> 教材第四章 ~ 第七章第一节

双重 DES、三重 DES

由于算力提升，可对 DES 进行暴力破解（平均需搜索一半的密钥空间 $O(2^{55})$）。两种可行的解决办法：

1. 设计新的加密算法——AES
2. 使用双重 DES、三重 DES

> [!NOTE|label:☆ 对双重 DES 进行「中途相遇攻击」] 假定**已知明密文**对 (P, C), 有 $C = E_{K_2}E_{K_1}(P)$，我们只需找出 $X = E_{K_1}(P) = D_{K_2}(C)$ 即可。平均可在 $O(2^{55} \times 2) = O(2^{56})$ 内暴力破解

> [!NOTE|label:三重 DES]
>
> - 双倍长度密钥的 3DES：$C = E_{K_1}(D_{K_2}(E_{K_1}(P)))$，它对特定的选择明文攻击和已知明文攻击的强度较弱，NIST 认定它只有 80 位的安全性
> - 三倍长度密钥的 3DES：$C = E_{K_3}(D_{K_2}(E_{K_1}(P)))$，由于中途相遇攻击，它的有效安全性仅为 112 位
>
> 可以复用 3DES 的代码来实现 DES（当 $K_2 = K_1$ 或 $K_3 = K_2$ 时）

数学基础——$GF(2^n)$

> 教材第五章

- 域：域是一个集合，我们可以在其上进行加法、减法、乘法和除法而**不脱离**该集合。有理数集合、实数集合以及复数集合都是我们所熟悉的域的例子
- 有限域：含有限个元素的域，有限域在密码学中很重要

图 5.2　群、环和域的性质

- $GF(2^n)$ 上的任何元素都表示为多项式，如 1100：$x^3 + x^2$，加法和乘法（需要对既约多项式取模）运算有多项式表示法（下图）和二进制表示法。注意，以多项式表示法运算时系数需模 2

Table 5.3 Polynomial Arithmetic Modulo $(x^3 + x + 1)$

		000	001	010	011	100	101	110	111
	+	0	1	x	$x+1$	x^2	x^2+1	x^2+x	x^2+x+1
000	0	0	1	x	$x+1$	x^2	x^2+1	x^2+x	x^2+x+1
001	1	1	0	$x+1$	x	x^2+1	x^2	x^2+x+1	x^2+x
010	x	x	$x+1$	0	1	x^2+x	x^2+x+1	x^2	x^2+1
011	$x+1$	$x+1$	x	1	0	x^2+x+1	x^2+x	x^2+1	x^2
100	x^2	x^2	x^2+1	x^2+x	x^2+x+1	0	1	x	$x+1$
101	x^2+1	x^2+1	x^2	x^2+x+1	x^2+x	1	0	$x+1$	x
110	x^2+x	x^2+x	x^2+x+1	x^2	x^2+1	x	$x+1$	0	1
111	x^2+x+1	x^2+x+1	x^2+x	x^2+1	x^2	$x+1$	x	1	0

(a) Addition

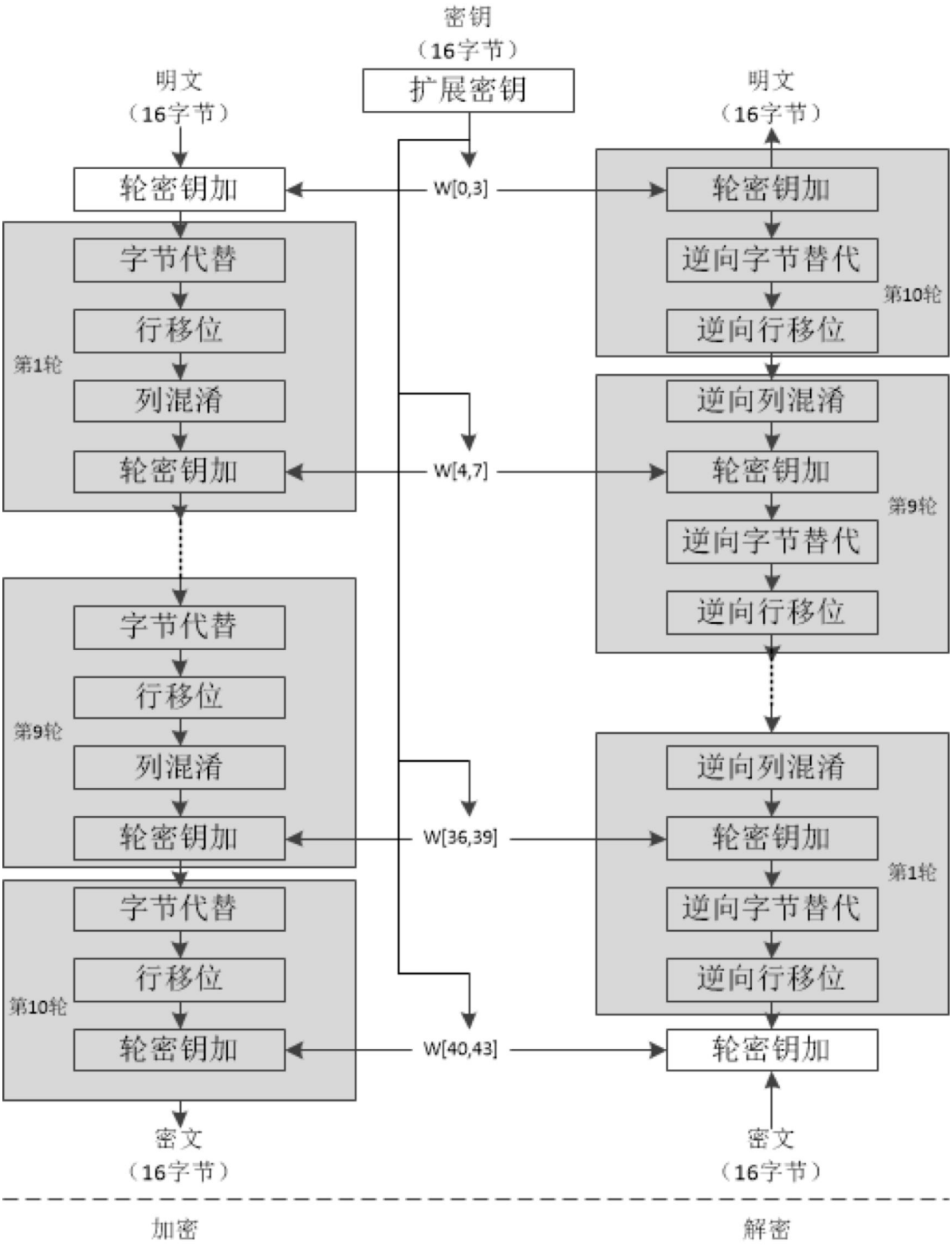
		000	001	010	011	100	101	110	111
	×	0	1	x	$x+1$	x^2	x^2+1	x^2+x	x^2+x+1
000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
001	1	0	1	x	$x+1$	x^2	x^2+1	x^2+x	x^2+x+1
010	x	0	x	x^2	x^2+x	$x+1$	1	x^2+x+1	x^2+1
011	$x+1$	0	$x+1$	x^2+x	x^2+1	x^2+x+1	x^2	1	x
100	x^2	0	x^2	$x+1$	x^2+x+1	x^2+x	x	x^2+1	1
101	x^2+1	0	x^2+1	1	x^2	x	x^2+x+1	$x+1$	x^2+x
110	x^2+x	0	x^2+x	x^2+x+1	1	x^2+1	$x+1$	x	x^2
111	x^2+x+1	0	x^2+x+1	x^2+1	x	1	x^2+1	x^2	$x+1$

(b) Multiplication

AES 原理

AES 轮结构由 4 个不同的阶段组成，包括一个置换和 3 个代替：

- 字节代替（Substitute Bytes）：用一个 S 盒完成分组的字节到字节的代替
- 行移位（ShiftRows）：一个简单的置换
- 列混淆（MixColumns）：利用域 $GF(2^8)$ 上的算术特性的一个代替
- 轮密钥加（AddRoundKey）：当前分组和扩展密钥的一部分进行按位 XOR



AES

视频来自 https://youtu.be/mlzxpkdXP58

- AES 比 3DES 更快
- AES 不是 Feistel 结构密码，但每个阶段均可逆
- AES 加解密代码可以复用是因为存在等价逆算法，两处改进使解密算法的结构与加密算法的结构一致（教材 P128）：
    1. 交换逆向行移位和逆向字节代替：这两个操作是可以交换的，即
    $$逆向移行[逆向字节代替(S_i)] = 逆向字节代替[逆向移行(S_i)]$$
    2. ☆ 交换轮密钥加和逆向列混淆：对给定的状态 S_i，和给定的轮密钥 w_j，有
    $$逆向列混淆(S_i \oplus w_j) = [逆向列混淆(S_i)] \oplus [逆向列混淆(w_j)]$$，所以要先**对轮密钥应用逆向列**

混淆

思考题

6.3

> Rijndael 和 AES 有何不同?

Rijndael 允许 128，192，256 位的分组长度，AES 只允许 128 位的分组长度。

<!-- 为什么 AES 最后一轮没有列混淆？无法找到等价的解密过程

第一轮之前要轮密钥加？否则第一轮的前三个就没用-->