

第 9 章 继承与多态

① 继承

- 定义基类
- 定义派生类
- 访问控制
- 类型转换

② 构造、拷贝控制与继承

- 派生类对象的构造
- 拷贝控制与继承

③ 虚函数与多态性

- 虚函数
- 动态绑定
- 抽象类
- 继承与组合
- 再探计算器

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。

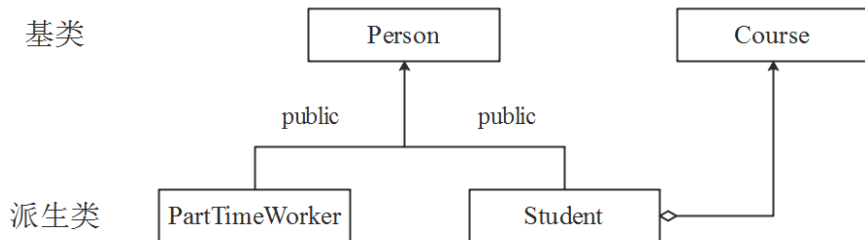
9.1 继承—定义基类和派生类

继承

基类：被继承的类；派生类：通过继承产生的新类

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。



9.1 继承—定义基类和派生类

例 9.1 中定义基类 Person:

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

9.1 继承—定义基类和派生类

例 9.1 中定义类 Course:

```
class Course {                //课程类
    string m_name;            //课程名
    int m_score;              //成绩
public:
    Course(const string &name = "", int score = 0):m_name(name), m_score(score) {}
    void setScore(int score) { m_score = score; }
    int score() const { return m_score; }
    const string& name() const { return m_name; }
};
```

9.1 继承—定义基类和派生类

语法

类名后面紧随一个冒号，后跟以逗号分隔的基类列表，其中每个基类名前面的访问限定符可以为 public、protected 或者 private

例 9.1 中定义派生类 PartTimeWorker:

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

9.1 继承—定义基类和派生类

例 9.1 中定义派生类 Student:

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


9.1 继承—定义基类和派生类

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。

9.1 继承—访问控制

下面代码正确吗？

```
class Base {  
private:  
    int m_pri;           //private成员  
protected:  
    int m_pro;           //protected成员  
public:  
    int m_pub;           //public成员  
};  
class PubDerv : public Base {  
    void foo() {  
        m_pri = 10;      //错误：不能访问Base类私有成员  
        m_pro = 1;       //正确：可以访问Base类受保护成员  
    }  
};  
void test() {  
    Base b;  
    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。

9.1 继承—访问控制

下面代码正确吗？

```
class PriDerv : private Base { //私有继承不影响派生类成员对 基类的访问
    void foo() {
        m_pro = 1;    //正确：可以访问Base类受保护成员
        m_pub = 1;    //正确：可以访问Base类公有成员
    }
};

void test() {
    PubDerv d1;
    PriDerv d2;
    d1.m_pub = 10;    //正确：m_pub在PubDerv中是公有的
    d2.m_pub = 1;     //错误：m_pub在PubDerv中是私有的
}
```

9.1 继承—访问控制

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：

```
class PubDerv : public Base {  
public:  
    using base::m_pro;      //声明为公有的  
};  
void test() {  
    PubDerv d;  
    d.m_pro;                 //正确  
}
```

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：

```
class Base {  
protected:  
    int m_data;  
public:  
    void foo(int) { /*...*/ }  
};  
class Derived : public Base {  
protected:  
    int m_data;           //基类m_data被隐藏  
public:  
    int foo() {           //基类foo成员被隐藏  
        return m_data;    //返回Derived::m_data  
    }  
};
```

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：

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



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：

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

9.1 继承—类型转换

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。这是因为基类对象不能提供派生类对象**新定义的部分**，例如：

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

```
PartTimeWorker w("Kevin", 21); //派生类对象
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：

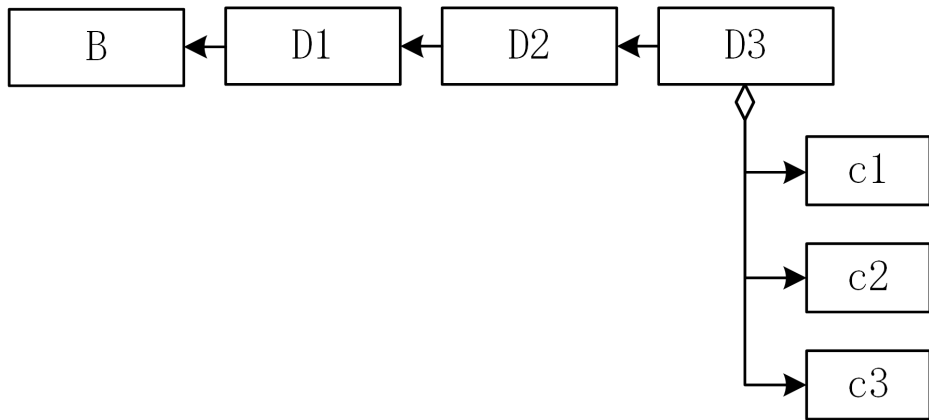
```
PriDerv d;                  //PriDerv私有继承Base
Base b(d);                  //错误：PriDerv不能转换为Base
```

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。

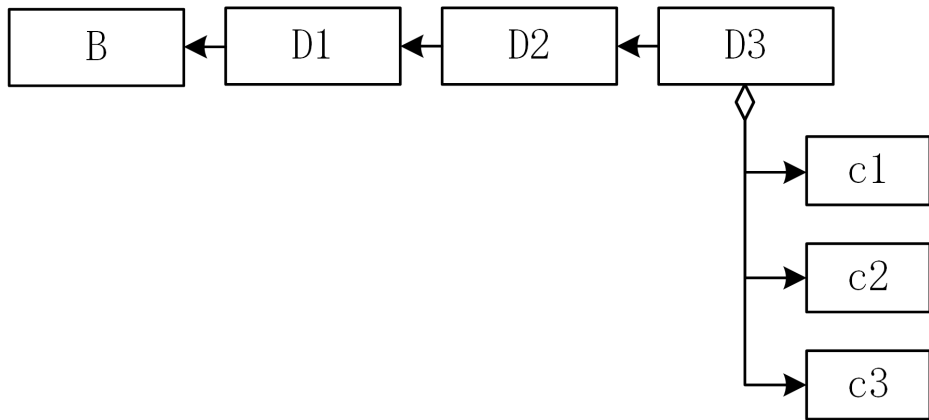
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序:

析构顺序:

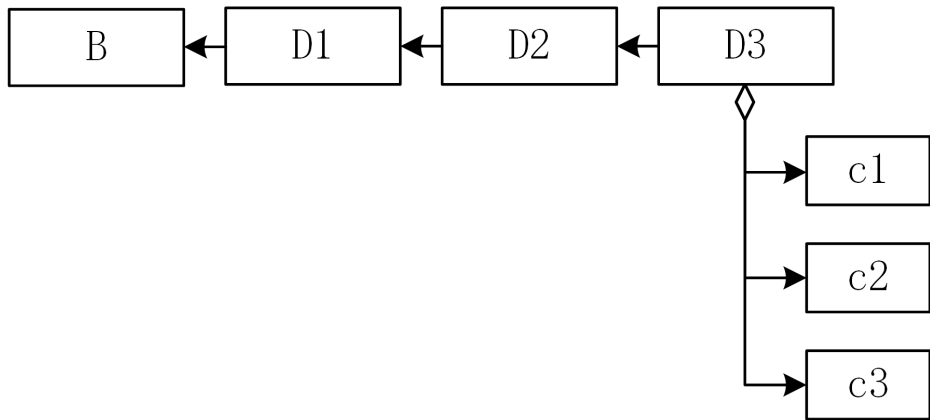
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序: B

析构顺序:

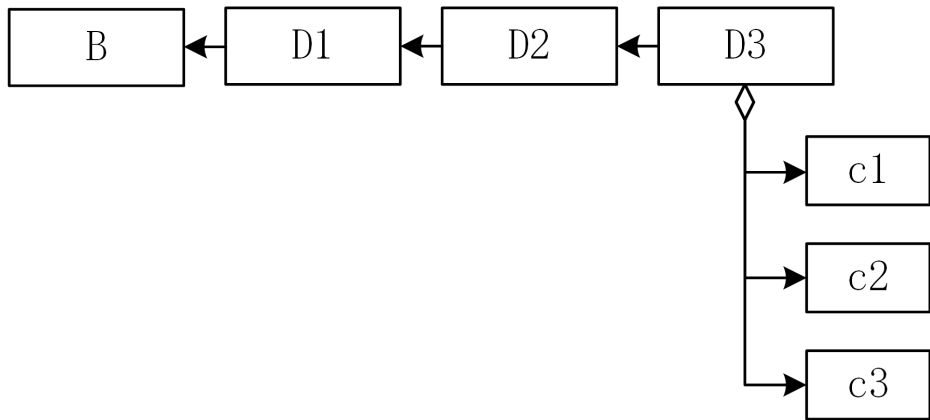
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序: B D1

析构顺序:

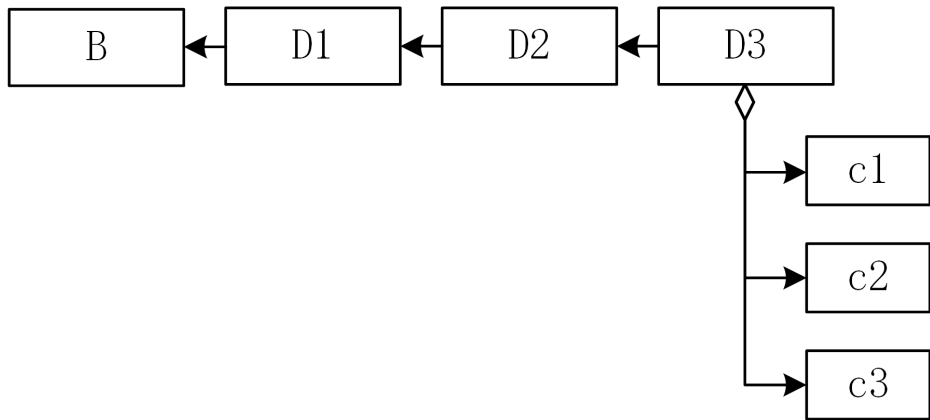
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序: B D1 D2

析构顺序:

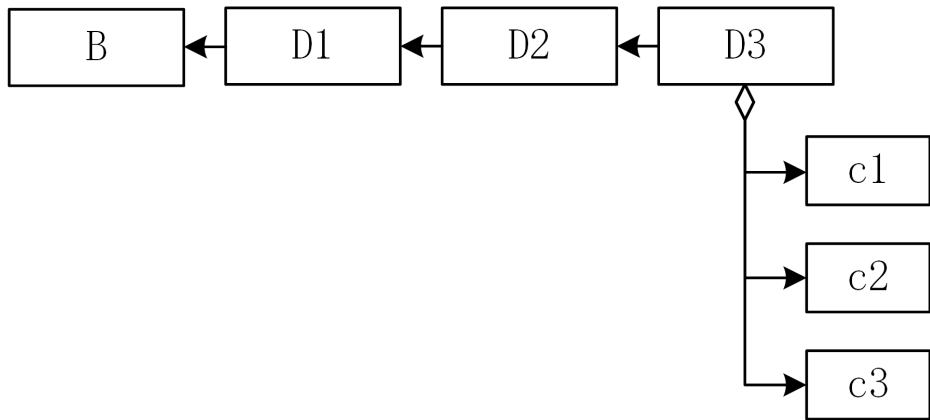
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序: B D1 D2 D3

析构顺序:

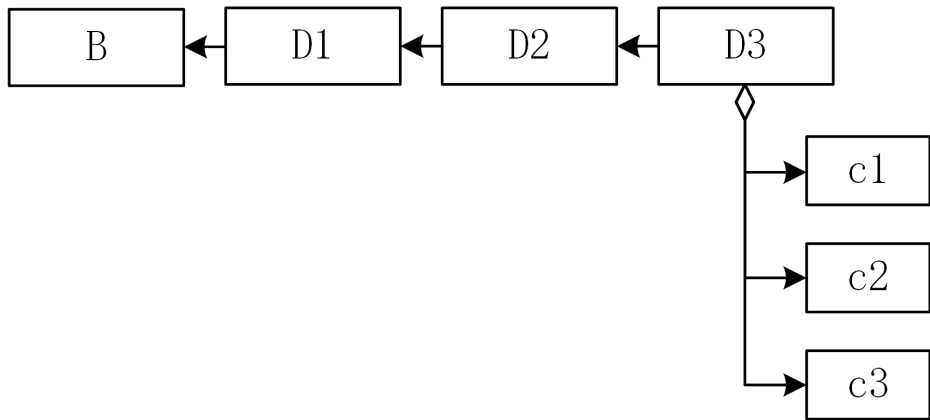
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序: B D1 D2 D3(c1

析构顺序:

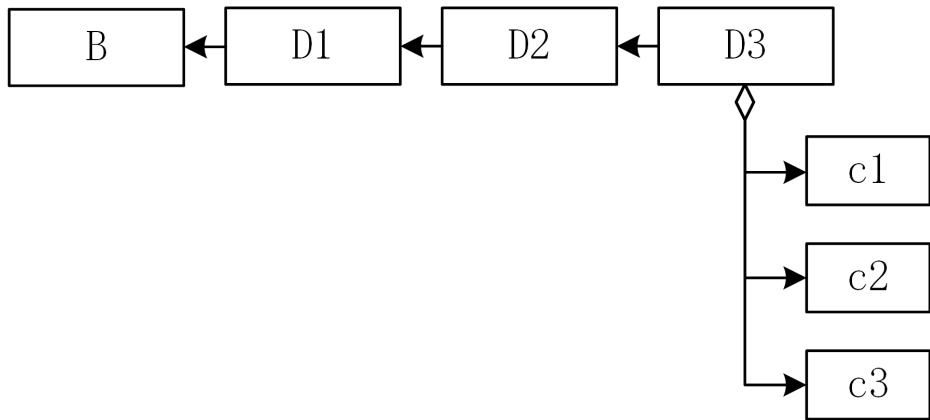
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序: B D1 D2 D3(c1 c2

析构顺序:

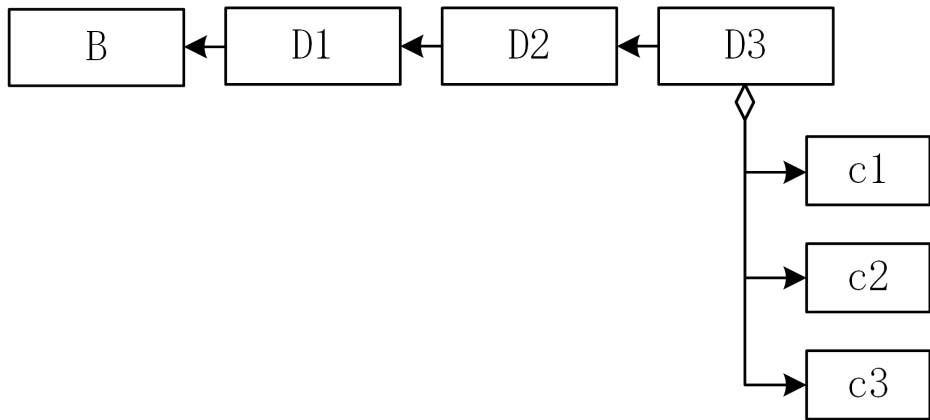
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序: B D1 D2 D3(c1 c2 c3)

析构顺序:

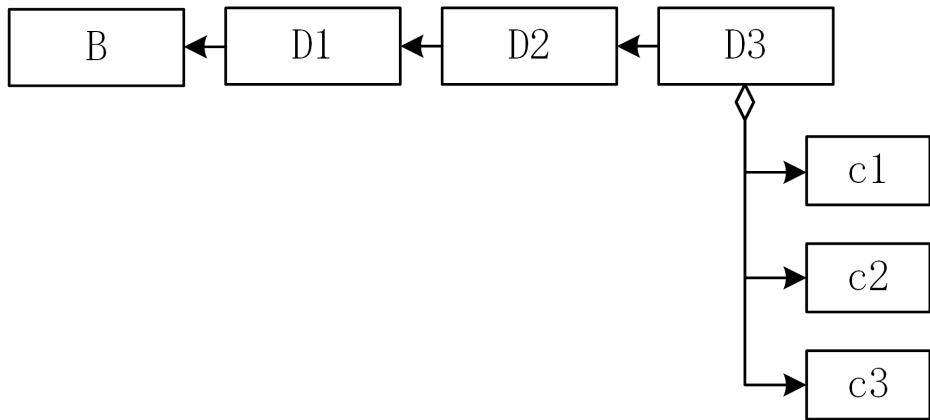
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序: B D1 D2 D3(c1 c2 c3)

析构顺序: D3

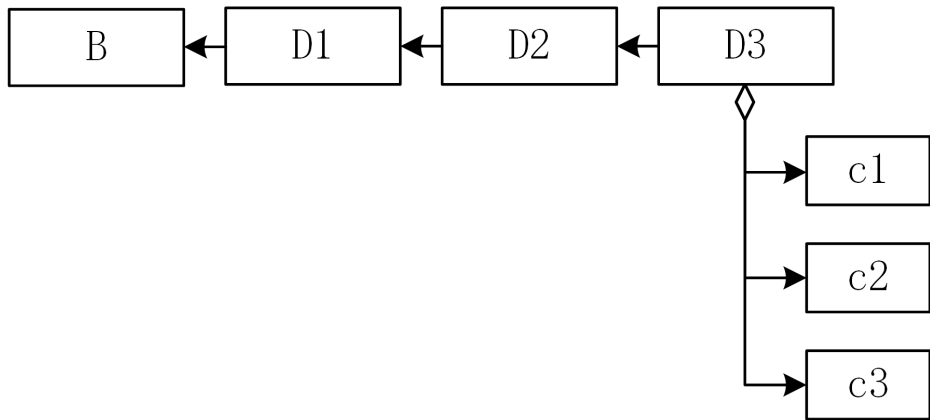
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序: B D1 D2 D3(c1 c2 c3)

析构顺序: D3(c3

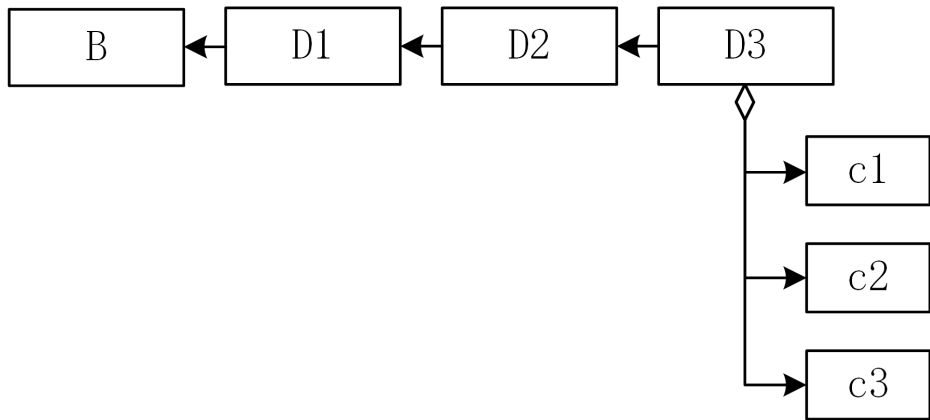
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序: B D1 D2 D3(c1 c2 c3)

析构顺序: D3(c3 c2

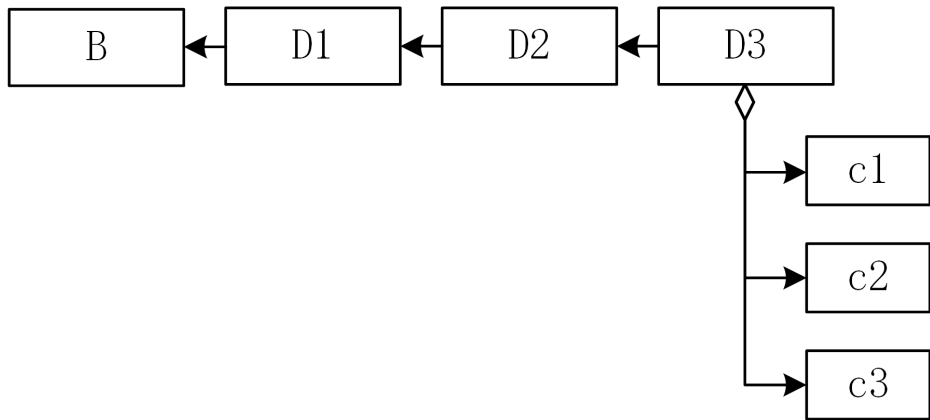
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序: B D1 D2 D3(c1 c2 c3)

析构顺序: D3(c3 c2 c1)

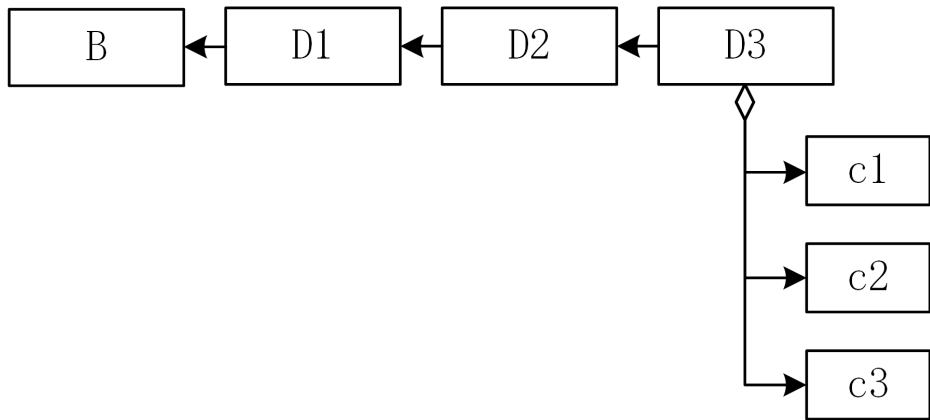
9.2 构造、拷贝控制与继承



构造顺序: B D1 D2 D3(c1 c2 c3)

析构顺序: D3(c3 c2 c1) D2

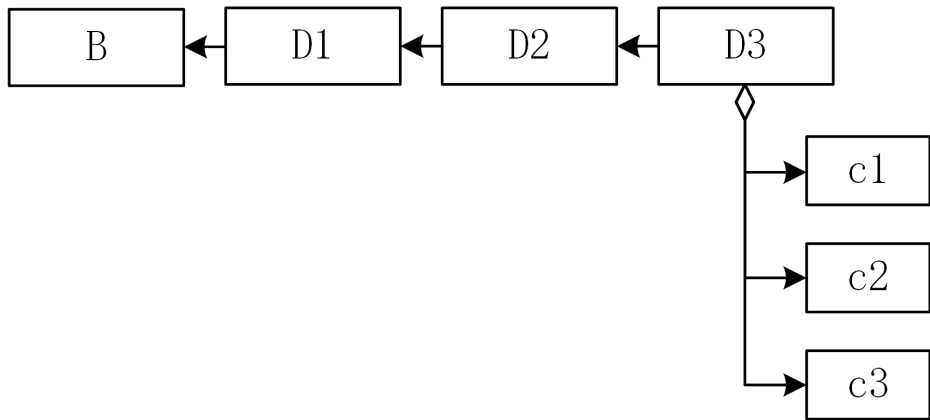
9.2 构造、拷贝控制与继承



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

9.2 构造、拷贝控制与继承—派生类对象的构造

派生类 Student 对象的构造

以上述 Student 类为例：

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

Student 类中成员 m_course 以复制构造的方式初始化。如下：

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

9.2 构造、拷贝控制与继承—派生类对象的构造

派生类 Student 对象的构造

类似地, Person 类初始化如下:

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

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。

9.2 构造、拷贝控制与继承—拷贝控制与继承

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：

```
Person::~~Person() {  
    cout<< "Destr of Person" <<endl;  
}  
Student::~~Student() {  
    cout<< "Destr of Student" <<endl;  
}  
Course::~~Course() {  
    cout<< "Destr of Course" <<endl;  
}
```

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**。

```
class A{/*...*/};
class B : public A {
    string m_d;
public:
    B(const B &d):A(d) /* 复制A的成员 */,
        m_d(d.m_d) /* 复制B的成员 */ {
        /*...*/
    }
    B(B &&d):A(std::move(d)) /* 移动A的成员 */,
        m_d(std::move(d.m_d)) /* 移动B的成员 */ {
        /*...*/
    }
};
```

9.2 构造、拷贝控制与继承——拷贝控制与继承

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：

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

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。

9.3 虚函数与多态性—虚函数

Shape、Circle 和 Square

下面定义了三个类：Shape、Circle 和 Square。

```
class Shape {
protected:
    string m_name;
public:
    Shape(const string &s = ""):m_name(s) { }
    virtual double area() const { return 0; } //此函数为虚函数
    const string& name() { return m_name; }
};

class Circle : public Shape {
private:
    double m_rad;
public:
    Circle(double r=0, const string &s = ""):Shape(s),
        m_rad(r) { }
    double area() const { return 3.1415926*m_rad*m_rad; }
};
```

9.3 虚函数与多态性—虚函数

Shape、Circle 和 Square

```
class Square : public Shape {  
private:  
    double m_len;  
public:  
    Square(double l=0, const string &s = ""):m_len(l) {}  
    double area() const { return m_len*m_len; }  
};
```

9.3 虚函数与多态性—动态绑定

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：

```
class Base { }  
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：

```
class Derived : public Base { };  
Derived d;  
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：

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

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

```
class Shape {
public:
    virtual ~Shape() {
        cout<<"Destr of Shape"<<endl;
    }
};
class Circle : public Shape {
public:
    ~Circle() {
        cout<<"Destr of Circle"<<endl;
    }
};
```

虚析构函数

运行如下代码：

```
Shape *p = new Circle();  
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**。

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。

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：

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。

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。

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。

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。

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。
- 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();
}
```

调用 test() 函数输出:

Derived:0

Derived:1

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

9.3 虚函数与多态性—动态绑定

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。

```
struct B {  
    virtual void fun1(int) { }  
    virtual void fun2() { }  
    void fun3() { }  
};  
struct D1 : public B {  
    void fun1() override { } //错误：基类没有不带参数的fun1函数  
    void fun2() final { }    //D1::fun2为最终版本  
    void fun3() override { } //错误：基类没有可覆盖的函数  
};  
struct D2 : public D1 {  
    void fun2() { }          //错误：不允许覆盖基类D1中的fun2函数  
};
```

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：

```
class Shape {  
public:  
    virtual double area() const = 0; //纯虚函数  
    /*...*/  
}  
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。

9.3 虚函数与多态性—继承与组合

Cat 和 Dog

```
class Cat {  
protected:  
    string m_name;  
public:  
    void meow() { //喵喵叫  
        cout<<"meowing"<<endl;  
    }  
};  
class Dog {  
protected:  
    string m_name;  
public:  
    void bark() { //汪汪叫  
        cout<<"barking"<<endl;  
    }  
};
```

IS-A 设计

改写 Dog 类如下：

```
class Dog : public Cat {  
public:  
    void bark();  
};  
Dog dog;           //创建一个Dog类对象  
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：

```
class Dog {  
    Cat m_cat;  
public:  
    void bark();  
};
```

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：

```
class Mammal {
protected:
    string m_name;
public:
    virtual void sounding() = 0;
};
class Cat : public Mammal {
protected:
    void meow();
public:
    void sounding() override { meow(); }
};
```

抽象共有属性设计

```
class Dog : public Mammal {  
protected:  
    void bark();  
public:  
    void sounding() override { bark(); }  
};
```

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

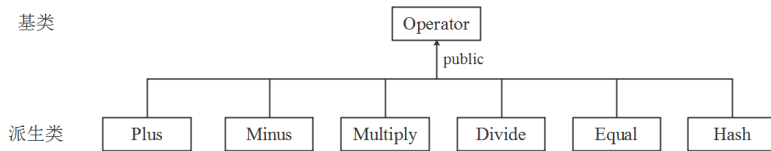
思考:

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：

```
class Operator{
public:
    Operator(char c, int num0prd, int pre) :
        m_symbol(c), m_num0prand(num0prd), m_precedence(pre){}
    char symbol() const { return m_symbol; }
    int num0prand() const { return m_num0prand; }
    int precedence() const { return m_precedence; };
    virtual double get(double a, double b) const = 0;
    virtual ~Operator() {}
protected:
    const char m_symbol; //符号
    const int m_num0prand; //目数
    const int m_precedence; //优先级
};
```

定义运算符基类

```
class Plus : public Operator{ //运算符 +
public:
    Plus() :Operator('+', 2, 2) {}
    double get(double a, double b) const { return a + b; }
};
class Minus :public Operator{ //运算符 -
public:
    Minus() :Operator('-', 2, 2) {}
    double get(double a, double b) const { return a - b; }
};
class Multiply :public Operator{ //运算符 *
public:
    Multiply() :Operator('*', 2, 3) {}
    double get(double a, double b) const { return a * b; }
};
```

定义运算符基类

```
class Divide :public Operator{ //运算符 /
public:
    Divide() :Operator('/', 2, 3) {}
    double get(double a, double b) const { return a / b; }
};
class Hash :public Operator{ //运算符 #
public:
    Hash() :Operator('#', 1, 1) {} //函数get无实际意义，仅为语
    确
    double get(double a, double b) const { return a; }
};
class Equal :public Operator{ //表达介绍符 =
public:
    Equal() :Operator('=', 2, 0) {} //函数get无实际意义，仅为语
    确
    double get(double a, double b) const { return a; }
};
```

法正

法正

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：

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

定义计算器类

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


定义计算器类

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