第二课：指针和引用

主讲人：**陈笑沙**

本节内容

- 2.1 指针概念
- 2.2 指针运算
- 2.3 指针与数组
- 2.4 堆内存分配
- 2.5 const 指针
- 2.6 指针与函数
- 2.7 字符串指针
- 2.8 命令行参数
- 2.9 引用的概念
- 2.10 左值与右值
- 2.11 const 引用

2.1 指针的概念

如何定义?

```
int a = 3;
int *p;
int *pa  = &a;
```

2.1 指针的概念

指针的意义

2.1 指针的概念

指针的意义

- 从数值的访问走向地址的访问(地址值的数值化)

2.1 指针的概念

指针的意义

- 从数值的访问走向地址的访问(地址值的数值化)
- 从访问名字所在存储位置走向访问任何存储位置

2.1 指针的概念

指针的意义

- 从数值的访问走向地址的访问(地址值的数值化)
- 从访问名字所在存储位置走向访问任何存储位置
- 获得高效数据访问的同时,也带来数据的不安全性

2.1 指针的概念

指针的类型

2.1 指针的概念

指针的类型

- 定义时星号前的类型即指针类型

2.1 指针的概念

指针的类型

- 定义时星号前的类型即指针类型
- 一定类型的指针指向一定类型的实体

2.1 指针的概念

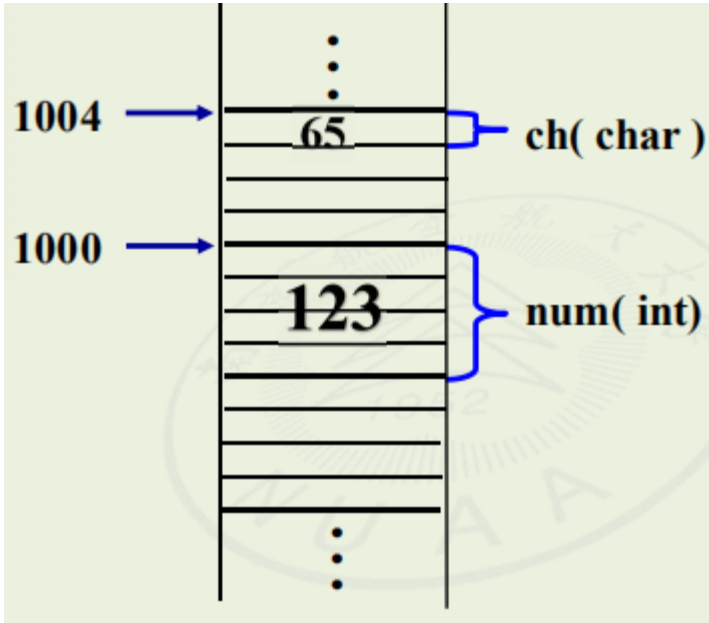
指针的类型

- 定义时星号前的类型即指针类型
- 一定类型的指针指向一定类型的实体
- 指针类型是：
  - 指针操作的依据
  - 编译检查的依据

2.1 指针的概念

假设定义如下变量

```
int num = 123;
char ch = 'A';
```



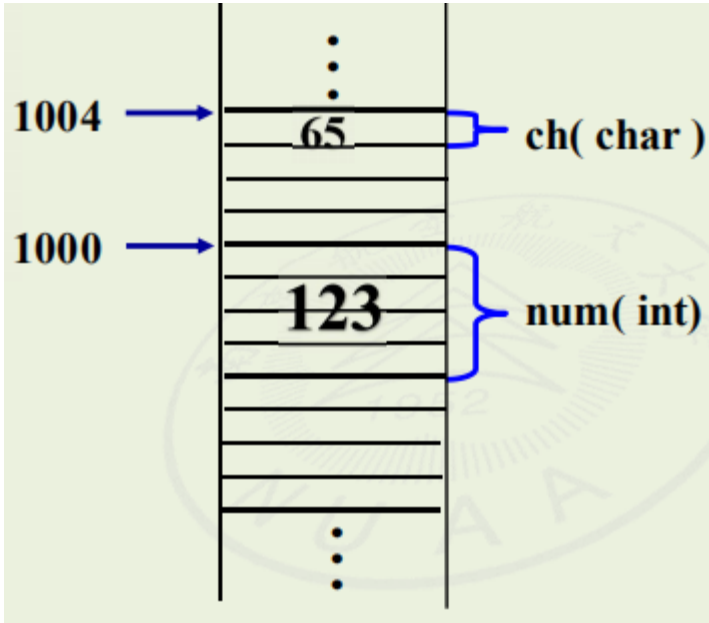
变量的存储与分配

2.1 指针的概念

取内存地址操作为

```
int num = 123;
char ch = 'A';

char *pchar;
pchar = &ch;
```



变量的存储与分配

2.1 指针的概念

example/lec02/pointerBasic

```
#include <iostream>
int main() {
  int a = 100, b = 10;
  int *pointer_1, *pointer_2;

  pointer_1 = &a;
  pointer_2 = &b;
  std::cout << "a = " << a << ", b = " << b << std::endl;
  std::cout << "*pointer_1 = " << *pointer_1
            << ", *pointer_2 = " << *pointer_2  << std::endl;

  return 0;
}
```

2.1 指针的概念

如何定义指针变量?

2.1 指针的概念

如何定义指针变量?

- 需要基类型

2.1 指针的概念

如何定义指针变量?

- 需要基类型
- 在定义指针变量时要注意:

2.1 指针的概念

如何定义指针变量?

- 需要基类型
- 在定义指针变量时要注意:
  - 指针变量前面的“*”表示该变量为指针型变量。指针变量名则不包含“*”。

2.1 指针的概念

如何定义指针变量?

- 需要基类型
- 在定义指针变量时要注意:
  - 指针变量前面的“*”表示该变量为指针型变量。指针变量名则不包含“*”。
  - 在定义指针变量时必须指定基类型。

2.1 指针的概念

如何定义指针变量?

- 需要基类型
- 在定义指针变量时要注意:
  - 指针变量前面的“*”表示该变量为指针型变量。指针变量名则不包含“*”。
  - 在定义指针变量时必须指定基类型。
  - 指针变量中只能存放地址（指针），不要将一个整数赋给一个指针变量。

2.1 指针的概念

思考 * 符号的含义：

```
1 int num = 16, *pNum = &num;
2 *pNum = 123;
3 num = 123;
```

2.1 指针的概念

思考 * 符号的含义：

```
1 int num = 16, *pNum = &num;
2 *pNum = 123;
3 num = 123;
```

2.1 指针的概念

思考 * 符号的含义：

```
1 int num = 16, *pNum = &num;
2 *pNum = 123;
3 num = 123;
```

2.2 指针运算

算术运算

2.2 指针运算

算术运算

- 指针加减整数

2.2 指针运算

算术运算

- 指针加减整数
- 指针递增/递减

2.2 指针运算

算术运算

- 指针加减整数
- 指针递增/递减
- 指针的步长（与数据类型的关系）

2.2 指针运算

比较运算

2.2 指针运算

比较运算

- 指针的大小比较
  - >
  - <
  - ≤
  - ≥

2.2 指针运算

比较运算

- 指针的大小比较
  - >
  - <
  - ≤
  - ≥
- 指针相等性判断
  - ==
  - ≠

2.2 指针运算

指针的差值

- 计算两个指针之间的距离

```
int diff = ptr2 - ptr2;
```

2.3 指针与数组

数组**大多数**情况都会退化为指针：

```
int a[3] = {1, 2, 3};
int *arr = a;
int *p = &a[0];
```

2.3 指针与数组

- 可以有：`p + 1`、`p += 1`、`p++`、`++p`等操作。
- 当然也有对应的减法操作。

`example/lec02/ptrCalc`

```
int a[3] = {1, 2, 3};
int *arr = a;
int *p = &a[0];

cout << p << " " << arr << " " << *arr << endl;
arr += 1;
cout << *arr << endl;

cout << *p << " " << *p++ << endl;
cout << *++p << endl;
```

2.3 指针与数组

可以通过指针引用数组元素：

```
int a[] = {1, 2, 3, 4};
int *p = a;

cout << *(p + 2) << endl;
cout << p[2] << endl;
```

2.3 指针与数组

函数接收数组参数：

```
void printArray(const int* arr, const size_t n)
{
    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
        cout << arr[i];
        if (i < n - 1)
            cout << ", ";
    }
    cout << endl;
}
```

2.3 指针与数组

扩展内容

多维数组：example/lec02/multiDim

```
int a[3][4] = {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12};
// type of a: int[3][4], sometimes int(*)[4]
// type of a[0]: int[4], sometimes int*
// type of a[0][0]: int
cout << "sizeof(a): " << sizeof(a) / sizeof(int) << endl;

// int **p = a; wrong
int (*p)[4] = a;
cout << "sizeof(*p): " << sizeof(*p) / sizeof(int) << endl;

cout << "*(p + 1)[0]: " << *(p + 1)[0] << endl;
cout << "**(p + 1): " << **(p + 1) << endl;
cout << "p[2][1]: " << p[2][1] << endl;
cout << "*(*(p + 2) + 1): " << *(*(p + 2) + 1) << endl;
```

2.3 指针与数组

扩展内容

特例：对于编译期间确定大小的数组，可以用模板捕获其大小。

```
template<size_t N>
void printArray(const int (&arr)[N])
{
    for (int i = 0; i < N; i++)
    {
        cout << arr[i];
        if (i < N - 1)
            cout << ", ";
    }
    cout << endl;
}
```

2.3 指针与数组

C++ 版替代方案：vector

example/lec02/primes

```
 1 #include <iostream>
 2 #include <vector>
 3
 4 using namespace std;
 5
 6 int main(int argc, char** argv) {
 7     if (argc < 2) {
 8         cout << "Usage: " << argv[0] << " [max number]" << e
 9         return EXIT_FAILURE;
10     }
11     int maxNum = atoi(argv[1]);
12     if (maxNum < 2) {
13         return 0;
14     }
15
```

2.3 指针与数组

C++ 版替代方案：vector

example/lec02/primes

```
#include <iostream>
#include <vector>

using namespace std;

int main(int argc, char** argv) {
    if (argc < 2) {
        cout << "Usage: " << argv[0] << " [max number]" << e
        return EXIT_FAILURE;
    }
    int maxNum = atoi(argv[1]);
    if (maxNum < 2) {
        return 0;
    }

```

2.3 指针与数组

C++ 版替代方案：vector

example/lec02/primes

```
 2 #include <vector>
 3
 4 using namespace std;
 5
 6 int main(int argc, char** argv) {
 7     if (argc < 2) {
 8         cout << "Usage: " << argv[0] << " [max number]" << e
 9         return EXIT_FAILURE;
10     }
11     int maxNum = atoi(argv[1]);
12     if (maxNum < 2) {
13         return 0;
14     }
15
16     vector<bool> primes(maxNum + 1, true);
```

2.3 指针与数组

C++ 版替代方案：vector

example/lec02/primes

```
 6 int main(int argc, char** argv) {
 7     if (argc < 2) {
 8         cout << "Usage: " << argv[0] << " [max number]" << e
 9         return EXIT_FAILURE;
10     }
11     int maxNum = atoi(argv[1]);
12     if (maxNum < 2) {
13         return 0;
14     }
15
16     vector<bool> primes(maxNum + 1, true);
17     for (int i = 2; i < primes.size() - 1; i++)
18     {
19         if (!primes[i])
20             continue;
```

2.3 指针与数组

C++ 版替代方案：vector

example/lec02/primes

```
 9          return EXIT_FAILURE;
10      }
11      int maxNum = atoi(argv[1]);
12      if (maxNum < 2) {
13          return 0;
14      }
15
16      vector<bool> primes(maxNum + 1, true);
17      for (int i = 2; i < primes.size() - 1; i++)
18      {
19          if (!primes[i])
20              continue;
21          for (int j = i + 1; j < primes.size(); j++) {
22              if (!primes[j])
23                  continue;
```

2.3 指针与数组

C++ 版替代方案：vector

example/lec02/primes

```
14      }
15
16      vector<bool> primes(maxNum + 1, true);
17      for (int i = 2; i < primes.size() - 1; i++)
18      {
19          if (!primes[i])
20              continue;
21          for (int j = i + 1; j < primes.size(); j++) {
22              if (!primes[j])
23                  continue;
24              if (j % i == 0)
25                  primes[j] = false;
26          }
27      }
28
```

2.3 指针与数组

C++ 版替代方案：vector

example/lec02/primes

```
21          for (int j = i + 1; j < primes.size(); j++) {
22              if (!primes[j])
23                  continue;
24              if (j % i == 0)
25                  primes[j] = false;
26          }
27      }
28
29      for (int i = 2; i < maxNum; i++)
30          if (primes[i])
31              cout << i << " ";
32      cout << endl;
33
34      return 0;
35  }
```

2.4 堆内存分配

C 语言方法

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main()
{
    int size = 4, i;
    int *p = (int*)malloc(size * sizeof(int));
    for (i = 0; i < size; i++)
      p[i] = i + 1;
    for (i = 0; i < size; i++)
      printf("%d ", p[i]);

    free(p);
    return 0;
}
```

2.4 堆内存分配

C 语言方法

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main()
{
    int size = 4, i;
    int *p = (int*)malloc(size * sizeof(int));
    for (i = 0; i < size; i++)
      p[i] = i + 1;
    for (i = 0; i < size; i++)
      printf("%d ", p[i]);

    free(p);
    return 0;
}
```

2.4 堆内存分配

C 语言方法

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main()
{
    int size = 4, i;
    int *p = (int*)malloc(size * sizeof(int));
    for (i = 0; i < size; i++)
      p[i] = i + 1;
    for (i = 0; i < size; i++)
      printf("%d ", p[i]);

    free(p);
    return 0;
}
```

2.4 堆内存分配

C 语言方法

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main()
{
    int size = 4, i;
    int *p = (int*)malloc(size * sizeof(int));
    for (i = 0; i < size; i++)
      p[i] = i + 1;
    for (i = 0; i < size; i++)
      printf("%d ", p[i]);

    free(p);
    return 0;
}
```

2.4 堆内存分配

C++ 语言方法

```cpp
#include <iostream>

int main()
{
    int size = 4;
    int *p = new int[size];
    for (int i = 0; i < size; i++)
        p[i] = i + 1;
    for (int i = 0; i < size; i++)
        std::cout << p[i] << " ";

    delete[] p;
    return 0;
}
```

2.4 堆内存分配

C++ 语言方法

```cpp
#include <iostream>

int main()
{
    int size = 4;
    int *p = new int[size];
    for (int i = 0; i < size; i++)
        p[i] = i + 1;
    for (int i = 0; i < size; i++)
        std::cout << p[i] << " ";

    delete[] p;
    return 0;
}
```

2.4 堆内存分配

C++ 语言方法

```cpp
#include <iostream>

int main()
{
    int size = 4;
    int *p = new int[size];
    for (int i = 0; i < size; i++)
        p[i] = i + 1;
    for (int i = 0; i < size; i++)
        std::cout << p[i] << " ";

    delete[] p;
    return 0;
}
```

2.4 堆内存分配

C++ 语言方法

```cpp
#include <iostream>

int main()
{
    int size = 4;
    int *p = new int[size];
    for (int i = 0; i < size; i++)
        p[i] = i + 1;
    for (int i = 0; i < size; i++)
        std::cout << p[i] << " ";

    delete[] p;
    return 0;
}
```

2.4 堆内存分配

new 与 delete 还有其他用法，涉及到类，之后再讲。

2.4 堆内存分配

C++ 替代方案：智能指针：

example/lec02/pascalTrig

```cpp
#include <iostream>
#include <memory>
#include <vector>

using namespace std;

int main(int argc, char **argv)
{
    // in this example
    // pure vector is better
    int n = 10;
    vector<unique_ptr<int[]>> pascalTrig(n);

    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
```

2.4 堆内存分配

C++ 替代方案：智能指针：

example/lec02/pascalTrig

```cpp
#include <iostream>
#include <memory>
#include <vector>

using namespace std;

int main(int argc, char **argv)
{
    // in this example
    // pure vector is better
    int n = 10;
    vector<unique_ptr<int[]>> pascalTrig(n);

    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
```

2.4 堆内存分配

C++ 替代方案：智能指针：

example/lec02/pascalTrig

```
 5 using namespace std;
 6
 7 int main(int argc, char **argv)
 8 {
 9     // in this example
10     // pure vector is better
11     int n = 10;
12     vector<unique_ptr<int[]>> pascalTrig(n);
13
14     for (int i = 0; i < n; i++)
15     {
16         pascalTrig[i] = make_unique<int[]>(i + 1);
17         pascalTrig[i][0] = 1;
18
19         if (i == 0)
```

2.4 堆内存分配

C++ 替代方案：智能指针：

example/lec02/pascalTrig

```
 9      // in this example
10      // pure vector is better
11      int n = 10;
12      vector<unique_ptr<int[]>> pascalTrig(n);
13
14      for (int i = 0; i < n; i++)
15      {
16          pascalTrig[i] = make_unique<int[]>(i + 1);
17          pascalTrig[i][0] = 1;
18
19          if (i == 0)
20              continue;
21          for (int j = 1; j ≤ i; j++)
22          {
23              if (j == i)
```

2.4 堆内存分配

C++ 替代方案：智能指针：

example/lec02/pascalTrig

```
20              continue;
21          for (int j = 1; j ≤ i; j++)
22          {
23              if (j == i)
24              {
25                  pascalTrig[i][j] = 1;
26              }
27              else
28              {
29                  pascalTrig[i][j] =
30                      pascalTrig[i - 1][j - 1] +
31                      pascalTrig[i - 1][j];
32              }
33          }
34      }
```

2.4 堆内存分配

C++ 替代方案：智能指针：

example/lec02/pascalTrig

```
33          }
34      }
35
36      for (int i = 0; i < n; i++)
37      {
38          for (int j = 0; j ≤ i; j++)
39          {
40              cout << pascalTrig[i][j] << "\t";
41          }
42          cout << "\n";
43      }
44      cout << endl;
45
46      return 0;
47  }
```

2.5 CONST 指针

const 的基本作用

2.5 CONST 指针

`const` 的基本作用

- 保护数据不被意外修改

2.5 CONST 指针

const 的基本作用

- 保护数据不被意外修改
- 提高代码可读性

2.5 CONST 指针

const 的基本作用

- 保护数据不被意外修改
- 提高代码可读性
- 编译器优化机会

2.5 CONST 指针

const 的基本作用

- 保护数据不被意外修改
- 提高代码可读性
- 编译器优化机会

```
const int size = 100;  // 常量声明
```

2.5 CONST 指针

指向常量的指针（POINTER TO CONSTANT）

```
const int* ptr;   // 指针可变，指向的数据不可变
int const* ptr1; // 和ptr一样

*ptr = 10; // wrong!
```

- 可以修改指针指向的地址
- 不能通过指针修改数据

2.5 CONST 指针

常量指针（CONSTANT POINTER）

```
int* const ptr = &var;  // 指针不可变，指向的数据可变
```

- 指针地址固定
- 可以通过指针修改数据

2.5 CONST 指针

指向常量的常量指针

```
const int* const ptr = &var;   // 指针和数据都不可变
```

2.5 CONST 指针

形式	指针可变性	数据可变性	声明示例
普通指针	✔	✔	`int* ptr`
指向常量的指针	✔	✘	`const int* ptr`
常量指针	✘	✔	`int* const ptr`
双向const指针	✘	✘	`const int* const ptr`

2.5 CONST 指针

```
const char* str1 = "Hello";   // 正确：字符串字面量是常量
char* str2 = "World";         // 错误：C++11起禁止（需强制转换）
```

2.6 指针与函数

函数可以接收指针作为参数，也可以返回指针，但是有以下易犯错误：

```
int* sum(const int* a, const int* b) {
    int c = *a + *b;
    return &c; // Wrong!
    // int* c = new int(*a + *b);
    // return c; // OK, remember to delete it.
}
```

2.6 指针与函数

指向函数的指针

```
// 声明函数原型
int add(int, int);

// 声明函数指针
int (*pf)(int, int) = &add;
int (*pf2)(int, int) = add; // also ok

// 调用
pf(1, 2);
pf2(1, 2);
add(1, 2);
```

示例：牛顿迭代法

example/lec02/newton

```cpp
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <cmath>

using Fn = double(*)(double);
// typedef double(*Fn)(double); // old way

double newton(Fn func, double guess = 1.0)
{
    double y = func(guess);
    if (std::abs(y) < 1e-10) {
        return guess;
    }

    double delta = 1e-10;
```

注意：函数指针没有加减运算。

示例：牛顿迭代法

example/lec02/newton

```cpp
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <cmath>

using Fn = double(*)(double);
// typedef double(*Fn)(double); // old way

double newton(Fn func, double guess = 1.0)
{
    double y = func(guess);
    if (std::abs(y) < 1e-10) {
        return guess;
    }

    double delta = 1e-10;
```

注意：函数指针没有加减运算。

示例：牛顿迭代法

example/lec02/newton

```
 5 using Fn = double(*)(double);
 6 // typedef double(*Fn)(double); // old way
 7
 8 double newton(Fn func, double guess = 1.0)
 9 {
10     double y = func(guess);
11     if (std::abs(y) < 1e-10) {
12         return guess;
13     }
14
15     double delta = 1e-10;
16     double dy = (func(guess + delta) - func(guess - delta))
17     return newton(func, guess - y / dy);
18 }
```

注意：函数指针没有加减运算。

示例：牛顿迭代法

example/lec02/newton

```
 9 {
10     double y = func(guess);
11     if (std::abs(y) < 1e-10) {
12         return guess;
13     }
14
15     double delta = 1e-10;
16     double dy = (func(guess + delta) - func(guess - delta)) /
17     return newton(func, guess - y / dy);
18 }
19
20 double equation1(double x) {
21     return x * x - 2;
22 }
23
```

注意：函数指针没有加减运算。

示例：牛顿迭代法

example/lec02/newton

```
21      return x * x - 2;
22  }
23
24  double equation2(double x) {
25      return tan(x) - 1;
26  }
27
28  int main(int argc, char** argv) {
29      std::cout << std::setprecision(10);
30      std::cout << newton(equation1) << std::endl;
31      std::cout << 4 * newton(equation2) << std::endl;
32      // using lambda function
33      std::cout << newton([](double x) {return x * x - 2;}) <<
34      return 0;
35  }
```

注意：函数指针没有加减运算。

示例：牛顿迭代法

example/lec02/newton

```
16      double dy = (func(guess + delta) - func(guess - delta)) /
17      return newton(func, guess - y / dy);
18  }
19
20  double equation1(double x) {
21      return x * x - 2;
22  }
23
24  double equation2(double x) {
25      return tan(x) - 1;
26  }
27
28  int main(int argc, char** argv) {
29      std::cout << std::setprecision(10);
30      std::cout << newton(equation1) << std::endl;
```

注意：函数指针没有加减运算。

示例：牛顿迭代法

example/lec02/newton

```
21      return x * x - 2;
22  }
23
24  double equation2(double x) {
25      return tan(x) - 1;
26  }
27
28  int main(int argc, char** argv) {
29      std::cout << std::setprecision(10);
30      std::cout << newton(equation1) << std::endl;
31      std::cout << 4 * newton(equation2) << std::endl;
32      // using lambda function
33      std::cout << newton([](double x) {return x * x - 2;}) <<
34      return 0;
35  }
```

注意：函数指针没有加减运算。

2.6 指针与函数

2.6 指针与函数

- 函数还可以返回函数指针，但是在 C++中用法不多。

2.6 指针与函数

- 函数还可以返回函数指针，但是在 C++中用法不多。
- 现代 C++可以结合 lambda 函数使用。

2.6 指针与函数

- 函数还可以返回函数指针，但是在 C++中用法不多。
- 现代 C++可以结合 lambda 函数使用。
- 实际工程建议使用 `std::function`，而不是直接使用函数指针。

2.7 字符串指针

基本声明方式

```
const char* str1 = "Hello";   // 推荐：显式常量
char str2[] = "World";        // 字符数组
char* str3 = str2;            // 指向数组的指针
```

2.7 字符串指针

内存布局（假设地址从0x1000开始）：

地址	内容
0x1000	'H'
0x1001	'e'
0x1002	'l'
0x1003	'l'
0x1004	'o'
0x1005	'\0'

2.7 字符串指针

核心特征：

- 以空字符\0结尾
- 字符串字面量存储在只读数据段
- 指针存储的是首字符地址

2.7 字符串指针

C++ 中不建议直接使用字符串指针，建议用 `std::string` 替代。

2.8 命令行参数

标准参数形式

```
int main(int argc, char* argv[])   // 最常用形式
int main(int argc, char** argv)    // 等价写法
```

其他合法形式

```
int main()                         // 无参数版本
int main(void)                     // C风格明确空参数
```

2.8 命令行参数

参数含义

参数	名称	描述
argc	Argument Count	命令行参数个数（≥1）
argv	Argument Vector	参数字符串数组指针

2.8 命令行参数

测试：example/lec02/args

```cpp
#include <iostream>

int main(int argc, char** argv) {
    for (int i = 0; i < argc; i++) {
        std::cout << argv[i] << std::endl;
    }
    return 0;
}
```

```
xmake run args 1 2 3 4 hello
.\build\windows\x64\release\args.exe 1 2 hello test
./a.out 1 2 3 4
```

2.9 引用的概念

1.1 基本定义

- **别名机制**：为已存在变量创建新名称
- **必须初始化**：声明时必须绑定到有效对象
- **不可重绑定**：初始化后不能更改目标

```
int x = 10;
int& ref = x;   // ref是x的别名
ref = 20;       // 修改的是x的值
```

2.9 引用的概念

核心特性

2.9 引用的概念

核心特性

- **类型安全**：严格匹配被引用类型

2.9 引用的概念

核心特性

- **类型安全**：严格匹配被引用类型
- **自动解引用**：使用时不需特殊符号

2.9 引用的概念

核心特性

- **类型安全**：严格匹配被引用类型
- **自动解引用**：使用时不需特殊符号
- **地址共享**：与被引用对象共享内存地址

2.9 引用的概念

引用解决的指针问题

指针问题	引用解决方案
空指针风险	必须初始化，不能为null
野指针问题	绑定后不可改变
内存泄漏隐患	不涉及动态内存管理
语法复杂度高	自动解引用，语法简洁
双重释放风险	天然遵循RAII[1]原则

1. RAII: Resource Acquisition Is Initialization，由 c++ 之父 Bjarne Stroustrup 提出的，中文翻译为资源获取即初始化

2.9 引用的概念

引用与指针的区别

特性	引用	指针
初始化要求	必须显式初始化	可延迟初始化
可空性	不可为空	可为 `nullptr`
重绑定	不可	可改变指向
内存管理	不涉及	需手动分配/释放
语法	自动解引用	需使用 * 和 → 操作符

2.10 左值与右值

基本定义

类别	特征	示例
左值	有持久身份，可取地址	变量
右值	临时对象，即将销毁	字面量、表达式结果

2.10 左值与右值

2.10 左值与右值

- 在引用的别名用法中，只有左值可以创建引用。

2.10 左值与右值

- 在引用的别名用法中，只有左值可以创建引用。
- 函数参数可以加两个 &，表示右值引用。

2.10 左值与右值

- 在引用的别名用法中，只有左值可以创建引用。
- 函数参数可以加两个 &，表示右值引用。

```
 1 int add(int&&, int&&);
 2 int constAdd(const int&, const int&);
 3 int main()
 4 {
 5     int a = 10;
 6     std::cout << add(1, 2) << std::endl; // ok
 7     std::cout << add(a, 2) << std::endl; // wrong
 8     std::cout << constAdd(a, 2) << std::endl; // ok
 9
10     return 0;
11 }
```

2.10 左值与右值

- 在引用的别名用法中，只有左值可以创建引用。
- 函数参数可以加两个 &，表示右值引用。

```
 1 int add(int&&, int&&);
 2 int constAdd(const int&, const int&);
 3 int main()
 4 {
 5     int a = 10;
 6     std::cout << add(1, 2) << std::endl; // ok
 7     std::cout << add(a, 2) << std::endl; // wrong
 8     std::cout << constAdd(a, 2) << std::endl; // ok
 9
10     return 0;
11 }
```

2.10 左值与右值

- 在引用的别名用法中，只有左值可以创建引用。
- 函数参数可以加两个 &，表示右值引用。

```cpp
int add(int&&, int&&);
int constAdd(const int&, const int&);
int main()
{
    int a = 10;
    std::cout << add(1, 2) << std::endl; // ok
    std::cout << add(a, 2) << std::endl; // wrong
    std::cout << constAdd(a, 2) << std::endl; // ok

    return 0;
}
```

2.11 CONST引用

核心特性

- **只读访问**：无法通过引用修改原对象
- **延长生命周期**：可绑定到临时对象
- **兼容性**：可接受 const 和非 const 对象

```
const int& cref = 42;   // 合法，延长字面量生命周期
```

引用的典型应用

引用的典型应用

- 函数参数传递（避免拷贝大对象）

引用的典型应用

- 函数参数传递（避免拷贝大对象）
- 返回保护性访问

引用的典型应用

- 函数参数传递（避免拷贝大对象）
- 返回保护性访问
- 配合临时对象使用

引用的典型应用

典型错误：

```
int& add(const int& a, const int& b)
{
    int c = a + b;
    return c; // 错误！返回局部变量的引用
}
```

引用的典型应用

求解一元二次方程（bad way）：

```
bool solve(const double a,
           const double b,
           const double c,
           double& x1,
           double& x2)
{
    double delta = b * b - 4 * a * c;
    if (delta < 0 || a == 0)
        return false;
    double s = sqrt(delta);
    x1 = (-b - s) / (2 * a);
    x2 = (-b + s) / (2 * a);
    return true;
}
```

作业：

1. 补完一元二次方程求解程序，分别对以下输入求解并输出结果：
    1. $a = 1, b = 2, c = 1$
    2. $a = 1, b = 1, c = 1$
    3. $a = 1, b = 1, c = -2$
    4. $a = 0, b = 1, c = 1$
2. 自行学习 `std::pair` 与 `std::optional` 的用法，实现一个求解一元二次方程的函数，并对第 1 问中的输入进行求解与输出（Good way）。

> *提示：xmake 中需要添加：*
> *`set_languages("c++17")` 以支持 `optional`。*
> *或者使用 `g++` 编译，加上 `--std=c++17` 的参数。*

1. https://zh.cppreference.com/w/cpp/utility/pair
2. https://zh.cppreference.com/w/cpp/utility/optional