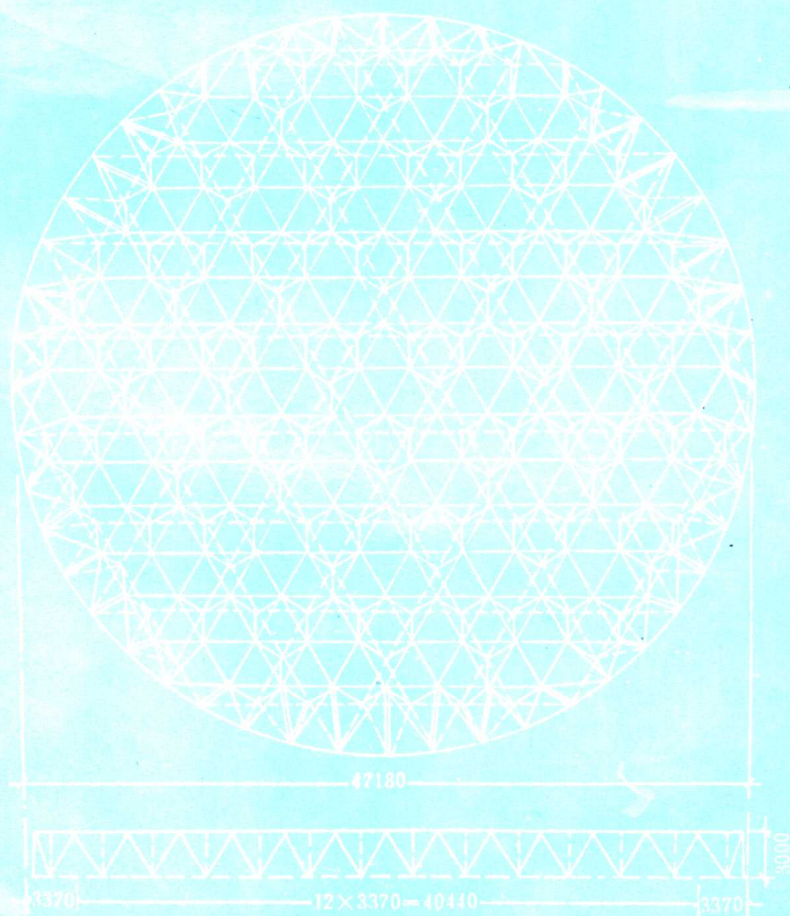


网架结构设计

张文福 张百龙 等编著



哈尔滨工业大学出版社

网架结构设计

张文福 张百龙 等编著



哈尔滨工业大学出版社

(黑)新登字第4号

内 容 提 要

本书内容包括:网架结构的特点、分类、选型及网架尺寸的确定问题,网架结构静内力计算的简化分析方法和精确分析法,网架结构竖向地震作用计算的精确法和简化计算方法。全书依据《网架结构设计与施工规定》(JGJ7-91)编写,并配有典型计算实例。

本书可作为高等院校建筑工程专业本科学生的教材或教学参考书,也可作为大专教材或电视大学、业余职工大学学生和广大工程技术人员学习自修之用。

网 架 结 构 设 计

张文福 张百龙 等编著

*

哈尔滨工业大学出版社出版

新华书店首都发行所发行

安达市友谊印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 12.56 字数 320 千字

1994年4月第1版 1994年4月第1次印刷

印数 1—2000

ISBN7-5603-0988-7/TB·8 定价 12.50 元

前 言

网架结构是一种较好的大跨度屋盖结构形式。它具有空间受力、节省钢材、空间刚度大、抗震性能好、建筑高度小、便于工厂化、定型化、建筑造型美观等优点。近年来,随着电子计算技术的发展,为网架的推广和应用创造了有利条件。到目前为止,国内已有大型体育馆、中型练习馆、展览馆、俱乐部、剧院、食堂以及工业厂房等近千余座工程的屋盖采用了网架结构。为进一步推广这种结构和满足教学的需要,编者根据《网架结构设计 with 施工规程》(JGJ7—91)和有关参考资料编写了此书。

本书在叙述方面,力求由浅入深,简明易懂,便于自学。在内容安排上,力求突出重点,同时为使读者较好地掌握网架结构的设计方法,配置了典型的计算实例。

本书共八章。前三章着重介绍网架结构的特点、分类、选型及网格尺寸的确定问题;第四章和第五章介绍网架结构常用的简化计算方法——交叉梁系差分法、假想弯矩法和拟夹层法;第六章介绍了网架结构的精确分析方法——矩阵位移法的原理和方法,并对对称性利用、温度应力计算和优化设计方法等内容作介绍;第七章阐述了网架结构地震作用计算方法,其中着重介绍了网架竖向地震作用计算的精确法和简化法;第八章介绍网架节点设计,在节点设计中着重介绍焊接空心球节点的设计问题。

本书在编写过程中,哈尔滨建筑大学著名钢结构专家钟善桐教授在百忙之中审阅了书稿并提出宝贵的建议,在此表示致谢。

全书由张文福、张百龙主编,赵文艳同志参加部分章节编写工作。

由于编者水平和时间所限,误漏之处在所难免,敬请广大读者予以批评指正。

编者

1994. 1

目 录

前 言	(1)
第一章 概述	(1)
第一节 网架结构的特点	(1)
第二节 网架结构的发展概况	(4)
第三节 网架结构的几何可变量分析	(8)
第二章 网架结构的分类和选型	(12)
第一节 网架结构的分类	(12)
第二节 网架结构的选型	(19)
第三章 网架几何尺寸的确定	(28)
第一节 网架几何尺寸的确定	(28)
第二节 网架结构的若干特殊问题	(30)
第四章 交叉梁系差分法	(35)
第一节 网架结构计算方法概述	(35)
第二节 交叉梁系差分法概要	(35)
第三节 交叉梁系网架的挠曲微分方程	(37)
第四节 差分算子及其表达式	(41)
第五节 边界条件的处理	(44)
第六节 等代梁弯矩和剪力差分解及网架杆件内力表达式	(48)
第七节 例题	(50)
第五章 假想弯矩法和拟夹层板法	(62)
第一节 假想弯矩法	(62)
第二节 拟夹层板法	(76)
第六章 矩阵位移法及其在网架结构设计中的应用	(95)
第一节 单元刚度矩阵及坐标变换	(95)
第二节 整体分析方法	(99)
第三节 支承条件的引入	(104)
第四节 杆件内力和支座反力计算	(107)
第五节 网架结构温度应力计算	(109)
第六节 对称性利用及其边界处理方法	(114)
第七节 网架结构优化设计方法	(118)
第七章 网架结构在地震作用下的内力计算	(123)
第一节 网架在地震作用下的计算原则	(123)
第二节 竖向地震反应谱	(126)
第三节 网架结构自由振动分析	(131)
第四节 网架结构竖向地震作用计算	(140)

第五节 网架结构竖向地震作用的简化算法.....	(149)
第八章 网架结构节点设计.....	(152)
第一节 概述.....	(152)
第二节 焊接钢板节点.....	(152)
第三节 焊接空心球节点.....	(158)
第四节 网架支座节点设计.....	(163)
附录一 钢管截面特性表.....	(171)
附录二 焊接空心球的承载力设计值表.....	(184)
附录三 橡胶垫板的材料性能.....	(186)
附录四 矩形平面周边简支网架拟夹层板法的弯矩和挠度系数表.....	(187)
主要参考文献.....	(193)

第一章 概 述

第一节 网架结构的特点

网架结构是杆件按照一定的规律布置,通过节点连接而成的网格状空间杆系结构。

网架外形可以呈平板状(图 1-1),亦可呈曲面状(图 1-2 和图 1-3)。前者称为平板网架(简称网架)。后者称为曲面网架(简称网壳)。常用曲面网壳结构有两类:网状筒壳(图 1-2)和网状穹顶(图 1-3)。网状筒壳中倾斜于房屋纵轴的杆件组成斜拱,而和纵轴平行的构件则是直的。其受力兼有杆系和壳体受力的特点,是一种受力合理,体型美观,经济效果好的结构形式。结构可以是单层或双层(跨度较大时,为防止失稳宜采用双层)。其缺点主要是支承边界处有较大的推力,会给结构处理带来困难;网状穹顶是适合于平面为圆形或正多边形的一种空间结构形状。穹顶结构的组成方案很多,如图 1-3 所示属于环式构造,辐射方向的构件起拱肋的作用,是主要支承构件,另外还有环形构件和斜撑。环形构件在屋盖结构满布荷载时会出现环拉力,可对拱肋起拉条作用,从而使拱肋的截面减小。从受力角度看该类结构比平板网架合理,但是它使建筑和采暖空间增大,屋面消耗材料也增多。

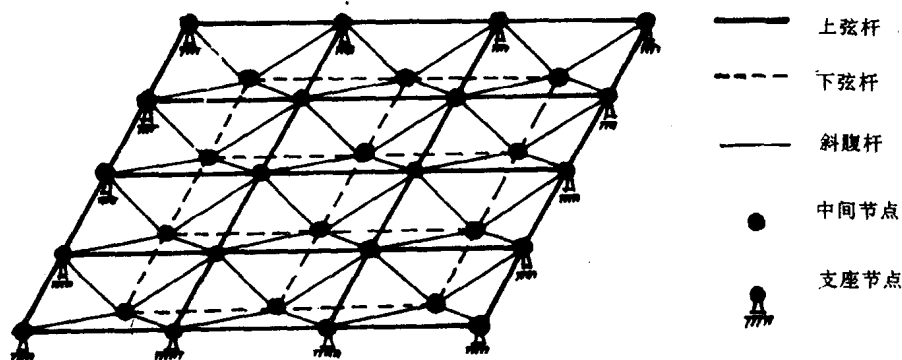


图 1-1 平板网架示例

由于网架结构无论在设计计算、构造与施工制作方面,还是在支座处理方面均较网壳简便,因此是目前较受欢迎的和发展最快的结构形式,并被广泛应用于大、中跨度屋盖体系中。本书将主要介绍平板网架(以后的简称网架)的选型、结构计算及设计。

网架跨度是指其短向跨度(L_2)或直径(D)。在工程实际中,一般将跨度在 60m 以上的

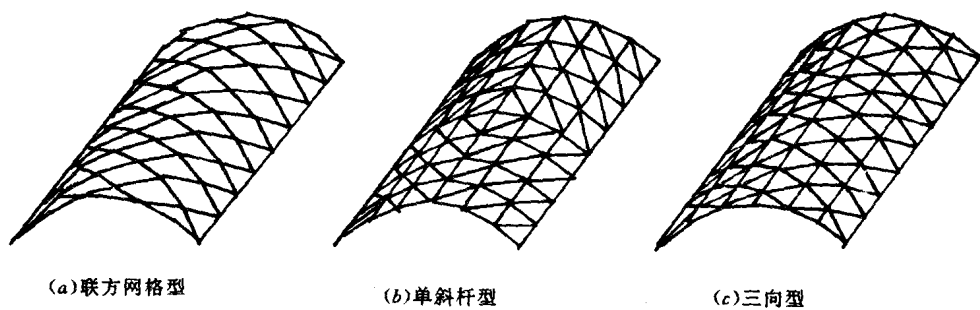


图 1-2 圆柱面网壳的网格形式

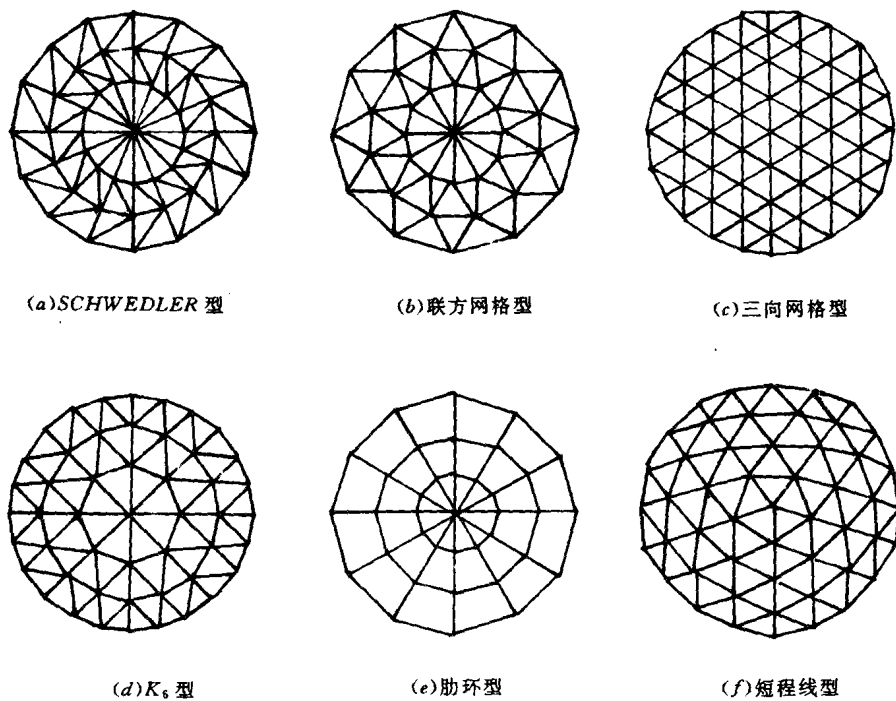


图 1-3 球面网壳的网格形式

网架称为大跨度网架；跨度在 30~60m 范围内的称为中跨度网架；跨度在 30m 以下称为小跨度网架。网架结构的主要优点有：

一、经济

网架结构是一种空间杆系结构,杆件主要承受轴力作用,截面尺寸相对较小,这些空间交汇的杆件又互为支承,将受力杆件与支承系统有机地结合起来,因而用料经济。由于结构组成的规律性,大量杆件和节点的形状、尺寸相同,这就给工厂成批生产创造了有利条件,从而使制造费用降低。同时,这种结构的刚度较大,当跨度相同时,网架高比平面桁架小,另外,由于网架具有空间受力的特性,因而应力分布较均匀,与平面结构相比较内力值也下降许多。例如 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 的屋盖,边界条件为周边简支,屋面荷载为 1.5kN/m^2 。采用间距为 5m 的钢屋架,跨中最大弯矩值为: $M_{\max}^{\pm}=1500\text{kN}\cdot\text{m}$;若用 5m 网格的正交正放网架,其跨中最大弯矩值为: $M_{\max}^{\pm}=913\text{kN}\cdot\text{m}$;若采用 3.54m 网格的两向正交斜放网架,由于短桁架的弹性支承作用,对角线桁架的跨中最大弯矩值为: $M_{\max}^{\pm}=322\text{kN}\cdot\text{m}$,近支座处产生的最大负弯矩值为: $M_{\max}^{-}\approx 480\text{kN}\cdot\text{m}$ 。由于以上原因,网架的用钢量比平面结构为少。例如:有关资料介绍^[1],首都体育馆屋盖网架($99\text{m} \times 112.2\text{m}$)耗钢量为 65kg/m^2 ;上海体育馆屋盖网架(柱内直径为 110m 面积共 9.500m^2)耗钢量为 47kg/m^2 ,这样大跨度的建筑若采用平面桁架,耗钢量至少也要达到 100kg/m^2 。又如,某 $34\text{m} \times 36\text{m}$ 的屋盖结构,采用网架结构,用钢量为 21.3kg/m^2 ;若采用普通钢屋架,用钢量为 36.52kg/m^2 ;若采用预应力钢筋砼折线形屋架,用钢量为 20.85kg/m^2 。可见,即使跨度不是很大时,如设计合理,网架结构用钢量也可以接近同跨度的钢筋砼屋架的用钢量。当跨度增加时,其经济性将显得更为突出。此外,由于网架高度的减少,可降低建筑物的高度,上部结构自重的减轻,又可使支承结构和基础负荷减小,所有这些因素都有利于降低建筑总造价。因此,采用网架结构可以取得较好的经济效果。

二、安全可靠

网架结构属高次超静定结构,具有多向受力性能。结构安全储备很大。倘若某一构件受压屈曲,也不会导致结构的整体崩溃。此外网架结构刚度和整体性较好,具有良好的抗震性能。1976年唐山地震时,京津地区的大中跨度网架并未发现任何破坏现象;1985年新疆乌恰县发生7.4级地震,地震烈度相当于9度。当时正在施工的县影剧院采用了 $24\text{m} \times 27\text{m}$ 的正放四角锥网架,网架高度为 2.66m 。网架仅局部发生轻微的损坏。这些实例都充分说明网架结构具有良好的抗震性能^[7]。

另外,当地基条件不好而出现不均匀沉降或当施工中不同时提升而出现局部杆件受力变异时,由于网架的多向传力性和内力重分布的结果,不会对网架结构产生太大的影响^[2]。

三、适应性强

网架结构能适应不同支承条件的公共建筑和工业厂房的要求;在建筑平面形状上也能适应正方形、矩形、多边形、圆形、扇形、三角形以及由此组合而成的各种平面形状的要求;既可用于大跨度屋盖,也适用于小跨度屋盖;网架内部空间还可以用以设置灯具、管道、吊顶、检修通道等设施。对于大柱距工业厂房,可以沿纵、横两个方向设置悬挂吊车,容易满足工艺要求。

四、建筑造型美观

网架结构具有造型轻巧、美观、大方、便于建筑处理和装饰等优点,如在公共建筑中采

用较大的挑檐,不仅可以丰富建筑造型亦可以改善网架中杆件的受力;在体育建筑中采用四点支承外露的网架屋盖,可以充分体现体育建筑的劲度和雄伟。

另外,钢管杆件球节点的网架直接外露或部分外露,显出规则的几何图形,会形成一种独特的结构韵律美。

五、设计、计算简便

目前,我国已有许多适用的网架结构分析和设计通用程序,有的单位已开发出相应的软件,可以直接绘制施工图。在手算方面也有不少用于不同类型网架的近似计算图表^{[3]、[4]}。所有这些都为网架的设计与计算提供了有利条件。另外由于网架杆件和节点的单一性,其结构施工图纸也较少,较受工程设计人员欢迎。

六、制作、安装方便

网架结构的杆件和节点比较单一,便于制成标准杆件和单元,可在工厂中成批生产。同时杆件与节点尺寸不大,便于储存、装卸、运输和拼装。安装时可利用大型起重设备进行吊装,也可以选用于千斤顶、升板机、卷扬机等小型施工机具。如陕西省体育馆(平面尺寸为 $60\text{m} \times 90\text{m}$)仅在边柱顶设置 26 台升板机即将 350 吨的网架屋盖顺利地安装至设计位置。此外对于中小跨度网架,也可以设置满堂红脚手架进行组装。

当然,网架结构也有它的缺点。网架结构的节点耗钢量较大,钢管取材也较其它型钢困难,网架屋面材料的选用还受到某些条件的限制,制造、施工费用较高,因而其造价还是比平面桁架高。随着网架结构定型化和商品化的发展,这些问题会得到进一步解决。

第二节 网架结构的发展概况

随着高强结构材料的发展。制造和施工工艺的更新,尤其是电子计算机在建筑结构计算中的广泛应用,近四十年来,网架结构在国内外得到了迅速的发展。

我国 1965 年首次在上海师范学院球类房采用网架结构(平面尺寸为 $31.4\text{m} \times 40.5\text{m}$ 的正放四角锥网架结构)。此后,网架结构以其固有的特点在全国各地得到广泛应用。到目前为止,已建成的采用网架屋盖形式的各类建筑物近千座,包括大、中、小跨度的体育馆、展览馆、俱乐部、影剧院、食堂、会议室、候车(船)厅等公共建筑以及飞机库、仓库、车间等工业建筑。其中首都体育馆的屋盖(1967 年建成)为 $90\text{m} \times 112.2\text{m}$ 矩形平面(图 1-4),采用正交斜放网架,耗钢量为 $65\text{kg}/\text{m}^2$,是目前国内单跨覆盖面积(1107.8m^2)最大的网架结构;上海体育馆屋盖(1973 年建成)为圆形平面(图 1-5),柱内直径 $D=110\text{m}$,外挑 7.5m ,面积为 12300m^2 ,采用三向交叉网架,耗钢量为 $47\text{kg}/\text{m}^2$,是目前国内跨度最大的网架结构。其它工程实例见图 1-6、图 1-7、图 1-8。在工业厂房中,特别是对于为适应工艺革新加快的需要而出现的多跨大柱距联合车间,网架结构更显示出它的优越性。例如唐山机车车辆厂客车总联合厂房,采用 $18\text{m} \times 18\text{m}$ 正放抽空四角锥网架为单元,组成柱网为 $18\text{m} \times 18\text{m}$ 的厂房屋盖,覆盖面积达 16340m^2 ;北京燕山石油化工总公司东风化工厂的四个主厂房(总面积为 4000m^2)亦采用了以 $18\text{m} \times 18\text{m}$ 柱网为基本单元的网架。这些多跨大柱距的工业厂房采用网架结构均取得了较好的技术经济效果。

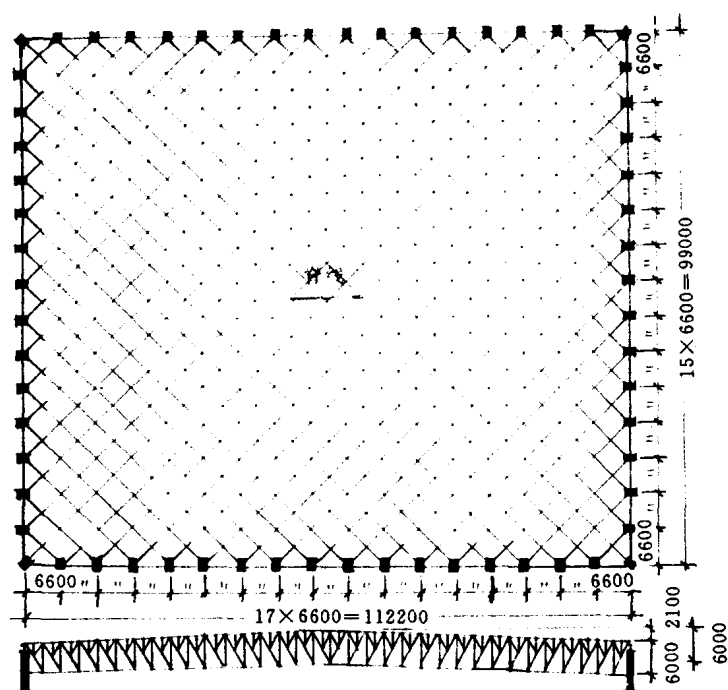


图 1-4 首都体育馆(1967 年 9 月)

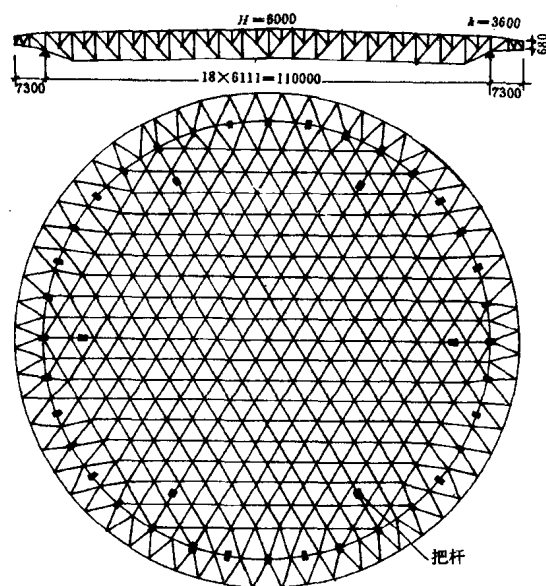


图 1-5 上海体育馆(1973 年 10 月)

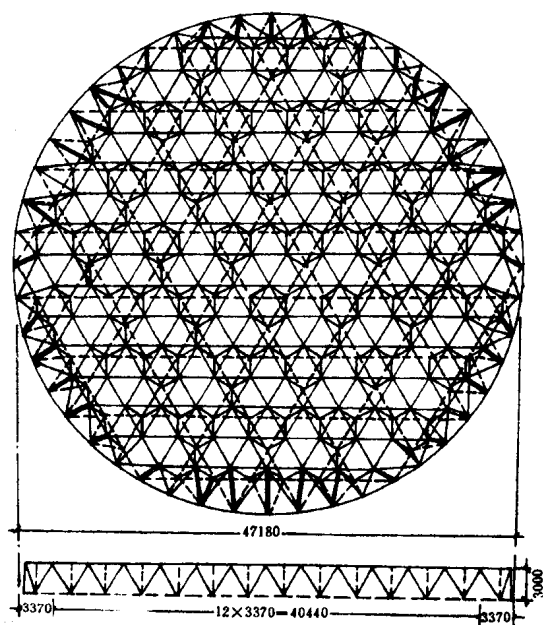


图 1-8 天津塘沽车站候车室(1977 年 12 月)

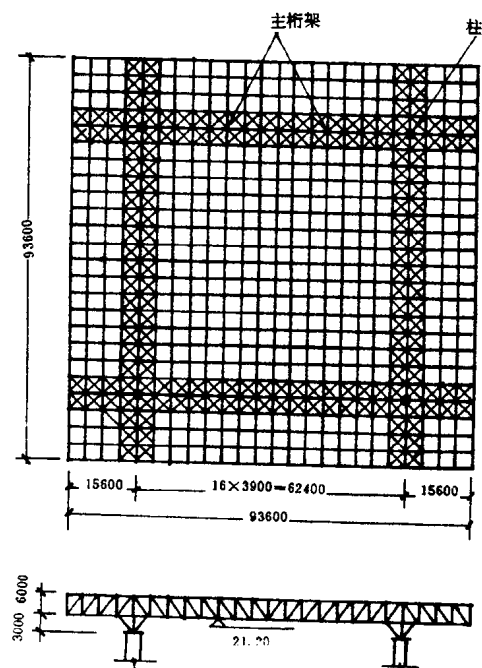


图 1-9 巴基斯坦伊斯兰堡体育馆

除此以外,我国为国外设计的一些大型公共建筑也采用了网架结构,如巴基斯坦伊斯兰堡体育馆屋盖结构(图 1-9),采用了 $93.6\text{m} \times 93.6\text{m}$ 四点支承的两向正交正放网架。

1980 年我国首次颁布《网架结构设计施工规程》(JGJ7-80)。该规程是对当时我国网架结构设计施工经验和科研成果的总结。近年来,在网架形式、节点构造和计算方法等方面又进行大量的研究和试验,取得了一些新的理论和方法,并且在施工制作安装方面积累了大量施工经验,为此,我国 1991 年颁布了修订后的《网架结构设计施工规程》(JGJ7-91)(以后简称《规程》)。该《规程》适用于工业与民用建筑屋盖及楼层的网架结构,其中屋盖的跨度不宜大于 120m 。本书全部按新规程编写。

在网架结构方面,日本、西德、美国、法国和英国等国家发展很显著。例如在大跨度屋盖中采用网架结构的有:瑞士苏黎世克洛滕喷气机库($125\text{m} \times 128\text{m}$),美国洛杉矶加里福尼亚大学体育馆($91\text{m} \times 122\text{m}$)耗钢量为 $73.23\text{kg}/\text{m}^2$ 。此外还兴建了一些大柱网的大面积建筑,如西德杜塞尔多夫博览会一座大型展览厅曾建有面积达 102600m^2 的网架,日本的大阪国际博览会中心节日广场上的巨型正放四角锥结构($292\text{m} \times 108\text{m}$),英国伯明翰国立展览中心面积 83700m^2 等,随着网架结构的发展,国外已形成了各自的标准单元,定型节点,建立了许多不同的体系,如西德的米罗(Mero)体系(由端头星锥体的杆件用螺栓球节连接),英国的空间板体系(SpaceDeck)(由预制的倒置四角锥单元组成的正放四角锥体系),法国的单蝙蝠体系(Unibat)(由预制的三角锥单元组成的斜放三角锥体系)等。总之,国外日趋向定型化发展,在许多国家形成专门的网架结构建筑体系,不仅在本地区使用,而且向国际市场推广使用。

国内外大量的工程实践说明,网架结构已成为目前大跨度空间结构中发展最快的一种结构形式,具有广泛的应用前景。

第三节 网架结构的几何可变性分析

网架结构属空间结构。若杆件布置合理和网架支承数目足够时,网架结构在外力作用下为空间受力和整体工作,此时网架结构为几何不可变体系;但是若杆件布置不合理或支承数目不够时,网架结构将不能承受任何外力,此时该网架结构为几何可变体系。为此,《规程》明确规定:网架杆件布置必须保证不出现几何可变情况,可见网架结构几何可变性分析十分重要。

我们从平面杆系的研究中已知道,平面内任意三个不共线的点 A 、 B 、 C 用三根杆相连后,成了静定而不变的基本组成——由三杆组成的三角形,如图 1-10(a)所示。今若于三角形的各边与空间 D 点分别再连一个三角面 ABD 、 ACD 和 BCD 与原三角面 ABC 构成一个有四个三角面的四面体 $ABCD$ 、(如图 1-10(a)所示),此四面体(三角锥)不论承受任何方向的荷载,体系均是稳定的。通常,我们将此四面体(三角锥)称为网架构成的“基本单元体”。进一步以 $ABCD$ 四面体为“基本单元体”,再以三杆与空间 E 点相连可组成另一个稳定体系 $ABCDE$ 如图(1-10(b)),如图以 F 点与 $ABCDE$ 相连成稳定体系则又需三杆如图 1-10(c)所示。依次类推,若 k 个空间点相连成一个静定的桁架体系时除“基本单元体”(三角锥)四个节点共需六根杆件外,其余各节点均需三杆,则空间杆系的静定体所需杆件数

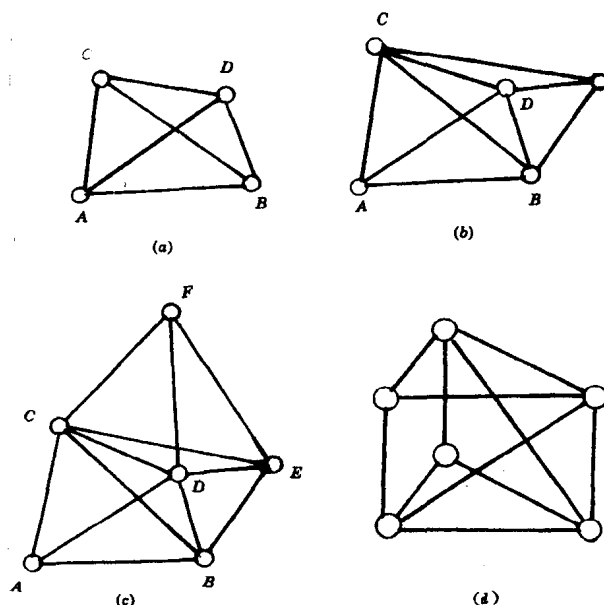


图 1-10 构成分析

为:

$$m = 3(k - 4) + 6 = 3k - 6 \quad (1-1)$$

式中 m ——空间桁架结构杆件总数;

k ——空间杆系节点总数;

6 ——为支座约束链杆数。

根据机动分析原理,空间网架结构的每一个节点有三个独立线位移,对于节点总数为 k 的网架,其杆件总数 m 应满足下式的要求:

$$m \geq 3k - 6 \quad (1-2)$$

应该指出:上式只是空间杆系几何不变的必要条件,但不是充分条件。这是因为该公式并没有反映出杆件的组合情况。所以,还必须再做几何构造分析。

通过前面分析,大家已经知道“四面体”可以看成为一个几何不变的稳定结构。这样从一个几何不变的四面体开始,连续不断地利用三个不共面的杆件交出一个新的节点所构成的结构,也必然是几何不变的体系。除“四面体”外,图 1-10(d)所示的“五面体”(三棱体)也是同时满足几何不变性充分和必要条件的稳定结构。由“四面体”或“五面体”这些稳定单元构成的网架结构也一定是几何不变的稳定体系。因此,三角形是几何不变的最小单元,如果网架基本单元的外表面是由三角形所组成,并且满足几何不变的必要条件(即式(1-2)),则此基本单元将是几何不变的。要检查网架结构是否满足几何不变性的充分条件,只要检查它是否都是由几何不变的基本单元(如三角锥或三棱体)所组成。

此外,在进行网架结构几何不变性分析时,还应注意结构体系不应是瞬变体系。即在网架中任何节点不得仅含有两根杆件,也不得存在两根或两根以上的共面杆件交出的新节点,因为这两种情况下节点是不稳定的。

若采用矩阵位移法分析网架结构,其几何不变性分析亦可通过对结构总体刚度矩阵行列式值的判定来实现。如果考虑边界条件(约束)以后的结构总体刚度矩阵 $[K]$ 为非奇异矩阵,即该矩阵的行列式值不等于零,即 $|K| \neq 0$ 则,网架的位移和杆力存在唯一解,而

且计算机将给出相应的结果和数据,此时网架必定是几何不变体系(假定初始数据和约束信息正确)。如果该矩阵的行列式等于零,即 $|K|=0$,此时无法求得位移和内力,计算机将拒绝打印位移和杆力,说明此时网架为几何可变体系。当然,上述判定 $|K|$ 值方法也可通过“零载法”(即在荷载项中输入零荷载)间接完成。具体由程序功能而定。

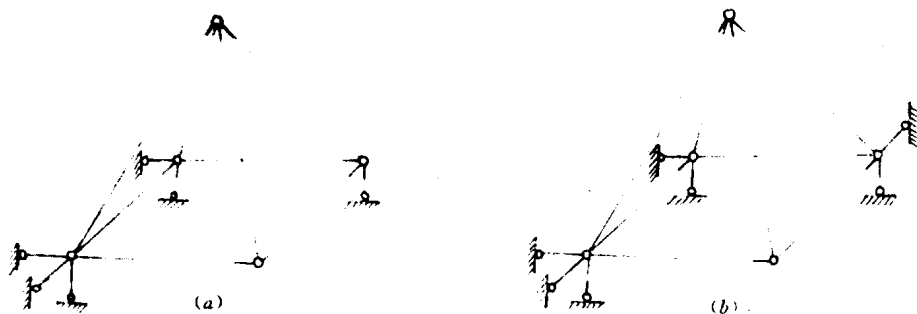


图 1-11 他约体系示例

按上述原则,不难对各种形式的网架进行几何不变性分析。

从几何可变分析角度出发,我们一般把网架结构分为两大类体系:“自约结构体系”和“他约结构体系”。所谓“自约结构体系”是指结构本身就是一个几何不变的体系。由稳定单元,如三角锥构成的网架就属于该类的体系;而依靠支座和边界条件的约束作用才能保持几何不变的体系称为“他约结构体系”。例如图 1-11a 所示为一个四角锥,其外表包含一个四边形的底面,属几何可变体系。但是通过适当增加支承约束数目可以将其转化为几何不变的体系,即在四角锥的底面增设一个链杆(图 1-11b)。该体系就称为“他约结构体系”。

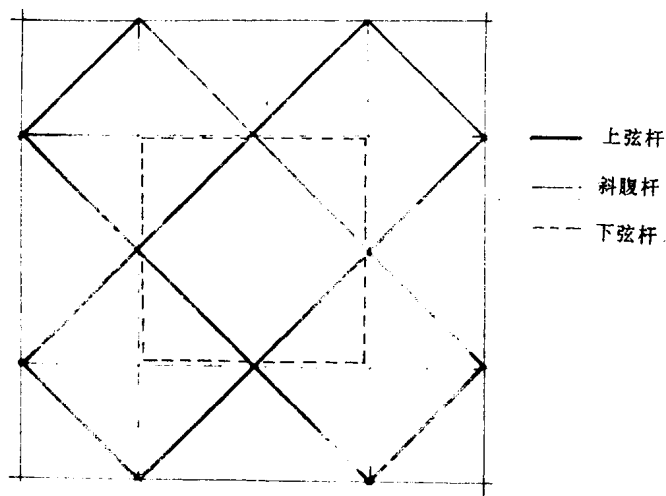


图 1-12 斜放四角锥网架

〔例题 1-1〕 试分析图 1-12 所示斜放四角锥网架的几何可变性。

[解]:

该斜放四角锥网架,共有节点 16 个(其中上弦节点 12 个,下弦节点 4 个),40 根杆件(其中上弦杆 20 根,下弦杆 4 根,斜腹杆 16 根)。

按公式(1-2)有:

$$m = 40 < 3k - 6 = 3 \times 16 - 6 = 42$$

所以,该网架连几何不变的必要条件也未满足;再从几何图形检查,体系内部没有几何不变的四面体,因而该体系属于几何可变体系。当然,若将周边上弦节点支承于刚度很大的圈梁或边桁架上,依靠外部的约束条件可以使该体系转变成几何不变体系。故该网架属于“他约结构体系”。