



尹德钰 刘善维 钱若军 合著

中国建筑工业出版社

网壳结构 设计

WANGQIAO JIEGOU SHEJI

ZHONGGUO JIANZHU GONGYE CHUBANSHE

网壳结构设计

尹德钰 刘善维 钱若军 合著



TU356
Y66

中国工业出版社

(京) 新登字 035 号

0293/57

本书全面介绍网壳结构的基本知识、理论概念和设计计算方法。内容紧密结合工程实际,首先介绍网壳结构在国内外的发晨状况,以及网壳结构常用型式和几何构成,然后论述网壳结构分析基本理论及其静、动力分析方法,包括非线性理论及稳定理论分析,提出了设计的临界荷载及安全系数,并有比较完整的设计实例。书中在计算机分析方法阐述中,提出了一个空间结构自动分析体系 AADS—DV 的源程序,可供直接应用。

本书内容考虑了设计、施工、科研、教学的需要,可供土建结构专业技术人员参考。



网壳结构设计
尹德钰 刘善维 钱若军 合著

*

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

顺义县天竺颖华印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 35½ 插页: 3 字数: 861 千字

1996 年 3 月第一版 1996 年 3 月第一次印刷

印数: 1—3, 200 册 定价: 37.50 元

ISBN 7-112-02629-6

TU·2003 (7718)

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 言

继刘锡良、刘毅轩等编著“平板网架设计”(1979年),刘善维、刘毅轩、钱若军等编著“网架结构设计手册”(1983年),沈祖炎、严慧、马克俭、陈扬骥等编著“空间网架结构”(1987年),董石麟、马克俭、严慧、苗春芳编著“组合网架结构与空腹网架结构”(1992年)后出版这一本“网壳结构设计”专著,非常及时,它将进一步丰富了空间网壳结构的宝库,对进一步推广空间结构起到重要的作用。前面已出版的几本专著都属平板类型的网架,本书是我国第一本空间网壳结构的专著,填补了关于网壳结构文献在我国的空白。

网壳结构在国外已很普遍,有不少建成的实例,在理论研究上也有不少成果。在我国不论在理论上或在实践上都刚起步,各高等院校、科研部门开始对网壳结构进行了计算分析和理论研究,有了些初步成果,发表了一些论文并培养出一批研究生。到目前为止我国已建成近百座网壳工程,积累了一定的设计和施工经验,当然,这与已建成近5000座平板网架相比还有很大差距。相信本书出版后将会很快促使网壳结构在我国能得到迅速发展。

本书的出版将会成为设计、制造和安装网壳结构的一本实用的参考书;网壳结构科学研究的资料详尽的文献;高等院校本科生和研究生的学习教材。

本书内容丰富、新颖、系统、齐全、深入浅出。作者积多年教学、设计、生产的实践经验及科研成果,阅读了大量国内外文献,付出了巨大的辛勤劳动,经历多年的不平凡的筹划和耕耘,终于写成了这本巨著。最后本人有幸对本书全稿进行细心的阅读与审校,认为这的确是一本有价值的空间结构文献。

书中除对网壳结构发展概况、常用类型、选型原则、基本计算理论、静动力非线性分析等进行常规系统的论述外,值得提出的是书中还用较大的篇幅对网壳结构的稳定分析(包括临界荷载和安全系数的确定)、网壳结构的静动力特性以及网壳结构的设计与实例进行了详尽地阐述;更值得注意的是本书对计算机分析方法及实施进行了专门的叙述,并提出了AADS—DV系统,这也是本书特色之一。

最后,让我代表广大读者对作者为编写本书付出的辛勤劳动和做出的卓越成绩表示衷心的感谢和祝贺。

天津大学教授、博士生导师

刘锡良 敬序

1994年4月1日

前 言

近几十年来,空间结构在世界范围内迅猛地发展,空间结构技术被誉为一个国家建筑业水平的象征。在国内外一些著名的城市不乏建筑造型艺术和结构技术都达到了出神入化境地的空间结构。久而久之,人们自然而然地,把这些优美的空间结构视为那个城市的标记。

在众多的空间结构中,网壳结构是一种既古老又年青的结构型式。网壳结构不仅因它的优美造型受到建筑师的青睐,也因其良好的结构性能为结构工程师所钟爱。国外对空间结构已进行了大量的工程实践,同时进行了系统、深入的研究,总结了不少分析和设计的经验,由此撰写出不少技术文献,这对设计网壳结构都是十分有用的。国内的学者和工程技术人员在推动网壳结构的发展同样功不可没。然而,在国内迄今尚未见到系统介绍网壳结构分析和设计的专著。为了顺应国内推广网壳结构,便于科研、教学、设计、施工的需要,我们根据多年的教学、科研及设计的经验,参考国内外的科研成果,撰写了本书。

本书从筹划到完成已数度春秋,在这数年内,网壳结构的发展日新月异,因此,也数易其稿。但是,本书必须紧密结合工程实际需要的指导思想未变。我们尽量使本书的先进性和实用性共存,理论分析与设计方法并有,力求从浩如烟海的文献资料中提炼出有关网壳结构的基本理论和概念。由国内外已建成的那些生动的工程实例告诉读者:什么是网壳,哪些工程中可以应用网壳,有哪几种网壳,如何设计与分析网壳。诚然,网壳结构的分析涉及到一些比较高深的数学、力学概念,但读者也将会发现,设计网壳结构也并非深奥莫测。

本书在内容取舍和编排方面作过多次调整,目的是希望书中内容具有一定的系统性,使读者能从中掌握网壳结构的基本知识,对希望进一步深入了解的读者,也可从书中所提供的基本概念及资料、信息进行专题研究。本书首先详细介绍了网壳结构在国内外的发展状况,以及网壳结构工程中常用的型式和几何构成;然后详细阐述网壳结构分析的基本理论及其静、动力分析方法,尤其是非线性分析理论和方法。网壳结构的稳定分析是设计中的关键,本书介绍其不同的分析方法,提出了设计临界荷载及安全系数,以供工程师们参考。本书在网壳结构的静力性能分析上颇费笔墨,因为系统介绍网壳结构特性的文献并不多见,而且对许多读者来说,要掌握网壳结构的特性远不如梁、框架一类平面结构的静力特性那样简单。因此,书中第五章的图文是不无作用的。本书对大量国内外网壳结构设计的经验择善而从,对设计网壳结构时荷载的确定,杆件、节点和下部支承结构的设计方法等,是经过刻意考虑进行详细论述的。希望本书能有利于读者为进行网壳设计打下基础。

读者不难发现,虽然本书在对网壳结构的计算机分析方面作了详尽的阐述,并且提供了空间结构自动分析系统 AADS—DV 的源程序,这是因为著者深深感到计算机方法的通用性和重要性,而且计算工具对结构理论的发展起了重大的推动作用,这是科技发展史上前所未有的。但是,著者同样认为,经典理论和方法也是很重要的。现代科技的进展大部

分是经典理论在新的条件下的实现。因此，本书对网壳结构的经典理论和方法同样不吝笔墨。至少，著者希望读者能通过本书有限章节进行的公式指导了解到问题的分析过程，及其模型的抽象与简化方法。此外，经典理论可以向读者提供一个对结构的宏观了解，这是十分有益的。

本书只是对网壳领域的初步总结和介绍，对网壳结构的深入研究尚涉及到网壳结构的弹塑性分析和稳定分析等等一系列理论问题，限于时间和篇幅，同时也考虑到理论的成熟性，本书未多涉及。以留待日后继续补充、完善。

我国在研究和大量应用网壳结构的历史不长，工程实践也不很多。限于水平和时间，本书难免有不足和欠妥之处。书中涉及到的一些观点和建议仅供参考。著者诚恳希望有关专家、学者、工程师和广大读者对本书批评指正。

本书引述了国内著名空间结构专家董石麟教授、曹资教授及其他一些著名专家的研究成果。他们的杰出成果无疑为本书增色生辉。本书成稿后又经我国著名空间结构专家、天津大学刘锡良教授审校。在此作者对诸位专家学者的帮助与不吝赐教，深表谢意。

本书在撰写过程中河海大学的夏绍华和周坚讲师协助进行了大量研究工作和程序调试，太原工业大学研究生聂国隼为本书计算了大量算例，煤炭部太原煤矿设计研究院王娟梅同志为本书精心绘制了大量插图。此外参加过其他工作的还有李亚材、胥传熹、石彦卿、高静萍、李梅旺、赵红花等。在此，作者一并表示感谢。

尹德钰 刘善维 钱若军

1995 年秋

目 录

序言

前言

第一章 网壳结构的发展	1
1-1 引言	1
1-2 网壳结构发展简史	4
1-2-1 网壳结构发展过程	4
1-2-2 网壳结构型式的发展	6
1-2-3 网壳结构材料的发展	17
1-2-4 我国网壳结构的发展	19
1-2-5 网壳结构分析计算方法的发展	22
1-2-6 网壳结构制作及安装方法的发展	26
1-3 网壳结构的优缺点	31
1-4 网壳结构的发展趋势	32
1-5 网壳结构的设计程序	37
第二章 网壳结构的类型及选型原则	39
2-1 型体	39
2-2 曲面的基本知识	41
2-3 曲面的形成方法	45
2-3-1 旋转法	45
2-3-2 平移法	45
2-3-3 曲面的切割与组合	49
2-4 网壳结构的构造型式和几何构成	54
2-4-1 单层球面网壳结构的型式	54
2-4-2 单层柱面网壳结构的型式	71
2-4-3 单层双曲抛物面网壳结构的型式	72
2-4-4 双层网壳结构的型式	73
2-5 网壳结构选型的一般原则	81
第三章 网壳结构的静、动力分析	85
3-1 网壳结构静力分析的一般原理和方法	85
3-2 弹性壳体理论基础	87
3-2-1 弹性壳体的基本概念及假定	87
3-2-2 平衡方程	88
3-2-3 几何方程	95
3-2-4 物理方程	100
3-2-5 边界条件	102

3-3 等效刚度	104
3-3-1 二维单元的等效刚度	104
3-3-2 球面网壳的结构比拟及其等效刚度的计算	109
3-3-3 圆柱面网壳的结构比拟及其等效刚度的计算	112
3-4 按薄膜理论分析网壳结构的拟壳法	115
3-4-1 球面网壳按薄膜理论的拟壳法	115
3-4-2 圆柱面网壳按薄膜理论的拟壳法	122
3-5 按有矩理论分析网壳结构的拟壳法	125
3-5-1 球面网壳按有矩理论的拟壳法	125
3-5-2 圆柱面网壳按有矩理论的拟壳法	135
3-6 网壳结构静力分析的有限单元法	140
3-6-1 引言	140
3-6-2 空间铰接杆单元	142
3-6-3 等截面直线空间梁单元	143
3-7 边界条件	146
3-7-1 边界约束的处理方法	146
3-7-2 斜边界约束的处理方法	147
3-7-3 网壳结构斜边界变换矩阵的计算	149
3-8 内力计算	152
3-9 欧拉角的计算	153
3-9-1 球面网壳	153
3-9-2 柱面网壳	154
3-10 温度应力、装配应力的计算	155
3-11 网壳结构的非线性分析	156
3-11-1 引言	156
3-11-2 梁—柱理论	157
3-11-3 非线性有限单元法	164
3-12 网壳结构的抗震分析	169
3-12-1 基本方程	170
3-12-2 振型分解反应谱法	172
3-12-3 时程法	174
3-13 网壳结构计算模型的比较和选择	178
3-13-1 球面网壳结构计算模型的比较和选择	178
3-13-2 双层柱面网壳结构计算模型的比较和选择	183
第四章 网壳结构的稳定分析	187
4-1 引言	187
4-2 网壳结构的失稳模态及影响因素	189
4-2-1 网壳结构的失稳模态	189
4-2-2 影响网壳的失稳因素	191
4-3 屈曲类型及平衡图形	192
4-4 结构稳定的能量准则	195
4-5 基于连续化假定的网壳结构稳定分析	200
4-5-1 壳体稳定理论基本概念	200

4-5-2 球面网壳临界荷载的近似计算	203
4-5-3 圆柱面网壳临界荷载的近似计算	209
4-6 基于离散化假定的网壳结构稳定分析	211
4-6-1 引言	211
4-6-2 网壳结构非线性平衡路线跟踪算法概述	213
4-6-3 网壳结构非线性平衡路线跟踪算法	214
4-6-4 判断因子及临界点的判断准则	231
4-7 设计临界荷载及安全系数	234
4-7-1 影响确定临界荷载理论值的因素	234
4-7-2 钢筋混凝土薄壳设计临界荷载及安全系数	235
4-7-3 网壳结构设计临界荷载及安全系数	239
第五章 网壳结构静力特性	243
5-1 引言	243
5-2 双层柱面网壳的静力特性及影响因素	244
5-2-1 双层柱面网壳的静力特性	244
5-2-2 边界条件对双层柱面网壳静力特性的影响	252
5-3 单层柱面网壳的静力特性	259
5-3-1 单层柱面网壳的位移及内力比较	259
5-3-2 长壳的静力特性分析	280
5-3-3 筒拱的静力特性分析	291
5-3-4 短壳的静力特性分析	302
5-4 单层球面网壳结构的静力特性	310
5-4-1 单层球面网壳结构的位移	313
5-4-2 单层球面网壳结构的内力	335
第六章 网壳结构设计	376
6-1 引言	376
6-2 荷载	376
6-2-1 荷载的分类	376
6-2-2 雪荷载	377
6-2-3 风荷载	381
6-3 杆件设计	389
6-3-1 杆件材料	389
6-3-2 杆件截面形式	389
6-3-3 杆件截面设计	390
6-3-4 杆件的计算长度和容许长细比	395
6-4 网壳结构的节点设计	396
6-4-1 网壳结构节点的特性及分类	396
6-4-2 网壳结构的节点设计	405
6-5 网壳的下部支承结构设计	415
6-5-1 网壳下部支承结构的设计要求	415
6-5-2 球面网壳的下部支承结构	415
6-5-3 柱面网壳的下部支承结构	417
第七章 网壳结构工程设计实例	421

7-1 球面网壳工程	421
7-1-1 工程概况及原始资料	421
7-1-2 球面网壳的型式及网格划分	422
7-1-3 球面网壳节点空间坐标计算	423
7-1-4 球面网壳的内力分析	424
7-1-5 杆件截面设计	425
7-1-6 网壳整体稳定验算	427
7-1-7 节点设计	428
7-1-8 节点试验	430
7-1-9 部分施工图	431
7-2 柱面网壳工程	431
7-2-1 工程概况及原始资料	431
7-2-2 柱面网壳的选型及网格划分	432
7-2-3 柱面网壳节点的空间座标	434
7-2-4 双层柱面网壳的内力分析	434
7-2-5 杆件截面设计	439
7-2-6 节点设计	440
7-2-7 部分施工图	441
第八章 网壳结构计算机分析方法及实施	442
8-1 网壳结构分析及设计程序概述	442
8-2 AADS—DV 系统结构	445
8-3 总刚度矩阵的形成和装配	450
8-3-1 空间梁系总刚度矩阵	451
8-3-2 总刚度矩阵的装配及存储	452
8-3-3 网壳结构自动分析及设计程序 AADS—DV 总刚度矩阵装配与程序	456
8-4 数据前处理技术	459
8-4-1 网壳结构的形体分析及成形策略	460
8-4-2 网壳结构的指示矩阵法	460
8-5 AADS—DV 系统输入数据流及说明	466
附录	479
附录一 AADS—DV 系统源程序	479
附录二 型钢的规格、尺寸及截面特性	524
附录三 轴心受压构件的稳定系数	540
本书主要符号	549
名词索引	551
人名对照及索引	553
参考文献	555

第一章 网壳结构的发展

1-1 引言

建筑结构通常分为平面结构和空间结构两大类。平面结构如梁、桁架、拱和刚架等，虽然在技术上比较成熟，应用很广，但是，自本世纪以来，大跨度、大空间的建筑在许多国家中得到了迅速发展；这是随着人类物质文明与精神文明的发展与提高，人们从事社会活动和生产需要建造大跨度的会堂、展览馆、体育馆、餐厅、飞机库、候车厅、工业厂房等建筑而促使的。平面结构从技术经济方面讲，很难跨越很大的空间，也很难满足建筑平面、空间和造型方面的要求。因此，从某种意义上说，大跨度建筑已成为现代生活中的重要组成部分，受到了世界各国建筑部门和研究部门的重视，开展了广泛的研究和探索。

解决大跨度建筑结构最具有竞争性的结构就是空间结构。所谓空间结构是指：结构的形体成三维状态，在荷载作用下，具有三维受力特性并呈空间工作的结构。在目前的实际工程中，空间结构可分为以下几种类型：薄壳结构、网壳结构、网架结构、悬索结构、折板结构、膜结构以及由上述某二种或几种组成的组合结构。详细观察自然界的一些物体，用仿生的原理可以更好地理解和发展空间结构。图 1-1-1 列出的几种动物和植物都是以空间结构形式出现的。蛋壳、鸟类的头颅是一种受力性能很好的薄壳机构；蜂窝类似空间网格结构；蜘蛛网是一种典型的悬索结构；棕榈有褶皱的叶子如同折板结构；肥皂泡是一种膜结构。

相对于平面结构，空间结构的特点是受力合理，刚度大，重量轻，造价低，结构形式新颖丰富、生动活泼，可以突出结构美而富有艺术表现力。用钢量低是空间结构尤为突出的特点。1963 年美国著名教授、建筑师司密斯 (Smith, M. G) 对 11 种、166 个已建成的大跨度钢结构工程实例进行统计分析，用相应跨度的用钢量指标为评价标准，几种结构的用钢量如图 1-1-2 所示。从图中可明显看出：当跨度不大时；这几种结构的用钢量相近，而随着跨度的增加，结构的用钢量成为离散的曲线。网架和不同形式的网壳结构均较平面结构节省钢材，尤以网壳结构用钢量最少。

空间结构对于现代建筑已产生了重大影响，许多设计师认为：“目前我们正处于一个重大的建筑革命前夜，它标志着从过去的二维结构改变为现在和将来的三维空间体系”，“三维结构愈来愈多地代替二维结构”。世界各国已建造了大量的、跨度从十几米到二百多米不同类型的空间结构。空间结构不但被公认为社会文明的象征，而且由于空间结构采用了大量的新材料、新技术和新工艺，因而成为反映一个国家建筑科学技术水平的标志。例如，在北京举行的亚运会，新建的 22 幢体育场馆屋盖，大多数采用了大、中跨度的网架结构、网壳结构、悬索结构和组合空间结构等。这些空间结构造型新颖，形式各异，技术先进，功能良好，集中体现了我国大跨度空间结构技术发展的新水平，为国家增添了光辉和荣誉。

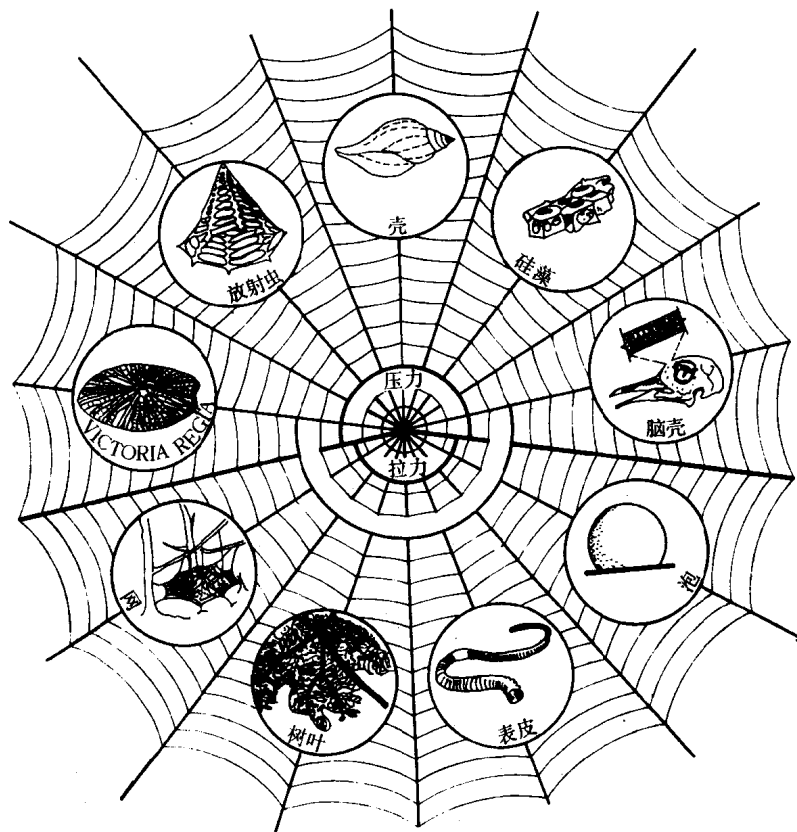


图 1-1-1 自然界的动物和植物的空间结构形式

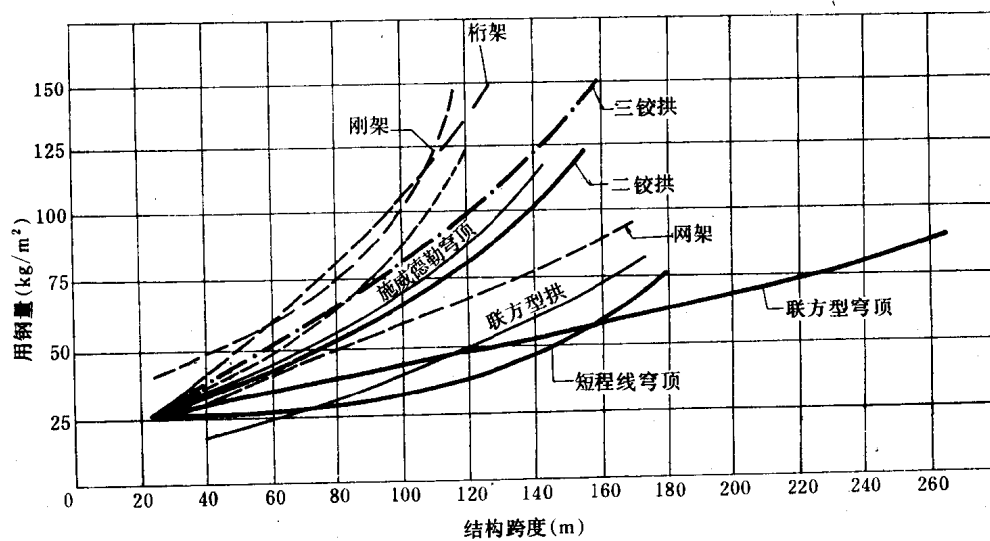


图 1-1-2 结构用钢量比较

随着国家经济建设的发展和物质条件的改善,空间结构必将进一步得到发展。

近半个世纪以来,发展最快、应用最广的空间结构是空间网格结构,空间网格结构主要是网架结构和网壳结构。空间网格结构是由于标准化而出现建筑构件工厂预制和工业化生产体系后发展起来的大型结构。它是采用离散的线状构件,通过特定的节点,按照建筑形体要求和一定的规律,组装成的三维连续体结构体系。当网格结构为平板型时即为网架结构(图 1-1-3),当网格结构为曲面形状并具有壳体的结构特性时即为网壳结构(图 1-1-4)。

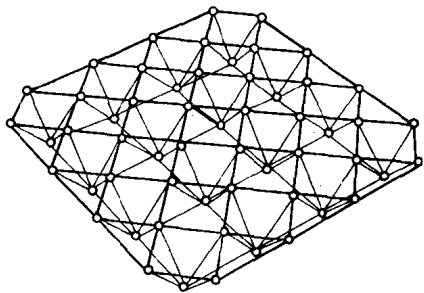


图 1-1-3 网架结构

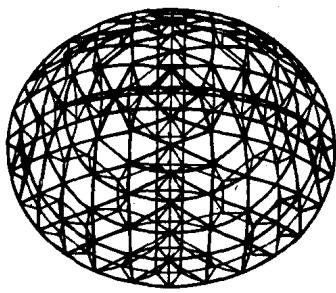


图 1-1-4 网壳结构

网壳结构的主要特点:

1. 网壳结构是采用大致相同的格子或尺寸较小的单元沿曲面有规律地布置而组成的空间杆系结构。当格子或单元的尺寸与结构整体尺寸相比为很小时,该结构大多具有各向同性或各向异性的连续体性质。因此,可以用连续体概念理解其力学特性,比较成熟的连续体钢筋混凝土薄壳的分析方法,对于网壳结构的发展起了很大的推动作用。

2. 网壳结构各构件之间没有鲜明的“主次”关系,各构件作为结构整体按照立体的几何特性,几乎能够均衡地承受任何种类的荷载。网壳结构的杆件主要承受轴向力,所有的杆件在荷载作用下随时随地承受各自应承受的作用力,所以内力分布比较均匀,应力峰值较小;也就是说,组成网壳结构的所有杆件在一个整体中协同工作。一般说来,整体作用会大于单个构件作用的和。因此,网壳结构的轻型化是它的重要特征。这一特征为建造大跨度或超大跨度结构带来了可能性,为运输、安装施工等带来了极大的方便。

3. 网壳结构的杆件可以用普通型钢、薄壁型钢、铝材、木材、钢筋混凝土和塑料、玻璃钢等制成,极易作到规格化、标准化,实现建筑构件的工业化大批量生产,从而把力学的合理性与生产的经济性结合起来,促成了经济的大跨度网壳结构的出现。

4. 大跨度空间结构是一种占据巨大空间的“庞然大物”,它具有改变其所在地区景观的很大影响力。因此,在选择结构方案时,既要重视材料的充分利用和良好的结构工作性能,又必须从美学上统盘考虑。网壳结构在这方面比其它类型的空间结构更具有吸引力,更能使设计师创造优美的“人造环境”。因为网壳结构具有非常丰富的建筑造型,无论是建筑平面或立面型体,都能给设计师以充分的设计自由和想象力;有时钢筋混凝土薄壳不能实现的形态,而网壳结构几乎都可以实现。网壳结构可以设计成外露的,也可以是内含的。由于网格的形式和大小、杆件的粗细、节点的形状等不同的配置,以及结构周边合理的处理,都可以使结构具有明暗对比,有韵律性,体现出动态感和静态感,从而把建筑美与结构美

有机地结合起来，而多种多样的合理形体与其周围环境谐调起来。

5. 在网壳结构中，节点具有特殊的作用和重要性，因为每个节点上连接的杆件很多，各杆件处于空间位置，是多方位的；通过节点传递三维力流也很复杂。因此，节点构造的合理性与可靠性，同网壳结构的整体工作性能、形体变化、施工安装的简易性与经济性是紧密相联的。目前国内外都已设计、生产出了几十种适用于网壳结构的节点，为网壳结构的应用与发展开辟了广阔的前途。

1-2 网壳结构发展简史

1-2-1 网壳结构发展过程

网壳结构的发展曾经历了一个漫长的历史演变过程，早期的穹顶如图 1-2-1 所示。

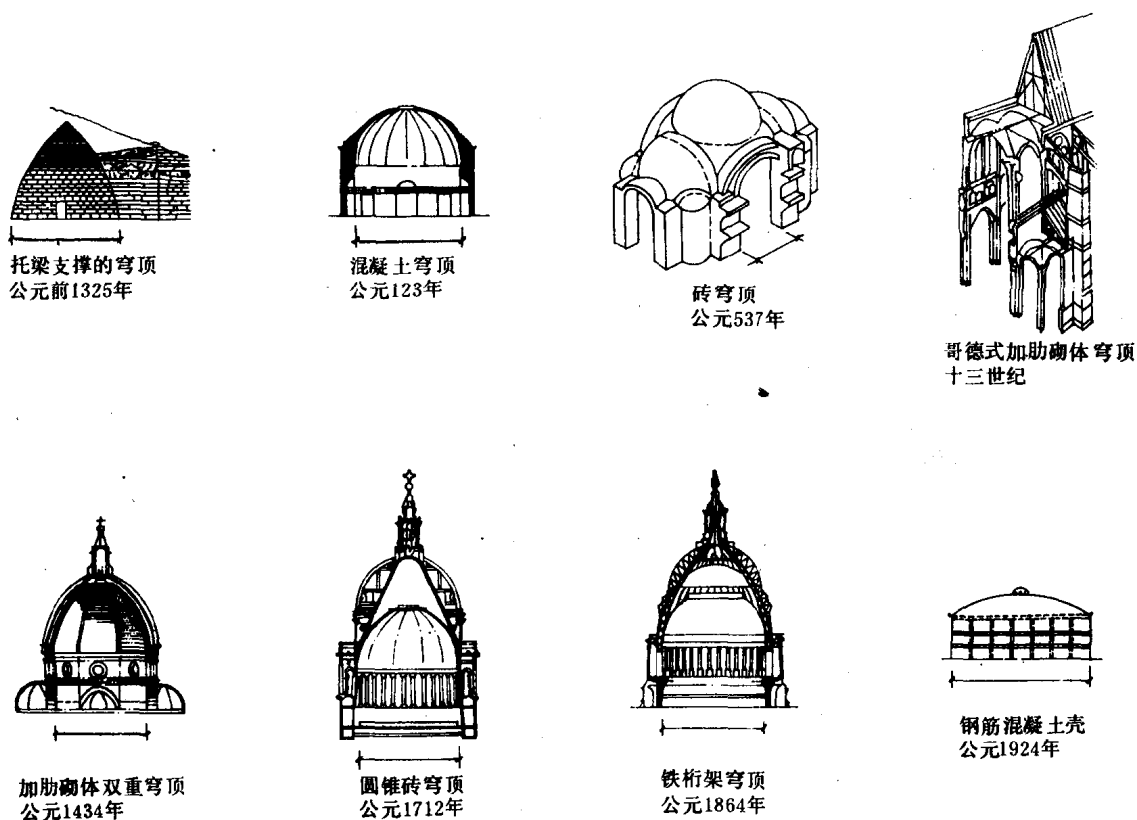


图 1-2-1 早期的穹顶

古代的人类为了生存，以稻草等构筑成穹顶居住，甚至某些鸟巢也筑成穹窿。实际上，人类很早就认识到穹窿具有最小的表面，封闭最大的空间，结构耗用的材料也是比较经济的。

网壳结构的发展是和人类生活、生产的需要，科学技术水平以及物质条件紧密相连的。

我国古代寺庙中的无梁殿,古罗马大量的宗教建筑多采用石料或砖建造圆形或圆柱形穹顶,这些穹顶的跨度都不大,一般在30~40m以内,厚度与跨度之比在1/10左右或更大,自重也很大。17世纪虽然已将生铁用于承重结构,但到18世纪,才将生铁结构用于教堂的圆屋顶。19世纪初,出现了轧制型钢和铆钉连接方法,19世纪80年代,发明了焊接技术,钢穹顶得到了广泛地应用。1863年由施威德勒(Schwedler, J. W)设计,在德国柏林建造了第一个钢穹顶,用于煤气罐的顶盖。不过,这个时期建造的钢穹顶主要是肋形或肋环形穹顶,其形式是以若干圆拱汇交到一个顶环上形成辐射形的体系,有时再配置一些同一方向的斜杆。许多其它形式的穹顶,多半都是以施威德勒型穹顶为基础加以变化构成的。

当钢筋混凝土结构出现之后,薄壳结构受到了人们极大的重视。1920年德国真纳(Jena)城的蔡斯(Zeiss)工厂建造了四点支承的筒壳屋盖。1924年德国建造的耶拿天文馆钢筋混凝土穹顶,其厚跨比只有1/420,被认为是第一个真正的薄壳结构。薄壳结构与传统的平面结构相比,其造型灵活优美,传力路线直接,受力性能良好,因为壳体结构主要受压,可以更合理地利用混凝土材料的力学特性,可以将承重结构与围护结构的两种功能融为一体,达到厚度小,自重轻,覆盖大跨度空间,得到了广泛地应用。

第二次世界大战以后,特别是近40多年来,网壳结构再一次受到重视和飞速发展,主要原因是:第一、钢筋混凝土薄壳施工时需要大量的模板,制作困难,劳动量大,费用高,高空浇筑或吊装费工费时。而网壳结构在施工时,采用的是在工厂中预制的构件,重量轻,安装简易。第二、建筑构件的工业化为网壳结构的发展注入了强大的生命力,特别是发明了多种节点体系和自动化程度较高的生产方法,既提高了生产效率,降低了成本,又保证了安装精度。第三、薄壳的理论和计算方法在早期是基于连续化假定的拟壳法,该法即使不十分精确,但基本上解决了网壳结构的静力分析问题。随着电子计算机技术的不断发展,广泛应用于杆系结构的有限单元法和网壳结构的“成形技术”等更促进了网壳结构的应用和发展。

在网壳结构发展过程中,值得重视的是,它不但被广泛应用于民用与工业厂房的屋盖外,还被广泛应用于其它建筑物和构筑物上。例如蓄水池、污水处理池、油库、储煤仓等的顶盖以及冷却塔、水塔、雷达天线等。图1-2-2为日本松川地热发电站冷却塔,其最大直径和高度均约为45m。图1-2-3是墨西哥建造的旋转双曲面体水塔。为了保护环境或冬季防冻,储煤仓(场)应加顶盖,加拿大一储煤仓的顶盖采用了联方型球面钢网壳,壳体直径64m,底平面直径56.39m,矢高13.72m,在设计荷载中,最大雪载达 219.7kg/m^2 ($\approx 2197\text{N/m}^2$),最大风速 $128.8\text{k}\cdot\text{p}\cdot\text{h}$ 。图1-2-4为日本广岛府热电站的15万吨储煤仓顶盖,直径为120m,是一联方型球面双层钢管网壳。

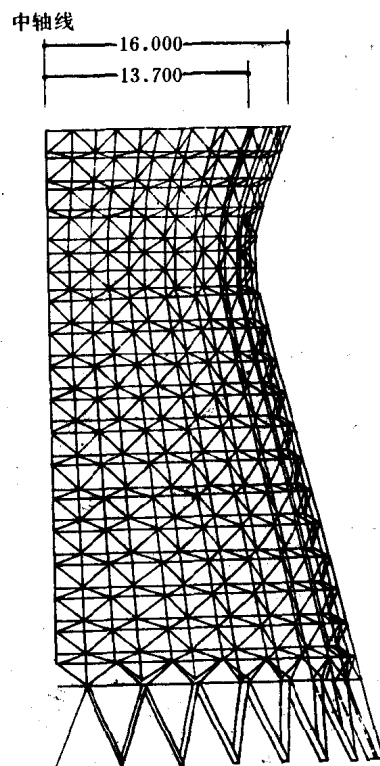


图 1-2-2 日本松川地热发电站冷却塔

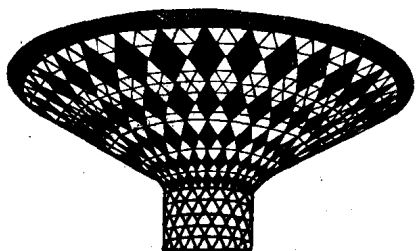


图 1-2-3 旋转双曲面体水塔

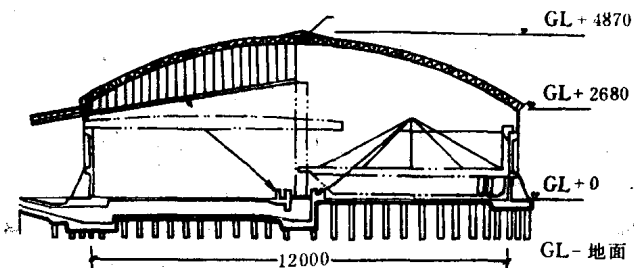


图 1-2-4 日本广岛府热电站储煤仓

1-2-2 网壳结构型式的发展

早期网壳结构的建筑平面多为圆形，结构为半球形，用于宗教建筑、政府建筑、纪念堂、体育馆、剧院和博览中心等。半球形网壳为同向曲率，易于制造和施工；从受力情况看，支座上只有垂直方向的反力而无推力；半球形可以封闭没有支柱的最大空间；当有观众席时，圆形平面可以布置更多的座位，辐射形的通道对出入口的人员流通也最有效，特别是这种建筑显得高大、雄伟、美观。但随着科学技术的进步和人们不断的探索与创新，网壳结构的形式逐步多样化，日新月异。

1. 肋型、肋环型和施威德勒型球面网壳

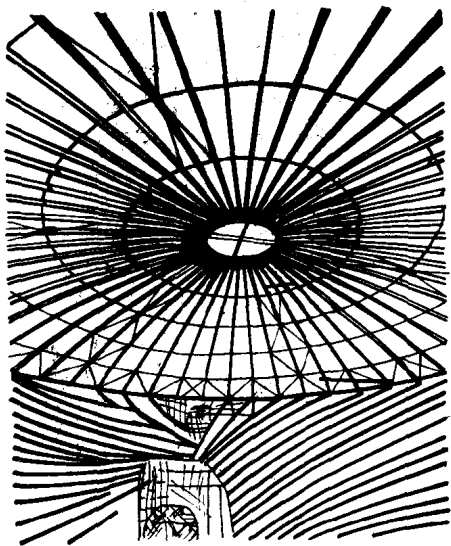


图 1-2-5 肋型穹顶

半球形结构最早为肋型穹顶(图 1-2-5)，它是按辐射方向设置若干平面肋构成的。肋可以是实腹的，也可以是格构的，下端支承于圆墙上，上端与中心的环形梁(或桁架)连接，当穹顶较小时，中心环可取消，各肋直接连在一起。肋与肋之间一般设置若干层环形檩条，上铺屋面板，檩条的另一作用是保证肋在平面外的稳定。当肋与中心环铰接而环的直径又不大时，每一对肋可视为三铰拱一样工作。肋型穹顶是推力体系，推力由墙结构或在肋的下部设置的支座环来承受。当肋为直线形时，可构成锥形穹顶，用于小跨度建筑。

球面穹顶在荷载作用下，除产生径向内力外，还产生环向内力，如把肋型穹顶的环形檩条与肋连成一个刚性体系时，檩条即可承受环向力，这种穹顶称为肋环型穹顶(图 1-2-6)。由于檩条参加工作，改善了结构的内力分布，减轻了

肋的重量。当肋与檩条均采用型钢时，结构更为简单。

德国工程师施威德勒于 1863 年对上述结构进一步发展和完善，提出了一种新的型式，

除了把经向肋与水平的折线环连在一起外, 为了加强这种结构和承受非对称荷载, 在每个梯形网格内再用斜杆分成二个或四个小三角形 (图 1-2-7)。这样内力顺着穹顶表面分布更为均匀, 使结构的重量进一步减轻, 并可建造更大跨度的穹顶。这种穹顶实际上是真正的网壳结构。目前, 网壳穹顶的型式虽然很多, 但基本上是从施威德勒穹顶发展起来的, 故施威德勒被誉为“穹顶结构之父”。

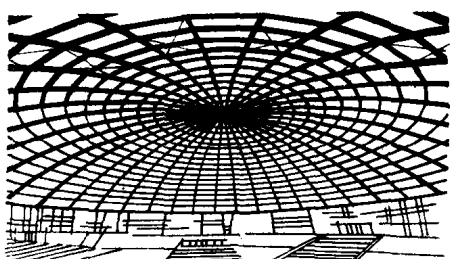


图 1-2-6 肋环型穹顶



图 1-2-7 施威德勒型球面网壳

2. 联方型球面网壳

在网壳结构中必须解决二个难点, 一是在每个节点上交汇的杆件数量尽量少, 二是每根杆件的长度和其它尺寸在整个结构中尽量相同或相差不多。为了解决这个问题, 德国建筑师佐林格 (Zollinger) 在 1906 年发明了联方型网壳。该种网壳的网格由两向斜交杆系构成, 基本单元是菱形, 网片夹角在 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间, 这种体系多用钢筋混凝土或木材建造 (图 1-2-8)。为了改善结构性能, 保证网壳的稳定, 通常再加设水平环向杆系, 这种体系主要用于金属网壳 (图 1-2-31)。联方型网壳在国内外得到了广泛的应用, 既适用于球面网壳, 也适用于柱面网壳。

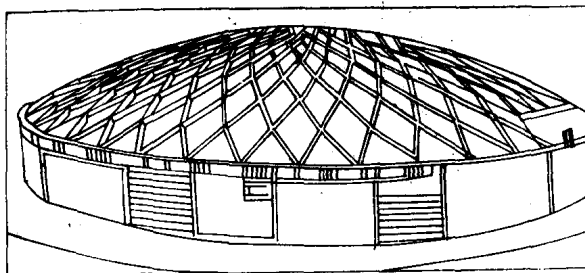


图 1-2-8 联方型木球面网壳

3. 凯威特型球面网壳

1925 年美国的凯威特 (Kiewitt, G. R) 博士将联方型网壳介绍到美国, 随后又加以改进, 综合了施威德勒型网壳、联方型网壳和三角形格子网壳分割的优点, 创造了一种新型网壳, 称为平行联方型网壳或凯威特型网壳。这种网壳结构的受力性能, 特别是在强烈风载和地震作用下的性能很好, 常用于大跨度结构。

目前世界上跨度最大的穹顶是 1973 年 7 月建成的美国新奥尔良体育馆, 可容纳观众