

高等学校土木建筑专业
|应用型本科系列规划教材|

结构力学

赵才其 赵玲 ◎ 主编

J I E G O U L I X U E



东南大学出版社
Southeast University Press

高等学校土木建筑专业应用型本科系列规划教材

结 构 力 学

主 审 单 建

主 编 赵才其 赵 玲

副主编 孙 云 范 力 盛力晶

参 编 (以拼音为序)

蒋亚琼 卢红琴 孟 玮

宋明志 张小娜

东南大学出版社

· 南京 ·

内 容 提 要

本书共 12 章,其中第 1~8 章即绪论、平面体系的几何构造分析、静定结构的内力分析、静定结构的位移计算、力法、位移法、渐近法、影响线及其应用为基本内容,一般需安排 64 学时;第 9~12 章即矩阵位移法、结构的动力分析、结构的稳定分析、结构的极限分析为专题内容,各校可根据具体情况选学,一般需安排 48 学时左右。

全书内容精练,通俗易懂,便于自学。既重视基本概念、基本原理的讲解和基本方法的训练,又注重理论知识与应用背景的结合,以及本学科最新成果及发展趋势的介绍。

本书既可作为普通高校本科土木工程专业(包括建筑工程、道路桥梁及工程管理等专业方向)以及水利工程、港口航道工程等相近专业的教材,更适合于各类应用型本科院校使用。同时也可供上述专业的广大工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学/赵才其,赵玲主编. —南京:东南大学出版社,2011.8

高等学校土木建筑专业应用型本科系列规划教材

ISBN 978 - 7 - 5641 - 2816 - 6

I. ①结… II. ①赵…②赵… 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(2011)第 103030 号

结构力学

出版发行:东南大学出版社

社 址:南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人:江建中

责任编辑:史建农 戴坚敏

网 址:<http://www.seupress.com>

电子邮件:press@seupress.com

经 销:全国各地新华书店

印 刷:南京四彩印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:22.25

字 数:572 千字

版 次:2011 年 8 月第 1 版

印 次:2011 年 8 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978 - 7 - 5641 - 2816 - 6

印 数:1 - 3000 册

定 价:46.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与读者服务部联系。电话(传真):025 - 83792328

高等学校土木建筑专业应用型本科系列 规划教材编审委员会

名誉主任 吕志涛

主任 蓝宗建

副主任 (以拼音为序)

陈 蓓 陈 斌 方达宪 汤 鸿

夏军武 肖 鹏 宗 兰 张三柱

秘书长 戴坚敏

委员 (以拼音为序)

戴望炎 董 祥 郭贯成 胡伍生

黄炳生 黄春霞 贾仁甫 李 果

李幽铮 廖东斌 刘 桐 刘殿华

刘子彤 龙帮云 吕恒林 陶 阳

单法明 王照宇 徐德良 殷为民

于习法 余丽武 喻 骁 张靖静

张敏莉 张伟郁 赵 玲 赵冰华

赵才其 赵庆华 郑廷银 周 佶

周桂云

总前言

国家颁布的《国家中长期教育改革和规划纲要(2010—2020年)》指出,要“适应国家和区域经济社会发展需要,不断优化高等教育结构,重点扩大应用型、复合型、技能型人才培养规模”;“学生适应社会和就业创业能力不强,创新型、实用型、复合型人才紧缺”。为了更好地适应我国高等教育的改革和发展,满足高等学校对应用型人才的培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等的要求,东南大学出版社携手国内部分高等院校组建土木建筑专业应用型本科系列规划教材编审委员会。大家认为,目前适用于应用型人才培养的优秀教材还较少,大部分国家级教材对于培养应用型人才的院校来说起点偏高,难度偏大,内容偏多,且结合工程实践的内容往往偏少。因此,组织一批学术水平较高、实践能力较强、培养应用型人才的教学经验丰富的教师,编写出一套适用于应用型人才培养的教材是十分必要的,这将有力地促进应用型本科教学质量的提高。

经编审委员会商讨,对教材的编写达成如下共识:

一、体例要新颖活泼。学习和借鉴优秀教材特别是国外精品教材的写作思路、写作方法以及章节安排,摒弃传统工科教材知识点设置按部就班、理论讲解枯燥无味的弊端,以清新活泼的风格抓住学生的兴趣点,让教材为学生所用,使学生对教材不会产生畏难情绪。

二、人文知识与科技知识渗透。在教材编写中参考一些人文历史和科技知识,进行一些浅显易懂的类比,使教材更具可读性,改变工科教材艰深古板的面貌。

三、以学生为本。在教材编写过程中,“注重学思结合,注重知行统一,注重因材施教”,充分考虑大学生人才就业市场的发展变化,努力站在学生的角度思考问题,考虑学生对教材的感受,考虑学生的学习动力,力求做到教材贴合学生实际,受教师和学生欢迎。同时,考虑到学生考取相关资格证书的需要,教材中还结合各类职业资格考试编写了相关习题。

四、理论讲解要简明扼要,文例突出应用。在编写过程中,紧扣“应用”两字创特色,紧紧围绕着应用型人才培养的主题,避免一些高深的理论及公式的推导,大力提倡白话文教材,文字表述清晰明了、一目了然,便于学生理解、接受,

能激起学生的学习兴趣,提高学习效率。

五、突出先进性、现实性、实用性、操作性。对于知识更新较快的学科,力求将最新最前沿的知识写进教材,并且对未来发展趋势用阅读材料的方式介绍给学生。同时,努力将教学改革最新成果体现在教材中,以学生就业所需的专业知识和操作技能为着眼点,在适度的基础知识与理论体系覆盖下,着重讲解应用型人才培养所需的知识点和关键点,突出实用性和可操作性。

六、强化案例式教学。在编写过程中,有机融入最新的实例资料以及操作性较强的案例素材,并对这些素材资料进行有效的案例分析,提高教材的可读性和实用性,为教师案例教学提供便利。

七、重视实践环节。编写中力求优化知识结构,丰富社会实践,强化能力培养,着力提高学生的学习能力、实践能力、创新能力,注重实践操作的训练,通过实际训练加深对理论知识的理解。在实用性和技巧性强的章节中,设计相关的实践操作案例和练习题。

在教材编写过程中,由于编写者的水平和知识局限,难免存在缺陷与不足,恳请各位读者给予批评斧正,以便教材编审委员会重新审定,再版时进一步提升教材的质量。本套教材以“应用型”定位为出发点,适用于高等院校土木建筑、工程管理等相关专业,高校独立学院、民办院校以及成人教育和网络教育均可使用,也可作为相关专业人士的参考资料。

高等学校土木建筑专业应用型
本科系列规划教材编审委员会
2010年8月

前 言

《结构力学》是高校土木工程专业本科生的一门主干课程,是本专业最重要的专业基础课之一。通过本课程的学习,可以使學生获得清晰的力学概念,掌握常见结构的力学分析方法和建立合理力学模型的基本技能,为后续相关专业课程的学习打下坚实的力学基础。

近年来我国高等教育快速发展,创办了不少应用型本科院校。其培养目标既有别于重点高校培养的研究型人才,也不同于一般高职院校培养的技能型人才。它们对力学的要求是什么?如何在课堂教学中加以体现?这些正是编者在本教材中试图回答的问题。

本书共 12 章,内容符合教育部审定的《结构力学课程教学基本要求》(约 110 学时)。在编写过程中尽量采用形象而直观的比喻,来解释那些不易理解的理论难点,力争使教材体系结构严谨,阐述深入浅出,在强调基本理论的同时尽量做到通俗易懂,理论紧密联系实际。

本书第 1~6 章由东南大学赵才其编写;第 7、12 章由扬州大学赵玲编写;第 8 章由扬州大学孙云编写;第 9、10 章由东南大学盛力晶、赵才其编写;第 11 章由中国矿业大学范力编写。全书由赵才其负责统稿。

书后各章习题及其解答分别由下列院校人员编写:南京工业大学卢红琴(第 2、3、9、10 章);南京理工大学泰州学院孟玮(第 4、5 章);安徽新华学院蒋亚琼(第 6、7 章);淮海工学院宋明志(第 8 章);黄河科技学院张小娜(第 11、12 章)。

本书由东南大学单建教授主审。

在本书的编写过程中,东南大学的研究生陶健、谢娜、王薇和赖俊明同学参与了大量的插图绘制及书稿整理工作,在此表示感谢!

由于编者的水平有限、时间仓促,书中的错误和不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2011 年 3 月于南京

目 录

1 绪论	1
1.1 结构力学的研究内容	1
1.2 结构的计算简图	3
1.3 平面杆系结构的分类	7
1.4 荷载的分类	8
2 平面体系的几何构造分析	9
2.1 概述	9
2.2 几个重要的概念	10
2.3 几何不变体系的判定规则	13
2.4 瞬变及常变体系	14
2.5 几何构造分析应用示例	15
2.6 虚铰在无穷远处的几何构造分析	17
3 静定结构的内力分析	22
3.1 概述	22
3.2 静定梁和刚架的内力分析	22
3.3 三铰拱的内力分析	37
3.4 平面桁架的内力分析	45
3.5 组合结构的内力分析	52
3.6 用零载法分析复杂体系的几何构造性质	54
4 静定结构的位移计算	63
4.1 概述	63
4.2 实功和虚功的概念	64
4.3 变形体虚功原理	65
4.4 静定结构在荷载作用下的位移计算	68
4.5 位移计算的实用方法——图乘法	73
4.6 非荷载因素作用下的位移计算	80
4.7 线弹性体系的互等定理	85
5 力法	93
5.1 超静定结构概述	93
5.2 超静定次数的确定	93
5.3 力法基本原理及典型方程	95
5.4 一般荷载作用下的内力分析	100
5.5 非荷载因素作用下的内力分析	106
5.6 利用对称性简化分析	110
5.7 超静定拱的内力分析	116
5.8 超静定结构的位移计算及最终内力图的校核	122
6 位移法	132
6.1 位移法的基本概念	132
6.2 等截面直杆的转角位移方程	133

6.3	位移法基本未知量的确定	138
6.4	位移法之一:基本结构—典型方程法	139
6.5	位移法之二:结点和截面平衡方程法	146
6.6	用位移法求解某些特定问题	150
7	渐近法	159
7.1	概述	159
7.2	力矩分配法的基本原理	159
7.3	连续梁和无侧移刚架的计算	167
7.4	有侧移刚架的计算	173
7.5	剪力分配法	181
8	影响线及其应用	188
8.1	影响线的概念	188
8.2	静力法作影响线	189
8.3	间接荷载作用下的影响线	196
8.4	平面桁架的内力影响线	198
8.5	机动法作影响线	200
8.6	影响线的应用	205
9	矩阵位移法	222
9.1	概述	222
9.2	杆端位移和杆端内力的表示方法	222
9.3	局部坐标系下的单元分析	224
9.4	整体坐标系下的单元分析	226
9.5	结构的整体分析	229
9.6	算例分析	237
10	结构的动力分析	249
10.1	概述	249
10.2	单自由度体系的自由振动	250
10.3	单自由度体系的强迫振动	257
10.4	多自由度体系的自由振动	261
10.5	多自由度体系的强迫振动	272
11	结构的稳定分析	282
11.1	概述	282
11.2	静力法求临界荷载	286
11.3	能量法求临界荷载	296
11.4	组合压杆的稳定分析	304
11.5	刚架结构的稳定分析	310
12	结构的极限分析	318
12.1	概述	318
12.2	静定梁的极限荷载	319
12.3	单跨超静定梁的极限荷载	323
12.4	多跨超静定梁的极限荷载	328
12.5	比例加载定理	330
12.6	刚架的极限荷载	332
	参考答案	338
	参考文献	346

1 绪论

1.1 结构力学的研究内容

顾名思义,结构力学的研究对象是工程结构,它不同于材料力学主要研究单个构件。结构是由很多构件(包括梁、板、柱等)组成的建筑物的“骨架”,因此从这一点来说结构力学研究的问题应比材料力学更为复杂,且研究的对象更接近于实际工程。它是进一步学习后续专业课之前的一门主干课程。通常在进行一项大型、复杂工程的结构设计时,关键工作之一就是如何对结构进行力学分析,而结构分析的三大任务便是对结构进行强度、刚度和稳定性分析,目的是确保工程结构的充分安全和经济实用。

工程结构从形态上分,通常有高层结构和大跨结构两大类,高层结构包括各种高层建筑和高耸的塔桅结构,如电视塔、输电塔等。图 1-1 为世界最高建筑——阿联酋的迪拜塔,高 828 m。图 1-2 为新建的广州电视塔,高 610 m,为世界第一高塔。

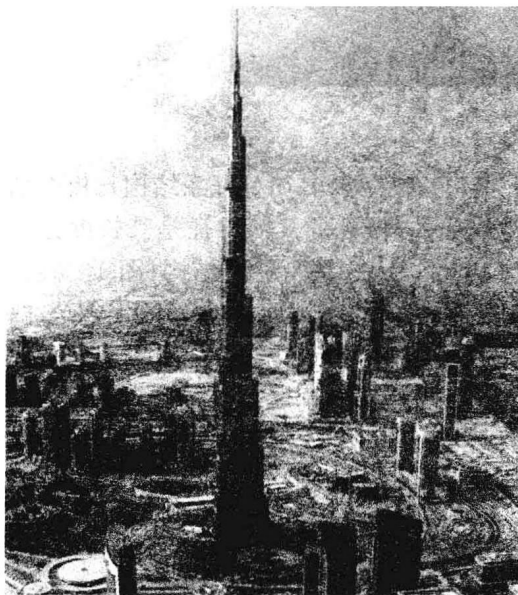


图 1-1

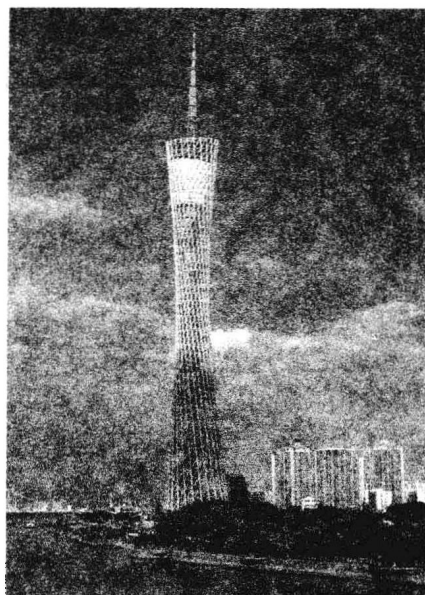
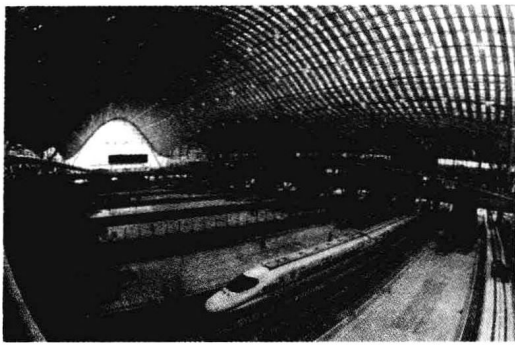
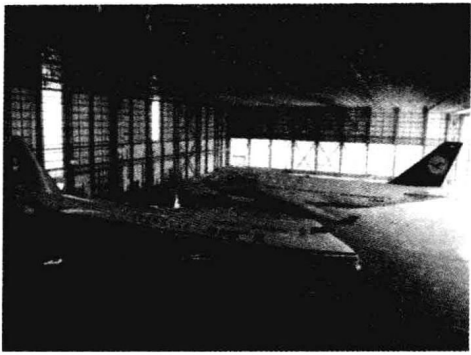


图 1-2

大跨结构包括各种大跨度的体育馆、火车站、机场航站楼和飞机库等空间结构(图 1-3)以及各种大跨度的桥梁结构,图 1-3(a)、(b)分别为武汉高铁车站和某飞机场的检修机库,图 1-4 为著名的美国金门大桥。



(a) 武汉高铁车站



(b) 某机场检修机库

图 1-3



图 1-4

按照组成结构的构件几何特点,结构又可分为杆件体系结构(简称杆系结构)、板壳结构和实体结构三大类。杆系结构是由一系列的杆件构成的,杆件的几何特征是其长度方向的尺度远大于另外两个方向(即截面的宽度和高度),也可以说它是“一维”结构(图 1-5)。板壳结构的基本构件是板或壳,其几何特征是某一个方向的尺度(常称为厚度)远小于另两个方向,因此它属于“二维”结构(图 1-6),如北京火车站的中央大厅便是由钢筋混凝土建造的薄壳结构。另外,人们在日常生活中接触的鸡蛋壳、乒乓球等均属薄壳结构。而实体结构则在 3 个方向的尺度均为同一数量级,例如:山体周边的挡土墙、水库大坝等。图 1-7(b) 为长江三峡大坝,全长 2 309 m,坝高 185 m,为目前世界第一大坝。

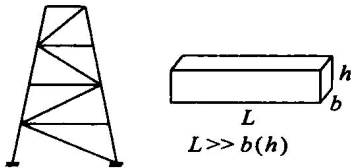
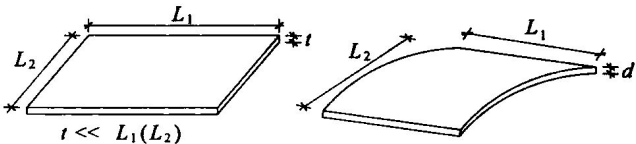


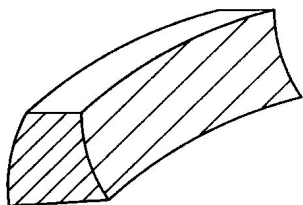
图 1-5



(a) 板

(b) 壳

图 1-6



(a) 实体结构示意图



(b) 长江三峡大坝

图 1-7

杆系结构是结构力学的主要研究对象。

1.2 结构的计算简图

由于实物工程的构造极其复杂,试图完全按照其实际工作状态进行受力分析几乎是不可能的,即便对少数简单工程或许有可能,但从实用角度看也是没有必要的。因此必须对实际工程进行相应的简化处理,即抓住主要矛盾,忽略次要因素,用一种能够基本反映实际结构受力状态的“简化图形”来代替原结构,这种“简化图形”便称为结构的计算简图,有时也称计算模型。如何准确、合理地选取计算简图是一名结构工程师应当具备的基本素质。当然,对于比较复杂的大型结构,要确定其计算简图也不是一件容易的事,还需具备一定的专业知识和实践经验,有时尚需借助模型试验等手段才能确定较合理的计算简图。在选取常见结构的计算简图时,应当遵循以下原则:

- (1) 计算简图必须能够较客观地反映实际结构的主要受力特征,确保计算结果可靠。
- (2) 在满足一定的计算精度要求下,应使计算简图尽量简单明了、方便可行。

选取杆件结构的计算简图,主要涉及以下五方面的简化:

1) 结构体系的简化

杆系结构可分为平面结构和空间结构两大类。当结构中各杆件的轴线与作用的荷载位于同一平面内时,称为平面结构;不在同一平面内时,称为空间结构。严格地说,实际结构几乎都是空间结构,但其中有很多较规则的空间结构,其主要承重结构以及力的传递路线呈平面受力形式,通常可简化为平面结构进行计算分析。如图 1-8(a)所示的单层工业厂房,沿其纵向长度方向有多榀门式刚架连接而成,可取其中的一榀作为计算简图进行受力分析(图 1-8(b))。

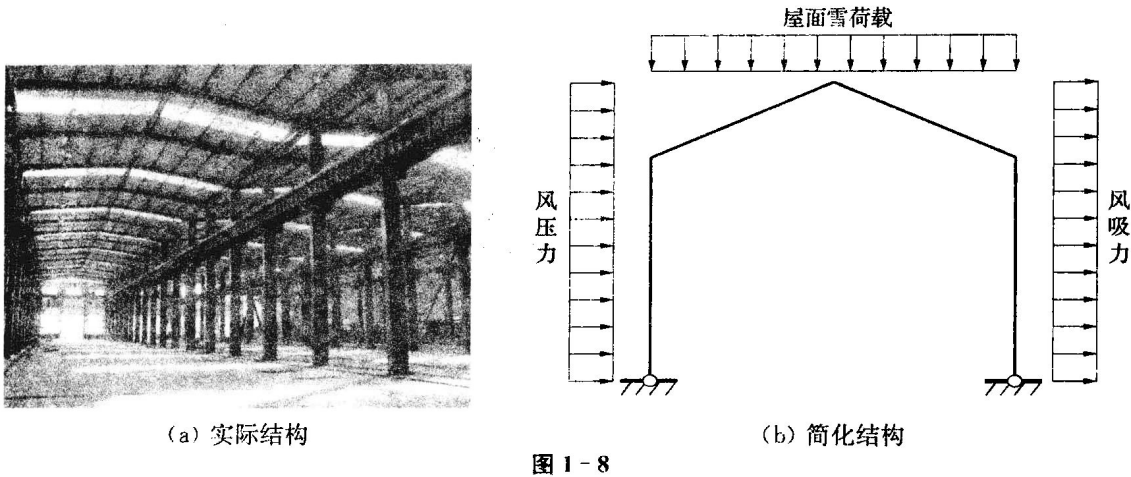
2) 杆件的简化

由于杆件的内力仅沿长度方向变化,故所有的杆件均以其轴线代替。

3) 结点的简化

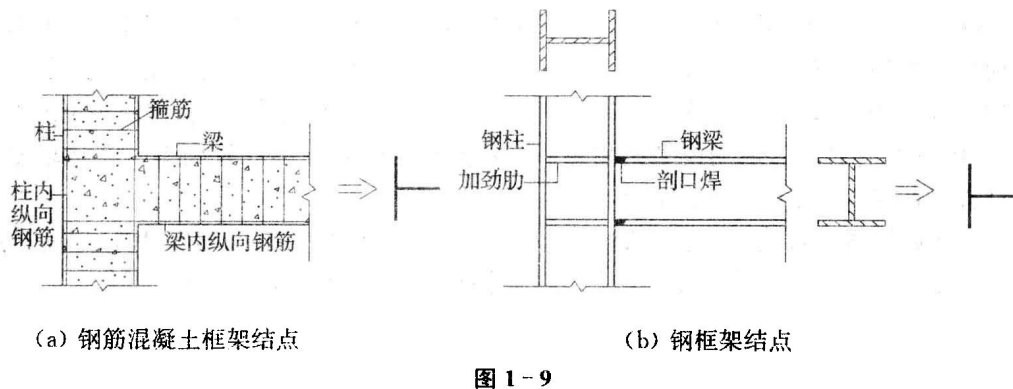
杆件之间的公共交接区域,即各杆件轴线的公共交点称为结构的结点,不同材料制作的杆件之间的连接方式有很多种,但根据其受力时的变形特点,在计算简图中可归纳为以下 3

种：刚性连接、铰接和混合连接。



(1) 刚性连接结点(简称刚结点)

其变形特点是被连接的杆件在其公共结点处不能相对移动和转动,杆件之间既可传递集中力还能传递弯矩。图 1-9(a)为现浇钢筋混凝土框架结点,梁、柱内的钢筋在交接区绑扎在一起,由混凝土将其浇筑成一个整体。图 1-9(b)为钢框架结点,“H”型钢梁、钢柱通过结点板将其焊接成整体,梁、柱之间不能相对移动和转动,可简化为刚结点。



(2) 铰接连接结点(简称铰结点)

该类结点的主要特征是被连接各杆件在结点处不能相对移动,但可绕结点中心自由转动,因此杆件之间只能传递集中力,不能传递弯矩。这种铰结点在实际工程中属于一种不易实现的理想连接方式。如图 1-10(a)所示是由角钢杆件构成的钢屋架结点,杆件之间通过一块公共的结点板将其焊接在一起,尽管在杆件的局部焊接区域不能转动,但由于杆件的长度相对于连接处的焊缝长度要长得得多,相对细长的杆件可以发生微小的相对转动,一般可以简化为铰接结点,由此引起的计算误差通常情况下是允许的(详见第 4 章相关分析)。

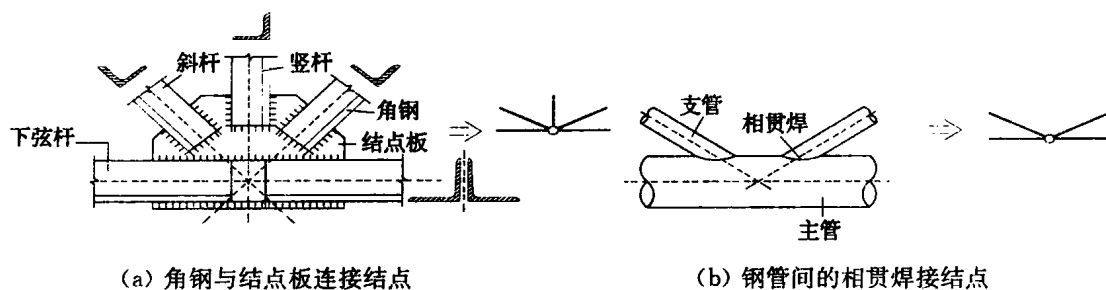


图 1-10

(3) 混合连接结点(简称混合结点或组合结点)

若在一个结点上同时出现上述两种连接方式时,则称该结点为混合结点或组合结点。图 1-11(a)所示为某轻钢结构厂房端部的山墙剖面图,抗风柱与钢梁之间为铰接,不能传递弯矩,而钢梁在该处可看成是连续或是刚性连接的,其计算简图如图 1-11(b)所示。

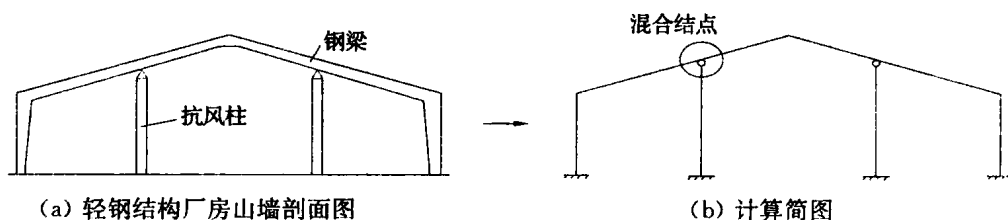


图 1-11

4) 支座的简化

上部结构与基础之间的连接装置称为支座。其作用是当结构承受荷载后将力传给基础,并限制结构沿某些方向运动。支座对结构产生的反作用力称为支座反力,平面杆系结构的支座一般可简化为以下 4 种形式。

(1) 活动铰支座

图 1-12(a)为多跨连续桥梁中的某一个中间支座的构造示意图,在该处它限制结构竖向移动,而转动和水平方向的移动是自由的(结构可通过辊轴沿水平方向移动,或绕销轴转动),因此它只产生一个竖向反力 F_y 。

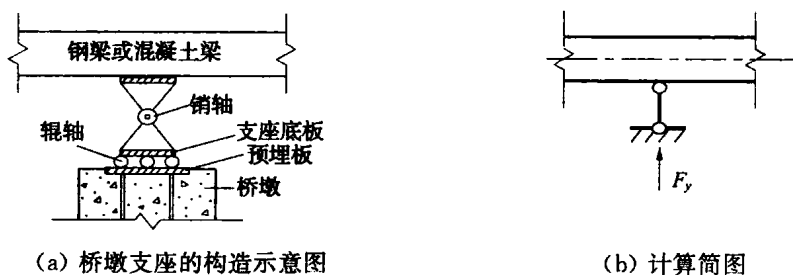
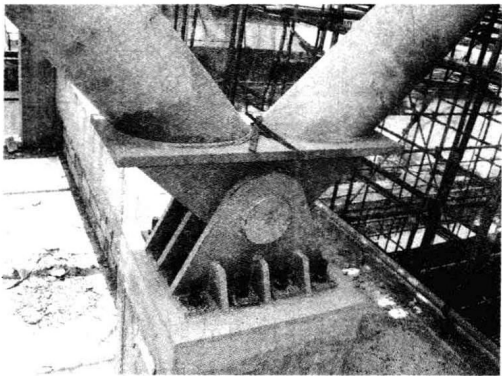


图 1-12

(2) 固定铰支座

图 1-13(a)为某钢结构工程的支座实景照片,它限制结构沿水平和竖向移动,只能绕

铰链中心转动,因此它产生两个方向的支座反力,即水平反力 F_x 和竖向反力 F_y , 作用点通过铰的中心。固定铰支座可用两根相交的链杆或一个铰表示(图 1-13(b)、(c)、(d))。



(a) 某工程的固定铰支座

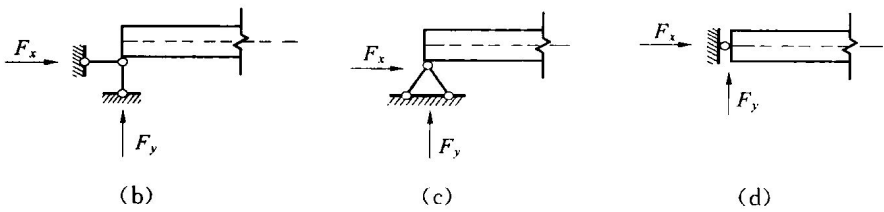


图 1-13

(3) 定向滑动支座

该类支座限制结构的转动和沿某一个方向的移动,但可沿另一个方向移动。计算简图可用一对垂直于运动方向的平行链杆表示。支座反力为一个反力矩 M 和一个沿平行于链杆方向的集中反力。

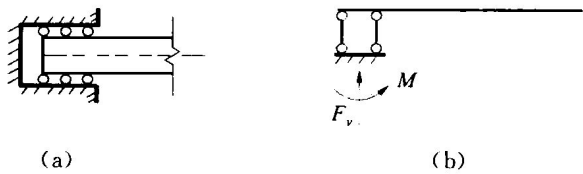


图 1-14

(4) 固定支座

固定支座是将结构的一端完全嵌固在支承物中,使其在该端不能发生任何的移动和转动。其作用相当于由定向滑动支座与活动铰支座组合而成,故其计算简图有时也可表示为图 1-15(c)、(d)的形式,相应地,支座反力为两个集中反力和一个反力矩。

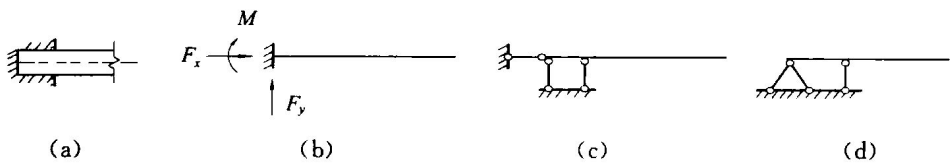


图 1-15

5) 荷载的简化

作用在杆件上的荷载通常分布在一定范围内,而杆件在计算简图中以轴线表示,因此,荷载也应简化为作用在杆轴上的力。当荷载作用的范围相对于结构很小时,则可简化为集中荷载,如悬挂在梁上的重物等;当荷载作用的范围较大时,则应简化为沿杆轴方向的分布荷载。如杆件的自重、楼板传给周边支承梁的力等。

1.3 平面杆系结构的分类

平面杆系结构是建筑工程中应用最为广泛的结构形式,也是结构力学课程的主要研究对象。根据其构造特征和受力特点,通常可分为以下几种类别:

(1) 梁——是一种以受弯为主的构件,其轴线一般为直线,也有折线或曲线(称曲梁)。既有单跨梁又有多跨梁(图 1-16)

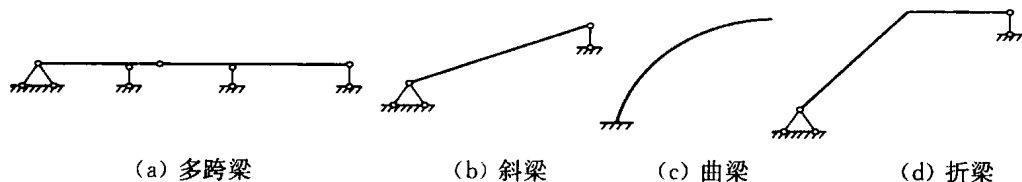


图 1-16

(2) 刚架——是由梁、柱等直杆通过刚结点组成的以受弯为主的结构(图 1-17)。有时也称为框架结构。

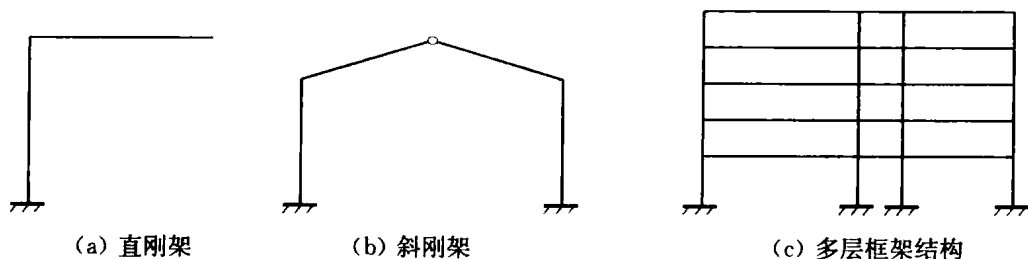


图 1-17

(3) 桁架——是由若干直杆通过铰结点连接而成的结构,当荷载都作用在结点上时,所有杆件的内力只有轴力,不产生弯矩和剪力(图 1-18)。

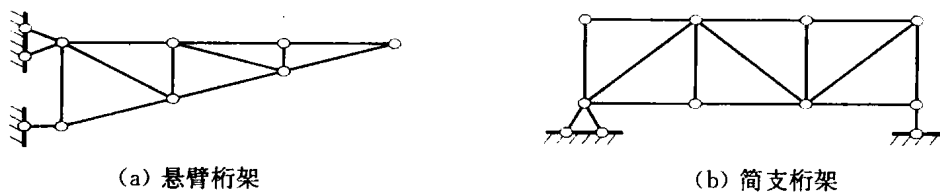


图 1-18

(4) 拱——杆轴通常为曲线,其主要受力特征是:在竖向荷载作用下支座产生水平推力,可使截面上的弯矩较同跨度的梁小得多(图 1-19)。

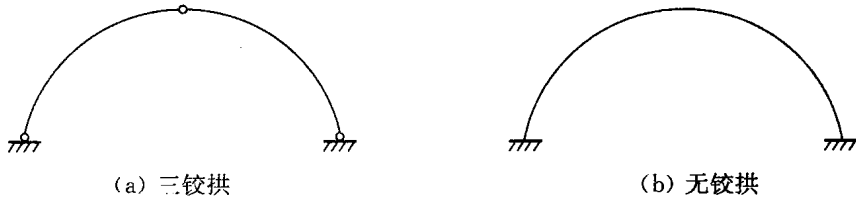


图 1-19

(5) 组合结构——将铰接杆(只有轴力的杆)与梁式杆(以受弯为主),通过组合结点连接在一起的结构(图 1-20)。

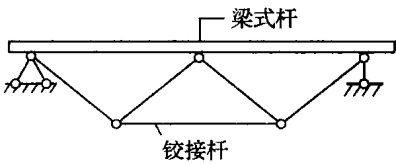


图 1-20

1.4 荷载的分类

荷载是指主动地作用于结构上的外力(理论力学中称为主动力),其作用效果使结构产生内力和位移。例如,结构本身的自重荷载,行驶在桥梁上的车辆荷载等。按照不同的分类方法,通常可将荷载分为以下几类:

(1) 根据荷载作用时间的长短可分为恒载和活载。恒载(也称永久荷载)是指长期作用在结构上的不变荷载,如结构的自重、安装在结构上的吊顶、管道及设备的重量等。而活载是指暂时作用在结构上的可变荷载。如:风、雪、人流等荷载。

(2) 根据荷载作用的位置是否变化可分为固定荷载和移动荷载。前者是指作用在结构上的位置始终不变的荷载,如各种恒载和绝大多数的活载。而后者是指在结构上可移动的荷载,如工业厂房内的吊车荷载和桥梁、路面上的各种车辆荷载等。

(3) 根据荷载作用范围的大小可分为集中荷载和分布荷载。

(4) 根据荷载作用性质的不同可分为静荷载和动荷载。若大小、方向和作用位置不随时间变化,或虽有变化但很缓慢,不会使结构产生振动或加速度,因而惯性力的影响可忽略不计的荷载称为静荷载。如结构的自重、楼面的活荷载等。而动荷载是指其大小、方向和作用位置将随时间急剧变化的荷载,并使结构产生加速度和惯性力。如地震作用、波浪荷载等。

应当指出,除以上直接作用的荷载外,还有很多也能引起结构内力和位移的“间接因素”,如温度变化、支座位置的改变、构件制作误差以及材料的收缩、徐变等,它们也属于荷载的范畴。