

## 《现代密码学》第四讲

# 分组密码 (二)

# 上节内容回顾

- 分组密码定义
- 分组密码算法的设计思想

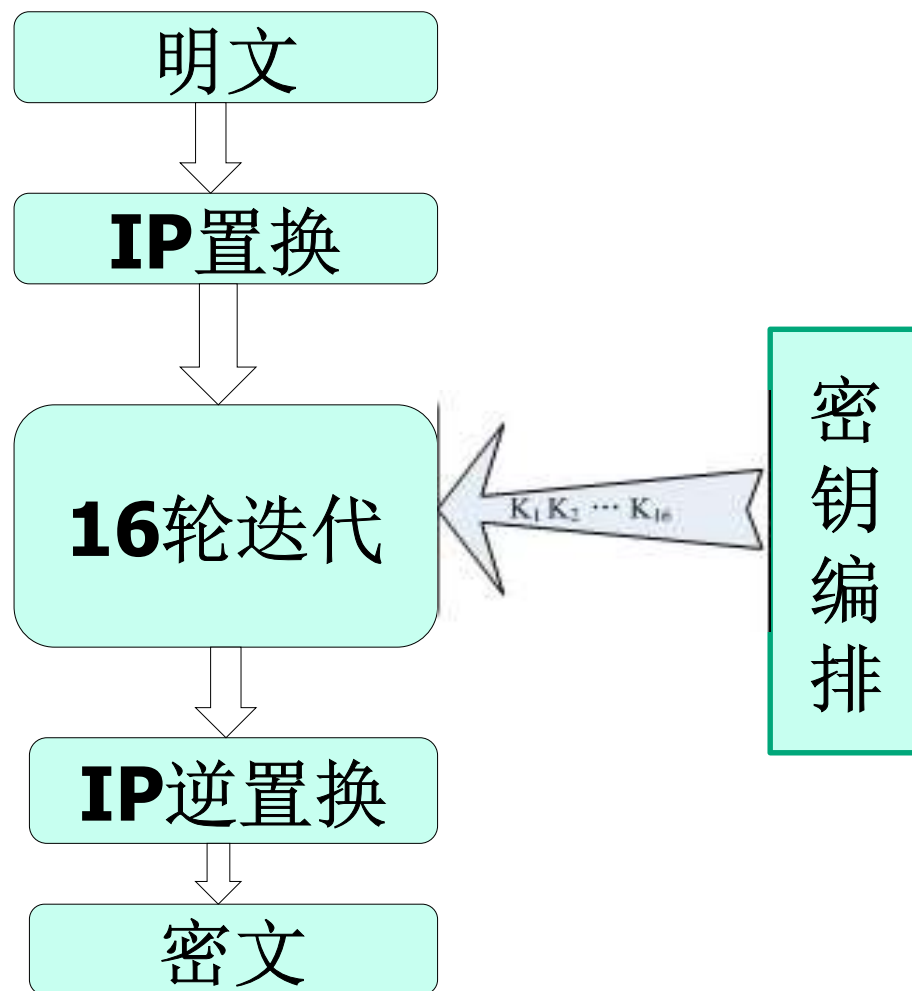
# 本节主要内容

- **DES**算法的整体结构
- **DES**算法的轮函数
- **DES**算法的密钥编排算法
- **DES**算法的安全增强

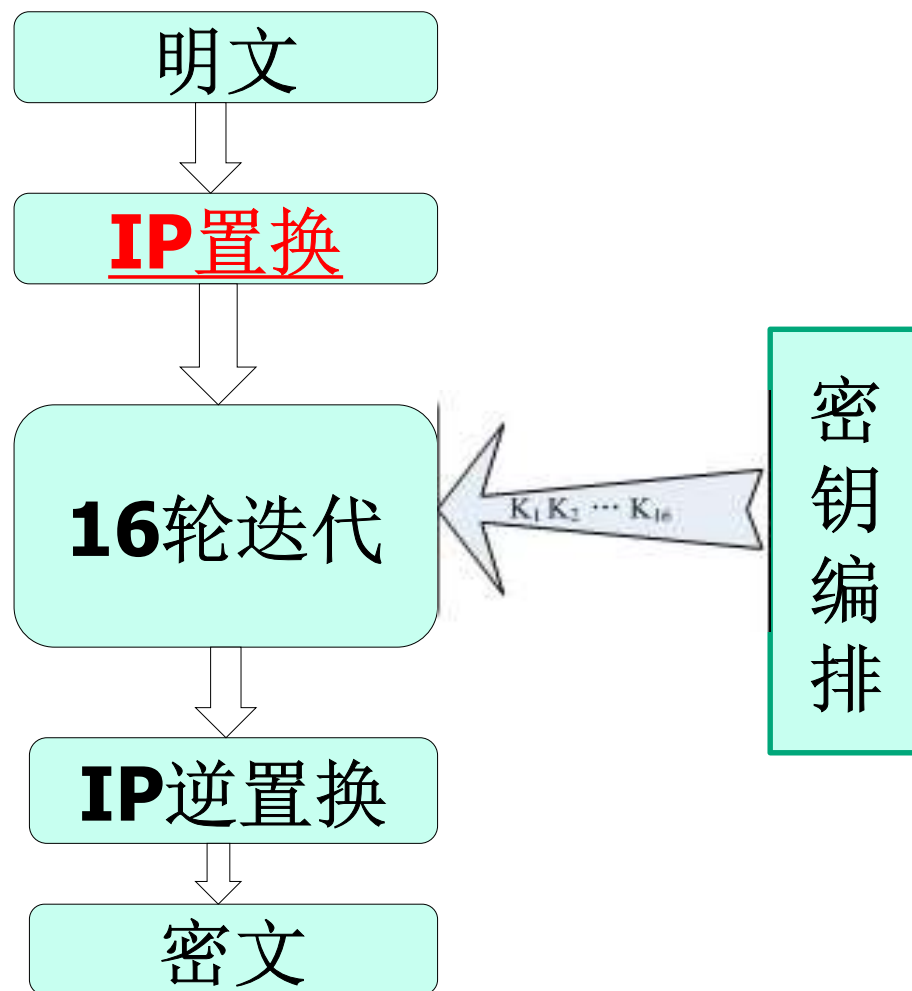
# 本节主要内容

- **DES**算法的整体结构
- **DES**算法的轮函数
- **DES**算法的密钥编排算法
- **DES**算法的安全增强

# DES算法的整体结构



# DES算法的整体结构



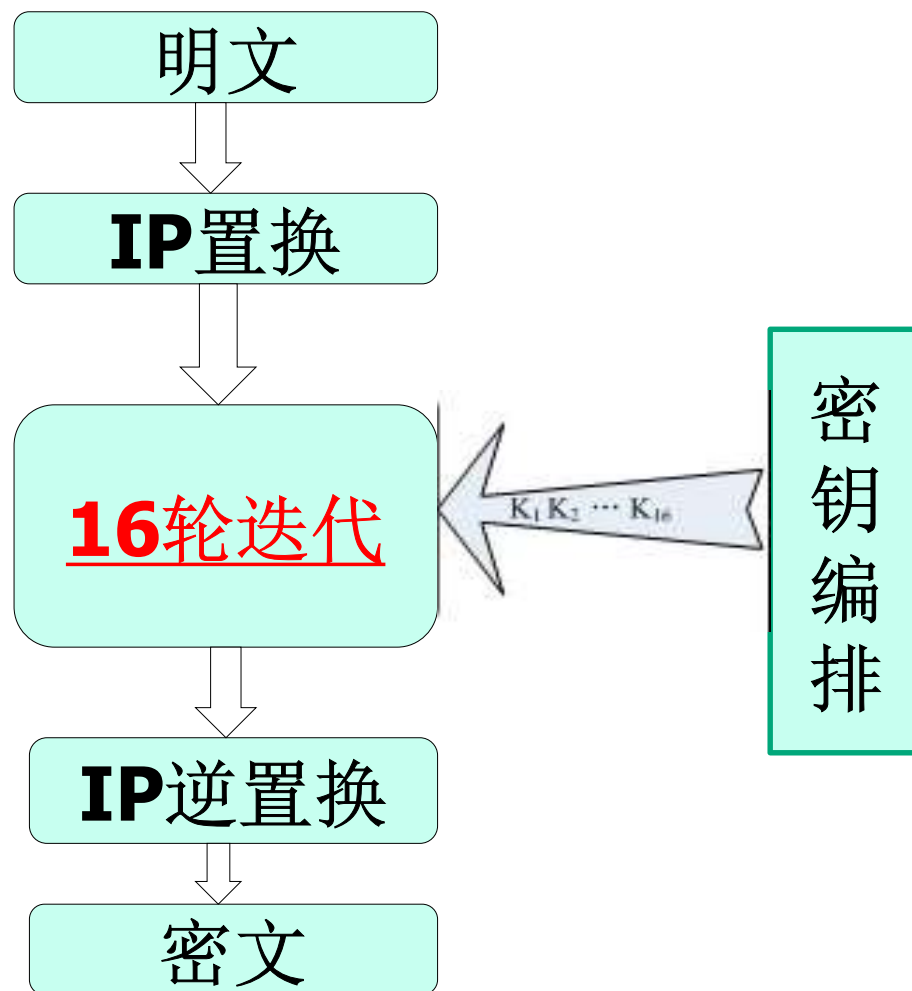
# DES算法的整体结构

- 1. 给定明文，通过一个固定的初始置换IP来重排输入明文块P中的比特，得到比特串 $P_0 = IP(P) = L_0R_0$ ，这里 $L_0$ 和 $R_0$ 分别是 $P_0$ 的前32比特和后32比特

初始置换IP

IP							
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算法的整体结构





# DES算法的整体结构

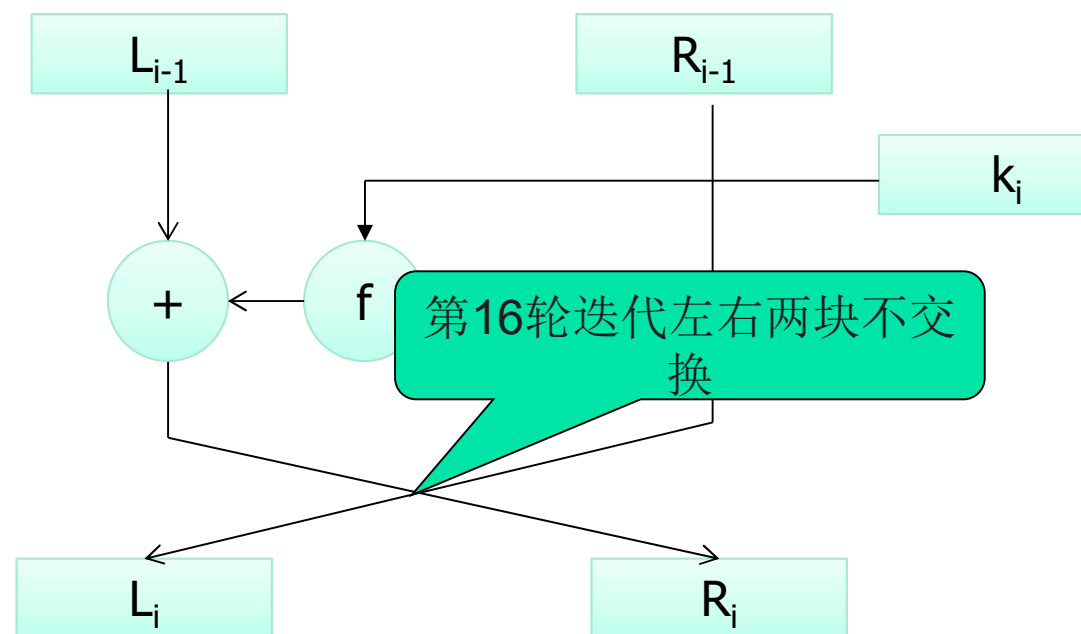
- Feistel结构
- 2. 按下述规则进行16次迭代，即 $1 \leq i \leq 16$

$$L_i = R_{i-1}$$

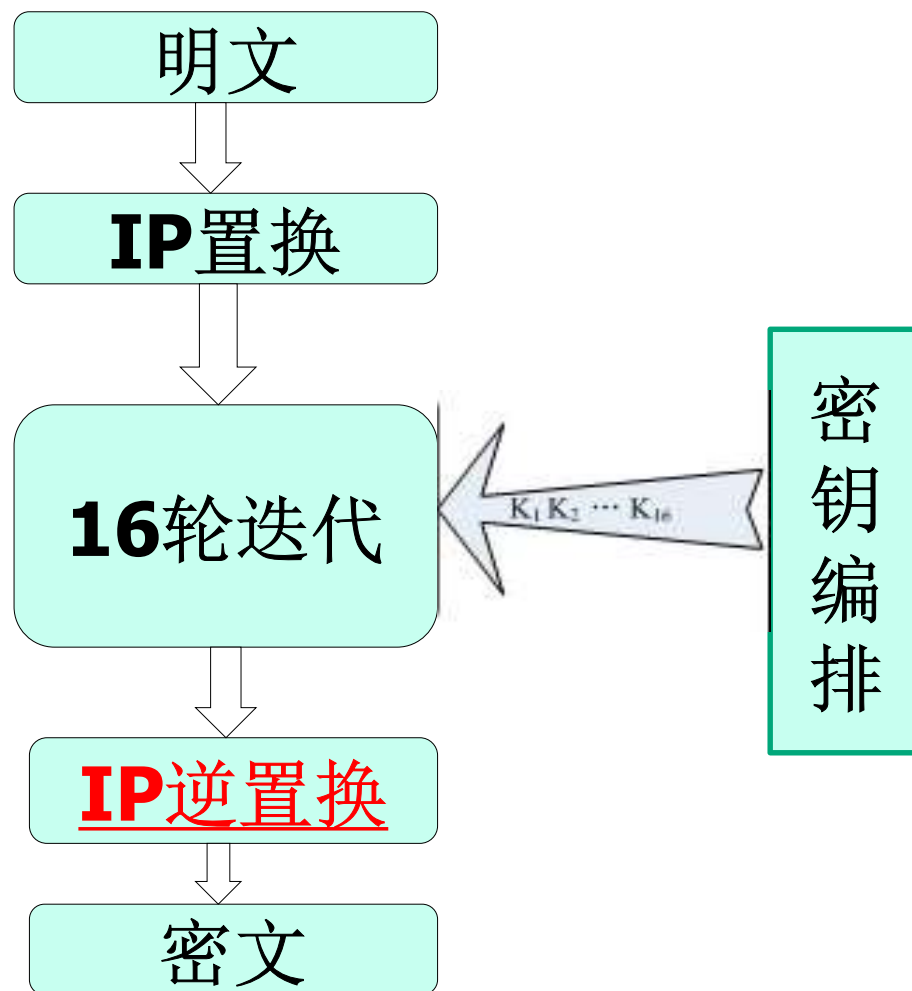
$$R_i = L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i)$$

这里 是对应比特的模2加，  
f是一个函数（称为轮函数）；

16个长度为48比特的子密钥 $K_i$  ( $1 \leq i \leq 16$ ) 是由密钥k经密钥编排函数计算出来的。



# DES算法的整体结构——Feistel结构



# DES算法的整体结构——Feistel结构

- 3. 对比特串 $R_{16}L_{16}$ 使用逆置换 $IP^{-1}$ 得到密文 $C$ ，即 $C=IP^{-1}(R_{16}L_{16})$ 。（注意 $L_{16}$ 和 $R_{16}$ 的相反顺序）

初始置换的  
逆置换 $IP^{-1}$

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

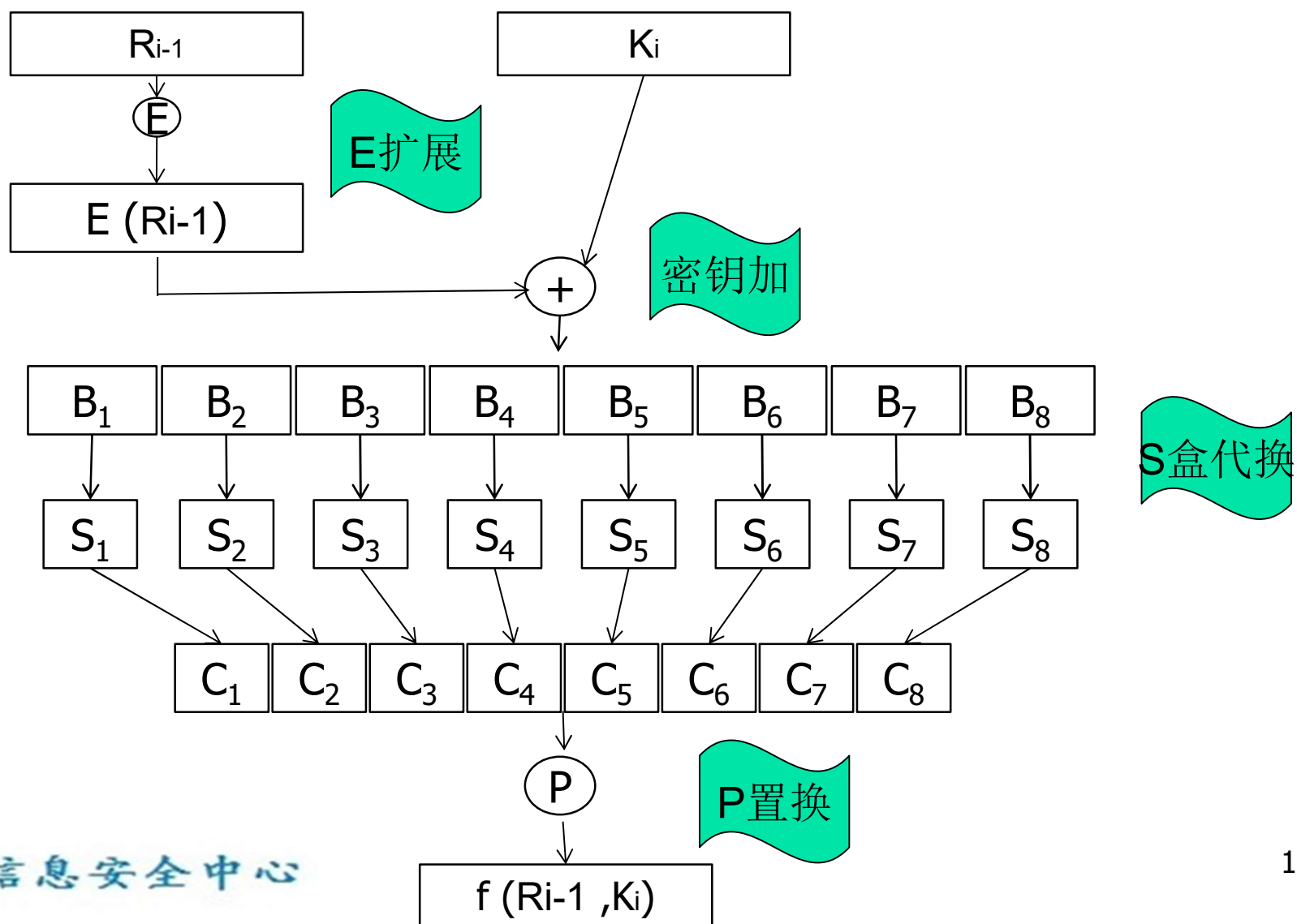
# 本节主要内容

- DES算法的整体结构——Feistel结构
- DES算法的轮函数
- DES算法的密钥编排算法
- DES算法的安全增强

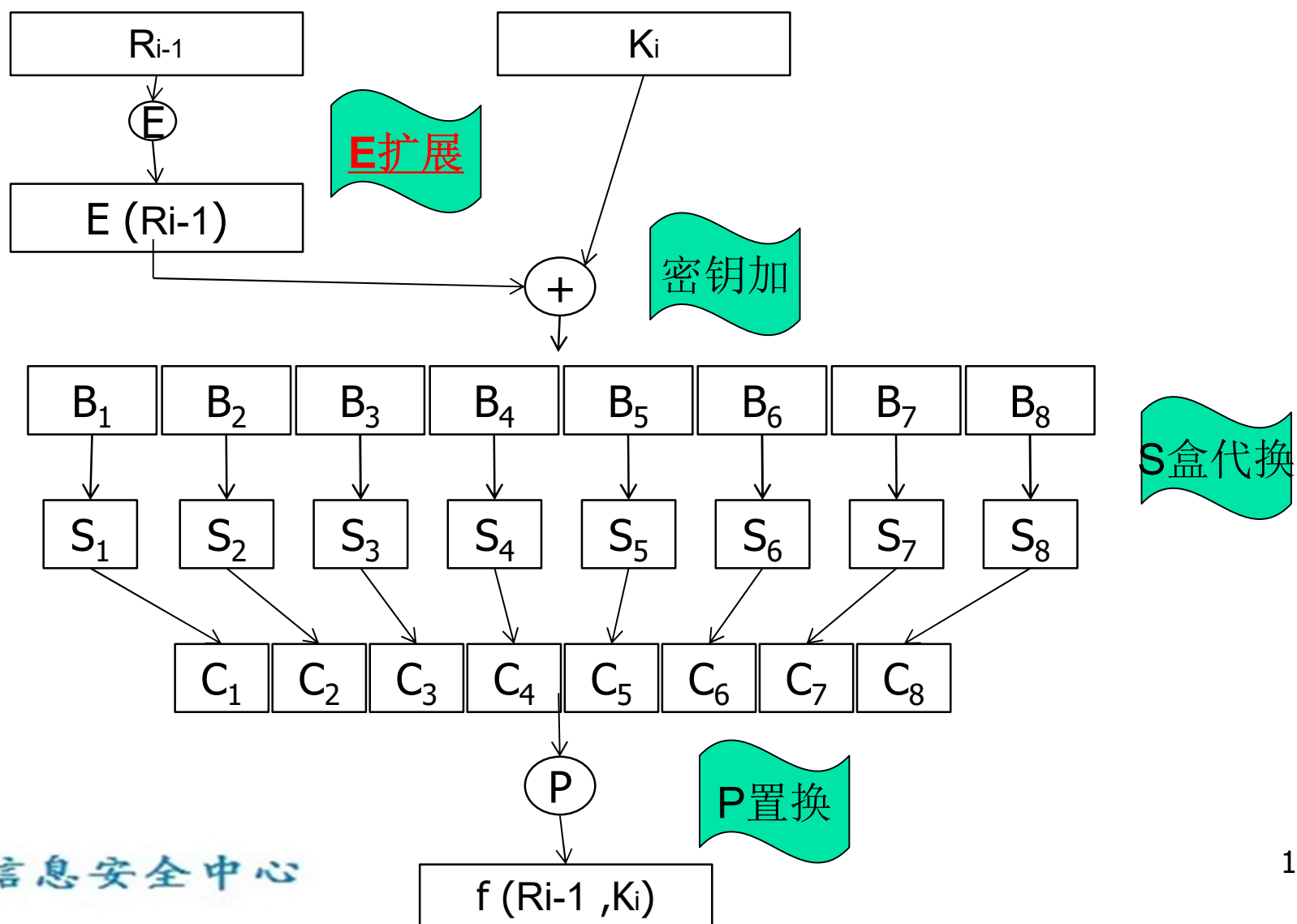
# DES的轮函数

函数 $f$ 以长度为32比特串 $R_{i-1}$ 作为第一输入，以长度为48比特串 $K_i$ 作为第二个输入，产生长度为32比特的输出

# DES的轮函数



# DES的轮函数



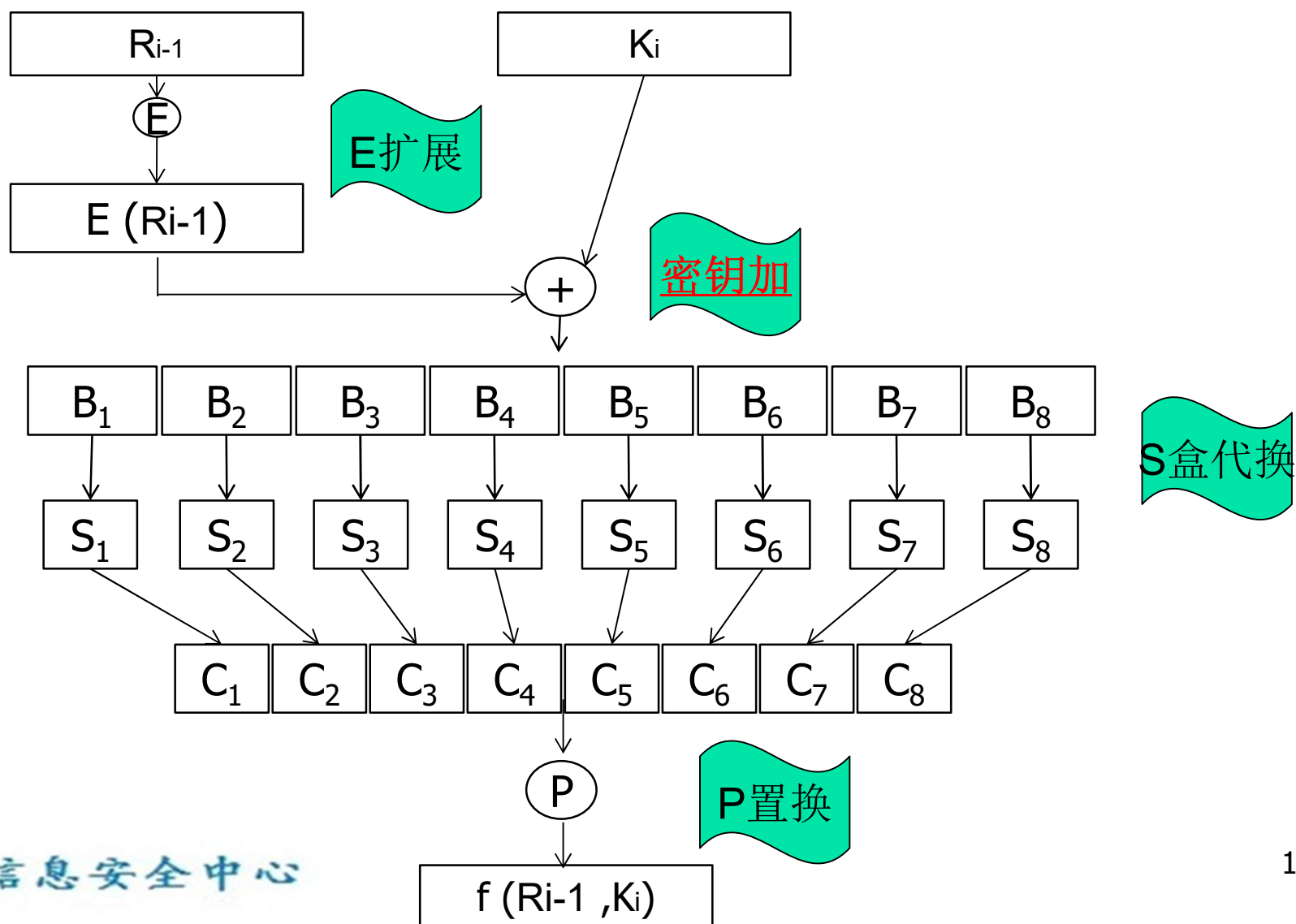
# DES的轮函数

**E扩展**:  $R_{i-1}$  根据扩展规则扩展为48比特长度的串;

E比特——选择表					
32	1	2	3	4	5
4	5	6	7	8	9
8	9	10	11	12	13
12	13	14	15	16	17
16	17	18	19	20	21
20	21	22	23	24	25
24	25	26	27	28	29
28	29	30	31	32	1



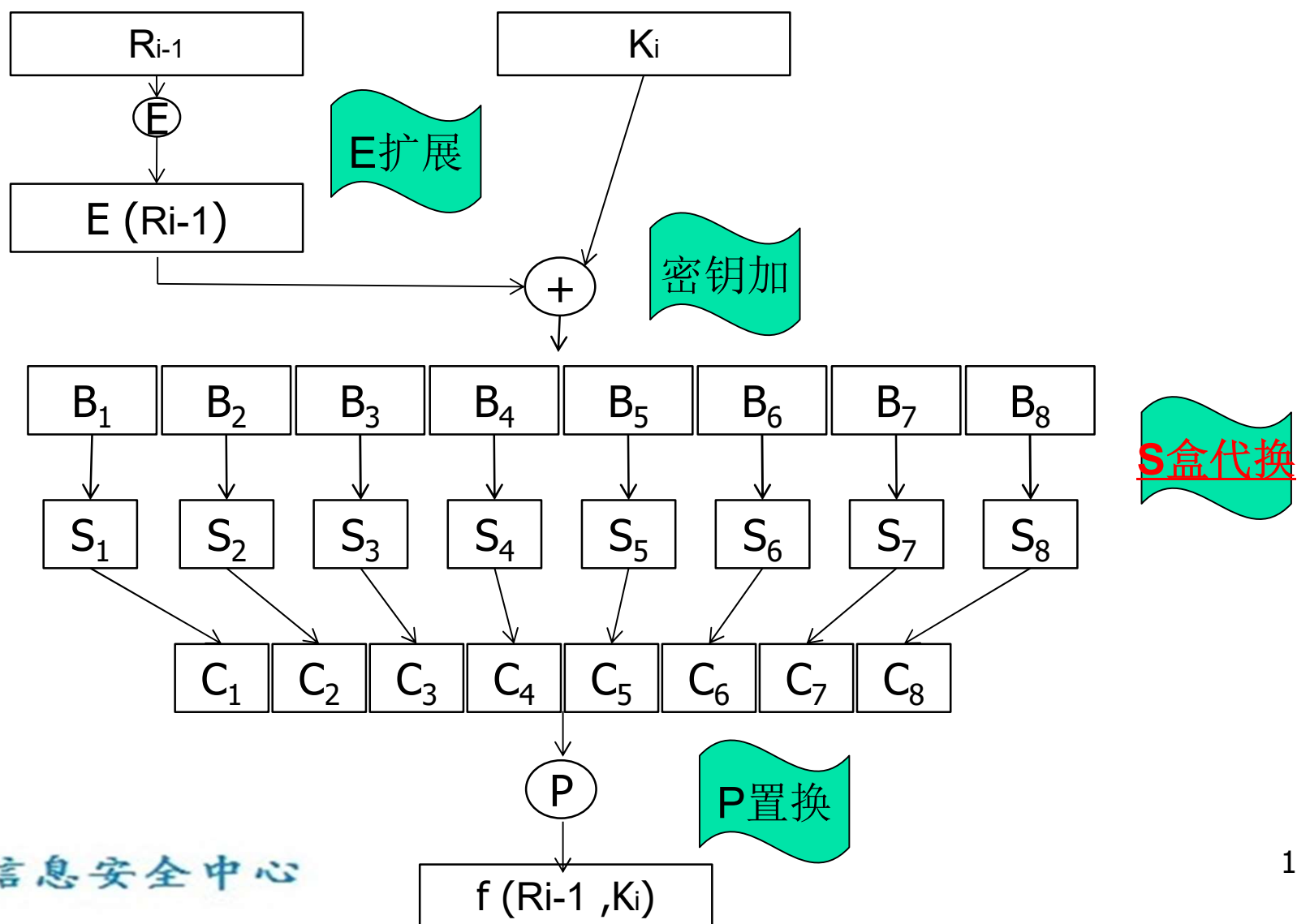
# DES的轮函数



# DES的轮函数

**密钥加：**计算  $E(R_{i-1}) \oplus K_i$ ，并将结果写成8个比特串，每个6比特， $B=B_1B_2B_3B_4B_5B_6B_7B_8$ .

# DES的轮函数



# DES的轮函数

**S盒代换**: 使用8个S盒 $S_1 \cdots S_8$ . 每个 $S_i$ 是一个固定的 $4 \times 16$ 阶矩阵, 其元素取 $0 \sim 15$ 之间的整数.

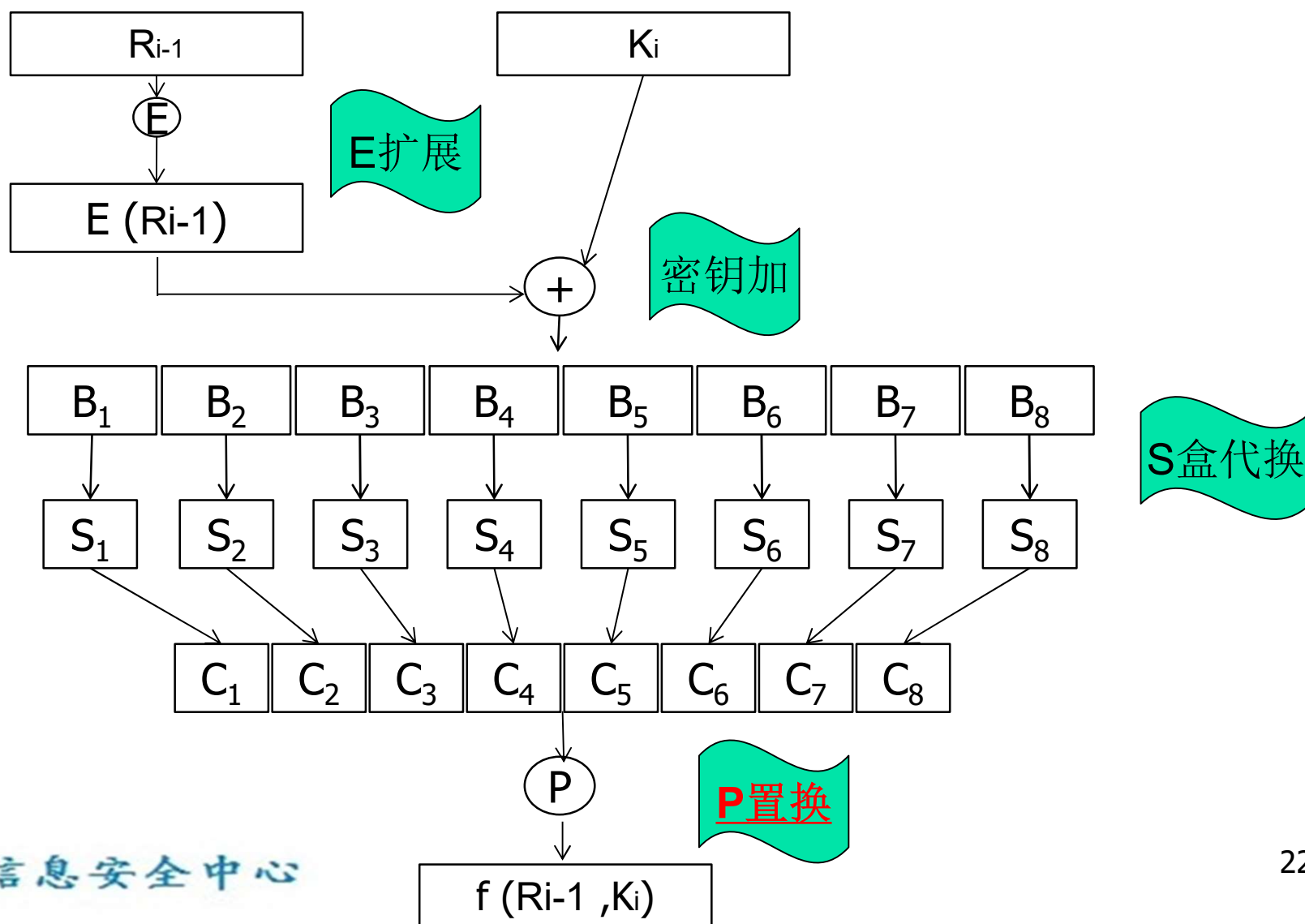
给定长度为6的比特串, 如 $B_j = b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6$ ,  
 $S_j(B_j)$  计算如下:

- 1)  $b_1 b_6$  两个比特确定了 $S_j$ 的行 $r$ 的二进制表示 ( $0 \leq r \leq 3$ ),
- 2)  $b_2 b_3 b_4 b_5$  四个比特确定了 $S_j$ 的列 $c$ 的二进制表示 ( $0 \leq c \leq 15$ ),
- 3)  $S_j(B_j)$  定义成长度为4的比特串的值  $S_j(r, c)$ . 由此可以算出  $C_j = S_j(B_j)$ ,  $1 \leq j \leq 8$ .

S <sub>1</sub>															
14	4	13	1	2	15	11	8	3	10	6	12	5	9	0	7
0	15	7	4	14	2	13	1	10	6	12	11	9	5	3	8
4	1	14	8	13	6	2	11	15	12	9	7	3	10	5	0
15	12	8	2	4	9	1	7	5	11	3	14	10	0	6	13
S <sub>2</sub>															
15	1	8	14	6	11	3	4	9	7	2	13	12	0	5	10
3	13	4	7	15	2	8	14	12	0	1	10	6	9	11	5
0	14	7	11	10	4	13	1	5	8	12	6	9	3	2	15
13	8	10	1	3	15	4	2	11	6	7	12	0	5	14	9
S <sub>3</sub>															
10	0	9	14	6	3	15	5	1	13	12	7	11	4	2	8
13	7	0	9	3	4	6	10	2	8	5	14	12	11	15	1
13	6	4	9	8	15	3	0	11	1	2	12	5	10	14	7
1	10	13	0	6	9	8	7	4	15	14	3	11	5	2	12
S <sub>4</sub>															
7	13	14	3	0	6	9	10	1	2	8	5	11	12	4	15
12	8	11	5	6	15	0	3	4	7	2	12	1	10	14	9
10	6	9	0	12	11	7	13	15	1	3	14	5	2	8	4
3	15	0	6	10	1	13	8	9	4	5	11	12	7	2	14
S <sub>5</sub>															
2	12	4	1	7	10	11	6	8	5	3	15	13	0	14	9
14	11	2	12	4	7	13	1	5	0	15	10	3	9	8	6
4	2	1	11	10	13	7	8	15	9	12	5	6	3	0	14
11	8	12	7	1	14	2	13	6	15	0	9	10	4	5	3
S <sub>6</sub>															
12	1	10	15	9	2	6	8	0	13	3	4	14	7	5	11
10	15	4	2	7	12	9	5	6	1	13	14	0	11	3	8
9	14	15	5	2	8	12	3	7	0	4	10	1	13	11	6
4	3	2	12	9	5	15	10	11	14	1	7	6	0	8	13
S <sub>7</sub>															
4	11	2	14	15	0	8	13	3	12	9	7	5	10	6	1
13	0	11	7	4	9	1	10	14	3	5	12	2	15	8	6
1	4	11	13	12	3	7	14	10	15	6	8	0	5	9	2
6	11	13	8	1	4	10	7	9	5	0	15	14	2	3	12
S <sub>8</sub>															
13	2	8	4	6	15	11	1	10	9	3	14	5	0	12	7
1	15	13	8	10	3	7	4	12	5	6	11	0	14	9	2
7	11	4	1	9	12	14	2	0	6	10	13	15	3	5	8
2	1	14	7	4	10	8	13	15	12	9	0	3	5	6	11



# DES的轮函数



# DES的轮函数

**P置换**: 长度为32比特串 $C=C_1C_2C_3C_4C_5C_6C_7C_8$ , 根据固定置换 $P(*)$ 进行置换, 得到比特串 $P(C)$ 。

P置换			
16	7	20	21
29	12	28	17
1	15	23	26
5	18	31	10
2	8	24	14
32	27	3	9
19	13	30	6
22	11	4	25

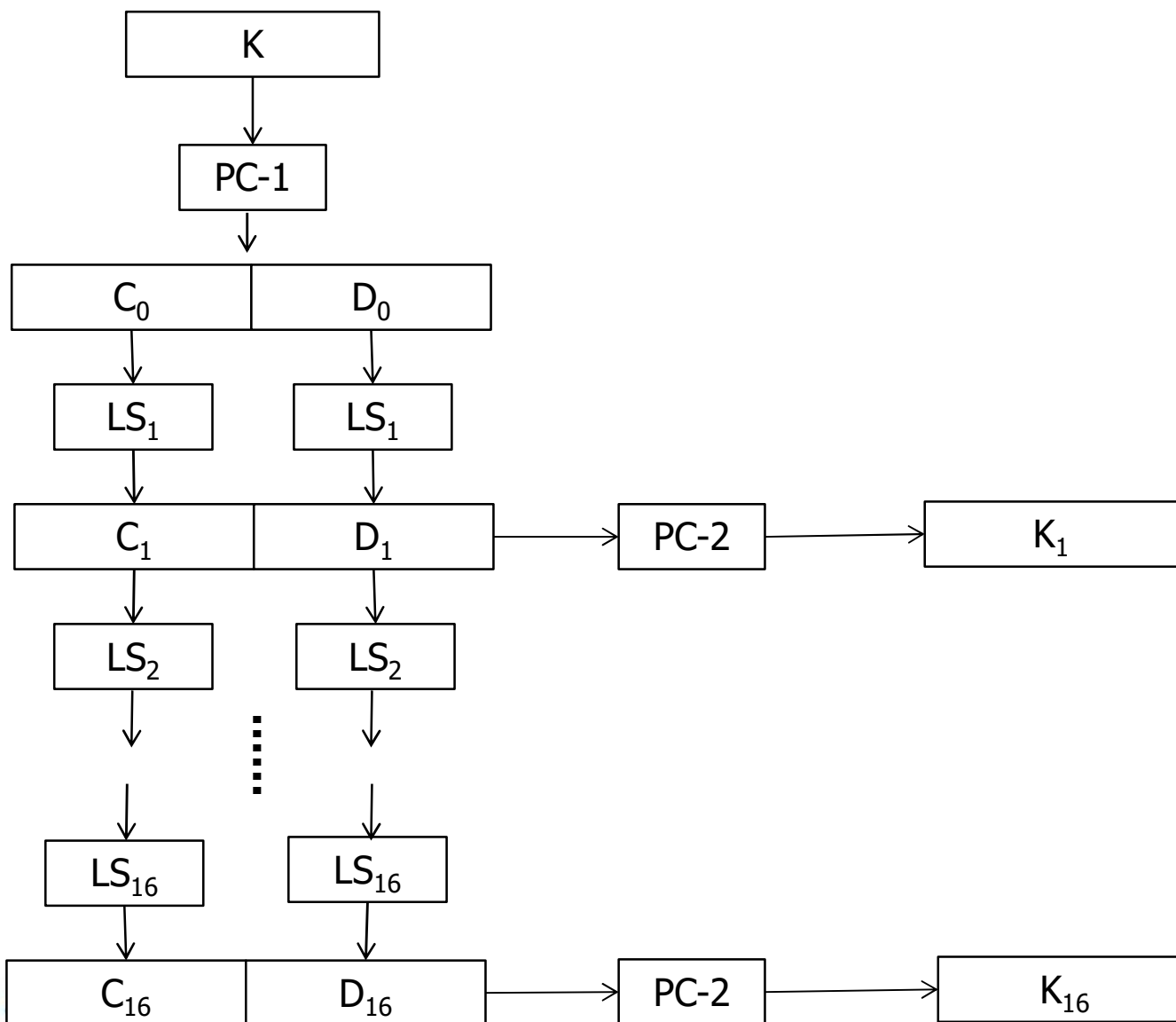
# 本节主要内容

- DES算法的整体结构——Feistel结构
- DES算法的轮函数
- **DES算法的密钥编排算法**
- DES算法的安全增强



# DES算法的密钥编排算法

每轮中使用的子密钥  
根据密钥编排算法  
从主密钥K中获得  
子密钥 $K_i$ :



# DES算法的密钥编排算法

- 给定64比特密钥K，根据固定的置换PC-1来处理K得到PC-1 (K)  
=C<sub>0</sub>D<sub>0</sub>，其中C<sub>0</sub>和D<sub>0</sub>分别由最前和最后28比特组成

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

# DES算法的密钥编排算法

- 计算 $C_i = LS_i(C_{i-1})$ 和 $D_i = LS_i(D_{i-1})$ ，且 $K_i = PC-2(C_i D_i)$ ， $LS_i$ 表示循环左移两个或一个位置，具体地，如果 $i=1, 2, 9, 16$ 就移一个位置，否则就移两个位置， $PC-2$ 是另一个固定的置换。

# DES算法的密钥编排算法

PC-2					
14	17	11	24	1	5
3	28	15	6	21	10
23	19	12	4	26	8
16	7	27	20	13	2
41	52	31	37	47	55
30	40	51	45	33	48
44	49	39	56	34	53
46	42	50	36	29	32

# DES算法的密钥编排算法

- 对 $1 \leq i \leq 16$ , DES的每一轮中使用K的56比特中的48个比特, 具体选取位置由下表确定



轮 1

10	51	34	60	49	17	33	57	2	9	19	42
3	35	26	25	44	58	59	1	36	27	18	41
22	28	39	54	37	4	47	30	5	53	23	29
61	21	38	63	15	20	45	14	13	62	55	31

轮 2

2	43	26	52	41	9	25	49	59	1	11	34
60	27	18	17	36	50	51	58	57	19	10	33
14	20	31	46	29	63	39	22	28	45	15	21
53	13	30	55	7	12	37	6	5	54	47	23

轮 3

51	27	10	36	25	58	9	33	43	50	60	18
44	11	2	1	49	34	35	42	41	3	59	17
61	4	15	30	13	47	23	6	12	29	62	5
37	28	14	39	54	63	21	53	20	38	31	7

轮 4

35	11	59	49	9	42	58	17	27	34	44	2
57	60	51	50	33	18	19	26	25	52	43	1
45	55	62	14	28	31	7	53	63	13	46	20
21	12	61	23	38	47	5	37	4	22	15	54

轮 5;

19	60	43	33	58	26	42	1	11	18	57	51
41	44	35	34	17	2	3	10	9	36	27	50
29	39	46	61	12	15	54	37	47	28	30	4
5	63	45	7	22	31	20	21	55	6	62	38

轮 6

3	44	27	17	42	10	26	50	60	2	41	35
25	57	19	18	1	51	52	59	58	49	11	34
13	23	30	45	63	62	38	21	31	12	14	55
20	47	29	54	6	15	4	5	39	53	46	22

轮 7

52	57	11	1	26	59	10	34	44	51	25	19
9	41	3	2	50	35	36	43	42	33	60	18
28	7	14	29	47	46	22	5	15	63	61	39
4	31	13	38	53	62	55	20	23	37	30	6

轮 8

36	41	60	50	10	43	59	18	57	35	9	3
58	25	52	51	34	19	49	27	26	17	44	2
12	54	61	13	31	30	6	20	62	47	45	23
55	15	28	22	37	46	39	4	7	21	14	53





轮 9

57	33	52	42	2	35	51	10	49	27	1	60
50	17	44	43	26	11	41	19	18	9	36	59
4	46	53	55	23	22	61	12	54	39	37	15
47	7	20	14	29	38	31	63	62	13	6	45

轮 13

58	34	17	43	3	36	52	11	50	57	2	35
51	18	9	44	27	41	42	49	19	10	1	60
7	45	20	39	22	21	28	15	53	38	4	14
46	6	23	13	63	37	30	62	61	47	5	12

轮 10

41	17	36	26	51	19	35	59	33	11	50	44
34	1	57	27	10	60	25	3	2	58	49	43
55	30	37	20	7	6	45	63	38	23	21	62
31	34	4	61	13	22	15	47	46	28	53	29

轮 14

42	18	1	27	52	49	36	60	34	41	51	9
35	2	58	57	11	25	26	33	3	59	50	44
54	29	4	23	6	5	12	62	37	22	55	61
30	53	7	28	47	21	14	46	45	31	20	63

轮 11

25	1	49	10	35	3	19	43	17	60	34	57
18	50	41	11	59	44	9	52	51	42	33	27
39	14	21	4	54	53	29	47	22	7	5	46
15	38	55	45	28	6	62	31	30	12	37	13

轮 15

26	2	50	11	36	33	49	44	18	25	35	58
19	51	42	41	60	9	10	17	52	43	34	57
38	13	55	7	53	20	63	46	21	6	39	45
14	37	54	12	31	5	61	30	29	15	4	47

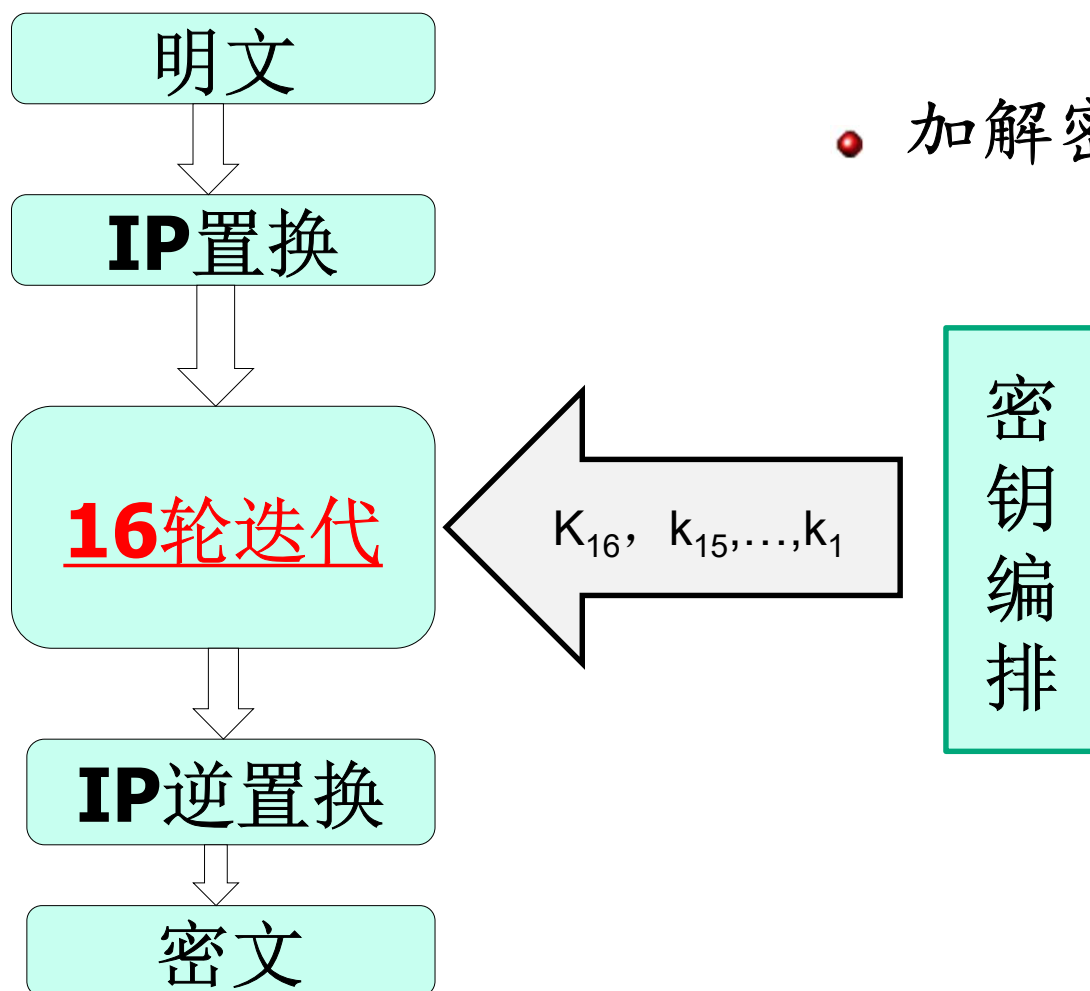
轮 12

9	50	33	59	19	52	3	27	1	44	18	41
2	34	25	60	43	57	58	36	35	26	17	11
23	61	5	55	38	37	13	31	6	54	20	30
62	22	39	29	12	53	46	15	14	63	21	28

轮 16

18	59	42	3	57	25	41	36	10	17	27	50
11	43	34	33	52	1	2	9	44	35	26	49
30	5	47	62	45	12	55	38	13	61	31	37
6	29	46	4	23	28	53	22	21	7	63	39

# DES算法的解密流程



• 加解密相似



# 本节主要内容

- DES算法的整体结构——Feistel结构
- DES算法的轮函数
- DES算法的密钥编排算法
- DES算法的安全增强

# DES算法的安全增强

## 穷举搜索攻击

目标：给定输入输出对  $(m_i, c_i = E(k, m_i))$   
 $i=1, \dots, 3$ ，寻找密钥  $k$ 。

挑战消息

`msg = "The unknown messages is:  
XXXX ..."`

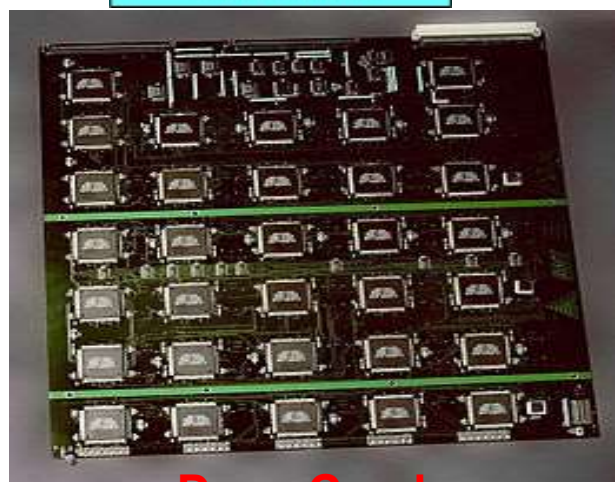
`CT = c1c2c3c4`



1997年1月

RSA  
Security  
公司

数据加密标准  
(DES)  
攻击挑战



Deep Crack



北京邮电大学

BEIJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS

## DES Challenge I

Rocke Verser,  
Justin Dolske, Matt Curtin, 和78,000个志愿者

分布式计算, 历时96 天

1997年4月18日

## DES Challenge II-1

distributed.net (or Distributed Computing Technologies, Inc.)

分布式计算, 历时39 天

1998年2月23日

## DES Challenge II-2

EFF ( Electronic Frontier Foundation)

造价\$250,000的DES破译机, 历时2.5 天

1998年7月15日

## DES Challenge III

EFF ( Electronic Frontier Foundation)

造价\$250,000的DES破译机, 历时22.5小时

1999年1月19日

## DES Challenge IV

COPACOBANA (120 FPGAs)

造价10K \$, 历时7天

2006年

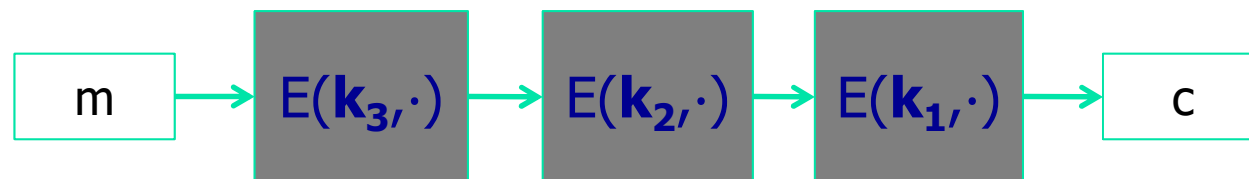
# DES算法的安全增强

**Triple-DES**  $3E((k_1, k_2, k_3), m) = E(k_3, E(k_2, E(k_1, m)))$

- 令  $E : K \times M \rightarrow C$  是一个分组密码

定义  $3E: K^3 \times M \rightarrow C$

密钥长度  $= 3 \times 56 = 168$  bits (穷举攻击复杂度  $\approx 2^{118}$ ).



# 主要知识点小结

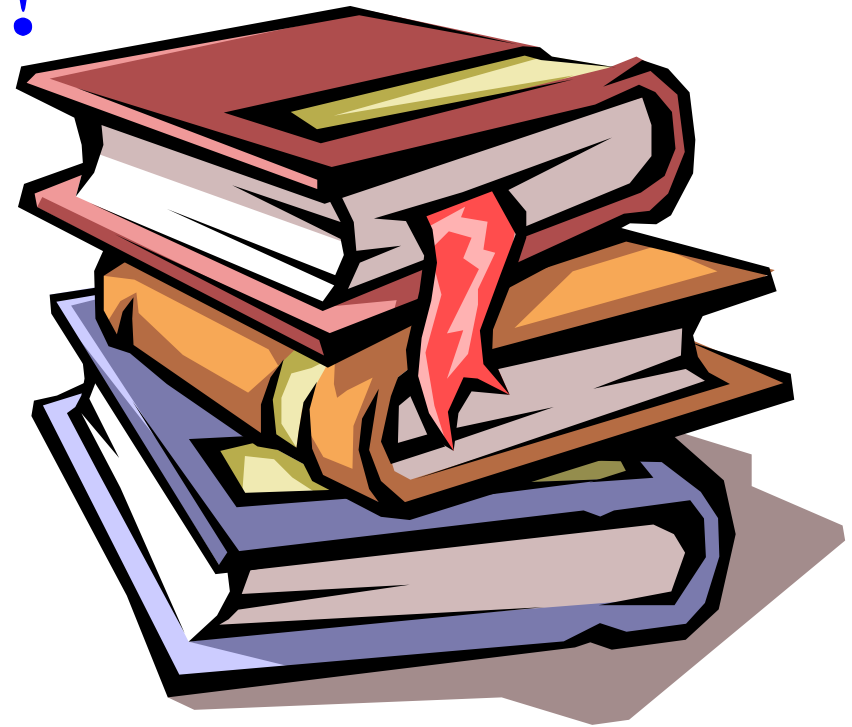
- DES算法的整体结构——Feistel结构
- DES算法的轮函数
- DES算法的密钥编排算法



北京邮电大学

BEIJING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS

THE END !



信息安全中心