



# 第三章 链表的实现与应用

主讲教师：同济大学电子与信息工程学院 陈宇飞  
同济大学电子与信息工程学院 龚晓亮

# 目录

- 链式结构的基本概念
- 单链表的基本操作
- 双向链表的基本操作
- 二叉搜索树

单链表



循环链表



双向链表





# 3.1 链式结构的基本概念

- 数组的不足

- 大小必须在定义时确定，导致空间浪费

是否可以按需分配空间

- 占用连续空间，导致小空间无法充分利用

是否可以充分利用不连续的空间

- 在插入/删除元素时必须前后移动元素

插入/删除时能否不移动元素

- 链表

不连续存放数据，用指针指向下一数据的存放地址



# 3.1 链式结构的基本概念

例：数据1， 2， 3， 4， 5， 分别存放在数组和链表中

存放5个元素：

数组： 连续的20字节

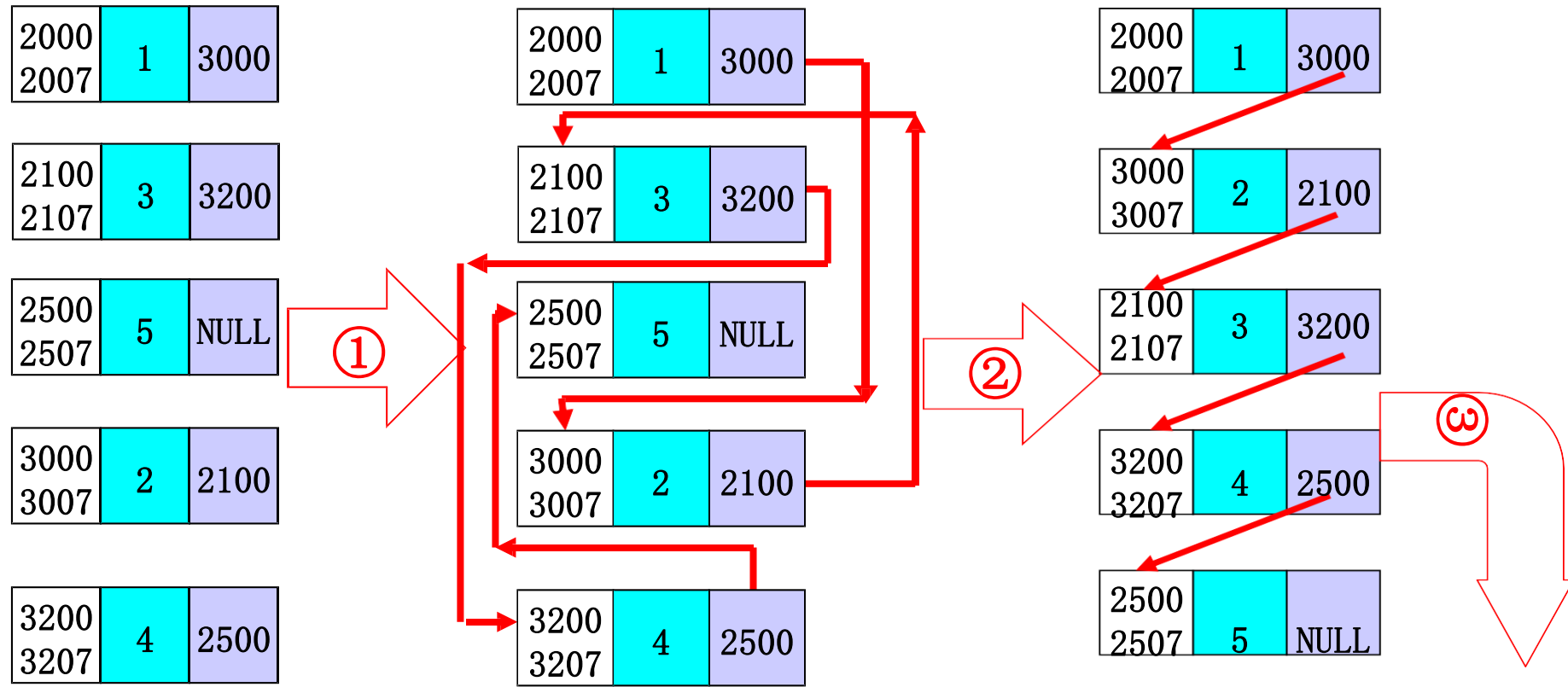
链表： 非连续的40字节 (每个结点的8字节连续)

数组

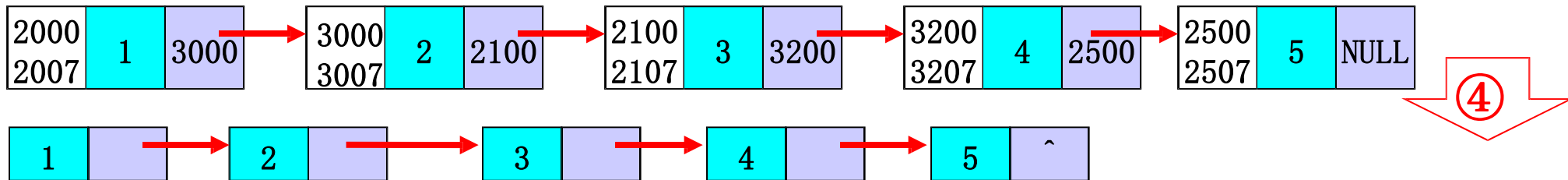
2000	1
2003	
2004	2
2007	
2008	3
2011	
2012	4
2015	
2016	5
2019	

链表

2000	1	3000
2007		
2100	3	3200
2107		
2500	5	NULL
2507		
3000	2	2100
3007		
3200	4	2500
3207		



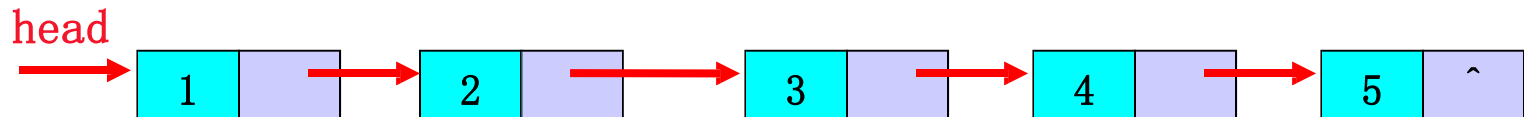
## 链表的表示方法:





# 3.1 链式结构的基本概念

- **结点**: 存放数据的基本单位
  - 数据域: 存放数据的值
  - 指针域: 存放下一个同类型结点的地址
- **链表**: 由若干结点构成的链式结构
- **表头结点**: 第一个结点
- **表尾结点**: 链表的最后一个结点, 指针域为NULL(空)
- **头指针**: 指向链表的表头结点的指针





# 3.1 链式结构的基本概念

```
struct student {  
    long num;  
    float score;  
    struct student *next;  
};
```



//指向结构体自身的指针成员类型  
不允许是自身的结构体类型，但可以  
是指针(因为指针占用空间已知)

```
int main()  
{  
    student a, b, c, *head, *p;  
    a.num = 31001; a.score=89.5;  
    b.num = 31003; b.score=90;  
    c.num = 31007; c.score=85;  
    head = &a; a.next = &b;  
    b.next = &c; c.next = NULL;  
    p=head;  
    do {  
        cout << p->num << " "  
             << p->score << endl;  
        p=p->next;  
    } while(p!=NULL);  
    return 0;  
}
```



# 3.1 链式结构的基本概念

student a, b, c, \*head, \*p;

a	2000 2011	?	?	(结点)
---	--------------	---	---	------

b	3000 3011	?	?	(结点)
---	--------------	---	---	------

c	2500 2511	?	?	(结点)
---	--------------	---	---	------

head	2100 2103	?
------	--------------	---

p	2200 2203	?
---	--------------	---





# 3.1 链式结构的基本概念

a. num = 31001; a. score=89.5;  
b. num = 31003; b. score=90;  
c. num = 31007; c. score=85;

a	2000 2011	31001 89.5	?	(结点)
---	--------------	---------------	---	------

b	3000 3011	31003 90	?	(结点)
---	--------------	-------------	---	------

c	2500 2511	31007 85	?	(结点)
---	--------------	-------------	---	------

head	2100 2103	?
p	2200 2203	?



# 3.1 链式结构的基本概念

```
head = &a; a.next = &b; b.next = &c; c.next = NULL;
```

a	2000 2011	31001 89.5	3000	(结点)
---	--------------	---------------	------	------

b	3000 3011	31003 90	2500	(结点)
---	--------------	-------------	------	------

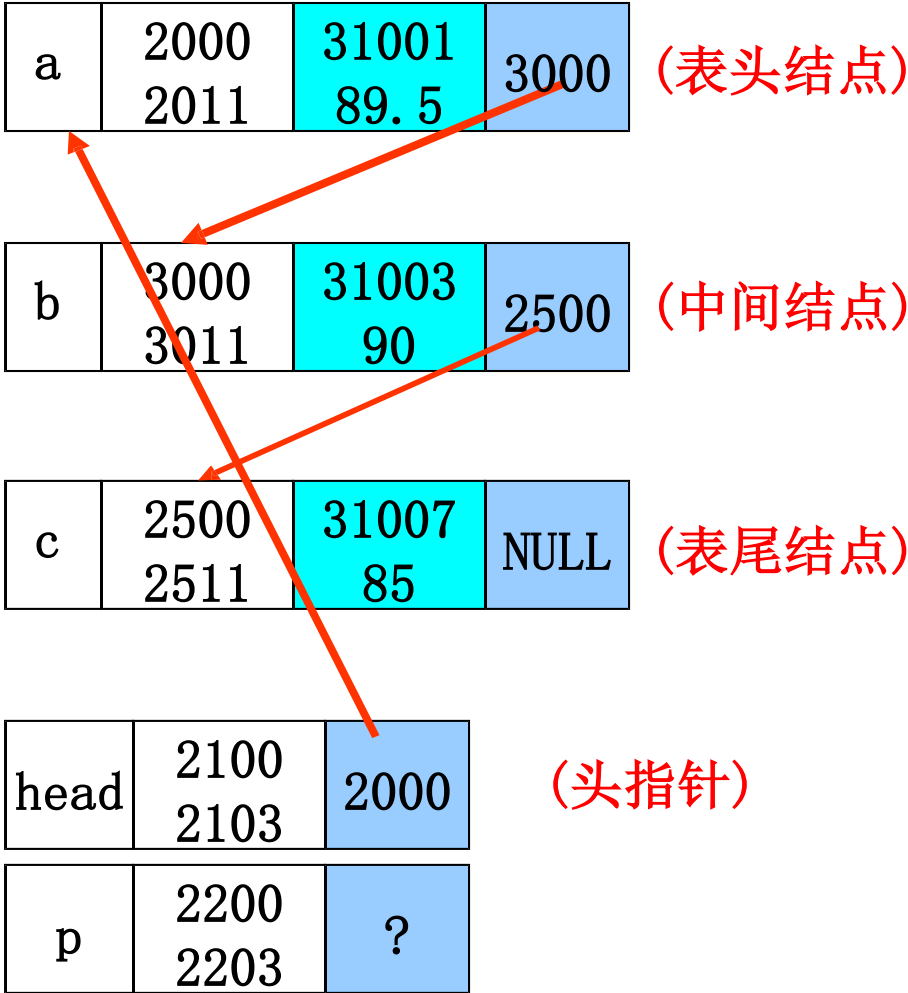
c	2500 2511	31007 85	NULL	(结点)
---	--------------	-------------	------	------

head	2100 2103	2000
p	2200 2203	?



# 3.1 链式结构的基本概念

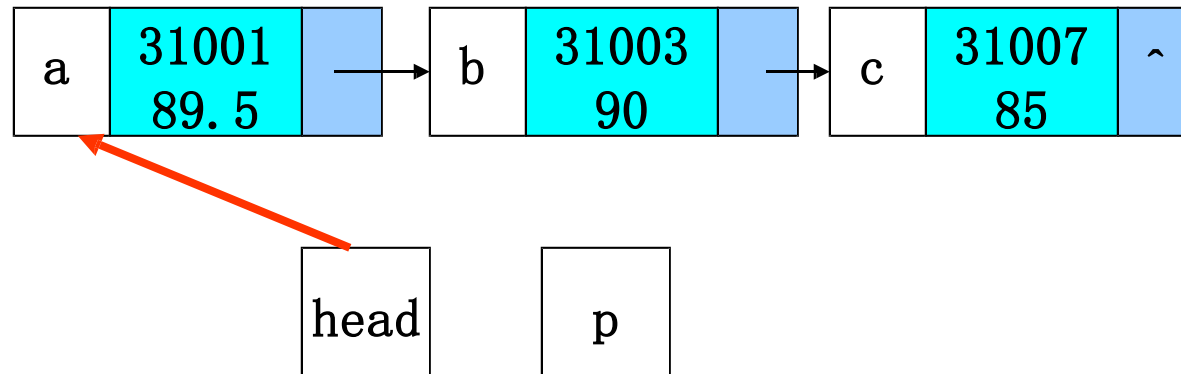
```
head = &a; a.next = &b; b.next = &c; c.next = NULL;
```





# 3.1 链式结构的基本概念

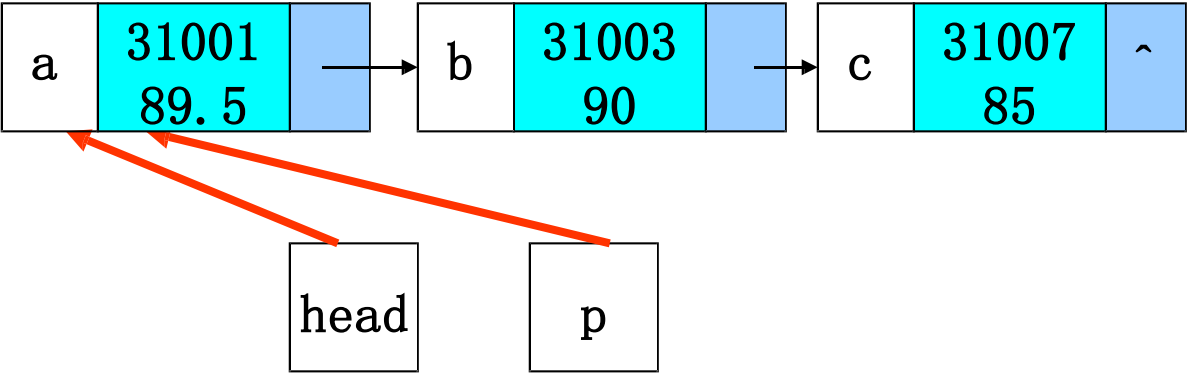
```
head = &a; a.next = &b; b.next = &c; c.next = NULL;
```





# 3.1 链式结构的基本概念

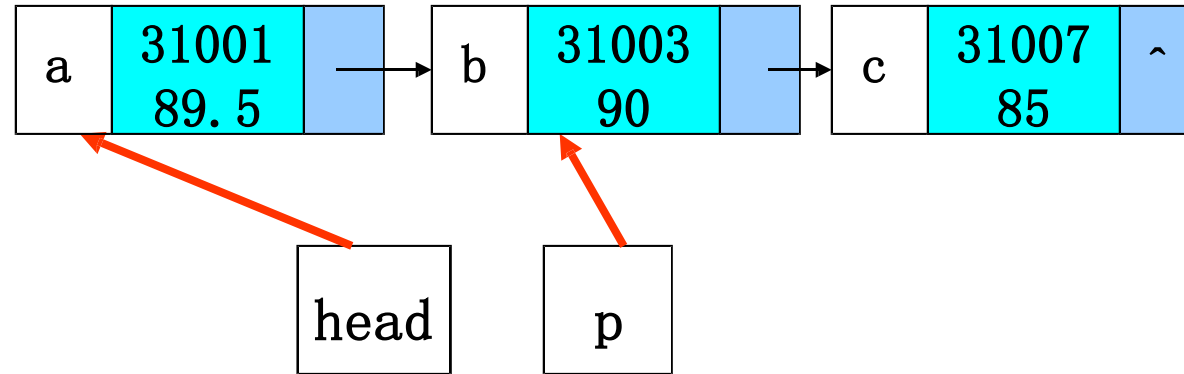
```
p=head;
```





# 3.1 链式结构的基本概念

```
do {  
    cout << p->num << " " << p->score << endl;  
    p=p->next;  
} while(p!=NULL);
```

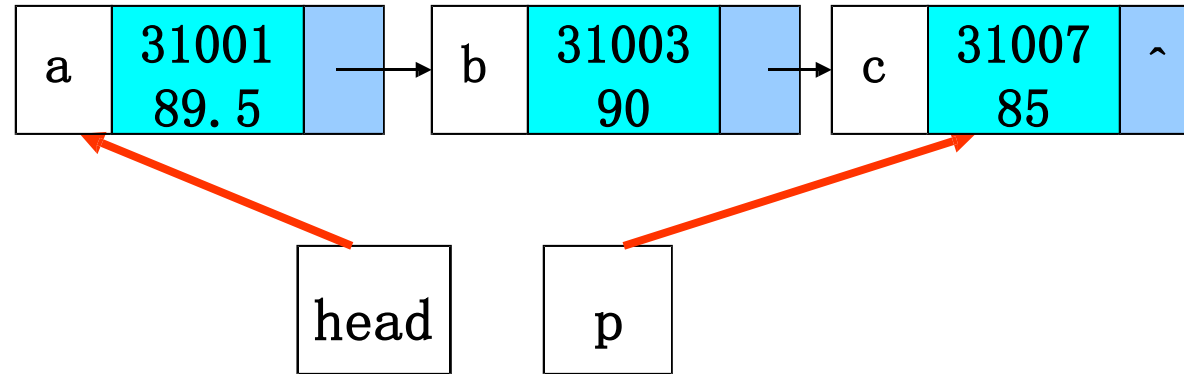


31001 89.5



# 3.1 链式结构的基本概念

```
do {  
    cout << p->num << " " << p->score << endl;  
    p=p->next;  
} while(p!=NULL);
```

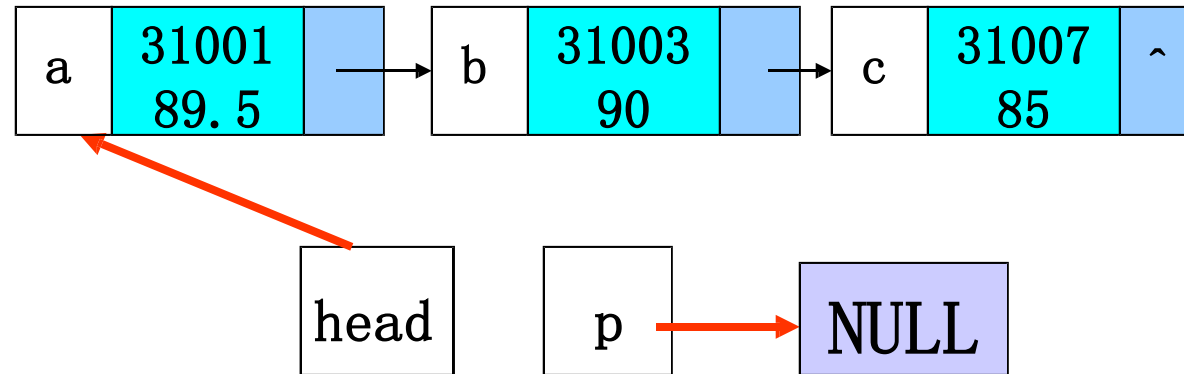


```
31001 89.5  
31003 90
```



# 3.1 链式结构的基本概念

```
do {  
    cout << p->num << " " << p->score << endl;  
    p=p->next;  
} while(p!=NULL);
```



```
31001 89.5  
31003 90  
31007 85
```





# 3.1 链式结构的基本概念

- 链表与数组的比较

数组	链表
大小在声明时固定	大小不固定
处理的数据个数有差异时，须按最大值声明	根据需要随时增加/减少结点
内存地址连续，可直接计算得到某个元素的地址	内存地址不连续，必须依次查找
逻辑上连续，物理上连续	逻辑上连续，物理上不连续

# 目录

- 链式结构的基本概念
- 单链表的基本操作
- 双向链表的基本操作
- 二叉搜索树

单链表





## 3.2 单链表的基本操作

- 链表的遍历

- 由于链表的指针域中包含了后继结点的存储地址，所以只要知道该链表的头指针，即可依次对每个结点进行访问
- 假设已创建包含一个数据域，且其类型为整型的单链表，head为表头指针

### 结点结构说明：

```
struct node
{
    int data;
    struct node *next;
};
```

头指针定义：struct node \*head;

```
//输出已建立单链表的各结点的值
void print(struct node *head)
{
    struct node *p = head;
    while(p != NULL) {
        cout << p->data << ' \t';
        p = p->next;
    }
}
```



## 3.2 单链表的基本操作

- 统计结点个数
  - 设置工作指针从表头结点开始，每经过一个结点，计数器值加1

```
int count(struct node *head)
{
    struct node *p = head;
    int n = 0;
    while (p != NULL) {
        n++;
        p = p->next;
    }
    return(n);
}
```



## 3.2 单链表的基本操作

- 查找结点
  - 设置一个序号计数器j和一个工作指针p，从表头结点开始，顺着链表进行查找。仅当j==i并且p!= NULL时查找成功，否则查找不成功

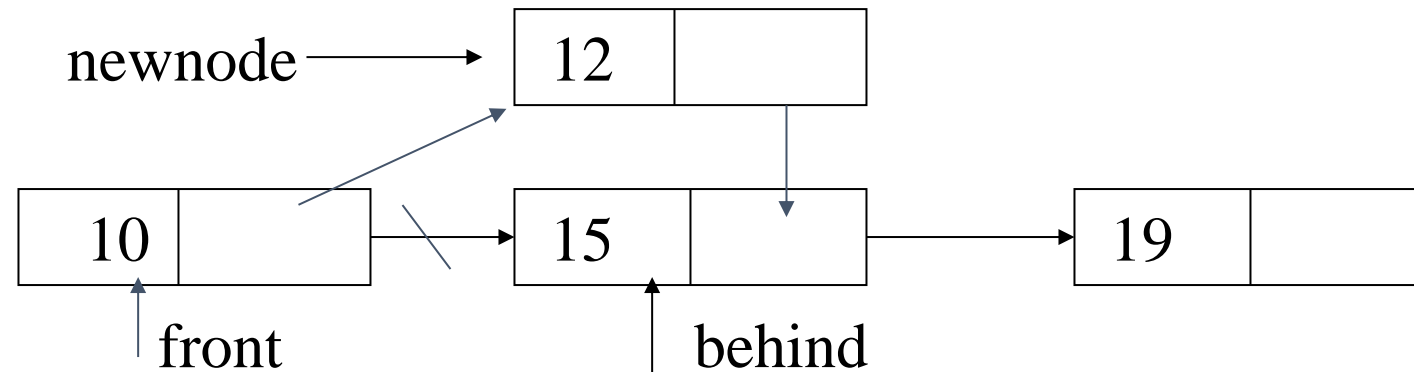
```
void search(struct node *head, int i)
{
    int j = 1;
    struct node *p = head;
    if(i < 0)
        cout << "illegal index\n";
    else
    {
        while(j != i && p != NULL) {
            j++;
            p = p->next ;
        }
    }
}
```

```
//接左边
    if(j == i && p != NULL)
        cout<<"index"<<i<<": "<<p>data;
    else
        cout<<"illegal index \n";
    }
}
```



## 3.2 单链表的基本操作

- 在链表中插入结点
  - 假定有一个指针behind指向链表中的某个结点，newnode指向待插入结点



- 如果有一个指针front指向behind的前驱，则：  
front->next = newnode;  
newnode->next = behind;
- 如果没有behind指针，则：  
newnode->next = front->next;  
front->next = newnode;      //不可交换次序



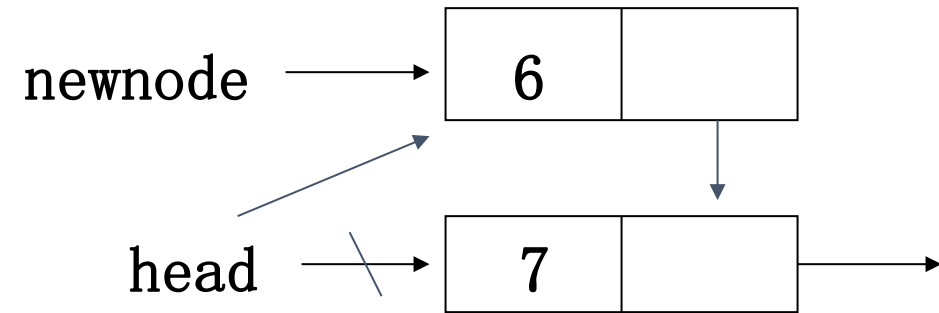
## 3.2 单链表的基本操作

- 两种特殊情况:

- 在表头结点之前插入:

`newnode->next = head;`

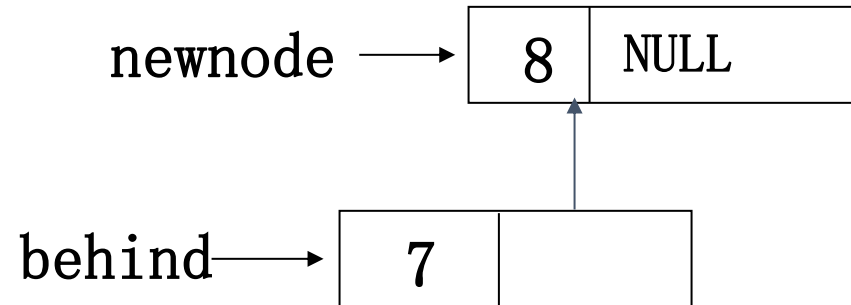
`head = newnode;`



- 在尾结点之后插入:

`behind->next = newnode;`

`newnode->next = NULL;`





//实现在头结点为head的链表中插入值为x的结点（已按数据递增排序）。

```
struct node * insert(node *head, int x)
{
    struct node *behind, *front, *newnode;
    newnode=new(nothrow) node; //未判断newnode是否为NULL, 后续课程内容
    newnode->data = x;      behind = head;
    if(head == NULL) {head = newnode; newnode->next = NULL;} //空表
    else //非空表
    {
        while(behind != NULL && x > behind->data) //找插入位置
        {
            front = behind; behind = behind->next; }
        if(behind == head) //插到第一个结点前
        {
            newnode->next = head; head = newnode; }
        else if(behind == NULL) //插到最后一个结点后
        {
            front->next = newnode; newnode->next = NULL; }
        else //插到front之后, behind之前
        {
            front->next = newnode; newnode->next = behind; }
    }
    return head;
}
```

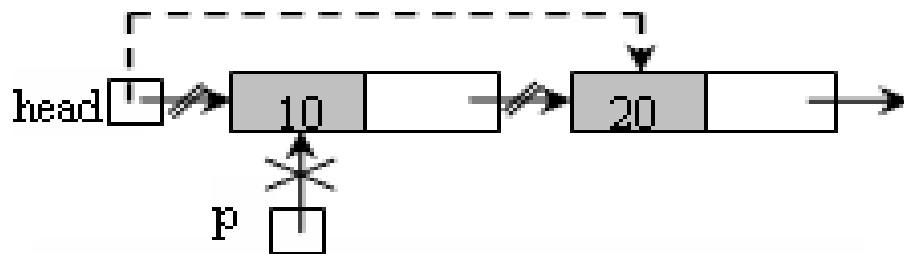


## 3.2 单链表的基本操作

- 删除链表中的某个结点
  - 把被删除结点的后继结点的地址, 赋给其前趋结点的指针域或表头指针head, 无后继结点时, 则赋NULL

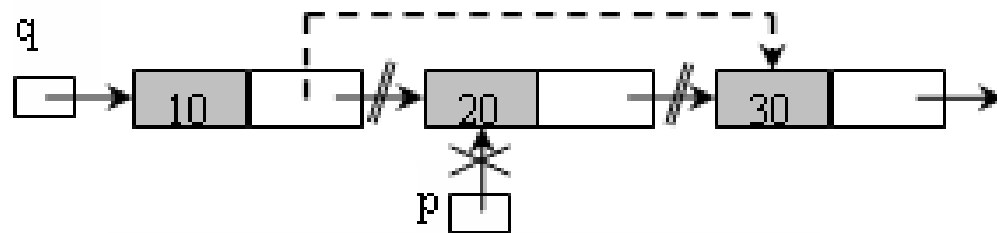
假定p为指向要删除结点的指针, q为指向删除结点前趋的指针

- 如删除第一个结点



```
head = p->next;  
delete p;
```

- 如删除链表的中间结点



```
q->next = p->next;  
delete p;
```



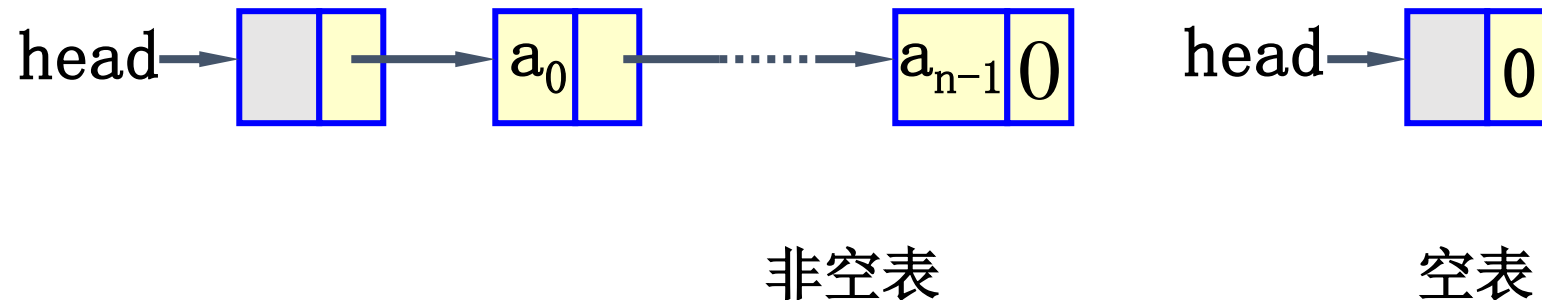
//实现在头结点为head的链表中删除值为x的结点。

```
struct node *delnode(node *head, int x)
{
    struct node *p, *q;  //p为工作指针, q为p的前驱
    p = head;
    if(head == NULL)      //空表
        cout<<"The list is null!\n";
    else{                 //非空表
        while(p != NULL && p->data != x) //找删除的结点
        {
            q = p;  p = p->next; }
        if(p == head) //删除第一个结点
        {
            head = p->next;  delete p; }
        else if(p != NULL) //删除非表头结点
        {
            q->next = p->next ;  delete p; }
        else //未找到要删除的元素
            cout << x <<"does not exist in the list!\n";
    }
    return head;
}
```



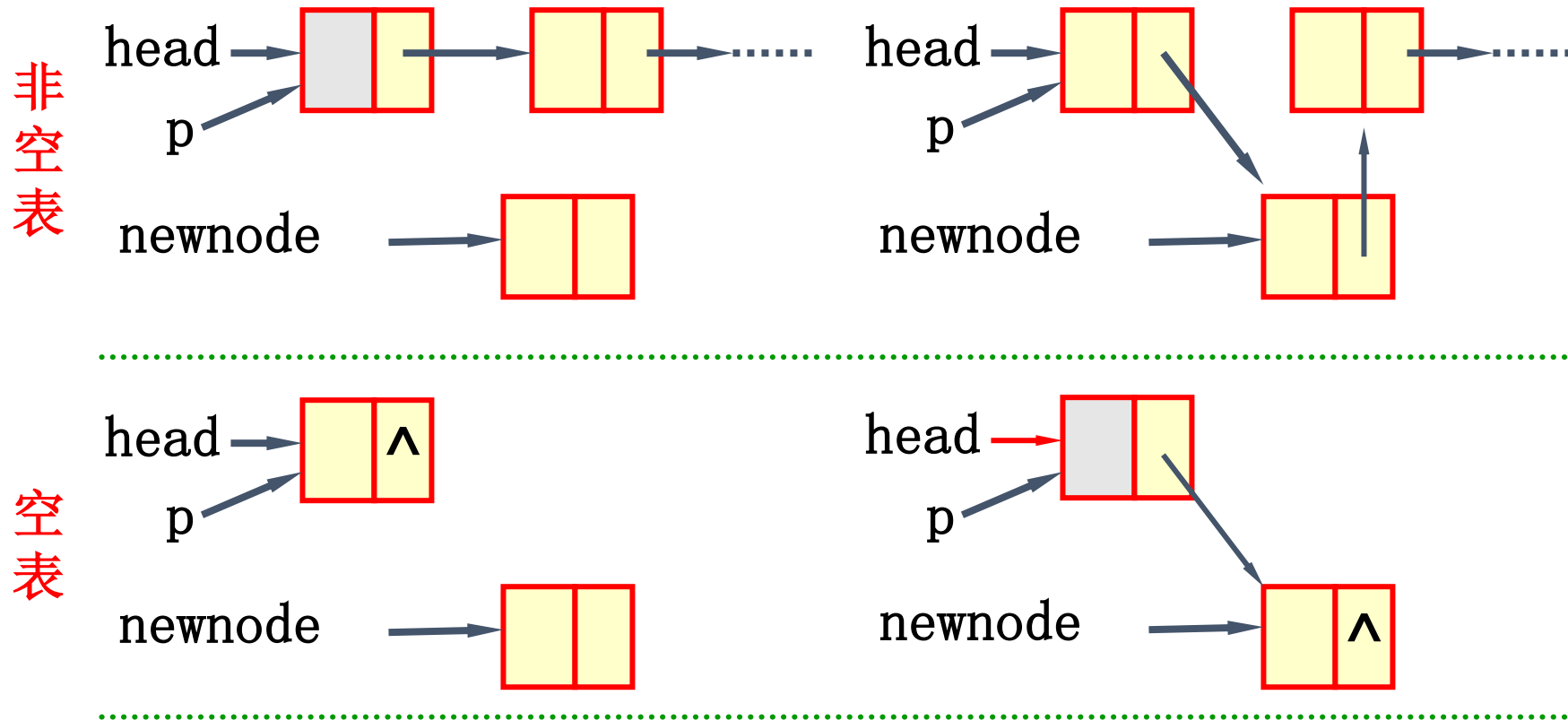
## 3.2 单链表的基本操作

- 带表头结点的单链表
  - 表头结点（又称伪结点）位于表的最前端，本身不带数据，仅标志表头
  - 设置表头结点的目的是统一空表与非空表、表头和表中位置的操作形式，简化链表操作的实现



## 3.2 单链表的基本操作

- 例：在带表头结点的单链表最前端插入新结点



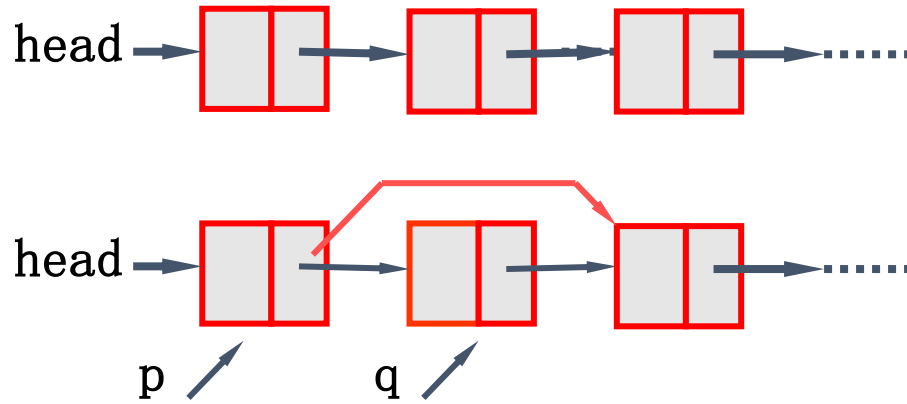
- 空表和非空表的操作是一致的

```
newnode->next = p->next;  
p->next = newnode;
```

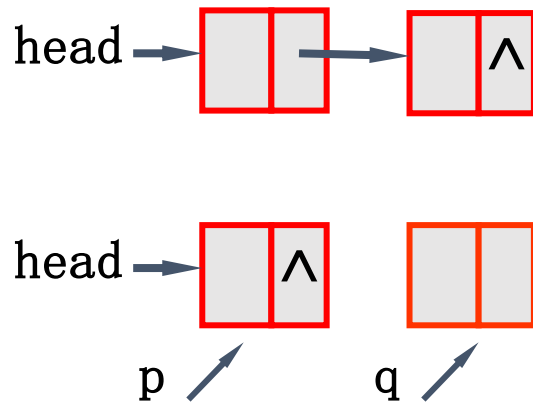
## 3.2 单链表的基本操作

- 例：从带表头结点的单链表中删除最前端的结点

非  
空  
表



空  
表



- 即使删除后为空表，也无需修改head，空表和非空表的操作是一致的

$q = p \rightarrow \text{next};$

$p \rightarrow \text{next} = q \rightarrow \text{next};$

$\text{delete } q;$

# 目录

- 链式结构的基本概念
- 单链表的基本操作
- 双向链表的基本操作
- 二叉搜索树



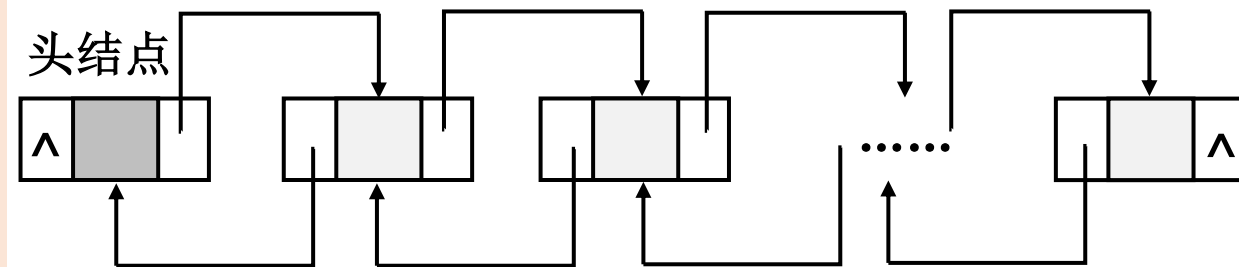


## 3.3 双向链表的基本操作

- 单链表的缺陷
  - 只能从头结点开始访问链表中的数据元素，如果需要逆序访问单链表中的数据元素将极其低效
- 双向链表的引入
  - 每个数据结点中都有两个指针，分别指向直接后继和直接前驱

双向链表的定义：

```
typedef struct DbNode
{
    int data; //结点数据
    DbNode *left; //前驱结点指针
    DbNode *right; //后继结点指针
} DbNode;
```



```
#include <iostream>
using namespace std;
typedef struct DbNode
{
    int data;//结点数据
    DbNode *left;//前驱结点指针
    DbNode *right;//后继结点指针
}DbNode;
//根据数据创建结点
DbNode *CreateNode(int data)
{
    DbNode *pnode = (DbNode *)malloc(sizeof(DbNode));
    if (pnode != NULL) //判断malloc是否成功申请到存储空间，后续课程内容
    {
        pnode->data = data;
        pnode->left = pnode->right = NULL;
    }
    return pnode;
}
```

```
//创建链表头
DbNode *CreateList(int hdata)//头结点数据
{
    DbNode *pnode = (DbNode *)malloc
        (sizeof(DbNode));
    if (pnode != NULL)
    {
        pnode->data = hdata;
        pnode->left = pnode->right = NULL;
    }
    return pnode;
}
```





//插入新结点，总是在表尾插入

```
DbNode *AppendNode(DbNode *head, int data)
```

```
{
    DbNode *node = CreateNode(data);
    if (node != NULL)
    {
        DbNode *p = head, *q = NULL;

        while (p != NULL)
        {
            q = p;
            p = p->right;
        }
        if (q != NULL) q->right = node;
        node->left = q;
    }
    return head;
}
```

```
int main()
{
    DbNode *head = CreateList(0);
    //生成链表头结点，数据为0
    for (int i = 1; i < 10; i++)
        //添加9个结点，数据为1到9
    {
        head = AppendNode(head, i);
    }

    return 0;
}
```



## 3.3 双向链表的基本操作

- 双向链表的遍历
  - 使用right指针进行遍历，直到NULL为止

```
//双向链表的测长
int GetLength(DbNode *head)
{
    int count = 1;
    DbNode *pnode = NULL;
    if (head == NULL) //链表空
    {
        return 0;
    }
    pnode = head->right;
```

```
//接左侧
while (pnode != NULL)
{
    pnode = pnode->right;
    //使用right指针遍历
    count++;
}
return count;
}
```



## 3.3 双向链表的基本操作

- 双向链表的遍历
  - 使用right指针进行遍历，直到NULL为止

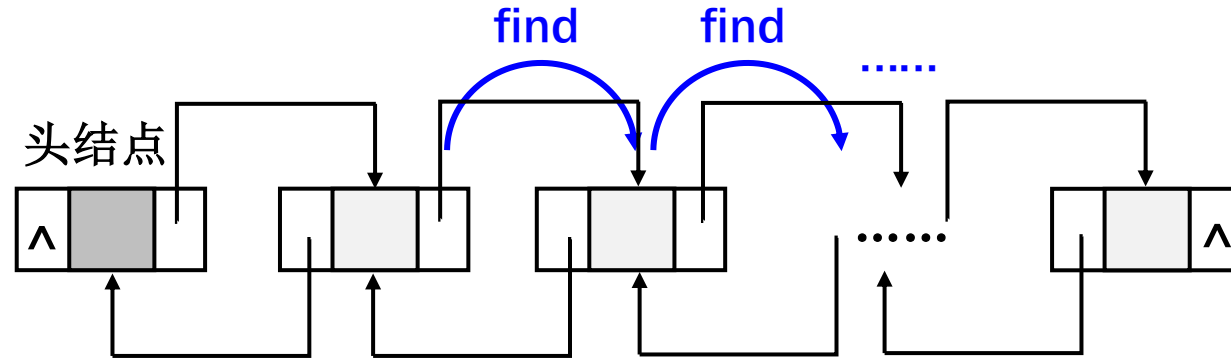
```
//打印整个链表
void PrintList(DbNode *head)
{
    DbNode *pnode = NULL;
    if (head == NULL) //链表为空
    {
        return;
    }
    pnode = head;
```

```
//接左侧
while (pnode != NULL)
{
    printf("%d ", pnode->data);
    pnode = pnode->right;
    //使用right指针遍历
}
printf("\n");
}
```



## 3.3 双向链表的基本操作

- 双向链表结点的查找
  - 使用right指针进行遍历，直到找到数据为data的结点。如果找到则返回结点，否则返回NULL





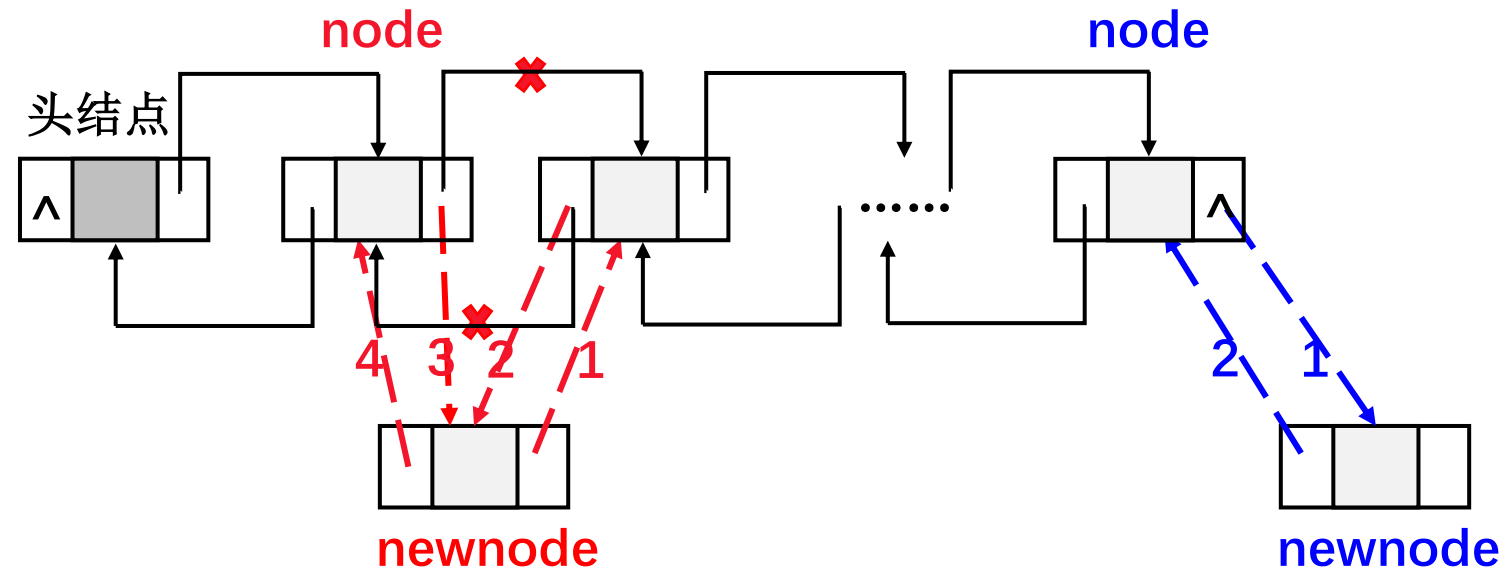
//查找数据为data的结点，如果找到则返回结点，否则返回NULL

```
DbNode *FindNode(DbNode *head, int data)
```

```
{  
    DbNode *pnode = head;  
    if (head == NULL) return NULL;    //链表空  
  
    //找到数据或者到达链表末尾，退出while循环  
    while (pnode != NULL && pnode->data != data)  
    {  
        pnode = pnode->right;        //使用right指针遍历  
    }  
    //没有找到数据为data的结点，返回NULL  
    if (pnode == NULL)  
    {  
        return NULL;  
    }  
    return pnode;  
}
```

## 3.3 双向链表的基本操作

- 双向链表结点的插入
  - 插入位置在**中间**：原后继结点的前驱指针指向新插入结点
  - 插入位置在**末尾**：直接插入





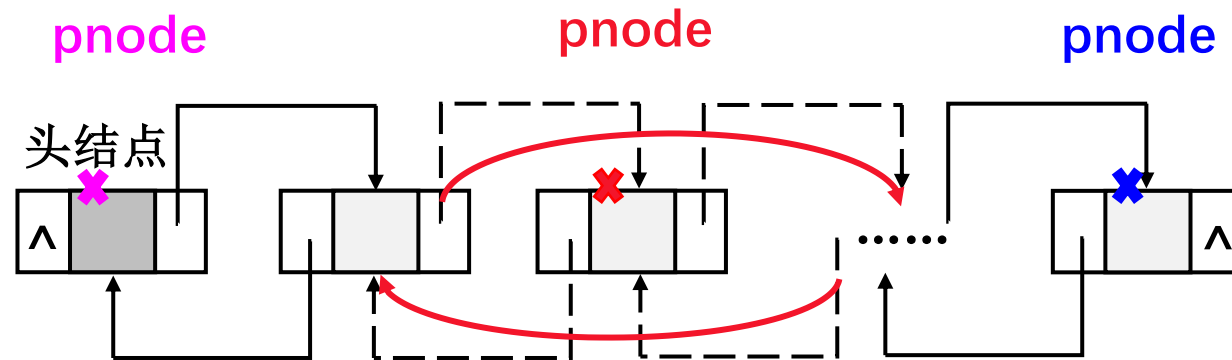
//在node结点之后插入新结点

```
void InsertNode(DbNode *node, int data)
{
    DbNode *newnode = CreateNode(data);

    if (node == NULL) return; //node为NULL时返回
    if (node->right == NULL) //node为最后一个结点
    {
        node->right = newnode; newnode->left = node;
    }
    else //node为中间结点
    {
        newnode->right = node->right;
        node->right->left = newnode;
        node->right = newnode;
        newnode->left = node;
    }
}
```

## 3.3 双向链表的基本操作

- 双向链表结点的删除
  - 删除头结点
  - 删除中间结点
  - 删除尾结点





//删除满足指定条件的结点，返回表头指针，删除失败（结点不存在）返回NULL  
DbNode \*DeleteNode(DbNode \*head, int data)

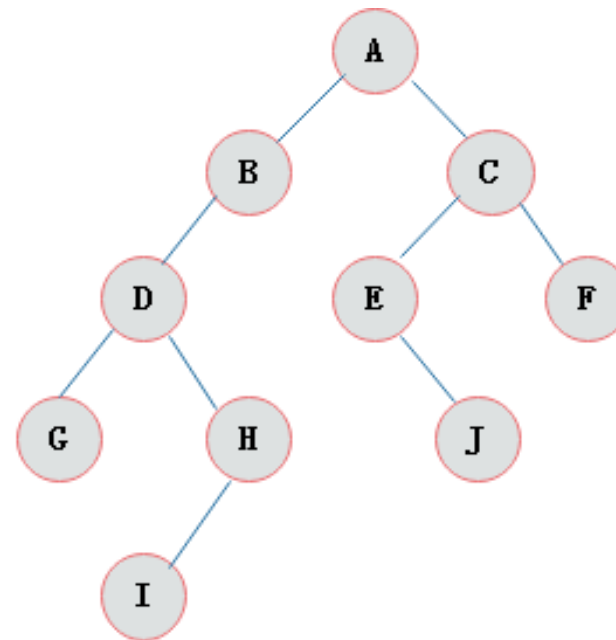


```
{
    DbNode *pnode = FindNode(head, data); //查找结点
    if (pnode == NULL) return NULL; //结点不存在时返回NULL
    else if (pnode->left == NULL) //pnode为第一个结点
    {
        head = pnode->right;
        if (head != NULL) head->left = NULL; //链表不为空
    }
    else if (pnode->right == NULL) //node为最后一个结点
    {
        pnode->left->right = NULL;
    }
    else //node为中间的结点
    {
        //接右侧
```

```
        pnode->left->right = pnode->right;
        pnode->right->left = pnode->left;
    }
    free(pnode);
    return head;
}
```

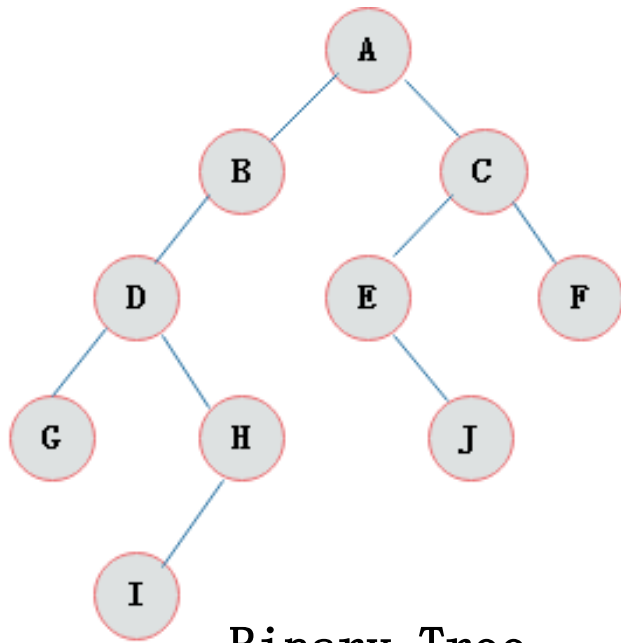
# 目录

- 链式结构的基本概念
- 单链表的基本操作
- 双向链表的基本操作
- 二叉搜索树



# 3.4 二叉搜索树 (Binary Search Tree)

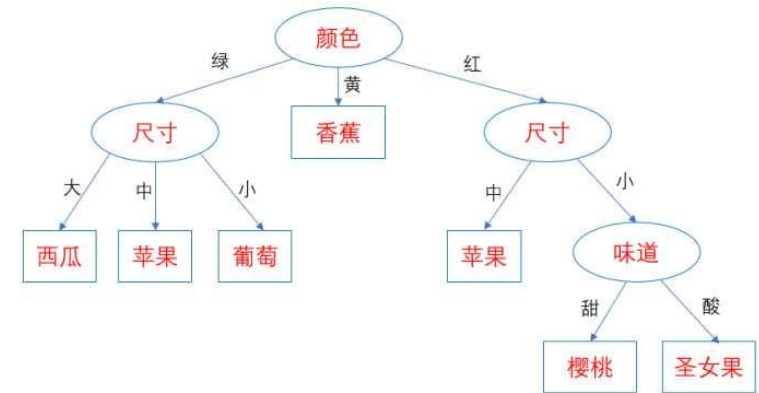
- 二叉树 (Binary Tree)
  - 每个结点最多有两个子结点的树
  - 叶子结点有0个子结点，根结点或者内部结点有一个或两个子结点



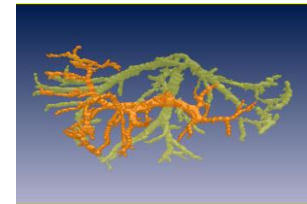
Binary Tree

如何存储?

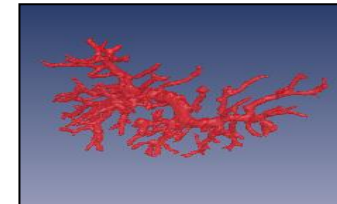
树的应用案例1:



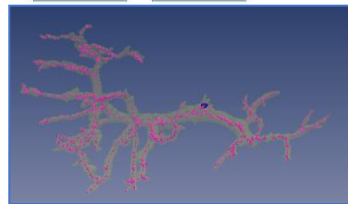
案例2:



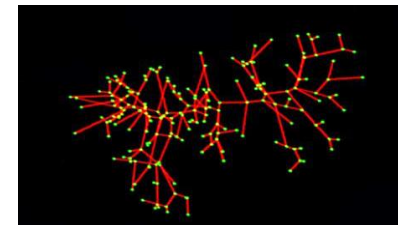
(a): 肝静脉与门静脉



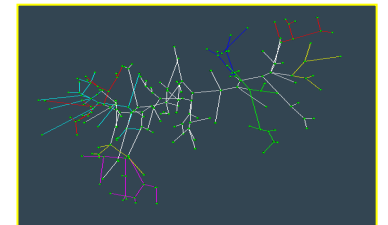
(b): 门静脉



(c): 门静脉骨架化



(d): 门静脉血管树图



(e): 血管树分支归类

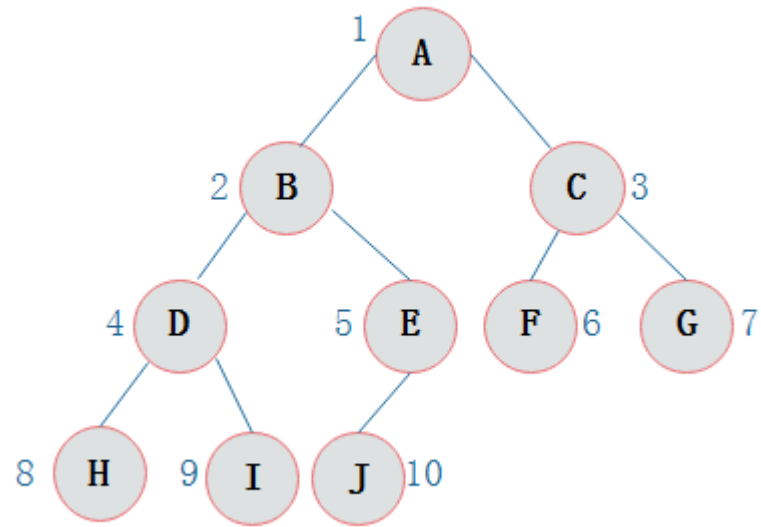


# 3.4 二叉搜索树 (Binary Search Tree)

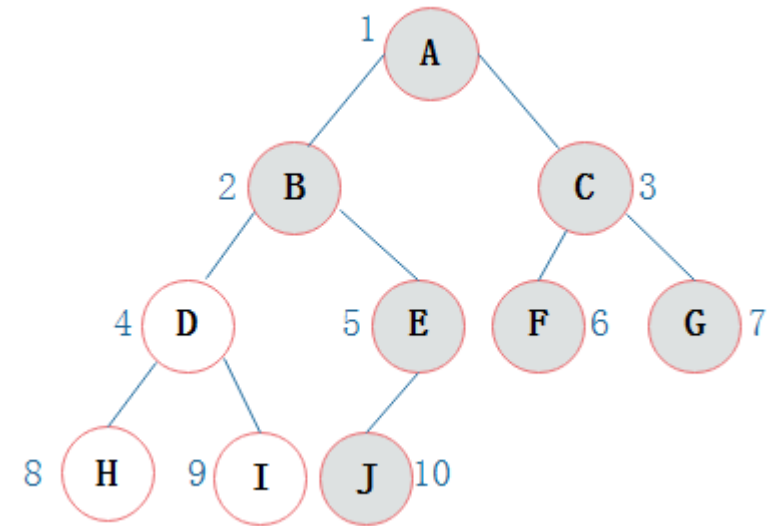
## • 二叉树存储

① 顺序存储：使用一维数组存储二叉树中的结点，并且结点的存储位置，就是数组的下标索引

缺点：一般只适合完全二叉树，否则采用顺序存储的方式十分浪费空间



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	B	C	∧	E	F	G	∧	∧	J



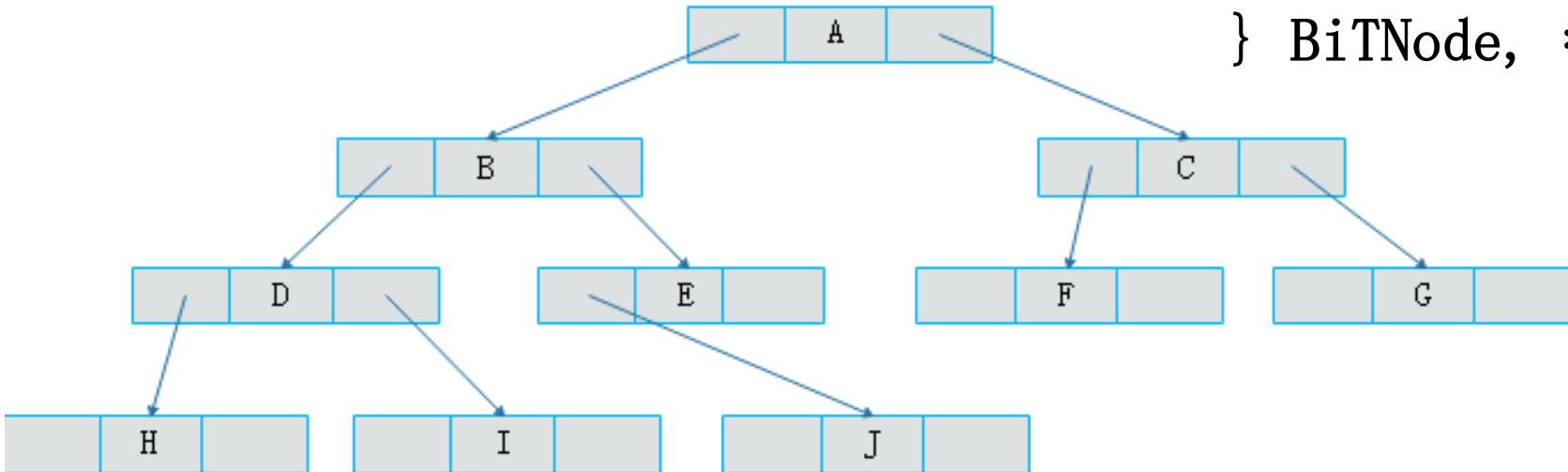
# 3.4 二叉搜索树 (Binary Search Tree)

## • 二叉树存储

- ② 链式存储：二叉树的每个结点最多有两个子结点，因此可以将结点数据结构定义为一个数据和两个指针域



```
typedef struct BiTNode{  
    TElemType data; //数据  
    struct BiTNode *lchild, *rchild;  
    //左右孩子指针  
} BiTNode, *BiTree;
```

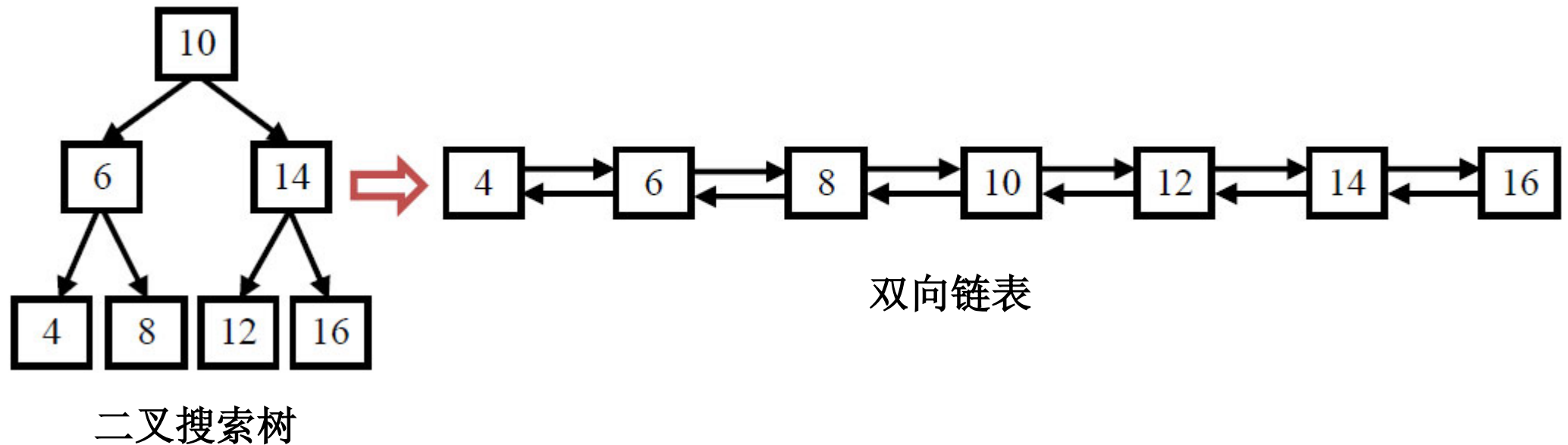


# 3.4 二叉搜索树 (Binary Search Tree)

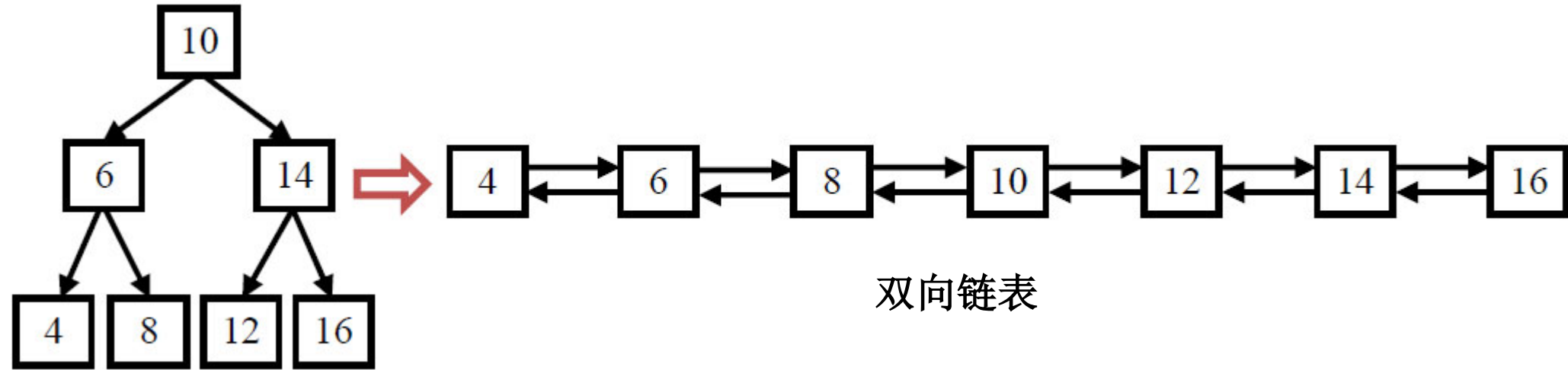


- 二叉搜索树 (BST)

- 若它的左子树非空，则左子树上所有结点的值均小于根结点的值
- 若它的右子树非空，则右子树上所有结点的值均大于根结点的值
- 左、右子树本身又各是一颗二叉搜索树

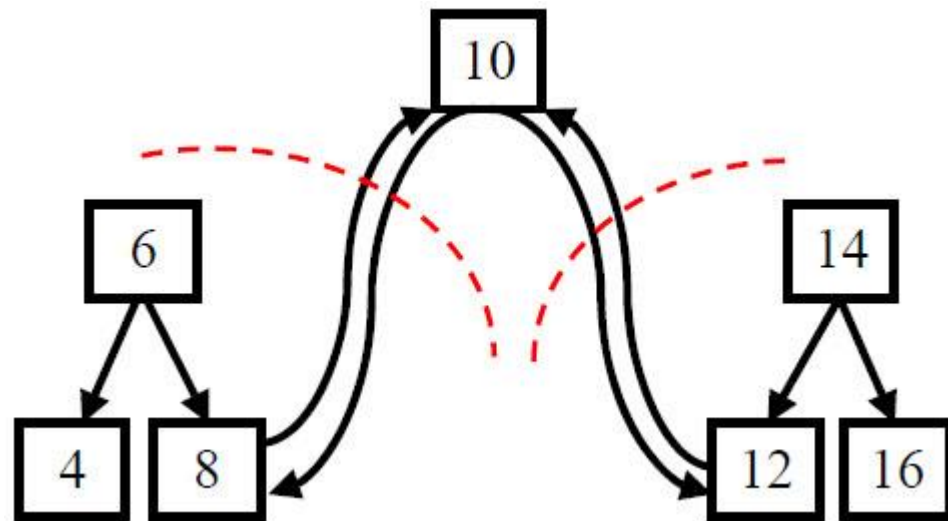


- 输入一棵二叉搜索树，将该二叉搜索树转换成一个排序的双向链表。要求不能创建任何新的结点，只能调整树中结点指针的指向。



双向链表

二叉搜索树



中序遍历  
递归



# 总结

- 链式结构的基本概念
- 单链表的基本操作（熟练掌握）
  - 遍历、统计、查找、插入、删除等
  - 带表头结点的链表
- 双向链表的基本操作（了解）
- 二叉搜索树（了解）