

46

0342-43

174

新编工科力学系列课程教材

结 构 力 学

于克萍 胡庆安 编



A0975290

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是根据国家教育部审定的结构力学课程教学基本要求编写的。基本内容包括:绪论、平面体系的机动分析、静定梁和静定平面刚架、静定拱式结构、静定平面桁架、影响线及其应用、静定结构的位移计算、力法、力法应用、位移法、渐近法、矩阵位移法、附录。课程基本要求中的结构极限荷载、结构动力计算和结构弹性稳定等内容在相关的力学系列教材中编写。

本书思路清晰,概念正确,深入浅出,可以作为公路工程、铁路工程、桥梁与隧道等专业的教材,也可作为土建、水利类专业教材以及供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学/于克萍,胡庆安编. —西安:西北工业大学出版社,2001.8

ISBN 7-5612-1363-8

I. 结... II. ①于... ②胡... III. 结构力学—高等学校—教材 IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 027392 号

出版发行: 西北工业大学出版社

通信地址: 西安市友谊西路 127 号,邮编: 710072 电话: 029-8493844

网 址: <http://www.nwpup.com>

印刷者: 西安高陵县印刷厂

开 本: 787mm×1 092mm

印 张: 19.75

字 数: 480 千字

版 次: 2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 01~7000

定 价: 21.00 元

前 言

本书是长安大学校本部(原西安公路交通大学)新编工科力学系列课程教材之一。

本书是根据国家教育部审定的结构力学课程教学基本要求和工科力学课程教学指导委员会面向 21 世纪工科力学课程教学改革的要求编写而成。在内容安排上密切结合交通土建专业的需要和特点,故可作为公路工程、铁路工程、桥梁与隧道等专业结构力学课程的教材,也可供土建、水利类专业以及有关工程技术人员参考。

本书在编写过程中,注意吸取众多同类教材的长处和多年来较丰富的教学经验,力图贯彻“打好基础,理论联系实际及由浅入深”等原则,在内容的阐述上尽可能做到由具体到抽象、由简单到复杂,以符合学生认识规律,方便教学又利于自学。在例题和习题的安排上比较全面,且大部分习题附有答案。

本书中冠以*号的章节,可由使用本教材的教师根据实际情况加以取舍。

本书第一、三、五、七、八、十和十一章,由于克萍编写;第二、四、六、九、十二章和附录由胡庆安编写。

本书由西安建筑科技大学工程力学教授林家骥任主审,并提出了很多宝贵意见。此外,原公路交通大学结构力学教研室的老师们亦提出了许多中肯的建议,在此,我们表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中难免有疏漏和不妥之处,恳望读者指正。

编 者

2001 年 6 月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 结构力学的研究对象和基本任务	1
§ 1-2 荷载的分类	1
§ 1-3 结构的计算简图	2
§ 1-4 杆件结构的分类	5
第二章 平面体系的机动分析	8
§ 2-1 机动分析的基本概念	8
§ 2-2 自由度和约束	9
§ 2-3 计算自由度	11
§ 2-4 几何不变体系的基本组成规则	12
§ 2-5 机动分析的示例	15
§ 2-6 无穷远虚铰连接的体系分析	17
§ 2-7 几何构造与静定性的关系	18
习题	19
第三章 静定梁和静定平面刚架	22
§ 3-1 单跨静定梁的计算	22
§ 3-2 用叠加法绘弯矩图	25
§ 3-3 多跨静定梁	27
§ 3-4 静定平面刚架	32
§ 3-5 少求或不求反力快速绘制弯矩图	37
§ 3-6 静定结构的特性	39
习题	40
第四章 静定拱式结构	49
§ 4-1 概述	49
§ 4-2 三铰拱的数解法	50
§ 4-3 三铰拱的压力线	54
§ 4-4 三铰拱的合理拱轴	55

习题	57
第五章 静定平面桁架	59
§ 5-1 概述	59
§ 5-2 结点法	61
§ 5-3 截面法	62
§ 5-4 截面法和结点法的联合应用	65
§ 5-5 各类平面桁架的比较	68
§ 5-6 组合结构的计算	69
* § 5-7 用零载法分析体系的几何构造	73
习题	74
第六章 影响线及其应用	80
§ 6-1 概述	80
§ 6-2 静力法作单跨静定梁的影响线	81
§ 6-3 机动法作单跨静定梁的影响线	84
§ 6-4 多跨静定梁的影响线	86
§ 6-5 间接荷载作用下的影响线	89
* § 6-6 三铰拱的影响线	91
§ 6-7 桁架的影响线	92
§ 6-8 利用影响线求量值	95
§ 6-9 公路的标准荷载制	97
§ 6-10 最不利荷载位置	98
* § 6-11 换算荷载	104
§ 6-12 简支梁的绝对最大弯矩	108
§ 6-13 简支梁的内力包络图	110
习题	113
第七章 静定结构的位移计算	118
§ 7-1 概述	118
§ 7-2 变形体系的虚功原理	119
§ 7-3 结构位移计算的一般公式——单位荷载法	123
§ 7-4 静定结构在荷载作用下的位移计算	125
§ 7-5 图乘法	129
§ 7-6 温度变化时的位移计算	134
§ 7-7 支座移动时的位移计算	137
§ 7-8 线弹性变形体的互等定理	138
* § 7-9 位移影响线	140
习题	142

第八章 力法	147
§ 8-1 超静定结构的概述	147
§ 8-2 超静定次数的确定	148
§ 8-3 力法的基本概念	151
§ 8-4 力法的典型方程	153
§ 8-5 力法的计算步骤与示例	155
§ 8-6 对称性的利用	164
§ 8-7 温度变化时超静定结构的计算	170
§ 8-8 支座移动时超静定结构的计算	172
§ 8-9 超静定结构的位移计算	175
§ 8-10 超静定结构计算结果的校核	176
§ 8-11 超静定结构的特性	179
习题	179
第九章 力法应用	188
§ 9-1 超静定结构影响线作法概述	188
§ 9-2 连续梁的均布荷载最不利位置及包络图	190
§ 9-3 交叉梁系	193
§ 9-4 超静定拱	196
§ 9-5 两铰拱及系杆拱的计算	198
§ 9-6 对称无铰拱的基本结构——弹性中心法	200
§ 9-7 对称无铰拱在荷载作用下的计算	202
§ 9-8 无铰拱影响线的绘制	208
§ 9-9 温度改变和混凝土收缩对无铰拱的影响	213
§ 9-10 支座移动时对无铰拱的影响	214
习题	215
第十章 位移法	219
§ 10-1 位移法的基本概念	219
§ 10-2 等截面直杆的转角位移方程	220
§ 10-3 位移法的基本未知量和基本结构	225
§ 10-4 位移法的典型方程	228
§ 10-5 位移法计算步骤与示例	230
§ 10-6 温度变化时的计算	237
§ 10-7 按平衡条件建立位移法典型方程	240
§ 10-8 力法和位移法的联合应用	241
习题	244

第十一章 渐近法	249
§ 11-1 概述	249
§ 11-2 力矩分配法的基本概念	249
§ 11-3 用力矩分配法计算连续梁	255
§ 11-4 无剪力分配法	259
习题	262
第十二章 矩阵位移法	265
§ 12-1 概述	265
§ 12-2 矩阵位移法的基本概念	265
§ 12-3 平面刚架的单元刚度矩阵(局部坐标系)	272
§ 12-4 平面刚架的单元刚度矩阵(结构坐标系)	275
§ 12-5 结构刚度矩阵	278
§ 12-6 综合结点荷载	285
§ 12-7 计算步骤和算例	288
§ 12-8 几点补充说明	290
习题	292
附录 连续梁和平面刚架程序的框图设计和源程序	295
参考文献	308

第一章 绪 论

§ 1-1 结构力学的研究对象和基本任务

工程中能承受荷载并起骨架作用的部分称为结构。例如公路、铁路上的桥梁和隧道,房屋中的梁柱体系以及挡土墙、水坝、涵洞等都是典型的结构实例。

按结构构件的几何特征,结构分为三大类:

(1)杆件结构:这类结构是由若干根长度远远大于其它两个尺寸的杆件组成的。如建筑物中梁和柱组成的梁柱体系。

(2)板壳结构:这类结构也称薄壁结构,它的厚度远远小于其它两个尺寸。若中面为平面的称之为薄板,如屋面;若中面为曲面的称之为薄壳,如双曲拱桥。

(3)实体结构:它的三个方向的尺寸基本为同量级的结构。如基础、桥墩、挡土墙等等。

结构力学是一门专业基础课,与理论力学、材料力学、弹性力学之间有着密切的关系。理论力学着重讨论物体机械运动的基本规律。其它三大力学着重讨论结构及其构件的强度、刚度和稳定性的问题。材料力学是以单个杆件作为研究对象;结构力学是在材料力学的基础上以杆件结构作为研究对象;弹性力学是以板壳结构和实体结构作为研究对象的。

结构力学的基本任务主要有以下三个方面:

(1)研究结构的组成规律及合理形式。

(2)研究结构的内力和变形的计算原理和计算方法,即结构的强度和刚度计算。

(3)研究结构的稳定性以及结构在动力作用下的特性和反应。

§ 1-2 荷载的分类

荷载是指主动作用在结构上的外力。如结构的自重、桥梁上行驶车辆的载重、水压力和土压力等等。除荷载外,还有其它因素也可以使结构产生内力和变形,如温度变化、支座移动、制造误差和材料收缩等。

荷载可根据不同特征进行分类。

一、按荷载作用时间的长短分

(1)恒载:是指长期作用在结构上的不变荷载,如结构的自重、固定在结构上的永久性设备。

(2)活载:是指暂时作用在结构上的可变荷载,如风、雪荷载,行驶在桥梁上的人流及车辆。

二、按荷载作用性质分

(1)静力荷载:是指大小、方向、作用位置不随时间变化或变化缓慢的荷载,它不致使结构产生明显的加速度,因而可以不考虑惯性力的影响。如结构的自重。

(2)动力荷载:是指随时间迅速变化的荷载,它将引起结构明显的振动,产生显著的加速度,因而惯性力的影响不可忽略。如打桩机产生的冲击荷载及动力机械产生的振动荷载。

三、按荷载的作用位置是否变化分

(1)固定荷载:是指在结构上的作用位置不发生变化的荷载,如结构的自重。

(2)移动荷载:是指在结构上的作用位置发生变化的荷载,如公路、桥梁上的汽车荷载。

四、按荷载作用的范围可分

(1)分布荷载:是指连续分布在结构上的荷载,如水压、风荷载。当分布荷载为常量时,称为均布荷载。

(2)集中荷载:当荷载作用区域很小时,可认为此荷载是作用在结构的一点上,称为集中荷载,如火车铁轨上的轮压。

§ 1-3 结构的计算简图

实际结构复杂多样,完全按照结构的实际工作状态进行力学分析是不可能的,也是没有必要的。因此,我们在对实际结构进行力学分析之前,必须加以简化,略去次要的因素,突出其主要特点,用一个简化的力学模型或图形来代替实际结构,这个简化的力学模型或图形称为此结构的计算简图。

计算简图的选择是力学计算的基础。选择的好坏直接影响着我们计算上的工作量和精确程度,如果选择不恰当,则计算结果不能反映结构的实际工作状态,严重的将会造成工程事故,所以应慎重选择。

选择计算简图应遵循的原则:

(1)尽可能地反映实际情况,使计算结果精确可靠。

(2)略去某些次要的因素,以便简化计算。

对于同一结构,在设计的不同阶段或采用不同的计算手段时,可以采用不同的计算简图。如在初步设计阶段,可采用较粗糙的计算简图;而在设计阶段,计算简图则应准确和完善。如用手算,可采用较为简单的计算简图;如用电算,则可采用较复杂的计算简图。

结构的简化工作分为三个方面:

(1)荷载的简化;

(2)杆件的简化;

(3)支座和结点的简化。

1. 杆件的简化

杆件的截面尺寸通常比杆件的长度小得多,因此可以近似地采用平截面假定,截面上的应力可根据截面的内力来计算,截面上的变形也可根据轴线上的变形来确定。所以,在计算简图

中,杆件用其轴线表示。若轴线是直线用直线表示,若轴线是曲线即用曲线表示。

2. 结点的简化

在杆件结构中,将杆件之间连接的地方称为结点。在计算简图中,结构的结点有两种基本类型,即铰结点和刚结点。

(1)铰结点:被连接的杆件间在连接处允许有相对转动,但不允许发生相对移动,其受力特征是能承受和传递力,但不能承受和传递力矩。这种理想情况,实际上很难遇到,但木结构中的榫接结点可以做为铰结点对待(见图 1-1)。

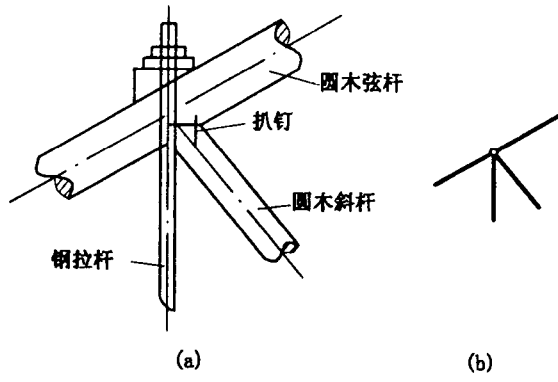


图 1-1

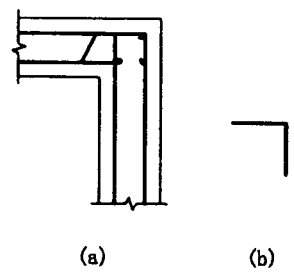


图 1-2

(2)刚结点:被连接的杆件在连接处既不能相对移动,也不能相对转动,其受力特征是能承受和传递力,也能承受和传递力矩。现浇的钢筋混凝土结点通常属于这类结点(见图 1-2)。

3. 支座的简化

将结构与基础联系起来的装置称为支座。支座的形式很多,在计算简图中常见的有辊轴支座、铰支座、定向支座和固定支座。

(1)辊轴支座:也称活动铰支座。被支承的部分可以转动和水平移动,不能竖向移动。这类支座所提供的反力只有竖向反力。在计算简图中可以用一根垂直于支承面的链杆来表示(见图 1-3)。

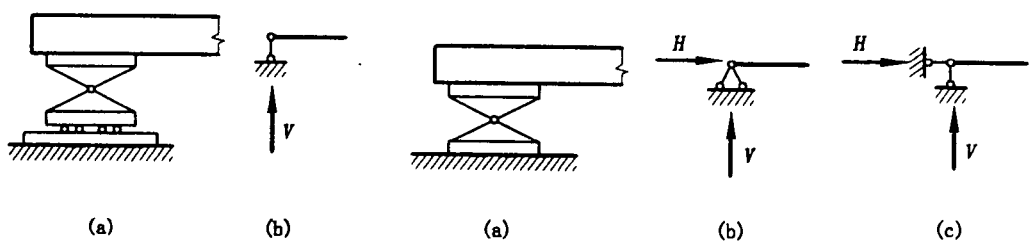


图 1-3

图 1-4

(2)固定铰支座:被支承的部分可以转动,但不能移动。这类支座所提供的反力有水平方向和竖直方向的反力。在计算简图中用两根相交的支座链杆表示(见图 1-4)。

(3)定向支座:又称滑动支座。被支承的部分不能沿垂直于支承面的方向移动,也不能转动,但可以沿支承面方向移动。提供的反力有垂直于支承面的反力和一个反力偶。在计算简图

中可用垂直于支承面的两根平行的支座链杆表示(见图 1-5, 图 1-6)。

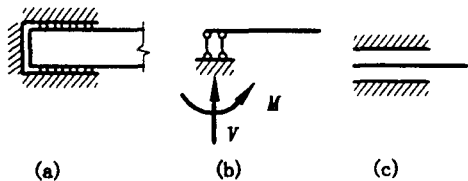


图 1-5

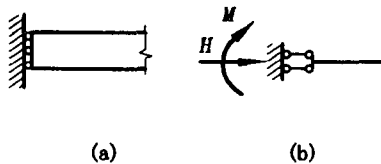


图 1-6

(4) 固定支座: 被支承的部分不允许有任何移动和转动。它提供的反力有水平方向和竖直方向的反力以及反力偶(见图 1-7)。

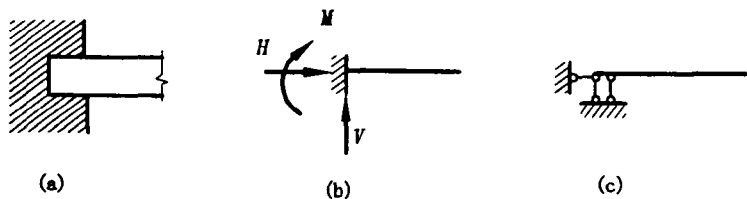


图 1-7

下面以实例说明结构的简化过程。

例如有一根直梁两端搁在墙上, 上面放一个重物如图 1-8(a)所示。简化时, 梁上的重物由于与梁的接触面很小, 可视为一集中荷载, 梁的自重是沿着梁均匀分布的, 则视为均布荷载。梁可用其轴线来表示。至于支座, 由于墙限制了梁端部的上下移动, 再考虑到接触面比较粗糙, 有摩擦, 故梁不能左右移动, 但是由于材料的热胀冷缩, 故可将一端视为固定铰支座而另一端视为辊轴支座。这样, 得到了图 1-8(b)所示的计算简图。

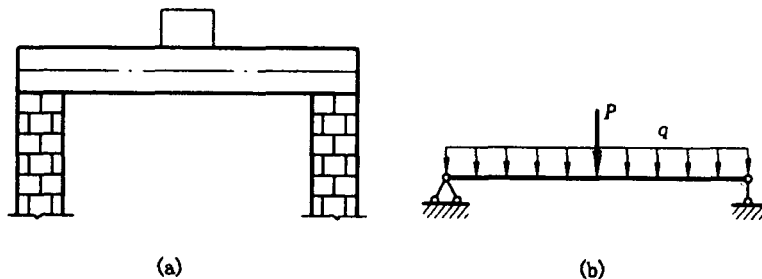


图 1-8

又如图 1-9(a)所示为一工业厂房结构图。该厂房结构是由一系列的屋架、柱和基础组成的平面单元(见图 1-9(b)), 再由屋面板等纵向构件组成的空间(见图 1-9(a))。作用在厂房上的荷载, 通常沿纵向是均匀分布的。因此, 可以从这个空间结构中, 取出柱间距中线之间的部分作为力计算单元。在计算单元中, 荷载和杆件都在同一平面中, 因而简化为平面结构(见图 1-9(b))。

对于图 1-9(b)所示平面结构, 讨论其屋架的计算简图。

在竖向荷载作用下, 简化时, 屋架的杆件用其轴线表示; 屋架杆件之间的结点简化为铰结

点;屋面荷载通过屋面板以集中力的形式作用在屋架上弦上;屋架的两端通过钢板焊接在柱上,可将其连接的地方分别简化为固定铰支座和辊轴支座。于是得到图 1-9(c)所示屋架的计算简图。

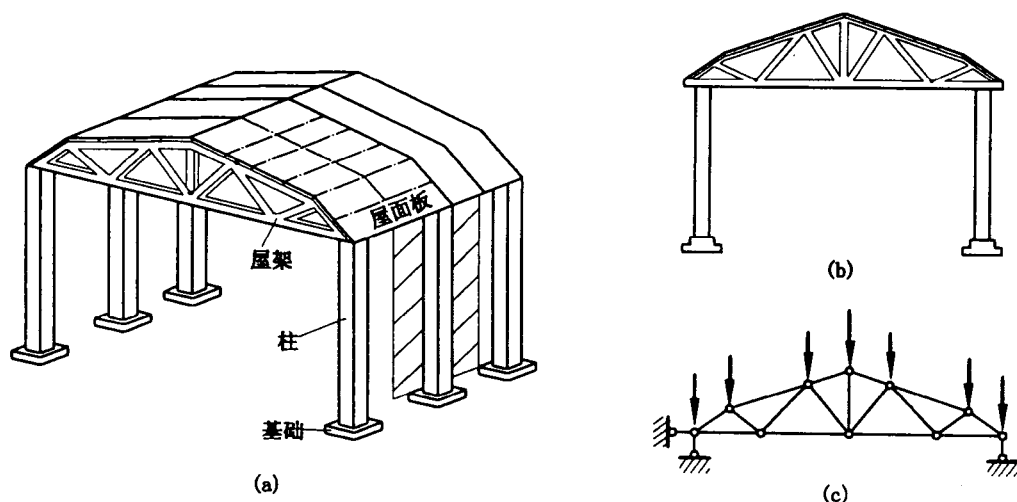


图 1-9

结构计算简图的选择十分重要,又很复杂,不仅需要力学基础,而且要有结构构造、结构设计与施工方面的专业知识和实际经验,有时还需借助于模型试验或现场实测才能确定合理的计算简图。通过这节的学习,初步了解到选择计算简图与简化的一般方法,但要真正掌握计算简图的合理选择,尚需在今后的学习与工作中注意体会,积累经验,逐步提高。

§ 1-4 杆件结构的分类

如上所述,结构力学研究的并不是实际的结构,而是代表实际结构的计算简图。因此结构的分类,实际上是指计算简图的分类。

杆件结构按其受力特点不同可分为以下几种:

(1)梁:梁是一种受弯杆件,杆件轴线一般为直线。有单跨梁和多跨梁,如图 1-10 所示。

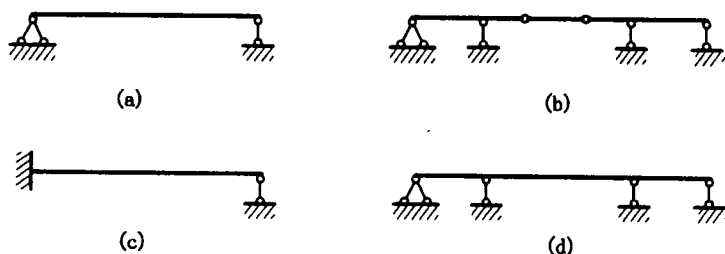


图 1-10

(2)拱:轴线为曲线且在竖向荷载作用下能产生水平推力。水平推力大大地改变了拱的受

力特性,如图 1-11 所示。

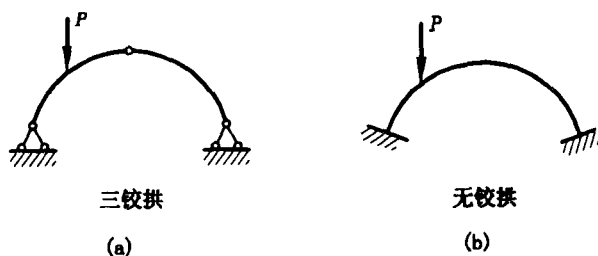


图 1-11

(3)刚架:具有刚结点的直杆结构,如图 1-12 所示。

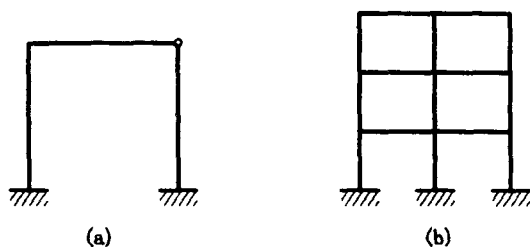


图 1-12

(4)桁架:由直杆组成且所有结点均为铰结点,如图 1-13 所示。当只承受结点荷载时,各杆只产生轴力。

(5)组合结构:组合结构是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,另一些杆件则同时还承受弯矩和剪力。如图 1-14 所示。

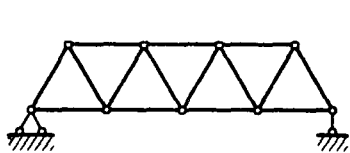


图 1-13

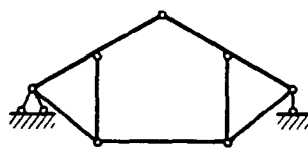


图 1-14

根据杆件和荷载的空间位置,结构可分为平面结构和空间结构。

(1)平面结构:各杆的轴线和荷载均在同一平面内,则此结构称为平面结构,如图 1-15 所示。

(2)空间结构:各杆的轴线和荷载不在一个平面内的称为空间结构,如图 1-16 所示。

按照结构的计算特点,结构可分为静定结构和超静定结构。

(1)静定结构:全部反力和内力均可由静力平衡条件求出的结构称为静定结构,如图 1-10(a), (b) 所示。

(2)超静定结构:全部反力和内力不能由静力平衡条件求出的结构称为超静定结构,如图 1-10(c), (d) 所示。

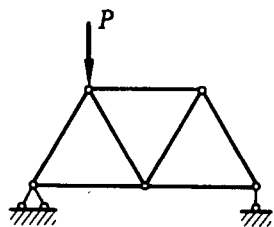


图 1 - 15

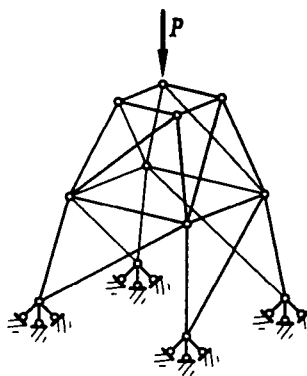


图 1 - 16

第二章 平面体系的机动分析

§ 2-1 机动分析的基本概念

当任意荷载作用时,若不考虑材料的变形,结构的几何形状与位置必须保持不变。如果一个体系的几何形状与位置是可以改变的,就不能用作工程结构。

在荷载作用下,结构中的杆件由于材料产生变形,它使结构的几何形状产生微小变化。分析杆件体系的形状时,不考虑这种微小变形产生的形状变化,即将杆件看成是没有变形的刚体(平面刚体,称为刚片)。

根据杆件体系的形状和位置,杆件体系可分为两类:

(1)几何不变体系:如图 2-1(a)所示,在任意荷载作用下,如不考虑材料变形,体系的几何形状和位置不发生任何改变。

(2)几何可变体系:如图 2-1(b)所示,即使在很小的荷载作用下,也会发生机械运动,而使体系的几何形状和位置发生改变。

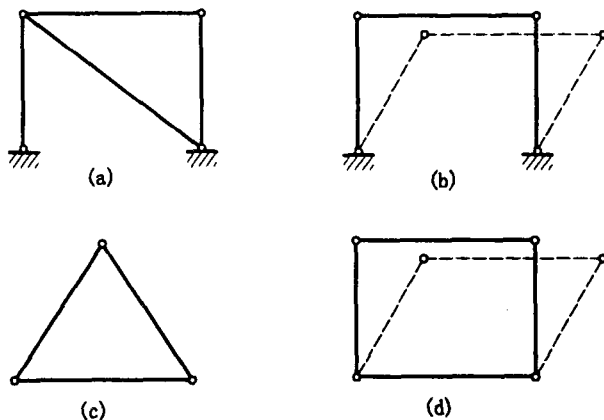


图 2-1

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)所示铰结三角形,虽然其位置在平面内是可以改变的(可以整体移动和转动),但铰结三角形的形状是不可能改变的,称为内部几何不变体系。图 2-1(d)所示铰结四边形,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。我们把这种判别体系是否几何可变所进行的几何组成性质的分析,称为机动分析或几何组成分析。

在机动分析中,由于不考虑材料的变形,因此可以把一根杆件或已知是几何不变的部分看作是一个刚体,在平面体系中又把刚体称为刚片。有时,为了便于分析可将地基也视为刚片。

§ 2-2 自由度和约束

一个体系的自由度表示该体系运动时独立变化的几何参数数目,也就是确定物体位置所需的独立坐标数目。

一、自由度

1. 平面中一个动点的自由度

在平面中,一个动点自由运动时,其位置要用两个坐标 x 和 y 来确定(见图 2-2(a))。所以,平面中一个动点的自由度为 2。

2. 平面中一个刚片的自由度

在平面中,一个刚片自由运动时,其位置可用它上面任一点 A 的坐标 x, y 和任一直线 AB 的倾角 φ 来确定(见图 2-2(b))。所以,平面中一个刚片的自由度为 3。

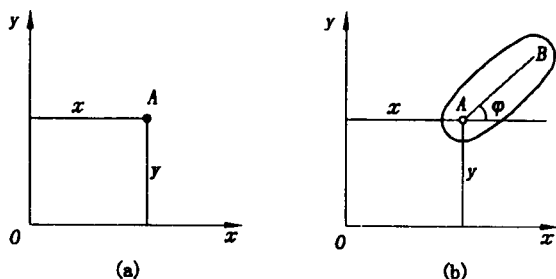


图 2-2

二、约束

使体系减少自由度的装置或连接,称为约束。能减少几个自由度的装置或连接,就相当几个约束。

1. 链杆约束

活动铰支座(见图 2-3(a))能限制刚片点 A 在垂直方向移动,但不能限制其水平方向移动和绕 A 点的转动,减少了一个自由度,相当一个约束。所以,一个支座链杆相当于一个约束。

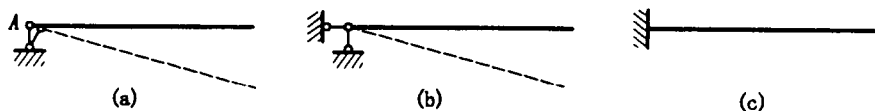


图 2-3

固定铰支座(见图 2-3(b))及固定支座(见图 2-3(c)),它们分别相当于 2 个和 3 个支座链杆,故其约束也分别为 2 个和 3 个约束。

对于刚片间的链杆约束,如图 2-4(a)所示,两个刚片 I 和 II 用链杆 EF 连接在一起。两独立的刚片有 6 个自由度,用链杆连接后,自由度减少为 5;因为用 3 个坐标可确定 I 刚片的位置,II 刚片再用两个坐标即可确定其位置,因此,一个刚片间的链杆也相当于一个约束。

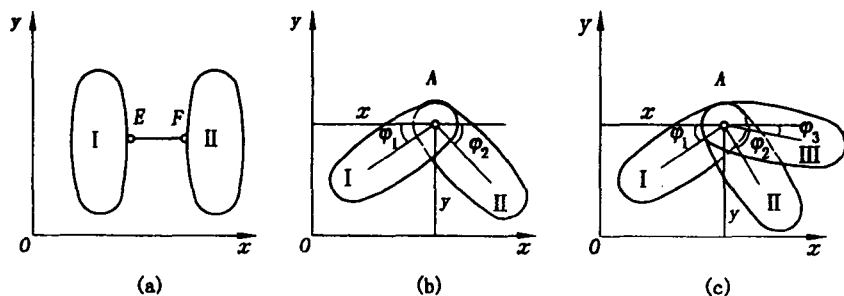


图 2-4

2. 铰约束

图 2-4(b)刚片 I 和 II 用一个铰 A 连接在一起,这种连接两刚片的铰称为单铰。两个独立的刚片在平面内有 6 个自由度,用铰连接后,自由度减少为 4;因为用 3 个坐标便可确定刚片 I 的位置,刚片 II 此时只能绕点 A 转动,且需一个转角就可以确定其位置。由此可见,一个单铰能减少 2 个自由度,即一个单铰相当于两个约束。

有时一个铰同时连接两个以上的刚片,这种铰称为复铰。如图 2-4(c)所示,三刚片用一个铰 A 相连。3 个独立的刚片有 9 个自由度,铰结后,点 A 可用 x, y 两个坐标确定,3 个刚片分别用 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 来确定,仅有 5 个自由度,即产生了 4 个约束,相当两个单铰。由此类推可得,连接 n 个刚片的复铰相当 $(n-1)$ 个单铰。此外,也可视 I 刚片位置确定,此时 II、III 刚片仅能绕点 A 转动,各减少了 2 个自由度,因此连接 3 个刚片的复铰相当 2 个单铰作用,同样可导出上述相同的结论。

如果在一个体系中增加一个约束,体系的自由度并不因此而减少,则称此约束为多余约束。

如图 2-5(a),刚片 AB 有 3 个自由度,现用一固定铰支座和一根支座链杆与地基相连,其自由度为零。体系为几何不变,此时的支座链杆称为必要约束。如果在增加一链杆与地基相连,如图 2-5(b)所示,此时,该支座链杆为多余约束。(可将 2, 3, 4, 任何一根支座链杆视为多余约束)。

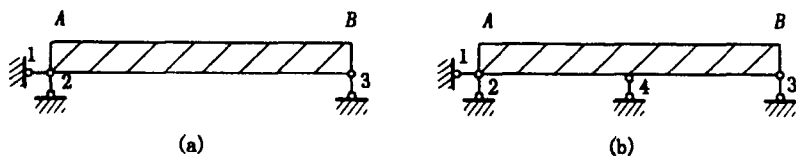


图 2-5