Go 学习笔记

第 3 版

好好学习　天天向上

前言

从 2012 年初开始学习和研究 Go 语言，虽不敢说精通，但总体上还是比较熟悉和了解的。这几年踏踏实实读着它的核心源码一路走过来，有收获，也有困扰，但还算用得顺手。

就我个人看来，要想了解 Go 的本质，是需要一些 C 的底子。换句话说，抛开 goroutine 等等时髦概念，其本质上还是 Next C 的路子。

这本笔记原则上力求简洁，属于工具书而非教程。目的是在需要的时候，花上很短的时间就可从头到尾复习完所有知识点。对熟练的程序员而言，工具书似乎比教程更重要些。

至于第二部分源码剖析，则属于可选部分，算是写给那些和我一样有好奇心的童鞋看的。

- **下载**：不定期更新，https://github.com/qyuhen/book。
- **联系**：qyuhen@hotmail.com

雨痕 二〇一四年夏初

更新

2012-01-11 开始学习 Go。
2012-01-15 第一版，基于 R60。
2012-03-29 升级到 1.0。
2012-06-15 升级到 1.0.2。
2013-03-26 升级到 1.1。
2013-12-12 第二版，基于 1.2。
2014-05-22 第三版，基于 1.3。

2014-06-05 增加 Reflect。

目录

第一部分 语言

第 1 章 类型

1.1 变量

Go 是静态类型语言，不能在运行期改变变量类型。

使用关键字 var 定义变量，自动初始化为零值。如果提供初始化值，可省略变量类型，由编译器自动推断。

```
var x int
var f float32 = 1.6
var s = "abc"
```

在函数内部，可用更简略的 ":=" 方式定义变量。

```
func main() {
    x := 123        // 注意检查，是定义新局部变量，还是修改全局变量。该方式容易造成错误。
}
```

可一次定义多个变量。

```
var x, y, z int
var s, n = "abc", 123

var (
    a int
    b float32
)

func main() {
    n, s := 0x1234, "Hello, World!"
    println(x, s, n)
}
```

多变量赋值时，先计算所有相关值，然后再从左到右依次赋值。

```
data, i := [3]int{0, 1, 2}, 0
i, data[i] = 2, 100                // (i = 0) -> (i = 2), (data[0] = 100)
```

特殊只写变量 "_"，用于忽略值占位。

```
func test() (int, string) {
    return 1, "abc"
}

func main() {
    _, s := test()
    println(s)
}
```

编译器会将未使用的局部变量当做错误。

```
var s string      // 全局变量没问题。

func main() {
    i := 0        // Error: i declared and not used。(可使用 "_ = i" 规避)
}
```

注意重新赋值与定义新同名变量的区别。

```
s := "abc"
println(&s)

s, y := "hello", 20      // 重新赋值：与前 s 在同一层次的代码块中，且有新的变量被定义。
println(&s, y)           // 通常函数多返回值 err 会被重复使用。

{
    s, z := 1000, 30     // 定义新同名变量：不在同一层次代码块。
    println(&s, z)
}
```

输出：

```
0x2210230f30
0x2210230f30 20
0x2210230f18 30
```

1.2 常量

常量值必须是编译期可确定的数字、字符串、布尔值。

```
const x, y int = 1, 2          // 多常量初始化
const s = "Hello, World!"      // 类型推断

const (                        // 常量组
    a, b      = 10, 100
    c    bool = false
```

```
)

func main() {
    const x = "xxx"             // 未使用局部常量不会引发编译错误。
}
```

不支持 1UL、2LL 这样的类型后缀。

在常量组中，如不提供类型和初始化值，那么视作与上一常量相同。

```
const (
    s   = "abc"
    x               // x = "abc"
)
```

常量值还可以是 len、cap、unsafe.Sizeof 等编译期可确定结果的函数返回值。

```
const (
    a   = "abc"
    b   = len(a)
    c   = unsafe.Sizeof(b)
)
```

如果常量类型足以存储初始化值，那么不会引发溢出错误。

```
const (
    a   byte = 100       // int to byte
    b   int  = 1e20      // float64 to int, overflows
)
```

枚举

关键字 iota 定义常量组中从 0 开始按行计数的自增枚举值。

```
const (
    Sunday = iota     // 0
    Monday            // 1，通常省略后续行表达式。
    Tuesday           // 2
    Wednesday         // 3
    Thursday          // 4
    Friday            // 5
    Saturday          // 6
)
```

```
const (
    _          = iota                  // iota = 0
    KB  int64 = 1 << (10 * iota)       // iota = 1
    MB                                 // 与 KB 表达式相同，但 iota = 2
    GB
    TB
)
```

在同一常量组中，可以提供多个 iota，它们各自增长。

```
const (
    A, B = iota, iota << 10   // 0, 0 << 10
    C, D                      // 1, 1 << 10
)
```

如果 iota 自增被打断，须显式恢复。

```
const (
    A   = iota      // 0
    B               // 1
    C   = "c"       // c
    D               // c，与上一行相同。
    E   = iota      // 4，显式恢复。注意计数包含了 C、D 两行。
    F               // 5
)
```

可通过自定义类型来实现枚举类型限制。

```
type Color int

const (
    Black Color = iota
    Red
    Blue
)

func test(c Color) {}

func main() {
    c := Black
    test(c)

    x := 1
    test(x) // Error: cannot use x (type int) as type Color in function argument
```

```
    test(1) // 常量会被编译器自动转换。
}
```

1.3 基本类型

更明确的数字类型命名，支持 Unicode，支持常用数据结构。

类型	长度	默认值	说明
bool	1	false	
byte	1	0	uint8
rune	4	0	Unicode Code Point, int32
int, uint	4 或 8	0	32 或 64 位
int8, uint8	1	0	-128 ~ 127, 0 ~ 255
int16, uint16	2	0	-32768 ~ 32767, 0 ~ 65535
int32, uint32	4	0	-21亿 ~ 21 亿, 0 ~ 42 亿
int64, uint64	8	0	
float32	4	0.0	
float64	8	0.0	
complex64	8		
complex128	16		
uintptr	4 或 8		足以存储指针的 uint32 或 uint64 整数
array			值类型
struct			值类型
string		""	UTF-8 字符串
slice		nil	引用类型
map		nil	引用类型
channel		nil	引用类型
interface		nil	接口
function		nil	函数

支持八进制、十六进制，以及科学记数法。标准库 math 定义了各数字类型取值范围。

```
a, b, c, d := 071, 0x1F, 1e9, math.MinInt16
```

空指针值 nil，而非 C/C++ NULL。

1.4 引用类型

引用类型包括 slice、map 和 channel。它们有复杂的内部结构，除了申请内存外，还需要初始化相关属性。

内置函数 new 计算类型大小，为其分配零值内存，返回指针。而 make 会被编译器翻译成具体的创建函数，由其分配内存和初始化成员结构，返回对象而非指针。

```
a := []int{0, 0, 0}     // 提供初始化表达式。
a[1] = 10

b := make([]int, 3)     // slice.goc: makeslice
b[1] = 10

c := new([]int)
c[1] = 10               // Error: invalid operation: c[1] (index of type *[]int)
```

有关引用类型具体的内存布局，可参考后续章节。

1.5 类型转换

不支持隐式类型转换，即便是从窄向宽转换也不行。

```
var b byte = 100
// var n int = b        // Error: cannot use b (type byte) as type int in assignment
var n int = int(b)      // 显式转换
```

使用括号避免优先级错误。

```
*Point(p)               // 相当于 *(Point(p))
(*Point)(p)
<-chan int(c)           // 相当于 <-(chan int(c))
(<-chan int)(c)
```

同样不能将其他类型当 bool 值使用。

```
a := 100
if a {                  // Error: non-bool a (type int) used as if condition
    println("true")
}
```

1.6 字符串

字符串是不可变值类型，内部用指针指向 UTF-8 字节数组。

- 默认值是空字符串 ""。
- 用索引号访问某字节，如 s[i]。
- 不能用序号获取字节元素指针。&s[i] 非法。
- 不可变类型，无法修改字节数组。
- 字节数组尾部不包含 NULL。

runtime.h

```
struct String
{
    byte*    str;
    intgo    len;
};
```

使用索引号访问字符 (byte)。

```
s := "abc"
println(s[0] == '\x61', s[1] == 'b', s[2] == 0x63)
```

输出：

```
true true true
```

使用 "`" 定义不做转义处理的原始字符串，支持跨行。

```
s := `a
b\r\n\x00
c`

println(s)
```

输出：

```
a
b\r\n\x00
c
```

连接跨行字符串时，"+" 必须在上一行末尾，否则导致编译错误。

```
s := "Hello, " +
     "World!"

s2 := "Hello, "
    + "World!"    // Error: invalid operation: + untyped string
```

支持用两个索引号返回子串。子串依然指向原字节数组，仅修改了指针和长度属性。

```
s := "Hello, World!"

s1 := s[:5]                  // Hello
s2 := s[7:]                  // World!
s3 := s[1:5]                 // ello
```

单引号字符常量表示 Unicode Code Point，支持 \uFFFF、\U7FFFFFFF、\xFF 格式。对应 rune 类型，UCS-4。

```
func main() {
    fmt.Printf("%T\n", 'a')

    var c1, c2 rune = '\u6211', '们'
    println(c1 == '我', string(c2) == "\xe4\xbb\xac")
}
```

输出：

```
int32                   // rune 是 int32 的别名
true true
```

要修改字符串，可先将其转换成 []rune 或 []byte，完成后再转换为 string。无论哪种转换，都会重新分配内存，并复制字节数组。

```
func main() {
    s := "abcd"
    bs := []byte(s)

    bs[1] = 'B'
    println(string(bs))

    u := "电脑"
```

```
    us := []rune(u)

    us[1] = '话'
    println(string(us))
}
```

输出:

```
aBcd
电话
```

用 for 循环遍历字符串时，也有 byte 和 rune 两种方式。

```
func main() {
    s := "abc汉字"

    for i := 0; i < len(s); i++ {       // byte
        fmt.Printf("%c,", s[i])
    }

    fmt.Println()

    for _, r := range s {               // rune
        fmt.Printf("%c,", r)
    }
}
```

输出:

```
a,b,c,æ,±,,å,-,,
a,b,c,汉,字,
```

1.7 指针

支持指针类型 *T，指针的指针 **T，以及包含包名前缀的 *<package>.T。

- 默认值 nil，没有 NULL 常量。
- 操作符 "&" 取变量地址，"*" 透过指针访问目标对象。
- 不支持指针运算，不支持 "->" 运算符，直接用 "." 访问目标成员。

```
func main() {
    type data struct{ a int }

    var d = data{1234}
    var p *data

    p = &d
```

```
    fmt.Printf("%p, %v\n", p, p.a)   // 直接用指针访问目标对象成员，无须转换。
}
```

输出：

```
0x2101ef018, 1234
```

不能对指针做加减法等运算。

```
x := 1234
p := &x
p++          // Error: invalid operation: p += 1 (mismatched types *int and int)
```

可以在 unsafe.Pointer 和任意类型指针间进行转换。

```
func main() {
    x := 0x12345678

    p := unsafe.Pointer(&x)         // *int -> Pointer
    n := (*[4]byte)(p)              // Pointer -> *[4]byte

    for i := 0; i < len(n); i++ {
        fmt.Printf("%X ", n[i])
    }
}
```

输出：

```
78 56 34 12
```

返回局部变量指针是安全的，编译器会根据需要将其分配在 GC Heap 上。

```
func test() *int {
    x := 100
    return &x            // 使用 runtime.new 分配 x 内存。但在内联时，也可能直接分配在目标栈。
}
```

将 Pointer 转换成 uintptr，可变相实现指针运算。

```
func main() {
    d := struct {
        s   string
        x   int
    }{"abc", 100}

    p := uintptr(unsafe.Pointer(&d))   // *struct -> Pointer -> uintptr
    p += unsafe.Offsetof(d.x)          // uintptr + offset
```

```
    p2 := unsafe.Pointer(p)            // uintptr -> Pointer
    px := (*int)(p2)                   // Pointer -> *int
    *px = 200                          // d.x = 200

    fmt.Printf("%#v\n", d)
}
```

输出：

```
struct { s string; x int }{s:"abc", x:200}
```

注意：GC 把 uintptr 当成普通整数对象，它无法阻止 "关联" 对象被回收。

1.8 自定义类型

可将类型分为命名和未命名两大类。命名类型包括 bool、int、string 等，而 array、slice、map 等和具体元素类型、长度等有关，属于未命名类型。

具有相同声明的未命名类型被视为同一类型。

- 具有相同基类型的指针。
- 具有相同元素类型和长度的 array。
- 具有相同元素类型的 slice。
- 具有相同键值类型的 map。
- 具有相同元素类型和传送方向的 channel。
- 具有相同字段序列 (字段名、类型、标签、顺序) 的匿名 struct。
- 签名相同 (参数和返回值，不包括参数名称) 的 function。
- 方法集相同 (方法名、方法签名相同，和次序无关) 的 interface。

```
var a struct { x int `a` }
var b struct { x int `ab` }

// cannot use a (type struct { x int "a" }) as type struct { x int "ab" } in assignment
b = a
```

可用 type 在全局或函数内定义新类型。

```
func main() {
    type bigint int64

    var x bigint = 100
    println(x)
}
```

新类型不是原类型的别名，除拥有相同数据存储结构外，它们之间没有任何关系，不会持有原类型任何信息。除非目标类型是未命名类型，否则必须显式转换。

```
x := 1234
var b bigint = bigint(x)          // 必须显式转换，除非是常量。
var b2 int64 = int64(b)

var s myslice = []int{1, 2, 3}    // 未命名类型，隐式转换。
var s2 []int = s
```

第 2 章 表达式

2.1 保留字

语言设计简练，保留字不多。

```
break        default        func         interface      select
case         defer          go           map            struct
chan         else           goto         package        switch
const        fallthrough    if           range          type
continue     for            import       return         var
```

2.2 运算符

全部运算符、分隔符，以及其他符号。

```
+       &       +=       &=       &&       ==       !=       (       )
-       |       -=       |=       ||       <        <=       [       ]
*       ^       *=       ^=       <-       >        >=       {       }
/       <<      /=       <<=      ++       =        :=       ,       ;
%       >>      %=       >>=      --       !        ...      .       :
        &^               &^=
```

运算符结合律全部从左到右。

```
 优先级        运算符                                              说明
------------+-------------------------------------------------+------------------------------
 high        *      /      &      <<     >>     &      &^
             +      -      |      ^
             ==     !=     <      <=     <      >=
             <-                                                  channel
             &&
 low         ||
```

简单位运算演示。

```
0110 &  1011 = 0010       AND      都为 1。
0110 |  1011 = 1111       OR       至少一个为 1。
0110 ^  1011 = 1101       XOR      只能一个为 1。
0110 &^ 1011 = 0100       AND NOT  清除标志位。
```

标志位操作。

```
a := 0
a |= 1 << 2            // 0000100: 在 bit2 设置标志位。
a |= 1 << 6            // 1000100: 在 bit6 设置标志位
a = a &^ (1 << 6)      // 0000100: 清除 bit6 标志位。
```

不支持运算符重载。尤其需要注意，"++"、"--" 是语句而非表达式。

```
n := 0
p := &n

// b := n++           // syntax error
// if n++ == 1 {}     // syntax error
// ++n                // syntax error

n++
*p++                  // (*p)++
```

没有 "~"，取反运算也用 "^"。

```
x := 1
x, ^x                 // 0001, -0010
```

2.3 初始化

初始化复合对象，必须使用类型标签，且左大括号必须在类型尾部。

```
// var a struct { x int } = { 100 }   // syntax error

// var b []int = { 1, 2, 3 }          // syntax error

// c := struct {x int; y string}      // syntax error: unexpected semicolon or newline
// {
// }

var a = struct{ x int }{100}
var b = []int{1, 2, 3}
```

初始化值以 "," 分隔。可以分多行，但最后一行必须以 "," 或 "}" 结尾。

```
a := []int{

```

```
    1,
    2           // Error: need trailing comma before newline in composite literal
}

a := []int{
    1,
    2,          // ok
}

b := []int{
    1,
    2 }         // ok
```

2.4 控制流

2.4.1 IF

很特别的写法：

- 可省略条件表达式括号。
- 支持初始化语句，可定义代码块局部变量。
- 代码块左大括号必须在条件表达式尾部。

```
x := 0

// if x > 10                // Error: missing condition in if statement
// {
// }

if n := "abc"; x > 0 {      // 初始化语句未必就是定义变量，比如 println("init") 也是可以的。
    println(n[2])
} else if x < 0 {           // 注意 else if 和 else 左大括号位置。
    println(n[1])
} else {
    println(n[0])
}
```

不支持三元操作符 "a > b ? a : b"。

2.4.2 For

支持三种循环方式，包括类 while 语法。

```
s := "abc"

for i, n := 0, len(s); i < n; i++ {   // 常见的 for 循环，支持初始化语句。
    println(s[i])
}

n := len(s)
for n > 0 {                           // 替代 while (n > 0) {}
    println(s[n])                     // 替代 for (; n > 0;) {}
    n--
}

for {                                 // 替代 while (true) {}
    println(s)                        // 替代 for (;;) {}
}
```

不要期望编译器能理解你的想法，在初始化语句中计算出全部结果是个好主意。

```
func length(s string) int {
    println("call length.")
    return len(s)
}

func main() {
    s := "abcd"

    for i, n := 0, length(s); i < n; i++ {   // 避免多次调用 length 函数。
        println(i, s[i])
    }
}
```

输出：

```
call length.
0 97
1 98
2 99
3 100
```

2.4.3 Range

类似迭代器操作，返回 (索引, 值) 或 (键, 值)。

```
                    1st value           2nd value
-----------------+-------------------+-----------------+-------------------
 string              index               s[index]           unicode, rune
 array/slice         index               s[index]
 map                 key                 m[key]
 channel             element
```

可忽略不想要的返回值，或用 "_" 这个特殊变量。

```
s := "abc"

for i := range s {                  // 忽略 2nd value，支持 string/array/slice/map。
    println(s[i])
}

for _, c := range s {               // 忽略 index。
    println(c)
}

m := map[string]int{"a": 1, "b": 2}

for k, v := range m {               // 返回 (key, value)。
    println(k, v)
}
```

注意，range 会复制对象。

```
a := [3]int{0, 1, 2}

for i, v := range a {             // index、value 都是从复制品中取出。

    if i == 0 {                   // 在修改前，我们先修改原数组。
        a[1], a[2] = 999, 999
        fmt.Println(a)            // 确认修改有效，输出 [0, 999, 999]。
    }

    a[i] = v + 100                // 使用复制品中取出的 value 修改原数组。
}

fmt.Println(a)                    // 输出 [100, 101, 102]。
```

建议改用引用类型，其底层数据不会被复制。

```
s := []int{1, 2, 3, 4, 5}
```

```
for i, v := range s {       // 复制 struct slice { pointer, len, cap }。

    if i == 0 {
        s = s[:3]           // 对 slice 的修改，不会影响 range。
        s[2] = 100          // 对底层数据的修改。
    }

    println(i, v)
}
```

输出：

```
0 1
1 2
2 100
3 4
4 5
```

另外两种引用类型 map、channel 是指针包装，而不像 slice 是 struct。

2.4.4 Switch

分支表达式可以是任意类型，不限于常量。可省略 break，默认自动终止。

```
x := []int{1, 2, 3}
i := 2

switch i {
    case x[1]:
        println("a")
    case 1, 3:
        println("b")
    default:
        println("c")
}
```

输出：

```
a
```

如需要继续下一分支，可使用 fallthrough，但不再判断条件。

```
x := 10

switch x {
case 10:
    println("a")
```

```
    fallthrough
case 0:
    println("b")
}
```

输出：

```
a
b
```

省略条件表达式，可当 if...else if...else 使用。

```
switch {
    case x[1] > 0:
        println("a")
    case x[1] < 0:
        println("b")
    default:
        println("c")
}

switch i := x[2]; {           // 带初始化语句
    case i > 0:
        println("a")
    case i < 0:
        println("b")
    default:
        println("c")
}
```

2.4.5 Goto, Break, Continue

支持在函数内 goto 跳转。标签名区分大小写，未使用标签引发错误。

```
func main() {
    var i int
    for {
        println(i)
        i++
        if i > 2 { goto BREAK }
    }

BREAK:
    println("break")

EXIT:                   // Error: label EXIT defined and not used
```

```
}
```

配合标签，break 和 continue 可在多级嵌套循环中跳出。

```
func main() {
L1:
    for x := 0; x < 3; x++ {
L2:
        for y := 0; y < 5; y++ {
            if y > 2 { continue L2 }
            if x > 1 { break L1 }

            print(x, ":", y, " ")
        }

        println()
    }
}
```

输出：

```
0:0  0:1  0:2
1:0  1:1  1:2
```

附：break 可用于 for、switch、select，而 continue 仅能用于 for 循环。

```
x := 100

switch {
case x >= 0:
    if x == 0 { break }
    println(x)
}
```

第 3 章 函数

3.1 函数定义

不支持 嵌套 (nested)、重载 (overload) 和 默认参数 (default parameter)。

- 无需声明原型。
- 支持不定长变参。
- 支持多返回值。
- 支持命名返回参数。
- 支持匿名函数和闭包。

使用关键字 func 定义函数，左大括号依旧不能另起一行。

```
func test(x, y int, s string) (int, string) {      // 类型相同的相邻参数可合并。
    n := x + y                                     // 多返回值必须用括号。
    return n, fmt.Sprintf(s, n)
}
```

函数是第一类对象，可作为参数传递。建议将复杂签名定义为函数类型，以便于阅读。

```
func test(fn func() int) int {
    return fn()
}

type FormatFunc func(s string, x, y int) string    // 定义函数类型。

func format(fn FormatFunc, s string, x, y int) string {
    return fn(s, x, y)
}

func main() {
    s1 := test(func() int { return 100 })          // 直接将匿名函数当参数。

    s2 := format(func(s string, x, y int) string {
        return fmt.Sprintf(s, x, y)
    }, "%d, %d", 10, 20)

    println(s1, s2)
}
```

有返回值的函数，必须有明确的终止语句，否则会引发编译错误。

3.2 变参

变参本质上就是 slice。只能有一个，且必须是最后一个。

```
func test(s string, n ...int) string {
    var x int
    for _, i := range n {
        x += i
    }

    return fmt.Sprintf(s, x)
}

func main() {
    println(test("sum: %d", 1, 2, 3))
}
```

使用 slice 对象做变参时，必须展开。

```
func main() {
    s := []int{1, 2, 3}
    println(test("sum: %d", s...))
}
```

3.3 返回值

不能用容器对象接收多返回值。只能用多个变量，或 "_" 忽略。

```
func test() (int, int) {
    return 1, 2
}

func main() {
    // s := make([]int, 2)
    // s = test()            // Error: multiple-value test() in single-value context

    x, _ := test()
    println(x)
}
```

多返回值可直接作为其他函数调用实参。

```
func test() (int, int) {
    return 1, 2
}

func add(x, y int) int {
    return x + y
}

func sum(n ...int) int {
    var x int
    for _, i := range n {
        x += i
    }

    return x
}

func main() {
    println(add(test()))
    println(sum(test()))
}
```

命名返回参数可看做与形参类似的局部变量，最后由 return 隐式返回。

```
func add(x, y int) (z int) {
    z = x + y
    return
}

func main() {
    println(add(1, 2))
}
```

命名返回参数可被同名局部变量遮蔽，此时需要显式返回。

```
func add(x, y int) (z int) {
    {                       // 不能在一个级别，引发 "z redeclared in this block" 错误。
        var z = x + y
        // return           // Error: z is shadowed during return
        return z            // 必须显式返回。
    }
}
```

命名返回参数允许 defer 延迟调用通过闭包读取和修改。

```
func add(x, y int) (z int) {
    defer func() {
        z += 100
    }()

    z = x + y
    return
}

func main() {
    println(add(1, 2))     // 输出: 103
}
```

显式 return 返回前，会先修改命名返回参数。

```
func add(x, y int) (z int) {
    defer func() {
        println(z)         // 输出: 203
    }()

    z = x + y
    return z + 200         // 执行顺序: (z = z + 200) -> (call defer) -> (ret)
}

func main() {
    println(add(1, 2))     // 输出: 203
}
```

3.4 匿名函数

匿名函数可赋值给变量，做为结构字段，或者在 channel 里传送。

```
// --- function variable ---

fn := func() { println("Hello, World!") }
fn()

// --- function collection ---

fns := [](func(x int) int){
    func(x int) int { return x + 1 },
    func(x int) int { return x + 2 },
```

```
}

println(fns[0](100))

// --- function as field ---

d := struct {
    fn func() string
}{
    fn: func() string { return "Hello, World!" },
}

println(d.fn())

// --- channel of function ---

fc := make(chan func() string, 2)
fc <- func() string { return "Hello, World!" }
println((<-fc)())
```

闭包复制的是原对象指针，这就很容易解释延迟引用现象。

```
func test() func() {
    x := 100
    fmt.Printf("x (%p) = %d\n", &x, x)

    return func() {
        fmt.Printf("x (%p) = %d\n", &x, x)
    }
}

func main() {
    f := test()
    f()
}
```

输出：

```
x (0x2101ef018) = 100
x (0x2101ef018) = 100
```

在汇编层面，test 实际返回的是 FuncVal 对象，其中包含了匿名函数地址、闭包对象指针。只需将返回对象地址保存到某个寄存器，就可让匿名函数获取相关闭包对象指针。

```
FuncVal { func_address, closure_var_pointer ... }
```

3.5 延迟调用

关键字 defer 用于注册延迟调用。这些调用直到 ret 前才被执行，通常用于释放资源或错误处理。

```
func test() error {
    f, err := os.Create("test.txt")
    if err != nil { return err }

    defer f.Close()                 // 注册调用，而不是注册函数。必须提供参数，那怕为空。

    f.WriteString("Hello, World!")
    return nil
}
```

多个 defer 注册，按 FILO 次序执行。哪怕函数或某个延迟调用发生错误，这些调用依旧会被执行。

```
func test(x int) {
    defer println("a")
    defer println("b")

    defer func() {
        println(100 / x)            // div0 异常未被捕获，逐步往外传递，最终终止进程。
    }()

    defer println("c")
}

func main() {
    test(0)
}
```

输出：

```
c
b
a
panic: runtime error: integer divide by zero
```

延迟调用参数在注册时求值或复制，可用指针或闭包 "延迟" 读取。

```
func test() {
    x, y := 10, 20

    defer func(i int) {
        println("defer:", i, y)     // y 闭包引用
```

```
    }(x)                            // x 被复制

    x += 10
    y += 100
    println("x =", x, "y =", y)
}
```

输出：

```
x = 20 y = 120
defer: 10 120
```

滥用 defer 可能会导致性能问题，尤其是在一个 "大循环" 里。

```
var lock sync.Mutex

func test() {
    lock.Lock()
    lock.Unlock()
}

func testdefer() {
    lock.Lock()
    defer lock.Unlock()
}

func BenchmarkTest(b *testing.B) {
    for i := 0; i < b.N; i++ {
        test()
    }
}

func BenchmarkTestDefer(b *testing.B) {
    for i := 0; i < b.N; i++ {
        testdefer()
    }
}
```

输出：

```
BenchmarkTest       50000000          43 ns/op
BenchmarkTestDefer  20000000         128 ns/op
```

3.6 错误处理

没有结构化异常，使用 panic 抛出错误，recover 捕获错误。

```
func test() {
```

```
    defer func() {
        if err := recover(); err != nil {
            println(err.(string))           // 将 interface{} 转型为具体类型。
        }
    }()

    panic("panic error!")
}
```

由于 panic、recover 参数类型为 interface{}，因此可抛出任何类型对象。

```
func panic(v interface{})
func recover() interface{}
```

延迟调用中引发的错误，可被后续延迟调用捕获，但仅最后一个错误可被捕获。

```
func test() {
    defer func() {
        fmt.Println(recover())
    }()

    defer func() {
        panic("defer panic")
    }()

    panic("test panic")
}

func main() {
    test()
}
```

输出：

```
defer panic
```

捕获函数 recover 只有在延迟调用内直接调用才会终止错误，否则总是返回 nil。任何未捕获的错误都会沿调用堆栈向外传递。

```
func test() {
    defer recover()                 // 无效!
    defer fmt.Println(recover())    // 无效!
    defer func() {
        func() {
            println("defer inner")
            recover()               // 无效!
        }()
```

```
    }()

    panic("test panic")
}

func main() {
    test()
}
```

输出：

```
defer inner
<nil>
panic: test panic
```

使用延迟匿名函数或下面这样都是有效的。

```
func except() {
    recover()
}

func test() {
    defer except()
    panic("test panic")
}
```

如果需要保护代码片段，可将代码块重构成匿名函数，如此可确保后续代码被执行。

```
func test(x, y int) {
    var z int

    func() {
        defer func() {
            if recover() != nil { z = 0 }
        }()

        z = x / y
        return
    }()

    println("x / y =", z)
}
```

除用 panic 引发中断性错误外，还可返回 error 类型错误对象来表示函数调用状态。

```
type error interface {
    Error() string
```

```
}
```

标准库 error.New 和 fmt.Errorf 函数用于创建实现 error 接口的错误对象。通过判断错误对象实例来确定具体错误类型。

```
var ErrDivByZero = errors.New("division by zero")

func div(x, y int) (int, error) {
    if y == 0 { return 0, ErrDivByZero }
    return x / y, nil
}

func main() {
    switch z, err := div(10, 0); err {
    case nil:
        println(z)
    case ErrDivByZero:
        panic(err)
    }
}
```

如何区别使用 panic 和 error 两种方式？惯例是：在包内部使用 panic，对外 API 使用 error 返回值。

第 4 章 数据

4.1 Array

和以往认知的数组有很大不同。

- 数组是值类型，赋值和传参会复制整个数组，而不是指针。
- 数组长度必须是常量，且是类型的组成部分。[2]int 和 [3]int 是不同类型。
- 支持 "=="、"!=" 操作符，因为内存总是被初始化过的。
- 指针数组 [n]*T，数组指针 *[n]T。

可用复合语句初始化。

```
a := [3]int{1, 2}               // 未初始化元素值为 0。
b := [...]int{1, 2, 3, 4}       // 通过初始化值确定数组长度。
c := [5]int{2: 100, 4:200}      // 使用索引号初始化元素。

d := [...]struct {
    name string
    age  uint8
}{
    {"user1", 10},              // 可省略元素类型。
    {"user2", 20},              // 别忘了最后一行的逗号。
}
```

支持多维数组。

```
a := [2][3]int{{1, 2, 3}, {4, 5, 6}}
b := [...][2]int{{1, 1}, {2, 2}, {3, 3}}    // 第 2 纬度不能用 "..."。
```

值拷贝行为会造成性能问题，通常会建议使用 slice，或数组指针。

```
func test(x [2]int) {
    fmt.Printf("x: %p\n", &x)
    x[1] = 1000
}

func main() {
    a := [2]int{}
    fmt.Printf("a: %p\n", &a)
```

```
    test(a)
    fmt.Println(a)
}
```

输出：

```
a: 0x2101f9150
x: 0x2101f9170
[0 0]
```

内置函数 len 和 cap 都返回数组长度 (元素数量)。

```
a := [2]int{}
println(len(a), cap(a))   // 2, 2
```

4.2 Slice

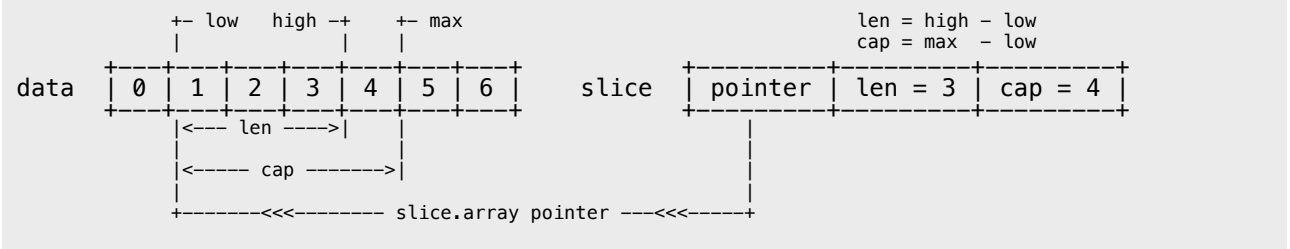
需要说明，slice 并不是数组或数组指针。它通过内部指针和相关属性引用数组片段，以实现变长方案。

runtime.h

```
struct Slice
{                          // must not move anything
    byte*    array;        // actual data
    uintgo   len;          // number of elements
    uintgo   cap;          // allocated number of elements
};
```

- 引用类型。但自身是结构体，值拷贝传递。
- 属性 len 表示可用元素数量，读写操作不能超过该限制。
- 属性 cap 表示最大扩张容量，不能超出数组限制。
- 如果 slice == nil，那么 len、cap 结果都等于 0。

```
data := [...]int{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}
slice := data[1:4:5]                      // [low : high : max]
```



创建表达式使用的是元素索引号，而非数量。

```
data := [...]int{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}

expression   slice                  len    cap     comment
-----------+----------------------+------+-------+---------------------
data[:6:8]   [0 1 2 3 4 5]          6      8       省略 low.
data[5:]     [5 6 7 8 9]            5      5       省略 high、max。
data[:3]     [0 1 2]                3      10      省略 low、max。
data[:]      [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9]  10     10      全部省略。
```

读写操作实际目标是底层数组，只需注意索引号的差别。

```
data := [...]int{0, 1, 2, 3, 4, 5}

s := data[2:4]
s[0] += 100
s[1] += 200

fmt.Println(s)
fmt.Println(data)
```

输出：

```
[102 203]
[0 1 102 203 4 5]
```

可直接创建 slice 对象，自动分配底层数组。

```
s1 := []int{0, 1, 2, 3, 8: 100}        // 通过初始化表达式构造，可使用索引号。
fmt.Println(s1, len(s1), cap(s1))

s2 := make([]int, 6, 8)                // 使用 make 创建，指定 len 和 cap 值。
fmt.Println(s2, len(s2), cap(s2))

s3 := make([]int, 6)                   // 省略 cap，相当于 cap = len。
fmt.Println(s3, len(s3), cap(s3))
```

输出：

```
[0 1 2 3 0 0 0 0 100]  9  9
[0 0 0 0 0 0]          6  8
[0 0 0 0 0 0]          6  6
```

使用 make 动态创建 slice，避免了数组必须用常量做长度的麻烦。还可用指针直接访问底层数组，退化成普通数组操作。

```
s := []int{0, 1, 2, 3}
```

```
p := &s[2]      // *int, 获取底层数组元素指针。
*p += 100

fmt.Println(s)
```

输出：

```
[0 1 102 3]
```

至于 []T，是指元素类型为 []T 。

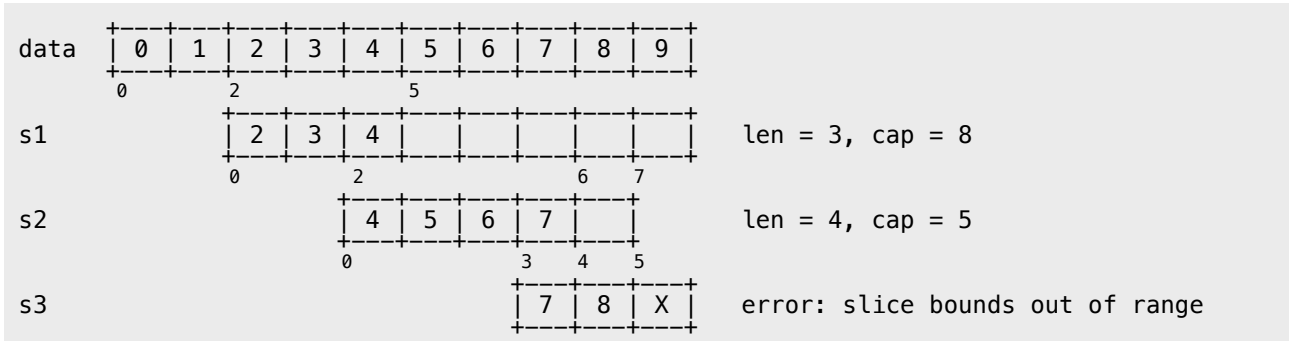
```
data := [][]int{
    []int{1, 2, 3},
    []int{100, 200},
    []int{11, 22, 33, 44},
}
```

4.2.1 reslice

所谓 reslice，是基于已有 slice 创建新 slice 对象，以便在 cap 允许范围内调整属性。

```
s := []int{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}

s1 := s[2:5]        // [2 3 4]
s2 := s1[2:6:7]     // [4 5 6 7]
s3 := s2[3:6]       // Error
```



新对象依旧指向原底层数组。

```
s := []int{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}

s1 := s[2:5]       // [2 3 4]
s1[2] = 100

s2 := s1[2:6]      // [100 5 6 7]
```

```
s2[3] = 200

fmt.Println(s)
```

输出：

```
[0 1 2 3 100 5 6 200 8 9]
```

4.2.2 append

向 slice 尾部添加数据，返回新的 slice 对象。

```
s := make([]int, 0, 5)
fmt.Printf("%p\n", &s)

s2 := append(s, 1)
fmt.Printf("%p\n", &s2)

fmt.Println(s, s2)
```

输出：

```
0x210230000
0x210230040
[] [1]
```

简单点说，就是在 array[slice.high] 写数据。

```
data := [...]int{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}

s := data[:3]
s2 := append(s, 100, 200)    // 添加多个值。

fmt.Println(data)
fmt.Println(s)
fmt.Println(s2)
```

输出：

```
[0 1 2 100 200 5 6 7 8 9]
[0 1 2]
[0 1 2 100 200]
```

一旦超出原 slice.cap 限制，就会重新分配底层数组，即便原数组并未填满。

```
data := [...]int{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}

s := data[:3:4]
fmt.Println(s)
```

```
s2 := append(s, 100, 200)
fmt.Println(s2)

fmt.Println(data)
fmt.Println(&data[0], &s[0], &s2[0])
```

输出：

```
[0 1 2]                                     // s, s.cap = 4
[0 1 2 100 200]                             // s2
[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9]                       // data
0x21020e140  0x21020e140  0x210232000       // pointer: data, s->array, s2->array
```

从输出结果可以看出，s2 重新分配了底层数组，并复制数据。如果只追加一个值，正好没超过 s.cap 限制，那么就不会重新分配数组。

大批量添加数据时，建议一次性分配 len 足够大的 slice，然后用索引号进行操作。还有，及时释放不再使用的 slice 对象，避免持有过期数组，造成 GC 无法回收。

4.2.3 copy

函数 copy 在两个 slice 间复制数据，复制长度以 len 小的为准。两个 slice 可指向同一底层数组，允许元素区间重叠。

```
data := [...]int{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}

s := data[8:]
s2 := data[:5]

copy(s2, s)          // dst:s2, src:s

fmt.Println(s2)
fmt.Println(data)
```

输出：

```
[8 9 2 3 4]
[8 9 2 3 4 5 6 7 8 9]
```

应及时将所需数据 copy 到较小的 slice，以便释放超大号底层数组内存。

4.3 Map

引用类型，哈希表。键必须是支持相等运算符 (==、!=) 类型，比如 number、string、pointer、array、struct，以及对应的 interface。值可以是任意类型，没有限制。

```
m := map[int]struct {
    name string
    age  int
}{
    1:  {"user1", 10},        // 可省略元素类型。
    2:  {"user2", 20},
}

println(m[1].name)
```

预先给 make 函数一个合理元素数量参数，有助于提升性能。因为事先申请一大块内存，可避免后续操作时频繁扩张。

```
m := make(map[string]int, 1000)
```

常见操作：

```
m := map[string]int{
    "a": 1,
}

if v, ok := m["a"]; ok {     // 判断 key 是否存在。
    println(v)
}

println(m["c"])              // 对于不存在的 key，直接返回 \0，不会出错。

m["b"] = 2                   // 新增或修改。

delete(m, "c")               // 删除。如果 key 不存在，不会出错。

println(len(m))              // 获取键值对数量。cap 无效。

for k, v := range m {        // 迭代，可仅返回 key。随机顺序返回，每次都不相同。
    println(k, v)
}
```

不能保证迭代返回次序，通常是随机结果，具体和版本实现有关。

从 map 中取回的是一个 value 临时复制品，对其成员的修改是没有任何意义的。

```
type user struct{ name string }

m := map[int]user{
    1: {"user1"},
}

m[1].name = "Tom"         // Error: cannot assign to m[1].name
```

正确做法是完整替换或使用指针。

```
u := m[1]
u.name = "Tom"
m[1] = u                  // 替换 value。

m2 := map[int]*user{
    1: &user{"user1"},
}

m2[1].name = "Jack"       // 返回的是指针复制品。透过指针修改原对象是允许的。
```

可以在迭代时安全删除键值。但如果期间有新增操作，那么就不知道会有什么意外了。

```
for i := 0; i < 5; i++ {
    m := map[int]string{
        0:  "a", 1:  "a", 2:  "a", 3:  "a", 4:  "a",
        5:  "a", 6:  "a", 7:  "a", 8:  "a", 9:  "a",
    }

    for k := range m {
        m[k+k] = "x"
        delete(m, k)
    }

    fmt.Println(m)
}
```

输出：

```
map[12:x 16:x 2:x 6:x 10:x 14:x 18:x]
map[12:x 16:x 20:x 28:x 36:x]
map[12:x 16:x 2:x 6:x 10:x 14:x 18:x]
map[12:x 16:x 2:x 6:x 10:x 14:x 18:x]
map[12:x 16:x 20:x 28:x 36:x]
```

4.4 Struct

值类型，赋值和传参会复制全部内容。可用 "_" 定义补位字段，支持指向自身类型的指针成员。

```
type Node struct {
    _    int
    id   int
    data *byte
    next *Node
}

func main() {
    n1 := Node{
        id:   1,
        data: nil,
    }

    n2 := Node{
        id:   2,
        data: nil,
        next: &n1,
    }
}
```

顺序初始化必须包含全部字段，否则会出错。

```
type User struct {
    name string
    age  int
}

u1 := User{"Tom", 20}
u2 := User{"Tom"}       // Error: too few values in struct initializer
```

支持匿名结构，可用作结构成员或定义变量。

```
type File struct {
    name string
    size int
    attr struct {
        perm  int
        owner int
    }
}

f := File{
    name: "test.txt",
```

```
    size: 1025,
    // attr: {0755, 1},   // Error: missing type in composite literal
}

f.attr.owner = 1
f.attr.perm = 0755

var attr = struct {
    perm  int
    owner int
}{2, 0755}

f.attr = attr
```

支持 "=="、"!=" 相等操作符，可用作 map 键类型。

```
type User struct {
    id   int
    name string
}

m := map[User]int{
    User{1, "Tom"}: 100,
}
```

可定义字段标签，用反射读取。标签是类型的组成部分。

```
var u1 struct { name string "username" }
var u2 struct { name string }

u2 = u1   // Error: cannot use u1 (type struct { name string "username" }) as
          //        type struct { name string } in assignment
```

空结构 "节省" 内存，比如用来实现 set 数据结构，或者实现没有 "状态" 只有方法的 "静态类"。

```
var null struct{}

set := make(map[string]struct{})
set["a"] = null
```

4.4.1 匿名字段

匿名字段不过是一种语法糖，从根本上说，就是一个与成员类型同名 (不含包名) 的字段。被匿名嵌入的可以是任何类型，当然也包括指针。

```
type User struct {
    name string
}

type Manager struct {
    User
    title string
}

m := Manager{
    User:  User{"Tom"},          // 匿名字段的显式字段名，和类型名相同。
    title: "Administrator",
}
```

可以像普通字段那样访问匿名字段成员，编译器从外向内逐级查找所有层次的匿名字段，直到发现目标或出错。

```
type Resource struct {
    id int
}

type User struct {
    Resource
    name string
}

type Manager struct {
    User
    title string
}

var m Manager
m.id = 1
m.name = "Jack"
m.title = "Administrator"
```

外层同名字段会遮蔽嵌入字段成员，相同层次的同名字段也会让编译器无所适从。解决方法是使用显式字段名。

```
type Resource struct {
    id   int
    name string
```

```
}

type Classify struct {
    id int
}

type User struct {
    Resource               // Resource.id 与 Classify.id 处于同一层次。
    Classify
    name string            // 遮蔽 Resource.name。
}

u := User{
    Resource{1, "people"},
    Classify{100},
    "Jack",
}

println(u.name)            // User.name: Jack
println(u.Resource.name)   // people

// println(u.id)           // Error: ambiguous selector u.id
println(u.Classify.id)     // 100
```

不能同时嵌入某一类型和其指针类型，因为它们名字相同。

```
type Resource struct {
    id int
}

type User struct {
    *Resource
    // Resource            // Error: duplicate field Resource
    name string
}

u := User{
    &Resource{1},
    "Administrator",
}

println(u.id)
println(u.Resource.id)
```

4.4.2 面向对象

面向对象三大特征里，Go 仅支持封装，尽管匿名字段的内存布局和行为类似继承。没有 class 关键字，没有继承、多态等等。

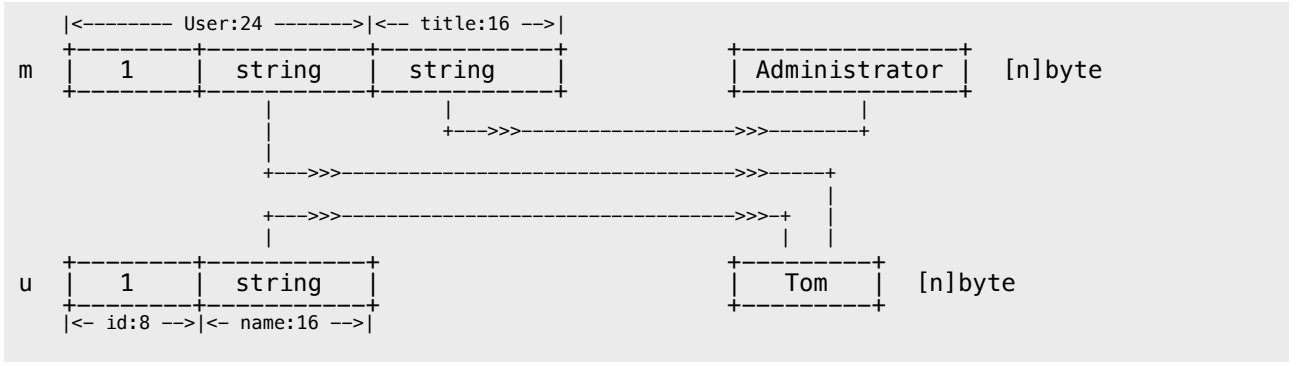
```
type User struct {
    id   int
    name string
}

type Manager struct {
    User
    title string
}

m := Manager{User{1, "Tom"}, "Administrator"}

// var u User = m     // Error: cannot use m (type Manager) as type User in assignment
                      // 没有继承，自然也不会有多态。
var u User = m.User   // 同类型拷贝。
```

内存布局和 C struct 相同，没有任何附加的 object 信息。



可以用 unsafe 包中的相关函数输出内存布局信息。

```
m      : 0x2102271b0, size: 40, align: 8
m.id   : 0x2102271b0, offset: 0
m.name : 0x2102271b8, offset: 8
m.title: 0x2102271c8, offset: 24
```

第 5 章 方法

5.1 方法定义

方法总是绑定对象实例，并隐式将实例作为第一实参 (receiver)。

- 只能为当前包内命名类型定义方法。
- 参数 receiver 可任意命名。如方法中未曾使用，可省略参数名。
- 参数 receiver 类型可以是 T 或 *T。基类型 T 不能是接口或指针。
- 不支持方法重载，receiver 只是参数签名的组成部分。
- 可用实例 value 或 pointer 调用全部方法，编译器自动转换。

没有构造和析构方法，通常用简单工厂模式返回对象实例。

```
type Queue struct {
    elements []interface{}
}

func NewQueue() *Queue {                        // 创建对象实例。
    return &Queue{make([]interface{}, 10)}
}

func (*Queue) Push(e interface{}) error {       // 省略 receiver 参数名。
    panic("not implemented")
}

// func (Queue) Push(e int) error {             // Error: method redeclared: Queue.Push
//     panic("not implemented")
// }

func (self *Queue) length() int {               // receiver 参数名可以是 self、this 或其他。
    return len(self.elements)
}
```

方法不过是一种特殊的函数，只需将其还原，就知道 receiver T 和 *T 的差别。

```
type Data struct{
    x int
}

func (self Data) ValueTest() {                  // func ValueTest(self Data);
    fmt.Printf("Value: %p\n", &self)
```

```
}

func (self *Data) PointerTest() {             // func PointerTest(self *Data);
    fmt.Printf("Pointer: %p\n", self)
}

func main() {
    d := Data{}
    p := &d
    fmt.Printf("Data: %p\n", p)

    d.ValueTest()       // ValueTest(d)
    d.PointerTest()     // PointerTest(&d)

    p.ValueTest()       // ValueTest(*p)
    p.PointerTest()     // PointerTest(p)
}
```

输出：

```
Data   : 0x2101ef018
Value  : 0x2101ef028
Pointer: 0x2101ef018
Value  : 0x2101ef030
Pointer: 0x2101ef018
```

5.2 匿名字段

可以像字段成员那样访问匿名字段方法，编译器负责查找。

```
type User struct {
    id   int
    name string
}

type Manager struct {
    User
}

func (self *User) ToString() string {                // receiver = &(Manager.User)
    return fmt.Sprintf("User: %p, %v", self, self)
}

func main() {
    m := Manager{User{1, "Tom"}}

    fmt.Printf("Manager: %p\n", &m)
```

```
    fmt.Println(m.ToString())
}
```

输出：

```
Manager: 0x2102281b0
User   : 0x2102281b0, &{1 Tom}
```

通过匿名字段，可获得和继承类似的复用能力。依据编译器查找次序，只需在外层定义同名方法，就可以实现 "override"。

```
type User struct {
    id   int
    name string
}

type Manager struct {
    User
    title string
}

func (self *User) ToString() string {
    return fmt.Sprintf("User: %p, %v", self, self)
}

func (self *Manager) ToString() string {
    return fmt.Sprintf("Manager: %p, %v", self, self)
}

func main() {
    m := Manager{User{1, "Tom"}, "Administrator"}

    fmt.Println(m.ToString())
    fmt.Println(m.User.ToString())
}
```

输出：

```
Manager: 0x2102271b0, &{{1 Tom} Administrator}
User   : 0x2102271b0, &{1 Tom}
```

5.3 方法集

每个类型都有与之关联的方法集，这会影响到接口实现规则。

- 类型 T 方法集包含全部 receiver T 方法。
- 类型 *T 方法集包含全部 receiver T + *T 方法。

- 如类型 S 包含匿名字段 T，则 S 方法集包含 T 方法。
- 如类型 S 包含匿名字段 *T，则 S 方法集包含 T + *T 方法。
- 不管嵌入 T 或 *T，*S 方法集总是包含 T + *T 方法。

用实例 value 和 pointer 调用方法 (含匿名字段) 不受方法集约束，编译器总是查找全部方法，并自动转换 receiver 实参。

5.4 表达式

根据调用者不同，方法分为两种表现形式：

```
instance.method(args...)  --->  <type>.func(instance, args...)
```

前者称为 method value，后者 method expression。

两者都可像普通函数那样赋值和传参，区别在于 method value 绑定实例，而 method expression 则须显式传参。

```
type User struct {
    id   int
    name string
}

func (self *User) Test() {
    fmt.Printf("%p, %v\n", self, self)
}

func main() {
    u := User{1, "Tom"}
    u.Test()

    mValue := u.Test
    mValue()                            // 隐式传递 receiver

    mExpression := (*User).Test
    mExpression(&u)                     // 显式传递 receiver
}
```

输出：

```
0x210230000, &{1 Tom}
0x210230000, &{1 Tom}
0x210230000, &{1 Tom}
```

需要注意，method value 会复制 receiver。

```
type User struct {
    id   int
    name string
}

func (self User) Test() {
    fmt.Println(self)
}

func main() {
    u := User{1, "Tom"}
    mValue := u.Test           // 立即复制 receiver，因为不是指针类型，不受后续修改影响。

    u.id, u.name = 2, "Jack"
    u.Test()

    mValue()
}
```

输出：

```
{2 Jack}
{1 Tom}
```

在汇编层面，method value 和闭包的实现方式相同，实际返回 FuncVal 类型对象。

```
FuncVal { method_address, receiver_copy }
```

可依据方法集转换 method expression，注意 receiver 类型的差异。

```
type User struct {
    id   int
    name string
}

func (self *User) TestPointer() {
    fmt.Printf("TestPointer: %p, %v\n", self, self)
}

func (self User) TestValue() {
    fmt.Printf("TestValue: %p, %v\n", &self, self)
}

func main() {
    u := User{1, "Tom"}
    fmt.Printf("User: %p, %v\n", &u, u)
```

```
    mv := User.TestValue
    mv(u)

    mp := (*User).TestPointer
    mp(&u)

    mp2 := (*User).TestValue    // *User 方法集包含 TestValue。
    mp2(&u)                     // 签名变为 func TestValue(self *User)。
}                               // 实际依然是 receiver value copy。
```

输出：

```
User       : 0x210231000, {1 Tom}
TestValue  : 0x210231060, {1 Tom}
TestPointer: 0x210231000, &{1 Tom}
TestValue  : 0x2102310c0, {1 Tom}
```

将方法 "还原" 成函数，就容易理解下面的代码了。

```
type Data struct{}

func (Data) TestValue()    {}
func (*Data) TestPointer() {}

func main() {
    var p *Data = nil
    p.TestPointer()

    (*Data)(nil).TestPointer()  // method value
    (*Data).TestPointer(nil)    // method expression

    // p.TestValue()            // invalid memory address or nil pointer dereference
    // (Data)(nil).TestValue()  // cannot convert nil to type Data
    // Data.TestValue(nil)      // cannot use nil as type Data in function argument
}
```

第 6 章 接口

6.1 接口定义

接口是一个或多个方法签名的集合，任何类型的方法集中只要拥有与之对应的全部方法，就表示它 "实现" 了该接口，无须在该类型上显式添加接口声明。

所谓对应方法，是指有相同名称、参数列表 (不包括参数名) 以及返回值。当然，该类型还可以有其他方法。

- 接口命名习惯以 er 结尾，结构体。
- 接口只有方法签名，没有实现。
- 接口没有数据字段。
- 可在接口中嵌入其他接口。
- 类型可实现多个接口。

```
type Stringer interface {
    String() string
}

type Printer interface {
    Stringer                            // 接口嵌入。
    Print()
}

type User struct {
    id   int
    name string
}

func (self *User) String() string {
    return fmt.Sprintf("user %d, %s", self.id, self.name)
}

func (self *User) Print() {
    fmt.Println(self.String())
}

func main() {
    var t Printer = &User{1, "Tom"}   // *User 方法集包含 String、Print。
    t.Print()
}
```

输出：

```
user 1, Tom
```

空接口 interface{} 没有任何方法签名，也就意味着任何类型都实现了空接口。其作用类似面向对象语言中的根对象 object。

```
func Print(v interface{}) {
    fmt.Printf("%T: %v\n", v, v)
}

func main() {
    Print(1)
    Print("Hello, World!")
}
```

输出：

```
int: 1
string: Hello, World!
```

匿名接口可用作变量类型，或结构成员。

```
type Tester struct {
    s interface {
        String() string
    }
}

type User struct {
    id   int
    name string
}

func (self *User) String() string {
    return fmt.Sprintf("user %d, %s", self.id, self.name)
}

func main() {
    t := Tester{&User{1, "Tom"}}
    fmt.Println(t.s.String())
}
```

输出：

```
user 1, Tom
```

6.2 执行机制

接口对象由接口表 (interface table) 指针和数据指针组成。

runtime.h

```
struct Iface
{
    Itab*    tab;
    void*    data;
};

struct Itab
{
    InterfaceType*    inter;
    Type*             type;
    void (*fun[])(void);
};
```

接口表存储元数据信息，包括接口类型、动态类型，以及实现接口的方法指针。无论是反射还是通过接口调用方法，都会用到这些信息。

数据指针持有的是目标对象的只读复制品，复制完整对象或指针。

```
type User struct {
    id   int
    name string
}

func main() {
    u := User{1, "Tom"}
    var i interface{} = u

    u.id = 2
    u.name = "Jack"

    fmt.Printf("%v\n", u)
    fmt.Printf("%v\n", i.(User))
}
```

输出：

```
{2 Jack}
{1 Tom}
```

接口转型返回临时对象，只有使用指针才能修改其状态。

```
type User struct {
    id   int
    name string
}

func main() {
    u := User{1, "Tom"}
    var vi, pi interface{} = u, &u

    // vi.(User).name = "Jack"         // Error: cannot assign to vi.(User).name
    pi.(*User).name = "Jack"

    fmt.Printf("%v\n", vi.(User))
    fmt.Printf("%v\n", pi.(*User))
}
```

输出：

```
{1 Tom}
&{1 Jack}
```

只有 tab 和 data 都为 nil 时，接口才等于 nil。

```
var a interface{} = nil             // tab = nil, data = nil
var b interface{} = (*int)(nil)     // tab 包含 *int 类型信息, data = nil

type iface struct {
    itab, data uintptr
}

ia := *(*iface)(unsafe.Pointer(&a))
ib := *(*iface)(unsafe.Pointer(&b))

fmt.Println(a == nil, ia)
fmt.Println(b == nil, ib, reflect.ValueOf(b).IsNil())
```

输出：

```
true  {0 0}
false {505728 0} true
```

6.3 接口转换

利用类型推断，可判断接口对象是否某个具体的接口或类型。

```
type User struct {
    id   int
    name string
```

```
}

func (self *User) String() string {
    return fmt.Sprintf("%d, %s", self.id, self.name)
}

func main() {
    var o interface{} = &User{1, "Tom"}

    if i, ok := o.(fmt.Stringer); ok {     // ok-idiom
        fmt.Println(i)
    }

    u := o.(*User)
    // u := o.(User)       // panic: interface is *main.User, not main.User
    fmt.Println(u)
}
```

还可用 switch 做批量类型判断，不支持 fallthrough。

```
func main() {
    var o interface{} = &User{1, "Tom"}

    switch v := o.(type) {
    case nil:                                   // o == nil
        fmt.Println("nil")
    case fmt.Stringer:                          // interface
        fmt.Println(v)
    case func() string:                         // func
        fmt.Println(v())
    case *User:                                 // *struct
        fmt.Printf("%d, %s\n", v.id, v.name)
    default:
        fmt.Println("unknown")
    }
}
```

超集接口对象可转换为子集接口，反之出错。

```
type Stringer interface {
    String() string
}

type Printer interface {
    String() string
    Print()
}
```

```
type User struct {
    id   int
    name string
}

func (self *User) String() string {
    return fmt.Sprintf("%d, %v", self.id, self.name)
}

func (self *User) Print() {
    fmt.Println(self.String())
}

func main() {
    var o Printer = &User{1, "Tom"}
    var s Stringer = o
    fmt.Println(s.String())
}
```

6.4 接口技巧

让编译器检查，以确保某个类型实现接口。

```
var _ fmt.Stringer = (*Data)(nil)
```

某些时候，让函数直接 "实现" 接口能省不少事。

```
type Tester interface {
    Do()
}

type FuncDo func()
func (self FuncDo) Do() { self() }

func main() {
    var t Tester = FuncDo(func() { println("Hello, World!") })
    t.Do()
}
```

第 7 章 并发

7.1 Goroutine

Go 在语言层面对并发编程提供支持，一种类似协程，称作 goroutine 的机制。

只需在函数调用语句前添加 go 关键字，就可创建并发执行单元。开发人员无需了解任何执行细节，调度器会自动将其安排到合适的系统线程上执行。goroutine 是一种非常轻量级的实现，可在单个进程里执行成千上万的并发任务。

事实上，入口函数 main 就以 goroutine 运行。另有与之配套的 channel 类型，用以实现 "以通讯来共享内存" 的 CSP 模式。相关实现细节可参考本书第二部分的源码剖析。

```
go func() {
    println("Hello, World!")
}()
```

调度器不能保证多个 goroutine 执行次序，且进程退出时不会等待它们结束。

默认情况下，进程启动后仅允许一个系统线程服务于 goroutine。可使用环境变量或标准库函数 runtime.GOMAXPROCS 修改，让调度器用多个线程实现多核并行，而不仅仅是并发。

```
func sum(id int) {
    var x int64
    for i := 0; i < math.MaxUint32; i++ {
        x += int64(i)
    }

    println(id, x)
}

func main() {
    wg := new(sync.WaitGroup)
    wg.Add(2)

    for i := 0; i < 2; i++ {
        go func(id int) {
            defer wg.Done()
            sum(id)
        }(i)
```

```
    }

    wg.Wait()
}
```

输出：

```
$ go build -o test

$ time -p ./test

0 9223372030412324865
1 9223372030412324865

real   7.70              // 程序开始到结束时间差（非 CPU 时间）
user   7.66              // 用户态所使用 CPU 时间片（多核累加）
sys    0.01              // 内核态所使用 CPU 时间片

$ GOMAXPROCS=2 time -p ./test

0 9223372030412324865
1 9223372030412324865

real   4.18
user   7.61              // 虽然总时间差不多，但由 2 个核并行，real 时间自然少了许多。
sys    0.02
```

调用 runtime.Goexit 将立即终止当前 goroutine 执行，调度器确保所有已注册 defer 延迟调用被执行。

```
func main() {
    wg := new(sync.WaitGroup)
    wg.Add(1)

    go func() {
        defer wg.Done()
        defer println("A.defer")

        func() {
            defer println("B.defer")
            runtime.Goexit()              // 终止当前 goroutine
            println("B")                  // 不会执行
        }()

        println("A")                      // 不会执行
    }()

    wg.Wait()
}
```

输出：

```
B.defer
A.defer
```

和协程 yield 作用类似，Gosched 让出底层线程，将当前 goroutine 暂停，放回队列等待下次被调度执行。

```
func main() {
    wg := new(sync.WaitGroup)
    wg.Add(2)

    go func() {
        defer wg.Done()

        for i := 0; i < 6; i++ {
            println(i)
            if i == 3 { runtime.Gosched() }
        }
    }()

    go func() {
        defer wg.Done()
        println("Hello, World!")
    }()

    wg.Wait()
}
```

输出：

```
$ go run main.go
0
1
2
3
Hello, World!
4
5
```

7.2 Channel

引用类型 channel 是 CSP 模式的具体实现，用于多个 goroutine 通讯。其内部实现了同步，确保并发安全。

默认为同步模式，需要发送和接收配对。否则会被阻塞，直到另一方准备好后被唤醒。

```
func main() {
    data := make(chan int)           // 数据交换队列
    exit := make(chan bool)          // 退出通知

    go func() {
        for d := range data {        // 从队列迭代接收数据，直到 close 。
            fmt.Println(d)
        }

        fmt.Println("recv over.")
        exit <- true                 // 发出退出通知。
    }()

    data <- 1                        // 发送数据。
    data <- 2
    data <- 3
    close(data)                      // 关闭队列。

    fmt.Println("send over.")
    <-exit                           // 等待退出通知。
}
```

输出：

```
1
2
3
send over.
recv over.
```

异步方式通过判断缓冲区来决定是否阻塞。如果缓冲区已满，发送被阻塞；缓冲区为空，接收被阻塞。

通常情况下，异步 channel 可减少排队阻塞，具备更高的效率。但应该考虑使用指针规避大对象拷贝，将多个元素打包，减小缓冲区大小等。

```
func main() {
    data := make(chan int, 3)        // 缓冲区可以存储 3 个元素
    exit := make(chan bool)

    data <- 1                        // 在缓冲区未满前，不会阻塞。
    data <- 2
    data <- 3

    go func() {
        for d := range data {        // 在缓冲区未空前，不会阻塞。
            fmt.Println(d)
```

```
        }

        exit <- true
    }()

    data <- 4                       // 如果缓冲区已满，阻塞。
    data <- 5
    close(data)

    <-exit
}
```

缓冲区是内部属性，并非类型构成要素。

```
var a, b chan int = make(chan int), make(chan int, 3)
```

除用 range 外，还可用 ok-idiom 模式判断 channel 是否关闭。

```
for {
    if d, ok := <-data; ok {
        fmt.Println(d)
    } else {
        break
    }
}
```

向 closed channel 发送数据引发 panic 错误，接收立即返回零值。而 nil channel，无论收发都会被阻塞。

内置函数 len 返回未被读取的缓冲元素数量，cap 返回缓冲区大小。

```
d1 := make(chan int)
d2 := make(chan int, 3)

d2 <- 1

fmt.Println(len(d1), cap(d1))    // 0  0
fmt.Println(len(d2), cap(d2))    // 1  3
```

7.2.1 单向

可以将 channel 隐式转换为单向队列，只收或只发。

```
c := make(chan int, 3)

var send chan<- int = c   // send-only
var recv <-chan int = c   // receive-only

send <- 1
// <-send                 // Error: receive from send-only type chan<- int

<-recv
// recv <- 2              // Error: send to receive-only type <-chan int
```

不能将单向 channel 转换为普通 channel。

```
d := (chan int)(send)     // Error: cannot convert type chan<- int to type chan int
d := (chan int)(recv)     // Error: cannot convert type <-chan int to type chan int
```

7.2.2 选择

如果需要同时处理多个 channel，可使用 select 语句。它随机选择一个可用 channel 做收发操作，或执行 default case。

```
func main() {
    a, b := make(chan int, 3), make(chan int)

    go func() {
        v, ok, s := 0, false, ""

        for {
            select {                          // 随机选择可用 channel，接收数据。
            case v, ok = <-a: s = "a"
            case v, ok = <-b: s = "b"
            }

            if ok {
                fmt.Println(s, v)
            } else {
                os.Exit(0)
            }
        }
    }()

    for i := 0; i < 5; i++ {
        select {                              // 随机选择可用 channel，发送数据。
```

```
        case a <- i:
        case b <- i:
        }
    }

    close(a)
    select {}                                   // 没有可用 channel，阻塞 main goroutine。
}
```

输出：

```
b 3
a 0
a 1
a 2
b 4
```

在循环中使用 select default case 需要小心，避免形成洪水。

7.2.3 模式

用简单工厂模式打包并发任务和 channel。

```
func NewConsumer() chan int {
    data := make(chan int, 3)

    go func() {
        for d := range data {
            fmt.Println(d)
        }

        os.Exit(0)
    }()

    return data
}

func main() {
    data := NewConsumer()

    data <- 1
    data <- 2
    close(data)

    select {}
}
```

用 channel 实现信号量 (semaphore)。

```
func main() {
    wg := sync.WaitGroup{}
    wg.Add(3)

    sem := make(chan int, 1)

    for i := 0; i < 3; i++ {
        go func(id int) {
            defer wg.Done()

            sem <- 1                    // 向 sem 发送数据，阻塞或者成功。

            for x := 0; x < 3; x++ {
                fmt.Println(id, x)
            }

            <-sem                       // 接收数据，使得其他阻塞 goroutine 可以发送数据。
        }(i)
    }

    wg.Wait()
}
```

输出：

```
$ GOMAXPROCS=2 go run main.go
0 0
0 1
0 2
1 0
1 1
1 2
2 0
2 1
2 2
```

用 closed channel 发出退出通知。

```
func main() {
    var wg sync.WaitGroup
    quit := make(chan bool)

    for i := 0; i < 2; i++ {
        wg.Add(1)
```

```
        go func(id int) {
            defer wg.Done()

            task := func() {
                println(id, time.Now().Nanosecond())
                time.Sleep(time.Second)
            }

            for {
                select {
                case <-quit:      // closed channel 不会阻塞，因此可用作退出通知。
                    return
                default:          // 执行正常任务。
                    task()
                }
            }
        }(i)
    }

    time.Sleep(time.Second * 5)   // 让测试 goroutine 运行一会。

    close(quit)                   // 发出退出通知。
    wg.Wait()
}
```

用 select 实现超时 (timeout)。

```
func main() {
    w := make(chan bool)
    c := make(chan int, 2)

    go func() {
        select {
        case v := <-c: fmt.Println(v)
        case <-time.After(time.Second * 3): fmt.Println("timeout.")
        }

        w <- true
    }()

    // c <- 1                       // 注释掉，引发 timeout。
    <-w
}
```

channel 是第一类对象，可传参 (内部实现为指针) 或者作为结构成员。

```
type Request struct {
```

```
    data []int
    ret  chan int
}

func NewRequest(data ...int) *Request {
    return &Request{ data, make(chan int, 1) }
}

func Process(req *Request) {
    x := 0
    for _, i := range req.data {
        x += i
    }

    req.ret <- x
}

func main() {
    req := NewRequest(10, 20, 30)
    Process(req)
    fmt.Println(<-req.ret)
}
```

第 8 章 包

8.1 工作空间

编译工具对源码目录有严格要求，每个工作空间 (workspace) 必须由 bin、pkg、src 三个目录组成。

```
workspace
    |
    +--- bin                                    // go install 安装目录。
    |     |
    |     +--- learn
    |
    +--- pkg                                    // go build 生成静态库 (.a) 存放目录。
    |     |
    |     +--- darwin_amd64
    |               |
    |               +--- mylib.a
    |               |
    |               +--- mylib
    |                       |
    |                       +--- sublib.a
    |
    +--- src                                    // 项目源码目录。
          |
          +--- learn
          |       |
          |       +--- main.go
          |
          +--- mylib
                  |
                  +--- mylib.go
                  |
                  +--- sublib
                          |
                          +--- sublib.go
```

可在 GOPATH 环境变量列表中添加多个 workspace，但不能和 GOROOT 相同。

```
export GOPATH=$HOME/projects/golib:$HOME/projects/go
```

通常 go get 使用第一个 workspace 保存下载的第三方库。

8.2 源文件

编码：源码文件必须是 UTF-8 格式，否则会导致编译器出错。
结束：语句以 ";" 结束，多数时候可以省略。
注释：支持 "//"、"/**/" 两种注释方式，不能嵌套。
命名：采用 camelCasing 风格，不建议使用下划线。

8.3 包结构

所有代码都必须组织在 package 中。

- 源文件头部以 "package <name>" 声明包名称。
- 包由同一目录下的多个源码文件组成。
- 包名类似 namespace，与包所在目录名、编译文件名无关。
- 可执行文件必须包含 package main，入口函数 main。

说明：os.Args 返回命令行参数，os.Exit 终止进程。

要获取正确的可执行文件路径，可用 filepath.Abs(exec.LookPath(os.Args[0]))。

包中成员以名称首字母大小写决定访问权限。

- public: 首字母大写，可被包外访问。
- internal: 首字母小写，仅包内成员可以访问。

该规则适用于全局变量、全局常量、类型、结构字段、函数、方法等。

8.3.1 导入包

使用包成员前，必须先用 import 关键字导入，但不能形成导入循环。

```
import "相对目录/包主文件名"
```

相对目录是指从 <workspace>/pkg/<os_arch> 开始的子目录，以标准库为例：

```
import "fmt"      ->  /usr/local/go/pkg/darwin_amd64/fmt.a
import "os/exec"  ->  /usr/local/go/pkg/darwin_amd64/os/exec.a
```

在导入时，可指定包成员访问方式。比如对包重命名，以避免同名冲突。

```
import     "yuhen/test"      // 默认模式: test.A
import  M  "yuhen/test"      // 包重命名: M.A
import  .  "yuhen/test"      // 简便模式: A
import  _  "yuhen/test"      // 非导入模式: 仅让该包执行初始化函数。
```

未使用的导入包，会被编译器视为错误 (不包括 "import _")。

```
./main.go:4: imported and not used: "fmt"
```

对于当前目录下的子包，除使用默认完整导入路径外，还可使用 local 方式。

```
workspace
    |
    +--- src
          |
          +--- learn
                 |
                 +--- main.go
                 |
                 +--- test
                        |
                        +--- test.go
```

main.go

```
import "learn/test"     // 正常模式
import "./test"         // 本地模式，仅对 go run main.go 有效。
```

8.2.2 初始化

初始化函数：

- 每个源文件都可以定义一个或多个初始化函数。
- 编译器不保证多个初始化函数执行次序。
- 初始化函数在单一线程被调用，仅执行一次。
- 初始化函数在包所有全局变量初始化后执行。
- 在所有初始化函数结束后才执行 main.main。
- 无法调用初始化函数。

因为无法保证初始化函数执行顺序，因此全局变量应该直接用 var 初始化。

```
var now = time.Now()

func init() {
    fmt.Printf("now: %v\n", now)
}

func init() {
    fmt.Printf("since: %v\n", time.Now().Sub(now))
}
```

可在初始化函数中使用 goroutine，可等待其结束。

```
var now = time.Now()

func main() {
    fmt.Println("main:", int(time.Now().Sub(now).Seconds()))
}

func init() {
    fmt.Println("init:", int(time.Now().Sub(now).Seconds()))
    w := make(chan bool)

    go func() {
        time.Sleep(time.Second * 3)
        w <- true
    }()

    <-w
}
```

输出：

```
init: 0
main: 3
```

不应该滥用初始化函数，仅适合完成当前文件中的相关环境设置。

8.4 文档

扩展工具 godoc 能自动提取注释生成帮助文档。

- 仅和成员相邻 (中间没有空行) 的注释被当做帮助信息。
- 相邻行会合并成同一段落，用空行分隔段落。
- 缩进表示格式化文本，比如示例代码。
- 自动转换 URL 为链接。
- 自动合并多个源码文件中的 package 文档。
- 无法显式 package main 中的成员文档。

8.4.1 Package

- 建议用专门的 doc.go 保存 package 帮助信息。
- 包文档第一整句 (中英文句号结束) 被当做 packages 列表说明。

8.4.2 Example

只要 Example 测试函数名称符合以下规范即可。

```
            格式                                  示例
-----------+---------------------------------+----------------------------------------
 package    Example,    Example_suffix          Example_test
 func       ExampleF,   ExampleF_suffix         ExampleHello
 type       ExampleT,   ExampleT_suffix         ExampleUser, ExampleUser_copy
 method     ExampleT_M, ExampleT_M_suffix       ExampleUser_ToString
```

说明：使用 suffix 作为示例名称，其首字母必须小写。如果文件中仅有一个 Example 函数，且调用了该文件中的其他成员，那么示例会显示整个文件内容，而不仅仅是测试函数自己。

8.4.3 Bug

非测试源码文件中以 BUG(author) 开始的注释，会在帮助文档 Bugs 节点中显示。

```
// BUG(yuhen): memory leak.
```

第 9 章 进阶

9.1 内存布局

了解对象内存布局，有助于理解值传递、引用传递等概念。

```
+--------+
|   1    |  int
+--------+

+--------+
|  3.14  |  float32
+--------+

+---+---+---+---+
| 1 | 2 | 3 | 4 |   [4]int
+---+---+---+---+
```

string

```
+---------+---------+
| pointer | len = 5 |   s = "hello"
+---------+---------+
    |
    |
    +---+---+---+---+---+
    | h | e | l | l | o |   [5]byte
    +---+---+---+---+---+
        |
        |
    +---------+---------+
    | pointer | len = 2 |   sub = s[1:3]
    +---------+---------+
```

struct

```
+---+---+---+---+---+---+---+---+
| 1 | 2 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |  struct { a byte; b byte; c int32 } = { 1, 2, 3 }
+---+---+---+---+---+---+---+---+
  a   b           c


+-----------+-----+
| pointer a |  b  |   struct { a *int; b int }
+-----------+-----+
    |
    |
    +-----+
    | int |
    +-----+
```

slice

```
+---------+---------+---------+
| pointer | len = 8 | cap = 8 |   x = []int{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 }
+---------+---------+---------+
    |
    |
    +---+---+---+---+---+---+---+---+
    | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |   [8]int
    +---+---+---+---+---+---+---+---+
        |
        |
    +---------+---------+---------+
    | pointer | len = 2 | cap = 5 |  y = x[1:3:6]
    +---------+---------+---------+
```

interface

```
+---------+---------+
|  *itab  |  *data  |    struct Iface
+---------+---------+
     |          |
     |          |
     +------+   +------+
     | Itab |   | data |
     +------+   +------+
```

new

```
+---------+
| pointer |     s = new([3]int)
+---------+
     |
     |
     +---+---+---+
     | 0 | 0 | 0 |   [3]int
     +---+---+---+
```

make

```
+---------+---------+---------+
| pointer | len = 1 | cap = 3 |   slice = make([]int, 1, 3)
+---------+---------+---------+
     |
     |
     +---+---+---+
     | 0 | 0 | 0 |   [3]int
     +---+---+---+


+---------+
| pointer |   map = make(map[string]int); 实际返回的是一个指针包装对象。
+---------+
     |
     |
     ..................
     .                  .
     . hashmap.c Hmap   .
     .                  .
     ..................


+---------+
| pointer |   channel = make(chan int); 实际返回的是一个指针包装对象。
+---------+
     |
     |
     ................
     .              .
     . chan.c Hchan .
     .              .
     ................
```

9.2 指针陷阱

对象内存分配会受编译参数影响。举个例子，当函数返回对象指针时，必然在堆上分配。可如果该函数被内联，那么这个指针就不会跨栈帧使用，就有可能直接在栈上分配，以实现代码优化目的。因此，是否阻止内联对指针输出结果有很大影响。

允许指针指向对象成员，并确保该对象是可达状态。

除正常指针外，指针还有 unsafe.Pointer 和 uintptr 两种形态。其中 uintptr 被 GC 当做普通整数对象，它不能阻止所 "引用" 对象被回收。

```
type data struct {
    x [1024 * 100]byte
}

func test() uintptr {
    p := &data{}
    return uintptr(unsafe.Pointer(p))
}

func main() {
    const N = 10000
    cache := new([N]uintptr)

    for i := 0; i < N; i++ {
        cache[i] = test()
        time.Sleep(time.Millisecond)
    }
}
```

输出：

```
$ go build -o test && GODEBUG="gctrace=1" ./test

gc607(1): 0+0+0 ms, 0 -> 0 MB 50 -> 45 (3070-3025) objects
gc611(1): 0+0+0 ms, 0 -> 0 MB 50 -> 45 (3090-3045) objects
gc613(1): 0+0+0 ms, 0 -> 0 MB 50 -> 45 (3100-3055) objects
```

合法的 unsafe.Pointer 被当做普通指针对待。

```
func test() unsafe.Pointer {
    p := &data{}
    return unsafe.Pointer(p)
}

func main() {
    const N = 10000
    cache := new([N]unsafe.Pointer)

    for i := 0; i < N; i++ {
        cache[i] = test()
        time.Sleep(time.Millisecond)
    }
}
```

输出：

```
$ go build -o test && GODEBUG="gctrace=1" ./test
```

```
gc12(1): 0+0+0 ms, 199 -> 199 MB 2088 -> 2088 (2095-7) objects
gc13(1): 0+0+0 ms, 399 -> 399 MB 4136 -> 4136 (4143-7) objects
gc14(1): 0+0+0 ms, 799 -> 799 MB 8232 -> 8232 (8239-7) objects
```

指向对象成员的 unsafe.Pointer，同样能确保对象不被回收。

```
type data struct {
    x   [1024 * 100]byte
    y   int
}

func test() unsafe.Pointer {
    d := data{}
    return unsafe.Pointer(&d.y)
}

func main() {
    const N = 10000
    cache := new([N]unsafe.Pointer)

    for i := 0; i < N; i++ {
        cache[i] = test()
        time.Sleep(time.Millisecond)
    }
}
```

输出：

```
$ go build -o test && GODEBUG="gctrace=1" ./test

gc12(1): 0+0+0 ms, 207 -> 207 MB 2088 -> 2088 (2095-7) objects
gc13(1): 1+0+0 ms, 415 -> 415 MB 4136 -> 4136 (4143-7) objects
gc14(1): 3+1+0 ms, 831 -> 831 MB 8232 -> 8232 (8239-7) objects
```

由于可以用 unsafe.Pointer、uintptr 创建 "dangling pointer" 等非法指针，所以在使用时需要特别小心。另外，cgo C.malloc 等函数所返回指针，与 GC 无关。

指针构成的 "循环引用" 加上 runtime.SetFinalizer 会导致内存泄露。

```
type Data struct {
    d   [1024 * 100]byte
    o   *Data
}

func test() {
    var a, b Data
```

```
    a.o = &b
    b.o = &a

    runtime.SetFinalizer(&a, func(d *Data) { fmt.Printf("a %p final.\n", d) })
    runtime.SetFinalizer(&b, func(d *Data) { fmt.Printf("b %p final.\n", d) })
}

func main() {
    for {
        test()
        time.Sleep(time.Millisecond)
    }
}
```

输出：

```
$ go build -gcflags "-N -l" && GODEBUG="gctrace=1" ./test

gc11(1): 2+0+0 ms, 104 -> 104 MB 1127 -> 1127 (1180-53) objects
gc12(1): 4+0+0 ms, 208 -> 208 MB 2151 -> 2151 (2226-75) objects
gc13(1): 8+0+1 ms, 416 -> 416 MB 4198 -> 4198 (4307-109) objects
```

垃圾回收器能正确处理 "指针循环引用"，但无法确定 Finalizer 依赖次序，也就无法调用 Finalizer 函数，这会导致目标对象无法变成不可达状态，其所占用内存无法被回收。

9.3 cgo

通过 cgo，可在 Go 和 C/C++ 代码间相互调用。受 CGO_ENABLED 参数限制。

```
package main

/*
   #include <stdio.h>
   #include <stdlib.h>

   void hello() {
        printf("Hello, World!\n");
   }
*/
import "C"

func main() {
    C.hello()
}
```

调试 cgo 代码很件很麻烦的事，建议单独保存到 .c 文件中。这样可以将其当做独立的 C 程序进行调试。

test.h

```
#ifndef __TEST_H__
#define __TEST_H__

void hello();

#endif
```

test.c

```
#include <stdio.h>
#include "test.h"

void hello() {
    printf("Hello, World!\n");
}

#ifdef __TEST__                     // 避免和 Go bootstrap main 冲突。

int main(int argc, char *argv[]) {
    hello();
    return 0;
}

#endif
```

main.go

```
package main

/*
   #include "test.h"
*/
import "C"

func main() {
    C.hello()
}
```

编译和调试 C，只需在命令行提供宏定义即可。

```
$ gcc -g -D__TEST__ -o test test.c
```

由于 cgo 仅扫描当前目录，如果需要包含其他 C 项目，可在当前目录新建一个 C 文件，然后用 #include 指令将所需的 .h、.c 都包含进来，记得在 CFLAGS 中使用 "-I" 参数指定原路径。某些时候，可能还需指定 "-std" 参数。

9.3.1 Flags

可使用 #cgo 命令定义 CFLAGS、LDFLAGS 等参数，自动合并多个设置。

```
/*
   #cgo CFLAGS: -g
   #cgo CFLAGS: -I./lib -D__VER__=1
   #cgo LDFLAGS: -lpthread

   #include "test.h"
*/
import "C"
```

可设置 GOOS、GOARCH 编译条件，空格表示 OR，逗号 AND，感叹号 NOT。

```
#cgo windows,386 CFLAGS: -I./lib -D__VER__=1
```

9.3.2 DataType

数据类型对应关系。

```
 C                    cgo                  sizeof
--------------------+--------------------+-----------------------------------------------
 char                 C.char               1
 signed char          C.schar              1
 unsigned char        C.uchar              1
 short                C.short              2
 unsigned short       C.ushort             2
 int                  C.int                4
 unsigned int         C.uint               4
 long                 C.long               4 或 8
 unsigned long        C.ulong              4 或 8
 long long            C.longlong           8
 unsinged long long   C.ulonglong          8
 float                C.float              4
 double               C.double             8
 void*                unsafe.Pointer
```

```
 char*                *C.char
 size_t               C.size_t
 NULL                 nil
```

可将 cgo 类型转换为标准 Go 类型。

```
/*
   int add(int x, int y) {
        return x + y;
   }
*/
import "C"

func main() {
    var x C.int = C.add(1, 2)
    var y int = int(x)
    fmt.Println(x, y)
}
```

9.3.3 String

字符串转换函数。

```
/*
   #include <stdio.h>
   #include <stdlib.h>

   void test(char *s) {
       printf("%s\n", s);
   }

   char* cstr() {
       return "abcde";
   }
*/
import "C"

func main() {
    s := "Hello, World!"

    cs := C.CString(s)                  // 该函数在 C heap 分配内存，需要调用 free 释放。
    defer C.free(unsafe.Pointer(cs))    // #include <stdlib.h>

    C.test(cs)
```

```
    cs = C.cstr()

    fmt.Println(C.GoString(cs))
    fmt.Println(C.GoStringN(cs, 2))
    fmt.Println(C.GoBytes(unsafe.Pointer(cs), 2))
}
```

输出：

```
Hello, World!
abcde
ab
[97 98]
```

用 C.malloc/free 分配 C heap 内存。

```
/*
   #include <stdlib.h>
*/
import "C"

func main() {
    m := unsafe.Pointer(C.malloc(4 * 8))
    defer C.free(m)                          // 注释释放内存。

    p := (*[4]int)(m)                        // 转换为数组指针。
    for i := 0; i < 4; i++ {
        p[i] = i + 100
    }

    fmt.Println(p)
}
```

输出：

```
&[100 101 102 103]
```

9.3.4 Struct/Enum/Union

对 struct、enum 支持良好，union 会被转换成字节数组。如果没使用 typedef 定义，那么必须添加 struct_、enum_、union_ 前缀。

struct

```
/*
   #include <stdlib.h>

   struct Data {
       int x;
```

```
   };

   typedef struct {
       int x;
   } DataType;

   struct Data* testData() {
       return malloc(sizeof(struct Data));
   }

   DataType* testDataType() {
       return malloc(sizeof(DataType));
   }
*/
import "C"

func main() {
    var d *C.struct_Data = C.testData()
    defer C.free(unsafe.Pointer(d))

    var dt *C.DataType = C.testDataType()
    defer C.free(unsafe.Pointer(dt))

    d.x = 100
    dt.x = 200

    fmt.Printf("%#v\n", d)
    fmt.Printf("%#v\n", dt)
}
```

输出：

```
&main._Ctype_struct_Data{x:100}
&main._Ctype_DataType{x:200}
```

enum

```
/*
   enum Color { BLACK = 10, RED, BLUE };
   typedef enum { INSERT = 3, DELETE } Mode;
*/
import "C"

func main() {
    var c C.enum_Color = C.RED
    var x uint32 = c
    fmt.Println(c, x)

    var m C.Mode = C.INSERT
    fmt.Println(m)
```

```
}
```

union

```
/*
   #include <stdlib.h>

   union Data {
       char x;
       int y;
   };

   union Data* test() {
       union Data* p = malloc(sizeof(union Data));
       p->x = 100;
       return p;
   }
*/
import "C"

func main() {
    var d *C.union_Data = C.test()
    defer C.free(unsafe.Pointer(d))

    fmt.Println(d)
}
```

输出：

```
&[100 0 0 0]
```

9.3.5 Export

导出 Go 函数给 C 调用，须使用 "//export" 标记。建议在独立头文件中声明函数原型，避免 "duplicate symbol" 错误。

main.go

```
package main

import "fmt"

/*
   #include "test.h"
*/
import "C"

//export hello
```

```
func hello() {
    fmt.Println("Hello, World!\n")
}

func main() {
    C.test()
}
```

test.h

```
#ifndef __TEST_H__
#define __TEST_H__

extern void hello();
void test();

#endif
```

test.c

```
#include <stdio.h>
#include "test.h"

void test() {
    hello();
}
```

9.3.6 Shared Library

在 cgo 中使用 C 共享库。

test.h

```
#ifndef __TEST_HEAD__
#define __TEST_HEAD__

int sum(int x, int y);

#endif
```

test.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "test.h"

int sum(int x, int y)
{
```

```
    return x + y + 100;
}
```

编译成 .so 或 .dylib。

```
$ gcc -c -fPIC -o test.o test.c
$ gcc -dynamiclib -o libtest.dylib test.o
```

将共享库和头文件拷贝到 Go 项目目录。

main.go

```
package main

/*
   #cgo CFLAGS: -I.
   #cgo LDFLAGS: -L. -ltest
   #include "test.h"
*/
import "C"

func main() {
    println(C.sum(10, 20))
}
```

输出：

```
$ go build -o test && ./test
130
```

编译成功后可用 ldd 或 otool 查看动态库使用状态。 静态库使用方法类似。

9.4 Reflect

没有运行期类型对象，实例也没有附加字段用来表明身份。只有转换成接口时，才会在其 itab 内部存储该与类型有关的信息，Reflect 所有操作都依赖于此。

9.4.1 Type

以 struct 为例，可获取其全部成员字段信息，包括非导出和匿名字段。

```
type User struct {
    Username string
```

```
}

type Admin struct {
    User
    title string
}

func main() {
    var u Admin
    t := reflect.TypeOf(u)

    for i, n := 0, t.NumField(); i < n; i++ {
        f := t.Field(i)
        fmt.Println(f.Name, f.Type)
    }
}
```

输出：

```
User main.User     // 可进一步递归。
title string
```

如果是指针，应该先使用 Elem 方法获取目标类型，指针本身是没有字段成员的。

```
func main() {
    u := new(Admin)

    t := reflect.TypeOf(u)
    if t.Kind() == reflect.Ptr {
        t = t.Elem()
    }

    for i, n := 0, t.NumField(); i < n; i++ {
        f := t.Field(i)
        fmt.Println(f.Name, f.Type)
    }
}
```

同样，value-interface 和 pointer-interface 也会导致方法集存在差异。

```
type User struct {
}

type Admin struct {
    User
}

func (*User) ToString() {}
```

```
func (Admin) test()     {}

func main() {
    var u Admin

    methods := func(t reflect.Type) {
        for i, n := 0, t.NumMethod(); i < n; i++ {
            m := t.Method(i)
            fmt.Println(m.Name)
        }
    }

    fmt.Println("--- value interface ---")
    methods(reflect.TypeOf(u))

    fmt.Println("--- pointer interface ---")
    methods(reflect.TypeOf(&u))
}
```

输出：

```
--- value interface ---
test
--- pointer interface ---
ToString
test
```

可直接用名称或序号访问字段，包括用多级序号访问嵌入字段成员。

```
type User struct {
    Username string
    age      int
}

type Admin struct {
    User
    title string
}

func main() {
    var u Admin
    t := reflect.TypeOf(u)

    f, _ := t.FieldByName("title")
    fmt.Println(f.Name)

    f, _ = t.FieldByName("User")       // 访问嵌入字段。
    fmt.Println(f.Name)
```

```
    f, _ = t.FieldByName("Username")   // 直接访问嵌入字段成员，会自动深度查找。
    fmt.Println(f.Name)

    f = t.FieldByIndex([]int{0, 1})    // Admin[0] -> User[1] -> age
    fmt.Println(f.Name)
}
```

输出：

```
title
User
Username
age
```

字段标签可实现简单元数据编程，比如标记 ORM Model 属性。

```
type User struct {
    Name string `field:"username" type:"nvarchar(20)"`
    Age  int    `field:"age" type:"tinyint"`
}

func main() {
    var u User

    t := reflect.TypeOf(u)
    f, _ := t.FieldByName("Name")

    fmt.Println(f.Tag)
    fmt.Println(f.Tag.Get("field"))
    fmt.Println(f.Tag.Get("type"))
}
```

输出：

```
field:"username" type:"nvarchar(20)"
username
nvarchar(20)
```

可从基本类型获取所对应复合类型。

```
var (
    Int    = reflect.TypeOf(0)
    String = reflect.TypeOf("")
)

func main() {
    c := reflect.ChanOf(reflect.SendDir, String)
    fmt.Println(c)

    m := reflect.MapOf(String, Int)
```

```
    fmt.Println(m)

    s := reflect.SliceOf(Int)
    fmt.Println(s)

    t := struct{ Name string }{}
    p := reflect.PtrTo(reflect.TypeOf(t))
    fmt.Println(p)
}
```

输出:

```
chan<- string
map[string]int
[]int
*struct { Name string }
```

与之对应，方法 Elem 可返回复合类型的基类型。

```
func main() {
    t := reflect.TypeOf(make(chan int)).Elem()
    fmt.Println(t)
}
```

方法 Implements 判断是否实现了某个具体接口，AssignableTo、ConvertibleTo 用于赋值和转换判断。

```
type Data struct {
}

func (*Data) String() string {
    return ""
}

func main() {
    var d *Data
    t := reflect.TypeOf(d)

    // 没法直接获取接口类型，好在接口本身是个 struct，创建
    // 一个空指针对象，这样传递给 TypeOf 转换成 interface{}
    // 时就有类型信息了。。
    it := reflect.TypeOf((*fmt.Stringer)(nil)).Elem()

    // 为啥不是 t.Implements(fmt.Stringer)，完全可以由编译器生成。
    fmt.Println(t.Implements(it))
}
```

某些时候，获取对齐信息对于内存自动分析是很有用的。

```
type Data struct {
    b   byte
    x   int32
}

func main() {
    var d Data

    t := reflect.TypeOf(d)
    fmt.Println(t.Size(), t.Align())   // sizeof，以及最宽字段的对齐模数。

    f, _ := t.FieldByName("b")
    fmt.Println(f.Type.FieldAlign())   // 字段对齐。
}
```

输出：

```
8  4
1
```

9.4.2 Value

Value 和 Type 使用方法类似，包括使用 Elem 获取指针目标对象。

```
type User struct {
    Username string
    age      int
}

type Admin struct {
    User
    title string
}

func main() {
    u := &Admin{User{"Jack", 23}, "NT"}
    v := reflect.ValueOf(u).Elem()

    fmt.Println(v.FieldByName("title").String())   // 用转换方法获取字段值
    fmt.Println(v.FieldByName("age").Int())        // 直接访问嵌入字段成员
    fmt.Println(v.FieldByIndex([]int{0, 1}).Int()) // 用多级序号访问嵌入字段成员
}
```

输出：

```
NT
```

```
23
23
```

除具体的 Int、String 等转换方法，还可返回 interface{}。只是非导出字段无法使用，需用 CanInterface 判断一下。

```
type User struct {
    Username string
    age      int
}

func main() {
    u := User{"Jack", 23}
    v := reflect.ValueOf(u)

    fmt.Println(v.FieldByName("Username").Interface())
    fmt.Println(v.FieldByName("age").Interface())
}
```

输出：

```
Jack

panic: reflect.Value.Interface: cannot return value obtained from unexported field or
method
```

当然，转换成具体类型不会引发 panic。

```
func main() {
    u := User{"Jack", 23}
    v := reflect.ValueOf(u)

    f := v.FieldByName("age")

    if f.CanInterface() {
        fmt.Println(f.Interface())
    } else {
        fmt.Println(f.Int())
    }
}
```

除 struct，其他复合类型 array、slice、map 取值示例。

```
func main() {
    v := reflect.ValueOf([]int{1, 2, 3})
    for i, n := 0, v.Len(); i < n; i++ {
        fmt.Println(v.Index(i).Int())
```

```
    }

    fmt.Println("---------------------------")

    v = reflect.ValueOf(map[string]int{"a": 1, "b": 2})
    for _, k := range v.MapKeys() {
        fmt.Println(k.String(), v.MapIndex(k).Int())
    }
}
```

输出:

```
1
2
3
---------------------------
a 1
b 2
```

需要注意，Value 某些方法没有遵循 "comma ok" 模式，而是返回 ZeroValue，因此需要用 IsValid 判断一下是否可用。

```
func (v Value) FieldByName(name string) Value {
    v.mustBe(Struct)
    if f, ok := v.typ.FieldByName(name); ok {
        return v.FieldByIndex(f.Index)
    }
    return Value{}
}
```

```
type User struct {
    Username string
    age      int
}

func main() {
    u := User{}
    v := reflect.ValueOf(u)

    f := v.FieldByName("a")
    fmt.Println(f.Kind(), f.IsValid())
}
```

输出:

```
invalid false
```

另外，接口是否为 nil，需要 tab 和 data 都为空。可使用 IsNil 方法判断 data 值。

```
func main() {
    var p *int

    var x interface{} = p
    fmt.Println(x == nil)

    v := reflect.ValueOf(p)
    fmt.Println(v.Kind(), v.IsNil())
}
```

输出：

```
false
ptr true
```

将对象转换为接口，会发生复制行为。该复制品只读，无法被修改。所以要通过接口改变目标对象状态，必须是 pointer-interface。

就算是指针，我们依然没法将这个存储在 data 的指针指向其他对象，只能透过它修改目标对象。因为目标对象并没有被复制，被复制的只是指针。

```
type User struct {
    Username string
    age      int
}

func main() {
    u := User{"Jack", 23}

    v := reflect.ValueOf(u)
    p := reflect.ValueOf(&u)

    fmt.Println(v.CanSet(), v.FieldByName("Username").CanSet())
    fmt.Println(p.CanSet(), p.Elem().FieldByName("Username").CanSet())
}
```

输出：

```
false  false
false  true
```

非导出字段无法直接修改，可改用指针操作。

```
type User struct {
    Username string
    age      int
}

func main() {
```

```
    u := User{"Jack", 23}
    p := reflect.ValueOf(&u).Elem()

    p.FieldByName("Username").SetString("Tom")

    f := p.FieldByName("age")
    fmt.Println(f.CanSet())

    // 判断是否能获取地址。
    if f.CanAddr() {
        age := (*int)(unsafe.Pointer(f.UnsafeAddr()))
        // age := (*int)(unsafe.Pointer(f.Addr().Pointer()))  // 等同
        *age = 88
    }

    // 注意 p 是 Value 类型，需要还原成接口才能转型。
    fmt.Println(u, p.Interface().(User))
}
```

输出:

```
false
{Tom 88} {Tom 88}
```

复合类型修改示例。

```
func main() {
    s := make([]int, 0, 10)
    v := reflect.ValueOf(&s).Elem()

    v.SetLen(2)
    v.Index(0).SetInt(100)
    v.Index(1).SetInt(200)

    fmt.Println(v.Interface(), s)

    v2 := reflect.Append(v, reflect.ValueOf(300))
    v2 = reflect.AppendSlice(v2, reflect.ValueOf([]int{400, 500}))

    fmt.Println(v2.Interface())

    fmt.Println("----------------------")

    m := map[string]int{"a": 1}
    v = reflect.ValueOf(&m).Elem()

    v.SetMapIndex(reflect.ValueOf("a"), reflect.ValueOf(100)) // update
    v.SetMapIndex(reflect.ValueOf("b"), reflect.ValueOf(200)) // add
```

```
    fmt.Println(v.Interface(), m)
}
```

输出:

```
[100 200] [100 200]
[100 200 300 400 500]
----------------------
map[a:100 b:200] map[a:100 b:200]
```

9.4.3 Method

可获取方法参数、返回值类型等信息。

```
type Data struct {
}

func (*Data) Test(x, y int) (int, int) {
    return x + 100, y + 100
}

func (*Data) Sum(s string, x ...int) string {
    c := 0
    for _, n := range x {
        c += n
    }

    return fmt.Sprintf(s, c)
}

func info(m reflect.Method) {
    t := m.Type

    fmt.Println(m.Name)

    for i, n := 0, t.NumIn(); i < n; i++ {
        fmt.Printf("  in[%d] %v\n", i, t.In(i))
    }

    for i, n := 0, t.NumOut(); i < n; i++ {
        fmt.Printf("  out[%d] %v\n", i, t.Out(i))
    }
}

func main() {
    d := new(Data)
    t := reflect.TypeOf(d)
```

```
    test, _ := t.MethodByName("Test")
    info(test)

    sum, _ := t.MethodByName("Sum")
    info(sum)
}
```

输出:

```
Test
  in[0] *main.Data    // receiver
  in[1] int
  in[2] int
  out[0] int
  out[1] int
Sum
  in[0] *main.Data
  in[1] string
  in[2] []int
  out[0] string
```

动态调用方法很简单，按 In 列表准备好所需参数即可 (不包括 receiver)。

```
func main() {
    d := new(Data)
    v := reflect.ValueOf(d)

    exec := func(name string, in []reflect.Value) {
        m := v.MethodByName(name)
        out := m.Call(in)

        for _, v := range out {
            fmt.Println(v.Interface())
        }
    }

    exec("Test", []reflect.Value{
        reflect.ValueOf(1),
        reflect.ValueOf(2),
    })

    fmt.Println("------------------------")

    exec("Sum", []reflect.Value{
        reflect.ValueOf("result = %d"),
        reflect.ValueOf(1),
        reflect.ValueOf(2),
    })
```

```
}
```

输出:

```
101
102
----------------------
result = 3
```

如改用 CallSlice，只需将变参打包成 slice 即可。

```
func main() {
    d := new(Data)
    v := reflect.ValueOf(d)

    m := v.MethodByName("Sum")

    in := []reflect.Value{
        reflect.ValueOf("result = %d"),
        reflect.ValueOf([]int{1, 2}),    // 将变参打包成 slice。
    }

    out := m.CallSlice(in)

    for _, v := range out {
        fmt.Println(v.Interface())
    }
}
```

非导出方法无法调用，甚至无法透过指针操作，因为接口类型信息中没有该方法地址。

9.4.4 Make

利用 Make、New 等函数，可实现近似泛型操作。

```
var (
    Int    = reflect.TypeOf(0)
    String = reflect.TypeOf("")
)

func Make(T reflect.Type, fptr interface{}) {

    // 实际创建 slice 的包装函数。
    swap := func(in []reflect.Value) []reflect.Value {

        // --- 省略算法内容 --- //
```

```
        // 返回和类型匹配的 slice 对象。
        return []reflect.Value{
            reflect.MakeSlice(
                reflect.SliceOf(T),   // slice type
                int(in[0].Int()),     // len
                int(in[1].Int())      // cap
            ),
        }
    }

    // 传入的是函数变量指针，因为我们要将变量指向 swap 函数。
    fn := reflect.ValueOf(fptr).Elem()

    // 获取函数指针类型，生成所需 swap function value。
    v := reflect.MakeFunc(fn.Type(), swap)

    // 修改函数指针实际指向，也就是 swap。
    fn.Set(v)
}

func main() {
    var makeints func(int, int) []int
    var makestrings func(int, int) []string

    // 用相同算法，生成不同类型创建函数。
    Make(Int, &makeints)
    Make(String, &makestrings)

    // 按实际类型使用。
    x := makeints(5, 10)
    fmt.Printf("%#v\n", x)

    s := makestrings(3, 10)
    fmt.Printf("%#v\n", s)
}
```

输出：

```
[]int{0, 0, 0, 0, 0}
[]string{"", "", ""}
```

原理并不复杂。

1. 核心是提供一个 swap 函数，其中利用 reflect.MakeSlice 生成最终 slice 对象，因此需要传入 element type、len、cap 参数。
2. 接下来，利用 MakeFunc 函数生成 swap value，并修改函数变量指向，以达到调用 swap 的目的。

3. 当调用具体类型的函数变量时，实际内部调用的是 swap，相关代码会自动转换参数列表，并将返回结果还原成具体类型返回值。

如此，在共享算法的前提下，无须用 interface{}，无须做类型转换，颇有泛型的效果。

第二部分 源码

基于 Go 1.3，相关文件位于 src/pkg/runtime 目录。
文章忽略了 32bit 代码，有兴趣的可自行查看源码文件。
为便于阅读，示例代码做过裁剪。

1. Memory Allocator

有关 Go 内存分配器模型，在 malloc.h 头部注释中做了明确说明。

malloc.h

```
// Memory allocator, based on tcmalloc.
// http://goog-perftools.sourceforge.net/doc/tcmalloc.html

// The main allocator works in runs of pages.
// Small allocation sizes (up to and including 32 kB) are
// rounded to one of about 100 size classes, each of which
// has its own free list of objects of exactly that size.
// Any free page of memory can be split into a set of objects
// of one size class, which are then managed using free list
// allocators.
//
// The allocator's data structures are:
//
//    FixAlloc: a free-list allocator for fixed-size objects,
//           used to manage storage used by the allocator.
//    MHeap: the malloc heap, managed at page (4096-byte) granularity.
//    MSpan: a run of pages managed by the MHeap.
//    MCentral: a shared free list for a given size class.
//    MCache: a per-thread (in Go, per-P) cache for small objects.
//    MStats: allocation statistics.
//
// Allocating a small object proceeds up a hierarchy of caches:
//
//    1. Round the size up to one of the small size classes
//       and look in the corresponding MCache free list.
//       If the list is not empty, allocate an object from it.
//       This can all be done without acquiring a lock.
//
//    2. If the MCache free list is empty, replenish it by
//       taking a bunch of objects from the MCentral free list.
//       Moving a bunch amortizes the cost of acquiring the MCentral lock.
//
//    3. If the MCentral free list is empty, replenish it by
//       allocating a run of pages from the MHeap and then
//       chopping that memory into a objects of the given size.
//       Allocating many objects amortizes the cost of locking
//       the heap.
//
//    4. If the MHeap is empty or has no page runs large enough,
//       allocate a new group of pages (at least 1MB) from the
//       operating system.  Allocating a large run of pages
//       amortizes the cost of talking to the operating system.
```

```
//
// Freeing a small object proceeds up the same hierarchy:
//
//     1. Look up the size class for the object and add it to
//        the MCache free list.
//
//     2. If the MCache free list is too long or the MCache has
//        too much memory, return some to the MCentral free lists.
//
//     3. If all the objects in a given span have returned to
//        the MCentral list, return that span to the page heap.
//
//     4. If the heap has too much memory, return some to the
//        operating system.
//
//     TODO(rsc): Step 4 is not implemented.
//
// Allocating and freeing a large object uses the page heap
// directly, bypassing the MCache and MCentral free lists.
```

原理也不算太复杂。

首先，分配器必然是以页 (page) 为单位向操作系统申请大块内存。这些大块内存被称为 span，由多个地址连续的页组成。所有申请的 span 都交由 heap 管理。

malloc.h

```
PageShift    = 13,
PageSize     = 1<<PageShift,    // 8192
```

其次，分配器以 32KB 为界，将对象分为大小两种。大对象直接从 heap 获取内存，这个无需多言。

malloc.h

```
MaxSmallSize = 32<<10,
```

为数众多的小对象须进一步划分，以提高内存使用效率。于是又以 8 字节倍数为单位，将小对象分成多个等级 (size class)。例如，L1 为 1 ~ 8 字节，L2 为 9 ~ 16 字节，如此等等。当然，这种划分和计算方式未必是连续和固定的，会根据经验和测试进行调整。

malloc.h

```
NumSizeClasses = 67,

// SizeToClass(0 <= n <= MaxSmallSize) returns the size class,
```

```
//     1 <= sizeclass < NumSizeClasses, for n.
//     Size class 0 is reserved to mean "not small".
//
// class_to_size[i] = largest size in class i
// class_to_allocnpages[i] = number of pages to allocate when
//     making new objects in class i

int32         runtime·SizeToClass(int32);
uintptr       runtime·roundupsize(uintptr);
extern int32  runtime·class_to_size[NumSizeClasses];
extern int32  runtime·class_to_allocnpages[NumSizeClasses];
extern int8   runtime·size_to_class8[1024/8 + 1];
extern int8   runtime·size_to_class128[(MaxSmallSize-1024)/128 + 1];
```

注：Go 1.3 不但将 page 增加到 8KB，还将等级调整到 67，其中 0 用于标记大对象。

组件 central 从 heap 获取 span，按照所属等级将大块内存切分成小块。每个小块存储一个相同等级对象，故称作 object。heap 管理多个 central 对象，每个 central 对应一种等级。

调度器为每个执行线程绑定一个 cache，用于小对象堆内存分配和回收。这么做的好处是无需加锁，大大提升了执行效率。cache 从 central 获取多个不同等级的 span，用以分配 object 内存。

一个优秀的内存分配器必然要平衡内存使用，既要用缓存快速分配，又不能有太多闲置造成浪费。central 除提供 object 储备外，还负责回收空闲空间，在多个 cache 间平衡使用。而当发现某 span 完整收回所属 object，则将其还给 heap，交由其他等级 central 使用 (需重新切分)。如此就形成了两个层面的调度平衡。

最后，heap 会尝试合并相邻的空闲 span，以形成更大的内存块，减少碎片。

分配流程:

1. 计算待分配对象所属等级。
2. 访问 cache，查找相同等级 span，从中提取 object。
3. 如目标 span 没有剩余空间，则向等级相同的 central 提取可用 span。
4. 如 central 没有可用 span，则从 heap 获取，并切分成 object 链表。
5. 当 heap 没有足够内存时，向操作系统申请新的 span 内存。

释放流程:

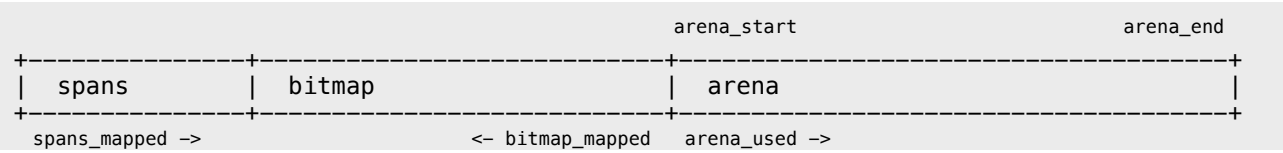
1. 计算待释放对象所属等级。
2. 将其归还给所属的 cache span，或添加到等级相同的可回收链表里。
3. 如可回收链表长度超过阈值，则将该链表内的 object 全部归还 central。
4. 当 central 中的 span 收回其全部 object，那么将该 span 还给 heap。
5. 垃圾回收器定时扫描 heap span 链表，并建议操作系统回收闲置的物理内存。

1.1 初始化

函数 mallocinit 除初始化 object 等级外，最重要的工作是设定保留虚拟地址范围。

预留内存地址包括三个部分：

- **arena**: 实际内存分配地址范围。
- **bitmap**: 为每个地址提供 4bit 标记位，用于垃圾回收等操作。
- **spans**: 记录每个 page 所对应的 span 地址，用于反查和合并操作。



malloc.h

```
struct MHeap
{
    MSpan** spans;
    uintptr spans_mapped;
    byte    *bitmap;
    uintptr bitmap_mapped;
    byte    *arena_start;
    byte    *arena_used;      // 下一分配位置。
    byte    *arena_end;
    bool    arena_reserved;
};
```

malloc.goc

```
void runtime·mallocinit(void)
{
    runtime·InitSizes();

    if(sizeof(void*) == 8 && (limit == 0 || limit > (1<<30))) {
```

```
        // 计算各保留区域大小。
        arena_size = MaxMem;  // 128GB
        bitmap_size = arena_size / (sizeof(void*)*8/4); // 8GB
        spans_size = arena_size / PageSize * sizeof(runtime·mheap.spans[0]);
        spans_size = ROUND(spans_size, PageSize); // 128MB

        // 尝试保留从 0xc00000000 开始的内存地址，如果失败则更换其他地址。
        // 重试范围从 0x10c00000000 直到 0x7fc00000000。
        for(i = 0; i <= 0x7f; i++) {
            p = (void*)(i<<40 | 0x00c0ULL<<32);
            p_size = bitmap_size + spans_size + arena_size + PageSize;
            p = runtime·SysReserve(p, p_size, &reserved);
            if(p != nil) break;
        }
    }

    // 设置保留区域参数。
    runtime·mheap.spans = (MSpan**)p1;
    runtime·mheap.bitmap = p1 + spans_size;
    runtime·mheap.arena_start = p1 + spans_size + bitmap_size;
    runtime·mheap.arena_used = runtime·mheap.arena_start;
    runtime·mheap.arena_end = p + p_size;
    runtime·mheap.arena_reserved = reserved;

    // 初始化 heap。
    runtime·MHeap_Init(&runtime·mheap);

    // 测试分配器。
    runtime·free(runtime·malloc(TinySize));
}
```

附: OSX/Darwin SysReserve 未使用 MAP_FIXED 参数，预留内存未必从 0xc00000000 开始。

初始化函数只是调用 mmap 预留虚拟内存地址，并没有实际内存分配。因此，就算你看到一个简单 "Hello, World!" 消耗上百 GB 内存，亦无需担心。

之所以这么做，是因为内存分配器算法依赖连续地址。当从操作系统分配 span 内存时，用于管理的 bitmap、spans 同步线性增长。

还有一项任务就是创建 heap 对象，这是整个内存分配器的根。

malloc.h

```
struct MHeap
{
    MSpan free[MaxMHeapList];   // 以页数为单位的多个 span 链表。
```

```
    MSpan freelarge;            // 页数超标的的 span 链表。
    MSpan busy[MaxMHeapList];   // 以页数为单位管理已分配大对象链表。
    MSpan busylarge;            // 页数超标的的已分配大对象链表。

    // 用 size class 做索引的 central 数组。
    struct {
        MCentral;
        byte pad[CacheLineSize];
    } central[NumSizeClasses];
};
```

mheap.c

```
void runtime·MHeap_Init(MHeap *h)
{
    // 初始化 span、cache 等 FixAlloc 分配器。
    runtime·FixAlloc_Init(&h->spanalloc, sizeof(MSpan), RecordSpan, ...);
    runtime·FixAlloc_Init(&h->cachealloc, sizeof(MCache), nil, ...);
    runtime·FixAlloc_Init(&h->specialfinalizeralloc, sizeof(SpecialFinalizer), ...);
    runtime·FixAlloc_Init(&h->specialprofilealloc, sizeof(SpecialProfile), ...);

    // 初始化 span 管理链表。
    for(i=0; i<nelem(h->free); i++) {
        runtime·MSpanList_Init(&h->free[i]);
        runtime·MSpanList_Init(&h->busy[i]);
    }

    // 初始化 large object 管理链表。
    runtime·MSpanList_Init(&h->freelarge);
    runtime·MSpanList_Init(&h->busylarge);

    // 初始化所有等级 central 对象。
    for(i=0; i<nelem(h->central); i++)
        runtime·MCentral_Init(&h->central[i], i);
}
```

函数初始化全局唯一 heap 对象：

1. 为 MSpan、MCache 等创建 FixAlloc 分配器；
2. 初始化用于 span 和大对象的管理链表；
3. 初始化 central 管理数组。

相比 Go 1.2，MHeap 多了 busy 链表，用于记录大对象内存分配，类似 LOH 的做法。

1.2 分配流程

函数 runtime·new、runtime·malloc 通过调用 mallocgc 完成对象堆内存分配。

malloc.goc

```
void* runtime·mallocgc(uintptr size, uintptr typ, uint32 flag)
{
    c = m->mcache;

    // 小对象
    if(!runtime·debug.efence && size <= MaxSmallSize) {
        // 微小对象（不包含指针，小于 16 字节）
        if((flag&(FlagNoScan|FlagNoGC)) == FlagNoScan && size < TinySize) {
            tinysize = c->tinysize;

            // 如果 cache.tiny 还有足够空间。
            if(size <= tinysize) {
                tiny = c->tiny;

                // 指针对齐
                if((size&7) == 0)
                    tiny = (byte*)ROUND((uintptr)tiny, 8);
                else if((size&3) == 0)
                    tiny = (byte*)ROUND((uintptr)tiny, 4);
                else if((size&1) == 0)
                    tiny = (byte*)ROUND((uintptr)tiny, 2);
                size1 = size + (tiny - c->tiny);

                // 直接从 tiny 分配，并调整 tiny 和 tinysize。
                if(size1 <= tinysize) {
                    v = (MLink*)tiny;
                    c->tiny += size1;
                    c->tinysize -= size1;
                    return v;
                }
            }

            // 如果 tiny 空间不足，则分配新的 tiny 内存块。
            // 直接从 alloc 获取一块 class size 2 等级的内存。
            s = c->alloc[TinySizeClass];

            // 如果 cache 没有可用剩余空间，则从 central 获取新的 span/objects。
            if(s->freelist == nil)
                s = runtime·MCache_Refill(c, TinySizeClass);

            // 从 span.freelist 列表提取 object，并调整链表。
            v = s->freelist;
```

```
            next = v->next;
            s->freelist = next;
            s->ref++;

            // 如果 object 剩余空间大于现有 tiny 内存块，那么就用大的替换掉。
            if(TinySize-size > tinysize) {
                c->tiny = (byte*)v + size;
                c->tinysize = TinySize - size;
            }

            size = TinySize;
            goto done;
        }

        // 普通小对象，计算 size class。
        if(size <= 1024-8)
            sizeclass = runtime·size_to_class8[(size+7)>>3];
        else
            sizeclass = runtime·size_to_class128[(size-1024+127) >> 7];
        size = runtime·class_to_size[sizeclass];

        // 从 cache.alloc 链表数组中找到对应等级的 span。
        s = c->alloc[sizeclass];
        if(s->freelist == nil)
            s = runtime·MCache_Refill(c, sizeclass);

        // 从 span.freelist 链表中提取可用的 object，并调整链表。
        v = s->freelist;
        next = v->next;
        s->freelist = next;
        s->ref++;

    done:
        c->local_cachealloc += size;
    } else {
        // 大对象直接从 heap 分配内存。
        s = largealloc(flag, &size);
        v = (void*)(s->start << PageShift);
    }

    // 对内存做 GC 标记，也就是前面提到过的 bitmap 区域。
    if(flag & FlagNoGC)
        runtime·marknogc(v);
    else if(!(flag & FlagNoScan))
        runtime·markscan(v);

    // 检查 GC 回收阈值。
    if(!(flag & FlagNoInvokeGC) && mstats.heap_alloc >= mstats.next_gc)
```

```
        runtime·gc(0);

    return v;
}

static MSpan* largealloc(uint32 flag, uintptr *sizep)
{
    // Allocate directly from heap.
    size = *sizep;
    npages = size >> PageShift;
    s = runtime·MHeap_Alloc(&runtime·mheap, npages, 0, 1, !(flag & FlagNoZero));
    return s;
}
```

相比以前版本，MCache 有两个明显的变化：

- 针对微小对象的优化，尝试将其组合到单个内存块，以提升内存利用率。
- 将空闲链表拆分成分配和回收两部分，用于分配的 alloc 数组保存了从 central 获取的所有 span，而 free 数组则用来保存所有回收的 object。

malloc.h

```
struct MCache
{
    // Allocator cache for tiny objects w/o pointers.
    byte*   tiny;
    uintptr tinysize;

    MSpan*     alloc[NumSizeClasses];   // 从 Central 获取的 Span，用于提取相应等级 object。
    MCacheList free[NumSizeClasses];    // 等待回收的 object 链表。
};
```

将分配和回收分开的好处是，分配操作集中在当前 span，当 free 链表返还给 central 时，就增加了以往 span 收回全部 object 的几率。

继续跟踪小对象内存分配过程，看看如何从 central 获取 span。

mcache.c

```
MSpan* runtime·MCache_Refill(MCache *c, int32 sizeclass)
{
    // 按照 size class 返回 alloc 数组中对应的 span。
    s = c->alloc[sizeclass];

    // 既然要 refill，当前 span 自然没有剩余 object 可用。
    if(s->freelist != nil)
```

```
        runtime·throw("refill on a nonempty span");

    // 将该 span 还给 central。
    if(s != &emptymspan)
        runtime·MCentral_UncacheSpan(&runtime·mheap.central[sizeclass], s);

    // 将 cache.free 链表中的 object 全部交还给 central。
    l = &c->free[sizeclass];
    if(l->nlist > 0) {
        runtime·MCentral_FreeList(&runtime·mheap.central[sizeclass], l->list);
        l->list = nil;
        l->nlist = 0;
    }

    // 从 central 获取一个可用的 span。
    s = runtime·MCentral_CacheSpan(&runtime·mheap.central[sizeclass]);
    c->alloc[sizeclass] = s;

    return s;
}
```

在分配阶段提前接入回收操作，是 Go 1.3 的积极信号?

以等级为索引，就可以从 heap.central 数组找到目标对象。central 有两个 span 管理链表，noempty 中的 span 还有可用 object 空间，empty 则相反。

malloc.h

```
struct MCentral
{
    Lock;
    int32 sizeclass;   // 所属等级。
    MSpan nonempty;    // 有剩余空间的 span 链表。
    MSpan empty;       // 没有剩余空间的 span 链表（被 cache 全部拿走，未必已经使用）
    int32 nfree;       // 所有有剩余空间 span.objects 数量。
};
```

mcentral.c

```
MSpan* runtime·MCentral_CacheSpan(MCentral *c)
{
retry:
    // 从非空 span 链表提取可用 span。
    for(s = c->nonempty.next; s != &c->nonempty; s = s->next) {
        goto havespan;
    }

    // 没有可用 span，则从 heap 获取。
```

```
    if(!MCentral_Grow(c)) {
        runtime·unlock(c);
        return nil;
    }
    goto retry;

havespan:
    // 计算 objects 数量，并重置 cache.nfree 计数器。
    cap = (s->npages << PageShift) / s->elemsize;
    n = cap - s->ref;
    c->nfree -= n;

    // 将该 span 转移到 empty 链表。
    runtime·MSpanList_Remove(s);
    runtime·MSpanList_InsertBack(&c->empty, s);
    s->incache = true;

    return s;
}
```

从上面函数可以看出，每次都拿走一整个 span。继续跟踪如何从 heap 获取 span。

mcentral.c

```
static bool MCentral_Grow(MCentral *c)
{
    // 获取 central 相关信息。
    runtime·MGetSizeClassInfo(c->sizeclass, &size, &npages, &n);

    // 从 heap 获取 span。
    s = runtime·MHeap_Alloc(&runtime·mheap, npages, c->sizeclass, 0, 1);

    // 将 span 切分成 object，保存到 freelist。
    tailp = &s->freelist;
    p = (byte*)(s->start << PageShift);
    s->limit = p + size*n;
    for(i=0; i<n; i++) {
        v = (MLink*)p;
        *tailp = v;
        tailp = &v->next;
        p += size;
    }
    *tailp = nil;

    // 增加 central 计数器，并将 span 插入 noempty 链表。
    c->nfree += n;
    runtime·MSpanList_Insert(&c->nonempty, s);
```

```
    return true;
}
```

从 heap 拿到 span 后，按所属等级切分成 object 链表。

malloc.h

```
struct MSpan
{
    MSpan   *next;        // 链表
    MSpan   *prev;
    PageID  start;        // 开始页序号; PageID = pointer >> PageShift
    uintptr npages;       // 包含的页数
    MLink   *freelist;    // 可用 object 链表
    uint16  ref;          // 已经使用 object 数量; capacity - freelist.num
    uint8   sizeclass;    // 等级
    bool    incache;      // 是否正在被 cache 使用
    byte    *limit;       // 结束地址
    MLink   *freebuf;     // 等待回收的 object 链表
};
```

接下来的事情，就是看 heap 如何管理 span 了。

malloc.h

```
struct MHeap
{
    Lock;
    MSpan free[MaxMHeapList];   // 以页数为单位的多个 span 链表。
    MSpan freelarge;            // 页数超标的的 span 链表。
    MSpan busy[MaxMHeapList];   // 以页数为单位管理已分配大对象链表。
    MSpan busylarge;            // 页数超标的的已分配大对象链表。
};
```

在 heap 里有个以页数为序号的数组 free，其中保存了多个 span 链表。只需用所需页数做索引就可以很方便取到所需 span。如果对应链表没有可用 span，那么就继续找页数更多的链表，直到从 freelarge 链表中取，或者向操作系统申请新内存空间。

成员 busy 和 busylarge 用于记录大对象内存分配。

mheap.c

```
MSpan* runtime·MHeap_Alloc(MHeap *h, uintptr npage, int32 sizeclass, bool large, ...)
{
    MSpan *s;

    s = MHeap_AllocLocked(h, npage, sizeclass);
```

```
    if(s != nil) {
        // 为大对象分配内存，记录到 busy[x] 或 busylarge 链表中。
        if(large) {
            if(s->npages < nelem(h->free))
                runtime·MSpanList_InsertBack(&h->busy[s->npages], s);
            else
                runtime·MSpanList_InsertBack(&h->busylarge, s);
        }
    }

    return s;
}

static MSpan* MHeap_AllocLocked(MHeap *h, uintptr npage, int32 sizeclass)
{
    // 从 free 链表数组中查找合适的 span。
    for(n=npage; n < nelem(h->free); n++) {
        if(!runtime·MSpanList_IsEmpty(&h->free[n])) {
            s = h->free[n].next;
            goto HaveSpan;
        }
    }

    // 从更大的链表中查找大小合适的 span。
    if((s = MHeap_AllocLarge(h, npage)) == nil) {
        if(!MHeap_Grow(h, npage))
            return nil;
        if((s = MHeap_AllocLarge(h, npage)) == nil)
            return nil;
    }

HaveSpan:
    // 从链表中移除。
    runtime·MSpanList_Remove(s);

    // 如果 span 大小超出预期。
    if(s->npages > npage) {
        // 截断尾部多余空间，新建 span。
        t = runtime·FixAlloc_Alloc(&h->spanalloc);
        runtime·MSpan_Init(t, s->start + npage, s->npages - npage);
        s->npages = npage;

        // 在 heap.spans 记录新 span 地址。
        p = t->start;
        p -= ((uintptr)h->arena_start>>PageShift);
        if(p > 0)
            h->spans[p-1] = s;
        h->spans[p] = t;
```

```
        h->spans[p+t->npages-1] = t;

        // 将新 span 重新放回 heap 链表。
        MHeap_FreeLocked(h, t);
    }

    // 在 heap.spans 保存 span 地址。
    s->sizeclass = sizeclass;
    p = s->start;
    p -= ((uintptr)h->arena_start>>PageShift);
    for(n=0; n<npage; n++)
        h->spans[p+n] = s;

    return s;
}
```

对于所获取的 span，分配器会截取多余部分，重新放回链表。在此期间，还会尝试合并相邻 span，以形成更大块可用内存空间，减少碎片。

mheap.c

```
static void MHeap_FreeLocked(MHeap *h, MSpan *s)
{
    // 将 span 从现有链表中移除。
    runtime·MSpanList_Remove(s);

    p = s->start;
    p -= (uintptr)h->arena_start >> PageShift;

    // 通过 heap.spans 检查左侧 span 是否可合并。
    if(p > 0 && (t = h->spans[p-1]) != nil && t->state != MSpanInUse) {
        // 合并状态参数。
        s->start = t->start;
        s->npages += t->npages;
        p -= t->npages;
        h->spans[p] = s;

        // 将左侧 span 管理对象从链表移除并释放。
        runtime·MSpanList_Remove(t);
        runtime·FixAlloc_Free(&h->spanalloc, t);
    }

    // 检查右侧 span 是否可合并。
    if((p+s->npages)*sizeof(h->spans[0]) < h->spans_mapped &&
       (t = h->spans[p+s->npages]) != nil && t->state != MSpanInUse) {
        // 合并参数。
        s->npages += t->npages;
        h->spans[p + s->npages - 1] = s;
```

```
        // 将右侧 span 管理对象从链表移除并释放。
        runtime·MSpanList_Remove(t);
        runtime·FixAlloc_Free(&h->spanalloc, t);
    }

    // 根据 span 页数，将其插入到合适的 free 链表中。
    if(s->npages < nelem(h->free))
        runtime·MSpanList_Insert(&h->free[s->npages], s);
    else
        runtime·MSpanList_Insert(&h->freelarge, s);
}
```

不管如何操作，最终都需要向操作系统申请内存。

mheap.c

```
static bool MHeap_Grow(MHeap *h, uintptr npage)
{
    // 每次申请的内存是 64KB 的倍数，最少 1MB。
    npage = (npage+15)&~15;
    ask = npage<<PageShift;
    if(ask < HeapAllocChunk) ask = HeapAllocChunk;

    v = runtime·MHeap_SysAlloc(h, ask);

    // 创建新的 span 保存刚申请的内存块。
    s = runtime·FixAlloc_Alloc(&h->spanalloc);
    runtime·MSpan_Init(s, (uintptr)v>>PageShift, ask>>PageShift);

    // 在 heap.spans 记录该 span 地址。
    p = s->start;
    p -= ((uintptr)h->arena_start>>PageShift);
    h->spans[p] = s;
    h->spans[p + s->npages - 1] = s;

    // 尝试合并相邻 span，并插入到合适的链表中。
    MHeap_FreeLocked(h, s);
    return true;
}
```

每次申请都须确保在 arena 范围内，并指定起始内存地址 (arena_used)。

malloc.goc

```
void* runtime·MHeap_SysAlloc(MHeap *h, uintptr n)
{
    // 检查是否超出 arena 保留范围。
```

```
    if(n <= h->arena_end - h->arena_used) {
        // 从 arena_used 处申请内存。
        p = h->arena_used;
        runtime·SysMap(p, n, h->arena_reserved, &mstats.heap_sys);

        // 调整下次申请地址。
        h->arena_used += n;

        // 同步为 spans、bitmap 增加内存。
        runtime·MHeap_MapBits(h);
        runtime·MHeap_MapSpans(h);

        return p;
    }
}
```

最后调用 mmap、VirtualAlloc 完成向操作系统申请内存操作。

mem_linux.c

```
void runtime·SysMap(void *v, uintptr n, bool reserved, uint64 *stat)
{
    p = runtime·mmap(v, n, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_ANON|MAP_FIXED|MAP_PRIVATE, -1, 0);
}
```

mem_windows.c

```
void runtime·SysMap(void *v, uintptr n, bool reserved, uint64 *stat)
{
    p = runtime·stdcall(runtime·VirtualAlloc, 4, v, n, (uintptr)MEM_COMMIT,
        (uintptr)PAGE_READWRITE);
}
```

1.3 释放流程

调用 free 函数释放 object 内存。

malloc.goc

```
void runtime·free(void *v)
{
    // 查找 object 所在 span。
    if(!runtime·mlookup(v, nil, nil, &s)) {
        runtime·throw("free runtime·mlookup");
    }

    size = s->elemsize;
```

```
    sizeclass = s->sizeclass;

    c = m->mcache;

    // 大对象
    if(sizeclass == 0) {
        // 直接归还给 heap。
        if(runtime·debug.efence)
            runtime·SysFault((void*)(s->start<<PageShift), size);
        else
            runtime·MHeap_Free(&runtime·mheap, s, 1);
    } else {
        // 小对象

        // 如果该 object 属于当前 alloc span，那么就归还到 freelist。
        if(c->alloc[sizeclass] == s) {
            runtime·markfreed(v);
            ((MLink*)v)->next = s->freelist;
            s->freelist = v;
            s->ref--;
        } else {
            // 否则添加到 cache.free 链表。
            runtime·MCache_Free(c, v, sizeclass, size);
        }
    }
}
```

大对象回归 heap，小对象要检查是否属于当前正在使用的 span。是就复用，不是就交给 free 链表，随后还给 central。

mcache.c

```
void runtime·MCache_Free(MCache *c, MLink *p, int32 sizeclass, uintptr size)
{
    // 将 object 添加到对应的 free 链表。
    l = &c->free[sizeclass];
    p->next = l->list;
    l->list = p;
    l->nlist++;

    // 如果 free 链表长度超出阈值，则将其归还给 central。
    if(l->nlist >= (runtime·class_to_allocnpages[sizeclass]<<PageShift)/size) {
        runtime·MCentral_FreeList(&runtime·mheap.central[sizeclass], l->list);
        l->list = nil;
        l->nlist = 0;
    }
}
```

函数 MCentral_FreeList 将等待回收链表中的 object 逐个添加到所属 span.freebuf 或 freelist 链表，然后检查 span 是否可以归还给 heap。

mcentral.c

```
void runtime·MCentral_FreeList(MCentral *c, MLink *start)
{
    // 遍历链表，逐个释放 object。
    for(; start != nil; start = next) {
        next = start->next;
        MCentral_Free(c, start);
    }
}

static void MCentral_Free(MCentral *c, MLink *v)
{
    // 查找该 object 所在 span。(用保留区域的 spans 查找)
    s = runtime·MHeap_Lookup(&runtime·mheap, v);

    // 如果该 span 还在被 cache 使用，那么添加到 span.freebuf。
    if(s->incache) {
        v->next = s->freebuf;
        s->freebuf = v;
        return;
    }

    // 显然该 span 即将非空，转移到 noempty 链表。
    if(s->freelist == nil) {
        runtime·MSpanList_Remove(s);
        runtime·MSpanList_Insert(&c->nonempty, s);
    }

    // 将该 object 添加到 span.freelist。
    v->next = s->freelist;
    s->freelist = v;
    s->ref--;
    c->nfree++;

    // 检查 span.ref 计数器，如果收回全部 object，立即返还给 heap。
    if(s->ref == 0) {
        MCentral_ReturnToHeap(c, s); // unlocks c
    }
}
```

如果 span 还在被 cache 使用，那么将回收的 object 暂存在 freebuf 链表中，等交还给 central 时，再转移到 freelist。

在 MCache_Refill 函数获取新 span 前，会调用 MCentral_UncacheSpan，将消耗一空的 span 交还给 central。

mcentral.c

```
void runtime·MCentral_UncacheSpan(MCentral *c, MSpan *s)
{
    s->incache = false;

    // 将 freebuf 中的 object 转移到 freelist。
    while((v = s->freebuf) != nil) {
        s->freebuf = v->next;
        v->next = s->freelist;
        s->freelist = v;
        s->ref--;
    }

    // 如果收回全部 object，将 span 归还给 heap。
    if(s->ref == 0) {
        MCentral_ReturnToHeap(c, s);
        return;
    }

    // 将 span 转移到 central.noempty 链表。
    cap = (s->npages << PageShift) / s->elemsize;
    n = cap - s->ref;
    if(n > 0) {
        c->nfree += n;
        runtime·MSpanList_Remove(s);
        runtime·MSpanList_Insert(&c->nonempty, s);
    }
}
```

最终将 span 归还到 heap 链表中，并没有实际释放。物理内存释放是由来垃圾回收器的一个特殊定时操作完成的。

mcentral.c

```
static void MCentral_ReturnToHeap(MCentral *c, MSpan *s)
{
    // 将 span 从 central 链表中移除。
    runtime·MSpanList_Remove(s);

    // 归还给 heap。
    runtime·MHeap_Free(&runtime·mheap, s, 0);
}
```

mheap.c

```
void runtime·MHeap_Free(MHeap *h, MSpan *s, int32 acct)
{
    // 合并相邻 span，然后插入到合适的链表中。
    MHeap_FreeLocked(h, s);
}
```

1.4 其他

在内存分配过程中，除普通对象外，还有些管理对象，比如 MSpan、MCache 等等。这些管理对象会被缓存，重复使用。如果也从 heap 分配，必然会导致所在内存块被长期占用，造成碎片化，不利于回收和合并。

为此，专门为它们额外准备了分配器。因同一种类型长度固定，故称作 FixAlloc。

malloc.h

```
struct FixAlloc
{
    uintptr size;                           // 固定分配长度。
    void    (*first)(void *arg, byte *p);   // 关联函数。
    void*   arg;                            // first 函数调用参数。
    MLink*  list;                           // 可复用空间链表。
    byte*   chunk;                          // 后备内存块当前分配指针。
    uint32  nchunk;                         // 后备内存块可用长度。
    uintptr inuse;                          // 后备内存块已使用长度。
};
```

在 MHeap_Init 函数中，专门创建所需的各种 FixAlloc 分配器。

mheap.c

```
void runtime·MHeap_Init(MHeap *h)
{
    runtime·FixAlloc_Init(&h->spanalloc, sizeof(MSpan), RecordSpan, ...);
    runtime·FixAlloc_Init(&h->cachealloc, sizeof(MCache), nil, ...);
}
```

mfixalloc.c

```
void runtime·FixAlloc_Init(FixAlloc *f, uintptr size, void (*first)(void*, byte*), void
*arg, uint64 *stat)
{
    f->size = size;
    f->first = first;
```

```
    f->arg = arg;
    f->list = nil;
    f->chunk = nil;
    f->nchunk = 0;
    f->inuse = 0;
    f->stat = stat;
}
```

注意 Span FixAlloc 参数 RecordSpan 的作用是为 heap.allspans 分配内存，用于存储所有 span 指针，GC Sweep 和 Heap Dump 操作都会用到该数据。

mheap.c

```
static void RecordSpan(void *vh, byte *p)
{
    MHeap *h;
    MSpan *s;
    MSpan **all;

    h = vh;
    s = (MSpan*)p;

    // 如果现有内存不足。
    if(h->nspan >= h->nspancap) {
        // 计算新容量。
        cap = 64*1024/sizeof(all[0]);
        if(cap < h->nspancap*3/2)
            cap = h->nspancap*3/2;

        // 重新分配内存。
        all = (MSpan**)runtime·SysAlloc(cap*sizeof(all[0]), &mstats.other_sys);

        // 将原来数据转移过来。
        if(h->allspans) {
            runtime·memmove(all, h->allspans, h->nspancap*sizeof(all[0]));

            // 释放原来的内存。
            if(h->allspans != runtime·mheap.sweepspans)
                runtime·SysFree(h->allspans, h->nspancap*sizeof(all[0]), ...);
        }

        h->allspans = all;
        h->nspancap = cap;
    }

    // 添加新 span。
    h->allspans[h->nspan++] = s;
}
```

回到正题，以 MSpan 为例，看看 FixAlloc 具体如何工作。

mheap.c

```
static bool MHeap_Grow(MHeap *h, uintptr npage)
{
    // 用 Span FixAlloc 创建新的 Span 对象。
    s = runtime·FixAlloc_Alloc(&h->spanalloc);
    runtime·MSpan_Init(s, (uintptr)v>>PageShift, ask>>PageShift);
}
```

mfixalloc.c

```
void* runtime·FixAlloc_Alloc(FixAlloc *f)
{
    // 如果空闲链表不为空，直接返回复用空间。
    if(f->list) {
        v = f->list;
        f->list = *(void**)f->list;
        f->inuse += f->size;
        return v;
    }

    // 如果后备内存块可用空间不足。
    if(f->nchunk < f->size) {
        // 重新申请 16KB 内存。
        f->chunk = runtime·persistentalloc(FixAllocChunk, 0, f->stat);
        f->nchunk = FixAllocChunk;
    }

    // 从后备内存块头部提取空间。
    v = f->chunk;

    // 执行 first 函数，比如 RecordSpan。
    if(f->first)
        f->first(f->arg, v);

    // 调整后备内存块的开始位置和可用大小。
    f->chunk += f->size;
    f->nchunk -= f->size;
    f->inuse += f->size;

    return v;
}
```

很简单的一个内存池算法。除一个复用链表外，还有后备大块内存用于切分操作。

FixAlloc 并没有使用 arena 区域，而是用 mmap 额外申请。另外，为减少系统调用，还有个全局 persistent 对象，每次申请 256KB 大块内存用于切分，总体上和 MHeap 体系类似。

malloc.goc

```
void* runtime·persistentalloc(uintptr size, uintptr align, uint64 *stat)
{
    // 大于 64KB 的直接用 mmap 分配。
    if(size >= PersistentAllocMaxBlock)
        return runtime·SysAlloc(size, stat);

    // 如果 persistent 剩余空间不足，则重新分配 256KB。
    if(persistent.pos + size > persistent.end) {
        persistent.pos = runtime·SysAlloc(PersistentAllocChunk, &mstats.other_sys);
        persistent.end = persistent.pos + PersistentAllocChunk;
    }

    // 从 persistent 分配内存。
    p = persistent.pos;
    persistent.pos += size;

    return p;
}
```

mem_linux.c

```
void* runtime·SysAlloc(uintptr n, uint64 *stat)
{
    p = runtime·mmap(nil, n, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_ANON|MAP_PRIVATE, -1, 0);
    return p;
}
```

释放操作也仅仅是将其添加到复用链表。

mfixalloc.c

```
void runtime·FixAlloc_Free(FixAlloc *f, void *p)
{
    f->inuse -= f->size;
    *(void**)p = f->list;
    f->list = p;
}
```

2. Garbage Collector

精确垃圾回收，很经典的 Mark-and-Sweep 算法。

当内存分配 (不包括缓存和未使用的 span) 超过预设阈值，就会引发垃圾回收操作。在回收前，需要暂停用户逻辑执行，也就是所谓的 StopTheWorld。然后启用多个线程从根对象开始并行扫描，直到标记出所有可回收对象。

1.3 对垃圾回收做了改进。在标记结束后，会立即恢复逻辑执行 (StartTheWorld)。创建或唤醒专门的 goroutine 去并发完成清理工作，而非以前那样与标记串行。这缩短了暂停时间，一定程度上改善了垃圾回收所引发的问题。

在完成清理后，新的阈值通常是存活对象所使用内存的 2 倍。需要注意的是，清理操作只是调用内存分配器的相关方法，将内存逐步交还给 heap，并未释放物理内存。

在入口函数，运行时专门创建一个 goroutine 定期执行与内存回收有关的操作。循环检查最后垃圾回收时间，如超出 2 分钟，则执行强制回收。另建议操作系统收回那些闲置超过 5 分钟的 span 物理内存。

2.1 垃圾回收

前面提到过，在 mallocgc 函数中会检查已分配内存是否超过垃圾回收阈值。

malloc.goc

```
void* runtime·mallocgc(uintptr size, uintptr typ, uint32 flag)
{
    if(!(flag & FlagNoInvokeGC) && mstats.heap_alloc >= mstats.next_gc)
        runtime·gc(0);
}
```

mgc0.c

```
void runtime·gc(int32 force)
{
    // 检查 GOGC 值。
    if(gcpercent == GcpercentUnknown) {
        // 默认 100。
        if(gcpercent == GcpercentUnknown)
            gcpercent = readgogc();
    }
```

```
    // GOGC == 0，禁用垃圾回收。
    if(gcpercent < 0)
        return;

    // 如果没达到阈值，那么下次再说。
    if(!force && mstats.heap_alloc < mstats.next_gc) {
        return;
    }

    // 木办法，先暂停。
    runtime·stoptheworld();

    // 如果 GODEBUG="gotrace=2"，会引发两次回收。
    for(i = 0; i < (runtime·debug.gctrace > 1 ? 2 : 1); i++) {
        runtime·mcall(mgc);
    }

    // 恢复执行。
    runtime·startheworld();
}
```

在 1.3 的垃圾回收器中，有两个重要改进：

- 清理操作默认被放到专门的后台 goroutine 并发执行。
- 引入代龄机制，减少对 heap.allspans 内存块的扫描操作。

mgc0.c

```
static void mgc(G *gp)
{
    gc(gp->param);
}

static void gc(struct gc_args *args)
{
    if(work.markfor == nil)
        work.markfor = runtime·parforalloc(MaxGcproc);

    // 非并发清理模式。
    while(runtime·sweepone() != -1)
        gcstats.npausesweep++;

    // 执行并行标记操作。
    work.nproc = runtime·gcprocs();
    runtime·parforsetup(work.markfor, work.nproc, RootCount + runtime·allglen,
                        nil, false, markroot);
```

```
    runtime·parfordo(work.markfor);

    // 因为清理过程由后台 goroutine 处理，只能先预估个值，现在分配空间的 2 倍。
    mstats.next_gc = mstats.heap_alloc+mstats.heap_alloc*gcpercent/100;

    // 设置 sweep 对象清理状态。
    runtime·mheap.sweepspans = runtime·mheap.allspans;
    runtime·mheap.sweepgen += 2; // 增加代龄计数。
    runtime·mheap.sweepdone = false;
    sweep.spans = runtime·mheap.allspans;
    sweep.nspan = runtime·mheap.nspan;
    sweep.spanidx = 0;

    // 如果是并发清理 (mgc0.c 头部定义的常量)，
    if(ConcurrentSweep && !args->eagersweep) {
        if(sweep.g == nil)
            // 如果是第一次，创建专用 goroutine 用于后台并发清理操作。
            sweep.g = runtime·newproc1(&bgsweepv, nil, 0, 0, runtime·gc);
        else if(sweep.parked) {
            // 唤醒 goroutine 清理垃圾。
            sweep.parked = false;
            runtime·ready(sweep.g);
        }
    } else {
        // 非并发模式，立即执行清理操作。
        while(runtime·sweepone() != -1)
            gcstats.npausesweep++;
    }

    // 收缩所有 goroutine 栈空间。
    for(i = 0; i < runtime·allglen; i++)
        runtime·shrinkstack(runtime·allg[i]);
}
```

用于垃圾的清理的 goroutine 被唤醒后会扫描 heap.allspans 列表，执行清理操作，完成后休眠直到再次被唤醒。

与常见固定 3 级代龄机制不同，Go 1.3 的代龄会逐步提升。为 span 引入代龄，可避免每次都扫描全部 span 内存块，减少操作时间。

mgc0.c

```
static FuncVal bgsweepv = {bgsweep};

static void bgsweep(void)
{
    for(;;) {
```

```
        // 清理垃圾。
        while(runtime·sweepone() != -1) {
            runtime·gosched();
        }

        // 如果期间再次触发过 gc，那就继续清理。
        if(!runtime·mheap.sweepdone) {
            continue;
        }

        // 全部搞定，那就暂停该 goroutine。
        sweep.parked = true;
        runtime·parkunlock(&gclock, "GC sweep wait");
    }
}

uintptr runtime·sweepone(void)
{
    // 当前代龄。
    sg = runtime·mheap.sweepgen;

    // 循环处理所有 span。
    for(;;) {
        idx = runtime·xadd(&sweep.spanidx, 1) - 1;

        // 跳出循环，标记结束。
        if(idx >= sweep.nspan) {
            runtime·mheap.sweepdone = true;
            return -1;
        }

        s = sweep.spans[idx];

        // 如果该 span 未被使用，提升代龄。
        if(s->state != MSpanInUse) {
            s->sweepgen = sg;
            continue;
        }

        // 检查 span 代龄，避免过于频繁的扫描。
        // if sweepgen == h->sweepgen - 2, the span needs sweeping
        // if sweepgen == h->sweepgen - 1, the span is currently being swept
        // if sweepgen == h->sweepgen, the span is swept and ready to use
        // h->sweepgen is incremented by 2 after every GC
        if(s->sweepgen != sg-2 || !runtime·cas(&s->sweepgen, sg-2, sg-1))
            continue;

        // 清理 span，返回页数。
```

```
        npages = s->npages;
        if(!runtime·MSpan_Sweep(s))
            npages = 0;

        return npages;
    }
}
```

清理 span 的操作，实际就是调用内存分配器的回收过程。

mgc0.c

```
bool runtime·MSpan_Sweep(MSpan *s)
{
    MLink head, *end;

    cl = s->sizeclass;
    size = s->elemsize;
    end = &head;

    p = (byte*)(s->start << PageShift);

    // 循环处理该 span 上所有 object 块。
    for(; n > 0; n--, p += size, type_data+=type_data_inc) {
        // 检查该 object 在 bitmap 里的标记位，以确定是否可回收。
        off = (uintptr*)p - (uintptr*)arena_start;
        bitp = (uintptr*)arena_start - off/wordsPerBitmapWord - 1;
        shift = off % wordsPerBitmapWord;
        bits = *bitp>>shift;

        if((bits & bitAllocated) == 0)
            continue;

        if((bits & bitMarked) != 0) {
            *bitp &= ~(bitMarked<<shift);
            continue;
        }

        // 根据 size class 分别处理。
        if(cl == 0) {
            // 大对象还给 heap，调整 next_gc 阈值。
            runtime·MHeap_Free(&runtime·mheap, s, 1);
            runtime·xadd64(&mstats.next_gc, -(uint64)(size * (gcpercent + 100)/100));
            res = true;
        } else {
            // 将可回收的 small object 添加到一个链表。
            end->next = (MLink*)p;
            end = (MLink*)p;
```

```
            nfree++;
        }
    }

    if(nfree > 0) {
        // 调整 next_gc 阈值。
        runtime·xadd64(&mstats.next_gc,
                       -(uint64)(nfree * size * (gcpercent + 100)/100));

        // 清理可回收链表。
        res = runtime·MCentral_FreeSpan(&runtime·mheap.central[cl], s, nfree,
                                        head.next, end);
    }

    return res;
}
```

mcentral.c

```
bool runtime·MCentral_FreeSpan(MCentral *c, MSpan *s, int32 n, MLink *start, MLink *end)
{
    // 将该 span 转移到 central.noempty 链表。
    if(s->freelist == nil) {
        runtime·MSpanList_Remove(s);
        runtime·MSpanList_Insert(&c->nonempty, s);
    }

    // 直接将回收链表合并到 span.freelist。
    end->next = s->freelist;
    s->freelist = start;
    s->ref -= n;
    c->nfree += n;

    // 如果还有 object 在使用，那么到此结束。
    if(s->ref != 0) {
        return false;
    }

    // 如果已收回全部 object，将其归还给 heap。
    MCentral_ReturnToHeap(c, s); // unlocks c
    return true;
}
```

本节忽略了标记算法细节，有兴趣的可以自行查阅源码。

2.2 内存释放

在进程入口，运行时专门启动一个 goroutine 进行强制垃圾回收和物理内存释放。

proc.c

```
void runtime·main(void)
{
    runtime·newproc1(&scavenger, nil, 0, 0, runtime·main);
}

static FuncVal scavenger = {runtime·MHeap_Scavenger};
```

这个 goroutine 会一直循环运行，定时执行相关操作。

mheap.c

```
void runtime·MHeap_Scavenger(void)
{
    // 1: 如果超过 2 分钟没有做过垃圾回收，强制执行。
    forcegc = 2*60*1e9;

    // 2: 如果某 span 闲置超过 5 分钟，那么将其内存还给操作系统。
    limit = 5*60*1e9;

    // 计算循环间隔，显然是 1 分钟。
    if(forcegc < limit)
        tick = forcegc/2;
    else
        tick = limit/2;

    h = &runtime·mheap;
    for(k=0;; k++) {
        // 暂停 1 分钟。
        runtime·notetsleepg(&note, tick);
        now = runtime·nanotime();

        // 检查距离上次垃圾回收是否已超过 2 分钟。
        if(now - mstats.last_gc > forcegc) {
            // 新建 goroutine，开始强制回收。
            runtime·newproc1(&forcegchelperv, (byte*)&notep, sizeof(notep), 0,
                             runtime·MHeap_Scavenger);
            now = runtime·nanotime();
        }

        // 检查闲置 span，归还内存。
        scavenge(k, now, limit);
    }
```

```
}
```

假设本次回收后已分配内存是 1GB，那么 next_gc 阈值就是 2GB，可能导致很长时间无法触发垃圾回收，这显然是个很大的负担。所以，定期执行强制回收是非常有必要的。

mheap.c

```
static FuncVal forcegchelperv = {(void(*)(void))forcegchelper};

static void forcegchelper(Note *note)
{
    runtime·gc(1);
}
```

回收操作上节已经分析过，我们回到物理内存释放操作上来。

mheap.c

```
static void scavenge(int32 k, uint64 now, uint64 limit)
{
    h = &runtime·mheap;

    // 遍历 heap.free 和 freelarge 链表。
    for(i=0; i < nelem(h->free); i++)
        sumreleased += scavengelist(&h->free[i], now, limit);
    sumreleased += scavengelist(&h->freelarge, now, limit);
}

static uintptr scavengelist(MSpan *list, uint64 now, uint64 limit)
{
    // 遍历链表里的所有 span。
    for(s=list->next; s != list; s=s->next) {
        // 如果该 span 闲置时间超过 5 分钟，而且内存未被释放过。
        if((now - s->unusedsince) > limit && s->npreleased != s->npages) {
            // 标记 span 释放的页数。
            s->npreleased = s->npages;
            // 释放 span 所管理的内存。
            runtime·SysUnused((void*)(s->start << PageShift), s->npages << PageShift);
        }
    }
}
```

遍历 heap 所有可分配的 span 链表，然后依次检查 span 是否闲置过久，是否已经释放过。如果可以，就建议操作系统收回其管理的内存。

mem_linux.c

```
void runtime·SysUnused(void *v, uintptr n)
{
    runtime·madvise(v, n, MADV_DONTNEED);
}
```

mem_windows.c

```
void runtime·SysUnused(void *v, uintptr n)
{
    r = runtime·stdcall(runtime·VirtualFree, 3, v, n, (uintptr)MEM_DECOMMIT);
}
```

对 Linux 而言，MADV_DONTNEED 实际就是告诉操作系统，这段物理内存暂时不用，可解除映射。但对应的虚拟内存并未释放，下次使用时，由操作系统再次建立物理内存映射。

不过 Windows 有些差别，释放后必须在重新分配。当用 MHeap_AllocLocked 函数从 heap 获取 span 时，会检查 npreleased 释放标记，以便重新分配内存。

mheap.c

```
static MSpan* MHeap_AllocLocked(MHeap *h, uintptr npage, int32 sizeclass)
{
    if(s->npreleased > 0)
        runtime·SysUsed((void*)(s->start<<PageShift), s->npages<<PageShift);
}
```

mem_windows.c

```
void runtime·SysUsed(void *v, uintptr n)
{
    r = runtime·stdcall(runtime·VirtualAlloc, 4, v, n, (uintptr)MEM_COMMIT,
                        (uintptr)PAGE_READWRITE);
}
```

mem_linux.c

```
void runtime·SysUsed(void *v, uintptr n)
{
    USED(v);
    USED(n);
}
```

除了后台自动回收，我们也可以手工调用 debug/FreeOSMemory 来释放物理内存。

mheap.c

```
void runtime/debug·freeOSMemory(void)
```

```
{
    runtime·gc(1);
    runtime·lock(&runtime·mheap);
    scavenge(-1, ~(uintptr)0, 0);     // scavenge(-1, 18446744073709551615, 0)
    runtime·unlock(&runtime·mheap);
}
```

2.3 状态输出

使用环境变量 GODEBUG="gotrace=1" 可输出 GC 相关状态信息，这有助于对程序运行状态进行监控，是常见的一种测试手段。

先了解有关的状态对象 (使用 runtime.ReadMemStats 函数可读取该信息)。

malloc.h

```
struct MStats
{
    // General statistics.
    uint64  alloc;            // 当前正在使用 object 容量。
    uint64  total_alloc;      // 历史分配总量 (包括已被释放的内存)。
    uint64  sys;              // 当前消耗的所有内存总量。
    uint64  nmalloc;          // 分配操作总次数。
    uint64  nfree;            // 释放操作总次数。

    // Statistics about malloc heap.
    uint64  heap_alloc;       // 正在使用的 object 容量。
    uint64  heap_sys;         // 当前分配的虚拟内存总量 (mmap-munmap)。
    uint64  heap_idle;        // 空闲 spans 容量。
    uint64  heap_inuse;       // 正在使用的 spans 容量。
    uint64  heap_released;    // 归还给 OS 的内存容量。
    uint64  heap_objects;     // 当前正在使用的 object 数量。

    // Statistics about garbage collector.
    uint64  next_gc;          // 下次回收阈值。
    uint64  last_gc;          // 上次回收时间。
    uint32  numgc;            // 回收次数。
};
```

在执行垃圾回收操作时，相关统计数据被更新。

mgc0.c

```
void runtime·updatememstats(GCStats *stats)
{
```

```
// 统计 stack、cache、span 等。
mstats.stacks_inuse = stacks_inuse;
mstats.mcache_inuse = runtime·mheap.cachealloc.inuse;
mstats.mspan_inuse = runtime·mheap.spanalloc.inuse;

// 所有内存开销总和。
mstats.sys = mstats.heap_sys + mstats.stacks_sys + mstats.mspan_sys +
    mstats.mcache_sys + mstats.buckhash_sys + mstats.gc_sys + mstats.other_sys;

// 状态清零。
mstats.alloc = 0;
mstats.total_alloc = 0;
mstats.nmalloc = 0;
mstats.nfree = 0;
for(i = 0; i < nelem(mstats.by_size); i++) {
    mstats.by_size[i].nmalloc = 0;
    mstats.by_size[i].nfree = 0;
}

// 将 cache 闲置 object 交还给 central。
flushallmcaches();

// 更新 cache 状态。
cachestats();

// 扫描所有 span，统计正在使用 object 信息。
for(i = 0; i < runtime·mheap.nspan; i++) {
    s = runtime·mheap.allspans[i];
    if(s->state != MSpanInUse)
        continue;

    if(s->sizeclass == 0) { // 大对象
        mstats.nmalloc++;
        mstats.alloc += s->elemsize;
    } else {
        mstats.nmalloc += s->ref;
        mstats.by_size[s->sizeclass].nmalloc += s->ref;
        mstats.alloc += s->ref*s->elemsize;
    }
}

// 按等级分类统计。
smallfree = 0;
mstats.nfree = runtime·mheap.nlargefree;
for(i = 0; i < nelem(mstats.by_size); i++) {
    mstats.nfree += runtime·mheap.nsmallfree[i];
    mstats.by_size[i].nfree = runtime·mheap.nsmallfree[i];
    mstats.by_size[i].nmalloc += runtime·mheap.nsmallfree[i];
```

```
        smallfree += runtime·mheap.nsmallfree[i] * runtime·class_to_size[i];
    }

    // nfree = 大对象总释放次数 + 各等级小对象释放次数总和
    // nmalloc = 正在使用 object 数量 + 总释放次数
    mstats.nmalloc += mstats.nfree;

    // 累计分配容量 = 正在使用 object 容量 + 大对象释放容量 + 各类小对象释放容量，历史数据总和。
    mstats.total_alloc = mstats.alloc + runtime·mheap.largefree + smallfree;

    // 当前正在使用 object 容量。
    mstats.heap_alloc = mstats.alloc;

    // 当前正在使用 object 数量。
    mstats.heap_objects = mstats.nmalloc - mstats.nfree;
}
```

要监控的第一种信息来自垃圾回收函数。

mgc0.c

```
static void gc(struct gc_args *args)
{
    t0 = args->start_time;

    // 从 stoptheworld 开始的各种准备时间 ...

    t1 = runtime·nanotime();

    // 非并发模式清理。
    // 准备并行标记设置。

    t2 = runtime·nanotime();

    // 并行标记。

    t3 = runtime·nanotime();

    // 等待并行任务结束 ...
    // 更新全部 cache 状态。
    // 预估 next_gc。

    heap0 = mstats.next_gc*100/(gcpercent+100);
    mstats.next_gc = mstats.heap_alloc+mstats.heap_alloc*gcpercent/100;

    t4 = runtime·nanotime();

    mstats.last_gc = t4;
```

```
    mstats.numgc++;

    if(runtime·debug.gctrace) {
        heap1 = mstats.heap_alloc;
        runtime·updatememstats(&stats);

        obj = mstats.nmalloc - mstats.nfree;

        runtime·printf("gc%d(%d): %D+%D+%D+%D us, %D -> %D MB, %D (%D-%D) objects, ...
            mstats.numgc,           // 0: GC 执行次数。
            work.nproc,             // 1: 并行 GC goroutine 数量。
            (t1-t0)/1000,           // 2: 包含 stoptheworld 在内的准备时间。
            (t2-t1)/1000,           // 3: 非并发模式垃圾清理，准备并行标记所耗时间。
            (t3-t2)/1000,           // 4: 并行标记所耗时间。
            (t4-t3)/1000,           // 5: 等待结束，更新状态统计等所耗时间。
            heap0>>20,              // 6: 回收前正在使用的 object 内存容量。
            heap1>>20,              // 7: 回收后正在使用的 object 内存容量。
            obj,                    // 8: 回收后正在使用的 object 数量。
            mstats.nmalloc,         // 9: 总计 object 分配次数。
            mstats.nfree,           // A: 总计 object 释放次数。
            sweep.nspan,            // B: 清理需要扫描的 span 数量。
            gcstats.nbgsweep,       // C: 并发模式清理 span 数量。
            gcstats.npausesweep,    // D: 暂停模式清理 span 数量 (非并发模式)。
            ...);
    }
}
```

```
          +- 2: 包含 stoptheworld 在内的准备时间。
          |  +- 3: 非并发模式垃圾清理，准备并行标记所耗时间。
          |  |  +- 4: 并行标记所耗时间。
          |  |  |   +- 5: 等待标记结束，更新状态等所耗时间。
          |  |  |   |
          |  |  |   |                      +- 8: 回收后正在使用的 object 数量。
          |  |  |   |                      |    +- 9: 总计 object 分配次数。
          |  |  |   |                      |    |   +- A: 总计 object 释放次数。
          |  |  |   |                      |    |   |
gc3(1): 3+1+187+0 us, 0 -> 0 MB, 46 (52-6) objects, 21/0/0 sweeps, ...
  |  |                    |      |                              |   | |
  |  |                    |      |                              |   | +- D: 暂停模式清理 Span 数量 (非并发模式)。
  |  |                    |      |                              |   +- C: 并发模式清理 Span 数量。
  |  |                    |      |                              +- B: 清理需要扫描的 span 数量。
  |  |                    |      |
  |  |                    |      +- 7: 回收后正在使用的 object 内存容量。
  |  |                    +- 6: 回收前正在使用的 object 内存容量。
  |  |
  |  +- 1: 并行镖行 goroutine 数量。
  +- 0: GC 执行次数。
```

因 1.3 使用了并发清理模式，因此输出的统计信息并不准确，比如回收前后正在使用的 object 容量、数量等。只能通过多次输出结果进行大概评估。

第二种信息则来自物理内存释放函数。

mheap.c

```
static void scavenge(int32 k, uint64 now, uint64 limit)
```

```
{
    if(runtime·debug.gctrace > 0) {
        if(sumreleased > 0)
            runtime·printf("scvg%d: %D MB released\n", k, (uint64)sumreleased>>20);

        runtime·printf("scvg%d: inuse: %D, idle: %D, sys: %D, released: %D, ...",
            k,                                              // 0: 执行次数。
            mstats.heap_inuse>>20,                          // 1: 正在被使用的 spans 容量。
            mstats.heap_idle>>20,                           // 2: 所有闲置 spans 的容量。
            mstats.heap_sys>>20,                            // 3: 已分配虚拟内存总量。
            mstats.heap_released>>20,                       // 4: 已释放物理内存总量。
            (mstats.heap_sys - mstats.heap_released)>>20);  // 5: 当前实际消耗内存。
    }
}
```

```
    +- 0: 执行次数.
    |                       +- 2: 所有空闲 span 内存容量。
    |                       |                           +- 4: 已释放物理内存总量。
    |                       |                           |
scvg6: inuse: 32, idle: 8, sys: 41, released: 0, consumed: 41 (MB)
               |                     |                                |
               |                     |                                +- 5: 实际消耗的内存 = sys - released
               |                     +- 3: 已分配虚拟内存总量。
               |
               +- 1: 正在使用的 span 内存容量（整个 span 容量，而不仅仅是正在使用的 object）。
```

关于物理内存释放总数统计，需要说明一下。在 scavengelist 函数，span 所释放内存被累加到 mstats.heap_released。但该内存会在下次使用时被重新分配，因此需要调整。

mheap.c

```
static uintptr scavengelist(MSpan *list, uint64 now, uint64 limit)
{
    sumreleased = 0;
    for(s=list->next; s != list; s=s->next) {
        if((now - s->unusedsince) > limit && s->npreleased != s->npages) {
            // 统计要释放的容量。
            released = (s->npages - s->npreleased) << PageShift;

            // 累加到释放总数。
            mstats.heap_released += released;

            sumreleased += released;
            s->npreleased = s->npages;
            runtime·SysUnused((void*)(s->start << PageShift), s->npages << PageShift);
        }
    }
    return sumreleased;
}

static MSpan* MHeap_AllocLocked(MHeap *h, uintptr npage, int32 sizeclass)
{
```

```
    // 减去重新分配的内存。如果该 span 没有释放过，其 npreleased == 0.
    mstats.heap_released -= s->npreleased<<PageShift;

    // 重新分配内存。
    if(s->npreleased > 0)
        runtime·SysUsed((void*)(s->start<<PageShift), s->npages<<PageShift);

    // 重置释放标记。
    s->npreleased = 0;
}
```

3. Goroutine Scheduler

调度器是运行时最核心的内容，要搞清工作原理，首先得知道 3 个基本抽象概念：

- **G**: goroutine 对象。每个 go 语句都会创建一个 G 对象。
- **P**: 抽象处理器。如同线程和 CPU 核的关系，执行 G 的前提是要获得一个 P。
- **M**: 系统线程。G 任务函数最终还是要由线程执行。

原理并不复杂，类似协程实现。通过自定义栈保存执行现场，从而将执行状态和执行线程分离。基于 multiplexed thread，在单个线程上切换执行多个并发任务。

相比线程，G 默认栈只有 4KB，按需扩张或收缩。这种轻量级设计开销极小，加上并发调度，避免了线程阻塞带来的损耗，轻松创建成千上万的并发任务。

当 M 执行 G 任务时，只需将相关寄存器 (SP) 指向 G 自带执行栈，然后 JMP 到任务函数即可。同样，在中途停止任务时，也只须将寄存器值写回 G 相关字段，任何 M 都可据此恢复并完成后续工作。

每个准备工作的 M 都必须绑定一个 P，以获得执行所需的资源环境。

- P 的数量限制了并发任务数量；
- 资源由 P 提供，如此无需为休眠的 M 提供资源设置。
- 数量众多的 G 任务分散到多个 P 队列，减少全局锁排队。

通常，P 的数量是 "固定" 的 (默认 1，最多 256)，但 M 则不确定。例如某个 M 被系统调用长时间阻塞，其关联的 P 会被收回，调度器会唤醒或创建新的 M 去执行其他排队任务。失去 P 的 M 则进入休眠状态，直到被调度器重新唤醒。

3.1 初始化

在 proc.c 注释里提到了 bootstrap 过程，其实际代码由汇编实现。

amd_asm64.s

```
TEXT _rt0_go(SB),NOSPLIT,$0
    // ... 准备操作 ...

    MOVL    16(SP), AX      // copy argc
```

```
    MOVL    AX, 0(SP)
    MOVQ    24(SP), AX      // copy argv
    MOVQ    AX, 8(SP)
    CALL    runtime·args(SB)
    CALL    runtime·osinit(SB)
    CALL    runtime·hashinit(SB)
    CALL    runtime·schedinit(SB)

    // create a new goroutine to start program
    PUSHQ   $runtime·main·f(SB)     // entry
    PUSHQ   $0                      // arg size
    ARGSIZE(16)
    CALL    runtime·newproc(SB)
    ARGSIZE(-1)
    POPQ    AX
    POPQ    AX

    // start this M
    CALL    runtime·mstart(SB)

    MOVL    $0xf1, 0xf1  // crash
    RET
```

看看调度器和几个相关的全局变量。

proc.c

```
struct Sched {
    M*      midle;        // idle m's waiting for work
    int32   nmidle;       // number of idle m's waiting for work
    int32   nmidlelocked; // number of locked m's waiting for work
    int32   mcount;       // number of m's that have been created
    int32   maxmcount;    // maximum number of m's allowed (or die)

    P*      pidle;        // 空闲 P 链表。
    uint32  npidle;

    // 待运行 G 全局链表
    G*      runqhead;
    G*      runqtail;
    int32   runqsize;

    // 可复用 G 对象链表
    G*      gfree;
};

Sched   runtime·sched;        // 调度器唯一实例。
int32   runtime·gomaxprocs;   // GOMAXPROCS
```

```
M    runtime·m0;
G    runtime·g0;               // idle goroutine for m0
M*   runtime·allm;
G**  runtime·allg;
```

调度器的初始化过程并不复杂，调用相关部件的初始化方法，初始化环境和全局参数，而其中最需要关注的就是 P。

proc.c

```
// The bootstrap sequence is:
//
//  call osinit
//  call schedinit
//  make & queue new G
//  call runtime·mstart
//
// The new G calls runtime·main.
void runtime·schedinit(void)
{
    // 最大线程数量限制。
    runtime·sched.maxmcount = 10000;

    // 符号表初始化。
    runtime·symtabinit();

    // 内存分配器初始化。
    runtime·mallocinit();

    // 初始化当前 M。
    mcommoninit(m);

    // 相关参数。
    runtime·goargs();
    runtime·goenvs();
    runtime·parsedebugvars();
    runtime·sched.lastpoll = runtime·nanotime();

    // 设置 GOMAXPROCS，默认值 1，最大值 256。
    procs = 1;
    p = runtime·getenv("GOMAXPROCS");
    if(p != nil && (n = runtime·atoi(p)) > 0) {
        if(n > MaxGomaxprocs)
            n = MaxGomaxprocs;
        procs = n;
    }
```

```
    // 初始化 P。
    runtime·allp = runtime·malloc((MaxGomaxprocs+1)*sizeof(runtime·allp[0]));
    procresize(procs);
}
```

为全局 P 指针数组分配内存 (一次性分配了 256 个指针)，然后按 GOMAXPROCS 数量初始化 P 实例。

runtime.h

```
struct P
{
    uint32  status;       // one of Pidle/Prunning/...
    P*      link;
    M*      m;            // back-link to associated M (nil if idle)
    MCache* mcache;

    // 待运行 G 队列 (循环数组)
    uint32  runqhead;
    uint32  runqtail;
    G*      runq[256];

    // 可复用 G 对象链表 (status == Gdead)
    G*      gfree;
    int32   gfreecnt;
};
```

调整 P 的数量，需要将现有 P 本地任务队列进行转移，然后再平均给新建的 P 对象。

proc.c

```
static void procresize(int32 new)
{
    old = runtime·gomaxprocs;

    // 不能超出 256.
    if(old < 0 || old > MaxGomaxprocs || new <= 0 || new >MaxGomaxprocs)
        runtime·throw("procresize: invalid arg");

    // 创建并初始化所需的 P。
    for(i = 0; i < new; i++) {
        p = runtime·allp[i];
        if(p == nil) {
            p = (P*)runtime·mallocgc(sizeof(*p), 0, FlagNoInvokeGC);
            p->id = i;
            p->status = Pgcstop;
            runtime·atomicstorep(&runtime·allp[i], p);
        }
```

```
    // 为 P 设置 MCache。
    if(p->mcache == nil) {
        if(old==0 && i==0)
            p->mcache = m->mcache;  // bootstrap
        else
            p->mcache = runtime·allocmcache();
    }
}

// 由于 P 数量调整，需重新分布 P 里面的 G 队列。
empty = false;
while(!empty) {
    empty = true;

    // 内层 for 循环遍历所有 old P，依次从每个 P 里提取一个 G 放到全局队列。
    // 然后通过外层 while 循环多次调用 for 循环，确保所有 G 都被转移到全局队列。
    // 这么做的目的还是希望各 P 里面先创建的 G 会优先进入全局队列，以更早被执行。
    for(i = 0; i < old; i++) {
        p = runtime·allp[i];

        // 链表为空。
        if(p->runqhead == p->runqtail)
            continue;

        empty = false;

        // 从 P 队列尾部提取 G。
        p->runqtail--;
        gp = p->runq[p->runqtail%nelem(p->runq)];

        // 放到全局 G 队列 (链表)。
        gp->schedlink = runtime·sched.runqhead;
        runtime·sched.runqhead = gp;
        if(runtime·sched.runqtail == nil)
            runtime·sched.runqtail = gp;
        runtime·sched.runqsize++;
    }
}

// 将全局队列中的 "部分" G 重新分布到 P 本地队列中。
// 每个 P 队列里最多填充一半。
for(i = 1; i < new * nelem(p->runq)/2 && runtime·sched.runqsize > 0; i++) {
    gp = runtime·sched.runqhead;
    runtime·sched.runqhead = gp->schedlink;
    if(runtime·sched.runqhead == nil)
        runtime·sched.runqtail = nil;
    runtime·sched.runqsize--;
```

```
        runqput(runtime·allp[i%new], gp);
    }

    // 如果 new P 数量少于 old，"释放" 多余的 P 对象。
    for(i = new; i < old; i++) {
        p = runtime·allp[i];
        runtime·freemcache(p->mcache);
        p->mcache = nil;
        gfpurge(p); // 将 P 持有的可复用 G 对象转移到全局链表。
        p->status = Pdead;
        // can't free P itself because it can be referenced by an M in syscall
    }

    // 为当前 M 关联 P。
    p = runtime·allp[0];
    acquirep(p);

    // 将全部 P 放到空闲链表 (allp[0] 已被使用)。
    for(i = new-1; i > 0; i--) {
        p = runtime·allp[i];
        p->status = Pidle;
        pidleput(p);
    }
}
```

G 结构很复杂，涉及到栈、抢占调用等很多参数，后面会详细说明。

runtime.h

```
struct G
{
    G*  schedlink;
};
```

在完成调度器初始化后，bootstrap 创建 main goroutine 运行 runtime·main。

proc.c

```
// The main goroutine.
void runtime·main(void)
{
    // 栈大小限制。
    if(sizeof(void*) == 8)
        runtime·maxstacksize = 1000000000;
    else
        runtime·maxstacksize = 250000000;

    // 使用独立线程执行系统监控。
```

```
    newm(sysmon, nil);

    // 创建 goroutine 运行垃圾回收器定时操作。
    runtime·newproc1(&scavenger, nil, 0, 0, runtime·main);

    // 执行用户代码的 init 和 main 函数。
    main·init();
    main·main();

    // 进程结束。
    runtime·exit(0);
}
```

3.2 创建任务

编译器将每个 go 语句编译成 newproc1 函数调用，创建 G 对象。

proc.c

```
G* runtime·newproc1(FuncVal *fn, byte *argp, int32 narg, int32 nret, void *callerpc)
{
    byte *sp;
    G *newg;
    P *p;

    // 从当前 P 获取可复用的 G 对象。
    p = m->p;
    if((newg = gfget(p)) != nil) {
        // ...
    } else {
        // 新建 G 对象。
        newg = runtime·malg(StackMin);

        // 全局变量 allg 保存所有 G 对象指针。
        allgadd(newg);
    }

    // 函数参数入栈。
    sp = (byte*)newg->stackbase;
    sp -= siz;
    runtime·memmove(sp, argp, narg);

    // sched 用于保存执行现场，比如寄存器值。
    runtime·memclr((byte*)&newg->sched, sizeof newg->sched);
    newg->sched.sp = (uintptr)sp;
    newg->sched.pc = (uintptr)runtime·goexit;
```

```
    newg->sched.g = newg;
    runtime·gostartcallfn(&newg->sched, fn);

    // 设置 G 状态。
    newg->gopc = (uintptr)callerpc;
    newg->status = Grunnable;

    // 将 G 保存到 P 本地队列。
    // 如果本地队列已满，则放到全局队列。
    runqput(p, newg);

    // 尝试唤醒某个 M 开始执行任务。(有空闲 P，且没有处于自旋等待的 M)
    if(runtime·atomicload(&runtime·sched.npidle) != 0 &&
       runtime·atomicload(&runtime·sched.nmspinning) == 0 &&
       fn->fn != runtime·main)  // TODO: fast atomic
        wakep();

    return newg;
}

static void wakep(void)
{
    startm(nil, true);
}
```

调度器对 G 对象做了缓存复用处理。如果 P 本地可复用队列为空，则从全局队列提取一些到本地。实在没有的情况下，才会新建 G 对象。

proc.c

```
static G* gfget(P *p)
{
retry:
    // 本地可复用 G 队列。
    gp = p->gfree;

    // 如果本地队列为空，则从全局队列找。
    if(gp == nil && runtime·sched.gfree) {
        // 提取可复用 G 到本地队列 (本地队列最多有 32 个可复用对象)。
        while(p->gfreecnt < 32 && runtime·sched.gfree) {
            p->gfreecnt++;
            gp = runtime·sched.gfree;
            runtime·sched.gfree = gp->schedlink;
            gp->schedlink = p->gfree;
            p->gfree = gp;
        }

        goto retry;
```

```
    }

    // 从本地队列提取。
    if(gp) {
        p->gfree = gp->schedlink;
        p->gfreecnt--;

        // 初始化栈空间。
        if(gp->stack0 == 0) {
            // Stack was deallocated in gfput.  Allocate a new one.
        }
    }

    return gp;
}
```

G.sched 字段保存了执行现场所需的环境参数。

runtime.h

```
struct  G
{
    Gobuf   sched;
    uintptr gopc;   // 执行该 go 语句的函数指针。
};

struct  Gobuf
{
    uintptr sp;     // 相当于 SP 寄存器
    uintptr pc;     // 相当于 IP/PC 寄存器
    G*      g;
    void*   ctxt;
    uintreg ret;
    uintptr lr;
};
```

在 newproc1 初始化 G.sched 过程中，有个关键的 gostartcallfn 调用。

proc.c

```
void runtime·gostartcallfn(Gobuf *gobuf, FuncVal *fv)
{
    runtime·gostartcall(gobuf, fv->fn, fv);
}
```

sys_x86.c

```
void runtime·gostartcall(Gobuf *gobuf, void (*fn)(void), void *ctxt)
```

```
{
    sp = (uintptr*)gobuf->sp;

    // 在初始化时，pc 指向 runtime·goexit。
    // 将 runtime·goexit 地址入栈。
    *--sp = (uintptr)gobuf->pc;

    // 重新调整 sp 位置。
    gobuf->sp = (uintptr)sp;

    // 将 pc 从 runtime·goexit 改为实际要执行的 go 函数。
    gobuf->pc = (uintptr)fn;

    gobuf->ctxt = ctxt;
}
```

当 M 执行完 G 任务后，必须调用 goexit 清理现场。将 goexit 地址提前入栈，任务函数结束时，其 RET 指令会将该地址 POP 到 IP 寄存器，从而完成对 goexit 函数的调用。

注: 汇编 CALL 指令会将当前 IP 入栈，调用完成后再由 RET 指令 POP IP 恢复到调用位置。

3.3 执行任务

要执行 goroutine，必须创建或唤醒某个处于休眠状态的 M。

runtime.h

```
struct  M
{
    G*      g0;                 // 用于执行调度器指令。
    void    (*mstartfn)(void);  // 启动函数。
    G*      curg;               // 准备执行的 G 任务。
    P*      p;                  // 关联 P。
    P*      nextp;              // 关联 P 临时存放位置。
    Note    park;               // 休眠标记。
    MCache* mcache;             // 所关联 P.cache。
};
```

每个 M 都有个 g0 栈，用于执行调度器相关指令 (和 goroutine 函数执行栈分开)。

让 M 工作的前提是有闲置的 P 可用，P 的数量限制了同时并发 M 的数量。没有关联到 P 的 M 不会被销毁，而是进入休眠状态，等待下次被唤醒。

proc.c

```
static void startm(P *p, bool spinning)
{
    M *mp;
    void (*fn)(void);

    // 获取空闲 P。
    if(p == nil) {
        p = pidleget();
        if(p == nil) {
            return;
        }
    }

    // 从空闲 M 队列获取。
    mp = mget();
    if(mp == nil) {
        // 创建 M，注意 fn = nil。
        fn = nil;
        newm(fn, p);
        return;
    }

    // 关联 P。
    mp->nextp = p;

    // 唤醒休眠的 M。
    // 调度器调用 notesleep 让 M 休眠，notewakeup 唤醒。
    runtime·notewakeup(&mp->park);
}
```

M 是对系统线程的一种抽象，其最大数量和 P 没有对应关系。

proc.c

```
static void newm(void(*fn)(void), P *p)
{
    // 创建并初始化 M。
    mp = runtime·allocm(p);
    mp->nextp = p;
    mp->mstartfn = fn;

    // 创建线程。
    runtime·newosproc(mp, (byte*)mp->g0->stackbase);
}
```

初始化过程并不复杂，其中有个最大数量检查 (可用 runtime/debug.SetMaxThreads 修改)，超出会导致进程崩溃退出。

proc.c

```
M* runtime·allocm(P *p)
{
    mp = runtime·cnew(mtype);

    // 初始化。
    mcommoninit(mp);

    // 创建 g0 栈。
    if(runtime·iscgo || Solaris || Windows)
        mp->g0 = runtime·malg(-1);
    else
        mp->g0 = runtime·malg(8192);

    return mp;
}

static void mcommoninit(M *mp)
{
    mp->id = runtime·sched.mcount++;

    // 检查是否超出最大 M 数量限制。
    checkmcount();

    runtime·mpreinit(mp);

    // 将 M 添加到 allm 链表。
    mp->alllink = runtime·allm;
    runtime·atomicstorep(&runtime·allm, mp);
}

static void checkmcount(void)
{
    // 在 schedinit 函数中，maxmcount 默认值 10000。
    if(runtime·sched.mcount > runtime·sched.maxmcount) {
        runtime·printf("runtime: program exceeds %d-thread limit\n",
                       runtime·sched.maxmcount);
        runtime·throw("thread exhaustion");
    }
}
```

回到 M 执行上来，通过系统调用创建线程，执行函数 runtime·mstart。

os_linux.c

```
void runtime·newosproc(M *mp, void *stk)
{
    flags = CLONE_VM    /* share memory */
        | CLONE_FS      /* share cwd, etc */
        | CLONE_FILES   /* share fd table */
        | CLONE_SIGHAND /* share sig handler table */
        | CLONE_THREAD  /* revisit - okay for now */
        ;

    ret = runtime·clone(flags, stk, mp, mp->g0, runtime·mstart);
}
```

线程函数首先检查是否有 mstartfn，比如在 runtime·main 里 newm(sysmon, nil) 就是如此执行的。绑定 P 的相关环境后，正式进入调度器核心 schedule 循环。

proc.c

```
void runtime·mstart(void)
{
    // 如果提供了 startfn 函数，那么就先执行。
    if(m->mstartfn)
        m->mstartfn();

    if(m->helpgc) {
        m->helpgc = 0;
        stopm();
    } else if(m != &runtime·m0) {
        // 绑定 P。
        acquirep(m->nextp);
        m->nextp = nil;
    }

    // 调度函数，会一直循环。
    schedule();

    // TODO(brainman): This point is never reached, because scheduler
    // does not release os threads at the moment. But once this path
    // is enabled, we must remove our seh here.
}

static void acquirep(P *p)
{
    m->mcache = p->mcache;
    m->p = p;
    p->m = m;
    p->status = Prunning;
}
```

调度函数首先从相关队列提取待运行的 G。

proc.c

```
// One round of scheduler: find a runnable goroutine and execute it.
// Never returns.
static void schedule(void)
{
top:
    gp = nil;

    // 定期检查全局队列，以确保其中的 G 不会等待太长时间。
    tick = m->p->schedtick;
    if(tick - (((uint64)tick*0x4325c53fu)>>36)*61 == 0 && runtime·sched.runqsize > 0) {
        gp = globrunqget(m->p, 1); // 返回一个可用 G。
    }

    // 从本地队列提取。
    if(gp == nil) {
        gp = runqget(m->p);
    }

    // 从其他队列查找。
    if(gp == nil) {
        gp = findrunnable();  // blocks until work is available
    }

    // 如果 G 被锁定到某个 M，那么就将 G 连同 P 一起移交给它。
    if(gp->lockedm) {
        // Hands off own p to the locked m,
        // then blocks waiting for a new p.
        startlockedm(gp);
        goto top;
    }

    execute(gp);
}
```

官方文档所提及 work-stealing 算法，就在 findrunnable 函数里。该函数会尝试各种途径获取可用 G，直到休眠为止。

proc.c

```
static G* findrunnable(void)
{
top:
    // 本地队列
```

```
    gp = runqget(m->p);
    if(gp)
        return gp;

    // 全局队列
    if(runtime·sched.runqsize) {
        // 转移一批 G 到本地队列，并返回第一个。
        gp = globrunqget(m->p, 0);
        if(gp)
            return gp;
    }

    // poll network
    gp = runtime·netpoll(false);  // non-blocking
    if(gp) {
        injectglist(gp->schedlink);
        gp->status = Grunnable;
        return gp;
    }

    // 随机从其他某个 P 队列 "偷" 一半过来。
    for(i = 0; i < 2*runtime·gomaxprocs; i++) {
        p = runtime·allp[runtime·fastrand1()%runtime·gomaxprocs];
        if(p == m->p)
            gp = runqget(p);
        else
            gp = runqsteal(m->p, p);
        if(gp)
            return gp;
    }
stop:
    // 再次检查全局队列。
    if(runtime·sched.runqsize) {
        gp = globrunqget(m->p, 0);
        return gp;
    }

    // 如果还是没有 G 任务，释放 P。
    p = releasep();
    pidleput(p);

    // 看看能不能换个有任务的 P 继续工作。
    for(i = 0; i < runtime·gomaxprocs; i++) {
        p = runtime·allp[i];
        if(p && p->runqhead != p->runqtail) {
            p = pidleget();
            if(p) {
                acquirep(p);
```

```
                goto top;
            }
            break;
        }
    }

    // 看看有没有新的 network epoll 任务出现，不过还得关联到一个 P 才行。
    if(runtime·xchg64(&runtime·sched.lastpoll, 0) != 0) {
        gp = runtime·netpoll(true);  // block until new work is available
        runtime·atomicstore64(&runtime·sched.lastpoll, runtime·nanotime());
        if(gp) {
            p = pidleget();
            if(p) {
                acquirep(p);
                injectglist(gp->schedlink);
                gp->status = Grunnable;
                return gp;
            }
            injectglist(gp);
        }
    }

    // 什么任务都没有的话，进入休眠。
    // 注意线程虽然休眠，但线程执行绪依然存在，一旦被唤醒，会在此处继续执行。
    // 至于 P，无需担心，startm 函数总是拿到可用 P 后才会唤醒 M。
    stopm();
    goto top;
}
```

在准备好 G 后，开始执行 execute 函数。

proc.c

```
// Schedules gp to run on the current M.
// Never returns.
static void execute(G *gp)
{
    // 设置相关状态。
    gp->status = Grunning;
    gp->waitsince = 0;
    gp->preempt = false;
    gp->stackguard0 = gp->stackguard;
    m->p->schedtick++;
    m->curg = gp;
    gp->m = m;

    // 调用汇编代码，执行 goroutine。
    runtime·gogo(&gp->sched);
```

```
}
```

asm_amd64.s

```
// void gogo(Gobuf*)
// restore state from Gobuf; longjmp
TEXT runtime·gogo(SB), NOSPLIT, $0-8
    MOVQ    8(SP), BX           // gobuf
    MOVQ    gobuf_g(BX), DX
    MOVQ    0(DX), CX           // make sure g != nil
    get_tls(CX)
    MOVQ    DX, g(CX)
    MOVQ    gobuf_sp(BX), SP    // 从 G.sched.sp 恢复 SP 寄存器
    MOVQ    gobuf_ret(BX), AX
    MOVQ    gobuf_ctxt(BX), DX
    MOVQ    $0, gobuf_sp(BX)    // clear to help garbage collector
    MOVQ    $0, gobuf_ret(BX)
    MOVQ    $0, gobuf_ctxt(BX)
    MOVQ    gobuf_pc(BX), BX    // 将 G.sched.pc，也就是 goroutine 函数地址压入 BX。
    JMP     BX                  // 跳转到该函数，开始执行。
```

这段汇编指令并不复杂，核心就是从 G.sched 里面恢复执行现场。

注意，gogo 没有保存 execute 的现场，没有将 IP 入栈。前面我们已经提到过，G 预先将 goexit 地址入栈。因此，当 goroutine 函数执行完毕，其尾部的 RET 指令 POP IP，实际跳转到 goexit 函数。

proc.c

```
runtime·goexit(void)
{
    runtime·mcall(goexit0);
}

static void goexit0(G *gp)
{
    gp->status = Gdead;
    gp->m = nil;
    gp->lockedm = nil;
    gp->paniconfault = 0;
    m->curg = nil;
    m->lockedg = nil;
    m->locked = 0;

    // 释放栈空间，并将 G 放回本地可复用链表。
    runtime·unwindstack(gp, nil);
    gfput(m->p, gp);
```

```
    // 重新进入调度函数。
    schedule();
}

static void gfput(P *p, G *gp)
{
    // 保存到 P 本地可复用链表。
    gp->schedlink = p->gfree;
    p->gfree = gp;
    p->gfreecnt++;

    // 如果链表过长，就将多余部分转移到全局链表。
    if(p->gfreecnt >= 64) {
        while(p->gfreecnt >= 32) {
            p->gfreecnt--;
            gp = p->gfree;
            p->gfree = gp->schedlink;
            gp->schedlink = runtime·sched.gfree;
            runtime·sched.gfree = gp;
        }
    }
}
```

收尾工作包括处理栈空间，将 G 放到可复用链表。然后再次跳转到 schedule 函数，形成调度循环。

再看 M 休眠操作是如何实现的。

proc.c

```
static void stopm(void)
{
    // 将 M 放到闲置队列。
    mput(m);

    // 通过系统调用让 M 休眠。(线程暂停执行，但未被销毁，执行绪依然保留)
    runtime·notesleep(&m->park);

    // 被唤醒后，重置标记。(唤醒函数会修改该标记)
    runtime·noteclear(&m->park);

    // 关联 P，继续从休眠位置开始执行。(既然被唤醒，调度器必然为其准备好了 P 对象)
    acquirep(m->nextp);
    m->nextp = nil;
}
```

线程休眠基本上是通过用户空间的互斥方式实现。

lock_futex.c

```
void runtime·notesleep(Note *n)
{
    while(runtime·atomicload((uint32*)&n->key) == 0) {
        runtime·futexsleep((uint32*)&n->key, 0, -1);
    }
}
```

os_linux.c

```
void runtime·futexsleep(uint32 *addr, uint32 val, int64 ns)
{
    if(ns < 0) {
        runtime·futex(addr, FUTEX_WAIT, val, nil, nil, 0);
        return;
    }

    ts.tv_nsec = 0;
    ts.tv_sec = runtime·timediv(ns, 1000000000LL, (int32*)&ts.tv_nsec);
    runtime·futex(addr, FUTEX_WAIT, val, &ts, nil, 0);
}
```

函数 notesleep 传递的 ns 参数是 -1，在 futexsleep 里意味着永不超时。因此，在不唤醒的情况下，M 所对应的线程会一直沉睡。

调用 notewakeup 解除休眠，唤醒 M 继续执行。

lock_futex.c

```
void runtime·notewakeup(Note *n)
{
    // 修改标记位值。
    old = runtime·xchg((uint32*)&n->key, 1);

    // 解除 umtx_sleep 休眠。
    runtime·futexwakeup((uint32*)&n->key, 1);
}
```

os_linux.c

```
void runtime·futexwakeup(uint32 *addr, uint32 cnt)
{
    ret = runtime·futex(addr, FUTEX_WAKE, cnt, nil, nil, 0);
    if(ret >= 0) return;
}
```

另外，在 schedule 里还提到了 lockedm，这是一种很特别的情况，它表示当前 G 只能由特定的 M 执行。

proc.c

```
static void startlockedm(G *gp)
{
    // G 锁定的目标 M。
    mp = gp->lockedm;

    // 解除当前 M 的 P 绑定。
    p = releasep();

    // 将 P 移交给目标 M，并唤醒。
    mp->nextp = p;
    runtime·notewakeup(&mp->park);

    // 当前 M 开始休眠。
    stopm();
}
```

3.4 连续栈

在 1.3 里，默认采用连续栈，但保留了分段栈算法，可用环境变量切换。

runtime.h

```
struct  G
{
    uintptr stackguard;     // 执行栈顶。
    uintptr stackguard0;    // 与 stackguard 相同，通常用于设置 StackPreempt 抢占标记。
    uintptr stackbase;      // 执行栈底。
    uintptr stack0;         // 所分配栈起始位置。
    uintptr stacksize;      // 栈大小（包括所有分段）。
};
```

栈结构依然是分段栈模式，只是连续栈在需要时会分配更大空间，拷贝所有数据。

```
 stack0             stackguard (stackguard0)                        stackbase
+---------------+-----------------------------------------+----------------+
|  SYSTEM       |  STACK                                  |  TOP           |
+---------------+-----------------------------------------+----------------+
                                                  <-- SP
```

在创建 G 对象时，为其分配栈空间，默认大小 4096。

proc.c

```
G* runtime·newproc1(FuncVal *fn, byte *argp, int32 narg, int32 nret, void *callerpc)
{
    if((newg = gfget(p)) != nil) {
        ...
    } else {
        newg = runtime·malg(StackMin);  // 默认大小 4096。
        allgadd(newg);
    }

    ...

    return newg;
}

G* runtime·malg(int32 stacksize)
{
    newg = runtime·malloc(sizeof(G));

    if(stacksize >= 0) {
        stacksize = runtime·round2(StackSystem + stacksize);
        if(g == m->g0) {
            stk = runtime·stackalloc(newg, stacksize);
        } else {
            newg->stacksize = stacksize;
            g->param = newg;
            runtime·mcall(mstackalloc);
            stk = g->param;
            g->param = nil;
        }

        // 设置栈相关参数。
        newg->stack0 = (uintptr)stk;
        newg->stackguard = (uintptr)stk + StackGuard;
        newg->stackguard0 = newg->stackguard;
        newg->stackbase = (uintptr)stk + stacksize - sizeof(Stktop);
    }

    return newg;
}
```

系统为默认固定大小的栈提供了缓存策略，所需内存直接从 mmap 分配而非 heap。这也容易理解，这些缓存对象生命周期持续到进程结束，完全没必要和 GC 打交道。

栈缓存由 M 管理，在创建 G 的时候分配给它。

runtime.h

```
struct  M
{
    int32   stackinuse;                 // 已使用数量
    uint32  stackcachepos;              // 可用索引序号
    uint32  stackcachecnt;              // 可用数量
    void*   stackcache[StackCacheSize];  // 缓存数组
};
```

stack.c

```
void* runtime·stackalloc(G *gp, uint32 n)
{
    // 累加栈分配空间计数。
    gp->stacksize += n;

    malloced = true;

    // 缓存固定大小的栈空间。
    if(n == FixedStack || m->mallocing) {
        // 如果缓存为空，那么从全局缓存提取或重新分配。
        if(m->stackcachecnt == 0)
            stackcacherefill();

        // 从本地缓存数组中获取栈空间。
        pos = m->stackcachepos;
        pos = (pos - 1) % StackCacheSize;
        v = m->stackcache[pos];
        m->stackcachepos = pos;
        m->stackcachecnt--;
        m->stackinuse++;

        // malloced 标记用于用于判断缓存和分配。
        malloced = false;
    } else
        // 从 gc heap 单独分配空间。
        v = runtime·mallocgc(n, 0, FlagNoProfiling|FlagNoGC|FlagNoZero|FlagNoInvokeGC);

    // 重置 TOP 区域。
    top = (Stktop*)((byte*)v+n-sizeof(Stktop));
    runtime·memclr((byte*)top, sizeof(*top));

    top->malloced = malloced;
    return v;
}

static void stackcacherefill(void)
```

```
{
    n = (StackCacheNode*)runtime·SysAlloc(FixedStack*StackCacheBatch, ...);
}
```

在函数头部，编译器都会插入 morestack 调用，用于检查是否需要扩张栈空间。

asm_amd64.s

```
TEXT runtime·morestack(SB),NOSPLIT,$0-0
      // Call newstack on m->g0's stack.
      MOVQ   m_g0(BX), BP
      MOVQ   BP, g(CX)
      MOVQ   (g_sched+gobuf_sp)(BP), SP
      CALL   runtime·newstack(SB)
      MOVQ   $0, 0x1003   // crash if newstack returns
      RET
```

在有些臃肿的 newstack 函数里，我们可以同时看到连续栈和分段栈算法。

stack.c

```
void runtime·newstack(void)
{
    // gp->status is usually Grunning, but it could be Gsyscall if a stack overflow
    // happens during a function call inside entersyscall.

    // 保存当前状态，用于恢复。
    gp = m->curg;
    oldstatus = gp->status;

    framesize = m->moreframesize;
    argsize = m->moreargsize;

    gp->status = Gwaiting;
    gp->waitreason = "stack growth";

    // 抢占式调度。
    if(gp->stackguard0 == (uintptr)StackPreempt) {
        runtime·gosched0(gp);   // never return
    }

    /* --- 连续栈 ------------------------------------------------- */

    // 由 GOCOPYSTACK 控制，默认 true (proc.c runtime·schedinit)。
    if(runtime·copystack) {
        nframes = copyabletopsegment(gp);
        if(nframes != -1) {
            // 计算当前栈大小。
```

```
        oldstk = (byte*)gp->stackguard - StackGuard;
        oldbase = (byte*)gp->stackbase + sizeof(Stktop);
        oldsize = oldbase - oldstk;

        // 新栈是原来的 2 倍。
        newsize = oldsize * 2;

        // 分配新栈空间，并拷贝数据。
        copystack(gp, nframes, newsize);

        // 恢复状态。
        gp->status = oldstatus;

        // 用 sched 现场恢复执行。
        runtime·gogo(&gp->sched);
    }
}

/* --- 分段栈 ------------------------------------------------- */

// 计算新栈帧所需大小。
framesize += argsize;
framesize += StackExtra;    // room for more functions, Stktop.
if(framesize < StackMin)
    framesize = StackMin;
framesize += StackSystem;
framesize = runtime·round2(framesize);

// 分配新栈帧空间。
stk = runtime·stackalloc(gp, framesize);

// 在新栈帧 top 区域记录原栈帧相关信息，形成链表结构。
top = (Stktop*)(stk+framesize-sizeof(*top));
top->stackbase = gp->stackbase;
top->stackguard = gp->stackguard;

// 将 G 栈信息指向新栈帧空间。
gp->stackbase = (uintptr)top;
gp->stackguard = (uintptr)stk + StackGuard;
gp->stackguard0 = gp->stackguard;

// 将参数复制到新栈帧。
sp = (uintptr)top;
if(argsize > 0) {
    sp -= argsize;
    dst = (uintptr*)sp;
    dstend = dst + argsize/sizeof(*dst);
    src = (uintptr*)top->argp;
```

```
        while(dst < dstend)
            *dst++ = *src++;
    }
}
```

当需要扩张时，连续栈会重新分配栈内存，然后将数据转移过去，并释放现有栈空间。

stack.c

```
static void copystack(G *gp, uintptr nframes, uintptr newsize)
{
    // 确定旧栈参数。
    oldstk = (byte*)gp->stackguard - StackGuard;
    oldbase = (byte*)gp->stackbase + sizeof(Stktop);
    oldsize = oldbase - oldstk;
    used = oldbase - (byte*)gp->sched.sp;
    oldtop = (Stktop*)gp->stackbase;

    // 分配新栈。
    newstk = runtime·stackalloc(gp, newsize);
    newbase = newstk + newsize;
    newtop = (Stktop*)(newbase - sizeof(Stktop));
    malloced = newtop->malloced;

    // 将旧站数据转移到新栈。
    runtime·memmove(newbase - used, oldbase - used, used);
    newtop->malloced = malloced; // 分配标记

    // 修改 G 参数，指向新栈。
    gp->stackbase = (uintptr)newtop;
    gp->stackguard = (uintptr)newstk + StackGuard;
    gp->stackguard0 = (uintptr)newstk + StackGuard;
    if(gp->stack0 == (uintptr)oldstk)
        gp->stack0 = (uintptr)newstk;
    gp->sched.sp = (uintptr)(newbase - used);

    // 释放旧栈内存。
    runtime·stackfree(gp, oldstk, oldtop);
}
```

当 goexit 清理 G 任务现场时，会调用 unwindstack 释放额外分配的栈空间。

panic.c

```
void runtime·unwindstack(G *gp, byte *sp)
{
    // 通过 TOP 链表，检查并释放分段栈空间（不包括第一个分段）。
    while((top = (Stktop*)gp->stackbase) != 0 && top->stackbase != 0) {
```

```
        // 当前分段信息。
        stk = (byte*)gp->stackguard - StackGuard;
        if(stk <= sp && sp < (byte*)gp->stackbase)
            break;

        // 指向前一分段。
        gp->stackbase = top->stackbase;
        gp->stackguard = top->stackguard;
        gp->stackguard0 = gp->stackguard;

        // 释放当前分段。
        runtime·stackfree(gp, stk, top);
    }
}
```

stack.c

```
void runtime·stackfree(G *gp, void *v, Stktop *top)
{
    n = (uintptr)(top+1) - (uintptr)v;
    gp->stacksize -= n;

    // 如果是重新分配的栈，释放内存!
    if(top->malloced) {
        runtime·free(v);
        return;
    }

    // 如果缓存已满，则转移一部分到全局缓存。
    if(m->stackcachecnt == StackCacheSize)
        stackcacherelease();

    // 将栈空间归还给本地缓存。
    pos = m->stackcachepos;
    m->stackcache[pos] = v;
    m->stackcachepos = (pos + 1) % StackCacheSize;
    m->stackcachecnt++;
    m->stackinuse--;
}
```

我们注意到，unwindstack 并没有处理第一分段，也就是说不管是连续栈还是分段栈，默认的栈空间并没有被收回。

对于分段栈而言，第一分段会一直跟随 G 对象进行复用。而如果是连续栈，会存在因空间扩张被重新分配的问题。在 goexit 将 G 放回空闲链表时，会专门处理这个状况。

proc.c

```
static void gfput(P *p, G *gp)
{
    top = (Stktop*)gp->stackbase;

    // 如果是重新分配的栈，那么就释放掉。
    if(top->malloced) {
        runtime·stackfree(gp, (void*)gp->stack0, top);
        gp->stack0 = 0;
        gp->stackguard = 0;
        gp->stackguard0 = 0;
        gp->stackbase = 0;
    }
}

static G* gfget(P *p)
{
    if(gp) {
        // 如果没有栈空间，则重新分配。
        if(gp->stack0 == 0) {
            // Stack was deallocated in gfput.  Allocate a new one.
            if(g == m->g0) {
                stk = runtime·stackalloc(gp, FixedStack);
            } else {
                gp->stacksize = FixedStack;
                g->param = gp;
                runtime·mcall(mstackalloc);
                stk = g->param;
                g->param = nil;
            }
            gp->stack0 = (uintptr)stk;
            gp->stackbase = (uintptr)stk + FixedStack - sizeof(Stktop);
            gp->stackguard = (uintptr)stk + StackGuard;
            gp->stackguard0 = gp->stackguard;
        }
    }

    return gp;
}
```

在垃圾回收过程中，还会尝试收缩连续栈空间。

mgc0.c

```
static void gc(struct gc_args *args)
{
    // Shrink a stack if not much of it is being used.
    for(i = 0; i < runtime·allglen; i++)
```

```
        runtime·shrinkstack(runtime·allg[i]);
}
```

3.5 系统调用

为配合调度器工作，专门使用 entersyscall、entersyscallblock 函数对 syscall、cgo 等操作进行包装，以便在阻塞时能释放 P 让其他任务得以运行。

src/syscall/asm_linux_amd64.s

```
TEXT    ·Syscall(SB),NOSPLIT,$0-64
    CALL    runtime·entersyscall(SB)
    MOVQ    16(SP), DI
    MOVQ    24(SP), SI
    MOVQ    32(SP), DX
    MOVQ    $0, R10
    MOVQ    $0, R8
    MOVQ    $0, R9
    MOVQ    8(SP), AX   // syscall entry
    SYSCALL
    CMPQ    AX, $0xfffffffffffff001
    JLS ok
    MOVQ    $-1, 40(SP) // r1
    MOVQ    $0, 48(SP)  // r2
    NEGQ    AX
    MOVQ    AX, 56(SP)  // errno
    CALL    runtime·exitsyscall(SB)
    RET
```

cgo-call.c

```
void runtime·cgocall(void (*fn)(void*), void *arg)
{
    runtime·entersyscall();
    runtime·asmcgocall(fn, arg);
    runtime·exitsyscall();

    endcgo();
}
```

函数 entersyscall 所包装系统调用，不会释放所关联 P，但会因超时被 sysmon 没收。而 entersyscallblock 则是长时间阻塞模式，主动释放 P。

两个函数都会将执行现场保存到 G.sched，就算 P 被没收，依旧可被其他 M 恢复执行。

proc.c

```
void ·entersyscallblock(int32 dummy)
{
    // 将执行现场保存到 G.sched。
    save(runtime·getcallerpc(&dummy), runtime·getcallersp(&dummy));

    // 设置 syscall 状态
    g->syscallsp = g->sched.sp;
    g->syscallpc = g->sched.pc;
    g->syscallstack = g->stackbase;
    g->syscallguard = g->stackguard;
    g->status = Gsyscall;

    // 释放所关联的 P。
    p = releasep();

    // 尝试让该 P 执行其他任务。
    handoffp(p);

    save(runtime·getcallerpc(&dummy), runtime·getcallersp(&dummy));
}

static void save(void *pc, uintptr sp)
{
    g->sched.pc = (uintptr)pc;
    g->sched.sp = sp;
    g->sched.lr = 0;
    g->sched.ret = 0;
    g->sched.ctxt = 0;
    g->sched.g = g;
}

static P* releasep(void)
{
    m->p = nil;
    m->mcache = nil;
    p->m = nil;
    p->status = Pidle;
    return p;
}
```

对于所释放 P，函数 handoffp 会进行各种 startm 尝试，直到放回闲置队列。

proc.c

```
static void handoffp(P *p)
{
    // 如果 P 本地队列还有待执行任务，唤醒或创建 M 执行。
```

```
    if(p->runqhead != p->runqtail || runtime·sched.runqsize) {
        startm(p, false);
        return;
    }

    // 检查全局队列是否有待运行任务。
    if(runtime·sched.runqsize) {
        startm(p, false);
        return;
    }

    ...

    // 放回闲置队列。
    pidleput(p);
}
```

从系统调用退出时，必须检查关联 P 是否有效，能否获取空闲的 P。如果关联失败，则将 G 放回全局队列，等待其他 M 恢复并完成余下任务。

proc.c

```
void runtime·exitsyscall(void)
{
    // 完成系统调用。
    if(exitsyscallfast()) {
        return;
    }

    // 尝试获取 P 完成任务。
    runtime·mcall(exitsyscall0);
}

static bool exitsyscallfast(void)
{
    // 检查 P 是否还在（如果 P 被 sysmon 拿走，status = Pidle）。
    if(m->p && m->p->status == Psyscall && runtime·cas(&m->p->status, Psyscall,
       Prunning)) {
        m->mcache = m->p->mcache;
        m->p->m = m;
        return true;
    }

    // 尝试获取闲置的 P。
    m->p = nil;
    if(runtime·sched.pidle) {
        p = pidleget();
        if(p) {
```

```
            acquirep(p);
            return true;
        }
    }

    return false;
}

static void exitsyscall0(G *gp)
{
    gp->status = Grunnable;
    gp->m = nil;
    m->curg = nil;

    // 尝试获取空闲的 P。
    p = pidleget();

    // 失败，将 G 放回全局队列。
    if(p == nil)
        globrunqput(gp);

    // 成功，关联 P，完成后续工作。
    if(p) {
        acquirep(p);
        execute(gp);  // Never returns.
    }

    // 检查是否有 locked G 需要处理。
    if(m->lockedg) {
        stoplockedm();
        execute(gp);  // Never returns.
    }

    // 休眠 M，直到唤醒后继续执行任务调度。
    stopm();
    schedule();  // Never returns.
}
```

可主动调用 runtime/Gosched 中断当前任务，将其放回全局队列，等待下次被其他 M 执行。

proc.c

```
void runtime·gosched(void)
{
    runtime·mcall(runtime·gosched0);
}
```

```
void runtime·gosched0(G *gp)
{
    gp->status = Grunnable;
    gp->m = nil;
    m->curg = nil;

    // 将当前 G 放回全局队列。
    globrunqput(gp);

    // M 继续处理其他任务。
    schedule();
}
```

与 gosched 类似的还有 park 函数，区别在于 park 没有将 G 放回队列，一直处于暂停状态 (注意不是 M 被暂停)。

proc.c

```
void runtime·park(bool(*unlockf)(G*, void*), void *lock, int8 *reason)
{
    m->waitlock = lock;
    m->waitunlockf = unlockf;
    g->waitreason = reason;
    runtime·mcall(park0);
}

static void park0(G *gp)
{
    gp->status = Gwaiting;
    gp->m = nil;
    m->curg = nil;

    // 当前 M 去执行其他任务，该函数不会返回。
    schedule();
}
```

只有调用 ready 函数，才能将其放回队列，得以继续执行。这种设计被用于并发垃圾清理和 channel 实现。

proc.c

```
void runtime·ready(G *gp)
{
    gp->status = Grunnable;

    // 放回本地队列。
    runqput(m->p, gp);
```

```
}
```

3.6 系统监控

系统监控线程 sysmon 完成如下三个工作:

- 将长时间没有处理的 netpoll 结果添加到全局队列。
- 收回长时间处于 Psyscall 状态的 P。
- 向长时间运行的 G 发出抢占调度通知。

系统监控积极回收 P，让处于等待状态的 G 任务得以运行，这是一种公平策略。

proc.c

```
static void sysmon(void)
{
    for(;;) {
        // 暂停。
        runtime·usleep(delay);

        // 处理网络操作结果。
        lastpoll = runtime·atomicload64(&runtime·sched.lastpoll);
        now = runtime·nanotime();
        if(lastpoll != 0 && lastpoll + 10*1000*1000 < now) {
            runtime·cas64(&runtime·sched.lastpoll, lastpoll, now);

            // 获取多个结果 (链表)。
            gp = runtime·netpoll(false);  // non-blocking

            if(gp) {
                // 添加到全局队列。
                injectglist(gp);
            }
        }

        // 1. 收回长时间处于系统调用阻塞的 P。
        // 2. 向长时间运行的 G 任务发出抢占通知。
        if(retake(now))
            idle = 0;
        else
            idle++;
    }
}

static uint32 retake(int64 now)
```

```
{
    // 检查所有的 P。
    for(i = 0; i < runtime·gomaxprocs; i++) {
        p = runtime·allp[i];
        s = p->status;

        if(s == Psyscall) {
            // 没收长时间处于系统调用阻塞的 P（有其他待运行任务）。
            if(p->runqhead == p->runqtail &&
                runtime·atomicload(&runtime·sched.nmspinning) +
                runtime·atomicload(&runtime·sched.npidle) > 0 &&
                pd->syscallwhen + 10*1000*1000 > now)
                continue;

            // 通过修改 P 状态，让 exitsyscallfast 中的判断失效。
            if(runtime·cas(&p->status, s, Pidle)) {
                handoffp(p);
            }
        } else if(s == Prunning) {
            // 向长时间运行的 G 发出抢占通知。
            if(pd->schedwhen + 10*1000*1000 > now)
                continue;
            preemptone(p);
        }
    }
    return n;
}
```

所谓抢占通知，不过是在 G 上设置标志而已。

proc.c

```
static bool preemptone(P *p)
{
    mp = p->m;
    gp = mp->curg;

    gp->preempt = true;
    gp->stackguard0 = StackPreempt;
    return true;
}
```

编译器在非内联函数头部插入 morestack 调用，这是引发抢占调度的关键。

asm_amd64.s

```
TEXT runtime·morestack(SB),NOSPLIT,$0-0
    CALL    runtime·newstack(SB)
```

```
    RET
```

stack.c

```
void runtime·newstack(void)
{
    // 检查抢占标志。
    if(gp->stackguard0 == (uintptr)StackPreempt) {
        if(oldstatus != Grunning || m->locks || m->mallocing || m->gcing ||
           m->p->status != Prunning) {
            gp->stackguard0 = gp->stackguard;
            gp->status = oldstatus;
            runtime·gogo(&gp->sched);   // never return
        }

        gp->status = oldstatus;
        runtime·gosched0(gp);   // 暂停当前任务，切换其他任务执行。never return
    }
}
```

换句话说，只有内部包含非内联函数调用才有机会触发抢占式调度。另外，发出抢占调度的不仅仅是 sysmon，在很多地方都有类似操作。

3.7 状态输出

使用用环境变量 GODEBUG="schedtrace=xxx" 输出调度器跟踪信息。

```
$ GOMAXPROCS=2 GODEBUG="schedtrace=1000" ./test


        +- 跟踪耗时.
        |                         +- 空闲 P 数量。
        |                         |                           +- 空闲 M 数量。
        |                         |                           |                           + 各 P 本地队列。
        |                         |                           |                           |
SCHED 1003ms: gomaxprocs=2 idleprocs=2 threads=5 idlethreads=2 runqueue=0 [0 0]
                    |                           |                           |
                    |                           |                           +- 全局队列任务数量。
                    |                           +- M 总数。
                    +- P 总数。
```

更详细的信息,需指定 "scheddetail=1"。

```
$ GOMAXPROCS=2 GODEBUG="schedtrace=1000,scheddetail=1" ./test
```

具体代码请参考 proc.c/runtime·schedtrace 函数。

4. Channel

Channel 是 Go 实现 CSP 模型的关键，鼓励用通讯来实现共享。

架构设计上，类似 FIFO 队列，多个 G 排队等待收发操作。如果是同步模式，就从排队的链表中获取一个能直接与之交换数据的对象；异步模式则围绕着数据缓冲区空位排队。

实际上，channel 并没有想象的那么神秘，一样是基于锁、链表、环状队列的实现。核心就是如果没有匹配的通讯对象或空槽，就让 G 休眠 (park)，然后在条件满足时唤醒。

SudoG 是对 G 的包装，WaitQ 则是 SudoG 排队链表。

chan.h

```
struct  SudoG
{
    G*      g;
    uint32* selectdone;
    SudoG*  link;
    int64   releasetime;
    byte*   elem;       // data element
};

struct  WaitQ
{
    SudoG*  first;
    SudoG*  last;
};
```

Hchan 除发送和接收排队链表外，还用 qcount、sendx、recvx 构建缓冲槽环状队列。

chan.h

```
struct  Hchan
{
    uintgo  qcount;         // 已使用槽数量。
    uintgo  dataqsiz;       // 缓冲区槽数量，同步模式为 0。
    uint16  elemsize;       // 数据类型长度。
    bool    closed;         // 关闭标记。
    Type*   elemtype;       // 数据类型。
    uintgo  sendx;          // 发送索引。
    uintgo  recvx;          // 接收索引。
    WaitQ   recvq;          // 等待接收 G 排队链表。
    WaitQ   sendq;          // 等待发送 G 排队链表。
    Lock;
```

```
};
```

创建 channel 时，需要给出缓冲槽的数量，同步模式为 0。

chan.goc

```
static Hchan* makechan(ChanType *t, int64 hint)
{
    Hchan *c;
    Type *elem;

    elem = t->elem;

    // 数据类型长度不能超过 64KB。
    if(elem->size >= (1<<16))
        runtime·throw("makechan: invalid channel element type");

    // 为 channel 和缓冲槽分配内存。
    c = (Hchan*)runtime·mallocgc(sizeof(*c) + hint*elem->size,
                                 (uintptr)t | TypeInfo_Chan, 0);
    c->elemsize = elem->size;
    c->elemtype = elem;
    c->dataqsiz = hint;

    return c;
}
```

4.1 Send

同步模式需从接收链表里找到接收者，然后交换数据。而异步模式，则要看是否有空数据槽可用。当无法获取接收者或空槽时，将当前 G 包装成 SudoG，加入等待发送链表，直到被唤醒。

参数 eq 为待发送数据，block 是否为阻塞模式。

chan.goc

```
static bool chansend(ChanType *t, Hchan *c, byte *ep, bool block, void *pc)
{
    // 向 nil channel 发送数据，阻塞。
    if(c == nil) {
        USED(t);
        if(!block)
            return false;
        runtime·park(nil, nil, "chan send (nil chan)");
```

```
    return false;  // not reached
}

// 加锁。
runtime·lock(c);

// 向 closed channel 发送数据，出错。
if(c->closed)
    goto closed;

// 如果缓冲槽大于 0，异步模式。
if(c->dataqsiz > 0)
    goto asynch;

// 从链表里找一个等待接收的 SudoG。
sg = dequeue(&c->recvq);
if(sg != nil) {
    // 解除锁定。
    runtime·unlock(c);

    gp = sg->g;
    gp->param = sg;

    // 将数据拷贝给接收方。
    if(sg->elem != nil)
        c->elemtype->alg->copy(c->elemsize, sg->elem, ep);

    // 唤醒接收 G。
    runtime·ready(gp);
    return true;
}

if(!block) {
    runtime·unlock(c);
    return false;
}

// 将当前 G 封装为 SudoG。
mysg.elem = ep;
mysg.g = g;
mysg.selectdone = nil;
g->param = nil;

// 添加到等待发送链表，阻塞直到被唤醒。
enqueue(&c->sendq, &mysg);
runtime·parkunlock(c, "chan send");

// 被意外唤醒，出错（通常是 channel closed。如被接收者唤醒，g->param != nil)。
```

```
    if(g->param == nil) {
        runtime·lock(c);
        if(!c->closed)
            runtime·throw("chansend: spurious wakeup");
        goto closed;
    }

    return true;

asynch:
    if(c->closed)
        goto closed;

    // 如果缓冲槽已满。
    if(c->qcount >= c->dataqsiz) {
        if(!block) {
            runtime·unlock(c);
            return false;
        }

        // 包装当前 G，加入等待发送队列，阻塞。
        mysg.g = g;
        mysg.elem = nil;
        mysg.selectdone = nil;
        enqueue(&c->sendq, &mysg);
        runtime·parkunlock(c, "chan send");

        // 被唤醒后，重试。
        runtime·lock(c);
        goto asynch;
    }

    // 如果缓冲槽有空位，将数据拷贝到缓冲区。
    c->elemtype->alg->copy(c->elemsize, chanbuf(c, c->sendx), ep);

    // 调整缓冲槽队列索引。
    if(++c->sendx == c->dataqsiz)
        c->sendx = 0;
    c->qcount++;

    // 缓冲槽已经有数据了，尝试从接收队列中唤醒一个 SudoG。
    sg = dequeue(&c->recvq);
    if(sg != nil) {
        gp = sg->g;
        runtime·unlock(c);
        runtime·ready(gp);
    } else
        runtime·unlock(c);
```

```
    return true;

closed:
    runtime·unlock(c);
    runtime·panicstring("send on closed channel");
    return false;  // not reached
}
```

虽然将同步和异步放在一个函数里，但不算复杂。

- 向 nil channel 发送数据，阻塞。
- 向 closed channel 发送数据，出错。
- 同步发送: 如有接收者，交换数据。否则排队、阻塞。
- 异步发送: 如有空位，拷贝数据到缓冲区。否则排队、阻塞。

4.2 Receive

和接收操作类似，规则如下：

- 从 nil channel 接收数据，阻塞。
- 从 closed channel 接收数据，直接返回。
- 同步接收: 如有发送者，交换数据。否则排队、阻塞。
- 异步接收: 如缓冲区不为空，拷贝数据。否则排队、阻塞。

参数 ep 保存接收到的数据 (SudoG.elem = ep)，received 表示接收是否成功。

chan.goc

```
static bool chanrecv(ChanType *t, Hchan* c, byte *ep, bool block, bool *received)
{
    // 从 nil channel 接收数据，阻塞。
    if(c == nil) {
        USED(t);
        if(!block)
            return false;
        runtime·park(nil, nil, "chan receive (nil chan)");
        return false;  // not reached
    }

    // 加锁。
    runtime·lock(c);
```

```
// 异步接收。
if(c->dataqsiz > 0)
    goto asynch;

// 从 closed channel 接收数据，直接返回。
if(c->closed)
    goto closed;

// 找一个等待发送的 SudoG。
sg = dequeue(&c->sendq);
if(sg != nil) {
    runtime·unlock(c);

    // 拷贝数据。
    if(ep != nil)
        c->elemtype->alg->copy(c->elemsize, ep, sg->elem);

    // 唤醒发送方。
    gp = sg->g;
    gp->param = sg;
    runtime·ready(gp);

    // 成功接收标记。
    if(received != nil)
        *received = true;

    return true;
}

if(!block) {
    runtime·unlock(c);
    return false;
}

// 将当前 G 包装成 SudoG，加入等待接收链表，阻塞。
mysg.elem = ep;
mysg.g = g;
mysg.selectdone = nil;
g->param = nil;
enqueue(&c->recvq, &mysg);
runtime·parkunlock(c, "chan receive");

// 意外唤醒。(通常是 channel closed。如被发送方唤醒，g->param != nil)
if(g->param == nil) {
    runtime·lock(c);
    if(!c->closed)
        runtime·throw("chanrecv: spurious wakeup");
```

```
        goto closed;
    }

    // 被发送方唤醒，成功接收标记。
    if(received != nil)
        *received = true;

    return true;

asynch:
    // 如缓冲槽没可用数据。
    if(c->qcount <= 0) {
        if(c->closed)
            goto closed;

        if(!block) {
            runtime·unlock(c);
            if(received != nil)
                *received = false;
            return false;
        }

        // 包装当前 G，加入等待链表，阻塞。
        mysg.g = g;
        mysg.elem = nil;
        mysg.selectdone = nil;
        enqueue(&c->recvq, &mysg);
        runtime·parkunlock(c, "chan receive");

        // 被唤醒，重试。
        runtime·lock(c);
        goto asynch;
    }

    // 从缓冲槽拷贝数据。
    if(ep != nil)
        c->elemtype->alg->copy(c->elemsize, ep, chanbuf(c, c->recvx));
    c->elemtype->alg->copy(c->elemsize, chanbuf(c, c->recvx), nil);

    // 调整缓冲槽队列索引。
    if(++c->recvx == c->dataqsiz)
        c->recvx = 0;
    c->qcount--;

    // 有新空位，尝试唤醒一个处于等待状态的异步发送者。
    sg = dequeue(&c->sendq);
    if(sg != nil) {
        gp = sg->g;
```

```
        runtime·unlock(c);
        runtime·ready(gp);
    } else
        runtime·unlock(c);

    if(received != nil)
        *received = true;

    return true;

closed:
    if(ep != nil)
        c->elemtype->alg->copy(c->elemsize, ep, nil);

    if(received != nil)
        *received = false;

    runtime·unlock(c);
    return true;
}
```

4.3 Select

Channel Select 设计是个让人有些不好评价的东西。

每个 case 语句都被编译器转换为 Scase 对象注册到 Select.scase 数组，而 Select 对象则维护着整个 select 代码块逻辑，这其中有两个很重要的排序规则。

- pollorder: 对顺序索引号洗牌。遍历时，返回随机序号。
- lockorder: 将地址相同 channel 排列到相邻位置，避免对同一 channel 重复锁定。

chan.h

```
struct  Scase
{
    SudoG   sg;             // must be first member (cast to Scase)
    Hchan*  chan;           // chan
    byte*   pc;             // return pc
    uint16  kind;
    uint16  so;             // vararg of selected bool
    bool*   receivedp;      // pointer to received bool (recv2)
};

struct  Select
{
```

```
    uint16  tcase;          // total count of scase[]
    uint16  ncase;          // currently filled scase[]
    uint16* pollorder;      // case poll order
    Hchan** lockorder;      // channel lock order
    Scase   scase[1];       // one per case (in order of appearance)
};
```

创建函数会为相关成员数组分配内存。

chan.goc

```
static Select* newselect(int32 size)
{
    int32 n;
    Select *sel;

    n = 0;
    if(size > 1)
        n = size-1;

    // 一次性分配数组，其中包括 scase 、lockorder、pollorder 数组。
    sel = runtime·mal(sizeof(*sel) +
        n*sizeof(sel->scase[0]) +
        size*sizeof(sel->lockorder[0]) +
        size*sizeof(sel->pollorder[0]));

    sel->tcase = size;
    sel->ncase = 0;
    sel->lockorder = (void*)(sel->scase + size);
    sel->pollorder = (void*)(sel->lockorder + size);

    return sel;
}
```

内存布局:

```
+--------+-------------+-----------------+-----------------+
| select | scase array | lockorder array | pollorder array |
+--------+-------------+-----------------+-----------------+
```

注册函数包括 send、receive、default 三种 case。

chan.goc

```
static void selectsend(Select *sel, Hchan *c, void *pc, void *elem, int32 so)
{
    int32 i;
    Scase *cas;
```

```
    i = sel->ncase;
    sel->ncase = i+1;
    cas = &sel->scase[i];

    cas->pc = pc;
    cas->chan = c;
    cas->so = so;
    cas->kind = CaseSend;
    cas->sg.elem = elem;
}

static void selectrecv(Select *sel, Hchan *c, void *pc, void *elem, bool *received,
int32 so)
{
    int32 i;
    Scase *cas;

    i = sel->ncase;
    sel->ncase = i+1;
    cas = &sel->scase[i];

    cas->pc = pc;
    cas->chan = c;
    cas->so = so;
    cas->kind = CaseRecv;
    cas->sg.elem = elem;
    cas->receivedp = received;
}

static void selectdefault(Select *sel, void *callerpc, int32 so)
{
    int32 i;
    Scase *cas;

    i = sel->ncase;
    sel->ncase = i+1;
    cas = &sel->scase[i];

    cas->pc = callerpc;
    cas->chan = nil;
    cas->so = so;
    cas->kind = CaseDefault;
}
```

注册过程很简单，ncase 表示注册序号，不能超过 tcase 限制。关键还是看 select 如何随机选择可用 channel case。

chan.goc

```
static void* selectgo(Select **selp)
{
    sel = *selp;

    // 按顺序往 pollorder 填充序号。
    for(i=0; i<sel->ncase; i++)
        sel->pollorder[i] = i;

    // 对 pollorder 洗牌，这样 pollorder[x] 返回的是一个“随机”序号。
    for(i=1; i<sel->ncase; i++) {
        o = sel->pollorder[i];
        j = runtime·fastrand1()%(i+1);
        sel->pollorder[i] = sel->pollorder[j];
        sel->pollorder[j] = o;
    }

    // 对 lockorder 进行排序，确保相同地址的 channel 处于相邻位置。
    // 需要对所有 case channel 进行加锁，以遍历它们的状态。
    // 不同 case 可能使用同一 channel，如此可避免 sellock 对同一个 channel 重复加锁。
    for(i=0; i<sel->ncase; i++) {
        j = i;
        c = sel->scase[j].chan;
        while(j > 0 && sel->lockorder[k=(j-1)/2] < c) {
            sel->lockorder[j] = sel->lockorder[k];
            j = k;
        }
        sel->lockorder[j] = c;
    }
    for(i=sel->ncase; i-->0; ) {
        c = sel->lockorder[i];
        sel->lockorder[i] = sel->lockorder[0];
        j = 0;
        for(;;) {
            k = j*2+1;
            if(k >= i)
                break;
            if(k+1 < i && sel->lockorder[k] < sel->lockorder[k+1])
                k++;
            if(c < sel->lockorder[k]) {
                sel->lockorder[j] = sel->lockorder[k];
                j = k;
                continue;
            }
            break;
        }
        sel->lockorder[j] = c;
```

```
    }

    // 按 lockorder 顺序对所有 channel 加锁。
    // select 必须获得所有 case channel 可操作状态。
    sellock(sel);

loop:
    // pass 1 - 遍历检查所有 case。
    dfl = nil;
    for(i=0; i<sel->ncase; i++) {
        // 使用 pollorder 随机返回某个 case。
        o = sel->pollorder[i];
        cas = &sel->scase[o];
        c = cas->chan;

        // 依据 kind，进行对应读写操作。
        switch(cas->kind) {
        case CaseRecv:
            if(c->dataqsiz > 0) {
                if(c->qcount > 0)
                    goto asyncrecv;
            } else {
                sg = dequeue(&c->sendq);
                if(sg != nil)
                    goto syncrecv;
            }
            if(c->closed)
                goto rclose;
            break;

        case CaseSend:
            if(c->closed)
                goto sclose;
            if(c->dataqsiz > 0) {
                if(c->qcount < c->dataqsiz)
                    goto asyncsend;
            } else {
                sg = dequeue(&c->recvq);
                if(sg != nil)
                    goto syncsend;
            }
            break;

        case CaseDefault:
            dfl = cas;
            break;
        }
    }
```

```
// 如果没有可用 channel，那么尝试执行 case default。
if(dfl != nil) {
    selunlock(sel);
    cas = dfl;
    goto retc;
}


// pass 2 - 没有可用 channel 和 default，
//          将当前 SudoG 保存到所有 channel 队列，以便在某个 channel 可操作时被唤醒。
done = 0;
for(i=0; i<sel->ncase; i++) {
    o = sel->pollorder[i];
    cas = &sel->scase[o];
    c = cas->chan;

    // 将 case.sg 换成当前 G。
    // 当被 channel 唤醒时，sg 会作为 g->param 传回。
    // 因为 sg 是 case 第一个字段，地址相同，因此可以转换回 Scase 对象。
    sg = &cas->sg;
    sg->g = g;
    sg->selectdone = &done;

    switch(cas->kind) {
    case CaseRecv:
        enqueue(&c->recvq, sg);
        break;

    case CaseSend:
        enqueue(&c->sendq, sg);
        break;
    }
}

// 当前 G 休眠，等待唤醒。
g->param = nil;
runtime·park(selparkcommit, sel, "select");

// 被唤醒后，再次加锁。
sellock(sel);
sg = g->param;

// pass 3 - 将 G 从其他未命中的 channel 等待队列中清除。
for(i=0; i<sel->ncase; i++) {
    cas = &sel->scase[i];
    if(cas != (Scase*)sg) {
        c = cas->chan;
```

```
            if(cas->kind == CaseSend)
                dequeueg(&c->sendq);
            else
                dequeueg(&c->recvq);
        }
    }

    // 意外唤醒，重试（如果被 channel 唤醒，g->param != nil）。
    if(sg == nil)
        goto loop;

    // 被 channel 唤醒，将 sg 转换回 Scase 对象。
    cas = (Scase*)sg;
    c = cas->chan;

    selunlock(sel);
    goto retc;

asyncrecv:
    // can receive from buffer

asyncsend:
    // can send to buffer

syncrecv:
    // can receive from sleeping sender (sg)

rclose:
    // read at end of closed channel

syncsend:
    // can send to sleeping receiver (sg)

retc:
    // return pc corresponding to chosen case.
    // Set boolean passed during select creation
    // (at offset selp + cas->so) to true.
    // If cas->so == 0, this is a reflect-driven select and we
    // don't need to update the boolean.
    pc = cas->pc;
    if(cas->so > 0) {
        as = (byte*)selp + cas->so;
        *as = true;
    }

    // 释放 Select。
    runtime·free(sel);
    return pc;
```

```
sclose:
    // send on closed channel
    selunlock(sel);
    runtime·panicstring("send on closed channel");
    return nil;  // not reached
}
```

虽然删除了很多代码，但整体流程还是很清楚的。

1. 对 pollorder 洗牌，构成 "随机" 选择条件。
2. 对 lockorder 排序，避免 sellock 对同一 channel 重复锁定。
3. 遍历 case 查找可用 channel。因为通过 pollorder 返回，所以就是随机选择。
4. 遍历时对单个 channel 的操作和前面两节内容相同，此处不做赘述。
5. 如所有 channel 都不可用，就尝试执行 case default。
6. 如没有 default，就将所有 case.sg.g 换成当前 G，放到所属 channel 排队链表中。
7. 一旦某个 channel 可用，就会唤醒当前 G，自然就可以找到可用 case。

在遍历前获取所有 channel 锁，确保并发安全，这个代价确实不小。

chan.goc

```
static void sellock(Select *sel)
{
    Hchan *c, *c0;

    c = nil;
    for(i=0; i<sel->ncase; i++) {
        c0 = sel->lockorder[i]; // channel

        // 如果前一个 channel 和当前地址相同，那么就表示已经加过锁了。
        if(c0 && c0 != c) {
            c = sel->lockorder[i];
            runtime·lock(c);
        }
    }
}
```

另外，如果在 select 语句外面套上 for 循环，那就意味着每次都要创建 Select 对象，完成注册、洗牌、排序、选择和释放等一大堆操作。

```
func main() {
    a, b := make(chan bool), make(chan bool)
```

```
    for {
        select {
        case <-a:
        case <-b:
        }
    }
}
```

汇编结果:

```
$ go build -gcflags "-S"

--- prog list "main" ---
0023 MOVL    $2,(SP)
0024 PCDATA  $0,$16
0025 CALL    ,runtime.newselect+0(SB)    // 创建 Select
0034 CALL    ,runtime.selectrecv+0(SB)   // 注册
0046 CALL    ,runtime.selectrecv+0(SB)   // 注册
0055 CALL    ,runtime.selectgo+0(SB)     // 执行 (goto rect: runtime·free(sel))
0057 JMP     ,23                         // 循环跳转
0058 RET     ,
```

5. Defer

通过一个简单示例，看看 defer 内部执行过程。

```
package main

import "sync"

var lock sync.Mutex

func test() {
    lock.Lock()
    defer lock.Unlock()
}

func main() {
    test()
}
```

用反汇编观察编译器如何处理 defer 调用。

```
(gdb) disass
Dump of assembler code for function main.test:
=> 0x0000000000002000 <+0>:     mov    rcx,QWORD PTR gs:0x8a0
   0x0000000000002009 <+9>:     cmp    rsp,QWORD PTR [rcx]
   0x000000000000200c <+12>:    ja     0x2015 <main.test+21>
   0x000000000000200e <+14>:    call   0x21db0 <runtime.morestack00_noctxt>
   0x0000000000002013 <+19>:    jmp    0x2000 <main.test>
   0x0000000000002015 <+21>:    sub    rsp,0x8
   0x0000000000002019 <+25>:    lea    rbx,ds:0x65d28
   0x0000000000002021 <+33>:    mov    QWORD PTR [rsp],rbx
   0x0000000000002025 <+37>:    call   0x23470 <sync.(*Mutex).Lock>
   0x000000000000202a <+42>:    lea    rbx,ds:0x65d28
   0x0000000000002032 <+50>:    mov    QWORD PTR [rsp],rbx
   0x0000000000002036 <+54>:    mov    ecx,0x40680
   0x000000000000203b <+59>:    push   rcx
   0x000000000000203c <+60>:    push   0x8
   0x000000000000203e <+62>:    call   0xeaa0 <runtime.deferproc>
   0x0000000000002043 <+67>:    pop    rcx
   0x0000000000002044 <+68>:    pop    rcx
   0x0000000000002045 <+69>:    test   rax,rax
   0x0000000000002048 <+72>:    jne    0x2055 <main.test+85>
   0x000000000000204a <+74>:    nop
   0x000000000000204b <+75>:    call   0xeb10 <runtime.deferreturn>
   0x0000000000002050 <+80>:    add    rsp,0x8
   0x0000000000002054 <+84>:    ret
```

```
   0x0000000000002055 <+85>:    nop
   0x0000000000002056 <+86>:    call   0xeb10 <runtime.deferreturn>
   0x000000000000205b <+91>:    add    rsp,0x8
   0x000000000000205f <+95>:    ret
End of assembler dump.
```

不算太复杂，核心就是 deferproc 和 deferreturn 两个函数。

panic.c

```
uintptr runtime·deferproc(int32 siz, FuncVal *fn, ...)
{
    Defer *d;

    // 新建 Defer 对象。
    d = newdefer(siz);

    // 保存 fn 等参数。
    d->fn = fn;
    d->pc = runtime·getcallerpc(&siz);

    // 保存第一个参数地址。这个很重要，因为这个地址记录了所在栈帧 (main.test) 的信息。
    if(thechar == '5')
        d->argp = (byte*)(&fn+2);  // skip caller's saved link register
    else
        d->argp = (byte*)(&fn+1);

    // 将所有参数拷贝到新建的 Defer 对象里。
    runtime·memmove(d->args, d->argp, d->siz);

    return 0;
}
```

和以往一样，Defer 对象会通过可复用链表缓存。

runtime.h

```
struct P
{
      Defer* deferpool[5];// pool of available Defer structs of different sizes
};
```

panic.c

```
static Defer* newdefer(int32 siz)
{
    d = nil;
    sc = DEFERCLASS(siz);
```

```
    // 从 P.deferpool 链接数组提取可复用对象。
    if(sc < nelem(p->deferpool)) {
        p = m->p;
        d = p->deferpool[sc];
        if(d)
            p->deferpool[sc] = d->link;
    }

    // 如果链表为空或 size 超出，则新建。
    if(d == nil) {
        // deferpool is empty or just a big defer
        total = TOTALSIZE(siz);
        d = runtime·malloc(total);
    }

    d->siz = siz;
    d->special = 0;

    // 新建的 Defer 被添加到 G.defer 链表。
    d->link = g->defer;
    g->defer = d;

    return d;
}
```

所有 defer 定义都被转换成 Defer 对象保存在 G.defer 链表中。编译器会在函数尾部插入 "call deferreturn" 指令，确保在退出前调用这些 Defer 对象。

编译器在这里玩了个技巧，用汇编指令重复执行 "call deferreturn"，以便执行当前函数里多个 defer 定义。

panic.c

```
void runtime·deferreturn(uintptr arg0)
{
    Defer *d;
    byte *argp;
    FuncVal *fn;

    // 从 G.defer 获取 Defer 对象。
    d = g->defer;
    if(d == nil)
        return;

    // 第一个参数地址。
    argp = (byte*)&arg0;
```

```
    // 在 deferproc 里提过，d.argp 实际保存了 defer 所在函数堆栈帧的地址，
    // 那么匹配这两个地址，就可以知道是否属于同一个函数栈帧。如果不同，那么这
    // 个 Defer 对象必然不属于当前函数，以此中断 call deferreturn 循环。
    if(d->argp != argp)
        return;

    // 将 Defer 参数入栈。
    runtime·memmove(argp, d->args, d->siz);
    fn = d->fn;

    // 释放 Defer 对象。
    g->defer = d->link;
    freedefer(d);

    // 执行 defer.fn 函数。
    // 两个参数分别是 fn 和 arg0 地址。
    runtime·jmpdefer(fn, argp);
}
```

汇编函数 jmpdefer 虽然只有几行，但是很有意思。

asm_amd64.s

```
// void jmpdefer(fn, sp);
// called from deferreturn.
// 1. pop the caller
// 2. sub 5 bytes from the callers return
// 3. jmp to the argument
TEXT runtime·jmpdefer(SB), NOSPLIT, $0-16
    MOVQ    8(SP), DX     // fn，也就是实际要执行的 defer 函数。
    MOVQ    16(SP), BX    // argp，也就是 callretrurn 参数 arg0 地址。
    LEAQ    -8(BX), SP    // caller sp after CALL
    SUBQ    $5, (SP)      // return to CALL again
    MOVQ    0(DX), BX
    JMP BX                // but first run the deferred function
```

第三行 "-8(BX)" 是什么意思?

BX 保存着 arg0 的地址，该参数在 "call deferreturn" 前保存在栈顶，而 call 指令又会 "PUSH IP" (main.test 0x2050)，所以这个结果就是将 0x2050 入栈。紧接着减去 "call deferreturn" 指令长度 5，正好就是 0x204b。

```
0x000000000000204b <+75>: call   0xeb10 <runtime.deferreturn>
0x0000000000002050 <+80>: add    rsp,0x8
```

这个地址最终由 deferreturn RET 指令 "POP IP"，形成循环调用。配合对 defer.argp 所在栈帧地址检查，就可以完成当前函数多个 defer 定义的调用。

至于 Defer 对象的释放过程，无需多言。

panic.c

```
static void freedefer(Defer *d)
{
    int32 sc;
    P *p;

    if(d->special)
        return;
    sc = DEFERCLASS(d->siz);
    if(sc < nelem(p->deferpool)) {
        p = m->p;
        d->link = p->deferpool[sc];
        p->deferpool[sc] = d;
        // No need to wipe out pointers in argp/pc/fn/args,
        // because we empty the pool before GC.
    } else
        runtime·free(d);
}
```

回过头想想，一个 defer 完整过程要处理缓存对象，参数拷贝，以及多次函数调用。显然比直接函数调用慢得多。

```
func test() {
    lock.Lock()
    lock.Unlock()
}
```

```
(gdb) disass
Dump of assembler code for function main.test:
   0x0000000000002015 <+21>:    sub    rsp,0x8
   0x0000000000002019 <+25>:    lea    rbx,ds:0x65d28
   0x0000000000002021 <+33>:    mov    QWORD PTR [rsp],rbx
   0x0000000000002025 <+37>:    call   0x23450 <sync.(*Mutex).Lock>
   0x000000000000202a <+42>:    lea    rbx,ds:0x65d28
   0x0000000000002032 <+50>:    mov    QWORD PTR [rsp],rbx
   0x0000000000002036 <+54>:    call   0x23560 <sync.(*Mutex).Unlock>
   0x000000000000203b <+59>:    add    rsp,0x8
   0x000000000000203f <+63>:    ret
End of assembler dump.
```

用 benchmark 测试，性能差异在 2x 以上。如果这个函数被大循环多次调用，其结果就非常明显了。因此，合理使用 defer 也是算法优化的一部分。

```
var lock sync.Mutex

func test() {
    lock.Lock()
    lock.Unlock()
}

func test2() {
    lock.Lock()
    defer lock.Unlock()
}

func BenchmarkTest(b *testing.B) {
    for i := 0; i < b.N; i++ {
        test()
    }
}

func BenchmarkTestDefer(b *testing.B) {
    for i := 0; i < b.N; i++ {
        test2()
    }
}
```

```
BenchmarkTest         50000000        43.6 ns/op
BenchmarkTestDefer    20000000         102 ns/op
```

还有一种情况就是用户调用 runtime/Goexit 终止 goroutine 执行。

panic.c

```
void runtime·Goexit(void)
{
    rundefer();
    runtime·goexit();
}

static void rundefer(void)
{
    Defer *d;

    while((d = g->defer) != nil) {
        g->defer = d->link;
        reflect·call(d->fn, (byte*)d->args, d->siz, d->siz);
```

```
        freedefer(d);
    }
}
```

这个时候只需依次处理掉 G.defer 链表里所有 Defer 对象即可，无需判断所属堆栈帧。

第三部分 附录

A. 工具

1. 工具集

1.1 go build

参数	说明	示例
-gcflags	传递给 5g/6g/8g 编译器的参数。	
-ldflags	传递给 5l/6l/8l 链接器的参数。	
-work	查看编译临时目录。	
-n	查看但不执行编译命令。	
-x	查看并执行编译命令。	
-a	强制重新编译所有依赖包。	
-v	查看被编译的包名，包括依赖包。	
-p n	并行编译所使用 CPU core 数量。默认全部。	
-o	输出文件名。	

gcflags

参数	说明	示例
-B	禁用边界检查。	
-N	禁用优化。	
-l	禁用函数内联。	
-u	禁用 unsafe 代码。	
-m	输出优化信息。	
-S	输出汇编代码。	

ldflags

参数	说明	示例
-w	禁用 DRAWF 调试信息，但不包括符号表。	
-s	禁用符号表。	
-X	修改字符串符号值。	-X main.VER '0.99' -X main.S 'abc'
-H	链接文件类型，其中包括 windowsgui。	

更多参数：

```
go help build
go tool 6g -h  或 https://golang.org/cmd/gc/
go tool 6l -h  或 https://golang.org/cmd/ld/
```

1.2 go install

和 go build 参数相同，将生成文件拷贝到 bin、pkg 目录。优先使用 GOBIN 环境变量所指定目录。

1.3 go clean

```
  参数          说明                                          示例
-----------+-----------------------------------------+-----------------------------------
 -n           查看但不执行清理命令。
 -x           查看并执行清理命令。
 -i           删除 bin、pkg 目录下的二进制文件。
 -r           清理所有依赖包临时文件。
```

1.4 go get

下载并安装扩展包。默认保存到 GOPATH 指定的第一个 workspace 目录。

```
  参数          说明                                          示例
-----------+-----------------------------------------+-----------------------------------
 -d           仅下载，不执行安装命令。
 -t           下载执行测试所需的依赖包。
 -u           更新包，包括其依赖包。
 -x           查看并执行命令。
```

2. 条件编译

通过 runtime.GOOS/GOARCH 判断，或使用编译约束标记。

```
// +build darwin linux
                                <--- 必须有空行，以区别包文档。
package main
```

在源文件 (.go, .h, .c, .s 等) 头部添加 "+build" 注释，指示编译器检查相关环境变量。多个约束标记会合并处理。其中空格表示 OR，逗号 AND，感叹号 NOT。

```
// +build darwin linux          --> 合并结果 (darwin OR linux) AND (amd64 AND (NOT cgo))
// +build amd64,!cgo
```

如果 GOOS、GOARCH 条件不符合，则编译器会会忽略该文件。

还可使用文件名来表示编译约束，比如 test_darwin_amd64.go。使用文件名拆分多个不同平台源文件，更利于维护。

```
$ ls -l /usr/local/go/src/pkg/runtime

-rw-r--r--@  1 yuhen  admin   11545 11 29 05:38 os_darwin.c
-rw-r--r--@  1 yuhen  admin    1382 11 29 05:38 os_darwin.h
-rw-r--r--@  1 yuhen  admin    6990 11 29 05:38 os_freebsd.c
-rw-r--r--@  1 yuhen  admin     791 11 29 05:38 os_freebsd.h
-rw-r--r--@  1 yuhen  admin     644 11 29 05:38 os_freebsd_arm.c
-rw-r--r--@  1 yuhen  admin    8624 11 29 05:38 os_linux.c
-rw-r--r--@  1 yuhen  admin    1067 11 29 05:38 os_linux.h
-rw-r--r--@  1 yuhen  admin     861 11 29 05:38 os_linux_386.c
-rw-r--r--@  1 yuhen  admin    2418 11 29 05:38 os_linux_arm.c
```

支持：*_GOOS、*_GOARCH、*_GOOS_GOARCH、*_GOARCH_GOOS 格式。

可忽略某个文件，或指定编译器版本号。更多信息参考标准库 go/build 文档。

```
// +build ignore
// +build go1.2             <--- 最低需要 go 1.2 编译。
```

自定义约束条件，需使用 "go build -tags" 参数。

test.go

```
// +build beta,debug

package main

func init() {
    println("test.go init")
}
```

输出：

```
$ go build -tags "debug beta" && ./test
test.go init

$ go build -tags "debug" && ./test
$ go build -tags "debug \!cgo" && ./test
```

3. 跨平台编译

首先得生成与平台相关的工具和标准库。

```
$ cd /usr/local/go/src

$ GOOS=linux GOARCH=amd64 ./make.bash --no-clean

# Building C bootstrap tool.
cmd/dist

# Building compilers and Go bootstrap tool for host, darwin/amd64.

cmd/6l
cmd/6a
cmd/6c
cmd/6g
pkg/runtime

... ...

---
Installed Go for linux/amd64 in /usr/local/go
Installed commands in /usr/local/go/bin
```

说明：参数 no-clean 避免清除其他平台文件。

然后回到项目所在目录，设定 GOOS、GOARCH 环境变量即可编译目标平台文件。

```
$ GOOS=linux GOARCH=amd64 go build -o test

$ file test
learn: ELF 64-bit LSB executable, x86-64, version 1 (SYSV)

$ uname -a
Darwin Kernel Version 12.5.0: RELEASE_X86_64 x86_64
```

注意：跨平台编译不支持 CGO，默认 CGO_ENABLED=0。

B. 调试

1. GDB

默认情况下，编译的二进制文件已包含 DWARFv3 调试信息，只要 GDB 7.1 以上版本都可以调试。

相关选项:

- 调试: 禁用内联和优化 -gcflags "-N -l"。
- 发布: 删除调试信息和符号表 -ldflags "-w -s"。

除了使用 GDB 的断点命令外，还可以使用 runtime.Breakpoint 函数触发中断。另外，runtime/debug.PrintStack 可用来输出调用堆栈信息。

某些时候，需要手工载入 Go Runtime support (runtime-gdb.py)。

.gdbinit

```
define goruntime
    source /usr/local/go/src/pkg/runtime/runtime-gdb.py
end

set disassembly-flavor intel
set print pretty on
dir /usr/local/go/src/pkg/runtime
```

说明：OSX 环境下，可能需要以 sudo 方式启动 gdb。

2. Data Race

数据竞争 (data race) 是并发程序里不太容易发现的错误，且很难捕获和恢复错误现场。Go 运行时内置了竞争检测，允许我们使用编译器参数打开这个功能。它会记录和监测运行时内存访问状态，发出非同步访问警告信息。

```
func main() {
    var wg sync.WaitGroup
    wg.Add(2)
```

```
    x := 100

    go func() {
        defer wg.Done()

        for {
            x += 1
        }
    }()

    go func() {
        defer wg.Done()
        for {
            x += 100
        }
    }()

    wg.Wait()
}
```

输出：

```
$ GOMAXPROCS=2 go run -race main.go

==================
WARNING: DATA RACE
Write by goroutine 4:
  main.func·002()
      main.go:25 +0x59

Previous write by goroutine 3:
  main.func·001()
      main.go:18 +0x59

Goroutine 4 (running) created at:
  main.main()
      main.go:27 +0x16f

Goroutine 3 (running) created at:
  main.main()
      main.go:20 +0x100
==================
```

数据竞争检测会严重影响性能，不建议在生产环境中使用。

```
func main() {
    x := 100

    for i := 0; i < 10000; i++ {
```

```
        x += 1
    }

    fmt.Println(x)
}
```

输出：

```
$ go build && time ./test

10100

real   0m0.060s
user   0m0.001s
sys    0m0.003s

$ go build -race  && time ./test

10100

real   0m1.025s
user   0m0.003s
sys    0m0.009s
```

通常作为非性能测试项启用。

```
$ go test -race
```

C. 测试

自带代码测试、性能测试、覆盖率测试框架。

- 测试代码必须保存在 *_test.go 文件。
- 测试函数命名符合 TestName 格式，Name 以大写字母开头。

1. Test

使用 testing.T 相关方法决定测试状态。

testing.T

方法	说明	其他
Fail	标记失败，但继续执行该测试函数。	
FailNow	失败，立即停止当前测试函数。	
Log	输出信息。仅在失败或 -v 参数时输出。	Logf
SkipNow	跳过当前测试函数。	Skipf = SkipNow + Logf
Error	Fail + Log	Errorf
Fatal	FailNow + Log	Fatalf

main_test.go

```
package main

import (
    "testing"
    "time"
)

func sum(n ...int) int {
    var c int
    for _, i := range n {
        c += i
    }

    return c
}

func TestSum(t *testing.T) {
    time.Sleep(time.Second * 2)
    if sum(1, 2, 3) != 6 {
        t.Fatal("sum error!")
    }
```

```
}

func TestTimeout(t *testing.T) {
    time.Sleep(time.Second * 5)
}
```

默认 go test 执行所有单元测试函数，支持 go build 参数。

```
  参数             说明                                        示例
---------------+-----------------------------------------+-------------------------------
 -c              仅编译，不执行测试。
 -v              显示所有测试函数执行细节。
 -run regex      执行指定的测试函数。(正则表达式)
 -parallel n     并发执行测试函数。 (默认: GOMAXPROCS)
 -timeout t      单个测试超时时间。                          -timeout 2m30s
```

```
$ go test -v -timeout 3s

=== RUN TestSum
--- PASS: TestSum (2.00 seconds)
=== RUN TestTimeout
panic: test timed out after 3s
FAIL   test   3.044s


$ go test -v -run "(?i)sum"

=== RUN TestSum
--- PASS: TestSum (2.00 seconds)
PASS
ok     test   2.044s
```

2. Benchmark

性能测试需要运行足够多的次数才能计算单次执行平均时间。

```
func BenchmarkSum(b *testing.B) {
    for i := 0; i < b.N; i++ {
        if sum(1, 2, 3) != 6 {
            b.Fatal("sum")
        }
    }
}
```

默认情况下，go test 不会执行性能测试函数，须使用 "-bench" 参数。

go test

参数	说明	示例
-bench regex	执行指定性能测试函数。(正则表达式)	
-benchmem	输出内存统计信息。	
-benctime t	设置每个性能测试运行时间。	-benchtime 1m30s
-cpu	设置并发测试。默认 GOMAXPROCS。	-cpu 1,2,4

```
$ go test -v -bench .

=== RUN TestSum
--- PASS: TestSum (2.00 seconds)
=== RUN TestTimeout
--- PASS: TestTimeout (5.00 seconds)
PASS

BenchmarkSum    100000000    11.0 ns/op

ok     test   8.358s


$ go test -bench . -benchmem -cpu 1,2,4 -benchtime 30s

BenchmarkSum       5000000000    11.1 ns/op    0 B/op    0 allocs/op
BenchmarkSum-2     5000000000    11.4 ns/op    0 B/op    0 allocs/op
BenchmarkSum-4     5000000000    11.3 ns/op    0 B/op    0 allocs/op

ok     test   193.246s
```

3. Example

与 testing.T 类似，区别在于通过捕获 stdout 输出来判断测试结果。

```
func ExampleSum() {
    fmt.Println(sum(1, 2, 3))
    fmt.Println(sum(10, 20, 30))
    // Output:
    // 6
    // 60
}
```

不能使用内置函数 print/println，它们默认输出到 stderr。

```
$ go test -v

=== RUN: ExampleSum
--- PASS: ExampleSum (8.058us)
PASS

ok     test   0.271s
```

Example 代码可输出到文档，详情参考包文档章节。

4. Cover

除显示代码覆盖率百分比外，还可输出详细分析记录文件。

go test

```
  参数             说明
---------------+-------------------------------------------------------------------------
 -cover          允许覆盖分析。
 -covermode      代码分析模式。（set: 是否执行; count: 执行次数; atomic: 次数，并发支持）
 -coverprofile   输出结果文件。
```

```
$ go test -cover -coverprofile=cover.out -covermode=count

PASS
coverage: 80.0% of statements
ok     test   0.043s


$ go tool cover -func=cover.out

test.go:    Sum             100.0%
test.go:    Add             0.0%
total:      (statements)    80.0%
```

用浏览器输出结果，能查看更详细直观的信息。包括用不同颜色标记覆盖、运行次数等。

```
$ go tool cover -html=cover.out
```

说明：将鼠标移到代码块，可以看到具体的执行次数。

5. PProf

监控程序执行，找出性能瓶颈。

除调用 runtime/pprof 相关函数外，还可直接用测试命令输出所需记录文件。

```
import (
    "os"
    "runtime/pprof"
)

func main() {
    // CPU
    cpu, _ := os.Create("cpu.out")
    defer cpu.Close()
    pprof.StartCPUProfile(cpu)
    defer pprof.StopCPUProfile()

    // Memory
    mem, _ := os.Create("mem.out")
    defer mem.Close()
    defer pprof.WriteHeapProfile(mem)

    // code ...
}
```

go test

```
  参数                          说明
--------------------------+-------------------------------------------------------------
 -blockprofile block.out     goroutine 阻塞。
 -blockprofilerate n         超出该参数设置时间的阻塞才被记录。单位：纳秒
 -cpuprofile cpu.out
 -memprofile mem.out         内存分配。
 -memprofilerate n           超出该参数设置的内存分配才被记录。单位：字节，默认 512KB。
```

输出分析结果。

```
$ go tool pprof -text test cpu.out

Total: 443 samples
     440  99.3%  99.3%      443 100.0% net.sotypeToNet
       1   0.2%  99.5%        1   0.2% net.(*UDPConn).WriteToUDP
       1   0.2%  99.8%        1   0.2% runtime.FixAlloc_Free
       1   0.2% 100.0%        1   0.2% strconv.ParseInt
       0   0.0% 100.0%      443 100.0% net.unixSocket
```

```
       0   0.0% 100.0%       53  12.0% runtime.InitSizes
       0   0.0% 100.0%      321  72.5% runtime.cmalloc
       0   0.0% 100.0%        1   0.2% runtime.convT2E
       0   0.0% 100.0%        1   0.2% runtime.gc
       0   0.0% 100.0%        1   0.2% runtime.printeface
       0   0.0% 100.0%      136  30.7% syscall.Kevent
       0   0.0% 100.0%       97  21.9% syscall.Read
       0   0.0% 100.0%      251  56.7% syscall.Syscall
       0   0.0% 100.0%      136  30.7% syscall.Syscall6
       0   0.0% 100.0%      154  34.8% syscall.Write
       0   0.0% 100.0%      136  30.7% syscall.kevent
```

共计 443 次采样，大约每秒 100 次，耗时 5 秒左右。各列数据含义：

```
    +- 当前函数采样次数（不包括它调用的其他函数）
    |
    |    +- 当前函数采样所占百分比
    |    |
    |    |
    440  99.3%  99.3%      443 100.0% net.sotypeToNet
                |          |   |
                |          |   +- 当前函数及其所调用函数所占百分比
                |          |
                |          +- 当前函数及其所调用函数采样次数
                |
                +- 列表前几行（含当前行）累计所占百分比。
```

还可使用 web 参数在浏览器输出图形。(需安装 graphviz)

```
$ go tool pprof -web test cpu.out
```

内存记录文件输出格式类似。如不使用 text/web 参数，将进入交互命令模式。