

第五章 函数

1 认识函数

- 定义函数
- 调用函数
- 调用规则
- 无参列表和 void 返回类型
- 函数声明

2 局部对象和全局对象

- 存储周期
- 局部对象
- 全局对象

3 参数传递

- 值传递
- 引用传递
- const 形参
- 数组形参

4 返回值类型

5 函数重载和特殊用途的函数

- 函数重载
- 默认参数
- 内联函数
- constexpr 函数

6 函数指针和 lambda 表达式

- 函数指针
- lambda 表达式
- lambda 表达式

7 递归调用

- 递推和回归
- 递归和循环

8 编译预处理和多文件结构

- 宏定义
- 条件编译
- 多文件结构

学习目标

- ① 掌握函数的定义，以及常用的参数传递方式和值返回方式；
- ② 理解函数调用机制及对象生命期的概念；
- ③ 能够根据需要编写具有一定实际用途的函数；
- ④ 掌握递归程序设计方法和多文件结构的使用；

5.1 认识函数

函数

具有名字的语句块。

- 通过调用函数的名字可以执行相应的代码块；
- 模块化程序设计的基础。

5.1 认识函数 — 定义函数

函数四要素

- 返回值类型 (return type);
- 函数名 (function name);
- 参数列表 (parameter list);
- 函数体 (function body)。

5.1 认识函数 — 定义函数

函数四要素

- 返回值类型 (return type);
- 函数名 (function name);
- 参数列表 (parameter list);
- 函数体 (function body)。

maximum 函数: 返回两个整数中较大的数

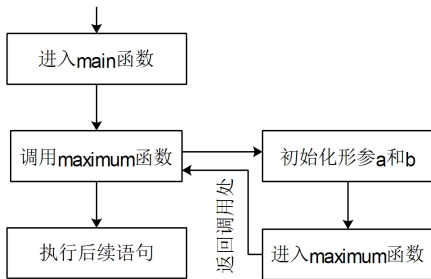
```
int maximum(int a, int b) { //a和b为两个int类型形参
    int c;                //用来保存结果
    c=a > b ? a : b;
    return c;              //返回结果
}
```

5.1 认识函数 — 调用函数

调用 maxnum 函数

```
int maximum(int a, int b) {  
    int c;  
    c=a > b ? a : b;  
    return c;  
}  
  
int main() {  
    int x, y, z;  
    cin >> x >> y;  
    //调用函数maximum, x和y为实参  
    z = maximum(x, y);  
    cout << "The maximum value is "  
        << z << endl;  
    return 0;  
}
```

函数调用过程 (如下):



5.1 认识函数 — 调用规则

调用规则

- 调用处的函数名要和被调函数的函数名一致;
- 实参和形参存在一一对应的关系, 类型要兼容;
- 实参可以是左值或右值, 但形参必须是左值 (用于接受实参的值)。

maximum 函数

```
int maximum(int a, int b)
{
    int c;
    c = a > b ? a : b;
    return c
}
```

是否正确调用 maximum 函数。

```
maximum(1); //错误: 实参数目不足
maximum("c++", "max"); //错误: 类型不匹配
maxi(1, 2); //错误: 函数名和被调函数名不一致
maximum(1, 2, 3); //错误: 实参个数太多
maximum(2.3, 4 + 1); //正确: 第一个实参将被转换为int
                        类型
```


5.1 认识函数 — 无参列表和 void 返回类型

问题：

函数的形参和返回值的作用是什么？

5.1 认识函数 — 无参列表和 void 返回类型

问题：

函数的形参和返回值的作用是什么？

函数的形参和返回值是主调函数和被调函数间信息传递的主要方式。

5.1 认识函数 — 无参列表和 void 返回类型

问题：

函数的形参和返回值的作用是什么？

函数的形参和返回值是主调函数和被调函数间信息传递的主要方式。

无参列表和 void 返回类型例子

```
void fun(){/**/} // 隐式定义空形参列表，返回值类型为~void
```

```
void fun(void){/**/} // 显式定义空形参列表，返回值类型为~void
```

练习

找出下面函数的错误。

1

```
int f(){  
    string s;  
    cin>>s;  
    return s;  
}
```

2

```
//定义一个无返回值的函数  
f2(int i){  
    cout<<i<<endl;  
}
```

3

```
int f(int v1,int v2)  
    int x=v1+v2;  
}
```

4

```
double square(double x)  
return x*x;
```

5.1 认识函数 — 函数声明

引入函数声明的原因

语法上对程序文件中函数的排列次序要求满足**先定义后使用**。

函数声明（函数原型）

- 返回值类型
- 名字
- 形参列表

函数声明的示例

```
int maximum(int a, int b);  
int maximum(int, int);
```

```
int maximum(int a, int b); //函数声明
```

```
int main() {  
    int x, y, z;  
    cin >> x >> y;  
    z = maximum(x, y);  
    cout << "z=" << z << endl;  
}  
  
int maximum(int a, int b) {  
    return c=a > b ? a : b;  
}
```

5.2 认识函数 — 存储周期

对象的生命期和作用域

一个对象的生命期取决于其**存储周期**类型，可访问性取决于**作用域**和**链接性**

5.2 认识函数 — 存储周期

对象的生命期和作用域

一个对象的生命期取决于其**存储周期**类型，可访问性取决于**作用域**和**链接性**

存储周期

存储周期（storage duration）表明了对象可以在内存里面存在的时间。

5.2 认识函数 — 存储周期

对象的生命期和作用域

一个对象的生命期取决于其**存储周期**类型，可访问性取决于**作用域**和**链接性**

存储周期

存储周期 (storage duration) 表明了对象可以在内存里面存在的时间。

C++ 支持四种类型的存储周期

- 自动存储周期 (automatic storage duration);
- 静态存储周期 (static storage duration);
- 动态存储周期 (dynamic storage duration);
- 线程存储周期 (thread storage duration)。

5.2 认识函数 — 存储周期

自动存储周期

定义在函数体或语句块内部的对象（包括函数的形参）。在程序执行到其定义的位置时创建，离开其作用域时被释放，在栈（stack）区分配存储空间。

5.2 认识函数 — 存储周期

自动存储周期

定义在函数体或语句块内部的对象（包括函数的形参）。在程序执行到其定义的位置时创建，离开其作用域时被释放，在**栈**（stack）区分配存储空间。

静态存储周期

定义在函数外面或使用 `static` 关键字声明的对象具有静态存储周期，即在程序运行期间，始终存在，直到程序结束，在**全局数据区**分配存储空间。

5.2 认识函数 — 存储周期

自动存储周期

定义在函数体或语句块内部的对象（包括函数的形参）。在程序执行到其定义的位置时创建，离开其作用域时被释放，在**栈**（stack）区分配存储空间。

静态存储周期

定义在函数外面或使用 `static` 关键字声明的对象具有静态存储周期，即在程序运行期间，始终存在，直到程序结束，在**全局数据区**分配存储空间。

动态存储周期

利用运算符 `new` 生成的对象具有动态存储周期，可利用运算符 `delete` 释放其内存空间，存储周期从 `new` 操作开始，到 `delete` 操作结束，在**堆**（heap）区分配存储空间。

5.2 认识函数 — 存储周期

自动存储周期

定义在函数体或语句块内部的对象（包括函数的形参）。在程序执行到其定义的位置时创建，离开其作用域时被释放，在**栈**（stack）区分配存储空间。

静态存储周期

定义在函数外面或使用 `static` 关键字声明的对象具有静态存储周期，即在程序运行期间，始终存在，直到程序结束，在**全局数据区**分配存储空间。

动态存储周期

利用运算符 `new` 生成的对象具有动态存储周期，可利用运算符 `delete` 释放其内存空间，存储周期从 `new` 操作开始，到 `delete` 操作结束，在**堆**（heap）区分配存储空间。

线程存储周期

为了支持并程序序设计，**C++11** 引入了 `thread_local` 关键字。存储周期在其所在的线程创建时开始，线程结束时结束。

局部对象 (local object)

在**语句块内部**定义的对象，包括函数的形参。

- 仅在相应的语句块内部可见；
- 屏蔽外层作用域中的同名对象；
- 生命期取决于存储类型。

自动对象

- 自动存储周期;
- 初始化方式: (1) 初始值; (2) 默认初始化 (内置类型除外)。

5.2.2 认识函数 — 局部对象

自动对象

- 自动存储周期;
- 初始化方式: (1) 初始值; (2) 默认初始化 (内置类型除外)。

使用自动对象的例子

```
void fun(float x) {  
    int t = x + 5;  
    cout << "t=" << t << endl;  
}  
  
int main() {  
    float t = 3.5;  
    cout << "t=" << t << endl;  
    fun(t);  
    for (int i = 0; i < 10; i++) {  
        float t = i, x = t + i;  
        cout << x << endl;  
    }  
    cout << x << endl; // 在此不可见  
    return 0;  
}
```

局部静态对象

函数体内部定义的局部对象需要静态存储周期，保存上一次调用的计算结果

- 局部作用域；
- 静态生命周期。

5.2.2 认识函数 — 局部对象

局部静态对象

函数体内部定义的局部对象需要静态存储周期，保存上一次调用的计算结果

- 局部作用域；
- 静态生命周期。

请问程序输出结果？

```
int fun() {  
    int a = 0; //a为局部自动对象  
    static int b = 0; //b为局部静态对象  
    return ++b + ++a;  
}  
  
int main() {  
    for (int i = 0; i < 3; ++i)  
        cout << fun() << endl;  
}
```

5.2.2 认识函数 — 局部对象

局部静态对象

函数体内部定义的局部对象需要静态存储周期，保存上一次调用的计算结果

- 局部作用域；
- 静态生命周期。

请问程序输出结果？

```
int fun() {  
    int a = 0; //a为局部自动对象  
    static int b = 0; //b为局部静态对象  
    return ++b + ++a;  
}  
  
int main() {  
    for (int i = 0; i < 3; ++i)  
        cout << fun() << endl;  
}
```

结果为：2 3 4

5.2.2 认识函数 — 局部对象

局部静态对象

函数体内部定义的局部对象需要静态存储周期，保存上一次调用的计算结果

- 局部作用域；
- 静态生命周期。

请问程序输出结果？

```
int fun() {  
    int a = 0; //a为局部自动对象  
    static int b = 0; //b为局部静态对象  
    return ++b + ++a;  
}  
  
int main() {  
    for (int i = 0; i < 3; ++i)  
        cout << fun() << endl;  
}
```

结果为：2 3 4

- 如果内置类型的局部静态对象没有提供初始值，则初始化为 0

5.2 认识函数 — 全局对象

全局对象

在函数外面定义的对象称为全局对象。

- 静态存储周期；
- 全局作用域（文件域）。

5.2 认识函数 — 全局对象

全局对象

在函数外面定义的对象称为全局对象。

- 静态存储周期;
- 全局作用域 (文件域)。

全局对象使用示例

```
int sum = 10; //定义全局对象
int main() {
    int sum = 1; //定义局部对象
    std::cout << sum << std::endl; //访问局部对象sum, 打印输出1
    std::cout << ::sum << std::endl; //访问全局对象sum, 打印输出10
    return 0;
}
```

- 如果内置类型的全局对象没有提供初始值, 则初始化为 0

5.2.3 认识函数 — 全局对象

链接性 (linkage)：在作用域外部的可见性

- 局部对象没有链接性，不能共享；
- 全局对象具有外部链接性(external linkage)，可在文件间共享；
- `static` 修饰的全局对象具有内部链接性 (internal linkage)，只能由同一个文件中的函数共享。

5.2.3 认识函数 — 全局对象

链接性 (linkage)：在作用域外部的可见性

- 局部对象没有链接性，不能共享；
- 全局对象具有外部链接性(external linkage)，可在文件间共享；
- `static` 修饰的全局对象具有内部链接性 (internal linkage)，只能由同一个文件中的函数共享。

fun.cpp

```
//g_val~具有外部链接性  
int g_val = 10;
```

main.cpp

```
extern int g_val;  
//gs_val内部链接性  
static int gs_val = 20;  
int main() {  
    cout << g_val + gs_val;  
    return 0;  
}
```

5.2.3 认识函数 — 全局对象

链接性 (linkage)：在作用域外部的可见性

- 局部对象没有链接性，不能共享；
- 全局对象具有外部链接性(external linkage)，可在文件间共享；
- `static` 修饰的全局对象具有内部链接性 (internal linkage)，只能由同一个文件中的函数共享。

fun.cpp

```
//g_val~具有外部链接性  
int g_val = 10;
```

main.cpp

```
extern int g_val;  
//gs_val内部链接性  
static int gs_val = 20;  
int main() {  
    cout << g_val + gs_val;  
    return 0;  
}
```

提示

尽量不要使用全局对象。

5.3 参数传递

实参和形参的交互方式

- 单向的值传递 (passed by value) 方式;
- 双向的引用传递 (passed by reference) 方式。

5.3.1 参数传递 — 值传递

普通值传递

将实参的值拷贝给形参。

- 非引用类型；
- 改变形参的值，不会影响到实参。

5.3.1 参数传递 — 值传递

普通值传递

将实参的值拷贝给形参。

- 非引用类型；
- 改变形参的值，不会影响到实参。

普通值传递的例子

```
void Swap(int x, int y) {  
    int z(x);  
    x = y;  
    y = z;  
} // 交换x和y的值  
int main() {  
    int i(4), j(5);  
    Swap(i, j); // 调用Swap函数，实参i和j分别初始化Swap函数的形参x和y  
    cout << "i=" << i << ",j=" << j << endl; // 输出i=4,j=5  
}
```

5.3.1 参数传递 — 值传递

例 5.1

找出 10 到 1000 之内的所有回文数。

5.3.1 参数传递 — 值传递

例 5.1

找出 10 到 1000 之内的所有回文数。

分析

回文数指左右对称的数，如 11、121、14341 等。判断一个数是否是回文数，可以把该数字的每一位数计算出来，然后再按照回文数定义判断。

5.3.1 参数传递 — 值传递

代码清单 5.1, 例 5.1

```
...
bool is_palindrome(int x); //函数声明
int main() {
    for (int i = 10; i <= 1000; ++i) {
        if (is_palindrome(i))
            cout << i << endl;
    }
    return 0;
}

bool is_palindrome(int x) {
    vector<int> digit; //存放x的每一位数字
    while (x != 0) {
        digit.push_back(x % 10); //获取当前x的个位数, 并将其尾插到~digit~
        x /= 10; //去掉~x~的个位数
    }
    for (int i = 0, j = digit.size() - 1; i < j; ++i, --j) {
        if (digit[i] != digit[j])
            return false;
    }
    return true;
}
```

5.3.1 参数传递 — 值传递

下面程序输出的结果是什么？

```
int f(int a, int b){  
    int c;  
    c = a + b;  
    return c;  
}  
  
int main(){  
    int x = 6, y = 7, z = 8, r;  
    r = f((x--, y++, x + y), z--);  
    cout << r << endl;  
    return 0;  
}
```

5.3.1 参数传递 — 值传递

下面程序输出的结果是什么？

```
int f(int a, int b){
    int c;
    c = a + b;
    return c;
}

int main(){
    int x = 6, y = 7, z = 8, r;
    r = f((x--, y++, x + y), z--);
    cout << r << endl;
    return 0;
}
```

结果

21

5.3.1 参数传递 — 值传递

地址传递

将实参的地址传递给形参，也就是说形参的类型为指针类型，通过形参改变实参的值。

5.3.1 参数传递 — 值传递

地址传递

将实参的地址传递给形参，也就是说形参的类型为指针类型，通过形参改变实参的值。

示例 1

```
void Swap(int *x, int *y) {  
    int z(*x);  
    *x = *y;  
    *y = z;  
}  
  
int main() {  
    int i(4), j(5);  
    Swap(&i, &j);  
    cout << "i=" << i << ",j=" << j  
        << endl;  
    return 0;  
}
```

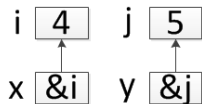
5.3.1 参数传递 — 值传递

地址传递

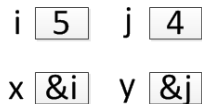
将实参的地址传递给形参，也就是说形参的类型为指针类型，通过形参改变实参的值。

示例 1

```
void Swap(int *x, int *y) {  
    int z(*x);  
    *x = *y;  
    *y = z;  
}  
  
int main() {  
    int i(4), j(5);  
    Swap(&i, &j);  
    cout << "i=" << i << ",j=" << j  
        << endl;  
    return 0;  
}
```



交换 *x 和 *y



5.3.1 参数传递 — 值传递

地址传递

将实参的地址传递给形参，也就是说形参的类型为指针类型，通过形参改变实参的值。

5.3.1 参数传递 — 值传递

地址传递

将实参的地址传递给形参，也就是说形参的类型为指针类型，通过形参改变实参的值。

示例 2

```
void Swap(int *x, int *y) {  
    int *z(x);  
    x = y;  
    y = z;  
}  
  
int main() {  
    int i(4), j(5);  
    Swap(&i, &j);  
    cout << "i=" << i << ",j=" << j  
        << endl;  
    return 0;  
}
```

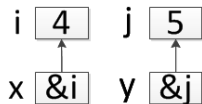
5.3.1 参数传递 — 值传递

地址传递

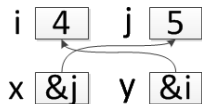
将实参的地址传递给形参，也就是说形参的类型为指针类型，通过形参改变实参的值。

示例 2

```
void Swap(int *x, int *y) {  
    int *z(x);  
    x = y;  
    y = z;  
}  
  
int main() {  
    int i(4), j(5);  
    Swap(&i, &j);  
    cout << "i=" << i << ",j=" << j  
        << endl;  
    return 0;  
}
```



交换 `x` 和 `y`



5.3 参数传递 — 引用传递

引用传递

形参是实参的引用

- 引用类型；
- 通过形参改变实参的值。

5.3 参数传递 — 引用传递

引用传递

形参是实参的引用

- 引用类型;
- 通过形参改变实参的值。

引用传递的例子

```
void swap(int &x, int &y) {//x和y分别是实参i和j的别名  
    int z(x);  
    x = y;  
    y = z;  
} //交换x和y所绑定的对象的值  
int main() {  
    int i(4), j(5);  
    Swap(i, j);  
    cout << "i=" << i << ",j=" << j << endl;//输出i=4,j=5  
    return 0;  
}
```


5.3.3 参数传递 — const 形参

const 形参

const 修饰的形参名字和 const 修饰的对象名字的含义相同。

5.3.3 参数传递 — const 形参

const 形参

const 修饰的形参名字和 const 修饰的对象名字的含义相同。

请问以下 const 修饰的形参名字的含义

```
void f_cval(const int i);  
void f_cpتر(const int *i);  
void f_cref(const int &i);
```

5.3.3 参数传递 — const 形参

const 形参

const 修饰的形参名字和 const 修饰的对象名字的含义相同。

请问以下 const 修饰的形参名字的含义

```
void f_cval(const int i); //i 为 const 对象
void f_cpتر(const int *i); //i 指向 const 类型的实参
void f_cref(const int &i); //i 为 const 类型实参的引用
```

5.3.3 参数传递 — const 形参

兼顾效率与安全

- 避免内容的拷贝：高效性；
- 不能通过形参改变实参：安全性。

5.3.3 参数传递 — const 形参

兼顾效率与安全

- 避免内容的拷贝：高效性；
- 不能通过形参改变实参：安全性。

const 引用形参可以接受字面值常量、表达式的求值结果、需要转换的对象或者 const 对象，但引用形参是不可以的。

```
void f_ref(int &i); // 引用形参
const int cx = 1;
int x = 1;
f_ref(41); // 错误：左值引用不能绑定字面值常量
f_ref(cx); // 错误：左值引用不能绑定常量
f_ref(x+1); // 错误：左值引用不能绑定右值表达式
```

5.3.3 参数传递 — const 形参

兼顾效率与安全

- 避免内容的拷贝：高效性；
- 不能通过形参改变实参：安全性。

const 引用形参可以接受字面值常量、表达式的求值结果、需要转换的对象或者 const 对象，但引用形参是不可以的。

```
void f_ref(int &i); // 引用形参
const int cx = 1;
int x = 1;
f_ref(41); // 错误：左值引用不能绑定字面值常量
f_ref(cx); // 错误：左值引用不能绑定常量
f_ref(x+1); // 错误：左值引用不能绑定右值表达式
```

建议

尽量使用引用形参，需要的时候使用指针形参

5.3 参数传递 — 数组形参

数组的特点

- 不可复制;
- 指针化。

5.3 参数传递 — 数组形参

数组的特点

- 不可复制;
- 指针化。

数组形参

通常使用指针的方式来传递首元素的地址。

5.3 参数传递 — 数组形参

数组的特点

- 不可复制;
- 指针化。

数组形参

通常使用指针的方式来传递首元素的地址。

示例

```
void fun(int *p);  
void fun2(int p[]); //等价于上式，数组的方式
```

5.3 参数传递 — 数组形参

数组的特点

- 不可复制;
- 指针化。

数组形参

通常使用指针的方式来传递首元素的地址。

示例

```
void fun(int *p);  
void fun2(int p[]); //等价于上式，数组的方式
```

调用方式

```
int arr[5] = {1, 2};  
fun(arr); //正确：数组名转化为首元素的地址  
fun(&arr[0]); //正确：显式传递首元素的地址
```

5.3 参数传递 — 数组形参

数组的特点

- 不可复制;
- 指针化。

数组形参

通常使用指针的方式来传递首元素的地址。

示例

```
void fun(int *p);  
void fun2(int p[]); // 等价于上式，数组的方式
```

调用方式

```
int arr[5] = {1, 2};  
fun(arr); // 正确：数组名转化为首元素的地址  
fun(&arr[0]); // 正确：显式传递首元素的地址
```

传递的是数组首元素的地址，编译器不会检查数组的大小

```
void fun(int p[5]); // “指明”数组的长度，无用
```

5.3.3 参数传递 — 数组形参

显式传递数组的长度

```
void print(char *str, unsigned size) {  
    for (unsigned i = 0; i < size; ++i)  
        cout << str[i];  
}
```

5.3.3 参数传递 — 数组形参

显式传递数组的长度

```
void print(char *str, unsigned size) {  
    for (unsigned i = 0; i < size; ++i)  
        cout << str[i];  
}
```

使用标记位来识别数组长度

```
void print(char *str) {  
    if (str) //如果str不是一个空指针  
        while (*str) //当前指针指向非空字符  
            cout << *str++; //输出当前指针指向的字符并指向下一个字符  
}  
  
char arr[] = "Hello C++";  
print(arr);
```

常处理 C 风格的字符数组，对其他数据类型的数组可能没有效果。

5.3.3 参数传递 — 数组形参

显式传递数组的长度

```
void print(char *str, unsigned size) {  
    for (unsigned i = 0; i < size; ++i)  
        cout << str[i];  
}
```

使用标记位来识别数组长度

```
void print(char *str) {  
    if (str) //如果str不是一个空指针  
        while (*str) //当前指针指向非空字符  
            cout << *str++; //输出当前指针指向的字符并指向下一个字符  
}  
  
char arr[] = "Hello C++";  
print(arr);
```

常处理 C 风格的字符数组，对其他数据类型的数组可能没有效果。

利用指针标明访问范围

```
void print(char *beg, char * end) {  
    //输出beg和end之间的元素（包含beg但不包含end指向的元素）  
    while (beg != end)  
        cout << *beg++; //输出当前指针指向的字符并指向下一个字符  
}  
  
char arr[] = "Hello C++";  
print(begin(arr), end(arr));
```

begin 和 end 函数可以获取数组的首元素和尾后元素的地址。

5.3.3 参数传递 — 数组形参

使用 const 形参

```
void print(const char *str);  
void print(const char *str, unsigned size);  
void print(const char *beg, const char * end);
```

5.3.3 参数传递 — 数组形参

使用 const 形参

```
void print(const char *str);  
void print(const char *str, unsigned size);  
void print(const char *beg, const char * end);
```

使用 const 形参提高安全性

只有当对数组进行写操作时，数组形参才使用非 const 类型，否则一律要使用 const 修饰，保证程序的安全性。

5.3.3 参数传递 — 数组形参

使用 const 形参

```
void print(const char *str);  
void print(const char *str, unsigned size);  
void print(const char *beg, const char * end);
```

使用 const 形参提高安全性

只有当对数组进行写操作时，数组形参才使用非 const 类型，否则一律要使用 const 修饰，保证程序的安全性。

课下思考

如何传递一个数组而非首元素地址？

5.3.3 参数传递 — 数组形参

多维数组特点

- 传递的是数组的首元素地址;
- 编译器只忽略第一维的长度。

5.3.3 参数传递 — 数组形参

多维数组特点

- 传递的是数组的首元素地址;
- 编译器只忽略第一维的长度。

使用 const 形参示例

```
void fun(int (*a2d)[5]); //a2d 指向一个含有5个元素的一维实参数组
void fun(int a2d[][5]); //与上式等价
int matrix[4][5] = {};
fun(matrix); //传递 matrix 首元素地址, 即一个具有5个元素的一维数组
```

5.4 返回值类型

返回值类型

- 有值返回;
- 无值返回 (返回一个 `void` 类型)。

5.4 返回值类型 — 无值返回

无值返回示例

```
void Swap(int &x, int &y) {  
    if (x == y)  
        return;  
    int z(x);  
    x = y;  
    y = z;  
}
```

问题

return 的作用是什么？

5.4 返回值类型 — 无值返回

无值返回示例

```
void Swap(int &x, int &y) {  
    if (x == y)  
        return; //显式返回主调函数  
    int z(x);  
    x = y;  
    y = z;  
    //隐式返回主调函数, 无需return语句  
}
```

回答

使用 return 语句来控制程序执行的流向。

有值返回

- 值返回 (return by value);
- 引用返回 (return by reference);
- 指针返回 (return by pointer)。

5.4.2 返回值类型 — 有值返回

值返回

通过拷贝返回值的方式将结果传递给主调函数。

- 简单;
- 安全;
- 效率低。

5.4.2 返回值类型 — 有值返回

值返回

通过拷贝返回值的方式将结果传递给主调函数。

- 简单;
- 安全;
- 效率低。

值返回示例

```
int maximum(int a, int b) {  
    return a > b ? a : b;  
}
```

5.4.2 返回值类型 — 有值返回

值返回

通过拷贝返回值的方式将结果传递给主调函数。

- 简单;
- 安全;
- 效率低。

值返回示例

```
int maximum(int a, int b) {  
    return a > b ? a : b;  
}
```

问题

为什么值返回效率低?

5.4.2 返回值类型 — 有值返回

值返回

通过拷贝返回值的方式将结果传递给主调函数。

- 简单;
- 安全;
- 效率低。

值返回示例

```
int maximum(int a, int b) {  
    return a > b ? a : b;  
}
```

问题

为什么值返回效率低?

```
int a = 10, b = 5;  
int c = maximum(a, b);
```

maximum 函数返回值存放在一个临时对象里, 用来初始化对象 c。

5.4.2 返回值类型 — 有值返回

引用返回

返回的对象的一个别名，与返回对象指向同一个存储空间，不会产生临时对象。

5.4.2 返回值类型 — 有值返回

引用返回

返回的对象的一个别名，与返回对象指向同一个存储空间，不会产生临时对象。

引用返回示例

```
const int & maximum(const int &a, const int &b) {  
    return a > b ? a : b; //返回对象a或对象b的引用  
}
```

调用 maximum 函数

```
int x,y;  
cin >> x >> y;  
int z = maximum(x,y);
```

5.4.2 返回值类型 — 有值返回

引用返回

返回的对象的一个别名，与返回对象指向同一个存储空间，不会产生临时对象。

引用返回示例

```
const int & maximum(const int &a, const int &b) {  
    return a > b ? a : b; //返回对象a或对象b的引用  
}
```

调用 maximum 函数

```
int x,y;  
cin >> x >> y;  
int z = maximum(x,y);
```

定义 x 或 y 的引用

```
const int &ref = maximum(x,y);
```

5.4.2 返回值类型 — 有值返回

返回一个非 const 左值引用

```
int& setMaximum(int &a, int &b) {  
    //返回对象a 或对象b 的引用  
    return a > b ? a : b;  
}  
  
int main(){  
    int x = 0, y = 1;  
    //把整数10赋值给 x 和 y 中较大者  
    setMaximum(x, y) = 10;  
    return 0;  
}
```

5.4.2 返回值类型 — 有值返回

返回一个非 const 左值引用

```
int& setMaximum(int &a, int &b) {  
    //返回对象a 或对象b 的引用  
    return a > b ? a : b;  
}  
  
int main(){  
    int x = 0, y = 1;  
    //把整数10赋值给 x 和 y 中较大者  
    setMaximum(x, y) = 10;  
    return 0;  
}
```

返回实参对象的地址

```
int* setMaximum(int &a, int &b) {  
    //返回引用a或b所绑定的实参对象的地址  
    return a > b ? &a : &b;  
}  
  
int main(){  
    int x = 0, y = 1;  
    //通过返回指针把10赋值给 x和 y中较大者  
    *setMaximum(x, y) = 10;  
}
```


5.4.2 返回值类型 — 有值返回

问题: 下面程序是否有问题, 为什么? 如果有问题, 该如何修改?

```
int& maximum(int a, int b) {  
    return a > b ? a : b;  
}
```

5.4.2 返回值类型 — 有值返回

问题: 下面程序是否有问题, 为什么? 如果有问题, 该如何修改?

```
int& maximum(int a, int b) {  
    return a > b ? a : b;  
}
```

回答: 切忌返回局部对象的地址或引用

形参对象 *a* 和 *b* 都是局部对象, *maximum* 函数终止时将会从内存中消亡, 因此返回一个已经不存在的对象的引用是无效的引用。

```
int& maximum(int a, int b) {  
    static int c;  
    c = a > b ? a : b;  
    return c; //正确: 返回静态局部对象c的引用  
}
```

值返回方法比较

- 值返回方式可以返回局部对象的值，但需要借助于一个额外的临时对象完成值的返回；
- 引用和指针返回不需要借助于临时对象，但不能返回局部对象的引用或地址；
- 指针返回还经常用于返回一个具有动态存储周期的对象的地址。

根据实际需要并结合安全性和效率来进行选择

重载

把同一作用域下具有相同名字但不同形参列表的一组函数称为重载 (overloaded) 函数，这些函数执行相似的操作。

重载

把同一作用域下具有相同名字但不同形参列表的一组函数称为重载 (overloaded) 函数, 这些函数执行相似的操作。

示例

```
const int& getMax(const int &a,
const int &b) {
    return a > b ? a : b;
}

const int& getMax(const int &a,
const int &b, const int &c) {
    return a > b ? (a > c ? a : c) :
        (b > c ? b : c);
}

const string& getMax(const string &a
, const string &b) {
    return a > b ? a : b;
}
```

重载

把同一作用域下具有相同名字但不同形参列表的一组函数称为重载 (overloaded) 函数, 这些函数执行相似的操作。

示例

```
const int& getMax(const int &a,
                  const int &b) {
    return a > b ? a : b;
}

const int& getMax(const int &a,
                  const int &b, const int &c) {
    return a > b ? (a > c ? a : c) :
        (b > c ? b : c);
}

const string& getMax(const string &a,
                    , const string &b) {
    return a > b ? a : b;
}
```

最佳匹配的原则

- 如果有精确匹配的函数, 则调用此函数; 否则选择实参与形参类型最接近的转换函数;
- 如果有一个以上无法区分的匹配, 则会出现二义性调用 (ambiguous call) 错误;
- 如果找不到任何一个与实参相匹配的函数, 则会出现无匹配错误。

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — 函数重载

示例

```
const int& getMax(const int &a, const int &b) {  
    return a > b ? a : b;  
}  
  
const int& getMax(const int &a, const int &b, const int &c) {  
    return a > b ? (a > c ? a : c) : (b > c ? b : c);  
}  
  
const string& getMax(const string &a, const string &b) {  
    return a > b ? a : b;  
}
```

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — 函数重载

示例

```
const int& getMax(const int &a, const int &b) {  
    return a > b ? a : b;  
}  
  
const int& getMax(const int &a, const int &b, const int &c) {  
    return a > b ? (a > c ? a : c) : (b > c ? b : c);  
}  
  
const string& getMax(const string &a, const string &b) {  
    return a > b ? a : b;  
}
```

问题: 以下函数调用第几个重载函数?

```
getMax(7, 8);  
getMax("C++", "Programming");
```


5.5 函数重载和特殊用途的函数 — 默认参数

默认参数

函数的某些形参总是接受一个默认的实参值 (default argument)。

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — 默认参数

默认参数

函数的某些形参总是接受一个默认的实参值 (default argument)。

示例

```
void turnoff(int time = 21);
```

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — 默认参数

默认参数

函数的某些形参总是接受一个默认的实参值 (default argument)。

示例

```
void turnoff(int time = 21);
```

使用

```
turnoff(); //省略实参，形参使用默认值  
turnoff(22); //包含实参，形参接受实参  
           值
```

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — 默认参数

默认参数

函数的某些形参总是接受一个默认的实参值 (default argument)。

示例

```
void turnoff(int time = 21);
```

使用

```
turnoff(); //省略实参, 形参使用默认值  
turnoff(22); //包含实参, 形参接受实参  
           值
```

形参的默认值可以是任何可以转换成形参类型的表达式

```
void turnoff(int time = getTime());
```

5.5.2 函数重载和特殊用途的函数 — 默认参数

具有多个默认值

一个函数可以有多个默认值，但所有具有默认值的参数必须**靠右侧**放置。

5.5.2 函数重载和特殊用途的函数 — 默认参数

具有多个默认值

一个函数可以有多个默认值，但所有具有默认值的参数必须**靠右侧**放置。

定义是否正确？

```
void print(int a, int b, int c = 3);  
void print(int a, int b = 2, int c);  
void print(int a = 1, int b = 2, int c = 3);
```

5.5.2 函数重载和特殊用途的函数 — 默认参数

具有多个默认值

一个函数可以有多个默认值，但所有具有默认值的参数必须**靠右侧**放置。

定义是否正确？

```
void print(int a, int b, int c = 3);  
void print(int a, int b = 2, int c);  
void print(int a = 1, int b = 2, int c = 3);
```

答案

```
void print(int a, int b, int c = 3); //正确：部分参数具有默认值  
void print(int a, int b = 2, int c); //错误：最右侧参数没有默认值  
void print(int a = 1, int b = 2, int c = 3); //正确：所有参数具有默认值
```

函数优缺点

- 函数的使用体现了模块化程序设计思想，降低了程序设计的复杂性；
- 函数调用，比如执行流的转移操作、参数传递、返回值处理等，需要时间和空间的开销。

C++ 提供了一种即保证函数化的形式又兼顾程序的执行效率的方法，即内联函数。

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — 内联函数

函数优缺点

- 函数的使用体现了模块化程序设计思想，降低了程序设计的复杂性；
- 函数调用，比如执行流的转移操作、参数传递、返回值处理等，需要时间和空间的开销。

C++ 提供了一种即保证函数化的形式又兼顾程序的执行效率的方法，即内联函数。

示例

```
inline void Swap(int &x, int &y){ /*...*/ }
```

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — 内联函数

函数优缺点

- 函数的使用体现了模块化程序设计思想，降低了程序设计的复杂性；
- 函数调用，比如执行流的转移操作、参数传递、返回值处理等，需要时间和空间的开销。

C++ 提供了一种即保证函数化的形式又兼顾程序的执行效率的方法，即内联函数。

示例

```
inline void Swap(int &x, int &y){ /*...*/ }
```

减少开销

编译器将在调用处嵌入内联函数的代码，不会发生函数调用，因而也不会产生函数调用的开销了。

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — 内联函数

函数优缺点

- 函数的使用体现了模块化程序设计思想，降低了程序设计的复杂性；
- 函数调用，比如执行流的转移操作、参数传递、返回值处理等，需要时间和空间的开销。

C++ 提供了一种即保证函数化的形式又兼顾程序的执行效率的方法，即内联函数。

示例

```
inline void Swap(int &x, int &y){ /*...*/ }
```

减少开销

编译器将在调用处嵌入内联函数的代码，不会发生函数调用，因而也不会产生函数调用的开销了。

注意

对于编译器来说，inline 关键字只是一个建议。

例 5.2

利用冒泡排序法将容器中的学生成绩排序。

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — 内联函数

例 5.2

利用冒泡排序法将容器中的学生成绩排序。



未排序



$1 < 5$ ，插入5前面



$1 < 4 < 5$ ，插入1和5之间



$-5 < 1$ ，插入1前面



$16 > 5$ ，插入5后面

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — 内联函数

利用冒泡排序法将容器中的学生成绩排序

```
inline void Swap(int & x, int &y) {  
    int z(x);  
    x = y;  
    y = z;  
}  
  
int main() {  
    srand(0);  
    vector<int> score(10);  
    for (auto &i : score)  
        i = rand() % 100;  
    for (int i = score.size()-1; i >=0; --i) {  
        for (int j = 0; j < i; ++j) {  
            //每一轮冒泡过程将最大的数浮出来（右边）  
            if (score[j+1] < score[j ]) //相邻的两个数比较  
                Swap(score[j+1], score[j]);  
        }  
    }  
    for (auto &i : score)  
        cout << i << endl;  
    return 0;  
}
```

问题

以下程序是否正确，为什么，该如何修改？

```
const int getNumber() { return 10; }  
const int numStudent = getNumber();  
  
int arr[numStudent];
```

问题

以下程序是否正确，为什么，该如何修改？

```
const int getNumber() { return 10; }
```

```
const int numStudent = getNumber();
```

```
int arr[numStudent];
```

此时编译器会报错，提示无法在编译时计算 numStudent 的值。这是因为只能在运行期间调用函数 getNumber 后才能计算 numStudent 的值。

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — constexpr 函数

constexpr 函数

constexpr 函数指的是能用于常量表达式的函数。要求：

- 函数体中有且仅有一条 return 语句；
- 函数返回值类型不能为 void；
- return 语句中的表达式必须是编译时的常量表达式。

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — constexpr 函数

constexpr 函数

constexpr 函数指的是能用于常量表达式的函数。要求：

- 函数体中有且仅有一条 return 语句；
- 函数返回值类型不能为 void；
- return 语句中的表达式必须是编译时的常量表达式。

示例

```
constexpr int f() { return 10; }  
constexpr int getNumber(int i) { return i; }  
int stu1[getNumber(10)]; //正确: getNumber(10)是常量表达式  
int num = 10;  
int stu2[getNumber(num)]; //错误: 运行时才能确定num的值
```

5.5 函数重载和特殊用途的函数 — constexpr 函数

constexpr 函数

constexpr 函数指的是能用于常量表达式的函数。要求：

- 函数体中有且仅有一条 return 语句；
- 函数返回值类型不能为 void；
- return 语句中的表达式必须是编译时的常量表达式。

示例

```
constexpr int f() { return 10; }  
constexpr int getNumber(int i) { return i; }  
int stu1[getNumber(10)]; //正确: getNumber(10)是常量表达式  
int num = 10;  
int stu2[getNumber(num)]; //错误: 运行时才能确定num的值
```

提示

constexpr 函数会隐式转化为内联函数。

5.6 函数指针和 lambda 表达式 — 函数指针

函数指针

- 函数名对应于函数的执行代码的入口地址；
- 指针可以指向一个函数；
- 函数的类型由返回值类型和形参列表决定。

5.6 函数指针和 lambda 表达式 — 函数指针

函数指针

- 函数名对应于函数的执行代码的入口地址；
- 指针可以指向一个函数；
- 函数的类型由返回值类型和形参列表决定。

示例

```
//声明一个~compareInt~函数： 比较两个整数大小
bool compareInt(int, int);
bool(*pf)(int, int); //定义一个指向此类型函数的指针
```

5.6 函数指针和 lambda 表达式 — 函数指针

函数指针

- 函数名对应于函数的执行代码的入口地址;
- 指针可以指向一个函数;
- 函数的类型由返回值类型和形参列表决定。

示例

```
//声明一个~compareInt~函数: 比较两个整数大小  
bool compareInt(int, int);  
bool(*pf)(int, int); //定义一个指向此类型函数的指针
```

问题: 请说明下面指针的含义?

```
bool* pf(int, int);
```

5.6 函数指针和 lambda 表达式 — 函数指针

函数指针

- 函数名对应于函数的执行代码的入口地址；
- 指针可以指向一个函数；
- 函数的类型由返回值类型和形参列表决定。

示例

```
//声明一个~compareInt~函数：比较两个整数大小
bool compareInt(int, int);
bool(*pf)(int, int); //定义一个指向此类型函数的指针
```

问题：请说明下面指针的含义？

```
bool* pf(int, int);
```

函数名为 pf，返回值类型为 bool* 的函数声明。

简化函数指针定义

利用类型别名关键字 `typedef` 或 `using` 来简化函数指针的定义。

5.6.1 函数指针和 lambda 表达式 — 函数指针

简化函数指针定义

利用类型别名关键字 `typedef` 或 `using` 来简化函数指针的定义。

示例

```
typedef bool (*pFun)(int, int);  
using pFun = bool (*)(int, int); // 与上式等价
```

```
pFun pf; // 和定义普通指针一样的方式来定义一个函数指针
```

函数指针初始化

和普通指针类型一样，应该在定义函数指针时初始化

函数指针初始化

和普通指针类型一样，应该在定义函数指针时初始化

示例

```
pFun pf1 = compareInt; //隐式初始化，pf1指向compareInt函数  
pFun pf2 = &compareInt; //显式初始化，pf2指向compareInt函数  
pFun pf3 = nullptr; //pf3不指向任何函数
```

5.6.1 函数指针和 lambda 表达式 — 函数指针

函数指针初始化

和普通指针类型一样，应该在定义函数指针时初始化

示例

```
pFun pf1 = compareInt; //隐式初始化，pf1指向compareInt函数  
pFun pf2 = &compareInt; //显式初始化，pf2指向compareInt函数  
pFun pf3 = nullptr; //pf3不指向任何函数
```

示例

当一个指针指向了一个具体的函数后，可以通过该指针来调用其指向的函数

```
bool b1 = pf1(1, 2);  
bool b2 = (*pf2)(1, 2);
```

5.6.1 函数指针和 lambda 表达式 — 函数指针

例 5.3

利用梯形法设计一个求数值积分的通用函数。

5.6.1 函数指针和 lambda 表达式 — 函数指针

例 5.3

利用梯形法设计一个求数值积分的通用函数。

提示

想要实现一个求积分的通用函数，可以将待求积分函数以参数的形式传递到这个通用函数里面，然后利用梯形法求解被积函数的积分。

5.6.1 函数指针和 lambda 表达式 — 函数指针

例 5.3

利用梯形法设计一个求数值积分的通用函数。

提示

想要实现一个求积分的通用函数，可以将待求积分函数以参数的形式传递到这个通用函数里面，然后利用梯形法求解被积函数的积分。

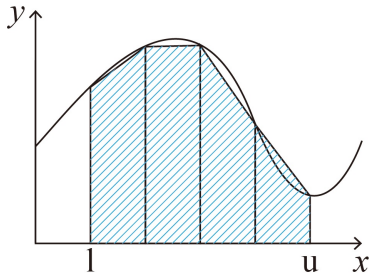


图: 梯形法求积分示例图

5.6.1 函数指针和 lambda 表达式 — 函数指针

代码清单 5.3, 例 5.3

```
using pFun = double (*)(double);
double f_sphere(double x) {
    return x*x;
}
double f_default(double x) {
    return 0;
}
double f_sin(double x) {
    return sin(x);
}
double integrate(double l, double u, pFun pf = f_default, int n = 1000) {
    double sum = 0.0;
    double gap = (u - l) / n; //每个间隔的长度
    for (int i = 0; i < n; i++)
        sum += (gap / 2.0) * (pf(l + i*gap) + pf(l + (i + 1)*gap));
    return sum;
}
int main() {
    cout<<"默认函数在区间[0:1]上的积分为: "<<integrate(0, 1) << endl;
    cout<<"Sphere函数在区间[0:1]上的积分为: "<<integrate(0, 1, f_sphere)<<endl;
    cout<<"sin函数在区间[0:1]上的积分为: "<<integrate(0, 1, f_sin)<<endl;
}
```


识别指针的原则

- 取出标识符;
- 由里向外;
- 由右向左。

识别指针的原则

- 取出标识符;
- 由里向外;
- 由右向左。

简单例子

```
int (*p1)[5];  
int *p2[5];  
int *&p3 = p2[0];
```

5.6.1 函数指针和 lambda 表达式 — 函数指针

识别指针的原则

- 取出标识符;
- 由里向外;
- 由右向左。

简单例子

```
int(*p1)[5];  
int *p2[5];  
int *&p3 = p2[0];
```

识别指针

```
void(*a[5])(int);  
void(*(*b)[5])(int);  
void(*c(int, void(*fp)(int)))(int);
```

5.6.1 函数指针和 lambda 表达式 — 函数指针

识别指针的原则

- 取出标识符;
- 由里向外;
- 由右向左。

简单例子

```
int(*p1)[5];  
int *p2[5];  
int *&p3 = p2[0];
```

识别指针

```
void(*a[5])(int);  
void(*(*b)[5])(int);  
void(*c(int, void(*fp)(int)))(int);
```

利用 using 声明简化语句

```
using PF = void(*)(int);  
PF *a[5];  
PF(*b)[5];  
PF c(int, PF);
```

5.6 函数指针和 lambda 表达式 — lambda 表达式

lambda 表达式

- 只使用一次；
- 临时的匿名函数，表示一个可以调用的代码单元；
- 与函数类似，lambda 表达式具有返回值、形参列表和函数体；
- 可定义在一个函数内部。

5.6 函数指针和 lambda 表达式 — lambda 表达式

lambda 表达式

- 只使用一次；
- 临时的匿名函数，表示一个可以调用的代码单元；
- 与函数类似，lambda 表达式具有返回值、形参列表和函数体；
- 可定义在一个函数内部。

1. 定义 lambda 表达式

`[captures](parameters) -> return type {statements}`

- captures: 指定在同一作用域下 lambda 主体捕获（访问）哪些对象以及如何捕获这些对象；
- parameters: 形参列表；
- return type: 返回值类型；
- statements: 函数体。

5.6 函数指针和 lambda 表达式 — lambda 表达式

auto 关键字

```
auto fun = [](int i) {cout << i << endl; };  
fun(17); //输出17
```

auto 关键字把一个 lambda 表达式存放到一个对象

5.6 函数指针和 lambda 表达式 — lambda 表达式

auto 关键字

```
auto fun = [](int i) {cout << i << endl; };  
fun(17); //输出17
```

auto 关键字把一个 lambda 表达式存放到一个对象

省略 return type 说明

```
[](int i)->int { return i*i; }
```

lambda 可以根据函数主体来推断返回类型。

5.6.2 函数指针和 lambda 表达式 — 捕获对象

捕获对象

lambda 可以捕获外围作用域内的局部对象，而且还可以指定捕获的方式

5.6.2 函数指针和 lambda 表达式 — 捕获对象

捕获对象

lambda 可以捕获外围作用域内的局部对象，而且还可以指定捕获的方式

按值捕获特定的外围对象

```
int divisor = 5;
vector<int> numbers{ 1, 2, 3, 4, 5,
    10, 15, 20, 25, 35, 45, 50 };
for_each(numbers.begin(), numbers.
    end(), [divisor](int y) {
    //divisor为外围divisor的拷贝
    if (y % divisor == 0)
        cout << y << endl;
    //输出被divisor整除的元素
});
```

divisor 作为副本在函数体内部使用

5.6.2 函数指针和 lambda 表达式 — 捕获对象

捕获对象

lambda 可以捕获外围作用域内的局部对象，而且还可以指定捕获的方式

按值捕获特定的外围对象

```
int divisor = 5;
vector<int> numbers{ 1, 2, 3, 4, 5,
    10, 15, 20, 25, 35, 45, 50 };
for_each(numbers.begin(), numbers.
    end(), [divisor](int y) {
    //divisor为外围divisor的拷贝
    if (y % divisor == 0)
        cout << y << endl;
    //输出被divisor整除的元素
});
```

divisor 作为副本在函数体内部使用

按引用捕获特定的外围对象

```
int sum = 0;

for_each(numbers.begin(), numbers.
    end(), [divisor, &sum](int y) {
    //sum为外围sum的引用
    if (y % divisor == 0)
        sum += y;
    //累加被divisor整除的元素，结果存
    放到外围对象sum中
});
```

sum 作为引用在函数体内部使用

5.6.2 函数指针和 lambda 表达式 — 捕获对象

捕获对象

lambda 可以捕获外围作用域内的局部对象，而且还可以指定捕获的方式

按值捕获特定的外围对象

```
int divisor = 5;
vector<int> numbers{ 1, 2, 3, 4, 5,
    10, 15, 20, 25, 35, 45, 50 };
for_each(numbers.begin(), numbers.
    end(), [divisor](int y) {
    //divisor为外围divisor的拷贝
    if (y % divisor == 0)
        cout << y << endl;
    //输出被divisor整除的元素
});
```

divisor 作为副本在函数体内部使用

按引用捕获特定的外围对象

```
int sum = 0;

for_each(numbers.begin(), numbers.
    end(), [divisor, &sum](int y) {
    //sum为外围sum的引用
    if (y % divisor == 0)
        sum += y;
    //累加被divisor整除的元素，结果存
    放到外围对象sum中
});
```

sum 作为引用在函数体内部使用

按引用捕获特定的外围对象

[=]和 [&] 分别以值捕获和引用捕获方式捕获外围所有对象

5.7 递归调用

递归调用

一个函数直接或间接地调用自己，这个函数称为递归函数（recursive function）

- 易实现；
- 可读性强。

例 5.4

求解以下数列的第 n 项。

$$f(n) = \begin{cases} 0 & n = 0 \\ f(n-1) + n & n > 0 \end{cases}$$

5.7 递归调用 — 递推和回归

例 5.4

```
#include<iostream>
int sumTo(int i) {
    if (i == 0) return 0;
    return sumTo(i - 1) + i;
}
int main() {
    std::cout << sumTo(3);
    return 0;
}
```

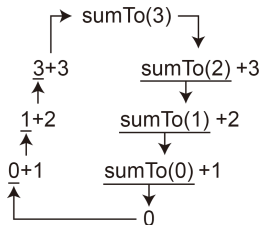


图: 函数调用 `sumTo(3)` 的执行过程

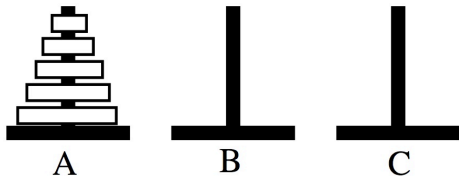
例 5.5

汉诺塔问题 (Tower of Hanoi)。如图所示, 有 A、B、C 三个柱子, A 柱上有 n 个大小不同的盘子, 大盘在下、小盘在上依次存放。要求将 A 柱上的盘子全部移动到 C 柱上, 每一次只能移动一个盘子, 可以借助任何一个柱子, 但必须保证在任意时刻大盘在下、小盘在上。

5.7 递归调用 — 递推和回归

例 5.5

汉诺塔问题 (Tower of Hanoi)。如图所示, 有 A、B、C 三个柱子, A 柱上有 n 个大小不同的盘子, 大盘在下、小盘在上依次存放。要求将 A 柱上的盘子全部移动到 C 柱上, 每一次只能移动一个盘子, 可以借助任何一个柱子, 但必须保证在任意时刻大盘在下、小盘在上。



分析

要想将 n 个盘子从 A 柱移到 C 柱，有三个步骤必须要完成：

- 先把 A 柱上 $n-1$ 个盘子移到 B 柱上；
- 将第 n 个盘子移到 C 柱上；
- 将 $n-1$ 个盘子从 B 柱移动到 C 柱上。

分析

要想将 n 个盘子从 A 柱移到 C 柱，有三个步骤必须要完成：

- 先把 A 柱上 $n-1$ 个盘子移到 B 柱上；
- 将第 n 个盘子移到 C 柱上；
- 将 $n-1$ 个盘子从 B 柱移动到 C 柱上。

目标

设计递归函数，其功能是将 n 个盘子从初始柱 `src` 上借助中间柱 `mid` 移动到目标柱 `tar` 上。

5.7 递归调用 — 递推和回归

汉诺塔问题

```
#include<iostream>
using namespace std;
void hanoi(int n, char src, char mid,
char tar) {
    if (n == 1)
        cout << src << "->" << tar << '\t'
            ;
    else {
        //将n-1个盘子移到中间柱上
        hanoi(n - 1, src, tar, mid);
        //将最后一个盘子移到目标柱上
        cout<<src<<"->"<< tar << '\t';
        //将n-1个盘子从中间柱移到目标柱上
        hanoi(n - 1, mid, src, tar);
    }
}

int main() {
    int n;
    cin >> n;
    hanoi(n, 'A', 'B', 'C');
    return 0;
}
```

5.7 递归调用 — 递推和回归

汉诺塔问题

```
#include<iostream>
using namespace std;
void hanoi(int n, char src, char mid,
char tar) {
    if (n == 1)
        cout << src << "->" << tar << '\t'
            ;
    else {
        //将n-1个盘子移到中间柱上
        hanoi(n - 1, src, tar, mid);
        //将最后一个盘子移到目标柱上
        cout<<src<<"->"<< tar << '\t';
        //将n-1个盘子从中间柱移到目标柱上
        hanoi(n - 1, mid, src, tar);
    }
}

int main() {
    int n;
    cin >> n;
    hanoi(n, 'A', 'B', 'C');
    return 0;
}
```

图: 移动过程

递归和循环

- 递归程序的递推和回归过程可以用循环结构来实现；
- 和循环结构相比，递归函数实现简单并且思路清晰，但缺点是需要消耗内存和其它的函数调用开销

5.7 递归调用 — 递归和循环

例 5.6

利用递归程序设计方法求解八皇后问题，要求找出所有可能方案。

例 5.6

利用递归程序设计方法求解八皇后问题，要求找出所有可能方案。

分析

对于八皇后问题，每一次递推在新一行安排一个皇后。有两种情形需要回归：

- 当前行没有可行位置，则程序需要回归，即进行回溯操作；
- 当所有的皇后都已经成功摆放，需要回归寻找下一个可行的方案。

5.7 递归调用 — 递归和循环

代码清单 5.6, 例 5.6

```
bool isSafe(int i, const vector<int> &que) {
    for (int k = 0; k < i; ++k)
        if (que[k] == que[i] || (abs(que[i] - que[k]) == abs(i - k)))
            return false;
    return true;
}

void queen(int i, vector<int> &que, int&cnt) {
    if (i == 8) {
        cout << "方案" << ++cnt << ":";
        for (int k = 0; k < que.size(); ++k) cout << que[k];
        return;
    }
    for (int k = 0; k < que.size(); ++k) {
        que[i] = k;
        if (isSafe(i, que)) queen(i + 1, que, cnt); //如果安全, 安排下一行皇后
    }
}

int main() {
    constexpr int sz = 8; int cnt(0);
    vector<int> que(sz);
    queen(0, que, cnt);
}
```

5.8 编译预处理和多文件结构

预处理指令

- 由 # 符号开头;
- 每条指令占一行;
- 通常放在文件的开始部分。

例如

- 文件包含指令 `#include` ;
- 宏定义;
- 条件编译指令。

宏定义

- 宏定义指令为 `#define`;
- 功能是定义一个标识符来代替一串字符，该标识符称为宏名；
- 分为带参和不带参两种。

宏定义

- 宏定义指令为 `#define`;
- 功能是定义一个标识符来代替一串字符, 该标识符称为宏名;
- 分为带参和不带参两种。

1. 不带参宏定义

`#define` 宏名 字符串常量

```
#define PI 3.14159
void testPI() {
    cout << 2 * PI << endl;
}
//用来编译希望执行的代码
#define DEBUG
```

宏定义

- 宏定义指令为 `#define`;
- 功能是定义一个标识符来代替一串字符, 该标识符称为宏名;
- 分为带参和不带参两种。

1. 不带参宏定义

`#define` 宏名 字符串常量

```
#define PI 3.14159
void testPI() {
    cout << 2 * PI << endl;
}
//用来编译希望执行的代码
#define DEBUG
```

2. 带参宏定义

`#define` 宏名 (参数表) 字符串常量

```
#define fun2(a,b) (a)*(b)
#define fun3(a,b) a*b
void testFun() {
    cout << fun2(1 + 2, 3 - 2) << endl;
    cout << fun3(1 + 2, 3 - 2) << endl;
} //参数必须用小括号括起来
```

宏定义

- 宏定义指令为 `#define`;
- 功能是定义一个标识符来代替一串字符, 该标识符称为宏名;
- 分为带参和不带参两种。

1. 不带参宏定义

`#define` 宏名 字符串常量

```
#define PI 3.14159
void testPI() {
    cout << 2 * PI << endl;
}
//用来编译希望执行的代码
#define DEBUG
```

2. 带参宏定义

`#define` 宏名 (参数表) 字符串常量

```
#define fun2(a,b) (a)*(b)
#define fun3(a,b) a*b
void testFun() {
    cout << fun2(1 + 2, 3 - 2) << endl;
    cout << fun3(1 + 2, 3 - 2) << endl;
} //参数必须用小括号括起来
```

建议

尽量使用 `const` 对象和内联函数

特殊操作符

可以使用一些特殊的操作符来实现特殊的功能

特殊操作符

可以使用一些特殊的操作符来实现特殊的功能

字符串化操作符

把语言符号转化成字符串，即将后面的宏参数进行字符串化操作。

```
#define str(a) #a
```

```
#define str(a) #a  
cout << str(test) << endl;
```

等价于

```
cout << "test" << endl;
```


特殊操作符

可以使用一些特殊的操作符来实现特殊的功能

字符串化操作符

把语言符号转化成字符串，即将后面的宏参数进行字符串化操作。

```
#define str(a) #a
```

```
#define str(a) #a  
cout << str(test) << endl;
```

等价于

```
cout << "test" << endl;
```

连接符

用来将两个语言符号连接为一个语言符号

```
#define glue(a,b) a##b
```

```
#define glue(a,b) a##b  
glue(c, out) << "test" << endl;  
int glue(x, 1) = 1;
```

等价于

```
cout << "test" << endl;  
int x1 = 1;
```

条件编译

- 程序中的代码在满足一定条件下才会被编译；
- 编译的条件有两类：宏名和常量表达式；
- 条件编译指令包括：`#ifdef`、`#ifndef`、`#undef`、`#if`、`#else`、`#endif` 等。

条件编译

- 程序中的代码在满足一定条件下才会被编译；
- 编译的条件有两类：宏名和常量表达式；
- 条件编译指令包括：`#ifdef`、`#ifndef`、`#undef`、`#if`、`#else`、`#endif` 等。

例子 1

```
#ifdef DEBUG
    cout << "x=" << x << endl;
#endif
```

如果定义了 `DEBUG` 宏，则上述 `cout` 语句将被编译，否则将被忽略。

条件编译

- 程序中的代码在满足一定条件下才会被编译；
- 编译的条件有两类：宏名和常量表达式；
- 条件编译指令包括：`#ifdef`、`#ifndef`、`#undef`、`#if`、`#else`、`#endif` 等。

例子 1

```
#ifdef DEBUG
    cout << "x=" << x << endl;
#endif
```

如果定义了 `DEBUG` 宏，则上述 `cout` 语句将被编译，否则将被忽略。

例子 2

```
#if 0
    cout << "此行代码永远也不会被编译"
        << endl;
#endif
```

常量表达式的值为 `false`，上面的 `cout` 语句永远也不会被编译。

多文件结构

编写一个较大的程序时，通常根据代码之间的耦合关系将它们放到不同的文件里面，进行单独的编写与编译，最终完成一个完整的程序。

- 标识符的可见性：把标识符的声明放到头文件里面，实现名字共享。；
- 头文件保护： `#ifndef`、`#define`、`#endif` 预编译指令或者 `#pragma once` 宏；
- 头文件包含：函数的声明、`const` 对象、全局对象的声明、内联函数、`constexpr` 函数、类和模板的定义。

多文件结构

编写一个较大的程序时，通常根据代码之间的耦合关系将它们放到不同的文件里面，进行单独的编写与编译，最终完成一个完整的程序。

- 标识符的可见性：把标识符的声明放到头文件里面，实现名字共享。；
- 头文件保护： `#ifndef`、`#define`、`#endif` 预编译指令或者 `#pragma once` 宏；
- 头文件包含：函数的声明、`const` 对象、全局对象的声明、内联函数、`constexpr` 函数、类和模版的定义。

提示

C++ 支持分离式编译。

5.8 编译预处理和多文件结构 — 多文件结构

myHeader.h

```
#ifndef MYHEADER_H
#define MYHEADER_H
const double pi = 3.1415926; //const对象
int add(int, int); ~I //函数声明
extern int g_sum; //全局对象声明
inline bool isNumber(char ch) { //内联函数
    return ch >= '0' && ch <= '9' ? 1 : 0;
}
constexpr int scale() { //constexpr 函数
    return 10;
}
class myClass { }; // 类定义
template<typename T> // 函数模板
const T& getMax(const T &a, const T &b)
{
    return a > b ? a : b;
}
#endif // !MYHEADER_H
```

add.cpp

```
int g_sum = 10;
int add(int a, int b) {
    return a + b;
}
```

multi_file.cpp

```
#include "myHeader.h"
#include <iostream>
using namespace std;
int main() {
    g_sum = add(4, 5);
    cout << g_sum << endl;
}
```

本章结束