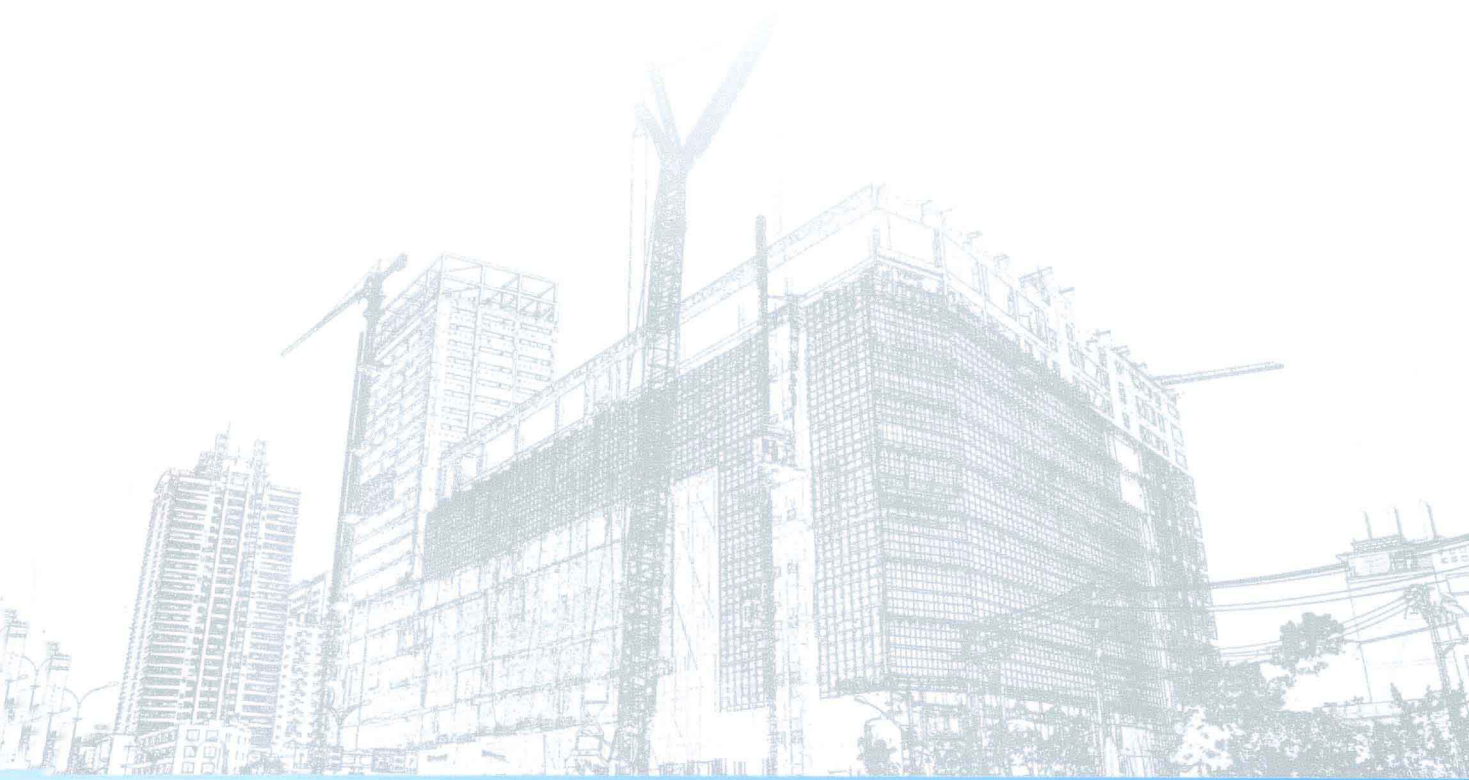




普通高等学校土木工程专业精编系列规划教材

结构力学 (上)

主编 丁克伟 何沛祥
主审 王建国



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

普通高等学校土木工程专业精编系列规划教材

结 构 力 学_(上)

主 编 丁克伟 何沛祥
副主编 吴 明
主 审 王建国



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

结构力学. 上/丁克伟,何沛祥主编. —武汉:武汉大学出版社,2013.8
普通高等学校土木工程专业精编系列规划教材
ISBN 978-7-307-11298-8

I. 结… II. ①丁… ②何… III. 结构力学—高等学校—教材 IV. O342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 145411 号

责任编辑:郭 芳 责任校对:邓 瑶 装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:荆州市鸿盛印务有限公司

开本:850×1168 1/16 印张:14.5 字数:396 千字

版次:2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-11298-8 定价:28.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

普通高等学校土木工程专业精编系列规划教材

编审委员会

(按姓氏笔画排名)

顾问: 干 洪 朱大勇 任伟新 张伟林 程 桦 颜事龙

主任委员: 丁克伟 徐 颖 高 飞

副主任委员: 戈海玉 方达宪 孙 强 杨智良 陆 峰 胡晓军

殷和平 黄 伟

委员: 马芹永 王 睿 王长柏 王佐才 韦 璐 方诗圣

白立华 刘运林 关 群 苏少卿 李长花 李栋伟

杨兴荣 杨树萍 肖峻峰 何夕平 何芝仙 沈小璞

张 洵 张 速 张广锋 陈 燕 邵 艳 林 雨

周 安 赵 青 荣传新 姚传勤 姚直书 袁文华

钱德玲 倪修全 郭建营 黄云峰 彭曙光 雷庆关

总责任编辑: 曲生伟

秘 书 长: 蔡 巍

特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导的模式而成为一次建设性、发现性的学习,从被动学习而成为主动学习,由教师传播知识而到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。

本系列教材在相关编写人员的配合下,将逐步配备基本数字教学资源,其主要内容包括:

课程教学指导文件

- (1)课程教学大纲;
- (2)课程理论与实践教学学时数;
- (3)课程教学日历:授课内容、授课时间、作业布置;
- (4)课程教学讲义、PowerPoint 电子教案。

课程教学延伸学习资源

- (1)课程教学参考案例集:计算例题、设计例题、工程实例等;
- (2)课程教学参考图片集:原理图、外观图、设计图等;
- (3)课程教学试题库:思考题、练习题、模拟试卷及参考解答;
- (4)课程实践教学(实习、实验、试验)指导文件;
- (5)课程设计(大作业)教学指导文件,以及典型设计范例;
- (6)专业培养方向毕业设计教学指导文件,以及典型设计范例;
- (7)相关参考文献:产业政策、技术标准、专利文献、学术论文、研究报告等。

基本数字教学资源网站链接:<http://www.stmpress.cn>

前言

本书按照教育部高教司理工处提出的“高等学校理工科本科指导性专业规范研制要求”，参照相关大纲及规范，结合多所高校的结构力学教学实践，在土木工程知识领域和知识单元方面提出适合土木工程专业结构力学教学内容和知识体系。

编写本书的目的是通过该课程的学习，使学生了解杆件结构的组成规律；掌握静定和超静定结构的内力和位移的计算方法；理解结构动力和稳定的计算方法，从而掌握系统的结构力学知识，提高结构计算能力，能熟练地分析、计算土木工程结构的力学性能，培养分析能力和科学作风，为学习有关专业课程以及毕业后从事结构设计、施工和科研工作打好理论基础。

本书由安徽建筑大学丁克伟、合肥工业大学何沛祥担任主编；安徽建筑大学吴明担任副主编；合肥工业大学朱亚林、安徽工程大学付佳丽、安徽新华学院路一担任参编。

具体编写分工为：

安徽建筑大学，丁克伟（前言、第1章、第7章）；

安徽建筑大学，吴明（第2章）；

合肥工业大学，朱亚林（第5章、第6章）；

安徽工程大学，付佳丽（第4章）；

安徽新华学院，路一（第3章）。

合肥工业大学的何沛祥做了大量统稿工作。合肥工业大学王建国主审了本书，并对本书的编写提出了许多宝贵的建议，特致谢意。

在本书的编写过程中参考了有关书籍，并从中引用了部分例题和习题。在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请使用本书的教师及读者提出指正。

编 者

2013年1月

目录

1 绪论	(1)
1.1 结构力学的研究对象和基本任务	(2)
1.2 杆系结构的计算简图	(5)
1.3 杆件结构的分类	(10)
1.4 结构力学在工程中的主要应用和学习方法	(12)
参考文献	(12)
2 平面体系的几何组成分析	(14)
2.1 几何可变体系、几何不变体系和几何组成分析的目的	(15)
2.2 几何组成分析的几个概念	(15)
2.3 平面几何不变体系的组成规则	(19)
2.4 瞬变体系的概念	(20)
2.5 平面杆件体系几何组成分析举例	(21)
2.6 静定与超静定结构的静力学特性和几何组成特性	(24)
知识归纳	(24)
独立思考	(25)
习题	(25)
参考文献	(27)
3 静定结构的受力分析	(28)
3.1 单跨静定梁	(29)
3.2 多跨静定梁	(39)
3.3 静定平面刚架	(44)
3.4 静定三铰拱	(53)
3.5 静定平面桁架	(65)
3.6 组合结构	(80)
3.7 悬索结构	(83)
3.8 静定结构总论	(85)
知识归纳	(87)
独立思考	(90)
习题	(90)
参考文献	(97)
4 静定结构的位移计算	(98)
4.1 结构位移及位移计算的目的	(99)
4.2 功、广义力与广义位移	(100)
4.3 变形体系的虚功原理	(100)

4.4	结构位移计算的一般公式	(103)
4.5	静定结构在荷载作用下的位移计算	(105)
4.6	图乘法	(109)
4.7	静定结构温度变化引起的位移计算	(113)
4.8	静定结构支座移动时的位移计算	(115)
4.9	线弹性结构的互等定理	(116)
	知识归纳	(119)
	独立思考	(119)
	习题	(120)
	参考文献	(122)
5	力法	(123)
5.1	概述	(124)
5.2	超静定结构的组成和超静定次数	(126)
5.3	力法的基本概念	(128)
5.4	力法的典型方程	(131)
5.5	力法的计算步骤和经典举例	(134)
5.6	对称性的利用	(142)
5.7	支座移动和温度改变时的超静定结构内力计算	(149)
5.8	超静定结构的位移计算	(154)
5.9	超静定结构内力计算的校核	(155)
	知识归纳	(157)
	独立思考	(157)
	习题	(158)
	参考文献	(163)
6	位移法	(164)
6.1	概述	(165)
6.2	等截面直杆的转角位移方程	(166)
6.3	位移法基本未知量数目的确定	(170)
6.4	位移法的典型方程	(172)
6.5	位移法的对称性利用	(178)
6.6	用直接平衡法建立位移法方程	(181)
* 6.7	非荷载因素作用下的位移法计算	(184)
	知识归纳	(187)
	独立思考	(187)
	习题	(188)
	参考文献	(193)
7	渐近法	(194)
7.1	概述	(195)
7.2	力矩分配法的基本概念	(195)
7.3	单结点的力矩分配法	(197)

7.4 多结点的力矩分配法	(201)
7.5 无剪力分配法	(205)
7.6 剪力分配法	(211)
知识归纳.....	(215)
独立思考.....	(215)
习题.....	(216)
参考文献.....	(220)



绪 论

课前导读

□ 内容提要

本章主要内容为结构力学的研究对象和基本任务，杆系结构计算简图及其选择原则，计算简图的简化要点，杆系结构的分类，荷载的分类和简化方法；简要介绍结构力学在工程中的主要应用和学习方法。

□ 能力要求

通过本章的学习，要求学生熟悉结构计算简图的基本原则、方法；杆系结构的分类；荷载的分类和简化方法。

1.1 结构力学的研究对象和基本任务

1.1.1 结构的分类

凡是能够承受一定荷载的固体构件及其系统的人造物都统称为结构。从更广义的意义上说,凡是能够承受一定荷载的固体构件及其系统自然物(如植物的根、茎、叶,动物的骨骼、血管,地壳、岩体等)都可以看作结构。在土木工程中,能承受荷载而起骨架作用的构筑物称为工程结构。图 1-1(a)所示为一巨型框架结构,图 1-1(b)所示为一塔结构,图 1-1(c)所示为一桥梁结构。

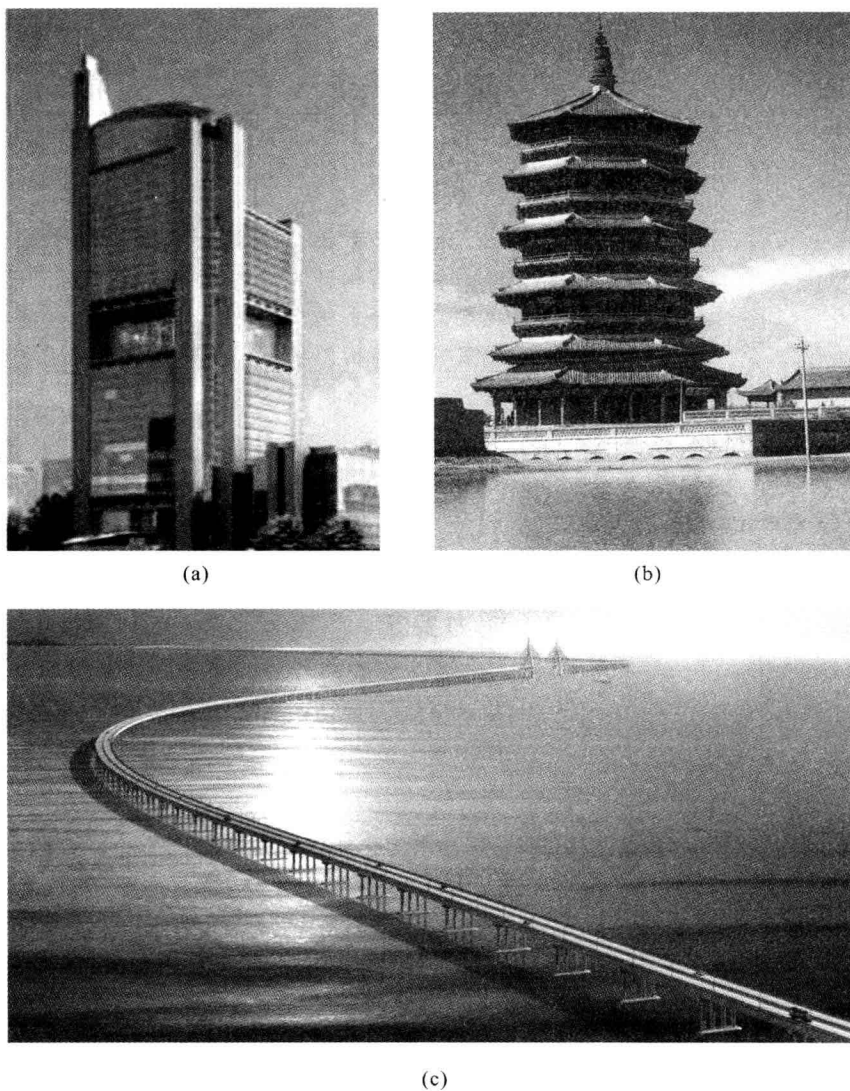


图 1-1

(a) 北京电视中心; (b) 应县佛宫寺释迦塔(公元 1056 年); (c) 杭州湾跨海大桥

在建筑工程领域中,常见的结构形式有以下几类:

(1) 杆件结构。

杆件的横截面的宽和高比杆长小得多,如图 1-2 所示。杆件结构是由两个或若干个杆件按照一定的方式连接组合而成的体系,例如梁柱形成的多层框架结构。

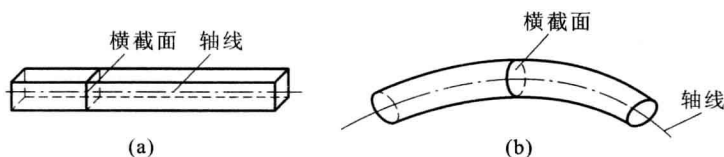


图 1-2

(2) 板壳结构(又称薄壳结构)。

板壳结构中三个方向尺寸中,厚度相对于其他两个方向的尺寸小得多,如图 1-3(a)所示的平板,一般民用建筑中现浇的楼板结构属于板结构。当薄壁结构为曲面时,则为壳体,如图 1-3(b)所示。

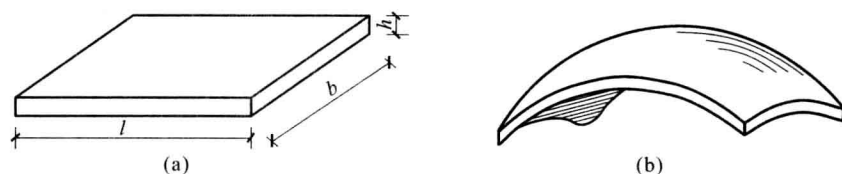


图 1-3

(3) 实体结构。

实体结构的三个方向尺寸是同一个数量级,长、宽、高大致相近。如一些建筑物的底座,如图 1-4(a)所示;再如堤坝,如图 1-4(b)所示。

(4) 其他结构。

其他结构有悬索结构、充气膜结构等。悬索结构是由柔性受拉索及其边缘构件所形成的承重结构。索的材料可以是钢丝束、钢丝绳、钢绞线、链条、圆钢,以及其他受拉性能良好的线材。悬索结构中的索网如图 1-5 所示。

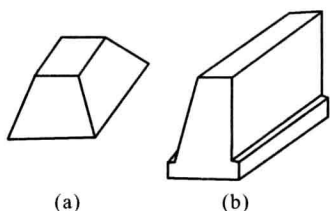


图 1-4

(a) 底座;(b) 堤坝

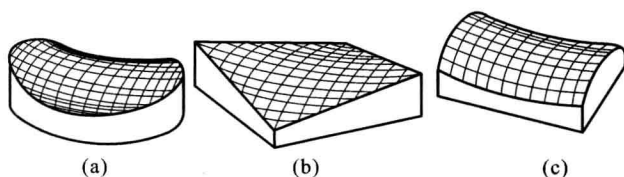


图 1-5

(a) 椭圆平面;(b) 矩形平面;(c) 菱形平面

充气膜结构是在特定的薄膜制品中充入气体后,使得膜面张紧产生预张力来抵抗外部荷载效应而形成的结构。充气结构又可分为气承式膜结构(Air-supported Membrane Structure)和气胀式膜结构(也称为气肋式膜结构)(Inflated Membrane Structure)。

1964 年东京奥林匹克体育馆穹顶是这类结构的典型代表。北京 2008 年奥运会的主体育场“鸟巢”采用气囊膜结构,“鸟巢”气囊膜结构如图 1-6 所示。

以上分别介绍了各种结构形式,实际建筑物往往是由各种结构形式组成的,如国家体育场(“鸟巢”)就是由 ETFE 膜结构、杆件结构等多种结构形式组成的综合体。

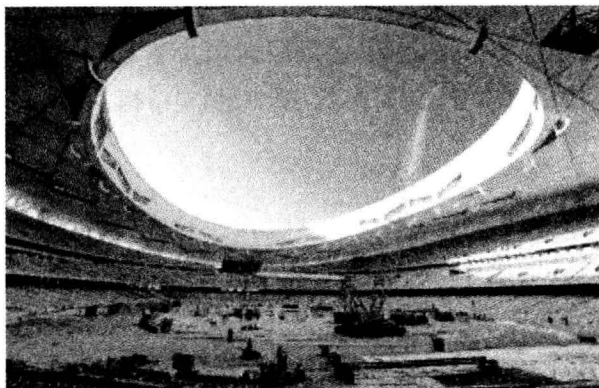


图 1-6

1.1.2 结构力学的研究对象

结构力学课程的先修课程有高等数学、大学物理、线性代数、理论力学、材料力学等。

理论力学研究的是刚体的机械运动的基本规律和刚体的力学分析,即研究刚体运动的几何性质及刚体运动的原因;材料力学研究的主要内容是单个杆件的强度、刚度、稳定性问题;而结构力学研究的是杆件体系的强度、刚度、稳定性问题。因此,理论力学、材料力学是学习结构力学的重要的基础课程,为结构力学学习提供理论分析的依据。

同时,结构力学又为后续课程弹性力学以及混凝土结构、砌体结构、钢结构、木结构、桥梁结构等专业课程提供力学分析原理和力学分析方法。

因此,结构力学课程是土建类、道路桥梁等专业本科生的一门重要的技术基础课程,为以后学好有关专业课程打好理论基础。它在各门课程中具有承上启下的作用。根据目前国内学科划分的方法,通常所说的结构力学主要指的是杆件结构力学,本书的研究对象是杆件结构力学即关于杆件体系的结构力学。

1.1.3 结构力学研究的基本任务

杆件结构力学是研究杆件结构的组成规律和合理形式以及结构在外因作用下的强度、刚度、稳定性问题,主要包括以下几个方面:

- ① 研究杆件结构的组成规律和合理形式及计算简图的合理选择;
- ② 研究杆件结构在静力荷载作用下,结构内力和变形的计算原理与方法;
- ③ 研究杆件结构在动力荷载作用下,结构动力反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,结构极限荷载的计算原理与方法。

杆件进行强度、稳定性计算是为了保证结构安全性和经济性的要求;计算刚度是为了保证结构不至于发生过大的变形,影响正常使用;研究组成规律的目的在于保证结构各部分,不至于发生相对的刚体运动,而能承受荷载维持平衡;探讨结构合理的形式,是为了有效地利用材料,使其性能得到充分发挥。

结构力学的计算问题分为以下两类:一类是静定问题,只需根据基本条件中的平衡条件即可求解;另一类是超静定问题,必须根据平衡条件、几何条件、物理条件这三个基本条件方能求解。

- ① 平衡条件。在一组外力系作用下,作为研究对象的整体及其中任何一部分都应满足力系的

平衡条件。

② 几何条件(即变形连续条件)。连续的结构发生变形后,仍是连续的,材料没有发生重叠或缝隙,同时结构的变形和位移应满足支座和结点的约束条件。

③ 物理条件。把结构的应力和变形联系起来的物理条件,即物理方程或本构方程。

结构力学问题的计算都是利用以上三个基本条件来解决的,掌握这三个基本条件是学好结构力学的必要条件。

1.2 杆系结构的计算简图

1.2.1 计算简图及其选择原则

实际结构十分复杂,完全按照原结构的实际情况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之前,必须加以简化,分清受力、变形的主次,抓住主要因素,略去不重要的细节,用一个简化的并能反映结构的主要受力和变形的力学模型来代替实际结构,这种简化的力学模型就是计算简图。结构受力分析在计算简图上进行。计算简图要慎重选取:若细节一一考虑,工作量大,也不为人所接受;若太简单,不能反映实际受力情况,甚至可能会造成工程事故。

选择计算简图的原则:

① 计算简图要反映实际结构的主要受力和变形性能;

② 分清主次,略去细节使计算简图便于计算。

计算简图的选择在上述原则指导下,要根据实际情况的具体要求和条件来选用,并不是一成不变的。如对重要的结构应采用比较精确的计算简图,对不重要的结构可以使用较为简单的计算简图。在初步设计阶段可使用较为粗糙的计算简图,在技术设计阶段应采用较为精确的计算简图。具体进行结构设计时要符合相关专业规范要求,如按现行抗震规范,利用计算机对复杂结构进行多遇地震作用下结构抗震分析,应采用不少于两个合适的力学模型,并对其计算结果进行分析比较,所有计算结果应经分析判断确认其合理、有效后,方可用于工程设计。

1.2.2 计算简图要点

1.2.2.1 结构体系简化

在杆件结构中,从空间角度可将结构划分为平面结构和空间结构,当杆件轴线与荷载作用线在同一个平面内时就是平面结构,否则就是空间结构。严格来说,所有的结构都是空间结构。然而对于很多空间结构来说,常可以忽略一些次要的空间约束,考虑到主要承重体系及力的传递路线而将实际结构分解为平面结构来处理,这样计算起来就简单得多。

1.2.2.2 杆件的简化

一维杆件,截面尺寸比杆件长度小得多,截面变形符合平截面假设,截面上的应力可以根据截面的内力来确定,截面上的变形也可根据轴线上的应变分量来确定。因此在计算中可用杆件轴线表示杆件,杆件之间的连接可用结点来表示,杆长可用结点之间的距离来表示,荷载作用点放在轴线上。当横截面尺寸较大时(例如超过杆长的 $1/4$),用轴线表示杆件就会带来较大的误差。

1.2.2.3 杆件之间连接的简化

结构中杆件与杆件之间的连接可以简化为结点。木结构、钢结构和混凝土结构中杆件与杆件之间相互连接的构造方式虽然很多,但其结点可以简化为以下两种类型:

(1) 铰结点。

限制杆件在连接处的相对移动但不能限制杆件在连接处的相对转动的连接,称为理想铰结点。理想铰结点处杆件不能相对移动,但可绕铰自由转动,铰结点处可以承受和传递力但不能承受和传递力矩。如图 1-7(a)所示的木屋架端节点,此处各杆不能相对移动,但能相互间微小转动,计算时就可以简化成一个铰结点,其计算简图如图 1-7(b)所示。

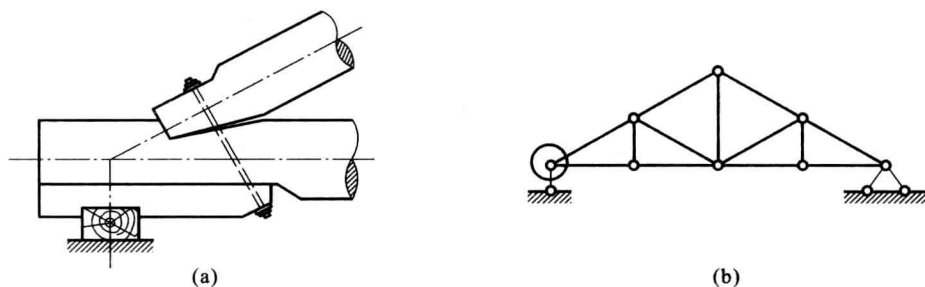


图 1-7

(a) 木屋架端节点构造; (b) 铰结点计算简图

(2) 刚结点。

同时限制杆件在连接处的相对移动和相对转动的连接,称为刚结点。刚结点处杆件不能相对移动也不能相对转动,刚结点可以承受和传递力,也可以承受和传递力矩。如现浇钢筋混凝土梁柱结点,由于梁柱之间的钢筋布置以及混凝土浇筑将它们浇筑成整体,使梁和柱之间不能相对移动和转动,计算时简化为一刚结点,如图 1-8 所示。

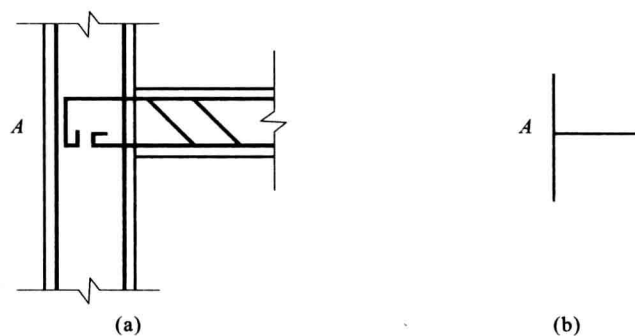


图 1-8

(a) 钢筋混凝土梁柱结点做法; (b) 刚结点计算简图

任何一个连续杆件可以看成是由无数个连续刚结点组成的。如图 1-9(a)所示,AD 杆件可看成是由 AB 杆件、BC 杆件、CD 杆件组成的,BA 杆件与 BC 杆件用刚结点连接,AC 杆件与 BE 杆件用铰结点连接,B 结点同时具有这两种结点的特征,这样的结点称为组合结点,如图 1-9(b)所示,同理 C 结点也是组合结点。

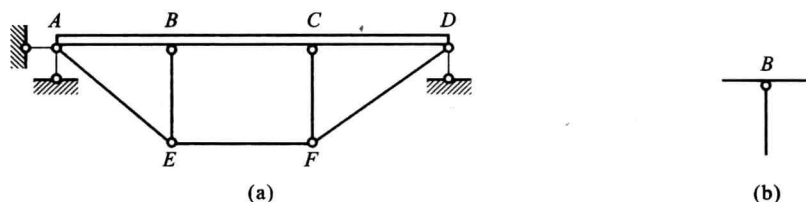


图 1-9

1.2.2.4 结构与基础间连接的简化

结构与基础的连接装置称为支座。支座的作用是把结构固定于基础之上；同时，结构所受的荷载通过支座传到基础与地基。支座对结构的作用力称为支座反力。在结构计算中所选用的支座简图必须与支座的实际构造和变形相符合，通常有以下几种：

(1) 活动铰支座（滚轴支座）。

如图 1-10(a) 所示，支承部分的装置即支座只能限制被支承的物体在 A 点处沿支承面竖直方向的移动，但允许被支承的物体沿平行于 mn 的方向移动和绕铰 A 转动。因此，当不考虑支撑面的摩擦力时，由于被支承的物体仅在支撑面竖直方向不能移动，在此方向一定受到力的作用，受到的作用力的方向垂直于支承面，受到的作用力可用 F_{Ay} 表示。

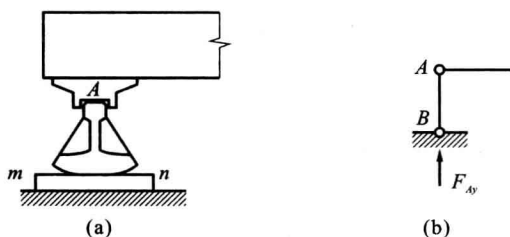


图 1-10

(2) 固定铰支座。

如图 1-11(a) 所示被支承的物体在 A 点处可以绕铰 A 点动，但不能移动。由于被支承的物体在该处不能移动，所以被支承的物体在该处受到支座反力 F_{RA} 的作用。 F_{RA} 通过铰点，可以分解成互相垂直的支座分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} ，但方向大小未定，其方向任意选定，最后由计算结果的正负确定方向。这种支座选择如图 1-11(b) 或图 1-11(c) 的计算简图（用交于 A 点的两个支杆来表示）。

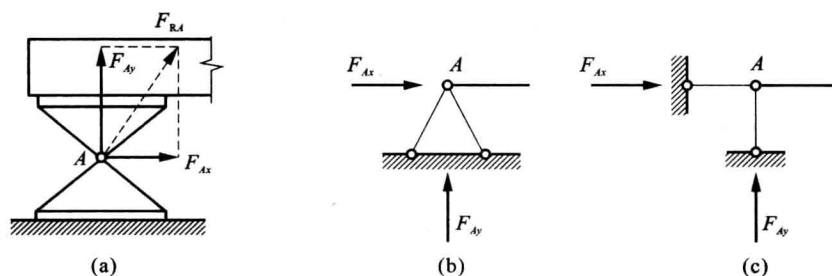


图 1-11

(3) 固定支座。

如图 1-12(a) 所示约束装置限制被支承的物体在 A 点处移动和转动，支座反力的大小、方向、作用点都是未知的。由于被支承的物体在 A 点处不能移动，所以通常可用水平反力 F_{Ax} 、竖向反力

F_{Ay} 表示, 由于不能转动, 可用反力矩 M_A 来表示, 计算简图如图 1-12(b) 所示, 支座反力的大小、方向通过计算能确定。

如图 1-12(a) 所示的悬臂梁, 当梁端插入墙身相当深度, 且与四周有相当好的密实性时, 梁端被完全固定, 可以视为固定支座。

如图 1-12(c) 所示的钢筋混凝土柱插入杯形基础时, 杯口与柱之间的缝隙用细石混凝土填实浇筑。当预制柱插入杯口一定深度时, 柱在杯口的移动和转动被完全限制, 可以简化为固定支座。

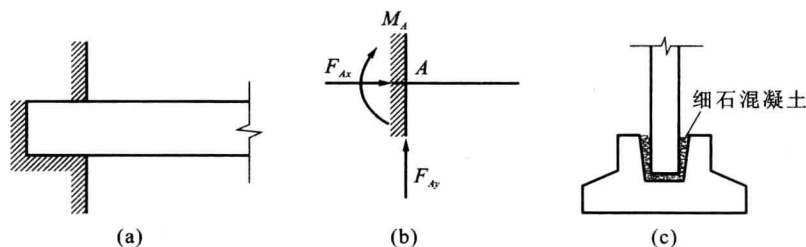


图 1-12

(4) 滑动支座(定向支座)。

如图 1-13(a) 所示被支承的物体在 A 点处不能转动, 也不能沿垂直于支承面的方向移动, 由于不能沿垂直于支承面的方向移动, 所以通常可用垂直于支承面方向的反力 F_{Ay} 表示, 由于不能转动所以可用反力矩 M_A 来表示, 计算简图如图 1-13(b) 所示, 支座反力的大小、方向需通过计算最终确定。

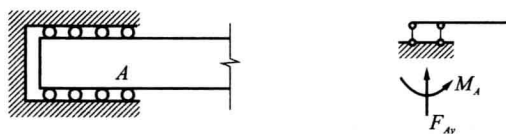


图 1-13

(5) 刚性支座与弹性支座。

刚性支座: 支座在外荷载作用下不产生变形。

弹性支座: 实际工程中, 这类支承部分有一定的弹性。在外荷载作用下支座产生变形, 从而影响结构的内力和变形, 其反力与结构支承端相应的位移成正比。

1.2.2.5 材料性质简化

假设材料为连续、均匀、各向同性、完全弹性或弹塑性。在工程中这种假定往往带有一定的近似性, 例如这种假设对于金属材料符合实际情况, 对于混凝土、砖、石等则带有一定的近似性。

1.2.2.6 荷载简化

结构承受的荷载可分为体积力和面积力两大类。体积力是结构的重力和惯性力; 表面力则是由其他物体通过接触面传给结构的作用力, 如土压力等。对于体积力和面积力, 荷载都可以简化为作用在杆件轴线上, 荷载简化将在后面继续讨论。

1.2.3 计算示例

(1) 体系的简化。

单层厂房结构如图 1-14(a) 所示, 它实际上是由屋架梁、柱、基础组成的空间结构体系, 屋面荷