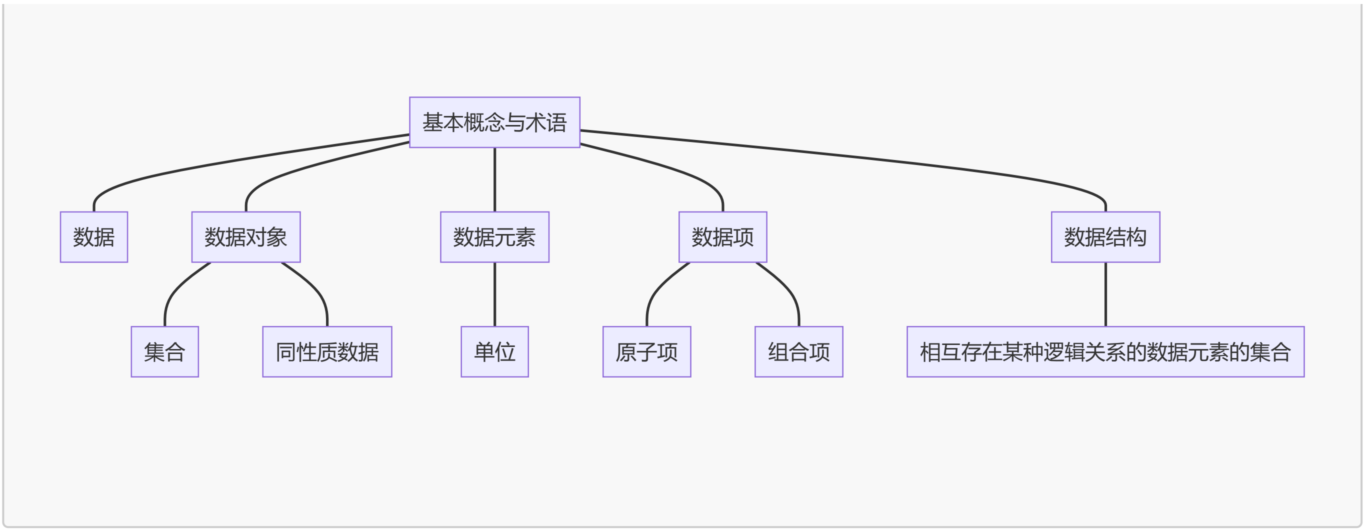
DATA STRUCTURE NOTES

[toc]

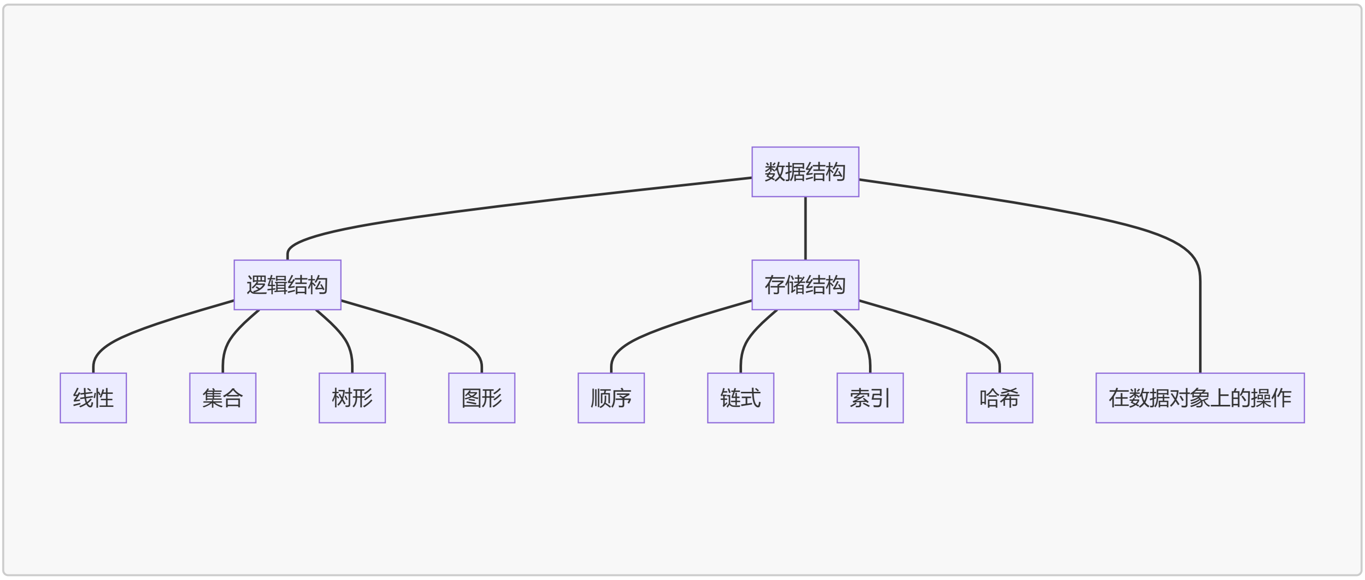
1. 1. 绪论

```
程序 = 算法 + 数据结构
数据结构 = 数据对象 + 结构
```

1.1. 基本概念与术语



1.2. 数据结构



1.3. 抽象数据类型 Abstract Data Type（ADP）

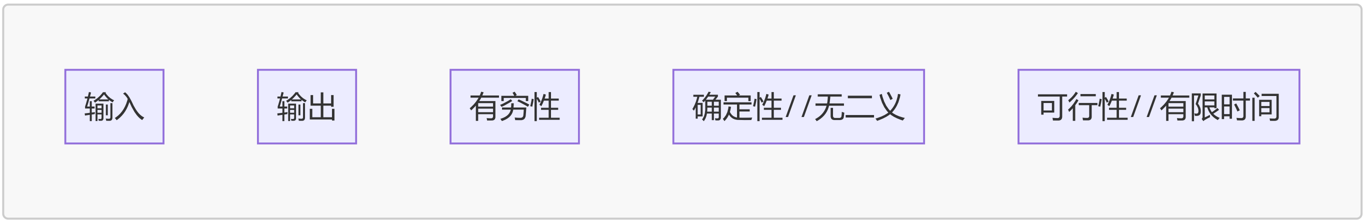
- 数据类型
  - 原子类型
  - 结构类型
- ADP：一个数学模型以及定义在该模型上的一组操作。
  - 体现了程序设计的**问题分解**、**抽象**和**信息隐藏**
  - **描述**

  -
    ```
    ADP 抽象数据类型名
    Data
        数据元素之间逻辑关系的定义
    Operation
        操作1
            初始条件
            操作结果描述
        操作2
            初始条件
            操作结果描述
    ```

```
        操作3
            初始条件
            操作结果描述
        ...
        操作n
            初始条件
            操作结果描述
    end ADP
```

1.4. 算法 Algorithm： 解决特定问题求解步骤的描述

1.4.1. 算法特性



1.4.2. 算法设计的要求

- 正确性
- 可读性
- 健壮性
- 时间效率高、存储量低

1.4.3. 算法效率的度量方法

- 事后统计（不科学、不准确）
- 事前分析估算

1.4.4. 函数渐进增长性：对比不同算法的优劣

1.4.5. 复杂度

时间复杂度：T（n） = O（f（n））

```
    T（n）：执行次数
    看数量级
    看增长率
    越小越优
```

分类

- 常数阶： O（1）
- 线性阶： O（n）

- 平方阶： O（n^2^）
- 对数阶： O（logn）
- nlogn阶： O（nlogn）
- 立方阶： O（n^3^）
- 指数阶： O（2^n^）
- ……

推导大O阶

- 用“1”取代加法常数

- 只保留最高阶项

- 最高阶项系数改为1

  注：O(1) < O(logn) < O(n) < O(nlogn) < (n^2^) < O(n^3^) < O(2^n^) < O(n!) < O(n^n^)

空间复杂度：S（n） = O（f（n））所需存储空间

> 注：“复杂度”一般指时间复杂度

1.4.6. 算法的分析

- 平均情况：期望的运行时间，计算平均时间复杂度。
- 最坏情况：计算最坏时间复杂度，是一种保证，一般时间复杂度指最坏情况。

2. 线性表

2.1. 顺序表的顺序存储

2.1.1. 补充：操作算法中用到的预定义常量和类型

- 函数结果状态代码

```
#define TRUE         1
#define FALSE        0
#define OK           1
#define ERROR        0
#define INFEASIBLE  -1
#define OVERFLOW    -2
```

- Status是函数的类型，其值是函数结果状态代码

```
typedef int Status;
typedef char Elemtype;
```

2.1.2. 线性表顺序存储的结构代码

```
//顺序存储结构代码        创建线性表
#define MAXSIZE 20                /*存储空间初始分配量*/
#define OK 1
#define ERROR 0

//线性表的动态分配存储结构
# define ListInitSize 100         /*存储空间初始分配量*/
# define ListIncrement 10         /*存储空间分配增量*/
typedef int Status;
typedef int Elemtype;
Elemtype *newbase;                //重新分配存储空间

typedef struct
{
    Elemtype *data;               /*储存数据元素  这里使用指针方便后边进行动态分配    储存空间基址*/
    int length;                   /*当前线性表的长度    线性表长度<=数组长度*/
    int listsize;                 //当前分配的存储容量 第三个属性根据需要，可有可无
}SqList;
```

```
注：status是一种函数类型，当函数返回值为函数结果状态代码时，函数定义为Status类型。
    函数结果状态码：
                    TRUE        1、FALSE    0
                    OK          1、ERROR    0
                    INFEASIBLE -1、OVERFLOW -2
```

2.1.3. 顺序表基本操作的实现

InitList(&L)

```
初始化操作，建立一个空的线性表L
```

- C

```
Status InitList(SqList* L)          //构造一个空的线性表
{
    //动态分配
    L->data = (Elemtype *)malloc(sizeof(Elemtype) * ListInitSize )

    if (!L->data);       //存储分配失败退出
        exti(ERROR);
    L->length = 0;      //空表长度为0
    L->listsize = ListInitSize;
    return OK;
}
```

- C++

```
Status InitList(SqList* L)          //构造一个空的线性表
{
    //动态分配
    L->data = new Elemtype(ListInitSize);

    if (!L->data);      //存储分配失败退出
        exti(ERROR);

    L->length = 0;      //空表长度为0
    L->listsize = ListInitSize;
    return OK;
}
```

DestroyList(&L)

> 销毁已存在的线性表L

- C

```
void DestroyList(SqList *L)
{
    if(L->data)  free(L->data);  //释放存储空间
}
```

- C++

```
void DestroyList(SqList &L)
{
    if(L.data)  delete[] L.data;  //释放存储空间
}
```

> 注：如果动态分配了一个数组，但是却用`delete p`的方式释放，没有用`[]`，则编译时没有问题，运行时也一般不会发生错误，但实际上会导致动态分配的数组没有被完全释放。

ClearList(&L)

> 将线性表清空

- C++

```
void ClearList(SqList &L)
{
    L->length = 0;          //将线性表的长度置为零
}
```

> 注：其实这只是形式上的清空，让计算机识别不了而已，真正的线性表在内存中还存在。

ListInsert(&L, i, e)

> 在线性表L中第i个位置插入新元素e

- C

```
Status ListInsert(SqList* L, int i, Elemtype e)         //在第i个位置插入新元素e
{
    //初始条件      i的位置要合理同时线性表要有空间可以插入新元素
    int k;
    if (L->length == MAXSIZE)
        return ERROR;
    if (i < 1 || i > L->length + 1)
        return ERROR;
    if (L->length >= L->listsize)       //存储空间已满，需要重新分配
    {
        newbase = (Elemtype*)realloc(L->data, (L->listsize + ListInitSize) *
sizeof(Elemtype))
            if (!newbase)
                exit(EOVERFLOW);
        L->data = newbase;
        L->listsize += ListIncrement;
    }

    //操作结果
    if (i <= L->length)
    {

        for (k = L->length - 1; k >= i - 1; k--)
            L->data[k + 1] = L->data[k];
    }
    L->data[i-1] = e;
    L->length++;

    return OK;

}


L.date[length] = e;
L.length++;

e = L.data[length];
L.length--;
```

- C++

```

```

ListDelete(&L, i, &e)

```
删除线性表L中第i个位置元素，用e返回
```

- C

```
Status ListDelete(SqList* L, int i, Elemtype* e)
{
    //初始条件
    int k;
    if (i<1 || i>L->length)         //删除的位置不合理
        return ERROR;
    if (L->length == 0)             //线性表没有元素可以删除
        return ERROR;

    //操作结果
    *e = L->data[i - 1];

    if (i < L->length)
    {
        for (k = i; k < L->length; k++)
            L->data[k - 1] = L->data[k];
    }
    L->length--;
    return OK;

}
```

- C++

```
```

IsEmpty(L)

```
若线性表为空，返回true，否则false
```

- C

```
int IsEmpty(SqList *L)
{
    if(L->length == 0)
        return 1;
    else return 0;
}
```

- C++

```
int IsEmpty(SqList &L)
{
    if(L->length == 0)
        return 1;
    else return 0;
}
```

ListLength(L)

```
返回线性表L的元素个数
```

- C

```
int ListLength(SqList *L)
{
    return L->length;
}
```

- C++

```
int ListLength(SqList &L)
{
    return L->length;
}
```

LocateElem(L, e)

```
L中查找与给定值e相等的元素，若成功返回该元素在表中的序号，否则返回0
```

顺序查找 O（n）

```
//for语句实现
Status LocateElem(SqList *L,Elemtype *e)
{
    int i;
    for(i = 0; i < L->length; i++)
    {
        if(L->data[i] == *e)
        return i+1;
    }
    return 0;
}

//while语句实现
Status LocateElem(SqList *L,Elemtype *e)
{
    int i = 0;
    while( i < L->length && L->data[i] != *e)
    {
        i++;
        if( i < L->length)
            return i+1;
    }

    return 0;
}
```

GetElem(L, i, &e)

```
将线性表L中的第i个位置元素返回给e
```

- C

```
Status GetElem(SqList L, int i, Elemtype *e)    //获得元素操作，讲读取的元素赋给e
{
    //初始条件  i的位置要合理
    if (L.length == 0 || i < 1 || i > L.length)
        return ERROR;
    //操作结果
    *e = L.data[i - 1];

    return OK;
}
```

- C++

```
Status GetElem(SqList L, int i, Elemtype &e)    //获得元素操作，讲读取的元素赋给e
{
    //初始条件  i的位置要合理
    if (L.length == 0 || i < 1 || i > L.length)
        return ERROR;
    //操作结果
    *e = L.data[i - 1];

    return OK;
}
```

2.2. 顺序表的链式存储（链表）

2.2.1. 单链表

```
typedef struct
{
    char name[20];
    float score;
}STD;
```

单链表结构代码

```
typedef struct node
{
    Elemtype data;      //数据域
    struct node *next;  //指针域
}LNode,*LinkList;       //Node为数据类型<=>struct node
                        //LinkList为指向结点的指针类型
//申请一个结点
s = (LinkList)malloc(sizeof(Node));
s = (LNode*)malloc(sizeof(LNode))
```

初始化构造空表 int InitList(LinkList *L)

```
//①被动修改
int InitList(LinkList *L)
{
    *L = (LNode*)malloc(sizeof(LNode));
    if(*L = NULL)
        return 0;
    (*L)->next = NULL;
        return 1;
}
//②主动接受
LinkList InitList()     //返回地址，不传参数
{
    LinkList L;
    L = (LNode*)malloc(sizeof(LNode));
    if( L == NULL)
        return NULL;
    L->next = NULL;
        return L;
}
//调用
    LinkList H;
    H = InitList();
```

判断链表是否为空 int IsLinkListEmpty(LinkList L)

```
int IsLinkListEmpty(LinkList L)
{
    if(L->next)
        return 0;
    else
        return 1;
}
```

创建非空单链表 int CreateList(LinkList *L, int n)

头插法

```
int CreateLinkListFront(LinkList *L, int n)             //O(n)
{
    *L = (*LNode)malloc(sizeof(LNode));     //建立带头节点的链表
    if(*L == NULL)
        return 0;
    int i;
    LinkList s;
    for(i = 0; i< n; i++)
    {
        s = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
        scanf(&s->data);                        //伪代码
        s->next = (*L)->next;
        (*L)->next = s;
    }
    return 1;
}
```

```


    s->next = L->next;
    L->next = s;


```

尾插法

```
int CreateLinkListRear(LinkList *L, int n)              //O(n)
{
    *L= (LinkList)malloc(sizeof(LNode))
    if(*L == NULL)
        return 0;
    (*L)->next = NULL;

    LinkList R;
    R = *L;
    for(i = 0; i<n; i++)
    {
        LinkList s;
        s = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
        scanf(&s->data);    //伪代码
        s->next = NULL;
        R->next = s;
        R = s;
    }
}
```

初始化函数和插入函数组合

```
int CreateList(LinkList *L,int n)
{
    int i = 1;
    Elemtype e;
    InitList(L);
    while( i < n )
    {
        InsertList(L,i++,e)
    }
    return 0;
}
```

遍历 int TraverLinkList(LinkList L)

```
int TraverLinkList(LinkList L)      //O(n)
{
    LinkList p = L->next;
    while(p)
    {
        printf(p->data);        //只是伪代码
        p = p->next;
    }
}
```

按值查找 LinkList LocateElem(LinkList L, ElemType e)

返回地址

```
 LinkList LocateElem(LinkList L, ElemType e)        //返回地址
 {
     LinkList p = L->next;
     while(p)
     {
         if( p->data == e )     //伪代码
            break;
            p = p->next;
     }
     return p;                  //就算找不到也是返回NULL
 }
```

返回位序

```
int LocateElem(LinkList L,ElemType e)
{
    LinkList p = L->next;
    int j = 1;
    while(p && p->data != e)
    {
        p = p->next;
        j++;
    }
    if(p)
        return j;
    else
        return 0;
}
```

按位序查找 LinkList GetPosElem(LinkList L,int i)

```
LinkList GetPosElem(LinkList L,int i)   //LinkList类型，返回结点地址或空指针
{
    if( i < 0 )
        return NULL;
    LinkList p = L->next;
    int j = 1;
    while( p && j < i )
    {
        p = p->next;
        j++;
    }
    if( !p || j > i )
        return NULL;
    return p;
}
```

求长度 int ListLength(LInkList L)

```
{
    LinkList p = L->next;
    int j = 1;
    while(p)
    {
        p = p->next;
        j++;
    }
}
```

按位序插入 int InsertList(LinkList L, int i, ElemType e)

```
//已知头指针L，位置i，待插入元素值e
int InsertList(LinkList L, int i, ElemType e)
{
    if(i <= 0)              //越界
        return 0;
    LinkList p;
        p = L;
    int j = 0;
    while(p && j<i-1)       //<=> p = GetPosElem(L, i-1)
    {
        p = p->next;
        ++j;
    }

    if(!p)                  //越界
        return 0;

    LinkList s = (LNode*)malloc(sizeof(LNode));     //生成新结点
    s->data = e;
    s->next = p->next;
    p->next = s;                            //插入
}
```

按位序删除 int DeleteList(List L, int i; ElemType *e)

```
int DeleteList(LinkList L, int i, ElemType *e)      //O(n)
{
    if(i<=0)
        return 0;

    LinkList p;
    p = L;
    int j = 0;
    while(p && j<i-1)
    {
        p = p->next;
        ++j;
    }

    if(!p)
        return 0;

    LinkList q;
    q = p->next;
    p->next = q->next;
    *e = q->data;
    free(q);
        return 1;
}
```

单链表的清空 int ClearList(LinkList *L)

清空只清空元素，保留头节点和头指针

```
int ClearList(LinkList L)           //O(n)
{
    LinkList p;
    while((*L)->next)
    {
        p = (*L)->next;
        (*L)->next = p->next;
        free(p);
    }
}
```

单链表的销毁 int DestroyList(LinkList *L)

> 销毁不保留头节点

```
int DestroyList(LinkList *L)
{
    LinkList p;
    while(L)
    {
        p = (*L);
        (*L) = (*L)->next;
        free(p);
    }
}
```

单链表的逆置 void inverted(LinkList L)

> 算法思路：讲单链表从头节点开始分割成两个链表，用头插法重新插入即可

```
void Inverted(LinkList L)
{
    LinkList p;
    p = L->next;         //临时指针，用于头插法
    L->next = NULL;      //断成两个链表
    while (p) {
        LinkList q;      //临时指针，保存链表
        q = p->next;
        p->next = L->next;
        L->next = p;
        p = q;
    }
}
```

```
迭代法
```

```
void Inverted(LinkList L)
{
    LinkList pre = NULL;
    LinkList cur = L->next;
    while(cur)
    {
        LinkList Next = cur->next;
        cur->next = pre;
        pre = cur;
        cur = Next;
    }
}
```

单向链表的就地排序 int sort(LinkList L)

```
int sort(LinkList *L)
{
    LinkList p;
    p = (*L)->next;
    (*L)->next = NULL;
    while(p){
        LinkList q;             //q用于保存未排序的链表
        linkList s;             //s用于保存第i-1个结点，确定插入位置
        q = p->next;
        s = (*L);
        while(s->next!=NULL && s->next->data <p->data){
            s = s->next;
        }
        p->next = s->next;
        s->next = p;
        p = q;
    }
    return 1;
}
```

有序表的归并

```
/*  问题:已知线性表LA和LB，数据元素均按值非递减有序排列，
    将LA、LB归并成一个新的线性表Lc，
    且Lc中的数据元素按值非递减有序排列。
*/

//顺序表
void MergeSq(SqList LA, SqList LB, SqList *LC)
{
    int i = 0, j = 0, k = 0;
    LC->length = LA.length + LB.length;
    while(i<LA.length && j<LB.length){      //LA和LB非空，写入小的元素到LC
        if( LA.elme[i] < LB.elem[j] )
            LC->elem[k++] = LA.elem[i++];
        else LC->elem[k++] = LB.elem[j++];
    }
    while(i<LA.length)
        LC->elem[k++] = LA.elem[i++];
    while(j<LB.length)
        LC->elem[k++] = LB.elem[j++];
}                                               //O(m+n)

//去除重复元素
void MergeSq(SqList LA, SqList LB, SqList *LC)
{
    int i = 0, j = 0, k = 0;
    LC->length = LA.length + LB.length;
    while(i<LA.length && j<LB.length){
        if( LA.elem[i] < LB.elem[j] ){
            if(LC->elem[k]!=LA.elem[i])
                LC->elem[k++] = LA.elem[i++];
            else i++;
        }
        else if(LA.elem[i]>LB.elem[j]){
            if(LC->elem[k]!=LB.elem[j])
                LC->elem[k++] = LB.elem[j++];
            else j++;
        }
    }
    while(i<LA.length)
        LC->elem[k++] = LA.elem[i++];
    while(j<LB.length)
        LC->elem[k++] = LB.elem[j++];
}

//单链表
void MergeLink(LinkList LA, LinkList LB)
{
    LinkList qa = LA, pa = LA->next;
    LinkList pb = LB->next, qb = pb->next;
    while(pa&&pb){
        if(pa->data <= pb->data){           //寻找插入位置
            qa = pa;
            pa = pa->next;
        }
        else{
            qa->next = pb;
```

```
                pb->next = pa;
                qa = pb;
                qb = pb->next;
            }
        }
        if(!pa)
            qa->next = pb;
            free(LB);
    }
```

2.2.2. 单向循环链表

判断是否为空的条件为p是否等于头指针 `p!=L`or`p->next!=L` 尾指针表示：a~1~ = `R->next->next`;a~n~ = `R`.

单向循环链表的插入 int CirInsertLink(LinkList L, int i, ElemType e)

```
int CirInsertLink(LinkList L, int i, ElemType e)
{
    LinkList p = L;
    int j = 0;
    while( p->next!=L && j<i-1 ){
        p = p->next;
        j++;
    }

    if( j<i-1 || j>i-1 ){
        printf("位置异常！");
        return 0;
    }

    LinkList s = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    s->data = e;            //伪代码
    s->next = p->next;
    p->next = s;
    return 1;

}
```

单向循环链表的删除 int CirDeleteLink(LinkList L, int i, ElemType e)

```
int CirDeleteLink(LinkList L, int i, ElemType e)
{
    LinkList p = L;
    int j = 0;
    while( p->next!=L && j < i-1 ){
        p = p->next;
        j++;
    }
    if(j<i-1 || j>i-1){
        printf("链表为空或位置异常! ");
        return 0;
    }

    LinkList q = p->next;
    e = q->next;
    p->next = q->next;
    free(q);
    return 1;
}
```

单向循环链表的合并 LinkList Connect(LinkList Ta,LinkList Tb)

这里是用尾指针表示的单向循环链表

```
LinkList Connect(LinkList Ta,LinkList Tb)
{
    LinkList p = Ta->next;          //保存Ta表的头结点，便于Tb表接上
    Ta->next = Tb->next->next;      //Tb表尾接到Ta表头
    free(Tb->next);                 //释放Tb头结点
    Tb->next = p;                   //Tb表尾接到Ta表头
    return Tb;                      //因为这里是用Tb的尾指针表示的
}
```

2.2.3. 双向循环链表

```
typedef struct DulNode          //dual
{
    struct DulNode *prior;      //前驱
    ElemType data;
    struct DulNode *next;       //后继
}DulNode,*DuLinkLIst
```

双向循环链表的初始化 int InitDuLinkList(DuLinkList *L)

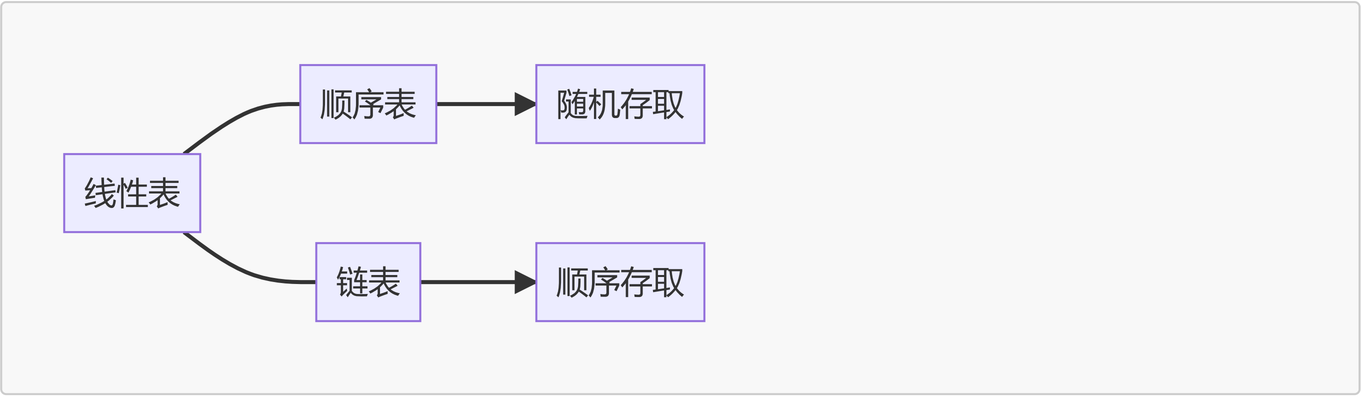
```
int InitDuLinkList(DuLinkList *L)
{
    *L = (DuLinkList)malloc(sizeof(DulNode));
    if(*L == NULL){
        printf("申请空间失败! \n");
        exit(0);
    }
    (*L)->next = (*L)->prior = *L;
    return 1;
}
```

双向循环链表的插入 int DuInsert(DuLinkList *L, int i, ElemType e)

```
int DuInsert(DuLinkList *L, int i, ElemType e)
{
    DuLinkList p = L;        //临时指针，指向头结点
    DuLinkList New_p;        //用于指向新节点
    int j = 0;

    while(p->next!=L && j < i-1){
        p = p->next;
        j++;
    }

    if(j<i-1 ||j>i-1){
        printf("位置不合理！\n");
        return 0;
    }

    s = (DuLinkList)malloc(sizeof(DulNode));
    s->data = e;

    s->next = p->next;       //后继
    p->next = s;

    s->prior = p;            //前驱
    p->next->prior = s;
}
```

双向循环链表的删除 int DuDelete(DuLinkList *L, int i, ElemType e)

```
int DuDelete(DuLinkList *L, int i, ElemType e)
{
    DuLinkList p = L;
    int j = 0;
    while(p->next != L && j<i-1 ){
        p = p->next;
    }

    if( j<i-1 || j >i-1 ){
        printf("链表为空或位置不合理！\n");
        return 0;
    }

    DuLinkList q = p->next;
    e = q->next;
    p->next = q->next;
    q->next->prior = p;
    free(q);
    return 1;
}
```



3. 栈与队列

3.1. 栈(stack)Last In First Out

栈是限定仅在表尾进行插入和删除操作的线性表。 栈顶：予许插入删除一段 栈底：另一端 LIFO结构

3.1.1. 栈的顺序存储

结构代码

Method 1

```
#define MAX 100
typedef struct stack
{
    SElemType data[MAX];
    int top;                //栈顶位置
    int StackSize;          //栈容量
}SqStack;
```

Method 2

```
typedef struct stack
{
    SElemType *data;        //指针
    int top;                //栈顶位置
    int StackSize;          //栈容量
}SqStack;
```

初始化操作 InitSqStack(SqStack *S, int max)

```
InitSqStack(SqStack *S, int max)
{
    S->data = (SElemType*)malloc(SElemType);
    if(S->data == NULL){
        printf("空间申请失败! ");
        exit(0);
    }
    S->top = -1;
    S->StackSize = max;
    return 1;
}
```

判断栈空 int IsStackEmpty(SqStack S)

```
int IsSqStackEmpty(SqStack S)
{
    if(S.top == -1)
        return 1;
    else
        return 0;
}
```

获取栈顶元素 int GetStackTop(SqStack S, int *e)

```
int GetSqStackTop(SqStack S, int *e)
{
    if(S.top == -1)
        return 0;
    *e = S.data[S.top];
        return 1;
}
```

求长度 int SqStackLength(SqStack S)

```
int StackLength(SqStack S)
{
    if(S.top == -1)
        return 0;
    return S.top+1;
}
```

进栈操作 int PushSqStack(SqStack *S, int e)

```
int PushSqStack(SqStack *S, int e)
{
    if(S->StackSize == S->top+1)
        return 0;
    S->data[++S->top] = e;
    return 1;
}
```

出栈操作 int PopSqStack(SqStack *S, int *e)

```
int PopSqStack(SqStack *S, int *e)
{
    if(S->top == -1)
        return 0;
    *e = S->data[S->top--];
        return 1;
}
```

遍历操作 int TraverSqStack(Stack S)

```
int TraverSqStack(Stack S)
{
    int k;
    if(s.top == -1){
        printf("栈空! ");
        return 0;
    }
    for(k = S.top; k >= 0; k--)
        printf("%-5d",S.data.data[k]);
    printf("/n");
}
```

创建顺序栈 int CreateSqStack(SqStack *S, int max)

```
int CreateSqStack(SqStack *S, int max)
{
    int x, YN;
    InitSqStack(S, max);
    do{
        printf("请输入进栈数据: ");
            scanf("%d", &x);
        printf("继续吗? yes = 1;no = 0");
            scanf("%d", &YN);
    }while(YN == 1);
}
```

3.1.2. 栈的链式存取

链栈不需要头节点!

结构代码

```
typedef struct StackNode
{
    SElemType data;
    struct StackNode *next;
}SNode,*LinkStack;
```

初始化 int InitLinkStack(LinkStack *S)

```
int InitLinkStack(LinkStack *S)
{
    *S = NULL;                  //只有一句，一般不用单独写函数
}
```

判断栈空 int IsLinkStackEmpty(LinkStack S)

```
int IsLinkStackEmpty(LinkStack S)
{
    if(S == NULL)
        return 1;
    else
        return 0;
}
```

获取栈顶元素 int GetLinkStackTop(LinkStack S, int *e)

```
int GetLinkStackTop(LinkStack S, int *e)
{
    if(S == NULL)
        return 0;
    *e = S->data;
        return 1
}
```

求长度 int LinkStackLength(LinkStack S)

```
int LinkStackLength(LinkStack S)
{
    int j = 0;
    LinkStack p = S;
    while (p) {
        p = p->next;
        j++;
    }
    return j;
}
```

进栈操作 int PushLinkStack(LinkStack *S)

```
int PushLinkStack(LinkStack *S)
{
    LinkStack p = (LinkStack)malloc(SNode);
    if (p == NULL)
        return 0;
    p->data = e;
    p->next = *S;
    *S = p;
    return 1;
}
```

出栈操作 int PopLinkStack(LinkStack *S， int *e)

```
int PopLinkStack(LinkStack *S, int *e)
{
    LinkStack p = *S;
    if(p == NULL)
        return 0;
    *S = p->next;
    *e = p->data;
    free(p);
    return 1;
}
```

遍历操作 int TraversLinkStack(LinkStack S)

```
int TraversLinkStack(LinkStack S)
{
    if(S == NULL){
        printf("栈空! ");
        return 0;
    }
    while(S){
        printf("%-5d",S->data);
        S = S->next;
    }
    printf("\n");
    return 1;
}
```

创建链栈 int CreateLinkStack(LinkStack S)

```
int CreateLinkStack(LinkStack S)
{
    int x,YN;
    InitLinkStack(&S);
    do{
        printf("请输入链栈数据: ");
        scanf("%d",&x);
        PushLinkStack(S,x);
        printf("继续吗? YES = 1; NO = 0.");
        scanf("%d",&YN);
    }while(YN == 1);
    return 1;
}
```

3.2. 队列(Queue)First In First Out

队头删除 队尾插入 FIFO结构

3.2.1. 链队列

链队列的结构代码

```
//链队列的结点及指针类型
typedef struct QNode
{
    QElemType data;
    struct QNode *next;
}QNode, *QueuePtr;

//链队列类型
typedef struct
{
    QueuePtr front;
    QueuePtr rear;
}LinkQueue;
```

链队列的初始化 int InitQueue(LinkQueue *Q)

```
int InitQueue(LinkQueue* Q)
{
    Q->front = Q->rear = (QueuePtr)malloc(sizeof(QNode));
    if (!Q->front)
        exit(0);
    Q->front->next = NULL;
    return 1;
}
```

链队列入队操作 int AppendQueue(LinkQueue *Q)

```
int AppendQueue(LinkQueue *Q, QElemType e)
{
    QueuePtr p = (QueuePtr)malloc(sizeof(QNode));
    if (!p)
        exit(0);
    p->data = e;
    p->next = NULL;
    Q->rear->next = p;
    Q->rear = p;
    return 1;
}
```

链队列出队 int DeQueue(LinkQueue *Q, QElemType &e)

```
int DeQueue(LinkQueue* Q)
{
    if (Q->front == Q->rear)
        return 0;
    QueuePtr p = Q->front->next;
    Q->front->next = p->next;

    if (Q->rear == p)
        Q->rear = Q->front;

    free(p);
    return 1;
}
```

获取链队列对头元素 int GetQueueHead(LinkQueue Q, QElemType &e)

```
int GetQueueHead(LinkQueue Q, QElemType &e)
{
    if(Q.front == Q.rear)
        return 0;
    e = Q.front->next->data;
    return 1;
}
```

链队列的销毁 int DestroyQueue(LinkQueue *Q)

```
int DestroyQueue(LinkQueue *Q)
{
    while(Q.front){
        p = Q.front->next;
        free(Q.front);
        Q.front = p;
    }
    return 1;
}
```

3.2.2. 顺序队列/循环队列

结构代码

```
#define MAXQSIZE 100
Typedef struct{
    QElemTyoe *base;
    int front;          //头指针
    int rear;           //尾指针
}SqQueue;
```

初始化 int InitQueue(SqQueue *Q)

```
int InitQueue(SqQueue *Q)
{
    Q.base = new QElemType[MAXSIZE];
    if(!Q.base)
        exit(0);
    Q.front = Q.rear = 0;
    return 1;
}
```

求长度 int QueueLength(SqQueue Q)

```
int QueueLength(SqQueue Q)
{
    return (Q.rear-Q.front+MAXQSIZE)%MAXQSIZE;
}
```

入队 int EnQueue(SqQueue *Q, QElemType e)

```
int EnQueue(SqQueue *Q, QElemType e)
{
    if((Q->rear+1)%MAXQSIZE == Q->front)
        return 0;
    Q->data[Q->rear] = e;
    Q->rear = (Q->rear + 1)%MAXQSIZE;
    return 1;
}
```

出队 int DeQueue(SqQueue *Q, QElemType *e)

```
int DeQueue(SqQueue *Q, QElemType *e)
{
    if(Q->front+1 == Q->rear)
        return 0;
    *e = Q->data[Q->front];
    Q->front = (Q->front + 1)%MAXQSIZE;
    return 1;
}
```

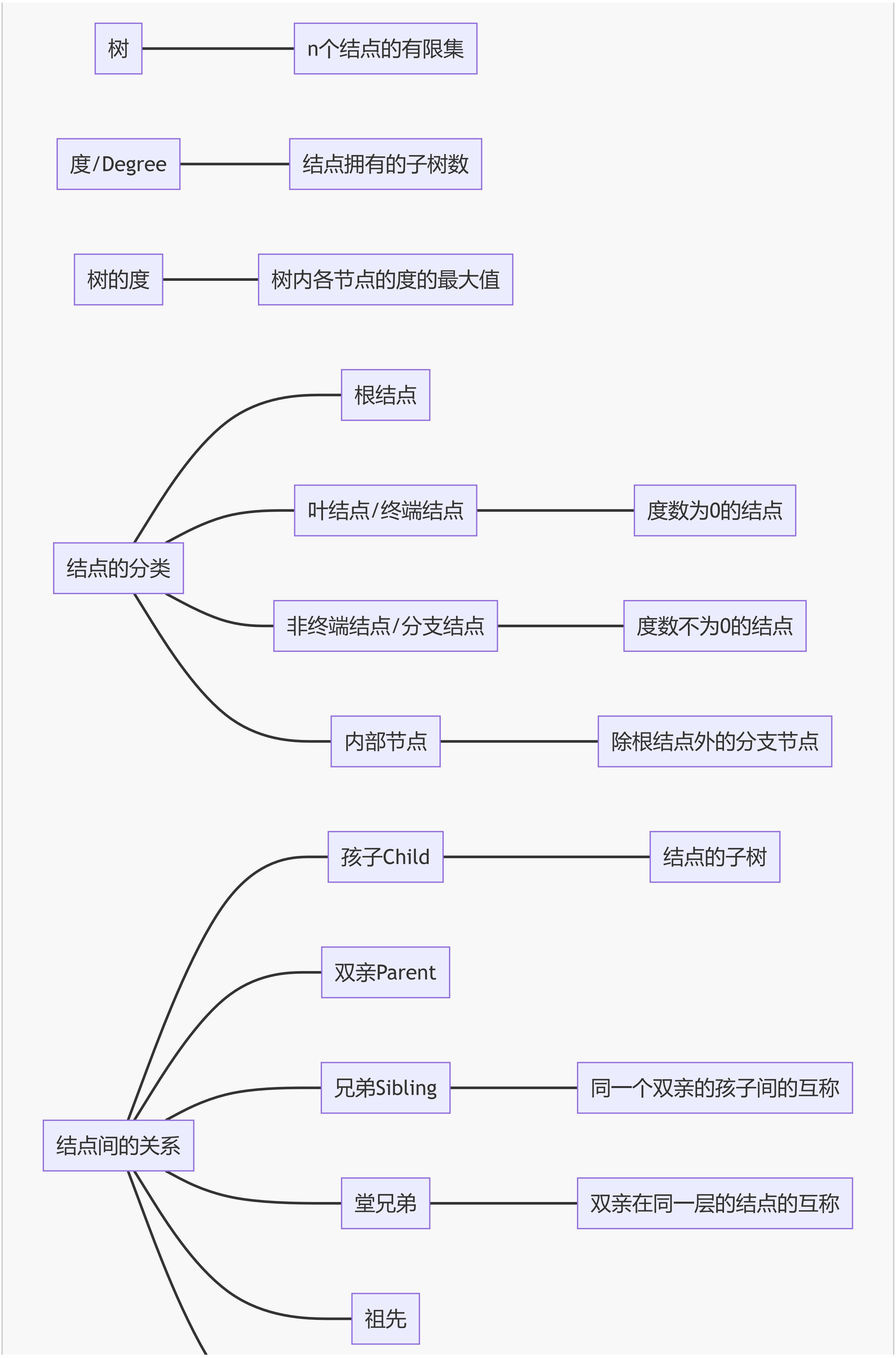
取对头元素 SElemType GetHead(SqQueue Q)

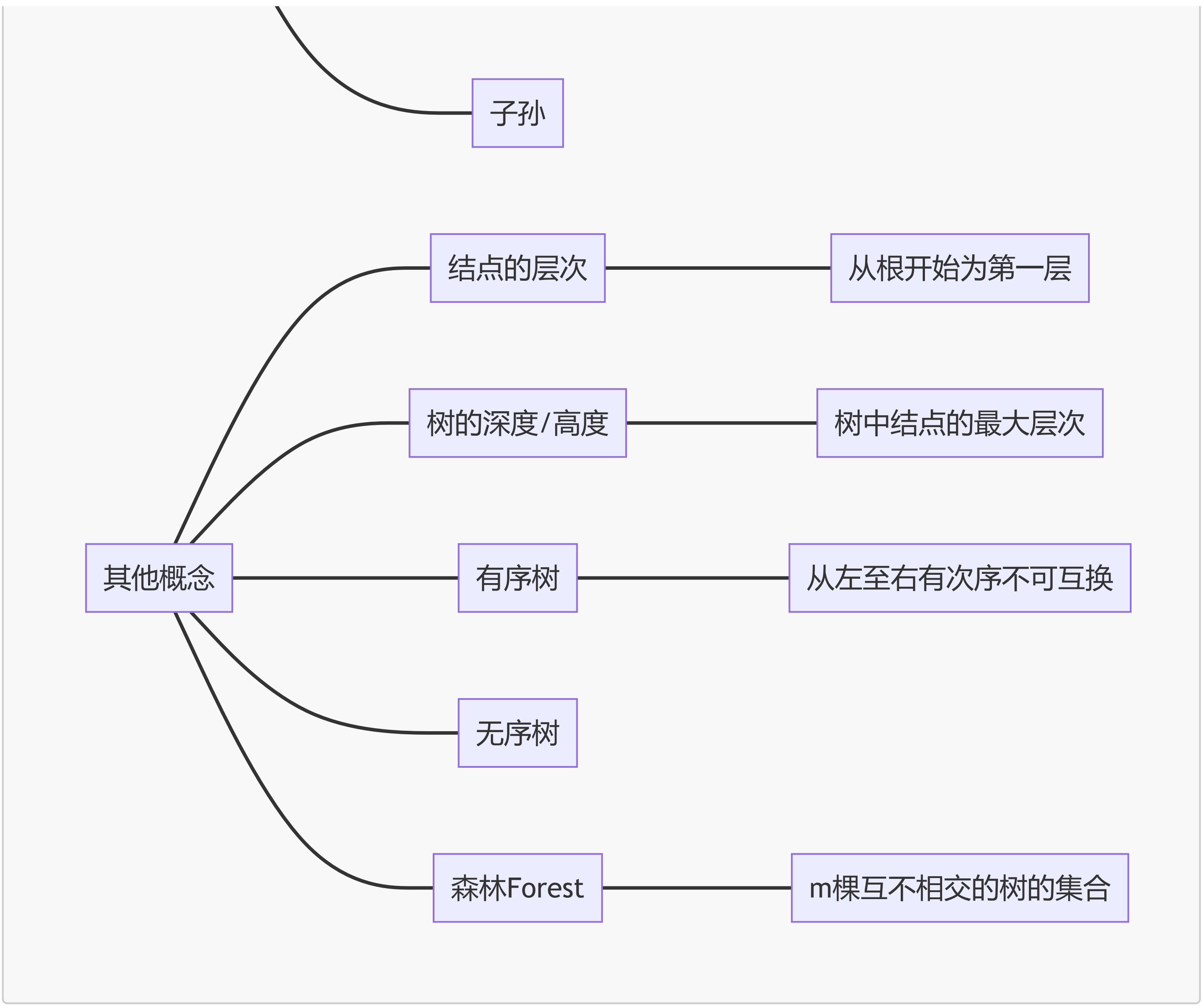
```
SElemType GetHead(SqQueue Q)
{
    if(Q->front+1 != Q->rear)
        return Q.data[Q.front];
}
```

4. 串、数组与广义表

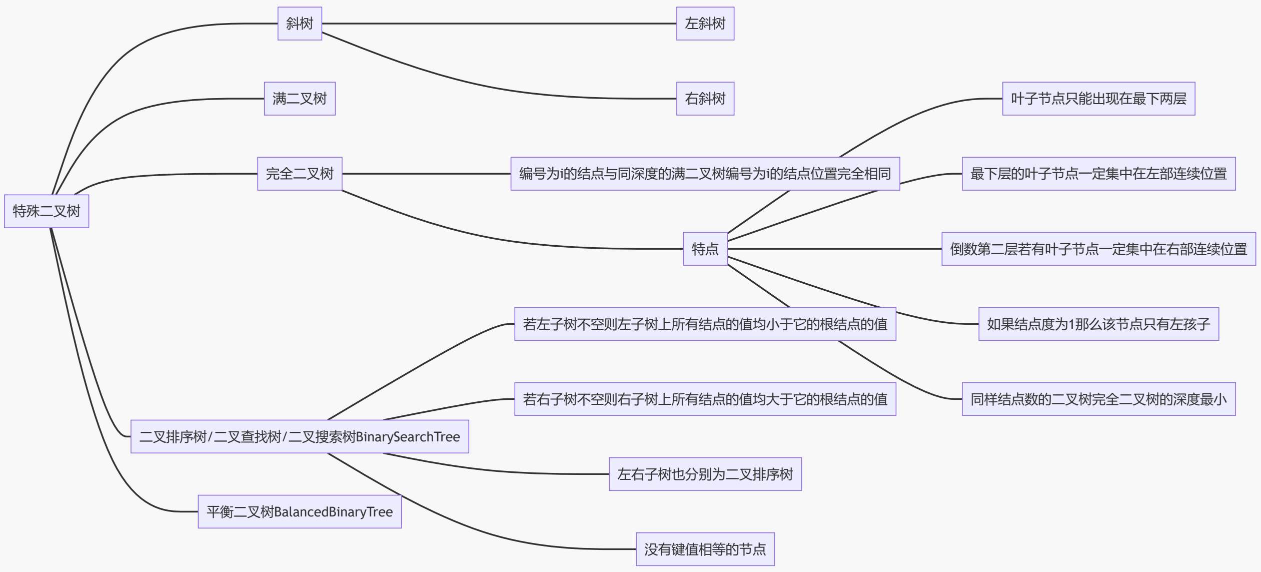
5. 树和二叉树

5.1. 一些基本概念


树
n个结点的有限集
度/Degree
结点拥有的子树数
树的度
树内各节点的度的最大值
结点的分类
根结点
叶结点/终端结点
度数为0的结点
非终端结点/分支结点
度数不为0的结点
内部节点
除根结点外的分支节点
结点间的关系
孩子Child
结点的子树
双亲Parent
兄弟Sibling
同一个双亲的孩子间的互称
堂兄弟
双亲在同一层的结点的互称
祖先


子孙
其他概念
结点的层次
从根开始为第一层
树的深度/高度
树中结点的最大层次
有序树
从左至右有次序不可互换
无序树
森林Forest
m棵互不相交的树的集合

5.2. 二叉树


特殊二叉树
斜树
左斜树
右斜树
满二叉树
完全二叉树
编号为i的结点与同深度的满二叉树编号为i的结点位置完全相同
特点
叶子节点只能出现在最下两层
最下层的叶子节点一定集中在左部连续位置
倒数第二层若有叶子节点一定集中在右部连续位置
如果结点度为1那么该节点只有左孩子
同样结点数的二叉树完全二叉树的深度最小
二叉排序树/二叉查找树/二叉搜索树BinarySearchTree
若左子树不空则左子树上所有结点的值均小于它的根结点的值
若右子树不空则右子树上所有结点的值均大于它的根结点的值
左右子树也分别为二叉排序树
没有键值相等的节点
平衡二叉树BalancedBinaryTree

5.2.1. 二叉树的性质

1. 第i层至多有2^{i-1}个结点。
2. 深度为k的二叉树至多有2^{k-1}个结点。
3. 分支线总数为$n-1$.
4. 记n_0为终端结点数，n_1为度数为2的结点数，n_2为度数为2的结点数，则
   1. $分叉总数 = n_1+2n_2$
   2. $n_0=n_2+1$
5. 具有n个结点的**完全二叉树**的深度是$[log_{2}n]+1$。
6. 对于有n个结点的完全二叉树的结点按层序编号，对任一结点i有
   1. 如果$i=1$,则结点i是二叉树的根，无双亲；如果$i>1$,则双亲结点是$[\frac{i}{2}]$。
   2. 如果$2i>n$，则结点i无左孩子（结点i为叶子结点）；否则其左孩子是结点$2i$。
   3. 如果$2i+1>n$，则结点i无右孩子；否则其右孩子为结点$2i+1$。

5.2.2. 二叉树的存储结构

顺序存储

```
#define MAXNODE 100                        //最大结点数
typedef ElemType SqBiTree[MAXNODE+1];    //1号单元存放根结点
```

二叉链表

```
typedef struct BiTNode
{
    DataType data;
    struct BITNode *Lchild;
    struct BITNode *Rchild;
}BiTNode, *BiTree;
```

三叉链表

```
typedef struct TriTNode
{
    DataType data;
    struct TriTNode *Lchild;
    struct TriTNode *Rchild;
    struct TriTNode *Rchild;
}TriTNode, *TriTree;
```

5.2.3. 二叉树的遍历（递归算法）

DLR：先序遍历法

```
void PreOrderTraverse(BiTree T)
{
    if(T == NULL)
        return ;
    printf("%c",T->data);
    PreOrderTraverse(T->Lchild);
    PreOrderTraverse(T->Rchild);
}
```

LDR：中序遍历法

```
void InOrderTraverse(BiTree T)
{
    if(T == NULL)
        return ;
    InOrderTraverse(T->Lchild);
    printf("%c",T->data);
    InOrderTraverse(T->Rchild);
}
```

LRD：后序遍历法

```
void PostOrderTraverse(BiTree T)
{
    if(T == NULL)
        return ;
    PostOrderTraverse(T->Lchild);
    PostOrderTraverse(T->Rchild);
    printf("%c",T->data);
}
```

层序遍历法

借助队列

```
void LeverOrderTraverse(BiTree)
{
    if(root == NULL)                //二叉树为空，结束遍历
        return ;
    Enqueue(root);                  //根指针入队
    while(!IsEmpty())               //队列非空
    {
        q = Dequeue();              //出队并取出对头
        visit(q->data);             //访问（输出出队结点信息）
        if(q->Lchild != NULL)       //左孩子入队
            Enqueue(q->Lchild)
        if(q->Rchild !=NULL)        //右孩子入队
            Eequeue(q->Rchild)
    }
}
```

基于任务分析法

```
//任务分析法后续遍历
void Postorder_iter(BiTree T)
{
    LinkStack S;
    InitLinkStack(&S);      //初始化栈

    ET e;
    BiTNode* p;
    e.ptr = T;
    e.task = 1;
    PushLinkStack(&S, e);

    while (!IsLinkStackEmpty(S))
    {
        e = GetLinkStackTop(S);
        PopLinkStack(&S, e);
        if (e.task == 0)                //访问
        {
            printf("%s ", e.ptr->Data.str);
        }
        else                            //遍历
        {
            e.task = 0;
            PushLinkStack(&S, e);       //访问根节点

            p = e.ptr;                  //维护当前指针

            e.ptr = p->RightChild;      //访问右子树

            if (e.ptr)
            {
                e.task = 1;             //布置任务
                PushLinkStack(&S, e);
            }

            e.ptr = p->LeftChild;       //访问左子树
            if (e.ptr)
            {
                e.task = 1;
                PushLinkStack(&S, e);
            }
        }
    }
}
```

注：给定了前序+中序就可以唯一确定二叉树 eg. 前序 **A** *B C* ***D E F G H I*** 根节点 左子树 右子树 中序 *B C* **A** ***E D G H F I*** 左子树 根节点 右子树

5.2.4. 二叉树的遍历（非递归算法）

```
//非递归先序遍历
void preOrderIterative(BiTNode* root)
{
    if (root == NULL)
```

```
        return;
    LinkStack nodeStack;        //创建一个栈保存结点
    push(&nodeStack, root);     //根节点进栈

    while (!IsEmpty(nodeStack)) //非空时迭代
    {
        BiTNode* node = top(nodeStack); //保存栈顶结点
        printf("%d", node->data);           //访问栈顶数据
        pop(&nodeStack);                    //栈顶结点出栈

        //子节点入栈
        if (node->RightChild)               //考虑栈学先进后出的特点
            push(node->RightChild);         //所以是先右子树进栈
        if (node->LeftChild)                //遍历时才能左子树先出栈
            push(node->LeftChild);
    }
}
```

```
//非递归中序遍历
void InOrderIterative(BiTNode* root)
{
    if (root == NULL)
        return;
    LinkStack nodeStack;            //创建一个栈保存结点
    BiTNode* currentNode = root;    //维护一个当前结点指针

    while (currentNode || !IsEmpty(nodeStack))
    {
        //当前结点非空，或栈非空时迭代处理
        while (currentNode)             //找到最深左子树
        {
            push(nodeStack, currentNode);
            currentNode = currentNode->LeftChild;
        }
        //左子树已经访问完
        currentNode = top(nodeStack);           //取栈顶结点
        printf("%c", currentNode->data);        //访问结点数据
        pop(&nodeStack);                        //出栈
        currentNode = currentNode->RightChild;  //将当前结点改为右子节点
    }
}
```

```
//非递归后序遍历
void PostOrderIterative(BiTNode* root)
{
    if (root == NULL)
        return;
    LinkStack nodeStack;            //创建一个栈保存结点
    BiTNode* currentNode = root;    //维护一个当前结点指针
    BiTNode* visitedNode = root;    //保存上一次访问的结点

    //当前结点非空，或栈非空时迭代处理
    while (currentNode  || !IsEmpty(nodeStack))
    {
        while (currentNode)         //沿左子树方向入栈
        {
            push(&nodeStack, currentNode);
            currentNode = currentNode->LeftChild;
        }
        currentNode = top(nodeStack);   //取栈顶元素

        //栈顶元素有右子树且未被访问
        if (currentNode->RightChild && currentNode->RightChild != visitedNode)
        {
            currentNode = currentNode->RightChild;
        }
        else    //右子树为空或被访问过
        {
            printf("%d", currentNode->data);    //访问结点数据
            visitedNode = currentNode;          //记录当前访问的结点
            currentNode = NULL;                 //当前结点设置为空，防止重复访问左子
树
            pop(&nodeStack);                    //出栈
        }
    }
}
```

5.2.5. 二叉树的建立

基于前序遍历递归算法

```
//基于前序遍历
//BiTNode root = Create(&root);
BiTNode* Create(BiTNode* bt)
{
    char ch[MAXSIZE];
    scanf("%s", ch);        //gets(ch)??
    Input(bt, ch);
    if (strcmp(ch,"#") == 1)
        bt = NULL;
    else
    {
        bt = (BiTree)malloc(sizeof(BiTNode));
        strcpy(bt->data.str, ch);
        bt->LeftChild = Create(bt->LeftChild);      //切记要将返回赋值
        bt->RightChild = Create(bt->RightChild);
    }
    return bt;
}
```

基于读边法

```
//依次输入父节点，子节点，数字0代表创建左子树，1代表创建右子树
int ReadEdgeCreate(BiTree* bt)
{
    LinkQueue Q;
    InitQueue(&Q);
    *bt = NULL;
    char father, child;
    int flag;
    printf("\t");
    scanf("%c,%c,%d", &father, &child, &flag);
    getchar();
    while ( child != '#' )
    {
        BiTree p = (BiTree)malloc(sizeof(BiTNode));
        p->Data.dt = (int)(child-'0');
        p->LeftChild = p->RightChild = NULL;
        EnQueue(&Q, p);
        if ( father == '#')
            *bt = p;
        else
        {
            BiTree s = GetHead(Q);
            while (s->Data.dt != (int)(father-'0'))
            {
                DeQueue(&Q);
                s = GetHead(Q);
            }
            if (flag == 0)
                s->LeftChild = p;
            else s->RightChild = p;
        }
        printf("\t");
        scanf("%c,%c,%d", &father, &child, &flag);
        getchar();
    }
    return OK;
}
```

5.2.6. 求最大结点

```
//结点类型为整形
int* PreFindMaxInt(BiTree bt, int* max)
{
    if (bt)
    {
        if (*max<=bt->Data.dt)
            *max = bt->Data.dt;
        max = PreFindMaxInt(bt->LeftChild, max);
        max = PreFindMaxInt(bt->RightChild, max);
    }
    return max;
}

//结点类型为字符串
char* PreFindMaxStr(BiTree bt, char *max)
{
    if (bt)
    {
        if (strcmp(max, bt->Data.str) <= 0)
            max = bt->Data.str;
        max = PreFindMaxStr(bt->LeftChild, max);
        max = PreFindMaxStr(bt->RightChild, max);
    }
    return max;
}
void PreFindMaxStr2(BiTree bt, char** max)      //利用二级指针
{
    if (bt)
    {
        if (strcmp(*max, bt->Data.str) <= 0)
            *max = bt->Data.str;
        PreFindMaxStr2(bt->LeftChild, max);
        PreFindMaxStr2(bt->RightChild, max);
    }
}
void PreFindMaxStr3(BiTree bt, char* max)
{
    if (bt)
    {
        if (strcmp(max, bt->Data.str) <= 0)
            strcpy(max, bt->Data.str);          //借助strcpy，注意区别于方法一
        PreFindMaxStr3(bt->LeftChild, max);
        PreFindMaxStr3(bt->RightChild, max);
    }
}
```

5.2.7. 查找指定结点

指定结点只有一个

```
BiTree Find(BiTree bt, char *find)
{
    if (!bt)
        return NULL;
    if (strcmp(find, bt->Data.str) == 0)
        return bt;
    if (Find(bt->LeftChild, find))
        return Find(bt->LeftChild, find);
    else
        return Find(bt->RightChild, find);
}
```

指定结点不止一个则需要借助数组等进行保存再输出

```
BiTree Find(BiTree bt, int e, BiTree p[], int *n)
{
    if(bt)
    {
        if(bt->data == e)
            p[(*n)++] = bt;
        Find(bt->leftChild, e, p, n);
        Find(bt->RightChild, e, p, n);
    }
}
```

5.2.8. 二叉树的销毁

```
int DeleteTree(BiTree& bt)
{
    if (bt->LeftChild)
    {
        DeleteTree(bt->LeftChild);
    }
    if (!(bt->LeftChild && bt->RightChild))
    {
        free(bt);
        bt = NULL;
        return 0;
    }if (bt->RightChild)
    {
        DeleteTree(bt->RightChild);
    }
}
```

5.2.9. 各种数量

求叶子节点个数

```
void LeafCount(BiTree bt, int *count)
{
    if (!bt)
        return;
    if (!bt->LeftChild && !bt->RightChild)      //叶子结点判断标志
        (*count)++;
    LeafCount(bt->LeftChild, count);             //先数左子树
    LeafCount(bt->RightChild, count);            //再数右子树
}
```

求总的结点个数

```
int SumNode(BiTree bt)
{
    if (!bt)
        return 0;
    else
    {
        int left = SumNode(bt->LeftChild);
        int right = SumNode(bt->RightChild);
        return left + right + 1;        //写成return SumNode(bt-
>LeftChild)+SumNode(bt->RightChild); 即可
    }
}
```

求二叉树的深度

```
int Depth(BiTree bt)
{
    if (!bt)
        return 0;
    else
    {
        int DepLeft = Depth(bt->LeftChild);      //左边的深度
        int DepRight = Depth(bt->RightChild);    //右边的深度
        if (DepLeft >= DepRight)                 //取最大的数作为深度
            return DepLeft + 1;                  //加1是加上根结点
        else
            return DepRight + 1;
    }
}
```

求二叉树的宽度

```
int Width(BiTree bt)
{
    int width = 0;          //更新最大宽度
    int len = 0;            //记录每一层的宽度
    int i;                  //遍历每一层的结点

    LinkQueue Q;            //基于层次遍历，故用队列
```

```c
    InitQueue(&Q);

    BiTree p;
    if (!bt)
        return 0;

    EnQueue(&Q, bt);        //根结点入队
    while (!IsEmpty(Q))
    {
        len = GetLengthQueue(Q);    //每一层入队后队列的长度即为该层的宽度
        width = len > width ? len : width;  //更新最大宽度
        for (i = 0; i < len; i++)
        {
            p = DeQueue(&Q);        //出队并记录出队结点便于访问该结点的孩子结点
            if (p->LeftChild)               //先左孩子入队
                EnQueue(&Q, p->LeftChild);
            if (p->RightChild)              //再右孩子入队
                EnQueue(&Q, p->RightChild);
        }
    }
    return width;
}
```

5.3. 树与森林（Tree）

5.3.1. 树的存储结构

双亲表示法

```c
#define MAXSIZE 100

typedef int TElemType;

typedef struct PTNode   //结点结构
{
    ElemType data;
    int parent;         //双亲位置
    //int FirstChild;       //长子位置
    //int RightSib;     //右兄弟位置
}PTNode;

typedef struct
{
    PTNode nodes[MAXSIZE];
    int r,n;            //根位置和结点数
}PTree;
```

孩子表示法

```
#define MAXSIZE 100

typedef int TElemType;

typedef struct CTNode            //孩子结点
{
    int child;
    struct CTNode* next;
}CTNode, *ChildPtr;

typedef struct                   //双亲结点
{
    TElemType data;
    ChildPtr firstchild;
}CTBox;

typedef struct                   //树结构
{
    CTBox nodes[MAXSIZE];
    int r, n;                    //结点数和根节点位置
}CTree;
```

双亲孩子表示法

```
typedef struct CTNode            //孩子结点
{
    int child;
    struct CTNode* next;
}CTNode, * ChildPtr;

typedef struct                   //双亲结点
{
    TElemType data;
    int parent;
    ChildPtr firstchild;         //孩子链头指针
}CTBox;

typedef struct                   //树类型
{
    CTBox nodes[MAXSIZE];
    int r, n;                    //结点数和根节点位置
}CPTree;
```

孩子兄弟表示法（链表）

```
typedef struct CSNode
{
    TElemType data;
    struct CSNode *firstchild, *nextsibling;
}CSNode, *CSTree;
```

5.3.2. 树的创建

孩子链表创建

```
int CreateChildLink(CTree* T)
{
    scanf("%d", &T->n);     //读入结点数
    T->r = 0;               //根位置
    for (int i = 0; i < T->n; i++)
    {
        scanf("%d", &T->nodes[i].data);
        T->nodes[i].firstchild = NULL;
        int f, c;
        scanf("%d%d", &f, &c);
        while (c != -1)     //循环读边
        {
            ChildPtr s = (ChildPtr)malloc(sizeof(CTNode));
            s->child = c;       //单链表的头插法
            s->next = NULL;
            s->next = T->nodes[f].firstchild;
            T->nodes[f].firstchild = s;
            scanf("%d%d", &f, &c);
        }
    }
}
```

读边法创建孩子兄弟链表

```
void CreateCSTree(CSTree* T)        //读边法创建孩子兄弟链表
{
    *T = NULL;
    char fa, ch;
    for (scanf("%c%c", &fa, &ch); ch != '#'; scanf("%c%c", &fa, &ch))
    {
        CSTree p = (CSTree)malloc(sizeof(CSNode));
        CSTree s, r;    //s用来保存队头元素；r用来保存上一次的链接点

        p->data = ch;
        p->firstchild = NULL;
        p->nextsibling = NULL;      //创建结点

```

```
            EnQueue(Q, p);              //指针入队

            if (fa == '#')      //所建为根节点
                *T = p;
            else                //非根节点的情况
            {

                GetHead(Q, s);

                while (s->data != fa)       //找父节点
                {
                    DeQueue(Q, s);
                    GetHead(Q, s);
                }

                if ((s->data == fa))        //链接第一个孩子结点
                {
                    s->firstchild = p;
                    r = p;
                }
                else                        //链接其他孩子结点
                {
                    r->nextsibling = p;
                    r = p;
                }

            }
        }
    }
```

5.3.3. 树和二叉树的转换

树的遍历

先根遍历

```
void PreOrderTree(CSTree T)
{
    if(T)
    {
        printf("%d", T->data);
        PreOrderTree(T->firstchild);
        PreOrderTree(T->nextsibling);
    }
}

或者
void PreOrderTree(CSTree T)
{
    if(T)
    {
        printf("%d", T->data);
        CSTree p;
        for(p = T->firstchild; p; p = p->nextsibling)
            PreOrderTree(p);
    }
}
```

注意：树的**先根**遍历等价于二叉树的**先序**遍历！！！

后根遍历

```
void PostOrderTree(CSTree T)
{
    if(T)
    {
        PreOrderTree(T->firstchild);
        printf("%d", T->data);
        PreOrderTree(T->nextsibling);
    }
}
或者
void PostOrderTree(CSTree T)
{
    if(T)
    {
        CSTree p;
        for(p = T->firstchild; p; p = p->nextsibling)
            PreOrderTree(p);
        printf("%d", T->data);
    }
}
```

注意：树的**后根**遍历等价于二叉树的**中序**遍历！！！

层次遍历

5.3.4. 树的基本操作

按值查找

结点值不相同

```
CSTree PreSearchBiT(CSTree T,ElemType e)
{                    // T是树根的地址，e是要找的结点值
    if(!T)
        return NULL;
    else
    {
        if(T->data == e)
            return T;
        else if(T->firstchild)
            return PreSearchBiT(T->firstchild, e);
        else if(T->nextsibling)
            return PreSearchBiT(T->nextsibling, e);
    }
}
```

结点值予许相同

```
void PreSearchBiT(CSTree T, ElemType e, CSTree p[], int *n)
{   //T是根指针, e是要找的结点值, 数组p存放的是查找结果, *n是个数
    if(T)
    {
        if(T->data == e)
            p[(*n)++] = T;
        PreSearchBiT(T->firstchild, e, p, n);
        PreSearchBiT(T->nextsibling, e, p, n);
    }
}
```

求树的深度

```
int Depth(CSTree T)
{
    int d1, d2;
    if (T == NULL)
        return 0;
    else
    {
        d1 = Depth(T->firstchild);
        d2 = Depth(T->nextsibling);
        return d1+1 > d2? d1+1 : d2;
    }
}
```

树的插入

```
CSTree InsertCSTree(CSTree* T, char fa, char ch)    //树的插入算法
{
    CSTree s, p;        //s用来保存插入结点;
    if (*T == NULL)
        return 0;
    else
    {
        if (fa == (*T)->data)       //找到父节点
            return InsertNode(T, ch);
        else if (p = InsertCSTree(&((*T)->firstchild), fa, ch))
            return p;
        else
            return InsertCSTree(&((*T)->nextsibling), fa, ch));
    }
}

CSTree InsertNode(CSTree* T, char ch)           //寻找插入位置
{
    CSTree s = (CSTree)malloc(sizeof(CSNode));
    CSTree p, q;        //p, q用来寻找插入位置
    s->data = ch;
    s->firstchild = s->nextsibling = NULL;      //创建结点

    if ((*T)->firstchild == NULL)       //插入位置恰好为第一个孩子
        (*T)->firstchild = s;
    else                                //插入不为第一个孩子
    {
        p = (*T)->firstchild;
        q = p->nextsibling;
        while (q)               //寻找插入位置
        {
            p = q;
            q = q->nextsibling;
        }

        p->nextsibling = s;

    }
    return *T;
}
```

树的删除

```
int DelNode(CSTree T)
{
    if (T)
    {
        DelNode(T->firstchild);
        DelNode(T->nextsibling);
        free(T);
    }
}

int DelCSTree(CSTree* T, char e)        //树的删除（删除指定结点）
```

```
{
    CSTree q;
    if (!(*T))
        return 0;
    else
    {
        if (e == (*T)->data)
        {
            q = *T;
            *T = (*T)->nextsibling;
            q->nextsibling = NULL;
            DelNode(q);
            return 1;
        }
        DelCSTree(&((*T)->firstchild), e);
        DelCSTree(&((*T)->nextsibling), e);
    }
}
```

输出树中所有从根到叶子的路径

```
//求根到叶子节点路径的算法
void LeavePath(CSTree T, LinkStack S)
{
    if (T)
    {
        PushLinkStack(&S, T->data);
        if (!T->firstchild)
            PrintStack(&S);              //输出路径
        else
            for (CSTree p = T->firstchild; p; p = p->nextsibling)
                LeavePath(p, S);
        PopLinkStack(&S);                //删除路径最后一个结点
    }
}
```

输出树中从根到指定叶子的路径（无重复）

```

```

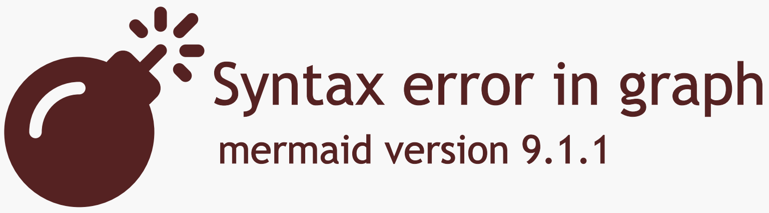
凹入法输出

```
void dispTree(CSTree T, int level)
{
    int i, j;
    if (!T)
        return;
    for (i = 1; i < level; i++)
        putchar(' ');
    printf("%s+", T->CSTdata);
    for (j = i + 1; j < 40; j++)            //j小于多少可自定义
        putchar('-');
    putchar('\n');
    dispTree(T->firstchild, level + 3);     // level加多少可自定义
    dispTree(T->nextsibling, level);        //因为兄弟结点与第一个孩子是同一层的，所
以level不用变。
}
```

6. 图

6.1. 图的一些基本概念与术语

图：顶点集V+弧集E构成Graph<V,E> <v,w>：从v到w的一条弧 P(v,w):附加到<v,w>的信息，一般称为权重



6.2. 图的存储结构

6.2.1. 邻接矩阵存储 Adjacency Matrix

图的邻接矩阵：数组表示法 $$ arcs[i][j]=\begin{cases} 1\quad if(v_i,V_j)\in E\ or\ <> <v_i,V_j>\in E\ 0\quad 其他 \end{cases} $$ 网的邻接矩阵 $$ arcs[i][j]=\begin{cases} w_{ij}\quad if(v_i,V_j)\in E\ or\ <v_i,V_j>\in E\ 0\quad\ \ \ if\ \ i=j\ \infin/-1\quad 其他 \end{cases} $$ **$空间复杂度为O(n^2)$ 适用于稠密图**

```
    graph LR
    无向图的邻接矩阵---主对角线为0
    无向图的邻接矩阵---一定为对称矩阵
    有向图的邻接矩阵---不一定不对称_如有向完全图的邻接矩阵是对称的
    有向图的邻接矩阵---顶点i的出度---第i行元素之和
    有向图的邻接矩阵---顶点i的入度---第i列元素之和
```

邻接矩阵的存储代码

```
typedef char GElemType
#define MAXSIZE 20
typedef struct
```

```
{
    GElemTyoe vertex[MAXSIZE];      //顶点数据类型。存放顶点信息
    EdgeType Edges[MAXSIZE][MAXSIZE];   //边/弧的数据类型，存放顶点间的关系
    int vertexNum, EdgeNum;         //存放顶点和边数
}MGraph;
```

基于邻接矩阵——创建函数

无向图

```
//无向图
void creatMGraph(MGraph *G)
{
    int i, j, k;
    printf("请输入顶点数和边数:");
    scanf("%d%d", &G->vertexNum, &G->EdgeNum);
    for (i = 0; i < G->vertexNum; i++)
    {
        printf("请输入第%d个顶点的值: ", i+1);
        scanf(&G->vertex[i]);
    }

    for (i = 0; i < G->vertexNum; i++)  //初始化邻接矩阵
        for (j = 0; j < G->vertexNum;j++)
            G->arcs[i][j] = O;

    for (k = 0; k < G->EdgeNum; k++)        //依次输入每一条边
    {
        printf("请输入第%d条边依附的两个顶点的序号: ", k+1);
        scanf("%d%d", &i, &j);          //边依附的两个顶点的序号
            G->arcs[i][j] = 1;
            G->arcs[j][i] = 1;          //置有边标志
    }
}
```

无向图

```
//有向图
void creatMGraph(MGraph *G)
{
    int i, j, k;
    printf("请输入顶点数和边数:");
    scanf("%d%d", &G->vertexNum, &G->EdgeNum);
    for (i = 0; i < G->vertexNum; i++)
    {
        printf("请输入第%d个顶点的值: ", i+1);
        scanf(&G->vertex[i]);
    }
    for (i = 0; i < G->vertexNum; i++)  //初始化邻接矩阵
        for (j = 0; j < G->vertexNum;j++)
            G->arcs[i][j] = 0;

    for (k = 0; k < G->EdgeNum; k++)        //依次输入每一条边
    {
        printf("请输入第%d条边依附的两个顶点的序号: ", k+1);
        scanf("%d%d", &i, &j);          //边依附的两个顶点的序号
            G->arcs[i][j] = 1;          //置有边标志
    }
}
```

无向网

```
void creatMGraph(MGraph *G)
{
    int i, j, k;
    int w;      //权值
    printf("请输入顶点数和边数:");
    scanf("%d%d", &G->vertexNum, &G->EdgeNum);
    for (i = 0; i < G->vertexNum; i++)
    {
        printf("请输入第%d个顶点的值: ", i+1);
        scanf(&G->vertex[i]);
    }

    printf("请输入边不存在的标志: ");
    int flag;
    scanf("%d", &flag);

    for (i = 0; i < G->vertexNum; i++)  //初始化邻接矩阵
        for (j = 0; j < G->vertexNum;j++)
            if(i == j)
                G->arcs[i][j] = 0;
            else
                G-> arcs[i][j] = flag;

    for (k = 0; k < G->EdgeNum; k++)        //依次输入每一条边
    {
        printf("请输入第%d条边的弧尾、弧头、序号和权值: ", k+1);
        scanf("%d%d%d", &i, &j, &w);    //边依附的两个顶点的序号
            G->arcs[i][j] = 1;
            G->arcs[j][i] = 1;          //置有边标志
    }
}
```

有向网

```
void creatMGraph(MGraph *G)
{
    int i, j, k;
    int w;      //权值
    printf("请输入顶点数和边数:");
    scanf("%d%d", &G->vertexNum, &G->EdgeNum);
    for (i = 0; i < G->vertexNum; i++)
    {
        printf("请输入第%d个顶点的值: ", i+1);
        scanf(&G->vertex[i]);
    }

    printf("请输入边不存在的标志: ");
    int flag;
    scanf("%d", &flag);

    for (i = 0; i < G->vertexNum; i++)  //初始化邻接矩阵
        for (j = 0; j < G->vertexNum;j++)
            if(i == j)
                G->arcs[i][j] = 0;
            else
                G-> arcs[i][j] = flag;

    for (k = 0; k < G->EdgeNum; k++)        //依次输入每一条边
    {
        printf("请输入第%d条边的弧尾、弧头、序号和权值: ", k+1);
        scanf("%d%d%d", &i, &j, &w);    //边依附的两个顶点的序号
            G->arcs[i][j] = 1;          //置有边标志
    }
}
```

6.2.2. 邻接表存储 Adjacencyc List

$$ 邻接表存储=顶点表+边表\ 边表：邻接于v_i的顶点链成的单链表\ 顶点表：由所有边表的头指针和存储顶点信息的一维数组构成 $$ 邻接表不唯一！！！ 有向图邻接表：按出度建立 有向图逆邻接表：按入度建立

```
    graph LR
    无向图的邻接表---顶点i的度---顶点i的边表中结点的个数
    无向图的邻接表---顶点i的邻接点---在顶点i的边表中找/遍历
    有向图的邻接表---顶点i的出度---顶点i的边表结点的个数
    有向图的邻接表---顶点i的邻接点
    有向图的邻接表---不便于求顶点i的入度
    有向图的逆邻接表---不便于求顶点i的出度
```

$空间复杂度为O(n+e)$适用于稀疏图

邻接表存储代码

```
//图的邻接表存储代码
typedef char GElemType
#define MSXSIZE 20
typedef struct EdgeNode
{
    int adjvex;     //存放顶点编号
    struct EdgeNode *next;  //链域
}EdgeNode;  //边表结点数据类型

typedef struct vertexNode
{
    GElemType vertex;   //存放顶点值
    EdgeNode *FirstEdge;    //存放边表的头指针
}VertexNode;        //顶点表结点的数据类型

typedef struct algraph
{
    VertexNode AdjList[MAXSIZE];
    int vertexNum, EdgeNum;     //顶点数和边数
}ALGraph;   //邻接表数据类型
```

```
//网的邻接表存储代码
#define MSXSIZE 20
typedef struct EdgeNode
{
    int adjvex;     //存放顶点编号
    int weight;     //存放边上的权值
    struct EdgeNode *next;
}EdgeNode;  //边表结点数据类型

typedef struct vertexNode
{
    GElemType vertex;   //存放顶点值
    EdgeNode *FirstEdge;    //存放边表的头指针
}VertexNode;        //顶点表结点的数据类型

typedef struct algraph
{
    VertexNode AdjList[MAXSIZE];
    int vertexNum, EdgeNum;
}ALGraph;   //邻接表数据类型
```

基于邻接表——创建函数

无向图

```
void CreateAlGraph(AlGraph *G)
{
    int i, k;
    printf("请输入顶点数和边数：");
    scanf("%d,%d", G->vertexNum, G->EdgeNum);
    //输入顶点信息，初始化边表
    for (i = 0; i < G->vertexNum; i++)  //创建顶点表
    {
        printf("请输入第%d个顶点信息：", i+1);
        scanf(" ",&G->adjList[i].vertex);
        G->adjList[i].FirstEdge = NULL;
    }
    //创建边表
    //依次输入边的信息存储在边表中
    for(k = 0; k < G->EdgeNum; k++)
    {
        printf("请输入第%d条边依附的顶点编号i、j：", k+1);
        scanf("%d%d", &i, &j);
        s = (EdgeNode*)malloc(sizeof(EdgeNode));
        s->adjvex = j;
        //头插法
        s->next = G->adjList[i].FirstEdge;
        G->adjList[i].FirstEdge = s;

        s = (EdgeNode*)malloc(sizeof(EdgeNode));
        s->adjvex = i;
        //头插法
        s->next = G->adjList[j].FirstEdge;
        G->adjList[j].FirstEdge = s;
    }
}
```

有向图

```
void CreateAlGraph(AlGraph *G)
{
    int i, k;
    printf("请输入顶点数和边数：");
    scanf("%d,%d", G->vertexNum, G->EdgeNum);
    //输入顶点信息，初始化边表
    for (i = 0; i < G->vertexNum; i++)  //创建顶点表
    {
        printf("请输入第%d个顶点信息：", i+1);
        scanf(" ",&G->adjList[i].vertex);
        G->adjList[i].FirstEdge = NULL;
    }
    //创建边表
    //依次输入边的信息存储在边表中
    for(k = 0; k < G->EdgeNum; k++)
    {
        printf("请输入第%d条边依附的顶点编号i、j: ", k+1);
        scanf("%d%d", &i, &j);
        s = (EdgeNode*)malloc(sizeof(EdgeNode));
        s->adjvex = j;
        //头插法
        s->next = G->adjList[i].FirstEdge;
        G->adjList[i].FirstEdge = s;
    }
}
```

无向网

```
void CreateAlGraph(AlGraph *G)
{
    int i, k;
    int w;
    printf("请输入顶点数和边数: ");
    scanf("%d,%d", G->vertexNum, G->EdgeNum);
    //输入顶点信息，初始化边表
    for (i = 0; i < G->vertexNum; i++)  //创建顶点表
    {
        printf("请输入第%d个顶点信息: ", i+1);
        scanf(" ",&G->adjList[i].vertex);
        G->adjList[i].FirstEdge = NULL;
    }
    //创建边表
    //依次输入边的信息存储在边表中
    for(k = 0; k < G->EdgeNum; k++)
    {
        printf("请输入第%d条边的弧尾、弧头、序号和权值: ", k+1);
        scanf("%d%d", &i, &j, &w);
        s = (EdgeNode*)malloc(sizeof(EdgeNode));
        s->adjvex = j;
        s->weight = w;
        //头插法
        s->next = G->adjList[i].FirstEdge;
        G->adjList[i].FirstEdge = s;

        s = (EdgeNode*)malloc(sizeof(EdgeNode));
        s->adjvex = i;
        s->weight = w;
        //头插法
        s->next = G->adjList[j].FirstEdge;
        G->adjList[j].FirstEdge = s;
    }
}
```

有向图

```
void CreateAlGraph(AlGraph *G)
{
    int i, k;
    int w;
    printf("请输入顶点数和边数：");
    scanf("%d,%d", G->vertexNum, G->EdgeNum);
    //输入顶点信息，初始化边表
    for (i = 0; i < G->vertexNum; i++)  //创建顶点表
    {
        printf("请输入第%d个顶点信息：", i+1);
        scanf(" ",&G->adjList[i].vertex);
        G->adjList[i].FirstEdge = NULL;
    }
    //创建边表
    //依次输入边的信息存储在边表中
    for(k = 0; k < G->EdgeNum; k++)
    {
        printf("请输入第%d条边的弧尾、弧头、序号和权值：", k+1);
        scanf("%d%d", &i, &j, &w);
        s = (EdgeNode*)malloc(sizeof(EdgeNode));
        s->adjvex = j;
        s->weight = w;
        //头插法
        s->next = G->adjList[i].FirstEdge;
        G->adjList[i].FirstEdge = s;
    }
}
```

6.2.3. 十字链表

整合了邻接表和逆邻接表，用于有向图。

6.2.4. 邻接多重表

方便对边操作（删除）。

6.2.5. 边集数组

$$ 边集数组 \begin{cases} 顶点信息数组\ 边信息数组 \begin{cases} 起点下标 \ begin \ 终点下标 \ end \ 权值 \ weight \end{cases} \end{cases} $$

$其应用详见克鲁斯卡尔（Kruskal）算法。$

6.3. 图的遍历 Traversing Graph

6.3.1. 深度优先搜索(Depth-First Search, DFS)

邻接矩阵的深度遍历算法

```
//邻接矩阵DFS
define MAXSIZE 9
int visited[MAXSIZE];   //访问标志数组

//深度优先递归算法
void DFS_MGraph(MGraph G, int i)
{
    int j;
    visited[i] = 0;
    printf("%c", G.vertex[i]);      //打印顶点
    for (j = 0; j < G.vertexNum; j++)
        if (G.Edges[i][j] == 1 && visited[j] == 0 )
            DFS_MGrapf(G, j);
}

//深度遍历操作
void DFS_Traverse(MGraph G)
{
    int i;
    for (i = 0; i < G.vertexNum; i++)
        visited[i] == 1;
    for (i = 0; i < G.vertexNum; i++)
        if(!visited[i])
            DFS_MGraph(G, i);
}
```

邻接表的深度遍历算法

```
void DFS_Traver (ALGraph G, int v)
{
    printf(" ", G.AList[v].vertex);     //访问出发点
    visit[v] = 1;       //做标志，1为已经访问过

    EdgeNode* p = G.AdjList[v].FirstEdge;
    while (p)
    {
        if (visited[p->adjvex] == 0)
            DFS_Traver (G, p->adjvex);
        p = p->next;
    }
}   //O(n+e)

//or
    //邻接表深度优先递归算法
void DFS(ALGraph GL, int i)
{
    EdgeNode* p;
    visited[i] = 0;
    printf("%c", GL.AdjList[i].vertex);
    p = GL.AdjList[i].FirstEdge;
    while (p)
    {
        if (visited[p->adjvex] == 0)
            DFS(GL, p->adjvex)
        p = p->next;
    }
}
    //深度优先遍历操作
void DFS_Traverse(ALGraph Gl)
{
    int i;
    for (i = 0; i < GL.vertexNum; i++)
        visited[i] = 1;
    for (i = 0; i < GL.vertexNum; i++)
        if (visited[i] ==0)
            DFS(GL, i);
}
```

6.3.2. 广度优先搜索(Breadth-First Search, BFS)

类似于*树的层次遍历*，需要借助**队列。**

邻接矩阵的广度遍历算法

```
void BFS_Traver (MGraph G)
{
    int i, j;       //i为行，j为列
    Queue Q;
    InitQueue(&Q);
    for (i = 0; i < G.vertexNum; i++)
    {
        if (visited[i] == 0)    //顶点未被访问
        {
            visited[i] = 1;     //标记访问
            printf("%c ", &G.vertex[i]);    //打印顶点
            EnQueue(&Q, i);     //顶点入队
            while (!IsQueueEmpty(Q))
            {
                i = DeQueue(&Q);    //取对头后出队
                for (j = 0; j < G.vertexNum; j++)   //判断其他顶点与当前顶点是否存在
边;
                                                    //并且未被访问过
                    if (G.Edges[i][j] == 1 && visited[j] ==0)
                    {
                        visited[j] = 1;         //标记访问
                        printf("%c ", &G.vertex[j]);    //打印顶点
                        EnQueue(&Q, j);     //顶点入队
                    }
            }
        }
    }
}
```

邻接表的广度遍历算法

```
//邻接表的广度遍历算法
void BFS_Traver (AdjGraph G, int v)
{
    Queue Q;
    InitQueue(&Q);
    printf(" ", G.AdjList[v].vertex);           //打印顶点
    visited[v] = 1;
    EnQueue(&Q, v);
    whlie(!IsQueueEmpty(Q))
    {
        v = DeQueue(&Q);
        EdgeNode* p = G.AdjList[v].FirstEdge;   //取v的邻接点
        while (p)
        {
            if (visit[p->adjvex] == 0)          //若此顶点未被访问
            {
                printf(" ", G.AdjList[p->adjvex].vextex);
                visited[p->adjvex] = 1;         //标记已访问
                EnQueue(&Q, p->adjvex);         //将该顶点入队
            }
            p = p->next;                        //指针指向下一个邻接点
        }
    }
}
```

6.4. 最小生成树 Minimum Cost Spanning Tree

最小生成树:构造连通网的最小代价生成树

6.4.1. 普里姆算法 Prim's Algorithm

借助网的邻接矩阵

```
#define INFINITY 66666
#define MAXVEX 10   //顶点个数最大值
void MiniSpanTree_Prim(MGrapf)
{
    int min, i, j, k;
    int adjvex[MAXVEX];     //保存起点下标
    int lowcost[MAXVEX];    //保存下标为起点到终点间的权值
    adjvex[0] = 0;          //初始化第一个顶点下标为0
    lowcost[0] = 0;         //初始化第一个权值为0,即v0加入生成树
    for (i = 1; i < G.vertexNum; i++)       //遍历除下标为0以外的全部顶点
    {
        adjvex[i] = 0;              //初始化默认v0为起点
        lowcost[i] = G.Edges[0][i]; //将v0顶点与之有边的权值存入数组
    }

    for (i = 1; i < G.vertexNum; i++)   //循环全部顶点,找最小的权值边
    {
        min = INFINITY;     //初始化最小权值为INFINITY
        j = 1;              //j用来循环自增
        k = 0;              //k用来标记最小权值终点的位置
        while (j < G.vertexNum)
        {
            if (lowcost[j] != 0 && lowcost[j] < min)
            {       //如果权值为0并且还小于min
                min = lowcost[j];   //更新最小权值
                k = j;              //标记最小权值终点位置,以便下一个循环遍历邻接矩阵
第k行
            }
            j++;
        }

        printf("(%d,%d)\n", adjvex[k], k);      //打印边(起点,终点)
        lowcost[k] = 0;                         //将当前最小权值起点的权值置为0,表示
该顶点已放入最小生成树中,后续不再对该顶点进行操作

        for (j = 0; j < G.vertexNum; j++)       //从上一次的顶点开始,循环全部顶点,更
新权值数组
        {
            if (lowcost[j] != 0 && G.Edges[k][j] < lowcost[j])      //如果顶点未放
入生成树 并且 各边权值小于未被加入生成树的顶点权值
            {
                lowcost[j] = G.Edges[k][j];     //将较小的权值存入权值数组
                adjvex[j] = k;                  //更新起点下标
            }
        }   //这里的lowcost[]数组保存了上一次起点各未加入边的最小权值以及当前顶点各未遍
历边的最小权值
    }
}   //O(n^2)
```

$算法的基本思想为:G(V,E)为连通网,假设U是V的一个非空子集,TE为最小生成树中边的集合,(u,v)是一条最小权值的边, \ 如果u\in U,v\in U-V,那么必有(u,v)在最下生成树里.$$从U=\left{u_0\right}开始,TE=\left{\right}开始,重复一下操作:\ 在所有{u}\in {U},\ {v}\in {U-V} \ 里找一条权值最小的边\left{u_0,v_0\right}并入TE,同时v_0并入U, 直至U = V为止.此时U中必有n-1条边.最后T = \left(V,\left{TE\right}\right)为最小生成树.$

Step:

1. 记录当前U集合的状态
2. 选择最小边以及权值加入到U集合中

$$完整代码$$

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

/**
 * 图顶点之前不通，那么邻接矩阵的值为MAX
 * 如果顶点是自己本身，那么值为0
 */
#define MAX 32767

typedef struct Graph {
    char* vexs;     //
    int** arcs;     //二维数组
    int vexNum;
    int arcNum;
}Graph;

typedef struct Edge {
    char vex;       //记录U集合到最小边的起始节点
    int weight;     //记录最小边
}Edge;

/**
 * 当edge.weight = 0时，代表顶点加入到U集合中
 */
Edge* initEdeg(Graph* G, int index) {
    Edge* edge = (Edge*)malloc(sizeof(Edge) * G -> vexNum);
    for (int i = 0; i < G ->vexNum; i++) {
        edge[i].vex = G -> vexs[index];
        edge[i].weight = G -> arcs[index][i];
    }
    return edge;
}

int getMinEdge(Edge* edge, Graph* G) {      //返回最小边的终点点位置下标
    int index;
    int min = MAX;
    for (int i = 0; i < G -> vexNum; i++) {
        if (edge[i].weight != 0 && edge[i].weight < min ) {
            min = edge[i].weight;
            index = i;
        }
    }
    return index;
}

void prim(Graph* G, int index) {        //Prim算法的实现  index表示从哪个结点开始
    int min;        //记录最小权值
    int seleted[MAXSIZE] = { 0 };   //标记已经加入集合U的顶点,避免重复加入相同的边
    seleted[index] = 1;     //源点已加入集合U
    Edge* edge = initEdeg(G, index);    //初始化边数组
    for (int i = 0; i < G -> vexNum - 1; i++) {     //已经加入一个顶点,所以只需要遍
历n-1次
        min = getMinEdge(edge, G);      //取最小
        printf("v%c --> v%c, weight = %d\n", edge[min].vex, G -> vexs[min],
edge[min].weight);      //打印最小生成树结点信息
        edge[min].weight = 0;       //权值为0表示加入到U集合
        seleted[min] = 1;       //标志终点已经加入集合U
        for (int j = 0; j < G -> vexNum; j++) {     //更新权值信息,再循环一次
            if (G -> arcs[min][j] < edge[j].weight) {   //仅对权值更小的边起点作更新
                edge[j].weight = G -> arcs[min][j];     //更新权值
                edge[j].vex = G -> vexs[min];           //更新起点
            }
        }
    }
}

Graph* initGraph(int vexNum) {
    Graph* G = (Graph*)malloc(sizeof(Graph));
    G -> vexs = (char*)malloc(sizeof(char) * vexNum);
    G -> arcs = (int**)malloc(sizeof(int*) * vexNum);
    for (int i = 0 ; i < vexNum; i++) {
        G -> arcs[i] = (int*)malloc(sizeof(int) * vexNum);
    }
    G -> vexNum = vexNum;
    G -> arcNum = 0;
    return G;
}

void createGraph(Graph* G, char* vexs, int* arcs) {
    for (int i = 0 ; i < G -> vexNum; i++) {
        G -> vexs[i] = vexs[i];
        for (int j = 0; j < G -> vexNum; j++) {
            G -> arcs[i][j] = *(arcs + i * G -> vexNum + j);
            if (G -> arcs[i][j] != 0 && G -> arcs[i][j] != MAX)
                G -> arcNum ++;
        }
    }
    G -> arcNum /= 2;
}

void DFS(Graph* G, int* visited, int index) {
    printf("%c\t", G -> vexs[index]);
    visited[index] = 1;
    for (int i = 0; i < G ->vexNum; i++) {
        if (G -> arcs[index][i] > 0 && G -> arcs[index][i] != MAX && !visited[i])
{
            DFS(G, visited, i);
        }
    }
}

int main() {
    Graph* G = initGraph(6);
    int* visited = (int*)malloc(sizeof(int) * G -> vexNum);
    for (int i = 0; i < G -> vexNum; i++)
        visited[i] = 0;
    int arcs[6][6] = {
        0, 6, 1, 5, MAX, MAX,
        6, 0, 5, MAX, 3, MAX,
        1, 5, 0, 5, 6, 4,
        5, MAX, 5, 0, MAX, 2,
        MAX, 3, 6, MAX, 0, 6,
        MAX, MAX, 4, 2, 6, 0
    };
    createGraph(G, "123456", (int*)arcs);
    DFS(G, visited, 0);
    printf("\n");
    prim(G, 0);
    return 0;
}
```

6.4.2. 克鲁斯卡尔算法 Kruskal's Algorithm

以边为目标去构建最小生成树 首先需要一个边集数组

```
typedef struct Edge
{
    int begin;  //起点
    int end;    //终点
    int weight; //权值
}Edge;
//初始化边集数组
Edge* initEdge(MGraph *G)
{
    int i, j;
    int index;
    Edge* edges = (Edge*)malloc(sizeof(Edge) * G->vertexNum);
    for ( i = 0; i < G.numVertexes-1; i++)          //只有n-1条边
    {
        for (j = i + 1; j < G.numVertexes; j++)     //从i+1开始,避免了同一条边重复加
入边集数组
        {
            if (G.arc[i][j] < GRAPH_INFINITY)       //vi,vj之间存在边,将信息存入边集
数组
            {
                edges[index].begin = i;
                edges[index].end = j;
                edges[index].weight = G.arc[i][j];
                index++;
            }
        }
    }
    return edges;
}
```

然后要对边集数组中应该按权值从小到大的顺序排列

```
/* 对权值进行排序 */
void sort(Edge *edges,MGraph *G)
{
    Edge temp;  //结构体也可以直接复制
    int i, j;
    for ( i = 0; i < G->numEdges; i++)
    {
        for ( j = i + 1; j < G->numEdges; j++)
        {
            if (edges[i].weight > edges[j].weight)
            {
                temp = edge[i];
                edge[i] = edge[j];
                edge[j] = tmep;
            }
        }
    }
    printf("权排序之后的为:\n");
    for (i = 0; i < G->numEdges; i++)
    {
        printf("(%d, %d) %d\n", edges[i].begin, edges[i].end, edges[i].weight);
    }
}
```

最后是Kruskal算法的实现 在加边的过程中,要判断图是否连通 此时需要一个辅助数组,来记录当前索引结点属于哪个连通分量 这里规定将第一个结点作为后续加入结点的连通分量,即后续加结点进来的时候,连通分量都统一为始节点

```
#define MAXEDGE 20
#define MAXVEX 20
#define GRAPH_INFINITY 65535

/* 查找连线顶点的尾部下标 */
//规定当parent[i]=0时表示在已经加入最小生成树的顶点集中vi为尾部,即只有一个邻接点
int Find(int *parent, int f)
{
    while ( parent[f] > 0)      //这个循环的作用在于找出尾部顶点
    {
        f = parent[f];
    }
    return f;
}

void MST_Kruskal(MGraph G)
{
    int i, j, n, m;
    int k = 0;
    int parent[MAXVEX];/* 定义一数组用来判断边与边是否形成环路 */

    /* 用来构建边集数组并排序********************* */
    Edge *edges = initEdge(G);/* 定义边集数组,edge的结构为begin,end,weight,均为整型
*/
    sort(edges, &G);    //对边集数组进行排序
    /* ******************************************* */

    for (i = 0; i < G.numVertexes; i++)     //一开始最小生成树顶点集中还没有度为2的结
点
        parent[i] = 0;  /* 初始化数组值为0 */

    printf("打印最小生成树: \n");
    for (i = 0; i < G.numEdges; i++)    /* 循环每一条边 */
    {
        n = Find(parent,edges[i].begin);    //找到顶点集中的尾部顶点
        m = Find(parent,edges[i].end);      //若end恰为尾部顶点,则说明形成回路
        if (n != m) /* 假如n与m不等，说明此边没有与现有的生成树形成环路 */
        {
            parent[n] = m;  /* 将此边的结尾顶点放入下标为起点的parent中。 */
                            /* 表示此顶点已经在生成树集合中 */
            printf("(%d, %d) %d\n", edges[i].begin, edges[i].end,
edges[i].weight);
        }
    }
}
```

$$完整程序$$

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#define MAX 32767

typedef struct Graph {
    char* vexs;
    int** arcs;
    int vexNum;
    int arcNum;
}Graph;

typedef struct Edge {
    int start;
    int end;
    int weight;
}Edge;

Edge* initEdge(Graph* G) {
    int index = 0;
    Edge* edge = (Edge*)malloc(sizeof(Edge) * G -> arcNum);
    for (int i = 0; i < G -> vexNum; i++) {
        for (int j = i + 1; j < G -> vexNum; j++) {
            if (G -> arcs[i][j] != MAX) {
                edge[index].start = i;
                edge[index].end = j;
                edge[index].weight = G -> arcs[i][j];
                index++;
            }
        }
    }
    return edge;
}

void sortEdge(Edge* edge, Graph* G) {
    Edge temp;
    for (int i = 0; i < G -> arcNum - 1; i++) {
        for (int j = 0; j < G -> arcNum - i - 1; j++) {
            if (edge[j].weight > edge[j + 1].weight) {
                temp = edge[j];
                edge[j] = edge[j + 1];
                edge[j + 1] = temp;
            }
        }
    }
}

void kruskal(Graph* G) {
    int* connected = (int*)malloc(sizeof(int) * G -> vexNum);
    for (int i = 0 ; i < G -> vexNum; i++) {
        connected[i] = i;       //规定一开始的连通分量是自己
    }
    Edge* edge = initEdge(G);
    sortEdge(edge, G);
    for (int i = 0; i < G -> arcNum; i++) {
        int start = connected[edge[i].start];
        int end = connected[edge[i].end];
        if (start != end) {
            printf("v%c --> v%c weight = %d\n", G -> vexs[edge[i].start], G -> 
vexs[edge[i].end], edge[i].weight);
            for (int j = 0; j < G -> vexNum; j++) {
                if (connected[j] == end) {
                    connected[j] = start;
                }
            }
        }
    }
}

Graph* initGraph(int vexNum) {
    Graph* G = (Graph*)malloc(sizeof(Graph));
    G -> vexs = (char*)malloc(sizeof(char) * vexNum);
    G -> arcs = (int**)malloc(sizeof(int*) * vexNum);
    for (int i = 0 ; i < vexNum; i++) {
        G -> arcs[i] = (int*)malloc(sizeof(int) * vexNum);
    }
    G -> vexNum = vexNum;
    G -> arcNum = 0;
    return G;
}
```

```
void createGraph(Graph* G, char* vexs, int* arcs) {
    for (int i = 0 ; i < G -> vexNum; i++) {
        G -> vexs[i] = vexs[i];
        for (int j = 0; j < G -> vexNum; j++) {
            G -> arcs[i][j] = *(arcs + i * G -> vexNum + j);
            if (G -> arcs[i][j] != 0 && G -> arcs[i][j] != MAX)
                G -> arcNum ++;
        }
    }
    G -> arcNum /= 2;
}

void DFS(Graph* G, int* visited, int index) {
    printf("%c\t", G -> vexs[index]);
    visited[index] = 1;
    for (int i = 0; i < G ->vexNum; i++) {
        if (G -> arcs[index][i] > 0 && G -> arcs[index][i] != MAX && !visited[i])
{
            DFS(G, visited, i);
        }
    }
}

int main() {
    Graph* G = initGraph(6);
    int* visited = (int*)malloc(sizeof(int) * G -> vexNum);
    for (int i = 0; i < G -> vexNum; i++)
        visited[i] = 0;
    int arcs[6][6] = {
        0, 6, 1, 5, MAX, MAX,
        6, 0, 5, MAX, 3, MAX,
        1, 5, 0, 5, 6, 4,
        5, MAX, 5, 0, MAX, 2,
        MAX, 3, 6, MAX, 0, 6,
        MAX, MAX, 4, 2, 6, 0
    };
    createGraph(G, "123456", (int*)arcs);
    DFS(G, visited, 0);
    printf("\n");
    kruskal(G);
    return 0;
}
```

$$ 总结:最小生成树 \begin{cases} 普里姆(Prim)算法 \begin{cases} O(n^2)\ 适用于稠密图\ \end{cases} \ 克鲁斯卡尔(Kruskal)算法 \begin{cases} O(eloge),\ e为边数\ 适用于稀疏图\ \end{cases} \ \end{cases} $$

6.5. 最短路径

6.5.1. 迪杰斯特拉算法 Dijkstra's Algorithm

```c
#define MAXEDGE 20
#define MAXVEX 20
#define GRAPH_INFINITY 65535
typedef struct
{
    int vexs[MAXVEX];
    int arc[MAXVEX][MAXVEX];
    int numVertexes, numEdges;
}MGraph;

typedef int Patharc[MAXVEX];    /* 用于存储最短路径下标的数组 */
typedef int ShortPathTable[MAXVEX];/* 用于存储到各点最短路径的权值和 */
/*  Dijkstra算法，求有向网G的v0顶点到其余顶点v的最短路径P[v]及带权长度D[v] */
/*  P[v]的值为前驱顶点下标,D[v]表示v0到v的最短路径长度和 */
void ShortestPath_Dijkstra(MGraph G, int v0, Patharc *P, ShortPathTable *D)
{
    int v,w,k,min;
    int final[MAXVEX];/* final[w]=1表示求得顶点v0至vw的最短路径 */
    for(v=0; v<G.numVertexes; v++)    /* 初始化数据 */
    {
        final[v] = 0;           /* 全部顶点初始化为未知最短路径状态 */
        (*D)[v] = G.arc[v0][v];/* 将与v0点有连线的顶点加上权值 */
        (*P)[v] = -1;               /* 初始化路径数组P为-1  */
    }

    (*D)[v0] = 0;  /* v0至v0路径为0 */
    final[v0] = 1;    /* v0至v0不需要求路径 */
    /* 开始主循环，每次求得v0到某个v顶点的最短路径 */
    for(v=1; v<G.numVertexes; v++)
    {
        min=GRAPH_INFINITY;    /* 当前所知离v0顶点的最近距离 */
        for(w=0; w<G.numVertexes; w++) /* 寻找离v0最近的顶点 */
        {
            if(!final[w] && (*D)[w]<min)
            {
                k=w;
                min = (*D)[w];    /* w顶点离v0顶点更近 */
            }
        }
        final[k] = 1;    /* 将目前找到的最近的顶点置为1 */
        for(w=0; w<G.numVertexes; w++) /* 修正当前最短路径及距离 */
        {
            /* 如果经过v顶点的路径比现在这条路径的长度短的话 */
            if(!final[w] && (min+G.arc[k][w]<(*D)[w]))
            { /*  说明找到了更短的路径，修改D[w]和P[w] */
                (*D)[w] = min + G.arc[k][w];  /* 修改当前路径长度 */
                (*P)[w]=k;
            }
        }
    }
}
```

$迪杰斯特拉算法本质是一种广义贪心算法, 先找到局部最优解, 再找到全局最优解$ $迪杰斯特拉算法需要三个辅助数组\ ① S数组:记录目标顶点到其他顶点的最短路径是否求得(\ 0 \ or \ 1)\ ② P数组:记录了目标结点到其他结点最短路径的前驱结点\ \ \ \ \ 例如:v_0到v_5的最短距离为v_0->v_3->v_5, 则前驱节点为v_3 \ ③ D数组:记录了目标顶点到其他顶点最短路径的长度\ 设集合X表示已经加入最短路径的顶点集 \ $

```
graph LR

1((1))-.12.-2((2))
1((1))-.16.-6((6))
1((1))-.14.-7((7))

2((2))-.10.-3((3))
2((2))-.7.-6((6))

7((7))-.9.-6((6))
7((7))-.8.-5((5))

6((6))-.6.-3((3))
6((6))-.2.-5((5))

3((3))-.3.-4((4))
3((3))-.5.-5((5))

5((5))-.4.-4((4))
```

$如图,开始时数组S, P, D值如表$

$phase \ 1$

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
	0	1	2	3	4	5	6
S	1	0	0	0	0	0	0
P	-1	0	-1	-1	-1	0	0
D	0	12	∞	∞	∞	16	14

$$X=\left{v_1\right}$$

$①顶点到自身最短路径默认找到且为0 \ ②没有前驱记为-1 \ ③如果一个顶点到期邻接点有弧,那么暂定这条弧为最短路径 \ $ $在D数组中找到最短的边12,把这条边的终点v_2加入X集合当中$ **$phase \ 2$**

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
	0	1	2	3	4	5	6
S	1	1	0	0	0	0	0
P	-1	0	1	-1	-1	0	0

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
D	0	12	22	∞	∞	16	14

$$X=\left{v_1,v_2\right}$$

$在D数组中找到最短的边14,把这条边的终点v_7加入X集合当中$ **$phase \ 3$**

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
	0	1	2	3	4	5	6
S	1	1	0	0	0	0	1
P	-1	0	1	-1	6	0	0
D	0	12	22	∞	22	16	14

$$X=\left{v_1,v_2,v_7\right}$$

$在D数组中找到最短的边16,把这条边的终点v_6加入X集合当中$ **$phase \ 4$**

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
	0	1	2	3	4	5	6
S	1	1	0	0	0	1	1
P	-1	0	1	-1	5	0	0
D	0	12	22	∞	18	16	14

$$X=\left{v_1,v_2,v_7,v_6\right}$$

$在D数组中找到最短的边18,把这条边的终点v_5加入X集合当中$ **$phase \ 5$**

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
	0	1	2	3	4	5	6
S	1	1	0	0	1	1	1
P	-1	0	1	4	5	0	0
D	0	12	22	22	18	16	14

$$X=\left{v_1,v_2,v_7,v_6,v_5\right}$$

$在D数组中找到最短的边22,把这条边的终点v_3加入X集合当中$ **$phase \ 6$**

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
	0	1	2	3	4	5	6
S	1	1	1	0	1	1	1

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
P	-1	0	1	4	5	0	0
D	0	12	22	22	18	16	14

$$X=\left{v_1,v_2,v_7,v_6,v_5,v_3\right}$$

$在D数组中找到最短的边22,把这条边的终点v_4加入X集合当中$ **$phase \ 7$**

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
	0	1	2	3	4	5	6
S	1	1	1	0	1	1	1
P	-1	0	1	4	5	0	0
D	0	12	22	22	18	16	14

$$X=\left{v_1,v_2,v_7,v_6,v_5,v_3,v_4\right}$$

$至此,迪杰斯特拉算法的整个流程已经结束了\ 现在只需要根据目标顶点在P中找前驱即可得到最短路径\ 例如,目标顶点为v_4,\ 则$ $$v_4在P中前驱为4即v_5\ v_5在P中前驱为5即v_6 \ v_6在P中前驱为0即v_1 $$

$这样就得到v_1到v_4的最短路径为$

$$v_1->v_6->v_5->v_4$$

$$完整代码$$

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#define MAX 32767

typedef struct Graph {
    char* vexs;
    int** arcs;
    int vexNum;
    int arcNum;
}Graph;

typedef struct Edge {
    int start;
    int end;
    int weight;
}Edge;

Edge* initEdge(Graph* G) {
    int index = 0;
    Edge* edge = (Edge*)malloc(sizeof(Edge) * G -> arcNum);
    for (int i = 0; i < G -> vexNum; i++) {
        for (int j = i + 1; j < G -> vexNum; j++) {
            if (G -> arcs[i][j] != MAX) {
                edge[index].start = i;
                edge[index].end = j;
                edge[index].weight = G -> arcs[i][j];
                index++;
            }
        }
    }
    return edge;
}

void sortEdge(Edge* edge, Graph* G) {
    Edge temp;
    for (int i = 0; i < G -> arcNum - 1; i++) {
        for (int j = 0; j < G -> arcNum - i - 1; j++) {
            if (edge[j].weight > edge[j + 1].weight) {
                temp = edge[j];
                edge[j] = edge[j + 1];
                edge[j + 1] = temp;
            }
        }
    }
}

void kruskal(Graph* G) {
    int* connected = (int*)malloc(sizeof(int) * G -> vexNum);
    for (int i = 0 ; i < G -> vexNum; i++) {
        connected[i] = i;
    }
    Edge* edge = initEdge(G);
    sortEdge(edge, G);
    for (int i = 0; i < G -> arcNum; i++) {
        int start = connected[edge[i].start];
        int end = connected[edge[i].end];
        if (start != end) {
            printf("v%c --> v%c weight = %d\n", G -> vexs[edge[i].start], G ->
vexs[edge[i].end], edge[i].weight);
            for (int j = 0; j < G -> vexNum; j++) {
                if (connected[j] == end) {
                    connected[j] = start;
                }
            }
        }
    }
}

Graph* initGraph(int vexNum) {
    Graph* G = (Graph*)malloc(sizeof(Graph));
    G -> vexs = (char*)malloc(sizeof(char) * vexNum);
    G -> arcs = (int**)malloc(sizeof(int*) * vexNum);
    for (int i = 0 ; i < vexNum; i++) {
        G -> arcs[i] = (int*)malloc(sizeof(int) * vexNum);
    }
    G -> vexNum = vexNum;
    G -> arcNum = 0;
    return G;
}

void createGraph(Graph* G, char* vexs, int* arcs) {
    for (int i = 0 ; i < G -> vexNum; i++) {
        G -> vexs[i] = vexs[i];
        for (int j = 0; j < G -> vexNum; j++) {
            G -> arcs[i][j] = *(arcs + i * G -> vexNum + j);
            if (G -> arcs[i][j] != 0 && G -> arcs[i][j] != MAX)
                G -> arcNum ++;
        }
    }
    G -> arcNum /= 2;
}

void DFS(Graph* G, int* visited, int index) {
    printf("%c\t", G -> vexs[index]);
    visited[index] = 1;
    for (int i = 0; i < G ->vexNum; i++) {
        if (G -> arcs[index][i] > 0 && G -> arcs[index][i] != MAX && !visited[i])
{
            DFS(G, visited, i);
        }
    }
}

int main() {
    Graph* G = initGraph(6);
    int* visited = (int*)malloc(sizeof(int) * G -> vexNum);
    for (int i = 0; i < G -> vexNum; i++)
        visited[i] = 0;
    int arcs[6][6] = {
        0, 6, 1, 5, MAX, MAX,
        6, 0, 5, MAX, 3, MAX,
        1, 5, 0, 5, 6, 4,
        5, MAX, 5, 0, MAX, 2,
        MAX, 3, 6, MAX, 0, 6,
        MAX, MAX, 4, 2, 6, 0
    };
    createGraph(G, "123456", (int*)arcs);
    DFS(G, visited, 0);
    printf("\n");
    kruskal(G);
    return 0;
}
```

6.5.2. 弗洛伊德算法 Floyd–Warshall Algorithm

```
typedef int Patharc[MAXVEX][MAXVEX];
typedef int ShortPathTable[MAXVEX][MAXVEX];
```

```
/* Floyd算法，求网图G中各顶点v到其余顶点w的最短路径P[v][w]及带权长度D[v][w]。 */
void ShortestPath_Floyd(MGraph G, Patharc *P, ShortPathTable *D)
{
    int v,w,k;
    for(v=0; v<G.numVertexes; ++v) /* 初始化D与P */
    {
        for(w=0; w<G.numVertexes; ++w)
        {
            (*D)[v][w]=G.arc[v][w]; /* D[v][w]值即为对应点间的权值 */
            (*P)[v][w]=w;               /* 初始化P */
        }
    }
    for(k=0; k<G.numVertexes; ++k)
    {
        for(v=0; v<G.numVertexes; ++v)
        {
            for(w=0; w<G.numVertexes; ++w)
            {
                if ((*D)[v][w]>(*D)[v][k]+(*D)[k][w])
                {/* 如果经过下标为k顶点路径比原两点间路径更短 */
                    (*D)[v][w]=(*D)[v][k]+(*D)[k][w];/* 将当前两点间权值设为更小的一
个 */
                    (*P)[v][w]=(*P)[v][k];/* 路径设置为经过下标为k的顶点 */
                }
            }
        }
    }
}
void PrintShortestPath(MGraph G)
{
    printf("各顶点间最短路径如下:\n");
    for(v=0; v<G.numVertexes; ++v)
    {
        for(w=v+1; w<G.numVertexes; w++)
        {
            printf("v%d-v%d weight: %d ",v,w,D[v][w]);
            k=P[v][w];              /* 获得第一个路径顶点下标 */
            printf(" path: %d",v);  /* 打印源点 */
            while(k!=w)             /* 如果路径顶点下标不是终点 */
            {
                printf(" -> %d",k); /* 打印路径顶点 */
                k=P[k][w];          /* 获得下一个路径顶点下标 */
            }
            printf(" -> %d\n",w);   /* 打印终点 */
        }
        printf("\n");
    }
    return ;
}
```

$弗洛伊德算法 \ 核心:\ \qquad 试探法,通过加入不同的点进行中转，选择出最优解 \ 该算法需要两个辅助数组:\ \qquad ①D数组:保存两点间最短路径长度 \ \qquad ②P数组:保存两点之间最短路径的前驱\ step:\ \qquad ①从

目标顶点v_1开始进行中转比较 \ \qquad ②到v_i顶点时,矩阵的对角线以及以v_i为行和列的元素忽略 \ \qquad ③如果{D(v_n->v_m)>D(v_n->v_i->v_m)},则修改D[n][m]的值为D[n][i]+D[i][m],同时修改P数组中的前驱,即P[n][m]的值修改为P[n][i]的值 \ \qquad ④最后根据前驱寻找最短路径即可 $

$$完整代码$$

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#define MAX 32767

typedef struct Graph {
    char* vexs;
    int** arcs;
    int vexNum;
    int arcNum;
}Graph;

Graph* initGraph(int vexNum) {
    Graph* G = (Graph*)malloc(sizeof(Graph));
    G -> vexs = (char*)malloc(sizeof(char) * vexNum);
    G -> arcs = (int**)malloc(sizeof(int*) * vexNum);
    for (int i = 0 ; i < vexNum; i++) {
        G -> arcs[i] = (int*)malloc(sizeof(int) * vexNum);
    }
    G -> vexNum = vexNum;
    G -> arcNum = 0;
    return G;
}

void createGraph(Graph* G, char* vexs, int* arcs) {
    for (int i = 0 ; i   < G -> vexNum; i++) {
        G -> vexs[i] = vexs[i];
        for (int j = 0; j < G -> vexNum; j++) {
            G -> arcs[i][j] = *(arcs + i * G -> vexNum + j);
            if (G -> arcs[i][j] != 0 && G -> arcs[i][j] != MAX)
                G -> arcNum ++;
        }
    }
    G -> arcNum /= 2;
}

void DFS(Graph* G, int* visited, int index) {
    printf("%c\t", G -> vexs[index]);
    visited[index] = 1;
    for (int i = 0; i < G ->vexNum; i++) {
        if (G -> arcs[index][i] > 0 && G -> arcs[index][i] != MAX && !visited[i])
{
            DFS(G, visited, i);
        }
    }
}
```

```
void floyd(Graph* G) {
    int d[G -> vexNum][G -> vexNum];
    int p[G -> vexNum][G -> vexNum];
    for (int i = 0; i < G -> vexNum; i++) {
        for (int j = 0; j < G -> vexNum; j++) {
            d[i][j] = G -> arcs[i][j];
            if (G -> arcs[i][j] > 0 && G -> arcs[i][j] != MAX) {
                p[i][j] = i;
            }
            else
                p[i][j] = -1;
        }
    }

    for (int i = 0; i < G -> vexNum; i++) {
        for (int j = 0; j < G -> vexNum; j++) {
            for (int k = 0; k < G -> vexNum; k++) {
                if (d[j][i] + d[i][k] < d[j][k]) {
                    d[j][k] = d[j][i] + d[i][k];
                    p[j][k] = p[i][k];
                }
            }
        }
    }

    for (int i = 0; i < G -> vexNum; i++) {
        for (int j = 0; j < G -> vexNum; j++) {
            printf("%d ", d[i][j]);
        }
        printf("\n");
    }
    printf("\n");
    for (int i = 0; i < G -> vexNum; i++) {
        for (int j = 0; j < G -> vexNum; j++) {
            printf("%d ", p[i][j]);
        }
        printf("\n");
    }
}

int main() {
    Graph* G = initGraph(4);
    int* visited = (int*)malloc(sizeof(int) * G -> vexNum);
    for (int i = 0; i < G -> vexNum; i++)
        visited[i] = 0;
    int arcs[4][4] = {
        0, 1, MAX, 3,
        1, 0, 2, 2,
        MAX, 2, 0, 8,
        3, 2, 8, 0
    };
    createGraph(G, "1234", (int*)arcs);
    DFS(G, visited, 0);
    printf("\n");
    floyd(G);
    return 0;
}
```

6.6. 拓扑排序

6.6.1. 基本概念

有向无环图 DAG(Directed Acyclic Graph)

AOV网 Activity On Vertex Network

1. 表示工程
2. **无环**
3. **有向图**
4. 顶点表示活动(任务)
5. 弧表示活动之间的优先关系(先后依赖关系)

拓扑序列

$顶点序列v_1,v_2,v_1...v_n满足从顶点v_i到v_j有路劲,则顶点序列中v_i必在v_j之前$

拓扑排序

$对一个有向图构造拓扑序列的过程$

6.6.2. 拓扑排序算法

基本思路:

1. 从AOV网中选择入度为0的顶点输出,并删除次顶点和以此顶点为尾的弧.
2. 重复上述步骤,直至输出全部顶点或者AOV网中不存在入度为0的顶点为止

基于邻接表的代码

使用邻接表,并在顶点表中增加入度域in

```
typedef struct arcNode      //边链表
{
    int vex_num;
    int weight;
    arcNode* next;
}arcNode;

typedef struct vexNode      //顶点表数据类型
{
    int in;     //入度域
    char vex;
    arcNode* First;
}vexNode;

typedef struct ALGraph      //邻接表数据类型
{
    vexNode List[MAXSIZE];
    int vexNum;
    int arcsNum;
}ALGraph;
```

使用栈,存储处理过程中入度为0的顶点,避免多次遍历顶点表 这里使用顺序栈即可,栈的基本操作直接写在算法里

```
int ToologicalSort(ALGraph* GL)
{
    printf("拓扑序列为: \n\n\t");

    int count = 0;      //记录已经输出的顶点数量

    int* stack = (int*)malloc(sizeof(int) * GL->vexNum);    //顺序栈
    int top = -1;       //规定为-1,方便后续操作
    int getTop;         //取栈顶值
    //栈里的值为顶点对应的序号

    for (int i = 0; i < GL->vexNum; i++)
        if (GL->List[i].in == 0)        //将入度为0的顶点入栈
            stack[++top] = i;           //top记得++

    arcNode* e;         //用来遍历顶点对应的边表
    int flag = 0;       //控制"->"的输出数量
    while (top != -1)   //栈非空
    {
        getTop = stack[top--];      //取栈顶值并出栈
        printf("V%d", (int)(GL->List[getTop].vex-'a')+1);   //输出序列
        if (flag != GL->vexNum - 1)     //n个顶点应该有n-1个"->"
        {
            printf(" -> ");
            flag++;
        }
        count++;    //已输出顶点数++

        for (e = GL->List[getTop].First; e; e = e->next)    //遍历边表
        {
            int k = e->vex_num;     //k记录当前顶点序号
            GL->List[k].in--;       //由于上个顶点以删除,故入度-1
            if (GL->List[k].in == 0)    //将入度为0的顶点入栈
                stack[++top] = k;
        }
    }
    printf("\n");

    if (count < GL->vexNum)     //输出顶点数量小于总顶点数说明存在环路
    {
        printf("\t有环！\n");
        return 0;
    }
    else
        return 1;
}
```

$$完整代码$$

```

#define MAXSIZE 20
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <windows.h>

typedef struct arcNode      //边链表
{
    int vex_num;
    int weight;
    arcNode* next;
}arcNode;

typedef struct vexNode      //顶点表数据类型
{
    int in;     //入度域
    char vex;
    arcNode* First;
}vexNode;

typedef struct ALGraph      //邻接表数据类型
{
    vexNode List[MAXSIZE];
    int vexNum;
    int arcsNum;
}ALGraph;

ALGraph* CreateALGraph()
{
    ALGraph* G = (ALGraph*)malloc(sizeof(ALGraph));
    printf("请输入顶点数和边数：");
    scanf("%d %d", &G->vexNum, &G->arcsNum);

    printf("请依次输入各顶点的值：\n");
    for (int v = 0; v < G->vexNum; v++)
    {
        getchar();
        scanf("%c", &G->List[v].vex);
        G->List[v].First = NULL;
    }
```

```c
    for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
    {
        G->List[i].in = 0;
    }

    printf("请依次输入弧头序号、弧尾序号：\n");
    int start, end;
    for (int k = 0; k < G->arcsNum; k++)
    {
        scanf("%d%d", &start, &end);
        arcNode* s = (arcNode*)malloc(sizeof(arcNode));
        s->vex_num = end;
        s->next = G->List[start].First;
        G->List[start].First = s;
        G->List[end].in++;
    }
    return G;
}

void printALGraph(ALGraph* LG)
{
    printf("\n图的邻接表为：\n");
    printf("\tin  vex\n");
    for (int i = 0; i < LG->vexNum; i++)
    {
        printf("\t________\n");
        printf("\t(%d) V%d  |-->", LG->List[i].in, (int)(LG->List[i].vex - 'a'));
        arcNode* s = LG->List[i].First;
        while (s)
        {
            arcNode* p = s->next;
            printf("V%d ", (int)(LG->List[s->vex_num].vex - 'a'));
            if (p)
                printf("-->");
            s = s->next;
        }
        printf("\n");
        printf("\t‾‾‾‾‾‾‾‾\n");
    }
}

int ToologicalSort(ALGraph* GL)
{
    printf("拓扑序列为：\n\n\t");
    arcNode* e;
    int i, k;
    int count = 0;

    int* stack = (int*)malloc(sizeof(int) * GL->vexNum);
    int top = -1;
    int getTop;

    for (int i = 0; i < GL->vexNum; i++)
        if (GL->List[i].in == 0)
```

```
            stack[++top] = i;

    int flag = 0;

    while (top != -1)
    {
        getTop = stack[top--];
        printf("V%d", (int)(GL->List[getTop].vex-'a')+1);
        if (flag != GL->vexNum - 1)
        {
            printf(" -> ");
            flag++;
        }
        count++;
        for (e = GL->List[getTop].First; e; e = e->next)
        {
            k = e->vex_num;
            GL->List[k].in--;
            if (GL->List[k].in == 0)
                stack[++top] = k;
        }
    }
    printf("\n");
    if (count < GL->vexNum)
    {
        printf("\t有环! \n");
        return 0;
    }
    else
        return 1;
}

int main(int argc, char* argv[])
{
    ALGraph* GL = CreateALGraph();
    printALGraph(GL);
    ToologicalSort(GL);
    return 0;
}
```

基于邻接矩阵的代码

```
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <windows.h>
#include <conio.h>

#define MAXSIZE 20
#define MAX 52725
```

```c
typedef struct Graph
{
    char vexs[MAXSIZE];
    int arcs[MAXSIZE][MAXSIZE];
    int vexNum, arcNum;
}Graph;

void CreateGraph(Graph* G)
{
    printf("请输入顶点数和边数：");
    scanf("%d %d", &G->vexNum, &G->arcNum);

    for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
        for (int j = 0; j < G->vexNum; j++)
            G->arcs[i][j] = MAX;

    printf("请依次输入弧头序号、弧尾序号、权值：");
    int start, end, w;
    for (int k = 0; k < G->arcNum; k++)
    {
        scanf("%d%d%d", &start, &end, &w);
        G->arcs[start][end] = w;
    }
}

void printMGraph(Graph* G)
{
    printf("图的邻接矩阵为：\n");             //输出图的邻接矩阵
    for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
    {
        for (int j = 0; j < G->vexNum; j++)
        {
            if (j == 0)
            {
                printf("\t");
            }
            printf("\t%d", G->arcs[i][j]);
        }
        printf("\n\n");
    }
}

void DFS(Graph* G, int* visited, int index)
{
    printf("%d\t", index + 1);
    visited[index] = 1;
    for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
    {
        if (G->arcs[index][i] > 0 && G->arcs[index][i] != MAX && visited[i] != 1)
        {
            DFS(G, visited, i);
        }
    }
```

```
}

void DFS_Extended(Graph *G, int *visited)
{
    DFS(G, visited, 0);
    for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
    {
        if (visited[i] != 1)
        {
            DFS(G, visited, i);
        }
    }
}

typedef struct Stack
{
    int data;
    struct Stack* next;
}Stack, * StackPtr;

Stack* initStack()
{
    Stack* stack = (Stack*)malloc(sizeof(Stack));
    stack->data = 0;
    stack->next = NULL;
    return stack;
}

int isEmpty(Stack* stack)
{
    if (stack->next == NULL)
    {
        return 1;
    }
    else
    {
        return 0;
    }
}

void push(Stack* stack, int data)
{
    Stack* s = (Stack*)malloc(sizeof(Stack));
    s->data = data;
    s->next = stack->next;
    stack->next = s;
}

int pop(Stack* stack)
{
    if (!isEmpty(stack))
    {
        Stack* s = stack->next;
        stack->next = s->next;
```

```
            return s->data;
        }
        else
        {
            return -1;
        }
    }

    int* FindInDegrees(Graph* G)
    {
        int* inDegrees = (int*)malloc(sizeof(int) * G->vexNum);
        for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
        {
            inDegrees[i] = 0;
        }
        for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
        {
            for (int j = 0; j < G->vexNum; j++)
            {
                if ( G->arcs[i][j] > 0 && G->arcs[i][j] != MAX)
                {
                    inDegrees[j]++;
                }
            }
        }
        return inDegrees;
    }

    void ToologicalSort(Graph* G, int *inDegrees, int *tp)
    {
        int index = 0;
        Stack* stack = initStack();
        for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
        {
            if (inDegrees[i] == 0)
            {
                push(stack, i);
                inDegrees[i]--;     //已经入栈准备输出，置为-1，避免再次入栈
            }
        }
        while (!isEmpty(stack))
        {
            int top = pop(stack);
            tp[index++] = top;
            printf("%d\t", top + 1);
            for (int k = 0; k < G->vexNum; k++)
            {
                if (G->arcs[top][k] > 0 && G->arcs[top][k] != MAX)
                {
                    inDegrees[k]--;
                }
            }
            for (int m = 0; m < G->vexNum; m++)
            {
                if (inDegrees[m] == 0)
                {
                    push(stack, m);
                    inDegrees[m]--;
                }
            }
        }
    }

    void ToologicalSort2(Graph* G, int* inDegrees)
    {
        Stack* stack = initStack();
        for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
            if (inDegrees[i] == 0)
                push(stack, i);

        while (!isEmpty(stack))
        {
            int top = pop(stack);
            printf("%d\t", top + 1);
            for (int k = 0; k < G->vexNum; k++)
            {
                if (G->arcs[top][k] > 0 && G->arcs[top][k] != MAX)
                {
                    inDegrees[k]--;
                    if (inDegrees[k] == 0)
                        push(stack, k);
                }
            }
        }
    }

    int main(int argc, char* argv[])
    {
        Graph* G = (Graph*)malloc(sizeof(Graph));
        CreateGraph(G);
        printf("序号:\t");
        for (int i = 0; i < G->vexNum; i++) {
            printf("\t%d", i);
        }
        printf("\n");
        printMGraph(G);
        int* visited = (int*)malloc(sizeof(int) * G->vexNum);
        for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
            visited[i] = 0;
        printf("DFS:\t\t");
        DFS_Extended(G, visited);
        printf("\n");

        int* tp = (int*)malloc(sizeof(int) * G->vexNum);
        int* inDegrees = FindInDegrees(G);
        printf("\ninDegrees[]:\n\t");
        for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
        {
```

```
        printf("\t%d", inDegrees[i]);
    }
    printf("\n\nTopological Order:\n\t\t");
    ToologicalSort(G, inDegrees, tp);

    printf("\ntp[]:\n\t");
    for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
        printf("\t%d", tp[i]+1);
    printf("\n");

    int* inDegrees2 = FindInDegrees(G);
    printf("\ninDegrees2[]:\n\t");
    for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
    {
        printf("\t%d", inDegrees2[i]);
    }
    printf("\n\nTopological Order 2:\n\t\t");
    ToologicalSort(G, inDegrees2);
    return 0;
}
```

6.7. 关键路径

6.7.1. 基本概念

AOE网 Activity On Edge Network

1. 表示工程的**带权有向图**
2. 顶点表示事件
3. 有向边表示活动
4. 边上权值表示活动持续时间

事件的最早发生时间etv (earliest time of vertex)

$即顶点v_k的最早发生时间,也记为Ve$ 注意:

1. “发生”是针对于事件的，也就是图中的顶点。
2. 只有在指向该顶点的**所有**有向边对应的活动结束，该顶点所代表的事件才发生。 $求顶点v_k最早发生时间的公式是$ $$ {\rm VE}[k] = \begin{cases} 0,\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad 当k=0时\ {\rm max}\left({\rm VE}[i]+{\rm len}<v_i,v_k>\right},当k\neq 0且<v_i,v_k>\in {\rm P}[k]时 \quad \ \end{cases} $$ $其中{\rm P}[k]表示所有到达顶点v_k的弧集合$

事件的最晚发生时间ltv (latest time of vertex)

$即顶点v_k的最晚发生时间,即最晚需要开始对应事件的时间,超出此时间会延误整个工期,也记为Vl$

活动的最早开工时间ete (earliest time of edge)

$即弧a_k的最晚发生时间$

注意:

1. “开始”是针对于活动的
2. 只有在一个顶点所代表的事件发生后，从该顶点出发的所有边对应的活动才能开始。 $$ {\rm VL}[k] = \begin{cases} {\rm VE}[k],\quad\quad\qquad\qquad\qquad\qquad 当k=n-1时\ {\rm min}\left({\rm VL}[j]+{\rm len}<v_k,v_j>\right},当k<n-1且<v_k,v_j>\in {\rm S}[k]时 \quad \ \end{cases} $$ $其中{\rm S}[k]表示所有从顶点v_k出发的弧集合$

活动的最晚开工时间lte (latest time of edge)

$即弧a_k的最晚发生时间,即不推迟工期的最晚开工时间$

关于"发生"与"开始"

时间余量

$$活动的最晚开工时间-活动的最早开工时间$$ $即$ $$L(l)-L(e)$$

路径长度

$各个活动所持续的时间之和$

关键活动、关键路径

$①最早开始时间和最晚开始时间相等的活动称为关键活动\ ②关键活动间的路径成为关键路径,也是从源点到汇点具有最大长度的路径$

6.7.2. 关键路径的算法

基于邻接表的代码

$$首先要进行拓扑排序求得拓扑序列并保存在栈中$$

```
int* VE;    //记录时间最早发生时间的数组
int* VL;    //记录时间最晚发生时间的数组
int* stack_TpOrder;//存储拓扑序列的栈
int top_TpOrder;

int ToologicalSort(ALGraph* GL)
{
    printf("拓扑序列为: \n\n\t");

    int count = 0;      //记录已经输出的顶点数量

    int* stack = (int*)malloc(sizeof(int) * GL->vexNum);    //顺序栈
    int top = -1;       //规定为-1,方便后续操作
    int getTop;         //取栈顶值
    //栈里的值为顶点对应的序号

    for (int i = 0; i < GL->vexNum; i++)
```

```
        if (GL->List[i].in == 0)        //将入度为0的顶点入栈
            stack[++top] = i;           //top记得++

//*******************************************************************
    top_TpOrder = -1;                                       //初始化
    VE = (int*)malloc(sizeof(int) * GL->vexNum);            //初始化
    for (int i = 0; i < GL->vexNum; i++)                 //初始化为0
        VE[i] = 0;
    stack_TpOrder = (int*)malloc(sizeof(int) * GL->vexNum); //初始化
//*******************************************************************

    arcNode* e;         //用来遍历顶点对应的边表
    int flag = 0;       //控制"->"的输出数量
    while (top != -1)   //栈非空
    {
        getTop = stack[top--];      //取栈顶值并出栈
        //专注于关键路径,这里可以不输出拓扑排序结果 printf("V%d", (int)(GL-
>List[getTop].vex - 'a') + 1);  //输出序列
        if (flag != GL->vexNum - 1)     //n个顶点应该有n-1个"->"
        {
            printf(" -> ");
            flag++;
        }
        count++;    //已输出顶点数++

//*******************************************************************************
        stack_TpOrder[++top_TpOrder] = getTop;  //将弹出的顶点序号压入拓扑序列栈
//*******************************************************************************

        for (e = GL->List[getTop].First; e; e = e->next)    //遍历边表
        {
            int k = e->vex_num;     //k记录当前顶点序号
            GL->List[k].in--;       //由于上个顶点以删除,故入度-1
            if (GL->List[k].in == 0)    //将入度为0的顶点入栈
                stack[++top] = k;

//************************************************************************
            if (VE[getTop] + e->weight > VE[k])     // 求各顶点时间的
                VE[k] = VE[getTop] + e->weight; //最早发生时间etv的值
//************************************************************************


        }
    }
    printf("\n");
    printf("\n");

    printf("最早发生时间的数组: \n\n");
    printf("\t序号\t");
    for (int i = 0; i < GL->vexNum; i++)
        printf("%d\t", i);
    printf("\n\n\t\t");
    for (int i = 0; i < GL->vexNum; i++)
        printf("%d\t", VE[i]);
    printf("\n");
    if (count < GL->vexNum)     //输出顶点数量小于总顶点数说明存在环路
    {
        printf("\t有环! \n");
        return 0;
    }
    else
        return 1;
}
```

$$接着才是关键路径的求解\ ①求时间指标\②求活动指标\③求时间余量$$

```
void CriticalPath(ALGraph* GL)
{
    int ete, lte;       //声明活动最早发生时间和最晚发生时间的变量
    int getTop;         //取栈顶值
    ToologicalSort(GL); //先进行拓扑排序，保存拓扑序列栈，计算各顶点最早发生时间etv数组
的值

    VL = (int*)malloc(sizeof(int) * GL->vexNum);    //事件最晚发生时间数组
    for (int i = 0; i < GL->vexNum; i++)            //从汇点开始
        VL[i] = VE[GL->vexNum - 1];             //让最晚发生时间初始化为汇点最早发生
时间

    while (top_TpOrder != -1)   //栈非空
    {
        getTop = stack_TpOrder[top_TpOrder--];      //取栈顶
        for (arcNode* e = GL->List[getTop].First ; e; e = e->next)  //遍历边表,修改
最晚发生时间数组的值
        {
            int k = e->vex_num;     //当前访问顶点序号
            if (VL[k] - e->weight < VL[getTop])     //更新当前顶点最晚发生时间
                VL[getTop] = VL[k] - e->weight;     //最晚发生时间要不影响后续的最晚
发生时间,故取小的值
        }
    }

    printf("最晚发生时间的数组: \n\n");       //输出最晚发生时间的数组
    printf("\t序号\t");
    for (int i = 0; i < GL->vexNum; i++)
        printf("%d\t", i);
    printf("\n\n\t\t");
    for (int i = 0; i < GL->vexNum; i++)
        printf("%d\t", VL[i]);
    printf("\n");

    printf("\n关键路径为: \n\t");             //输出关键路径
    for (int j = 0; j < GL->vexNum; j++)
    {
        for (arcNode* e = GL->List[j].First; e; e = e->next)
        {
            int k = e->vex_num;
            ete = VE[j];                //活动的最早发生时间
            lte = VL[k] - e->weight;    //活动的最迟发生时间
            if (ete == lte)             //相等即在关键路径上
            {
                if (j == 0)
                    printf("V%d ", (int)(GL->List[j].vex - 'a'));
                printf("-->");
                printf(" V%d ", (int)(GL->List[k].vex - 'a'));
            }
        }
    }
    printf("\n");
}

int main(int argc, char* argv[])
{
    ALGraph* GL = CreateALGraph();
    CriticalPath(GL);
    return 0;
}
```

基于邻接矩阵的代码

在关键路径完整代码的基础上增加一下两个函数

```
int getIndex(int* tp, int i, Graph *G)      //返回顶点i在拓扑序列里面的位置
{
    for (int index = 0; index < G->vexNum; index++)
        if (tp[index] == i)
            break;
    return index;
}
void CriticalPath(Graph* G, int* tp)
{
    int* early = (int*)malloc(sizeof(int) * G->vexNum);     //最早发生时间数组
    int* late = (int*)malloc(sizeof(int) * G->vexNum);      //最晚发生时间数组
    for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)          //两个数组初始化为0
        early[i] = late[i] = 0;

    for (int i = 1; i < G->vexNum; i++)      //生成最早发生时间数组
    {   //直接从顶点1开始就可以了,0没有必要比较
        int index = getIndex(tp, i, G);      //i作为弧尾,得到顶点i在拓扑序列中的位置
        int max = 0;     //初始化最大值
        for (int j = 0; j < index; j++)      //j表示拓扑序列的第j个位置,只需要在index
之前找就可以了,不必遍历全部
            if (G->arcs[tp[j]][i] > 0 && G->arcs[tp[j]][i] != MAX)   //有弧,top[j]
作为弧头
                if (G->arcs[tp[j]][i] + early[tp[j]] > max)
                    max = G->arcs[tp[j]][i] + early[tp[j]];     //更新最大值
        early[i] = max;     //得到顶点i的最早发生时间
    }
    printf("early[]:\n\t");     //输出最早发生时间数组
    for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
        printf("\t%d", early[i]);

    late[(G->vexNum) - 1] = early[(G->vexNum) - 1];     //从汇点开始
    for (int i = G->vexNum - 2; i >= 0; i--)        //生成最晚发生时间数组,同样的道理，汇点没有必要判断
    {
        int min = late[(G->vexNum) - 1];    //初始化最大值
        int index2 = getIndex(tp, i, G);    //这里的顶点i作为弧头,返回顶点i在拓扑序列中的位置
        for (int j = (G->vexNum) - 1; j  > index2; j--)     //j是拓扑序列中的第j个位置,只要在index2的后面找,不必全部遍历判断
            if (G->arcs[i][tp[j]] > 0 && G->arcs[i][tp[j]] != MAX)  //有弧,top[j]作为弧尾
                if (late[tp[j]] - G->arcs[i][tp[j]] < min)
                    min = late[tp[j]] - G->arcs[i][tp[j]];          //更新最小值
        late[i] = min;      //得到顶点i的最晚发生时间
    }

    printf("\nlate[]:\n\t");        //输出最晚发生时间数组
    for (int i = 0; i < G->vexNum; i++)
        printf("\t%d", late[i]);

    printf("\n关键路径: \n\t");
    for (int i = 0; i < G->vexNum; i++) {   //顶点i作为弧尾
        int index_c = getIndex(tp, i, G);   //先得到顶点i在拓扑序列中的位置
        for (int j = 0; j < index_c; j++) { //j是拓扑序列中的第j个顶点,在index_c之前找就可以了
            if (G->arcs[tp[j]][i] > 0 && G->arcs[tp[j]][i] != MAX) {    //有弧,top[j]是弧头
                if (late[i] - G->arcs[tp[j]][i] == early[tp[j]]) {      //时间余量为0
                    printf("\t%d -(%d)-> %d", tp[j], G->arcs[tp[j]][i], i);     //输出路径
                }
            }
        }
    }
    printf("\n" );
}
```

7. 查找

7.1. 基本概念

7.1.1. 查找表 Search Table

```
同一类型的数据元素(或记录)构成的集合
```

7.1.2. 关键字 Key

> 数据元素中某个数据项的值

7.1.3. 次关键字 Secondary Key

> 可以识别多个数据元素(或记录)的关键字

7.1.4. 静态查找表 Static Search Table

> 只做查找操作的查找表

7.1.5. 动态查找表 Dynamic Search Table

> 在查找的过程中同时进行插入或删除数据元素的操作

7.1.6. 平均查找长度ASL

$$ASL=\sum_{i=1}^n P_iC_i\其中P_i是元素i被查找的概率\C_i是查到元素i时的查找次数$$

7.2. 顺序表查找

$$ASL_{success}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n C_i =\frac{1}{n} \frac{n(n+1)}{2} =\frac{n+1}{2} $$
$$ASL_{fail}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n C_i =\frac{1}{n} {n(n+1)} =n+1$$

7.2.1. 普通法

```c
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <windows.h>
#include <conio.h>

typedef struct List
{
    int *data;
    int length;
    int num;
}List, * ListPtr;

```

```
List* initList(int length)
{
    List* L = (ListPtr)malloc(sizeof(List));
    L->data = (int*)malloc(sizeof(int) * length);
    L->length = length;
    L->num = 0;
    return L;
}

void addList(List* L, int data)
{
    L->data[L->num++] = data;
}

void printList(List* L)
{
    for (int i = 0; i < L->num; i++) {
        printf("\t%d", L->data[i]);
    }
}

int searchList(List* L, int key)
{
    for (int i = 0; i < L->num; i++) {
        if (L->data[i] == key)
            return i;
    }
    return -1;
}

int main(int argc, char* argv[])
{
    List* L = initList(10);
    addList(L, 2);
    addList(L, 3);
    addList(L, 7);
    addList(L, 5);
    addList(L, 4);
    addList(L, 0);
    addList(L, 6);
    addList(L, 8);
    printList(L);
    printf("\n");
    printf("\t%d", searchList(L, 4));
    printf("\t%d", searchList(L, 3));
    printf("\t%d", searchList(L, 7));
    printf("\t%d", searchList(L, 10));
    return 0;
}
```

7.2.2. 优化法(设置哨兵)sentry

```c
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <windows.h>
#include <conio.h>

typedef struct List
{
    int* data;
    int length;
    int num;
}List, * ListPtr;

List* initList(int length)
{
    List* L = (ListPtr)malloc(sizeof(List));
    L->data = (int*)malloc(sizeof(int) * length);
    L->length = length;
    L->num = 1;
    return L;
}

void addList(List* L, int data)
{
    L->data[L->num++] = data;
}

void printList(List* L)
{
    for (int i = 0; i < L->num; i++) {
        printf("\t%d", L->data[i]);
    }
}

int searchList_sentry(List* L, int key)
{
    L->data[0] = key;
    int i;
    for (i = L->num - 1; L->data[i] != key; i--){}
    return i;
}

int main(int argc, char* argv[])
{
    List* L = initList(10);
    addList(L, 2);
    addList(L, 3);
    addList(L, 7);
    addList(L, 5);
    addList(L, 4);
    addList(L, 0);
    addList(L, 6);
    addList(L, 8);
    printList(L);
    printf("\n");
    printf("\t%d", searchList_sentry(L, 4));
    printf("\t%d", searchList_sentry(L, 10));
    return 0;
}
```

7.3. 有序表查找

7.3.1. 折半查找(二分查找)

$$ASL_{success}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n C_i =\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{h}{k 2^{k-1}}=\frac{n+1}{n}log_2(n+1)-1\approx log_2(n+1)$$ $$ASL_{fail}:补全左右子节点为多出的结点,对每一层多出的结点个数乘以对应层数再求和即可$$

```
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <windows.h>
#include <conio.h>

typedef struct List
{
    int* data;
    int length;
}List, * ListPtr;

List* initList(int length)
{
    List* L = (ListPtr)malloc(sizeof(List));
    L->data = (int*)malloc(sizeof(int) * length);
    L->length = length;
    for (int i = 0; i < L->length; i++) {
        L->data[i] = i + 1;
    }
    return L;
}

void printList(List* L)
{
    for (int i = 0; i < L->length; i++) {
        printf("\t%d", L->data[i]);
    }
}

int binarySearch(List* L, int key)      //循环
{
    int start = 0;
    int end = L->length - 1;
    int mid;
    while (start <= end) {
        mid = (start + end) / 2;
        if (L->data[mid] < key) {
            start = mid + 1;
        }
        else if (key < L->data[mid]) {
            end = mid - 1;
        }
        else if (L->data[mid] == key)
            return mid;
    }
    return -1;
}

int binarySearch_recurs(List* L, int key, int start, int end)   //递归法
{
    if (start == end) {
        if (L->data[start] == key)
            return start;
        else
            return -1;
    }
    int mid = (start + end) / 2;
    if (key < L->data[mid]) {
        binarySearch_recurs(L, key, start, mid - 1);
    }
    else if (L->data[mid] < key) {
        binarySearch_recurs(L, key, mid + 1, end);
    }
    else return mid;
}


int main(int argc, char* argv[])
{
    List* L = initList(10);
    printList(L);
    printf("\n");
    printf("\t%d", binarySearch(L,3));
    printf("\t%d", binarySearch(L,5));
    printf("\t%d", binarySearch(L,11));
    printf("\t%d", binarySearch(L,1));
    printf("\t%d", binarySearch_recurs(L, 6, 0, L->length - 1));
    printf("\t%d", binarySearch_recurs(L,99,0,L->length-1));
    printf("\t%d", binarySearch_recurs(L,10,0,L->length-1));
    printf("\t%d", binarySearch_recurs(L,9,0,L->length-1));
    return 0;
}

/*  OUTPUT
*   1       2       3        4       5       6        7       8       9       10
*   2       4       -1       0       5       -1       9       8
```

```
*/
```

7.3.2. 插值查找

7.3.3. 斐波那契查找

7.4. 索引查找

7.4.1. 稠密索引

稠密索引是指再线性索引中,将数据集中的每个记录对应一个索引项,索引表中的索引项是按照关键码有序排列的.

7.4.2. 分块索引

$块间有序,块内无序$ $$ASL_{success} = \frac{1}{2}(\frac{n}{t}+t)+1\n个记录的数据集被平均分成m块,每个块中有t条记录\即有\ n = mt \ or \ m = \frac{n}{t}$$

7.4.3. 倒排索引

7.5. 二叉排序树 BST(Binary Sort Tree)

```
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <windows.h>
#include <conio.h>

typedef struct BSTNode
{
    int data;
    struct BSTNode* lchild;
    struct BSTNode* rchild;
}BSTNode, * BSTNodePtr;

void BSTInsert(BSTNode** T, int data)
{
    if (*T == NULL) {
        *T = (BSTNodePtr)malloc(sizeof(BSTNode));
        (*T)->data = data;
        (*T)->lchild = NULL;
        (*T)->rchild = NULL;
    }
    else if (data < (*T)->data) {
        BSTInsert(&(*T)->lchild, data);
    }
    else if (data > (*T)->data) {
        BSTInsert(&(*T)->rchild, data);
    }
    else return;
}

const char* BST_Search(BSTNode* T, int key)
{
    if (T) {
        if (T->data == key)
            return "SEARCH SUCCESS!";
        else if (T->data > key) {
            BST_Search(T->lchild, key);
        }
        else if (T->data < key) {
            BST_Search(T->rchild, key);
        }
    }
    else {
        return "SEARCH FAIL!";
    }
}

void delNode(BSTNode** T)
{
    BSTNode* s;
    BSTNode* rightDeepest;
    BSTNode* rightDeepest_pri;
    if ((*T)->lchild == NULL ) {
        s = (*T);
        (*T) = (*T)->rchild;
        free(s);
    }
    else if ((*T)->rchild == NULL) {
        s = (*T);
        (*T) = (*T)->lchild;
        free(s);
    }
    else if ((*T)->lchild && (*T)->lchild) {
        rightDeepest = (*T)->lchild;
        rightDeepest_pri = (*T)->lchild;
        while (rightDeepest) {
            rightDeepest_pri = rightDeepest;
            rightDeepest = rightDeepest->rchild;
        }
        if (rightDeepest) {
            (*T)->data = rightDeepest->data;
            rightDeepest_pri->rchild = rightDeepest->lchild;
            free(rightDeepest);
        }
        else {
            (*T)->data = rightDeepest_pri->data;
            (*T)->lchild = rightDeepest_pri->lchild;
            free(rightDeepest_pri);
        }
    }
```

```
        return;
    }

    const char* Delete(BSTNode** T, int key)
    {
        if (*T) {
            if ((*T)->data == key) {
                delNode(&(*T));
                return "SUCCESSFULLY DELETE!";
            }
            else if ((*T)->data < key)
                Delete(&(*T)->rchild, key);
            else if ((*T)->data > key)
                Delete(&(*T)->lchild, key);
        }
        else {
            return "NOT EXSIST!";
        }
    }

    void preOrder(BSTNode* T)
    {
        if (T) {
            printf("\t%d", T->data);
            preOrder(T->lchild);
            preOrder(T->rchild);
        }
    }

    void inOrder(BSTNode* T)
    {
        if (T) {
            preOrder(T->lchild);
            printf("\t%d", T->data);
            preOrder(T->rchild);
        }
    }

    void postOrder(BSTNode* T)
    {
        if (T) {
            preOrder(T->lchild);
            printf("\t%d", T->data);
            preOrder(T->rchild);
        }
    }

    int main(int argc, char* argv[])
    {
        BSTNode* T = NULL;
        int init[10] = { 62,88,58,47,35,73,51,99,37,93 };
        for (int i = 0; i < 10; i++) {
            BSTInsert(&T, init[i]);
        }
        printf("\nPREORDER\t");
        preOrder(T);
        printf("\n\n");

        printf("INORDER \t");
        inOrder(T);
        printf("\n\n");

        printf("POSTORDER\t");
        postOrder(T);
        printf("\n\n");

        puts(BST_Search(T, 99));
        puts(BST_Search(T, 27));
        puts(BST_Search(T, 47));
        puts(BST_Search(T, 100));

        puts(Delete(&T, 73));
        puts(Delete(&T, 100));
        puts(Delete(&T, 62));
        puts(Delete(&T, 73));
        puts(Delete(&T, 51));
        puts(Delete(&T, 47));
        puts(Delete(&T, 35));
        puts(Delete(&T, 99));

        return 0;
    }

    //OUTPUT
    //      PREORDER                62      58      47      35      37      51      88
    73      99      93
    //
    //      INORDER                 58      47      35      37      51      62      88
    73      99      93
    //
    //      POSTORDER               58      47      35      37      51      62      88
    73      99      93
    //
    //      SEARCH SUCCESS!
    //      SEARCH FAIL!
    //      SEARCH SUCCESS!
    //      SEARCH FAIL!
    //      SUCCESSFULLY DELETE!
    //      NOT EXSIST!
    //      SUCCESSFULLY DELETE!
    //      NOT EXSIST!
    //      SUCCESSFULLY DELETE!
    //      SUCCESSFULLY DELETE!
    //      SUCCESSFULLY DELETE!
    //      SUCCESSFULLY DELETE!
```

7.6. 平衡二叉树 ALV树

$平衡二叉树(Self-Balancing\ Binary\ Search\ Tree\ or \ Height-Balanced\ Binary\ Search\ Tree),是一种二叉排序树,其中\textbf{每一个结点}的左子树和右子树的高度差至多等于1\ ①高度平衡的二叉排序树\ ②平衡因子BF(Balanced\ Factor):二叉树上结点的左子树高度减去右子树高度的值\ ③要注意|BF|≤1是对每一个节点\ ④最小不平衡子树:距离插入结点最近的,以且|BF|≥1的结点为根的子树$

7.6.1. 二叉平衡树的实现原理

$BF\begin{cases} +\quad→\quad右旋\ -\quad→\quad左旋 \end{cases} \旋转后要注意最小不平衡子树的根节点与它的子节点符号要相同(这里的相同是包括0的)$

7.7. 多路查找树(B树)

7.7.1. 2-3树

7.7.2. 2-3-4树

7.7.3. B树

7.7.4. B+树

7.8. 哈希表(散列表)查找)

$散列表/哈希表(Hash\ Table):采用散列技术将存储记录的一块连续的存储空间$ $散列技术:在记录的存储位置和它的关键字之间建立一个确定的对应关系f,使得$ $$存储位置=f(关键字)$$ $每一个关键字只对应一个存储位置.其中对应关系f称为散列函数或哈希(Hash)函数\ 散列技术既是一种存储方法,也是一种查找方法\ 散列技术的记录之间不存在逻辑关系,只与关键字有关联,适合求解"查找值与给定值相等的记录"的问题.\ 散列是面向查找的存储结构.\ 冲突现象(collision):两个关键字key_1\neq key_2,但是有f(key_1)=f(key_2).\ \ key_1和key_2称为这个散列函数的同义词(synonym).$

7.8.1. 散列函数的构造方法

$$原则\begin{cases} 计算简单\ 散列地址分布均匀 \end{cases}$$

直接定址法

取关键字的某个线性函数值为散列地址. $$f(key)=a\cdot key=b$$

数字分析法

抽取、反转、右环移位、左环移位、前后叠加等等

平方取中法

例如$$1234^2→1522756→227$$

折叠法fen

等位数分割叠加求和,按散列表表长,取后几位作为散列地址.

除留余数法

$$f(key)=key\ mod\ p(p≤m)$$ m为散列表长. 根据经验,p通常为小于等于m的最小质数或不包含小于20质因子的合数.

随机数法

$$f(key)=random(key)$$

7.8.2. 处理散列冲突的方法

8. 排序

9. 实验or应用

9.1. 线性表

9.1.1. 简单的学生成绩管理

Visual Studio 2019 中实现

```
#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include<string.h>
#define OK 1
#define OVERFLOW -2
#define ListIncrement 2
int n;
typedef int Status;

typedef struct
{
    char name[10];
    float score;
}STD;

STD *newbase;

typedef struct
{
    STD *data;
    int length;
    int listsize;
}SqList;

Status InitList(SqList *L)
{
    printf("请输入学生人数n: ");
    scanf_s("%d", &n);
    L->data = (STD*)malloc(sizeof(STD) * n);

    if (!L->data)
    {
        printf("Create failed!");
        exit(0);
    }
    L->length = 0;
    L->listsize = n;

        printf("Successfully creat!Please initialize the Sequence List\n");
    //  printf("%d\n", L->listsize);
    return OK;
}

Status InputList(SqList *L, int n)
{
    int i;
    for (i = 0; i < n; i++)
    {
        scanf_s("%s",L->data[i].name,10);
        scanf_s("%f",&L->data[i].score);
    }
    L->length = n;
    return 0;
}

Status DisplayList(SqList *L,int n)
{
    int i;
    char *na = "name";
    char *p = "score";
    printf("%-8s%-8s\n",na,p);
    for (i = 0; i < n; i++)
    {
        printf("%-8s%-8.1f \n", L->data[i].name, L->data[i].score);

    }
    return 1;
}

Status GetSTD1(SqList* L)
{
    printf("请输入要查找的学生的姓名: ");
    char FindName[10];
    scanf_s("%s", FindName, 10);
    int i;
    for (i = 0; i < n ; i++)
    {
        if (strcmp(FindName, L->data[i].name) == 0)
        {
            printf("%8s%8.1f\n", L->data[i].name, L->data[i].score);
            return 1;
        }
    }
    printf("该学生不存在! \n");
        return 0;
}

Status GetSTD2(SqList* L)
{
    int i;
    printf("请输入你要查找的学生序号: ");
    scanf_s("%d", &i);
    if (i > 0 && i <= L->length)
        printf("第%d个学生是%s\n", i, L->data[i - 1].name);
    else printf("该序号不存在, 请重新输入! ");
    return 0;
}

Status ListInsert(SqList *L)
{
    int i;
    printf("Please the position i you want to insert.\n");
    int bool = 1;
    while (bool)
    {
        scanf_s("%d", &i);
        if (i < 1 || i > L->length+1)
        {
            printf("插入的位置不合理! 请重新输入! \n");
        }
        else bool = 0;
    }
    newbase = (STD*)malloc(sizeof(STD));
    if (L->length = L->listsize)
    {
        newbase = (STD*)realloc(L->data, (L->listsize + ListIncrement) *
sizeof(STD));
        if (!L->data)
        {
            printf("Recreate failed!\n");
            exit(0);
        }
        L->data = newbase;
        L->listsize += ListIncrement;
        L->length += 1;
        n = n + 1;
    }

    int j;
    for (j = L->length; j >= i; j--)
    {
        L->data[j] = L->data[j - 1];
    }

    printf("Please input the data to insert.\n");
    scanf_s("%s",L->data[i-1].name,10);
    scanf_s("%f",&L->data[i-1].score);
    printf("插入成功");
    return OK;
}

Status DeleteList(SqList* L)
{
    int i;
    printf("Please the position i you want to delete.\n");
    int bool = 1;
    while(bool)
    {
        scanf_s("%d", &i);
        if (i < 1 || i > L->length)
        {
            printf("删除的位置不合理！请重新输入！\n");
        }
        else bool = 0;
    }

    int j;
    for (j = i-1; j < L->length-1; j++)
    {
        L->data[j] = L->data[j + 1];
    }
    L->length -= 1;
    n = n - 1;
    return OK;
}

Status GetNum(SqList *L)
{
    if (!IsEmpty(L))
        printf("The number of the students is “%d”\n", L->length);
    else printf("线性表不存在，请选择新建表格（0）\n");
    return OK;
}

Status IsEmpty(SqList* L)
{
    if (L->length == 0)
        return 1;
    else return 0;
}

Status DestroyList(SqList* L)
{
    if (L->data)
    {
        free(L->data);
        L->data = NULL;
        L->length = 0;
        L->listsize = 0;
    }
    return OK;
}

int main()
{
    SqList* L = (SqList*)malloc(sizeof(SqList));
    int sta = 1;
    printf("--------------------------功能界面--------------------------\n");
    printf("-------------------------0.创建新表--------------------------\n");
    printf("1.添加学生\t2.显示学生表\t3.按姓名查找学生\t4.按序号查找学生\n");
    printf("5.插入学生\t6.删除学生信息\t7.统计学生人数\t\t8.清空表格\n");
    printf("------------------------------------------------------------\n");


    while (1)
    {
        int fun;
        printf("请输入功能对应数字");
        scanf_s("%d", &fun);
        getchar();
        switch (fun)
        {
            case -1:
                return 0;
            case 0:
                InitList(L);
                break;
            case 1:
                if (sta == 1)
                {
                    InputList(L, n);
                    sta = 0;
                }
                else
                    printf("线性表已存在，请选择插入（5）或清空（8）！\n");
                break;
            case 2:
                if (!IsEmpty(L))
                    DisplayList(L, n);
                else printf("线性表不存在，请选择新建表格（0）\n");
                break;
            case 3:
                if (!IsEmpty(L))
                    GetSTD1(L);
                else printf("线性表不存在，请选择新建表格（0）\n");
                break;
            case 4:
                if (!IsEmpty(L))
                    GetSTD2(L);
                else printf("线性表不存在，请选择新建表格（0）\n");
                break;
            case 5:
                if (!IsEmpty(L))
                    ListInsert(L);
                else printf("线性表不存在，请选择新建表格（0）\n");
                break;
            case 6:
                if ( !IsEmpty(L) && ((L->listsize) > 0))
                    DeleteList(L);
                else
                {
                    DestroyList(L);
                    printf("线性表不存在，请选择新建表格（0）\n");
                }
                break;
            case 7:
                GetNum(L);
                break;
            case 8:
                DestroyList(L);
                sta = 1;
                break;
            default:
                printf("输入错误，请重新输入！\n");
        }
    }
    return 0;
}
```

9.1.2. 图书信息管理

Visual Studio 2019 中实现

```
/*
*   实现图书信息管理，具体要求如下：
*
*   定义图书结构体类型ElemType，至少包括三个属性（书号，书名，价格）；
*   定义图书顺序表SqList（ElemType指针，表长，容量）。
*
*   功能：1、初始化创建一个空表（提示：需要分配存储空间）；
*         2、插入一条新的图书信息到表中第i个元素；
*         3、删除表中第i条图书信息；
*         4、按书名进行查找，并返回找到的图书的完整信息；
*         5、查找表中的第i条图书信息；
*         6、输出顺序表中的所有图书信息（注意排版清楚美观）；
*         7、修改指定图书信息的价格；
*         8、自己分析，扩展有意义的功能。
*
*   主函数中定义顺序表变量L，通过调用各功能函数顺序完成以下操作：
*       1. 初始化创建空表L，
*       2. 连续插入3条数据到表头，
*       3. 输出顺序表，
*       4. 插入一条数据使其成为表中第3条数据，
*       5. 输出顺序表，
*       6. 根据指定的书名进行删除；
*       7. 输出顺序表;
*       8. 按书名进行查找，并输出查找到的图书完整信息;
*       9. 按书名查找后进行对应记录价格的修改;
*       10.输出修改后全部图书信息。
*/

/*  测试样例
    ISBN                书名                    定价
    9787302257646       程序设计基础            25
    9787302219972       单片机技术及应用        32
    9787302203513       编译原理                46
    9787811234923       汇编语言程序设计教程    21
    9787512100831       计算机操作系统          17
    9787302265436       计算机导论实验指导      18
    9787302180630       实用数据结构            29
    9787302225065       数据结构(C语言版)       38
    9787302171676       C#面向对象程序设计      39
    9787302250692       c语言程序设计           42
    9787302150664       数据库原理              35
    9787302260806       Java编程与实践          56
    9787302252887       Java程序设计与应用教程  39
    9787302198505       嵌入式操作系统及编程    25
    9787302169666       软件测试                24
    9787811231557       Eclipse基础与应用       35
*/

#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include<string.h>
#define OK 1
#define OVERFLOW -2
#define ListIncrement 2
typedef int Status;
int n;

typedef struct
{
    char ISBN[15];
    char BookName[50];
    float price;
}TBook;

typedef struct
{
    TBook* data;
    int length;
    int listsize;
}SqList;

TBook* newbase;

Status InitList(SqList* L,int n);    //初始化
Status InputList(SqList* L,int i);   //输入图书信息
Status DisplayList(SqList* L);       //输出图书信息
Status ListInsert(SqList* L);        //插入图书信息
Status DeListAcoName(SqList* L);     //根据书名删除图书信息
Status DeListAcoNum(SqList* L);      //根据序号删除图书信息
Status GetName(SqList* L);           //根据书名查找图书
Status GetSeNum(SqList* L);          //根据序号查找图书
Status GetNum(SqList* L);            //输出图书总数
Status MdfPrice(SqList* L);          //修改图书价格
Status IsEmpty(SqList* L);           //判断表格是否为空
Status DestroyList(SqList* L);       //销毁图书信息;

int main(int argc, char* argv[])
{
    SqList* L = (SqList*)malloc(sizeof(SqList));
    printf("--------------------------功能界面--------------------------\n");
    printf("------------------------图书信息管理------------------------\n");
    printf("1. 初始化创建空表L; \n");
    printf("2. 初始化后输入图书信息; \n");
    printf("3. 输出全部图书信息; \n");
    printf("4. 插入图书信息\n");
    printf("5. 根据指定的书名进行删除; \n");
    printf("6. 根据指定的序号进行删除; \n");
    printf("7. 按书名进行查找, 并输出查找到的图书完整信息; \n");
    printf("8. 按序号进行查找, 并输出查找到的图书完整信息; \n");
    printf("9. 按书名查找后进行对应记录价格的修改; \n");
    printf("10.输出图书总数。\n");
    printf("11.销毁所有图书信息。\n");
    printf("12.退出。\n");


    while (1)
    {
        int fun;
        printf("-------------------------请输入功能对应数字: ");
        scanf_s("%d", &fun);
        getchar();
        switch (fun)
        {
        case 12:
            return 0;
        case 1:
            printf("请输入图书数量: ");
            scanf_s("%d", &n);
            InitList(L,n);
            break;
        case 2:
            if (!IsEmpty(L))
            {
                int i;
                printf("请依次输入书号 (ISBN) 、书名、价格: \n");
                for (i = 0; i < n; i++)
                {
                    InputList(L,i);
                }
            }
            else printf("线性表不存在，请选择初始化（1）\n");
            break;
        case 3:
            if (!IsEmpty(L))
                DisplayList(L);
            else printf("线性表不存在，请选择初始化（1）\n");
            break;
        case 4:
            if (!IsEmpty(L))
            {
                ListInsert(L);
            }
            else printf("线性表不存在，请选择新建表格（0）\n");
            break;
        case 5:
            if (!IsEmpty(L))
            {
                DeListAcoName(L);
            }
            else printf("线性表不存在，请选择初始化（1）\n");
            break;
        case 6:
            if (!IsEmpty(L))
            {
                DeListAcoNum(L);
            }
            else printf("线性表不存在，请选择初始化（1）\n");
            break;
        case 7:
            if (!IsEmpty(L))
                GetName(L);
            else
            {
                DestroyList(L);
                printf("线性表不存在，请选择初始化（1）\n");
            }
            break;
        case 8:
            if (!IsEmpty(L))
            {
                GetSeNum(L);
            }
            else
            {
                DestroyList(L);
                printf("线性表不存在，请选择初始化（1）\n");
            }
            break;
        case 9:
            if (!IsEmpty(L))
            {
                MdfPrice(L);
            }
            else
            {
                DestroyList(L);
                printf("线性表不存在，请选择初始化（1）\n");
            }
            break;
        case 10:
            if (!IsEmpty(L))
            {
                GetNum(L);
            }
            else
            {
                DestroyList(L);
                printf("线性表不存在，请选择初始化（1）\n");
            }
            break;
        case 11:
            DestroyList(L);
            printf("销毁成功！请选择重新初始化（1）或者退出（12）\n");
            break;
        default:
            printf("输入错误，请重新输入！\n");
        }
        printf("\n");
    }
    return 0;
}

Status InitList(SqList* L,int n)
{
    L->data = (TBook*)malloc(sizeof(TBook)*n);

    if (!L->data)
    {
        printf("Create failed!");
        exit(0);
    }
    L->length = 0;
    L->listsize = n;

    printf("Successfully creat!Please initialize the Sequence List\n");
    //printf("Listsize:%d\n", L->listsize);
    //printf("Length:%d\n", L->length);
    return OK;
}

Status InputList(SqList* L,int i)
{

    scanf_s("%s", L->data[i].ISBN, 15);
    scanf_s("%s", L->data[i].BookName, 50);
    scanf_s("%f", &L->data[i].price);

    L->length += 1;
    return 1;
}

Status DisplayList(SqList* L)
{
    int i;
    const char *Is = "ISBN";
    const char *Na = "书名";
    const char *Pr = "价格";
    printf("%-20s%-25s%-25s\n", Is, Na, Pr);
    for (i = 0; i < L->length; i++)
    {
        printf("%-20s%-25s%-10.2f\n", L->data[i].ISBN, L->data[i].BookName, L-
>data[i].price);
    }
    return 1;
}

Status ListInsert(SqList* L)
{
    int i;
    printf("Please input the position i you want to insert:  ");
    int b = 1;
    while (b)
    {
        scanf_s("%d", &i);
        if (i < 1 || i > L->length + 1)
        {
            printf("插入的位置不合理！请重新输入！\n");
        }
        else b = 0;
    }
    newbase = (TBook*)malloc(sizeof(TBook));
    if (L->length == L->listsize)
    {
        newbase = (TBook*)realloc(L->data, (L->listsize + ListIncrement) *
sizeof(TBook));
        if (!L->data)
        {
            printf("Recreate failed!\n");
            exit(0);
        }
        L->data = newbase;
        L->listsize += ListIncrement;
    }

    int j;
    for (j = L->length; j >= i; j--)
    {
        L->data[j] = L->data[j - 1];
    }
    printf("请依次输入书号（ISBN）、书名、价格：\n");
    InputList(L,i-1);
    printf("插入成功！\n");
    return OK;
}

Status DeListAcoName(SqList* L)
{
    int i, j;
    printf("Please input the Bookname you want to delete:  ");
    int b = 1;
    char FindName[50] = { 0 };

    while (b)
    {
        scanf_s("%s", FindName,50);
        for (i = 0; i < L->length; i++)
        {
            if ( strcmp(L->data[i].BookName, FindName) == 0 )
            {
                b = 0;
                break;
            }
        }
        if (i == L->length)
            printf("删除的图书不存在！请重新输入！\n");
    }

    for (j = i; j < L->length - 1; j++)
    {
        L->data[j] = L->data[j + 1];
    }
    L->length -= 1;
    printf("删除成功！\n");

    if (L->length == 0)
        DestroyList(L);

    return OK;
}

Status DeListAcoNum(SqList* L)
{
    int i;
    printf("Please input the position i you want to delete:  ");
    int b = 1;
    while (b)
    {
        scanf_s("%d", &i);
        if (i < 1 || i > L->length)
        {
            printf("删除的位置不合理！请重新输入！\n");
        }
        else b = 0;
    }
    int j;
    for (j = i - 1; j < L->length - 1; j++)
    {
        L->data[j] = L->data[j + 1];
    }
    L->length -= 1;
    printf("删除成功！\n");

    if (L->length == 0)
        DestroyList(L);

    return OK;
}

Status GetName(SqList* L)
{
    const char* Is = "ISBN";
    const char* Na = "书名";
    const char* Pr = "价格";

    printf("请输入要查找的书名：");
    char FindName[50] = { 0 };
    scanf_s("%s", FindName, 50);
    int i;
    for (i = 0; i < L->length; i++)
    {
        if (strcmp(FindName, L->data[i].BookName) == 0)
        {
            printf("%-20s%-25s%-25s\n", Is, Na, Pr);
            printf("%-20s%-25s%-10.2f\n", L->data[i].ISBN, L->data[i].BookName, L-
>data[i].price);
            return 1;
        }
    }
    printf("查找的书名不存在！\n");
    return 0;
}

Status GetSeNum(SqList* L)
{
    int i;
    const char* Is = "ISBN";
    const char* Na = "书名";
    const char* Pr = "价格";
    printf("请输入你要查找图书序号：");
    scanf_s("%d", &i);
    if (i >= 0 && i <= L->length)
    {
        printf("第%d条图书信息为\n", i);
        printf("%-20s%-25s%-25s\n", Is, Na, Pr);
        printf("%-20s%-25s%-10.2f\n", L->data[i-1].ISBN, L->data[i-1].BookName, L-
>data[i-1].price);
    }
    else printf("该序号图书不存在，请重新输入！");
    return 0;
}

Status GetNum(SqList* L)
{
    printf("图书总数为：“%d”\n", L->length);
    return OK;
}

Status MdfPrice(SqList* L)
{
    const char* Is = "ISBN";
    const char* Na = "书名";
    const char* Pr = "价格";

    printf("请输入要修改价格的书名：");
    char FindName[50] = { 0 };
    scanf_s("%s", FindName, 50);
    int i;
    float NewPrice;
    for (i = 0; i < L->length; i++)
    {
        if (strcmp(FindName, L->data[i].BookName) == 0)
        {
            printf("该图书的信息为：\n");
            printf("%-20s%-25s%-25s\n", Is, Na, Pr);
            printf("%-20s%-25s%-10.2f \n", L->data[i].ISBN, L->data[i].BookName,
L->data[i].price);

            printf("请输入新价格：");
            scanf_s("%f", &NewPrice);
            L->data[i].price = NewPrice;
            printf("修改后图书信息为：\n");
            printf("%-20s%-25s%-25s\n", Is, Na, Pr);
            printf("%-20s%-25s%-10.2f\n", L->data[i].ISBN, L->data[i].BookName, L-
>data[i].price);
            return OK;
        }
    }
    printf("查找的书名不存在！\n");
    return 0;
}

Status IsEmpty(SqList* L)
{
    if (L->length == 0 && L->listsize == 0)
        return 1;
    else return 0;
}

Status DestroyList(SqList* L)
{
    if (L->data)
    {
        free(L->data);
        L->data = NULL;
        L->length = 0;
        L->listsize = 0;
    }
    return OK;
}
```

9.1.3. 党史学习

```
//120211080526 计算机2105 张烁
/*
*       Q1: 党史学习（50分）
*        (1) 将不少于3条党史信息初始化保存到单链表中
*        (2) 根据代表名字，查找所有相关的历史信息并输出
*        (3) 插入一条新的党史信息到单链表中
*        (4) 输出全部信息
*        (5) 根据输入的年份，修改相关信息（如：代表人数）
*        (6) 清空整张表信息
*/
/*  测试样例
        事件              时间          主要人物
        中共一大      1921年      毛泽东   董必武
        中共三大      1923年      陈独秀
        五卅运动      1925年      刘少奇
        南昌起义      1927年      周恩来
        遵义会议      1935年      毛泽东
        中共十二大        1982年      邓小平
        中共十六大        2002年      江泽民
        中共十九大        2017年      习近平
*/
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <iostream>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

typedef struct
{
    char event[20];
    char time[20];
    char MainPeo[10];
}PartyInfo;

typedef struct node
{
    PartyInfo data;
    struct node *next;
}LNode,*LinkList;
```

```c
int InitLink(LinkList* L,LinkList *R)
{
    *L = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    (*R) = (*L);
    if ((*L) == NULL)
        return 0;

    (*L)->next = NULL;
    printf("创建空表成功!\n");
    return 1;
}

int InsertLink(LinkList* L,LinkList *R)
{
    int n;
    printf("请输入要插入的信息条数: ");
    scanf("%d", &n);
    int i;
    for (i = 0; i < n; i++) {
        LinkList s = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
        scanf("%s %s %s", s->data.event, s->data.time, s->data.MainPeo);
        s->next = NULL;
        (*R)->next = s;
        (*R) = s;
    }
    return 1;
}

int Getname(LinkList L)
{
    const char* Ev = "事件";
    const char* Ti = "时间";
    const char* Mp = "主要人物";
    char FindName[20];
    printf("请输入代表名字: ");
    scanf("%s", FindName);

    LinkList p = L->next;
    int head = 1,j = 0;
    while (p) {
        if (strcmp(FindName, p->data.MainPeo) == 0) {
            if (head == 1) {
                printf("        %-15s%-15s%-15s\n", Ev, Ti, Mp);
                head = 0;
            }
            printf("        %-15s%-15s%-15s\n", p->data.event, p->data.time, p-
>data.MainPeo);
            j++;
        }
        p = p->next;
    }
    if (j == 0) {
        printf("你所查找的信息为空! \n");
        return 0;
    }
    if (j)
        return 1;
    return 1;
}

int TraverLinkList(LinkList L)
{
    if (L->next) {
        const char* Ev = "事件";
        const char* Ti = "时间";
        const char* Mp = "主要人物";
        printf("    %-15s%-15s%-15s\n", Ev, Ti, Mp);
        LinkList p = L->next;
        while (p) {
            printf("    %-15s%-15s%-15s\n", p->data.event, p->data.time, p-
>data.MainPeo);
            p = p->next;
        }
        return 1;
    }
    else printf("链表为空! \n");
    return 0;

}

int ModifyAcoYear(LinkList L)
{
    const char* Ev = "事件";
    const char* Ti = "时间";
    const char* Mp = "主要人物";
    char FindTime[20];
    printf("请输入年份 (如: 2000年) : ");
    scanf("%s", FindTime);

    LinkList p = L->next;
    int head = 1, j = 0;
    while (p) {
        if (strcmp(FindTime, p->data.time) == 0) {
            if (head == 1) {
                printf("    %-10s%-10s%-10s\n", Ev, Ti, Mp);
                head = 0;
            }
            printf("    %-10s%-10s%-10s\n", p->data.event, p->data.time, p-
>data.MainPeo);
            printf("请输入新的代表人物信息: ");
            char NewPeoInfo[20];
                scanf("%s", NewPeoInfo);
                strcpy(p->data.MainPeo, NewPeoInfo);
            j++;
        }
        p = p->next;
    }
    if (j == 0) {
        printf("你所查找的信息为空！\n");
        return 0;
    }
    if (j)
        return 1;
    return 1;
}

int ClearLink(LinkList L)
{
    LinkList p;
    while (L->next)
    {
        p = L->next;
        L->next = p->next;
        free(p);
    }
    printf("链表已清空！\n");
    return 1;
}

int main()
{
    LinkList L = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    LinkList R;
    int sta = 1;
    printf("--------------------------功能界面--------------------------\n");
    printf("--------------------------党史学习--------------------------\n");
    printf("    1. 初始化创建空链表；\n");
    printf("    2. 初始化后输入党史信息；\n");
    printf("    3. 输出全部党史信息；\n");
    printf("    4. 插入新的党史信息；\n");
    printf("    5. 根据代表名字，查找所有相关的历史信息并输出；\n");
    printf("    6. 根据输入的年份，修改代表人物信息；\n");
    printf("    7. 清空整张表信息；\n");
    printf("    8. 退出。\n");

    while (1)
    {
        int fun;
        printf("------------------------请输入功能对应数字：");
        scanf_s("%d", &fun);
        getchar();
        switch (fun)
        {
            case 1:
                InitLink(&L,&R);
                break;
            case 2:
                InsertLink(&L, &R);
                break;
            case 3:
                TraverLinkList(L);
                break;
            case 4:
                InsertLink(&L, &R);
                break;
            case 5:
                Getname(L);
                break;
            case 6:
                ModifyAcoYear(L);
                break;
            case 7:
                ClearLink(L);
                break;
            case 8:
                return 0;
                break;
            default:
                printf("输入错误，请重新输入！\n");
                break;
            }
            printf("\n");
    }
    return 0;
}
```

9.1.4. 学习强国

```
/*
*   采用单链表存储。存储信息为：学习强国中所列新思想或要闻。
*   具体包括：发布时间，内容标题，阅读量，点赞量。
*   完成功能：
*           1. 初始化创建空表；
*           2. 插入；
*           3. 删除；
*           4. 查找（按关键字）；
*           5. 输出
*           6. 排序
*   主函数中调用，顺序完成以下操作：
*           初始化空表；插入至少5条数据；
*           输出；按关键字查找（关键字可以根据表中信息自定义，比如，“冬奥”，“碳汇”等）；
*           输出；删除找到的信息；
*           输出；
*           按点赞量排序；
*           输出。
*/
/*  测试样例
    发布时间 内容标题 阅读量        点赞量
    0407        冬奥        123         111
    0408        抗疫        222         527
    0409        抗疫在行动  345         555
    0410        冬奥进行时  333         666
    0411        学习党史    567         444
    0504        五四运动 725        999
*/
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <locale.h>

typedef struct
{
    char time[10];
    char head[20];
    int read;
    int Like;
}Learn;

typedef struct node
{
    Learn data;
    struct node* next;
}LNode, * LinkList;

const char* Ti = "发布时间";
const char* He = "内容标题";
const char* Re = "阅读量";
const char* Li = "点赞量";
const char* po = "位置";

int Init(LinkList* L)
{
    *L = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    (*L)->next = NULL;
    printf("    创建成功!\n");
    return 1;
}

int Insert(LinkList* L)
{
    int n;
    printf("    Please input the number of the informtions:");
    scanf("%d", &n);
    int i;
    for (i = 0; i < n; i++)
    {
        LinkList s = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
        printf("    ");
        scanf("%s%s%d%d", &s->data.time, &s->data.head, &s->data.read, &s-
>data.Like);
        s->next = (*L)->next;
        (*L)->next = s;
    }
    printf("    Succeed!\n");
    return 1;
}
```

```
LinkList Pos(LinkList* L, LinkList s)
{
    LinkList p = *L;
    while (p->next != s) {
        p = p->next;
    }
    return p;
}

int Del(LinkList* L, int Dp)
{
    LinkList p = *L;
    int j = 0;
    while (p && j < Dp - 1) {
        p = p->next;
        j++;
    }

    LinkList q = p->next;
    p->next = q->next;
    free(q);
    return 1;

}

int sort(LinkList* L)
{
    LinkList p;
    p = (*L)->next;
    (*L)->next = NULL;
    while (p)
    {
        LinkList q = p->next;
        LinkList s = (*L);
        while (s->next != NULL && s->next->data.Like < p->data.Like) {
            s = s->next;
        }
        p->next = s->next;
        s->next = p;
        p = q;
    }
    return 1;
}

int Disp(LinkList L)
{
    printf("\n");
    LinkList p = L->next;
    printf("    %-15s%-15s%-15s%-15s%-15s\n", Ti, He, Re, Li, po);
    int j = 1;
    while (p)
    {
        printf("    %-15s%-15s%-15d%-15d%-15d\n", p->data.time, p->data.head, p-
>data.read, p->data.Like, j);
        p = p->next;
        j++;
    }
    printf("\n");
    return 1;
}

int Substring(char* main, char* sub)
{
    if (strstr(main, sub))
        return 1;
}

LinkList GetKeyWord(LinkList L)
{
    LinkList p = L->next;
    char keyword[100];
    printf("    请输入关键词: ");
    scanf("%s", keyword);
    int sta = 1;
    int j = 1;
    while (p) {
        if (Substring(p->data.head, keyword)) {
            if (sta == 1) {
                printf("    %-15s%-15s%-15s%-15s%-15s\n", Ti, He, Re, Li, po);
                sta = 0;
            }
            printf("    %-15s%-15s%-15d%-15d%-15d\n", p->data.time, p->data.head,
p->data.read, p->data.Like, j);

        }
        j++;
        p = p->next;

    }
    return p;
}

void PrintMenu()
{
    printf("\n");
    printf("        ******************************************\n");
    printf("        **************** 学习强国 ***************\n");
    printf("        ******************************************\n");
}

int Clear(LinkList* L)
{
    (*L)->next = NULL;
    printf("清空成功! \n");
    return 1;
}
```

```
int IsEmpty(LinkList L)
{
    if (L->next == NULL)
    {
        printf("链表为空! 请插入信息! \n");
        return 1;
    }
    else
        return 0;
}

int main()
{
    PrintMenu();
    LinkList L = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    LinkList R = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    LinkList Find = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    int sta = 1;
    printf("    1. 初始化\n");
    printf("    2. 插入信息\n");
    printf("    3. 输出\n");
    printf("    4. 按点赞量输出\n");
    printf("    5. 关键字查找并输出\n");
    printf("    6. 删除信息\n");
    printf("    7. 清空\n");
    printf("    8. 退出\n");
    printf("\n");
    while (1)
    {
        int fun;
        printf("  Input The Corresponding Number:");
        scanf("%d", &fun);
        getchar();
        switch (fun)
        {
            case 1:
                Init(&L);
                break;
            case 2:
                Insert(&L);
                break;
            case 3:
                IsEmpty(L);
                Disp(L);
                break;
            case 4:
                IsEmpty(L);
                sort(&L);
                Disp(L);
                break;
            case 5:
                IsEmpty(L);
                GetKeyWord(L);
                int yn;
                printf("    要删除吗? (1/0)");
                scanf("%d", &yn);
                while (yn) {
                    int Dp;
                    printf("    请输入要删除的位置");
                    scanf("%d", &Dp);
                    Del(&L, Dp);
                    int YN;
                    printf("    继续吗? (1/0)\n     ");
                    scanf("%d", &YN);
                    printf("\n");
                    if (YN == 1)
                        continue;
                    else if (YN == 0)
                        break;
                }
                break;
            case 6:
                IsEmpty(L);
                int D;
                printf("    请输入要删除的位置:");
                scanf("%d", &D);
                Del(&L, D);
                printf("\n");
                break;
            case 7:
                Clear(&L);
                printf("\n");
                break;
            case 8:
                return 0;
            default:
                printf("ERROR!\n");
                break;
        }
    }
    return 0;
}
```

9.1.5. 集合及其运算

```
/*
*       Q2: 整数集合用单链表实现存储, 实现如下操作: (30分)
*         (1) 初始化集合
*         (2) 插入一个数到集合指定位置
*         (3) 按值删除集合中的元素
*         (4) 按值在集合中进行查找
*         (5) 清空集合
*         (6) 求两个集合的交集
*         (7) 求两个集合的并集
*         (8) 求两个集合的差集
*        (9) 输出集合
*/
/*
    测试样例
        初始化 5 2 7 3 3 6 4 9 7 0 8 1 6
        LA: 1 9 9 1 27 8 16 2 3 5 7 7 0 0
        LB: 2  2357 3 0 57 8 52 8 8 8
*/
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <iostream>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

typedef struct node
{
    int data;
    struct node* next;
}LNode, * LinkList;


int InitLink(LinkList* L, LinkList R)
{
    if ((*L) == NULL)
        return 0;

    (*L)->next = NULL;
    printf("创建空表成功!\n");
    return 1;
}

int InsertLink(LinkList* L, LinkList R)
{
    int n;
    LinkList Rear = (*L);
    printf("请输入要插入个数: ");
    scanf("%d", &n);
    int i;
    for (i = 0; i < n; i++) {
        LinkList s = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
        scanf("%d", &s->data);
        s->next = NULL;
        Rear->next = s;
        Rear = s;
    }
    return 1;
}

int DeleteLinkPos(LinkList* L)
{
    int e;
    printf("请输入要删除的值: ");
    scanf("%d", &e);
    LinkList p = (*L)->next;
    LinkList q = p->next;
    while (q) {
        if (q->data == e) {
            p->next = q->next;
            free(q);
            q = p->next;
        }
        else {
            p = p->next;
            q = q->next;
        }
    }
    return 1;
}

int GetPosAcoNum(LinkList L)
{
    LinkList p = L->next;
    int e;
    printf("请输入要查找的值:");
    scanf("%d", &e);
    int sta = 1;
    int pos = 1;
    while (p)
    {
        if (p->data == e) {
            if (sta = 1) {
                printf("    该元素出现在");
                sta = 0;
            }
            printf("位置%d", pos);
        }
        pos++;
        p = p->next;
    }
    if (sta == 1) {
        printf("查无此数! \n");
        return 0;
    }
    printf("\n");
    return 1;
}

int InsertLinkPos(LinkList* L)
{
    int i;
    printf("请输入要插入的位置: ");
    scanf("%d", &i);
    int j = 1;
    LinkList p = (*L)->next;
    while ( p && j < i-1 ) {
        p = p->next;
        ++j;
    }
    if (!p)
        return 0;

    LinkList s = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    int e;
    printf("请输入要插入的数：");
    scanf("%d", &e);
    s->data = e;
    s->next = p->next;
    p->next = s;
    return 1;
}

int ClearLink(LinkList L)
{
    LinkList p;
    while (L->next)
    {
        p = L->next;
        L->next = p->next;
        free(p);
    }
    printf("链表已清空！\n");
    return 1;
}

int TraverLinkList(LinkList L)
{
    if (L->next) {
        LinkList p = L->next;
        while (p) {
            printf("%d ", p->data);
            p = p->next;
        }
        printf("\n");
        return 1;
    }
    else printf("链表为空！\n");
    return 0;

}

int SortLink(LinkList* L)
{
    LinkList p = (*L)->next;
    (*L)->next = NULL;

    while(p) {
        LinkList s;
        LinkList q;
        s = (*L);
        q = p->next;
        while (s->next && s->next->data < p->data) {
            s = s->next;
        }
        p->next = s->next;
        s->next = p;
        p = q;
    }
    return 1;
}

int SortAndDelReapted(LinkList L)
{
    LinkList p, q;
    p = L->next;
    q = p->next;
    while (p && q)
    {
        if (p->data == q->data)
        {
            p->next = q->next;
            free(q);
            q = p->next;
        }
        else
        {
            p = q;
            q = p->next;
        }

    }
    return 1;
}

int Intersection(LinkList LA, LinkList LB)
{
    LinkList LC = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    LC->next = NULL;
    LinkList pc = LC;
    LinkList pa = LA->next;
    LinkList pb = LB->next;
    while (pa && pb) {
        if (pa->data < pb->data) {
            pa = pa->next;
        }
        else if (pa->data > pb->data) {
            pb = pb->next;
        }
        else {
            LinkList s = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
            s->data = pa->data;
            s->next = pc->next;
            pc->next = s;
            pc = s;
            pa = pa->next;
            pb = pb->next;
        }
    }

    printf("集合Set_A为: \n");
    printf("        ");
    TraverLinkList(LA);
    printf("集合Set_B为: \n");
    printf("        ");
    TraverLinkList(LB);
    printf("集合Set_A与Set_B的交集为: \n");
    printf("        ");
    TraverLinkList(LC);
    return 1;
}

int Union(LinkList LA, LinkList LB)
{
    LinkList LC = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    LC->next = NULL;
    LinkList pc = LC;
    LinkList pa = LA->next;
    LinkList pb = LB->next;
    while (pa && pb) {
        if (pa->data < pb->data) {
            LinkList s = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
            s->data = pa->data;
            s->next = pc->next;
            pc->next = s;
            pc = s;
            pa = pa->next;
        }
        else if (pa->data > pb->data) {
            LinkList s = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
            s->data = pb->data;
            s->next = pc->next;
            pc->next = s;
            pc = s;
            pb = pb->next;
        }
        else {
            LinkList s = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
            s->data = pa->data;
            s->next = pc->next;
            pc->next = s;
            pc = s;
            pa = pa->next;
            pb = pb->next;
        }
    }
    if (pa)
        pc->next = pa;
    if (pb)
        pc->next = pb;
    printf("集合Set_A为: \n");
    printf("        ");
    TraverLinkList(LA);
    printf("集合Set_B为: \n");
    printf("        ");
    TraverLinkList(LB);
    printf("集合Set_A与Set_B的并集为: \n");
    printf("        ");
    TraverLinkList(LC);
    return 1;
}

int Complement(LinkList LA, LinkList LB)
{
    LinkList LC = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    LC->next = NULL;
    LinkList pc = LC;
    LinkList pa = LA->next;
    LinkList pb = LB->next;
    while (pa&&pb) {
        if (pa->data == pb->data) {
            pa = pa->next;
            pb = pb->next;
        }
        else if (pa->data < pb->data) {
            LinkList s = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
            s->data = pa->data;
            s->next = pc->next;
            pc->next = s;
            pc = s;
            pa = pa->next;
        }
        else if (pa->data > pb->data) {
            pb = pb->next;
        }
    }
    if (pa)
        pc->next = pa;


    printf("集合Set_A为: \n");
    printf("        ");
    TraverLinkList(LA);
    printf("集合Set_B为: \n");
    printf("        ");
    TraverLinkList(LB);
    printf("集合Set_A与Set_B的差集为: \n");
    printf("        ");
    TraverLinkList(LC);
    return 1;
}

int main()
{
    LinkList LA = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    LinkList LB = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    LinkList LC = (LinkList)malloc(sizeof(LNode));
    LinkList Ra = LA;
    LinkList Rb = LB;
    printf("--------------------------功能界面--------------------------\n");
    printf("------------------------集合极其运算------------------------\n");
    printf("    1. 初始化创建空集合; \n");
    printf("    2. 初始化后输入集合元素; \n");
    printf("    3. 输出全部集合元素; \n");
    printf("    4. 插入一个数到集合指定位置; \n");
    printf("    5. 按值删除集合中的元素; \n");
    printf("    6. 按值在集合中进行查找; \n");
    printf("    7. 清空集合; \n");
    printf("    8. 进行集合运算; \n");
    printf("    9. 求两个集合的交集; \n");
    printf("    10.求两个集合的并集; \n");
    printf("    11.求两个集合的差集; \n");
    printf("    0. 退出。\n");

    while (1)
    {
        int fun;
        printf("------------------------请输入功能对应数字: ");
        scanf_s("%d", &fun);
        getchar();
        switch (fun)
        {
            case 1:
                InitLink(&LA, Ra);
                break;
            case 2:
                InsertLink(&LA, Ra);
                break;
            case 3:
                TraverLinkList(LA);
                break;
            case 4:
                InsertLinkPos(&LA);
                break;
            case 5:
                DeleteLinkPos(&LA);
                break;
            case 6:
                GetPosAcoNum(LA);
                break;
            case 7:
                ClearLink(LA);
                break;
            case 8:
                InitLink(&LA, Ra);
                printf("    输入Set_A的元素: \n");
                InsertLink(&LA, Ra);
                SortLink(&LA);
                printf("                ");
                TraverLinkList(LA);

                InitLink(&LB, Rb);
                printf("    输入Set_B的元素: \n");
                InsertLink(&LB, Rb);
                SortLink(&LB);
                printf("                ");
                TraverLinkList(LB);
                break;
            case 9:
                Intersection(LA, LB);
                break;
            case 10:
                SortAndDelReapted(LA);
                SortAndDelReapted(LB);
                Union(LA, LB);
                break;
            case 11:
                SortAndDelReapted(LA);
                SortAndDelReapted(LB);
                Complement(LA, LB);
                break;
            case 0:
                return 0;
                break;
            default:
                printf("输入错误, 请重新输入! \n");
                break;
            }
            printf("\n");
    }
    return 0;
}
```

9.1.6. 双向循环链表实验

```
/*
*       Q3: 整数序列保存在双向链表中, 实现如下操作: (20分)
*        (1) 创建;
*        (2) 遍历输出;
*        (3) 按值查找;
*        (4) 按位序插入;
*        (5) 按位序删除;
*/
/*
    测试样例
        初始化 5 2 7 3  3  6  4  9 7 0 8 1 6      13个
               1 9 9 1  27 8  16 2 3 5 7 7        12个
               2 3 0 57 8  52 8  8 8 0 0 2357     12个
*/
```

```
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <iostream>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <iostream>

typedef struct DulNode
{
    struct DulNode* prior;
    int data;
    struct DulNode* next;
}DulNode, *DuLinkList;

int InitDuLinkList(DuLinkList* L)
{
    *L = (DuLinkList)malloc(sizeof(DulNode));
    if (*L == NULL) {
        printf("申请空间失败! \n");
            exit(0);
    }
    (*L)->next = (*L)->prior = *L;
    printf("创建空表成功!\n");
    return 1;
}

int InputDuLink(DuLinkList L)
{
    DuLinkList p = L;
    int n;
    printf("请输入个数: ");
    scanf("%d", &n);
    int i;
    for (i = 0; i < n ; i++) {
        DuLinkList s = (DuLinkList)malloc(sizeof(DulNode));
        scanf("%d", &s->data);
        s->next = p->next;      //后继
        p->next = s;
        s->prior = p;           //前驱
        p->next->prior = s;
        p = p->next;
    }
    return 1;
}

int GetPosAcoNum(DuLinkList L)
{
    DuLinkList p = L->next;
    int e;
    printf("请输入要查找的值:");
    scanf("%d", &e);
    int sta = 1;
    int pos = 1;
    while (p->next!=L)
    {
        if (p->data == e) {
            if (sta = 1) {
                printf("    该元素出现在");
                sta = 0;
            }
            printf("位置%d", pos);
        }
        pos++;
        p = p->next;
    }
    if (sta == 1) {
        printf("查无此数！\n");
        return 0;
    }
    printf("\n");
    return 1;
}

int DisDuLink(DuLinkList L)
{
    DuLinkList p = L->next;
    while (p->next != L->next) {
        printf("%d ", p->data);
        p = p->next;
    }
    return 1;
}

int DuDelete(DuLinkList L)
{
    DuLinkList p = L;
    int j = 0;
    int i;
    printf("请输入要删除的位置：");
    scanf("%d", &i);

    while (p->next != L && j < i - 1) {
        p = p->next;
        ++j;
    }

    if (j<i - 1 || j >i - 1){
        printf("链表为空或位置不合理！\n");
        return 0;
    }

    DuLinkList q = p->next;
    p->next = q->next;
    q->next->prior = p;
    free(q);
    return 1;
}
```

```
int DuInsert(DuLinkList L)
{
    DuLinkList p = L;        //临时指针，指向头结点
    DuLinkList New_p;        //用于指向新节点
    int j = 0;
    int i;
    printf("请输入要插入的位置：");
    scanf("%d", &i);

    while (p->next != L && j < i - 1) {
        p = p->next;
        j++;
    }

    if (j<i - 1 || j>i - 1) {
        printf("位置不合理！\n");
        return 0;
    }

    int e;
    printf("请输入要插入的数：");
    scanf("%d", &e);
    DuLinkList s = (DuLinkList)malloc(sizeof(DulNode));
    s->data = e;

    s->next = p->next;       //后继
    p->next = s;

    s->prior = p;            //前驱
    p->next->prior = s;
    return 1;
}

int main()
{
    DuLinkList L = (DuLinkList)malloc(sizeof(DulNode));
    printf("--------------------------功能界面--------------------------\n");
    printf("------------------------双向循环链表------------------------\n");
    printf("    1. 初始化；\n");
    printf("    2. 初始化后输入元素；\n");
    printf("    3. 遍历输出；\n");
    printf("    4. 按值查找；\n");
    printf("    5. 按位序插入；\n");
    printf("    6. 按位序删除；\n");
    printf("    0. 退出。\n");

    while (1)
    {
        int fun;
        printf("------------------------请输入功能对应数字：");
        scanf_s("%d", &fun);
        getchar();
        switch (fun)
        {
            case 1:
                InitDuLinkList(&L);
                break;
            case 2:
                InputDuLink(L);
                break;
            case 3:
                printf("\n");
                printf("        ");
                DisDuLink(L);
                printf("\n");
                break;
            case 4:
                printf("\n");
                GetPosAcoNum(L);

                break;
            case 5:
                printf("\n");
                DuInsert(L);

                break;
            case 6:
                printf("\n");
                DuDelete(L);

                break;
            case 0:
                return 0;
                break;
            default:
                printf("\n");
                printf("输入错误，请重新输入！\n");
                break;
        }
        printf("\n");
    }
    return 0;
}
```

9.2. 栈的应用

9.2.1. 进制转换

```
//十进制转八进制
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <iostream>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
```

```
typedef struct StackNode
{
    int data;
    struct StackNode * next;
}SNode, *LinkStack;

int Push(LinkStack* S, int e)
{
    LinkStack s = new SNode;
    s->data = e;
    s->next = *S;
    *S = s;
    return 1;
}

int Pop(LinkStack* S)
{
    LinkStack p = *S;
    int e;
    if (p == NULL)
        return 0;
    *S = p->next;
    e = p->data;
    free(p);
    return e;
}

int main()
{
    LinkStack S = NULL;
    int Ten;
    printf("请输入十进制数字：");
    scanf("%d", &Ten);
    int temp, In;
    while (Ten) {
        In = Ten / 8;
        temp = Ten % 8;
        Push(&S, temp);
        Ten = In;
    }
    printf("转化为八进制的结果为：");
    LinkStack p = S;
    while (p)
    {
        p = p->next;
        printf("%d", Pop(&S));
    }
    return 1;
}
```

9.2.2. 括号匹配

```
/*
*      写程序，实现括号匹配（提示：首先定义并实现顺序栈）；
*/
/*  测试样例
        样例1     (){}[]
        样例2     {[()]}
        样例3     {{{{{{}2727()()][]
        样例4     {654*8-96+454}*(666-66)
        样例5     [[]]{{{}}}(({{[]}}))
*/
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <iostream>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

                                //定义并实现顺序栈
typedef struct Stack{
    char Bracket[100];
    int top = -1;
    int StackSize = 100;
}Sqstack;

int Empty(Sqstack S) {
    if (S.top == -1)
        return 1;
    else return 0;
}

int Push(Sqstack *S, char bra) {
    if  (S->StackSize == S->top + 1)
        return 0;
    S->top++;
    S->Bracket[S->top] = bra;
    return 1;
}

char Pop(Sqstack *S) {
    char e;
    if (S->top == -1)
        return 0;
    else {
        e = S->Bracket[S->top--];
        return e;
    }
}

char GetTop(Sqstack S) {
    if (S.top == -1)
        return 0;
    return S.Bracket[S.top];
}
```

```
                                //定义并实现顺序栈

void PrintMenu()
{
    printf("        ******************************************\n");
    printf("        *               括号匹配                *\n");
    printf("        ******************************************\n");
}

int main()
{
    PrintMenu();
    char arr[100];
    while (1)
    {
        printf("-----------请输入一串字符，包含括号：\n");
        scanf("%s", arr);
        Sqstack S;
        int i;
        int state = 0;
        for (i = 0; i < 100 && arr[i] != '\0'; i++) {
            if (arr[i] == '{' || arr[i] == '(' || arr[i] == '[') {
                Push(&S, arr[i]);
                state++;
            }
            if (arr[i] == ')') {
                if (GetTop(S) == '(') {
                    Pop(&S);
                }
                else {
                    break;
                }
            }
            if (arr[i] == ']') {
                if (GetTop(S) == '[') {
                    Pop(&S);
                }
                else {
                    break;
                }
            }
            if (arr[i] == '}') {
                if (GetTop(S) == '{') {
                    Pop(&S);
                }
                else {
                    break;
                }
            }
        }
        if (Empty(S) && state) {
            printf("匹配！\n");
        }
        else {
            printf("不匹配! \n");
        }
        int YN;
        printf("继续吗? (1/0)\n");
        scanf("%d", &YN);
        printf("\n");
        if (YN == 1)
            continue;
        else if (YN == 0)
            return 0;
    }
}
```

9.2.3. 回文判断

```
/*
*       Q1: 写程序, 进行回文判断 (要求: 定义链队和链栈) ;
*/
/*  测试样例
        样例1     11111111111
        样例2     12321
        样例3     asc12321cba
        样例4     !@!@!@!@!
        样例5     d5z2q7q2z5d
        样例6     !@#$%^&*()(*&^%$#@!
        样例7     _+{}:"<><":}{+_
        样例7     [];',./.,';][
        样例8     /*-+-*/
//      样例9     ...qaq...
//      样例10    @!=!@
//

#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <iostream>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

                                                        //链栈操作
typedef struct StackNode
{
    char data;
    struct StackNode* next;
}SNode, * LinkStack;

int InitLinkStack(LinkStack* S)
{
    *S = NULL;
    return 1;
}
```

```c
int IsLinkStackEmpty(LinkStack S)
{
    if (S == NULL)
        return 1;
    else
        return 0;
}

int LinkStackLength(LinkStack S)
{
    int j = 0;
    LinkStack p = S;
    while (p) {
        p = p->next;
        j++;
    }
    return j;
}

char GetLinkStackTop(LinkStack S)
{
    if (S == NULL)
        return 0;
    return S->data;
}

int PushLinkStack(LinkStack* S, char c)
{
    LinkStack p = (LinkStack)malloc(sizeof(SNode));
    if (p == NULL)
        return 0;
    p->data = c;
    p->next = *S;
    *S = p;
    return 1;
}

int PopLinkStack(LinkStack* S)
{
    LinkStack p = *S;
    if (p == NULL)
        return 0;
    *S = p->next;
    free(p);
    return 1;
}

int ClearLinkStack(LinkStack* S) {
    LinkStack p = (*S)->next;
    while (p) {
        p = p->next;
        PopLinkStack(S);
    }
    return 1;
}

                                                        //链队操作

typedef struct QNode
{
    char data;
    struct QNode* next;
}QNode, * QueuePtr;

typedef struct
{
    QueuePtr front;
    QueuePtr rear;
}LinkQueue;

int InitQueue(LinkQueue* Q)
{
    Q->front = Q->rear = (QueuePtr)malloc(sizeof(QNode));
    if (!Q->front)
        exit(0);
    Q->front->next = NULL;
    return 1;
}

int LinkQueueLength(LinkQueue Q) {
    QueuePtr p = Q.front->next;
    int n = 0;
    if (Q.front == Q.rear)
        return 0;
    while (p) {
        n++;
        p = p->next;
    }
    return n;
}

char GetLinkQueueTop(LinkQueue Q)
{
    if (Q.front == Q.rear)
        return 0;
    return  Q.front->next->data;;
}

int AppendQueue(LinkQueue* Q, char e)
{
    QueuePtr p = (QueuePtr)malloc(sizeof(QNode));
    if (!p)
        exit(0);
    p->data = e;
    p->next = NULL;
    Q->rear->next = p;
    Q->rear = p;
    return 1;
```

```c
}

int DeQueue(LinkQueue* Q)
{
    if (Q->front == Q->rear)
        return 0;
    QueuePtr p = Q->front->next;
    Q->front->next = p->next;

    if (Q->rear == p)
        Q->rear = Q->front;

    free(p);
    return 1;
}

int ClearQueue(LinkQueue *Q)
{
    Q->front = Q->rear;
    return 1;
}

                                                      //判断回文
int Palindrome(LinkStack S, LinkQueue Q)
{
    if (LinkStackLength(S) != LinkQueueLength(Q))
        return 0;
    while (!IsLinkStackEmpty(S))
    {
        char e1, e2;
        if (GetLinkStackTop(S) != GetLinkQueueTop(Q))
            return 0;
        else {
            PopLinkStack(&S);
            DeQueue(&Q);
        }
    }
    return 1;
}

void PrintMenu()
{
    printf("\n");
    printf("        ******************************************\n");
    printf("        *                回文判断                *\n");
    printf("        ******************************************\n");
}

int main()
{
    PrintMenu();
    while (1) {
        LinkStack S;
        LinkQueue Q;
        InitLinkStack(&S);
        InitQueue(&Q);
        printf("        请输入一串字符: ");
        char P[50];
        int i;
        scanf("%s", P);
        for (i = 0; P[i] != '\0'; i++) {
            PushLinkStack(&S, P[i]);
            AppendQueue(&Q, P[i]);
        }
        if (Palindrome(S, Q))
            printf("    ——————————%s是回文数! \n",P);
        else
            printf("    ——————————%s不是回文数! \n",P);

        int YN;
        printf("    继续吗? (1/0)\n     ");
        scanf("%d", &YN);
        printf("\n");
        if (YN == 1)
            continue;
        else if (YN == 0)
            return 0;
    }
}
```

9.2.4. 表达式求值

```
/*
*       Q3: 写程序, 实现表达式求值
*           基本要求: 操作数为1位整数;
*           高阶要求: 操作数为实数。
*/
/*  测试样例
    1+2+3#
    1.1+2.2+3.3#
    1+2-3#
    -2+3.1#
    -5.27*2+3.14*5#
    6+1/0#
    2.7+(-5*2.1+4)#
    8.16/5.27+19.91-20.03/3.06+(-7.25*2)#
*/
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
#include <iostream>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

typedef struct StackNode
{
    char data;
    struct StackNode* next;
}SNode, * LinkStack;

typedef struct NumStack
{
    float data;
    struct NumStack* next;
}NSNode, *NumLinkStack;

int InitLinkStack(LinkStack* S)
{
    *S = NULL;
    return 1;
}

int InitLinkStack2(NumLinkStack* S)
{
    *S = NULL;
    return 1;
}

int IsLinkStackEmpty(LinkStack S)
{
    if (S == NULL)
        return 1;
    else
        return 0;
}

int IsLinkStackEmpty2(NumLinkStack S)
{
    if (S == NULL)
        return 1;
    else
        return 0;
}

char GetLinkStackTop(LinkStack S)
{
    if (S == NULL)
        return 0;
    return S->data;
}

float GetLinkStackTop2(NumLinkStack S)
{
    if (S == NULL)
        return 0;
    return S->data;
}

int LinkStackLength(LinkStack S)
{
    int j = 0;
    LinkStack p = S;
    while (p) {
        p = p->next;
        j++;
    }
    return j;
}

int LinkStackLength2(NumLinkStack S)
{
    int j = 0;
    NumLinkStack p = S;
    while (p) {
        p = p->next;
        j++;
    }
    return j;
}

int PushLinkStack(LinkStack* S,char e)
{
    LinkStack p = (LinkStack)malloc(sizeof(SNode));
    if (p == NULL)
        return 0;
    p->data = e;
    p->next = *S;
    *S = p;
    return 1;
}

int PushLinkStack2(NumLinkStack* S, float e)
{
    NumLinkStack p = (NumLinkStack)malloc(sizeof(NSNode));
    if (p == NULL)
        return 0;
    p->data = e;
    p->next = *S;
    *S = p;
    return 1;
}

int PopLinkStack(LinkStack* S)
{
    LinkStack p = *S;
    if (p == NULL)
        return 0;
    *S = p->next;
    free(p);
    return 1;
}

int PopLinkStack2(NumLinkStack* S)
{
    NumLinkStack p = *S;
    if (p == NULL)
        return 0;
    *S = p->next;
    free(p);
    return 1;
}

int TraversLinkStack(LinkStack S)
{
    if (S == NULL) {
        printf("栈空! ");
        return 0;
    }
    while (S) {
        printf("%c", S->data);
        S = S->next;
    }
    return 1;
}

int TraversLinkStack2(NumLinkStack S)
{
    if (S == NULL) {
        printf("栈空! ");
        return 0;
    }
    while (S) {
        printf("%.2f ", S->data);
        S = S->next;
    }
    return 1;
}

char Prior(char theta1, char theta2)
{
    int i, j;
    char pri[7][7] = {//  +   -   *   /   (   )   #
                        {'>','>','<','<','<','>','>'},
                        {'>','>','<','<','<','>','>'},
                        {'>','>','>','>','<','>','>'},
                        {'>','>','>','>','<','>','>'},
                        {'<','<','<','<','<','=','0'},
                        {'>','>','>','>','0','>','>'},
                        {'<','<','<','<','<','0','='} };

    switch (theta1) {
                        case '+': i = 0; break;
                        case '-': i = 1; break;
                        case '*': i = 2; break;
                        case '/': i = 3; break;
                        case '(': i = 4; break;
                        case ')': i = 5; break;
                        case '#': i = 6; break;
    }

    switch (theta2) {
                        case '+': j = 0; break;
                        case '-': j = 1; break;
                        case '*': j = 2; break;
                        case '/': j = 3; break;
                        case '(': j = 4; break;
                        case ')': j = 5; break;
                        case '#': j = 6; break;
    }
    return pri[i][j];
}

int IsOPRT(char c)
{
    if (c == '+' || c == '-' || c == '*' || c == '/' || c == '(' || c == ')' || c
== '#')
        return 1;
    else return 0;
}

int IsNum(char c)
{
    switch (c)
    {
        case '0':
        case '1':
        case '2':
        case '3':
        case '4':
        case '5':
        case '6':
        case '7':
        case '8':
        case '9':
            return 1;
        default:
            return 0;
            break;
    }
    return 1;
}

float CCLT(float left, float right, char operators)
{
    switch (operators)
    {
        case '+':
            return  left + right;
        case '-':
            return left - right;
        case '*':
            return float(left * right);
        case '/':
            if (right != 0)
                return float(left / right);
            else
            {
                printf("Divisor can not Be zero!\n");
                return 0;
            }
    }
    return 1;
}

float CCLT2(float left, float right, char operators)
{
    switch (operators)
    {
        case '+':
            return  1;
        case '-':
            return 1;
        case '*':
            return 1;
        case '/':
            if (right != 0)
                return 1;
            else
            {
                return 0;
            }
    }
    return 1;
}

void PrintMenu()
{
    printf("\n");
    printf("        ******************************************\n");
    printf("        *************** 实数范围内 ***************\n");
    printf("        *************** 表达式求值 ***************\n");
    printf("        ******************************************\n");
    printf("\n");
}

float CtoN(char c)
{
    if (IsNum(c))
        return float(c - '0');
    return 0;
}

int main()
{
    PrintMenu();
    while (1)
    {
        NumLinkStack Num;
        LinkStack Oprt;
        InitLinkStack2(&Num);
        InitLinkStack(&Oprt);
        PushLinkStack(&Oprt, '#');
        printf("    请输入运算表达式，以'#'结束！\n\n");
        printf("    ");
        char Expression[100];
        scanf("%s", Expression);
        printf("    \n");
        int j = 0;
        int pan = 1;
        while ( pan &&(Expression[j] != '#' || GetLinkStackTop(Oprt) != '#')) {

            if (!IsOPRT(Expression[j])) {
                float sumIn = 0;
                float sumDe = 0;
                float temp = 1;

                do {
                    sumIn *= 10;
                    sumIn += CtoN(Expression[j]);
                    j++;
                } while (IsNum(Expression[j]));

                if (Expression[j] == '.') {
                    j++;
                    float power = 1;
                    do {
                        power /= 10;
                        sumDe += power * CtoN(Expression[j]);
                        j++;
                    } while (IsNum(Expression[j]));
                }
                PushLinkStack2(&Num, (float)(sumIn + sumDe));
                printf("    运算符栈: ");
                TraversLinkStack(Oprt);
                printf(" ");
                printf("        运算数栈: ");
                TraversLinkStack2(Num);
                printf("\n");
            }
            else {
                switch (Prior(Oprt->data, Expression[j]))
                {
                    case '<':
                        PushLinkStack(&Oprt, Expression[j]);
                        printf("    运算符栈: ");
                        TraversLinkStack(Oprt);
                        printf(" ");
                        printf("        运算数栈: ");
                        TraversLinkStack2(Num);
                        printf("\n");
                        break;
                    case '=':
                        PopLinkStack(&Oprt);
                        printf("    运算符栈: ");
                        TraversLinkStack(Oprt);
                        printf(" ");
                        printf("        运算数栈: ");
                        TraversLinkStack2(Num);
                        printf("\n");
                        break;
                    case '>':
                        char Op = GetLinkStackTop(Oprt);
                        PopLinkStack(&Oprt);
                        float rigth = GetLinkStackTop2(Num);
                        PopLinkStack2(&Num);
                        float left = GetLinkStackTop2(Num);
                        PopLinkStack2(&Num);
                        pan = CCLT2(left, rigth, Op);
                        PushLinkStack2(&Num, CCLT(left, rigth, Op));
                        if (!pan) {
                            printf("输入不合法! \n");
                            PushLinkStack2(&Num, 0.00000);
                        }
                        printf("    运算符栈: ");
                        TraversLinkStack(Oprt);
                        printf(" ");
                        printf("        运算数栈: ");
                        TraversLinkStack2(Num);
                        printf("\n");
                        j--;
                        break;
                }
                j++;
            }
        /*  if (j >= strlen(Expression))
                break;*/
        }
        printf("\n");
        printf("    %s结果为: %.2f\n\n", Expression, GetLinkStackTop2(Num));

        printf("    继续吗? (1/0)\n");
        int YN;
        scanf("%d", &YN);
        if (YN == 1)
            continue;
        if (YN == 0)
            return 0;
    }
}
```

9.3. 队列的应用

9.3.1. 舞伴问题

9.3.2. 排队模拟问题

9.3.3. 求二项式系数

9.3.4. 无冲突子集的划分

```
//创建哈夫曼树的算法
void huff_tree(HufTree ht, int w[], int n)
{
    int i, s1, s2;
    for (i = 1; i < 2 * n; i++)
    {
        if (i >= 1 && i <= n)ht[i].weight = w[i - 1];
        else ht[i].weight = 0;
        ht[i].parent = 0;
        ht[i].lch = 0;
        ht[i].rch = 0;
    }
    for (i = n + 1; i < 2 * n; i++)
    {
        select(ht, n, &s1, &s2);
        ht[i].weight = ht[s1].weight + ht[s2].weight;
        ht[i].lch = s1; ht[i].rch = s2;
        ht[s1].parent = i; ht[s2].parent = i;
    }
}

void select(HufTree ht, int n, int* s1, int* s2)
{
    int i, min;
    for (min = 100, i = 1; i < 2 * n; i++)
    {
        if (ht[i].parent == 0 && ht[i].weight != 0 && ht[i].weight < min)
        {
            min = ht[i].weight;
            *s1 = i;
        }
    }//for
    for (min = 100, i = 1; i < 2 * n; i++)
    {
        if (ht[i].parent == 0 && ht[i].weight != 0 && i != *s1 && ht[i].weight <
min)
        {
            min = ht[i].weight;
            *s2 = i;
        }
    }//for
}

//哈夫曼树类型
```

```
#define n
#define m 2*N-1
typedef struct
{
    char data;
    int weight;
    int parent, lch, rch;
}HufNodeType, *HufTree;

//哈夫曼编码的创建
char ** huf_code(HufTree ht,int n)
{
    char *cd, **hcd;
    int i, start, c, f;
    hcd = (char**)malloc((n+1)*sizeof(char*));
    cd = (char*)malloc(n*sizeof(char));
    for(i = 1; i<=n; i++)
    {
        cd[n-1]='\0';
        start = n-1;
        c = i;
        f = ht[c].parent;
        while (f)
        {
            if (ht[f].lch == c)
            cd[--start] = '0';
            else
            cd[--start] = '1';
            c = f;
            f = ht[f],parent;
        }
        hcd[i] = (char*)malloc((n-start)*sizeof(char));
        strcpy(hud[i], &cd[start]);
    }
    return hcd;
}
```

```
int InsertTree(CSTree* T,char fa[], char ch[]){
    CSTree p=NULL,q,s;
    PreSearch(*T, fa, &p);
    if(p){
        s=(CSTree)malloc(sizeof(CSNode));
        strcpy(s->data,ch);
        s->firstchild=s->nextsibling= NULL;
        if(!p->firstchild)
            p->firstchild=s;
        else{
            q=p->firstchild;
            while(q->nextsibling)
                q=q->nextsibling;
                q->nextsibling=s;
        }
        return 1;
    }
    return 0;
}

void DeleteTree(CSTree* T,CSTree Fa, char ch[], int *find){
    CSTree p;
    if(*T){
        if(strcmp((*T)->data,ch)==0){
            p=*T;
            if(Fa!=NULL){
                if(Fa->nextsibling==*T)
                    Fa->nextsibling=(*T)->nextsibling;
                else if(Fa->firstchild==*T)
                    Fa->firstchild=(*T)->nextsibling;
            }
            p->nextsibling=NULL;
            PostDelete(p);
            if(Fa==NULL)
                *T=NULL;
            *find=1;
        }
        if(*find==0)DeleteTree(&(*T)->firstchild, *T, ch, find);
        if(*find==0)DeleteTree(&(*T)->nextsibling, *T, ch, find);
    }
}
void PostDelete(CSTree T){
    if(T){
        PostDelete(T->firstchild);
        PostDelete(T->nextsibling);
        free(T);
    }
}
```