Go 学习笔记

第 2 版

好好学习　天天向上

前言

转眼用 Go 写程序已经两年了，一路惊喜，一路埋坑。老版笔记也是补丁摞补丁，不堪入目。早有心思重写，可一直被 Go 的不稳定状态所困扰，怕白费功夫。如今这 1.2 算是一个里程碑，终于着手扫尘出新。

新版重新规划了目录结构，将语言和工具分离开来，而且不再包含频繁变化的标准库内容。第二部分由源码剖析等高阶内容代替，以便了解更多底层实现信息。

内容力求简洁，以便在较短时间内完成阅读和复习。如没有大的意外，这个版本会坚持到下一个里程碑。

不定期更新，可到 https://github.com/qyuhen/book 下载最新版本。

联系方式:

- qyuhen@hotmail.com

雨痕 二〇一三年末于北京家中

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。

2014-05-20 更新。

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	128		
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.c: runtime·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

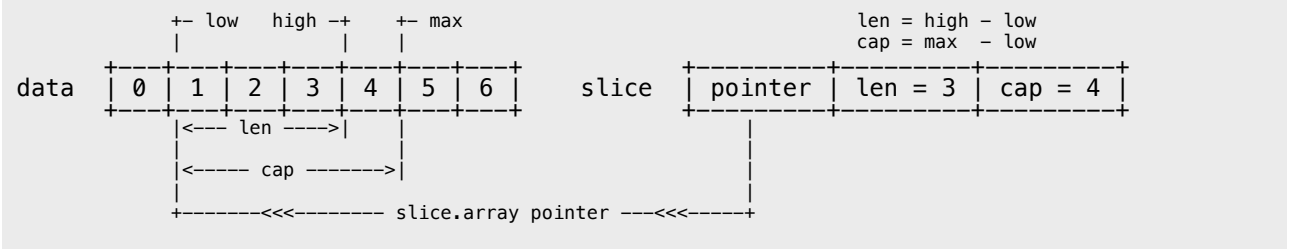
需要说明，slice 并不是数组或数组指针。它通过内部指针和相关属性引用数组片段，以实现变长方案。

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 。

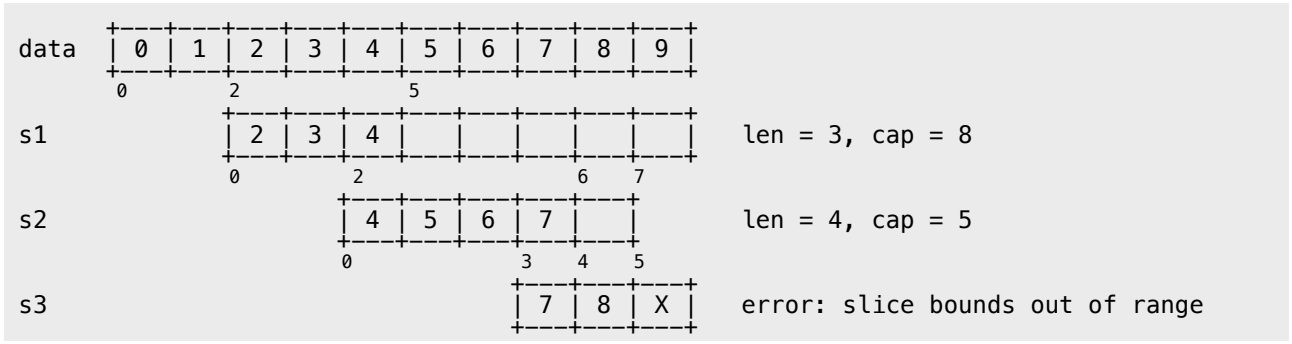
```
data := [][]int{
    []int{1, 2, 3},
    []int{100, 200},
    []int{11, 22, 33, 44},
}
```

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。
    println(k, v)
}
```

不能保证迭代次序和添加时相同，具体结果和不同版本的实现有关。

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。

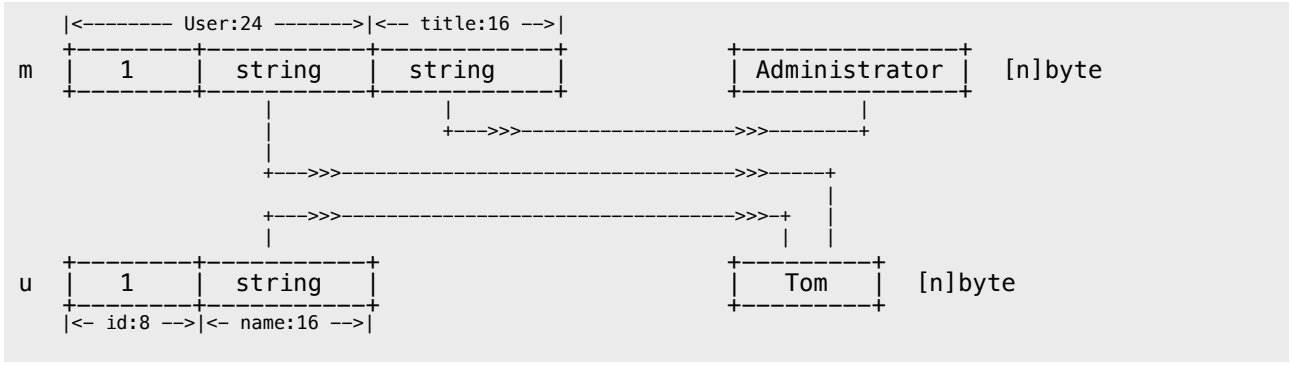
```
type User struct {
    id   int
    name string
}

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。

第二部分 源码

基于 go 1.2，相关文件位于 go/src/pkg/runtime 目录。为便于阅读，示例代码做过裁剪。另外，本文没有提供 32-bit 代码分析，请自行参考源码文件。

1. Memory Allocator

在 malloc.h 开头有一大段注释，明确表示 “Memory allocator, based on tcmalloc”，详细描述了内存分配器的相关信息，仔细阅读有助于理解本章内容。

```
// 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-M) 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.
```

举例来描述内存分配器的算法流程，假设每次为对象分配内存都是一次人力资源请求。

作为管理成千上万人力资源的公司 (heap)，基于成本考虑，每次招聘不可能是一两个人，通常是一百或者更多。这些人依照实际用工需要，被安排到不同部门 (central) 接受职业培训。

当门店 (cache) 接到客户请求 (malloc)，就从对应部门调人 (object) 过来，为其安排任务。在完成任务后，此人并不会立即回到上级部门，而是留在门店。因为按以往经验，该地区出现类似需求的几率很高。如此，可避免去上级部门排队 (lock) 申请调人，影响客户服务。

如果门店经理发现某工种滞留人员过多，就会打发其中一部分回培训部，因为其他门店可能更需要这些人。

公司得给每个人发工资，自然不能让人闲着。如某部门闲散人员过多，那么就让其中一些人转岗去别的人力紧缺部门，接受新职业培训后，积极完成客户需求。

通过两次平衡，即满足了门店的快速服务，又避免了人力浪费。

另外，董事会定期巡查所有部门，如发现某部门转岗后还有大量闲人，那么就解聘一些，以缩减运营成本。只是这些人的工位依然保留，一旦需要，立即招聘填充，避免影响公司管理架构。

1.1 基本概念

内存分配器想要高效，无非是要满足几个条件：首先，是向操作系统申请大块内存，减少系统调用次数；其次，将大块内存分割成多种不同大小规格的小块缓存，用于数量庞大的小对象快速分配和复用；最后，在多个线程之间平衡缓存，即避免锁造成的性能问题，还要充分利用已申请内存。

内存申请和管理以页 (4096 字节) 为单位。每次申请内存，heap 都新建一个名为 span 的对象将这些页管理起来。这么做是为了减少碎片，尽可能提供更大块内存用于分割。

malloc.h

```
struct MSpan
{
    MSpan    *next;        // in a span linked list
    MSpan    *prev;        // in a span linked list
    PageID    start;       // starting page number, start = page_address>>PageShift
    uintptr   npages;      // number of pages in span
    MLink    *freelist;    // list of free objects
    uint32    ref;         // number of allocated objects in this span
    int32     sizeclass;   // size class
    uintptr   elemsize;    // computed from sizeclass or from npages
    uint32    state;       // MSpanInUse etc
};
```

另一方面，页对于大多数对象来说太大了。因此，以 8 的倍数为单位，将对象分成不同级别，比如长度 1 ~ 8 字节为 L1，9 ~ 16 为 L2，如此等等。分配器以 32KB 为界，将对象分为大小两种，所有小对象都能对应到 60 个级别中的一种。

将 span 的大块内存按需切分成不同级别存储单元，以满足不同小对象的存储需求。举例来说，存储 13 字节小对象，只需找到 L2.span，从中获取一个存储单元即可。至于大对象，直接用一个大小合适的 span 当存储单元。

在分配器中，级别称为 sizeclass，每个切分出来的对象存储单元称为 object。

malloc.h

```
enum
{
    // Computed constant.  The definition of MaxSmallSize and the
    // algorithm in msize.c produce some number of different allocation
    // size classes.  NumSizeClasses is that number.  It's needed here
    // because there are static arrays of this length; when msize runs its
    // size choosing algorithm it double-checks that NumSizeClasses agrees.
```

```
    NumSizeClasses = 61,

    // Tunable constants.
    MaxSmallSize = 32<<10,
}

// Size classes.  Computed and initialized by InitSizes.
//
// 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

extern int8  runtime·size_to_class8[1024/8 + 1];
extern int8  runtime·size_to_class128[(MaxSmallSize-1024)/128 + 1];

int32 runtime·SizeToClass(int32);
extern int32 runtime·class_to_size[NumSizeClasses];
extern int32 runtime·class_to_allocnpages[NumSizeClasses];
```

在初始化阶段，分配器向操作系统申请预留了超大范围的虚拟地址，其管理算法依赖连续内存地址做索引因子，必须阻止其他内存申请操作占用这些地址。

所保留地址用途分成三个部分：

- arena: 向操作系统申请存储内存的实际地址范围。
- spans: 数组指针，记录页所对应 span 对象，用于反查和合并。
- bitmap: 位图，为内存地址提供 4 bit 属性标记位，用于垃圾回收等。

malloc.h

```
struct MHeap
{
    // span lookup
    MSpan** spans;               // index = span->start - arena_start>>PageShift
    uintptr spans_mapped;

    // range of addresses we might see in the heap
    byte *bitmap;
    uintptr bitmap_mapped;

    byte *arena_start;
    byte *arena_used;
```

```
    byte *arena_end;
};
```

作为管理用途的 spans、bitmap，可随 arena 线性增量申请同步扩张，节约内存。

如同每个 CPU 核心都有自己的缓存，内存分配器为每个工作线程绑定一个本地缓存管理对象 cache。这样可在无锁状态下快速获取存储单元，减少因为竞争导致排队。

将同一级别的 object 单元串成链表，然后用数组管理这些链表。需要时，用 classsize 做数组索引就可找到对应链表，提取或归还 object。

malloc.h

```
struct MLink            // 将 object 转型成 MLink，存储下一个 object 指针，构成链表。
{
    MLink *next;
};

// Per-thread (in Go, per-M) cache for small objects.
// No locking needed because it is per-thread (per-M).
struct MCacheList
{
    MLink *list;
    uint32 nlist;
};

struct MCache
{
    MCacheList list[NumSizeClasses];
};
```

当对应链表无法提供可用缓存时，就须向下层机构 central 申请。

分配器在 heap 里管理着多个 central 对象，每个对应一种 sizeclass。它从 heap 获取 span，按 sizeclass 切分成 object，保存到 span.freelist 链表里。切分完成的 span，被放到 noempty 链表里。

当 cache 申请内存时，从 noempty 链表拿出一个 span，将它的 freelist 移交过去就行了。至于这个没有剩余空间的 span 会被转移到 emtpy 链表。

malloc.h

```
struct MCentral
{
```

```
    Lock;
    int32 sizeclass;
    MSpan nonempty;
    MSpan empty;
    int32 nfree;
};

struct MHeap
{
    // central free lists for small size classes.
    struct {
        MCentral;
    } central[NumSizeClasses];
};
```

当 object 被归还给 cache 时，分配器会检查所对应链表容量。如超出某个阈值，就提取一部分送回 central，以分配给其他饥饿线程使用。

通过 heap.spans 可反查到 object 所对应的 span。当 central 发现某个 span 收回全部 object 时，会将其送还给 heap，以便分配给其他 central 使用。

分配器使用 central 来平衡内存分配，让每个 cache 仅持有合适数量的 object，并回收那些空闲的大块内存，用于切分其他级别 object，减少了内存浪费。

整个进程只有一个 heap，它管理着内存分配的各个方面。除前面提及的那些，还有两个重要的 span 管理链表。

malloc.h

```
extern MHeap runtime·mheap;

MaxMHeapList = 1<<(20 - PageShift),    // Maximum page length for fixed-size list.

struct MHeap
{
    Lock;
    MSpan free[MaxMHeapList];    // free lists of given length
    MSpan large;                 // free lists length >= MaxMHeapList
};
```

将页数相同的 span 串成链表，放到 free 数组，超出页数限制的统统发配到 large 链表里。与前面一样，这是为了快速获取大小合适的 span。

具体算法：在 free 数组找到和需求页数相同的链表，如链表为空，就遍历数组中页数更多的链表。如全部失败，则继续检查 large，直至从操作系统申请新的内存为止。

依据上面的算法，所拿到的 span 页数可能大于需求预期。为避免浪费，分配器将多余部分截取下来，重新放回链表中。不过在放回之前，会通过 heap.spans 检查相邻 span 状态，尽可能合并成更大的 span 内存块。这么做从可减少碎片，提高内存利用率。同样，从操作系统申请内存时，也会尝试合并操作。

1.2 初始化

函数 mallocinit 除调用 InitSizes 初始化 size_to_class 等几个全局表外，最重要的就是设定保留虚拟地址范围。

malloc.goc

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

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

        // 在 64-bit 系统中，实际保留地址 256MB spans + 8GB bitmap + 128GB arena
        arena_size = MaxMem;
        bitmap_size = arena_size / (sizeof(void*)*8/4);
        spans_size = arena_size / PageSize * sizeof(runtime·mheap.spans[0]);
        spans_size = ROUND(spans_size, PageSize);

        // 起始地址 0xc000000000，如果失败则换个位置。
        for(i = 0; i <= 0x7f; i++) {
            p = (void*)(i<<40 | 0x00c0ULL<<32);

            // 保留虚拟地址范围，并未实际分配内存。
            p = runtime·SysReserve(p, bitmap_size + spans_size + arena_size);
            if(p != nil) break;
        }
    }

    // 保留区域头部存储 spans、bitmap。仅设置地址，并没有分配内存。
    runtime·mheap.spans = (MSpan**)p;
    runtime·mheap.bitmap = p + spans_size;

    // 确定地址范围和线性分配起始地址 arena_used。每次分配成功后后移该地址。
    runtime·mheap.arena_start = p + spans_size + bitmap_size;
    runtime·mheap.arena_used = runtime·mheap.arena_start;
    runtime·mheap.arena_end = runtime·mheap.arena_start + arena_size;
```

```
    // 初始化 heap 全局变量，为当前线程创建 cache。
    runtime·MHeap_Init(&runtime·mheap);
    m->mcache = runtime·allocmcache();
}
```

```
 spans              bitmap           arena
|****--------------|------------****|************------------------------------------|
     spans_mapped        bitmap_mapped      arean_start     arena_used                              arena_end
```

分配器用 mmap 向操作系统增量申请内存，不管预留多大的虚拟地址空间，也只在实际读写时，操作系统才会按页分配物理内存。

另外，OSX/darwin SysReserve 函数中 mmap 没有使用 MAP_FIXED 参数，因此其保留起始地址未必是 0xc000000000。

mem_darwin.c

```
void* runtime·SysReserve(void *v, uintptr n)
{
    void *p = runtime·mmap(v, n, PROT_NONE, MAP_ANON|MAP_PRIVATE, -1, 0);
    if(p < (void*)4096) return nil;
    return p;
}
```

1.3 分配流程

从分配函数 malloc、new 开始剖析整个分配流程。

malloc.goc

```
void* runtime·malloc(uintptr size)
{
    return runtime·mallocgc(size, 0, FlagNoInvokeGC);
}

void runtime·new(Type *typ, uint8 *ret)
{
    ret = runtime·mallocgc(typ->size, ...);
}
```

超过 32KB 的大对象从 heap 分配，小对象直接从 cache 对应链表中提取。

malloc.goc

```
void* runtime·mallocgc(uintptr size, uintptr typ, uint32 flag)
{
    MCache *c;
    MCacheList *l;
    uintptr npages;
    MSpan *s;
    MLink *v;

    c = m->mcache;  // m 当前线程。

    // 小对象从 cache 提取 object，大对象直接从 heap 分配。
    if(size <= MaxSmallSize) {
        // 计算对应 sizeclass。
        if(size <= 1024-8)
            sizeclass = runtime·size_to_class8[(size+7)>>3];
        else
            sizeclass = runtime·size_to_class128[(size-1024+127) >> 7];

        // 用 sizeclass 做索引，找到对应链表。
        l = &c->list[sizeclass];

        // 如果没有可用 object，从 central 批发一些过来。
        if(l->list == nil)
            runtime·MCache_Refill(c, sizeclass);

        // 从链表取出第一个可用 object。
        v = l->list;

        // 调整链表状态。
        l->list = v->next;
        l->nlist--;
    } else {
        // 直接从 mheap 获取大小合适的 span。
        npages = size >> PageShift;
        s = runtime·MHeap_Alloc(&runtime·mheap, npages, 0, 1, !(flag & FlagNoZero));
        v = (void*)(s->start << PageShift);
    }

    // 在 heap.bitmap 中标记 object 状态。
    if(!(flag & FlagNoGC))
        runtime·markallocated(v, size, (flag&FlagNoScan) != 0);

    // 检查是否触发垃圾回收。
    if(!(flag & FlagNoInvokeGC) && mstats.heap_alloc >= mstats.next_gc)
        runtime·gc(0);

    return v;
}
```

如果链表为空，则需要从相同 sizeclass 的 central 批量获取的 object。

mcache.c

```
void runtime·MCache_Refill(MCache *c, int32 sizeclass)
{
    MCacheList *l = &c->list[sizeclass];
    l->nlist = runtime·MCentral_AllocList(&runtime·mheap.central[sizeclass], &l->list);
}
```

直接将找到的 span.freelist 返回给 cache，有别于 1.2 版本之前使用数量表的做法。

mcentral.c

```
int32 runtime·MCentral_AllocList(MCentral *c, MLink **pfirst)
{
    MSpan *s;
    int32 cap, n;

    // 加锁
    runtime·lock(c);

    // 如果 noemtpy 链表上没有 span，也就意味着没有剩余 object 可返回。
    if(runtime·MSpanList_IsEmpty(&c->nonempty)) {
        if(!MCentral_Grow(c)) {   // 从 heap 获取 heap，切割 object。
            return 0;
        }
    }

    // 从 nonemtpy 链表提取可用 span。
    s = c->nonempty.next;

    // 计算可用 object 数量。
    cap = (s->npages << PageShift) / s->elemsize;
    n = cap - s->ref;

    // 直接返回整个 span.freelist。
    *pfirst = s->freelist;

    // 调整 span 和 central 状态。
    s->freelist = nil;
    s->ref += n;
    c->nfree -= n;

    // 将 span 转移到 emtpy 链表。
    runtime·MSpanList_Remove(s);
    runtime·MSpanList_Insert(&c->empty, s);
```

```
    runtime·unlock(c);
    return n;
}
```

扩张 central 时，需将获取的 span 切割成 object 存储到 span.freelist 链表。该 span 会被添加到 central.noempty，表示非空，有 object 可供使用。

mcentral.c

```
static bool MCentral_Grow(MCentral *c)
{
    // 获取 central 相关信息。
    runtime·MGetSizeClassInfo(c->sizeclass, &size, &npages, &n);

    // 从 heap 获取可用 span。
    s = runtime·MHeap_Alloc(&runtime·mheap, npages, c->sizeclass, 0, 1);

    // 按 sizeclass 切割成 object，保存到 freelist。
    tailp = &s->freelist;
    p = (byte*)(s->start << PageShift); // 起始地址
    for(i=0; i<n; i++) {
        v = (MLink*)p;
        *tailp = v;
        tailp = &v->next;
        p += size;
    }

    // 调整 central 可用 object 数量。
    c->nfree += n;

    // 将 span 添加到 noemtpy 链表。
    runtime·MSpanList_Insert(&c->nonempty, s);

    return true;
}
```

从 heap 获取 span 一样要加锁。

mheap.c

```
MSpan* runtime·MHeap_Alloc(MHeap *h, uintptr npage, int32 sizeclass, int32 acct, int32
zeroed)
{
    runtime·lock(h);

    s = MHeap_AllocLocked(h, npage, sizeclass);
```

```
    runtime·unlock(h);
    return s;
}
```

首先从 free 数组中寻找页数相同的 span 链表，如链表为空，那么找页数更多的链表。再不行，就从 large 里面找。全部失败时，就得向操作系统申请内存了。

如果找到的 span 太大，就将多余的部分截取出来，放回链表。在返回 span 之前，按页在 heap.spans 对应位置填写指针，用于反查。

mheap.c

```
static MSpan* MHeap_AllocLocked(MHeap *h, uintptr npage, int32 sizeclass)
{
    MSpan *s, *t;
    PageID p;

    // 从 free 数组寻找合适的 span。
    for(n=npage; n < nelem(h->free); n++) {
        // 如果该链表为空，那么继续找页数更多的链表。
        if(!runtime·MSpanList_IsEmpty(&h->free[n])) {
            s = h->free[n].next;
            goto HaveSpan;
        }
    }

    // 如果在 free 所有链表里都没找到，继续从 large 链表中找。
    if((s = MHeap_AllocLarge(h, npage)) == nil) {
        // 全部失败，扩张 heap。
        if(!MHeap_Grow(h, npage)) return nil;

        // 再次从 large 中分配。
        if((s = MHeap_AllocLarge(h, npage)) == nil) return nil;
    }

HaveSpan:
    // 如果返回 span 页数大于期望。
    if(s->npages > npage) {
        // 截取 span 尾部多余部分，生成新的 span。
        t = runtime·FixAlloc_Alloc(&h->spanalloc);
        runtime·MSpan_Init(t, s->start + npage, s->npages - npage);
        s->npages = npage;

        // 在 heap.spans 标记截取出来的 span 信息。
        p = t->start;
        if(sizeof(void*) == 8)
            p -= ((uintptr)h->arena_start>>PageShift); // 注意减去 arena_start。
```

```
        if(p > 0) h->spans[p-1] = s;                    // 标记待返回 span 结束位置。
        h->spans[p] = t;
        h->spans[p+t->npages-1] = t;
        t->state = MSpanInUse;

        // 将截取出来的 span 放回 free/large 链表。该函数会执行合并操作。
        MHeap_FreeLocked(h, t);
    }

    // 修正待返回 span 属性，并在 heap.spans 标记信息。
    s->sizeclass = sizeclass;
    p = s->start;
    if(sizeof(void*) == 8) p -= ((uintptr)h->arena_start>>PageShift);

    for(n=0; n<npage; n++)   // 在 heap.spans 所有对应位置填写 span 指针。
        h->spans[p+n] = s;   //   mheap.c runtime·MHeap_Lookup, MHeap_LookupMaybe

    return s;
}
```

将 span 放回链表前，会尝试合并相邻块。

mheap.c

```
static void MHeap_FreeLocked(MHeap *h, MSpan *s)
{
    // 修改 span 状态。
    s->state = MSpanFree;

    p = s->start;
    if(sizeof(void*) == 8) p -= (uintptr)h->arena_start >> PageShift;

    // 检查 heap.spans，合并该 span 前后相邻未使用的 span，形成更大内存块。
    if(p > 0 && (t = h->spans[p-1]) != nil && t->state != MSpanInUse) {
        // 合并左侧 span。
        s->start = t->start;
        s->npages += t->npages;
        s->npreleased = t->npreleased; // absorb released pages
        p -= t->npages;
        h->spans[p] = s;

        // 释放左侧 span 资源。
        runtime·MSpanList_Remove(t);
        t->state = MSpanDead;
        runtime·FixAlloc_Free(&h->spanalloc, t);
    }
```

```
    if((p+s->npages)*sizeof(h->spans[0]) < h->spans_mapped &&
        (t = h->spans[p+s->npages]) != nil && t->state != MSpanInUse) {
        // 合并右侧 span。
        s->npages += t->npages;
        s->npreleased += t->npreleased;
        h->spans[p + s->npages - 1] = s;

        // 释放右侧 span 资源。
        runtime·MSpanList_Remove(t);
        t->state = MSpanDead;
        runtime·FixAlloc_Free(&h->spanalloc, t);
    }

    // 根据页数决定插入 free 还是 large 链表。
    if(s->npages < nelem(h->free))
        runtime·MSpanList_Insert(&h->free[s->npages], s);
    else
        runtime·MSpanList_Insert(&h->large, s);
}
```

从操作系统申请内存，其大小总是 64KB 的倍数，最少 1MB。

mheap.c

```
static bool MHeap_Grow(MHeap *h, uintptr npage)
{
    // 最小 1MB，总是 64KB (16 Pages) 的倍数。
    npage = (npage+15)&~15;
    ask = npage<<PageShift;
    if(ask < HeapAllocChunk)                // HeapAllocChunk = 1<<20
        ask = HeapAllocChunk;

    // 从操作系统分配内存。
    v = runtime·MHeap_SysAlloc(h, ask);

    // 创建新 Span 对象，管理新分配内存。
    s = runtime·FixAlloc_Alloc(&h->spanalloc);
    runtime·MSpan_Init(s, (uintptr)v>>PageShift, ask>>PageShift);

    p = s->start;
    if(sizeof(void*) == 8) p -= ((uintptr)h->arena_start>>PageShift);

    // 在 heap.spans 标记 span。
    h->spans[p] = s;
    h->spans[p + s->npages - 1] = s;
    s->state = MSpanInUse;

    // 添加到 free/large 链表，一样会合并相邻未使用的 span。
```

```
    MHeap_FreeLocked(h, s);

    return true;
}
```

函数 MHeap_SysAlloc 表明 Go 存在内存上限，并不会扩大保留地址范围。不过 64 位系统 128GB 的保留地址空间，暂时够用了。

malloc.goc

```
void* runtime·MHeap_SysAlloc(MHeap *h, uintptr n)
{
    // 判断是否在保留区域内。
    if(n <= h->arena_end - h->arena_used) {
        // 使用了 arena_used 作为分配地址。
        p = h->arena_used;

        // 在指定地址分配内存。
        runtime·SysMap(p, n, &mstats.heap_sys);

        // 调整下一次分配地址。
        h->arena_used += n;

        // 按需为 heap.spans 等分配内存。
        runtime·MHeap_MapBits(h);
        runtime·MHeap_MapSpans(h);

        return p;
    }

    return p;
}
```

最终通过 mmap、VirtualAlloc 向操作系统申请内存，注意指定 arena_used 作为开始地址。

mem_linux.c

```
void runtime·SysMap(void *v, uintptr n, uint64 *stat)
{
    void *p;

    runtime·xadd64(stat, n);

    // On 64-bit, we don't actually have v reserved, so tread carefully.
    if(sizeof(void*) == 8 && (uintptr)v >= 0xffffffffU) {
        p = mmap_fixed(v, n, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_ANON|MAP_PRIVATE, -1, 0);
```

```
        if(p == (void*)ENOMEM)
            runtime·throw("runtime: out of memory");
        if(p != v) {
            runtime·printf("runtime: address space conflict: map(%p) = %p\n", v, p);
            runtime·throw("runtime: address space conflict");
        }

        return;
    }

    p = runtime·mmap(v, n, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_ANON|MAP_FIXED|MAP_PRIVATE, -1, 0);

    if(p == (void*)ENOMEM)
        runtime·throw("runtime: out of memory");
    if(p != v)
        runtime·throw("runtime: cannot map pages in arena address space");
}
```

mem_windows.c

```
void runtime·SysMap(void *v, uintptr n, uint64 *stat)
{
    void *p;

    runtime·xadd64(stat, n);
    p = runtime·stdcall(runtime·VirtualAlloc, 4, v, n,
        (uintptr)MEM_COMMIT, (uintptr)PAGE_READWRITE);

    if(p != v)
        runtime·throw("runtime: cannot map pages in arena address space");
}
```

1.4 释放流程

调用 free 释放 object，更确切说是还给 cache 或 heap。

malloc.goc

```
void runtime·free(void *v)
{
    // 查找管理该 object 的 span。
    if(!runtime·mlookup(v, nil, nil, &s)) { ... }

    sizeclass = s->sizeclass;
    c = m->mcache;
```

```
    if(sizeclass == 0) {
        // 大对象直接归还给 heap。
        runtime·MHeap_Free(&runtime·mheap, s, 1);
    } else {
        // 将 object 归还给 cache。
        runtime·MCache_Free(c, v, sizeclass, size);
    }
}
```

对象释放规则和分配相对应。只需跟踪小对象，反正最终也得回到 heap。

mcache.c

```
void runtime·MCache_Free(MCache *c, void *v, int32 sizeclass, uintptr size)
{
    MCacheList *l;
    MLink *p;

    // 找到对应的链表。
    l = &c->list[sizeclass];

    // 将 object 指针转换成 MLink*，添加到链表头部。
    p = v;
    p->next = l->list;
    l->list = p;

    // 调整链表和 cache 属性。
    l->nlist++;
    c->local_cachealloc -= size;

    // 如果链表上的 object 数量超出初始值的 2 倍，则归还一半给 central。
    if(l->nlist >= 2*(runtime·class_to_allocnpages[sizeclass]<<PageShift)/size)
        ReleaseN(l, l->nlist/2, sizeclass);
}
```

内存池本质就是复用，将 object 重新放回 cache 链表是很自然的。但如果 cache 持有太多空闲 object 就会造成浪费，可能其他线程 cache 更需要这些内存单元。

mcache.c

```
static void ReleaseN(MCacheList *l, int32 n, int32 sizeclass)
{
    MLink *first, **lp;
    int32 i;

    // 提取头部 n 个 object 组成链表。
    first = l->list;
    lp = &l->list;
```

```
    for(i=0; i<n; i++)
        lp = &(*lp)->next;
    l->list = *lp;
    *lp = nil;
    l->nlist -= n;

    // 将链表归还给 central。
    runtime·MCentral_FreeList(&runtime·mheap.central[sizeclass], first);
}
```

循环链表，依次将 object 交回对应的 span.freelist。如果发现 span 已收回全部内存，那么将其还给 heap。

mcentral.c

```
void runtime·MCentral_FreeList(MCentral *c, MLink *start)
{
    MLink *next;
    runtime·lock(c);

    // 循环链表，依次归还 object。
    for(; start != nil; start = next) {
        next = start->next;
        MCentral_Free(c, start);
    }

    runtime·unlock(c);
}

static void MCentral_Free(MCentral *c, void *v)
{
    MSpan *s;
    MLink *p;

    // 找到管理该 object 的 span。
    s = runtime·MHeap_Lookup(&runtime·mheap, v);

    // 将 span 转移到 noempty 链表。
    if(s->freelist == nil) {
        runtime·MSpanList_Remove(s);
        runtime·MSpanList_Insert(&c->nonempty, s);
    }

    // 将 object 加到 span.freelist 头部。
    p = v;
    p->next = s->freelist;
    s->freelist = p;
    c->nfree++;
```

```
    // 调整 span 分配计数器。如满血，那么将 span 还给 heap。
    if(--s->ref == 0) {
        size = runtime·class_to_size[c->sizeclass];

        // 从 central 链表中移除，然后交还给 heap。
        runtime·MSpanList_Remove(s);
        runtime·MHeap_Free(&runtime·mheap, s, 0);
    }
}
```

调用 MHeap_FreeLocked 函数，合并相邻 span，然后添加到 heap 管理链表。释放过程到此为止，内存只是还给 heap，将其释放给操作系统是由垃圾回收器完成的。

mheap.c

```
void runtime·MHeap_Free(MHeap *h, MSpan *s, int32 acct)
{
    MHeap_FreeLocked(h, s);
}
```

1.5 其他

内存管理对象中，cache 和 span 在运行期动态创建。它们引用 arena 内存，但自身并不从 arena 分配，而是使用 FixAlloc 内存分配器。

每个 FixAlloc 实例管理和分配一种固定长度的对象，按需使用 mmap 申请内存。

malloc.h

```
// FixAlloc is a simple free-list allocator for fixed size objects. Malloc uses a
// FixAlloc wrapped around SysAlloc to manages its MCache and MSpan objects.
struct FixAlloc
{
    uintptr  size;
    void     (*first)(void *arg, byte *p);    // called first time p is returned
    void*    arg;
    MLink*   list;
    byte*    chunk;
    uint32   nchunk;
    uintptr  inuse;    // in-use bytes now
};
```

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;
}
```

在初始化 heap 时，创建了 spanalloc 和 cachealloc 两个 FixAlloc 分配器对象。

mheap.c

```
void runtime·MHeap_Init(MHeap *h)
{
    runtime·FixAlloc_Init(&h->spanalloc, sizeof(MSpan), RecordSpan, h, ...);
    runtime·FixAlloc_Init(&h->cachealloc, sizeof(MCache), nil, nil, &mstats.mcache_sys);
}
```

用 RecordSpan 的目的是为 heap.allspans 申请内存，用来存储所有 span 指针。

mheap.c

```
static void RecordSpan(void *vh, byte *p)
{
    MHeap *h = vh;
    s = (MSpan*)p;

    // 内存不足时，重新申请，并将原数据转移过来。
    if(h->nspan >= h->nspancap) {
        cap = 64*1024/sizeof(all[0]);
        if(cap < h->nspancap*3/2) cap = h->nspancap*3/2; // 扩容到 1.5 倍

        all = (MSpan**)runtime·SysAlloc(cap*sizeof(all[0]), &mstats.other_sys);
        if(h->allspans) {
            runtime·memmove(all, h->allspans, h->nspancap*sizeof(all[0]));
            runtime·SysFree(h->allspans, h->nspancap*sizeof(all[0]), &mstats.other_sys);
        }

        h->allspans = all;
        h->nspancap = cap;
    }

    // 记录 span 指针。
```

```
    h->allspans[h->nspan++] = s;
}
```

看看 FixAlloc_Alloc 的实际分配过程。

mheap.c

```
static bool MHeap_Grow(MHeap *h, uintptr npage)
{
    v = runtime·MHeap_SysAlloc(h, ask);
    s = runtime·FixAlloc_Alloc(&h->spanalloc);
    runtime·MSpan_Init(s, (uintptr)v>>PageShift, ask>>PageShift);
}
```

mfixalloc.c

```
void* runtime·FixAlloc_Alloc(FixAlloc *f)
{
    // 如果链表不为空，直接返回第一个可用块。
    if(f->list) {
        v = f->list;
        f->list = *(void**)f->list;
        f->inuse += f->size;
        return v;
    }

    // 如果链表为空，且剩余空间不足。
    if(f->nchunk < f->size) {
        // 申请一个新的 16KB 内存块，将指针存放到 chunk 字段。
        f->chunk = runtime·persistentalloc(FixAllocChunk, 0, f->stat);

        // 剩余空间长度。
        f->nchunk = FixAllocChunk;
    }

    // 返回可用内存块开始地址。
    v = f->chunk;

    // 调用指定函数，比如 RecordSpan。
    if(f->first)
      f->first(f->arg, v);

    // 调整 chunk 开始位置，减少可用空间长度。
    f->chunk += f->size;
    f->nchunk -= f->size;
    f->inuse += f->size;

    return v;
}
```

从上面代码可以看出，在需要时，FixAlloc 会申请一个新的 chunk 内存块。以往申请的内存都被切分使用，释放时保存到 freelist 链表以供复用。

mfixalloc.c

```
void runtime·FixAlloc_Free(FixAlloc *f, void *p)
{
    f->inuse -= f->size;

    // 插入到链表头部。
    *(void**)p = f->list;
    f->list = p;
}
```

FixAlloc 调用 mmap 申请内存。

malloc.goc

```
void* runtime·persistentalloc(uintptr size, uintptr align, uint64 *stat)
{
    runtime·SysAlloc(size, stat);
}
```

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;
}
```

2. Garbage Collector

Go 使用精确垃圾回收算法，也就是 Mark-and-Sweep，没有代龄。

本节内容不会深入到标记和清除的算法细节中，仅注释主要回收过程。如对相关算法感兴趣，可参考相关论文或《深入理解计算机系统 第二版》9.10 章节。

垃圾回收和物理内存释放是分开进行的。垃圾回收尽可能将内存回收到 heap，然后由专门的函数定期释放物理内存。

2.1 垃圾回收

前面提到过，在分配内存的 malloc.goc/mallocgc 函数中会触发垃圾回收。

mgc0.c

```
void runtime·gc(int32 force)
{
    // 初始化 gcpercent，首次从 GOGC 环境变量获取，默认值 100。
    if(gcpercent == GcpercentUnknown) {    // first time through
        gcpercent = readgogc();
    }

    // GOGC=off，将禁用垃圾回收。
    if(gcpercent < 0) return;

    // 非强制回收时，检查正在使用 object 容量是否超过阈值。
    if(!force && mstats.heap_alloc < mstats.next_gc) { return; }

    // 停止所有不相关的东西，开始回收！
    a.start_time = runtime·nanotime();
    runtime·stoptheworld();

    // GODEBUG="gotrace=2" 会引发两次回收。
    for(i = 0; i < (runtime·debug.gctrace > 1 ? 2 : 1); i++) {
        // g0 stacks are not scanned, and we don't need to scan gc's internal state.
        // switch to g0, call gc(&a), then switch back
        g->param = &a;
        g->status = Gwaiting;
        g->waitreason = "garbage collection";

        // 调用回收函数。
        runtime·mcall(mgc);
```

```
        // record a new start time in case we're going around again
        a.start_time = runtime·nanotime();
    }

    // 恢复执行。
    runtime·starttheworld();

    // 执行 finalizers。
    if(fing == nil)
        fing = runtime·newproc1(&runfinqv, nil, 0, 0, runtime·gc);

    runtime·gosched();
}
```

环境变量 GOGC 可关闭 GC，或调整回收阈值。并发回收受 GOMAXPROC 等限制。

```
static void mgc(G *gp)
{
    gc(gp->param);
}

static void gc(struct gc_args *args)
{
    // 确定并行回收的 goroutine 数量 = min(GOMAXPROCS, cpus, 8)。
    work.nproc = runtime·gcprocs();

    // 添加所有根对象。
    addroots();

    // 设置并行 mark、sweep 属性。
    runtime·parforsetup(work.markfor, work.nproc, work.nroot, nil, false, markroot);
    runtime·parforsetup(work.sweepfor, work.nproc, runtime·mheap.nspan, ..., sweepspan);

    // 开始并行 mark。
    runtime·parfordo(work.markfor);

    // 开始并行 sweep。
    runtime·parfordo(work.sweepfor);

    // 重置统计数据。
    cachestats();

    // 设置下次回收阈值。受 GOGC 影响，默认是回收后内存使用量的 2 倍。
    mstats.next_gc = mstats.heap_alloc+mstats.heap_alloc*gcpercent/100;

    // 更新垃圾回收统计信息。
    mstats.last_gc = t4;
```

```
    mstats.pause_ns[mstats.numgc%nelem(mstats.pause_ns)] = t4 - t0;
    mstats.pause_total_ns += t4 - t0;
    mstats.numgc++;
}
```

跳过 markroot，我们看看 sweepspan 是如何回收内存的。

```
static void sweepspan(ParFor *desc, uint32 idx)
{
    s = runtime·mheap.allspans[idx];
    p = (byte*)(s->start << PageShift);
    cl = s->sizeclass;
    size = s->elemsize;

    if(cl == 0) {
        n = 1;
    } else {
        npages = runtime·class_to_allocnpages[cl];
        n = (npages << PageShift) / size;
    }

    // 遍历 span 所有 object。
    for(; n > 0; n--, p += size, ...) {
        if(cl == 0) {
            // 如果 object 是大对象，直接归还给 heap。
            runtime·MHeap_Free(&runtime·mheap, s, 1);
        } else {
            switch(compression) {
            case MTypes_Words:
                break;
            case MTypes_Bytes:
                break;
            }

            // 将可回收小对象 object 组成链表。
            end->next = (MLink*)p;
            end = (MLink*)p;
            nfree++;
        }
    }

    if(nfree) {
        // 将可回收 object 链表归还给 span。
        runtime·MCentral_FreeSpan(&runtime·mheap.central[cl], s, nfree, head.next, end);
    }
}
```

直接使用内存分配器释放函数，收回空闲 object，最终将 span 还给 heap。

mcentral.c

```
void runtime·MCentral_FreeSpan(MCentral *c, MSpan *s, int32 n, MLink *start, MLink *end)
{
    // 将 span 转移到 central.noempty 链表。
    if(s->freelist == nil) {
        runtime·MSpanList_Remove(s);
        runtime·MSpanList_Insert(&c->nonempty, s);
    }

    // 将收集的空闲 object 链表添加到 span.freelist。
    end->next = s->freelist;
    s->freelist = start;
    s->ref -= n;
    c->nfree += n;

    // 如果该 span 满血，将其归还给 heap。
    if(s->ref == 0) {
        runtime·MHeap_Free(&runtime·mheap, s, 0);
    }
}
```

2.2 释放内存

在进程入口函数，专门新建了一个 goroutine，用于内存释放。

proc.c

```
void runtime·main(void)
{
    runtime·newproc1(&scavenger, nil, 0, 0, runtime·main);
}

static FuncVal scavenger = {runtime·MHeap_Scavenger};
```

死循环，做两件事：超时 2 分钟，强制垃圾回收；每隔 1 分钟，释放一次物理内存。

mheap.c

```
// Release (part of) unused memory to OS.
// Goroutine created at startup.
// Loop forever.
void runtime·MHeap_Scavenger(void)
{
```

```
    g->issystem = true;
    g->isbackground = true;

    forcegc = 2*60*1e9;
    limit = 5*60*1e9;

    // 确定循环间隔，从两个条件中选一个小的，然后取半。按上面两个数字，也就是 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();

        // 检查上次 GC 到现在是不是超过 2 分钟了。
        if(now - mstats.last_gc > forcegc) {
            // 启动一个新 goroutine，进行强制垃圾回收。
            runtime·newproc1(&forcegchelperv, ..., 0, runtime·MHeap_Scavenger);
            now = runtime·nanotime();
        }

        // 释放物理内存。
        scavenge(k, now, limit);
    }
}

static FuncVal forcegchelperv = {(void(*)(void))forcegchelper};
static void forcegchelper(Note *note) { runtime·gc(1); }
```

在执行过程中，长时间达不到 GC 触发条件是很正常的情况。只是这会导致 cache 一直持有空闲 object，让 span 无法收回全部内存，自然也就无法释放它管理的物理内存。因此，就算达不到触发条件，定期强制回收也是必要的。

释放物理内存操作，会扫描 heap.free 和 large 链表，查找长期闲置的 span。

mheap.c

```
static void scavenge(int32 k, uint64 now, uint64 limit)
{
    h = &runtime·mheap;
    sumreleased = 0;
```

```
    // 检查 heap.free 所有链表里的 span。
    for(i=0; i < nelem(h->free); i++)
        sumreleased += scavengelist(&h->free[i], now, limit);

    // 检查 heap.large 链表里所有的 span。
    sumreleased += scavengelist(&h->large, now, limit);
}

static uintptr scavengelist(MSpan *list, uint64 now, uint64 limit)
{
    if(runtime·MSpanList_IsEmpty(list)) return 0;

    // 遍历链表上所有 span。
    for(s=list->next; s != list; s=s->next) {
        // 检查未使用时间是否超过 5 分钟，npreleased != npages 表示未全部释放。
        if((now - s->unusedsince) > limit && s->npreleased != s->npages) {
            mstats.heap_released += released;
            sumreleased += released;

            // 标记该 span 物理内存被释放，重新使用时内核会重新分配。
            // mheap.c 142 MHeap_AllocLocked，基本上是对 Windows VirtualAlloc 的措施。
            s->npreleased = s->npages;

            // 释放该 span 所管理的内存。
            runtime·SysUnused((void*)(s->start << PageShift), s->npages << PageShift);
        }
    }

    return sumreleased;
}
```

所谓释放，仅仅是通知操作系统，可以解除物理内存和该段虚拟地址的映射。

内存分配器并没有放弃这段虚拟内存，在下次重新使用该 span 时，操作系统会重新为其分配物理内存。因此，无须销毁这些 span 对象。

mem_linux.c

```
void runtime·SysUnused(void *v, uintptr n)
{
    runtime·madvise(v, n, MADV_DONTNEED);
}
```

mem_darwin.c

```
void runtime·SysUnused(void *v, uintptr n)
{
    // Linux's MADV_DONTNEED is like BSD's MADV_FREE.
```

```
    runtime·madvise(v, n, MADV_FREE);
}
```

mem_windows.c

```
void runtime·SysUnused(void *v, uintptr n)
{
    void *r = runtime·stdcall(runtime·VirtualFree, 3, v, n, (uintptr)MEM_DECOMMIT);
    if(r == nil)
        runtime·throw("runtime: failed to decommit pages");
}
```

2.3 状态输出

使用环境变量 GODEBUG="gctrace=1" 可输出 GC 相关信息，有助于对程序运行状态进行监控。

在此之前，需了解与统计相关的状态对象和函数。

malloc.h

```
struct MStats
{
    // General statistics.
    uint64    alloc;         // 当前正在使用 object 容量。
    uint64    total_alloc;   // 自启动以来累计全部分配容量，包括已经被释放的内存。
    uint64    sys;           // 包括 heap_sys、stack、span、cache 在内所有内存总和。
    uint64    nmalloc;       // object 分配总次数。
    uint64    nfree;         // object 释放总次数。

    // Statistics about malloc heap.
    uint64    heap_alloc;    // 等于 alloc。
    uint64    heap_sys;      // mmap - munmap，不等于 RSS。
    uint64    heap_idle;     // heap 空闲 span 总容量。bytes
    uint64    heap_inuse;    // 正在使用的 span 总容量。bytes
    uint64    heap_released; // 归还给 OS 的内存容量。bytes
    uint64    heap_objects;  // 当前正在使用的 object 数量。

    // Statistics about garbage collector.
    uint64    next_gc;      // 下次 GC 阈值。
    uint64    last_gc;      // 最后一次 GC 时间。
    uint32    numgc;        // GC 次数。
    bool      enablegc;
    bool      debuggc;

    // 按 sizeclass 分类统计数据。
```

```
    struct {
        uint32 size;
        uint64 nmalloc;
        uint64 nfree;
    } by_size[NumSizeClasses];
};
```

mgc0.c

```
static void updatememstats(GCStats *stats)
{
    // 重置状态对象。
    if(stats) runtime·memclr((byte*)stats, sizeof(*stats));

    // 统计 stack、cache、sys 等内存容量。
    mstats.sys = mstats.heap_sys + mstats.stacks_sys + mstats.mspan_sys +
        mstats.mcache_sys + mstats.buckhash_sys + mstats.gc_sys + mstats.other_sys;

    // 重置 mstats 相关属性。
    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 链表中空闲的 object 全部归还给 central。
    for(pp=runtime·allp; p=*pp; pp++) {
        c = p->mcache;
        if(c==nil) continue;
        runtime·MCache_ReleaseAll(c);
    }

    // 刷新所有 cache 统计信息。
    cachestats();

    // 遍历所有 span，统计正在使用 object 数量。此时，cache 上已经没有空闲 object 了。
    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，整个 span 当一个 object 用。
            mstats.nmalloc++;
            mstats.alloc += s->elemsize;
        } else {
            // 通过 span.ref 计数器就可知道分配出去的 object 数量。
```

```
            mstats.nmalloc += s->ref;                               // 累加总数
            mstats.by_size[s->sizeclass].nmalloc += s->ref;     // 按 sizeclass 累加
            mstats.alloc += s->ref*s->elemsize;                 // 总分配内存容量
        }
    }

    smallfree = 0;

    // 释放大对象的次数。
    mstats.nfree = runtime·mheap.nlargefree;

    // 统计小对象释放次数。
    for(i = 0; i < nelem(mstats.by_size); i++) {
        // 累加总释放次数。
        mstats.nfree += runtime·mheap.nsmallfree[i];

        // 按 sizeclass 分类累加。
        mstats.by_size[i].nfree = runtime·mheap.nsmallfree[i];

        // 分配次数 = 正在使用未释放 object 数量 + 释放次数。
        mstats.by_size[i].nmalloc += runtime·mheap.nsmallfree[i];

        // 累加小对象总释放容量。
        smallfree += runtime·mheap.nsmallfree[i] * runtime·class_to_size[i];
    }

    // 分配次数 = 正在使用未释放 object 数量 + 释放次数。
    mstats.nmalloc += mstats.nfree;

    // 累计分配内存容量 = 正在使用 object 容量 + 历史释放容量。不等于当前 heap 管理的内存容量。
    mstats.total_alloc = mstats.alloc + runtime·mheap.largefree + smallfree;

    // 正在使用 object 容量。
    mstats.heap_alloc = mstats.alloc;

    // 当前还在使用 object 数量 = 分配次数 - 释放次数。
    mstats.heap_objects = mstats.nmalloc - mstats.nfree;
}
```

第一种信息来自垃圾回收函数。

mgc0.c

```
static void gc(struct gc_args *args)
{
    // ... 各种准备 ....
    t0 = args->start_time;    // 这个时间来自 stoptheworld 之前。 runtime·gc mgc0.c:2005
```

```
    if(runtime·debug.gctrace) {
        updatememstats(nil);
        heap0 = mstats.heap_alloc;
        obj0 = mstats.nmalloc - mstats.nfree;
    }

    t1 = runtime·nanotime();
    // ... mark ...
    t2 = runtime·nanotime();
    // ... sweep ...
    t3 = runtime·nanotime();
    // ... cleanup, next_gc ...
    t4 = runtime·nanotime();

    mstats.last_gc = t4;
    mstats.numgc++;

    if(runtime·debug.gctrace) {
        updatememstats(&stats);
        heap1 = mstats.heap_alloc;
        obj1 = mstats.nmalloc - mstats.nfree;

        runtime·printf("gc%d(%d): %D+%D+%D ms, %D -> %D MB %D -> %D (%D-%D) objects,"
                " %D(%D) handoff, %D(%D) steal, %D/%D/%D yields\n",
            mstats.numgc,             // GC 次数
            work.nproc,               // 并行 GC goroutine 数量
            (t2-t1)/1000000,          // mark 耗时 ms
            (t3-t2)/1000000,          // sweep 耗时 ms
            (t1-t0+t4-t3)/1000000,    // cleanup: 准备和结束清理耗时，包括 stoptheworld。
            heap0>>20,                // 回收前正在使用的内存 MB
            heap1>>20,                // 回收后正在使用的内存 MB
            obj0,                     // 回收前正在使用的 object 数量
            obj1,                     // 回收后正在使用的 object 数量
            mstats.nmalloc,           // 总计 object 分配次数
            mstats.nfree,             // 总计 object 释放次数
    }
}
```

```
    +- 垃圾回收次数                          +- 回收前正在使用的 object 数量（活跃对象，非缓存 object）
    |                                        |
    |   +- 并发回收 goroutine 数量           |       +- 回收后正在使用的 object 数量
    |   |                                    |       |
    |   |                                    |       |          +- 总计释放 object 次数
    |   |                                    |       |          |
gc443(1): 0+0+0 ms, 400 -> 160 MB 47 -> 44 (706-662) objects, ...
              |          |       |                   |
              |          |       |                   +- 总计分配 object 次数
              |          |       |
              |          |       +- 回收后正在使用内存
              |          |
              |          +- 回收前正在使用内存（仅是正在使用的 object，不包括空闲 span 等）
              |
              +- mark + sweep + cleanup 耗时（cleanup 包括 stoptheworld 时间和结束清理时间）
```

另一种来自物理内存释放函数。

mheap.c

```
static void scavenge(int32 k, uint64 now, uint64 limit)
{
    sumreleased = 归还给 OS 的内存;

    if(runtime·debug.gctrace > 0) {
        if(sumreleased > 0)
            printf("scvg%d: %D MB released",
                k,                          // 执行 scavenge 的次数。
                (uint64)sumreleased>>20     // 本次归还给 OS 的内存 MB。
            );

        printf("scvg%d: inuse: %D, idle: %D, sys: %D, released: %D, consumed: %D (MB)",
            k,                                          // 执行 scavenge 的次数。
            mstats.heap_inuse>>20,                      // 正在使用的 span 内存
            mstats.heap_idle>>20,                       // 空闲 span 内存
            mstats.heap_sys>>20,                        // 乱七八糟内存总量
            mstats.heap_released>>20,                   // 交还给 OS 的内存量
           (mstats.heap_sys - mstats.heap_released)>>20); // 当前实际消耗
    }
}
```

```
    +- 清理次数
    |                       +- 空闲 span 内存
    |                       |                           +- 交还给 OS 的 span 内存
    |                       |                           |
scvg6: inuse: 32, idle: 8, sys: 41, released: 0, consumed: 41 (MB)
               |                     |                             |
               |                     |                             +- 实际消耗的内存 = sys - released
               |                     |
               |                     +- 整个进程所申请的内存
               |
               +- 正在使用的 span 内存（整个 span 容量，而不仅仅是正在使用的 object）
```

当 span 物理内存被释放，释放页数保存在 npreleased。累加释放容量到 released，表示当前整个进程交还给操作系统的物理内存总量。而当该 span 再次被启用时，内核会补齐所释放内存，就应该从 released 减掉。

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) {
            // (页数 - 以前释放页数)<<4096 = 本次释放页数。MHeap_FreeLocked 合并 span 造成的。
            released = (s->npages - s->npreleased) << PageShift;
            sumreleased += released;
```

```
            // 累加释放计数。
            mstats.heap_released += released;

            // 标记释放页数。
            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)
{
    mstats.heap_idle -= s->npages<<PageShift;

    // 如果该 span 以前被释放过，那么 s-> npreleased > 0，应该减去。
    mstats.heap_released -= s->npreleased<<PageShift;

    // 重新启用后，OS 会重新为其分配内存，重置释放标记。
    s->npreleased = 0;
}
```

3. Goroutine Scheduler

在 proc.c 头部提到调度器几个相关抽象概念。

```
// Goroutine scheduler
// The scheduler's job is to distribute ready-to-run goroutines over worker threads.
//
// The main concepts are:
// G - goroutine.
// M - worker thread, or machine.
// P - processor, a resource that is required to execute Go code.
//     M must have an associated P to execute Go code, however it can be
//     blocked or in a syscall w/o an associated P.
//
// Design doc at http://golang.org/s/go11sched.
```

网上有大牛用地鼠运砖的例子来描述调度器工作流程，说得极好。我也东施效颦，讲讲我理解的调度器。

作为老板 (scheduler)，其目的自然是让地鼠 (M) 在最短时间内，用最快速度将砖 (G) 从仓库运到窑里。除了老板，还有一只地位特殊的地鼠 sysmon，专职监工。

刚开始，老板让唯一的马仔，名叫 M0 的地鼠通知监工上班，然后组装好所有小车 (P)，因为地鼠必须有车才能工作。当然，除非老板大发慈悲，否则车就这些。好了，现在我们知道基本的工作单位是: 地鼠(M) + 小车(P) + 砖(G)。

地鼠 M0 工作后，陆陆续续有很多新的砖被丢到仓库里。这家伙心里不平衡，就跟老板说：还有好多小车闲着，你多招几个地鼠来工作吧，否则会耽误公司业务。

新地鼠们来了，大家齐心协力将砖运往窑里。当某只地鼠发现分给自己的那拨运完了，就看看仓库里是否有没分配的砖，如果有就划拉一部分给自己。实在没有，就从别的地鼠那偷一点过来。好地鼠都是活雷锋，为了尽快完成老板交代的任务，可谓尽心尽力。

说起来，还有两种特殊的砖头 (syscall、locked)。作为好奇心严重的小地鼠，看到第一种砖头的时候，多半会停下来 (block)，拿到手上把玩。结果么，车被监工拿走分给其他围观的小地鼠，或者自己主动将车送给酱油众。砖头瞅清楚了，车也没了，工作无法继续。小地鼠四下找找，看有没有闲下来的小车，有就继续工作，没有就只能把手上的砖头放回仓库，等其他有车的伙计运走。另一种

砖头上刻了某只地鼠的名字，表明要专鼠专送，否则会倒大霉。小地鼠没办法，只好将砖连同车一起交给那个家伙，自己失业回宿舍休息，等下次有机会再上岗。

小地鼠们一次一块，在仓库和砖窑间奔波。如果所有的砖都运完了，除了倒霉的 M0，其他地鼠就把车放到空地上，回宿舍睡觉。没办法，老板不放鼠啊。等有了新砖头，自然会通知它们开工的。

运砖工作看着简单，但幺蛾子也不少。比如说，某地鼠可能会看某砖不顺眼，就把砖扔回仓库，去运下一块 (gosched)。还有就是砖忒重，可怜的小地鼠快累死了也没送到窑里，还会耽误吃饭。幸好，善良的监工会通知 (preempt) 它，等吃完饭再接着送。

从某种意义上说，goroutine 本质还是线程池。只是调度处理做得更好，更高效和智能。

要想高效，首先得 multiplexed thread，频繁创建和销毁线程肯定是行不通的。其次，得让线程在阻塞时自动切换，去执行其他任务。具体的做法是将执行状态从线程分离出来，用名为 G 的结构体为线程提供执行现场。

每条 go 语句都会生成一个 G 对象，它包含 8KB 栈内存，可按需扩张。执行时只需修改 SP 寄存器，使其指向 G 所提供的栈，然后 JMP 到目标函数即可。如需要切换其他任务，只需将相关寄存器内容写回 G 对应字段。因为 G 保存了执行现场，任何线程都可以恢复执行该任务。

线程被抽象成 M 对象，如果不给它指定任务，那么就会从本地和全局队列中查找等待运行的 G 对象，如此循环往复。M 还有一个名为 g0 的栈，专门用于执行调度器指令。

如同系统线程需要调度到 CPU 核心才能执行一样，M 也必须关联一个抽象处理器 P 才能工作。P 的数量决定了 goroutine 并发数。默认值 1，但可用环境变量或相关函数修改。

调度器用 P 将 M 和 G 关联起来，大大提升了执行性能。首先，不用为休眠的 M 提供对象缓存，只需在执行时访问 P 缓存即可，减少了内存浪费。其次，将大量的 G 分散到多个 P 本地队列中，减少了全局锁造成的排队。

相对而言，P 的数量是固定的，M 则根据需要新建或复用，两者数量并不一致。例如，某 M 因系统调用时间过长而被收回 P，正好又没有其他休眠 M 可用，调度器就会新建一个来执行任务。最多只能有 256 个 P，但却可创建成千上万的 M。

在之前版本，死循环函数可以一直霸占着 M。如果正好 P = 1，那么其他任务就没机会运行，甚至 GC 都会因 stoptheworld 时间过长而被卡住。为此，专门增加了抢占式调度，通过设定抢占标志，让 M 主动切换。

3.1 初始化

从 bootstrap 开始。流程注释写在 proc.c 里，但实际代码是由汇编实现的。

proc.c

```
// The bootstrap sequence is:
//
//    call osinit
//    call schedinit
//    make & queue new G
//    call runtime·mstart
//
// The new G calls runtime·main.

struct Sched {
    uint64    goidgen;

    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;        // idle P's
    uint32    npidle;
    uint32    nmspinning;

    // Global runnable queue.
    G*        runqhead;
    G*        runqtail;
    int32     runqsize;

    // Global cache of dead G's.
    Lock      gflock;
    G*        gfree;
};

Sched runtime·sched;
M     runtime·m0;          // main thread
G     runtime·g0;          // idle goroutine for m0
P**   runtime·allp;        // all P, runtime.h
```

```
M*    runtime·allm;        // all M
G*    runtime·allg;        // all G
G*    runtime·lastg;
```

asm_amd64.s

```
TEXT _rt0_go(SB),NOSPLIT,$0

    // 为当前主线程 m0 设置 g0。
    get_tls(BX)
    LEAQ    runtime·g0(SB), CX
    MOVQ    CX, g(BX)
    LEAQ    runtime·m0(SB), AX
    MOVQ    AX, m(BX)

    MOVQ    CX, m_g0(AX) // save m->g0 = g0

    // 初始化
    CALL    runtime·args(SB)
    CALL    runtime·osinit(SB)
    CALL    runtime·hashinit(SB)
    CALL    runtime·schedinit(SB)

    // 创建 main groutine。
    PUSHQ   $runtime·main·f(SB)  // entry
    PUSHQ   $0                   // arg size
    CALL    runtime·newproc(SB)

    // 开始执行。
    CALL    runtime·mstart(SB)

    RET
```

调度器初始化最重要的任务是创建 P。

proc.c

```
void runtime·schedinit(void)
{
    // 默认最大线程数量限制。如果调度器发现 M 数量超出该值，直接让进程崩溃。
    runtime·sched.maxmcount = 10000;

    // 初始化内存分配器。
    runtime·mallocinit();

    // 初始化当前 M，也就是 m0。
    mcommoninit(m);

    // 分解命令行参数和环境变量。
```

```
    runtime·goargs();
    runtime·goenvs();
    runtime·parsedebugvars();

    // 默认 GOMAXPROCS = 1，最多不能超过 256。
    procs = 1;
    p = runtime·getenv("GOMAXPROCS");
    if(p != nil && (n = runtime·atoi(p)) > 0) {
        if(n > MaxGomaxprocs) n = MaxGomaxprocs;
        procs = n;
    }

    // P 指针数组。
    runtime·allp = runtime·malloc((MaxGomaxprocs+1)*sizeof(runtime·allp[0]));

    // 调整 P 数量。
    procresize(procs);
}
```

调整数量除按需创建和释放 P 对象外，还会导致原 G 队列被重新分配。

runtime.h

```
struct P
{
    int32    id;
    uint32   status;         // one of Pidle/Prunning/...
    P*       link;
    M*       m;              // back-link to associated M (nil if idle)
    MCache*  mcache;

    // Queue of runnable goroutines.
    G**      runq;
    int32    runqhead;
    int32    runqtail;
    int32    runqsize;

    // Available G's (status == Gdead)
    G*       gfree;
    int32    gfreecnt;
};
```

proc.c

```
// Change number of processors.  The world is stopped, sched is locked.
static void procresize(int32 new)
{
    // 当前值。
    old = runtime·gomaxprocs;
```

```
// 初始化 P。
for(i = 0; i < new; i++) {
    p = runtime·allp[i];

    // 新建 P。
    if(p == nil) {
        p = (P*)runtime·mallocgc(sizeof(*p), 0, FlagNoInvokeGC);
        p->id = i;
        p->status = Pgcstop;
        runtime·atomicstorep(&runtime·allp[i], p);
    }

    // 创建内存分配器 cache。
    if(p->mcache == nil) {
        if(old==0 && i==0)
            p->mcache = m->mcache;  // bootstrap
        else
            p->mcache = runtime·allocmcache();
    }

    // 新建 G 队列。
    if(p->runq == nil) {
        p->runqsize = 128;
        p->runq = (G**)runtime·mallocgc(p->runqsize*sizeof(G*), 0, FlagNoInvokeGC);
    }
}

// 将原来 P 上所有待运行 G 转移到全局队列。
for(i = 0; i < old; i++) {
    p = runtime·allp[i];
    while(gp = runqget(p))
        globrunqput(gp);
}

// 将 G 从全局队列重新分配到 P。
for(i = 1; runtime·sched.runqhead; i++) {
    gp = runtime·sched.runqhead;
    runtime·sched.runqhead = gp->schedlink;
    runqput(runtime·allp[i%new], gp);
}
runtime·sched.runqtail = nil;
runtime·sched.runqsize = 0;

// 如果是减小 GOMAXPROCS，那么就释放掉多余的 P。
for(i = new; i < old; i++) {
    p = runtime·allp[i];
    runtime·freemcache(p->mcache);
```

```
        p->mcache = nil;
        gfpurge(p);
        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。
    acquirep(p);

    // 重置其他 P 状态，放入空闲队列。
    for(i = new-1; i > 0; i--) {
        p = runtime·allp[i];
        p->status = Pidle;
        pidleput(p);
    }

    // 设置新的 GOMAXPROCS 值。
    runtime·atomicstore((uint32*)&runtime·gomaxprocs, new);
}
```

完成初始化后，开始执行 main goroutine。在 main.main 之前，还分别创建了专职系统监控的 M(sysmon) 和用于垃圾回收的 G(scavenger)。

proc.c

```
// The main goroutine.
void runtime·main(void)
{
    // Max stack size is 1 GB on 64-bit, 250 MB on 32-bit.
    if(sizeof(void*) == 8)
        runtime·maxstacksize = 1000000000;
    else
        runtime·maxstacksize = 250000000;

    // 专门创建一个线程，运行调度器监控。
    newm(sysmon, nil);

    if(m != &runtime·m0)
        runtime·throw("runtime·main not on m0");

    // 创建 goroutine 运行垃圾回收。
    runtime·newproc1(&scavenger, nil, 0, 0, runtime·main);

    // 执行用户代码 main.init 初始化函数。
    main·init();

    // 执行用户代码入口 main.main。
    main·main();
```

```
    // 退出，终止进程。
    runtime·exit(0);
}
```

3.2 创建任务

编译器将 go 语句翻译成 runtime·newproc 函数调用，创建 G 对象。

runtime.h

```
struct G
{
    uintptr  stackguard0;  // can be set to StackPreempt as opposed to stackguard
    uintptr  stackbase;
    Gobuf    sched;
    uintptr  stackguard;   // same as stackguard0, but not set to StackPreempt
    uintptr  stack0;
    uintptr  stacksize;
    G*       alllink;      // on allg
    void*    param;        // passed parameter on wakeup
    int16    status;
    int64    goid;
    int8*    waitreason;   // if status==Gwaiting
    G*       schedlink;
    bool     preempt;      // preemption signal, duplicates stackguard0 = StackPreempt
    M*       m;            // for debuggers, but offset not hard-coded
    M*       lockedm;
    uintptr  gopc;         // pc of go statement that created this goroutine
};
```

proc.c

```
// Create a new g running fn with siz bytes of arguments.
// Put it on the queue of g's waiting to run.
// The compiler turns a go statement into a call to this.
void runtime·newproc(int32 siz, FuncVal* fn, ...)
{
    runtime·newproc1(fn, argp, siz, 0, runtime·getcallerpc(&siz));
}
```

和内存分配器一样，调度器对 G 做了复用缓存处理。gfget 首先从 P.gfree 获取可复用 G，如果失败，就从 sched.gfree 转移一批过来 (填满 32 个坑)。实在没有，才新建 G 实例。

```
// Create a new g running fn with narg bytes of arguments starting
// at argp and returning nret bytes of results.  callerpc is the
// address of the go statement that created this.  The new g is put
// on the queue of g's waiting to run.
G* runtime·newproc1(FuncVal *fn, byte *argp, int32 narg, int32 nret, void *callerpc)
{
    siz = narg + nret;
    siz = (siz+7) & ~7;

    // 尝试从 p.gfree、runtime·sched.gfree 链表拿出一个 G 复用。
    if((newg = gfget(m->p)) != nil) {
        ...
    } else {
        // 新建 G，stacksize = 8KB。
        newg = runtime·malg(StackMin);

        // 放到全局双向链表。
        runtime·lock(&runtime·sched);
        if(runtime·lastg == nil)
            runtime·allg = newg;
        else
            runtime·lastg->alllink = newg;
        runtime·lastg = newg;
        runtime·unlock(&runtime·sched);
    }

    // 将执行参数入栈。
    sp = (byte*)newg->stackbase;
    sp -= siz;
    runtime·memmove(sp, argp, narg);

    // 初始化 G.sched，该结构用于保存执行现场数据。
    runtime·memclr((byte*)&newg->sched, sizeof newg->sched);
    newg->sched.sp = (uintptr)sp;               // 类似 SP 寄存器。
    newg->sched.pc = (uintptr)runtime·goexit;   // 类似 PC 寄存器。
    newg->sched.g = newg;

    // 非常关键的一次调用。坑爹啊！这是执行完 G，调用 goexit 的关键。
    // stack.c runtime·gostartcallfn -> sys_x86.c runtime·gostartcall
    runtime·gostartcallfn(&newg->sched, fn);

    // 将 G 放入当前 M->P 队列尾部。
    newg->gopc = (uintptr)callerpc;             // 创建 G 的函数指针。
    newg->status = Grunnable;
    runqput(m->p, newg);

    // 尝试唤醒 M 开始执行。(有空闲 P，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)
         wakep();

    return newg;
}
```

获取 G 以后，将函数实参入栈，最后尝试唤醒某个 M 开始执行。

```
// Tries to add one more P to execute G's.
// Called when a G is made runnable (newproc, ready).
static void wakep(void)
{
    // be conservative about spinning threads
    if(!runtime·cas(&runtime·sched.nmspinning, 0, 1)) return;
    startm(nil, true);
}
```

在 M 执行完 G 任务后，需要调用 runtime·goexit 清理现场，重新循环。

通过 runtime·gostartcallfn -> sys_x86.c runtime·gostartcall，将 goexit 地址预先入栈，等 G 函数执行结束，其 ret 指令会将该地址 pop 到 IP/PC 寄存器，完成调用。

runtime.h

```
struct Gobuf
{
    uintptr    sp;
    uintptr    pc;
    G*         g;
    uintptr    ret;
    void*      ctxt;
    uintptr    lr;
};
```

sys_x86.c

```
void runtime·gostartcall(Gobuf *gobuf, void (*fn)(void), void *ctxt)
{
    uintptr *sp;

    sp = (uintptr*)gobuf->sp;

    // 此时 pc 指向 goexit，将其地址入栈。
    *--sp = (uintptr)gobuf->pc;

    // 调整栈，尤其是 pc 指向 goroutine 函数。
```

```
    gobuf->sp = (uintptr)sp;
    gobuf->pc = (uintptr)fn;
    gobuf->ctxt = ctxt;
}
```

3.3 执行任务

M 除了使用 G stack 外，还有自己的 g0 stack，专门执行调度操作。

runtime.h

```
struct M
{
    G*       g0;                 // goroutine with scheduling stack
    void     (*mstartfn)(void);
    G*       curg;               // current running goroutine
    P*       p;                  // attached P for executing Go code
    P*       nextp;
    int32    id;
    bool     spinning;
    Note     park;
    M*       alllink;            // on allm
    M*       schedlink;
    MCache*  mcache;
    G*       lockedg;
    uintptr  createstack[32];    // Stack that created this thread.
    uint32   locked;             // tracking for LockOSThread
    M*       nextwaitm;          // next M waiting for lock
};
```

开始工作前，必须获得一个空闲 P。

```
// Schedules some M to run the p (creates an M if necessary).
// If p==nil, tries to get an idle P, if no idle P's returns false.
static void startm(P *p, bool spinning)
{
    // 获取空闲 P。
    if(p == nil) {
        p = pidleget();

        // 如果没有可用 P，获取 M 是没有意义的。
        if(p == nil) {
            return;
        }
    }
```

```
    // 从 runtime·sched.midle 队列提取空闲 M。
    mp = mget();

    // 如果没有可用 M，新建。
    if(mp == nil) {
        newm(fn, p);
        return;
    }
}
```

新建的 M 对象关联一个系统线程，在此会检查 M 总数是否超出阈值。

proc.c

```
// Create a new m.  It will start off with a call to fn, or else the scheduler.
static void newm(void(*fn)(void), P *p)
{
    mp = runtime·allocm(p);

    mp->nextp = p;
    mp->mstartfn = fn;

    // 创建系统线程。
    runtime·newosproc(mp, (byte*)mp->g0->stackbase);
}

// Allocate a new m unassociated with any thread.
M* runtime·allocm(P *p)
{
    mp = runtime·cnew(mtype);
    mcommoninit(mp);

    // 创建 M.g0
    // In case of cgo, pthread_create will make us a stack.
    // Windows will layout sched stack on OS stack.
    if(runtime·iscgo || 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 M 总数量(默认10000)，超出会引发进程崩溃。
```

```
    checkmcount();

    runtime·mpreinit(mp);

    // Add to runtime·allm so garbage collector doesn't free m
    // when it is just in a register or thread-local storage.
    mp->alllink = runtime·allm;
    runtime·atomicstorep(&runtime·allm, mp);
}
```

继续执行的秘密在 newosproc 函数里，runtime·mstart。

os_linux.c

```
void runtime·newosproc(M *mp, void *stk)
{
    ret = runtime·clone(flags, stk, mp, mp->g0, runtime·mstart);
}
```

M 有两种执行方式：像普通线程那样执行函数，如 newm(sysmon)；循环 schedule，从队列中获取 G。

proc.c

```
// Called to start an M.
void runtime·mstart(void)
{
    if(g != m->g0)
        runtime·throw("bad runtime·mstart");

    // 如果 newm 提供了执行函数，那么直接执行。
    // 执行完成后，这个 M 会加入到 G 的抢夺行列。
    if(m->mstartfn)
        m->mstartfn();

    if(m->helpgc) {
        m->helpgc = 0;
        stopm();
    } else if(m != &runtime·m0) {
        acquirep(m->nextp);
        m->nextp = nil;
    }

    // 调度器核心执行函数。
    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.
}

// Associate p and the current m.
static void acquirep(P *p)
{
    m->mcache = p->mcache;   // 设置小对象分配缓存。
    m->p = p;
    p->m = m;
    p->status = Prunning;
}
```

除了 P 本地队列，还会定期检查全局队列，住在这里的多半是 netpoll 和 syscall 遗民。

```
// 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，除返回一个外，还尝试转移一批到本地队列。
    tick = m->p->schedtick;
    if(tick - (((uint64)tick*0x4325c53fu)>>36)*61 == 0 && runtime·sched.runqsize > 0) {
        gp = globrunqget(m->p, 1);
    }

    // 从当前 P.runq 中提取 G。
    if(gp == nil) {
        gp = runqget(m->p);
    }

    // 如果为空，那么就从其他队列中查找。
    if(gp == nil) {
        gp = findrunnable();  // blocks until work is available
    }

    // 如果发现这个 G 被锁定到某个 M 上，那么将 P 转交给那个锁定 M 继续执行。
    if(gp->lockedm) {
        // Hands off own p to the locked m,
        // then blocks waiting for a new p.
        startlockedm(gp);
        goto top;
    }

    // 执行 G 任务。
    execute(gp);
```

```
}
```

官方文档提及的 work-stealing 算法，就在 findrunnable 里。

```
// Finds a runnable goroutine to execute.
// Tries to steal from other P's, get g from global queue, poll network.
static G* findrunnable(void)
{
    G *gp;
    P *p;

top:
    // 尝试从当前 P 队列获取。
    gp = runqget(m->p);
    if(gp) return gp;

    // 尝试从全局队列获取一批 G，默认数量 sched.runqsize/gomaxprocs+1。
    if(runtime·sched.runqsize) {
        gp = globrunqget(m->p, 0);  // 返回第一个 G，其他的都转移到当前 P 的队列中。
        if(gp) return gp;
    }

    // ... 省略 netpoll ...

    // 随机从其他 P 里获取。
    for(i = 0; i < 2*runtime·gomaxprocs; i++) {
        p = runtime·allp[runtime·fastrand1()%runtime·gomaxprocs];

        if(p == m->p) // 如果是自己，gp == nil，继续循环。
            gp = runqget(p);
        else
            gp = runqsteal(m->p, p); // 偷一半到自己的 P 队列，并返回一个。

        if(gp) return gp;
    }
stop:
    // 再次尝试全局队列。
    if(runtime·sched.runqsize) {
        gp = globrunqget(m->p, 0);
        return gp;
    }

    // 还是找不到，释放 P。
    p = releasep();
    pidleput(p);

    // 再次检查所有的 P 队列。
```

```
    for(i = 0; i < runtime·gomaxprocs; i++) {
        p = runtime·allp[i];
        if(p && p->runqhead != p->runqtail) {
            p = pidleget();
            if(p) {
                acquirep(p); // 将 P 拿回来。
                goto top;    // 再来一次。
            }
            break;
        }
    }

    // 折腾半天，还是什么收获都没有，只好 stop，将自己放入 sched.midle 队列。
    stopm();
    goto top;
}
```

如果发现 G 锁定了别的 M，那么就将 P 和 G 交给它，自己回空闲队列睡觉。

```
// Schedules the locked m to run the locked gp.
static void startlockedm(G *gp)
{
    mp = gp->lockedm;

    // 将 P 释放，交给 mp。
    p = releasep();
    mp->nextp = p;

    // 唤醒 pm。
    runtime·notewakeup(&mp->park);

    // 休眠。
    stopm();
}
```

回到任务执行流程，schedule -> execute -> gogo，这段汇编代码才是关键。

```
// Schedules gp to run on the current M.
// Never returns.
static void execute(G *gp)
{
    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        // 用 G.sched.sp 设定 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 函数指针放到 BX。
    JMP     BX                      // 跳转，执行 goroutine 函数。
```

兜兜转转，总算 JMP 到 goroutine 函数。前面提到过，该函数 ret 指令使得预先压入的 goexit 地址 pop 到 PC/IP 寄存器，完成清理工作。

```
// Finishes execution of the current goroutine.
void runtime·goexit(void)
{
    runtime·mcall(goexit0);
}

static void goexit0(G *gp)
{
    gp->status = Gdead;
    m->curg = nil;

    // 释放 G 额外分配的栈帧。
    runtime·unwindstack(gp, nil);

    // 将 G 放回 P.gfree。
    // 如果空闲数量过多，就移交一部分给 sched.gfree，以便其他 P 获取。
    gfput(m->p, gp);

    // 再次调用 schedule 循环。
    schedule();
}
```

在 goexit0 尾部，再次调用 schedule，开始下一轮工作。

3.4 系统调用

用标准库包装系统调用，插入 entersyscall 或 entersyscallblock，以配合调度器工作。两者区别是： entersyscall 的 P 可能被 sysmon 拿走，entersyscallblock 则是主动将 P 交给其他 M 去执行任务。

proc.c

```
// The same as runtime·entersyscall(), but with a hint that the syscall is blocking.
void ·entersyscallblock(int32 dummy)
{
    p = releasep();
    handoffp(p);

    g->stackguard0 = StackPreempt;  // 可抢占标志
}
```

转移 P 函数 handoffp 会进行各种 startm 尝试，直到把 P 放回 sched.pidle。

```
// Hands off P from syscall or locked M.
static void handoffp(P *p)
{
    // if it has local work, start it straight away
    if(p->runqhead != p->runqtail || runtime·sched.runqsize) {
        startm(p, false);
        return;
    }

    // no local work, check that there are no spinning/idle M's,
    // otherwise our help is not required
    if(runtime·atomicload(&runtime·sched.nmspinning) +
       runtime·atomicload(&runtime·sched.npidle) == 0 &&  // TODO: fast atomic
       runtime·cas(&runtime·sched.nmspinning, 0, 1)) {
        startm(p, true);
        return;
    }

    if(runtime·sched.runqsize) {
        runtime·unlock(&runtime·sched);
        startm(p, false);
        return;
    }

    // If this is the last running P and nobody is polling network,
    // need to wakeup another M to poll network.
    if(runtime·sched.npidle == runtime·gomaxprocs-1 &&
       runtime·atomicload64(&runtime·sched.lastpoll) != 0) {
```

```
       runtime·unlock(&runtime·sched);
        startm(p, false);
        return;
    }

    pidleput(p);
}
```

从系统调用退出，必须检查关联 P 是否有效，以确定能否继续工作。在获取 P 失败后，将 G 放回全局队列，由其他 M 完成该任务。至于这个失去工作的 M，将回到空闲队列，直到下次被唤醒。

```
void runtime·exitsyscall(void)
{
    if(exitsyscallfast()) {
        // There's a cpu for us, so we can run.
        return;
    }

    // Call the scheduler.
    runtime·mcall(exitsyscall0);
}

static bool exitsyscallfast(void)
{
    // 检查 Psyscall 状态，如果被 sysmon 拿走，状态值会被修改。
    if(m->p && m->p->status == Psyscall &&
       runtime·cas(&m->p->status, Psyscall, Prunning)) {
        return true;
    }

    // 获取其他空闲 P。
    m->p = nil;
    if(runtime·sched.pidle) {
        p = pidleget();
        if(p) {
            acquirep(p);
            return true;
        }
    }

    return false;
}

// runtime·exitsyscall slow path on g0.
// Failed to acquire P, enqueue gp as runnable.
static void exitsyscall0(G *gp)
```

```
{
    // 获取空闲 P。
    p = pidleget();

    // 获取失败，将 G 放到全局队列。
    if(p == nil)
        globrunqput(gp);

    // 获取成功，关联 P，继续执行。
    if(p) {
        acquirep(p);
        execute(gp);  // Never returns.
    }

    // 失败，停止。
    stopm();
}
```

可主动调用 runtime.Gosched 中断任务。当前 G 被放回全局队列，M 执行其他任务。

proc.c

```
void runtime·gosched(void)
{
    runtime·mcall(runtime·gosched0);
}

void runtime·gosched0(G *gp)
{
    gp->status = Grunnable;

    // 让出 M。
    gp->m = nil;
    m->curg = nil;

    // 当当前 G 放回全局队列。
    globrunqput(gp);

    // 让 M 执行其他任务。
    schedule();
}
```

与之类似的 runtime·park 虽然也会中断当前任务，却没有被放回等待队列，而是一直阻塞到被专门唤醒。这个设计被用于 channel 实现。

proc.c

```
// Puts the current goroutine into a waiting state and unlocks the lock.
```

```
// The goroutine can be made runnable again by calling runtime·ready(gp).
void runtime·park(void(*unlockf)(Lock*), Lock *lock, int8 *reason)
{
    runtime·mcall(park0);
}

// runtime·park continuation on g0.
static void park0(G *gp)
{
    // 注意状态是 Gwaiting。
    gp->status = Gwaiting;

    // 让出 M，让它执行其他任务。
    gp->m = nil;
    m->curg = nil;
    schedule();
}

// Mark gp ready to run.
void runtime·ready(G *gp)
{
    // 修改状态为 Grunnable，重新放回本地队列.
    gp->status = Grunnable;
    runqput(m->p, gp);
}
```

3.5 系统监控

系统监控线程 sysmon 主要起三个作用：

- 将 netpoll 结果放到全局队列。
- 收回长时间处于 Psyscall 状态的 P。
- 向长时间运行的 G 发出抢占通知。

proc.c

```
static void sysmon(void)
{
    for(;;) {
        runtime·usleep(delay);

        // poll network if not polled for more than 10ms
        if(lastpoll != 0 && lastpoll + 10*1000*1000 < now) {
            gp = runtime·netpoll(false);  // non-blocking
            if(gp) {
```

```
                injectglist(gp);
            }
        }

        // retake P's blocked in syscalls
        // and preempt long running G's
        if(retake(now))
            idle = 0;
        else
            idle++;
    }
}

static uint32 retake(int64 now)
{
    for(i = 0; i < runtime·gomaxprocs; i++) {
        p = runtime·allp[i];
        if(p==nil) continue;
        s = p->status;

        if(s == Psyscall) {
            // Retake P from syscall if it's there for more than 1 sysmon tick (20us).
            if(runtime·cas(&p->status, s, Pidle)) {
                handoffp(p);
            }
        } else if(s == Prunning) {
            // Preempt G if it's running for more than 10ms.
            if(pd->schedwhen + 10*1000*1000 > now) continue;

            preemptone(p);  // 发出抢占通知
        }
    }
}

// Tell the goroutine running on processor P to stop.
// Returns true if preemption request was issued.
static bool preemptone(P *p)
{
    M *mp = p->m;
    G *gp = mp->curg;

    gp->preempt = true;
    gp->stackguard0 = StackPreempt;

    return true;
}
```

所谓抢占通知，不过是设置 G 的几个成员。那么抢占行为何时发生呢?

编译器会在每个非内联函数头部插入 "runtime.morestack" 汇编指令，用于判断和扩大执行栈。猫腻就在这里。

```
(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   0x227a0 <runtime.morestack00>
   0x0000000000002013 <+19>:   jmp    0x2000 <main.test>
   0x0000000000002015 <+21>:   sub    rsp,0x50
```

跟踪 morestack，最终在 runtime·newstack 一大堆代码里找到切换操作。

asm_amd64.s

```
TEXT runtime·morestack00(SB),NOSPLIT,$0
    get_tls(CX)
    MOVQ    m(CX), BX
    MOVQ    $0, AX
    MOVQ    AX, m_moreframesize(BX)
    MOVQ    $runtime·morestack(SB), AX
    JMP     AX

TEXT runtime·morestack(SB),NOSPLIT,$0-0
    CALL    runtime·newstack(SB)
```

stack.c

```
void runtime·newstack(void)
{
    gp = m->curg;

    // 检查抢占标志
    if(gp->stackguard0 == (uintptr)StackPreempt) {
        runtime·gosched0(gp);    // never return
    }
}
```

正如官方所言，1.2 抢占调度还很原始，只有在调用非内联函数时才有可能引发抢占调度。另外，发出抢占通知的并不仅仅是 sysmon，调度器在很多地方都会设置抢占标志。

3.6 分段栈

M 使用 G 自带栈内存，而非线程堆栈。执行过程中，runtime·newstack 会做出判断，按需增加新的栈帧。这种方式通常被称作分段栈。1.2 将初始栈帧从 4KB 提高到 8KB，据测试可提升执行性能。

看看创建 G 对象时，如何设置栈信息。

proc.c

```
G* runtime·malg(int32 stacksize)
{
    newg = runtime·malloc(sizeof(G));

    if(stacksize >= 0) {
        if(g == m->g0) {
            // running on scheduler stack already.
            stk = runtime·stackalloc(StackSystem + stacksize);
        } else {
            // have to call stackalloc on scheduler stack.
            g->param = (void*)(StackSystem + stacksize);
            runtime·mcall(mstackalloc);
            stk = g->param;
            g->param = nil;
        }

        newg->stacksize = StackSystem + stacksize;
        newg->stack0 = (uintptr)stk;
        newg->stackguard = (uintptr)stk + StackGuard;
        newg->stackguard0 = newg->stackguard;
        newg->stackbase = (uintptr)stk + StackSystem + stacksize - sizeof(Stktop);
        runtime·memclr((byte*)newg->stackbase, sizeof(Stktop));
    }

    return newg;
}
```

stack.c

```
void* runtime·stackalloc(uint32 n)
{
    return runtime·mallocgc(n, 0, FlagNoProfiling|FlagNoGC|FlagNoZero|FlagNoInvokeGC);
}
```

栈结构有些复杂，下面是简易示意图。

```
stack0              stackguard (stackguard0)                          stackbase          --> High Address
+---------------+-----------------------------------------+--------------+
|  System       |  Stack                                  |  Top         |
+---------------+-----------------------------------------+--------------+
```

其中 stackbase、stackguard 指针作用类似 BP、SP 寄存器，Top 段保存前栈帧指针，System 段用于信号处理等系统用途。

当需要扩张 G 栈内存时，会调用 morestack -> newstack 创建新栈帧。

stack.c

```
// Called from runtime·newstackcall or from runtime·morestack when a new
// stack segment is needed.  Allocate a new stack big enough for
// m->moreframesize bytes, copy m->moreargsize bytes to the new frame,
// and then act as though runtime·lessstack called the function at
// m->morepc.
void runtime·newstack(void)
{
    framesize = m->moreframesize;
    argsize = m->moreargsize;
    gp = m->curg;
    oldstatus = gp->status;
    sp = gp->sched.sp;

    // 栈溢出检查。
    if(sp < gp->stackguard - StackGuard) {
        runtime·throw("runtime: split stack overflow");
    }

    if(newstackcall && m->morebuf.sp - sizeof(Stktop) - argsize - 32 > gp->stackguard) {
        // special case: called from runtime.newstackcall (framesize==1)
        // to call code with an arbitrary argument size,
        // and we have enough space on the current stack.
        // the new Stktop* is necessary to unwind, but
        // we don't need to create a new segment.
        top = (Stktop*)(m->morebuf.sp - sizeof(*top));
        stk = (byte*)gp->stackguard - StackGuard;
        free = 0;
    } else {
        // allocate new segment.

        // 计算实际需要扩张的栈内存大小。
        framesize += argsize;
        framesize += StackExtra;    // room for more functions, Stktop.
        if(framesize < StackMin) framesize = StackMin;
        framesize += StackSystem;
```

```
        // 所有栈帧。
        gp->stacksize += framesize;

        // 不能超出最大栈内存限制。
        if(gp->stacksize > runtime·maxstacksize) {
            runtime·throw("stack overflow");
        }

        // 为新栈帧分配内存。
        stk = runtime·stackalloc(framesize);
        top = (Stktop*)(stk+framesize-sizeof(*top));
        free = framesize;
    }

    // 在新栈帧 top 区记录原栈帧相关指针。
    top->stackbase = gp->stackbase;
    top->stackguard = gp->stackguard;

    // 在新栈帧 top 区域记录扩张信息。
    top->gobuf = m->morebuf;
    top->argp = m->moreargp;
    top->argsize = argsize;
    top->free = free;

    // 清除 M 上的扩张信息。
    m->moreargp = nil;
    m->morebuf.pc = (uintptr)nil;
    m->morebuf.lr = (uintptr)nil;
    m->morebuf.sp = (uintptr)nil;

    // 修改 G 栈信息，指向新栈帧。
    gp->stackbase = (uintptr)top;
    gp->stackguard = (uintptr)stk + StackGuard;
    gp->stackguard0 = gp->stackguard;
}
```

任务执行结束，goexit 用 unwindstack 释放所有新增的栈帧。

panic.c

```
// Free stack frames until we hit the last one
// or until we find the one that contains the sp.
void runtime·unwindstack(G *gp, byte *sp)
{
    // 因为初始栈帧 top 区域是空的，因此这个循环只是对后分配的栈帧做处理。
    while((top = (Stktop*)gp->stackbase) != 0 && top->stackbase != 0) {
        stk = (byte*)gp->stackguard - StackGuard;
```

```
        // 检查参数 sp 是否在当前栈帧内，如果是，终止释放。
        if(stk <= sp && sp < (byte*)gp->stackbase) break;

        // 释放当前栈帧前，修改 G 参数，使其指向前一栈帧。
        gp->stackbase = top->stackbase;
        gp->stackguard = top->stackguard;
        gp->stackguard0 = gp->stackguard;

        // 根据当前栈帧 top 内的大小信息，释放该栈帧。
        if(top->free != 0) {
            gp->stacksize -= top->free;
            runtime·stackfree(stk, top->free);
        }
    }
}
```

3.7 状态输出

使用环境变量 GODEBUG="schedtrace=xxx" 输出调度器跟踪信息。

```
$ GOMAXPROCS=2 GODEBUG="schedtrace=1000" ./test


         +- 跟踪耗时
         |            +- GOMAXPROCS, P 总数
         |            |                          +- M 总数
         |            |                          |                              +- G 全局队列
         |            |                          |                              |
SCHED 1003ms: gomaxprocs=2 idleprocs=2 threads=5 idlethreads=2 runqueue=0 [0 0]
                                   |                        |                          |
                                   |                        |                          +- 各 P.G 本地队列
                                   |                        |
                                   |                        +- 空闲 M 数量
                                   |
                                   +- 空闲 P 数量
```

更详细的信息，需指定 "scheddetail=1"。

```
$ GOMAXPROCS=2 GODEBUG="schedtrace=1000,scheddetail=1" ./test

SCHED 1008ms: gomaxprocs=2 idleprocs=2 threads=5 idlethreads=2 runqueue=0 gcwaiting=0
nmidlelocked=1 nmspinning=0 stopwait=0 sysmonwait=0
  P0: status=0 schedtick=1281 syscalltick=863 m=-1 runqsize=0/128 gfreecnt=1
  P1: status=0 schedtick=1301 syscalltick=860 m=-1 runqsize=0/128 gfreecnt=1
  M2: p=-1 curg=-1 mallocing=0 throwing=0 gcing=0 locks=0 ... spinning=0 lockedg=-1
  M1: p=-1 curg=-1 mallocing=0 throwing=0 gcing=0 locks=1 ... spinning=0 lockedg=-1
  M0: p=-1 curg=4  mallocing=0 throwing=0 gcing=0 locks=2 ... spinning=0 lockedg=-1
  G1: status=4(sleep)       m=-1 lockedm=-1
  G2: status=3()            m=3  lockedm=-1
  G4: status=3(stack split) m=0  lockedm=-1
```

4. Channel

如果没有 channel，goroutine 会失色不少。

4.1 Channel

简单点说，channel 就是 FIFO 队列，多个 goroutine 排队进行收发操作。同步模式，从排队中寻找一个能直接与之交换数据的对象；异步模式，则是围绕着缓冲区空位排队。

SudoG 封装了 G 和 elem 指针，WaitQ 则是排队链表。

chan.c

```
struct SudoG
{
    G*       g;           // g and selgen constitute
    uint32   selgen;      // a weak pointer to g
    SudoG*   link;
    int64    releasetime;
    byte*    elem;        // data element
};

struct WaitQ
{
    SudoG*    first;
    SudoG*    last;
};
```

所有等待发送和接收的 G 都保存在 sendq、recvq 链表；dataqsiz 是缓冲区容量 (元素数量)，sendx、recvq、qcount 共同维护基于数组的环状队列状态。

chan.c

```
// The garbage collector is assuming that Hchan can only contain pointers into the stack
// and cannot contain pointers into the heap.
struct Hchan
{
    uintgo  qcount;    // total data in the q
    uintgo  dataqsiz;  // size of the circular q
    uint16  elemsize;
    uint16  pad;       // ensures proper alignment of the buffer that follows Hchan
    bool    closed;
    Alg*    elemalg;   // interface for element type
    uintgo  sendx;     // send index
```

```
    uintgo  recvx;     // receive index
    WaitQ   recvq;     // list of recv waiters
    WaitQ   sendq;     // list of send waiters
    Lock;
};
```

创建 channel 对象时，会检查元素类型长度，一次性分配包括缓冲区在内的全部内存。

chan.c

```
Hchan* runtime·makechan_c(ChanType *t, int64 hint)
{
    elem = t->elem;

    // 元素类型不能大于 64KB。
    if(elem->size >= (1<<16))
        runtime·throw("makechan: invalid channel element type");

    // 为 channel 和缓冲 slot 分配内存。
    c = (Hchan*)runtime·mallocgc(sizeof(*c) + hint*elem->size, ..., 0);
    c->elemsize = elem->size;
    c->elemalg = elem->alg;    // 该类型接口，比如复制数据等方法。
    c->dataqsiz = hint;

    return c;
}
```

4.2 Send

加锁，确保在同一时刻只有一个操作。想想也很正常，否则这个底层状态实在不好维护。

在同一个函数里实现了同步和异步版本，参数 pres 用来接收操作是否成功。

chan.c

```
/*
 * generic single channel send/recv
 * if the bool pointer is nil, then the full exchange will occur. if pres is not nil,
 * then the protocol will not sleep but return if it could not complete.
 */
void runtime·chansend(ChanType *t, Hchan *c, byte *ep, bool *pres, void *pc)
{
    // 如果 channel == nil
    if(c == nil) {
        // 想要立即获取状态，返回 false。
        if(pres != nil) {
```

```
        *pres = false;
        return;
    }

    // park 会释放 M，但不会把 G 放回队列。如果没有人唤醒(ready)它，那就一直阻塞。
    runtime·park(nil, nil, "chan send (nil chan)");
    return;  // not reached
}

// 这把锁的粒度是不是太大了?
runtime·lock(c);

// 如果向 closed channel 发数据，直接 panic。
if(c->closed) goto closed;

// 如果是 buffered channel，那么执行异步版本。
if(c->dataqsiz > 0) goto asynch;

// 从 recvq 里抓一个 G 出来。
sg = dequeue(&c->recvq);
if(sg != nil) {
    // 有人接收，就私下一对一解决，没 channel 什么事了，释放锁。
    runtime·unlock(c);

    gp = sg->g;
    gp->param = sg;

    // 利用接口方法，拷贝数据。
    if(sg->elem != nil)
        c->elemalg->copy(c->elemsize, sg->elem, ep);

    // 唤醒这个因 park 而处于 Waiting 状态的接收人。
    runtime·ready(gp);

    return;
}

// 将当前 G 打包放到 sendq 里面排队去。
mysg.elem = ep;
mysg.g = g;
mysg.selgen = NOSELGEN;
g->param = nil;
enqueue(&c->sendq, &mysg);

// 释放 M，将当前 G 改成 Waiting，阻塞到有人唤醒为止。
runtime·park(runtime·unlock, c, "chan send");
return;
```

```
asynch:
    if(c->closed) goto closed;

    // 如果缓冲 slots 已满，打包放到 sendq 里，等待被唤醒。
    if(c->qcount >= c->dataqsiz) {
        mysg.g = g;
        mysg.elem = nil;
        mysg.selgen = NOSELGEN;
        enqueue(&c->sendq, &mysg);
        runtime·park(runtime·unlock, c, "chan send");

        runtime·lock(c);

        // 被唤醒，尝试再次向缓冲区发送数据。
        goto asynch;
    }

    // 将数据拷贝到 slots。
    c->elemalg->copy(c->elemsize, chanbuf(c, c->sendx), ep);
    if(++c->sendx == c->dataqsiz) c->sendx = 0;
    c->qcount++;

    // 现在 slots 有数据了，如果 recvq 正好有人，就唤醒它接收数据，没有就算了。
    sg = dequeue(&c->recvq);
    if(sg != nil) {
        gp = sg->g;
        runtime·unlock(c);
        runtime·ready(gp);
    } else
        runtime·unlock(c);

    return;

closed:
    runtime·unlock(c);
    runtime·panicstring("send on closed channel");
}
```

不算复杂，总结一下：

- 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，直接将数据拷贝给它，否则排队、阻塞。
- 异步发送：如缓冲区未满，将数据拷贝到缓冲区，否则排队、阻塞。

4.3 Receive

接收和发送过程类似，规则如下：

- 从 nil channel 接收数据，阻塞。
- 从 closed channel 接受数据，直接返回。
- 同步接收：如有发送者，直接从它那接收数据，否则排队、阻塞。
- 异步接收：如缓冲区不为空，从缓冲区拷贝数据，否则排队、阻塞。

参数 eq 保存接收的数据，selected 是否有数据提供，received 是否接收成功。

chan.c

```
void runtime·chanrecv(ChanType *t, Hchan* c, byte *ep, bool *selected, bool *received)
{
    // 如果是 nil channel，阻塞。
    if(c == nil) {
        runtime·park(nil, nil, "chan receive (nil chan)");
        return;  // not reached
    }

    // 和发送使用同一把锁。
    runtime·lock(c);

    // 异步版本。
    if(c->dataqsiz > 0) goto asynch;

    // 从 closed channel 拿不到任何东西，直接返回，不会 panic。
    if(c->closed) goto closed;

    // 从 sendq 找一个等着发送数据的家伙。
    sg = dequeue(&c->sendq);
    if(sg != nil) {
        // 一样是抛开 channel 私下交易。
        runtime·unlock(c);

        // 拷贝数据。
        if(ep != nil) c->elemalg->copy(c->elemsize, ep, sg->elem);
        gp = sg->g;
        gp->param = sg;

        // 唤醒发送者，让它解除阻塞。
        runtime·ready(gp);

        return;
    }
```

```
    // 没找到发送者，将自己打包放到 recvq，等待。
    mysg.elem = ep;
    mysg.g = g;
    mysg.selgen = NOSELGEN;
    g->param = nil;
    enqueue(&c->recvq, &mysg);
    runtime·park(runtime·unlock, c, "chan receive");

    return;

asynch:
    // 如果缓冲区没有数据。
    if(c->qcount <= 0) {
        if(c->closed) goto closed;

        // 将自己打包放到 recvq，等待。
        mysg.g = g;
        mysg.elem = nil;
        mysg.selgen = NOSELGEN;
        enqueue(&c->recvq, &mysg);
        runtime·park(runtime·unlock, c, "chan receive");

        runtime·lock(c);

        // 被唤醒，再次尝试从缓冲区接收数据。
        goto asynch;
    }

    // 从缓冲区拷贝数据。
    if(ep != nil) c->elemalg->copy(c->elemsize, ep, chanbuf(c, c->recvx));

    // 将缓冲区该位置清零。
    c->elemalg->copy(c->elemsize, chanbuf(c, c->recvx), nil);
    if(++c->recvx == c->dataqsiz) c->recvx = 0;
    c->qcount--;

    // 现在缓冲区有空位了，如果 sendq 有人排队，尝试唤醒，没有也无所谓。
    sg = dequeue(&c->sendq);
    if(sg != nil) {
        gp = sg->g;
        runtime·unlock(c);
        runtime·ready(gp);
    } else
        runtime·unlock(c);

    return;
```

```
closed:
    runtime·unlock(c);
}
```

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。