第七章 模板与泛型编程

目录

学习目标

1. 掌握模板的定义和基本使用方法，包括函数模板和类模板；
2. 学会运用模板实现泛型编程；
3. 掌握常用排序算法和二分查找算法。

概念　代码　说明　问题/答案　注意

7.1 函数模板

泛型编程

泛型编程是指一种采用与数据类型无关的方式编写代码的方法，是代码重用的重要手段。

模板是泛型编程的基础，它将数据类型参数化，为数据结构和算法的抽象提供通用的代码解决方案

7.1 函数模板

泛型编程

泛型编程是指一种采用与数据类型无关的方式编写代码的方法，是代码重用的重要手段。

模板是泛型编程的基础，它将数据类型参数化，为数据结构和算法的抽象提供通用的代码解决方案

请观察下面两组代码：

getMax 函数定义一

```
const int & getMax(const int &a, const int &b){
    return a>b ? a : b;
}
```

getMax 函数定义二

```
const string & getMax(const string &a, const string
  &b){
    return a>b ? a : b;
}
```

7.1 函数模板

泛型编程

泛型编程是指一种采用与数据类型无关的方式编写代码的方法，是代码重用的重要手段。

模板是泛型编程的基础，它将数据类型参数化，为数据结构和算法的抽象提供通用的代码解决方案

请观察下面两组代码：

getMax 函数定义一

```
const int & getMax(const int &a, const int &b){
    return a>b ? a : b;
}
```

getMax 函数定义二

```
const string & getMax(const string &a, const string
  &b){
    return a>b ? a : b;
}
```

问题

这两个定义有什么相同点?

7.1.1 定义函数模板

定义函数模板来实现一类函数的通用代码解决方案：

getMax 函数模板定义

```
template <typename T>
const T & getMax(const T &a, const T &b){
    return a>b ? a : b;
}
```

7.1.1 定义函数模板

定义函数模板来实现一类函数的通用代码解决方案：

getMax 函数模板定义

```
template <typename T>
const T & getMax(const T &a, const T &b){
    return a>b ? a : b;
}
```

说明

- 模板的定义以关键字 `template` 开始
- 模板参数列表放在一对尖括号里面
- 每一个参数前面用 `typename` （或 `class` ）声明
- 如果列表含有多个模板参数，则参数之间用逗号分开

7.1.1 定义函数模板

定义函数模板来实现一类函数的通用代码解决方案：

getMax 函数模板定义

```
template <typename T>
const T & getMax(const T &a, const T &b){
    return a>b ? a : b;
}
```

说明

- 模板的定义以关键字 `template` 开始
- 模板参数列表放在一对尖括号里面
- 每一个参数前面用 `typename` （或 `class` ）声明
- 如果列表含有多个模板参数，则参数之间用逗号分开

注意

模板的声明和定义应放在同一个头文件里

7.1.2 实例化函数模板

实例化模板函数时，使用者需要提供具体的数据类型或值:

7.1.2 实例化函数模板

实例化模板函数时，使用者需要提供具体的数据类型或值:

实例化方法一

```
cout << getMax(1.0, 2.5) << endl; // T为double
```

说明

编译器在编译的过程中，利用实参来推断模板参数的类型

7.1.2 实例化函数模板

实例化模板函数时，使用者需要提供具体的数据类型或值:

实例化方法一

```
cout << getMax(1.0, 2.5) << endl; // T为double
```

说明

编译器在编译的过程中，利用实参来推断模板参数的类型

实例化方法二

```
cout << getMax<double>(1.0, 2.5) << endl; // 显式指明
  T为 double
cout << getMax<string>("Hi␣", "C++") << endl; // 显
  式指明T为 string
```

说明

用户显式地指明模板参数的类型

7.1.2 实例化函数模板 — 为类类型添加模板支持

当模板函数的实参为类类型时，需要为类对象添加模板使用到的相关操作：

7.1.2 实例化函数模板 — 为类类型添加模板支持

当模板函数的实参为类类型时，需要为类对象添加模板使用到的相关操作：

示例代码

```
Fraction a(3,4),b(2,5);
cout << getMax(a, b) << endl; // T为Fraction类型
```

7.1.2 实例化函数模板 — 为类类型添加模板支持

当模板函数的实参为类类型时，需要为类对象添加模板使用到的相关操作：

示例代码

```
Fraction a(3,4),b(2,5);
cout << getMax(a, b) << endl; // T为Fraction类型
```

问题

在编译上面代码时提示编译错误，原因可能是什么？

7.1.2 实例化函数模板 — 为类类型添加模板支持

当模板函数的实参为类类型时，需要为类对象添加模板使用到的相关操作：

示例代码

```
Fraction a(3,4),b(2,5);
cout << getMax(a, b) << endl; // T为Fraction类型
```

问题

在编译上面代码时提示编译错误，原因可能是什么？

答案

在 `getMax` 模板内部用到了关系 `>` 运算，但 `Fraction` 类不支持关系 `>` 运算

7.1.2 实例化函数模板 — 为类类型添加模板支持

给 Fraction 类型添加关系 > 运算支持：

Fraction 类 关系 > 运算 声明及定义

```
class Fraction{
    // 将关系>运算声明为Fraction类的友元
    friend bool operator>(const Fraction &lhs, const
      Fraction &rhs);
    // 其它成员与之前一致
    ...
};

bool operator>(const Fraction &lhs, const Fraction &
  rhs){
    return lhs.m_numerator*rhs.m_denominator > lhs.
      m_denominator*rhs.m_numerator;
}
```

说明

根据运算符重载的原则将关系运算符函数 operator> 作为 Fraction 类的辅助函数，并将其声明为 Fraction 类的友元

7.1.3 模板参数类型

以下两组代码中，模板参数有什么区别?

foo 函数定义

```
template <typename T, typename U>
T foo(const T &t, const U &u) {
    return T(t);
}
```

maxElem 函数定义

```
template<typename T, int size>
const T& maxElem(T(&arr)[size]) {
    T *p = &arr[0];
    for (auto i = 0; i < size; ++i)
        if (*p < arr[i])
            p = &arr[i];
    return *p;
}
```

7.1.3 模板参数类型

以下两组代码中，模板参数有什么区别?

foo 函数定义

```
template <typename T, typename U>
T foo(const T &t, const U &u) {
    return T(t);
}
```

maxElem 函数定义

```
template<typename T, int size>
const T& maxElem(T(&arr)[size]) {
    T *p = &arr[0];
    for (auto i = 0; i < size; ++i)
        if (*p < arr[i])
            p = &arr[i];
    return *p;
}
```

类型参数

作为类型说明符，指定函数的返回值类型、形参类型以及函数体内对象的类型等

7.1.3 模板参数类型

以下两组代码中，模板参数有什么区别?

foo 函数定义

```
template <typename T, typename U>
T foo(const T &t, const U &u) {
    return T(t);
}
```

maxElem 函数定义

```
template<typename T, int size>
const T& maxElem(T(&arr)[size]) {
    T *p = &arr[0];
    for (auto i = 0; i < size; ++i)
        if (*p < arr[i])
            p = &arr[i];
    return *p;
}
```

类型参数

作为类型说明符，指定函数的返回值类型、形参类型以及函数体内对象的类型等

非类型参数

代表一个值，当编译器实例化该模板时必须要为其提供一个常量表达式

7.1.3 模板参数类型

以下两组代码中，模板参数有什么区别?

foo 函数定义

```
template <typename T, typename U>
T foo(const T &t, const U &u) {
    return T(t);
}
```

maxElem 函数定义

```
template<typename T, int size>
const T& maxElem(T(&arr)[size]) {
    T *p = &arr[0];
    for (auto i = 0; i < size; ++i)
        if (*p < arr[i])
            p = &arr[i];
    return *p;
}
```

类型参数

作为类型说明符，指定函数的返回值类型、形参类型以及函数体内对象的类型等

非类型参数

代表一个值，当编译器实例化该模板时必须要为其提供一个常量表达式

说明

maxElem 函数模板中的函数形参 arr 为一个指向含有 size 个 T 类型数据元素数组的引用

7.1.3 模板参数类型

调用 maxElem 函数：

maxElem 函数模板实例化

```
int arr[10] = {1,8,5,3};
int x = maxElem(arr); // 或者显式调用 maxElem<int
  ,10>(arr);
```

编译器将会生成如下版本的函数：

```
const int& maxElem(int (&arr)[10]);
```

7.1.3 模板参数类型

调用 maxElem 函数:

maxElem 函数模板实例化

```
int arr[10] = {1,8,5,3};
int x = maxElem(arr); // 或者显式调用 maxElem<int
  ,10>(arr);
```

问题

还有什么传递数组参数的方式?

编译器将会生成如下版本的函数:

```
const int& maxElem(int (&arr)[10]);
```

7.1.3 模板参数类型

调用 maxElem 函数：

maxElem 函数模板实例化

```
int arr[10] = {1,8,5,3};
int x = maxElem(arr); // 或者显式调用 maxElem<int
  ,10>(arr);
```

编译器将会生成如下版本的函数：

```
const int& maxElem(int (&arr)[10]);
```

问题

还有什么传递数组参数的方式?

答案

还可以通过指针传递数组首地址的方式

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

如果前面定义的 getMax 函数模板在调用过程中的实参为指针类型：

getMax 函数调用一

```
int a = 1, b = 2;
getMax(&a, &b);
```

说明

需要返回两个指针所指向的对象的比较结果

getMax 定义一

```
template <typename T>
const T & getMax(const T & a, const T & b){
    return a > b ? a : b;
}
```

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

如果前面定义的 getMax 函数模板在调用过程中的实参为指针类型：

getMax 函数调用一

```
int a = 1, b = 2;
getMax(&a, &b);
```

getMax 定义一

```
template <typename T>
const T & getMax(const T & a, const T & b){
    return a > b ? a : b;
}
```

说明

需要返回两个指针所指向的对象的比较结果

问题

getMax 函数模板的定义还能否满足要求?

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

如果前面定义的 getMax 函数模板在调用过程中的实参为指针类型：

getMax 函数调用一

```
int a = 1, b = 2;
getMax(&a, &b);
```

getMax 定义一

```
template <typename T>
const T & getMax(const T & a, const T & b){
    return a > b ? a : b;
}
```

说明

需要返回两个指针所指向的对象的比较结果

问题

getMax 函数模板的定义还能否满足要求?

答案

不能。编译器推演出的参数 T 为 int*，函数体里面的操作变成了两个指针对象的比较

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

为此，需要重载一个 getMax 模板函数：

getMax 函数调用二

```
int a = 1, b = 2;
getMax(&a, &b);
```

getMax 函数模板重载

```
template <typename T>
T* const & getMax( T* const &a, T* const &b){
    return *a>*b ? a : b;
}
```

说明

模板实参 T 的类型为 int，*a 和 *b 指向的是 int 对象，函数体里面的操作是两个 int 对象的比较

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

进一步，如果调用的实参是指向字符串的指针：

getMax 函数调用三

```
const char *a = "Hi", *b = "C++";
cout << getMax(a, b) << endl;
```

说明

需要返回指向字符串值较大的字符指针

getMax 函数定义二

```
template <typename T>
const T & getMax(const T & a, const T & b){
    return a > b ? a : b;
}

template <typename T>
T* const & getMax( T* const &a, T* const &b){
    return *a>*b ? a : b;
}
```

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

进一步，如果调用的实参是指向字符串的指针：

getMax 函数调用三

```
const char *a = "Hi", *b = "C++";
cout << getMax(a, b) << endl;
```

getMax 函数定义二

```
template <typename T>
const T & getMax(const T & a, const T & b){
    return a > b ? a : b;
}

template <typename T>
T* const & getMax( T* const &a, T* const &b){
    return *a>*b ? a : b;
}
```

说明

需要返回指向字符串值较大的字符指针

问题

现有的两个 getMax 函数的定义还能否满足要求?

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

进一步，如果调用的实参是指向字符串的指针：

getMax 函数调用三

```
const char *a = "Hi", *b = "C++";
cout << getMax(a, b) << endl;
```

getMax 函数定义二

```
template <typename T>
const T & getMax(const T & a, const T & b){
    return a > b ? a : b;
}

template <typename T>
T* const & getMax( T* const &a, T* const &b){
    return *a>*b ? a : b;
}
```

说明

需要返回指向字符串值较大的字符指针

问题

现有的两个 getMax 函数的定义还能否满足要求?

答案

不能。*a 和 *b 指向的是单个字符，函数体里面的操作变成了两个字符的比较

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

为此，需要特例化一个 getMax 模板函数：

getMax 函数调用三

```
const char *a = "Hi", *b = "C++";
cout << getMax(a, b) << endl;
```

getMax 函数模板特化

```
template <>
const char* const & getMax(const char* const &a,
  const char* const &b){
    return strcmp(a,b) > 0 ? a : b;
}
```

说明

模板实参 T 的类型为 const char*，函数形参 a 和 b 分别为一个指向 const char 对象的 const 指针的引用，函数体里面的操作是两个字符串值的比较

说明

模板参数列表为空，表明将显式提供所有模板实参

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

为此，需要特例化一个 getMax 模板函数：

getMax 函数调用三

```
const char *a = "Hi", *b = "C++";
cout << getMax(a, b) << endl;
```

getMax 函数模板特化

```
template <>
const char* const & getMax(const char* const &a,
  const char* const &b){
    return strcmp(a,b) > 0 ? a : b;
}
```

说明

模板实参 T 的类型为 const char*，函数形参 a 和 b 分别为一个指向 const char 对象的 const 指针的引用，函数体里面的操作是两个字符串值的比较

说明

模板参数列表为空，表明将显式提供所有模板实参

注意

一个特例化的函数模板本质上是一个实例，而非函数名的一个重载版本

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

还可以通过模板特化改善算法：

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

还可以通过模板特化改善算法：

Swap 函数模板定义

```
template<typename T>
void Swap(T &a, T &b) {
    T c(a); // 复制构造对象 c
    a = b;
    b = c;
}
```

说明

需要构造一个辅助的局部对象 c，才能完成 a 和 b 的交换

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

还可以通过模板特化改善算法：

Swap 函数模板定义

```
template<typename T>
void Swap(T &a, T &b) {
    T c(a); // 复制构造对象 c
    a = b;
    b = c;
}
```

说明

需要构造一个辅助的局部对象 c，才能完成 a 和 b 的交换

如果 T 是 int，可以利用模板特化做出优化：

7.1.3 模板参数类型 — 模板重载与特化

还可以通过模板特化改善算法：

Swap 函数模板定义

```
template<typename T>
void Swap(T &a, T &b) {
    T c(a); // 复制构造对象 c
    a = b;
    b = c;
}
```

说明

需要构造一个辅助的局部对象 c，才能完成 a 和 b 的交换

如果 T 是 int，可以利用模板特化做出优化：

Swap 函数模板特化

```
template<>
void Swap(int &a, int &b)
    a ^= b;
    b ^= a;
    a ^= b;
}
```

说明

利用异或操作完成两个整数的交换，没有创建辅助对象，没有产生构造和析构行为，提高了执行效率

7.1.4 类成员模板

类的成员函数也可以定义为函数模板：

类 X 定义

```
class X{
    void * m_p = nullptr;
public:
    template <typename T>
    void reset(T *t) { m_p = t; }
};
```

说明

成员函数 reset 定义为一个函数模板，接受不同类型的指针实参

7.1.4 类成员模板

类的成员函数也可以定义为函数模板：

类 X 定义

```
class X{
    void * m_p = nullptr;
public:
    template <typename T>
    void reset(T *t) { m_p = t; }
};
```

reset 函数调用

```
int i = 0;
double d = 0;
X x;
x.reset(&i); // 或者x.reset<int>(&i);
x.reset(&d); // 或者x.reset<double>(&d);
```

说明

成员函数 reset 定义为一个函数模板，接受不同类型的指针实参

说明

- 第一条 reset 函数调用将模板成员函数的模板参数 T 与 int 类型绑定，m_p 存放整型对象 i 的地址
- 第二条 reset 函数调用，编译器推断出模板成员函数的模板参数 T 为 double 类型，并重置 m_p 的值为 double 类型对象 d 的地址

7.1.5 可变参函数模板

C++11 新标准允许我们使用数目可变的模板参数：

foo 函数定义

```
template<typename... Args >
    void foo(Args... args) {
    // 打印参数包args中参数的个数
    cout << sizeof...(args) << endl;
}
```

说明

- 可变数目的参数称为参数包，用省略号“...”表示，可包含 0 到任意个模板参数
- foo 函数的形参 args 为模板参数包类型，接受可变数目的实参

7.1.5 可变参函数模板

C++11 新标准允许我们使用数目可变的模板参数：

foo 函数定义

```
template<typename... Args >
    void foo(Args... args) {
    // 打印参数包args中参数的个数
    cout << sizeof...(args) << endl;
}
```

foo 函数调用

```
foo(); // 输出: 0
foo(1,1.5); // 输出: 2
foo(1,1.5,"C++"); // 输出: 3
```

说明

- 可变数目的参数称为参数包，用省略号“...”表示，可包含 0 到任意个模板参数
- foo 函数的形参 args 为模板参数包类型，接受可变数目的实参

7.1.5 可变参函数模板 — 包展开

可以通过递归的方式展开函数模板参数包：

print 函数定义

```
template<typename T, typename... Args>
ostream& print(ostream &os, const T &t, const Args
  &... rest) {
    os << t << "␣"; // 打印第一个参数
    return print(os, rest...); // 递归调用
}

template<typename T>
ostream& print(ostream &os, const T &t) {
    return os << t; // 打印最后一个参数
}
```

说明

- 第一次处理参数包中的第一个参数，然后用剩余参数调用自身
- 当参数包里面只剩下一个参数时，非可变参模板与可变参模板都匹配，但是非可变参模板更特例化，编译器首选非可变参数版本

7.1.5 可变参函数模板 — 包展开

可以通过递归的方式展开函数模板参数包：

print 函数定义

```
template<typename T, typename... Args>
ostream& print(ostream &os, const T &t, const Args
  &... rest) {
    os << t << "␣"; // 打印第一个参数
    return print(os, rest...); // 递归调用
}

template<typename T>
ostream& print(ostream &os, const T &t) {
    return os << t; // 打印最后一个参数
}
```

print 函数调用

```
print(cout,1, 2.5, "C++") << endl; // 输出1 2.5 C++
```

说明

- 第一次处理参数包中的第一个参数，然后用剩余参数调用自身
- 当参数包里面只剩下一个参数时，非可变参模板与可变参模板都匹配，但是非可变参模板更特例化，编译器首选非可变参数版本

7.1.5 可变参函数模板 — 包展开

可以通过递归的方式展开函数模板参数包：

print 函数定义

```
template<typename T, typename... Args>
ostream& print(ostream &os, const T &t, const Args
  &... rest) {
    os << t << "␣"; // 打印第一个参数
    return print(os, rest...); // 递归调用
}

template<typename T>
ostream& print(ostream &os, const T &t) {
    return os << t; // 打印最后一个参数
}
```

print 函数调用

```
print(cout,1, 2.5, "C++") << endl; // 输出1 2.5 C++
```

说明

- 第一次处理参数包中的第一个参数，然后用剩余参数调用自身
- 当参数包里面只剩下一个参数时，非可变参模板与可变参模板都匹配，但是非可变参模板更特例化，编译器首选非可变参数版本

问题

print 函数的形参是左值引用，如果是右值引用呢?

7.1.5 可变参函数模板 — 转发参数包

两个函数的形参都是右值引用，forwardValue 函数调用报错，为什么?

forwardValue 函数及 rvalue 函数定义

```
void rvalue(int &&val){}

template<typename T>
void forwardValue(T &&val) {
    rvalue(val);
}
```

forwardValue 函数调用

```
forwardValue(42); // 错误
```

7.1.5 可变参函数模板 — 转发参数包

两个函数的形参都是右值引用，forwardValue 函数调用报错，为什么?

forwardValue 函数及 rvalue 函数定义

```
void rvalue(int &&val){}

template<typename T>
void forwardValue(T &&val) {
    rvalue(val);
}
```

forwardValue 函数调用

```
forwardValue(42); // 错误
```

forwardValue 函数调用细节

```
T &&val = 42; // 等同于auto &&val = 42
rvalue(val);
```

答案

- 右值引用声明 && 与类型推导结合可以与右值绑定，所以 val 为右值引用
- 临时对象 42 通过右值引用 val 引用之后生命期能延续是因为右值引用 val 是左值
- rvalue 函数只接受右值形参，但 val 是左值

7.1.5 可变参函数模板 — 转发参数包

两个函数的形参都是右值引用，forwardValue 函数调用报错，为什么?

forwardValue 函数及 rvalue 函数定义

```
void rvalue(int &&val){}

template<typename T>
void forwardValue(T &&val) {
    rvalue(val);
}
```

forwardValue 函数调用

```
forwardValue(42); // 错误
```

forwardValue 函数调用细节

```
T &&val = 42; // 等同于auto &&val = 42
rvalue(val);
```

答案

- 右值引用声明 && 与类型推导结合可以与右值绑定，所以 val 为右值引用
- 临时对象 42 通过右值引用 val 引用之后生命期能延续是因为右值引用 val 是左值
- rvalue 函数只接受右值形参，但 val 是左值

问题

可以让传入 rvalue 函数的实参保持原属性吗?

7.1.5 可变参函数模板 — 转发参数包

在 C++11 新标准下可以利用 `std::forward` 函数实现：

`std::forward` 函数描述性声明

```
template<typename T>
T&& forward(T val);
```

7.1.5 可变参函数模板 — 转发参数包

在 C++11 新标准下可以利用 std::forward 函数实现：

std::forward 函数描述性声明

```
template<typename T>
T&& forward(T val);
```

forwardValue 函数定义二

```
template<typename T>
void forwardValue(T &&val) {
    rvalue(std::forward<T>(val));
}
```

forwardValue 函数调用二

```
forwardValue(42); // 正确
int a = 42;
forwardValue(a); // 正确
```

7.1.5 可变参函数模板 — 转发参数包

在 C++11 新标准下可以利用 std::forward 函数实现：

std::forward 函数描述性声明

```
template<typename T>
T&& forward(T val);
```

forwardValue 函数定义二

```
template<typename T>
void forwardValue(T &&val) {
    rvalue(std::forward<T>(val));
}
```

forwardValue 函数调用二

```
forwardValue(42); // 正确
int a = 42;
forwardValue(a); // 正确
```

说明

当传入 forwardValue 的实参为 42 是右值，T 被推断为非引用类型，forward<T> 将返回右值

7.1.5 可变参函数模板 — 转发参数包

在 C++11 新标准下可以利用 std::forward 函数实现：

std::forward 函数描述性声明

```
template<typename T>
T&& forward(T val);
```

forwardValue 函数定义二

```
template<typename T>
void forwardValue(T &&val) {
    rvalue(std::forward<T>(val));
}
```

forwardValue 函数调用二

```
forwardValue(42); // 正确
int a = 42;
forwardValue(a); // 正确
```

说明

当传入 forwardValue 的实参为 42 是右值，T 被推断为非引用类型，forward<T> 将返回右值

说明

当传入 forwardValue 的实参为 a 是左值，T 被推断为左值引用类型，此时 forward<T> 将返回左值

7.1.5 可变参函数模板 — 转发参数包

在 C++11 新标准下可以利用 std::forward 函数实现：

std::forward 函数描述性声明

```
template<typename T>
T&& forward(T val);
```

forwardValue 函数定义二

```
template<typename T>
void forwardValue(T &&val) {
    rvalue(std::forward<T>(val));
}
```

forwardValue 函数调用二

```
forwardValue(42); // 正确
int a = 42;
forwardValue(a); // 正确
```

说明

当传入 forwardValue 的实参为 42 是右值，T 被推断为非引用类型，forward<T> 将返回右值

说明

当传入 forwardValue 的实参为 a 是左值，T 被推断为左值引用类型，此时 forward<T> 将返回左值

注意

在 C++11 新标准下，&&& 折叠为 &

7.1.5 可变参函数模板 — 转发参数包

可以组合使用可变参模板与 `forward` 函数，实现参数包完美转发：

7.1.5 可变参函数模板 — 转发参数包

可以组合使用可变参模板与 `forward` 函数，实现参数包完美转发：

`fun` 函数定义二和 `foo` 函数定义二

```
void foo(const string &s, int &&i) {
    cout << s << i << endl;
}

template<typename... Args>
void fun(Args&&... args) {
    foo(std::forward<Args>(args)...);
}
```

说明

`std::forward<Args>(args)...`

相当于：

`std::forward<`T_i`>(`t_i`)`

其中 T_i 为参数包中第 i 个参数 t_i 的类型

7.1.5 可变参函数模板 — 转发参数包

可以组合使用可变参模板与 forward 函数，实现参数包完美转发：

fun 函数定义二和 foo 函数定义二

```
void foo(const string &s, int &&i) {
    cout << s << i << endl;
}

template<typename... Args>
void fun(Args&&... args) {
    foo(std::forward<Args>(args)...);
}
```

说明

std::forward<Args>(args)...

相当于：

std::forward<T_i>(t_i)

其中 T_i 为参数包中第 i 个参数 t_i 的类型

当进行如下调用：

fun 函数调用

```
fun("abc", 42);
```

foo 函数的实参将扩展为：

```
std::forward<const char * >("abc"), std::forward<int>(42)
```

7.2 类模板

类似函数模板，可以定义一个类模板用来生成具有相同结构的一族类实例：

Array 类模板定义

```
template<typename T, size_t N>
class Array {
    T m_ele[N];
public:
    Array() {}
    Array(const std::initializer_list<T> &);
    T& operator[](size_t i);
    constexpr size_t size() { return N; }
};
```

说明

- 类型参数 T 和非类型参数 N，分别用来表示元素的类型和元素的数目
- initializer_list 类型是 C++11 标准库提供的新类型，支持具有相同类型但数量未知的列表类型

7.2.1 成员函数定义

与普通类相同，既可以在类的内部，也可以在类的外部定义类模板成员函数：

Array 类模板 构造函数 类外定义

```
template<typename T, size_t N>
Array<T, N>::Array(const std::initializer_list<T> &l
  ):m_ele{T()}{
    size_t m = l.size() < N ? l.size() : N;
    for (size_t i = 0; i < m; ++i) {
        m_ele[i] = *(l.begin() + i);
    }
}
```

说明

- 必须以关键字 `template` 开始，后接与类模板相同的模板参数列表
- 紧随类名后面的参数列表代表一个实例化的实参列表，每个参数不需要 `typename` 或 `class` 说明符

7.2.1 成员函数定义

与普通类相同，既可以在类的内部，也可以在类的外部定义类模板成员函数：

Array 类模板 构造函数 类外定义

```
template<typename T, size_t N>
Array<T, N>::Array(const std::initializer_list<T> &l
  ):m_ele{T()}{
    size_t m = l.size() < N ? l.size() : N;
    for (size_t i = 0; i < m; ++i) {
        m_ele[i] = *(l.begin() + i);
    }
}
```

说明

- `m_ele` 中的每一个元素用 `T` 类型的默认初始化方式 (`T()`) 初始化
- 将形参 `l` 中的元素依次复制到类模板数组成员 `m_ele` 中相应的位置
- `l.begin` 返回列表 `l` 中第一个元素的迭代器

7.2.1 成员函数定义

与普通类相同，既可以在类的内部，也可以在类的外部定义类模板成员函数：

Array 类模板 构造函数 类外定义

```
template<typename T, size_t N>
Array<T, N>::Array(const std::initializer_list<T> &l
  ):m_ele{T()}{
    size_t m = l.size() < N ? l.size() : N;
    for (size_t i = 0; i < m; ++i) {
        m_ele[i] = *(l.begin() + i);
    }
}
```

说明

- m_ele 中的每一个元素用 T 类型的默认初始化方式 (T()) 初始化
- 将形参 l 中的元素依次复制到类模板数组成员 m_ele 中相应的位置
- l.begin 返回列表 l 中第一个元素的迭代器

Array 类模板 [] 运算符函数 类外定义

```
template<typename T, size_t N>
T& Array<T, N>::operator[](size_t i) {
    return m_ele[i];
}
```

说明

类模板的下标运算符函数返回数组 m_ele 中第 i 个元素的引用

7.2.2 实例化类模板

当使用一个类模板时，我们需要显式提供模板参数信息，即模板实参列表:

实例化 Array 类模板

```
Array<char, 5> a; //创建一个Array<char, 5>类型对象 a
Array<int, 5> b = {1,2,3}; //创建一个Array<int, 5>类
  型对象 b
```

说明

创建对象 b 时，将执行具有形参的构造函数，其形参 l 接受初始化列表 {1,2,3}，其余元素具有默认值 0

7.2.2 实例化类模板

当使用一个类模板时，我们需要显式提供模板参数信息，即模板实参列表:

实例化 Array 类模板

```
Array<char, 5> a; //创建一个Array<char, 5>类型对象 a
Array<int, 5> b = {1,2,3}; //创建一个Array<int, 5>类
  型对象 b
```

说明

创建对象 b 时，将执行具有形参的构造函数，其形参 l 接受初始化列表 {1,2,3}，其余元素具有默认值 0

下面代码逐个输出对象 b 的每一个元素:

```
for (int i = 0; i < b.size(); ++i)
    cout << b[i] << "␣";
```

输出结果为: 1 2 3 0 0

7.2.3 默认模板参数

函数参数可以具有默认值，模板参数同样也可以有默认值：

Array 类模板定义二

```
template<typename T = int, size_t N = 10>
class Array {
    // 其它成员保持不变
};
```

说明

- 类模板参数 T 具有默认类型 int
- 类模板参数 N 具有默认值 10

7.2.3 默认模板参数

函数参数可以具有默认值，模板参数同样也可以有默认值：

Array 类模板定义二

```
template<typename T = int, size_t N = 10>
class Array {
    // 其它成员保持不变
};
```

说明

- 类模板参数 T 具有默认类型 int
- 类模板参数 N 具有默认值 10

实例化 Array 类模板二

```
Array<> a = { 'A' };
cout << a.size() << "␣" << a[0] << endl;
```

说明

- a 的元素数目为默认值 10
- a[0] 的类型为 int，字符'A' 转换为 65

输出结果为：10 65

7.2.3 默认模板参数

和类模板参数一样，函数模板参数也可以有默认值：

Array 类模板定义三

```
template<typename T, size_t N>
class Array {
    // 其它成员保持不变
public:
    template<typename F = Less<T>>
    void sort(F f = F());
};
```

说明

- 新增了一个成员函数模板 sort，用来对数组进行排序
- sort 的函数模板参数 F 具有默认值 Less<T>

7.2.3 默认模板参数

和类模板参数一样，函数模板参数也可以有默认值：

Array 类模板定义三

```
template<typename T, size_t N>
class Array {
    // 其它成员保持不变
public:
    template<typename F = Less<T>>
    void sort(F f = F());
};
```

Less 类模板定义

```
template<typename T>
struct Less{
    bool operator()(const T &a, const T &b) {
        return a < b;
    }
};
```

说明

- 新增了一个成员函数模板 sort，用来对数组进行排序
- sort 的函数模板参数 F 具有默认值 Less<T>

说明

类模板 Less<T> 具有一个模板参数 T，且只有一个函数调用运算符，该成员函数带有两个形参，用来比较两个形参的大小，返回值类型为 bool

7.2.3 默认模板参数

和类模板参数一样，函数模板参数也可以有默认值：

Array 类模板定义三

```
template<typename T, size_t N = 10>
class Array {
    // 其它成员保持不变
public:
    template<typename F = Less<T>>
    void sort(F f = F());
};
```

说明

- sort 的函数参数 f 也有默认值，即 F 类的一个函数对象，代表默认比较方式为 Less

7.2.3 默认模板参数

和类模板参数一样，函数模板参数也可以有默认值：

Array 类模板定义三

```
template<typename T, size_t N = 10>
class Array {
    // 其它成员保持不变
public:
    template<typename F = Less<T>>
    void sort(F f = F());
};
```

说明

- sort 的函数参数 f 也有默认值，即 F 类的一个函数对象，代表默认比较方式为 Less

问题

理清 函数参数、模板参数、类模板参数、函数模板参数 的概念

7.3.1 排序算法

排序是数据处理的最基本任务，目的是按照某种规则将一组无序数据重新排列，使之有序。下面将给 `Array` 模板类增加三种最常用的排序算法：选择排序、插入排序和冒泡排序

7.3.1 排序算法

排序是数据处理的最基本任务，目的是按照某种规则将一组无序数据重新排列，使之有序。下面将给 Array 模板类增加三种最常用的排序算法：选择排序、插入排序和冒泡排序

Array 类模板定义四

```
template<typename T, size_t N>
class Array {
    //其它成员保持不变
public:
    template<typename F = Less<T> >
    void selectionSort(F f = F()); //选择排序
    template<typename F = Less<T> >
    void insertionSort(F f = F()); //插入排序
    template<typename F = Less<T> >
    void bubbleSort(F f = F()); //冒泡排序
private:
    void swap(int i, int j){
        T t = m_ele[i];
        m_ele[i] = m_ele[j];
        m_ele[j] = t;
    }
};
```

说明

成员 swap 函数用来交换两个元素的位置，它仅在 Array 类内部使用，因此它的访问属性为 private

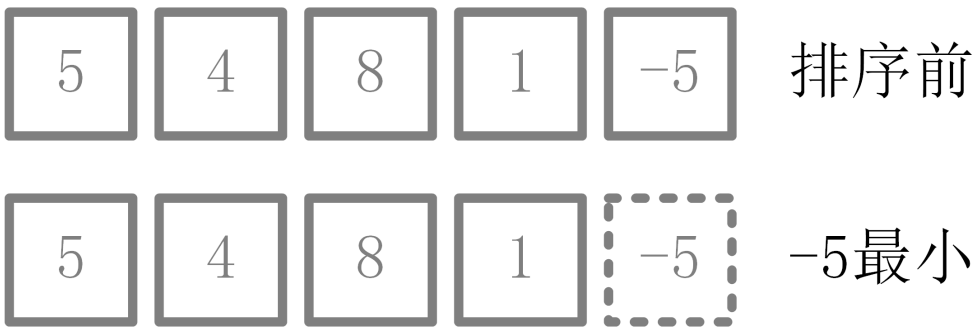
7.3.1 排序算法 — 选择排序

每次在待排序元素中选择最小的一个，换放到已排序数列后面

排序前

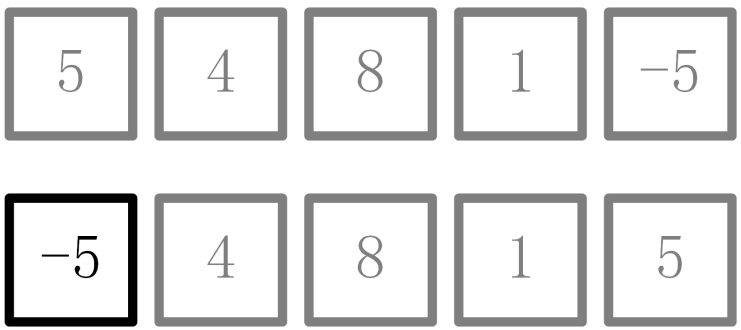
7.3.1 排序算法 — 选择排序

每次在待排序元素中选择最小的一个，换放到已排序数列后面



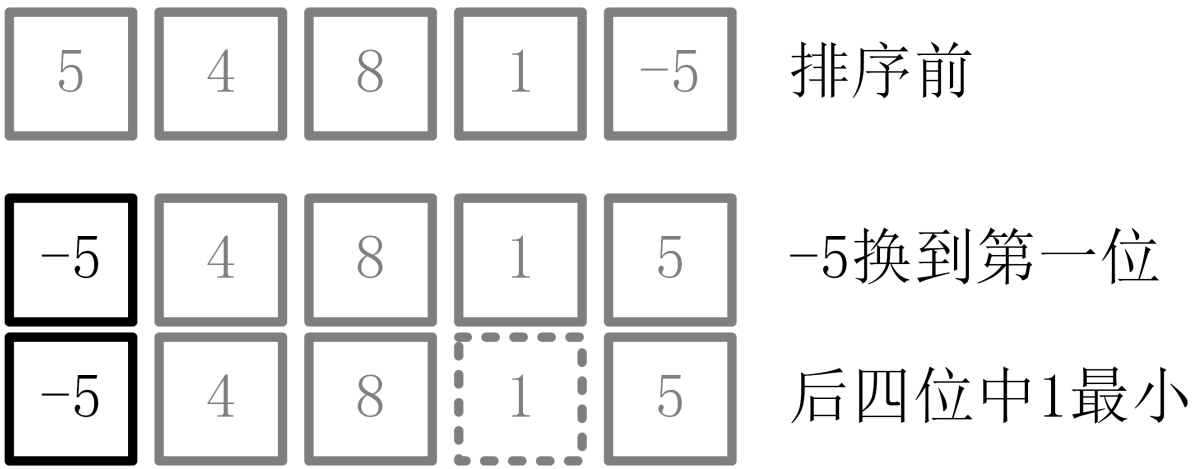
7.3.1 排序算法 — 选择排序

每次在待排序元素中选择最小的一个，换放到已排序数列后面



7.3.1 排序算法 — 选择排序

每次在待排序元素中选择最小的一个，换放到已排序数列后面



7.3.1 排序算法 — 选择排序

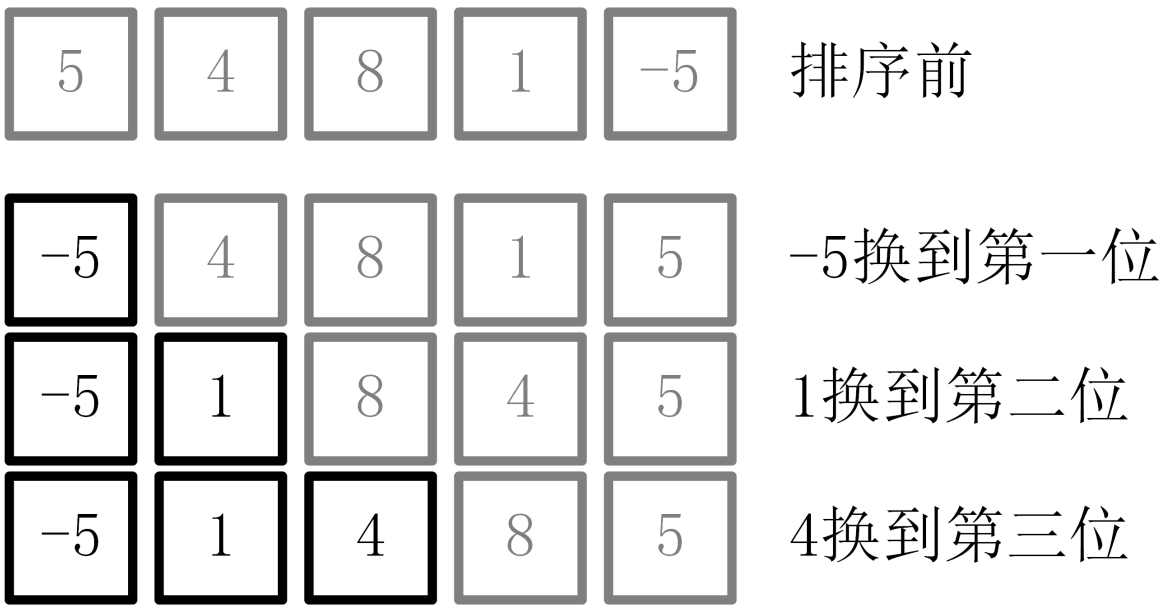
每次在待排序元素中选择最小的一个，换放到已排序数列后面

7.3.1 排序算法 — 选择排序

每次在待排序元素中选择最小的一个，换放到已排序数列后面

7.3.1 排序算法 — 选择排序

每次在待排序元素中选择最小的一个，换放到已排序数列后面



7.3.1 排序算法 — 选择排序

每次在待排序元素中选择最小的一个，换放到已排序数列后面

7.3.1 排序算法 — 选择排序

每次在待排序元素中选择最小的一个，换放到已排序数列后面

7.3.1 排序算法 — 选择排序

每次在待排序元素中选择最小的一个，换放到已排序数列后面

7.3.1 排序算法 — 选择排序

选择排序算法的实现如下：

Array 成员函数 selectionSort 定义

```
template<typename T, size_t N>
template<typename F >
void Array<T, N>::selectionSort(F f) {
    for (int i = 0; i < N - 1; ++i){
        int min = i; // 记录待排序数据中最小元素位置
        for (int j = i + 1; j < N; ++j) {
            if (f(m_ele[j], m_ele[min]))
                min = j; //更新最小元素位置
        }
        swap(i, min); //把最小元素放到位置i
    }
}
```

说明

if 语句里的条件表达式将调用函数对象 f (Less<T>)，检查第一个实参对象是否小于第二个实参对象

7.3.1 排序算法 — 插入排序

将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中

排序前

7.3.1 排序算法 — 插入排序

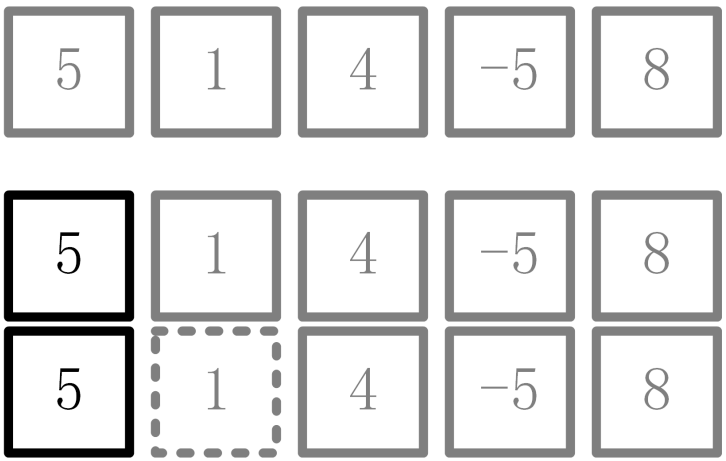
将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中

排序前

前一位为有序数列

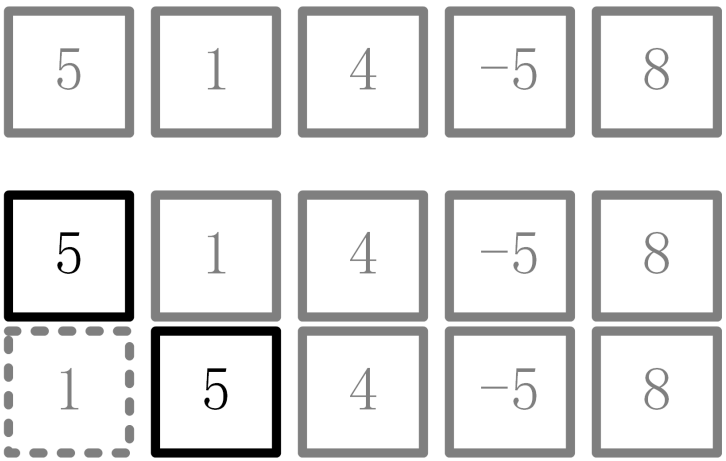
7.3.1 排序算法 — 插入排序

将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中



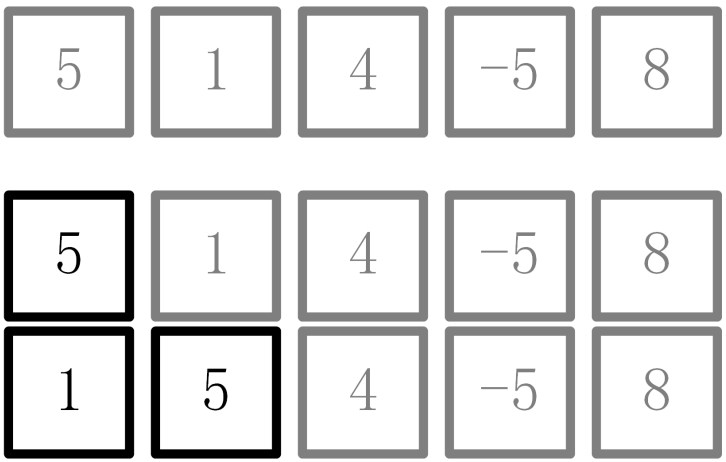
7.3.1 排序算法 — 插入排序

将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中



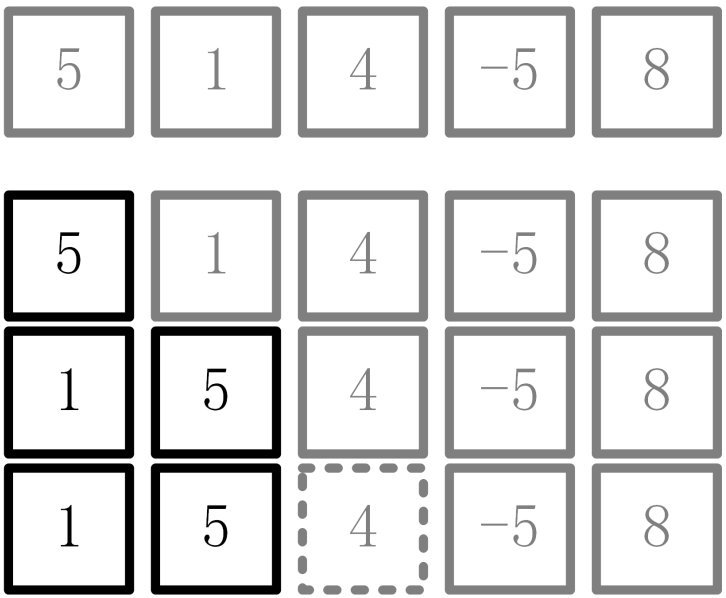
7.3.1 排序算法 — 插入排序

将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中



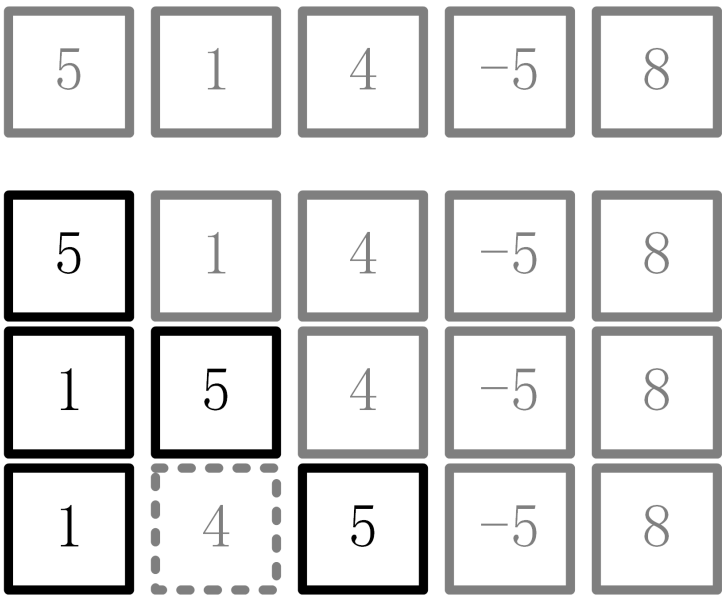
7.3.1 排序算法 — 插入排序

将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中



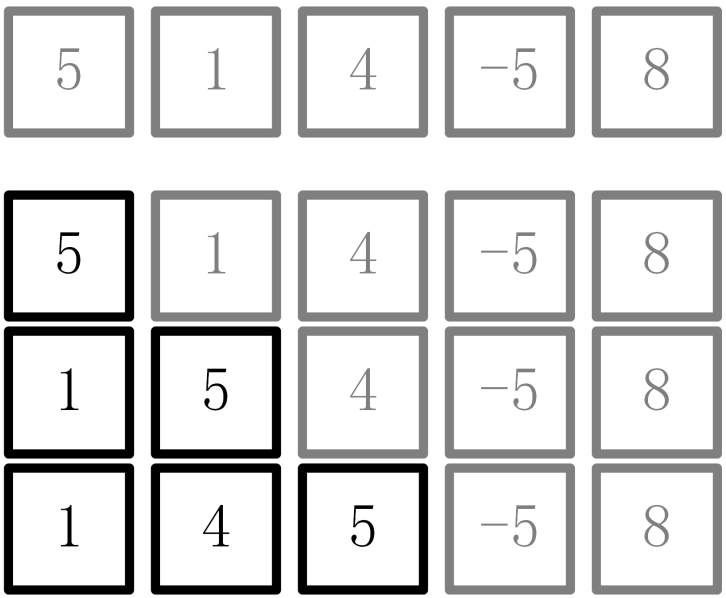
7.3.1 排序算法 — 插入排序

将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中



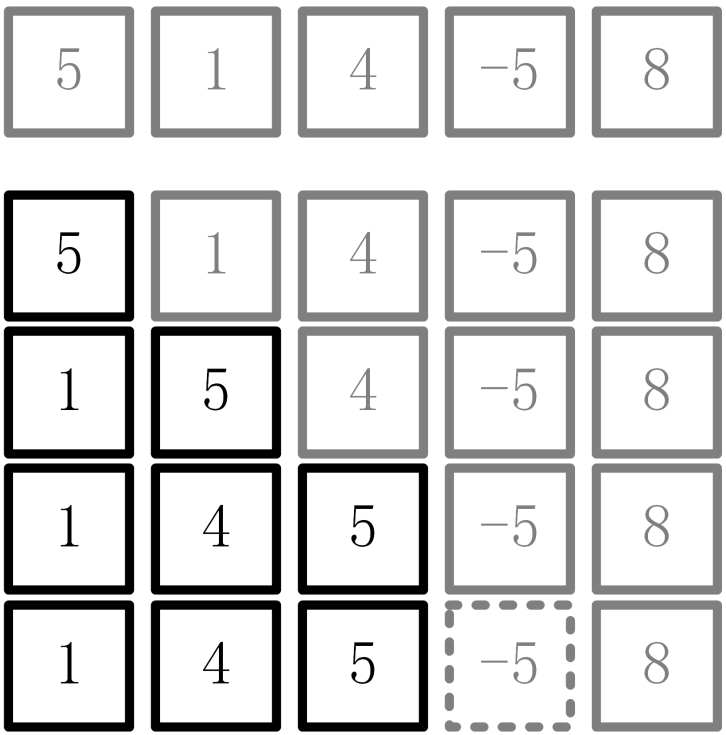
7.3.1 排序算法 — 插入排序

将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中



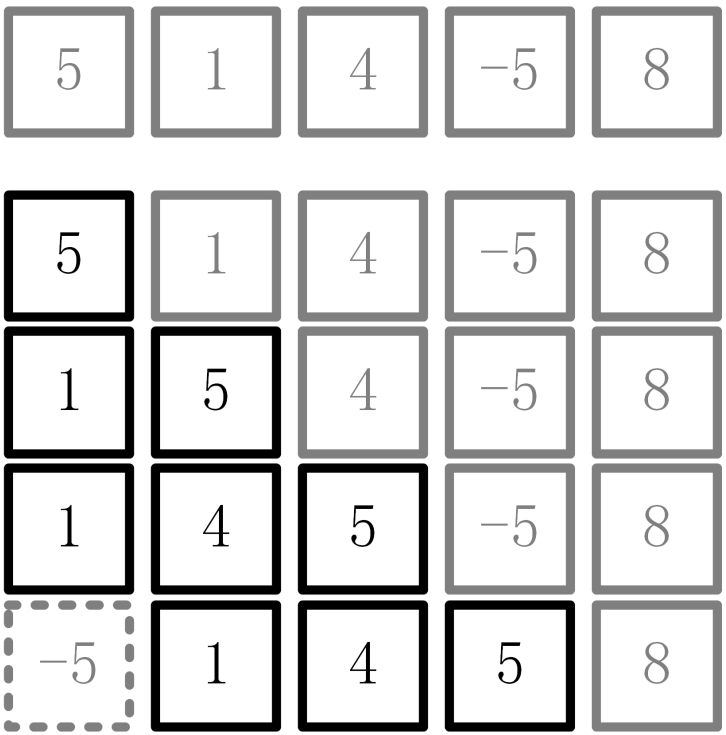
7.3.1 排序算法 — 插入排序

将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中



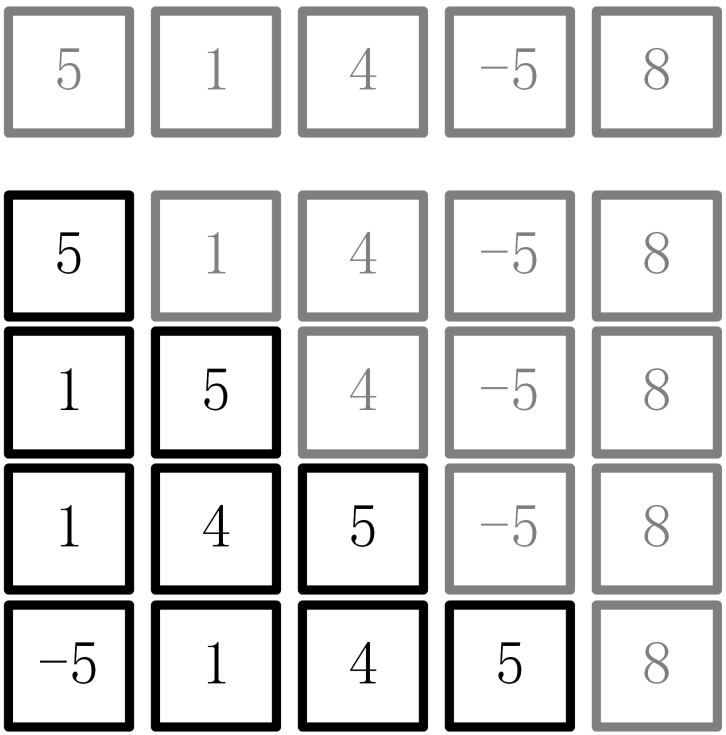
7.3.1 排序算法 — 插入排序

将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中



7.3.1 排序算法 — 插入排序

将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中



7.3.1 排序算法 — 插入排序

将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中

7.3.1 排序算法 — 插入排序

将待排序的元素逐个插入已经排好序的元素序列中

7.3.1 排序算法 — 插入排序

插入排序算法的实现如下：

Array 成员函数 insertionSort 定义

```
template<typename T, size_t N>
template<typename F >
void Array<T, N>::insertionSort(F f) {
    for (int i = 1, j; i < N; ++i) {
        T t = m_ele[i]; //待插入元素
        for (j = i; j > 0; --j) { //查找插入位置
            if (f(m_ele[j - 1], t))
                break;
            m_ele[j] = m_ele[j - 1]; //逐个向后移动元素
        }
        m_ele[j] = t; //将待插入元素放到正确位置
    }
}
```

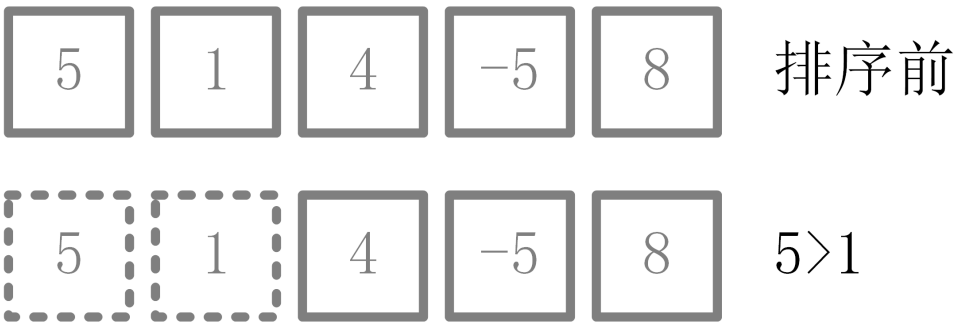
7.3.1 排序算法 — 冒泡排序

不断比较相邻的两个元素，如果发现逆序则交换

排序前

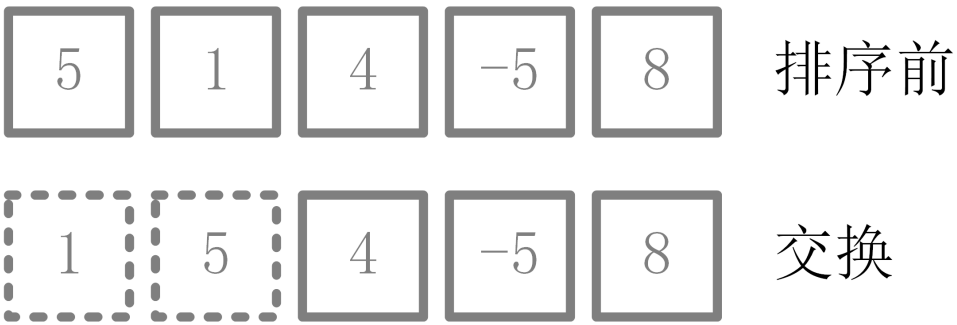
7.3.1 排序算法 — 冒泡排序

不断比较相邻的两个元素，如果发现逆序则交换



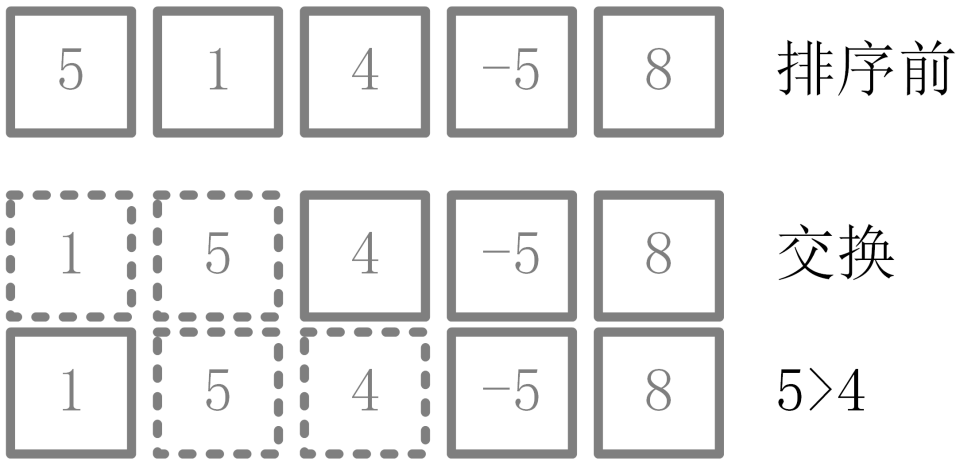
7.3.1 排序算法 — 冒泡排序

不断比较相邻的两个元素，如果发现逆序则交换



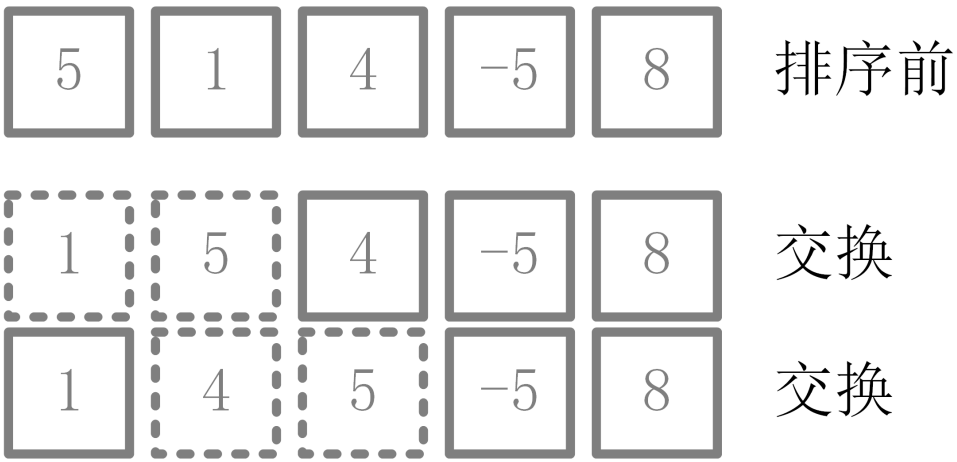
7.3.1 排序算法 — 冒泡排序

不断比较相邻的两个元素，如果发现逆序则交换



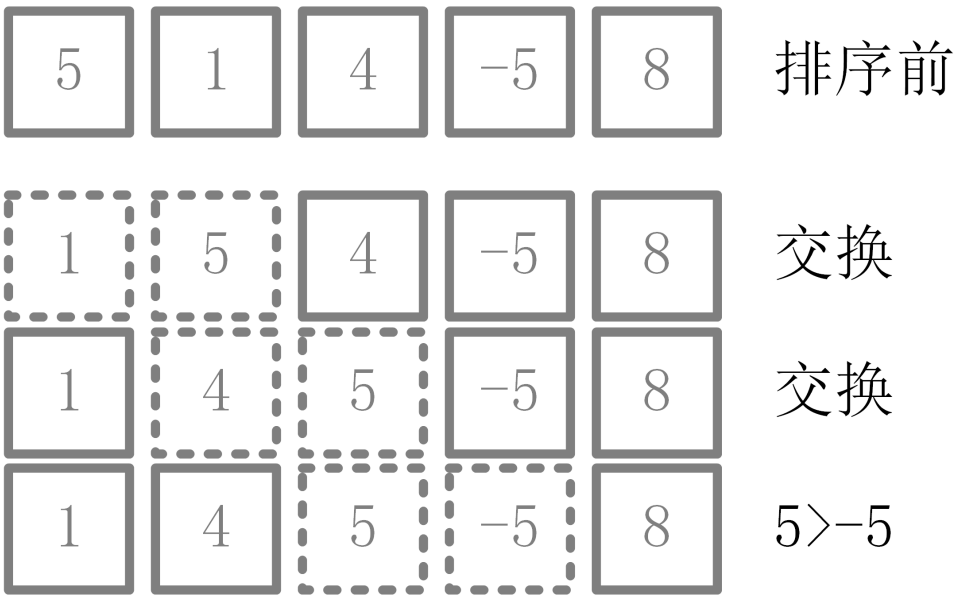
7.3.1 排序算法 — 冒泡排序

不断比较相邻的两个元素，如果发现逆序则交换



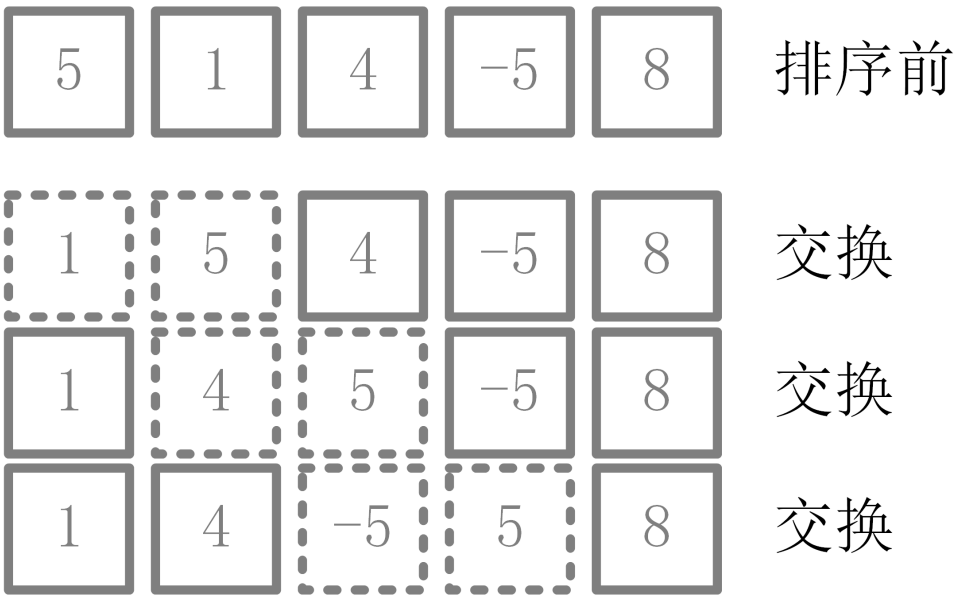
7.3.1 排序算法 — 冒泡排序

不断比较相邻的两个元素，如果发现逆序则交换



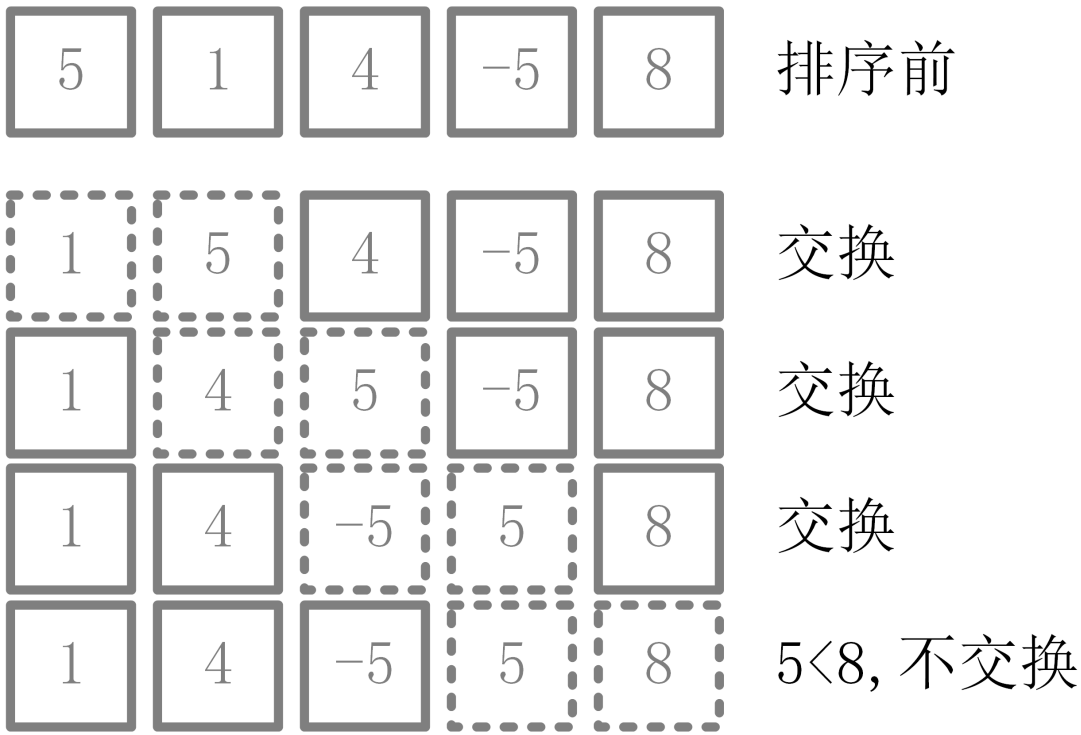
7.3.1 排序算法 — 冒泡排序

不断比较相邻的两个元素，如果发现逆序则交换



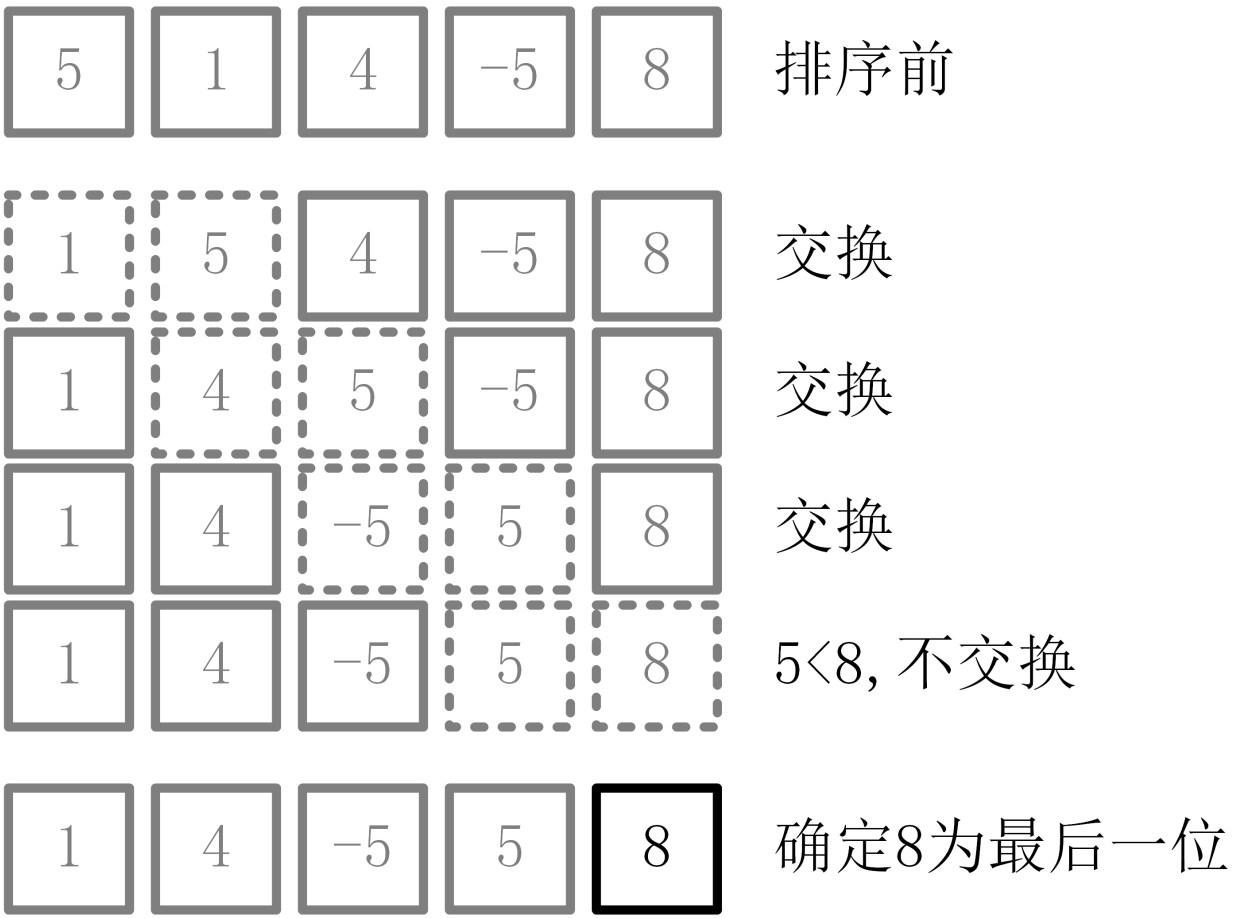
7.3.1 排序算法 — 冒泡排序

不断比较相邻的两个元素，如果发现逆序则交换



7.3.1 排序算法 — 冒泡排序

不断比较相邻的两个元素，如果发现逆序则交换



7.3.1 排序算法 — 冒泡排序

冒泡排序算法的实现如下：

Array 成员函数 selectionSort 定义

```
template<typename T, size_t N>
template<typename F >
void Array<T, N>::bubbleSort(F f){
    for (int i = N - 1; i >= 0; --i){
        for (int j = 0; j <= i - 1; ++j){
            if (f(m_ele[j + 1], m_ele[j]))
                swap(j, j + 1); //相邻元素交换
        }
    }
}
```

7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之

7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之

在有序数列中查找16

7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之

在有序数列中查找16

中点位置为5，5<16

7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之

在有序数列中查找16

在右半序列继续查找

7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之

在有序数列中查找16

中点位置为12，12<16

7.3.2 二分查找算法

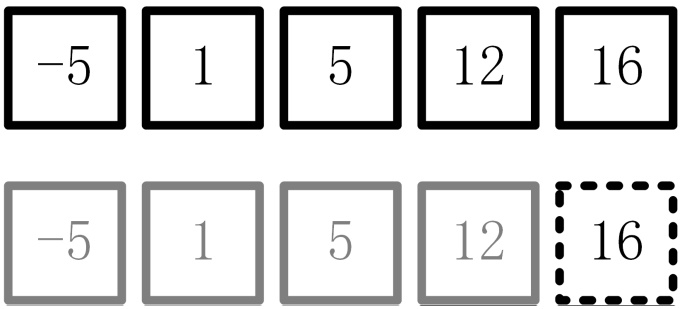
又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之

在有序数列中查找16

在右半序列继续查找

7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之

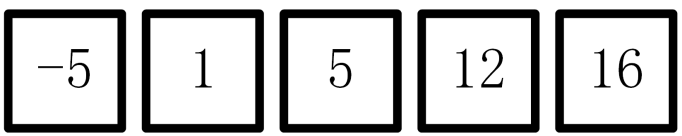


7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之

在有序数列中查找16

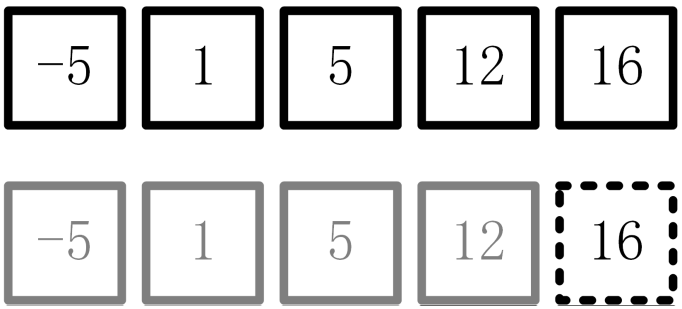
中点位置为16。返回此位置

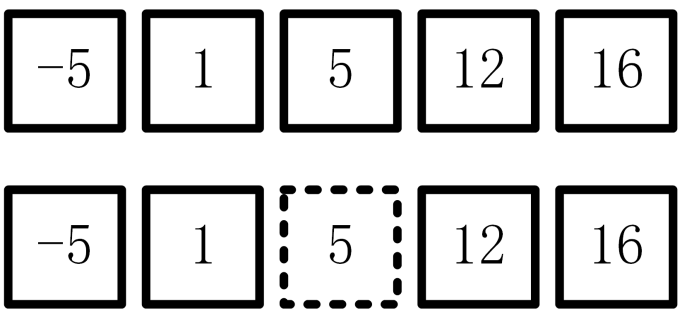


在有序数列中查找0

7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之



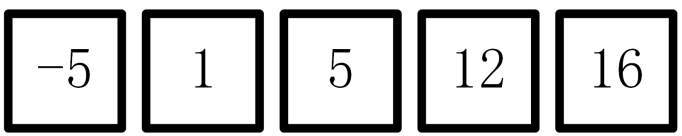


7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之

在有序数列中查找16

中点位置为16。返回此位置

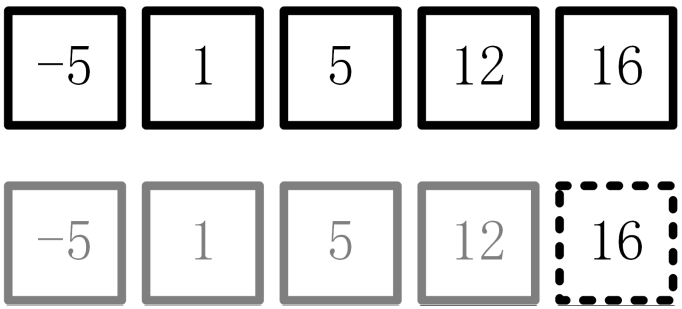


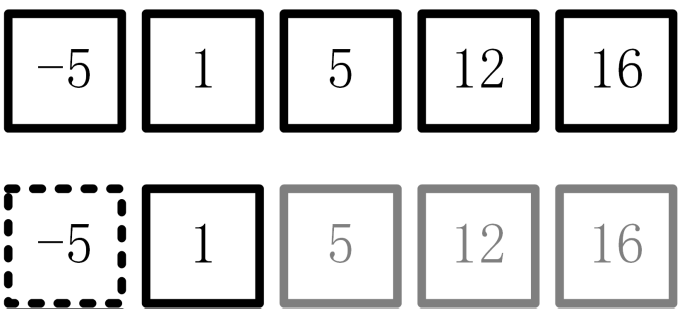
在有序数列中查找0

在左半序列继续查找

7.3.2 二分查找算法

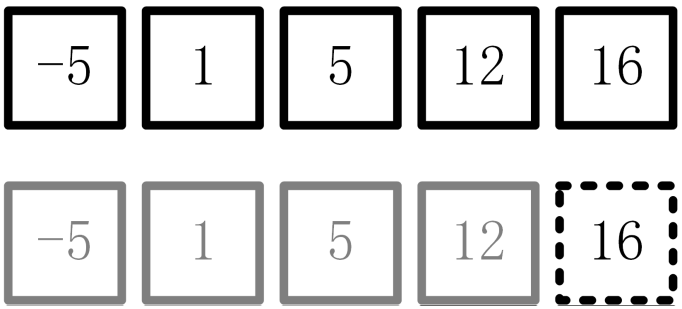
又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之

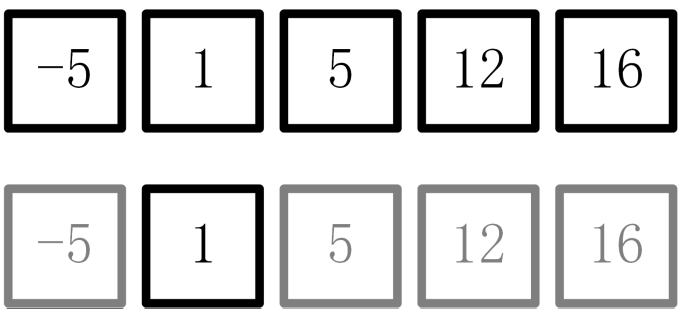




7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之



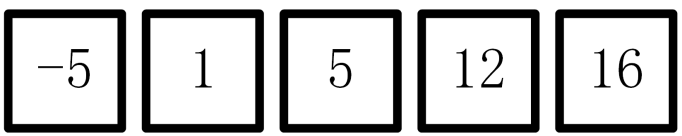


7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之

在有序数列中查找16

中点位置为16。返回此位置

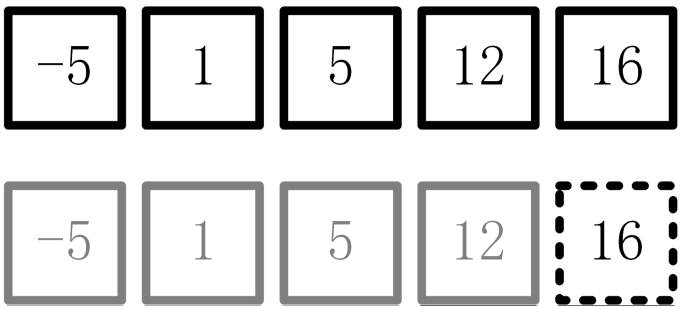


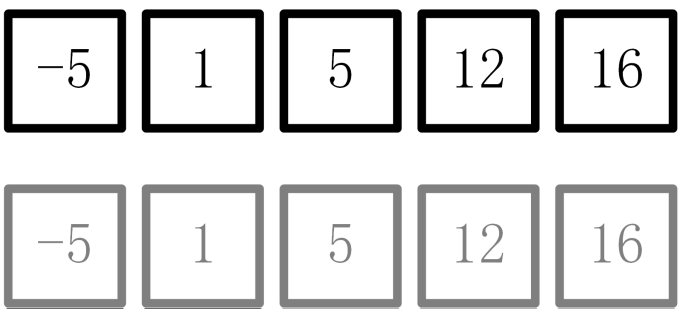
在有序数列中查找0

中点位置为1，1>0

7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之



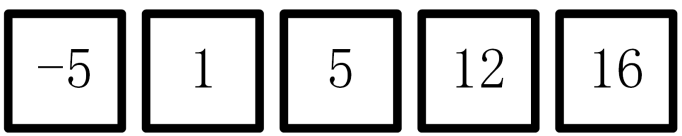


7.3.2 二分查找算法

又称折半查找，在有序序列中使用，其基本思想为分而治之

在有序数列中查找16

中点位置为16。返回此位置



在有序数列中查找0

左半序列为空，查找失败

7.3.2 二分查找算法

二分查找算法的实现如下：

Array 成员函数 binarySearch 定义

```
template<typename T, size_t N>
int Array<T, N>::binarySearch(const T &value, int
  left, int right) {
    while (left <= right) {
        int middle = (left + right) / 2;//计算中点位置
        if (m_ele[middle] == value)
            return middle;
        else if (m_ele[middle] > value)
            right = middle - 1;//修改right指针
        else
            left = middle + 1;//修改left指针
    }
    return -1; //查找失败
}
```

说明

- 如果 value 小于中点位置 (middle) 元素，则将 right 指针设置为 middle-1；
- 如果 value 大于中点位置元素，则将 left 指针设置为 middle+1；
- 如果查找失败则返回-1

7.3.2 二分查找算法

二分查找算法的实现如下：

Array 成员函数 binarySearch 定义

```
template<typename T, size_t N>
int Array<T, N>::binarySearch(const T &value, int
  left, int right) {
    while (left <= right) {
        int middle = (left + right) / 2;//计算中点位置
        if (m_ele[middle] == value)
            return middle;
        else if (m_ele[middle] > value)
            right = middle - 1;//修改right指针
        else
            left = middle + 1;//修改left指针
    }
    return -1; //查找失败
}
```

说明

- 如果 value 小于中点位置 (middle) 元素，则将 right 指针设置为 middle-1；
- 如果 value 大于中点位置元素，则将 left 指针设置为 middle+1；
- 如果查找失败则返回-1

问题

查找 4 返回时，left 和 right 的值是多少?

7.3.2 二分查找算法

二分查找算法的实现如下：

Array 成员函数 binarySearch 定义

```
template<typename T, size_t N>
int Array<T, N>::binarySearch(const T &value, int
  left, int right) {
    while (left <= right) {
        int middle = (left + right) / 2;//计算中点位置
        if (m_ele[middle] == value)
            return middle;
        else if (m_ele[middle] > value)
            right = middle - 1;//修改right指针
        else
            left = middle + 1;//修改left指针
    }
    return -1; //查找失败
}
```

说明

- 如果 value 小于中点位置 (middle) 元素，则将 right 指针设置为 middle-1;
- 如果 value 大于中点位置元素，则将 left 指针设置为 middle+1;
- 如果查找失败则返回-1

问题

查找 4 返回时，left 和 right 的值是多少?

答案

查找失败，结束于元素 1，left 值为 2，right 值为 1