

## 26 | 信任始于握手：TLS1.2 连接过程解析

经过前几讲的介绍，你应该已经熟悉了对称加密与非对称加密、数字签名与证书等密码学知识。

有了这些知识“打底”，现在我们就可以正式开始研究 HTTPS 和 TLS 协议了。

### HTTPS 建立连接

当你在浏览器地址栏里键入“https”开头的 URI，再按下回车，会发生什么呢？

回忆一下[第 8 讲](#)的内容，你应该知道，浏览器首先要从 URI 里提取出协议名和域名。因为协议名是“https”，所以浏览器就知道了端口号是默认的 443，它再用 DNS 解析域名，得到目标的 IP 地址，然后就可以使用三次握手与网站建立 TCP 连接了。

在 HTTP 协议里，建立连接后，浏览器会立即发送请求报文。但现在是 HTTPS 协议，它需要再用另外一个“握手”过程，在 TCP 上建立安全连接，之后才是收发 HTTP 报文。这个“握手”过程与 TCP 有些类似，是 HTTPS 和 TLS 协议里最重要、最核心的部分，懂了它，你就可以自豪地说自己“掌握了 HTTPS”。

### TLS 协议的组成

在讲 TLS 握手之前，我先简单介绍一下 TLS 协议的组成。TLS 包含几个子协议，你也可以理解为它是由几个不同职责的模块组成，比较常用的有记录协议、警报协议、握手协议、变更密码规范协议等。

**记录协议**（Record Protocol）规定了 TLS 收发数据的基本单位：记录（record）。它有点像是 TCP 里的 segment，

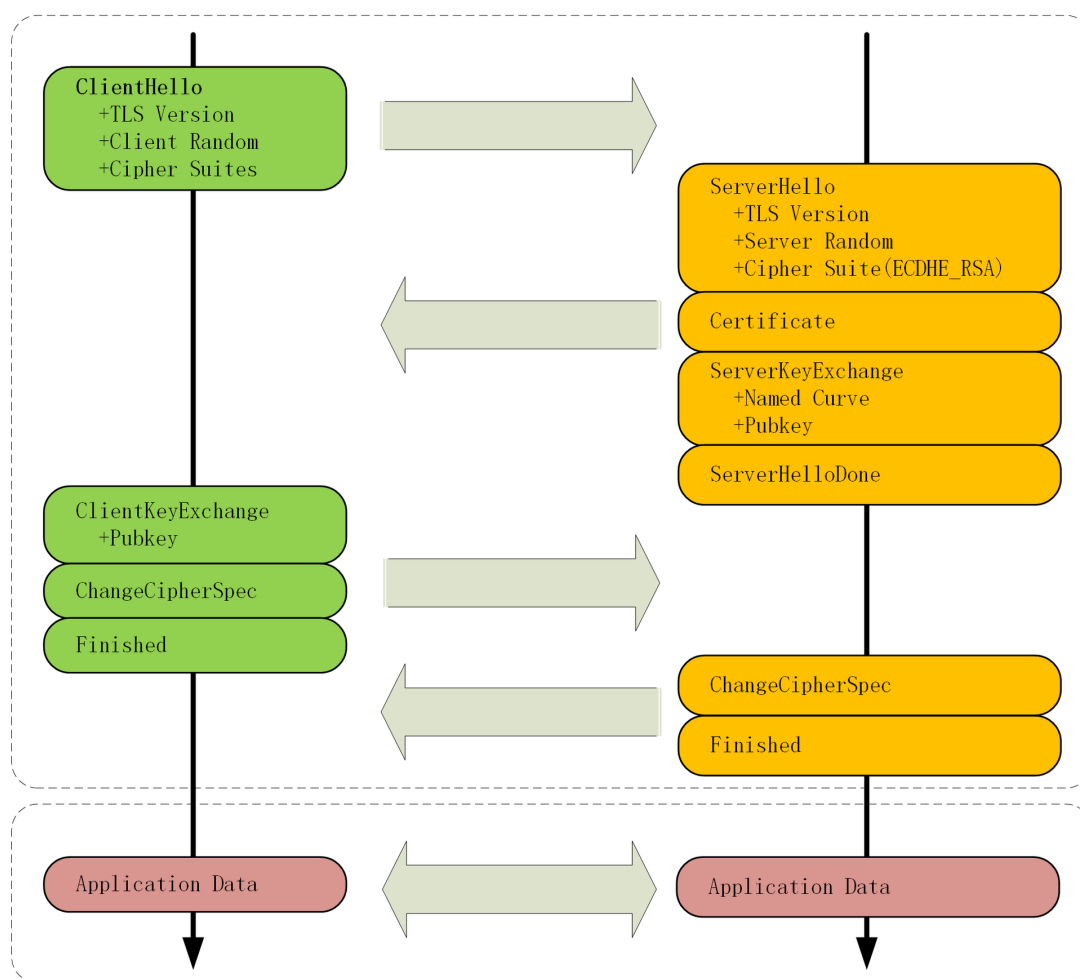
所有的其他子协议都需要通过记录协议发出。但多个记录数据可以在一个 TCP 包里一次性发出，也并不需要像 TCP 那样返回 ACK。

**警报协议 (Alert Protocol)** 的职责是向对方发出警报信息，有点像是 HTTP 协议里的状态码。比如，`protocol_version` 就是不支持旧版本，`bad_certificate` 就是证书有问题，收到警报后另一方可以选择继续，也可以立即终止连接。

**握手协议 (Handshake Protocol)** 是 TLS 里最复杂的子协议，要比 TCP 的 SYN/ACK 复杂的多，浏览器和服务器会在握手过程中协商 TLS 版本号、随机数、密码套件等信息，然后交换证书和密钥参数，最终双方协商得到会话密钥，用于后续的混合加密系统。

最后一个是**变更密码规范协议 (Change Cipher Spec Protocol)**，它非常简单，就是一个“通知”，告诉对方，后续的数据都将使用加密保护。那么反过来，在它之前，数据都是明文的。

下面的这张图简要地描述了 TLS 的握手过程，其中每一个“框”都是一个记录，多个记录组合成一个 TCP 包发送。所以，最多经过两次消息往返（4 个消息）就可以完成握手，然后就可以在安全的通信环境里发送 HTTP 报文，实现 HTTPS 协议。



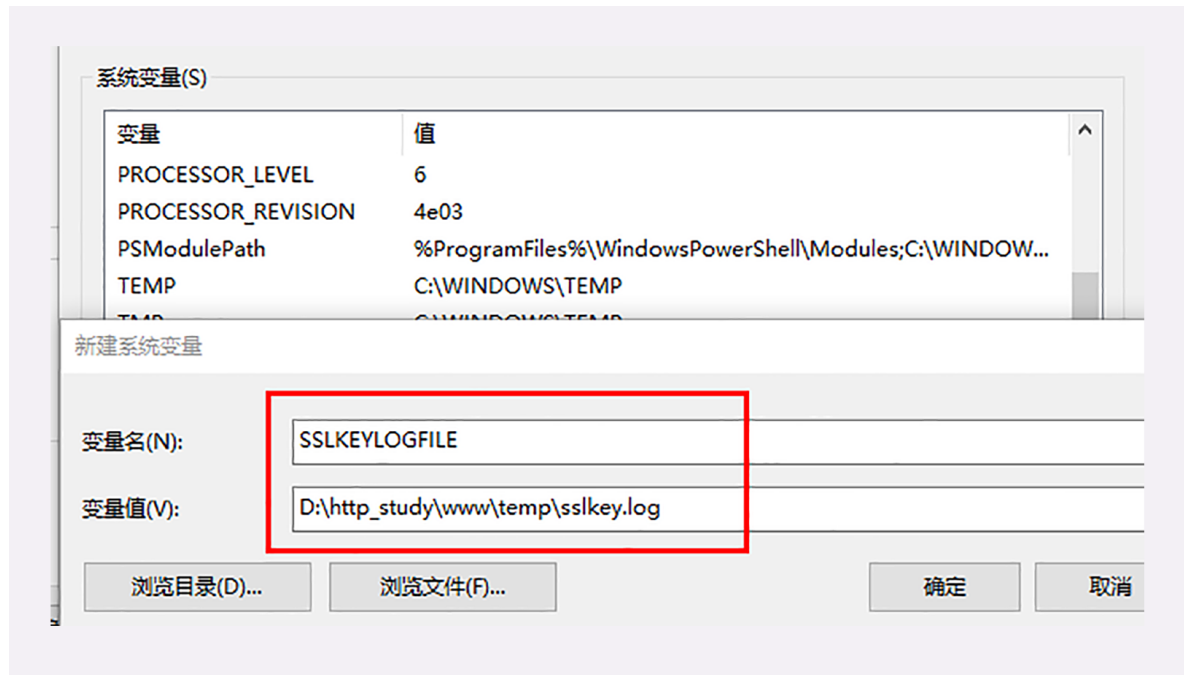
## 抓包的准备工作

这次我们在实验环境里测试 TLS 握手的 URI 是“/26-1”，看了上面的图你就可以知道，TLS 握手的前几个消息都是明文的，能够在 Wireshark 里直接看。但只要出现了“Change Cipher Spec”，后面的数据就都是密文了，看到的也就会是乱码，不知道究竟是什么东西。

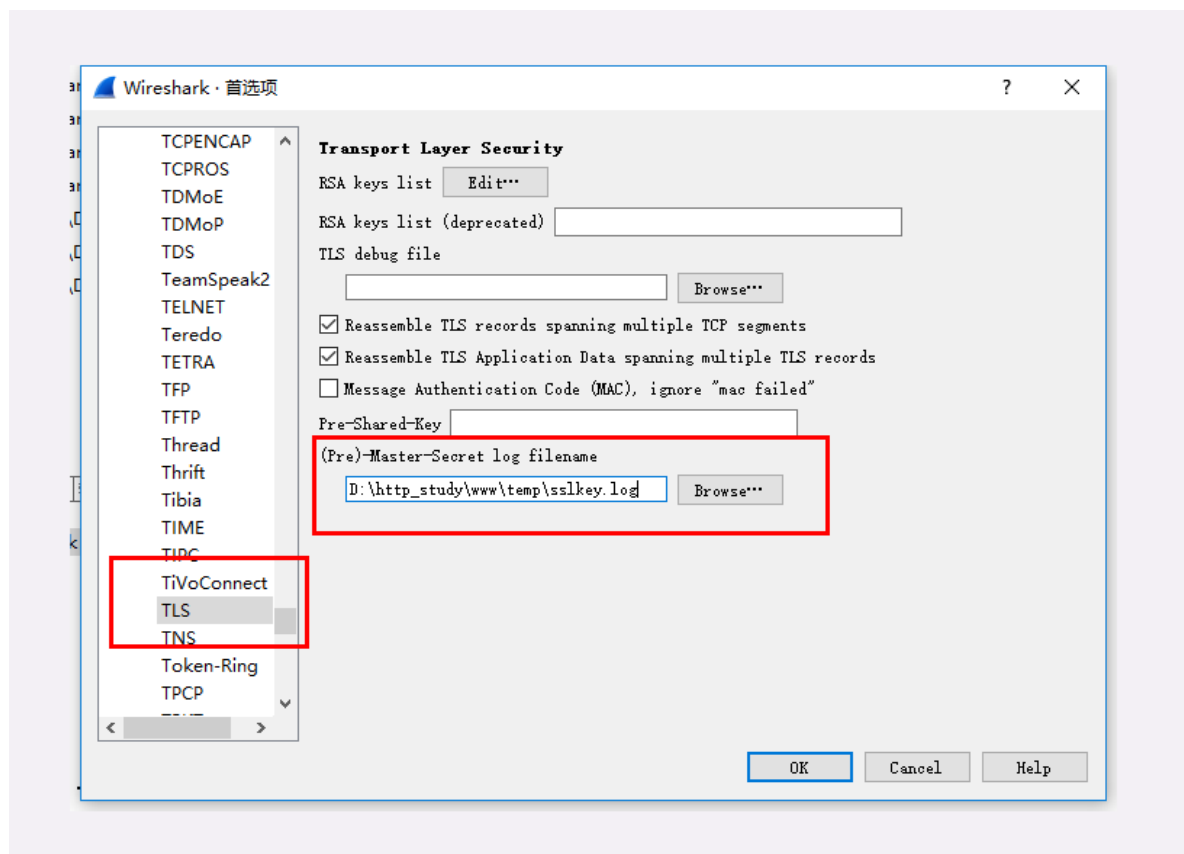
为了更好地分析 TLS 握手过程，你可以再对系统和 Wireshark 做一下设置，让浏览器导出握手过程中的秘密信息，这样 Wireshark 就可以把密文解密，还原出明文。

首先，你需要在 Windows 的设置里新增一个系统变量“SSLKEYLOGFILE”，设置浏览器日志文件的路径，比如“D:\http\_study\www\temp\sslkey.log”（具体的设置过程

就不详细说了，可以在设置里搜索“系统变量”）。



然后在 Wireshark 里设置“Protocols-TLS”（较早版本的 Wireshark 里是“SSL”），在“(Pre)-Master-Secret log filename”里填上刚才的日志文件。

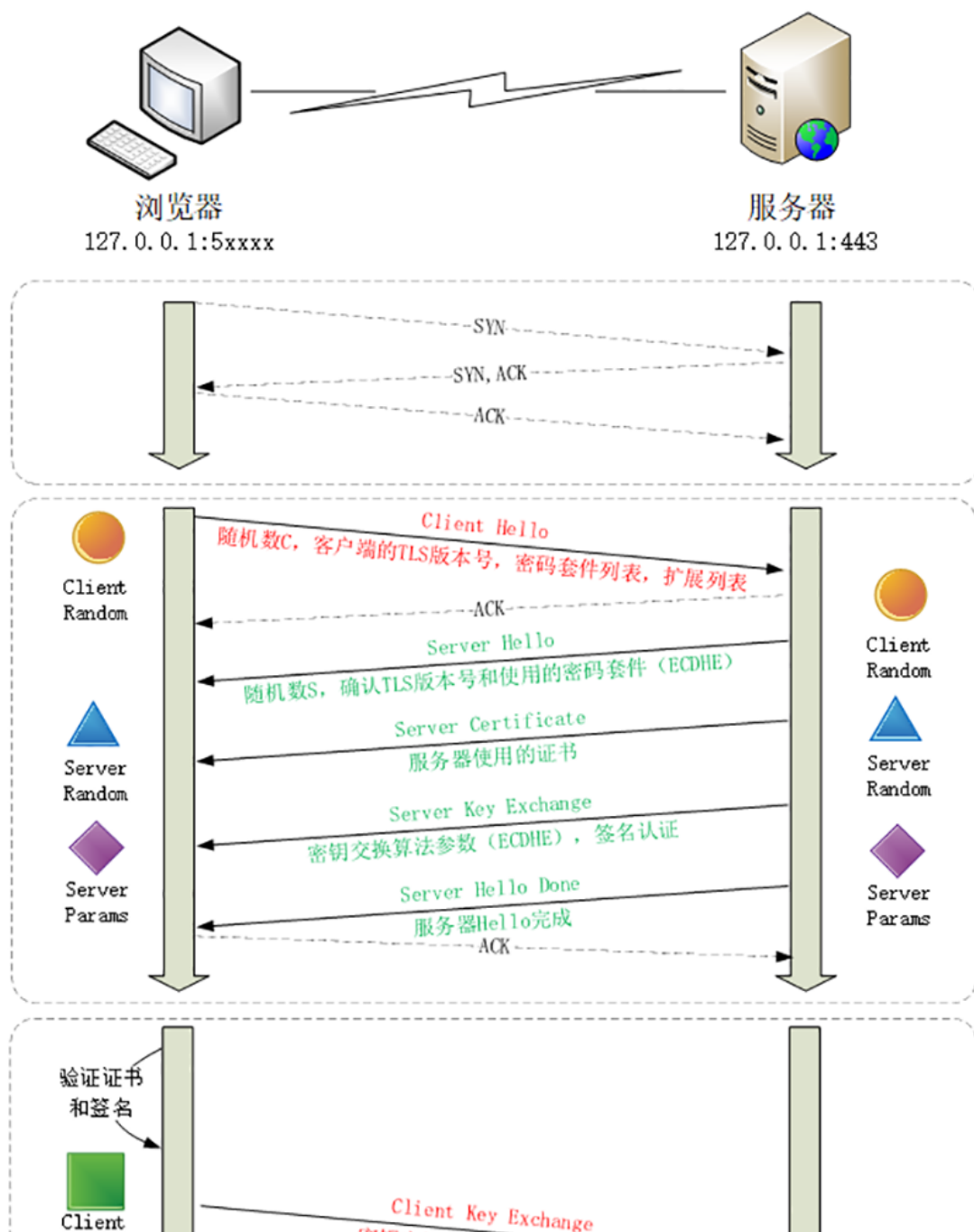


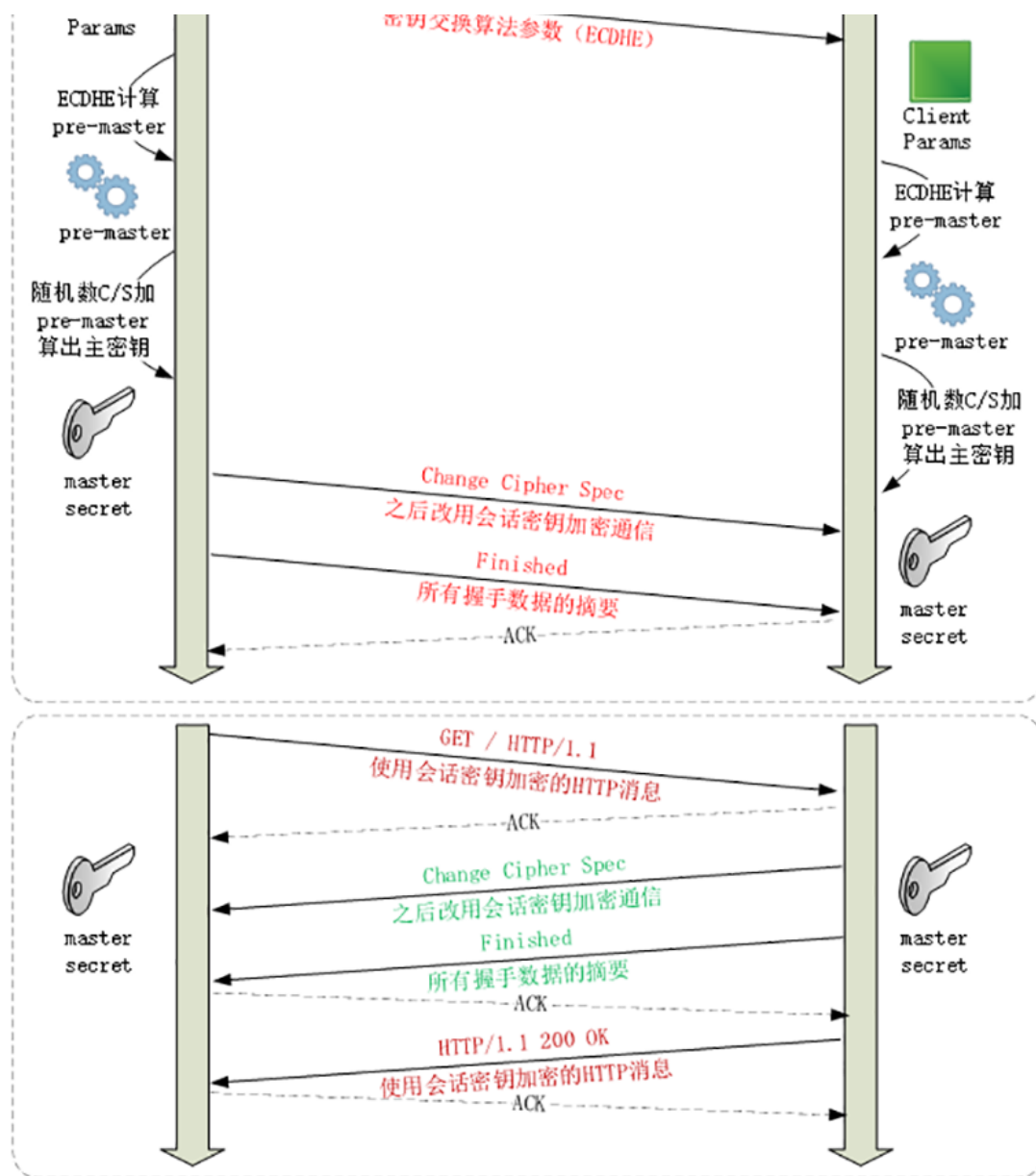
设置好之后，过滤器选择“tcp port 443”，就可以抓到实验环境里的所有 HTTPS 数据了。

如果你觉得麻烦也没关系，GitHub 上有抓好的包和相应的日志，用 Wireshark 直接打开就行。

## ECDHE 握手过程

刚才你看到的是握手过程的简要图，我又画了一个详细图，对应 Wireshark 的抓包，下面我就用这个图来仔细剖析 TLS 的握手过程。





在 TCP 建立连接之后，浏览器会首先发一个“Client Hello”消息，也就是跟服务器“打招呼”。里面有客户端的版本号、支持的密码套件，还有一个随机数（Client Random），用于后续生成会话密钥。

[复制代码](#)

```
Handshake Protocol: Client Hello
  Version: TLS 1.2 (0x0303)
  Random: 1cbf803321fd2623408dfe...
  Cipher Suites (17 suites)
    Cipher Suite:
  TLS_ECDHE_RSA_WITH_AES_128_GCM_SHA256 (0xc02f)
    Cipher Suite:
  TLS_ECDHE_RSA_WITH_AES_256_GCM_SHA384 (0xc030)
```

这个的意思就是：“我这边有这些这些信息，你看看哪些是能用的，关键的随机数可得留着。”

作为“礼尚往来”，服务器收到“Client Hello”后，会返回一个“Server Hello”消息。把版本号对一下，也给出一个**随机数 (Server Random)**，然后从客户端的列表里选一个作为本次通信使用的密码套件，在这里它选择了“TLS\_ECDHE\_RSA\_WITH\_AES\_256\_GCM\_SHA384”。

 复制代码

1  
2  
3  
4


```
Handshake Protocol: Server Hello
  Version: TLS 1.2 (0x0303)
  Random: 0e6320f21bae50842e96...
  Cipher Suite: TLS_ECDHE_RSA_WITH_AES_256_GCM_SHA384
(0xc030)
```

这个的意思就是：“版本号对上了，可以加密，你的密码套件挺多，我选一个最合适的吧，用椭圆曲线加 RSA、AES、

SHA384。我也给你一个随机数，你也得留着。”

然后，服务器为了证明自己的身份，就把证书也发给了客户端（Server Certificate）。

接下来是一个关键的操作，因为服务器选择了 ECDHE 算法，所以它会在证书后发送“**Server Key Exchange**”消息，里面是椭圆曲线的公钥（**Server Params**），用来实现密钥交换算法，再加上自己的私钥签名认证。

 复制代码

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7

```
Handshake Protocol: Server Key Exchange
  EC Diffie-Hellman Server Params
    Curve Type: named_curve (0x03)
    Named Curve: x25519 (0x001d)
    Pubkey: 3b39deaf00217894e...
    Signature Algorithm: rsa_pkcs1_sha512 (0x0601)
    Signature: 37141adac38ea4...
```

这相当于说：“刚才我选密码套件有点复杂，所以再给你个算法的参数，和刚才的随机数一样有用，别丢了。为了防止别人冒充，我又盖了个章。”

之后是“**Server Hello Done**”消息，服务器说：“我的信息就是这些，打招呼完毕。”

这样第一个消息往返就结束了（两个 TCP 包），结果是客户端和服务端通过明文共享了三个信息：**Client Random**、**Server Random** 和 **Server Params**。



客户端这时也拿到了服务器的证书，那这个证书是不是真实有效的呢？

这就要用到第 25 讲里的知识了，开始走证书链逐级验证，确认证书的真实性，再用证书公钥验证签名，就确认了服务器的身份：“刚才跟我打招呼的不是骗子，可以接着往下走。”

然后，客户端按照密码套件的要求，也生成一个椭圆曲线的公钥（Client Params），用“Client Key Exchange”消息发给服务器。

 复制代码

1  
2  
3

```
Handshake Protocol: Client Key Exchange
  EC Diffie-Hellman Client Params
    Pubkey: 8c674d0e08dc27b5eaa...
```

现在客户端和服务端手里都拿到了密钥交换算法的两个参数（Client Params、Server Params），就用 ECDHE 算法一阵算，算出了一个新的东西，叫“Pre-Master”，其实也是一个随机数。

至于具体的计算原理和过程，因为太复杂就不细说了，但算法可以保证即使黑客截获了之前的参数，也是绝对算不出这个随机数的。

现在客户端和服务端手里有了三个随机数：Client Random、Server Random 和 Pre-Master。用这三个作为原始材料，就可以生成用于加密会话的主密钥，叫“Master Secret”。而黑客因为拿不到“Pre-Master”，所以也就得不

到主密钥。

为什么非得这么麻烦，非要三个随机数呢？

这就必须说 TLS 的设计者考虑得非常周到了，他们不信任客户端或服务器伪随机数的可靠性，为了保证真正的“完全随机”“不可预测”，把三个不可靠的随机数混合起来，那么“随机”的程度就非常高了，足够让黑客难以猜测。

你一定很想知道“Master Secret”究竟是怎么算出来的吧，贴一下 RFC 里的公式：

 复制代码

1  
2

```
master_secret = PRF(pre_master_secret, "master secret",  
                    ClientHello.random +  
                    ServerHello.random)
```

这里的“PRF”就是伪随机数函数，它基于密码套件里的最后一个参数，比如这次的 SHA384，通过摘要算法来再一次强化“Master Secret”的随机性。

主密钥有 48 字节，但它也不是最终用于通信的会话密钥，还会再用 PRF 扩展出更多的密钥，比如客户端发送用的会话密钥（client\_write\_key）、服务器发送用的会话密钥（server\_write\_key）等等，避免只用一个密钥带来的安全隐患。

有了主密钥和派生的会话密钥，握手就快结束了。客户端发一个“Change Cipher Spec”，然后再发一个“Finished”消息，把之前所有发送的数据做个摘要，再加密一下，让服务器做个验证。

意思就是告诉服务器：“后面都改用对称算法加密通信了”

啊，用的就是打招呼时说的 AES，加密对不对还得你测一下。”

服务器也是同样的操作，发“Change Cipher Spec”和“Finished”消息，双方都验证加密解密 OK，握手正式结束，后面就收发被加密的 HTTP 请求和响应了。

## RSA 握手过程

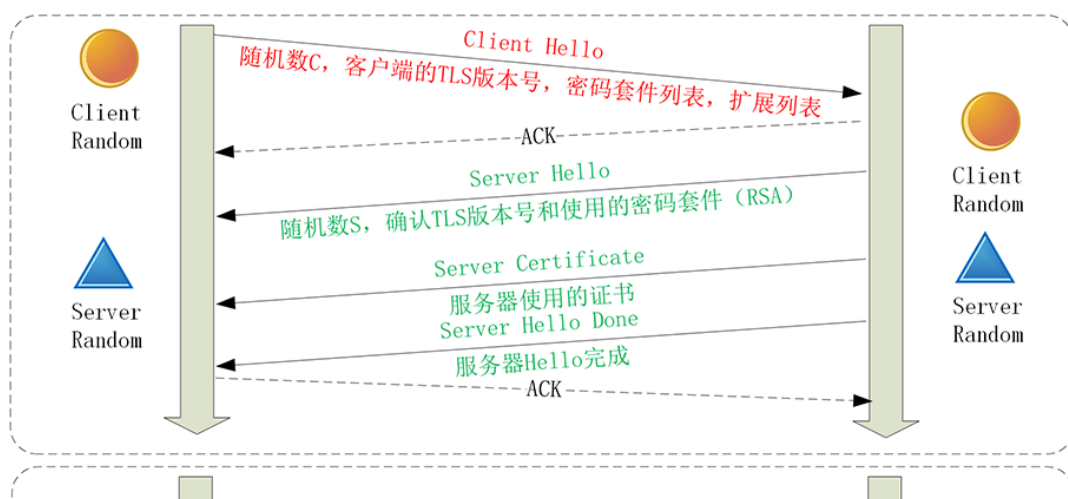
整个握手过程可真是够复杂的，但你可能会问了，好像这个过程和其他地方看到的不一样呢？

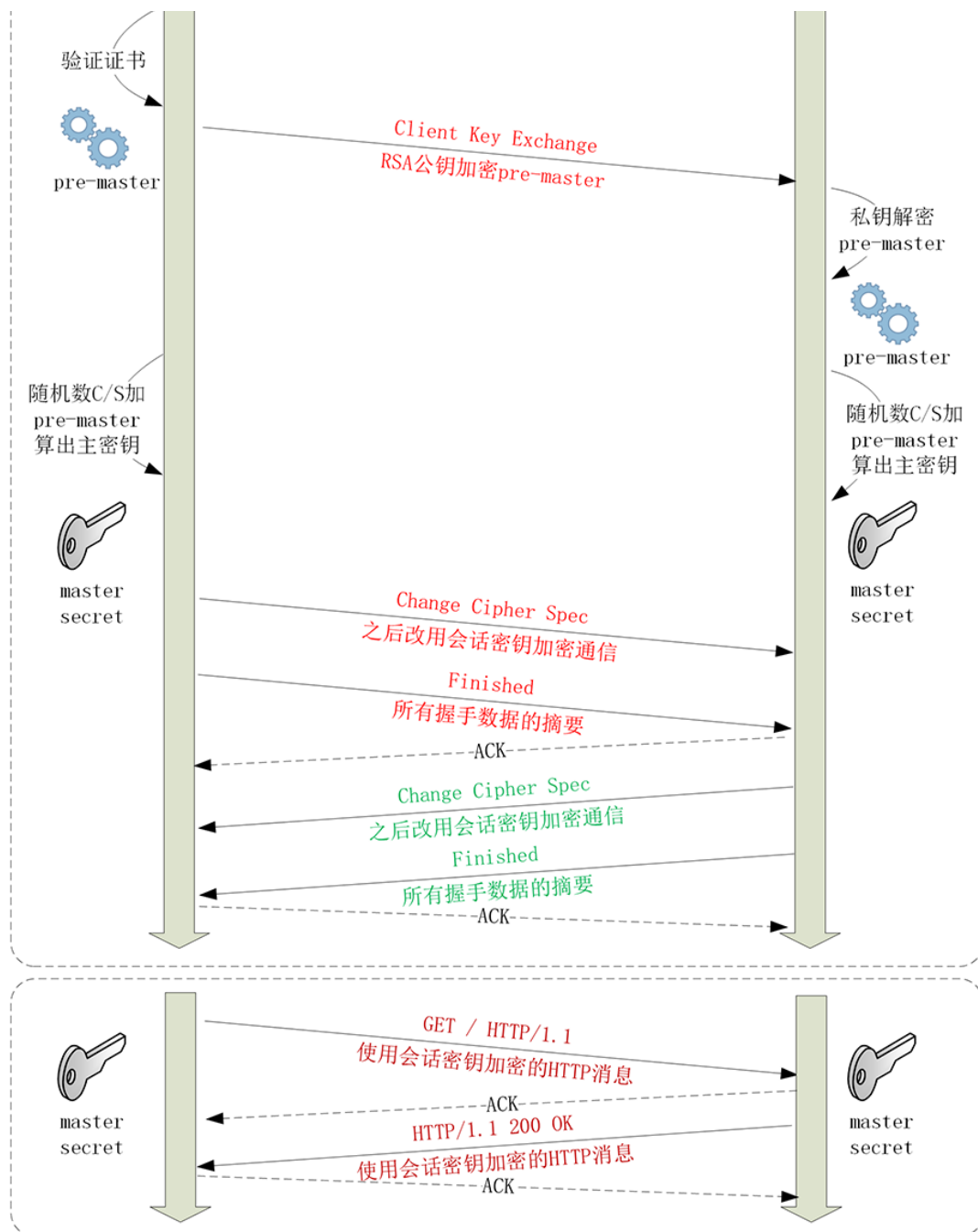
刚才说的其实是如今主流的 TLS 握手过程，这与传统的握手有两点不同。

第一个，使用 ECDHE 实现密钥交换，而不是 RSA，所以会在服务器端发出“Server Key Exchange”消息。

第二个，因为使用了 ECDHE，客户端可以不用等到服务器发回“Finished”确认握手完毕，立即就发出 HTTP 报文，省去了一个消息往返的时间浪费。这个叫“TLS False Start”，意思就是“抢跑”，和“TCP Fast Open”有点像，都是不等连接完全建立就提前发应用数据，提高传输的效率。

实验环境在 440 端口 (<https://www.chrono.com:440/26-1>) 实现了传统的 RSA 密钥交换，没有“False Start”，你可以课后自己抓包看一下，这里我也画了个图。





大体的流程没有变，只是“Pre-Master”不再需要用算法生成，而是客户端直接生成随机数，然后用服务器的公钥加密，通过“Client Key Exchange”消息发给服务器。服务器再用私钥解密，这样双方也实现了共享三个随机数，就可以生成主密钥。

## 双向认证

到这里 TLS 握手就基本讲完了。

不过上面说的是“**单向认证**”握手过程，只认证了服务器的身份，而没有认证客户端的身份。这是因为通常单向认证通过后已经建立了安全通信，用账号、密码等简单的手段就能够确认用户的真实身份。

但为了防止账号、密码被盗，有的时候（比如网上银行）还会使用 U 盾给用户颁发客户端证书，实现“**双向认证**”，这样会更加安全。

双向认证的流程也没有太多变化，只是在“**Server Hello Done**”之后，“**Client Key Exchange**”之前，客户端要发送“**Client Certificate**”消息，服务器收到后也把证书链走一遍，验证客户端的身份。

## 小结

今天我们学习了 HTTPS/TLS 的握手，内容比较多、比较难，不过记住下面四点就可以。

1  
HTTPS 协议会先与服务器执行 TCP 握手，然后执行 TLS 握手，才能建立安全连接；

2  
握手的目标是安全地交换对称密钥，需要三个随机数，第三个随机数“Pre-Master”必须加密传输，绝对不能让黑客破解；

3  
“Hello”消息交换随机数，“Key Exchange”消息交换“Pre-Master”；

4  
“Change Cipher Spec”之前传输的都是明文，之后都是对称密钥加密的密文。

## 课下作业

1  
密码套件里的那些算法分别在握手过程中起了什么作用？

2

你能完整地描述一下 RSA 的握手过程吗？

3

你能画出双向认证的流程图吗？

欢迎你把自己的学习体会写在留言区，与我和其他同学一起讨论。如果你觉得有所收获，也欢迎把文章分享给你的朋友。



## 课外小贴士

- 01 TLS 中记录协议原本定义有压缩方式，但后来发现存在安全漏洞（CRIME 攻击），所以现在这个字段总是 NULL，即不压缩。
- 02 在 TLS1.2 里，客户端和随机数的长度都是 28 字节，前面的四个字节是 UNIX 时间戳，但并没有实际意义。
- 03 Chrome 开发者工具的“Security”面板里可以看到 HTTPS 握手时选择的版本号、密码套件和椭圆曲线，例如“ECDHE\_RSA with X25519, and AES\_256\_GCM”。
- 04 ECDHE 即“短暂 - 椭圆曲线 - 迪菲 - 赫尔曼”（ephemeral Elliptic Curve Diffie-Hellman）算法，使用椭圆曲线增强了 DH 算法的安全性

和性能，公钥和私钥都是临时生成的。

**05** 在 Wireshark 抓包里你还会看见“Session ID”“Extension”等字段，涉及会话复用和扩展协议，后面会讲到。