

全国高等院校**土木工程类**应用型系列规划教材

结构力学

郑荣跃 主 编
高 潮 副主编



科学出版社

全国高等院校土木工程类应用型系列规划教材



结 构 力 学

郑荣跃 主 编
高 潮 副主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书根据教育部高等学校非力学专业力学基础课程教学指导分委员会修订的《结构力学课程教学基本要求(A类)》编写。全书共分12章,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、结构位移计算、力法、位移法、渐近解法、矩阵位移法、影响线及其应用、结构的动力计算、结构的稳定计算、结构的极限荷载等。本书特点是强调基本理论、基本概念、基本方法,注意吸收定性结构力学的思想,注重突出计算与分析能力的培养,强调与实际工程的密切联系。

本书可作为高等院校土木工程、水利工程、工程力学等专业本科教材,也可作为土建类非结构专业的教材,还可以供高等院校力学教师及相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学 / 郑荣跃主编. —北京:科学出版社,2012
全国高等院校土木工程类应用型系列规划教材
ISBN 978-7-03-031293-8

I. ①结… II. ①郑… 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(2012)第 033317 号

责任编辑:任加林 / 责任校对:王万红
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年6月第一次印刷 印张:31 1/4

字数:690 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈铭浩〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137154(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

前 言

结构力学是高等学校土木工程、水利工程、交通工程等专业的一门主要专业基础课。结构力学课程的教学目标是使学生掌握结构的类型与特点,掌握结构强度、刚度、稳定性、动力特性等的计算分析方法,学会运用所学理论分析和解决实际工程中有关结构的计算和设计问题。结构力学在整个专业课程体系处于承上启下的核心地位。一方面它以高等数学、理论力学、材料力学等课程为基础,另一方面它又要为钢结构、钢筋混凝土结构、土力学与地基基础等后续课程提供必需的基础知识和计算方法,而且在课程设计、毕业设计的过程中也要反复用到结构力学知识。能不能学好结构力学已经成为衡量一个学生能不能学好本专业的重要标志。然而,由于结构力学具有概念抽象、理论严密、系统完整、逻辑性强,以及内容丰富、方法综合、与工程实际联系紧密等特点,一直被认为是比较难学的课程。因此,需要对结构力学课程教学不断进行改革和提高,而为不同类型院校的本科学生提供合适的教材也就成为当前需要迫切解决的问题。

本书定位为切合实际的应用型的本科类教材,考虑应用型本科院校土木工程、水利工程、交通工程等相关专业的培养要求,强调基本理论、基本概念、基本方法,注意吸收定性结构力学的思想,注重突出计算与分析能力的培养,强调与实际工程的密切联系。内容编排由浅入深、循序渐进,同时兼顾不同层次学生学习需求,适当压缩理论推导,且精选与实际结构紧密联系的典型例题与习题。

全书按《结构力学课程教学基本要求(A类)》(多学时)将内容划分为基础部分和专题部分,其中第1~7章是结构力学的基础部分,第8~12章是结构力学的专题部分。

本书由郑荣跃主编,具体编写分工如下:第1、2章由杜文学编写,第3、4章由高潮编写,第5章由萧寒编写,第6、7章由蒙彦宇编写,第8章由梧松编写,第9、11章由郑荣跃编写,第10章由严蔚和郑荣跃编写,第12章由王建民编写,研究生曹茜茜、俞静、朱军光完成了有关文字输入、插图绘制和部分习题求解工作。

本书承蒙教育部力学教学指导委员会委员、湖南省力学学会理事长唐国金教授精心审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢!

限于编者水平,书中不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 结构与结构设计	1
1.2 结构力学的研究对象及任务	5
1.3 结构的计算简图	6
1.4 杆件结构分类	10
1.5 荷载分类	12
1.6 结构力学的基本假定	13
1.7 结构力学的学习方法	14
小结	15
复习思考题	15
第 2 章 平面体系的几何组成分析	16
2.1 基本概念	16
2.2 平面体系的计算自由度	18
2.3 几何不变体系的组成规则	22
2.4 瞬变体系	23
2.5 几何组成分析实例	23
2.6 虚铰	25
2.7 平面体系的几何组成分析方法及一般步骤	26
2.8 体系的几何组成与静定性	28
小结	29
复习思考题	29
习题	30
第 3 章 静定结构的受力分析	33
3.1 概述	33
3.2 静定结构内力分析基础	33
3.3 静定梁	36
3.4 静定平面刚架	48
3.5 三铰拱	57
3.6 静定平面桁架	67
3.7 组合结构	79
3.8 静定空间结构	86
3.9 静定结构的一般性质	93

小结	99
复习思考题	99
习题	99
第4章 结构位移计算	103
4.1 概述	103
4.2 变形图和弹性曲线	105
4.3 变形体的虚功原理	106
4.4 结构位移计算的一般公式	117
4.5 图乘法	122
4.6 静定结构由于温度改变的位移计算	132
4.7 静定结构由于支座移动引起的位移计算	136
4.8 互等定理	137
小结	140
复习思考题	141
习题	141
第5章 力法	145
5.1 超静定结构的组成和超静定次数	145
5.2 力法的基本概念	148
5.3 超静定刚架和排架	154
5.4 超静定桁架和组合结构	157
5.5 对称结构的计算	161
5.6 两铰拱	169
5.7 无铰拱	174
5.8 支座移动和温度改变时的计算	180
5.9 超静定结构位移的计算	186
5.10 超静定结构计算的校核	188
小结	190
复习思考题	191
习题	191
第6章 位移法	198
6.1 位移法的基本原理	198
6.2 位移法基本未知量数目的确定	206
6.3 位移法的基本结构和基本方程(典型方程)	210
6.4 位移法计算步骤及举例	216
6.5 等截面直杆的转角位移方程	224
6.6 用直接平衡法建立位移法基本方程	227
6.7 对称性的利用	232
6.8 温度改变及支座移动下的位移法计算	236

小结	239
复习思考题	239
习题	240
第 7 章 渐近解法	245
7.1 渐近解法概述	245
7.2 力矩分配法的基本原理	245
7.3 荷载作用下连续梁和无侧移刚架的计算	253
7.4 有侧移刚架的计算——无剪力分配法	260
7.5 多层多跨刚架的近似计算	265
7.6 超静定结构的特性	265
小结	268
复习思考题	268
习题	269
第 8 章 矩阵位移法	273
8.1 概述	273
8.2 局部坐标系下单元刚度矩阵	273
8.3 整体局部坐标系下单元刚度矩阵	278
8.4 整体刚度矩阵	281
8.5 等效结点荷载	290
8.6 矩阵位移法计算步骤和实例	292
8.7 平面刚架结构分析的 Matlab 应用	296
附录 平面刚架数值分析程序	306
小结	314
复习思考题	315
习题	315
第 9 章 影响线及其应用	318
9.1 移动荷载和影响线的基本概念	318
9.2 静力法作静定梁的影响线	319
9.3 结点荷载作用下的影响线	325
9.4 静定桁架影响线	326
9.5 机动法作静定梁的影响线	329
9.6 影响线的应用	332
9.7 简支梁的内力包络图和绝对最大弯矩	340
9.8 超静定结构的影响线	344
9.9 连续梁的最不利荷载位置及内力包络图	346
小结	348
复习思考题	349
习题	349

第 10 章 结构的动力计算	353
10.1 概述	353
10.2 单自由度体系运动方程的建立	359
10.3 单自由度体系的自由振动	364
10.4 单自由度体系的强迫振动	370
10.5 多自由度体系的自由振动	381
10.6 振型向量的正交性	395
10.7 多自由度体系的强迫振动	397
10.8 无限自由度体系的自由振动	404
10.9 计算频率的近似方法	407
小结	413
复习思考题	413
习题	414
第 11 章 结构的稳定计算	417
11.1 概述	417
11.2 有限自由度体系的稳定	420
11.3 弹性压杆的稳定——静力法	425
11.4 弹性压杆的稳定——能量法	432
11.5 剪力对临界荷载的影响	436
11.6 组合压杆的稳定	438
11.7 用矩阵位移法确定刚架的临界荷载	442
小结	449
复习思考题	449
习题	449
第 12 章 结构的极限荷载	453
12.1 概述	453
12.2 纯弯曲梁的极限弯矩和塑性铰	454
12.3 梁的极限荷载	456
12.4 比例加载时判定极限荷载的一般定理	462
12.5 刚架的极限荷载	465
小结	476
复习思考题	477
习题	477
主要参考文献	491

第 1 章 绪 论

本章提示：本章从结构的概念与分类入手，引入结构力学与工程结构设计的关系。内容涵盖结构力学的研究内容、结构计算简图的概念及简化要点、结构与荷载的分类、结构力学的基本假定等，最后介绍结构力学的学习方法。

1.1 结构与结构设计

1.1.1 结构的概念

在土木工程中，由建筑材料按照一定的方式组成并能承受或传递荷载起骨架作用的部分称为工程结构，简称结构，如图 1.1 所示的建筑是一种典型的工程结构（梁柱体系）。

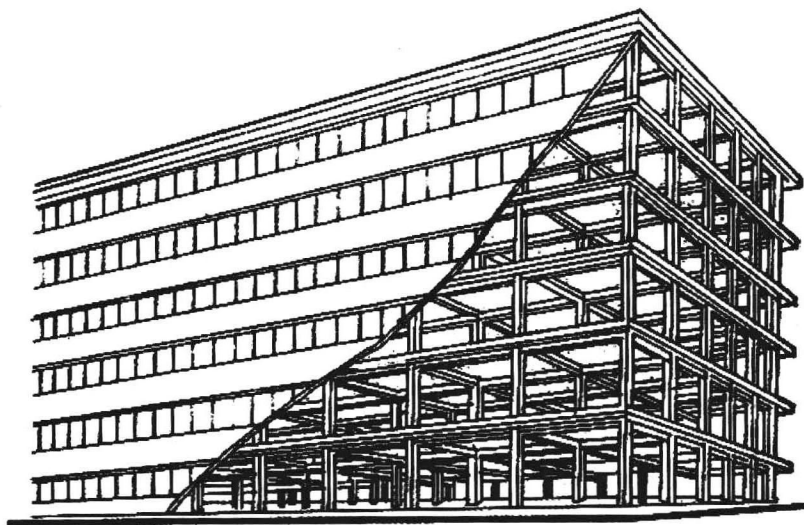
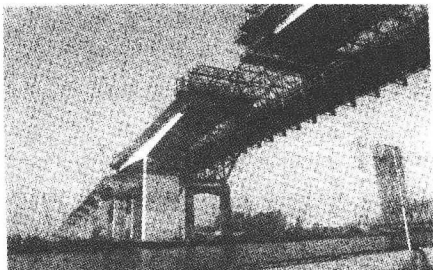
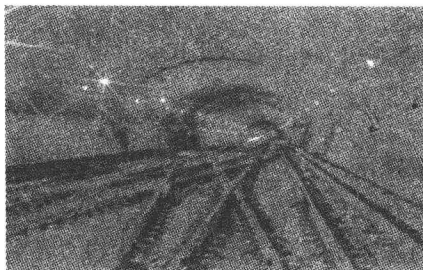


图 1.1 工程结构

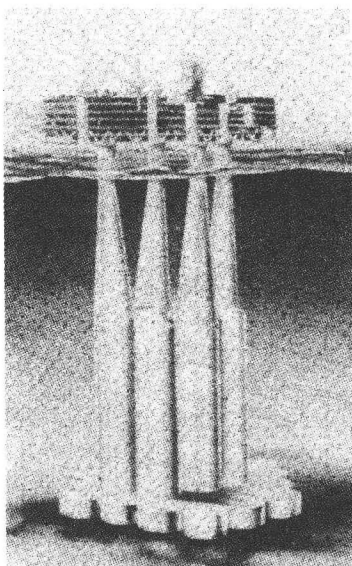
土木工程涉及各种各样的工程结构，常根据结构的用途、使用的材料或结构体系等对结构进行分类：①按照结构的用途不同，将结构分为建筑结构、桥梁结构、水工结构、地下结构和特种结构等。用途不同的结构，其结构形式与结构体系有很大的不同。②按照建筑材料的不同，将结构分为木结构、砌体结构、钢筋混凝土结构、钢结构和组合结构等。③按照结构体系的不同，将结构分为墙体结构、排架结构、刚架结构、框架结构、框架-剪力墙结构、剪力墙结构、壳体结构以及索与膜结构等。一些典型工程结构的示例如图 1.2 所示。



(a) 桥梁结构



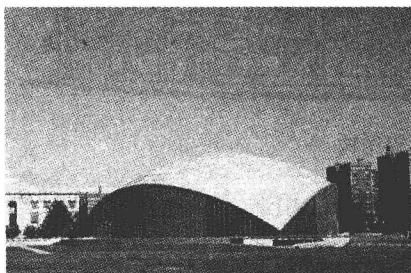
(b) 地铁



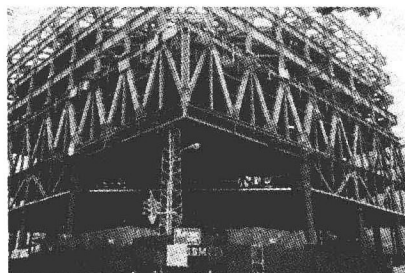
(c) 海洋平台



(d) 电视塔

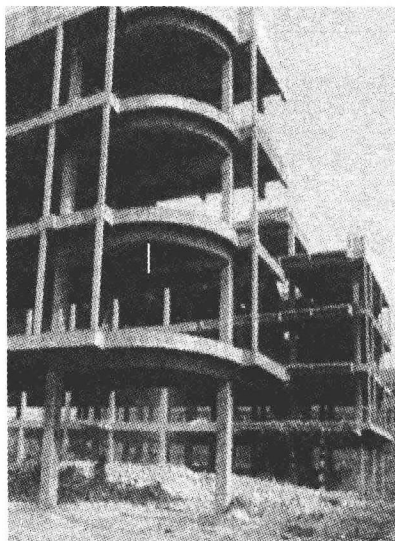


(e) 混凝土结构

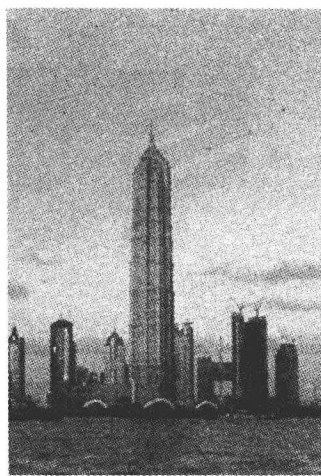


(f) 钢结构

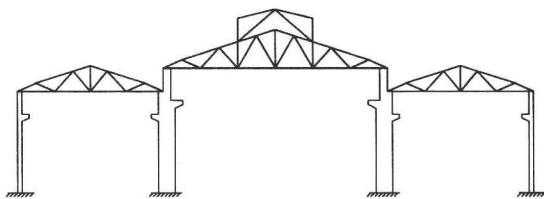
图 1.2 工程结构示例



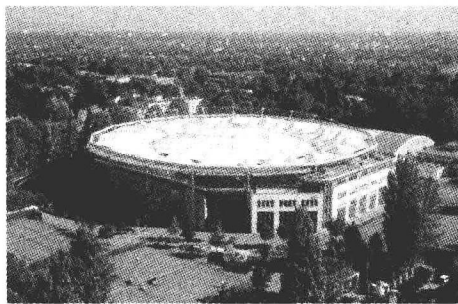
(g) 框架结构



(h) 筒体结构



(i) 排架结构



(j) 索膜结构

图 1.2 工程结构示例(续)

结构还可按其几何特征分为下面三种类型。

(1) 杆系结构(又称杆件结构)

杆系结构是由长度远大于其他两个方向尺寸(截面尺寸)的杆件按一定的组成规律组成的结构,如图 1.3 所示。如果组成结构的所有杆件的轴线均位于同一平面内,并且荷载也作用于该平面内,则此种结构称为平面杆系结构,否则为空间杆系结构。

(2) 薄壁结构(又称板壳结构)

薄壁结构通常指的是厚度远小于其他两个方向尺寸的结构。若为一平面板状时,称为薄板;若它具有曲面外形时,称为薄壳。房屋建筑中的楼板、地下连续墙、壳体屋盖(图 1.4)等均属于板壳结构。

(3) 实体结构

实体结构是指三个方向的尺寸为同量级的结构,如堤坝、挡土墙(图 1.5)、块式基础等均属于实体结构。

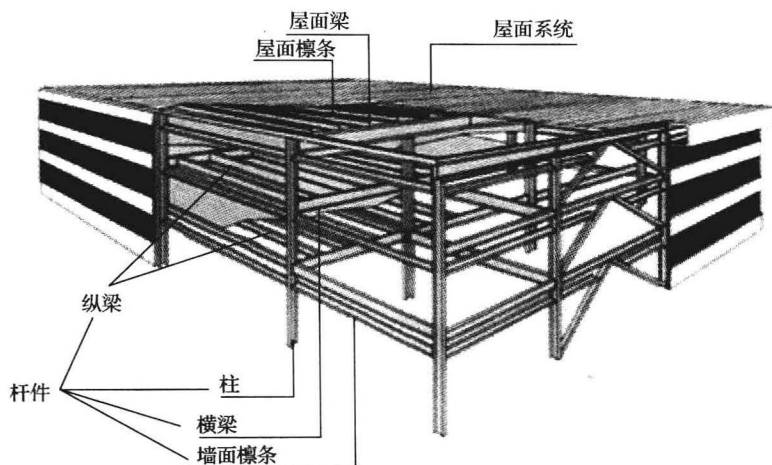


图 1.3 平面结构



图 1.4 壳体结构

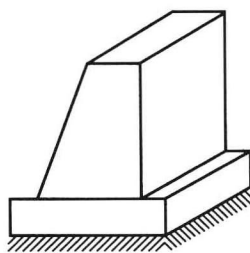


图 1.5 实体结构

在建筑工程领域，杆系结构是应用最多、使用最广泛的一种结构形式。

1.1.2 结构设计的一般过程

结构是设计和建造出来的，整个土木工程的相关活动，即工程建设活动，是研究、设计和修建各种工程结构(包括各种建筑物和构筑物)的过程。

工程结构设计包括方案设计、初步设计和施工图设计三个部分，具体分为结构方案的确定、结构布置、结构分析与计算、构件截面设计、构造设计及绘制施工图。其中，结构分析与计算是结构设计中最主要、最关键的工作，是指采用力学方法对结构在各种荷载(指广义荷载)作用下的内力、变形等效应进行分析与计算。在结构分析与计算前，首先应确定结构在整个服役期间内所有可能作用在其上的荷载作用，分别求出它们的作用效应，考虑各种荷载与作用同时出现的可能性，进行作用效应组合，得到结构构件各控制截面的效应控制值。

1.1.3 结构力学在结构设计中的地位与作用

结构设计过程需要解决该结构为承担在其服役期可能承受的荷载作用时本身所应具备的承载能力的计算问题，为此需首先知道荷载在结构的各个组成构件中产生的作用效

应,解决此问题主要依据的理论基础和方法即为本门课程的主要学习内容。下面以某钢筋混凝土结构设计为例进行说明。

如设计图 1.6 中的框架梁,则需在结构体系及承重杆件截面尺寸确定之后,根据荷载作用情况,计算出梁中各截面由该荷载产生的效应(内力和变形),此过程可称为荷载效应计算;再根据荷载效应确定梁截面以满足承载能力所需的钢筋数量及布置情况,完成截面设计,这一过程可称为结构抗力计算。荷载效应的计算过程及内容属于结构力学课程范围,即确定结构整体受力性能及各个部位的受力和变形的大小;结构抗力分析则属于后续专业课程的内容,如为使构件能承受上述荷载效应,混凝土构件截面应需的钢筋数量及布置、钢结构中构件间的连接情况确定及建筑基础尺寸、类型及配筋情况等均属于不同的专业课程。

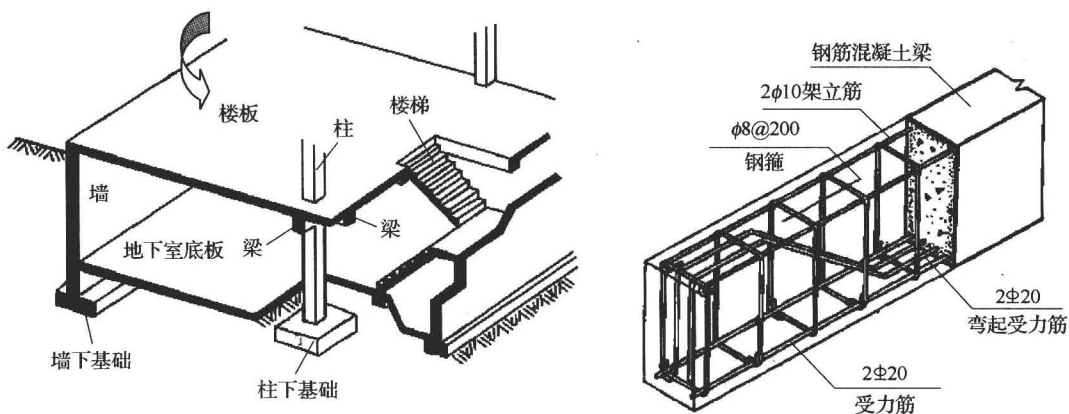


图 1.6 结构分析

由上可见,结构力学分析是结构设计相当关键的一个重要环节。学好结构力学,掌握杆件结构的计算原理与方法,是学好工程结构课的重要条件,同时也是作为一个结构工程师所必须具备的基础知识。

1.2 结构力学的研究对象及任务

结构力学是力学学科的一个分支,是研究结构在荷载和外界因素作用下的力学响应(结构的受力和变形)的学科。结构力学在研究对象和主要任务上与理论力学、材料力学略有区别。

1.2.1 结构力学研究对象

结构力学研究对象为各种各样的工程结构,涉及较广,根据所涉及的范围,通常将结构力学分为“狭义结构力学”、“广义结构力学”和“现代结构力学”。

狭义结构力学的研究对象为由杆件所组成的体系。这种体系能承担外界荷载作用,并起传力骨架作用,又称为经典结构力学。

广义结构力学的研究对象为可变形的物体。除可变形杆件组成的体系外,还包括可变形的连续体(平板、块体、壳体等)。

现代结构力学将工程项目从论证到设计,从施工到使用期内维护的整个过程作为大系统,研究大系统中的各种各样力学问题。其研究对象范围更广。

本书将以狭义结构力学为主,主要研究对象是杆件结构。考虑在所有结构的设计中,几乎都含有杆件的设计分析,因此,通常所说的结构力学指的就是杆件结构力学。

1.2.2 结构力学研究任务

结构力学的任务是研究结构的组成规律、合理形式及其力学性能,研究结构在荷载、温度变化、支座移动等各种因素作用下的强度、刚度和稳定性的计算原理和计算方法。具体包含以下五个方面。

- 1) 研究杆件结构的组成规律,使结构具有可靠的几何组成和合理的组成方式。
- 2) 研究杆件结构在静力荷载作用下,结构内力和位移的计算原理与方法。
- 3) 研究杆件结构在动力荷载作用下,结构的动力性态和动力响应的计算原理与方法。
- 4) 研究杆件结构在静力荷载作用下,结构稳定性的计算原理与方法。
- 5) 研究杆件结构在静力荷载作用下,结构极限承载能力的计算原理与方法。

1.2.3 结构力学课程与其他课程的关系

结构力学是理论力学与材料力学的后续课程。

理论力学主要研究物体机械运动的基本规律和力学一般原理。材料力学主要研究单个杆件的强度、刚度和稳定性。结构力学则以理论力学和材料力学的知识为基础,主要研究杆件结构的强度、刚度和稳定性,从而为钢、木结构和钢筋混凝土结构等后续专业课程及以后的结构设计提供一般的计算原理与分析方法。因此,结构力学是介于基础课与专业技术课之间的专业基础课,或者称为技术基础课。

1.3 结构的计算简图

工程结构往往很复杂且是多种多样的,完全严格地考虑每一结构的全部特点及其各部分之间的相互作用来建立理论和进行计算是不现实也是不经济的,因此需要确定结构的计算简图,即按一定的原则略去一些次要因素,把在主要方面具有共同特点的同类结构进行科学概括并加以典型化,然后建立起相应的计算理论。

我们把用来代替实际结构的简化图形称为结构的计算简图。合理地选取结构的计算简图是对结构进行正确计算的前提,是必须首先解决的问题。

如图 1.7(a)所示,一根横梁两端搁置在墙上,中间悬挂一物体。这是一类最简单的结构,但如果一定按照实际的情形进行分析,则因反力沿墙宽的分布规律难以知道,所以无法确定其两端的反力。

现若假定其反力为均匀分布,并以其作用于墙宽中点的合力来代替分布的反力。梁用其轴线来代替。原来的实际结构物便抽象和简化为如图 1.7(b)所示的计算模型,即相应的计算简图。显然,只要墙宽比梁的长度小很多,则作上述简化在工程上是完全许可的。



图 1.7 实际结构及其计算简图

从上述示例可以看出,计算简图的确定可包含以下几个方面的内容。

1.3.1 结构简化的内容

(1) 结构体系的简化

一般结构实际上都是空间结构,各部相连成为一空间整体以承受各方向可能出现的荷载。在多数情况下,常忽略一些次要的空间约束,而将实际结构分解为平面结构。

(2) 杆件的简化

根据杆件受力后的变形特点,结合材料力学已建立的概念,各种杆件在结构计算简图中均用其轴线来代替。例如,等截面直杆的轴线为一条直线;曲杆的轴线为一条曲线;变截面杆件的轴线用其两端形心连成的直线或曲线(折线)来代替。

(3) 结点的简化

在杆系结构中,杆件相互连接的地方称为结点。在计算简图中,结构的结点通常可简化为铰结点和刚结点两种理想情况。

1) 铰结点特点是由其所连接各杆件都可以绕结点自由转动,即在结点处各杆件之间的夹角可以改变。在平面杆系中铰结点如图 1.8 所示。故在简化过程中,若连接在同一点的各个杆件,结点不限制其相互发生转动而仅约束其发生相对线位移,可将这种结点以铰结点来表示。

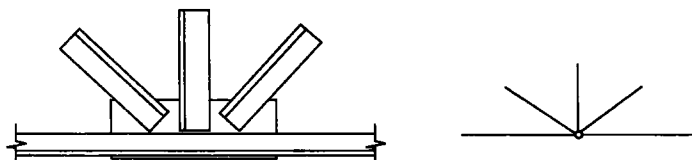


图 1.8 铰结点

2) 刚结点特点是由其所连接各杆不能绕结点自由转动,即在结点处各杆端之间的夹角始终保持不变(图 1.9)。平面结构的刚结点用图 1.9(c)表示。

3) 组合结点是连接在结点处的各杆件,部分杆件间的连接是铰结点,部分杆件间的联系是刚结点的情况,如图 1.10 所示。

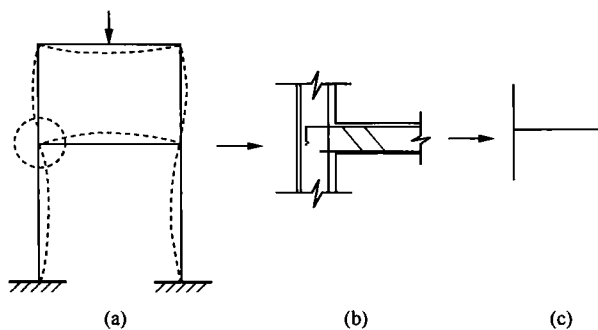


图 1.9 刚结点

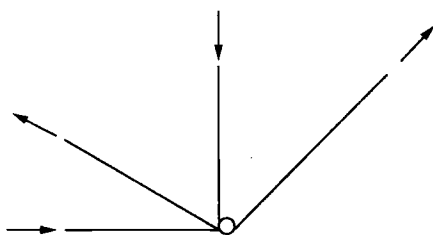


图 1.10 组合结点

(4) 支座的简化

平面杆件结构的常用支座有活动铰支座、固定铰支座、固定支座和定向支座四种。

1) 活动铰支座。如图 1.11(a)所示,连接于 A 支座处的杆件可产生水平方向的位移和绕 A 点的转角,但不能发生竖向位移(或可以说平面内在 A 点只有一个线位移不能发生)。此时 A 支座称为活动铰支座(或移动铰支座),只提供—个支座反力 R , 方向视计算结果而定。图 1.11(b)是该类铰支座的平面表示形式。

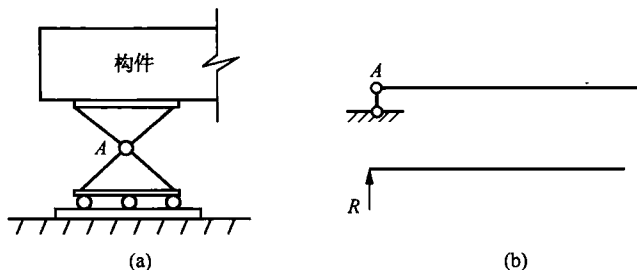


图 1.11 活动铰支座

2) 固定铰支座。如图 1.12 所示,连接于 A 支座处的杆件只能产生绕 A 点的转角,不能产生线位移。此时 A 支座称为固定铰支座,提供两个方向的支座反力 R_x 、 R_y , 方向待定。图 1.12(b)是该类铰支座的平面表示形式。

3) 固定支座。若连接于 A 点的杆件既不能移动,也不能转动,则称支座 A 为固定支座。该类支座的平面表示形式和支座反力如图 1.13 所示。

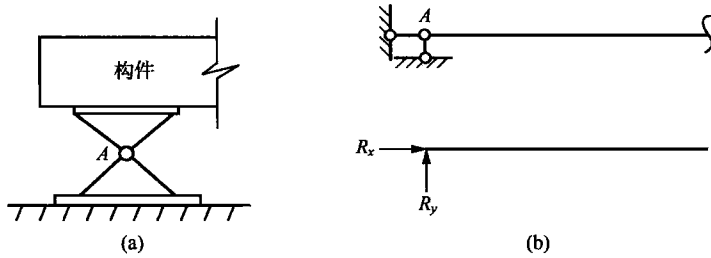


图 1.12 固定铰支座

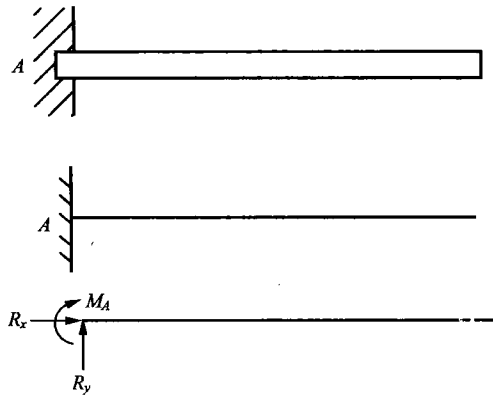


图 1.13 固定支座

4) 定向支座。这种支座只允许杆端沿一定方向自由移动,而沿其他方向既不能移动,也不能转动,该类支座的平面表示形式和支座反力如图 1.14 所示。

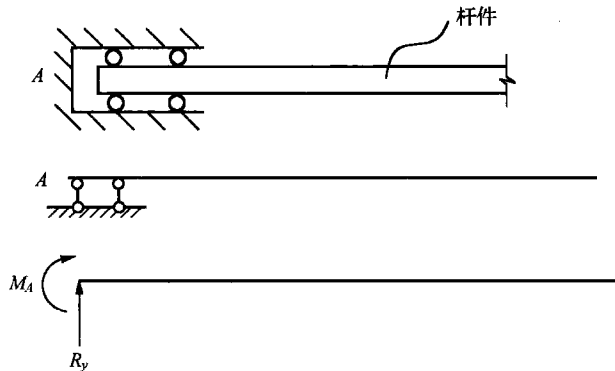


图 1.14 定向支座

(5) 材料性质的简化

工程中的材料一般是不均匀的,也不符合线弹性的假设。但在结构的计算与分析过程中,一般做简化处理,将组成各构件的材料都假设为连续的、均匀的、各向同性和线弹性的。