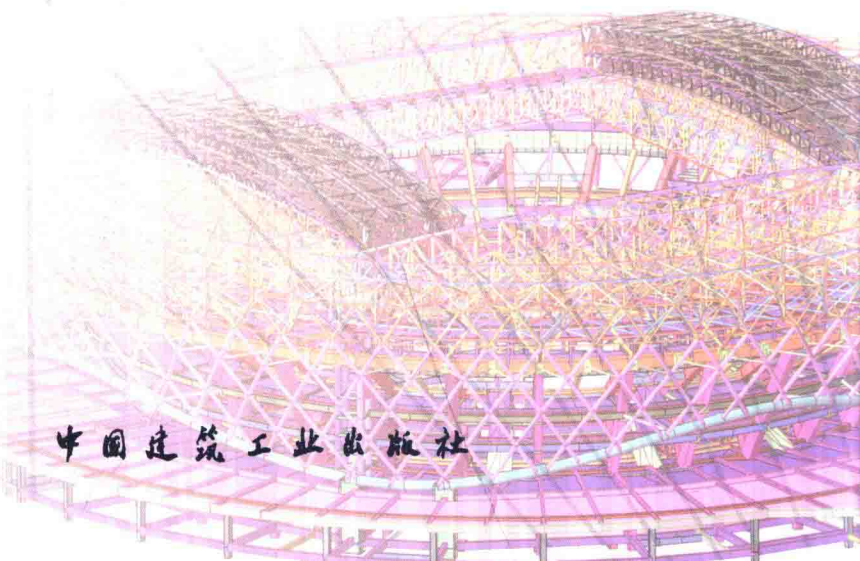


大跨空间结构 设计与分析

杜新喜 编著

中国建筑工程出版社



大跨空间结构设计与分析

杜新喜 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大跨空间结构设计与分析/杜新喜编著. —北京: 中国
建筑工业出版社, 2014. 10
ISBN 978-7-112-17136-1

I. ①大… II. ①杜… III. ①空间结构—结构设计
②空间结构—结构分析 IV. ①TU330.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 180014 号

大跨空间结构发展迅速, 应用广泛, 本书结合实际工程, 归纳概括了空间结构的设计方法和研究成果。全书共分为 7 章, 前 4 章介绍空间结构设计, 后 3 章介绍网格结构性能研究。空间结构设计内容包括: 结构选型和高效建模、荷载作用和构件验算、节点及支座设计、工程设计步骤等内容。网格结构承载性能研究包括: 非线性有限元分析、初始缺陷对整体结构性能影响、损伤免疫力设计方法。本书可作为土木工程专业研究生教学用书, 也可供相关工程技术人员参考。

责任编辑: 赵梦梅 田立平

责任设计: 张 虹

责任校对: 李美娜 党 蕾

大跨空间结构设计与分析

杜新喜 编著

*

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

北京楠竹文化发展有限公司制版

北京市书林印刷有限公司印刷

*

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 15 1/2 字数: 382 千字

2014 年 12 月第一版 2014 年 12 月第一次印刷

定价: 38.00 元

ISBN 978-7-112-17136-1

(25934)

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)



前 言

本书系统地介绍了大跨空间结构的设计要点和难点,可作为工程人员的工具参考书,以便解决在实际工程设计中遇到的难题;也可以作为研究生学习的教材,以便尽快地开展课题研究工作。

全书共分为7章,前4章介绍空间结构设计,后3章介绍网格结构性能研究。第1章介绍了空间结构类型、受力特点和建模方法。针对自由曲面网格建模的难题,介绍了一种基于AutoCAD的网格拟合剖分方法,可快速地建立复杂空间曲面结构模型。第2章依据最新的设计规范,给出了各种荷载组合的取值。围绕结构设计计算问题,推导了空间杆、梁的单元刚度矩阵,读者在编制有限元程序时可以直接引用。第3章围绕节点设计,给出了常用节点的设计步骤和公式,包括螺栓球节点、焊接球节点、嵌入毂节点、铸钢节点、节点板节点、相贯节点等,并纠正了设计规程关于螺栓球最小直径设计公式的不足。本章对常用支座节点的设计方法、设计公式、受力特点等进行了解释说明。综合前3章的设计理论,第4章通过两个网格结构实例,介绍了网格工程的设计步骤、施工图绘制等内容。

极限承载力和稳定验算是网格结构性能分析的重要组成部分,第5章重点介绍了几何非线性、材料非线性的有限元方法,并推导了空间杆、梁的单元切线刚度矩阵。另外,由于安装应力对网格结构受力性能有不可忽视的影响,因此第6章介绍了安装应力研究成果,包括测量试验、模型承载力试验和考虑杆长偏差的随机有限元分析方法等。本章的最后通过两个算例分析,对比分析了不同初始缺陷引入方法对网格承载力影响的差别,以便提醒读者在设计中注意安装应力问题。为了解决网格结构连续性倒塌的难题,第7章介绍了损伤免疫力分析及设计方法,并给出了两个工程实例应用情况。

我的研究生骆顺心、胡文进、张慎、万金国、刘茂青、陈宝林等在校期间的研究课题,是本书内容的重要组成部分,全书由刘茂青完成统稿。本书还借鉴了有关专家学者的资料,在此一并致谢。由于时间仓促,书中难免有引用同行专家著作或资料而未能详细说明出处,敬请见谅!由于作者水平有限,不足之处在所难免,敬请读者不吝指正。

杜新喜 于珞珈山

2014年6月

目 录

第1章 空间结构类型及建模	1
1.1 网架结构	1
1.1.1 几何不变性分析	2
1.1.2 网架结构分类	3
1.1.3 网架选型基本规定	9
1.2 网壳结构	9
1.2.1 网壳结构的分类	10
1.2.2 柱面网壳结构	13
1.2.3 球面网壳结构	15
1.2.4 网壳选型基本规定	20
1.3 自由曲面建模	21
1.3.1 曲面生成	22
1.3.2 网格划分	23
1.3.3 基本原理	23
1.3.4 曲面建模	25
1.4 悬索结构	29
1.5 管桁架结构	33
1.6 张弦梁结构	35
1.7 索穹顶结构	36
本章参考文献	38
第2章 空间结构设计	39
2.1 荷载和作用	39
2.1.1 永久荷载	40
2.1.2 屋面活荷载	41
2.1.3 风荷载	41
2.1.4 雪荷载	43
2.1.5 积灰荷载	45
2.1.6 施工和检修荷载	45
2.1.7 吊车荷载	45
2.1.8 温度作用	46
2.2 空间结构地震作用	48
2.2.1 地震计算方法	49
2.2.2 网格结构动力特性	50

2.2.3	抗震验算的条件	51
2.2.4	振型分解反应谱法	52
2.3	空间结构计算	55
2.3.1	空间杆单元	55
2.3.2	空间梁单元	59
2.3.3	空间索单元	63
2.4	空间结构设计验算	66
2.4.1	杆件应力验算	66
2.4.2	挠度验算	67
2.4.3	长细比验算	67
2.4.4	计算长度系数	70
	本章参考文献	71
第3章	节点及支座设计	72
3.1	螺栓连接节点	72
3.1.1	一般螺栓连接	72
3.1.2	螺栓球节点	75
3.1.3	螺栓板节点	89
3.2	焊接节点	90
3.2.1	一般焊接连接	90
3.2.2	焊接空心球节点	91
3.2.3	焊接钢板节点	98
3.2.4	相贯节点	101
3.3	其他连接节点	105
3.3.1	铸钢节点	105
3.3.2	嵌入式毂节点	112
3.3.3	预应力索节点	116
3.4	支座节点	118
3.4.1	支承布置及构造	118
3.4.2	支座假定	119
3.4.3	平板压力支座	121
3.4.4	单、双面弧形压力支座	124
3.4.5	球铰压力支座	126
3.4.6	平板拉力支座	126
3.4.7	单面弧形拉力支座	127
3.4.8	可滑动铰支座	127
3.4.9	球铰拉力支座	127
3.4.10	橡胶板式支座	128
3.4.11	刚接支座	131
	本章参考文献	131
第4章	网格结构设计实例	133
4.1	USSCAD 介绍说明	133

4.2	网架结构设计实例	134
4.2.1	工程概况	134
4.2.2	结构选型	135
4.2.3	建立模型	135
4.2.4	分析设计	137
4.2.5	结构施工图	138
4.2.6	支座节点设计	143
4.3	网壳结构设计实例	146
4.3.1	工程概况和选型	146
4.3.2	建立模型和计算	147
4.3.3	支座节点设计	150
	本章参考文献	152
第5章	结构非线性分析	153
5.1	非线性有限元概述	153
5.2	几何非线性	155
5.2.1	Lagrange 列式法	155
5.2.2	杆单元切线刚度	158
5.2.3	梁单元切线刚度	159
5.3	材料非线性	163
5.3.1	基于钢材屈服准则的杆件模型	163
5.3.2	基于截面塑性的杆件模型	166
5.3.3	塑性铰杆件模型	168
5.3.4	受力全过程杆件模型	172
5.4	非线性方程求解方法	177
5.4.1	牛顿法	178
5.4.2	收敛准则	180
5.4.3	弧长法	180
5.5	网壳的稳定性计算	182
	本章参考文献	186
第6章	安装应力研究分析	188
6.1	初始几何缺陷	188
6.2	安装应力试验研究	191
6.2.1	安装应力试验	191
6.2.2	极限承载力试验	194
6.2.3	安装应力影响机理	196
6.3	安装应力有限元研究	198
6.3.1	随机有限元法	198
6.3.2	算例一	200
6.3.3	算例二	202

6.3.4 对比分析	205
本章参考文献	207
第7章 免疫力设计方法	208
7.1 定义及研究意义	208
7.2 研究综述	209
7.3 损伤免疫力	211
7.3.1 以不引起其他构件失效为准则	211
7.3.2 以变形特性为指标	217
7.3.3 以极限承载力为指标	218
7.3.4 以体系可靠度为指标	219
7.3.5 四种不同免疫力评述	221
7.4 损伤免疫力设计方法	222
7.5 工程实例介绍	228
7.5.1 工程实例1	228
7.5.2 工程实例2	233
本章参考文献	237

第1章 空间结构类型及建模

空间结构能适应各种变化的建筑造型需要,极大地满足建筑师的空间造型需求。空间结构不仅具有三维空间的结构形体,在荷载作用下为三向受力状态,且构件主要受轴力作用,具有受力合理、自重小、造价低、施工方便、节省工期以及形式活泼新颖、能够突出人类艺术创造力等优点。空间结构常用的杆件截面类型如图1-1所示。空间结构造型灵活多变,在进行结构建模时工作量极大,影响结构工程师的工作效率。在CAD技术飞速应用发展的今天,利用计算机进行空间结构的快速建模是空间网格结构研究的热点之一。本章主要介绍典型空间结构形式、建模方法及受力特点。

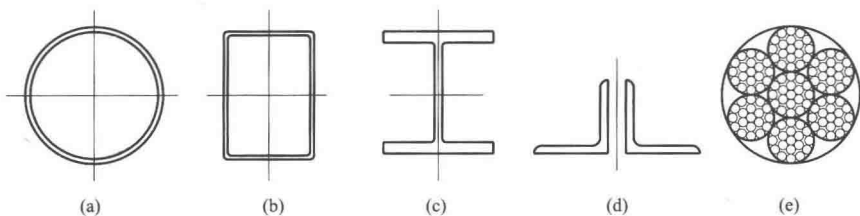


图1-1 杆件截面类型

(a) 圆钢管; (b) 矩形钢管; (c) H型钢; (d) 双角钢; (e) 钢丝绳截面

1.1 网架结构

网架结构是将杆件按一定规律通过节点连接组成的平板空间网格结构体系。网格结构为三向传力的空间杆系结构,节点一般铰接,杆件主要承受轴力作用,杆件截面尺寸相对较小。由于结构组合有规律,大量的杆和节点的形状、尺寸相同,便于工厂化生产,便于工地安装。

网架结构是高次超静定结构,能较好地承受集中荷载、均布荷载、动力荷载和非对称荷载,抗震性能好。网架结构能够适应不同跨度、不同支承条件的公共建筑和工厂厂房的要求,也能适应不同建筑平面及其组合。1981年5月我国颁布了《网架结构设计 with 施工规定》JGJ 7—80,1991年9月又将其进行修订颁布了《网架结构设计 with 施工规程》JGJ 7—91,2010年7月将网架结构、网壳结构和立体管桁架结构等相关条文进行了结合颁布了《空间网格结构技术规程》JGJ 7—2010。此外,针对网架结构螺栓球节点及其配件,我国专门颁布了《钢网架螺栓球节点》JG/T 10—2009和《钢网架螺栓球节点用高强度螺栓》GB/T 16939—1997,针对网架结构焊接球节点及其配件,颁布了《钢网架焊接空心球节点》JG/T 11—2009,一些省份甚至出台了针对节点生产制作的地方标准,例如江苏省地方标准《钢网架(壳)螺栓球节点锥头技术规范》DB32/ 952—2006。这些行

业标准是对我国目前网架结构工程和科研成果的总结,有力地推动了我国网架结构的发展。

我国是网架生产的大国,其年生产规模、建筑面积成为了世界之最,涌现出了一大批优秀的代表性工程。1964年,我国建成的第一个平板网架——上海师范学院球类房正放四角锥网架,跨度 $31.5\text{m} \times 40.5\text{m}$,如图1-2所示。此后陆续建成的首都体育馆(图1-3)、南京五台山体育馆、上海体育馆、福州市体育馆等,均采用网架结构。目前,我国网架结构仍然朝气蓬勃、经久不衰,健康发展^[1]。



图1-2 上海师范学院球类房网架



图1-3 首都体育馆网架

1.1.1 几何不变性分析

网架结构是空间铰接杆系结构,在任意外力作用下不允许发生几何可变,故必须进行结构几何不变性分析。

网架结构的几何不变性分析必须满足两个条件:一是具有必要的约束数量,如果不具备必要的约束数量,这个结构肯定是可变体系,简称必要条件;二是约束设置方式要合理,如约束布置不合理,虽然满足必要条件,结构仍可能是可变体系,简称充分条件。

网架结构是空间结构,一个节点有三个自由度,其几何不变的必要条件是^[1]:

$$W = 3J - B - S < 0 \quad (1-1)$$

式中 B ——网架的杆件数;

S —— 支座约束链杆数, $S \geq 6$;

J —— 网架的节点数。

由此可见: ① $W > 0$, 该网架为几何可变体系; ② $W = 0$, 该网架无多余约束, 如杆件和约束布置合理, 该网架为静定结构; ③ $W < 0$ 该网架有多余约束, 如杆件和约束布置合理, 该网架为超静定结构。

网架结构的几何不变的充分条件是: ①用三个不在一个平面上的杆件汇交于一点, 该点为空间不动点, 即几何不变的; ②三角锥是组成空间结构几何不变的最小单元; ③由三角形图形的平面组成的空间结构, 其节点至少为三平面交汇点时, 该结构为几何不变体系。

网架结构最少支座约束条件是: 满足对整体刚体位移的约束, 即约束刚体的三个平动位移和三个转动位移, 以免发生网架整体刚体位移。因此, 对网架结构最基本的约束应至少满足 6 个自由度, 如图 1-4 所示。

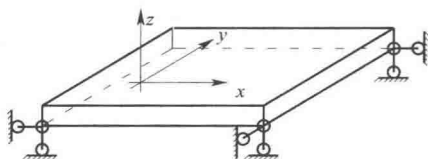


图 1-4 网架最少支座约束条件

1.1.2 网架结构分类

网架结构按照弦杆层数不同可分为双层网架、三层网架和多层网架结构。双层网架结构（图 1-5）是由上弦层、下弦层和腹杆层组成的空间结构, 是最常用的一种网架结构。

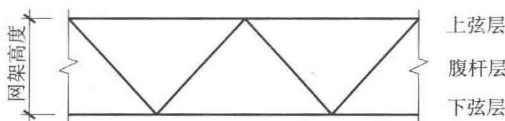


图 1-5 双层网架结构

三层网架是由上弦层、中弦层、下弦层、上腹杆层和下腹杆层等组成的空间结构。其特点是: 提高网架高度, 减小网格尺寸, 减少弦杆内力。研究资料表明, 网架高度不变的情况下, 增加网架层数可有效减少杆件的长度, 一般情况下, 三层网架腹杆长度仅为双层网架腹杆长度的一半, 同时三层网架结构的弦杆内力比双层网架结构降低 25% ~ 60% , 从而减小杆件直径, 扩大螺栓球节点的应用范围。多层网架则是由更多的弦杆层和腹杆层组成的网架。

网架结构通常由基本网格单元按照一定的逻辑构型规则组成, 根据网格单元和构型规则的不同, 网架结构可以分为以下几种类型^[2]:

1. 平面桁架体系网架

平面桁架体系网架是由平面桁架交叉组成, 组成的基本单元如图 1-6 所示。这类网架上弦和下弦的杆件长度相等, 而且其上弦、下弦和腹杆位于同一垂直平面内。一般可设计为斜腹杆受拉, 竖杆受压, 斜腹杆和弦杆夹角宜在 40° ~ 60° 之间。采用平面桁架网格单

元，可以形成以下四种网架结构形式：

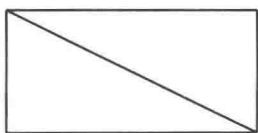


图 1-6 平面桁架体系基本单元

(1) 两向正交正放网架：如图 1-7 所示，两向正交正放网架是由两个方向的平面桁架垂直交叉而成。在矩形建筑平面中应用时，两向桁架分别与边界垂直（或平行），两个方向网格数宜布置成偶数，如为奇数，则在桁架中部节间宜做成交叉腹杆。由于该网架上弦、下弦组成的网格为矩形，弦层内无有效支承，属于几何可变体系。为能有效传递水平荷载，对于周边支撑网架，宜在支承平面（支承平面指与支承结构相连弦杆组成的平面，上弦或下弦平面）内沿周边设置水平斜杆（见图 1-7 虚线部分）；对于点支撑网架，应在支承平面（上弦或下弦平面）内沿主桁架（通过支承桁架）的两侧（或一侧）设置水平斜杆。

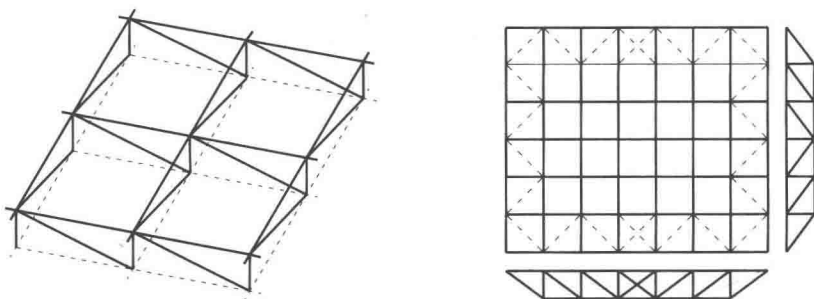


图 1-7 两向正交正放网架

(2) 两向正交斜放网架：如图 1-8 所示，也是由两个方向的平面桁架交叉而成，在矩形建筑平面中应用时，两向桁架与矩形建筑边界夹角为 45° （或 -45° ），它可以简单理解为由两向正交正放桁架在建筑平面上放置时旋转 45° 。这类网架两个方向平面桁架的跨度有长有短，节间数有多有少，但网架是等高的，因此各榀桁架刚度各异，能形成良好的空间受力体系。

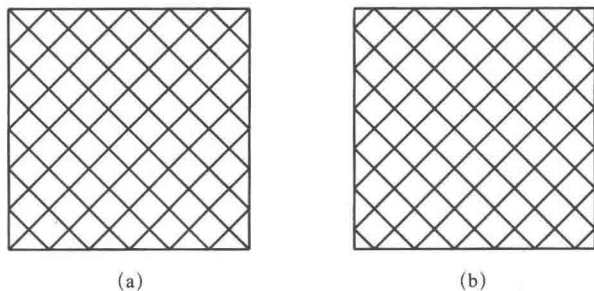


图 1-8 两向正交斜放网架

(a) 有角柱；(b) 无角柱

(3) 两向斜交斜放网架：如图 1-9 所示，由两个方向的平面桁架交叉组成，但其角度并不正交，从而形成菱形网格。它主要适用于两个方向网格尺寸不同，而要求弦杆长度相等者。同时，这类网架杆件之间的角度不规则，造成节点构造复杂，空间受力性能欠佳，因此只是在建筑上有特殊要求时才考虑使用。

(4) 三向网架：如图 1-10 所示，由三个方向桁架按 60° 角相互交叉组成。这类网架的上、下弦平面的网格一般呈正三角形，为几何不变体，空间刚度大，受力性能好，支座受力较均匀，但汇交于一个节点的杆件最多可达 13 根，节点构造比较复杂，宜采用焊接空心球节点。

三向网架适合于较大跨度 ($l > 60\text{m}$)，且建筑平面为三角形、六边形、多边形和圆形，当用于非六边形平面时，周边将出现一些非正三角形网格。

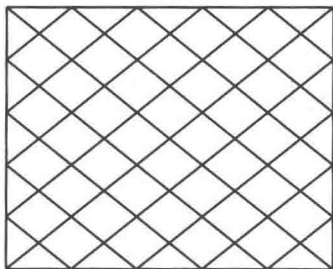


图 1-9 两向斜交斜放网架

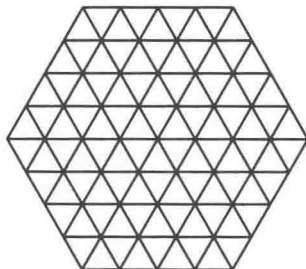


图 1-10 三向网架

2. 四角锥体系网架

四角锥体系网架是由许多四角锥按照一定规律组成，组成的基本单元为倒置四角锥，如图 1-11 所示。这类网架上、下弦平面均为方形网格，下弦节点均落在上弦组成的方形网格形心的投影线上，与上弦网格的四个节点用斜腹杆相连。若改变上、下弦错开的平移值，或相对地旋转上、下弦杆，并适当抽去一些弦杆和腹杆，即可以获得各种形式的四角锥网架，主要包括以下六种网架结构形式：

(1) 正放四角锥网架：如图 1-12 所示，由倒置的四角锥体为组成单元，锥底的四边为网架上弦杆，锥棱为斜腹杆，连接各锥顶点的杆件即为下弦杆。建筑平面为矩形时，上、下弦杆均与边界平行（垂直）。上、下节点均分别连接 8 根杆件，节点构造较统一。如果网格两个方向尺寸相等，腹杆与下弦平面夹角为 45° ，即 $h = \sqrt{2}/2 \cdot s$ (h 为网架高度， s 为网格尺寸)，上弦、下弦和腹杆长度均相等，使杆件标准化。

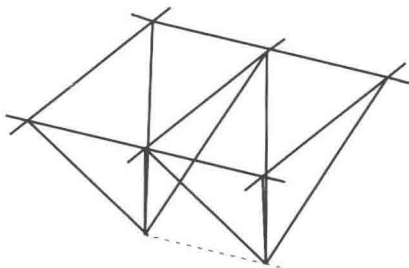


图 1-11 四角锥体系基本单元

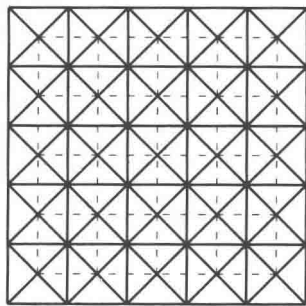


图 1-12 正放四角锥网架

正放四角锥网架空间刚度比其他类型四角锥网架及两向网架更大,用钢量可能略高些。这种网架因杆件标准化,节点统一化,便于工厂化生产,在国内外得到广泛应用。

(2) 正放抽空四角锥网架:如图1-13所示,正放抽空四角锥网架是在正放四角锥网架的基础上,适当抽调一些四角锥单元中的腹杆和下弦杆,使下弦网格尺寸大一倍。这种网架的杆件数量少,腹杆总数为正放四角锥网架腹杆总数的 $3/4$ 左右,下弦杆数量为正放四角锥网架 $1/2$ 左右,构造相对简单,经济效果较好。由于周边网格不宜抽去杆件,两个方向网格数宜取为奇数。如果取 $h = \sqrt{2}/2 \cdot s$,则上、下弦杆和腹杆长度相等。这种网架受力与正交正放交叉梁系相似,刚度较正放四角锥网架要弱一些。

(3) 单向折线形网架:如图1-14所示,单向折线形网架是将正放四角锥网架取消纵向的上、下弦杆,同时保留周边一圈纵向上弦杆而组成的网架,适用于周边支承形式下使用。在周边支承的情况下,当正放四角锥网架长宽比大于3时,沿长方向上、下弦杆内力很小,沿短跨方向上、下弦杆内力较大,处于明显单向受力状态,故可取消纵向上、下弦杆,保留周边一圈纵向上弦杆,形成单向折线形网架。周边一圈四角锥是为加强其整体刚度,构成一个较完整的空间网架结构。

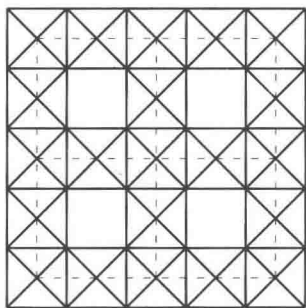


图 1-13 正放抽空四角锥网架

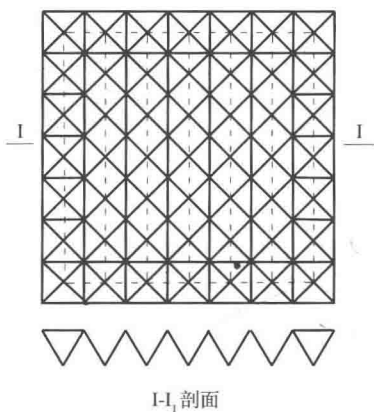


图 1-14 单向折线形网架

单向折线形网架处于单向受力状态,由交成V形的桁架传力,比单纯的平面桁架刚度大,同时不需要支撑体系,所有杆件均为受力杆件。所以在周边支承的边界且长宽比大于3或两边支承的条件下,可以获得较好的经济效益。

(4) 斜放四角锥网架:如图1-15所示,由倒置的四角锥组成,上弦网格呈正交正放形式,上弦杆与边界成 45° 夹角,下弦网格也为正交正放,下弦杆与边界垂直(或平行)。这种网架的下弦杆长度等于上弦杆长度的 $\sqrt{2}$ 倍。在周边支承的边界条件下,上弦杆受压,下弦杆受拉,体现了长杆受拉短杆受压的设计意图,具有较合理的受力状态。此外,节点处汇交的杆件相对较少(上弦节点6根,下弦节点8根)。当网架高度为下弦杆长度的一半时,上弦杆与斜腹杆等长。

这种网架适用于周边支承的情况,节点构造简单,杆件受力合理,用钢量较省,也是国内工程中应用较多的一种形式。

(5) 棋盘形四角锥网架:如图1-16所示,由于其形状与国际象棋的棋盘相似而得名。在正放四角锥基础上,除周边四角锥不变外,中间四角锥间格抽空,下弦杆呈正交斜

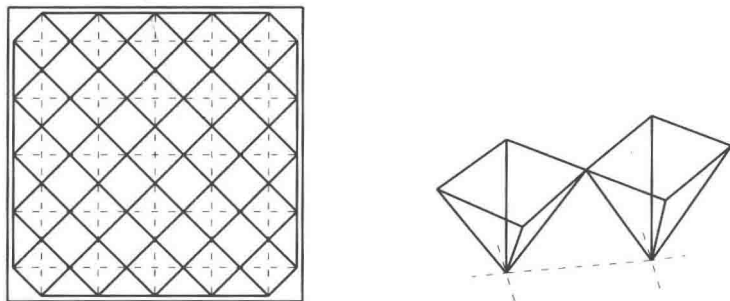


图 1-15 斜放四角锥网架

放，上弦杆呈正交正放，下弦杆与边界呈 45° 夹角，上弦杆与边界垂直（或平行），也可理解为斜放四角锥网架结构绕垂直轴转动 45° 而成。这种网架也具有上弦短下弦长的优点，且节点上汇交杆件少，用钢量省，屋面板规格单一，空间刚度比斜放四角锥网架好。它适用于周边支撑的情况。

（6）星形四角锥网架：如图 1-17 所示，由两个倒置的三角形小桁架相互交叉而成。两个小桁架的底边构成网架上弦，上弦正交斜放，各单元顶点相连即为下弦，下弦正交正放，在两个小桁架交汇处设有竖杆，斜腹杆与上弦杆在同一平面内。这种网架也具有上弦短下弦长的特点，杆件受力合理。当网架高度等于上弦杆长度时，上弦杆与竖杆等长，斜腹杆与下弦杆等长，且为上弦杆长度的 $\sqrt{2}$ 倍。

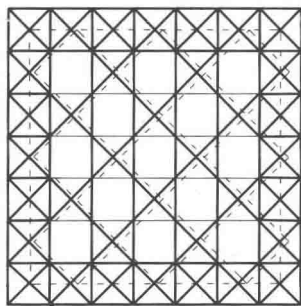


图 1-16 棋盘形四角锥网架

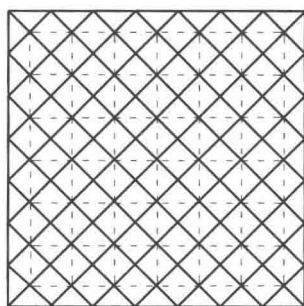


图 1-17 星形四角锥网架

3. 三角锥体系网架

由倒置的三角锥（图 1-18）组成。锥底三条边，即网架的上弦杆，组成正三角形，棱边为网架腹杆，锥顶用杆件相连，即为网架下弦杆。三角锥体系是组成空间结构几何不变的最小单元。不同的三角锥体布置可以获得不同的三角锥网架。

（1）三角锥网架：如图 1-19 所示，是由倒置的三角锥体组合而成的，上、下弦平面均为正三角形网格，下弦三角形的顶点在上弦三角形网格的形心投影线上。三角锥

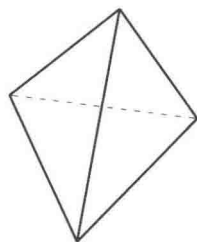


图 1-18 三角锥体系基本单元

网架受力比较均匀,整体抗扭、抗弯刚度好,如果取网架高度为网格尺寸的 $\sqrt{6}/3$ 倍,则网架的上弦、下弦和腹杆杆件长度相等。上、下弦节点处汇交9根,节点构造类型完全相同。它一般适用于大中跨度及重屋盖的建筑,当建筑平面为三角形、六边形或圆形时最为适宜。

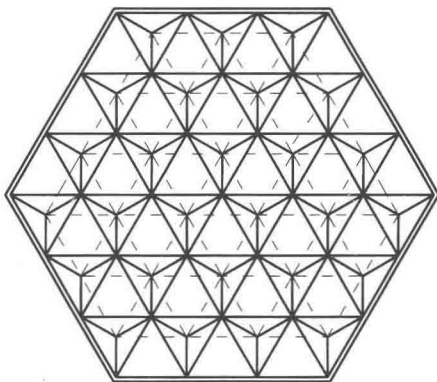


图 1-19 三角锥网架

(2) 抽空三角锥网架:是在三角锥网架基础上,适当抽去一些三角锥中的腹杆和下弦杆,使上弦网格仍为三角形。抽锥规律不同,则形成的下弦网格的形状也将不同。第一种抽锥规律是:沿网架周边一圈的网格均不抽锥,内部从第二圈开始沿三个方向间隔一个网格开始抽锥,图 1-20 (a) 中有影线部分为抽掉椎体的网格,下弦网格为三角形和六边形的组合形状。第二种抽锥规律是:从周边网格开始抽锥,沿三个方向间隔两个网格抽锥一个,图 1-20 (b) 中有影线部分为抽掉椎体的网格,下弦网格均为六边形。抽空三角锥网架抽掉杆件较多,整体刚度不如三角锥网架,适用于中小跨度的三角形、六边形和圆形的建筑平面。

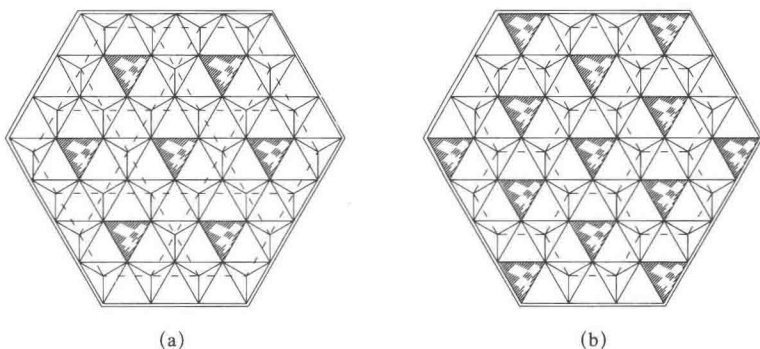


图 1-20 抽空三角锥网架

(a) 第一种方式; (b) 第二种方式

(3) 蜂窝形三角锥网架:如图 1-21 所示,蜂窝形三角锥网架是倒置三角锥按一定规律排列组成,上弦网格为三角形和六边形,下弦网格为六边形。它的上弦杆较短,下弦杆较长,受力合理。每个节点均只汇交6根杆件,节点构造统一,用钢量较省。蜂窝形三角

锥网架是从本身来讲是几何可变的，需要借助于支座水平约束来保证其几何不变，在施工安装时应引起注意。分析表明，这种网架的下弦杆和腹杆内力以及支座的竖向反力均可由静力平衡条件求得，根据支座水平约束情况决定上弦杆的内力。它主要适用于周边支承的中小跨度屋盖。

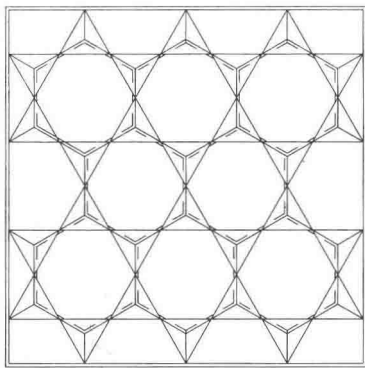


图 1-21 蜂窝型三角锥网架

1.1.3 网架选型基本规定

平面形状为矩形的周边支承或三边支承一边开口的网架，当其边长比（即长边与短边之比）小于或等于 1.5 时，宜选用正放四角锥网架、斜放四角锥网架、棋盘形四角锥网架、正放抽空四角锥网架、两向正交斜放网架、两向正交正放网架。当其边长比大于 1.5 时，宜选用两向正交正放网架、正放四角锥网架或正放抽空四角锥网架。平面形状为矩形、多点支承的网架可根据具体情况选用正放四角锥网架、正放抽空四角锥网架、两向正交正放网架。平面形状为圆形、正六边形等周边支承的网架，可根据具体情况选用三向网架、三角锥网架或抽空三角锥网架。对中小跨度，也可选用蜂窝形三角锥网架。

网架的网格高度与网格尺寸应根据跨度大小、荷载条件、柱网尺寸、支承情况、网格形式以及构造要求和建筑功能等因素确定，网架的高跨比可取 $1/10 \sim 1/18$ 。网架的短向跨度的网格数不宜小于 5。确定网格尺寸时宜使相邻杆件的夹角小于 45° ，且不宜小于 30° 。

1.2 网壳结构

网架结构就整体受力而言类似于受弯的平板，反映了很多平面结构的特性。因此，虽然其基本单元构件主要承受轴力作用，但整体上是受弯的结构，杆件轴力较大。网壳结构则是主要承受薄膜内力的壳体，主要以其合理的形体来抵抗外荷载的作用。特别是跨度较大时，同等条件下形体合理的网壳要比网架节约许多钢材。网壳结构外形美观，富于表现，充满变化的特点，改善、丰富了人类的居住环境。

我国制定了较为齐全的网壳结构设计标准。2003 年 8 月颁布了《网壳结构技术规程》JGJ 61—2003，2010 年 7 月又颁布了《空间网格结构技术规程》JGJ 7—2010。此外，针对网壳结构焊接球节点及其配件，颁布了《钢网架焊接空心球节点》JG/T 11—2009，针对嵌入榫节点颁布了《单层网壳嵌入式榫节点》JG/T 136—2001，它们有力地推动了网壳结构的发展。