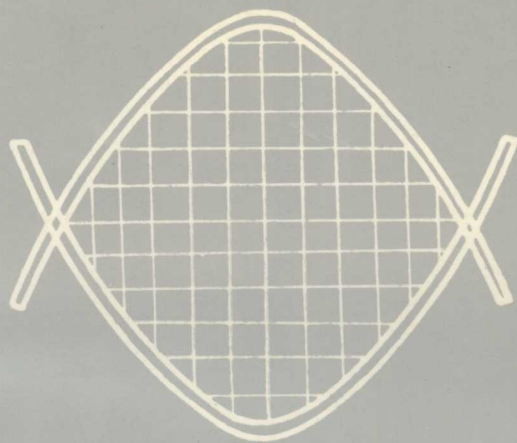


肖 焱

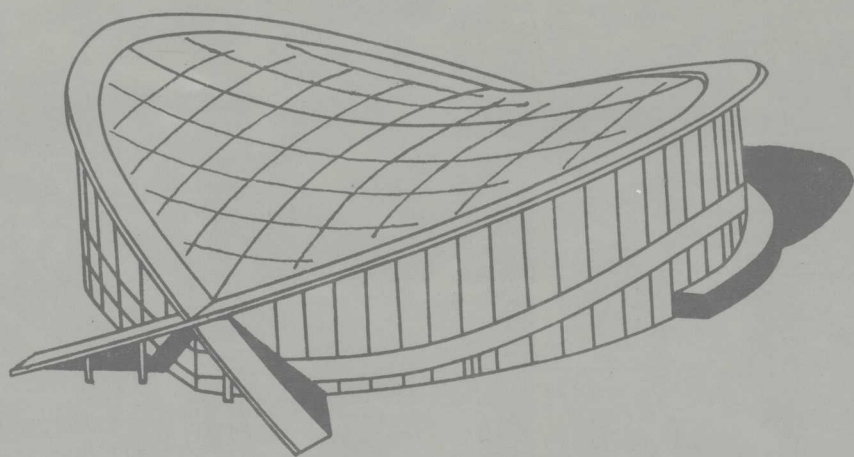
马少华

王伟成

编著



空间结构与施工



东 南 大 学 出 版 社

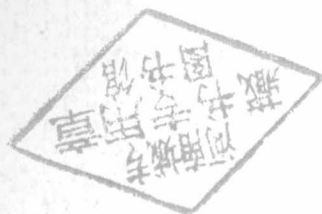
0025240

空间结构设计与施工

肖 焱 马少华 王伟成 编著

TU399

X.337



200151076

东南大学出版社

(苏)新登字第 012 号

内 容 简 介

本书共分四篇二十五章,较全面地阐述空间结构中的薄壳结构、空间网格结构、张拉结构、组合空间结构等四类结构,每种结构均介绍了几何形态、选型设计、内力分析、力学特性、设计构造要点及施工安装问题。内容力求实用,公式推导从简,着重说理,书中附有较多例题,详细列出常用结构的计算步骤,便于初学者掌握。

本书可作为土建类有关专业高年级学生或空间结构研究方向硕士生的教学用书。由于本书编写时紧密结合有关《规程》,工程实例较多,故也很适用于从事土建工程设计和施工的技术人员参考。

责任编辑: 刘柱升

空 间 结 构 设 计 与 施 工

肖 焱 马少华 王伟成 编著

东南大学出版社出版发行

南京四牌楼 2 号 邮编 210018

南京东颖印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 28.75 字数 700 千

1993 年 3 月第 1 版 1993 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1—2000 册

ISBN7—81023—708—X

TU·45

定价:18.00 元

序 言

空间结构在力学分析、设计和施工诸方面均较常规结构麻烦,再加之人们目前对它还不很熟悉,因而影响了它的普及和推广。作者试图写一本比较实用的空间结构书籍,供大学生和工程技术人员使用。编写时对较复杂的数学推导均从简(如果需要详细公式演算过程可参考有关文献),着重概念性说理和对具体计算方法和步骤的介绍,并有较多例题,便于初学者掌握。

本书内容包括薄壳结构、空间网格结构、张拉结构和组合空间结构等四大类结构在线弹性阶段的内力分析、力学特性、设计、构造和施工等问题。

本书适用于从事土建设计和施工技术人员使用。

本书用于土建类专业高年级学生选修课时,可根据教学需要加以选取,对于空间结构研究方向的硕士生,可作为空间结构课之一,其余如空间结构非线性分析、动力、温度应力等问题则可在后续空间结构课完成。

空间结构发展至今已形成一个相当大的领域,方兴未艾。特别象膜结构和组合空间结构目前还有很多问题正在研究中,因此本书对这部分内容写得较简,但考虑到它们很有发展前途,决定还是单独设立篇、章。

本书第一、二篇,第三篇第十五章的15-1~15-4节、第二十一章,第四篇第二十三、二十五章由肖炽(兼主编)编写;其中第四、五章由王伟成编写;第三、四篇其余章节由马少华编写。

本书编写过程中得到徐永基高工帮助,使作者得益非浅,深表谢意。

限于作者水平,书中有不当之处恳请读者批评指正。

肖 炽

东南大学土木工程系
扬州华江空间结构工程总公司

1993年3月

目次

序 言

绪 论	(1)
一、什么叫空间结构?	(1)
二、研究和发展空间结构的意义	(1)
三、空间结构分类	(1)
四、空间结构的特点	(2)

第一篇 薄壳结构

第一章 总 论	(4)
1-1 概 述	(4)
一、定义	(4)
二、特点	(4)
三、薄壳结构的发展	(4)
1-2 薄壳结构的分类	(5)
一、按曲面形成方法分类	(5)
二、按高斯曲率分类	(8)
三、按所用材料分类	(9)
1-3 薄壳结构内力分析方法的一般概念	(10)
一、壳体内力	(10)
二、无弯矩理论	(11)
三、弯矩理论及边界效应法概念	(11)
第二章 圆形底旋转面薄壳	(12)
2-1 选型设计	(12)
一、几何特性	(12)
二、选型设计	(13)
2-2 旋转面球壳计算理论及方法	(13)
一、球壳薄膜内力	(13)
(一) 任意旋转面壳体在轴对称荷载作用下的薄膜内力计算公式	(13)
(二) 闭口球壳在轴对称荷载作用下的薄膜内力	(13)
(三) 任意旋转面壳体在非轴对称荷载作用下的薄膜内力	(14)
(四) 球壳在非轴对称荷载作用下的薄膜内力	(16)
二、球壳弯曲内力	(19)
(一) 任意旋转面壳的轴对称位移	(19)

(二) 任意旋转面壳的弯曲	(20)
(三) 球壳的弯曲	(21)
(四) 简化计算法	(22)
2-3 圆形底球壳算例及力学特性	(28)
一、现浇钢筋混凝土闭口球壳算例	(28)
二、装配整体式钢筋混凝土开口球壳算例	(34)
三、球壳力学特性	(39)
2-4 设计要点	(39)
一、几何尺寸及配筋	(39)
二、边缘构件	(40)
三、装配整体式球壳	(41)
 第三章 双曲扁壳	(44)
3-1 选型设计	(44)
一、几何特性	(44)
二、选型设计	(45)
3-2 双曲扁壳计算理论及方法	(46)
一、双曲扁壳基本微分方程	(46)
二、简化计算法	(48)
(一) 位移 w 及 M_x 、 M_y 的计算	(49)
(二) 应力函数 Φ 及 T_x 、 T_y 、 S 的计算	(50)
(三) 计算方法	(52)
3-3 双曲扁壳算例及力学特性	(53)
一、现浇钢筋混凝土双曲扁壳算例	(53)
二、装配整体式钢筋混凝土双曲扁壳算例	(57)
三、力学特性	(60)
3-4 设计要点	(60)
一、几何尺寸及配筋	(60)
二、边缘构件	(61)
(一) 带拉杆双铰拱内力简化计算法	(62)
(二) 密排柱支承的曲梁的内力计算	(67)
三、装配整体式双曲扁壳	(70)
 第四章 圆柱面薄壳	(73)
4-1 选型设计	(73)
4-2 圆柱面薄壳计算理论	(74)
一、圆柱面壳薄膜内力	(74)
(一) 基本微分方程	(74)
(二) 均布荷载	(75)
(三) 自重及雪载作用下的薄膜内力	(76)
二、圆柱面壳弯曲内力	(76)
(一) 圆柱面壳轴对称弯曲	(76)

(二) 圆柱面壳轴对称弯曲的简化计算法	(78)
4-3 边界效应法计算方法、算例及力学特性	(81)
一、计算方法	(81)
(一) 边梁在外荷载和边扰力作用下的变形	(82)
(二) 壳板在外荷载和边扰力作用下的变形	(84)
二、计算步骤	(84)
三、现浇圆柱面长薄壳算例	(85)
四、圆柱面短壳	(91)
(一) 计算步骤	(91)
(二) 现浇圆柱面短薄壳算例	(92)
五、力学特性	(96)
六、装配整体式圆柱面薄壳内力计算	(97)
(一) 基本假设及坐标系	(97)
(二) 基本微分方程	(97)
(三) 齐次解	(98)
(四) 特解(薄膜解)	(99)
(五) 装配整体式圆柱面长薄壳算例	(99)
4-4 设计要点	(101)
一、几何尺寸	(101)
二、稳定性验算	(102)
三、边缘构件	(103)
四、构造要求	(104)
第五章 折板结构	(107)
5-1 选型设计	(107)
一、折板结构形式	(107)
二、选型设计	(108)
5-2 一般计算理论	(109)
5-3 V 形折板内力分析方法	(113)
一、内力分析方法	(113)
二、非预应力钢筋混凝土 V 形折板算例	(115)
5-4 V 型折板屋盖设计要点	(116)
一、材料及配筋	(116)
二、采光、通风	(118)
第六章 双曲抛物面薄壳	(119)
6-1 选型设计	(119)
一、几何特性	(119)
二、选型设计	(120)
6-2 双曲抛物面薄壳计算理论和方法	(121)
一、双曲抛物面薄壳计算理论	(121)
(一) 阶梯函数和脉冲函数的性质	(121)

(二) 微分方程和边界条件	(123)
(三) 用伽辽金变分法求解	(123)
二、现浇组合型双曲抛物面薄壳算例	(125)
6-3 力学特性	(128)
6-4 设计要点	(128)
一、边缘构件	(128)
二、构造要求	(128)
第七章 板壳有限元法内力分析	(131)
7-1 薄板的弯曲	(131)
一、应变、应力和弯矩、扭矩表达式	(131)
二、变形能表达式	(133)
三、组合应力分量	(133)
7-2 刚度矩阵和荷载向量	(134)
一、单元刚度矩阵	(134)
二、单元荷载向量	(135)
7-3 常用的板壳单元	(135)
一、单元的相容条件	(135)
二、矩形单元	(136)
三、简化的三次三角形单元	(136)
四、Clough-Tocher 三角形单元	(137)
7-4 用板壳单元进行内力分析	(139)
一、整体坐标系与局部坐标系	(140)
二、局部坐标系中板壳单元的刚度矩阵	(141)
三、单元刚度矩阵从局部坐标系向整体坐标的转换	(142)
四、主从自由度的处理	(143)
五、伪单元	(144)
第八章 自由曲面薄壳	(146)
第九章 装配式薄壳结构施工	(148)
9-1 壳板的预制	(148)
一、对混凝土的质量要求	(148)
二、混凝土浇筑技术	(148)
三、模板	(149)
四、预制壳板精度要求	(149)
9-2 壳板的拼装	(149)
一、支架设计	(150)
二、壳板安装及标高调整	(150)
三、灌缝及支架拆除	(150)
9-3 薄壳结构安装	(150)
一、高空拼装法	(151)

二、整体顶升法	(152)
三、整体提升法	(155)

第二篇 空间网格结构

第十章 总 论	(156)
10-1 概 述	(156)
一、定义	(156)
二、分类及发展	(156)
三、特点及存在问题	(157)
10-2 空间网格结构体系设计	(158)
一、结构形体设计	(158)
二、单元分析及组合	(158)
三、连接	(158)
第十一章 网架结构内力分析及设计	(159)
11-1 我国常用的网架结构形式	(159)
一、交叉桁架体系	(159)
二、四角锥体系	(160)
三、三角锥体系	(162)
四、折线型网架	(163)
11-2 网架几何不变性分析	(163)
一、网架几何不变的必要条件	(164)
二、网架几何不变的必要充分条件	(164)
11-3 空间桁架位移法	(165)
一、基本假定	(165)
二、单元刚度矩阵	(165)
三、结构总刚度矩阵	(168)
四、边界条件及对称性利用	(172)
五、杆件内力计算	(174)
六、线性方程组求解	(174)
11-4 下弦内力法	(176)
一、基本方程式	(176)
二、杆件内力计算	(178)
三、挠度计算	(180)
四、矩形平面网架的内力和挠度计算用表及算例	(181)
11-5 交叉梁系差分法	(183)
一、基本微分方程	(183)
二、差分法基本概念	(184)
三、网架的差分表达式	(185)
四、边界条件处理	(186)

五、网架内力计算	(188)
六、算例	(190)
例 11-4 两向正交斜放网架节点挠度算例	(190)
例 11-5 两向正交正放架网架内力算例	(190)
11-6 拟夹层板法	(191)
一、基本微分方程	(192)
二、基本微分方程级数解	(197)
三、计算表格制作及使用	(198)
四、网架杆件内力计算	(199)
五、正放四角锥网架算例	(201)
11-7 假想弯矩法	(204)
11-8 设计及构造	(209)
一、网架结构受力特点	(209)
二、选型	(209)
(一) 各种支承情况及平面形状的选型	(210)
(二) 几何尺寸的选择	(214)
三、设计及构造要求	(214)
(一) 屋面排水坡度的形成及起拱 例 2-8	(214)
(二) 支承	(220)
(三) 杆件	(222)
(四) 自重估算及容许挠度	(222)
(五) 节点设计与构造	(222)
第十二章 网壳结构内力分析及设计	(230)
12-1 选型设计	(230)
一、球面网壳网格的划分	(230)
(一) 短程线网格划分方法	(230)
(二) 四边形网格子午线划分法	(238)
(三) 球面网壳的形式	(238)
二、圆柱面网壳的形式及水平推力处理	(239)
三、双曲抛物面网壳的形式及等弦长计算	(242)
四、矢跨比、高跨比	(243)
12-2 内力分析方法	(243)
一、双层网壳空间桁架位移法	(243)
二、单层网壳空间梁单元分析法	(245)
(一) 单元局部坐标系的确定及坐标转换矩阵	(245)
(二) 单元刚度矩阵	(247)
(三) 单元荷载的处理	(249)
12-3 工程实例	(250)
一、东京国际贸易中心 2 号馆	(250)
二、扬州大学农学院礼堂	(250)
三、神户港岛野外剧场	(252)

四、筑波国际科学技术博览会集会大厅	(253)
五、东莞雄狮大酒店多功能厅	(255)
第十三章 空间网格结构施工	(256)
13-1 网架结构施工	(256)
一、节点制作与拼装	(256)
二、网架安装	(261)
(一) 高空散装法	(262)
(二) 分条(分块)吊装法	(264)
(三) 高空滑移法	(266)
(四) 整体提升及整体顶升法	(274)
(五) 整体吊装法	(277)
13-2 网壳结构施工	(278)
一、高空散装法	(278)
二、其他安装法	(282)

第三篇 张拉结构

第十四章 总 论	(284)
14-1 概 述	(284)
14-2 悬索屋盖的构成、分类及特点	(284)
一、悬索屋盖的构成	(284)
二、悬索屋盖的分类	(285)
三、悬索屋盖的特点	(285)
第十五章 悬索结构设计的基本问题	(288)
15-1 水平力的处理	(288)
一、内部平衡方法	(288)
(一) 拱的形式	(288)
(二) 环的形式	(291)
(三) 水平梁加压杆的形式	(291)
(四) 平衡的形式	(292)
(五) 悬臂的形式	(294)
(六) 框架平衡的形式	(294)
二、外部平衡方法	(295)
(一) 后拉索的形式	(296)
(二) 主索的形式	(296)
三、组合平衡方法	(297)
15-2 变形处理	(297)
一、加强刚度方法	(298)
(一) 利用重屋盖加强刚度	(298)
(二) 利用拉索加强刚度	(298)

(三) 利用稳定索加强刚度	(299)
(四) 用壳体作用加强刚度	(299)
二、不影响装修	(299)
15-3 预应力、垂度与矢高	(299)
一、预应力的影响	(299)
二、垂度、矢高的影响	(300)
15-4 抗震与抗风	(303)
15-5 设计计算方法	(303)
一、设计方法	(303)
二、计算方法	(304)
三、计算假定	(305)
第十六章 单向单层悬索屋盖	(306)
16-1 单索的基本方程	(306)
一、单索平衡方程	(306)
(一) 沿跨度均布荷载	(306)
(二) 沿索曲线均布荷载	(307)
(三) 任意分布荷载	(308)
二、单索变形协调方程	(309)
(一) 索长计算	(310)
(二) 索变形协调方程	(310)
三、单索计算	(311)
16-2 单向单层悬索盖设计	(312)
一、结构布置	(312)
二、结构计算	(313)
(一) 结构计算简图及荷载	(313)
(二) 参数选择	(313)
第十七章 单向双层悬索屋盖	(316)
17-1 仅有竖腹杆、且跨内无交点	(316)
17-2 仅有竖腹杆、上、下索在跨中相连	(318)
17-3 单向双层悬索屋盖设计	(320)
一、结构布置	(320)
二、参数选择	(320)
(一) 索预应力	(320)
(二) 垂度	(321)
(三) 悬索截面积	(321)
三、施工过程计算	(321)
四、设计算例	(322)
第十八章 辐射状悬索屋盖	(324)
18-1 轮辐式悬索结构基本方程	(324)

一、满布均布荷载的情况	(325)
二、非均布的极对称荷载	(326)
18-2 轮辐式屋盖设计计算	(327)
一、结构选型及布置	(327)
二、参数选择	(327)
三、施工过程验算	(329)
四、外环计算	(329)
五、算例	(330)
第十九章 正交索网悬索屋盖	(331)
19-1 双曲抛物面索网的几何形态	(331)
19-2 正交索网的等代薄膜	(332)
19-3 索网的基本方程	(333)
19-4 近似解法之一——加权残数法	(334)
19-5 近似解法之二——差分法	(335)
19-6 椭圆形双曲抛物面正交索网的计算	(336)
一、索网计算方法	(336)
二、椭圆形外环的计算	(338)
三、考虑椭圆形外环变形的索网计算	(341)
第二十章 悬索结构有限单元法分析	(343)
20-1 计算假定	(343)
20-2 节点平衡方程	(343)
20-3 非线性方程组的求解方法	(345)
一、牛顿法	(345)
二、改进牛顿法	(345)
三、荷载增量法	(346)
20-4 初始态的确定	(346)
20-5 温度效应及索单元的松弛	(347)
20-6 悬索结构分析计算机程序简介	(347)
第二十一章 悬索结构的构造及施工	(349)
21-1 钢索	(349)
一、型钢及钢筋	(349)
二、钢丝束、钢绞线、钢丝绳及静力性能	(349)
21-2 钢索的连接与锚固	(352)
一、索与索的连接	(352)
二、索与屋面和吊顶的连接	(352)
三、斜拉索与屋面构件的连接	(352)
四、索与地锚的连接	(352)
五、锚具	(353)

21-3 悬索结构施工	(354)
一、单向单层悬索屋盖施工	(354)
二、单向双层悬索屋盖施工	(357)
三、双层辐射状悬索屋盖施工	(359)
四、双向单层(索网)悬索屋盖施工	(360)
第二十二章 薄膜结构	(366)
22-1 薄膜结构分类及优缺点	(366)
一、张拉式薄膜结构	(366)
二、充气式薄膜结构	(366)
三、优缺点	(368)
20-2 薄膜结构基本方程	(369)
一、平衡方程	(369)
二、物理方程	(369)
三、几何方程	(369)
四、抗皱条件	(370)
22-3 气承式球面薄膜结构内力计算	(370)
一、内压作用下的薄膜内力	(370)
二、自重作用下的薄膜内力及所需内压	(370)
三、对称雪载作用下的薄膜内力及所需内压	(371)
四、半边雪载作用下的薄膜内力及所需内压	(372)
五、风载作用下的薄膜内力及所需内压	(373)
22-4 筒状充气薄膜结构	(373)
一、内力作用下的薄膜内力	(374)
二、自重作用下的薄膜内力	(374)
三、对称雪载作用下的薄膜内力	(374)
四、半边雪载作用下的薄膜内力	(374)
五、风载作用下的薄膜内力	(374)
22-5 充气式薄膜结构工程实例	(375)
一、1970 年大阪世界博览会富士馆	(375)
二、移动式医院	(375)
三、气承式充气结构体育馆	(376)

第四篇 组合空间结构

第二十三章 总论	(380)
23-1 张拉组合空间结构	(381)
一、斜拉网架结构	(381)
二、悬索网架结构	(382)
三、张弦网架结构	(383)
23-2 组合空间网格结构	(384)

一、组合网架结构	(384)
二、组合网壳结构	(384)
第二十四章 组合网架结构	(385)
24-1 选型	(385)
一、面板	(385)
二、网格形式	(386)
三、组合网架高及网格尺寸	(386)
24-2 内力计算方法	(386)
一、拟板法	(386)
(一) 面层刚度的计算	(387)
(二) 等效抗弯刚度	(387)
(三) 构件内力计算	(387)
二、拟网架法	(389)
(一) 面板等代杆	(389)
(二) 面板面内力	(391)
三、面板的弯曲	(391)
24-3 组合网架设计构造	(391)
一、自重估算	(391)
二、钢筋混凝土面板设计	(391)
三、节点构造	(392)
24-4 组合网架施工	(392)
第二十五章 张拉网架结构	(394)
25-1 斜拉网架结构	(394)
一、选型	(394)
二、分析	(395)
三、设计构造与施工	(398)
25-2 张弦网架结构	(399)
一、选型	(399)
二、分析	(401)
附 录	(404)
附录 1 圆形底旋转壳内力分析用 η 表示几何尺寸图	(404)
附录 2 双曲扁壳在均布荷载作用下薄膜内力系数	(405)
附录 3 双曲扁壳带拉杆双铰拱内力用表	(407)
附录 4 圆柱面壳内力、位移系数表及几何尺寸图	(410)
附录 5 双曲抛物面扁扭壳的内力及位移系数表	(424)
附录 6 蜂窝形三角锥网架内力、挠度计算用表	(435)
附录 7 拟夹层板法 $\bar{w}$ 、 $\bar{M}_x$ 、 $\bar{M}_y$ 、 $\bar{Q}_x$ 、 $\bar{Q}_y$ 系数表	(436)
参考文献	(438)

绪 论

一、什么叫空间结构?

凡是建筑结构的形体成三维空间状并具有三维受力特性、而呈立体工作状态的结构,称空间结构。

观察自然界的物体,如蛋壳是一种受力性能很好的空间结构(薄壳结构),而肥皂泡也是典型的空間结构(充气薄膜结构),蜂窝也是(空间网格结构),蜘蛛网则是属于索网结构了。人类在观察大自然中,创造了很多既经济又美观的空间结构,为自己建造房屋所用。

二、研究和发展空间结构的意义

1. 为社会生活和生产的不断发展提供服务

例如,以前大型的飞机机翼宽(指两翼端点间距离)在 45m 以下,而在 70 年代出现的波音 747 型飞机机翼宽达 60m,为了存放和修理这些大型飞机的房屋就要求有更大的跨度。

近年来由于工业产品更新换代的周期越来越短,生产流程变化速度加快,工业生产就向我们提出需要建造更多的大柱网灵活车间。

由于人民生活水平的提高,对文化生活设施提出更高的要求,希望建造更多更美的大跨度影剧院、体育馆等建筑。

上述各种大柱网、大空间的建筑,唯有空间结构才能完善地满足现代建筑和各种功能要求。

2. 空间结构是标志一个国家的建筑技术水平

世界各国对空间结构的研究和发展都极为重视。例如国际性博览会、奥运会、亚运会等,各国都以新型的空间结构来显示本国的建筑科学技术水平。这是因为空间结构的分析、设计和施工,技术要求高而复杂,是需要依靠各方面的高技术水平才能实现的一种结构。所以它是衡量一个国家建筑技术水平高低的标志之一。

3. 空间结构具有良好的经济效益

(1) 与平面结构比较,可节约大量钢材、水泥和木材,从而大大减轻了结构自重。

(2) 大部分空间结构具有良好的抗地震性能。

(3) 具有良好的力学性能:例如,薄壳结构由于传力结构与承重结构合而为一,内力传递简捷,结构整体性能极好;又如对大多数网架结构而言,由于是高次超静定体系,即使抽去其中某些杆件也不会立即破坏等等。空间结构优良的力学性能正愈来愈为人们所认识。

三、空间结构分类

所谓空间结构,应该包括屋盖结构和墙体、柱等支承系统,换句话说,空间结构不仅可作为屋盖和楼层结构,而且还可以将屋盖及其支承系统合为一体。限于篇幅,本书各章节讨论的内容仅限于屋盖或楼层结构。

空间结构是一种正在发展着的新结构,特别是本世纪以来,取得了长足的进步,新的空间结构形式不断涌现,从而推动了结构理论的发展。空间结构发展至今已形成了一个相当广阔的领域,在这个大领域里,空间结构类型繁多,各个结构的个性强烈,使人有眼花缭乱之感。因此,欲给以一个合理的统一分类较困难,现不妨按空间构刚性差异来区分,可分为刚性空间结构、柔性空间结构和组合空间结构三大类。

如图 0-1 所示。

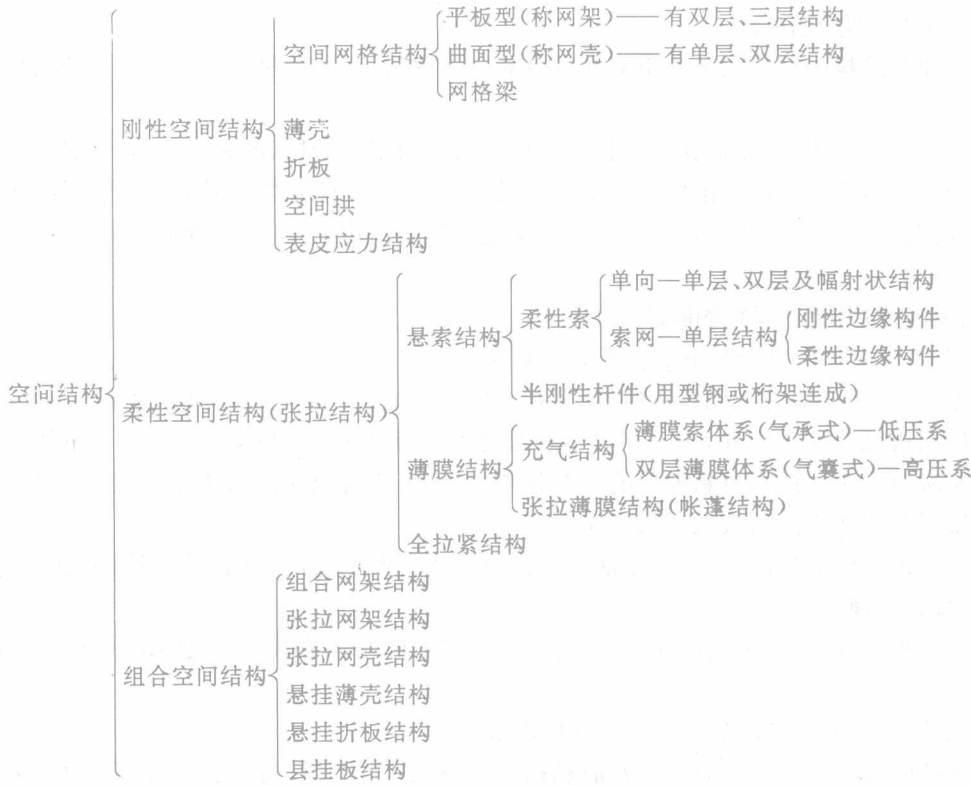


图 0-1 空间结构分类

构成空间结构的材料,有用钢筋混凝土、织物、木和石等各种,但现代空间结构已极少使用木和石材。

四、空间结构的特点

空间结构具有如下特点:

1. 内力呈三维传递并以面内力或轴力为主

典型的例子如薄壳结构,这是一种具有三维空间的连续体结构,它的厚度远比其他方向为小,其大部分内力是沿着中曲面传递(简称面内力,如沿中曲面方向的拉力、压力、顺剪力),仅在边界附近(约 1/10 跨度长的范围内)存在着面外力(如弯矩、竖向剪力)。

又如悬索结构,是用只承受拉力的钢索来代替受弯的梁式结构,因此充分发挥了钢材的材性,从而大大减轻了结构自重。

2. 内力的均匀性和分散性

例如空间网格结构在均布荷载作用下其内力呈较均匀的连续变化,如在集中荷载作用