密码学的历史

- **古罗马：凯撒密码（Caesar 密码）**

字母表	ABCDEFGHIGKLMNOPQRSTUVWXYZ
对应密文	DEFGHIGKLMNOPQRSTUVWXYZABC
明文	Caesar was a great soldier
密文	Fdhvdu zdv d juhdw vroglhu

CAESAR 密码： c=(m+ 3) Mod 26

密码学的历史

- **美国南北战争时期**

输入方向 →

输出方向 ↓

C	A	N	Y
O	U	U	N
D	E	R	S
T	A	N	D

明文:

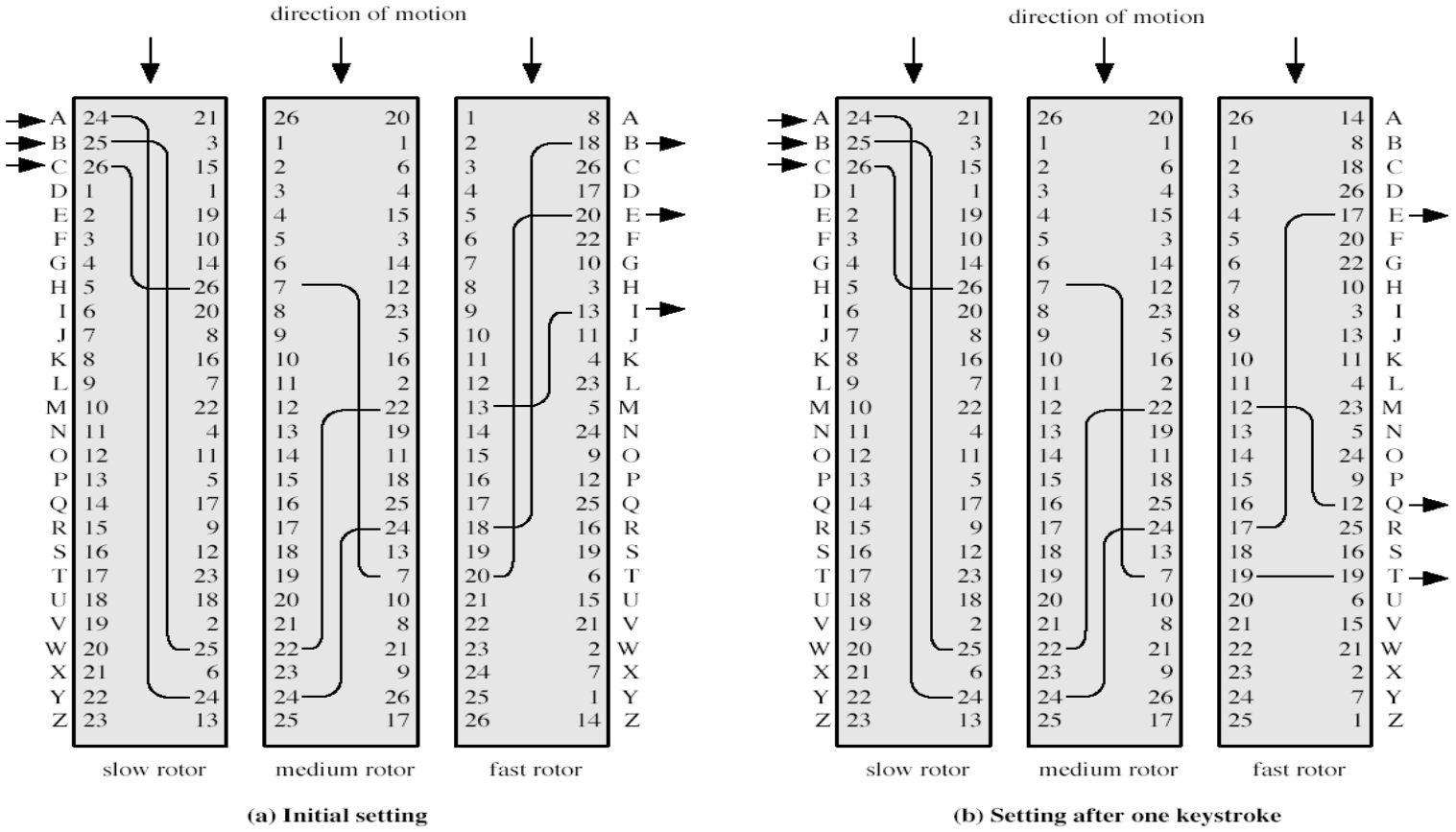
Can you understand

密文:

Codtaueanurnynsd

密码学的历史

- **具有连线的三转子机器**



密码学的历史

- **艾伦·图灵（Alan Turing）**
  - **二战期间成功地破译了纳粹德国密码系统Enigma。**
  - **1912～1954，英国数学家，一生对智能与机器之间的关系进行着不懈探索，被誉为“计算机科学之父”。**
  - **1931～1934，剑桥大学国王学院；1937～1938，普林斯顿大学**
  - **1936年，24岁的图灵提出“图灵机”的设想。**
  - **《机器会思考吗？》的论文提出了用于判定机器是否具有智能的试验方法，即图灵试验，被誉为“人工智能之父”**

密码学的历史

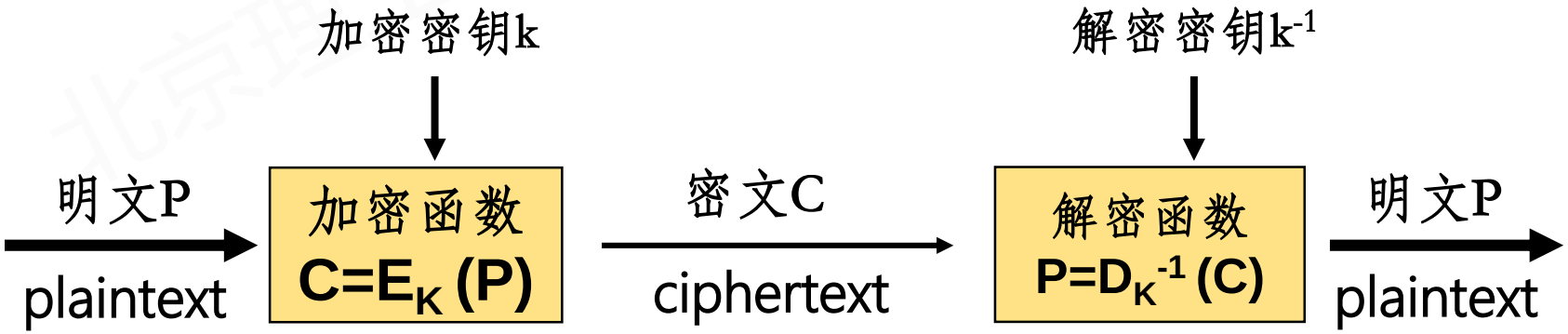
- **艾伦·图灵（Alan Turing）**
  - **1948年，奥运会马拉松项目银牌得主。**
  - **1954年6月8日，服毒自杀，42岁**
  - **1966年，美国计算机协会以他的名字命名了计算机领域的最高奖“图灵奖”。**
  - **2000年，姚期智 Andrew Chi-Chih Yao**

密码学的历史

- **现代密码学**
  - **随着电子计算机的诞生，以语言学为基础的密码方法失效**
  - **现代密码方法主要在二进制字串上进行**
  - **密码方法所基于的问题只要被证明无法有效解出，就是安全**
  - **现代密码学的主要威胁：**
    - **暴力破解的速度**
    - **量子计算的发展**

密码学的基本概念

- **基本术语**
  - **明文：plaintext，原有的信息**
  - **密文：ciphertext，明文经过加密变换后的内容**
  - **加密函数：Encryption，用来加密的数学函数**
  - **解密函数：Decryption，用来解密的数学函数**



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
- **古典密码算法**
  - 密码体制的安全性依赖于算法本身的保密性
  - 算法存在以下限制
    - 不适合大规模生产
    - 不适合较大的或者人员变动频繁的组织
    - 用户无法了解算法的安全性

密码算法的分类

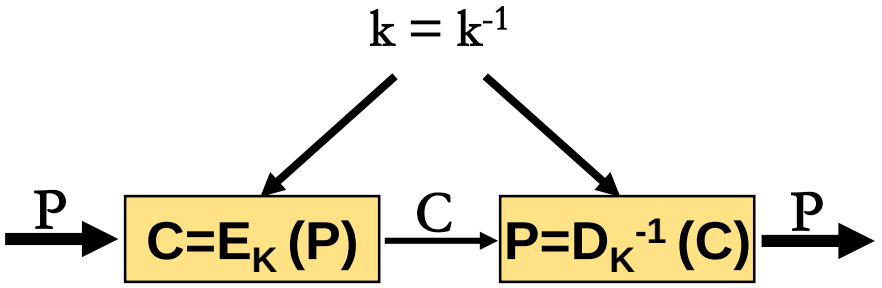
- **古典密码算法种类**
  - **代码加密**：“代码”指专有词汇或者特殊用语，“黑话”
  - **替换加密**：用一组密文字母代替一组明文字母，但保持明文的顺序，例如：凯撒密码
  - **变位加密**：对明文字母作重新排序
  - **一次性加密**：利用代码本，结合上述方法，用代码本上每一页加密明文的一个片段

密码算法的分类

- **现代密码算法**
  - **把算法和密钥分开**
  - **密码算法可以公开，密钥保密**
  - **密码系统的安全性依赖于密钥的保密性**
  - **优点包括：**
    - **密码算法可以经过充分论证，安全性有保证**
    - **对密码系统的管理简单**
    - **可应用于大规模场景**

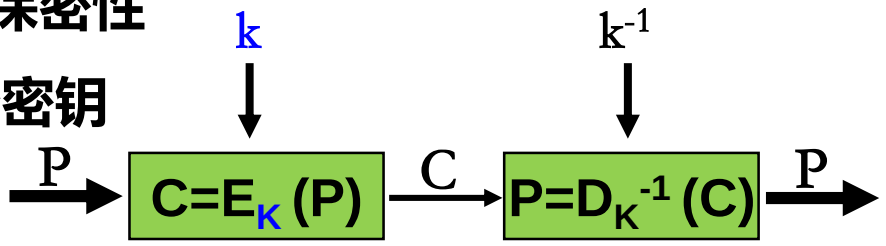
密码算法的分类

- **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
- **对称密钥密码**
  - 也成“单钥体制”，$k = k^{-1}$
  - 算法优点
    - 加密速度快，使用简单
  - 算法缺点
    - 密钥分配：必须通过保密通道进行
    - 密钥个数：n个用户需要n(n-1)个密钥



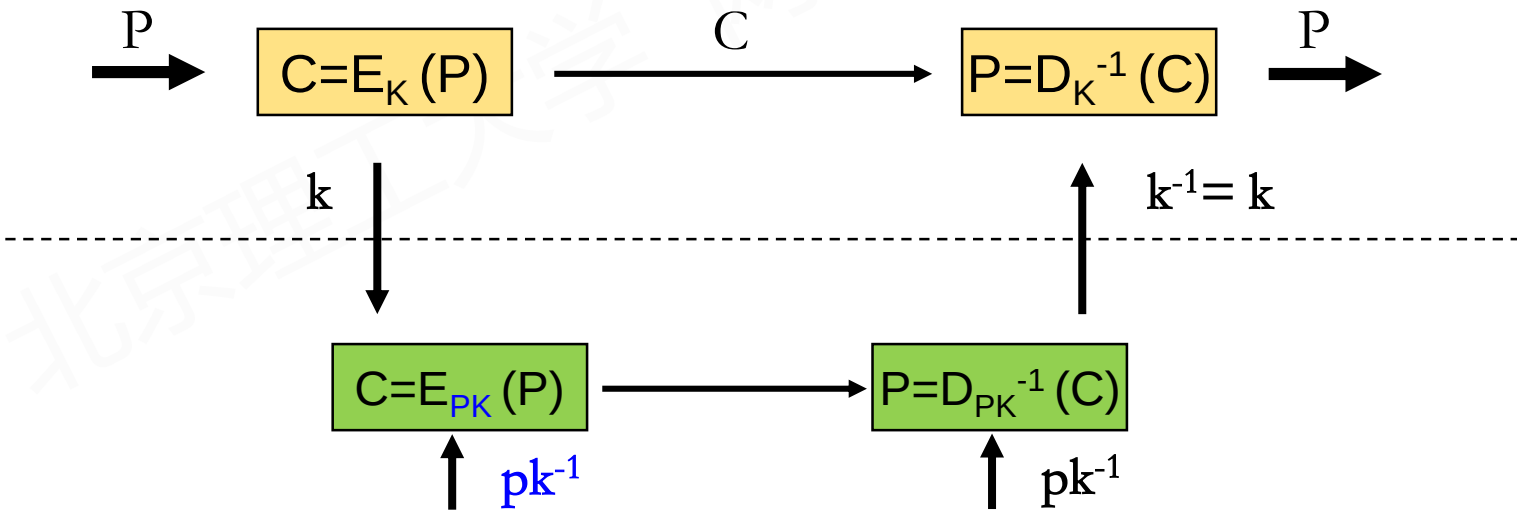
密码算法的分类

- **非对称密钥密码**
  - **“公开密钥密码体制（PKI-Public Key Infrastructure）”**
  - **加密和解密使用不同的密钥（k, k^{-1}）**
  - **把加密密钥公开（公钥），解密密钥保密（私钥）**
  - **对于每一个用户，形成“公私密钥对”**
  - **算法优点**
    - **密钥分配：不必保持信道的保密性**
    - **密钥个数：n个用户需要n个密钥**
  - **算法缺点**
    - **算法速度：比对称密钥算法慢10倍左右(软件)**



密码算法的分类

- **混合加密体系**
  - **结合对称密钥密码和非对称密钥密码体系**
  - **采用对称方法进行通信，采用PKI体系进行密钥交换**



密码算法的分类

- **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
- **分组密码（Block Cipher）**
  - 一次加密或解密操作作用于一个数据块，比如64bit
  - 数据块之间加密是独立的
- **序列密码（Stream Cipher）**
  - 一次加密或解密操作作用于一位或者一个字节
  - 前部分密文参与后部分明文的加密，数据块之间加密不独立

密码算法的分类

- **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
- **双向加密**
  - 明文加密后，需要解密，目的是信息的交换
- **单向加密**
  - 明文加密后，不需要解密，目的验证数据的完整性

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

密码分析

- **什么是密码分析?**
  - **未知密钥，利用数学方法恢复明文，或者推导出密钥**
  - **对密码进行分析的尝试称为“攻击”或者“破解”**
  - **对密码体系的攻击方法包括:**
    - **暴力破解：对密钥进行穷尽搜索**
    - **已经明文攻击：利用一段已知明文和密文的对应关系**
    - **选定明文攻击：设法让对手加密一段选定的明文，获得加密结果**
    - **选定密文攻击：设法让对手回复一段的密文，获得明文结果**
    - **选定密钥攻击：用于分析密码算法和体系**

密码分析

- **其他密码攻击方法**
  - 可以针对人机系统的弱点进行攻击，而不是攻击密码算法本身
  - 欺骗用户密码（技术手段或者社会工程学）
  - 在用户输入密钥时，窥视或者偷窃密钥内容
  - 利用密码系统实现中的缺陷或者漏洞
  - 妨碍用户正确使用密码系统
  - 让口令的另一方透露密钥和信息
  - 威胁用户交出密钥

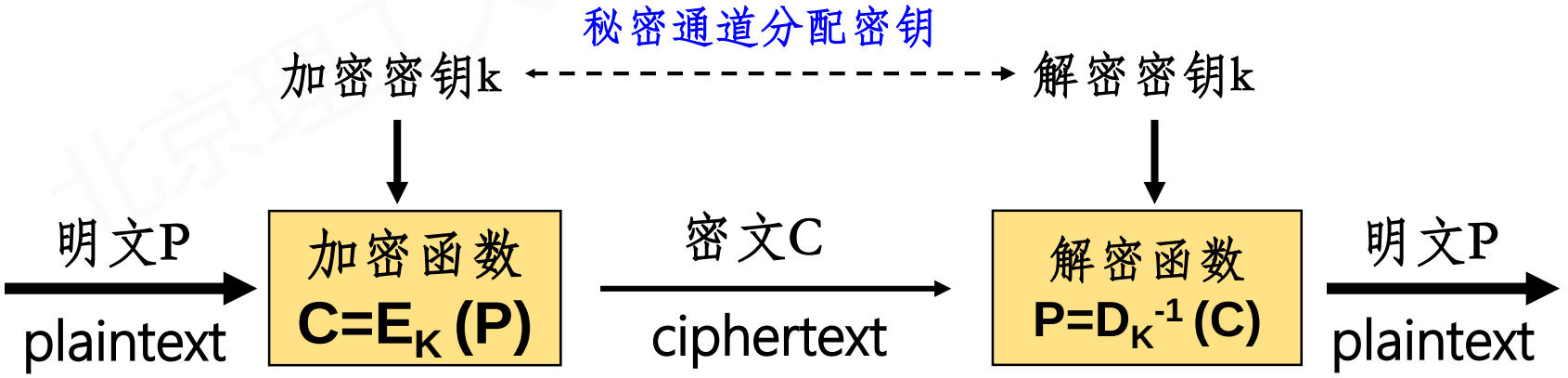
密码分析

- **密码算法的安全性**
  - **如果破解算法的代价大于被加密数据本身的价值，或者在信息的生命周期内无法破解，那么算法可能是安全的**
  - **如果一个密码算法用可得到的资源不能被破解，则称该算法是计算上安全的**

- **处理复杂性：计算量、CPU时间**
- **数据复杂性：所需输入的数据量**
- **存储复杂性：计算所需要的存储空间**

对称密钥密码算法

- **常用的对称密钥密码算法**
  - DES、3DES
  - IDEA
  - RC2、RC4、RC5
  - AES
  - CAST-128
  - Blowfish



DES算法

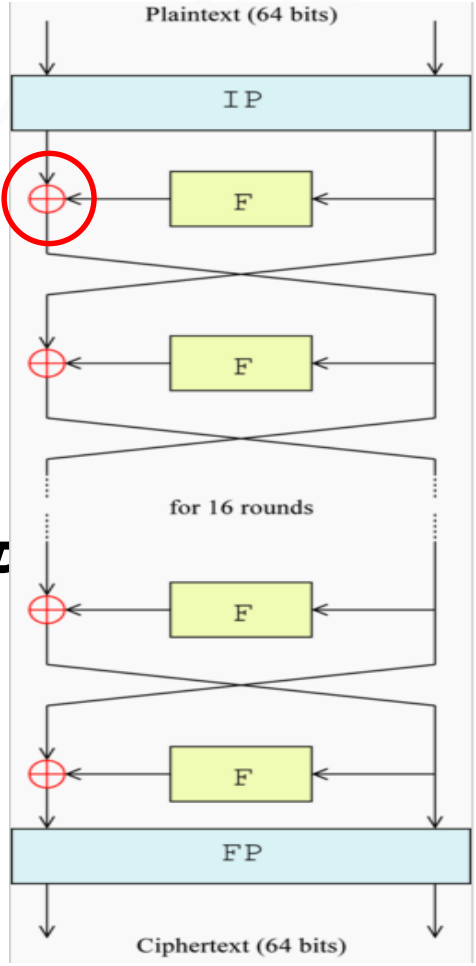
- DES，Data Encryption Standard
- 20世纪70年代，IBM公司为美国国家标准局研制
- 1977年成为美国国家标准，1998年废弃
- 2001年，DES算法被安全性更强的AES算法所取代
- DES算法是一个分组加密算法，以64bit为一个分组
- DES算法使用标准的算术和逻辑运算

DES算法

- **DES的总体框架**
  - **明文分成64bit为单位的块m**
  - **对于每个m，执行如下操作：**

$$DES(m)=FP \cdot T_{16} \cdot T_{15} \cdot \ldots\ldots T_2 \cdot T_1 \cdot$$

  - **初始置换（Initial Permutation），*IP***
  - **16轮迭代，T_i，i=1,2,...16**
  - **末置换（Final Permutation），*FP***



DES算法

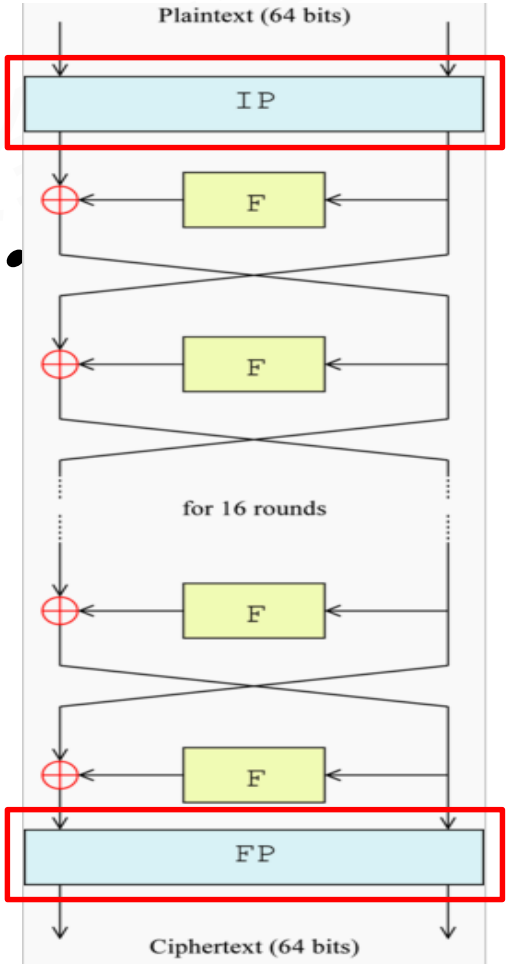
- **DES的初始置换和末置换**

$DES(m)=FP \cdot T_{16} \cdot T_{15} \cdot \cdots\cdots T_2 \cdot T_1 \cdot$

– $IP * FP = I$，即 $FP = IP^{-1}$

– 对m中64个位置进行置换

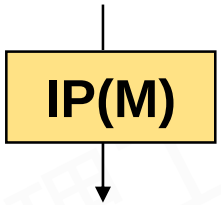
– 输入：$m = m_1 m_2 \ldots m_{64}$



DES算法

- **DES的初始置换和末置换**

$m = m_1 m_2, \ldots\ldots m_{62} m_{63}, m_{64}$

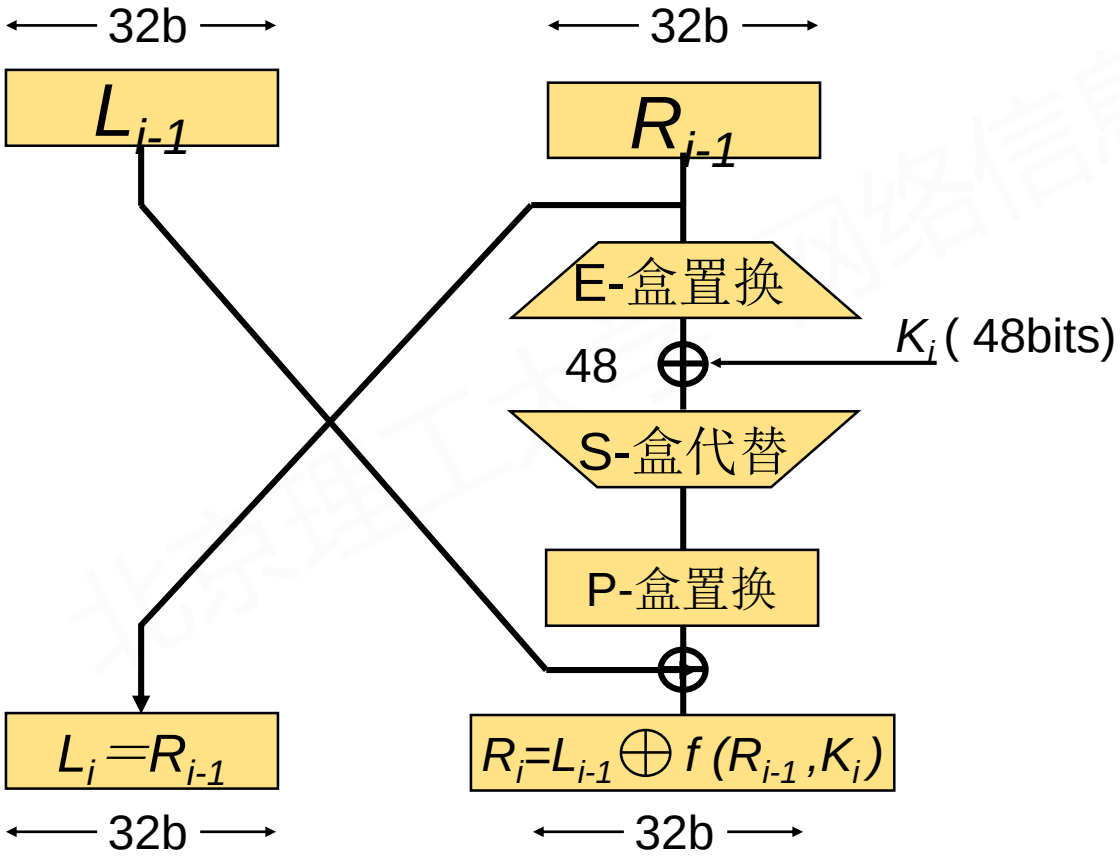


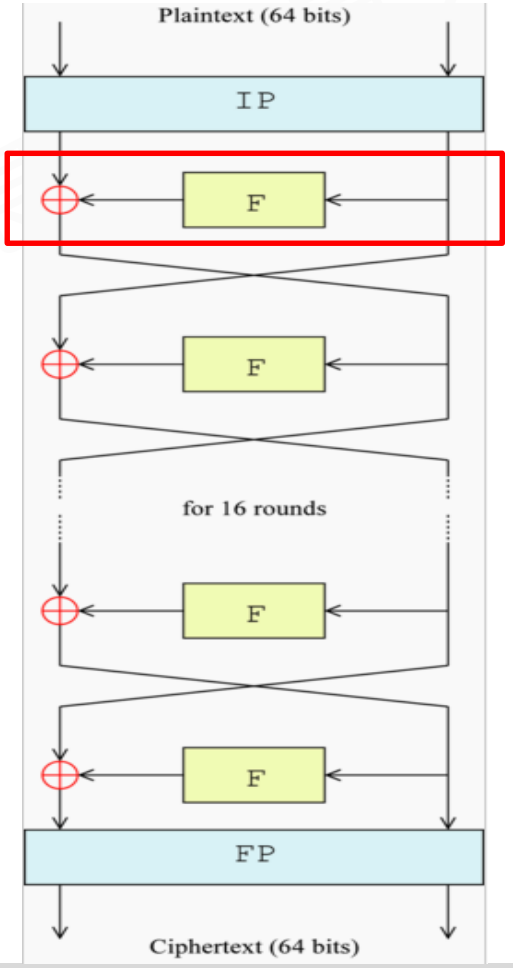
$m' = m_{58} m_{50}, \ldots\ldots m_{23} m_{15}, m_7$

58	50	42	34	26	18	10	2
60	52	44	36	28	20	12	4
62	54	46	38	30	22	14	6
64	56	48	40	32	24	16	8
57	49	41	33	25	17	9	1
59	51	43	35	27	19	11	3
61	53	45	37	29	21	13	5
63	55	47	39	31	23	15	7

DES算法

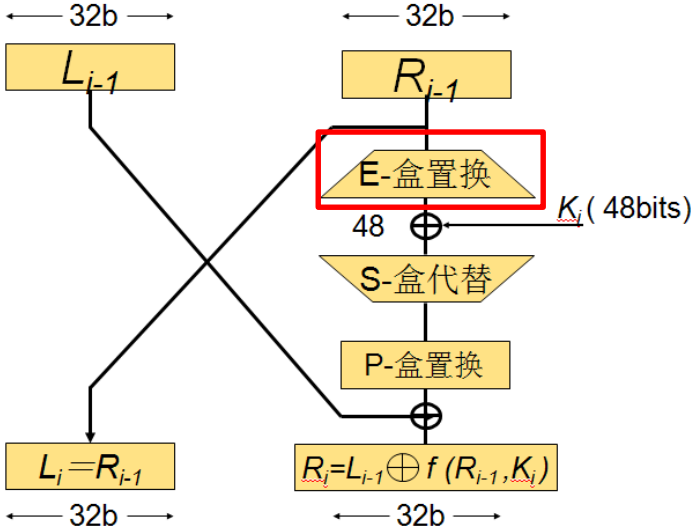
- **每次迭代**

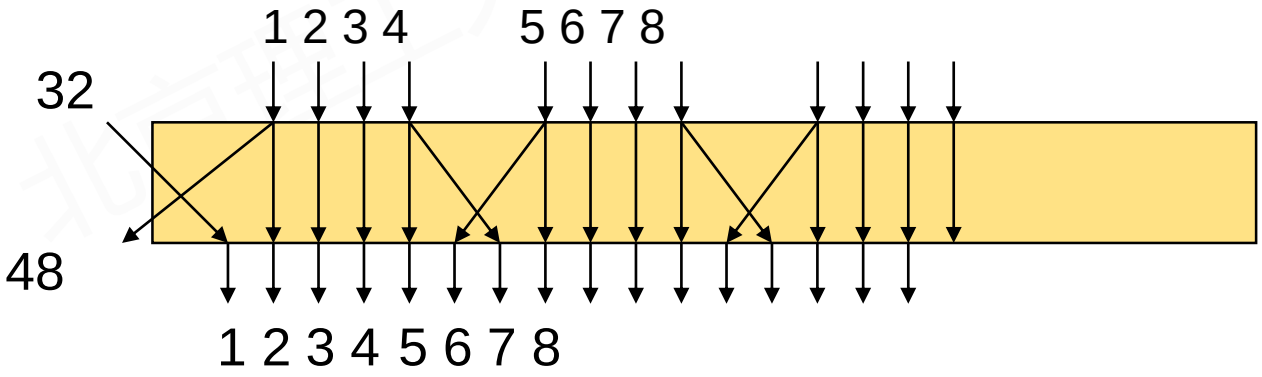

32b
32b
L_{i-1}
R_{i-1}
E-盒置换
48
K_i (48bits)
S-盒代替
P-盒置换
$L_i = R_{i-1}$
$R_i = L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i)$
32b
32b


Plaintext (64 bits)
IP
F
F
for 16 rounds
F
F
FP
Ciphertext (64 bits)

DES算法

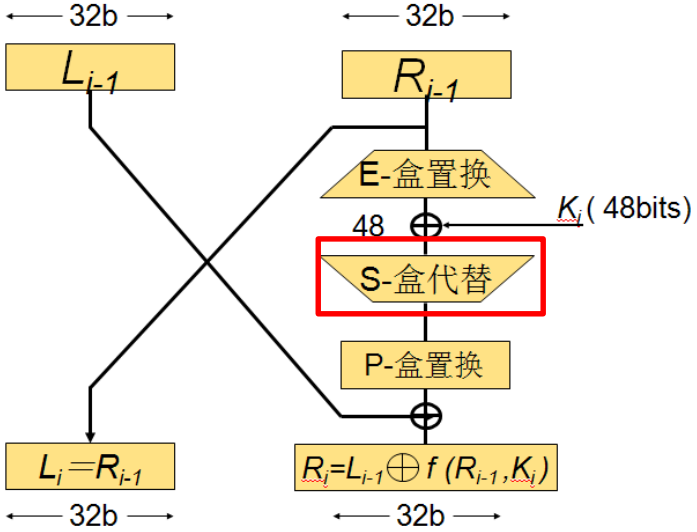
- **E-盒置换**
  - 将32位扩展成48位
  - 目的：输入的一位影响下一步的两个替换，使得输出对输入的依赖性传播得更快，密文的每一位都依赖于明文的每一位

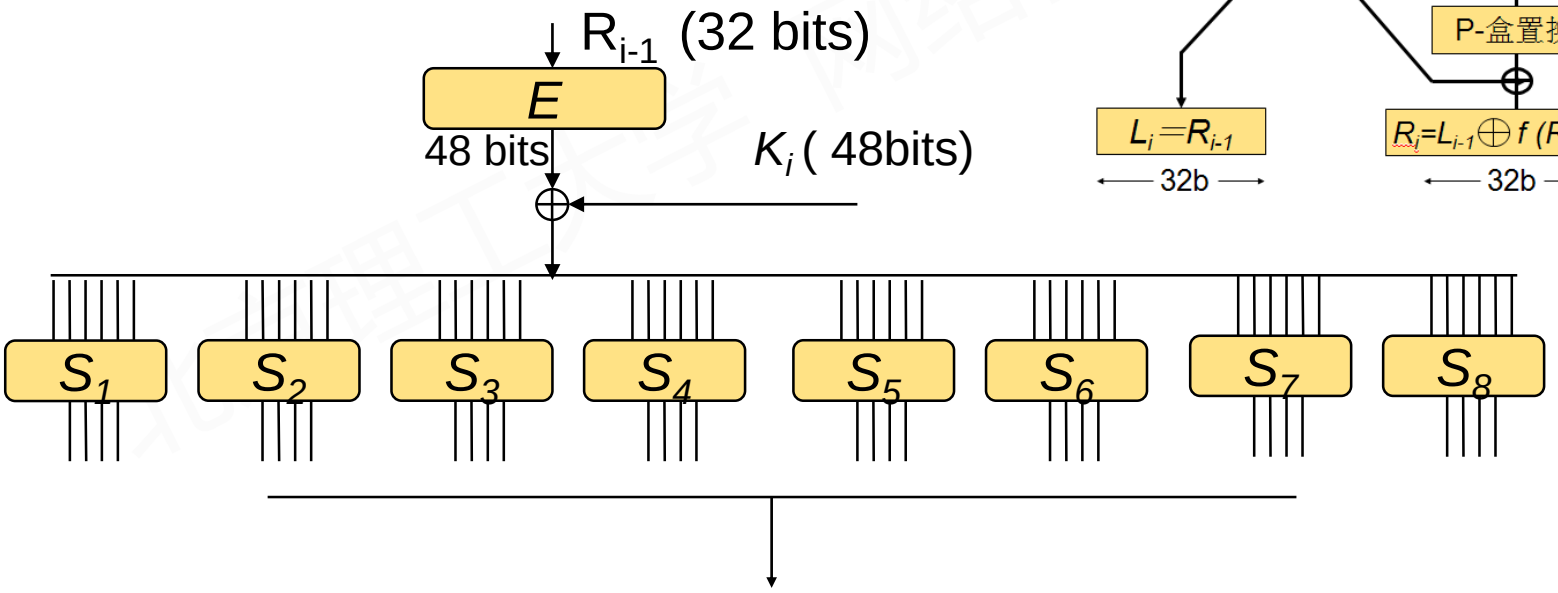




DES算法

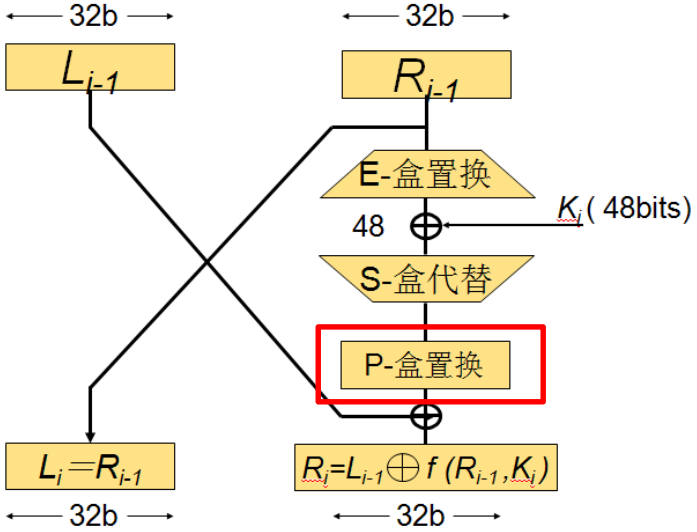
- **S-盒置换**
  - **将48位压缩成32位**
  - **S_i输入6位，查表输出4位**





DES算法

- **P-盒置换**
  - **32位输入32位输出**
  - **仅置换位置**



1	2	3	4	5	6	7	8	9											30	31	32
16	7	20	21	29	12	28	17	1	15	.	.	..	.					.	11	4	25

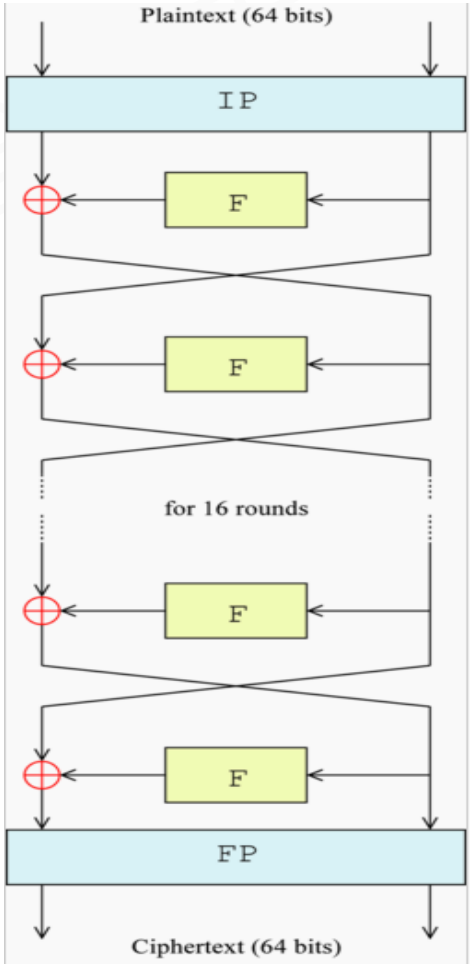
DES算法

- **DES的解密过程**

$$m = DES^{-1}(c) = IP^{-1} \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \ldots T_{15} \cdot T_{16}$$

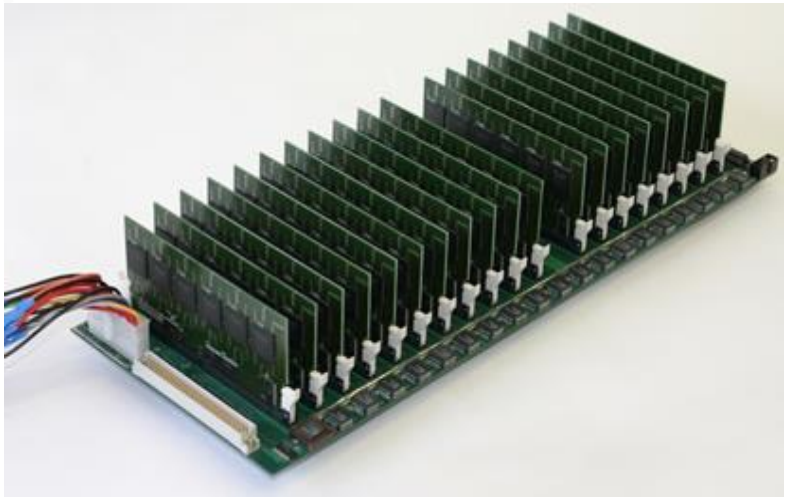
  - DES的解密过程与加密过程十分相似
  - 不同是，将16次迭代的顺寻颠倒
  - 可以证明

$$DES^{-1}(DES(m)) = m$$



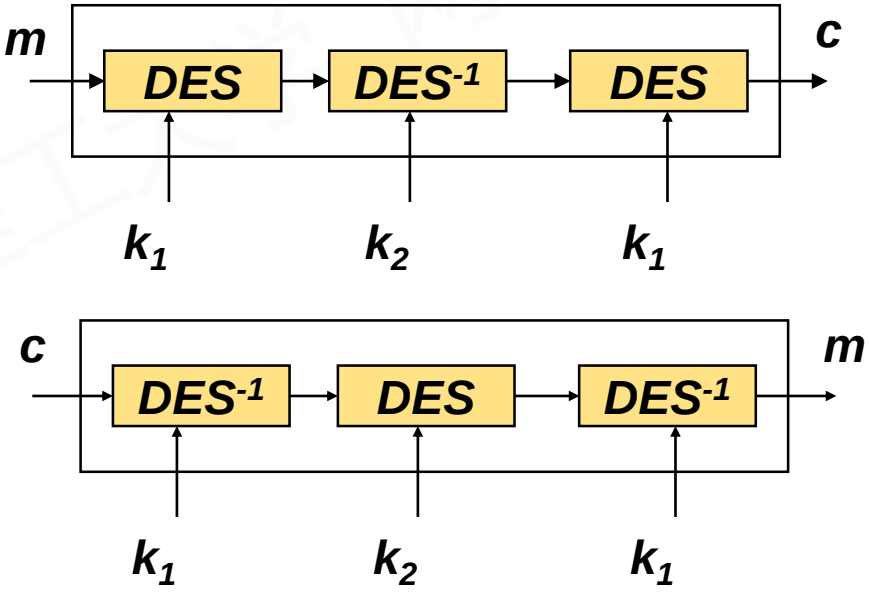
DES算法

- **DES的安全性**
  - 1976年，耗资2000万美元的计算机，可以在一天中找到密钥。
  - 1993年，设计100万美元的计算机3.5小时用穷举法找到密钥。
  - 2006年，1万美元的计算机可以用6.4天可以找到密钥。
  - DES安全性不足源自于密钥太短



Triple DES算法

- **Triple DES算法**
  - **3DES算法，密钥长度是112比特，$k=k_1k_2$**
  - **密钥数量：2^{112}**



DES算法的硬件实现

- **商业DES芯片**
  - **VLSI公司的VM009芯片**
  - **1993年制造，200M Bytes/s**
  - **2009年，采用FPGA技术，速度可达到750M Bytes/s**
- **软件实现**
  - **采用双核服务器，速度约19M Bytes/s**

对称密钥密码算法

算法	密钥长度	迭代次数	数学操作	应用
DES	56	16	XOR, S-Box	
3DES	112 or 168	48	XOR,S-Box	PGP,S/MIME
IDEA	128	8	XOR, +, ×	PGP
BlowFish	最大448	16	XOR, S-Box, +	
RC5	最大2048	<255	+,—, XOR	
CAST-128	40 - 128	16	+,—, S-Box	PGP

RC4算法

- **算法历史**
  - **RC4是RSA算法发明人Ronald Rivest在1987年设计**
  - **2002年图灵奖获得者**
  - **Ron’s Code 4 (Rivest Cipher 4), RC2, RC5, RC6**
  - **密钥长度可变的流加密算法簇**
  - **其核心部分的S-Box长度可为任意，但一般为256字节**
  - **该算法速度是DES算法的10倍**

RC4算法

- **算法思想**
  - **RC4产生一个伪随机bit流，与输入流明文逐位异或**
  - **解密时，用密文与伪随机bit流逐位异或产生明文**
  - **异或操作具有对称性：**

    0 x 1 x 1 = 0 ； 0 x 0 x 0 = 0; 1 x 1 x 1 = 1 ; 1 x 0 x 0 = 1
  - **RC4算法关键是根据密钥产生伪随机bit流**
    - **使用了一个256位的转换器（S-BOX）**
    - **两个指针**

RC4算法

- **密钥的使用（密钥调度算法）**
  - **对于变长密钥，应用它置换S-BOX**
  - **伪代码，其中S为一个字节数组**

```
for i from 0 to 255
    S[i] := i
endfor
j := 0
for i from 0 to 255
    j := (j + S[i] + key[i mod keylength]) mod 256
    swap(&S[i],&S[j])
endfor
```

RC4算法

- **伪随机流产生算法**
  - **RPGA: pseudo-random generation algorithm**
  - **每周期i增加1， j增加S[i]，每次运算可输出一个Byte**

```
i := 0
j := 0
while GeneratingOutput:
     i := (i + 1) mod 256
     j := (j + S[i]) mod 256
     swap(&S[i],&S[j])
     output S[(S[i] + S[j]) mod 256]
endwhile
```

RC4算法

- **伪随机流产生算法**