

高等学校教材

# 结 构 力 学

(第 二 版)

上 册

龙驭球 包世华 主编

龙驭球 包世华 支秉琛 编

高等教育出版社

# 第一版序

本书是根据1977年11月教育部委托召开的高等学校工科力学教材会议讨论的《结构力学》编写大纲编写的，适用于五年制土建、水利类专业。本书在编写时主要参考了我们以前编写的三本教材：《结构力学》（清华大学建筑工程系编，中国建筑工业出版社1974年出版），《结构力学》（龙驭球、包世华合编，高等教育出版社1966年出版），《有限元法概论》（龙驭球编，人民教育出版社1979年出版）。

全书共十三章，分上、下两册。上册讨论静定结构和超静定结构的基本计算方法，包括：绪论和构造分析、静定结构的受力分析、虚功原理和结构的位移计算、力法、位移法、渐近法和近似法、影响线以及结构的计算简图和计算方法等八章。下册讨论结构分析中的能量方法、矩阵方法和几个专题，包括：能量原理、结构矩阵分析、结构的动力计算、结构的稳定计算以及结构的塑性概念和极限荷载等五章。关于专题弹性地基梁的计算的内容，考虑到教学上的方便，将单独成册另行出版。

全书中的内容可区分为必学与选学两部分。凡是我们可以列入选学的章节，都用星号加以标志。其中包括：第十二章结构的稳定计算、第十三章结构的塑性分析和极限荷载的全章，第十章结构矩阵分析和第十一章结构的动力计算的后半章，以及分散在其他各章中的有关各节。应当指出，必学与选学的区分并不是绝对的，对于不同的专业、不同的学制、不同的教学条件，显然在教材内容的取舍上可以而且应当有所不同。

本书上册由清华大学结构力学教研组龙驭球、包世华、支秉琛编写，下册由龙驭球、包世华、支秉琛、沈恒滋、匡文起编写，全书由龙驭球、包世华修改定稿，全部习题的解答和校核工作由教研组集体完成。

本书由同济大学朱宝华、西安冶金建筑学院钟朋主审，参加审稿的有同济大学、西安冶金建筑学院、重庆建筑工程学院、郑州工学院、湖南大学、哈尔滨建筑工程学院、天津大学、大连工学院、北京工业大学、北京建筑工程学院、华东水利学院、武汉水利电力学院、西安空军工程学院和山东建筑工程学院等十四个院校的同志。参加审稿的同志对本书提出了许多很好的意见，在此深表谢意。

本书一定还存在不少问题，请读者提出意见，以便进一步提高。

编者

1979年6月

(京) 112 号

### 内 容 提 要

本书是清华大学结构力学教研组编，龙驭球、包世华主编《结构力学》(五年制用)的第二版。第二版加深了内容、拓宽了知识面，既可作为五年制土建、水利和道桥等专业的教材，又可兼作其他专业学生、研究生、教师及有关工程技术人员参考用书。

全书共十五章，分上、下两册。上册讨论静定结构和超静定结构的基本计算方法，包括：结论和构造分析、静定结构受力分析、静定结构影响线、结构位移计算、力法、位移法、渐近法和近似法以及结构的计算简图和计算方法等八章；较第一版拓宽了覆盖面，增补了一些有特色的解法，以适应多种专业及深层次的需要。下册讨论结构分析中的能量方法、矩阵方法和几个专题，包括：能量原理、结构矩阵分析、结构的动力计算、结构的稳定计算，结构的塑性分析和极限荷载、结构的随机振动以及结构的几何非线性分析等七章；较第一版有较大的修改与更新，后两章是新增加的内容。

本书内容丰富、全面，叙述详尽，具有一定的特色。

责任编辑 余美茵

本书第一版获 1987 年国家  
优秀教材奖

高等学校教材

结 构 力 学

(第 二 版)

上 册

龙驭球 包世华 主编

龙驭球 包世华 支秉琛 编

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 35.25 字数 850 000

1979年8月第1版 1994年5月第2版 1994年5月第1次印刷

印数 0001—1135

ISBN 7-04-004357-2/TU·54

定价 13.40 元

## 第二版序

本书是清华大学结构力学教研组编，龙驭球、包世华主编《结构力学》的第二版。根据五年制的课程要求和教师、研究生参考进修的需要，本书考虑了知识面的拓宽和教学内容的更新。

全书分为上下两册，上册讨论静定结构和超静定结构的基本计算方法，下册讨论结构矩阵分析和其他几个专题内容。在教材内容上第二版有适当的拓宽和更新。其中上册由于内容比较成熟和定型，修改量较少，主要包括两个方面：第一，拓宽覆盖面，以适应多种专业的需要。例如，充实影响线内容、增添弹性荷载法内容，以满足路桥专业的教学要求。此外，还增加了空间体系几何构造分析、交叉梁系和弹性支座上连续梁的计算等内容。第二，荟萃拾遗，增补一些有特色的解法。例如，桁架的通路法和代替杆法，桁架位移的图解法，超静定拱的柱比法，刚架的力矩迭代法等。下册中各专题内容的修改量较大，一方面对原有的五章（能量原理，结构矩阵分析，结构的动力计算，结构的稳定计算，结构的塑性分析和极限荷载）作了不少修改与更新，另一方面还增加了随机振动和几何非线性分析两新章。书中星号“\*”内容，可供教学选学。

参加本书修订工作的有龙驭球、包世华、支秉琛三位教授。匡文起教授参加了下册的修订工作。

本书第二版审阅人为西安冶金建筑学院刘铮教授、沈锦英教授，审阅中提了不少宝贵意见，特向他们表示衷心的感谢。

本书中有不妥之处，热忱欢迎指正。

编者  
于清华大学  
1992年9月

# 目 录

<b>第一章 绪论和构造分析</b> ..... 1	习题..... 181
§ 1-1 结构力学的任务和学习方法 ..... 1	<b>第四章 结构位移计算</b> ..... 186
§ 1-2 结构的计算简图 ..... 3	§ 4-1 虚力原理求刚体体系的 位移..... 187
§ 1-3 结构和荷载的分类 ..... 8	§ 4-2 变形体位移计算的一般公 式和步骤 ..... 191
§ 1-4 几何构造分析的几个概念 .....16	§ 4-3 变形体的虚功原理 ..... 193
§ 1-5 平面几何不变体系的组成 规律 .....18	§ 4-4 温度作用时的位移计算 ..... 198
§ 1-6 平面杆件体系的计算自由 度 .....17	§ 4-5 荷载作用下的位移计算 ..... 200
* § 1-7 空间体系的几何构造分析 .....20	§ 4-6 图乘法 ..... 208
§ 1-8 几何构造与静力特性的 关系 .....23	* § 4-7 弯矩面积法、共轭梁法和 弹性荷载法 ..... 216
§ 1-9 结语 .....25	* § 4-8 杆的挠度曲线微分方程和 求挠度曲线的初参数法 ..... 230
习题.....26	§ 4-9 桁架结点位移图解法 ..... 237
<b>第二章 静定结构的受力分析</b> .....29	§ 4-10 互等定理..... 239
§ 2-1 直杆的受力分析 .....29	* § 4-11 位移影响线..... 242
§ 2-2 曲杆的受力分析 .....37	§ 4-12 结语..... 243
§ 2-3 静定结构支座反力的分析 方法 .....40	习题..... 244
§ 2-4 静定多跨梁及刚架 .....47	<b>第五章 力法</b> ..... 254
§ 2-5 三铰拱 .....63	§ 5-1 超静定结构的组成和超静 定次数 ..... 254
§ 2-6 静定平面桁架 .....75	§ 5-2 力法的基本概念 ..... 258
§ 2-7 静定空间桁架 ..... 103	§ 5-3 力法计算举例 ..... 261
§ 2-8 应用刚体体系虚位移原理 求静定结构内力 ..... 109	§ 5-4 超静定拱的计算 ..... 270
§ 2-9 静定结构总论 ..... 115	§ 5-5 力法计算的简化(一) ——对称性的应用 ..... 274
习题..... 122	* § 5-6 力法计算的简化(二) ——广义未知力的应用 ..... 279
<b>第三章 静定结构的影响线</b> ..... 137	§ 5-7 弹性中心法和柱比法 ..... 283
§ 3-1 移动荷载和影响线的概念 ..... 137	* § 5-8 数值积分法 ..... 292
§ 3-2 静力法作影响线 ..... 138	* § 5-9 空间刚架的计算 ..... 299
§ 3-3 机动法作影响线 ..... 156	* § 5-10 交叉梁系的计算..... 300
§ 3-4 影响线的应用 ..... 162	* § 5-11 三弯矩方程和五弯矩方程..... 303
§ 3-5 铁路、公路的标准荷载制 和换算荷载..... 171	§ 5-12 支座移动和温度改变时的 计算..... 311
§ 3-6 简支梁的包络图和绝对最 大弯矩 ..... 176	§ 5-13 超静定结构的位移计算和
§ 3-7 结语 ..... 180	

力法计算的校核.....	318	§ 7-3 力矩分配法应用举例 .....	447
§ 5-14 超静定结构的影响线.....	323	§ 7-4 无剪力分配法的概念 .....	455
* § 5-15 用弹性荷载法作影响线.....	331	* § 7-5 无剪力分配法的应用—— 符合倍数关系的多跨刚架.....	461
§ 5-16 荷载的最不利分布和内力 包络图.....	339	* § 7-6 无剪力分配法与力矩分配法的 联合应用 .....	465
§ 5-17 超静定结构的特性.....	342	§ 7-7 力矩分配法与位移法的 联合应用 .....	471
§ 5-18 结语.....	346	* § 7-8 力矩迭代法的基本概念 .....	474
习题.....	346	* § 7-9 力矩迭代法计算有侧移的 刚架 .....	477
<b>第六章 位移法 .....</b>	<b>356</b>	§ 7-10 多层多跨刚架的近似计算.....	483
§ 6-1 位移法的基本概念 .....	356	§ 7-11 结语.....	491
§ 6-2 等截面杆件的计算 .....	360	习题.....	492
§ 6-3 无侧移刚架的计算 .....	365	<b>第八章 结构的计算简图和计 算方法 .....</b>	<b>501</b>
§ 6-4 有侧移刚架的计算 .....	368	§ 8-1 计算简图概述 .....	501
§ 6-5 位移法的基本体系算法 .....	376	§ 8-2 支座、结点和构件的简化 .....	502
§ 6-6 对称结构的计算 .....	380	§ 8-3 结构体系的简化 .....	509
§ 6-7 支座位移和温度改变时的 计算 .....	384	§ 8-4 计算方法概述 .....	521
* § 6-8 斜杆刚架的计算 .....	390	§ 8-5 力法、位移法和渐近法的 比较 .....	522
* § 6-9 变截面杆件 .....	395	* § 8-6 复杂基本结构、复杂单元 和子结构的应用 .....	524
* § 6-10 考虑剪切和轴向变形时 刚架的计算.....	402	§ 8-7 结语 .....	529
* § 6-11 空间刚架的计算.....	409	习题.....	531
* § 6-12 位移法作影响线.....	414	<b>附录 1 习题答案.....</b>	<b>539</b>
* § 6-13 混合法.....	422	<b>附录 2 索引.....</b>	<b>552</b>
§ 6-14 结语.....	427	<b>上册参考书目 .....</b>	<b>555</b>
习题.....	428		
<b>第七章 渐近法和近似法.....</b>	<b>435</b>		
§ 7-1 力矩分配法的基本概念 .....	435		
§ 7-2 多结点的力矩分配 .....	441		

# 第一章 绪论和构造分析

## § 1-1 结构力学的任务和学习方法

建筑物和工程中承受、传递荷载而起骨架作用的部分称为工程结构，简称为结构。房屋中的梁柱体系，水工建筑物中的闸门和水坝，公路铁路上的桥梁和隧洞等，都是工程结构的典型例子。

从几何角度来看，结构可分为三类：

1. 杆件结构——这类结构是由杆件所组成。杆件的几何特征是横截面尺寸要比长度小得多。梁、拱、桁架、刚架是杆件结构的典型形式。

2. 板壳结构——这类结构也称为薄壁结构。它的厚度要比长度和宽度小得多。房屋中的楼板和壳体屋盖、水工结构中的拱坝都是板壳结构。

3. 实体结构——这类结构的长、宽、厚三个尺度大小相仿。水工结构中的重力坝属于实体结构。

狭义的结构往往指的就是杆件结构，而通常所说的结构力学就是指杆件结构力学。

结构力学与理论力学、材料力学、弹塑性力学有密切的关系。理论力学着重讨论物体机械运动的基本规律，其余三门力学着重讨论结构及其构件的强度、刚度、稳定性和动力反应等问题，其中材料力学以单个杆件为主要研究对象，结构力学以杆件结构为主要研究对象，弹塑性力学以实体结构和板壳结构为主要研究对象。

结构力学的任务是根据力学原理研究在外力和其他外界因素作用下结构的内力和变形，结构的强度、刚度、稳定性和动力反应，以及结构的组成规律。具体地说，包括以下几个方面：

- (1) 讨论结构的组成规律和合理形式，以及结构计算简图的合理选择；
- (2) 讨论结构内力和变形的计算方法，进行结构的强度和刚度的验算；
- (3) 讨论结构的稳定性以及在动力荷载作用下的结构反应。

结构力学问题的研究手段包含理论分析、实验研究和数值计算三个方面。实验研究方法的内容在实验力学和结构检验课程中讨论，理论分析和数值计算方面的内容在结构力学课程中讨论。

在结构分析中，首先把实际结构简化成计算模型，称为结构计算简图；然后再对计算简图进行计算。结构力学中介绍的计算方法是多种多样的，但所有各种方法都要考虑下列三方面的条件：

- (1) 力系的平衡条件或运动条件；
- (2) 变形的几何连续条件；
- (3) 应力与变形间的物理条件（或称为本构方程）。

在运用上述条件进行计算时可以采用不同的途径和解法。结构力学的基本解法可归纳

为三类：力法、位移法和混合法。这些解法如果采用能量形式来表述，则称为能量法。

电子计算机的出现，对结构力学学科产生了巨大的影响。过去由于缺乏现代化的计算手段，结构分析都是靠“手算”。现在情况不同了，过去无法解算的许多大型结构计算问题，现在已经成为“电算”中的常规问题。“电算”提高了结构力学解决问题的能力，同时也对结构力学提出了新的要求，即“电算”方法必须适应“电算”的特点。因此，一些与“电算”关系密切的内容，例如能量原理、结构矩阵分析、有限元法、半解析法、结构分析软件、结构优化设计等，已经在结构力学中占据愈来愈重要的地位，在结构力学学科领域里形成了一个新的分支学科——计算结构力学。这就是借助计算机采用数值方法解决结构力学问题的一个分支学科。

在《结构力学课程教学基本要求》中提出了关于分析能力、计算能力、自学能力和表达能力的培养要求。其要点如下：

### 1. 分析能力

在结构力学课程中要培养多方面的分析能力，例如：

选择结构计算简图的能力——如何对实际结构进行“删繁就简”，确定其计算简图，这是进行结构力学计算的第一步。在结构力学课程中要初步培养这方面的能力。

进行力系平衡分析和变形几何分析的能力——对结构的受力状态要进行平衡分析，对结构的变形和位移状态要进行几何分析。这两方面的分析能力是结构分析中的两个看家本领，要在反复运用中加以融会贯通，逐步提高，力求达到能正确、熟练、灵活运用水平。

选择计算方法的能力——结构力学中的计算方法很多，要了解各种方法的特点和最适用的场合，具有根据具体问题选择恰当计算方法的能力。

### 2. 计算能力

在结构力学课程中培养计算方面的能力包含三项：具有对各种结构进行计算或确定计算步骤的能力；具有对计算结果进行定量校核或定性判断的能力；初步具有使用结构计算程序的能力。在此三项中，计算能力是基础——不会计算，也就不会校核。不会手算，则电算是盲目的。校核和判断能力可以说比计算能力要更高一层——校核并不是重复计算一遍，而是要求用另一方法来核算。这里要求校核者能掌握多种算法并能灵活地运用。判断则要求能用简略的办法确定计算结果的合理范围，这里要求评判者通晓结构的力学性能和各种近似算法。使用计算程序的能力日益显得更加重要——不会电算就无法计算大型问题，也无法提高计算效率。

作题练习，是学习结构力学的重要环节。不作一定数量的习题，就很难对基本概念和方法有深入的理解，也很难培养较好的计算能力。但是作题也要避免各种盲目性。举例如下：

不看书，不复习，埋头作题，这是一种盲目性。应当在理解的基础上作题，通过作题来巩固和加深理解。

贪多求快，不求甚解，这是另一种盲目性。有的习题要精作。一道题用三种方法作，往往比用一种方法作三道题更有收获。

只会对答数，不会自己校核和判断，这也是一种盲目性。要养成校核习惯，学会自行校核的本领。在实际工作中，计算人员要对自己交出来的计算结果负责。这种负责精神应



当及早培养。

做错了题不改正，不会从中吸取教训，这也是一种盲目性。做错了题不改正，就是轻率地仍掉了一个良好的学习机会。特别不要放过一个似是而非的模糊概念，因为认识真理的主要障碍不是明显的谬误，而是似是而非的“真理”。

### 3. 自学能力

自学就是把别人的知识变成自己的。自学包含两个方面，一是消化已学的知识，二是摄取新的知识。如果把知识比作一个“笔记本”，也就是说，一是要由厚变薄，二是要由薄变厚。

消化，就是要把书本上的结论用自己的话来表述，把黑板上的论证按照自己的思路来整理，把分章分节学来的知识融成整体，把整章的丰富内容提炼概括成简短的几句话，在自己演算的习题本里穿插几行札记。总之，要把“笔记本”由厚变薄，把收集到的珍珠用线串起来，使知识得到升华，便于储存，便于驾驭。

摄取，就是逐步扩大自己的知识领域，把“笔记本”由薄变厚。摄取要有选择，扩大要围绕一个中心。首先要把中心内容扎扎实实地牢固掌握，把主要教科书精读钻研，然后有选择地阅读参考书籍和资料，这样，新知识才能在原来的知识结构上生根。

### 4. 表达能力

作业要整洁，清晰，严谨。

计算书要书写整洁，因为是要给人看的。书写整洁，与其说是一种能力，无宁说是一种习惯，一种郑重和负责任的习惯。

既要有形式上的整洁，更要有内容上的清晰。作题要步骤分明，思路清楚，图形简明，数据准确。

整洁和清晰，体现了一种严谨作风。科学是严谨的，从事科学的人要注意培养严谨作风。

## § 1-2 结构的计算简图

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，对实际结构进行力学计算以前必须加以简化。略去不重要的细节，显示其基本特点，用一个简化的图形来代替实际结构。这种图形称为结构的计算简图。

选择计算简图的原则是：

(1) 从实际出发——计算简图要反映实际结构的主要性能；

(2) 分清主次，略去细节——计算简图要便于计算。

计算简图的选择是力学计算的基础，极为重要。在下面几章讨论各种结构时，将说明从实际结构到计算简图的简化过程。在第八章中将总结计算简图选择的一些规律。这里先对支座和结点的简化作一些说明。

把结构与基础联系起来的装置称为支座。支座的作用是把结构固定于基础上，并使结构承受的荷载通过支座传到基础和地基。支座对结构的反作用力称为支座反力。

平面结构的支座构造形式很多，常用的计算简图有三种：

### 1. 铰支座

图 1-1 所示为一弧形闸门及其铰支座。闸门启动时绕一固定圆轴的中心旋转。

铰支座通常用图 1-2 a 所示方式表示。结构可以绕  $A$  点转动，但  $A$  点的水平移动和竖向移动被限制。因此，铰支座可提供  $A$  点的水平反力  $X_A$  和竖向反力  $Y_A$ 。略去摩擦力的作用，反力  $X_A$  和  $Y_A$  都通过铰  $A$  的中心。图 1-2 b 所示为用支杆表示的铰支座简图。支杆是专门用来表示支座的链杆，通常被认为是刚性的，即不考虑其长度的改变。

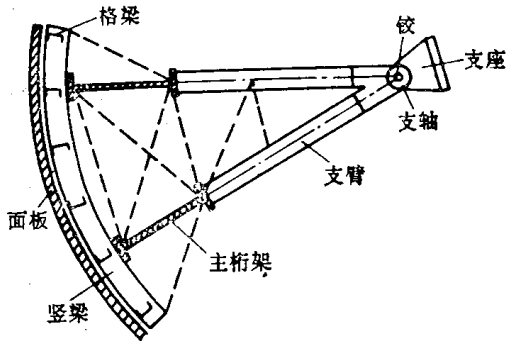


图 1-1

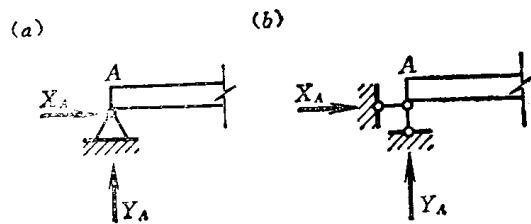


图 1-2

### 2. 滚轴支座

图 1-3 a 和 b 所示为一桥梁的滚轴支座的照片。滚轴支座常用图 1-4 a 所示方式表示。

滚轴支座容许结构绕铰  $A$  转动和沿支承面在水平方向移动，只有  $A$  点的竖向移动被限制。因此，支座只提供  $A$  点的竖向反力  $Y_A$ 。图 1-4 b 所示为用支杆表示的滚轴支座简图。由图可以看出，结构可绕铰  $A$  转动，并可沿着以  $B$  为圆心、 $AB$  为半径的圆弧移动；当移动很微小时，其方向可以看成是水平的。

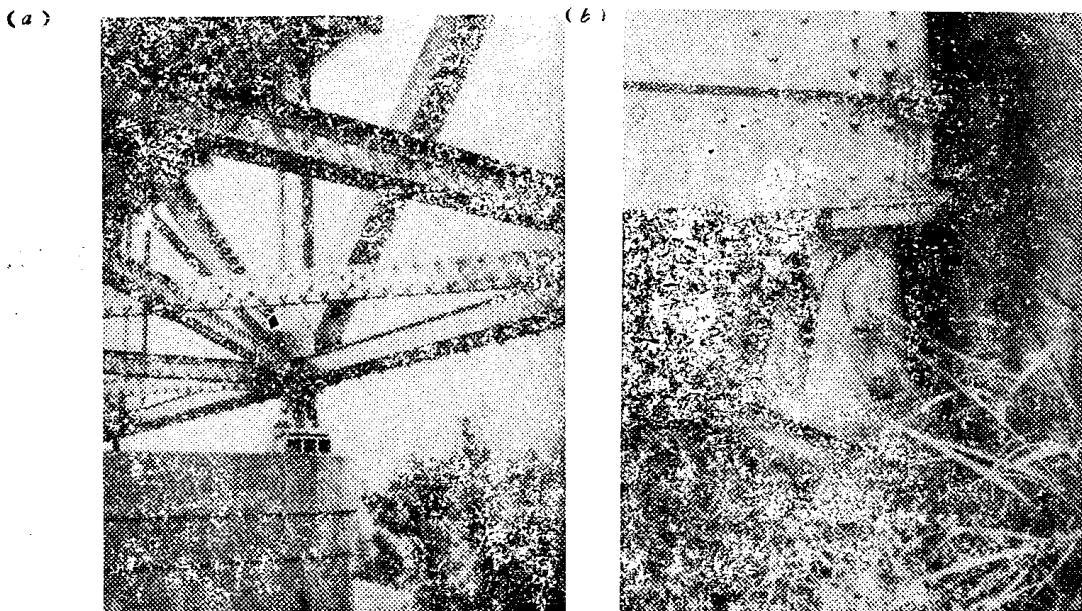


图 1-3

### 3. 固定支座

图 1-5 所示为一现浇钢筋混凝土基础。当土质很硬、地基的变形很小时，柱子可视为

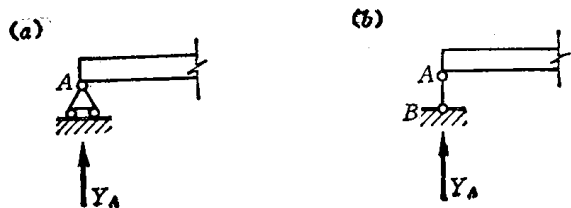


图 1-4

完全固定于基础的顶面，其支座为固定支座。固定支座常用图 1-6 a 所示方式表示。结构 A 端的水平移动、竖向移动和转动全被限制。固定支座可提供水平反力  $X_A$ 、竖向反力  $Y_A$  和反力偶  $M_A$ 。图 1-6 b 所示为用支杆表示的固定支座简图和所提供的反力。

#### 4. 定向支座

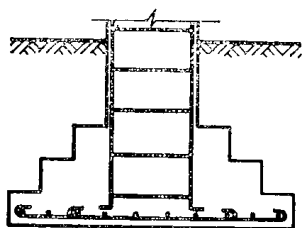


图 1-5

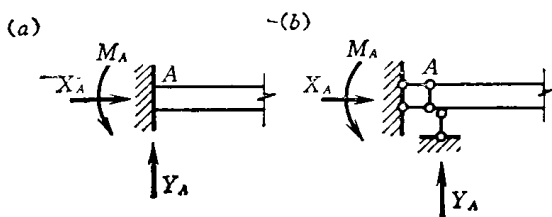


图 1-6

图 1-7 a 所示为这种支座的构造。其计算简图常用图 1-7 b 所示的方式表示。结构 A 端可沿水平方向自由移动，但竖向移动和转动受到限制。定向支座可以提供竖向反力  $Y_A$  和反力偶  $M_A$ 。

在空间结构中常用的支座计算简图有以下几种：

##### 1. 可动圆球支座

这种支座的构造如图 1-8 a 所示。在支座与基础之间设置一个可以自由滚动的圆球。结构 A 端可以有沿  $x$ 、 $z$  轴线方向的自由移动和绕通过球心的三根轴线的自由转动，只有竖向移动被限制。其计算简图可用图 1-8 b 所示的一根支杆表示。可动圆球支座可提供通过球心的竖向反力  $Y_A$ 。

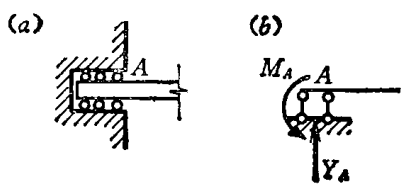


图 1-7

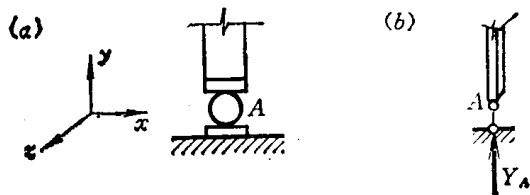


图 1-8

##### 2. 可动圆柱支座

图 1-9 a 所示为这类支座的构造简图。结构的 A 端连接在一个具有底座的圆球上，圆球底座与下部基础之间设置一组圆柱，圆柱可在其支承垫板上滚动。因此，结构的 A 端可沿圆柱轴的法线方向移动 ( $x$  轴方向) 和绕通过球心的三根轴线转动，但沿竖向 ( $y$  轴方向) 和圆柱轴线方向 ( $z$  轴方向) 的移动被限制。其计算简图如图 1-9 b 所示。可动圆柱支座提供竖向反力  $Y_A$  和水平反力  $Z_A$ 。

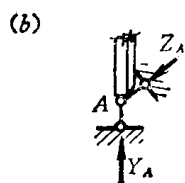
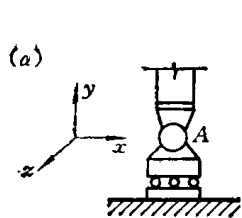


图 1-9

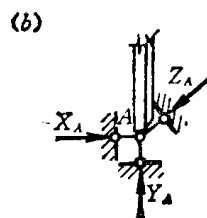
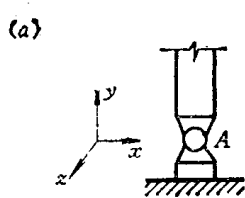


图 1-10

### 3. 固定圆球支座

这类支座的构造如图 1-10 a 所示。结构的 A 端连接着一个设置在基础上的圆球，圆球的位置不能移动。结构可绕通过球心的三根轴线自由转动，但沿三个坐标轴方向的移动被限制。固定圆球支座提供沿三个坐标轴方向的支座反力  $X_A$ 、 $Y_A$  和  $Z_A$ 。其计算简图示于图 1-10 b。

### 4. 固定支座

空间结构中的固定支座可以限制结构支座处的六个位移分量（三个移动分量和三个转动分量），并提供六个支座反力，即沿三个坐标轴方向的反力  $X_A$ 、 $Y_A$ 、 $Z_A$  和绕三个轴的反力偶  $M_{x_A}$ 、 $M_{y_A}$ 、 $M_{z_A}$ 。

结构中两个或两个以上杆件的共同联结处称为结点。钢结构、木结构和钢筋混凝土结构的结点构造方式很多，但结点的计算简图常分为铰结点、刚结点及其组合型式。

#### 1. 平面结构的铰结点

平面铰结点是用光滑圆柱铰联结的结点，其特征是结点处的各杆可以绕铰结点在平面内自由转动。装配式门架（图 1-14）的中间结点 C 是平面铰结点的一种理想情况。图 1-11 a 所示木屋架结点在计算中常视为铰结点，其计算简图如图 1-11 b 所示。

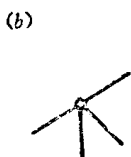
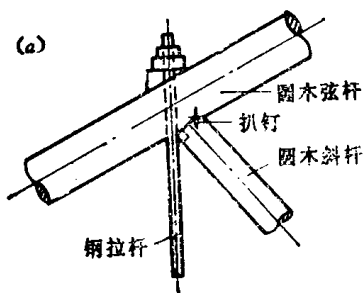


图 1-11

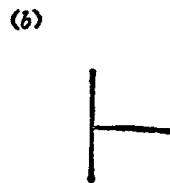
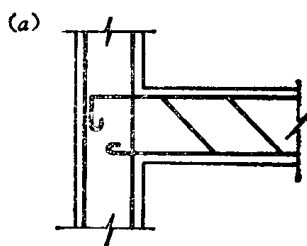


图 1-12

#### 2. 空间结构的铰结点

空间结构的铰结点是用光滑圆球铰联结的结点。其特征是结点处的各杆可以绕通过球铰中心的三个轴线自由转动。

#### 3. 刚结点

图 1-12 a 所示为一钢筋混凝土多层平面框架边柱与梁的结点。上、下柱与梁用混凝土浇成整体，钢筋的布置使各杆可以抵抗杆端弯矩。计算中这种结点常视为刚结点，其计算简图如图 1-12 b 所示。刚结点的特征是变形前后结点处各杆轴之间的夹角保持不变。在钢筋混凝土结构中刚结点很容易实现。空间刚架中的结点一般都是刚结点。

#### 4. 组合结点

在同一结点处，有些杆之间为刚结，有些杆之间为铰结，这种结点称为组合结点。图 1-13 所示为组合结点  $A$  的计算简图。在结点  $A$  处，上、下和左边三杆之间为刚结，而右边水平杆与其他各杆之间为铰结。

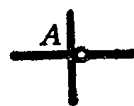


图 1-13

下面给出几个选取结构计算简图的例子。

图 1-14  $a$  所示为一装配式钢筋混凝土门式刚架。两个预制的  $\Gamma$  形构件插在杯口基础内，四周缝隙用沥青麻刀填实，柱脚在杯口内可有微小的转动。因此，在计算简图中，柱脚  $A$  和  $B$  可简化为铰支座。两个构件在中间用合页式的铰联结成铰结点  $C$  (图 1-14  $b$ )。结点  $D$  和  $E$  则取为刚结点。结构计算简图示于图 1-14  $c$ 。这种结构称为三铰刚架。

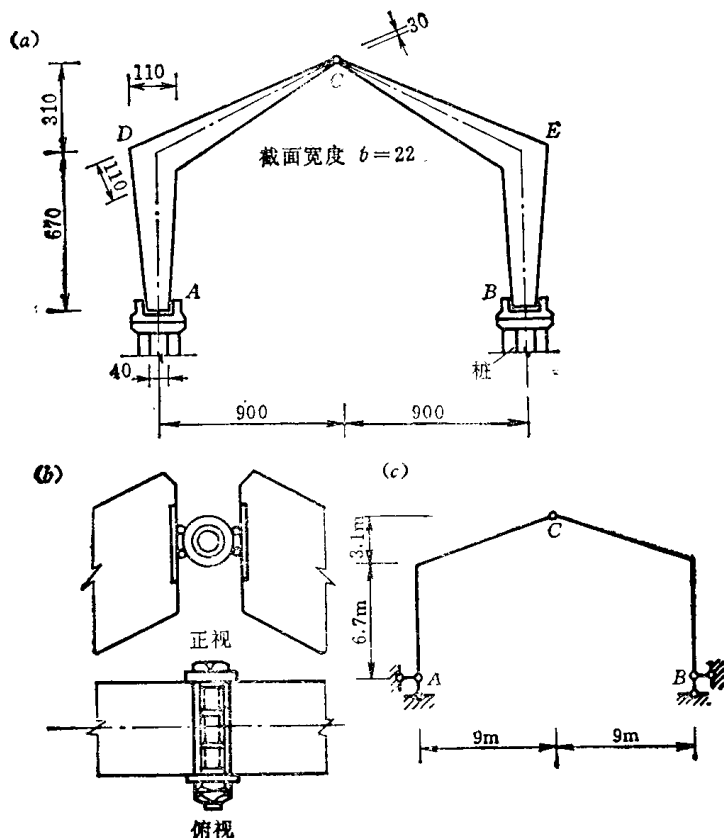


图 1-14

图 1-15 所示为一水利工程中的钢筋混凝土渡槽。在纵向计算中，整个槽身可视作支承在支架上的 U 形截面筒支梁，所受荷载是均布的水重和自重，计算简图如图 1-15  $b$  所示。为了进行横向计算，用两个垂直于纵向轴线的平面从槽身截出单位长度的一段。这是一个 U 形刚架，如图 1-15  $c$  所示。刚架所受的内部水压力在底部为均匀分布，在两侧为三角形分布。每段槽身上的竖向荷载靠整个槽身横截面上的竖向剪力来支承，实际上主要靠渡槽两侧壁板内的竖向剪力来支承。图 1-15  $c$  中所示的两侧支座实际上代表两侧壁板内竖向剪力所起的支承作用。

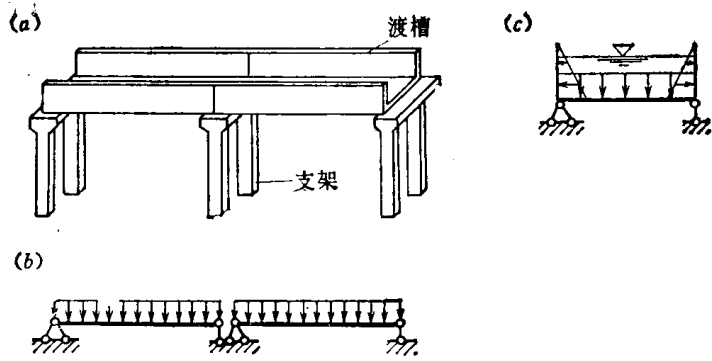


图 1-15

### § 1-3 结构和荷载的分类

#### 1. 结构的分类

这里, 结构的分类实际上是指结构计算简图的分类。

杆件结构通常可分为下列几类:

(1) 梁 梁(图 1-16 a) 是一种受弯构件, 其轴线通常为直线。梁可以是单跨的或多跨的。

(2) 拱 拱(图 1-16 b) 的轴线是曲线, 其力学特点是在竖向荷载作用下有水平支座反力。

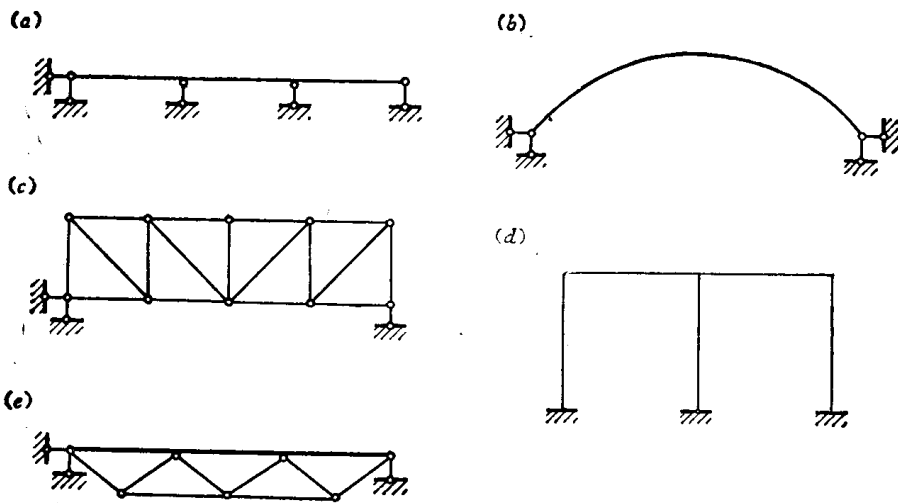


图 1-16

(3) 桁架 桁架(图 1-16 c) 是由直杆组成的, 所有结点都是铰结点。

(4) 刚架 刚架(图 1-16 d) 也是由直杆组成的, 其结点为刚结点。

(5) 组合结构 组合结构(图 1-16 e) 是桁架和梁或刚架组合在一起形成的结构, 其中含有组合结点。

杆件结构可分为平面结构和空间结构两类。在平面结构中各杆的轴线和外力的作用线都在同一平面内，图 1-17 所示桁架是平面结构的一例。空间结构则不满足上述条件，图 1-18 所示为一空间刚架，各杆的轴线不在同一平面内。大多数结构在设计中是按平面结构进行计算的。但有些情况必须考虑结构的空作用。

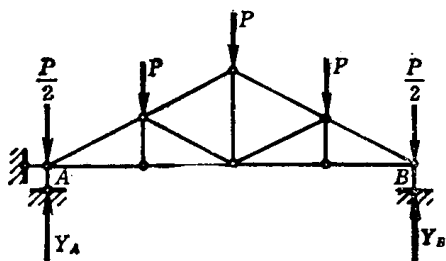


图 1-17

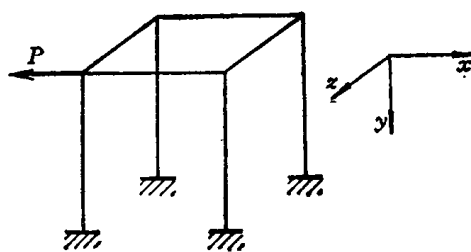


图 1-18

杆件结构也可以分为静定结构和超静定结构两类。

图 1-19 a 所示为一简支梁，其支座反力可由平面力系的三个平衡方程  $\Sigma X=0$ ,  $\Sigma Y=0$ ,  $\Sigma M=0$  确定。支座反力求出后，任一截面的内力可由截面一边的隔离体平衡条件计算出来。简支梁是静定结构的一个例子。静定结构的支座反力和内力可用静力学的平衡条件完全确定。

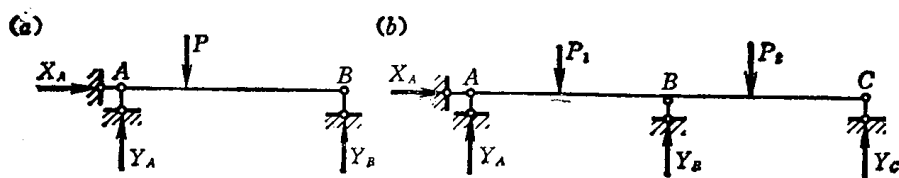


图 1-19

图 1-19 b 所示为一连续梁，有四个未知支座反力，仅用三个平衡方程不能完全求得这些反力。因此，各截面的内力也不能由平衡条件完全确定。连续梁是超静定结构的一个例子。超静定结构的支座反力和内力不能用平衡条件完全确定，计算时必须考虑结构变形的几何条件和物理条件。

## 2. 荷载的分类

荷载是主动作用于结构的外力，例如结构的自重、加于结构的水压力和土压力，以及其他物件的重力等。除外力以外，还有其它因素可以使结构产生内力或变形，如温度变化、基础沉陷、材料的收缩等。从广义来说，这些因素也可以称为荷载。

对结构进行计算以前，须先确定结构所受的荷载。荷载的确定是结构设计中极为重要的工作。荷载如估计过大，设计的结构就会过于笨重，造成浪费；如估计过低，则设计的结构将不够安全。确定荷载需要周密的考虑和谨慎的工作。荷载规范总结了设计经验和科学研究的成果，供设计时应用。但在不少情况下，设计者需深入现场、结合实际情况调查研究，才能合理地确定荷载。

荷载可以根据不同的特征进行分类：

根据荷载作用时间的久暂，可以分为恒载和活载两类。恒载是长期作用在结构上的不

变荷载，如结构的自重或土压力。活载是在建筑物施工和使用期间可能存在的可变荷载，如楼面荷载、屋面荷载、吊车荷载、雪载和风载等。

对结构进行计算时，恒载和大部分活载（如雪载、风载）在结构上作用的位置可以认为是固定的，这种荷载称为固定荷载。有些活载如吊车梁上的吊车荷载、公路桥梁上的汽车荷载，在结构上的位置是移动的，这种荷载称为移动荷载。

根据荷载作用的性质，可以分为静力荷载和动力荷载两类。静力荷载的数值、方向和位置不随时间变化或变化极为缓慢，因而不使结构产生显著的运动。动力荷载则随时间迅速变化、会使结构产生显著的运动。结构的自重和其他恒载是静力荷载。动力机械运转时产生的荷载或冲击波的压力是动力荷载的例子。车辆荷载、风载和地震力通常在设计中视作静力荷载，但在特殊情况下要按动力荷载考虑。

## § 1-4 几何构造分析的几个概念

### 1. 几何不变体系和几何可变体系

图 1-20 a 所示为由两根竖杆和一根横杆绑扎组成的平面支架。结点  $A$  和  $B$  可取为铰结点；假定竖杆在地基内埋得很浅，支点  $C$  和  $D$  可取为铰支座。显然，这个支架是不稳固的，容易倾倒，如图中虚线所示。如果加上一根斜撑  $AD$ ，就得到图 1-20 b 所示的支架，这个支架是一个稳固的平面体系。

结构受荷载作用时，截面上产生应力，材料因而产生应变，结构发生变形。这种变形一般是微小的。在几何构造分析中，不考虑这种由于材料的应变所产生的变形。这样，杆件体系可以分为两类：

几何不变体系（图 1-20 b）——在不考虑材料应变的条件下，体系的位置和形状是不能改变的；

几何可变体系（图 1-20 a）——在不考虑材料应变的条件下，体系的位置和形状是可以改变的。

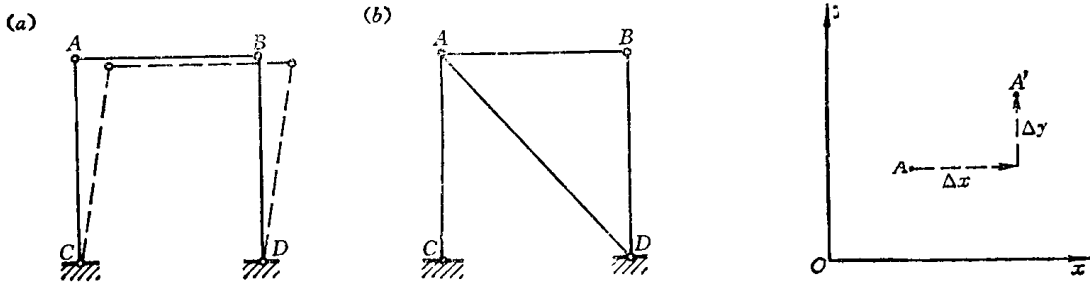


图 1-20

图 1-21

一般结构都必须几何不变体系，而不能采用几何可变体系。几何构造分析的一个主要目的就是要检查并设法保证结构的几何不变性。

### 2. 自由度

图 1-21 所示为平面内一点  $A$  的运动情况。一点在平面内可以有二种独立运动方式。



即沿  $x$  轴方向和  $y$  轴方向的移动。所以，一点在平面内有两个自由度。

图 1-22 所示为平面内一刚片（即平面刚体）由原来的位置  $AB$  改变到位置  $A'B'$ 。可以看出，此刚片在平面内有  $x$  轴方向的移动  $\Delta x$ 、 $y$  轴方向的移动  $\Delta y$  和转动  $\Delta\theta$  三种独立的运动方式。所以，一个刚片在平面内有三个自由度。

一般说来，如果一体系有  $n$  个独立的运动方式，此体系就有  $n$  个自由度。一个体系的自由度等于这个体系运动时可以独立改变的坐标数目，或确定此体系位置时所需的独立坐标数目。

普通机械中使用的机构有一个自由度，即只有一种运动方式。一般工程结构都是几何不变体系，其自由度为零。凡是自由度大于零的体系都是几何可变体系。

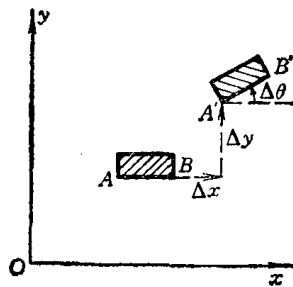


图 1-22

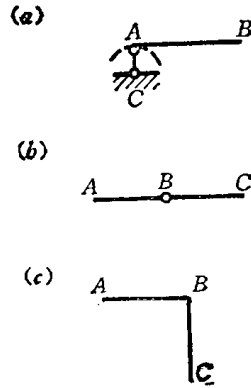


图 1-23

### 3. 约束

限制体系的运动、使体系自由度减少的装置称为约束。使体系减少一个自由度的装置便称为一个约束。

图 1-23 a 所示为一杆  $AB$ ，用一支杆  $AC$  与基础相连。无支杆时杆  $AB$  在平面内有三个自由度，加上支杆  $AC$  后，它只有两种运动方式： $A$  点沿以  $C$  为圆心、以  $AC$  为半径画的圆弧移动和绕  $A$  点的转动。支杆  $AC$  使杆  $AB$  的自由度由 3 减为 2。因此，一根支杆相当于一个约束。

图 1-23 b 所示的杆  $AB$  和  $BC$  用一平面内的铰  $B$  联结。两根孤立的杆在平面内共有六个自由度，用铰联结后自由度减为 4。因为用三个坐标确定  $AB$  杆位置后，杆  $BC$  只能绕  $B$  点转动，其位置可用一个转角确定。所以，一个平面铰相当于两个约束。

图 1-23 c 所示的两根杆件  $AB$  和  $BC$  在  $B$  点刚结。原来的两根孤立杆在平面内共有六个自由度，刚性联结成整体后只有三个自由度。所以，一个刚性联结相当于三个约束。

### 4. 多余约束

如果在体系上增加一个约束而不减少体系的自由度，则此约束称为多余约束。

例如图 1-24 a 中，平面内一点  $A$  用两根不共线的链杆①和②联结到基础， $A$  点的两个自由度都受到限制。这两根链杆都是非多余约束；或称必要约束。

如果用三根链杆将  $A$  点与地基相联结（图 1-24 b），实际上仍只减少两个自由度。因此，这三根链杆中只有两根（不共线的任何两根）是必要约束，而有一根是多余约束。

对于一个体系中的约束，应当分清哪些是多余的，哪些是必要的。只有必要约束才对