

高校土木工程专业规划教材
高校结构力学课程改革创新推荐教材

结构力学

主编 郭仁俊

J I E G O U L I X U E

中国建筑工业出版社

0342/65

2007

高校土木工程专业规划教材
高校结构力学课程改革创新推荐教材

结 构 力 学

主 编 郭仁俊

副主编 陈宽德 汪 新

主 审 刘 铮

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

结构力学/郭仁俊主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2007

高校土木工程专业规划教材

高校结构力学课程改革创新推荐教材

ISBN 978-7-112-09166-9

I. 结… II. 郭… III. 结构力学-高等学校-教材

IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 035979 号

高校土木工程专业规划教材
高校结构力学课程改革创新推荐教材

结 构 力 学

主 编 郭仁俊

副主编 陈宽德 汪 新

主 审 刘 铮

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京密云红光制版公司制版

北京富生印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 28 字数: 677 千字

2007 年 7 月第一版 2007 年 7 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 39.00 元 (附网络下载)

ISBN 978-7-112-09166-9

(15830)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书主要包括：绪论、平面体系的几何组成分析、静定结构的受力分析、结构的位移计算、力法、位移法、渐近法、影响线及其应用、矩阵位移法、结构的极限荷载、结构弹性稳定计算、结构动力学以及附录。附录内容有静定结构内力的简捷计算、结构位移计算的改进方法、超静定结构的 EXCEL 算法、力法计算机程序分析及附录主要内容的多媒体教学辅助软件，对教、学有良好的作用。

本书可作为土木工程、水利、隧道等专业结构力学课程的教材，也可作为土建类非结构专业的教材，还可以作为相关专业工程技术人员的参考书。

本书所附网络下载的地址为：www.cabp.com.cn/td/cabp15830.rar。

* * *

责任编辑：朱首明 吉万旺

责任设计：董建平

责任校对：孟楠 王爽

前 言

结构力学是研究外因作用下结构内力、变形计算的科学,是土建、路桥、水利、隧道工程等专业重要的技术基础课。然而,结构计算繁琐、比较难学,因此需要对结构力学课程教学不断进行改革和提高。

本书第1章~第12章内容与传统结构力学相同,符合教育部审定的“结构力学课程教学基本要求”,书中符号按照国家标准《量和标准》(GB 3100~3102—93)中有关规定采用。附录I~V是在广东省教育科学“十五”规划项目支持下,本着“方法正确、简便实用、容易掌握、计算迅速”的原则研制的改进内容,包括从静定结构到超静定结构,从支座反力、内力到位移计算的一系列方法。考虑到人们的教学习惯和教学内容安排,将这些改进方法列入附录中。值得提出的是,上述改进方法的概念、原理与传统方法完全相同,学习时无需增加新知识。在使用本书时,应鼓励学生采用改进方法对传统方法计算结果进行校核。这样既可以使学生加深对基本知识的理解,又有助于提高学生的力学分析能力。

本书可作为土木、水利、隧道等专业结构力学课程的教材,也可以作为土建类非结构专业的教材,还可作为有关工程技术人员参考书。

本书第1~12章编写人员有:广东工业大学郭仁俊(第1、3、5章)、汪新(第7章、9.8节)、朱江(第6、8章)、黄卷潜(第2、4、12章),华南理工大学陈宽德(9.1~9.7节、第10、11章);附录I~IV的研编人员有:郭仁俊(附录I~IV理论分析、文稿编写)、陈宽德(附录I、II、III多媒体教学软件编制,见附录V)、汪新(附录II、III的EXCEL表及附录IV的力法程序编制,见附录V)(见www.cabp.com.cn/td/cabp15830.rar);郭仁俊对全书进行了统稿,任主编;陈宽德、汪新任副主编。

本书由西安建筑科技大学刘铮教授主审。

在本书编写和各种教改方法研制过程中,得到广东工业大学校长张湘伟教授及建设学院的大力支持,刘铮教授为本书的编写创造了良好的工作条件。中国矿业大学袁文伯教授、广东工贸职业技术学院姚立宁教授、西安科技大学杨更社教授、西安建筑科技大学王荫长教授等对本书提出许多宝贵意见,广东省建设职业技术学院蔡东副教授、广东工业大学郭新光、练俊同学为本书教改内容作了许多有益的工作,广东工业大学研究生梁瑞庆对书稿整理做了许多工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于编写经验不足、水平有限、时间仓促,错误之处在所难免,尤其是附录中各种方法还有待改进和完善,敬请读者和专家惠予指正,以便今后进一步提高。

编 者

主要符号表

A 振幅, 面积	F_P 集中荷载
c 支座广义位移, 黏滞阻尼系数	F_H 水平推力
c_{cr} 临界阻尼系数	F_I 惯性力
D 侧移刚度, 行列式	F_Q 剪力
E_P 结构总势能	F_{AH} 、 F_{AV} A 处沿水平、竖向的分力
f 矢高, 工程频率	F_{pe} 欧拉临界荷载
F_P 节点荷载向量, 综合节点荷载向量	F_R 阻力
F_N 轴力	i 线刚度
F_e 弹性力	I 单位矩阵
F_{Ax} 、 F_{Ay} A 支座沿 x 、 y 方向的反力	$\overline{k^e}$ 局部坐标系下的单元刚度矩阵
F_{cr} 临界荷载	K 结构刚度矩阵
F_{pu} 极限荷载	M 力矩, 力偶矩, 弯矩
G 切变模量	M^F 固端弯矩
I 惯性矩	p 分布荷载集度
k 刚度系数	r 单位位移引起的广义反力
k^e 整体坐标系下的单元刚度矩阵	S 劲度系数, 截面静矩, 影响线量值
m 质量	T 周期, 动能
M 质量矩阵	u 水平位移
M_u 极限弯矩	V 应变能
q 均布荷载集度	X 广义未知力
R 广义反力	α 线膨胀系数
t 时间	Δ 节点位移向量
T 坐标转换矩阵	δ 单位力引起的广义位移
v 竖向位移	ξ 阻尼比
W 平面体系自由度, 功, 弯矩截面系数	μ 力矩分配系数
Z 广义未知位移	σ_s 屈服极限
Δ 广义位移	φ 角位移, 初相角
γ 剪力分配系数, 角应变	ω 角频率
A 振幅向量	θ 干扰力频率
C 弯矩传递系数	σ_b 强度极限
d 节间距离	σ_u 极限应力
E 弹性模量	Φ 振型矩阵
E_P^* 荷载势能	

目 录

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 结构力学的研究对象、任务及特点	1
1.2 结构的计算简图	3
1.3 平面杆件结构的分类	6
1.4 荷载的分类	8
第 2 章 平面体系的几何组成分析	9
2.1 概述	9
2.2 平面体系的自由度	9
2.3 几何不变体系的基本组成规则	12
2.4 瞬变体系	14
2.5 几何组成分析示例	16
2.6 几何组成与静定性的关系	19
思考题	21
习题	21
答案	23
第 3 章 静定结构的受力分析	24
3.1 静定结构内力分析基础	24
3.2 静定梁	31
3.3 静定平面刚架	37
3.4 静定平面桁架	44
3.5 三铰拱	56
3.6 静定组合结构	63
3.7 静定结构的静力特性	65
思考题	67
习题	68
答案	75
第 4 章 结构的位移计算	77
4.1 概述	77
4.2 变形体系的虚功原理	78

4.3 结构位移计算的一般公式	83
4.4 静定结构在荷载作用下的位移计算	85
4.5 图乘法	90
4.6 静定结构在温度变化时的位移计算	96
4.7 静定结构在支座移动时的位移计算	98
4.8 线性弹性体系的互等定理	99
思考题	102
习题	103
答案	105
第5章 力法	107
5.1 超静定结构概述	107
5.2 力法的基本概念	110
5.3 力法典型方程	113
5.4 力法计算示例	115
5.5 温度改变和支座移动时超静定结构的计算	120
5.6 超静定结构的位移计算及最后弯矩图的校核	124
5.7 对称性的利用	129
5.8 超静定拱的内力计算	135
5.9 超静定结构的特性	142
思考题	143
习题	144
答案	147
第6章 位移法	149
6.1 概述	149
6.2 等截面直杆的转角位移方程	150
6.3 位移法的基本未知量和基本结构	155
6.4 位移法的典型方程及计算步骤	157
6.5 位移法计算示例	162
6.6 直接由平衡条件建立位移法典型方程	168
6.7 对称性的利用	170
*6.8 支座位移和温度变化时超静定结构的计算	172
思考题	175
习题	175
答案	178
第7章 渐近法	179
7.1 概述	179
7.2 力矩分配法的基本原理	179

7.3 力矩分配法计算连续梁和无节点线位移刚架	183
7.4 无剪力分配法	190
*7.5 剪力分配法	193
思考题	198
习题	199
答案	200
第 8 章 影响线及其应用	201
8.1 影响线的概念	201
8.2 静力法作单跨静定梁的影响线	202
8.3 间接荷载作用下的影响线	207
8.4 多跨静定梁的影响线	208
8.5 机动法作影响线	209
8.6 桁架的影响线	212
8.7 利用影响线求影响量	215
8.8 最不利荷载位置	217
8.9 简支梁的内力包络图和绝对最大弯矩	223
*8.10 超静定梁影响线的概念	228
*8.11 连续梁的内力包络图	231
思考题	234
习题	234
答案	237
第 9 章 矩阵位移法	238
9.1 概述	238
9.2 单元及单元刚度矩阵	238
9.3 单元刚度矩阵的坐标变换	244
9.4 结构的原始刚度矩阵	248
9.5 支承条件的引入	254
9.6 非节点荷载的处理	257
9.7 矩阵位移法的解题步骤及示例	261
9.8 平面刚架矩阵位移法 Visual Basic 程序	270
思考题	277
习题	277
答案	279
第 10 章 结构的极限荷载	281
10.1 概述	281
10.2 极限弯矩、塑性铰和破坏机构	282
10.3 梁的极限荷载	285

10.4 比例加载判定定理	293
10.5 刚架的极限荷载	297
思考题	301
习题	301
答案	303
第 11 章 结构弹性稳定计算	304
11.1 概述	304
11.2 用静力法确定临界荷载	306
11.3 用能量法确定临界荷载	315
11.4 变截面直杆的稳定	320
11.5 组合压杆的稳定	322
11.6 用矩阵位移法计算刚架的临界荷载	325
思考题	331
习题	332
答案	334
第 12 章 结构动力学	335
12.1 概述	335
12.2 体系振动的自由度	336
12.3 单自由度体系的自由振动	338
12.4 单自由度体系的强迫振动	344
12.5 多自由度体系的自由振动	352
12.6 多自由度体系的强迫振动	365
* 12.7 无限自由度体系的自由振动	371
12.8 计算频率的近似方法	374
思考题	377
习题	377
答案	382
附录 I 静定结构内力的简捷计算	384
I.1 求反力、任一截面内力的反正法	384
I.2 绘制剪力图、轴力图的力矢移动法	386
I.3 绘制弯矩图的单跨杆件法	389
附录 II 结构位移计算的改进方法	393
II.1 求指定截面位移的代数法	393
II.2 绘制位移图的弯矩荷载法	399
附录 III 超静定结构的 EXCEL 算法	414
III.1 力法采用 EXCEL 计算的作法	414

III.2 位移法采用 EXCEL 计算的作法	419
III.3 力矩分配法采用 EXCEL 计算的作法	423
附录 IV 力法计算机程序分析	428
IV.1 编制程序的理论分析	428
IV.2 力法程序的实现	431
附录 V 网络下载 (见 www.cabp.com.cn/td/cabp15830.rar)	
V.1 附录 I、II、III 的多媒体教学辅助软件	
V.2 附录 II 位移计算的 EXCEL 表格	
V.3 附录 III 各种超静定结构分析方法的 EXCEL 表格	
V.4 力法计算机程序	
主要参考文献	435

第1章 绪 论

1.1 结构力学的研究对象、任务及特点

在工程范畴内,由建筑材料按照合理方式组成,能够承担和传递荷载并且符合经济原则的物体或体系称为工程结构(简称结构)。在土木和水利工程中,房屋中的梁、柱、基础以及桥梁、挡土墙、闸门、水坝等等都是结构的实例。结构在建筑物或构筑物中起着支撑荷载的骨架作用,无论它是由单个构件(例如梁)还是多个构件(例如屋架)所组成,当不考虑材料的微小应变时,其本身各部分之间都不会发生相对运动,且直接或间接与地基连接,并将其上所受的荷载传到地基上。图 1-1 所示是单层工业厂房的屋架、柱、基础等结构的例子。

按照几何特征的不同,结构可分为三种类型:

1. 杆件结构(又称杆系结构)

它是由若干根长度远大于其他两个尺度(截面的宽度和高度)的杆件所组成的结构。若组成结构的所有杆件的轴线都在同一平面内,并且作用于结构的荷载也位于此同一平面,则这种结构为平面杆件结构,否则,为空间杆件结构。实际上,所有杆件结构都是空间结构,但为

了简化计算,常常将某些空间特征不明显的结构分解为若干平面结构来计算。例如,图 1-1(b)所示的平面结构就是图 1-1(a)所示厂房中的一个横向承重排架。而对于某些具有明显空间特征的结构,如图 1-2 所示的圆形水池、空间桁架等,则不能分解为平面结构,而必须按空间结构考虑。

2. 薄壁结构 工程中,对于厚度远小于其他两个尺度的构件,当其为一平板状物体时,称为薄板(图 1-3a);当其具有曲面外形时,称为薄壳(图 1-3b)。薄壁结构是指仅由薄板或仅由薄壳或者由薄板与薄壳一起组成的结构。矩形水池、薄壳屋顶等是薄壁结

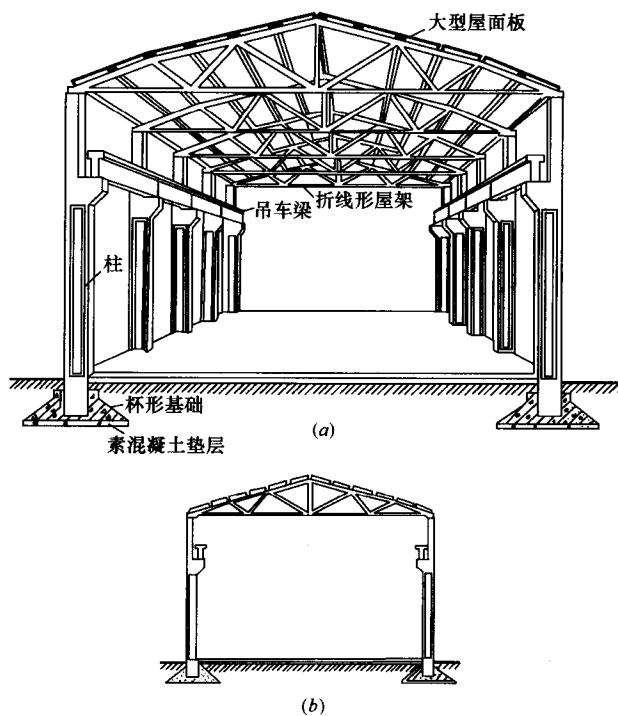


图 1-1

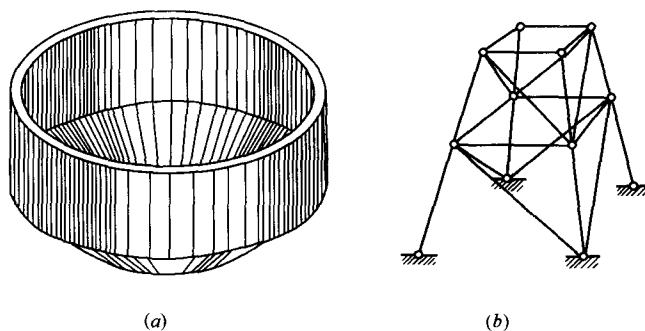


图 1-2

(a) 圆形水池；(b) 空间桁架

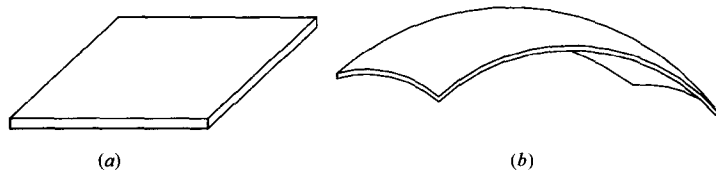


图 1-3

构的工程实例。

3. 实体结构 在三个方向的尺度大约为同一量级的结构称为实体结构，例如图 1-4 所示的挡土墙、块式基础等均属于实体结构。

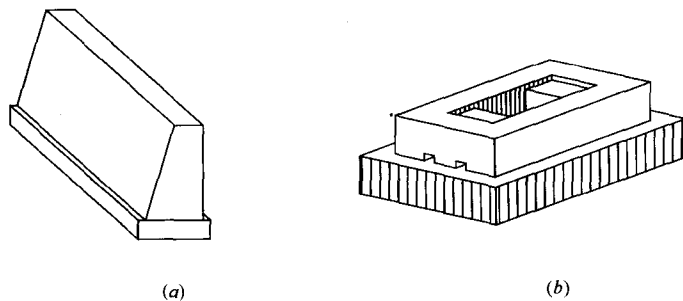


图 1-4

(a) 挡土墙；(b) 块基础

结构力学的研究对象主要为杆件结构。

结构力学的任务是研究结构的组成规律和合理形式，研究结构在外因作用下的强度、刚度和稳定性的原理和计算方法。研究结构组成规律的目的是为了保证结构能够维持平衡并承担荷载；研究结构的合理形式是为了有效地利用材料，使其性能得到充分地发挥；计算强度和稳定性的目的是使结构满足经济与安全的双重要求；计算刚度的目的则是保证结构不致发生过大的变形，以满足正常使用的要求。

对结构进行强度计算时，必须先确定结构的内力，然后按照强度条件选定或验算各杆件的截面尺寸。在结构的刚度和稳定性的计算中，也将涉及内力计算问题。因此，研究杆件结构在外因作用下的内力计算，便成为本课程着重讨论的内容。

结构力学与材料力学、弹性力学有着密切的联系，它们的任务都是讨论变形体系的强度、刚度和稳定性，但在研究对象上有所区别。材料力学基本上是研究单个杆件的计算，结构力学主要是研究由杆件所组成的结构，而弹性力学则研究各种薄壁结构和实体结构，同时对杆件也作更精确的分析。

结构力学是一门专业基础课，在专业学习中占有重要的地位。学好这门课要用到数学、理论力学、材料力学等已修课程的知识；另一方面又为钢筋混凝土结构、钢结构、结构抗震设计等后续专业课的学习奠定必要的力学基础。学习结构力学要“抓住重点、灵活分析、多作练习”。全书有重点，各章也有重点。例如叠加原理、静力平衡条件就是全书的重点，几何不变的组成规则则是第2章的重点等等。对重点内容一定要熟练掌握、真正理解；求解结构力学问题，作法往往不是唯一的。例如，静定桁架的内力计算、结构内力图的绘制、几何体系的组成分析等等，这就需要善于思考、灵活分析；掌握、消化结构力学的基本理论、基本方法需要通过一定数量的习题练习。因此，多作练习对于真正掌握、深刻理解结构分析方法以及提高力学分析能力是十分必要的。

1.2 结构的计算简图

1.2.1 计算简图的概念

为了对结构进行受力分析，需要先选定结构的计算简图。所谓计算简图，就是在对实际结构略去次要因素后得到的简化了的图形，并以此代替实际结构进行受力分析。这是因为实际结构是很复杂的，要完全按照结构的真实情况进行力学分析，将是很办不到的，同时也是不必要的。因为即使办得到，其分析方法也十分复杂，无实用价值。

选定结构计算简图应遵循下述原则：第一，应尽可能正确反映结构的实际状态，使计算结果精确可靠；第二，略去某些次要因素，使受力分析得以简化，便于计算。

1.2.2 结构简化的内容

通常对平面杆件结构的简化包括：(1) 杆件的简化；(2) 节点的简化；(3) 支座的简化；(4) 荷载的简化。

1.2.2.1 杆件的简化

组成平面杆件结构的各个杆件，其长度远大于截面的宽度和高度，尽管杆件的材料、截面形状、所受荷载、两端约束可能各有不同，但其变形都符合平截面假设，即变形前为平面的横截面，变形后仍保持为平面。这样，截面上的应力就可由截面内力确定。于是，在受力分析时，只需要确定杆件截面的位置，而无须知道截面的形状。因此，在计算简图中，结构的杆件就可抽象地用其轴线来表示。

1.2.2.2 节点的类型及简化

在杆件结构中，各杆件相互连接的地方称为节点。确定结构的计算简图时，通常将杆件和杆件的连接区域简化为铰节点和刚节点两种理想情况。

1. 铰节点

铰节点的特征是与节点相连接的各杆件在连接处都可以绕节点自由转动。工程中，通

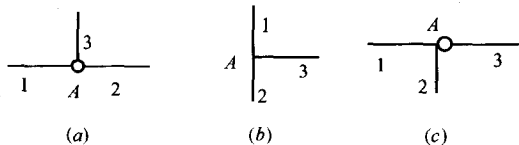


图 1-5

过螺栓、铆钉、楔头、焊接等方式连接的节点，各杆端虽不能绕节点任意转动，但由于连接不是很牢固或连接处刚性不大，各杆件之间仍有微小相对转动的可能，因此计算时常作为铰节点处理（图 1-5a），由此引起的误差在多数情况下是允许的。

铰节点只能传递力，不能传递力矩。

2. 刚节点

刚节点的特征是汇交于节点各杆端之间不能发生任何相对转动。工程中，现浇钢筋混凝土梁与柱连接的节点以及其他连接方法使节点的刚度很大时，计算简图中常简化为刚节点（图 1-5b）。

刚节点不但能传递力，也能传递力矩。

有时还会遇到在结构同一个节点处部分杆件之间刚接，部分杆件之间铰接的组合节点。例如图 1-5（c）所示节点 A，节点处 1、2 杆为刚性连接，3 杆与 1、2 杆则由铰连接。

1.2.2.3 支座的类型及简化

工程中，将构件与基础、墙、柱等支承物联系起来，以固定结构位置的装置叫做支座。在计算简图中，平面杆件结构的支座通常归纳为以下四种类型：

1. 活动铰支座

图 1-6（a）是活动铰支座的构造简图，它容许结构在支承处绕圆柱铰 A 转动和沿平行于支承平面 $m-n$ 的方向移动，但不能沿垂直于支承平面的方向移动。根据这一约束特点，在计算简图中，可以用一根垂直于支承平面的链杆 AB 来表示（图 1-6b）。因为与链杆 AB 相连的结构可以绕铰 A 转动，链杆又可以绕铰 B 转动，当转动很微小时，A 点的移动方向可看成与 AB 垂直。显然，链杆 AB 对构件的约束与活动铰支座完全相同。活动铰支座的受力特点是：当不考虑支承平面上的摩擦力时，支座反力 F_A 将通过铰 A 中心并与支承平面垂直。

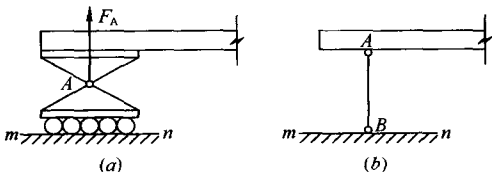


图 1-6

2. 固定铰支座

图 1-7（a）是固定铰支座的构造简图，它容许结构在支承处绕铰 A 转动，但不能有水平和坚直方向的移动。因此，固定铰支座的受力特点是：支座反力通过铰 A 的中心，但力的大小和方向未知。在计算简图中，这种支座可以用相交于 A 点的两根支承链杆来表示（图 1-7b、c）。

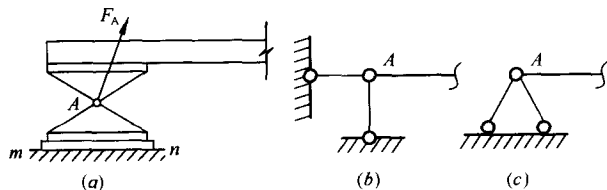


图 1-7

3. 固定支座

图 1-8（a）是固定支座的构造简图，它是将杆件一端嵌固在支承物中，使其在此端不能产生任何转动和移动。显然，这种支座的反力可以用水平反力、竖向反力和反力偶矩来表示（图

1-8b)。由于有三个未知量，所以固定支座反力的大小、方向和作用点都是未知的。

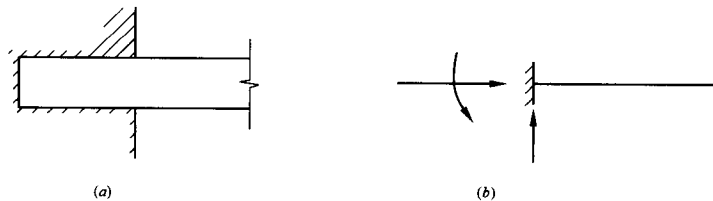


图 1-8

4. 定向支座

定向支座（又称滑动支座）的构造简图如图 1-9（a）所示，它是将杆件端部的上、下面用辊轴夹着并嵌入支承物中，使结构在支承处不允许有转动和垂直于支承面的移动，但可以沿杆轴方向有不大的位移。在计算简图中，可用垂直于支承面的两根平行链杆表示（图 1-9b）。这种支座的反力为一个垂直于支承面的力和一个力偶矩，可见定向支座反力和反力偶矩的大小未知。

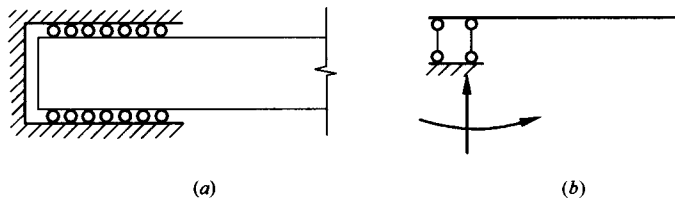


图 1-9

1.2.2.4 荷载的简化

作用于结构杆件上的荷载总是分布在一定范围（某一部分面积或体积）内的。而在计算简图中，杆件是用轴线表示的。因此，荷载也要简化为作用于杆轴上的力。当荷载作用范围与结构本身相比很小时，可以简化为集中力，例如悬挂在梁上的重物，梁作用于柱或墙上的力等。当荷载作用范围较大时，则可简化为沿杆轴方向分布的线荷载，如杆件自重、楼板作用于梁的力等。

1.2.3 结构简化示例

图 1-10（a）为一根中间悬吊有重物，两端搁置在墙上的横梁。若要按照实际情况进行分析，首先无法确定梁两端的反力，因为反力沿墙宽的分布规律难以知道。根据上述结构简化作法，将梁用其轴线代替；考虑到由于支撑面的摩擦，梁不能自由移动，但受热膨胀时仍可伸长，故将一端简化为固定铰支座，另一端为活动铰支座；由于墙宽比梁的长度小很多，因此，支座反力用集中力表示；忽略悬挂重物绳索的宽度，将重物视作梁上的集中荷载。于是，图 1-10(a)所示的实际结构便抽象和简化为图 1-10(b)所示的计算简图。

图 1-11（a）是一个现浇钢筋混凝土厂房屋架。施工时，先浇筑基础部分，再浇筑柱和梁，最后使全部屋架形成一个整体。确定结构计算简图时，梁、柱各用其轴线代替，

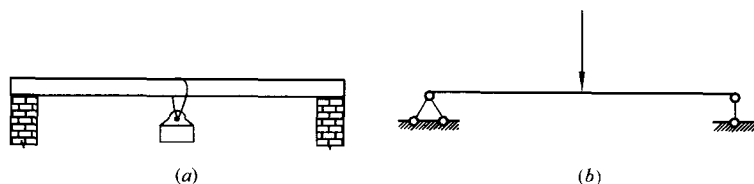


图 1-10

梁与柱连接处用刚节点表示，柱与基础的连接为固定支座。于是可得图 1-11 (b) 所示的屋架计算简图。

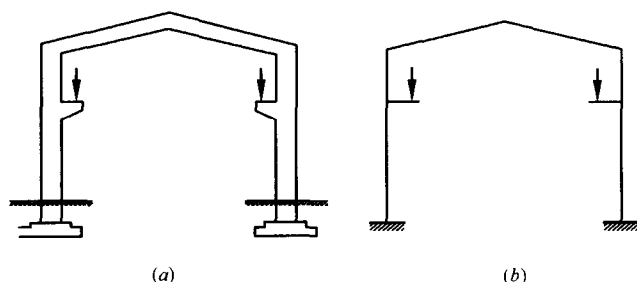


图 1-11

以上两例的计算简图基本上都能正确地反映结构的工作情况，同时也为结构反力、内力的计算提供了简便的方法。

需要指出的是，以上仅简单介绍了选取结构计算简图的原则、简化内容和简化过程。然而要恰当地作出某一实际结构的计算简图，则是一个综合性较强的问题，这需要有丰富的结构计算经验，同时要有对结构的整体和各部分构造、受力情况的正确判断和了解。对一些比较复杂的新型结构，往往要通过反复地模型实验或现场实测，才能获得较合理的计算简图。不过，对于常用的结构形式，初学者可以直接利用前人已积累的经验，采用已有的计算简图。

1.3 平面杆件结构的分类

平面杆件结构是本书研究的主要对象，按其组成特征和受力特点，它可分为以下几种类型：

1. 梁 梁是一种受弯构件，其轴线通常为直线，可以是单跨的或多跨的，计算简图如图 1-12 所示。

2. 刚架 刚架是由若干杆件主要用刚节点连接的结构，刚架各杆承受弯矩、剪力、轴力。图 1-13 是其计算简图。

3. 桁架 桁架是由若干根直杆在两端用理想铰连接而成的结构，当桁架只受节点荷载时，各杆只产生轴力。图 1-14 所示是桁架的计算简图。

4. 拱 拱是由轴线为曲线的杆件组成且在竖向荷载作用下支座处会产生水平反力（又称水平推力）的结构。杆件内力一般有弯矩、剪力和轴力，但因水平推力的存在，使