Project01——SM4的软件实现与优化

1 实验环境

编译器	Visual Studio 2022
操作系统	Windows11
处理器	12th Gen intel(R) Core(TM) i5-12500H (2.50GHz)

2 SM4算法实现

2.1 SM4加解密算法

SM4算法采用非平衡Feistel结构，分组长度为128-bit，密钥长度为128-bit，迭代轮数为32轮。本节我们将简述SM4加密算法，重点是展示代码实现。

1、输入的128-bit明文m，按32-bit划分记为$(X_0^0, X_0^1, X_0^2, X_0^3)$。

2、进行32轮迭代，每一轮有一个32-bit的轮密钥K_{i-1}参与运算（$i = 1, 2, \cdots, 32$）：

$$\begin{aligned} X_i^0 &= X_{i-1}^1 \\ X_i^1 &= X_{i-1}^2 \\ X_i^2 &= X_{i-1}^3 \\ X_i^3 &= X_{i-1}^0 \oplus T(X_{i-1}^1 \oplus X_{i-1}^2 \oplus X_{i-1}^3 \oplus K_{i-1}) \end{aligned}$$

其中，函数$T : \mathbb{F}_2^{32} \to \mathbb{F}_2^{32}$，由非线性变换$S$和线性变换$L$复合而成。

设函数T的32-bit输入为$\mathcal{A} = \{a_0, a_1, a_2, a_3\} \in (\mathbb{F}_{2^8})^4$，则:

- 非线性变换S：对每个字节单独进行查表代替操作（高4位为行标，低4位为列标），即:

$$\mathcal{B} = (S(a_0), S(a_1), S(a_2), S(a_3))$$

- 线性变换L：对非线性变换S的32-bit输出$\mathcal{B}$，计算（<<<为循环左移）：

$L(\mathcal{B}) = \mathcal{B} \oplus (\mathcal{B} <<< 2) \oplus (\mathcal{B} <<< 10) \oplus$ （$\mathcal{B} <<< 18$） $\oplus (\mathcal{B} <<< 24)$

主要实现如下:

```
//一轮SM4加密
void SM4_1R(int index, uint32_t* A, uint32_t* rk, bool is_enc, uint32_t temp) {
    uint32_t k = (is_enc == 1 ? rk[index] : rk[31 - index]);
    temp = A[1] ^ A[2] ^ A[3] ^ k;
    temp = (Sbox[temp >> 24] << 24) | (Sbox[(temp >> 16) & 0xff] << 16) |
(Sbox[(temp >> 8) & 0xff] << 8) | (Sbox[temp & 0xff]);
    temp = A[0] ^ temp ^ rotl32(temp, 2) ^ rotl32(temp, 10) ^ rotl32(temp, 18) ^
rotl32(temp, 24);
    A[0] = A[1];
    A[1] = A[2];
    A[2] = A[3];
    A[3] = temp;
}
```

```c
void SM4(uint8_t* input, uint8_t* output, uint32_t* rk, bool is_enc) {
    uint32_t A[4];
    uint32_t temp = 0;
    A[0] = ((uint32_t)input[0] << 24) | ((uint32_t)input[1] << 16) |
((uint32_t)input[2] << 8) | input[3];
    A[1] = ((uint32_t)input[4] << 24) | ((uint32_t)input[5] << 16) |
((uint32_t)input[6] << 8) | input[7];
    A[2] = ((uint32_t)input[8] << 24) | ((uint32_t)input[9] << 16) |
((uint32_t)input[10] << 8) | input[11];
    A[3] = ((uint32_t)input[12] << 24) | ((uint32_t)input[13] << 16) |
((uint32_t)input[14] << 8) | input[15];
    for (int i = 0; i < 32; i++) {
        SM4_1R(i, A, rk, is_enc, temp);
    }
    uint32_t tmp = A[0];
    A[0] = A[3];
    A[3] = tmp;
    tmp = A[1];
    A[1] = A[2];
    A[2] = tmp;

    output[0] = (A[0] >> 24) & 0xFF; output[1] = (A[0] >> 16) & 0xFF;
    output[2] = (A[0] >> 8) & 0xFF; output[3] = A[0] & 0xFF;
    output[4] = (A[1] >> 24) & 0xFF; output[5] = (A[1] >> 16) & 0xFF;
    output[6] = (A[1] >> 8) & 0xFF; output[7] = A[1] & 0xFF;
    output[8] = (A[2] >> 24) & 0xFF; output[9] = (A[2] >> 16) & 0xFF;
    output[10] = (A[2] >> 8) & 0xFF; output[11] = A[2] & 0xFF;
    output[12] = (A[3] >> 24) & 0xFF; output[13] = (A[3] >> 16) & 0xFF;
    output[14] = (A[3] >> 8) & 0xFF; output[15] = A[3] & 0xFF;
}
```

2.2 轮密钥生成

SM4算法的主密钥k为128-bit，轮密钥生成方案采用非平衡Feistel结构。本小节我们将简述其轮密钥生成方案，重点展示代码的实现。

1、将k按32-bit进行划分，记为(MK_0, MK_1, MK_2, MK_3)。然后，分别与32-bit的系统参数FK_0, FK_1, FK_2, FK_3进行异或。记为：

$$\begin{aligned} K_{-4} &= MK_0 \oplus FK_0 \\ K_{-3} &= MK_1 \oplus FK_1 \\ K_{-2} &= MK_2 \oplus FK_2 \\ K_{-1} &= MK_3 \oplus FK_3 \end{aligned}$$

2、生成轮密钥$K_i (i = 0, 1, \cdots, 31)$：

$$K_i = K_{i-4} \oplus T'(K_{i-3} \oplus K_{i-2} \oplus K_{i-1} \oplus CK_i)$$

其中函数T'只需将加密算法中的函数T中的线性变换L替换为：

$$L'(\mathcal{B}) = \mathcal{B} \oplus (\mathcal{B} <<< 13) \oplus (\mathcal{B} <<< 23)$$

主要代码实现：

```c
//初始密钥
```

```
#define LOAD_KEY(index)\
    do{\
        k[index]=(key[index<<2]<<24)|(key[(index<<2)+1]<<16)|(key[(index<<2)+2]
<<8)|(key[(index<<2)+3]);\
        k[index]=k[index]^FK[index];\
    }while(0)

//一轮轮密钥生成
#define KEY_GEN_1R(index)\
    do{\
        temp=k[1]^k[2]^k[3]^CK[index];\
        temp=(Sbox[temp>>24]<<24)|(Sbox[(temp>>16)&0xff]<<16)|
(Sbox[(temp>>8)&0xff]<<8)|(Sbox[temp&0xff]);      \
        rk[index]=k[0]^temp^rotl32(temp,13)^rotl32(temp,23);\
        k[0]=k[1];\
        k[1]=k[2];\
        k[2]=k[3];\
        k[3]=rk[index];\
    }while(0)

void SM4_KEY_GEN(uint8_t* key, uint32_t* rk) {
    uint32_t k[4];
    uint32_t temp;
    LOAD_KEY(0);
    LOAD_KEY(1);
    LOAD_KEY(2);
    LOAD_KEY(3);
    for (int i = 0; i < 32; i++) {
        KEY_GEN_1R(i);
    }
}
```

3 SM4 T-table优化

S盒操作为$x_0, x_1, x_2, x_3 \to S(x_0), S(x_1), S(x_2), S(x)_3$，其中$x_0, x_1, x_2, x_3$为8bit。为了提高效率，可以将S盒与后续的线性变换L合并，得到：

$$\begin{aligned} &L(S(x_0), S(x_1), S(x_2), S(x_3)) \\ = &L(S(x_0) << 24) \oplus L(S(x_1) << 16) \oplus L(S(x_2) << 8) \oplus L(S(x_3)) \end{aligned}$$

定义4个8bit→32bit查找表T_i：

$$\begin{aligned} T_0(x) &= L(S(x_0) << 24) \\ T_1(x) &= L(S(x_1) << 16) \\ T_2(x) &= L(S(x_2) << 8) \\ T_3(x) &= L(S(x_3)) \end{aligned}$$

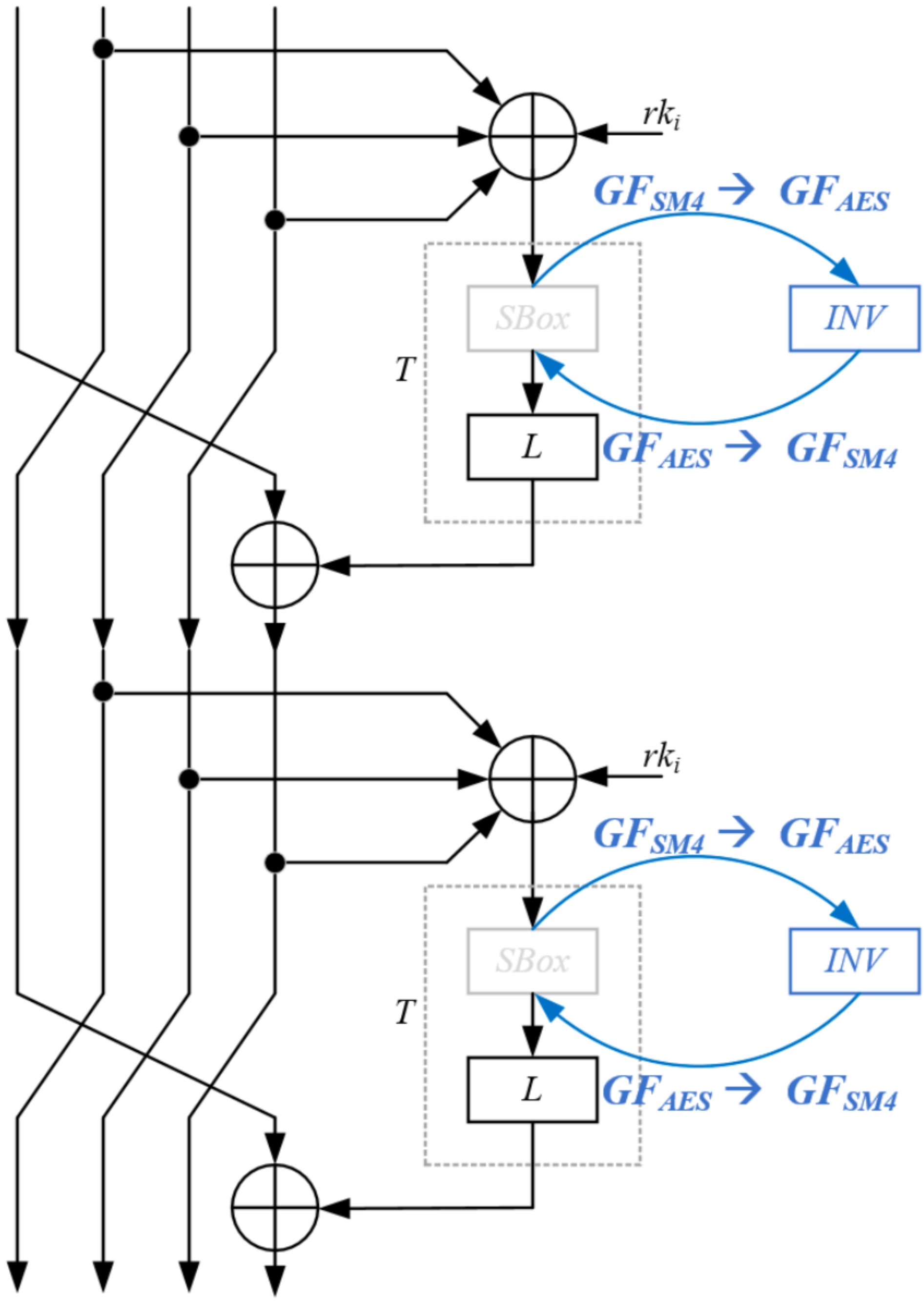
SM4一轮加解密实现如下：

```
//一轮SM4加密
void SM4_T_table_1R(int index, uint32_t* A, uint32_t* rk, bool is_enc, uint32_t temp) {
    uint32_t k = (is_enc == 1 ? rk[index] : rk[31 - index]);
    temp = A[1] ^ A[2] ^ A[3] ^ k;
    temp = A[0] ^ Table0[(temp >> 24) & 0xff] ^ Table1[(temp >> 16) & 0xff] ^ Table2[(temp >> 8) & 0xff] ^ Table3[temp & 0xff];
    A[0] = A[1];
    A[1] = A[2];
    A[2] = A[3];
    A[3] = temp;
}
```

4 SM4 AESNI优化

主要使用SIMD和域同构的方法对SM4进行优化。基本思想是利用SM4与AES中S盒结构的相似性，借助intel的AESNI指令完成S盒操作。由于SM4的S盒与AES的S盒所属的数域都是$GF(2^8)$，由近世代数的知识可知，二者之间存在一个同构映射。

找到同构映射后，在SM4进入S盒前，将SM4的S盒输入值映射到AES的数域，然后通过_mm_aesenclast_si128()完成S盒的操作得到输出，再将输出逆映射回SM4的数域即可。



这里注意，SM4和AES的存储方式不同（分别为小端序和大端序），因此在进行映射前先转换存储方式。且为了消除AES最后一轮行移位与异或密钥的影响，这里使用逆行移位与异或0密钥来处理。具体实现如下(其中矩阵乘法采用了查找表的方式实现，具体参考):

```
#define OPT_SM4_1R(index)\
    do{\
    __m128i k=_mm_set1_epi32((is_enc==1?rk[index]:rk[31-index]));\
    temp=xor4(A[1],A[2],A[3],k);\
    temp=SM4_SBOX(temp);\

 temp=xor6(A[0],temp,rotl_epi32(temp,2),rotl_epi32(temp,10),rotl_epi32(temp,18),
rotl_epi32(temp,24));\
    A[0]=A[1];\
    A[1]=A[2];\
    A[2]=A[3];\
    A[3]=temp;\
```

```
    }while(0)

#define MulMatrix(x,highmask,lowmask)\
(_mm_xor_si128(_mm_shuffle_epi8(lowmask,_mm_and_si128(x,_mm_set1_epi32(0x0f0f0f0f))),\

_mm_shuffle_epi8(highmask,_mm_and_si128(_mm_srli_epi16(x,4),_mm_set1_epi32(0x0f0f0f0f)))))

//进行同构映射
__m128i SM4_INPUT_TO_AES(__m128i x) {
    __m128i highmask = _mm_set_epi8(0x22, 0x58, 0x1a, 0x60, 0x02, 0x78, 0x3a,
0x40, 0x62, 0x18,
        0x5a, 0x20, 0x42, 0x38, 0x7a, 0x00);
    __m128i lowmask = _mm_set_epi8(0xe2, 0x28, 0x95, 0x5f, 0x69, 0xa3, 0x1e,
0xd4, 0x36, 0xfc,
        0x41, 0x8b, 0xbd, 0x77, 0xca, 0x00);
    return MulMatrix(x, highmask, lowmask);
}

__m128i AES_OUTPUT_TO_SM4(__m128i x) {
    __m128i highmask = _mm_set_epi8(0x14, 0x07, 0xc6, 0xd5, 0x6c, 0x7f, 0xbe,
0xad, 0xb9, 0xaa,
        0x6b, 0x78, 0xc1, 0xd2, 0x13, 0x00);
    __m128i lowmask = _mm_set_epi8(0xd8, 0xb8, 0xfa, 0x9a, 0xc5, 0xa5, 0xe7,
0x87, 0x5f, 0x3f,
        0x7d, 0x1d, 0x42, 0x22, 0x60, 0x00);
    return MulMatrix(x, highmask, lowmask);
}

__m128i SM4_SBOX(__m128i x) {
    __m128i mask = _mm_set_epi8(0x03, 0x06, 0x09, 0x0c, 0x0f, 0x02, 0x05, 0x08,
        0x0b, 0x0e, 0x01, 0x04, 0x07, 0x0a, 0x0d, 0x00);
    //逆行移位和全零密钥抵消AES最后一轮操作，只保留过S盒
    x = _mm_shuffle_epi8(x, mask);
    x = _mm_xor_si128(SM4_INPUT_TO_AES(x), _mm_set1_epi8(0b00100011));
    x = _mm_aesenclast_si128(x, _mm_setzero_si128());
    return _mm_xor_si128(AES_OUTPUT_TO_SM4(x), _mm_set1_epi8(0b00111011));
}

void SM4_AESNI(uint8_t* input, uint8_t* output, uint32_t* rk, bool is_enc) {
    __m128i temp;
    __m128i A[4];
    __m128i vindex;
    temp = _mm_loadu_si128((__m128i*)input);
    vindex = _mm_setr_epi8(3, 2, 1, 0, 7, 6, 5, 4, 11, 10, 9, 8, 15, 14, 13,
12);
    //小端序-->大端序
    A[0] = _mm_unpacklo_epi64(_mm_unpacklo_epi32(temp, temp),
_mm_unpacklo_epi32(temp, temp));
    A[1] = _mm_unpackhi_epi64(_mm_unpacklo_epi32(temp, temp),
_mm_unpacklo_epi32(temp, temp));
    A[2] = _mm_unpacklo_epi64(_mm_unpackhi_epi32(temp, temp),
_mm_unpackhi_epi32(temp, temp));
```

```
    A[3] = _mm_unpackhi_epi64(_mm_unpackhi_epi32(temp, temp),
_mm_unpackhi_epi32(temp, temp));
    A[0] = _mm_shuffle_epi8(A[0], vindex);
    A[1] = _mm_shuffle_epi8(A[1], vindex);
    A[2] = _mm_shuffle_epi8(A[2], vindex);
    A[3] = _mm_shuffle_epi8(A[3], vindex);
    for (int i = 0; i < 32; i++) {
        OPT_SM4_1R(i);
    }
    //大端序-->小端序
    A[0] = _mm_shuffle_epi8(A[0], vindex);
    A[1] = _mm_shuffle_epi8(A[1], vindex);
    A[2] = _mm_shuffle_epi8(A[2], vindex);
    A[3] = _mm_shuffle_epi8(A[3], vindex);
    _mm_storeu_si128((__m128i*)output,
_mm_unpacklo_epi64(_mm_unpacklo_epi32(A[3], A[2]), _mm_unpacklo_epi32(A[1],
A[0])));

}
```

5 SM4 GFNI优化

可以使用gf2p8affineqb指令直接计算$GF(2^8)$上的同构映射，比AESNI使用的指令数更少。这里映射矩阵与常数向量参考。具体实现如下:

```
// SM4 S盒到AES S盒的仿射变换矩阵

__m128i sm4_to_aes_matrix =
_mm_set1_epi64x(0b00000110'00010111'00001010'00110101'00111010'01110010'10011011
'00001101);
// AES S盒到SM4 S盒的仿射变换矩阵

__m128i aes_to_sm4_matrix =
_mm_set1_epi64x(0b10011100'00111010'10001100'11000100'01110100'11000011'01100001
'10101000);

// 仿射变换常数
__m128i sm4_to_aes_constant = _mm_set1_epi8(0b00100011);
__m128i aes_to_sm4_constant = _mm_set1_epi8(0b00111011);

// 使用GF2P8AFFINEQB和AES-NI实现的SM4 S盒
__m128i SM4_BOX_TO_AES_GFNI(__m128i x) {

    // 1. SM4输入 -> AES输入
    __m128i aes_input = _mm_gf2p8affine_epi64_epi8(x, sm4_to_aes_matrix, 0);

    aes_input = _mm_xor_si128(aes_input, sm4_to_aes_constant);

    // 2. 使用AES-NI计算AES S盒
    // 这里使用AESENCLAST指令，因为AES S盒 = AESENCLAST(x, 0)
    __m128i aes_output = _mm_aesenclast_si128(aes_input, _mm_setzero_si128());

    // 3. AES输出 -> SM4输出
    __m128i sm4_output = _mm_gf2p8affine_epi64_epi8(aes_output,
aes_to_sm4_matrix, 0);
```

```
    sm4_output = _mm_xor_si128(sm4_output, aes_to_sm4_constant);

    return sm4_output;
}

#define GFNI_SM4_1R(index)\
    do{\
    __m128i k=_mm_set1_epi32((is_enc==1?rk[index]:rk[31-index]));\
    temp=xor4(A[1],A[2],A[3],k);\
    temp=SM4_BOX_TO_AES_GFNI(temp);\

 temp=xor6(A[0],temp,rotl_epi32(temp,2),rotl_epi32(temp,10),rotl_epi32(temp,18),
rotl_epi32(temp,24));\
    A[0]=A[1];\
    A[1]=A[2];\
    A[2]=A[3];\
    A[3]=temp;\
    }while(0)
```

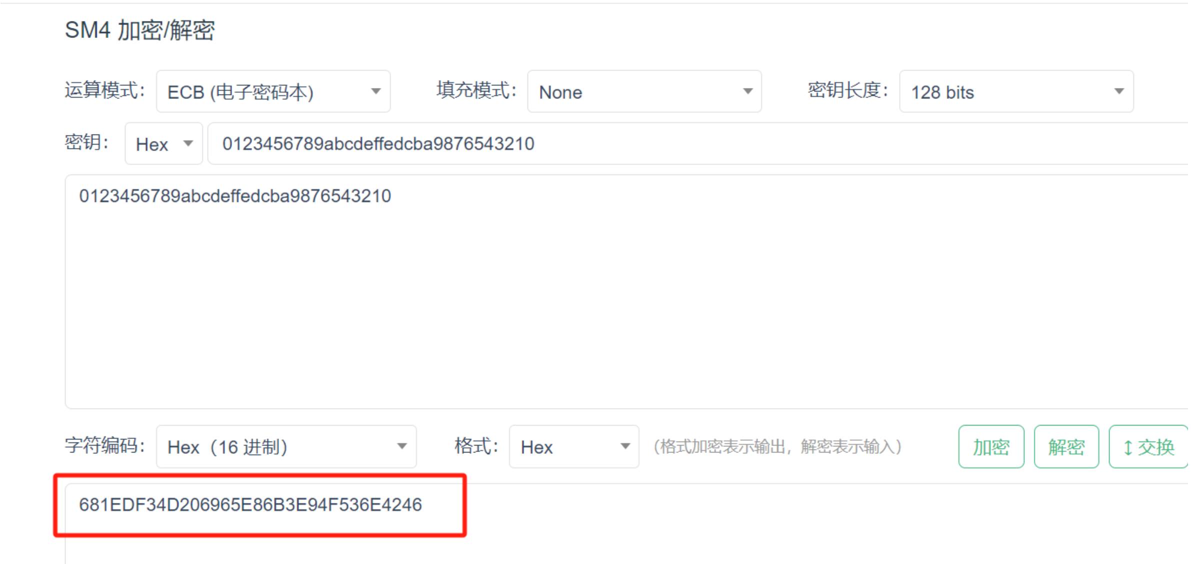
4 结果展示

- 正确性：

  输入明文和密钥均为：

```
uint8_t input[16] = { 0x01, 0x23, 0x45, 0x67, 0x89, 0xab, 0xcd, 0xef, 0xfe,
0xdc, 0xba, 0x98, 0x76, 0x54, 0x32, 0x10 };
uint8_t key[16] = { 0x01, 0x23, 0x45, 0x67, 0x89, 0xab, 0xcd, 0xef, 0xfe, 0xdc,
0xba, 0x98, 0x76, 0x54, 0x32, 0x10 };
```

  通过在线加密平台得到密文：



  下述实现均参考该结果来判断正确性。

- 结果分析

  使用每个字节需要的时钟周期数作为性能指标。

原始：

```
=====================SM4加解密=====================
密文：
68 1e df 34 d2 06 96 5e 86 b3 e9 4f 53 6e 42 46
明文：
01 23 45 67 89 ab cd ef fe dc ba 98 76 54 32 10
=====================SM4性能测试=====================
加密100次总周期数： 63275
总处理数据量： 1600 bytes
性能指标： 39.55 cycles/byte

解密100次总周期数： 63152
总处理数据量： 1600 bytes
性能指标： 39.47 cycles/byte
```

T-table优化：

```
=====================SM4_T_table加解密=====================
密文：
68 1e df 34 d2 06 96 5e 86 b3 e9 4f 53 6e 42 46
明文：
01 23 45 67 89 ab cd ef fe dc ba 98 76 54 32 10
=====================SM4_T_table性能测试=====================
加密100次总周期数： 45164
总处理数据量： 1600 bytes
性能指标： 28.23 cycles/byte

解密100次总周期数： 46992
总处理数据量： 1600 bytes
性能指标： 29.37 cycles/byte
```

AESNI优化：

```
=====================SM4_AESNI加解密=====================
密文：
68 1e df 34 d2 06 96 5e 86 b3 e9 4f 53 6e 42 46
明文：
01 23 45 67 89 ab cd ef fe dc ba 98 76 54 32 10
=====================SM4_AESNI性能测试=====================
加密100次总周期数： 49
总处理数据量： 1600 bytes
性能指标： 0.03 cycles/byte

解密100次总周期数： 48
总处理数据量： 1600 bytes
性能指标： 0.03 cycles/byte
```

GFNI优化：

```
=====================SM4_GFNI加解密=====================
密文：
68 1e df 34 d2 06 96 5e 86 b3 e9 4f 53 6e 42 46
明文：
01 23 45 67 89 ab cd ef fe dc ba 98 76 54 32 10
=====================SM4_GFNI性能测试=====================
加密100次总周期数： 35
总处理数据量： 1600 bytes
性能指标： 0.02 cycles/byte

解密100次总周期数： 33
总处理数据量： 1600 bytes
性能指标： 0.02 cycles/byte
```

由上可以看到，所有的优化结果均正确，且最终优化了近2000倍！