



高等院校机械类特色专业系列规划教材

STRUCTURAL MECHANICS

结构力学 教程

侯祥林 郑夕健 编著



东北大学出版社
Northeastern University Press

高等院校机械类特色专业系列规划教材

结构力学教程

侯祥林 郑夕健 编著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 侯祥林 郑夕健 2015

图书在版编目(CIP)数据

结构力学教程 / 侯祥林, 郑夕健编著. -- 沈阳: 东北大学出版社, 2015.4

ISBN 978-7-5517-0966-8

I. ① 结... II. ① 侯... ② 郑... III. ① 结构力学—高等学校—教材 IV. ① O342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 109964 号

内容提要

本书为高等院校机械类特色专业系列规划教材, 全书内容分为基础篇、静定结构篇、超静定结构篇和结构稳定与极限载荷篇四篇共 11 章。基础篇包括绪论、平面体系的几何组成分析 2 章; 静定结构篇包括静定梁与静定刚架、静定平面桁架、静定结构的位移计算、影响线及其应用 4 章; 超静定结构篇包括力法、位移法、矩阵位移法 3 章; 结构稳定与极限载荷篇包括结构稳定、梁和刚架的极限荷载 2 章。本书附有客观型与主观型的各章习题、参考答案和自测题。本书可作为高等院校机械等专业本科生的结构力学教材, 也可以供研究生和工程技术人员参考。

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83687331

传真: 024-83680180

E-mail: neuph@neupress.com

http://www.neupress.com

印刷者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm×260mm

印张: 17.5

字数: 352 千字

出版时间: 2015 年 4 月第 1 版

印刷时间: 2015 年 4 月第 1 次印刷

组稿编辑: 周文婷

责任编辑: 汪彤彤

封面设计: 刘江旸

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-0966-8

定价: 29.00 元

前 言

机械类结构力学课程是机械工程各专业本科生的重要技术基础课、主干课和必修课。结构力学课程是在学习工程力学、机械设计等课程的基础上,通过学习相关知识,掌握工程机械杆件结构的受力特性,掌握工程机械中杆件结构的计算原理和方法。随着高层建筑的发展需要,高耸大型的起重机、混凝土泵车等工程机械的快速发展,对机械工程类专业结构力学课程要求不断提升。通过课程学习,为建筑机械钢结构和机械工程中结构设计方面的后续专业课程学习和工程机械设计奠定基础,使得学生获得机械结构分析与计算等方面的综合运用能力。

目前,机械类结构力学教材较为缺少,因此多数采用土木工程类的结构力学教材作为替代,造成学生缺乏对于机械工程类实例的了解。而既有的一些教材一方面是年代久远,另一方面教材中多数是在绪论中针对机械类问题引入,而在总体内容上实质性缺少机械工程实例讲解。针对这个问题,通过多年来讲授机械类结构力学的教学实践,依托辽宁省本科教学改革项目“机械类结构力学课程体系和内容的改革与实践研究”,将授课教案通过整理修改,编写出针对机械工程类的结构力学教程。教材具有下面几个特色。

(1) 模块化思路。《结构力学教程》将整体内容划分为4个模块,共11章。基础篇包括:绪论和平面体系的几何组成分析;静定结构篇包括静定梁与静定刚架、静定平面桁架内力分析、静定结构的位移计算和影响线及其应用;超静定结构篇包括力法、位移法和矩阵位移法;结构稳定与极限载荷篇包括结构稳定、梁和刚架的极限荷载,强化了本书的知识体系。

(2) 面向机械工程的具体实际问题,涵盖了门式起重机、桥式起重机、塔式起重机、混凝土泵车臂架体系、擦窗机、挖掘机和装载机等工程机械结构体系对象,将结构体系简化、体系组成分析,静定与超静定问题分析求解和计算贯穿于全书。

(3) 强调各类问题的求解过程步骤化,如力法求解步骤为:确定基本未知量与形成静定体系、列力法方程、图乘法计算方程系数,求解基本未知量、绘制最终内力图。这种思想强化了工程问题求解过程,为引导型无纸考试评判方法提供了条件。

(4) 习题方面,编写了包括判断题、选择题、填空题和分析、计算、绘图题等各类客观题和主观题,并给出参考答案。便于针对基本概念和实际综合问题的分析计算方法的掌握。

本书由侯祥林和郑夕健两位老师编著,研究生王洁乐、李琦、吕长权等在稿件编排等方面做了大量工作,在此表示衷心感谢。

本书为高等院校机械类特色专业系列规划教材。

本书的出版获得辽宁省本科教学研究项目经费资助和沈阳建筑大学资助,衷心感谢。

限于作者水平,书中错误难免,敬请批评指正。

编 者

2015年4月

目 录

第 1 篇 基础篇

第 1 章 绪论	2
§ 1-1 结构力学的研究对象和任务	2
§ 1-2 结构的计算简图	3
§ 1-3 约束和结点分类	4
§ 1-4 荷载的分类	6
§ 1-5 杆件结构的分类	7
第 2 章 平面体系的几何组成分析	8
§ 2-1 概述	8
§ 2-2 平面体系的计算自由度	8
§ 2-3 几何不变体系的组成规则	11
§ 2-4 瞬变体系	13
§ 2-5 机动分析举例	14
§ 2-6 几何构造与静定性的关系	16

第 2 篇 静定结构篇

第 3 章 静定梁与静定刚架	18
§3-1 工程实例	18
§3-2 单跨静定梁	19
§3-3 多跨静定梁	23
§3-4 静定平面刚架	29
§3-5 少求或不求约束力绘制弯矩图	35
§3-6 静定结构的特性	37
第 4 章 静定平面桁架内力分析	40
§ 4-1 概述	40
§ 4-2 结点法	41
§ 4-3 截面法	43
§ 4-4 结点法与截面法的联合运用	46
§ 4-5 组合结构的内力计算	49
第 5 章 静定结构的位移计算	52

§ 5-1 概述	52
§ 5-2 变形体系的虚功原理	54
§ 5-3 载荷作用下静定结构位移 计算单位载荷法	57
§ 5-4 图乘法	62
§ 5-5 非载荷因素引起位移	69
§ 5-6 线弹性结构的互等定理	74
第 6 章 影响线及其应用	78
§ 6-1 概述	78
§ 6-2 用静力法作单跨静定梁的影响线	79
§ 6-3 用机动法作单跨静定梁的影响线	85
§ 6-4 多跨静定梁的影响线	88
§ 6-5 桁架的影响线	90
§ 6-6 利用影响线求量值	92
 第 3 篇 超静定结构篇	
第 7 章 力法	98
§ 7-1 超静定问题工程实例	98
§ 7-2 超静定次数的计算	99
§ 7-3 力法的基本原理	101
§ 7-4 力法典型方程	103
§ 7-5 用力法计算超静定梁和刚架	105
§ 7-6 力法求解对称超静定问题	115
§ 7-7 非载荷因素引起的内力计算	119
§ 7-8 超静定结构位移计算、内力图校核和超静定结构特性	121
第 8 章 位移法	125
§ 8-1 位移法基本概念	125
§ 8-2 位移基本结构和基本未知量	126
§ 8-3 等截面直杆的转角位移方程	128
§ 8-4 位移法典型方程及基本步骤	132
§ 8-5 位移法具体应用举例	139
§ 8-6 结构对称性利用	147
第 9 章 矩阵位移法	153

§ 9-1 概述	153
§ 9-2 单元刚度矩阵	154
§ 9-3 在整体坐标中的单元刚度矩阵	158
§ 9-4 整体分析	162
§ 9-5 边界条件的处理	166
§ 9-6 非结点荷载的处理	168
§ 9-7 结构矩阵分析举例	169
 第 4 篇 结构稳定与极限载荷篇	
第 10 章 结构稳定	182
§ 10-1 概述	182
§ 10-2 临界荷载求解的静力法	184
§ 10-3 用能量法确定临界荷载	191
§ 10-4 变截面压杆的稳定	196
§ 10-5 结构稳定问题与强度问题的区别	200
第 11 章 梁和刚架的极限荷载	203
§ 11-1 概述	203
§ 11-2 极限弯矩, 塑性铰, 破坏机构	203
§ 11-3 极限荷载的计算方法	205
§ 11-4 超静定梁的极限荷载计算	208
§ 11-5 超静定刚架的极限荷载	212
习题与参考答案	217
参考文献	271

第1篇 基础篇

引言

1. 结构力学

结构力学是机械设计专业方向的一门专业基础课。通过课程学习,培养学生掌握静定与超静定机械结构在载荷等因素作用下的内力、变形和稳定性等方面的计算原理与计算方法,为机械产品中的结构设计打好基础。

本篇包括绪论和平面体系的几何组成分析。

2. 研究内容

- (1) 绪论;
- (2) 平面体系的几何组成分析。

3. 课程基本要求

- (1) 了解结构力学的研究对象和任务;
- (2) 掌握结构的计算简图,约束分类、载荷分类和杆件结构分类;
- (3) 了解平面体系的机动分析、平面体系计算自由度的计算;
- (4) 掌握平面几何不变体系组成规则及其应用。

第 1 章 绪论

§ 1-1 结构力学的研究对象和任务

1. 结构

按照一定规律组成，并能承受一定荷载作用的骨架体系，称为结构。结构一般由多个部分构件联结而成，包括梁、刚架、桁架和组合结构等。例如图 1-1a 塔式起重机、图 1-1b 泵车臂架、图 1-1c 挖掘机和图 1-1d 门式起重机的主体钢结构等均为结构。机械工程中的构件体系与建筑结构不同的是，不但能够形成机构运动，同时在每个状态也是一个结构体系承担载荷。

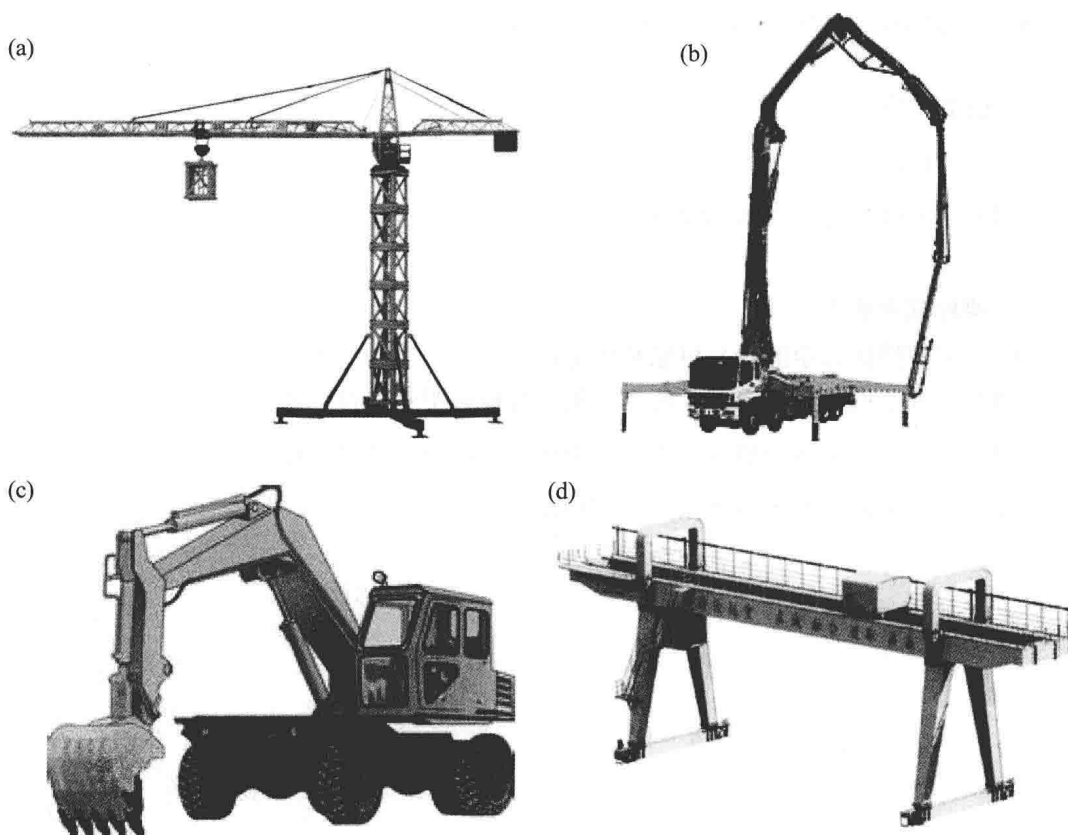


图 1-1

2. 研究对象

理论力学研究刚体的静力学、运动学和动力学；材料力学一般研究线弹性单个杆件的强度、刚度和稳定性计算与构件设计问题。

结构力学以结构为研究对象，研究杆件组成的结构体系的计算问题。

3. 基本任务和研究内容

结构力学研究结构的组成规律和结构在荷载、温度变化、支座位移等因素作用下的内力、变形和稳定的计算原理和计算方法。

研究内容包括：

- (1) 在几何分析方面，探讨结构的几何组成规律；
- (2) 在强度计算方面，研究结构的内力计算方法；
- (3) 在刚度计算方面，研究结构的变形计算方法；
- (4) 在稳定计算方面，分析结构的稳定性。

4. 结构力学的目的

几何组成分析的目的就是保证结构各部分不发生相对运动，并能承受载荷；强度和稳定计算的目的是保证结构满足安全和经济的要求；刚度计算的目的是保证结构不发生过大的变形。

§ 1-2 结构的计算简图

1. 计算简图

针对复杂的实际结构，通过抽象与简化，使其成为既能反映实际受力情况而又便于计算的图形，并用来代替实际结构的力学模型，称为计算简图。

2. 计算简图选择的两条原则

- (1) 从实际出发：计算简图要反映结构的实际受力情况；
- (2) 分清主次，略去细节：计算简图要便于分析和计算。

3. 影响计算简图选择的主要因素

- (1) 结构的重要性：重要——精确，反之——粗略；
- (2) 设计阶段：初步设计——粗略，技术设计——精确；
- (3) 计算问题的性质：静力计算——精确，动力和稳定计算——粗略；
- (4) 计算工具：计算机——精确，计算尺——粗略。

4. 结构简化内容

- (1) 杆件简化：以轴线代表杆件；
- (2) 支座和结点简化；
- (3) 载荷简化；
- (4) 体系简化。

如图 1-2a 所示的门式起重机受自重和起吊载荷作用。视梁自重为均布载荷，起吊重物为集中力，考虑结构在水平方向不移动，将约束一端化为固定铰支座，另一端为链杆，简化结果如图 1-2b 所示。

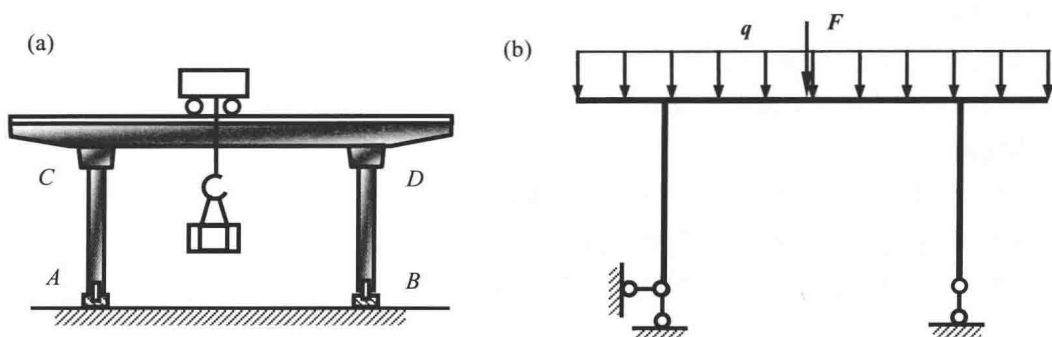


图 1-2

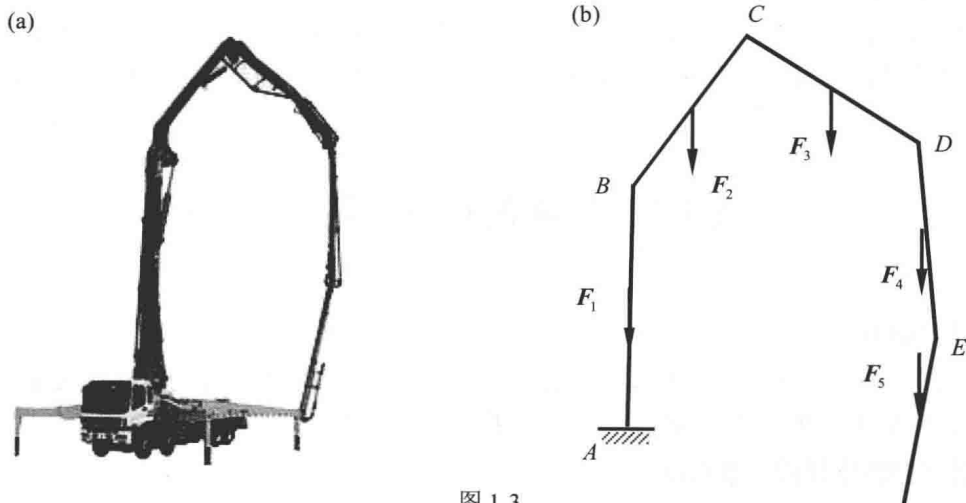


图 1-3

图 1-3a 为混凝土泵车臂架体系，底盘为基础部分，臂架之间通过铰接和液压传力部分构成，刚性良好，在每一个工作状态，臂架连接部位相对固定，简化为刚结点。结构体系简化结果如图 1-3b 所示。

§1-3 约束和结点分类

1. 结点分类

在杆件组成结构中，两个或两个以上杆件共同的联接称为结点。根据实际结构组成，可以分为铰结点、刚结点和组合结点。

(1) 铰结点。与铰相联的各杆可以分别绕它任意转动。

图 1-4a 为桥式起重机起重臂，联接处不发生线位移，却有较小的角位移，结点简化为铰结点，如图 1-4b 所示。

(2) 刚结点。当结点转动时，各杆端的转角都相同。

图 1-4c 为门式起重机，联接处不发生线位移，也不发生角位移，结点简化为刚结点，如图 1-4d 所示。

(3) 组合结点。部分刚结，另一部分为铰结点，如图 1-4e 所示。

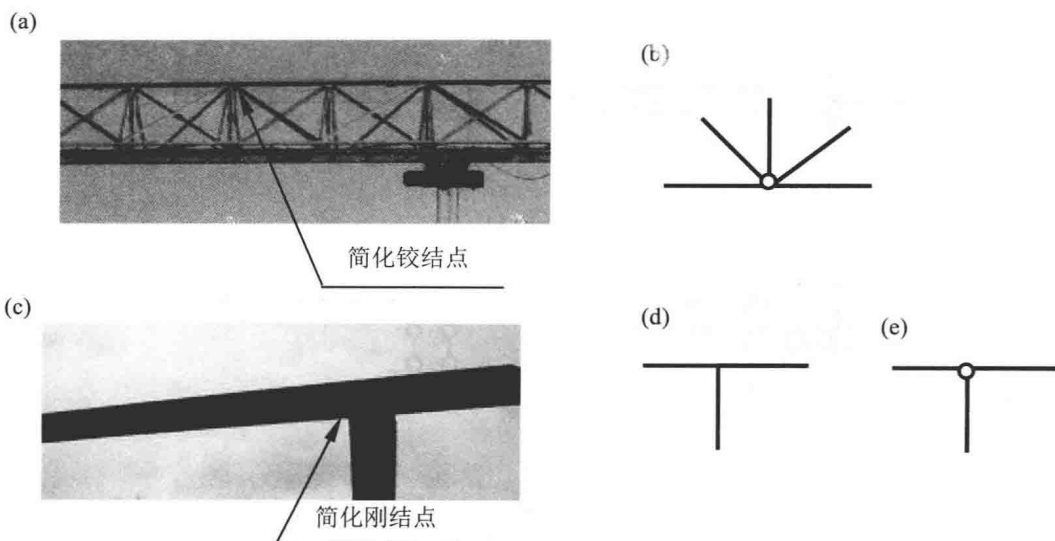


图 1-4

2. 约束分类

(1) 第一类约束（活动铰支座约束、链杆约束）。限制一个方向平动位移的约束，该约束产生一个方向上的约束力，如图 1-5 所示。

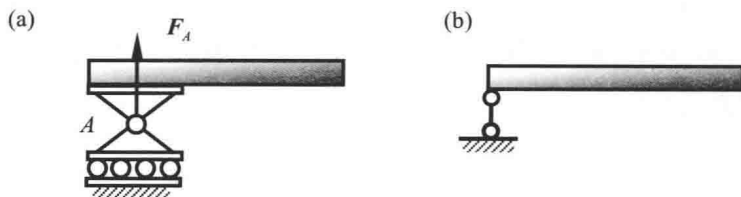


图 1-5

(2) 第二类约束（固定铰支座约束）。限制两个方向平动位移的约束，该约束产生两个方向上的独立约束力，如图 1-6 所示。

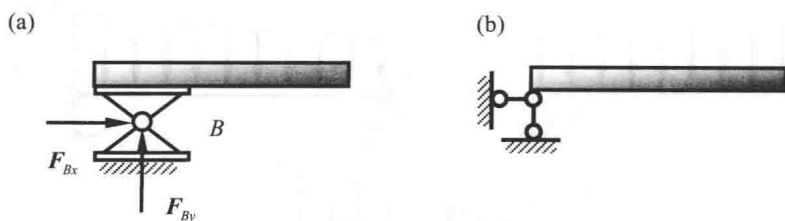


图 1-6

(3) 第三类约束（固定支座约束，固定端约束）。限制两个方向平动位移和一个方向转动位移约束，该约束产生两个方向上的独立约束力和一个力偶，如图 1-7 所示。

(4) 第四类约束（定向支座约束）。限制一个方向平动位移和一个方向转动位移约束，

该约束产生一个方向约束力和一个力偶，如图 1-8 所示。

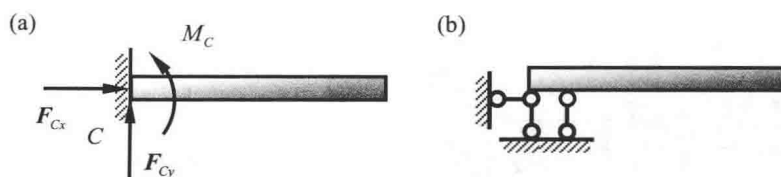


图 1-7



图 1-8

§1-4 荷载的分类

荷载是作用在结构上的外力和其他因素，例如结构自重、水压力、土压力、风压力、雪压力以及人群重量等。还有温度变化、基础沉降、材料收缩等引起的荷载。

荷载的分类：

(1) 荷载根据分布情况，可分为集中力、分布荷载、集中力偶。

图 1-9a 为集中力，可称为第一类荷载；图 1-9b 为集中力偶，可称为第三类荷载；

图 1-10 为分布荷载的矩形、三角形和梯形三种类型，可称为第二类荷载。

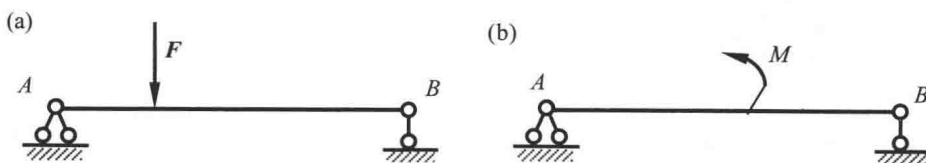


图 1-9

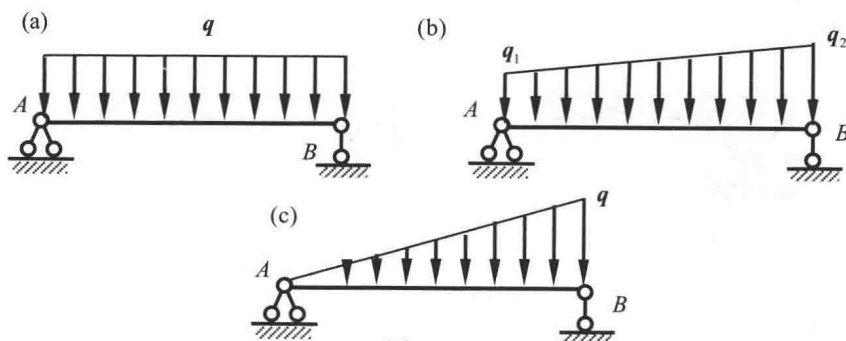


图 1-10

(2) 根据作用时间，可分为恒载和活载。

(3) 根据作用性质，可分为静载和动载。

(4) 根据作用位置, 可分为固定荷载和移动荷载。图 1-11 中集中力为移动荷载, 分布荷载为固定荷载。

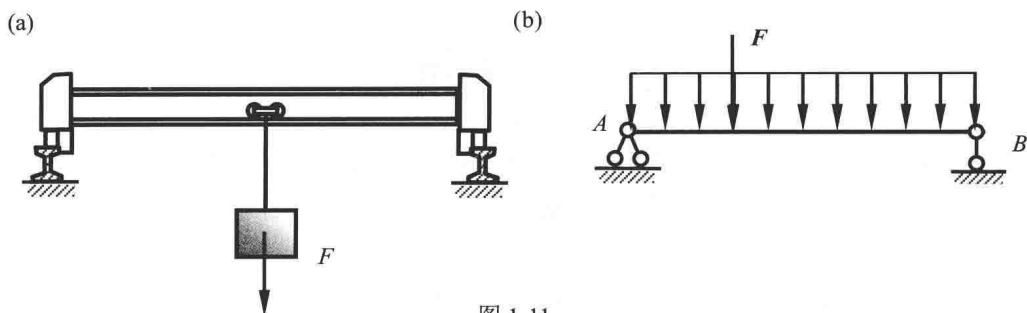


图 1-11

§1-5 杆件结构的分类

1. 结构分类

- (1) 按照空间观点, 分为平面结构和空间结构两类。
- (2) 按照几何观点, 分为杆件结构, 薄壁结构和实体结构三类。
- (3) 按照计算方法的特点, 分为静定结构和超静定结构两类。

2. 杆件分类

- (1) 梁: 梁是一种受弯构件, 如图 1-12a 所示。
- (2) 刚架: 刚架由梁和柱组成, 各杆件受力以弯矩为主, 如图 1-12b 所示。
- (3) 桁架: 桁架由若干杆件, 两端用铰联结而成的结构, 各杆只产生轴力, 如图 1-12c 所示。
- (4) 组合结构: 部分由链杆, 部分由梁式杆组合而成的结构。如图 1-12d 所示。

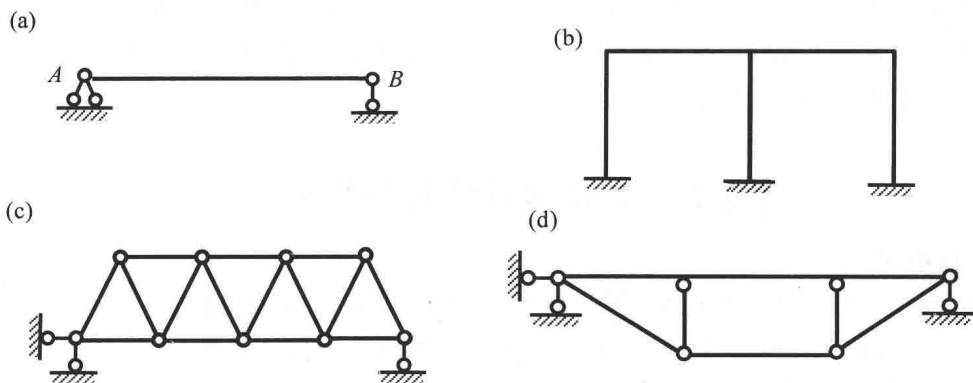


图 1-12

第2章 平面体系的几何组成分析

§ 2-1 概述

杆件结构通常是由若干杆件相互联结而组成的体系，只有组成合理的体系才能够作为工程结构使用，所以要针对杆件组成体系进行机动分析，确保所组成的体系为几何不变体系。

(1) 几何可变体系。在任意荷载作用下，若不考虑材料的形变，其几何形状与位置均不能保持不变的体系，称为几何可变体系，如图 2-1a 所示。

(2) 几何不变体系。在任意荷载作用下，若不考虑材料的变形，其体系的几何形状与位置保持不变的体系，称为几何不变体系，如图 2-1b 所示。

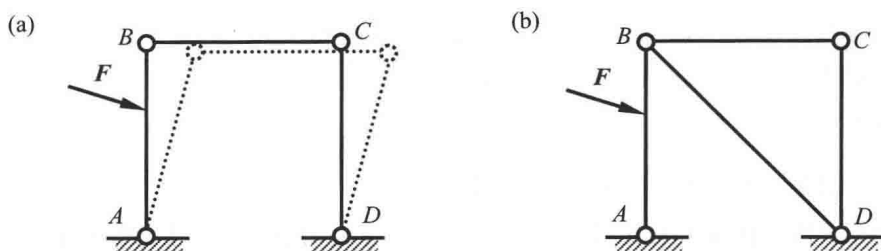


图 2-1

判别体系是否几何不变的工作，称为体系的几何机动分析，或称几何分析。

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几何不变的一部分体系看成一个刚体。在平面体系中将刚体称为刚片。工程中的结构必须是几何不变体系，方能承受荷载和传递荷载。

§ 2-2 平面体系的计算自由度

1. 自由度

判定一个体系为几何不变或几何可变体系，应先计算它的自由度。

物体的自由度是指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。

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，它的位置用坐标 x_A 和 y_A 完全可以确定，它的自由度等于 2，如图 2-2a 所示。

平面上的一个刚片，它的位置用 x_A ， y_A 和 φ_A 可以完全确定，它的自由度等于 3，如图 2-2b 所示。

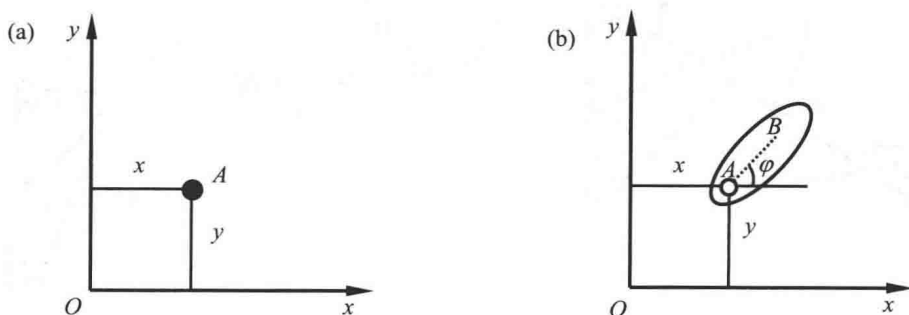


图 2-2

2. 联系

体系有一定的自由度，加入限制运动的装置可使自由度减少，减少自由度的装置称为联系。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，自由度为 2，减少了一个自由度，称链杆为一个联系或一个约束，如图 2-3a 所示。

(2) 铰。两个刚片用一个铰连接，可减少两个自由度，称连接两个刚片的铰为单铰，相当于两个联系，如图 2-3b 所示。连接多个刚片的铰称为复铰 ($n > 2$)，相当于 $(n-1)$ 个单铰，相当于 $2 \times (n-1)$ 个联系，如图 2-3c 所示。

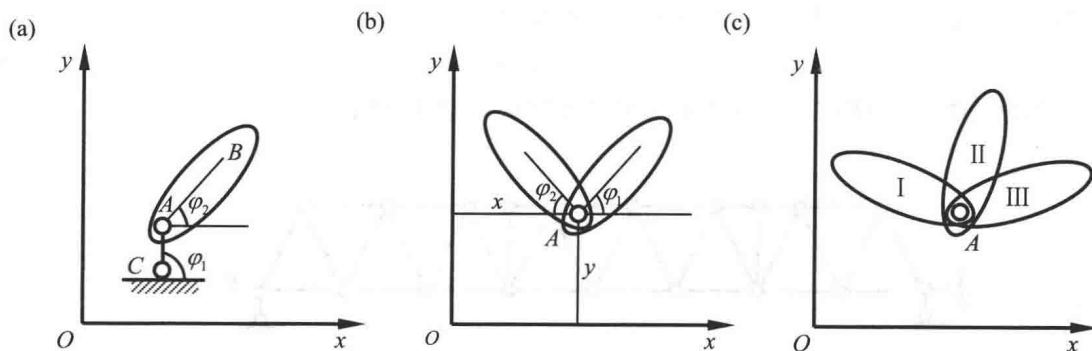


图 2-3

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总数目。设体系的计算自由度为 W ，体系固定端数为 g ，体系的单铰数为 h ，支座链杆数为 r ，体系的刚片数为 m ，则

$$W = 3m - (3g + 2h + r) \quad (2-1)$$

例题 2-1 图 2-4 所示的装载机, 设有起升和保持两种体系, 求体系的计算自由度。

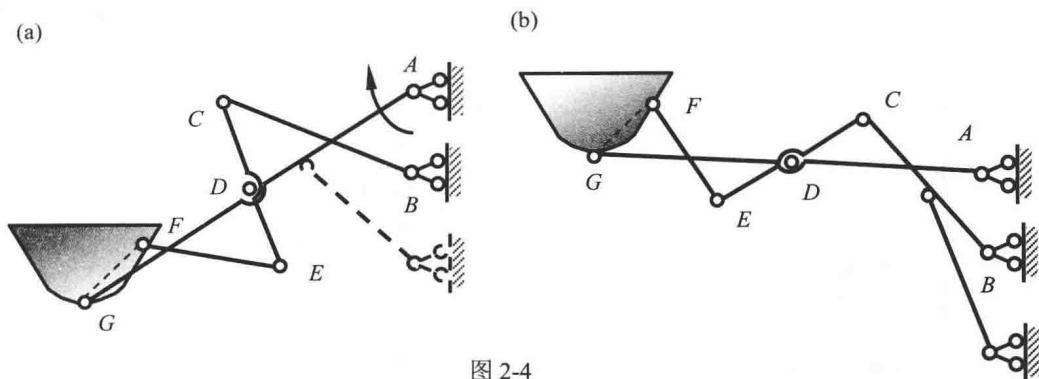


图 2-4

解:

(1) 图 2-4a 所示为装载机起升体系。体系刚片数 $m=5$, 固定端 $g=0$, 单铰数 $h=7$, 支座链杆数 $r=0$, 则

$$W = 3 \times 5 - 2 \times 7 = 1 > 0$$

此时为几何可变体系。

(2) 图 2-4b 所示为装载机保持体系。体系刚片数 $m=6$, 固定端 $g=0$, 单铰数 $h=9$, 支座链杆数 $r=0$, 则

$$W = 3 \times 6 - 2 \times 9 = 0$$

此时为几何不变体系。

如图 2-5 所示的体系完全由两端铰结杆件所组成, 称为铰结链杆体系或桁架体系。其计算自由度除可用式(2-1)计算外, 还可以用下面的公式简化计算。设体系结点数为 j , 杆件数为 b , 支座链杆数为 r , 则体系计算自由度 W 为

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

例题 2-2 计算图 2-5 所示的起重机水平臂体系的计算自由度。

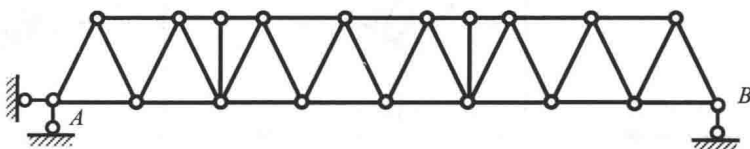


图 2-5

解: 体系的结点数 $j=19$, 杆件数为 $b=35$, 支座链杆数为 $r=3$, 则体系计算自由度 W 为

$$W = 2 \times 19 - (35 + 3) = 0$$

4. 平面体系计算自由度结果分析

平面体系的计算自由度结果有三种情况:

(1) $W > 0$, 表明体系缺少足够的联系, 因此可以肯定体系是几何可变的。