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
587 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;
```

done!

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。

done!

done!
done!
done!
done!

第 15 章
面向对象程序设计

内容

面向对象程序设计基于三个基本概念：数据抽象、继承和动态绑定。第 7 章已经介绍了数据抽象的知识，本章将介绍继承和动态绑定。

继承和动态绑定对程序的编写有两方面的影响：一是我们可以更容易地定义与其他类相似但不完全相同的新类；二是在使用这些彼此相似的类编写程序时，我们可以在一定程度上忽略掉它们的区别。

592 在很多程序中都存在着一些相互关联但是有细微差别的概念。例如，书店中不同书籍的定价策略可能不同：有的书籍按原价销售，有的则打折销售。有时，我们给那些购买书籍超过一定数量的顾客打折；另一些时候，则只对前多少本销售的书籍打折，之后就调回原价，等等。面向对象的程序设计（OOP）适用于这类应用。

15.1 OOP：概述

面向对象程序设计（object-oriented programming）的核心思想是数据抽象、继承和动态绑定。通过使用数据抽象，我们可以将类的接口与实现分离（见第 7 章）；使用继承，可以定义相似的类型并对其相似关系建模；使用动态绑定，可以在一定程度上忽略相似类型的区别，而以统一的方式使用它们的对象。

继承

通过**继承**（inheritance）联系在一起的类构成一种层次关系。通常在层次关系的根部有一个**基类**（base class），其他类则直接或间接地从基类继承而来，这些继承得到的类称为**派生类**（derived class）。基类负责定义在层次关系中所有类共同拥有的成员，而每个派生类定义各自特有的成员。

为了对之前提到的不同定价策略建模，我们首先定义一个名为 `Quote` 的类，并将它作为层次关系中的基类。`Quote` 的对象表示按原价销售的书籍。`Quote` 派生出另一个名为 `Bulk_quote` 的类，它表示可以打折销售的书籍。

这些类将包含下面的两个成员函数：

- `isbn()`，返回书籍的 `ISBN` 编号。该操作不涉及派生类的特殊性，因此只定义在 `Quote` 类中。
- `net_price(size_t)`，返回书籍的实际销售价格，前提是用户购买该书的数量达到一定标准。这个操作显然是类型相关的，`Quote` 和 `Bulk_quote` 都应该包含该函数。

在 C++语言中，基类将类型相关的函数与派生类不做改变直接继承的函数区分对待。对于某些函数，基类希望它的派生类各自定义适合自身的版本，此时基类就将这些函数声明成**虚函数**（virtual function）。因此，我们可以将 `Quote` 类编写成：

```
class Quote {
public:
    std::string isbn() const;
    virtual double net_price(std::size_t n) const;
};
```

593 派生类必须通过使用**类派生列表**（class derivation list）明确指出它是从哪个（哪些）基类继承而来的。类派生列表的形式是：首先是一个冒号，后面紧跟以逗号分隔的基类列表，其中每个基类前面可以有访问说明符：

```
class Bulk_quote : public Quote {          // Bulk_quote 继承了 Quote
public:
    double net_price(std::size_t) const override;
};
```

因为 `Bulk_quote` 在它的派生列表中使用了 `public` 关键字，因此我们完全可以把

Bulk_quote 的对象当成 Quote 的对象来使用。

派生类必须在其内部对所有重新定义的虚函数进行声明。派生类可以在这样的函数之前加上 virtual 关键字，但是并不是非得这么做。出于 15.3 节（第 538 页）将要解释的原因，C++11 新标准允许派生类显式地注明它将使用哪个成员函数改写基类的虚函数，具体措施是在该函数的形参列表之后增加一个 override 关键字。

动态绑定

通过使用**动态绑定**（dynamic binding），我们能用同一段代码分别处理 Quote 和 Bulk_quote 的对象。例如，当要购买的书籍和购买的数量都已知时，下面的函数负责打印总的费用：

```
// 计算并打印销售给定数量的某种书籍所得的费用
double print_total(ostream &os,
                   const Quote &item, size_t n)
{
    // 根据传入 item 形参的对象类型调用 Quote::net_price
    // 或者 Bulk_quote::net_price
    double ret = item.net_price(n);
    os << "ISBN: " << item.isbn()     // 调用 Quote::isbn
       << " # sold: " << n << " total due: " << ret << endl;
    return ret;
}
```

该函数非常简单：它返回调用 net_price() 的结果，并将该结果连同调用 isbn() 的结果一起打印出来。

关于上面的函数有两个有意思的结论：因为函数 print_total 的 item 形参是基类 Quote 的一个引用，所以出于 15.2.3 节（第 534 页）将要解释的原因，我们既能使用基类 Quote 的对象调用该函数，也能使用派生类 Bulk_quote 的对象调用它；又因为 print_total 是使用引用类型调用 net_price 函数的，所以出于 15.2.1 节（第 528 页）将要解释的原因，实际传入 print_total 的对象类型将决定到底执行 net_price 的哪个版本：

```
// basic 的类型是 Quote；bulk 的类型是 Bulk_quote
print_total(cout, basic, 20);          // 调用 Quote 的 net_price
print_total(cout, bulk, 20);           // 调用 Bulk_quote 的 net_price
```

第一条调用语句将 Quote 对象传入 print_total，因此当 print_total 调用 net_price 时，执行的是 Quote 的版本；在第二条调用语句中，实参的类型是 Bulk_quote，因此执行的是 Bulk_quote 的版本（计算打折信息）。因为在上述过程中 594 函数的运行版本由实参决定，即在运行时选择函数的版本，所以动态绑定有时又被称为**运行时绑定**（run-time binding）。

在 C++语言中，当我们使用基类的引用（或指针）调用一个虚函数时将发生动态绑定。

15.2 定义基类和派生类

定义基类和派生类的方式在很多方面都与我们已知的定义其他类的方式类似，但是也有一些不同之处。本节将介绍在定义有继承关系的类时可能用到的基本特性。

15.2.1 定义基类

我们首先完成 Quote 类的定义：

```
class Quote {
public:
    Quote() = default;          // 关于=default 请参见 7.1.4 节（第 237 页）
    Quote(const std::string &book, double sales_price):
                    bookNo(book), price(sales_price) { }
    std::string isbn() const { return bookNo; }
    // 返回给定数量的书籍的销售总额
    // 派生类负责改写并使用不同的折扣计算算法
    virtual double net_price(std::size_t n) const
                { return n * price; }
    virtual ~Quote() = default;  // 对析构函数进行动态绑定
private:
    std::string bookNo;          // 书籍的 ISBN 编号
protected:
    double price = 0.0;          // 代表普通状态下不打折的价格
};
```

对于上面这个类来说，新增的部分是在 net_price 函数和析构函数之前增加的 virtual 关键字以及最后的 protected 访问说明符。我们将在 15.7.1 节（第 552 页）详细介绍虚析构函数的知识，现在只需记住作为继承关系中根节点的类通常都会定义一个虚析构函数。

基类通常都应该定义一个虚析构函数，即使该函数不执行任何实际操作也是如此。

成员函数与继承

派生类可以继承其基类的成员，然而当遇到如 net_price 这样与类型相关的操作时，
595 派生类必须对其重新定义。换句话说，派生类需要对这些操作提供自己的新定义以**覆盖**（override）从基类继承而来的旧定义。

在 C++语言中，基类必须将它的两种成员函数区分开来：一种是基类希望其派生类进行覆盖的函数；另一种是基类希望派生类直接继承而不要改变的函数。对于前者，基类通常将其定义为**虚函数**（virtual）。当我们使用指针或引用调用虚函数时，该调用将被动态绑定。根据引用或指针所绑定的对象类型不同，该调用可能执行基类的版本，也可能执行某个派生类的版本。

基类通过在其成员函数的声明语句之前加上关键字 virtual 使得该函数执行动态绑定。任何构造函数之外的非静态函数（参见 7.6 节，第 268 页）都可以是虚函数。关键字 virtual 只能出现在类内部的声明语句之前而不能用于类外部的函数定义。如果基类把一个函数声明成虚函数，则该函数在派生类中隐式地也是虚函数。我们将在 15.3 节（第 536 页）介绍更多关于虚函数的知识。

成员函数如果没被声明为虚函数，则其解析过程发生在编译时而非运行时。对于 isbn 成员来说这正是我们希望看到的结果。isbn 函数的执行与派生类的细节无关，不管作用于 Quote 对象还是 Bulk_quote 对象，isbn 函数的行为都一样。在我们的继承层次关系中只有一个 isbn 函数，因此也就不存在调用 isbn() 时到底执行哪个版本的疑问。

访问控制与继承

派生类可以继承定义在基类中的成员，但是派生类的成员函数不一定有权访问从基类继承而来的成员。和其他使用基类的代码一样，派生类能访问公有成员，而不能访问私有成员。不过在某些时候基类中还有这样一种成员，基类希望它的派生类有权访问该成员，同时禁止其他用户访问。我们用**受保护的**（protected）访问运算符说明这样的成员。

我们的 Quote 类希望它的派生类定义各自的 net_price 函数，因此派生类需要访问 Quote 的 price 成员。此时我们将 price 定义成受保护的。与之相反，派生类访问 bookNo 成员的方式与其他用户是一样的，都是通过调用 isbn 函数，因此 bookNo 被定义成私有的，即使是 Quote 派生出来的类也不能直接访问它。我们将在 15.5 节（第 542 页）介绍更多关于受保护成员的知识。

15.2.1 节练习

练习 15.1：什么是虚成员？

练习 15.2：protected 访问说明符与 private 有何区别？

练习 15.3：定义你自己的 Quote 类和 print_total 函数。

596

15.2.2 定义派生类

派生类必须通过使用**类派生列表**（class derivation list）明确指出它是从哪个（哪些）基类继承而来的。类派生列表的形式是：首先是一个冒号，后面紧跟以逗号分隔的基类列表，其中每个基类前面可以有以下三种访问说明符中的一个：public、protected 或者 private。

派生类必须将其继承而来的成员函数中需要覆盖的那些重新声明，因此，我们的 Bulk_quote 类必须包含一个 net_price 成员：

```
class Bulk_quote : public Quote {          // Bulk_quote 继承自 Quote
public:
    Bulk_quote() = default;
    Bulk_quote(const std::string&, double, std::size_t, double);
    // 覆盖基类的函数版本以实现基于大量购买的折扣政策
    double net_price(std::size_t) const override;
private:
    std::size_t min_qty = 0;               // 适用折扣政策的最低购买量
    double discount = 0.0;                 // 以小数表示的折扣额
};
```

我们的 Bulk_quote 类从它的基类 Quote 那里继承了 isbn 函数和 bookNo、price 等数据成员。此外，它还定义了 net_price 的新版本，同时拥有两个新增加的数据成员 min_qty 和 discount。这两个成员分别用于说明享受折扣所需购买的最低数量以及一旦该数量达到之后具体的折扣信息。

我们将在 15.5 节（第 543 页）详细介绍派生列表中用到的访问说明符。现在，我们只需知道访问说明符的作用是控制派生类从基类继承而来的成员是否对派生类的用户可见。

如果一个派生是公有的，则基类的公有成员也是派生类接口的组成部分。此外，我们能将公有派生类型的对象绑定到基类的引用或指针上。因为我们在派生列表中使用了

public，所以 Bulk_quote 的接口隐式地包含 isbn 函数，同时在任何需要 Quote 的引用或指针的地方我们都能使用 Bulk_quote 的对象。

大多数类都只继承自一个类，这种形式的继承被称作“单继承”，它构成了本章的主题。关于派生列表中含有多于一个基类的情况将在 18.3 节（第 710 页）中介绍。

派生类中的虚函数

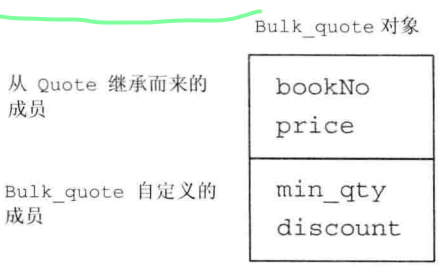
派生类经常（但不总是）覆盖它继承的虚函数。如果派生类没有覆盖其基类中的某个虚函数，则该虚函数的行为类似于其他的普通成员，派生类会直接继承其在基类中的版本。

C++11 派生类可以在它覆盖的函数前使用 virtual 关键字，但不是非得这么做。我们将在 15.3 节（第 538 页）介绍其原因，C++11 新标准允许派生类显式地注明它使用某个成员函数覆盖了它继承的虚函数。具体做法是在形参列表后面、或者在 const 成员函数（参见 7.1.2 节，第 231 页）的 const 关键字后面、或者在引用成员函数（参见 13.6.3 节，第 483 页）的引用限定符后面添加一个关键字 override。

597 ### 派生类对象及派生类向基类的类型转换

一个派生类对象包含多个组成部分：一个含有派生类自己定义的（非静态）成员的子对象，以及一个与该派生类继承的基类对应的子对象，如果有多个基类，那么这样的子对象也有多个。因此，一个 Bulk_quote 对象将包含四个数据元素：它从 Quote 继承而来的 bookNo 和 price 数据成员，以及 Bulk_quote 自己定义的 min_qty 和 discount 成员。

C++标准并没有明确规定派生类的对象在内存中如何分布，但是我们可以认为 Bulk_quote 的对象包含如图 15.1 所示的两部分。



在一个对象中，继承自基类的部分和派生类自定义的部分不一定是连续存储的。图 15.1 只是表示类工作机理的概念模型，而非物理模型。

图 15.1：Bulk_quote 对象的概念结构

因为在派生类对象中含有与其基类对应的组成部分，所以我们能把派生类的对象当成基类对象来使用，而且我们也能将基类的指针或引用绑定到派生类对象中的基类部分上。

```
Quote item;                    // 基类对象
Bulk_quote bulk;               // 派生类对象
Quote *p = &item;              // p 指向 Quote 对象
p = &bulk;                     // p 指向 bulk 的 Quote 部分
Quote &r = bulk;               // r 绑定到 bulk 的 Quote 部分
```

这种转换通常称为**派生类到基类的**（derived-to-base）类型转换。和其他类型转换一样，编译器会隐式地执行派生类到基类的转换（参见 4.11 节，第 141 页）。

这种隐式特性意味着我们可以把派生类对象或者派生类对象的引用用在需要基类引

用的地方；同样的，我们也可以把派生类对象的指针用在需要基类指针的地方。

在派生类对象中含有与其基类对应的组成部分，这一事实是继承的关键所在。

派生类构造函数

598

尽管在派生类对象中含有从基类继承而来的成员，但是派生类并不能直接初始化这些成员。和其他创建了基类对象的代码一样，派生类也必须使用基类的构造函数来初始化它的基类部分。

每个类控制它自己的成员初始化过程。

派生类对象的基类部分与派生类对象自己的数据成员都是在构造函数的初始化阶段（参见 7.5.1 节，第 258 页）执行初始化操作的。类似于我们初始化成员的过程，派生类构造函数同样是通过构造函数初始化列表来将实参传递给基类构造函数的。例如，接受四个参数的 Bulk_quote 构造函数如下所示：

```
Bulk_quote(const std::string& book, double p,
           std::size_t qty, double disc) :
           Quote(book, p), min_qty(qty), discount(disc) { }
    // 与之前一致
};
```

该函数将它的前两个参数（分别表示 ISBN 和价格）传递给 Quote 的构造函数，由 Quote 的构造函数负责初始化 Bulk_quote 的基类部分（即 bookNo 成员和 price 成员）。当（空的）Quote 构造函数体结束后，我们构建的对象的基类部分也就完成初始化了。接下来初始化由派生类直接定义的 min_qty 成员和 discount 成员。最后运行 Bulk_quote 构造函数的（空的）函数体。

除非我们特别指出，否则派生类对象的基类部分会像数据成员一样执行默认初始化。如果想使用其他的基类构造函数，我们需要以类名加圆括号内的实参列表的形式为构造函数提供初始值。这些实参将帮助编译器决定到底应该选用哪个构造函数来初始化派生类对象的基类部分。

首先初始化基类的部分，然后按照声明的顺序依次初始化派生类的成员。

派生类使用基类的成员

派生类可以访问基类的公有成员和受保护成员：

```
// 如果达到了购买书籍的某个最低限量值，就可以享受折扣价格了
double Bulk_quote::net_price(size_t cnt) const
{
    if (cnt >= min_qty)
        return cnt * (1 - discount) * price;
    else
        return cnt * price;
}
```

该函数产生一个打折后的价格：如果给定的数量超过了 min_qty，则将 discount（一

599

个小于 1 大于 0 的数）作用于 price。

我们将在 15.6 节（第 547 页）进一步讨论作用域，目前只需要了解派生类的作用域嵌套在基类的作用域之内。因此，对于派生类的一个成员来说，它使用派生类成员（例如 min_qty 和 discount）的方式与使用基类成员（例如 price）的方式没什么不同。

关键概念：遵循基类的接口

必须明确一点：每个类负责定义各自的接口。要想与类的对象交互必须使用该类的接口，即使这个对象是派生类的基类部分也是如此。

因此，派生类对象不能直接初始化基类的成员。尽管从语法上来说我们可以在派生类构造函数体内给它的公有或受保护的基类成员赋值，但是最好不要这么做。和使用基类的其他场合一样，派生类应该遵循基类的接口，并且通过调用基类的构造函数来初始化那些从基类中继承而来的成员。

继承与静态成员

如果基类定义了一个静态成员（参见 7.6 节，第 268 页），则在整个继承体系中只存在该成员的唯一定义。不论从基类中派生出来多少个派生类，对于每个静态成员来说都只存在唯一的实例。

```
class Base {
public:
    static void statmem();
};
class Derived : public Base {
    void f(const Derived&);
};
```

静态成员遵循通用的访问控制规则，如果基类中的成员是 private 的，则派生类无权访问它。假设某静态成员是可访问的，则我们既能通过基类使用它也能通过派生类使用它：

```
void Derived::f(const Derived &derived_obj)
{
    Base::statmem();              // 正确：Base 定义了 statmem
    Derived::statmem();           // 正确：Derived 继承了 statmem
    // 正确：派生类的对象能访问基类的静态成员
    derived_obj.statmem();        // 通过 Derived 对象访问
    statmem();                    // 通过 this 对象访问
}
```


派生类的声明

派生类的声明与其他类差别不大（参见 7.3.3 节，第 250 页），声明中包含类名但是不包含它的派生列表：

```
class Bulk_quote : public Quote;  // 错误：派生列表不能出现在这里
class Bulk_quote;                 // 正确：声明派生类的正确方式
```

一条声明语句的目的是令程序知晓某个名字的存在以及该名字表示一个什么样的实体，如一个类、一个函数或一个变量等。派生列表以及与定义有关的其他细节必须与类的主体一起出现。

被用作基类的类

如果我们想将某个类用作基类，则该类必须已经定义而非仅仅声明：

```
class Quote;                                    // 声明但未定义
// 错误：Quote 必须被定义
class Bulk_quote : public Quote { ... };
```

这一规定的原因显而易见：派生类中包含并且可以使用它从基类继承而来的成员，为了使用这些成员，派生类当然要知道它们是什么。因此该规定还有一层隐含的意思，即一个类不能派生它本身。

一个类是基类，同时它也可以是一个派生类：

```
class Base { /* ...*/ };
class D1: public Base { /* ...*/ };
class D2: public D1 { /* ...*/ };
```

在这个继承关系中，Base 是 D1 的**直接基类**（direct base），同时是 D2 的**间接基类**（indirect base）。直接基类出现在派生列表中，而间接基类由派生类通过其直接基类继承而来。

每个类都会继承直接基类的所有成员。对于一个最终的派生类来说，它会继承其直接基类的成员；该直接基类的成员又含有其基类的成员；依此类推直至继承链的顶端。因此，最终的派生类将包含它的直接基类的子对象以及每个间接基类的子对象。

防止继承的发生

有时我们会定义这样一种类，我们不希望其他类继承它，或者不想考虑它是否适合作为一个基类。为了实现这一目的，C++11 新标准提供了一种防止继承发生的方法，即在类名后跟一个关键字 final：

C++ 11

```
class NoDerived final { /* */ };          // NoDerived 不能作为基类
class Base { /* */ };
// Last 是 final 的；我们不能继承 Last
class Last final : Base { /* */ };        // Last 不能作为基类
class Bad : NoDerived { /* */ };          // 错误：NoDerived 是 final 的
class Bad2 : Last { /* */ };              // 错误：Last 是 final 的
```

15.2.2 节练习

601

练习 15.4：下面哪条声明语句是不正确的？请解释原因。

```
class Base { ... };
(a) class Derived : public Derived { ... };
(b) class Derived : private Base { ... };
(c) class Derived : public Base;
```

练习 15.5：定义你自己的 Bulk_quote 类。

练习 15.6：将 Quote 和 Bulk_quote 的对象传给 15.2.1 节（第 529 页）练习中的 print_total 函数，检查该函数是否正确。

练习 15.7：定义一个类使其实现一种数量受限的折扣策略，具体策略是：当购买书籍的数量不超过一个给定的限量时享受折扣，如果购买量一旦超过了限量，则超出的部分将以原价销售。

15.2.3 类型转换与继承

理解基类和派生类之间的类型转换是理解 C++语言面向对象编程的关键所在。

通常情况下，如果我们想把引用或指针绑定到一个对象上，则引用或指针的类型应与对象的类型一致（参见 2.3.1 节，第 46 页和 2.3.2 节，第 47 页），或者对象的类型含有一个可接受的 const 类型转换规则（参见 4.11.2 节，第 144 页）。存在继承关系的类是一个重要的例外：我们可以将基类的指针或引用绑定到派生类对象上。例如，我们可以用 Quote& 指向一个 Bulk_quote 对象，也可以把一个 Bulk_quote 对象的地址赋给一个 Quote*。

可以将基类的指针或引用绑定到派生类对象上有一层极为重要的含义：当使用基类的引用（或指针）时，实际上我们并不清楚该引用（或指针）所绑定对象的真实类型。该对象可能是基类的对象，也可能是派生类的对象。

和内置指针一样，智能指针类（参见 12.1 节，第 400 页）也支持派生类向基类的类型转换，这意味着我们可以将一个派生类对象的指针存储在一个基类的智能指针内。

静态类型与动态类型

当我们使用存在继承关系的类型时，必须将一个变量或其他表达式的**静态类型**（static type）与该表达式表示对象的**动态类型**（dynamic type）区分开来。表达式的静态类型在编译时总是已知的，它是变量声明时的类型或表达式生成的类型；动态类型则是变量或表达式表示的内存中的对象的类型。动态类型直到运行时才可知。

602 例如，当 print_total 调用 net_price 时（参见 15.1 节，第 527 页）：

```
double ret = item.net_price(n);
```

我们知道 item 的静态类型是 Quote&，它的动态类型则依赖于 item 绑定的实参，动态类型直到在运行时调用该函数时才会知道。如果我们传递一个 Bulk_quote 对象给 print_total，则 item 的静态类型将与它的动态类型不一致。如前所述，item 的静态类型是 Quote&，而在此例中它的动态类型则是 Bulk_quote。

如果表达式既不是引用也不是指针，则它的动态类型永远与静态类型一致。例如，Quote 类型的变量永远是一个 Quote 对象，我们无论如何都不能改变该变量对应的对象的类型。

基类的指针或引用的静态类型可能与其动态类型不一致，读者一定要理解其中的原因。

不存在从基类向派生类的隐式类型转换……

之所以存在派生类向基类的类型转换是因为每个派生类对象都包含一个基类部分，而基类的引用或指针可以绑定到该基类部分上。一个基类的对象既可以以独立的形式存在，也可以作为派生类对象的一部分存在。如果基类对象不是派生类对象的一部分，则它只含有基类定义的成员，而不含有派生类定义的成员。

因为一个基类的对象可能是派生类对象的一部分，也可能不是，所以不存在从基类向派生类的自动类型转换：

```
Quote base;
Bulk_quote* bulkP = &base;          // 错误：不能将基类转换成派生类
Bulk_quote& bulkRef = base;         // 错误：不能将基类转换成派生类
```

如果上述赋值是合法的，则我们有可能会使用 bulkP 或 bulkRef 访问 base 中本不存在的成员。

除此之外还有一种情况显得有点特别，即使一个基类指针或引用绑定在一个派生类对象上，我们也不能执行从基类向派生类的转换：

```
Bulk_quote bulk;
Quote *itemP = &bulk;               // 正确：动态类型是 Bulk_quote
Bulk_quote *bulkP = itemP;          // 错误：不能将基类转换成派生类
```

编译器在编译时无法确定某个特定的转换在运行时是否安全，这是因为编译器只能通过检查指针或引用的静态类型来推断该转换是否合法。如果在基类中含有一个或多个虚函数，我们可以使用 dynamic_cast（参见 19.2.1 节，第 730 页）请求一个类型转换，该转换的安全检查将在运行时执行。同样，如果我们已知某个基类向派生类的转换是安全的，则我们可以使用 static_cast（参见 4.11.3 节，第 144 页）来强制覆盖掉编译器的检查工作。

……在对象之间不存在类型转换

派生类向基类的自动类型转换只对指针或引用类型有效，在派生类类型和基类类型之间不存在这样的转换。很多时候，我们确实希望将派生类对象转换成它的基类类型，但是这种转换的实际发生过程往往与我们期望的有所差别。

603

请注意，当我们初始化或赋值一个类类型的对象时，实际上是在调用某个函数。当执行初始化时，我们调用构造函数（参见 13.1.1 节，第 440 页和 13.6.2 节，第 473 页）；而当执行赋值操作时，我们调用赋值运算符（参见 13.1.2 节，第 443 页和 13.6.2 节，第 474 页）。这些成员通常都包含一个参数，该参数的类型是类类型的 const 版本的引用。

因为这些成员接受引用作为参数，所以派生类向基类的转换允许我们给基类的拷贝/移动操作传递一个派生类的对象。这些操作不是虚函数。当我们给基类的构造函数传递一个派生类对象时，实际运行的构造函数是基类中定义的那个，显然该构造函数只能处理基类自己的成员。类似的，如果我们将一个派生类对象赋值给一个基类对象，则实际运行的赋值运算符也是基类中定义的那个，该运算符同样只能处理基类自己的成员。

例如，我们的书店类使用了合成版本的拷贝和赋值操作（参见 13.1.1 节，第 440 页和 13.1.2 节，第 444 页）。关于拷贝控制与继承的知识将在 15.7.2 节（第 552 页）做更详细的介绍，现在我们只需要知道合成版本会像其他类一样逐成员地执行拷贝或赋值操作：

```
Bulk_quote bulk;                    // 派生类对象
Quote item(bulk);                   // 使用 Quote::Quote(const Quote&) 构造函数
item = bulk;                        // 调用 Quote::operator=(const Quote&)
```

当构造 item 时，运行 Quote 的拷贝构造函数。该函数只能处理 bookNo 和 price 两个成员，它负责拷贝 bulk 中 Quote 部分的成员，同时忽略掉 bulk 中 Bulk_quote 部分的成员。类似的，对于将 bulk 赋值给 item 的操作来说，只有 bulk 中 Quote 部分的成员被赋值给 item。

因为在上述过程中会忽略 Bulk_quote 部分，所以我们可以说 bulk 的 Bulk_quote 部分被**切掉**（sliced down）了。

当我们用一个派生类对象为一个基类对象初始化或赋值时，只有该派生类对象中的基类部分会被拷贝、移动或赋值，它的派生类部分将被忽略掉。

15.2.3 节练习

练习 15.8：给出静态类型和动态类型的定义。

练习 15.9：在什么情况下表达式的静态类型可能与动态类型不同？请给出三个静态类型与动态类型不同的例子。

练习 15.10：回忆我们在 8.1 节（第 279 页）进行的讨论，解释第 284 页中将 `ifstream` 传递给 `Sales_data` 的 `read` 函数的程序是如何工作的。

关键概念：存在继承关系的类型之间的转换规则

要想理解在具有继承关系的类之间发生的类型转换，有三点非常重要：

- 从派生类向基类的类型转换只对指针或引用类型有效。
- 基类向派生类不存在隐式类型转换。
- 和任何其他成员一样，派生类向基类的类型转换也可能会由于访问受限而变得不可行。我们将在 15.5 节（第 544 页）详细介绍可访问性的问题。

尽管自动类型转换只对指针或引用类型有效，但是继承体系中的大多数类仍然（显式或隐式地）定义了拷贝控制成员（参见第 13 章）。因此，我们通常能够将一个派生类对象拷贝、移动或赋值给一个基类对象。不过需要注意的是，这种操作只处理派生类对象的基类部分。

15.3 虚函数

如前所述，在 C++语言中，当我们使用基类的引用或指针调用一个虚成员函数时会执行动态绑定（参见 15.1 节，第 527 页）。因为我们直到运行时才能知道到底调用了哪个版本的虚函数，所以所有虚函数都必须有定义。通常情况下，如果我们不使用某个函数，则
604 无须为该函数提供定义（参见 6.1.2 节，第 186 页）。但是我们必须为每一个虚函数都提供定义，而不管它是否被用到了，这是因为连编译器也无法确定到底会使用哪个虚函数。

对虚函数的调用可能在运行时才被解析

当某个虚函数通过指针或引用调用时，编译器产生的代码直到运行时才能确定应该调用哪个版本的函数。被调用的函数是与绑定到指针或引用上的对象的动态类型相匹配的那一个。

举个例子，考虑 15.1 节（第 527 页）的 `print_total` 函数，该函数通过其名为 `item` 的参数来进一步调用 `net_price`，其中 `item` 的类型是 `Quote&`。因为 `item` 是引用而且 `net_price` 是虚函数，所以我们到底调用 `net_price` 的哪个版本完全依赖于运行时绑定到 `item` 的实参的实际（动态）类型：

```
Quote base("0-201-82470-1", 50);
print_total(cout, base, 10);          // 调用 Quote::net_price
Bulk_quote derived("0-201-82470-1", 50, 5, .19);
```

```
print_total(cout, derived, 10);        // 调用 Bulk_quote::net_price
```

在第一条调用语句中，item 绑定到 Quote 类型的对象上，因此当 print_total 调用 net_price 时，运行在 Quote 中定义的版本。在第二条调用语句中，item 绑定到 Bulk_quote 类型的对象上，因此 print_total 调用 Bulk_quote 定义的 net_price。 605

必须要搞清楚的一点是，动态绑定只有当我们通过指针或引用调用虚函数时才会发生。

```
base = derived;                        // 把 derived 的 Quote 部分拷贝给 base
base.net_price(20);                    // 调用 Quote::net_price
```

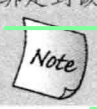
当我们通过一个具有普通类型（非引用非指针）的表达式调用虚函数时，在编译时就会将调用的版本确定下来。例如，如果我们使用 base 调用 net_price，则应该运行 net_price 的哪个版本是显而易见的。我们可以改变 base 表示的对象的值（即内容），但是不会改变该对象的类型。因此，在编译时该调用就会被解析成 Quote 的 net_price。

关键概念：C++的多态性

OOP 的核心思想是多态性（polymorphism）。多态性这个词源自希腊语，其含义是“多种形式”。我们把具有继承关系的多个类型称为多态类型，因为我们能使用这些类型的“多种形式”而无须在意它们的差异。引用或指针的静态类型与动态类型不同这一事实正是 C++语言支持多态性的根本所在。

当我们使用基类的引用或指针调用基类中定义的一个函数时，我们并不知道该函数真正作用的对象是什么类型，因为它可能是一个基类的对象也可能是一个派生类的对象。如果该函数是虚函数，则直到运行时才会决定到底执行哪个版本，判断的依据是引用或指针所绑定的对象的真实类型。

另一方面，对非虚函数的调用在编译时进行绑定。类似的，通过对象进行的函数（虚函数或非虚函数）调用也在编译时绑定。对象的类型是确定不变的，我们无论如何都不可能令对象的动态类型与静态类型不一致。因此，通过对象进行的函数调用将在编译时绑定到该对象所属类中的函数版本上。



当且仅当对通过指针或引用调用虚函数时，才会在运行时解析该调用，也只有在这种情况下对象的动态类型才有可能与静态类型不同。

派生类中的虚函数

当我们在派生类中覆盖了某个虚函数时，可以再一次使用 virtual 关键字指出该函数的性质。然而这么做并非必须，因为一旦某个函数被声明成虚函数，则在所有派生类中它都是虚函数。

一个派生类的函数如果覆盖了某个继承而来的虚函数，则它的形参类型必须与被它覆盖的基类函数完全一致。

同样，派生类中虚函数的返回类型也必须与基类函数匹配。该规则存在一个例外，当类的虚函数返回类型是类本身的指针或引用时，上述规则无效。也就是说，如果 D 由 B 派生得到，则基类的虚函数可以返回 B*而派生类的对应函数可以返回 D*，只不过这样的返回类型要求从 D 到 B 的类型转换是可访问的。15.5 节（第 544 页）将介绍如何确定一个基类的可访问性，在 15.8.1 节（第 561 页）中我们将看到这种虚函数的一个实际例子。 606

基类中的虚函数在派生类中隐含地也是一个虚函数。当派生类覆盖了某个虚函数时，该函数在基类中的形参必须与派生类中的形参严格匹配。

final 和 override 说明符

如我们将要在 15.6 节（第 550 页）介绍的，派生类如果定义了一个函数与基类中虚函数的名字相同但是形参列表不同，这仍然是合法的行为。编译器将认为新定义的这个函数与基类中原有的函数是相互独立的。这时，派生类的函数并没有覆盖掉基类中的版本。就实际的编程习惯而言，这种声明往往意味着发生了错误，因为我们可能原本希望派生类能覆盖掉基类中的虚函数，但是一不小心把形参列表弄错了。

C++11

要想调试并发现这样的错误显然非常困难。在 C++11 新标准中我们可以使用 override 关键字来说明派生类中的虚函数。这么做的好处是在使得程序员的意图更加清晰的同时让编译器可以为我们发现一些错误，后者在编程实践中显得更加重要。如果我们使用 override 标记了某个函数，但该函数并没有覆盖已存在的虚函数，此时编译器将报错：

```
struct B {
    virtual void f1(int) const;
    virtual void f2();
    void f3();
};
struct D1 : B {
    void f1(int) const override;      // 正确：f1 与基类中的 f1 匹配
    void f2(int) override;            // 错误：B 没有形如 f2(int) 的函数
    void f3() override;               // 错误：f3 不是虚函数
    void f4() override;               // 错误：B 没有名为 f4 的函数
};
```

在 D1 中，f1 的 override 说明符是正确的，因为基类和派生类中的 f1 都是 const 成员，并且它们都接受一个 int 返回 void，所以 D1 中的 f1 正确地覆盖了它从 B 中继承而来的虚函数。

D1 中 f2 的声明与 B 中 f2 的声明不匹配，显然 B 中定义的 f2 不接受任何参数而 D1 的 f2 接受一个 int。因为这两个声明不匹配，所以 D1 的 f2 不能覆盖 B 的 f2，它是一个新函数，仅仅是名字恰好与原来的函数一样而已。因为我们使用 override 所表达的意思是我们希望能覆盖基类中的虚函数而实际上并未做到，所以编译器会报错。

因为只有虚函数才能被覆盖，所以编译器会拒绝 D1 的 f3。该函数不是 B 中的虚函数，因此它不能被覆盖。类似的，f4 的声明也会发生错误，因为 B 中根本就没有名为 f4 的函数。

607

我们还能把某个函数指定为 final，如果我们已经把函数定义成 final 了，则之后任何尝试覆盖该函数的操作都将引发错误：

```
struct D2 : B {
    // 从 B 继承 f2() 和 f3()，覆盖 f1(int)
    void f1(int) const final;     // 不允许后续的其他类覆盖 f1(int)
};
struct D3 : D2 {
    void f2();                    // 正确：覆盖从间接基类 B 继承而来的 f2
    void f1(int) const;           // 错误：D2 已经将 f2 声明成 final
};
```

final 和 override 说明符出现在形参列表（包括任何 const 或引用修饰符）以及尾置返回类型（参见 6.3.3 节，第 206 页）之后。

虚函数与默认实参

和其他函数一样，虚函数也可以拥有默认实参（参见 6.5.1 节，第 211 页）。如果某次函数调用使用了默认实参，则该实参值由本次调用的静态类型决定。

换句话说，如果我们通过基类的引用或指针调用函数，则使用基类中定义的默认实参，即使实际运行的是派生类中的函数版本也是如此。此时，传入派生类函数的将是基类函数定义的默认实参。如果派生类函数依赖不同的实参，则程序结果将与我们的预期不符。

如果虚函数使用默认实参，则基类和派生类中定义的默认实参最好一致。

回避虚函数的机制

在某些情况下，我们希望对虚函数的调用不要进行动态绑定，而是强迫其执行虚函数的某个特定版本。使用作用域运算符可以实现这一目的，例如下面的代码：

```
// 强行调用基类中定义的函数版本而不管 baseP 的动态类型到底是什么
double undiscounted = baseP->Quote::net_price(42);
```

该代码强行调用 Quote 的 net_price 函数，而不管 baseP 实际指向的对象类型到底是什么。该调用将在编译时完成解析。

通常情况下，只有成员函数（或友元）中的代码才需要使用作用域运算符来回避虚函数的机制。

什么时候我们需要回避虚函数的默认机制呢？通常是当一个派生类的虚函数调用它覆盖的基类的虚函数版本时。在此情况下，基类的版本通常完成继承层次中所有类型都要做的共同任务，而派生类中定义的版本需要执行一些与派生类本身密切相关的操作。

如果一个派生类虚函数需要调用它的基类版本，但是没有使用作用域运算符，则在运行时该调用将被解析为对派生类版本自身的调用，从而导致无限递归。

608

15.3 节练习

练习 15.11：为你的 Quote 类体系添加一个名为 debug 的虚函数，令其分别显示每个类的数据成员。

练习 15.12：有必要将一个成员函数同时声明成 override 和 final 吗？为什么？

练习 15.13：给定下面的类，解释每个 print 函数的机理：

```
class base {
public:
   string name() { return basename; }
   virtual void print(ostream &os) { os << basename; }
private:
```

```
    string basename;
};
class derived : public base {
public:
    void print(ostream &os) { print(os); os << " " << i; }
private:
    int i;
};
```

在上述代码中存在问题吗？如果有，你该如何修改它？

练习 15.14：给定上一题中的类以及下面这些对象，说明在运行时调用哪个函数：

```
base bobj;       base *bp1 = &bobj;       base &br1 = bobj;
derived dobj;    base *bp2 = &dobj;       base &br2 = dobj;
(a) bobj.print();    (b) dobj.print();    (c) bp1->name();
(d) bp2->name();     (e) br1.print();     (f) br2.print();
```

15.4 抽象基类

假设我们希望扩展书店程序并令其支持几种不同的折扣策略。除了购买量超过一定数量享受折扣外，我们也可能提供另外一种策略，即购买量不超过某个限额时可以享受折扣，但是一旦超过限额就要按原价支付。或者折扣策略还可能是购买量超过一定数量后购买的全部书籍都享受折扣，否则全都不打折。

上面的每个策略都要求一个购买量的值和一个折扣值。我们可以定义一个新的名为 Disc_quote 的类来支持不同的折扣策略，其中 Disc_quote 负责保存购买量的值和折
609 扣值。其他的表示某种特定策略的类（如 Bulk_quote）将分别继承自 Disc_quote，每个派生类通过定义自己的 net_price 函数来实现各自的折扣策略。

在定义 Disc_quote 类之前，首先要确定它的 net_price 函数完成什么工作。显然我们的 Disc_quote 类与任何特定的折扣策略都无关，因此 Disc_quote 类中的 net_price 函数是没有实际含义的。

我们可以在 Disc_quote 类中不定义新的 net_price，此时，Disc_quote 将继承 Quote 中的 net_price 函数。

然而，这样的设计可能导致用户编写出一些无意义的代码。用户可能会创建一个 Disc_quote 对象并为其提供购买量和折扣值，如果将该对象传给一个像 print_total 这样的函数，则程序将调用 Quote 版本的 net_price。显然，最终计算出的销售价格并没有考虑我们在创建对象时提供的折扣值，因此上述操作毫无意义。

纯虚函数

认真思考上面描述的情形我们可以发现，关键问题并不仅仅是不知道应该如何定义 net_price，而是我们根本就不希望用户创建一个 Disc_quote 对象。Disc_quote 类表示的是一本打折书籍的通用概念，而非某种具体的折扣策略。

我们可以将 net_price 定义成**纯虚**（pure virtual）函数从而令程序实现我们的设计意图，这样做可以清晰明了地告诉用户当前这个 net_price 函数是没有实际意义的。和普通的虚函数不一样，一个纯虚函数无须定义。我们通过在函数体的位置（即在声明语句

的分号之前）书写=0 就可以将一个虚函数说明为纯虚函数。其中，=0 只能出现在类内部的虚函数声明语句处：

```
// 用于保存折扣值和购买量的类，派生类使用这些数据可以实现不同的价格策略
class Disc_quote : public Quote {
public:
    Disc_quote() = default;
    Disc_quote(const std::string& book, double price,
               std::size_t qty, double disc):
                  Quote(book, price),
                  quantity(qty), discount(disc) { }
    double net_price(std::size_t) const = 0;
protected:
    std::size_t quantity = 0;          // 折扣适用的购买量
    double discount = 0.0;             // 表示折扣的小数值
};
```

和我们之前定义的 Bulk_quote 类一样，Disc_quote 也分别定义了一个默认构造函数和一个接受四个参数的构造函数。尽管我们不能直接定义这个类的对象，但是 Disc_quote 的派生类构造函数将会使用 Disc_quote 的构造函数来构建各个派生类对象的 Disc_quote 部分。其中，接受四个参数的构造函数将前两个参数传递给 Quote 的构造函数，然后直接初始化自己的成员 discount 和 quantity。默认构造函数则对这些成员进行默认初始化。

值得注意的是，我们也可以为纯虚函数提供定义，不过函数体必须定义在类的外部。 610
也就是说，我们不能在类的内部为一个=0 的函数提供函数体。

含有纯虚函数的类是抽象基类

含有（或者未经覆盖直接继承）纯虚函数的类是**抽象基类**（abstract base class）。抽象基类负责定义接口，而后续的其他类可以覆盖该接口。我们不能（直接）创建一个抽象基类的对象。因为 Disc_quote 将 net_price 定义成了纯虚函数，所以我们不能定义 Disc_quote 的对象。我们可以定义 Disc_quote 的派生类的对象，前提是这些类覆盖了 net_price 函数：

```
// Disc_quote 声明了纯虚函数，而 Bulk_quote 将覆盖该函数
Disc_quote discounted;             // 错误：不能定义 Disc_quote 的对象
Bulk_quote bulk;                   // 正确：Bulk_quote 中没有纯虚函数
```

Disc_quote 的派生类必须给出自己的 net_price 定义，否则它们仍将是抽象基类。

我们不能创建抽象基类的对象。

派生类构造函数只初始化它的直接基类

接下来可以重新实现 Bulk_quote 了，这一次我们让它继承 Disc_quote 而非直接继承 Quote：

```
// 当同一书籍的销售量超过某个值时启用折扣
// 折扣的值是一个小于 1 的正的小数值，以此来降低正常销售价格
class Bulk_quote : public Disc_quote {
public:
    Bulk_quote() = default;
```

```
    Bulk_quote(const std::string& book, double price,
               std::size_t qty, double disc):
          Disc_quote(book, price, qty, disc) { }
    // 覆盖基类中的函数版本以实现一种新的折扣策略
    double net_price(std::size_t) const override;
};
```

这个版本的 Bulk_quote 的直接基类是 Disc_quote，间接基类是 Quote。每个 Bulk_quote 对象包含三个子对象：一个（空的）Bulk_quote 部分、一个 Disc_quote 子对象和一个 Quote 子对象。

如前所述，每个类各自控制其对象的初始化过程。因此，即使 Bulk_quote 没有自己的数据成员，它也仍然需要像原来一样提供一个接受四个参数的构造函数。该构造函数将它的实参传递给 Disc_quote 的构造函数，随后 Disc_quote 的构造函数继续调用 Quote 的构造函数。Quote 的构造函数首先初始化 bulk 的 bookNo 和 price 成员，当 Quote 的构造函数结束后，开始运行 Disc_quote 的构造函数并初始化 quantity 和 discount 成员，最后运行 Bulk_quote 的构造函数，该函数无须执行实际的初始化或其他工作。

611

关键概念：重构

在 Quote 的继承体系中增加 Disc_quote 类是重构（refactoring）的一个典型示例。重构负责重新设计类的体系以便将操作和/或数据从一个类移动到另一个类中。对于面向对象的应用程序来说，重构是一种很普遍的现象。

值得注意的是，即使我们改变了整个继承体系，那些使用了 Bulk_quote 或 Quote 的代码也无须进行任何改动。不过一旦类被重构（或以其他方式被改变），就意味着我们必须重新编译含有这些类的代码了。

15.4 节练习

练习 15.15：定义你自己的 Disc_quote 和 Bulk_quote。

练习 15.16：改写你在 15.2.2 节（第 533 页）练习中编写的数量受限的折扣策略，令其继承 Disc_quote。

练习 15.17：尝试定义一个 Disc_quote 的对象，看看编译器给出的错误信息是什么？

15.5 访问控制与继承

每个类分别控制自己的成员初始化过程（参见 15.2.2 节，第 531 页），与之类似，每个类还分别控制着其成员对于派生类来说是否**可访问**（accessible）。

受保护的成员

如前所述，一个类使用 protected 关键字来声明那些它希望与派生类分享但是不想被其他公共访问使用的成员。protected 说明符可以看做是 public 和 private 中和后的产物：

- 和私有成员类似，受保护的成员对于类的用户来说是不可访问的。

- 和公有成员类似，受保护的成员对于派生类的成员和友元来说是可访问的。

此外，protected 还有另外一条重要的性质。

- 派生类的成员或友元只能通过派生类对象来访问基类的受保护成员。派生类对于一个基类对象中的受保护成员没有任何访问特权。

为了理解最后一条规则，请考虑如下的例子：

612

```
class Base {
protected:
    int prot_mem;                       // protected 成员
};
class Sneaky : public Base {
    friend void clobber(Sneaky&);       // 能访问 Sneaky::prot_mem
    friend void clobber(Base&);         // 不能访问 Base::prot_mem
    int j;                              // j 默认是 private
};
// 正确：clobber 能访问 Sneaky 对象的 private 和 protected 成员
void clobber(Sneaky &s) { s.j = s.prot_mem = 0; }
// 错误：clobber 不能访问 Base 的 protected 成员
void clobber(Base &b) { b.prot_mem = 0; }
```

如果派生类（及其友元）能访问基类对象的受保护成员，则上面的第二个 clobber（接受一个 Base&）将是合法的。该函数不是 Base 的友元，但是它仍然能够改变一个 Base 对象的内容。如果按照这样的思路，则我们只要定义一个形如 Sneaky 的新类就能非常简单地规避掉 protected 提供的访问保护了。

要想阻止以上的用法，我们就要做出如下规定，即派生类的成员和友元只能访问派生类对象中的基类部分的受保护成员；对于普通的基类对象中的成员不具有特殊的访问权限。

公有、私有和受保护继承

某个类对其继承而来的成员的访问权限受到两个因素影响：一是在基类中该成员的访问说明符，二是在派生类的派生列表中的访问说明符。举个例子，考虑如下的继承关系：

```
class Base {
public:
    void pub_mem();                 // public 成员
protected:
    int prot_mem;                   // protected 成员
private:
    char priv_mem;                  // private 成员
};
struct Pub_Derv : public Base {
    // 正确：派生类能访问 protected 成员
    int f() { return prot_mem; }
    // 错误：private 成员对于派生类来说是不可访问的
    char g() { return priv_mem; }
};
struct Priv_Derv : private Base {
    // private 不影响派生类的访问权限
    int f1() const { return prot_mem; }
};
```

派生访问说明符对于派生类的成员（及友元）能否访问其直接基类的成员没什么影响。对
613 基类成员的访问权限只与基类中的访问说明符有关。Pub_Derv 和 Priv_Derv 都能访问受保护的成员 prot_mem，同时它们都不能访问私有成员 priv_mem。

派生访问说明符的目的是控制派生类用户（包括派生类的派生类在内）对于基类成员的访问权限：

```
Pub_Derv d1;                    // 继承自 Base 的成员是 public 的
Priv_Derv d2;                   // 继承自 Base 的成员是 private 的
d1.pub_mem();                   // 正确：pub_mem 在派生类中是 public 的
d2.pub_mem();                   // 错误：pub_mem 在派生类中是 private 的
```

Pub_Derv 和 Priv_Derv 都继承了 pub_mem 函数。如果继承是公有的，则成员将遵循其原有的访问说明符，此时 d1 可以调用 pub_mem。在 Priv_Derv 中，Base 的成员是私有的，因此类的用户不能调用 pub_mem。

派生访问说明符还可以控制继承自派生类的新类的访问权限：

```
struct Derived_from_Public : public Pub_Derv {
    // 正确：Base::prot_mem 在 Pub_Derv 中仍然是 protected 的
    int use_base() { return prot_mem; }
};
struct Derived_from_Private : public Priv_Derv {
    // 错误：Base::prot_mem 在 Priv_Derv 中是 private 的
    int use_base() { return prot_mem; }
};
```

Pub_Derv 的派生类之所以能访问 Base 的 prot_mem 成员是因为该成员在 Pub_Derv 中仍然是受保护的。相反，Priv_Derv 的派生类无法执行类的访问，对于它们来说，Priv_Derv 继承自 Base 的所有成员都是私有的。

假设我们之前还定义了一个名为 Prot_Derv 的类，它采用受保护继承，则 Base 的所有公有成员在新定义的类中都是受保护的。Prot_Derv 的用户不能访问 pub_mem，但是 Prot_Derv 的成员和友元可以访问那些继承而来的成员。

派生类向基类转换的可访问性

派生类向基类的转换（参见 15.2.2 节，第 530 页）是否可访问由使用该转换的代码决定，同时派生类的派生访问说明符也会有影响。假定 D 继承自 B：

- 只有当 D 公有地继承 B 时，用户代码才能使用派生类向基类的转换；如果 D 继承 B 的方式是受保护的或者私有的，则用户代码不能使用该转换。
- 不论 D 以什么方式继承 B，D 的成员函数和友元都能使用派生类向基类的转换；派生类向其直接基类的类型转换对于派生类的成员和友元来说永远是可访问的。
- 614 如果 D 继承 B 的方式是公有的或者受保护的，则 D 的派生类的成员和友元可以使用 D 向 B 的类型转换；反之，如果 D 继承 B 的方式是私有的，则不能使用。

对于代码中的某个给定节点来说，如果基类的公有成员是可访问的，则派生类向基类的类型转换也是可访问的；反之则不行。

关键概念：类的设计与受保护的成员

不考虑继承的话，我们可以认为一个类有两种不同的用户：普通用户和类的实现者。

其中，普通用户编写的代码使用类的对象，这部分代码只能访问类的公有（接口）成员；实现者则负责编写类的成员和友元的代码，成员和友元既能访问类的公有部分，也能访问类的私有（实现）部分。

如果进一步考虑继承的话就会出现第三种用户，即派生类。基类把它希望派生类能够使用的部分声明成受保护的。普通用户不能访问受保护的成员，而派生类及其友元仍旧不能访问私有成员。

和其他类一样，基类应该将其接口成员声明为公有的；同时将属于其实现的部分分成两组：一组可供派生类访问，另一组只能由基类及基类的友元访问。对于前者应该声明为受保护的，这样派生类就能在实现自己的功能时使用基类的这些操作和数据；对于后者应该声明为私有的。

友元与继承

就像友元关系不能传递一样（参见 7.3.4 节，第 250 页），友元关系同样也不能继承。基类的友元在访问派生类成员时不具有特殊性，类似的，派生类的友元也不能随意访问基类的成员：

```
class Base {
    // 添加 friend 声明，其他成员与之前的版本一致
    friend class Pal;              // Pal 在访问 Base 的派生类时不具有特殊性
};
class Pal {
public:
    int f(Base b) { return b.prot_mem; } // 正确：Pal 是 Base 的友元
    int f2(Sneaky s) { return s.j; }     // 错误：Pal 不是 Sneaky 的友元
    // 对基类的访问权限由基类本身控制，即使对于派生类的基类部分也是如此
    int f3(Sneaky s) { return s.prot_mem; }  // 正确：Pal 是 Base 的友元
};
```

如前所述，每个类负责控制自己的成员的访问权限，因此尽管看起来有点儿奇怪，但 f3 确实是正确的。Pal 是 Base 的友元，所以 Pal 能够访问 Base 对象的成员，这种可访问性包括了 Base 对象内嵌在其派生类对象中的情况。 615

当一个类将另一个类声明为友元时，这种友元关系只对做出声明的类有效。对于原来那个类来说，其友元的基类或者派生类不具有特殊的访问能力：

```
// D2 对 Base 的 protected 和 private 成员不具有特殊的访问能力
class D2 : public Pal {
public:
    int mem(Base b)
        { return b.prot_mem; }          // 错误：友元关系不能继承
};
```

不能继承友元关系；每个类负责控制各自成员的访问权限。

改变个别成员的可访问性

有时我们需要改变派生类继承的某个名字的访问级别，通过使用 using 声明（参见 3.1 节，第 74 页）可以达到这一目的：

```
class Base {
public:
```

```
    std::size_t size() const { return n; }
protected:
    std::size_t n;
};
class Derived : private Base {          // 注意：private 继承
public:
    // 保持对象尺寸相关的成员的访问级别
    using Base::size;
protected:
    using Base::n;
};
```

因为 Derived 使用了私有继承，所以继承而来的成员 size 和 n（在默认情况下）是 Derived 的私有成员。然而，我们使用 using 声明语句改变了这些成员的可访问性。改变之后，Derived 的用户将可以使用 size 成员，而 Derived 的派生类将能使用 n。

通过在类的内部使用 using 声明语句，我们可以将该类的直接或间接基类中的任何可访问成员（例如，非私有成员）标记出来。using 声明语句中名字的访问权限由该 using 声明语句之前的访问说明符来决定。也就是说，如果一条 using 声明语句出现在类的 private 部分，则该名字只能被类的成员和友元访问；如果 using 声明语句位于 public 部分，则类的所有用户都能访问它；如果 using 声明语句位于 protected 部分，则该名字对于成员、友元和派生类是可访问的。

派生类只能为那些它可以访问的名字提供 using 声明。

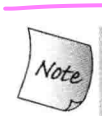
616

默认的继承保护级别

在 7.2 节（第 240 页）中我们曾经介绍过使用 struct 和 class 关键字定义的类具有不同的默认访问说明符。类似的，默认派生运算符也由定义派生类所用的关键字来决定。默认情况下，使用 class 关键字定义的派生类是私有继承的；而使用 struct 关键字定义的派生类是公有继承的：

```
class Base { /* ... */ };
struct D1 : Base { /* ... */ };          // 默认 public 继承
class D2 : Base { /* ... */ };           // 默认 private 继承
```

人们常常有一种错觉，认为在使用 struct 关键字和 class 关键字定义的类之间还有更深层次的差别。事实上，唯一的差别就是默认成员访问说明符及默认派生访问说明符；除此之外，再无其他不同之处。



一个私有派生的类最好显式地将 private 声明出来，而不要仅仅依赖于默认的设置。显式声明的好处是可以令私有继承关系清晰明了，不至于产生误会。

15.5 节练习

练习 15.18：假设给定了第 543 页和第 544 页的类，同时已知每个对象的类型如注释所示，判断下面的哪些赋值语句是合法的。解释那些不合法的语句为什么不被允许：

```
Base *p = &d1;                  // d1 的类型是 Pub_Derv
p = &d2;                        // d2 的类型是 Priv_Derv
```

```
p = &d3;                    // d3 的类型是 Prot_Derv
p = &dd1;                   // dd1 的类型是 Derived_from_Public
p = &dd2;                   // dd2 的类型是 Derived_from_Private
p = &dd3;                   // dd3 的类型是 Derived_from_Protected
```

练习 15.19：假设 543 页和 544 页的每个类都有如下形式的成员函数：

```
void memfcn(Base &b) { b = *this; }
```

对于每个类，分别判断上面的函数是否合法。

练习 15.20：编写代码检验你对前面两题的回答是否正确。

练习 15.21：从下面这些一般性抽象概念中任选一个（或者选一个你自己的），将其对应的一组类型组织成一个继承体系：

(a) 图形文件格式（如 gif、tiff、jpeg、bmp）

(b) 图形基元（如方格、圆、球、圆锥）

(c) C++语言中的类型（如类、函数、成员函数）

练习 15.22：对于你在上一题中选择的类，为其添加合适的虚函数及公有成员和受保护的成员。

15.6 继承中的类作用域

每个类定义自己的作用域（参见 7.4 节，第 253 页），在这个作用域内我们定义类的成员。当存在继承关系时，派生类的作用域嵌套（参见 2.2.4 节，第 43 页）在其基类的作用域之内。如果一个名字在派生类的作用域内无法正确解析，则编译器将继续在外层的基类作用域中寻找该名字的定义。

617

派生类的作用域位于基类作用域之内这一事实可能有点儿出人意料，毕竟在我们的程序文本中派生类和基类的定义是相互分离开来的。不过也恰恰因为类作用域有这种继承嵌套的关系，所以派生类才能像使用自己的成员一样使用基类的成员。例如，当我们编写下面的代码时：

```
Bulk_quote bulk;
cout << bulk.isbn();
```

名字 isbn 的解析将按照下述过程所示：

- 因为我们是通过 Bulk_quote 的对象调用 isbn 的，所以首先在 Bulk_quote 中查找，这一步没有找到名字 isbn。
- 因为 Bulk_quote 是 Disc_quote 的派生类，所以接下来在 Disc_quote 中查找，仍然找不到。
- 因为 Disc_quote 是 Quote 的派生类，所以接着查找 Quote；此时找到了名字 isbn，所以我们使用的 isbn 最终被解析为 Quote 中的 isbn。

在编译时进行名字查找

一个对象、引用或指针的静态类型（参见 15.2.3 节，第 532 页）决定了该对象的哪些成员是可见的。即使静态类型与动态类型可能不一致（当使用基类的引用或指针时会发生

这种情况），但是我们能使用哪些成员仍然是由静态类型决定的。举个例子，我们可以给 Disc_quote 添加一个新成员，该成员返回一个存有最小（或最大）数量及折扣价格的 pair（参见 11.2.3 节，第 379 页）：

```
class Disc_quote : public Quote {
public:
    std::pair<size_t, double> discount_policy() const
        { return {quantity, discount}; }
    // 其他成员与之前的版本一致
};
```

我们只能通过 Disc_quote 及其派生类的对象、引用或指针使用 discount_policy：

```
Bulk_quote bulk;
Bulk_quote *bulkP = &bulk;          // 静态类型与动态类型一致
Quote *itemP = &bulk;               // 静态类型与动态类型不一致
bulkP->discount_policy();           // 正确：bulkP 的类型是 Bulk_quote*
itemP->discount_policy();           // 错误：itemP 的类型是 Quote*
```

618 尽管在 bulk 中确实含有一个名为 discount_policy 的成员，但是该成员对于 itemP 却是不可见的。itemP 的类型是 Quote 的指针，意味着对 discount_policy 的搜索将从 Quote 开始。显然 Quote 不包含名为 discount_policy 的成员，所以我们无法通过 Quote 的对象、引用或指针调用 discount_policy。

名字冲突与继承

和其他作用域一样，派生类也能重用定义在其直接基类或间接基类中的名字，此时定义在内层作用域（即派生类）的名字将隐藏定义在外层作用域（即基类）的名字（参见 2.2.4 节，第 43 页）：

```
struct Base {
    Base(): mem(0) { }
protected:
    int mem;
};
struct Derived : Base {
    Derived(int i): mem(i) { }              // 用 i 初始化 Derived::mem
                                            // Base::mem 进行默认初始化
    int get_mem() { return mem; }           // 返回 Derived::mem
protected:
    int mem;                                // 隐藏基类中的 mem
};
```

get_mem 中 mem 引用的解析结果是定义在 Derived 中的名字，下面的代码

```
Derived d(42);
cout << d.get_mem() << endl;            // 打印 42
```

的输出结果将是 42。

派生类的成员将隐藏同名的基类成员。

通过作用域运算符来使用隐藏的成员

我们可以通过作用域运算符来使用一个被隐藏的基类成员：

```
struct Derived : Base {
    int get_base_mem() { return Base::mem; }
    // ...
};
```

作用域运算符将覆盖掉原有的查找规则，并指示编译器从 Base 类的作用域开始查找 mem。如果使用最新的 Derived 版本运行上面的代码，则 d.get_mem() 的输出结果将是 0。

Best Practices 除了覆盖继承而来的虚函数之外，派生类最好不要重用其他定义在基类中的名字。

关键概念：名字查找与继承 619

理解函数调用的解析过程对于理解 C++的继承至关重要，假定我们调用 p->mem()（或者 obj.mem()），则依次执行以下 4 个步骤：

- 首先确定 p（或 obj）的静态类型。因为我们调用的是一个成员，所以该类型必然是类类型。
- 在 p（或 obj）的静态类型对应的类中查找 mem。如果找不到，则依次在直接基类中不断查找直至到达继承链的顶端。如果找遍了该类及其基类仍然找不到，则编译器将报错。
- 一旦找到了 mem，就进行常规的类型检查（参见 6.1 节，第 183 页）以确认对于当前找到的 mem，本次调用是否合法。
- 假设调用合法，则编译器将根据调用的是否是虚函数而产生不同的代码：
  - 如果 mem 是虚函数且我们是通过引用或指针进行的调用，则编译器产生的代码将在运行时确定到底运行该虚函数的哪个版本，依据是对象的动态类型。
  - 反之，如果 mem 不是虚函数或者我们是通过对象（而非引用或指针）进行的调用，则编译器将产生一个常规函数调用。

一如往常，名字查找先于类型检查

如前所述，声明在内层作用域的函数并不会重载声明在外层作用域的函数（参见 6.4.1 节，第 210 页）。因此，定义派生类中的函数也不会重载其基类中的成员。和其他作用域一样，如果派生类（即内层作用域）的成员与基类（即外层作用域）的某个成员同名，则派生类将在其作用域内隐藏该基类成员。即使派生类成员和基类成员的形参列表不一致，基类成员也仍然会被隐藏掉：

```
struct Base {
    int memfcn();
};
struct Derived : Base {
    int memfcn(int);          // 隐藏基类的 memfcn
};
Derived d; Base b;
b.memfcn();                   // 调用 Base::memfcn
d.memfcn(10);                 // 调用 Derived::memfcn
d.memfcn();                   // 错误：参数列表为空的 memfcn 被隐藏了
d.Base::memfcn();             // 正确：调用 Base::memfcn
```

Derived 中的 memfcn 声明隐藏了 Base 中的 memfcn 声明。在上面的代码中前两条调用语句容易理解，第一个通过 Base 对象 b 进行的调用执行基类的版本；类似的，第二个通过 d 进行的调用执行 Derived 的版本；第三条调用语句有点特殊，d.memfcn() 是非法的。

620 为了解析这条调用语句，编译器首先在 Derived 中查找名字 memfcn；因为 Derived 确实定义了一个名为 memfcn 的成员，所以查找过程终止。一旦名字找到，编译器就不再继续查找了。Derived 中的 memfcn 版本需要一个 int 实参，而当前的调用语句无法提供任何实参，所以该调用语句是错误的。

虚函数与作用域

我们现在可以理解为什么基类与派生类中的虚函数必须有相同的形参列表了（参见 15.3 节，第 537 页）。假如基类与派生类的虚函数接受的实参不同，则我们就无法通过基类的引用或指针调用派生类的虚函数了。例如：

```
class Base {
public:
    virtual int fcn();
};
class D1 : public Base {
public:
    // 隐藏基类的 fcn，这个 fcn 不是虚函数
    // D1 继承了 Base::fcn() 的定义
    int fcn(int);                    // 形参列表与 Base 中的 fcn 不一致
    virtual void f2();               // 是一个新的虚函数，在 Base 中不存在
};
class D2 : public D1 {
public:
    int fcn(int);                    // 是一个非虚函数，隐藏了 D1::fcn(int)
    int fcn();                       // 覆盖了 Base 的虚函数 fcn
    void f2();                       // 覆盖了 D1 的虚函数 f2
};
```

D1 的 fcn 函数并没有覆盖 Base 的虚函数 fcn，原因是它们的形参列表不同。实际上，D1 的 fcn 将隐藏 Base 的 fcn。此时拥有了两个名为 fcn 的函数：一个是 D1 从 Base 继承而来的虚函数 fcn；另一个是 D1 自己定义的接受一个 int 参数的非虚函数 fcn。

通过基类调用隐藏的虚函数

给定上面定义的这些类后，我们来看几种使用其函数的方法：

```
Base bobj; D1 d1obj; D2 d2obj;

Base *bp1 = &bobj, *bp2 = &d1obj, *bp3 = &d2obj;
bp1->fcn();              // 虚调用，将在运行时调用 Base::fcn
bp2->fcn();              // 虚调用，将在运行时调用 Base::fcn
bp3->fcn();              // 虚调用，将在运行时调用 D2::fcn

D1 *d1p = &d1obj; D2 *d2p = &d2obj;
bp2->f2();               // 错误：Base 没有名为 f2 的成员
d1p->f2();               // 虚调用，将在运行时调用 D1::f2()
d2p->f2();               // 虚调用，将在运行时调用 D2::f2()
```

前三条调用语句是通过基类的指针进行的，因为 fcn 是虚函数，所以编译器产生的代码将在运行时确定使用虚函数的哪个版本。判断的依据是该指针所绑定对象的真实类型。在 bp2 的例子中，实际绑定的对象是 D1 类型，而 D1 并没有覆盖那个不接受实参的 fcn，所以通过 bp2 进行的调用将在运行时解析为 Base 定义的版本。

621

接下来的三条调用语句是通过不同类型的指针进行的，每个指针分别指向继承体系中的一个类型。因为 Base 类中没有 f2()，所以第一条语句是非法的，即使当前的指针碰巧指向了一个派生类对象也无济于事。

为了完整地阐明上述问题，我们不妨再观察一些对于非虚函数 fcn(int) 的调用语句：

```
Base *p1 = &d2obj; D1 *p2 = &d2obj; D2 *p3 = &d2obj;
p1->fcn(42);                    // 错误：Base 中没有接受一个 int 的 fcn
p2->fcn(42);                    // 静态绑定，调用 D1::fcn(int)
p3->fcn(42);                    // 静态绑定，调用 D2::fcn(int)
```

在上面的每条调用语句中，指针都指向了 D2 类型的对象，但是由于我们调用的是非虚函数，所以不会发生动态绑定。实际调用的函数版本由指针的静态类型决定。

覆盖重载的函数

和其他函数一样，成员函数无论是否是虚函数都能被重载。派生类可以覆盖重载函数的 0 个或多个实例。如果派生类希望所有的重载版本对于它来说都是可见的，那么它就需要覆盖所有的版本，或者一个也不覆盖。

有时一个类仅需覆盖重载集合中的一些而非全部函数，此时，如果我们不得不覆盖基类中的每一个版本的话，显然操作将极其烦琐。

一种好的解决方案是为重载的成员提供一条 using 声明语句（参见 15.5 节，第 546 页），这样我们就无须覆盖基类中的每一个重载版本了。using 声明语句指定一个名字而不指定形参列表，所以一条基类成员函数的 using 声明语句就可以把该函数的所有重载实例添加到派生类作用域中。此时，派生类只需要定义其特有的函数就可以了，而无须为继承而来的其他函数重新定义。

类内 using 声明的一般规则同样适用于重载函数的名字（参见 15.5 节，第 546 页）：基类函数的每个实例在派生类中都必须是可访问的。对派生类没有重新定义的重载版本的访问实际上是对 using 声明点的访问。

15.6 节练习

练习 15.23：假设第 550 页的 D1 类需要覆盖它继承而来的 fcn 函数，你应该如何对其进行修改？如果你修改之后 fcn 匹配了 Base 中的定义，则该节的那些调用语句将如何解析？

15.7 构造函数与拷贝控制

622

和其他类一样，位于继承体系中的类也需要控制当其对象执行一系列操作时发生什么样的行为，这些操作包括创建、拷贝、移动、赋值和销毁。如果一个类（基类或派生类）没有定义拷贝控制操作，则编译器将为它合成一个版本。当然，这个合成的版本也可以定义成被删除的函数。

15.7.1 虚析构函数

继承关系对基类拷贝控制最直接的影响是基类通常应该定义一个虚析构函数（参见 15.2.1 节，第 528 页），这样我们就能动态分配继承体系中的对象了。

如前所述，当我们 delete 一个动态分配的对象的指针时将执行析构函数（参见 13.1.3 节，第 445 页）。如果该指针指向继承体系中的某个类型，则有可能出现指针的静态类型与被删除对象的动态类型不符的情况（参见 15.2.2 节，第 530 页）。例如，如果我们 delete 一个 Quote*类型的指针，则该指针有可能实际指向了一个 Bulk_quote 类型的对象。如果这样的话，编译器就必须清楚它应该执行的是 Bulk_quote 的析构函数。和其他函数一样，我们通过在基类中将析构函数定义成虚函数以确保执行正确的析构函数版本：

```
class Quote {
public:
    // 如果我们删除的是一个指向派生类对象的基类指针，则需要虚析构函数
    virtual ~Quote() = default;          // 动态绑定析构函数
};
```

和其他虚函数一样，析构函数的虚属性也会被继承。因此，无论 Quote 的派生类使用合成的析构函数还是定义自己的析构函数，都将是虚析构函数。只要基类的析构函数是虚函数，就能确保当我们 delete 基类指针时将运行正确的析构函数版本：

```
Quote *itemP = new Quote;              // 静态类型与动态类型一致
delete itemP;                          // 调用 Quote 的析构函数
itemP = new Bulk_quote;                // 静态类型与动态类型不一致
delete itemP;                          // 调用 Bulk_quote 的析构函数
```

如果基类的析构函数不是虚函数，则 delete 一个指向派生类对象的基类指针将产生未定义的行为。

之前我们曾介绍过一条经验准则，即如果一个类需要析构函数，那么它也同样需要拷贝和赋值操作（参见 13.1.4 节，第 447 页）。基类的析构函数并不遵循上述准则，它是一个重要的例外。一个基类总是需要析构函数，而且它能将析构函数设定为虚函数。此时，该析构函数为了成为虚函数而令内容为空，我们显然无法由此推断该基类还需要赋值运算符或拷贝构造函数。

623 **虚析构函数将阻止合成移动操作**

基类需要一个虚析构函数这一事实还会对基类和派生类的定义产生另外一个间接的影响：如果一个类定义了析构函数，即使它通过=default 的形式使用了合成的版本，编译器也不会为这个类合成移动操作（参见 13.6.2 节，第 475 页）。

15.7.1 节练习

练习 15.24：哪种类需要虚析构函数？虚析构函数必须执行什么样的操作？

15.7.2 合成拷贝控制与继承

基类或派生类的合成拷贝控制成员的行为与其他合成的构造函数、赋值运算符或析构函数类似：它们对类本身的成员依次进行初始化、赋值或销毁的操作。此外，这些合成的成员还负责使用直接基类中对应的操作对一个对象的直接基类部分进行初始化、赋值或销