



卓越工程师系列教材

# 结构分析方法与程序应用

JIEGOU FENXI FANGFA YU CHENGXU YINGYONG

罗永坤 彭俊生 蔡 婧 编著



科学出版社

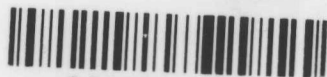
卓越工程师系列教材

内 容 简 介

# 结构分析方法与程序应用

罗永坤 彭俊生 蔡 婧 编著

昆明理工大学图书馆  
呈贡校区  
中文藏书章



03002206396

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书为土木工程卓越工程师系列教材之一。本书系统介绍杆系结构分析的矩阵位移理论、结构分析计算有限元软件使用方法和结构计算成果定性分析方法三方面的内容,旨在使读者基本掌握结构分析计算机方法和计算成果应用方法。

本书的特点是分三个层面由浅入深地展开结构分析方法内容的介绍。首先通过连续梁介绍结构分析理论的基本方法和结构分析软件应用,读者可以很快了解结构分析的基本方法;在此基础上,全面介绍矩阵位移法理论和各类结构的计算分析方法;最后,结合结构计算成果应用的方法介绍结构定性分析方法。

本书体系完整、内容新颖、特色鲜明,既可作为高等学校土木、水利、交通、力学、机械等专业高年级学生结构分析方法课程教材,也可供相关领域的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

结构分析方法与程序应用 / 罗永坤, 彭俊生, 蔡婧编著.

—北京: 科学出版社, 2014.2

卓越工程师系列教材

ISBN 978-7-03-039698-3

I. ① 结… II. ① 罗… ② 彭… ③ 蔡… III. ① 结构分析—分析方法—教材 IV. ① O342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 020013 号

责任编辑: 杨 岭 于 楠 / 封面设计: 墨创文化

责任校对: 贺江艳 / 责任印制: 邱志强

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>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014年2月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014年2月第一次印刷 印张: 9 1/4

字数: 220千字

定价: 25.00元

## “卓越工程师系列教材”编委会

|       |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|
| 主 编   | 蒋葛夫 | 翟婉明 |     |
| 副 主 编 | 阎开印 |     |     |
| 编 委   | 张卫华 | 高 波 | 高仕斌 |
|       | 彭其渊 | 董大伟 | 潘 炜 |
|       | 郭 进 | 易思蓉 | 张 锦 |
|       | 金炜东 |     |     |



# 前 言

土木工程结构设计建设中需要进行大量的结构计算。在电子计算机问世以前,结构的力学分析是一项难度大、耗时多、纷繁复杂的艰苦工作。设计人员需要花费大量的时间去学习结构计算方法。计算机的出现及迅速发展,数值分析方法与结构分析理论结合,发展出了结构分析计算机方法。应用结构分析计算机软件,可以快速准确地完成大量烦琐、耗力的计算分析工作,节省了大量的结构计算分析时间,大大拓展了人类认知领域,使高度更高、跨度更大、功能多样、体系复杂的结构成为可能。用计算机方法对结构进行计算分析是土木工程技术人员必备的核心能力。

由于计算机不仅可以以远快于人计算分析的速度进行力学分析,而且可以有更高的精确度,甚至完成部分绘图工作。这使部分专业人员养成了对计算机硬件的依赖,甚至认为结构力学分析的技能对结构专业人员无足轻重。但是实践证明,有了计算机软件,专业人员不仅需要学习结构计算分析方法,而且必须具有更为扎实的力学概念,否则很难在专业修养上取得进一步提高。

本书内容共分5章。第1章简要介绍经典方法。第2章通过连续梁的分析,介绍结构分析的矩阵位移法的基本思路 and 主要步骤,介绍如何使用 SAP2000 软件进行连续梁分析的方法,以便读者初步了解结构分析计算机方法。第3章较为系统地介绍杆系结构的矩阵位移法理论,并给出不同类型结构用矩阵位移法求解的例题。第4章介绍 SAP2000 软件的使用方法,给出了不同结构使用有限元计算软件计算的详细步骤。第5章介绍结构计算成果判断的定性分析方法。

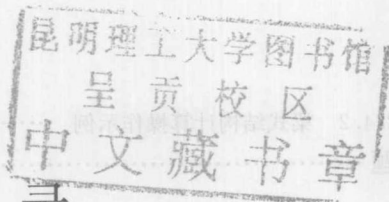
在本书编写过程中,西南交通大学土木学院刘蓉华、黄慧萱、马珩、江南、齐欣、李翠娟等多位老师提供了宝贵的建议和支持,在此对他们表示衷心的感谢。

本书在内容和选材上进行了一些新的尝试,但限于作者的能力和水平,书中难免存在不足之处,欢迎读者批评指正。

编著者

2013年10月

于西南交通大学



# 目 录

## 前言

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第1章 绪论                       | 1  |
| 1.1 结构分析的任务                  | 1  |
| 1.1.1 结构及功能                  | 1  |
| 1.1.2 结构分析                   | 1  |
| 1.1.3 学习方法                   | 3  |
| 1.2 结构的计算简图与结构分类             | 3  |
| 1.2.1 结构的计算简图                | 3  |
| 1.2.2 结构的计算简图实例              | 6  |
| 1.2.3 结构的分类                  | 7  |
| 1.3 结构荷载                     | 9  |
| 1.4 结构分析基本理论与方法              | 10 |
| 1.4.1 结构分析理论                 | 10 |
| 1.4.2 解超静定结构的力法              | 12 |
| 1.4.3 解超静定结构的位移法             | 13 |
| 1.5 矩阵位移法和有限单元法              | 14 |
| 1.5.1 矩阵位移法思路                | 14 |
| 1.5.2 有限单元法                  | 14 |
| 第2章 连续梁分析                    | 18 |
| 2.1 连续梁传统分析方法                | 18 |
| 2.1.1 用力法求解连续梁：三弯矩方程         | 18 |
| 2.1.2 用位移法求解连续梁              | 19 |
| 2.2 用矩阵位移法分析连续梁              | 20 |
| 2.2.1 数据准备                   | 21 |
| 2.2.2 单元分析                   | 22 |
| 2.2.3 整体分析                   | 23 |
| 2.2.4 结构刚度矩阵的形成方法            | 24 |
| 2.2.5 连续梁分析示例                | 25 |
| 2.3 结构分析程序使用简介               | 26 |
| 2.3.1 SAP2000 有限元分析程序的界面     | 27 |
| 2.3.2 SAP2000 有限元分析程序的菜单功能简介 | 29 |
| 2.4 连续梁计算示例                  | 39 |
| 2.4.1 SAP2000 结构静力分析的步骤      | 39 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 2.4.2 梁式结构计算操作示例 ..... | 40 |
| 练习题 .....              | 49 |

### 第3章 结构分析的矩阵位移法 .....

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 3.1 局部坐标系下的单元刚度矩阵 .....          | 51 |
| 3.1.1 整体坐标与局部坐标系 .....           | 51 |
| 3.1.2 局部坐标系下的平面刚架单元的单元刚度矩阵 ..... | 52 |
| 3.1.3 考虑剪切变形的单元刚度矩阵 .....        | 53 |
| 3.1.4 空间刚架的单元刚度矩阵 .....          | 54 |
| 3.1.5 其他单元刚度矩阵 .....             | 55 |
| 3.2 整体坐标系下的单元刚度矩阵 .....          | 56 |
| 3.2.1 坐标转换 .....                 | 56 |
| 3.2.2 刚架单元的刚度矩阵 .....            | 58 |
| 3.3 结构原始刚度矩阵 .....               | 59 |
| 3.3.1 确定定位向量 $\lambda$ .....     | 59 |
| 3.3.2 集成结构刚度矩阵 $K$ .....         | 60 |
| 3.3.3 整体刚度矩阵的性质 .....            | 60 |
| 3.4 结构荷载列阵的形成 .....              | 60 |
| 3.4.1 结点荷载向量 $F_D$ 的形成 .....     | 60 |
| 3.4.2 非结点荷载的等效结点荷载向量 $F_E$ ..... | 61 |
| 3.5 支座约束的处理 .....                | 62 |
| 3.6 单元杆端力计算 .....                | 63 |
| 3.7 矩阵位移法计算步骤和示例 .....           | 63 |
| 3.7.1 矩阵位移法计算步骤 .....            | 63 |
| 3.7.2 算例 .....                   | 64 |
| 练习题 .....                        | 72 |

### 第4章 结构分析程序应用 .....

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 4.1 SAP2000 常用单元类型 .....       | 74 |
| 4.1.1 框架单元 .....               | 74 |
| 4.1.2 其他单元 .....               | 77 |
| 4.2 SAP2000 结构分析模型 .....       | 86 |
| 4.2.1 结构分析类型 .....             | 86 |
| 4.2.2 计算模型的单位 .....            | 87 |
| 4.2.3 属性的概念 .....              | 88 |
| 4.2.4 荷载工况与荷载组合 .....          | 88 |
| 4.2.5 SAP2000 前处理——模板的使用 ..... | 90 |
| 4.2.6 二维杆系结构模型的建立 .....        | 91 |
| 4.2.7 三维杆系结构模型的建立 .....        | 93 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 4.2.8 实体结构模型的建立 .....      | 94  |
| 4.3 刚架结构的静力分析 .....        | 95  |
| 4.3.1 刚架结构的基本特点 .....      | 95  |
| 4.3.2 单跨刚架的算例 .....        | 95  |
| 4.4 桁架结构的静力分析 .....        | 101 |
| 4.4.1 桁架结构的基本特点 .....      | 101 |
| 4.4.2 静定桁架的内力分析 .....      | 101 |
| 4.4.3 超静定桁架的内力分析 .....     | 103 |
| 4.4.4 组合结构的计算 .....        | 105 |
| 4.5 拱式结构的静力分析 .....        | 106 |
| 4.5.1 拱式结构的基本特点 .....      | 106 |
| 4.5.2 单跨拱式结构的计算 .....      | 106 |
| 4.5.3 梁拱组合结构的计算 .....      | 108 |
| 4.6 交叉梁结构的静力分析 .....       | 109 |
| 4.6.1 交叉梁结构的基本特点 .....     | 109 |
| 4.6.2 交叉梁结构的计算 .....       | 110 |
| 练习题 .....                  | 111 |
| <br>第5章 结构计算结果判断 .....     | 114 |
| 5.1 结构受力定性分析方法 .....       | 115 |
| 5.1.1 叠加法及其应用 .....        | 115 |
| 5.1.2 等效替代法及其应用 .....      | 117 |
| 5.1.3 结构的受力特性 .....        | 118 |
| 5.1.4 对称性利用 .....          | 119 |
| 5.1.5 结构变形图与结构位移定性判断 ..... | 121 |
| 5.2 结构的近似计算方法 .....        | 122 |
| 5.2.1 选择适当的结构的计算简图 .....   | 122 |
| 5.2.2 渐近法 .....            | 123 |
| 5.2.3 结构分析的定性分析示例 .....    | 130 |
| <br>主要参考文献 .....           | 132 |
| 索引 .....                   | 133 |



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 结构分析的任务

### 1.1.1 结构及功能

结构是建筑物或构筑物中用于担负预定任务、支承并传递荷载而起骨架作用的部分。土木工程中常见的结构有桥梁、隧道、水坝和建筑中的梁柱体系等。

在建筑物中结构预定的功能包括：①结构应该能够承受正常使用和正常施工时可能出现的各种荷载，即结构的各个构件有足够承受荷载的能力(称为承载力)和必需的可靠度；②结构在正常使用时具有良好的工作性能，即良好地满足使用要求，而不会使人有不安全感和不舒适感，否则可能出现梁的挠度偏大、屋面渗漏、墙体因温差出现不允许的裂缝等情况；③结构的构件和所用材料在正常维护下具有足够的耐久性，即对长期的物理环境作用(如温度变化、摩擦)和化学环境作用(如腐蚀、化学变化)有足够的抵御能力，不致因此而丧失承载力或降低可靠度；④结构在设计规定的偶然事件(如符合抗震设防烈度有关条件下的地震)发生时和发生后，仍能保持必需的整体稳定性，即建筑物不会发生整体或局部倒塌，对生命财产的安全有基本保障。

### 1.1.2 结构分析

工程结构的分析、设计和建造是一门科学，它是伴随着人类文明的发展而发展的古老而又年轻的技艺。在距今六七千年的河姆渡新石器文化遗址中，考古挖掘发现了大量榫卯结构的木质构件，说明当时的人们已经掌握了一些简单的结构知识。中国古代的万里长城、河北赵县的安济桥(图 1.1)、四川的都江堰水利工程，以及埃及的金字塔、印度的泰姬陵、法国的埃菲尔铁塔等都是随着人类文明发展的独具匠心之作。通过这些伟大工匠成地将经验和智慧应用在大型建筑的分析、设计和建设中，成就了建筑史上不朽的功勋。

结构分析是土木工程建设的基础。人类早期的建筑更多的是从大自然中观察模仿和经验积累的产物。随着生产和技术的进步，人们对结构受力的规律、结构的强度、刚度和稳定性的认识不断加深，并从经验和实验中逐渐形成了结构力学学科。通过广泛应用于工程建设实践，不断完善成为一门指导工程建设的基础性科学。

结构分析方法是在经典力学的框架体系下逐渐发展起来的。19 世纪，工业革命在技术上带来了突飞猛进的发展，人们开始设计建造各种大规模的建筑结构，需要进行更为精确的分析和计算。19 世纪末 20 世纪初，结构力学逐渐发展成为一门独立的学科，包括结

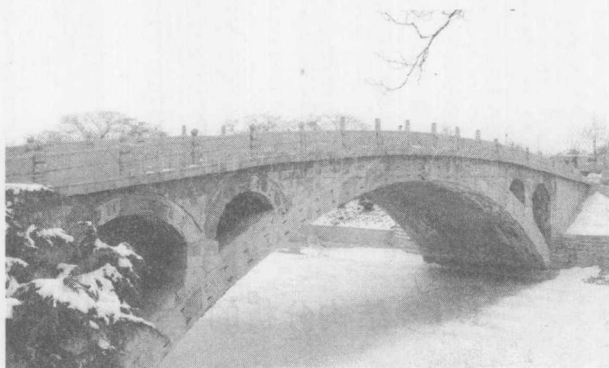


图 1.1 河北赵县安济桥

构静力学、动力学和结构稳定理论。

结构分析理论和方法的发展也推动了近现代建筑结构的发展。人们可以通过结构分析计算,事先对结构的力学行为有较清楚的认识,以便在设计建造时通过改变结构形式、选用不同材料等手段来优化结构受力。20 世纪以来土木工程结构无论是从建设规模还是复杂程度上都发生了空前的飞跃,其中结构分析理论和方法的发展有重要的贡献。

计算机的发展,为结构分析提供了有力的计算工具。应用结构分析理论、现代数学方法和计算机技术而发展起来的有限元法的出现和成熟,加速了结构分析方法的发展,大大拓展了人类的认知领域,使高度更高、跨度更大、功能多样、体系复杂的结构成为可能。图 1.2 所示为国家体育场。其结构异常复杂,对于如此复杂的结构若不用计算机软件进行结构分析,很难在短时间内获得符合设计要求的计算结果。

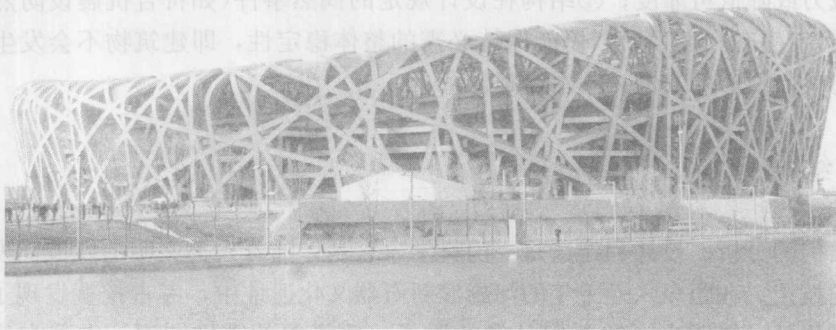


图 1.2 国家体育场

用计算机方法对结构的力学行为进行分析是土木工程技术人员必备的核心能力。一方面,计算机速度快、周期短、计算成本较低,可容易地模拟复杂荷载条件和多种材料组成的工程问题,可以在较短时间内完成大量的计算工作,使计算分析与设计工作可以快速完成;应用计算机程序分析得到的计算结果准确,且可以通过细化计算提供更准确的计算结果。另一方面,通过应用计算机程序,可以对大量不同的结构进行计算分析与研究,了解结构在不同荷载环境下的力学行为,可以弥补实验经费高、时间长的不足,对于某些难以进行实验的工程问题,可以通过计算机数值模拟来进行定性和定量分析,可以在较短时间内提高对结构的分析能力和对大型复杂结构的把控能力。

本书第 1 章介绍结构分析理论相关的基本原理。第 2 章通过连续梁,简要介绍结构分

析计算机方法原理与程序应用过程。第3章以平面杆系结构为例介绍结构分析的一般原理和计算机实现方法。第4章通过读者熟悉的平面桁架、平面刚架等典型结构形式,介绍结构分析程序应用方法。第5章介绍结构定性分析方法和结构计算分析成果的判断与应用。读者通过本书的学习,可以较为全面地了解结构分析计算机方法的原理和实现的方法,能够掌握用现有结构分析程序进行结构分析计算的方法。

### 1.1.3 学习方法

结构分析方法与程序应用是一门实践性很强的课程。要求读者既要学习必要的书本知识,掌握相关的理论与方法;又要亲自进行上机操作,不断积累,从实践中学会程序应用的方法,体会并领悟结构分析的要领。

## 1.2 结构的计算简图与结构分类

### 1.2.1 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(计算模型)。

计算简图的选择是力学计算的基础,选择计算简图的原则是:①通过计算简图得到的计算结果要准确,能正确反映实际结构的性能;②计算简图要便于计算,分清主次,略去细节,在合理的时间内得到计算结果。

简化内容通常包括以下几个方面:

- (1)结构体系的简化。
- (2)杆件的简化。
- (3)杆件间连接的简化。
- (4)结构与基础间连接的简化。
- (5)材料性质的简化。
- (6)荷载的简化。

#### 1. 结构体系的简化

杆系结构可分为平面杆系结构和空间杆系结构。一般结构实际上都是空间结构,各部分相互连接成为一个空间整体,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分解为平面结构,使计算得以简化,这样可以大大缩小计算工作量。当然,也有一些结构具有明显的空间特征,不宜简化成平面结构。

#### 2. 杆件的简化

杆件的截面尺寸(宽度、厚度)通常比杆件长度小得多,截面上的应力可根据截面的内

力(弯矩、轴力、剪力)来确定。在计算简图中,杆件用其轴线表示,杆件之间的连接区用结点表示,杆长用结点间的距离表示,而荷载的作用点也转移到轴线上。

### 3. 杆件间连接的简化

杆件间的连接区简化为结点。结点通常简化为以下两种理想情形。

(1)铰结点。被连接的杆件在连接处不能相对移动,但可相对转动,即可以传递力,不能传递力矩。这种理想情况实际上很难遇到。木屋架的结点比较接近于铰结点如图 1.3 所示。

(2)刚结点。被连接的杆件在连接处既不能相对移动,又不能相对转动;既可以传递力,也可以传递力矩。现浇钢筋混凝土结点通常属于这类情形,如图 1.4 所示。

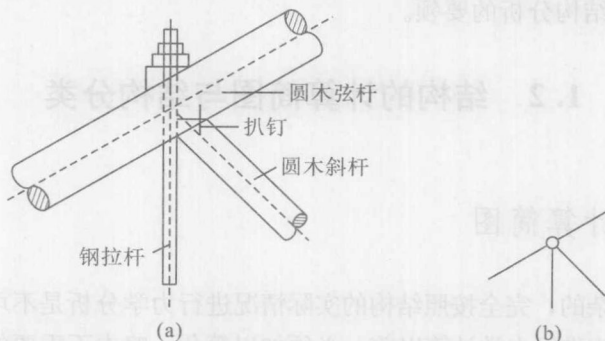


图 1.3 铰结点

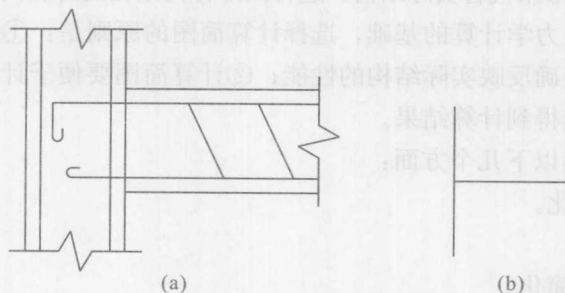


图 1.4 刚结点

铰连接和刚性连接之间的差异有时很难辨别。一般说来,如果一个构件只是在一个点上和另一构件相连,则更接近铰连接;如果一个构件在两个相距较远的点上和另一构件相连,则可以视为刚性连接。

### 4. 结构与基础间连接的简化

结构与基础的连接区简化为支座。按其受力特征,对于平面问题,支座一般简化为以下 4 种情形。

(1)活动铰支座。被支承的部分可以转动和水平移动,不能竖向移动 [图 1.5(a)],能提供的反力只有竖向反力  $F_y$ 。在计算简图中用一根链杆表示 [图 1.5(b)]。

(2)固定铰支座。被支承的部分可以转动,不能移动 [图 1.6(a)],能提供两个反力  $F_x$ 、 $F_y$ 。在计算简图中用两根相交的支杆表示 [图 1.6(b)]。



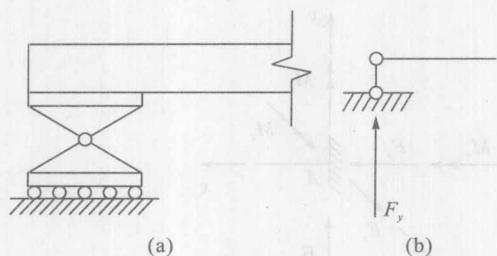


图 1.5 平面活动铰支座

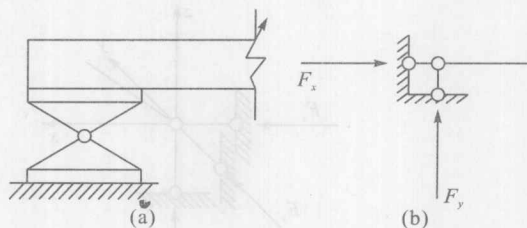


图 1.6 平面固定铰支座

(3) 定向支座(滑动支座)。被支承的部分不能转动,但可沿一个方向平行滑动[图 1.7(a)],能提供反力矩  $M$  和一个反力  $F_y$  (或  $F_x$ )。在计算简图中用两根平行支杆表示[图 1.7(b)]。

(4) 固定支座。被支承的部分完全被固定[图 1.8(a)],能提供 3 个反力  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $M$ 。在计算简图中可用图 1.8(b)表示。

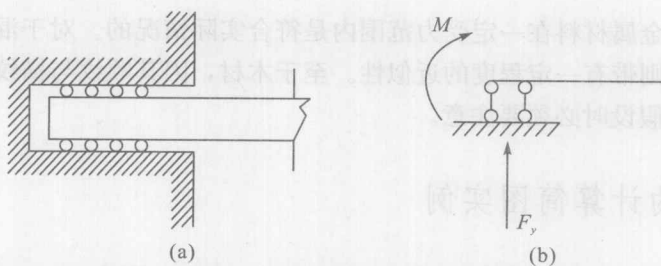


图 1.7 平面定向支座

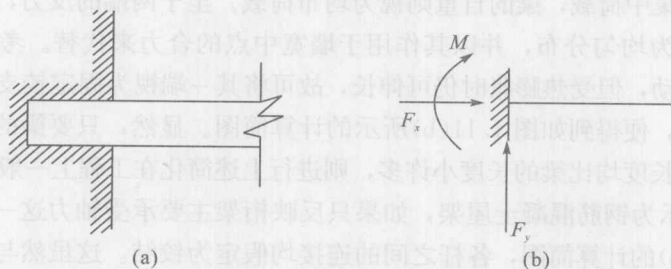


图 1.8 平面固定支座

对于空间结构,支座可简化为空间活动铰支座、空间固定铰支座、空间定向支座和空间固定支座等类型。如图 1.9 所示,空间固定铰支座,被支承的部分可以转动,不能移动,能提供 3 个反力  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 。在计算简图中用 3 根相交的支杆表示。

图 1.10 所示为空间固定支座。被支承的部分完全被固定,能提供 6 个反力  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ 。在计算简图中可用图 1.10 表示。

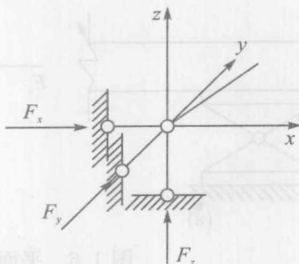


图 1.9 空间固定铰支座

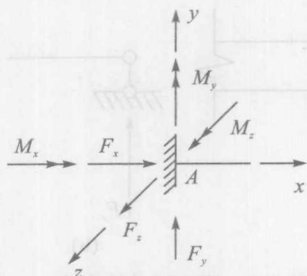


图 1.10 空间固定支座

## 5. 材料性质的简化

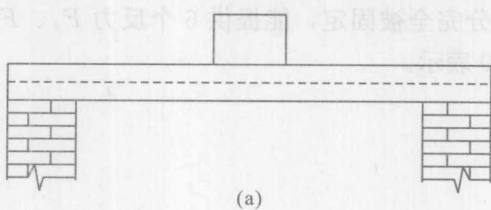
在土木工程中,结构所用的建筑材料通常为钢、混凝土、砖、石、木料等。在结构计算中,为了简化,对组成各构件的材料一般都假设为连续的、均匀的、各向同性的、完全弹性或弹塑性的。

上述假设对于金属材料在一定受力范围内是符合实际情况的。对于混凝土、钢筋混凝土、砖、石等材料则带有一定程度的近似性。至于木材,因其顺纹与横纹方向的物理性质不同,故应用这些假设时必须要注意。

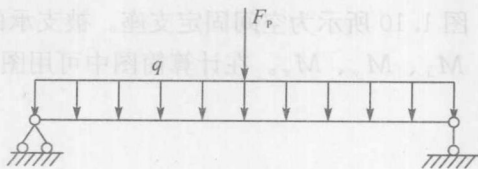
### 1.2.2 结构的计算简图实例

图 1.11(a)所示为一根梁两端搁在墙上,其上放一重物。简化时,梁本身用其轴线来代表。重物近似看成集中荷载,梁的自重则视为均布荷载。至于两端的反力,其分布规律难以准确知道,现假定为均匀分布,并以其作用于墙宽中点的合力来代替。考虑到支承面有摩擦,梁不能左右移动,但受热膨胀时仍可伸长,故可将其一端视为固定铰支座而另一端视为活动铰支座。这样,便得到如图 1.11(b)所示的计算简图。显然,只要梁的截面尺寸、墙宽及重物与梁的接触长度均比梁的长度小许多,则进行上述简化在工程上一般是许可的。

图 1.12(a)所示为钢筋混凝土屋架,如果只反映桁架主要承受轴力这一特点,则计算时可采用如图 1.12(b)的计算简图,各杆之间的连接均假定为铰结。这虽然与实际情况不完全相符,但可使计算大为简化,而由此引起计算结果的误差在工程上通常是容许的。如果将各杆连接处均视为刚结,则可得较精确的计算简图[图 1.12(c)],但这样计算就复杂得多。通常,在初步设计中采用计算较简单但精确度不高的图形,而在最后设计中改用计算较繁但精确度较高的图形。计算机的应用为采用较精确的计算简图提供了更多的可能性。



(a)



(b)

图 1.11 简支梁计算简图

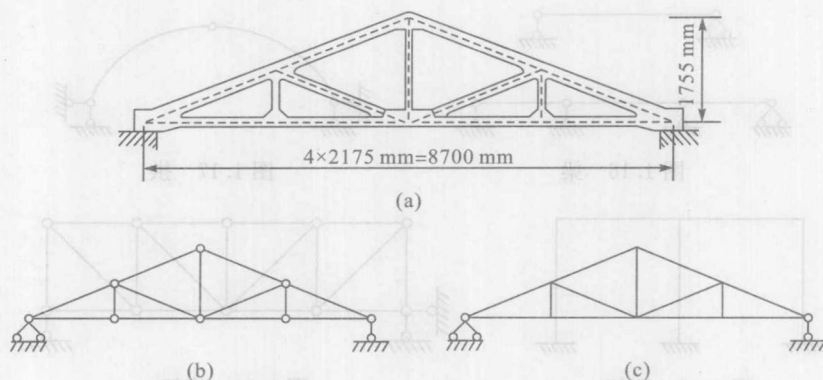


图 1.12 钢筋混凝土屋架计算简图

应该指出的是, 确定一个结构的计算简图, 特别是对于比较复杂的结构, 不是一件容易的事情。它需要有一定的专业知识和实际经验, 并对结构各部分的构造、相互作用和受力情况有正确的判断。有时, 还需要借助于模型实验或现场实测才能确定合理的计算简图。

### 1.2.3 结构的分类

结构的类型很多, 可以从不同的观点来分类。

(1) 按照几何特征, 结构可分为杆件结构、薄壁结构和实体结构。

杆件结构或杆系结构是由长度远大于其他两个尺度(即截面的高度和宽度)的杆件组成的结构。薄壁结构是指其厚度远小于其他两个尺度(即长度和宽度)的结构, 如板(图 1.13)和壳(图 1.14)。实体结构则是三个方向的尺度相近的结构, 如水坝(图 1.15)、地基、挡土墙、堤坝等。

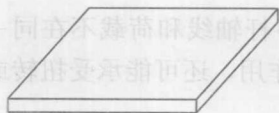


图 1.13 板



图 1.14 壳

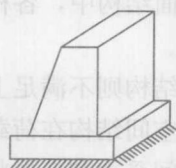


图 1.15 实体结构

(2) 杆件结构按其受力特性不同又可分为以下几种。

① 梁。梁是使用广泛的最简单的结构形式。梁是一种受弯杆件, 其轴线通常为直线, 当荷载垂直于梁轴线时, 横截面上的内力只有弯矩和剪力, 没有轴力。梁可分为单跨的和多跨的(图 1.16)。

② 拱。拱的轴线为曲线且在竖向荷载作用下会产生水平反力(推力), 这使得拱比跨度、荷载相同的梁的弯矩和剪力都要小, 而有较大的轴向压力(图 1.17)。

③ 刚架。刚架由直杆组成并具有刚结点(图 1.18)。各杆均为受弯杆, 内力通常是弯矩、剪力和轴力都有。

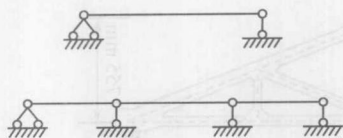


图 1.16 梁

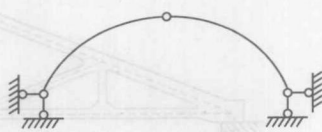


图 1.17 拱



图 1.18 刚架

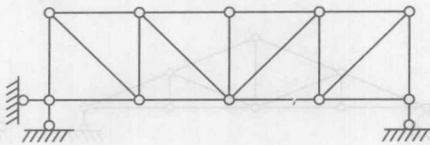


图 1.19 桁架

④桁架。桁架由直杆组成,但所有结点均为铰结点(图 1.19)。当只受到作用于结点的集中荷载时,各杆只产生轴力。

⑤组合结构。组合结构是由桁架和梁或桁架与刚架组合在一起的结构,其中有些杆件只承受轴力,另一些杆件同时还承受弯矩和剪力(图 1.20)。

⑥悬索结构。悬索结构的主要承重构件为悬挂于塔、柱上的缆索,索只受轴向拉力,可最充分地发挥钢材强度,且自重轻,可跨越很大的跨度,如悬索屋盖、悬索桥、斜拉桥等(图 1.21)。

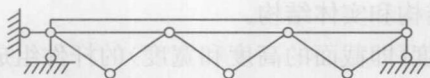


图 1.20 组合结构

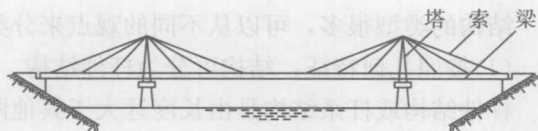


图 1.21 悬索结构

(3)结构按空间形态可分为平面结构和空间结构。

在平面结构中,各杆轴线和外力(包括荷载和反力)均在同一平面内。图 1.22 所示为平面桁架。

空间结构则不满足上述条件,图 1.23 所示为一空间结构,各杆轴线和荷载不在同一平面内。空间结构在荷载作用下,除同时承受轴力、弯矩和剪力作用,还可能承受扭转或弯曲等空间受力和变形状态。图 1.24 为实际空间结构的图示。

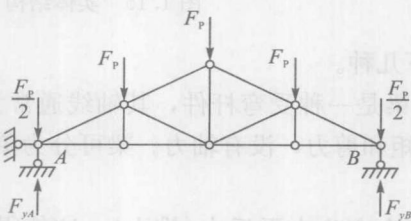


图 1.22 平面桁架

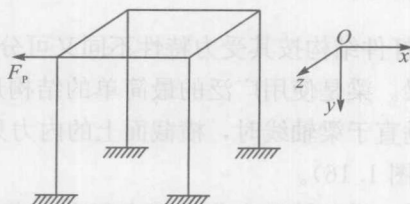


图 1.23 空间刚架



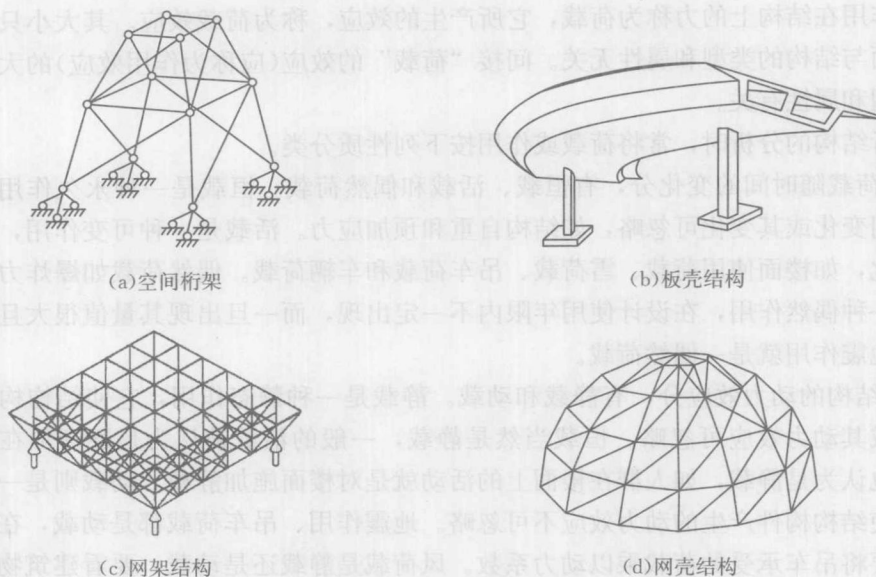


图 1.24 实际空间结构

### 1.3 结构荷载

结构所承受的荷载来自两类现象,如图 1.25 所示。一类由自然现象产生,如地球的地心吸力(即重力),因气象变化产生的风力和冰、雪的自重,因材料性能产生的热胀冷缩和干缩,因地质原因产生的地基沉降、地震时的地面运动等。另一类由人为现象产生,如机器运行产生的周期振动、爆炸产生的冲击振动、人为施加的预应力等。

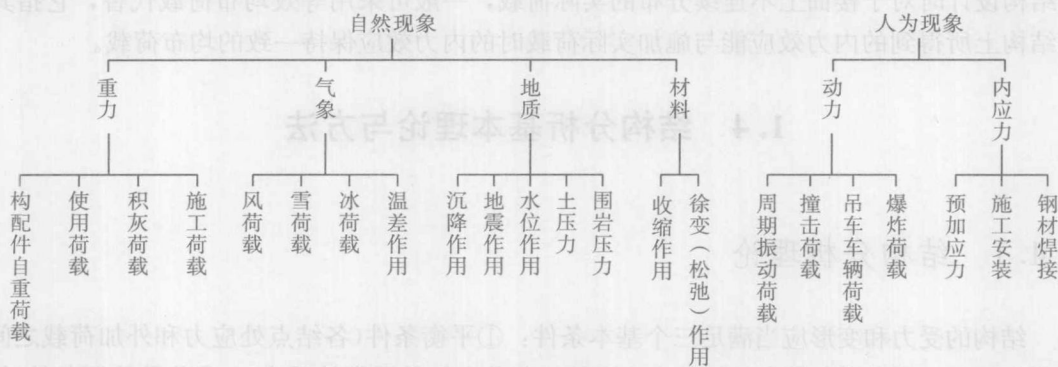


图 1.25 结构荷载

这两类现象从对结构产生的影响和效应分析,又各自有两种可能。一种是直接施加在结构上,使它产生内力和变形的荷载(也称为直接作用),如结构自身的重力荷载、施加在楼面上人群和设备的使用荷载。另一种是因某种原因(非直接施加)使结构产生内力和变形的作用(也可认为是间接“荷载”或间接作用),如材料热胀冷缩而变形受到约束产生的温差作用、地基不均匀沉降引起的沉降作用、地震使建筑物产生加速度反应导致的地震作用等。