

结
构
力
学

刘蓉华◎编著

JIEGOU

LIXUE



西南交通大学出版社

结

构

力

学

刘蓉华◎编著

JIEGOU

LIXUE

西南交通大学出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

结构力学 / 刘蓉华编著. —成都: 西南交通大学出版社, 2014.9

ISBN 978-7-5643-3419-2

I. ①结… II. ①刘… III. ①结构力学 IV.
①O342

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 205341 号

结构力学

刘蓉华 编著

责任编辑	曾荣兵
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	21
字 数	495 千字
版 次	2014 年 9 月第 1 版
印 次	2014 年 9 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-3419-2
定 价	39.50 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

本书是按照教育部力学课程教学指导委员会撰写的《结构力学课程教学基本要求》，围绕应用型人才培养，根据土建类结构力学的教学计划和教学大纲编写的。

全书共九章，第一~六章主要内容包括了静定结构内力计算与位移计算、超静定结构计算的力法与位移法，这些内容是结构力学课程的重要基础，也是学习者必须修读的结构力学经典部分。本书的第七、八、九章是在其经典内容的基础上，进一步介绍杆件结构分析的一些专题分析方法，包括杆系结构的计算机分析、结构动力分析和在移动荷载作用下的结构分析，这些专题内容将为学习相关专业课程以及进行结构设计和科学研究打下良好的基础。

本书的编写致力于读者结构力学的基本概念的培养及应用能力的提高，全书内容简明，讲解语言平实，叙述深入浅出，尽可能注意由具体到抽象，由简单到复杂，注重综合归纳、思考提高。在全书各章的开篇均根据《结构力学课程教学基本要求》，对学习目的和主要知识点的掌握程度，给出了“了解”、“熟悉与理解”、“掌握与应用”由低到高的层次要求。全书的编写符合课程的认知和发展规律，也适应于当前教学改革的要求。

本书是西南交通大学结构力学教研室教师在长期从事结构力学教学、科研以及工程实践的基础上写成的，罗永坤、黄慧萱、蔡婧、江南、马珩、齐欣、李翠娟老师为本书的策划、编写、修订等给予了大量的帮助与支持，在此一并表示衷心的感谢！

限于编者的水平，书中难免存在疏漏和不足之处，诚恳期望同行和读者批评指正。

编 者

2014 年 8 月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 结构力学的研究对象和基本任务	2
第二节 结构的计算简图	2
第三节 杆件结构的分类	6
第二章 平面体系的几何组成分析	8
第一节 结构的几何不变性	9
第二节 运动自由度的概念	9
第三节 几何不变体系的简单组成规则	11
第四节 几何组成分析示例	15
第五节 体系的几何构造与静定性	17
习 题	18
习题参考答案	20
第三章 静定结构的受力分析	21
第一节 静定梁	22
第二节 多跨静定梁	29
第三节 静定平面刚架	32
第四节 三铰拱	42
第五节 静定平面桁架	47
第六节 组合结构	54
第七节 静定结构的一般性质	57
习 题	58
习题参考答案	62
第四章 静定结构位移计算	65
第一节 概 述	66
第二节 虚功原理及其在位移计算中的应用	67
第三节 荷载作用下结构的位移计算	70
第四节 图乘法	77

第五节 静定结构在非荷载因素作用下的位移计算	84
第六节 弹性体系的互等定理	89
习 题	91
习题参考答案	94
第五章 力 法	96
第一节 超静定结构的概念和超静定次数	97
第二节 力法的基本原理	99
第三节 荷载作用下各类超静定结构的计算	105
第四节 对称性的利用	111
第五节 广义荷载作用下的力法计算	118
第六节 超静定结构在荷载作用下的位移计算	123
第七节 超静定结构最后内力图的校核	125
第八节 超静定结构的特性	128
习 题	129
习题参考答案	133
第六章 位移法	135
第一节 位移法的基本思路	136
第二节 单跨超静定梁的杆端力	137
第三节 位移法的基本未知量和基本结构	140
第四节 位移法原理与位移法方程	142
第五节 位移法计算步骤及示例	145
第六节 对称性的利用	154
第七节 力矩分配法	156
习 题	166
习题参考答案	171
第七章 矩阵位移法	173
第一节 概 述	174
第二节 结构离散化	174
第三节 局部坐标系下单元刚度方程和单元刚度矩阵	180
第四节 单元刚度矩阵的坐标转换	188
第五节 结构的整体分析	193
第六节 单元杆端力的计算	207
第七节 计算步骤和算例	211
第八节 矩阵位移法计算程序主框图简介	219
习 题	220

习题参考答案	225
第八章 结构动力学	228
第一节 概 述	229
第二节 结构动力计算简图和动力自由度	231
第三节 单自由度体系的自由振动	233
第四节 单自由度体系在简谐荷载作用下的强迫振动	245
第五节 单自由度体系在一般动荷载作用下的强迫振动	254
第六节 多自由度体系的自由振动	256
第七节 多自由度体系在简谐荷载作用下强迫振动	269
第八节 振型分解法	274
习 题	278
习题参考答案	282
第九章 影响线及其应用	285
第一节 移动荷载与影响线的概念	286
第二节 静力法作单跨静定梁影响线	286
第三节 静力法作多跨静定梁的影响线	295
第四节 间接荷载作用下的影响线	297
第五节 机动法作静定梁影响线的概念	299
第六节 桁架内力影响线	304
第七节 影响线的应用	311
第八节 简支梁的绝对最大弯矩和内力包络图的概念	319
习 题	322
习题参考答案	326

第一章 绪 论

【学习目的和基本要求】

结构力学是土木工程专业的一门重要的专业（技术）基础课。一方面，它以高等数学、理论力学、材料力学等课程为基础；另一方面，它又是钢结构、钢筋混凝土结构、土力学与地基基础、结构抗震等土木工程类专业课的基础。该课程在基础课与专业课之间起着承上启下的作用，是土木工程专业的一门重要主干课程。

对本章学习的基本要求如下：

了解：（1）结构力学的基本研究对象和学科内容，与其他课程的关系；

（2）杆件结构分类；

（3）选取结构计算的原则，初步了解杆件结构怎样简化为计算简图。

掌握：（1）杆件结构常见的四种支座及其计算简图；

（2）四种支座所能产生的反力及反力的计算；

（3）杆件结构常见的三类结点及其计算简图；

（4）三类结点的变形和受力特点；

（5）结构计算简图的概念和确定计算简图的原则。

第一节 结构力学的研究对象和基本任务

建筑物和工程设施中承受、传递荷载而起骨架作用的部分称为工程结构，简称结构。最简单的结构是一根梁或一根柱；一般结构则是由若干杆件或其他非杆元件（如板、壳等）联结而成。例如：工程中的房屋、塔架、桥梁、隧道、挡土墙、水坝等都属于结构。

结构的类型是多种多样的。通常，按组成元件的几何特征，结构可分为杆件结构、板壳结构和实体结构三类。

杆件结构是由若干个杆件相互连接而组成的结构。杆件的几何特征是其横截面的高度和宽度远小于杆件的长度。梁、刚架、拱、桁架等都是杆件结构的典型形式。

板壳结构也称为薄壁结构，其几何特征是厚度远小于长度和宽度两个方向的尺寸。房屋建筑中的楼板和壳体屋盖等都是属于板壳结构。

实体结构也称为三维连续体结构，其几何特征是结构的长、宽、厚三个尺度大小相仿。例如：建筑物或设备的基础、水工结构中的重力坝等均属于实体结构。

结构力学是以杆件结构为主要研究对象，其主要任务包括以下三方面内容：

（1）研究结构的组成规律和合理形式等问题。

（2）研究结构在荷载以及外界因素作用下的内力和位移的计算。在此基础上，即可利用后续相关专业课程知识进行结构设计和验算。

（3）研究结构的稳定性计算以及在动力荷载作用下的动力反应。

结构力学是一门专业（技术）基础课，它一方面要用到数学、理论力学和材料力学等课程的知识，另一方面又为建筑结构、桥梁、隧道等专业课程提供必要的基本理论和计算方法。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。

第二节 结构的计算简图

实际结构往往是很复杂的，如果完全按照实际结构的工作状态进行分析，事实上会遇到一定的困难，同时也是不必要的，因而在对实际结构进行力学分析之前，需要作出某些简化和假设。在计算时，常将实际结构中的一些次要因素忽略不计，但是又要能反映出实际结构的主要受力特征。这种经过简化的结构图形称为结构的计算简图。

结构计算简图简化的原则如下：

（1）保留主要因素，略去次要因素，使计算简图能反映出实际结构的主要受力特征及主要性能。

(2) 分清主次, 略去细节。根据需要与可能, 从实际出发, 力求计算简洁明了, 便于计算。

对于一个结构, 尤其是复杂结构的计算简图的确定, 需要具有丰富的实践经验和对实际结构物的全面了解。这方面本书不作详细讨论, 以下仅介绍平面杆件结构中常用的杆件、支座和结点的简化形式。

一、杆件的简化

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。变截面杆件常可近似地用直线或曲线来代替。

二、支座的简化和分类

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。在工程结构中, 从支座对结构的约束作用(解除约束后, 约束作用以约束反力表示)来看, 常用的计算简图可分为如下四种类型:

1. 活动铰支座

这种支座的构造简图可用图 1.1(a) 所示方式表示。它对结构的约束作用是只能阻止结构沿垂直于支承平面方向移动, 这时, 结构既可绕铰 A 作转动, 又可沿着与支承平面 $m-n$ 平行的方向微量移动。因此, 当不考虑支承平面上的摩擦力时, 活动铰支座的反力将通过铰 A 的中心并与支承平面垂直, 其作用点和方向是确定的, 只是大小未知, 可用 F_{RA} 表示。根据上述特点, 这种支座在计算简图中常用图 1.1(b) 所示的一根竖向支座链杆来代表。

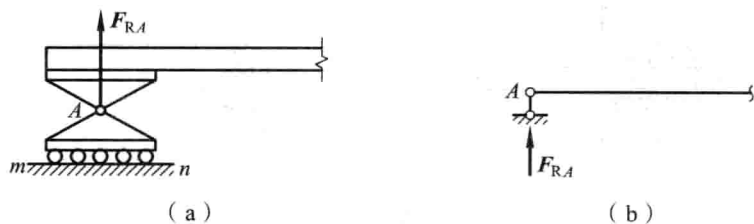


图 1.1

2. 固定铰支座

这种支座的构造简图可用图 1.2(a) 所示方式表示。它对结构的约束作用是不允许结构发生任何移动, 而只能绕铰 A 转动。因此, 固定铰支座的反力将通过铰 A 的中心, 但其方向和大小都是未知的, 可以用两个沿确定方向的未知反力 F_{Ax} 和 F_{Ay} 来表示。这种支座在计算简图中常用图 1.2(b)、(c) 所示交于点 A 的两根链杆来表示。

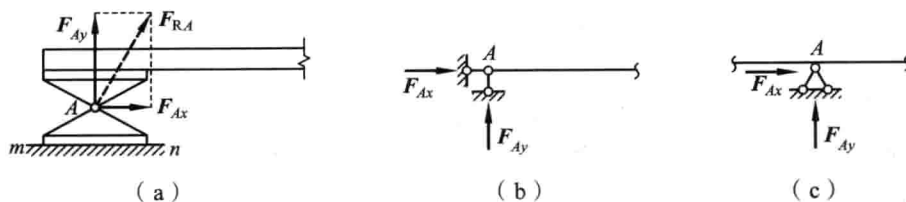


图 1.2

3. 固定支座

这种支座不允许结构在 A 处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，可以用图 1.3 (a) 所示的水平 and 竖向的反力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 及反力偶 M_A 表示。固定支座也可用图 1.3 (b) 所示三根既不全平行又不全交于一点的链杆表示。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。在计算简图中，这种支座常采用图 1.3 (c) 所示的图形。

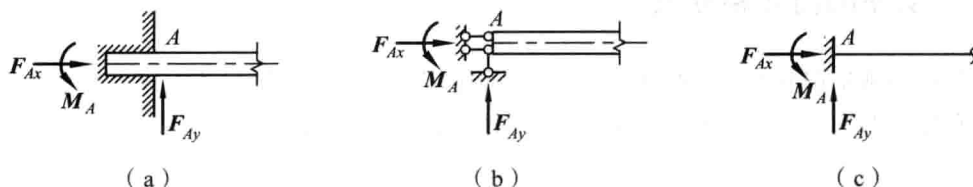


图 1.3

4. 滑动支座

图 1.4 (a) 所示为滑动支座（亦称定向铰支座）的示意图。这类支座能限制结构的转动，阻止结构沿垂直于支承平面方向移动，但允许结构沿支承平面方向滑动。例如：图 1.4 (a) 所示的结构在支座处的转动和竖向移动将受到限制，但可沿水平方向有微小滑动，可用图 1.4 (b) 所示的两根竖向平行支杆来表示这类滑动支座的机动特征和受力特征。相应的支座反力有两个：限制垂直方向移动的反力 F_{Ay} 和限制转动的反力矩 M_A 。



图 1.4

三、结点的简化

在杆件结构中，几根杆件相互联结处称为结点。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：

1. 铰结点

铰结点的特征是所联结各杆可以绕铰作自由转动，因此可用一理想光滑的铰来表示。但

这种理想情况在实际工程中很难实现。例如：图 1.5 (a) 所示为木屋架的下弦中间结点构造图，此结点处各杆并不能完全自由地转动，但是由于杆件间的联结对于相对转动的约束不强，受力时杆件可发生微小的相对转动。因此，其计算简图可近似地处理为如图 1.5 (b) 所示的铰结点。

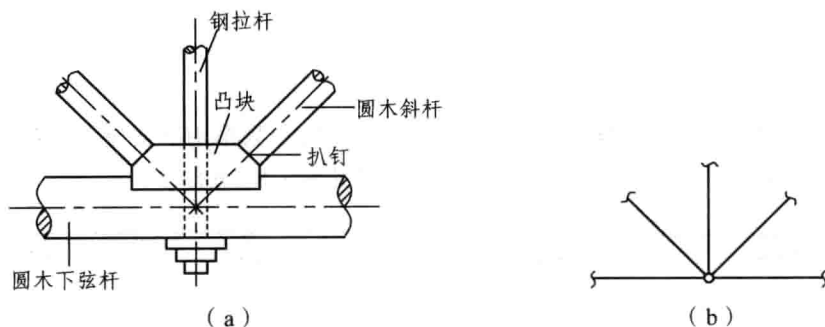


图 1.5

2. 刚结点

刚结点的特征是所联结的杆件之间不能在结点处产生相对转动，即刚结点处各杆件之间的夹角在变形前后保持不变。图 1.6 (a) 所示为混凝土多层刚架边柱与横梁的结点构造图。由于边柱与横梁间为整体浇筑，同时横梁的受力钢筋伸入柱内并满足锚固长度的要求，因而就保证了横梁与边柱能相互牢固地联结在一起，构成了刚结点，其计算简图如图 1.6 (b) 所示。

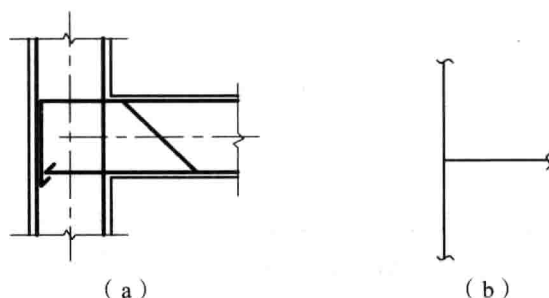


图 1.6

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 1.7 (a) 中 A 、 B 为刚结点， C 为铰结点， D 则为组合结点。组合结点 D [见图 1.7 (b)] 应视为 BD 、 ED 、 CD 三杆在此结点相联，其中， BD 与 ED 两杆是刚性联结， 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。

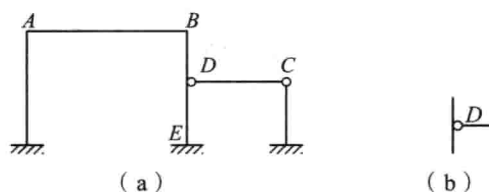


图 1.7

第三节 杆件结构的分类

结构的分类实际上是计算简图的分类。根据平面结构的组成特征和受力特点,可分为以下几种类型:

1. 梁

梁是一种受弯构件,它的轴线一般为直线,在竖向荷载作用下支座不产生水平反力。梁可以是单跨,如图 1.8 (a) 所示;也可以是多跨,见图 1.8 (b)。

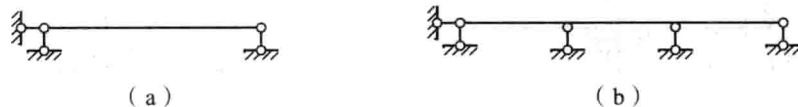


图 1.8

2. 拱

拱是一种杆轴为曲线且在竖向力作用下,会产生水平反力的结构,见图 1.9。



图 1.9

3. 刚架

刚架通常由直杆组成,其组成特点是杆件联结处的结点为刚结点,见图 1.10,各杆件主要受弯。刚架有时也称为框架。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。

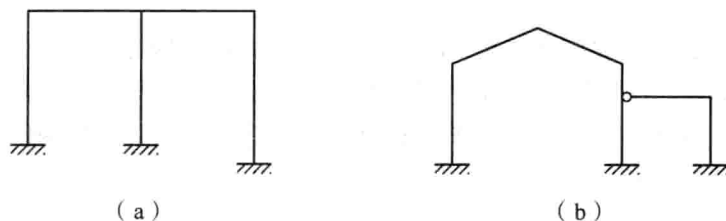


图 1.10

4. 桁架

桁架由直杆组成,其组成特点是各杆相联结处的结点均为铰结点,见图 1.11。当桁架承受结点荷载时,各杆内只产生轴力。

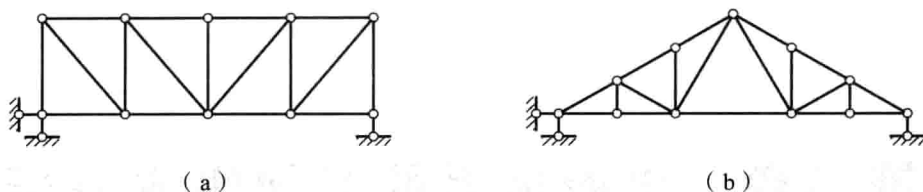


图 1.11

5. 组合结构

组合结构是由桁架杆件和梁[见图 1.12 (a)]或桁架杆件和刚架[见图 1.12 (b)]等组合而成的结构，其受力特点为除桁架杆件只承受轴力作用外，其余受弯杆件还同时承受轴力、剪力和弯矩作用。

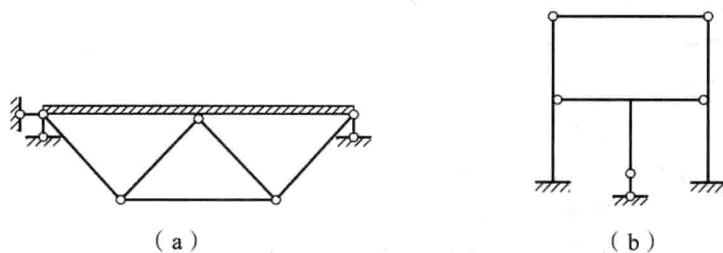


图 1.12

按照杆轴线和外力的空间位置，结构可分为平面结构和空间结构。如果结构的各杆轴线及外力（包括荷载和反力）均在同一平面内，则称为平面结构；否则，便是空间结构。严格说来，工程实际中的结构都是空间结构，只是在一般情况下可以简化为平面结构或近似地分解为几个平面结构来计算；但有些则必须按空间结构来计算。

第二章 平面体系的几何组成分析

【学习目的和基本要求】

体系的几何组成分析是判定该体系能否作为建筑结构使用的依据。熟练掌握体系几何组成分析基本方法,能快速判断静定结构的组成顺序,为静定结构内力计算奠定基础。对于超静定结构,能迅速确定多余约束的个数;通过减除多余约束使超静定结构变成静定结构,为超静定结构内力计算奠定基础。

对本章学习的基本要求如下:

了解: (1) 几何不变体系、几何可变体系的概念;

(2) 自由度、刚片、约束的概念。

熟悉与理解: (1) 无多余联系几何不变体系组成的三角形规则;

(2) 三刚片不共线的三铰(实或虚)相连;

(3) 两刚片不全相交也不全平行的三杆相连,或不共线的一杆一铰相连;

(4) 加减二元体不改变几何构造性;

(5) 不满足三角形规则时的体系可变性。

掌握与应用: (1) 必要约束和多余约束的概念;

(2) 应用三角形规则进行体系的几何组成分析;

(3) 静定杆系结构的组成顺序;

(4) 通过减除约束使超静定结构改造成静定结构;

(5) 体系的几何组成与静力特性之间的关系。

第一节 结构的几何不变性

在土木或水利工程中,结构是用来支承或传递荷载的,因此它的几何形状和位置必须是稳固的。具有稳固几何形状和位置的体系称为**几何不变体系**;反之,如体系的几何形状或位置可以或可能发生改变,则称为**几何可变体系**。只有几何不变体系才能用于工程结构。

在本章中,体系几何形状的改变与结构变形是两个性质不同的概念。前者是指体系的材料在不发生应变的情况下,其几何构形发生改变;后者则是指当结构受外因(如荷载)作用,杆件截面上产生应力,同时材料发生应变,从而引起结构变形。结构的变形通常是微小的。在体系的几何组成分析中,不涉及材料应变和结构变形问题。

杆件体系按几何组成方式分类,可分为几何可变体系和几何不变体系两类。图 2.1 (a) 所示铰接四边形 $ABCD$ 是一个四链杆机构,其几何形状和位置(简称位形)是不稳固的,随时处在可变状态,甚至倾倒,这样的体系称为几何可变体系。图 2.1 (b) 所示体系与图 2.1 (a) 相比,多了一根斜撑杆件 CB ,成为由两个铰接三角形(ABC 与 BCD)构成的体系。显然,它在任意荷载作用下,在不考虑材料发生应变的条件下,其几何形状和位置能稳固地保持不变,这样的体系称为几何不变体系。如果在图 2.1 (b) 所示体系上再增加斜杆 AD ,便形成图 2.1 (c) 所示具有一个多余杆件的几何不变体系。显然,多余是相对于形成几何不变体系的最少约束数而言的。

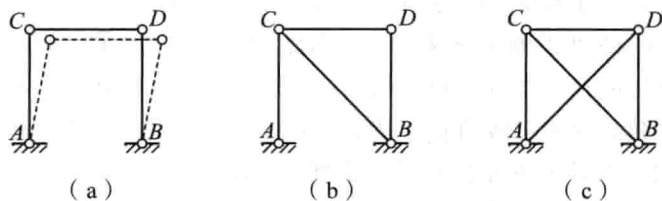


图 2.1

几何组成分析的目的在于: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而维持平衡;同时也为正确区分静定结构和超静定结构,以及对结构进行内力计算打下必要的基础。工程结构要求必须是几何不变体系,所以体系几何组成分析的主要目的就是保证结构几何图形的不变性,同时也有助于确定内力分析的顺序和选择恰当的计算方法。

第二节 运动自由度的概念

为了便于对体系进行几何组成分析,先讨论体系运动自由度的概念。所谓运动自由度(以下简称为自由度),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参数 x 和 y 来确定[见图 2.2 (a)]，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。

对平面体系作几何组成分析时，由于不考虑材料的应变，所以认为各个构件没有变形。于是，可以把一根梁、一根链杆或体系中已经肯定为几何不变的某个部分看作一个平面刚体，简称为刚片。一个刚片在平面内运动时，其位置将由它上面的任一点 A 的坐标 (x, y) 和过 A 点的任一直线 AB 的倾角 φ 来确定，见图 2.2 (b)。因此，一个刚片在平面内的自由度等于 3，即刚片在平面内不但可以自由移动，而且还可以自由转动。

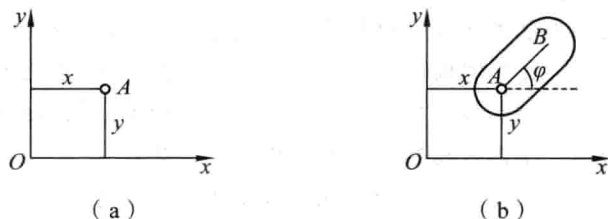


图 2.2

对刚片加上约束装置，它的自由度将会减少，凡能减少一个自由度的装置称为一个约束。例如：用一根链杆将刚片与基础相联，见图 2.3 (a)，则刚片将不能沿链杆方向移动，因而减少了一个自由度，故一根链杆为一个约束。如果在刚片与基础之间再加一根链杆，见图 2.3 (b)，则刚片又减少了一个自由度。此时，它就只能绕 A 点作转动而丧失了自由移动的可能，即减少了两个自由度。

用一个铰把两个刚片 I 和 II 在 A 点联结起来，见图 2.3 (c)，对刚片 I 而言，其位置可由 A 点的坐标 (x, y) 和 AB 线的倾角 φ_1 来确定。因此，它仍有 3 个自由度。在刚片 I 的位置被确定后，因为刚片 II 与刚片 I 在 A 点以铰联结，所以刚片 II 只能绕 A 点作相对转动。也就是说，刚片 II 只保留了独立的相对转角 φ_2 。因此，由刚片 I、II 所组成的体系在平面内的自由度为 4 个。而两个独立的刚片在平面内的自由度总数应为 $2 \times 3 = 6$ 个。因此，用一个铰将两个刚片联结起来后，就使自由度的总数减少了 2 个。这种联结两个刚片的铰称为单铰。由上述可见，一个单铰相当于两个约束，即相当于两根链杆的约束作用，见图 2.3 (b)。

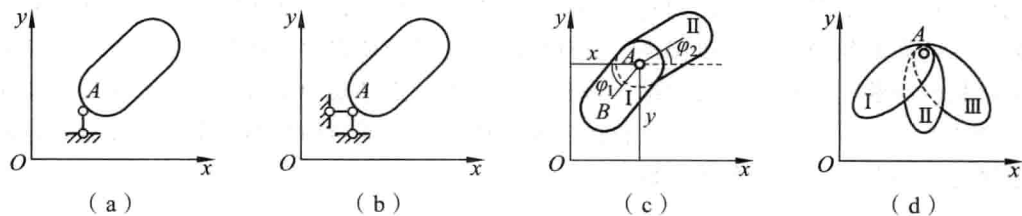


图 2.3

有时一个铰同时联结两个以上的刚片，这种铰称为复铰。图 2.3 (d) 所示为三个刚片共用一个铰 A 相联，若刚片 I 的位置已确定，则刚片 II、III 都只能绕 A 点转动，从而各减少了 2 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，平面体系中联结 n 个刚片的复铰相当于 $(n-1)$ 个单铰的作用。