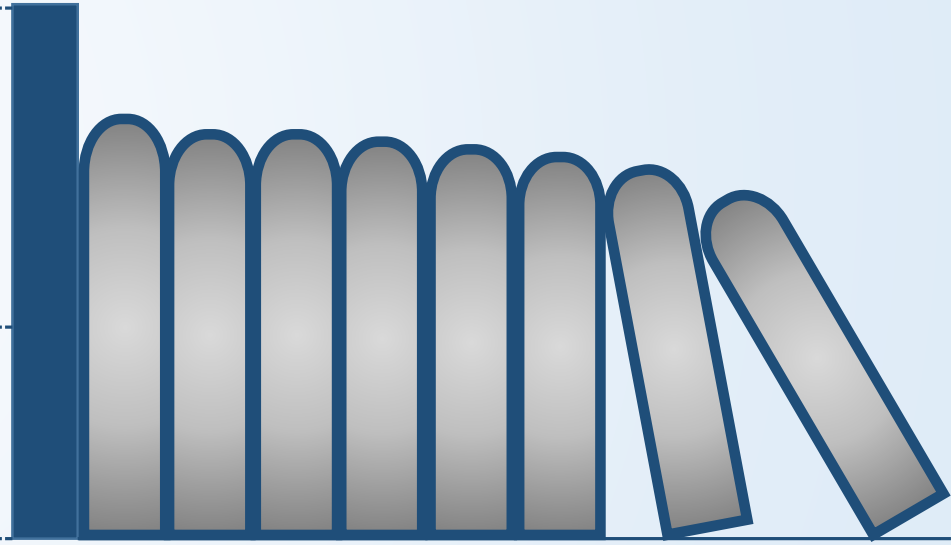
哈爾濱工業大學(深圳)
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SHENZHEN

AES密码算法实验

主讲教师：蒋琳

实验教师：苏婷



2021年11月24日星期三

实验目的

- 理解分组密码算法的基本思想
- 掌握 AES 算法加密和解密原理
- 掌握AES密钥扩展算法
- 了解AES密码算法S盒的构造方式

实验内容

1、编写程序完成AES-128算法的加密和解密过程，请用demo.c中的S盒、逆S盒、轮常量Rcon等信息；

2、过程输出10轮K_i的值，要求输出16进制格式；

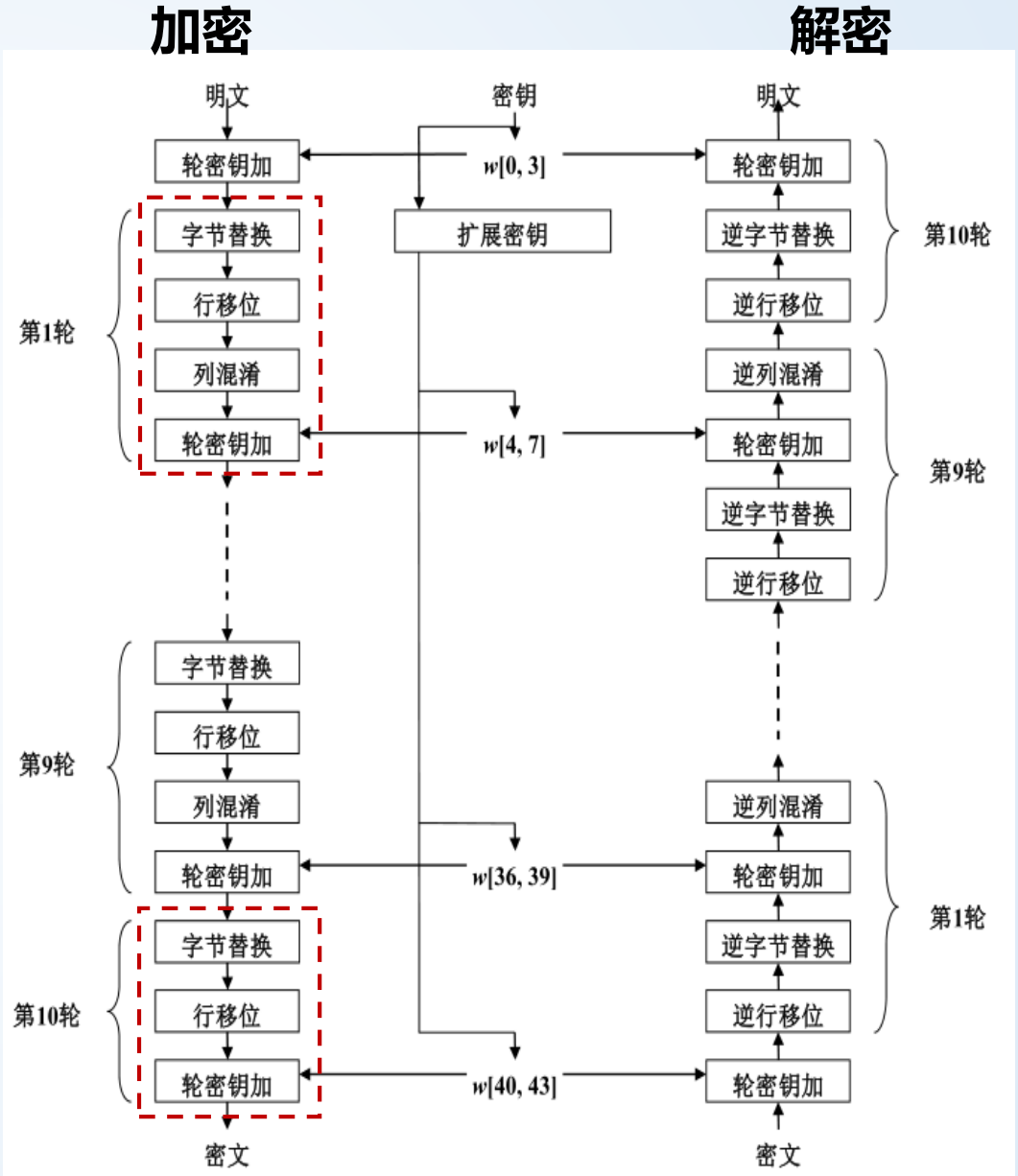
3、扩展：编码实现S盒和逆S盒。（选做）

实验原理

AES算法主要有四种运算：

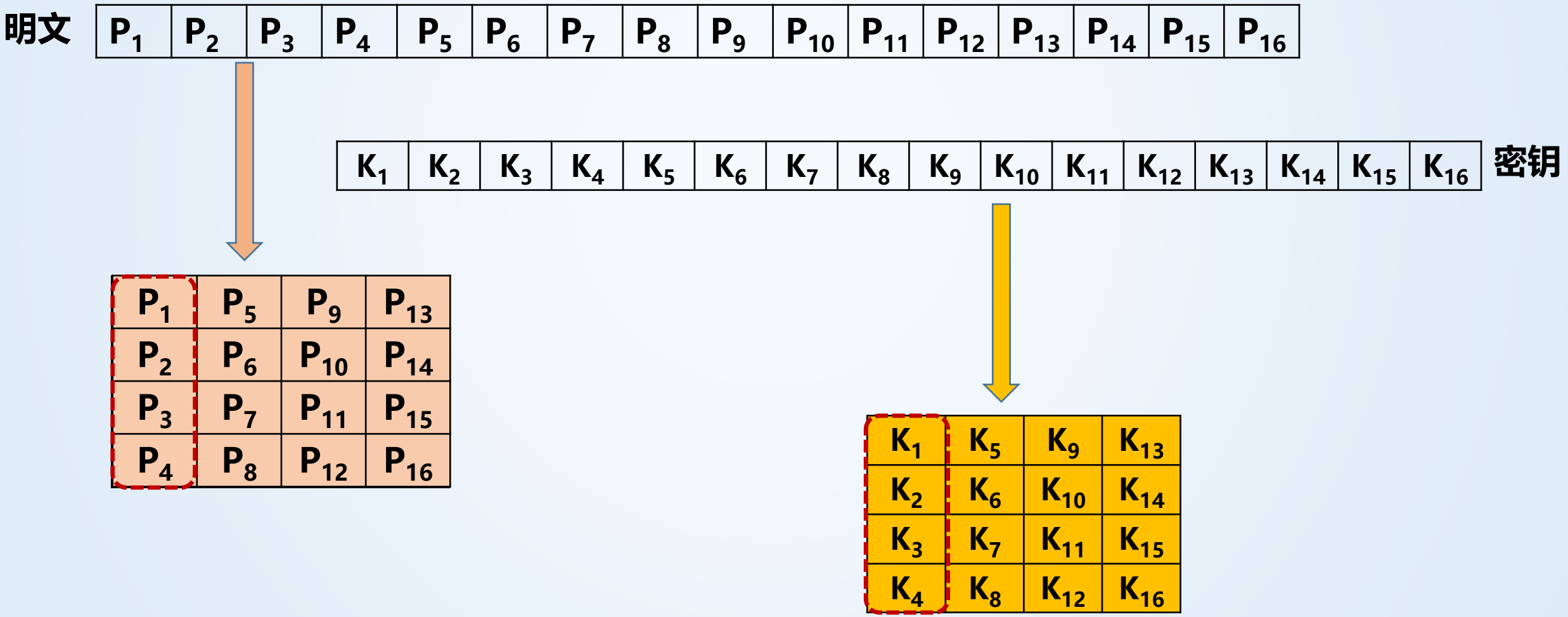
- 字节替换
- 行移位
- 列混淆
- 轮密钥加

- 在轮处理开始前进行了轮密钥加处理
- 最后一轮比前面9轮少了列混淆处理



实验原理

- 初始化，AES中的运算都是以字节为单位的，128位的明文可以分为16个字节



实验原理

➢ 字节替换

字节的高4位作为行号，低4位作为列号，查找S盒中对应行列交叉点的元素作为输出。

例如：95对应的输出为2a

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	63	7c	77	7b	f2	6b	6f	c5	30	1	67	2b	fe	d7	ab	76
1	ca	82	c9	7d	fa	59	47	f0	ad	d4	a2	af	9c	a4	72	c0
2	b7	fd	93	26	36	3f	f7	cc	34	a5	e5	f1	71	d8	31	15
3	04	c7	23	c3	18	96	05	9a	07	12	80	e2	eb	27	b2	75
4	09	83	2c	1a	1b	6e	5a	a0	52	3b	d6	b3	29	e3	2f	84
5	53	d1	00	ed	20	fc	b1	5b	6a	cb	be	39	4a	4c	58	cf
6	d0	ef	aa	fb	43	4d	33	85	45	f9	02	7f	50	3c	9f	a8
7	51	a3	40	8f	92	9d	38	f5	bc	b6	da	21	10	ff	f3	d2
8	cd	0c	13	ec	5f	97	44	17	c4	a7	7e	3d	64	5d	19	73
9	60	81	4f	dc	22	2a	90	88	46	ee	b8	14	de	5e	0b	db
A	e0	32	3a	0a	49	6	24	5c	c2	d3	ac	62	91	95	e4	79
B	e7	c8	37	6d	8d	d5	4e	a9	6c	56	f4	ea	65	7a	ae	08
C	ba	78	25	2e	1c	a6	b4	c6	e8	dd	74	1f	4b	bd	8b	8a
D	70	3e	b5	66	48	03	f6	0e	61	35	57	b9	86	c1	1d	9e
E	e1	f8	98	11	69	d9	8e	94	9b	1e	87	e9	ce	55	28	df
F	8c	a1	89	0d	bf	e6	42	68	41	99	2d	0f	b0	54	bb	16

实验原理

➢ 逆字节替换

字节的高4位作为行号，低4位作为列号，查找逆S盒中对应行列交叉点的元素作为输出。

2a对应的输出为95

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	52	09	6a	d5	30	36	a5	38	bf	40	a3	9e	81	f3	d7	fb
1	7c	e3	39	82	9b	2f	ff	87	34	8e	43	44	c4	de	e9	cb
2	54	7b	94	32	a6	c2	23	3d	ee	4c	95	0b	42	fa	c3	4e
3	08	2e	a1	66	28	d9	24	b2	76	5b	a2	49	6d	8b	d1	25
4	72	f8	f6	64	86	68	98	16	d4	a4	5c	cc	5d	65	b6	92
5	6c	70	48	50	fd	ed	b9	da	5e	15	46	57	a7	8d	9d	84
6	90	d8	ab	00	8c	bc	d3	0a	f7	e4	58	05	b8	b3	45	06
7	d0	2c	1e	8f	ca	3f	0f	02	c1	af	bd	03	01	13	8a	6b
8	3a	91	11	41	4f	67	dc	ea	97	f2	cf	ce	f0	b4	e6	73
9	96	ac	74	22	e7	ad	35	85	e2	f9	37	e8	1c	75	df	6e
A	47	f1	1a	71	1d	29	c5	89	6f	b7	62	0e	aa	18	be	1b
B	fc	56	3e	4b	c6	d2	79	20	9a	db	c0	fe	78	cd	5a	f4
C	1f	dd	a8	33	88	07	c7	31	b1	12	10	59	27	80	ec	5f
D	60	51	7f	a9	19	b5	4a	0d	2d	e5	7a	9f	93	c9	9c	ef
E	a0	e0	3b	4d	ae	2a	f5	b0	c8	eb	bb	3c	83	53	99	61
F	17	2b	04	7e	ba	77	d6	26	e1	69	14	63	55	21	0c	7d

实验原理

➢ 行移位

- ◆ 每一行按字节循环移位
- ◆ 第1行保持不变，第2行循环左移1个字节，第3行循环左移2个字节，第4行循环左移3个字节
- ◆ 每一列的四个字节被扩散到4个不同的列

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{03}
a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}
a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{23}
a_{30}	a_{31}	a_{32}	a_{33}

输入

行移位

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{03}
a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{10}
a_{22}	a_{23}	a_{20}	a_{21}
a_{33}	a_{30}	a_{31}	a_{32}

输出

实验原理

➢ 逆行移位

- ◆ 每一行按字节循环移位
- ◆ 第1行保持不变，第2行循环右移1个字节，第3行循环右移2个字节，第4行循环右移3个字节

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{03}
a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{10}
a_{22}	a_{23}	a_{20}	a_{21}
a_{33}	a_{30}	a_{31}	a_{32}

输入

逆行移位 →

a_{00}	a_{01}	a_{02}	a_{03}
a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}
a_{20}	a_{21}	a_{22}	a_{23}
a_{30}	a_{31}	a_{32}	a_{33}

输出

实验原理

➢ 列混淆-左乘一个矩阵

- ◆ 以列为单位，使得输出的每1个字节和输入的4个字节都有关。
- ◆ GF(2^8)上的乘法，模不可约多项式m(x)的乘法运算。

$$\begin{bmatrix} S'_{0,0} & S'_{0,1} & S'_{0,2} & S'_{0,3} \\ S'_{1,0} & S'_{1,1} & S'_{1,2} & S'_{1,3} \\ S'_{2,0} & S'_{2,1} & S'_{2,2} & S'_{2,3} \\ S'_{3,0} & S'_{3,1} & S'_{3,2} & S'_{3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 02 & 03 & 01 & 01 \\ 01 & 02 & 03 & 01 \\ 01 & 01 & 02 & 03 \\ 03 & 01 & 01 & 02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{0,0} & S_{0,1} & S_{0,2} & S_{0,3} \\ S_{1,0} & S_{1,1} & S_{1,2} & S_{1,3} \\ S_{2,0} & S_{2,1} & S_{2,2} & S_{2,3} \\ S_{3,0} & S_{3,1} & S_{3,2} & S_{3,3} \end{bmatrix}$$

输出 **输入**

$$s'_{0,j} = (2 \cdot s_{0,j}) \oplus (3 \cdot s_{1,j}) \oplus s_{2,j} \oplus s_{3,j}$$
$$s'_{1,j} = s_{0,j} \oplus (2 \cdot s_{1,j}) \oplus (3 \cdot s_{2,j}) \oplus s_{3,j}$$
$$s'_{2,j} = s_{0,j} \oplus s_{1,j} \oplus (2 \cdot s_{2,j}) \oplus (3 \cdot s_{2,j})$$
$$s'_{3,j} = (3 \cdot s_{0,j}) \oplus s_{1,j} \oplus s_{2,j} \oplus (2 \cdot s_{2,j})$$

这里·表示GF(2^8)乘法，⊕表示异或操作。

$$3 \cdot s_{1,j} = (02 \oplus 01) \cdot s_{1,j} = (02 \cdot s_{1,j}) \oplus (01 \cdot s_{1,j})$$

实验原理

➢ 逆列混淆

- ◆ 找到逆列混淆的左乘矩阵
- ◆ 逆向列混淆中左乘矩阵与正向列混淆的正向列混淆的左乘矩阵互为逆矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 02 & 03 & 01 & 01 \\ 01 & 02 & 03 & 01 \\ 01 & 01 & 02 & 03 \\ 03 & 01 & 01 & 02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0E & 0B & 0D & 09 \\ 09 & 0E & 0B & 0D \\ 0D & 09 & 0E & 0B \\ 0B & 0D & 09 & 0E \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} S'_{0,0} S'_{0,1} S'_{0,2} S'_{0,3} \\ S'_{1,0} S'_{1,1} S'_{1,2} S'_{1,3} \\ S'_{2,0} S'_{2,1} S'_{2,2} S'_{2,3} \\ S'_{3,0} S'_{3,1} S'_{3,2} S'_{3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0E & 0B & 0D & 09 \\ 09 & 0E & 0B & 0D \\ 0D & 09 & 0E & 0B \\ 0B & 0D & 09 & 0E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{0,0} S_{0,1} S_{0,2} S_{0,3} \\ S_{1,0} S_{1,1} S_{1,2} S_{1,3} \\ S_{2,0} S_{2,1} S_{2,2} S_{2,3} \\ S_{3,0} S_{3,1} S_{3,2} S_{3,3} \end{bmatrix}$$

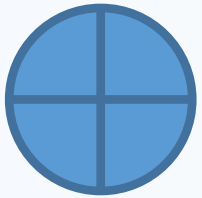
输出 **输入**

实验原理

➢ 轮密钥加

明文矩阵

P_1	P_5	P_9	P_{13}
P_2	P_6	P_{10}	P_{14}
P_3	P_7	P_{11}	P_{15}
P_4	P_8	P_{12}	P_{16}



子密钥矩阵

K_1	K_5	K_9	K_{13}
K_2	K_6	K_{10}	K_{14}
K_3	K_7	K_{11}	K_{15}
K_4	K_8	K_{12}	K_{16}

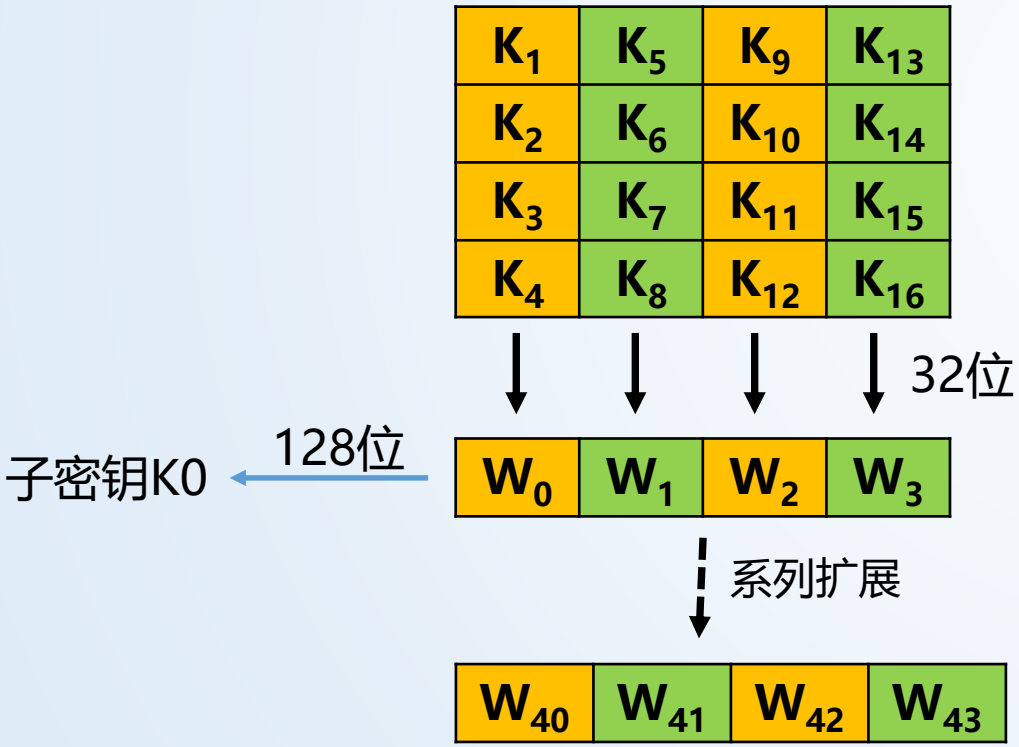
注：将字符转换为ASCii码按字节进行异或

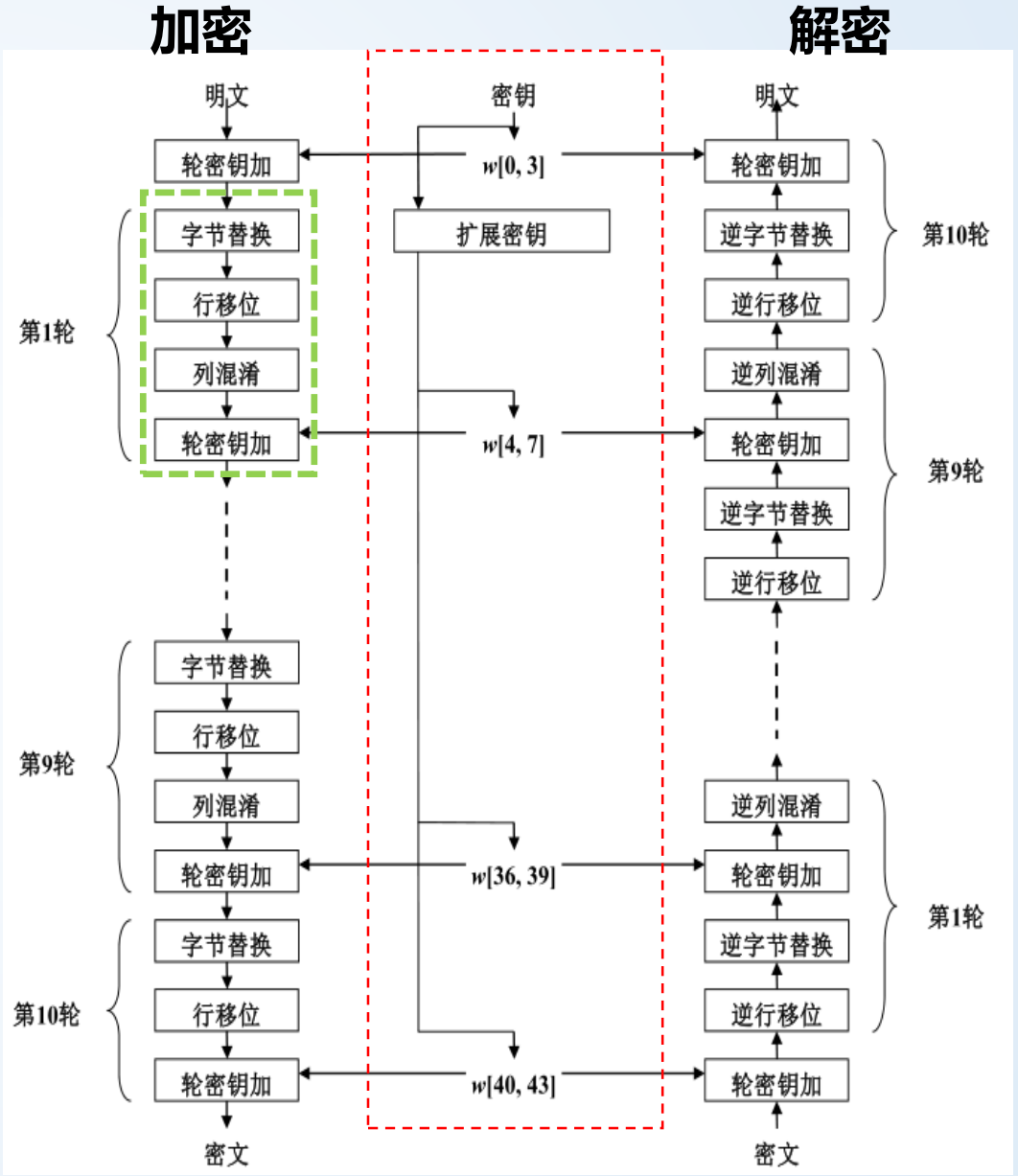
异或的结果再进行异或就是异或的逆

实验原理

➢ 密钥扩展

◆ 由4字的种子密钥，生成一个44字的一维线性数组。





实验原理

➢ 密钥扩展

◆ 当i<4时

W[0]=($k_1k_2k_3k_4$)

W[1]=($k_5k_6k_7k_8$)

W[2]=($k_9k_{10}k_{11}k_{12}$)

W[3]=($k_{13}k_{14}k_{15}k_{16}$)

◆ 当i>=4时，其中N_k=4

$$W[i]=\begin{cases} W[i-N_k]\oplus temp & (i \bmod N_k = 0) \\ W[i-N_k]\oplus W[i-1] & (i \bmod N_k \neq 0) \end{cases}$$

temp=SubByte (RotByte (*W*[*i*-1])) ⊕ Rcon[j]

RotByte ( )表示循环左移一个字节；

SubByte( )是S盒的字节代换；

Rcon[j]为轮常数，其中j是轮数。

表 1 轮常量值表

j	1	2	3	4	5
Rcon[j]	01000000	02000000	04000000	08000000	10000000
j	6	7	8	9	10
Rcon[j]	20000000	40000000	80000000	1B000000	36000000

```
/************************************
Nk: 10轮的密钥取4，12轮取6
Nb:  一轮密钥字长度（字位单位），这里取4
Nr:  轮数，这里取10
************************************/
KeyExpansion (byte   Key[4*Nk] , W[Nb*(Nr+1)])
{
    For (i =0; i < Nk; i ++)
        W[i]=( Key[4* i], Key[4* i +1], Key[4* i +2], Key[4* i +3] );
    For (i =Nk; i <Nb*(Nr+1); i ++)
    {
        temp=W[i -1];
        if (i % Nk= =0)
            temp=SubByte (RotByte (temp))^Rcon[i /Nk];
        W[i]=W[i - Nk]^temp;
    }
}
```

实验原理

➢ 密钥扩展

W_0	W_1	W_2	W_3	⇢	W_4	W_5	W_6	W_7

举个例子，种子密钥K= 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F 00 01 02 03 04 05

W_0 = 06 07 08 09
W_1 = 0A 0B 0C 0D
W_2 = 0E 0F 00 01
W_3 = 02 03 04 05

⇢

$$K_0 = (W_0, W_1, W_2, W_3) = \begin{bmatrix} 06 & 0A & 0E & 02 \\ 07 & 0B & 0F & 03 \\ 08 & 0C & 00 & 04 \\ 09 & 0D & 01 & 05 \end{bmatrix}$$

W_4 = SubByte (RotByte (W_3)) ⊕ Rcon[1] ⊕ W_0

= SubByte(03 04 05 02) ⊕ Rcon[1] ⊕W_0

= (7B F2 6B 77) ⊕(01 00 00 00) ⊕ (06 07 08 09)

= 7C F5 63 7E

W_5 = W_1 ⊕ W_4 = (0A 0B 0C 0D) ⊕ (7C F5 63 7E) = 76 FE 6F 73

W_6 = W_2 ⊕ W_5 = (0E 0F 00 01) ⊕ (76 FE 6F 73) = 78 F1 6F 72

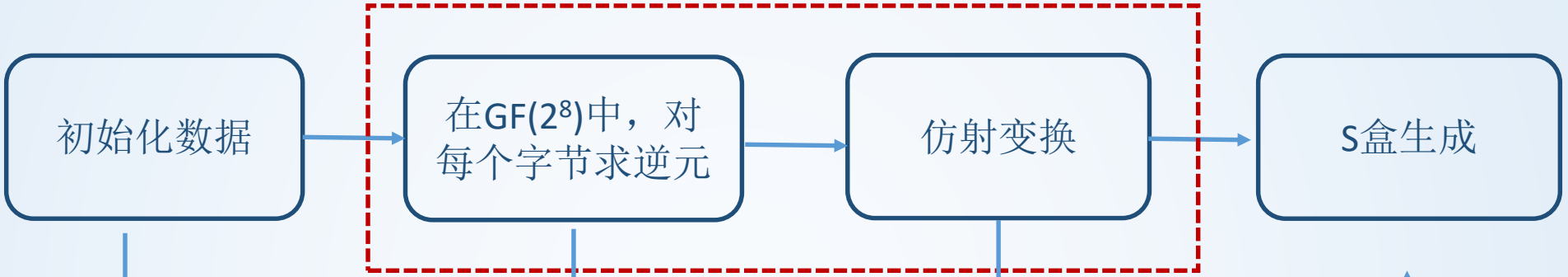
W_7 = W_3 ⊕ W_6 = (02 03 04 05) ⊕ (78 F1 6F 72) = 7A F2 6B 77

⇢

$$K_1 = (W_4, W_5, W_6, W_7) = \begin{bmatrix} 7C & 76 & 78 & 7A \\ F5 & FE & F1 & F2 \\ 63 & 6F & 6F & 6B \\ 7E & 73 & 72 & 77 \end{bmatrix}$$

实验原理

S盒构造方式：



列 0-f

行 0-f

00	01	.....	0e	0f
10	11	.....	1e	1f
.....				
e0	e1	.....	ee	ef
f0	f1	.....	fe	ff

00	01	.....	e5	c7
74	b4	.....	ee	b2
.....				
b1	d	.....	1e	b3
5b	23	.....	41	1c

63	7c	.....	ab	76
ca	82	.....	72	c0
.....				
e1	f8	.....	28	df
8c	a1	.....	bb	16

实验原理

S盒构造方式：

- 在GF(2^8)中，对S盒中的每个字节x求逆x^{-1}

  $x \cdot x^{-1} = 1 \ (mod\ x^8 + x^4 + x^3 + x + 1)$

- 在GF(2^8)上对每个进行仿射变换

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1&0&0&0&1&1&1&1 \\ 1&1&0&0&0&1&1&1 \\ 1&1&1&0&0&0&1&1 \\ 1&1&1&1&0&0&0&1 \\ 1&1&1&1&1&0&0&0 \\ 0&1&1&1&1&1&0&0 \\ 0&0&1&1&1&1&1&0 \\ 0&0&0&1&1&1&1&1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

低

高

x^{-1}　　63

以输入95为例

$\{95\}^{-1}$=8A

$$\begin{pmatrix} 1&0&0&0&1&1&1&1 \\ 1&1&0&0&0&1&1&1 \\ 1&1&1&0&0&0&1&1 \\ 1&1&1&1&0&0&0&1 \\ 1&1&1&1&1&0&0&0 \\ 0&1&1&1&1&1&0&0 \\ 0&0&1&1&1&1&1&0 \\ 0&0&0&1&1&1&1&1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

8A　　63　　2A

实验内容

1、编写程序完成AES-128算法的加密和解密过程，请用demo.c中的S盒、逆S盒、 轮常量Rcon等信息；

2、过程输出10轮K_i的值，要求输出16进制格式；

3、选做：编码实现构造S盒和逆S盒。

实验步骤

加密：

1、轮密钥加预处理；

2、9轮字节替换，行移位，列混淆，轮密钥加；

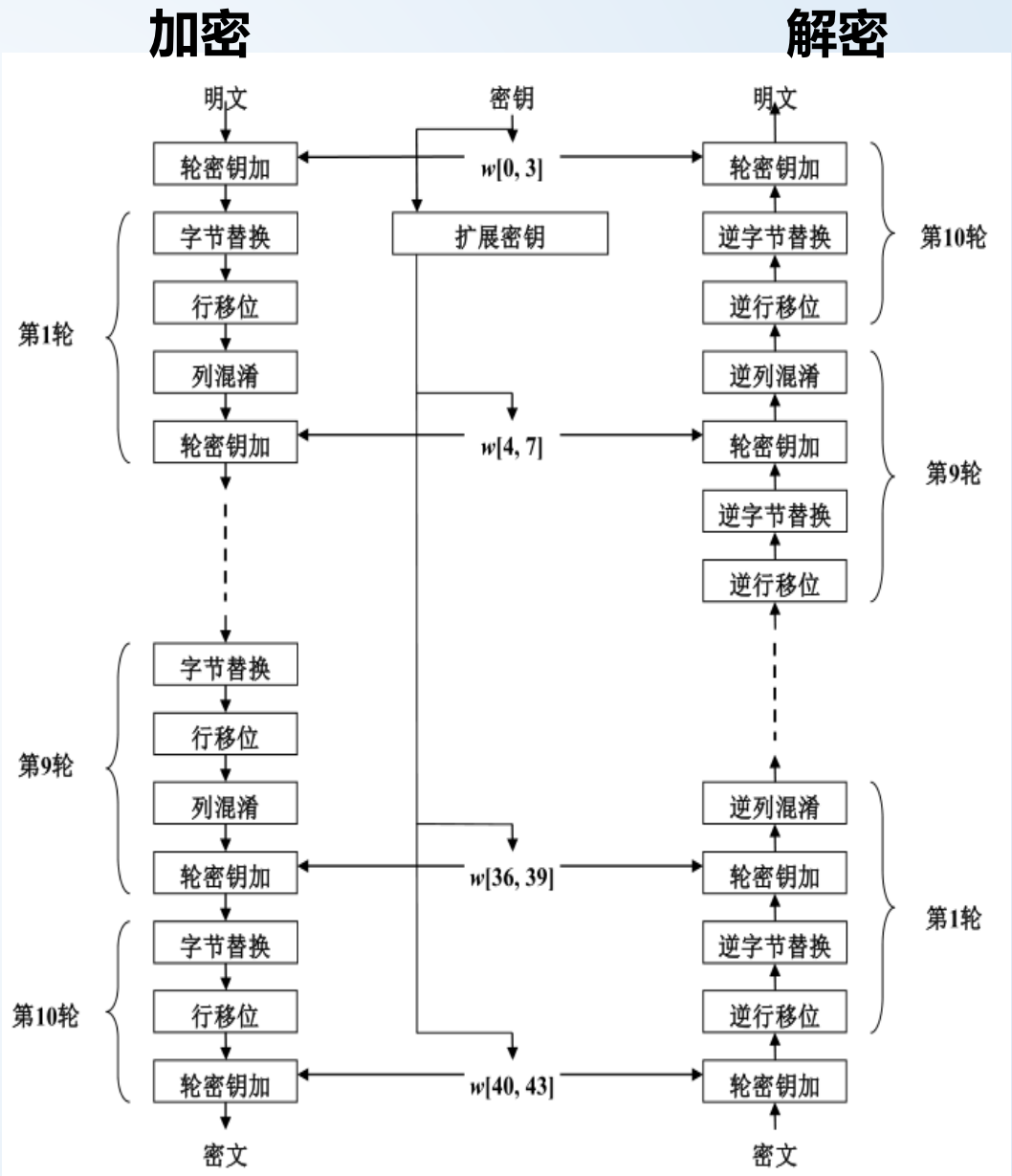
3、第10轮没有列混淆；

解密：

1、轮密钥加；

2、9轮逆字节替换，逆行移位，逆列混淆，轮密钥加；

3、第10轮没有逆列混淆；



实验要求

- 根据要求截取三组结果截图，其中包括明文、10轮的轮密钥及对应的密文及解密后的明文。
- 请把电子版实验报告及源代码打包成一个zip上传到系统中，命名格式如下：

压缩包：“学号_姓名_实验2_AES”

谢谢