



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校土建类专业新编系列教材

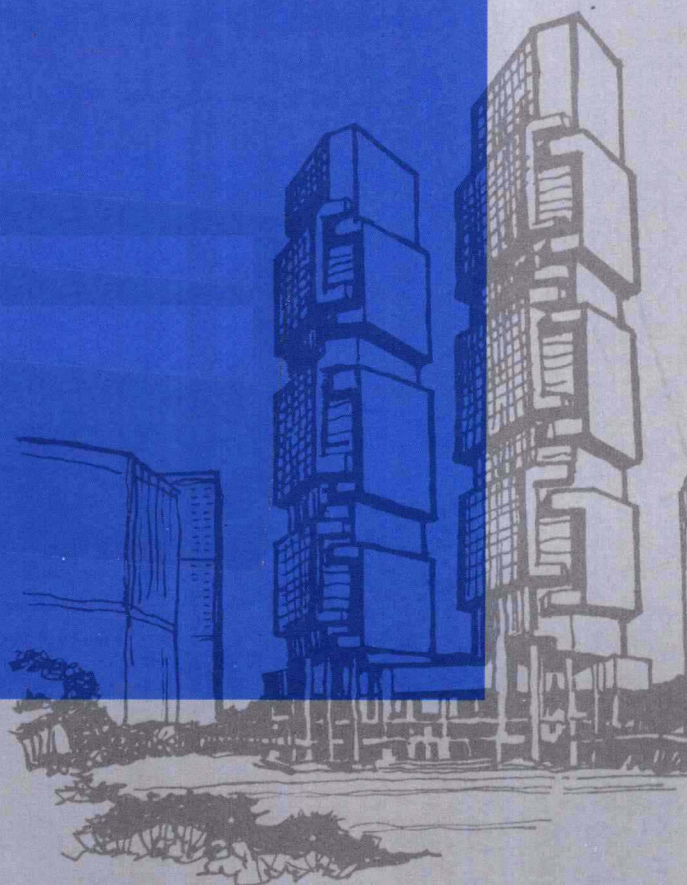
结构力学



(第4版)

胡兴国 吴莹 主编

武汉理工大学出版社





普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校土建类专业新编系列教材

结 构 力 学

(第 4 版)

胡兴国 吴 莹 主编



武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 提 要

全书共 11 章,内容包括绪论、平面体系的几何组成分析、静定结构的内力计算、静定结构的位移计算、影响线、静定结构分析方法总论、力法、位移法、力矩分配法及连续梁的影响线、矩阵位移法、结构的动力计算。除第 6 章外均有本章提要、本章小结、思考题和习题。附录部分有矩阵位移法的电算程序及其应用和 ANSYS 结构分析软件介绍,书后附有部分习题参考答案。

本书除可作为土建类专业教材外,也可供土建工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学/胡兴国,吴莹主编. —4 版. —武汉:武汉理工大学出版社,2012. 11

ISBN 978-7-5629-3852-1

I. ① 结… II. ① 胡… ② 吴… III. ① 结构力学-高等学校-教材 IV. ① 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 257299 号

项目负责人:蔡德民 刘永坚 田道全

责任编辑:于应魁

责任校对:夏冬琴

封面设计:语新文化书籍设计工作室

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号)

邮 编:430070

网 址:<http://www.techbook.com.cn>

印 刷 者:荆州市今印印务有限公司

经 销 者:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16

印 张:21.25

字 数:530 千字

版 次:2012 年 11 月第 4 版

印 次:2012 年 11 月第 1 次印刷 总第 26 次印刷

印 数:173001—176000 册

定 价:36.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87785758 87515778 87165708(传真)

• 版权所有 盗版必究 •

前 言

(第 4 版)

本书是根据高等学校土建类专业“结构力学”教学要求编写的。自 1997 年出版以来,历经第 1 版、第 2 版、第 3 版共 25 次印刷,发行量达到了 17 万余册,得到了使用者的充分肯定和好评。为结合卓越工程师培养计划,再次修订出版,使全书从形式到内容都日臻完善。

全书共分 11 章和 2 个附录,内容包括绪论、平面体系的几何组成分析、静定结构的内力计算、静定结构的位移计算、影响线、静定结构分析方法总论、力法、位移法、力矩分配法及连续梁的影响线、矩阵位移法、结构的动力计算,附录 A 为矩阵位移法的电算程序及其应用,附录 B 为 ANSYS 结构分析软件介绍,教学时数为 100 学时左右。

本书突出基本概念、基本原理、基本方法及其应用。加强对于问题的提出、模型的建立、解决分析问题的方法的讨论与研究,有利于培养学生解决实际问题的能力。

本书主干清晰,有利于加强对结构及结构力学的整体认识;有利于突出理论和实践两个重点;有利于锻炼、培养、激发学生的学习兴趣 and 创造性思维。

本书例题典型实用、计算过程清晰,思考题和习题注重实用性且题量适当,重在巩固概念,加强运用能力。

本书在编写方面力求体现特色鲜明,内容精炼;既注重理论性,更注重实用性。结构方面遵循循序渐进、承上启下的规律。文字叙述方面坚持少而精原则,做到重点突出,逻辑性强;由浅入深,通俗易懂;利于教学,便于自学。

作为“十一五”国家级规划教材,《结构力学》(第 4 版)在前 3 版的基础上经过精心修订,重点完善了 1.4 节“结构力学的学习方法”,在原第 5 章与第 6 章之间,即静定结构相关内容全部讲完,超静定结构开始之前增加了“静定结构分析方法总论”,为进入超静定结构内容的学习打好基础。将原第 10 章“矩阵位移法的电算程序及其应用”调整为附录 A,增加附录 B“ANSYS 结构分析软件介绍”。

本书第 4 版由武汉大学胡兴国和华中科技大学吴莹负责修订。

编 者

2012 年 6 月

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	(3)
1.2.1 确定计算简图的原则	(3)
1.2.2 平面杆件结构的简化	(3)
1.2.3 结构计算简图示例	(6)
1.3 平面杆件结构和荷载的分类	(8)
1.3.1 平面杆件结构的分类	(8)
1.3.2 荷载的分类	(9)
1.4 结构力学的学习方法	(10)
1.4.1 结构力学的一般分析方法	(10)
1.4.2 结构力学基本解题思路	(10)
1.4.3 结构力学的学习方法	(11)
本章小结	(12)
2 平面体系的几何组成分析	(13)
2.1 概述	(13)
2.1.1 几何组成分析的目的	(13)
2.1.2 几个重要概念	(14)
2.2 几何不变体系组成规则及体系分析举例	(18)
2.2.1 几何不变体系的组成规则	(18)
2.2.2 体系几何组成分析举例	(20)
2.2.3 几何组成分析中应注意的事项	(23)
本章小结	(23)
思考题	(24)
习题	(24)
3 静定结构的内力计算	(27)
3.1 静定结构概述	(27)
3.2 静定梁	(28)
3.2.1 单跨静定梁	(28)
3.2.2 多跨静定梁	(35)
3.3 静定平面刚架	(38)

3.3.1	刚架的特征	(38)
3.3.2	静定平面刚架的类型	(40)
3.3.3	静定平面刚架的内力分析	(40)
3.3.4	刚架内力图的另一作法	(47)
3.4	三铰拱	(49)
3.4.1	概述	(49)
3.4.2	三铰拱的内力分析	(50)
3.4.3	三铰拱的合理拱轴	(54)
3.5	静定平面桁架	(56)
3.5.1	概述	(56)
3.5.2	静定平面桁架的内力计算	(58)
3.5.3	几种常用桁架受力性能的比较	(66)
3.6	静定组合结构	(69)
3.7	静定结构的特性	(71)
	本章小结	(73)
	思考题	(74)
	习题	(75)
4	静定结构的位移计算	(82)
4.1	概述	(82)
4.1.1	杆系结构的位移	(82)
4.1.2	计算位移的目的	(83)
4.2	虚功原理	(83)
4.2.1	虚功的概念	(83)
4.2.2	虚功原理	(84)
4.3	结构位移计算的一般公式	(87)
4.4	静定结构在荷载作用下的位移计算	(89)
4.5	图乘法	(92)
4.6	静定结构由于支座位移、温度改变所引起的位移	(97)
4.6.1	由于支座位移所引起的位移	(97)
4.6.2	由于温度改变所引起的位移	(98)
4.7	线性变形体系的互等定理	(100)
4.7.1	功的互等定理	(100)
4.7.2	位移互等定理	(101)
4.7.3	反力互等定理	(102)
	本章小结	(103)
	思考题	(104)
	习题	(104)

5 影响线	(109)
5.1 影响线的概念	(109)
5.2 用静力法作静定梁的影响线	(110)
5.2.1 反力影响线	(110)
5.2.2 剪力影响线	(111)
5.2.3 弯矩影响线	(112)
5.3 用机动法作静定梁的影响线	(114)
5.4 影响线的应用	(115)
5.4.1 求各种荷载作用下的影响线	(116)
5.4.2 最不利荷载位置的确定	(117)
5.5 简支梁的内力包络图和绝对最大弯矩	(121)
5.5.1 简支梁的内力包络图	(121)
5.5.2 简支梁的绝对最大弯矩	(121)
本章小结	(125)
思考题	(126)
习题	(126)
6 静定结构分析方法总论	(129)
6.1 静定结构的特点	(129)
6.2 静定结构的分析方法	(130)
6.2.1 力的研究	(130)
6.2.2 结构变形或位移的研究	(133)
6.2.3 力与变形的物理关系,结构在各种外因作用下的位移计算	(135)
6.3 结构静力分析方法总述	(137)
7 力法	(138)
7.1 超静定结构的概念	(138)
7.2 力法的基本原理	(139)
7.2.1 力法的基本结构	(139)
7.2.2 力法的基本未知量	(139)
7.2.3 力法的基本方程	(139)
7.3 超静定次数的确定与基本结构	(141)
7.4 力法典型方程	(143)
7.5 力法的计算步骤和举例	(145)
7.5.1 超静定刚架	(146)
7.5.2 超静定桁架	(148)
7.5.3 超静定组合结构	(150)
7.5.4 铰接排架	(151)

7.5.5 两铰拱的计算	(153)
7.6 超静定结构的位移计算	(155)
7.7 超静定结构最后内力图的校核	(156)
7.7.1 平衡条件的校核	(157)
7.7.2 位移条件的校核	(157)
7.8 对称性的利用	(159)
7.8.1 选取对称的基本结构	(159)
7.8.2 荷载分组	(161)
7.9 温度改变时超静定结构的计算	(166)
7.10 支座位移时超静定结构的计算	(169)
7.11 超静定结构的特性	(172)
本章小结	(173)
思考题	(174)
习题	(174)
8 位移法	(180)
8.1 位移法的基本概念	(180)
8.1.1 概述	(180)
8.1.2 位移法的基本思路	(180)
8.2 位移法的基本未知量及基本结构	(182)
8.2.1 基本未知量的确定	(182)
8.2.2 位移法的基本结构	(183)
8.3 等截面直杆的计算	(184)
8.3.1 固端力	(184)
8.3.2 刚度方程	(184)
8.3.3 等截面杆转角位移方程	(188)
8.4 位移法典型方程	(189)
8.5 用位移法计算连续梁和无侧移刚架	(193)
8.6 用位移法计算有侧移刚架	(196)
8.7 用剪力分配法计算等高铰接排架	(201)
8.7.1 柱顶有水平集中荷载作用的计算	(201)
8.7.2 柱间有水平荷载作用的计算	(203)
8.7.3 单阶变截面柱排架计算	(204)
8.8 对称性的利用	(204)
8.8.1 奇数跨对称结构	(204)
8.8.2 偶数跨对称结构	(205)
8.8.3 对称结构简化举例	(206)
本章小结	(208)
思考题	(208)

习题	(209)
9 力矩分配法及连续梁的影响线	(212)
9.1 力矩分配法的概念	(212)
9.1.1 名词解释	(212)
9.1.2 力矩分配法的基本概念	(214)
9.2 用力矩分配法计算多结点连续梁和无侧移刚架	(219)
9.3 连续梁影响线及内力包络图	(225)
9.3.1 用机动法绘制连续梁影响线的轮廓	(225)
9.3.2 连续梁的内力包络图	(228)
本章小结	(230)
思考题	(231)
习题	(231)
10 矩阵位移法	(234)
10.1 概述	(234)
10.2 局部坐标系下的单元刚度矩阵	(235)
10.2.1 结构的离散化	(235)
10.2.2 杆端力与杆端位移之间的关系式	(235)
10.3 整体坐标下的单元刚度矩阵	(239)
10.4 用先处理法建立结构刚度矩阵	(242)
10.5 非结点荷载的处理、等效结点荷载	(251)
本章小结	(256)
思考题	(257)
习题	(257)
11 结构的动力计算	(259)
11.1 概述	(259)
11.1.1 结构动力计算的特点和任务	(259)
11.1.2 动力荷载的分类及体系振动自由度	(259)
11.2 单自由度体系的自由振动	(261)
11.3 单自由度体系的强迫振动	(265)
11.4 阻尼对单自由度体系振动的影响	(269)
11.5 多自由度体系的自由振动	(274)
11.5.1 列动力平衡方程(刚度法)	(275)
11.5.2 列位移方程(柔度法)	(276)
11.5.3 两种方法间的关系及使用选择	(276)
11.5.4 柔度法建立的微分方程的解	(277)
11.5.5 刚度法建立的微分方程的解	(278)

11.6 多自由度体系在简谐荷载作用下的强迫振动·····	(281)
本章小结·····	(284)
思考题·····	(284)
习题·····	(285)
附录 A 矩阵位移法的电算程序及其应用 ·····	(288)
A.1 程序编制的一般原理与方法·····	(288)
A.1.1 概述·····	(288)
A.1.2 数据的输入·····	(288)
A.1.3 单元定位向量与结构刚度矩阵的存储·····	(289)
A.1.4 结构刚度方程的求解·····	(291)
A.2 框图设计·····	(292)
A.2.1 总框图·····	(292)
A.2.2 程序标识符·····	(293)
A.2.3 子框图·····	(294)
A.3 源程序·····	(306)
A.4 程序应用举例·····	(313)
A.4.1 上机计算步骤·····	(313)
A.4.2 输出结果说明·····	(314)
A.4.3 计算举例·····	(314)
习题·····	(319)
附录 B ANSYS 结构分析软件介绍 ·····	(321)
B.1 概述·····	(321)
B.2 运行环境·····	(321)
B.3 使用有限元结构分析软件的一般步骤·····	(321)
B.4 ANSYS 结构分析软件介绍·····	(322)
B.4.1 ANSYS 的基本组成·····	(322)
B.4.2 ANSYS 的基本功能·····	(323)
B.4.3 ANSYS 典型分析过程·····	(323)
部分习题参考答案 ·····	(325)
参考文献 ·····	(330)

1 绪 论

本章提要

本章介绍结构力学的研究对象和任务,重点讨论结构的计算简图,并介绍平面杆件结构和荷载的分类以及结构力学的学习方法。

1.1 结构力学的研究对象和任务

在土木工程中,由建筑材料按照一定的方式构成,并能承受荷载作用的物体或体系称为工程结构(简称结构)。结构在建筑物中起着承受和传递荷载的骨架作用,如单层工业厂房的基础、柱、屋架(梁)通过相互联结而构成厂房的骨架(图 1.1)。又如民用建筑中的框架、公路与铁路工程中的桥梁以及挡土墙、水坝等,都是结构的实际例子。结构一般是由多个构件联结而成的,如桁架、框架等。最简单的结构可以是单个构件,如单跨梁、独立柱等。

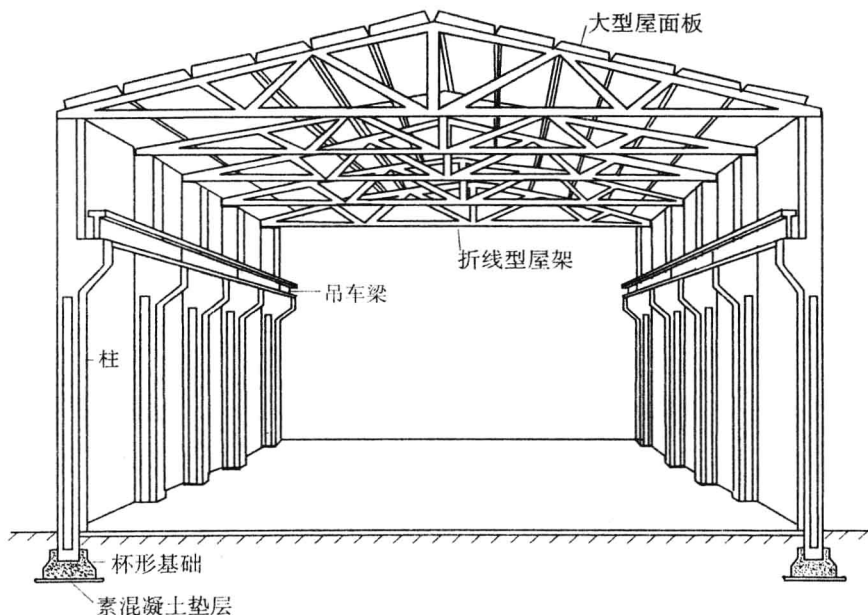


图 1.1

按照几何观点,结构可以分为杆件结构、薄壁结构和实体结构三种类型。杆件结构的几何特征在于构件的长度远大于截面的宽度和高度。由若干杆件组成的结构即为杆件结构(图 1.1)。薄壁结构是指构件的厚度远小于其他两个方向尺度的结构。构件为平板状则称

为薄板；由若干块薄板可组成各种薄壁结构〔图 1.2(a)、图 1.2(b)中的屋面〕。具有曲面外形的薄壁结构称为薄壳结构〔图 1.2(c)中的屋面〕。实体结构是指构件在三个方向的尺度大约为同一量级的结构，例如挡土墙、块式基础〔图 1.3(a)、图 1.3(b)〕等。

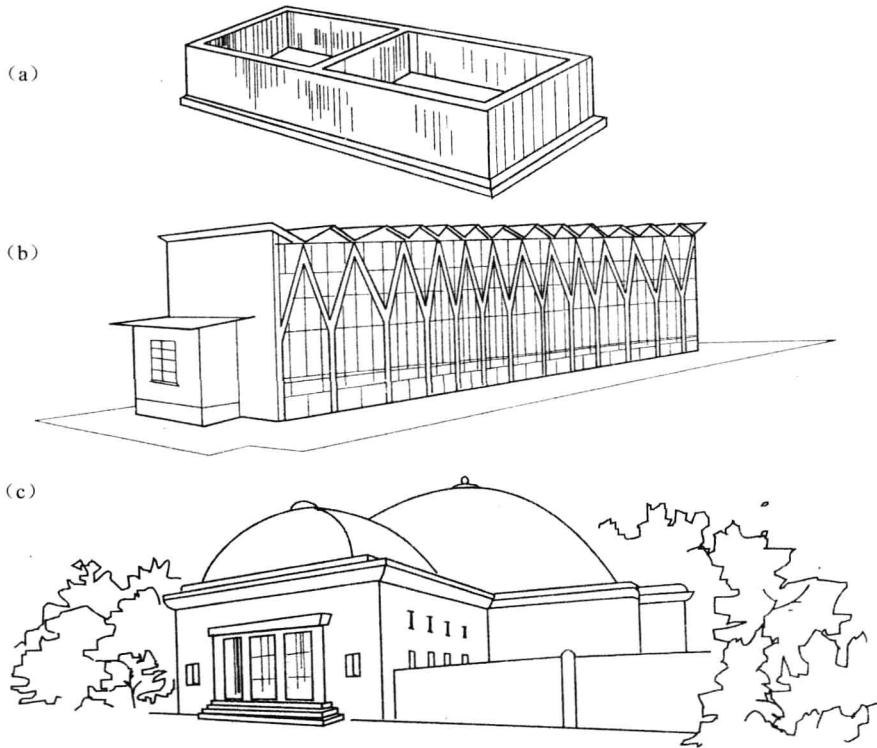


图 1.2

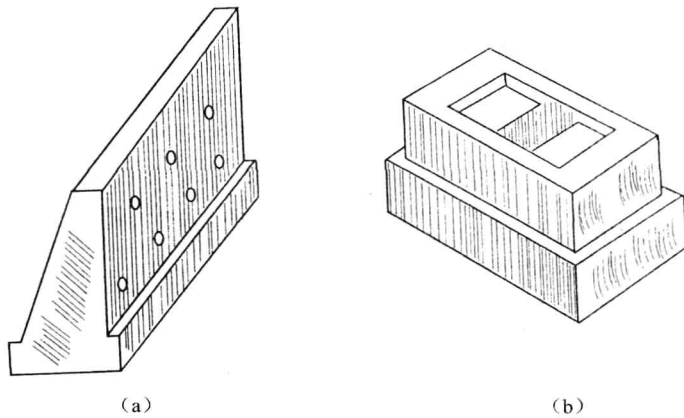


图 1.3

杆件结构是结构力学的主要研究对象，因此，本书研究的范围只限于杆件结构。
结构力学的任务是：研究结构的组成规律和合理形式以及结构在外因作用下的强度、刚度

和稳定性的计算原理与计算方法。

研究结构组成规律的目的在于保证结构各部分不致发生相对运动,使之可以承受荷载并维持平衡;研究结构的合理形式是为了有效地利用材料,使其性能得到充分发挥;进行强度和稳定性计算的目的是为了保证结构在外因作用下不致破坏;计算刚度的目的在于保证结构不致发生过大的、在实用上不能容许的变形和位移。而结构的内力和位移计算是强度、刚度计算的主要内容,也是本书研究的主要内容。有关结构稳定性问题本书不作讨论。

1.2 结构的计算简图

土木工程中的实际结构是很复杂的,完全按照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,为了便于计算,在对实际结构进行力学计算之前,必须作某些简化和假定。略去一些次要因素的影响,反映其主要特征,用一个简化了的图形来代替实际结构,这种图形叫做结构的计算简图或称计算模型。

1.2.1 确定计算简图的原则

计算简图的确定是力学计算的基础,极为重要。确定计算简图要遵循下列原则:

- (1)略去次要因素,便于分析和计算;
- (2)尽可能反映实际结构的主要受力特征。

1.2.2 平面杆件结构的简化

一般结构实际上都是空间结构,各部分相互联结成一个空间整体,以承受各个方向可能出现的荷载。但在多数情况下,常可以忽略一些次要的空间约束而将实际结构简化为平面结构。平面杆件结构是指结构各杆的轴线与作用荷载均位于同一平面内,可简称为平面结构。平面杆件结构的简化主要包括杆件、结点和支座的简化。

1.2.2.1 杆件的简化

杆件结构中的杆件,由于其截面尺寸通常远比杆件的长度小得多,截面上的应力可近似认为在截面上均匀分布,因此,可根据截面的内力来确定。所以,在计算简图中杆件可用其轴线来表示,杆件的长度则按杆件轴线交点间的距离计取。杆件的自重或作用于杆件上的荷载,一般可近似地按作用在杆件的轴线上去处理。轴线为直线的梁、柱等构件可用直线表示;曲杆、拱等构件的轴线为曲线,则可用相应的曲线表示。

1.2.2.2 结点的简化

对于由杆件相互联结而成的结构,杆件之间的联结区用位于各杆轴线交点处的结点表示。由不同材料制作的平面杆件结构,在杆件的联结方式上有不同做法,形式很多。根据它们的受力及变形特点,在计算简图中常归纳为以下三种:

(1)铰结点

铰结点的特征是被联结的杆件在联结处不能相对移动,但可绕结点中心相对转动,即可以传递力,但不能传递力矩。

在实际工程中,这种理想铰是很难实现的,只是当结构的构造符合一定条件时,才可以近似地简化为铰结点,如图 1.4 所示木屋架结点。在计算简图中,铰结点用一个小圆圈表示。

(2)刚结点

刚结点的特征是被联结的杆件在联结处既不能相对移动,又不能相对转动;既可以传递力,也可以传递力矩。如现浇钢筋混凝土刚架中的结点通常属于这类情形,如图 1.5 所示。

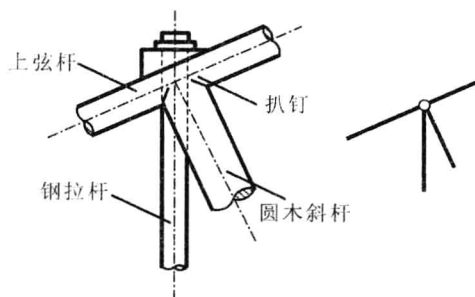


图 1.4

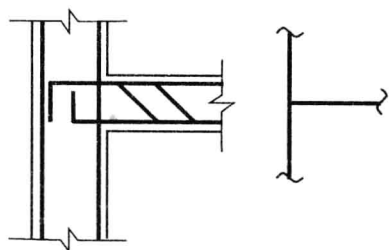


图 1.5

(3)组合结点

若干杆件汇交于同一结点,当其中某些杆件联结视为刚结点,而另一些杆件联结视为铰结点时,便形成组合结点。例如,在图 1.6 所示的结构计算简图中, D 结点则为组合结点。

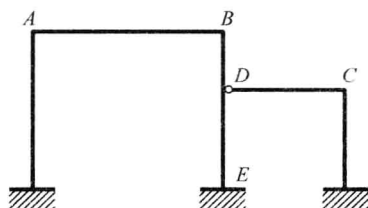


图 1.6

1.2.2.3 支座的简化

将结构与基础或其他支承物联系起来,以固定结构位置的装置,叫做支座。平面杆件结构的支座通常有以下三种形式:

(1)可动铰支座

这种支座常用图 1.7(a)所示方式表示。它对结构的约束作用是只能阻止结构上的 A 端沿垂直于支承平面方向的移动;而结构既可绕铰 A 转动,又可沿着支承平面水平移动。因此当不考虑支承平面的摩擦力时,其支座反力将通过铰 A 的中心并与支承平面垂直。即反力的作用点和作用线是确定的,只有大小和指向是未知的,可用 V_A 来表示。根据上述特点,这种支座在计算简图上常用一根链杆来表示[图 1.7(b)]。

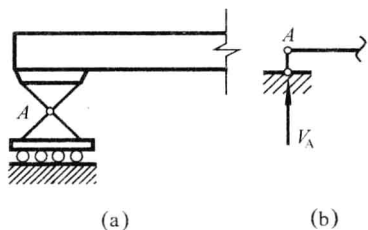


图 1.7

在实际结构中,凡符合或近似符合上述约束条件的支承装置,则可取为可动铰支座。

(2)固定铰支座

这种支座常用图 1.8(a)所示方式表示。它对结构的约束作用是不允许结构在 A 端发生任何移动,而只能绕铰 A 转动。因铰支座的反力将通过铰的中心,但是方向和大小都是未知的,显然,可以用两个沿确定方向的未知分反力 H_A 和 V_A 来表示。固定铰支座在计算简图中又常用交于一点 A 的两根链杆来表示[图 1.8(b)、图 1.8(c)]。

在实际结构中,凡属不能移动而可作微小转动的装置,都可视为固定铰支座。例如,插入杯形基础的钢筋混凝土柱子,当用沥青麻丝填缝时,则柱与基础的联结便可视为固定铰支座[图 1.9(a)、图 1.9(b)]。

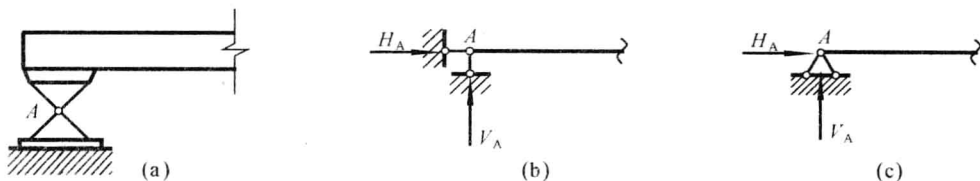


图 1.8

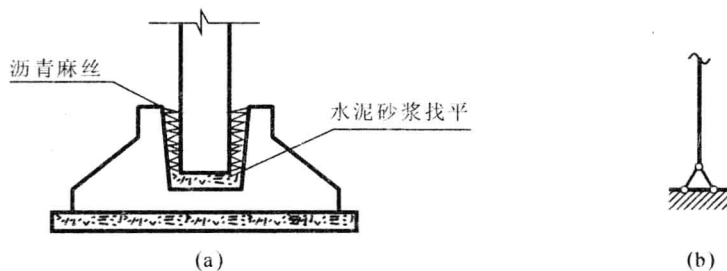


图 1.9

(3) 固定支座

这种支座不允许结构在 A 端发生任何移动和转动。它的反力大小、方向和作用点都是未知的。因此,可以用水平和竖向分力 H_A 和 V_A 及反力矩 M_A 表示〔图 1.10(a)〕。也可用三根不全平行又不全交于一点的链杆表示,如图 1.10(b)所示。在计算简图中则常采用图 1.10(c)所示表示。

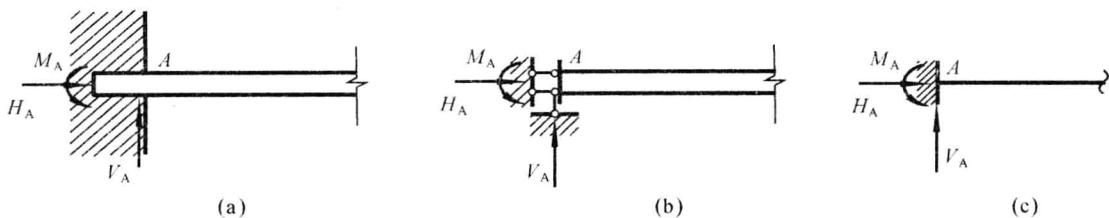


图 1.10

在实际结构中,凡嵌入墙身的杆件,其嵌入部分有足够的长度,致使杆端不能有任何移动和转动时,该杆端所联结的支座就可视为固定支座,如图 1.11(a)、图 1.11(b)所示悬挑阳台梁。又如插入杯形基础中的柱子,如果用细石混凝土填实,或与基础整体现浇的柱子,则柱与基础的联结也可看做固定支座〔图 1.12(a)、图 1.12(b)〕。

此外,在实际结构中,尤其是在结构分析中,为了简化计算而利用结构对称性时,常会用到一种定向支座(或称滑动支座),如图 1.13(a)所示。这类支座能限制结构在 A 端的转动和一个方向上的移动,但允许在另一个方向上滑动。在限制移动方向上的反力和限制转动方向上的反力矩是两个未知的反力。滑动支座在计算简图上又常用两根平行的链杆来表示〔图 1.13(b)、图 1.13(c)〕。图 1.13(b)在水平方向上允许滑动,而图 1.13(c)则在竖直方向上允许滑动。

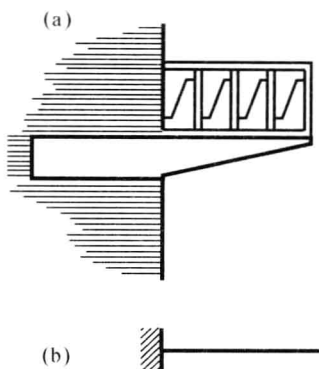


图 1.11

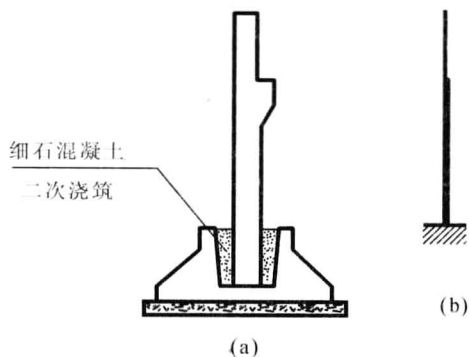


图 1.12

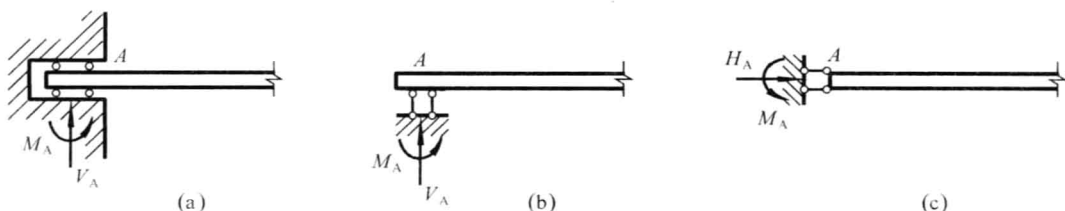


图 1.13

1.2.3 结构计算简图示例

在工程实际中,只有根据实际结构的主要受力情况去进行抽象和简化,才能得出它的计算简图。下面通过两个实例进行具体的分析。

图 1.14(a)为一钢筋混凝土单层工业厂房的结构示意图,它是由多个横向排架借助于屋面板、吊车梁、柱间支撑等纵向构件联结成的一个空间结构。从荷载传递来看,屋面荷载和吊车轮压等都主要通过屋面板和吊车梁等构件传递到一个个横向排架上,故在选取计算简图时,可略去排架之间纵向联系的作用,而把这样的空间结构简化为一系列的平面排架来分析,如图 1.14(b)所示。当然,这种不考虑空间作用的简化方法,具有一定的近似性,但在一般情况下,它反映了厂房结构的受力特点。

下面对平面排架再作进一步分析。

首先,对于平面排架内的屋架,由于通常采用预埋钢板,在吊装就位后,再与柱顶预埋钢板焊接在一起,则屋架端部与柱顶不能发生相对线位移,但仍有可能发生微小的转动。在计算屋架各杆的内力时,可把它单独取出,用固定铰支座和可动铰支座代替柱顶的支承作用。再将屋架的各杆均用轴线表示,并假定所有这些轴线都位于同一平面且在每个结点处都相交于一点,这些交点就可代替实际的结点。根据力学分析和实测的验证可知,当荷载只作用于结点时,屋架各杆的内力主要是轴力,剪力和弯矩都很小,故可把屋架的各个结点均假定为理想铰结点,其计算简图如图 1.14(c)所示。

其次,在计算平面排架中竖柱的内力时,其屋架部分用抗拉刚度为无限大的杆件来代替,竖杆也用轴线来表示。牛腿上由吊车梁传来的荷载相对于柱轴线的偏心,用牛腿处的悬挑短

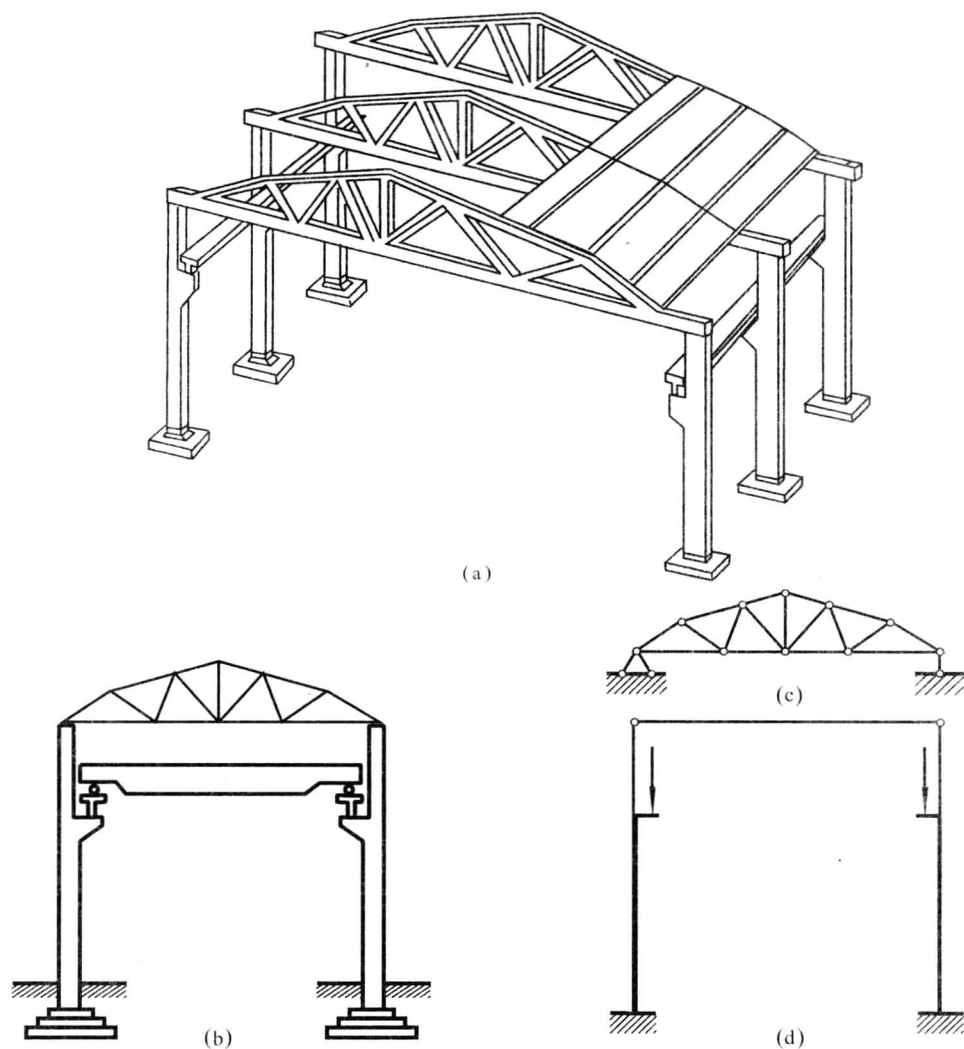


图 1.14

杆来表示。竖杆与基础之间的联结按固定支座处理。其计算简图如图 1.14(d)所示。

选取计算简图要有较多的实践经验,还要涉及施工知识、构造知识及设计概念。

如图 1.15(a)所示斜梁门式刚架结构,一般为了施工方便,左右两半刚架分别平卧在地面整体预制,则斜梁与立柱构成刚结点。左右两半刚架通过吊装插入事先浇筑成带有杯口的独立基础上,顶部通过预埋铁件或焊接或螺栓连接等构造方式形成铰结点。与基础的联结则取决于设计要求。通常用细石混凝土分两次浇捣密实形成整体,则支座即为固定支座〔图 1.15(b)〕;有时设计要求支座能有微小转动,如室内有高温热源的厂房,需考虑温度影响的温度应力,则基础填塞沥青麻丝于杯口上部,此时支座可简化为铰支座〔图 1.15(c)〕。当然,不同的处理结构所产生的内力分布是不同的,设计的效果也不一样。因此,计算简图的选取必须要与实际要求相一致,否则就会导致设计的不合理、不经济甚至不安全。