

结构力学

主 编 胡晓光 段文峰

副主编 田 伟 李 妍 宋 平 蔡 斌

JIEGOU LIXUE



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

结 构 力 学

主 编 胡晓光 段文峰

副主编 田 伟 李 妍 宋 平 蔡 斌



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

本书根据高等院校土木工程专业结构力学课程的基本要求编写,注重基本理论、基本方法的讲授。本书可供教学学时为 60~120 课时的结构力学课程选用。

本书共 12 章,内容包括绪论、平面体系的几何组成分析、静定结构的内力分析、静定结构的位移计算、力法、影响线及其应用、位移法、渐近法、矩阵位移法、结构动力学、结构的极限荷载和结构稳定性计算。本书各章附有习题及参考答案。

本书可作为土木工程类各专业及工程力学专业的教材,也可作为有关工程技术人员工作及自学的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学/胡晓光,段文峰主编. --北京:北京邮电大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-5635-2698-7

I. ①结… II. ①胡…②段… III. ①结构力学 IV. ①0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 152292 号

书 名: 结构力学

著作责任者: 胡晓光 段文峰 主编

责任编辑: 刘春棠

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发行部: 电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京联兴华印刷厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 19.5

字 数: 496 千字

印 数: 1—4 000 册

版 次: 2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2698-7

定 价: 40.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

本书是为普通高等院校土木工程类各专业及工程力学等专业的中、多学时结构力学课程的教学而编写的。

根据对 21 世纪人才进行素质教育和创新意识培养的要求,适当降低了对结构力学深度和难度的要求,更加注重于基本理论、基本方法和基本计算的训练,注重于培养学生的创新能力。本书内容的选取借鉴了国内的优秀教材,其特点是注重基础训练,淡化纯理论推导,注重公式物理意义的讲解和基本方法的学习和掌握。

本书共 12 章,采用了最新的国家标准规定的符号。

本书由胡晓光、段文峰担任主编,由田伟、李妍、宋平(浙江建设职业技术学院)、蔡斌担任副主编。胡晓光负责全书统稿。其中第 1 章、第 5 章、第 7 章和第 10 章由胡晓光、田伟编写,第 2 章、第 6 章和第 8 章由段文峰编写,第 3 章由宋平(浙江建设职业技术学院)编写,第 4 章和第 9 章由蔡斌编写,第 11 章和第 12 章由李妍编写。吉林建筑工程学院苏铁坚教授审阅了全书。

在本书的编写过程中,得到了吉林建筑工程学院领导及该院力学教研室全体老师的大力支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,不妥之处在所难免,希望读者指正,以利于对本书的进一步完善和提高。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 结构的分类	1
1.2 荷载的分类	2
1.3 结构的计算简图	3
1.4 结构力学的研究对象和任务	5
第 2 章 平面体系的几何组成分析	6
2.1 平面体系几何组成分析的相关概念	7
2.1.1 几何不变体系和几何可变体系	7
2.1.2 刚片、自由度和联系的概念	7
2.2 几何不变体系的基本组成规则	9
2.2.1 三刚片规则	9
2.2.2 二元体规则	9
2.2.3 两刚片规则	10
2.3 瞬变体系	12
2.4 几何构造与静定性的关系	13
习题	13
第 3 章 静定结构的内力分析	16
3.1 静力平衡	16
3.1.1 利用静力平衡求解支座反力	16
3.1.2 利用静力平衡求解杆件内力	19
3.2 静定梁	21
3.2.1 内力图	21
3.2.2 利用微分关系作内力图	21
3.2.3 叠加法作弯矩图	23
3.2.4 斜梁	27
3.2.5 多跨静定梁	29
3.3 静定平面刚架	31

3.3.1 刚架概述·····	31
3.3.2 刚架内力分析·····	32
3.3.3 少求或不求反力绘制弯矩图·····	37
3.4 三铰拱·····	39
3.4.1 拱结构概述·····	39
3.4.2 三铰拱的反力和内力计算·····	39
3.4.3 三铰拱的合理拱轴线·····	44
3.5 静定平面桁架及组合结构·····	46
3.5.1 桁架的概念·····	46
3.5.2 桁架的内力计算·····	48
3.5.3 静定组合结构·····	55
3.5.4 静定结构的特性·····	57
习题·····	57
第4章 静定结构的位移计算 ·····	64
4.1 结构位移的基本概念·····	64
4.2 变形体系的虚功原理、结构位移计算的一般公式和单位荷载法·····	65
4.2.1 变形体系的虚功原理·····	65
4.2.2 结构位移计算的一般公式和单位荷载法·····	65
4.3 荷载作用下的位移计算·····	67
4.4 图乘法·····	69
4.5 静定结构在支座移动、温度变化时的位移计算·····	72
4.5.1 静定结构在支座移动时的位移计算·····	72
4.5.2 静定结构在温度变化时的位移计算·····	73
4.6 线弹性结构的互等定理·····	75
习题·····	77
第5章 力法 ·····	80
5.1 超静定结构的概念和超静定次数的确定·····	80
5.2 力法原理和力法方程·····	82
5.3 用力法计算超静定结构·····	87
5.4 对称性的利用·····	99
5.5 温度变化和支座移动时超静定结构的计算·····	103
5.6 超静定结构的位移计算和最后内力图的校核·····	107
5.7 超静定结构的特性·····	111
习题·····	112
第6章 影响线及其应用 ·····	115
6.1 影响线的概念·····	115
6.2 用静力法作单跨静定梁的影响线·····	116

6.3	间接荷载作用下的影响线	118
6.4	机动法作静定结构的影响线	120
6.5	多跨静定梁的影响线	122
6.6	静定桁架的影响线	123
6.7	利用影响线求量值	125
6.8	最不利荷载位置的确定	126
6.9	简支梁的绝对最大弯矩	131
6.10	简支梁的包络图	133
6.11	超静定结构的影响线	134
6.12	连续梁均布荷载的最不利布置及包络图	137
	习题	139
第 7 章	位移法	143
7.1	基本概念	143
7.2	等截面直杆的转角位移方程	144
7.3	基本未知量数目的确定和基本结构	147
7.4	位移法典型方程及计算步骤	149
7.5	直接由平衡条件建立位移法基本方程	158
7.6	对称性的利用	160
	习题	163
第 8 章	渐近法	165
8.1	概述	165
8.2	力矩分配法的基本原理	165
8.2.1	劲度系数和传递系数的概念	165
8.2.2	力矩分配法的基本原理	166
8.3	用力矩分配法计算连续梁和无侧移刚架	169
8.4	无剪力分配法	176
8.4.1	无剪力分配法的计算方法	176
8.4.2	无剪力分配法应用推广	180
8.5	剪力分配法	181
	习题	184
第 9 章	矩阵位移法	188
9.1	概述	188
9.2	单元分析	188
9.2.1	结构离散化	188
9.2.2	在单元局部坐标中的单元刚度矩阵	189
9.3	在整体坐标中的单元刚度矩阵	193
9.4	整体分析	196

9.4.1 直接刚度法的原理	197
9.4.2 结构原始刚度矩阵的性质	199
9.4.3 举例	200
9.5 边界条件的处理	202
9.6 非结点荷载的处理	204
9.7 结构矩阵分析举例	207
习题	215
第 10 章 结构动力学	217
10.1 概述	217
10.1.1 结构动力计算的特点和目的	217
10.1.2 动荷载的种类	217
10.2 结构振动的自由度	218
10.3 单自由度体系的自由振动	219
10.3.1 单自由度体系自由振动的运动方程	219
10.3.2 单自由度体系的自由振动分析	221
10.4 单自由度体系在简谐荷载作用下的强迫振动	223
10.4.1 体系的运动方程	223
10.4.2 纯强迫振动分析	224
10.4.3 算例	225
10.5 阻尼对单自由度体系振动的影响	229
10.5.1 阻尼对单自由度体系自由振动的影响	229
10.5.2 阻尼对简谐荷载作用下强迫振动的影响	231
10.6 单自由度体系在任意荷载作用下的强迫振动	234
10.7 多自由度结构的自由振动	236
10.7.1 体系运动方程的建立	236
10.7.2 频率和主振型	238
10.8 多自由度体系在简谐荷载作用下的强迫振动	244
10.9 振型分解法	249
习题	252
第 11 章 结构的极限荷载	256
11.1 极限弯矩、塑性铰和破坏机构	256
11.2 静定结构的极限荷载	258
11.3 单跨超静定梁的极限荷载	258
11.4 比例加载时关于极限荷载的几个定理	261
11.5 连续梁的极限荷载	263
11.6 刚架的极限荷载	264
习题	267

第 12 章 结构稳定性计算	269
12.1 结构稳定问题概述	269
12.2 结构稳定分析的静力法	271
12.2.1 有限自由度体系的临界荷载计算	271
12.2.2 无限自由度体系临界荷载计算	273
12.3 结构稳定分析的能量法	277
12.3.1 有限自由度体系临界荷载计算	278
12.3.2 无限自由度体系临界荷载计算	280
12.4 平面刚架稳定分析的矩阵位移法	283
12.5 剪力对临界荷载的影响	289
12.6 组合压杆的稳定性计算	290
习题	293
参考答案	295

第 1 章 绪 论

1.1 结构的分类

结构是建筑物中能承受荷载、传递荷载、起到骨架作用的部分,如房屋建筑中的梁、板、柱等都是结构的一部分。

结构的类型很多,可从不同的角度来分类。按照其几何特征,一般可分为杆件结构、薄壁结构和实体结构。

当构件的长度远大于其截面尺寸时称为杆件。由杆件组成的结构称为杆件结构或杆系结构。薄壁结构指构件的厚度远小于长度和宽度的结构。实体结构指构件三个方向的尺寸相近的结构。

结构力学的研究对象是杆件结构。杆件结构按其受力特性不同又可分为以下几种。

(1) 梁

梁是一种受弯杆件,其轴线通常为直线。常见的有单跨梁和多跨梁(如图 1.1 所示)。



图 1.1

(2) 刚架

刚架是由梁和柱组成的结构,其结点以刚结点为主,也可有铰结点(如图 1.2 所示)。

(3) 拱

拱是轴线为曲线且在竖向荷载作用下支座处产生水平反力的结构(如图 1.3 所示)。

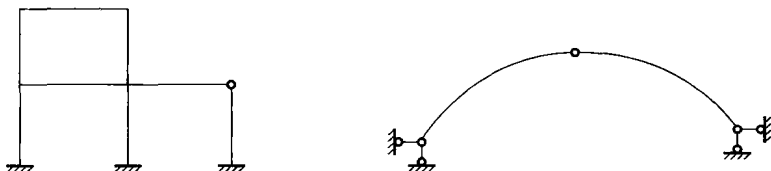


图 1.2

图 1.3

(4) 桁架

桁架是由若干直杆在两端用铰连接而成的结构(如图 1.4 所示)。

(5) 组合结构

组合结构是桁架和梁或桁架和刚架组合在一起的结构(如图 1.5 所示)。

(6) 悬索结构

悬索结构是承重构件为悬挂于塔或柱上的缆索(如图 1.6 所示)。

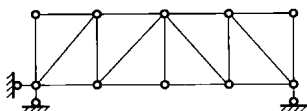


图 1.4

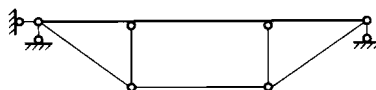


图 1.5

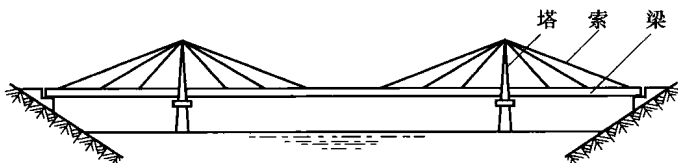


图 1.6

按照杆件轴线和外力作用的空间位置,结构可分为平面结构和空间结构。当杆件轴线和作用力均在同一平面内时为平面结构,否则是空间结构。虽然实际工程中多为空间结构,但很多情况下可以简化为平面结构来计算。

1.2 荷载的分类

荷载是作用在结构上的外力中的主动力。荷载有几种不同的分类方法。

(1) 按荷载作用的状况分类

按荷载作用的状况可以分为集中荷载和分布荷载。当作用在结构上的荷载的分布面积远小于结构的尺寸时,可认为荷载是作用在结构上的一个点上,将该荷载视为集中荷载,如火车和汽车的轮压、次梁传给主梁的荷载等。当作用在结构上的荷载的分布面积不是远小于结构的尺寸时,则为分布荷载,如静水压力、土压力、人群给楼板作用的荷载等。分布荷载的大小用单位面积或长度上的作用力——荷载集度来表示。当分布荷载的集度为定值时,称为均布荷载。

(2) 按荷载作用的时间分类

按荷载作用的时间可以分为恒载和活载。恒载是指长期作用在结构上不随时间变化的荷载,如结构的自重等。活载是指作用在结构上随时间变化的荷载,如人群、吊车等。

活载又可分为固定荷载和移动荷载。当荷载作用在结构上的位置可以认为是不变动的时,称为固定荷载。当荷载作用在结构上的位置是移动的时,称为移动荷载,如火车、汽车、吊车等。

(3) 按荷载对结构产生的动力效应分类

按荷载对结构产生的动力效应可以分为静力荷载和动力荷载。静力荷载是指荷载的大小、方向和作用位置不随时间变化,或虽有变化但较缓慢,不会使结构产生明显的加速度,因而可以略去惯性力影响的荷载。一般风荷载、雪荷载等多数活荷载都可视为静力荷载计算。动力荷载是指荷载作用在结构上使结构产生明显的加速度,因而惯性力不容忽视的荷载,如地震、机械振动荷载等。

结构主要是由荷载作用而产生内力、变形、位移。除荷载外还有一些因素也可使结构产生内力和位移,如温度变化、支座沉陷、材料松弛、徐变等。

1.3 结构的计算简图

实际结构受力复杂,按实际情况进行分析是烦琐、困难的,几乎难以实现。因此,必须将实际结构作必要的抽象和简化。采用简化的图形代替实际结构称为结构的计算简图。

选取结构的计算简图一般遵循以下原则。

- (1) 抓住主要因素,尽可能反映结构的实际情况。
- (2) 略去次要因素,方便结构的计算。

计算简图的选取直接关系到计算精度和计算工作量,应根据结构的重要性、计算问题的性质、设计阶段的要求及计算工具的性能等具体情况而定。

将杆件结构简化为计算简图,通常从以下几个方面进行简化。

1. 杆件的简化

在计算简图中,用杆件轴线来代替杆件。

2. 结点的简化

杆件与杆件的连接区用杆件轴线的交点表示,称为结点或节点。结点可分为以下两种。

(1) 刚结点

刚结点的特征是汇交于结点的各杆端既不能相对移动,也不能相对转动。如图 1.7(a) 所示为一个钢筋混凝土框架的结点,该结点可传递力和力矩。其计算简图如图 1.7(b) 所示。

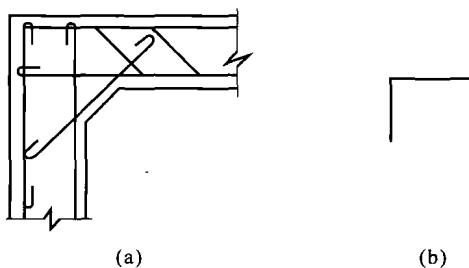


图 1.7

(2) 铰结点

铰结点的特征是汇交于结点的各杆端不能相对移动,但可以绕结点自由转动。一般钢桁架的结点如图 1.8(a) 所示,根据结点的构造和受力特点简化为铰结点。铰结点能传递力,不能传递力矩,其计算简图如图 1.8(b) 所示。

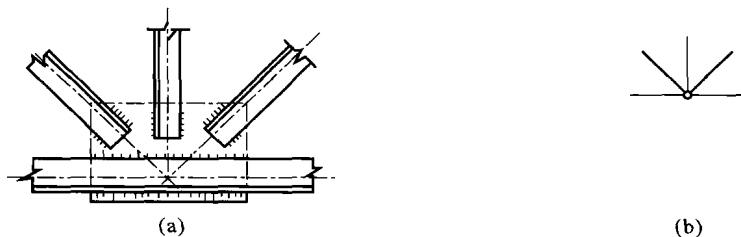


图 1.8

3. 支座的简化

支座是支承结构或构件的各种装置。常见的平面结构支座有以下 4 种。

(1) 可动铰支座

可动铰支座也称滚轴支座,如图 1.9(a)所示。其特征是支座只约束结构的竖向移动,不约束其水平移动和转动。其计算简图如图 1.9(b)所示。

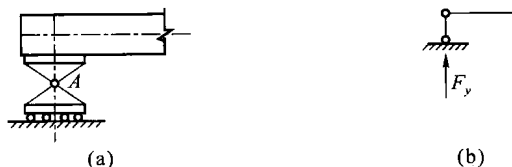


图 1.9

(2) 固定铰支座

固定铰支座如图 1.10(a)所示,其特征是支座约束结构的移动,不约束其转动。其计算简图如图 1.10(b)所示。



图 1.10

(3) 固定支座

固定支座如图 1.11(a),其特征是既约束结构的移动也约束转动。其计算简图如图 1.11(b)所示。



图 1.11

(4) 定向支座

定向支座也称滑动支座,如图 1.12(a)所示。其特征是约束结构转动和垂直于支承面的移动。其计算简图如图 1.12(b)所示。



图 1.12

1.4 结构力学的研究对象和任务

为使结构既能安全、正常地工作,又能符合经济的要求,需对其进行科学合理的设计。设计时需确定结构的最不利内力并以此作为设计的依据选用材料、确定截面尺寸等。也就是说,结构设计中非常重要的内容是对结构进行力学分析,而结构力学就是研究结构受力的学问。

结构力学与理论力学、材料力学、弹性力学有着密切的联系。理论力学是研究质点和刚体运动的学科,且不考虑研究对象自身的变形。它是材料力学、结构力学、弹性力学的基础。结构力学、材料力学、弹性力学的任务基本上是相同的,只是研究对象和侧重点有所不同。材料力学只研究单根杆件的内力和位移,解决单根杆件的强度、刚度和稳定性问题;结构力学研究杆系的上述问题和动力响应等问题;弹性力学以实体结构和板壳结构为主要研究对象。

结构力学的研究对象是由杆件组成的杆系结构,如桁架、框架等。研究的具体内容和任务如下。

- (1) 讨论结构的组成规则和合理形式,抽象出结构的计算简图。
- (2) 讨论系杆结构内力和位移的计算方法。
- (3) 讨论结构的稳定性、极限荷载及动力荷载作用下结构的动力反应。

第 2 章 平面体系的几何组成分析

图 2.1 所示为单层轻钢结构房屋体系,体系纵向由交叉的圆钢支撑提供整体稳定性。国内某在建该体系厂房施工过程中,纵向未能采取可靠的临时支撑,形成类似于图 2.3(b)所示的铰接四边形可变体系,导致刚架在安装过程中发生连续倒塌的重大工程事故,图 2.2 为倒塌现场图片。本例说明工程结构必须是几何不变的,本章正是研究平面体系的几何组成,并以此判断平面体系能否用做工程结构,学习的意义重大。

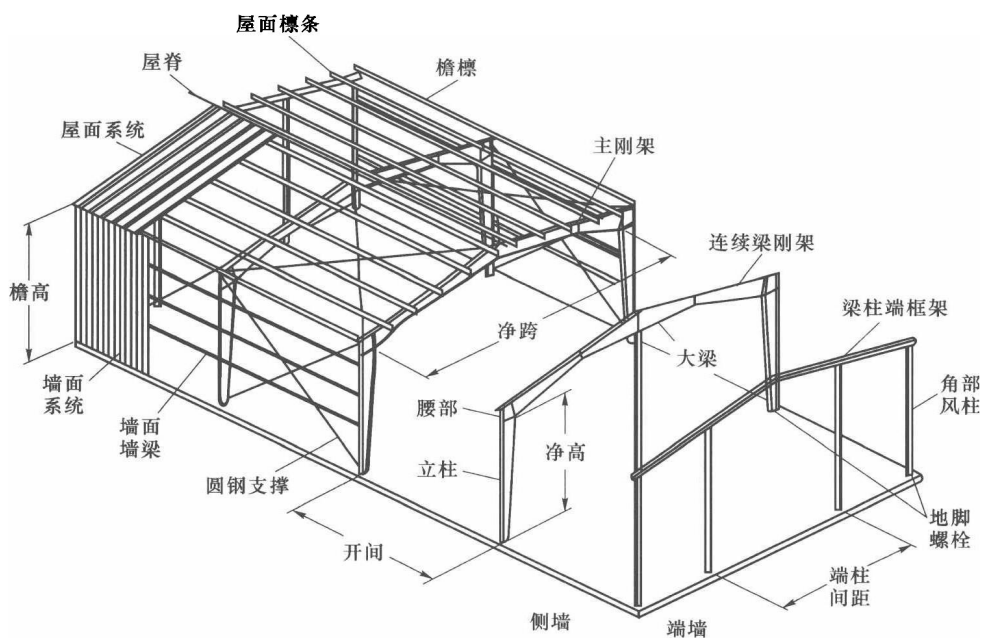


图 2.1



图 2.2

2.1 平面体系几何组成分析的相关概念

2.1.1 几何不变体系和几何可变体系

杆件结构是由若干杆件相互连接而组成的体系,体系能否作为工程结构使用,要看杆件组成是否合理。当体系受到荷载作用后,构件将产生变形,通常这种变形是很微小的,可忽略。图 2.3(a)所示为铰接三角形,若不考虑材料的小变形,体系受任意荷载作用,其几何形状和位置均保持不变,这样的体系称为几何不变体系。图 2.3(b)所示为铰接四边形,不考虑材料的小变形,体系即使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。几何可变体系包括瞬变体系和常变体系。

工程结构必须是几何不变体系。对工程结构应首先判别它是否几何不变,从而决定能否采用。这一工作称为体系的机动分析或几何组成分析。

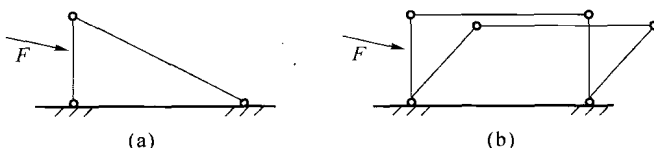


图 2.3

2.1.2 刚片、自由度和联系的概念

在几何组成分析中,由于不考虑材料的小变形,因此可以把一根杆件或已知几何不变的部分体系看做一个刚体。研究平面体系时将刚体称为刚片。

为判定体系的几何可变性,需引入自由度的概念。自由度是确定体系位置时所需要的独立参数的数目。例如平面上的一个点 A ,它的位置用坐标 x_A 和 y_A 完全可以确定,所以平面上点的自由度等于 2,如图 2.4(a)所示。又如平面上的一个刚片,它的位置用 x_A 、 y_A 和 φ_A 完全可以确定,所以平面内刚片的自由度等于 3,如图 2.4(b)所示。

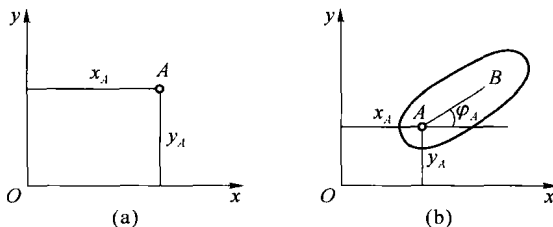


图 2.4

体系有自由度,加入限制运动的装置可使自由度减少。把减少自由度的装置称为一个联系(或约束),常见的联系有链杆和铰。如图 2.5(a)所示,用一根链杆将一个刚片与地基相连,因 A 点不能沿链杆方向移动,这样就减少了 1 个自由度,其位置可用参数 φ_1 和 φ_2 确定。所以,一个链杆相当于 1 个联系。

如图 2.5(b)所示,用一个铰 A 把 I 和 II 两个刚片连接起来,这种连接两个刚片的铰称

为单铰。连接体位置可用 4 个参数 x_A 、 y_A 、 φ_1 和 φ_2 确定,于是两个刚片自由度由 6 个变成 4 个,减少了两个自由度。所以,一个单铰相当于两个联系。同理可知,如图 2.5(c)所示,连接 3 个刚片的铰能减少 4 个自由度,相当于两个单铰作用。把连接 3 个或 3 个以上刚片的铰称为复铰。由此可推知,连接 n 个刚片的复铰相当于 $(n-1)$ 个单铰,即相当于 $2(n-1)$ 个联系。

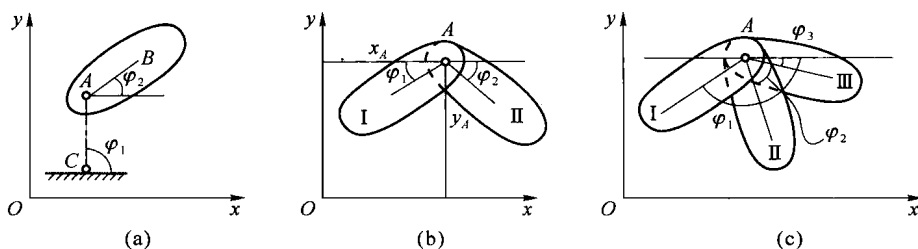


图 2.5

一个平面体系通常由若干刚片彼此用铰相连,并用支座链杆与基础相连。设体系的刚片数为 m ,单铰数为 h ,支座链杆数为 r ,则体系的自由度 w 为

$$w = 3m - (2h + r) \quad (2.1)$$

式中, $3m$ 为体系无约束情况下的自由度数; $2h$ 为 h 个单铰所减少的自由度数; r 为支座链杆所减少的自由度数。

【例 2.1】 求图 2.6 所示体系的自由度 w 。

解:体系刚片数 $m=8$,单铰数 $h=10$,支座链杆数 $r=4$ (其中固定端支座相当于 3 个链杆),则

$$w = 3 \times 8 - (2 \times 10 + 4) = 0$$

【例 2.2】 求如图 2.7 所示体系的计算自由度 w 。

解:对图 2.7(a)和(b),体系刚片数 $m=8$,单铰数 $h=10$,支座链杆数 $r=4$,则

$$w = 3 \times 8 - (2 \times 10 + 4) = 0$$

如图 2.7 所示的这种完全由两端铰结的杆件所组成的体系称为铰结链杆体系。其自由度除可用式(2.1)计算外,还可用下面的简便公式来计算。

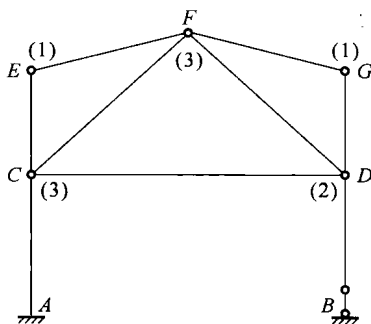


图 2.6

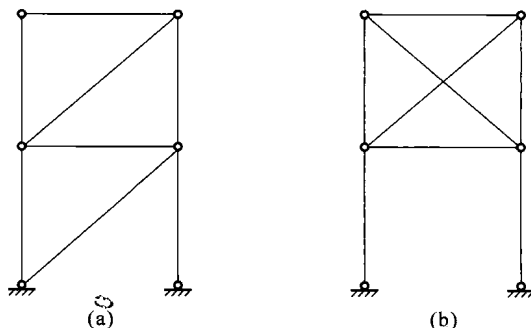


图 2.7

设体系的结点数为 j ,杆件数为 b ,支座链杆数为 r ,则体系自由度 w 为

$$w = 2j - (b + r) \quad (2.2)$$