

C++ 基础库 CO 参考文档

Alvin 2019/11/23

idealvin@qq.com

CO 是一个优雅、高效的 C++ 基础库，支持 Linux, Windows 与 Mac 平台。本文档将介绍 CO 的功能组件及使用方法。

1. 概览

CO 追求极简、高效，不依赖于 [boost](#) 等三方库，仅使用了少量的 C++11 特性。

- CO 实现的功能组件：
 - 基本定义(`def`)
 - 原子操作(`atomic`)
 - 快速伪随机数生成器(`random`)
 - `LruMap`
 - 基本类型快速转字符串(`fast`)
 - 高效字符流(`fastream`)
 - 高效字符串(`fastring`)
 - 字符串操作(`str`)
 - 命令行参数与配置文件解析库(`flag`)
 - 高效流式日志库(`log`)
 - 单元测试框架(`unittest`)
 - 时间库(`time`)
 - 线程库(`thread`)
 - 协程库(`co`)
 - 高效 `json` 库(`json`)
 - 高性能 `json rpc` 框架(`rpc`)
 - `hash` 库(`hash`)
 - `path` 库(`path`)
 - 文件系统操作(`fs`)
 - 系统操作(`os`)
- CO 使用的 C++11 特性：
 - `auto`
 - `std::move`
 - `std::bind`
 - `std::function`
 - `std::unique_ptr`
 - `std::unordered_map`
 - `std::unordered_set`
 - `variadic templates`

2. 基本定义(def)

include: [base/def.h](#).

2.1 定长整数类型

```
int8    int16   int32   int64
uint8   uint16  uint32  uint64
```

这些类型在不同平台的长度是一致的，不存在可移植性问题。[Google Code Style](#) 建议除了 int，不要使用 short, long, long long 等内置整数类型。

def.h 还定义了上述整数类型的最大、最小值：

```
MAX_UINT8  MAX_UINT16  MAX_UINT32  MAX_UINT64
MAX_INT8   MAX_INT16   MAX_INT32   MAX_INT64
MIN_INT8   MIN_INT16   MIN_INT32   MIN_INT64
```

2.2 读写 1、2、4、8 字节

def.h 定义了如下的宏，用于读写 1、2、4、8 字节的数据(注意边界对齐)：

```
load8   load16  load32  load64
save8   save16  save32  save64
```

- 代码示例

```
uint64 v;           // 8 字节
save32(&v, 7);      // v 的前 4 个字节设为 7
uint16 x = load16(&v); // 读取 v 的前 2 个字节
```

2.3 DISALLOW_COPY_AND_ASSIGN

这个宏用于禁止 C++ 类中的拷贝构造函数与赋值操作：

- 代码示例

```
class T {
public:
    T();
    DISALLOW_COPY_AND_ASSIGN(T);
};
```

2.4 force_cast 强制类型转换

force_cast 是对 C 风格强制类型转换的包装：

- 代码示例

```
char c = force_cast<char>(97); // char c = (char) 97;
```

2.5 __forceinline 与 __thread

`__forceinline` 是 VS 中的关键字，Linux 等平台用下面的宏模拟：

```
#define __forceinline __attribute__((always_inline))
```

`__thread` 是 gcc 中的关键字，用于支持 TLS，Windows 上用下面的宏模拟：

```
#define __thread __declspec(thread)
```

- 代码示例

```
// 获取当前线程的 id
__forceinline unsigned int gettid() {
    static __thread unsigned int id = 0;
    if (id != 0) return id;
    return id = __gettid();
}
```

2.6 unlikely

`unlikely` 宏用于分支选择优化(仅支持 gcc、clang)：

```
// 与 if (v == -1) 逻辑上等价，但提示编译器 v == -1 的可能性较小
if (unlikely(v == -1)) {
    cout << "v == -1" << endl;
}
```

3. 原子操作(atomic)

include: `base/atomic.h`.

`atomic` 库定义了如下的原子操作：

<code>atomic_inc</code>	<code>atomic_dec</code>	<code>atomic_add</code>	<code>atomic_sub</code>
<code>atomic_fetch_inc</code>	<code>atomic_fetch_dec</code>	<code>atomic_fetch_add</code>	<code>atomic_fetch_sub</code>
<code>atomic_or</code>	<code>atomic_and</code>	<code>atomic_xor</code>	
<code>atomic_fetch_or</code>	<code>atomic_fetch_and</code>	<code>atomic_fetch_xor</code>	
<code>atomic_swap</code>	<code>atomic_compare_swap</code>		
<code>atomic_get</code>	<code>atomic_set</code>	<code>atomic_reset</code>	

上述原子操作适用于 1, 2, 4, 8 字节长度的数据类型。inc, dec, add, sub, or, and, xor 各有一个 `fetch` 版，区别在于，`fetch` 版本返回原子操作之前的值，非 `fetch` 版本返回原子操作之后的值。

- 代码示例

```
bool b = false;
int i = 0;
uint64 u = 0;

atomic_inc(&i);           // return ++i;
atomic_dec(&i);           // return --i;
atomic_add(&i, 3);        // return i += 3;
atomic_sub(&i, 3);        // return i -= 3;
atomic_fetch_inc(&u);     // return u++;
```

```

atomic_or(&i, 8);           // return i |= 8;
atomic_and(&i, 7);          // return i &= 7;
atomic_xor(&i, 7);          // return i ^= 7;
atomic_fetch_xor(&i, 7);    // v = i; i ^= 7; return v;

atomic_swap(&b, true);      // v = b; b = true; return v;
atomic_compare_swap(&i, 0, 1); // v = i; if (i == 0) i = 1; return v;

atomic_get(&u);             // return u;
atomic_set(&u, 7);          // u = 7;
atomic_reset(&i);           // i = 0;

```

4. 随机数生成器(random)

include: [base/random.h](#).

Random 是一个速度极快的伪随机数生成器，可以连续无重复的生成 1~2G-2 之间的整数。[leveldb](#) 用到了这种算法，本库选用了与 leveldb 不同的常数 **16385**，计算速度更快。算法的数学原理可以参考[一种快速的随机数生成算法](#)一文。

- 代码示例

```

Random r(7);           // 7 是种子数，不带参数时，默认为 1
int n = r.next();      // !! 非线程安全

```

5. LruMap

include: [base/lru_map.h](#).

LRU 是一种常用的缓存策略，当缓存达到容量上限时，优先替换掉最近最少使用的数据。**LruMap** 基于 `std::list`、`std::unordered_map` 实现，内部元素是无序的。

- 代码示例

```

LruMap<int, int> m(128);           // capacity: 128
m.insert(1, 23);                  // m.size() > 128 时，删除内部 list 尾部的元素(最近最少使用)
                                   // !! key 已经存在时，则不会插入新元素
auto it = m.find(1);              // 找到时，将 1 放到内部 list 首部
if (it != m.end()) m.erase(it);   // erase by iterator
m.erase(it->first);               // erase by key

```

6. 基本类型快速转字符串(fast)

include: [base/fast.h](#).

fast 库提供了如下的函数：

```

u32toh u64toh u32toa u64toa i32toa i64toa dtoa

```

xtoh 系列函数将整数类型转换为十六进制字符串，内部用一个 table 缓存前 256 个数对应的 16 进制字符串(2个字节)，不同平台测试结果比 `snprintf` 快 10~25 倍左右。

xtoa 系列函数将整数类型转换为十进制 ascii 字符串，内部用一个 table 缓存前 10000 个数对应的 10 进制字符串(4个字节)，不同平台测试结果比 `snprintf` 快 10~25 倍左右。

dtoa 将浮点数转换为十进制 `ascii` 字符串，基于 `snprintf` 实现，但每次转换后，将结果保存到一个 `LruMap` 中，供下次查询使用。大部分应用程序中，出现的浮点数可能是固定的若干个，上述缓存策略对性能会有较大的提升。对同一个浮点数分别调用 10 万次 `dtoa` 与 `snprintf`，结果显示 `dtoa` 比 `snprintf` 快 25 倍左右。

- 代码示例

```
char buf[32];
int len = fast::u32toh(255, buf); // "0xff", 返回长度 4
int len = fast::i32toa(-99, buf); // "-99", 返回长度 3
int len = fast::dtoa(0.123, buf); // "0.123"
```

7. 高效字符流(faststream)

include: [base/faststream.h](#).

7.1 faststream

C++ 标准库中的 `std::ostringstream` 性能较差，比 `snprintf` 慢好几倍。**faststream** 基于 `fast` 实现，在不同平台比 `snprintf` 快 10~30 倍左右。`faststream` 支持两种工作模式：流模式与二进制模式。

- 代码示例

```
faststream fs(1024);           // 预分配 1k 内存
fs << "hello world" << 23;     // 流模式

int i = 23;
char buf[8];
fs.append(buf, 8);              // 追加 8 字节
fs.append(&i, 4);               // 追加 4 字节
fs.append(i);                  // 追加 4 字节, 与 fs.append(&i, 4) 等价
fs.append((int16) 23);         // 追加 2 字节
fs.append('c');               // 追加单个字符
fs.append(100, 'c');           // 追加 100 个 'c'
fs.append('c', 100);           // 追加 100 个 'c'

fs.c_str();                    // 返回 C 风格字符串
fs.str();                      // 返回 C++ 字符串, 内存拷贝
fs.data();                    // 返回数据指针
fs.size();                    // 返回数据长度
fs.capacity();                // 容量

fs.reserve(4096);              // 预分配至少 4k 内存
fs.resize(32);                 // size -> 32, buffer 中内容不变
fs.clear();                    // size -> 0
fs.swap(faststream());         // 交换
```

7.2 magicstream

magicstream 用法与 `faststream` 几乎完全一样，唯一不同的是，调用 `str()` 方法后，返回的字符串接管了 `magicstream` 的内部内存，`magicstream` 对象自身失效，不可再使用，与 `faststream` 相比，少了一次内存拷贝。

- 代码示例

```
fastring s = (magicstream() << "hello" << 123).str();
```

8. 高效字符串(fastring)

include: [base/fastring.h](#).

fastring 是一种字符串类型，特别对内存拷贝进行了优化，大部分情况可以取代 C++ 标准库中的 **std::string**。CO 库内部用到字符串的地方，已全部替换成 fastring。

- fastring 的特性：
 - 类中仅有一个指针成员，**sizeof(fastring) == sizeof(void*)**。
 - 内置引用计数，复制操作仅增加引用计数(原子操作，线程安全)，不会进行内存拷贝。
 - 空字符串不分配内存，内部指针为 **0**，不存在引用计数，复制空字符串不会增加引用计数。
- 代码示例

```
fastring s;           // 空字符串，无内存分配
fastring s(32);       // 空字符串，预分配内存(容量为32)
fastring s("hello");  // 非空字符串
fastring s(88, 'x');   // 初始化 s 为 88 个 'x'
fastring s('x', 88);  // 初始化 s 为 88 个 'x'
fastring t = s;       // s, t 指向同一个字符串
// !! 后续修改 s, t 若导致重新分配内存，则 s, t 可能会指向不同的字符串

s += "xx";           // 追加
s.append("xx");      // 追加  <==>  s += "xx";
s.swap(fastring());  // 交换

s + "xxx";           // +
s > "xxx";           // >
s < "zzz"            // <
s <= "zz"            // <=
s >= "zz"            // >=

s.find('c');          // 查找字符
s.find("xx", 3);      // 从 pos 3 开始查找子串
s.rfind('c');         // 反向查找字符
s.rfind("xx");        // 反向查找字符串
s.find_first_of("xy"); // 查找第一次出现的 "xy" 中的字符
s.find_first_not_of("xy"); // 查找第一次出现的非 "xy" 中的字符
s.find_last_of("xy");  // 查找最后一次出现的 "xy" 中的字符
s.find_last_not_of("xy"); // 查找最后一次出现的非 "xy" 中的字符

s.starts_with('x');   // s 是否以 'x' 开头
s.starts_with("xx");  // s 是否以 "xx" 开头
s.ends_with('x');     // s 是否以 'x' 结尾
s.ends_with("xx");    // s 是否以 "xx" 结尾

s.replace("xxx", "yy"); // 将 s 中的 "xxx" 替换为 "yy"
s.replace("xxx", "yy", 3); // 将 s 中的 "xxx" 替换为 "yy", 最多替换 3 次

s.strip();            // 删除 s 两端的空白字符 " \t\r\n"
s.strip("ab");        // 删除 s 两端的 'a', 'b'
s.strip("ab", 'l');   // 删除 s 左端的 'a', 'b'
s.strip("ab", 'r');   // 删除 s 右端的 'a', 'b'

s.to_lower();         // s 转换为小写
s.to_upper();         // s 转换为大写
s.lower();            // 返回 s 的小写形式, s 本身不变
s.upper();            // 返回 s 的大写形式, s 本身不变
s.clone();            // 返回 s 的一份拷贝 (memory copy)
s.match("x*y?z");     // 字符串匹配, * 匹配任意字符串, ? 匹配单个字符
```

9. 字符串操作(str)

include: [base/str.h](#).

9.1 切分字符串(split)

split 函数将字符串切分成若干个子串，原字符串保持不变，返回切分后的结果。

- 函数原型

```
// @s: 原字符串, fastring 或 const char*
// @c: 分隔符, 单个字符或'\0'结尾的字符串
// @n: 切分次数, 0 或 -1 表示不限次数, 默认为 0
std::vector<fastring> split(s, c, n=0);
```

- 代码示例

```
str::split("x y z", ' ');    // -> [ "x", "y", "z" ]
str::split("|x|y|", '|');    // -> [ "", "x", "y" ]
str::split("xoo", "oo");     // -> [ "x", "y" ]
str::split("xoo", 'o');      // -> [ "x", "", "y" ]
str::split("xoo", 'o', 1);   // -> [ "x", "oy" ]
```

9.2 修剪字符串(strip)

strip 函数去掉字符串左右两边指定的字符，原字符串保持不变，返回 strip 后的结果。

- 函数原型

```
// @s: 原字符串, fastring 或 const char*
// @c: 需要去掉的字符集, 单个字符或字符串
// @d: 方向, 'l' 或 'L' 修剪左边, 'r' 或 'R' 修剪右边, 默认为 'b', 修剪左右两边
fastring strip(s, c=" \t\r\n", d='b');
```

- 代码示例

```
str::strip("abxxa", "ab");    // -> "xx"    修剪两边
str::strip("abxxa", "ab", 'l'); // -> "xxa"   修剪左边
str::strip("abxxa", "ab", 'r'); // -> "abxx"  修剪右边
```

9.3 替换子串(replace)

replace 函数用于替换字符串中的子串，原字符串保持不变，返回替换后的结果。

- 函数原型

```
// @s: 原字符串, fastring 或 const char*
// @sub: 替换前的子串
// @to: 替换后的子串
// @n: 最大替换次数, 0 或 -1 表示不限制次数, 默认为 0
fastring replace(s, sub, to, n=0);
```

- 代码示例

```
str::replace("xooxoo", "oo", "ee");    // -> "xeexeex"
str::replace("xooxoo", "oo", "ee", 1); // -> "xeexoox"
```

9.4 字符串转内置类型

str 库提供如下的函数，将字符串转为内置类型：

```
to_int32  to_int64  to_uint32  to_uint64  to_bool  to_double
```

- 函数说明
 - 若转换失败，抛出 `fastring` 类型的异常。
 - 转换为整数时，字符串末尾可带单位 `k, m, g, t, p`，不区分大小写。
- 代码示例

```
bool x = str::to_bool("false");    // "true" or "1" -> true, "false" or "0" -> false
double x = str::to_double("3.14"); // 3.14

int32 x = str::to_int32("-23");     // -23
int64 x = str::to_int64("4k");     // 4096
uint32 x = str::to_uint32("8M");   // 8 << 20
uint64 x = str::to_uint64("8T");   // 8ULL << 40
```

9.5 内置类型转字符串

str 库提供 `from` 函数，将内置类型转为字符串。

- 代码示例

```
fastring s = str::from(true);    // -> "true"
fastring s = str::from(23);      // -> "23"
fastring s = str::from(3.14);    // -> "3.14"
```

9.6 debug string

str 库提供 `dbg` 函数，从指定类型生成一个 debug 字符串。

- 函数原型

```
// @v: 内置类型，字符串类型，或常用的 STL 容器类型(vector, map, set)
fastring dbg(v);
```

- 代码示例

```
std::vector<int> v { 1, 2, 3 };
std::set<int> s { 1, 2, 3 };
std::map<int, int> m { {1, 1}, {2, 2} };
str::dbg(v);    // -> "[1,2,3]"
str::dbg(s);    // -> "{1,2,3}"
str::dbg(m);    // -> "{1:1,2:2}"

str::dbg(true); // -> "true"
str::dbg(23);   // -> "23"
str::dbg("23"); // -> "\"23\"", 字符串类型，两边加引号
```

- 当字符串中含有 `"` 时，`dbg()` 生成的字符串看起来会有点瑕疵，不过此函数一般用于打日志，应该无伤大雅。

10. 命令行参数与配置文件解析库(flag)

include: [base/flag.h](#).

10.1 基本概念

flag 库是一个类似 [google gflags](#) 的命令行参数及配置文件解析库，其原理很简单，代码中定义静态全局变量，然后在程序启动时解析命令行参数及配置文件，修改这些全局变量的值。

10.1.1 flag 变量

flag 库中的宏定义的静态全局变量，称为 **flag** 变量。如下面的代码定义了名为 **x** 的 flag 变量，它对应的全局变量名是 **FLG_x**。

```
DEF_bool(x, false, "xxx"); // bool FLG_x = false;
```

flag 库支持 7 种类型的 flag 变量：

```
bool, int32, int64, uint32, uint64, double, string
```

10.1.2 command line flag

命令行参数中，以 **-x=y** 的形式出现，其中 **x** 被称为一个 **command line flag** (以下都简称为 **flag**)。命令行中的 flag，与代码中的 flag 变量是一一对应的(下面不再区分二者)。flag 库为了简便易用，设计得非常灵活：

- **-x=y** 可以省略前面的 **-**，简写为 **x=y**。
- **x=y** 前面可以带任意数量的 **-**。
- **bool** 类型的 flag，**-b=true** 可以简写为 **-b**，简写时不能省略 **-**。

```
./exe -b -i=32 s=hello xx # b,i,s 是 flag, xx 不是 flag
```

10.2 flag 库的初始化

flag 库对外仅提供一个 api 函数 **flag::init0**，用于初始化 flag 库及解析命令行参数、配置文件等。

```
// 主要流程：
// 1. 解析命令行参数，更新 flag 变量的值。
// 2. 若 FLG_mkconf 非空，生成配置文件，退出程序。
// 3. 若 FLG_config 非空，解析由此指定的配置文件。
// 4. 若 FLG_daemon 为 true，将程序放入后台执行。

// 解析过程中遇到任何错误，输出错误信息，退出程序。
// 解析全部正常，返回非 flag 的参数列表。
std::vector<fastring> init(int argc, char** argv);
```

此函数需要在进入 **main** 函数时调用一次：

```
#include "base/flag.h"

int main(int argc, char** argv) {
    flag::init(argc, argv);
}
```

10.3 代码中定义、声明及使用 **flag** 变量

10.3.1 定义 **flag** 变量

flag 库提供了 7 个宏，分别用于定义 7 种不同类型的 flag 变量：

```
DEF_bool DEF_int32 DEF_int64 DEF_uint32 DEF_uint64 DEF_double DEF_string
```

下面的代码，分别定义了类型为 bool 与 string 的两个 flag 变量：

```
DEF_bool(b, false, "comments"); // bool FLG_b = false;
DEF_string(s, "x", "comments"); // fastring FLG_s = "x";
```

DEF_xxx 宏带有三个参数，第一个参数是 flag 变量名，第二个参数是默认值，第三个参数是注释。需要注意下面两点：

- flag 变量是全局变量，一般不要在头文件中定义它们。
- flag 变量的名字是唯一的，不能定义两个名字相同的 flag 变量。

10.3.2 声明 **flag** 变量

与定义类似，flag 库也提供了 7 个宏，分别用于声明 7 种不同类型的 flag 变量：

```
DEC_bool DEC_int32 DEC_int64 DEC_uint32 DEC_uint64 DEC_double DEC_string
```

下面的代码声明了一个 int32 类型的变量：

```
DEC_int32(i32); // extern int32 FLG_i32;
```

DEC_xxx 宏只有一个参数，接收 flag 变量名。一个 flag 变量只能定义一次，但可以声明多次，可以在任何需要的地方声明它们。声明一般用于引用其它地方定义的 flag 变量。

10.3.3 使用 **flag** 变量

定义或声明 flag 变量后，就可以像普通变量一样使用它们：

```
DEC_bool(b);
if (!FLG_b) std::cout << "b is false" << std::endl;

DEF_string(s, "hello", "xxx");
FLG_s += " world";
std::cout << FLG_s << std::endl;
```

10.4 命令行中使用 **flag**

10.4.1 命令行中设置 **flag** 变量的值

假设程序中定义了如下的 flag：

```
DEF_bool(x, false, "bool x");
DEF_bool(y, false, "bool y");
DEF_int32(i, -32, "int32");
DEF_uint64(u, 64, "uint64");
DEF_double(d, 3.14, "double");
DEF_string(s, "hello world", "string");
```

程序启动时，可以通过命令行参数修改 `flag` 变量的值：

- 所有的 `flag` 变量，都可以用 `x=y` 的形式设置其值

```
./xx x=true i=8 u=88 -d=8.8 --s="wow aha" # flag 前面的 - 可选
```

- `bool flag` 设置为 `true` 时，可以略去其值

```
./xx -x # -x=true
```

- 多个单字母命名的 `bool flag`，可以合并设置为 `true`

```
./xx -xy # -x=true -y=true
```

- 整型 `flag` 可以带单位 `k, m, g, t, p`，不区分大小写

```
./xx i=-4k # i=-4096
```

- 整型 `flag` 可以传 8, 16 进制数

```
./xx i=032 # i=26      8 进制
./xx u=0xff # u=255    16 进制
```

10.4.2 查看帮助信息

```
$ ./xx --help
usage:
  ./xx --           print flags info
  ./xx --help       print this help info
  ./xx --mkconf      generate config file
  ./xx --daemon      run as a daemon (Linux)
  ./xx xx.conf       run with config file
  ./xx config=xx.conf run with config file
  ./xx -x -i=8k -s=ok run with commandline flags
  ./xx x=true i=8192 s=ok run with commandline flags
```

10.4.3 查看 `flag` 变量列表

```
$ ./xx --
--config: .path of config file
         type: string      default: ""
         from: ../../base/flag.cc
--mkconf: .generate config file
         type: bool        default: false
         from: ../../base/flag.cc
```

10.5 程序启动时指定配置文件

命令行中可以用 `flag config` 指定程序的配置文件：

```
./xx config=xx.conf
./xx xx.conf # 若配置文件名以 .conf 或 config 结尾，且程序只有一个参数，则可省略 config=
```

另外也可以在代码中调用 `flag::init()` 之前，修改 `FLG_config` 的值，指定配置文件。

10.6 自动生成配置文件

程序启动时，可以用 `--mkconf` 自动生成配置文件：

```
./xx --mkconf # 在 xx 所在目录生成 xx.conf
```

- 特别说明
 - 注释以 `.` 开头的 `flag`，带有隐藏属性，不会生成到配置文件中，但 `./xx --` 可以查看。
 - 注释为空的 `flag`，带有隐身属性，不会生成到配置文件中，`./xx --` 也无法查看。

10.7 配置文件的格式

`flag` 库的配置文件格式，也比较灵活：

- 忽略行前、行尾的空白字符，书写更自由，不容易出错。
- `#` 或 `//` 表示注释，支持整行注释与行尾注释。
- 引号中的 `#` 或 `//` 不是注释。
- 一行一个 `flag`，形式强制统一为 `x=y`，看起来一目了然。
- `=` 号前后可以任意添加空白字符，书写更自由。
- 可以用 `\` 续行，以免一行太长，影响美观。
- 字符串不支持转义，以免产生歧义。

下面是一个配置文件的示例：

```
# config file: xx.conf
daemon = false           # 后台运行程序 (daemon 由 flag 库内部定义)
boo = true               # 不能像命令行中那样简写为 -boo

s =                      # 空字符串
s = hello \
    world                # s = "helloworld"
s = "http://github.com" # 引号中的 # 与 // 不是注释
s = "I'm ok"            # 字符串中含有单引号，两端可以加双引号
s = 'how are "U"'       # 字符串中含有双引号，两端可以加单引号

i32 = 4k                  # 4096，整型可以带单位 k,m,g,t,p，不区分大小写
i32 = 032                 # 8 进制，i32 = 26
i32 = 0xff                # 16 进制，i32 = 255
pi = 3.14159              # double 类型
```

11. 高效流式日志库(log)

include: `base/log.h`.

11.1 基本介绍

`log` 库是一个类似 `google glog` 的 C++ 流式日志库，打印日志比 `printf` 系列的函数更方便、更安全：

```
LOG << "hello world" << 23;
```

`log` 库内部实现中采用异步方式，日志先写入缓存，达到一定量或超过一定时间后，由后台线程一并写入文件，性能在不同平台比 `glog` 提升了 20~150 倍左右。

下表是在不同平台连续打印 100 万条(每条 50 字节左右) info 级别日志的测试结果:

log vs glog	google glog	co log
win2012 机械硬盘	1.6MB/s	180MB/s
win10 ssd	3.7MB/s	560MB/s
mac ssd	17MB/s	450MB/s
linux ssd	54MB/s	1023MB/s

11.2 Api 介绍

log 库对外仅提供两个 api 函数:

```
void init();
void close();
```

log::init() 需要在 **main** 函数开头调用一次。由于 log 库依赖于 flag 库, 所以 main 函数一般得像下面这样写:

```
#include "base/flag.h"
#include "base/log.h"

int main(int argc, char** argv) {
    flag::init(argc, argv);
    log::init();
}
```

log::close() 将缓存中的日志写入文件, 并退出后台写日志的线程。log 库内部会捕获 **SIGINT, SIGTERM, SIGQUIT** 等信号, 在程序退出前调用此函数, 以免丢失日志。

11.3 打印不同级别的日志

日志分为 debug, info, warning, error, fatal 5 个级别, 可以分别用宏 DLOG, LOG, WLOG, ELOG, FLOG 打印 5 种不同级别的日志:

```
DLOG << "this is DEBUG log " << 23;
LOG << "this is INFO log " << 23;
WLOG << "this is WARNING log " << 23;
ELOG << "this is ERROR log " << 23;
FLOG << "this is FATAL log " << 23;
```

打印 **fatal** 日志, 一般表示程序出现了致命错误, log 库会打印当前线程的函数调用栈信息, 并终止程序的运行。

11.4 条件日志(LOG_IF)

log 库也提供 **IF** 版的宏, 接受一个条件参数, 当满足指定条件时才打印日志。

- 代码示例

```
DLOG_IF(cond) << "this is DEBUG log " << 23;
LOG_IF(cond) << "this is INFO log " << 23;
WLOG_IF(cond) << "this is WARNING log " << 23;
ELOG_IF(cond) << "this is ERROR log " << 23;
FLOG_IF(cond) << "this is FATAL log " << 23;
```

11.5 每 N 条打印一次日志(LOG_EVERY_N)

log 库提供 **LOG_EVERY_N** 等宏，支持每 N 条打印一次日志，这些宏内部使用原子操作，保证线程安全性。

- 代码示例

```
// 打印第 1, 33, 65..... 条日志
DLOG_EVERY_N(32) << "this is DEBUG log " << 23;
LOG_EVERY_N(32) << "this is INFO log " << 23;
WLOG_EVERY_N(32) << "this is WARNING log " << 23;
ELOG_EVERY_N(32) << "this is ERROR log " << 23;
```

FLOG 没有这个功能，因为 FLOG 一打印，程序就挂了。

11.6 打印前 N 条日志(LOG_FIRST_N)

log 库提供 **LOG_FIRST_N** 等宏，支持打印前 N 条日志。这些宏内部同样使用原子操作，保证线程安全性。

- 代码示例

```
// 打印前 10 条日志
DLOG_FIRST_N(10) << "this is DEBUG log " << 23;
LOG_FIRST_N(10) << "this is INFO log " << 23;
WLOG_FIRST_N(10) << "this is WARNING log " << 23;
ELOG_FIRST_N(10) << "this is ERROR log " << 23;
```

11.7 CHECK: 加强版的 assert

log 库提供了一系列的 CHECK 宏，可视为加强版的 assert，这些宏在 DEBUG 模式下也不会被清除。

- 代码示例

```
CHECK(1 + 1 == 2) << "say something here";
CHECK_EQ(1 + 1, 2); // ==
CHECK_NE(1 + 1, 2); // !=
CHECK_GE(1 + 1, 2); // >=
CHECK_LE(1 + 1, 2); // <=
CHECK_GT(1 + 1, 2); // > greater than
CHECK_LT(1 + 1, 2); // < less than
```

CHECK 失败时，LOG 库会先调用 log::close() 写日志，再打印当前线程的函数调用栈信息，然后退出程序。

11.8 配置项

- log_dir

指定日志目录，默认为当前目录下的 **logs** 目录，不存在时将会自动创建。

```
DEF_string(log_dir, "logs", "Log dir, will be created if not exists");
```

- log_file_name

指定日志文件名(不含路径)，默认为空，使用程序名作为日志文件名。

```
DEF_string(log_file_name, "", "name of log file, using exename if empty");
```

- min_log_level

指定打印日志的最小级别，用于屏蔽低级别的日志，默认为 0，打印所有级别的日志。

```
DEF_int32(min_log_level, 0, "write logs at or above this level");
```

- max_log_file_size

指定日志文件的最大大小，默认 256M，超过此大小，生成新的日志文件，旧的日志文件会被重命名。

```
DEF_int64(max_log_file_size, 256 << 20, "max size of log file, default: 256MB");
```

- max_log_file_num

指定日志文件的最大数量，默认是 8，超过此值，删除旧的日志文件。

```
DEF_uint32(max_log_file_num, 8, "max number of log files");
```

- max_log_buffer_size

指定日志缓存的最大大小，默认 32M，超过此值，丢掉一半的日志。

```
DEF_uint32(max_log_buffer_size, 32 << 20, "max size of log buffer, default: 32MB");
```

11.9 功能及性能测试

LOG 库的测试代码见 [test/log_test.cc](#).

```
# 生成 log.exe
cd co/test && xmake -b log && cd ../build

# 打印不同类型的日志
./log.exe

# -min_log_level 指定输出日志的最小级别
./log.exe -min_log_level=1    # 0-4: debug,info,warning,error,fatal

# 性能测试，单线程连续打印 100 万条 info 级别的日志
./log.exe -perf
```

12. 单元测试框架(unittest)

include: [base/unitest.h](#).

unittest 是一个单元测试框架，与 [google gtest](#) 类似，但更简单易用。

12.1 定义测试单元及用例

- 代码示例

```
#include "base/unitest.h"
#include "base/os.h"

// 定义一个名为 os 的测试单元，os 有 3 个不同的测试用例
// 运行单元测试程序时，可用参数 -os 指定运行此单元测试中的用例
```

```

DEF_test(os) {
    DEF_case(homedir) {
        EXPECT_NE(os::homedir(), std::string());
    }

    DEF_case(pid) {
        EXPECT_GE(os::pid(), 0);
    }

    DEF_case(cpunum) {
        EXPECT_GT(os::cpunum(), 0);
    }
}

```

12.2 运行测试用例

`co/unittest/base` 下有一些单元测试代码，可按下述步骤编译、执行：

```

# 生成 unittest 可执行文件
cd co/unittest/base && xmake && cd ../../build

# 运行所有测试用例
./unittest -a

# 仅运行 os 单元中的测试用例
./unittest -os

```

13. 时间库(time)

include: `base/time.h`.

13.1 monotonic time

monotonic time 在多数平台实现为自系统启动开始的时间，一般用于计时，比系统时间稳定，不受系统时间的影响。

- 代码示例

```

int64 us = now::us(); // 微秒
int64 ms = now::ms(); // 毫秒

```

13.2 时间字符串(now::str())

now::str() 基于 `strftime` 实现，以指定格式返回当前系统时间的字符串形式。

- 函数原型

```

// fm: 时间输出格式
fastring str(const char* fm="%Y-%m-%d %H:%M:%S");

```

- 代码示例

```

fastring s = now::str(); // "2018-08-08 08:08:08"
fastring s = now::str("%Y"); // "2028"

```


13.3 sleep

Linux 平台支持微秒级的 sleep，但 Windows 平台难以实现。因此，time 库中仅支持毫秒、秒级的 sleep。

- 代码示例

```
sleep::ms(10); // sleep for 10 milliseconds
sleep::sec(1); // sleep for 1 second
```

13.4 计时器(Timer)

Timer 基于 monotonic 时间实现，对象创建时，即开始计时。

```
Timer t;
sleep::ms(10);

int64 us = t.us(); // 微秒
int64 ms = t.ms(); // 毫秒

t.restart();      // 重新开始计时
```

14. 线程库(thread)

include: [base/thread.h](#).

14.1 互斥锁(Mutex)

Mutex 是多线程编程中常用的一种互斥锁，同一时刻，只能有一个线程抢到锁，其他线程必须等待锁被释放。

还有一种读写锁，同一时刻，允许多个线程读，但最多只有一个线程写。在实际应用中，读写锁性能较差，本库因此移除了读写锁。

与 **Mutex** 相对应的，有一个 **MutexGuard** 类，用于互斥锁的自动获取、释放。

- 代码示例

```
Mutex m;
m.lock();           // 获取锁，若锁已被其他线程占用，则当前线程会阻塞
m.unlock();         // 释放锁
m.try_lock();       // 获取锁，若锁已被其他线程占用，返回 false，当前线程不会阻塞

MutexGuard g(m);    // 构造函数中调用 m.lock() 获取锁，析构函数中调用 m.unlock() 释放锁
```

14.2 同步事件(SyncEvent)

SyncEvent 是多线程编程中常用的一种同步机制，适用于生产者-消费者模型。

- SyncEvent 构造函数说明

```
// manual_reset: 是否在 wait 结束时手动设置 event 的同步状态
// signaled:     event 的初始状态是否为 signaled
SyncEvent(bool manual_reset=false, bool signaled=false);
```

- 代码示例

```

SyncEvent ev;
ev.wait();           // 线程 A, 等待事件同步, wait() 函数自动将 event 状态设置为 unsignaled
ev.signal();         // 线程 B, 事件同步通知

SyncEvent ev(true, false); // 启用 manual_reset, 等待的线程需要手动设置 event 同步状态
ev.wait(1000);         // 线程 A, 等待 1000 毫秒, 直到事件同步或超时
ev.reset();           // 线程 A, 手动设置 event 状态为 unsignaled
ev.signal();          // 线程 B, 事件同步通知

```

14.3 线程(Thread)

Thread 类是对线程的封装, 创建 Thread 对象时, 线程就会启动, 线程函数执行完时, 线程自动退出。

Thread 类除构造、析构函数外, 仅提供两个方法:

- **join()**, 阻塞, 等待线程函数执行完, 然后退出线程
- **detach()**, 不阻塞, 线程函数执行完时, 自动释放系统资源
- 代码示例

```

// 启动线程
Thread x(f);           // void f();
Thread x(f, p);        // void f(void*); void* p;
Thread x(&T::f, &t);    // void T::f(); T t;
Thread x(std::bind(f, 7)); // void f(int v);
Thread x(std::bind(&T::f, &t, 7)); // void T::f(int v); T t;

// 阻塞, 等线程函数执行完
x.join();

// 启动线程, 并销毁 Thread 对象, 线程独立于 Thread 对象运行
Thread(f).detach();

```

14.4 获取当前线程的 id

gettid() 用于获取当前线程的 id, thread 库利用 **TLS** 保存线程 id, 每个线程只需一次系统调用。

Linux glibc 从 **2.30** 版本开始增加了 gettid 系统调用, 为避免冲突, thread 库在 Linux 平台, 将 gettid 定义为一个宏。

- 代码示例

```

int id = gettid();

```

14.5 基于 TLS 的 thread_ptr

thread_ptr 用法与 **std::unique_ptr** 类似, 但内部使用了 **TLS** 机制, 每个线程设置并拥有自己的 ptr。

- 代码示例

```

struct T {
    void run() {
        cout << gettid() << endl;
    }
};

thread_ptr<T> pt;

```

```
// 在 thread 1 的线程函数中执行
if (pt == NULL) pt.reset(new T);
pt->run(); // 打印 thread 1 的 id

// 在 thread 2 的线程函数中执行
if (pt == NULL) pt.reset(new T);
pt->run(); // 打印 thread 2 的 id
```

14.6 定时任务调度器(TaskSched)

TaskSched 类用于定时任务的调度，内部由单线程调度所有任务，但可以从任意线程添加任务。

- TaskSched 提供的方法
 - run_in
 - run_every
 - run_daily

```
// @f: std::function<void()> 类型的函数对象

// n 秒后执行 f 一次
void run_in(f, n);

// 每 n 秒执行一次 f
void run_every(f, n);

// 每天的 hour:min:sec 执行一次
// @hour: 0-23, 默认为 0
// @min: 0-59, 默认为 0
// @sec: 0-59, 默认为 0
void run_daily(f, hour=0, min=0, sec=0);
```

- 代码示例

```
TaskSched s; // 启动任务调度线程
s.run_in(f, 3); // 3 秒后执行 f 一次 void f();
s.run_every(std::bind(f, 0), 3); // 每 3 秒执行一次 f void f(int);
s.run_daily(f); // 每天 00:00:00 执行一次 f
s.run_daily(f, 23); // 每天 23:00:00 执行一次 f
s.run_daily(f, 23, 30); // 每天 23:30:00 执行一次 f
s.stop(); // 退出任务调度线程
```

15. 协程库(co)

include: [base/co.h](#).

15.1 基本概念

- 协程是运行于线程中的轻量级调度单位。
- 协程所在的线程被称为协程调度线程。
- 一个进程中可以存在多个协程调度线程，各个调度线程是相互独立的。
- 一个调度线程中可以存在多个协程，但同一时刻只有一个协程运行。
- 一个协程挂起时，调度线程自动切换到该线程中的其他协程运行。
- 协程的切换是在用户态进行的，比线程间的切换更快。

协程非常适合写网络程序，是最好的网络编程方式，没有之一。协程以同步的方式写代码，不需要嵌套的异步回调，大大减轻了程序员的思想负担。

co 协程库实现的是一种 **golang** 风格的协程，有下面几个特性：

- 内置多个协程调度线程，默认为系统 CPU 核数。
- 同一线程中的协程共用一个栈，协程挂起时，会将栈上数据保存到协程中，切换回来时再将数据恢复到栈上。这种方式大大降低了内存占用，单机可以轻松创建上百万协程。
- 可以在任何地方(包括在协程中)创建新的协程，各协程为平级关系。

co 协程库在 linux, mac, windows 等平台，分别基于 **epoll**, **kqueue**, **iocp** 实现。

co 协程库中 context 切换的相关代码，取自 **tbox**，而 tbox 则参考了 **boost context** 的实现，在此表示感谢！

15.2 创建协程(go)

golang 中用关键字 **go** 创建协程，与之类似，co 库中提供 **go()** 方法创建协程。

创建协程与创建线程类似，需要指定一个协程函数，go() 方法的第一个参数就是协程函数：

```
void go(void (*f)());
void go(void (*f)(void*), void* p); // p 指定函数参数

template<typename T>
void go(void (T::*f)(), T* p);      // p 绑定 T 类对象

void go(const std::function<void()>& f);
```

实际测试发现，创建 **std::function** 类型的对象开销较大，因此 go() 特别对 **void f()**、**void f(void*)**、**void T::f()** 类型的函数进行了优化，实际应用中，应该优先使用这三类函数。

严格来说，go() 方法只是将一个 **callback** 分配到一个调度线程中，真正创建协程是由调度线程完成的。但从用户的角度看，逻辑上可以认为 go() 创建了协程，并分配到指定的调度线程中，等待被执行。

- 代码示例

```
go(f);                      // void f();
go(f, p);                   // void f(void*); void* p;
go(&T::f, p);               // void T::f(); T* p;
go(std::bind(f, 7));        // void f(int);
go(std::bind(&T::f, p, 7)); // void T::f(int); T* p;
```

15.3 协程的调度控制

协程的调度工作由调度线程自动完成，用户不需要关心。具体来说，调度线程做了下面几件事：

- 创建并启动协程。
- 阻塞时挂起协程。
- 适时的唤醒协程。
- 协程函数结束时，回收协程资源。

用户不能直接控制协程，但可以控制协程函数什么时候结束执行。co 库只给用户提供了两个非 go 的协程 api：

```
void sleep(unsigned int ms); // 毫秒
void stop();
```

- **sleep** 在协程中调用时，调度线程会挂起当前协程，切换到其他协程执行。
- **stop** 并非停止协程，而是退出所有的调度线程。服务器程序一般不会善终，几乎用不到此方法。
- 代码示例

```
// 每秒打印一行 "hello world"
void f() {
    while (true) {
        co::sleep(1000);
        cout << "hello world" << endl;
    }
}

int main(int argc, char** argv) {
    go(f);           // 启动协程
    sleep::sec(8);   // 防止主线程立即退出
    co::stop();      // 退出所有调度线程
    return 0;
}
```

15.4 socket api

co 包装了常用的 socket api，以支持一般的网络编程。所有这些 api 都在 **namespace co** 中，一般必须在协程中调用。大部分 api 形式上与原生的 socket api 基本一致，用法跟原生 api 几乎一样。

co 包装的 api 在 io 阻塞时，调度线程会自动挂起当前协程，切换到其他协程执行。

15.4.1 常用的 socket api

co 提供了十几个常用的 socket api:

```
sock_t tcp_socket(int v=4); // 4 for ipv4, 6 for ipv6
sock_t udp_socket(int v=4); // 4 for ipv4, 6 for ipv6

close  shutdown  bind  listen  accept  getsockopt
recv  recvfrom  send  sendto  connect  setsockopt

int recvn(sock_t fd, void* buf, int n);
int recvn(sock_t fd, void* buf, int n, int ms);
```

上述 api 与原生 api 有些细微的差别，说明如下:

- 原生 api 参数中的 **struct sockaddr*** 替换成了 **void***，免去手动转换的麻烦。
- **tcp_socket**, **udp_socket** 用于创建 socket，创建的 socket 在 linux/mac 平台是非阻塞的，在 windows 平台则是 **overlapped** 的，无需用户另行设置。
- **close** 提供两个版本，第二个版本可以多带一个参数 **@ms**，将当前协程挂起若干毫秒，再关闭 socket。这种延迟关闭的操作，在一定程度上能缓解连续的非合法攻击。
- **shutdown** 用单个字符 **@c** 指定关闭方向，**'r'** 关闭读，**'w'** 关闭写，默认关闭读写。

```
int shutdown(sock_t fd, char c='b');
```

- **accept** 返回的 socket 是非阻塞或 overlapped 的，无需用户自行设置。

- `connect`, `recv`, `recvn`, `recvfrom`, `send`, `sendto` 各提供两个版本，第二个版本可以多带一个参数，指定超时时间 `@ms` (毫秒)。超时发生时，这些 api 返回 -1，并设置 `errno` 为 `ETIMEDOUT`。
- `recvn` 接收 `@n` 字节的 tcp 数据，全部接收完返回 `n`，连接断开返回 0，其他错误返回 -1。
- 上述 api 发生错误时返回 -1，可以用 `co::error()` 获取错误码，`co::strerror()` 查看错误描述。

15.4.2 常用的 socket option 设置

```
void set_reuseaddr(sock_t fd);           // 设置 SO_REUSEADDR
void set_tcp_nodelay(sock_t fd);         // 设置 TCP_NODELAY
void set_tcp_keepalive(sock_t fd);       // 设置 SO_KEEPALIVE
void set_send_buffer_size(sock_t fd, int n); // 设置发送缓冲区大小
void set_recv_buffer_size(sock_t fd, int n); // 设置接收缓冲区大小
```

15.4.3 其他 api

```
// 填充 ip 地址
bool init_ip_addr(struct sockaddr_in* addr, const char* ip, int port);
bool init_ip6_addr(struct sockaddr_in6* addr, const char* ip, int port);

// ip 地址转换成字符串
fastring ip_str(struct sockaddr_in* addr);
fastring ip_str(struct sockaddr_in6* addr);

// 发送一个 RST，非正常关闭 tcp 连接，避免进入 timedwait 状态，多用于服务端
void reset_tcp_socket(sock_t fd);

// @n: 先将当前协程挂起 n 毫秒，再 reset socket
void reset_tcp_socket(sock_t fd, int n);

int error();           // 返回当前错误码
const char* strerror(); // 返回当前错误码对应的字符串
const char* strerror(int err); // 返回 @err 对应的字符串
```

15.4.4 系统 api hook

在协程中调用 co 库的 socket api 不会阻塞，但三方库中调用的是原生的 socket api，仍然可能阻塞。为了解决这个问题，需要 hook 相关的 api，迫使三方库调用 hook 后的 api。

co 库目前支持 linux/mac 平台的 hook，下面是 hook 的函数列表：

```
sleep    usleep    nanosleep

accept    accept4    connect    close    shutdown
read      readv      recv      recvfrom  recvmsg
write     writev      send      sendto    sendmsg
select    poll      gethostbyaddr  gethostbyname

gethostbyaddr_r  gethostbyname2  // linux
gethostbyname_r  gethostbyname2_r // linux

epoll_wait // linux
kevent     // mac
```

用户一般不需要关心 api hook，有兴趣可以翻看 [hook](#) 的源码实现。

15.4.5 tcp server/client 示例

- server 代码示例

```
struct Connection {
    sock_t fd;    // conn fd
    fastring ip;  // peer ip
    int port;     // peer port
};

void on_new_connection(void* p) {
    std::unique_ptr<Connection> conn((Connection*)p);
    sock_t fd = conn->fd;
    co::set_tcp_keepalive(fd);
    co::set_tcp_nodelay(fd);

    fastream fs(1024);

    while (true) {
        int r = co::recv(fd, (void*)fs.data(), fs.capacity());
        if (r == 0) {           // 客户端关闭了连接
            co::close(fd);      // 调用 close 正常关闭连接
            break;
        } else if (r == -1) {   // 异常错误, 直接 reset 连接
            co::reset_tcp_socket(fd, 3000);
            break;
        } else {
            fs.resize(r);
            cout << fs.c_str() << endl;
            co::send(fd, fs.data(), r);
        }
    }
}

void server_fun() {
    sock_t fd = co::tcp_socket();
    co::set_reuseaddr(fd);

    int r;
    sock_t connfd;
    struct sockaddr_in addr;
    co::init_ip_addr(&addr, "127.0.0.1", 7788);

    co::bind(fd, &addr, sizeof(addr));
    co::listen(fd, 1024);

    while (true) {
        connfd = co::accept(fd, &addr, &r);
        if (connfd == -1) continue;

        Connection* conn = new Connection;
        conn->fd = connfd;
        conn->ip = co::ip_str(&addr);
        conn->port = addr.sin_port;

        // 为每个客户端连接创建一个新协程, 在协程中处理连接上的数据
        co::go(on_new_connection, conn);
    }
}

go(server_fun); // 启动 server 协程
```

- client 代码示例

```
void client_fun() {
    sock_t fd = co::tcp_socket();

    struct sockaddr_in addr;
    co::init_ip_addr(&addr, "127.0.0.1", 7788);

    co::connect(fd, &addr, sizeof(addr), 3000);
    co::set_tcp_nodelay(fd);

    char buf[12] = { 0 };

    for (int i = 0; i < 7; ++i) {
        co::sleep(1000);
        co::send(fd, "hello world", 11);
        co::recv(fd, buf, 12);
        cout << buf << endl;
    }

    co::close(fd);
}

go(client_fun); // 启动 client 协程
```

15.5 协程间的同步机制

co 库实现了与线程类似的同步机制，熟悉多线程编程的开发人员，很容易从线程切换到协程编程。

15.5.1 协程锁(co::Mutex)

co 库实现了协程锁 `co::Mutex`，用法与线程库中的 `Mutex` 完全一样，只是需要在协程环境中使用。协程锁获取失败时，调度线程会挂起当前协程，切换到其他协程，调度线程自身不会阻塞。

与线程库类似，co 库也提供了一个 `co::MutexGuard` 类，用法与线程库中的 `MutexGuard` 完全一样。

- 代码示例

```
co::Mutex mtx;
int v = 0;

void f1() {
    co::MutexGuard g(mtx);
    ++v;
}

void f2() {
    co::MutexGuard g(mtx);
    --v;
}

go(f1);
go(f2);
```

15.5.2 协程同步事件(co::Event)

co 库实现了同步事件类 `co::Event`，用法与线程库中的 `SyncEvent` 类似，但需要在协程环境中使用。调用 `wait()` 方法等待同步事件时，调度线程自动挂起当前协程，切换到其他协程执行。

- 代码示例

```
co::Event ev;
int v = 0;

void f1() {
    ev.wait();
    if (v == 2) v = 1;
}

void f2() {
    v = 2;
    ev.signal();
}

go(f1);
go(f2);
```

15.6 Pool

15.6.1 Pool 类及其用法

线程支持 **TLS** 机制，协程也可以支持类似的 **CLS** 机制，但考虑到系统中可能创建上百万协程，CLS 似乎不怎么高效，co 库最终放弃了 CLS，取而代之实现了 **Pool** 类：

```
class Pool {
public:
    Pool();
    ~Pool();

    void* pop();
    void push(void* p);
    void clear(const std::function<void(void*)>& cb=0);

private:
    void* _p;
};
```

Pool 主要提供 **pop** 与 **push** 两个方法，前者从 Pool 拉取一个元素，后者将元素放回 Pool。

Pool 类是协程安全的，调用类中的方法不需要加锁，但必须在协程环境中使用。Pool 内部实现中有多个 pool，不同的线程使用不同的 pool。

- 代码示例

```
co::Pool p;

Redis* rds = (Redis*) p.pop();    // 从 pool 中拉取一个 redis 连接
if (rds == NULL) rds = new Redis; // pool 为空时，创建新的 redis 连接

rds->get("xx");                    // 调用 redis 的 get 方法
p.push(rds);                       // 用完 redis，放回 pool 中

// 清空当前线程的 pool
p.clear(
    [](void* p) { delete (Redis*) p; }
);
```

15.6.2 用 Kakalot 简化 Pool 的操作

Pool 中的元素用完后，需要手动 push 回去，操作上可能带来一些麻烦。为此，co 库提供了 **Kakalot** 类(卡卡特)，卡卡特构造时从 Pool 拉取元素，析构时将元素放回 Pool，而且还自带指针属性，可以像使用指针一样使用卡卡特。

- 代码示例

```
co::Pool p;

void f() {
    co::Kakalot<Redis> rds(p);           // 卡卡特现在变身为 Redis* 指针
    if (rds == NULL) rds = new Redis;    // 对卡卡特重新赋值
    rds->get("xx");                      // 卡卡特果然强大
}

go(f);
```

使用 CLS 机制，100w 协程需要建立 100w 连接，但使用 pool 机制，100w 协程可能只需要共用少量的连接。Pool 看起来比 CLS 更高效、更合理，这也是本协程库不支持 CLS 的原因。

15.7 配置项

co 库支持的配置项如下：

- co_sched_num

调度线程数，默认为系统 CPU 核数，目前的实现中，这个值必须 <= CPU 核数。

- co_stack_size

协程栈大小，默认为 1M。每个调度线程都会分配一个栈，调度线程内的协程共用这个栈。

- tcp_max_recv_size

co::recv 一次能接收的最大数据长度，默认为 1M，超过此大小，分批接收。

- tcp_max_send_size

co::send 一次能发送的最大数据长度，默认为 1M，超过此大小，分批发送。

16. 高效 json 库(json)

include: [base/json.h](#).

json 库的设计原则是精简、高效、易用，不同平台的测试结果显示，其性能略高于 **rapidjson**，如果有 **jemalloc** 的加持，其性能甚至接近 **rapidjson** 的两倍。

- json 库的特性

- 支持 null、bool、int、double、string 五种基本类型。
- 支持 array、object 两种复合类型。
- 所有类型统一用一个 **Json** 类表示。
- **Json** 类内部仅一个指针数据成员，**sizeof(Json) == sizeof(void*)**。
- **Json** 内置引用计数，复制操作仅增加引用计数(非原子操作，非线程安全)，不进行内存拷贝。

16.1 基本类型

- 代码示例

```
Json x;                                // null
x.is_null();                           // 判断是否为 null

Json x = false;                        // bool 类型
x.is_bool();                           // 判断是否为 bool 类型
bool b = x.get_bool();                 // 获取 bool 类型的值

Json x = 123;                          // int 类型
int i = x.get_int();                   // 获取 int 类型的值

Json x = (int64) 23;                   // int 类型, 64位
int64 i = x.get_int64();               // 返回 64 位整数

Json x = 3.14;                         // double 类型
double d = x.get_double();             // 获取 double 类型的值

Json x = "hello world";               // 字符串类型
Json x(s, n);                         // 字符串类型 (const char* s, size_t n)
x.is_string();                        // 判断是否为字符串类型
x.size();                             // 返回字符串的长度
const char* s = x.get_string();       // 返回字符串指针, 字符串以 '\0' 结尾
```

16.2 array 类型

array 是一种数组类型, 可以存储任意类型的 Json 对象。

```
Json x = json::array();                // 创建空数组, 不同于 null
x.is_array();                          // 判断是否为 array 类型
x.size();                              // 返回 array 中元素个数
x.empty();                             // 判断 array 是否为空

Json x;                                // null, 调用 push_back 后自动变成 array 类型
x.push_back(false);                   // 添加 bool 类型的值
x.push_back(1);                       // 添加 int 类型的值
x.push_back(3.14);                    // 添加 double 类型的值
x.push_back("hello");                 // 添加 string 类型的值
x.push_back(x);                       // 添加 array 类型的对象
x.push_back(obj);                     // 添加 object 类型的对象

// 访问 array 成员
x[0].get_bool();
x[1].get_int();

// 遍历 array
for (uint32 i = 0; i < x.size(); ++i) {
    Json& v = x[i];
}
```

16.3 object 类型

object 类型内部以 key-value 形式存储, value 可以是任意类型的 Json 对象, key 则有下列几条限制:

- key 必须是 **"\0"** 结尾的 C 字符串.
- key 中不能包含双引号 **"**.

```

Json x = json::object();           // 创建空 object 对象，不同于 null
x.is_object();                     // 判断是否为 object 类型
x.size();                          // 返回 object 中元素个数
x.empty();                         // 判断 object 是否为空

Json x;                            // null，调用 add_member() 后自动变成 object 类型
x.add_member("name", "Bob");       // 添加字符串对象
x.add_member("age", 23);           // 添加整数类型
x.add_member("height", 1.68);      // 添加 double 类型
x.add_member("array", array);      // 添加 array 类型
x.add_member("obj", obj);          // 添加 object 类型

// has_member 与 [] 各需查找一次
x.has_member("name");              // 判断是否包含成员 "name"
x["name"].get_string();            // 获取成员的值

// key 不存在时返回 null
Json v = x.find("age");            // Json 内置引用计数，返回对象不会影响性能。
if (v.is_int()) v.get_int();

if (!(v = x.find("obj")).is_null()) {
    do_something();
}

// 遍历
for (auto it = x.begin(); it != x.end(); ++it) {
    const char* key = it->key;      // key
    Json& v = it->value;           // value
}

```

16.4 json 转字符串

Json 类提供 `str()` 与 `pretty()` 方法，将 json 转化成字符串：

```

Json x;
fastring s = x.str();              // 返回字符串
fastring s = x.pretty();          // 返回 pretty 字符串

fastream fs;
fs << x;                          // json 字符串写入 fastream 中
LOG << x;                         // 日志库基于 fastream 实现，可以直接打印 json 对象

```

16.5 字符串转 json

`json::parse()` 或者 Json 类中的 `parse_from()` 方法可以将字符串转化成 Json 对象：

```

Json x;
fastring s = x.str();

// parse 失败时, y 为 null
Json y = json::parse(s);
Json y = json::parse(s.data(), s.size());
y.parse_from(x.str());

```

16.6 注意事项

16.6.1 添加与查找成员

object 类型，内部用数组(**std::vector**)保存 key-value 对，这样可以保持成员添加时的顺序，但同时增加了查找成员的开销。**operator[]** 会进行查找操作，实际应用中应该尽量避免使用。

- 添加成员时用 **add_member** 取代 **operator[]**

```
// add_member 不查找，直接将成员添加到尾部
x.add_member("age", 23); // 比 x["age"] = 23 效率更高
```

- 查找成员时用 **find** 取代 **operator[]**

```
// 传统的成员访问，3 次查找操作，效率低
if (x.has_member("age") && x["age"].is_int()) {
    int i = x["age"].get_int();
}

// 用 find 取代 []，只需一次查找操作
Json v = x.find("age");
if (v.is_int()) {
    int i = v.get_int();
}
```

16.6.2 字符串类型中的特殊字符

json 字符串内部以 '\0' 结尾，应该避免在字符串中包含二进制字符。

json 字符串支持包含 " 与 \，也支持 **r, \n, \t** 等转义字符。但包含这些特殊字符，会降低 **json::parse()** 的性能，实际应用中应该尽量少用。

```
Json x = "hello\r\n\t"; // ok, 字符串中包含转义字符
Json x = "hello\"world\""; // ok, 字符串中包含 "
Json x = "hello\\world\""; // ok, 字符串中包含 \
```

17. 高性能 json rpc 框架(rpc)

include: **base/rpc.h**.

rpc 框架基于协程实现，内部使用 **tcp/json** 作为传输协议，简单的测试显示单线程 qps 可以达到 **12w+**。json 与基于结构的二进制协议相比，至少有下面几个好处：

- 抓包可以直接看到传输的 json 对象，方便调试。
- rpc 调用直接传输 json 对象，不需要定义各种结构体，大大减少代码量。
- rpc 调用参数形式一致，固定为 **(const Json& req, Json& res)**，很容易自动生成代码。
- 可以实现通用的 rpc client，不需要为不同的 rpc server 生成不同的 client 代码。

17.1 rpc server 接口介绍

rpc server 的接口非常简单：

```
namespace rpc {
class Service {
public:
    virtual ~Service() = default;
    virtual void process(const Json& req, Json& res) = 0; // 业务处理
};
```

```

class Server {
public:
    virtual ~Server() = default;
    virtual void start() = 0;           // 启动 rpc server 协程
    virtual void add_service(Service*) = 0; // server 启动前必须先添加 Service 的实现
};

// 创建一个 rpc server, passwd 非空时, 客户端连接后需要进行密码认证
Server* new_server(const char* ip, int port, const char* passwd="");
} // rpc

```

rpc::Server 接收客户端连接，为每个连接创建一个新协程，新协程接收客户端请求，然后同步调用 **rpc::Service** 提供的 **process()** 方法处理请求，最后将结果发送回客户端。

具体的业务处理，需要继承 **rpc::Service** 并实现 **process()** 方法。实际上，**process()** 的代码是自动生成的，用户只需要实现具体的 **rpc** 调用方法。

17.2 实现一个 rpc server

17.2.1 定义 proto 文件

下面是一个简单的 proto 文件 **hello_world.proto**：

```

// # 或 // 表示 注释
package xx // namespace xx

service HelloWorld {
    hello,
    world,
}

hello.req {
    "method": "hello"
}

hello.res {
    "method": "hello",
    "err": 200,
    "errmsg": "200 ok"
}

world.req {
    "method": "world"
}

world.res {
    "method": "world",
    "err": 200,
    "errmsg": "200 ok"
}

```

package xx 表示将代码生成到命名空间 **xx** 中，还可以用 **package xx.yy.zz** 生成嵌套命名空间。

service HelloWorld 定义一个继承 **rpc::Service** 的 **service** 类，**hello, world** 是它提供的两个 **rpc** 方法。

hello.req, hello.res, world.req, world.res 是请求参数及响应结果的示例，生成代码时不需要这些。

- 需要注意，一个 proto 文件只能定义一个 **service**。

17.2.2 生成 service 代码

代码生成器见 [co/rpcgen](#) 目录。

- 生成 rpcgen

```
./build.sh rpcgen.cc // 生成 build/rpcgen
```

- 生成 service 代码

```
rpcgen hello_world.proto
```

下面是生成的 C++ 头文件 **hello_world.h**:

```
#pragma once

#include "base/rpc.h"
#include "base/hash.h"
#include <unordered_map>

namespace xx {

class HelloWorld : public rpc::Service {
public:
    typedef void (HelloWorld::*Fun)(const Json&, Json&);

    HelloWorld() {
        _methods[hash64("hello")] = &HelloWorld::hello;
        _methods[hash64("world")] = &HelloWorld::world;
    }

    virtual ~HelloWorld() {}

    virtual void process(const Json& req, Json& res) {
        Json& method = req["method"];
        if (!method.is_string()) {
            res.add_member("err", 400);
            res.add_member("errmsg", "400 req has no method");
            return;
        }

        auto it = _methods.find(hash64(method.get_string(), method.size()));
        if (it == _methods.end()) {
            res.add_member("err", 404);
            res.add_member("errmsg", "404 method not found");
            return;
        }

        (this->*it->second)(req, res);
    }

    virtual void hello(const Json& req, Json& res) = 0;

    virtual void world(const Json& req, Json& res) = 0;

private:
    std::unordered_map<uint64, Fun> _methods;
};

} // xx
```

可以看到 HelloWorld 的构造函数已经将 hello, world 方法注册到内部的 map 中，process() 方法根据 req 中的 **method** 字段，找到并调用对应的 rpc 方法。用户只需继承 **HelloWorld** 类，实现具体进行业务处理的 hello, world 方法即可。

业务处理方法可能不同的线程中调用，实现时需要注意线程安全性。业务处理方法内部需要连接到其他网络服务时，可以用协程安全的 **co::Pool** 管理这些网络连接。

生成的头文件可以直接放到 server 代码所在目录，客户端不需要用到。客户端只需参考 proto 文件中的 req/res 定义，就知道怎么构造 req 发起 rpc 调用了。

17.2.3 具体的业务实现

下面的示例代码 **hello_world.cc** 给出了一个简单的实现:

```
#include "hello_world.h"

namespace xx {

class HelloWorldImpl : public HelloWorld {
public:
    HelloWorldImpl() = default;
    virtual ~HelloWorldImpl() = default;

    virtual void hello(const Json& req, Json& res) {
        res.add_member("method", "hello");
        res.add_member("err", 200);
        res.add_member("errmsg", "200 ok");
    }

    virtual void world(const Json& req, Json& res) {
        res.add_member("method", "world");
        res.add_member("err", 200);
        res.add_member("errmsg", "200 ok");
    }
};

} // xx
```

17.2.4 启动 rpc server

启动 rpc server 一般只需要如下的三行代码:

```
rpc::Server* server = rpc::new_server("127.0.0.1", 7788, "passwd");
server->add_service(new xx::HelloWorldImpl);
server->start();
```

注意调用 **start()** 方法会创建一个协程，server 在协程中运行，防止主线程退出是用户需要关心的事。

17.3 rpc client

rpc client 的接口如下:

```
class Client {
public:
    virtual ~Client() = default;
    virtual void call(const Json& req, Json& res) = 0;
};
```



```
Client* new_client(const char* ip, int port, const char* passwd="");
} // rpc
```

rpc::new_client() 创建一个 rpc client，服务端若设置了密码，客户端需要带上密码进行认证。

call() 方法发起 rpc 调用，不同的 rpc 请求可以用 req 中的 method 字段标志。

- 特别提醒
 - **rpc::Client** 创建时，并没有立即建立连接，第一次发起 rpc 调用才会建立连接。
 - **delete rpc::Client** 会关闭连接，这个操作必须在协程内进行。

下面是一个简单的 rpc client 示例：

```
void client_fun() {
    rpc::Client* c = rpc::new_client("127.0.0.1", 7788, "passwd");

    for (int i = 0; i < 10000; ++i) {
        Json req, res;
        req.add_member("method", "hello");
        c->call(req, res); // 调用 hello 方法
    }

    delete c; // 在协程内 delete，是安全关闭连接所必须的
}

int main(int argc, char** argv) {
    go(client_fun); // 创建协程
    while (1) sleep::sec(7);
    return 0;
}
```

需要注意，一个 **rpc::Client** 对应一个连接，不要在多个线程中使用同一个 **rpc::Client**。多线程环境中，可以使用 **co::Pool** 管理客户端连接，下面是一个例子：

```
co::Pool cli_pool;

void client_fun() {
    co::Kakalot<rpc::Client> c(cli_pool);
    if (c == NULL) c = rpc::new_client("127.0.0.1", 7788, "passwd");

    for (int i = 0; i < 10; ++i) {
        Json req, res;
        req.add_member("method", "hello");
        c->call(req, res); // 调用 hello 方法
    }
}

// 创建 8 个协程
for (int i = 0; i < 8; ++i) {
    go(client_fun);
}
```

17.4 配置项

rpc 库支持的配置项如下：

- **rpc_max_msg_size**

rpc 消息最大长度，默认为 **8M**。

- `rpc_recv_timeout`

rpc 接收数据超时时间，单位为毫秒，默认 `1024` 毫秒。

- `rpc_send_timeout`

rpc 发送数据超时时间，单位为毫秒，默认 `1024` 毫秒。

- `rpc_conn_timeout`

rpc 连接超时时间，单位为毫秒，默认 `3000` 毫秒。

- `rpc_tcp_nodelay`

是否启用 tcp nodelay，默认为 `true`。

- `rpc_log`

是否记录 rpc 日志，默认为 `true`。

18. hash 库(hash)

include: `base/hash.h`.

`hash` 库提供了如下的几个函数：

- `hash64`

计算 64 位的 hash 值，内部使用 `murmur 2 hash` 算法。

- `hash32`

直接返回 `hash64` 的低 32 位。murmur 2 的 32 位版本每次读取 4 字节，比 64 位版本慢了一倍，弃用。

- `md5sum`

计算字符串或指定长度数据的 md5 值，返回 `32` 字节的字符串。

- `crc16`

计算字符串或指定长度数据的 crc16 值，实现取自 `redis`。

- `base64_encode`

base64 编码，不添加 `\r, \n`，实际应用中，没有必要添加。

- `base64_decode`

base64 解码，解码失败时抛出 `fastring` 类型的异常。

- 代码示例

```
uint64 h = hash64(s);           // 计算字符串 s 的 hash 值
uint64 h = hash64(s, n);        // 计算指定长度数据的 hash 值
uint32 h = hash32(s);           // 计算 32 位 hash 值
fastring s = md5sum("hello world"); // 计算字符串的 md5，返回结果为 32 字节
uint16 x = crc16("hello world"); // 计算字符串的 crc16
fastring e = base64_encode(s);   // base64 编码，不会抛出异常
fastring d = base64_decode(e);   // base64 解码，d 应该与 s 相同
```

19. path 库(path)

include: [base/path.h](#).

path 库移植于 [golang](#), path 分隔符必须为 '/'。

- **path::clean()**

返回路径的最短等价形式, 路径中连续的分隔符会被清除掉。

```
path::clean("./x/y/"); // return "x/y"
path::clean("./x/.."); // return "."
path::clean("./x/./.."); // return ".."
```

- **path::join()**

将任意数量的字符串拼接成一个完整的路径, 返回 `path::clean()` 处理后的结果。

```
path::join("x", "y", "z"); // return "x/y/z"
path::join("/x/", "y"); // return "x/y"
```

- **path::split()**

将路径切分为 dir, file 两部分, 若路径中不含分隔符, 则 dir 部分为空。返回结果满足性质 **path = dir + file**。

```
path::split("/"); // -> { "/", "" }
path::split("/a"); // -> { "/", "a" }
path::split("/a/b"); // -> { "/a/", "b" }
```

- **path::dir()**

返回路径的目录部分, 返回 `path::clean()` 处理后的结果。

```
path::dir("a"); // return "."
path::dir("a/"); // return "a"
path::dir("/"); // return "/"
path::dir("/a"); // return "/";
```

- **path::base()**

返回路径最后的一个元素。

```
path::base(""); // return "."
path::base("/"); // return "/"
path::base("/a/"); // return "a" 忽略末尾的分隔符
path::base("/a"); // return "a"
path::base("/a/b"); // return "b"
```

- **path::ext()**

函数返回路径中文件名的扩展名。

```
path::ext("/a.cc"); // return ".cc"
path::ext("/a.cc/"); // return ""
```

20. 文件系统操作(fs)

include: `base/fs.h`.

`fs` 库最小限度的实现了常用的文件系统操作，不同平台 `path` 分隔符建议统一使用 `'/'`。

20.1 元数据操作

- 代码示例

```
bool x = fs::exists(path); // 判断文件是否存在
bool x = fs::isdir(path);  // 判断文件是否为目录
int64 x = fs::mtime(path); // 获取文件的修改时间
int64 x = fs::fsize(path); // 获取文件的大小

fs::mkdir("a/b");           // mkdir a/b
fs::mkdir("a/b", true);     // mkdir -p a/b

fs::remove("x/x.txt");      // rm x/x.txt
fs::remove("a/b");          // rmdir a/b   删除空目录
fs::remove("a/b", true);    // rm -rf a/b

fs::rename("a/b", "a/c");   // 重命名
fs::symlink("/usr", "x");   // 软链接 x -> /usr, windows 需要 admin 权限
```

20.2 文件的基本读写操作

`fs` 库实现了 `fs::file` 类，支持文件的基本读写操作。

- `fs::file` 类的特性

- 支持 `r`, `w`, `a`, `m` 四种读写模式，前三种与 `fopen` 保持一致，`m` 与 `w` 类似，但不会清空已存在文件的数据。
- 不支持缓存，直接读写文件。
- 支持 `move` 语义，可以将 `file` 对象直接放入 STL 容器中。

- 代码示例

```
fs::file f; // 后续可调用 f.open() 打开文件
fs::file f("xx", 'r'); // 读模式打开文件

// 自动关闭之前打开的文件
f.open("xx", 'a'); // 追加写，文件不存在时创建
f.open("xx", 'w'); // 一般写，文件不存在时创建，文件存在时清空数据
f.open("xx", 'm'); // 修改写，文件不存在时创建，文件存在时不清数据

if (f) f.read(buf, 512); // 读取最多 512 字节
f.write(buf, 32);        // 写入 32 字节
f.write("hello");        // 写入字符串
f.write('c');            // 写入单个字符
f.close();              // 关闭文件，file 析构时会调用 close()
```

20.3 文件流(fs::fstream)

`fs::file` 不支持缓存，写小文件性能较差，为此，`fs` 库另外提供了 `fs::fstream` 类。

- `fs::fstream` 类的特性

- 只写不读，仅支持 `w`, `a` 两种模式。
- 可以自定义缓存大小，默认为 `8k`。

- 支持 **move** 语义，可将 `fstream` 对象放入 STL 容器中。

- 代码示例

```
fs::fstream s; // 默认缓存为 8k
fs::fstream s(4096); // 指定缓存为 4k
fs::fstream s("path", 'a'); // 追加模式，缓存默认为 8k
fs::fstream s("path", 'w', 4096); // 写模式，指定缓存为 4k

s.open("path", 'a'); // 打开文件，自动关闭之前已经打开的文件
if (s) s << "hello world" << 23; // 流式写
s.append(data, size); // 追加指定长度的数据
s.flush(); // 将缓存中数据写入文件
s.close(); // 关闭文件，析构时会自动关闭
```

21. 系统操作(os)

include: [base/os.h](#).

```
os::homedir(); // 返回 home 目录路径
os::cwd(); // 返回当前工作目录路径
os::exepath(); // 返回当前进程路径
os::exename(); // 返回当前进程名
os::pid(); // 返回当前进程 id
os::cpunum(); // 返回 cpu 核数
os::daemon(); // 后台运行，仅支持 Linux 平台
```

22. 编译

CO 使用 **xmake** 进行编译，后续可能不再支持 **scons**, **vs-project**。

- 编译器

- Linux: **gcc 4.8+**
- Mac: **clang 3.3+**
- Windows: **vs2015**

- 安装 xmake

windows 与 debian/ubuntu 可以直接去 xmake 的 [release](#) 页面下载安装包，其他系统请参考 xmake 的 [Installation](#) 说明。

xmake 在 linux 上默认禁止 root 用户编译，**ruki** 说 root 不安全，可以在 **~/.bashrc** 中加上下面的一行，启用 root 编译:

```
export XMAKE_ROOT=y
```

- 编译 co/base 库

co/base 是 CO 提供的核心基础库，其他工具都依赖于 base 库。

```
# 在 co/lib 目录下生成 libbase.a 或 base.lib
cd co/base
xmake
```

- 编译 co/unitest

co/unitest 是单元测试代码，用于检验 **base** 库功能的正确性。

```
# 在 co/build 目录下生成可执行文件 unittest 或 unittest.exe
cd co/unitest/base
xmake

cd ../../build
./unittest -a      # 执行所有单元测试
./unittest -os     # 执行 os 单元测试
./unittest -json   # 执行 json 单元测试
```

- 编译 **co/test**

co/test 包含了一些测试代码。

```
# 在 co/build 目录下生成相应的可执行文件
cd co/test
xmake          # 编译 test 目录下的全部目标代码
xmake -b log   # 编译 log_test.cc
xmake -b flag  # 编译 flag_test.cc
xmake build flag # 编译 flag_test.cc

cd ../../build
./log.exe -perf # log 库性能测试
./rpc.exe -c=0  # 启动 rpc server
./rpc.exe -c=1  # 启动 rpc client
```

- 编译 **rpcgen**

rpcgen 是 **json rpc** 的代码生成器，根据指定的 **proto** 文件，自动生成相应的代码。

```
# 在 co/build 目录下生成 rpcgen 或 rpcgen.exe
cd co/rpcgen
xmake

# 建议将 rpcgen 放到系统目录下(/usr/local/bin/).
# 有些 linux 系统自带了一个 rpcgen，为避免冲突，可能需要重命名 rpcgen.
rpcgen hello_world.proto
```

proto 文件格式可以参考 **co/test/rpc/hello_world.proto**。

- 生成头文件目录

```
cd co/base && ./_inc.sh # 生成 co/inc 目录
```

co/inc 目录下的 **base** 目录包含了本库对外提供的全部头文件。

23. 结语

这份文档其实还可以写得更详细一点，终因语言乏力、精力有限作罢，只能说声抱歉了。文档中难免有些疏漏、错误之处，敬请海涵与指正！

- 有问题请提交到 [github](#).
- 赞助、商务合作请联系 idealvin@qq.com.
- 捐他一个亿！请用微信扫下图:



Alvin idealvin@qq.com