第 9 章 继承与多态

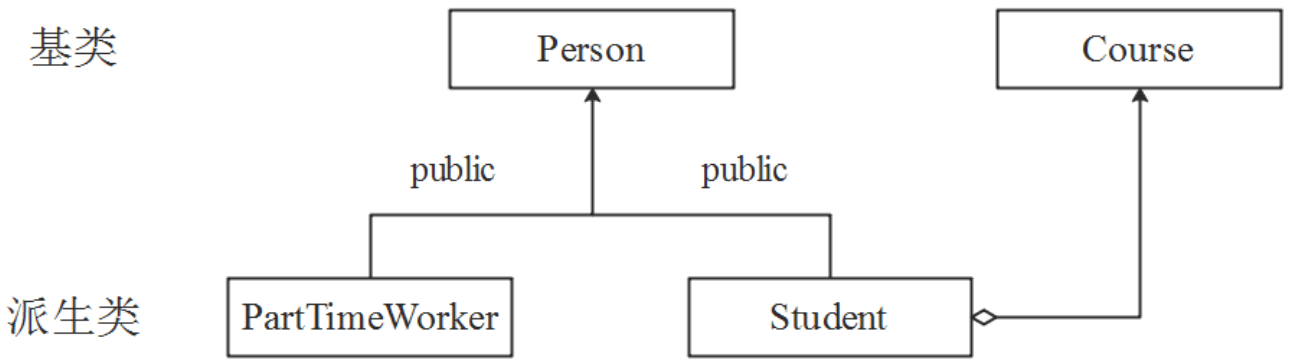
目录

学习目标

- 理解继承的内涵和基本语法；
- 掌握拷贝控制成员与继承的关系；
- 掌握并学会运用动态绑定技术。

例 9.1:

下面设计一个简单的人员系统，包括两类人员：学生（指大学生）和兼职员工。该系统包含以下几个类：Person、Student、PartTimeWorker 和 Course。



例 9.1 中定义基类 Person：

```
1  class Person {                                  //人员类
2  protected:
3      string m_name;                              //名字
4      int m_age;                                  //年龄
5  public:
6      Person(const string &name = "", int age = 0):m_name(name),
         m_age(age){}
7      virtual ~Person() = default;    //default关键字见教材6.2.1节
8      const string& name() const { return m_name; }
9      int age() const { return m_age; }
10     void plusOneYear() { ++m_age; } //年龄自增
11 };
```

例 9.1 中定义基类 Course：

```
1  class Course {                    //课程类
2      string m_name;                //课程名
3      int m_score;                  //成绩
4  public:
5      Course(const string &name = "", int score = 0):
6      m_name(name), m_score(score) {}
7      void setScore(int score) { m_score = score; }
8      int score() const { return m_score; }
9      const string& name() const { return m_name; }
10 };
```

例 9.1 中定义派生类 PartTimeWorker：

```
1  class PartTimeWorker : public Person { //兼职人员类，公有
                                          继承Person
2  private:
3      double m_hour;                     //工作小时数
4      static double ms_payRate;          //每小时工资
5  public:
6      PartTimeWorker(const string &name, int age, double h=0):
7      Person(name, age), m_hour(h){}
8      void setHours(double h) { m_hour = h; }
9      double salary() { return m_hour * ms_payRate; }
10 };
11 double PartTimeWorker::ms_payRate = 7.53; //静态成员初始化
```

例 9.1 中定义派生类 Student：

```
1  class Student : public Person { //学生类，公有继承Person
2  private:
3      Course m_course;              //课程信息
4  public:
5      Student(const string &name, int age, const Course &c):
6      Person(name, age), m_course(c) {}
7      Course& course() { return m_course; }
8  };
```

提示：使用关键字 `final` 防止被继承

可以利用 C++11 提供的关键字 final 来阻止继承的发生：

```
class NoDerived final {};      //NoDerived 不能作为基类被继承
```

如果我们想让例 9.1 中派生类 Student 和 PartTimeWorker 不再被任何类继承，我们应该如何做？

三类访问限定声明

a. 该类中的函数　b. 派生类中的函数　c. 其友元函数　d. 该类的对象

- `public`：可以被 a、b、c 和 d 访问。
- `protected`：可以被 a、b 和 c 访问。
- `private`: 可以被 a 和 c 访问。

下面代码正确吗?

```
1  class Base {
2  private:
3      int m_pri;          //private成员
4  protected:
5      int m_pro;          //protected成员
6  public:
7      int m_pub;          //public成员
8  };
9  class PubDerv : public Base {
10     void foo() {
11         m_pri = 10;     //错误: 不能访问Base类私有成员
12         m_pro = 1;      //正确: 可以访问Base类受保护成员
13     }
14 };
15 void test() {
16     Base b;
17     b.m_pro = 10; }     //错误: 不能访问Base类受保护成员
```

三类继承方式

- `public` 继承: 基类的 protected 和 public 属性在其派生类中保持不变。
- `protected` 继承: 基类的 protected 和 public 属性在派生类中变为 protected。
- `private` 继承: 基类的 protected 和 public 属性在派生类中变为 private。

以上三种继承，基类中的 private 属性在其派生类中均保持不变。

提示：公有继承是主流

由于私有继承和受保护继承均具有局限性，所以公有继承是主流的继承方式。

下面代码正确吗?

```
1  class PriDerv : private Base { //私有继承不影响派生类成员对
                                  基类的访问
2      void foo() {
3          m_pro = 1;     //正确: 可以访问Base类受保护成员
4          m_pub = 1;     //正确: 可以访问Base类公有成员
5      }
6  };
7  void test() {
8      PubDerv d1;
9      PriDerv d2;
10     d1.m_pub = 10;      //正确: m_pub在PubDerv中是公有的
11     d2.m_pub = 1;       //错误: m_pub在PubDerv中是私有的
12 }
```

使用 using 声明

通过使用 using 声明，可以改变派生类中基类成员的访问权限：

```
1  class PubDerv : public Base {
2  public:
3      using base::m_pro;        //声明为公有的
4  };
5  void test() {
6      PubDerv d;
7      d.m_pro;                  //正确
8  }
```

注意：

派生类只能为它可以访问的名字提供 using 声明。

命名冲突

如果派生类成员的名字和基类的成员名字相同，那么定义在派生类（内层作用域）的名字将会屏蔽掉基类（外层作用域）的名字：

```
1  class Base {
2  protected:
3      int m_data;
4  public:
5      void foo(int) { /*...*/ }
6  };
7  class Derived : public Base {
8  protected:
9      int m_data;                          //基类m_data被隐藏
10 public:
11     int foo() {                          //基类foo成员被隐藏
12         return m_data;                   //返回Derived::m_data
13     }
14 };
```

命名冲突

如果在派生类里面需要访问基类的同名成员，则可以使用基类的作用域运算符：

```
1  class Derived : public Base {
2      /*...*/
3      int foo() { return Base::m_data; } //返回Base中的m_data
4  };
```

如果我们想调用基类中的 foo 函数，我们应该如何做？

派生类到基类的转换

一个派生类不仅包含自己定义的（非静态）成员，而且还包含其从基类继承的成员。因此，可以将派生类对象当成基类对象使用，也就是说可以将基类的指针或引用与派生类对象绑定，例如：

```
1  PartTimeWorker w("Kevin", 21);
2  Person p, *ptr;
3  ptr = &w;                    //基类指针ptr指向派生类对象w
4  Person &p2 = w;              //基类引用绑定到派生类对象w
5  p = w;                       //派生类对象赋值给基类对象
```

派生类到基类的转换

虽然派生类可以自动转换为基类的引用或指针，但没有从基类到派生类的自动转换。这是显而易见的，因为基类对象不能提供派生类对象新定义的部分，例如：

```
1  PartTimeWorker *w2 = &p;          //错误：不能将基类转换为派生类
2  w = p;                            //错误：不能将基类转换为派生类
```

用派生类对象来创建一个基类对象：

```
1  PartTimeWorker w("Kevin", 21);    //派生类对象
2  Person p(w);                      //利用派生类对象构造基类对象
```

如果派生类以私有方式或受保护的方式继承基类，那么派生类将不能自动转换为基类类型，例如：

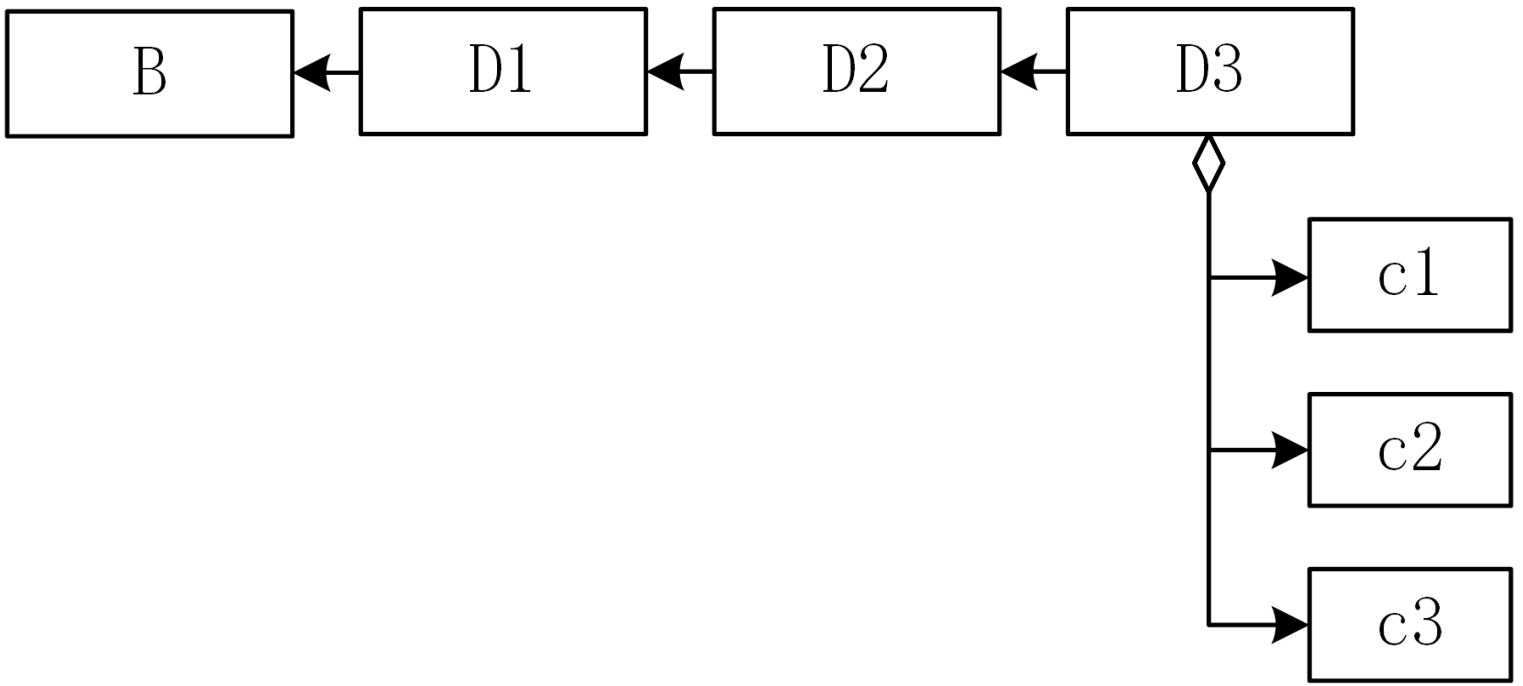
```
1  PriDerv d;                        //priDerv私有继承Base
2  Base b(d);                        //错误：PriDerv不能转换为Base
```

提示：从派生类到基类的转换原则

理解从派生类到基类的隐式自动转换需要明白三点：

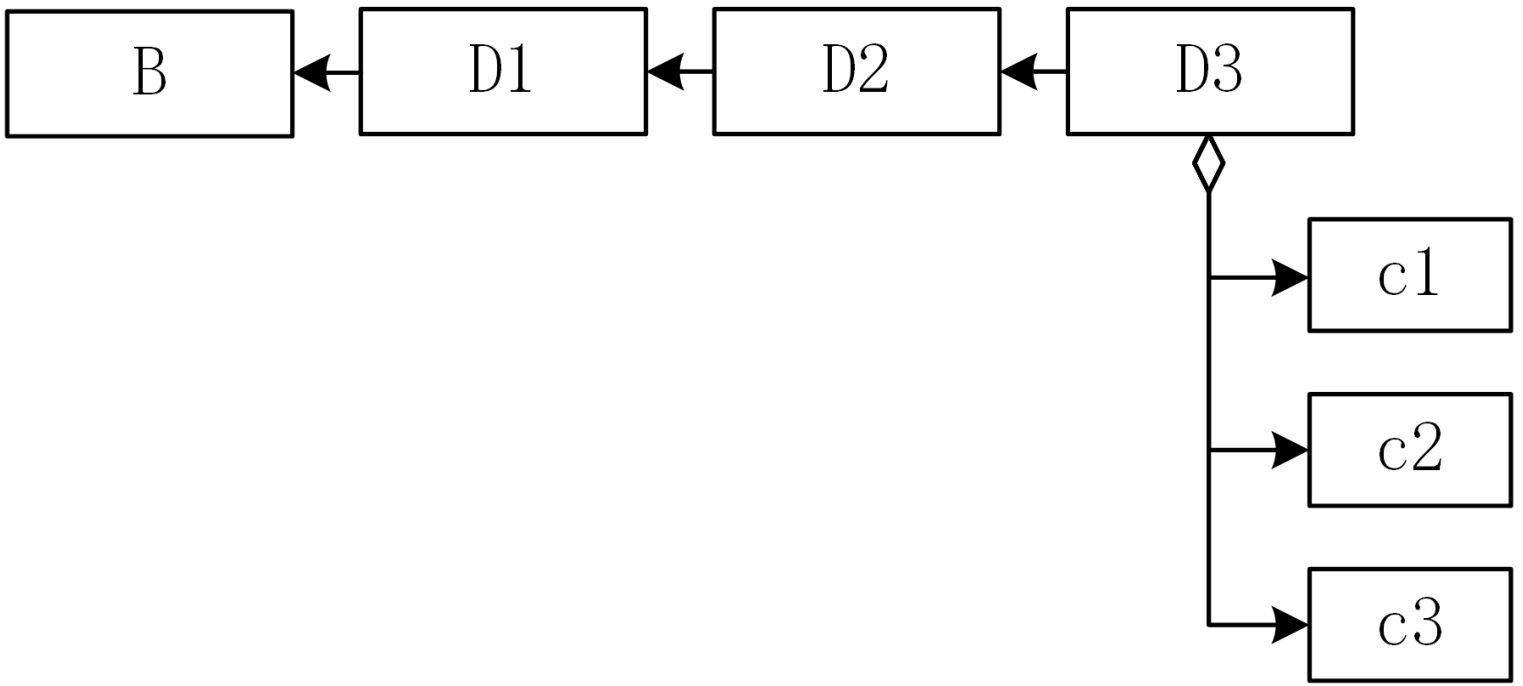
- 这种转换只限于指针或引用类型;
- 转换的前提是公有继承;
- 没有从基类到派生类的隐式自动转换。

9.2 构造、拷贝控制与继承



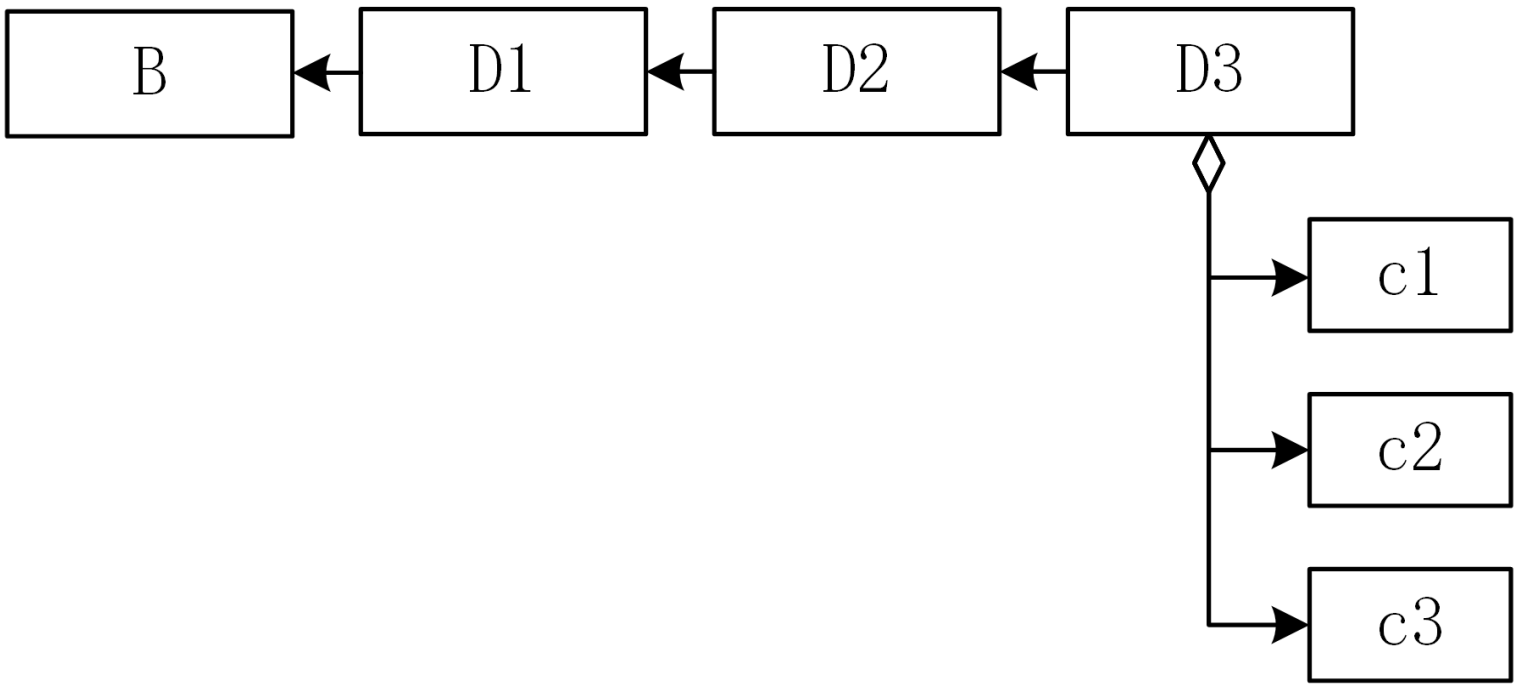
构造顺序:
析构顺序:

9.2 构造、拷贝控制与继承



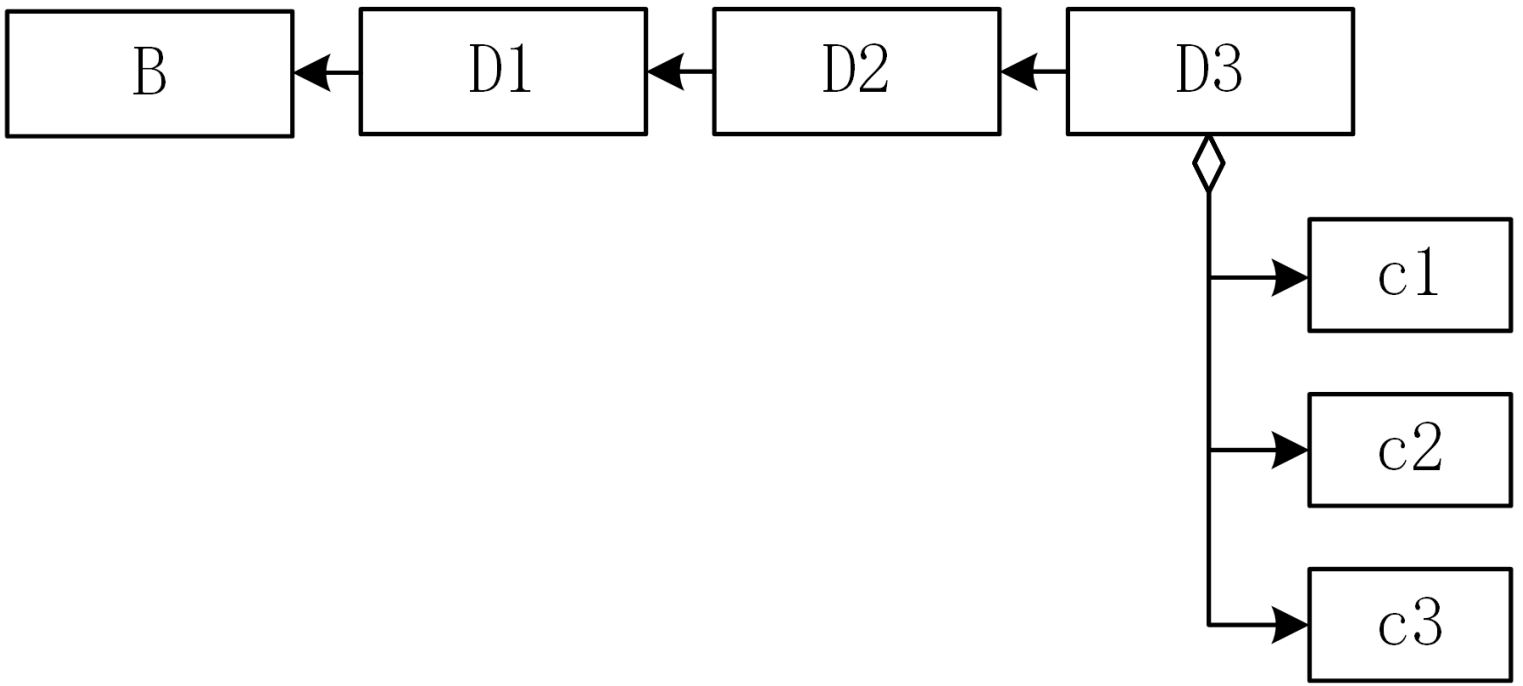
构造顺序：B
析构顺序：

9.2 构造、拷贝控制与继承



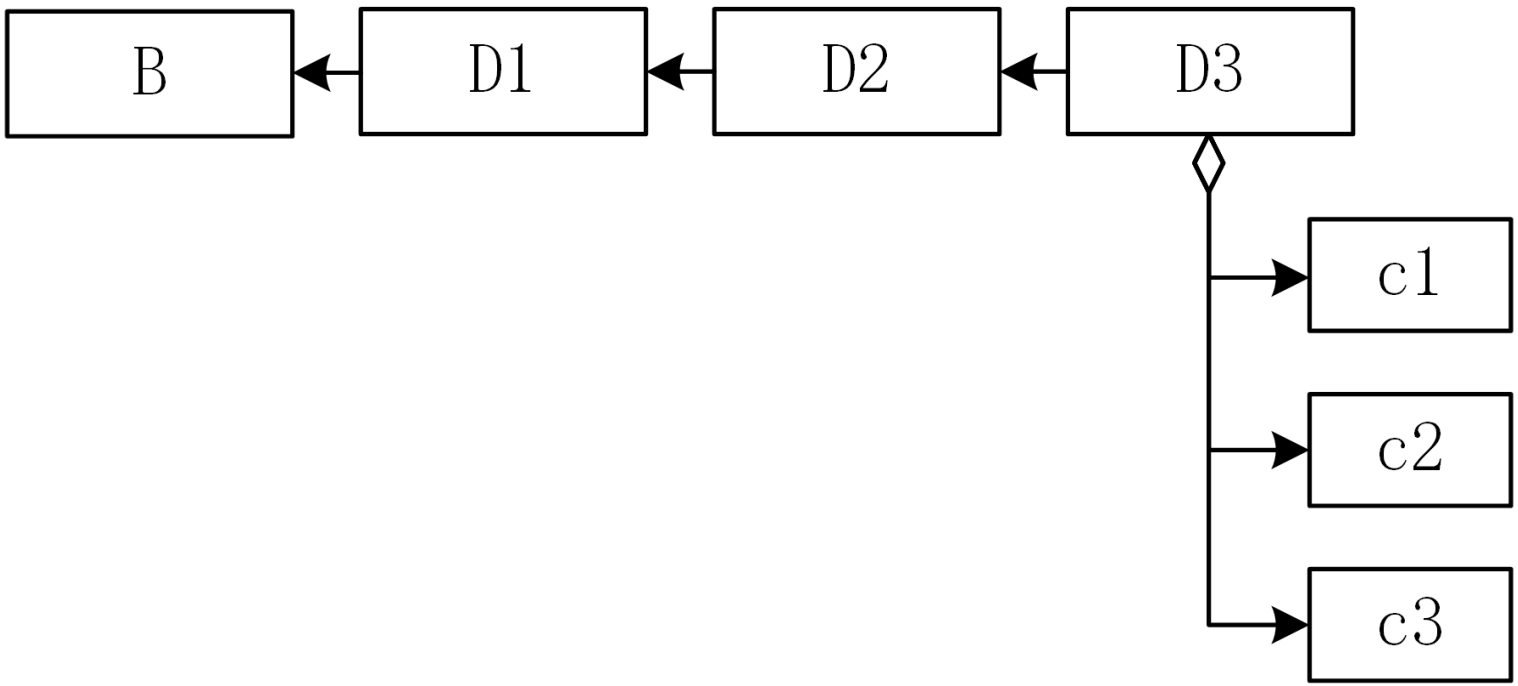
构造顺序：B D1
析构顺序：

9.2 构造、拷贝控制与继承



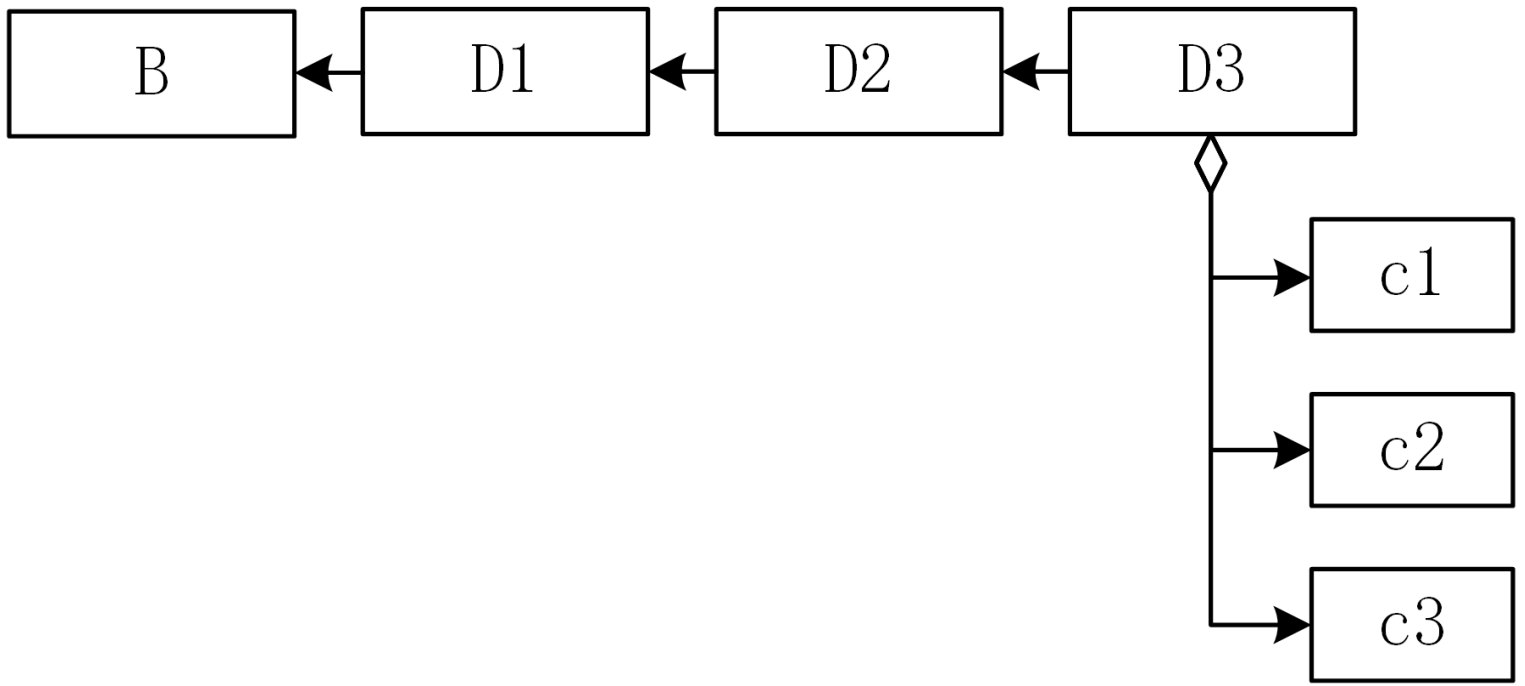
构造顺序：B D1 D2
析构顺序：

9.2 构造、拷贝控制与继承



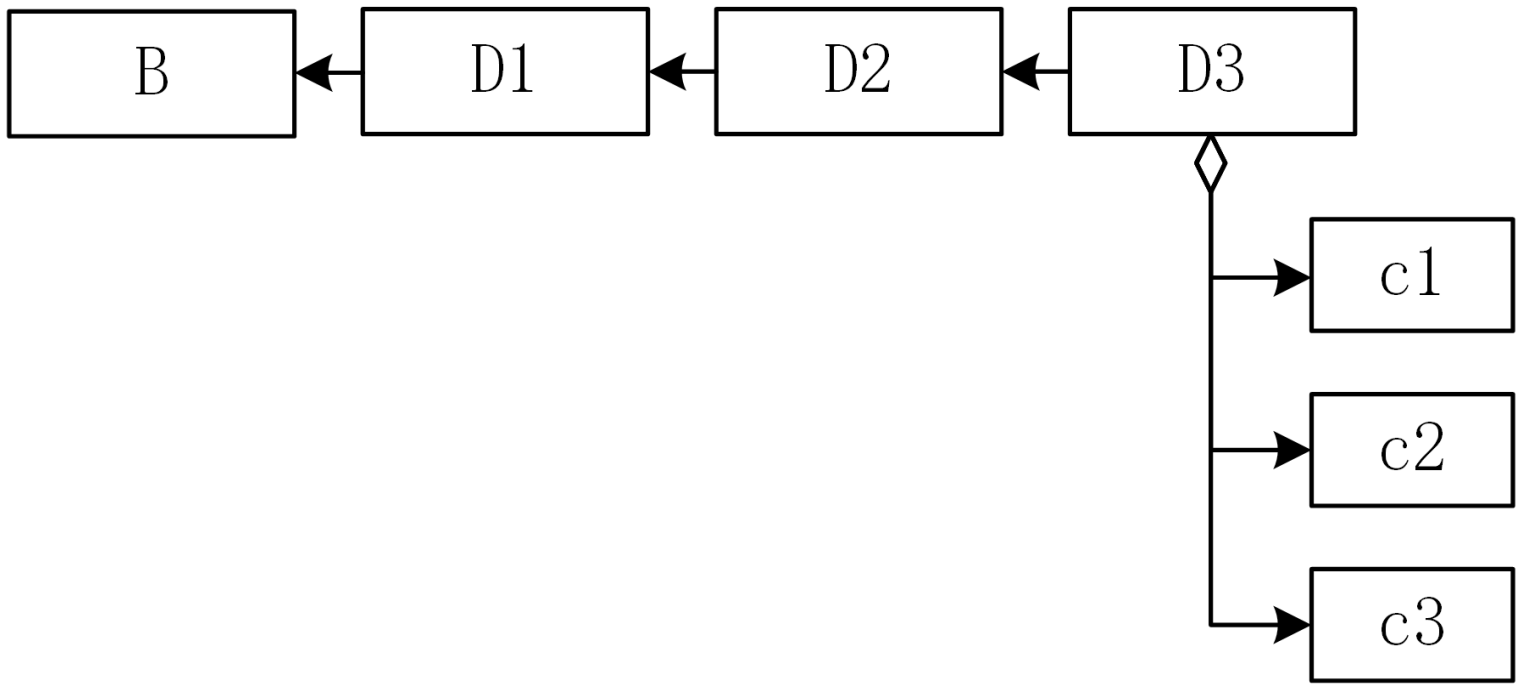
构造顺序：B D1 D2 D3
析构顺序：

9.2 构造、拷贝控制与继承



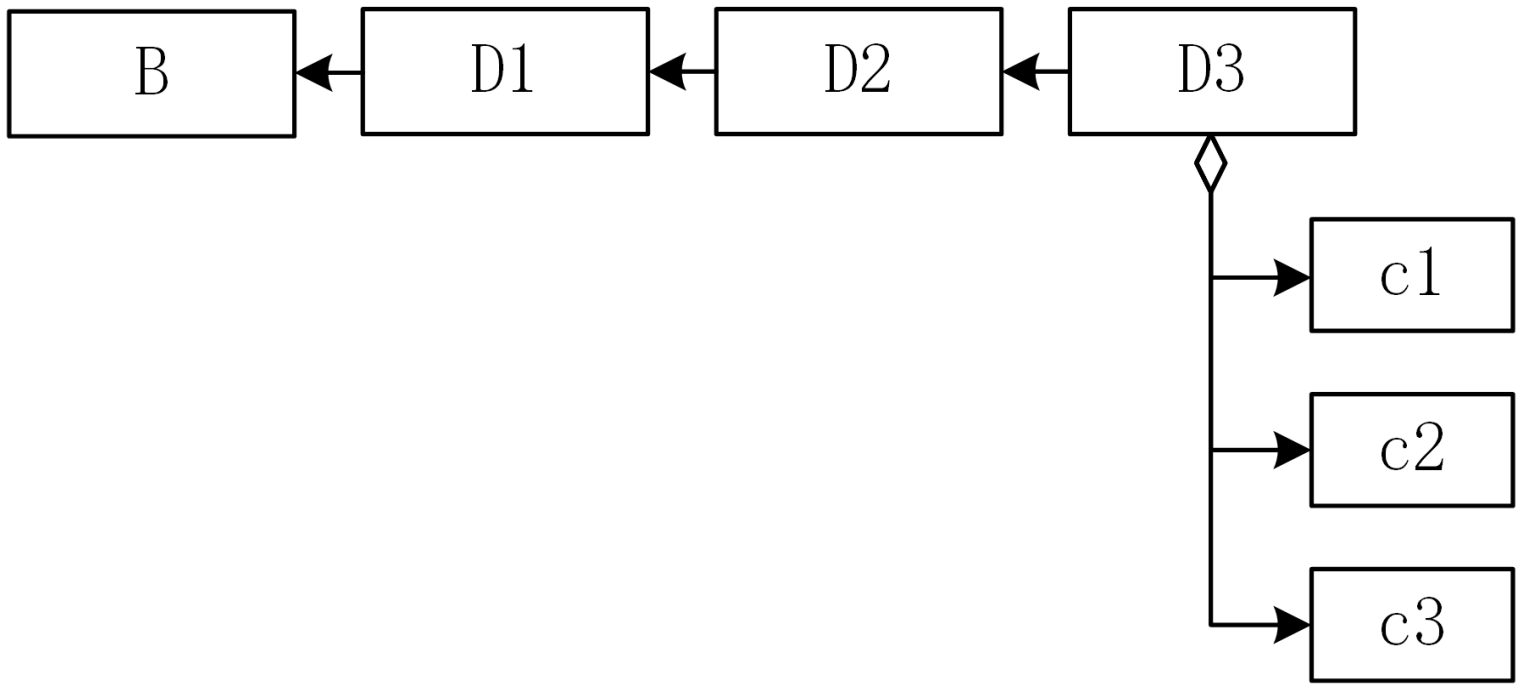
构造顺序：B D1 D2 D3(c1
析构顺序：

9.2 构造、拷贝控制与继承



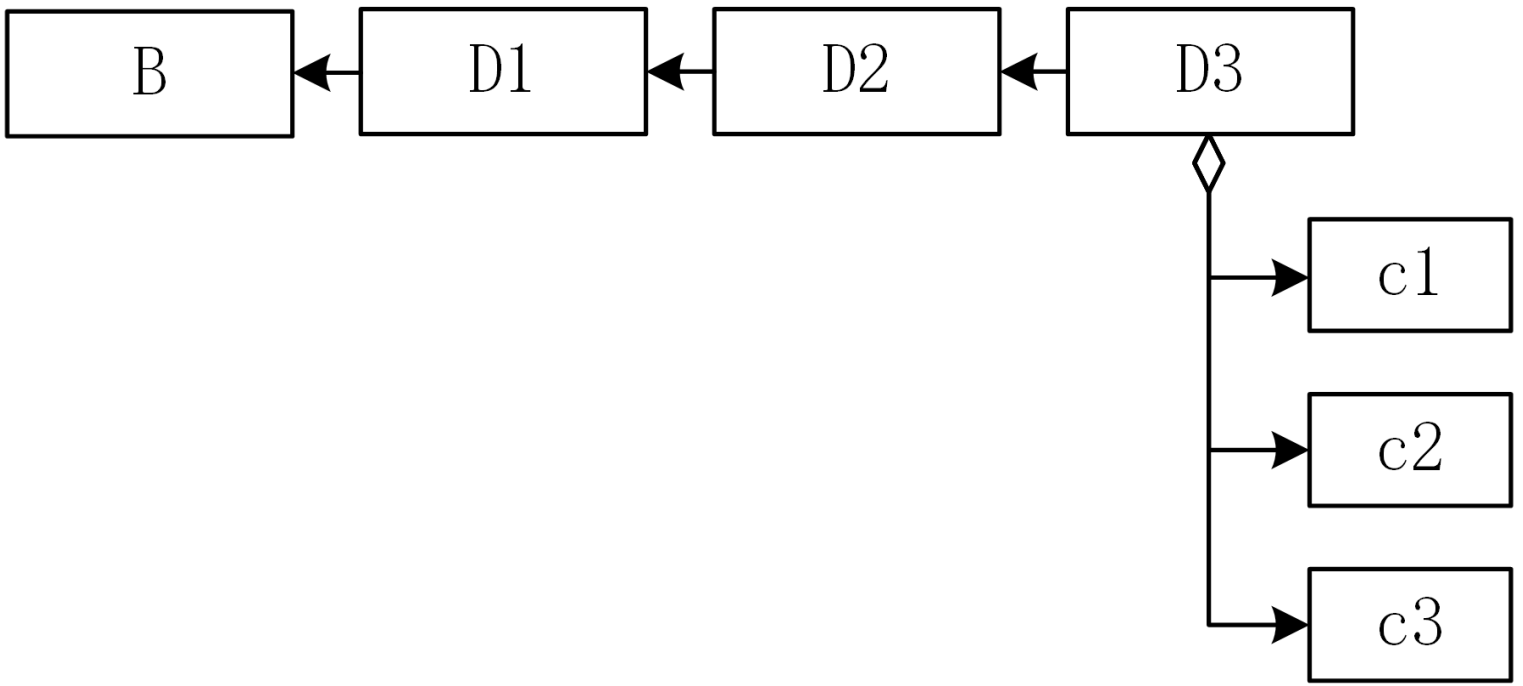
构造顺序：B D1 D2 D3(c1 c2
析构顺序：

9.2 构造、拷贝控制与继承



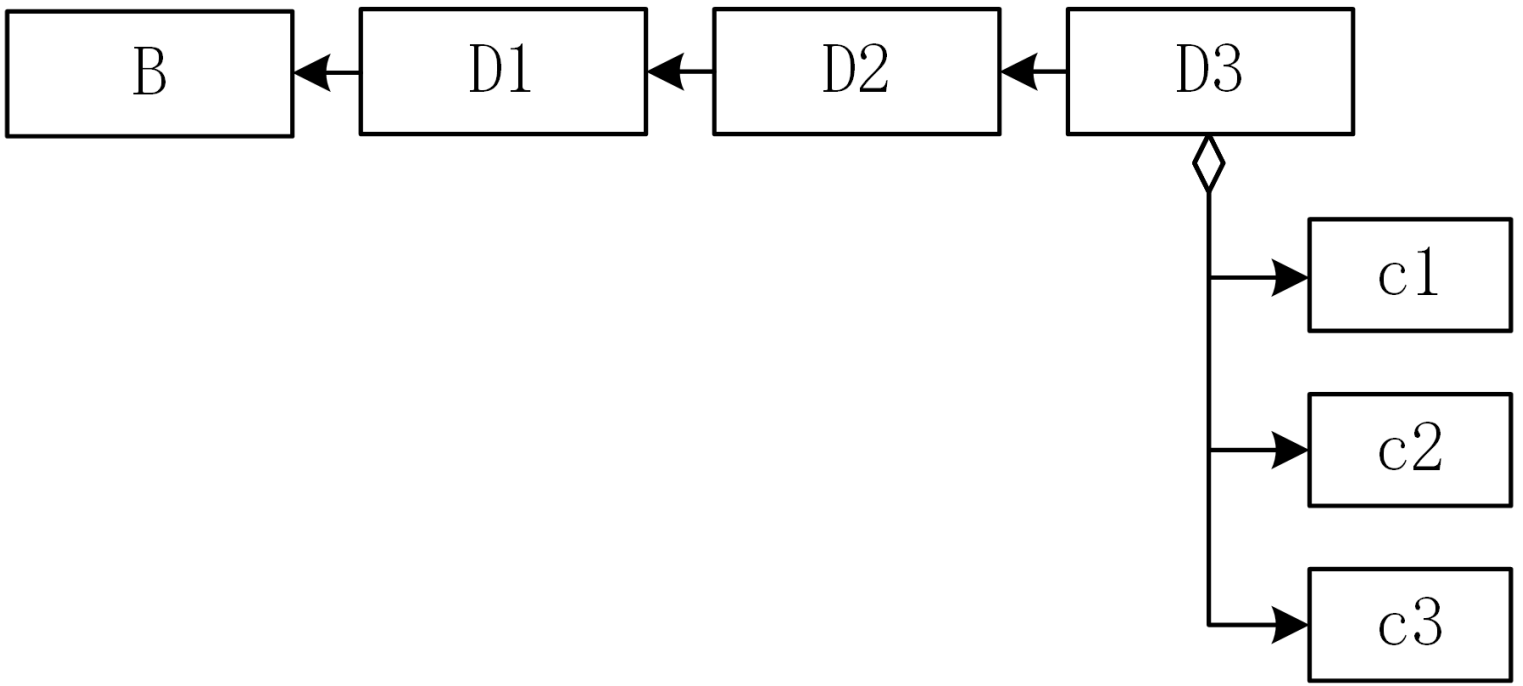
构造顺序：B D1 D2 D3(c1 c2 c3)
析构顺序：

9.2 构造、拷贝控制与继承



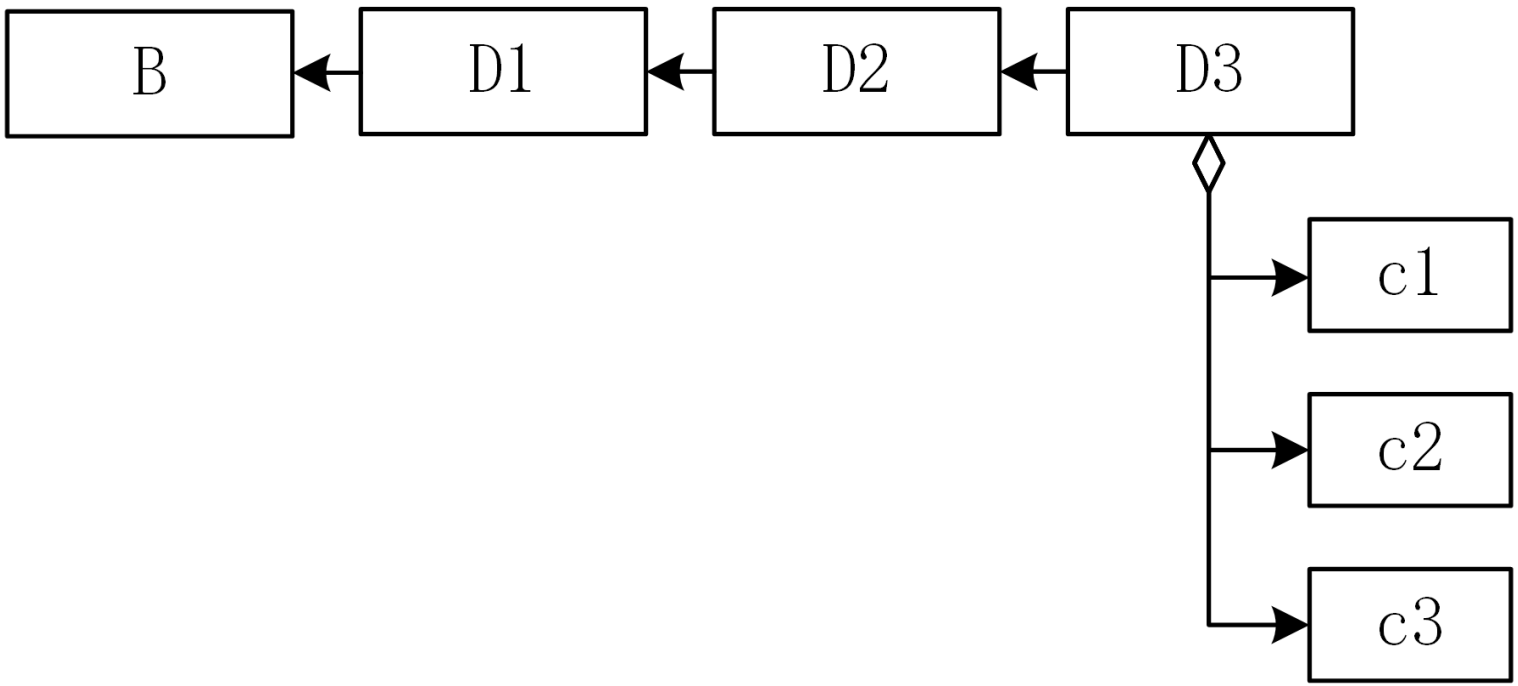
构造顺序：B D1 D2 D3(c1 c2 c3)
析构顺序：D3

9.2 构造、拷贝控制与继承



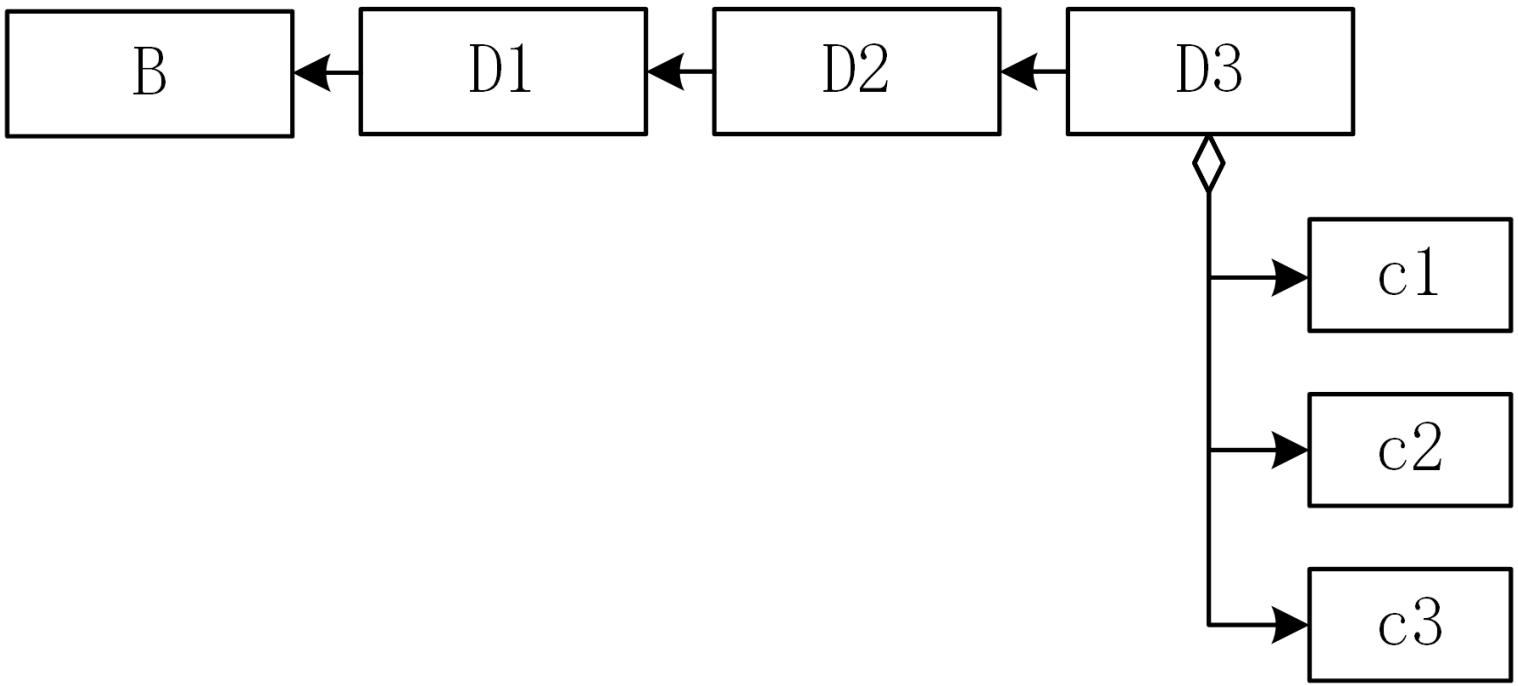
构造顺序：B D1 D2 D3(c1 c2 c3)
析构顺序：D3(c3

9.2 构造、拷贝控制与继承



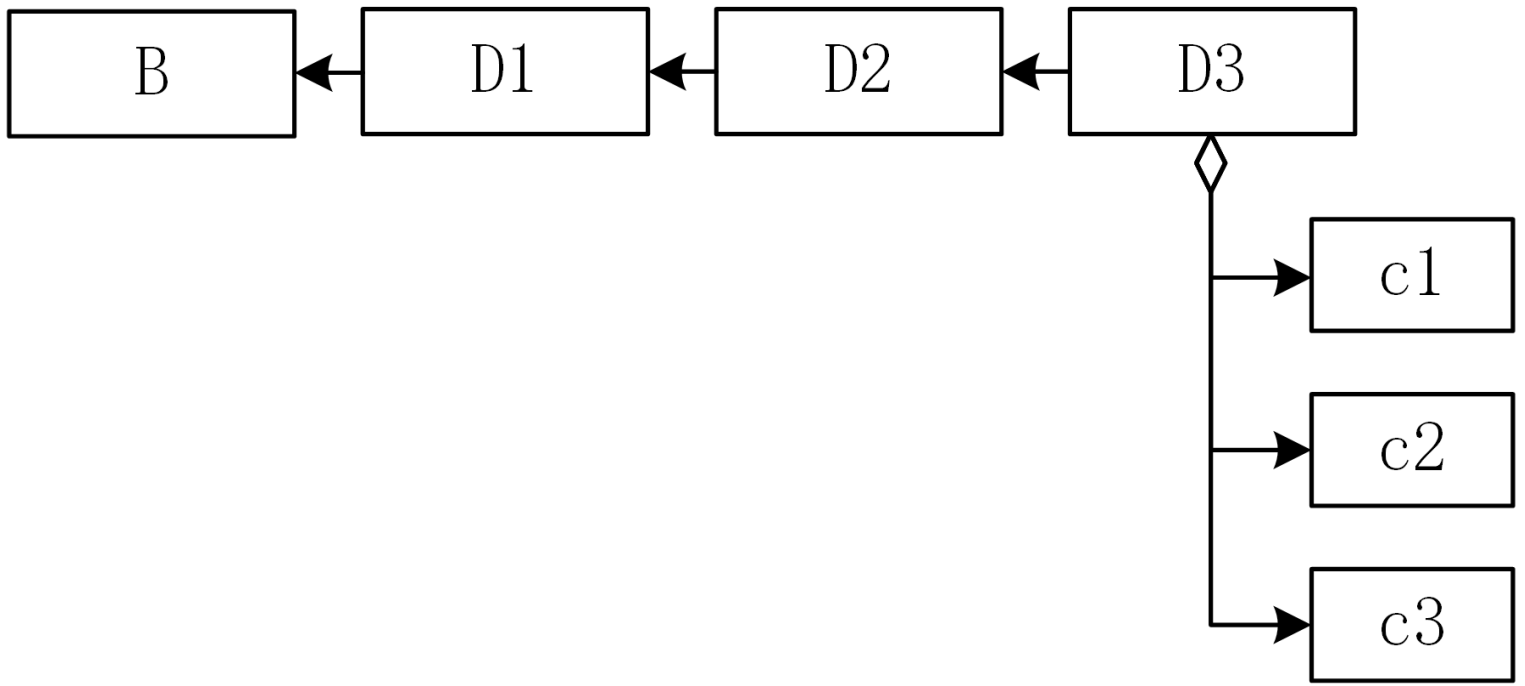
构造顺序：B D1 D2 D3(c1 c2 c3)
析构顺序：D3(c3 c2

9.2 构造、拷贝控制与继承



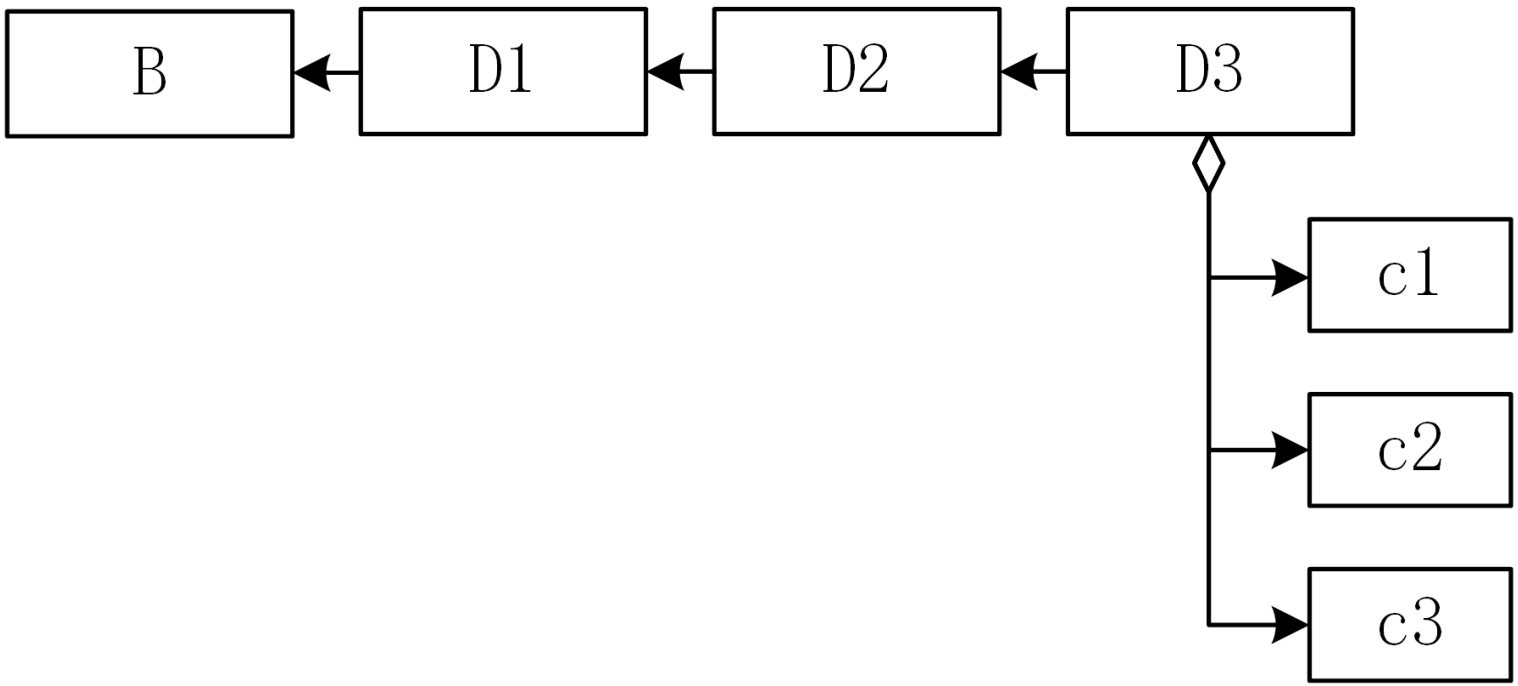
构造顺序：B D1 D2 D3(c1 c2 c3)
析构顺序：D3(c3 c2 c1)

9.2 构造、拷贝控制与继承



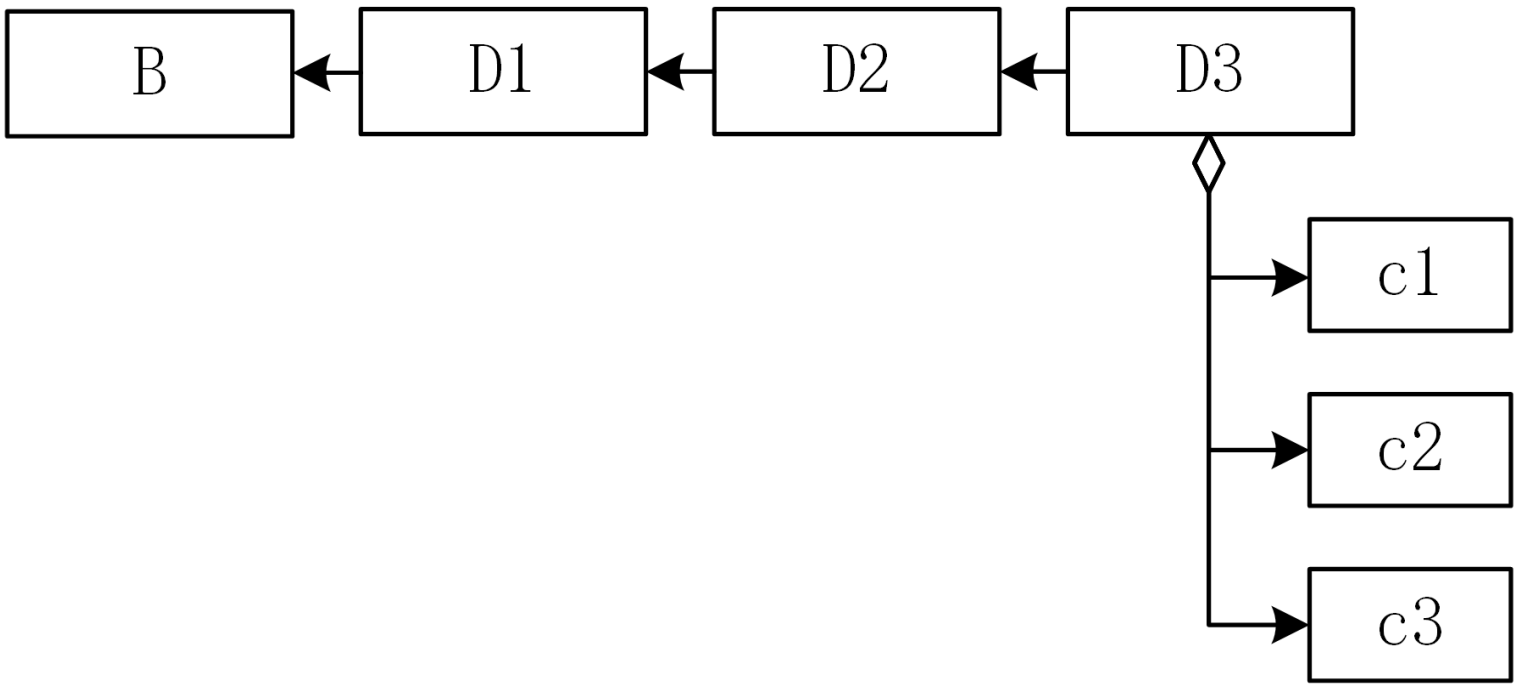
构造顺序：B D1 D2 D3(c1 c2 c3)
析构顺序：D3(c3 c2 c1) D2

9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序：B D1 D2 D3(c1 c2 c3)
析构顺序：D3(c3 c2 c1) D2 D1

9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序：B D1 D2 D3(c1 c2 c3)
析构顺序：D3(c3 c2 c1) D2 D1 B

派生类 Student 对象的构造

以上述 Student 类为例:

```
1  Student::Student(const string &name,int age,const Course &c):
2      Person(name, age),/*初始化基类成员*/
3      m_course(c)/*初始化自有成员*/ {
4      cout<<"Constr of Student"<<endl;
5  }
```

Student 类中成员 m_course 以复制构造的方式初始化。如下:

```
1  Course::Course(const Course &rhs): m_name(rhs.name),
2      m_score(rhs.m_score) {
3      cout<< "Copy constr of Course" <<endl;
4  }
```

派生类 Student 对象的构造

类似地，Person 类初始化如下：

```
1  Person::Person(const string &name = "",int age = 0):
2      m_name(name), m_age(age) {
3      cout<<"Constr of Person"<<endl;
4  }
```

当创建 Student 类对象时：

Student s("Kevin", 19, Course("Math"));

输出结果：

Constr of Person
Copy constr of Course
Constr of Student

提示：存在继承关系的类的成员初始化

在派生类对象构造过程中，每个类仅负责自己的成员的初始化。

析构与继承

类似于构造函数，Course、Student 和 Person 类的析构函数的函数如下：

```
1  Person::~Person() {
2      cout<< "Destr of Person" <<endl;
3  }
4  Student::~Student() {
5      cout<< "Destr of Student" <<endl;
6  }
7  Course::~Course() {
8      cout<< "Destr of Course" <<endl;
9  }
```

利用如下代码创建 Student 类对象：

```
Course c("Math");
{
    Student s("Kevin", 19, c);     //思考：输出结果会是怎样的?
}
```

析构与继承

输出结果：

```
Destr of Student
Destr of Course
Destr of Person
```

复制、移动与继承

一个派生类对象在复制或移动的时候，除复制或移动自有成员外，还要复制或移动基类部分的成员。因此，通常在复制或移动构造函数的初始化列表中调用基类的复制或移动构造函数。

```
1  class A{/*...*/};
2  class B : public A {
3      string m_d;
4  public:
5      B(const B &d):A(d) /* 复制A的成员 */,
6          m_d(d.m_d) /* 复制B的成员 */ {
7          /*...*/
8      }
9      B(B &&d):A(std::move(d)) /* 移动A的成员 */,
10         m_d(std::move(d.m_d)) /* 移动B的成员 */ {
11         /*...*/
12     }
13 };
```

赋值与继承

与复制和移动构造函数类似，必须在派生类的赋值运算符中显式调用基类的赋值运算符，才能正确地完成基类成员的赋值：

```
1  B& B::operator=(const B &d) {
2      if(this == &d) return *this;
3      A::operator=(d);                    //赋值A的成员
4      m_d = d.m_d;                        //赋值自身成员
5      return *this;
6  }
```

提示：派生类中使用基类的构造或赋值成员

在派生类对象的构造或赋值过程中，无论基类相应的成员是编译器合成的还是自定义的，派生类都可以直接使用它们。如果基类中合成的构造函数、复制构造函数或赋值运算符是删除的或者是不可以访问的，那么派生类中对应的合成成员也是删除的，原因是派生类不能执行基类成员的构造、复制和赋值。

Shape、Circle 和 Square

下面定义了三个类：Shape、Circle 和 Square。

```
 1  class Shape {
 2  protected:
 3      string m_name;
 4  public:
 5      Shape(const string &s = ""):m_name(s) { }
 6      virtual double area() const { return 0; } //此函数为虚函数
 7      const string& name() { return m_name; }
 8  };
 9  class Circle : public Shape {
10  private:
11      double m_rad;
12  public:
13      Circle(double r=0, const string &s = ""):Shape(s),
14          m_rad(r) { }
15      double area() const { return 3.1415926*m_rad*m_rad; }
16  };
```

Shape、Circle 和 Square

```
1  class Square : public Shape {
2  private:
3      double m_len;
4  public:
5      Square(double l=0, const string &s = ""):m_len(l) {}
6      double area() const { return m_len*m_len; }
7  };
```

静态类型和动态类型

静态类型指对象声明时的类型或表达式生成时的类型，在编译时就已经确定，例如：

```
1       class Base { }
2       Base *p;        //指针p的静态类型为Base
```

动态类型指指针或引用所绑定的对象的类型，仅在运行时可知，例如：

```
1       class Derived : public Base { };
2       Derived d;
3       Base *p = &d; //指针p的动态类型为Derived
```

动态绑定

基类指针 p 的静态类型为 Base，但它的动态类型为 Derived。如果一个对象既不是指针也不是引用，那么它的静态类型和动态类型一致，比如 d 的静态类型和动态类型都是 Derived。除需要重写基类的虚函数外，还必须用基类的指针或引用才能触发动态绑定，例如：

```
1       Shape sh, *p = &sh;     //p指向Shape类对象
2       Square sq(1.0);
3       cout<<p->area()<<endl; //打印输出0
4       p = &sq;                //将p绑定到sq
5       cout<<p->area()<<endl; //打印输出1.0
```

动态绑定

同样，可以利用基类的引用实现动态绑定，例如：

```
1       bool operator>(const Shape &s1, const Shape &s2) {
2           return s1.area()>s2.area();
3       }
4       Shape *p = nullptr;
5       Square sq(2.0);
6       Circle ci(1.2);
7       if(sq>ci)          //调用重载的运算符>
8           p = &sq;
```

虚析构函数

通常情况下，基类的析构函数应该是虚函数，保证正确 delete 一个动态派生类对象，例如：

```
1   class Shape {
2   public:
3       virtual ~Shape() {
4           cout<<"Destr of Shape"<<endl;
5       }
6   };
7   class Circle : public Shape {
8   public:
9       ~Circle() {
10          cout<<"Destr of Circle"<<endl;
11      }
12  };
```

虚析构函数

运行如下代码：

```
1       Shape *p = new Circle();
2       delete p;
```

由于 Shape 类的析构函数为虚函数，因此在执行 delete 操作时，将会执行 p 的动态类型的析构函数，即派生类 Circle 的析构函数，然后再执行基类 Shape 的析构函数，从而保证 p 指向的动态 Circle 类对象能够正确释放内存。上面代码执行 delete 操作将输出：

Destr of Circle
Destr of Shape

如果基类析构函数为非虚函数，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。

提示：虚析构函数将阻止移动运算的合成

基类中的虚析构函数将阻止编译器合成移动操作，通过 =default 形式使用合成的析构函数也会产生同样的影响。

9.3 虚函数与多态性—动态绑定

提示：虚析构函数将阻止移动运算的合成

基类中的虚析构函数将阻止编译器合成移动操作，通过 =default 形式使用合成的析构函数也会产生同样的影响。

注意

在使用虚函数时：

提示：虚析构函数将阻止移动运算的合成

基类中的虚析构函数将阻止编译器合成移动操作，通过 =default 形式使用合成的析构函数也会产生同样的影响。

注意

在使用虚函数时：

- 动态绑定必须通过基类指针或引用绑定到派生类对象才能触发。

提示：虚析构函数将阻止移动运算的合成

基类中的虚析构函数将阻止编译器合成移动操作，通过 =default 形式使用合成的析构函数也会产生同样的影响。

注意

在使用虚函数时：

- 动态绑定必须通过基类指针或引用绑定到派生类对象才能触发。
- 若基类的某个函数被声明为虚函数，则派生类中对应的重写版本自动为虚函数，可不必进行 virtual 声明。

提示：虚析构函数将阻止移动运算的合成

基类中的虚析构函数将阻止编译器合成移动操作，通过 =default 形式使用合成的析构函数也会产生同样的影响。

注意

在使用虚函数时：

- 动态绑定必须通过基类指针或引用绑定到派生类对象才能触发。
- 若基类的某个函数被声明为虚函数，则派生类中对应的重写版本自动为虚函数，可不必进行 virtual 声明。
- 内联成员、静态成员和模板成员均不能声明为虚函数，因为这些成员的行为必须在编译时确定，不能实现动态绑定。

9.3 虚函数与多态性—动态绑定

提示：虚析构函数将阻止移动运算的合成

基类中的虚析构函数将阻止编译器合成移动操作，通过 =default 形式使用合成的析构函数也会产生同样的影响。

注意

在使用虚函数时：

- 动态绑定必须通过基类指针或引用绑定到派生类对象才能触发。
- 若基类的某个函数被声明为虚函数，则派生类中对应的重写版本自动为虚函数，可不必进行 virtual 声明。
- 内联成员、静态成员和模板成员均不能声明为虚函数，因为这些成员的行为必须在编译时确定，不能实现动态绑定。
- 动态绑定的实现是有代价的。每个派生类需要额外的空间保存虚函数的入口地址，函数的调用机制也是间接实现的，动态绑定的实现是以时间和空间为代价的，因此大量的虚函数会导致程序性能的下降。

提示：虚析构函数将阻止移动运算的合成

基类中的虚析构函数将阻止编译器合成移动操作，通过 =default 形式使用合成的析构函数也会产生同样的影响。

注意

在使用虚函数时：

- 动态绑定必须通过基类指针或引用绑定到派生类对象才能触发。
- 若基类的某个函数被声明为虚函数，则派生类中对应的重写版本自动为虚函数，可不必进行 virtual 声明。
- 内联成员、静态成员和模板成员均不能声明为虚函数，因为这些成员的行为必须在编译时确定，不能实现动态绑定。
- 动态绑定的实现是有代价的。每个派生类需要额外的空间保存虚函数的入口地址，函数的调用机制也是间接实现的，动态绑定的实现是以时间和空间为代价的，因此大量的虚函数会导致程序性能的下降。
- 派生类版本的声明必须与基类版本的声明完全一致，包括函数名、形参列表和返回值类型。

9.3 虚函数与多态性—动态绑定

```
class Base {
public:
    virtual Base* foo() { cout << "Base" << endl;
     return this; }
};
class Derived : public Base {
public:
    Derived* foo() { cout << "Derived" << endl;
     return this; }
};
void test() {
    Derived d;
    Base *p = &d;
    p->foo();
    d.foo();
}
```

调用 test() 函数输出:

Derived

Derived

例外

基类版本返回基类指针或引用，派生类版本可以返回派生类指针或引用

9.3 虚函数与多态性—动态绑定

```
class Base{
public:
    virtual void fun(int i=0) {
        cout << "Base:" << i << endl; }
};
class Derived : public Base{
public:
    void fun(int i=1) {
        cout << "Derived:" << i << endl; }
};
void test(){
    Derived d;
    Base *p = &d;
    p->fun();
    d.fun();
}
```

注意

如果参数具有默认值，则各个版本中对应形参的默认值必须相同

调用 test() 函数输出:

```
Derived:0
Derived:1
```

final 和 override 说明符

C++11 引入了关键字 override 用来显式说明派生类的函数要覆盖基类的虚函数。类似的，可以使用关键字 final 阻止派生类覆盖基类版本的虚函数。

```
1  struct B {
2      virtual void fun1(int) { }
3      virtual void fun2() { }
4      void fun3() { }
5  };
6  struct D1 : public B {
7      void fun1() override { } //错误: 基类没有不带参数的fun1函数
8      void fun2() final { }    //D1::fun2为最终版本
9      void fun3() override { } //错误: 基类没有可覆盖的函数
10 };
11 struct D2 : public D1 {
12     void fun2() { }          //错误: 不允许覆盖基类D1中的fun2函数
13 };
```

纯虚函数

上面定义的 Shape 类，实际上并不代表具体的几何形状类，因此它的成员函数 area 的定义是没有意义的，Shape 类只是几何形状的一个抽象，因此也不希望用户创建一个 Shape 类对象。C++ 允许将这样的虚函数声明为纯虚（pure virtual）函数：

```
1    class Shape {
2    public:
3        virtual double area() const = 0; //纯虚函数
4        /*...*/
5    }
6    Shape sh;                  //错误：不能创建抽象类的实例
```

提示：公有继承方式下的基类成员函数的继承与覆盖

- 不要重新定义基类非虚函数，所有作用于基类的非虚操作都适用于它的派生类。
- 如果需要重新定义基类函数，则该函数应声明为虚函数。
- 派生类继承基类非虚函数的接口和实现、虚函数的接口和默认实现，以及纯虚函数的接口。

一般情况下，对纯虚函数不需要定义，但可以为纯虚函数提供定义，而且必须放在类外。

Cat 和 Dog

```
1   class Cat {
2   protected:
3       string m_name;
4   public:
5       void meow() {   //喵喵叫
6           cout<<"meowing"<<endl;
7       }
8   };
9   class Dog {
10  protected:
11      string m_name;
12  public:
13      void bark() {   //汪汪叫
14          cout<<"barking"<<endl;
15      }
16  };
```

IS-A 设计

改写 Dog 类如下：

```
1       class Dog : public Cat {
2       public:
3           void bark();
4       };
5       Dog dog;          //创建一个Dog类对象
6       dog.bark();       //调用bark函数
```

虽然 dog 能汪汪叫，但是它也会喵喵叫，因为 Dog 类继承了 Cat 类的 meow 函数，显然这是不符合事实的，Dog 不是一种 Cat，显然不是属于关系。

HAS-A 设计

改写 Dog 类如下：

```
1       class Dog {
2           Cat m_cat;
3       public:
4           void bark();
5       };
```

在这种设计中，虽然 dog 不能喵喵叫了（不能直接调用 meow 函数），但这种设计不符合自然逻辑，Dog 和 Cat 类显然不是组合关系。

抽象共有属性设计

把 Cat 和 Dog 共有的属性抽象出来，包括名字和发声行为，从而形成一个新的公共基类 Mammal：

```
1   class Mammal {
2   protected:
3       string m_name;
4   public:
5       virtual void sounding() = 0;
6   };
7   class Cat : public Mammal {
8   protected:
9       void meow();
10  public:
11      void sounding() override { meow(); }
12  };
```

抽象共有属性设计

```
1       class Dog : public Mammal {
2       protected:
3           void bark();
4       public:
5           void sounding() override { bark(); }
6       };
```

在上面的设计中，既统一了接口，又实现了不同的行为。这种设计也符合事实和自然逻辑。下面的 dog 和 cat 也有了正常的行为：

```
Dog dog; Cat cat;
dog.sounding();      //dog 能正常的汪汪叫
cat.sounding();      //cat 能正常的喵喵叫
```

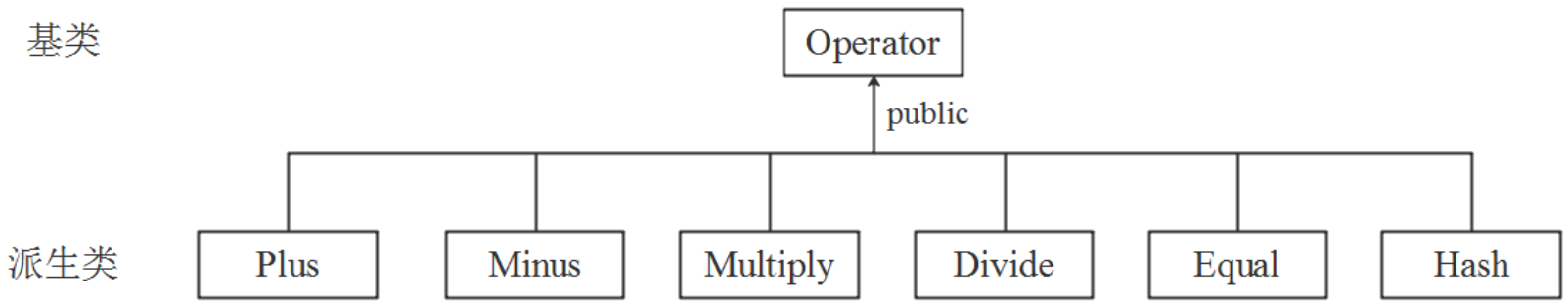
9.3 虚函数与多态性—再探计算器

思考:

在前面章节，利用链栈实现了一个简单的计算器程序。经过学习本章节后，如何利用 OOP 思想重新设计与实现计算机程序?

定义运算符基类

把每一种运算符抽象成一个类，再把运算符的共有属性抽象出来，形成一个公共基类 Operator。运算符继承关系如下：



定义运算符基类

基类 Operator 和它的派生类如下：

```
1  class Operator{
2  public:
3      Operator(char c, int numOprd, int pre) :
4          m_symbol(c), m_numOprand(numOprd), m_precedence(pre){}
5      char symbol() const { return m_symbol; }
6      int numOprand() const { return m_numOprand; }
7      int precedence() const { return m_precedence; };
8      virtual double get(double a, double b) const = 0;
9      virtual ~Operator() {}
10 protected:
11     const char m_symbol;   //符号
12     const int m_numOprand; //目数
13     const int m_precedence; //优先级
14 };
```

定义运算符基类

```
1  class Plus : public Operator{ //运算符 +
2  public:
3      Plus() :Operator('+', 2, 2) {}
4      double get(double a, double b) const { return a + b; }
5  };
6  class Minus :public Operator{ //运算符 -
7  public:
8      Minus() :Operator('-', 2, 2) {}
9      double get(double a, double b) const { return a - b; }
10 };
11 class Multiply :public Operator{ //运算符 *
12 public:
13     Multiply() :Operator('*', 2, 3) {}
14     double get(double a, double b) const { return a * b; }
15 };
```

定义运算符基类

```
1  class Divide :public Operator{ //运算符 /
2  public:
3      Divide() :Operator('/', 2, 3) {}
4      double get(double a, double b) const { return a / b; }
5  };
6  class Hash :public Operator{   //运算符 #
7  public:
8      Hash() :Operator('#', 1, 1) {} //函数get无实际意义，仅为语
                                        法正确
9      double get(double a, double b) const { return a; }
10 };
11 class Equal :public Operator{  //表达介绍符 =
12 public:
13     Equal() :Operator('=', 2, 0) {} //函数get无实际意义，仅为语
                                        法正确
14     double get(double a, double b) const { return a; }
15 };
```

定义计算器类

由于 unique_ptr 不支持复制操作，因此向前面章节定义的 Node 模板和 Stack 模板分别添加支持移动语义的构造函数和 push 函数：

```
template<typename T> // 含右值形参的移动构造函数
Node<T>::Node(T &&val) :m_value(std::move(val)) { }
template<typename T>
void Stack<T>::push(T &&val) { //含右值形参的push函数
    Node<T> *node = new Node<T>(std::move(val));
    node->m_next = m_top;
    m_top = node;
}
```

定义计算器类

Calculator 类的定义如下：

```
1  class Calculator {
2  private:
3      Stack<double> m_num;              //操作数栈
4      Stack<unique_ptr<Operator>> m_opr; //运算符数栈
5      void calculate();
6      //成员函数readNum和isNum与前面章节定义的相同
7  public:
8      Calculator(){ m_opr.push(make_unique<Hash>()); } //调用移
        动push函数
9      double doIt(const string &exp);
10 };
```

定义计算器类

```
1  void Calculator::calculate(){ //操作数出栈并进行相应计算
2      double a[2] = {0};
3      for (auto i = 0; i < m_opr.top()->numOprand(); ++i) {
4          a[i] = m_num.top();
5          m_num.pop();
6      }//调用绑定的函数对象进行表达式运算，并将计算结果压栈
7      m_num.push(m_opr.top()->get(a[1],a[0]));//注意操作数的顺序
8      m_opr.pop();
9  }
```

定义计算器类

```
1  double Calculator::doIt(const string & exp){
2      for (auto it = exp.begin(); it != exp.end();){
3          if (isNum(it)) //如果是操作数, 则将其压栈
4              m_num.push(readNum(it));
5          else{  //根据当前运算符创建相应的派生类对象
6              char o = *it++;
7              unique_ptr<Operator> oo; //定义基类指针
8              if (o == '+')
9                  oo = make_unique<Plus>();//与Plus对象绑定, 触发
                       移动语义
10             else if (o == '-')
11                 oo = make_unique<Minus>();//与Minus对象绑定
12             else if (o == '*')
13                 oo = make_unique<Multiply>();//与Multiply绑定
14             else if (o == '/')
15                 oo = make_unique<Divide>();//与Divide对象绑定
```

定义计算器类

```
            else if (o == '=')
                oo = make_unique<Equal>();//与Equal对象绑定
            while (oo->precedence()<=m_opr.top()->precedence())
             {
                if (m_opr.top()->symbol() == '#')
                    break;
                calculate(); //根据栈顶运算符，执行相应计算
            }
            if( oo->symbol() != '=')//除=以外，其它运算符入栈
                m_opr.push(std::move(oo));//将oo转换为右值，调用
                 移动push函数
        }
    }
    double result = m_num.top();
    m_num.pop();
    return result;
}
```

本章结束