为什么多线程读写 shared_ptr 要加锁？

陈硕（giantchen_AT_gmail_DOT_com）

2012-01-28

最新版下载：http://chenshuo.googlecode.com/files/CppEngineering.pdf

我在《Linux 多线程服务端编程：使用 muduo C++ 网络库》第 1.9 节“再论 shared_ptr 的线程安全”中写道：

（shared_ptr）的引用计数本身是安全且无锁的，但对象的读写则不是，因为 shared_ptr 有两个数据成员，读写操作不能原子化。根据文档（http://www.boost.org/doc/libs/release/libs/smart_ptr/shared_ptr.htm#ThreadSafety），shared_ptr 的线程安全级别和内建类型、标准库容器、std::string 一样，即：

- 一个 shared_ptr 对象实体可被多个线程同时读取（文档例 1）；
- 两个 shared_ptr 对象实体可以被两个线程同时写入（例 2），“析构”算写操作；
- 如果要从多个线程读写同一个 shared_ptr 对象，那么需要加锁（例 3~5）。

请注意，以上是 shared_ptr 对象本身的线程安全级别，不是它管理的对象的线程安全级别。

后文（p.18）则介绍如何高效地加锁解锁。本文则具体分析一下为什么“因为 shared_ptr 有两个数据成员，读写操作不能原子化”使得多线程读写同一个 shared_ptr 对象需要加锁。这个在我看来显而易见的结论似乎也有人抱有疑问，那将导致灾难性的后果，值得我写这篇文章。本文以 boost::shared_ptr 为例，与 std::shared_ptr 可能略有区别。

shared_ptr 的数据结构

shared_ptr 是引用计数型（reference counting）智能指针，几乎所有的实现都采用在堆（heap）上放个计数值（count）的办法（除此之外理论上还有用循环链表的办法，不过没有实例）。具体来说，shared_ptr<Foo> 包含两个成员，一个是指向 Foo 的指针 ptr，另一个是 ref_count 指针（其类型不一定是原始指针，有可能是 class 类型，但

不影响这里的讨论），指向堆上的 ref_count 对象。ref_count 对象有多个成员，具体的数据结构如图 1 所示，其中 deleter 和 allocator 是可选的。

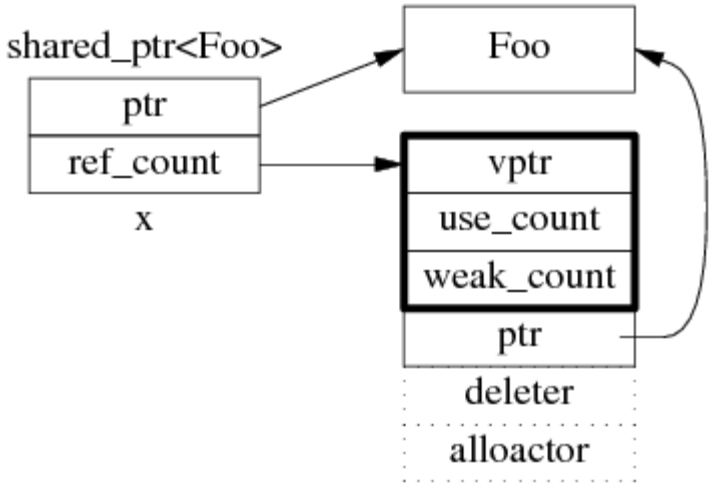
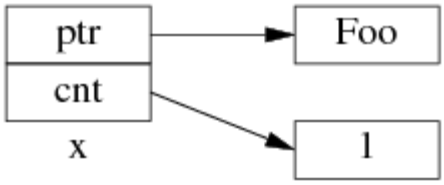


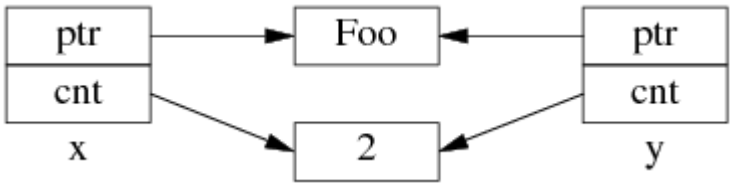
图 1：shared_ptr 的数据结构。

为了简化并突出重点，后文只画出 use_count 的值：



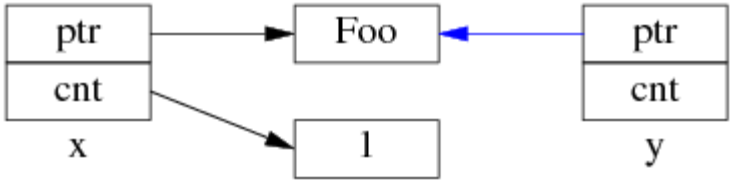
以上是 shared_ptr<Foo> x(new Foo); 对应的内存数据结构。

如果再执行 shared_ptr<Foo> y = x; 那么对应的数据结构如下。

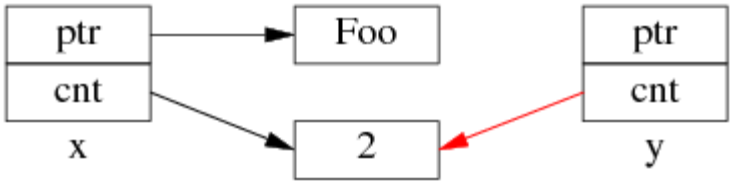


但是 y=x 涉及两个成员的复制，这两步拷贝不会同时（原子）发生。

中间步骤 1，复制 ptr 指针：



中间步骤 2，复制 ref_count 指针，导致引用计数加 1：



步骤 1 和步骤 2 的先后顺序跟实现相关（因此步骤 2 里没有画出 y.ptr 的指向），我见过的都是先 1 后 2。

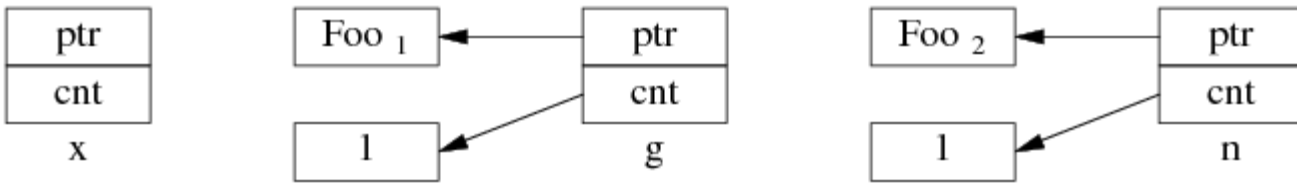
既然 y=x 有两个步骤，如果没有 mutex 保护，那么在多线程里就有 race condition。

多线程无保护读写 shared_ptr 可能出现的 race condition

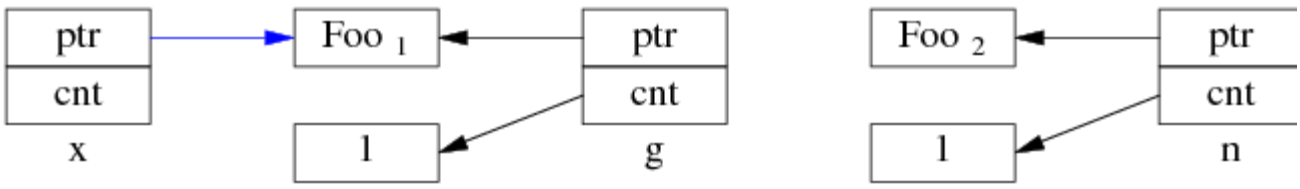
考虑一个简单的场景，有 3 个 shared_ptr<Foo> 对象 x、g、n：

- shared_ptr<Foo> g(new Foo); // 线程之间共享的 shared_ptr
- shared_ptr<Foo> x; // 线程 A 的局部变量
- shared_ptr<Foo> n(new Foo); // 线程 B 的局部变量

一开始，各安其事。

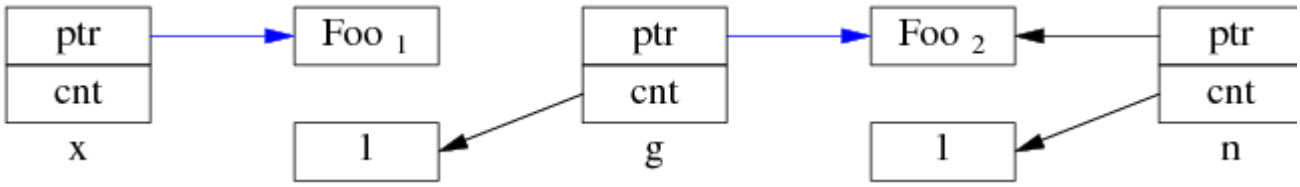


线程 A 执行 x = g;（即 read g），以下完成了步骤 1，还没来及执行步骤 2。这时切换到了 B 线程。

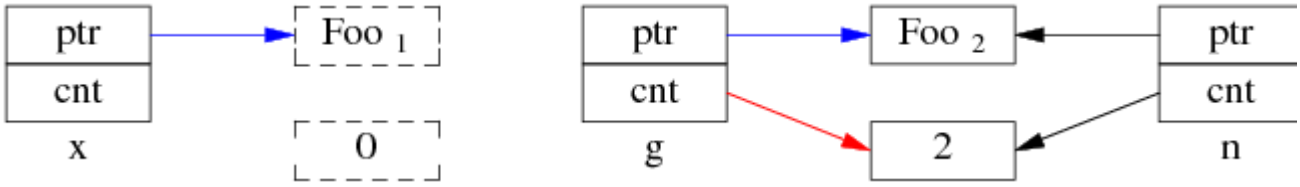


同时编程 B 执行 g = n;（即 write g），两个步骤一起完成了。

先是步骤 1：

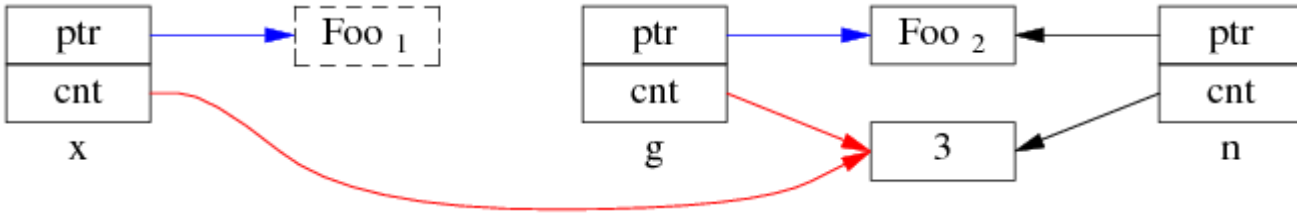


再是步骤 2：



这是 Foo1 对象已经销毁，x.ptr 成了空悬指针！

最后回到线程 A，完成步骤 2：



多线程无保护地读写 g，造成了“x 是空悬指针”的后果。这正是多线程读写同一个 shared_ptr 必须加锁的原因。

当然，race condition 远不止这一种，其他线程交织（interweaving）有可能会造成其他错误。

思考，假如 shared_ptr 的 operator= 实现是先复制 ref_count（步骤 2）再复制 ptr（步骤 1），会有哪些 race condition？

杂项

shared_ptr 作为 unordered_map 的 key

如果把 boost::shared_ptr 放到 unordered_set 中，或者用于 unordered_map 的 key，那么要小心 hash table 退化为链表。

http://stackoverflow.com/questions/6404765/c-shared-ptr-as-unordered-sets-key/12122314#12122314

直到 Boost 1.47.0 发布之前，unordered_set<std::shared_ptr<T> > 虽然可以编译通过，但是其 hash_value 是 shared_ptr 隐式转换为 bool 的结果。也就是说，如果不自定义 hash 函数，那么 unordered_{set/map} 会退化为链表。
https://svn.boost.org/trac/boost/ticket/5216

Boost 1.51 在 boost/functional/hash/extensions.hpp 中增加了有关重载，现在只要包含这个头文件就能安全高效地使用 unordered_set<std::shared_ptr> 了。

这也是 muduo 的 examples/idleconnection 示例要自己定义 hash_value(const boost::shared_ptr<T>& x) 函数的原因（书第 7.10.2 节，p.255）。因为 Debian 6 Squeeze、Ubuntu 10.04 LTS 里的 boost 版本都有这个 bug。

为什么图 1 中的 ref_count 也有指向 Foo 的指针？

shared_ptr<Foo> sp(new Foo) 在构造 sp 的时候捕获了 Foo 的析构行为。实际上 shared_ptr.ptr 和 ref_count.ptr 可以是不同的类型（只要它们之间存在隐式转换），这是 shared_ptr 的一大功能。分 3 点来说：

1. 无需虚析构；假设 Bar 是 Foo 的基类，但是 Bar 和 Foo 都没有虚析构。

shared_ptr<Foo> sp1(new Foo); // ref_count.ptr 的类型是 Foo*

shared_ptr<Bar> sp2 = sp1; // 可以赋值，自动向上转型（up-cast）

sp1.reset(); // 这时 Foo 对象的引用计数降为 1

此后 sp2 仍然能安全地管理 Foo 对象的生命期，并安全完整地释放 Foo，因为其 ref_count 记住了 Foo 的实际类型。

2. shared_ptr<void> 可以指向并安全地管理（析构或防止析构）任何对象；muduo::net::Channel class 的 tie() 函数就使用了这一特性，防止对象过早析构，见书 7.15.3 节。

shared_ptr<Foo> sp1(new Foo); // ref_count.ptr 的类型是 Foo*

shared_ptr<void> sp2 = sp1; // 可以赋值，Foo* 向 void* 自动转型

sp1.reset(); // 这时 Foo 对象的引用计数降为 1

此后 sp2 仍然能安全地管理 Foo 对象的生命期，并安全完整地释放 Foo，不会出现 delete void* 的情况，因为 delete 的是 ref_count.ptr，不是 sp2.ptr。

3. 多继承。假设 Bar 是 Foo 的多个基类之一，那么：

shared_ptr<Foo> sp1(new Foo);

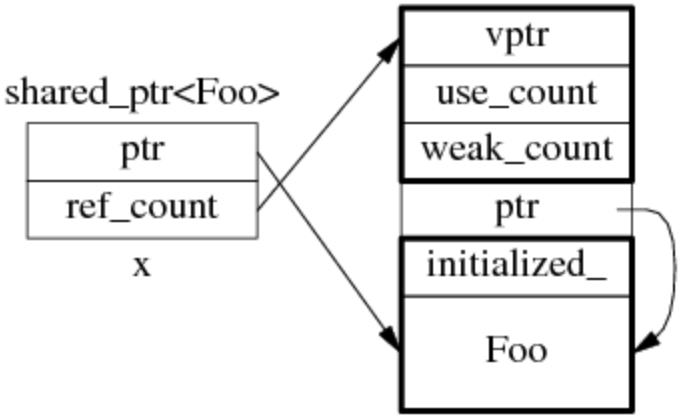
shared_ptr<Bar> sp2 = sp1; // 这时 sp1.ptr 和 sp2.ptr 可能指向不同的地址，因为 Bar subobject 在 Foo object 中的 offset 可能不为 0。

sp1.reset(); // 此时 Foo 对象的引用计数降为 1

但是 sp2 仍然能安全地管理 Foo 对象的生命期，并安全完整地释放 Foo，因为 delete 的不是 Bar*，而是原来的 Foo*。换句话说，sp2.ptr 和 ref_count.ptr 可能具有不同的值（当然它们的类型也不同）。

为什么要尽量使用 make_shared()？

为了节省一次内存分配，原来 shared_ptr<Foo> x(new Foo); 需要为 Foo 和 ref_count 各分配一次内存，现在用 make_shared() 的话，可以一次分配一块足够大的内存，供 Foo 和 ref_count 对象容身。数据结构是：



不过 Foo 的构造函数参数要传给 make_shared()，后者再传给 Foo::Foo()，这只有在 C++11 里通过 perfect forwarding 才能完美解决。

(.完.)