



普通高等教育“十二五”规划教材

结构力学

主 编 邱秀梅



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

结 构 力 学

主 编 邱秀梅



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是高等学校“十二五”规划教材,是根据教育部高等学校力学基础课程教学指导分委员会制定的“结构力学课程教学基本要求”和有关国家标准及教学改革发展的需要编写而成的。本书分为绪论、平面体系的几何组成分析、静定结构内力分析、虚功原理及静定结构位移计算、力法、位移法、渐近法、影响线及其应用、矩阵位移法、结构动力学简介共十章内容,每章后附有小结、思考题、习题,习题参考答案。

本书可供工院校水电、土木、桥梁等不同专业、不同层次的教学选用,也可作为相关专业的电大、夜大和函授的自学教材;并可供其他专业学生和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学 / 邱秀梅主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 1
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-0458-5

I. ①结… II. ①邱… III. ①结构力学—高等学校—教材 IV. ①0342

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第008834号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 结构力学
作 者	主编 邱秀梅
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 24印张 569千字
版 次	2013年1月第1版 2013年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	49.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

编写人员名单

主 编 邱秀梅 (山东农业大学)

副主编 王素华 (山东农业大学)

张学科 (宁夏大学)

姜德贵 (山东农业大学)

张志亮 (四川农业大学)

参 编 康 菊 (宁夏大学)

郭少春 (宁夏大学)

前言

本书是普通高等学校“十二五”规划教材，是根据教育部高等学校力学基础课程教学指导分委员会制定的“结构力学课程教学基本要求”和有关国家标准及教学改革发展的需要编写而成的。

本书以培养和造就“厚基础、强能力、高素质、广适应”的创造性复合人才为宗旨，编写大纲经过了编委老师们的认真讨论和反复修改，集中了编委们多年的教学经验和智慧。在阐述结构力学基本概念、基本原理和基本方法上，力求实现体系上和内容上的更新，做到了内容精炼，由浅入深，并引入工程领域的实例及与工程有关的算例与例题，每章之前予以概述，每章之后附有小结、思考题和习题，便于自学。本书为读者的后续学习和掌握新方法、新技术提供必要的结构力学基础，也为读者的独立思考留有空间，以利于创新能力的培养。

本书与同类教材相比具有以下特色：重组课程体系，对经典内容加以精选，使之更加简练；注意与相关课程的贯通、融合与渗透，减少了不必要的相互重叠内容；广泛涉及工程概念，缩短了理论和工程实际的距离；注意互动式、启发式教学，为学生独立思考留出较大空间。

全书共分为十章内容，具体编写分工如下：山东农业大学邱秀梅编写第一章、第九章；山东农业大学王素华编写第六章、第七章；宁夏大学张学科编写第五章；山东农业大学姜德贵编写第四章、第八章；四川农业大学张志亮编写第三章；宁夏大学康菊编写第二章、第五章；宁夏大学郭少春编写第十章。全书由邱秀梅统稿。

本书承蒙山东农业大学水利土木工程学院力学系刘福胜教授主审，对本教材提出了很多宝贵意见，作者谨致深切的感谢！

本书的编写和出版，得到了中国水利水电出版社和参编人员的大力支持和积极配合，在此一并表示衷心的感谢！

由于编者水平所限，教材中不妥之处，敬请读者指正。

编者

2012年5月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 结构力学的研究对象和任务	1
第二节 结构的计算简图	3
第三节 平面杆系结构的分类	7
第四节 荷载的分类	8
小结	8
思考题	9
第二章 平面体系的几何组成分析	10
第一节 几何组成分析的目的	10
第二节 几何组成分析的基本概念	11
第三节 无多余约束几何不变体系的组成规则	16
第四节 几何可变体系	17
第五节 平面杆件体系的几何组成分析举例	20
第六节 体系的几何组成和静力特性之间的关系	23
小结	23
思考题	25
习题	25
习题参考答案	27
第三章 静定结构内力分析	29
第一节 概述	29
第二节 多跨静定梁	35
第三节 静定平面刚架	38
第四节 三铰拱	46
第五节 静定平面桁架	54
第六节 静定组合结构	62
第七节 静定结构的静力特性	64
小结	66

思考题	67
习题	68
习题参考答案	73
第四章 虚功原理及静定结构位移计算	76
第一节 概述	76
第二节 虚功原理及应用	78
第三节 结构位移计算的一般公式	83
第四节 静定结构在荷载作用下的位移计算	85
第五节 图乘法	90
第六节 静定结构由于温度改变和支座移动引起的位移	96
第七节 线弹性结构的互等定理	101
小结	103
思考题	105
习题	106
习题参考答案	111
第五章 力法	113
第一节 超静定结构概述	113
第二节 力法的基本原理	116
第三节 荷载作用下超静定结构的力法求解	121
第四节 支座移动和温度变化时超静定结构的计算	134
第五节 对称性的利用	137
第六节 超静定结构的位移计算与最后内力图的校核	149
第七节 超静定结构的特性	155
小结	157
思考题	158
习题	159
习题参考答案	163
第六章 位移法	165
第一节 位移法的基本概念	165
第二节 等截面单跨超静定梁的转角位移方程	167
第三节 位移法的基本未知量——独立位移的确定	173
第四节 位移法基本原理及示例	176
第五节 对称性的利用	186
第六节 力法与位移法的比较	189
第七节 联合法与混合法	190
小结	194
思考题	195

习题	196
习题参考答案	199
第七章 渐近法	200
第一节 力矩分配法的基本概念	200
第二节 力矩分配法的基本原理	201
第三节 用力矩分配法计算连续梁和无侧移刚架	208
第四节 无剪力分配法	216
第五节 附加链杆法	220
第六节 多层多跨刚架的分层计算法	224
小结	227
思考题	227
习题	228
习题参考答案	230
第八章 影响线及其应用	231
第一节 移动荷载和影响线的概念	231
第二节 静力法作静定结构影响线	232
第三节 机动法作静定结构影响线	240
第四节 影响线的应用	243
第五节 简支梁的包络图和绝对最大弯矩	251
第六节 用机动法作超静定梁影响线的概念	255
第七节 连续梁的内力包络图	259
小结	262
思考题	263
习题	263
习题参考答案	267
第九章 矩阵位移法	270
第一节 概述	270
第二节 局部坐标系下单元刚度矩阵	271
第三节 整体坐标系下的单元刚度矩阵	278
第四节 用矩阵位移法解连续梁	282
第五节 用矩阵位移法解平面刚架	292
第六节 用矩阵位移法解平面桁架和组合结构	300
小结	303
思考题	303
习题	304
习题参考答案	306

第十章 结构动力学简介	308
第一节 概述	308
第二节 结构体系的动力自由度	309
第三节 单自由度体系的振动分析	312
第四节 多自由度体系的振动分析	333
第五节 近似法求自振频率	358
小结	365
思考题	365
习题	367
习题参考答案	373
参考文献	376

第一章 绪 论

第一节 结构力学的研究对象和任务

一、结构及分类

人类为了满足生存和发展的需要，建造了大量的各式各样的建筑物和构筑物，在各种建筑物和构筑物中承受和传递荷载而起骨架作用的部分称为结构。例如房屋建筑中的梁柱体系，水工建筑物中的水坝和闸门，公路、铁路上的桥梁和隧洞等，都是工程结构的典型实例。随着科学技术的迅猛发展，相继出现了一些新型的结构形式，如膜结构、索膜结构和索承网壳结构等。所有结构都是由基本构件组成的，基本构件是指组成建筑物和构筑物单个组成部分。

不同的分类方法分成不同的结构类型。如按维数分为三维（空间）和二维（平面）结构；按承重骨架分为砖混结构、框架结构、桁架结构、钢结构和索膜结构等；结构力学中按基本构件的几何特征将结构分为三类。

（一）杆系结构

杆系结构是由若干根杆件相互连接而组成的结构形式。杆件的几何特征是长度方向的尺寸远远大于横截面方向的尺寸，如图 1-1 所示。桁架、刚架和拱是杆系结构的典型实例。

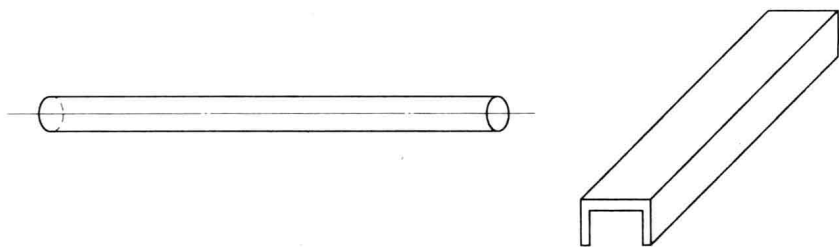


图 1-1 杆件

（二）板壳结构

板壳结构是由若干块板壳相互连接而组成的结构形式。板、壳的几何特征是厚度方向的尺寸要远远小于长度和宽度方向的尺寸，如图 1-2 所示。中面为平面的结构称为平板结构；中面为曲面的结构称为薄壳结构。房屋建筑中的楼板、壳体屋盖、飞机和高速列车的外壳等均属于板壳结构。

（三）实体结构

实体结构是指长、宽、高三个方向的尺度大小相仿的结构。如图 1-3 所示的挡土墙，

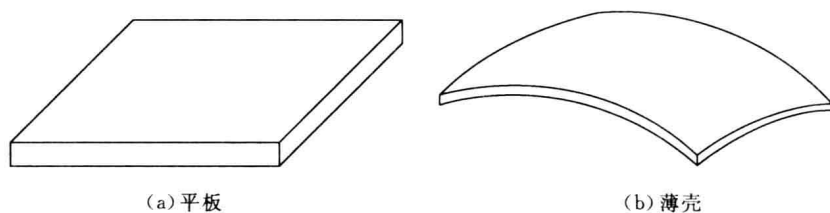


图 1-2 板壳

图 1-4 所示的块状基础和堤坝等都属于实体结构。

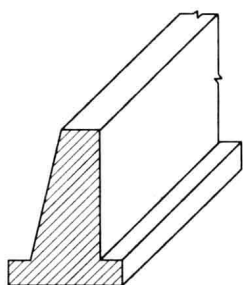


图 1-3 挡土墙

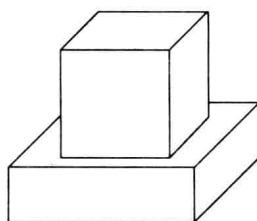


图 1-4 块状基础

二、结构力学的研究对象

结构力学与理论力学、材料力学、弹性力学有着密切的关系。理论力学着重研究刚体静、动力学的基本规律。其他三门力学着重研究结构及其构件的强度、刚度和稳定性问题。其中材料力学以单根杆件为主要研究对象，结构力学以若干根杆件组成的杆系结构为主要研究对象。板壳与实体结构则主要是弹性力学的研究对象。

三、结构力学的任务

结构力学主要是研究杆系结构的组成规律及合理形式，研究杆系结构在外因作用下的内力、变形、动力响应和稳定性等方面的计算原理和方法，以保证结构满足安全性、适用性和经济性的要求。结构力学的任务主要包括以下几个方面：

- (1) 研究结构的组成规律及合理形式，分析讨论结构计算简图的选取方法。
- (2) 研究结构内力和变形的计算原理和方法，以便进行结构强度和刚度验算。
- (3) 研究结构的稳定性及在动力荷载作用下的动力响应。

结构力学问题的研究手段包括理论分析、实验研究和数值计算三个方面。实验研究方法的内容在实验力学和结构检验课程中讨论，理论分析和数值计算方面的内容在结构力学课程中讨论。

结构力学是土木工程、水利水电和路桥等专业的一门重要的专业技术基础课程。它前承高等数学、理论力学及材料力学等相关课程，后启钢筋混凝土结构、钢结构、水工建筑物及桥梁工程等相关专业课程，在整个专业培养过程中，起着承上启下的作用。因此要学好它就要做到三勤，即勤学、勤练、勤思考总结，掌握结构力学的三项基本内容，即基本概念、基本原理和基本计算，提升分析、解决实际问题的能力，为后续专业课程的顺利学习打下坚实的结构力学基础。

第二节 结构的计算简图

一、计算简图的定义及其选择原则

实际结构是多样而复杂的,要想完全、严格地按照实际结构的全部特点建立模型进行计算是十分繁琐和困难的,也是不必要的。因此,对实际结构进行力学分析以前,需要作出某些简化和假设,忽略实际结构的一些次要因素,抓住影响实际结构受力和变形的主要因素,用一个简化了的图形代替实际结构,这个简化图形称为原实际结构的计算简图。实际结构计算简图的合理选择在结构分析中是极为重要的环节,也是必须首先要解决的第一步问题。因此合理选取实际结构的计算简图需要遵循以下原则:

(1) 从实际结构出发,保留主要因素,略去次要因素,使计算简图能反映出实际结构的主要受力和变形特征。

(2) 从计算工作量出发——计算简图要便于分析计算。

当然,对于一个实际结构来说,其计算简图并不是唯一不变的。如在初步分析计算时,可用一种较为简单的计算简图;当最后计算时,再用一种较为复杂的计算简图,以保证结构的设计精度。

二、计算简图的简化要点

选取计算简图需要对实际结构进行多方面的简化,杆系结构计算简图的简化要点如下。

(一) 结构体系的简化

实际结构一般都是空间结构,承受各方向可能出现的荷载。但对多数空间结构而言,常可以略去一些次要的空间约束,将空间结构简化为平面结构,使计算得以简化。当然也有一些结构具有明显的空间特征而不宜简化为平面结构。本书主要讲述了平面结构的计算问题。

(二) 杆件的简化

对于组成杆系结构的杆件而言,由于其长度方向的尺寸远远大于横截面方向的尺寸,在计算简图中,是用杆件的轴线来代替实际杆件,杆件之间的连接区域用结点表示,结点间的距离表示杆长,外荷载的作用点也简化到轴线上。

(三) 结点的简化

杆件间的连接区域称为结点。根据实际杆系结构的结点连接方式,结点可抽象简化为理想的铰结点、刚结点和组合结点。

1. 铰结点

被理想铰结点连接的杆件在连接处不能相对移动,但可相对转动,即可以传递力,但不能传递弯矩。这种理想的铰结连接在实际工程的杆件连接中很难遇到。如图 1-5 (a) 所示为一木屋架的端点构造。根据端点杆件的连接特征,各杆端虽不能任意转动,但由于连接不可能很严密牢固,使得杆件间连接对于相对转动的约束不强,受力时杆件之间会发生微小转动的可能。因此将这种连接方式的结点简化成理想铰结点,如图 1-5 (b) 所示,不致引起明显的误差。如图 1-6 (a) 所示钢焊接结点构造,该处各杆件因焊接在结

点板上而不能相对转动，通过计算机数值分析可知这种连接结构中各杆件主要承受轴力，因此计算时也将这种结点简化成理想铰接点，如图 1-6 (b) 所示。

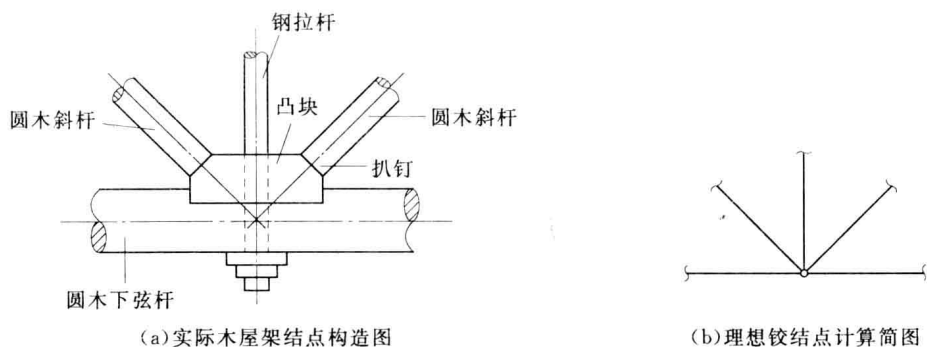


图 1-5 木屋架结点的简化

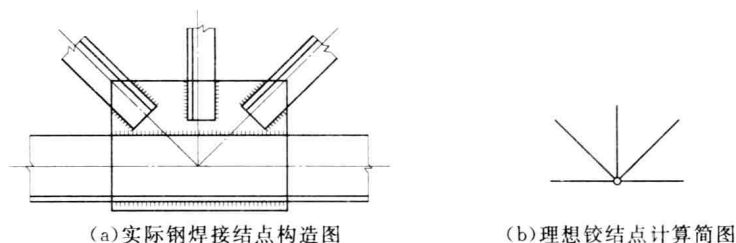


图 1-6 钢焊接结点的简化

2. 刚结点

被刚结点连接的杆件在连接处既不能相对移动，也不能相对转动（所连接的各杆件之间夹角保持不变），既可以传递力，又可以传递弯矩。如图 1-7 (a) 所示为现浇钢筋混凝土边柱与横梁的结点构造图，由于边柱和横梁在结点处的钢筋绑扎在一起而整体浇注，使得横梁和边柱能够牢固地连接在一起共同工作，常可视为刚结点，其计算简图如图 1-7 (b) 所示。

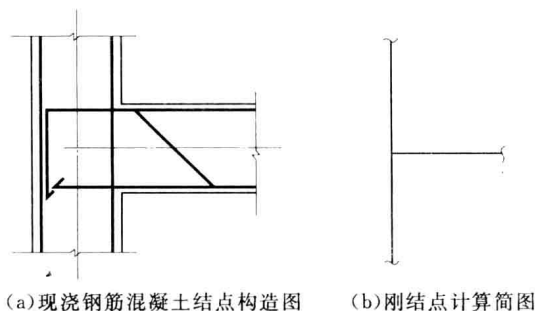


图 1-7 现浇钢筋混凝土结点的简化

3. 组合结点

如图 1-8 (a) 所示为工业建筑中采用的一种组合结点形式，横梁 AB 和竖杆 CD 由钢筋混凝土做成，但 CD 杆的截面面积比 AB 梁的截面面积小很多，斜杆 AD 、 BD 则为型钢。因为 AB 是一根整体的钢筋混凝土梁，截面的抗弯刚度又较大，因此杆件 AB 在计算简图中取为整根梁。而竖杆 CD 、斜杆 AD 和 BD 的抗弯刚度与横梁 AB 相比小得多，它们主要承受轴力，所以杆件 CD 、 AD 、 BD 的两端都看作铰结，其中铰 C 与梁 AB 的下方连接，组合结点计算简图如图 1-8 (b) 所示。这种铰结点和刚结点在一起形成的结点称为组合结点，组合结点处的铰又称为不完全铰。

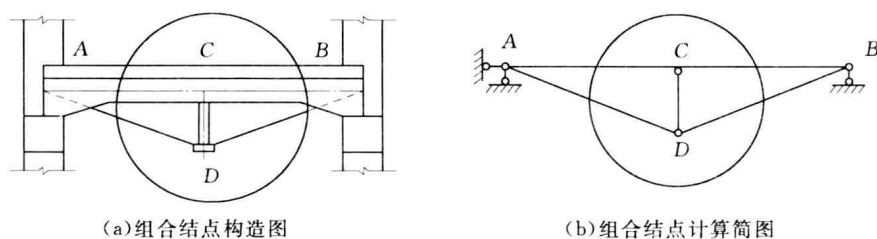


图 1-8 组合结点的简化

(四) 支座的简化

支座是将结构和基础连接起来的装置。其作用是将结构固定于基础上，并将结构上的荷载通过支座传到基础和地基上。支座对结构的作用力称为支座反力。平面结构的支座一般简化为以下四种形式。

1. 活动铰支座

被支承的部分可以转动和水平移动，但不能竖向移动，构造简图如图 1-9 (a) 所示，所提供的反力只有竖向反力 F_y ，所以计算简图中可用一根链杆表示如图 1-9 (b) 所示，故活动铰支座也叫链杆支座或滚轴支座。

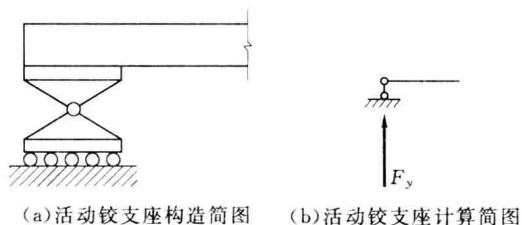


图 1-9 活动铰支座

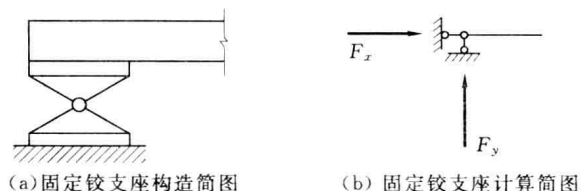


图 1-10 固定铰支座

2. 固定铰支座

被支承的部分可以转动，但不能作水平和竖向移动，构造简图如图 1-10 (a) 所示。能提供两个反力 F_x 、 F_y 。在计算简图中用交于一点的两根链杆来表示如图 1-10 (b) 所示。

3. 固定支座

被支承的部分完全被固定，不能发生任何位移，构造简图如图 1-11 (a) 所示，能提供三个反力 F_x 、 F_y 、 M 。在计算简图中固定支座如图 1-11 (b) 所示。

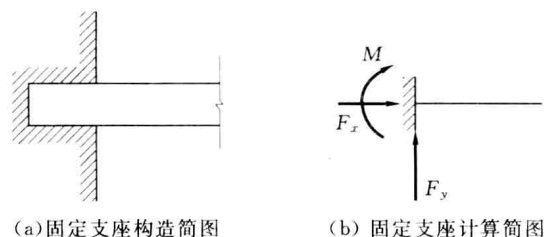


图 1-11 固定支座

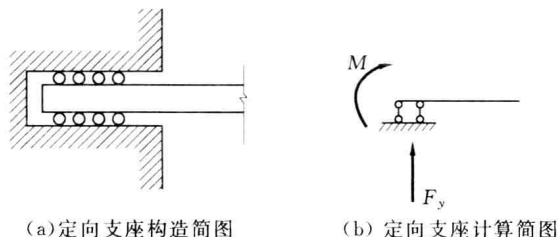


图 1-12 定向支座

4. 定向支座

被支承的部分不能转动，但可沿杆轴方向滑动，构造简图如图 1-12 (a) 所示。能提供一个反力矩 M 和一个反力 F_y 。在计算简图中用两根平行链杆来表示，如图 1-12 (b) 所示。

(五) 荷载的简化

结构所受的荷载分为体积力和表面力两大类。体积力是指分布于物体体积内的力，如结构的自重和惯性力等。表面力是指作用于物体外表面的力，是由其他物体通过接触面而传给结构的作用力，如风压力、土压力和车辆的轮压力等。由于在杆件结构受力分析中把杆件简化为轴线，因此体积力和表面力均简化为作用于杆轴上的力，同时按荷载在杆轴上的分布情况可简化为集中荷载和分布荷载。

(六) 材料性质的简化

土建工程结构中所用的建筑材料通常为钢材、钢筋混凝土、砖石和木材等，为了简化结构计算，一般均可将这些材料假设为连续、均匀、各向同性、完全弹性或弹塑性体。这些假设对于金属材料而言，在一定的受力范围内是合适的，但对其他材料只能是近似的。如木材，顺纹和横纹的物理性质是不同的，所以应用这些假设时要注意区分。

根据以上计算简图的简化原则和要点，就可以抽象提取出实际结构的计算简图。

如图 1-8 (a) 所示的组合吊车梁的两端由柱子上的牛腿支承。因为吊车梁两端的预埋钢板通过较短的焊缝与柱子牛腿上的预埋钢板相连。这种构造对吊车梁支承端的转动起到的约束作用很小。综合考虑梁支座的实际工作状况和计算的简便，因此可将梁的一端简化为固定铰支座，而另一端简化为活动铰支座。吊车梁的计算简图如图 1-8 (b) 所示。经这样简化，既可以使计算简便，又基本能反映结构的主要受力特点。

如图 1-13 (a) 所示一钢筋混凝土厂房结构，梁和柱都是预制的，柱子下端插入杯口内，然后用细石混凝土填实。梁与柱的连接是通过梁端和柱顶的预埋钢板焊接而实现的。在梁上有屋面板连接，在柱的牛腿上有吊车梁连接。

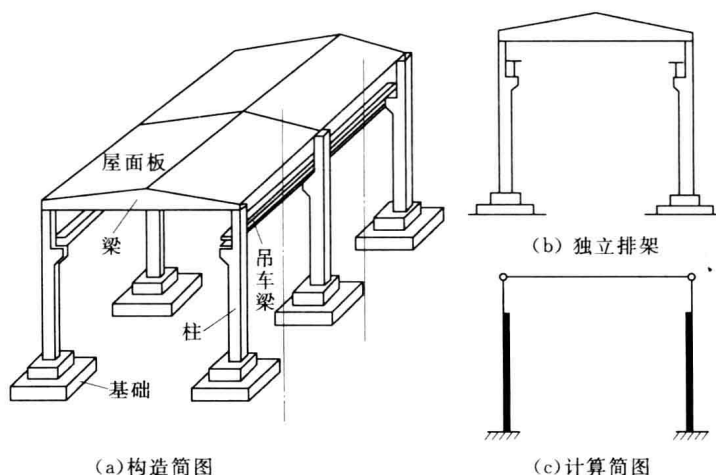


图 1-13 钢筋混凝土厂房

首先厂房是由许多柱、梁、屋面板和吊车梁连接起来的空间结构，但沿纵向为对称规律排列，作用于厂房上的各种荷载可以分配到横向梁柱上，使得每一榀梁柱结构成为一个独立体系，这样实际的空间结构便简化成平面结构，如图 1-13 (b) 所示，工程上把这种结构叫做排架。

其次，梁和柱都是用它们的轴线来代替。梁和柱的连接只依靠预埋钢板的焊接，梁端和柱顶之间虽不能发生相对移动，但仍有发生微小转动的可能，因此可取为铰结点。柱底和基础之间可以认为不能发生相对移动和转动，可取为固定端，独立排架的计算简图如图 1-13 (c) 所示。

请读者思考吊车梁的计算简图应如何取出。

第三节 平面杆系结构的分类

结构分析是针对其计算简图进行的，平面杆系结构的分类也是按实际结构的计算简图进行分类的，分类标准不同，其类别名称各异。

一、按几何和受力特点分类

根据杆系结构的几何和受力特点可分为以下五种类型。

1. 梁

梁的轴线一般为直线，它是一种受弯构件，在竖向荷载作用下支座处不产生水平反力。梁一般分为单跨梁和多跨梁，如图 1-14 所示。

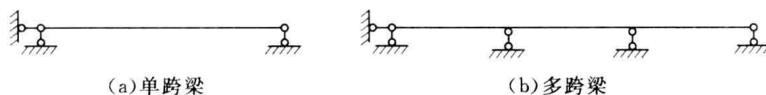


图 1-14 梁

2. 拱

拱的轴线是曲线，在竖向荷载作用下能产生水平反力。这种水平反力的作用使得拱内弯矩远远小于同荷载、同跨度、同支承的梁的弯矩，如图 1-15 所示。

3. 刚架

刚架一般由直杆组成，杆件连接处的结点通常为刚结点，刚架在工程上常称为框架，如图 1-16 所示。

4. 桁架

桁架一般也由直杆组成，所有结点均为铰结点，所有荷载都作用在结点上，如图 1-17 所示。

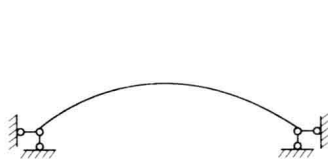


图 1-15 拱

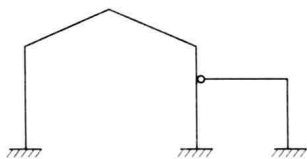


图 1-16 刚架

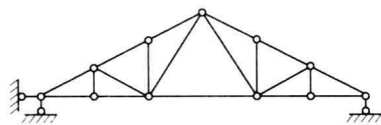


图 1-17 桁架

5. 组合结构

组合结构是由桁架和梁或刚架组成的结构，其中含有组合结点，如图 1-18 所示。

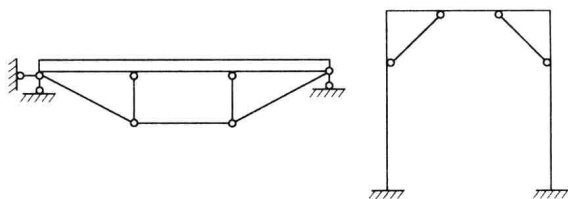


图 1-18 组合结构

二、按计算方法的特点分类

根据计算方法的特点可分为如下两种。

1. 静定结构

若结构的所有支座反力和内力都可以由静力平衡条件唯一确定，则此结构称为静定结构，如图 1-14 (a) 所示。

2. 超静定结构

若结构的所有支座反力和内力不能仅由静力平衡条件唯一确定，而必须同时考虑变形条件才能唯一确定，则此结构称为超静定结构，如图 1-14 (b) 所示。

第四节 荷载的分类

荷载是指主动作用在结构上的外力，如自重、土压力、水压力、风荷载和雪荷载等。除外力以外，温度变化、基础沉陷及制造误差等也能使超静定结构产生内力和变形，这些因素也可以称为超静定结构的荷载。荷载的确定是结构设计中极为重要的环节，若荷载取值过大，则设计的结构会过于笨重而造成浪费；若荷载取值过小，则设计的结构安全性不够，因此合理地确定结构的荷载需要进行慎重周密的工作。

根据荷载作用时间的长短以及荷载的作用性质，可将荷载分类如下：

(1) 根据荷载作用时间的长短，荷载可分为恒载和活载。恒载是指永久作用在结构上的荷载，如结构本身的自重、土压力等。活载是指暂时作用在结构上的荷载，如施工荷载、人群荷载、风载、雪载和车辆荷载等。恒载和活载中的有些荷载（人群荷载、风荷载和雪荷载）的作用位置是固定不变的，这部分荷载称为固定荷载，有些活载（如吊车荷载、汽车和列车荷载）在结构上的作用位置是变化的，这类荷载又称为移动荷载。

(2) 根据荷载作用的性质，荷载可分为静力荷载和动力荷载。静力荷载是指逐渐增加的荷载，荷载的大小、方向和作用位置的变化不至于使结构产生明显的冲击或振动，因而可以忽略惯性力的影响，如结构的自重等。动力荷载是指荷载的大小、方向或作用位置随时间迅速的变化，使结构产生明显的加速度，因而惯性力的影响不容忽略，称为动力荷载，如机器的振动荷载、爆炸荷载等。

荷载的确定是比较复杂的，常常需要综合考虑多种因素，然后进行详细的统计分析，需要查阅有关的“荷载规范”，还要深入实际地进行详细的调查研究等，只有这样才能对荷载作出合理的确定。

小 结

本章是结构力学全部教学内容的前奏，通过本章的学习，读者可以了解到结构力学课