

高职高专教育

新编系列教材

结构力学

赵冬 李力 编

刘俊卿 审

JIEGOU
LIXUE

冶金工业出版社

NECOW 2004

NECOW 2004

NECOW 2004

NECOW 2004

NECOW

NECOW

NECOW 2004

高职高专教育新编系列教材

结构力学

赵冬 编

李力

刘俊卿 审

北 京

冶金工业出版社

2003

内 容 提 要

本书是为高职高专建筑工程专业编写的教材,内容包括绪论、平面杆件体系的几何组成分析、静定结构的内力计算、影响线、静定结构的位移计算、力法、位移法、力矩分配法、矩阵位移法计算连续梁、结构动力计算基础等 10 章,各章末均配有习题。最后附有平面刚架框图设计、FORTRAN 语言编制的电算程序及习题答案。

本书适用面较广,可作为土建类及相近专业的大专教材和职业培训教材,也可供建筑类工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学/赵冬,李力编. —北京:冶金工业出版社,
2003.11

ISBN 7-5024-3173-X

I. 结… II. ①赵… ②李… III. 结构力学
IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 077711 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 俞跃春 美术编辑 李 心

责任校对 侯 璐 李文彦 责任印制 李玉山

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2003 年 11 月第 1 版,2003 年 11 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 15 印张; 357 千字; 229 页; 1—4000 册

25.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

冶金工业出版社出版的部分高职高专教材书目

书 名	作 者
AutoCAD2002 计算机辅助设计	王 茹 雷光明 主编
材料力学	王克林 刘俊卿 刘新东 编
结构力学	赵 冬 李力编 刘俊卿 审
电工与电子技术	李季洲 主编
建筑工程经济与项目管理	李慧民 主编
建筑施工组织	胡长明 主编
建筑施工技术	王士川 主编
建筑设备工程	郑庆红 主编
土力学与基础工程	韩晓雷 主编
混凝土及砌体结构	王社良 主编

(以上为西安建筑科技大学高职高专系列教材)

工厂电气控制设备	赵秉衡 主编
工业企业供电	靳希才 主编
电机及电力拖动	吴裕隆 主编
数字电子技术基础	刘培宇 主编
实用模拟电子技术	欧伟民 主编
机械维修与安装	周师圣 主编
机械设计基础	吴联兴 主编

序

高职高专的教材建设工作是整个教育教学工作中的重要组成部分。近些年来,在各级教育管理部门、学校和出版社的共同努力下,各地陆续出版了一批高职高专教育系列教材,但从整体上看,适应教学要求、具有高职高专教育特色的教材还不多,不少院校仍在使用本科或中专的教材。随着新技术、新材料、新工艺的不断涌现,特别是高职高专教育要适应新时期发展的需要,所以教材建设滞后于高职高专教育的情况急需解决。为此我们组织了一批专业学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,依据 1999 年 8 月教育部高教司制定的《高职高专教育基础课程的基本要求》和《高职高专教育专业人才培养目标规格》及国家颁布的最新规范编写了一套供土木类专业使用的系列教材。

本系列教材的编写,力图从人才培养的大局出发,站在素质教育、创新教育的高度,以提高学生的综合素质为根本宗旨,以培养学生的创新精神、适应能力和实践能力为重点,以“必需”、“够用”为度的原则,以满足教学的需要。高职高专学生通过本系列教材的学习,可以为毕业后的继续学习甚至终身教育打下扎实的基础,使学生具有一定的可持续发展的能力。

我们首批编写了 10 种教材,并准备在充分吸取培养技术应用型专门人才方面取得成功经验的基础上陆续组织编写其他专业的教材,以满足本科院校举办的二级职业技术学院、高等职业技术学院、高等专科学校及成人专科学校的教学用书。欢迎广大师生和读者在使用中提出意见和建议。

西安建筑科技大学
高职高专系列教材编审委员会
2002 年 12 月

前 言

本书主要是为满足高等职业技术学校建筑工程专业教学需要编写的结构力学教材。根据高职培养高级应用型人才的特点,本书力图内容精炼,基础理论简明,条理清楚,例题类型齐全,分析透彻,讲解详细,注意培养学生分析问题和解决问题的能力。为加强计算机的应用,结合矩阵法内容,书末附有 FORTRAN 语言编制的电算程序。为便于巩固所学知识,各章编有难度适中的习题。

本书由西安建筑科技大学赵冬、李力编写,赵冬教授负责统稿工作。西安建筑科技大学刘俊卿教授对全书进行审阅。

在本书的编写过程中,得到西安建筑科技大学职业技术学院领导的关心和大力支持,在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中不妥之处,欢迎广大读者批评指正。

编 者

2003 年 6 月于西安

目 录

1 绪论	1
1.1 结构力学的研究对象和任务	1
1.2 结构的计算简图	2
1.3 杆件结构与荷载的分类	4
2 平面杆件体系的几何组成分析	7
2.1 概述	7
2.2 自由度和约束的概念	8
2.3 几何不变体系的基本组成规则及结构的静定性与几何组成关系	10
2.4 几何组成分析举例	12
习题	14
3 静定结构的内力计算	17
3.1 静定单跨梁	17
3.2 静定多跨梁	22
3.3 静定平面刚架	25
3.4 三铰拱	33
3.5 静定平面桁架	41
3.6 静定平面组合结构	50
习题	52
4 影响线	57
4.1 影响线的概念	57
4.2 静力法作静定单跨梁的影响线	57
4.3 结点荷载作用下梁的影响线	60
4.4 机动法作静定梁的影响线	61
4.5 影响线的应用	65
习题	71
5 静定结构的位移计算	74
5.1 概述	74
5.2 虚功和虚功原理及荷载作用下的位移	74
5.3 图乘法	80
5.4 温度改变和支座移动引起的位移	87
5.5 线弹性结构的互等定理	91
习题	93
6 力法	97
6.1 超静定结构概述	97

6.2	超静定次数的确定	98
6.3	力法的基本概念	101
6.4	力法的计算步骤和算例	105
6.5	对称性的利用	114
6.6	力法计算超静定拱	120
6.7	温度改变和支座移动时超静定结构的计算	127
6.8	超静定结构的位移计算与校核	130
6.9	超静定结构的特性	131
	习题	133
7	位移法	136
7.1	位移法的基本概念	136
7.2	等截面直杆的形常数和载常数	138
7.3	位移法的基本未知量和基本结构	141
7.4	位移法基本方程	143
7.5	用位移法计算超静定刚架的步骤和示例	146
	习题	150
8	力矩分配法	153
8.1	力矩分配法的基本概念	153
8.2	单结点的力矩分配	157
8.3	用力矩分配法计算连续梁和无结点线位移的刚架	159
	习题	165
9	矩阵位移法计算连续梁	167
9.1	矩阵位移法的概念	167
9.2	梁单元的刚度矩阵	167
9.3	连续梁的整体刚度矩阵和整体刚度方程	171
9.4	结构的结点荷载	176
9.5	矩阵位移法计算连续梁的步骤和举例	179
	习题	184
10	结构动力计算	185
10.1	结构动力计算概念及其特点	185
10.2	结构动力计算的计算简图和动力自由度	186
10.3	单自由度结构的自由振动	188
10.4	在简谐荷载作用下单自由度结构的强迫振动	196
	习题	201
	附录 平面刚架分析程序	204
	习题答案	224
	参考文献	229

1 绪 论

1.1 结构力学的研究对象和任务

1.1.1 结构

建筑物中能承受荷载,起骨架作用的物体或体系称为结构。例如工业与民用建筑中的梁柱体系;桥梁中的梁、拱、墩台等组成的体系。

按照几何尺寸特征,结构通常分为三类。

1.1.1.1 杆件结构

由杆件组成的结构称为杆件结构。杆件的几何特征是横截面尺寸远小于长度。

1.1.1.2 板壳结构

由薄板或薄壳组成的结构称为板壳结构,也称薄壁结构,其几何特征是厚度远小于其长度和宽度。

1.1.1.3 实体结构

实体结构是指 3 个方向的尺寸大致为同一量级的结构。

1.1.2 结构力学的研究对象

结构力学的研究对象是杆件结构。本书主要研究平面杆件结构,即各杆轴线及荷载都在同一平面内的结构。

1.1.3 结构力学的任务

结构力学的主要任务是研究杆件结构强度、刚度、稳定性的计算原理及方法和合理组成原理。其主要内容包括以下 4 个方面:

- (1) 研究由荷载等因素在结构中所产生的内力(强度问题);
- (2) 计算由荷载等因素所引起的结构各部分的变形(刚度问题);
- (3) 分析结构的稳定性(稳定性问题,本书对这一问题不作讨论);
- (4) 研究结构的组成规律和合理形式(合理组成问题)。

1.1.4 结构力学与其他课程的关系

结构力学是土木工程类各专业的一门重要的专业基础课,在各门课程的学习中起着承上启下的作用。

结构力学是理论力学和材料力学的后续课程。理论力学研究的是刚体的机械运动(包括静止和平衡)的基本规律和刚体的力学分析。材料力学研究的是单个杆件的强度、刚度和稳定性问题。而结构力学则是研究结构的强度、刚度、稳定性和合理组成的问题。因此理论力学和材料力学是结构力学的重要基础课,为结构力学提供力学分析的基本原理和基础。

同时,结构力学又为后继的专业课程提供力学基础。

1.2 结构的计算简图

1.2.1 概述

实际结构是复杂的,完全按照结构的实际工作状态进行力学分析是不可能的,也是不必要的。因此,对实际结构进行力学计算以前,必须加以简化。

在计算时,对一个实际结构,用一个略去不重要的细节、而能反映其基本受力和变形性能的简化的计算图形来代替它,这种代替实际结构的简化计算图形就称为结构的计算简图。结构的受力分析都是在计算简图上进行。因此,计算简图的选择,是结构受力分析的基础;选择不当,则计算结果不能反映结构的实际工作状态,严重的将会引起工程事故。所以,对计算简图的选择,应该十分重视。

计算简图的选择原则是:

- (1) 计算简图应能反映实际结构的主要受力和变形性能;
- (2) 保留主要因素,略去次要因素,使计算简图便于计算。

此外,在设计的不同阶段,或采用不同的计算手段时,对于同一实际结构可采用不同的计算简图。如在初步设计的方案阶段,可采用较为粗糙的计算简图;而在技术设计阶段,则应采用较为精细的计算简图。如用手算,可采用较为简单的计算简图;而用电算,则可采用较复杂的计算简图。

1.2.2 杆件结构的简化

选取计算简图的主要工作是将实际结构进行简化。杆件结构的简化主要包括杆件的简化和结点的简化。

1.2.2.1 杆件的简化

在计算简图中,杆件用杆件的轴线表示;杆件的长度则用杆件两端各杆件轴线交点之间的距离来表示。

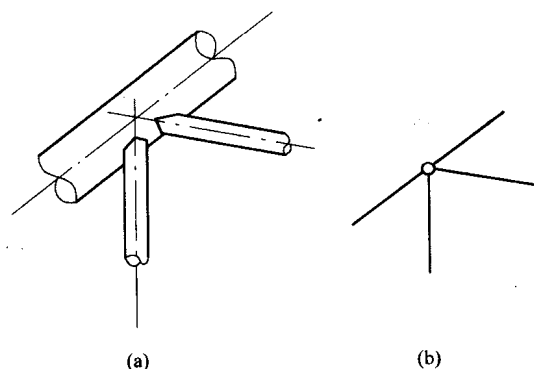


图 1-1

1.2.2.2 结点的简化

杆件与杆件的联结处称为结点。根据构造的不同,各种实际结点可分别简化为铰结点或刚结点:

A 铰结点

如图 1-1(a)所示,是一个屋架的上弦结点。各杆之间的联结,不能阻止其相互间的微小转动,计算时简化为一铰结点,其计算简图如图 1-1(b)所示。理想铰结点的特征是结点上所联结的各杆不能相对移动,而可以绕铰作自由转动。在铰结点处,只

能承受和传递力,而不能承受和传递力矩。这种理想光滑的铰结点,在实际结构中很难遇到,木屋架的结点也只是比较接近铰结点。

B 刚结点

如图 1-2(a)所示,是一钢筋混凝土框架边柱和梁的结点。梁和柱之间的钢筋布置以及混凝土将它们浇注成整体,使梁和柱不能产生相对移动和相对转动,计算时简化为一刚结点,其计算简图如图 1-2(b)所示。刚结点的特征是结点上所联结的各杆端之间不能有相对移动,也不能有相对转动。在刚结点处不但能承受和传递力,而且能承受和传递力矩。

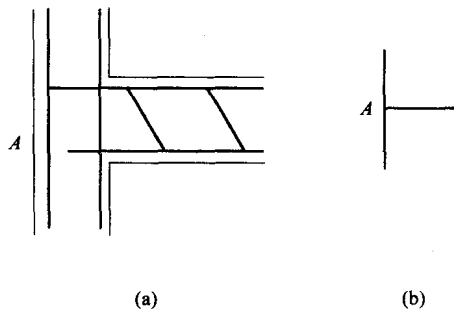


图 1-2

除了铰结点和刚结点,有时还会遇到这两种结点在一起而形成的组合结点。在图 1-3 中,结点 E 是 EB 、 EI 、 EF 三杆的联结处,其中 EB 、 EI 两杆为刚性连接, EF 杆为铰联结,故此结点为组合结点。结点 D 的情形与此相同,也是组合结点。

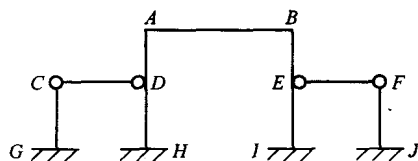


图 1-3

C 支座的简化

结构与基础的联结装置称为支座。支座的作用是把结构固定于基础上,同时,结构所受的荷载,通过支座传到基础和地基。支座对结构的反作用力称为支座反力。常见的支座有下列 4 种。

a 铰支座

图 1-4(a)所示的铰支座通常可用图 1-4(b)的计算简图来表示。铰支座的机动特征是结构可以绕铰的中心 A 转动,但 A 点的水平和竖向移动受限制。因此,结构受荷载作用时,如略去转动时摩擦力的作用, A 点只有水平支座反力 F_{Ax} 和竖向支座反力 F_{Ay} ,且通过铰支座的中心。根据铰支座构造的机动特征和受力特征,也可用支杆表示的计算简图来表示[图 1-4(c)]。支杆也称支座链杆,是两端为铰而一端连于基础的刚性杆。

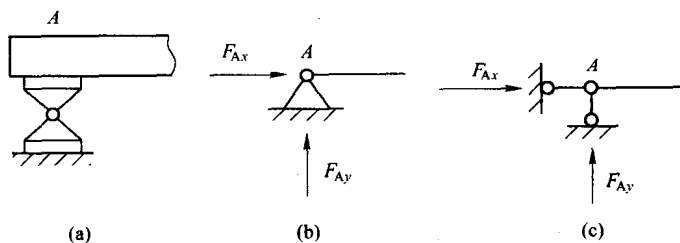


图 1-4

b 可动铰支座

图 1-5(a)、(b)所示的可动铰支座可用图 1-5(c)所示的计算简图来表示。可动铰支座的机动特征是结构可以绕铰 A 转动,并容许沿支承面 $m-n$ 作微小移动,但限制铰 A 的竖向移动。因此,结构受荷载时只有竖向支座反力 F_{Ay} 。根据可动铰支座构造的机动特征和受力特征,也可用垂直于支承面的一根支杆表示的计算简图来表示[图 1-5(d)]。由此图可知,

结构可以绕铰 A 转动,并可沿以 B 为圆心、 AB 为半径的圆弧移动。如果移动量很小,则方向可看作是水平的。

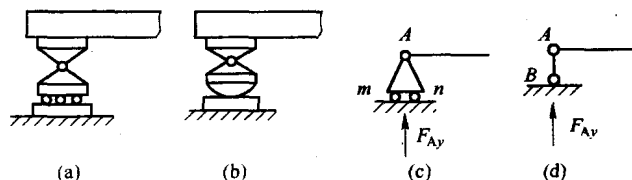


图 1-5

c 固定支座

图 1-6(a)所示的固定支座可用图 1-6(b)所示的计算简图表示。结构在 A 端的水平移动、竖向移动和转动全部受到限制。在荷载作用下, A 端有水平支座反力 F_{Ax} 、竖向支座反力 F_{Ay} 和反力偶 M_A 。

d 定向支座

图 1-7(a)所示的定向支座可用图 1-7(b)所示的计算简图表示。定向支座的机动特征是可以沿辊轴滚动的方向作微小移动,但不能沿垂直于滚动的方向移动,也不能发生转动。因此在荷载作用下,有垂直于支承面的反力 F_{Ay} 和反力偶 M_A 。

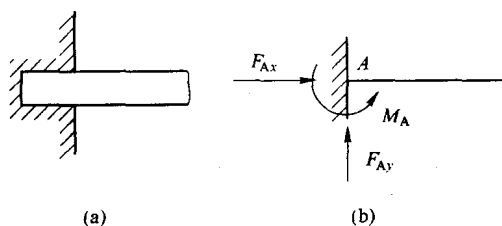


图 1-6

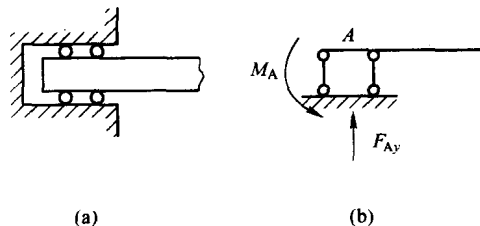


图 1-7

1.3 杆件结构与荷载的分类

1.3.1 杆件结构的分类

杆件结构的分类,实际就是计算简图的分类。

(1) 按照空间观点,杆件结构可以分为平面结构和空间结构两类。

如果组成结构的所有杆件的轴线都在同一平面内,且外力的作用线也在这个平面内,则结构称为平面结构。否则称为空间结构。

(2) 按照力学性能的不同,杆件结构可以分为梁、刚架、拱、桁架和组合结构 5 类。

1) 梁。梁是一种以受弯为主的杆件,也是一种常见的简单结构。梁可以做成单跨的,也可以做成多跨的,其轴线通常为直线(也可以是曲线)(图 1-8)。

2) 刚架。刚架是由直杆组成的具有刚结点的结构,各杆主要受弯曲。刚架的结点大多数为刚结点,但也可以有部分铰结点或组合结点(图 1-9)。

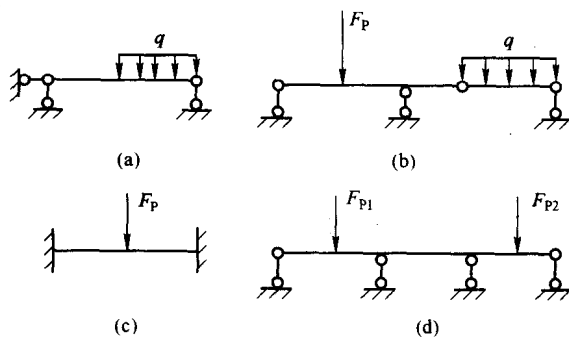


图 1-8

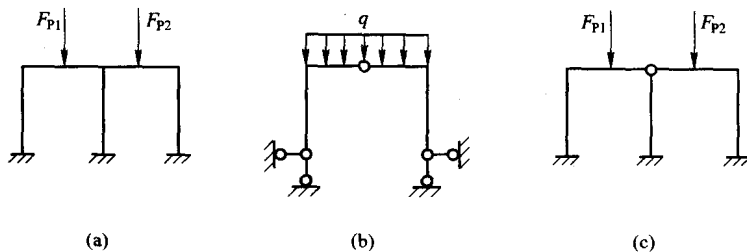


图 1-9

3) 拱。拱是在竖向荷载作用下有水平支座反力的曲杆结构,通常以受压为主(图 1-10)。

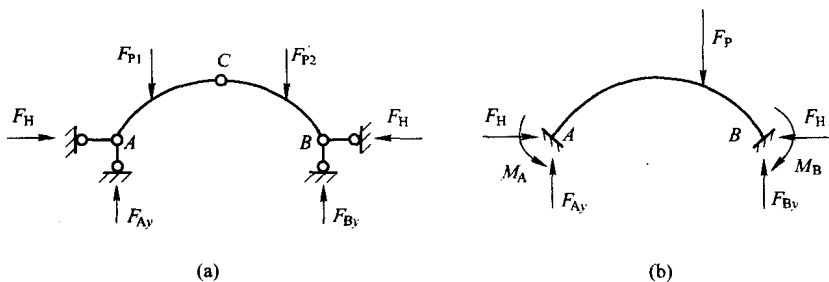


图 1-10

4) 桁架。仅在杆的两端与铰相联的直杆称为链杆。全由链杆组成的结构称为桁架(图 1-11)。若荷载仅作用在桁架的结点上,则每根杆件将只承受轴力。

5) 组合结构。组合结构是部分由桁架的链杆,部分由梁或刚架组合而成的结构(图 1-12)。在这种结构中,链杆只承受轴向力,而梁或刚架部分则除轴力外,同时还承受弯矩和剪力。

(3) 按照计算方法的特点,杆件结构又可分为静定结构和超静定结构两类。

1) 静定结构。支座反力和任一截面上的内力可由静力平衡条件全部确定的结构称为静

定结构。

2) 超静定结构。支座反力和任一截面上的内力不能仅由静力平衡条件全部确定的结构称为超静定结构。

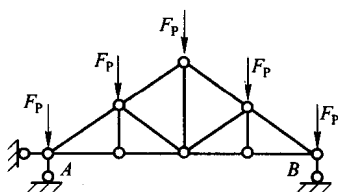


图 1-11

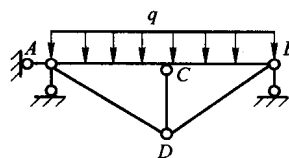


图 1-12

1.3.2 荷载的分类

(1) 根据作用时间的久暂,荷载可分为恒载和活载两类。

恒载是永久作用在结构上的荷载,如结构的自重力、土压力以及长期停放在结构上的设备或附属物的重力等。在结构使用过程中,这些荷载的大小、方向和作用点都不发生变化。

活载是暂时作用在结构上的荷载,如车辆、人群、风、雪等荷载。活载又可进一步分为可动荷载和移动荷载两类。可动荷载是指能作用于结构上任意位置的荷载,如风载、雪载等。移动荷载是指大小和方向保持不变。但作用点位置可以改变的荷载,如汽车荷载、列车荷载和吊车荷载等。

(2) 根据作用的动力效果,荷载可分为静力荷载和动力荷载两类。

静力荷载是大小、方向和位置不随时间变化或变化极为缓慢,不引起结构振动的荷载。

动力荷载是大小或位置迅速改变,引起结构振动的荷载。

2 平面杆件体系的几何组成分析

2.1 概述

2.1.1 几何不变体系与几何可变体系

由若干根杆件联结而成的体系称为杆件体系。图 2-1(a)所示的铰接杆件体系的几何形状是可变的,很容易发生虚线表示的几何变形。显然,该体系是不牢固的,极易倾倒,不能作为结构使用。如果在体系中加入一根斜杆,如图 2-1(b)所示,就可成为一个能作为结构使用的牢固体系了。

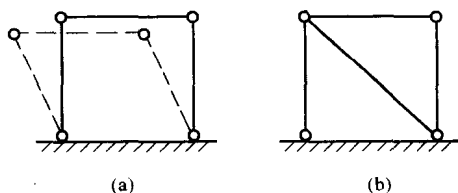


图 2-1

根据受荷载作用后能否保持其几何形状和位置,杆件体系可以分为几何不变体系和几何可变体系两类。在不考虑材料变形的前提下,凡受到任意荷载作用后,几何形状和位置均能保持不变的体系称为几何不变体系;相反,会产生机械运动而不能保持原有形状和位置的体系称为几何可变体系。

结构必须是几何不变体系,几何可变体系是不能作为结构来使用的。

2.1.2 几何瞬变体系

图 2-2 所示体系是几何可变体系的一种特殊情况,其特点是两根链杆共线,3 个铰在同一直线上。

从微小运动的角度来看,这也是一种可变体系。当链杆 I 和 II 分别绕 A 和 B 转动时,在 C 点处有一公切线,此时 C 点可沿公切线作微小的上下移动。但当 C 点移动一个微小距离后,3 个铰不再位于同一直线上,铰 C 的移动不能再进行,于是体系变为几何不变的。这种本来是几何可变的,经过微小移动后又成为几何不变的体系称为几何瞬变体系。

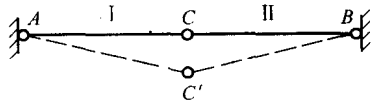


图 2-2

几何瞬变体系是不能应用于工程结构的。例如图 2-3(a)所示的瞬变体系在力 F_P 作用下,铰 C 产生了微小位移,以点 C 为研究对象[图 2-3(b)],由平衡方程可求出 AC 杆与 BC 杆的轴力为

$$F_{NAC} = F_{NBC} = \frac{F_P}{2\sin\theta}$$

由于 θ 很小, 因此即使荷载不大, 也会使杆件产生很大的内力。

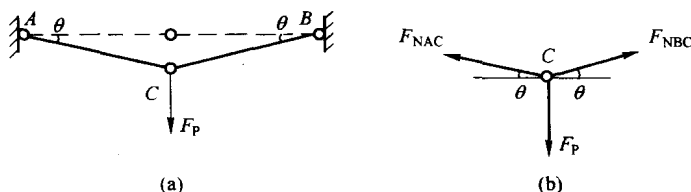


图 2-3

2.1.3 几何组成分析的目的

杆件体系几何组成分析的目的为:

- (1) 判定体系是否几何可变, 从而决定该体系是否可以用作结构;
- (2) 研究几何不变体系的组成规律;
- (3) 正确区分静定结构与超静定结构。

2.2 自由度和约束的概念

2.2.1 刚片和自由度

2.2.1.1 刚片

在几何组成分析中, 由于不考虑材料的变形, 可把每一杆件或体系中已被肯定为几何不变的某个部分看作刚体。平面内的刚体称为刚片。在分析平面体系时, 体系的基础连同地球在一起被看作一个大刚片。

2.2.1.2 自由度

确定体系位置所需要的独立参数的数目称作体系的自由度。

欲确定平面上一个点的位置, 需用两个坐标, 故平面上的点具有两个自由度。

欲确定图 2-4 中刚片 AB 的位置, 需用 x_A 、 y_A 和 φ 3 个几何参数, 故平面上的一个自由刚片具有 3 个自由度。

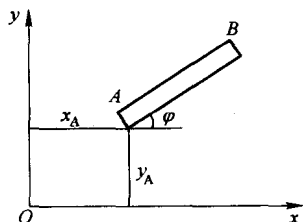


图 2-4

2.2.2 约束

使体系减少自由度的装置或联结, 称作约束。能减少 1 个自由度的装置或联结称为一个约束。物体或体系的自由度将因加入约束而减少。

约束有两大类, 支座约束和刚片间的约束。

2.2.2.1 支座约束

A 可动铰支座

欲确定图 2-5(a) 中刚片的位置需要 x_A 和 φ 两个参数, 有两个自由度, 所以可动铰支座相当于一个约束。