

高等学校教材·计算机科学与技术

可赠送课件

jsjc@tup.tsinghua.edu.cn

算法与数据结构

陈媛 何波 涂晓红 涂飞 编著



清华大学出版社

高等学校教材·计算机科学与技术

算法与数据结构

陈 媛 何 波 涂晓红 涂 飞 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是高等院校计算机专业及相关专业的本科教材, 全书系统地介绍了算法与数据结构方面的基本知识。其主要内容有: 数据结构和算法的基本概念和术语, C 语言的基本数据类型及用 C 语言描述算法的要点; 线性表的逻辑结构, 线性表的顺序存储结构和链式存储结构, 数组线性表的应用实例; 栈与队列的基本概念及存储结构, 栈与队列的应用实例; 串的基本概念和存储结构, 串的应用实例; 树及二叉树的基本概念及存储结构, 二叉树的应用——哈夫曼树及编码; 图的基本概念及存储结构, 图的遍历, 图的生成树和最小生成树, 最短路径, 有向无环图, 图的应用实例; 静态查找, 动态查找, 哈希表查找; 插入排序、选择排序、交换排序、归并排序、基数排序、外部排序简介; 递归的概念及设计方法, 递归与回溯关系, 递归技术的应用实例, 递归的评价; 附录——课程设计指导。本书重点阐述了基本数据结构及算法在程序开发中的应用方法, 通过深入地学习和分析, 能够帮助读者极大地提高软件开发和设计能力。

本书给出的所有算法和程序采用 C 语言描述并均调试通过。书中每章的最后有小结、习题和上机实习题, 并且在附录中给出了课程设计的要求和内容, 便于作为教材或教学辅导书使用。

版权所有, 翻印必究。举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签, 无标签者不得销售。

本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术, 用户可通过在图案表面涂抹清水, 图案消失, 水干后图案复现; 或将表面膜揭下, 放在白纸上用彩笔涂抹, 图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

算法与数据结构 / 陈媛等编著. —北京: 清华大学出版社, 2005.4

(高等学校教材·计算机科学与技术)

ISBN 7-302-10365-8

I. 算… II. 陈… III. ①电子计算机-计算方法-高等学校-教材②数据结构-计算方法-高等学校-教材 IV. TP311.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 005051 号

出 版 者: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn>

邮 编: 100084

社总机: 010-62770175

客户服务: 010-62776969

责任编辑: 李江涛

印 刷 者: 世界知识印刷厂

装 订 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印张: 17.5 字数: 428 千字

版 次: 2005 年 4 月第 1 次 2005 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-10365-8/TP·7051

印 数: 1~4000

定 价: 23.00 元

高等学校教材·计算机

编审委员会成员

(按地区排序)

清华大学	周立柱	教授
	覃 征	教授
	王建民	教授
	刘 强	副教授
	冯建华	副教授
北京大学	杨冬青	教授
	陈 钟	教授
	陈立军	副教授
北京航空航天大学	马殿富	教授
	吴超英	副教授
	姚淑珍	教授
中国人民大学	王 珊	教授
	孟小峰	教授
	陈 红	教授
北京交通大学	阮秋琦	教授
北京信息工程学院	孟庆昌	教授
北京科技大学	杨炳儒	教授
石油大学	陈 明	教授
天津大学	艾德才	教授
复旦大学	吴立德	教授
	吴百锋	教授
	杨卫东	副教授
华东理工大学	邵志清	教授
华东师范大学	杨宗源	教授
	应吉康	教授
东华大学	乐嘉锦	教授
上海第二工业大学	蒋川群	教授
浙江大学	吴朝晖	教授
	李善平	教授
南京大学	骆 斌	教授

南京航空航天大学	秦小麟	教授
南京理工大学	张功萱	教授
南京邮电学院	朱秀昌	教授
苏州大学	龚声蓉	教授
江苏大学	宋余庆	教授
武汉大学	何炎祥	教授
华中科技大学	刘乐善	教授
中南财经政法大学	刘腾红	教授
华中师范大学	王林平	副教授
	魏开平	教授
武汉理工大学	李中年	教授
国防科技大学	赵克佳	教授
	肖 侬	副教授
中南大学	陈松乔	教授
湖南大学	林亚平	教授
	邹北骥	教授
西安交通大学	沈钧毅	教授
	齐 勇	教授
西北大学	周明全	教授
长安大学	巨永峰	教授
西安石油学院	方 明	教授
西安邮电学院	陈莉君	副教授
哈尔滨工业大学	郭茂祖	教授
吉林大学	徐一平	教授
	毕 强	教授
长春工程学院	沙胜贤	教授
山东大学	孟祥旭	教授
	郝兴伟	教授
山东科技大学	郑永果	教授
中山大学	潘小轰	教授
厦门大学	冯少荣	教授
福州大学	林世平	副教授
云南大学	刘惟一	教授
重庆邮电学院	王国胤	教授
西南交通大学	杨 燕	副教授

出版说明

改革开放以来，特别是党的十五大以来，我国教育事业取得了举世瞩目的辉煌成就，高等教育实现了历史性的跨越，已由精英教育阶段进入国际公认的大众化教育阶段。在质量不断提高的基础上，高等教育规模取得如此快速的发展，创造了世界教育发展史上的奇迹。当前，教育工作既面临着千载难逢的良好机遇，同时也面临着前所未有的严峻挑战。社会不断增长的高等教育需求同教育供给特别是优质教育供给不足的矛盾，是现阶段教育发展面临的基本矛盾。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2001年8月，教育部下发了《关于加强高等学校本科教学工作，提高教学质量的若干意见》，提出了十二条加强本科教学工作提高教学质量的措施和意见。2003年6月和2004年2月，教育部分别下发了《关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知》和《教育部实施精品课程建设提高高校教学质量和人才培养质量》文件，指出“高等学校教学质量和教学改革工程”是教育部正在制订的《2003—2007年教育振兴行动计划》的重要组成部分，精品课程建设是“质量工程”的重要内容之一。教育部计划用五年时间（2003—2007年）建设1500门国家级精品课程，利用现代化的教育信息技术手段将精品课程的相关内容上网并免费开放，以实现优质教学资源共享，提高高等学校教学质量和人才培养质量。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作，提高教学质量的若干意见》精神，紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”，在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下，我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”（以下简称“编委会”），旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划，讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师，其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求，“编委会”一致认为，精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求，处于一个比较高的起点上；精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要，要有特色风格、有创新性（新体系、新内容、新手段、新思路，教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量）、先进性（对原有的学科体系有实质性的改革和发展、顺应并符合新世纪教学发展的规律、代表并引领课程发展的趋势和方向）、示范性（教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性）和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐（通过所在高校的“编委会”成员推荐），经“编委会”认真评审，最后由清华大学出版社审定出版。

目前，针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”，即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。首批推出的特色精品教材包括：

(1) 高等学校教材·计算机应用——高等学校各类专业，特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 高等学校教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 高等学校教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 高等学校教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 高等学校教材·信息管理与信息系统

清华大学出版社经过近 20 年的努力，在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌，为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材经过 20 多年的精雕细刻，形成了技术准确、内容严谨的独特风格，这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会
E-mail: dingl@tup.tsinghua.edu.cn

前 言

一、关于算法与数据结构

计算机的日益发展，其应用早已不局限于简单的数值运算，而涉及到问题的分析、数据结构框架的设计以及插入、删除、排序、查找等复杂的非数值处理和操作。算法与数据结构的学习就是为以后利用计算机资源高效地开发非数值处理的计算机程序打下坚实的理论和、方法和技术基础。

算法与数据结构旨在分析研究计算机加工的数据对象的特性，以便选择适当的数据结构和存储结构，从而使建立在其上的解决问题的算法达到最优。

二、结构安排

全书共分为 9 章，每章主要内容如下。

第 1 章：概述。主要介绍了数据结构的基本概念及研究对象，C 语言的数据类型及算法描述要点。

第 2 章：线性表。主要介绍了线性表的概念、线性表的存储结构、基本操作的实现、线性表的应用等内容。

第 3 章：栈和队列。主要介绍了栈和队列的定义、基本操作的实现及应用等内容。

第 4 章：串。主要介绍了串的概念、串的存储结构、串的基本操作的实现及应用。

第 5 章：树。主要介绍了树的有关概念、二叉树的相关概念及性质、树的表示、树的遍历、线索二叉树的表示及哈夫曼树的应用等内容。

第 6 章：图。主要介绍了图的基本概念、图的存储结构及实现、图的遍历、图的连通性问题、最短路径、AOV 网与拓扑排序以及 AOE 网与关键路径等内容。

第 7 章：查找。主要介绍了查找的基本概念以及几种最常用的查找方法，即顺序表查找、索引表查找、树表查找和哈希表查找。

第 8 章：排序。主要介绍了排序的基本概念、常用的排序方法（插入、选择、交换、归并和基数）及它们的实现算法。

第 9 章：递归。主要介绍了递归的概念及设计方法、递归与回溯的关系、递归技术的应用等内容。

附录 A 中介绍了课程设计的要求及题目等内容。

本书由陈媛主编，并编写了第 1 章、第 5 章、第 6 章；何波，编写了第 7 章、第 9 章；涂晓红，编写了第 2 章、第 8 章、附录 A；涂飞，编写了第 3 章、第 4 章。

三、本书特点

本书是作者在多年的教学实践的基础上，参考了近年出版的多种数据结构类相关教材编写而成的。本书给出的所有算法和程序采用 C 语言描述并均调试通过。算法与数据结构

的学习过程是进行复杂程序设计的训练过程，因此在本书中每章都有习题和上机练习题，并且在附录中给出了课程设计的要求和内容。

四、适用对象

本书可作为计算机专业、信息专业或其他相关专业的本、专科教材，也是广大参加自学考试的人员和软件工作者的参考资料。本书既可作为“数据结构和/或算法”课程的教材，也可作为其他程序类课程的辅导教材。

限于编者的水平，书中可能有错误和不妥之处，敬请读者指教。

编者
2005年02月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数据结构的基本概念与学习方法.....	1
1.1.1 数据结构的研究对象.....	1
1.1.2 数据结构的基本概念和基本术语.....	2
1.2 算法与数据结构.....	6
1.2.1 算法的概念.....	6
1.2.2 描述算法的方法.....	7
1.2.3 算法分析.....	7
1.3 C 语言的数据类型及其算法描述要点.....	11
1.3.1 C 语言的基本数据类型概述.....	11
1.3.2 C 语言的数组和结构数据类型.....	11
1.3.3 C 语言的指针类型概述.....	15
1.3.4 C 语言的函数.....	19
1.3.5 用 C 语言验证算法的方法.....	22
1.4 学习算法与数据结构的意义和方法.....	25
第 2 章 线性表	28
2.1 线性表的逻辑结构.....	28
2.1.1 线性表的定义.....	28
2.1.2 线性表的运算.....	29
2.2 线性表的顺序存储结构——顺序表.....	29
2.2.1 线性表.....	29
2.2.2 顺序存储结构的优缺点.....	31
2.2.3 顺序表上的基本运算.....	31
2.3 线性表的链式存储结构——链表.....	35
2.3.1 单链表.....	35
2.3.2 循环链表和双向链表.....	42
2.4 数组.....	45
2.4.1 数组的定义与操作.....	46
2.4.2 数组的顺序存储结构.....	46
2.4.3 矩阵的压缩存储方法.....	47
2.5 线性表应用示例.....	54
第 3 章 栈和队列	61
3.1 栈.....	61
3.1.1 栈的基本概念.....	61

3.1.2	栈的顺序存储结构	63
3.1.3	栈的链式存储结构	66
3.2	栈的应用实例	67
3.2.1	表达式求值	67
3.2.2	栈与函数调用	69
3.2.3	栈在回溯法中的应用	70
3.3	队列	70
3.3.1	队列的基本概念	71
3.3.2	队列的顺序存储结构	71
3.3.3	队列的链式存储结构	75
3.4	队列应用实例	78
3.4.1	舞伴问题	78
3.4.2	模拟打印队列的管理	79
第4章	串	85
4.1	串的概念	85
4.1.1	串的定义	85
4.1.2	串的基本操作定义	86
4.2	串的存储结构	87
4.2.1	静态存储结构(顺序存储方式)	88
4.2.2	动态存储结构	89
4.3	串基本操作的实现	92
4.3.1	串联接、求子串	92
4.3.2	求子串位置:串的模式匹配	94
4.3.3	子串的插入和修改、串的置换操作实现简介	96
4.4	串的应用举例——文本编辑	97
第5章	树	100
5.1	树	100
5.1.1	树的概念	100
5.1.2	树的基本操作	102
5.2	二叉树	102
5.2.1	二叉树的概念	102
5.2.2	二叉树的性质	104
5.2.3	二叉树的存储结构及其实现	105
5.3	二叉树的遍历	107
5.3.1	递归的遍历算法	107
5.3.2	二叉树遍历操作举例	111
5.4	线索二叉树	113
5.5	一般树的表示和遍历	118
5.5.1	一般树的表示	118

5.5.2	二叉树与树之间的转换	120
5.5.3	一般树的遍历	122
5.6	哈夫曼树及其应用	122
5.6.1	哈夫曼树(最优二叉树)	122
5.6.2	哈夫曼树的应用	125
第 6 章	图	134
6.1	图的定义和术语	134
6.2	图的存储结构	138
6.2.1	邻接矩阵	138
6.2.2	图的邻接表	139
6.2.3	十字链表	141
6.2.4	边集数组	142
6.3	图的遍历	143
6.3.1	深度优先搜索	144
6.3.2	广度优先搜索	146
6.4	图的连通性	148
6.4.1	无向图的连通分量	148
6.4.2	生成树和最小代价生成树	149
6.5	有向无环图及应用	155
6.5.1	拓扑排序	155
6.5.2	关键路径	160
6.6	最短路径及应用	164
6.6.1	单源最短路径	164
6.6.2	每个顶点之间的最短路径	168
第 7 章	查找	173
7.1	基本概念与术语	173
7.2	静态查找表	175
7.2.1	静态查找表结构	175
7.2.2	顺序查找	175
7.2.3	有序表的折半查找	176
7.2.4	有序表的插值查找和斐波那契查找	179
7.2.5	分块查找	180
7.3	动态查找表	181
7.3.1	二叉排序树	181
7.3.2	平衡二叉树(AVL 树)	185
7.3.3	B-树和 B+树	190
7.4	哈希表查找	196
7.4.1	哈希表与哈希方法	196
7.4.2	常用的哈希函数	197

7.4.3	处理冲突的方法	199
7.4.4	哈希表的查找分析	200
第8章	排序	203
8.1	基本概念	203
8.2	插入排序	204
8.2.1	直接插入排序	204
8.2.2	希尔排序	206
8.3	交换排序	207
8.3.1	冒泡排序	207
8.3.2	快速排序	208
8.4	选择排序	211
8.4.1	简单选择排序	211
8.4.2	堆排序	212
8.5	归并排序	216
8.6	*基数排序	218
8.7	*外部排序简介	222
8.7.1	外存信息的存取	223
8.7.2	外部排序的基本方法	223
第9章	递归	226
9.1	递归的概念及设计方法	226
9.1.1	递归模型	226
9.1.2	递归的执行过程	228
9.1.3	递归设计	229
9.1.4	递归到非递归的转换	229
9.2	递归与回溯	231
9.3	递归技术应用实例	235
9.3.1	汉诺(hanoi)塔问题	235
9.3.2	组合数学:委员会问题	239
9.4	递归评价	241
附录	课程设计实习指导	245

第 1 章 绪 论

[内容提要] 数据结构的研究对象；基本概念和术语；算法的概念，描述算法的 C 语言。

计算机科学是一门研究信息的表示和处理的科学，而信息的表示和组织又直接关系到信息处理程序的效率。由于许多程序规模大、结构复杂、处理对象多为非数值型的数据，因此单纯依靠程序设计人员的经验和技巧已不能编制出高效率的处理程序。为了设计出效率高、可靠性强的程序，人们必须对程序设计的方法进行系统的研究。这就要求程序设计人员不但要掌握一般的程序设计技巧，而且要研究计算机程序加工的对象，即研究数据的特性以及数据之间存在的关系，这就是数据（或称信息）的结构。

数据结构是在整个计算机科学与技术领域上广泛使用的术语。它用来反映一个数据的内部构成，即一个数据由哪些成分数据构成，以什么方式构成，呈什么结构（或关系）。数据结构分为逻辑上的数据结构和物理上的数据结构。逻辑上的数据结构反映成分数据之间的逻辑关系，而物理上的数据结构反映成分数据在计算机内部的存储安排。

1.1 数据结构的基本概念与学习方法

1.1.1 数据结构的研究对象

数据结构作为一门学科主要研究数据的各种逻辑结构和存储结构，以及对数据的各种操作。因此，主要有 3 方面的内容：数据的逻辑结构；数据的物理存储结构；对数据的操作（或算法或运算）。通常，算法的设计取决于数据的逻辑结构，算法的实现取决于数据的物理存储结构。

用计算机解决一个实际问题时，一般的步骤是：首先得到实际问题的数学模型，然后设计相应的算法，最后编写程序，调试、完善，直至得到问题的答案。当人们用计算机处理数值计算问题时，所用的数学模型是用数学方程描述的：若问题是不变的，要用代数方程描述；若问题是动态的，就要用微分方程来描述。所涉及的运算对象一般是简单的整型、实型和逻辑型数据，因此程序设计者的主要精力集中于程序设计技巧上，而不是数据的存储和组织上。然而，目前计算机应用的更多领域是“非数值计算问题”，它们的数学模型无法用数学方程描述，而是用“数据结构”描述，解决此类问题的关键是设计出合适的数据结构。这是一种什么样的数学模型呢？下面，我们用 3 个例子对它们进行说明，使读者对这种模型有一个感性的认识。

例 1.1: 求一组 (n 个) 整数中的最大值。

算法：基本操作是“比较两个数的大小”。

模型：由多个整数排成的一个序列（一对一关系）——线性结构。

例 1.2：计算机对弈。

算法：对弈的规则和策略。

模型：由多个格局构成的呈现层次结构的树（一对多关系）——树形结构。

例 1.3：制定教学计划。

算法：各课程间的先后关系。

模型：各课程构成的复杂的先后关系（多对多关系）——图形结构。

从以上 3 个例子可以看出：描述非数值计算问题的数学模型是用线性表、树、图等结构来描述的，这也就是数据结构的研究对象。一般说来，数据结构是一门研究非数值计算的程序设计问题中计算机的操作对象，以及它们之间的关系和操作等的学科。

1.1.2 数据结构的基本概念和基本术语

数据：所有能被输入到计算机中，且被计算机处理的符号的集合。它是计算机程序加工处理的对象。客观事物包括数值、字符、声音、图形、图像等，它们本身并不是数据，只有通过编码变成能被计算机识别、存储和处理的符号形式后才是数据。例如，例 1.1 中的一批整形数据。

数据元素：是数据的基本单位，在计算机程序中通常是作为一个整体进行考虑和处理的。例如，例 1.1 中的一个整型数据。

数据项：数据结构中讨论的最小单位。若数据元素可再分，则每一个独立的处理单元就是数据项，数据元素是数据项的集合；若数据元素不可再分，则数据元素和数据项是同一概念。例如，例 1.1 中的整型数据不可再分，一个整型数据既是数据元素也是数据项。但例 1.3 中的课程（课程号、课程名等）数据元素可再分，课程号、课程名就可作为数据项，不是数据元素了。

数据结构：是相互之间存在一种或多种特定关系的数据元素的集合。这个概念涉及了两方面的内容：一方面是数据元素；另一方面是数据元素之间的相互关系，数据元素不是孤立存在的，在它们之间总存在某种相互关系。

逻辑结构：是数据元素之间的相互逻辑关系，它与数据的存储无关，是独立于计算机的。

物理结构（或存储结构）：是数据结构在计算机中的表示（又称映像），它包括数据元素的机内表示和关系的机内表示。由于具体实现的方法有顺序、链接、索引、散列等多种，所以，一种数据结构可表示成一种或多种存储结构。

从集合论的观点出发，数据结构是由两个集合构成的一个二元组：

$$B = (D, R) \quad (1-1)$$

B 是一种数据结构，它由同属一个数据对象的数据元素的有限集合 D 和 D 上二元关系的有限集合 R 组成。式 (1-1) 称为数据结构的形式定义。其中：

$$D = \{d_i | 1 \leq i \leq n, n \geq 0\}$$

$$R = \{r_j | 1 \leq j \leq m, m \geq 1\}$$

d_i 表示第 i 个数据元素， n 为 B 中数据元素的个数； r_j 表示第 j 个关系， m 为 D 上关系

的个数。一般讨论 $m=1$ 的情况，即 R 中只包含一个关系， $R=\{r\}$ 。

D 上二元关系 r 是序偶的集合。对于 r 中的任一序偶 $\langle x,y \rangle (x,y \in D)$ ，我们把 x 称为序偶的第一元素；把 y 称为序偶的第二元素，又称序偶的第一元素是第二元素的前驱，第二元素为第一元素的后续。例如，序偶 $\langle x,y \rangle$ 中， x 为 y 的前驱，而 y 为 x 的后续。

数据结构还能够利用图形形象地表示出来，图形中的每一个结点（或称为顶点）对应一个数据元素，两个结点之间带箭头的连线（或称为弧或有向边）对应二元关系中的一个序偶，其中序偶的第一元素为弧的起始结点（即弧尾），第二元素为它的终止结点（或弧头）。

作为例子，下面根据表 1.1 构造一些典型的数据结构。

表 1.1 教务处人事简表

职工号	姓名	出生年份	职务
1	王敏	1962	处长
2	赵华	1968	科长
3	刘永年	1964	科长
4	陈曙光	1972	主任
5	马力仁	1959	科员
6	邢德	1975	科员
7	高为	1972	科员
8	张力	1967	科员

例 1.4: 一种数据结构 $L=(D,R)$ ，其中：

$$D=\{1,2,3,4,5,6,7,8\}$$

$$R=\{r\}$$

$$r=\{\langle 5,1 \rangle, \langle 1,3 \rangle, \langle 3,8 \rangle, \langle 8,2 \rangle, \langle 2,7 \rangle, \langle 7,4 \rangle, \langle 4,6 \rangle\}$$

对应的图形如图 1.1 所示。

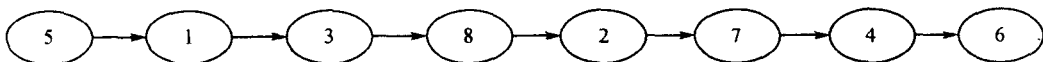


图 1.1 线性结构

不难看出， r 是按职工年龄从大到小排列的关系。

在 L 中，每一个数据元素有且只有一个前驱元素（除第一个结点 5 外），有且只有一个后续（除最后一个元素 6 外）。这种数据结构的特点是数据元素之间的 1:1 联系，我们把具有这种特点的数据结构称为线性结构。

例 1.5: 一种数据结构 $T=(D,R)$ ，其中

$$D=\{1,2,3,4,5,6,7,8\}$$

$$R=\{r\}$$

$$r=\{\langle 1,2 \rangle, \langle 1,3 \rangle, \langle 1,4 \rangle, \langle 2,5 \rangle, \langle 2,6 \rangle, \langle 3,7 \rangle, \langle 3,8 \rangle\}$$

对应的图形如图 1.2 所示。

不难看出， r 是人员之间的领导和被领导的关系。

在 T 中，每一个数据元素有且只有一个前驱元素（除

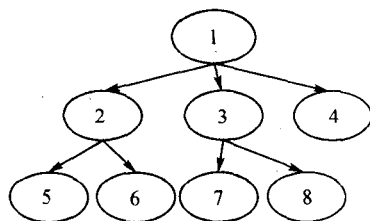


图 1.2 树型结构

根结点 1 外), 但可以有任意多个后续结点 (树叶可看成为具有 0 个后续结点)。这种数据结构的特点是数据元素之间的 1 : N 联系, 我们把具有这种特点的数据结构称为树型结构。

例 1.6: 一种数据结构 $G = (D, R)$, 其中

$$D = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$$

$$R = \{r\}$$

$$r = \{ \langle 1, 2 \rangle, \langle 2, 1 \rangle, \langle 1, 4 \rangle, \langle 4, 1 \rangle, \langle 2, 3 \rangle, \langle 3, 2 \rangle, \langle 2, 6 \rangle, \langle 6, 2 \rangle, \langle 2, 7 \rangle, \langle 7, 2 \rangle, \langle 3, 7 \rangle, \langle 7, 3 \rangle, \langle 4, 6 \rangle, \langle 6, 4 \rangle, \langle 5, 7 \rangle, \langle 7, 5 \rangle \}$$

对应的图形如图 1.3 所示。

从图 1.3 可以看出, r 是 D 上的对称关系。为了简化起见, 我们把 $\langle x, y \rangle$ 和 $\langle y, x \rangle$ 这两个序偶用一个无序对 (x, y) 来代替; 在图形中, 我们把 x 结点和 y 结点之间两条相反的弧用一条无向边来代替。这样 r 关系可改写为: $r = \{ (1, 2), (1, 4), (2, 3), (2, 6), (2, 7), (3, 7), (4, 6), (5, 7) \}$, 对应的图形如图 1.4 所示。

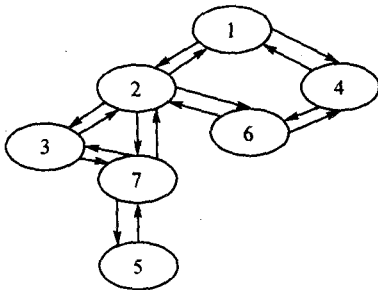


图 1.3 有向图形结构

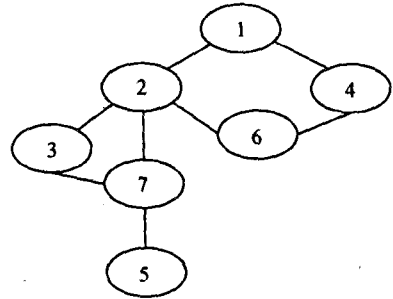


图 1.4 无向图形结构

不难看出, r 是人员之间的友好关系。

在 G 中, 每一个数据元素可以有任意多个前驱元素和任意多个后续元素。这种数据结构的特点是数据元素之间的 $M : N$ 联系, 我们把具有这种特点的数据结构称为图型结构。

上述数据结构定义中的“关系”描述的是数据元素之间的抽象化的相互关系, 这种数据元素之间的相互逻辑关系通常称为逻辑结构, 它与数据的存储无关, 是独立于计算机的。

根据数据元素之间关系的不同特性, 有下列 4 类基本逻辑结构: ① 集合, 结构中的元素之间除了“同属一个集合”的相互关系之外, 别无其他关系; ② 线性结构, 结构中的元素之间存在一对一的相互关系; ③ 树形结构, 结构中的元素之间存在一对多的相互关系; ④ 图形结构, 结构中的元素之间存在多对多的相互关系。图 1.5 为上述 4 种基本逻辑结构的关系图。

数据结构在计算机中的表示 (又称映像) 称为数据的物理结构, 又称为存储结构。它包括数据元素的机内表示和关系的机内表示, 下面分别讨论。

(1) 数据元素的映像方法

用二进制位 (bit) 的位串表示数据元素。通常称这个位串为结点 (node)。当数据元素由若干数据项组成时, 位串中与各数据项对应的子位串称为数据域 (data field)。因此, 结点是数据元素的机内表示 (或机内映像)。例如: