专业特色选修课《网络信息安全》


# 密码算法和密码学

下篇

## En/Decryption Algorithms and Cryptology

嵩　天

songtian@bit.edu.cn

北京理工大学计算机学院

# 本节大纲

- 非对称密钥密码算法
- 单向散列函数

# 密码算法的分类

- 古典密码算法和现代密码算法
  - 根据算法和密钥是否分开来区分
- 对称密钥密码和非对称密钥密码
  - 根据加密和解密是否使用相同的密钥来区分
- 分组密码和序列密码
  - 根据每次操作的数据单元是否分块来区分
- 双向加密和单向加密
  - 根据明文加密后是否需要还原来区分

# 非对称密钥密码算法

- 对称密钥密码系统的缺点
  - 密钥分发需要经过安全通道
  - 无法用于鉴别身份(数字签名)
  - 密钥管理复杂，$O(n^2)$
- 非对称密钥密码系统
  - 1976年由W. Diffie和M. Hellman提出
  - 受到了Ralph Merkle工作的启发

# 非对称密钥密码算法

- 非对称密钥密码系统
  - 两个密钥，一公一私
  - 对密钥分配、数字签名、认证等具有深远影响
  - 相关算法真正基于数学理论，而不是代替和换位
  - 密码学史上一次真正意义的革命

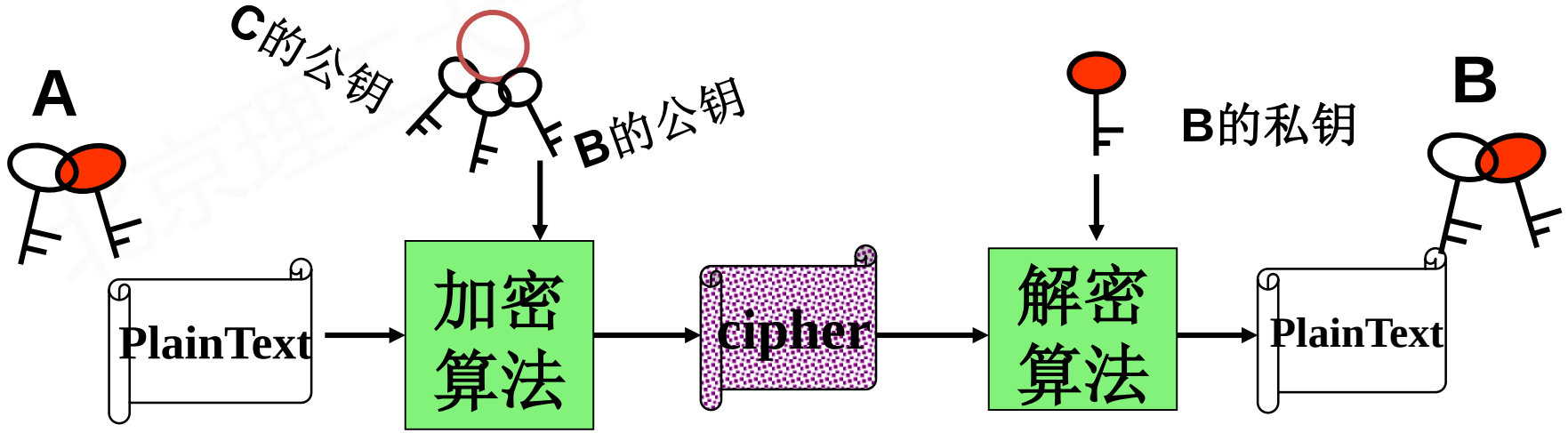
# 非对称密钥密码算法

- 常用的非对称密钥密码算法
  - Diffie-Hellman密钥交换协议
  - ElGamal
  - RSA
  - ECC，椭圆曲线
  - Cramer-Shoup算法

# 非对称密钥密码算法

信息接收

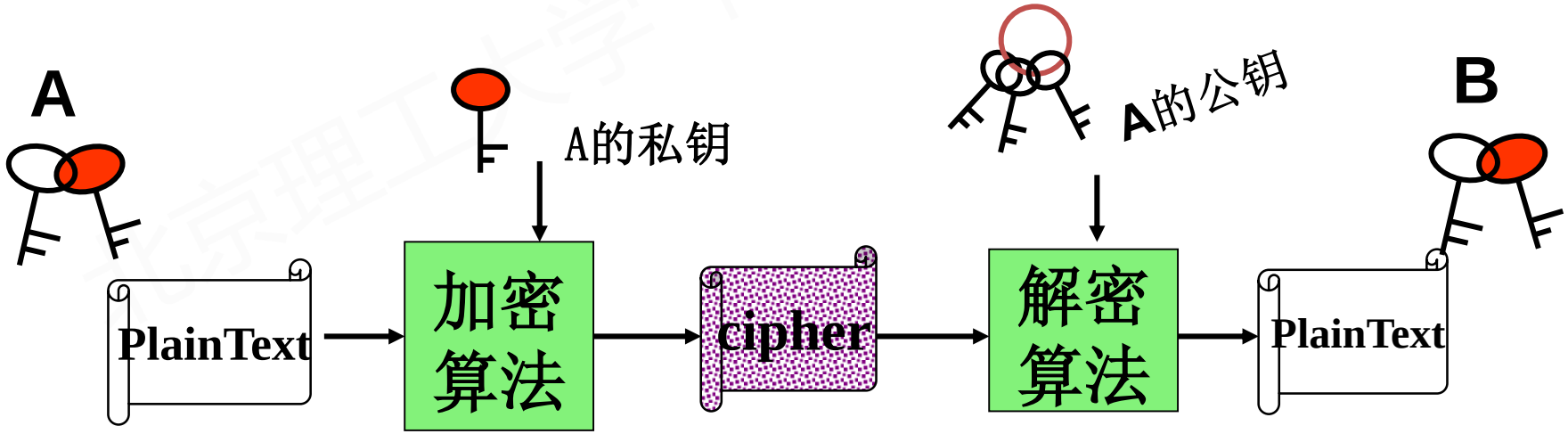
- 加密原理
  - 每个通信实体有一对密钥，公钥公开，用于加密和验证签名，私钥保密，用作解密和签名
  - A向B发送消息，用B公钥加密；B收到后，用其私钥解密



# 非对称密钥密码算法

来源证明

- 签名原理
  - A向B发送消息，用A的私钥加密——签名过程
  - B收到密文后，用A的公钥解密——验证签名过程

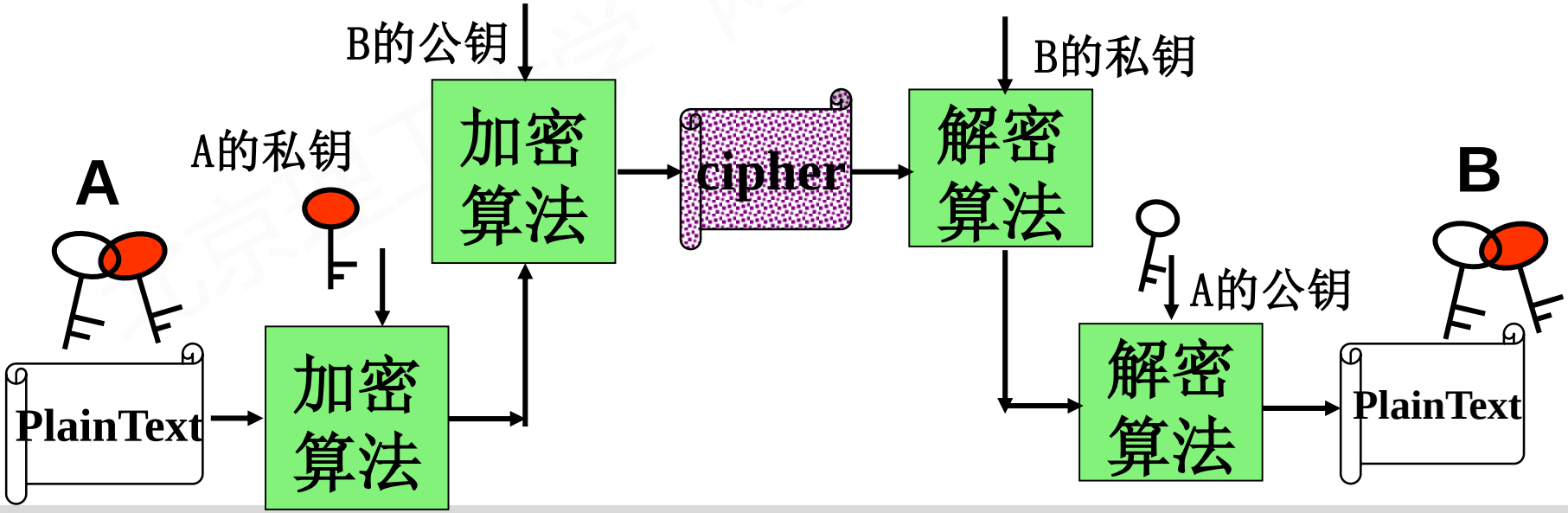


# 非对称密钥密码算法

- 签名和加密同时使用

**可证明来源的信息接收**

  - A向B发送消息，用A的私钥加密——签名过程
  - B收到密文后，用A的公钥解密——验证签名过程

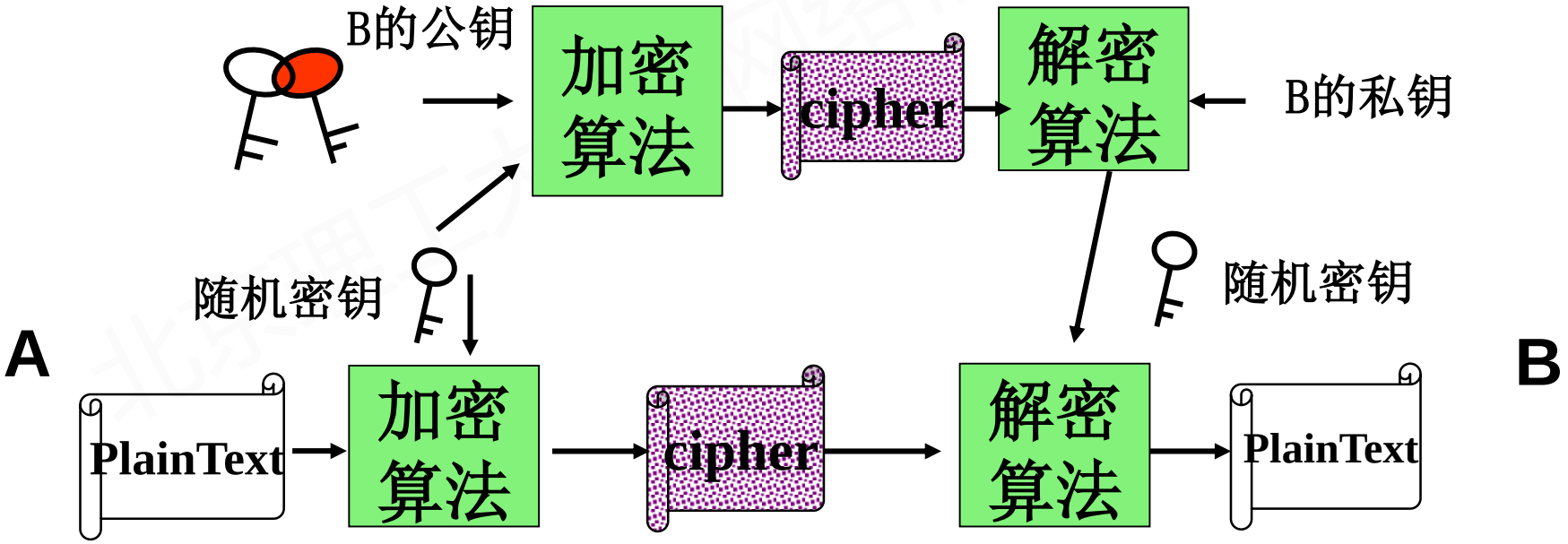


# 非对称密钥密码算法

- 与对称密钥算法同时使用

高速数据加密传输

– 对称密钥算法加密消息，非对称密钥算法加密密钥



# 非对称密钥密码算法

- 算法要求
  - 参与双方A和B都包含一对密钥，且密钥产生容易（$k_a$，$k_a^{-1}$）和（$k_b$，$k_b^{-1}$），A向B发送消息
  - 已知$k_b$，A的加密操作是容易的，$C = E_{kb}(P)$
  - 已知$k_b^{-1}$，B对密文解密操作是容易的，$P=D_{kb}^{-1}(C)$
  - 已知$k_b$，求$k_b^{-1}$在计算上不可行（由公钥无法计算私钥）
  - 仅知$k_b$和C，恢复P在计算上不可行（仅知公钥，无法破解）

# 非对称密钥密码算法

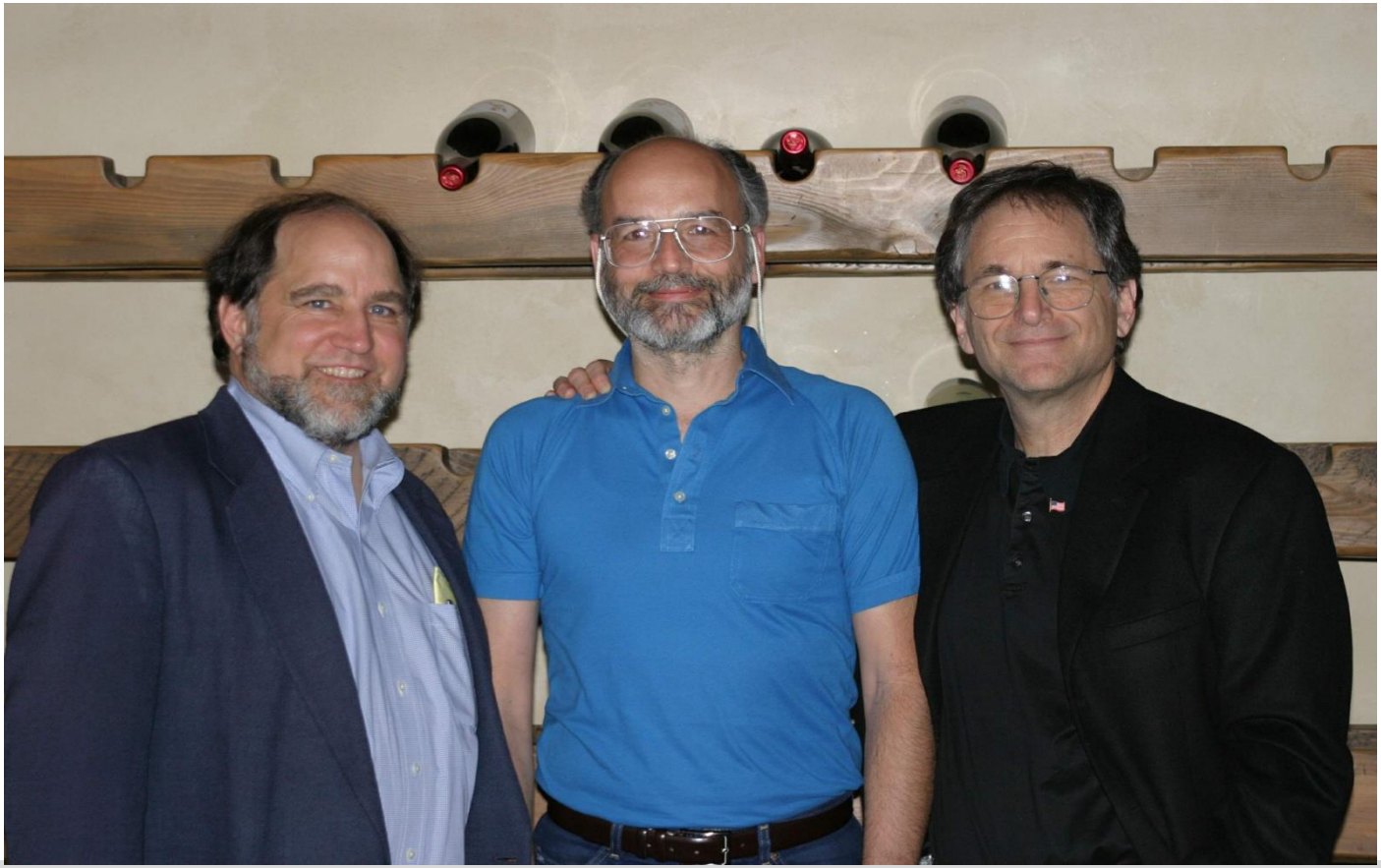
- 非对称密钥密码算法的理解
  - 公开密钥算法和对称密钥算法那种更安全？

    任何一种算法的安全性都依赖于密钥的长度和破解的工作量，从密码分析角度来说，两种方法具有同样优势
  - 对称密钥算法过时了吗？

    公开密钥算法相对很慢，适合用在数字签名和密钥管理等片段加密的情况，对称密钥仍然是主流方法。

# RSA算法

- RSA算法介绍



# RSA算法

- RSA算法介绍
  - RSA安全性基于分解极大数的困难性（两素数积的因式分解）
  - 至今，只有短的RSA密钥才可以被强力破解
  - 至今，世界上还没有任何可靠的攻击RSA算法的方式
  - 只要密钥足够长，RSA加密的信息在计算上不能被破解
  - RSA算法于1977年以论文形式发表，1983年在美国申请了专利， U.S. Patent 4,405,829，但已经过时，其他国家没有被授予专利

# RSA算法

- 数论基础
  - 模运算的特点：可交换、可结合、可分配

$$(a+b) \bmod n = ((a \bmod n) + (b \bmod n)) \bmod n$$

$$(a-b) \bmod n = ((a \bmod n) - (b \bmod n)) \bmod n$$

$$(a \times b) \bmod n = ((a \bmod n) \times (b \bmod n)) \bmod n$$

$$(a \times (b+c)) \bmod n = (a \times b) \bmod n + (a \times c) \bmod n$$

# RSA算法

- 数论基础
  - 幂的模运算

$$m^2 \bmod n = (m \times m) \bmod n = (m \bmod n)^2 \bmod n$$

$$m^4 \bmod n = (m^2 \bmod n)^2 \bmod n$$

$$m^8 \bmod n = ((m^2 \bmod n)^2 \bmod n)^2 \bmod n$$

$$m^{25} \bmod n = (m \times m^8 \times m^{16}) \bmod n$$

# RSA算法

- 欧拉函数 $\phi(n)$
  - 正整数$n$，欧拉函数是小于或等于$n$的正整数中与$n$互质的数的数目

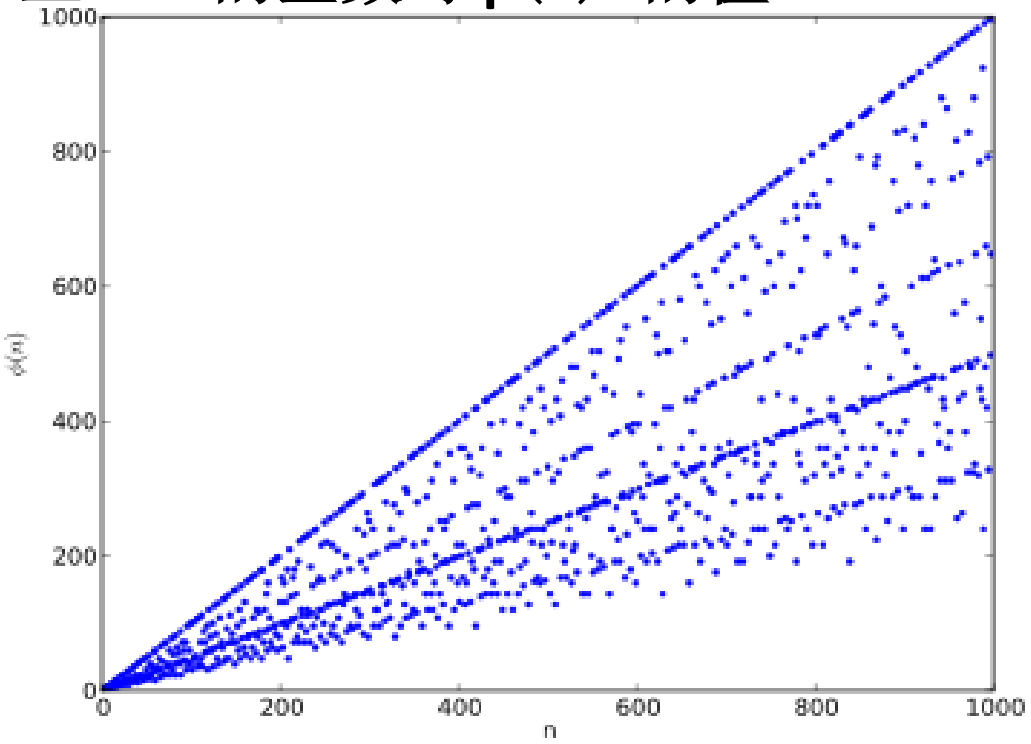
    $\phi(3)=|\{1, 2\}| =2$

    $\phi(7)=|\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}| =6$

    $\phi(10)=|\{1, 3, 7, 9\}| =4$
  - 如果p是素数，则 Φ (p)=(p-1)， 比如 Φ (5)、 Φ (11)
  - 如果p, q 是素数，则 $\phi(pq)=\phi(p)\,\phi(q)=(p-1)(q-1)$

# RSA算法

- 欧拉函数 $\phi(n)$
  - 当n为1至1000的整数时$\phi$(n) 的值



# RSA算法

- 欧拉定理（费马-欧拉定理）
  - 若整数$m$和$n$互素，则 $m^{\phi(n)} \equiv 1 \mod n$
  - 欧拉定理用来简化幂的模运算
  - 例如，计算$7^{222}$的个位数，即 $7^{222} \mod 10$

    因为7和10是互质，而且$\phi(10) = 4$，

    根据欧拉定理知，$7^4 \equiv 1 \pmod{10}$

    所以：$7^{222} \equiv 7^{4\times55+2} \equiv (7^4)^{55} \times 7^2 \equiv 1^{55} \times 7^2 \equiv 49 \equiv 9 \pmod{10}$

# RSA算法

- 算法组成
  - 密钥生成算法（产生公钥和私钥）
  - 加密算法
  - 解密算法

# RSA算法

- 密钥生成算法　　RSA的安全性基于分解极大数的困难性
  - 取两个大素数 *p, q* , 保密　　*p=7, q=17*
  - 计算*N=pq*，公开*N*　　*N=119*
  - 计算欧拉函数*φ(N) = (p-1)(q-1)*　　*Φ(N)=96*
  - 任意取一个与*φ(N)* 互素的整数*e*, 即 *1<e< φ(N)*　　公钥*e=5*
    *e*作为公钥公开
  - 寻找*d*, 使得 *de ≡1 mod φ(N)* ，　*d* 作为私钥保密　　*5d ≡1 mod 96*　　得到*d=77*

# RSA算法

- 加密算法（加密过程）
  - 密钥对 （{e, N}，{d, N}）
  - 把待加密内容分成k比特分组， $k \le \log_2 N$，写成数字M，

    则： $C = M^e \bmod N$

（{5,119}, {77,119}）

$C = M^5 \bmod 119$

- 解密算法（解密过程）

  $M = C^d \bmod N$

  - 可以证明，解密是正确的

$M = C^{77} \bmod 119$

# RSA算法

- 加密数字例子
  - 明文M=19， $19^5 \equiv 66 \bmod 119$ ， 密文C= 66
  - 解密过程： $66^{77} \bmod 119 = ?$
- 加密字符串例子
  - 每次读取字符串中多个字节，变成M进行加解密
  - RSA　　focusRSA
  - 5CB6CD6BC　　9F47D51C325D67B 5CB6CD6BC
  - RSA在实现上需要结合填充方法使用

# RSA算法

- 填充
  - 在消息中填充随机信息，使得密文和明文的对应关系存在随机性
  - **ANSI X.923** （零+个数）

```
... | DD DD DD DD DD DD DD DD | DD DD DD DD 00 00 00 04 |
```

  - **ISO 10126** （随机数+个数）

```
... | DD DD DD DD DD DD DD DD | DD DD DD DD 81 A6 23 04 |
```

  - **RSA**实现中采用**PKCS#1**填充方法（个数）

```
... | DD DD DD DD DD DD DD DD | DD DD DD DD 04 04 04 04 |
```

# RSA算法的安全性

- 攻击方法
  - 蛮力攻击：尝试所有密钥
  - 密码分析：等效于对两个素数乘积N的因子分解（求p和q）
- 大数的因子分解是数论中的一个经典难题

| 十进制数字位数 | 近似比特数 | 得到的数据 | MIPS年 |
|---|---|---|---|
| 100 | 332 | 1991 | 7 |
| 110 | 365 | 1992 | 75 |
| 120 | 398 | 1993 | 830 |
| 129 | 428 | 1994 | 5000 |
| 130 | 431 | 1996 | 500 |
| 193 | 640 | 2005 | 2.2GHz-CPU 运算30年 |

# RSA算法的安全性

- 大数的因子分解是数论中的一个经典难题
  - 一般使用1024位密钥，证书认证机构采用2048位

RSA-640

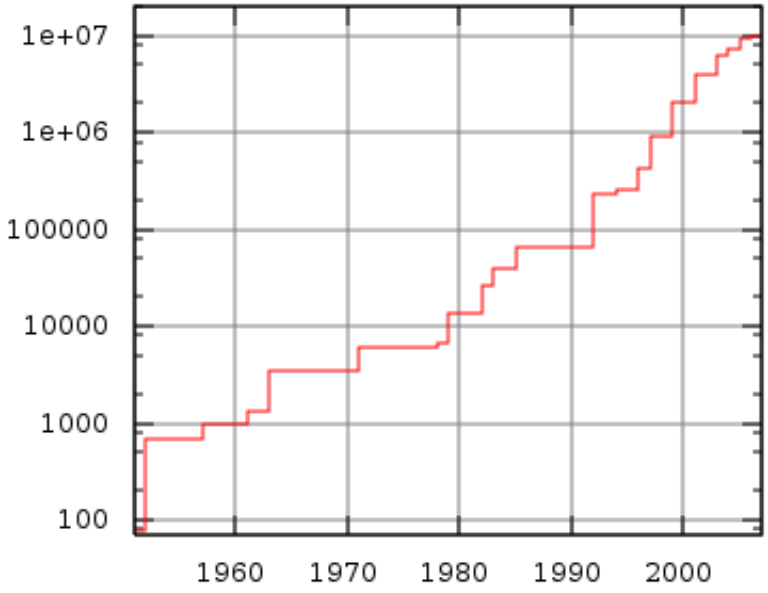
```
163473364580925384844313388386509085984178367003309231218111085238933310010450815121211816751157 9
and
190087128166482211312685157393541397547189678996851549366663853908802710380210449895719126146557 1
```

# RSA算法的安全性

- 已知最大素数
  - 欧几里得证明存在无限多个素数
  - 已知最大素数于2008年8月23日发现（梅森素数）UCLA

$$2^{43,112,609} - 1$$

  - 十进制12,978,189位
  - 悬赏第一个1亿位和10亿位素数



# RSA算法

- RSA的算法性能
  - 软件实现比DES软件慢100倍
  - 硬件实现比DES硬件慢1000倍

| | 512位 | 768位 | 1024位 |
|---|---|---|---|
| 加密 | 0.03 | 0.05 | 0.08 |
| 解密 | 0.16 | 0.48 | 0.93 |
| 签名 | 0.16 | 0.52 | 0.97 |
| 验证 | 0.02 | 0.07 | 0.08 |

# 椭圆曲线密码系统

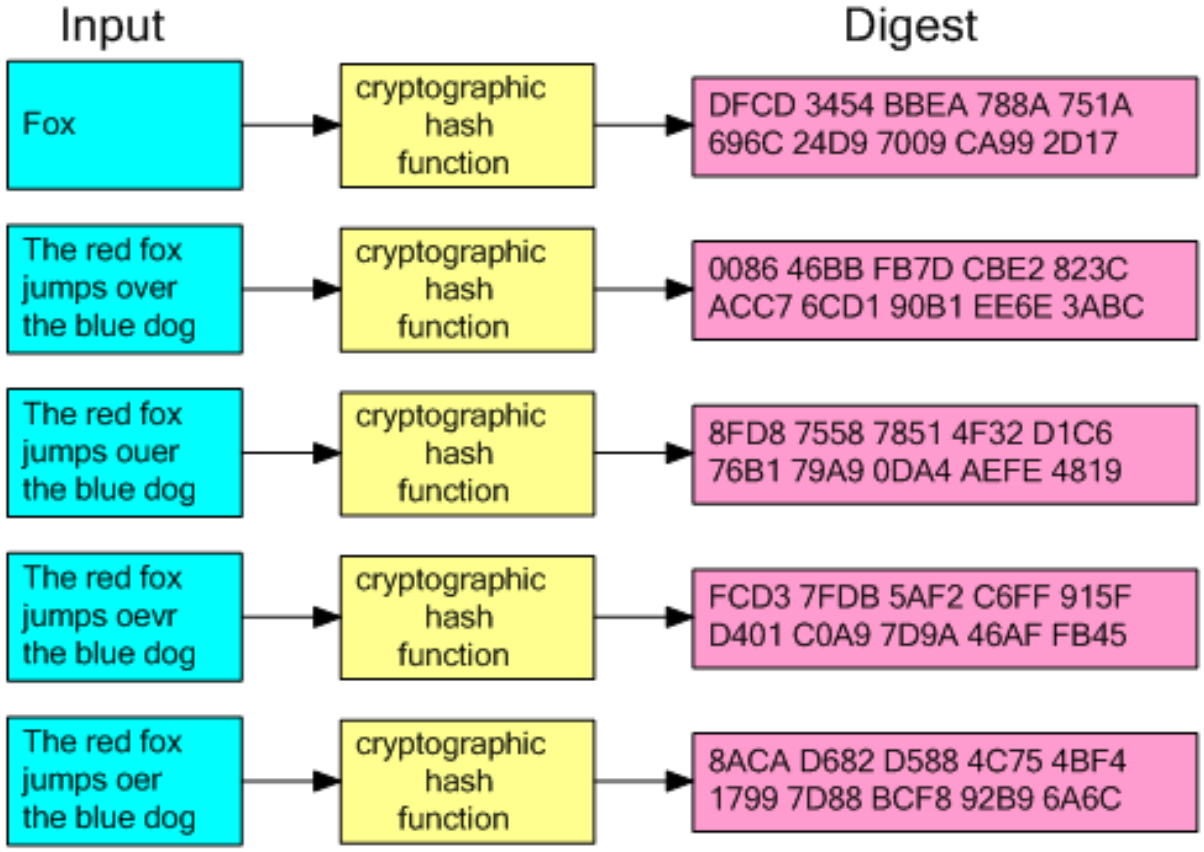
- 算法概况
  - Elliptic Curve Cryptography，缩写为ECC
  - 理论基础是解决椭圆曲线离散对数的困难性
  - 主要优势是使用更短的密钥达到与RSA相同的安全性
  - 160位密钥可达到RSA1024位密钥的安全性，甚至更高

# 本节大纲

- 非对称密钥密码算法
- 单向散列函数

# 单向散列函数

- Hash：哈希函数、散列函数
  - $h = H(m)$

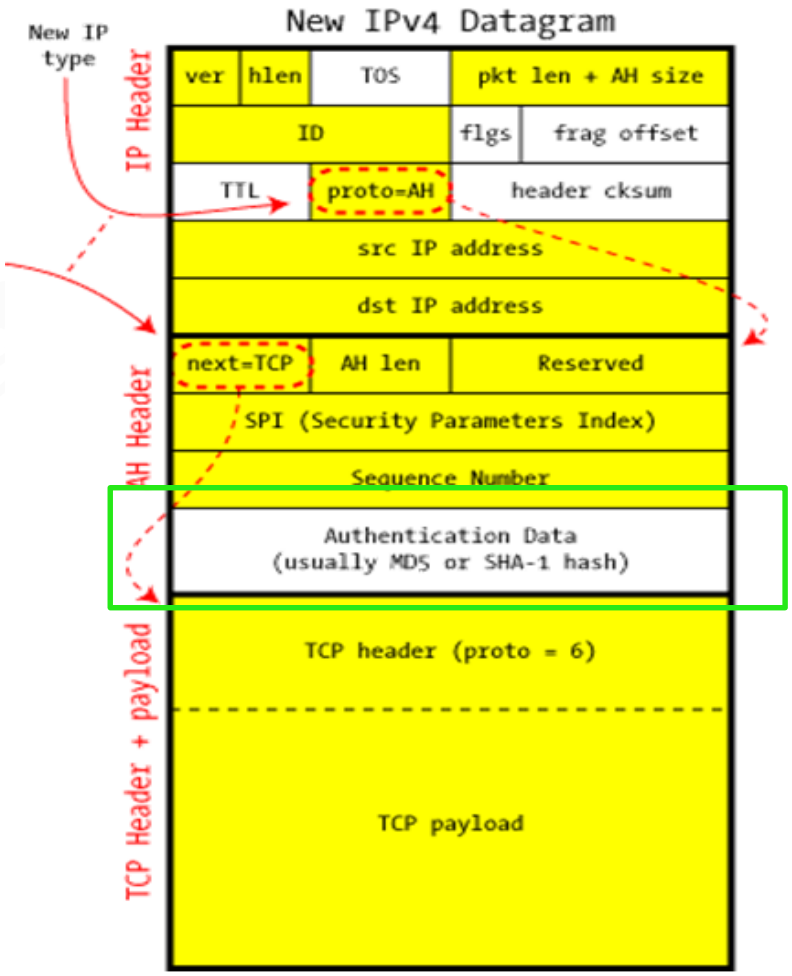


# 单向散列函数

- H的特点和要求
  - 可以操作任意长度内容*m*
  - 给定*m*，计算*h*是容易的
  - 给定任意*m*，产生的h的长度固定
  - 给定*h*，寻找*m'*，使得*h = H(m')*是困难的
  - 寻找任何*(m,m')* ，*m≠m'* ，使得*H(m) =H(m')*计算上不可行

# 单向散列函数

- 常用的单向散列函数
  - *MD2、MD4、MD5*
  - *SHA-0、SHA-1*
  - *SHA-256/224*
  - *SHA-512/384*
  - 例如：IPSec安全协议

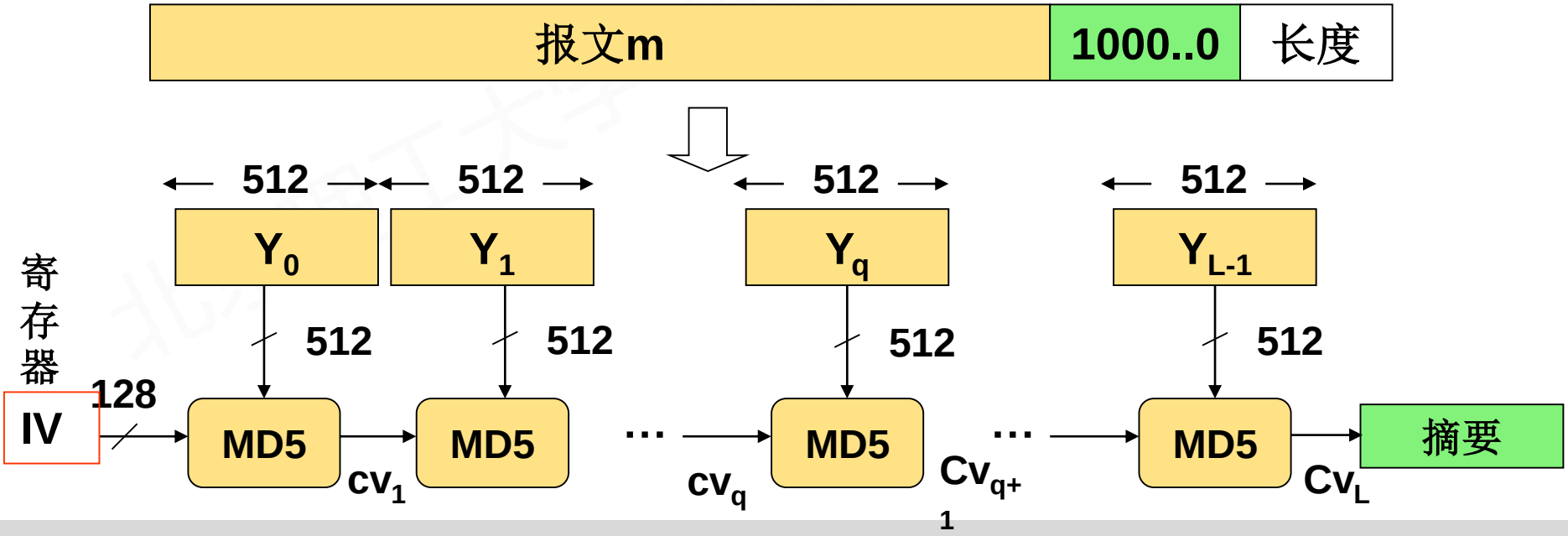


# MD5算法

- 算法历史
  - MD5是1992年， 由Ronald Rivest设计
  - MD, MD2, MD3, MD4, MD5, MD6
  - MD： Message Digest，信息摘要算法
  - 对任意输入均产生128bit的输出
  - 基于32位的简单操作，易于软件实现
  - 简单而紧凑，没有复杂的程序和大数据结构
  - 详细： RFC 1321

# MD5算法

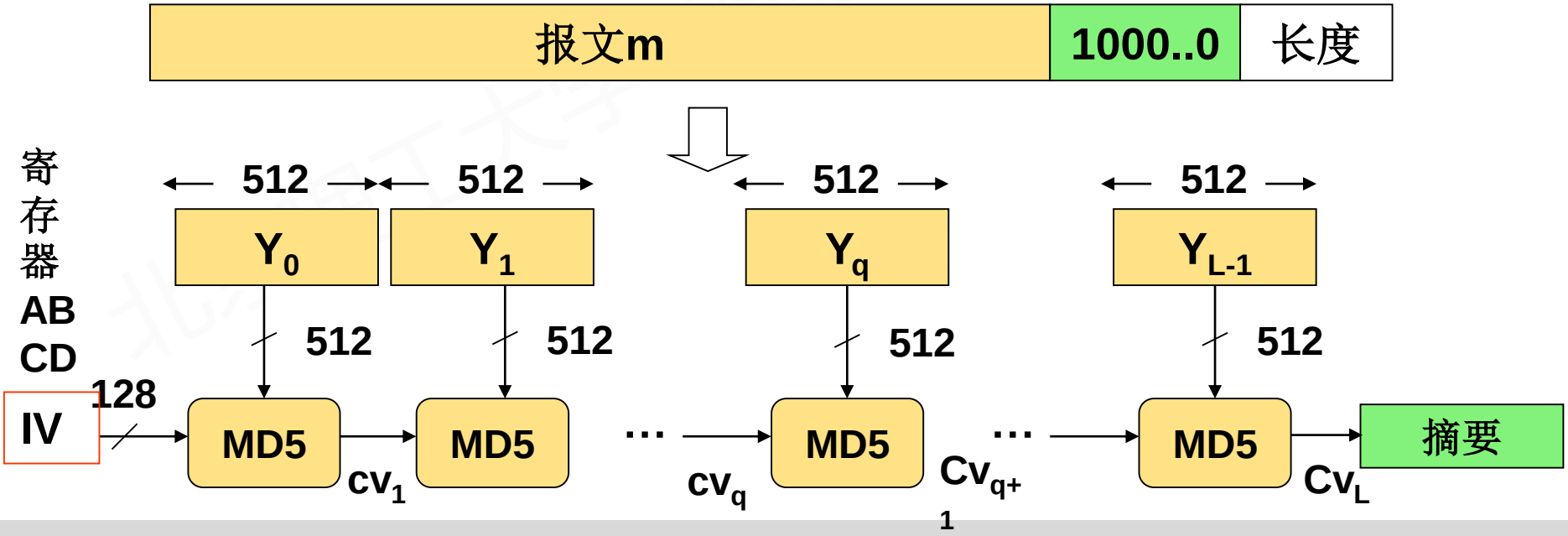
- 算法步骤
  - Step1：填充，使报文的长度为512减64位
  - Step2：将填充前的长度写入最后64位，总长为512整数倍



# MD5算法

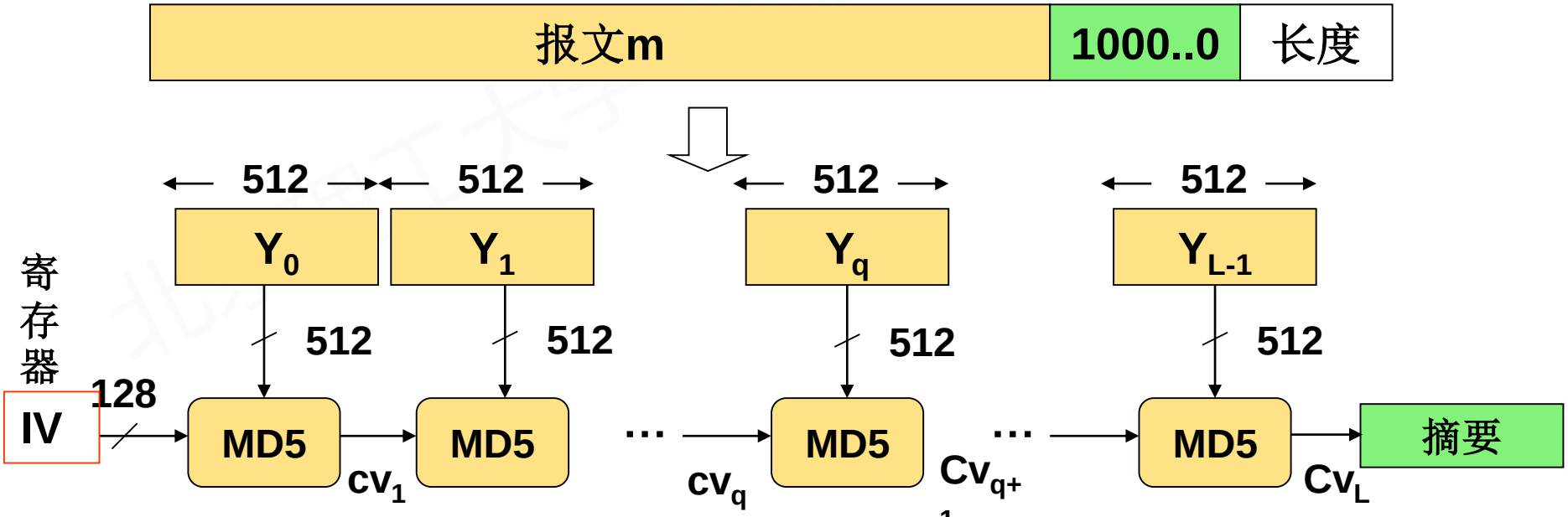
- 算法步骤
  - Step3：初始化4个32位寄存器

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

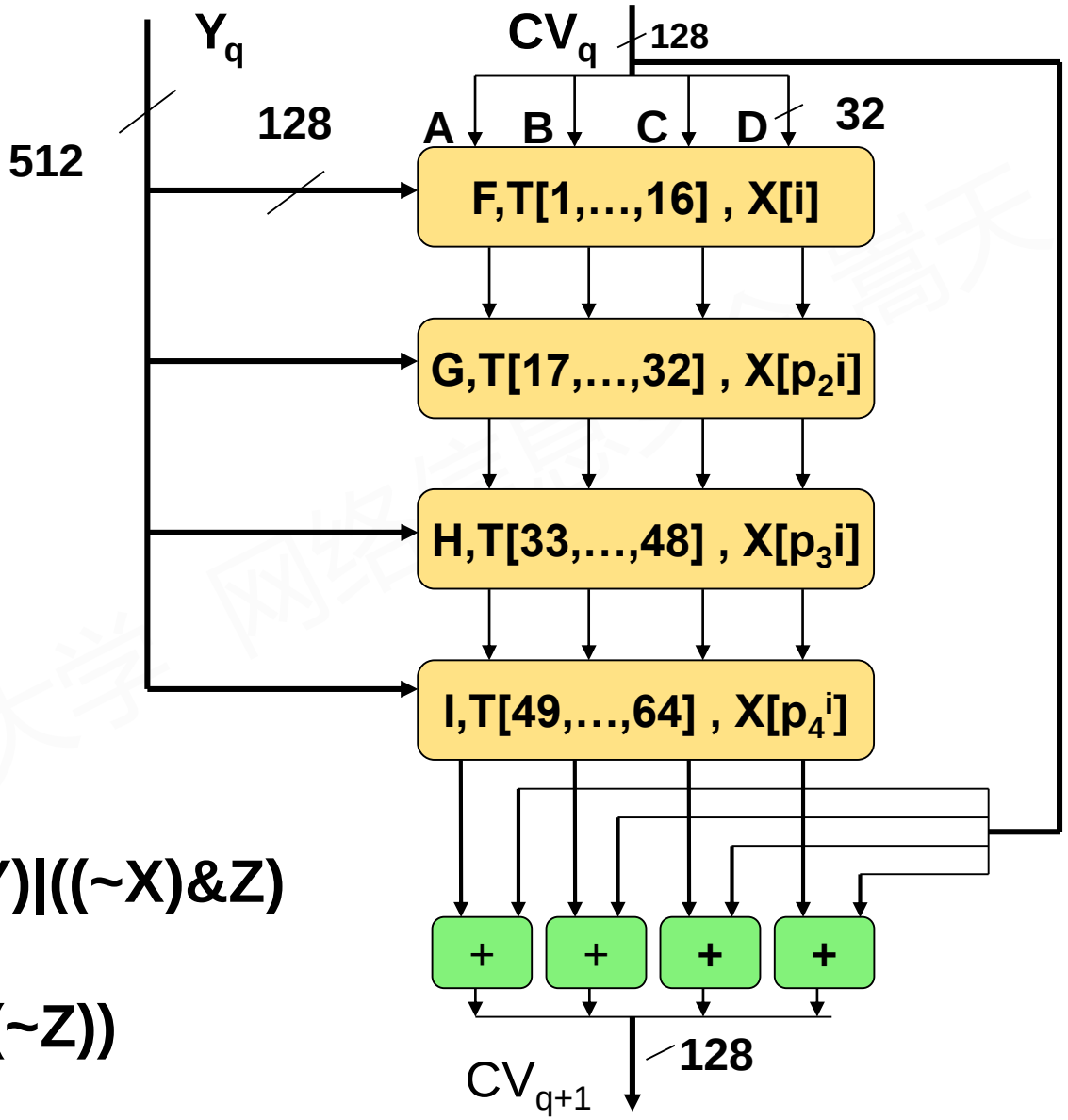


# MD5算法

- 算法步骤
  - Step4：处理每个报文分组，核心是4轮循环的压缩函数



- 算法步骤
  - Step4

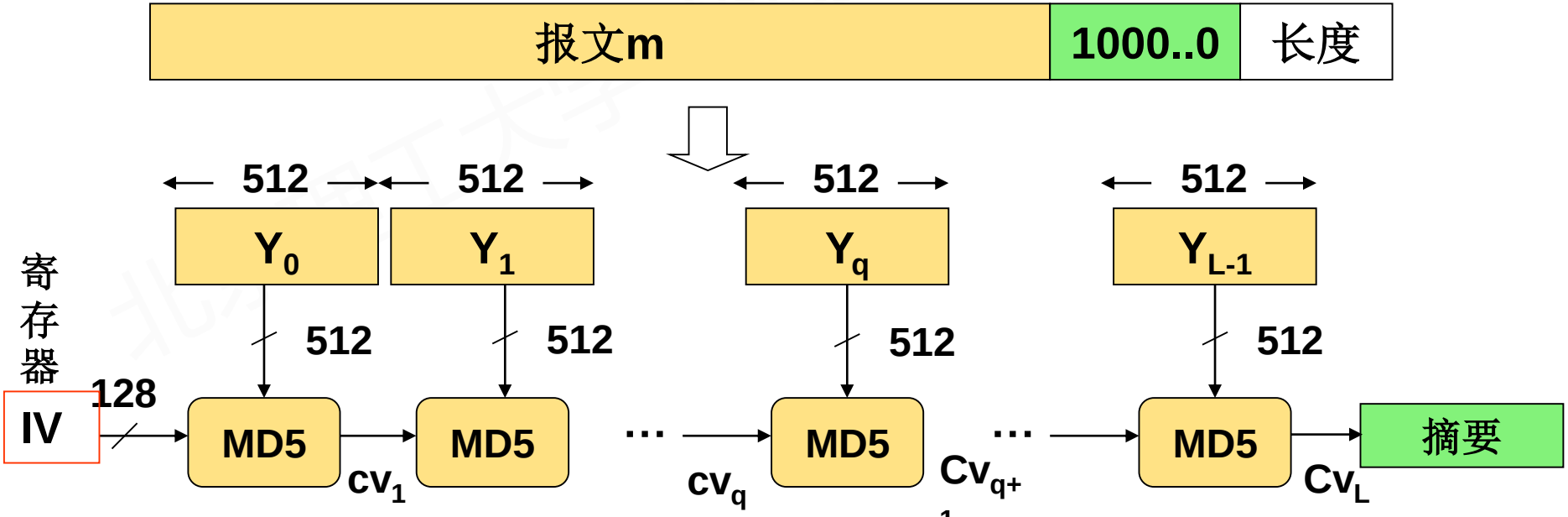



F(X,Y,Z) =(X&Y)|((~X)&Z)

I(X,Y,Z)=Y^(X|(~Z))

# MD5算法

- 算法步骤
  - Step5：所有L 个 512 bit 的分组处理完之后，第L阶段的输出便是128bit 的报文摘要



# MD5算法

- 算法的安全性
  - 128位的信息摘要找到“碰撞”是可能的
  - 2004年，王小云证明MD5数字签名算法可以产生碰撞
  - 2008年，荷兰埃因霍芬技术大学科学家成功把2个可执行文件进行了MD5碰撞，使这两个运行结果不同的程序计算出同一个MD5
  - 2008年，科研人员通过MD5碰撞成功生成了伪造的SSL证书

# MD5算法

- 王小云　教授
  - 1966年生于山东诸城
  - 1993年山东大学数学系获博士学位
  - 2005年6月受聘为清华大学高等研究中心“杨振宁讲座教授”，清华大学“长江学者特聘教授”
  - 获得了密码学领域最权威的两大刊物Eurocrypto与Crypto的最佳论文奖
  - 2017年，中国科学院院士

# SHA算法

- 算法介绍
  - SHA：Security Hash Algorithm，是美国政府密码标准
  - SHA-0和SHA-1算法产生160位的摘要信息（散列值）
  - 单次输入信息最长（$2^{64}$ – 1）位
  - 基于MD4设计，和MD5方法十分类似

| Algorithm and variant | | Output size (bits) | Internal state size (bits) | Block size (bits) | Max message size (bits) |
|---|---|---|---|---|---|
| SHA-0 | | 160 | 160 | 512 | $2^{64} - 1$ |
| SHA-1 | | 160 | 160 | 512 | $2^{64} - 1$ |
| SHA-2 | *SHA-256/224* | 256/224 | 256 | 512 | $2^{64} - 1$ |
| | *SHA-512/384* | 512/384 | 512 | 1024 | $2^{128} - 1$ |

# SHA算法

- 算法的安全性
  - SHA-1在许多安全协议中广为使用：TLS/SSL、PGP、SSH和IPSec
  - SHA-1被视为MD5的后继者
  - 2005年2月，王小云团队对SHA-0进行破解，在$2^{39}$的计算复杂度内可以找到碰撞（每秒10万次运算，63天）
  - 2005年8月，王小云和姚期智夫妇对SHA-1进行破解，在$2^{63}$的计算复杂度内可以找到碰撞
  - SHA算法已经是不安全的了，但尚无完善替换算法（SHA-2/SHA-3）

# 本节小结

- 经过本节的学习，我们知道
  - 非对称密钥密码算法
  - RSA算法和Ron Rivest
  - MD5和单向散列算法
- 请大家复习课件内容

# 本节补充

- Linux系统密码安全

# LINUX系统密码安全

- /etc/passwd

root:fi3sED95ibqR6:0:1:System Operator:/:/bin/ksh

daemon:*:1:1::/tmp:

uucp: OORoMN9FyZfNE :4:4::/var/spool/uucppublic:/usr/lib/uucp/uucico

rachel: eH5/.mj7NB3dx:181:100:Rachel Cohen:/u/rachel:/bin/ksh

# LINUX系统密码安全

- 如何加密呢？ ---- crypt( )
  - 早期的UNIX/Linux版本，基于DES
  - 将用户的口令作为加密密钥，加密一个64bit全部为0的数据块，然后将被加密的数据块再一次加密，重复25次，最后用11个可打印的ASCII字符表示，保存在/etc/passwd中
  - $C_0$=000..00, $C_n$=$DES_p(C_{n-1})$

# LINUX系统密码安全

- 如何破解呢？
  - 没有算法可以恢复口令，唯一的破解方式是蛮力攻击
  - 问题：相同的明文总是得到相同的密文
  - 字典攻击：可以构造一个密码字典

# LINUX系统密码安全

- 增加干扰项（Salt）
  - 盐是一个12bit的随机数（0-4095），时间相关
  - 生成口令：
    - 选一个时间相关的随机数

      salt= rand (time()) mod 4096
    - 对密码加密：cipher = crypt(password, salt)
    - 被转换成两个ASCII字符，与被加密的口令一起存在/etc/passwd中 ，即 saltcipher

# LINUX系统密码安全

- 增加干扰项（Salt）

| Password | Salt | Encrypted Password |
|---|---|---|
| nutmeg | Mi | MiqkFWCm1fNJI |
| ellen1 | ri | ri79KNd7V6.Sk |
| Sharon | ./ | ./2aN7ysff3qM |
| norahs | am | amfIADT2iqjAf |
| norahs | 7a | 7azfT5tIdyh0I |

# LINUX系统密码安全

- 增加干扰项（Salt）
  - 口令验证
    - 用户输入口令password;
    - 取/etc/passwd中的salt( 加密口令的前两个字符)
    - 计算cipher2=crypt(password, salt)
    - 比较cipher2和cipher 是否相等
  - crypt()其实是一个散列过程，最新UNIX采用MD5算法

# LINUX系统密码安全

- 一个简单的口令破解程序，功能是什么？

```
#include <stdio.h>
#include <pwd.h>
int main(int argc,char **argv) {
        struct passwd *pw;
        while(pw=getpwent() ){
                char *crypt();    char *result;  char salt[3];
                strcmp(salt, pw->pw  passwd, 2);
                salt[2]='\0';
                result = crypt(pw->pw_name,&salt);
                if(!strcmp(result,pw->pw_passwd)){
                        printf("%s  's Password = Username \n",pw->pw_name);
                }
        }
        exit(0);
}
```

# LINUX系统密码安全

- 隐藏口令文件
  - /etc/passwd 对普通用户必须是可读的，因为许多进程需要该文件查找用户UID ，根目录，用户名等信息
  - 把/etc/passwd中的口令字段保存在/etc/shadow 中，把/etc/shadow设置成只有root可读，保持/etc/passwd的权限不变

# LINUX系统密码安全

- /etc/shadow

```
root: 1LOTWOUA.YC2o:10173:0::7:7::
mail:*:10173:0::7:7::
….
Jackie:7PbiWxVa5Ar9E: 10713:0:-1:7:-1:-1:1073897239
```

  - 用户名
  - 口令
  - 口令最后一次修改日期，从1970/1/1算起的天数
  - 用户在指定的天数之内不能修改口令
  - 用户在指定的天数之内必须修改口令

# LINUX系统密码安全

- /etc/shadow

```
netlab: $1$VjshiOoO$zu5C3n1QHuqL5g37pjrnT/:14541:0:99999:7:::
```

  - 提前几天警告用户修改口令
  - 在账号失效之前用户必须在此字段所指定的天数内修改口令
  - 账号失效的天数
  - 保留

- 采用MD5的crypt()函数中，salt以$1$开头，$结尾
- 采用MD5的crypt()函数中，salt长度为8个字符