

JIANZHU LIXUE

高等学校省级规划教材
——土木工程专业系列教材

建筑力学 (II)

J I A N Z H U L I X U E

◎ 吴 约 主 编
赵 青 副主编
张 速
丁克伟 主 审



合肥工业大学出版社

高等学校省级规划教材

——土木工程专业系列教材

建筑力学(Ⅱ)

吴 约 主 编

赵 青 副主编
张 速

丁克伟 主 审

合肥工业大学出版社

内容提要

本书是参照原国家教委编写的高等工科院校结构力学(少学时)课程基本要求,结合建筑类院校的专业特点编写而成的。

全书共分为10章,其主要内容有绪论、平面体系的几何组成分析、静定结构的内力和位移计算、力法、位移法、力矩分配法、影响线和包络图、矩阵位移法和结构动力学简介。本书根据高等工科院校教育发展的新形势和各相关专业发展的需要,结合建筑类院校的教学要求,对结构力学(少学时)内容进行了整合和充实,增加了矩阵位移法和结构动力学简介的内容,供相关专业教学时选用。本书具有内容完整、层次分明、适用专业面广等特点。

本书主要可作为高等工科院校及建筑力学(工程力学)课程中的结构力学部分的教材,也可用于各类成人院校、高职院校结构力学课程的教材以及相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

建筑力学. 2/吴约主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2007.12

ISBN 978-7-81093-707-8

I. 建… II. 吴… III. 建筑力学—高等学校—教材 IV. TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 199941 号

建筑力学(II)

主编:吴约 责任编辑:陈淮民 特约编辑:吴咏梅

出版 合肥工业大学出版社
地址 合肥市屯溪路193号
邮编 230009
电话 总编室:0551-2903038
发行部:0551-2903198
网址 www.hfutpress.com.cn
E-mail press@hfutpress.com.cn
版次 2007年12月第1版
印次 2009年1月第1次印刷
开本 787毫米×1092毫米 1/16
印张 17.75
字数 432千字
发行 全国新华书店
印刷 合肥星光印务有限责任公司

ISBN 978-7-81093-707-8

定价:29.00元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

前 言

建筑力学是建筑类高等工科院校的一门重要的专业基础课。建筑力学的主要内容包括理论力学、材料力学和结构力学。《建筑力学（I）》包含了理论力学和材料力学的内容。《建筑力学（II）》包含结构力学的内容。

《建筑力学（II）》是按照原国家教委编写的高等工科学校结构力学课程（少学时）教学基本要求，根据新形势下教学改革趋势和建筑类院校的教学特点，结合编写组教师长期的教学经验编写而成的。在编写过程中力求做到概念清晰、内容简明、重点突出，强调对学生工程计算能力的培养。在保留传统结构力学课程（少学时）内容的基础上，又适当地增加了矩阵位移法和结构动力学简介的内容，使得本书的内容更加完整，能满足不同专业的教学需要。

本书适用于建筑类高等学校的相关专业的建筑力学课程的教学，建议学时为50~70学时。根据各学校具体情况，第9章和第10章可作为选修章节安排。本书也适用于工科其它专业学生的建筑力学（工程力学）课程的学习，也可供工程技术人员参考。

本书由安徽建筑工业学院吴约副教授担任主编，张速副教授和赵青副教授任副主编。参加编写的教师有吴约（前言、第1章和第10章）、张速（第2章、第8章）、刘安中（第3章）、晏燕（第4章）、赵青（第5章）、余景平（第6章和第7章）、苏少卿（第9章）。

安徽建筑工业学院丁克伟教授主审了该书，对本书的编写提出了许多建设性的意见，特致谢意。并对干洪教授、张伟林教授、沈小璞教授在本书的编写过程中给予的关心和支持表示谢意。

本书在编写过程中参考了有关书籍，并从中引用了部分习题和例题。在此一并表示感谢。

书中若有不妥之处，敬请读者提出指正。

编 者

2007年11月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 杆件结构力学的研究对象和任务	1
1.2 杆件结构的计算简图	2
1.3 平面杆件结构的分类	6
1.4 荷载的分类	7
第 2 章 平面体系的几何组成分析	9
2.1 几何组成分析的目的	9
2.2 刚片、自由度、约束的概念.....	10
2.3 几何不变体系的组成规则.....	11
2.4 几何组成分析举例.....	14
2.5 静定结构与超静定结构.....	17
第 3 章 静定结构的内力分析	22
3.1 静定梁.....	22
3.2 多跨静定梁.....	28
3.3 静定平面刚架.....	31
3.4 三铰拱.....	39
3.5 静定平面桁架.....	46
3.6 静定组合结构.....	54
3.7 静定结构的特征.....	57
第 4 章 静定结构的位移计算	64
4.1 概述.....	64
4.2 虚功原理.....	65
4.3 结构位移计算的一般方法.....	67
4.4 静定结构在荷载作用下的位移计算.....	68
4.5 图乘法.....	73

4.6	静定结构由于支座移动、温度变化所引起的位移	79
4.7	互等定理	83
第5章	力法	91
5.1	超静定结构概述	91
5.2	力法的基本概念	94
5.3	力法的典型方程	96
5.4	用力法计算超静定刚架	98
5.5	用力法解超静定桁架、排架	103
5.6	对称性的利用	105
5.7	超静定结构自内力的计算	111
5.8	等截面单跨超静定梁的杆端内力	115
第6章	位移法	128
6.1	位移法的基本概念	128
6.2	位移法基本未知量的确定	132
6.3	用位移法计算刚架的步骤和示例	134
6.4	位移法的典型方程	139
第7章	力矩分配法	147
7.1	概述	147
7.2	力矩分配法的基本概念	147
7.3	用力矩分配法计算连续梁和无结点线位移的刚架	154
第8章	影响线和内力包络图	163
8.1	影响线的概念	163
8.2	用静力法作单跨静定梁的影响线	164
8.3	用机动法作单跨静定梁的影响线	169
8.4	利用影响线求量值	170
8.5	最不利荷载位置	172
8.6	简支梁的内力包络图	176
8.7	连续梁的内力包络图	177

第 9 章 矩阵位移法	184
9.1 概述	184
9.2 矩阵位移法的基本概念	184
9.3 单元分析	189
9.4 坐标变换	193
9.5 结构整体分析	197
9.6 直接刚度法计算平面刚架	208
第 10 章 结构动力计算简介	218
10.1 概述	218
10.2 单自由度体系的自由振动	221
10.3 单自由度体系的强迫振动	229
10.4 单自由度体系有阻尼的振动	233
10.5 多自由度体系的自由振动	239
10.6 多自由度体系在简谐荷载下的强迫振动	253
附录	262
1. 习题答案	262
2. 平面刚架程序	271
参考文献	273

第 1 章 结 论

本章介绍结构力学的研究对象和任务,重点讨论结构的计算简图,并介绍平面杆件结构和荷载的分类。

1.1 杆件结构力学的研究对象和任务

在建筑物中用来承受荷载起骨架作用的部分称为结构。房屋建筑工程中的梁柱体系,桥梁道路工程中的铁路大桥、公路桥,水力工程中的闸门结构、坝体、涵洞隧道、挡土墙等都是工程结构的典型例子。

从几何角度来看,结构可分为杆件结构、板壳结构和实体结构三种类型。

1. 杆件结构

由若干杆件组成的结构即为杆件结构。杆件的几何特征是横截面尺寸要比长度小得多(图 1-1)。

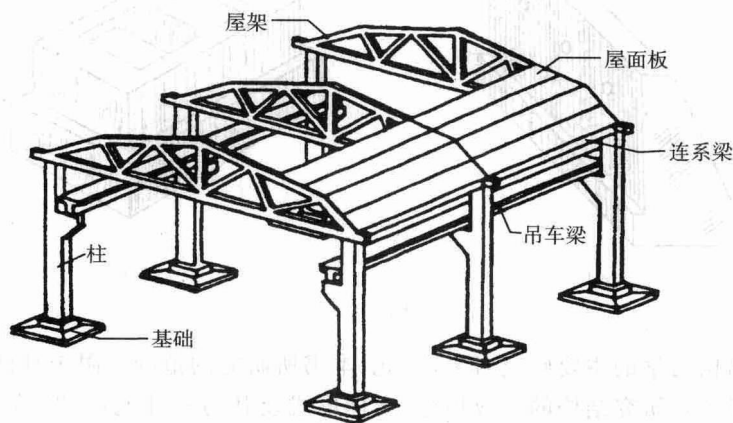


图 1-1

2. 板壳结构

厚度要比长度和宽度小得多的结构。这类结构也称为薄壁结构,平面形状的薄壁结构称为薄板;由若干块薄板可组成各种薄壁结构(图 1-2、图 1-3)。具有曲面外形的薄壁结构称为

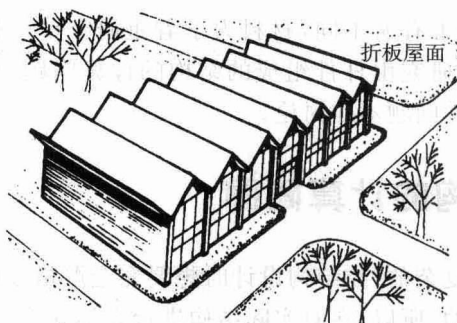


图 1-2

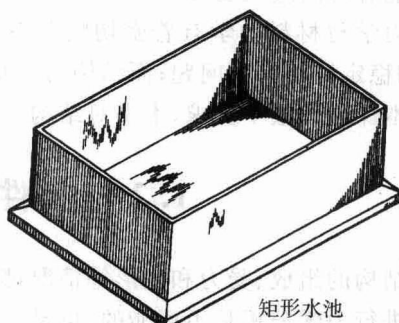


图 1-3

薄壳(图 1-4)。

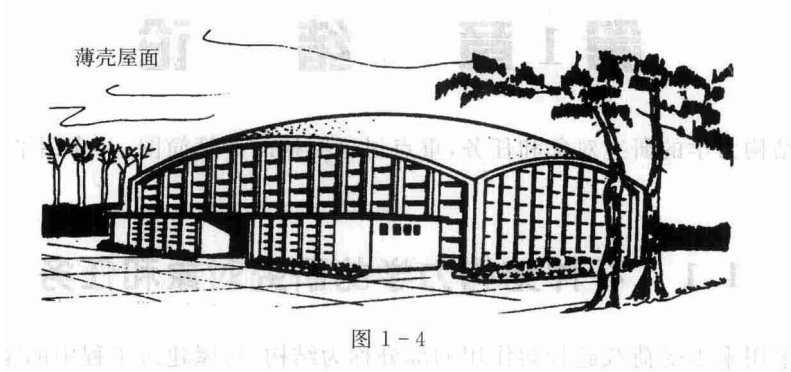


图 1-4

3. 实体结构

它的三个方向的尺寸大约为同一量级的结构,例如挡土墙(图 1-5(a))、块式基础(图 1-5(b))都为实体结构。

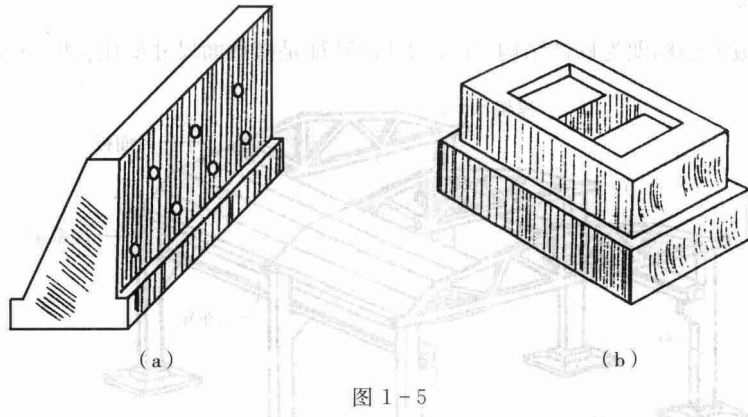


图 1-5

杆件结构是结构力学的主要研究对象,因此,本书所研究的范围只限于杆件结构。

结构力学的任务是研究结构的组成规律、合理形式及其力学性能,研究结构在荷载、温度变化、支座移动等外因作用下的强度、刚度和稳定性的计算原理和计算方法。

研究结构的组成规律是为了保证结构各部分不致发生相对运动,因而能承受荷载并维持平衡;研究结构的合理形式是为了有效利用材料,使其性能得到充分的发挥;对结构进行强度和稳定计算是为了保证结构满足安全和经济的要求;对结构进行刚度计算是为了保证结构不致发生实用上不能容许的过大变形。

结构力学与材料力学有着密切的联系,但分工有所不同,材料力学着重研究单个杆件的内力、变形和稳定性的计算问题;而结构力学则着重研究由杆件组成的结构的计算问题。根据非结构专业对本课程的教学要求,本书对结构的稳定性问题不作讨论。

1.2 杆件结构的计算简图

实际结构的组成、受力和变形等情况都是很复杂的,在结构设计时想要完全严格按照结构的实际情况进行力学分析是不可能的,也是不必要的。所以,在对实际结构进行力学计算前,必须对结构作一些必要的简化和假定,突出其主要特点,略去某些次要因素,采用一个简化的图形来代

替实际结构。这种经过简化并用于进行计算的图形就称为结构的计算简图或称计算模型。

结构的计算简图,在力学分析中代表实际结构,是进行力学分析的依据。结构计算简图的选择是否合理,直接影响计算工作量和设计精度,因此在结构分析中选择结构计算简图是必须先解决的重要课题。如果计算简图不能正确地反映结构的实际受力状态,甚至选择错误,会使计算产生较大的误差甚至造成工程事故。因此在选择计算简图时,必须慎重,应遵循如下两条原则:

- (1) 略去次要因素,便于分析和计算;
- (2) 尽可能反映实际结构的主要受力特征。

选取计算简图时,需要在多方面进行简化。下面简要说明杆件结构计算简图的简化要点:

1.2.1 结构体系的简化

在杆件结构中,根据杆件轴线和荷载作用线在空间所处的位置,可划分为平面结构和空间结构。当结构所有杆件的轴线和荷载作用线都处在同一平面内时,称它为平面结构;否则,就称为空间结构。严格说来,实际的结构都是空间结构。然而,对于绝大多数的空间结构来说,它的主要承重结构和力的传递路线,大多是由若干平面组合形成的。由于平面力系的计算要比空间力系简单得多,所以通常总是尽可能地把它简化为平面结构来计算;当然,若结构具有明显的空间特征,则就不能简化为平面结构而应简化为空间结构来处理。本书主要讨论平面结构的计算问题。

1.2.2 杆件的简化

根据杆件受力后的特点,由材料力学可知,各种杆件在结构计算简图中均用其轴线来代替,杆件之间的连接区用结点表示,杆长用结点间的距离表示,而荷载的作用点也转移到轴线上。当截面尺寸增大时(例如超过长度的 $1/4$),杆件用其轴线表示的简化,将引起较大的误差。

1.2.3 结点的简化

结构中杆件相互联结处称为结点。在计算简图中,结点通常简化为铰结点、刚结点和组合结点几种。

1. 铰结点

铰结点的特征是各杆端不能相对移动但可相对转动,可以传递力但不能传递力矩,因而常用一理想光滑的铰来表示。这种理想情形,在实际工程中很难实现,例如图1-6(a)所示木屋架的支座结点构造图,显然各杆件并不能自由转动,但由于联结不可能很严密牢固,杆件能作微小的转动。事实上结构在荷载作用下所产生的转动也很小,因此该结点可假定为铰结点,如图1-6(b)示。

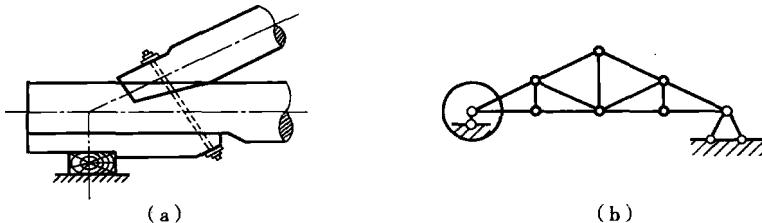


图 1-6

2. 刚结点

刚结点的特征是被联接的杆件在联接处既不能相对移动,又不能相对转动;既可以传递力,

也可以传递力矩。如现浇钢筋混凝土刚架中的结点通常属于这类情形,如图 1-7 所示。

3. 组合结点

如果在同一个结点上同时出现上述两种连接方式时,即部分刚结、部分铰结的结点,则称这种结点为组合结点或不完全结点。例如图 1-8 所示的结构计算简图中, D 结点则为组合结点。

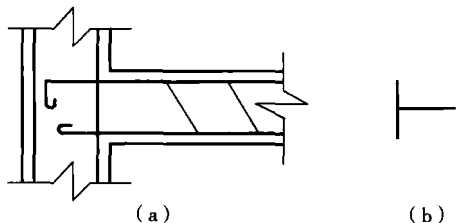


图 1-7

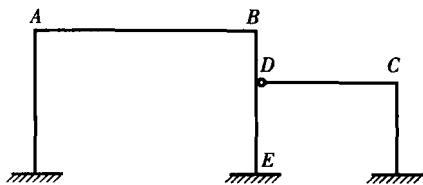


图 1-8

1.2.4 支座的简化

将结构与基础或其他支承物联系,并用以固定结构位置的装置称为支座。按其受力特征,一般简化为以下 4 种情形:

1. 可动铰支座

被支承的部分可以转动和水平移动,不能竖向移动,所以可动铰支座的反力只有竖向反力 F_y 。这种支座在计算简图中用一根垂直于支承面的链杆来表示,如图 1-9 所示。

2. 固定铰支座

被支承的部分可以转动,不能移动,所以固定铰支座的反力通过铰中心,但其大小、方向都是未知的,通常可将该反力分解为水平和竖向的分力 F_x 、 F_y 。这种支座在计算简图中用两根相交的链杆来表示。如图 1-10 所示。

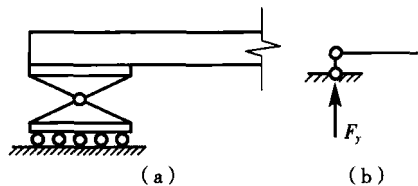


图 1-9

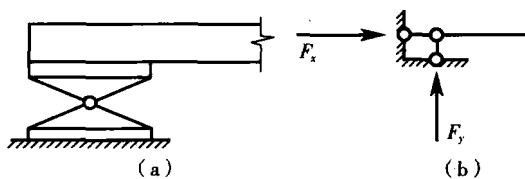


图 1-10

3. 定向支座(滑动支座)

被支承的部分不能转动,但可沿一个方向平行滑动,该支座的反力为反力矩 M 和一个反力 F_y 。这种支座在计算简图中用两根平行的链杆来表示。如图 1-11 所示。

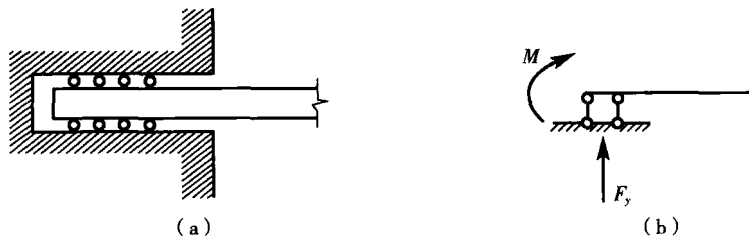


图 1-11

4. 固定支座

被支承的部分完全被固定,既不容许发生移动和转动。该支座的反力为水平反力 F_x 、竖向反力 F_y 和反力矩 M 。这种支座的计算简图如图 1-12 所示。

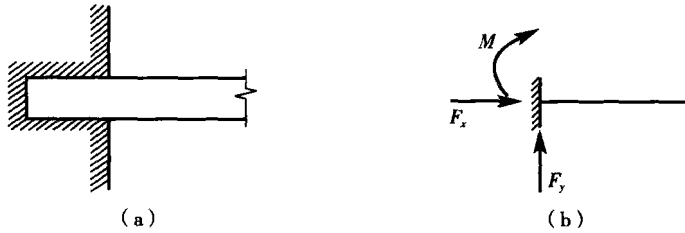


图 1-12

1.2.5 荷载的简化

结构承受的荷载可分为体积力和表面力两大类。体积力指的是结构的自重或惯性力等;表面力则是由其它物体通过接触面而传给结构的作用力,如车辆的轮压力。由于在杆件结构中把杆件简化为轴线,因此不管是体积力还是表面力都可以简化为作用在杆件轴线上的力。荷载按其分布情况可以简化为集中荷载和分布荷载。

通过下面一个实例来说明结构计算简图的取法。

图 1-13(a)为一钢筋混凝土单层工业厂房的示意图,它是由多个横向排架借助于屋面板、吊

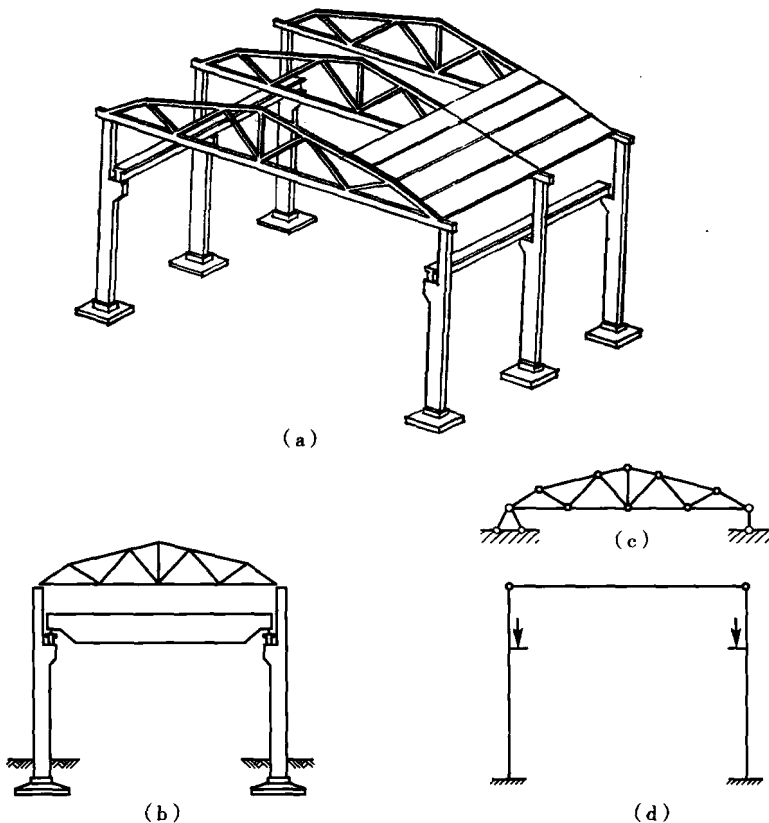


图 1-13

车梁、柱间支撑等联成一个空间体系。从其荷载传递情况来看,屋面荷载和吊车荷载等都主要是通过屋面板和吊车梁等构件传递到一个个的横向排架上,故在选择计算简图时,可以略去排架之间纵向联系的作用,而把这样的空间结构简化为一系列的平面排架来分析,如图 1-13(b) 所示。当然,这种不考虑空间作用的简化方法,具有一定的近似性,但在一般情况下,它反映了厂房结构的主要受力特点。

下面再对平面排架作进一步分析。

首先分析平面排架的屋顶桁架,由于钢筋混凝土柱顶与桁架端部的联结构造是采用预埋钢板,在吊装就位后,再与柱顶预埋钢板焊接在一起,则屋顶桁架端部与柱顶不能发生相对移动,但仍可发生相对转动。可见,屋顶桁架与柱的联接看作铰结点,这样,在计算屋顶桁架的内力时,可单独取出屋顶桁架,并用铰支座代替其相互联结的作用,其计算简图如图 1-13(c) 所示。

其次分析平面排架的竖柱,由于屋架的刚度很大,相应变形很小,因此认为两柱顶之间的距离在受荷载前后没有变化,则屋架部分用抗拉刚度为无限大的杆件来代替,竖柱也用轴线来表示。牛腿上由吊车梁传来的荷载相对柱轴线的偏心,用在牛腿处的悬挑短杆来表示,竖柱与基础之间的联结按固定支座处理。其计算简图如图 1-13(d) 所示。

1.3 平面杆件结构的分类

本书仅研究和讨论平面杆件结构,常见的平面杆件结构有如下几种类型:

1. 梁

是一种受弯构件,其轴线通常为直线,当荷载垂直于梁轴线时,横截面上的内力只有弯矩和剪力。梁可以是单跨的(图 1-14(a))也可以是多跨的(图 1-14(b))。

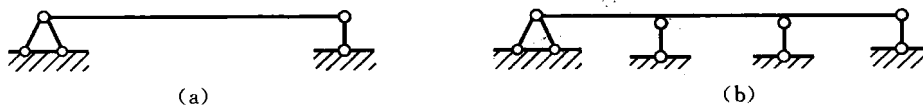


图 1-14

2. 拱

拱的轴线为曲线且在竖向荷载作用下会产生水平反力(推力),这使得拱比跨度、荷载相同的梁的弯矩及剪力都要小,而有较大的轴向压力,如图 1-15 所示。

3. 刚架

由梁和柱用刚结点联结组成一个整体结构,在荷载作用下刚架杆截面上一般有弯矩、剪力和轴力,如图 1-16 所示。

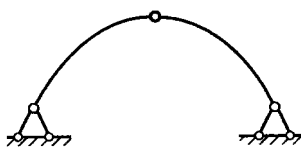


图 1-15

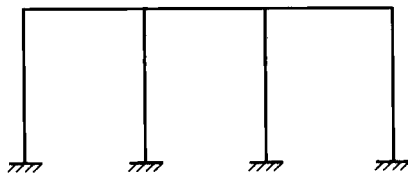


图 1-16

4. 桁架

由直杆组成,但所有结点均为铰结点(图 1-17),当只受到作用于结点的集中荷载时,各杆只产生轴力。

5. 组合结构

这是由桁架和梁或桁架与刚架组合在一起的结构,其中有些杆件只承受轴力,另一些杆件同时还承受弯矩和剪力,如图1-18所示。

按照所用计算方法的特点,平面杆件结构又可分为静定结构和超静定结构。若在任意荷载作用下,结构的全部反力和内力都可以由静力平衡条件确定,这样的结构称为静定结构,如图1-14(a)、图1-15、图1-17所示;若只靠平衡条件还不能确定全部反力和内力,还必须考虑变形条件才能确定,这样的结构称为超静定结构,如图1-14(b)、图1-16、图1-18所示。

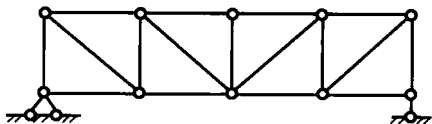


图 1-17

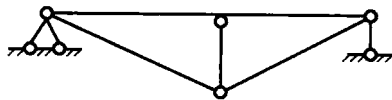


图 1-18

1.4 荷载的分类

荷载是主动作用于结构上的外力。例如,结构的自重、风压力、人群及设备。实际工程中的荷载,根据其不同的特征,主要有下列分类:

1. 根据荷载分布的情况,荷载可分为集中荷载和分布荷载

(1) 作用在结构上的荷载,一般总是分布在一定面积上。若分布面积远小于结构的尺寸时,则可认为此荷载是作用在结构的一点上,称为集中荷载,如吊车梁上的吊车轮压就是集中荷载。

(2) 分布荷载是指连续分布在结构某一部分上的荷载,它又可分为均布荷载和非均布荷载。当分部荷载的集度各处相同时称为均布荷载,如梁的自重可简化为沿梁长作用的均布线荷载;当分布荷载的集度各处不相同称为非均布荷载,如作用在水池壁板上的水压力是一个呈三角形分布的非均布荷载。

2. 根据荷载作用时间的久暂,荷载可分为恒载和活载

(1) 恒载是永久作用在结构上的不变荷载,如结构的自重、土压力等。

(2) 活载是暂时作用于结构上的可变荷载,如风力、人群、雪等。

3. 根据荷载位置是否变化,荷载又可分为固定荷载和移动荷载

(1) 恒载和大部分活载(如雪载、风载)在结构上作用的位置可以认为是固定的,这种荷载称为固定荷载。

(2) 有些活载如吊车梁上的吊车荷载、公路桥梁上的汽车荷载,在结构上的位置是移动的,这种荷载称为移动荷载。

4. 根据荷载作用的性质,荷载可分为静力荷载和动力荷载

(1) 静力荷载是指其大小、方向和位置不随时间变化或变化很缓慢的荷载,它不致使结构产生显著的加速度,因而可以略去惯性力的影响。如结构自重及其他恒载都是静力荷载。

(2) 动力荷载是指随时间迅速变化的荷载,它将引起结构振动,使结构产生不容忽视的加速度,因而必须考虑惯性力的影响。如动力机械产生的振动荷载就是动力荷载。

思考题

- 1-1 结构力学的研究对象和任务是什么?和材料力学比较有何异同?
- 1-2 确定结构计算简图应遵循什么原则?杆件结构计算简图简化的要点是什么?
- 1-3 杆件结构常用的结构形式有那几类?它们有什么特点?
- 1-4 什么是静力荷载?什么是动力荷载?试举一些例子。
- 1-5 拱式结构和曲梁有何区别?

第 2 章 平面体系的几何组成分析

本章介绍几何组成分析的目的和几何不变体系的几个组成规则以及如何利用这些规则来对平面体系进行几何组成分析和判断静定结构或超静定结构。平面结构的几何组成分析与内力分析之间是密切相关的,本章内容将在后面许多章节中得到应用。

2.1 几何组成分析的目的

在实际工程结构中,杆件结构是由若干杆件互相连接所组成的体系,并与地基连接成一整体,用来承受荷载的作用。

当体系受到任意荷载作用后,若不考虑材料的形变,而能保持其几何形状和位置不变的,则称为几何不变体系。例如图 2-1(a) 所示的体系,受到荷载 F_P 作用时,若不考虑材料的变形,则其几何性状与位置均能保持不变,这样的体系即为几何不变体系。

另一类体系,即使不考虑材料的变形,在很小的荷载作用下,也会发生机械运动而不能保持原有的几何形状和位置,这样的体系称为几何可变体系。例如图 2-1(b) 所示铰结四边形,即使不考虑材料的变形,在很小的荷载 F_P 作用下,也会发生机械运动而不能保持原有的几何形状和位置,这样的体系即为几何可变体系。

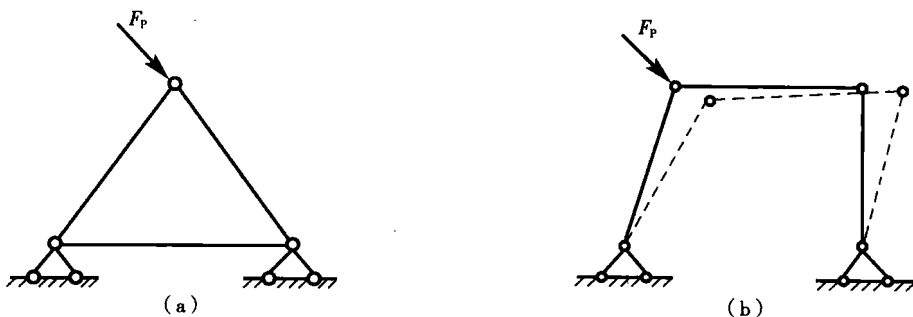


图 2-1

工程上的结构必须是几何不变体系,否则将不能承受荷载而维持平衡。因此,在设计结构和选择其计算简图时,首先必须判别它是否几何不变,从而决定能否采用。这一项工作称为几何组成分析或几何构造分析。对体系进行几何组成分析的目的在于:

- (1) 判别某一体系是否几何不变,从而决定它是否能够作为结构;
- (2) 研究几何不变体系的组成规则,以确保结构承受荷载而维持平衡;同时也为区分静定结构和超静定结构以及进行结构的内力计算打下必要的基础。

2.2 刚片、自由度、约束的概念

刚片、自由度、约束的概念,在几何组成分析中占有相当重要的地位,掌握这些内容有助于本章和后续章节内容的学习。

2.2.1 刚片

所谓刚片,就是指平面体系中几何形状不变的平面刚体。例如,一根梁、一根链杆、一个铰结三角形或体系中已经肯定为几何不变的某个部分均可视为刚片。

2.2.2 自由度

所谓体系的自由度,是指该体系运动时,用来确定其位置所需独立坐标的数目,也就是体系运动时可以独立变化的几何参数数目。例如,图2-2(a)中在平面内自由运动的点,要确定该点的位置,必须要两个坐标 x 、 y 来确定,故该点在平面内的自由度等于2;再如,图2-2(b)中一个刚片在平面内自由运动时,要确定其位置可由平面上任一点 A 的坐标 x 、 y 和任一直线 AB 的倾角 φ 来确定,故一个刚片在平面内的自由度等于3。

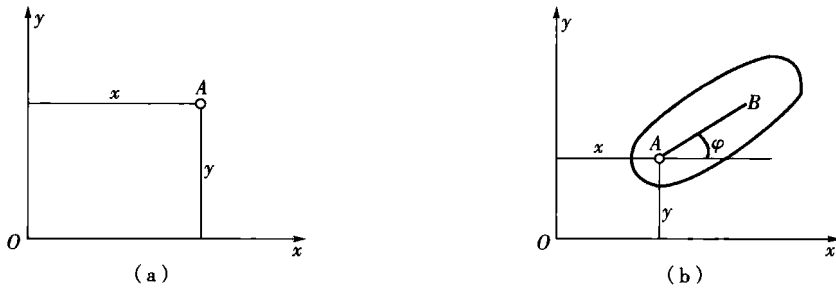


图 2-2

2.2.3 约束(联系)

所谓约束(联系),是指能够减少自由度的装置,或限制体系运动的装置。常用的约束有链杆和铰(包括单铰、复铰)。如图2-3(a)所示用一根链杆将一个刚片与地基相联,刚片将只有两种运动的可能。即 A 点绕 B 点的转动和刚片绕 A 点的转动,其自由度由未约束前的三个减为约束后两个,故一根链杆是一个约束。如图2-3(b)所示用一个铰 A 把两个刚片联结起来,这种联结两刚片的铰称为单铰。刚片I的位置由 A 点的坐标 x 、 y 和直线 AB 与 x 轴的倾角 φ_1 确定后,则刚片II只能相对于刚片I绕 A 点转动,其位置只需要一个参数倾角 φ_2 即可确定。因此,两个刚片用一个单铰联结后,体系的自由度就由6个减为4个。可见一个单铰相当于两个约束,也就是相当于两根链杆的作用。若用一个铰同时联结三个或三个以上的刚片,这种铰称为复铰。如图2-3(c)所示刚片I、II、III共同用铰 A 相联结,若刚片I的位置由 A 点的坐标 x 、 y 和倾角 φ_1 确定后,则刚片II和III就只能分别绕 A 点作转动,其位置只需由两个参数倾角 φ_1 、 φ_2 即可确定,因而各减少了两个自由度。可见,联结三个刚片的复铰相当于两个单铰的作用。由此可推知,联结 n 个刚片的复铰相当于 $(n-1)$ 个单铰的作用。