高等学校计算机专业规划教材

高等学校计算机专业“十二五”省级规划教材

Data Structure in C Second Edition

数据结构（C语言版）

（第2版）

朱昌杰 肖建于 编著

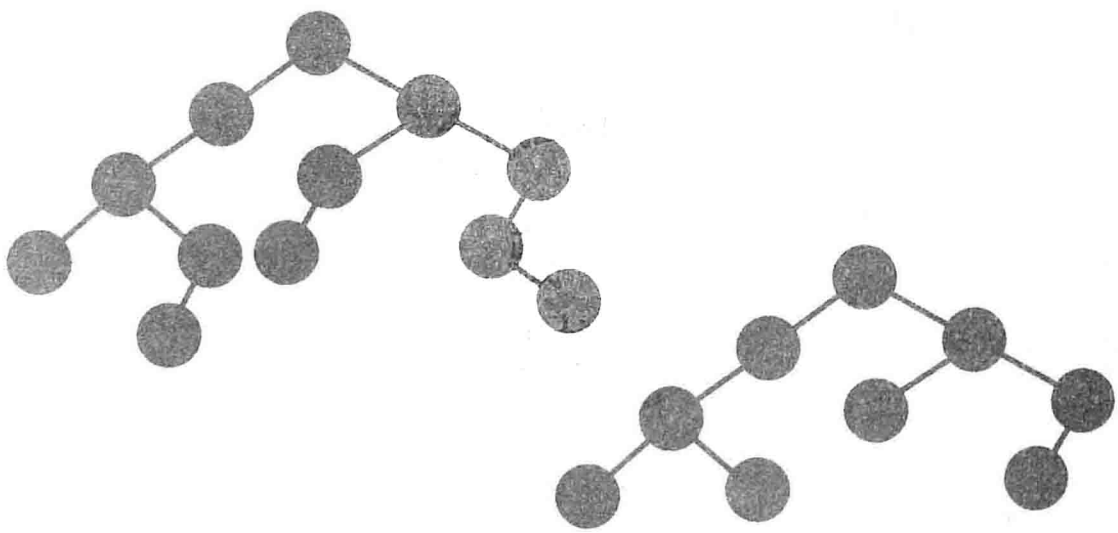
清华大学出版社

高等学校计算机专业规划教材

Data Structure in C Second Edition

数据结构（C语言版）（第2版）

朱昌杰 肖建于 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了各种常用的数据结构与算法方面的基本知识，并使用C语言描述其算法。全书共8章，第1章介绍了数据结构与算法的一些基本概念；第2～6章分别讨论了线性表、栈与队列、串、多维数组与广义表、树和二叉树、图等常用的数据结构及其应用；第7章和第8章分别介绍查找和内部排序，它们都是数据处理时广泛使用的技术。本书的特色是深入浅出，既注重理论又重视实践；全书配有大量的例题和详尽的注释，各章都有不同类型的习题。

本书可以作为高等院校计算机专业本科生的教材，也可以作为报考高等学校计算机专业硕士研究生入学考试的复习用书，也可以作为专科和成人教育的教材，同时还可以作为从事计算机系统软件和应用软件设计与开发人员的参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

数据结构：C语言版/朱昌杰，肖建于编著. --2版. --北京：清华大学出版社，2014
高等学校计算机专业规划教材
ISBN 978-7-302-37063-5

Ⅰ. ①数… Ⅱ. ①朱… ②肖… Ⅲ. ①数据结构-高等学校-教材 ②C语言-程序设计-高等学校-教材 Ⅳ. ①TP311.12 ②TP312

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第143023号

责任编辑： 龙启铭
封面设计： 何凤霞
责任校对： 李建庄
责任印制： 王静怡

出版发行： 清华大学出版社
网　　址：http://www.tup.com.cn, http://www.wqbook.com
地　　址：北京清华大学学研大厦A座　　邮　　编：100084
社 总 机：010-62770175　　邮 购：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
课 件 下 载：http://www.tup.com.cn,010-62795954
印 装 者： 三河市李旗庄少明印装厂
经　　销： 全国新华书店
开　　本： 185mm×260mm　　印　　张：14.75　　字　　数：368千
版　　次： 2011年5月第1版　　2014年9月第2版　　印　　次：2014年9月第1次印刷
印　　数： 1～2000
定　　价： 29.00元

产品编号：059492-01

前言

本书是安徽省省级“十二五”规划教材和省级精品资源共享课程教材。自本书第 1 版出版以来，得到了很多高校和广大读者的广泛认可，获得了很好的评价。在广泛听取读者和专家的意见基础上，结合课程组在教学中遇到的实际情况，对原书做了认真的修订。

这次修订保持了原书层次清晰、语言通俗、理论分析透彻、内容实用、例题经典的特点，力求做到深入浅出，将复杂的概念用简洁浅显的语言讲述。使读者尽快掌握数据结构与算法方面的基本知识。本次在以下几个方面对第 1 版进行了修订：

（1）对原书的内容做了十分慎重的斟酌，增加了一些新的更有用的内容，使本书更具有实用性。在第 1 章增加了算法效率度量相关概念，第 4 章增加了 KMP 算法，第 6 章增加了图的存储结构。

（2）为了使读者更容易接受和理解教材内容，对部分章节的内容和讲解方法进行了改进。如在第 3 章修订了表达式求值算法，第 6 章修订了求最短路径算法等。

（3）为了更准确地描述内容，对原书部分文字进行了修改。

本书由朱昌杰、肖建于编著，参加编写还有张震、李璟、刘怀愚、周影、赵娟、施汉琴等老师，朱坤同学参加了部分程序的调试和校对工作。在编写过程中，始终得到了清华大学出版社各级领导的大力支持和帮助，在此一并表示诚挚的感谢！

最后，借用本书再版的机会，向选择使用本书的老师和读者表示衷心的感谢。由于水平有限，本书中难免存在一些不妥之处，敬请读者批评指正。

编　者

2014 年 6 月

目录

第 1 章 绪　论

本章知识要点：

- 数据结构的基本概念。
- 逻辑结构、物理结构的分类及其特点。
- 数据类型和抽象数据类型的概念及其定义方式。
- C 语言的常用数据类型。
- 用 C 语言描述算法的注意事项。
- 算法设计的目标和算法效率的度量。

1.1 数据结构的基本概念

随着计算机技术的飞速发展，计算机的应用已经遍布人类社会的各个领域。计算机处理的数据也越来越丰富，而数据的组织形式和表示方式直接关系到计算机对数据的处理效率，因此，为了更好地进行程序设计，需要对程序所加工处理的对象进行系统和深入的研究。而数据结构就是要研究各种数据的特性以及数据之间的关系，进而根据实际情况合理地组织、存储数据，最终设计出好的算法。

数据是对客观事物的符号表示，在计算机科学中是指所有能输入到计算机中并被计算机程序所处理的符号的总称，它是计算机程序加工的“原料”。例如，一个班级的所有学生的成绩、某学院所有教师信息记录、从公元 100 至 3000 年间的所有闰年以及某公司所有职员的薪资信息等都称为数据。

数据元素是数据的基本单位，在程序设计中通常作为一个整体进行考虑和处理。例如，学生学籍管理系统中关于某个学生的一条记录就是一个数据元素，每个记录中可能包含多个属性（如姓名、学号、专业、年级等），每个属性就称为一个数据项，数据项是具有独立含义的数据的最小单位。

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。这些数据元素不是孤立存在的，而是有着某种关系的，这种关系称为结构。数据结构包括的内容有数据元素之间的逻辑结构、数据在计算机中的存储方式（即物理结构）和施加在该数据上的操作。

1.1.1 数据的逻辑结构

数据元素与数据元素之间的逻辑关系称为数据的逻辑结构。根据数据元素之间逻辑关系的不同特性，可将数据结构分为以下 4 类基本结构。

1. 集合

这种结构中的数据元素同属于一个集合，除此之外别无其他关系（集合在数据结构中很少讨论）。

2. 线性结构

这种结构中的数据元素之间存在一个对一个的关系。

3. 树形结构

这种结构中的数据元素之间存在一个对多个的关系。

4. 图形结构

这种结构中的数据元素之间存在多个对多个的关系。

从上述关系来看，线性结构是树形结构的特例，树形结构是图形结构的特例。一般情况下，数据结构的逻辑结构可以用二元组来表示：

$$Data\_Structure=(D,R)$$

其中，D 是数据元素的有限集，R 是 D 上的关系的有限集，其中每个关系都是从 R 到 D 的关系。

下面将给出关于线性结构、树形结构和图形结构的 3 个实际用例，以帮助读者深入理解逻辑结构。

例 1-1 某班级学生学籍管理问题。当我们要查阅张伟同学的家庭住址时，或者当我们要查询张伟同学是哪个民族时，因为一个班级里可能有两位同学都叫张伟，所以我们要按学号进行查询，而同名的两个张伟的学号是不同的。所有同学的学号存在一个对一个的关系，这是一种典型的线性关系，如图 1.1 所示。

20101204038	王平	男	汉族	天津市河西区幸福大街 36 号
20101204039	闻亮亮	女	满族	淮南市八公山区西四村 64 栋 23 号
20101204040	张伟	男	布依族	唐山市古冶区平庄村 128 号
20101204041	张伟	男	汉族	淮北市濉溪县王桥 100 号
20101204042	仲萍	女	汉族	邯郸市邯山区滏河北大街 56 号

图 1.1 学生学籍线性结构图

例 1-2 计算机中的文件和文件夹的组织问题。计算机中某个磁盘可能包含多个文件夹，每个文件夹又可以包含多个子文件夹，每个子文件夹又可以包含自己的文件和子文件夹，文件夹之间或文件夹与文件之间存在着一个对多个的关系，这是一种典型的树形结构，如图 1.2 所示。

例 1-3 连锁超市的分店问题。某家大型连锁超市在某城市开了 6 家分店，各个分店除了和总店有一定关系外，还和其他分店存在着某种联系，所以各个连锁店之间存在一种多个对多个的关系，这是一种典型的图形结构，如图 1.3 所示。

1.1.2 数据的物理结构

数据的物理结构即是数据在计算机中的存储方式，数据的存储方式将直接影响或决定数据的处理效率。常用的存储结构有以下 4 种。

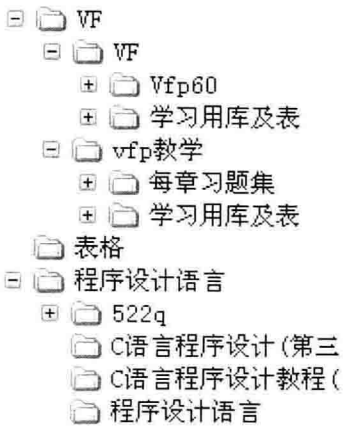


图 1.2 文件夹树形结构图

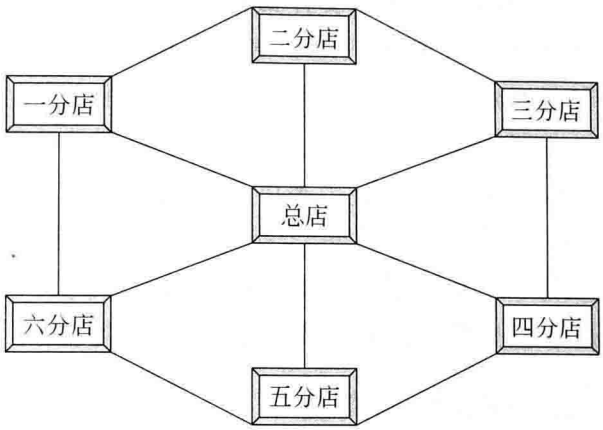


图 1.3 连锁超市图形结构图

1. 顺序存储结构

这种存储方式是将逻辑上连续的数据存储在地址连续的内存空间中，存储地址的相对关系即对应数据之间的逻辑关系。其优点是节省存储空间，因为不需要额外的存储空间来保存数据间的逻辑关系，可以进行随机访问。其缺点是进行数据的插入和删除时可能需要移动大量的数据。

2. 链式存储结构

这种存储方式中数据的存储结构不表示数据之间的逻辑结构，结点之间的逻辑结构是由附加的指针字段来表示的。其优点是在进行数据的插入和删除时，仅需修改指针，不需要移动数据。其缺点是需要额外的存储空间来存储数据之间的逻辑关系。

3. 索引存储结构

这种存储方式在存储数据信息的同时，还建立附加的索引表。索引表由索引项构成，其一般形式为：(关键字，地址)，关键字能够唯一地标识一个数据元素，地址表示指向数据元素的指针。其优点是在进行插入和删除操作时，只需修改存储在索引表中对应数据元素的存储地址，而不必移动存放在数据表中的数据，因此保持了较高的数据修改运算效率。其缺点是创建和维护索引表要增加时间和空间的开销。

4. 散列存储结构

这种存储方式是根据数据的关键字通过哈希函数计算出的值来确定数据的存储地址。其优点是查找速度快，只要给出待查找的关键字，即可计算出该数据的存储地址。与上述三种方法不同的是，散列存储方式只适合要求对数据进行快速查找和输出的场合，其关键是要选择一个好的散列函数和处理“冲突”的方法，详见第 7 章。

1.2 数据类型和抽象数据类型

1.2.1 数据类型

在用高级程序设计语言编程序时，要对程序中用到的每一个常量、变量和表达式定义数据类型，不同类型数据的取值范围不同，所允许进行的操作也不同。因此数据类型

是一个值的集合和定义在该值集上的一组操作的总称。例如在C语言中，基本整型一般为2个字节（即16位），表示范围为-2^{15}～$(2^{15}-1)$，即-32 768～32 767，允许进行的操作有加、减、乘、除和取模等，并且定义了运算规则。

在高级程序设计语言中，数据类型分为两类：原子类型和结构类型。原子类型又称为非结构类型，其值是不可分解的，C语言中的原子类型即是其基本类型（整型、字符型、浮点型和枚举类型）、指针类型和空类型。结构类型又称为构造类型，该类型的各个成分既可以是原子类型的，也可以是结构类型的（即允许嵌套定义）。C语言中的结构类型是数组类型、结构体类型和共用体类型等。

1.2.2 抽象数据类型

抽象数据类型（Abstract Data Type，ADT）是指用于表示实际应用问题的数据模型以及定义在该模型上的一组操作。抽象数据类型与一般数据类型的概念是一致的，都只专注于其逻辑特性，相同的数据类型在不同的计算机系统中的表示和实现可能是不同的，但只要其数学特性不变，就不会影响外部的使用。

另一方面，从抽象的层次和定义的范畴来看，抽象数据类型较之一般数据类型抽象层次更高，定义范畴更广。抽象数据类型不再局限于计算机系统中已经实现的数据类型，可以是用户所定义的数据类型，它可以由计算机系统已经实现的数据类型来表示和实现。抽象数据类型必须先定义后使用，定义抽象数据类型只描述数据的逻辑结构及允许进行的操作，不考虑数据的物理存储及其操作的具体实现。

一个具体问题的抽象数据类型定义一般包括数据对象（即数据元素的集合）、数据关系和基本操作三方面的内容。抽象数据类型可用三元组（D,R,P）来表示。其中D是数据对象；R是D上的关系的集合；P是D中数据运算的基本操作集合。对抽象数据类型的定义需要约定一定的格式，本书均采用如下格式定义抽象数据类型：

```
ADT <抽象数据类型名>
{
    数据对象：数据对象的定义
    数据关系：数据关系的定义
    基本操作：基本操作的定义
}ADT 抽象数据类型名
```

其中基本操作的定义格式为：

```
基本操作名(参数列表)
  初始条件
  操作结果
```

基本操作有两种参数：赋值参数只为操作提供输入值；引用参数以&打头，除了可以提供输入值外，还将返回操作结果。“初始条件”是指操作执行之前数据结构和参数应该满足什么条件，不满足条件则操作失败，程序将返回出错信息。“操作结果”是指操作

正常完成的情况下数据结构的变化及应返回的结果。

例 1-4 抽象数据类型复数的定义。

```
ADT Complex
{
    数据对象 D: D={c1,c2|c1,c2 均为实数}
    数据关系 R: R={<c1,c2>|c1 是复数的实数部分,c2 是复数的虚数部分}
    基本操作 P:
      InitComplex(&Z,v1,v2)
        操作结果: 构造了复数 Z,元素 c1 和 c2 分别被赋值为参数 v1 和 v2
      DestroyComplex(&Z)
        操作结果: 复数 Z 被销毁
      GetReal(Z,&real)
        操作结果: 用 real 返回复数 Z 的实部的值
      GetVirtual(Z,&virtual)
        操作结果: 用 virtual 返回复数 Z 的虚部的值
      Add(Z1,Z2,&sum)
        操作结果: 用 sum 返回两个复数 Z1,Z2 的和
      ModComplex(Z,&model)
        操作结果: 用 model 返回复数 Z 的模
} ADT Complex
```

1.3 C 语言的数据类型

C 语言提供了如图 1.4 所示的一些数据类型，并且可以由这些数据类型构造出不同的、更加复杂的数据类型。

下面对各种类型的变量作简单介绍。

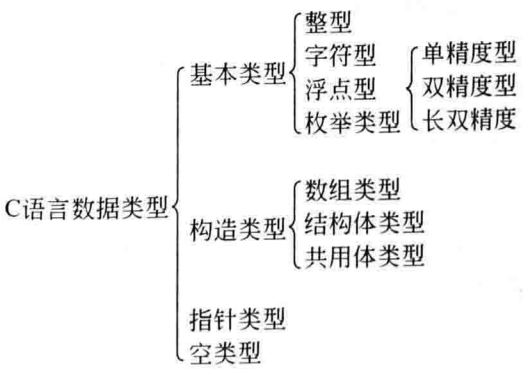


图 1.4 C 语言的数据类型

1. 整型

整型一般用 int 表示，其变量可以分为基本整型（int）、短整型（short int 或 short）和长整型（long int 或 long）。一个基本整型变量值的表示范围为–32 768～32 767。若变量的值不为负值，还可以定义其为无符号整型；若未加声明，则表示为有符号整型。C 语言没有具体规定各类整型数据所占用的内存字节数，只要求长整型数据长度不短于基本整型，短整型不长于基本整型。具体如何实现因计算机系统的不同可能有所不同。

2. 浮点型

浮点数即实数，浮点型一般用 float 表示，浮点型变量可以分为单精度（一般占 4 字节，用 float 表示）、双精度（一般占 8 字节，用 double 表示）和长双精度（一般占 16

字节，用 long double 表示）。不同类型的浮点数的有效数字长度不同，所表示的数值范围也不同，具体请读者参阅相关 C 语言教程，本书不做详细说明。

3. 字符型

C 语言的字符常量是用单撇号括起来的一个字符，一般用 char 来表示。在内存中存放字符并不是存放字符本身，而是将该字符的 ASCII 码放到存储单元中。字符串常量是一对双撇号括起来的字符序列。C 语言规定'\0'作为字符串的结束标志，该标志由系统自动添加，在书写时不需要添加，输出时也不会输出该字符。

4. 枚举类型

枚举类型一般适用于变量的值只有几种可能的情况，可以将变量的值一一列举出来，变量只能取该范围之内的其中一个值。枚举类型的声明一般用 enum。

5. 数组类型

数组是由用户定义的结构数据类型，是按一定顺序排列的具有相同性质的变量的集合。所有数组元素具有相同的数组名，但有不同的数组下标，下标用方括号括起来。数组元素可以是基本类型，也可以是构造类型。

6. 结构体类型

结构体类型是将不同类型的数据组合在一起构成新的类型，C 语言允许用户根据在编程时的需要自行定义该类型。结构体类型一般以 struct 打头，必须先声明结构体类型再定义该类型的变量。

7. 共用体类型

共用体类型一般用 union（有些 C 语言书籍将其直译为联合）来表示，共用体类型变量的内存长度等于最长的成员的长度。在程序中不能引用共用体变量，只能引用共用体变量中的成员，在每一瞬间只能有一个成员起作用，即各成员不是同时存在和起作用的。

8. 指针类型

定义指针变量需要用*符号，指针变量中存放的不是数据本身，而是反映数据存放位置的地址。指针可以应用到链表、数组、结构体类型数据的成员中等，这是编程者需要重点掌握的一个知识点。

9. 空类型

空类型一般用 void 来表示。在调用函数值时，通常应向调用者返回一个函数值。但是有一类函数调用后不需要向调用者返回函数值，这种函数可以定义为空类型。

1.4 用 C 语言描述算法的注意事项

1.4.1 算法及其特征

算法是为解决特定问题而规定的指令的有限序列，每一条指令表示一个或多个操作。算法具有以下 5 个重要特性。

1. 有穷性

一个算法必须总是（对任何合法的输入值）在执行有穷步之后结束，且每一步都可以在有穷时间内完成。有穷时间是指可以接受的时间内，例如一个程序能够执行并完成，但是需要执行 100 年，则可认为其是无法实现的。

2. 确定性

对每种可能的情况所执行的操作，算法中都必须有确切的规定，使程序的阅读者和执行者能够明确理解其含义，并且在任何条件下，算法都要保证相同的输入只能得到相同的输出。例如这样的描述“当 A 属于中年时，salary 为 2000 元”，假如 38 岁算是中年，41 岁也算是中年，那么 46 岁算不算呢？该条件无法判断是否满足，因此，如果算法中出现了这样的判断条件，则程序将不能正确执行。

3. 可行性

算法中的每一个操作都必须是能够准确执行的。例如，如果出现 B=3，则 A/(B−3) 就是无法执行的。

4. 输入

一个算法有 0 个或多个输入。如果需要初始值，可以在程序运行时由用户输入，也可以在算法中直接给出。

5. 输出

一个算法有 1 个或多个输出。

在算法的上述 5 个重要特性中，最基本的是有穷性、确定性和可行性。

1.4.2 C 语言描述算法的注意事项

1. 预定义常量

```
#define TRUE        1
#define FALSE       0
#define MAXSIZE     1000
#define OK          1
#define ERROR       0
#define INFEASIBLE  -1
#define OVERFLOW    -2
```

2. 输入和输出语句

```
scanf(格式控制字符串,输入项表);
printf(格式控制字符串,输出项表);
```

3. 赋值语句

```
变量名=表达式;
```

4. 选择语句

```
if(条件)
        语句1;
   else
        语句2;
```

或者

```
switch(表达式)
  {
     case  条件1：语句序列1;break;
     ⋮
     case  条件n：语句序列n;break;
     default：语句序列n+1;
  }
```

5. 注释

```
//单行注释文字
```

6. 循环语句

```
while(条件)
     循环体语句;              //条件成立才执行循环体
```

或者

```
do {
     循环体语句;
     }while(条件);           //至少先执行一次循环体,如果条件成立,再继续执行循环体
```

或者

```
for(赋初值表达式1;条件表达式2;步长表达式3)
     循环体语句;
```

7. 结束语句

```
return(返回表达式);         //正常结束语句,根据实际情况"返回表达式"可有可无
break;                      //case结束语句
exit;                       //异常结束语句
```