

C 编程 芥子观

吴同

C语言 芥子观

吴同

目录

| | |
|----------------|-----|
| 前言与说明 | vii |
| 第一章 基础知识 | 1 |
| 1.1 进制的表示和转换 | 2 |
| 1.2 信息与编码 | 4 |
| 1.3 字符集 | 6 |
| 1.4 计算机的基本结构 | 7 |
| 1.5 编程语言与编译 | 7 |
| 1.6 C 语言简介 | 9 |
| 1.7 信息的查询 | 10 |
| 第二章 你好, 世界! | 13 |
| 2.1 IDE | 14 |
| 2.2 主函数和语句 | 15 |
| 2.3 头文件 | 16 |
| 2.4 空白符和注释 | 16 |
| 2.5 警告与错误 | 18 |
| 2.6 第一个 C 语言程序 | 19 |

| | |
|------------------------|-----------|
| 第三章 变量 | 23 |
| 3.1 变量和声明 | 24 |
| 3.2 标识符和关键字 | 26 |
| 3.3 数据类型 | 28 |
| 3.4 整型 | 28 |
| 3.5 浮点数 | 30 |
| 3.6 整型和浮点数 | 31 |
| 3.7 字符 | 32 |
| 3.8 字符串 | 35 |
| 3.9 运算 | 36 |
| 3.10 数学运算 | 38 |
| 3.11 赋值运算 | 40 |
| 3.12 关系运算 | 43 |
| 3.13 逻辑运算 | 44 |
| 3.14 自增和自减 | 45 |
| 3.15 数据类型强制转换 | 47 |
| 3.16 * 位运算 * | 47 |
| 3.17 * 逗号运算 * | 49 |
| 第四章 输入和输出 | 51 |
| 4.1 printf() 和 scanf() | 52 |
| 4.2 其它输入输出 | 64 |

| | |
|--|----------------|
| 第五章 分支与循环 | 67 |
| 5.1 分支结构 | 68 |
| 5.2 实例: 判断奇偶性 | 76 |
| 5.3 循环结构 | 79 |
| 5.4 <code>break</code> 和 <code>continue</code> | 85 |
| 5.5 多层循环, 循环与分支 | 87 |
| 5.6 实例: 鸡兔同笼问题 | 88 |
| 5.7 * 条件运算符 * | 92 |
| 5.8 * <code>goto</code> 语句 * | 93 |
| 第六章 数组 | 95 |
| 6.1 一维数组 | 96 |
| 6.2 二维数组和高维数组 | 99 |
| 6.3 实例: 简单的排序算法 | 101 |
| 6.4 * 变长数组 * | 105 |
| 第七章 函数 | 107 |
| 7.1 函数的定义和使用 | 108 |
| 7.2 函数的声明 | 115 |
| 7.3 函数的参数 | 117 |
| 7.4 变量的作用域 | 120 |
| 7.5 函数的返回值 | 123 |
| 7.6 递归 | 125 |

| | |
|---------------------------|------------|
| 7.7 实例: 斐波那契数列 | 127 |
| 第八章 预处理命令 | 133 |
| 8.1 注释 | 134 |
| 8.2 #include 命令 | 135 |
| 8.3 #define 命令 | 136 |
| 8.4 * 带参宏函数 * | 137 |
| 第九章 指针 | 141 |
| 9.1 变量在内存中的储存 | 142 |
| 9.2 指针的定义和使用 | 143 |
| 9.3 指针的运算 | 146 |
| 9.4 数组与指针 | 147 |
| 9.5 二维指针 | 148 |
| 9.6 指针作为函数的参数 | 149 |
| 9.7 * 函数指针 * | 150 |
| 9.8 * 申请内存和内存泄漏 * | 154 |
| 第十章 字符串 | 159 |
| 10.1 字符串, 数组与指针 | 160 |
| 10.2 字符串的处理函数 | 162 |
| 第十一章 结构体 | 165 |
| 第十二章 文件输入输出 | 173 |

目录

| | |
|-------------------------|------------|
| 12.1 打开文件 | 174 |
| 12.2 字符和字符串读写 | 175 |
| 12.3 格式化读写 | 177 |
| 第十三章 其他内容补充 | 179 |
| 13.1 sizeof() | 180 |
| 13.2 typedef | 181 |
| 13.3 随机数 | 184 |
| 13.4 const | 186 |
| 第十四章 小型编程项目练习推荐 | 189 |
| 附录 A 附加信息 | 193 |

前言与说明

题释

佛家的世界观中,须弥山是世界中央的一座高山,“周遭为须弥海所围绕,高为八万由旬¹,深入水面八万由旬,基底呈四方形,周围有三十二万由旬”(《立世阿毗昙论·数量品》)。然而《维摩诘所说经·不思议品》中却说:“须弥纳芥子,芥子纳须弥。”也就是说小小的芥子,竟可以容纳大大的须弥山。

物质地讲,芥子不可能容纳须弥。我以为“芥子纳须弥”者,在于我心以芥子为发端,不断扩张心眼所见,最终把须弥纳入我心中。原来是我心可纳须弥,所以认为芥子可纳须弥。本指南题名《C 语言芥子观》,即取此意,希望这本小小的“芥子”,能作为读者攀登计算机领域这座“须弥山”的发端。待到读者攀到顶峰,将这座大山容纳进心中时,不也可以说是这本“芥子”容纳了“须弥山”了吗?

此外,C 语言语法简洁明快,功能却十分强大,在计算机发展史上发挥了巨大的作用,时至今日也在继续发光发热。也可以说,C 语言这“芥子”里,容纳了计算机诞生以来,多少惊人的巧思和多少了不起的创举。这些“须弥山”,且留待读者攀登。

如何阅读指南

我认为学习计算机最重要的一环在于动手做。一方面,计算机程序编译运行灵敏方便,读者可以很容易地实验,观察结果,调整总结;另一方面,亲自上手可以检验自己的理解,并体会微妙的细节。章节中给出的代码,读者可以自行编写并实验。一些章节后面会有编程实例小节,读者可以先编写代码再阅读,也可以边阅读边编写代码,并与给出的参考代码对照。第**十四**章也列举了一些大约需要十天完成的小型编程项目,读者可挑选其中一二编写,以融会贯通本书中学到的内容。

¹本义轭,代指公牛挂轭走一天的旅程。1 由旬在不同说法中等于 7 到 20 公里不等。

指南中你将学到

- 有关编程语言和计算机技术的基础知识.
- 如何使用 C 语言编写程序.
- 如何恰当地组织代码.
- 一些初等的编程思维.

关于格式的说明

指南中形如 * 标题 * 的节标题表示该部分内容为较复杂或较不常用的内容, 对完成一般的程序无较大影响, 初次阅读可跳过. 这些小节不会描述过多细节. 这些小节被放在章的末尾.

指南中形如这样地内容表示正文.

指南中形如这样的内容表示我对读者的建议.

- 指南中形如这样的内容表示准则或规范.

对象 指南中形如这样的内容表示对对象的说明.

指南中形如这样的内容表示强调或式子.

代码片段 1:

```
1 //指南中形如这样的内容表示代码.
```

指南中形如这样的内容表示程序输入, 输出和信息. 指南中不会列出所有代码的输出, 以期鼓励读者自行编写程序实验.

指南中形如这样的内容: <https://www.baidu.com> 表示链接, 可以点击跳转到对应的图, 表, 网页, 注释, 章节或其它支持跳转的组件. 部分 pdf 阅读器可能无法使用此功能.

代码中形如这样的内容表示涉及到 * 章节 * 的内容.

其它

指南中部分内容为了方便初学者理解, 在不损失主干的前提下做了简化, 并用脚注进行补充.

指南中难免有疏漏之处, 敬请读者谅解. 如遇错漏, 望能告知. 我的邮箱: wutong.tony@foxmail.com.

第一章

基础知识

1.1 进制的表示和转换

我们最常用的进制是逢十进一的十进制, 逢 N 进一的进制则被同理称作 N 进制. 一般地, 我们常用 $(a)_N$ 表示一个 N 进制数 a , 例如二进制数 101 就被表示为 $(101)_2$, 不加括号默认是十进制数. 此外, 我们也可以用 0b 或 0x 分别作为前缀修饰一个数, 以表示它是二进制数或十六进制数, 例如 0b101 表示二进制数 101. 大于十进制的进制, 用字母 A, B, C,...(或 a, b, c,...) 依次表示 10, 11, 12,..., 例如十六进制数 0xAF, 表示个位是 15, 十位是 10.

为了更深刻地理解进制, 让我们换一个角度看待十进制.

我们观察 263. 我们发现 2 表示 200, 即 2×10^2 ; 6 表示 60, 即 6×10^1 ; 3 表示 3, 即 3×10^0 . 即 $263 = 2 \times 10^2 + 6 \times 10^1 + 3 \times 10^0$. 可以看到每个数位上表示的数字都是数位上实际的数字乘以一个倍率. 我们把各个数位从右到左, 从 0 开始编号称为位次¹. 用表格来观察一下:

| | | | |
|----------|---|-----------------|-----------------|
| 位次 | 2 | 1 | 0 |
| 倍率 | 10^2 | 10^1 | 10^0 |
| 数位上实际的数字 | 2 | 6 | 3 |
| 数位上表示的数字 | 2×10^2 | 6×10^1 | 3×10^0 |
| 实际表示的数字 | $2 \times 10^2 + 6 \times 10^1 + 3 \times 10^0 = 263$ | | |

我们会发现

$$\text{十进制数} = \sum_{\text{各个数位}} \text{数位上实际的数字} \times 10^{\text{位次}},$$

也就是说, 十进制表示的数字是各个数位上实际的数字乘 10 的位次幂的和.

这是可以理解的, 因为某个数位上的数字增加了 1, 必然是因为前一个数位增加了 10 进位了; 而前一个数位增加了 10, 则必然是因为再前一个数位增加了 100 进位了... 如此这般, 某个数位上的数字增加了 1, 必然是因为位次为 0 的数位增加了 10 的该数位位次的幂. 而位次为 0 的数位增加 1, 就代表这个数字增加了 1. 所以十进制表示的数字是各个数位上实际的数字乘 10 的位次幂的和.

¹但我们也用第一位, 最后一位这样的词汇, 它们则通常表示从左往右排列的数码的对应位置, 例如 0101 的第一位是 0, 最后一位是 1. 读者可以通过上下文自行分辨.

第一章 基础知识

这个式子指出了十进制的计算方式. 我们可以同理推演到其它进制中.

例如对于二进制数:

$$\text{二进制数} = \sum_{\text{各个数位}} \text{数位上实际的数字} \times 2^{\text{位次}}.$$

那么 101 这个二进制数在十进制中的值就是 $1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 5$. 读者也可以用逢二进一的规则从 1 数到 5, 看看 5 对应的二进制数是不是 101.

更一般地:

$$N \text{ 进制数} = \sum_{\text{各个数位}} \text{数位上实际的数字} \times N^{\text{位次}},$$

这同样可以用我们之前的推演来解释和理解.

我们知道怎么把一个 N 进制数转化为十进制数了, 反过来, 我们怎么把一个数转化成 N 进制数呢? 这需要用到短除法. 我们把十进制数 A 不断除以 N , 直到得到的商为 0, 把得到的余数倒序排列起来, 就是所需要的 N 进制数了.

例如我们求 36926 的八进制表达:

$$36926 \div 8 = 4615 \cdots 6$$

$$4615 \div 8 = 576 \cdots 7$$

$$576 \div 8 = 72 \cdots 0$$

$$72 \div 8 = 9 \cdots 0$$

$$9 \div 8 = 1 \cdots 1$$

$$1 \div 8 = 0 \cdots 1$$

则 36926 的八进制表达为 $(110076)_8$. 读者不妨想想这是为什么.

一般地, 计算机中常用的进制有二进制, 八进制, 十进制, 十六进制.

特别地, 十六进制转化为二进制等价于把各数位上的数字表示的四位二进制

(不足四位的补零) 直接连接在一起, 例如

$$0xA87F = 1010\ 1000\ 0111\ 1111,$$

其中

$$0xA = 1010, 0x8 = 1000, 0x7 = 0111, 0xF = 1111.$$

不妨想想为什么.

基于这个性质, 我们查看二进制码时, 通常转换为十六进制码. 这样做不仅简短易读, 而且每个十六进制数位只与相应位置的四位二进制数一一对应, 而不受其它位置二进制数干扰. 例如 RGB 码每两位十六进制一组, 表示一种颜色的强度, 如 $0x39C5BB$, 如果需要调高红分量, 只需增大前两位 (39) 的数值, 而不受后四位绿分量和蓝分量的影响, 同理绿分量和蓝分量也不会因 39 增大而受影响.

1.2 信息与编码

能够消除不确定性的东西被称为信息. 例如我们去餐馆里吃鱼, 上菜后, 我们不知道上的鱼是什么鱼, 它有可能是草鱼, 有可能是鲢鱼, 也有可能是其它鱼, 于是问服务员“这是什么鱼?”, 如果服务员说“这是草鱼”, 于是原有的“这条鱼可能是草鱼, 也可能是鲢鱼或者其它鱼”的不确定性就被消除了, 服务员为我们提供了信息; 反之, 如果服务员说“反正不是大雁”, 那因为我们根据常理常情已经能判断这是鱼类, 而非某种大雁, 服务员的回答没有我们消除不确定性, 则回答中包含的信息几乎为零.

此外, 如果服务员说“反正不是鲤鱼”, 这也为我们消除了一些不确定性, 至少我们知道这不是鲤鱼了. 然而这个回答消除的不确定性显然没有“这是草鱼”的多, 这说明我们可以根据消除不确定性的多少来量化信息的多少, “这是草鱼”中所含的信息就比“反正不是鲤鱼”中所含的多.

但信息本身是无法被直接感知的, 表达信息者必须按照某种规则把它组织成特定的形式, 这个过程称为编码; 获取信息者则又按照相同的规定把这种形式还原为信息, 这个过程称为解码. 完成一次编码和解码, 才能算作一次信息的交流. 这种“规定”被称作编码规则, 这种“特定的形式”则被称为编码 (读者可通过上下文自行区分编码一词指动词词义的编码, 还是名词词义的编码).

例如前面提到的数字 263, 我们并没有真的写出了“数字 263”, 而是只写出了数字“2”, “6”和“3”, 并把他们排列在一起以表示“数字 263”. 那么我们怎么从这种“排列”中还原出信息“数字 263”呢? 我们可以通过前文提到的十进制转换的方法来把这种“排列”计算得到“数字 263”.

“数字 263”就是信息, 它是一种抽象的概念. “‘2’, ‘6’和‘3’的排列”就是编码, 它是可以表达“数字 263”的一种特定的形式. 信息的表达者使用十进制把“数字 263”表示为“排列”, 信息的获取者使用十进制把“排列”还原为“数字 263”, 所以十进制的转换规则就是一种编码方式.

但是编码和其对应的信息并无绝对关系, 不同的信息, 应用不同的编码规则, 可能得到相同的编码; 相同的编码, 应用不同的编码规则, 也可能得到不同的信息. 例如如果我们使用八进制的方法解释“2”, “6”和“3”的排列, 那么我们会认为 263 指示的数字是“数字 179”($(263)_8 = 179$). 可见, 如果只知道编码, 却不知道它是用什么规则进行编码的, 理论上等同于什么都不知道, 用错误的编码规则解码了编码, 得到的错误内容被称为乱码. 同理, 相同的信息也可以用不同的编码规则被编码为不同的编码, 例如“数字 263”既可以用十进制表示为“263”, 也可以用十六进制表示为“0x107”($263 = 0x107$).

需要注意的是, 我们也可以认为 263 表示的是“数字 1”, 因为编码规则理论上就是一套把编码转换为对应的信息的“对应”规则, 但这种“对应”的合理自然并不是其必然要求. 例如我现在发明一套编码规则: 任何编码都表示数字 1, 那么 263 就表示“数字 1”. 这是合法的编码规则, 只是这样的编码规则下我们不能表示除了“数字 1”以外的任何数, 这样的编码规则也没有什么价值.

事实上, “2”表示“数字 2”同样是一种编码规则. “数字 2”同样是信息, 而我们使用阿拉伯数字这种编码规则, 把现在上面写一个弯, 再到下面写一横的符号, 编码为“数字 2”. 我们也可以使用罗马数字的编码规则, 用“II”表示“数字 2”. 我们的文字, 语言同样是编码规则, 它们把我们的思维转换为特定的符号或声音序列. 可见, 编码规则并不总是和数学有关, 只要是能够建立编码到信息的对应关系的规则, 都可以被称为编码规则.

在编码长度一定, 编码方式一定的情况下, 一段编码可以表示的不同信息数量是有上限的. 我们这里只讨论进制的情况: 一个 M 位的 N 进制数, 总共可以表示 N^M 个数字. 这从排列组合上是可以理解的, 这个数字的每一位有 N 种可能, 总共有 M 位, 于是这个数字最多有 N^M 种可能编码, 而每一种编码对应一个特定的数字, 所以总共可以表示 N^M 个数字.

计算机学中, 也用数据来模糊地称呼信息和编码.

有兴趣的读者可以学习香农创立的信息论, 以了解更多关于信息的概念.

1.3 字符集

所有的数据在计算机中都是由若干二进制数表示的, 那么我们是怎么看到文字的呢?

答案是我们制定了若干套编码规则, 把字符按照一定规律编码为数字, 把字符编码为数字的编码规则叫做字符集. 例如我们现在发明一套字符集, 用 0 表示 “a”, 1 表示 “b”, ..., 25 表示 “z”, 26 表示空格, 那么 “i love u” 就在计算机中被储存为 “8 26 11 14 21 4 26 20”, 计算机显示文字时, 再把这串数字解码回字符并显示在显示屏上.

最早的字符集是美国国家标准协会 (ANSI, American National Standards Institute) 设计的 ASCII¹ (American Standard Code for Information Interchange, 见表 A.1). 它用一个字节 (8 位二进制数) 表示字符, 总共可以表示 $2^8 = 256$ 种字符 (但标准只规定了其中的 128 种, 因为标准中第一位总是为 0). 它能表示的字符包括英文字母, 数字, 常用符号和控制符. 虽然 256 乍听之下很多, 但世界各地的文本中, 非英文字母非常多, 更别说东亚语言例如中文, 有数十万个汉字, 每个汉字都需要一个单独编码表示. 显然 ASCII 标准不能通行于世界.

于是万国码 Unicode 应运而生, 他可以表示非常巨大数量的字符, 常见的标准由 UTF-8, UTF-16 等, 同时他向下兼容 ASCII 码, 即 ASCII 文本用 Unicode 标准打开能正确显示. 例如读者现在看到的中文就是 Unicode 标准表示的.

然而全世界的字符集至今没有统一为一个标准, 这就导致使用 A 字符集的文本, 被使用 B 字符集的软件解读时, 因为字符集不同而变成了乱码. 一般来讲, 不同的字符集不兼容东亚语言如中文, 所以会导致乱码; 而英文则是兼容的, 因此我们**建议**在代码中只使用英文, 并且文件路径也只包含英文, 否则可能导致乱码或错误. (但本指南中代码注释使用中文)

另外注意, 代码中的符号均为英文符号, 例如英文分号, 英文逗号, 英文引号, 英文括号.

¹读作 /'æski/

1.4 计算机的基本结构

在美国科学家冯·诺依曼提出的冯·诺依曼结构中, 计算机包括控制器, 计算器, 存储器, 输入设备, 输出设备¹. 控制器负责控制机器的动作和状态, 计算器对数据进行加减乘除等运算, 存储器存储程序, 中间结果等数据, 输入设备从外界将数据输入计算机, 输出设备将数据从计算机输出到外界.

简化地讲, 现代计算机 (下称计算机) 使用 CPU²实现控制器和计算器, 用内存和硬盘等实现存储器, 用鼠标, 键盘, 摄像头等实现输入设备, 用屏幕, 扬声器, 电机马达等实现输出设备. 计算机工作的流程被预先编码为程序存储在存储器中, 程序由大量 CPU 可以解码执行的指令组成, 运行时 CPU 依次读取指令, 并按照指令命令计算器和存储设备执行各类计算和数据流转, 输入设备获取数据, 输出设备输出数据.

计算机中的数据以字节 (Byte, 简称 B) 为单位, 1 个字节是一个 8 位二进制数, 每一位二进制数被称为 1 比特 (bit). $2^{10} = 1024$ 字节被称为 1 千字节 (KB), 1024KB 被称为 1 兆字节 (MB), 1024MB 被称为 1 吉字节 (GB), 同理有 $1024\text{GB}=1\text{TB}$, $1024\text{TB}=1\text{PB}$...

1.5 编程语言与编译

CPU 能够读取的指令是各类操作按照指令集编码成特定的二进制串, 这样的二进制指令码被称为机器码, 它们与计算机的操作一一对应. 但是机器码极其晦涩难懂, 用其编写程序低效且易错. 于是汇编语言被开发出来了, 汇编语言为指令起名, 称为助记符, 例如用 ADD 表示加指令, SUB 表示减指令, eax 表示 CPU 的某个寄存器 (一种小型存储单元), 执行前, 使用汇编器根据助记符和指令的对应规则, 将助记符替换为可被 CPU 理解执行的指令. 这样的过程叫做编译. 需要注意的是, 汇编和机器码之间的关系是一一对应的, 助记符只是机器码的一个容易记忆和理解的名字.

虽然汇编语言极大地提高了编程效率, 然而它依然十分晦涩且复杂, 因为要实

¹需要注意的是, 符合冯·诺依曼结构的东西不一定是现代计算机, 能够计算的东西也不一定满足冯·诺依曼结构, 也就是说, 能够计算的东西 \supseteq 符合冯·诺依曼结构的东西 \supseteq 现代计算机. 感兴趣的读者可以学习计算理论.

²Central Processing Unit 中央处理器.

现一个功能, 在计算机底层往往需要很多繁杂的步骤. 于是高级语言应运而生, 而汇编被称为低级语言. 高级和低级在此没有情感态度之分, 只表示二者的层级关系. 高级语言仍然使用了一定的符号规则, 执行前被编译为汇编指令, 而汇编又被编译为对应的机器码 (可执行文件, windows 系统下后缀为.exe) 供 CPU 执行. 这类需要先通过编译器编译为机器码的高级语言被称为编译型语言, 常见的编译型语言有 C, C++, Rust 等. 还有一类高级语言不以编译为基础, 被称为解释型语言, 例如 Python 等. 解释型语言由解释器逐句解释语句并执行, 而不需要先生成可执行文件.

高级语言与低级语言最大的不同在于, 高级语言通过逻辑关联建构其符号规则, 一条语句往往是逻辑完整的, 并被编译器通过一定的规则编译为实现该语句的若干条汇编. 例如汇编中 ADD 命令只表示将 ACC 寄存器和 X 寄存器的值加在一起, 并将结果存储进 ACC 中. 然而实际应用中我们往往需要把 a 位置的数据和 b 位置的数据加在一起, 并把结果写入 c 中, 于是这个操作就需要 a 移入 ACC, b 移入 X, 执行加指令, ACC 移入 c 四条汇编完成¹. 然而高级语言 (以 C 语言为例) 把这个命令写作 $c = a + b$; 一条语句, 编译时再由编译器将其对应编译为若干条汇编和机器码. 如此这般, 程序员往往只用专注于程序的逻辑过程, 而不用费心于这些逻辑在计算机底层是如何实现的, 这不仅使得程序员的思维更加连贯, 也通过编译器等计算机程序自动料理底层实现, 减少了因疏忽造成的错误.

这样将细枝末节交由计算机控制, 而把逻辑对象独立出来的做法被称为抽象. 一个优秀的程序员一定是善于进行抽象的, 只有如此才能使自己的思维从细枝末节中解脱出来. 例如手动挡车有一二三四五档, 驾驶员需要自己换挡, 而自动挡车的档位被抽象成了前进挡, 运动档等, 驾驶员只需要注意加速还是减速, 到达对应时速时计算机会自动换挡.

然而抽象也有其副作用, 交由计算机自行控制的细枝末节对程序员而言就透明了, 于是通过操纵更底层的对象以实现更精准的控制变为了不可能. 手动挡车在驾驶员车技高超时可以通过在适当时候换挡来减少油耗, 自动挡车的换挡功能却被交给计算机自动控制, 于是不能实现和驾驶员一样精细的操作, 增加了油耗. 同样的道理, 一个资深的汇编程序员往往能通过底层完成精细的优化, 从而写出运行更快的代码. 而高度抽象的高级语言如 Python, 往往运行十分缓慢.

我们把编程语言文本称为源代码或源码. 从机器码反推汇编源码是容易的, 因为汇编和机器码是一一对应的. 然而从机器码反推高级语言源码是极其困难的, 因为不仅多条机器码才对应一条高级语言语句, 而且编译器在编译过程中还会根据调

¹这里只是不符合实际的简化模型.

整生成的机器码顺序, 或删减一些多余的机器码, 以优化效率. 所以我们可以认为如果共享了源码, 那么任何人都可以修改程序, 如果只共享了可执行文件, 那么修改程序是几乎不可能的.

在发布自己的程序时同时公开程序源码, 以供他人自由修改和使用的做法被称为开源. 开源在商业上通常是不利的, 因为竞争对手可以通过阅读源码以窃取算法, 收费等限制也可以通过修改源码去除. 然而开源在程序员社区中是被鼓励的, 因为可以使优秀的算法被大众自由使用, 从而避免了重复劳动, 使得计算机世界可以以更低成本完成更高质量的工作. 历史上有自由软件运动和开源软件运动等运动促进开源. 抛开道德意义不谈, 开源是计算机界独特的共享文化, 塑造了一个活跃的计算机领域.

1.6 C 语言简介

1972 年, C 语言之父丹尼斯·里奇在贝尔实验室以 B 语言为蓝本, 开发出了 C 语言, 随后与 Unix 之父肯尼斯·汤普森一起用 C 语言重写了 Unix 内核. 至此, 恰如盘古开天辟地一般, 计算机发展史上最具里程碑意义的两件发明——C 语言和 Unix——诞生了. C 语言成为当时几乎所有开发使用的语言, 产生了新的代码哲学, 并在后世启发了几乎所有高级语言, 且至今仍然是世界主要编程语言之一.

C 是最接近低级语言的高级语言, 因为 C 中仍然可以通过指针调用底层结构, 这种不太高的抽象程度使得使用者可以以其它语言做不到的方式对底层进行调用和优化. C 语法简洁优雅, 功能高效强大, 犹如中餐大厨的菜刀, 只有一把, 却在善治刀者手中无所不能.

高级语言中, 和 C 亲缘关系最近的高级语言是 C++, 它是 C 的超集¹, 也就是说 C 的代码当作 C++ 也能正常运行. 这是因为 C++ 最早的设计理念就是 C 加上类 (C with class), 即在 C 中添加类这种新的语言设计. 虽然后来的发展二者却走上了不同的道路, 但学习 C++ 之前最好能先掌握 C.

C 语言源码文件常见后缀名为 `.c`, C++ 源码文件常见后缀名为 `.cpp` (C plus plus). 虽然后缀不同, 但源码文件只是普通的文本文件, 可以用记事本和其它文本编辑器打开.

¹事实上并不是, 例如 C++ 不支持变长数组. 把 C++ 称作 C 的超集只是一种习惯性的错误, 只是这种错误多数情况下是正确的. 初学者无需太在意.

此外, 1982 年为了使 C 语言能够健康地发展下去, 美国国家标准委员会成立了 C 语言委员会, 向 C 语言添加新的语法和特性, 不同版本的 C 常以它们发布的年份的后两位进行命名, 如 1989 年发布的 C89, 1999 年发布的 C99, 2011 年发布的 C11 等. 本指南采用 C99 标准.

1.7 信息的查询

对于程序员而言, 最重要的一项能力或许是信息的查询. 因为计算机学科与传统学科相比, 一方面有着快速迭代, 知识量巨大的特点, 于是几乎不可能精通每一个细节; 另一方面又有着社区庞大, 交流活跃的特点, 所以遇到无法解决的问题, 查询是最好的方法.

查找有一些技巧:

- 不要使用百度. 使用必应, 或者可能的话使用谷歌.
- 尽量使用英文搜索.
- 查找官方手册, 而非经过媒体加工的网页.
- 搜索时直接输入关键词, 中间用空格隔开. 例如不要搜索 “C 语言编译时遇到段错误怎么办?”, 而是搜索 “段错误 C”.

此外, 必要时需要询问有关人员时, 也有一些技巧:

- 先试图自行解决, 不要遇事先问人.
- 贴全信息. 把源代码, 错误信息, 自己做过的尝试等以附加信息形式补全.
- 不要使用情绪化表达.

小结

- 逢 N 进一的数制叫作 N 进制. 进制之间可以通过加权求和或者短除法进行转换. 计算机领域常用二进制, 八进制, 十进制和十六进制.

- 信息是可以消除不确定性的东西。信息通过编码规则编码成编码，编码又同理通过编码规则解码回信息。进制，字符集，机器码，文字，语言都是编码规则。
- 高级语言程序通过编译变为机器码，以供 CPU 中的控制器执行，控制计算机的运行。高级语言蕴含着一种重要的思维方式：抽象。抽象有利有弊。
- 开源创造了一个活跃的计算机社区，我们也要擅长利用计算机社区解决问题。

第二章

你好，世界！

用输出 “Hello, World!” 作为测试程序的做法最早可见于 1978 年出版的书籍 *The C Programming Language*, 而后成为了程序界的传统. 程序员往往使用输出 “Hello, World!” 作为上手新语言的第一个程序, 以测试环境配置是否完善, 以及使用者是否已初步理解该语言的语法. 本章也将遵循此传统, 带领读者创建并运行第一个 C 语言程序——一个输出 “Hello, World!” 的程序.

2.1 IDE

我们已经在前面的章节提到了编译器. 实际开发中, 除编译器外, 我们还会用到文本编辑工具, 调试工具等等配套工具, 以增加开发效率. 我们把配套的代码开发工具称为集成开发环境 (IDE, Integrated Development Environment). 读者可以把 IDE 理解为工作台. 本节中我们将介绍三种常用 IDE 及其安装.

值得注意的是, 虽然本节中的 IDE 都同时支持 C 和 C++, 我们把 C 语言代码写在 C++ 文件中, 并用 C++ 编译器编译, 一般是没问题的, 但我们不建议读者这样做.

DevCpp

一款轻量级的简单 IDE, 配置简单, 基本可以满足初学者的需求, 也被广泛应用于信息学奥林匹克竞赛. 推荐.

安装地址: <https://sourceforge.net/projects/orwelldevcpp/>. 初次启动需选择配置, 除语言外全部默认即可.

VS Code

一款轻量级, 高扩展的多语言 IDE, 可以通过安装扩展或写脚本的方式自定义功能, 是目前世界范围内被最广泛使用的 IDE. 但是不自带 C 语言编译器, 需自己安装并配置. 具体请自行研究. 推荐.

安装地址: <https://code.visualstudio.com/>.

Visual Studio

一款重量级, 面向工程项目的 IDE, 功能强大且复杂, 初学者几乎都用不到, 且体积巨大. 不推荐.

安装地址: <https://visualstudio.microsoft.com/zh-hans/vs/>.

安装并打开 IDE 后, 创建新文件, 命名为 `HelloWorld.c` 并打开, 在出现的界面里就可以输入代码了.

2.2 主函数和语句

C 语言程序中必须有并且只有一个 `main` 函数, 被称为主函数. 主函数是程序的入口, 程序总从主函数开始运行. 我们在刚刚创建的文件中输入:

```
1 int main(){
2
3     return 0;
4 }
```

这就是一个最简易的程序了.

其中, 第一行 `int main()` 表示这里是主函数的开始, 然后用一对大括号包裹主函数的内容.

第三行 `return 0;` 表示主函数结束并返回 0, 它后面用一个分号作为结束. 这样以分号作为结束的代码被称为语句, 不同的语句可以完成特定的功能.

读者尚不能理解“函数”“返回”等概念, 就暂且把这当作固定语法, 表示程序的开始和结束. 在完成第七章的学习后, 读者就能理解这些概念了.

2.3 头文件

头文件是包含了特定功能的文件, 常常以 `.h` 作为后缀, 也被称为库. 通过引用它们, 我们可以使用其中的功能. 其中, 按照 C 语言标准被预置在编译器中的头文件被称为 C 语言标准库¹.

我们想要使用输出功能以输出 `Hello, World!`, 就需要引用标准库 `stdio.h`. 这个标准库是 `Standard Input and Output` 的缩写, 包含了常用的输入输出功能.

要想引用一个头文件, 我们需要在代码最开头使用 `#include` 命令, 其后接着用尖括号 `<>` 或双引号 `" "` 包裹的头文件名. 被引用的对象可以是被内置在编译器中的 C 语言标准库, 也可以是我们自定义的头文件. 我们建议总是用尖括号包裹 C 语言标准库. 由于我们不涉及多文件编程, 如何自定义头文件和双引号包裹头文件的作用我们略过.

综上, 我们在代码的最开头添加上 `#include <stdio.h>`, 添加后形如:

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int main(){
4
5     return 0;
6 }
```

这样, 我们就引用了 `stdio.h`, 并能在后续的代码中使用输出功能了.

2.4 空白符和注释

我们注意到, 我们的代码中被添加了若干个空格, 空行和缩进 (按 `tab` 键输入), 它们被称为空白符. 多余的空白符会在编译的第一个阶段被去除, 因此, 我们可以在代码的任意地方 (除了单词之间) 添加任意多个空白符.

空白符有其作用, 我们观察下面两段程序:

¹ 参见菜鸟教程: <https://www.runoob.com/cprogramming/c-standard-library.html>.

第二章 你好, 世界!

```
1 int main(){
2     int a = 0, b = 1;
3     int c = a + b;
4
5     return 0;
6 }
```

```
1 int main(){
2     int a=0,b           =1;
3     int c=a+ b;
4 return 0;
5 }
```

根据空白符规则我们知道, 两段程序语义完全一样, 但第一段程序整洁有序, 第二段程序杂乱恼人. 这说明恰当添加空白符可以使代码整齐, 干净, 并且能让逻辑结构更加清晰, 便于阅读和修改. 我们**建议**读者使用如下的空白符规则:

- 每一个进入一个大括号内部, 所有语句添加一个缩进.
- 运算符两端各添加一个空格.
- 逗号, 分号后添加一个空格.
- 不同逻辑部分之间用空行隔开, 但空行不多于两行.

此外, 我们还可以为代码添加注释. 注释以//开头, 直至行尾, 或以/**/包裹. 编译时, 它们会被当作空白符删掉, 所以我们可以注释中书写任意内容. 例如下面的例子:

```
1 /*
2     这是一段示例程序.
3 */
4
5 int main(){
6     int a = 1; // 定义变量a, 将其赋值为1.
7     return 0;
8 }
```

我们可以在注释中添加对代码的解释和标注, 提高代码的可读性.

此外, 调试代码时, 有时需要临时去掉一部分代码. 我们这时可以将其注释掉, 这样在编译时它们就会被忽略. 我们也可以使用快捷键: 先选中需要被注释掉的代码, 然后使用 `ctrl+/` 即可将其注释掉, 再使用一次 `ctrl+/` 即可使被注释掉的文本恢复.

2.5 警告与错误

当我们的程序有语法错误, 无法正常编译时, 编译器会停止编译, 并抛出一个错误, 错误信息会告知我们错误的位置和原因, 我们需要解决错误以完成编译.

例如我们试图编译下面的程序:

```
1 int main(){
2     int a;
3     int a;
4
5     return 0;
6 }
```

编译器会抛出错误, 错误信息¹为:

```
foo.c: In function 'main':
foo.c:3:9: error: redeclaration of 'a' with no
      linkage
   3 |     int a;
     |         ^
foo.c:2:9: note: previous declaration of 'a' was
      here
   2 |     int a;
     |         ^
```

告知我们在 `foo.c` 这个程序的的 `main` 函数的第 3 行出现重复定义的错误, 编译中

¹不同的编译器给出的错误信息格式不同, 读者得到不同的错误信息, 但大体上是一个意思.

断.

警告与错误类似, 当我们的程序出现可能具有歧义, 或明显的语义错误时, 编译器虽然会完成编译, 但会抛出警告, 警示程序员. 如果程序员清楚的知道自己的程序没有问题, 而是编译器误报了, 那么可以忽略警告. 但一般来讲, 出现警告往往意味着程序有不严谨的地方, 我们**建议**读者解决每一个警告.

例如我们试图编译下面的程序:

```
1 int main(){
2     int a = 0;
3
4     a = a++ + ++a;
5
6     return 0;
7 }
```

编译器虽然完成了编译, 但会抛出以下警告¹:

```
foo.c: In function 'main':
foo.c:4:7: warning: operation on 'a' may be
      undefined [-Wsequence-point]
    4 |     a = a++ + ++a;
      |     ~~^~~~~~
```

告知程序员, 第 4 行对变量 a 进行的运算可能存在问题.

错误和警告的品类十分繁杂, 指南中将提到其中常见的, 其余未提到的读者可根据报错信息自行搜索解决.

2.6 第一个 C 语言程序

接下来, 我们使用 `stdio.h` 中提供的 `printf()` 函数来输出 `Hello, World!`.

我们在主函数中加上 `printf("Hello, World!");` 语句, 这个语句表示将 `Hello,`

¹也可能不抛出警告, 取决于对编译器的设置.

World! 输出到控制台中, 添加后形如:

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int main(){
4     printf("Hello, World!\n");
5
6     return 0;
7 }
```

然后根据安装的 IDE 的操作方式编译源文件. 现在我们源代码同目录中应该有一个 HelloWorld.exe 文件, 双击运行.

读者应该看到一个黑框一闪而过. 这是因为我们的程序运行的非常快, 它输出完 Hello, World! 后就立刻关闭了, 所以我们看不见输出内容. 我们需要让它在输出后等待. 现在, 我们将代码改成:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     printf("Hello, World!\n");
6     system("pause");
7
8     return 0;
9 }
```

我们引用了另一个头文件 `stdlib.h`(STanDard LIbrary), 并使用了其中 `system()` 函数使程序暂停. 再次编译并运行, 我们应当看见:

```
Hello, World!
按下任意键继续...
```

“按下任意键继续...” 即是 `system("pause");` 语句的效果. `system("pause");` 在指南后续还会出现, 但我们将略去输出中的 “按下任意键继续...”.

至此, 我们的第一个 C 语言程序完成了. 你好, 世界!

小结

- 每个程序必须有且只有一个主函数, 它是程序的开始执行的地方.
- 头文件包含了特定功能, 通过引用它们我们可以使用这些功能. 其中按照 C 语言标准被预置在编译器中的头文件被称为标准库. 标准库 `stdio.h` 可以提供输入输出功能.
- 空白符和注释对程序语义没有影响, 但可以使程序变得整洁美观.
- 错误是使程序无法完成编译的语法错误. 警告是编译器认为存在歧义或存在问题的语义错误.

第三章

变量

3.1 变量和声明

变量是 C 语言中的基础, 它就像一个容器, 我们可以使用它储存数据. 我们在使用一个变量前, 首先要声明它, 告知编译器这是一个变量, 它的语法形如

类型 标识符;

其中 类型是这个变量的类型, 例如储存整数的 `int`, 储存实数的 `double`. 标识符是这个变量的名字, 在后文中出现时, 指代我们声明的这个变量. 具体将在后文讲解. 例如下面的例子

```
1 int main(){
2     int a; // 声明一个变量, 数据类型为int, 名字为a.
3
4     return 0;
5 }
```

在一个变量使用前, 必须先声明. 否则编译器不知道我们在指代什么, 是非法的; 而同一个标识符被声明多次也是非法的. 例如下面的例子会报错:

```
1     int main(){
2         a = 7; // 未声明a却使用了a.
3
4         int b;
5         double b; // 声明了两次b.
6
7         return 0;
8     }
```

对变量最基础的操作是赋值, 一个赋值语句形如

标识符 = 初始值;

赋值操作会把 标识符指代的变量储存的值更新为 初始值。注意, 这里的等号和数学中的等号含义并不相同。详见第3.11节。例如下面的例子:

代码片段 三.1:

```
1 int main(){
2     int a; // 声明一个int型变量a.
3     a = 1; // a的值更新为1, 后文中再使用a时, 就表示1
4
5     int b; // 再声明一个int型变量b.
6     b = a; // 把b的值更新为a的值, 即此时b的值为1
7
8     return 0;
9 }
```

此外, 变量也可以在声明时被赋值, 称为初始化, 语法形如

类型 标识符 = 值;

例如代码三.1可以写作

```
1 int main(){
2     int a = 1;
3
4     int b = a;
5
6     return 0;
7 }
```

我们**建议**, 总是初始化每个变量为一个默认值, 例如总是把每个变量初始化为0.

注意, 我们可以一次声明多个变量, 并初始化其中的若干个。例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a = 10, b; // 声明int型变量a, 初始化为10; 再
    声明int型变量b.
3     float c; // 声明float型变量c.
4     return 0;
5 }
```

3.2 标识符和关键字

标识符的命名需要遵循:

- 由英文大小写字母, 数字, 下划线组成.
- 不能以数字开头.

另外, C 语言还保留了一些词, 用于帮助编译器识别语法结构, 例如 `if` 和 `for`. 我们的标识符也不能和它们重名, 否则编译器会误以为是语法单元, 而发生意料之外的错误. 我们将在后面的学习中学到更多关键字. 所以还有下面一条规则:

- 不能和关键字重名

例如这些都是合法的标识符名称:

`abc, str1, _this_one, EnjoyYourself, m1xYm01Kp`

这些都是不合法的标识符名称:

`123, 2p, wutong.tony@foxmail.com, for`

需要注意的是, 标识符的名称是大小写敏感的, 例如 `hello` 和 `Hello` 会被看作两个不同的标识符. 例如下面的例子会报错:


```
1 int main(){
2     int hello = 0, res;
3     res = Hello + 5;
4
5     return 0;
6 }
```

然而合法的标识符名称中, 大家可以看到有的语义不明或混乱, 有的则语义清晰. 当一个项目有数千数万个标识符时, 一个优秀的命名规范能够帮助 coder 和维护者理解每一个变量的用途, 而不用根据上下文或注释进行猜测. 所以虽然原则上合法的标识符名称都可以编译通过, 但我们仍然**建议**大家使用如下的命名规范:

- 使用英文命名, 不要参杂汉语拼音和其它语言.
- 对于每一类标识符, 使用统一的命名方法.
- 当一个标识符的使用贯穿全文时, 使用复杂的命名指明它的作用; 当一个标识符只是短暂使用时, 使用简洁的命名.
- 尽可能简明扼要的说明这个变量的用途.
- **不推荐**在变量有明确意义时, 使用诸如 `a1`, `a2`, `a3` 这样没有意义的命名, 甚至混用表示几个风马牛不相及的变量.
- **不推荐**在没有使用统一缩写标准时, 大量使用缩写.
- **不推荐**使用过长的命名.

其中命名方法包括下划线命名法, 大驼峰命名法, 小驼峰命名法等. 以 “how do you like it” 的命名为例, 不同的命名方法下分别写作:

下划线命名法: `how_do_you_like_it`

大驼峰命名法: `HowDoYouLikeIt`

小驼峰命名法: `howDoYouLikeIt`

我们**建议**对于变量的命名, 使用下划线命名法. 但是注意这里的命名显然太长了, 只是为了演示不同命名方法才使用的. 当然, 读者现在还不能明白各类变量的命名传统是什么, 但在随后的学习中我们会逐步体会到的.

3.3 数据类型

每个变量都有自己的数据类型, 是在声明时就确定的, 不可更改的. 不同的数据类型有不同的表示范围, 当我们试图用它们表示超出自己表示范围的值时, 会发生意料之外的错误, 称为溢出.

C 语言定义了几种基本的数据类型, 包括:

整型 包括 `int`¹, `short`, `long`, 用于表示整数. 一般使用 `int`; 当需要减小内存开销, 且需要表示的整数的范围较小时, 使用 `short`; 当需要表示的整数范围很大时, 使用 `long`. 一般使用 `int` 即可.²

浮点型 包括 `float` 和 `double`, 用于表示实数³. `float` 精度较低, 但占用内存小; `double` 精度较高, 但占用内存多. 一般使用 `double` 即可.

字符 `char` 类型, 用于表示字符. 它只能表示 ASCII 字符, 并且实质上是很短的整型.

无类型 `void` 类型. 在后续学习中会出现.

不同的数据类型的变量在内存中占用的空间也不同 (见表A.2). 读者无需立即记住这些信息, 但一个优秀的程序员对各个类型占用的内存应该心中有数.

3.4 整型

我们知道 `int` 类型占用 4 个字节, 即一个 32 位的二进制数. 那么理论上 `int` 总共可以表示 $2^{32} - 1 \approx 4.6 \times 10^9$ (46 亿) 个数.

所以 `int` 的表示范围其实很大, 在实际应用中往往很难超出限制, 并不需要过多使用 `long`.

¹整数 `integer` 的缩写

²`short` 也可写作 `short int`, `long` 也可写作 `long int`

³严格地说, 浮点数只能表示一部分的有理数. 但因为计算机科学是允许合理误差的, 那么在误差范围内我们认为它们表示实数.

我们为整型变量赋值时,也可以使用第1.1节中提到的不同进制表示方法.除了提到过的 0b 和 0x 外,我们还可以用 0 作为前缀表示八进制,但这并不是标准语法.例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a = 20;           // 十进制
3     int b = 0x14;         // 十六进制
4     int c = 0b00010100;   // 二进制
5     int d = 024;          // 八进制
6
7     return 0;
8 }
```

需要注意的是,二进制的整型常量表示法不是 C 语言标准,并不是所有编译器都支持的,使用时需谨慎.

整型也支持负数,它的表示范围从 0 开始,向正负两端对称扩展,所以 int 的实际表示范围是

$$-2^{31} + 1 \sim 2^{31} - 1$$
¹

例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a = 10;
3     int b = -4;
4     int c = a + b; // c = 10 - 4 = 6
5
6     return 0;
7 }
```

当我们能够保证某个变量一定非负时,我们可以在声明时在类型前加上 unsigned 修饰,表示这是一个无符号数,那么这个变量的表示范围就会被拓展到

$$0 \sim 2^{32} - 1$$

¹读者可能已经发现,整型实际可以表示的总数比整型总共可以表示的总数少了一个,这是因为 0 和 -0 被看作了两个数.这和整型储存格式有关.

但与此同时它也不再能表示负数, 否则会报错. 特别地, `unsigned int` 也可以简写为 `unsigned`. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     unsigned int a = 10;
3     unsigned b = 15;
4     unsigned short c = 1234;
5     unsigned long int d = 0;
6
7     return 0;
8 }
```

3.5 浮点数

浮点数常量有两种表示方法.

第一种形如 `a.b`, 其中 `.` 是小数点. 当 `b = 0` 时, 我们仍然要把 `.0` 写出来, 来显式地表示这是一个浮点数而不是整型; 当 `a = 0` 时 `a` 是可以省略的. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     float a = 3.14;
3     float a = 2.0;
4     double b = .3; // b = 0.3
5     double c = -2.5;
6
7     return 0;
8 }
```

第二种形如 `aEn` 或 `aen`, 表示

$$a \times 10^n.$$

例如下面的例子:

```
1 int main(){
```

```
2     float a = 314E-2;    // a = 3.14
3     double b = 3e2;      // b = 300
4     double c = -2.5E-3;  // c = -0.0025
5
6     return 0;
7 }
```

浮点数也可以用 `unsigned` 修饰:

```
1 int main(){
2     unsigned float a = 0.3;
3
4     return 0;
5 }
```

需要注意的是浮点数有精确度问题, 这和浮点数储存格式有关. 例如 `double` 型的 3.14 在内存中的实际值是 3.140000000000000124. 虽然误差很小, 但在多次参与运算后, 这些误差累积起来可能给结果产生可观测误差, 从而导致错误结果. 所以在要求精确的程序中, 我们一般不使用浮点数; 而在允许误差的工程代码中, 浮点数有更广泛的应用.

3.6 整型和浮点数

整型和浮点数可以相互赋值, 程序会先自动把浮点数转换为整型, 把整型转换为浮点数. 注意, 浮点数转换为整型时会向下取整. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a = 5;
3     double b = 2.5;
4
5     double c = 4; // c = 4.0
6     int d = 3.14; // d = 3
7
8     c = a; // c = 3.0
9     d = b; // b = 2
```

```
10
11     return 0;
12 }
```

另外, 整型常量的默认类型为 `int`, 我们可以在它们后面加上 `l` 或 `L` 修饰, 来表示这是一个 `long` 类型的整型. 浮点数常量的默认类型为 `double`, 我们可以在它们后面加上 `f` 或 `F` 修饰, 来表示这是一个 `float` 类型的浮点数. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a = 10L;
3     double b = 2.5f;
4
5     return 0;
6 }
```

读者注意, 把浮点数赋值给一个整型变量是不会警告的, 所以在写代码时一定要注意变量的类型, 不然容易导致 BUG 而且需要在 DEBUG 上 (消除 BUG) 浪费很长时间.

3.7 字符

字符常量总是用一对单引号 `''` 包裹, 内部只包含一个字符. 这个字符必须是 ASCII 标准规定的 128 种字符之一.¹

例如这些都是合法的字符常量:

`'a'`, `'#'`, `'8'`

这些都是不合法的字符常量:

`'ab'`, `' 吴 '`

¹但是并非每种 ASCII 字符都可以显示, 部分 ASCII 字符是控制符.

字符变量定义的例子:

```
1 int main(){
2     char ch = 'a';
3
4     return 0;
5 }
```

而字符变量和字符常量本质上都是整型 (只是表示范围很小), 它们的值就是字符对应的 ASCII 码 (详见表A.1). 故字符和整型可以互相赋值, 进行计算. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a = 'p'; // p的ASCII值为112, 故a的值为112.
3     char b = 85; // 85对应的ASCII码为U, 故b的值为'U'
4     int c = 'b' + 3 // b的ASCII值为98, 故c = 98 + 3
5                     = 101.
6     return 0;
7 }
```

需要注意的是 3 和 '3' 是不同的东西. 前者表示数字 3, 后者表示字符'3'. 前者的实际值为 3, 后者的实际值为 51 (3 的 ASCII 值).

这里有一个小技巧, 可以把字符转换为它对应的数字, 或者把数字转换为它对应的字符:

```
1 int main(){
2     int val1 = '3' - '0';
3     int val2 = '7' - '0';
4     // val1的值为3, val2的值为7.
5
6     char ch1 = 3 + '0';
7     char ch2 = 7 + '0';
8     // ch1的值为'3', ch2的值为'7'.
9 }
```

```

10     return 0;
11 }

```

这个技巧之所以成立, 是因为 ASCII 码中 0~9, a~z, A~Z 都是顺序排列的. 所以用一个数字的字符减去 '0', 就是这个字符相对于 0 是第几个, 就恰好是这个字符对应的数字. 反之亦然.

这也是抽象思维的体现. 我们并不需要关心 '0' 的 ASCII 码具体是多少, 但我们可以通过逻辑推演把它形式化地运用.

同理, 可以用这个技巧数出一个字母是第几个字母:

```

1 int main(){
2     int order_of_e = 'e' - 'a' + 1; // order_of_e =
        5
3     // 加1是由于表达式 'e' - 'a' 是从0开始计数的.
4
5     return 0;
6 }

```

字符也有另一种表示方法, 称为转义符, 通过一个反斜杠加上数字, 来表示这个数字对应的 ASCII 码. 这个数字是八进制数, 如果数字前加上 x 则是十六进制数. 例如下面这个例子:

```

1 int main(){
2     char a = '\141'; // 字符 a
3     char b = '\x61'; // 字符 a
4
5     return 0;
6 }

```

如果转义符后的数字大于 255, 编译器会报错.(超过 ASCII 表示范围)

转义符也可以用来表示一些直接使用会导致歧义的字符, 例如 ' 直接表示会是 ''', 编译器会认为前两个引号表示一个字符, 第三个引号是语法错误. 故我们用 \' 表示它. 同理反斜杠自身如果直接表示为 \' 会被编译器认为和后面的引号共同构成了转义符引发语法错误, 故反斜杠也需要转义表达为 \\. 其它还有 \", \% 等 (后面会介绍它们作为语法单元的用法). 例如下面的例子:


```
1 int main(){
2     char a = '\\';
3     char b = '\"';
4     char c = '\\';
5     char d = '\\%';
6
7     return 0;
8 }
```

此外, 还有一些常用的转义符如\n 表示换行, \t 表示缩进. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     printf("abc\n"); // 输出abc后换行.
6     printf("\t\tk"); // 进行两次缩进后输出k.
7     system("pause");
8
9     return 0;
10 }
```

3.8 字符串

一个字符串常量总是被一对"" 包裹, 内部包含若干个字符, 内部字符的规范和字符相同. 字符串的类型为 `char[]` 或 `char*`, 但我们还没有学习数组 (详见第六章) 和指针 (详见第九章), 读者暂时无法理解它们的含义. 这里只是简单介绍字符串, 细节我们将放在第十章.

下面是字符串定义的例子:

```
1 int main(){
2     char str2[] = "CuWO4";
3     char *str1 = "C语言入门指南";
4 }
```

```
5     return 0;  
6 }
```

读者先把这两种定义方式背住即可.

3.9 运算

C 语言中对变量, 常量和其它量的操作叫做运算. 例如数学运算符 $+$, 赋值运算符 $=$, 逻辑运算符 $\&\&$ 等. 运算对若干个量进行运算, 并得到一个结果. 被运算的量叫做操作数, 运算和它的操作数构成的式子叫做表达式, 运算的结果称为返回值, 表达式的值等于运算的返回值.

例如

$$3 + 5$$

这个表达式, 3 和 5 是操作数, $+$ 是运算, 表达式的值 8.

表达式也可以作为另外一个运算的操作数, 例如

$$2 * (3 + 5)$$

中乘运算 ($*$) 的第二个操作数就是刚刚的表达式. 整个表达式会先计算括号内的表达式, 得到结果 8, 然后再代入乘运算的表达式得到 $2 * 8$, 再计算乘运算后得到整个表达式的值为 16.

有 N 个操作数的运算符称为 N 目运算符. 例如上面提到的加运算和乘运算是二目运算符. 一目运算符 (又被称为单目运算符) 例如负号运算 ($-$), 例如下面这个表达式

$$-5$$

就是负号运算符作用于操作数 5, 得到表达式的值为-5. 其它的单目运算符例如后面将讲到的非运算符!

C 语言中只有一个三目运算符, 但较不常用, 涉及的运算也暂时不需要介绍, 详见第5.7节.

运算符的作用有先后顺序, 按照不同运算符的优先级, 优先计算级别更高的运

第三章 变量

算。例如读者熟悉的四则运算，乘除优先级更高，总是先计算；加减优先级更低，总是后计算。例如下面这个表达式

$$5 - 3 * 2$$

中，乘运算优先级更高，先计算得到 6，然后再计算减运算，得到整个表达式的值为 -1。

同级运算符的计算遵循结合性，左结合的运算符先计算左边，右结合的运算符先计算右边。例如四则运算都是左结合的，同级运算符从左到右依次计算。例如下面这个表达式

$$2 + 3 - 7$$

中，加运算和减运算优先级相同，都是左结合的表达式，故优先计算加运算得到 5，再计算减运算得到整个表达式的值为 -2。

当我们想优先计算部分表达式时，我们可以为它加上括号。括号内部的运算符依照优先级和结合性计算得到值，再参与括号外的运算。例如下面这个表达式

$$3 + (5 - 2 * 5)$$

中，括号内部的运算符依照优先级和结合性计算得到表达式的值为-5，再参与括号外的加运算得到整个表达式的值为 -2。

另外，包含表达式的括号也可以看作表达式，所以可以为一个表达式添加多层括号，也可以在单独表达式外添加若干层括号，虽然我们**不推荐**这样做。例如下面的表达式

$$(((2 + ((1 * 3))))))$$

和表达式

$$2 + (1 * 3)$$

是等价的。

我们不厌其烦地用小学数学作为例子阐述优先级，结合性和括号，是希望读者能够理清思路，否则可能找来混乱。读者将在后文中看到这么做的必要性。

表A.3展示了所有运算符的优先级，读者不用背住，后面的章节会介绍常用的运算符优先级，其它不清楚时查表即可。

3.10 数学运算

C 语言中的数学运算包括单目运算符正号 `+` 和负号 `-`, 以及四则运算加法 `+`, 减法 `-`, 乘法 `*` 和除法 `/`, 以及取余运算 `%` 七种. 读者在前面已经见过它们中的一些的简单应用了, 本节中将介绍若干细节.

正号和负号

正号运算符是单目运算符, 返回它后面的表达式的值, 几乎没有使用场景. 负号运算符返回它后面的表达式的相反数. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a = +3; // a = 3
3     double b = -(1.5 + 1.1); // b = -2.6
4
5     return 0;
6 }
```

加法, 减法和乘法

加法运算符可以求两个数的和, 减法运算符可以求两个数的差, 乘法运算符可以求两个数的积, 我们在前面已经见过了. 特别地, 当它们的操作数一个为整型, 一个为浮点数时, 它们会先把整型转换为浮点数, 然后进行两个浮点数的加, 减或乘, 最后返回一个浮点数, 即使结果是整数. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     double a = 2.1 * 10; // a = 21.0
3     double b = 1.8 + 2; // b = 3.8
4
5     return 0;
6 }
```

除法

类似于加法, 减法, 乘法, 除法在两个操作数一个为整型一个为浮点数时, 会把整型转换为浮点数, 并返回浮点数除浮点数的结果. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     double a = 7.5 / 4.5; // a = 1.666...67
3     double b = 5 / 4.0; // b = 1.25
4     double c = 6 / 3.0; // c = 2.0
5
6     return 0;
7 }
```

然而除法相较于其它三种四则运算要复杂一些, 因为它在整数上是不封闭的, 也就是说两个整数相除可能得到非整数. 对于这种情况, C 语言会在整数除整数, 返回二者的商向下取整, 即整除. 换言之, 如果有式子

$$a \div b = k \cdots m, \quad a, b, k, m \in \mathbb{Z},$$

那么 a / b 的结果为 k .

例如,

$$11 \div 3 = 3 \cdots 2,$$

则 $11 / 3$ 的结果为 3. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     double a = 11 / 3.0; // a = 3.666...67
3     int b = 11 / 3; // b = 3
4
5     return 0;
6 }
```

注意, 这不是错误行为, 而是某些情况下正确且必要的写法.

取余

取余运算是一个二目运算符, 操作数必须为两个整型, 它返回第一个数整除第二个数的余数. 换言之, 如果有式子

$$a \div b = k \cdots m, \quad a, b, k, m \in \mathbb{Z},$$

那么 `a % b` (读作 a 模 b) 的结果为 m.

例如,

$$11 \div 3 = 3 \cdots 2,$$

则 `11 % 3` 的结果为 2. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a = 7 % 2; // a = 1
3
4     return 0;
5 }
```

取余运算 (也称模运算) 的常见应用包括结合其它运算可以判断一个数的奇偶. 将在第[五](#)章中介绍.

3.11 赋值运算

赋值运算符 `=` 会把右侧的值赋值给左边, 需要注意:

- 左边的表达式必须是可修改的.
- 左右的表达式必须是相同类型的.

例如下面的例子都是非法的:

```
1 int func(){
2     return 10;
3 }
```

```
4
5 int main(){
6     int a = 2, b = 3;
7
8     a + b = 10; // 错误, 左边的表达式不可修改.
9     10 = 5; // 错误, 左边的表达式不可修改.
10    a = func; // 错误, 左右表达式类型不同
11
12    return 0;
13 }
```

整型和浮点数可以相互赋值是因为它们在赋值前被自动转换成了对应的类型, 而非它们是相同的类型. 字符和整型可以赋值是因为字符本质是整型.

我们再来看一段代码:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 1;
6
7     printf("%d\n", a); // 输出a.
8
9     a = a + 5;
10
11    printf("%d\n", a); // 输出a.
12
13    system("%d\n");
14
15    return 0;
16 }
```

读者可以先试着编译运行上面的代码. 可以看到, 结果输出了

```
1
6
```

也就是说, 经过第 6 行这行奇怪的数学上“不成立”的式子, `a` 的值由 1 增长了 5, 变为了 6.

事实上, 前文花这么多笔墨介绍运算过程, 就是因为 C 语言中的运算和数学运算相近但不全相同. 只有了解了底层机制, 才能理解一些看似“奇怪”的行为.

我们观察这个表达式, 表达式中有赋值运算和加运算, 查表可知加运算优先级更高, 故先处理加运算, 得到结果 6, 再把 6 代入赋值运算中, 表达式变为 `a = 6`, 再处理赋值运算, `a` 的值变为 6. 所以因为运算执行的先后关系, 这个表达式的含义就是 `a` 自增 5. 这就是前文所谓的“赋值运算和数学中的等号不是一个东西”的含义.

C 语言提供了语法糖¹, 上面第 9 行代码也可以写作:

```
1  a += 5;
```

类似地, 加减乘除模以及其它的运算都有类似的表达, 例如 `-=`, `*=`, `/=`, `%=`.

此外, 赋值运算符是右结合的, 返回值为左式 (或右式) 的值. 所以我们可以实现连续赋值:

```
1  int main(){
2      int a, b, c;
3      a = b = c = 10; // a = 10, b = 10, c = 10
4
5      return 0;
6 }
```

想想这是为什么.

但是我们不推荐这么做.

¹即某种语法的简洁写法.

3.12 关系运算

在 C 语言中, 用数值 0 表示一个逻辑为假, 用非 0 值 (通常使用 1, 后文将不再考虑非 1 值表示真, 因为在某些标准中这可能出现问题) 来表示一个逻辑为真.

关系运算符有 `>`, `<`, `>=`, `<=`, `==` 和 `!=` 六种. 它们分别表示大于, 小于, 大于等于, 小于等于, 等于, 不等于. 它们的返回值为表达式是否成立 (为真), 成立 (真) 时返回 1, 不成立 (假) 时返回 0.

例如下面这些表达式的值

`3 >= 1, 5 < 4, 3 == 1 + 2, 6 != 5`

分别为 1, 0, 1, 1.

下面的代码依次输出了上面四个表达式的值, 读者可以自行验证:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     printf("%d\n", 3 >= 1);
6     printf("%d\n", 5 < 4);
7     printf("%d\n", 3 == 1 + 2);
8     printf("%d\n", 6 != 5);
9
10    system("pause");
11
12    return 0;
13 }
```

需要注意的是, 新手容易一不小心就把 `==` 写作 `=`, 读者不要犯这样的错误. 一般这种情况编译器会有警告.

3.13 逻辑运算

逻辑运算包括逻辑与运算 `&&`, 逻辑或运算 `||`, 逻辑非 `!`. 它们的操作数都可以是任意基础类型 (除了 `void`), 其中与运算和或运算是二目运算符, 非运算是单目运算符.

与运算可以理解为先把两端的值转换为真/假, 当两端的值均为真 (A 真 “与” B 真同时成立) 时, 返回真 (1); 否则返回假 (0).

例如下面的表达式的值

```
1 && 1, 1 && 0, 0 && 1, 0 && 0
```

分别为 1, 0, 0, 0.

或运算则可以理解为先把两端的值转换为真/假, 当两端的值有任意一个真 (A 真 “或” B 真成立) 时, 返回真 (1); 否则返回假 (0).

例如下面的表达式的值

```
1 || 1, 1 || 0, 0 || 1, 0 || 0
```

分别为 1, 1, 1, 0.

非运算则是并 “非” A 这样, 操作数为真 (1) 时, 返回假 (0); 操作数为假 (0) 时, 返回真.

例如下面的表达式的值

```
!0, !1
```

分别为 1, 0.

逻辑运算符可以嵌套使用, 例如下面的表达式的值

```
!(1 && 0) || 0
```

为 1.

但除了非运算符优先级很高外, 与运算和或运算的优先级常常搞不清楚谁先谁

后, 所以我们**建议**与运算和或运算综合使用时, 都打上括号.

逻辑运算符通常和关系运算符搭配起来使用, 例如表达式

$$x \geq 0 \ \&\& \ x < 5$$

就表示变量 x 在 $[0, 5)$ 的范围时返回真, 否则返回假. 它们的具体用法将在第[五](#)章中详细介绍.

3.14 自增和自减

对于整型变量 x , C 语言提供了 $x += 1$ 和 $x -= 1$ 的语法糖, 分别记作 $x++$ 或 $++x$, 以及 $x--$ 或 $--x$. 它们被称为自增/自减.

例如下面三段代码是完全等价的:

```
1 int main(){
2     int a = 0;
3     a += 1;
4     a -= 1;
5
6     return 0;
7 }
```

```
1 int main(){
2     int a = 0;
3     a++;
4     a--;
5
6     return 0;
7 }
```

```
1 int main(){
2     int a = 0;
3     ++a;
4     --a;
```

```
5
6     return 0;
7 }
```

也可以把这些式子用在表达式中, 但是结果会有所不同. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a1 = 0;
3     int b1 = a1++; // b1 = 0, a1 = 1
4
5     int a2 = 0;
6     int b2 = ++a2; // b2 = 1, a2 = 1
7     return 0;
8 }
```

语句后的注释标注了代码执行后的结果. 造成这种情况的原因是 `a++` 语句优先级较低, 会先执行语句再执行自增; `++a` 语句优先级较高, 会先执行自增再执行语句.

然而, 这种做法是**非常错误的**, 我们**不推荐**这么做, 也不准备继续辨析这些概念.

因为这种先后关系根据不同编译器有不同的表现, 只是现在有大量程序员这么用, 编译器才基本都进行了这样的实现. 但是换用较古早的编译器, 就可能引入 BUG. 某些意义上, 这属于 UB(Undefined Behavior, 未定义行为的缩写), 而 C 语言标准中 UB 由编译器自行处理. 也就是说, 编译器在检测到 UB 语句后, 即使在终端打开了一个井字棋 (部分编译器确实有这样的彩蛋行为) 也是完全符合标准的.

消除 UB 行为能够换来更健壮的程序, 可读性和可维护性更好的代码, 而代价只是多写一行代码; 反之, 为了少些一行代码, 却留下了隐患, 可能在未来留下无穷无尽的问题, 这是得不偿失的. 因此, 为了代码的可移植性, 可读性和稳定性, 我们**建议**总是把自增自减语句独立成句. 除此之外, 我们**建议**读者在今后的编程生涯中, 能够减少很多歧义和隐藏 BUG, 而代价只是多写一行代码时, 不要偷懒. 尽可能不使用可能导致 UB 的代码.

3.15 数据类型强制转换

除了计算机自动帮我们转换类型 (例如浮点数和整型的例子) 外, 我们也可以显式地转换变量类型. 语法是

(类型) 变量或常量

当我们把浮点数转换为整型时, 会向下取整. 当我们把超过某种类型表达范围的数转换为这种类型时, 会得到意料之外的结果 (这与对应类型的储存方式有关)¹. 某些类型之间不能转换.

例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a = (int)2.5; // 由于自动类型转换, 和 int a =
                        2.5; 等价, a = 2
3     double b = (double)a; // 同上, b = 2.0
4     int c = (int)1000000000000; // 超过范围, c =
                        -727379968
5     char *str = (char*)10; // 错误, 没有整型转换为字
                        符串的转换方式.
6
7     return 0;
8 }
```

3.16 * 位运算 *

位运算包括按位与运算 `&`, 按位或运算 `|`, 按位异或运算 `^`, 按位非运算 `~` (也成为按位取反运算), 左移运算 `<<` 和右移运算 `>>`.

前三者都是二目运算符, 他们把操作数转换为二进制, 然后逐位进行与, 或和异或运算, 然后又把结果逐位排列成为一个二进制数, 作为返回值. 按位非则是把

¹但这在某些算法的实现中起到了重要作用, 例如雷神之锤内核中的平方根倒数算法. 事实上这段精彩的代码也是指南的封面.

操作数的所有二进制位倒转 (0 变 1, 1 变 0) 作为返回值返回。

表三.3展示了操作数 1 和操作数 2 进行异或运算后的结果。

| 操作数 1 | 操作数 2 | 结果 |
|-------|-------|----|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

表 三.3: 异或运算结果表

可以看到, 当操作数相同时, 异或结果为 0. 当操作数不同时, 异或结果为 1.

异或运算又被称为半加器, 即一个不进位的二进制加法器. 那么 $0 + 0 = 0$, $0 + 1 = 1$, $1 + 0 = 1$, $1 + 1 = 1$ (原为 11) 就很容易理解了.

负数在内存中的储存结构较复杂, 在这里不会讨论按位取反结果.

左右移运算则是一个二目运算, 表示把左操作数的二进制整体向左或右移动右操作数位, 超出范围的舍去, 空缺的补 0.

例如 $0b110 \ll 2$ 的结果为 $0b11000$, $0b110 \gg 2$ 的结果为 $0b1$. 在不超出范围的情况下, $a \ll n$ 的结果为 $a \times 2^n$, $a \gg n$ 的结果为 a 整除 2^n , 想想这是为什么.

下面展示了位运算的例子:

```

1  int main(){
2      int a = 5 & 6;    // 101 & 110 = 100, a = 4
3      int b = 5 | 6;    // 101 | 110 = 111, b = 7
4      int c = 5 ^ 6;    // 101 ^ 110 = 011, c = 3
5      int d = ~5;       // d = -6
6      int e = 3 << 1;   // e = 6
7      int f = 5 >> 1;   // f = 2
8
9      return 0;
10 }
```

位运算具有高速的特点, 但代价是晦涩难懂, 可用于加速代码, 指南不会过多涉及. 我们将在第[五](#)章中讨论其中一种简单应用.

3.17 * 逗号运算 *

逗号运算符, 是优先级最低的运算符, 它是一个二目运算符, 效果是依次计算左右两个表达式的值, 并返回右式的结果.

我们可以用逗号运算符来在一行中运行多个语句. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a = 4, b = 5;
3     a = 6, printf("%d, %d\n", a, b); // 先把6赋值给a
    , 再依次打印a和b的值.
4
5     return 0;
6 }
```

但除了声明变量外, 我们**不推荐**这么做.

指南将在第[五](#)章中介绍关于逗号运算符的一个技巧, 能够帮助我们的代码更优雅.

第四章

输入和输出

我们的程序可以和程序外的用户 (或其它程序模拟的用户) 交互, 交互的方式就是交换信息, 包括输入信息和输出信息 (也称打印信息). 本章就介绍各类与命令行窗口相关的输入输出.

4.1 printf() 和 scanf()

C 语言标准库 `stdio.h` 中定义了两个强大的输入输出函数¹`printf()`²和`scanf()`³. 它们可以实现在控制台中格式化输入输出文本, 变量等内容. 我们先介绍 `printf()` 的输出功能.

`printf()` 的格式

`printf()` 的格式形如:

```
printf("文本", 参数 1, 参数 2, ...)
```

文本可以是空文本. 参数可以有若干个, 也可以没有.

当没有参数时, `printf()` 将直接输出文本内容. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     printf("Hello World!\n");
6     system("pause");
7
8     return 0;
9 }
```

会输出

¹函数的概念不同于数学上的函数, 指的是根据输入的参数, 执行一定功能的东西. 具体将在第七章中讨论.

²PRINT Format, 格式化输出的缩写

³SCAN Format, 格式化输入的缩写

```
Hello World!
```

参数总是和文本中的格式符一一对应。格式符以% 开头, 用一个字母表示参数的类型, 例如%d 表示十进制 `int` 型, %f 表示 `float` 型。在文本中检测到格式符后, `printf()` 将把对应顺序的参数带入到格式符中。例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 5;
6     float b = 10;
7     printf("%d\n", a);           // 输出a并换行.
8     printf("%d, %f\n", a, b);    // 输出a, 用逗号间隔后
                                   再输出b, 然后换行.
9     system("pause");
10
11     return 0;
12 }
```

参数的类型和格式符的输出类型应该一一对应, 否则会导致意料之外的错误。参数的数量和格式符的数量应该一一对应, 当参数数量多于格式符数量时, 程序会忽略超过格式符数量的参数; 当格式符数量多于参数数量时, 多余参数数量的格式符的输出会发生意料之外的错误。这些情况编译器一般都会警告。

另外, 当我们要直接输出% 符号时, 为防止编译器把它和后面的符号误认为格式符, 我们需要把它转义。例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     printf("%d"); // 直接输出文本%d.
6     system("pause");
7
8     return 0;
9 }
```

printf() 输出整型

十进制 int 的格式符为%d, 当有 short 修饰时, 加上 h 前缀; 当有 long 修饰时, 加上l 修饰. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 10;
6     short b = 10;
7     long c = 10;
8     printf("%d, %hd, %ld\n", a, b, c);
9     system("pause");
10
11     return 0;
12 }
```

将输出

```
10, 10, 10
```

如果错误地指定变量的长度, 可能不会发生错误, 也可能发生意料之外的错误.

默认情况下, 正数省去正号, 负数输出负号. 我们也可以加上 + 前缀, 来强制输出数的符号. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = -10;
6     int b = 10;
7     printf("%d, %d, %+d, %+d\n", a, b, a, b);
8     system("pause");
9
10    return 0;
```

```
11 }
```

将输出

```
-10, 10, -10, +10
```

另外我们可以加上空格前缀, 使得输出负数时正常输出, 输出正数时输出一个空格, 来帮助对齐格式. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 10;
6     int b = -10;
7     printf("%d\n%d\n", a, b);
8     printf("\n");
9     printf("% d\n% d\n", a, b);
10    system("pause");
11
12    return 0;
13 }
```

的输出为

```
10
-10

 10
 -10
```

其中前两行数字没有对齐, 倒数两行 10 前补了一个空格, 数字时对齐的.

如果我们想输出无符号数, 那么就使用%u 格式符. 对于 short 和 long 我们同样加上 h 和 l 前缀. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
```

```

3
4 int main(){
5     unsigned int a = 10;
6     unsigned short b = 10;
7     unsigned long c = 10;
8     printf("%u, %hu, %lu\n", a, b, c);
9     system("pause");
10
11     return 0;
12 }

```

将输出

```
10, 10, 10
```

如果用%u 输出负数会发生意料之外的错误.

如果我们想以八进制输出, 就把%d 换为%o; 同理如果想以十六进制输出, 就换为%x 或%X(区别在与字母的大小写). 对于 short 和 long 我们同样加上 h 和 l 前缀. 例如下面的例子:

```

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 10;
6     short b = 10;
7     long c = 10;
8     printf("%d, %ho, %lx, %lX\n", a, b, c, c);
9     system("pause");
10
11     return 0;
12 }

```

将输出

```
10, 12, a, A
```

另外需要注意, %o, %x 和 %X 只能输出无符号数.

如果想加上前缀, 那么我们再加上 # 前缀. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 10;
6     short b = 10;
7     long c = 10;
8     printf("%d, %#ho, %#lx, %#lX\n", a, b, c, c);
9     system("pause");
10
11     return 0;
12 }
```

将输出

```
10, 012, 0xa, 0XA
```

另外 %d 是 UB, 部分编译器会忽略 # 当作 %d, 部分编译器会输出意料之外的错误, 部分编译器会开启井字棋.

printf() 输出浮点数

对于一个 float 型变量, 我们可以使用 %f, %e, %E, %g 和 %G 五种控制符输出. 其中 %f 是用十进制输出, %e 使用 aen 形式输出, %g 自动选择十进制或 aen 中短的那种格式输出, 并省去多余的 0. %E 和 %G 与 %e 和 %g 用法相同, 只是它们使用 aEn 形式, 即 E 是大写的. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     float a = 0.000025;
```

```

6     printf("%f\n", a);
7     printf("%e\n%E\n", a, a);
8     printf("%g\n%G\n", a, a);
9     system("pause");
10
11     return 0;
12 }

```

的输出为

```

0.000025
2.500000e-005
2.500000E-005
2.5e-005
2.5E-005

```

对于 double 类型, 我们需要在前面加上 l 修饰. 例如下面的例子:

```

1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  int main(){
5      float a = 0.000025;
6      printf("%lf\n", a);
7      printf("%le\n%lE\n", a, a);
8      printf("%lg\n%lG\n", a, a);
9      system("pause");
10
11     return 0;
12 }

```

的输出为

```

0.000025
2.500000e-005
2.500000E-005
2.5e-005

```



```
2.5E-005
```

此外, 前文提到的 + 前缀和空格前缀对浮点数也适用. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     float a = 0.000025;
6     printf("%+lf\n", a);
7     printf("% lf\n", a);
8     system("pause");
9
10    return 0;
11 }
```

的输出为

```
+0.000025
0.000025
```

printf() 输出字符和字符串

字符的控制符为%c, 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     char ch = 'a';
6     printf("%cb%c", ch, 'c');
7
8     return 0;
9 }
```

的输出为

```
abc
```

此外, 由于字符本质是整型, 所以字符也可以用整型控制符输出, 反之亦然. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     char ch = 'a';
6     int val = 97;
7     printf("%d\n", ch);
8     printf("%c\n", val);
9     system("pause");
10
11     return 0;
12 }
```

的输出为

```
97
a
```

字符串的格式符为%s. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     char *str = "Cool China";
6     printf("%s!\n", str);
7     system("pause");
8
9     return 0;
10 }
```

的输出为

```
Cool China!
```

格式化输出

我们可以在格式符后加一个数字, 表示这个变量输出的最小宽度, 不足的将在前面补空格. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 12, b = 5;
6     printf("%5d%5d\n", a, b);
7     system("pause");
8
9     return 0;
10 }
```

的输出为

```
12    5|
```

我们也可以再用-修饰, 表示左对齐. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 12, b = 5;
6     printf("%-5d%-5d\n", a, b);
7     system("pause");
8
9     return 0;
10 }
```

的输出为

```
12    5    |
```

我们也可以用 . 后加一个数字修饰, 表示精确到小数点后几位, 不足的补零, 也可以和最小宽度连用. 例如下面的例子:

代码片段 四.1:

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  int main(){
5      double a = 2.5;
6      printf("%.2lf|\n", a);
7      printf("%6.2lf|\n", a);
8      printf("%-6.2lf|\n", a);
9      system("pause");
10
11     return 0;
12 }
```

的输出为

```
2.50|
   2.50|
2.50  |
```

此外, 多行字符串之间不加符号, 编译器会自动帮我们把它们拼接在一起. 所以我们可以使用下面的技巧来增强 printf() 的可读性:

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  int main(){
5      double a = 2.5;
6      printf(
7          "%.2lf|\n"
8          "%6.2lf|\n"
9          "%-6.2lf|\n",
```

```
10     a,  
11     a,  
12     a  
13 );  
14     system("pause");  
15  
16     return 0;  
17 }
```

这段代码和代码[四.1](#)是等价的.

scanf()

scanf() 的基本格式与 printf() 类似, 形如

```
scanf("文本", &参数1, &参数2,...)
```

其中, 文本中也可以插入控制符, 来吧对应位置的输入赋值给对应位置的参数, 控制符格式和 printf() 相同, 只是不能使用前缀修饰. 注意, 参数前要加上 &, 原因将在第[九](#)章中解释.

例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>  
2 #include <stdlib.h>  
3  
4 int main(){  
5     int a = 0;  
6     double b = 0;  
7     scanf("%d, %lf", &a, &b);  
8     printf("%d, %lf\n", a, b);  
9     system("pause");  
10  
11     return 0;  
12 }
```

用户输入的多个空白符会被当作一个空白符, 当用户输入的文本和 `scanf()` 中文本指定的格式不同时, 可能会发生意料之外的错误. 有时会发生奇怪的行为, 这与缓冲区有关, 我们不在这里讨论.

特别地, 当输入字符串时, 我们反而不能用 `&` 修饰, 并且字符串必须初始化过且输入的字符串不超过原来字符串的长度. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     char str[] = "Star War is brilliant.";
6     scanf("%s", str);
7     printf("%s\n", str);
8     system("pause");
9
10    return 0;
11 }
```

原因将在第十章中解释.

4.2 其它输入输出

`stdio.h` 下还包含其它输入输出函数:

`getchar()`

`getchar()` 会读取一个字符并返回. 用法形如

```
c = getchar();
```

等价于

```
scanf("%c", &c);
```

putchar(char)

putchar(char) 会输出括号内的字符. 用法形如

```
putchar(c);
```

等价于

```
printf("%c", c);
```

gets(char*)

gets(char*) 需要把读取后的储存字符串写在其括号内, 它将读取一整行信息, 并存入指定的字符串中. 用法形如

```
gets(str);
```

例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     char str[30];
6     gets(str);
7     printf("%s", str);
8     system("pause");
9
10    return 0;
11 }
```

此外, 读者可以输入 Hello World , 比较上面的代码和下面的代码的效果:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
```

```
4 int main(){
5     char str[30];
6     scanf("%s", str);
7     printf("%s", str);
8     system("pause");
9
10    return 0;
11 }
```

可以发现 `gets(str);` 和 `scanf("%s", str);` 不完全等价. 前者会把空格当作字符串的一部分, 后者则会把空格当作字符串于其他部分的分割, 故而停止输入.

puts(char*)

`puts(char*)` 会输出括号内的字符串, 用法形如

```
puts(str);
```

等价于

```
printf("%s", str);
```

此外, windows 平台上还有一个只能使用于 windows 平台的库 `conio.h` 用于输入输出, 读者可以自行了解.

第五章

分支与循环

我们前文的几乎所有代码都是从 `main()` 开始, 一句一句顺序执行的, 这样的结构被称为顺序结构. 但是只有顺序结构的程序是很无聊的, 首先它无法进行逻辑判断, 它只能顺着预定的轨道执行下去, 直到结束; 其次我们需要它做什么, 我们就必须在对应位置写一句语句, 例如我们需要它输出 100 个 a, 我们就必须写一百次 `printf("a");`. 本节中将介绍另外两种程序结构, 使得我们的程序真正开始有趣起来.

5.1 分支结构

分支结构指的是程序运行到此处时, 将从多个分支中选择一个继续执行, 而选择的依据是我们定义的逻辑条件. 这在 C 语言中由两种语句实现.

if else 语句

分支结构主要由 `if else` 语句实现. 它最基础的结构形如

```
if(条件){  
    语句块  
}
```

其中 条件是一个表达式, 当 条件为真时, 运行大括号内 语句块的内容, 然后继续顺序运行. 否则跳过整段代码. 例如下面的例子:

```
1  #include <stdio.h>  
2  #include <stdlib.h>  
3  
4  int main(){  
5      int temp;  
6      scanf("%d", &temp);  
7  
8      if(temp > 0){  
9          temp += 5;  
10         printf("beautiful.\n");
```

```
11     }
12
13     printf("%d\n", temp);
14
15     system("pause");
16
17     return 0;
18 }
```

例如我们输入 3, 那么 `temp > 0` 为真, 执行 `if` 后打括号内的语句, `temp` 先自增 5 变为 8, 然后输出 `beautiful`. 大括号执行结束, 继续执行打印 `temp`, 输出 8. 故输出为

```
beautiful.
8
```

再例如我们输入-1, 那么 `temp > 0` 为假, 跳过 `if` 后大括号内的所有语句, 执行打印 `temp`, 输出-1. 故输出为

```
-1
```

特别地, 当语句块中只有一个语句时, 大括号可以省略. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int temp = 0;
6     scanf("%d", &temp);
7
8     if(temp > 0) printf("beautiful.\n");
9
10    printf("%d\n", temp);
11
12    system("pause");
13
14    return 0;
```

```
15 }
```

但我们**不推荐**这么做。

我们也可以在 `if` 的大括号后加入若干个 `else if` 来不断检验条件, 直到条件为真, 执行对应条件的语句块, 执行完毕后结束整个 `if` 以及连带的 `else if` 的检验, 继续执行后面的代码。语法形如

```
if(条件1){
    语句块1
}else if(条件2){
    语句块2
}
...
else if(条件n){
    语句块n
}
```

例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int temp = 0;
6     scanf("%d", &temp);
7
8     if(temp > 5){
9         printf("A\n");
10    }else if(temp <= 5 && temp > 0){
11        printf("B\n");
12    }else if(temp < -5){
13        printf("C\n");
14    }
```

```
15
16     printf("kk\n");
17
18     system("pause");
19
20     return 0;
21 }
```

例如我们输入 3, 第一个 if 条件为假, 检测第二个 if, 第一个 if 条件为真, 打印 B, 结束 if 及其连带的语句, 执行打印 kk. 故输出为

```
B
kk
```

再例如我们输入-1, 三个 if 的条件都为假, 继续执行打印 kk. 故输出为

```
kk
```

另外, 上面这段代码第 10 行中的条件可以写作 `temp > 0`, 因为如果能执行这次判断, 上一次判断结果一定为假, 而 `temp > 5` 为假就一定已经满足 `temp ≤ 5`. 故可以省略.

此外, 我们也可以在一段 if 结构的最后加上一个 else, 表示当所有条件为假时, 则执行 else 后大括号的语句. 语法形如

```
if(表达式1){
    语句块1
}else if(表达式2){
    语句块2
}
...
else if(表达式n){
    语句块n
}else{
    语句块default
}
```

例如下面的例子:

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  int main(){
5      int temp = 0;
6      scanf("%d", &temp);
7
8      if(temp > 5){
9          printf("A\n");
10     }else if(temp > 0){
11         printf("B\n");
12     }else if(temp < -5){
13         printf("C\n");
14     }else{
15         printf("D\n");
16     }
17
18     printf("kk\n");
19
20     system("pause");
21
22     return 0;
23 }
```

我们再输入-1, 三个 if 的条件均为假, 执行 else 中的语句, 打印 D, 结束 if 语句, 打印 kk. 故输出为

```
D
kk
```

我们建议读者使用下面的规范组织 if 语句:

- 当 if 后只有一个语句时, 不省略大括号.
- 当 else if 和 else 被夹在前后两个语句块的大括号中时, 不换行.

有时我们需要先输入一个数, 然后立即对这个数进行判断, 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int n = 0;
6
7     // do something
8
9     scanf("%d", &n);
10    if(n > 0){
11        printf("greater than 0 !\n");
12    }else if(n == 0){
13        printf("equalt to 0 !\n");
14    }else{
15        printf("less than 0 !\n");
16    }
17
18    system("pause");
19
20    return 0;
21 }
```

这样的代码结构较为松散, 不能一眼看出代码意图. 这里介绍一种基于逗号运算符 (见第3.17节) 的技巧. 我们可以把上面的代码写作:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int n = 0;
6
7     // do something
8 }
```

```
9     if(scanf("%d", &n), n > 0){
10         printf("greater than 0 !\n");
11     }else if(n == 0){
12         printf("equalt to 0 !\n");
13     }else{
14         printf("less than 0 !\n");
15     }
16
17     system("pause");
18
19     return 0;
20 }
```

由于 `scanf()` 也可以看作一个表达式 (见第[七](#)章), 故语法上成立. 逗号运算符会先执行 `scanf()`, 再判断 `n > 0` 的真假, 然后返回 `n > 0` 的结果. 这样我们代码结构就更紧凑了.

switch case 语句

`switch` 语句也可以实现分支结构, 但功能较弱. `switch` 语句语法形如

```
switch(变量){
    case 值1:
        语句块1
        break;
    case 值2:
        语句块2
        break;
    ...
    case 值n:
        语句块n
        break;
    default:
        语句块default
}
```


`case` 可以有若干个, `default` 可以省去. 注意不要漏写 `break`, 否则在一个分支判定成功执行后, 将顺序执行后续分支中的代码.

上面的语法等价于

```
if(变量 == 值1){
    语句块1
}else if(变量 == 值2){
    语句块2
}
...
else if(变量 == 值n){
    语句块n
}else{
    语句块default
}
```

例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 0;
6     scanf("%d", &a);
7
8     switch(a){
9         case 0:
10             printf("I\n");
11             break;
12         case 1:
13             printf("Love\n");
```

```
14         break;
15     case 2:
16         printf("U\n");
17         break;
18     default:
19         printf("ERROR: Your love is out of range
20               !\n");
21     }
22     return 0;
23 }
```

读者可以根据语义自行测试.

5.2 实例: 判断奇偶性

我们来举一个例子, 来看一看分支结构的丰富内涵, 并学习一下分析问题和优化代码的大致过程.

输入一个整数 a , 判断它的奇偶性. 若为奇, 输出 `odd!`; 若为偶, 输出 `even!`.

我们注意到, 奇数和偶数的一个区别是能不能被 2 整除. 奇数被 2 除时, 总是余 1; 偶数被 2 除时, 总是余 0. 故我们可以使用模运算来得出 a 除 2 的余数, 并检验它的值来判断 a 的奇偶性. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 0;
6     scanf("%d", &a);
7     if(a % 2 == 1){
8         printf("odd!\n");
9     }else if(a % 2 == 0){
10        printf("even!\n");
11    }
```

```
11     }
12
13     system("pause");
14
15     return 0;
16 }
```

我们又注意到一个数模 2 的结果不是 1 就是 0, 故第二个 if 可以省略, 直接使用 else. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 0;
6     scanf("%d", &a);
7     if(a % 2 == 1){
8         printf("odd!\n");
9     }else{
10        printf("even!\n");
11    }
12
13    system("pause");
14
15    return 0;
16 }
```

而 if 语句其实只关心括号中表达式的值, 当值为 1(真) 时就执行, 反之为 0(假) 时就不执行, 所以虽然有些反直觉, 但上面的代码等价于下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 0;
6     scanf("%d", &a);
7     if(a % 2){
```

```
8         printf("odd!\n");
9     }else{
10         printf("even!\n");
11     }
12
13     system("pause");
14
15     return 0;
16 }
```

虽然到了这一步我们已经既不推荐，也没有必要了。¹ 但这仍然是很好的思维训练，能够帮助我们理解代码执行的原理。结合第3.9节，想想这是为什么。

此外，我们还可以用第3.16节中提到的位运算来加速这个判断。因为我们注意到，根据式1.1，一个数是奇数，等价于它的二进制表达式第0位是1；反之，一个数是偶数，等价于它的二进制表达式第0位是0。想想这是为什么。利用这个性质，我们把a按位与1，由于1的第0位是1，1与任何数求与运算等于这个数本身，故结果的第0位为a的第0位，而1的其它位都是0，故结果的其它位一定都是0。因此按位与的结果就是a的第0位。故我们可以写出下面的代码：

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 0;
6     scanf("%d", &a);
7     if(a & 1){
8         printf("odd!\n");
9     }else{
10         printf("even!\n");
11     }
12
13     system("pause");
```

¹因为现代编译器非常智能，会自动帮我们生成的可执行文件中的命令优化成这个样子，在源代码文件中最要紧的还是保证可读性。

```
14  
15     return 0;  
16 }
```

读者可以自行验证上面这些代码的正确性.

5.3 循环结构

分支结构指的是程序运行到此处时, 会在我们定义的逻辑条件为真时反复运行, 直到条件变为假. 这在 C 语言中由两种语句实现.

while 语句

while 语句的语法形如

```
while(条件){  
    语句块  
}
```

运行到 while 一行时, 将判断 条件的真假, 若为假则跳过 语句块, 继续运行; 若为真则执行语句块, 然后跳回 while 一行再次判断, 重复此过程直到条件为假.

例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>  
2 #include <stdlib.h>  
3  
4 int main(){  
5     int a = 0;  
6  
7     while(a < 5){
```

```

8         printf("%d ", a);
9         a++;
10    }
11
12    printf("\n");
13    system("pause");
14
15    return 0;
16 }

```

第 1 次执行到 `while` 行, `a < 5` 成立, 故打印 `a`, 然后 `a` 自增 1 变为 1, 语句块结束, 再次回到 `while` 行, `a < 5` 成立, 再次执行代码块 ...如此这般直到执行代码块五次后, 此时 `a` 值为 5, 第 6 次执行 `while` 行, `a < 5` 不成立, 结束循环, 打印回车.

故输出为

```
0 1 2 3 4
```

我们也可以使用语法

```

do{
    语句块
}while(条件);

```

来把条件判断放在语句块执行之后. 注意这种写法 `while()` 后需要有一个分号. 二者的区别在于 `do while` 语句即使条件不成立, 也会在第一次执行到 `do` 行时, 进入循环. 换言之 `do while` 语句中的语句块至少会被执行一次.

此外, 我们也可以用 `while(1)` 来构造一个死循环. 因为条件恒为真, 这个循环将一直执行下去. 例如下面的例子:

```

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3

```

```
4 int main(){
5     while(1){
6         printf("Ha");
7     }
8
9     return 0;
10 }
```

这个程序不会自己结束, 只能强制关闭. 读者也可以打开任务管理器查看性能, 读者应该会看到 CPU 中的某一个核心为了这段代码满载运行了.

for 语句

for 语句也可以看作 while 语句的语法糖. 它的语法形如

```
for(语句1; 条件; 语句2){
    语句块
}
```

它等价于

```
语句1
while(条件){
    语句块
    语句2
}
```

也就相当于 语句 1 是初始化, 语句 2 是每次循环后执行的固定命令.

但小区别在于, for 中的 语句 1 中声明的变量会在 for 语句结束后被回收, 此时重新声明不会引发错误. 但 while 语句中的 语句 1 则不会被回收, 不能在后

文中重新声明, 对于一些常用的暂时变量, 这可能引发麻烦. 详见第7.4节. 因此我们建议:

- 诸如 `i, j, k` 这样的暂用的循环变量, 只在使用时在 `for` 语句中声明.

利用 `for` 语句, 我们可以使代码更紧凑, 表意更清晰. 例如前文中的代码可以写作:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     for (int a = 0; a < 5; a++){
6         printf("%d ", a);
7     }
8
9     printf("\n");
10    system("pause");
11
12    return 0;
13 }
```

此外, 因为 `a` 被声明在了 `for` 语句中, 语句外声明 `a` 的代码是合法的:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     for (int a = 0; a < 5; a++){
6         printf("%d ", a);
7     }
8
9     int a = 0;
10    a -= 5;
11
12    printf("\n");
```



```
13     system("pause");
14
15     return 0;
16 }
```

而使用 `while` 则会报错.

我们再展示一个例子, 来说明循环结构的应用: 给定正数 n , 求式子

$$\sum_{i=1}^n i^2$$

的值.

它的实现有些微妙, 相比之下言语有些苍白. 我们直接贴出代码, 读者自行从代码的语义出发, 想想这是为什么.

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  int main(){
5      unsigned long res = 0;
6      int n = 0;
7      scanf("%d", &n);
8
9      for(int i = 1; i <= n; i++){
10         res += i * i;
11     }
12
13     printf("%lu\n", res);
14     system("pause");
15
16     return 0;
17 }
```

注意, 由于结果可能很大, 同时我们能保证它是非负的, 所以我们应该把它的类型声明为 `unsigned long`.

其实利用数学归纳法容易证明

$$\sum_{i=1}^n i^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}.$$

也就是说其实上面的代码等价于:

```

1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  int main(){
5      int n = 0;
6      scanf("%d", &n);
7
8      unsigned long res = n * (n + 1) * (2 * n + 1) /
          6;
9
10     printf("%lu\n", res);
11     system("pause");
12
13     return 0;
14 }
```

这样我们大大优化了这段代码, 运行效率大大提高了. 这也某种意义上说明了数学和计算机科学的紧密联系, 和写代码前分析问题的重要性. 当然, 我们的本意只是介绍求和式计算的范式.

读者也可以想想:

1. 第 8 行代码能不能写作 `unsigned long res = n / 6 * (n + 1) * (2 * n + 1);`? 为什么? 怎样改正这种写法的错误之处? 改正后相较于第 8 行的写法有什么优势?¹

¹由于这些问题较困难, 下面贴出答案:

- (a) 不能.
- (b) 因为当 `n` 为奇数时, 表达式 `n / 2` 因为是整型除以整型, 会发生舍去小数部分, 并不严格等于数学上的 $\frac{n}{2}$, 从而导致结果错误.

2. 求积式该如何用代码求出? 例如 $\prod_{i=1}^n i$

此外, 和 `if` 相似, 当 `while` 和 `for` 后的语句块中只有一个语句时, 大括号可以省略, 但我们**不推荐**这么做.

5.4 `break` 和 `continue`

C 语言定义了两个关键字 `break` 和 `continue`, 用于循环结构的操控 (此外, 正如我们学过的 `break` 语句也能用在 `switch` 语句中). `break` 的语法形如

```
break;
```

`continue` 的语法形如

```
continue;
```

`break` 语句能跳出整个循环, 继续执行后面的代码, 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
```

(c) 应当先判断 `n` 的奇偶, 根据 `n` 的奇偶分别使用:

```
(n + 1) / 2 * n * (2 * n + 1)  (n 为奇数)
n / 6 * (n + 1) * (2 * n + 1)  (n 为偶数)
```

(d) 读者可是试着输入 1200, 看看两种方法的输出各是多少. 可以看到第一种发生了意料之外的错误, 而第二种则输出了正确的答案. 这是因为中间的结果其实也是整型, 而在运算过程中产生的中间变量过大, 则可能发生溢出, 发生意料之外的错误. 例如第一种方法由左向右运算, 当计算完第二次乘号时, $1200 \times 1201 \times 2401$ 已经太大了, `int` 无法支持发生了溢出, 此后再除以 6, 也只能得到一个错误的结果. 而第二种方法则先除以了 6, 使得中间变量的数值大大减小了, 没有发生溢出, 故输出了正确的结果.

```
4 int main(){
5     for(int i = 0; i < 5; i++){
6         if(i == 3){
7             break;
8         }
9         printf("%d ", i);
10    }
11
12    printf("\n");
13    system("pause");
14
15    return 0;
16 }
```

前几次循环中 `i == 3` 为假, 故只打印 `i`, 直到循环执行到 `i = 3` 时, 程序进入 `if` 语句内, `break` 执行, 跳出了 `for` 循环, 打印换行. 故输出为

```
0 1 2
```

而 `continue` 则是结束此次循环, 开始下次循环 (但 `for` 语句括号中的最后一个语句仍然会执行). 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     for(int i = 0; i < 5; i++){
6         if(i == 3){
7             continue;
8         }
9         printf("%d ", i);
10    }
11
12    printf("\n");
13    system("pause");
14
15    return 0;
```

```
16 }
```

$i = 3$ 时, 进入 `if` 语句, 执行 `continue`; , 不再进行此次循环. 而别的循环则打印 `i`, 故输出为:

```
0 1 2 4
```

5.5 多层循环, 循环与分支

循环可以嵌套, 分支也可以嵌套, 循环和分支也可以相互嵌套. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     printf("\t\tj is even\t\tj is odd\n");
6     for(int i = 0; i < 5; i++){
7         if(i % 2 == 0){
8             printf("i is even\t");
9         }else{
10             printf("i is odd\t");
11         }
12         for(int j = 0; j < 2; j++){
13             printf("(i, j) = (%d, %d)\t\t", i, j);
14         }
15         printf("\n");
16     }
17
18     printf("\n");
19     system("pause");
20
21     return 0;
22 }
```

这段代码虽然繁琐,但并不复杂.读者可以结合输出理解,并学习控制台中的排版技巧.

5.6 实例：鸡兔同笼问题

我们研究一个例子,来观察嵌套结构的应用.

今有鸡兔混杂一笼,数之,有头 n 个,有脚 m 只,问鸡数 x ,兔数 y 各几何?

相信大家对这个《孙子算经》中的问题都很熟了.我们今天抛去故有的思路,从零开始,试着用程序解决它.

我们知道问题对应求解方程组

$$\begin{cases} x + y = n \\ 2x + 4y = m \end{cases} \quad (1)$$
$$x, y, n, m \in \mathbb{N}$$

首先我们先尝试最朴素的方法:暴力穷举.计算机的强大之处就在于超快的算力,所以穷举虽然看似朴素甚至愚蠢,但常常是解决计算机问题时最容易写出代码的办法,甚至有时在处理一些极端复杂的问题时,穷举是唯一的方法.

我们考虑设置两个循环变量 i 和 j ,分别表示鸡的数量和兔子的数量,令它们遍历 $[0, a] \times [0, a]$ 中的所有整点(即尝试所有 (i, j) 的可能组合),当它们满足式5.6时,输出 i 和 j ,即为解.例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int n = 0, m = 0;
6     scanf("%d %d", &n, &m);
7 }
```

```
8     for(int i = 0; i <= n; i++){
9         for(int j = 0; j <= m; j++){
10             if(i + j == n && 2 * i + 4 * j == m){
11                 printf("%d %d", i, j);
12             }
13         }
14     }
15
16     printf("\n");
17     system("pause");
18
19     return 0;
20 }
```

这样我们就完成了一个在有解的情况下可以给出正确答案的代码雏形了。

我们再观察式5.6, 由于它是非退化线性方程组, 故至多有一组解。也就是说, 当我们找到一组解时, 就可以停止穷举了。我们可以通过设置一个新变量 `flag` 来实现这一点, 他表示我们是否找到解了, 它被初始化为 0, 当我们找到一组解时, 它被赋值为 1, 而循环条件中加上 `flag` 为 0。我们还可以通过这个变量来判断有没有解, 若循环结束它仍然为 0, 我们就可以断言输入的问题无解。例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int n = 0, m = 0;
6     scanf("%d %d", &n, &m);
7
8     int flag = 0;
9
10    for(int i = 0; i <= n && flag == 0; i++){
11        for(int j = 0; j <= m && flag == 0; j++){
12            if(i + j == n && 2 * i + 4 * j == m){
13                printf("%d %d", i, j);
14                flag = 1;
15            }
16        }
17    }
```

```

15         }
16     }
17 }
18
19 if(flag == 0){
20     printf("No solution exists!");
21 }
22
23 printf("\n");
24 system("pause");
25
26 return 0;
27 }

```

这个代码看似很好了, 既能在有解时得出解, 又能在无解时判断出无解, 然而读者可以尝试输入

```
100000 300000
```

我们可以看到, 程序运行了很久才输出了答案 (5000, 5000). 前面的章节中所有的代码都很简单, 运行都在零点零几微妙内就完成了, 所以读者可能忽略了代码的执行其实是需要时间的. 一般情况下, CPU 一秒钟可以执行 $1e8 \sim 1e9$ 行 C 语言代码, 而我们注意在输入 100000 300000 时, 外循环执行了 $1e5$ 次, 每次外循环由执行了一次内循环, 而每次内循环时, 内循环内的代码又被执行了 $1e5$ 次. 故内循环内的代码需要被执行 $1e5 \times 1e5 = 1e10$ 次!(有解时会中断循环, 故实际上小于这个值, 但数量级是不变的) 所以理论上这个简单的程序需要 10s 到 100s 不等. 我们迫切需要优化代码.

我们注意到, (i, j) 是解时, 一定有 $i + j = n$, 故我们其实可以省去内层循环, 把 j 用 $n - i$ 表示, 那么我们的代码变为:

```

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int n = 0, m = 0;
6     scanf("%d %d", &n, &m);

```



```
7
8     int flag = 0;
9
10    for(int i = 0; i <= n && flag == 0; i++){
11        int j = n - i;
12        if(2 * i + 4 * j == m){
13            printf("%d %d", i, j);
14            flag = 1;
15        }
16    }
17
18    if(flag == 0){
19        printf("No solution exists!");
20    }
21
22    printf("\n");
23    system("pause");
24
25    return 0;
26 }
```

此时我们若再次尝试刚刚的输入, 我们只有一层循环了, 那么判断语句这一次只会被执行 $1e5$ 次, 而 $1e5$ 相较于 $1e8$, 不过沧海之一粟. 所以这一次我们的程序又“立即”得出结果了. 然而如果我们再输入更大的数, 程序还是需要运行很久 (虽然可能在此之前已经溢出了).

当然, 我们都学过数学, 我们可以直接解出式5.6的解的表达式为

$$\begin{cases} x = 2n - \frac{m}{2} \\ y = \frac{m}{2} - n \end{cases} \quad (2)$$

注意到, x, y 为整数的条件是 m 为偶数, 同时还必须满足 x, y 非负. 故把条件和表达式翻译成程序之后, 我们写出:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
```

```
3
4 int main(){
5     int n = 0, m = 0;
6     scanf("%d %d", &n, &m);
7
8     int x = 2 * n - m / 2;
9     int y = m / 2 - n;
10
11     if(x < 0 || y < 0 || m % 2 == 1){
12         printf("No solution exists!");
13     }else{
14         printf("%d %d", x, y);
15     }
16
17
18     printf("\n");
19     system("pause");
20
21     return 0;
22 }
```

这一次, 无论我们输入的数据多大, 只要不溢出, 程序都能在固定的很短的时间内给出答案了. 这也再一次应证了数学在计算机科学中的重要性.

总之, 多层循环是危险的, 它可能会使一个简单的任务占用大量的时间, 造成严重的性能下降. 在非必要的情况下, 我们**建议**尽可能把循环嵌套层数降下来, 零层循环 (顺序结构) 就能解决问题是最好的. 当然, 这需要技巧, 而且也并非每个任务都能优化掉必要的循环的.

5.7 * 条件运算符 *

条件运算符?: 是一个三目运算符 (也是 C 语言中唯一一个三目运算符, 故有时也直接用 “三目运算符” 来指代), 用法形如

表达式1? 表达式2 : 表达式3

当 表达式1 为真时, 它返回 表达式2 , 否则返回 表达式3 .

例如:

```
1 int main(){
2     int a = 10, b = 5;
3
4     int max = (a > b)? a : b;
5
6     return 0;
7 }
```

等价于

```
1 int main(){
2     int a = 10, b = 5;
3
4     int max;
5     if(a > b){
6         max = a;
7     }else{
8         max = b;
9     }
10
11     return 0;
12 }
```

条件运算符常用于压缩代码.

条件运算符是右结合的, 也可以嵌套使用, 但我们**不推荐**这么做.

5.8 *goto 语句 *

goto 语句是汇编时代的遗珍, 但由于容易导致恶行 BUG, 并且很难维护, 现在几乎不再被使用, 在高级语言中也几乎都被禁用. C 语言因为发明的早, 仍然保留着这个语句. 我们虽然不能一棒子打死说 goto 语句就是不好的, 例如 Linux 内核

中就大量使用 `goto` 语句, 提高性能和可读性, 但总的而言它很难被驾驭, 我们不推荐使用. 它的语法形如

```
label:  
goto label;
```

其中 `label` 是程序员自定的, 可以放在程序中的任意位置 (独立成行, 或冒号后接其它语句). 执行 `goto label;` 后, 程序无条件跳转到 `label` 处继续运行. 本质上循环和分支结构都是 `goto` 语句实现的, 但有了高级语言的封装, 我们不再需要去操心底层的跳转指令了.

第六章

数组

本章将介绍一种新的数据储存形式: 数组. 它在储存连续的数据上有优良的特性.

6.1 一维数组

一个一维数组 (在不引起歧义的情况下, 简称数组) 的声明形如

类型 标识符[长度] = { 初始值 };

这将开辟一个储存有长度个数据的, 每个数据的类型都为类型的, 名字为标识符的数组. 多个初始值之间用逗号隔开, 会被逐个顺序赋值给数组中的数据. 数组中的数据被称为元素. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int arr[5] = { 5, 3, 4, 2, 1 };
3
4     return 0;
5 }
```

声明了一个长度为 5 的数组 `arr`, 其中的元素依次为 5, 3, 4, 2, 1.

当我们声明一个数组时初始化了时, 我们可以省略长度, 数组的长度会被默认声明为初始值的个数. 例如上面的代码和下面的例子是等价的:

```
1 int main(){
2     int arr[] = { 5, 3, 4, 2, 1 };
3
4     return 0;
5 }
```

特别地, 我们也可以把初始值写作一个单独的 0, 来表示把数组中所有元素初始化为 0. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
```

```
2     int arr[5] = { 0 };
3
4     return 0;
5 }
```

声明了一个长度为 5 的数组 `arr`, 其中的元素依次为 0, 0, 0, 0, 0.

我们**建议**, 对于所有无特殊初始值的数组, 都使用这种方法把元素都初始化为 0.

我们可以使用中括号访问数组中的第 n 个元素, 语法形如

标识符[n]

其中 n 被称为索引. 注意, 这里的 n 是从 0 开始编号的, 也就是说第 0 个元素才是我们常言说的第 1 个. 所以这里的第 n 个其实是我们常言说的第 $n + 1$ 个. 我们将在第 9 章中解释这样设计有什么好处. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int arr[5] = { 5, 3, 4, 2, 1};
6
7     arr[3] = 7;
8     printf("%d %d", arr[0], arr[3]);
9
10    printf("\n");
11    system("pause");
12
13    return 0;
14 }
```

我们先把 `arr` 中的第 3 个元素改为了 7, 然后打印了其中的第 0 和第 3 个元素. 输出为

5 7

索引必须要满足

$$0 \leq \text{索引} < \text{数组长度}.$$

否则会发生意料之外的错误, 被称为数组越界. 例如一个长度为 5 的数组, 我们不能尝试访问它第 10 个数.

此外, 数组也常和 for 循环共用, 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int arr[5] = { 5, 3, 4, 2, 1};
6
7     for(int i = 0; i < 5; i++){
8         arr[i]++;
9     }
10
11     for(int i = 0; i < 5; i++){
12         printf("%d ", arr[i]);
13     }
14
15     printf("\n");
16     system("pause");
17
18     return 0;
19 }
```

这段程序先用循环变量 `i` 遍历了数组 `arr`, 使其中的每个元素都自增 1. 然后又依次打印了 `arr` 中的每个元素. 故输出为

6 4 5 3 2

读者需要注意这里 `for` 语句的格式, 它的循环变量是定义在左闭右开区间 $[0, n)$ 上的, 其中 `n` 是数组的长度. 换言之循环变量被初始化为开始位置的索引, 而

循环条件为它小于所需截取的长度. 这样的格式在很多特殊条件下也能产生符合直觉的结果, 我们**建议**读者使用.

6.2 二维数组和高维数组

我们可以通过语法

类型 标识符[n][m] = { 初始值 };

来声明一个二维数组, 它的长度为 n , 元素为长度为 m 的一维数组. 也就是说它是元素为数组的数组. 二维数组的初始值用大括号包裹, 内部形如一维数组的初始值, 大括号之间用逗号隔开. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int arr[3][2] = { { 0, 1 }, { 7, 8 }, { 4, 5 }
3                     };
4     return 0;
5 }
```

就声明了一个二维数组, 它有三个元素, 每个元素是一个长度为 2 的整型一维数组. 它们依次分别是

0, 1

7, 8

4, 5

特别地, 和一维数组相似, 初始值单列一个 0 虽然不符合二维数组初始值的语法, 但也表示把所有 (数组中的) 元素初始化为 0. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int arr[3][2] = { 0 };
```

```
3
4     return 0;
5 }
```

二维数组也可以用中括号来访问,但需要注意二维数组用中括号访问一次得到的是一个数组,需要对这个数组再用中括号访问一次,才能得到对应位置的值。例如前文定义的 `arr` 是二维数组, `arr[1]` 表示的是 `arr` 中储存的第 1 个数组,我们如果想得到这个数组的第 0 个值,我们需要使用 `arr[1][0]`。例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int arr[3][2] = { { 0, 1 }, { 7, 8 }, { 4, 5 }
6                     };
7     printf("%d\n", arr[1][0]);
8     system("pause");
9
10    return 0;
11 }
```

这段代码将输出 `arr` 中储存的第 1 个数组的第 0 个值,即 7。故输出为

```
7
```

二维数组之所以被称为“二维”,是因为它也可以被理解为把数据排成一个方阵,第一个索引表示行,第二个索引表示列。例如下面的例子将以方阵形式输出 `arr`:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int arr[3][2] = { { 0, 1 }, { 7, 8 }, { 4, 5 }
6                     };
7 }
```

```
7     printf("\t%4d%4d\n\n", 0, 1);
8     for(int i = 0; i < 3; i++){
9         printf("%4d\t", i);
10        for(int j = 0; j < 2; j++){
11            printf("%4d", arr[i][j]);
12        }
13        printf("\n");
14    }
15
16    system("pause");
17
18    return 0;
19 }
```

它的输出为

| | | |
|---|---|---|
| | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 |
| 1 | 7 | 8 |
| 2 | 4 | 5 |

所以 `arr[1][0]` 也可以看作第 1 行第 0 列的元素, 故为 7. 所以二维数组常常被用来表示矩阵.

类似地, 我们可以定义三维数组, 四维数组等, 不再赘述.

6.3 实例: 简单的排序算法

算法学中的一个基础内容就是排序算法, 指的是通过一系列操作, 把一个数组中的元素从小到大 (或从大到小) 排列. 本节介绍两种最基础的排序算法, 冒泡排序和选择排序.

冒泡排序

冒泡排序基于一个朴素的思想：如果我们想让一组数据从小到大排序，那么就不断交换其中相邻的，前一个大，后一个小的数据对，直至数据有序。例如对于数组

3, 4, 1, 5

我们从 (3, 4) 开始检查, (3, 4) 顺序合理, 检查下一个; (4, 1) 顺序不合理, 交换, 数组变为 3, 1, 4, 5; (4, 5) 顺序合理, 检查下一个. 到达最后一组, 停止第一轮, 数组变为

3, 1, 4, 5

我们接着从 (3, 1) 开始检查, 顺序不合理, 交换, 数组变为 (1, 3); 后面的数据对顺序都合理, 保持不变, 停止第二轮, 数组变为

1, 3, 4, 5

我们接着检查, 发现每一组的顺序都合理, 所以数组已经有序, 结束程序.

把思路总结起来, 要实现冒泡排序, 我们首先需要设置一个变量 `flag`, 来表示数组是否有序. 然后需要设置一个外层死循环, 在循环中我们依次做三件事:

- 把 `flag` 初始化为 1.
- 遍历数组, 检查每对数据的顺序是否合理:
 - 若合理, 不做任何事.
 - 若不合理, 交换它们, 并把 `flag` 更新为 0.
- 检查 `flag` 的值, 若为 1, 则跳出循环.

我们称这样形似代码的有逻辑结构的文本为伪代码, 它通常能帮助我们理清思路, 并把思路翻译成代码.

我们来解释这里设置 `flag` 的方式为什么有效. 我们在每轮循环中先假定数据是有序的 (`flag = 1`), 然后执行主要的部分 (比较数据对), 在执行过程中, 如果没有发生交换, 说明数据的确是有序的, 与此同时 `flag` 会保持 1, 那么我们就能在结

束主要部分后跳出循环; 若在执行过程中交换了数据, 那么说明我们对数据有序的假定是错误的, 同时我们也不能保证在完成本轮之后它就会变成有序的, 因此我们把 `flag` 设为 0, 再进行一轮, 并把判断本轮循环后是否有序的任务移交给下一轮循环.

我们把它翻译成代码:

代码片段 六.1:

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  int main(){
5      int n, arr[100] = { 0 };
6      scanf("%d", &n);
7      for(int i = 0; i < n; i++){
8          scanf("%d", &arr[i]);
9      }
10
11     while(1){
12         int flag = 1;
13
14         for(int i = 0; i < n - 1; i++){
15             if(arr[i] > arr[i + 1]){
16                 int temp = arr[i];
17                 arr[i] = arr[i + 1];
18                 arr[i + 1] = temp;
19                 flag = 0;
20             }
21         }
22
23         if(flag == 1){
24             break;
25         }
26     }
27
28     for(int i = 0; i < n; i++){
```

```
29     printf("%d ", arr[i]);
30 }
31
32 printf("\n");
33 system("pause");
34
35 return 0;
36 }
```

几个值得注意的点：

1. 这段代码的输入格式是先输入我们需要排序的数组的长度，再依次输入数据，用空格隔开。
2. 我们先把 `arr` 的长度定义为了 100，而接下来的代码中我们把它当作了一个长度为 `n` 的数组使用。因此我们需要保证我们待排序的数组长度不大于 100。我们在第6.4中讲解为什么要这么做，以及我们现在可以怎么做。
3. 在交换两个值时，由于直接写 `arr[i] = arr[i + 1]`；那么 `arr[i]` 的数据就会因被覆盖掉而丢失，所以我们需要定义一个中间变量 `temp`。具体交换的方法代码语义已经很显然了。
4. 主体部分我们的遍历上限是 `n - 1`，因为 `n` 个数据中只有 `n - 1` 组数据对。读者可以自行尝试改成 `n` 会有什么结果，想想这是为什么。

例如我们如果输入

```
5
1 4 3 7 2
```

程序将输出

```
1 2 3 4 7
```

说明我们的程序是成功的。读者也可以尝试更大规模的数据样本。当然，在此基础上仍然有很多优化空间，读者可以自行尝试。

选择排序

选择排序基于另一个朴素的思想, 如同我们理扑克牌, 我们从左手中选取最小的一张放到右手, 如此反复直到左手不剩牌, 那么右手的牌就是有序的. 读者可以自行尝试设计, 实现, 优化.

这两种排序算法需要使用两层循环, 按照前面我们学过的知识, 我们知道在数据规模很大时它们的效率很低. 除了这两种最简单的排序算法外, 最常用的排序算法有快速排序和归并排序等, 针对特殊情况效率很高的排序算法有桶排序等. 读者可以自行了解.

6.4 * 变长数组 *

我们在前文中所有数组在声明时的长度都是一个确定的值, 这其实是历史原因, 最早的 C 语言标准中数组的长度必须是在编译时就确定的. 但是 C99 标准¹允许以变量的值为数组的长度进行声明. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int n = 10;
3
4     int arr[n];
5
6     return 0;
7 }
```

但是上面的代码中一旦数组被声明了, 它的长度和 `n` 就没有任何关系了, 例如下面的例子

```
1 int main(){
2     int n = 10;
3
4     int arr[n];
```

¹最早的 C 语言没有标准, 各大编译器厂商自行实现, 这导致了不同的编译器编译同一段代码可能产生不同的结果. 于是 1989 年, ANSI(American National Standards Institute, 美国国家标准化协会的缩写) 制定了第一版 C 语言标准 C89. 而后 C 语言也不断发展, 陆续推出了 C99, C11, C17 等标准 (后续的标准的更新大多是关于 C++ 而非 C 的), 它们允许了某些新特性.

```
5  
6     n += 5;  
7  
8     return 0;  
9 }
```

中, 执行完 `n` 自增 5 后, 并不会使 `arr` 的长度增长 5.

但是由于一方面 C89 标准中这样的代码是错误的, 在部分嵌入式开发中可能遇到因 C 语言标准过低而报错的问题; 另一方面 C++ 并不支持这样的特性, 养成这样的习惯可能对未来读者学习 C++ 带来障碍, 所以我们**不太推荐**这么做. 当然我们可以通过别的方法实现变长数组, 虽然会更麻烦一些, 但上面提到的这些兼容性问题都不存在, 我们将在第9.8节中介绍.

第七章

函数

C 语言被称为面向过程语言, 简单地说就是函数式编程. 可以说 C 语言组织代码结构的核心就是函数. 有了函数, 我们的代码可以更模块化, 更低耦合, 也就是说功能和功能之间互相依赖更小, 方便我们添加新功能和修改旧功能, 而不必牵一发而动全身.

编程语言中的函数和数学中的函数不同, 虽然它们的英文都是 Function, 但前者更偏向于“功能”的意项. 函数除了可以实现根据参数返回一个值外, 还可以执行若干指令.

7.1 函数的定义和使用

函数的定义形如

```
类型 标识符(类型1 参数1, 类型2 参数2,...){  
    语句块  
}
```

其中类型除了包括变量可以声明的几种类型外, 还可以为 `void` 无类型. 参数可以有若干个, 也可以没有, 它们前面的类型分别表示它们的类型. 语句块被称为这个函数的函数体. 若类型不是无类型, 那函数体中至少需要包含一个 `return` 语句. 一个函数被定义后, 我们就可以在后文中调用它, 调用的方法为 `标识符(参数1, 参数2,...)`, 那么代码运行至此时就会执行标识符对应函数的函数体. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>  
2 #include <stdlib.h>  
3  
4 void func(){  
5     printf("abcd\n");  
6  
7     int arr[3] = { 0 };  
8     for(int i = 0; i < 3; i++){
```

```
9         printf("%d ", arr[i]);
10     }
11     printf("\n");
12 }
13
14 int main(){
15
16     printf("start\n");
17
18     func();
19
20     printf("end\n");
21
22     system("pause");
23
24     return 0;
25 }
```

我们定义了一个无类型无参数函数 `func()`，调用它时会先打印 `abcd`，然后定义一个数组 `arr` 并初始化元素为 0，然后逐个打印其中的元素。程序仍然会从主函数开始，那么我们会先打印 `start`，然后调用 `func()`，然后打印 `end`。故输出为

```
start
abcd
0 0 0
end
```

注意到主函数其实也是一个函数，这也是它为什么被称为主“函数”。

我们也可以为 `func` 设置一个参数，例如下面的例子：

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 void func(int n){
5     printf("abcd\n");
6 }
```

```
7     int arr[100] = { 0 };
8     for(int i = 0; i < n; i++){
9         printf("%d ", arr[i]);
10    }
11    printf("\n");
12 }
13
14 int main(){
15
16     printf("start\n");
17
18     func(5);
19
20     printf("end\n");
21
22     system("pause");
23
24     return 0;
25 }
```

我们为 func() 函数添加了一个参数 n, 在函数体输出 arr 的前 n 个元素. 在主函数中我们为 func 传入了 5, 那么 func 中的 n 就等于 5, 于是就会输出 arr 中的前 5 个元素. 故输出为

```
start
abcd
0 0 0 0 0
end
```

我们也可以为 func 设置一个返回值, 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int func(int n){
5     printf("abcd\n");
6 }
```

```
7     int arr[100] = { 0 };
8     for(int i = 0; i < n; i++){
9         printf("%d ", arr[i]);
10    }
11    printf("\n");
12
13    return 10;
14 }
15
16 int main(){
17
18     printf("start\n");
19
20     int a = func(5);
21
22     printf("end\n");
23
24     printf("a: %d\n", a);
25
26     system("pause");
27
28     return 0;
29 }
```

`func` 这时会返回 10, 相当于我们调用 `func()` 时, 它会被看作一个返回值为 10 的表达式. 那么主函数中 `a` 的值就为 10. 故输出为

```
1 start
2 abcd
3 0 0 0 0 0
4 end
5 a: 10
```

函数也可以被多次调用, 有返回值的函数也不一定需要用变量来承接它的返回值, 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
```

```
2 #include <stdlib.h>
3
4 int func(int n){
5     printf("abcd\n");
6
7     int arr[100] = { 0 };
8     for(int i = 0; i < n; i++){
9         printf("%d ", arr[i]);
10    }
11    printf("\n");
12
13    return 10;
14 }
15
16 int main(){
17
18     func(3);
19
20     int a = func(5);
21
22     printf("a: %d\n", a);
23
24     system("pause");
25
26     return 0;
27 }
```

输出为

```
abcd
0 0 0
abcd
0 0 0 0 0
a: 10
```

但是我们本节中定义的 `func()` 函数是很丑陋的, 因为它是一些没有关系的功

能的堆砌. 关于什么时候需要定义一个函数, 我们**建议**采用下面的规范:

- 每一个函数只完成一个特定的功能, 当有两个功能需要被完成时, 就定义两个独立的函数.
- 当一个功能需要多次出现时, 把它定义为函数.
- 当一个功能的实现需要超过两层嵌套是, 把嵌套的内部定义为函数.

例如第冒泡排序[六.1](#), 它是一个相对独立的, 并且可能需要被多次调用的功能, 所以我们更好的做法是把代码写作:

代码片段 七.1:

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  int bubble_sort(int arr[], int len){
5      while(1){
6          int flag = 1;
7
8          for(int i = 0; i < len - 1; i++){
9              if(arr[i] > arr[i + 1]){
10                 int temp = arr[i];
11                 arr[i] = arr[i + 1];
12                 arr[i + 1] = temp;
13                 flag = 0;
14             }
15         }
16
17         if(flag == 1){
18             break;
19         }
20     }
21
22     return 0;
23 }
24
```

```
25 int main(){
26     return 0;
27 }
```

注意, 这段代码中有些参数传递的问题是我们还没有解释的, 后面的章节中将详细介绍.

如此这般, 冒泡排序这个功能就被我们抽象出来了, 当我们在任何地方需要用到它时, 直接把需要排序的数组和数组长度作为参数传递给它就可以了. 而主函数中也不一定需要出现冒泡排序的代码了. 当我们需要测试冒泡排序功能时, 我们可以再定义一个函数 `test()`:

```
1  int test(){
2      int n = 0, arr[100] = { 0 };
3      scanf("%d", &n);
4      for(int i = 0; i < n; i++){
5          scanf("%d", &arr[i]);
6      }
7
8      bubble_sort(arr, n);
9
10     for(int i = 0; i < n; i++){
11         printf("%d ", arr[i]);
12     }
13
14     printf("\n");
15     system("pause");
16
17     return 0;
18 }
```

而在主函数中直接调用 `test()` 即可, 当我们不需要测试时只需要简单把主函数中 `test()` 的调用删去即可. 这就是模块化和解耦合.

此外, 我们**不推荐**把函数定义为无类型函数, 我们**建议**把一个不需要返回值的函数定义为整型, 当它正确运行时返回 0, 当它出现异常情况时返回一个非零值. 例如 C 语言规范中规定 `main()` 函数就是这么做的.

其实我们在前面的章节中已经见过一些函数了, 例如 `printf()` 函数和 `scanf()` 函数. 当我们引用头文件时, 就相当于把头文件中的这些函数包含到我们的代码中来, 允许我们在代码中调用它们.

7.2 函数的声明

和变量相似, 在没有本节将介绍的声明的情况下, 函数只能在函数定义之后调用. 但是函数中是可以调用别的函数的, 首先大型项目数百数千个函数, 按照调用顺序依次排列很繁琐; 其次打开代码映入眼帘的先是各种高度模块化的函数, 却不知道这些函数被用来干什么了, 代码阅读时思想负担很重; 最致命的是两个函数相互调用时, 代码不可能编译通过. 因此, 我们在 C 语言中可以声明函数.

一个函数的声明形如

类型 标识符(类型1 参数1, 类型2 参数2,...);

简而言之就是函数定义的第一行. 我们也可以省去参数, 写作

类型 标识符(类型1, 类型2,...);

函数被定义了, 相当于告诉编译器有这么一个函数, 只需要在代码中任意位置补上这个函数的定义 (也称为函数的实现, 相应地, 函数的定义被称为函数的原型), 就可以在函数定义之后调用这个函数了. 例如第冒泡排序[六.1](#)可以写作:

代码片段 七.2:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int bubble_sort(int arr[], int len); // sort the arr
   , whose length equals to len
```

```
5  int test();
6
7  int main(){
8      test();
9      return 0;
10 }
11
12 int test(){
13     int n = 0, arr[100] = { 0 };
14     scanf("%d", &n);
15     for(int i = 0; i < n; i++){
16         scanf("%d", &arr[i]);
17     }
18
19     bubble_sort(arr, n);
20
21     for(int i = 0; i < n; i++){
22         printf("%d ", arr[i]);
23     }
24
25     printf("\n");
26     system("pause");
27
28     return 0;
29 }
30
31 int bubble_sort(int arr[], int len){
32     while(1){
33         int flag = 1;
34
35         for(int i = 0; i < len - 1; i++){
36             if(arr[i] > arr[i + 1]){
37                 int temp = arr[i];
38                 arr[i] = arr[i + 1];
39                 arr[i + 1] = temp;
40                 flag = 0;
```

```
41         }
42     }
43
44     if(flag == 1){
45         break;
46     }
47 }
48
49 return 0;
50 }
```

虽然主函数中调用 `test()` 时它还没被定义, 但在代码开头已经声明过它了, 所以调用是合法的. 编译器会自动在后续代码中寻找 `test()` 函数的定义, 并把它们链接到一起.

我们建议在大型项目中使用如下的代码结构规范:

第一部分 用注释说明程序目的, 修改日期, 修改作者等信息, 然后编写预处理命令 (例如引入头文件, 第8章将介绍).

第二部分 声明全局变量 (第7.4节将介绍).

第三部分 声明需要用到的所有函数, 并添加注释表明函数功能.

第四部分 主函数. 主函数中不包含任何功能性代码, 只应包含表明程序最基础逻辑结构的语句, 和实现具体功能的函数的调用.

第五部分 实现所有函数.

7.3 函数的参数

函数定义时的参数被称为形式参数 (简称形参), 调用时的参数被称为实际参数 (简称实参). 例如下面的例子:

代码片段 七.3:

```
1 int func(int a, double b){
```

```
2     return 0;
3 }
4
5 int main(){
6     func(1, 2.5);
7     return 0;
8 }
```

中, `a` 和 `b` 就是形参, `1` 和 `2.5` 就是实参.

我们也可以设置数组形参和字符串形参, 设置的方法例如下面的例子:

```
1 int func1(int arr1[], int *arr2, int arr3[10]){
2     return 0;
3 }
4
5 int func2(int arr[][5]){
6     return 0;
7 }
8
9 int func3(char str1[], char *str2){
10     return 0;
11 }
```

其中, `func1` 展示了设置一维数组形参的三种形式, `arr1` 和 `arr2` 是不定长的, `arr3` 是定长为 10 的. `func2` 展示了设置二维数组形参的方式, 需要注意只有第一个中括号中的长度是可省的. `func3` 展示了设置字符串形参的方式. 这些写法的含义我们会在第[九章](#)和第[十章](#)讲解.

形参和实参的类型, 数量都要一一对应, 调用时, 实参会被赋值给形参. 故代码[七.3](#)就可以理解为

```
a = 1;
b = 2.5;
```

如果这样, 那么我们就应该注意到一个容易被新手忽略的问题: 函数中对形参的操作, 是不会对实参产生影响的, 因为形参只是实参的一个副本, 而非实参本身. 例如下面的例子:

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  int swap(int x, int y){
5      int temp = x;
6      x = y;
7      y = temp;
8      return 0;
9  }
10
11 int main(){
12     int a = 1, b = 2;
13
14     swap(a, b);
15
16     printf("a: %d  b: %d\n", a, b);
17     system("pause");
18
19     return 0;
20 }
```

中, 我们尝试用 `swap` 函数交换两个数的值, 但是输出仍然为

```
1 2
```

也就是说 `a, b` 并没有被交换. 那么交换是否发生了呢? 其实在函数体中, `x` 和 `y` 的值确实被交换了, 但它们只是 `a` 和 `b` 的副本, 不会影响 `a` 和 `b` 的值.

但基础数据类型中, 两个特例是字符串和数组. 例如第7.1节中冒泡排序函数的代码, 显然改变了 `arr` 中元素的值. 这和我们提到的规则是否违背? 其实不违背. 这些现象的原因是什么? 对于普通的数据类型我们怎么实现在函数中改变实参的值? 我们将在第九章中讲解.

7.4 变量的作用域

每个变量都有其作用域, 只有在其作用域之内它才能被调用, 而作用域结束时, 作用域中声明的所有变量会被操作系统回收. 例如下面的例子

```
1 int func(int a){
2     a = 1;
3     return 0;
4 }
5
6 int main(){
7     int a = 2;
8     a++;
9     return 0;
10 }
```

中, `a` 在 `func()` 中被声明了, 在主函数中也被声明了, 但编译器并没有报错. 这是因为前者的作用域局限于 `func()` 函数中, 而后者的作用域局限于主函数中, 二者是两个不同的变量. 因此, 我在主函数中令 `a` 自增和 `func()` 中的 `a` 没有关系, 反之亦然.

此外, 在一个函数中, 每个大括号规定了一个作用域. 例如下面的例子

```
1 int main(){
2
3     for(int i = 0; i < 5; i++){
4         int a;
5     }
6
7     int a;
8
9     return 0;
10 }
```

中, 第一个 `a` 被声明在了 `for` 规定的作用域中, 在 `for` 结束时就被回收了, 所以我们可以再一次声明 `a`.

此外, 下面的代码也是合法的:

```
1 int main(){
2
3     int a;
4
5     for(int i = 0; i < 5; i++){
6         int a;
7     }
8
9     return 0;
10 }
```

因为小作用域中可以重新声明大作用域中的变量. 那么如果我们在小作用域中调用 `a`, 它指代的是哪个变量呢? 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5
6     int a = 1;
7
8     for(int i = 0; i < 5; i++){
9         int a;
10        a = 2;
11    }
12
13    printf("%d\n", a);
14    system("pause");
15
16    return 0;
17 }
```

输出为

```
1
```

所以小作用域中如果重新定义了变量, 小作用域中对这个标识符的调用, 调用的是小作用域中的变量, 而对大作用域中的变量没有影响.

此外, 定义在所有函数之外的变量被称为全局变量, 它的作用域是整个程序, 所有的函数都可以访问它, 与之相对应的, 定义在函数中的变量被称为局部变量. 例如下面的例子:

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  int a = 1;
5
6  int func(){
7      a++;
8
9      return 0;
10 }
11
12 int main(){
13     printf("%d\n", a);
14
15     func();
16
17     printf("%d\n", a);
18
19     return 0;
20 }
```

将输出

```
1
2
```

一般情况下, 全局变量可使用的内存空间更大. 例如如果在主函数中声明 `int arr[100000000];`, 那么这个数组会占用 $100000000 \times 4B = 4E8B = 381MB$ 内存, 而一般局部变量总共只能使用 2MB 的内存空间, 故程序会因使用超出可用内存的内存而发生段错误意外结束. 但如果我把这个数组声明为全局变量, 全局变量可使

用的内存, 粗糙地说, 取决于电脑内存大小, 381MB 对于数 G 内存而言不过毛毛雨, 则不会发生段错误.

在个人代码中, 我们不反对定义全局变量. 但在更复杂的代码例如工程代码中, 由于变量数太多, 全局变量可能引入很多问题, 我们**不推荐**定义全局变量.

7.5 函数的返回值

函数可以使用 `return` 语句返回一个值. 语法形如

```
return 表达式;
```

函数将返回表达式的值, 然后函数结束.

当函数类型为无类型时, 也可以使用

```
return;
```

表示函数结束.

我们**建议**, 当函数不需要返回任何东西时, 把函数返回类型设置为 `int` 而非 `void`, 并在函数正常运行之后返回 0. 主函数也是这么做的, 在主函数结束处返回 0 是告诉操作系统, 我们的程序正常运行了.

此外, 我们也可以在函数运行中使用 `return` 语句, 来中途停止函数运行, `return` 语句后的所有内容将不再被执行. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int func(){
```

```
5     int a = 0;
6
7     return 0; // 以下的内容将不会被执行.
8
9     printf("%d\n", a);
10
11    return 0;
12 }
13
14 int main(){
15
16     func();
17
18     system("pause");
19
20     return 0;
21 }
```

运行后可以发现, 程序并没有打印 a.

这常被用于在函数开头时检查输入是否合法, 或是否到达边际条件, 如果输入可能导致函数运行异常, 则提前跳出函数. 例如冒泡排序[七.2](#)的函数体可以修改为:

代码片段 七.4:

```
1 int bubble_sort(int arr[], int len){
2     if(len < 0){
3         return -1;
4     }
5
6     while(1){
7         int flag = 1;
8
9         for(int i = 0; i < len - 1; i++){
10             if(arr[i] > arr[i + 1]){
11                 int temp = arr[i];
12                 arr[i] = arr[i + 1];
```

```
13         arr[i + 1] = temp;
14         flag = 0;
15     }
16 }
17
18     if(flag == 1){
19         break;
20     }
21 }
22
23     return 0;
24 }
```

若数组长度小于零, 直接返回-1 表示不合法的输入, 并不再运行后续代码.

如此这般, 我们就可以在调用函数时知晓函数是否正常运行了, 形如:

```
1 if(bubble_sort(arr, len) == -1){
2     // 发生错误, 处理.
3 }
```

注意, 排序算法虽然被写在表达式中, 但是它仍然会运行, 并把 `arr` 排序. 这就是所谓“编程语言中的函数和数学中的函数不同”.

我们**建议**总是在函数开头判断异常情况.

7.6 递归

函数也可以调用自己, 这种情况被称为递归. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int func(){
4
5     printf("Ha");
6 }
```

```
7     func();
8
9     return 0;
10 }
11
12 int main(){
13
14     func();
15
16     return 0;
17 }
```

我们调用 `func()` 后, 它将打印 `Ha`, 然后调用 `func()`, 再次调用的 `func()` 中又将再次调用 `func()`, 如此往复. 但是程序运行一段时间后就自己停止了, 这是因为当递归层数过多时, 会发生爆栈错误. 所以递归程序我们一定要设置边际条件, 到达边际条件时递归停止. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int func(int n){
4     if(n <= 0){
5         return 0;
6     }
7
8     printf("Ha");
9
10    func(n - 1);
11
12    return 0;
13 }
14
15 int main(){
16
17    func(10);
18
19    return 0;
```

```
20 }
```

我们为 `func()` 设置了一个形参 `n` 来控制它, 当形参小于等于 0 时, 不再向下递归. 而每次递归调用自己时, 传入的参数减 1, 故当我们输入一个正数 `n` 时, `func()` 会被调用 `n + 1` 次, 并输出 `n` 个 `Ha`.

7.7 实例: 斐波那契数列

我们举一个例子, 来展示递归程序的应用.

其中, 斐波那契数列 $\{F_n\}$ 满足

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2} \quad (n \geq 3) \quad (1)$$

$$F_1 = F_2 = 1 \quad (2)$$

我们还是从最朴素的想法出发. 我们设置函数 `F(int n)` 表示第 `n` 项, 把式2当作递归的边际条件, 若不满足边际条件, 则利用式1向下递归运算, 然后加上输入合法性判定, 我们有:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 unsigned long F(int n){
5     if(n < 1){ // 非法输入
6         return 0;
7     }
8
9     if(n == 1 || n == 2){ // 边际条件
10        return 1;
11    }
12
13    return F(n - 1) + F(n - 2);
14 }
15
```

```

16 int main(){
17     int n = 0;
18     scanf("%d", &n);
19
20     printf("%lu\n", F(n));
21     system("pause");
22
23     return 0;
24 }

```

例如我们输入 6, 程序正确输出了 8. 读者可以大脑当 CPU, 纸当内存, 脑测这段代码的运行, 来了解递归程序的运行机制.

但读者可以尝试输入 45, 这并不是一个很大的数, 但是程序却运行了一会才给出答案, 而读者可以尝试输入 70(其实 F_{70} 已经溢出了), 程序此时的运行时间可能需要数万年. 因此这段代码是急需优化的!

我们先来考虑为什么会需要这么久. 我们输入 45, 那么 $F(44)$ 和 $F(43)$ 被调用了, 故 $F(44)$ 被调用了 1 次, 而 $F(44)$ 又会调用 $F(43)$ 和 $F(42)$, 故 $F(43)$ 被调用了 2 次, 以次类推, $F(42)$ 被调用了 4 次, $F(41)$ 被调用了 8 次, ..., $F(2)$ 被调用了 $2^{44} \approx 1.7\text{E}13$ 次. 而程序总共发生多少次调用呢? $2^0 + 2^1 + \dots + 2^{44} = 2^{45} - 1 \approx 1.7\text{E}13$ 次! 而随着 n 的增大, 运行时长也呈指数型增长.

究其原因, 是因为发生了大量的重复计算. 例如 8 次 $F(41)$ 的调用中, 显然只有第一次是必要的, 然而剩余 7 次仍然运行了, 并重复计算了 $F(41)$ 的值. 因此我们可以考虑建立一个全局数组 `Fib`, 用来储存斐波那契数列的值. 当递归程序运行时, 先检查数组是否已知此项的值了, 若已知, 则直接返回, 若未知, 在进行递归计算. 例如下面的例子:

```

1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  unsigned long Fib[1000000] = { 0 };
5
6  unsigned long F(int n){
7      if(n < 1){ // 非法输入
8          return 0;

```

```
9     }
10
11     if(n == 1 || n == 2){ // 边际条件
12         return 1;
13     }
14
15     if(Fib[n] != 0){
16         return Fib[n];
17     }else{
18         Fib[n] = F(n - 1) + F(n - 2);
19         return Fib[n];
20     }
21 }
22
23 int main(){
24     int n = 0;
25     scanf("%d", &n);
26
27     printf("%lu\n", F(n));
28     system("pause");
29
30     return 0;
31 }
```

这时得出结果已经很快了。当然, 读者可能已经发现, 这里的递归是并不必要的, 因为我们可以把代码改成:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 unsigned long Fib[100000] = { 0 };
5
6 unsigned long F(int n){
7     Fib[1] = 1;
8     Fib[2] = 1;
9 }
```

```

10     for(int i = 3; i <= n; i++){
11         Fib[i] = Fib[i - 1] + Fib[i - 2];
12     }
13
14     return Fib[n];
15 }
16
17 int main(){
18     int n = 0;
19     scanf("%d", &n);
20
21     printf("%lu\n", F(n));
22     system("pause");
23
24     return 0;
25 }

```

我们用递推代替了递归, 这不仅避免了 n 过大时爆栈, 也优化掉了调用函数所需的时间. 这段代码也尚有很多优化空间, 读者可以自行尝试.

除了运行效率上的优化, 我们还可以优化代码支持的范围. 但是关于支持的范围的优化是无止境的, 因为只要我们需要的 F_n 足够大, 再大的内存空间也不够用. 归根结底, 优化都是无止境的, 关键要看问题的需求. 在实际应用中, 满足需求的代码就是好代码, 追求完美优化往往适得其反.

当然, 正如指南中其它例子展示的那样, 这并不是最好的解决方法. 最好的方法是利用斐波那契数列满足

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{\sqrt{5}+1}{2} \right)^n - \left(\frac{\sqrt{5}-1}{2} \right)^n \right]$$

来计算. 这个式子可以用母函数法, 特征值法等方法证明, 求幂级数可以使用快速幂算法优化. 有读者可能担心根号 5 使用 `double` 类型储存可能在数据很大时引入误差, 其实这也可以靠模 p 数域解决. 读者可以自行了解.

此外, 一种效率优秀, 用时稳定, 并且还满足一些其它性质的排序算法——归并排序也是使用递归实现的. 读者可以自行了解.

总结:

- 递归程序常常比较抽象复杂, 需要先逻辑推演清楚.
- 一个优秀的递归程序效率很高, 与此同时一个劣质的递归程序效率可能非常低, 使用递归一定要慎重.

第八章

预处理命令

广义上的编译固然指将代码变为可执行文件的过程, 但狭义上的编译却只是广义上的编译中的一个环节. 广义上的编译被分为预处理, 狭义上的编译, 汇编, 链接四个过程. 其中, 在预处理阶段被编译器处理的命令被称为预处理命令.

预处理的输出仍然是代码, 但是会根据源代码中的预处理命令, 对代码进行增添, 替换, 删除.¹ 本章中只列出了部分预处理命令.

注意, 预处理阶段不会检查代码语法.

8.1 注释

注释是最简单的预处理命令, 它们会在预处理阶段被删去或改为空白符. 这也是为什么注释中的内容对程序没有影响. 例如下面的例子:

```
1  /*
2      * Hello! I'm a comment.
3      */
4
5  int main(){
6      // Nice to meet you. I'm also a comment.
7      return 0;
8  }
```

经过预处理会得到:

```
1  int main(){
2
3      return 0;
4  }
```

已略去其它提示文件信息等信息的内容, 后文亦是如此.

¹读者若感兴趣, 可以部署 gcc 编译器, 使用 -E 指令提示编译器只进行预处理, 查看代码被预处理后的结果.

8.2 #include 命令

`#include` 命令我们已经很熟了, 它会把目标文件展开到源文件中, 例如 `#include <stdio.h>` 会把 `stdio.h` 这个文件中的内容展开到我们的源文件中, 仅仅 `#include <stdio.h>` 一行, 在预处理后的文件中就被展开为了 881 行各类函数的声明, 以及其它定义和说明. 正因有了这些函数的声明, 我们才得以调用 `stdio.h` 中包含的函数. (这些函数的定义另在它处)

此外, `#include` 命令后的文件名也可以用双引号包裹, 表示从同目录下开始搜索目标文件. 我们也可以引用自己的文件. 例如如果在同目录下创建两个文件 `abc.h` 和 `test.c`, 分别写入如下代码:

代码片段 八.1: `abc.h`

```
1 How do you do?
```

代码片段 八.2: `test.c`

```
1 #include "abc.h"
2
3 int main(){
4     return 0;
5 }
```

那么 `test.c` 被预处理后将得到:

```
1 How do you do?
2
3 int main(){
4     return 0;
5 }
```

双引号既能引用官方库, 又能引用自建库, 而尖括号只能引用官方库. 我们建议读者在引用标准库时使用尖括号, 在引用自己的库时使用双引号. 一方面由于双引号优先搜索同目录文件, 而尖括号优先搜索官方库所在路径, 这样做能加快编译速度; 另一方面这也是一种约定俗成, 能一眼便知哪些库是官方库, 哪些库是自建库.

8.3 #define 命令

#define 命令可以定义一个宏, 语法形如

#define 宏名 内容

在预处理时, 编译器会把所有与宏名相同的独立的文本, 替换为内容, 被称为宏展开, 注意宏展开只是简单的替换. 例如下面的例子:

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  #define N 10
5  #define IF if(
6
7  int main(){
8      int arr[N] = { 0 };
9      for(int i = 0; i < N; i++){
10         printf("%d ", arr[i]);
11     }
12
13     IF 1){
14         system("pause");
15     }
16
17     return 0;
18 }
```

被预处理后将得到 (省去):

```
1  int main(){
2      int arr[10] = { 0 };
3      for(int i = 0; i < 10; i++){
```

```
4         printf("%d ", arr[i]);
5     }
6
7     if( 1){
8         system("pause");
9     }
10
11     return 0;
12 }
```

可见文中所有的 `N` 都被替换成了 `10`, 而所有 `IF` 都被替换成了 `if`。前者好处多多, 例如我们在需要修改数组范围时, 只需在代码开头修改宏定义的值即可, 而无需全文一处一处查找替换, 我们**建议**这么做; 后者则后患无穷, 很容易导致语义混淆, 我们**不推荐**这么做。

此外, 我们也**建议**普通的宏名使用如下命名规范:

- 全使用大写字母。
- 多个单词之间用下划线隔开。

例如 `#define HASH_KEY 127598716`。

当我们的代码中有需要大量使用的特殊常数, 或具有含义的特殊数据时, 我们**建议**使用宏。虽然宏也可以展开为常用的代码段, 我们却**不建议**这么做。

8.4 * 带参宏函数 *

我们也可以为宏加上参数, 好像函数一样, 被称为带参宏函数, 但宏函数的机理还是替换而非像真正的函数一样运行。它的语法形如:

```
#define 宏名 (形参1, 形参2,...) 内容
```

其中, 宏名和包裹形参的括号之间不可以由空白符. 当展开宏时, 在宏名后加上括号, 传入实参, 即可把内容中的形参替换为对应实参. 例如下面的例子:

```
1 #define max(a, b) (a > b)? a : b
2
3 int main(){
4     int a = 5;
5     max(a, 7);
6 }
```

经过预处理会得到:

```
1 int main(){
2     int a = 5;
3     (a > 7)? a : 7;
4 }
```

但是由于运算符优先级的问题, 这种写法很容易导致问题, 例如下面的例子:

```
1 #define max(a, b) (a > b)? a : b
2
3 int main(){
4     int a = 5;
5     max(a, 7) + 4;
6 }
```

经过预处理会得到:

```
1 int main(){
2     int a = 5;
3     (a > 7)? a : 7 + 4;
4 }
```

我们本是需要 a 和 7 中大的那个加上 4, 但实际的语义却是 a 和 7+4 中大的那个. 解决方法很简单, 只需把宏的内容用括号包裹即可:

```
1 #define max(a, b) ((a > b)? a : b)
2
```



```
3 int main(){
4     int a = 5;
5     max(a, 7) + 4;
6 }
```

我们**建议**当用带参宏函数来表示与参数的式子时,总是这么做.

宏函数和真正的函数有许多行为不同的地方,这里不一一列举.读者只需遵循宏函数本质是替换进行推演,便可一一辨明.

此外,带参宏函数还有一些吊诡的应用,例如下面的例子:

```
1 #define CODE_BLOCK(name, expr, stat) name(expr){
   stat }
2
3 int main(){
4     int arr[10] = { 0 };
5     CODE_BLOCK(for, int i = 0; i < 10; i++,
6               CODE_BLOCK(if, i % 2 == 0, arr[i]++;))
7     return 0;
8 }
```

经过预处理会得到:

```
1 int main(){
2     int arr[10] = { 0 };
3     for(int i = 0; i < 10; i++){ if(i % 2 == 0){ arr
4                                   [i]++; } }
5     return 0;
6 }
```

这样做虽然能运行,但代码语义很混乱.当多个形如这样的带参宏互相嵌套时,代码将变得非常混乱,我们**不推荐**这么做.但这也提醒我们,宏函数的本质只是替换.

第九章

指针

有人说, 指针是 C 语言的灵魂, 其形容是否过度暂且不表, 指针确实在 C 语言中发挥着异常重要的作用. 除此之外, 指针也揭开了程序运行中诸多现象的本质, 前文中大量奇怪的程序行为背后的原因都将在本章中得到解答.

注意, 本节内容可能较难, 遇到一时难以想通的地方, 读者要仔细思考, 或用程序实验. 想通之后, 就基本学通了 C 语言了.

9.1 变量在内存中的储存

每个变量都被储存在内存中. 内存被逐字节排序, 从 `0x0000 0000` 到 `0xFFFF FFFF`(这远远低估了地址的范围, 实际上根据 64 位系统和 32 位系统的差异, 寻址范围各有区别且都远大于此), 每一位被排到的序号就称为这一位的地址. 一个变量占用的内存位中, 最小的地址被称为这个变量的地址¹. 例如一个 `unsigned int` 型的变量, 占用 4 位内存, 值为 `0xF00F FF00`. 假设它的地址为 `0x0061FDF4`, 那么内存排布将形如表 9.1.

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------------|---|---|---|---|---|---|---|------------|---|---|---|---|---|---|---|
| ... | 0x0061FDF4 | | | | | | | | 0x0061FDF5 | | | | | | | |
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---|---|---|---|---|---|---|------------|---|---|---|---|---|---|---|-----|
| 0x0061FDF6 | | | | | | | | 0x0061FDF7 | | | | | | | | ... |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

表 9.1: 内存排布表

已知地址, 那么 CPU 就可以访问该地址, 读取或写入对应地址中储存的值. 我们的程序中对变量的所有操作, 都是基于此, 变量的本质也就是对应内存地址中的值.

例如 `x = a + b`; 在 CPU 看来, 就是取出 `a` 指代的地址中的值, 然后取出 `b` 指代的地址中的值, 对它们执行加法运算, 然后把结果写入 `x` 指代的地址.

操作变量地址的工具就是指针. 几乎所有高级语言都禁止了指针, 因为它太过底层. 所以 C 语言是最接近底层, 最接近硬件的高级语言.

¹本节这些讨论只是理想情况, 实际情况有大小端等分别.

9.2 指针的定义和使用

指针的声明形如

数据类型 *标识符;

其中数据类型是这个指针要储存地址的变量的类型. * 只表示它后面一个变量是指针. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a, *p, b; // a, b是普通变量, p是指针.
3
4     return 0;
5 }
```

& 称为取址运算符, 给定变量 a, &a 将返回它的地址, 可以赋值给对应类型的指针. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     int a = 10;
3     int *p = &a;
4
5     return 0;
6 }
```

p 中就储存有 a 的地址了, 此时称 p 指向 a.

指针在 printf() 中的控制符为%p, 将会以十六进制格式输出指针, 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
```

```
5     int a = 10;
6     int *p = &a;
7
8     printf("%p\n", p);
9     system("pause");
10
11     return 0;
12 }
```

将输出 `a` 的地址. 多次运行输出不同, 这是因为每次运行系统分配给 `a` 的地址都不同. 但是在同一次运行内, `a` 的地址是不会变的, 在声明 `a` 时就已确定.

`*` 被称为取值运算符, 给定指针 `p`, `*p` 表示 `p` 指向的变量的值. 注意这和指针声明时的星号无关. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a = 10;
6     int *p = &a;
7
8     printf("%d %d\n", a, *p);
9
10    *p = 5;
11
12    printf("%d\n", a);
13
14    system("pause");
15
16    return 0;
17 }
```

将输出

```
10 10
5
```

我们也可以定义指针数组, 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int *p[3];
6
7     int a, b, c;
8
9     p[0] = &a;
10    p[1] = &b;
11    p[2] = &c;
12
13    printf("%24p %24p %24p\n", p[0], p[1], p[2]);
14
15    system("pause");
16
17    return 0;
18 }
```

读者可能发现输出不是两两相隔 4 字节的, 也就是说我们连续定义的三个变量 `a`, `b` 和 `c` 在内存中却不是连续排列的, 这是因为我们运行程序时, 还有大量其它进程在运行, 内存存在吐息之间变化很大, 操作系统因此会为它们分配不同的地址.

指针的类型可以被表示为

指向的数据类型*

例如 `int *p;` 中 `p` 的类型为 `int*`. 但是注意, 不可以把 `int *p;` 理解为 `int* p;`, 星号在指针的声明中只表示它的后一个变量是指针.

我们习惯上用 `NULL` 表示一个指针不指向任何变量, `NULL` 是标准库中的一个宏, 值为 0.

9.3 指针的运算

指针也可以进行加减法运算和比较运算, 前者表示地址的移动, 后者则表示比较两个指针储存地址的高低. 注意, 指针的加减并不是数值上加减, 而是以指针对应类型的长度为一个单位进行加减.

例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int a;
6     int *p = &a;
7
8     printf("%p %p\n", p, p + 1);
9     system("pause");
10
11     return 0;
12 }
```

的输出相差了 4, 而 `int` 占用的内存长度就是 4B.

指针也可以和指针进行加减运算, 但这一般没有意义, 并且很容易导致错误, 我们**不推荐**这么做. 此外, 读者可以尝试运行如下例子:

```
1 int main(){
2     int a;
3     int *p = &a;
4
5     p += 10000;
6
7     *p = 10;
8
9     return 0;
10 }
```


程序发生了段错误意外停止. 这是因为 `a` 的地址加 10000, 是未分配给我们程序的内存, 可能没有程序在占用, 也可能别的应用甚至操作系统在占用. 如果我们尝试修改它的内容, 最好的结果是无事发生, 否则轻则在运行的应用崩溃, 重则操作系统崩溃, 很危险. 这样尝试访问非本程序所有的内存的指针称为野指针. 一般情况下, 我们**不推荐**对指针进行运算, 因为容易写出野指针.

9.4 数组与指针

数组的本质是开辟了申请一段连续的内存, 例如 `int arr[10]`; 将申请 $4 \times 10 = 40\text{B}$ 的内存. 与申请变量不同的是, 这段内存一定是连续的. 而数组的标识符其实是指向这段内存头部地址的指针. 因此下面的两种写法是等价的:

```
arr[i]
*(arr + i)
```

想想这是为什么, 这也就将通了数组的使用的底层逻辑. 也就解释了为什么数组下标从 0 开始. 也就讲通了为什么数组不能越界, 因为数组越界相当于访问野指针.

其实按逻辑推理, 下面两种写法也是等价的:

```
arr[5]
5[arr]
```

而事实上它们也都能被正确编译和运行, 尽管我们**极不推荐**这么做, 但想想这是为什么.

9.5 二维指针

此外, 因为指针本身也是一个变量, 只是它储存的值较特殊, 是一个地址, 但这个值本身也需要一个地址储存, 所以我们自然可以对一个指针取址, 那么自然也可以把地址赋值给另一个指针. 这个指向指针的指针就叫二维指针. 在声明二维指针时, 使用两个星号.

例如下面的例子:

```
1  int main(){
2      int a;
3
4      int *p1 = &a;
5
6      int **p2 = &p1;
7
8      *p2; // = p1
9
10     **p2; // = *p1 = a
11
12     return 0;
13 }
```

此外, 二维数组是数组的数组, 而数组是一段内存头部的指针, 那么二维数组就是指针的指针, 所以二维数组本质就是二维指针.

所以下面两种写法是等价的:

```
arr[i][j]
*(*(arr + i) + j)
```

所以二维数组只使用一个中括号时, 表示一个指针, 换言之下面两种写法是等价的:

```
arr[i]
*(arr + i)
```

其中 `arr` 是二维指针, 故取一次值为一个一维指针.

同理可知高维指针的含义和使用, 此处略.

9.6 指针作为函数的参数

第7.3节中我们提到形参和实参之间只传递值, 但并不是同一个变量了. 但用下面的方法就可以实现在函数内修改函数外的变量的值:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int swap(int *a, int *b){
5     int temp = *a;
6     *a = *b;
7     *b = temp;
8
9     return 0;
10 }
11
12 int main(){
13     int x = 4, y = 3;
14
15     printf("%d %d\n", x, y);
16
17     swap(&x, &y);
18
19     printf("%d %d\n", x, y);
20
```

```

21     system("pause");
22
23     return 0;
24 }

```

输出为

```

4 3
3 4

```

可见 `x` 和 `y` 确实交换了。这是因为我们传入的并非 `x` 和 `y`, 而是 `x` 和 `y` 的地址。尽管按照函数传参的规则, 储存地址的变量, 也就是指针 `a` 和 `&x`, `b` 和 `&y` 并非同一个变量了, 但是我们并不需要它们相同, 我们只需要得到 `x` 和 `y` 的地址, 它们的地址在一次运行期间是不会变的, `swap()` 内部直接用地址访问 `x` 和 `y`, 那么访问的自然就是两个变量本身了, 于是可以实现交换。

这也解释了为什么代码七.1中能够修改实参 `arr` 的值, 因为我们传入的是数组, 而数组是指针, 所以在内部调用 `arr[i]` 时, 其实是在已知地址求值, 于是求得的结果和实参是同一个变量, 在代码内部可以直接修改。

除此之外, 这也解释了 `scanf()` 中要改变的变量需要用 `&` 修饰, 是为了传入它们的地址, 使得函数内部能够修改它们的值。也解释了为什么在输入字符串时不需要用取址运算符, 因为字符串本质是数组, 数组本质是指针, 所以传入字符串的标识符, 就已经足以修改其值了。将在第十章中详细讲解。

9.7 * 函数指针 *

函数的标识符其实也是一个指针, 我们也可以把它作为参数传入函数中。那么当我们在函数体中调用函数指针形参时, 就会调用对应的传入的函数。例如下面的例子:

```

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int callfunc(int (*func)()){
5     (*func)();

```

```
6     return 0;
7 }
8
9 int func1(){
10     printf("A sail!\n");
11     return 0;
12 }
13
14 int func2(){
15     printf("A veil awave upon the waves.\n");
16     return 0;
17 }
18
19 int main(){
20     int x = 4, y = 3;
21
22     callfunc(func1);
23
24     callfunc(func2);
25
26     system("pause");
27
28     return 0;
29 }
```

函数指针常见的应用例如优化代码七.4, 使之能适应更多变的需求:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 #define N 5
5
6 int arr[N] = {3, 5, 1, 7, 6};
7
8 int print();
9 int comp_default(int a, int b);
```

```
10 int bubble_sort(int arr[], int len, int (*comp)(int
    a, int b));
11
12 int main(){
13
14     print();
15
16     bubble_sort(arr, N, comp_default);
17
18     print();
19
20     system("pause");
21
22     return 0;
23 }
24
25 int print(){
26     for(int i = 0; i < N; i++){
27         printf("%d ", arr[i]);
28     }
29     printf("\n");
30     return 0;
31 }
32
33 int comp_default(int a, int b){
34     if(a < b){
35         return 1;
36     }else{
37         return 0;
38     }
39 }
40
41 int bubble_sort(int arr[], int len, int (*comp)(int
    a, int b)){
42     if(len < 0){
43         return -1;
```

```
44     }
45
46     while(1){
47         int flag = 1;
48
49         for(int i = 0; i < len - 1; i++){
50             if(!comp(arr[i], arr[i + 1])){
51                 int temp = arr[i];
52                 arr[i] = arr[i + 1];
53                 arr[i + 1] = temp;
54                 flag = 0;
55             }
56         }
57
58         if(flag == 1){
59             break;
60         }
61     }
62
63     return 0;
64 }
```

其中利用了 C 语言提供的语法糖, 当函数指针作为形参时, 函数内部可以不对其取值, 默认表示其取值结果. `bubble_sort()` 第 3 个参数传入一个函数指针, 这个函数的含义是对于一对相邻数据, 当有序时, 返回真, 否则返回假.

当我们传入 `comp_default` 时, 就表示从小到大排序; 例如我们如果想实现从大到小排序, 只需要编写:

```
1 int comp_reverse(int a, int b){
2     if(a > b){
3         return 1;
4     }else{
5         return 0;
6     }
7 }
```

并作为 `bubble_sort()` 的第 3 个参数传入即可。

9.8 * 申请内存和内存泄漏 *

如果我们执行：

```
1 int main(){
2     int *p;
3     *p = 10;
4
5     return 0;
6 }
```

就会发生段错误，这是因为 `p` 尚未被分配指向的内存，系统会随机为它分配一个值，于是相当于访问野指针。我们可以使用 `malloc()` 和 `free()` 显式地为指针申请内存。

`malloc()` 的原型为 `void *malloc(int size)`。它会申请一段大小为 `size` 字节的内存，并返回这段内存的头部地址。在使用完毕后，我们需要用 `free()` 显式将其释放。例如下面的例子：

```
1 #include <stdlib.h>
2
3 int main(){
4     int *p = (int*)malloc(sizeof(int));
5     *p = 10;
6     free(p);
7
8     return 0;
9 }
```

其中 `sizeof()` 的用法见第13.1节。

我们可以利用这种方法模拟数组。例如下面的例子：

```
1 #include <stdio.h>
```



```
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     int *p = (int*)malloc(10 * sizeof(int));
6
7     for(int i = 0; i < 10; i++){
8         p[i] = i + 1;
9     }
10
11     for(int i = 0; i < 10; i++){
12         printf("%d ", p[i]);
13     }
14
15     printf("\n");
16     system("pause");
17
18     free(p);
19
20     return 0;
21 }
```

想想这是为什么.

除此之外, 我们也能模拟多维数组, 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 #define N 3
5 #define M 2
6
7 int main(){
8     int **p = (int**)malloc(N * sizeof(int*));
9     for(int i = 0; i < N; i++){
10         p[i] = (int*)malloc(M * sizeof(int));
11     }
```

```
12
13     for(int i = 0; i < N * M; i++){
14         p[i / M][i % M] = i;
15     }
16
17     for(int i = 0; i < N; i++){
18         for(int j = 0; j < M; j++){
19             printf("%d ", p[i][j]);
20         }
21         printf("\n");
22     }
23
24     system("pause");
25
26     for(int i = 0; i < N; i++){
27         free(p[i]);
28     }
29     free(p);
30
31     return 0;
32 }
```

想想这是为什么, 有什么好处, 又有什么别的用法.¹

需要注意, `malloc()` 和 `free()` 总是需要配套出现, 否则操作系统不会自动释放程序员显式申请的内存, 会导致内存泄漏. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdlib.h>
2
3 int main(){
```

¹由于问题较复杂, 贴出答案示例, 供参考.

1. 略.
2. 可以灵活申请可变长度的内存.
3. 可以申请非方阵形的二维数组. 例如我们先申请三个储存指针的内存空间, 其中第一个指针申请 1 个单位内存, 第二个申请 2 个单位, 第三个申请 3 个单位, 就可以申请得到形如三角形的二维数组.

```
4     while(1){
5         malloc(1);
6     }
7     return 0;
8 }
```

运行一段时间后将会发生段错误, 因为不断申请内存, 最后超过限度. 但是内存泄漏往往不这么显眼, 而是非常隐蔽地藏在某个循环或分支中, 申请不可回收的内存也不这么迅速, 而是会在数小时到数天之内逐渐占满内存. 这种情况很难 DEBUG, 所以我们**建议**在编写 `malloc()` 时, 就立即将 `free()` 写好, 正如写好前大括号就立即写后大括号那样.

此外, 当申请内存和递归和其它更复杂的结构嵌套在一起时, 很容易发生内存泄漏, 要谨慎.

第十章

字符串

10.1 字符串, 数组与指针

其实读者应该已经看出, 字符串是字符类型的数组, 字符串的标识符是指向这个数组地址头部的指针. 所以和数组以及指针有关的操作都可以应用在字符串上. 但是字符串有两个特殊的地方:

字符串常量

字符串常量用双引号包裹, 值为这段字符串的头部地址指针. 它可以用在字符串的初始化中, 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     char *str1 = "May the force be with you.";
3     char str2[] = "So uncivilized.";
4
5     return 0;
6 }
```

但字符串一旦初始化, 再把字符串变量赋值给数组型字符串就是错误的, 我们只能适用下标访问的方式修改字符串了. 例如下面的例子:

```
1 int main(){
2     char str[] = "May the force be with you.";
3
4     str = "ABC"; // 错误.
5
6     str[0] = 'A';
7     str[1] = 'B';
8     str[2] = 'C';
9
10    return 0;
11 }
```

我们可以把字符串常量赋值给指针型的字符串, 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     char *str = "May the force be with you.";
6
7     printf("%s\n", str);
8
9     str = "So uncivilized.";
10
11    printf("%s\n", str);
12
13    system("pause");
14
15    return 0;
16 }
```

但这种直接赋值的写法是**错误**的, 因为相当于开辟了一段新内存, 用于储存 `So uncivilized.`, 并令 `str` 指过去, 但是原来的 `May the force be with you.` 仍然留存在内存中的另一处地方没有被释放, 因此造成了内存泄漏.

特殊元素

字符串中有一个特殊元素 `\0`, 它的值为 0, 它总是字符串的最后一个元素, 表示字符串结束. 也就是说, 一个长度为 10 的字符串, 最多只能储存 9 个字符, 因为最后一个元素必须是 `\0`.

例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
```

```

4  int main(){
5      char str[3];
6      str[0] = 'A';
7      str[1] = 'B';
8      str[2] = 'C';
9
10     printf("%s\n",str);
11     system("pause");
12
13     return 0;
14 }

```

的输出会发生意料之外的错误, 因为 `printf()` 读取不到 `\0`, 认为字符串还没有结束, 就会继续读取后续内存并以字符形式输出, 直到读取到值为 0 的内存. 所以输出可能是乱码例如

AB 烫烫烫烫烫烫烫]D 癆 .

10.2 字符串的处理函数

`strcat()`

`strcat()`¹接受两个字符串参数, 会把第二个字符串拼接到第一个之后. 第一个字符串大小需要能够容纳两个字符串, 否则会发生越界错误.

`strcpy()`

`strcpy()`²接受两个字符串参数, 会把第二个字符串拷贝到第一个字符串中. 第一个字符串大小需要能够容纳第二个字符串, 否则会发生越界错误.

¹STRing CATenate, 字符串拼接的缩写.

²STRing CoPY, 字符串拷贝的缩写.

strcmp()

`strcmp()`¹接受两个字符串参数, 会比较两个字符串内容是否相同, 返回真假值.

sprintf()

`sprintf()` 类似 `printf()`, 只是它的第一个参数是一个字符串指针, 它会把输出结果输出到字符串指针中, 可以理解为虚拟打印机. 它可以方便地完成字符串拼接, 插入, 修改等内容.

¹STRing CoMPare, 字符串比较的缩写.

第十一章

结构体

结构体是一种程序员自己定义的数据类型, 一个结构体变量中储存着若干个变量. 一个结构体的定义形如

```
struct 结构体名 {  
    内部变量声明  
};
```

注意定义的大括号后面需要一个分号.

当我们定义了一个结构体后, 就可以声明类型为这种结构体的变量, 语法形如

```
struct 结构体名 变量名;
```

我们也可以在定义结构体时, 声明结构体变量, 语法形如

```
struct 结构体名 {  
    变量声明  
} 结构体变量名;
```

当我们声明了结构体变量后, 就可以用点运算符. 来访问其中的变量, 语法形如

```
结构体变量名. 内部变量名
```

例如下面的例子:

```
1 struct STU{
2     int a;
3     double b;
4 }x;
5
6 int main(){
7     struct STU y;
8
9     x.a = 1;
10    x.b = 2.5;
11
12    y.a = 0;
13    y.b = 1.3;
14
15    return 0;
16 }
```

定义了一种结构体 STU, 它的内部包含了整型的 a 和浮点型的 b 两个变量. 然后声明了两个类型为STU的变量 x 和 y, 接着分别把其内部的 a 和 b 赋值为了 1, 0 和 2.5, 1.3.

结构体可以互相赋值, 例如下面的例子:

```
1 struct STU{
2     int a;
3     double b;
4 };
5
6 int main(){
7     struct STU x, y;
8
9     x.a = 1;
10    x.b = 2.5;
11
12    y.a = 0;
13    y.b = 1.3;
```

```
14
15     struct STU temp = x;
16     x = y;
17     y = temp;
18
19     return 0;
20 }
```

就交换了 `x` 和 `y`.

我们也可以像基本的数据类型那样, 定义结构体数组和结构体指针, 它们的用法和基本数据类型的数组和指针相同, 在此不再赘述. 特别地若 `A` 为一个结构体指针, 那么 `(*A).x` 可以简写为 `A->x`.

结构体相当于把若干变量捆绑在一起, 当发生赋值等操作时, 这些变量会被一起赋值. 这在处理同一个对象的不同属性时很有用, 例如我们可以定义一个结构体 `STUDENT`, 它包含学生姓名和学生成绩, 然后根据学生成绩对学生进行排序, 那么学生姓名也会随之一起被排序. 例如下面的例子:

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  #define N 3
5
6  struct STUDENT{
7      int score;
8      char *name;
9  }class_L9[N];
10
11 int init();
12 int print(struct STUDENT arr[], int len);
13 int swap(struct STUDENT *a, struct STUDENT *b);
14 int bubble_sort(struct STUDENT arr[], int len);
15
16 int main(){
17     init();
18 }
```

```
19     print(class_L9, N);
20     printf("\n");
21
22     bubble_sort(class_L9, N);
23
24     print(class_L9, N);
25
26     system("pause");
27
28     return 0;
29 }
30
31 int init(){
32     class_L9[0].score = 71;
33     class_L9[0].name = "Andy";
34
35     class_L9[1].score = 63;
36     class_L9[1].name = "Bob";
37
38     class_L9[2].score = 93;
39     class_L9[2].name = "Carol";
40
41     return 0;
42 }
43
44 int print(struct STUDENT arr[], int len){
45     for(int i = 0; i < 3; i++){
46         printf("%s: %d\n", arr[i].name, arr[i].score
47             );
48     }
49     return 0;
50 }
51
52 int swap(struct STUDENT *a, struct STUDENT *b){
53     struct STUDENT temp = *a;
54     *a = *b;
```

```
54     *b = temp;
55     return 0;
56 }
57
58 int bubble_sort(struct STUDENT arr[], int len){
59     if(len < 0){
60         return -1;
61     }
62
63     while(1){
64         int flag = 1;
65         for(int i = 0; i < len - 1; i++){
66             if(arr[i].score > arr[i + 1].score){
67                 swap(&arr[i], &arr[i + 1]);
68                 flag = 0;
69             }
70         }
71         if(flag == 1){
72             break;
73         }
74     }
75     return 0;
76 }
```

输出为

```
Andy: 71
Bob: 63
Carol: 93

Bob: 63
Andy: 71
Carol: 93
```

可见，我们在 `bubble_sort()` 中只对成绩进行了排序，在结果中学生名字也随着成绩一同进行了排序。

此外, 利用函数指针, 我们可以编写泛用性更广的排序. 例如下面的例子:

```
1  int bubble_sort(struct STUDENT arr[], int len,  
    int (*comp)(struct STUDENT a, struct STUDENT b  
    )){  
2      if(len < 0){  
3          return -1;  
4      }  
5  
6      while(1){  
7          int flag = 1;  
8          for(int i = 0; i < len - 1; i++){  
9              if(!comp(arr[i], arr[i + 1])){  
10                 swap(&arr[i], &arr[i + 1]);  
11                 flag = 0;  
12             }  
13         }  
14         if(flag == 1){  
15             break;  
16         }  
17     }  
18     return 0;  
19 }
```

其中, 形参 `comp()` 指定排序方法. 它的规则是, 对于一对相邻数据, 当有序时, 它返回真, 否则返回假.

如果我们现在想实现按照首字母顺序排序, 那么我们只需要编写 `comp2()` 函数如下 (默认首字母大写):

```
1  int comp2(struct STUDENT a, struct STUDENT b)  
    {  
2      if(a.name[0] < b.name[0]){  
3          return 1;  
4      }else{  
5          return 0;  
        }
```

```
6     }  
7 }
```

并在调用 `bubble_sort()` 时使用:

```
1 bubble_sort(class_L9, N, comp2);
```

即可.

第十二章

文件输入输出

12.1 打开文件

`FILE` 是 `stdio.h` 中的一个结构体, 其指针变量专门用于进行文件操作, 称为文件指针. 我们称声明一个 `FILE*` 变量并赋值的过程为打开文件.

打开文件的函数为 `fopen()`, 它需要两个字符串参数, 第一个参数指定目标文件的相对路径, 第二个参数指定打开方式. 文件操作完毕后需要使用 `fclose()` 函数关闭文件. 二者总是一一对应.

例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int main(){
4     FILE *fp = fopen("test.txt", "w"); // 以写入方式
        打开同目录下的test.txt文件, 储存在文件指针fp
        中.
5     fclose(fp); // 关闭fp对应的文件.
6
7     return 0;
8 }
```

其中, 打开方式有 `w`, `r`, `a` 三种.

w 以写入方式打开, 打开后只可以写入, 不可以读取文件内容. 若文件存在, 那么将清空文件内容; 若文件不存在, 那么将新建空白文件.

r 以只读方式打开, 打开后只可以读取, 不可以写入文件内容. 若文件存在, 那么将打开文件; 若文件不存在, 将返回空指针 `NULL`.

a 以追加方式打开, 效果同 `w`, 只是不会清空文件内容, 写入的内容将追加在文件末尾.

我们也可以在打开方式后添加 `+` 后缀, 使得其它效果不变, 但可以随意读写文件.

我们也可以添加后缀 `b` 或 `t`, 指定文件格式为二进制格式还是字符串格式. 当后缀缺乏时, 默认为 `t`.

例如"r+b" 就表示打开文件, 若文件不存在则返回空指针 `NULL`. 可以随意读写文件. 文件读写格式为二进制.

C 语言默认有两个文件指针 `stdin` 和 `stdout`, 分别为控制台输入和输出, 尽管控制台不是文件, 但其实也可以按照文件处理.

此外, 与字符串的最后一个元素是`\0` 类似, 可以认为文件的最后一个字符是 `EOF`¹. `EOF` 实际上是 `stdio.h` 中的一个宏.

12.2 字符和字符串读写

`fgetc()`

原型为 `int fgetc(FILE *fp)`, 与 `getc()` 类似, 区别在于从文件指针 `fp` 指向的文件而非控制台中读取.

`fputc()`

原型为 `int fputc(int ch, FILE *fp)`, 与 `putc()` 类似, 区别在于向文件指针 `fp` 指向的文件而非控制台中写入.

`fgets()`

原型为 `char *fgets(char *str, int n, FILE *fp)`. 其中 `str` 为储存内容的数组, `n` 为读取长度, `fp` 为指向目标文件的文件指针. 注意, 读取长度包括`\0`, 故实际上最多只能从 `fp` 指向的文件中读取 `n - 1` 个字符.

`fgets()` 遇到三种情况会停止读取:

1. 字符串长度到达读取长度.
2. 读取到换行.

¹End Of File, 文件末尾的缩写.

3. 读取到 EOF.

其它功能与 `gets()` 类似.

fputs()

原型为 `int fputs(char *str, FILE *fp)`, 与 `puts()` 类似, 区别在于向文件指针 `fp` 指向的文件而非控制台中写入.

例如, 在同目录下分别创建 `abc.txt` 和 `test.c` 两个文件, 分别写入:

代码片段 十二.1: `abc.txt`

```
THIS! IS! FIRST! LINE!!!  
be water, my friend.  
--Bruce Lee
```

代码片段 十二.2: `test.c`

```
1 #include <stdio.h>  
2  
3 int main(){  
4     FILE *fp = fopen("abc.txt", "r");  
5     if(fp == NULL){  
6         printf("ERROR: file not found.");  
7         return 0;  
8     }  
9  
10    char *str;  
11    fgets(str, 100, fp);  
12    printf("%s", str);  
13  
14    printf("\n\n");  
15  
16    char c;  
17    while((c = fgetc(fp)) != EOF){  
18        printf("%c", c);
```

```
19     }
20
21     return 0;
22 }
```

那么输出为

```
THIS! IS! FIRST! LINE!!!
```

```
be water, my friend.
    --Bruce Lee
```

12.3 格式化读写

`stdio.h` 中还提供了两个文件读写函数 `fprintf()` 和 `fscanf()`, 它们分别与 `printf()` 和 `scanf()` 类似, 只是第一个参数需要提供文件指针, 而输入输出也将指向 `fp` 指向的文件.

但是注意, `fscanf()` 不会在末尾时为待输入文本传递 `EOF`, 此时我们需要 `feof()` 来判断, 它的参数为文件指针, 返回是否已经到达文件末尾, 若到达, 返回非零值, 否则返回 0.

例如代码[十二.2](#)等价于:

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int main(){
4     FILE *fp = fopen("abc.txt", "r");
5     if(fp == NULL){
6         printf("ERROR: file not found.");
7         return 0;
8     }
9
10    char *str;
```

```
11     fscanf(fp, "%s", str);
12     printf("%s", str);
13
14     printf("\n\n");
15
16     int c;
17     while(1){
18         fscanf(fp, "%c", &c);
19         if(feof(fp) != 0){
20             break;
21         }
22         printf("%c", c);
23     }
24
25     return 0;
26 }
```


第十三章

其他内容补充

13.1 sizeof()

`sizeof()` 可以看作一种特殊的单目运算符, 它会返回小括号中对象占用的内存大小 (单位: B). 特别地, 它可以作用于数据类型等对象. 例如下面的例子:

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3
4  struct test1{
5      int a;
6      double b;
7  };
8
9  int main(){
10
11     int a = 0;
12     int arr1[10] = { 0 };
13     int *arr2 = (int*)malloc(10*sizeof(int));
14
15     printf(
16         "%d\n"
17         "%d\n"
18         "%d\n"
19         "%d\n"
20         "%d\n",
21         sizeof(int),
22         sizeof(struct test1),
23         sizeof(a),
24         sizeof(arr1),
25         sizeof(arr2)
26     );
27
28     system("pause");
29
30     free(arr2);
```

```
31
32     return 0;
33 }
```

输出为

```
4
16
4
40
8
```

前两个输出说明 `sizeof()` 可以返回数据类型的内存占用, 其中结构体 `test1` 占用的内存并非 $4 + 8 = 12\text{B}$ 与内存对齐有关. 后三个输出说明 `sizeof()` 可以返回变量的内存占用, 但需要注意的是, 我们把指针当数组用时, `sizeof()` 仍然视其为指针, 并会返回指针的内存占用.

13.2 typedef

typedef 的语法形如

```
typedef 旧类型名 新类型名;
```

这将把新类型名视作旧类型名的别名. 例如下面的例子:

```
1 typedef int INTEGER;
2
3 INTEGER main(){
4     INTEGER a = 0;
5
6     return 0;
7 }
```

等价于

```
1 int main(){
2     int a = 0;
3
4     return 0;
5 }
```

我们也可以为数组起别名:

```
1 typedef char CHAR_20[20];
2
3 int main(){
4     CHAR_20 a = { 0 }, b = { 0 };
5
6     return 0;
7 }
```

等价于

```
1 int main(){
2     char a[20] = { 0 }, b[20] = { 0 };
3
4     return 0;
5 }
```

我们也可以为指针起别名:

```
1 typedef int *PTR_INT;
2
3 int main(){
4     PTR_INT p1, p2;
5
6     return 0;
7 }
```

等价于

```
1 int main(){
2     int *p1, *p2;
3
4     return 0;
5 }
```

我们也可以为结构体起别名:

```
1 typedef struct test{
2     int a;
3     double b;
4 } TEST;
5
6 int main(){
7     TEST stu;
8
9     return 0;
10 }
```

等价于

```
1 struct test{
2     int a;
3     double b;
4 };
5
6 int main(){
7     struct test stu;
8
9     return 0;
10 }
```

需要注意的是, 我们使用 `typedef` 定义新类型后, 就不能在使用时再在新类型前加上别的修饰词了. 例如下面的例子:

```
1 typedef int INTEGER;
2
```

```
3 int main(){
4     unsigned INTEGER a = 0;
5
6     return 0;
7 }
```

会报错. 这和使用 `#define` 定义新类型是不同的.

`typedef` 的意义在于有时我们需要一种特殊的代码内部信息交换格式, 例如接口 `Interface`, 它的值表示调用第几接口, 然而本质上它不过是一个整型变量. 如果我们在需要接口的地方都使用 `int`, 未免容易引起混淆; 但若使用 `typedef int Interface;`, 那么接口变量的语义就显然了. 用一个稍粗糙的比喻来说明, 就是“同样是一块毛巾, `typedef` 告诉我们这块毛巾用来擦脸, 还是用来擦脚.”

13.3 随机数

标准库 `stdlib.h` 中包括了一个随机数生成模块. 其中, 我们使用 `srand(unsigned)` 设置随机数种子, 使用 `rand()` 生成一个随机数. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int main(){
5     srand(0); // 设置随机数种子为0
6
7     for(int i = 0; i < 5; i++){
8         printf("%d\n", rand());
9     }
10
11     system("pause");
12
13     return 0;
14 }
```

将输出

```
38
7719
21238
2437
8855
```

但读者可以多运行几次, 会发现输出始终为这 5 个数. 这是因为计算机生成的随机数是伪随机数. 它其实是根据种子确定的, 分布几乎没有规律的, 周期很大的一个周期函数. 由于它的周期很大, 并且在不知道种子和随机算法的情况下, 很难根据过往数据推知下一个随机, 所以我们可以近似认为它是随机的.

我们可以利用标准库 `time.h` 中的 `time(*time_t)` 函数, 它会返回和运行时间有关的一个值, 这样就可以使得程序每次运行, 生成的随机数序列各不相同. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <time.h>
4
5 int main(){
6     srand((unsigned)time(NULL));
7
8     for(int i = 0; i < 5; i++){
9         printf("%d\n", rand());
10    }
11
12    system("pause");
13
14    return 0;
15 }
```

但短时间内大量运行还是会导致随机序列相近. 另一种设置种子的方法是申请一字节内存, 以内存地址作为随机数种子. 例如下面的例子:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
```

```
4  int main(){
5      void *p = malloc(1);
6      srand((unsigned)p);
7      free(p);
8
9      for(int i = 0; i < 5; i++){
10         printf("%d\n", rand());
11     }
12
13     system("pause");
14
15     return 0;
16 }
```

这种方法随机性大大增强了.

13.4 const

在声明变量时, 我们可以用 `const` 修饰, 表示这个变量可以等同于常量, 它是只读的, 不能通过赋值或其它手段修改它的值. 例如下面的例子:

```
1  int main(){
2      const double SQRT_5 = 2.23607;
3
4      SQRT_5 = 2.0; // 错误.
5
6      return 0;
7  }
```

这有助于防止一些不改被修改的变量被修改. 当这种错误发生时, 编译时即会发生错误, 更容易 DEBUG, 而不至于把错误拖到运行时, 增加 DEBUG 时间.

`const` 也可以修饰函数的形参, 来告知函数的调用者, 实参在函数运行期间不会被修改. 例如下面的例子:


```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int func(const int arr[]){
5
6     return 0;
7 }
8
9 int main(){
10
11     return 0;
12 }
```

当 `const` 修饰指针时, 有两种情况.

`const int *p` 表示 `p` 指向的数据是常量, `*p` 不能修改; 但 `p` 本身的值, 即指向谁是可修改的. 此时称 `p` 为常量指针.

`int *const p` 表示 `p` 本身是常量, `p` 不能修改, 即指向谁不能修改; 但 `*p` 可以修改. 此时称 `p` 为指针常量.

此外, 形如 `const int *const p;` 表示 `p` 本身指向谁不可修改, 同时 `p` 指向的数据不可修改.

但需要注意的是, 下面的代码是允许的:

```
1 int main(){
2     int a = 0;
3     const int *p = &a;
4     a = 10;
5
6     return 0;
7 }
```

也就是说常量指针指向的数据, 不一定是常量.

第十四章

小型编程项目练习推荐

通过自行实现一些小型项目, 我们能更深刻理解编程, 也能体会编程带给我们的成就感. 下面是一些有趣的小型项目推荐, 难度递增. 但注意, 它们中的每一个可能都并不那么容易完成, 也不是所有知识我们都已经完全了解, 刚上手时把它们实现到一个令人满意的程度可能需要数周甚至一两个月. 当遇到阻碍时, 不要忘记搜索和询问的技巧.

小型游戏

例如贪吃蛇, 俄罗斯方块, 2048, 扫雷. 我们可能需要使用休眠函数控制游戏速度, 随机函数产生随即结果, 二维数组储存地图等. 此外, windows 平台的读者可以尝试了解 `conio.h` 头文件, 可能帮助我们实现流畅的输入输出.

计算器

例如算术计算器, 方程计算器等. 前者可以实现加减乘除, 指数对数, 三角函数等的高精度估算; 后者可以实现对输入的方程或方程组进行解析和求解, 这可能需要编译原理的帮助.

基础算法库

例如排序算法, 幂函数算法, 随机算法等. 把它们重新实现一遍, 并在自己的代码中引用它们而非标准库, 可能更有成就感, 尽管我们自己的算法库可能效率和精度都不如标准库.

我们习惯上把成型的基本算法库称为轮子, 把编写基本算法库称为造轮子. 一方面, C 语言在引用别人的轮子时很容易出现符号冲突等问题, 另一方面, C 语言编程社区规模也远不如现代语言编程社区, 因此 C 语言程序员往往在自己的项目中造轮子. 这固然是重复工作, 但也是 C 语言编程特色, 不得不品尝.

简单的电脑病毒

简单的电脑病毒往往原理并不复杂, 我们可以先实现一个在没有任何防火墙保护的电脑上可以自我复制, 并造成破坏的病毒. 记得开启虚拟机实验. 试试用无害

的病毒恶搞你的朋友。

简单的人工智能算法

简单的人工智能其实并不像它的名字那样可怕。读者可以从 MNIST 数据集上的数字识别入手。当你真的创造出一个会学习的“婴儿”，或许编程和你的电脑会更可爱。

第 A 章

附加信息

| 字符编码 | 符号 | 解释 | 字符编码 | 符号 | 解释 |
|--------|-----|--------|------|-----|--------|
| 0 | NUL | 空字符 | 1 | SOH | 标题开始 |
| 2 | STX | 正文开始 | 3 | ETX | 正文结束 |
| 4 | EOT | 传输结束 | 5 | ENQ | 询问 |
| 6 | ACK | 收到通知 | 7 | BEL | 铃 |
| 8 | BS | 退格 | 9 | HT | 水平制表符 |
| 10 | LF | 换行符 \n | 11 | VT | 垂直制表符 |
| 12 | FF | 换页符 | 13 | CR | 回车符 \r |
| 14 | SO | 移出 | 15 | SI | 移入 |
| sub 16 | DLE | 数据链路转义 | 17 | DC1 | 设备控制 1 |
| 18 | DC2 | 设备控制 2 | 19 | DC3 | 设备控制 3 |
| 20 | DC4 | 设备控制 4 | 21 | NAK | 拒绝接收 |
| 22 | SYN | 同步空闲 | 23 | ETB | 传输块结束 |
| 24 | CAN | 取消 | 25 | EM | 介质中断 |
| 26 | SUB | 替换 | 27 | ESC | 换码符 |
| 28 | FS | 文件分隔符 | 29 | GS | 组分分隔符 |
| 30 | RS | 记录分离符 | 31 | US | 单元分隔符 |
| 32 | | 空格 | 33 | ! | 感叹号 |
| 34 | " | 双引号 | 35 | # | 井号 |
| 36 | \$ | 美元符 | 37 | % | 百分号 |
| 38 | & | 与 | 39 | ' | 单引号 |
| 40 | (| 左括号 | 41 |) | 右括号 |
| 42 | * | 星号 | 43 | + | 加号 |
| 44 | , | 逗号 | 45 | - | 连字号或减号 |
| 46 | . | 句点或小数点 | 47 | / | 斜杠 |
| 48 | 0 | 0 | 49 | 1 | 1 |
| 50 | 2 | 2 | 51 | 3 | 3 |
| 52 | 4 | 4 | 53 | 5 | 5 |
| 54 | 6 | 6 | 55 | 7 | 7 |
| 56 | 8 | 8 | 57 | 9 | 9 |

附录 A 附加信息

| | | | | | |
|-----|---|--------|-----|---|--------|
| 58 | : | 冒号 | 59 | ; | 分号 |
| 60 | < | 小于 | 61 | = | 等号 |
| 62 | > | 大于 | 63 | ? | 问号 |
| 64 | @ | 电子邮件符号 | 65 | A | 大写字母 A |
| 66 | B | 大写字母 B | 67 | C | 大写字母 C |
| 68 | D | 大写字母 D | 69 | E | 大写字母 E |
| 70 | F | 大写字母 F | 71 | G | 大写字母 G |
| 72 | H | 大写字母 H | 73 | I | 大写字母 I |
| 74 | J | 大写字母 J | 75 | K | 大写字母 K |
| 76 | L | 大写字母 L | 77 | M | 大写字母 M |
| 78 | N | 大写字母 N | 79 | O | 大写字母 O |
| 80 | P | 大写字母 P | 81 | Q | 大写字母 Q |
| 82 | R | 大写字母 R | 83 | S | 大写字母 S |
| 84 | T | 大写字母 T | 85 | U | 大写字母 U |
| 86 | V | 大写字母 V | 87 | W | 大写字母 W |
| 88 | X | 大写字母 X | 89 | Y | 大写字母 Y |
| 90 | Z | 大写字母 Z | 91 | [| 左中括号 |
| 92 | \ | 反斜杠 | 93 |] | 右中括号 |
| 94 | ^ | 音调符号 | 95 | _ | 下划线 |
| 96 | ` | 重音符 | 97 | a | 小写字母 a |
| 98 | b | 小写字母 b | 99 | c | 小写字母 c |
| 100 | d | 小写字母 d | 101 | e | 小写字母 e |
| 102 | f | 小写字母 f | 103 | g | 小写字母 g |
| 104 | h | 小写字母 h | 105 | i | 小写字母 i |
| 106 | j | 小写字母 j | 107 | k | 小写字母 k |
| 108 | l | 小写字母 l | 109 | m | 小写字母 m |
| 110 | n | 小写字母 n | 111 | o | 小写字母 o |
| 112 | p | 小写字母 p | 113 | q | 小写字母 q |
| 114 | r | 小写字母 r | 115 | s | 小写字母 s |
| 116 | t | 小写字母 t | 117 | u | 小写字母 u |

| | | | | | |
|-----|---|--------|-----|---|--------|
| 118 | v | 小写字母 v | 119 | w | 小写字母 w |
| 120 | x | 小写字母 x | 121 | y | 小写字母 y |
| 122 | z | 小写字母 z | 123 | { | 左大括号 |
| 124 | | 垂直线 | 125 | } | 右大括号 |
| 126 | ~ | 波浪号 | 127 | | 删除 |

表 A.1: ASCII 字符集对照表

| 数据类型 | 占用内存 (B) |
|--------|--------------------|
| int | 4 |
| short | 2 |
| long | 4 或 8 ¹ |
| char | 1 |
| float | 4 |
| double | 8 |

¹ 因操作系统而异

表 A.2: 数据类型占用内存表

| 优先级 | 运算符 ¹ |
|-----|--|
| 1 | [] () . -> |
| 2 | -负号 +正号 (type) ++ -- *取值 &取址 ! ~ sizeof |
| 3 | / *乘法 % |
| 4 | +加法 -减法 |
| 5 | << >> |
| 6 | < > <= >= |
| 7 | == != |
| 8 | &按位与 |
| 9 | ^ |
| 10 | |
| 11 | && |
| 12 | |
| 13 | ?: |
| 14 | = += -= *= /= %= <<= >>= &= ^= = |
| 15 | , |

¹ 表中运算符当发生歧义时运算符后用上标标注运算名称.

表 A.3: 运算符优先级表

| 快捷键 | 解释 |
|------------------|---|
| ctrl + c | 复制. |
| ctrl + x | 剪切. |
| ctrl + v | 粘贴. |
| ctrl + a | 全选. |
| ctrl + z | 撤销上一步操作. |
| ctrl + y | 重做上一步被撤销的操作. |
| ctrl + w | 关闭当前页面. |
| ctrl + f | 查找. 当选中文本时, 会查找选中的文本. |
| ctrl + h | 替换. |
| ctrl + s | 保存. |
| ctrl + shift + s | 另存为. |
| ctrl + / | 注释/恢复选中文本 |
| 左键双击文本 | 选中双击处的一个词. |
| win + 空格 | 切换输入法. 安装并切换至英语输入法后, 误触 ctrl + 空格不会变为中文输入法. |
| 按住 alt, 重复单击 tab | 切换页面. |

表 A.4: 部分常用快捷键

