libevent 源码深度剖析

张亮
Email: sparling.liang@hotmail.com

回想刚开始写时，就冠以“深度剖析”的名称，也是为了给自己一些压力，以期能写好这一系列文章，对 libevent 源代码的各方面作详细的分析；现在看来也算是达到了最初的目的。希望能给学习和使用 libevent 的朋友们有所帮助。

Email：sparkling.liang@hotmail.com
张亮

目录

一 序幕

1 前言

Libevent 是一个轻量级的开源高性能网络库，使用者众多，研究者更甚，相关文章也不少。写这一系列文章的用意在于，一则分享心得；二则对 libevent 代码和设计思想做系统的、更深层次的分析，写出来，也可供后来者参考。

附带一句：Libevent 是用 c 语言编写的（MS 大牛们都偏爱 c 语言哪），而且几乎是无处不函数指针，学习其源代码也需要相当的 c 语言基础。

2 Libevent 简介

上来当然要先夸奖啦，Libevent 有几个显著的亮点：
事件驱动（event-driven），高性能;
轻量级，专注于网络，不如 ACE 那么臃肿庞大；
源代码相当精炼、易读；
跨平台，支持 Windows、Linux、*BSD 和 Mac Os；
支持多种 I/O 多路复用技术， epoll、poll、dev/poll、select 和 kqueue 等；
支持 I/O，定时器和信号等事件；
注册事件优先级；

Libevent 已经被广泛的应用，作为底层的网络库；比如 memcached、Vomit、Nylon、Netchat 等等。
Libevent 当前的最新稳定版是 1.4.13；这也是本文参照的版本。

3 学习的好处

学习 libevent 有助于提升程序设计功力，除了网络程序设计方面外，Libevent 的代码里有很多有用的设计技巧和基础数据结构，比如信息隐藏、函数指针、c 语言的多态支持、链表和堆等等，都有助于提升自身的程序功力。

程序设计不止要了解框架，很多细节之处恰恰也是事关整个系统成败的关键。只对 libevent 本身的框架大概了解，那或许仅仅是一知半解，不深入代码分析，就难以了解其设计的精巧之处，也就难以为自己所用。

事实上 Libevent 本身就是一个典型的 Reactor 模型，理解 Reactor 模式是理解 libevent 的基石；因此下一节将介绍典型的事件驱动设计模式——Reactor 模式。

参考资料：
Libevent: http://monkey.org/~provos/libevent/

二 Reactor 模式

前面讲到，整个 libevent 本身就是一个 Reactor，因此本节将专门对 Reactor 模式进行必要的介绍，并列出 libevnet 中的几个重要组件和 Reactor 的对应关系，在后面的章节中可能还会提到本节介绍的基本概念。

1 Reactor 的事件处理机制

首先来回想一下普通函数调用的机制：程序调用某函数→函数执行，程序等待→函数将结果和控制权返回给程序→程序继续处理。

Reactor 释义“反应堆”，是一种事件驱动机制。和普通函数调用的不同之处在于：应用程序不是主动的调用某个 API 完成处理，而是恰恰相反，Reactor 逆置了事件处理流程，应用程序需要提供相应的接口并注册到 Reactor 上，如果相应的时间发生，Reactor 将主动调用应用程序注册的接口，这些接口又称为“回调函数”。使用 Libevent 也是想 Libevent 框架注册相应的事件和回调函数；当这些时间发声时，Libevent 会调用这些回调函数处理相应的事件（I/O 读写、定时和信号）。

用“好莱坞原则”来形容 Reactor 再合适不过了：不要打电话给我们，我们会打电话通知你。

举个例子：你去应聘某 xx 公司，面试结束后。

“普通函数调用机制”公司 HR 比较懒，不会记你的联系方式，那怎么办呢，你只能面试完后自己打电话去问结果；有没有被录取啊，还是被据了；

“Reactor”公司 HR 就记下了你的联系方式，结果出来后会主动打电话通知你：有没有被录取啊，还是被据了；你不用自己打电话去问结果，事实上也不能，你没有 HR 的留联系方式。

2 Reactor 模式的优点

Reactor 模式是编写高性能网络服务器的必备技术之一，它具有如下的优点：

1）响应快，不必为单个同步时间所阻塞，虽然 Reactor 本身依然是同步的；

2）编程相对简单，可以最大程度的避免复杂的多线程及同步问题，并且避免了多线程/进程的切换开销；

3）可扩展性，可以方便的通过增加 Reactor 实例个数来充分利用 CPU 资源；

4）可复用性，reactor 框架本身与具体事件处理逻辑无关，具有很高的复用性；

3 Reactor 模式框架

使用 Reactor 模型，必备的几个组件：事件源、Reactor 框架、多路复用机制和事件处理程序，先来看看 Reactor 模型的整体框架，接下来再对每个组件做逐一说明。

1） 事件源

Linux 上是文件描述符，Windows 上就是 Socket 或者 Handle 了，这里统一称为“句柄集”；程序在指定的句柄上注册关心的事件，比如 I/O 事件。

2） event demultiplexer——事件多路分发机制

由操作系统提供的 I/O 多路复用机制，比如 select 和 epoll。

程序首先将其关心的句柄（事件源）及其事件注册到 event demultiplexer 上；

当有事件到达时，event demultiplexer 会发出通知“在已经注册的句柄集中，一个或多个句柄的事件已经就绪”；

程序收到通知后，就可以在非阻塞的情况下对事件进行处理了。

对应到 libevent 中，依然是 select、poll、epoll 等，但是 libevent 使用结构体 eventop 进行了封装，以统一的接口来支持这些 I/O 多路复用机制，达到了对外隐藏底层系统机制的目的。

3） Reactor——反应器

Reactor，是事件管理的接口，内部使用 event demultiplexer 注册、注销事件；并运行事件循环，当有事件进入“就绪”状态时，调用注册事件的回调函数处理事件。

对应到 libevent 中，就是 event_base 结构体。

一个典型的Reactor声明方式

```
class Reactor
{
public:
    int register_handler(Event_Handler *pHandler, int event);
    int remove_handler(Event_Handler *pHandler, int event);
    void handle_events(timeval *ptv);
    // ...
};
```

4） Event Handler——事件处理程序

事件处理程序提供了一组接口，每个接口对应了一种类型的事件，供 Reactor 在相应的事件发生时调用，执行相应的事件处理。通常它会绑定一个有效的句柄。

对应到 libevent 中，就是 event 结构体。

下面是两种典型的 Event Handler 类声明方式，二者互有优缺点。

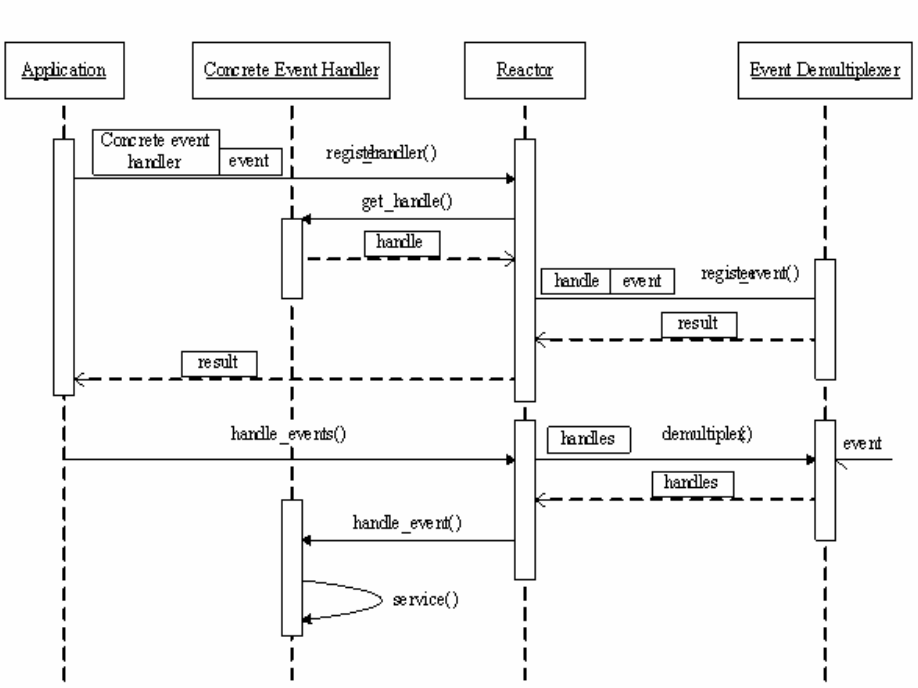
```
class Event_Handler
{
public:
    virtual void handle_read() = 0;
    virtual void handle_write() = 0;
    virtual void handle_timeout() = 0;
    virtual void handle_close() = 0;
    virtual HANDLE get_handle() = 0;
    // ...
};
```

```
class Event_Handler
{
public:
    // events maybe read/write/timeout/close .etc
    virtual void handle_events(int events) = 0;
    virtual HANDLE get_handle() = 0;
    // ...
};
```

4 Reactor 事件处理流程

前面说过 Reactor 将事件流“逆置”了，那么使用 Reactor 模式后，事件控制流是什么样子呢？

可以参见下面的序列图。



5 小结

上面讲到了 Reactor 的基本概念、框架和处理流程，对 Reactor 有个基本清晰的了解后，再来对比看 libevent 就会更容易理解了，接下来就正式进入到 libevent 的代码世界了，加油！

参考资料：

Pattern-Oriented Software Architecture, Patterns for Concurrent and Networked Objects, Volume 2

三 基本使用场景和事件流程

1 前言

学习源代码该从哪里入手？我觉得从程序的基本使用场景和代码的整体处理流程入手是个不错的方法，至少从个人的经验上讲，用此方法分析 libevent 是比较有效的。

2 基本应用场景

基本应用场景也是使用 libevnet 的基本流程，下面来考虑一个最简单的场景，使用 livevent 设置定时器，应用程序只需要执行下面几个简单的步骤即可。

1）首先初始化 libevent 库，并保存返回的指针

struct event_base * base = event_init();

实际上这一步相当于初始化一个 Reactor 实例；在初始化 libevent 后，就可以注册事件了。

2）初始化事件 event，设置回调函数和关注的事件

evtimer_set(&ev, timer_cb, NULL);

事实上这等价于调用 event_set(&ev, -1, 0, timer_cb, NULL);

event_set 的函数原型是：

```
void event_set(struct event *ev, int fd, short event, void (*cb)(int, short, void *), void *arg)
```

ev：执行要初始化的 event 对象；

fd：该 event 绑定的“句柄”，对于信号事件，它就是关注的信号；

event：在该 fd 上关注的事件类型，它可以是 EV_READ, EV_WRITE, EV_SIGNAL；

cb：这是一个函数指针，当 fd 上的事件 event 发生时，调用该函数执行处理，它有三个参数，调用时由 event_base 负责传入，按顺序，实际上就是 event_set 时的 fd, event 和 arg；

arg：传递给 cb 函数指针的参数；

由于定时事件不需要 fd，并且定时事件是根据添加时（event_add）的超时值设定的，因此这里 event 也不需要设置。

这一步相当于初始化一个 event handler，在 libevent 中事件类型保存在 event 结构体中。

注意：libevent 并不会管理 event 事件集合，这需要应用程序自行管理；

3）设置 event 从属的 event_base

event_base_set(base, &ev);

这一步相当于指明 event 要注册到哪个 event_base 实例上；

4）是正式的添加事件的时候了

event_add(&ev, timeout);

基本信息都已设置完成，只要简单的调用 event_add()函数即可完成，其中 timeout 是定时值；

这一步相当于调用 Reactor::register_handler()函数注册事件。

5）程序进入无限循环，等待就绪事件并执行事件处理
event_base_dispatch(base);

3 实例代码

上面例子的程序代码如下所示

```
struct event ev;
struct timeval tv;

void time_cb(int fd, short event, void *argc)
{
    printf("timer wakeup\n");
    event_add(&ev, &tv); // reschedule timer
}

int main()
{
    struct event_base *base = event_init();

    tv.tv_sec = 10; // 10s period
    tv.tv_usec = 0;
    evtimer_set(&ev, time_cb, NULL);
    event_add(&ev, &tv);
    event_base_dispatch(base);
}
```

4 事件处理流程

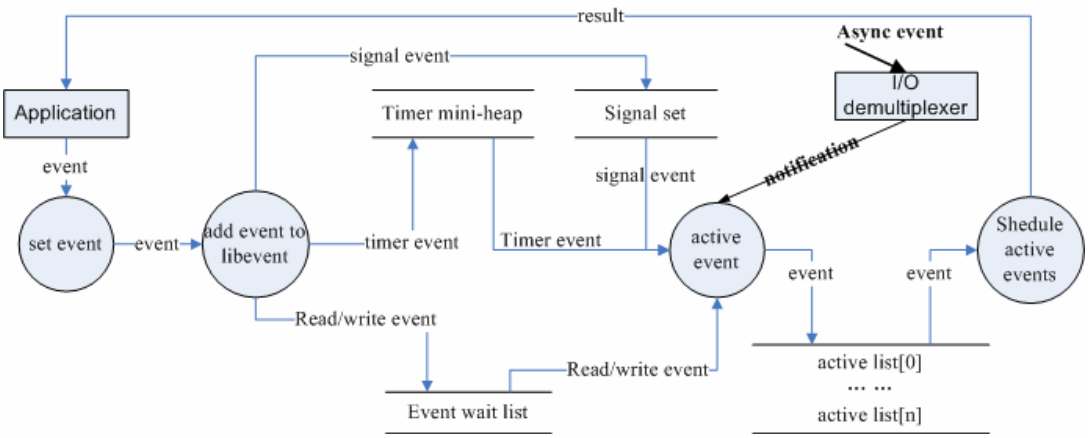
当应用程序向 libevent 注册一个事件后，libevent 内部是怎么样进行处理的呢？下面的图就给出了这一基本流程。

1） 首先应用程序准备并初始化 event，设置好事件类型和回调函数；这对应于前面第步骤 2 和 3；

2） 向 libevent 添加该事件 event。对于定时事件，libevent 使用一个小根堆管理，key 为超时时间；对于 Signal 和 I/O 事件，libevent 将其放入到等待链表（wait list）中，这是一个双向链表结构；

3） 程序调用 event_base_dispatch()系列函数进入无限循环，等待事件，以 select()函数为例；每次循环前 libevent 会检查定时事件的最小超时时间 tv，根据 tv 设置 select()的最大等待时间，以便于后面及时处理超时事件；
当 select()返回后，首先检查超时事件，然后检查 I/O 事件；

Libevent 将所有的就绪事件，放入到激活链表中；
然后对激活链表中的事件，调用事件的回调函数执行事件处理；



5 小结

本节介绍了 libevent 的简单实用场景，并旋风般的介绍了 libevent 的事件处理流程，读者应该对 libevent 有了基本的印象，下面将会详细介绍 libevent 的事件管理框架（Reactor 模式中的 Reactor 框架）做详细的介绍，在此之前会对源代码文件做简单的分类。

四 libevent 源代码文件组织

1 前言

详细分析源代码之前，如果能对其代码文件的基本结构有个大概的认识和分类，对于代码的分析将是大有裨益的。

2 源代码组织结构

Libevent 的源代码虽然都在一层文件夹下面，但是其代码分类还是相当清晰的，主要可分为头文件、内部使用的头文件、辅助功能函数、日志、libevent 框架、对系统 I/O 多路复用机制的封装、信号管理、定时事件管理、缓冲区管理、基本数据结构和基于 libevent 的两个实用库等几个部分，有些部分可能就是一个源文件。
源代码中的 test 部分就不在我们关注的范畴了。
1）头文件
主要就是 event.h：事件宏定义、接口函数声明，主要结构体 event 的声明；
2）内部头文件
xxx-internal.h：内部数据结构和函数，对外不可见，以达到信息隐藏的目的；
3）libevent 框架
event.c：event 整体框架的代码实现；
4）对系统 I/O 多路复用机制的封装
epoll.c：对 epoll 的封装；
select.c：对 select 的封装；
devpoll.c：对 dev/poll 的封装;
kqueue.c：对 kqueue 的封装；
5）定时事件管理
min-heap.h：其实就是一个以时间作为 key 的小根堆结构；
6）信号管理
signal.c：对信号事件的处理；
7）辅助功能函数
evutil.h 和 evutil.c：一些辅助功能函数，包括创建 socket pair 和一些时间操作函数：加、减和比较等。
8）日志
log.h 和 log.c：log 日志函数
9）缓冲区管理
evbuffer.c 和 buffer.c：libevent 对缓冲区的封装；
10）基本数据结构
compat\sys 下的两个源文件：queue.h 是 libevent 基本数据结构的实现，包括链表，双向链表，队列等；_libevent_time.h：一些用于时间操作的结构体定义、函数和宏定义；
11）实用网络库

http 和 evdns：是基于 libevent 实现的 http 服务器和异步 dns 查询库；

3 小结

本节介绍了 libevent 的组织和分类，下面将会详细介绍 libevent 的核心部分 event 结构。

五 libevent 的核心：事件 event

对事件处理流程有了高层的认识后，本节将详细介绍 libevent 的核心结构 event，以及 libevent 对 event 的管理。

1 libevent 的核心-event

Libevent 是基于事件驱动（event-driven）的，从名字也可以看到 event 是整个库的核心。event 就是 Reactor 框架中的事件处理程序组件；它提供了函数接口，供 Reactor 在事件发生时调用，以执行相应的事件处理，通常它会绑定一个有效的句柄。

首先给出 event 结构体的声明，它位于 event.h 文件中：

```
struct event {
    TAILQ_ENTRY (event) ev_next;
    TAILQ_ENTRY (event) ev_active_next;
    TAILQ_ENTRY (event) ev_signal_next;
    unsigned int min_heap_idx;  /* for managing timeouts */
    struct event_base *ev_base;
    int ev_fd;
    short ev_events;
    short ev_ncalls;
    short *ev_pncalls;   /* Allows deletes in callback */
    struct timeval ev_timeout;
    int ev_pri;       /* smaller numbers are higher priority */
    void (*ev_callback)(int, short, void *arg);
    void *ev_arg;
    int ev_res;       /* result passed to event callback */
    int ev_flags;
};
```

下面详细解释一下结构体中各字段的含义。

1）ev_events：event关注的事件类型，它可以是以下3种类型：

I/O事件： EV_WRITE和EV_READ

定时事件：EV_TIMEOUT

信号： EV_SIGNAL

辅助选项：EV_PERSIST，表明是一个永久事件

Libevent中的定义为：

```
#define EV_TIMEOUT   0x01
#define EV_READ      0x02
#define EV_WRITE  0x04
#define EV_SIGNAL 0x08
#define EV_PERSIST   0x10   /* Persistant event */
```

可以看出事件类型可以使用“|”运算符进行组合，需要说明的是，信号和I/O事件不能同时

设置；
还可以看出libevent使用event结构体将这3种事件的处理统一起来；
2）ev_next，ev_active_next 和 ev_signal_next 都是双向链表节点指针；它们是 libevent 对不同事件类型和在不同的时期，对事件的管理时使用到的字段。
libevent 使用双向链表保存所有注册的 I/O 和 Signal 事件，ev_next 就是该 I/O 事件在链表中的位置；称此链表为“已注册事件链表”；
同样 ev_signal_next 就是 signal 事件在 signal 事件链表中的位置；
ev_active_next：libevent 将所有的激活事件放入到链表 active list 中，然后遍历 active list 执行调度，ev_active_next 就指明了 event 在 active list 中的位置；
2）min_heap_idx 和 ev_timeout，如果是 timeout 事件，它们是 event 在小根堆中的索引和超时值，libevent 使用小根堆来管理定时事件，这将在后面定时事件处理时专门讲解
3）ev_base 该事件所属的反应堆实例，这是一个 event_base 结构体，下一节将会详细讲解；
4）ev_fd，对于 I/O 事件，是绑定的文件描述符；对于 signal 事件，是绑定的信号；
5）ev_callback，event 的回调函数，被 ev_base 调用，执行事件处理程序，这是一个函数指针，原型为：

```
void (*ev_callback)(int fd, short events, void *arg)
```

其中参数 fd 对应于 ev_fd；events 对应于 ev_events；arg 对应于 ev_arg；
6）ev_arg：void*，表明可以是任意类型的数据，在设置 event 时指定；
7）eb_flags：libevent 用于标记 event 信息的字段，表明其当前的状态，可能的值有：

```
#define EVLIST_TIMEOUT   0x01 // event在time堆中
#define EVLIST_INSERTED  0x02 // event在已注册事件链表中
#define EVLIST_SIGNAL    0x04 // 未见使用
#define EVLIST_ACTIVE    0x08 // event在激活链表中
#define EVLIST_INTERNAL  0x10 // 内部使用标记
#define EVLIST_INIT      0x80 // event 已被初始化
```

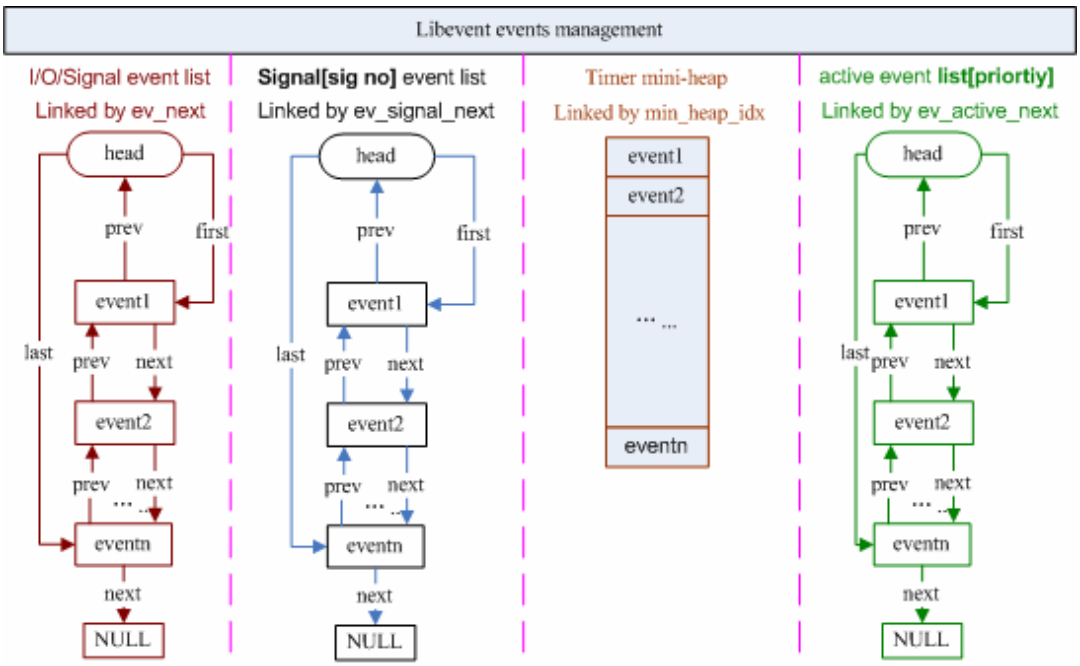
8）ev_ncalls：事件就绪执行时，调用 ev_callback 的次数，通常为 1；
9）ev_pncalls：指针，通常指向 ev_ncalls 或者为 NULL；
10）ev_res：记录了当前激活事件的类型；

2 libevent 对 event 的管理

从 event 结构体中的 3 个链表节点指针和一个堆索引出发，大体上也能窥出 libevent 对 event 的管理方法了，可以参见下面的示意图。

每次当有事件 event 转变为就绪状态时，libevent 就会把它移入到 active event list[priority]中，其中 priority 是 event 的优先级；

接着 libevent 会根据自己的调度策略选择就绪事件，调用其 cb_callback()函数执行事件处理；并根据就绪的句柄和事件类型填充 cb_callback 函数的参数。



3 事件设置的接口函数

要向 libevent 添加一个事件，需要首先设置 event 对象，这通过调用 libevent 提供的函数有：event_set(), event_base_set(), event_priority_set()来完成；下面分别进行讲解。

```
void event_set(struct event *ev, int fd, short events,
     void (*callback)(int, short, void *), void *arg)
```

1.设置事件 ev 绑定的文件描述符或者信号，对于定时事件，设为-1 即可；

2.设置事件类型，比如 EV_READ|EV_PERSIST, EV_WRITE, EV_SIGNAL 等；

3.设置事件的回调函数以及参数 arg；

4.初始化其它字段，比如缺省的 event_base 和优先级；

```
int event_base_set(struct event_base *base, struct event *ev)
```

设置 event ev 将要注册到的 event_base；

libevent 有一个全局 event_base 指针 current_base，默认情况下事件 ev 将被注册到 current_base 上，使用该函数可以指定不同的 event_base；

如果一个进程中存在多个 libevent 实例，则必须要调用该函数为 event 设置不同的 event_base；

```
int event_priority_set(struct event *ev, int pri)
```

设置event ev的优先级，没什么可说的，注意的一点就是：当ev正处于就绪状态时，不能设置，返回-1。

4 小结

本节讲述了libevent的核心event结构，以及libevent支持的事件类型和libevent对event的管理模型；接下来将会描述libevent的事件处理框架，以及其中使用的重要的结构体event_base。

六 初见事件处理框架

前面已经对 libevent 的事件处理框架和 event 结构体做了描述，现在是时候剖析 libevent 对事件的详细处理流程了，本节将分析 libevent 的事件处理框架 event_base 和 libevent 注册、删除事件的具体流程，可结合前一节 libevent 对 event 的管理。

1 事件处理框架-event_base

回想 Reactor 模式的几个基本组件，本节讲解的部分对应于 Reactor 框架组件。在 libevent 中，这就表现为 event_base 结构体，结构体声明如下，它位于 event-internal.h 文件中：

```
struct event_base {
    const struct eventop *evsel;
    void *evbase;
    int event_count;        /* counts number of total events */
    int event_count_active; /* counts number of active events */
    int event_gotterm;      /* Set to terminate loop */
    int event_break;        /* Set to terminate loop immediately */
    /* active event management */
    struct event_list **activequeues;
    int nactivequeues;
    /* signal handling info */
    struct evsignal_info sig;
    struct event_list eventqueue;
    struct timeval event_tv;
    struct min_heap timeheap;
    struct timeval tv_cache;
};
```

下面详细解释一下结构体中各字段的含义。

1）evsel 和 evbase 这两个字段的设置可能会让人有些迷惑，这里你可以把 evsel 和 evbase 看作是类和静态函数的关系，比如添加事件时的调用行为：evsel->add(evbase, ev)，实际执行操作的是 evbase；这相当于 class::add(instance, ev)，instance 就是 class 的一个对象实例。

evsel指向了全局变量static const struct eventop *eventops[]中的一个；

前面也说过，libevent将系统提供的I/O demultiplex机制统一封装成了eventop结构；因此eventops[]包含了select、poll、kequeue和epoll等等其中的若干个全局实例对象。

evbase实际上是一个eventop实例对象；

先来看看eventop结构体，它的成员是一系列的函数指针，在event-internal.h文件中：

```
struct eventop {
    const char *name;
    void *(*init)(struct event_base *); // 初始化
    int (*add)(void *, struct event *); // 注册事件
    int (*del)(void *, struct event *); // 删除事件
```

```
    int (*dispatch)(struct event_base *, void *, struct timeval *); // 事件分发
    void (*dealloc)(struct event_base *, void *); // 注销，释放资源
    /* set if we need to reinitialize the event base */
    int need_reinit;
};
```

也就是说，在 libevent 中，每种 I/O demultiplex 机制的实现都必须提供这五个函数接口，来完成自身的初始化、销毁释放；对事件的注册、注销和分发。

比如对于 epoll，libevent 实现了 5 个对应的接口函数，并在初始化时并将 eventop 的 5 个函数指针指向这 5 个函数，那么程序就可以使用 epoll 作为 I/O demultiplex 机制了，这个在后面会再次提到。

2）activequeues 是一个二级指针，前面讲过 libevent 支持事件优先级，因此你可以把它看作是数组，其中的元素 activequeues[priority]是一个链表，链表的每个节点指向一个优先级为 priority 的就绪事件 event。

3）eventqueue，链表，保存了所有的注册事件 event 的指针。

4）sig 是由来管理信号的结构体，将在后面信号处理时专门讲解；

5）timeheap 是管理定时事件的小根堆，将在后面定时事件处理时专门讲解；

6）event_tv 和 tv_cache 是 libevent 用于时间管理的变量，将在后面讲到；

其它各个变量都能因名知意，就不再啰嗦了。

2 创建和初始化 event_base

创建一个 event_base 对象也既是创建了一个新的 libevent 实例，程序需要通过调用 event_init()（内部调用 event_base_new 函数执行具体操作）函数来创建，该函数同时还对新生成的 libevent 实例进行了初始化。

该函数首先为 event_base 实例申请空间，然后初始化 timer mini-heap，选择并初始化合适的系统 I/O 的 demultiplexer 机制，初始化各事件链表；

函数还检测了系统的时间设置，为后面的时间管理打下基础。

3 接口函数

前面提到 Reactor 框架的作用就是提供事件的注册、注销接口；根据系统提供的事件多路分发机制执行事件循环，当有事件进入“就绪”状态时，调用注册事件的回调函数来处理事件。

Libevent 中对应的接口函数主要就是：

```
int  event_add(struct event *ev, const struct timeval *timeout);
int  event_del(struct event *ev);
int  event_base_loop(struct event_base *base, int loops);
void event_active(struct event *event, int res, short events);
void event_process_active(struct event_base *base);
```

本节将按介绍事件注册和删除的代码流程，libevent 的事件循环框架将在下一节再具体描述。

对于定时事件，这些函数将调用 timer heap 管理接口执行插入和删除操作；对于 I/O 和

Signal 事件将调用 eventopadd 和 delete 接口函数执行插入和删除操作（eventop 会对 Signal 事件调用 Signal 处理接口执行操作）；这些组件将在后面的内容描述。

1）注册事件

函数原型：

```
int event_add(struct event *ev, const struct timeval *tv)
```

参数：ev：指向要注册的事件；

tv：超时时间；

函数将 ev 注册到 ev->ev_base 上，事件类型由 ev->ev_events 指明，如果注册成功，ev 将被插入到已注册链表中；如果 tv 不是 NULL，则会同时注册定时事件，将 ev 添加到 timer 堆上；

如果其中有一步操作失败，那么函数保证没有事件会被注册，可以讲这相当于一个原子操作。这个函数也体现了 libevent 细节之处的巧妙设计，且仔细看程序代码，部分有省略，注释直接附在代码中。

```
int event_add(struct event *ev, const struct timeval *tv)
{
    struct event_base *base = ev->ev_base; // 要注册到的event_base
    const struct eventop *evsel = base->evsel;
    void *evbase = base->evbase; // base使用的系统I/O策略

    // 新的timer事件，调用timer heap接口在堆上预留一个位置
    // 注：这样能保证该操作的原子性：
    // 向系统I/O机制注册可能会失败，而当在堆上预留成功后，
    // 定时事件的添加将肯定不会失败；
    // 而预留位置的可能结果是堆扩充，但是内部元素并不会改变
    if (tv != NULL && !(ev->ev_flags & EVLIST_TIMEOUT)) {
        if (min_heap_reserve(&base->timeheap,
            1 + min_heap_size(&base->timeheap)) == -1)
            return (-1);  /* ENOMEM == errno */
    }
    // 如果事件ev不在已注册或者激活链表中，则调用evbase注册事件
    if ((ev->ev_events & (EV_READ|EV_WRITE|EV_SIGNAL)) &&
        !(ev->ev_flags & (EVLIST_INSERTED|EVLIST_ACTIVE))) {
            res = evsel->add(evbase, ev);
            if (res != -1) // 注册成功，插入event到已注册链表中
                event_queue_insert(base, ev, EVLIST_INSERTED);
    }

    // 准备添加定时事件
    if (res != -1 && tv != NULL) {
        struct timeval now;

        // EVLIST_TIMEOUT表明event已经在定时器堆中了，删除旧的
        if (ev->ev_flags & EVLIST_TIMEOUT)
            event_queue_remove(base, ev, EVLIST_TIMEOUT);
```

```
        // 如果事件已经是就绪状态则从激活链表中删除
        if ((ev->ev_flags & EVLIST_ACTIVE) &&
            (ev->ev_res & EV_TIMEOUT)) {
                // 将ev_callback调用次数设置为0
                if (ev->ev_ncalls && ev->ev_pncalls) {
                    *ev->ev_pncalls = 0;
                }
                event_queue_remove(base, ev, EVLIST_ACTIVE);
        }
        // 计算时间，并插入到timer小根堆中
        gettime(base, &now);
        evutil_timeradd(&now, tv, &ev->ev_timeout);
        event_queue_insert(base, ev, EVLIST_TIMEOUT);
    }
    return (res);
}
```

event_queue_insert()负责将事件插入到对应的链表中，下面是程序代码；
event_queue_remove()负责将事件从对应的链表中删除，这里就不再重复贴代码了；

```
void event_queue_insert(struct event_base *base, struct event *ev,
int queue)
{
    // ev可能已经在激活列表中了，避免重复插入
    if (ev->ev_flags & queue) {
        if (queue & EVLIST_ACTIVE)
            return;
    }
    // ...
    ev->ev_flags |= queue; // 记录queue标记
    switch (queue) {
    case EVLIST_INSERTED: // I/O或Signal事件，加入已注册事件链表
        TAILQ_INSERT_TAIL(&base->eventqueue, ev, ev_next);
        break;
    case EVLIST_ACTIVE: // 就绪事件，加入激活链表
        base->event_count_active++;
        TAILQ_INSERT_TAIL(base->activequeues[ev->ev_pri], ev,
ev_active_next);
        break;
    case EVLIST_TIMEOUT: // 定时事件，加入堆
        min_heap_push(&base->timeheap, ev);
        break;
    }
}
```

2）删除事件：

函数原型为：`int  event_del(struct event *ev);`

该函数将删除事件 ev，对于 I/O 事件，从 I/O 的 demultiplexer 上将事件注销；对于 Signal 事件，将从 Signal 事件链表中删除；对于定时事件，将从堆上删除；

同样删除事件的操作则不一定是原子的，比如删除时间事件之后，有可能从系统 I/O 机制中注销会失败。

```
int event_del(struct event *ev)
{
    struct event_base *base;
    const struct eventop *evsel;
    void *evbase;

    // ev_base为NULL，表明ev没有被注册
    if (ev->ev_base == NULL)
        return (-1);
    // 取得ev注册的event_base和eventop指针
    base = ev->ev_base;
    evsel = base->evsel;
    evbase = base->evbase;

    // 将ev_callback调用次数设置为
    if (ev->ev_ncalls && ev->ev_pncalls) {
        *ev->ev_pncalls = 0;
    }

    // 从对应的链表中删除
    if (ev->ev_flags & EVLIST_TIMEOUT)
        event_queue_remove(base, ev, EVLIST_TIMEOUT);
    if (ev->ev_flags & EVLIST_ACTIVE)
        event_queue_remove(base, ev, EVLIST_ACTIVE);
    if (ev->ev_flags & EVLIST_INSERTED) {
        event_queue_remove(base, ev, EVLIST_INSERTED);
        // EVLIST_INSERTED表明是I/O或者Signal事件，
        // 需要调用I/O demultiplexer注销事件
        return (evsel->del(evbase, ev));
    }
    return (0);
}
```

4 小节

分析了 event_base 这一重要结构体，初步看到了 libevent 对系统的 I/O demultiplex 机制的封装 event_op 结构，并结合源代码分析了事件的注册和删除处理，下面将会接着分析事件管理框架中的主事件循环部分。

七 事件主循环

现在我们已经初步了解了 libevent 的 Reactor 组件——event_base 和事件管理框架，接下来就是 libevent 事件处理的中心部分——事件主循环，根据系统提供的事件多路分发机制执行事件循环，对已注册的就绪事件，调用注册事件的回调函数来处理事件。

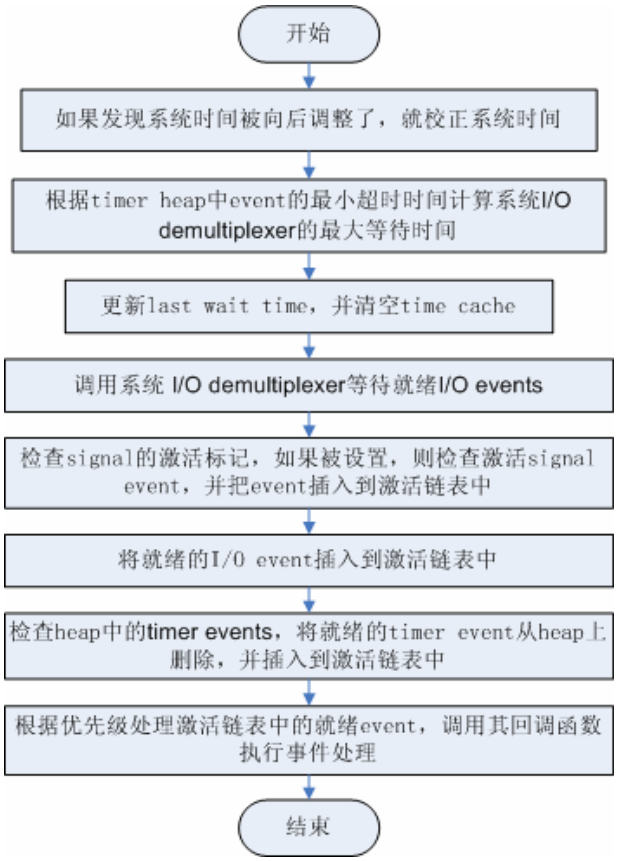
1 阶段性的胜利

Libevent 将 I/O 事件、定时器和信号事件处理很好的结合到了一起，本节也会介绍 libevent 是如何做到这一点的。

在看完本节的内容后，读者应该会对 Libevent 的基本框架：事件管理和主循环有比较清晰的认识了，并能够把 libevent 的事件控制流程清晰的串通起来，剩下的就是一些细节的内容了。

2 事件处理主循环

Libevent 的事件主循环主要是通过 event_base_loop ()函数完成的，其主要操作如下面的流程图所示，event_base_loop 所作的就是持续执行下面的循环。



清楚了 event_base_loop 所作的主要操作，就可以对比源代码看个究竟了，代码结构还是相当清晰的。

```
int event_base_loop(struct event_base *base, int flags)
{
    const struct eventop *evsel = base->evsel;
    void *evbase = base->evbase;
    struct timeval tv;
    struct timeval *tv_p;
    int res, done;

    // 清空时间缓存
    base->tv_cache.tv_sec = 0;
    // evsignal_base是全局变量，在处理signal时，用于指名signal所属的event_base实例
    if (base->sig.ev_signal_added)
        evsignal_base = base;
    done = 0;
    while (!done) { // 事件主循环
        // 查看是否需要跳出循环，程序可以调用event_loopexit_cb()设置event_gotterm标记
        // 调用event_base_loopbreak()设置event_break标记
        if (base->event_gotterm) {
            base->event_gotterm = 0;
            break;
        }
        if (base->event_break) {
            base->event_break = 0;
            break;
        }
        // 校正系统时间，如果系统使用的是非MONOTONIC时间，用户可能会向后调整了系统时间
        // 在timeout_correct函数里，比较last wait time和当前时间，如果当前时间< last wait time
        // 表明时间有问题,这是需要更新timer_heap中所有定时事件的超时时间。
        timeout_correct(base, &tv);

        // 根据timer heap中事件的最小超时时间,计算系统I/O demultiplexer的最大等待时间
        tv_p = &tv;
        if (!base->event_count_active && !(flags & EVLOOP_NONBLOCK)) {
            timeout_next(base, &tv_p);
        } else {
            // 依然有未处理的就绪时间，就让I/O demultiplexer立即返回，
```

```
不必等待
            // 下面会提到，在libevent中，低优先级的就绪事件可能不能立即
被处理
            evutil_timerclear(&tv);
        }
        // 如果当前没有注册事件，就退出
        if (!event_haveevents(base)) {
            event_debug(("%s: no events registered.", __func__));
            return (1);
        }
        // 更新last wait time，并清空time cache
        gettime(base, &base->event_tv);
        base->tv_cache.tv_sec = 0;
        // 调用系统I/O demultiplexer等待就绪I/O events，可能是
epoll_wait，或者select等；
        // 在evsel->dispatch()中，会把就绪signal event、I/O event插入到
激活链表中
        res = evsel->dispatch(base, evbase, tv_p);

        if (res == -1)
            return (-1);
        // 将time cache赋值为当前系统时间
        gettime(base, &base->tv_cache);
        // 检查heap中的timer events，将就绪的timer event从heap上删除，
并插入到激活链表中
        timeout_process(base);

        // 调用event_process_active()处理激活链表中的就绪event，调用其
回调函数执行事件处理
        // 该函数会寻找最高优先级（priority值越小优先级越高）的激活事件
链表，
        // 然后处理链表中的所有就绪事件；
        // 因此低优先级的就绪事件可能得不到及时处理；
        if (base->event_count_active) {
            event_process_active(base);
            if (!base->event_count_active && (flags & EVLOOP_ONCE))
                done = 1;
        } else if (flags & EVLOOP_NONBLOCK)
            done = 1;
    }

    // 循环结束，清空时间缓存
    base->tv_cache.tv_sec = 0;
```

```
    event_debug(("%s: asked to terminate loop.", __func__));
    return (0);
}
```

3 I/O 和 Timer 事件的统一

Libevent 将 Timer 和 Signal 事件都统一到了系统的 I/O 的 demultiplex 机制中了，相信读者从上面的流程和代码中也能窥出一斑了，下面就再啰嗦一次了。

首先将 Timer 事件融合到系统 I/O 多路复用机制中，还是相当清晰的，因为系统的 I/O 机制像 select()和 epoll_wait()都允许程序制定一个最大等待时间（也称为最大超时时间）timeout，即使没有 I/O 事件发生，它们也保证能在 timeout 时间内返回。

那么根据所有 Timer 事件的最小超时时间来设置系统 I/O 的 timeout 时间；当系统 I/O 返回时，再激活所有就绪的 Timer 事件就可以了，这样就能将 Timer 事件完美的融合到系统的 I/O 机制中了。

这是在 Reactor 和 Proactor 模式（主动器模式，比如 Windows 上的 IOCP）中处理 Timer 事件的经典方法了，ACE 采用的也是这种方法，大家可以参考 POSA vol2 书中的 Reactor 模式一节。

堆是一种经典的数据结构，向堆中插入、删除元素时间复杂度都是 O(lgN)，N 为堆中元素的个数，而获取最小 key 值（小根堆）的复杂度为 O(1)；因此变成了管理 Timer 事件的绝佳人选（当然是非唯一的），libevent 就是采用的堆结构。

4 I/O 和 Signal 事件的统一

Signal 是异步事件的经典事例，将 Signal 事件统一到系统的 I/O 多路复用中就不像 Timer 事件那么自然了，Signal 事件的出现对于进程来讲是完全随机的，进程不能只是测试一个变量来判别是否发生了一个信号，而是必须告诉内核“在此信号发生时，请执行如下的操作”。

如果当 Signal 发生时，并不立即调用 event 的 callback 函数处理信号，而是设法通知系统的 I/O 机制，让其返回，然后再统一和 I/O 事件以及 Timer 一起处理，不就可以了嘛。是的，这也是 libevent 中使用的方法。

问题的核心在于，当 Signal 发生时，如何通知系统的 I/O 多路复用机制，这里先买个小关子，放到信号处理一节再详细说明，我想读者肯定也能想出通知的方法，比如使用 pipe。

5 小节

介绍了 libevent 的事件主循环，描述了 libevent 是如何处理就绪的 I/O 事件、定时器和信号事件，以及如何将它们无缝的融合到一起。

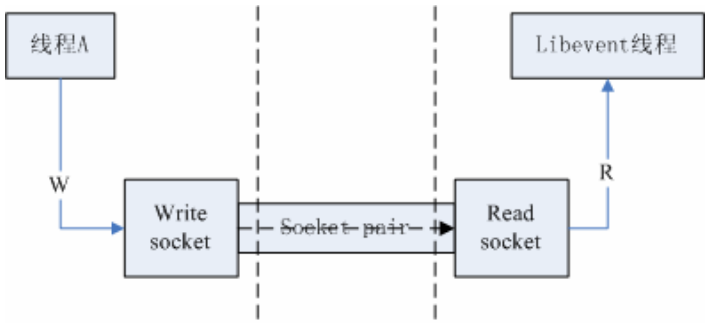
八 集成信号处理

现在我们已经了解了 libevent 的基本框架：事件管理框架和事件主循环。上节提到了 libevent 中 I/O 事件和 Signal 以及 Timer 事件的集成，这一节将分析如何将 Signal 集成到事件主循环的框架中。

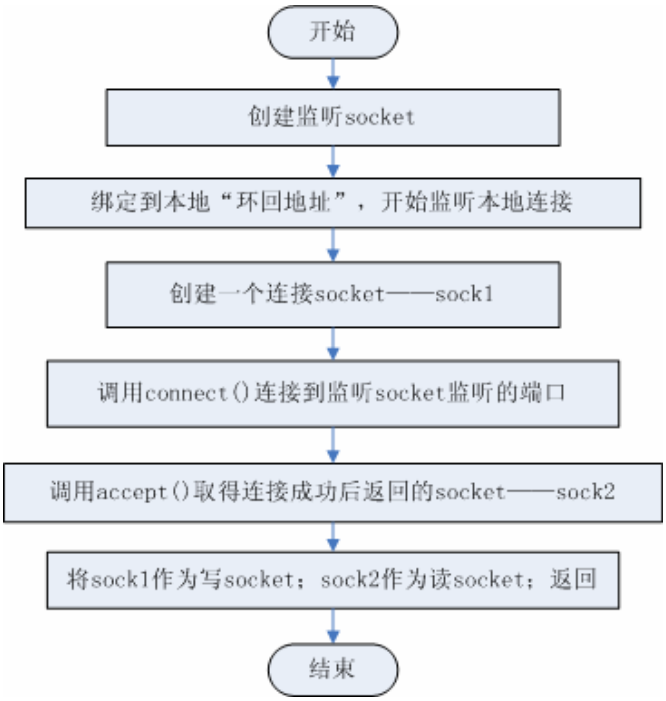
1 集成策略——使用 socket pair

前一节已经做了足够多的介绍了，基本方法就是采用“消息机制”。在 libevent 中这是通过 socket pair 完成的，下面就来详细分析一下。

Socket pair 就是一个 socket 对，包含两个 socket，一个读 socket，一个写 socket。工作方式如下图所示：



创建一个 socket pair 并不是复杂的操作，可以参见下面的流程图，清晰起见，其中忽略了一些错误处理和检查。



Libevent 提供了辅助函数 evutil_socketpair()来创建一个 socket pair，可以结合上面的创

建流程来分析该函数。

2 集成到事件主循环——通知 event_base

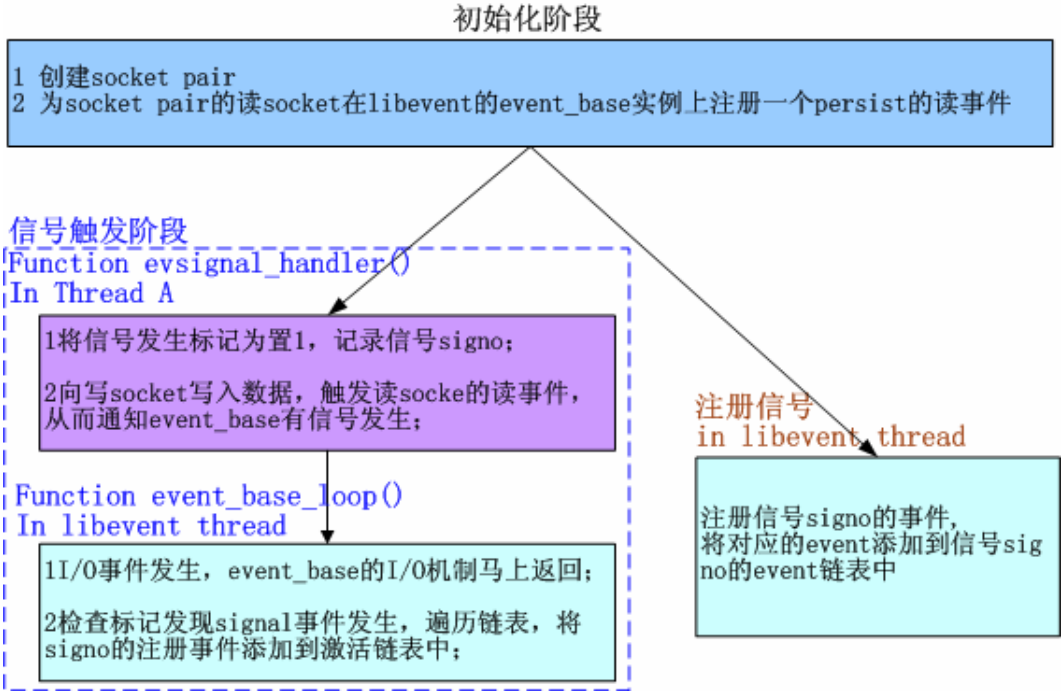
Socket pair 创建好了，可是 libevent 的事件主循环还是不知道 Signal 是否发生了啊，看来我们还差了最后一步，那就是：**为 socket pair 的读 socket 在 libevent 的 event_base 实例上注册一个 persist 的读事件。**

这样当向写 socket 写入数据时，读 socket 就会得到通知，触发读事件，从而 event_base 就能相应的得到通知了。

前面提到过，Libevent 会在事件主循环中检查标记，来确定是否有触发的 signal，如果标记被设置就处理这些 signal，这段代码在各个具体的 I/O 机制中，以 Epoll 为例，在 epoll_dispatch()函数中，代码片段如下：

```
    res = epoll_wait(epollop->epfd, events, epollop->nevents, timeout);
    if (res == -1) {
        if (errno != EINTR) {
            event_warn("epoll_wait");
            return (-1);
        }
        evsignal_process(base);// 处理signal事件
        return (0);
    } else if (base->sig.evsignal_caught) {
        evsignal_process(base);// 处理signal事件
    }
```

完整的处理框架如下所示：



注 1：libevent 中，初始化阶段并不注册读 socket 的读事件，而是在注册信号阶段才会测试并注册；
注 2：libevent 中，检查 I/O 事件是在各系统 I/O 机制的 dispatch()函数中完成的，该 dispatch()函数在 event_base_loop()函数中被调用；

4 evsignal_info 结构体

Libevent 中 Signal 事件的管理是通过结构体 evsignal_info 完成的，结构体位于 evsignal.h 文件中，定义如下：

```
struct evsignal_info {
    struct event ev_signal;
    int ev_signal_pair[2];
    int ev_signal_added;
    volatile sig_atomic_t evsignal_caught;
    struct event_list evsigevents[NSIG];
    sig_atomic_t evsigcaught[NSIG];
#ifdef HAVE_SIGACTION
    struct sigaction **sh_old;
#else
    ev_sighandler_t **sh_old;
#endif
    int sh_old_max;
};
```

下面详细介绍一下个字段的含义和作用：
1）ev_signal， 为 socket pair 的读 socket 向 event_base 注册读事件时使用的 event 结构体；
2）ev_signal_pair，socket pair 对，作用见第一节的介绍；
3）ev_signal_added，记录 ev_signal 事件是否已经注册了；
4）evsignal_caught，是否有信号发生的标记；是 volatile 类型，因为它会在另外的线程中被修改；
5）evsigvents[NSIG]，数组，evsigevents[signo]表示注册到信号 signo 的事件链表；
6）evsigcaught[NSIG]，具体记录每个信号触发的次数，evsigcaught[signo]是记录信号 signo 被触发的次数；
7）sh_old 记录了原来的 signal 处理函数指针，当信号 signo 注册的 event 被清空时，需要重新设置其处理函数；

evsignal_info 的初始化包括，创建 socket pair，设置 ev_signal 事件（但并没有注册，而是等到有信号注册时才检查并注册），并将所有标记置零，初始化信号的注册事件链表指针等。

5 注册、注销 signal 事件

注册 signal 事件是通过 evsignal_add(struct event *ev)函数完成的，libevent 对所有的信号注册同一个处理函数 evsignal_handler()，该函数将在下一段介绍，注册过程如下：

1 取得 ev 要注册到的信号 signo；

2 如果信号 signo 未被注册，那么就为 signo 注册信号处理函数 evsignal_handler()；

3 如果事件 ev_signal 还没哟注册，就注册 ev_signal 事件；

4 将事件 ev 添加到 signo 的 event 链表中；

从 signo 上注销一个已注册的 signal 事件就更简单了，直接从其已注册事件的链表中移除即可。如果事件链表已空，那么就恢复旧的处理函数；

下面的讲解都以 signal()函数为例，sigaction()函数的处理和 signal()相似。

处理函数evsignal_handler()函数做的事情很简单，就是记录信号的发生次数，并通知event_base有信号触发，需要处理：

```
static void evsignal_handler(int sig)
{
    int save_errno = errno; // 不覆盖原来的错误代码
    if (evsignal_base == NULL) {
        event_warn("%s: received signal %d, but have no base configured",
__func__, sig);
        return;
    }
    // 记录信号sig的触发次数，并设置event触发标记
    evsignal_base->sig.evsigcaught[sig]++;
    evsignal_base->sig.evsignal_caught = 1;
#ifndef HAVE_SIGACTION
    signal(sig, evsignal_handler); // 重新注册信号
#endif

    // 向写socket写一个字节数据，触发event_base的I/O事件，从而通知其有信号触发，需要处理
    send(evsignal_base->sig.ev_signal_pair[0], "a", 1, 0);
    errno = save_errno; // 错误代码
}
```

5 小节

本节介绍了 libevent 对 signal 事件的具体处理框架，包括事件注册、删除和 socket pair 通知机制，以及是如何将 Signal 事件集成到事件主循环之中的。

九 集成定时器事件

现在再来详细分析 libevent 中 I/O 事件和 Timer 事件的集成，与 Signal 相比，Timer 事件的集成会直观和简单很多。Libevent 对堆的调整操作做了一些优化，本节还会描述这些优化方法。

1 集成到事件主循环

因为系统的 I/O 机制像 select()和 epoll_wait()都允许程序制定一个最大等待时间（也称为最大超时时间）timeout，即使没有 I/O 事件发生，它们也保证能在 timeout 时间内返回。

那么根据所有 Timer 事件的最小超时时间来设置系统 I/O 的 timeout 时间；当系统 I/O 返回时，再激活所有就绪的 Timer 事件就可以了，这样就能将 Timer 事件完美的融合到系统的 I/O 机制中了。

具体的代码在源文件 event.c 的 event_base_loop()中，现在就对比代码来看看这一处理方法：

```
if (!base->event_count_active && !(flags & EVLOOP_NONBLOCK)) {
            // 根据Timer事件计算evsel->dispatch的最大等待时间
            timeout_next(base, &tv_p);
        } else {
            // 如果还有活动事件，就不要等待，让evsel->dispatch立即返回
            evutil_timerclear(&tv);
        }
        // ...
         // 调用select() or epoll_wait() 等待就绪I/O事件
        res = evsel->dispatch(base, evbase, tv_p);
         // ...
         // 处理超时事件，将超时事件插入到激活链表中
            timeout_process(base);
```

timeout_next()函数根据堆中具有最小超时值的事件和当前时间来计算等待时间，下面看看代码：

```
static int timeout_next(struct event_base *base, struct timeval **tv_p)
{
    struct timeval now;
    struct event *ev;
    struct timeval *tv = *tv_p;

    // 堆的首元素具有最小的超时值
    if ((ev = min_heap_top(&base->timeheap)) == NULL) {
        // 如果没有定时事件，将等待时间设置为NULL,表示一直阻塞直到有
I/O事件发生
        *tv_p = NULL;
```

```
        return (0);
    }
    // 取得当前时间
    gettime(base, &now);
    // 如果超时时间<=当前值，不能等待，需要立即返回
    if (evutil_timercmp(&ev->ev_timeout, &now, <=)) {
        evutil_timerclear(tv);
        return (0);
    }
    // 计算等待的时间=当前时间-最小的超时时间
    evutil_timersub(&ev->ev_timeout, &now, tv);

    return (0);
}
```

2 Timer 小根堆

Libevent 使用堆来管理 Timer 事件，其 key 值就是事件的超时时间，源代码位于文件 min_heap.h 中。

所有的数据结构书中都有关于堆的详细介绍，向堆中插入、删除元素时间复杂度都是 O(lgN)，N 为堆中元素的个数，而获取最小 key 值（小根堆）的复杂度为 O(1)。堆是一个完全二叉树，基本存储方式是一个数组。

Libevent 实现的堆还是比较轻巧的，虽然我不喜欢这种编码方式（搞一些复杂的表达式）。轻巧到什么地方呢，就以插入元素为例，来对比说明，下面伪代码中的 size 表示当前堆的元素个数：

典型的代码逻辑如下：

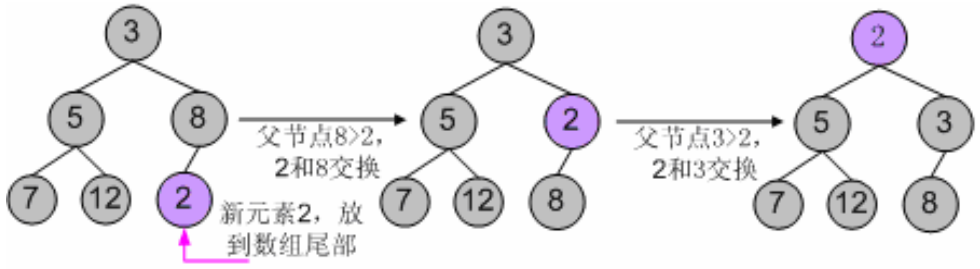
```
Heap[size++] ← new; // 先放到数组末尾，元素个数+1
// 下面就是 shift_up()的代码逻辑，不断的将 new 向上调整
_child = size;
while(_child>0) // 循环
{
    _parent ← (_child-1)/2; // 计算 parent
    if(Heap[_parent].key < Heap[_child].key)
        break; // 调整结束，跳出循环
    swap(_parent, _child); // 交换 parent 和 child
}
```

而 libevent 的 heap 代码对这一过程做了优化，在插入新元素时，只是为新元素预留了一个位置 hole（初始时 hole 位于数组尾部），但并不立刻将新元素插入到 hole 上，而是不断向上调整 hole 的值，将父节点向下调整，最后确认 hole 就是新元素的所在位置时，才会真正的将新元素插入到 hole 上，因此在调整过程中就比上面的代码少了一次赋值的操作，代码逻辑是：

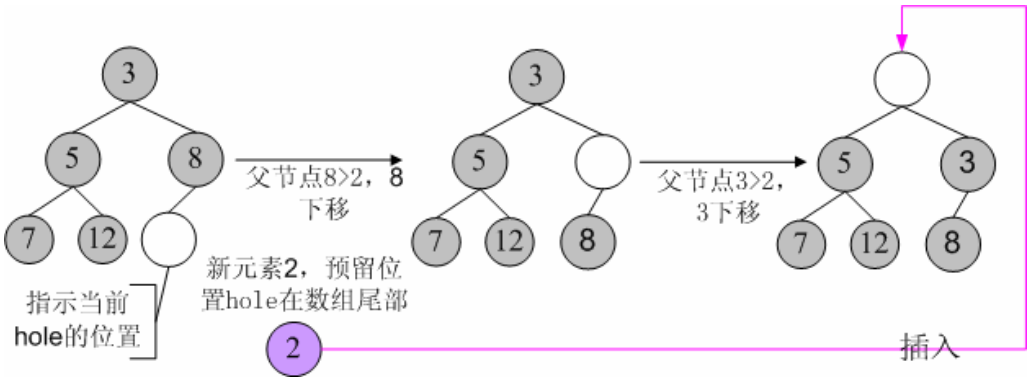
```
// 下面就是 shift_up()的代码逻辑，不断的将 new 的“预留位置”向上调整
_hole = size; // _hole 就是为 new 预留的位置，但并不立刻将 new 放上
while(_hole>0) // 循环
{
    _parent ← (_hole-1)/2; // 计算 parent
    if(Heap[_parent].key < new.key)
        break; // 调整结束，跳出循环
    Heap[_hole] = Heap[_parent]; // 将 parent 向下调整
    _hole = _parent; // 将_hole 调整到_parent
}
Heap[_hole] = new; // 调整结束，将 new 插入到_hole 指示的位置
size++; // 元素个数+1
```

由于每次调整都少做一次赋值操作，在调整路径比较长时，调整效率会比第一种有所提高。libevent 中的 min_heap_shift_up_()函数就是上面逻辑的具体实现，对应的向下调整函数是 min_heap_shift_down_()。

举个例子，向一个小根堆 3, 5, 8, 7, 12 中插入新元素 2，使用第一中典型的代码逻辑，其调整过程如下图所示：



使用 libevent 中的堆调整逻辑，调整过程如下图所示：



对于删除和元素修改操作，也遵从相同的逻辑，就不再罗嗦了。

3 小节

通过设置系统 I/O 机制的 wait 时间，从而简捷的集成 Timer 事件；主要分析了 libevent 对堆调整操作的优化。

十 支持 I/O 多路复用技术

Libevent 的核心是事件驱动、同步非阻塞，为了达到这一目标，必须采用系统提供的 I/O 多路复用技术，而这些在 Windows、Linux、Unix 等不同平台上却各有不同，如何能提供优雅而统一的支持方式，是首要关键的问题，这其实不难，本节就来分析一下。

1 统一的关键

Libevent支持多种I/O多路复用技术的关键就在于结构体eventop，这个结构体前面也曾提到过，它的成员是一系列的函数指针，定义在event-internal.h文件中：

```
struct eventop {
    const char *name;
    void *(*init)(struct event_base *); // 初始化
    int (*add)(void *, struct event *); // 注册事件
    int (*del)(void *, struct event *); // 删除事件
    int (*dispatch)(struct event_base *, void *, struct timeval *); //
事件分发
    void (*dealloc)(struct event_base *, void *); // 注销，释放资源
    /* set if we need to reinitialize the event base */
    int need_reinit;
};
```

在 libevent 中，每种 I/O demultiplex 机制的实现都必须提供这五个函数接口，来完成自身的初始化、销毁释放；对事件的注册、注销和分发。

比如对于 epoll，libevent 实现了 5 个对应的接口函数，并在初始化时并将 eventop 的 5 个函数指针指向这 5 个函数，那么程序就可以使用 epoll 作为 I/O demultiplex 机制了。

2 设置 I/O demultiplex 机制

Libevent 把所有支持的 I/O demultiplex 机制存储在一个全局静态数组 eventops 中，并在初始化时选择使用何种机制，数组内容根据优先级顺序声明如下：

```
/* In order of preference */
static const struct eventop *eventops[] = {
#ifdef HAVE_EVENT_PORTS
    &evportops,
#endif
#ifdef HAVE_WORKING_KQUEUE
    &kqops,
#endif
#ifdef HAVE_EPOLL
    &epollops,
```

```
#endif
#ifdef HAVE_DEVPOLL
    &devpollops,
#endif
#ifdef HAVE_POLL
    &pollops,
#endif
#ifdef HAVE_SELECT
    &selectops,
#endif
#ifdef WIN32
    &win32ops,
#endif
    NULL
};
```

然后 libevent 根据系统配置和编译选项决定使用哪一种 I/O demultiplex 机制，这段代码在函数 event_base_new()中：

```
    base->evbase = NULL;
    for (i = 0; eventops[i] && !base->evbase; i++) {
        base->evsel = eventops[i];

        base->evbase = base->evsel->init(base);
    }
```

可以看出，libevent 在编译阶段选择系统的 I/O demultiplex 机制，而不支持在运行阶段根据配置再次选择。

以 Linux 下面的 epoll 为例，实现在源文件 epoll.c 中，eventops 对象 epollops 定义如下：

```
const struct eventop epollops = {
    "epoll",
    epoll_init,
    epoll_add,
    epoll_del,
    epoll_dispatch,
    epoll_dealloc,
    1 /* need reinit */
};
```

变量 epollops 中的函数指针具体声明如下，注意到其返回值和参数都和 eventop 中的定义严格一致，这是函数指针的语法限制。

```
static void *epoll_init  (struct event_base *);
static int epoll_add (void *, struct event *);
static int epoll_del (void *, struct event *);
static int epoll_dispatch(struct event_base *, void *, struct timeval *);
static void epoll_dealloc   (struct event_base *, void *);
```

那么如果选择的是 epoll，那么调用结构体 eventop 的 init 和 dispatch 函数指针时，实际调用的函数就是 epoll 的初始化函数 epoll_init()和事件分发函数 epoll_dispatch()了；

关于 epoll 的具体用法这里就不多说了，可以参见介绍 epoll 的文章（本人的哈哈）：

http://blog.csdn.net/sparkliang/archive/2009/11/05/4770655.aspx

C++语言提供了虚函数来实现多态，在 C 语言中，这是通过函数指针实现的。对于各类函数指针的详细说明可以参见文章：

http://blog.csdn.net/sparkliang/archive/2009/06/09/4254115.aspx

同样的，上面 epollops 以及 epoll 的各种函数都直接定义在了 epoll.c 源文件中，对外都是不可见的。对于 libevent 的使用者而言，完全不会知道它们的存在，对 epoll 的使用也是通过 eventop 来完成的，达到了信息隐藏的目的。

3 小节

支持多种 I/O demultiplex 机制的方法其实挺简单的，借助于函数指针就 OK 了。通过对源代码的分析也可以看出，Libevent 是在编译阶段选择系统的 I/O demultiplex 机制的，而不支持在运行阶段根据配置再次选择。

十一 时间管理

为了支持定时器，Libevent 必须和系统时间打交道，这一部分的内容也比较简单，主要涉及到时间的加减辅助函数、时间缓存、时间校正和定时器堆的时间值调整等。下面就结合源代码来分析一下。

1 初始化检测

Libevent 在初始化时会检测系统时间的类型，通过调用函数 detect_monotonic()完成，它通过调用 clock_gettime()来检测系统是否支持 monotonic 时钟类型：

```
static void detect_monotonic(void)
{
#if defined(HAVE_CLOCK_GETTIME) && defined(CLOCK_MONOTONIC)
    struct timespec  ts;

    if (clock_gettime(CLOCK_MONOTONIC, &ts) == 0)
        use_monotonic = 1; // 系统支持monotonic时间
#endif
}
```

Monotonic 时间指示的是系统从 boot 后到现在所经过的时间，如果系统支持 Monotonic 时间就将全局变量 use_monotonic 设置为 1，设置 use_monotonic 到底有什么用，这个在后面说到时间校正时就能看出来了。

2 时间缓存

结构体 event_base 中的 tv_cache，用来记录时间缓存。这个还要从函数 gettime()说起，先来看看该函数的代码：

```
static int gettime(struct event_base *base, struct timeval *tp)
{
    // 如果tv_cache时间缓存已设置，就直接使用
    if (base->tv_cache.tv_sec) {
        *tp = base->tv_cache;
        return (0);
    }
    // 如果支持monotonic，就用clock_gettime获取monotonic时间
#if defined(HAVE_CLOCK_GETTIME) && defined(CLOCK_MONOTONIC)
    if (use_monotonic) {
        struct timespec  ts;
        if (clock_gettime(CLOCK_MONOTONIC, &ts) == -1)
```

```
            return (-1);
        tp->tv_sec = ts.tv_sec;
        tp->tv_usec = ts.tv_nsec / 1000;
        return (0);
    }
#endif
    // 否则只能取得系统当前时间
    return (evutil_gettimeofday(tp, NULL));
}
```

如果 tv_cache 已经设置，那么就直接使用缓存的时间；否则需要再次执行系统调用获取系统时间。

函数 evutil_gettimeofday()用来获取当前系统时间，在 Linux 下其实就是系统调用 gettimeofday()；Windows 没有提供函数 gettimeofday，而是通过调用_ftime()来完成的。

在每次系统事件循环中，时间缓存 tv_cache 将会被相应的清空和设置，再次来看看下面 event_base_loop 的主要代码逻辑：

```
int event_base_loop(struct event_base *base, int flags)
{
    // 清空时间缓存
    base->tv_cache.tv_sec = 0;
    while(!done){
        timeout_correct(base, &tv); // 时间校正
        // 更新event_tv到tv_cache指示的时间或者当前时间（第一次）
        // event_tv <--- tv_cache
        gettime(base, &base->event_tv);
        // 清空时间缓存-- 时间点1
        base->tv_cache.tv_sec = 0;
        // 等待I/O事件就绪
        res = evsel->dispatch(base, evbase, tv_p);
        // 缓存tv_cache存储了当前时间的值-- 时间点2
        // tv_cache <--- now
        gettime(base, &base->tv_cache);
        // .. 处理就绪事件
    }
    // 退出时也要清空时间缓存
    base->tv_cache.tv_sec = 0;
    return (0);
}
```

时间 event_tv 指示了 dispatch()上次返回，也就是 I/O 事件就绪时的时间，第一次进入循环时，由于 tv_cache 被清空，因此 gettime()执行系统调用获取当前系统时间；而后将会更新为 tv_cache 指示的时间。

时间 tv_cache 在 dispatch()返回后被设置为当前系统时间，因此它缓存了本次 I/O 事件就绪时的时间（event_tv）。

从代码逻辑里可以看出 event_tv 取得的是 tv_cache 上一次的值，因此 event_tv 应该小于

tv_cache 的值。

设置时间缓存的优点是不必每次获取时间都执行系统调用，这是个相对费时的操作；在上面标注的时间点 2 到时间点 1 的这段时间（处理就绪事件时），调用 gettime()取得的都是 tv_cache 缓存的时间。

3 时间校正

如果系统支持 monotonic 时间，该时间是系统从 boot 后到现在所经过的时间，因此不需要执行校正。

根据前面的代码逻辑，如果系统不支持 monotonic 时间，用户可能会手动的调整时间，如果时间被向前调整了（MS 前面第 7 部分讲成了向后调整，要改正），比如从 5 点调整到了 3 点，那么在时间点 2 取得的值可能会小于上次的时间，这就需要调整了，下面来看看校正的具体代码，由函数 timeout_correct()完成：

```
static void timeout_correct(struct event_base *base, struct timeval *tv)
{
    struct event **pev;
    unsigned int size;
    struct timeval off;
    if (use_monotonic) // monotonic时间就直接返回，无需调整
        return;
    gettime(base, tv); // tv <---tv_cache
    // 根据前面的分析可以知道event_tv应该小于tv_cache
    // 如果tv < event_tv表明用户向前调整时间了，需要校正时间
    if (evutil_timercmp(tv, &base->event_tv, >=)) {
        base->event_tv = *tv;
        return;
    }
    // 计算时间差值
    evutil_timersub(&base->event_tv, tv, &off);

    // 调整定时事件小根堆
    pev = base->timeheap.p;
    size = base->timeheap.n;
    for (; size-- > 0; ++pev) {
        struct timeval *ev_tv = &(**pev).ev_timeout;
        evutil_timersub(ev_tv, &off, ev_tv);
    }
    base->event_tv = *tv; // 更新event_tv为tv_cache
}
```

在调整小根堆时，因为所有定时事件的时间值都会被减去相同的值，因此虽然堆中元素的时间键值改变了，但是相对关系并没有改变，不会改变堆的整体结构。因此只需要遍历堆中的所有元素，将每个元素的时间键值减去相同的值即可完成调整，不需要重新调整堆的结构。

当然调整完后，要将 event_tv 值重新设置为 tv_cache 值了。

4 小节

主要分析了一下 libevent 对系统时间的处理，时间缓存、时间校正和定时堆的时间值调整等，逻辑还是很简单的，时间的加减、设置等辅助函数则非常简单，主要在头文件 evutil.h 中，就不再多说了。

十二 让 libevent 支持多线程

Libevent 本身不是多线程安全的，在多核的时代，如何能充分利用 CPU 的能力呢，这一节来说说如何在多线程环境中使用 libevent，跟源代码并没有太大的关系，纯粹是使用上的技巧。

1 错误使用示例

在多核的 CPU 上只使用一个线程始终是对不起 CPU 的处理能力啊，那好吧，那就多创建几个线程，比如下面的简单服务器场景。

1 主线程创建工作线程 1；

2 接着主线程监听在端口上，等待新的连接；

3 在线程 1 中执行 event 事件循环，等待事件到来；

4 新连接到来，主线程调用 libevent 接口 event_add 将新连接注册到 libevent 上；

… …

上面的逻辑看起来没什么错误，在很多服务器设计中都可能用到主线程和工作线程的模式….

可是就在线程 1 注册事件时，主线程很可能也在操作事件，比如删除，修改，通过 libevent 的源代码也能看到，没有同步保护机制，问题麻烦了，看起来不能这样做啊，难道只能使用单线程不成！？

2 支持多线程的几种模式

Libevent 并不是线程安全的，但这不代表 libevent 不支持多线程模式，其实方法在前面已经将 signal 事件处理时就接触到了，那就是消息通知机制。

一句话，**“你发消息通知我，然后再由我在合适的时间来处理”**；

说到这就再多说几句，再打个比方，把你自己比作一个工作线程，而你的头是主线程，你有一个消息信箱来接收别人发给你的消息，当时头有个新任务要指派给你。

2.1 暴力抢占

那么第一节中使用的多线程方法相当下面的流程：

1 当时你正在做事，比如在写文档；

2 你的头找到了一个任务，要指派给你，比如帮他搞个 PPT，哈；

3 头命令你马上搞 PPT，你这是不得不停止手头的工作，把 PPT 搞定了再接着写文档；

…

2.2 纯粹的消息通知机制

那么基于纯粹的消息通知机制的多线程方式就像下面这样：

1 当时你正在写文档；

2 你的头找到了一个任务，要指派给你，帮他搞个 PPT；

3 头发个消息到你信箱，有个 PPT 要帮他搞定，这时你并不鸟他；

4 你写好文档，接着检查消息发现头有个 PPT 要你搞定，你开始搞 PPT；

…

第一种的好处是消息可以立即得到处理，但是很方法很粗暴，你必须立即处理这个消息，所以你必须处理好切换问题，省得把文档上的内容不小心写到 PPT 里。在操作系统的进程通信中，消息队列（消息信箱）都是操作系统维护的，你不必关心。

第二种的优点是通过消息通知，切换问题省心了，不过消息是不能立即处理的（基于消息通知机制，这个总是难免的），而且所有的内容都通过消息发送，比如 PPT 的格式、内容等等信息，这无疑增加了通信开销。

2.3 消息通知+同步层

有个折中机制可以减少消息通信的开销，就是提取一个同步层，还拿上面的例子来说，你把工作安排都存放在一个工作队列中，而且你能够保证“任何人把新任务扔到这个队列”，“自己取出当前第一个任务”等这些操作都能够保证不会把队列搞乱（其实就是个加锁的队列容器）。

再来看看处理过程和上面有什么不同：

1 当时你正在写文档；

2 你的头找到了一个任务，要指派给你，帮他搞个 PPT；

2 头有个 PPT 要你搞定，他把任务 push 到你的工作队列中，包括了 PPT 的格式、内容等信息；

3 头发个消息（一个字节）到你信箱，有个 PPT 要帮他搞定，这时你并不鸟他；

4 你写好文档，发现有新消息（这预示着有新任务来了），检查工作队列知道头有个 PPT 要你搞定，你开始搞 PPT；

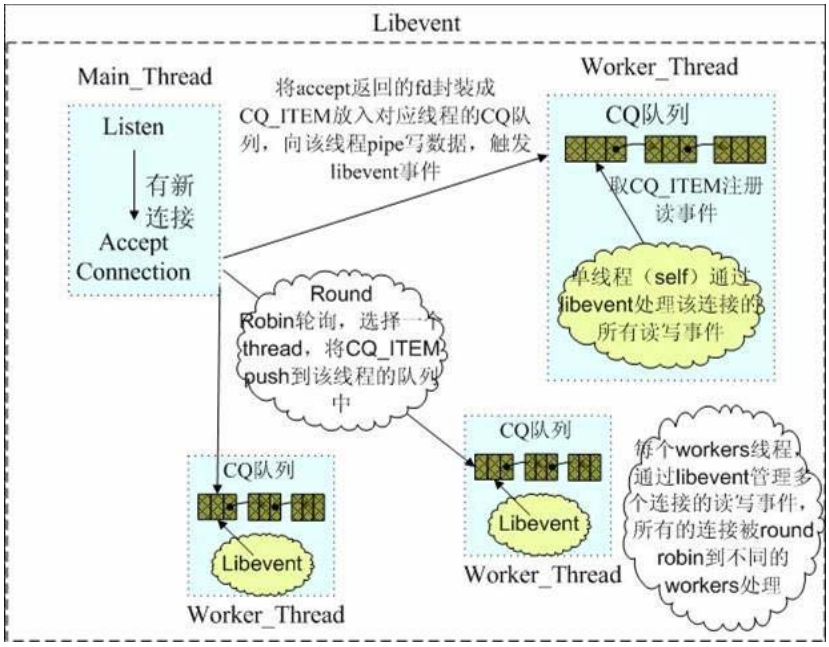
…

工作队列其实就是一个加锁的容器（队列、链表等等），这个很容易实现实现；而消息通知仅需要一个字节，具体的任务都 push 到了在工作队列中，因此想比 2.2 减少了不少通信开销。

多线程编程有很多陷阱，线程间资源的同步互斥不是一两句能说得清的，而且出现 bug 很难跟踪调试；这也有很多的经验和教训，因此如果让我选择，在绝大多数情况下都会选择机制 3 作为实现多线程的方法。

3 例子——memcached

Memcached 中的网络部分就是基于 libevent 完成的，其中的多线程模型就是典型的消息通知+同步层机制。下面的图足够说明其多线程模型了，其中有详细的文字说明。



注：该图的具体出处忘记了，感谢原作者。

4 小节

本节更是 libevent 的使用方面的技巧，讨论了一下如何让 libevent 支持多线程，以及几种支持多线程的机制，memcached 使用 libevent 的多线程模型。

到此为止，对 libevent 源码的分析也就结束了，其中的基本数据结构比如链表、红黑树等就不再写了，都是经典的数据结构，好参考资料多多。