華中科技大學

第8章 多态与虚函数

许向阳

xuxy@hust.edu.cn

大纲

8.0 多态性

8.1 虚函数

8.2 虚析构函数

8.3 类的引用

8.4 抽象类

8.5 虚函数友元与晚期绑定

8.6 有虚函数的内存布局

要点

核心：动态多态

动态多态的应用

动态多态的内在运行机理

虚函数： virtual … fun(…) … fun是虚函数

虚基类： class D : virtual 派生控制 B{…}； B是虚基类

抽象类： virtual … fun(…) =0; 含有此类函数的类为抽象类

8.0 多态性

菜农：

商贩：

食客：

8.0 多态性

水果卖家：介绍水果叫什么名字，水果什么价格。
在不同的水果摊位前，可以使用同一样的词汇。
一词多义

苹果老板：SoldFruit() {
    cout<<“好吃的苹果，便宜呀”；
}

香蕉老板：SoldFruit(){
    我这有生一点的香蕉，也有熟香蕉；
    您要哪一种？
    ……
}

8.0 多态性

华中科技大学

静态多态

相同的函数名称，但参数不同（与返回类型无关）

动态多态

- 相同的函数名称、相同的参数
- 分属不同的类；基类与派生类
- 隐含参数 this 所指向的类不相同
- 函数的返回类型一般也相同

除非分别返回指向基类 和派生类的指针或者引用

8.0 多态性

多态性：

- 具有相似功能的不同函数，使用同一名称
- 用相同的调用方式，调用不同功能的同名函数。
- 动态多态，用同一个接口、同一个调用形式，实现不同实例函数的访问

我问 → 白菜什么价？

我对面站的是谁（即指针指向的对象）？

菜农？ 商贩？ 餐馆服务员？

8.0 多态性

多态性的实现———联编

联　　编：绑定、装配

将一个标识符名和一个地址联系在一起。

静态联编：前期联编、早期联编

在生成可执行程序时已经完成

编译时多态性：函数重载、运算符重载

动态联编：晚期联编、后期联编

程序运行时才动态完成

运行时多态：使用虚函数

8.1 虚函数

virtual 函数类型 函数名(形式参数表);

基类中，在函数声明时，加"virtual "。
在体外实现时，不要加 virtual。

```
class  fruit {
  public:
        virtual void  EatFruit( );
};

void  fruit::EatFruit( ) {
     cout << "eat …? "<<endl;
}
```

8.1 虚函数


```
class apple : public fruit  {
    public:
            void  EatFruit( )
            {
                    cout << " I like to eat apple." <<endl;
            }
};

class banana : public fruit {
    public:
            void  EatFruit( )
            {  cout << " Banana, Ha Ha." <<endl;  }
};
```

8.1 虚函数


```
fruit      *ptrfruit,  abstractfruit;
apple       redapple;
banana    yellowbanana;
int          i;
cout << "select fruit : 1 apple , 2 banana , ** fruit  "<<endl;
cin >>i;
if (i==1)   ptrfruit = &redapple;  //基类对象指针，指向派生类对象
  else  if (i==2)   ptrfruit = &yellowbanana;
            else ptrfruit=&abstractfruit;
ptrfruit -> EatFruit();
```

Q：输入1，程序的运行结果是什么？
输入2，程序的运行结果是什么？
去掉 virtual，程序的运行结果又是什么？

8.1 虚函数


```
select fruit : 1 apple , 2 banana, ** fruit
1
 I like to eat apple.
```

```
select fruit : 1 apple , 2 banana, ** fruit
2
 Banana, Ha Ha.
```

```
select fruit : 1 apple , 2 banana, ** fruit
3
 fruit ... ?
```

有 virtual 时的运行结果

基类对象指针指向派生类对象，执行的是派生类的函数

8.1 虚函数


```
select fruit : 1 apple , 2 banana, ** fruit
1
 fruit ... ?
```

```
select fruit : 1 apple , 2 banana, ** fruit
2
 fruit ... ?
```

```
select fruit : 1 apple , 2 banana, ** fruit
3
 fruit ... ?
```

去掉 virtual 后的运行结果

基类对象指针指向派生类对象，执行的是基类的函数

从编译的角度看：基类指针 → 基类的函数

8.1 虚函数

华中科技大学

对象、对象指针　调用函数比较

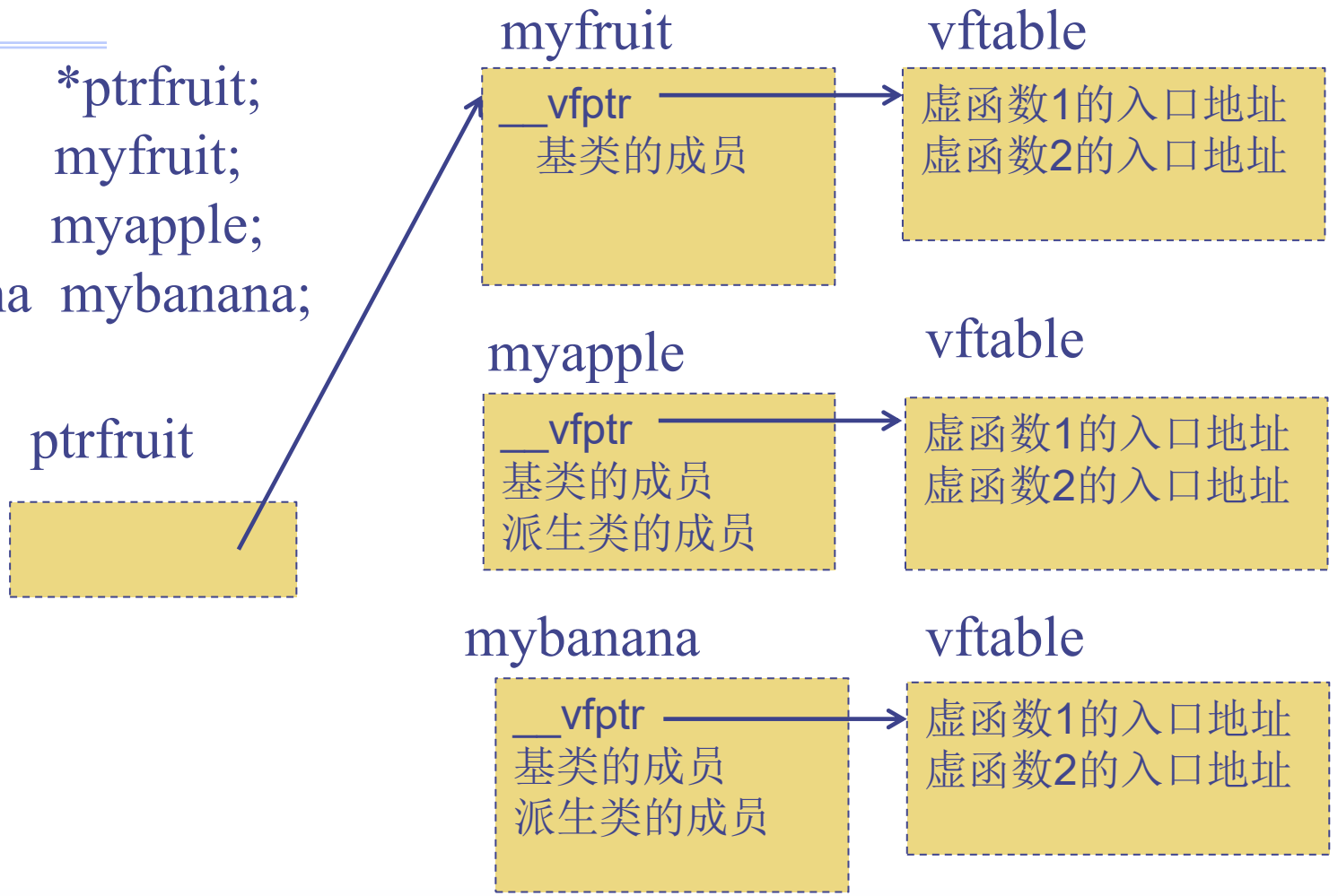
```
apple   redapple;
redapple.fruit::EatFruit( );
redapple.EatFruit( );
```

```
fruit  *ptrfruit;
ptrfruit = &redapple;
ptrfruit->fruit::EatFruit();
ptrfruit->EatFruit();
```

```
fruit ... ?
I like to eat apple.
```

8.1 虚函数


```
fruit     *ptrfruit;
fruit     myfruit;
apple     myapple;
banana    mybanana;
```



8.1 虚函数

名称	值
ptrfruit	0x00acfce8
_vfptr	0x002a78d4 const fruit::`vftable'
[0]	0x002a1235 fruit::DispFruitName(void)
[1]	0x002a1023 fruit::EatFruit(void)

```
fruit      *ptrfruit;
fruit      myfruit;
ptrfruit = &myfruit
ptrfruit->EatFruit();
```

ptrfruit	0x00acfcbc {cAppleName=0x00acfcc0 "Red Apple" }
[apple]	{cAppleName=0x00acfcc0 "Red Apple" }
fruit	{...}
_vfptr	0x002a7924 const apple::`vftable'
[0]	0x002a1032 apple::DispFruitName(void)
[1]	0x002a1208 apple::EatFruit(void)
cAppleName	0x00acfcc0 "Red Apple"

```
apple  myapple
ptrfruit = &myapple;
ptrfruit->EatFruit();
```

ptrfruit =(fruit *) &myapple;

不是用public 派生控制时，强制类型转换

8.1 虚函数

```
fruit     *ptrfruit;
ptrfruit->EatFruit();

ptrfruit->EatFruit();
mov       eax,dword ptr [ebp-24h]   // ptrfruit的地址是 [ebp-24h]
mov       edx,dword ptr [eax]       // 指向的对象中的4个字节
mov       esi,esp
mov       ecx,dword ptr [ebp-24h]
mov       eax,dword ptr [edx+4]     // 函数的入口地址
call      eax
```

Q：有 virtual 时，是如何找到函数的入口地址的？

8.1 虚函数

Q：将 virtual 去掉，如何找到函数的入口地址？

```
fruit      *ptrfruit;
apple      myapple;
ptrfruit = &myapple;

ptrfruit->EatFruit();

mov        ecx,dword ptr [ebp-24h]
call       fruit::EatFruit (0EC1028h)
```

编译器看到 ptrfruit 是指向基类的，
EatFruit又不是虚函数，不会到虚函数表找其入口地址，
因而调用的是基类的函数。

8.1 虚函数

正确理解 虚函数

```
fruit      *ptrfruit;
apple      myapple;        ptrfruit = &myapple;
myapple.EatFruit();              // 运行子类的函数
myapple. fruit::EatFruit( );  // 运行基类的函数
ptrfruit->EatFruit();
```

- 从子类的角度看，它有自己的 **EatFruit**函数，同时也有继承的父类的 **EatFruit**。
- 单纯的父类对象或者父类对象指针，调用的是父类的成员函数。
- 父类指针指向子类对象时，虚函数的功效才显现出来。挂羊头卖狗肉、表里不一
- 编译按定义的类型（表象）来执行检查；
- 函数调用是根据虚函数表找入口地址，找到的是实际指向对象的函数地址（本质）

8.1 虚函数

实验

1、有虚函数时，对象的存储空间是如何布局的？

2、虚函数表中存放什么信息？

3、通过对象访问虚函数、非虚函数，编译生成的代码有无差别？

4、通过对象、对象指针或对象引用 访问虚函数，编译生成的代码有无差别？

5、通过对象、对象指针或对象引用 访问非虚函数，编译生成的代码有无差别？

6、在有继承关系时，派生类的虚函数表如何变迁？

7、基类指针（或引用）指向子类对象，能访问哪些函数？

8.1 虚函数

1、有虚函数时，对象存储空间的布局

2、虚函数表中存放的信息

```
class A {
public :
    int x;
    A(int x) { A::x = x; }
    virtual void vf1(int v) { cout << x+v<<endl; }
    virtual void vf2(int v) { cout << 2 * x+v<<endl; }
    void fa(int v) { cout << 3 * x+v<<endl; }
};
A  a(5);        // sizeof (A) == 8
```

监视 1

搜索(Ctrl+E)　搜索深度: 3

名称	值	类型
a	{x=5 }	A
__vfptr	0x00e29b34 {虚函数表分析.exe!void(* A::`vftable'[3])()} {0x00e210b...	void * *
[0]	0x00e210b4 {虚函数表分析.exe!A::vf1(int)}	void *
[1]	0x00e2137f {虚函数表分析.exe!A::vf2(int)}	void *
x	5	int

8.1 虚函数

3、通过对象访问虚函数、非虚函数，编译生成的代码有无差别？

```
A  a(5);
a.vf1(10);
 push          0Ah
 lea           ecx,[a]
 call          A::vf1 (0E210B4h)
 a.vf2(10);
 push          0Ah
 lea           ecx,[a]
 call          A::vf2 (0E2137Fh)
 a.fa(10);
 push          0Ah
 lea           ecx,[a]
 call          A::fa (0E210BEh)
```

通过对象访问虚函数、非虚函数，无差别

8.1 虚函数

4、通过对象、对象指针或对象引用 访问虚函数，编译生成的代码有无差别？

```
A   a(5);
a.vf1(10);
  push          0Ah
  lea           ecx,[a]
  call          A::vf1 (0E210B4h)
  a.vf2(10);
  push          0Ah
  lea           ecx,[a]
  call          A::vf2 (0E2137Fh)
```

对象、对象指针访问虚函数的方式不同

```
A *pa =&a;
pa->vf1(10);
  push          0Ah
  mov           eax,dword ptr [pa]
  mov           edx,dword ptr [eax]
  mov           ecx,dword ptr [pa]
  mov           eax,dword ptr [edx]
  call          eax
  pa->vf2(10);
  push          0Ah
  mov           eax,dword ptr [pa]
  mov           edx,dword ptr [eax]
  mov           ecx,dword ptr [pa]
  mov           eax,dword ptr [edx+4]
  call          eax
```

4、通过对象、对象指针或对象引用 访问虚函数，编译生成的代码有无差别？

```
A  a(5);
a.vf1(10);
  push        0Ah
  lea         ecx,[a]
  call        A::vf1 (0E210B4h)
  a.vf2(10);
  push        0Ah
  lea         ecx,[a]
  call        A::vf2 (0E2137Fh)
```

对象指针与对象引用的本质相同

```
A &ra =a;
ra.vf1(10);
  push        0Ah
  mov         eax,dword ptr [ra]
  mov         edx,dword ptr [eax]
  mov         ecx,dword ptr [ra]
  mov         eax,dword ptr [edx]
  call        eax
  ra.vf2(10);
  push        0Ah
  mov         eax,dword ptr [ra]
  mov         edx,dword ptr [eax]
  mov         ecx,dword ptr [ra]
  mov         eax,dword ptr [edx+4]
  call        eax
```

5、通过对象、对象指针或对象引用 访问非虚函数，编译生成的代码有无差别？

```
A   a(5);
a.fa(10);
push        0Ah
lea         ecx,[a]
call        A::fa (0E210BEh)
```

```
A *pa =&a;
 pa->fa(10);
 push        0Ah
 mov         ecx,dword ptr [pa]
 call        A::fa (0E210BEh)
```

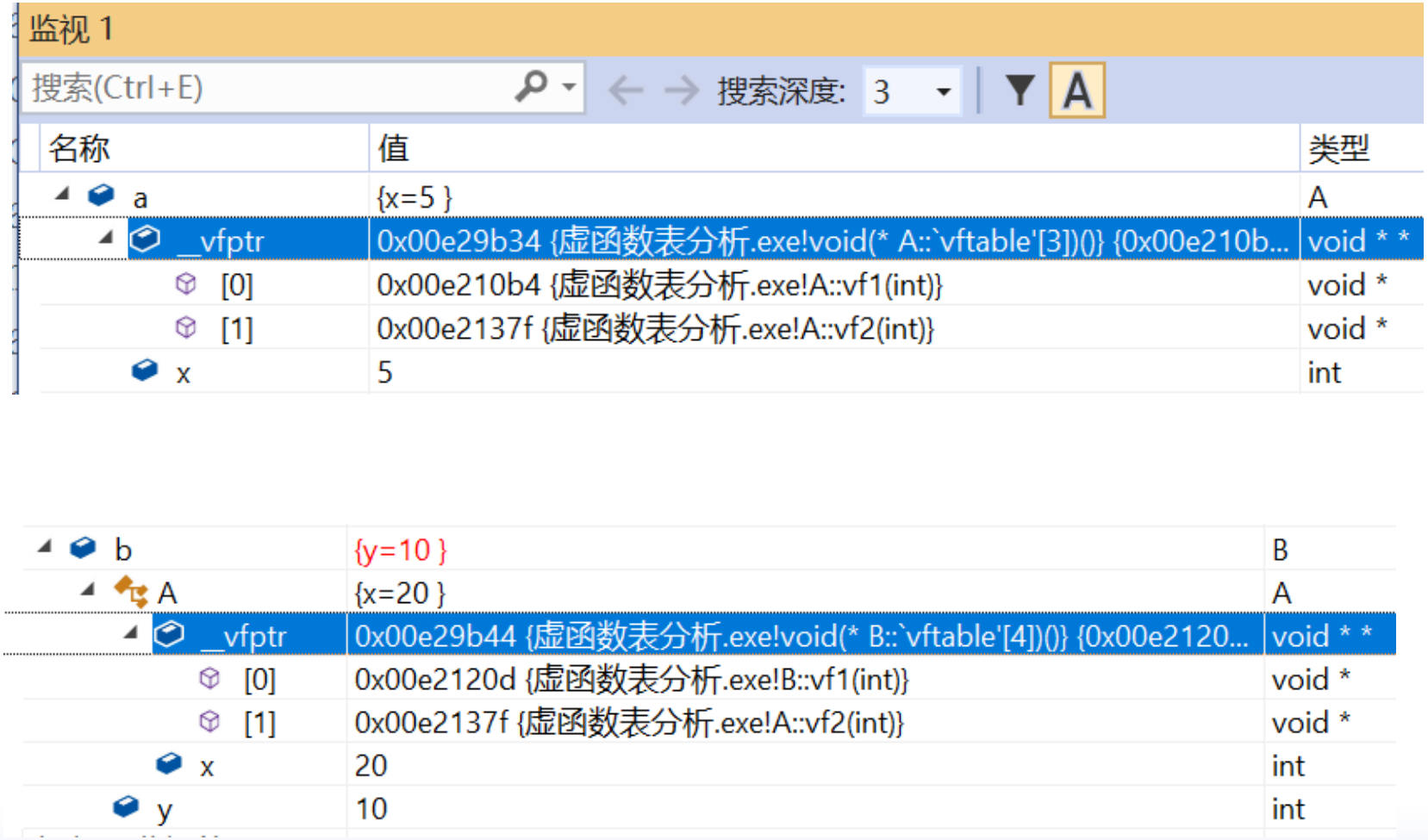
```
A &ra =a;
 ra.fa(10);
 push        0Ah
 mov         ecx,dword ptr [ra]
 call        A::fa (0E210BEh)
```

6、在有继承关系时，派生类的虚函数表如何变迁？

```
class B : public A {
public:
    int y;
    B(int y) :A(2 * y) { B::y = y;    }
    void vf1(int v) { cout << 4 * y + v << endl; }
    virtual void vf3() { cout << " new  virtual func" << endl; }
};
B  b(10);     // sizeof(B) ==12
```

b	{y=10 }	B
A	{x=20 }	A
__vfptr	0x00e29b44 {虚函数表分析.exe!void(* B::`vftable'[4])()} {0x00e2120...	void * *
[0]	0x00e2120d {虚函数表分析.exe!B::vf1(int)}	void *
[1]	0x00e2137f {虚函数表分析.exe!A::vf2(int)}	void *
x	20	int
y	10	int

8.1 虚函数


监视 1
搜索(Ctrl+E)
搜索深度: 3
名称
值
类型
a
{x=5 }
A
__vfptr
0x00e29b34 {虚函数表分析.exe!void(* A::`vftable'[3])()} {0x00e210b...
void * *
[0]
0x00e210b4 {虚函数表分析.exe!A::vf1(int)}
void *
[1]
0x00e2137f {虚函数表分析.exe!A::vf2(int)}
void *
x
5
int
b
{y=10 }
B
A
{x=20 }
A
__vfptr
0x00e29b44 {虚函数表分析.exe!void(* B::`vftable'[4])()} {0x00e2120...
void * *
[0]
0x00e2120d {虚函数表分析.exe!B::vf1(int)}
void *
[1]
0x00e2137f {虚函数表分析.exe!A::vf2(int)}
void *
x
20
int
y
10
int

8.1 虚函数

比较：在对象 a 中 与 对象b 中虚函数表的差异

b.__vfptr[0]	0x00ca1212 {虚函数表分析.exe!B::vf1(int)}
b.__vfptr[1]	0x00ca1389 {虚函数表分析.exe!A::vf2(int)}
b.__vfptr[2]	0x00ca12e4 {虚函数表分析.exe!B::vf3(void)}
b.__vfptr[3]	0x00000000
a.__vfptr[0]	0x00ca10b4 {虚函数表分析.exe!A::vf1(int)}
a.__vfptr[1]	0x00ca1389 {虚函数表分析.exe!A::vf2(int)}
a.__vfptr[2]	0x00000000

A类中 有 2个虚函数

B类中，存在同名的函数 vf1，地址覆盖

直接继承的函数 vf2，地址保持

新增的虚函数 vf3，新增地址

通过对象 与 通过指针（引用）访问虚函数的差别

```
B   b(10);
b.vf1(1);
 push      1
 lea       ecx,[b]
 call      B::vf1 (0E2120Dh)
    b.vf2(1);
 push      1
 lea       ecx,[b]
 call      A::vf2 (0E2137Fh)
    b.vf3( );
 lea       ecx,[b]
 call      B::vf3 (0E212DAh)
```

```
B   *pb = &b;
pb->vf1(1);
push     1
mov      eax,dword ptr [pb]
mov      edx,dword ptr [eax]
mov      ecx,dword ptr [pb]
mov      eax,dword ptr [edx]
call     eax
pb->vf2(1);
push     1
mov      eax,dword ptr [pb]
mov      edx,dword ptr [eax]
mov      ecx,dword ptr [pb]
mov      eax,dword ptr [edx+4]
call     eax
```

7、基类指针（或引用）指向子类对象，能访问哪些函数？

```
A* p = &b;
p->vf1(1);     // 虚函数表中 vf1的地址已变为 B类 vf1 的地址
p->A::vf1(1);     // 调用 A类的 vf1
                  // 直接调用A类函数，不通过虚函数表

p->vf2(2);
p->vf3();  // error vf3 不是 A类的成员
```

通过基类指针/引用，只能访问基类的函数

实验总结

1、有虚函数时，对象的存储空间是如何布局的？

2、虚函数表中存放什么信息？

3、通过对象访问虚/非虚函数，机器代码有无差别？

4、通过对象、对象指针或对象引用 访问虚函数，编译生成的代码有无差别？

5、通过对象、对象指针或对象引用 访问非虚函数，编译生成的代码有无差别？

6、在有继承关系时，派生类的虚函数表如何变迁？

7、基类指针/引用指向子类对象，能调用哪些函数？

1、增加了4个字节
虚函数表指针

2、虚函数的入口地址

3、无差别

4、有差别
实现细节……

5、无差别

6、继承、覆盖、新增

7、编译按定义的类型来检查

8.1 虚函数

基类指针（引用）指向子类对象，
在调用形式为访问基类的虚函数时，
实际访问的是子类中定义的同名函数 。

8.1 虚函数

- 虚函数一般在基类的public部分（注意可访问性检查）。
- 在派生类定义取代型虚函数时，函数原型应和基类的虚函数相同。
- 在派生类，无论是否使用 virtual 保留字都将成为虚函数。
- 虚函数只有在具有继承关系的类层次中才需要表现多态。

```
fruit  :          *fruitptr;
    virtual  void  EatFruit();

Apple :           fruitptr=&o_apple;
     void  EatFruit( );      // 虚函数        fruitptr->EatFruit();
     void  EatFruit(int x);  // 新增的成员函数
```

8.1 虚函数

- 虚函数一般在基类的**public**或**protected**部分。
- 在派生类定义取代型虚函数时，函数原型应和基类的虚函数相同。
- 在派生类，无论是否使用 **virtual** 保留字都将成为虚函数。
- 虚函数只有在具有继承关系的类层次中才需要表现多态。

```
fruit :  virtual  void  EatFruit();

Apple :
      void  EatFruit( );        // 虚函数
      void  EatFruit(int x);  // 新增的成员函数
```

8.1 虚函数

- 构造函数不能定义为虚函数

  构造对象时类型是确定的，不需根据类型不同表现多态行为。

- 析构函数可定义为虚函数

  派生类的析构函数可通过父类指针、引用或**delete**调用。

虚函数VS 函数重载

函数重载

- 函数名称相同，参数不同；
- 可以是成员函数和非成员函数；
- 以传递参数的差别，确定调用哪一个函数。

虚函数

- 函数名称相同、参数、返回值相同；
  （隐含的第一参数是不同的）
- 只能是成员函数；
- 根据对象的不同，去调用不同类的虚函数。

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。

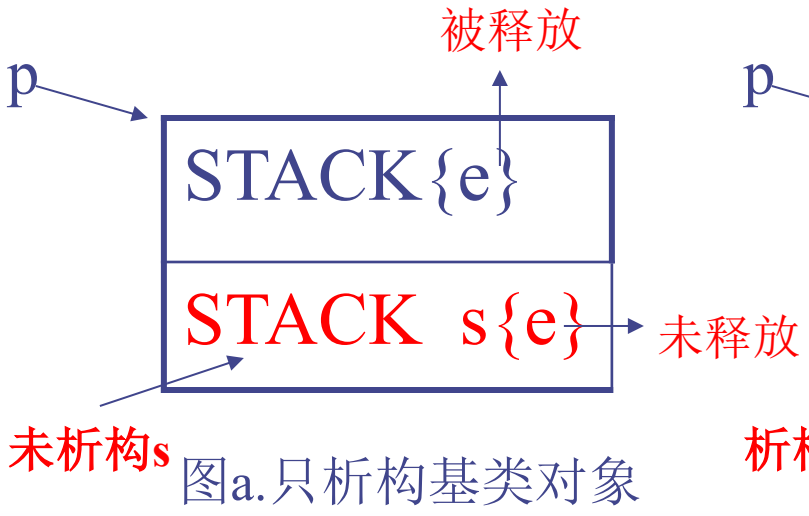
- 在使用delete运算符删除一个对象时，
  为了保证执行的析构函数就是该对象自己的析构函数，
  应将析构函数定义为虚析构函数。

8.2 虚析构函数

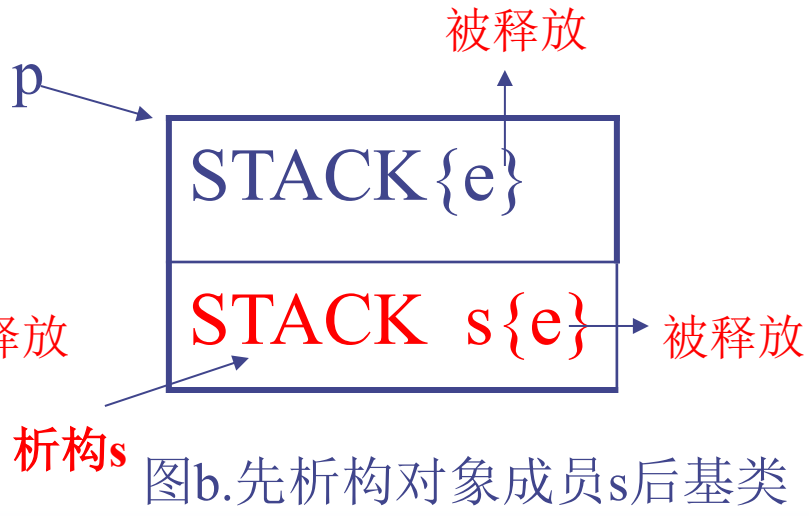

```
class STACK{
   int *e, p, c;
public:
   virtual  int  getp( ){ return p; }
   virtual  int  push(int f){ return  p<c?(e[p++]=f,1): 0; }
   virtual  int  pop (int&f){ return  p>0?(f=e[--p],1): 0; }
   STACK(int m): e(new int[m]), c(e?m:0), p(0){ }
   virtual ~STACK( ){ if(e){ delete e; e=0; c=0; p=0;}}
};

class QUEUE: public STACK{//公有派生，基类和派生类构成父子关系
   STACK s;
public:
   virtual int enter(int f) { return s.getp( ) ? push(f): s.push(f); }
   virtual int leave(int&f) { if (!s.getp( )) while(pop(f)) s.push(f);  return
    s.pop(f); }
   QUEUE(int m): STACK(m), s(m){  }
   ~QUEUE( ){ }
};
void main(void){  STACK *p=new QUEUE(9); delete  p; }
```

8.2 虚析构函数

- 如果~STACK没定义为虚函数，则delete p调用析构函数~STACK，只释放基类对象成员e占用的内存，未析构对象成员s
- 如果~STACK定义为虚函数，则delete p调用析构函数~QUEUE，把QUEUE(9)当作QUEUE对象析构(如图b)。



图a.只析构基类对象



图b.先析构对象成员s后基类

8.3 类的引用

类名　&p = 类的一个对象;

8.3 类的引用


```
#include <iostream>
using namespace std;
class A{
    int  i;
public:
    A(int i) { A::i=i; cout<<"A: i="<<i<<"\n"; };
    ~A( ) { if(i) cout<<"~A: i="<<i<<"\n"; i=0; };
};
void g(A &a) {cout<< "g is running\n"; }
        //调用时初始化形参a

void h(A &&a=A(5)) {cout<< "h is running\n"; }
        //调用时初始化形参a，A(5)为默认值
```

8.3 类的引用


```
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
   cout<<"CALL g(b)\n";
   g(b);          //使用同类型的传统左值作为实参调用函数g()
   h( );          //使用无址右值A(5)作为实参初始化形参a
   h(A(4));       //使用无址右值A(4)作为实参初始化形参a
   cout<<"main return\n";
   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
```

8.3 类的引用

- 当类包含指针成员时，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，一般应自定义：

```
A( )
A(A&&) noexcept
A(const A&)
A& operator=(const A&)
A& operator=(A&&) noexcept
~A( )
```

8.3 类的引用


```
class  QUEUE :

QUEUE(int m);//初始化队列：最多申请m个元素
QUEUE(const QUEUE& q); //用q深拷贝初始化队列
QUEUE(QUEUE&& q)noexcept;//用q移动初始化队列

    //深拷贝赋值并返回被赋值队列
virtual QUEUE& operator=(const QUEUE& q);

    //移动赋值并返回被赋值队列
virtual QUEUE& operator=(QUEUE&& q)noexcept;

virtual ~QUEUE();
```

8.3 类的引用

- 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。

8.3 类的引用

- 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。

8.3 类的引用


```
STACK(int m);                    //初始化栈：最多存放2m-2个元素
STACK(const STACK& s);           //用栈s深拷贝初始化栈
STACK(STACK&& s)noexcept;        //用栈s移动拷贝初始化栈

STACK& operator=(const STACK& s);    //深拷贝赋值并返回被赋值栈
STACK& operator=(STACK&& s)noexcept;//移动赋值并返回被赋值栈

~STACK()noexcept;                          //销毁栈
```

```
STACK::STACK(int m):QUEUE(m),q(m){ }

STACK::STACK(const STACK& s):QUEUE(s),q(s.q) { }

STACK::STACK(STACK&& s)noexcept
        : QUEUE((QUEUE &&)s),q((QUEUE &&)s.q)   {  }
```

8.4 抽象类

virtual 函数类型 函数名(形式参数表) = 0;

纯虚函数没有函数体。

函数体由派生类给出。

含有纯虚函数的类：抽象类。

设计抽象类的目的：

建立一个公有的接口，动态的使用它的成员函数。

8.4 抽象类

- 抽象类常用作派生类的基类，不能有具体的对象（不能有抽象类定义的变量、常量或new产生）。

- 如果派生类没有重新定义该基类的虚函数，或者定义了基类所没有新的纯虚函数，则派生类也会成为抽象类。

- 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了函数体，则该派生类就会成为具体类。

8.4 抽象类


```
class A {
public:
    virtual void f1( )=0;
    virtual void f2( )=0;
    void f3( ) {cout<<“A3"<<endl;}
};
void A::f1( ) {cout<<"A1 "<<endl;}
void A::f2( ) {cout<<"A2 "<<endl;}
```

A 为抽象类

- 可以有非虚函数 f3
- 尽管在A的体外定义了f1, f2，但A仍是抽象类

// A a1; error 抽象类不能定义任何对象

8.4 抽象类

```
class B : public A {
private:
   void f2( )    {
        this->A::f2( );
        cout<<"B2 "<<endl;
    }
};
```

B 为抽象类

- B 中未重新定义 f1
- B 中重新定义了 f2

A：
public: f1、f2、f3

B：
public:
  A::f1、A::f2、A::f3
private：
  f2

B： f1 、f3前，
    可省略类的限定符
public:
   f1、A::f2、f3
private：
   f2

8.4 抽象类

```
class C:public B {
private:
   void f1() {cout<<"C1 "<<endl;}
public:
   void f4() {cout<<“f4 "<<endl;}
};
void main(void)
{    C  c;
     A  *p=(A *)&c;
     p->f1( );    //  显示 C1
     p->f2( );    //  显示 A2、B2
     p->f3( );    //  显示 A3
     p->f4( );   // error  f4 不是A类的成员
}
```

A：
public: f1、f2、f3

B：public:
f1、A::f2、f3
private： f2

C：public:
A::f1、A::f2、f3
f4
private: f1

8.4 抽象类

```
class C: public B {
private:    void f1( ) {cout<<"C1 "<<endl;}
public:     void f4( ) {cout<<"f4 "<<endl; }
};
void main(void)
{    C  c;
     A  a1;      // A 无法实例化抽象类
     B  b1;      //  B 无法实例化抽象类
     A  *a2;
     a2= new A;  //  A 无法实例化抽象类
     c.f1( );          //  无法访问私有成员（在C类中申明）
     c.f2( );          //  无法访问私有成员（在B类中申明）
}   //  c类中未定义f2, B中定义了 f2, 同时继承了 A 类的f2,
    //  按作用域小优先的原则，c.f2() 等价于  c.B::f2()
```

C：public:
A::f1、A::f2、f3
f4
private: f1

8.4 抽象类


```
class C:public B {
private:    void f1() {cout<<"C1 "<<endl;}
public:     void f4() {cout<<“f4 "<<endl;}
};
void main(void)
{     C  c;
      c.f1();          //  无法访问私有成员（在C类中申明）
      c.A::f1();     //   f1 在 A是public,  A ->public 派生 B
                       //                B  ->public 派生 C
      c.f4();
      c.f2( );   // 等同于 c.B::f2(); 无法访问私有成员
      c.A::f2( );    //显示 A2
}
```

8.5 虚函数友元与晚期绑定

虚函数友元

- 一个函数是虚函数
- 该虚函数是另外一个类的友元
- 友元关系不能传递
- 友元关系不能继承
- 友元特性 与 是否是 虚函数（或者实例函数）无关

8.5 虚函数友元与晚期绑定

晚期绑定

- 编译程序为有虚函数的类创建一个虚函数入口地址表VFT，
- 表首地址存放在对象的起始单元中。
- 当对象调用虚函数时，通过其起始单元得到VFT首址，动态绑定到相应的函数成员。

8.5 虚函数友元与晚期绑定

设基类A和派生类B都有虚函数，对应的虚函数入口地址表分别为VFT_A和VFT_B。

VFT_A

在A类中申明的虚函数

VFT_B

在B类中申明的虚函数

A类中未被取代的虚函数

派生类对象b构造阶段

- 先将VFT_A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时，A类对象调用的虚函数与VFT_A绑定，执行的虚函数将是A类的函数；
- 在B类构造函数的函数体执行前，将VFT_B的首地址存放到b的起始单元，绑定和执行的将是B类的函数。
- 如果B类没有定义这样的函数，根据面向对象的作用域，将调用基类A的相同原型的函数。

8.5 虚函数友元与晚期绑定

生存阶段：

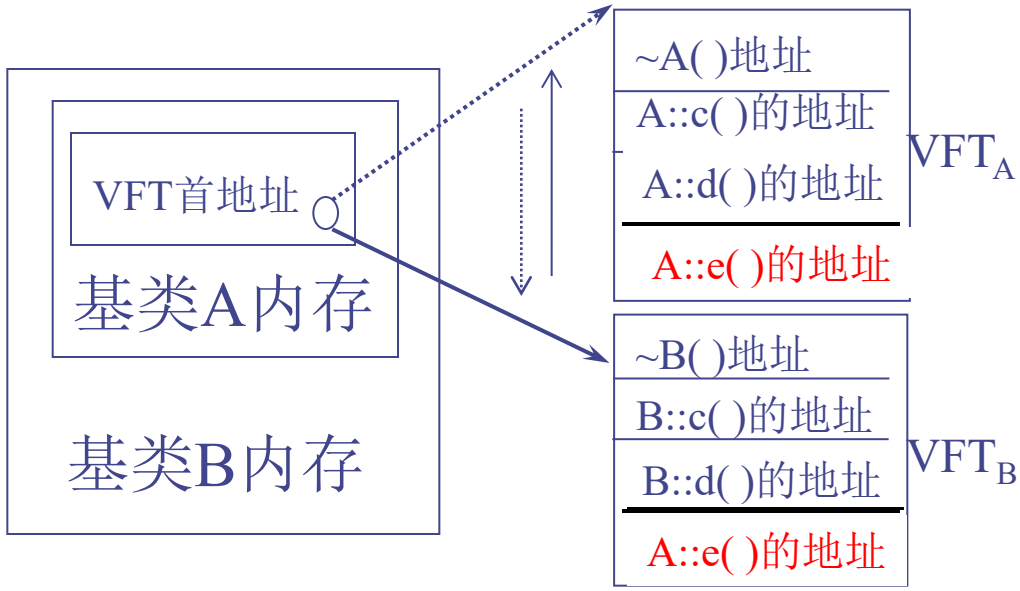
b的起始单元指向VFT_B，绑定和执行的将是B类的函数。如果B类没有定义这样的函数，根据面向对象的作用域，将调用基类A的相同原型的函数。

析构阶段：

b的起始单元指向VFT_B，绑定和执行的方式同上；在b的析构函数执行完后、基类的析构函数执行前，将VFT_A首地址存放到b的起始单元，此后绑定和执行的将是A的函数。如果A类没有定义这样的函数，根据面向对象的作用域，将调用基类A的相同原型的函数。

8.5 虚函数友元与晚期绑定

```
#include <iostream.h>
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( );}//virtual可省
};
```




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

输出结果（先构造的后析构：像栈）

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

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，则派生类对象将其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。
- 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。

8.6 有虚函数时的内存布局

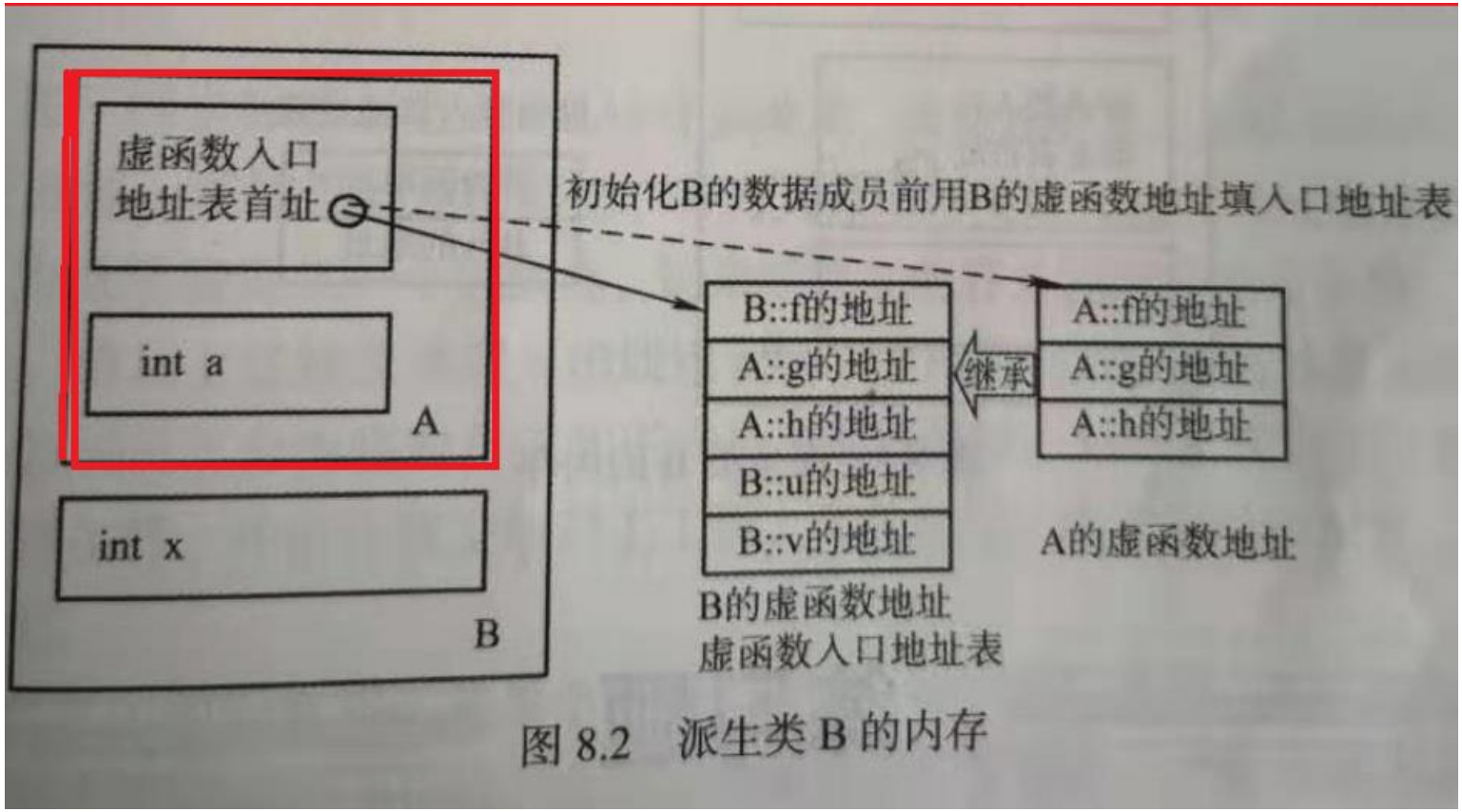
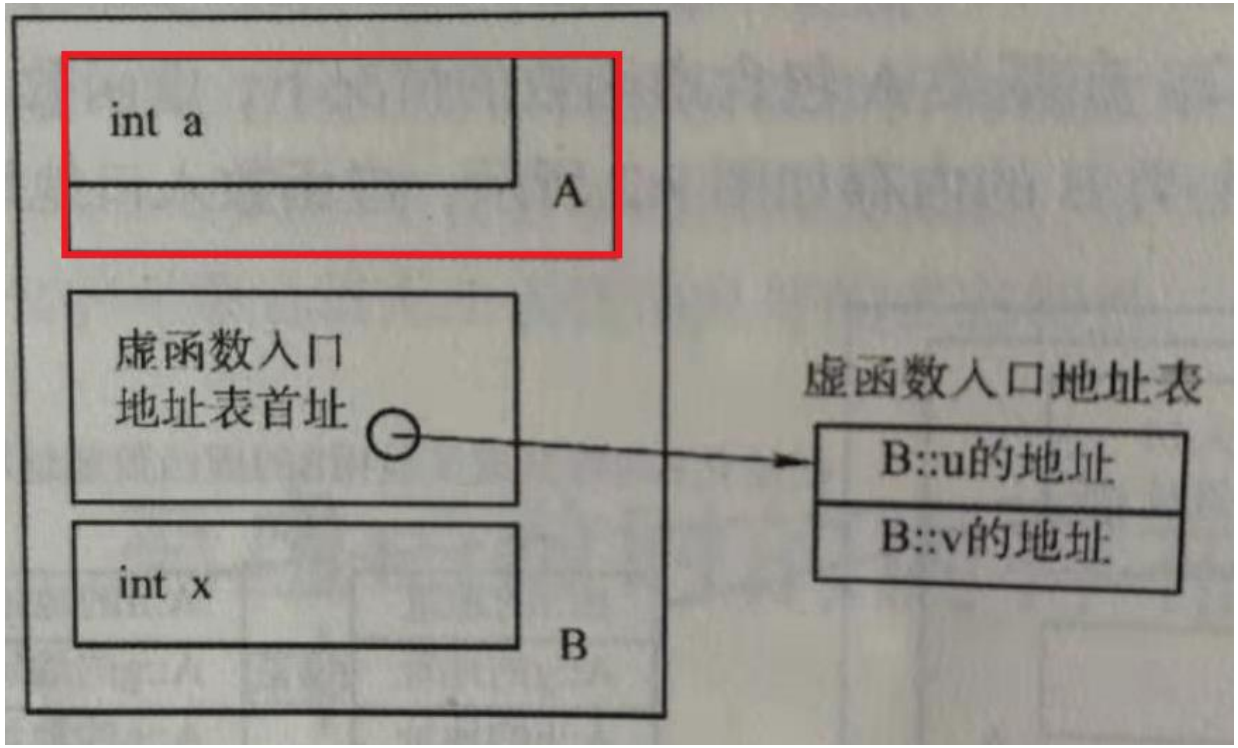


图 8.2 派生类 B 的内存

基类有虚函数时，派生类的内存布局

8.6 有虚函数时的内存布局



基类无虚函数时，派生类的内存布局

总结

- 多态性
- 虚函数
- 纯虚函数和抽象类
- 运行时多态的实现机理

练习

学校人员有学生、教师、职员等，各种人员的信息不同。

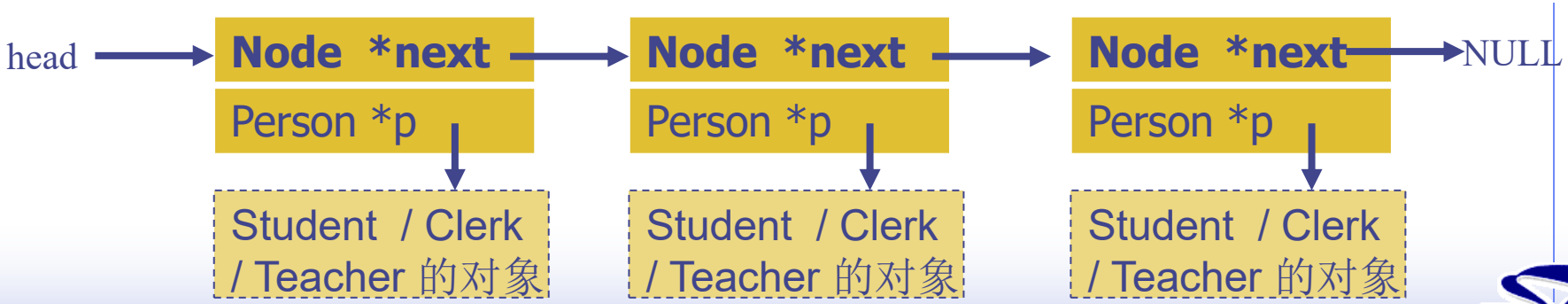
将不同人员的信息链接在一个表上，形成异质链表

实现人员的新增、退出、显示等功能

即实现链表结点的插入、删除、输出信息等工作。

设计建议

- 建立一个 基类 ： Person, 包含 学生、教师、职员的共同信息，如姓名、年龄、社会保险号等；
- 从基类派生出 学生 Student、教师 Teacher、职员 类 Clerk，在各类中增加各自的新成员；
- 定义一个链表结点类，含有 Person 的指针成员，结点的下一个成员。



设计建议

- 在 Person 中，提供信息输出的虚函数，并实现基本信息的输出；在 学生、教师、职员等中，实现信息输出函数时，应调用基类的相应函数；
- 使用循环的方法，显示链表中各结点对应的人员信息；
- 在链表结点类中，有 增加链表结点、删除链表结点、显示链表结点对应人员信息的成员函数。
- 注意空间的申请和释放，防止内存泄露。