

25-固若金汤的根本（下）：数字签名与证书

上一讲中我们学习了对称加密和非对称加密，以及两者结合起来的混合加密，实现了机密性。

但仅有机密性，离安全还差的很远。

黑客虽然拿不到会话密钥，无法破解密文，但可以通过窃听收集到足够多的密文，再尝试着修改、重组后发给网站。因为没有完整性保证，服务器只能“照单全收”，然后他就可以通过服务器的响应获取进一步的线索，最终就会破解出明文。

另外，黑客也可以伪造身份发布公钥。如果你拿到了假的公钥，混合加密就完全失效了。你以为自己是在和“某宝”通信，实际上网线的另一端却是黑客，银行卡号、密码等敏感信息就在“安全”的通信过程中被窃取了。

所以，在机密性的基础上还必须加上完整性、身份认证等特性，才能实现真正的安全。

摘要算法

实现完整性的手段主要是**摘要算法**（Digest Algorithm），也就是常说的散列函数、哈希函数（Hash Function）。

你可以把摘要算法近似地理解成一种特殊的压缩算法，它能够把任意长度的数据“压缩”成固定长度、而且独一无二的“摘要”字符串，就好像是给这段数据生成了一个数字“指纹”。

换一个角度，也可以把摘要算法理解成特殊的“单向”加密算法，它只有算法，没有密钥，加密后的数据无法解密，不能从摘要逆推出原文。



SHA-2

c8b388b4459e13f978
d7e15c761ee1a5e255

摘要算法实际上是把数据从一个“大空间”映射到了“小空间”，所以就存在“冲突”（collision，也叫碰撞）的可能性，就如同现实中的指纹一样，可能会有两份不同的原文对应相同的摘要。好的摘要算法必须能够“抵抗冲突”，让这种可能性尽量地小。

因为摘要算法对输入具有“单向性”和“雪崩效应”，输入的微小不同会导致输出的剧烈变化，所以也被TLS用来生成伪随机数（PRF，pseudo random function）。

你一定在日常工作中听过、或者用过MD5（Message-Digest 5）、SHA-1（Secure Hash Algorithm 1），它们就是最常用的两个摘要算法，能够生成16字节和20字节长度的数字摘要。但这两个算法的安全强度比较低，不够安全，在TLS里已经被禁止使用了。

目前TLS推荐使用的是SHA-1的后继者：SHA-2。

SHA-2实际上是一系列摘要算法的统称，总共有6种，常用的有SHA224、SHA256、SHA384，分别能够生成28字节、32字节、48字节的摘要。

你可以用实验环境的URI“/25-1”来测试一下TLS里的各种摘要算法，包括MD5、SHA-1和SHA-2。

```
https://www.chrono.com/25-1?algo=md5
https://www.chrono.com/25-1?algo=sha1
https://www.chrono.com/25-1?algo=sha256
```

完整性

摘要算法保证了“数字摘要”和原文是完全等价的。所以，我们只要在原文后附上它的摘要，就能够保证数据的完整性。

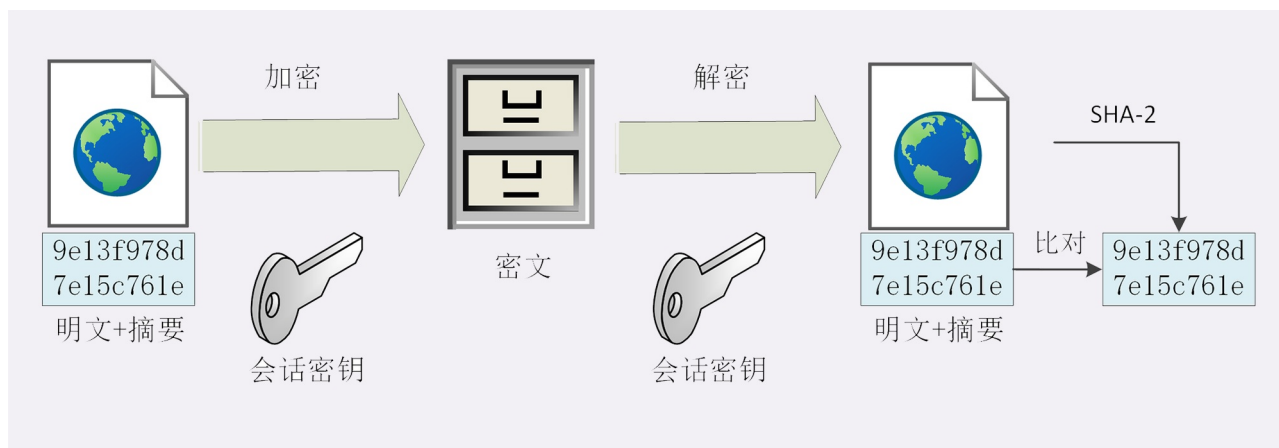
比如，你发了条消息：“转账1000元”，然后再加上一个SHA-2的摘要。网站收到后也计算一下消息的摘要，把这两份“指纹”做个对比，如果一致，就说明消息是完整可信的，没有被修改。

如果黑客在中间哪怕改动了一个标点符号，摘要也会完全不同，网站计算比对就会发现消息被篡改，是不可信的。

不过摘要算法不具有机密性，如果明文传输，那么黑客可以修改消息后把摘要也一起改了，网站还是鉴别不出完整性。

所以，真正的完整性必须要建立在机密性之上，在混合加密系统里用会话密钥加密消息和摘要，这样黑客无法得知明文，也就没有办法动手脚了。

这有个术语，叫哈希消息认证码（HMAC）。



数字签名

加密算法结合摘要算法，我们的通信过程可以说是比较安全了。但这里还有漏洞，就是通信的两个端点（endpoint）。

就像一开始所说的，黑客可以伪装成网站来窃取信息。而反过来，他也可以伪装成你，向网站发送支付、转账等消息，网站没有办法确认你的身份，钱可能就这么被偷走了。

现实生活中，解决身份认证的手段是签名和印章，只要在纸上写下签名或者盖个章，就能够证明这份文件确实是由本人而不是其他人发出的。

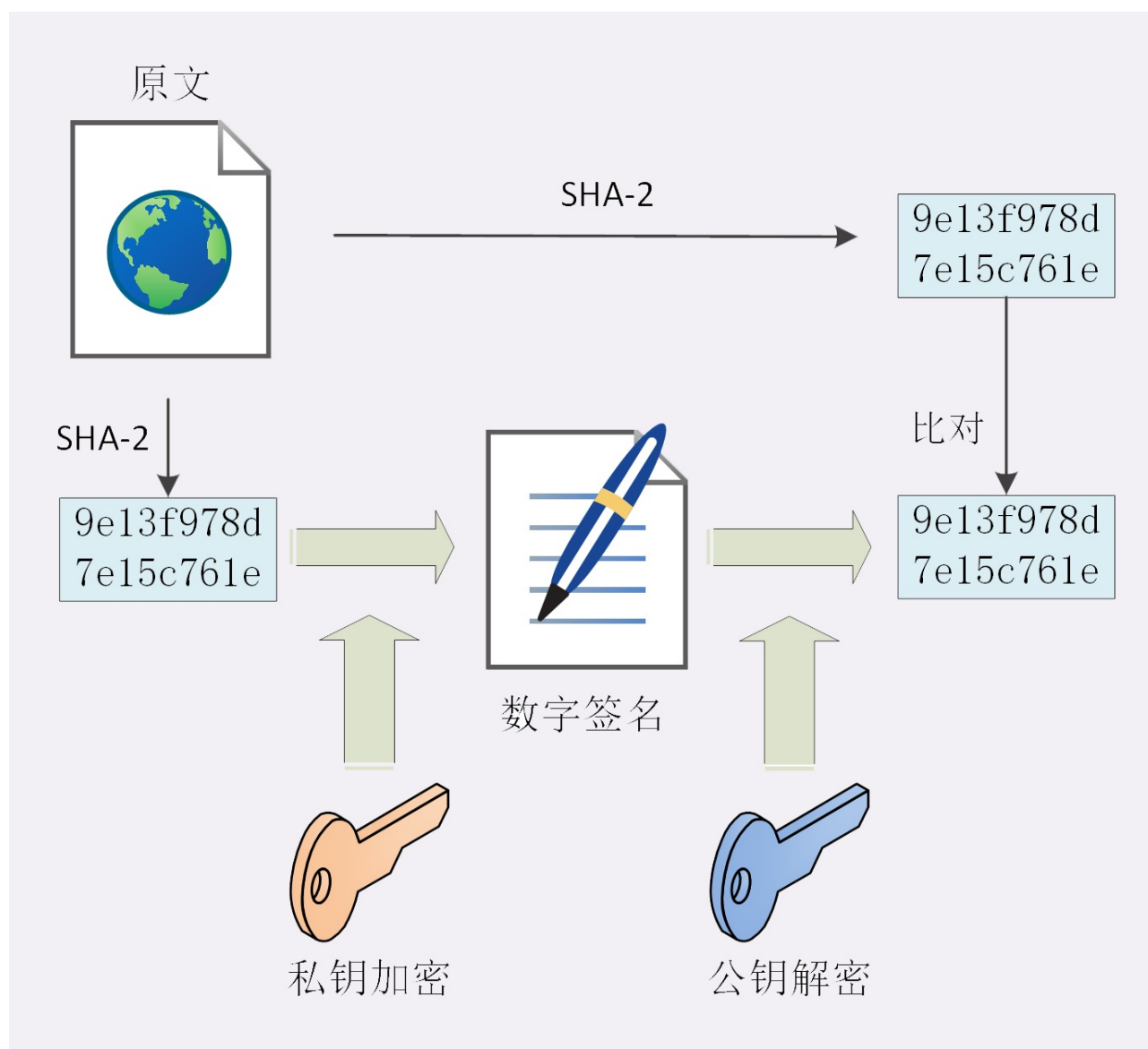
你回想一下之前的课程，在TLS里有什么东西和现实中的签名、印章很像，只能由本人持有，而其他任何人都不会有呢？只要用这个东西，就能够在数字世界里证明你的身份。

没错，这个东西就是非对称加密里的“**私钥**”，使用私钥再加上摘要算法，就能够实现“**数字签名**”，同时实现“身份认证”和“不可否认”。

数字签名的原理其实很简单，就是把公钥私钥的用法反过来，之前是公钥加密、私钥解密，现在是私钥加密、公钥解密。

但又因为非对称加密效率太低，所以私钥只加密原文的摘要，这样运算量就小的多，而且得到的数字签名也很小，方便保管和传输。

签名和公钥一样完全公开，任何人都可以获取。但这个签名只有用私钥对应的公钥才能解开，拿到摘要后，再比对原文验证完整性，就可以像签署文件一样证明消息确实是你发的。



刚才的这两个行为也有专用术语，叫做“**签名**”和“**验签**”。

只要你和网站互相交换公钥，就可以用“签名”和“验签”来确认消息的真实性，因为私钥保密，黑客不能伪造签名，就能够保证通信双方的身份。

比如，你用自己的私钥签名一个消息“我是小明”。网站收到后用你的公钥验签，确认身份没问题，于是也用它的私钥签名消息“我是某宝”。你收到后再用它的公钥验一下，也没问题，这样你和网站就都知道对方不是假冒的，后面就可以用混合加密进行安全通信了。

实验环境的URI “/25-2” 演示了TLS里的数字签名，它使用的是RSA1024。

数字证书和CA

到现在，综合使用对称加密、非对称加密和摘要算法，我们已经实现了安全的四大特性，是不是已经完美了呢？

不是的，这里还有一个“**公钥的信任**”问题。因为谁都可以发布公钥，我们还缺少防止黑客伪造公钥的手段，也就是说，怎么来判断这个公钥就是你或者某宝的公钥呢？

真是“按下葫芦又起了瓢”，安全还真真是个麻烦事啊，“一环套一环”的。

我们可以用类似密钥交换的方法来解决公钥认证问题，用别的私钥来给公钥签名，显然，这又会陷入“无穷递归”。

但这次实在是“没招”了，要终结这个“死循环”，就必须引入“外力”，找一个公认的可信第三方，让它作为“信任的起点，递归的终点”，构建起公钥的信任链。

这个“第三方”就是我们常说的**CA**（Certificate Authority，证书认证机构）。它就像网络世界里的公安局、教育部、公证中心，具有极高的可信度，由它来给各个公钥签名，用自身的信誉来保证公钥无法伪造，是可信的。

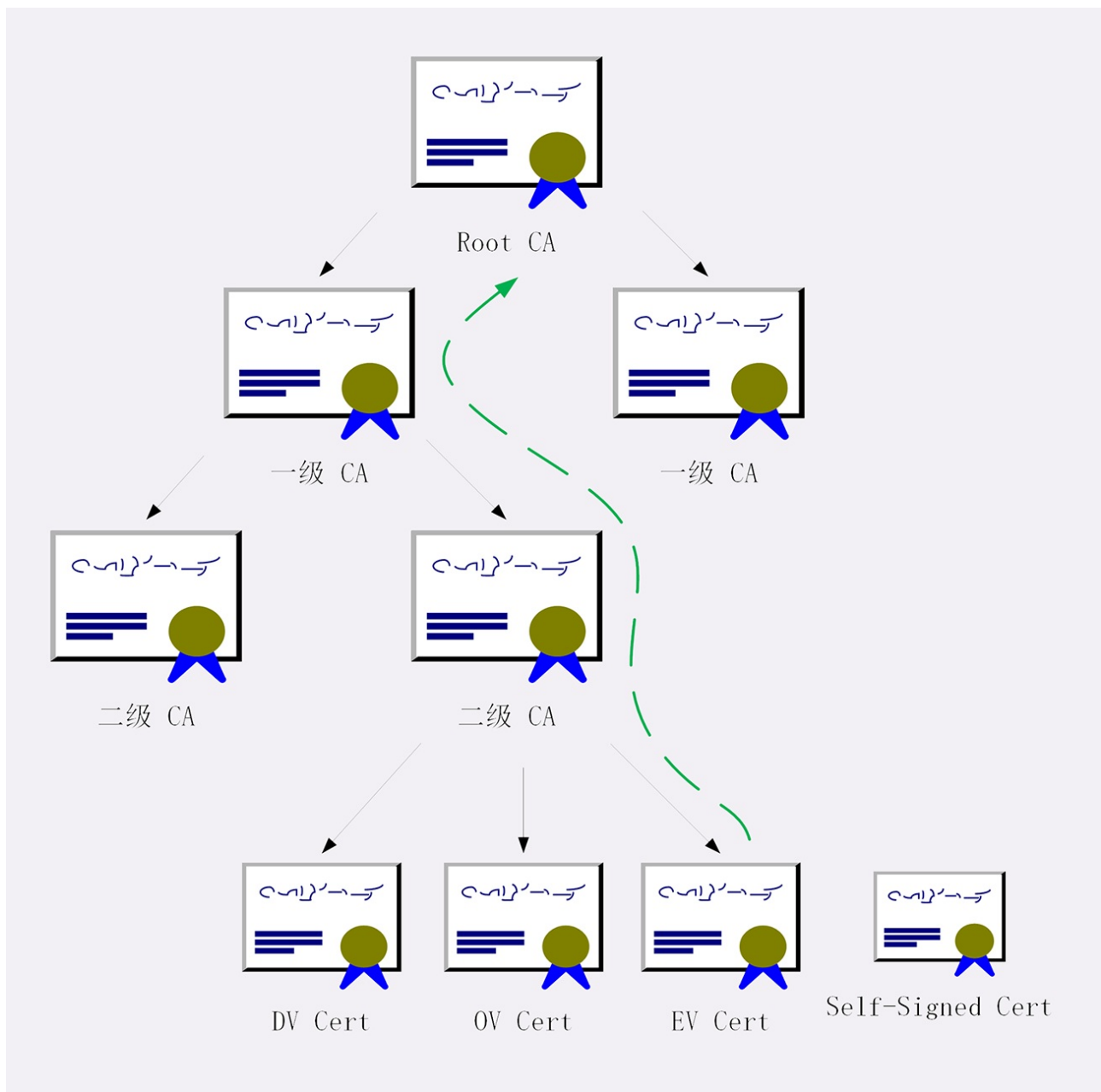
CA对公钥的签名认证也是有格式的，不是简单地把公钥绑定在持有者身份上就完事了，还要包含序列号、用途、颁发者、有效时间等等，把这些打成一个包再签名，完整地证明公钥关联的各种信息，形成“**数字证书**”（Certificate）。

知名的CA全世界就那么几家，比如DigiCert、VeriSign、Entrust、Let’s Encrypt等，它们签发的证书分DV、OV、EV三种，区别在于可信程度。

DV是最低的，只是域名级别的可信，背后是谁不知道。EV是最高的，经过了法律和审计的严格核查，可以证明网站拥有者的身份（在浏览器地址栏会显示出公司的名字，例如Apple、GitHub的网站）。

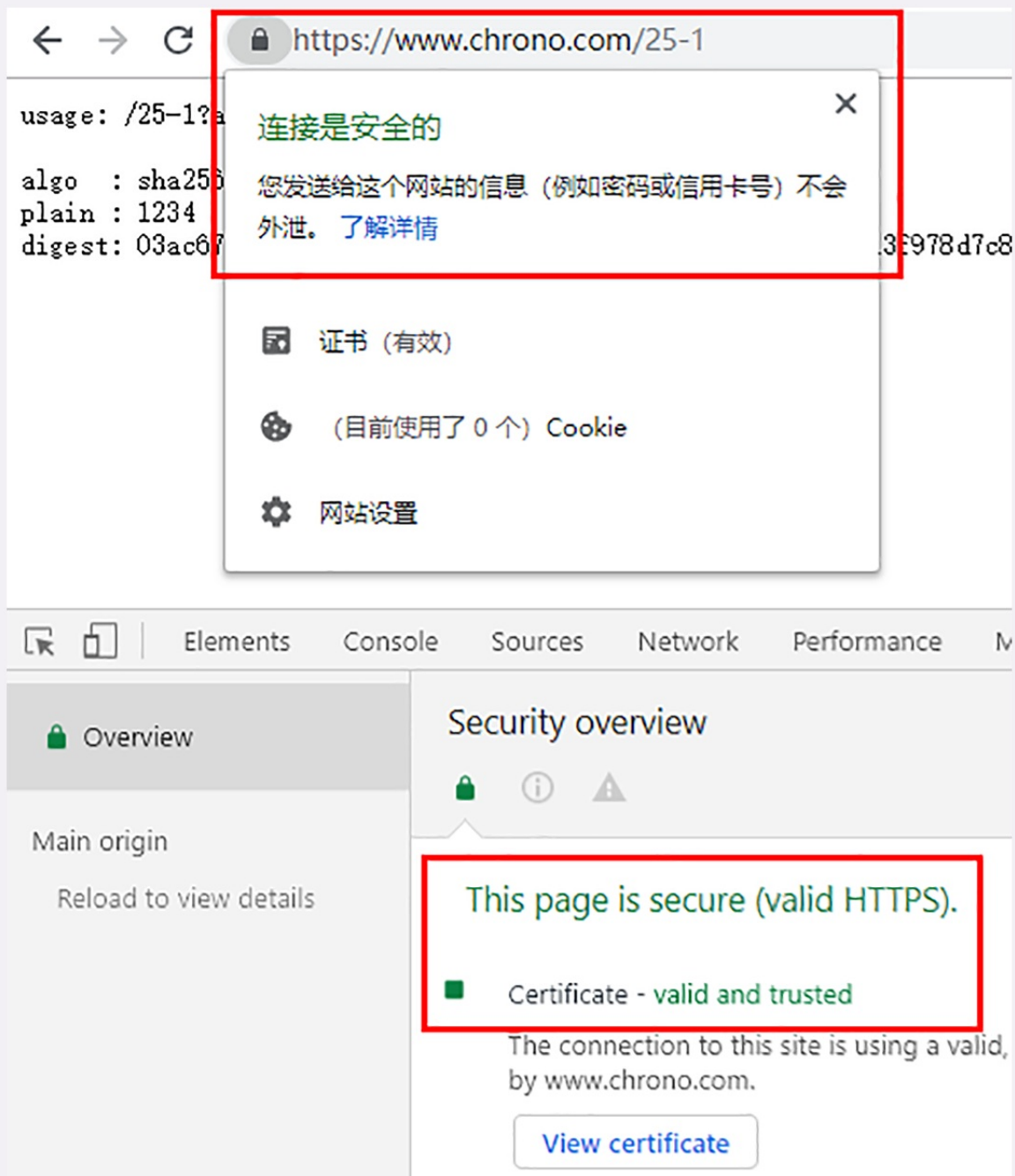
不过，CA怎么证明自己呢？

这还是信任链的问题。小一点的CA可以让大CA签名认证，但链条的最后，也就是**Root CA**，就只能自己证明自己了，这个就叫“**自签名证书**”（Self-Signed Certificate）或者“**根证书**”（Root Certificate）。你必须相信，否则整个证书信任链就走不下去了。



有了这个证书体系，操作系统和浏览器都内置了各大CA的根证书，上网的时候只要服务器发过来它的证书，就可以验证证书里的签名，顺着证书链（Certificate Chain）一层层地验证，直到找到根证书，就能够确定证书是可信的，从而里面的公钥也是可信的。

我们的实验环境里使用的证书是“野路子”的自签名证书（在Linux上用OpenSSL命令行签发），肯定不会被浏览器所信任的，所以用Chrome访问时就会显示成红色，标记为不安全。但你只要把它安装进系统的根证书存储区里，让它作为信任链的根，就不会再有危险警告。



证书体系的弱点

证书体系（PKI，Public Key Infrastructure）虽然是目前整个网络世界的安全基础设施，但绝对的安全是不存在的，它也有弱点，还是关键的“信任”二字。

如果CA失误或者被欺骗，签发了错误的证书，虽然证书是真的，可它代表的网站却是假的。

还有一种更危险的情况，CA被黑客攻陷，或者CA有恶意，因为它（即根证书）是信任的源头，整个信任链里的所有证书也就都不可信了。

这两种事情并不是“耸人听闻”，都曾经实际出现过。所以，需要再给证书体系打上一些补丁。

针对第一种，开发出了CRL（证书吊销列表，Certificate revocation list）和OCSP（在线证书状态协议，Online Certificate Status Protocol），及时废止有问题的证书。

对于第二种，因为涉及的证书太多，就只能操作系统或者浏览器从根上“下狠手”了，撤销对CA的信任，列入“黑名单”，这样它颁发的所有证书就都会被认为是不安全的。

小结

今天我们学习了数字签名和证书、CA，是不是有种“盗梦空间”一层套一层的感觉？你可以在课后再去各大网站，结合它们“小锁头”里的信息来加深理解。

今天的内容可以简单概括为四点：

1. 摘要算法用来实现完整性，能够为数据生成独一无二的“指纹”，常用的算法是SHA-2；
2. 数字签名是私钥对摘要的加密，可以由公钥解密后验证，实现身份认证和不可否认；
3. 公钥的分发需要使用数字证书，必须由CA的信任链来验证，否则就是不可信的；
4. 作为信任链的源头CA有时也会不可信，解决办法有CRL、OCSP，还有终止信任。

课下作业

1. 为什么公钥能够建立信任链，用对称加密算法里的对称密钥行不行呢？
2. 假设有一个三级的证书体系（Root CA=>一级CA=>二级CA），你能详细解释一下证书信任链的验证过程吗？

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 摘要算法除了用于 TLS 安全通信，还有很多其他的用途，比如散列表、数据校验、大文件比较等。
- 02 虽然 SHA-2 很安全，但出于“未雨绸缪”的考虑，又出现了 SHA-3，它也有 6 种算法，名字与 SHA-2 差不多，比如 SHA3-224、SHA3-256，目前还未纳入 TLS。
- 03 “账号 + 密码”也能够实现简单的的身份认证，但在安全通信未建立前使用很容易就会被窃取，所以在 TLS 里不能用。
- 04 Let's Encrypt 是著名的免费 CA，它只颁发 DV 证书，而且出于安全目的有效期只有 90 天，但可以用 Certbot 工具自动续订。
- 05 证书的格式遵循 X509 v3 标准，有两种编码方式，一种是二进制的 DER，另一种是 ASCII 码的 PEM，实验环境使用的是 PEM。

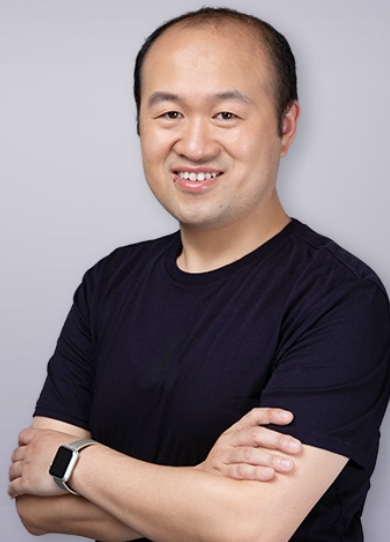
透视 HTTP 协议

深入理解 HTTP 协议本质与应用

罗剑锋

奇虎360技术专家

Nginx/OpenResty 开源项目贡献者



新版升级：点击「 请朋友读」，20位好友免费读，邀请订阅更有**现金**奖励。

精选留言：

● 郭凯强 2019-07-24 08:48:15

问题1. 非加密算法需要公开公钥从而让客户端能解密。如果用对称加密，加密密钥公开，就达不到加密效果了

问题2. 客户端发现当前网站的证书是二级CA，在可信任签发机构中找不到，就会去拿二级CA的数字证书的签发机构去做检查，发现它是一级CA，也不在可信任签发机构中，再找一级CA的数字证书的签发机构，发现是受信任的ROOT CA，至此完成验证。如果到最后一层CA都不受信任，就会警告用户 [4赞]

作者回复2019-07-24 09:03:21

✓

● 彩色的沙漠 2019-07-24 13:03:13

对于第二个问题证书链验证的过程，有些不理解的地方，请老师指教，您在文章说“操作系统和浏览器都内置了各大CA的根证书，上网的时候只要服务器发过来它的证书，就可以验证证书里的签名，顺着证书链（Certificate Chain）一层层地验，直到找到根证书”，服务器只返回了他的证书（假如返回的是二级证书），浏览器内置的是根证书（根公钥）使用根公钥只能解密根机构签名的证书，无法解密二级证书，使用一级证书（公钥）才能解密二级证。那么浏览器是怎么自下向上层层解析到根证书？我的理解的是服务器返回的是证书链，然后浏览器就可以使用信任的根证书（根公钥）解析证书链的根证书得到一级证书的公钥+摘要验签，然后拿一级证书的公钥解密一级证书拿到二级证书的公钥和摘要验签，再然后拿二级证书的公钥解密二级证书得到服务器的公钥和摘要验签，验证过程就结束了。谢谢！ [3赞]

作者回复2019-07-24 13:41:46

你理解的很对，服务器会在握手的时候返回整个证书链，但通常为了节约数据量，不会包含最终的根证书，因为根证书通常已经在浏览器或者操作系统里内置了。

● Leon  2019-07-24 14:54:56

重放和篡改的问题没有提，黑客是解不开秘文，但是可以重复发送，需要时间戳和随机数再合起来做一个不可逆的签名，服务端收到重复的就丢弃 [2赞]

作者回复2019-07-24 16:56:13

感谢补充，这个就是nonce了。

- 极客时间 2019-07-24 00:42:59
到这里完全爆炸了 [2赞]

作者回复2019-07-24 09:02:55
哪里不明白可以随时问。

- 放开那个猴子 2019-07-24 22:12:19
看完老师的文章有点迷惑，主要是没搞清完整的流程，又去找资料看了一下，说下自己的理解，老师看看对不。

数字签名和数字证书只用于TSL/SSL的握手阶段，主要是保证服务器的公钥能够正确地传给浏览器（不被中间人伪装发送假的公钥）

具体流程大概是：

- 1、服务器去CA机构申请证书，证书中包含了要发给客户端的公钥、签发者、到期时间等信息。如果这样简单地把证书发给浏览器，中间人可以轻松地修改成自己的公钥，之后的通信就是不安全的了。于是需要一定的加密手段，这里的做法就是使用数字签名：将证书的信息利用摘要算法计算出摘要之后，用CA的秘钥进行加密，生成数字签名。
- 2、服务器将数字证书和数字签名一起发给浏览器，因为有数字签名，所以数字证书无法被中间人做修改（修改之后生成的数字签名无法被CA公钥解密），浏览器拿到数字证书之后，去本地的信任机构中查询到对应的机构，利用其公钥解密数字签名，验证证书是否有被修改过。这一步就保证了浏览器获取到的公钥一定是正确的。
- 3、公钥正确地传给浏览器之后，接着就是协商对称加密的密钥，然后通信等等..

参考：

http://www.ruanyifeng.com/blog/2011/08/what_is_a_digital_signature.html
<https://www.zhihu.com/question/52493697> [1赞]

作者回复2019-07-25 09:00:52
态度很认真，值得表扬。

有一点小错误，数字签名的防篡改不是因为“修改之后生成的数字签名无法被CA公钥解密”，而是修改后的摘要变动了，与签名里解密出的原始摘要不匹配，所以能够发现原文被篡改。

另外，你说的这些是目前流行的PKI体系，但公钥私钥本身并不一定要用证书，它们本身属于密码学。

- 大小兵 2019-07-24 13:42:58
老师我有两个疑问：
 1. 用自己的私钥对摘要进行加密生成数字签名，这个数字签名需要经过公钥加密后发送给对方吗？
 2. 是否在每次发送消息时都要进行生成摘要和生成数字签名这两个过程？ [1赞]

作者回复2019-07-24 14:03:17

1.只要私钥加密后就可以了，不需要公钥参与，私钥加密的结果就是签名。

2.如果每次都要对消息签名就需要做这两步，先摘要再加密，也就是数字签名。

3.但私钥运算很慢，实际上不会这样做，而是在握手的时候签名验签，接下来会讲tls握手，它实现了完善的密钥交换过程。

- Geek_54edc1 2019-07-24 11:10:45

1、因为对称加密时，双方要协商密钥，密钥在传输过程中极易被窃取，而非对称加密方式，双方只要协商公钥就行了，私钥都是自己保存的 [1赞]

作者回复2019-07-24 13:39:35

√

• 锦 2019-07-24 09:19:21

使用非对称加密算法RSA交换对称算法AES的密钥部分有疑问：

1，这个交换动作是谁发起的？

2，需要双方都要确认吗？

3，其中非对称加密算法RSA的私钥保存部分没看懂，网站的私钥保存在服务器端，安全；那么用户的私钥呢？是保存在ca证书颁发机构吗？还是保存在浏览器端？

另外，如果网站用户使用黑客手段修改客户端内存数据，然后提交服务器，这种情况https有招吗？

[1赞]

作者回复2019-07-24 09:54:47

1/2可以看接下来的tls握手，如何交换如何确认就要使用一种双方都认可的协议。

3.私钥需要自己保管，方法有很多，比如u盾（特殊的usb设备），或者直接就是一个文本文件，想怎么存就怎么存。

4.https只保证通信链路的安全，在这之外它是无能为力的。

• -W.LI- 2019-07-24 08:41:14

对称加密就一个密钥，CA有你的私钥如果ca被黑了黑客可以随便怎么玩。用公钥的话，CA被黑了，黑客没法拿到私钥。只能伪装用户没法伪装服务器。不晓得理解的对不对。

第二个应该从下往上一级一级严重吧。三级验证不通过就不用验证二级了。 [1赞]

作者回复2019-07-24 09:10:11

1的理解有点小问题，信任链里其实不一定非要有ca，如果只是在一个很小的范围内，没有证书只用公钥也可以建立信任关系。

关键是对称密钥没有私密性，不能实现身份认证。

• 小鱼 2019-07-24 20:35:24

老师，能介绍下EDI的实现过程吗？如基于OFTP2协议的EDI是如何实现的

作者回复2019-07-25 09:05:37

这个就离HTTP有点太远了，可能介绍不了，抱歉啊。

• 大小兵 2019-07-24 18:32:04

老师不好意思，刚才第一个问题没问好，我想问的是：

用自己的私钥对摘要进行加密生成数字签名，然后原文，摘要，数字签名这三个是不是都要经过会话密钥加密后发送给对方？

作者回复2019-07-25 09:02:32

不用。

因为数字签名是公开的，谁都可以拿到后验证签名，所以没有必要加密。

摘要也不需要发送，本身就已经含在了签名里（公钥解密后得到）。

原文需要视情况加密，如果需要保密就用会话密钥加密，否则就不用。

- 阿锋 2019-07-24 15:09:31

那证书信任链最底层的证书，如何找到上层的证书？是不是底层的证书把上层信息也包含了？

作者回复2019-07-24 16:56:59

是以证书链的形式传递的，也就是多个链条上相关的证书。

- 阿锋 2019-07-24 15:04:22

不是很理解这句话：CA 对公钥的签名认证？是CA用自己的私钥对第三方的公钥签名？

作者回复2019-07-24 16:55:29

是的，你理解的很正确。

- 丶景 2019-07-24 10:40:35

希望老师可以滑一张完整的流程图，谢谢老师

作者回复2019-07-24 14:00:54

到下一讲握手的时候回有。

- 开水 2019-07-24 08:26:23

感觉得多看几遍

作者回复2019-07-24 09:02:21

这块确实不太好理解，有疑问可以随时问。

- 韦超才 2019-07-24 08:16:28

HMAC很数字签名都是对哈希摘要进行加密，前者用对称加密，后者用非对称加密。

作者回复2019-07-24 09:02:31

√