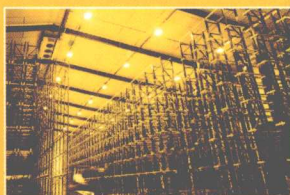


新型空间钢结构 设计与实例

黄斌 毛文筠 编著



DESIGN AND EXEMPIE



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新型空间钢结构设计与实例

黄 斌 毛文筠 编著

目 录

第一章 绪论	1
第二章 空间钢结构的分类	5
第三章 空间钢结构的组成	10
第四章 空间钢结构的受力特点	15
第五章 空间钢结构的构造要求	20
第六章 空间钢结构的连接	25
第七章 空间钢结构的稳定性	30
第八章 空间钢结构的疲劳	35
第九章 空间钢结构的防腐	40
第十章 空间钢结构的防火	45
第十一章 空间钢结构的抗震	50
第十二章 空间钢结构的施工	55
第十三章 空间钢结构的维护	60

图 目 录

图 1-1 空间钢结构的分类	1
图 2-1 空间钢结构的组成	5
图 3-1 空间钢结构的受力特点	10
图 4-1 空间钢结构的构造要求	15
图 5-1 空间钢结构的连接	20
图 6-1 空间钢结构的稳定性	25
图 7-1 空间钢结构的疲劳	30
图 8-1 空间钢结构的防腐	35
图 9-1 空间钢结构的防火	40
图 10-1 空间钢结构的抗震	45
图 11-1 空间钢结构的施工	50
图 12-1 空间钢结构的维护	55



机械工业出版社

本书介绍了多种新型空间钢结构的形式和特点,论述了相关分析和设计理论,在此基础上给出了新型空间钢结构的静力、动力特性和稳定性计算与分析的过程,并附有典型工程设计实例。全书共分七章,内容包括新型空间钢结构体系、网壳结构计算与构造、拱支网壳、外铺面板网壳、局部双层网壳、斜拉网壳和新型立体桁架。

本书可供结构工程师、科研人员以及相关专业的高校师生参考。

黄斌 文著 黄斌

图书在版编目(CIP)数据

新型空间钢结构设计与实例/黄斌,毛文筠编著. —北京:机械工业出版社, 2009. 10

ISBN 978-7-111-28347-8

I. 新… II. ①黄…②毛… III. 空间结构: 钢结构—结构设计
IV. TU391. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 168367 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张 晶 责任编辑: 张 晶

版式设计: 张世琴 责任校对: 姜 婷

封面设计: 张 静 责任印制: 杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 11.25 印张 · 276 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-28347-8

定价: 39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

读者服务部: (010)68993821 封面无防伪标均为盗版



前言

新型空间钢结构大多在 20 世纪 90 年代以后进入工程应用,它不仅可用于跨度较大的公共建筑,如体育场馆、展览馆、会议中心、机场候机楼等,在中小跨度建筑和特种结构中也时常采用,发展前景十分广阔。

本书对常见的新型空间钢结构进行了较全面的分析,并给出了一些典型的设计实例。第 3 章、4 章、5 章侧重于介绍拱支网壳、外铺面板网壳和局部双层网壳的稳定性分析;第 6 章、7 章侧重于介绍斜拉网壳和新型立体桁架的动力分析。这样,读者就可以根据自己的需要进行取舍。本书理论部分阐述简明扼要,重点在将基础理论和各种新型空间钢结构的实际计算分析相结合,以方便广大工程设计人员、高校师生理解。绝大多数算例利用了通用计算软件 ANSYS 和结构分析设计专业软件 MIDAS 求解,这两种软件在业内已经普及,对于读者而言,可借鉴性较强。

合著者毛文筠,为四川理工学院建工系讲师,在新型空间钢结构的计算分析与软件应用方面作出了较大的贡献。本书的部分内容还采用了已毕业的硕士研究生徐硕、樊亭等的研究成果。本书引述了多位国内外空间结构专家以及一些兄弟单位的研究成果,在此对这些专家学者深表谢意!在编著过程中得到了北京 MIDAS 技术有限公司吴晓平等工程技术人员的大力协助,上海建筑设计研究院有限公司和浙江精工钢构公司为本书提供了翔实的设计资料,在此一并表示衷心感谢!

由于作者水平有限,不足之处在所难免,敬请读者不吝指正。

黄 斌

于武昌 马房山

目 录

前言

第1章 新型空间钢结构体系 1

1.1 传统网壳结构体系 1

1.1.1 球面网壳 1

1.1.2 柱面网壳 4

1.1.3 其他曲面网壳 5

1.1.4 典型工程实例 6

1.1.5 结构选型 10

1.2 新型网壳结构体系 11

1.2.1 拱支网壳 11

1.2.2 组合网壳 15

1.2.3 外铺钢板肋环形网壳 16

1.2.4 局部双层网壳 17

1.2.5 斜拉网壳 20

1.2.6 弦支网壳 21

1.2.7 索撑网壳 24

1.2.8 空腹网壳 27

1.2.9 斗拱型穹顶 28

1.3 新型立体桁架结构体系 30

1.3.1 立体桁架 30

1.3.2 斜拉立体桁架 34

1.3.3 张弦立体桁架 35

第2章 网壳结构计算与构造 40

2.1 网壳结构的有限元计算 40

2.1.1 网壳结构的计算方法分类 40

2.1.2 网壳结构的计算模型 40

2.1.3 空间刚架位移法 41

2.2 网壳结构的稳定性分析 47

2.2.1 屈曲类型 48

2.2.2 网壳结构的失稳模态 48

2.2.3 导致网壳结构失稳的因素 49

2.2.4 特征值屈曲分析 51

2.2.5 几何非线性全过程分析 52

2.2.6 非线性平衡路径跟踪技术 54

2.3 网壳结构的抗震分析 56

2.3.1 网壳结构的动力特性 57

2.3.2 网壳结构的地震反应分析 57

2.3.3 动内力分布规律 60

2.4 杆件与节点构造 61

2.4.1 杆件 61

2.4.2 焊接空心球节点 61

2.4.3 螺栓球节点 63

2.4.4 嵌入式毂节点 64

2.4.5 支座节点 64

第3章 拱支网壳 67

3.1 交叉拱支网壳稳定性分析 67

3.1.1 计算模型 67

3.1.2 屈曲模态分析 68

3.1.3 几何非线性分析 69

3.1.4 参数分析 70

3.2 拱支索拉网壳结构抗震分析 73

3.2.1 计算模型 73

3.2.2 拱支索拉网壳自振分析 73

3.2.3 拱支索拉网壳反应谱分析 76

3.2.4 拱支索拉网壳时程分析 77

3.2.5 反应谱与时程分析结果对比 80

3.3 拱支网壳结构初步设计实例 80

3.3.1 工程概况 80

3.3.2 荷载工况 80

3.3.3 风振计算 82

3.3.4 结构静力计算 84

3.3.5 结构自振特性 84

3.3.6 整体稳定计算 89

3.3.7 节点计算 90

第4章 外铺面板网壳 95

4.1 组合网壳结构 95

4.1.1 几何非线性稳定分析 95

4.1.2 对比分析 95

4.1.3 结构计算	98	6.2.1 斜拉柱面网壳自振分析	118
4.1.4 节点设计	99	6.2.2 自振特性的参数分析	122
4.2 外铺钢板肋环形网壳	100	6.2.3 斜拉柱面网壳反应谱分析	124
4.2.1 工程概况	100	6.2.4 斜拉柱面网壳时程分析法	126
4.2.2 建模求解	100	6.2.5 反应谱法与时程法结果比较	130
4.2.3 内部网壳的全过程分析	101		
4.2.4 线性屈曲分析	102	第7章 新型立体桁架	132
4.2.5 非线性全过程分析	104	7.1 斜拉立体桁架结构分析	132
4.2.6 参数分析	106	7.1.1 计算模型	132
第5章 局部双层网壳	107	7.1.2 极限承载力分析	133
5.1 局部双层球面网壳	107	7.1.3 水平地震作用分析	135
5.1.1 工程概况	107	7.1.4 竖向地震作用分析	140
5.1.2 建模求解	107	7.2 斜拉立体桁架结构设计实例	144
5.1.3 非线性全过程分析	108	7.2.1 工程概况	144
5.1.4 对比分析	110	7.2.2 结构模型	146
5.1.5 参数分析	112	7.2.3 荷载与作用	148
5.2 局部双层柱面网壳	114	7.2.4 荷载组合	149
5.2.1 正交斜放局部双层柱面网壳	114	7.2.5 结构静力计算	150
5.2.2 正交正放局部双层柱面网壳	114	7.2.6 桅杆结构稳定性计算	159
第6章 斜拉网壳	116	7.2.7 结构抗震计算	162
6.1 斜拉网壳静力特性	116	7.2.8 节点设计	167
6.2 斜拉柱面网壳抗震分析	117	7.2.9 吊装工况分析	168
		参考文献	170

第 1 章 新型空间钢结构体系

近几十年来,空间钢结构在世界范围内迅猛发展,在各种体育场馆、剧院、会展中心、机场候机楼、工业厂房等建筑中得到了广泛的应用,而空间结构技术也被誉为一个国家建筑业水平的象征。在这里,空间结构是指结构形体呈三维状态,具有三维受力特性并呈空间工作的结构。与平面结构不同,空间结构不仅仅依赖材料的性能,更依赖自己合理的形体来充分利用不同材料的特性,以适应不同建筑造型和功能需要,跨越更大的空间。在目前的实际工程中,以曲面网壳和空间立体桁架为主的空间钢结构由于自重轻、刚度好,建筑造型丰富,更是得到了大量的应用。

1.1 传统网壳结构体系

网壳是空间钢结构最典型的代表。它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,组装成三维连续结构体系。网壳具有重量轻,施工速度快,工业化程度高,应用范围广等优点。网壳各构件之间没有明显主次关系,各构件集结为整体工作,能够几乎均衡地承受荷载,所以内力分布比较均匀,应力峰值较小。此外,不同曲面的网壳可以提供各种新颖、美观的建筑造型,因此也是深受建筑师青睐的一种结构形式。

传统网壳的分类按曲面外形划分,常见的有以下几种类型:

1.1.1 球面网壳

1. 单层球面网壳

单层球面网壳构造简单,重量轻,外观简洁优美,但稳定性较差,一般适用于中、小跨度结构。单层球面网壳的形式,按网格划分主要有:

(1) 肋环型球面网壳。肋环型球面网壳(图 1.1)由一系列相同的径梁和环梁组成,这些肋在球顶相交,在基础处以拉力环加强。肋环型网壳的优点是每个节点仅有 4 根杆件交汇,节点构造简单。这种网壳一般采用型钢制作,因而很容易保证节点的刚度,以传递平面内外力。该类网壳适用于中、小跨度结构。

(2) 肋环斜杆型球面网壳。亦称施威德勒型。如图 1.2 所示,这种网壳是在肋环型基础

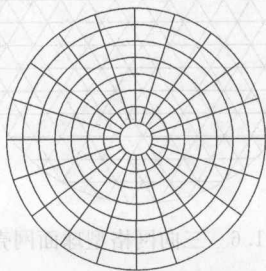


图 1.1 肋环型球面网壳

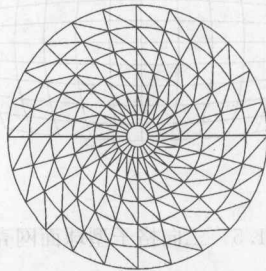


图 1.2 肋环斜杆型球面网壳

上加斜杆而成,这样可以增强结构承受不对称荷载的能力,大大提高网壳的刚度。肋环斜杆型单层网壳角位移都很小,随着结构矢跨比的增大,结构的竖向位移相应减少,且在结构边缘部位处位移变化幅度较大。各杆内力相应减少,弯曲应力在杆件总应力中的比重越来越小。这类网壳适用于大、中跨度结构。

(3) 葵花型球面网壳。亦称联方型。

如图 1.3a 所示,这种网壳由人字斜杆组成菱形网格,两斜杆夹角在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 之间。为了增强网壳的刚度和稳定性,加设杆件使网格成为三角形,如图 1.3b 所示。联方型网壳适用于大、中跨度结构。

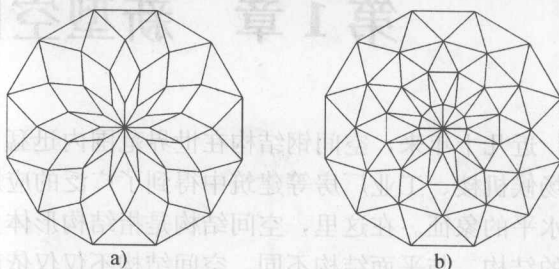


图 1.3 葵花型球面网壳

a) 无纬向杆 b) 有纬向杆

(4) 扇形三向网格型球面网壳。亦称

凯威特型。如图 1.4 所示,这种网壳是由 n (通常 $n=6$ 或 8) 根径肋把球面分为 n 个对称扇形曲面。每个扇形面内,由环杆和斜杆组成大小较匀称的三角形网格,根据肋数 n 简称为 K_n 型。这种网壳综合了旋转式划分法与均分三角形划分法的优点,因此不但网格大小匀称,而且内力分布均匀,适用于大、中跨度结构。

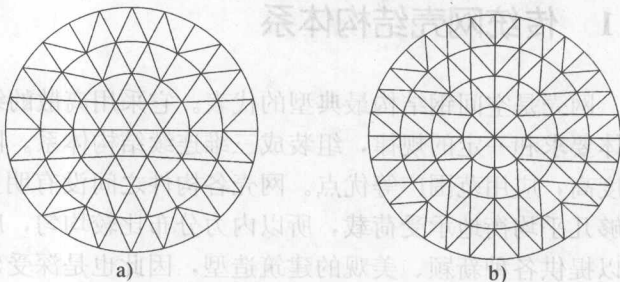


图 1.4 扇形三向网格型球面网壳

a) $n=6$ b) $n=8$

(5) 二向格子型球面网壳。如

图 1.5 所示,这种网壳一般采用子午线大圆划分法构成四边形的球面

网格,即用正交的子午线族组成网格。子午线间的夹角一般都相等,可求得全等网格,如不等则组成不等网格。

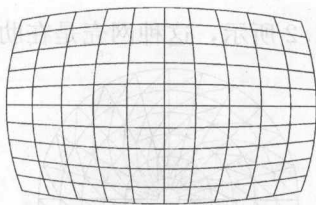


图 1.5 二向格子型球面网壳

(6) 三向网格型球面网壳。如图 1.6 所示,这种网壳的网格在水平投影面上呈正三角形,

即在水平投影面通过圆心作夹角为 $\pm 60^\circ$ 的三个轴,将轴 n 等分并连线,形成正三角形网格,再投影到球面上形成三向网格型网壳。它受力性能好,外形美观,适用于中、小跨度结构。

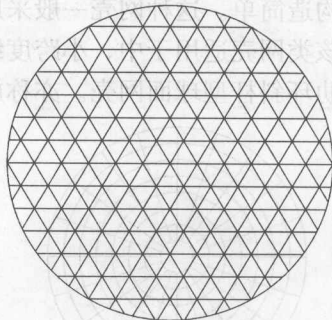


图 1.6 三向网格型球面网壳

(7) 短程线球面网壳。短程线的概念是用过球心的平面截球,在球面上所得截线称为大

圆。这个大圆上 a 、 b 两点间的无数连线中，其直线最短，故称为短程线。一个球面最大可以分割成 20 个等边球面三角形，只需用大圆等分球面，用直线连接球面三角形的顶点，就得到一个正 20 面体，它们的边长都是相等的。对于直径较大的球体，这个 20 面体的边长太长，会导致杆件的长细比过大，故需将这个正三角形进一步划分。一般可用弦均分法、等弧再分法和边弧等分法。工程实践证明，短程线型网壳（图 1.7）的网络划分规整、均匀，杆件和节点的种类在各种球面网壳中是最少的，其杆件受力非常均匀，最适合在工厂中大批量生产，造价也最经济。

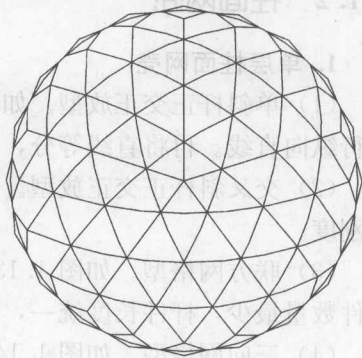


图 1.7 短程线型网壳

2. 双层球面网壳

当跨度较大或有特殊的建筑构造要求时，可以选用双层球面网壳。双层球面网壳可由交叉桁架体系和角锥体系组成，主要形式有：

(1) 交叉桁架体系。上节所述几种单层球面网壳网格划分形式都适用于交叉桁架体系，只要将单层网壳中每个杆件，用平面网片（图 1.8）来代替，即可形成双层球面网壳，网片竖杆是各杆共用，方向通过球心。



图 1.8 平面网片形式

(2) 角锥体系

1) 肋环型四角锥球面网壳。如图 1.9 所示。

2) 联方型四角锥球面网壳。如图 1.10 所示。

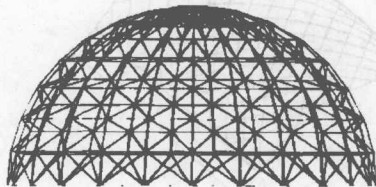
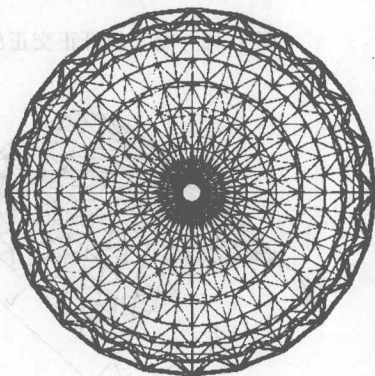


图 1.9 肋环型四角锥球面网壳

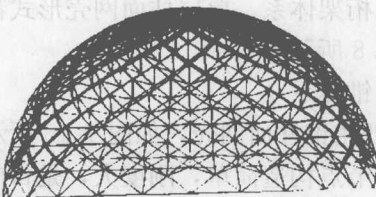
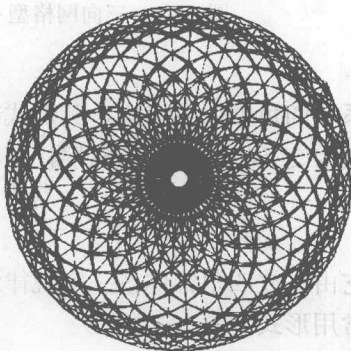


图 1.10 联方型四角锥球面网壳

1.1.2 柱面网壳

1. 单层柱面网壳

(1) 单斜杆正交正放型。如图 1.11 所示, 首先沿曲线划分等弧长, 通过曲线等分点作平行纵向直线。再将直线等分, 做平行于曲线的横线, 形成方格, 对每个方格加斜杆。

(2) 交叉斜杆正交正放型。如图 1.12 所示, 它是将方格内设置交叉斜杆, 以提高网壳的刚度。

(3) 联方网格型。如图 1.13 所示, 其杆件组成菱形网格, 杆件夹角在 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间。杆件数量最少, 杆件长度统一, 节点上只连接 4 根杆件, 节点构造简单, 但刚度较差。

(4) 三向网格型。如图 1.14 所示, 三向网格可理解为联方网格上加纵向杆件, 使菱形变为三角形。三向网格型刚度最好, 杆件品种也较少, 是一种较经济合理的形式。

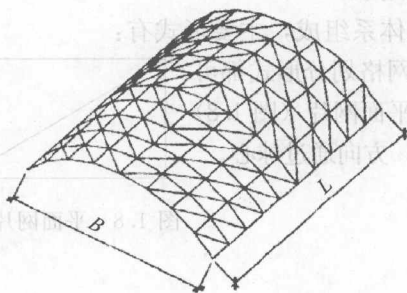


图 1.11 单斜杆正交正放型

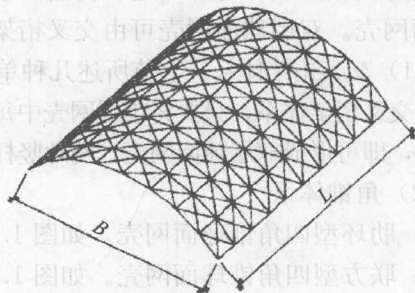


图 1.12 交叉斜杆正交正放型

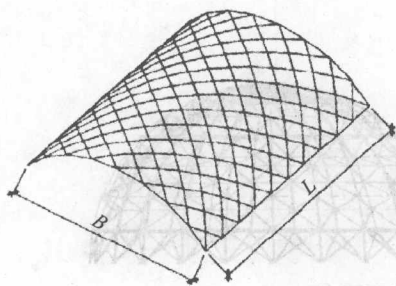


图 1.13 联方网格型

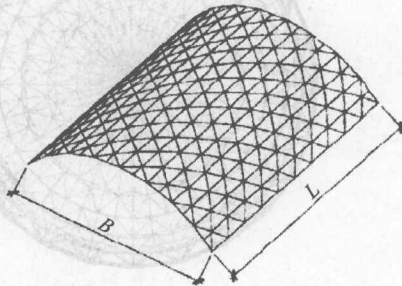


图 1.14 三向网格型

2. 双层柱面网壳

双层柱面网壳形式很多, 主要由交叉桁架体系和四角锥体系组成, 其形式有:

(1) 交叉桁架体系。单层柱面网壳形式都可成为交叉桁架体系的双层柱面网壳, 每个网片形式如图 1.8 所示。

(2) 四角锥体系

1) 正放四角锥柱面网壳, 如图 1.15 所示。它由正放四角锥体按一定规律组合而成。其杆件品种少, 节点构造简单, 刚度大, 是目前最常用形式之一。

2) 斜置正放四角锥柱面网壳。如图 1.16 所示。

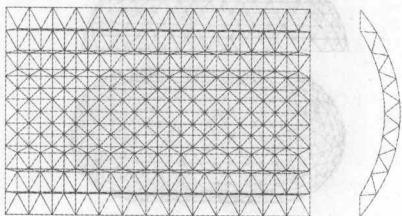


图 1.15 正放四角锥柱面网壳

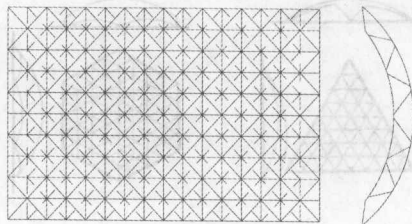


图 1.16 斜置正放四角锥柱面网壳

(3) 三角锥体系。三角锥柱面网壳, 如图 1.17 所示。

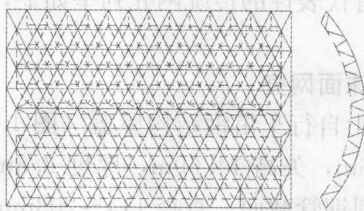


图 1.17 三角锥柱面网壳

1.1.3 其他曲面网壳

其他曲面网壳, 如双曲抛物面网壳 (图 1.18)、椭圆抛物面网壳 (图 1.19)、双曲扁网壳 (图 1.20)、单块扭网壳 (图 1.21)、切割形成的曲面网壳 (图 1.22) 和组合形成的曲面网壳 (图 1.23) 等, 非常富有建筑造型上的表现力, 也得到了广泛的应用。

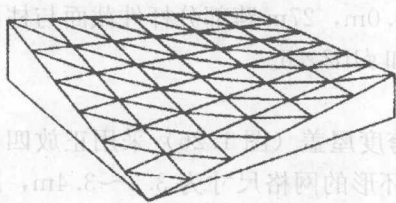


图 1.18 双曲抛物面网壳

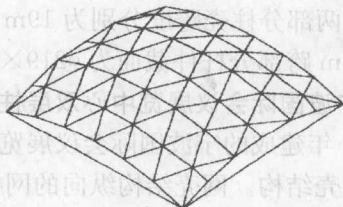


图 1.19 椭圆抛物面网壳

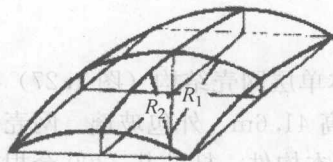


图 1.20 双曲扁网壳

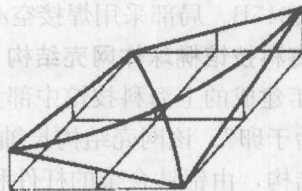


图 1.21 单块扭网壳

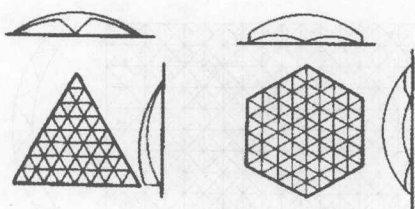


图 1.22 切割形成的曲面网壳

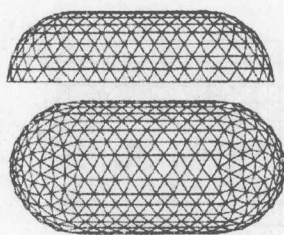


图 1.23 组合形成的曲面网壳

1.1.4 典型工程实例

现将我国近几年来建成的有代表性的传统网壳列举如下,以了解我国网壳结构应用与发展的情况。

1. 北京奥运自行车馆双层球面网壳

2007年建成的北京奥运老山自行车馆钢结构屋盖(图1.24)是国内最大的双层球面网壳结构之一。网壳直径149.536m,矢高14.69m,厚度2.8m,用钢量约为 $70\text{kg}/\text{m}^2$ 。网格以四角锥网格为主,杆件采用圆钢管截面,直径114~203mm;节点为焊接空心球节点,直径为300~600mm。网壳通过边桁架支承于人字型钢柱柱顶,边桁架由4根环梁通过腹杆连接而成。环梁与腹杆及与人字型钢柱相连的节点均采用相贯节点。人字型钢柱沿环向倾斜设置,柱脚采用铸钢球铰支座节点。除柱脚铸钢节点外,全部钢结构采用Q345钢制作。

2. 成都双流机场候机楼单层柱面网壳

2001年竣工的成都双流机场扩建工程候机楼顶层屋面大面积采用单层柱面网壳和由两个单层柱面网壳组合的T形网壳(图1.25)。单层柱面网壳长56.5m,跨度27.0m,矢高5.0m,支承于顶层高8m的柱顶,采用了三种规格的杆件 $\phi 245 \times 12$ 、 $\phi 168 \times 10$ 和 $\phi 114 \times 8$ 。T形网壳两部分柱壳跨度分别为19m和27m,矢高5.0m,27m跨部分杆件截面与柱面网壳相同,19m跨部分杆件截面为 $\phi 219 \times 10$ 、 $\phi 152 \times 10$ 和 $\phi 102 \times 6$ 。

3. 宁波国际会议展览中心双层柱面网壳

2002年建成的宁波国际会议展览中心主展厅大跨度屋盖(图1.26)采用正放四角锥双层柱面网壳结构。网壳结构纵向的网格尺寸为3m,环形的网格尺寸为3.3~3.4m,厚度为3m。网壳的杆件均采用Q345B热轧无缝钢管,规格分别为 $\phi 89 \times 4$ 、 $\phi 114 \times 4$ 、 $\phi 40 \times 5$ 、 $\phi 140 \times 6$ 、 $\phi 159 \times 7$ 、 $\phi 159 \times 8$ 、 $\phi 180 \times 10$ 、 $\phi 180 \times 12$ 、 $\phi 219 \times 10$ 、 $\phi 219 \times 12$ 、 $\phi 219 \times 16$ 。螺栓球节点采用45钢,高强螺栓的性能等级为10.9级,材质为20MnTiB钢,锥头和套筒的材质均为Q345B。局部采用焊接空心球节点。

4. 上海科技馆椭球体网壳结构

2001年建成的上海科技馆中部大堂由一巨型椭球体单层网壳结构(图1.27)覆盖,象征“生命始于卵”。该网壳结构长轴67m,短轴51m,高41.6m,外包玻璃。网壳采用铝钛合金网壳结构,由铝钛合金的杆件和节点板作为两大基本构件。杆件共3300余根。杆件截面呈“工”字形,有3种形式,截面总高度皆为254mm,翼缘尺寸分别为 $158\text{mm} \times 7.8\text{mm}$ 、 $172\text{mm} \times 9.5\text{mm}$ 、 $215\text{mm} \times 11.6\text{mm}$,腹板厚度分别为4.8mm、5.8mm、7.8mm。圆形节点板厚9.5mm,直径450mm。杆件通过305系列不锈钢螺栓与节点板连接。支承节点采用不

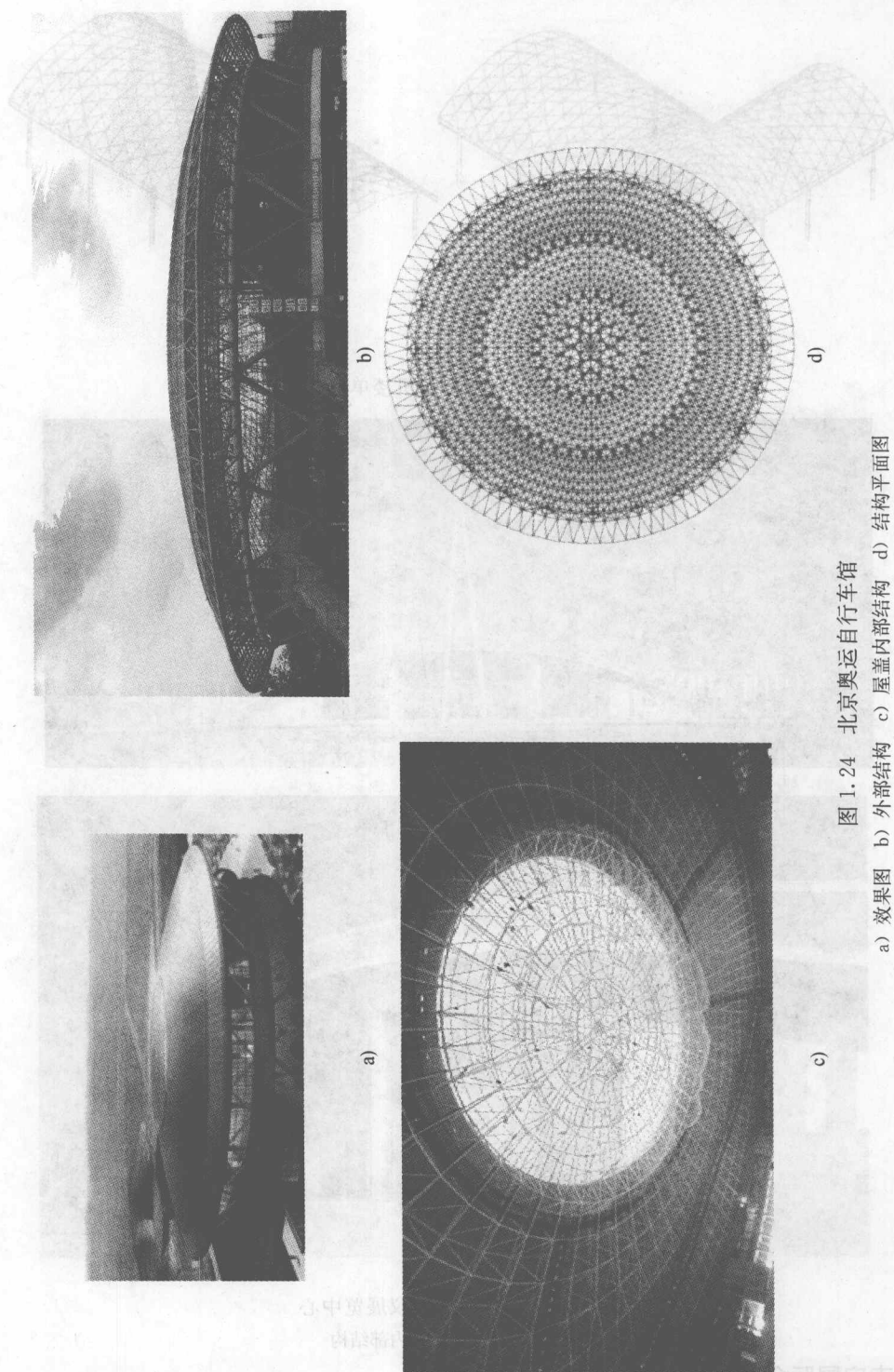


图 1.24 北京奥运自行车馆
a) 效果图 b) 外部结构 c) 屋盖内部结构 d) 结构平面图

锈钢异形节点板与混凝土中的预埋板焊接固定。

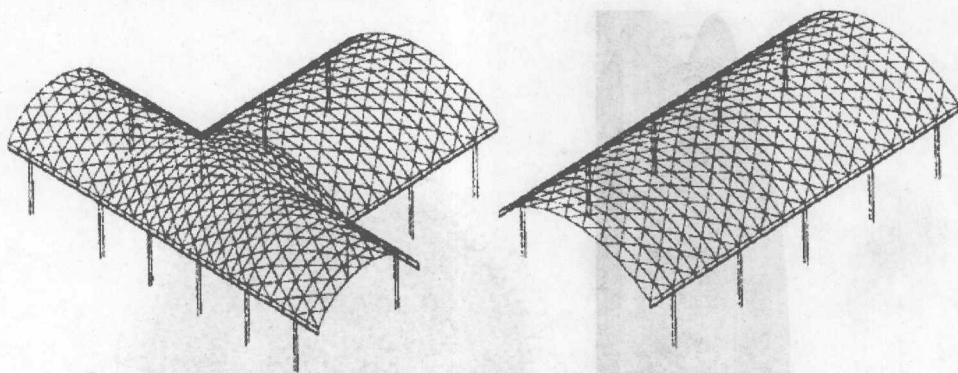
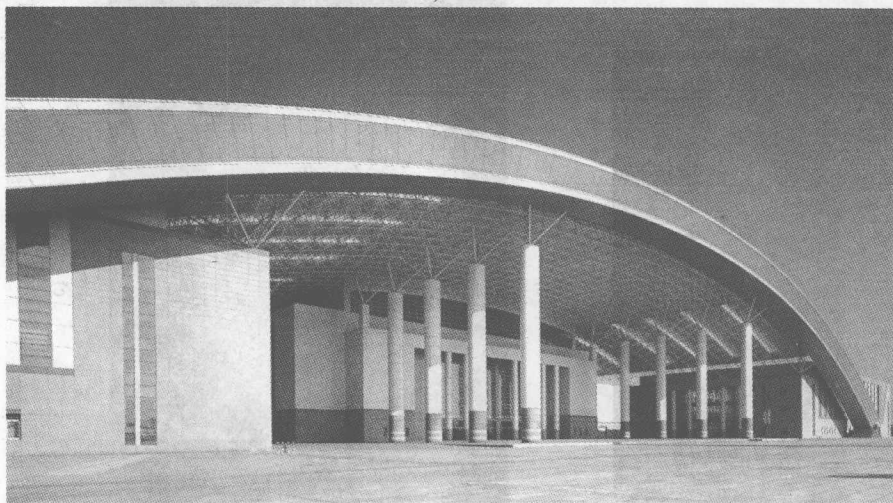


图 1.25 成都双流机场候机楼单层柱面网壳



a)



b)

图 1.26 宁波国际会议展览中心

a) 全景图 b) 屋盖内部结构

5. 南宁国际会展中心双曲面网壳

2003 年竣工的南宁国际会展中心 (图 1.28) 建筑面积约 11 万 m^2 , 屋盖为双曲面钢网

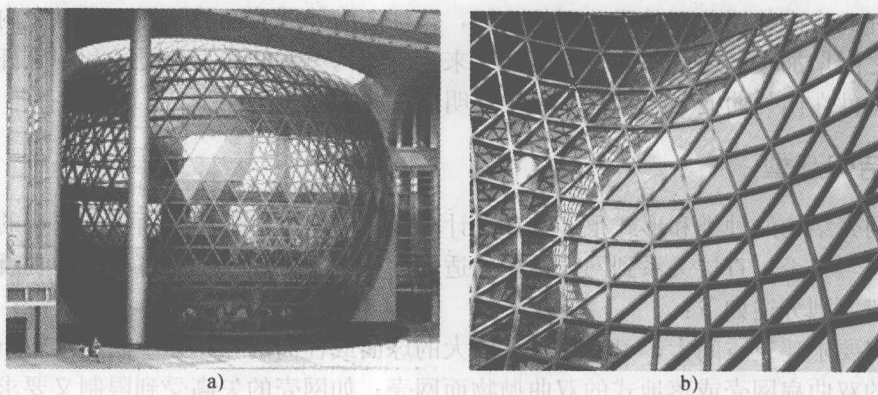


图 1.27 上海科技馆

a) 全景图 b) 内部结构

壳结构。该网壳结构由 12 个双曲面空间结构单元旋转而成，犹如 12 片花瓣组成的一朵硕大的朱槿花，如图 1.28 所示。结构高 48m，支承在钢筋混凝土环梁的 12 个铰支座上。底部外径 72m，内径 54m；顶部外径 21.5m，内径 13m。每个单元分为内、外两层，内层和外层均具有两个曲面。每个曲面由弦杆和腹杆组成。每根弦杆均为圆弧曲线。弦杆 1 为内层曲面的

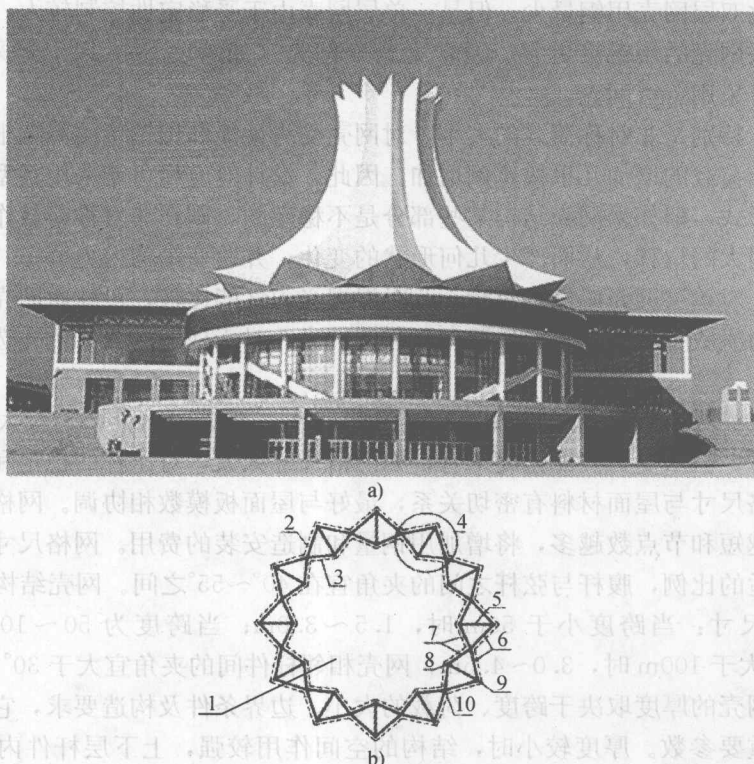


图 1.28 南宁国际会展中心

a) 全景图 b) 平面结构图

- 1—屋盖位置 2—外膜 3—内膜 4—单元 5—中间桁架腹杆
6—外层曲面单元腹杆 7—内层单元腹杆 8—弦杆 1 9—弦杆 3 10—弦杆 2

弦杆, 弦杆 2 为内外层曲面单元共用的弦杆, 弦杆 3 为外层曲面的弦杆。通过在内弦杆 1 和外弦杆 3 之间增加腹杆形成中间的平面桁架来改善结构单元的受力性能。利用弦杆上增加的附属连接构件在内外曲面各覆盖有一层半透明的薄膜。

1.1.5 结构选型

由于网壳结构的种类和形式很多, 在设计时选择的范围比较广, 而影响选型的因素也很多。选型适当与否, 直接关系到网壳结构的适用性、可靠性和技术经济指标。现就网壳结构选型的一般原则分述如下:

(1) 当要求建筑空间大, 可选用矢高较大的球面或柱面网壳; 当空间要求较小, 可选用矢高较小的双曲扁网壳或落地式的双曲抛物面网壳; 如网壳的矢高受到限制又要求较大的空间, 可将网壳支承于墙上或柱上。

(2) 如建筑平面为圆形平面, 可选用球面网壳、组合柱面或组合双曲抛物面网壳等。如平面为方形或矩形, 可选用柱面、双曲抛物面和双曲扁网壳。当平面狭长时, 宜选用柱面网壳。如平面为菱形, 可选用双曲抛物面网壳。如为三角形、多边形的平面, 可对球面、柱面或双曲抛物面等作适当的切割或组合可以实现要求的平面。

(3) 网壳的跨度是根据建筑使用功能决定的, 跨度越大, 用钢量越多。在同等条件下, 单层网壳通常比双层网壳用钢量少, 但是, 单层网壳由于受稳定性控制较大, 当跨度超过一定数值后, 双层网壳的用钢量更省。通常大跨度网壳(如跨度 80m 以上)采用双层网壳, 中小跨度网壳可采用单层网壳。

(4) 荷载, 特别是非对称荷载的大小, 对网壳受力性能和用钢量的影响很大。当跨度确定后, 用钢量随荷载的增加几乎按比例增加。因此, 设计时应尽可能采用轻型屋面。即使选择了最佳结构形式, 但如果网壳结构某些部分是不稳定的, 则在非对称荷载作用下, 杆件和节点会产生相当大的位移, 从而产生几何形状的变化, 并改变结构内力分布。因此, 当非对称荷载较大时, 对单层网壳应慎重对待, 此时根据受力性能比较, 对球面网壳可优先选用短程线型, 其次为凯威特型、施威德勒型和联方型网壳; 对于柱面网壳可优先选用双斜杆型和联方型。

(5) 网格数或网格尺寸对于网壳的挠度影响较小, 而对用钢量影响较大。网格尺寸越大, 用钢量越省。但从受力性能角度来看, 如网格尺寸太大, 对压杆的稳定和钢材利用均不利。另外, 网格尺寸与屋面材料有密切关系, 最好与屋面板模数相协调。网格尺寸也不宜太小, 因为杆件越短和节点数越多, 将增加用钢量和制造安装的费用。网格尺寸还必须保证与网壳厚度有合适的比例, 腹杆与弦杆之间的夹角宜在 $40^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 之间。网壳结构的网格在构造上可采用以下尺寸: 当跨度小于 50m 时, 1.5~3.0m; 当跨度为 50~100m 时, 2.5~3.5m; 当跨度大于 100m 时, 3.0~4.5m, 网壳相邻杆件间的夹角宜大于 30° 。

(6) 双层网壳的厚度取决于跨度、荷载的大小、边界条件及构造要求, 它是影响网壳挠度和用钢量的重要参数。厚度较小时, 结构的空间作用较强, 上下层杆件内力分布比较均匀, 用钢量少。当跨度、荷载较大或有悬挂起重机时, 以及支承点较少时, 厚度应取大一些。

(7) 矢跨比是影响网壳结构静力特性和总造价的主要因素之一。矢跨比越大, 网壳表面积越大, 屋面材料用得越多, 结构用钢量越增加, 但侧向推力有所减少, 可降低下部结构的

造价；矢跨比越小，屋面材料相应减少，侧向推力增加，从而提高了下部结构的造价。矢跨比较小的球面网壳宜选用二向格子型、三向格子型网壳。矢跨比的确定除根据建筑要求外，最好进行优化分析。球面网壳一般取 $1/5 \sim 1/2$ ，双曲扁网壳取 $1/10 \sim 1/6$ ，柱面网壳取 $1/6 \sim 1/3$ 。

(8) 影响网壳结构静力特性和经济设计的一个重要因素是支承条件，它包括支承的位置、数目、种类和楼层的支承标高。支承数目越多，杆件内力分布越均匀；支承刚性越大，节点挠度越小，网壳的横向稳定性越大，但支座和基础的造价越高。当网壳支承在地面上时，所有支座的竖向位移和水平位移均被约束，或者竖向位移、水平位移及转动位移均被约束。支承在楼层上时，柱子底端固定，柱子顶部固定或铰接并设置较大的支座环。支承在楼层上时，所有支座的竖向和水平位移均被约束。如果网壳的侧向推力较大，可采用侧向弹性支承以减小此推力，但其弹性刚度应适度，如果取得过大，则对侧向推力的影响甚微，取得过小，将改变网壳的受力性能，甚至使杆件内力和节点挠度增加。

(9) 单层网壳的强度、刚度和稳定性不仅与杆件传递的轴力、剪力有关，而且还依赖于各个方向传递的弯矩和扭矩，并要求这些力通过各个节点传递时不产生滑移和扭曲。因此，对于单层网壳，一般都选用具有抗弯抗扭性能强的网壳专用螺栓球节点、焊接空心球节点或其他类似的刚性节点。双层网壳可采用铰接节点，单层网壳采用刚接节点。

总之，进行网壳结构选型时，必须根据工程的实际情况综合考虑以上各种因素，通过技术经济比较分析，合理地确定网壳形式。如果简单地以某种网壳单位面积的材料消耗或造价进行选型，难以获得理想的效果。

1.2 新型网壳结构体系

网壳结构以其优雅的建筑造型、合理的结构形式和强大的跨越能力在全世界范围内得到了长足发展。然而，随着人们对其跨越能力及空间造型提出更高要求，传统单一的网壳结构形式越来越难以满足工程需要，于是大量新型网壳结构便应运而生。新型网壳结构主要由两种途径组合或杂交 (hybrid) 得来：一是刚性结构与刚性结构结合的，例如单层网壳+板=组合网壳，单层网壳+杆=局部双层网壳，单(双)层网壳+拱=拱支网壳；二是刚柔结合的杂交，例如单层网壳+索+杆=弦支网壳，单层网壳+索=索撑网壳，双层网壳+索=斜拉网壳。总之，新型网壳结构以另外一种或几种结构(或构件)的优点弥补传统网壳结构的弱点，它们相互配合、相互补充、相得益彰。与传统网壳结构相比，新型网壳在结构计算和设计理论方面还不尽完善，现对几种不同类型的新型网壳作基本介绍。

1.2.1 拱支网壳

1. 结构形式和特点

拱支网壳空间结构是综合了网壳和拱结构各自优点的基础上构思出的一种新型杂交结构形式。拱支网壳结构利用拱结构具有整体刚度大、稳定性好的特点，改善了网壳结构的整体性能，丰富了大跨空间结构的造型，利用这一结构形式还可构成可开合的结构体系，以满足人们新的要求。因而，它是一种有效的大跨空间结构形式，可望在未来的超大跨结构中得到广泛的应用。