DES 算法设计过程

姓名：南风不竞
学号：神撼之杀

一、作业要求

完成一个 DES 算法的详细设计，包括:算法原理概述；总体结构；模块分解；数据结构；类-C 语言算法过程。

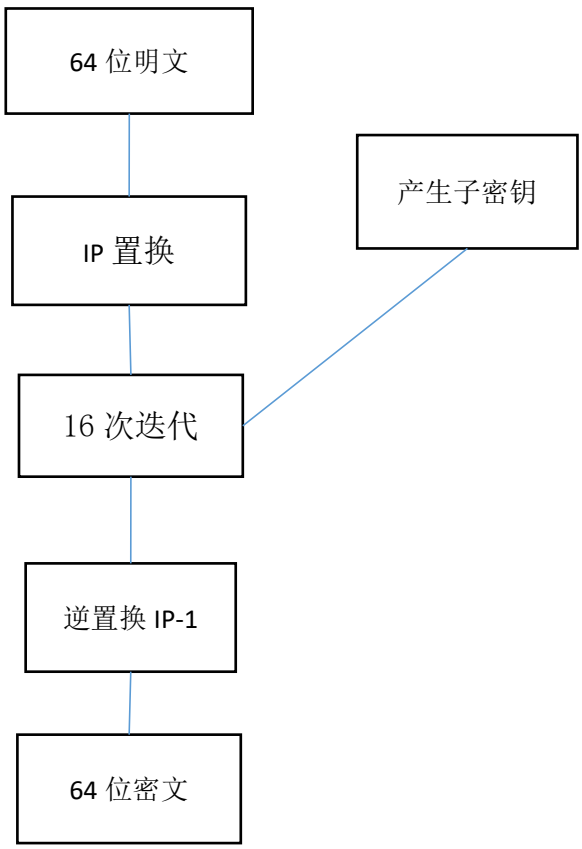
二、设计过程

1. 算法原理概述

DES 是一个对称加密算法，加密解密使用相同的密钥，主要步骤是换位和置换。DES 也是分组密码，输入的明文和密钥要求是 64 位长度，输出的密文长度也是 64 位，使用了 Feistel 网络，基于混淆和扩散这两种操作，增强了密码强度，另外加密和解密过程几乎相同，方便了软件和硬件上的实现。

2. 总体结构

加密过程：



解密过程：

除了子密钥应反序调用 ，其他与加密过程完全一致。

3.模块分解

比较主要和复杂的模块有以下几个：

1. 产生 16 个子密钥

通过 64 位密钥，根据 PC-1 表压缩得到 56 位，分成前后 28 位 C0、D0，进行 16 次循环，第 1, 2, 9, 16 次循环时循环左移一位，否则左移两位，再经过 PC-2 表得到子密钥 Ki。

2. 各种置换

根据置换表让二进制元素重新排位。

3. 16 次迭代运算

加密：经过初始置换后获得 L0,R0，经过 16 次 Li = Ri-1, Ri = Li-1 f(Ri-1, Ki), i = 1 .. 16，f 为 Feistel 轮函数，最后对得到的 L16R16 进行左右交换。

解密算法：子密钥反序调用

4. Feistel 轮函数

将 32 位的 R 进行 E 扩展成 48 位，再与对应的子密钥进行按位异或运算，分成 8 个长度为 6 的分组，通过对应的 S-盒进行 6-4 转换，输出 8 个长度为 4 的分组后合并，再进行 P 置换。

5. S-盒 6-4 转换

S-盒是一个 4 行、16 列的表,输入为 6 位二进制数组 b0b1b2b3b4b5,输出为 “S-盒[(b0b5)10][(b1b2b3b4)10]”的 4 位二进制表示。

4.数据结构

所有表包括 PC-1、PC-2、P 以及 8 个 S 盒在 python 程序中均看成一维数组，用 list 表示。8 个 S 盒 list 在放进一个 list，所有数据结构如下：

```
# 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]

# 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]
```

8 个 S 盒都如下，由于形式一致就不一一展示：

```
# 8个S盒
S1 = [14, 4, 13, 1, 2, 15, 11, 8, 3, 10, 6, 12, 5, 9, 0, 7,
      0, 15, 7, 4, 15, 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]

S2 = [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]

S3 = [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]
```

```
PC1 = [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]

PC2 = [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]
```

```
# E-扩展
EXTENDED_RULE_TABLE = [[32, 5], [4, 9], [8, 13], [12, 17],
                       [16, 21], [20, 25], [24, 29], [28, 1]]

P = [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]

S_BOXS = [S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8]   # S盒的集合
IPSIZE = len(IP)                            # 明文块长度
HALFSIZE = IPSIZE / 2                       # 一半数组长度
ITERATION_COUNTERS = 16                     # 迭代次数
S_BOX_NUM = len(S_BOXS)                     # S-盒数量
S_BOX_COLS = 16                             # S-盒列数
```

三、python 代码实现与测试

1. 代码实现（和相关注释）

1. 产生 16 个子密钥

```
SUBKEYS = []        # 子密钥集合
def general_subkeys(K):
    """
    生成子密钥集合
    @K: 给定的密钥
    """
    HALF_SUBKEY_LENGTH = 28
    # 64位K通过PC-2表压缩成56位
    subkey = get_PC1_subkey(K)
    # 获得 C0, D0
    C, D = subkey[:HALF_SUBKEY_LENGTH], subkey[HALF_SUBKEY_LENGTH:]
    # 获得 C1, D1
    for i in range(1, 17):
        if i == 1 or i == 2 or i == 9 or i == 16:
            C, D = move_onebit_subkey(C), move_onebit_subkey(D) # 循环左移一位
        else:
            C, D = move_twobit_subkey(C), move_twobit_subkey(D) # 循环左移两位
        SUBKEYS.append(get_PC2_subkey(C + D))    # 56位K通过PC-2表压缩成48位
```

移位和经过 PC-1、PC-2 表压缩：

```
def get_PC1_subkey(K):
    """
    对64位的k进行压缩置换得到56位
    """
    return [K[i-1] for i in PC1]

def get_PC2_subkey(K):
    """
    对56位的k进行压缩置换得到48位
    """
    return [K[i-1] for i in PC2]
```

2. 各种置换

```
def permutate_plain_text_by_IP(plain_text):
    """
    通过IP重排明文块
    """
    return [plain_text[ip_index - 1] for ip_index in IP]

def inverse_permutate_by_IP_1(R_L):
    """
    逆置换IP-1
    """
    return [R_L[i - 1] for i in IP_1]

def permutate_by_P(thiry_two_bit_R):
    """
    32位R逆置换
    """
    return [thiry_two_bit_R[i - 1] for i in P]
```

E-扩展:

```
def E_extended(R):
    """
    E扩展
    """
    extended_R = []
    for i in range(len(EXTENDED_RULE_TABLE)):
        extended_R.append(R[EXTENDED_RULE_TABLE[i][0] - 1])
        for j in range(4):
            extended_R.append(R[4 * i + j])
        extended_R.append(R[EXTENDED_RULE_TABLE[i][1] - 1])

    return extended_R
```

3. 16 次迭代运算

```
def DES_encryption_or_decryption(text, secret_key, is_decrypt):
    """
    对text进行加密或解密，secret_key是密钥，is_decrypt不为0则加密，否则解密
    """
    # IP置换
    deal_text = permutate_plain_text_by_IP(text)
    L, R = deal_text[:int(HALFSIZE)], deal_text[int(HALFSIZE):]

    # 产生子密钥
    general_subkeys(secret_key)

    # 16次迭代
    start, end, interval = 0, ITERATION_COUNTERS, 1
    # 若为解密，反序调用子密钥
    if is_decrypt:
        start, end, interval = ITERATION_COUNTERS - 1, -1, -1
    for i in range(start, end, interval):
        t_L = R
        R = exclsive_or(L, feistel(R, i))
        L = t_L
    # 逆置换IP-1
    return inverse_permutate_by_IP_1(R + L)
```

4. Feistel 轮函数

```
def feistel(R, i):
    """
    feistel轮函数，R为长度为32位的Ri-1，i为迭代第i次
    """
    # 1 - 长度为32位的Ri-1作E-扩展，作为48位的串E(Ri-1)
    # 2 - 将E(Ri-1)和长度为48位的子密钥Ki作48位二进制串按位异或运算
    t_R = exclsive_or(E_extended(R), get_subkey(i))
    # 3 - 将2得到的结果分成8个长度为6的分组，经过8个不同的S-盒
    #     进行6-4转换，得到8个长度分别为4位的分组
    # 4 - 将分组结果合并成长度为32位的串
    GROUP_LEN = 6
    # 5 - 把32位的串进行P-置换
    return permutate_by_P(list(chain(*[S_box_substitution(
                t_R[GROUP_LEN * i : GROUP_LEN * (i + 1)], S_BOXS[i]) for i in range(S_BOX_NUM)])))
```

5. S-盒 6-4 转换

```python
def S_box_substitution(R_group, S_BOX):
    """
    S盒替换
    @R_group:6位二进制数组b0b1b2b3b4b5
    输出为“S-盒[(b0b5)10][(b1b2b3b4)10]”的4位二进制表示
    """
    row = (R_group[0] << 1) + R_group[5] # 行：b0b5 的十进制

    def cal_binlist(x, y):
        return x * 2 + y
    col = reduce(cal_binlist, R_group[3:7]) # 列：b1b2b3b4 的十进制

    demical_output = S_BOX[row * S_BOX_COLS + col] # 获得S-盒对应的数字

    # S-盒对应的10进制数字转成4位二进制list
    return list(map(lambda x: int(x), list(bin(demical_output)[2:].zfill(4))))
```

6. 总体结构

```python
def DES_encryption_or_decryption(text, secret_key, is_decrypt):
    """
    对text进行加密或解密，secret_key是密钥，is_decrypt不为0则加密，否则解密
    """
    # IP置换
    deal_text = permutate_plain_text_by_IP(text)
    L, R = deal_text[:int(HALFSIZE)], deal_text[int(HALFSIZE):]

    # 产生子密钥
    general_subkeys(secret_key)

    # 16次迭代
    start, end, interval = 0, ITERATION_COUNTERS, 1
    # 若为解密，反序调用子密钥
    if is_decrypt:
        start, end, interval = ITERATION_COUNTERS - 1, -1, -1
    for i in range(start, end, interval):
        t_L = R
        R = exclsive_or(L, feistel(R, i))
        L = t_L
    # 逆置换IP-1
    return inverse_permutate_by_IP_1(R + L)
```

3. 测试过程及结果

1. 加密测试代码：读取要加密的明文，随机生成密钥，加密获得十六进制可读字符串密文，默认"utf-8"编码

随机产生 64 位密钥

```
def random_generated_key():
    """
    随机产生0~1大小的随机数四舍五入获得0和1，得到密钥list
    """
    return [round(random.random()) for i in range(64)]
```

把二进制密文转成可读的十六进制字符串

```
def binlist_to_hexlist(binlist):
    """
    把生成的二进制密文转成可读的十六进制字符串
    @binlist: 二进制列表
    """
    def cal_binlist(x, y):
        return x * 2 + y
    return [hex(reduce(cal_binlist, binlist[i * 4 : (i + 1) * 4]))[2:] for i in range(len(binlist) // 4)]
```

加密测试的代码

```
def encrypt_test():
    '''
    读取要加密的明文，随机生成密钥，加密获得密文，默认"utf-8"编码
    plain_text.txt :  明文
    secret_key.txt :  密钥
    '''
    # -------------------------读取将加密的明文-----------------------------
    with open("plain_text.txt", "r", encoding="utf-8") as fin:
        read_data = fin.read()
    # 获得密文的16进制的list
    hex_list = list(bytearray(read_data, encoding="utf-8"))
    # 判断密文是不是8字节的倍数，不是则补上缺的位数
    # 假如缺4个字节，则补上4个4；假如缺5，则补上5个5
    # 解密的时候再对应去掉
    hex_list_len = len(hex_list)
    if (hex_list_len % 8):
        lack_num = 8 - hex_list_len % 8
        for i in range(lack_num):
            hex_list.append(lack_num)
    # ------------------------------------------------------------------------

    # 16进制list--->二进制字符串list--->合并成二进制字符串-->二进制list
    bin_str_list = list(map(lambda x: bin(x)[2:], hex_list))
    for i in range(len(bin_str_list)):
        if len(bin_str_list[i]) < 8:
            bin_str_list[i] = (8 - len(bin_str_list[i])) * '0' + bin_str_list[i]

    bin_list = list(map(lambda x: int(x), list(''.join(bin_str_list))))
    #------------------------------------------------------------
```

```
# --------------随机生成64位密钥并保存在文件中------------------
secret_key = random_generated_key()
print("secret_key = ", ''.join(list(map(lambda x: str(x), secret_key))))
with open("secret_key.txt", "w") as fout:
    fout.write(''.join(list(map(lambda x: str(x), secret_key))))
#-------------------------------------------------------------

# ---------------对二进制list进行每次分64位进行加密再转成16进制可读字符串------------------
ciphertext = []
for i in range(int(len(bin_list) / 64)):
    t = DES_encryption_or_decryption(bin_list[i * 64 : (i + 1) * 64], secret_key, 0)
    ciphertext += t
# 转成16进制可读字符串
# 将密文保存进文件中
with open("ciphertext.txt", "w", encoding="utf-8") as fout:
    fout.write(''.join(binlist_to_hexlist(ciphertext)))
# -------------------------------------------------------------
```

2. 解密测试代码：根据密文和密钥获得明文，并把结果输出到文件中，默认"utf-8"编码

把十六进制字符串转换成二进制字符串 list

```
def hexstr_to_binstrlist(hexstr):
    """
    把十六进制字符串转换成二进制字符串list
    @hexstr:十六进制字符串
    """
    return list(chain(*[list((bin(int(i, 16))[2:]).zfill(4)) for i in hexstr]))
```

解密测试代码

```
def decrypt_test():
    """
    根据密文和密钥获得明文，并把结果输出到文件中，默认"utf-8"编码
    secret_key.txt : 密钥
    ciphertext.txt : 密文
    result.txt : 解密结果
    """
    # ------------------------读取密文和对应的密钥-----------------------
    with open("secret_key.txt", "r") as fin:
        secret_key = list(map(lambda x: int(x), list(fin.read())))

    with open("ciphertext.txt", "r") as fin:
        ciphertext = list(map(lambda x: int(x), list(fin.read())))
    # -------------------------------------------------------------

    # ------------------每次分64位进行解密获得二进制list--------------------
    bin_list = []
    for i in range(int(len(ciphertext) / 64)):
        t = DES_encryption_or_decryption(ciphertext[i * 64 : (i + 1) * 64], secret_key, 1)
        for i in range(int(len(t) / 8)):
            t = list(map(lambda x: str(x), t))
            bin_list.append(''.join(t[i * 8 : (i + 1) * 8]))
    # -------------------------------------------------------------
```

```
# ------------------将二进制list转成16进制list转成明文--------------------
hex_list = list(map(lambda x: int(hex(int(x, 2)), 16), bin_list))
# 获取最后一位数字，判断是否是由于不足8字节而填补上的
end_num = hex_list[len(hex_list) - 1]
if end_num < 8:
    for i in range(-end_num, 0, 1):
        if hex_list[i] != end_num:
            break
    else:
        hex_list = hex_list[:-end_num]

with open("result.txt", "w", encoding="utf-8") as fout:
    fout.write(bytearray(hex_list).decode("utf-8"))
# ----------------------------------------------------------------
```

3. main 函数代码

```
if __name__ == "__main__":
    encrypt_test()
    decrypt_test()
```

4. 运行

在 plain_text.txt 放进一大段中文和英文的文字，运行程序，得到运行结果。为了防止数据偶然性，多次运行程序，并多次更换 plain_text.txt 中的数据。

5. 运行结果

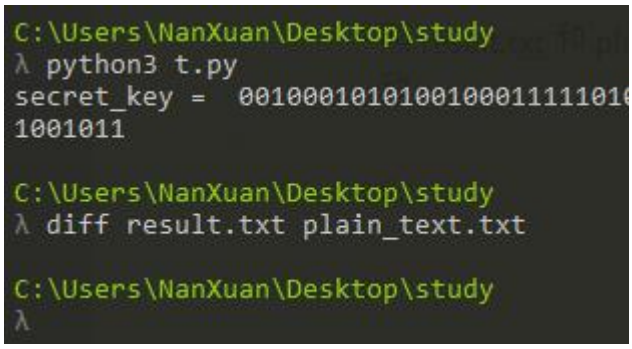
每次运行程序密钥都随机生成：

```
C:\Users\NanXuan\Desktop\study
λ python3 t.py
secret_key =  0100011101110101110001101100110111001011011110100010010011010000

C:\Users\NanXuan\Desktop\study
λ python3 t.py
secret_key =  1111110011110110010111011001100110010101011111010100001011001001

C:\Users\NanXuan\Desktop\study
λ python3 t.py
secret_key =  0010001010100100011111010111110011010101111010101001111101001011
```

各个文件夹都有正确生成对应的内容，result.txt 也生成了正确的解密结果，由于人工对照 result.txt 和 plain_text.txt 对照具有较大误差性，因此使用 diff 进行比较两者的内容是否一致：



没有任何提示输出，说明两个文件夹的内容一致。多次运行程序，结果相同，可以说明本次实验的代码错误的概率较低。

四、算法设计总结和感想

本次实验主要使用了 python，比用 c++实现节省了许多劳动力，但还是不得不多加细心和耐心。除了加密过程中对二进制 1 和 0 的处理容易出现错误，还有许多细节需要进一步的思考处理，比如：

1. 如果输入的明文不是 8 字节的倍数要如何处理？

我的处理方式是假如明文字节数距离 8 字节的倍数少 x 个字节，则在明文末尾补上 x 个 x，若缺少 4 个字节，则再末尾补上 4 个 4 即可，解密时再去掉。也考虑到会有明文恰好是以 x 个 x 结尾，但考虑到出现这种情况的概率较少，故不作处理。

2. 如何将明文转换成二进制数组？以及解密后如何将二进制数组转成可读的字符串？

查资料找了各种各样的方法先把明文转成十六进制再转成二进制以及把密文二进制转成十六进制可读字符串。

以及编码问题和字符串与各种进制数字的转换。最后对代码添加尽可能详细和必要的注释以及对代码进行简化。

老师上课的 ppt 内容已经是讲的非常清晰简明易懂，非常有助于捋顺逻辑，非常良心，各个表的数据和网上查找的数据是一致的，所以在写代码的过程中节省较多时间。

另外，DES 算法比较复杂，加密和解密过程却几乎相同，非常方便，写代码时不由得佩服对算法设计者的智慧。

PS：由于老师作业要求没有说能另交代码，因此附上本次作业代码的 github 地址：
https://github.com/freakkid/Mint/tree/master/2017%E4%BF%A1%E6%81%AF%E5%AE%89%E5%85%A8/hw1_DES