西安电子科技大学

物联网安全实验课程 实验报告

实验名称 DES 加密算法

物联网工程 1803041 班

姓名 魏红旭 学号 18030400014

同作者

实验日期 2021 年 5 月 25 日

成 绩

指导教师评语： 指导教师： 年月日
实验报告内容基本要求及参考格式 一、实验目的 二、实验所用仪器（或实验环境） 三、实验基本原理及步骤（或方案设计及理论计算） 四、实验数据记录（或仿真及软件设计） 五、实验结果分析及回答问题（或测试环境及测试结果）

一、实验目的：

编程实现 DES 算法，深入理解 DES 加密解密原理

二、实验所用仪器（或实验环境）

计算机科学与技术学院实验中心，可接入 Internet 网台式机 44 台。

三、实验基本原理及要求

实验原理:

第一阶段: 对输入的 64 位的明文分组进行固定的“初始置换”（Initial Permutation, IP），即按固定的规则重新排列明文分组的 64 位二进制数据，再重排后的 64 位数据前后 32 位分为独立的左右两个部分，前 32 位记为 L0，后 32 位记为 R0。初始置换写为:

（L0，R0）←IP（64 位分组明文）

第二阶段：16 轮相同函数迭代。将上一轮输出的 Ri-1 直接作为 Li 输入，同时将 Ri-1 进与第 i 个 48 位的子密钥 ki 经“轮函数 f”转换后，得到一个 32 位的中间结果，再将此中间结果与上一轮的 Li-1 做异或运算，并将得到的新的 32 位结果作为下一轮的 Ri。如此往复，迭代处理 16 次。每次的子密钥不同，16 个子密钥的生成与轮函数 f，后面单独阐述。可以将这一过程写为：

$$L_i \leftarrow R_{i-1}, R_i \leftarrow L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, k_i)$$

第三阶段：将第 16 轮迭代结果左右两半组 L16，R16 直接合并为 64 位（L16，R16），输入到初始逆置换来消除初始置换的影响。这一步的输出结果即为加密过程的密文。可将这一过程写为：输出 64 位密文←IP-1（L16，R16）

实验要求：

以每个学生的学号为明文，利用 DES 算法对其加密，给加密结果，其中密钥取：23A4Z77995BC0FF。

四、实验步骤及实验数据记录：（要有文字描述和必要截图）

- 首先说明对于密钥的处理：实验要求密钥取 23A4Z77995BC0FF，但是由于密钥中存在大于 F 的字母，所以程序中规定，对于介于（ F ， Z ］之间的字母，均按照 F 处理（不区分大小写）；学号为 18030400014，因为明文需补齐 16 位，所以输出的明文为 1803040001400000.

1. 首先将 16 位十六进制密钥转换成 64 位二进制密钥，64 位的秘钥首先根据表格 PC-1 进行变换，原秘钥中只有 56 位会进入新秘钥，PC-1 表也只有 56 个元素，然后，将这个秘钥拆分为左右两部分，*C0* 和 *D0*，每半边都有 28 位。相关代码如下图所示：

   1） Main 函数中整体代码：

```
string text="1803040001400000";
string key="23A4F77995BC0FF1";
string cipher_text[16];
int Result_Cipher_Text[16][64],middle_result[8][8],Combine_LR[64];
cout << "Text: " << text << endl;
cout << "Key: " << key << endl;
int** Target_text=new int*[8],**Target_key=new int*[8],**SubKey=new int*[8];
for (int i = 0; i < 8; ++i) {
    *(Target_text+i)=new int[8];
    *(Target_key+i)=new int[8];
    *(SubKey+i)=new int[7];
}
//将明文转换成二进制，并将64位二进制结果存成8*8的矩阵
Target_text=HexToBinary(text);
//将密钥转换成二进制，并将64位二进制结果存成8*8的矩阵
Target_key=HexToBinary(key);
//将64位密钥根据表格PC-1进行变换，得到56位新密钥K+，再分为C0,D0
SubKey=Create_SubKey(Target_key);
```

2) 十六进制转换成二进制代码：

```
//十六进制字符串，转换成二进制数组
int** HexToBinary(string original){
    int x[original.size()],middle_data[4*original.size()],num=0;
    int** result=new int*[8];
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        *(result+i)=new int[8];
    for (int i = 0; i < original.size(); ++i) {
        if(original[i]>'F'&&original[i]<='Z') original[i]='F';
        else if(original[i]>'f'&&original[i]<='z') original[i]='f';
        if(original[i]>='0'&&original[i]<='9'){
            x[i]=original[i]-48;    //0的ASCLL为48
        }else if(original[i]>='A'&&original[i]<='F'){
            x[i]=original[i]-55;    //A的ASCLL为65，减10
        }else if(original[i]>='a'&&original[i]<='f'){
            x[i]=original[i]-87;    //a的ASCLL为97，减10
        }
        middle_data[4*i] = x[i] / 8;
        middle_data[4*i+1] = (x[i] - middle_data[4*i] * 8) / 4;
        middle_data[4*i+2] = (x[i] - middle_data[4*i] * 8 - middle_data[4*i+1] * 4) / 2;
        middle_data[4*i+3] = x[i] - middle_data[4*i] * 8 - middle_data[4*i+1] * 4 - middle_data[4*i+2] * 2;
    }
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        for (int j = 0; j < 8; ++j)
            result[i][j]= middle_data[num++];
    return result;
}
```

3) PC-1 变换产生第一轮 56 位密钥，并分成 C0，D0 代码：

```
//通过PC-1变换产生第一轮秘钥（64位密钥->56位），同时生成C0/D0
int** Create_SubKey(int** key){
    int** SubKey=new int*[8];
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        *(SubKey+i)=new int[7];
    int middle_data[64],num=0,C_num=0,D_num=0;
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        for (int j = 0; j < 8; ++j)
            middle_data[num++]=key[i][j];
    for (int i = 0; i < 8; ++i) {
        for (int j = 0; j < 7; ++j) {
            SubKey[i][j]=middle_data[PC_1[i][j] - 1];
            if(C_num<28) C[C_num++]=SubKey[i][j]; //56位分为28+28，分别存到C/D中
            else D[D_num++]=SubKey[i][j];
        }
    }
    return SubKey;
}
```

2. 现在已经得到 C0，D0，我们现在创建 16 个块 Cn 和 Dn，1<=n<=16。每一对 Cn 和 Dn 都是由前一对 Cn-1 和 Dn-1 移位而来。具体说来，对于 n = 1，2，…，16，在前一轮移位的结果上，使用左移表进行一些次数的左移操作，就是将除第一位外的所有位往左移一位，将第一位移动至最后一位。例如 C3 and D3 是 C2 and D2 移位而来，C16 and D16 则是由 C15 and D15 通过左移得到。代码如下图所示：

```
for (int i = 1; i <= 16; ++i) {
    //根据C0,D0J进行16次循环移位，依次得到C1-C16,D1-D16
    Cycle_SubKey( n: i-1);
```

```
//循环产生子密钥，C1-C16,D1-D16,由C0、D0推导
void Cycle_SubKey(int n){
    int times=Left_Shift[n],C0,D0;
    for (int i = 0; i < times; ++i) {
        C0=C[0];
        D0=D[0];
        for (int j = 0; j < 28; ++j) {
            C[j - 1] = C[j];
            D[j - 1] = D[j];
        }
        C[27] = C0;
        D[27] = D0;
    }
}
```

3. 由 C1-C16,D1-D16 可以得到所有新秘钥 Kn（1<=n<=16），对每对拼合后的子秘钥 CnDn，按表 PC-2 执行变换：每对子秘钥有 56 位，但 PC-2 仅仅使用其中的 48 位，所以最终所得到新密钥 Kn 都将转换成 48 位，代码如下图所示：

```
for (int i = 1; i <= 16; ++i) {
    //根据C0,D0J进行16次循环移位，依次得到C1-C16,D1-D16
    Cycle_SubKey( n: i-1);
    //对子密钥进行拼合，形成CnDn，并按照PC-2执行变换，得到48位密钥，循环16次，得到K1-K16
    TurnInto_NewKey( n: i-1);
}   //子密钥处理告一段落
```

```
//通过PC-2,使56位子密钥变为48位，并记录
void TurnInto_NewKey(int n){
    int** NewSubKey=new int*[8];
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        *(NewSubKey+i)=new int[6];
    int NowCD[56],NewKey[48],num=0;
    for (int i = 0; i < 56; ++i) {
        if(i<28) NowCD[i]=C[i];
        else NowCD[i]=D[i-28];
    }
    for (int i = 0; i < 8; ++i) {
        for (int j = 0; j < 6; ++j) {
            NewKey[num++]=NowCD[PC_2[i][j]-1];
            SubKey_ByPC2[15-n][num-1]=NewKey[num-1];
        }
    }
}
```

4. 下面我们开始对明文进行处理，对于明文数据，我们 IP 表进行初次变换，然后将变换结果分为 32 位的左半边 L0 和 32 位的右半边 R0，代码如下图所示：

```
    }   //子密钥处理告一段落
    //对明文数据通过IP进行变换，并将64位二进制数据分为L和R两部分，各32
    IP_Transform(Target_text);
```

```
//通过IP变换初始化L,R
void IP_Transform(int** original){
    int ori_data[64],num=0,middle_data[64];
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        for (int j = 0; j < 8; ++j)
            ori_data[num++]=original[i][j];
    for (int i = 0; i < 8; ++i) {
        for (int j = 0; j < 8; ++j) {
            middle_data[8*i+j]=ori_data[IP[i][j]-1];
            if(8*i+j<32) L[8*i+j]=middle_data[8*i+j];
            else R[8*i+j-32]=middle_data[8*i+j];
        }
    }
}
```

5. 我们接着执行 16 个迭代，对 1<=n<=16，使用一个函数 f，函数 f 输入两个区块：一个 32 位的数据区块和一个 48 位的秘钥区块 Kn；输出一个 32 位的区块。定义+表示异或 XOR，那么让 n 从 1 循环到 16，我们计算 Ln=Rn-1；Rn=Ln-1+f(Rn-1,Kn)；这样我们就得到最终区块，也就是 n=16 的 L16R16。

```
for (int i = 1; i <= 16; ++i)  {
    /*通次此函数进行16次迭代后得到L1-L16,R1-R16
     * Ln = Rn-1 ;
     * Rn = Ln-1 + F(Rn-1,Kn);
     */
    Update_LR(i, flag: 0);
```

```
/*通次此函数进行16次迭代后得到L1-L16,R1-R16
* Ln = Rn-1 ; Rn = Ln-1 + F(Rn-1,Kn); */
void Update_LR(int n,int flag){
    int middle_L[32],middle_R[32];
    for (int i = 0; i < 32; ++i) {
        middle_L[i]=L[i];
        middle_R[i]=R[i];
    }
    int* result=new int[32];
    //在F函数中实现F(Rn-1,Kn)
    result=F(n,flag);
    for (int i = 0; i < 32; ++i) {
        L[i]=middle_R[i];
        R[i]=(result[i]+middle_L[i])%2;
    }
    /*在第16个迭代之后，我们有了区块L16 and R16。
     * 接着我们逆转两个区块的顺序得到一个64位的区块*/
    if(n==16){
        for (int i = 0; i < 32; i++) {
            int temp = L[i];
            L[i] = R[i];
            R[i] = temp;
        }
    }
}
```

6. 现在介绍 f 函数工作方式：

计算 f，我们首先拓展每个 Rn-1，将其从 32 位拓展到 48 位。这是通过使用 E 表来重复 Rn-1 中的一些位来实现的，也就是说函数 E(Rn-1)输入 32 位输出 48 位。接着在 f 函数中，我们对输出 E(Rn-1)和秘钥 Kn 执行 XOR 运算：Kn+E(Rn-1)，f 函数此部分代码如下图所示：

```
/*为了计算F，我们首先拓展每个Rn-1，将其从32位拓展到48位。这是通过使用表E
 * 来重复Rn-1中的一些位来实现。也就是说函数E(Rn-1)输入32位输出48位。*/
int* F(int n,int flag){
    int *result=new int[32],** B=new int*[8];
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        *(B+i)=new int[6];
    int middle_ER[48],NowK[48],a[48],first,second,middle_all_s[8],result_s[32];
    for (int i = 0; i < 48; ++i) {
        middle_ER[i]=R[E_Table[i]-1];  //使用表E扩展位数
        NowK[i]=SubKey_ByPC2[16-n][i]; //取原先记录的子密钥
    }
    //逆变换，为了实现解密过程准备
    if(flag==1){
        for (int i = 0; i < 48; ++i) {
            NowK[i]=SubKey_ByPC2[n-1][i];
        }
    }
    for (int i = 0; i < 48; ++i)
        a[i]=(NowK[i]+middle_ER[i])%2;    //进行XOR运算
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        for (int j = 0; j < 6; ++j)       //将8组6比特数据记录在B中
            B[i][j]=a[6*i+j];
```

7. 通过 S 盒进行计算，8 组 6 比特的数据被转换为 8 组 4 比特（一共 32 位）的数据，得到结果之后进行 P 变换，代码如下图所示：

```
/*B的第一位和最后一位组合起来的二进制数决定一个介于0和3之间的十进制数（或者二进制00到11之间）。
 * 设这个数为i。B的中间4位二进制数代表一个介于0到15之间的十进制数（二进制0000到1111）。
 * 设这个数为j。查表找到第i行第j列的那个数*/
for (int i = 0; i < 8; ++i) {
    first=B[i][0]*2+B[i][5];          //将8组数据输入S函数
    second=B[i][1] * 8 + B[i][2] * 4 + B[i][3] * 2 + B[i][4];
    middle_all_s[i]=S_Box[i][first][second];
}
```

```
    for (int i = 0; i < 8; ++i) {
        result_s[i*4]=middle_all_s[i]/8;
        result_s[i*4+1]=(middle_all_s[i]-result_s[i*4]*8)/4;
        result_s[i*4+2]=(middle_all_s[i]-result_s[i*4]*8-result_s[i*4+1]*4)/2;
        result_s[i*4+3]=middle_all_s[i]-result_s[i*4]*8-result_s[i*4+1]*4-result_s[i*4+2]*2;
    }
    //对S盒的输出转换成二进制之后，进行P变换，得到32位数据
    for (int i = 0; i < 32; ++i)
        result[i]=result_s[P[i]-1];
    return result;
}
```

8. 一直完成 16 个迭代。在第 16 个迭代之后，我们有了区块 L16 和 R16。接着我们逆转两个区块的顺序得到一个 64 位的区块，然后对其执行一个最终的变换 IP-1，然后写成 16 进制的结果即为明文对应的密文。

```
    /*在第16个迭代之后，我们有了区块L16 and R16。
     * 接着我们逆转两个区块的顺序得到一个64位的区块*/
    if(n==16){
        for (int i = 0; i < 32; i++) {
            int temp = L[i];
            L[i] = R[i];
            R[i] = temp;
        }
    }
}
```

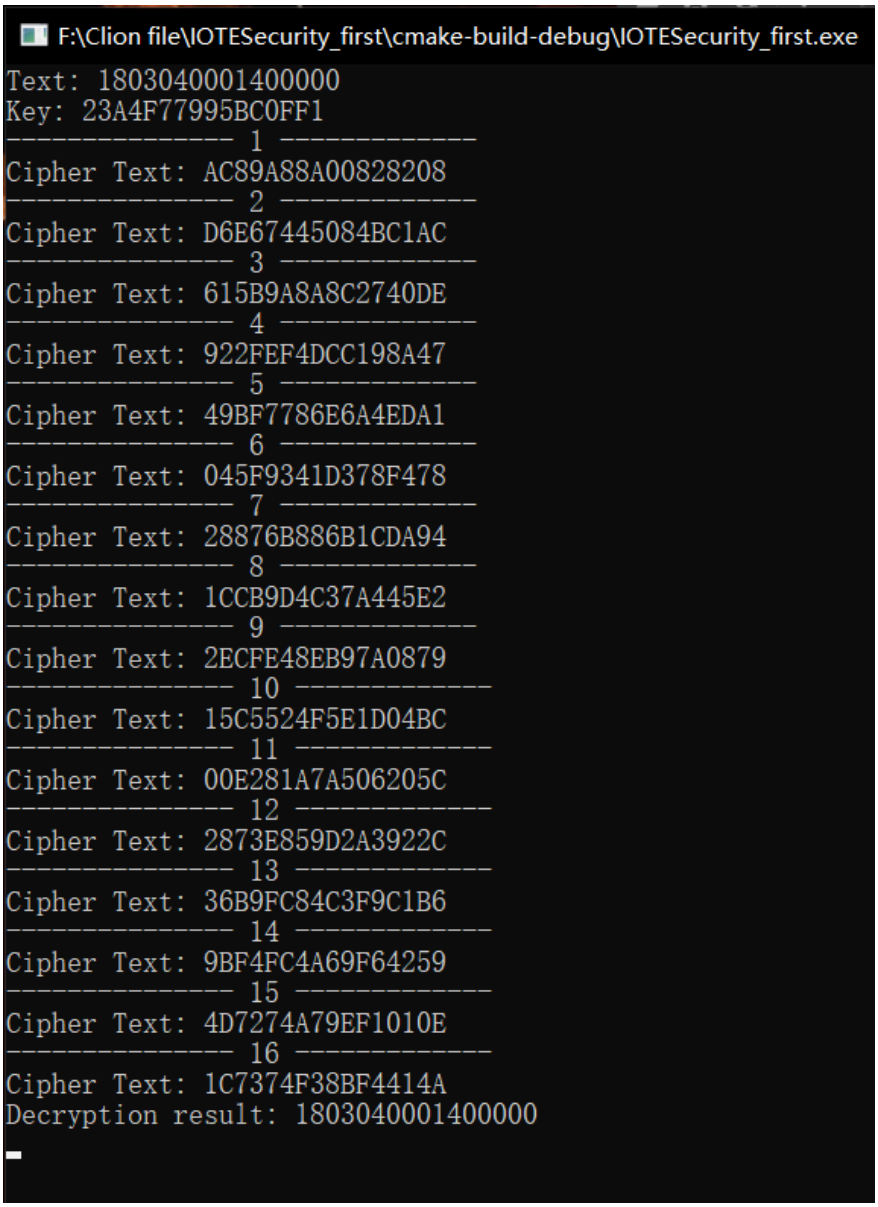
- **解密过程：**

解密就是加密的反过程，执行上述步骤，只是中间存在一步子密钥顺序的调换，在 16 轮迭代中，调转左右子秘钥的位置，代码如下图所示：

```cpp
//实现DES的解密过程，只是中间存在一步子密钥顺序的调换，其他相同
void Decode(string original){
    int** middle=new int*[8];
    int result[64],Combine_LR[64];
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        middle[i]=new int[8];
    middle=HexToBinary(original);
    IP_Transform(middle);
    for (int i = 1; i <= 16; ++i) {
        Update_LR(i, flag: 1);
    }
    for (int j = 0; j < 64; ++j) {
        if(j<32) Combine_LR[j]=L[j];
        else Combine_LR[j]=R[j-32];
    }
    for (int j = 0; j < 8; ++j) {
        for (int k = 0; k < 8; ++k) {
            result[j*8+k]=Combine_LR[IP_Inverse[j][k]-1];
        }
    }
    string Final_result=BinaryToHex(result);
    cout<<"Decryption result: "<<Final_result<<endl;
}
```

五、实验结果分析及实验总结与体会

- 实验结果截图：



- 结果分析：

实验要求输出 16 个子密钥，所以我们在每轮迭代过后我们需要对当前子密钥进行二进制-->十六进制转换并输出密钥，在 16 轮迭代结束之后输出最终的密钥：即为 1C7374F38BF4414A，然后我们对此密钥进行解密，解密后的结果为：1803040001400000，和我们输入的明文一致，表示加解密过程正常实现。

- **实验总结：**

  本次实验通过对 DES 算法的研究，我初步了解了数据加密和解密的过程，虽然 DES 算法的过程和代码看着复杂，但是其原理并不难，实际上就是变化的过程较多、较为复杂。DES 使用一个 56 位的密钥以及附加的 8 位奇偶校验码，产生最大 64 位的分组，这是一个迭代的分组密码，使用了 Feistel 技术，将加密的文本分成两半，使用子密钥对其中一般应用循环功能，然后输出与另一半进行“异或”运算，接着交换这两半，此过程循环，最后一个循环不交换。

六、 源代码

```
#include <iostream>
#include <string>
using namespace std;
/*----------------------------变换表初始化-----------------------------*/
//---S 盒，8 组 6bit
int S_Box[8][4][16]={
        {
                {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}
        },
        {
                {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}
        },
        {
                {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}
        },
        {
                {7,13,14,3,0,6,9,10,1,2,8,5,11,12,4,15},
                {13,8,11,5,6,15,0,3,4,7,2,12,1,10,14,9},
                {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}
        },
        {
```

```
                {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}
        },
        {
                {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}
        },
        {
                {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}
        },
        {
                {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}
        }
};
//E 扩展，拓展每个 Rn-1，将其从 32 位拓展到 48 位，通过此表来重复实现
int E_Table[48]={
        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
};
//对于明文数据 M，通过 IP 进行重新变换
int IP[8][8]={
        {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}
};
//密文逆置换
int IP_Inverse[8][8]={
```

```
        {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}
};
//64->56 选择，得到 k+，分割为 C\D
int PC_1[8][7]={
        {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}
};
//秘钥置换，56->48，使得 CD 组合变为新密钥 Kn
int PC_2[8][6]={
        {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}
};
//P 置换及左移操作
int P[32] = {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};
int Left_Shift[16]={1,1,2,2,2,2,2,2,1,2,2,2,2,2,2,1};

/*------------------------------全局参数声明-------------------------------
----*/
int L[32]={0},R[32]={0},C[28]={0},D[28]={0};
int SubKey_ByPC2[16][48]={0};

/*------------------------------函数部分---------------------------------
----*/
//十六进制字符串，转换成二进制数组
```

```
int** HexToBinary(string original){
    int x[original.size()],middle_data[4*original.size()],num=0;
    int** result=new int*[8];
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        *(result+i)=new int[8];
    for (int i = 0; i < original.size(); ++i) {
        if(original[i]>'F'&&original[i]<='Z') original[i]='F';
        else if(original[i]>'f'&&original[i]<='z') original[i]='f';
        if(original[i]>='0'&&original[i]<='9'){
            x[i]=original[i]-48;    //0 的 ASCLL 为 48
        }else if(original[i]>='A'&&original[i]<='F'){
            x[i]=original[i]-55;    //A 的 ASCLL 为 65，减 10
        }else if(original[i]>='a'&&original[i]<='f'){
            x[i]=original[i]-87;    //a 的 ASCLL 为 97，减 10
        }
        middle_data[4*i] = x[i] / 8;
        middle_data[4*i+1] = (x[i] - middle_data[4*i] * 8) / 4;
        middle_data[4*i+2] = (x[i] - middle_data[4*i] * 8 - middle_data[4*i+1] * 4) / 2;
        middle_data[4*i+3] = x[i] - middle_data[4*i] * 8 - middle_data[4*i+1] * 4 - middle_data[4*i+2] * 2;
    }
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        for (int j = 0; j < 8; ++j)
            result[i][j]= middle_data[num++];
    return result;
}
//-------二进制转化成十六进制
string BinaryToHex(int a[]){
    string result;
    result.resize(16);
    for (int i = 0,j=0; i < 64; i+=4,++j) {
        int sum=a[i] * 8 + a[i + 1] * 4 + a[i + 2] * 2 + a[i + 3];
        if(sum<10) result[j]=sum+'0';
        else if(sum==10)  result[j]='A';
        else if(sum==11)  result[j]='B';
        else if(sum==12)  result[j]='C';
        else if(sum==13)  result[j]='D';
        else if(sum==14)  result[j]='E';
        else if(sum==15)  result[j]='F';
    }
    return result;
}

```

```
159. //通过 PC-1 变换产生第一轮秘钥（64 位密钥->56 位），同时生成 C0/D0
160. int** Create_SubKey(int** key){
161.     int** SubKey=new int*[8];
162.     for (int i = 0; i < 8; ++i)
163.         *(SubKey+i)=new int[7];
164.     int middle_data[64],num=0,C_num=0,D_num=0;
165.     for (int i = 0; i < 8; ++i)
166.         for (int j = 0; j < 8; ++j)
167.             middle_data[num++]=key[i][j];
168.     for (int i = 0; i < 8; ++i) {
169.         for (int j = 0; j < 7; ++j) {
170.             SubKey[i][j]=middle_data[PC_1[i][j] - 1];
171.             if(C_num<28) C[C_num++]=SubKey[i][j]; //56 位分为 28+28，分别存到
    C/D 中
172.             else D[D_num++]=SubKey[i][j];
173.         }
174.     }
175.     return SubKey;
176. }
177.
178. //循环产生子密钥，C1-C16,D1-D16,由 C0、D0 推导
179. void Cycle_SubKey(int n){
180.     int times=Left_Shift[n],C0,D0;
181.     for (int i = 0; i < times; ++i) {
182.         C0=C[0];
183.         D0=D[0];
184.         for (int j = 0; j < 28; ++j) {
185.             C[j - 1] = C[j];
186.             D[j - 1] = D[j];
187.         }
188.         C[27] = C0;
189.         D[27] = D0;
190.     }
191. }
192. //通过 PC-2,使 56 位子密钥变为 48 位，并记录
193. void TurnInto_NewKey(int n){
194.     int** NewSubKey=new int*[8];
195.     for (int i = 0; i < 8; ++i)
196.         *(NewSubKey+i)=new int[6];
197.     int NowCD[56],NewKey[48],num=0;
198.     for (int i = 0; i < 56; ++i) {
199.         if(i<28) NowCD[i]=C[i];
200.         else NowCD[i]=D[i-28];
201.     }
```

```
    for (int i = 0; i < 8; ++i) {
        for (int j = 0; j < 6; ++j) {
            NewKey[num++]=NowCD[PC_2[i][j]-1];
            SubKey_ByPC2[15-n][num-1]=NewKey[num-1];
        }
    }
}
//通过 IP 变换初始化 L,R
void IP_Transform(int** original){
    int ori_data[64],num=0,middle_data[64];
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        for (int j = 0; j < 8; ++j)
            ori_data[num++]=original[i][j];
    for (int i = 0; i < 8; ++i) {
        for (int j = 0; j < 8; ++j) {
            middle_data[8*i+j]=ori_data[IP[i][j]-1];
            if(8*i+j<32) L[8*i+j]=middle_data[8*i+j];
            else R[8*i+j-32]=middle_data[8*i+j];
        }
    }
}
/*为了计算 F，我们首先拓展每个 Rn-1，将其从 32 位拓展到 48 位。这是通过使用表 E
 * 来重复 Rn-1 中的一些位来实现。也就是说函数 E(Rn-1)输入 32 位输出 48 位。*/
int* F(int n,int flag){
    int *result=new int[32],** B=new int*[8];
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        *(B+i)=new int[6];
    int middle_ER[48],NowK[48],a[48],first,second,middle_all_s[8],result_s[
32];
    for (int i = 0; i < 48; ++i) {
        middle_ER[i]=R[E_Table[i]-1];  //使用表 E 扩展位数
        NowK[i]=SubKey_ByPC2[16-n][i]; //取原先记录的子密钥
    }
    //逆变换，为了实现解密过程准备
    if(flag==1){
        for (int i = 0; i < 48; ++i) {
            NowK[i]=SubKey_ByPC2[n-1][i];
        }
    }
    for (int i = 0; i < 48; ++i)
        a[i]=(NowK[i]+middle_ER[i])%2;    //进行 XOR 运算
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        for (int j = 0; j < 6; ++j)       //将 8 组 6 比特数据记录在 B 中
            B[i][j]=a[6*i+j];
```

```
245.     /*B 的第一位和最后一位组合起来的二进制数决定一个介于 0 和 3 之间的十进制数（或者二进制 00 到 11 之间）。
246.      * 设这个数为 i。B 的中间 4 位二进制数代表一个介于 0 到 15 之间的十进制数（二进制 0000 到 1111）。
247.      * 设这个数为 j。查表找到第 i 行第 j 列的那个数*/
248.     for (int i = 0; i < 8; ++i) {
249.         first=B[i][0]*2+B[i][5];          //将 8 组数据输入 S 函数
250.         second=B[i][1] * 8 + B[i][2] * 4 + B[i][3] * 2 + B[i][4];
251.         middle_all_s[i]=S_Box[i][first][second];
252.     }
253.     for (int i = 0; i < 8; ++i) {
254.         result_s[i*4]=middle_all_s[i]/8;
255.         result_s[i*4+1]=(middle_all_s[i]-result_s[i*4]*8)/4;
256.         result_s[i*4+2]=(middle_all_s[i]-result_s[i*4]*8-
    result_s[i*4+1]*4)/2;
257.         result_s[i*4+3]=middle_all_s[i]-result_s[i*4]*8-result_s[i*4+1]*4-
    result_s[i*4+2]*2;
258.     }
259.     //对 S 盒的输出转换成二进制之后，进行 P 变换，得到 32 位数据
260.     for (int i = 0; i < 32; ++i)
261.         result[i]=result_s[P[i]-1];
262.     return result;
263. }
264. /*通次此函数进行 16 次迭代后得到 L1-L16,R1-R16
265. * Ln = Rn-1 ； Rn = Ln-1 + F(Rn-1,Kn)； */
266. void Update_LR(int n,int flag){
267.     int middle_L[32],middle_R[32];
268.     for (int i = 0; i < 32; ++i) {
269.         middle_L[i]=L[i];
270.         middle_R[i]=R[i];
271.     }
272.     int* result=new int[32];
273.     //在 F 函数中实现 F(Rn-1,Kn)
274.     result=F(n,flag);
275.     for (int i = 0; i < 32; ++i) {
276.         L[i]=middle_R[i];
277.         R[i]=(result[i]+middle_L[i])%2;
278.     }
279.     /*在第 16 个迭代之后，我们有了区块 L16 and R16。
280.      * 接着我们逆转两个区块的顺序得到一个 64 位的区块*/
281.     if(n==16){
282.         for (int i = 0; i < 32; i++) {
283.             int temp = L[i];
284.             L[i] = R[i];
```

```
            R[i] = temp;
        }
    }
}

//实现 DES 的解密过程，只是中间存在一步子密钥顺序的调换，其他相同
void Decode(string original){
    int** middle=new int*[8];
    int result[64],Combine_LR[64];
    for (int i = 0; i < 8; ++i)
        middle[i]=new int[8];
    middle=HexToBinary(original);
    IP_Transform(middle);
    for (int i = 1; i <= 16; ++i) {
        Update_LR(i,1);
    }
    for (int j = 0; j < 64; ++j) {
        if(j<32) Combine_LR[j]=L[j];
        else Combine_LR[j]=R[j-32];
    }
    for (int j = 0; j < 8; ++j) {
        for (int k = 0; k < 8; ++k) {
            result[j*8+k]=Combine_LR[IP_Inverse[j][k]-1];
        }
    }
    string Final_result=BinaryToHex(result);
    cout<<"Decryption result: "<<Final_result<<endl;
}
/*------------------------------Main 函数，程序入口-------------------------------*/
int main() {
    string text="1803040001400000";
    string key="23A4Z77995BC0FF1";
    string cipher_text[16];
    int Result_Cipher_Text[16][64],middle_result[8][8],Combine_LR[64];
    cout << "Text: " << text << endl;
    cout << "Key: " << key << endl;
    int** Target_text=new int*[8],**Target_key=new int*[8],**SubKey=new int*[8];
    for (int i = 0; i < 8; ++i) {
        *(Target_text+i)=new int[8];
        *(Target_key+i)=new int[8];
        *(SubKey+i)=new int[7];
    }
```

```
    //将明文转换成二进制，并将 64 位二进制结果存成 8*8 的矩阵
    Target_text=HexToBinary(text);
    //将密钥转换成二进制，并将 64 位二进制结果存成 8*8 的矩阵
    Target_key=HexToBinary(key);
    //将 64 位密钥根据表格 PC-1 进行变换，得到 56 位新密钥 K+，再分为 C0,D0
    SubKey=Create_SubKey(Target_key);
    for (int i = 1; i <= 16; ++i) {
        //根据 C0,D0J 进行 16 次循环移位，依次得到 C1-C16,D1-D16
        Cycle_SubKey(i-1);
        //对子密钥进行拼合，形成 CnDn，并按照 PC-2 执行变换，得到 48 位密钥，循环 16 次，得到 K1-K16
        TurnInto_NewKey(i-1);
    }   //子密钥处理告一段落
    //对明文数据通过 IP 进行变换，并将 64 位二进制数据分为 L 和 R 两部分，各 32
    IP_Transform(Target_text);
    //进行 16 次迭代
    for (int i = 1; i <= 16; ++i)  {
        /*通次此函数进行 16 次迭代后得到 L1-L16,R1-R16
         * Ln = Rn-1 ;
         * Rn = Ln-1 + F(Rn-1,Kn);
        */
        Update_LR(i,0);
        for (int j = 0; j < 64; ++j) {
            if(j<32) Combine_LR[j]=L[j];
            else Combine_LR[j]=R[j-32];
        }
        //对翻转过后的 LR 执行最终一步 IP-1 变换
        for (int j = 0; j < 8; ++j) {
            for (int k = 0; k < 8; ++k) {
                Result_Cipher_Text[i-1][j*8+k]=Combine_LR[IP_Inverse[j][k]-1];
            }
        }
        cipher_text[i-1]=BinaryToHex(Result_Cipher_Text[i-1]);
        cout<<"--------------- "<<i<<" -------------"<<endl;
        cout<<"Cipher Text: "<<cipher_text[i-1]<<endl;
    }
    Decode(cipher_text[15]); //对最终第 16 次加密结果进行解密，查看是否对应初始明文。
    return 0;
}
```