

第III部分

类设计者的工具

内容

第 13 章 拷贝控制.....	439
第 14 章 操作重载与类型转换.....	489
第 15 章 面向对象程序设计.....	525
第 16 章 模板与泛型编程.....	577

类是 C++ 的核心概念。我们已经从第 7 章开始详细介绍了如何定义类。第 7 章涵盖了使用类的所有基本知识：类作用域、数据隐藏以及构造函数，还介绍了类的一些重要特性：成员函数、隐式 `this` 指针、友元以及 `const`、`static` 和 `mutable` 成员。在第 III 部分中，我们将延伸类的有关话题的讨论，将介绍拷贝控制、重载运算符、继承和模板。

如前所述，在 C++ 中，我们通过定义构造函数来控制在类类型的对象初始化时做什么。类还可以控制在对象拷贝、赋值、移动和销毁时做什么。在这方面，C++ 与其他语言是不同的，其他很多语言都没有给予类设计者控制这些操作的能力。第 13 章将介绍这些内容。本章还会介绍新标准引入的两个重要概念：右值引用和移动操作。

第 14 章介绍运算符重载，这种机制允许内置运算符作用于类类型的运算对象。这样，我们创建的类型直观上就可以像内置类型一样使用，运算符重载是 C++ 借以实现这一目的方法之一。

类可以重载的运算符中有一种特殊的运算符——函数调用运算符。对于重载了这种运算符的类，我们可以“调用”其对象，就好像它们是函数一样。新标准库中提供了一些设施，使得不同类型的可调用对象可以以一种一致的方式来使用，我们也将介绍这部分内容。

第 14 章最后将介绍另一种特殊类型的类成员函数——转换运算符。这些运算符定义了类类型对象的隐式转换机制。编译器应用这种转换机制的场合与原因都与内置类型转换是一样的。

第 III 部分的最后两章将介绍 C++ 如何支持面向对象编程和泛型编程。

第 15 章介绍继承和动态绑定。继承和动态绑定与数据抽象一起构成了面向对象编程的基础。继承令关联类型的定义更为简单，而动态绑定可以帮助我们编写类型无关的代码，可以忽略具有继承关系的类型之间的差异。

第 16 章介绍函数模板和类模板。模板可以让我们写出类型无关的通用类和函数。新标准引入了一些模板相关的新特性：可变参数模板、模板类型别名以及控制实例化的新方法。

编写我们自己的面向对象的或是泛型的类型需要对 C++ 有深刻的理解。幸运的是，我们无须掌握如何构建面向对象和泛型类型的细节也可以使用它们。例如，标准库中广泛使用了我们将在第 15 章和第 16 章中学习的技术，虽然我们已经使用过标准库类型和算法，但实际上我们并不了解它们是如何实现的。

因此，读者应该明白第 III 部分涉及的是相当深入的内容。编写模板或面向对象的类要求对 C++ 的基本知识和基本类的定义有着深刻的理解。

第 13 章

拷贝控制

内容

13.1 拷贝、赋值与销毁	440
13.2 拷贝控制和资源管理	452
13.3 交换操作	457
13.4 拷贝控制示例	460
13.5 动态内存管理类	464
13.6 对象移动	470
小结	486
术语表	486

如我们在第 7 章所见，每个类都定义了一个新类型和在此类型对象上可执行的操作。在本章中，我们还将学到，类可以定义构造函数，用来控制在创建此类型对象时做什么。

在本章中，我们还将学习类如何控制该类型对象拷贝、赋值、移动或销毁时做什么。类通过一些特殊的成员函数控制这些操作，包括：拷贝构造函数、移动构造函数、拷贝赋值运算符、移动赋值运算符以及析构函数。

496

当定义一个类时，我们显式地或隐式地指定在此类型的对象拷贝、移动、赋值和销毁时做什么。一个类通过定义五种特殊的成员函数来控制这些操作，包括：**拷贝构造函数**（copy constructor）、**拷贝赋值运算符**（copy-assignment operator）、**移动构造函数**（move constructor）、**移动赋值运算符**（move-assignment operator）和**析构函数**（destructor）。拷贝和移动构造函数定义了当用同类型的另一个对象初始化本对象时做什么。拷贝和移动赋值运算符定义了将一个对象赋予同类型的另一个对象时做什么。析构函数定义了当此类型对象销毁时做什么。我们称这些操作为**拷贝控制操作**（copy control）。

如果一个类没有定义所有这些拷贝控制成员，编译器会自动为它定义缺失的操作。因此，很多类会忽略这些拷贝控制操作（参见 7.1.5 节，第 239 页）。但是，对一些类来说，依赖这些操作的默认定义会导致灾难。通常，实现拷贝控制操作最困难的地方是首先认识到什么时候需要定义这些操作。



WARNING

在定义任何 C++ 类时，拷贝控制操作都是必要部分。对初学 C++ 的程序员来说，必须定义对象拷贝、移动、赋值或销毁时做什么，这常常令他们感到困惑。这种困扰很复杂，因为如果我们不显式定义这些操作，编译器也会为我们定义，但编译器定义的版本的行为可能并非我们所想。

13.1 拷贝、赋值与销毁

我们将以最基本的操作——拷贝构造函数、拷贝赋值运算符和析构函数作为开始。我们在 13.6 节（第 470 页）中将介绍移动操作（新标准所引入的操作）。



13.1.1 拷贝构造函数

如果一个构造函数的第一个参数是自身类类型的引用，且任何额外参数都有默认值，则此构造函数是拷贝构造函数。

```
class Foo {
public:
    Foo();           // 默认构造函数
    Foo(const Foo&); // 拷贝构造函数
    // ...
};
```

拷贝构造函数的第一个参数必须是一个引用类型，原因我们稍后解释。虽然我们可以定义一个接受非 const 引用的拷贝构造函数，但此参数几乎总是一个 const 的引用。拷贝构造函数在几种情况下都会被隐式地使用。因此，拷贝构造函数通常不应该是 explicit 的（参见 7.5.4 节，第 265 页）。

497

合成拷贝构造函数

如果我们没有为一个类定义拷贝构造函数，编译器会为我们定义一个。与合成默认构造函数（参见 7.1.4 节，第 235 页）不同，即使我们定义了其他构造函数，编译器也会为我们合成一个拷贝构造函数。

如我们将在 13.1.6 节（第 450 页）中所见，对某些类来说，**合成拷贝构造函数**（synthesized copy constructor）用来阻止我们拷贝该类类型的对象。而一般情况，合成的拷贝构造函数会将其参数的成员逐个拷贝到正在创建的对象中（参见 7.1.5 节，第 239 页）。编译器从给

定对象中依次将每个非 `static` 成员拷贝到正在创建的对象中。

每个成员的类型决定了它如何拷贝：对类类型的成员，会使用其拷贝构造函数来拷贝；内置类型的成员则直接拷贝。虽然我们不能直接拷贝一个数组（参见 3.5.1 节，第 102 页），但合成拷贝构造函数会逐元素地拷贝一个数组类型的成员。如果数组元素是类类型，则使用元素的拷贝构造函数来进行拷贝。

作为一个例子，我们的 `Sales_data` 类的合成拷贝构造函数等价于：

```
class Sales_data {
public:
    // 其他成员和构造函数的定义，如前
    // 与合成的拷贝构造函数等价的拷贝构造函数的声明
    Sales_data(const Sales_data&);

private:
    std::string bookNo;
    int units_sold = 0;
    double revenue = 0.0;
};

// 与 Sales_data 的合成的拷贝构造函数等价
Sales_data::Sales_data(const Sales_data &orig):
    bookNo(orig.bookNo),           // 使用 string 的拷贝构造函数
    units_sold(orig.units_sold),   // 拷贝 orig.units_sold
    revenue(orig.revenue)         // 拷贝 orig.revenue
{                                // 空函数体}
```

拷贝初始化

现在，我们可以完全理解直接初始化和拷贝初始化之间的差异了（参见 3.2.1 节，第 76 页）：

```
string dots(10, '.');           // 直接初始化
string s(dots);                // 直接初始化
string s2 = dots;               // 拷贝初始化
string null_book = "9-999-99999-9"; // 拷贝初始化
string nines = string(100, '9'); // 拷贝初始化
```

当使用直接初始化时，我们实际上是要求编译器使用普通的函数匹配（参见 6.4 节，第 209 页）来选择与我们提供的参数最匹配的构造函数。当我们使用 **拷贝初始化**（copy initialization）时，我们要求编译器将右侧运算对象拷贝到正在创建的对象中，如果需要的话还要进行类型转换（参见 7.5.4 节，第 263 页）。

拷贝初始化通常使用拷贝构造函数来完成。但是，如我们将在 13.6.2 节（第 473 页）◀ 498 所见，如果一个类有一个移动构造函数，则拷贝初始化有时会使用移动构造函数而非拷贝构造函数来完成。但现在，我们只需了解拷贝初始化何时发生，以及拷贝初始化是依靠拷贝构造函数或移动构造函数来完成的就可以了。

拷贝初始化不仅在我们用`=`定义变量时会发生，在下列情况下也会发生

- 将一个对象作为实参传递给一个非引用类型的形参
- 从一个返回类型为非引用类型的函数返回一个对象
- 用花括号列表初始化一个数组中的元素或一个聚合类中的成员（参见 7.5.5 节，第 266 页）

某些类类型还会对它们所分配的对象使用拷贝初始化。例如，当我们初始化标准库容器或是调用其 `insert` 或 `push` 成员（参见 9.3.1 节，第 306 页）时，容器会对其元素进行拷贝初始化。与之相对，用 `emplace` 成员创建的元素都进行直接初始化（参见 9.3.1 节，第 308 页）。

参数和返回值

在函数调用过程中，具有非引用类型的参数要进行拷贝初始化（参见 6.2.1 节，第 188 页）。类似的，当一个函数具有非引用的返回类型时，返回值会被用来初始化调用方的结果（参见 6.3.2 节，第 201 页）。

拷贝构造函数被用来初始化非引用类类型参数，这一特性解释了为什么拷贝构造函数自己的参数必须是引用类型。如果其参数不是引用类型，则调用永远也不会成功——为了调用拷贝构造函数，我们必须拷贝它的实参，但为了拷贝实参，我们又需要调用拷贝构造函数，如此无限循环。

拷贝初始化的限制

如前所述，如果我们使用的初始化值要求通过一个 `explicit` 的构造函数来进行类型转换（参见 7.5.4 节，第 265 页），那么使用拷贝初始化还是直接初始化就不是无关紧要的了：

```
vector<int> v1(10); // 正确：直接初始化
vector<int> v2 = 10; // 错误：接受大小参数的构造函数是 explicit 的
void f(vector<int>); // f 的参数进行拷贝初始化
f(10); // 错误：不能用一个 explicit 的构造函数拷贝一个实参
f(vector<int>(10)); // 正确：从一个 int 直接构造一个临时 vector
```

直接初始化 `v1` 是合法的，但看起来与之等价的拷贝初始化 `v2` 则是错误的，因为 `vector` 的接受单一大小参数的构造函数是 `explicit` 的。出于同样的原因，当传递一个实参或从函数返回一个值时，我们不能隐式使用一个 `explicit` 构造函数。如果我们希望使用一个 `explicit` 构造函数，就必须显式地使用，像此代码中最后一行那样。

499 > 编译器可以绕过拷贝构造函数

在拷贝初始化过程中，编译器可以（但不是必须）跳过拷贝/移动构造函数，直接创建对象。即，编译器被允许将下面的代码

```
string null_book = "9-999-99999-9"; // 拷贝初始化
```

改写为

```
string null_book("9-999-99999-9"); // 编译器略过了拷贝构造函数
```

但是，即使编译器略过了拷贝/移动构造函数，但在这个程序点上，拷贝/移动构造函数必须是存在且可访问的（例如，不能是 `private` 的）。

13.1.1 节练习

练习 13.1：拷贝构造函数是什么？什么时候使用它？

练习 13.2：解释为什么下面的声明是非法的：

```
Sales_data::Sales_data(Sales_data rhs);
```

练习 13.3: 当我们拷贝一个 StrBlob 时，会发生什么？拷贝一个 StrBlobPtr 呢？

练习 13.4: 假定 Point 是一个类类型，它有一个 public 的拷贝构造函数，指出下面程序片段中哪些地方使用了拷贝构造函数：

```
Point global;
Point foo_bar(Point arg)
{
    Point local = arg, *heap = new Point(global);
    *heap = local;
    Point pa[ 4 ] = { local, *heap };
    return *heap;
}
```

练习 13.5: 给定下面的类框架，编写一个拷贝构造函数，拷贝所有成员。你的构造函数应该动态分配一个新的 string（参见 12.1.2 节，第 407 页），并将对象拷贝到 ps 指向的位置，而不是 ps 本身的位置。

```
class HasPtr {
public:
    HasPtr(const std::string &s = std::string()):
        ps(new std::string(s)), i(0) { }
private:
    std::string *ps;
    int i;
};
```

13.1.2 拷贝赋值运算符

与类控制其对象如何初始化一样，类也可以控制其对象如何赋值：

```
Sales_data trans, accum;
trans = accum; // 使用 Sales_data 的拷贝赋值运算符
```

与拷贝构造函数一样，如果类未定义自己的拷贝赋值运算符，编译器会为它合成一个。

重载赋值运算符

在介绍合成赋值运算符之前，我们需要了解一点儿有关重载运算符（overloaded operator）的知识，详细内容将在第 14 章中进行介绍。

重载运算符本质上是函数，其名字由 operator 关键字后接表示要定义的运算符的符号组成。因此，赋值运算符就是一个名为 operator= 的函数。类似于任何其他函数，运算符函数也有一个返回类型和一个参数列表。

重载运算符的参数表示运算符的运算对象。某些运算符，包括赋值运算符，必须定义为成员函数。如果一个运算符是一个成员函数，其左侧运算对象就绑定到隐式的 this 参数（参见 7.1.2 节，第 231 页）。对于一个二元运算符，例如赋值运算符，其右侧运算对象作为显式参数传递。

拷贝赋值运算符接受一个与其所在类相同类型的参数：

```
class Foo {
public:
```

```
Foo& operator=(const Foo&); // 赋值运算符
// ...
};
```

为了与内置类型的赋值（参见 4.4 节，第 129 页）保持一致，赋值运算符通常返回一个指向其左侧运算对象的引用。另外值得注意的是，标准库通常要求保存在容器中的类型要具有赋值运算符，且其返回值是左侧运算对象的引用。



赋值运算符通常应该返回一个指向其左侧运算对象的引用。

合成拷贝赋值运算符

与处理拷贝构造函数一样，如果一个类未定义自己的拷贝赋值运算符，编译器会为它生成一个合成拷贝赋值运算符（synthesized copy-assignment operator）。类似拷贝构造函数，对于某些类，合成拷贝赋值运算符用来禁止该类型对象的赋值（参见 13.1.6 节，第 450 页）。如果拷贝赋值运算符并非出于此目的，它会将右侧运算对象的每个非 static 成员赋予左侧运算对象的对应成员，这一工作是通过成员类型的拷贝赋值运算符来完成的。对于数组类型的成员，逐个赋值数组元素。合成拷贝赋值运算符返回一个指向其左侧运算对象的引用。

501

作为一个例子，下面的代码等价于 Sales_data 的合成拷贝赋值运算符：

```
// 等价于合成拷贝赋值运算符
Sales_data&
Sales_data::operator=(const Sales_data &rhs)
{
    bookNo = rhs.bookNo;           // 调用 string::operator=
    units_sold = rhs.units_sold; // 使用内置的 int 赋值
    revenue = rhs.revenue;        // 使用内置的 double 赋值
    return *this;                 // 返回一个此对象的引用
}
```

13.1.2 节练习

练习 13.6：拷贝赋值运算符是什么？什么时候使用它？合成拷贝赋值运算符完成什么工作？什么时候会生成合成拷贝赋值运算符？

练习 13.7：当我们将一个 StrBlob 赋值给另一个 StrBlob 时，会发生什么？赋值 StrBlobPtr 呢？

练习 13.8：为 13.1.1 节（第 443 页）练习 13.5 中的 HasPtr 类编写赋值运算符。类似拷贝构造函数，你的赋值运算符应该将对象拷贝到 ps 指向的位置。



13.1.3 析构函数

析构函数执行与构造函数相反的操作：构造函数初始化对象的非 static 数据成员，还可能做一些其他工作；析构函数释放对象使用的资源，并销毁对象的非 static 数据成员。

析构函数是类的一个成员函数，名字由波浪号接类名构成。它没有返回值，也不接受参数：

```
class Foo {
public:
    ~Foo(); // 析构函数
```

```
//...  
};
```

由于析构函数不接受参数，因此它不能被重载。对一个给定类，只会有唯一一个析构函数。

析构函数完成什么工作

如同构造函数有一个初始化部分和一个函数体（参见 7.5.1 节，第 257 页），析构函数也有一个函数体和一个析构部分。在一个构造函数中，成员的初始化是在函数体执行之前完成的，且按照它们在类中出现的顺序进行初始化。在一个析构函数中，首先执行函数体，502然后销毁成员。成员按初始化顺序的逆序销毁。

在对象最后一次使用之后，析构函数的函数体可执行类设计者希望执行的任何收尾工作。通常，析构函数释放对象在生存期分配的所有资源。

在一个析构函数中，不存在类似构造函数中初始化列表的东西来控制成员如何销毁，析构部分是隐式的。成员销毁时发生什么完全依赖于成员的类型。销毁类类型的成员需要执行成员自己的析构函数。内置类型没有析构函数，因此销毁内置类型成员什么也不需要做。



隐式销毁一个内置指针类型的成员不会 `delete` 它所指向的对象。

与普通指针不同，智能指针（参见 12.1.1 节，第 402 页）是类类型，所以具有析构函数。因此，与普通指针不同，智能指针成员在析构阶段会被自动销毁。

什么时候会调用析构函数

无论何时一个对象被销毁，就会自动调用其析构函数：

- 变量在离开其作用域时被销毁。
- 当一个对象被销毁时，其成员被销毁。
- 容器（无论是标准库容器还是数组）被销毁时，其元素被销毁。
- 对于动态分配的对象，当对指向它的指针应用 `delete` 运算符时被销毁（参见 12.1.2 节，第 409 页）。
- 对于临时对象，当创建它的完整表达式结束时被销毁。

由于析构函数自动运行，我们的程序可以按需要分配资源，而（通常）无须担心何时释放这些资源。

例如，下面代码片段定义了四个 `Sales_data` 对象：

```
{ // 新作用域  
    // p 和 p2 指向动态分配的对象  
    Sales_data *p = new Sales_data;           // p 是一个内置指针  
    auto p2 = make_shared<Sales_data>();      // p2 是一个 shared_ptr  
    Sales_data item(*p);                      // 拷贝构造函数将*p 拷贝到 item 中  
    vector<Sales_data> vec;                   // 局部对象  
    vec.push_back(*p2);                       // 拷贝 p2 指向的对象  
    delete p;                                // 对 p 指向的对象执行析构函数  
} // 退出局部作用域；对 item、p2 和 vec 调用析构函数  
// 销毁 p2 会递减其引用计数；如果引用计数变为 0，对象被释放  
// 销毁 vec 会销毁它的元素
```

503 每个 Sales_data 对象都包含一个 string 成员，它分配动态内存来保存 bookNo 成员中的字符。但是，我们的代码唯一需要直接管理的内存就是我们直接分配的 Sales_data 对象。我们的代码只需直接释放绑定到 p 的动态分配对象。

其他 Sales_data 对象会在离开作用域时被自动销毁。当程序块结束时，vec、p2 和 item 都离开了作用域，意味着在这些对象上分别会执行 vector、shared_ptr 和 Sales_data 的析构函数。vector 的析构函数会销毁我们添加到 vec 的元素。shared_ptr 的析构函数会递减 p2 指向的对象的引用计数。在本例中，引用计数会变为 0，因此 shared_ptr 的析构函数会 delete p2 分配的 Sales_data 对象。

在所有情况下，Sales_data 的析构函数都会隐式地销毁 bookNo 成员。销毁 bookNo 会调用 string 的析构函数，它会释放用来保存 ISBN 的内存。



当指向一个对象的引用或指针离开作用域时，析构函数不会执行。

合成析构函数

当一个类未定义自己的析构函数时，编译器会为它定义一个合成析构函数（synthesized destructor）。类似拷贝构造函数和拷贝赋值运算符，对于某些类，合成析构函数被用来阻止该类型的对象被销毁（参见 13.1.6 节，第 450 页）。如果不是这种情况，合成析构函数的函数体就为空。

例如，下面的代码片段等价于 Sales_data 的合成析构函数：

```
class Sales_data {
public:
    // 成员会被自动销毁，除此之外不需要做其他事情
    ~Sales_data() { }
    // 其他成员的定义，如前
};
```

在（空）析构函数体执行完毕后，成员会被自动销毁。特别的，string 的析构函数会被调用，它将释放 bookNo 成员所用的内存。

认识到析构函数体自身并不直接销毁成员是非常重要的。成员是在析构函数体之后隐含的析构阶段中被销毁的。在整个对象销毁过程中，析构函数体是作为成员销毁步骤之外的另一部分而进行的。

13.1.3 节练习

练习 13.9：析构函数是什么？合成析构函数完成什么工作？什么时候会生成合成析构函数？

练习 13.10：当一个 StrBlob 对象销毁时会发生什么？一个 StrBlobPtr 对象销毁时呢？

练习 13.11：为前面练习中的 HasPtr 类添加一个析构函数。

练习 13.12：在下面的代码片段中会发生几次析构函数调用？

```
bool fcn(const Sales_data *trans, Sales_data accum)
{
    Sales_data item1(*trans), item2(accum);
```

```

        return item1.isbn() != item2.isbn();
    }
}

```

练习 13.13：理解拷贝控制成员和构造函数的一个好方法是定义一个简单的类，为该类定义这些成员，每个成员都打印出自己的名字：

```

struct X {
    X() {std::cout << "X()" << std::endl;}
    X(const X&) {std::cout << "X(const X&)" << std::endl;}
};

```

给 `X` 添加拷贝赋值运算符和析构函数，并编写一个程序以不同方式使用 `X` 的对象：将它们作为非引用和引用参数传递；动态分配它们；将它们存放于容器中；诸如此类。观察程序的输出，直到你确认理解了什么时候会使用拷贝控制成员，以及为什么会使用它们。当你观察程序输出时，记住编译器可以略过对拷贝构造函数的调用。

13.1.4 三/五法则



如前所述，有三个基本操作可以控制类的拷贝操作：拷贝构造函数、拷贝赋值运算符和析构函数。而且，在新标准下，一个类还可以定义一个移动构造函数和一个移动赋值运算符，我们将在 13.6 节（第 470 页）中介绍这些内容。

C++语言并不要求我们定义所有这些操作：可以只定义其中一个或两个，而不必定义所有。但是，这些操作通常应该被看作一个整体。通常，只需要其中一个操作，而不需要定义所有操作的情况是很少见的。

504

需要析构函数的类也需要拷贝和赋值操作

当我们决定一个类是否要定义它自己版本的拷贝控制成员时，一个基本原则是首先确定这个类是否需要一个析构函数。通常，对析构函数的需求要比对拷贝构造函数或赋值运算符的需求更为明显。如果这个类需要一个析构函数，我们几乎可以肯定它也需要一个拷贝构造函数和一个拷贝赋值运算符。

我们在练习中用过的 `HasPtr` 类是一个好例子（参见 13.1.1 节，第 443 页）。这个类在构造函数中分配动态内存。合成析构函数不会 `delete` 一个指针数据成员。因此，此类需要定义一个析构函数来释放构造函数分配的内存。

应该怎么做可能还有点儿不清晰，但基本原则告诉我们，`HasPtr` 也需要一个拷贝构造函数和一个拷贝赋值运算符。

505

如果我们为 `HasPtr` 定义一个析构函数，但使用合成版本的拷贝构造函数和拷贝赋值运算符，考虑会发生什么：

```

class HasPtr {
public:
    HasPtr(const std::string &s = std::string()): ps(new std::string(s)), i(0) { }
    ~HasPtr() { delete ps; }
    // 错误：HasPtr 需要一个拷贝构造函数和一个拷贝赋值运算符
    // 其他成员的定义，如前
};

```

在这个版本的类定义中，构造函数中分配的内存将在 `HasPtr` 对象销毁时被释放。但不幸的是，我们引入了一个严重的错误！这个版本的类使用了合成的拷贝构造函数和拷贝

赋值运算符。这些函数简单拷贝指针成员，这意味着多个 HasPtr 对象可能指向相同的内存：

```
HasPtr f(HasPtr hp)           // HasPtr 是传值参数，所以将被拷贝
{
    HasPtr ret = hp;          // 拷贝给定的 HasPtr
    // 处理 ret
    return ret;               // ret 和 hp 被销毁
}
```

当 `f` 返回时，`hp` 和 `ret` 都被销毁，在两个对象上都会调用 `HasPtr` 的析构函数。此析构函数会 `delete` `ret` 和 `hp` 中的指针成员。但这两个对象包含相同的指针值。此代码会导致此指针被 `delete` 两次，这显然是一个错误（参见 12.1.2 节，第 411 页）。将要发生什么是未定义的。

此外，`f` 的调用者还会使用传递给 `f` 的对象：

```
HasPtr p("some values");
f(p);                      // 当 f 结束时，p.ps 指向的内存被释放
HasPtr q(p);                // 现在 p 和 q 都指向无效内存！
```

`p`（以及 `q`）指向的内存不再有效，在 `hp`（或 `ret`）销毁时它就被归还给系统了。



如果一个类需要自定义析构函数，几乎可以肯定它也需要自定义拷贝赋值运算符和拷贝构造函数。

需要拷贝操作的类也需要赋值操作，反之亦然

虽然很多类需要定义所有（或是不需要定义任何）拷贝控制成员，但某些类所要完成的工作，只需要拷贝或赋值操作，不需要析构函数。

作为一个例子，考虑一个类为每个对象分配一个独有的、唯一的序号。这个类需要一个拷贝构造函数为每个新创建的对象生成一个新的、独一无二的序号。除此之外，这个拷贝构造函数从给定对象拷贝所有其他数据成员。这个类还需要自定义拷贝赋值运算符来避免将序号赋予目的对象。但是，这个类不需要自定义析构函数。

这个例子引出了第二个基本原则：如果一个类需要一个拷贝构造函数，几乎可以肯定它也需要一个拷贝赋值运算符。反之亦然——如果一个类需要一个拷贝赋值运算符，几乎可以肯定它也需要一个拷贝构造函数。然而，无论是需要拷贝构造函数还是需要拷贝赋值运算符都不必然意味着也需要析构函数。

13.1.4 节练习

练习 13.14：假定 `numbered` 是一个类，它有一个默认构造函数，能为每个对象生成一个唯一的序号，保存在名为 `mysn` 的数据成员中。假定 `numbered` 使用合成的拷贝控制成员，并给定如下函数：

```
void f (numbered s) { cout << s.mysn << endl; }
```

则下面代码输出什么内容？

```
numbered a, b = a, c = b;
f(a); f(b); f(c);
```

练习 13.15：假定 `numbered` 定义了一个拷贝构造函数，能生成一个新的序号。这会改变上一题中调用的输出结果吗？如果会改变，为什么？新的输出结果是什么？

练习 13.16: 如果 `f` 中的参数是 `const numbered&`, 将会怎样? 这会改变输出结果吗? 如果会改变, 为什么? 新的输出结果是什么?

练习 13.17: 分别编写前三题中所描述的 `numbered` 和 `f`, 验证你是否正确预测了输出结果。

13.1.5 使用`=default`

我们可以通过将拷贝控制成员定义为`=default` 来显式地要求编译器生成合成的版本 (参见 7.1.4 节, 第 237 页):

```
class Sales_data {
public:
    // 拷贝控制成员; 使用 default
    Sales_data() = default;
    Sales_data(const Sales_data&) = default;
    Sales_data& operator=(const Sales_data &);
    ~Sales_data() = default;
    // 其他成员的定义, 如前
};

Sales_data& Sales_data::operator=(const Sales_data&) = default;
```

当我们在类内用`=default` 修饰成员的声明时, 合成的函数将隐式地声明为内联的 (就像任何其他类内声明的成员函数一样)。如果我们不希望合成的成员是内联函数, 应该只对成员的类外定义使用`=default`, 就像对拷贝赋值运算符所做的那样。



我们只能对具有合成版本的成员函数使用`=default` (即, 默认构造函数或拷贝控制成员)。

13.1.6 阻止拷贝



大多数类应该定义默认构造函数、拷贝构造函数和拷贝赋值运算符, 无论是隐式地还是显式地。

虽然大多数类应该定义 (而且通常也的确定义了) 拷贝构造函数和拷贝赋值运算符, 但对某些类来说, 这些操作没有合理的意义。在此情况下, 定义类时必须采用某种机制阻止拷贝或赋值。例如, `iostream` 类阻止了拷贝, 以避免多个对象写入或读取相同的 IO 缓冲。为了阻止拷贝, 看起来可能应该不定义拷贝控制成员。但是, 这种策略是无效的: 如果我们的类未定义这些操作, 编译器为它生成合成的版本。

定义删除的函数

在新标准下, 我们可以通过将拷贝构造函数和拷贝赋值运算符定义为删除的函数 (deleted function) 来阻止拷贝。删除的函数是这样一种函数: 我们虽然声明了它们, 但不能以任何方式使用它们。在函数的参数列表后面加上`=delete` 来指出我们希望将它定义为删除的:

```
struct NoCopy {
    NoCopy() = default;           // 使用合成的默认构造函数
    NoCopy(const NoCopy&) = delete;        // 阻止拷贝
    NoCopy &operator=(const NoCopy&) = delete;    // 阻止赋值
```

```

~NoCopy() = default;      // 使用合成的析构函数
// 其他成员
};

=delete 通知编译器（以及我们代码的读者），我们不希望定义这些成员。

```

与`=default`不同，`=delete`必须出现在函数第一次声明的时候，这个差异与这些声明的含义在逻辑上是吻合的。一个默认的成员只影响为这个成员而生成的代码，因此`=default`直到编译器生成代码时才需要。而另一方面，编译器需要知道一个函数是删除的，以便禁止试图使用它的操作。

与`=default`的另一个不同之处是，我们可以对任何函数指定`=delete`（我们只能对编译器可以合成的默认构造函数或拷贝控制成员使用`=default`）。虽然删除函数的主要用途是禁止拷贝控制成员，但当我们希望引导函数匹配过程时，删除函数有时也是有用的。

析构函数不能是删除的成员

值得注意的是，我们不能删除析构函数。如果析构函数被删除，就无法销毁此类型的对象了。对于一个删除了析构函数的类型，编译器将不允许定义该类型的变量或创建该类的临时对象。而且，如果一个类有某个成员的类型删除了析构函数，我们也不能定义该类的变量或临时对象。因为如果一个成员的析构函数是删除的，则该成员无法被销毁。而如果一个成员无法被销毁，则对象整体也就无法被销毁了。

对于删除了析构函数的类型，虽然我们不能定义这种类型的变量或成员，但可以动态分配这种类型的对象。但是，不能释放这些对象：

```

struct NoDtor {
    NoDtor() = default; // 使用合成默认构造函数
    ~NoDtor() = delete; // 我们不能销毁 NoDtor 类型的对象
};

NoDtor nd; // 错误：NoDtor 的析构函数是删除的
NoDtor *p = new NoDtor(); // 正确：但我们不能 delete p
delete p; // 错误：NoDtor 的析构函数是删除的

```



对于析构函数已删除的类型，不能定义该类型的变量或释放指向该类型动态分配对象的指针。

合成的拷贝控制成员可能是删除的

如前所述，如果我们未定义拷贝控制成员，编译器会为我们定义合成的版本。类似的，如果一个类未定义构造函数，编译器会为其合成一个默认构造函数（参见 7.1.4 节，第 235 页）。对某些类来说，编译器将这些合成的成员定义为删除的函数：

- 如果类的某个成员的析构函数是删除的或不可访问的（例如，是 `private` 的），则类的合成析构函数被定义为删除的。
- 如果类的某个成员的拷贝构造函数是删除的或不可访问的，则类的合成拷贝构造函数被定义为删除的。如果类的某个成员的析构函数是删除的或不可访问的，则类合成的拷贝构造函数也被定义为删除的。
- 如果类的某个成员的拷贝赋值运算符是删除的或不可访问的，或是类有一个 `const` 的或引用成员，则类的合成拷贝赋值运算符被定义为删除的。
- 如果类的某个成员的析构函数是删除的或不可访问的，或是类有一个引用成员，它没有类内初始化器（参见 2.6.1 节，第 65 页），或是类有一个 `const` 成员，它没有

类内初始化器且其类型未显式定义默认构造函数，则该类的默认构造函数被定义为删除的。

本质上，这些规则的含义是：如果一个类有数据成员不能默认构造、拷贝、复制或销毁，509则对应的成员函数将被定义为删除的。

一个成员有删除的或不可访问的析构函数会导致合成的默认和拷贝构造函数被定义为删除的，这看起来可能有些奇怪。其原因是，如果没有这条规则，我们可能会创建出无法销毁的对象。

对于具有引用成员或无法默认构造的 `const` 成员的类，编译器不会为其合成默认构造函数，这应该不奇怪。同样不出人意料的规则是：如果一个类有 `const` 成员，则它不能使用合成的拷贝赋值运算符。毕竟，此运算符试图赋值所有成员，而将一个新值赋予一个 `const` 对象是不可能的。

虽然我们可以将一个新值赋予一个引用成员，但这样做改变的是引用指向的对象的值，而不是引用本身。如果为这样的类合成拷贝赋值运算符，则赋值后，左侧运算对象仍然指向与赋值前一样的对象，而不会与右侧运算对象指向相同的对象。由于这种行为看起来并不是我们所期望的，因此对于有引用成员的类，合成拷贝赋值运算符被定义为删除的。

我们将在 13.6.2 节（第 476 页）、15.7.2 节（第 553 页）及 19.6 节（第 751 页）中介绍导致类的拷贝控制成员被定义为删除函数的其他原因。



本质上，当不可能拷贝、赋值或销毁类的成员时，类的合成拷贝控制成员就被定义为删除的。

private 拷贝控制

在新标准发布之前，类是通过将其拷贝构造函数和拷贝赋值运算符声明为 `private` 的来阻止拷贝：

```
class PrivateCopy {  
    // 无访问说明符；接下来的成员默认为 private 的；参见 7.2 节（第 240 页）  
    // 拷贝控制成员是 private 的，因此普通用户代码无法访问  
    PrivateCopy(const PrivateCopy&);  
    PrivateCopy &operator=(const PrivateCopy&);  
    // 其他成员  
public:  
    PrivateCopy() = default; // 使用合成的默认构造函数  
    ~PrivateCopy(); // 用户可以定义此类型的对象，但无法拷贝它们  
};
```

由于析构函数是 `public` 的，用户可以定义 `PrivateCopy` 类型的对象。但是，由于拷贝构造函数和拷贝赋值运算符是 `private` 的，用户代码将不能拷贝这个类型的对象。但是，友元和成员函数仍旧可以拷贝对象。为了阻止友元和成员函数进行拷贝，我们将这些拷贝控制成员声明为 `private` 的，但并不定义它们。

声明但不定义一个成员函数是合法的（参见 6.1.2 节，第 186 页），对此只有一个例外，我们将在 15.2.1 节（第 528 页）中介绍。试图访问一个未定义的成员将导致一个链接时错误。通过声明（但不定义）`private` 的拷贝构造函数，我们可以预先阻止任何拷贝该类型对象的企图：试图拷贝对象的用户代码将在编译阶段被标记为错误；成员函数或友元函数中的拷贝操作将会导致链接时错误。510



希望阻止拷贝的类应该使用`=delete` 来定义它们自己的拷贝构造函数和拷贝赋值运算符，而不应该将它们声明为 `private` 的。

13.1.6 节练习

练习 13.18: 定义一个 `Employee` 类，它包含雇员的姓名和唯一的雇员证号。为这个类定义默认构造函数，以及接受一个表示雇员姓名的 `string` 的构造函数。每个构造函数应该通过递增一个 `static` 数据成员来生成一个唯一的证号。

练习 13.19: 你的 `Employee` 类需要定义它自己的拷贝控制成员吗？如果需要，为什么？如果不呢，为什么？实现你认为 `Employee` 需要的拷贝控制成员。

练习 13.20: 解释当我们拷贝、赋值或销毁 `TextQuery` 和 `QueryResult` 类（参见 12.3 节，第 430 页）对象时会发生什么。

练习 13.21: 你认为 `TextQuery` 和 `QueryResult` 类需要定义它们自己版本的拷贝控制成员吗？如果需要，为什么？如果不呢，为什么？实现你认为这两个类需要的拷贝控制操作。



13.2 拷贝控制和资源管理

通常，管理类外资源的类必须定义拷贝控制成员。如我们在 13.1.4 节（第 447 页）中所见，这种类需要通过析构函数来释放对象所分配的资源。一旦一个类需要析构函数，那么它几乎肯定也需要一个拷贝构造函数和一个拷贝赋值运算符。

为了定义这些成员，我们首先必须确定此类型对象的拷贝语义。一般来说，有两种选择：可以定义拷贝操作，使类的行为看起来像一个值或者像一个指针。

类的行为像一个值，意味着它应该也有自己的状态。当我们拷贝一个像值的对象时，副本和原对象是完全独立的。改变副本不会对原对象有任何影响，反之亦然。

行为像指针的类则共享状态。当我们拷贝一个这种类的对象时，副本和原对象使用相同的底层数据。改变副本也会改变原对象，反之亦然。

在我们使用过的标准库类中，标准库容器和 `string` 类的行为像一个值。而不出意外的，`shared_ptr` 类提供类似指针的行为，就像我们的 `StrBlob` 类（参见 12.1.1 节，第 511 > 405 页）一样，`IO` 类型和 `unique_ptr` 不允许拷贝或赋值，因此它们的行为既不像值也不像指针。

为了说明这两种方式，我们会为练习中的 `HasPtr` 类定义拷贝控制成员。首先，我们将令类的行为像一个值；然后重新实现类，使它的行为像一个指针。

我们的 `HasPtr` 类有两个成员，一个 `int` 和一个 `string` 指针。通常，类直接拷贝内置类型（不包括指针）成员；这些成员本身就是值，因此通常应该让它们的行为像值一样。我们如何拷贝指针成员决定了像 `HasPtr` 这样的类是具有类值行为还是类指针行为。

13.2 节练习

练习 13.22: 假定我们希望 `HasPtr` 的行为像一个值。即，对于对象所指向的 `string`

成员，每个对象都有一份自己的拷贝。我们将在下一节介绍拷贝控制成员的定义。但是，你已经学习了定义这些成员所需的所有知识。在继续学习下一节之前，为 HasPtr 编写拷贝构造函数和拷贝赋值运算符。

13.2.1 行为像值的类



为了提供类值的行为，对于类管理的资源，每个对象都应该拥有一份自己的拷贝。这意味着对于 ps 指向的 string，每个 HasPtr 对象都必须有自己的拷贝。为了实现类值行为，HasPtr 需要

- 定义一个拷贝构造函数，完成 string 的拷贝，而不是拷贝指针
- 定义一个析构函数来释放 string
- 定义一个拷贝赋值运算符来释放对象当前的 string，并从右侧运算对象拷贝 string

类值版本的 HasPtr 如下所示

```
class HasPtr {
public:
    HasPtr(const std::string &s = std::string()):
        ps(new std::string(s)), i(0) { }
    // 对 ps 指向的 string，每个 HasPtr 对象都有自己的拷贝
    HasPtr(const HasPtr &p):
        ps(new std::string(*p.ps)), i(p.i) { }
    HasPtr& operator=(const HasPtr &);

    ~HasPtr() { delete ps; }

private:
    std::string *ps;
    int      i;
};
```

我们的类足够简单，在类内就已定义了除赋值运算符之外的所有成员函数。第一个构造函数接受一个（可选的）string 参数。这个构造函数动态分配它自己的 string 副本，并将指向 string 的指针保存在 ps 中。拷贝构造函数也分配它自己的 string 副本。析构函数对指针成员 ps 执行 delete，释放构造函数中分配的内存。

<512

类值拷贝赋值运算符

赋值运算符通常组合了析构函数和构造函数的操作。类似析构函数，赋值操作会销毁左侧运算对象的资源。类似拷贝构造函数，赋值操作会从右侧运算对象拷贝数据。但是，非常重要的一点是，这些操作是以正确的顺序执行的，即使将一个对象赋予它自身，也保证正确。而且，如果可能，我们编写的赋值运算符还应该是异常安全的——当异常发生时能将左侧运算对象置于一个有意义的状态（参见 5.6.2 节，第 175 页）。

在本例中，通过先拷贝右侧运算对象，我们可以处理自赋值情况，并能保证在异常发生时代码也是安全的。在完成拷贝后，我们释放左侧运算对象的资源，并更新指针指向新分配的 string：

```
HasPtr& HasPtr::operator=(const HasPtr &rhs)
{
    auto newp = new string(*rhs.ps); // 拷贝底层 string
    delete ps; // 释放旧内存
```

```

    ps = newp;           // 从右侧运算对象拷贝数据到本对象
    i = rhs.i;
    return *this;        // 返回本对象
}

```

在这个赋值运算符中，非常清楚，我们首先进行了构造函数的工作：newp 的初始化器等价于 HasPtr 的拷贝构造函数中 ps 的初始化器。接下来与析构函数一样，我们 delete 当前 ps 指向的 string。然后就只剩下拷贝指向新分配的 string 的指针，以及从 rhs 拷贝 int 值到本对象了。

关键概念：赋值运算符

当你编写赋值运算符时，有两点需要记住：

- 如果将一个对象赋予它自身，赋值运算符必须能正确工作。
- 大多数赋值运算符组合了析构函数和拷贝构造函数的工作。

当你编写一个赋值运算符时，一个好的模式是先将右侧运算对象拷贝到一个局部临时对象中。当拷贝完成后，销毁左侧运算对象的现有成员就是安全的了。一旦左侧运算对象的资源被销毁，就只剩下将数据从临时对象拷贝到左侧运算对象的成员中了。

513 >

为了说明防范自赋值操作的重要性，考虑如果赋值运算符如下编写将会发生什么

```

// 这样编写赋值运算符是错误的!
HasPtr&
HasPtr::operator=(const HasPtr &rhs)
{
    delete ps; // 释放对象指向的 string
    // 如果 rhs 和*this 是同一个对象，我们就将从已释放的内存中拷贝数据!
    ps = new string(*(rhs.ps));
    i = rhs.i;
    return *this;
}

```

如果 rhs 和本对象是同一个对象，delete ps 会释放*this 和 rhs 指向的 string。接下来，当我们在 new 表达式中试图拷贝*(rhs.ps) 时，就会访问一个指向无效内存的指针，其行为和结果是未定义的。



对于一个赋值运算符来说，正确工作是非常重要的，即使是将一个对象赋予它自身，也要能正确工作。一个好的方法是在销毁左侧运算对象资源之前拷贝右侧运算对象。

13.2.1 节练习

练习 13.23：比较上一节练习中你编写的拷贝控制成员和这一节中的代码。确定你理解了你的代码和我们的代码之间的差异（如果有的话）。

练习 13.24：如果本节中的 HasPtr 版本未定义析构函数，将会发生什么？如果未定义拷贝构造函数，将会发生什么？

练习 13.25：假定希望定义 StrBlob 的类值版本，而且希望继续使用 shared_ptr，

这样我们的 `StrBlobPtr` 类就仍能使用指向 `vector` 的 `weak_ptr` 了。你修改后的类将需要一个拷贝构造函数和一个拷贝赋值运算符，但不需要析构函数。解释拷贝构造函数和拷贝赋值运算符必须要做什么。解释为什么不需要析构函数。

练习 13.26：对上一题中描述的 `StrBlob` 类，编写你自己的版本。

13.2.2 定义行为像指针的类



对于行为类似指针的类，我们需要为其定义拷贝构造函数和拷贝赋值运算符，来拷贝指针成员本身而不是它指向的 `string`。我们的类仍然需要自己的析构函数来释放接受 `string` 参数的构造函数分配的内存（参见 13.1.4 节，第 447 页）。但是，在本例中，析构函数不能单方面地释放关联的 `string`。只有当最后一个指向 `string` 的 `HasPtr` 销毁时，它才可以释放 `string`。

令一个类展现类似指针的行为的最好方法是使用 `shared_ptr` 来管理类中的资源。拷贝（或赋值）一个 `shared_ptr` 会拷贝（赋值）`shared_ptr` 所指向的指针。<514>
`shared_ptr` 类自己记录有多少用户共享它所指向的对象。当没有用户使用对象时，`shared_ptr` 类负责释放资源。

但是，有时我们希望直接管理资源。在这种情况下，使用引用计数（reference count）（参见 12.1.1 节，第 402 页）就很有用了。为了说明引用计数如何工作，我们将重新定义 `HasPtr`，令其行为像指针一样，但我们不使用 `shared_ptr`，而是设计自己的引用计数。

引用计数

引用计数的工作方式如下：

- 除了初始化对象外，每个构造函数（拷贝构造函数除外）还要创建一个引用计数，用来记录有多少对象与正在创建的对象共享状态。当我们创建一个对象时，只有一个对象共享状态，因此将计数器初始化为 1。
- 拷贝构造函数不分配新的计数器，而是拷贝给定对象的数据成员，包括计数器。拷贝构造函数递增共享的计数器，指出给定对象的状态又被一个新用户所共享。
- 析构函数递减计数器，指出共享状态的用户少了一个。如果计数器变为 0，则析构函数释放状态。
- 拷贝赋值运算符递增右侧运算对象的计数器，递减左侧运算对象的计数器。如果左侧运算对象的计数器变为 0，意味着它的共享状态没有用户了，拷贝赋值运算符就必须销毁状态。

唯一的难题是确定在哪里存放引用计数。计数器不能直接作为 `HasPtr` 对象的成员。下面的例子说明了原因：

```
HasPtr p1("Hiya!");
HasPtr p2(p1);    // p1 和 p2 指向相同的 string
HasPtr p3(p1);    // p1、p2 和 p3 都指向相同的 string
```

如果引用计数保存在每个对象中，当创建 `p3` 时我们应该如何正确更新它呢？可以递增 `p1` 中的计数器并将其拷贝到 `p3` 中，但如何更新 `p2` 中的计数器呢？

解决此问题的一种方法是将计数器保存在动态内存中。当创建一个对象时，我们也分配一个新的计数器。当拷贝或赋值对象时，我们拷贝指向计数器的指针。使用这种方法，副本和原对象都会指向相同的计数器。

定义一个使用引用计数的类

通过使用引用计数，我们就可以编写类指针的 HasPtr 版本了：

```
515> class HasPtr {
public:
    // 构造函数分配新的 string 和新的计数器，将计数器置为 1
    HasPtr(const std::string &s = std::string()):
        ps(new std::string(s)), i(0), use(new std::size_t(1)) {}
    // 拷贝构造函数拷贝所有三个数据成员，并递增计数器
    HasPtr(const HasPtr &p):
        ps(p.ps), i(p.i), use(p.use) { ++*use; }
    HasPtr& operator=(const HasPtr &);

    ~HasPtr();

private:
    std::string *ps;
    int i;
    std::size_t *use; // 用来记录有多少个对象共享*ps 的成员
};
```

在此，我们添加了一个名为 `use` 的数据成员，它记录有多少对象共享相同的 `string`。接受 `string` 参数的构造函数分配新的计数器，并将其初始化为 1，指出当前有一个用户使用本对象的 `string` 成员。

类指针的拷贝成员“篡改”引用计数

当拷贝或赋值一个 `HasPtr` 对象时，我们希望副本和原对象都指向相同的 `string`。即，当拷贝一个 `HasPtr` 时，我们将拷贝 `ps` 本身，而不是 `ps` 指向的 `string`。当我们进行拷贝时，还会递增该 `string` 关联的计数器。

(我们在类内定义的) 拷贝构造函数拷贝给定 `HasPtr` 的所有三个数据成员。这个构造函数还递增 `use` 成员，指出 `ps` 和 `p.ps` 指向的 `string` 又有了一个新的用户。

析构函数不能无条件地 `delete ps`——可能还有其他对象指向这块内存。析构函数应该递减引用计数，指出共享 `string` 的对象少了一个。如果计数器变为 0，则析构函数释放 `ps` 和 `use` 指向的内存：

```
HasPtr::~HasPtr()
{
    if (--*use == 0) { // 如果引用计数变为 0
        delete ps; // 释放 string 内存
        delete use; // 释放计数器内存
    }
}
```

拷贝赋值运算符与往常一样执行类似拷贝构造函数和析构函数的工作。即，它必须递增右侧运算对象的引用计数（即，拷贝构造函数的工作），并递减左侧运算对象的引用计数，在必要时释放使用的内存（即，析构函数的工作）。

而且与往常一样，赋值运算符必须处理自赋值。我们通过先递增 `rhs` 中的计数然后递减左侧运算对象中的计数来实现这一点。通过这种方法，当两个对象相同时，在我们检查 `ps`（及 `use`）是否应该释放之前，计数器就已经被递增过了：

```
516> HasPtr& HasPtr::operator=(const HasPtr &rhs)
{
    if (this != &rhs) {
```

```

++*rhs.use; // 递增右侧运算对象的引用计数
if (--*use == 0) { // 然后递减本对象的引用计数
    delete ps; // 如果没有其他用户
    delete use; // 释放本对象分配的成员
}
ps = rhs.ps; // 将数据从 rhs 拷贝到本对象
i = rhs.i;
use = rhs.use;
return *this; // 返回本对象
}

```

13.2.2 节练习

练习 13.27: 定义你自己的使用引用计数版本的 HasPtr。

练习 13.28: 给定下面的类，为其实现一个默认构造函数和必要的拷贝控制成员。

<p>(a) class TreeNode { private: std::string value; int count; TreeNode *left; TreeNode *right; };</p>	<p>(b) class BinStrTree { private: TreeNode *root; };</p>
--	--

13.3 交换操作

除了定义拷贝控制成员，管理资源的类通常还定义一个名为 swap 的函数（参见 9.2.5 节，第 303 页）。对于那些与重排元素顺序的算法（参见 10.2.3 节，第 342 页）一起使用的类，定义 swap 是非常重要的。这类算法在需要交换两个元素时会调用 swap。

如果一个类定义了自己的 swap，那么算法将使用类自定义版本。否则，算法将使用标准库定义的 swap。虽然与往常一样我们不知道 swap 是如何实现的，但理论上很容易理解，为了交换两个对象我们需要进行一次拷贝和两次赋值。例如，交换两个类值 HasPtr 对象（参见 13.2.1 节，第 453 页）的代码可能像下面这样：

```

HasPtr temp = v1; // 创建 v1 的值的一个临时副本
v1 = v2; // 将 v2 的值赋予 v1
v2 = temp; // 将保存的 v1 的值赋予 v2

```

这段代码将原来 v1 中的 string 拷贝了两次——第一次是 HasPtr 的拷贝构造函数将 v1 拷贝给 temp，第二次是赋值运算符将 temp 赋予 v2。将 v2 赋予 v1 的语句还拷贝了原来 v2 中的 string。如我们所见，拷贝一个类值的 HasPtr 会分配一个新 string 并将其拷贝到 HasPtr 指向的位置。517

理论上，这些内存分配都是不必要的。我们更希望 swap 交换指针，而不是分配 string 的新副本。即，我们希望这样交换两个 HasPtr：

```

string *temp = v1.ps; // 为 v1.ps 中的指针创建一个副本
v1.ps = v2.ps; // 将 v2.ps 中的指针赋予 v1.ps
v2.ps = temp; // 将保存的 v1.ps 中原来的指针赋予 v2.ps

```

编写我们自己的 swap 函数

可以在我们的类上定义一个自己版本的 swap 来重载 swap 的默认行为。swap 的典型实现如下：

```
class HasPtr {
    friend void swap(HasPtr&, HasPtr&);
    // 其他成员定义，与 13.2.1 节（第 453 页）中一样
};

inline
void swap(HasPtr &lhs, HasPtr &rhs)
{
    using std::swap;
    swap(lhs.ps, rhs.ps);      // 交换指针，而不是 string 数据
    swap(lhs.i, rhs.i);        // 交换 int 成员
}
```

我们首先将 swap 定义为 friend，以便能访问 HasPtr 的（private 的）数据成员。由于 swap 的存在就是为了优化代码，我们将其声明为 inline 函数（参见 6.5.2 节，第 213 页）。swap 的函数体对给定对象的每个数据成员调用 swap。我们首先 swap 绑定到 rhs 和 lhs 的对象的指针成员，然后是 int 成员。



与拷贝控制成员不同，swap 并不是必要的。但是，对于分配了资源的类，定义 swap 可能是一种很重要的优化手段。



swap 函数应该调用 swap，而不是 std::swap

此代码中有一个很重要的微妙之处：虽然这一点在这个特殊的例子中并不重要，但在一般情况下它非常重要——swap 函数中调用的 swap 不是 std::swap。在本例中，数据成员是内置类型的，而内置类型是没有特定版本的 swap 的，所以在本例中，对 swap 的调用会调用标准库 std::swap。

但是，如果一个类的成员有自己类型特定的 swap 函数，调用 std::swap 就是错误的了。例如，假定我们有另一个命名为 Foo 的类，它有一个类型为 HasPtr 的成员 h。如果我们未定义 Foo 版本的 swap，那么就会使用标准库版本的 swap。如我们所见，标准库 swap 对 HasPtr 管理的 string 进行了不必要的拷贝。

518 我们可以为 Foo 编写一个 swap 函数，来避免这些拷贝。但是，如果这样编写 Foo 版本的 swap：

```
void swap(Foo &lhs, Foo &rhs)
{
    // 错误：这个函数使用了标准库版本的 swap，而不是 HasPtr 版本
    std::swap(lhs.h, rhs.h);
    // 交换类型 Foo 的其他成员
}
```

此编码会编译通过，且正常运行。但是，使用此版本与简单使用默认版本的 swap 并没有任何性能差异。问题在于我们显式地调用了标准库版本的 swap。但是，我们不希望使用 std 中的版本，我们希望调用为 HasPtr 对象定义的版本。

正确的 swap 函数如下所示：

```
void swap(Foo &lhs, Foo &rhs)
```

```

{
    using std::swap;
    swap(lhs.h, rhs.h); // 使用 HasPtr 版本的 swap
    // 交换类型 Foo 的其他成员
}

```

每个 `swap` 调用应该都是未加限定的。即，每个调用都应该是 `swap`，而不是 `std::swap`。如果存在类型特定的 `swap` 版本，其匹配程度会优于 `std` 中定义的版本，原因我们将在 16.3 节（第 616 页）中进行解释。因此，如果存在类型特定的 `swap` 版本，`swap` 调用会与之匹配。如果不存在类型特定的版本，则会使用 `std` 中的版本（假定作用域中有 `using` 声明）。

非常仔细的读者可能会奇怪为什么 `swap` 函数中的 `using` 声明没有隐藏 `HasPtr` 版本 `swap` 的声明（参见 6.4.1 节，第 210 页）。我们将在 18.2.3 节（第 706 页）中解释为什么这段代码能正常工作。

在赋值运算符中使用 `swap`

定义 `swap` 的类通常用 `swap` 来定义它们的赋值运算符。这些运算符使用了一种名为拷贝并交换（copy and swap）的技术。这种技术将左侧运算对象与右侧运算对象的一个副本进行交换：

```

// 注意 rhs 是按值传递的，意味着 HasPtr 的拷贝构造函数
// 将右侧运算对象中的 string 拷贝到 rhs
HasPtr& HasPtr::operator=(HasPtr rhs)
{
    // 交换左侧运算对象和局部变量 rhs 的内容
    swap(*this, rhs);      // rhs 现在指向本对象曾经使用的内存
    return *this;           // rhs 被销毁，从而 delete 了 rhs 中的指针
}

```

在这个版本的赋值运算符中，参数并不是一个引用，我们将右侧运算对象以传值方式传递给了赋值运算符。因此，`rhs` 是右侧运算对象的一个副本。参数传递时拷贝 `HasPtr` 的操作会分配该对象的 `string` 的一个新副本。519

在赋值运算符的函数体中，我们调用 `swap` 来交换 `rhs` 和 `*this` 中的数据成员。这个调用将左侧运算对象中原来保存的指针存入 `rhs` 中，并将 `rhs` 中原来的指针存入 `*this` 中。因此，在 `swap` 调用之后，`*this` 中的指针成员将指向新分配的 `string`——右侧运算对象中 `string` 的一个副本。

当赋值运算符结束时，`rhs` 被销毁，`HasPtr` 的析构函数将执行。此析构函数 `delete rhs` 现在指向的内存，即，释放掉左侧运算对象中原来的内存。

这个技术的有趣之处是它自动处理了自赋值情况且天然就是异常安全的。它通过在改变左侧运算对象之前拷贝右侧运算对象保证了自赋值的正确，这与我们在原来的赋值运算符中使用的方法是一致的（参见 13.2.1 节，第 453 页）。它保证异常安全的方法也与原来的赋值运算符实现一样。代码中唯一可能抛出异常的是拷贝构造函数中的 `new` 表达式。如果真发生了异常，它也会在我们改变左侧运算对象之前发生。



使用拷贝和交换的赋值运算符自动就是异常安全的，且能正确处理自赋值。

13.3 节练习

练习 13.29: 解释 swap(HasPtr&, HasPtr&) 中对 swap 的调用不会导致递归循环。

练习 13.30: 为你的类值版本的 HasPtr 编写 swap 函数, 并测试它。为你的 swap 函数添加一个打印语句, 指出函数什么时候执行。

练习 13.31: 为你的 HasPtr 类定义一个<运算符, 并定义一个 HasPtr 的 vector。为这个 vector 添加一些元素, 并对它执行 sort。注意何时会调用 swap。

练习 13.32: 类指针的 HasPtr 版本会从 swap 函数受益吗? 如果会, 得到了什么益处? 如果不是, 为什么?

13.4 拷贝控制示例

虽然通常来说分配资源的类更需要拷贝控制, 但资源管理并不是一个类需要定义自己的拷贝控制成员的唯一原因。一些类也需要拷贝控制成员的帮助来进行簿记工作或其他操作。

作为类需要拷贝控制来进行簿记操作的例子, 我们将概述两个类的设计, 这两个类可能用于邮件处理应用中。两个类命名为 Message 和 Folder, 分别表示电子邮件 (或者其他类型的) 消息和消息目录。每个 Message 对象可以出现在多个 Folder 中。但是, 任意给定的 Message 的内容只有一个副本。这样, 如果一条 Message 的内容被改变, 则我们从它所在的任何 Folder 来浏览此 Message 时, 都会看到改变后的内容。

为了记录 Message 位于哪些 Folder 中, 每个 Message 都会保存一个它所在 Folder 的指针的 set, 同样的, 每个 Folder 都保存一个它包含的 Message 的指针的 set。图 13.1 说明了这种设计思路。

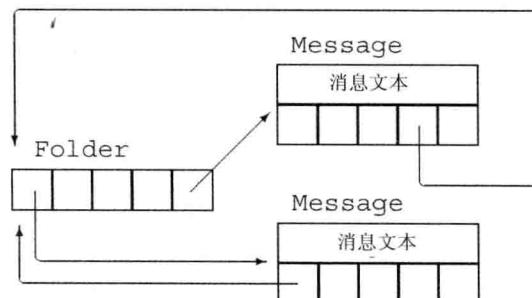


图 13.1: Message 和 Folder 类设计

我们的 Message 类会提供 save 和 remove 操作, 来向一个给定 Folder 添加一条 Message 或是从中删除一条 Message。为了创建一个新的 Message, 我们会指明消息内容, 但不会指出 Folder。为了将一条 Message 放到一个特定 Folder 中, 我们必须调用 save。

当我们拷贝一个 Message 时, 副本和原对象将是不同的 Message 对象, 但两个 Message 都出现在相同的 Folder 中。因此, 拷贝 Message 的操作包括消息内容和 Folder 指针 set 的拷贝。而且, 我们必须在每个包含此消息的 Folder 中都添加一个指向新创建的 Message 的指针。

当我们销毁一个 Message 时, 它将不复存在。因此, 我们必须从包含此消息的所有

Folder 中删除指向此 Message 的指针。

当我们把一个 Message 对象赋予另一个 Message 对象时，左侧 Message 的内容会被右侧 Message 的内容所替代。我们还必须更新 Folder 集合，从原来包含左侧 Message 的 Folder 中将它删除，并将它添加到包含右侧 Message 的 Folder 中。

观察这些操作，我们可以看到，析构函数和拷贝赋值运算符都必须从包含一条 Message 的所有 Folder 中删除它。类似的，拷贝构造函数和拷贝赋值运算符都要将一个 Message 添加到给定的一组 Folder 中。我们将定义两个 private 的工具函数来完成这些工作。



拷贝赋值运算符通常执行拷贝构造函数和析构函数中也要做的工作。这种情况下，公共的工作应该放在 private 的工具函数中完成。

Folder 类也需要类似的拷贝控制成员，来添加或删除它保存的 Message。

521

我们将 Folder 类的设计和实现留作练习。但是，我们将假定 Folder 类包含名为 addMsg 和 remMsg 的成员，分别完成在给定 Folder 对象的消息集合中添加和删除 Message 的工作。

Message 类

根据上述设计，我们可以编写 Message 类，如下所示：

```
class Message {
    friend class Folder;
public:
    // folders 被隐式初始化为空集合
    explicit Message(const std::string &str = "") :
        contents(str) { }
    // 拷贝控制成员，用来管理指向本 Message 的指针
    Message(const Message&);           // 拷贝构造函数
    Message& operator=(const Message&); // 拷贝赋值运算符
    ~Message();                         // 析构函数
    // 从给定 Folder 集合中添加/删除本 Message
    void save(Folder&);
    void remove(Folder&);
private:
    std::string contents;           // 实际消息文本
    std::set<Folder*> folders;    // 包含本 Message 的 Folder
    // 拷贝构造函数、拷贝赋值运算符和析构函数所使用的工具函数
    // 将本 Message 添加到指向参数的 Folder 中
    void add_to_Folders(const Message&);
    // 从 folders 中的每个 Folder 中删除本 Message
    void remove_from_Folders();
};
```

这个类定义了两个数据成员：contents，保存消息文本；folders，保存指向本 Message 所在 Folder 的指针。接受一个 string 参数的构造函数将给定 string 拷贝给 contents，并将 folders（隐式）初始化为空集。由于此构造函数有一个默认参数，因此它也被当作 Message 的默认构造函数（参见 7.5.1 节，第 260 页）。

save 和 remove 成员

除拷贝控制成员外，Message 类只有两个公共成员：save，将本 Message 存放在给定 Folder 中；remove，删除本 Message：

```
void Message::save(Folder &f)
{
    folders.insert(&f); // 将给定 Folder 添加到我们的 Folder 列表中
    f.addMsg(this); // 将本 Message 添加到 f 的 Message 集合中
}
522 void Message::remove(Folder &f)
{
    folders.erase(&f); // 将给定 Folder 从我们的 Folder 列表中删除
    f.remMsg(this); // 将本 Message 从 f 的 Message 集合中删除
}
```

为了保存（或删除）一个 Message，需要更新本 Message 的 folders 成员。当 save 一个 Message 时，我们应保存一个指向给定 Folder 的指针；当 remove 一个 Message 时，我们要删除此指针。

这些操作还必须更新给定的 Folder。更新一个 Folder 的任务是由 Folder 类的 addMsg 和 remMsg 成员来完成的，分别添加和删除给定 Message 的指针。

Message 类的拷贝控制成员

当我们拷贝一个 Message 时，得到的副本应该与原 Message 出现在相同的 Folder 中。因此，我们必须遍历 Folder 指针的 set，对每个指向原 Message 的 Folder 添加一个指向新 Message 的指针。拷贝构造函数和拷贝赋值运算符都需要做这个工作，因此我们定义一个函数来完成这个公共操作：

```
// 将本 Message 添加到指向 m 的 Folder 中
void Message::add_to_Folders(const Message &m)
{
    for (auto f : m.folders) // 对每个包含 m 的 Folder
        f->addMsg(this); // 向该 Folder 添加一个指向本 Message 的指针
}
```

此例中我们对 m.folders 中每个 Folder 调用 addMsg。函数 addMsg 会将本 Message 的指针添加到每个 Folder 中。

Message 的拷贝构造函数拷贝给定对象的数据成员：

```
Message::Message(const Message &m):
    contents(m.contents), folders(m.folders)
{
    add_to_Folders(m); // 将本消息添加到指向 m 的 Folder 中
}
```

并调用 add_to_Folders 将新创建的 Message 的指针添加到每个包含原 Message 的 Folder 中。

Message 的析构函数

当一个 Message 被销毁时，我们必须从指向此 Message 的 Folder 中删除它。拷贝赋值运算符也要执行此操作，因此我们会定义一个公共函数来完成此工作：

```
// 从对应的 Folder 中删除本 Message
void Message::remove_from_Folders()
{
    for (auto f : folders) // 对 folders 中每个指针
        f->remMsg(this); // 从该 Folder 中删除本 Message
}
```

函数 `remove_from_Folders` 的实现类似 `add_to_Folders`, 不同之处是它调用 `remMsg` 来删除当前 `Message` 而不是调用 `addMsg` 来添加 `Message`。 ◀523

有了 `remove_from_Folders` 函数, 编写析构函数就很简单了:

```
Message::~Message()
{
    remove_from_Folders();
}
```

调用 `remove_from_Folders` 确保没有任何 `Folder` 保存正在销毁的 `Message` 的指针。编译器自动调用 `string` 的析构函数来释放 `contents`, 并自动调用 `set` 的析构函数来清理集合成员使用的内存。

Message 的拷贝赋值运算符

与大多数赋值运算符相同, 我们的 `Message` 类的拷贝赋值运算符必须执行拷贝构造函数和析构函数的工作。与往常一样, 最重要的是我们要组织好代码结构, 使得即使左侧和右侧运算对象是同一个 `Message`, 拷贝赋值运算符也能正确执行。

在本例中, 我们先从左侧运算对象的 `folders` 中删除此 `Message` 的指针, 然后再将指针添加到右侧运算对象的 `folders` 中, 从而实现了自赋值的正确处理:

```
Message& Message::operator=(const Message &rhs)
{
    // 通过先删除指针再插入它们来处理自赋值情况
    remove_from_Folders(); // 更新已有 Folder
    contents = rhs.contents; // 从 rhs 拷贝消息内容
    folders = rhs.folders; // 从 rhs 拷贝 Folder 指针
    add_to_Folders(rhs); // 将本 Message 添加到那些 Folder 中
    return *this;
}
```

如果左侧和右侧运算对象是相同的 `Message`, 则它们具有相同的地址。如果我们在 `add_to_Folders` 之后调用 `remove_from_Folders`, 就会将此 `Message` 从它所在的所有 `Folder` 中删除。

Message 的 swap 函数

标准库中定义了 `string` 和 `set` 的 `swap` 版本 (参见 9.2.5 节, 第 303 页)。因此, 如果为我们的 `Message` 类定义它自己的 `swap` 版本, 它将从中受益。通过定义一个 `Message` 特定版本的 `swap`, 我们可以避免对 `contents` 和 `folders` 成员进行不必要的拷贝。

但是, 我们的 `swap` 函数必须管理指向被交换 `Message` 的 `Folder` 指针。在调用 `swap(m1, m2)` 之后, 原来指向 `m1` 的 `Folder` 现在必须指向 `m2`, 反之亦然。

我们通过两遍扫描 `folders` 中每个成员来正确处理 `Folder` 指针。第一遍扫描将 `Message` 从它们所在的 `Folder` 中删除。接下来我们调用 `swap` 来交换数据成员。最后

对 `folders` 进行第二遍扫描来添加交换过的 `Message`:

```
524> void swap(Message &lhs, Message &rhs)
{
    using std::swap; // 在本例中严格来说并不需要，但这是一个好习惯
    // 将每个消息的指针从它（原来）所在 Folder 中删除
    for (auto f: lhs.folders)
        f->remMsg(&lhs);
    for (auto f: rhs.folders)
        f->remMsg(&rhs);
    // 交换 contents 和 Folder 指针 set
    swap(lhs.folders, rhs.folders);           // 使用 swap(set&, set&)
    swap(lhs.contents, rhs.contents);         // swap(string&, string&)
    // 将每个 Message 的指针添加到它的（新）Folder 中
    for (auto f: lhs.folders)
        f->addMsg(&lhs);
    for (auto f: rhs.folders)
        f->addMsg(&rhs);
}
```

13.4 节练习

练习 13.33: 为什么 `Message` 的成员 `save` 和 `remove` 的参数是一个 `Folder&`? 为什么我们不将参数定义为 `Folder` 或是 `const Folder&`?

练习 13.34: 编写本节所描述的 `Message`。

练习 13.35: 如果 `Message` 使用合成的拷贝控制成员，将会发生什么?

练习 13.36: 设计并实现对应的 `Folder` 类。此类应该保存一个指向 `Folder` 中包含的 `Message` 的 `set`。

练习 13.37: 为 `Message` 类添加成员，实现向 `folders` 添加或删除一个给定的 `Folder*`。这两个成员类似 `Folder` 类的 `addMsg` 和 `remMsg` 操作。

练习 13.38: 我们并未使用拷贝和交换方式来设计 `Message` 的赋值运算符。你认为其原因是什么?



13.5 动态内存管理类

某些类需要在运行时分配可变大小的内存空间。这种类通常可以（并且如果它们确实可以说的话，一般应该）使用标准库容器来保存它们的数据。例如，我们的 `StrBlob` 类使用一个 `vector` 来管理其元素的底层内存。

但是，这一策略并不是对每个类都适用；某些类需要自己进行内存分配。这些类一般来说必须定义自己的拷贝控制成员来管理所分配的内存。



例如，我们将实现标准库 `vector` 类的一个简化版本。我们所做的一个简化是不使用模板，我们的类只用于 `string`。因此，它被命名为 `StrVec`。

StrVec 类的设计

回忆一下，`vector` 类将其元素保存在连续内存中。为了获得可接受的性能，`vector`

预先分配足够的内存来保存可能需要的更多元素（参见 9.4 节，第 317 页）。`vector` 的每个添加元素的成员函数会检查是否有空间容纳更多的元素。如果有，成员函数会在下一个可用位置构造一个对象。如果没有可用空间，`vector` 就会重新分配空间：它获得新的空间，将已有元素移动到新空间中，释放旧空间，并添加新元素。

我们在 `StrVec` 类中使用类似的策略。我们将使用一个 `allocator` 来获得原始内存（参见 12.2.2 节，第 427 页）。由于 `allocator` 分配的内存是未构造的，我们将在需要添加新元素时用 `allocator` 的 `construct` 成员在原始内存中创建对象。类似的，当我们需要删除一个元素时，我们将使用 `destroy` 成员来销毁元素。

每个 `StrVec` 有三个指针成员指向其元素所使用的内存：

- `elements`, 指向分配的内存中的首元素
- `first_free`, 指向最后一个实际元素之后的位置
- `cap`, 指向分配的内存末尾之后的位置

图 13.2 说明了这些指针的含义。

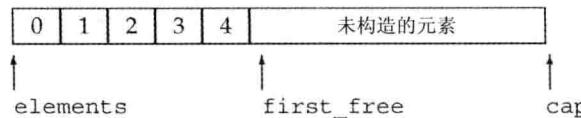


图 13.2: StrVec 内存分配策略

除了这些指针之外，`StrVec` 还有一个名为 `alloc` 的静态成员，其类型为 `allocator<string>`。`alloc` 成员会分配 `StrVec` 使用的内存。我们的类还有 4 个工具函数：

- `alloc_n_copy` 会分配内存，并拷贝一个给定范围中的元素。
- `free` 会销毁构造的元素并释放内存。
- `chk_n_alloc` 保证 `StrVec` 至少有容纳一个新元素的空间。如果没有空间添加新元素，`chk_n_alloc` 会调用 `reallocate` 来分配更多内存。
- `reallocate` 在内存用完时为 `StrVec` 分配新内存。

虽然我们关注的是类的实现，但我们将定义 `vector` 接口中的一些成员。

StrVec 类定义

526

有了上述实现概要，我们现在可以定义 `StrVec` 类，如下所示：

```
// 类 vector 类内存分配策略的简化实现
class StrVec {
public:
    StrVec(): // allocator 成员进行默认初始化
        elements(nullptr), first_free(nullptr), cap(nullptr) { }
    StrVec(const StrVec&); // 拷贝构造函数
    StrVec &operator=(const StrVec&); // 拷贝赋值运算符
    ~StrVec(); // 析构函数
    void push_back(const std::string&); // 拷贝元素
    size_t size() const { return first_free - elements; }
    size_t capacity() const { return cap - elements; }
    std::string *begin() const { return elements; }
    std::string *end() const { return first_free; }
```

```

    // ...
private:
    Static std::allocator<std::string> alloc; // 分配元素
    // 被添加元素的函数所使用
    void chk_n_alloc()
    {
        if (size() == capacity()) reallocate();
    }
    // 工具函数，被拷贝构造函数、赋值运算符和析构函数所使用
    std::pair<std::string*, std::string*> alloc_n_copy
        (const std::string*, const std::string*);
    void free(); // 销毁元素并释放内存
    void reallocate(); // 获得更多内存并拷贝已有元素
    std::string *elements; // 指向数组首元素的指针
    std::string *first_free; // 指向数组第一个空闲元素的指针
    std::string *cap; // 指向数组尾后位置的指针
};

};

类体定义了多个成员：
```

- 默认构造函数(隐式地)默认初始化 alloc 并(显式地)将指针初始化为 nullptr，表明没有元素。
- size 成员返回当前真正在使用的元素的数目，等于 first_free-elements。
- capacity 成员返回 StrVec 可以保存的元素的数量，等价于 cap-elements。
- 当没有空间容纳新元素，即 cap==first_free 时，chk_n_alloc 会为 StrVec 重新分配内存。
- begin 和 end 成员分别返回指向首元素(即 elements)和最后一个构造的元素之后位置(即 first_free)的指针。

使用 construct

函数 push_back 调用 chk_n_alloc 确保有空间容纳新元素。如果需要，
527 chk_n_alloc 会调用 reallocate。当 chk_n_alloc 返回时，push_back 知道必有空间容纳新元素。它要求其 allocator 成员来 construct 新的尾元素：

```

void StrVec::push_back(const string& s)
{
    chk_n_alloc(); // 确保有空间容纳新元素
    // 在 first_free 指向的元素中构造 s 的副本
    alloc.construct(first_free++, s);
}

```

当我们用 allocator 分配内存时，必须记住内存是未构造的(参见 12.2.2 节，第 428 页)。为了使用此原始内存，我们必须调用 construct，在此内存中构造一个对象。传递给 construct 的第一个参数必须是一个指针，指向调用 allocate 所分配的未构造的内存空间。剩余参数确定用哪个构造函数来构造对象。在本例中，只有一个额外参数，类型为 string，因此会使用 string 的拷贝构造函数。

值得注意的是，对 construct 的调用也会递增 first_free，表示已经构造了一个新元素。它使用前置递增(参见 4.5 节，第 131 页)，因此这个调用会在 first_free 当前值指定的地址构造一个对象，并递增 first_free 指向下一个未构造的元素。

alloc_n_copy 成员

我们在拷贝或赋值 StrVec 时，可能会调用 alloc_n_copy 成员。类似 vector，我们的 StrVec 类有类值的行为（参见 13.2.1 节，第 453 页）。当我们拷贝或赋值 StrVec 时，必须分配独立的内存，并从原 StrVec 对象拷贝元素至新对象。

alloc_n_copy 成员会分配足够的内存来保存给定范围的元素，并将这些元素拷贝到新分配的内存中。此函数返回一个指针的 pair（参见 11.2.3 节，第 379 页），两个指针分别指向新空间的开始位置和拷贝的尾后的位置：

```
pair<string*, string*>
StrVec::alloc_n_copy(const string *b, const string *e)
{
    // 分配空间保存给定范围中的元素
    auto data = alloc.allocate(e - b);
    // 初始化并返回一个 pair，该 pair 由 data 和 uninitialized_copy 的返回值构成
    return {data, uninitialized_copy(b, e, data)};
}
```

alloc_n_copy 用尾后指针减去首元素指针，来计算需要多少空间。在分配内存之后，它必须在此空间中构造给定元素的副本。

它是在返回语句中完成拷贝工作的，返回语句中对返回值进行了列表初始化（参见 6.3.2 节，第 203 页）。返回的 pair 的 first 成员指向分配的内存的开始位置；second 成员则是 uninitialized_copy（参见 12.2.2 节，第 429 页）的返回值，此值是一个指针，指向最后一个构造元素之后的位置。528

free 成员

free 成员有两个责任：首先 destroy 元素，然后释放 StrVec 自己分配的内存空间。for 循环调用 allocator 的 destroy 成员，从构造的尾元素开始，到首元素为止，逆序销毁所有元素：

```
void StrVec::free()
{
    // 不能传递给 deallocate 一个空指针，如果 elements 为 0，函数什么也不做
    if (elements) {
        // 逆序销毁旧元素
        for (auto p = first_free; p != elements; /* 空 */)
            alloc.destroy(--p);
        alloc.deallocate(elements, cap - elements);
    }
}
```

destroy 函数会运行 string 的析构函数。string 的析构函数会释放 string 自己分配的内存空间。

一旦元素被销毁，我们就调用 deallocate 来释放本 StrVec 对象分配的内存空间。我们传递给 deallocate 的指针必须是之前某次 allocate 调用所返回的指针。因此，在调用 deallocate 之前我们首先检查 elements 是否为空。

拷贝控制成员

实现了 alloc_n_copy 和 free 成员后，为我们的类实现拷贝控制成员就很简单了。

拷贝构造函数调用 alloc_n_copy:

```
StrVec::StrVec(const StrVec &s)
{
    // 调用 alloc_n_copy 分配空间以容纳与 s 中一样多的元素
    auto newdata = alloc_n_copy(s.begin(), s.end());
    elements = newdata.first;
    first_free = cap = newdata.second;
}
```

并将返回结果赋予数据成员。alloc_n_copy 的返回值是一个指针的 pair。其 first 成员指向第一个构造的元素，second 成员指向最后一个构造的元素之后的位置。由于 alloc_n_copy 分配的空间恰好容纳给定的元素，cap 也指向最后一个构造的元素之后的位置。

析构函数调用 free:

```
StrVec::~StrVec() { free(); }
```

拷贝赋值运算符在释放已有元素之前调用 alloc_n_copy，这样就可以正确处理自赋值了：

529

```
StrVec &StrVec::operator=(const StrVec &rhs)
{
    // 调用 alloc_n_copy 分配内存，大小与 rhs 中元素占用空间一样多
    auto data = alloc_n_copy(rhs.begin(), rhs.end());
    free();
    elements = data.first;
    first_free = cap = data.second;
    return *this;
}
```

类似拷贝构造函数，拷贝赋值运算符使用 alloc_n_copy 的返回值来初始化它的指针。

在重新分配内存的过程中移动而不是拷贝元素

在编写 reallocate 成员函数之前，我们稍微思考一下此函数应该做什么。它应该

- 为一个新的、更大的 string 数组分配内存
- 在内存空间的前一部分构造对象，保存现有元素
- 销毁原内存空间中的元素，并释放这块内存

观察这个操作步骤，我们可以看出，为一个 StrVec 重新分配内存空间会引起从旧内存空间到新内存空间逐个拷贝 string。虽然我们不知道 string 的实现细节，但我们知道 string 具有类值行为。当拷贝一个 string 时，新 string 和原 string 是相互独立的。改变原 string 不会影响到副本，反之亦然。

由于 string 的行为类似值，我们可以得出结论，每个 string 对构成它的所有字符都会保存自己的一份副本。拷贝一个 string 必须为这些字符分配内存空间，而销毁一个 string 必须释放所占用的内存。

拷贝一个 string 就必须真的拷贝数据，因为通常情况下，在我们拷贝了一个 string 之后，它就会有两个用户。但是，如果是 reallocate 拷贝 StrVec 中的 string，则在拷贝之后，每个 string 只有唯一的用户。一旦将元素从旧空间拷贝到了新空间，我们就会立即销毁原 string。

因此，拷贝这些 `string` 中的数据是多余的。在重新分配内存空间时，如果我们能避免分配和释放 `string` 的额外开销，`StrVec` 的性能会好得多。

移动构造函数和 `std::move`

通过使用新标准库引入的两种机制，我们就可以避免 `string` 的拷贝。首先，有一些标准库类，包括 `string`，都定义了所谓的“移动构造函数”。关于 `string` 的移动构造函数如何工作的细节，以及有关实现的任何其他细节，目前都尚未公开。但是，我们知道，移动构造函数通常是将资源从给定对象“移动”而不是拷贝到正在创建的对象。而且我们知道标准库保证“移后源”（moved-from）`string` 仍然保持一个有效的、可析构的状态。对于 `string`，我们可以想象每个 `string` 都有一个指向 `char` 数组的指针。可以假定 `string` 的移动构造函数进行了指针的拷贝，而不是为字符分配内存空间然后拷贝字符。

C++ 11

< 530

我们使用的第二个机制是一个名为 `move` 的标准库函数，它定义在 `utility` 头文件中。目前，关于 `move` 我们需要了解两个关键点。首先，当 `reallocate` 在新内存中构造 `string` 时，它必须调用 `move` 来表示希望使用 `string` 的移动构造函数，原因我们将在 13.6.1 节（第 470 页）中解释。如果它漏掉了 `move` 调用，将会使用 `string` 的拷贝构造函数。其次，我们通常不为 `move` 提供一个 `using` 声明（参见 3.1 节，第 74 页），原因我们将在 18.2.3 节（第 706 页）中解释。当我们使用 `move` 时，直接调用 `std::move` 而不是 `move`。

`reallocate` 成员

了解了这些知识，现在就可以编写 `reallocate` 成员了。首先调用 `allocate` 分配新内存空间。我们每次重新分配内存时都会将 `StrVec` 的容量加倍。如果 `StrVec` 为空，我们将分配容纳一个元素的空间：

```
void StrVec::reallocate()
{
    // 我们将分配当前大小两倍的内存空间
    auto newcapacity = size() ? 2 * size() : 1;
    // 分配新内存
    auto newdata = alloc.allocate(newcapacity);
    // 将数据从旧内存移动到新内存
    auto dest = newdata;        // 指向新数组中下一个空闲位置
    auto elem = elements;      // 指向旧数组中下一个元素
    for (size_t i = 0; i != size(); ++i)
        alloc.construct(dest++, std::move(*elem++));
    free(); // 一旦我们移动完元素就释放旧内存空间
    // 更新我们的数据结构，执行新元素
    elements = newdata;
    first_free = dest;
    cap = elements + newcapacity;
}
```

`for` 循环遍历每个已有元素，并在新内存空间中 `construct` 一个对应元素。我们使用 `dest` 指向构造新 `string` 的内存，使用 `elem` 指向原数组中的元素。我们每次用后置递增运算将 `dest`（和 `elem`）推进到各自数组中的下一个元素。

`construct` 的第二个参数（即，确定使用哪个构造函数的参数（参见 12.2.2 节，第 428 页））是 `move` 返回的值。调用 `move` 返回的结果会令 `construct` 使用 `string` 的移

动构造函数。由于我们使用了移动构造函数，这些 `string` 管理的内存将不会被拷贝。相反，我们构造的每个 `string` 都会从 `elem` 指向的 `string` 那里接管内存的所有权。

531 在元素移动完毕后，我们调用 `free` 销毁旧元素并释放 `StrVec` 原来使用的内存。`string` 成员不再管理它们曾经指向的内存；其数据的管理职责已经转移给新 `StrVec` 内存中的元素了。我们不知道旧 `StrVec` 内存中的 `string` 包含什么值，但我们保证对它们执行 `string` 的析构函数是安全的。

剩下的就是更新指针，指向新分配并已初始化过的数组了。`first_free` 和 `cap` 指针分别被设置为指向最后一个构造的元素之后的位置及指向新分配空间的尾后位置。

13.5 节练习

练习 13.39：编写你自己版本的 `StrVec`，包括自己版本的 `reserve`、`capacity`（参见 9.4 节，第 318 页）和 `resize`（参见 9.3.5 节，第 314 页）。

练习 13.40：为你的 `StrVec` 类添加一个构造函数，它接受一个 `initializer_list<string>` 参数。

练习 13.41：在 `push_back` 中，我们为什么在 `construct` 调用中使用前置递增运算？如果使用后置递增运算的话，会发生什么？

练习 13.42：在你的 `TextQuery` 和 `QueryResult` 类（参见 12.3 节，第 431 页）中用你的 `StrVec` 类代替 `vector<string>`，以此来测试你的 `StrVec` 类。

练习 13.43：重写 `free` 成员，用 `for_each` 和 `lambda`（参见 10.3.2 节，第 346 页）来代替 `for` 循环 `destroy` 元素。你更倾向于哪种实现，为什么？

练习 13.44：编写标准库 `string` 类的简化版本，命名为 `String`。你的类应该至少有一个默认构造函数和一个接受 C 风格字符串指针参数的构造函数。使用 `allocator` 为你的 `String` 类分配所需内存。



13.6 对象移动

新标准的一个最主要的特性是可以移动而非拷贝对象的能力。如我们在 13.1.1 节（第 440 页）中所见，很多情况下都会发生对象拷贝。在其中某些情况下，对象拷贝后就立即被销毁了。在这些情况下，移动而非拷贝对象会大幅度提升性能。

如我们已经看到的，我们的 `StrVec` 类是这种不必要的拷贝的一个很好的例子。在重新分配内存的过程中，从旧内存将元素拷贝到新内存是不必要的，更好的方式是移动元素。使用移动而不是拷贝的另一个原因源于 `IO` 类或 `unique_ptr` 这样的类。这些类都包含不能被共享的资源（如指针或 `IO` 缓冲）。因此，这些类型的对象不能拷贝但可以移动。

532

在旧 C++ 标准中，没有直接的方法移动对象。因此，即使不必拷贝对象的情况下，我们也不得不拷贝。如果对象较大，或者是对象本身要求分配内存空间（如 `string`），进行不必要的拷贝代价非常高。类似的，在旧版本的标准库中，容器中所保存的类必须是可拷贝的。但在新标准中，我们可以用容器保存不可拷贝的类型，只要它们能被移动即可。



标准库容器、`string` 和 `shared_ptr` 类既支持移动也支持拷贝。IO 类和 `unique_ptr` 类可以移动但不能拷贝。

13.6.1 右值引用



C++ 11

为了支持移动操作，新标准引入了一种新的引用类型——右值引用（rvalue reference）。所谓右值引用就是必须绑定到右值的引用。我们通过`&&`而不是`&`来获得右值引用。如我们将要看到的，右值引用有一个重要的性质——只能绑定到一个将要销毁的对象。因此，我们可以自由地将一个右值引用的资源“移动”到另一个对象中。

回忆一下，左值和右值是表达式的属性（参见 4.1.1 节，第 121 页）。一些表达式生成或要求左值，而另外一些则生成或要求右值。一般而言，一个左值表达式表示的是一个对象的身份，而一个右值表达式表示的是对象的值。

类似任何引用，一个右值引用也不过是某个对象的另一个名字而已。如我们所知，对于常规引用（为了与右值引用区分开来，我们可以称之为左值引用（lvalue reference）），我们不能将其绑定到要求转换的表达式、字面常量或是返回右值的表达式（参见 2.3.1 节，第 46 页）。右值引用有着完全相反的绑定特性：我们可以将一个右值引用绑定到这类表达式上，但不能将一个右值引用直接绑定到一个左值上：

```
int i = 42;
int &r = i;           // 正确: r 引用 i
int &&rr = i;         // 错误: 不能将一个右值引用绑定到一个左值上
int &r2 = i * 42;    // 错误: i*42 是一个右值
const int &r3 = i * 42; // 正确: 我们可以将一个 const 的引用绑定到一个右值上
int &&rr2 = i * 42;  // 正确: 将 rr2 绑定到乘法结果上
```

返回左值引用的函数，连同赋值、下标、解引用和前置递增/递减运算符，都是返回左值的表达式的例子。我们可以将一个左值引用绑定到这类表达式的结果上。

返回非引用类型的函数，连同算术、关系、位以及后置递增/递减运算符，都生成右值。我们不能将一个左值引用绑定到这类表达式上，但我们可以将一个 `const` 的左值引用或者一个右值引用绑定到这类表达式上。

左值持久：右值短暂

533

考察左值和右值表达式的列表，两者相互区别之处就很明显了：左值有持久的状态，而右值要么是字面常量，要么是在表达式求值过程中创建的临时对象。

由于右值引用只能绑定到临时对象，我们得知

- 所引用的对象将要被销毁
- 该对象没有其他用户

这两个特性意味着：使用右值引用的代码可以自由地接管所引用的对象的资源。



右值引用指向将要被销毁的对象。因此，我们可以从绑定到右值引用的对象“窃取”状态。

变量是左值

变量可以看作只有一个运算对象而没有运算符的表达式，虽然我们很少这样看待变

量。类似其他任何表达式，变量表达式也有左值/右值属性。变量表达式都是左值。带来的结果就是，我们不能将一个右值引用绑定到一个右值引用类型的变量上，这有些令人惊讶：

```
int &&rr1 = 42; // 正确：字面常量是右值
int &&rr2 = rr1; // 错误：表达式 rr1 是左值！
```

其实有了右值表示临时对象这一观察结果，变量是左值这一特性并不令人惊讶。毕竟，变量是持久的，直至离开作用域时才被销毁。



变量是左值，因此我们不能将一个右值引用直接绑定到一个变量上，即使这个变量是右值引用类型也不行。

标准库 move 函数

C++ 11

虽然不能将一个右值引用直接绑定到一个左值上，但我们可以显式地将一个左值转换为对应的右值引用类型。我们还可以通过调用一个名为 **move** 的新标准库函数来获得绑定到左值上的右值引用，此函数定义在头文件 utility 中。**move** 函数使用了我们将在 16.2.6 节（第 610 页）中描述的机制来返回给定对象的右值引用。

```
int &&rr3 = std::move(rr1); // ok
```

move 调用告诉编译器：我们有一个左值，但我们希望像一个右值一样处理它。我们必须认识到，调用 **move** 就意味着承诺：除了对 **rr1** 赋值或销毁它外，我们将不再使用它。在调用 **move** 之后，我们不能对移后源对象的值做任何假设。

534



我们可以销毁一个移后源对象，也可以赋予它新值，但不能使用一个移后源对象的值。

如前所述，与大多数标准库名字的使用不同，对 **move**（参见 13.5 节，第 469 页）我们不提供 **using** 声明（参见 3.1 节，第 74 页）。我们直接调用 **std::move** 而不是 **move**，其原因将在 18.2.3 节（第 707 页）中解释。



使用 **move** 的代码应该使用 **std::move** 而不是 **move**。这样做可以避免潜在的名字冲突。

13.6.1 节练习

练习 13.45：解释右值引用和左值引用的区别。

练习 13.46：什么类型的引用可以绑定到下面的初始化器上？

```
int f();
vector<int> vi(100);
int? r1 = f();
int? r2 = vi[0];
int? r3 = r1;
int? r4 = vi[0] * f();
```

练习 13.47：对你在练习 13.44（13.5 节，第 470 页）中定义的 **String** 类，为它的拷贝构造函数和拷贝赋值运算符添加一条语句，在每次函数执行时打印一条信息。

练习 13.48: 定义一个 `vector<String>` 并在其上多次调用 `push_back`。运行你的程序，并观察 `String` 被拷贝了多少次。

13.6.2 移动构造函数和移动赋值运算符



类似 `string` 类（及其他标准库类），如果我们自己的类也同时支持移动和拷贝，那么也能从中受益。为了让我们自己的类型支持移动操作，需要为其定义移动构造函数和移动赋值运算符。这两个成员类似对应的拷贝操作，但它们从给定对象“窃取”资源而不是拷贝资源。

类似拷贝构造函数，移动构造函数的第一个参数是该类类型的一个引用。不同于拷贝构造函数的是，这个引用参数在移动构造函数中是一个右值引用。与拷贝构造函数一样，任何额外的参数都必须有默认实参。

除了完成资源移动，移动构造函数还必须确保移后源对象处于这样一个状态——销毁它是无害的。特别是，一旦资源完成移动，源对象必须不再指向被移动的资源——这些资源的所有权已经归属新创建的对象。

作为一个例子，我们为 `StrVec` 类定义移动构造函数，实现从一个 `StrVec` 到另一个 `StrVec` 的元素移动而非拷贝：

```
StrVec::StrVec(StrVec &&s) noexcept // 移动操作不应抛出任何异常
    // 成员初始化器接管 s 中的资源
    : elements(s.elements), first_free(s.first_free), cap(s.cap)
{
    // 令 s 进入这样的状态——对其运行析构函数是安全的
    s.elements = s.first_free = s.cap = nullptr;
}
```

我们将简短解释 `noexcept`（它通知标准库我们的构造函数不抛出任何异常），但让我们先分析一下此构造函数完成什么工作。

与拷贝构造函数不同，移动构造函数不分配任何新内存；它接管给定的 `StrVec` 中的内存。在接管内存之后，它将给定对象中的指针都置为 `nullptr`。这样就完成了从给定对象的移动操作，此对象将继续存在。最终，移后源对象会被销毁，意味着将在其上运行析构函数。`StrVec` 的析构函数在 `first_free` 上调用 `deallocate`。如果我们忘记了改变 `s.first_free`，则销毁移后源对象就会释放掉我们刚刚移动的内存。

移动操作、标准库容器和异常



由于移动操作“窃取”资源，它通常不分配任何资源。因此，移动操作通常不会抛出任何异常。当编写一个不抛出异常的移动操作时，我们应该将此事通知标准库。我们将看到，除非标准库知道我们的移动构造函数不会抛出异常，否则它会认为移动我们的类对象时可能会抛出异常，并且为了处理这种可能性而做一些额外的工作。

一种通知标准库的方法是在我们的构造函数中指明 `noexcept`。`noexcept` 是新标准引入的，我们将在 18.1.4 节（第 690 页）中讨论更多细节。目前重要的是要知道，`noexcept` 是我们承诺一个函数不抛出异常的一种方法。我们在一个函数的参数列表后指定 `noexcept`。在一个构造函数中，`noexcept` 出现在参数列表和初始化列表开始的冒号之间：

```
class StrVec {
```

C++
11

535

```

public:
    StrVec(StrVec&&) noexcept; // 移动构造函数
    // 其他成员的定义，如前
};

StrVec::StrVec(StrVec &&s) noexcept : /* 成员初始化器 */
{ /* 构造函数体 */ }

```

我们必须在类头文件的声明中和定义中（如果定义在类外的话）都指定 `noexcept`。



不抛出异常的移动构造函数和移动赋值运算符必须标记为 `noexcept`。

536

搞清楚为什么需要 `noexcept` 能帮助我们深入理解标准库是如何与我们自定义的类型交互的。我们需要指出一个移动操作不抛出异常，这是因为两个相互关联的事实：首先，虽然移动操作通常不抛出异常，但抛出异常也是允许的；其次，标准库容器能对异常发生时其自身的行为提供保障。例如，`vector` 保证，如果我们调用 `push_back` 时发生异常，`vector` 自身不会发生改变。

现在让我们思考 `push_back` 内部发生了什么。类似对应的 `StrVec` 操作（参见 13.5 节，第 466 页），对一个 `vector` 调用 `push_back` 可能要求为 `vector` 重新分配内存空间。当重新分配 `vector` 的内存时，`vector` 将元素从旧空间移动到新内存中，就像我们在 `reallocate` 中所做的那样（参见 13.5 节，第 469 页）。

如我们刚刚看到的那样，移动一个对象通常会改变它的值。如果重新分配过程使用了移动构造函数，且在移动了部分而不是全部元素后抛出了一个异常，就会产生问题。旧空间中的移动源元素已经被改变了，而新空间中未构造的元素可能尚不存在。在此情况下，`vector` 将不能满足自身保持不变的要求。

另一方面，如果 `vector` 使用了拷贝构造函数且发生了异常，它可以很容易地满足要求。在此情况下，当在新内存中构造元素时，旧元素保持不变。如果此时发生了异常，`vector` 可以释放新分配的（但还未成功构造的）内存并返回。`vector` 原有的元素仍然存在。

为了避免这种潜在问题，除非 `vector` 知道元素类型的移动构造函数不会抛出异常，否则在重新分配内存的过程中，它就必须使用拷贝构造函数而不是移动构造函数。如果希望在 `vector` 重新分配内存这类情况下对我们自定义类型的对象进行移动而不是拷贝，就必须显式地告诉标准库我们的移动构造函数可以安全使用。我们通过将移动构造函数（及移动赋值运算符）标记为 `noexcept` 来做到这一点。

移动赋值运算符

移动赋值运算符执行与析构函数和移动构造函数相同的工作。与移动构造函数一样，如果我们的移动赋值运算符不抛出任何异常，我们就应该将它标记为 `noexcept`。类似拷贝赋值运算符，移动赋值运算符必须正确处理自赋值：

```

StrVec &StrVec::operator=(StrVec &&rhs) noexcept
{
    // 直接检测自赋值
    if (this != &rhs) {
        free(); // 释放已有元素
        elements = rhs.elements; // 从 rhs 接管资源
        first_free = rhs.first_free;
    }
}

```

```

    cap = rhs.cap;
    // 将 rhs 置于可析构状态
    rhs.elements = rhs.first_free = rhs.cap = nullptr;
}
return *this;
}

```

在此例中，我们直接检查 `this` 指针与 `rhs` 的地址是否相同。如果相同，右侧和左侧运算对象指向相同的对象，我们不需要做任何事情。否则，我们释放左侧运算对象所使用的内存，并接管给定对象的内存。与移动构造函数一样，我们将 `rhs` 中的指针置为 `nullptr`。

< 537

我们费心地去检查自赋值情况看起来有些奇怪。毕竟，移动赋值运算符需要右侧运算对象的一个右值。我们进行检查的原因是此右值可能是 `move` 调用的返回结果。与其他任何赋值运算符一样，关键点是我们不能在使用右侧运算对象的资源之前就释放左侧运算对象的资源（可能是相同的资源）。

移后源对象必须可析构



从一个对象移动数据并不会销毁此对象，但有时在移动操作完成后，源对象会被销毁。因此，当我们编写一个移动操作时，必须确保移后源对象进入一个可析构的状态。我们的 `StrVec` 的移动操作满足这一要求，这是通过将移后源对象的指针成员置为 `nullptr` 来实现的。

除了将移后源对象置为析构安全的状态之外，移动操作还必须保证对象仍然是有效的。一般来说，对象有效就是指可以安全地为其赋予新值或者可以安全地使用而不依赖其当前值。另一方面，移动操作对移后源对象中留下的值没有任何要求。因此，我们的程序不应该依赖于移后源对象中的数据。

例如，当我们从一个标准库 `string` 或容器对象移动数据时，我们知道移后源对象仍然保持有效。因此，我们可以对它执行诸如 `empty` 或 `size` 这些操作。但是，我们不知道将会得到什么结果。我们可能期望一个移后源对象是空的，但这并没有保证。

我们的 `StrVec` 类的移动操作将移后源对象置于与默认初始化的对象相同的状态。因此，我们可以继续对移后源对象执行所有的 `StrVec` 操作，与任何其他默认初始化的对象一样。而其他内部结构更为复杂的类，可能表现出完全不同的行为。



WARNING 在移动操作之后，移后源对象必须保持有效的、可析构的状态，但是用户不能对其值进行任何假设。

合成的移动操作

与处理拷贝构造函数和拷贝赋值运算符一样，编译器也会合成移动构造函数和移动赋值运算符。但是，合成移动操作的条件与合成拷贝操作的条件大不相同。

回忆一下，如果我们不声明自己的拷贝构造函数或拷贝赋值运算符，编译器总会为我们合成这些操作（参见 13.1.1 节，第 440 页和 13.1.2 节，第 444 页）。拷贝操作要么被定义为逐成员拷贝，要么被定义为对象赋值，要么被定义为删除的函数。

与拷贝操作不同，编译器根本不会为某些类合成移动操作。特别是，如果一个类定义了自己的拷贝构造函数、拷贝赋值运算符或者析构函数，编译器就不会为它合成移动构造函数和移动赋值运算符了。因此，某些类就没有移动构造函数或移动赋值运算符。如我们将在第 477 页所见，如果一个类没有移动操作，通过正常的函数匹配，类会使用对应的拷

< 538

贝操作来代替移动操作。

只有当一个类没有定义任何自己版本的拷贝控制成员，且类的每个非 static 数据成员都可以移动时，编译器才会为它合成移动构造函数或移动赋值运算符。编译器可以移动内置类型的成员。如果一个成员是类类型，且该类有对应的移动操作，编译器也能移动这个成员：

```
// 编译器会为 X 和 hasX 合成移动操作
struct X {
    int i;           // 内置类型可以移动
    std::string s;  // string 定义了自己的移动操作
};

struct hasX {
    X mem; // X 有合成的移动操作
};

X x, x2 = std::move(x);           // 使用合成的移动构造函数
hasX hx, hx2 = std::move(hx);    // 使用合成的移动构造函数
```



只有当一个类没有定义任何自己版本的拷贝控制成员，且它的所有数据成员都能移动构造或移动赋值时，编译器才会为它合成移动构造函数或移动赋值运算符。

与拷贝操作不同，移动操作永远不会隐式定义为删除的函数。但是，如果我们显式地要求编译器生成`=default` 的（参见 7.1.4 节，第 237 页）移动操作，且编译器不能移动所有成员，则编译器会将移动操作定义为删除的函数。除了一个重要例外，什么时候将合成的移动操作定义为删除的函数遵循与定义删除的合成拷贝操作类似的原则（参见 13.1.6 节，第 449 页）：

- 与拷贝构造函数不同，移动构造函数被定义为删除的函数的条件是：有类成员定义了自己的拷贝构造函数且未定义移动构造函数，或者是有类成员未定义自己的拷贝构造函数且编译器不能为其合成移动构造函数。移动赋值运算符的情况类似。
- 如果有类成员的移动构造函数或移动赋值运算符被定义为删除的或是不可访问的，则类的移动构造函数或移动赋值运算符被定义为删除的。
- 类似拷贝构造函数，如果类的析构函数被定义为删除的或不可访问的，则类的移动构造函数被定义为删除的。
- 类似拷贝赋值运算符，如果有类成员是 `const` 的或是引用，则类的移动赋值运算符被定义为删除的。

539 例如，假定 Y 是一个类，它定义了自己的拷贝构造函数但未定义自己的移动构造函数：

```
// 假定 Y 是一个类，它定义了自己的拷贝构造函数但未定义自己的移动构造函数
struct hasY {
    hasY() = default;
    hasY(hasY&&) = default;
    Y mem; // hasY 将有一个删除的移动构造函数
};
hasY hy, hy2 = std::move(hy); // 错误：移动构造函数是删除的
```

编译器可以拷贝类型为 Y 的对象，但不能移动它们。类 `hasY` 显式地要求一个移动构造函数，但编译器无法为其生成。因此，`hasY` 会有一个删除的移动构造函数。如果 `hasY` 忽略了移动构造函数的声明，则编译器根本不能为它合成一个。如果移动操作可能被定义为

删除的函数，编译器就不会合成它们。

移动操作和合成的拷贝控制成员间还有最后一个相互作用关系：一个类是否定义了自己的移动操作对拷贝操作如何合成有影响。如果类定义了一个移动构造函数和/或一个移动赋值运算符，则该类的合成拷贝构造函数和拷贝赋值运算符会被定义为删除的。



定义了一个移动构造函数或移动赋值运算符的类必须也定义自己的拷贝操作。
否则，这些成员默认地被定义为删除的。

移动右值，拷贝左值……

如果一个类既有移动构造函数，也有拷贝构造函数，编译器使用普通的函数匹配规则来确定使用哪个构造函数（参见 6.4 节，第 208 页）。赋值操作的情况类似。例如，在我们的 StrVec 类中，拷贝构造函数接受一个 `const StrVec` 的引用。因此，它可用于任何可以转换为 `StrVec` 的类型。而移动构造函数接受一个 `StrVec&&`，因此只能用于实参是（非 `static`）右值的情形：

```
StrVec v1, v2;
v1 = v2;                                // v2 是左值；使用拷贝赋值
StrVec getVec(istream &);      // getVec 返回一个右值
v2 = getVec(cin);           // getVec(cin) 是一个右值；使用移动赋值
```

在第一个赋值中，我们将 `v2` 传递给赋值运算符。`v2` 的类型是 `StrVec`，表达式 `v2` 是一个左值。因此移动版本的赋值运算符是不可行的（参见 6.6 节，第 217 页），因为我们不能隐式地将一个右值引用绑定到一个左值。因此，这个赋值语句使用拷贝赋值运算符。

在第二个赋值中，我们赋予 `v2` 的是 `getVec` 调用的结果。此表达式是一个右值。在此情况下，两个赋值运算符都是可行的——将 `getVec` 的结果绑定到两个运算符的参数都是允许的。调用拷贝赋值运算符需要进行一次到 `const` 的转换，而 `StrVec&&` 则是精确匹配。因此，第二个赋值会使用移动赋值运算符。

……但如果没有移动构造函数，右值也被拷贝

540

如果一个类有一个拷贝构造函数但未定义移动构造函数，会发生什么呢？在此情况下，编译器不会合成移动构造函数，这意味着此类将有拷贝构造函数但不会有移动构造函数。如果一个类没有移动构造函数，函数匹配规则保证该类型的对象会被拷贝，即使我们试图通过调用 `move` 来移动它们时也是如此：

```
class Foo {
public:
    Foo() = default;
    Foo(const Foo&); // 拷贝构造函数
    // 其他成员定义，但 Foo 未定义移动构造函数
};

Foo x;
Foo y(x);           // 拷贝构造函数；x 是一个左值
Foo z(std::move(x)); // 拷贝构造函数，因为未定义移动构造函数
```

在对 `z` 进行初始化时，我们调用了 `move(x)`，它返回一个绑定到 `x` 的 `Foo&&`。`Foo` 的拷贝构造函数是可行的，因为我们可以将一个 `Foo&&` 转换为一个 `const Foo&`。因此，`z` 的初始化将使用 `Foo` 的拷贝构造函数。

值得注意的是，用拷贝构造函数代替移动构造函数几乎肯定是安全的（赋值运算符的

情况类似)。一般情况下，拷贝构造函数满足对应的移动构造函数的要求：它会拷贝给定对象，并将原对象置于有效状态。实际上，拷贝构造函数甚至都不会改变原对象的值。



如果一个类有一个可用的拷贝构造函数而没有移动构造函数，则其对象是通过拷贝构造函数来“移动”的。拷贝赋值运算符和移动赋值运算符的情况类似。

拷贝并交换赋值运算符和移动操作

我们的 `HasPtr` 版本定义了一个拷贝并交换赋值运算符（参见 13.3 节，第 459 页），它是函数匹配和移动操作间相互关系的一个很好的示例。如果我们为此类添加一个移动构造函数，它实际上也会获得一个移动赋值运算符：

```
class HasPtr {
public:
    // 添加的移动构造函数
    HasPtr(HasPtr &p) noexcept : ps(p.ps), i(p.i) { p.ps = 0; }
    // 赋值运算符既是移动赋值运算符，也是拷贝赋值运算符
    HasPtr& operator=(HasPtr rhs)
        { swap(*this, rhs); return *this; }
    // 其他成员的定义，同 13.2.1 节（第 453 页）
};
```

在这个版本中，我们为类添加了一个移动构造函数，它接管了给定实参的值。构造函数体将给定的 `HasPtr` 的指针置为 0，从而确保销毁移后源对象是安全的。此函数不会抛出异常，因此我们将其标记为 `noexcept`（参见 13.6.2 节，第 473 页）。

541 现在让我们观察赋值运算符。此运算符有一个非引用参数，这意味着此参数要进行拷贝初始化（参见 13.1.1 节，第 441 页）。依赖于实参的类型，拷贝初始化要么使用拷贝构造函数，要么使用移动构造函数——左值被拷贝，右值被移动。因此，单一的赋值运算符就实现了拷贝赋值运算符和移动赋值运算符两种功能。

例如，假定 `hp` 和 `hp2` 都是 `HasPtr` 对象：

```
hp = hp2; // hp2 是一个左值；hp2 通过拷贝构造函数来拷贝
hp = std::move(hp2); // 移动构造函数移动 hp2
```

在第一个赋值中，右侧运算对象是一个左值，因此移动构造函数是不可行的。`rhs` 将使用拷贝构造函数来初始化。拷贝构造函数将分配一个新 `string`，并拷贝 `hp2` 指向的 `string`。

在第二个赋值中，我们调用 `std::move` 将一个右值引用绑定到 `hp2` 上。在此情况下，拷贝构造函数和移动构造函数都是可行的。但是，由于实参是一个右值引用，移动构造函数是精确匹配的。移动构造函数从 `hp2` 拷贝指针，而不会分配任何内存。

不管使用的是拷贝构造函数还是移动构造函数，赋值运算符的函数体都 `swap` 两个运算对象的状态。交换 `HasPtr` 会交换两个对象的指针（及 `int`）成员。在 `swap` 之后，`rhs` 中的指针将指向原来左侧运算对象所拥有的 `string`。当 `rhs` 离开其作用域时，这个 `string` 将被销毁。

建议：更新三/五法则

所有五个拷贝控制成员应该看作一个整体：一般来说，如果一个类定义了任何一个

拷贝操作，它就应该定义所有五个操作。如前所述，某些类必须定义拷贝构造函数、拷贝赋值运算符和析构函数才能正确工作（参见 13.1.4 节，第 447 页）。这些类通常拥有一个资源，而拷贝成员必须拷贝此资源。一般来说，拷贝一个资源会导致一些额外开销。在这种拷贝并非必要的情况下，定义了移动构造函数和移动赋值运算符的类就可以避免此问题。

Message 类的移动操作

定义了自己的拷贝构造函数和拷贝赋值运算符的类通常也会从移动操作受益。例如，我们的 Message 和 Folder 类（参见 13.4 节，第 460 页）就应该定义移动操作。通过定义移动操作，Message 类可以使用 string 和 set 的移动操作来避免拷贝 contents 和 folders 成员的额外开销。

但是，除了移动 folders 成员，我们还必须更新每个指向原 Message 的 Folder。我们必须删除指向旧 Message 的指针，并添加一个指向新 Message 的指针。

移动构造函数和移动赋值运算符都需要更新 Folder 指针，因此我们首先定义一个操作来完成这一共同的工作：

```
// 从本 Message 移动 Folder 指针
void Message::move_Folders(Message *m)
{
    folders = std::move(m->folders); // 使用 set 的移动赋值运算符
    for (auto f : folders) { // 对每个 Folder
        f->remMsg(m); // 从 Folder 中删除旧 Message
        f->addMsg(this); // 将本 Message 添加到 Folder 中
    }
    m->folders.clear(); // 确保销毁 m 是无害的
}
```

此函数首先移动 folders 集合。通过调用 move，我们使用了 set 的移动赋值运算符而不是它的拷贝赋值运算符。如果我们忽略了 move 调用，代码仍能正常工作，但带来了不必要的拷贝。函数然后遍历所有 Folder，从其中删除指向原 Message 的指针并添加指向新 Message 的指针。

值得注意的是，向 set 插入一个元素可能会抛出一个异常——向容器添加元素的操作要求分配内存，意味着可能会抛出一个 bad_alloc 异常（参见 12.1.2 节，第 409 页）。因此，与我们的 HasPtr 和 StrVec 类的移动操作不同，Message 的移动构造函数和移动赋值运算符可能会抛出异常。因此我们未将它们标记为 noexcept（参见 13.6.2 节，第 473 页）。

函数最后对 m.folders 调用 clear。在执行了 move 之后，我们知道 m.folders 是有效的，但不知道它包含什么内容。由于 Message 的析构函数遍历 folders，我们希望能确定 set 是空的。

Message 的移动构造函数调用 move 来移动 contents，并默认初始化自己的 folders 成员：

```
Message::Message(Message &m) : contents(std::move(m.contents))
{
    move_Folders(&m); // 移动 folders 并更新 Folder 指针
}
```

在构造函数体中，我们调用了 `move_Folders` 来删除指向 `m` 的指针并插入指向本 `Message` 的指针。

移动赋值运算符直接检查自赋值情况：

```
Message& Message::operator=(Message &&rhs)
{
    if (this != &rhs) {           // 直接检查自赋值情况
        remove_from_Folders();
        contents = std::move(rhs.contents); // 移动赋值运算符
        move_Folders(&rhs);   // 重置 Folders 指向本 Message
    }
    return *this;
}
```

543 与任何赋值运算符一样，移动赋值运算符必须销毁左侧运算对象的旧状态。在本例中，销毁左侧运算对象要求我们从现有 `folders` 中删除指向本 `Message` 的指针，我们调用 `remove_from_Folders` 来完成这一工作。完成删除工作后，我们调用 `move` 从 `rhs` 将 `contents` 移动到 `this` 对象。剩下的就是调用 `move_Messages` 来更新 `Folder` 指针了。

移动迭代器

`StrVec` 的 `reallocate` 成员（参见 13.5 节，第 469 页）使用了一个 `for` 循环来调用 `construct` 从旧内存将元素拷贝到新内存中。作为一种替换方法，如果我们能调用 `uninitialized_copy` 来构造新分配的内存，将比循环更为简单。但是，`uninitialized_copy` 恰如其名：它对元素进行拷贝操作。标准库中并没有类似的函数将对象“移动”到未构造的内存中。

C++ 11 新标准库中定义了一种**移动迭代器**（move iterator）适配器（参见 10.4 节，第 358 页）。一个移动迭代器通过改变给定迭代器的解引用运算符的行为来适配此迭代器。一般来说，一个迭代器的解引用运算符返回一个指向元素的左值。与其他迭代器不同，移动迭代器的解引用运算符生成一个右值引用。

我们通过调用标准库的 `make_move_iterator` 函数将一个普通迭代器转换为一个移动迭代器。此函数接受一个迭代器参数，返回一个移动迭代器。

原迭代器的所有其他操作在移动迭代器中都照常工作。由于移动迭代器支持正常的迭代器操作，我们可以将一对移动迭代器传递给算法。特别是，可以将移动迭代器传递给 `uninitialized_copy`：

```
void StrVec::reallocate()
{
    // 分配大小两倍于当前规模的内存空间
    auto newcapacity = size() ? 2 * size() : 1;
    auto first = alloc.allocate(newcapacity);
    // 移动元素
    auto last = uninitialized_copy(make_move_iterator(begin()),
                                   make_move_iterator(end()),
                                   first);
    free();           // 释放旧空间
    elements = first; // 更新指针
    first_free = last;
```

```

    cap = elements + newcapacity;
}

```

`uninitialized_copy` 对输入序列中的每个元素调用 `construct` 来将元素“拷贝”到目的位置。此算法使用迭代器的解引用运算符从输入序列中提取元素。由于我们传递给它的是移动迭代器，因此解引用运算符生成的是一个右值引用，这意味着 `construct` 将使用移动构造函数来构造元素。

值得注意的是，标准库不保证哪些算法适用移动迭代器，哪些不适用。由于移动一个对象可能销毁掉原对象，因此你只有在确信算法在为一个元素赋值或将其传递给一个用户定义的函数后不再访问它时，才能将移动迭代器传递给算法。544

建议：不要随意使用移动操作

由于一个移后源对象具有不确定的状态，对其调用 `std::move` 是危险的。当我们调用 `move` 时，必须绝对确认移后源对象没有其他用户。

通过在类代码中小心地使用 `move`，可以大幅度提升性能。而如果随意在普通用户代码（与类实现代码相对）中使用移动操作，很可能导致莫名其妙的、难以查找的错误，而难以提升应用程序性能。

Best Practices 在移动构造函数和移动赋值运算符这些类实现代码之外的地方，只有当你确信需要进行移动操作且移动操作是安全的，才可以使用 `std::move`。

13.6.2 节练习

练习 13.49：为你的 `StrVec`、`String` 和 `Message` 类添加一个移动构造函数和一个移动赋值运算符。

练习 13.50：在你的 `String` 类的移动操作中添加打印语句，并重新运行 13.6.1 节（第 473 页）的练习 13.48 中的程序，它使用了一个 `vector<String>`，观察什么时候会避免拷贝。

练习 13.51：虽然 `unique_ptr` 不能拷贝，但我们在 12.1.5 节（第 418 页）中编写了一个 `clone` 函数，它以值方式返回一个 `unique_ptr`。解释为什么函数是合法的，以及为什么它能正确工作。

练习 13.52：详细解释第 478 页中的 `HasPtr` 对象的赋值发生了什么？特别是，一步一步描述 `hp`、`hp2` 以及 `HasPtr` 的赋值运算符中的参数 `rhs` 的值发生了什么变化。

练习 13.53：从底层效率的角度看，`HasPtr` 的赋值运算符并不理想，解释为什么。为 `HasPtr` 实现一个拷贝赋值运算符和一个移动赋值运算符，并比较你的新的移动赋值运算符中执行的操作和拷贝并交换版本中执行的操作。

练习 13.54：如果我们为 `HasPtr` 定义了移动赋值运算符，但未改变拷贝并交换运算符，会发生什么？编写代码验证你的答案。

13.6.3 右值引用和成员函数

除了构造函数和赋值运算符之外，如果一个成员函数同时提供拷贝和移动版本，它也能从中受益。这种允许移动的成员函数通常使用与拷贝/移动构造函数和赋值运算符相同的参数模式——一个版本接受一个指向 `const` 的左值引用，第二个版本接受一个指向非

`const` 的右值引用。

例如，定义了 `push_back` 的标准库容器提供两个版本：一个版本有一个右值引用参数，而另一个版本有一个 `const` 左值引用。假定 `X` 是元素类型，那么这些容器就会定义以下两个 `push_back` 版本：

```
void push_back(const X&);      // 拷贝：绑定到任意类型的 X
void push_back(X&&);         // 移动：只能绑定到类型 X 的可修改的右值
```

我们可以将能转换为类型 `X` 的任何对象传递给第一个版本的 `push_back`。此版本从其参数拷贝数据。对于第二个版本，我们只可以传递给它非 `const` 的右值。此版本对于非 `const` 的右值是精确匹配（也是更好的匹配）的，因此当我们传递一个可修改的右值（参见 13.6.2 节，第 477 页）时，编译器会选择运行这个版本。此版本会从其参数窃取数据。

一般来说，我们不需要为函数操作定义接受一个 `const X&&` 或是一个（普通的）`X&` 参数的版本。当我们希望从实参“窃取”数据时，通常传递一个右值引用。为了达到这一目的，实参不能是 `const` 的。类似的，从一个对象进行拷贝的操作不应该改变该对象。因此，通常不需要定义一个接受一个（普通的）`X&` 参数的版本。



区分移动和拷贝的重载函数通常有一个版本接受一个 `const T&`，而另一个版本接受一个 `T&&`。

作为一个更具体的例子，我们将为 `StrVec` 类定义另一个版本的 `push_back`：

```
class StrVec {
public:
    void push_back(const std::string&); // 拷贝元素
    void push_back(std::string&&);     // 移动元素
    // 其他成员的定义，如前
};

// 与 13.5 节（第 466 页）中的原版本相同
void StrVec::push_back(const string &s)
{
    chk_n_alloc(); // 确保有空间容纳新元素
    // 在 first_free 指向的元素中构造 s 的一个副本
    alloc.construct(first_free++, s);
}
void StrVec::push_back(string &&s)
{
    chk_n_alloc(); // 如果需要的话为 StrVec 重新分配内存
    alloc.construct(first_free++, std::move(s));
}
```

这两个成员几乎是相同的。差别在于右值引用版本调用 `move` 来将其参数传递给 `construct`。如前所述，`construct` 函数使用其第二个和随后的实参的类型来确定使用哪个构造函数。由于 `move` 返回一个右值引用，传递给 `construct` 的实参类型是 `string&&`。因此，会使用 `string` 的移动构造函数来构造新元素。

当我们调用 `push_back` 时，实参类型决定了新元素是拷贝还是移动到容器中：

```
StrVec vec; // 空 StrVec
string s = "some string or another";
vec.push_back(s); // 调用 push_back(const string&)
```

```
vec.push_back("done"); // 调用 push_back(string&&)
```

这些调用的差别在于实参是一个左值还是一个右值（从"done"创建的临时 string），具体调用哪个版本据此来决定。

右值和左值引用成员函数

通常，我们在一个对象上调用成员函数，而不管该对象是一个左值还是一个右值。例如：

```
string s1 = "a value", s2 = "another";
auto n = (s1 + s2).find('a');
```

此例中，我们在一个 string 右值上调用 find 成员（参见 9.5.3 节，第 325 页），该 string 右值是通过连接两个 string 而得到的。有时，右值的使用方式可能令人惊讶：

```
s1 + s2 = "wow!";
```

此处我们对两个 string 的连接结果——一个右值，进行了赋值。

在旧标准中，我们没有办法阻止这种使用方式。为了维持向后兼容性，新标准库类仍然允许向右值赋值。但是，我们可能希望在自己的类中阻止这种用法。在此情况下，我们希望强制左侧运算对象（即，this 指向的对象）是一个左值。

我们指出 this 的左值/右值属性的方式与定义 const 成员函数相同（参见 7.1.2 节，C++ 11 第 231 页），即，在参数列表后放置一个引用限定符（reference qualifier）：

```
class Foo {
public:
    Foo &operator=(const Foo&) &; // 只能向可修改的左值赋值
    // Foo 的其他参数
};

Foo &Foo::operator=(const Foo &rhs) &
{
    // 执行将 rhs 赋予本对象所需的工作
    return *this;
}
```

引用限定符可以是&或&&，分别指出 this 可以指向一个左值或右值。类似 const 限定符，引用限定符只能用于（非 static）成员函数，且必须同时出现在函数的声明和定义中。

对于&限定的函数，我们只能将它用于左值；对于&&限定的函数，只能用于右值：

```
Foo &retFoo(); // 返回一个引用；retFoo 调用是一个左值
Foo retVal(); // 返回一个值；retVal 调用是一个右值
Foo i, j; // i 和 j 是左值
i = j; // 正确：i 是左值
retFoo() = j; // 正确：retFoo() 返回一个左值
retVal() = j; // 错误：retVal() 返回一个右值
i = retVal(); // 正确：我们可以将一个右值作为赋值操作的右侧运算对象
```

一个函数可以同时用 const 和引用限定。在此情况下，引用限定符必须跟随在 const 限定符之后：

```
class Foo {
public:
    Foo someMem() & const; // 错误：const 限定符必须在前
    Foo anotherMem() const &; // 正确：const 限定符在前
};
```

重载和引用函数

就像一个成员函数可以根据是否有 `const` 来区分其重载版本一样（参见 7.3.2 节，第 247 页），引用限定符也可以区分重载版本。而且，我们可以综合引用限定符和 `const` 来区分一个成员函数的重载版本。例如，我们将为 `Foo` 定义一个名为 `data` 的 `vector` 成员和一个名为 `sorted` 的成员函数，`sorted` 返回一个 `Foo` 对象的副本，其中 `vector` 已被排序：

```
class Foo {
public:
    Foo sorted() &&;           // 可用于可改变的右值
    Foo sorted() const &;      // 可用于任何类型的 Foo
    // Foo 的其他成员的定义
private:
    vector<int> data;
};

// 本对象为右值，因此可以原址排序
Foo Foo::sorted() &&
{
    sort(data.begin(), data.end());
    return *this;
}
// 本对象是 const 或是一个左值，哪种情况我们都不能对其进行原址排序
Foo Foo::sorted() const & {
    Foo ret(*this);           // 拷贝一个副本
    sort(ret.data.begin(), ret.data.end()); // 排序副本
    return ret;               // 返回副本
}
```

当我们对一个右值执行 `sorted` 时，它可以安全地直接对 `data` 成员进行排序。对象是一个右值，意味着没有其他用户，因此我们可以改变对象。当对一个 `const` 右值或一个左值执行 `sorted` 时，我们不能改变对象，因此就需要在排序前拷贝 `data`。

编译器会根据调用 `sorted` 的对象的左值/右值属性来确定使用哪个 `sorted` 版本：

548 `retVal().sorted();` // `retVal()` 是一个右值，调用 `Foo::sorted() &&`
`retFoo().sorted();` // `retFoo()` 是一个左值，调用 `Foo::sorted() const &`

当我们定义 `const` 成员函数时，可以定义两个版本，唯一的差别是一个版本有 `const` 限定而另一个没有。引用限定的函数则不一样。如果我们定义两个或两个以上具有相同名字和相同参数列表的成员函数，就必须对所有函数都加上引用限定符，或者所有都不加：

```
class Foo {
public:
    Foo sorted() &&;
    Foo sorted() const; // 错误：必须加上引用限定符
    // Comp 是函数类型的类型别名（参见 6.7 节，第 222 页）
    // 此函数类型可以用来比较 int 值
    using Comp = bool(const int&, const int&);
    Foo sorted(Comp*);           // 正确：不同的参数列表
    Foo sorted(Comp*) const;     // 正确：两个版本都没有引用限定符
};
```

本例中声明了一个没有参数的 `const` 版本的 `sorted`, 此声明是错误的。因为 `Foo` 类中还有一个无参的 `sorted` 版本, 它有一个引用限定符, 因此 `const` 版本也必须有引用限定符。另一方面, 接受一个比较操作指针的 `sorted` 版本是没问题的, 因为两个函数都没有引用限定符。



如果一个成员函数有引用限定符, 则具有相同参数列表的所有版本都必须有引用限定符。

13.6.3 节练习

练习 13.55: 为你的 `StrBlob` 添加一个右值引用版本的 `push_back`。

练习 13.56: 如果 `sorted` 定义如下, 会发生什么:

```
Foo Foo::sorted() const & {
    Foo ret(*this);
    return ret.sorted();
}
```

练习 13.57: 如果 `sorted` 定义如下, 会发生什么:

```
Foo Foo::sorted() const & { return Foo(*this).sorted(); }
```

练习 13.58: 编写新版本的 `Foo` 类, 其 `sorted` 函数中有打印语句, 测试这个类, 来验证你对前两题的答案是否正确。

549

小结

每个类都会控制该类型对象拷贝、移动、赋值以及销毁时发生什么。特殊的成员函数——拷贝构造函数、移动构造函数、拷贝赋值运算符、移动赋值运算符和析构函数定义了这些操作。移动构造函数和移动赋值运算符接受一个（通常是非 `const` 的）右值引用；而拷贝版本则接受一个（通常是 `const` 的）普通左值引用。

如果一个类未声明这些操作，编译器会自动为其生成。如果这些操作未定义成删除的，它们会逐成员初始化、移动、赋值或销毁对象：合成的操作依次处理每个非 `static` 数据成员，根据成员类型确定如何移动、拷贝、赋值或销毁它。

分配了内存或其他资源的类几乎总是需要定义拷贝控制成员来管理分配的资源。如果一个类需要析构函数，则它几乎肯定也需要定义移动和拷贝构造函数及移动和拷贝赋值运算符。

术语表

拷贝并交换（copy and swap） 涉及赋值运算符的技术，首先拷贝右侧运算对象，然后调用 `swap` 来交换副本和左侧运算对象。

拷贝赋值运算符（copy-assignment operator） 接受一个本类型对象的赋值运算符版本。通常，拷贝赋值运算符的参数是一个 `const` 的引用，并返回指向本对象的引用。如果类未显式定义拷贝赋值运算符，编译器会为它合成一个。

拷贝构造函数（copy constructor） 一种构造函数，将新对象初始化为同类型另一个对象的副本。当向函数传递对象，或以传值方式从函数返回对象时，会隐式使用拷贝构造函数。如果我们未提供拷贝构造函数，编译器会为我们合成一个。

拷贝控制（copy control） 特殊的成员函数，控制拷贝、移动、赋值及销毁本类类型对象时发生什么。如果类未定义这些操作，编译器会为它合成恰当的定义。

拷贝初始化（copy initialization） 一种初始化形式，当我们使用`=`为一个新创建的对象提供初始化器时，会使用拷贝初始化。如果我们向函数传递对象或以传值方式从函数返回对象，以及初始化一个数组或一个聚合类时，也会使用拷贝初始化。

删除的函数（deleted function） 不能使用的函数。我们在一个函数的声明上指定`=delete` 来删除它。删除的函数的一个常见用途是告诉编译器不要为类合成拷贝和/或移动操作。

析构函数（destructor） 特殊的成员函数，当对象离开作用域或被释放时进行清理工作。编译器会自动销毁每个数据成员。类类型的成员通过调用其析构函数来销毁；而内置类型或复合类型的成员的销毁则不需要做任何工作。特别是，析构函数不会释放指针成员指向的对象。

左值引用（lvalue reference） 可以绑定到左值的引用。

逐成员拷贝 / 赋值（memberwise copy/assign） 合成的拷贝与移动构造函数及拷贝与移动赋值运算符的工作方式。合成的拷贝或移动构造函数依次处理每个非 `static` 数据成员，通过从给定对象拷贝或移动对应成员来初始化本对象成员；拷贝或移动赋值运算符从右侧运算对象中将每个成员拷贝赋值或移动赋值到左侧运算对象中。内置类型或复合类型的成员直接进行初始化或赋值。类类型的成员通过成员对应的拷贝/移动构造函数或拷贝/移动赋值运算符进行初始化或赋值。

move 用来将一个右值引用绑定到一个左值的标准库函数。调用 `move` 隐含地承诺我们将不会再使用移后源对象，除了销毁它或赋予它一个新值之外。

移动赋值运算符（move-assignment operator） 接受一个本类型右值引用参数的赋值运算符版本。通常，移动赋值运算符将数据从右侧运算对象移动到左侧运算对象。赋值之后，对右侧运算对象执行析构函数必须是安全的。

移动构造函数（move constructor） 一种构造函数，接受一个本类型的右值引用。通常，移动构造函数将数据从其参数移动到新创建的对象中。移动之后，对给定的实参执行析构函数必须是安全的。

移动迭代器（move iterator） 迭代器适配器，它生成的迭代器在解引用时会得到一个右值引用。

重载运算符（overloaded operator） 一种函数，重定义了运算符应用于类类型的对象时的含义。本章介绍了如何定义赋值运算符；第 14 章中将介绍重载运算符的更多细节内容。

引用计数（reference count） 一种程序设计技术，通常用于拷贝控制成员的设计。引用计数记录了有多少对象共享状态。构造函数（不是拷贝/移动构造函数）将引用计数置为 1。每当创建一个新副本时，计数

值递增。当一个对象被销毁时，计数值递减。赋值运算符和析构函数检查递减的引用计数是否为 0，如果是，它们会销毁对象。

引用限定符（reference qualifier） 用来指出一个非 `static` 成员函数可以用于左值或右值的符号。限定符`&`和`&&`应该放在参数列表之后或 `const` 限定符之后（如果有的话）。被`&`限定的函数只能用于左值；被`&&`限定的函数只能用于右值。

右值引用（rvalue reference） 指向一个将要销毁的对象的引用。

合成赋值运算符（synthesized assignment operator） 编译器为未显式定义赋值运算符的类创建的（合成的）拷贝或移动赋值运算符版本。除非定义为删除的，合成赋值运算符会逐成员地将右侧运算对象赋予（移动到）左侧运算对象。

合成拷贝/移动构造函数（synthesized copy/move constructor） 编译器为未显式定义对应的构造函数的类生成的拷贝或移动构造函数版本。除非定义为删除的，合成拷贝或移动构造函数分别通过从给定对象拷贝或移动成员来逐成员地初始化新对象。

合成析构函数（synthesized destructor） 编译器为未显式定义析构函数的类创建的（合成的）版本。合成析构函数的函数体为空。

第 14 章

重载运算与类型转换

内容

14.1 基本概念	490
14.2 输入和输出运算符	494
14.3 算术和关系运算符	497
14.4 赋值运算符	499
14.5 下标运算符	501
14.6 递增和递减运算符	502
14.7 成员访问运算符	504
14.8 函数调用运算符	506
14.9 重载、类型转换与运算符	514
小结	523
术语表	523

在第 4 章中我们看到，C++语言定义了大量运算符以及内置类型的自动转换规则。这些特性使得程序员能编写出形式丰富、含有多种混合类型的表达式。

当运算符被用于类类型的对象时，C++语言允许我们为其指定新的含义；同时，我们也能自定义类类型之间的转换规则。和内置类型的转换一样，类类型转换隐式地将一种类型的对象转换成另一种我们所需类型的对象。

552 当运算符作用于类类型的运算对象时，可以通过运算符重载重新定义该运算符的含义。明智地使用运算符重载能令我们的程序更易于编写和阅读。举个例子，因为在 Sales_item 类（参见 1.5.1 节，第 17 页）中定义了输入、输出和加法运算符，所以可以通过下述形式输出两个 Sales_item 的和：

```
cout << item1 + item2; // 输出两个 Sales_item 的和
```

相反的，由于我们的 Sales_data 类（参见 7.1 节，第 228 页）还没有重载这些运算符，因此它的加法代码显得比较冗长而不清晰：

```
print(cout, add(data1, data2)); // 输出两个 Sales_data 的和
```



14.1 基本概念

重载的运算符是具有特殊名字的函数：它们的名字由关键字 operator 和其后要定义的运算符号共同组成。和其他函数一样，重载的运算符也包含返回类型、参数列表以及函数体。

重载运算符函数的参数数量与该运算符作用的运算对象数量一样多。一元运算符有一个参数，二元运算符有两个。对于二元运算符来说，左侧运算对象传递给第一个参数，而右侧运算对象传递给第二个参数。除了重载的函数调用运算符 operator() 之外，其他重载运算符不能含有默认实参（参见 6.5.1 节，第 211 页）。

如果一个运算符函数是成员函数，则它的第一个（左侧）运算对象绑定到隐式的 this 指针上（参见 7.1.2 节，第 231 页），因此，成员运算符函数的（显式）参数数量比运算符的运算对象总数少一个。



当一个重载的运算符是成员函数时，this 绑定到左侧运算对象。成员运算符函数的（显式）参数数量比运算对象的数量少一个。

对于一个运算符函数来说，它或者是类的成员，或者至少含有一个类类型的参数：

```
// 错误：不能为 int 重定义内置的运算符  
int operator+(int, int);
```

这一约定意味着当运算符作用于内置类型的运算对象时，我们无法改变该运算符的含义。

我们可以重载大多数（但不是全部）运算符。表 14.1 指明了哪些运算符可以被重载，哪些不行。我们将在 19.1.1 节（第 726 页）介绍重载 new 和 delete 的方法。

我们只能重载已有的运算符，而无权发明新的运算符号。例如，我们不能提供 operator** 来执行幂操作。

有四个符号（+、-、*、&）既是一元运算符也是二元运算符，所有这些运算符都能被重载，从参数的数量我们可以推断到底定义的是哪种运算符。

553 对于一个重载的运算符来说，其优先级和结合律（参见 4.1.2 节，第 121 页）与对应的内置运算符保持一致。不考虑运算对象类型的话，

```
x == y + z;
```

永远等价于 $x == (y + z)$ 。

表 14.1: 运算符

可以被重载的运算符						
+	-	*	/	%	^	
&		~	!	,	=	
<	>	<=	>=	++	--	
<<	>>	==	!=	&&		
+=	-=	/=	%=	^=	&=	
=	*=	<<=	>>=	[]	()	
->	->*	new	new[]	delete	delete[]	
不能被重载的运算符						
:	.*	.	.	?	:	

直接调用一个重载的运算符函数

通常情况下，我们将运算符作用于类型正确的实参，从而以这种间接方式“调用”重载的运算符函数。然而，我们也能像调用普通函数一样直接调用运算符函数，先指定函数名字，然后传入数量正确、类型适当的实参：

```
// 一个非成员运算符函数的等价调用
data1 + data2;                                // 普通的表达式
operator+(data1, data2);                      // 等价的函数调用
```

这两次调用是等价的，它们都调用了非成员函数 `operator+`，传入 `data1` 作为第一个实参、传入 `data2` 作为第二个实参。

我们像调用其他成员函数一样显式地调用成员运算符函数。具体做法是，首先指定运行函数的对象（或指针）的名字，然后使用点运算符（或箭头运算符）访问希望调用的函数：

```
data1 += data2;                                // 基于“调用”的表达式
data1.operator+=(data2);                      // 对成员运算符函数的等价调用
```

这两条语句都调用了成员函数 `operator+=`，将 `this` 绑定到 `data1` 的地址、将 `data2` 作为实参传入了函数。

某些运算符不应该被重载

回忆之前介绍过的，某些运算符指定了运算对象求值的顺序。因为使用重载的运算符本质上是一次函数调用，所以这些关于运算对象求值顺序的规则无法应用到重载的运算符上。特别是，逻辑与运算符、逻辑或运算符（参见 4.3 节，第 126 页）和逗号运算符（参见 4.10 节，第 140 页）的运算对象求值顺序规则无法保留下来。除此之外，`&&` 和 `||` 运算符的重载版本也无法保留内置运算符的短路求值属性，两个运算对象总是会被求值。554

因为上述运算符的重载版本无法保留求值顺序和/或短路求值属性，因此不建议重载它们。当代码使用了这些运算符的重载版本时，用户可能会突然发现他们一直习惯的求值规则不再适用了。

还有一个原因使得我们一般不重载逗号运算符和取地址运算符：C++语言已经定义了这两种运算符用于类类型对象时的特殊含义，这一点与大多数运算符都不相同。因为这两种运算符已经有了内置的含义，所以一般来说它们不应该被重载，否则它们的行为将异于常态，从而导致类的用户无法适应。

Best Practices

通常情况下，不应该重载逗号、取地址、逻辑与和逻辑或运算符。

使用与内置类型一致的含义

当你开始设计一个类时，首先应该考虑的是这个类将提供哪些操作。在确定类需要哪些操作之后，才能思考到底应该把每个类操作设成普通函数还是重载的运算符。如果某些操作在逻辑上与运算符相关，则它们适合于定义成重载的运算符：

- 如果类执行 IO 操作，则定义移位运算符使其与内置类型的 IO 保持一致。
- 如果类的某个操作是检查相等性，则定义 `operator==`；如果类有了 `operator==`，意味着它通常也应该有 `operator!=`。
- 如果类包含一个内在的单序比较操作，则定义 `operator<`；如果类有了 `operator<`，则它也应该含有其他关系操作。
- 重载运算符的返回类型通常情况下应该与其内置版本的返回类型兼容：逻辑运算符和关系运算符应该返回 `bool`，算术运算符应该返回一个类类型的值，赋值运算符和复合赋值运算符则应该返回左侧运算对象的一个引用。

提示：尽量明智地使用运算符重载

每个运算符在用于内置类型时都有比较明确的含义。以二元`+`运算符为例，它明显执行的是加法操作。因此，把二元`+`运算符映射到类类型的一个类似操作上可以极大地简化记忆。例如对于标准库类型 `string` 来说，我们就会使用`+`把一个 `string` 对象连接到另一个后面，很多编程语言都有类似的用法。

当在内置的运算符和我们自己的操作之间存在逻辑映射关系时，运算符重载的效果最好。此时，使用重载的运算符显然比另起一个名字更自然也更直观。不过，过分滥用运算符重载也会使我们的类变得难以理解。

在实际编程过程中，一般没有特别明显的滥用运算符重载的情况。例如，一般来说没有哪个程序员会定义 `operator+` 并让它执行减法操作。然而经常发生的一种情况是，程序员可能会强行扭曲了运算符的“常规”含义使得其适应某种给定的类型，这显然是我们不希望发生的。因此我们的建议是：只有当操作的含义对于用户来说清晰明了时才使用运算符。如果用户对运算符可能有几种不同的理解，则使用这样的运算符将产生二义性。

赋值和复合赋值运算符

赋值运算符的行为与复合版本的类似：赋值之后，左侧运算对象和右侧运算对象的值相等，并且运算符应该返回它左侧运算对象的一个引用。重载的赋值运算应该继承而非违背其内置版本的含义。

如果类含有算术运算符（参见 4.2 节，第 124 页）或者位运算符（参见 4.8 节，第 136 页），则最好也提供对应的复合赋值运算符。无须赘言，`+=` 运算符的行为显然应该与其内置版本一致，即先执行`+`，再执行`=`。

选择作为成员或者非成员

当我们定义重载的运算符时，必须首先决定是将其声明为类的成员函数还是声明为一个普通的非成员函数。在某些时候我们别无选择，因为有的运算符必须作为成员；另一些

情况下，运算符作为普通函数比作为成员更好。

下面的准则有助于我们在将运算符定义为成员函数还是普通的非成员函数做出抉择：

- 赋值（`=`）、下标（`[]`）、调用（`()`）和成员访问箭头（`->`）运算符必须是成员。
 - 复合赋值运算符一般来说应该是成员，但并非必须，这一点与赋值运算符略有不同。
 - 改变对象状态的运算符或者与给定类型密切相关的运算符，如递增、递减和解引用运算符，通常应该是成员。
 - 具有对称性的运算符可能转换任意一端的运算对象，例如算术、相等性、关系和位运算符等，因此它们通常应该是普通的非成员函数。

程序员希望能在含有混合类型的表达式中使用对称性运算符。例如，我们能求一个 int 和一个 double 的和，因为它们中的任意一个都可以是左侧运算对象或右侧运算对象，所以加法是对称的。如果我们想提供含有类对象的混合类型表达式，则运算符必须定义成非成员函数。

556

当我们把运算符定义成成员函数时，它的左侧运算对象必须是运算符所属类的一个对象。例如：

```
string s = "world";
string t = s + "!"; // 正确: 我们能把一个 const char* 加到一个 string 对象中
string u = "hi" + s; // 如果 + 是 string 的成员, 则产生错误
```

如果 `operator+` 是 `string` 类的成员，则上面的第一个加法等价于 `s.operator+("!")`。同样的，“hi”+`s` 等价于“hi”.`operator+(s)`。显然“hi”的类型是 `const char*`，这是一种内置类型，根本就没有成员函数。

因为 string 将 + 定义成了普通的非成员函数，所以 "hi"+s 等价于 operator+("hi", s)。和任何其他函数调用一样，每个实参都能被转换成形参类型。唯一的要求是至少有一个运算对象是类类型，并且两个运算对象都能准确无误地转换成 string。

14.1 节练习

练习 14.1: 在什么情况下重载的运算符与内置运算符有所区别？在什么情况下重载的运算符又与内置运算符一样？

练习 14.2: 为 Sales data 编写重载的输入、输出、加法和复合赋值运算符。

练习 14.3: string 和 vector 都定义了重载的==以比较各自的对象, 假设 svec1 和 svec2 是存放 string 的 vector, 确定在下面的表达式中分别使用了哪个版本的==?

- (a) "cobble" == "stone"
(c) svec1 == svec2

(b) svec1[0] == svec2[0]
(d) "svec1[0] == "stone"

练习 14.4: 如何确定下列运算符是否应该是类的成员？

- (a) % (b) %= (c) ++ (d) -> (e) << (f) && (g) == (h) ()

练习 14.5: 在 7.5.1 节的练习 7.40 (第 261 页) 中, 编写了下列类中某一个的框架, 请问在这个类中应该定义重载的运算符吗? 如果是, 请写出来。

- (a) Book (b) Date (c) Employee
(d) Vehicle (e) Object (f) Tree

14.2 输入和输出运算符

如我们所知，IO 标准库分别使用`>>`和`<<`执行输入和输出操作。对于这两个运算符来说，IO 库定义了用其读写内置类型的版本，而类则需要自定义适合其对象的新版本以支持 IO 操作。

14.2.1 重载输出运算符`<<`

通常情况下，输出运算符的第一个形参是一个非常量 `ostream` 对象的引用。之所以 `ostream` 是非常量是因为向流写入内容会改变其状态；而该形参是引用是因为我们无法直接复制一个 `ostream` 对象。

第二个形参一般来说是一个常量的引用，该常量是我们想要打印的类类型。第二个形参是引用的原因是我们希望避免复制实参；而之所以该形参可以是常量是因为（通常情况下）打印对象不会改变对象的内容。

为了与其他输出运算符保持一致，`operator<<`一般要返回它的 `ostream` 形参。

Sales_data 的输出运算符

举个例子，我们按照如下形式编写 `Sales_data` 的输出运算符：

```
ostream &operator<<(ostream &os, const Sales_data &item)
{
    os << item.isbn() << " " << item.units_sold << " "
        << item.revenue << " " << item.avg_price();
    return os;
}
```

除了名字之外，这个函数与之前的 `print` 函数（参见 7.1.3 节，第 234 页）完全一样。打印一个 `Sales_data` 对象意味着要分别打印它的三个数据成员以及通过计算得到的平均销售价格，每个元素以空格隔开。完成输出后，运算符返回刚刚使用的 `ostream` 的引用。

输出运算符尽量减少格式化操作

用于内置类型的输出运算符不太考虑格式化操作，尤其不会打印换行符，用户希望类的输出运算符也像如此行事。如果运算符打印了换行符，则用户就无法在对象的同一行内接着打印一些描述性的文本了。相反，令输出运算符尽量减少格式化操作可以使用户有权控制输出的细节。

Best Practices

通常，输出运算符应该主要负责打印对象的内容而非控制格式，输出运算符不应该打印换行符。

输入输出运算符必须是非成员函数

与 `iostream` 标准库兼容的输入输出运算符必须是普通的非成员函数，而不能是类的成员函数。否则，它们的左侧运算对象将是我们的类的一个对象：

```
Sales_data data;
data << cout;           // 如果 operator<< 是 Sales_data 的成员
```

假设输入输出运算符是某个类的成员，则它们也必须是 `istream` 或 `ostream` 的成员。然而，这两个类属于标准库，并且我们无法给标准库中的类添加任何成员。

因此，如果我们希望为类自定义 IO 运算符，则必须将其定义成非成员函数。当然，IO 运算符通常需要读写类的非公有数据成员，所以 IO 运算符一般被声明为友元（参见 7.2.1 节，第 241 页）。 558

14.2.1 节练习

练习 14.6：为你的 Sales_data 类定义输出运算符。

练习 14.7：你在 13.5 节的练习（第 470 页）中曾经编写了一个 String 类，为它定义一个输出运算符。

练习 14.8：你在 7.5.1 节的练习 7.40（第 261 页）中曾经选择并编写了一个类，为它定义一个输出运算符。

14.2.2 重载输入运算符>>



通常情况下，输入运算符的第一个形参是运算符将要读取的流的引用，第二个形参是将要读入到的（非常量）对象的引用。该运算符通常会返回某个给定流的引用。第二个形参之所以必须是个非常量是因为输入运算符本身的目的就是将数据读入到这个对象中。

Sales_data 的输入运算符

举个例子，我们将按照如下形式编写 Sales_data 的输入运算符：

```
istream &operator>>(istream &is, Sales_data &item)
{
    double price; // 不需要初始化，因为我们将先读入数据到 price，之后才使用它
    is >> item.bookNo >> item.units_sold >> price;
    if (is) // 检查输入是否成功
        item.revenue = item.units_sold * price;
    else
        item = Sales_data(); // 输入失败：对象被赋予默认的状态
    return is;
}
```

除了 if 语句之外，这个定义与之前的 read 函数（参见 7.1.3 节，第 234 页）完全一样。if 语句检查读取操作是否成功，如果发生了 IO 错误，则运算符将给定的对象重置为空 Sales_data，这样可以确保对象处于正确的状态。



输入运算符必须处理输入可能失败的情况，而输出运算符不需要。

输入时的错误

559

在执行输入运算符时可能发生下列错误：

- 当流含有错误类型的数据时读取操作可能失败。例如在读取完 bookNo 后，输入运算符假定接下来读入的是两个数字数据，一旦输入的不是数字数据，则读取操作及后续对流的其他使用都将失败。
- 当读取操作到达文件末尾或者遇到输入流的其他错误时也会失败。

在程序中我们没有逐个检查每个读取操作，而是等读取了所有数据后赶在使用这些数据前一次性检查：

```

if (is)                                // 检查输入是否成功
    item.revenue = item.units_sold * price;
else
    item = Sales_data();      // 输入失败：对象被赋予默认的状态

```

如果读取操作失败，则 `price` 的值将是未定义的。因此，在使用 `price` 前我们需要首先检查输入流的合法性，然后才能执行计算并将结果存入 `revenue`。如果发生了错误，我们无须在意到底是哪部分输入失败，只要将一个新的默认初始化的 `Sales_data` 对象赋予 `item` 从而将其重置为空 `Sales_data` 就可以了。执行这样的赋值后，`item` 的 `bookNo` 成员将是一个空 `string`，`revenue` 和 `units_sold` 成员将等于 0。

如果在发生错误前对象已经有一部分被改变，则适时地将对象置为合法状态显得异常重要。例如在这个输入运算符中，我们可能在成功读取新的 `bookNo` 后遇到错误，这意味着对象的 `units_sold` 和 `revenue` 成员并没有改变，因此有可能会将这两个数据与一条完全不匹配的 `bookNo` 组合在一起。

通过将对象置为合法的状态，我们能（略微）保护使用者免于受到输入错误的影响。此时的对象处于可用状态，即它的成员都是被正确定义的。而且该对象也不会产生误导性的结果，因为它的数据在本质上确实是一体的。



当读取操作发生错误时，输入运算符应该负责从错误中恢复。

标示错误

一些输入运算符需要做更多数据验证的工作。例如，我们的输入运算符可能需要检查 `bookNo` 是否符合规范的格式。在这样的例子中，即使从技术上来看 IO 是成功的，输入运算符也应该设置流的条件状态以标示出失败信息（参见 8.1.2 节，第 279 页）。通常情况下，输入运算符只设置 `failbit`。除此之外，设置 `eofbit` 表示文件耗尽，而设置 `badbit` 表示流被破坏。最好的方式是由 IO 标准库自己来标示这些错误。

560 >

14.2.2 节练习

练习 14.9: 为你的 `Sales_data` 类定义输入运算符。

练习 14.10: 对于 `Sales_data` 的输入运算符来说如果给定了下面的输入将发生什么情况？

- (a) 0-201-99999-9 10 24.95 (b) 10 24.95 0-210-99999-9

练习 14.11: 下面的 `Sales_data` 输入运算符存在错误吗？如果有，请指出来。对于这个输入运算符如果仍然给定上个练习的输入将发生什么情况？

```

istream& operator>>(istream& in, Sales_data& s)
{
    double price;
    in >> s.bookNo >> s.units_sold >> price;
    s.revenue = s.units_sold * price;
    return in;
}

```

练习 14.12: 你在 7.5.1 节的练习 7.40（第 261 页）中曾经选择并编写了一个类，为它定义一个输入运算符并确保该运算符可以处理输入错误。

14.3 算术和关系运算符

通常情况下，我们把算术和关系运算符定义成非成员函数以允许对左侧或右侧的运算对象进行转换（参见 14.1 节，第 492 页）。因为这些运算符一般不需要改变运算对象的状态，所以形参都是常量的引用。

算术运算符通常会计算它的两个运算对象并得到一个新值，这个值有别于任意一个运算对象，常常位于一个局部变量之内，操作完成后返回该局部变量的副本作为其结果。如果类定义了算术运算符，则它一般也会定义一个对应的复合赋值运算符。此时，最有效的方式是使用复合赋值来定义算术运算符：

```
// 假设两个对象指向同一本书
Sales_data
operator+(const Sales_data &lhs, const Sales_data &rhs)
{
    Sales_data sum = lhs;           // 把 lhs 的数据成员拷贝给 sum
    sum += rhs;                   // 将 rhs 加到 sum 中
    return sum;
}
```

这个定义与原来的 add 函数（参见 7.1.3 节，第 234 页）是完全等价的。我们把 lhs 拷贝给局部变量 sum，然后使用 Sales_data 的复合赋值运算符（将在第 500 页定义）将 rhs 的值加到 sum 中，最后函数返回 sum 的副本。



如果类同时定义了算术运算符和相关的复合赋值运算符，则通常情况下应该使用复合赋值来实现算术运算符。

561

14.3 节练习

练习 14.13：你认为 Sales_data 类还应该支持哪些其他算术运算符（参见表 4.1，第 124 页）？如果有的话，请给出它们的定义。

练习 14.14：你觉得为什么调用 operator+= 来定义 operator+ 比其他方法更有效？

练习 14.15：你在 7.5.1 节的练习 7.40（第 261 页）中曾经选择并编写了一个类，你认为它应该含有其他算术运算符吗？如果是，请实现它们；如果不是，解释原因。

14.3.1 相等运算符



通常情况下，C++ 中的类通过定义相等运算符来检验两个对象是否相等。也就是说，它们会比较对象的每一个数据成员，只有当所有对应的成员都相等时才认为两个对象相等。依据这一思想，我们的 Sales_data 类的相等运算符不但应该比较 bookNo，还应该比较具体的销售数据：

```
bool operator==(const Sales_data &lhs, const Sales_data &rhs)
{
    return lhs.isbn() == rhs.isbn() &&
           lhs.units_sold == rhs.units_sold &&
           lhs.revenue == rhs.revenue;
}
bool operator!=(const Sales_data &lhs, const Sales_data &rhs)
```

```

{
    return !(lhs == rhs);
}

```

就上面这些函数的定义本身而言，它们似乎比较简单，也没什么价值，对于我们来说重要的是从这些函数中体现出来的设计准则：

- 如果一个类含有判断两个对象是否相等的操作，则它显然应该把函数定义成 `operator==` 而非一个普通的命名函数：因为用户肯定希望能使用 `==` 比较对象，所以提供了 `==` 就意味着用户无须再费时费力地学习并记忆一个全新的函数名字。此外，类定义了 `==` 运算符之后也更容易使用标准库容器和算法。
- 如果类定义了 `operator==`，则该运算符应该能判断一组给定的对象中是否含有重复数据。
- 通常情况下，相等运算符应该具有传递性，换句话说，如果 `a==b` 和 `b==c` 都为真，则 `a==c` 也应该为真。
- 如果类定义了 `operator==`，则这个类也应该定义 `operator!=`。对于用户来说，当他们能使用 `==` 时肯定也希望使用 `!=`，反之亦然。
- 相等运算符和不相等运算符中的一个应该把工作委托给另外一个，这意味着其中一个运算符应该负责实际比较对象的工作，而另一个运算符则只是调用那个真正工作的运算符。



如果某个类在逻辑上有相等性的含义，则该类应该定义 `operator==`，这样做可以使得用户更容易使用标准库算法来处理这个类。

14.3.1 节练习

练习 14.16：为你的 `StrBlob` 类（参见 12.1.1 节，第 405 页）、`StrBlobPtr` 类（参见 12.1.6 节，第 421 页）、`StrVec` 类（参见 13.5 节，第 465 页）和 `String` 类（参见 13.5 节，第 470 页）分别定义相等运算符和不相等运算符。

练习 14.17：你在 7.5.1 节的练习 7.40（第 261 页）中曾经选择并编写了一个类，你认为它应该含有相等运算符吗？如果是，请实现它；如果不是，解释原因。



14.3.2 关系运算符

定义了相等运算符的类也常常（但不总是）包含关系运算符。特别是，因为关联容器和一些算法要用到小于运算符，所以定义 `operator<` 会比较有用。

通常情况下关系运算符应该

1. 定义顺序关系，令其与关联容器中对关键字的要求一致（参见 11.2.2 节，第 378 页）；并且
2. 如果类同时也含有 `==` 运算符的话，则定义一种关系令其与 `==` 保持一致。特别是，如果两个对象是 `!=` 的，那么一个对象应该 `<` 另外一个。



尽管我们可能会认为 `Sales_data` 类应该支持关系运算符，但事实证明并非如此，其中的缘由比较微妙，值得读者深思。

一开始我们可能会认为应该像 `compareIsbn`（参见 11.2.2 节，第 379 页）那样定义 `<`，该函数通过比较 `ISBN` 来实现对两个对象的比较。然而，尽管 `compareIsbn` 提供的

顺序关系符合要求 1，但是函数得到的结果显然与我们定义的`==`不一致，因此它不满足要求 2。

对于 `Sales_data` 的`==`运算符来说，如果两笔交易的 `revenue` 和 `units_sold` 成员不同，那么即使它们的 `ISBN` 相同也无济于事，它们仍然是不相等的。如果我们定义的`<`运算符仅仅比较 `ISBN` 成员，那么将发生这样的情况：两个 `ISBN` 相同但 `revenue` 和 `units_sold` 不同的对象经比较是不相等的，但是其中的任何一个都不比另一个小。然而实际情况是，如果我们有两个对象并且哪个都不比另一个小，则从道理上来讲这两个对象应该是相等的。563

基于上述分析我们也许会认为，只要让 `operator<` 依次比较每个数据元素就能解决问题了，比方说让 `operator<` 先比较 `isbn`，相等的话继续比较 `units_sold`，还相等再继续比较 `revenue`。

然而，这样的排序没有任何必要。根据将来使用 `Sales_data` 类的实际需要，我们可能会希望先比较 `units_sold`，也可能希望先比较 `revenue`。有的时候，我们希望 `units_sold` 少的对象“小于”`units_sold` 多的对象；另一些时候，则可能希望 `revenue` 少的对象“小于”`revenue` 多的对象。

因此对于 `Sales_data` 类来说，不存在一种逻辑可靠的`<` 定义，这个类不定义`<` 运算符也许更好。



如果存在唯一一种逻辑可靠的`<` 定义，则应该考虑为这个类定义`<` 运算符。如果类同时还包含`==`，则当且仅当`<` 的定义和`==` 产生的结果一致时才定义`<` 运算符。

14.3.2 节练习

练习 14.18：为你的 `StrBlob` 类、`StrBlobPtr` 类、`StrVec` 类和 `String` 类定义关系运算符。

练习 14.19：你在 7.5.1 节的练习 7.40（第 261 页）中曾经选择并编写了一个类，你认为它应该含有关系运算符吗？如果是，请实现它；如果不是，解释原因。

14.4 赋值运算符

之前已经介绍过拷贝赋值和移动赋值运算符（参见 13.1.2 节，第 443 页和 13.6.2 节，第 474 页），它们可以把类的一个对象赋值给该类的另一个对象。此外，类还可以定义其他赋值运算符以使用别的类型作为右侧运算对象。

举个例子，在拷贝赋值和移动赋值运算符之外，标准库 `vector` 类还定义了第三种赋值运算符，该运算符接受花括号内的元素列表作为参数（参见 9.2.5 节，第 302 页）。我们能以如下的形式使用该运算符：

```
vector<string> v;
v = {"a", "an", "the"};
```

同样，也可以把这个运算符添加到 `StrVec` 类中（参见 13.5 节，第 465 页）：

```
class StrVec {
public:
    StrVec &operator=(std::initializer_list<std::string>);
    // 其他成员与 13.5 节（第 465 页）一致
};
```

564> 为了与内置类型的赋值运算符保持一致（也与我们已经定义的拷贝赋值和移动赋值运算一致），这个新的赋值运算符将返回其左侧运算对象的引用：

```
StrVec &StrVec::operator=(initializer_list<string> il)
{
    // alloc_n_copy 分配内存空间并从给定范围内拷贝元素
    auto data = alloc_n_copy(il.begin(), il.end());
    free();           // 销毁对象中的元素并释放内存空间
    elements = data.first; // 更新数据成员使其指向新空间
    first_free = cap = data.second;
    return *this;
}
```

和拷贝赋值及移动赋值运算符一样，其他重载的赋值运算符也必须先释放当前内存空间，再创建一片新空间。不同之处是，这个运算符无须检查对象向自身的赋值，这是因为它的形参 `initializer_list<string>`（参见 6.2.6 节，第 198 页）确保 `il` 与 `this` 所指的不是同一个对象。



我们可以重载赋值运算符。不论形参的类型是什么，赋值运算符都必须定义为成员函数。

复合赋值运算符

复合赋值运算符非得是类的成员，不过我们还是倾向于把包括复合赋值在内的所有赋值运算都定义在类的内部。为了与内置类型的复合赋值保持一致，类中的复合赋值运算符也要返回其左侧运算对象的引用。例如，下面是 `Sales_data` 类中复合赋值运算符的定义：

```
// 作为成员的二元运算符：左侧运算对象绑定到隐式的 this 指针
// 假定两个对象表示的是同一本书
Sales_data& Sales_data::operator+=(const Sales_data &rhs)
{
    units_sold += rhs.units_sold;
    revenue += rhs.revenue;
    return *this;
}
```



赋值运算符必须定义成类的成员，复合赋值运算符通常情况下也应该这样做。这两类运算符都应该返回左侧运算对象的引用。

14.4 节练习

练习 14.20: 为你的 `Sales_data` 类定义加法和复合赋值运算符。

练习 14.21: 编写 `Sales_data` 类的`+和+=`运算符，使得`+`执行实际的加法操作而`+=`调用`+`。相比于 14.3 节（第 497 页）和 14.4 节（第 500 页）对这两个运算符的定义，本题的定义有何缺点？试讨论之。

练习 14.22: 定义赋值运算符的一个新版本，使得我们能把一个表示 ISBN 的 `string` 赋给一个 `Sales_data` 对象。

练习 14.23: 为你的 `StrVec` 类定义一个 `initializer_list` 赋值运算符。

练习 14.24: 你在 7.5.1 节的练习 7.40 (第 261 页) 中曾经选择并编写了一个类, 你认为它应该含有拷贝赋值和移动赋值运算符吗? 如果是, 请实现它们。

练习 14.25: 上题的这个类还需要定义其他赋值运算符吗? 如果是, 请实现它们; 同时说明运算对象应该是什么类型并解释原因。

14.5 下标运算符

表示容器的类通常可以通过元素在容器中的位置访问元素, 这些类一般会定义下标运算符 `operator[]`。



下标运算符必须是成员函数。

565

为了与下标的原始定义兼容, 下标运算符通常以所访问元素的引用作为返回值, 这样做的好处是下标可以出现在赋值运算符的任意一端。进一步, 我们最好同时定义下标运算符的常量版本和非常量版本, 当作用于一个常量对象时, 下标运算符返回常量引用以确保我们不会给返回的对象赋值。



如果一个类包含下标运算符, 则它通常会定义两个版本: 一个返回普通引用, 另一个是类的常量成员并且返回常量引用。

举个例子, 我们按照如下形式定义 `StrVec` (参见 13.5 节, 第 465 页) 的下标运算符:

```
class StrVec {
public:
    std::string& operator[](std::size_t n)
    { return elements[n]; }
    const std::string& operator[](std::size_t n) const
    { return elements[n]; }
    // 其他成员与 13.5 (第 465 页) 一致
private:
    std::string *elements;           // 指向数组首元素的指针
};
```

上面这两个下标运算符的用法类似于 `vector` 或者数组中的下标。因为下标运算符返回的是元素的引用, 所以当 `StrVec` 是非常量时, 我们可以给元素赋值; 而当我们对常量对象取下标时, 不能为其赋值:

```
// 假设 svec 是一个 StrVec 对象
const StrVec cvec = svec;           // 把 svec 的元素拷贝到 cvec 中
// 如果 svec 中含有元素, 对第一个元素运行 string 的 empty 函数
if (svec.size() && svec[0].empty()) {
    svec[0] = "zero";               // 正确: 下标运算符返回 string 的引用
    cvec[0] = "Zip";                // 错误: 对 cvec 取下标返回的是常量引用
}
```

566

14.5 节练习

练习 14.26: 为你的 StrBlob 类、StrBlobPtr 类、StrVec 类和 String 类定义下标运算符。

14.6 递增和递减运算符

在迭代器类中通常会实现递增运算符（`++`）和递减运算符（`--`），这两种运算符使得类可以在元素的序列中前后移动。C++语言并不要求递增和递减运算符必须是类的成员，但是因为它们改变的正好是所操作对象的状态，所以建议将其设定为成员函数。

对于内置类型来说，递增和递减运算符既有前置版本也有后置版本。同样，我们也应该为类定义两个版本的递增和递减运算符。接下来我们首先介绍前置版本，然后实现后置版本。



定义递增和递减运算符的类应该同时定义前置版本和后置版本。这些运算符通常应该被定义成类的成员。

定义前置递增/递减运算符

为了说明递增和递减运算符，我们不妨在 StrBlobPtr 类（参见 12.1.6 节，第 421 页）中定义它们：

```
class StrBlobPtr {
public:
    // 递增和递减运算符
    StrBlobPtr& operator++(); // 前置运算符
    StrBlobPtr& operator--();
    // 其他成员和之前的版本一致
};
```



为了与内置版本保持一致，前置运算符应该返回递增或递减后对象的引用。

567

递增和递减运算符的工作机理非常相似：它们首先调用 `check` 函数检验 `StrBlobPtr` 是否有效，如果是，接着检查给定的索引值是否有效。如果 `check` 函数没有抛出异常，则运算符返回对象的引用。

在递增运算符的例子中，我们把 `curr` 的当前值传递给 `check` 函数。如果这个值小于 `vector` 的大小，则 `check` 正常返回；否则，如果 `curr` 已经到达了 `vector` 的末尾，`check` 将抛出异常：

```
// 前置版本：返回递增/递减对象的引用
StrBlobPtr& StrBlobPtr::operator++()
{
    // 如果 curr 已经指向了容器的尾后位置，则无法递增它
    check(curr, "increment past end of StrBlobPtr");
    ++curr; // 将 curr 在当前状态下向前移动一个元素
    return *this;
}
```

```

StrBlobPtr& StrBlobPtr::operator--()
{
    // 如果 curr 是 0，则继续递减它将产生一个无效下标
    --curr;                                // 将 curr 在当前状态下向后移动一个元素
    check(curr, "decrement past begin of StrBlobPtr");
    return *this;
}

```

递减运算符先递减 curr，然后调用 check 函数。此时，如果 curr（一个无符号数）已经是 0 了，那么我们传递给 check 的值将是一个表示无效下标的非常大的正数值（参见 2.1.2 节，第 33 页）。

区分前置和后置运算符

要想同时定义前置和后置运算符，必须首先解决一个问题，即普通的重载形式无法区分这两种情况。前置和后置版本使用的是同一个符号，意味着其重载版本所用的名字将是相同的，并且运算对象的数量和类型也相同。

为了解决这个问题，后置版本接受一个额外的（不被使用）int 类型的形参。当我们使用后置运算符时，编译器为这个形参提供一个值为 0 的实参。尽管从语法上来说后置函数可以使用这个额外的形参，但是在实际过程中通常不会这么做。这个形参的唯一作用就是区分前置版本和后置版本的函数，而不是真的要在实现后置版本时参与运算。

接下来我们为 StrBlobPtr 添加后置运算符：

```

class StrBlobPtr {
public:
    // 递增和递减运算符
    StrBlobPtr operator++(int);           // 后置运算符
    StrBlobPtr operator--(int);
    // 其他成员和之前的版本一致
};

```



为了与内置版本保持一致，后置运算符应该返回对象的原值（递增或递减之前 的值），返回的形式是一个值而非引用。

568

对于后置版本来说，在递增对象之前需要首先记录对象的状态：

```

// 后置版本：递增/递减对象的值但是返回原值
StrBlobPtr StrBlobPtr::operator++(int)
{
    // 此处无须检查有效性，调用前置递增运算时才需要检查
    StrBlobPtr ret = *this; // 记录当前的值
    ++*this;              // 向前移动一个元素，前置++需要检查递增的有效性
    return ret;            // 返回之前记录的状态
}
StrBlobPtr StrBlobPtr::operator--(int)
{
    // 此处无须检查有效性，调用前置递减运算时才需要检查
    StrBlobPtr ret = *this; // 记录当前的值
    --*this;              // 向后移动一个元素，前置--需要检查递减的有效性
    return ret;            // 返回之前记录的状态
}

```

由上可知，我们的后置运算符调用各自的前置版本来完成实际的工作。例如后置递增运算符执行

```
++*this
```

该表达式调用前置递增运算符，前置递增运算符首先检查递增操作是否安全，根据检查的结果抛出一个异常或者执行递增 curr 的操作。假定通过了检查，则后置函数返回事先存好的 ret 的副本。因此最终的效果是，对象本身向前移动了一个元素，而返回的结果仍然反映对象在未递增之前原始的值。



因为我们不会用到 int 形参，所以无须为其命名。

显式地调用后置运算符

如在第 491 页介绍的，可以显式地调用一个重载的运算符，其效果与在表达式中以运算符号的形式使用它完全一样。如果我们想通过函数调用的方式调用后置版本，则必须为它的整型参数传递一个值：

```
StrBlobPtr p(a1);           // p 指向 a1 中的 vector
p.operator++(0);            // 调用后置版本的 operator++
p.operator++();             // 调用前置版本的 operator++
```

尽管传入的值通常会被运算符函数忽略，但却必不可少，因为编译器只有通过它才能知道应该使用后置版本。

569

14.6 节练习

练习 14.27：为你的 StrBlobPtr 类添加递增和递减运算符。

练习 14.28：为你的 StrBlobPtr 类添加加法和减法运算符，使其可以实现指针的算术运算（参见 3.5.3 节，第 106 页）。

练习 14.29：为什么不定义 const 版本的递增和递减运算符？

14.7 成员访问运算符

在迭代器类及智能指针类（参见 12.1 节，第 400 页）中常常用到解引用运算符 (*) 和箭头运算符 (->)。我们以如下形式向 StrBlobPtr 类添加这两种运算符：

```
class StrBlobPtr {
public:
    std::string& operator*() const
    { auto p = check(curr, "dereference past end");
      return (*p)[curr];           // (*p) 是对象所指的 vector
    }
    std::string* operator->() const
    { // 将实际工作委托给解引用运算符
      return & this->operator*();
    }
    // 其他成员与之前的版本一致
}
```

解引用运算符首先检查 curr 是否仍在作用范围内，如果是，则返回 curr 所指元素的一个引用。箭头运算符不执行任何自己的操作，而是调用解引用运算符并返回解引用结果元素的地址。



箭头运算符必须是类的成员。解引用运算符通常也是类的成员，尽管并非必须如此。

值得注意的是，我们将这两个运算符定义成了 const 成员，这是因为与递增和递减运算符不一样，获取一个元素并不会改变 StrBlobPtr 对象的状态。同时，它们的返回值分别是非常量 string 的引用或指针，因为一个 StrBlobPtr 只能绑定到非常量的 StrBlob 对象（参见 12.1.6 节，第 421 页）。

这两个运算符的用法与指针或者 vector 迭代器的对应操作完全一致：

```
StrBlob a1 = {"hi", "bye", "now"};
StrBlobPtr p(a1);                                // p 指向 a1 中的 vector
*p = "okay";                                     // 给 a1 的首元素赋值
cout << p->size() << endl;                      // 打印 4，这是 a1 首元素的大小
cout << (*p).size() << endl;                     // 等价于 p->size()
```

对箭头运算符返回值的限定

570

和大多数其他运算符一样（尽管这么做不太好），我们能令 operator* 完成任何我们指定的操作。换句话说，我们可以让 operator* 返回一个固定值 42，或者打印对象的内容，或者其他。箭头运算符则不是这样，它永远不能丢掉成员访问这个最基本的含义。当我们重载箭头时，可以改变的是箭头从哪个对象当中获取成员，而箭头获取成员这一事实则永远不变。

对于形如 point->mem 的表达式来说，point 必须是指向类对象的指针或者是一个重载了 operator-> 的类的对象。根据 point 类型的不同，point->mem 分别等价于

```
(*point).mem;                                // point 是一个内置的指针类型
point.operator()->mem;                        // point 是类的一个对象
```

除此之外，代码都将发生错误。point->mem 的执行过程如下所示：

- 如果 point 是指针，则我们应用内置的箭头运算符，表达式等价于 (*point).mem。首先解引用该指针，然后从所得的对象中获取指定的成员。如果 point 所指的类型没有名为 mem 的成员，程序会发生错误。
- 如果 point 是定义了 operator-> 的类的一个对象，则我们使用 point.operator->() 的结果来获取 mem。其中，如果该结果是一个指针，则执行第 1 步；如果该结果本身含有重载的 operator->()，则重复调用当前步骤。最终，当这一过程结束时程序或者返回了所需的内容，或者返回一些表示程序错误的信息。



重载的箭头运算符必须返回类的指针或者自定义了箭头运算符的某个类的对象。

14.7 节练习

练习 14.30: 为你的 StrBlobPtr 类和在 12.1.6 节练习 12.22（第 423 页）中定义的 ConstStrBlobPtr 类分别添加解引用运算符和箭头运算符。注意：因为 ConstStrBlobPtr 的数据成员指向 const vector，所以 ConstStrBlobPtr 中的运算符必须返回常量引用。

练习 14.31: 我们的 StrBlobPtr 类没有定义拷贝构造函数、赋值运算符及析构函数，为什么？

练习 14.32: 定义一个类令其含有指向 StrBlobPtr 对象的指针，为这个类定义重载的箭头运算符。



14.8 函数调用运算符

571

如果类重载了函数调用运算符，则我们可以像使用函数一样使用该类的对象。因为这样的类同时也能存储状态，所以与普通函数相比它们更加灵活。

举个简单的例子，下面这个名为 absInt 的 struct 含有一个调用运算符，该运算符负责返回其参数的绝对值：

```
struct absInt {
    int operator()(int val) const {
        return val < 0 ? -val : val;
    }
};
```

这个类只定义了一种操作：函数调用运算符，它负责接受一个 int 类型的实参，然后返回该实参的绝对值。

我们使用调用运算符的方式是令一个 absInt 对象作用于一个实参列表，这一过程看起来非常像调用函数的过程：

```
int i = -42;
absInt absObj;           // 含有函数调用运算符的对象
int ui = absObj(i);      // 将 i 传递给 absObj.operator()
```

即使 absObj 只是一个对象而非函数，我们也能“调用”该对象。调用对象实际上是在运行重载的调用运算符。在此例中，该运算符接受一个 int 值并返回其绝对值。



函数调用运算符必须是成员函数。一个类可以定义多个不同版本的调用运算符，相互之间应该在参数数量或类型上有所区别。

如果类定义了调用运算符，则该类的对象称作 **函数对象**（function object）。因为可以调用这种对象，所以我们说这些对象的“行为像函数一样”。

含有状态的函数对象类

和其他类一样，函数对象类除了 operator() 之外也可以包含其他成员。函数对象类通常含有一些数据成员，这些成员被用于定制调用运算符中的操作。

举个例子，我们将定义一个打印 string 实参内容的类。默认情况下，我们的类会将

内容写入到 cout 中，每个 string 之间以空格隔开。同时也允许类的用户提供其他可写入的流及其他分隔符。我们将该类定义如下：

```
class PrintString {
public:
    PrintString(ostream &o = cout, char c = ' '):
        os(o), sep(c) {}
    void operator()(const string &s) const { os << s << sep; }
private:
    ostream &os;           // 用于写入的目的流
    char sep;              // 用于将不同输出隔开的字符
};
```

我们的类有一个构造函数，它接受一个输出流的引用以及一个用于分隔的字符，这两个形参的默认实参（参见 6.5.1 节，第 211 页）分别是 cout 和空格。572之后的函数调用运算符使用这些成员协助其打印给定的 string。

当定义 PrintString 的对象时，对于分隔符及输出流既可以使用默认值也可以提供我们自己的值：

```
PrintString printer;          // 使用默认值，打印到 cout
printer(s);                  // 在 cout 中打印 s，后面跟一个空格
PrintString errors(cerr, '\n');
errors(s);                   // 在 cerr 中打印 s，后面跟一个换行符
```

函数对象常常作为泛型算法的实参。例如，可以使用标准库 for_each 算法（参见 10.3.2 节，第 348 页）和我们自己的 PrintString 类来打印容器的内容：

```
for_each(vs.begin(), vs.end(), PrintString(cerr, '\n'));
```

for_each 的第三个实参是类型 PrintString 的一个临时对象，其中我们用 cerr 和换行符初始化了该对象。当程序调用 for_each 时，将会把 vs 中的每个元素依次打印到 cerr 中，元素之间以换行符分隔。

14.8 节练习

练习 14.33: 一个重载的函数调用运算符应该接受几个运算对象？

练习 14.34: 定义一个函数对象类，令其执行 if-then-else 的操作：该类的调用运算符接受三个形参，它首先检查第一个形参，如果成功返回第二个形参的值；如果不成功返回第三个形参的值。

练习 14.35: 编写一个类似于 PrintString 的类，令其从 istream 中读取一行输入，然后返回一个表示我们所读内容的 string。如果读取失败，返回空 string。

练习 14.36: 使用前一个练习定义的类读取标准输入，将每一行保存为 vector 的一个元素。

练习 14.37: 编写一个类令其检查两个值是否相等。使用该对象及标准库算法编写程序，令其替换某个序列中具有给定值的所有实例。

14.8.1 lambda 是函数对象

在前一节中，我们使用一个 PrintString 对象作为调用 for_each 的实参，这一

用法类似于我们在 10.3.2 节（第 346 页）中编写的使用 lambda 表达式的程序。当我们编写了一个 lambda 后，编译器将该表达式翻译成一个未命名类的未命名对象（参见 10.3.3 节，第 349 页）。在 lambda 表达式产生的类中含有一个重载的函数调用运算符，例如，对于我们传递给 stable_sort 作为其最后一个实参的 lambda 表达式来说：

```
// 根据单词的长度对其进行排序，对于长度相同的单词按照字母表顺序排序
stable_sort(words.begin(), words.end(),
[](const string &a, const string &b)
{ return a.size() < b.size();});
```

其行为类似于下面这个类的一个未命名对象

```
class ShorterString {
public:
    bool operator()(const string &s1, const string &s2) const
    { return s1.size() < s2.size(); }
};
```

产生的类只有一个函数调用运算符成员，它负责接受两个 string 并比较它们的长度，它的形参列表和函数体与 lambda 表达式完全一样。如我们在 10.3.3 节（第 352 页）所见，默认情况下 lambda 不能改变它捕获的变量。因此在默认情况下，由 lambda 产生的类当中的函数调用运算符是一个 const 成员函数。如果 lambda 被声明为可变的，则调用运算符就不是 const 的了。

用这个类替代 lambda 表达式后，我们可以重写并重新调用 stable_sort：

```
stable_sort(words.begin(), words.end(), ShorterString());
```

第三个实参是新构建的 ShorterString 对象，当 stable_sort 内部的代码每次比较两个 string 时就会“调用”这一对象，此时该对象将调用运算符的函数体，判断第一个 string 的大小小于第二个时返回 true。

表示 lambda 及相应捕获行为的类

如我们所知，当一个 lambda 表达式通过引用捕获变量时，将由程序负责确保 lambda 执行时引用的对象确实存在（参见 10.3.3 节，第 350 页）。因此，编译器可以直接使用该引用而无须在 lambda 产生的类中将其存储为数据成员。

相反，通过值捕获的变量被拷贝到 lambda 中（参见 10.3.3 节，第 350 页）。因此，这种 lambda 产生的类必须为每个值捕获的变量建立对应的数据成员，同时创建构造函数，令其使用捕获的变量的值来初始化数据成员。举个例子，在 10.3.2 节（第 347 页）中有一个 lambda，它的作用是找到第一个长度不小于给定值的 string 对象：

```
// 获得第一个指向满足条件元素的迭代器，该元素满足 size() is >= sz
auto wc = find_if(words.begin(), words.end(),
[sz](const string &a)
{ return a.size() >= sz;});
```

该 lambda 表达式产生的类将形如：

```
574> class SizeComp {
    SizeComp(size_t n): sz(n) {} // 该形参对应捕获的变量
    // 该调用运算符的返回类型、形参和函数体都与 lambda 一致
    bool operator()(const string &s) const
    { return s.size() >= sz; }
```

```

private:
    size_t sz; // 该数据成员对应通过值捕获的变量
};

```

和我们的 `ShorterString` 类不同，上面这个类含有一个数据成员以及一个用于初始化该成员的构造函数。这个合成的类不含有默认构造函数，因此要想使用这个类必须提供一个实参：

```

// 获得第一个指向满足条件元素的迭代器，该元素满足 size() is >= sz
auto wc = find_if(words.begin(), words.end(), SizeComp(sz));

```

`lambda` 表达式产生的类不含默认构造函数、赋值运算符及默认析构函数；它是否含有默认的拷贝/移动构造函数则通常要视捕获的数据成员类型而定（参见 13.1.6 节，第 450 页和 13.6.2 节，第 475 页）。

14.8.1 节练习

练习 14.38：编写一个类令其检查某个给定的 `string` 对象的长度是否与一个阈值相等。使用该对象编写程序，统计并报告在输入的文件中长度为 1 的单词有多少个、长度为 2 的单词又有多少个、……、长度为 10 的单词又有多少个。

练习 14.39：修改上一题的程序令其报告长度在 1 至 9 之间的单词有多少个、长度在 10 以上的单词又有多少个。

练习 14.40：重新编写 10.3.2 节（第 349 页）的 `biggies` 函数，使用函数对象类替换其中的 `lambda` 表达式。

练习 14.41：你认为 C++11 新标准为什么要增加 `lambda`？对于你自己来说，什么情况下会使用 `lambda`，什么情况下会使用类？

14.8.2 标准库定义的函数对象

标准库定义了一组表示算术运算符、关系运算符和逻辑运算符的类，每个类分别定义了一个执行命名操作的调用运算符。例如，`plus` 类定义了一个函数调用运算符用于对一对运算对象执行 + 的操作；`modulus` 类定义了一个调用运算符执行二元的 % 操作；`equal_to` 类执行 ==，等等。

这些类都被定义成模板的形式，我们可以为其指定具体的应用类型，这里的类型即调用运算符的形参类型。例如，`plus<string>` 令 `string` 加法运算符作用于 `string` 对象；`plus<int>` 的运算对象是 `int`；`plus<Sales_data>` 对 `Sales_data` 对象执行加法运算，以此类推：

```

plus<int> intAdd; // 可执行 int 加法的函数对象
negate<int> intNegate; // 可对 int 值取反的函数对象
// 使用 intAdd::operator(int, int) 求 10 和 20 的和
int sum = intAdd(10, 20); // 等价于 sum = 30
sum = intNegate(intAdd(10, 20)); // 等价于 sum = 30
// 使用 intNegate::operator(int) 生成 -10
// 然后将 -10 作为 intAdd::operator(int, int) 的第二个参数
sum = intAdd(10, intNegate(10)); // sum = 0

```

< 575

表 14.2 所列的类型定义在 `functional` 头文件中。

表 14.2: 标准库函数对象

算术	关系	逻辑
<code>plus<Type></code>	<code>equal_to<Type></code>	<code>logical_and<Type></code>
<code>minus<Type></code>	<code>not_equal_to<Type></code>	<code>logical_or<Type></code>
<code>multiplies<Type></code>	<code>greater<Type></code>	<code>logical_not<Type></code>
<code>divides<Type></code>	<code>greater_equal<Type></code>	
<code>modulus<Type></code>	<code>less<Type></code>	
<code>negate<Type></code>	<code>less_equal<Type></code>	

在算法中使用标准库函数对象

表示运算符的函数对象类常用来替换算法中的默认运算符。如我们所知，在默认情况下排序算法使用 `operator<` 将序列按照升序排列。如果要执行降序排列的话，我们可以传入一个 `greater` 类型的对象。该类将产生一个调用运算符并负责执行待排序类型的大于运算。例如，如果 `svec` 是一个 `vector<string>`，

```
// 传入一个临时的函数对象用于执行两个 string 对象的>比较运算
sort(svec.begin(), svec.end(), greater<string>());
```

则上面的语句将按照降序对 `svec` 进行排序。第三个实参是 `greater<string>` 类型的一个未命名的对象，因此当 `sort` 比较元素时，不再是使用默认的`<`运算符，而是调用给定的 `greater` 函数对象。该对象负责在 `string` 元素之间执行`>`比较运算。

需要特别注意的是，标准库规定其函数对象对于指针同样适用。我们之前曾经介绍过比较两个无关指针将产生未定义的行为（参见 3.5.3 节，第 107 页），然而我们可能会希望通过比较指针的内存地址来 `sort` 指针的 `vector`。直接这么做将产生未定义的行为，因此我们可以使用一个标准库函数对象来实现该目的：

```
vector<string *> nameTable; // 指针的 vector
// 错误：nameTable 中的指针彼此之间没有关系，所以<将产生未定义的行为
sort(nameTable.begin(), nameTable.end(),
    [](string *a, string *b) { return a < b; });
// 正确：标准库规定指针的 less 是定义良好的
sort(nameTable.begin(), nameTable.end(), less<string*>());
```

576 关联容器使用 `less<key_type>` 对元素排序，因此我们可以定义一个指针的 `set` 或者在 `map` 中使用指针作为关键值而无须直接声明 `less`。

14.8.2 节练习

练习 14.42：使用标准库函数对象及适配器定义一条表达式，令其

- (a) 统计大于 1024 的值有多少个。
- (b) 找到第一个不等于 pooh 的字符串。
- (c) 将所有的值乘以 2。

练习 14.43：使用标准库函数对象判断一个给定的 `int` 值是否能被 `int` 容器中的所有元素整除。

14.8.3 可调用对象与 function

C++语言中有几种可调用的对象：函数、函数指针、lambda 表达式（参见 10.3.2 节，第 346 页）、bind 创建的对象（参见 10.3.4 节，第 354 页）以及重载了函数调用运算符的类。

和其他对象一样，可调用的对象也有类型。例如，每个 lambda 有它自己唯一的（未命名）类类型；函数及函数指针的类型则由其返回值类型和实参类型决定，等等。

然而，两个不同类型的可调用对象却可能共享同一种调用形式（call signature）。调用形式指明了调用返回的类型以及传递给调用的实参类型。一种调用形式对应一个函数类型，例如：

```
int(int, int)
```

是一个函数类型，它接受两个 int、返回一个 int。

不同类型可能具有相同的调用形式

对于几个可调用对象共享同一种调用形式的情况，有时我们会希望把它们看成具有相同的类型。例如，考虑下列不同类型的可调用对象：

```
// 普通函数
int add(int i, int j) { return i + j; }
// lambda，其产生一个未命名的函数对象类
auto mod = [] (int i, int j) { return i % j; };
// 函数对象类
struct divide {
    int operator()(int denominator, int divisor) {
        return denominator / divisor;
    }
};
```

上面这些可调用对象分别对其参数执行了不同的算术运算，尽管它们的类型各不相同，但 577 是共享同一种调用形式：

```
int(int, int)
```

我们可能希望使用这些可调用对象构建一个简单的桌面计算器。为了实现这一目的，需要定义一个函数表（function table）用于存储指向这些可调用对象的“指针”。当程序需要执行某个特定的操作时，从表中查找该调用的函数。

在 C++语言中，函数表很容易通过 map 来实现。对于此例来说，我们使用一个表示运算符符号的 string 对象作为关键字；使用实现运算符的函数作为值。当我们需要求给定运算符的值时，先通过运算符索引 map，然后调用找到的那个元素。

假定我们的所有函数都相互独立，并且只处理关于 int 的二元运算，则 map 可以定义成如下的形式：

```
// 构建从运算符到函数指针的映射关系，其中函数接受两个 int、返回一个 int
map<string, int(*)(int,int)> binops;
```

我们可以按照下面的形式将 add 的指针添加到 binops 中：

```
// 正确：add 是一个指向正确类型函数的指针
binops.insert({"+", add}); // {"+", add} 是一个 pair (参见 11.2.3 节，379 页)
```

但是我们不能将 mod 或者 divide 存入 binops：

```
binops.insert({"%", mod});           // 错误: mod 不是一个函数指针
```

问题在于 `mod` 是个 `lambda` 表达式，而每个 `lambda` 有它自己的类类型，该类型与存储在 `binops` 中的值的类型不匹配。

标准库 function 类型

C++ 11 我们可以使用一个名为 `function` 的新的标准库类型解决上述问题，`function` 定义在 `functional` 头文件中，表 14.3 列举出了 `function` 定义的操作。

表 14.3: `function` 的操作

<code>function<T> f;</code>	<code>f</code> 是一个用来存储可调用对象的空 <code>function</code> ，这些可调用对象的调用形式应该与函数类型 <code>T</code> 相同（即 <code>T</code> 是 <code>retType(args)</code> ）
<code>function<T> f(nullptr);</code>	显式地构造一个空 <code>function</code>
<code>function<T> f(obj);</code>	在 <code>f</code> 中存储可调用对象 <code>obj</code> 的副本
<code>f</code>	将 <code>f</code> 作为条件：当 <code>f</code> 含有一个可调用对象时为真；否则为假
<code>f(args)</code>	调用 <code>f</code> 中的对象，参数是 <code>args</code>
定义为 <code>function<T></code> 的成员的类型	
<code>result_type</code>	该 <code>function</code> 类型的可调用对象返回的类型
<code>argument_type</code>	当 <code>T</code> 有一个或两个实参时定义的类型。如果 <code>T</code> 只有一个实参，则 <code>argument_type</code> 是该类型的同义词；如果 <code>T</code> 有两个实参，则 <code>first_argument_type</code> 和 <code>second_argument_type</code> 分别代表两个实参的类型
<code>first_argument_type</code>	
<code>second_argument_type</code>	

`function` 是一个模板，和我们使用过的其他模板一样，当创建一个具体的 `function` 类型时我们必须提供额外的信息。在此例中，所谓额外的信息是指该 `function` 类型能够表示的对象的调用形式。参考其他模板，我们在一对尖括号内指定类型：

```
function<int(int, int)>
```

在这里我们声明了一个 `function` 类型，它可以表示接受两个 `int`、返回一个 `int` 的可调用对象。因此，我们可以用这个新声明的类型表示任意一种桌面计算器用到的类型；

```
function<int(int, int)> f1 = add;           // 函数指针
function<int(int, int)> f2 = divide();      // 函数对象类的对象
function<int(int, int)> f3 = [](int i, int j) // lambda
    { return i * j; };
cout << f1(4,2) << endl;                  // 打印 6
cout << f2(4,2) << endl;                  // 打印 2
cout << f3(4,2) << endl;                  // 打印 8
```

578 使用这个 `function` 类型我们可以重新定义 `map`：

```
// 列举了可调用对象与二元运算符对应关系的表格
// 所有可调用对象都必须接受两个 int、返回一个 int
// 其中的元素可以是函数指针、函数对象或者 lambda
map<string, function<int(int, int)>> binops;
```

我们能把所有可调用对象，包括函数指针、`lambda` 或者函数对象在内，都添加到这个 `map` 中：

```
map<string, function<int(int, int)>> binops = {
    {"+", add},                                // 函数指针
    {"-", std::minus<int>()},                  // 标准库函数对象
    {"/", divide()},                          // 用户定义的函数对象
    {"*", [](int i, int j) { return i * j; }}, // 未命名的 lambda
    {"%", mod} };                            // 命名了的 lambda 对象
```

我们的 map 中包含 5 个元素，尽管其中的可调用对象的类型各不相同，我们仍然能够把所有这些类型都存储在同一个 `function<int (int, int)>` 类型中。

一如往常，当我们索引 map 时将得到关联值的一个引用。如果我们索引 `binops`，将得到 `function` 对象的引用。`function` 类型重载了调用运算符，该运算符接受它自己的实参然后将其传递给存好的可调用对象：

```
binops["+"](10, 5); // 调用 add(10, 5)
binops["-"](10, 5); // 使用 minus<int>对象的调用运算符
binops["/"](10, 5); // 使用 divide 对象的调用运算符
binops["*"](10, 5); // 调用 lambda 函数对象
binops["%"](10, 5); // 调用 lambda 函数对象
```

我们依次调用了 `binops` 中存储的每个操作。在第一个调用中，我们获得的元素存放着一个指向 `add` 函数的指针，因此调用 `binops["+"] (10, 5)` 实际上是使用该指针调用 `add`，并传入 10 和 5。在接下来的调用中，`binops["-"]` 返回一个存放着 `std::minus<int>` 类型对象的 `function`，我们将执行该对象的调用运算符。

重载的函数与 `function`

我们不能（直接）将重载函数的名字存入 `function` 类型的对象中：

```
int add(int i, int j) { return i + j; }
Sales_data add(const Sales_data&, const Sales_data&);
map<string, function<int(int, int)>> binops;
binops.insert( {"+", add}); // 错误：哪个 add?
```

解决上述二义性问题的一条途径是存储函数指针（参见 6.7 节，第 221 页）而非函数的名字：

```
int (*fp)(int, int) = add; // 指针所指的 add 是接受两个 int 的版本
binops.insert( {"+", fp}); // 正确：fp 指向一个正确的 add 版本
```

同样，我们也能使用 `lambda` 来消除二义性：

```
// 正确：使用 lambda 来指定我们希望使用的 add 版本
binops.insert( {"+", [](int a, int b) {return add(a, b);}} );
```

`lambda` 内部的函数调用传入了两个 `int`，因此该调用只能匹配接受两个 `int` 的 `add` 版本，而这也正是执行 `lambda` 时真正调用的函数。



新版本标准库中的 `function` 类与旧版本中的 `unary_function` 和 `binary_function` 没有关系，后两个类已经被更通用的 `bind` 函数替代了（参见 10.3.4 节，第 357 页）。

14.8.3 节练习

练习 14.44：编写一个简单的桌面计算器使其能处理二元运算。

14.9 重载、类型转换与运算符

在 7.5.4 节（第 263 页）中我们看到由一个实参调用的非显式构造函数定义了一种隐式的类型转换，这种构造函数将实参类型的对象转换成类类型。我们同样能定义对于类类型的类型转换，通过定义类型转换运算符可以做到这一点。转换构造函数和类型转换运算符共同定义了类类型转换（class-type conversions），这样的转换有时也被称作用户定义的类型转换（user-defined conversions）。

14.9.1 类型转换运算符

类型转换运算符（conversion operator）是类的一种特殊成员函数，它负责将一个类类型的值转换成其他类型。类型转换函数的一般形式如下所示：

```
operator type() const;
```

其中 *type* 表示某种类型。类型转换运算符可以面向任意类型（除了 `void` 之外）进行定义，只要该类型能作为函数的返回类型（参见 6.1 节，第 184 页）。因此，我们不允许转换成数组或者函数类型，但允许转换成指针（包括数组指针及函数指针）或者引用类型。

类型转换运算符既没有显式的返回类型，也没有形参，而且必须定义成类的成员函数。类型转换运算符通常不应该改变待转换对象的内容，因此，类型转换运算符一般被定义成 `const` 成员。



一个类型转换函数必须是类的成员函数；它不能声明返回类型，形参列表也必须为空。类型转换函数通常应该是 `const`。

定义含有类型转换运算符的类

举个例子，我们定义一个比较简单的类，令其表示 0 到 255 之间的一个整数：

```
class SmallInt {
public:
    SmallInt(int i = 0) : val(i)
    {
        if (i < 0 || i > 255)
            throw std::out_of_range("Bad SmallInt value");
    }
    operator int() const { return val; }
private:
    std::size_t val;
};
```

我们的 `SmallInt` 类既定义了向类类型的转换，也定义了从类类型向其他类型的转换。其中，构造函数将算术类型的值转换成 `SmallInt` 对象，而类型转换运算符将 `SmallInt` 对象转换成 `int`：

```
SmallInt si;
```

```
si = 4;           // 首先将 4 隐式地转换成 SmallInt，然后调用 SmallInt::operator=
si + 3;          // 首先将 si 隐式地转换成 int，然后执行整数的加法
```

尽管编译器一次只能执行一个用户定义的类型转换（参见 4.11.2 节，第 144 页），但是隐式的用户定义类型转换可以置于一个标准（内置）类型转换之前或之后（参见 4.11.1 节，第 141 页），并与其一起使用。因此，我们可以将任何算术类型传递给 SmallInt 的构造函数。类似的，我们也能使用类型转换运算符将一个 SmallInt 对象转换成 int，然后再将所得的 int 转换成任何其他算术类型：

```
// 内置类型转换将 double 实参转换成 int
SmallInt si = 3.14;           // 调用 SmallInt(int) 构造函数
// SmallInt 的类型转换运算符将 si 转换成 int
si + 3.14;                   // 内置类型转换将所得的 int 继续转换成 double
```

因为类型转换运算符是隐式执行的，所以无法给这些函数传递实参，当然也就不能在类型转换运算符的定义中使用任何形参。同时，尽管类型转换函数不负责指定返回类型，但实际上每个类型转换函数都会返回一个对应类型的值：

```
class SmallInt;
operator int(SmallInt&);                                // 错误：不是成员函数
class SmallInt {
public:
    int operator int() const;                            // 错误：指定了返回类型
    operator int(int = 0) const;                          // 错误：参数列表不为空
    operator int*() const { return 42; } // 错误：42 不是一个指针
};
```

提示：避免过度使用类型转换函数

和使用重载运算符的经验一样，明智地使用类型转换运算符也能极大地简化类设计者的工作，同时使得使用类更加容易。然而，如果在类类型和转换类型之间不存在明显的映射关系，则这样的类型转换可能具有误导性。

例如，假设某个类表示 Date，我们也许会为它添加一个从 Date 到 int 的转换。然而，类型转换函数的返回值应该是什么？一种可能的解释是，函数返回一个十进制数，依次表示年、月、日，例如，July 30, 1989 可能转换为 int 值 19890730。同时还存在另外一种合理的解释，即类型转换运算符返回的 int 表示的是从某个时间节点（比如 January 1, 1970）开始经过的天数。显然这两种理解都合情合理，毕竟从形式上看它们产生的效果都是越靠后的日期对应的整数值越大，而且两种转换都有实际的用处。

问题在于 Date 类型的对象和 int 类型的值之间不存在明确的一对一映射关系。因此在此例中，不定义该类型转换运算符也许会更好。作为替代的手段，类可以定义一个或多个普通的成员函数以从各种不同形式中提取所需的信息。

类型转换运算符可能产生意外结果

在实践中，类很少提供类型转换运算符。在大多数情况下，如果类型转换自动发生，用户可能会感觉比较意外，而不是感觉受到了帮助。然而这条经验法则存在一种例外情况：对于类来说，定义向 bool 的类型转换还是比较普遍的现象。

在 C++ 标准的早期版本中，如果类想定义一个向 bool 的类型转换，则它常常遇到一个问题：因为 bool 是一种算术类型，所以类类型的对象转换成 bool 后就能被用在任何

需要算术类型的上下文中。这样的类型转换可能引发意想不到的结果，特别是当 `istream` 含有向 `bool` 的类型转换时，下面的代码仍将编译通过：

```
int i = 42;
cin << i; // 如果向 bool 的类型转换不是显式的，则该代码在编译器看来将是合法的！
```

这段程序试图将输出运算符作用于输入流。因为 `istream` 本身并没有定义 `<<`，所以本来代码应该产生错误。然而，该代码能使用 `istream` 的 `bool` 类型转换运算符将 `cin` 转换成 `bool`，而这个 `bool` 值接着会被提升成 `int` 并用作内置的左移运算符的左侧运算对象。这样一来，提升后的 `bool` 值（1 或 0）最终会被左移 42 个位置。这一结果显然与我们的预期大相径庭。

显式的类型转换运算符

C++ 11 为了防止这样的异常情况发生，C++11 新标准引入了显式的类型转换运算符（`explicit conversion operator`）：

```
class SmallInt {
public:
    // 编译器不会自动执行这一类型转换
    explicit operator int() const { return val; }
    // 其他成员与之前的版本一致
};
```

和显式的构造函数（参见 7.5.4 节，第 265 页）一样，编译器（通常）也不会将一个显式的类型转换运算符用于隐式类型转换：

```
SmallInt si = 3;      // 正确：SmallInt 的构造函数不是显式的
si + 3;              // 错误：此处需要隐式的类型转换，但类的运算符是显式的
static_cast<int>(si) + 3; // 正确：显式地请求类型转换
```

当类型转换运算符是显式的时，我们也能执行类型转换，不过必须通过显式的强制类型转换才可以。

该规定存在一个例外，即如果表达式被用作条件，则编译器会将显式的类型转换自动应用于它。换句话说，当表达式出现在下列位置时，显式的类型转换将被隐式地执行：

- `if`、`while` 及 `do` 语句的条件部分
- `for` 语句头的条件表达式
- 逻辑非运算符 `(!)`、逻辑或运算符 `(||)`、逻辑与运算符 `(&&)` 的运算对象
- 条件运算符 `(?:)` 的条件表达式。

583 转换为 `bool`

在标准库的早期版本中，IO 类型定义了向 `void*` 的转换规则，以求避免上面提到的问题。在 C++11 新标准下，IO 标准库通过定义一个向 `bool` 的显式类型转换实现同样的目的。

无论我们什么时候在条件中使用流对象，都会使用为 IO 类型定义的 `operator bool`。例如：

```
while (std::cin >> value)
```

`while` 语句的条件执行输入运算符，它负责将数据读入到 `value` 并返回 `cin`。为了对条件求值，`cin` 被 `istream` `operator bool` 类型转换函数隐式地执行了转换。如果 `cin` 的条件状态是 `good`（参见 8.1.2 节，第 280 页），则该函数返回为真；否则该函数返回为假。



向 `bool` 的类型转换通常用在条件部分，因此 `operator bool` 一般定义成 `explicit` 的。

14.9.1 节练习

练习 14.45: 编写类型转换运算符将一个 `Sales_data` 对象分别转换成 `string` 和 `double`，你认为这些运算符的返回值应该是什么？

练习 14.46: 你认为应该为 `Sales_data` 类定义上面两种类型转换运算符吗？应该把它们声明成 `explicit` 的吗？为什么？

练习 14.47: 说明下面这两个类型转换运算符的区别。

```
struct Integral {
    operator const int();
    operator int() const;
};
```

练习 14.48: 你在 7.5.1 节的练习 7.40（第 261 页）中曾经选择并编写了一个类，你认为它应该含有向 `bool` 的类型转换运算符吗？如果是，解释原因并说明该运算符是否应该是 `explicit` 的；如果不是，也请解释原因。

练习 14.49: 为上一题提到的类定义一个转换目标是 `bool` 的类型转换运算符，先不用在意这么做是否应该。

14.9.2 避免有二义性的类型转换



如果类中包含一个或多个类型转换，则必须确保在类类型和目标类型之间只存在唯一一种转换方式。否则的话，我们编写的代码将很可能会具有二义性。

在两种情况下可能产生多重转换路径。第一种情况是两个类提供相同的类型转换：例如，当 A 类定义了一个接受 B 类对象的转换构造函数，同时 B 类定义了一个转换目标是 A 类的类型转换运算符时，我们就说它们提供了相同的类型转换。

第二种情况是类定义了多个转换规则，而这些转换涉及的类型本身可以通过其他类型转换联系在一起。最典型的例子是算术运算符，对某个给定的类来说，最好只定义最多一个与算术类型有关的转换规则。



通常情况下，不要为类定义相同的类型转换，也不要在类中定义两个及以上以
上转换源或转换目标是算术类型的转换。

584

实参匹配和相同的类型转换

在下面的例子中，我们定义了两种将 B 转换成 A 的方法：一种使用 B 的类型转换运
算符、另一种使用 A 的以 B 为参数的构造函数：

```
// 最好不要在两个类之间构建相同的类型转换
struct B;
struct A {
    A() = default;
    A(const B&);           // 把一个 B 转换成 A
    // 其他数据成员
```

```

};

struct B {
    operator A() const; // 也是把一个 B 转换成 A
    // 其他数据成员
};
A f(const A&);

B b;
A a = f(b); // 二义性错误：含义是 f(B::operator A())
              // 还是 f(A::A(const B&))？

```

因为同时存在两种由 B 获得 A 的方法，所以造成编译器无法判断应该运行哪个类型转换，也就是说，对 f 的调用存在二义性。该调用可以使用以 B 为参数的 A 的构造函数，也可以使用 B 当中把 B 转换成 A 的类型转换运算符。因为这两个函数效果相当、难分伯仲，所以该调用将产生错误。

如果我们确实想执行上述的调用，就不得不显式地调用类型转换运算符或者转换构造函数：

```

A a1 = f(b.operator A()); // 正确：使用 B 的类型转换运算符
A a2 = f(A(b));          // 正确：使用 A 的构造函数

```

值得注意的是，我们无法使用强制类型转换来解决二义性问题，因为强制类型转换本身也面临二义性。

二义性与转换目标为内置类型的多重类型转换

另外如果类定义了一组类型转换，它们的转换源（或者转换目标）类型本身可以通过其他类型转换联系在一起，则同样会产生二义性的问题。最简单也是最困扰我们的例子就是类当中定义了多个参数都是算术类型的构造函数，或者转换目标都是算术类型的类型转换运算符。

例如，在下面的类中包含两个转换构造函数，它们的参数是两种不同的算术类型；同时还包含两个类型转换运算符，它们的转换目标也恰好是两种不同的算术类型：

```

585> struct A {
    A(int = 0);           // 最好不要创建两个转换源都是算术类型的类型转换
    A(double);
    operator int() const; // 最好不要创建两个转换对象都是算术类型的类型转换
    operator double() const;
    // 其他成员
};

void f2(long double);
A a;
f2(a); // 二义性错误：含义是 f(A::operator int())
        // 还是 f(A::operator double())？

long lg;
A a2(lg); // 二义性错误：含义是 A::A(int) 还是 A::A(double)?

```

在对 f2 的调用中，哪个类型转换都无法精确匹配 long double。然而这两个类型转换都可以使用，只要后面再执行一次生成 long double 的标准类型转换即可。因此，在上面的两个类型转换中哪个都不比另一个更好，调用将产生二义性。

当我们试图用 long 初始化 a2 时也遇到了同样问题，哪个构造函数都无法精确匹配 long 类型。它们在使用构造函数前都要求先将实参进行类型转换：

- 先执行 long 到 double 的标准类型转换，再执行 A(double)
- 先执行 long 到 int 的标准类型转换，再执行 A(int)

编译器没办法区分这两种转换序列的好坏，因此该调用将产生二义性。

调用 f2 及初始化 a2 的过程之所以会产生二义性，根本原因是它们所需的标准类型转换级别一致（参见 6.6.1 节，第 219 页）。当我们使用用户定义的类型转换时，如果转换过程包含标准类型转换，则标准类型转换的级别将决定编译器选择最佳匹配的过程：

```
short s = 42;
// 把 short 提升成 int 优于把 short 转换成 double
A a3(s);           // 使用 A::A(int)
```

在此例中，把 short 提升成 int 的操作要优于把 short 转换成 double 的操作，因此编译器将使用 A::A(int) 构造函数构造 a3，其中实参是 s（提升后）的值。



当我们使用两个用户定义的类型转换时，如果转换函数之前或之后存在标准类型转换，则标准类型转换将决定最佳匹配到底是哪个。

提示：类型转换与运算符

< 586

要想正确地设计类的重载运算符、转换构造函数及类型转换函数，必须加倍小心。尤其是当类同时定义了类型转换运算符及重载运算符时特别容易产生二义性。以下的经验规则可能对你有所帮助：

- 不要令两个类执行相同的类型转换：如果 Foo 类有一个接受 Bar 类对象的构造函数，则不要在 Bar 类中再定义转换目标是 Foo 类的类型转换运算符。
- 避免转换目标是内置算术类型的类型转换。特别是当你已经定义了一个转换成算术类型的类型转换时，接下来
 - 不要再定义接受算术类型的重载运算符。如果用户需要使用这样的运算符，则类型转换操作将转换你的类型的对象，然后使用内置的运算符。
 - 不要定义转换到多种算术类型的类型转换。让标准类型转换完成向其他算术类型转换的工作。

一言以蔽之：除了显式地向 bool 类型的转换之外，我们应该尽量避免定义类型转换函数并尽可能地限制那些“显然正确”的非显式构造函数。

重载函数与转换构造函数

当我们调用重载的函数时，从多个类型转换中进行选择将变得更加复杂。如果两个或多个类型转换都提供了同一种可行匹配，则这些类型转换一样好。

举个例子，当几个重载函数的参数分属不同的类类型时，如果这些类恰好定义了同样的转换构造函数，则二义性问题将进一步提升：

```
struct C {
    C(int);
    // 其他成员
```

```

};

struct D {
    D(int);
    // 其他成员
};

void manip(const C&);

void manip(const D&);

manip(10);           // 二义性错误：含义是 manip(C(10)) 还是 manip(D(10))

```

其中 C 和 D 都包含接受 int 的构造函数，两个构造函数各自匹配 manip 的一个版本。因此调用将具有二义性：它的含义可能是把 int 转换成 C，然后调用 manip 的第一个版本；也可能是把 int 转换成 D，然后调用 manip 的第二个版本。

调用者可以显式地构造正确的类型从而消除二义性：

```
manip(C(10));      // 正确：调用 manip(const C&)
```



如果在调用重载函数时我们需要使用构造函数或者强制类型转换来改变实参的类型，则这通常意味着程序的设计存在不足。

重载函数与用户定义的类型转换

当调用重载函数时，如果两个（或多个）用户定义的类型转换都提供了可行匹配，则我们认为这些类型转换一样好。在这个过程中，我们不会考虑任何可能出现的标准类型转换的级别。只有当重载函数能通过同一个类型转换函数得到匹配时，我们才会考虑其中出现的标准类型转换。

例如当我们调用 manip 时，即使其中一个类定义了需要对实参进行标准类型转换的构造函数，这次调用仍然会具有二义性：

```

struct E {
    E(double);
    // 其他成员
};

void manip2(const C&);

void manip2(const E&);

// 二义性错误：两个不同的用户定义的类型转换都能用在此处
manip2(10);      // 含义是 manip2(C(10)) 还是 manip2(E(double(10)))

```

在此例中，C 有一个转换源为 int 的类型转换，E 有一个转换源为 double 的类型转换。对于 manip2(10) 来说，两个 manip2 函数都是可行的：

- manip2(const C&) 是可行的，因为 C 有一个接受 int 的转换构造函数，该构造函数与实参精确匹配。
- manip2(const E&) 是可行的，因为 E 有一个接受 double 的转换构造函数，而且为了使用该函数我们可以利用标准类型转换把 int 转换成所需的类型。

因为调用重载函数所请求的用户定义的类型转换不止一个且彼此不同，所以该调用具有二义性。即使其中一个调用需要额外的标准类型转换而另一个调用能精确匹配，编译器也会将该调用标示为错误。



在调用重载函数时，如果需要额外的标准类型转换，则该转换的级别只有当所有可行函数都请求同一个用户定义的类型转换时才有用。如果所需的用户定义的类型转换不止一个，则该调用具有二义性。

14.9.2 节练习

练习 14.50：在初始化 ex1 和 ex2 的过程中，可能用到哪些类类型的转换序列呢？说明初始化是否正确并解释原因。

```
struct LongDouble {
    LongDouble(double = 0.0);
    operator double();
    operator float();
};

LongDouble ldObj;
int ex1 = ldObj;
float ex2 = ldObj;
```

练习 14.51：在调用 calc 的过程中，可能用到哪些类型转换序列呢？说明最佳可行函数是如何被选出来的。

```
void calc(int);
void calc(LongDouble);
double dval;
calc(dval); // 哪个 calc?
```

14.9.3 函数匹配与重载运算符



重载的运算符也是重载的函数。因此，通用的函数匹配规则（参见 6.4 节，第 208 页）同样适用于判断在给定的表达式中到底应该使用内置运算符还是重载的运算符。不过当运算符函数出现在表达式中时，候选函数集的规模要比我们使用调用运算符调用函数时更大。如果 a 是一种类类型，则表达式 a sym b 可能是

```
a.operatorsym(b); // a 有一个 operatorsym 成员函数
operatorsym(a, b); // operatorsym 是一个普通函数
```

和普通函数调用不同，我们不能通过调用的形式来区分当前调用的是成员函数还是非成员函数。

当我们使用重载运算符作用于类类型的运算对象时，候选函数中包含该运算符的普通非成员版本和内置版本。除此之外，如果左侧运算对象是类类型，则定义在该类中的运算符的重载版本也包含在候选函数内。

< 588

当我们调用一个命名的函数时，具有该名字的成员函数和非成员函数不会彼此重载，这是因为我们用来调用命名函数的语法形式对于成员函数和非成员函数来说是不相同的。当我们通过类类型的对象（或者该对象的指针及引用）进行函数调用时，只考虑该类的成员函数。而当我们在表达式中使用重载的运算符时，无法判断正在使用的是成员函数还是非成员函数，因此二者都应该在考虑的范围内。



表达式中运算符的候选函数集既应该包括成员函数，也应该包括非成员函数。

举个例子，我们为 SmallInt 类定义一个加法运算符：

```
class SmallInt {
    friend
    SmallInt operator+(const SmallInt&, const SmallInt&);

public:
    SmallInt(int = 0); // 转换源为 int 的类型转换
    operator int() const { return val; } // 转换目标为 int 的类型转换

private:
    std::size_t val;
};
```

589 可以使用这个类将两个 SmallInt 对象相加，但如果我们试图执行混合模式的算术运算，就将遇到二义性的问题：

```
SmallInt s1, s2;
SmallInt s3 = s1 + s2; // 使用重载的 operator+
int i = s3 + 0; // 二义性错误
```

第一条加法语句接受两个 SmallInt 值并执行+运算符的重载版本。第二条加法语句具有二义性：因为我们可以把 0 转换成 SmallInt，然后使用 SmallInt 的+；或者把 s3 转换成 int，然后对于两个 int 执行内置的加法运算。



如果我们对同一个类既提供了转换目标是算术类型的类型转换，也提供了重载的运算符，则将会遇到重载运算符与内置运算符的二义性问题。

14.9.3 节练习

练习 14.52：在下面的加法表达式中分别选用了哪个 operator+？列出候选函数、可行函数及为每个可行函数的实参执行的类型转换：

```
struct LongDouble {
    // 用于演示的成员 operator+；在通常情况下+是个非成员
    LongDouble operator+(const SmallInt&);
    // 其他成员与 14.9.2 节（第 521 页）一致
};

LongDouble operator+(LongDouble&, double);
SmallInt si;
LongDouble ld;
ld = si + ld;
ld = ld + si;
```

练习 14.53：假设我们已经定义了如第 522 页所示的 SmallInt，判断下面的加法表达式是否合法。如果合法，使用了哪个加法运算符？如果不合法，应该怎样修改代码才能使其合法？

```
SmallInt s1;
double d = s1 + 3.14;
```

小结

590

一个重载的运算符必须是某个类的成员或者至少拥有一个类类型的运算对象。重载运算符的运算对象数量、结合律、优先级与对应的用于内置类型的运算符完全一致。当运算符被定义为类的成员时，类对象的隐式 `this` 指针绑定到第一个运算对象。赋值、下标、函数调用和箭头运算符必须作为类的成员。

如果类重载了函数调用运算符 `operator()`，则该类的对象被称作“函数对象”。这样的对象常用在标准函数中。`lambda` 表达式是一种简便的定义函数对象类的方式。

在类中可以定义转换源或转换目的是该类型本身的类型转换，这样的类型转换将自动执行。只接受单独一个实参的非显式构造函数定义了从实参类型到类类型的类型转换；而非显式的类型转换运算符则定义了从类类型到其他类型的转换。

术语表

调用形式 (call signature) 表示一个可调用对象的接口。在调用形式中包括返回类型以及一个实参类型列表，该列表在一对圆括号内，实参类型之间以逗号分隔。

类类型转换 (class-type conversion) 包括由构造函数定义的从其他类型到类类型的转换以及由类型转换运算符定义的从类类型到其他类型的转换。只接受单独一个实参的非显式构造函数定义了从实参类型到类类型的转换；而类型转换运算符则定义了从类类型到某个指定类型的转换。

类型转换运算符 (conversion operator) 是类的成员函数，定义了从类类型到其他类型的转换。类型转换运算符必须是它要转换的类的成员，并且通常被定义为常量成员。这类运算符既没有返回类型，也不接受参数。它们返回一个可变为转换运算符类型的值，也就是说，`operator int` 返回一个 `int`，`operator string` 返回一个 `string`，依此类推。

显式的类型转换运算符 (explicit conversion operator) 由关键字 `explicit` 限定的类

型转换运算符。这样的运算符用于条件中的隐式类型转换。

函数对象 (function object) 定义了重载调用运算符的对象。在需要使用函数的地方都能使用函数对象。

函数表 (function table) 形如 `map` 或 `vector` 的容器，容器中所存的值可以被调用。

函数模板 (function template) 能够表示任意可调用类型的标准库模板。

重载的运算符 (overloaded operator) 重定义了某种内置运算符的含义的函数。重载的运算符函数含有关键字 `operator`，之后是要定义的符号。重载的运算符必须含有至少一个类类型的运算对象。重载运算符的优先级、结合律、运算对象数量都与其内置版本一致。

用户定义的类型转换 (user-defined conversion) 类类型转换的同义词。

