10 | 怎么防止数据重放攻击?

2020-12-16 范学雷

实用密码学 进入课程 >

讲述：范学雷

时长 15:34 大小 14.27M

你好，我是范学雷。

上一讲，我们讨论了对称密钥分组算法的链接模式，从链接模式出发，我们还分析了 ECB 模式，初始化向量和链接模式的缺失导致了 ECB 模式的安全缺陷，尤其是数据重放攻击。

我们说，有密码学基础知识的工程师，都应该知道 ECB 模式的安全问题，并且不会在应用程序中使用它。这一讲，我们来讨论一个更广泛使用的加密模式，CBC 模式。

CBC 模式，可能是 2018 年之前最常用、最常见的加密模式。和 ECB 模式不同，由于初始化向量和链接模式的使用，CBC 模式解决了数据重放攻击的问题。可是，从 2018 年开始，由于它的安全问题，CBC 模式开始退出历史舞台，尽管这一进程可能需要十数年，甚至数十年。

为什么还要学习 CBC 模式?

不知道你是不是已经有了一个问题：既然 CBC 要退出历史舞台了，我们还学习它干什么呢?

第一个原因，CBC 的退出进程可能需要十数年才能完成。你现在工作的项目种，可能还存在 CBC 模式的大量使用。我们学习了 CBC 模式，有助于你解决现存项目的安全问题。

第二个原因，学习针对 CBC 的攻击方案， 是我们深入理解加密算法安全问题的最好的切入点。了解这些安全缺陷和攻击方案，有助于你更好地使用密码学的算法。因为，这些缺陷也可能换个面孔，出现在应用程序层面。如果你能够说清楚 CBC 模式的攻击办法，也就意味着你已经试着走入了算法的细节。

第三个原因，也是最重要的原因，就是我们要进一步地理解初始化向量和链接模式对加密算法的影响。学习 CBC 模式会为我们将来讨论更高级的协议和更安全的算法打下基础。

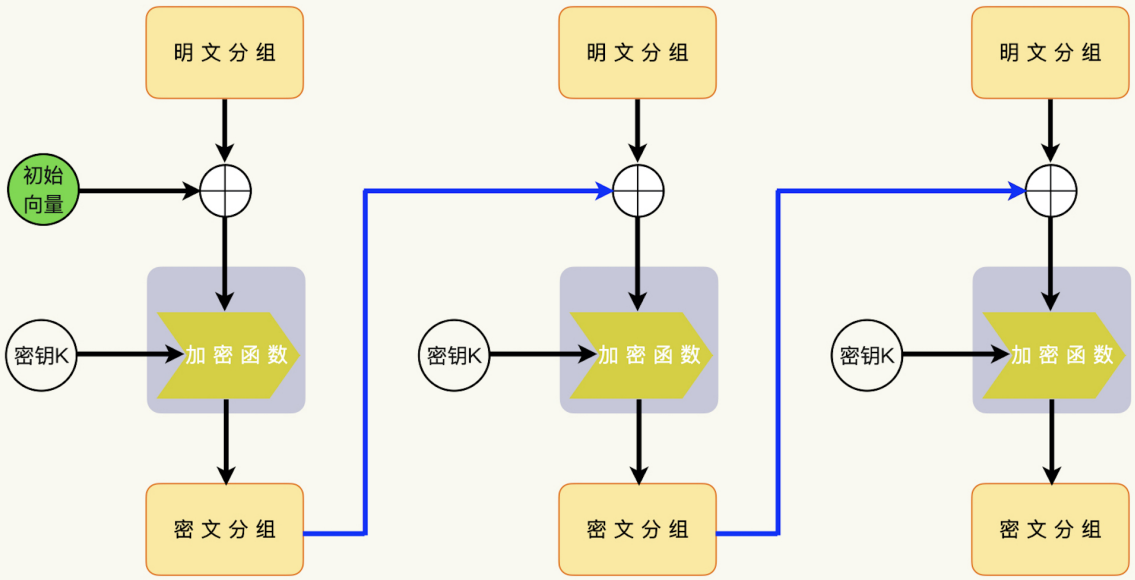
那么，CBC 模式是什么样子的？它是怎么解决数据重放攻击的？它存在哪些安全陷阱？这是我们这一次要解决的问题。

CBC 模式什么样?

和其他模式不同的是，在 CBC（Cipher Block Chaining）模式中，明文分组在加密之前，要与前一组的密文分组进行异或运算，异或运算的结果会参与加密函数的运算。

也就是说，上一次的密文分组要参与下一次的加密运算，每一个密文数据不仅依赖于它对应的明文分组，还依赖于上一次的密文分组。

这样的话，每一个密文分组，都依赖于前面所有的明文分组，包括初始化向量。



所以，我们能够知道，CBC 模式是需要初始化向量的。最显而易见的原因，就是第一个明文分组还不存在所谓的“上一个密文分组”。所以，我们需要一个外部引入的初始化向量来替代“上一个密文分组”参与运算。

不过，我们需要注意的是，在加密过程中，加密函数的输入数据是明文分组（Mi）和上一次的密文分组（Ci-1）的异或运算的结果（Mi ^ Ci-1）。

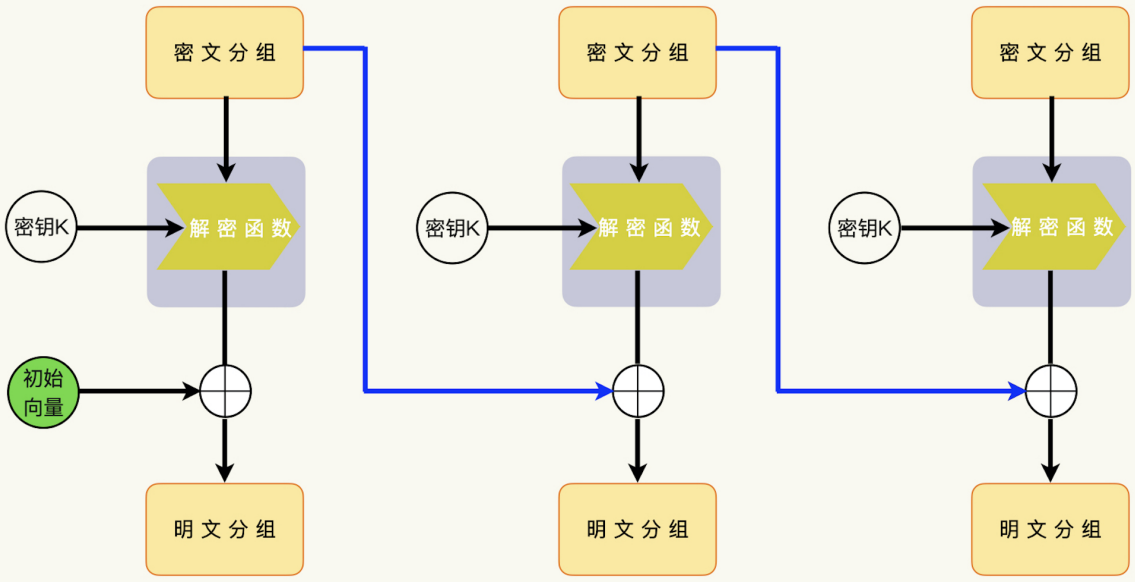
在解密过程中，解密函数的输出数据，也是明文分组和上一次的密文分组的异或运算结果（Mi ^ Ci-1）。我们要是想得到解密的明文分组，就需要把明文分组和上一次的密文分组分离开来。

我们现在可以确定的是，上一次的密文分组（Ci-1）是已知的。所以，只要我们把上一次的密文分组和解密函数的输出数据进行异或运算，就把明文分组分离出来了。

```
1 (Ci-1) ^ (Mi ^ Ci-1) = Mi
```

复制代码

所以，我们可以发现，对于解密过程来说，如果我们把解密函数的运算结果与上一次的密文分组进行异或运算，就可以获得对应的明文分组。



不难想象，在解密过程中，我们要想获得第一个明文分组，用来替代“上一个密文分组”的初始化向量就必须要参与解密的过程。也就是说，**加密过程的初始化向量和解密过程的初始化向量必须是一样的，否则，我们就没有办法得到第一个明文分组。**

注意一点，初始化向量只影响第一个明文分组，并不影响后续的解密过程和明文分组。

类似地，一个密文分组，只影响它的下一个明文分组，并不影响更后面的解密过程和明文分组。

而在加密过程中，每一个密文分组，都依赖于前面所有的明文分组，包括初始化向量。

所以，我们在这里要注意的就是加密过程和解密过程的区别。这是一个重要的特征，我们先在这里打个伏笔，后面我们会再讨论这个特征有什么用。

总的来说，理解 CBC 模式，我们要把握以下三个关键点：

加密和解密要使用初始化向量；

加密和解密的初始化向量是等同的；

上一次的密文分组参与下一次的加密和解密运算。

初始化向量需要保密吗？

我们讨论过初始化向量的选择问题，就是在一个对称密钥的生命周期里，初始化向量不能重复。

如果每一次运算，初始化向量都能不重复，即使是相同的明文数据，它的加密结果也是不同的。但是，如果初始化向量重复使用，相同的明文就会有相同的密文。重复使用的初始化向量，会消解密文反馈的作用，使得 CBC 模式和 ECB 模式一样脆弱。

所以，初始化向量的唯一性在加密运算的安全性中至关重要。

那你会问了，既然初始化向量这么重要，那我们需要对它进行保密吗？**初始化向量并不需要保密。**如果你对这一点有疑问，不妨换个角度想一想：每一个分组加密的初始化向量都是上一次加密运算得到的密文分组，而密文分组是可以公开的信息。

初始化向量不需要保密，这是我们要打的第二个伏笔。

异或运算会不会有问题？

我在上面的讲解中提到了异或运算，其实，它在密码算法里有广泛的应用，为什么它如此广泛？

第一个原因是**异或运算是按位运算，所以在相同的计算环境下，异或运算时间只和数据的位数相关，和数据的实际数值无关。**放在密码学算法的世界里，如果运算时间和实际数值无关，那简直再好不过了。

换句话说，如果运算时间和数据数值相关，而且别人还了解到这种相关性，他就可以通过统计学的方法，通过观察、测算运算时间，找到运算时间和数据数值之间的关联，来破解密码。

第二个原因同样是**按位运算，在相同的计算环境下，异或运算的复杂度，也就是需要的算力，只和数据的位数相关，和数据的实际数值无关。**而且，一个运算需要的算力，在计算机环境中，可以通过占用的 CPU 周期数，以及消耗的内存空间来衡量。

同理，如果占用的 CPU 或者消耗的内存和数据数值相关，别人就可以通过统计学的办法，然后观察 CPU 的占用、电力消耗或者内存的消耗，来破解密码。一般来说，这种相关性，也会影响运算时间，从而使得基于测算运算时间的攻击方式同样有效。

不光如此，如果运算的复杂度和数据数值相关，密码破解的办法可就是千奇百怪的了。记录、测算计算机的噪音、温度、辐射、反应时间等等，都有可能成为有效的攻击手段。

如果让一个一流的黑客，拿着手机进入数据中心，录一段服务器发出的声音，说不定你的服务器就被攻陷了。之所以没有说一定会被攻破，是因为近几年的密码学进展，已经发展出了具有防范能力的算法和实现。

但是，如果你的服务器使用的是十年前的技术和软件，黑客得手的概率还是有的。我们后面会讨论这些新技术和新算法。

第三个原因和异或运算的运算特点有关，也就是相同的数据归零，不同的数据归一。

> 归零律：如果两段数据完全相同，它们的异或运算结果，就是每一位都是零的数据；
>
> 恒等律：如果一段数据和一段全是零的数据进行异或运算，前一段数据中是零的位运算后还是零，是一的位运算后还是一。也就是说，和零进行异或运算，不改变原数据的数值。

正是异或运算的归零律和恒等律，CBC 模式才能成立，解密才能进行。这两个性质，还使得解密运算和加密运算具有相同的运算效率。

然而，CBC 模式的主要安全问题，也来源于异或运算的这两个性质。

如果两段数据中只有一位不同，它们的异或运算结果，就是只有这一位的数据是一，其他的数据都是零。那是不是我们就可以通过构造明文分组或者密文分组，一次改变一位数据，然后把数据交给加密运算或者解密运算来处理，通过观察加密或者解密的结果展开攻击了？

比如说，一个 128 位的密钥，它的强度能承受 2^128 次的运算，是一个强度的指数级别的量级。

如果我们一次改变一位数据的攻击方式得逞，最多需要 128 次的运算；

如果我们一次只能观测一个字节，一次一位的改变需要 2^8 = 256 次，这样的攻击方式得逞，最多需要 255 * 16 = 4080 次的运算。

这样的运算强度，和设计的理论值 2^128 相差太远了，一次有效的破解也就是分分钟的事情。

还别说，这样的攻击方式在实践中真的是可行的。这种攻击方式，把 CBC 模式变成了一个充满陷阱的模式。用的好，它就是安全的；用的不好，它就会惹来麻烦。这实在不符合密码算法要皮实、耐用的要求。

阻断一个攻击的方式之一，就是破坏攻击依赖的路径或者条件。对于上面的攻击方式，其实只要攻击者没有办法一次改变一位数据或者少量的数据，这样的攻击就可以被有效破解了。

也就是要保证攻击者在展开攻击的时候，没有办法一次改变不少于一个数据分组的数据。对于 AES 来说，数据分组大小是 128 位，攻击者需要运算 2^128 次，才可以攻击得逞。

计算量这么大，攻击者的攻击方式就无效了。那我们怎么做才能让攻击者没办法呢？

密文分组、密钥、加密算法、解密算法，这些都是固定的数据或算法，没有考量的空间。剩下的变量，就只有明文分组和初始化向量了。要想解决掉这个安全问题，该怎么控制明文分组和初始化向量？异或运算又是怎样带来麻烦的？

要想深入地了解这些问题，有点烧脑。下一次，我们集中精力来讨论、分析其中的细节和办法。

密钥少一位会有影响吗？

不知道你有没有注意到，我们上面的讨论，提到了数据的位数。

因为分组加密是按照固定的分组进行加解密运算，所以每一次的分组运算，数据的位数都是固定的。比如，AES 算法的分组大小都是 128 位。所以，我们不用担心分组运算的数据位数的变化。

在分组运算中，初始化向量、密文分组和明文分组密钥的数据位数也都是固定的。所以，我们也不需要担心它们的位数的变化。加密算法和解密算法不涉及数据位数，所以我们也不担心算法。剩下的一个变量，就是密钥了。密钥的位数会变化吗？密钥的位数变化有影响吗？

一般来说，我们也不太关心密钥的位数变化，密钥少一位似乎也不是什么无关紧要的事情。所以，出于互操作性的考虑，很多标准和协议（包括应用最广泛的 TLS 1.2 协议）需要把密钥的高位的零清除掉，然后再参与运算。

原来 128 位的密钥，可能就被清除成了 127 位或者 126 位的密钥了。2018 年发布的的 TLS 1.3 版本，不再需要清除密钥高位的零。少一位密码，当然会带来计算性能的差异，以及由此引发的计算时间偏差。可是，似乎 2020 年之前，没有人担心这件事。

直到 2020 年 9 月 8 日，当我正在写这一篇稿的时候，一个名字叫做“浣熊攻击”的安全研究成果发布了。浣熊攻击可以利用密钥高位清零造成的运算时间差，通过观察、测算运算时间，运用统计学的技术破解运算密钥。这实在是一个了不起的发现。

目前来看，这种攻击方式还比较复杂，不容易执行。但是，一旦发现攻击方法，如果业界没有采取及时的措施，攻击技术的改进速度是惊人的。“浣熊攻击”出现，再一次敲了敲大门，**警告我们要尽量避免计算时间偏差和计算算力偏差，谨慎地处理不可避免的计算时间偏差和算力偏差。**

Take Away（今日收获）

今天，通过解构 CBC 模式，我们讨论了在分组运算里，一个典型的链接模式是什么样子的，以及重申了初始化向量的唯一性要求。使用唯一的初始化向量和恰当的链接模式，可以帮助我们防范数据重放攻击。

还有，通过异或运算和密钥位数的讨论，我们要小心计算时间偏差和计算算力偏差对算法安全性的影响。一般来说，这是一个特别容易忽视的问题。不仅仅是密码学算法，对所有私密数据的运算，都要小心处理计算时间偏差和计算算力偏差。否则，都有数据泄漏的危险。

另外，为了后面更进一步地讨论 CBC 模式的安全问题，我们还在这一次埋了不少的伏笔暗线，比如，初始化向量不需要保密，异或运算的特点等。

通过今天的讨论，我们要：

理解 CBC 模式的三个关键点。

了解计算时间偏差和算力偏差对算法安全性的影响。

思考题

今天的思考题，是一个动手题，也是一个简单的密码算法漏洞扫描的思路。

通过上面的讨论，我们知道密钥的位数很关键，一位也不能多，一位也不能少。找一个你熟悉的密码算法库，这个算法库可以是 Java Script 的，也可以是 Java 的，也可以是你熟悉的项目使用的算法库。

然后，调用它的对称密钥生成接口，试着产生很多 128 位的密钥。你看一看，有没有可能返回 127 位或者 129 位的密钥。 如果你找到了不是 128 位的密钥，这个算法库就有潜在的安全问题。

如果你恰好学过统计学，还能使用统计学的软件，你可以试着多做一道思考题。我假设你知道 RSA 非对称密钥算法，也了解它的调用接口。同样的，找一个你熟悉的 RSA 算法实现，生成一对 1024 位 RSA 非对称密钥，用公钥加密大量的 1024 位的不同数据，然后用私钥解密这些数据，统计解密消耗的时间。

如果解密时间不是大致相同的，这个 RSA 实现就是有问题的。破解起来可能就是分分钟的事情。这是一个让我们了解计算时间偏差和计算算力偏差的练手题，也是个常见的分析 RSA 实现漏洞的攻击办法。

欢迎在留言区留言，记录、讨论你的发现。

好的，今天就这样，我们下次再聊。

提建议

上一篇 09 | 为什么ECB模式不安全?

下一篇 11 | 怎么利用解密端攻击?

精选留言 (10)

写留言

maver
2020-12-22

“如果我们一次改变一位数据的攻击方式得逞，最多需要 128 次的运算；”

老师，请问这种一次改变一位数据的攻击方式，有实际可行的攻击手段吗？还是说只是理论上存在可能性?

展开

天天有吃的
2020-12-18

问题5：初始化向量不需要保密，是不是可以这么理解，他会随着第一个数组分组最为加密信息传下去，加密方式是保密的，初始化向量也会变成加密信息的一部分?

作者回复: 初始化向量不需要保密的意思，就是初始化向量可以公开，可以让攻击者知道。

天天有吃的
2020-12-18

问题4：如果我们一次只能观测一个字节，一次一位的改变需要 2^8 = 256 次，这样的攻击方式得逞，最多需要 255 * 16 = 4080 次的运算;

之前128次应该是128位每个位数设置为1试试，最多也就128次；但是这句有点不理解，一次改变一个字节byte是啥意思，256这个数值和4080这两个数字代表的是什么含义?

展开

作者回复: 一次改变一个字节的意思就是攻击的时候，需要一个字节一个字节的尝试。256表示，一个字节有8位，如果每次改变这个字节的一位，需要256次，才能把这个字节所有的可能数值列

举完。4080表示攻击一个数据分组需要的计算量，一个字节需要256次，由于尝试了255种可能性后，最后一种可能性就不需要再尝试了，所以不是256，是最多需要255次尝试。一个数据分组16个字节，255乘以16，就是需要的计算次数。

1

天天有吃的
2020-12-18

问题3：有点没法想象...噪音跟温度还能用来破解密码，硬件层面都能破解软件编写的程序吗，纯好奇这个场景是怎么样的？

展开

作者回复: 软件使用过硬件运转的，比如如果计算复杂，CPU就会加快，温度会升高，风扇会加速，噪音也会加大，计算结果会延迟，这些都是外部可以观察到的结果。感兴趣细节的话，可以看看这篇报道，https://threatpost.com/side-channel-poc-attack-targets-encryption-software-glitch/136703/，以及https://www.usenix.org/system/files/conference/usenixsecurity18/sec18-alam.pdf，还有这个https://www.cs.tau.ac.il/~tromer/papers/radioexp-20150227.pdf

天天有吃的
2020-12-18

问题2：非CBC模式（普通情况），加解密使用的初始向量也是要相同的吧，为什么算CBC的特点？

作者回复: 或者换个说法，CBC模式要遵守这个特点？

天天有吃的
2020-12-18

小白打卡中...
问题1：异或运算的结果会参与加密函数的运算，这个结果是担任怎么样的角色呢？输入了此结果，明文还需要直接输入加密函数吗？

作者回复: 一般来说，加密函数只接收一种数据输入，如果明文参与了数据的异或运算，当然就不能直接输入加密函数了。


可怜大灰狼
2020-12-17

Timing Attack本地写了代码尝试，果然很神奇。java里的String的equals方法是按照字符一个个顺序匹配的，直到碰到不一样会返回。java.lang.String#equals碰到大量分批次有目的破解时，找到每轮中耗时最少出现次数最多的那个值。这样子依次就破解了每个字符。后来改用java.security.MessageDigest#isEqual，就破解不出来了。

展开

作者回复: 赞！计算时间偏差和算力偏差，是一个很重要的概念。当我们比较含有秘密的信息的时候，不能使用String.equals()这样方法。如果你发现有人比较密钥、口令，使用了String.equals(), 就可以报个漏洞了。密码学是不是也很简单？！


1


彩色的沙漠
2020-12-16

如果两段数据中只有一位不同，它们的异或运算结果，就是只有这一位的数据是一，其他的数据都是零。那是不是我们就可以通过构造明文分组或者密文分组，一次改变一位数据，然后把数据交给加密运算或者解密运算来处理，通过观察加密或者解密的结果展开攻击了？
老师，这里面的一次改变一位然后把数据交给加密运算或者解密运算来处理，我们没有...

展开

作者回复: 交给持有密钥的来运算，攻击者观察结果。后面我们还会讲具体的攻击案例。


1


Litt1eQ
2020-12-16

这让我想到了一个攻击方式 timing attack，如果采用不安全的字符串比较方式 可以通过执行比较的时间 进而推断出待比较的内容 比如密码（口令）等。

展开

作者回复: 嗯，是的。只要是涉及到秘密的运算，都要考虑计算的时间偏差和算力偏差。


孜孜

2020-12-16

私钥解密是在服务端，想知道时间差和算力偏差很难吧。。。再加上复杂网络延迟影响。。。

作者回复: 对于了解统计学的攻击者来说，这是很容易的事情。

1