

普通高等教育“十三五”规划教材

结构力学

(第二版)

主编 邱秀梅



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十三五”规划教材

结构力学

(第二版)

主编 邱秀梅



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 摘 要

本书是普通高等教育“十三五”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，在第一版基础上，总结近几年教学经验，为教学改革发展需要编写而成。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。

本书可供工科院校水电、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（C I P）数据

结构力学 / 邱秀梅主编. -- 2版. -- 北京：中国水利水电出版社，2017.12
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5170-6196-0

I. ①结… II. ①邱… III. ①结构力学—高等学校—教材 IV. ①O342

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第326190号

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 结构力学（第二版） JIEGOU LIXUE
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 (营销中心)
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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 24.5印张 580千字
版 次	2013年1月第1版第1次印刷 2017年12月第2版 2017年12月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	56.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

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）

张建刚（山东农业大学）

第二版前言

本书第一版自 2013 年 1 月出版以来,得到了广大同仁和读者的选用和好评,为了使本教材更加完美和实用,在经过广泛征求读者使用要求和建议的基础上,对本书进行了全面修订。

这次修订,基本保持了教材第一版的内容体系和风格,全面体现了近几年的教学经验和成果,主要工作如下:

(1) 对第一版的文字叙述、图表表示进行了全面修订,力求做到文字简练准确、规范严谨,图表清晰美观,可读性强。对部分章节的内容进行了重新编排和编写,使之更加符合认知规律,便于读者理解和掌握。

(2) 名词、概念的提法更加通俗易懂,并用黑体标出,使之更加醒目。

(3) 统一修改了量的符号表示,使之更加规范和标准化。

(4) 增加了一些读者思考问题,进一步提升了读者的阅读兴趣。

(5) 增加了一些图片、证明、方法对比等,便于读者理解和掌握相关内容。如计算自由度和实际自由度的比较、刚体虚功原理的提出、力法位移法的六字口诀、弯矩图和影响线的对比等。

本书第一版的作者全部参加了第二版的修订工作,而且章节分工和第一版相同,在各编委提出的各自章节修改建议的基础上,全书由邱秀梅统一修改完成。山东农业大学张建刚老师参加了修改工作。

本书第二版的修改完成,得到了山东农业大学水利土木工程学院力学系刘福胜教授的细致审阅和指点,特此致谢。相关院校的教师和读者对第二版的修订提出了许多修改建议,在此一并致谢。

本书的再版,得到了中国水利水电出版社的大力支持和积极配合,在此表示衷心的感谢。

教材虽经修改再版,但由于编者水平有限,不当之处敬请广大同仁和读者提出批评指正。

编者

2017 年 8 月

第一版前言

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；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

第二版前言

第一版前言

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	9
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	18
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	84
第四节 静定结构在荷载作用下的位移计算	86
第五节 图乘法	91
第六节 静定结构由于温度改变和支座移动引起的位移	97
第七节 线弹性结构的互等定理	101
小结	104
思考题	105
习题	106
习题参考答案	111
第五章 力法	114
第一节 超静定结构概述	114
第二节 力法的基本原理	117
第三节 荷载作用下超静定结构的力法求解	122
第四节 支座移动和温度变化时超静定结构的计算	135
第五节 对称性的利用	138
第六节 超静定结构的位移计算与最后内力图的校核	150
第七节 超静定结构的特性	156
小结	158
思考题	159
习题	160
习题参考答案	164
第六章 位移法	166
第一节 位移法的基本概念	166
第二节 等截面单跨超静定梁的转角位移方程	168
第三节 位移法的基本未知量——独立位移的确定	174
第四节 位移法基本原理及示例	177
第五节 对称性的利用	188
第六节 力法与位移法的比较	191
第七节 联合法与混合法	192
小结	196

思考题	197
习题	197
习题参考答案	200
第七章 渐近法	202
第一节 力矩分配法的基本概念	202
第二节 力矩分配法的基本原理	203
第三节 用力矩分配法计算连续梁和无侧移刚架	215
第四节 无剪力分配法	218
第五节 附加链杆法	223
第六节 多层多跨刚架的分层算法	226
小结	229
思考题	230
习题	230
习题参考答案	232
第八章 影响线及其应用	233
第一节 移动荷载和影响线的概念	233
第二节 静力法作静定结构影响线	234
第三节 机动法作静定结构影响线	242
第四节 影响线的应用	245
第五节 简支梁的包络图和绝对最大弯矩	254
第六节 用机动法作超静定梁影响线的概念	258
第七节 连续梁的内力包络图	261
小结	264
思考题	265
习题	266
习题参考答案	270
第九章 矩阵位移法	272
第一节 概述	272
第二节 局部坐标系下单元刚度矩阵	273
第三节 整体坐标系下单元刚度矩阵	280
第四节 用矩阵位移法解连续梁	284
第五节 用矩阵位移法解平面刚架	294
第六节 用矩阵位移法解平面桁架和组合结构	301
小结	304
思考题	305
习题	305
习题参考答案	307

第十章 结构动力学简介.....	310
第一节 概述	310
第二节 结构体系的动力自由度	311
第三节 单自由度体系的振动分析	314
第四节 多自由度体系的振动分析	335
第五节 近似法求自振频率	361
小结	368
思考题	368
习题	370
习题参考答案	376
参考文献	379

第一章 绪 论

结构力学是以理论力学和材料力学为基础的工科专业又一基础力学课程。结构力学主要是研究杆系结构的组成规律和内力计算。本章介绍了结构力学的研究对象和任务、结构的计算简图、平面杆系结构的分类、荷载的分类。通过本章的学习,可使读者对结构力学课程有一个感性认识。

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。所有结构都是由若干个基本构件组成的,**基本构件**是指组成建筑物和构筑物的单个组成部分,如杆件、板壳、块体等。

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。

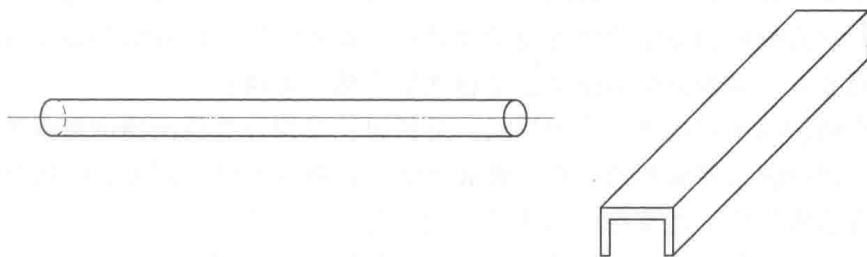


图 1-1 杆件

(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。

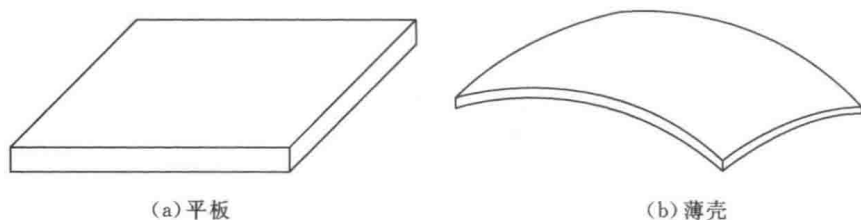


图 1-2 板壳

(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 1-4 所示的块状基础等都属于实体结构。

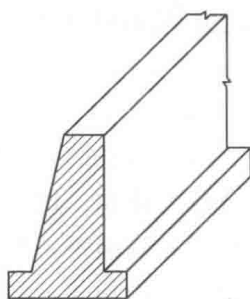


图 1-3 挡土墙

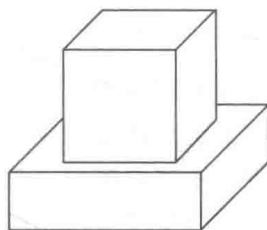


图 1-4 块状基础

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内力及变形，进而研究其强度、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。实验研究方法的內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內容在结构力学课程中讨论。

结构力学是土木、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，起着承上启下的桥梁作用。因此要学好它就要做到三勤，即勤学、勤练、勤思考总结，切实掌握结构力学的基本內容，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理论分析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,使计算简图最大限度地反映出实际结构的主要受力特征和变形特征。

(2) 计算简图要和相应的计算手段相匹配,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,外荷载的作用点也简化到轴线上。

(三) 结点的简化

杆件之间的连接区域称为**结点**,结点间的距离表示杆长。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土建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,受力时杆件之间有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,而且对实际工程是偏于安全的。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结点,如图 1-6 (b) 所示。

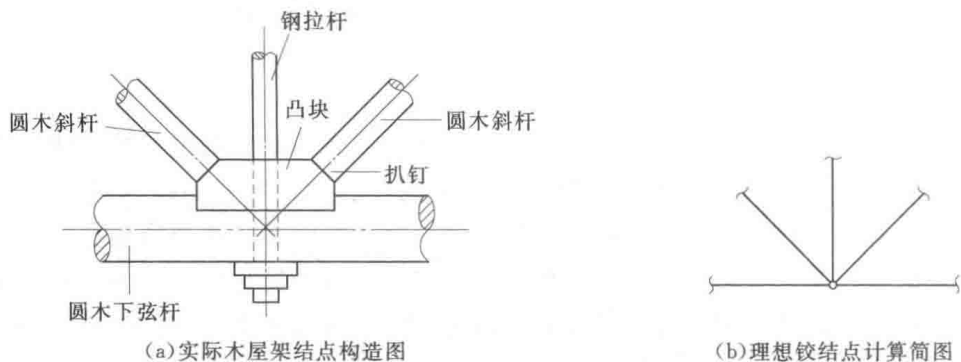


图 1-5 木屋架结点的简化

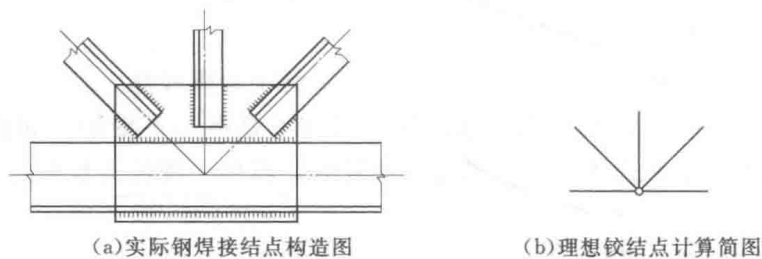


图 1-6 钢焊接结点的简化

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筑,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。

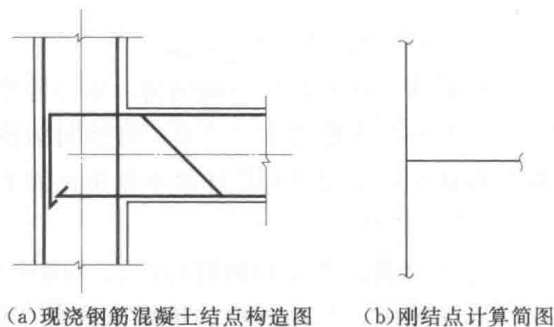


图 1-7 现浇钢筋混凝土结点的简化

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 的两端都看作铰结点,其中铰 C 与梁 AB 的下方连接如图 1-8 (b) 所示。这种铰结点和刚结点连接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。

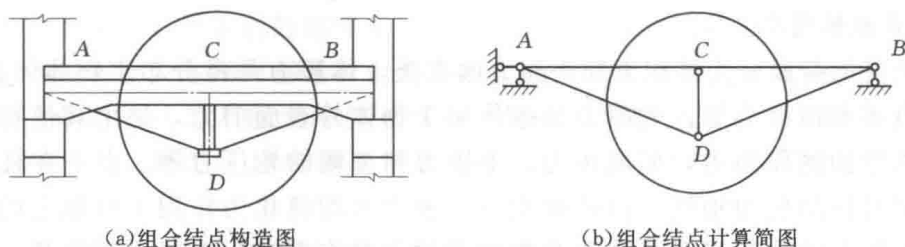


图 1-8 组合结点的简化

(四) 支座的简化

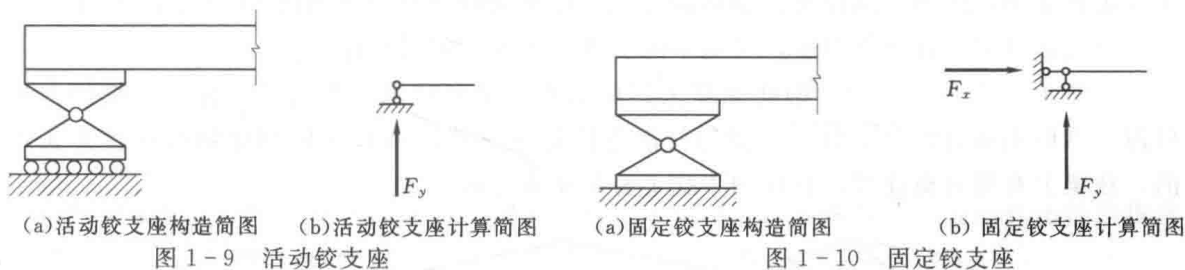
支座是将结构和基础连接起来的装置。其作用是将结构固定于基础上，并将结构上的荷载通过支座传到基础和地基上。支座对结构的作用力称为**支座反力**。平面结构的支座一般简化为以下四种形式。

1. 活动铰支座

被支承的部分可以绕铰心转动，还可以沿与支承方向相垂直方向移动，但构件不能沿支承方向移动，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，活动铰支座也叫链杆支座或滚轴支座。

2. 固定铰支座

被支承的部分可以绕铰心转动，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。

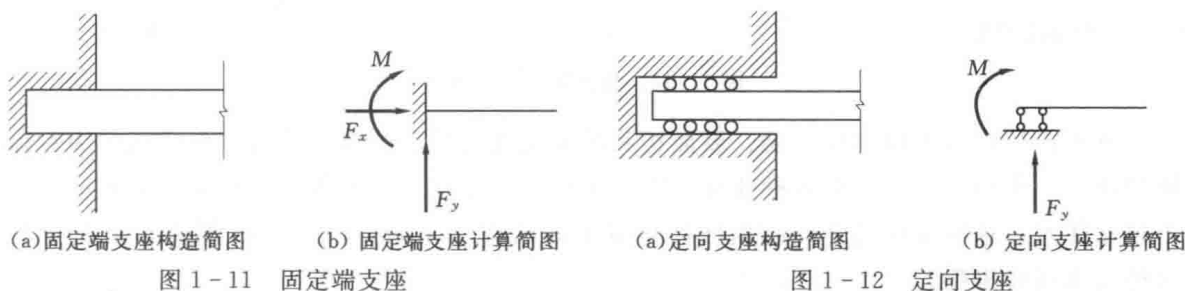


3. 固定端支座

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 。在计算简图中固定端支座如图 1-11 (b) 所示。

4. 定向支座

被支承的部分不能转动，但可沿与支承方向相垂直方向滑动，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。需要说明的是，理想的集中荷载是不存在的，当分布荷载的分布面积和构件尺寸相比可以忽略时，分布荷载就可以按集中荷载处理。

(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。这种连接对吊车梁支承端的转动起到的约束作用很小。综合考虑梁和支座的实际工作状况和计算的简便，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。

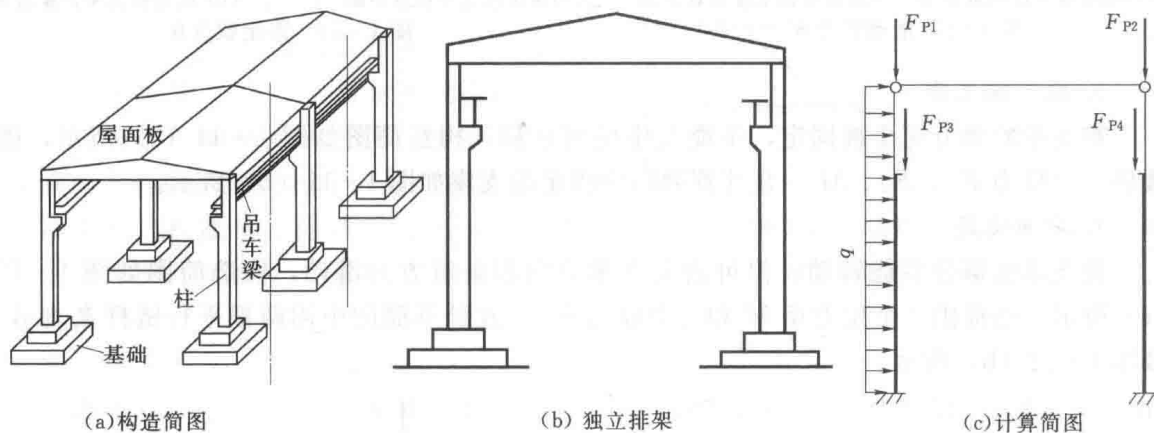


图 1-13 钢筋混凝土厂房

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作排架。

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，屋面板的重量通过结点传到柱子上，再加上风荷载及吊车荷载，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。

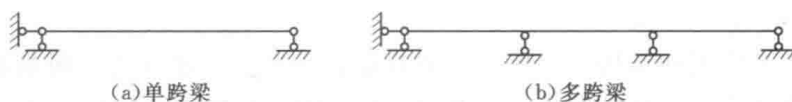


图 1-14 梁

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。

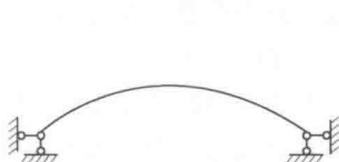


图 1-15 拱

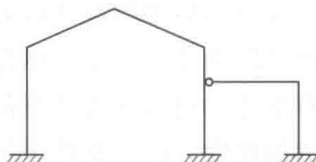


图 1-16 刚架

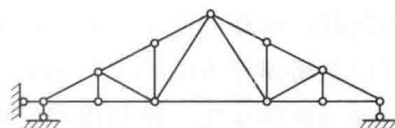


图 1-17 桁架

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。