

普通高等教育“十三五”特色教材

数据结构案例教程 (C语言版)

主 编 程海英 彭文艺 姜贵平

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
http://www.phei.com.cn

普通高等教育“十三五”特色教材

数据结构案例教程 (C语言版)

主 编 程海英 彭文艺 姜贵平
副主编 李 静 许美玲 刘三满
段永平 王 维

贵州师范学院内部使用

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

数据结构是计算机和信息技术等相关专业的一门重要的专业基础课程，数据结构及其处理算法是设计与实现系统软件和大型应用软件的重要基础，结合数据结构课程的现状和发展趋势，本书具有难度适中、结构合理、应用性强的特点。

全书共9章，内容包括第1章数据结构基础，综述数据结构的基本概念；第2章至第5章主要讨论几种基本的线性结构，即线性表、栈和队列、串、数组和广义表；第6章和第7章主要介绍非线性结构，即树和二叉树、图；第8章和第9章分别讨论两种基本的操作，即查找和排序。

全书采用C语言作为数据结构和算法的描述语言，对数据结构的定义和算法描述详细，代码注释完整，便于初学者模仿训练，循序渐进，稳步提高。本书既可作为高等院校计算机科学与技术、软件工程、通信工程等信息类专业的教材，也可供从事软件开发与工程应用设计的工作人员参考使用。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

数据结构案例教程：C语言版 / 程海英，彭文艺，姜贵平主编. —北京：电子工业出版社，2020.1
ISBN 978-7-121-38101-0

I. ①数… II. ①程… ②彭… ③姜… III. ①数据结构—C语言—程序设计—高等学校—教材 IV. ①TP311.12②TP312.8

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第274243号

责任编辑：祁玉芹

印 刷：中国电影出版社印刷厂

装 订：中国电影出版社印刷厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编：100036

开 本：787×1092 1/16 印张：18.5 字数：450千字

版 次：2020年1月第1版

印 次：2020年1月第1次印刷

定 价：48.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：qiyuqin@phei.com.cn。

数据结构是计算机和信息技术类等相关专业的一门重要的专业基础课程。随着当前高等教育的发展和社会对各类信息人才需求的不断变化,对于数据结构课程的内容提出了更高、更全面的要求。数据结构的概念既抽象又具体,抽象在于可以脱离计算机而存在,具体则在于可用程序代码在计算机中加以实现,这对于教材的内容也提出了更高的要求。本书结合数据结构课程的发展现状和趋势,具有难度适中、结构合理、应用性强的特点。

全书共9章内容,其中第1章数据结构基础,综述数据结构的基本概念,主要叙述数据结构和抽象数据类型的定义与关系,算法和算法分析;第2章至第5章主要讨论几种基本的线性结构,即线性表、栈和队列、串、数组和广义表的数据结构及其应用;第6章和第7章主要介绍非线性结构,即树和二叉树、图的数据结构及其应用;第8章和第9章分别讨论两种基本的操作,即查找和排序,主要介绍各种实现方法和高效性的分析及比较。本书突出了抽象数据类型的概念,对每一类数据结构,均分别给出相应的抽象数据类型的定义。

本书在内容组织和编排上,力求理论与实际应用紧密结合,更加突出应用性。本书有以下3个主要特点。

- (1) 内容层次分明、结构清晰。在内容的选取上坚持学以致用、学用结合的原则,省略一些纯理论的推导和烦琐的数学证明,强调最基础、最适用的设计思想及实现技术。
- (2) 遵从由浅入深的原则,侧重应用性,把握理论深度,通过大量的例题、算法和每一章给出的习题及编程实例,突出对学习者应用能力的培养。
- (3) 内容丰富、语言通俗易懂、表述严谨、案例丰富、适用面广。

本书既可作为高等院校软件工程、计算机科学与技术、通信工程等信息类专业本(专)科学生的教材,也可作为软件设计人员学习参考书。

全书采用C语言作为数据结构和算法的描述语言,对数据结构的定义和算法描述详细,代码注释完整,便于初学者模仿训练,循序渐进,稳步提高。

本书的第1章至第3章、第6章至第9章由程海英编写，第4章和第5章由彭文艺编写，由程海英统一定稿。

本书在编写过程中，得到了许多专家和众多院校数据结构任课教师的大力支持和帮助，提出了许多中肯的意见和很好的建议。在此表示衷心的感谢！

由于时间仓促及编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者及同行批评指正。

编者

2019年9月

第 1 章 数据结构基础	1
1.1 数据结构的基本概念	2
1.1.1 数据结构的研究内容	2
1.1.2 基本概念和术语	5
1.1.3 数据结构课程的内容	8
1.2 数据类型和抽象数据类型	9
1.2.1 数据类型	9
1.2.2 抽象数据类型	9
1.3 算法和算法分析	10
1.3.1 算法特性	11
1.3.2 算法描述	12
1.3.3 算法性能分析	12
1.4 本章小结	15
习题	16
编程实例	18
第 2 章 线性表	19
2.1 线性表的定义	20
2.1.1 线性表的逻辑结构	20
2.1.2 线性表的抽象数据类型	20
2.2 线性表的顺序存储及实现	22
2.2.1 顺序表	22
2.2.2 顺序表的基本运算	23
2.3 线性表的链式存储及实现	28

2.3.1	单链表	29
2.3.2	单链表的基本运算	30
2.3.3	循环链表	36
2.3.4	双向链表	37
2.3.5	静态链表	39
2.3.6	单链表应用举例	40
2.4	顺序表与链表的比较	43
2.5	本章小结	44
	习题	44
	编程实例	46
第 3 章	栈和队列	48
3.1	栈	49
3.1.1	栈的定义	49
3.1.2	栈的表示和实现	50
3.2	栈的应用	55
3.2.1	数制转换问题	56
3.2.2	括号匹配检验	57
3.2.3	表达式求值	58
3.2.4	栈与递归	61
3.3	队列	64
3.3.1	队列的定义	64
3.3.2	队列的表示和实现	65
3.4	队列的应用	71
3.5	本章小结	73
	习题	74
	编程实例	75
第 4 章	串	79
4.1	串的定义和基本运算	80
4.1.1	串的定义	80
4.1.2	串的基本操作	81
4.2	串的存储结构	82
4.2.1	定长顺序存储	82
4.2.2	堆存储	83

4.2.3 链式存储	85
4.3 串的运算实现	86
4.4 串的模式匹配	90
4.4.1 BF 算法	90
4.4.2 KMP 算法	92
4.5 本章小结	95
习题	96
编程实例	99
第 5 章 数组和广义表	103
5.1 数组的定义及存储	104
5.1.1 数组的定义	104
5.1.2 数组的基本操作	105
5.1.3 数组的顺序存储	105
5.2 特殊矩阵的压缩存储	107
5.2.1 对称矩阵	108
5.2.2 三角矩阵	109
5.2.3 对角矩阵	110
5.3 稀疏矩阵	111
5.3.1 稀疏矩阵的三元组表存储	111
5.3.2 稀疏矩阵的十字链表存储	115
5.4 广义表	117
5.4.1 广义表的定义	117
5.4.2 广义表的存储结构	119
5.4.3 广义表的基本操作实现	121
5.5 本章小结	122
习题	123
编程实例	124
第 6 章 树和二叉树	127
6.1 树的定义与基本术语	128
6.1.1 树的定义	128
6.1.2 树的基本术语	131
6.2 二叉树	131
6.2.1 二叉树的定义	131

58	6.2.2 二叉树的性质	134
68	6.2.3 二叉树的存储实现	136
02	6.3 遍历二叉树	139
00	6.3.1 遍历二叉树的递归实现	139
20	6.3.2 遍历二叉树的非递归实现	141
20	6.3.3 遍历算法的应用	145
20	6.4 线索二叉树	148
00	6.4.1 线索二叉树的基本概念	148
00	6.4.2 线索二叉树的运算实现	150
50	6.5 树和森林	153
00	6.5.1 树的存储结构	153
00	6.5.2 树、森林与二叉树的转换	156
20	6.5.3 树和森林的遍历	158
00	6.6 哈夫曼树及其应用	159
00	6.6.1 哈夫曼树的基本概念	159
80	6.6.2 构造哈夫曼树	161
00	6.6.3 哈夫曼编码	163
00	6.7 本章小结	165
00	习题	166
00	编程实例	168
00	第 7 章 图	172
00	7.1 图的定义与基本术语	173
00	7.1.1 图的定义	173
00	7.1.2 基本术语	175
00	7.2 图的存储结构	177
00	7.2.1 邻接矩阵	177
00	7.2.2 邻接链表	179
00	7.2.3 十字链表	182
00	7.2.4 邻接多重表	183
00	7.3 图的遍历	184
00	7.3.1 深度优先搜索	185
00	7.3.2 广度优先搜索	187
00	7.4 图的应用	189
00	7.4.1 最小生成树	189

7.4.2	最短路径问题	195
7.4.3	AOV 网与拓扑排序	200
7.4.4	AOE 网与关键路径	203
7.5	本章小结	208
	习题	209
	编程实例	211
第 8 章	查找	216
8.1	查找的基本概念	217
8.2	线性表的查找	218
8.2.1	顺序查找	218
8.2.2	折半查找	219
8.2.3	分块查找	222
8.3	树表的查找	223
8.3.1	二叉排序树	223
8.3.2	平衡二叉树	229
8.3.3	B 树	234
8.4	散列表的查找	241
8.4.1	散列表的基本概念	241
8.4.2	散列函数的构造方法	242
8.4.3	处理冲突的方法	244
8.4.4	散列表的查找	247
8.5	本章小结	248
	习题	249
	编程实例	251
第 9 章	排序	254
9.1	排序的基本概念	255
9.1.1	什么是排序	255
9.1.2	排序的实现	256
9.2	插入排序	257
9.2.1	直接插入排序	257
9.2.2	折半插入排序	259
9.2.3	希尔排序	260
9.3	交换排序	261

261	9.3.1 冒泡排序	261
263	9.3.2 快速排序	263
266	9.4 选择排序	266
266	9.4.1 简单选择排序	266
268	9.4.2 堆排序	268
273	9.5 归并排序	273
275	9.6 基数排序	275
275	9.6.1 多关键字排序	275
275	9.6.2 链式基数排序	275
279	9.7 本章小结	279
280	习题	280
282	编程实例	282

第 1 章

数据结构基础



结构之美无处不在

说到结构，任何一事物都有自己的结构，就如可以看得见且触摸得到的课桌、椅子，还有看不见却也存在的分子、原子。可见一事物只要存在，就一定会有自己的结构。一幅画的生成，画家在挥毫泼墨之前，首先要在数尺素绢之上做结构上的统筹规划、谋篇布局；一件衣服的制作，如果在制作之前没有对衣服的袖、领、肩、襟、身等各个部位周密筹划，形成一个合理的结构系统，便无法缝制出合体的衣服；还有教育管理系统的结构、通用技术的学科结构、课堂教学结构等。试想一下，管理大量数据是否也需要数据结构呢？

本章知识要点：

- ◆ 数据结构的基本概念
- ◆ 数据结构和抽象数据类型
- ◆ 算法和算法分析

1.1 数据结构的基本概念

计算机科学是一门研究数据表示和数据处理的科学。数据是计算机化的信息，它是计算机可以直接处理的最基本和最重要的对象。无论是进行科学计算或数据处理、过程控制、存储和检索文件、数据库技术等计算机应用，都是对数据进行加工处理的过程。因此，要设计出一个结构好而且效率高的程序，必须研究数据的特性、数据间的相互关系及其对应的存储表示，并利用这些特性和关系设计出相应的算法和程序。

计算机在发展的初期，其应用范围是数值计算，所处理的数据都是整型、实型、布尔型等简单数据，以此为加工、处理对象的程序设计称为数值型程序设计。随着计算技术的发展，计算机逐渐进入到商业、制造业等其他领域，广泛地应用于数据处理和过程控制中。与此相对应，计算机所处理的数据也不再是简单的数值，而是字符串、图形、图像、语音、视频等复杂的数据。这些复杂的数据不仅量大，而且具有一定的结构。例如，一幅图像是一个由若干简单数值组成的矩阵，一个图形中的几何坐标可以组成表。此外，语言编译过程中所使用的栈、符号表和语法树，操作系统中用到的队列、磁盘目录树等，都是有结构的数据。数据结构所研究的就是这些有结构的数据，因此，数据结构的知识不论对研制系统软件还是开发应用软件都非常重要，它是学习软件知识和提高软件设计水平的重要基础。

1.1.1 数据结构的研究内容

在计算机发展的初期，人们使用计算机的目的主要是处理数值计算问题。当使用计算机来解决一个具体问题时，一般需要经过如下几个步骤：首先要从该具体问题抽象出一个适当的数学模型，然后设计或选择一个求解此数学模型的算法，最后编出程序进行调试、测试，得到最终的答案。例如，用计算机进行全球天气预报时，可以求解一组球面坐标系下的二阶椭圆偏微分方程。

随着计算机应用领域的扩大和软、硬件的发展，非数值计算问题显得越来越重要。据统计，当今处理非数值计算问题占用了 90% 以上的机器时间。这类问题涉及的数据结构更为复杂，数据元素之间的相互关系一般无法用数学方程式来描述。因此，解决这类问题的关键不再是数学分析和计算方法，而是要设计出合适的数据结构。而数据结构主要研究非数值计算问题，下面通过具体实例加以说明。

【例 1-1】 学生信息检索系统。当系统需要查某个学生的有关情况时，或者想查询某个专业或年级的学生的有关情况时，只要建立相关的数据结构，按照某种算法编写相关的程序，就可以实现计算机自动检索。为此，可以在学生信息检索系统中建立一张按学号顺序排列的学生信息表和若干张分别按姓名、专业、年级顺序排列的索引表，如表 1-1~表 1-4 所示。由这 4 张表构成的文件便是学生信息检索的数学模型。

表 1-1 学生基本信息表

学号	姓名	性别	专业	年级
2011010001	崔志永	男	计算机科学与技术	2011级
2011030005	李淑芳	女	软件工程	2011级
2012040010	陆丽	女	数学与应用数学	2012级
2012030012	张志强	男	软件工程	2012级
2012010012	李淑芳	女	计算机科学与技术	2012级
2013040001	王宝国	男	数学与应用数学	2013级
2013010001	石国利	男	计算机科学与技术	2013级
2013030001	刘文茜	女	软件工程	2013级

表 1-2 姓名索引表

姓名	索引号	姓名	索引号	姓名	索引号
崔志永	1	张志强	4	石国利	7
李淑芳	2, 5	王宝国	6	刘文茜	8
陆丽	3				

表 1-3 专业索引表

专业	索引号
计算机科学与技术	1, 5, 7
软件工程	2, 4, 8
数学与应用数学	3, 6

表 1-4 年级检索表

年级	索引号	年级	索引号
2011级	1, 2	2013级	6, 7, 8
2012级	3, 4, 5		

诸如此类的还有电话号码查询问题, 考试成绩查询问题, 企业进、销、存管理问题等。在这类文档管理的数学模型中, 计算机处理的对象之间通常存在着一种简单的线性关系, 这类数学模型可称为线性的数据结构。

【例 1-2】 计算机系统组成结构, 如图 1-2 所示。

计算机系统是由硬件系统和软件系统这两大系统组成, 硬件系统由 CPU、存储器、输入/输出设备、外设组成, 而软件系统由系统软件和应用软件组成。如果把它们视为数据元素, 这些元素之间所呈现的是一种层次关系, 从上到下按层进行展开, 形成“一棵倒立的树”, 最上层是“树根”, 依层向下展出“节点”和“树叶”。

树结构还有一个单位的组织机构、国家行政区域规划、书籍目录等。在这类问题中, 计算机处理的对象是树结构, 元素之间是一种一对多的层次关系, 这类数学模型称为树的数据结构。

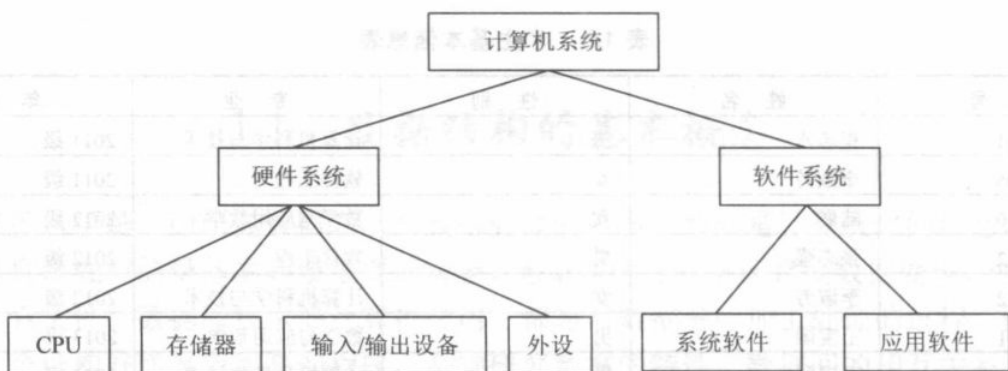


图 1-1 计算机系统组成结构图

【例 1-3】最短路径问题。从城市 A 到城市 B 有多条线路可达，但每条线路的交通成本不同，那么怎样选择一条线路，使得从城市 A 出发到达城市 B 所花费的费用最低呢？解决问题的方法是，可以将这类问题抽象为图的最短路径问题。如图 1-2 所示，图中的顶点代表城市，有向边代表两个城市之间的通路，边上的权值代表两个城市之间的交通费。求解 A 到 B 的最低费用，就是要在有向图中，从 A 点到 B 点的多条路径中，寻找一条各边权值之和最小的路径，即为该图的最短路径。

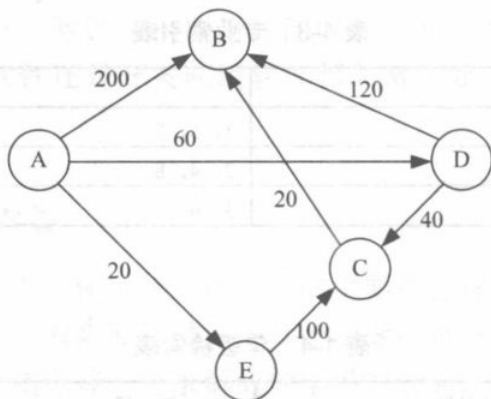


图 1-2 最短路径问题

图结构还有网络工程图问题、教学计划编排问题、比赛编排问题等，在这类问题中，元素之间是多对多的网状关系，这类数学模型称为图的数据结构。

由以上 3 个例子可见，描述这类非数值计算问题的数学模型不再是数学方程，而是诸如表、树、图之类的数据结构。因此，可以说数据结构课程主要是研究非数值计算的程序设计问题中所出现的计算机操作对象以及它们之间的关系和操作的学科。

“数据结构”最早是 1968 年在美国被确定为一门独立的课程的。同年，著名的美国计算机科学家 D.E.Knuth 教授所著《计算机程序设计技巧》的第一卷《基本算法》，是第一系统地阐述数据的逻辑结构以及运算的著作。从 20 世纪 60 年代末到 70 年代初出现了大型程序，程序与数据相对独立，结构化程序设计成为程序设计方法学的主要内容，人们越来越感到数据结构的重要性，认为程序设计的实质就是针对所处理问题选择一种好的数据结构，并加之一种好的算法。

数据结构在计算机科学中是一门综合性的专业基础课，是操作系统、数据库、人工智

能等课程的基础。同时，数据结构技术也广泛地应用于信息科学、系统工程、应用数学以及各种工程技术领域。数据结构的研究涉及的知识面十分广，可以认为它是介于数学、计算机硬件和软件之间的一门核心课程。

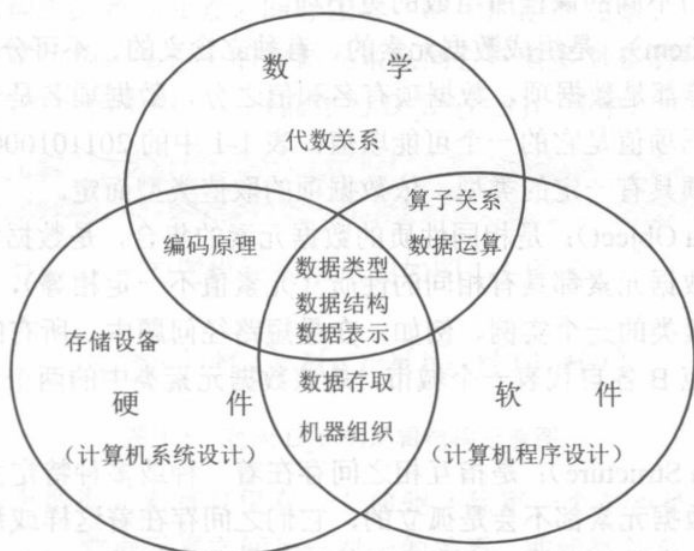


图 1-3 数据结构与其他课程的关系

学习数据结构的目的是为了了解计算机处理对象的特性，将实际问题中所涉及的处理对象在计算机中表示出来并对它们进行处理。对于计算机专业的学生，不学习数据结构是不行的，因为几乎所有的程序和软件都要使用某种或某些数据结构。例如，在面向对象的程序设计中，每一个对象在严格意义上来说就是一个数据结构，而哪个程序不使用对象呢？可以这样说，不懂数据结构，就编不出什么像样的程序和软件。

此外，数据结构在软件工程和计算机学科的其他领域也发挥着重要甚至关键的作用。例如，对大型数据库的管理，为互联网提供索引服务、云计算、云存储都需要广泛使用数据结构。在软件工程领域，数据结构被单独提取出来作为软件设计与实现过程的一个阶段。

1.1.2 基本概念和术语

在系统地学习数据结构知识之前，先对一些基本概念和术语赋予确切的含义。

数据 (Data)：是信息的载体，能够被计算机识别、存储和加工处理。它是计算机程序加工的原料，应用程序可以处理各种各样的数据。计算机科学中，所谓数据就是计算机加工处理的对象，它可以是数值数据，也可以是非数值数据。数值数据是一些整数、实数或复数，主要用于工程计算、科学计算和商务处理等；非数值数据包括字符、文字、图形、图像、语音等。

数据元素 (Data Element)：是数据的基本单位。在不同的条件下，数据元素又可称为元素、节点、顶点、记录等。例如，学生信息检索系统中学生信息表中的一个记录、计算机系统组成结构中状态树的一个状态、最短路径问题中的一个顶点等，都被称为一个数据元素。

有时，一个数据元素可由若干个数据项组成。例如，学生信息检索系统中学生信息表

的每一个数据元素就是一个学生记录,它包括学生的学号、姓名、性别、专业和年级等数据项。这些数据项可以分为两种:一种叫作初等数据项,如学生的性别、年级等,这些数据项是在数据处理时不能再分割的最小单位;另一种叫作组合数据项,如学生的成绩,它可以再划分为由各门不同的课程所组成的更小项。

数据项 (Data Item): 是组成数据元素的、有独立含义的、不可分割的最小单位,如表 1-1 的学号、年级等都是数据项。数据项有名和值之分,数据项名是一个数据项的标识,用变量定义,而数据项值是它的一个可能取值,表 1-1 中的 2011010001 是数据项“学号”的一个取值。数据项具有一定的类型,依数据项的取值类型而定。

数据对象 (Data Object): 是相同性质的数据元素的集合,是数据集合的一个子集。在某个具体问题中,数据元素都具有相同的性质(元素值不一定相等),属于同一数据对象,数据元素是数据元素类的一个实例。例如,在最短路径问题中,所有的顶点是一个数据元素类,顶点 A 和顶点 B 各自代表一个城市,是该数据元素类中的两个实例,其数据元素的值分别为 A 和 B。

数据结构 (Data Structure): 是指互相之间存在着一种或多种特定关系的数据元素的集合。在计算机中,数据元素都不会是孤立的,它们之间存在着这样或那样的关系,这种数据元素之间的关系称为数据结构。一个数据结构包含两个要素:一个是数据元素的集合,另一个是关系的集合。在形式上,数据结构通常可以采用一个二元组来表示。

数据结构的定义为一个二元组:

$$\text{Data_Structure} = (D, R)$$

式中, D 是数据元素的有限集, R 是 D 上关系的有限集。

数据结构包括数据逻辑结构和数据存储结构。

1. 数据逻辑结构

数据逻辑结构可以看作是从具体问题抽象出来的数学模型,其与数据的存储无关。根据数据元素间关系的不同特性,通常有下面四类基本的逻辑结构,如图 1-4 所示。

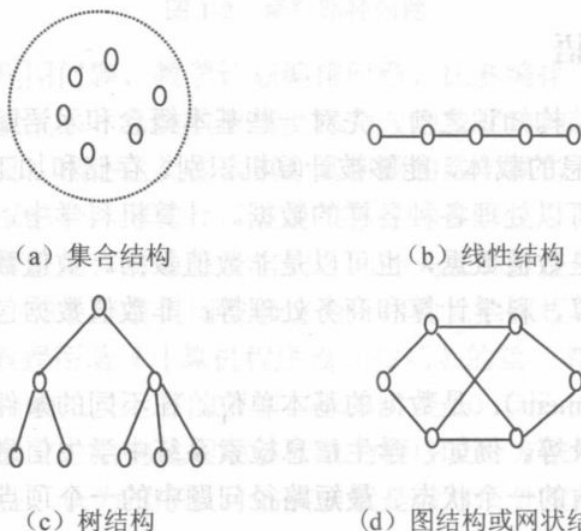


图 1-4 四类基本的逻辑结构示意图