

高等学校土建类专业应用型本科“十二五”规划教材

结构力学

JIEGOU LIXUE

主编 宋非非 宋 平



WUTP

武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

高等学校土建类专业应用型本科“十二五”规划教材

结 构 力 学

主 编 宋非非 宋 平
副主编 冯 永 鲁晓俊 陈 岩
主 审 刘 江

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 提 要

本书是根据高等院校土木工程本科指导性专业规范及当前结构力学课程的基本要求编写的,注重基本理论和基本方法的讲授。本书可供教学学时为 60~120 课时的结构力学课程选用。

全书共 11 章,内容包括绪论、平面体系的几何组成分析、静定结构的内力计算(梁、平面刚架、拱和平面桁架)、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、结构的动力计算、结构的稳定性计算。全书各章均附有习题及参考答案。

本书可作为土木工程类、水利工程类各专业及工程力学专业的教材,也可作为相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/宋非非,宋平主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2014. 8

ISBN 978-7-5629-4622-9

I. ① 结… II. ① 宋… ② 宋… III. ① 结构力学-高等学校-教材 IV. ①0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 175010 号

项目负责人:王利永

责任编辑:张莉娟

责任校对:戴皓华

装帧设计:许伶俐

出版发行:武汉理工大学出版社

地 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮 编:430070

网 址:<http://www.techbook.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:京山德兴印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:19

字 数:475 千字

版 次:2014 年 8 月第 1 版

印 次:2014 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3000 册

定 价:35.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

高等学校土建类专业应用型本科系列教材

编 审 委 员 会

顾 问：马成松 杜月中 孟高头 唐友尧 熊丹安

主 任：李新福 杨学忠

副 主 任：(按姓氏笔画排列)

江义声 许立强 许程洁 向惠生 陈升平

陈礼和 陈 蓓 陈俊杰 陈宜虎 张志国

张伯平 郑 毅 杨和礼 杨子江 柳立生

姚金星 荀 勇 胡铁明 袁海庆 蒋沧如

委 员：(按姓氏笔画排列)

牛秀艳 马成松 邓 训 王有凯 王晓琴

史兆琼 孙 艳 刘富勤 许汉明 许程洁

刘 江 刘 伟 刘 芳 刘 斌 刘黎虹

刘广杰 刘红霞 邹祖绪 吴秀丽 张 敏

张志国 张朝新 张淑华 陈金洪 沈中友

杜春海 李永信 李武生 宋非非 宋 平

杨双全 杨子江 郑 毅 赵 亮 赵元勤

胡忠军 胡铁明 施鲁莎 柳立生 董晓琳

韩东男 程 瑶 熊海滢 熊瑞生

秘 书：王利永

总责任编辑：于应魁

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 21 世纪对进行素质教育和创新意识培养的要求,本书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。本书内容的选取借鉴了国内的优秀教材,其特点为注重基础训练,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 11 章,采用了最新国家标准规定的符号。

本书由长春建筑学院宋非非、浙江建设职业技术学院宋平担任主编,长春建筑学院冯永、陈岩,武昌理工学院鲁晓俊担任副主编,华中科技大学文华学院刘江担任主审。具体编写分工如下:第 1~5 章由宋非非、宋平编写,第 6 章由南京理工大学泰州科技学院孟玮编写,第 7 章由冯永编写,第 8 章由宋非非编写,第 9 章由陈岩编写,第 10 章由鲁晓俊编写,第 11 章由长春建筑学院庞辉编写。全书由宋非非负责统稿。

由于编者水平有限,不妥之处在所难免,希望广大读者批评指正,以利于本书的进一步完善和提高。

编 者

2014 年 6 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 结构的分类	(1)
1.1.1 梁	(1)
1.1.2 刚架	(1)
1.1.3 拱	(1)
1.1.4 桁架	(1)
1.1.5 组合结构	(2)
1.1.6 悬索结构	(2)
1.2 荷载的分类	(2)
1.2.1 按荷载作用的状况	(2)
1.2.2 按荷载作用的时间	(2)
1.2.3 按荷载对结构产生的动力效应	(2)
1.3 结构的计算简图	(3)
1.3.1 杆件的简化	(3)
1.3.2 结点的简化	(3)
1.3.3 支座的简化	(3)
1.4 结构力学的研究对象和任务	(4)
2 平面体系的几何组成分析	(5)
2.1 概述	(5)
2.2 平面体系的计算自由度	(5)
2.2.1 自由度	(5)
2.2.2 联系	(6)
2.2.3 体系的计算自由度	(6)
2.2.4 平面体系的计算自由度结果分析	(7)
2.3 几何不变体系的简单组成规则	(8)
2.3.1 三刚片规则	(8)
2.3.2 二元体规则	(8)
2.3.3 两刚片规则	(9)
2.4 瞬变体系	(9)
2.5 机动分析举例	(10)
2.6 几何构造与静定性的关系	(12)

习题	(13)
3 静定结构的内力分析	(15)
3.1 静力平衡	(15)
3.1.1 利用静力平衡求解支座反力	(15)
3.1.2 利用静力平衡求解杆件内力	(18)
3.2 静定梁	(20)
3.2.1 内力图	(20)
3.2.2 利用微分关系作内力图	(20)
3.2.3 叠加法作弯矩图	(21)
3.2.4 斜梁	(26)
3.2.5 多跨静定梁	(27)
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	(31)
3.3.3 少求或不求反力绘制弯矩图	(36)
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	(40)
3.4.3 三铰拱的合理轴线	(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	(56)
习题	(57)
4 静定结构的位移计算	(63)
4.1 结构位移的概念	(63)
4.1.1 结构位移	(63)
4.1.2 结构位移计算的目的	(63)
4.1.3 位移计算的有关假设	(64)
4.2 变形体系的虚功原理	(64)
4.2.1 虚功和刚体系虚功原理	(64)
4.2.2 变形体系虚功原理	(64)
4.3 结构位移计算的一般公式	(67)
4.3.1 结构位移的计算	(67)

4.3.2	单位荷载的设置	(68)
4.4	静定结构在荷载作用下的位移计算	(69)
4.5	图乘法	(73)
4.6	静定结构温度变化引起的位移计算	(78)
4.7	静定结构支座移动时的位移计算	(81)
4.8	线弹性结构的互等定理	(82)
4.8.1	虚功互等定理(也称功的互等定理)	(82)
4.8.2	位移互等定理	(82)
4.8.3	反力互等定理	(83)
4.8.4	反力位移互等定理	(83)
	习题	(84)
5	力法	(88)
5.1	超静定结构概述	(88)
5.1.1	超静定结构的概念	(88)
5.1.2	超静定次数的确定	(88)
5.2	力法原理和力法方程	(90)
5.2.1	力法基本原理	(90)
5.2.2	力法典型方程	(92)
5.2.3	力法一般方程的建立	(92)
5.3	用力法计算超静定结构	(93)
5.3.1	超静定梁和刚架	(93)
5.3.2	超静定桁架和排架	(96)
5.3.3	超静定组合结构	(101)
5.4	对称性的利用	(105)
5.4.1	选取对称的基本结构	(105)
5.4.2	荷载分组	(106)
5.4.3	对称结构的内力	(106)
5.4.4	半结构的计算(半刚架法)	(109)
5.5	温度变化和支座移动时超静定结构的计算	(111)
5.5.1	温度变化时超静定结构的内力计算	(111)
5.5.2	支座移动时超静定结构的内力计算	(113)
5.6	超静定结构的位移计算和最后内力图的校核	(115)
5.6.1	超静定结构的位移计算	(115)
5.6.2	超静定结构最后内力图的校核	(118)
5.7	超静定结构的特性	(120)
	习题	(120)

6 影响线及其应用 (124)

6.1 移动荷载和影响线的概念 (124)

6.2 用静力法作静定结构的影响线 (124)

6.2.1 单跨静定梁的影响线 (124)

6.2.2 多跨静定梁的影响线 (125)

6.2.3 间接荷载作用下的影响线 (126)

6.2.4 静定桁架的影响线 (128)

6.3 用机动法作静定结构的影响线 (130)

6.4 超静定结构的影响线 (133)

6.4.1 静力法 (134)

6.4.2 机动法 (134)

6.5 利用影响线求量值 (135)

6.5.1 集中荷载作用的情况 (135)

6.5.2 分布荷载作用的情况 (136)

6.6 最不利荷载位置的确定 (137)

6.6.1 集中荷载的情况 (137)

6.6.2 均布荷载的情况 (139)

6.7 简支梁的绝对最大弯矩 (142)

6.8 内力包络图 (144)

6.8.1 简支梁内力包络图 (144)

6.8.2 连续梁内力包络图 (145)

习题..... (147)

7 位移法 (151)

7.1 基本概念 (151)

7.2 等截面直杆的转角位移方程 (152)

7.2.1 两端固定的单跨超静定梁 (152)

7.2.2 一端固定、另一端铰支的单跨超静定梁..... (154)

7.2.3 一端固定、另一端定向支撑的单跨超静定梁..... (154)

7.3 基本未知量数目的确定和基本结构 (157)

7.4 位移法典型方程及计算步骤 (158)

7.5 直接由平衡条件建立位移法基本方程 (167)

7.6 对称性的利用 (168)

习题..... (171)

8 渐近法 (173)

8.1 概述 (173)

8.2	力矩分配法的基本原理	(173)
8.2.1	劲度系数和传递系数的概念	(173)
8.2.2	力矩分配法的基本原理	(174)
8.3	用力矩分配法计算连续梁和无侧移刚架	(177)
8.4	无剪力分配法	(183)
8.4.1	无剪力分配法的计算方法	(183)
8.4.2	无剪力分配法应用推广	(187)
	习题	(189)
9	矩阵位移法	(192)
9.1	概述	(192)
9.2	单元分析	(192)
9.2.1	结构离散化	(192)
9.2.2	在单元局部坐标中的单元刚度矩阵	(193)
9.3	在整体坐标中的单元刚度矩阵	(197)
9.4	整体分析	(201)
9.4.1	直接刚度法的原理	(201)
9.4.2	结构原始刚度矩阵的性质	(204)
9.4.3	举例	(204)
9.5	边界条件的处理	(206)
9.5.1	“划零置1”法	(207)
9.5.2	置大数法	(208)
9.5.3	先处理法	(208)
9.6	非结点荷载的处理	(209)
9.7	结构矩阵分析举例	(213)
	习题	(221)
10	结构动力学	(223)
10.1	概述	(223)
10.1.1	结构动力计算的特点和目的	(223)
10.1.2	动荷载的种类	(223)
10.2	结构振动的自由度	(224)
10.3	单自由度体系的自由振动	(225)
10.3.1	单自由度体系自由振动的运动方程	(225)
10.3.2	单自由度体系的自由振动分析	(227)
10.4	单自由度体系在简谐荷载作用下的强迫振动	(229)
10.4.1	体系的运动方程	(229)

10.4.2	纯强迫振动分析·····	(230)
10.4.3	算例·····	(231)
10.5	阻尼对单自由度体系振动的影响·····	(235)
10.5.1	阻尼对单自由度体系自由振动的影响·····	(236)
10.5.2	阻尼对简谐荷载作用下强迫振动的影响·····	(239)
10.6	单自由度体系在任意荷载作用下的强迫振动·····	(241)
10.7	多自由度结构的自由振动·····	(244)
10.7.1	体系运动方程的建立·····	(244)
10.7.2	频率和主振型·····	(247)
10.8	多自由度体系在简谐荷载作用下的强迫振动·····	(253)
10.8.1	用柔度法求解平稳阶段的纯强迫振动·····	(253)
10.8.2	用刚度法求解平稳阶段的纯强迫振动·····	(256)
10.9	振型分解法·····	(259)
	习题·····	(262)
11	结构的稳定性计算·····	(266)
11.1	结构稳定问题概述·····	(266)
11.1.1	结构的平衡状态·····	(266)
11.1.2	结构的失稳形式·····	(266)
11.2	结构稳定分析的静力法·····	(268)
11.2.1	有限自由度体系临界荷载计算·····	(268)
11.2.2	无限自由度体系临界荷载计算·····	(271)
11.3	结构稳定分析的能量法·····	(276)
11.3.1	有限自由度体系的临界荷载计算·····	(276)
11.3.2	无限自由度体系的临界荷载计算·····	(278)
	习题·····	(282)
	参考答案·····	(284)
	参考文献·····	(291)

1 绪 论

1.1 结构的分类

在工程实际中能承受荷载、传递荷载并起到骨架作用的体系称为结构,如房屋建筑中的梁、板、柱等。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。

杆件结构 当构件的长度远大于其截面尺寸时称其为杆件。由杆件组成的结构称为杆件结构或称为杆系结构。

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。

结构力学的主要研究对象是杆件结构,因此杆件结构按其受力特性不同又可分为以下几种。

1.1.1 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(图 1.1)。



图 1.1
(a) 单跨梁;(b) 多跨梁

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,也有铰结点(图 1.2)。

1.1.3 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(图 1.3)。

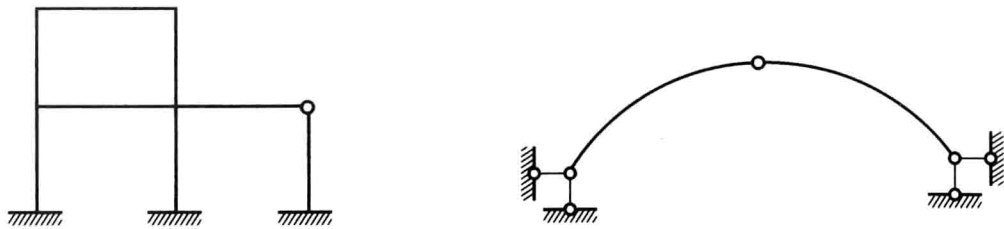


图 1.2

图 1.3

1.1.4 桁架

桁架是由若干直杆在两端用铰连接而成的结构(图 1.4)。

1.1.5 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(图 1.5)。

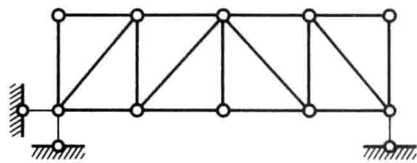


图 1.4

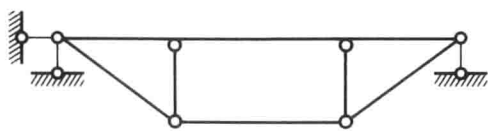


图 1.5

1.1.6 悬索结构

悬索结构是承重构件为悬挂于塔或柱上的缆索(图 1.6)。

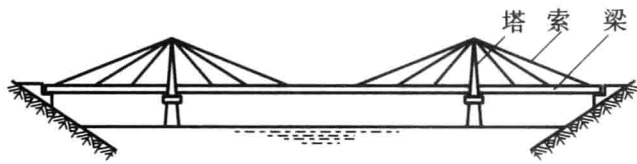


图 1.6

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,否则为空间结构。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,它有以下几种不同的分类方法。

1.2.1 按荷载作用的状况

按荷载作用的情况,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,则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与结构的尺寸相差不大时,则视为分布荷载,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。

1.2.2 按荷载作用的时间

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。荷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认为是不变动时,称为固定荷载;当荷载作用在结构上的位置是移动的时,则称为移动荷载,如火车、汽车、吊车等。

1.2.3 按荷载对结构产生的动力效应

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且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;动力荷载是指当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,如地震作用、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。除荷载外还有一些其他因素也可使结构产生内力和位移,如温度变化、支座沉陷、材料松驰、徐变等,此处不再赘述。

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、几乎难以实现的。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,计算简图应根据结构的重要性、计算问题的性质和设计阶段的要求以及计算工具的性能等具体情况来选择。

将杆件结构简化为计算简图,通常从以下几个方面来进行。

1.3.1 杆件的简化

在计算简图中,通常用杆件轴线来代替杆件。

1.3.2 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。

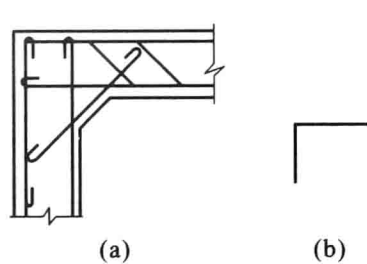


图 1.7

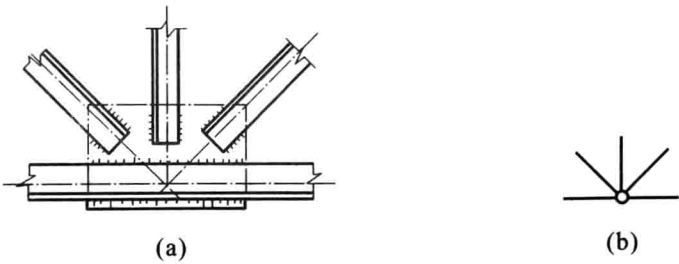


图 1.8

(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可简化为铰结点。铰结点能传递力,但不能传递力矩,其计算简图如图 1.8(b)所示。

1.3.3 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四种。

(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。

(2) 固定铰支座

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

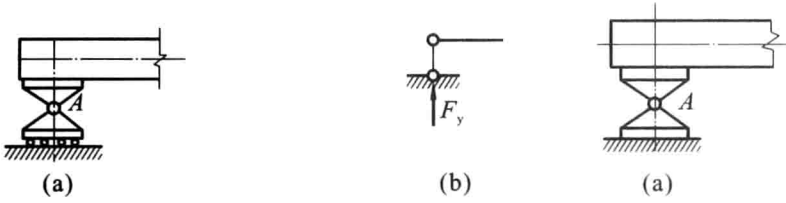


图 1.9

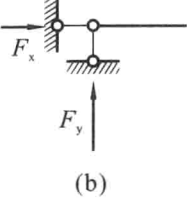


图 1.10

(3) 固定支座

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

(4) 定向支座

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

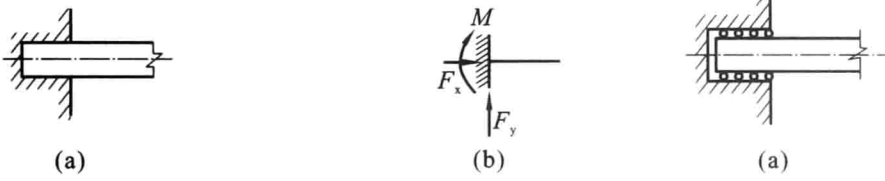


图 1.11

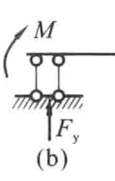


图 1.12

1.4 结构力学的研究对象和任务

为使结构能安全、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来选用材料、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一门学问。

理论力学(静力学部分)研究的对象为刚体;研究的问题是平衡。材料力学研究的对象是一根杆,横放是梁,竖放是柱;研究的问题是杆件的内力、应力、变形及杆件的强度、刚度和稳定性。而结构力学研究的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是:

- ① 结构的组成规则和合理形式;
- ② 杆系结构的内力和位移;
- ③ 结构的稳定性,以及动力荷载作用下结构的动力反应。

2 平面体系的几何组成分析

2.1 概 述

杆件结构是由若干杆件相互连接而组成的体系,但组成的不合理体系是不能成为结构的,只有组成的体系为几何不变的体系方可作为结构。

在几何不变体系里,在任意荷载作用下,若不考虑材料的变形,则体系的几何形状与位置保持不变,如图 2.1(a)所示;在几何可变体系里,在任意荷载作用下,虽不考虑材料的变形,但其几何形状与位置均不能保持不变,如图 2.1(b)所示。

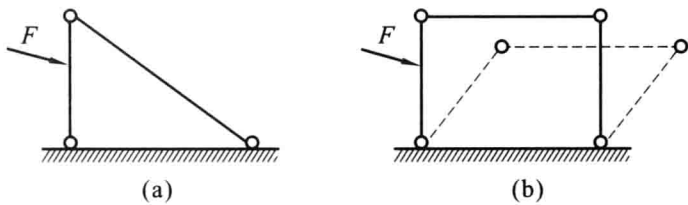


图 2.1

把判别体系是否几何可变这项工作称为体系的几何机动分析,或称为几何构造分析。在几何机动分析中,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一部分体系看成一个刚体。在平面体系中又将刚体称为刚片。

工程中的结构必须是几何不变体系,才能承受荷载、传递荷载。

2.2 平面体系的计算自由度

2.2.1 自由度

为判定体系的几何可变性,有时要先计算它的自由度。

物体的自由度 物体运动时独立变化的几何参数的数目称为物体的自由度。也可理解为确定物体位置所需的独立坐标数,即:

物体的自由度 = 物体运动的独立参数
= 确定物体位置所需的
独立坐标数

平面上的一个点,若它的位置用坐标 x_A 和 y_A 完全可以确定,则它的自由度等于 2,如图 2.2(a)所示。

平面上的一个刚片,若它的位置用 x_A 、 y_A 和 φ_A 完全可以确定,则它的自由度等于 3,

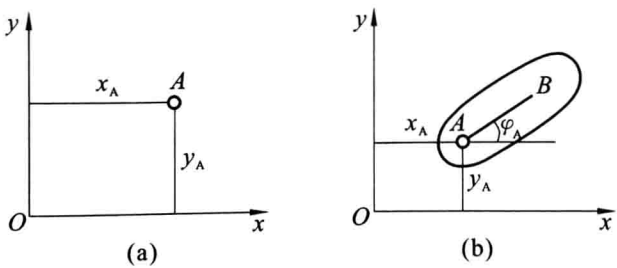


图 2.2

如图 2.2(b)所示。

2.2.2 联系

体系也有自由度,加入限制其运动的装置可使自由度减少,那么,减少自由度的装置就称为联系。能减少一个自由度的装置称为一个联系或一个约束,常用的联系有链杆和铰。

(1) 链杆

一个刚片有 3 个自由度,加上了一个链杆则变为 2,减少的一个自由度就称链杆为一个联系或一个约束,如图 2.3(a)所示。

(2) 铰

两个刚片用一个铰连接可减少两个自由度,那么连接两个刚片的铰称为单铰,相当于两个联系,如图 2.3(b)所示。连接两个以上刚片的铰称为复铰($n > 2$),相当于 $(n-1)$ 个单铰,或 $2 \times (n-1)$ 个联系,如图 2.3(c)所示。

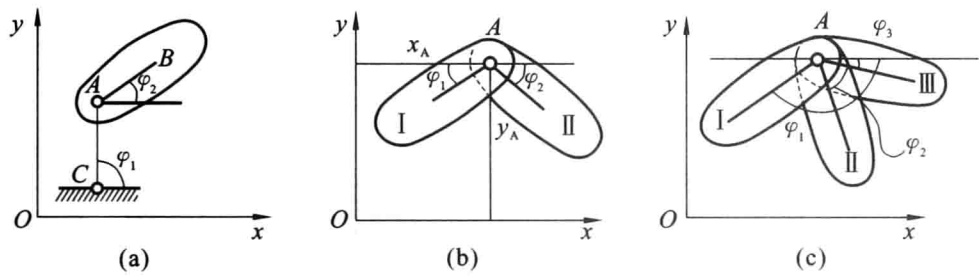


图 2.3

2.2.3 体系的计算自由度

体系的计算自由度为组成体系各刚片自由度之和减去体系中联系的数目。设体系的计算自由度为 w ,体系的单铰数为 h ,支座链杆数为 r ,体系的刚片数为 m ,则有:

$$w = 3m - (2h + r) \tag{2.1}$$

【例 2.1】 求图 2.4 所示的体系的计算自由度 w 。

【解】 体系刚片数 $m=7$,单铰数 $h=9$,支座链杆数 $r=4$ (其中固定端支座相当于 3 个链杆),则有:

$$w = 3 \times 7 - (2 \times 9 + 4) = -1$$

【例 2.2】 求图 2.5 所示的体系的计算自由度 w 。

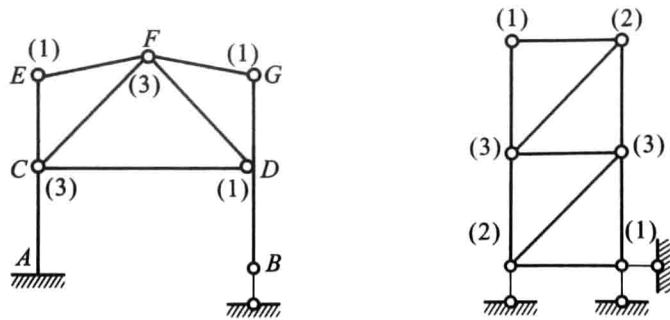


图 2.4

图 2.5