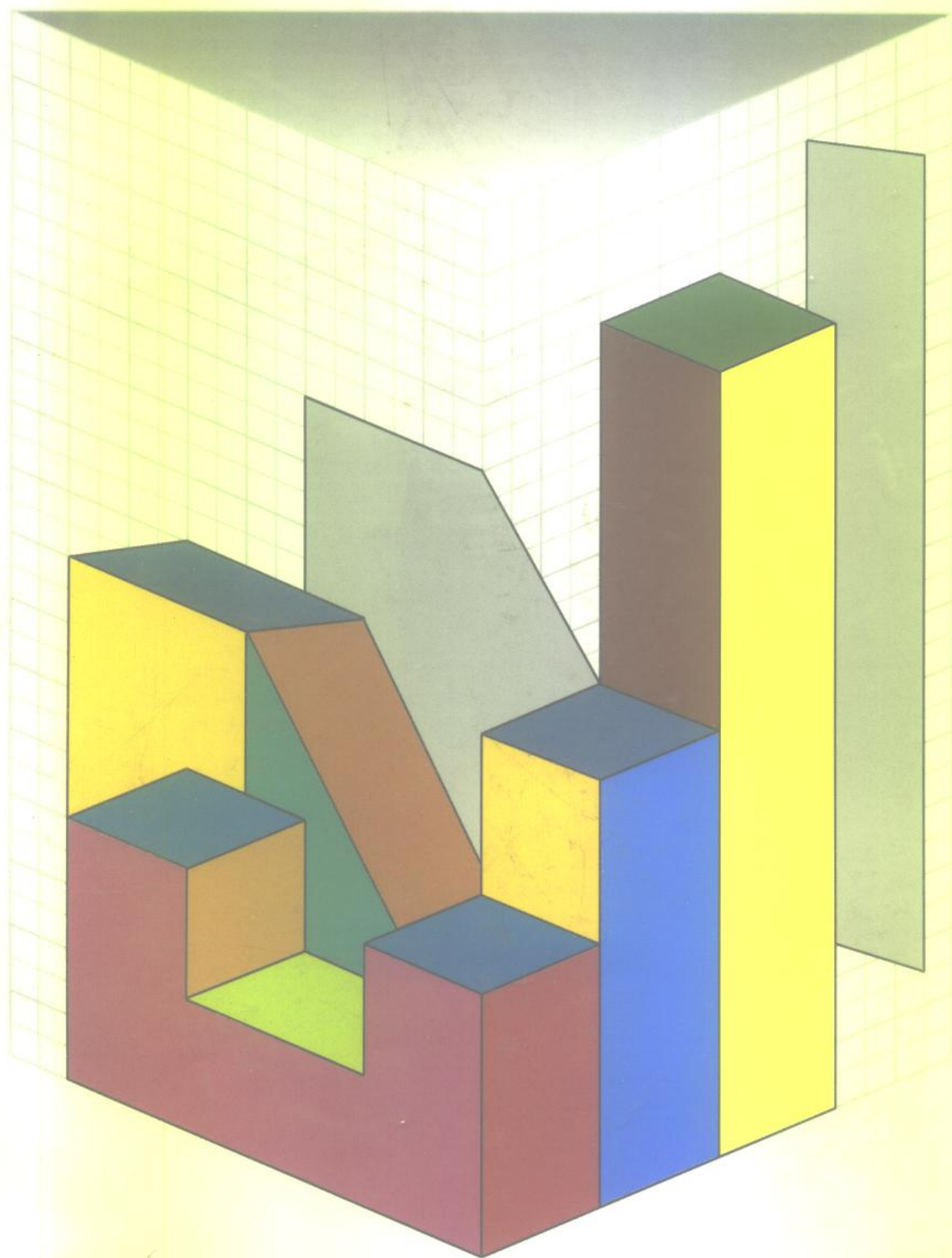




董石麟 钱若军 著

中国建筑工业出版社

空间网格结构分析理论与计算方法



70356
74
463379

国家科学技术学术著作出版基金资助出

空间网格结构 分析理论与计算方法

董石麟 钱若军 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

空间网格结构分析理论与计算方法/董石麟, 钱若军著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2000

ISBN 7-112-04181-3

I. 空… I. ①董…②钱… II. ①空间结构: 网架结构-结构力学-分析 (力学) ②空间结构: 网架结构-结构计算 IV. TU356

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 13781 号

本书系统地介绍了空间网格结构分析理论和计算方法, 讨论各类空间网格结构的静力、稳定和动力分析的力学模型、计算原则与方法。全书共分五篇二十六章。第一篇共两章, 主要阐述空间网格结构的形式、分类和分析计算方法概论。第二篇共八章, 主要讨论空间网格结构按离散型计算模型, 以有限元理论的数值法进行分析。第三篇共十二章, 主要讨论空间网格结构按连续化计算模型, 以板壳结构的经典与非经典理论方法进行分析。第四篇共两章, 主要讨论空间网格结构的曲面表示和外形分析方法。第五篇共两章, 主要讨论蜂窝形三角锥网架结构、组合网架结构等一些空间网格结构的简捷计算方法。书中还给出了大量计算图表和多个工程算例。

本书可供土建专业的设计、科研、施工等科技人员使用, 也可作为高等院校土建专业高年级学生和研究生的教材。

责任编辑: 赵梦梅

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

空间网格结构
分析理论与计算方法
董石麟 钱若军 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

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 35 插页: 2 字数: 849 千字

2000 年 8 月第一版 2000 年 8 月第一次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 70.00 元

ISBN 7-112-04181-3
TU · 3283 (8979)

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

大跨空间结构是衡量一个国家建筑科学技术水平的重要标志之一，各国都十分重视大跨空间结构技术的研究、应用和发展。近一、二十年来，我国在大跨空间结构领域，包括网架结构、网壳结构、索网结构、组合网架结构和组合网壳结构在内的一类空间网格结构，得到了迅速的发展，取得了丰硕的科技成果，且创造出我国自己的特色，在体育馆、展览馆、大型商场、车站、飞机库、工厂车间、煤棚、仓库等建筑中应用十分广泛，为国家的建设起到了应有的作用。

由于空间网格结构迅速发展和实际工程应用的急需，广大科研、设计、施工和教学人员企盼并欢迎有一本系统阐述空间网格结构分析理论、计算方法和工程应用方面的书籍。本书的出版正是满足了这一要求，因而它是一本很有意义的科技著作。

从本书的章节内容和特点来看，它的系统性、实用性和可读性都较强。这表示出著者多年来对空间网格结构的基本理论、结构形体、计算方法和工程应用等进行了系统、深入的研究和大量的工作。书中着重阐述了各种空间网格结构基于连续化板壳的经典与非经典的理论和方法以及基于有限元法数值法的分析理论和方法。两种理论和方法可互为补充、融为一体。本书还给出较多的算例和实用计算图表，以便读者在设计计算空间网格结构工程中应用。

本书是空间网格结构方面的专著，其内容的深度和广度尚属罕见，在学术理论和分析计算方面有开拓性和创新性。它的出版将有助于广大土木建筑科技人员的提高和实际应用，也有利于促进空间网格结构在我国的应用和发展。这是科技界和工程界的一本难能可贵的著作，具有无可非议的价值。

最后，我热切期待有更多的各种空间结构专著问世，为发展我国空间结构事业作出更大的贡献。

中国建筑科学研究院研究员、教授、设计大师 何广乾

1999年3月15日于北京

前 言

近十多年来,网架结构、网壳结构、索网结构、组合网架结构、组合网壳结构等一类空间网格结构得到了迅速的发展和开拓,在大跨度、大柱网、大开间的体育馆、影剧院、车站、候机厅、大型商场、工业车间和仓库等建筑中获得了广泛的应用,越来越受到国内外工程界和科技界的关注,是一类方兴未艾、发展前景宽广的空间结构。我国空间网格结构的应用范围之广、结构形式之多以及科研工作的深度与国际上不相上下,有的还超过了国外。著者在空间网格结构的计算理论、分析方法、试验研究和工程实践诸方面做了大量的工作,取得了一批科技成果,并具有我国自己的特色。这些科技成果有的已用于具体的空间结构工程,有的被《网架结构设计施工规程》JGJ7—91等我国空间结构规程、规范所采纳,有的编入高等学校空间结构教材。有关空间网格结构计算理论与分析方法的文献资料,特别是最新研究成果既分散又难找,至于全面系统的专著在国内外还没有。在这种情况下,为了有利于促进空间网格结构的进一步发展,也为了尽可能比较全面和系统地总结和汇集我国自己的科研成果和实践经验,特著此书,以供从事空间结构科研、设计、教学等部门的科技人员使用,也可作为大专院校研究生和高年级大学生的教材与参考书。

本书的写作宗旨,着重于讨论空间网格结构分析的经典与非经典板壳理论和有限单元法,介绍基于各种理论的数学力学模型、计算原则与方法。写作时遵循以下原则:

系统性和完整性。本书基本上讨论了迄今为止的各类空间网格结构的分析计算理论和方法。

学术思想新颖。本书力求反映近十年来国内外的最新科技成果,书中很多是著者的研究成果,一定程度上反映了当前的先进水平。

理论与应用相结合。本书在阐述理论的同时,以较多的篇幅介绍分析技巧、计算例题和实用计算图表,以便读者在空间结构工程设计计算时应用。

深入浅出。本书虽然是一本理论性较强的著作,但写作时力求深入浅出,易读易懂。

全书共分五篇二十六章。第一篇共两章,主要是空间网格结构的形式、分类和分析计算方法的概论。第二篇共八章,主要讨论空间网格结构按离散型计算模型,基于有限元法理论的数值分析方法。第三篇共十二章,主要讨论空间网格结构按连续化计算模型,基于板壳结构的经典与非经典理论的分析计算方法。第四篇共两章,主要讨论空间网格结构的曲面表示和外形分析方法。第五篇共二章,主要讨论蜂窝形三角锥网架结构、组合网架结构等一些空间网格结构的简捷计算方法。

本书第一、三、五篇由浙江大学董石麟教授撰写;第二、四篇由同济大学钱若军教授撰写。全书由董石麟教授主审定稿。浙江大学周定中老师为本书的有关章节进行了校核;浙江大学高博青副教授、邓华博士、河海大学夏绍华博士、胥传喜副教授、刘惠义副教授、同济大学王人鹏副教授、上海民用建筑设计院董明工程师、浙江大学朱忠义、顾磊、袁行飞、周晓峰博士生、陈侃硕士生分别参与了有关章节的研讨、程序编制和调试、插图绘制等工

作；在撰写过程中还引用了有关兄弟单位的资料，除在相应章节中说明外，仅在此一并致谢。

本书不当之处，在所难免，恳切希望读者批评指正。

董石麟、钱若军于 1998 年 12 月

目 录

第一篇 空间网格结构及其计算方法概论

第一章 空间网格结构概论	1
1-1 空间网格结构	1
1-2 网架结构的形式与分类	2
1-3 组合网架结构的形式与分类	7
1-4 网壳结构的形式与分类	10
1-5 组合网壳结构的形式与分类	13
第二章 空间网格结构的计算方法概论	15
2-1 网架结构的计算方法	15
2-2 组合网架结构的计算方法	19
2-3 网壳结构的计算方法	20
2-4 组合网壳结构的计算方法	22

第二篇 空间结构分析的有限元法

第三章 有限单元法基础	23
3-1 概述	23
3-2 能量原理	25
3-3 单元刚度矩阵	39
3-4 荷载向节点的移置及边界条件	45
3-5 有限元基本方程	47
3-6 坐标变换	53
3-7 单元的惯性特性	64
3-8 单元的形态分析	65
3-9 总刚度矩阵的形成和装配	92
第四章 杆件体系的有限单元法	96
4-1 空间铰接杆单元刚度矩阵	96
4-2 等截面直线空间梁单元刚度矩阵	100
4-3 剪切变形的影响	106
4-4 变截面直线平面梁单元刚度矩阵	112
4-5 圆形曲梁单元刚度矩阵	119
4-6 空间薄壁杆单元刚度矩阵	124
4-7 温度、初应变的影响	127

4-8	节点的主从关系及坐标变换	128
4-9	空间梁系总刚度矩阵	135
4-10	边界条件	137
4-11	内力计算	141
4-12	松弛自由度	142
第五章	平面应力及板壳问题的有限单元法	144
5-1	平面应力问题的有限单元法	144
5-2	弹性薄板问题的有限单元法	149
5-3	弹性薄壳问题的有限单元法	157
第六章	空间结构非线性有限元法	160
6-1	二节点直线空间铰接杆单元的非线性有限元法	160
6-2	五节点空间曲线单元的非线性有限元法	164
6-3	等截面直线空间梁单元非线性有限元法	172
6-4	膜结构非线性有限元法	179
第七章	材料非线性问题的有限单元法	188
7-1	概述	188
7-2	屈服准则、屈服函数	188
7-3	强化理论	191
7-4	应力—应变关系	193
7-5	弹塑性有限单元法	195
第八章	结构体系的惯性特性	197
8-1	等直杆动力位移模型	197
8-2	空间铰接杆等价质量矩阵	199
8-3	等截面空间梁单元等价质量矩阵	200
8-4	薄膜单元等价质量矩阵	202
8-5	板壳单元等价质量矩阵	202
第九章	有限元基本方程组求解技术	203
9-1	线性代数方程组解法	203
9-2	非线性代数方程组解法	212
9-3	广义特征值问题	221
9-4	特征问题的解法	228
9-5	大型特征问题的解法	237
9-6	振型迭加法解运动方程	244
9-7	直接积分法解运动方程	248
9-8	运动方程缩减技术	253
第十章	子结构分析法	257
10-1	子结构分析法的基本理论	257
10-2	子结构分析法	258
10-3	算例	261

第三篇 空间网格结构的连续化分析法

第十一章 网架结构拟夹层板分析法的一般原理与方法	266
11-1 引言	266
11-2 基本假定和计算模型	266
11-3 等代刚度的确定	267
11-4 基本方程式的建立	272
11-5 矩形平面周边简支网架的基本方程式的求解	275
第十二章 两向正交正放类网架拟夹层板分析法	282
12-1 两向正交正放类网架的基本方程式及其求解	282
12-2 网架剪切变形与两向不等刚度的影响	286
12-3 内力、挠度计算用表的编制	287
12-4 网架变刚度的影响及其近似计算方法	292
12-5 网架杆件内力的计算公式	294
12-6 拟夹层板法设计计算网架的具体步骤	299
12-7 计算例题	299
12-8 两向正交正放类网架的动力特性	301
第十三章 两向正交斜放网架拟夹层板分析法	303
13-1 两向正交斜放网架基本方程式的建立和特点	303
13-2 矩形平面第一类简支网架的解答	304
13-3 矩形平面第二类简支网架的解答	305
13-4 两类简支网架解答的对比及剪切变形的影响	312
13-5 内力、挠度计算用表的编制	313
13-6 网架杆件内力的计算公式	321
13-7 计算例题	322
13-8 两向正交斜放网架的动力特性	323
第十四章 三向类网架拟夹层板分析法	324
14-1 三向类网架基本方程式的建立和特点	324
14-2 矩形平面周边简支网架基本方程式的求解	326
14-3 网架剪切变形与变刚度的影响	328
14-4 内力、挠度计算用表的编制	329
14-5 网架杆件内力的计算公式	335
14-6 三向类网架结构的动力特性	343
第十五章 斜放四角锥网架拟夹层板分析法	345
15-1 斜放四角锥网架基本方程式的建立和特点	345
15-2 矩形平面周边简支网架基本方程式的求解	349
15-3 网架剪切变形、上下弦刚度比的影响	353
15-4 内力、挠度计算用表的编制	354
15-5 网架杆件内力的计算公式	367

15-6	计算网架上弦杆内力的另一途径	368
15-7	计算例题	371
15-8	斜放四角锥网架的动力特性	372
第十六章	组合网架拟夹层板分析法	374
16-1	计算模型及等代刚度计算	374
16-2	基本方程式的建立和规格化	375
16-3	矩形平面周边简支组合网架基本方程式的求解	377
16-4	组合网架各类杆件的内力计算	377
16-5	上弦板的形式对内力、挠度的影响	380
16-6	组合网架拟夹层板法的设计计算步骤	381
16-7	组合网架的动力特性	382
第十七章	三层网架拟夹层板分析法	384
17-1	计算模型及一般关系式	384
17-2	正交正放类三层网架的结构形式及拟夹层板分析法	386
第十八章	交叉拱系扁网壳的拟壳分析法	391
18-1	定义和形式	391
18-2	基本假定和计算模型	392
18-3	扁网壳位移法基本方程式的建立	392
18-4	扁网壳与各向异性扁壳的比较	397
18-5	扁网壳混合法基本方程式的建立	399
18-6	四组拱系组成的扁网壳	400
18-7	三组拱系组成的扁网壳	402
18-8	两组拱系组成的扁网壳	404
18-9	多组拱系组成的扁网壳	405
18-10	带肋扁壳——扁网壳的一个推广	406
18-11	矩形平面周边简支扁网壳混合法基本方程式的求解	407
18-12	由拟壳解答求网壳杆件内力的计算公式	410
18-13	扁网壳的动力特性	412
18-14	拟壳法设计计算扁网壳的具体步骤	413
18-15	计算例题	414
第十九章	圆柱面网壳的拟壳分析法	415
19-1	正交异性圆柱面网壳的常用形式及其基本方程式的建立	415
19-2	基本方程式的齐次解	416
19-3	基本方程式的特解——薄膜解	419
19-4	边界条件及确定待定常数	421
第二十章	球面网壳的拟壳分析法	423
20-1	球面网壳的形式和一种分类方法	423
20-2	球面网壳的等代刚度	424
20-3	基本方程式的建立	426

20-4	基本方程式的求解和内力、变位计算公式	427
20-5	薄膜内力和薄膜变位	429
20-6	边界条件和连接条件	429
20-7	由网壳内力返回计算网壳杆件内力	432
20-8	计算例题	434
第二十一章	组合扁网壳的拟三层壳分析法	435
21-1	基本假定和计算模型	435
21-2	等代刚度的确定	435
21-3	基本方程式的建立	436
21-4	矩形平面周边简支不等常曲率组合扁网壳的求解	438
21-5	三向、四向组合扁网壳的简化计算	441
21-6	组合扁网壳的动力特性	442
21-7	算例与讨论	443
第二十二章	网壳结构的稳定计算	446
22-1	概述	446
22-2	扁网壳线性理论稳定计算	446
22-3	球面扁网壳非线性理论稳定计算	449
22-4	组合扁网壳的稳定计算	454

第四篇 形态分析

第二十三章	曲线和曲面的表示	456
23-1	曲线的表示	456
23-2	曲面的表示	458
23-3	曲面块的拼接	462
第二十四章	形状分析	466
24-1	张力结构形状分析的概念和目的	466
24-2	离散坐标定义的曲面解析表示	467
24-3	张力结构的全过程分析	470
24-4	支座移动法	471
24-5	力密度 (Force Density) 法	474
24-6	动力松弛 (Dynamic Relaxation) 法	478
24-7	杆长修改法	481
24-8	控制点逼近法	485

第五篇 网架计算的若干种特殊分析方法

第二十五章	蜂窝形三角锥网架计算的新方法——下弦内力法	492
25-1	蜂窝形三角锥网架的机动分析	492
25-2	基本方程式——五下弦内力方程式的建立	494
25-3	矩形平面简支网架的内力计算公式	495

第一篇 空间网格结构及其计算方法概论

第一章 空间网格结构概论

1-1 空间网格结构

空间网格结构是在本世纪中叶特别是近二十多年来蓬勃发展起来的新结构，它是由多根杆件按照某种有规律的几何图形通过节点连接起来的空间结构。空间网格结构与平面桁架、刚架不同之处在于连接构造是空间的，可以充分发挥空间三维捷径传力的优越性，特别适宜于覆盖大跨度建筑。

这种空间网格结构通常可分为双层的（也可多层的）平板形网格结构（简称网架结构或网架），单层和双层的曲面形网格结构（简称网壳），如图 1-1-1 所示。也就是说，网格结构是网架与网壳的总称。

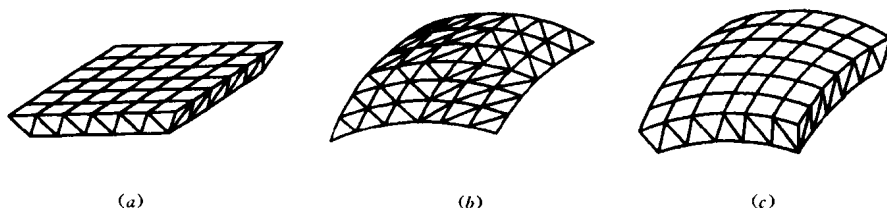


图 1-1-1 网格结构——网架与网壳
(a) 网架；(b) 单层网壳；(c) 双层网壳

绝大部分网格结构是采用钢管或型钢材料制作而成，只有个别网格结构是采用钢筋混凝土、木材或塑料杆件制作的。

如采用钢筋混凝土平板覆盖钢网格结构，并使其连接成整体共同工作，从而形成一种下部为钢结构、上部为钢筋混凝土结构的组合网格结构；这种结构具有刚度大、自重轻、综合技术经济指标好的特点，可用于屋盖结构，也可用于楼层结构。

组合网格结构通常也可分为平板形组合网格结构（一般以钢筋混凝土上弦平板代替钢上弦，简称组合网架结构或组合网架）和曲面形组合网格结构（一般以钢筋混凝土平板覆盖在单层网壳上，简称为组合网壳结构或组合网壳），如图 1-1-2 所示。也就是说，组合网格结构是组合网架与组合网壳的总称。

人们通常把空间结构划分成五大类，即薄壳结构（包括折板结构）、悬索结构、网架结

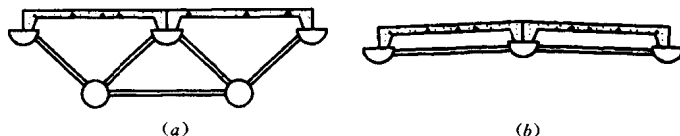


图 1-1-2 组合网格结构——组合网架与组合网壳
(a) 组合网架；(b) 组合网壳

构、网壳结构和膜结构（包括充气膜结构和支承膜结构）。可以说，网架结构与网壳结构是这五类空间结构中应用最多、发展最快、颇受国内外关注的两类空间结构。

网架结构与网壳结构（亦即总称为网格结构）迅速发展的原因主要有：

1. 工程建设的需要，特别是大中跨度体育、文化、展览、工厂建筑兴建的需要，促进了网格结构的应用和发展。如我国各省、市、自治区一级的大型体育场馆建设，70%以上采用了各种形式的网格结构。
2. 杆件和节点的标准化、工厂化生产，使网格结构的制作安装走现场装配和半装配的道路，提高了制作精度，加快了施工速度，降低了工程造价。
3. 电子计算技术在网格结构设计中的应用，使得这种高次超静定的、计算难度较大的空间结构可以比较精确地进行分析计算，通常可编制 CAD 程序或计算用表，供设计应用。这不仅解决了过去无法进行的结构分析问题，而且还缩短了工程的设计周期。

1-2 网架结构的形式与分类

网架结构的种类甚多，且不断有所发展创新。当前，经常遇见的主要有 15 种网架，根据其组成又可划分为四大类，兹在下面分别阐述。

1-2-1 平面桁架系组成的网架结构

第一类是由平面桁架系组成的网架结构，它是由平面桁架发展和演变过来的。可以认为组成这类网架结构的基本单元是网片，它由一根上弦杆、一根下弦杆、一根斜杆及二根竖杆构成，如图 1-2-1 (e) 所示。相邻的网片是通过公共的竖杆连接起来的，许多网片的集合便构成整个网架。由于平面桁架系的数量和设置方位不同，这类网架又可分成四种：

1. 两向正交正放网架 这是由两组平面桁架系组成的网架，桁架系在水平面上的投影轴线互成 90° 交角，且与边界平行或垂直，所形成的网格可以是矩形的，也可以是正方形的（图 1-2-1a）。图中粗实线表示上弦，细实线表示下弦，虚线表示斜杆，以下均同。
2. 两向正交斜放网架 它可由两向正交正放网架在水平面上旋转 45° 而得，因而桁架系与边界成 45° 交角（图 1-2-1b）。
3. 两向斜交斜放网架 这是两组平面桁架系在水平面上投影轴线的交角不等于 90° 的网架。网格是菱形的，菱形的内角一般在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 范围内。这种网架适宜于边界柱距在两个方向是不等的情况（图 1-2-1c）。
4. 三向网架 这是由三组平行桁架系组成的网架，桁架系在水平面上的投影轴线通常互成 60° 交角，所形成的网格是三角形的。三向网架交于上、下弦节点的杆件数通常有 10 根，即 6 根弦杆、3 根斜杆及 1 根竖杆。相对来说，这是杆件数和节点数最多的一种网架结构

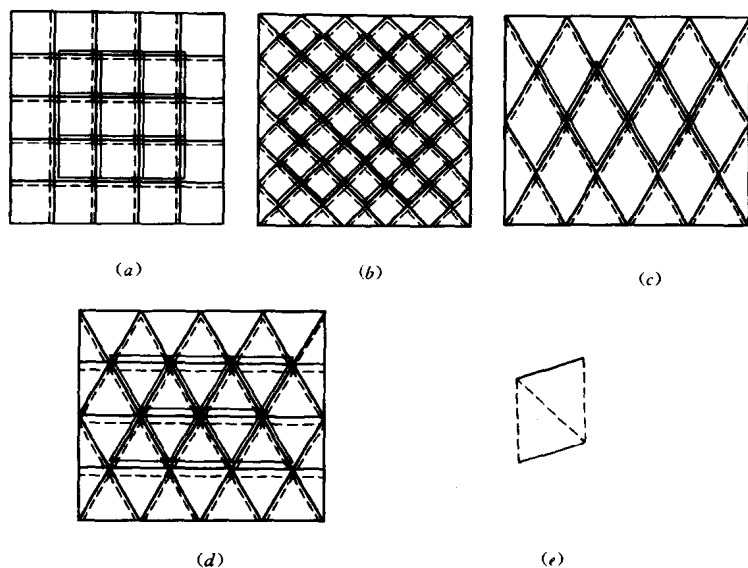


图 1-2-1 平面桁架系组成的网架
(a) 两向正交正放网架；(b) 两向正交斜放网架；(c) 两向斜交斜放网架；
(d) 三向网架；(e) 网片

(图 1-2-1d)。

1-2-2 四角锥体组成的网架结构

第二类是由四角锥体组成的网架结构，它的基本单元是由 4 根弦杆、4 根斜杆构成的正四角锥体，即五面体。锥体可以顺置也可以倒置（图 1-2-2g）。由这些四角锥体排列组成网架时，还要用上弦杆或下弦杆把相邻的锥顶连接起来。根据锥体的组合方式和连接锥顶弦杆的方向不同，这类四角锥体组成的网架又可分为六种：

1. 正放四角锥网架 组成这种网架的四角锥底边是与边界平行或垂直的，角锥满铺于整个网架平面。网架的上（下）弦节点即是顺（倒）置角锥的顶点，亦可看成是倒（顺）置角锥底边的角点，从而使同方向的上、下弦杆的平面投影正好形成两组平行线，互差半个网格间距。所形成的上、下弦网格通常都是正方形的（图 1-2-2a），当两个方向的弦杆长度不等时，也可形成矩形网格。

2. 正放抽空四角锥网架 它可由正放四角锥网架跳格式地抽去锥体的四根斜杆和相应的四根下弦杆而成。从总体来说，它的下弦杆和斜杆数分别是正放四角锥网架的 $1/2$ 和 $3/4$ ，这可节约网架材料用量。上弦杆无任何变化，不抽空，便于铺设屋面。这种正放抽空四角锥网架，亦可看作为两向正交正放的立体桁架组成的网架（图 1-2-2b）。

3. 斜放四角锥网架 这是由倒置斜放的四角锥体连接组成，上、下弦杆的水平投影轴线互成 45° 交角，下弦杆与边界平行或垂直（图 1-2-2c）。这种网架的上、下弦杆的长度之比为 $1 : \sqrt{2}$ 。它正符合网架上弦杆受压宜短、下弦杆受拉宜长的受力要求。

4. 棋盘形四角锥网架 它可由斜放四角锥网架在水平面上旋转 45° 而得，因而上弦杆与边界平行或垂直（图 1-2-2d）。

5. 星形四角锥网架 这是由顺置正放的四角锥体组合而成，连接锥顶的上弦杆与相应

的斜杆是在同一个竖向平面内，因而上、下弦杆的水平投影轴线也互成 45° 交角。此外，对每一个下弦节点还需增设一根竖杆，它与上弦节点相连以减小上弦杆的计算长度。这种网架上、下弦杆的长度比也是 $1 : \sqrt{2}$ (图 1-2-2e)。从另一个角度来看，这种星形四角锥网架，可以认为是由倒置斜放的星形单元体 (图 1-2-2h) 与正交正放的下弦杆系组合而成。

6. 单向折线形网架 又称折板型网架，它可由正放四角锥网架通长地删去某一方向的上弦杆和下弦杆而成 (为增加网架的刚度和满足几何不变性的要求，靠周边一圈网格范围内该方向的上、下弦杆尚应保留)，详见图 1-2-2f。这种网架又可看作为一组向左下方倾斜、另一组向右下方倾斜，而上、下弦杆为公共的平面桁架系所构成。从这个意义上来说，单向折线形网架也可归属为由平面桁架系组成的网架。

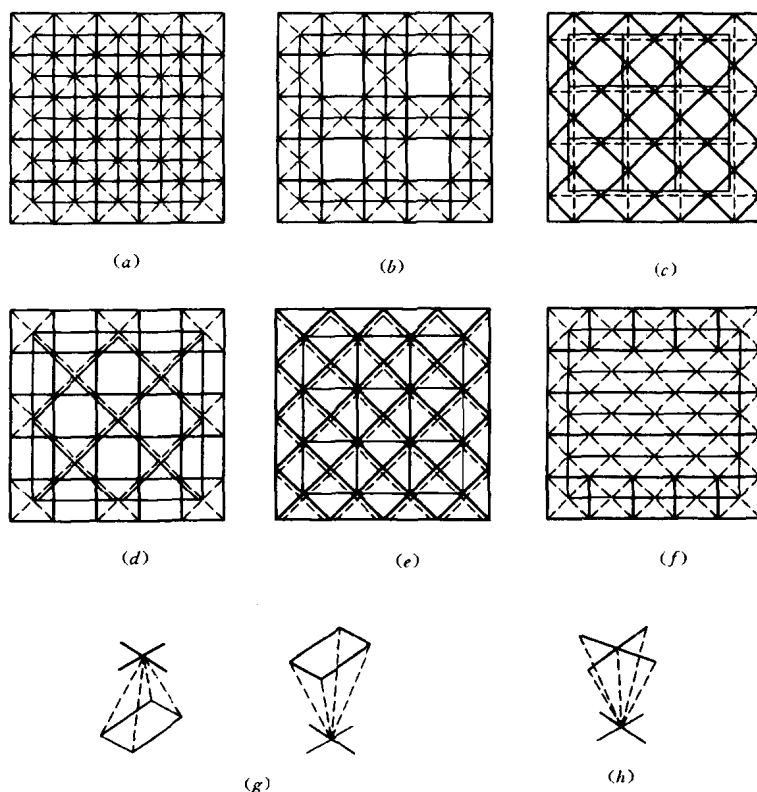


图 1-2-2 四角锥体组成的网架

(a) 正放四角锥网架；(b) 正放抽空四角锥网架；(c) 斜放四角锥网架；(d) 棋盘形四角锥网架；(e) 星形四角锥网架；(f) 单向折线形网架；(g) 四角锥体；(h) 星形单元体

1-2-3 三角锥体组成的网架结构

第三类是由三角锥体组成的网架结构，它的基本单元是由 3 根弦杆、3 根斜杆所构成的正三角锥体，即四面体。三角锥体可以顺置，也可以倒置 (图 1-2-3e)。根据三角锥体的组合方式和连接锥顶弦杆的方法不同，这类三角锥体组成的网架又可分为四种：

1. 三角锥网架 由顺置的错格排列的三角锥体与三向互成 60° 的下弦杆数系连接而成 (图 1-2-3a)。所形成的上、下弦网格都是正三角形，每个上、下弦节点均连有 6 根弦杆、3 根斜杆共 9 根杆件。这种网架的杆件数和节点数，相对来说，也是比较多的一种。

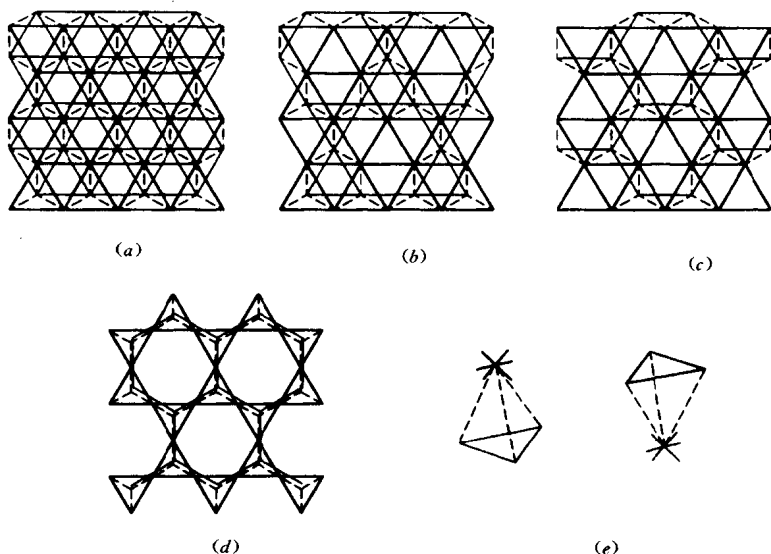


图 1-2-3 三角锥体组成的网架

(a) 三角锥网架；(b) 抽空三角锥网架 I 型；(c) 抽空三角锥网架 II 型；
(d) 蜂窝形三角锥网架；(e) 三角锥体

2. 抽空三角锥网架 I 型 它可由三角锥网架跳格式地抽去锥体的 3 根斜杆和相应的 6 根下弦杆而成 (图 1-2-3b)。从总体来说, 抽空三角锥网架 I 型的下弦杆数和斜杆数分别是三角锥网架的 $1/2$ 和 $3/4$, 而上弦杆数无任何变化。交于上弦节点的杆件数为 9 根或 8 根 (即 6 根上弦杆、3 根斜杆或 6 根上弦杆、2 根斜杆), 交于下弦节点的杆件数均为 7 根 (即 4 根下弦杆、3 根斜杆)。这种网架的下弦杆正好形成一种正六边形和正三角形相间的网格, 建筑造型美观、轻巧。

3. 抽空三角锥网架 II 型 它可由三角锥网架采用另一种跳格方式, 抽去锥体的 3 根斜杆和相应的 6 根下弦杆而成 (图 1-2-3c)。但从总体来说, 抽空三角锥网架 II 型的下弦杆数和斜杆数分别是三角锥网架的 $1/3$ 和 $2/3$, 比抽空三角锥网架 I 型的抽空率还要大, 但上弦杆数仍无任何变化。交于上弦节点的杆件数为 8 根 (即 6 根上弦杆、2 根斜杆), 交于下弦节点的杆件数为 6 根 (即 3 根下弦杆、3 根斜杆)。这种网架的下弦杆正好形成一种正六角形的网格, 建筑造型也比较大方美观。

4. 蜂窝形三角锥网架 这是由倒置的三角锥体两两相连而成。确切地说, 是用一根下弦杆连接相邻两锥体的锥顶, 同时用一个上弦节点连接相邻两锥体底边的角点, 从而组成上弦网格是正六边形与正三角形相间的、下弦网格是正六角形的网架 (图 1-2-3d)。上、下弦杆的长度比为 $1:2/\sqrt{3}$, 这对网架受力也是有利的。交于上弦节点的杆件有 6 根 (即 4 根上弦杆、2 根斜杆), 交于下弦节点的杆件也是 6 根 (即 3 根下弦杆、3 根斜杆)。

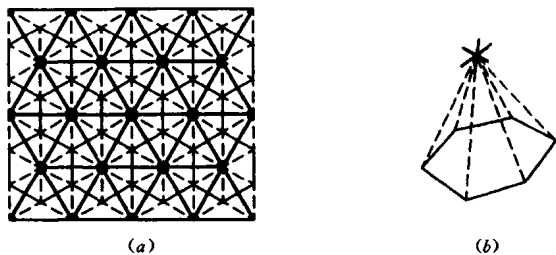


图 1-2-4 六角锥体组成的网架

(a) 六角锥网架；(b) 六角锥体

相对来说,这是杆件数和节点数最少的一种网架结构。

1-2-4 六角锥体组成的网架结构

第四类是由六角锥体组成的网架结构,它的基本单元体是由6根弦杆、6根斜杆构成的正六角锥体,即七面体(图1-2-4b)。这类网架的一种主要形式即为六角锥网架,它由顺置的密排六角锥体与三向互成 60° 的上弦杆系连接而成(图1-2-4a)。所形成的上、下弦网格分别为正三角形、正六角形。交于上弦节点的杆件数为12根(即6根上弦杆、6根斜杆),交于下弦节点的杆件数为6根(即3根下弦杆、3根斜杆)。相对来说,这也是一种杆件数和节点数较多的网架。

1-2-5 我国首次采用各种形式网架的工程实例

前述四类共15种网架,除两向斜交斜放网架已设计未施工外,其他各种形式网架在我国都有所推广应用。表1-2-1中列出了首次采用各种形式网架的工程实例,以便了解这些网架的基本情况。

我国首次建成各种形式网架的工程实例

表 1-2-1

序号	网架形式	工程名称	建成年份	平面尺寸×高度	用钢量 (kg/m ²)	安装方法
1	两向正交正放	上海体院篮球房	1966	35m×35m×2.5m	15.4	双机抬吊
2	两向正交斜放	上海体院羽毛球房	1966	30m×45m×2.5m	14.6	双机抬吊
3	两向斜交斜放	上海新火车站	后未用	54m×72m×5m	50	
4	三 向	上海文化广场	1970	扇形 76×(62.8~138.2)×5	45	地面拼装,拔杆整体起吊,高空移位
5	正放四角锥	上海师范学院球类房	1964	31.5m×40.5m×1.8m	35.6	四角锥单元起吊,高空拼装
6	正放抽空四角锥	上海市航空俱乐部机库	1966	27.3m×35.1m×2.2m	~17	双机抬吊,高空平移就位
7	斜放四角锥	天津科学宫礼堂	1966	14.8m×23.3m×1m	6.3	分条起吊,水平移动就位,高空拼接
8	棋盘形四角锥	大同矿务局云岗矿食堂	1973	18m×24m×1.3m(2个)	7	四个5吨手拉葫芦提升网架
9	星形四角锥	杭州起重机械厂食堂	1980	28m×36m×2.5m	28	地面拼装,拔杆整体吊装,高空移位
10	单向折线形	大同矿务局一车间	1978	12m×40m×1m	9	分条吊装,高空拼接
11	三 角 锥	上海徐汇区工人俱乐部	1984	正六边形 D24m×1.96m	21	满堂脚手,高空拼装
12	抽空三角锥Ⅰ型	天津塘沽车站	1977	圆形 D47.2m×(3.0~3.6)m	30	地面拼装,道木垛上顶升就位
13	抽空三角锥Ⅱ型	保定百花电影院	1982	长六边形(21.6~28m)×35.3m×1.96m	24.5	地面拼装,双拔杆整体吊装
14	蜂窝形三角锥	大同矿机修厂会议室	1978	15.4m×16.3m×1m	7.2	工地组拼,整体吊装
15	六 角 锥	某车站网架模型	1966	7.2m×7.5m×1m		按单元逐个拼装,再整体吊装就位