



新世纪高职高专实用规划教材

● 建筑系列

结构力学

JIEGOU LIXUE

李元美 主 编

张代理 陈登智 副主编

赠 送
电子课件



清华大学出版社

新世纪高职高专实用规划教材 建筑系列

结 构 力 学

李元美 主 编

张代理 陈登智 副主编

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是根据国家教育委员会颁布试行的“结构力学课程基本要求”和建设部(1993)441号文件《关于普通高等学校专科房屋建筑工程专业教育的培养目标、毕业生基本要求和培养方案、教学基本要求通知》的精神进行编写的。

本书的主要内容包括绪论、结构的计算简图、平面体系的几何组成、静定结构的受力分析、静定结构的位移计算、力法、位移法、力矩分配法、影响线、矩阵位移法、结构动力计算基础。每章均有相当数量的思考题和习题,并附有部分习题答案。

本书可以作为高职高专建筑工程、交通土建工程、水利工程等专业学生的教材,亦可供有关工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学/李元美主编;张代理,陈登智副主编.—北京:清华大学出版社,2006.8

(新世纪高职高专实用规划教材 建筑系列)

ISBN 7-302-13421-9

I. 结… II. ①李… ②张… ③陈… III. 结构力学—高等学校:技术学校—教材 IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 079692 号

出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:彭 欣

文稿编辑:李春明

封面设计:陈刘源

排版人员:房书萍

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:18.5 字数:436 千字

版 次:2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-13421-9/O · 559

印 数:1~4000

定 价:26.00 元

前 言

本书是根据国家教育委员会颁布试行的“结构力学课程基本要求”和建设部(1993)441号文件《关于普通高等学校专科房屋建筑工程专业教育的培养目标、毕业生基本要求和培养方案、教学基本要求通知》的精神,针对高职高专土木工程类各专业的培养规格和要求编写的。

为较好地反映高职高专教学的特点和需要,本书在内容的阐述和取材方面,着重强调理论联系实际,为综合解决工程实际问题打好基础,重视力学概念和理论知识的应用,在保证必需的基础理论够用的前提下,理论证明和公式推导适当从简,充分体现高职高专培养应用型人才的特点。在写法上力求简单易懂,循序渐进,在各章中精编了较多的例题、思考题、习题,突出了各章的重点、难点和学习中应注意的问题。

本书由李元美主编,参加本书编写的有李元美(绪论、第1、2、3、4、8章)、陈登智(第5、6、7章)和张代理(第9、10章)。

由于编写时间仓促,编者水平有限,书中难免有疏漏和错误,恳请使用该书的师生提出宝贵意见。

编 者

目 录

绪 论	1	2.7 思考题.....	20
第 1 章 结构的计算简图.....	2	2.8 习题.....	20
1.1 结构的计算简图.....	2	第 3 章 静定结构的受力分析	23
1.1.1 计算简图的简化原则.....	2	3.1 简支斜梁.....	23
1.1.2 计算简图的简化内容.....	2	3.2 多跨静定梁.....	25
1.2 杆件结构的分类.....	5	3.2.1 多跨静定梁约束力的计算与 几何组成	25
1.3 荷载的分类.....	7	3.2.2 多跨静定梁内力图的绘制	27
1.3.1 按作用时间的久暂.....	7	3.3 静定平面刚架.....	29
1.3.2 按荷载作用的性质.....	7	3.3.1 静定平面刚架的特点 及分类	29
1.3.3 按荷载位置的变化.....	7	3.3.2 静定平面刚架支座反力 的计算	31
1.3.4 按荷载作用的范围.....	7	3.3.3 用截面法求静定平面 刚架杆端截面内力	33
1.4 思考题.....	8	3.3.4 静定平面刚架内力图 的绘制	37
第 2 章 平面体系的几何组成	9	3.4 静定平面桁架与组合结构.....	43
2.1 几何不变体系和几何可变体系及 几何组成分析的目的.....	9	3.4.1 一般概念	43
2.1.1 几何不变体系和 几何可变体系.....	9	3.4.2 桁架按几何组成和 外形分类	44
2.1.2 几何组成分析的目的.....	10	3.4.3 桁架的内力分析	44
2.2 自由度和约束的概念.....	10	3.4.4 几种桁架受力性能的比较	50
2.2.1 自由度.....	10	3.4.5 组合结构	51
2.2.2 约束.....	11	3.5 三铰拱.....	53
2.3 几何不变体系的简单组成规则.....	12	3.5.1 三铰拱的组成和类型	53
2.3.1 规则 I：二元体规则 (一个点与一个刚片的连接).....	12	3.5.2 三铰拱的反力和内力	54
2.3.2 规则 II：两刚片规则.....	13	3.5.3 三铰拱的受力特性	58
2.3.3 规则 III：三刚片规则.....	14	3.5.4 三铰拱的合理拱轴线	58
2.4 几何组成分析举例.....	15	3.6 思考题.....	59
2.5 结构的几何组成和静定性的关系.....	18	3.7 习题.....	60
2.5.1 静力平衡条件与结构静 定性的关系.....	18	第 4 章 静定结构的位移计算	65
2.5.2 几何组成与结构静定性 的关系.....	18	4.1 概述.....	65
2.6 小结.....	19		

4.2 虚功和虚功原理.....66	5.13 习题.....133
4.2.1 功、广义力和广义位移.....66	第6章 位移法138
4.2.2 虚功及虚功原理.....66	6.1 位移法的基本概念.....138
4.3 荷载作用下位移的计算.....67	6.1.1 概述.....138
4.4 图乘法.....74	6.1.2 位移法的基本假定.....138
4.5 温度变化引起的位移计算.....82	6.1.3 位移法的基本思路.....138
4.6 支座移动所引起的位移计算.....85	6.2 位移法的基本未知量及基本结构.....140
4.7 线性变形体系的互等定理.....88	6.2.1 基本未知量的确定.....140
4.7.1 功的互等定理.....88	6.2.2 位移法的基本结构.....141
4.7.2 位移互等定理.....89	6.3 等截面直杆的计算.....142
4.7.3 反力互等定理.....89	6.3.1 固端力.....142
4.8 思考题.....90	6.3.2 刚度方程.....143
4.9 习题.....91	6.3.3 等截面杆转角位移方程.....146
第5章 力法94	6.4 位移法典型方程及举例.....147
5.1 超静定结构的概念.....94	6.5 用位移法计算连续梁和 无侧移刚架.....151
5.2 力法的基本原理.....94	6.6 用位移法计算有侧移刚架.....154
5.2.1 力法的基本结构.....94	6.7 用剪力分配法计算等高铰接排架.....160
5.2.2 力法的基本未知量.....95	6.7.1 柱顶有水平集中荷载作用 的计算.....160
5.2.3 力法的基本方程.....95	6.7.2 柱间有水平荷载作用 的计算.....163
5.3 超静定次数的确定与基本结构.....97	6.7.3 单阶变截面柱排架计算.....163
5.4 力法典型方程.....99	6.8 对称性的利用.....164
5.5 力法的计算步骤和举例.....101	6.8.1 奇数跨对称结构.....164
5.5.1 超静定刚架.....101	6.8.2 偶数跨对称结构.....165
5.5.2 超静定桁架.....104	6.8.3 对称结构简化举例.....166
5.5.3 超静定组合结构.....106	6.9 思考题.....168
5.5.4 铰接排架.....107	6.10 习题.....169
5.5.5 两铰拱的计算.....109	第7章 力矩分配法172
5.6 超静定结构的位移计算.....111	7.1 力矩分配法的基本概念.....172
5.7 超静定结构最后内力图的校核.....113	7.1.1 名词解释.....172
5.7.1 平衡条件的校核.....113	7.1.2 力矩分配法的基本概念.....174
5.7.2 位移条件的校核.....114	7.2 用力矩分配法计算多结点连续梁 和无侧移刚架.....179
5.8 对称性的利用.....116	7.3 思考题.....186
5.8.1 选取对称的基本结构.....117	7.4 习题.....186
5.8.2 荷载分组.....118	
5.9 温度改变时超静定结构的计算.....124	
5.10 支座位移时超静定结构的计算.....128	
5.11 超静定结构的特性.....131	
5.12 思考题.....132	

第 8 章 影响线	189	9.3 单元刚度方程和单元刚度矩阵.....	221
8.1 影响线的概念.....	189	9.4 结构的整体刚度方程和 整体刚度矩阵.....	228
8.2 用静力法作单跨静定梁的影响线.....	189	9.5 非结点荷载的等效化.....	233
8.2.1 简支梁的影响线.....	190	9.6 计算步骤和算例.....	236
8.2.2 外伸梁的影响线.....	192	9.7 思考题.....	240
8.3 机动法作静定梁的影响线.....	195	9.8 习题.....	240
8.3.1 机动法作影响线 的原理和步骤.....	195	第 10 章 结构动力计算基础	243
8.3.2 机动法作简支梁 的影响线.....	196	10.1 结构动力计算的特点和 动力自由度.....	243
8.3.3 机动法作静定多跨梁 的影响线.....	197	10.1.1 结构动力计算的特点.....	243
8.4 影响线的应用.....	199	10.1.2 动荷载的分类.....	243
8.4.1 利用影响线求固定荷载 作用下的反力和内力.....	199	10.1.3 结构动力计算的任务.....	244
8.4.2 利用影响线确定荷载的 最不利位置.....	202	10.1.4 结构动力计算中体系 的自由度.....	244
8.5 简支梁的内力包络图和绝对 最大弯矩.....	206	10.2 单自由度体系的自由振动.....	245
8.5.1 简支梁的内力包络图.....	206	10.2.1 自由振动微分方程 的建立.....	246
8.5.2 简支梁的绝对最大弯矩.....	207	10.2.2 自由振动微分方程的解.....	247
8.6 连续梁的影响线及其应用简介.....	210	10.2.3 结构的自振周期.....	248
8.6.1 利用挠度图作连续梁的 影响线轮廓.....	210	10.3 单自由度体系的强迫振动.....	251
8.6.2 连续梁最不利荷载位置.....	212	10.3.1 简谐荷载.....	252
8.6.3 连续梁的内力包络图.....	212	10.3.2 一般动荷载.....	255
8.7 思考题.....	215	10.3.3 动力荷载不作用在集中质量 上时的等效动力荷载.....	256
8.8 习题.....	216	10.4 阻尼对振动的影响.....	258
第 9 章 矩阵位移法	218	10.4.1 有阻尼的自由振动.....	259
9.1 概述.....	218	10.4.2 有阻尼的强迫振动.....	261
9.2 结构离散化及位移、力的表示 与编码.....	218	10.5 多自由度体系的自由振动.....	265
9.2.1 单元划分.....	218	10.5.1 刚度法.....	265
9.2.2 位移、力的正方向规定.....	219	10.5.2 柔度法.....	273
9.2.3 结点位移整体编码.....	219	10.5.3 主振型的正交性.....	276
9.2.4 单元杆端位移局部编码.....	221	10.6 多自由度体系的强迫振动.....	276
9.2.5 定位向量.....	221	10.7 思考题.....	277
		10.8 习题.....	278
		附录 部分习题参考答案	280

绪 论

工程中承受荷载起骨架作用的构件或构件体系称为结构。例如房屋中的梁、柱基础、屋架等构件，以及由其组成的体系都是结构。

从几何尺度上讲，结构通常分为 3 类。

(1) 杆件结构，即由杆件或若干根杆件联结组成。杆件的几何特征是长度方向尺寸较其他两向尺寸大得多。

(2) 板壳结构，又称薄壁结构。它的几何特征是厚度较其他两向尺寸小得多。

(3) 实体结构，其几何特征是 3 个方向尺寸大致相仿。

本课程研究的对象就是杆件结构，因此该课程也可称为杆件结构力学，简称为结构力学。

结构力学是土木建筑、道路、桥梁、水利工程以及地下工程等专业重要的专业基础课，是 3 大力学学科中最为重要的学科之一，在各门课程学习中起着承上启下的作用。

结构力学的任务主要包括以下几个方面：

(1) 结构的组成规律、受力特征、合理形式及结构计算简图的合理选择。

(2) 结构内力与变形的计算。

(3) 结构的稳定性及在动力荷载作用下的结构动力反应。

(4) 移动荷载作用下结构的支座反力和内力的变化。

结构力学的计算方法很多，但所有方法都必须满足 3 个基本条件，即力系平衡条件、变形连续条件和物理条件(物理方程或本构方程)。

第1章 结构的计算简图

1.1 结构的计算简图

1.1.1 计算简图的简化原则

实际工程中结构是非常复杂的，完全按结构的实际工作状态进行力学分析和计算是不可能的，也是不必要的。因此，对结构进行力学分析计算之前，必须对实际结构进行简化，即用简化了的图形代替实际结构，我们把这种简化了的图形称为结构的计算简图。如上所述，对结构的力学分析计算是在计算简图上进行的，计算简图的选择就尤为重要，选择不当，计算结果就不能反映结构的实际工作状态，产生误差，甚至造成工程事故。所以，对计算简图的选择应十分重视。

计算简图的简化原则是：

(1) 从实际出发，计算简图应能正确反映实际结构的主要受力和变形性能，使计算结果接近实际情况。

(2) 分清主次，保留主要因素，略去次要因素，使计算简图便于计算。此外，在不同情况下，对同一实际结构可分别选取不同的计算简图。如在初步设计阶段，可采用比较粗略的计算简图；而在技术设计阶段，则应采用较为精细的计算简图。另外，采用不同的计算手段，宜采用不同精细程度的计算简图。如手工计算时，可采用较粗略的计算简图；当使用电算时，则可采用较精细的计算简图。

1.1.2 计算简图的简化内容

计算简图的简化通常包含下述四方面的简化。

1. 平面简化

实际工程结构，一般都是空间结构。如果空间结构在某平面内的杆系结构主要承担该平面内的荷载时，可以把空间结构分解为几个平面结构进行计算。这种简化称为结构的平面简化。

2. 杆件的简化

在计算简图中，结构的杆件总可用其纵向轴线代替。如梁、柱等纵轴线为直线的杆件，就用纵轴线(直线)代替杆件；而曲杆、拱等构件的纵轴线为曲线，则用相应的曲线(纵轴曲线)代替杆件。杆件的长度则用杆件两端各杆件轴线交点之间的长度来表示。

3. 结点的简化

结构中杆件的相互连接处称为结点, 根据实际构造, 结点的计算简图分为两种基本类型, 即铰结点和刚结点。铰结点的特征是结点上所连接的各杆不能相对移动, 而可以绕铰自由转动。在铰结点处只能承受和传递力, 而不能承受和传递力矩。刚结点的特征是结点上所连接的各杆端之间不能相对移动, 也不能有相对转动。在刚结点处不但能承受和传递力, 而且能够承受和传递力矩。图 1.1 是屋架结点的简化, 图 1.2 是框架梁和柱结点的简化。

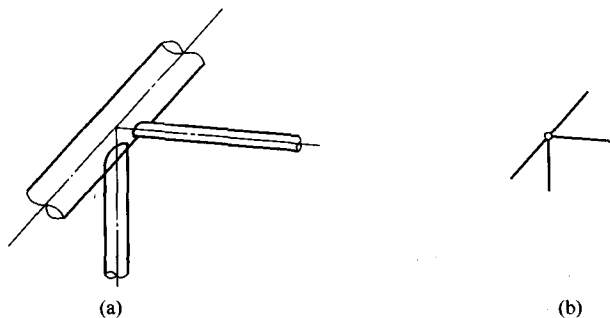


图 1.1

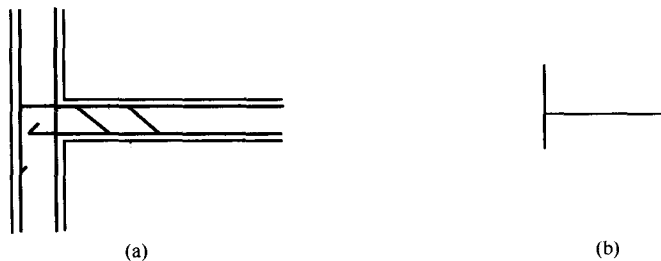


图 1.2

4. 支座的简化

结构与基础的连接部分称为支座。支座的作用是把结构固定于基础上, 同时结构所受的荷载, 通过支座传给基础。支座对结构的反作用力称为支座反力。根据支座的实际构造和约束特点, 支座通常简化为固定铰支座、可动铰支座和固定端支座三种基本类型。

(1) 固定铰支座

如图 1.3 所示, 固定铰支座的机动特征是结构可以绕铰的中心(A 点)转动, 但 A 点的水平和竖向移动受限制。因此其计算简图如图 1.3 所示。由于固定铰支座上述的机动特征, 所以其受力特征为(若受荷载作用时)固定铰支座有水平支座反力 X_A 和竖向支座反力 Y_A , 且通过铰的中心。

实际工程中, 一预制钢筋混凝土柱, 插入杯形基础内, 杯口与柱子之间的空隙处用沥青麻丝填充, 柱子可以有微小的转动, 但不能在竖直方向和水平方向移动, 所以可以简化为一个固定铰支座, 如图 1.4 所示。

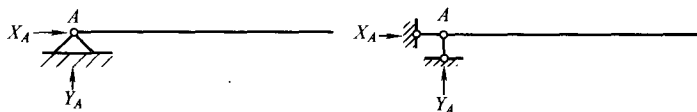


图 1.3

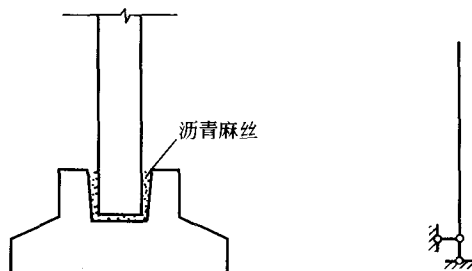


图 1.4

(2) 可动铰支座

如图 1.5 所示, 可动铰支座的机动特征是结构可以绕铰的中心(A 点)转动, 并允许结构铰 A 沿支承面方向作微小移动, 但不允许(铰 A)沿垂直承载面方向移动。因此, 其计算简图如图 1.5 所示。由于可动铰支座的上述机动特征, 所以其相应的受力特征为(若受荷载作用时)可动铰支座只有垂直于支承面方向的约束力(支座反力) Y_A 。

(3) 固定端支座

固定端支座的机动特征是结构不能绕支座端转动, 不能沿水平方向移动, 也不能沿竖向移动。因此, 其计算简图如图 1.6 所示。由于固定端支座的上述机动特征, 所以其相应的受力特征为(若受荷载作用时)固定端支座有约束转动的力偶 M_A , 有约束水平方向移动的反力 X_A , 还有约束竖向移动的反力 Y_A , 如图 1.6 所示。



图 1.5

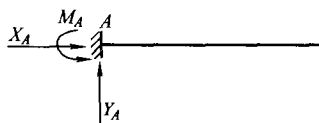


图 1.6

实际工程中的挑梁(悬臂梁), 因梁端插入墙内, 梁端不能有移动和转动, 所以可简化为一固定端支座, 如图 1.7 所示。

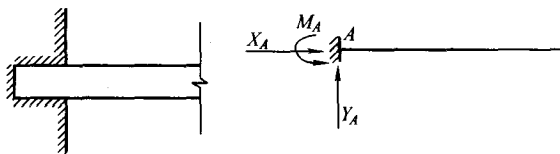


图 1.7

1.2 杆件结构的分类

杆件结构的分类, 实际就是计算简图的分类。

杆件结构通常可分为下列几类。

1. 梁

梁是一种受弯构件。可分为单跨梁(图 1.8(a)和(b))和多跨梁(图 1.9(a)和(b))。

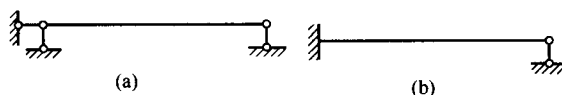


图 1.8

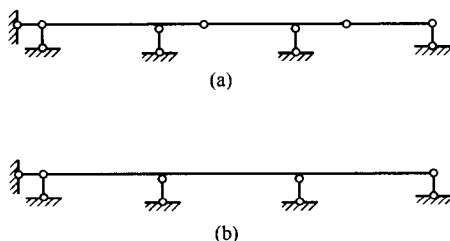


图 1.9

2. 拱

拱的轴线为曲线, 在竖向荷载作用下有水平推力 H (图 1.10(a)和(b))。水平推力大小改变了拱的受力特征。

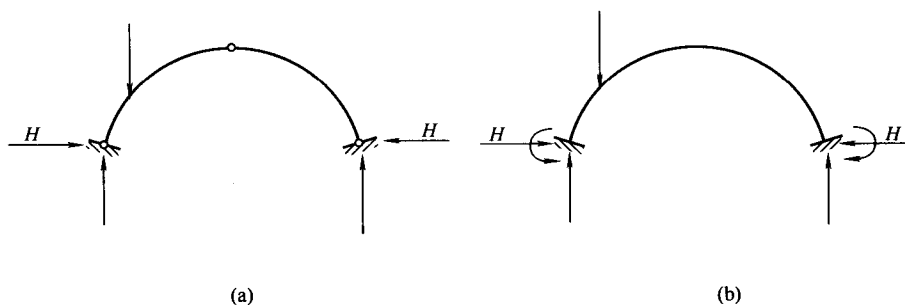


图 1.10

3. 桁架

桁架由直杆组成, 杆与杆之间的连接点为铰结点。当荷载作用于结点(即结点荷载)时, 各杆只受轴力(图 1.11(a)和(b))。



图 1.11

4. 刚架

刚架通常由若干直杆组成，杆件间的结点多为刚结点，如图 1.12(a)、(b)所示。杆件内力一般有弯矩、剪力和轴力，以弯矩为主。

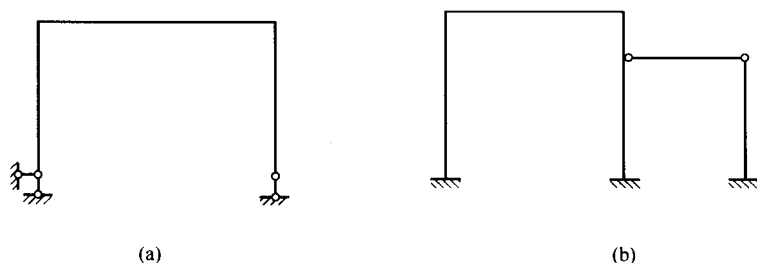


图 1.12

5. 组合结构

组合结构是由桁架杆件和梁式杆组合而成的结构，如图 1.13(a)、(b)所示。

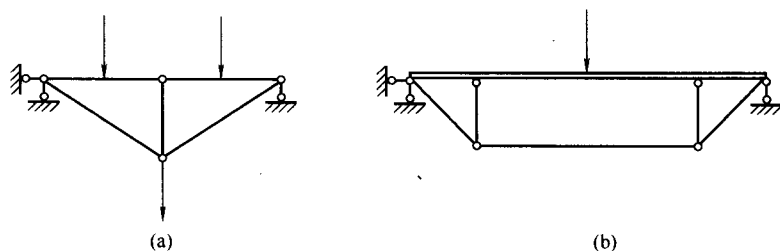


图 1.13

根据杆件结构的计算特点，可分为静定结构和超静定结构两大类。

静定结构：凡用静力平衡条件可以确定全部支座反力和内力的结构，称为静定结构。

超静定结构：凡不能用静力平衡条件确定全部支座反力和内力的结构，称为超静定结构。

根据杆件和荷载在空间的位置，结构可分为平面结构和空间结构。

平面结构：各杆件的轴线和荷载都在同一平面内，称为平面结构。

空间结构：各杆件的轴线和荷载不在同一平面内，或各杆件的轴线在同一平面内，但荷载不在该平面内时，称为空间结构。

1.3 荷载的分类

1.3.1 按作用时间的久暂

荷载按其作用时间的久暂可分为恒荷载和活荷载。

(1) 恒荷载(简称恒载)——长期作用于结构上的不变荷载,如结构的自重、固定于结构上的设备的重量等。这种荷载的大小、方向和作用位置是不变的。

(2) 活荷载(简称活载)又称可变荷载——暂时作用于结构上的荷载,如吊车荷载、结构上的人群、风、雪等荷载。

1.3.2 按荷载作用的性质

荷载根据其作用的性质可分为静力荷载和动力荷载。

(1) 静力荷载——凡缓慢地施加,不引起结构的振动,因而可忽略惯性力影响的荷载是静力荷载。结构的恒载都是静力荷载。只考虑位置改变,不考虑动力效应的移动荷载,也是静力荷载。

(2) 动力荷载——凡能引起显著振动或冲击,因而必须考虑惯性力影响的荷载是动力荷载。如建筑工地用吊车起吊或放下重物时,重物对结构的作用应按动力荷载考虑,再如地震、爆炸时对结构的作用也是动力荷载(作用)。

1.3.3 按荷载位置的变化

荷载按其位置的变化可分为固定荷载和移动荷载。

(1) 固定荷载——凡荷载的作用位置固定不变的荷载是固定荷载,如风、雪、结构自重等。

(2) 移动荷载——凡可以在结构上自由移动的荷载是移动荷载,如吊车、汽车、火车等的轮压。

1.3.4 按荷载作用的范围

荷载按作用的范围可分为集中荷载和分布荷载。

(1) 集中荷载——凡荷载作用的面积相对于总面积是微小的,作用在这个面积上的荷载,可以简化为集中荷载,如车轮的轮压等。

(2) 分布荷载——凡分布在一定面积或长度上的荷载,可简化为分布荷载,如风、雪、结构自重等。

分布荷载又可分为均布荷载和非均布荷载两种。

1.4 思考题

1. 什么是结构的计算简图？计算简图的简化原则如何？
2. 计算简图的简化内容有哪些？分别如何简化？
3. 杆件可以分为哪几类？
4. 作用于结构上的荷载如何分类？

第 2 章 平面体系的几何组成

2.1 几何不变体系和几何可变体系及几何组成分析的目的

2.1.1 几何不变体系和几何可变体系

杆系结构是由杆件相互连接而成用来支承荷载的。为了能够支承荷载，结构的几何形状必须是不能改变的。

在荷载作用下，结构中的杆件有由于材料应变产生的弹性变形，它使结构的几何形状产生微小的变化。但在分析杆件体系的形状时，不考虑这种微小弹性应变产生的形状变化，即将杆件看成是没有弹性变形的刚体(平面刚体，称为刚片)。讨论几何组成分析时，杆件都看成刚片。

由杆件组成的体系可以分为两类：

(1) 几何不变体系——在不考虑材料的应变条件下，几何形状和位置保持不变的体系称几何不变体系，如图 2.1(a)、(b)所示。

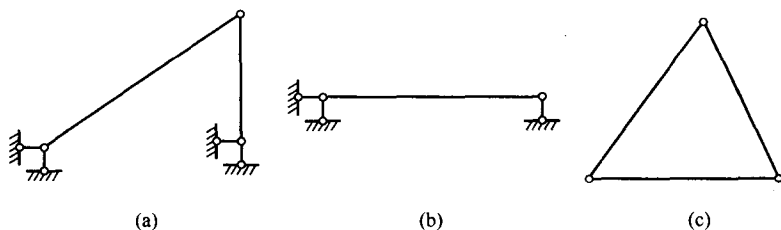


图 2.1

(2) 几何可变体系——在不考虑材料的应变条件下，几何形状和位置可以改变的体系称几何可变体系，如图 2.2(a)、(b)所示。

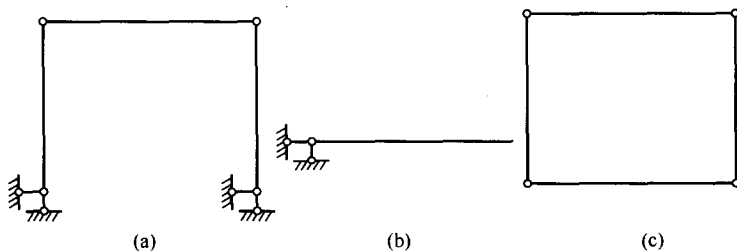


图 2.2

与几何不变和几何可变体系相应的还有内部几何不变和内部几何可变体系两种情况。图 2.1(c)所示的铰接三角形，虽然其位置在平面内是可变的(可以整体移动和转动)，但铰

接三角形的形状是不能改变的,称为内部几何不变体系,简称内部不变。图 2.2(c)所示为铰接四边形,不仅其位置在平面内是可以改变的,四边形的形状也是可以改变的,称为内部几何可变体系,简称内部可变。

2.1.2 几何组成分析的目的

结构必须是几何不变体系,因此对体系必须进行几何组成分析,对体系进行几何组成分析可以达到如下目的:

- (1) 判断体系是否几何可变,从而决定体系是否可以用做结构。
- (2) 根据体系的几何组成,以确定结构是静定的还是超静定的,从而选择反力与内力的计算方法。
- (3) 通过几何组成分析,明确结构的构成特点,从而选择结构受力分析的顺序。

2.2 自由度和约束的概念

2.2.1 自由度

确定体系位置所必需的独立坐标的个数,称为自由度。自由度也可以说是一个体系运动时,可以独立改变其位置的坐标个数。

1. 一个点的自由度

如图 2.3(a)所示,平面内一点 $A(x,y)$,其在平面内的位置可由其直角坐标 x 、 y 确定,即确定 A 点位置所必需的独立坐标有两个 (x,y) ,因此,点 A 在平面内有两个自由度。

上述点 A 的自由度也可以通过运动的观点来分析:平面内一点 $A(x,y)$ 运动至 $A'(x+\Delta x, y+\Delta y)$,可以分解为两种独立的运动,即沿水平方向移动 Δx ,以及沿垂直方向移动 Δy ,因此,独立改变其位置的坐标有两个,因而有两个自由度。

2. 一个刚片的自由度

如图 2.3(b)所示,平面内一刚片,在平面内除了可以沿水平方向和垂直方向移动外,还可以自由转动。它的位置通常是用其上任一点 A 的坐标 (x,y) 和通过 A 的任一直线 AB 的倾角 ϕ 三个坐标确定的。所以,一个刚片在平面内有三个自由度。

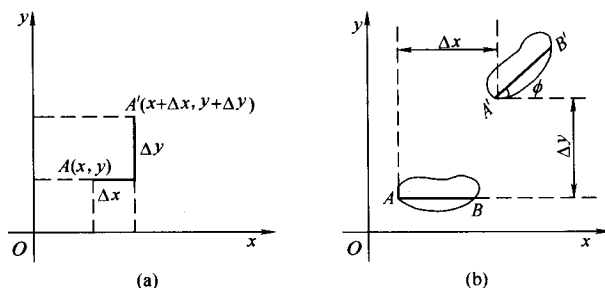


图 2.3