



# 程序设计与算法(二)

## 算法基础

郭 炜

微信公众号



微博: <http://weibo.com/guoweiofpku>

**学会程序和算法，走遍天下都不怕!**

讲义照片均为郭炜拍摄



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

信息科学技术学院

配套教材：

高等教育出版社

《算法基础与在线实践》

刘家瑛 郭炜 李文新 编著

本讲义中所有例题，根据题目名称在  
<http://openjudge.cn>  
“百练”组进行搜索即可提交





北京大学  
PEKING UNIVERSITY

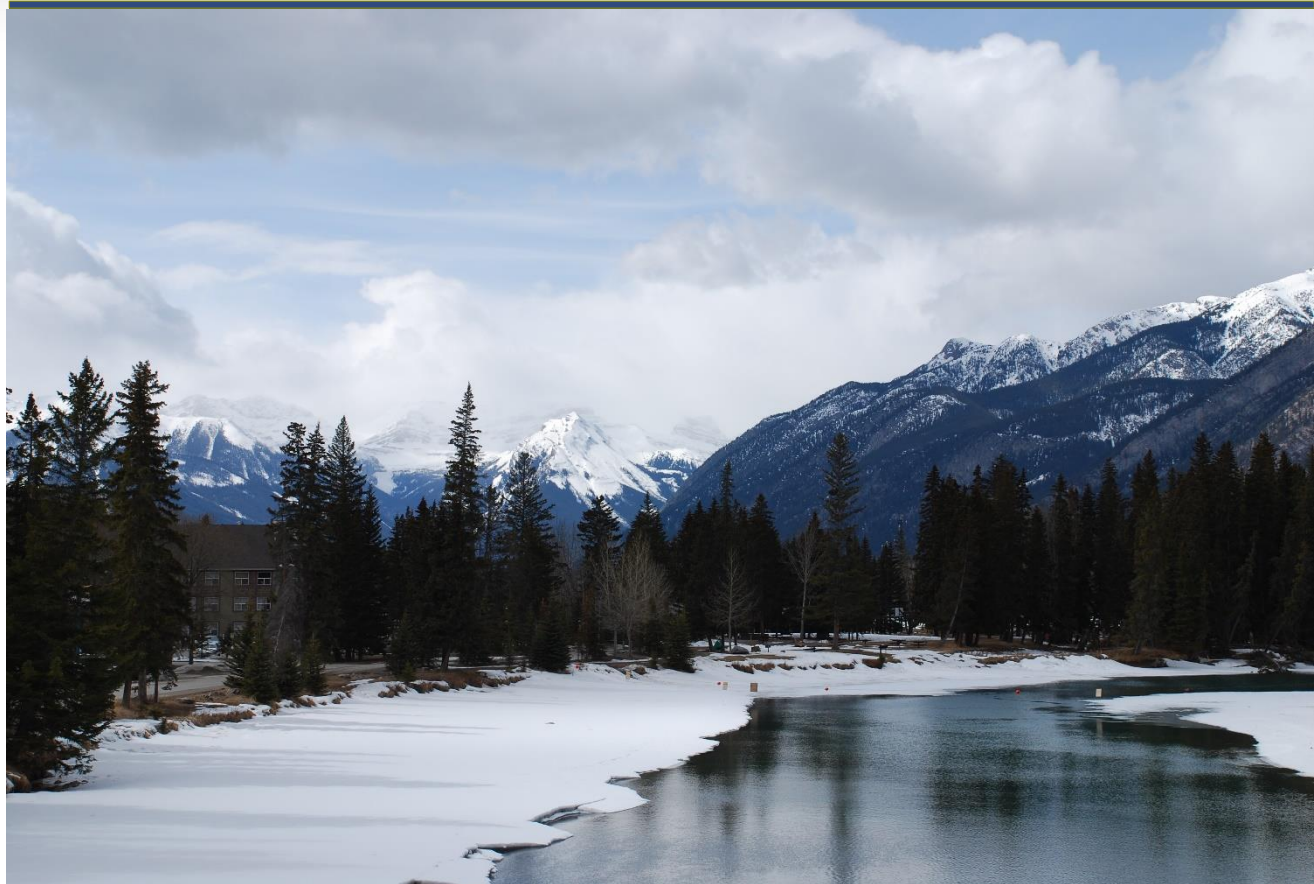
# 动态规划(一)



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

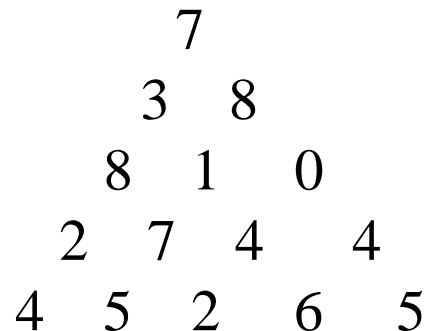
信息科学技术学院

## 例题 数字三角形



加拿大班芙国家公园

# 例题一、数字三角形(POJ1163)



在上面的数字三角形中寻找一条从顶部到底边的路径，使得路径上所经过的数字之和最大。路径上的每一步都只能往左下或右下走。只需要求出这个最大和即可，不必给出具体路径。

三角形的行数大于1小于等于100，数字为 0 - 99

输入格式：

5 //三角形行数。下面是三角形

7

3 8

8 1 0

2 7 4 4

4 5 2 6 5

要求输出最大和

# 解题思路:

用二维数组存放数字三角形。

$D(r, j)$  : 第 $r$ 行第 $j$ 个数字( $r, j$ 从1开始算)

$MaxSum(r, j)$  : 从 $D(r, j)$ 到底边的各条路径中,  
最佳路径的数字之和。

问题: 求  $MaxSum(1, 1)$

典型的递归问题。

$D(r, j)$ 出发, 下一步只能走 $D(r+1, j)$ 或者 $D(r+1, j+1)$ 。故对于 $N$ 行的三角形:

```
if ( r == N)
    MaxSum(r, j) = D(r, j)
else
    MaxSum( r, j) = Max{ MaxSum(r+1, j), MaxSum(r+1, j+1) }
                    + D(r, j)
```

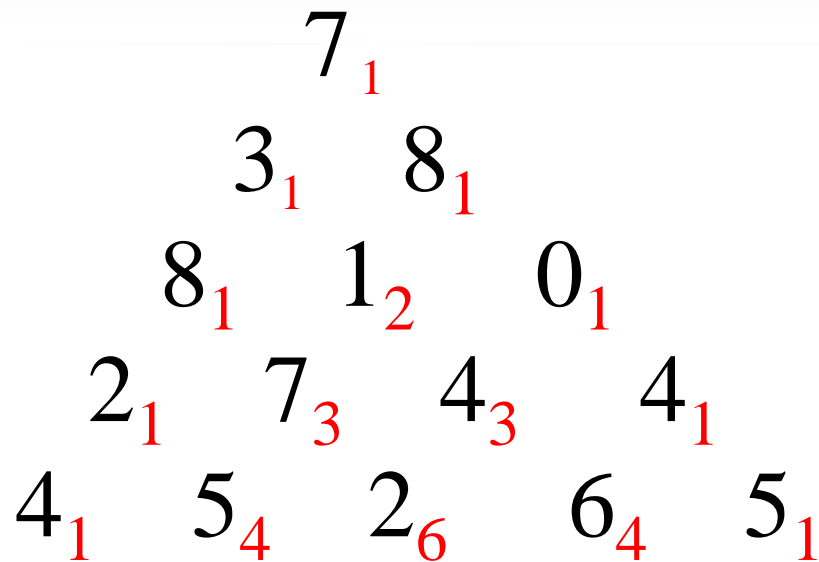
# 数字三角形的递归程序:

```
#include <iostream>
#include <algorithm>
#define MAX 101
using namespace std;
int D[MAX][MAX];
int n;
int MaxSum(int i, int j){
    if(i==n)
        return D[i][j];
    int x = MaxSum(i+1,j);
    int y = MaxSum(i+1,j+1);
    return max(x,y)+D[i][j];
}

int main(){
    int i,j;
    cin >> n;
    for(i=1;i<=n;i++)
        for(j=1;j<=i;j++)
            cin >> D[i][j];
    cout << MaxSum(1,1) << endl;
}
```



# 为什么超时?



- 回答: 重复计算

如果采用递归的方法, 深度遍历每条路径, 存在大量重复计算。则时间复杂度为  $2^n$ , 对于  $n = 100$  行, 肯定超时。

# 改进

如果每算出一个 $\text{MaxSum}(r,j)$ 就保存起来，下次用到其值的时候直接取用，则可免去重复计算。那么可以用 $O(n^2)$ 时间完成计算。因为三角形的数字总数是  $n(n+1)/2$

## 数字三角形的记忆递归型动归程序:

```
#include <iostream>
#include <algorithm>
using namespace std;

#define MAX 101

int D[MAX][MAX];    int n;
int maxSum[MAX][MAX];

int MaxSum(int i, int j){
    if( maxSum[i][j] != -1 )
        return maxSum[i][j];
    if(i==n)
        maxSum[i][j] = D[i][j];
    else {
        int x = MaxSum(i+1,j);
        int y = MaxSum(i+1,j+1);
        maxSum[i][j] = max(x,y)+
            D[i][j];
    }
    return maxSum[i][j];
}
```

```
int main(){
    int i,j;
    cin >> n;
    for(i=1;i<=n;i++)
        for(j=1;j<=i;j++) {
            cin >> D[i][j];
            maxSum[i][j] = -1;
        }
    cout << MaxSum(1,1) << endl;
}
```

# 递归转成递推

7

3 8

8 1 0

2 7 4 4

4 5 2 6 5

4	5	2	6	5

# 递归转成递推

7

3 8

8 1 0

2 7 4 4

4 5 2 6 5

7				
4	5	2	6	5

# 递归转成递推

7

3 8

8 1 0

2 7 4 4

4 5 2 6 5

7	12			
4	5	2	6	5

# 递归转成递推

7

3 8

8 1 0

2 7 4 4

4 5 2 6 5

7	12	10		
4	5	2	6	5

# 递归转成递推

7

3 8

8 1 0

2 7 4 4

4 5 2 6 5

7	12	10	10	
4	5	2	6	5



# 递归转成递推

7

3 8

8 1 0

2 7 4 4

4 5 2 6 5

20				
7	12	10	10	
4	5	2	6	5

# 递归转成递推

7

3 8

8 1 0

2 7 4 4

4 5 2 6 5

20	13			
7	12	10	10	
4	5	2	6	5

# 递归转成递推

7

3 8

8 1 0

2 7 4 4

4 5 2 6 5

20	13	10		
7	12	10	10	
4	5	2	6	5

# 递归转成递推

7

3 8

8 1 0

2 7 4 4

4 5 2 6 5

30				
23	21			
20	13	10		
7	12	10	10	
4	5	2	6	5

```

#include <iostream>
#include <algorithm>
using namespace std;
#define MAX 101
int D[MAX][MAX];    int n;
int maxSum[MAX][MAX];
int main()  {
    int i,j;
    cin >> n;
    for(i=1;i<=n;i++)
        for(j=1;j<=i;j++)
            cin >> D[i][j];
    for( int i = 1;i <= n; ++ i )
        maxSum[n][i] = D[n][i];
    for( int i = n-1; i>= 1;  --i )
        for( int j = 1; j <= i; ++j )
            maxSum[i][j] =
                max(maxSum[i+1][j],maxSum[i+1][j+1]) + D[i][j]
    cout << maxSum[1][1] << endl;
}

```

# 空间优化

7  
3 8  
8 1 0  
2 7 4 4  
4 5 2 6 5

4	5	2	6	5
---	---	---	---	---

没必要用二维maxSum数组存储每一个MaxSum(r,j),只要从底层一行行向上递推,那么只要一维数组maxSum[100]即可,即只要存储一行的MaxSum值就可以。

# 空间优化

7  
3 8  
8 1 0  
2 7 4 4  
4 5 2 6 5

7	5	2	6	5
---	---	---	---	---

没必要用二维maxSum数组存储每一个MaxSum(r,j),只要从底层一行行向上递推,那么只要一维数组maxSum[100]即可,即只要存储一行的MaxSum值就可以。

# 空间优化

7  
3 8  
8 1 0  
2 7 4 4  
4 5 2 6 5

7	12	2	6	5
---	----	---	---	---

没必要用二维maxSum数组存储每一个MaxSum(r,j),只要从底层一行行向上递推,那么只要一维数组maxSum[100]即可,即只要存储一行的MaxSum值就可以。



# 空间优化

7  
3 8  
8 1 0  
2 7 4 4  
4 5 2 6 5

7	12	10	6	5
---	----	----	---	---

没必要用二维maxSum数组存储每一个MaxSum(r,j),只要从底层一行行向上递推,那么只要一维数组maxSum[100]即可,即只要存储一行的MaxSum值就可以。

# 空间优化

7  
3 8  
8 1 0  
2 7 4 4  
4 5 2 6 5

7	12	10	10	5
---	----	----	----	---

没必要用二维maxSum数组存储每一个MaxSum(r,j),只要从底层一行行向上递推,那么只要一维数组maxSum[100]即可,即只要存储一行的MaxSum值就可以。

# 空间优化

7  
3 8  
8 1 0  
2 7 4 4  
4 5 2 6 5

20	12	10	10	5
----	----	----	----	---

没必要用二维maxSum数组存储每一个MaxSum(r,j),只要从底层一行行向上递推,那么只要一维数组maxSum[100]即可,即只要存储一行的MaxSum值就可以。

# 空间优化

7  
3 8  
8 1 0  
2 7 4 4  
4 5 2 6 5

20	13	10	10	5
----	----	----	----	---

没必要用二维maxSum数组存储每一个MaxSum(r,j),只要从底层一行行向上递推,那么只要一维数组maxSum[100]即可,即只要存储一行的MaxSum值就可以。

## 空间优化

进一步考虑，连maxSum数组都可以不要，直接用D的第n行替代maxSum即可。

节省空间，时间复杂度不变

## 空间优化

```
#include <iostream>
#include <algorithm>
using namespace std;
#define MAX 101
int D[MAX][MAX];
int n; int * maxSum;
int main(){
    int i,j;
    cin >> n;
    for(i=1;i<=n;i++)
        for(j=1;j<=i;j++)
            cin >> D[i][j];
    maxSum = D[n]; //maxSum指向第n行
    for( int i = n-1; i>= 1; --i )
        for( int j = 1; j <= i; ++j )
            maxSum[j] = max(maxSum[j],maxSum[j+1]) + D[i][j];
    cout << maxSum[1] << endl;
}
```



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

信息科学技术学院

## 动规解题的一般思路



加拿大班芙国家公园

## 递归到动规的一般转化方法

- 递归函数有 $n$ 个参数，就定义一个 $n$ 维的数组，数组的下标是递归函数参数的取值范围，数组元素的值是递归函数的返回值，这样就可以从边界值开始，逐步填充数组，相当于计算递归函数值的逆过程。



# 动规解题的一般思路

## 1. 将原问题分解为子问题

- 把原问题分解为若干个子问题，子问题和原问题形式相同或类似，只不过规模变小了。子问题都解决，原问题即解决(数字三角形例)。
- 子问题的解一旦求出就会被保存，所以每个子问题只需求解一次。

# 动规解题的一般思路

## 2. 确定状态

- 在用动态规划解题时，我们往往将和子问题相关的各个变量的一组取值，称之为一个“状态”。一个“状态”对应于一个或多个子问题，所谓某个“状态”下的“值”，就是这个“状态”所对应的子问题的解。

# 动规解题的一般思路

## 2. 确定状态

所有“状态”的集合，构成问题的“状态空间”。“状态空间”的大小，与用动态规划解决问题的时间复杂度直接相关。在数字三角形的例子里，一共有 $N \times (N+1)/2$ 个数字，所以这个问题的状态空间里一共就有 $N \times (N+1)/2$ 个状态。

整个问题的时间复杂度是状态数目乘以计算每个状态所需时间。

在数字三角形里每个“状态”只需要经过一次，且在每个状态上作计算所花的时间都是和 $N$ 无关的常数。

# 动规解题的一般思路

## 2. 确定状态

用动态规划解题，经常碰到的情况是， $K$ 个整型变量能构成一个状态（如数字三角形中的行号和列号这两个变量构成“状态”）。如果这 $K$ 个整型变量的取值范围分别是 $N_1, N_2, \dots, N_k$ ，那么，我们就可以用一个 $K$ 维的数组 `array[N1][N2].....[Nk]` 来存储各个状态的“值”。这个“值”未必就是一个整数或浮点数，可能是需要一个结构才能表示的，那么array就可以是一个结构数组。一个“状态”下的“值”通常会是一个或多个子问题的解。

# 动规解题的一般思路

## 3. 确定一些初始状态（边界状态）的值

以“数字三角形”为例，初始状态就是底边数字，值就是底边数字值。

# 动规解题的一般思路

## 4. 确定状态转移方程

定义出什么是“状态”，以及在该“状态”下的“值”后，就要找出不同的状态之间如何迁移——即如何从一个或多个“值”已知的“状态”，求出另一个“状态”的“值”（“**人人为我**”递推型）。状态的迁移可以用递推公式表示，此递推公式也可被称作“状态转移方程”。

数字三角形的状态转移方程：

$$\text{MaxSum}[r][j] = \begin{cases} D[r][j] & r = N \\ \text{Max}\{ \text{MaxSum}[r+1][j], \text{MaxSum}[r+1][j+1] \} + D[r][j] & \text{其他情况} \end{cases}$$

# 能用动规解决的问题的特点

- 1) **问题具有最优子结构性质。** 如果问题的最优解所包含的子问题的解也是最优的，我们就称该问题具有最优子结构性质。
- 2) **无后效性。** 当前的若干个状态值一旦确定，则此后过程的演变就只和这若干个状态的值有关，和之前是采取哪种手段或经过哪条路径演变到当前的这若干个状态，没有关系。



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

信息科学技术学院

例题  
最长上升子序列



加拿大班芙国家公园



## 例题二：最长上升子序列(百练2757)

### 问题描述

一个数的序列 $a_i$ ，当 $a_1 < a_2 < \dots < a_s$ 的时候，我们称这个序列是上升的。对于给定的一个序列 $(a_1, a_2, \dots, a_N)$ ，我们可以得到一些上升的子序列 $(a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_K})$ ，这里 $1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_K \leq N$ 。比如，对于序列 $(1, 7, 3, 5, 9, 4, 8)$ ，有它的一些上升子序列，如 $(1, 7)$ ,  $(3, 4, 8)$ 等等。这些子序列中最长的长度是4，比如子序列 $(1, 3, 5, 8)$ 。

你的任务，就是对于给定的序列，求出最长上升子序列的长度。

### 输入数据

输入的第一行是序列的长度N ( $1 \leq N \leq 1000$ )。第二行给出序列中的N个整数，这些整数的取值范围都在0到10000。

### 输出要求

最长上升子序列的长度。

### 输入样例

7

1 7 3 5 9 4 8

### 输出样例

4

# 解题思路

## 1.找子问题

“求序列的前 $n$ 个元素的最长上升子序列的长度”是个子问题，但这样分解子问题，不具有“无后效性”

假设 $F(n) = x$ ,但可能有多个序列满足 $F(n) = x$ 。有的序列的最后一个元素比 $a_{n+1}$ 小，则加上 $a_{n+1}$ 就能形成更长上升子序列；有的序列最后一个元素不比 $a_{n+1}$ 小.....以后的事情受如何达到状态 $n$ 的影响，不符合“无后效性”

# 解题思路

## 1.找子问题

“求以 $a_k$  ( $k=1, 2, 3...N$ ) 为终点的最长上升子序列的长度”

一个上升子序列中最右边的那个数，称为该子序列的“终点”。

虽然这个子问题和原问题形式上并不完全一样，但是只要这 $N$ 个子问题都解决了，那么这 $N$ 个子问题的解中，最大的那个就是整个问题的解。

## 2. 确定状态:

子问题只和一个变量-- 数字的位置相关。因此序列中数的位置 $k$  就是“状态”，而状态  $k$  对应的“值”，就是以 $a_k$ 做为“终点”的最长上升子序列的长度。

状态一共有 $N$ 个。

### 3. 找出状态转移方程：

$\text{maxLen}(k)$ 表示以 $a_k$ 做为“终点”的最长上升子序列的长度那么：

初始状态： $\text{maxLen}(1) = 1$

$\text{maxLen}(k) = \max \{ \text{maxLen}(i) : 1 \leq i < k \text{ 且 } a_i < a_k \text{ 且 } k \neq 1 \} + 1$

若找不到这样的 $i$ ,则 $\text{maxLen}(k) = 1$

$\text{maxLen}(k)$ 的值，就是在 $a_k$ 左边，“终点”数值小于 $a_k$ ，且长度最大的那个上升子序列的长度再加1。因为 $a_k$ 左边任何“终点”小于 $a_k$ 的子序列，加上 $a_k$ 后就能形成一个更长的上升子序列。

## “人人为我” 递推型动归程序

```
#include <iostream>
#include <cstring>
#include <algorithm>
using namespace std;
```

```
const int MAXN = 1010;

int a[MAXN];    int maxLen[MAXN];

int main() {
    int N;          cin >> N;
    for( int i = 1; i <= N; ++i) {
        cin >> a[i];    maxLen[i] = 1;
    }
    for( int i = 2; i <= N; ++i) {
        //每次求以第i个数为终点的最长上升子序列的长度
        for( int j = 1; j < i; ++j)
            //察看以第j个数为终点的最长上升子序列
            if( a[i] > a[j] )
                maxLen[i] = max(maxLen[i], maxLen[j] + 1);
    }
    cout << * max_element(maxLen + 1, maxLen + N + 1 );
    return 0;
} //时间复杂度O(N²)
```

# 动归的常用两种形式

## 1) 递归型

优点：直观，容易编写

缺点：可能会因递归层数太深导致爆栈，函数调用带来额外时间开销。无法使用滚动数组节省空间。总体来说，比递推型慢。

## 1) 递推型

效率高，有可能使用滚动数组节省空间





北京大学  
PEKING UNIVERSITY

信息科学技术学院

## 例题 最长公共子序列



荷兰阿姆斯特丹库肯霍夫公园

### 例三、公共子序列 (POJ1458)

给出两个字符串，求出这样的一个最长的公共子序列的长度：子序列中的每个字符都能在两个原串中找到，而且每个字符的先后顺序和原串中的先后顺序一致。

## Sample Input

abcfbc abfcab

programming contest

abcd mnp

## Sample Output

4

2

0

输入两个串s1,s2,

设MaxLen(i,j)表示:

s1的左边i个字符形成的子串, 与s2左边的j个字符形成的子串的最长公共子序列的长度(i,j从0开始算)

MaxLen(i,j) 就是本题的 “状态”

假定  $\text{len1} = \text{strlen}(s1), \text{len2} = \text{strlen}(s2)$

那么题目就是要求  $\text{MaxLen}(\text{len1}, \text{len2})$

显然:

$\text{MaxLen}(n,0) = 0 \quad (n = 0 \dots \text{len1})$

$\text{MaxLen}(0,n) = 0 \quad (n = 0 \dots \text{len2})$

递推公式:

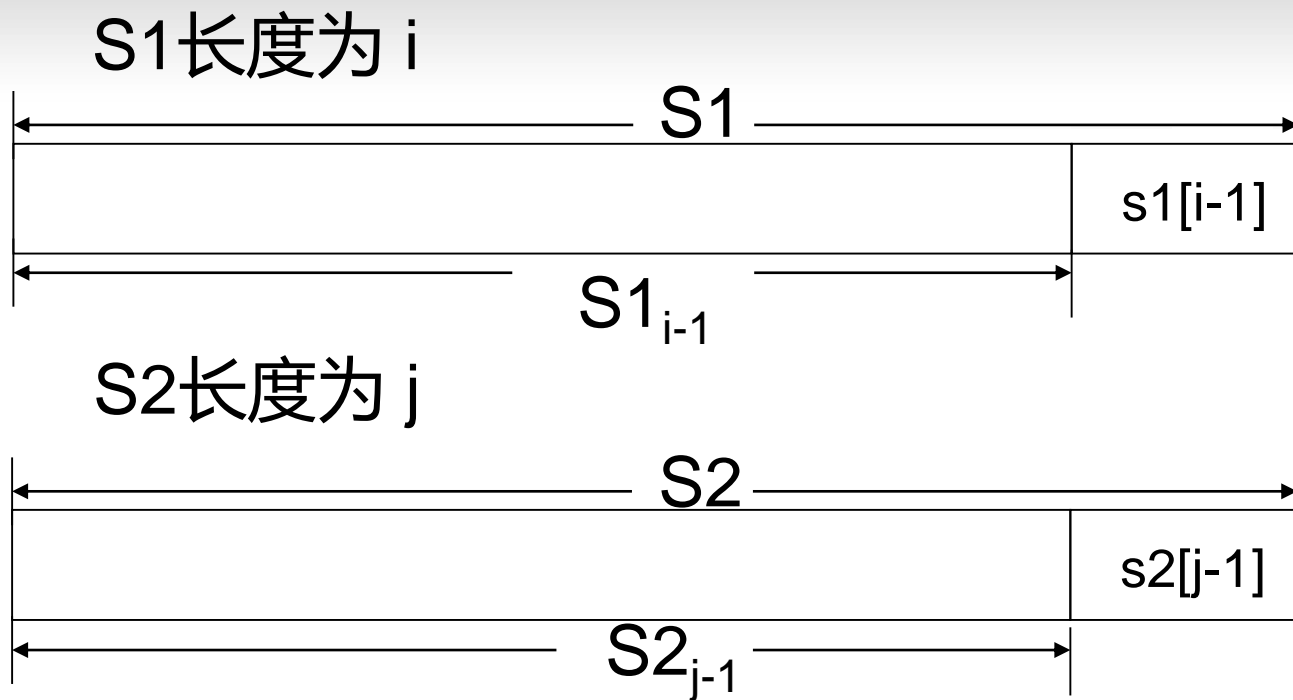
if (  $s1[i-1] == s2[j-1]$  ) //s1的最左边字符是s1[0]

$\text{MaxLen}(i,j) = \text{MaxLen}(i-1,j-1) + 1;$

else

$\text{MaxLen}(i,j) = \text{Max}(\text{MaxLen}(i,j-1), \text{MaxLen}(i-1,j) );$

时间复杂度 $O(mn)$  m,n是两个字符串长度



$S1[i-1] \neq s2[j-1]$ 时,  $\text{MaxLen}(S1, S2)$ 不会比 $\text{MaxLen}(S1, S2_{j-1})$ 和 $\text{MaxLen}(S1_{i-1}, S2)$ 两者之中任何一个小, 也不会比两者都大。

```
#include <iostream>
#include <cstring>
using namespace std;
char sz1[1000];
char sz2[1000];
int maxLen[1000][1000];
int main() {
    while( cin >> sz1 >> sz2 ) {
        int length1 = strlen( sz1 );
        int length2 = strlen( sz2 );
        int nTmp;
        int i,j;
        for( i = 0; i <= length1; i ++ )
            maxLen[i][0] = 0;
        for( j = 0; j <= length2; j ++ )
            maxLen[0][j] = 0;
```

```
for( i = 1; i <= length1; i ++ ) {  
    for( j = 1; j <= length2; j ++ ) {  
        if( sz1[i-1] == sz2[j-1] )  
            maxLen[i][j] = maxLen[i-1][j-1] + 1;  
        else  
            maxLen[i][j] = max(maxLen[i][j-1],  
                               maxLen[i-1][j]);  
    }  
}  
cout << maxLen[length1][length2] << endl;  
}  
return 0;  
}
```



# 活学活用

- 掌握递归和动态规划的思想，解决问题时灵活应用



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

信息科学技术学院

## 例题 最佳加法表达式



波兰华沙老城

## 例四、最佳加法表达式

有一个由1..9组成的数字串.问如果将 $m$ 个加号插入到这个数字串中,在各种可能形成的表达式中, 值最小的那个表达式的值是多少

# 解题思路

假定数字串长度是 $n$ ，添完加号后，表达式的最后一个加号添加在第  $i$  个数字后面，那么整个表达式的最小值，就等于在前  $i$  个数字中插入  $m - 1$  个加号所能形成的最小值，加上第  $i + 1$  到第  $n$  个数字所组成的数的值（ $i$ 从1开始算）。

# 解题思路

设 $V(m,n)$ 表示在 $n$ 个数字中插入 $m$ 个加号所能形成的表达式最小值，那么：

if  $m = 0$

$V(m,n) = n$ 个数字构成的整数

else if  $n < m + 1$

$V(m,n) = \infty$

else

$V(m,n) = \text{Min}\{ V(m-1,i) + \text{Num}(i+1,n) \} \ (i = m \dots n-1)$

$\text{Num}(i,j)$ 表示从第 $i$ 个数字到第 $j$ 个数字所组成的数。数字编号从1开始算。此操作复杂度是 $O(j-i+1)$ ，可以预处理后存起来。

总时间复杂度： $O(mn^2)$ 。

# 解题思路

总时间复杂度:  $O(mn^2)$  .

若  $n$  比较大, `long long` 不够存放运算过程中的整数, 则需要使用高精度计算 (用数组存放大整数, 模拟列竖式做加法), 复杂度为  $O(mn^3)$