接球网壳结构（图 1.1.9）。它由吊塔、斜拉索、内环梁、焊接球网壳、稳定索和外环梁组成。网壳为类四角锥形式双层网壳，支承于由斜拉索吊拉的内环梁和框架柱支承的外环梁上，网壳最大跨度 50m；网壳上还设有 9 根稳定索，锚固

于外环梁外侧，内环梁采用箱形钢梁，两端点直线跨度 230m，其上挂有 18 根斜拉索；吊塔为外侧施加竖向预应力的钢筋混凝土筒体结构，高度达 85m，屋面材料为轻型压型钢板。



图 1.1.9 杭州黄龙体育场

2. 会展中心

随着会展经济的兴起，各地新建了一批会展中心。作为造型各异、空间要求灵活的公共建筑，网格结构是与之最为匹配的结构形式之一。有代表性的工程有：广州国际会展中心的屋盖结构（跨度 127m，图 1.1.10）、哈尔滨国际会展中心屋盖结构（跨度 128m，图 1.1.11）、广东东莞现代国际会展中心（采用 $154\text{m} \times 379\text{m}$ 斜拉网架结构，图 1.1.12）、宁波国际会展中心（主跨为 63m 的圆柱面正放四角锥网壳，图 1.1.13）。

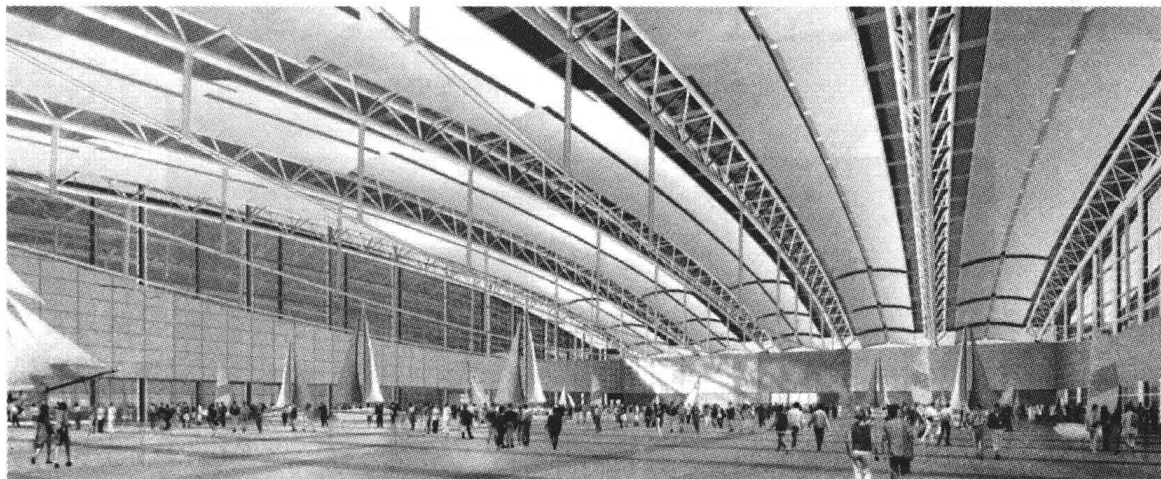


图 1.1.10 广州国际会展中心

宁波国际会展中心（图 1.1.13）主展厅的圆柱壳上弦的半径为 190m，矢高 35.5m。屋盖结构在横向分为三跨，中间主跨的跨度为 63m，两侧边跨的跨度均为 31.5m。屋盖的横向水平投影长度为 137.8m，纵向水平投影长度为 135m，总水平投影面积约 19000m^2 。