

指针与动态分配

💡 Tip

获取本讲代码: <https://datawhalechina.github.io/cstart/site/resources/Lecture5/Codes/>

一个[可视化 C 语言语句的小工具](#), 请利用工具高效学习

对象的四要素

我们可以将 C 语言对象简化为四个要素:

类型	标识符	值	地址
int	name	1	&name(int*: 0xffebab38)
int(int)	fun	内存中的一段指令	&fun(int(*) (int): 0x6346317d)

类型

对象、函数和表达式拥有称为类型的属性, 它确定存储于对象或表达式求值所得的二进制值的判读方式。

简单来说, 类型决定了对象(变量、函数和表达式临时对象)在内存中存储的**字节大小**与二进制值的**判读方式**。

例如: 对于 int 类型在 **ILP32** 数据模型下的存储字节大小为 **4字节**, 并且 **C23** 标准规定数值按照**补码**解释; 而对于 float 类型存储大小为 **4字节**, 并且 C 语言标准规定数值按照**IEEE 754 单精度浮点数标准**解释。

```
int int_num = -1;
float float_num = 1.0;
/* sizeof 作为一个运算符, 可以用于获取对象类型的内存存储大小(以字节为单位)
 * printf %x 将数字按照16进制打印并且包含前缀
 * 通过打印16进制的方式, 直接打印出数据在内存中存储的数值
 * 直接打印出 -1 在内存中存储的二进制数值
 * 通过 *(int*)&, 对数值重新进行解释, 从而打印出 1.0 在内存中存储的二进制数值
 * 你将在本节学习 *(int*)& 的语法细节
 */
printf("sizeof int_num: %zu, value: %#x\nsizeof float_num: %zu, value: %#x\n",
       sizeof int_num, int_num, sizeof float_num, *(int *)&float_num);
```

对于 Linux x86_64 平台按照 **C23** 标准编译的输出结果应为:

```
sizeof int_num: 4, value: 0xffffffff
sizeof float_num: 4, value: 0x3f800000
```

标识符

标识符是数字、下划线、小写及大写拉丁字母(和以 \u 及 \U 转义记号)指定的。

程序员通过标识符访问标识符代表的内存对象 (变量、函数)。


地址

C 语言对象按照语言标准和 ABI 存储在内存中，我们可以通过 `&` 运算符获取对象的内存存储地址。

```
printf("addr of int_num: %p, addr of float_num: %p\n", &int_num, &float_num);
```

addr of int_num: 0x7fff017eb4d0, addr of float_num: 0x7fff017eb4d4

指针

 **Tip**

当我们谈论指针时，一般都指代 Pointer，即指针对象（变量）。

当我们需要谈论类型时，我们一般使用指针类型进行区分。

中文的二义性一定程度上加大了解指针的难度。

指针作为对象 (Pointer AS Object)


与所有变量一样，指针也可以简化为四个要素:

类型	标识符	值	地址
int*	i_ptr	0xffebab38	&f_ptr(int**: 0xffebab34)
float*	f_ptr	NULL	&f_ptr(float**: 0xffebab30)
int(*) (int)	fun_ptr	0x6346317d	&fun_ptr(int(**)(int): 0xffebab2c)

值（四字节）	地址（32位）	指针访问	标识符
0x00000001	0xAFFFFFFF	*p	a
0xAFFFFFFF	0xAFFFFFFB		p

指针特殊之处在于:

- 所有指针类型的存储大小都是一致的: 对于 `ILP32` 为 `4字节`，而对于 `LP64` 为 `8字节`，因为所有内存对象的内存地址都是相同大小的。
- 指针存储的值表示内存中一个对象的地址，如果指针不指向任何有效对象，应当将其赋值为 `NULL`。
- 指针的类型解读: 一个 `*` 符号表示指针类型，剩余部分表示 **指针所指向对象的类型**。例如，`int*` 表示指向 `int` 对象的指针，`int**` 表示指向 `int*` 对象 (该对象是一个指针) 的指针。
- 我们可以通过 `*` 运算符，通过指针访问指针指向的内存对象，并 `**` 根据指针的类型判读数值。

 **Caution**

需要注意的是: 指针本身作为一个对象，也存储在内存中，拥有其自身的地址。

为何需要指针

作为C语言初学者的小P写下了如下一段代码。希望能够实现交换变量值的功能。

```
void swap(int a, int b) {
    int tmp = a;
    a = b;
    b = tmp;
    return;
}

int main(void) {
    int x = 114, y = 514;
    printf("Before swap: x=%d, y=%d\n", x, y);
    swap(x, y);
    printf("After swap: x=%d, y=%d\n", x, y);
    return 0;
}
```

然而在运行后我们却得到结果

```
Before swap: x=114,y=514
After swap: x=114,y=514
```

这是因为，在这段代码中，C 语言的函数是**按值传递**的，这意味着函数**参数变量**并不是函数调用时**传入的内存对象**，而只是**传入对象的数值拷贝**，函数所做的只是将两个参数变量的值进行交换。

为了满足这样的需求，C 提供了**指针**这一概念，当然指针能做的不止这些。

指针的使用

取址运算符 &

指针存储的是地址，如果想要指针指向某个变量，则需要获取那个变量的**地址**，在变量名称前面加 **&** 即获取其**地址**。

这个**地址数值**也有其数值类型，什么类型的变量取地址就会获得对应的**指针类型**。

⚠ Caution

如果你尝试将不同**指针类型**的**地址数值**赋值给不同**指针类型**的指针，编译器可能会提示警告或拒绝编译。

你可以通过**转型运算符**显式的将**地址数值**的**指针类型**转换为你需要的**指针类型**，但请确保你这样做是合理且**必须**的。

程序员**始终不应该**忽视编译器的提示，反而应该学会利用编译器给你的提示。

我们希望你能够始终在编译时添加 **-Wall -Werror**，并学会 STFW, RTFM, ATFAI 来解决编译器报错，来确保程序的正确性。

解引用运算符 *

解引用指针以访问其所指向的对象。

& 与 * 能够彼此抵消，均不求值。

通过解引用指针可以访问(读取或修改)指向的对象。

下标运算符 []

按照定义，下标运算符 `E1[E2]` 严格等同于 `*((E1)+(E2))`。

```
int x = 114514;
int *ptr = &x;
printf("x: [%d] *ptr: [%d]\n", x, *ptr);
*ptr = 1919810;
printf("x: [%d] *ptr: [%d]\n", x, ptr[0]);
```

运行后得到

```
x: [114514] *ptr: [114514]
x: [1919810] *ptr: [1919810]
```

Note

学会思考 🤔 与提问 ? : 既然 `[]` 严格与 `*` 等价，这是否意味着指针和数组之间存在联系？

带着疑问继续接下来的学习。

指针算术运算

若指针 P 指向下标为 I 的数组元素，则

- `P+N` 与 `N+P` 是指向同一数组中下标为 `I+N` 的元素的指针
- `P-N` 是指向同一数组中下标为 `I-N` 的元素的指针

C 语言标准规定: 仅若原指针和结果指针都指向同一数组中的元素，或该数组的尾后一位置，指针算数的行为才有定义。注意在 `p` 指向数组首元素时，执行 `p-1` 是未定义行为。

Caution

始终不应该尝试使用未定义的指针值（未定义的指针算数结果或未初始化的垃圾值）

使用指向未知的指针是程序中最难检测的 BUG 之一，因为这意味着，当你使用指针访问对象时，你无法知晓会修改哪个对象，并且编译器可能会错误理解程序并导致错误的优化。

若指针 `P1` 指向下标为 `I` 的数组元素（或尾后一位置）而 `P2` 是指向同一数组的下标为 `J` 的元素（或尾后一位置），则

- `P1-P2` 拥有等于 `I-J` 的值和 `ptrdiff_t` 类型（有符号整数类型，最大大小典型地为能声明的最大对象的一半）

仅当结果适合于 `ptrdiff_t` 时，行为才有定义。

为指针算术的目的，把指向非数组元素的对象的指针当做指向大小为 1 的数组首元素的指针。

```
int x[5] = {0, 1, 2, 3, 4};
int *p = &a[0];
printf("%x %x\n", p, p + 3);
// 可能的结果： ffffd7f0 ffffd7fc
// ffffd7f0 + 3 * sizeof(int) -> ffffd7fc
int *p1 = &x[0], *p2 = &x[4];
printf("%d %d\n", p1 - p2, p2 - p1);
// 输出： -4 4
```

void*

`void*` 被认为是一种通用指针类型(泛型)。

`void*` 类型的指针用于传递未知类型的对象，这在泛型接口中常用：malloc 返回 `void*`。

指针的隐式转换

与数值运算不同，指针中极少出现隐式类型转换。

仅有指向任意类型对象的指针能隐式转换成 `void*` 类型的指针，反之亦然。

尽管如此，显式指明 `void*` 指针的转换有时可以提升代码的可读性。

如果你尝试将不同指针类型的数值赋值给不同指针类型的指针，编译器可能会提示警告或拒绝编译。

指针的显式转换

因为指针对象的空间存储是相同的，所以可以认为指针之间的类型转换意味着对指向对象的数值判读方式转换。

回顾之前代码出现的 `*(int*)&float_num`，使用转型运算符 `(int*)` 对 `&float_num` 返回的地址数值的类型进行转换，通过 `*` 解引用的方式访问数据，并根据指针类型 `int*` 实现了按 `int` 进行数值判读。

指针与数组

指针与数组的隐式转换

数组与指向其首元素指针之间存在隐式转换。即 `int[2]` 与 `int*` 之间可以隐式转换，且后者指针指向前者数组的首元素。

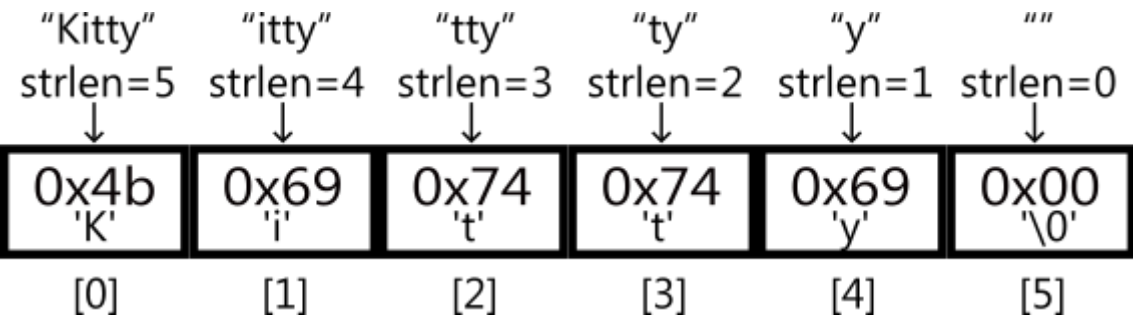
⚠ Caution

需要注意的是，即使存在隐式转换，`int[]` 与 `int*` 也依然是完全不同的类型。

数组类型 `int[]` 还保有数组大小这一隐藏信息。

当数组类型用于函数形参列表时，它会转换成对应的指针类型：`int f(int a[2])` 和 `int f(int* a)` 声明同一个函数。因为函数实际参数类型为指针类型，使用数组实参的函数调用会进行一个数组到指针转换；被调用函数无法获得实参数组的大小，必须显式传递。

```
int a[5] = {0, 1, 2, 3, 4};
int *ptr = a;
printf("%zu %zu\n", sizeof a, sizeof ptr);
// 输出： 20 8
printf("%d %d\n", *(ptr+2), a[2]);
// 输出： 2 2
```



Tip

知识祛魅——字符串

在学习字符串的输入时，初学者大概会迷惑，为什么字符串是一个字符数组，而且输入时不需要取地址符 `&`，而且可以直接用数组名。

现在我们知道字符数组名在此处被解释为字符指针。

`scanf` 将一串字符连续放置到该地址开始的一段空间，并在末尾添加 `\0` 表示字符串的结束。

所以，字符串其实就是满足字符串规范的字符数组，当你将一段空间上的数据解释为字符串时，机器会一直遍历这段数据直到遇到 `\0`，这也是为什么我们以文本编码形式查看非文本文件时常常看到乱码。

指向数组的指针

对数组对象进行取值会得到**指向数组的指针类型**，你可以通过 `int (*ptr)[N]` 的方式定义指向 `int[N]` 数组对象的指针。

```
int a[3] = {0, 1, 2};
int (*ptr)[3] = &a;
printf("%zu %zu\n", sizeof a, sizeof ptr);
//输出：12 8
```

地址	访问	标识符及类型	指向整个数组的指针	指向数组元素的指针	通过p1访问	通过p2访问
0xA1000000	array[0]	标识符：array 类型：int[10]	int (*p1)[10] =&array	int *p2 = array	(*p1)[0]	p2[0]
0xA1000004	array[1]			p2+1	(*p1)[1]	p2[1]
0xA1000008	array[2]			p2+2	(*p1)[2]	p2[2]
0xA1000012	array[3]			p2+3	(*p1)[3]	p2[3]
0xA1000016	array[4]			p2+4	(*p1)[4]	p2[4]
0xA1000020	array[5]			p2+5	(*p1)[5]	p2[5]
0xA1000024	array[6]			p2+6	(*p1)[6]	p2[6]
0xA1000028	array[7]			p2+7	(*p1)[7]	p2[7]
0xA1000032	array[8]			p2+8	(*p1)[8]	p2[8]
0xA1000036	array[9]			p2+9	(*p1)[9]	p2[9]

结构体

结构体是一种由一序列的成员组成的类型，成员的存储以顺序分配于内存中。

```
/* 结构体定义：引入一个新类型 struct 名字 并定义其含义
*/
```

```

struct IntVector {
    /* 结构体成员 */
    int *data;
    size_t size;
    size_t capacity;
}; // 记得末尾的 `

/* 结构体变量 */
struct IntVector vector = {.data = NULL, .size = 0, .capacity = 0};
/* 通过成员运算符`.`访问结构体成员 */
printf("%p, %zu, %zu", vector.data, vector.size, vector.capacity);

/* 结构体指针 */
struct IntVector *v_p = &vector;
/* 结构体指针通过成员运算符`->`访问对象成员 */
printf("%p, %zu, %zu", v_p->data, v_p->size, v_p->capacity);

```

typedef

typedef 声明提供一种声明标识符为类型别名的方式，以用于替换可能复杂的类型名。

```

/* 声明 int_t 为类型 int 的别名 */
typedef int int_t;
/* 声明 char_t 为类型 char 的别名
 * str_t 为 char[10] 的别名
 * char_p 为 char* 的别名
 * fp 为 char(*)(void) 的别名
 */
typedef char char_t, str_t[10], *char_p, (*fp)(void);

char_t ch = 'a';
str_t str = "abcdefg";
char_p ch_p = &ch;
char function(void) {
    return 'a';
}
fp ch_fp = &function;

/* 声明 IntVector 为匿名结构体的别名 */
typedef struct {
    /* 结构体成员 */
    int *data;
    size_t size;
    size_t capacity;
} IntVector;

IntVector vector = {.data = NULL, .size = 0, .capacity = 0};

```

typedef 名可以是不完整类型，它会照常变得完整：

```

typedef char str_t[];
/* 此时 s 的类型为 char[13] */
str_t s = "hello world\n";


```

动态内存管理

分配内存: [malloc](#), [calloc](#), [realloc](#)

函数	功能
<code>void* malloc(size_t size);</code>	分配内存
<code>void* calloc(size_t num, size_t size);</code>	分配并清零内存
<code>void *realloc(void *ptr, size_t new_size)</code>	扩充之前分配的内存块

可以将计算机中一片连续的空间看成一个大数组，分配内存函数的事情就是找到一段空白并将其标记为已使用，并将这段空白的起始位置返回。

 **Tip**

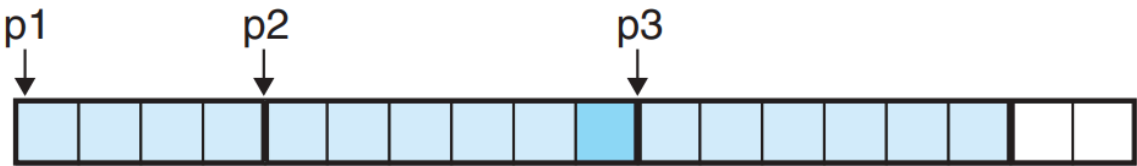
对于常见的内存模型，一般将堆内存作为动态内存供程序员动态管理。



(a) `p1 = malloc(4*sizeof(int))`



(b) `p2 = malloc(5*sizeof(int))`



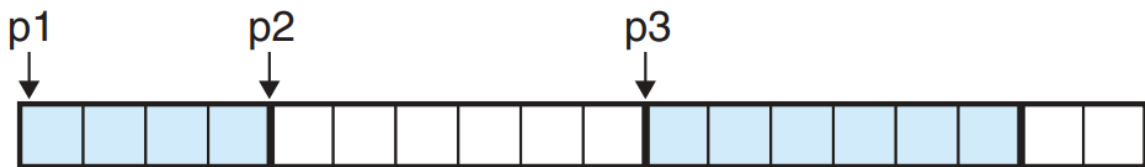
(c) `p3 = malloc(6*sizeof(int))`

上面这张图展示了分配空间的一种可能性，在实际使用中，你不应该假设内存的分配方式。

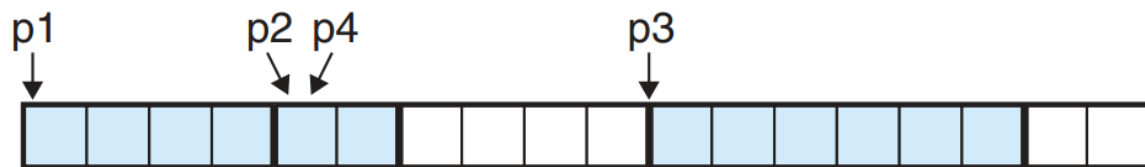
释放空间: [free](#)

对于大多数现代编程语言，如Java、Python等，都有着自带的垃圾回收器，能够自动检测不再可访问的内存区域并将其释放。

然而C语言中，需要我们手动释放空间，否则所有的垃圾只会到程序结束的时候释放。理论上讲这会带来更高的时间效率与空间效率（垃圾回收器常常是保守的），只要你有良好的代码习惯，内存对象随用随放，然而大多数时候只会带来花样百出的内存泄露问题。



(d) free(p2)



(e) p4 = malloc(2*sizeof(int))

紧接之前的局面，将p2所指空间释放后，这片空间就可以供其他malloc请求使用。

不进行free会带来内存泄露问题，但进行不恰当的free同样也会引发问题，我们会在下文介绍一种由free创造的一类危险指针

在动态内存管理中，指针作为管理内存的工具存在。也就是说，如果一片已分配的内存空间没有指向它的指针，那么它将变成程序无法访问的空间，也就是**内存泄漏**。

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
void test(void) {
    int* a = malloc(1000000);
    printf("%p\n", a);
}
int main(void) {
    while (1) {
        test();
    }
    return 0;
}
```

⚠ Caution

Linux 默认情况不对程序可拥有的内存地址空间做出限制，这意味着单个进程可以一直申请的堆内存空间，从而挤压其他进程的内存资源，造成系统卡顿。

或者在进程耗尽地址空间后错误终止。

对于需要长时间运行的程序，一定要避免内存泄漏的发生！

💡 Tip

内存泄露

- 定义：无法释放分配的内存
- 初始症状：无任何症状
- 在达到临界点之前，内存泄漏实际上并不是问题
- 后来的症状：程序性能表现急剧下降.....
- 然后你的程序就被杀死了！
- 因为当你请求更多内存时，操作系统会说“不，不能这样做”

危险的指针

指针是一个强大的工具，提供了程序员与底层交互的可能性，打破了一定的抽象障碍。

但同时，莫大的权限也带来了许多问题，下面我们将介绍几类常见错误。

野指针

C中的指针可以任意赋值，当一个指针未初始化或错误地初始化时便成为了野指针：

```
int *ptr1, *ptr2 = (int *)0x11451400;
printf("%d %d\n", *ptr1, *ptr2); // ERROR
```

空悬指针

当一片空间被释放时，所有指向这片空间的指针都成为了空悬指针。此时这个地址已经成为无效地址，可能被分配给其他程序或者当前程序的其他指针，此时去解引用这个指针会引发错误：

```
int *ptr = malloc(sizeof(int));
free(ptr);
printf("%d\n", *ptr); // ERROR
```

越界指针

对指针做算数运算是很常见的，但是当我们使用指针去访问数组元素时，如果运算后的结果超过了数组的空间区域，便会引发错误：

```
int a[5];
int *ptr = &a[4];
ptr += 1;
printf("%d\n", *ptr); //ERROR
```

空指针

与前面几个指针不同，空指针的存在是合理的，但是解引用空指针会引发错误。

事实上，保持未利用的指针是空指针有助于你的调试。假设一个值错误的指针恰好对应了某个可用的内存区域，污染了某个区域的数据，你可能会在相隔这个指针甚远的区域发现这个错误而且无法与这个指针产生联系，这是相当致命的。

```
int *ptr = NULL;
int sum = 0;
/* case1
 * 在理论上指针不应该为空的地方使用assert保证指针非空。
 */
assert(ptr != NULL);
if(*ptr > 0) {
    sum += *ptr;
}
/* case2
 * 在正常情况下指针可能为空的地方，在解引用指针前对指针特判。
 * 可以直接写一个逻辑判断语句；
```

```

* 也可以利用逻辑运算符的[短路特性]
(https://zh.cppreference.com/w/c/language/operator\_logical)。
*/
if(ptr == NULL) {
    return;
}
if(*ptr > 0) {
    sum += *ptr;
}
/* case3 */
if(ptr != NULL && *ptr > 0) {
    sum+=*ptr;
}

```

⚠ Caution

在解引用指针前一定要确保指针有效

错误的假设是调试的痛苦之源 🤖

向量: Vector

`vector` 是一种动态数组，用于存储逻辑关系为“一个或多个”的数据结构。`vector` 中的元素在内存中是连续存储的，因此可以通过索引快速访问。

Vector 的结构

`vector` 的基本结构体定义如下：

```

#include <assert.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

typedef struct {
    int *data;          // 指向整数数组的指针
    size_t size;        // 当前元素数量
    size_t capacity;    // 数组的当前容量（已分配的内存大小）
} IntVector;

```

初始化 Vector

创建一个空的 `IntVector`，初始容量设置为 4：

```

void initVector(IntVector *vec) {
    vec->size = 0;
    vec->capacity = 4; // 初始容量设为 4
    vec->data = malloc(vec->capacity * sizeof(int)); // 动态分配内存
}

```

添加元素

在 `IntVector` 中添加元素时，需要检查当前元素数量是否已达到容量。如果达到，则进行扩容：

```
void pushBack(IntVector *vec, int value) {
    // 检查是否需要扩容
    if (vec->size >= vec->capacity) {
        vec->capacity *= 2; // 将容量翻倍
        int *new_data = realloc(vec->data, vec->capacity * sizeof(int)); // 重新分配内存
        vec->data = new_data;
    }
    vec->data[vec->size] = value; // 添加新元素
    vec->size++;                // 更新当前元素数量
}
```

访问元素

可以通过索引获取 `IntVector` 中的元素，确保索引在有效范围内：

```
int get(IntVector *vec, size_t index) {
    assert(index < vec->size); // 检查索引是否越界
    return vec->data[index];   // 返回指定索引的元素
}
```

释放内存

当不再需要 `IntVector` 时，应释放其分配的内存：

```
void freeVector(IntVector *vec) {
    free(vec->data); // 释放动态分配的数组
    vec->data = NULL; // 避免悬空指针
    vec->size = 0;
    vec->capacity = 0;
}
```

打印内容

为了调试和查看 `IntVector` 的内容，可以实现打印函数：

```
void printVector(IntVector *vec) {
    printf("IntVector (size = %zu, capacity = %zu):", vec->size, vec->capacity);
    for (size_t i = 0; i < vec->size; i++) {
        printf(" %d", vec->data[i]);
    }
    printf("\n");
}
```

示例

以下是一个简单的示例，展示如何使用 `IntVector`：

```
int main(void) {
    IntVector vec;
    initVector(&vec); // 初始化向量

    // 添加元素到向量
    for (int i = 0; i < 10; i++) {
        pushBack(&vec, i);
    }

    // 打印向量内容
    printVector(&vec);

    // 获取和打印特定索引的元素
    for (size_t i = 0; i < vec.size; i++) {
        printf("Element at index %zu: %d\n", i, get(&vec, i));
    }

    // 释放向量的内存
    freeVector(&vec);
    return 0;
}
```

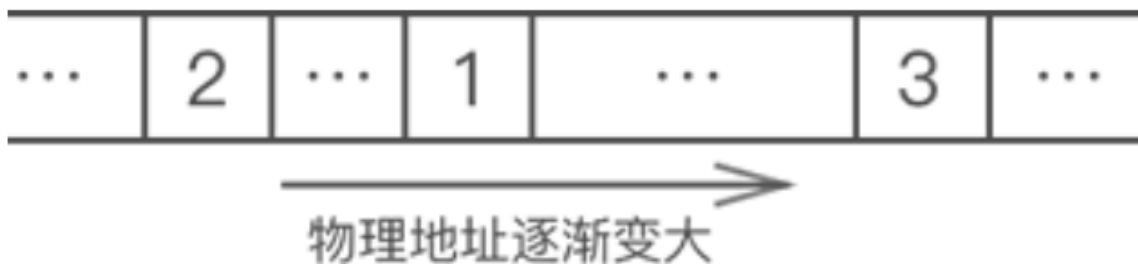
向量总结

`vector` 是一种灵活且高效的数据结构，适合需要频繁访问和动态调整大小的场景。`vector` 在内存访问和索引方面更具优势，但在插入和删除操作时，可能会导致大量元素的移动。

链表（单链表）

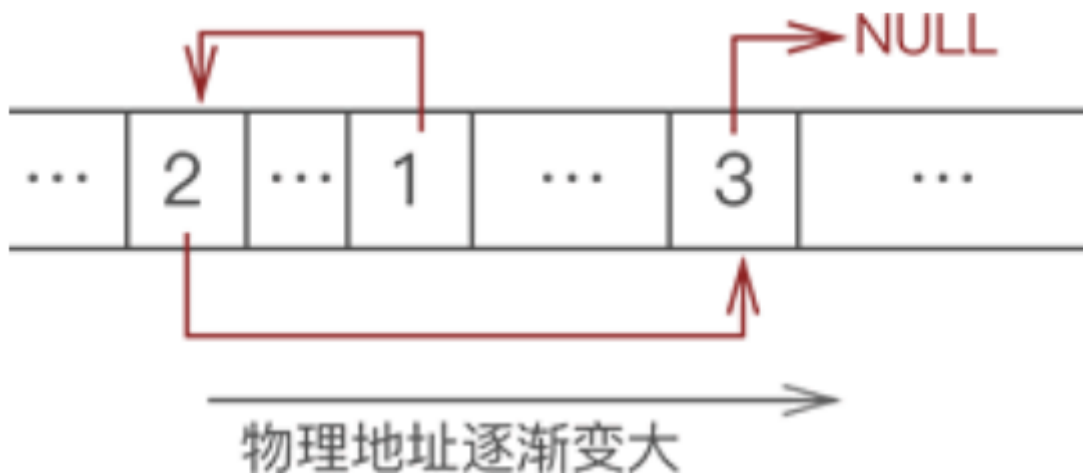
链表又称单链表、链式存储结构，用于存储逻辑关系为“一对一”的数据。

使用链表存储数据，不强制要求数据在内存中集中存储，各个元素可以分散存储在内存中。例如，使用链表存储 {1,2,3}，各个元素在内存中的存储状态可能是：



可以看到，数据不仅没有集中存放，在内存中的存储次序也是混乱的。那么，链表是如何存储数据间逻辑关系的呢？

链表存储数据间逻辑关系的实现方案是：为每一个元素配置一个指针，每个元素的指针都指向自己的直接后继元素，如下图所示：



显然，我们只需要记住元素 1 的存储位置，通过它的指针就可以找到元素 2，通过元素 2 的指针就可以找到元素 3，以此类推，各个元素的先后次序一目了然。像图 2 这样，数据元素随机存储在内存中，通过指针维系数据之间“一对一”的逻辑关系，这样的存储结构就是链表。

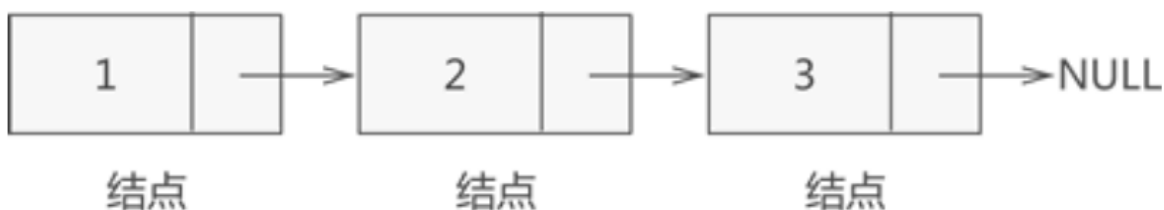
结点（节点）

在链表中，每个数据元素都配有一个指针，这意味着，链表上的每个“元素”都长下图这个样子：



数据域用来存储元素的值，指针域用来存放指针。数据结构中，通常将这样的整体称为结点。

也就是说，链表中实际存放的是一个一个的结点，数据元素存放在各个结点的数据域中。举个简单的例子，图 3 中 {1,2,3} 的存储状态用链表表示，如下图所示：



在 C 语言中，可以用结构体表示链表中的结点，例如：

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

typedef struct Node{
    int elem;                //代表数据域
    struct Node * next;      //代表指针域，指向直接后继元素
} Node;
```

头结点、头指针和首元结点

一个完整的链表应该由以下几部分构成：

头指针：是指向链表中一个结点所在存储位置的指针。如果链表中有头结点，则头指针指向头结点；若链表中没有头结点，则头指针指向链表中第一个数据结点（也叫首元结点）。

链表有头指针，当我们需要使用链表中的数据时，我们可以使用遍历查找等方法，从头指针指向的结点开始，依次搜索，直到找到需要的数据；反之，若没有头指针，则链表中的数据根本无法使用，也就失去了存储数据的意义。

结点：链表中的节点又细分为头结点、首元结点和其它结点：

头结点：位于链表的表头，即链表中第一个结点，其一般不存储任何数据，特殊情况可存储表示链表信息（表的长度等）的数据。

头结点的存在，其本身没有任何作用，就是一个空结点，但是在对链表的某些操作中，链表有无头结点，可以直接影响编程实现的难易程度。

例如，若链表无头结点，则对于在链表中第一个数据结点之前插入一个新结点，或者对链表中第一个数据结点做删除操作，都必须要当做特殊情况，进行特殊考虑；而若链表中设有头结点，以上两种特殊情况都可被视为普通情况，不需要特殊考虑，降低了问题实现的难度。

链表有头结点，也不一定都是有利的。例如解决约瑟夫环问题，若链表有头结点，在一定程度上会阻碍算法的实现。

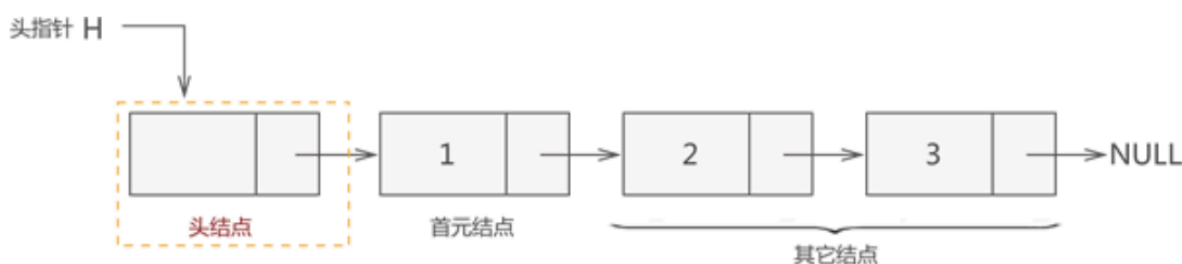
所以，对于一个链表来说，设置头指针是必要且必须的，但有没有头结点，则需要根据实际问题特殊分析。

首元结点：指的是链表开头第一个存有数据的结点。

其他节点：链表中其他的节点。

也就是说，一个完整的链表是由头指针和诸多个结点构成的。每个链表都必须有头指针，但头结点不是必须的。

例如，创建一个包含头结点的链表存储 {1,2,3}，如下图所示：



链表的创建

创建一个带头结点的链表，实现步骤如下：

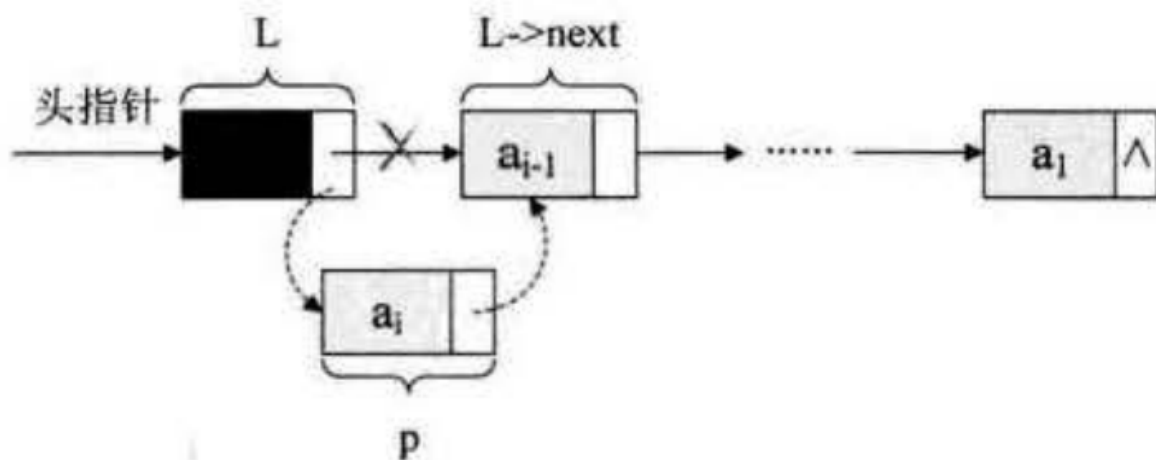
1. 定义一个头指针；
2. 创建一个头结点，让头指针指向它；
3. 每创建一个结点，都令其直接前驱结点的指针指向它（尾插法/头插法）。

创建头指针和头结点

```
typedef struct Node {  
    int elem;                // 代表数据域  
    struct Node *next;       // 代表指针域, 指向直接后继元素  
} Node;  
  
Node *head = malloc(sizeof(Node)); // 头指针指向 malloc 分配的头结点/首元结点  
head->elem = 0;                  // 头结点数据域存储链表元素个数。  
head->next = NULL;               // 初始头结点/首元结点的后继元素为空
```

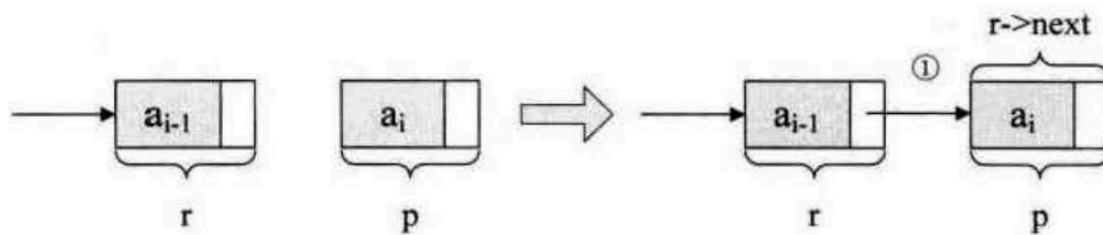
创建结点——头插法

```
Node *p = NULL;  
while (condition) {  
    p = malloc(sizeof(Node));  
    p->elem = element;  
    p->next = head->next;  
    head->next = p;  
    head->elem++;  
}
```



创建结点——尾插法

```
Node *r = head;                // r 在尾插法中始终指向最后一个结点  
Node *p = NULL;  
while (condition) {  
    p = malloc(sizeof(Node));  
    p->elem = element;  
    p->next = NULL;  
    r->next = p;  
    r = p;  
    head->elem++;  
}
```

链表的基本操作

学会创建链表之后，本节继续讲解链表的一些基本操作，包括向链表中添加数据、删除链表中的数据、读取、查找和更改链表中的数据。

链表读取元素

获得链表第 i 个数据的算法思路：

1. 声明一个结点 p 指向链表的第一个结点，初始化 j 从 1 开始；
2. 当 $j < i$ 时，就遍历链表，让 p 的指针向后移动，不断指向下一个结点， j 累加 1；
3. 若到链表末尾 p 为空，则说明第 i 个元素不存在；
4. 否则读取成功，返回结点 p 的数据

实现代码如下：

```
/* 用 e 返回 list 中第 i 个(从0开始计数)数据元素的值 */
bool GetElem(Node *list, int i, int *e) {
    Node *p;
    p = list->next;           //p 指向首元结点
    int j = 0;
    while (p && j < i) {      //p 不为空或者计数器 j 还没有等于 i 时，循环继续
        p = p->next;           //p 指向下一个结点
        j++;
    }
    if (!p) {                  //第 i 个元素不存在
        return false;
    }
    *e = p->elem;
    return true;
}
```

了解了链表如何读取元素，同理我们可以实现更新和查找链表元素。

链表插入元素

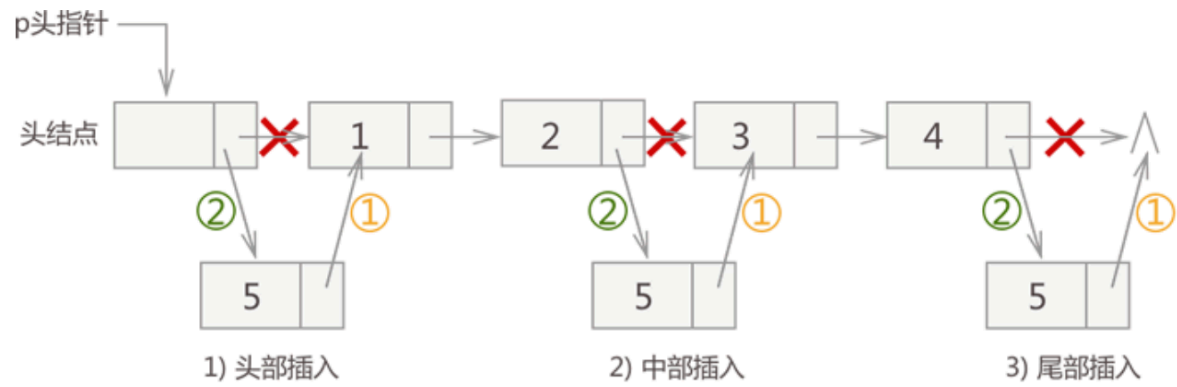
向链表中增添元素，根据添加位置不同，可分为以下 3 种情况：

- 插入到链表的头部，作为首元节点；
- 插入到链表中间的某个位置；
- 插入到链表的最末端，作为链表中最后一个结点；

对于有头结点的链表，3 种插入元素的实现思想是相同的，具体步骤是：

1. 将新结点的 `next` 指针指向插入位置后的结点；
2. 将插入位置前结点的 `next` 指针指向插入结点；

例如，在链表 {1,2,3,4} 的基础上分别实现在头部、中间、尾部插入新元素 5，其实现过程如图所示：

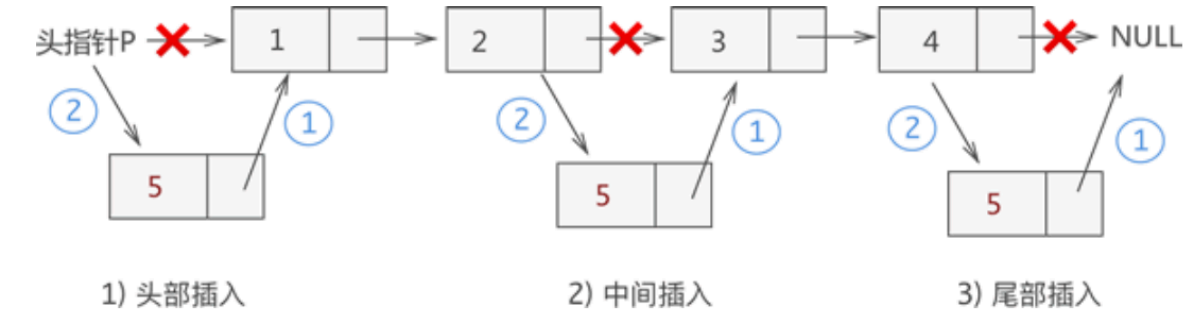


从图中可以看出，虽然新元素的插入位置不同，但实现插入操作的方法是一致的，都是先执行步骤 1，再执行步骤 2。实现代码如下：

```
/* 在 list 中第 i 个位置之前插入新的数据元素 e */
bool ListInsert(Node *list, int i, int e) {
    Node *p = list;          // p 指向头结点
    int j = 0;
    while (p && j < i) {    // 寻找第 i - 1 个结点,
        p = p->next;
        j++;
    }
    if (!p) {
        return false;
    }
    Node *r = malloc(sizeof(Node));
    r->elem = e;
    r->next = p->next;
    p->next = r;
    list->elem++;
    return true;
}
```

注意：链表插入元素的操作必须是先步骤 1，再步骤 2；反之，若先执行步骤 2，除非再添加一个指针，作为插入位置后续链表的头指针，否则会导致插入位置后的这部分链表丢失，无法再实现步骤 1。

对于没有头结点的链表，在头部插入结点比较特殊，需要单独实现。



和 2)、3) 种情况相比，由于链表没有头结点，在头部插入新结点，此结点之前没有任何结点，实现的步骤如下：

1. 将新结点的指针指向首元结点；
2. 将头指针指向新结点。

实现代码如下：

```

/* 在 list 中第 i 个位置之前插入新的数据元素 e
 * 因为可能需要修改头指针的指向，我们需要传入头指针 Node *head 的地址赋值给 Node **list
 */
bool ListInsert(Node **list, int i, int e) {
    if (i == 0) {
        Node *r = malloc(sizeof(Node));
        r->elem = e;
        r->next = (*list)->next;
        (*list) = r;
        return true;
    }
    else {
        /* ..... */
    }
}

```

链表删除元素

从链表中删除指定数据元素时，实则就是将存有该数据元素的节点从链表中摘除。

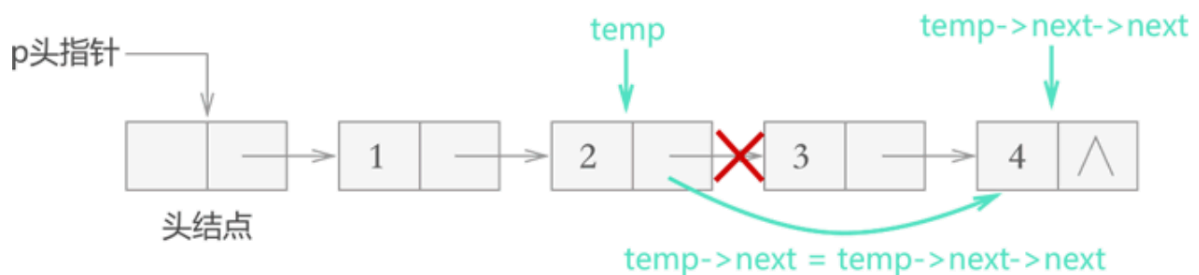
对于有头结点的链表来说，无论删除头部（首元结点）、中部、尾部的结点，实现方式都一样，执行以下三步操作：

1. 找到目标元素所在结点的直接前驱结点；
2. 将目标结点从链表中摘下来；
3. 手动释放结点占用的内存空间；

从链表上摘除目标节点，只需找到该节点的直接前驱节点 temp，执行如下操作：

```
temp->next=temp->next->next;
```

例如，从存有 {1,2,3,4} 的链表中删除存储元素 3 的结点，则此代码的执行效果如图 3 所示：



实现代码如下：

```

/* 删除 list 中的第 i 个数据元素，并用 e 返回其值 */
int ListDelete(Node *list, int i, int* e) {
    Node *p = list;
    int j = 0;
    while (p->next && j < i) {           // 寻找删除节点的前驱节点
        p = p->next;
        j++;
    }
    if (!(p->next)) {
        return false;                    // L 中不存在第 i 个元素
    }
}

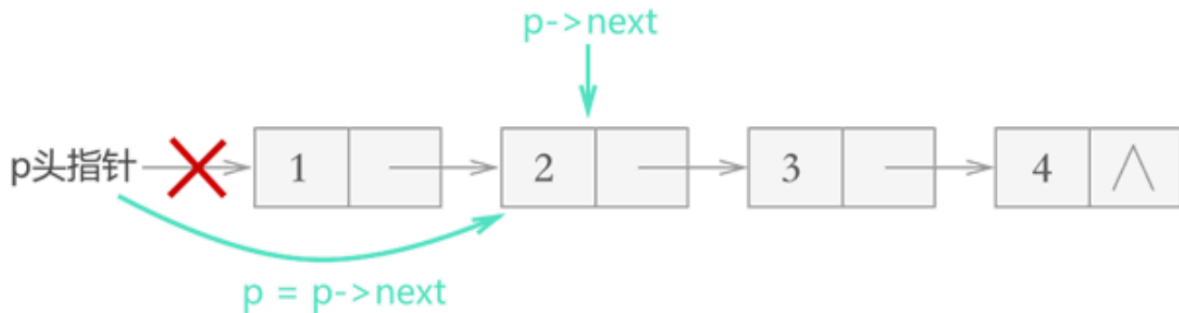
```

```

Node *r = p->next;           // 标记要删除的结点
p->next = r->next;           // 移除结点
*e = r->elem;                // 返回结点所存数据
free(r);                    // 释放结点
return true;
}

```

对于不带头结点的链表，需要单独考虑删除首元结点的情况，删除其它结点的方式和图 3 完全相同，如下图所示：



实现代码如下：

```

/* 删除 list 中的第 i 个数据元素，并用 e 返回其值 */
int ListDelete(Node **list, int i, int* e) {
    if (i == 0) {
        Node *r = *list;
        *list = r->next;
        *e = r->elem;
        free(r);
    }
    else {
        //.....
    }
}

```

链表查找元素

在链表中查找指定数据元素，最常用的方法是：从首元结点开始依次遍历所有节点，直至找到存储目标元素的结点。如果遍历至最后一个结点仍未找到，表明链表中没有存储该元素。

链表更新元素

更新链表中的元素，只需通过遍历找到存储此元素的节点，对节点中的数据域做更改操作即可。

链表销毁

```

void ListDestructs(Node *list) {
    Node *p = list;
    while (p != NULL) {
        Node *r = p->next;
        free(p);
        p = r;
    }
}

```

链表总结

链表是一种常用的数据结构，用于存储逻辑关系为“一对一”的数据。与数组不同，链表的元素可以分散存储在内存中，并通过指针连接，形成一个线性结构。

- **优点：**
 - 动态大小：可以灵活扩展，方便插入和删除操作。
 - 节省内存：不需要预先分配固定大小的内存。
- **缺点：**
 - 随机访问效率低：必须从头开始遍历，无法直接通过索引访问。
 - 内存开销：每个结点需要额外的存储空间来存储指针。

链表是一种灵活且功能强大的数据结构，适用于频繁插入和删除操作的场景。尽管随机访问性能较差，但其动态特性和高效的插入、删除操作使其在许多应用中得到广泛使用。