C++程序设计精要教程

华中科技大学

第8章　虚函数与多态

◆8.1　虚函数

- 虚函数：即用virtual定义的成员函数。Java几乎所有函数都默认为虚函数。当基类对象指针或引用指向或引用不同类型派生类对象时，通过虚函数到基类或派生类中同名函数的映射实现(动态)多态。
- 动态多态：重载函数表现的是静态(编译时)多态性，虚函数表现的是动态(运行时)多态性：
- 重载函数是静态多态函数，通过静态绑定调用重载函数；虚函数是动态多态函数，通过动态绑定调用(虚映射到实)函数。动态绑定是程序运行时自己完成的，静态绑定是编译或操作系统完成的。
- 虚函数的动态绑定通过存储在对象中的一个指针完成，因此虚函数一定有this(指向这个对象）。(该指针指向虚函数入口地址表VFT)

第8章　虚函数与多态

【例8.1】定义父类POINT2D和子类CIRCLE的绘图函数成员show()

```
#include <iostream>
using namespace std;
class POINT2D {
    int  x, y;
public:
    int getx( ) { return x; }
    int gety( ) { return y; }
    virtual POINT2D *show( )  { cout<<"Show a point\n"; return this;}  //定义虚函数
    POINT2D(int x, int y) { POINT2D::x=x; POINT2D::y=y; }
};
class CIRCLE: public POINT2D {   //POINT2D和CIRCE满足父子关系
    int r;
```

第8章　虚函数与多态

```
public:
    int getr( ) { return r; }
    CIRCLE *show( ) { cout<<“Show a circle\n”; return this; } //原型相同, 成为虚函数
    CIRCLE(int x, int y, int r):POINT2D(x, y) { CIRCLE::r = r; }
};

void main(void)
{
    CIRCLE c(3, 7, 8);
    POINT2D *p = &c;      //父类指针p可以直接指向子类对象c
    c.getr( );            //CIRCLE::getr()
    p->getx( );           //POINT2D::getx()
    p->gety( );           //POINT2D::gety()
    p->show( );           //CIRCLE::show()
}
```

第8章　虚函数与多态

◆8.1　虚函数

- 虚函数必须是类的成员函数，非成员函数不能说明为虚函数，普通函数如main不能说明为虚函数（与编译器有关）。
- 虚函数一般在基类的public或protected部分。在派生类中重新定义成员函数时，函数原型必须完全相同；
- 虚函数只有在具有继承关系的类层次结构中定义才有意义，否则引起额外开销 (需要通过VFT访问)；
- 一般用父类指针(或引用)访问虚函数。根据父类指针所指对象类型的不同，动态绑定相应对象的虚函数；(虚函数的动态多态性)

第8章　虚函数与多态

◆8.1　虚函数

- 虚函数有隐含的this参数，参数表后可出现const和volatile，静态函数成员没有this参数，不能定义为虚函数：即不能有virtual static之类的说明；
- 构造函数构造对象的类型是确定的，不需根据类型表现出多态性，故不能定义为虚函数；析构函数可通过父类指针(引用)或delete调用，父类指针指向的对象类型可能是不确定的，因此析构函数可定义为虚函数。
- 一旦父类(基类)定义了虚函数，即使没有 virtual 声明，所有派生类中原型相同的非静态成员函数自动成为虚函数；(虚函数特性的无限传递性)

第8章　虚函数与多态

◆8.1　虚函数

- 虚函数同普通函数成员一样，可声明为或自动成为inline函数 (但内联会失败)，也可重载、缺省和省略参数。
- 虚函数能根据对象类型适当地绑定函数成员，且绑定函数成员的效率非常之高，因此，最好将普通函数成员全部定义为虚函数。
- 注意：虚函数主要通过基类和派生类表现出多态特性，由于union既不能定义基类又不能定义派生类，故不能在union中定义虚函数。
- 可以在虚函数原型的最后加上 final 声明，表示派生类不能再定义这个虚函数 (不能被派生类覆盖) (final只能修饰虚函数)。

第8章　虚函数与多态

```
#include <iostream>        //【例8.2】虚函数的使用方法
using namespace std;
struct A {
    virtual void f1( ) { };          //定义虚函数f1( )
    virtual void f2( ) const { };  //定义虚函数f2( )
    virtual void f3( ) { };          //定义虚函数f3( )
    virtual void f4( ) final { };   //子孙类不能覆盖f4( )
};

class B: public A {                  //A和B满足父子关系
    virtual void f1( ) { }           //virtual可省略, f1( )自动成为虚函数
    void f2( ) noexcept final { } //f2( )和基类函数原型相同, 自动成为虚函数, 子孙类不能覆盖f2( )
};
```

第8章　虚函数与多态

```
class C: B {            //B和C不满足父子关系，故A和C也不满足父子关系
   void f2( ) { }       //错误: f2( )不能被覆盖, 应当删除此函数
   void f3( ) { }
   void f4( ) { }       //错误: f4( )不能被覆盖, 应当删除此函数
};
void main(void)
{
   C  c;
   A *p = (A *)&c;    //A和C不满足父子关系，需要进行强制类型转换
   p->f1( );          //调用B::f1( )
   p->f2( );          //调用B::f2( )
   p->A::f2( );       //明确调用实函数A::f2( )
   p->f3( );          //调用C::f3( )
   c.f3( );           //error, why ?
   p->f4( );          //调用A::f4( )
}
```

第8章　虚函数与多态

◆8.1　虚函数

- 重载函数使用静态联编（早期绑定）机制；虚函数采用动态联编（晚期绑定）机制；
- 早期绑定：在程序运行之前的绑定；晚期绑定：在程序运行中，由程序自己完成的绑定。
- 对于父类A中声明的虚函数f( )，若在子类B中重定义f( )，必须确保子类B::f( )与父类A::f( )具有完全相同的函数原型，才能覆盖原虚函数f( )而产生虚特性，执行动态联编机制。否则，只要有一个参数不同，编译系统就认为它是一个全新的（函数名相同时重载）函数，而不实现动态联编。

第8章　虚函数与多态

◆8.2　虚析构函数

- 如果基类的析构函数定义为虚析构函数，则派生类的析构函数就会自动成为虚析构函数（原型不同）。
- 说明虚析构函数的目的在于在使用delete运算符释放一个对象时，能够保证所执行的析构函数就是该对象的析构函数；最好将所有的析构函数都定义为虚析构函数。对象数组指针p应用delete [] p释放。
- 如果为基类和派生类的对象分配了动态内存，或者为派生类的对象成员分配了动态内存，则一定要将基类和派生类的析构函数定义为虚析构函数，否则便可能造成内存泄漏，导致系统出现内存保护错误。

第8章　虚函数与多态

```
class A {
public:
    char *s;
    A(const char *s) {
        this->s = new char [strlen(s)+1];
        strcpy(this->s, s);
    }
    virtual ~A( ) { delete s; }
};
```

```
class B: public A {
public:
    char *s;
    B(const char *s): A(s) {
        this->s = new char [strlen(s)+1];
        strcpy(this->s, s);
    }
    ~B( ) { delete s; }  //自动称为虚函数
};

void main(void)
{
    A *a[2] = { new B("123"), new A("abc") };
    delete a[0];   //执行 ~B()
    delete a[1];   //执行 ~A()
}    //如果 ~A() 非虚，结果怎样？
```

第8章　虚函数与多态

◆8.3　类的引用

- 用父类引用实现动态多态性时需要注意，若被(new产生)引用对象自身不能析构，则必须用delete &析构：

```
A  &z = *new B("123");
delete &z;  //析构对象z并释放对象z占用的内存
```

- 上述delete &z完成了两个任务：①调用该对象析构函数~B( )，释放其基类和对象成员各自为字符指针s分配的空间；②释放B对象自身占用的存储空间。
- 如将delete &z改为z.~A( )，则只完成任务①而没完成②；如果改为free(&z)，则只完成任务②而没完成①。造成内存泄露。为什么z.~A( ) 执行~B( )？（z实现为指针）

第8章　虚函数与多态

◆8.3　类的引用

- 引用变量引用类的变量、函数参数或者常量，一般不需要引用变量负责构造和析构。由被引用的类的变量、参数或常量自动完成析构。
- 当用常量对象、类型为&&的返回对象作为实参调用函数时，优先调用的函数是带有&&参数的函数。
- 常量对象既可以被有址变量引用（分配对象内存），也可以被无址变量引用（分配对象缓存），但优先被无址形参引用。

第8章　虚函数与多态

【例8.7】应用delete析构有址引用变量引用的通过new生成的对象

```
#include <iostream>
using namespace std;
class A {
    int  x;
public:
    A(int x): x(x) { cout << "A" << x;  };
    ~A( )  { cout << "~A" << x; };
};
void f(A &a) { cout << “f(A &)"; }
void f(A &&a = A(0)) { cout << “f(A &&)"; }
```

第8章　虚函数与多态

```
void main(void)
{
    A a(1), b(2);           //自动调用构造函数构造a、b
    A &p = a;               //p本身不用负责构造和析构a
    A &q = *new A(3);//q有址引用new生成的无名对象
    A &r = p;               //r有址引用p所引用的对象a
    f(a);                   //f(A &)
    f(r);                   //f(A &)
    f((A&&)a);              //f(A &&)
    f( );                   //f(A&&)
    f(A(1));                //f(A &&)
    delete &q;              //q析构并释放通过new产生的对象A(3)
}                           //退出main()时依次自动析构b、a
```

第8章　虚函数与多态

◆8.3　类的引用

- 当类的内部包含指针成员时，为了防止内存泄漏，不应使用编译自动生成的构造函数、赋值运算符函数和析构函数。
- 对于类型为A且内部有指针的类，应自定义A()、A(A&&) noexcept 、A(const A&)、A& operator=(const A&)、 A& operator=(A&&) noexcept以及~A( )函数。
- A(A&&)、A& operator=(A&&)通常应按移动语义实现，构造和赋值分别是浅拷贝移动构造和浅拷贝移动赋值。“移动”即将一个对象（通常是常量）内部的(分配内存的) 指针成员浅拷贝赋给新对象的内部指针成员，而前者的内部指针成员设置为空指针（即内存被移走了）。
- 对于A的派生类B，在构造和赋值以基类A相关的对象时，若B类参数为&&，则应对用A类参数为&&的拷贝和赋值运算函数。

第8章　虚函数与多态

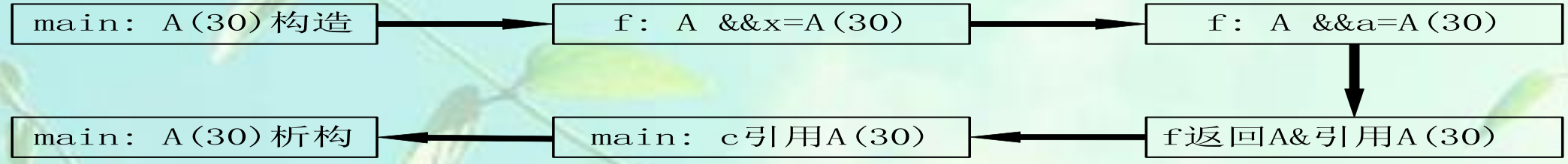
```
class A {
    int  *p = 0;
    int  m = 0;
public:
    A( ): p(nullptr), m(0) { }
    A(int m): m(p?m:0), p(new int[m]) { }   //有问题吗?
    A(const A &a): p(new int[a.m]), m(p? a.m : 0)  { //深拷贝构造
        for (int x = 0; x < m; x++) p[x] = a.p[x];
    }
    A(A &&a) noexcept: p(a.p), m(a.m)  { //移动拷贝构造不要为p重新分配内存
        a.p = nullptr;
        a.m = 0;
    }
    ~A( ) {
        if (p) { delete p; p = nullptr; m = 0; }
    };
```

```
A &operator=(const A &a) {  //浅拷贝移动构造不为e重新分配内存
    if (&a == this) return *this;
    if (p) delete p;
    p = new int[a.m];
    m = p ? a.m: 0;
    for (int x = 0; x < m; x++) p[x] = a.p[x];
    return *this;
  }
  A &operator=(A &&a) noexcept  {  //浅拷贝移动构造不为e重新分配内存
    if (&a == this) return *this;
    if (p) delete p;
    p = a.p;    m = p ? a.m : 0;   //移动语义：资源a.p转移
    a.p = nullptr;  a.m = 0;       //移动语义：资源a.p已经转移，故资源数量设为 0
    return *this;
  }
};
```

第8章　虚函数与多态

```
A &f(A &&x)  {
   //A &&a = static_cast<A &&>(x);  //a引用x所引用的对象;
   //return a;    //返回A&：参数有名有址，类型&&自动转换为&。x和a都不负责析构
   return x;      //结果同上述两条语句
}
void main() {  A &c = f(A(30));   // c引用A(30 }
```

在函数f中，移动构造或赋值新变量，不用反复释放和申请内存，提高了程序执行效率



第8章　虚函数与多态

◆8.4　抽象类

- 纯虚函数：不必定义函数体的虚函数，也可以重载、缺省参数、省略参数、内联等，相当于Java的interface。
- 定义格式：virtual 函数原型 = 0。 (0即函数体为空)
- 纯虚函数有this，不能同时用static定义(表示无this)。
- 构造函数不能定义为虚函数，同样也不能定义为纯虚函数。
- 析构函数可以定义为虚函数，也可定义为纯虚函数。
- 函数体定义应在派生类中实现，成为非纯虚函数。

第8章　虚函数与多态

◆8.4　抽象类

- 抽象类：含有纯虚函数的类。
- 抽象类常用作派生类的基类，不应该有对象或类实例 (相当于Java的interface)。
- 如果派生类继承了抽象类的纯虚函数，却没有在派生类中重新定义该原型虚函数，或者派生类定义了基类所没有的纯虚函数，则派生类就会自动成为抽象类。
- 在多级派生的过程中，如果到某个派生类为止，所有纯虚函数都已在派生类中全部重新定义，则该派生类就会成为非抽象类（具体类）。

第8章　虚函数与多态

【例8.10】多级派生中的抽象类

```
#include <iostream>
using namespace std;
struct A {  //A被定义为抽象类
   virtual void f1( ) = 0;
   virtual void f2( ) = 0;
};
void A::f1( ) { cout << "A1"; }  //不是在派
void A::f2( ) { cout << "A2"; }  //生类中定义
class B: public A {
   //重新定义f2，未定义f1，B为抽象类
   void f2( ) { A::f2( );  cout << "B2"; }
};
class C: public B {  // f1和f2均重定义，C为具体类
   void f1( ) { cout << "C1"; } //自动虚函数, 内联失败
};
```

- 纯虚函数表示在各种继承关系中所有派生类都需要遵循的公共行为。
- 类外定义的纯虚函数体，相当于缺省行为，可以在成员函数中调用

```
void main(void)
{
   C  c;
   A *p = &c;
   p->f1( );    //C::f1( )
   p->f2( );    //B::f2( )
   B *q = (B *)&c;
   q->f1( );    //C::f1( )
   q->f2( );    //error, private
}
```

第8章　虚函数与多态

◆8.4　抽象类

- 抽象类不能定义或产生任何对象，包括用new创建的对象，故不能用作函数参数的类型和函数的返回类型 (调用前后要产生该类型的对象)。
- 抽象类可作派生类的基类 (父类)，若定义相应的基类引用和指针，就可引用或指向非抽象派生类对象。
- 通过抽象类指针或引用可调用抽象类的纯虚函数，根据多态性，实际调用的应是该类的非抽象派生类的虚函数。如果该派生类没有重新定义被调虚函数，则会导致程序出现不可意料的运行错误。调用抽象类的普通函数成员不会出现该问题。

第8章　虚函数与多态

【例8.11】本例说明抽象类不能产生对象

```
#include <iostream>
using namespace std;
struct A {
//定义类A为抽象类
   virtual void f1( ) = 0;
   void f2( ) { };
};
struct B: A {
//定义A的非抽象子类B
   void f1( ) { };
};
A  f( );       //×，返回类A意味着抽
               //象类要产生A类对象
int g(A  x); //×，调用时要传递
               //一个A类的对象
A &h(A &y);    //√，可以引用非抽象子类B的对象

void main(void)
{
   A  a;           //×，抽象类不能产生对象a
   B  b;           //√，B不是抽象类
   A *p = &b;      //√，可以指向非抽象子类B的对象
   p->f1( );       //√，B::f1( )
   p->f2( );       //√，A::f2( )
}
```

第8章　虚函数与多态

◆8.4　抽象类

- 内存管理函数malloc可以为抽象类分配空间，但不调用构造函数，因此，内存管理函数malloc实质上不产生抽象类对象(VFT没有填好)。只有成功地构造了某个类的对象，才能通过抽象类指针或引用访问 (VFT), 进而通过VFT调用这个类的虚函数。
- 抽象类作为抽象级别最高的类，主要用于定义派生类共有的数据和函数成员。抽象类的纯虚函数没有函数体，意味目前尚无法描述该函数的功能。例如，如果图形是点、线和圆等类的抽象类，那么抽象类的绘图函数就无法绘出具体的图形。

第8章　虚函数与多态

◆8.4　抽象类

- 纯虚函数和虚函数都能定义成另一个类的成员友元。由于纯虚函数一般不会定义函数体，故纯虚函数一般不要定义为其他类的成员友元。
- 如果类A的函数成员f定义为类B的友元，那么f 就可以访问类B的所有成员，但是，f并不能访问从类B派生的类C的所有成员，除非f也定义为类C的友元或者类A就是类C。（即友元对派生不具备传递性）

第8章　虚函数与多态

【例8.13】说明纯虚函数和虚函数定义为友元的用法

```
#include <iostream>
using namespace std;
class  C;
struct  A {
    virtual void f1(C &c) = 0;
    virtual void f2(C &c);
};
class  B: A {
public:
    void f1(C &c); //f1自动成虚函数
};
class  C {
    char  c;
    //允许但无意义，A::f1无函数体
    friend void A::f1(C &c);
    friend void A::f2(C &c);
public:
    C(char c) { C::c = c; }
};
void A::f1(C &c)
{ cout << "B:: " << c.c << "\n"; }
void A::f2(C &c)
{ cout << "A:: " << c.c << "\n"; }
void B::f1(C &c)
{ cout << c.c; }    //×，B::f1不是C的
                    //友元，不能访问c.c
void main( ) {
    B  b;    C c('C');
    A *p = (A *) new B;
    p->f1(c);          //调用B::f1( )
    p->f2(c);          //调用A::f2( )
}
```

第8章　虚函数与多态

◆8.5 虚函数友元与晚期绑定

- **虚函数动态绑定：**
  - **C++使用虚函数地址表(VFT)来实现虚函数的动态绑定。VFT是一个函数指针列表，存放对象的所有虚函数的入口地址。**
  - **编译程序为有虚函数的类创建一个VFT，其首地址通常存放在对象的起始单元中。调用虚函数的对象通过起始单元的VFT动态绑定相应的函数成员，从而使虚函数随调用对象的不同而表现多态特性。**
- **动态绑定比静态绑定多一次地址访问，在一定程度上降低了程序的执行效率，但同虚函数的多态特性带来的优点相比，效率降低所产生的影响是微不足道的。**

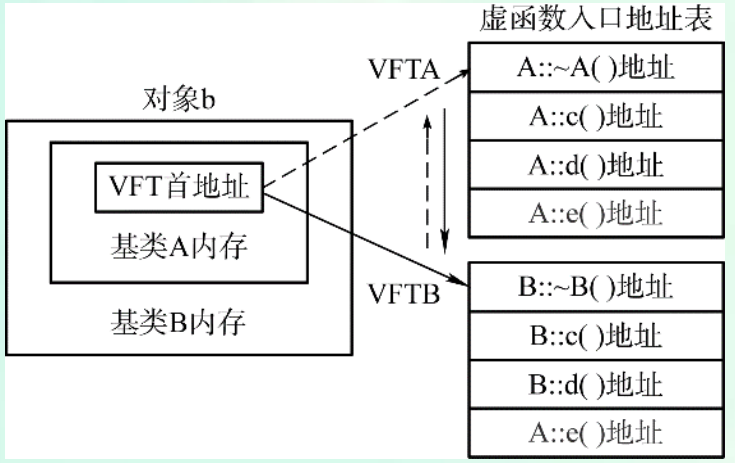
第8章　虚函数与多态

◆8.5 虚函数友元与晚期绑定

- **虚函数动态绑定过程：设基类A和派生类B对应的虚函数表分别为VFTA和VFTB。则派生类对象b的虚函数动态绑定过程如下：**
  - **对象构造：先将VFTA的首地址存放到b的起始单元，在A类构造函数的函数体执行前甚至初试化前，使A类对象调用的虚函数与VFTA绑定，可使A类构造函数执行A的虚函数；在B类构造函数的函数体执行前（甚至初试化前），将VFTB的首地址存放到b的起始单元，使B类对象调用的虚函数与VFTB绑定，可使B类构造函数执行B的虚函数。**
  - **对象使用(生成期间)：b的起始单元指向VFTB，执行B的虚函数。**
  - **对象析构：由于b的起始单元已指向VFTB，故析构函数调用的是B的虚函数；然后将VFTA的首地址存放到b的起始单元，使基类析构函数调用的虚函数与VFTA绑定，使基类析构函数调用基类A的虚函数。**

第8章　虚函数与多态

```
#include <iostream>   //例8.14
using namespace std;
class A {
    virtual void c( ) { cout<<"Construct A\n";   }
    virtual void d( ) { cout<<"Deconstruct A\n"; }
    virtual void e( ) { };
public:
    A( ) { c( ); };
    virtual ~A( ) { d( ); };
};
class B: A {
    virtual void c( ) { cout<<"Construct B\n";   }
    virtual void d( ) { cout<<"Deconstruct B\n"; }
public:
    B( ) { c( ); };   //等价于 B( ): A( ) { c( ); };
    virtual ~B( ) { d( ); };
};
```




```
void main(void){  B b;  }
```

输出结果：

```
Construct A
Construct B
Deconstruct B
Deconstruct A
```

第8章　虚函数与多态

◆8.6　有虚函数时的内存布局

- 派生类的存储空间由基类和派生类的非静态数据成员构成。当基类或派生类包含虚函数或纯虚函数时，派生类的存储空间还包括虚函数入口地址表首址所占存储单元。
- 如果基类定义了虚函数或者纯虚函数，则派生类对象将基类的起始单元作为共享单元，用于存放基类和派生类的虚函数地址表首址。【例7.10】
- 如果基类没有定义虚函数，而派生类定义了虚函数，则派生类的存储空间由三部分组成：第一部分为基类存储空间，第二部分为派生类虚函数入口地址表首址，第三部分为该派生类新定义的数据成员。