中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

Module I. Fundamentals of Information Security

Chapter 2
Cryptographic Techniques

Web Security: Theory & Applications

School of Data & Computer Science, Sun Yat-sen University

Outline

- **2.1 Cryptology Introduction**
  - Introduction
  - History
  - Concepts & Items
- **2.2 Symmetric Key Cryptographic Algorithms**
  - Introduction
  - Types & Modes
  - Data Encryption Standard (DES)
  - Advanced Encryption Standard (AES)

Outline

- **2.3 Mathematical Foundations of Public-Key Cryptography**
  - Prime factorizations of integers
  - The *Euclidean* Algorithm
  - *Bézout*'s Theorem
  - Linear Congruence
  - The Extended_*Euclidean* Algorithm
  - The Chinese Remainder Theorem
  - *Euler*'s φ function
  - *Euler*'s Theorem
  - *Fermat*'s Little Theorem

Outline

- 2.4 Asymmetric Key Cryptographic Algorithms
  - Introduction
  - The RSA Algorithm
  - Digital Signatures
- **2.5 MAC and Hashing Algorithms**
  - Message Authentication Code
  - Hash Function
  - Message-Digest Algorithm
- 2.6 Typical Applications
  - MD5 and Passwords
  - AES and WiFi Protected Access
  - RSA and e-Business

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.1 Introduction

- 消息认证的必要性
  - 网络通信针对消息内容的攻击方法
    - ✧ 伪造消息
    - ✧ 窜改消息内容
    - ✧ 改变消息顺序
    - ✧ 消息重放或者延迟
  - 消息认证
    - ✧ 如果接收方计算的认证信息与收到的匹配，则
      - ◌ 接收者可以确信消息未被改变
      - ◌ 接收者可以确信消息来自所声称的发送者
      - ◌ 如果消息中含有序列号，则可以保证正确的消息顺序

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.1 Introduction

- 消息认证的三种方式
  - Message Encryption
    - ✧ 消息加密方法。对整个消息进行加密，以密文作为消息的认证标识。可以采用现有的密码体制实现。
  - Message Authentication Code
    - ✧ 消息认证码。使用用一个公开函数，加上一个密钥，为消息产生一个固定长度的小数据块 (即为消息认证码 MAC，或称密码校验和 Cryptographic Checksum) 作为消息的认证标识，并附加到消息中一起传输。
  - Hash Function
    - ✧ 哈希方法使用一个公开函数，将任意长度的消息映射到一个固定长度的散列值，作为消息认证标识，并附加到消息中一起传输。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

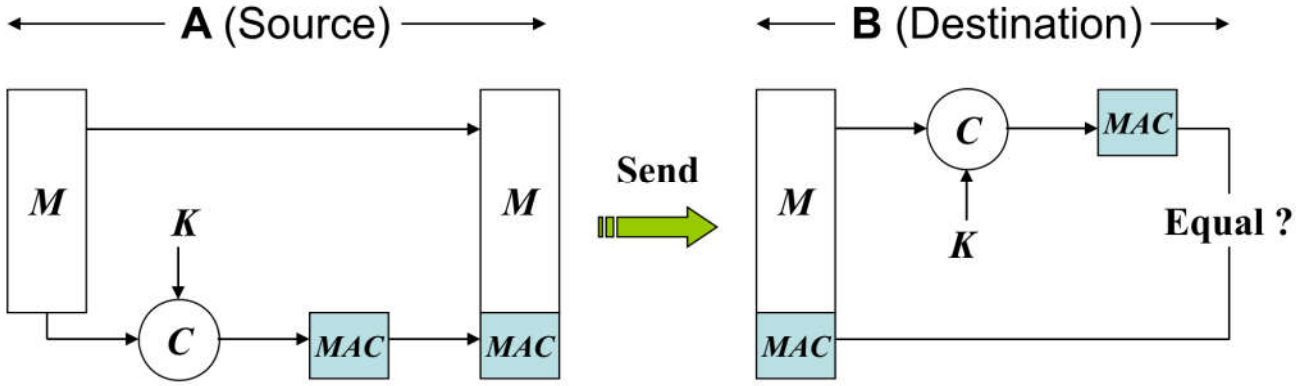
2.5.2 MAC

- 概述
  - 基本结构
    - ✧ MAC 方法使用一个双方共享的秘密密钥，为目标消息生成一个固定长度的小数据块，并加入到消息中。该数据块称为消息认证码 MAC，或密码校验和 (Cryptographic Checksum)。
    - ✧ MAC 方法需要对消息数据的全体进行加密运算，形成速度慢。
    - ✧ MAC 函数类似于加密函数，但不需要可逆性，因此受到攻击的弱点在数学上比加密算法要少。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.2 MAC

- 概述
  - MAC 方法只用于消息认证
    - ✧ 用户 *A* 和用户 *B* 共享密钥 *K*。*C* 为 MAC 函数。对于消息 *M*，$MAC = C_K(M)$。
    - ✧ 信道传输 $M \| MAC$，模型只提供消息认证，没有提供机密性。



2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.2 MAC

- 概述
  - MAC 方法用于与明文相关的消息认证和保密性
    - ✧ 用户 *A* 和用户 *B* 共享密钥 *K* 和 K_2。 *E* 和 *D* 为加解密函数。
    - ✧ 模型提供了与明文相关的消息认证。
      - ◌ $MAC = C_K(M)$，信道传输 $E(K_2, M \| MAC)$。
      - ◌ 接收端先解密再认证。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.2 MAC

- 概述
  - MAC 方法用于与密文相关的消息认证和保密性
    - ✧ 用户 *A* 和用户 *B* 共享密钥 *K* 和 K_2。 *E* 和 *D* 为加解密函数。
    - ✧ 与密文相关的消息认证：
      - ◌ $M' = E(K_2, M\|MAC)$
      - ◌ $MAC = C_K(M')$，信道传输 $M' \| MAC$ 。
      - ◌ 接收端先认证再解密。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.2 MAC

- 概述
  - MAC 不等于数字签名
    - ✧ 通讯双方共享同一个私有密钥
  - MAC 结构的重要性
    - ✧ 密钥足够长+加密算法足够好 ≠ 安全。
  - 攻击案例
    - ✧ $M = (X_1, X_2, \ldots, X_t)$
    - ✧ 对 M 产生校验和 $\Delta M = X_1 \oplus X_2 \oplus \ldots \oplus X_t$
    - ✧ $MAC = E_K(\Delta M)$
    - ✧ 攻击者选择 $M' = (Y_1, Y_2, \ldots, Y_{t-1}, Y_t)$，使得 Y_t 满足

      $$Y_t = Y_1 \oplus Y_2 \oplus \ldots \oplus Y_{t-1} \oplus \Delta M$$
    - ✧ 于是 $\Delta M' = \Delta M \Rightarrow E_K(\Delta M) = E_K(\Delta M') \Rightarrow C_K(M') = C_K(M)$
    - ✧ 尽管攻击者不知道 K，仍然可以伪造消息 M'。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.2 MAC

- MAC 算法
  - 条件
    - ✧ 攻击者知道 MAC 函数但不知道密钥 K。
  - 要求
    - ✧ 已知消息 M 和 $C_K(M)$，要想构造 M' 使得 $C_K(M)=C_K(M')$ 在计算上不可行 (计算上无碰撞)。
    - ✧ $C_K(M)$ 均匀分布：随机选择 M 和 M'

$$\Pr[C_K(M) = C_K(M')] = 2^{-|MAC|}$$

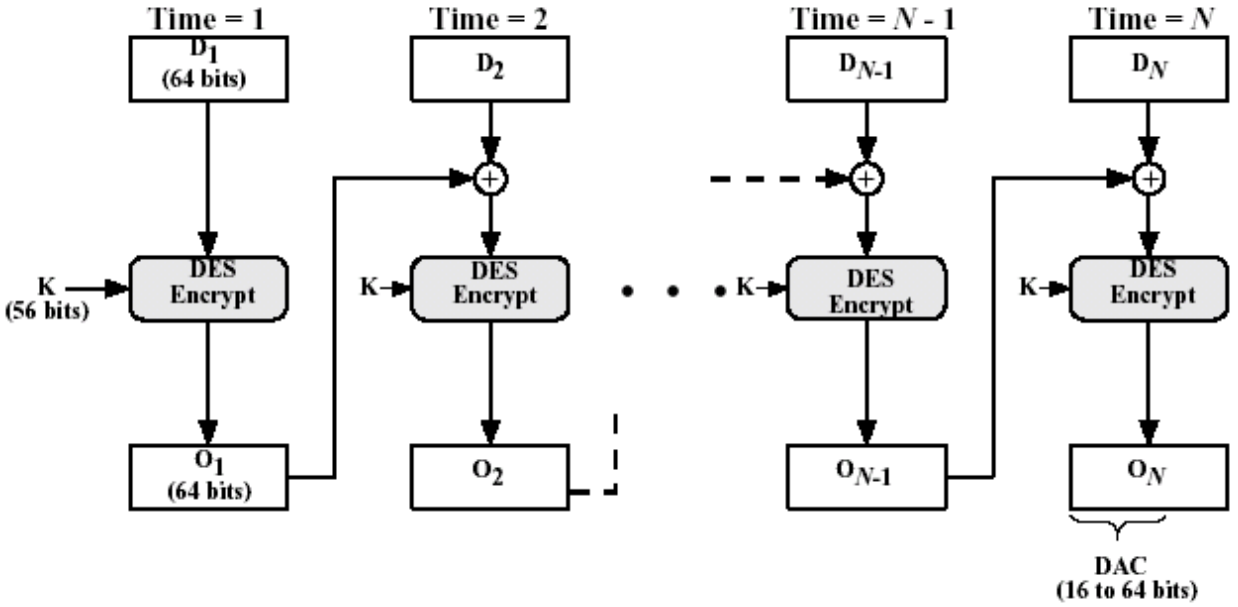
    - ✧ 如果 f 是 M 的一个变换 (例如对某些位取反)，那么

$$\Pr[C_K(M) = C_K(f(M))] = 2^{-|MAC|}$$

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.2 MAC

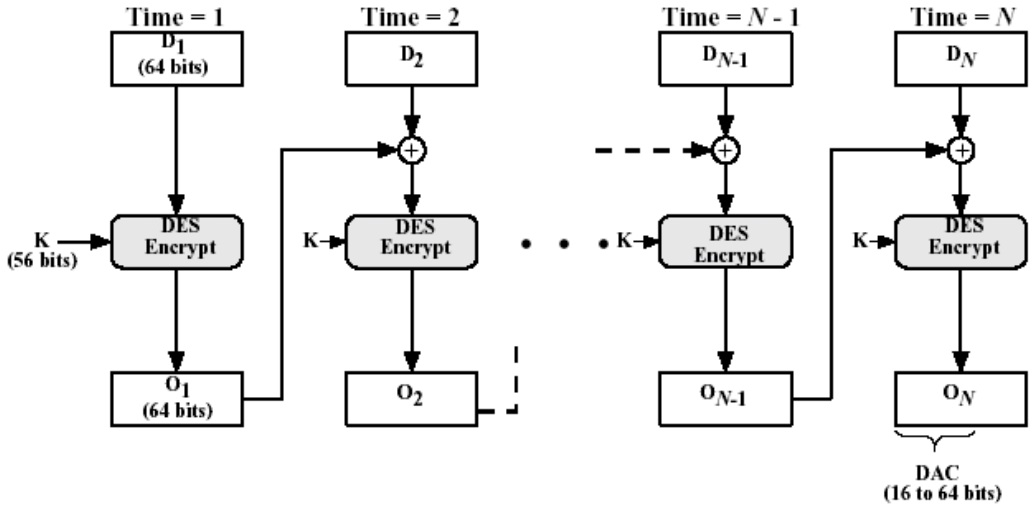
- MAC 算法
  - ANSI x9.17 标准 (FIPS PUB 113)
    - ✧ CBC 模式结构，初始向量为0
    - ✧ 基于 DES 加密算法，也适用于其他加密算法



2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.2 MAC

- MAC 算法
  - ANSI x9.17 标准 (FIPS PUB 113)
    - ✧ 算法：
      - $M = (X_1, X_2, \ldots, X_t)$
      - $\Delta M_1 = E_K(X_1)$
      - $\Delta M_{j+1} = E_K(X_{j+1} \oplus \Delta M_j)$, $1 \le j < t$
      - $MAC = \Delta M_t$



2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.3 Hash

- 概述
  - 散列 (Hashing) 通过某种特定的函数 (Hash 函数) 将要检索的项与用来检索的索引 (Hash Value 散列值) 关联起来，生成一种便于搜索的数据结构 (Hash List 散列表)。
  - 在安全数据库设计中，散列算法也被用来加密保存在数据库中的密码字串。数据库中保管的是密码的散列值或密码指纹，而非密码本身，密码验证通过密码指纹验证实现。由于散列算法所计算出来的散列值具有不可逆 (无法逆向倒推原数值) 的性质，在数据库受到攻击的情况下，仍然能够有效地保护密码。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.3 Hash

- 概述
  - 散列方法应用在信息安全领域，将源数据经过散列算法计算出数据指纹 (Data Fingerprint)，用于识别经过传播途径得到的数据是否有误 (通信误码或被窜改)，以保证数据的来源真实性。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.3 Hash

- Hash 函数
  - Hash function : $h = H(M)$
    - ✧ M：变长消息， $H(M)$：定长的散列值
    - ✧ 散列函数 H 是一个公开的函数，将任意长度的消息 M 变换为固定长度的散列码 h。如 MD5 输出128位，SHA-1输出160位。
    - ✧ 散列函数是一种算法，算法的输出内容称为散列码或者消息摘要。消息摘要与原始消息唯一对应，不同的原始消息必须对应于不同的消息摘要，因此散列函数能用来检测消息的完整性，验证消息从建立开始到收到为止没有被改变或破坏。
    - ✧ 散列函数又称为：哈希 (Hash) 函数、数字指纹 (Digital Fingerprint)、压缩 (Compression) 函数、数据认证码 (Data Authentication Code) 等。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.3 Hash

- Hash 函数
  - 对 Hash 函数 *H* 的要求
    - ***H***(*x*) can be applied to any size data
    - ***H***(*x*) produces a fixed-length output.
    - ***H***(*x*) is relatively easy to compute for any given *x*
    - One-way property
      - computationally infeasible to find *x* such that ***H***(*x*) = *h*
    - Weak collision resistance
      - computationally infeasible to find $y \neq x$ such tha ***H***(*y*) = ***H***(*x*)
    - Strong collision resistance
      - computationally infeasible to find any pair (*x*, *y*) such that ***H***(*x*) = ***H***(*y*)

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.3 Hash

- Hash 函数
  - 对 Hash 函数 *H* 的要求
    - ✧ *H* 能用于任意大小的分组
    - ✧ *H* 能产生定长的输出
    - ✧ 对任何给定的 *x*， *H*(*x*) 要相对易于计算，使得硬件和软件实现成为实际可能
    - ✧ 对任何给定的码 *h* ，寻找 *x* 使得 *H*(*x*)＝ *h* 在计算上是不可行的，即单向性 (one-way)
    - ✧ 对任意给定的分组 *x*，寻找不等于 *x* 的 *y*，使得 *H*(*x*)=*H*(*y*) 在计算上是不可行的， 即弱抗冲突性 (Weak Collision-free)
    - ✧ 找到任何满足 *H*(*x*)=*H*(*y*) 的一对数 (x, y)， 在计算上是不可行的，即强抗冲突性 (Strong Collision-free)

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.3 Hash

- 对散列方法的攻击
  - 生日攻击理论
    - ✧ 若 $k \geq 1.18 \times 2^{m/2} \approx 2^{m/2}$，则 k 个在 $[1, 2^m]$ 的随机数中有两个数相等的概率不低于0.5；若 $k \geq 0.83 \times n^{1/2}$，两个在 $[1, n]$ 的 k 个随机数集合有交集的概率不小于0.5。
    - ✧ 因此，当 Hash 算法选用 N 位的 Hash 值时，两组消息（选择 $k=N/2$）中有一对消息产生相同 Hash 值的概率超过0.5。
      - ◌ MD5 算法输出摘要为128位，要找出至少2个消息的 Hash 值相同的概率大于0.5，则利用生日攻击需要进行的计算量 k 或时间复杂度为 2^{64}。类似地， SHA-1 算法输出摘要为160位，攻击需要进行的计算量为 2^{80}。
  - 对策
    - ✧ 采用足够长的 Hash 值：64 -> 128 -> 160 -> 256

2.5 MAC and Hashing Algorithms

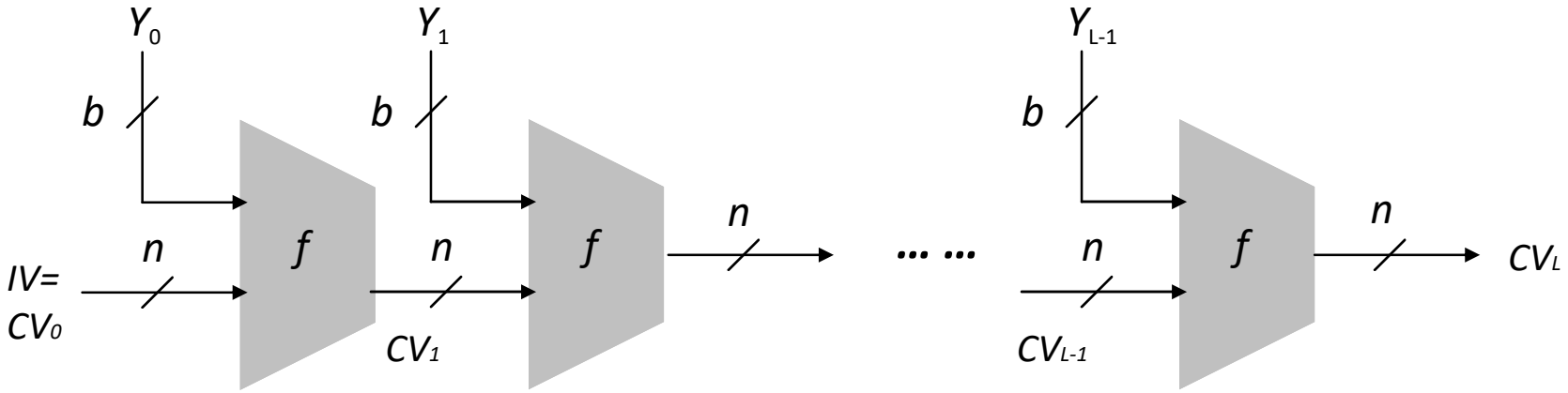
2.5.3 Hash

- Hash 函数通用模型
  - 由 *Ralph Merkle* 于1989年提出，得到广泛采用。
    - ✧ *R. Merkle* co-invented the *Merkle-Hellman* knapsack cryptosystem, invented cryptographic hashing, and invented *Merkle* trees.
  - 模型结构
    - ✧ 把原始消息 M 分成一些固定长度的块 Y_i
    - ✧ 最后一块 padding 并使其包含消息 M 的长度
    - ✧ 设定初始值 CV_0
    - ✧ 采用压缩函数 f，$CV_i = f(CV_{i-1}, Y_{i-1})$
    - ✧ 最后一个 CV_i 为 hash 值

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.3 Hash

- Hash 函数通用模型



- ✧ *IV* - initial value 初始值
- ✧ *CV* - chaining value 链接值
- ✧ Y_i - *i*th input block (第 *i* 个输入数据块)
- ✧ *f* - compression algorithm (压缩算法）
- ✧ *n* - length of hash code (散列码的长度, 128/160/256/512)
- ✧ *b* - length of input block (输入块的长度, 512/1024-SHA512)

2.5 MAC and Hashing Algorithms

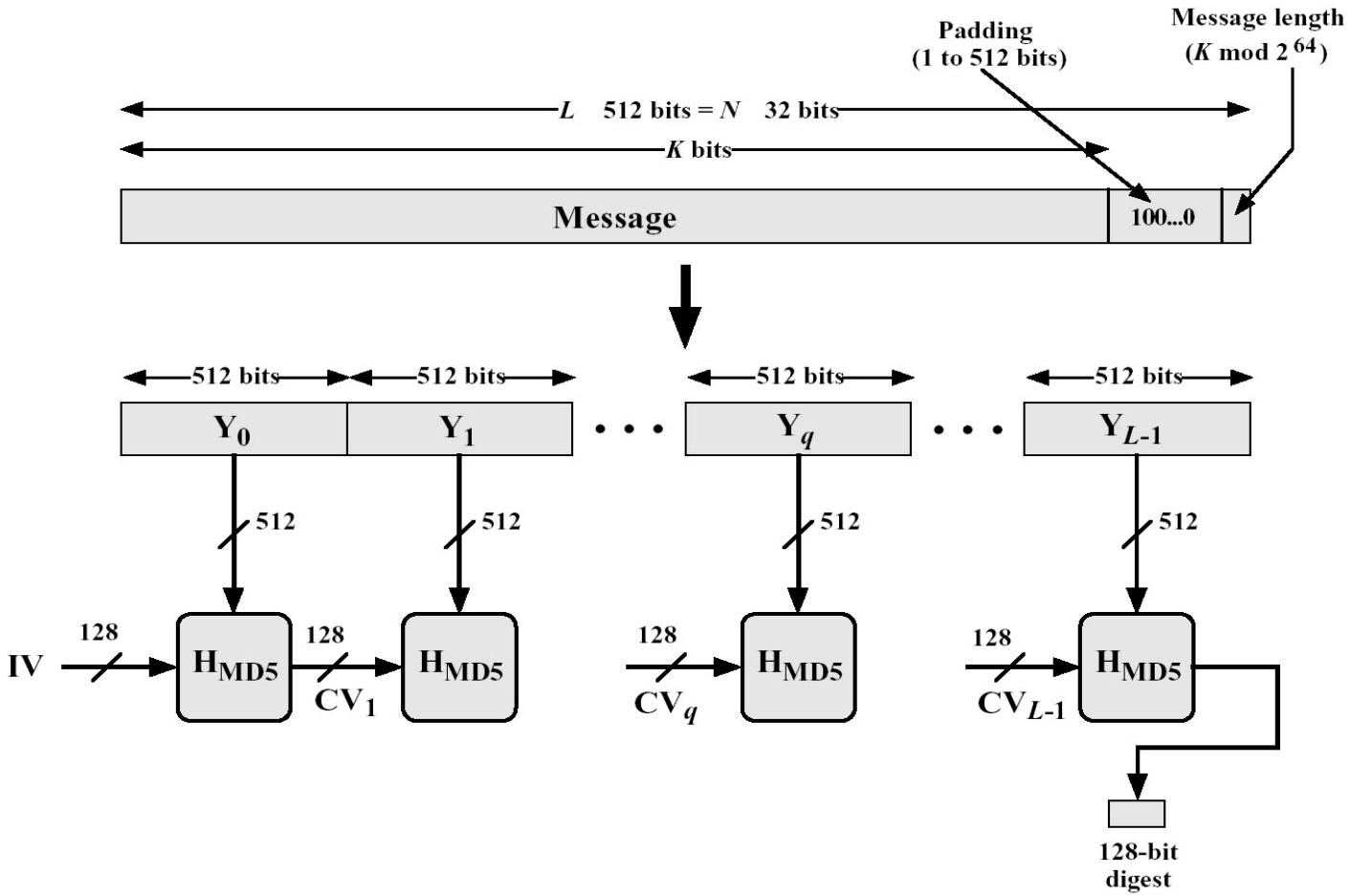
2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- 概述
  - MD5 即 Message-Digest Algorithm 5 (信息-摘要算法 5)
    - MD4 (1990)、MD5(1992, RFC 1321) 作者 *Ron Rivest*，是广泛使用的散列算法，经常用于确保信息传输的完整性和一致性。
    - MD5 使用 little-endian，输入任意不定长度信息，以512位长进行分组，生成四个32位数据，最后联合起来输出固定128位长的信息摘要。
    - MD5 算法的基本过程为：求余、取余、调整长度、与链接变量进行循环运算、得出结果。
    - MD5 不是足够安全的
      - *Hans Dobbertin* 在1996年找到了两个不同的 512-bit 块,它们在 MD5 计算下产生相同的 hash 值。
      - 至今还没有真正找到两个不同的消息，它们的 MD5 的 hash 值相等。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 的基本流程



2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - 填充 padding
    - ✧ 在原始消息数据尾部填充标识 100…0，填充后的消息位数 $L \equiv 448 \pmod{512}$。至少要填充1个位，所以标识长度 1~512位。
    - ✧ 再向上述填充好的消息尾部附加原始消息的位数的低64位，最后得到一个长度 L 是512位整数倍的消息。
  - 分块
    - ✧ 把填充后的消息结果分割为 L 个512位的分组：$Y_0, Y_1, \ldots, Y_{L-1}$。
    - ✧ 结果也表示成 N 个32位长的字 $M_0, M_1, \ldots, M_{N-1}$，$N = L \times 16$。
  - 初始化
    - ✧ 初始化一个128位的 MD 缓冲区，记为 CV_q，也表示为4个32位寄存器 (A, B, C, D)；$CV_0 = IV$。迭代在 MD 缓冲区进行，最后一步的128位输出即为算法结果。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - 初始化
    - ✧ 寄存器 (*A*, *B*, *C*, *D*) 置16进制初值作为初始向量 *IV*，并采用小端存储 (little-endian) 的存储结构：
      - *A* = 0x67452301
      - *B* = 0xEFCDAB89
      - *C* = 0x98BADCFE
      - *D* = 0x10325476

Word A	01	23	45	67
Word B	89	AB	CD	EF
Word C	FE	DC	BA	98
Word D	76	54	32	10

      - Little-Endian 将低位字节排放在内存的低地址端，高位字节排放在内存的高地址端。相反 Big-Endian 将高位字节排放在内存的低地址端，低位字节排放在内存的高地址端。存储结构与 CPU 体系结构和语言编译器有关。PowerPC 系列采用 big endian 方式存储数据，而 Intel x86系列则采用 little endian 方式存储。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

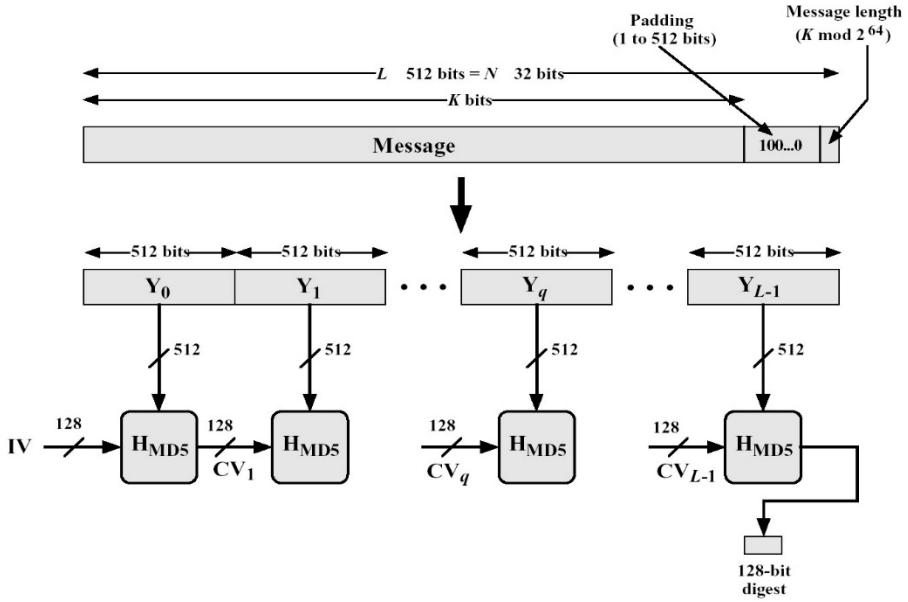
2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - 总控流程
    - ✧ 以512位消息分组为单位，每一分组 Y_q (q = 0, 1, …, L-1) 经过4个循环的压缩算法，表示为：

$$CV_0 = IV$$

$$CV_i = H_{MD5}(CV_{i-1}, Y_i)$$

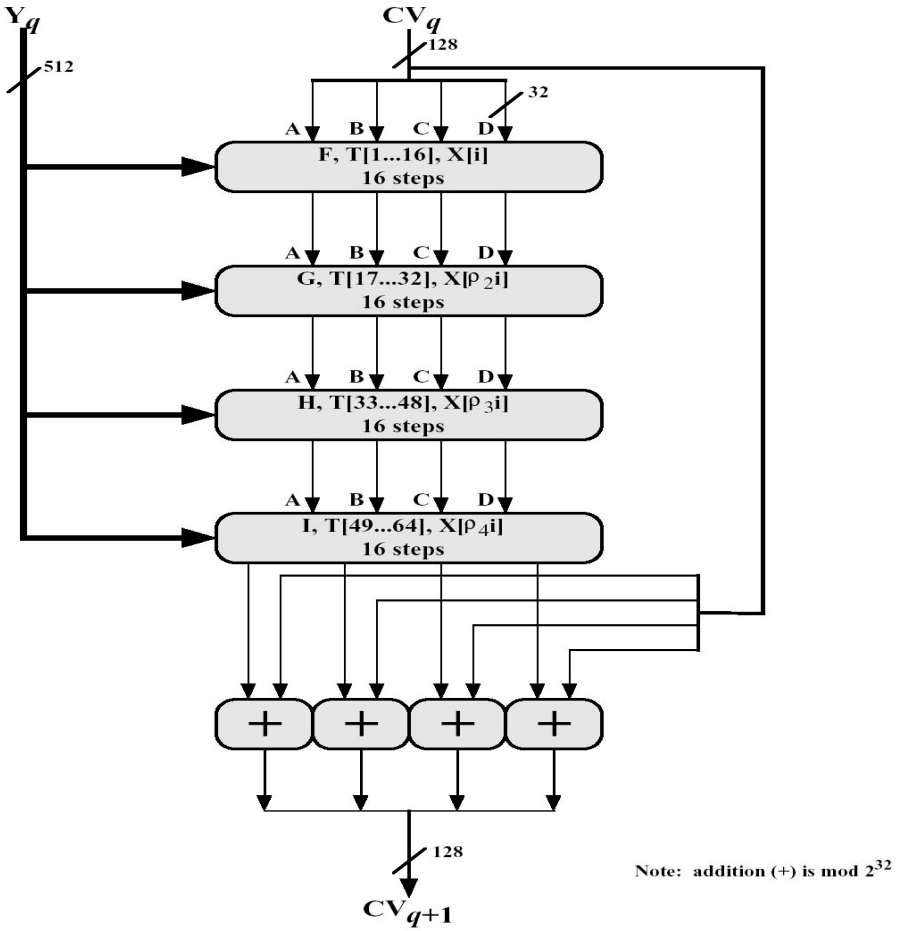
    - ✧ 输出结果：MD = CV_L .



2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - MD5 压缩函数 H_{MD5}
    - ✧ H_{MD5} 从 *CV* 输入128位，从消息分组输入512位，完成4轮循环后，输出128位，用于下一轮输入的 *CV* 值。
    - ✧ 每轮循环分别固定不同的生成函数 *F, G, H, I*，结合指定的 *T* 表元素 *T*[] 和消息分组的不同部分 *X*[] 做16 次运算，生成下一轮循环的输入。
    - ✧ 总共有64次迭代运算。



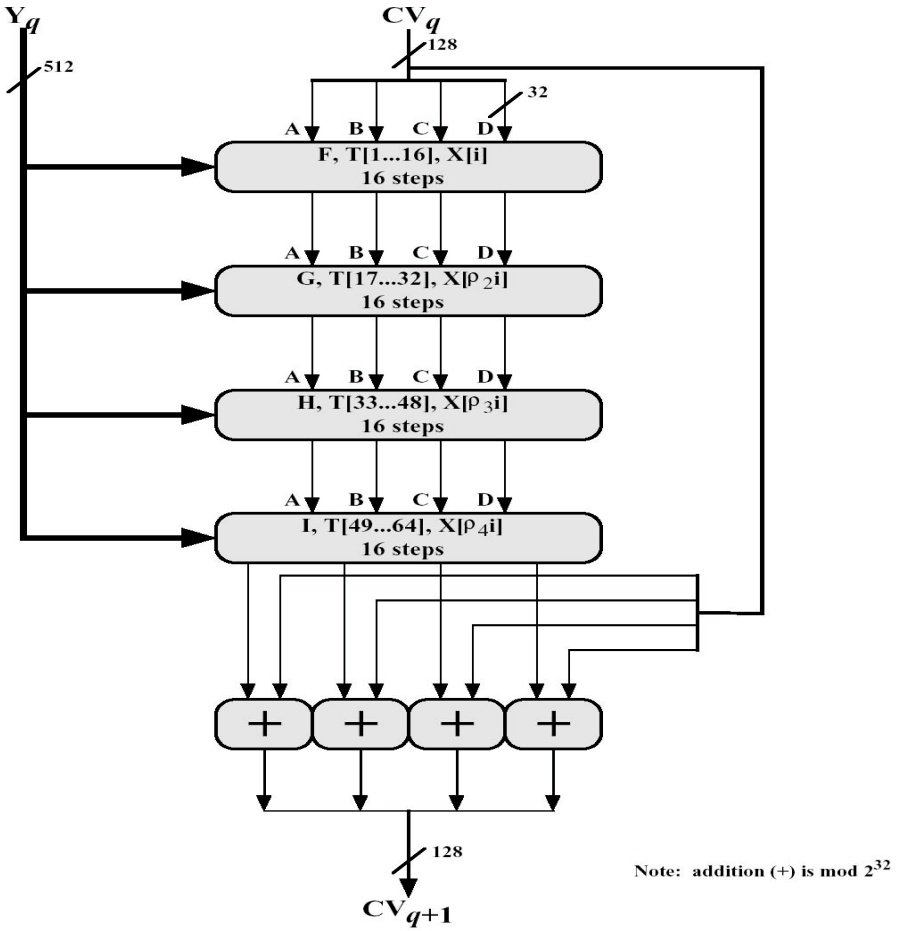
MD5 第 *q* 分组的4轮循环逻辑 (压缩函数)

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - MD5 压缩函数 H_{MD5}
    - ✧ 4轮循环中使用的生成函数 (轮函数) g 是一个32位非线性逻辑函数，在相应各轮的定义如下：

轮次	Function g	$g(b, c, d)$
1	$F(b,c,d)$	$(b\wedge c)\vee(\neg b\wedge d)$
2	$G(b,c,d)$	$(b\wedge d)\vee(c\wedge\neg d)$
3	$H(b,c,d)$	$b\oplus c\oplus d$
4	$I(b,c,d)$	$c\oplus(b\vee\neg d)$



MD5 第 q 分组的4轮循环逻辑 (压缩函数)

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - MD5 压缩函数 H_{MD5}
    - ✧ 每轮循环中的一步运算逻辑

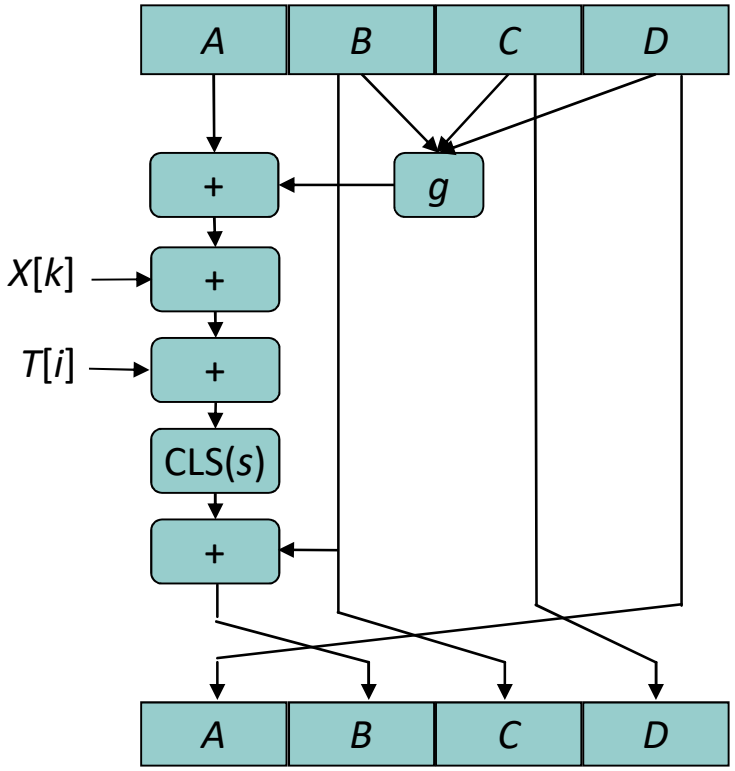
$$a \leftarrow b + ((a + g(b,c,d) + X[k] + T[i]) <<< s)$$

    - ✧ 说明：
      - ◌ a, b, c, d : MD 缓冲区 (A, B, C, D) 的当前值。
      - ◌ g : 轮函数 $(F, G, H, I$ 中的一个)。
      - ◌ $<<<s$: 将32位输入循环左移 (CLS) s 位。
      - ◌ $X[k]$: 当前处理消息分组的第 k 个32位字，即 $M_{q\times16+k}$。
      - ◌ $T[i]$: T 表的第 i 个元素，32位字。
      - ◌ + : 模 2^{32} 加法。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - MD5 压缩函数 H_{MD5}
    - ✧ 每轮循环中的一步运算逻辑



MD5 每轮迭代中的一步运算逻辑

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - MD5 压缩函数 H_{MD5}
    - ✧ 各轮迭代中 $X[k]$ 之间的关系：
      - ◌ 第1轮迭代：$X[j]$, j = 1..16.
        顺序使用 X[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10,11,12,13,14,15]
      - ◌ 第2轮迭代：$X[\rho_2(j)]$, $\rho_2(j) = (1 + 5j) \bmod 16$, j = 1..16.
        顺序使用 X[1, 6,11, 0, 5,10,15, 4, 9,14, 3, 8,13, 2, 7,12]
      - ◌ 第3轮迭代：$X[\rho_3(j)]$, $\rho_3(j) = (5 + 3j) \bmod 16$, j = 1..16.
        顺序使用 X[5, 8,11,14, 1, 4, 7,10,13, 0, 3, 6, 9,12,15, 2]
      - ◌ 第4轮迭代：$X[\rho_4(j)]$, $\rho_4(j) = 7j \bmod 16$, j = 1..16.
        顺序使用 X[0, 7,14, 5,12, 3,10, 1, 8,15, 6,13, 4,11, 2, 9]

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - MD5 压缩函数 H_{MD5}
    - ✧ *T* 表的生成
      - ◌ $T[i] = int(2^{32} \times |sin(i)|)$
        - *int* 取整函数，*sin* 正弦函数，以 *i* 作为弧度输入。
    - ✧ 各次迭代运算采用的 *T* 值：

T[1.. 4] = { 0xd76aa478, 0xe8c7b756, 0x242070db, 0xc1bdceee }

T[5.. 8] = { 0xf57c0faf, 0x4787c62a, 0xa8304613, 0xfd469501 }

T[9..12] = { 0x698098d8, 0x8b44f7af, 0xffff5bb1, 0x895cd7be }

T[13..16] = { 0x6b901122, 0xfd987193, 0xa679438e, 0x49b40821 }

T[17..20] = { 0xf61e2562, 0xc040b340, 0x265e5a51, 0xe9b6c7aa }

T[21..24] = { 0xd62f105d, 0x02441453, 0xd8a1e681, 0xe7d3fbc8 }

T[25..28] = { 0x21e1cde6, 0xc33707d6, 0xf4d50d87, 0x455a14ed }

T[29..32] = { 0xa9e3e905, 0xfcefa3f8, 0x676f02d9, 0x8d2a4c8a }

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - MD5 压缩函数 H_{MD5}
    - ✧ 各次迭代运算采用的 *T* 值：

T[33..36] = { 0xfffa3942, 0x8771f681, 0x6d9d6122, 0xfde5380c }

T[37..40] = { 0xa4beea44, 0x4bdecfa9, 0xf6bb4b60, 0xbebfbc70 }

T[41..44] = { 0x289b7ec6, 0xeaa127fa, 0xd4ef3085, 0x04881d05 }

T[45..48] = { 0xd9d4d039, 0xe6db99e5, 0x1fa27cf8, 0xc4ac5665 }

T[49..52] = { 0xf4292244, 0x432aff97, 0xab9423a7, 0xfc93a039 }

T[53..56] = { 0x655b59c3, 0x8f0ccc92, 0xffeff47d, 0x85845dd1 }

T[57..60] = { 0x6fa87e4f, 0xfe2ce6e0, 0xa3014314, 0x4e0811a1 }

T[61..64] = { 0xf7537e82, 0xbd3af235, 0x2ad7d2bb, 0xeb86d391 }

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - MD5 压缩函数 H_{MD5}
    - ✧ 各次迭代运算采用的左循环移位的 *s* 值：

s[1..16] = { 7, 12, 17, 22, 7, 12, 17, 22, 7, 12, 17, 22, 7, 12, 17, 22 }

s[17..32] = { 5, 9, 14, 20, 5, 9, 14, 20, 5, 9, 14, 20, 5, 9, 14, 20 }

s[33..48] = { 4, 11, 16, 23, 4, 11, 16, 23, 4, 11, 16, 23, 4, 11, 16, 23 }

s[49..64] = { 6, 10, 15, 21, 6, 10, 15, 21, 6, 10, 15, 21, 6, 10, 15, 21 }

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - MD5 压缩函数 H_{MD5}
    - ✧ 每次循环使用相同的迭代逻辑和 4×16 次运算的预设参数表。
    - ✧ Ref. to : RFC 1321

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - 关于 Endianess 的问题
    - ✧ Endianess 涉及多字节数据类型与内存存储结构的定义，与 CPU 架构和语言编译器有关。比如 x86 是 little-endian，PowerPC 则是 big-endian；C 编译器多采用 little-endian，Java 则是 big-endian；一些 ARM 架构可以支持 little-big 之间的转换。
    - ✧ Endianess 问题可能导致混合数据类型数据运算过程中内存数值转换的错误。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- MD5 算法逻辑
  - 关于 Endianess 的问题
    - ✧ MD5 算法中从原始消息数据中顺序取4个字节，按 little-endian 转移到1个32位无符号整型变量，每16个32位无符号整型变量再顺序组成1个消息分组进行 H_{MD5} 压缩，同时累计原始消息数据的位数，保存在64位无符号整型变量 *count* 中。直到余下的原始消息数据不够组成1个消息分组时，获得 *count* 的最终值。
    - ✧ 按要求填充 100...0，留下末尾64位，由 *count* 按 little-endian 转移成8个字节顺序填充 (注意到按 RFC1321，*count* 在转移字节时被看成是2个32位的字，没有交换高低32位的位置)。余下的原始消息数据加上填充数据构成1-2个消息分组，继续对其进行 H_{MD5} 压缩。
    - ✧ 算法结束时，对32位寄存器 *A* 的值按照 little-endian 转换成4个字节，顺序输出其16进制数符号；同样分别处理寄存器 *B, C, D*，输出 MD5 值的其他24个符号。

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- 几种散列函数的比较

	MD5	SHA-1	RIPEMD-160
摘要长度	128	160	160
分组长度	512	512	512
步数	64	80	160
最大消息长度	无限	$2^{64}-1$	$2^{64}-1$
基本逻辑函数	4	4	5
加法常数	64	4	9
Endianess	Little-endian	Big-endian	Little-endian
性能	32.4Mbps	14.1Mbps	13.6Mbps

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- SHA
  - SHA 的产生
    - 1992 NIST 制定 SHA (128位)
    - 1993 SHA 成为标准
    - 1994 修改产生 SHA-1 (160位)
    - 1995 SHA-1 成为新标准
      - SHA-1 要求输入消息长度 < 2^{64}
      - SHA-1 摘要长度为160位

2.5 MAC and Hashing Algorithms

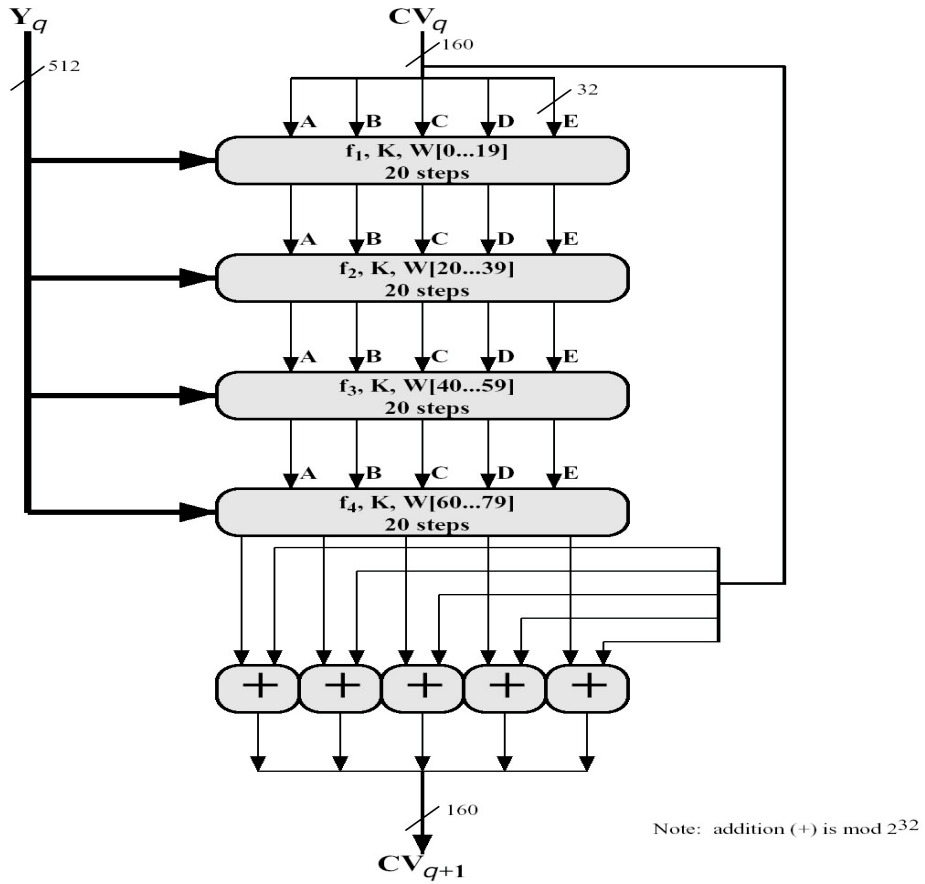
2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- SHA
  - SHA-1 的算法结构与 MD5 类似
    - ✧ 第一步：padding
      - ◌ 与 MD5 相同，补齐到 512 的倍数
    - ✧ 第二步
      - ◌ 分块长度512位
    - ✧ 第三步
      - ◌ 初始化 MD buffer 为160位常量 (5个32位长度的字)
      - ◌ 进入循环，160位输入+512位输入 ⇒ 160位输出
    - ✧ 第四步
      - ◌ 最后的输出为 SHA-1 的结果

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- SHA
  - SHA-1 的算法结构

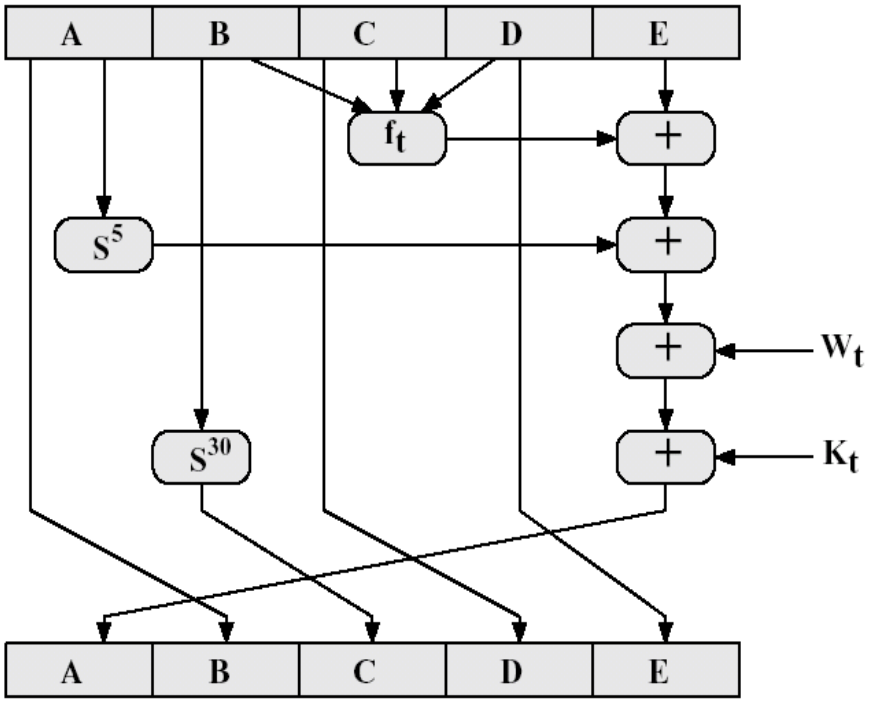


SHA-1 第 *q* 个分组的4轮循环逻辑 (压缩函数)

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- SHA
  - SHA-1 的算法结构
    - ✧ W_t : 从消息块导出
    - ✧ K_t : 常量



SHA-1 每轮循环中的一步运算逻辑

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- SHA
  - SHA-1 的一些讨论
    - ✧ 使用 big-endian
    - ✧ 抵抗生日攻击：160位 hash 值
    - ✧ 没有发现两个不同的 512-bit 块,它们在 SHA-1 计算下产生相同的 hash 值
    - ✧ 速度慢于 MD5
    - ✧ 安全性优于 MD5

2.5 MAC and Hashing Algorithms

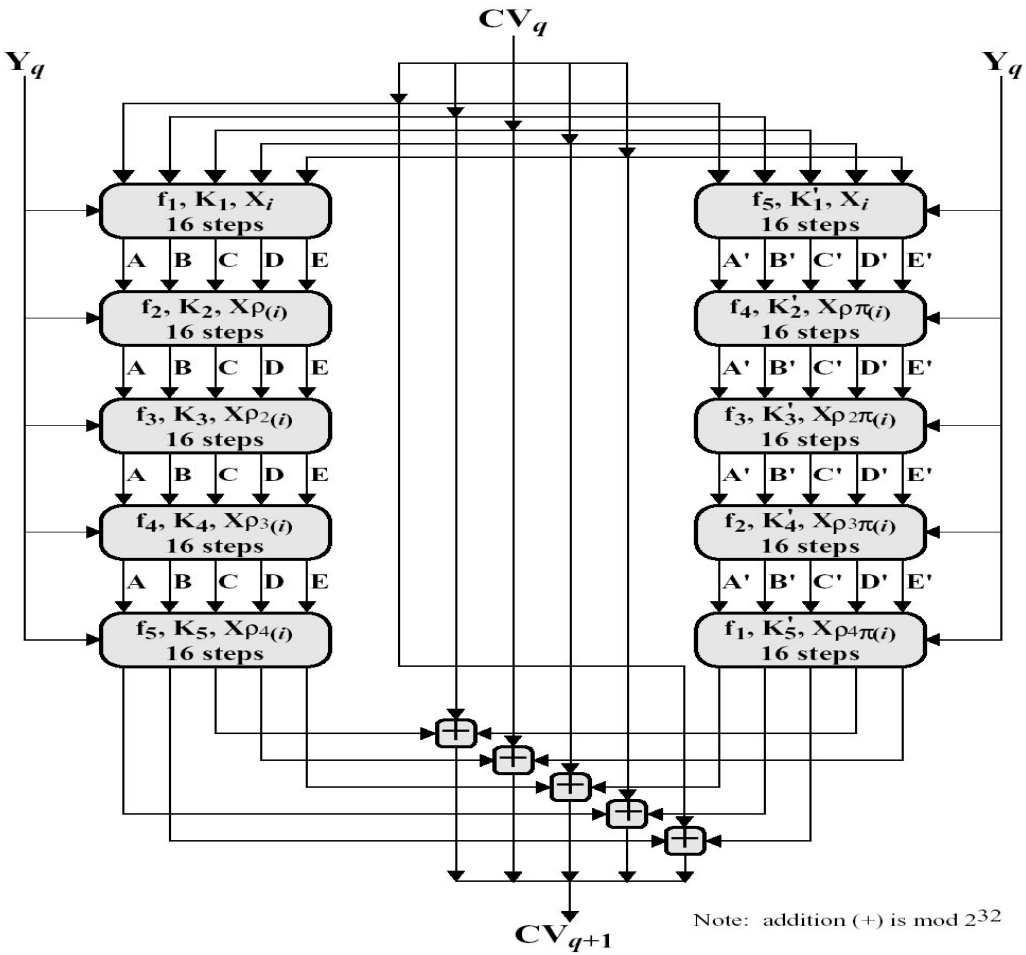
2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- RIPEMD
  - 概况
    - ✧ 以 MD5 为基础，是欧洲 RIPE 项目的结果
    - ✧ RIPEMD 为128位，更新后成为 RIPEMD-160
    - ✧ 输入：任意长度的消息
    - ✧ 处理：以512位为分组单位
    - ✧ 输出：长度为160位的消息摘要

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- RIPEMD
  - RIPEMD 的算法结构



2.5 MAC and Hashing Algorithms

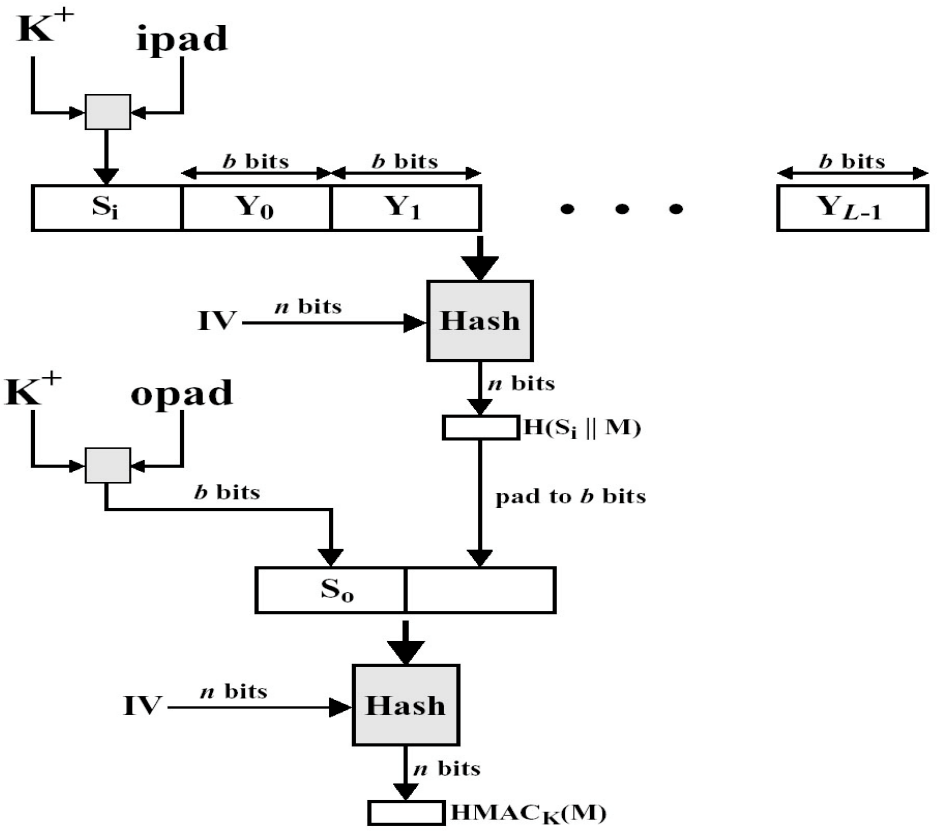
2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- HMAC
  - What is HMAC
    - ✧ In cryptography, a *keyed-hash message authentication code* (HMAC) is a specific type of MAC involving a cryptographic hash function and a secret cryptographic key.
    - ✧ It may be used to simultaneously verify both the data integrity and the authentication of a message, as with any MAC.
    - ✧ Any cryptographic hash function, such as MD5 or SHA-1, may be used in the calculation of an HMAC; the resulting MAC algorithm is termed HMAC-MD5 or HMAC-SHA1 accordingly.
    - ✧ The cryptographic strength of the HMAC depends upon the cryptographic strength of the underlying hash function, the size of its hash output, and on the size and quality of the key.
    - ✧ Ref. to RFC 2104

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- HMAC
  - HMAC 的算法结构



M – message input to HMAC

H – embedded hash function

K – secrete key

b - length of input block

n - length of hash code

ipad – 00110110 重复 *b*/8 次

opad – 01011010 重复 *b*/8 次

$$HMAC_k = H[(K^+ \oplus opad)||H[(K^+ \oplus ipad)||M]]$$

2.5 MAC and Hashing Algorithms

2.5.4 Message-Digest Algorithm (MD)

- HMAC
  - HMAC 的算法结构
    - ✧ 对密钥 K 左边补0，生成一个 b 位的数据块 K^+；
    - ✧ K^+ 与 *ipad* 作 XOR，生成 b 位的 S_i；
    - ✧ 对 $(S_i||M)$ 进行标准过程的 hash 压缩，得到 $H(S_i||M)$；
    - ✧ K^+ 与 *opad* 作 XOR，生成 b 位的 S_o；
    - ✧ 对 $S_o||H(S_i||M)$ 进行标准过程的 hash 压缩，得到
      $$\text{HMAC}_K = H[S_o||H(S_i||M)].$$
  - HMAC 特征
    - ✧ 可直接使用各种 hash 算法
    - ✧ 可使用将来的更加安全和更加快速的 hash 算法
    - ✧ 保持原始 hash 算法的性能
    - ✧ 密钥的使用简单
    - ✧ 与 hash 函数有同等的安全性

Outline

- 2.1 Cryptology Introduction
- 2.2 Symmetric Key Cryptographic Algorithms
- 2.3 Mathematical Foundations of Public-Key Cryptography
- 2.4 Asymmetric Key Cryptographic Algorithms
- 2.5 MAC and Hashing Algorithms
- **2.6 Typical Applications**
  - MD5 and Passwords
  - AES and Wi-Fi Protected Access
  - RSA and e-Business

2.6 Typical Applications

- Discussing
  - MD5 and Passwords
  - AES and Wi-Fi Protected Access
  - RSA and e-Business

References

1. William Stallings, Cryptography and Network Security: Principles and Practice (5th Edition), Prentice Hall 2010
2. http://en.wikipedia.org/wiki/
   - Birthday attack
   - Cryptography
   - Data Encryption Standard
   - Diffie–Hellman key exchange
   - Digital signature
   - Hash function
   - Information_security
   - MD5
   - Public-key cryptography
   - RSA

End of Chapter 2