

高等学校教材

建筑力学 第三分册

结构力学

(第二版)

湖南大学结构力学教研室 编

李家宝 主编

高等教育出版社

高等学校教材

建筑力学 第三分册

结构力学

(第二版)

湖南大学结构力学教研室 编

李家宝 主编

高等教育出版社

本书是《建筑力学》第三分册《结构力学》的第二版,是在第一版的基础上,参照1986年10月高等学校工科结构力学课程教学领导小组制订的给水排水、建筑学、建筑材料等非结构专业的结构力学课程教学基本要求进行修订的。

本书主要内容有:体系的几何组成分析、静定结构的内力分析和位移计算、力法、位移法、力矩分配法、影响线和内力包络图、矩阵位移法、结构的计算简图和简化分析。为了加强对电子计算机计算方法的学习,改写了矩阵位移法,并附有平面刚架分析程序。为了更便于教和学,对静定结构的计算、力法、位移法等也作了一些修改。增编了第十章“结构的计算简图和简化分析”,是为了贯彻理论联系实际的原则和培养学生分析、解决问题的能力。本书各章的习题作了适当调整,增加了思考题,以利于复习。

本书可作为给水排水、建筑学、建筑材料等非结构专业的教材,也可作为土建类大专各有关专业的教材,以及供有关工程技术人员等参考。

本书责任编辑 余美茵

(京) 112号

高等学校教材
建筑力学 第三分册
结 构 力 学
(第二版)

湖南大学结构力学教研室 编
李家宝 主编

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
四川省金堂新华印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 15.25 字数 350 000

1979年9月第1版 1989年3月第2版 1993年3月第5次印刷

印数 80 194—99 516

ISBN 7-04-002168-4/TB·123

定价 4.65 元

第一版前言

按一九七七年十一月高等学校工科力学教材会议制定的教材建设规划,湖南大学、哈尔滨建筑工程学院、重庆建筑工程学院三院校为土建类的建筑学、给水排水、建筑材料、采暖通风等专业编写了这套中学时的建筑力学教材。本教材共分三个分册:第一分册——理论力学,第二分册——材料力学,第三分册——结构力学。为了便于选用本教材,在编写时我们既注意了这三部分内容的相互联系和配合,又保持了各自相对的独立性和理论的系统性。

本书是建筑力学的第三分册——结构力学。在编写过程中注意贯彻辩证唯物主义观点和理论联系实际的原则,力求做到内容精简,由浅入深,便于自学。在介绍结构力学的基本计算原理和计算方法的基础上,适当写了一部分与现代结构力学发展相适应的新内容,为读者今后继续学习和掌握新方法,新技术提供必要的结构力学基础知识。

全部讲授完本书的内容约需80~90学时。采用本教材时,可根据各专业的不同要求和学时数对内容酌情取舍。第九章的内容如果没有时间讲授,可留作自学,或根据实际情况另作专题讲授。在每章书后均附有一定数量的习题,可根据需要全作或选作。

本书由天津大学(主审)、北京工业大学(主审)、西安冶金建筑学院、武汉建筑材料工业学院、清华大学、重庆建筑工程学院、北京建筑工程学院、同济大学等院校的部分结构力学教师审阅。

本书由湖南大学主编,参加编写工作的有:湖南大学李家宝(第一、四、五、六、七章)王兰生(第二、三、八章)、哈尔滨建筑工程学院范乃文(第九章)。由于编者水平有限,希望使用本书的教师和读者对书中的缺点和错误予以批评指正。

编 者

一九七八年十二月

目 录

第一章 绪论1	§ 5-3 超静定次数的确定86
§ 1-1 杆件结构力学的研究对象和任务.....1	§ 5-4 力法的典型方程89
§ 1-2 杆件结构的计算简图.....4	§ 5-5 用力法计算超静定刚架91
§ 1-3 平面杆件结构的分类.....8	§ 5-6 对称性的利用94
§ 1-4 荷载的分类.....9	§ 5-7 用力法计算铰接排架100
第二章 体系的几何组成分析11	§ 5-8 等截面单跨超静定梁的杆端内力102
§ 2-1 几何组成分析的目的.....11	思考题.....112
§ 2-2 平面体系的自由度概念.....11	习题.....113
§ 2-3 几何不变体系的简单组成规则.....13	第六章 位移法117
§ 2-4 几何组成分析的步骤和举例.....16	§ 6-1 位移法的基本概念.....117
§ 2-5 静定结构和超静定结构.....17	§ 6-2 位移法的基本未知量数目.....121
思考题.....18	§ 6-3 用位移法计算刚架的步骤和示例.....123
习题.....18	§ 6-4 位移法的典型方程.....128
第三章 静定结构的内力分析21	思考题.....134
§ 3-1 静定梁.....21	习题.....134
§ 3-2 静定平面刚架.....27	第七章 力矩分配法137
§ 3-3 三铰拱.....35	§ 7-1 概述.....137
§ 3-4 静定平面桁架.....42	§ 7-2 力矩分配法的基本概念.....137
§ 3-5 静定结构小结.....47	§ 7-3 用力矩分配法计算连续梁和无结点线位移的刚架.....144
思考题.....49	§ 7-4 超静定结构小结.....152
习题.....50	思考题.....153
第四章 静定结构的位移计算55	习题.....154
§ 4-1 计算结构位移的目的.....55	*第八章 影响线和内力包络图156
§ 4-2 功 广义力和广义位移.....56	§ 8-1 影响线的一般概念.....156
§ 4-3 计算结构位移的一般公式.....58	§ 8-2 用静力法作简支梁的影响线.....156
§ 4-4 静定结构由于荷载所引起的位移.....62	§ 8-3 利用影响线求反力和内力.....159
§ 4-5 图乘法.....67	§ 8-4 最不利荷载位置.....161
§ 4-6 静定结构由于支座位移、温度改变所引起的位移.....73	§ 8-5 简支梁的内力包络图.....163
§ 4-7 互等定理.....76	§ 8-6 连续梁的内力包络图.....165
思考题.....78	思考题.....168
习题.....80	习题.....169
第五章 力法83	*第九章 矩阵位移法170
§ 5-1 超静定结构概述.....83	§ 9-1 概述.....170
§ 5-2 力法的基本概念.....84	§ 9-2 单元刚度矩阵.....172

§ 9-3 结构刚度矩阵.....	176	§ 10-1 概述.....	200
§ 9-4 单元刚度矩阵的坐标变换.....	181	§ 10-2 将空间结构分解为平面结构.....	200
§ 9-5 非结点荷载的处理.....	184	§ 10-3 将板壳结构简化为交叉体系.....	203
§ 9-6 用直接刚度法计算平面刚架.....	185	§ 10-4 将结构分解为基本部分和附属部分.....	207
§ 9-7 几个问题的简单说明.....	197	§ 10-5 忽略次要变形.....	209
思考题.....	198	习题.....	214
习题.....	198	附录 平面刚架分析程序.....	215
第十章 结构的计算简图和简化分析.....	200		

第一章 绪 论

§1-1 杆件结构力学的研究对象和任务

土木工程中的各类建筑物和构筑物,例如房屋、桥梁、水池、水塔、挡土墙(图 1-1 至图 1-7)、等等,在使用过程中,都要承受各种荷载的作用。这种承担荷载的建筑物和构筑物或者其中的某些承重构件,都可称为结构。图 1-1 所示由屋架、柱子、吊车梁、屋面构件以及基础等组成的工业厂房空间骨架,图 1-6 所示的水池和图 1-7 所示的挡土墙都是结构的例子。

结构的类型是多种多样的,就几何观点来分,有杆件结构(图 1-1)、薄壁结构(图 1-3、1-4 中的屋面和图 1-6)和实体结构(图 1-7)三类。杆件的基本特征是它的长度远大于其他两个尺度——截面的宽度和高度。杆件结构便是由若干这种杆件所组成的。薄壁结构是厚度远小于其他两个尺度的结构。平面板状的薄壁结构,称为薄板;由若干块薄板可组成各种薄壁结构(图 1-4、1-6 b)。具有曲面外形的薄壁结构,称为薄壳结构(图 1-3、1-6 a)。实体结构是指三个方向的尺度大约为同一量级的结构,例如挡土墙(图 1-7)、堤坝、块体基础等。

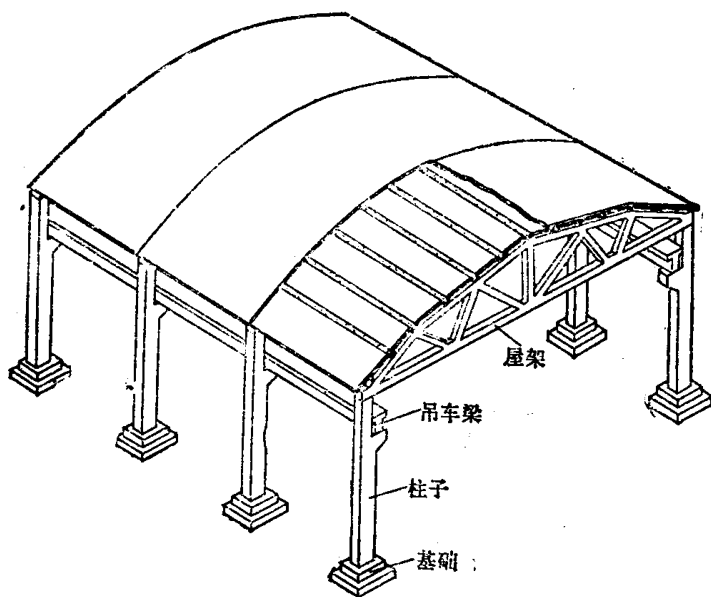


图 1-1

依照空间观点,杆件结构可分为平面杆件结构和空间杆件结构两类。凡组成结构的所有杆件的轴线都位于某一平面内,并且荷载也作用于该平面内的结构,称为平面杆件结构。否则,便是空间结构。严格说来,实际的结构都是空间结构,不过在进行计算时,常可根据其实际受力情况的特点,将它分解为若干平面结构来分析,以使计算简化。但需注意,并非所有情况都能这样

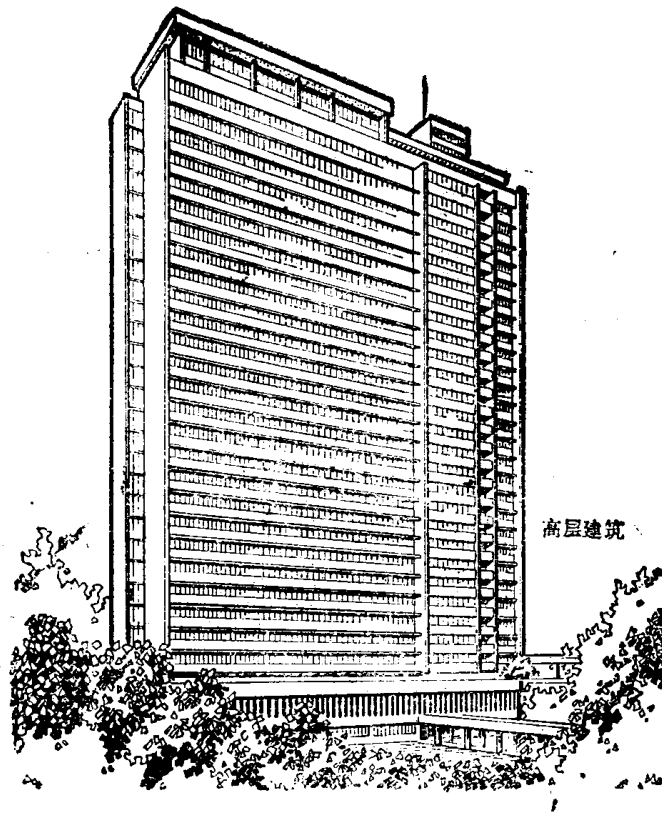


图 1-2

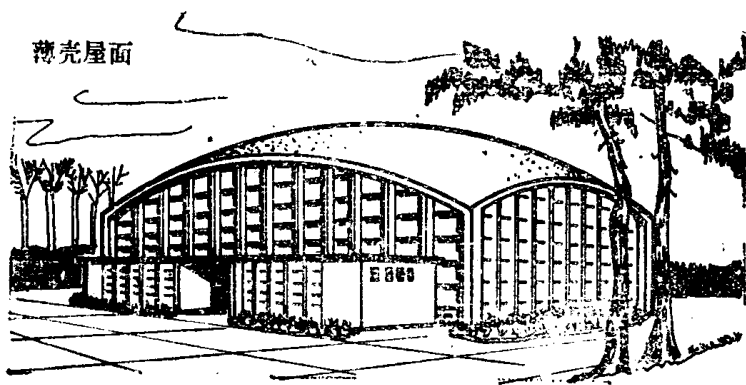


图 1-3

处理,有些是必须作为空间结构来研究的。本书的研究对象只限于平面杆件结构。

杆件结构力学的任务是研究结构的组成规律和合理形式以及结构在外因作用下的强度、刚度和稳定性的计算原理和计算方法。研究组成规律的目的在于保证结构各部分不致发生相对运动,使它能承担荷载并维持平衡。进行强度和稳定性计算的目的在于保证结构的安全并使之符合经济的要求。计算刚度的目的在于保证结构不致发生过大的、在实用上不能容许的位移。研究结构的合理形式是为了有效地利用材料,使其受力性能得到充分的发挥。上述强度、刚度和稳定性的计算,不仅在设计结构时需要进行,而且当已有结构所承受的荷载情况改变时,也应加

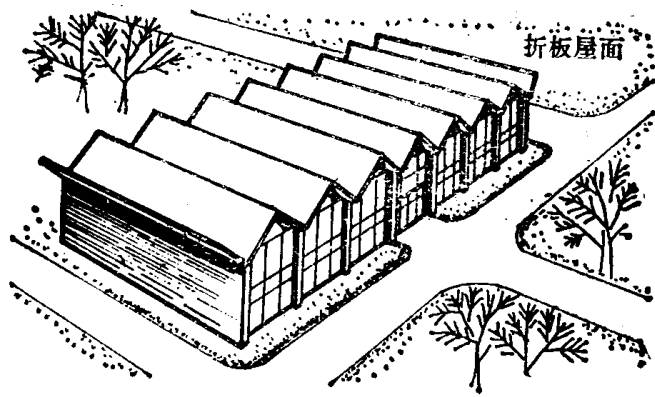
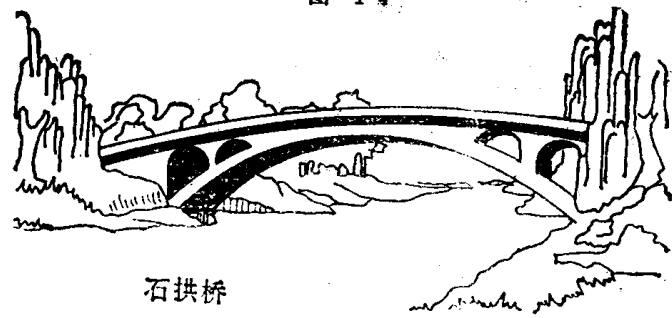
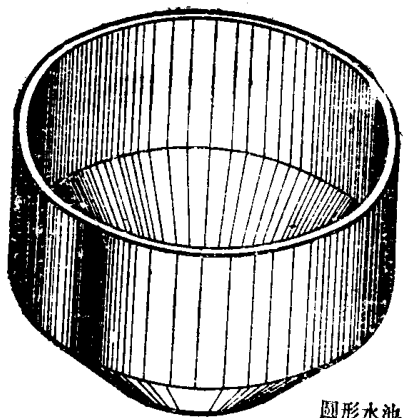


图 1-4



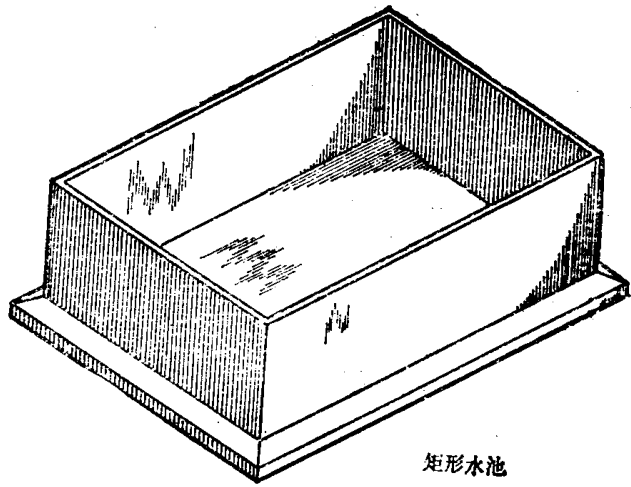
石拱桥

图 1-5



圆形水池

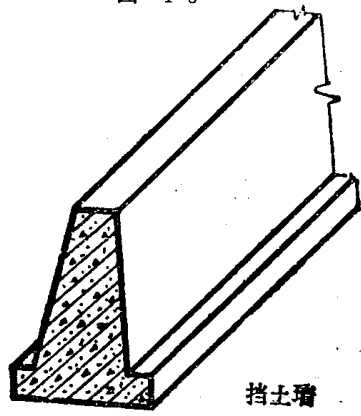
(c)



矩形水池

(b)

图 1-6



挡土墙

图 1-7

以核算,以判明是否需要采取加固措施。

结构力学与材料力学的基本区别在于:后者主要是研究材料的强度和单根杆件的强度、刚度和稳定性的计算,而结构力学的研究对象是由杆件所组成的体系。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未作讨论。

本书主要介绍结构力学中最基本的计算原理和计算方法,这些内容是解决一般常用结构的静力计算问题所必需的,也是进一步学习和掌握其他现代结构分析方法的基础。为了与现代结构力学的发展相适应,在第九章中扼要地介绍了结构矩阵分析的基本内容。

§1-2 杆件结构的计算简图

对结构进行力学分析之前,必须先将实际结构加以简化,分清结构受力、变形的主次,抓住主要矛盾,忽略一些次要因素,进行科学抽象,用一个简化了的理想模型来代替实际结构。这种在结构计算中用以代替实际结构并能反映结构主要受力和变形特点的理想模型,称为结构的计算简图。

确定结构的计算简图时,通常包括杆件的简化、支座的简化和结点的简化等方面的内容。

一、杆件的简化

根据杆件受力后的变形特点,由材料力学可知,各种杆件在计算简图中均用其轴线来代替。等截面直杆的轴线是一直线,曲杆是一曲线。一根变截面杆件也都近似地以一条直线或曲线来代替。

二、支座的简化和分类

在建筑结构中,从支座对结构的约束作用来看,常用的计算简图可分为三类:

(一) 可动铰支座(图 1-8)

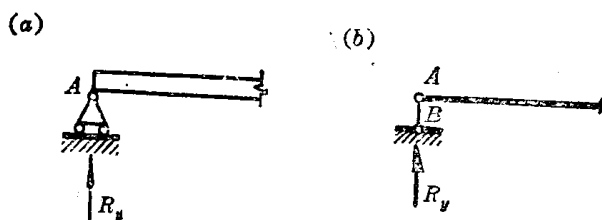


图 1-8

这种支座常用图 1-8 a 所示方式表示,它对结构的约束作用是只能阻止结构上的 A 点沿垂直于支承平面方向的移动,这时,结构既可绕铰 A 作转动,又可沿着支承平面移动。因此,当不考虑支承平面上的摩擦力时,其支座反力将通过铰 A 的中心并与支承平面垂直,即反力的作用点和方向是确定的,只是大小是未知的,可用 R_y 来表示它。根据上述特点,这种支座在计算简图中又常用一根链杆来表示(图 1-8 b),因为与该链杆相联的结构不仅可绕铰 A 转动,而且当链杆绕铰 B 作微小转动时,结构也可在垂直于链杆的方向作微小移动。显然,链杆 AB 的内力即代表该支座的反力。

在实际结构中,凡符合或近似地符合上述约束条件的支承装置,都可取成可动铰支座。

(二) 铰支座(图 1-9)

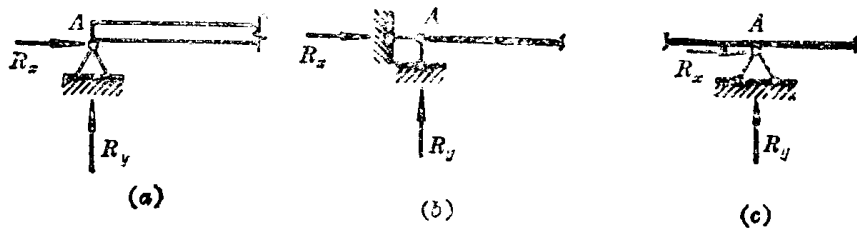


图 1-9

这种支座常用图 1-9 a 所示方式表示,它对结构的约束作用是不允许结构上的 A 点发生任何移动,而结构只能绕铰 A 转动。因此,铰支座反力将通过铰 A 的中心,但其方向和大小都是未知的,显然,可以用两个沿确定方向的未知分反力 R_x 和 R_y 来表示它。铰支座在计算简图中又常用交于一点 A 的两根链杆来表示(图 1-9 b、c)

在实际结构中,凡属不能移动而可作微小转动的支承情况,都可视为铰支座。例如插入钢筋混凝土杯形基础中的柱子,当用沥青麻丝填缝时,则柱的下端便可视为铰支座。

(三) 固定支座(图 1-10)

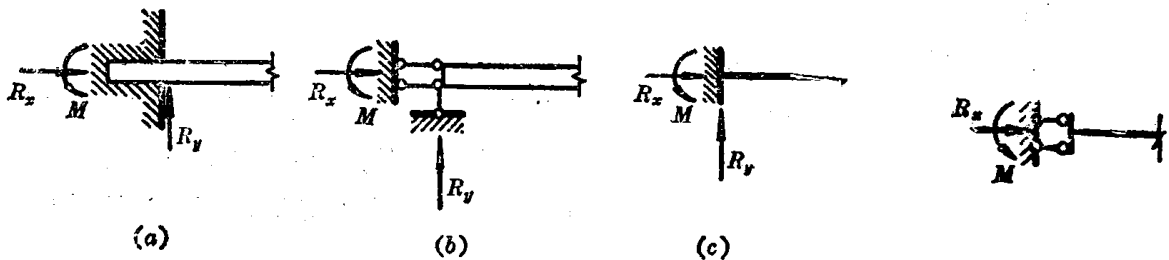


图 1-10

图 1-11

这种支座不允许结构发生任何移动和转动。它的反力的大小、方向和作用点都是未知的。因此,可以用水平和竖向的分反力 R_x 和 R_y 以及反力矩 M 来表示(图 1-10 a)。固定支座也可用三根既不全平行又不全交于一点的链杆表示(图 1-10 b)。显然,这时三根链杆的内力是与这种支座的三个反力等效的,因为若将两根水平链杆的内力均向杆件截面的中心平移后,便可合成为一个沿杆轴作用的水平反力 R_x 和一个反力矩 M 。在计算简图中固定支座则常采用图 1-10 c 所示的图形。

在实际结构中,凡嵌入墙身的杆件,其嵌入部分有足够的长度,以致使杆端不能有任何移动和转动时,该端就可视为固定支座。又如插入杯形基础中的柱子,如果用细石混凝土填缝,则柱的下端一般也看作是固定支座(参见图 3-9)。

此外,在结构分析中,我们有时还会用到图 1-11 所示的支座,它由两根平行的链杆表示,其支座反力为沿杆轴作用的水平力 R_x 和一个反力矩 M 。这种支座称为定向支座。

三、结点的简化

在杆件结构中，几根杆件相互联结的地方叫做结点。根据结构的受力特点和结点的构造情况，在计算中常将其简化为以下两种类型：

(一) 铰结点(图 1-12)

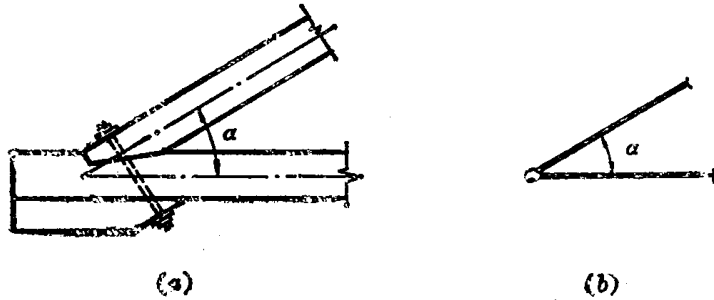


图 1-12

铰结点的特点是它所联结的各杆件都可以绕铰自由转动。例如图 1-12 a 所示木屋架的端结点，它的构造情况大致符合上述约束的要求，故其计算简图如图 1-12 b 所示，其中两杆之间的夹角 α 是可以改变的。

在实际结构中，根据其受力特点，如果一根杆件只有轴力，则此杆两端可用铰与结构的其他部分相联(参见图 1-15)。

(二) 刚结点(图 1-13)

刚结点的特点是它所联结的各杆件变形前后在结点处各杆端切线的夹角保持不变，即各杆端转动的角度应相等。例如图 1-13 a 所示钢筋混凝土结构的某一结点，它的构造是三根杆件之间用钢筋联成整体并用混凝土浇注在一起，这种结点的变形情况基本上符合上述特点，故可视为刚结点，其计算简图如图 1-13 b 所示。

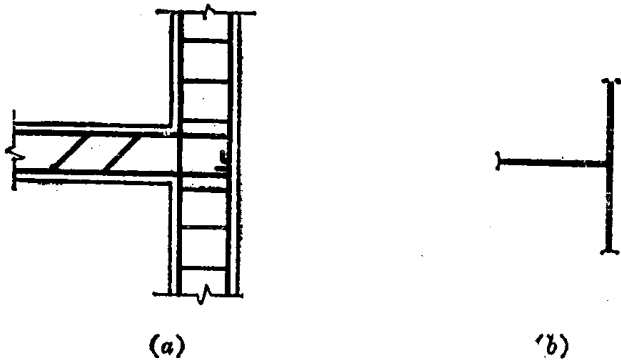


图 1-13

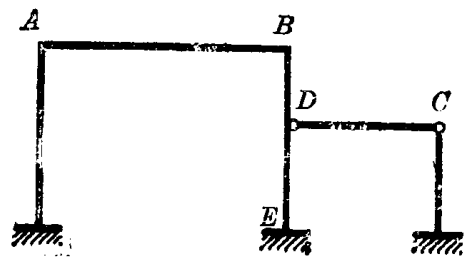


图 1-14

有时还会遇到铰结点和刚结点在一起形成的组合结点。例如，在图 1-14 中，A、B 为刚结点，C 为铰结点，D 则为组合结点。组合结点 D 应视为 BD、ED、CD 三杆在此结点相联，其中 BD 与 ED 二杆是刚性联结，CD 杆与其他两杆则由铰联结。组合结点处的铰又称为不完全铰。

综上所述，我们必须根据结构的支座和结点的实际构造情况，并分析其受力和变形特点，合

理确定各支座和结点的类别。

四、计算简图示例

下面用一个简单例子来说明选取计算简图的方法和原则。

图 1-15a 所示为工业建筑中采用的一种桁架式组合吊车梁,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 16 锰圆钢。吊车梁两端由柱子上的牛腿支承。

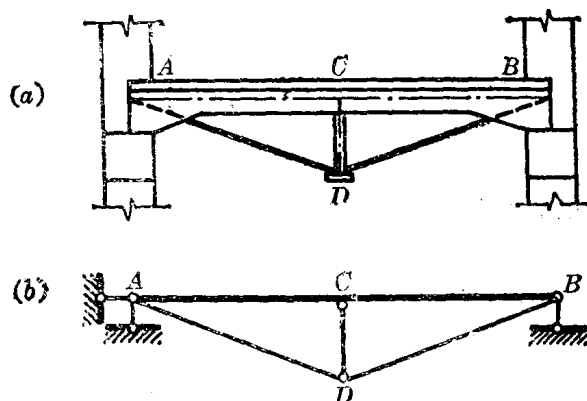


图 1-15

支座简化:由于吊车梁两端的预埋钢板仅通过较短的焊缝与柱子牛腿上的预埋钢板相联,这种构造对吊车梁支承端的转动不能起多大的约束作用,又考虑到梁的受力情况和计算的简便,所以梁的一端可简化为铰支座而另一端则简化为可动铰支座。

结点简化:因 AB 是一根整体的钢筋混凝土梁,截面抗弯刚度较大,故在计算简图中, AB 取为连续杆,而竖杆 CD 和钢拉杆 AD 、 BD 与横梁 AB 相比,截面的抗弯刚度小得多,它们主要是承受轴力,故杆件 CD 、 AD 、 BD 的两端都可看作是铰结,其中铰 C 联在横梁 AB 的下方。

再用各杆件的轴线代替各杆件,则得图 1-15 b 所示的计算简图。图中 A 、 B 、 D 为铰结点, C 为组合结点。这个简图,保证了主要横梁 AB 的受力性能(有弯矩、剪力和轴力);对其余三杆,保留了主要内力为轴力这一特点,而忽略了较小的弯矩和剪力的影响。对于支座,保留了主要的竖向支承作用,忽略了微弱转动的约束作用。实践证明,分析时取这样的计算简图是合理的,它既反映了结构的变形和受力特点,又能使计算比较简单。

由以上简例可知,选取结构的计算简图时,应遵循的原则是:(1)尽可能正确地反映实际结构的主要工作性能,以使计算结果精确可靠。(2)必须抓住主要矛盾,忽略某些次要因素,力求计算简便。

用计算简图代替实际结构进行计算,虽然存在着一定的差异,但这是一种科学的抽象。在力学计算中,突出结构最本质的属性,忽略一些次要因素,这样就能更深入地了解问题的实质,认识事物的内在规律性。适当地选取实际结构的计算简图,是一个比较复杂的问题,不仅要掌握选取的原则,而且需要有较多的实践经验。对一些新型结构,往往还要通过反复试验和实践才能获得比较合理的计算简图。不过,对于常用的结构,前人已积累了许多经验,我们可以直接采用那些

已为实践所验证的常用的计算简图。在计算简图选定之后,在作结构设计时,还应采取相应的构造措施,以使实际结构的内力分布和变形特点与计算简图的情况相符。

在实际工作中,有时对于同一结构,根据不同情况,可以分别采用不同的计算简图。例如,在初步设计杆件截面时,常先采用一个较简单又较粗略的计算简图,而在最后计算时,再采用一个较复杂但较精确的计算简图。较为精确的计算简图,可通过放弃某些简化假定,或代以较为符合实际情况的假定而获得,可是计算工作就要复杂得多。由于在工程设计中使用了电子计算机,所以许多较为复杂但又比较精确的计算简图已被采用。

§1-3 平面杆件结构的分类

平面杆件结构是本书的研究对象,它有如下几种类型:

一、梁 梁是一种受弯杆件,可以是单跨的(图 1-16 a, c),也可以是多跨的(图 1-16 b, d)。

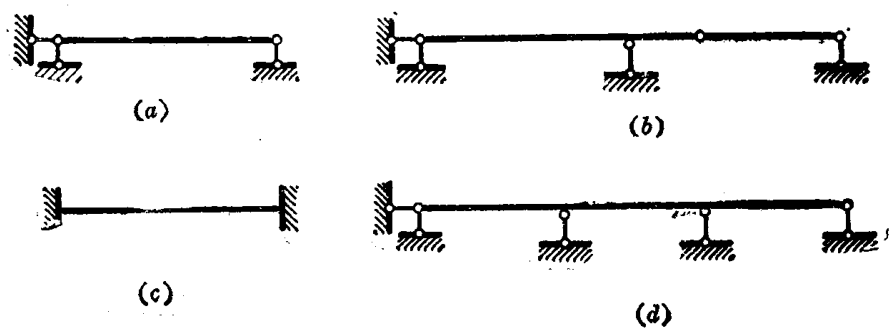


图 1-16

二、拱 拱是曲线形的且在竖向荷载作用下将产生水平反力的杆件结构(图 1-17)。这种水平反力将使拱内弯矩远小于跨度、荷载及支承情况相同的梁的弯矩。

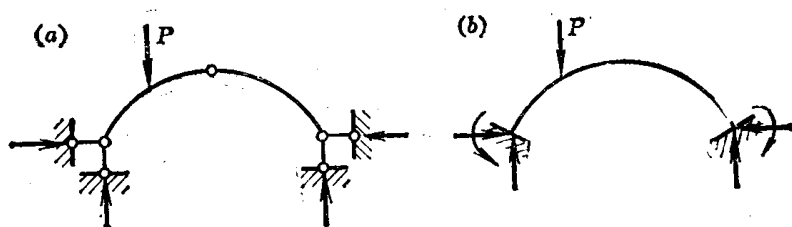


图 1-17

三、刚架 刚架是由梁和柱组成的结构(图 1-18),各杆件主要受弯。刚架的结点主要是刚结点,也可以有部分铰结点或组合结点。

四、桁架 桁架是由若干杆件在每杆两端用理想铰联结而成的结构(图 1-19)。其各杆的轴线一般都是直线,当只受到作用于结点的荷载时,各杆只产生轴力。

五、组合结构 在这种结构中(图 1-20),有些杆件只承受轴力,而另一些杆件还同时承受弯矩和剪力。

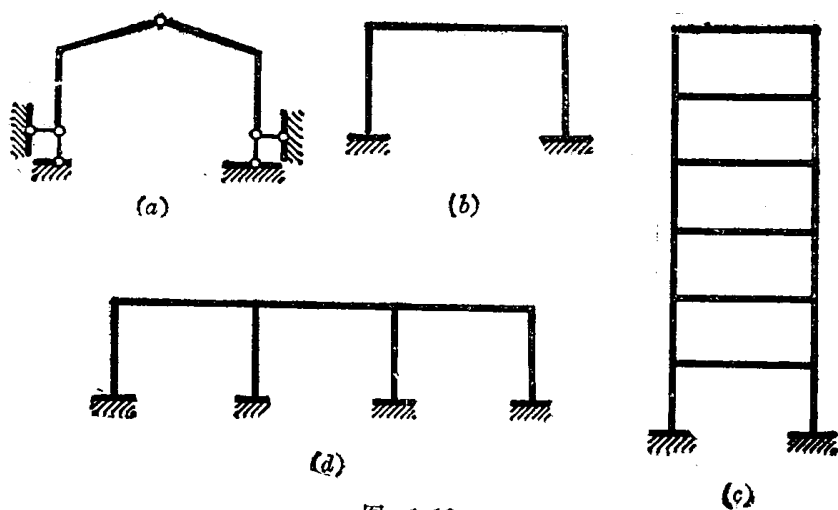


图 1-18

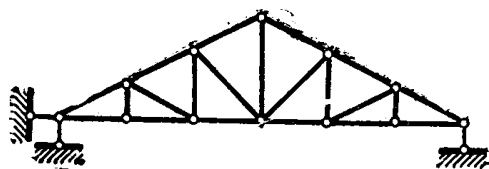


图 1-19

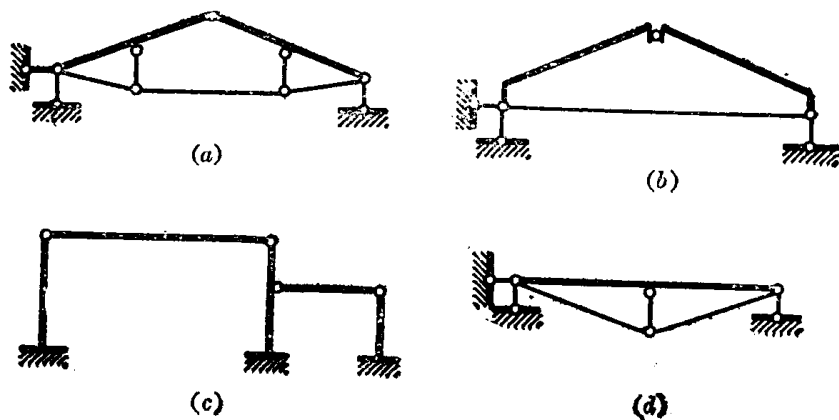


图 1-20

§1-4 荷载的分类

作用于结构上的荷载，按其作用时间的久暂可以分为恒载和活载两类。恒载是指永久作用在结构上的荷载，如自重、结构上的固定设备的重量等。活载是指暂时作用在结构上且位置可以变动的荷载，如结构上的临时设备、风力、雪重、人群、水压力、移动的吊车等。

根据荷载作用的性质，又可分为静力荷载和动力荷载。静力荷载是指逐渐增加的、不致使结构产生显著的冲击或振动，因而可略去惯性力影响的荷载，恒载和上述大多数活载都属静力荷载。动力荷载是指作用在结构上面对结构产生显著的冲击或引起其振动的荷载，在这类荷载作用

下, 结构将会发生不容忽视的加速度。例如动力机械的振动、爆炸冲击、地震等所引起的荷载就是动力荷载。

本书只讨论结构在静力荷载作用下的计算问题。

应该指出, 结构除承受荷载外, 还可能受到其他外在因素的作用, 如温度改变、支座位移、材料收缩等, 这些因素对结构受力和变形的影响将在后面有所讨论。

第二章 体系的几何组成分析

§ 2-1 几何组成分析的目的

杆件结构是由若干杆件互相联结所组成的体系,并与地基联结成一整体,用来承受荷载的作用。当不考虑各杆件本身的变形时,它应能保持其原有几何形状和位置不变,即当不考虑材料的应变时,杆件结构的各个杆件之间以及整个结构与地面之间,应不致发生相对运动。

体系受到任意荷载作用后,在不考虑材料应变的条件下,若能保持其几何形状和位置不变者,称为几何不变体系,图 2-1a 所示即为这类体系的一个例子。可是另有一类体系,如图 2-1b 所示的例子,尽管只受到很小的荷载 P 作用,也将引起几何形状的改变,这类体系称为几何可变体系。显然,土木工程结构不能采用几何可变体系。

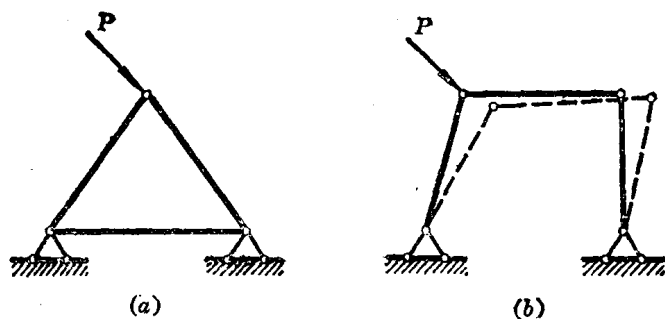


图 2-1

体系的上述区别是由于它们的几何组成不同。分析体系的几何组成,以确定它们属于哪一类体系,称为体系的几何组成分析。作这种分析的目的在于:判别某一体系是否几何不变,从而决定它能否作为结构;研究几何不变体系的组成规则,以保证所设计的结构能承受荷载且维持平衡;同时也为正确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。

在本章中,只讨论平面杆件体系的几何组成分析。

§ 2-2 平面体系的自由度概念

为了便于对体系进行几何组成分析,先讨论平面体系自由度的概念。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。在平面内的某一动点 A ,其位置要由两个坐标 x 和 y 来确定(图 2-2a),所以一个点的自由度等于 2,即点在平面内可以作两种相互独立的运动,通常用平行于坐标轴的两种移动来描述。

在平面体系中,由于不考虑材料的应变,所以可认为各个构件没有变形。于是,可以把一根