图论

计算几何

数论

网络流

字符串

数据结构

最优化

ADDITIONAL DOCUMENTS

---

1. 构造圆方树

G 用于存图，T 是构造的圆方树。只有一个点的点双没有添加方点。

```
static vector<int> G[NMAX + 10], T[NMAX + 10];
void bcc(int u, int f = 0) {
  static stack<Pair> stk;
  static bool marked[NMAX + 10];
  static int in[NMAX + 10], low[NMAX + 10], cur;
  in[u] = low[u] = ++cur;
  for (int v : G[u]) {
    if (v == f) f = 0;  // 应对重边
    else if (in[v]) low[u] = min(low[u], in[v]);
    else {
      stk.push(Pair(u, v));  // stk 内存储 DFS 树上的边
      bcc(v, u);
      low[u] = min(low[u], low[v]);
      if (low[v] > in[u]) {  // 割边 u - v
        T[u].push_back(v);
        T[v].push_back(u);
        stk.pop();
      } else if (low[v] >= in[u]) {  // 可能有点双了
        cnt++;
        int linked = 0, p = n + cnt;  // linked 点数，p 圆方树上的新方点
        auto add = [p, &linked](int x) {
          if (!marked[x]) {
            marked[x] = true;
            T[p].push_back(x);
            T[x].push_back(p);
            linked++;
        }};
        while (!stk.empty()) {
          Pair x = stk.top();
          stk.pop();
          add(x.u);
          add(x.v);
          if (x.u == u && x.v == v) break;
        }
        for (int v : T[p]) marked[v] = false;
        if (linked == 0) cnt--;  // 假点双
}}}}
```

2. 最小树形图：朴素算法

给定一张 n 个点 m 条边的带权有向图，求以 r 为根的最小树形图上的边权总和，如果不存在输出 -1。时间复杂度为 $\mathrm{O}(nm)$。调用 mdst(r) 获得答案，调用前需清空 id 数组。如要求不定根的最小树形图，可以额外添加一个节点，向原图中的每个点连接一条边权为 ∞ 的边。

```
static int n, m, G[NMAX + 10], nxt[MMAX + 10];
static struct Edge { int u, v, w; } E[MMAX + 10], *in[NMAX + 10];
static int id[NMAX + 10], mark[NMAX + 10];
int find(int x) { return id[x] ? id[x] = find(id[x]) : x; }
int dfs(int x) {
  mark[x] = 1; int ret = 1;
  for (int i = G[x]; i; i = nxt[i])
    if (!mark[E[i].v]) ret += dfs(E[i].v);
  return ret;
}
inline int detect(int x) {
  mark[x] = x;
  for (int y = in[x]->u; in[y]; y = in[y]->u)
    if (mark[y]) return mark[y] == x ? y : 0;
    else mark[y] = x;
  return 0;
}
int mdst(int r) {
  if (dfs(r) < n) return -1;
  int ret = 0;
  while (true) {
    memset(in, 0, sizeof(in));
    memset(mark, 0, sizeof(mark));
    for (auto *e = E + 1; e <= E + m; e++)
      if (e->u != e->v && e->v != r && (!in[e->v] || e->w < in[e->v]->w))
        in[e->v] = e;
    int p = 0, t = 0;
    for (int x = 1; x <= n; x++, t |= p) if (!mark[x] && in[x]) {
      if (!(p = detect(x))) continue;
      ret += in[p]->w;
      for (int x = in[p]->u; x != p; x = in[x]->u)
        id[find(x)] = p, ret += in[x]->w;
      for (auto *e = E + 1; e <= E + m; e++) {
        int u = find(e->u), v = find(e->v);
        if (u != p && v == p) e->w -= in[e->v]->w;
        e->u = u; e->v = v;
    }}
    if (!t) break;
  }
  for (int x = 1; x <= n; x++) if (in[x]) ret += in[x]->w;
  return ret;
}
```

3. blossom algorithm

```
#include <stdio.h>
#include <algorithm>
#include <queue>
using namespace std;
const int maxn = 510;
struct node {
  int v;
  node *next;
} pool[maxn*maxn*2] , *g[maxn];
```

```
int top,n , m,match[maxn];
int kind[maxn] , pre[maxn] , vis[maxn] , c[maxn];
queue < int > q;
int f[maxn],ans;
void add ( int u , int v ) {node *tmp = &pool[++top];tmp -> v = v; tmp -> next = g[u]; g[u] = tmp;}
int find ( int x ) {int i , t;for ( i = x ; c[i] > 0 ; i = c[i] ) ;while ( c[x] > 0 ) {t = c[x];c[x] = i;x = t;}return i;}
void getpath ( int x , int tar , int root ) {
  int t;
  while ( x != root ) {t = match[x];match[tar] = x;match[x] = tar;tar = t;x = pre[t];}
  match[tar] = x;match[x] = tar;
}
int lca ( int u , int v , int root ) {
  int i;for ( i = 1 ; i <= n ; i++ ) f[i] = 0;
  while ( find ( u ) != root ) {u = find ( u );f[u] = 1;if ( !match[u] ) break;u = pre[match[u]];}
  f[root] = 1;
  while ( find ( v ) != root ) {v = find ( v );if ( f[v] == 1 ) return v;if ( !match[v] ) break;v = pre[match[v]];}
  return root;
}
void blossom ( int x , int y , int l ) {
  while ( find ( x ) != l ) {pre[x] = y;y = match[x];if ( kind[match[x]] == 2 ) {kind[match[x]] = 1;q.push ( match[x] );}if ( find ( x ) == x ) c[find(x)] = l;if ( find ( match[x] ) == match[x] ) c[find(match[x])] = l;x = pre[y];}
}
void bfs ( int x ) {
  int k , i , z;
  for ( i = 1 ; i <= n ; i++ ) {
    kind[i] = pre[i] = vis[i] = 0;c[i] = -1;
  }
  while ( q.size () ) q.pop ();q.push ( x );kind[x] = 1; vis[x] = 1;
  while ( q.size () ) {
    k = q.front (); q.pop ();
    for ( node *j = g[k] ; j ; j = j -> next ) {
      if ( !vis[j->v] ) {
        if ( !match[j->v] ) {
          getpath ( k , j -> v , x );
          return ;
        }
        else {
          kind[j->v] = 2;
          kind[match[j->v]] = 1;
          pre[j->v] = k;
          vis[j->v] = 1; vis[match[j->v]] = 1;
          q.push ( match[j->v] );
        }
      }
      else {
        if ( find ( k ) == find ( j -> v ) ) continue;
        if ( kind[find(j->v)] == 1 ) {
          z = lca ( k , j -> v , x );
          blossom ( k , j -> v , z );
          blossom ( j -> v , k , z );
        }
      }
    }
  }
}
void work () {
  int i , u , v;
  scanf ( "%d%d" , &n , &m );
  for ( i = 1 ; i <= m ; i++ ) {
    scanf ( "%d%d" , &u , &v );
    add ( u , v ); add ( v , u );
  }
  for ( i = 1 ; i <= n ; i++ ) {
    if ( !match[i] ) bfs ( i );
  }
  for ( i = 1 ; i <= n ; i++ ) if ( match[i] ) ans++;
  printf ( "%d\n" , ans / 2 );
  for ( i = 1 ; i <= n ; i++ ) printf ( "%d%c" , match[i] , i==n?'\n':' ' );
}
int main () {
  work ();
  return 0;
}
```

4. euler_tour

```
stack < int > s;
void dfs ( int i ) {
  for ( node *j = g[i] ; j ; j = j -> next ) if ( !j -> taboo ) {
    s.push ( j -> f );
    j -> taboo = 1;
    dfs ( j -> v );
    ans[++index] = s.top ();
    s.pop ();
  }
}
```

5. 最小圆覆盖

```

#include <stdio.h>
#include <algorithm>
#include <math.h>

using namespace std;

const int maxn = 120000;
struct point {
  double x , y;
} a[maxn] , c , tmp1 , tmp2;
int n;
double r;
double tmp;
double dis ( point x1 , point x2 ) {return sqrt ( (x1.x-x2.x)*(x1.x-x2.x) + (x1.y-x2.y)*(x1.y-x2.y) );}
double det ( point x1 , point x2 , point x3 ) {return (x2.x-x1.x) * (x3.y-x1.y) - (x3.x-x1.x) * (x2.y-x1.y);}
double abs ( double x ) {if ( x < 0 ) return -x;return x;}
point getcen ( point x1 , point x2 , point x3 ) {
  double A , B , C , D , E , F;point ret;
  if ( x1.x == x2.x ) A = 0.0, B = 1.0, C = (x1.y+x2.y)/2.0;
  else {
    A = 1.0/((x1.y-x2.y) / (x1.x-x2.x));B = 1.0;
    C = -(x1.y+x2.y)/2.0 - A * (x1.x+x2.x)/2.0;
  }
  if ( x1.x == x3.x ) D = 0.0, E = 1.0, F = (x1.y+x3.y)/2.0;
  else {
    D = 1.0/((x1.y-x3.y) / (x1.x-x3.x));E = 1.0;
    F = -(x1.y+x3.y)/2.0 - D * (x1.x+x3.x)/2.0;
  }
  ret.x = (B * F - C * E) / (A * E - B * D);
  ret.y = (A * F - C * D) / (B * D - A * E);
  return ret;
}
void work () {
  int i , j , k;
  srand(67890);
  scanf ( "%d" , &n );
  for ( i = 1 ; i <= n ; i++ ) scanf ( "%lf%lf" , &a[i].x , &a[i].y );
  random_shuffle ( a + 1 , a + 1 + n );
  if ( n == 2 ) {
    printf ( "%.3lf\n" , dis ( a[1] , a[2] ) / 2.0 );
    return ;
  }
  c.x = a[1].x;c.y = a[1].y;r = 0.0;
  for ( i = 2 ; i <= n ; i++ ) {
    if ( dis ( c , a[i] ) - r > 1e-9 ) {
      c.x = a[i].x;c.y = a[i].y;r = 0.0;
      for ( j = 1 ; j < i ; j++ ) {
        if ( dis ( c , a[j] ) - r > 1e-9 ) {
```

```
          c.x = (a[i].x + a[j].x) / 2.0;
          c.y = (a[i].y + a[j].y) / 2.0;
          r = dis ( a[i] , a[j] ) / 2.0;
          tmp = r; tmp1 = c;
          for ( k = 1 ; k <= j - 1 ; k++ ) {
            if ( dis ( tmp1 , a[k] ) - tmp > 1e-9 ) {
              if ( abs(det ( a[i] , a[j] , a[k] )) < 1e-9 ) continue;
              tmp2 = getcen ( a[i] , a[j] , a[k] );
              tmp = dis ( tmp2 , a[i] );
              tmp1 = tmp2;
            }
          }
          c = tmp1; r = tmp;
        }
      }
    }
  }
  printf ( "%.3lf\n" , r );
}
int main () {
  work ();
  return 0;
}
```

6. 线性筛 & 杜教筛

计算积性函数 $f(n)$ 的前缀和 $F(n)=\sum_{k=1}^{n} f(k)$：先选定辅助函数 $g(n)$ 进行 Dirichlet 卷积，得到递推公式：

$$F(n)=\frac{1}{g(1)}\left(\sum_{k=1}^{n}(f\times g)(k)-\sum_{k=2}^{n} g(k)F\left(\left\lfloor\frac{n}{k}\right\rfloor\right)\right)$$

对于 Euler 函数 $\varphi(n)$，选定 $g(n)=1$，得：

$$\Phi(n)=\frac{n(n+1)}{2}-\sum_{k=2}^{n}\Phi\left(\left\lfloor\frac{n}{k}\right\rfloor\right)$$

对于 Mobius 函数 $\mu(n)$，选定 $g(n)=1$，得：

$$\mathrm{M}(n)=1-\sum_{k=2}^{n}\mathrm{M}\left(\left\lfloor\frac{n}{k}\right\rfloor\right)$$

如果没有预处理，时间复杂度为 $\Theta(n^{3/4})$，空间复杂度为 $\Theta(\sqrt{n})$。如果预处理前 $\Theta(n^{2/3})$ 项前缀和，则时空复杂度均变为 $\Theta(n^{2/3})$。下面的代码以 Euler 函数为例，能够在 1s 内计算 10^{10} 内的数据。可以多次调用。

```
#define S 17000000  // for F(10^10)
static int pc, pr[S + 10];
static i64 phi[S + 10];
static unordered_map<i64, i64> dat;
inline void sub(i64 &a, i64 b) { a -= b; if (a < 0) a += MOD; }
inline i64 c2(i64 n) { n %= MOD; return n * (n + 1) % MOD * INV2 % MOD; }
i64 F(i64 n) {  // 杜教筛
  if (n <= S) return phi[n];
  if (dat.count(n)) return dat[n];
  i64 &r = dat[n] = c2(n);
  for (i64 i = 2, l; i <= n; i = l + 1) {
    i64 p = n / i;
    l = n / p;
    sub(r, (l - i + 1) * F(p) % MOD);  // (l - i + 1) % MOD?
  }
  return r;
}
phi[1] = 1;  // 线性筛
for (int i = 2; i <= S; i++) {
  if (!phi[i]) {
    pr[pc++] = i;
    phi[i] = i - 1;
  }
  for (int j = 0; pr[j] * i <= S; j++) {
    int p = pr[j];
    if (i % p) phi[i * p] = phi[i] * (p - 1);
    else {
      phi[i * p] = phi[i] * p;
      break;
}}}
for (int i = 2; i <= S; i++) add(phi[i], phi[i - 1]);
```

7. 类 Euclid 算法

类 Euclid 算法在模意义下计算：

$$\sum_{k=0}^{n} k^p\left\lfloor\frac{ak+b}{c}\right\rfloor^q$$

其中所有参数非负，在计算过程中始终保证 $K=p+q$ 不增，$a,\,c\geqslant 1$ 且 $b\geqslant 0$。需要 Bernoulli 数（$B_1=+1/2$）来计算自然数幂前缀和 $S_p(x)=\sum_{k=1}^{x} k^p=\sum_{k=1}^{p+1} a_k^{(p)} x^k$，其中 $a_k^{(p)}=\frac{1}{p+1}\binom{p+1}{k}B_{p+1-k}$。代码中 has 为访问标记数组，每次使用前需清空，val 为记忆化使用的数组，qpow 是快速幂，S 是自然数幂前缀和，A 记录了 $a_k^{(p)}$，C 是组合数。时空复杂度为 $\mathrm{O}(K^3\log\max\{a,\,c\})$。

算法主要分为三个情况，其中 $a\geqslant c$ 和 $b\geqslant c$ 的情况比较简单。当 $a,\,b<c$ 时，用 $j=\lfloor(ak+b)/c\rfloor$ 进行代换，注意最终要转化为 $\lfloor(c(j-1)+c-b-1)/a\rfloor<k\leqslant\lfloor(cj+c-b-1)/a\rfloor$，再进行一次分部求和即可。注意处理 $k\leqslant n$ 这个条件。

```
i64 F(i64 n, i64 a, i64 b, i64 c, int p, int q, int d = 0) {
  if (n < 0) return 0;
  if (has[d][p][q]) return val[d][p][q];
  has[d][p][q] = true;
  i64 &ret = val[d++][p][q] = 0;  // 后面的 d 均加 1
  if (!q) ret = S(n, p) + (!p);   // 注意 p = 0 的边界情况
  else if (!a) ret = qpow(b / c, q) * (S(n, p) + (!p)) % MOD;
  else if (a >= c) {
    i64 m = a / c, r = a % c, mp = 1;
    for (int j = 0; j <= q; j++, mp = mp * m % MOD)
      add(ret, C[q][j] * mp % MOD * F(n, r, b, c, p + j, q - j, d) % MOD);
  } else if (b >= c) {
    i64 m = b / c, r = b % c, mp = 1;
    for (int j = 0; j <= q; j++, mp = mp * m % MOD)
      add(ret, C[q][j] * mp % MOD * F(n, a, r, c, p, q - j, d) % MOD);
  } else {
    i64 m = (a * n + b) / c;
    for (int k = 0; k < q; k++) {
      i64 s = 0;
      for (int i = 1; i <= p + 1; i++)
        add(s, A[p][i] * F(m - 1, c, c - b - 1, a, k, i, d) % MOD);
      add(ret, C[q][k] * s % MOD);
    }
    ret = (qpow(m, q) * S(n, p) - ret) % MOD;
  } return ret;
}
```

8. dinic

```
void add ( int u , int v , int f ) {
  node *tmp1 = &pool[++top] , *tmp2 = &pool[++top];
  tmp1 -> v = v; tmp1 -> f = f; tmp1 -> next = g[u]; g[u] = tmp1; tmp1 -> rev = tmp2;
  tmp2 -> v = u; tmp2 -> f = 0; tmp2 -> next = g[v]; g[v] = tmp2; tmp2 -> rev = tmp1;
}
bool makelevel () {
  int i , k;
  queue < int > q;
  for ( i = 1 ; i <= 1 + n + n + 1 ; i++ ) level[i] = -1;
  level[1] = 1; q.push ( 1 );
  while ( q.size () != 0 ) {
    k = q.front (); q.pop ();
    for ( node *j = g[k] ; j ; j = j -> next )
      if ( j -> f && level[j->v] == -1 ) {
        level[j->v] = level[k] + 1;
        q.push ( j -> v );
        if ( j -> v == 1 + n + n + 1 ) return true;
      }
  }
  return false;
```

```
}
int find ( int k , int key ) {
  if ( k == 1 + n + n + 1 ) return key;
  int i , s = 0;
  for ( node *j = g[k] ; j ; j = j -> next )
    if ( j -> f && level[j->v] == level[k] + 1 && s < key ) {
      i = find ( j -> v , min ( key - s , j -> f ) );
      j -> f -= i;
      j -> rev -> f += i;
      s += i;
    }
  if ( s == 0 ) level[k] = -1;
  return s;
}
void dinic () {
  int ans = 0;
  while ( makelevel () == true ) ans += find ( 1 , 99999 );
  //printf ( "%d\n" , ans );
  if ( ans == sum ) printf ( "^_^\n" );
  else printf ( "T_T\n" );
}
```

9. 费用流

```
void add ( int u , int v , int f , int c ) {
  node *tmp1 = &pool[++top] , *tmp2 = &pool[++top];
  tmp1 -> v = v; tmp1 -> f = f; tmp1 -> c = c; tmp1 -> next = g[u]; g[u] = tmp1; tmp1 -> rev = tmp2;
  tmp2 -> v = u; tmp2 -> f = 0; tmp2 -> c = -c; tmp2 -> next = g[v]; g[v] = tmp2; tmp2 -> rev = tmp1;
}
bool spfa () {
  int i , k;
  queue < int > q;
  for ( i = 1 ; i <= 1 + n*m*3 + 1 ; i++ ) dis[i] = 9999999, f[i] = 0;
  dis[1] = 0; f[1] = 1; q.push ( 1 );
  while ( q.size () != 0 ) {
    k = q.front (); q.pop (); f[k] = 0;
    for ( node *j = g[k] ; j ; j = j -> next )
      if ( j -> f && dis[j->v] > dis[k] + j -> c ) {
          dis[j->v] = dis[k] + j -> c;
          from[j->v] = j;
          if ( f[j->v] == 0 ) q.push ( j -> v );
          f[j->v] = 1;
      }
  }
  if ( dis[1+n*m*3+1] != 9999999 ) return true;
  return false;
}
int find () {
  int i , f = 999999 , s = 0;
  for ( i = 1+n*m*3+1 ; i != 1 ; i = from[i] -> rev -> v ) f = min ( f , from[i] -> f );
  flow += f;
  for ( i = 1+n*m*3+1 ; i != 1 ; i = from[i] -> rev -> v ) from[i] -> f -= f, from[i] -> rev -> f += f;
  return f * dis[1+n*m*3+1];
}
void dinic () {
  int ans = 0;
  while ( spfa () == true ) ans += find ();
  //printf ( "%d\n" , flow );
  if ( flow == sum && sum == sum1 ) printf ( "%d\n" , ans );
  else printf ( "-1\n" );
}
```

10. 后缀排序：DC3

DC3 后缀排序算法，时空复杂度 $\Theta(n)$。字符串本体 s 数组、sa 数组和 rk 数组都要求 3 倍空间。下标从 0 开始，字符串长度为 n，字符集 Σ 为 $[0, m]$。partial_sum 需要标准头文件 numeric。

```
#define CH(i, n) i < n ? s[i] : 0
static int ch[NMAX + 10][3], seq[NMAX + 10];
static int arr[NMAX + 10], tmp[NMAX + 10], cnt[NMAX + 10];
inline bool cmp(int i, int j) {
  return ch[i][0] == ch[j][0] && ch[i][1] == ch[j][1] && ch[i][2] == ch[j][2];
}
inline bool sufcmp(int *s, int *rk, int n, int i, int j) {
  if (s[i] != s[j]) return s[i] < s[j];
  if ((i + 1) % 3 && (j + 1) % 3) return rk[i + 1] < rk[j + 1];
  if (s[i + 1] != s[j + 1]) return s[i + 1] < s[j + 1];
  return rk[i + 2] < rk[j + 2];
}
void radix_sort(int n, int m, int K, bool init = true) {
  if (init) for (int i = 0; i < n; i++) arr[i] = i;
  int *a = arr, *b = tmp;
  for (int k = 0; k < K; k++) {
    memset(cnt, 0, sizeof(int) * (m + 1));
    for (int i = 0; i < n; i++) cnt[ch[a[i]][k]]++;
    partial_sum(cnt, cnt + m + 1, cnt);
    for (int i = n - 1; i >= 0; i--) b[--cnt[ch[a[i]][k]]] = a[i];
    swap(a, b);
  }
  if (a != arr) memcpy(arr, tmp, sizeof(int) * n);
}
void suffix_sort(int *s, int n, int m, int *sa, int *rk) {
  s[n] = 0; n++;
  int p = 0, q = 0;
  for (int i = 1; i < n; i += 3, p++) for (int j = 0; j < 3; j++)
    ch[p][2 - j] = CH(i + j, n);
  for (int i = 2; i < n; i += 3, p++) for (int j = 0; j < 3; j++)
    ch[p][2 - j] = CH(i + j, n);
  radix_sort(p, m, 3);
  for (int i = 0; i < p; i++) {
    if (!q || (q && !cmp(arr[i - 1], arr[i]))) q++;
    s[n + arr[i]] = q;
  }
  if (q < p) suffix_sort(s + n, p, q, sa + n, rk + n);
  else {
    for (int i = 0; i < p; i++) sa[n + s[n + i] - 1] = i;
    for (int i = 0; i < p; i++) rk[n + sa[n + i]] = i + 1;
  }
  m = max(m, p);
  p = q = 0;
  for (int i = 1; i < n; i += 3, p++) rk[i] = rk[n + p];
  for (int i = 2; i < n; i += 3, p++) rk[i] = rk[n + p];
  for (int i = 0; i < n; i++) if (i % 3) seq[rk[i] - 1] = i;
  for (int i = 0; i < n; i += 3, q++) {
    ch[i][0] = i + 1 < n ? rk[i + 1] : 0;
    ch[i][1] = s[i];
    arr[q] = i;
  }
  radix_sort(q, m, 2, false);
  for (int i = seq[0] == n - 1, j = arr[0] == n - 1, k = 0; i < p || j < q; k++) {
    if (i == p) sa[k] = arr[j++];
    else if (j == q) sa[k] = seq[i++];
    else if (sufcmp(s, rk, n, seq[i], arr[j])) sa[k] = seq[i++];
    else sa[k] = arr[j++];
  }
  for (int i = 0; i < n - 1; i++) rk[sa[i]] = i + 1;
}
```

11. AC 自动机

时间复杂度 $O(n+m+z+n|\Sigma|)$，n 是模板串总长度，m 是目标串长度，z 是总匹配次数，Σ 是字符集。如果想移掉 $n|\Sigma|$ 这一项，需要使用哈希表。传入的字符串下标从 0 开始。

```
struct Node {
  Node() : mark(false), suf(NULL), nxt(NULL) {
    memset(ch, 0, sizeof(ch));
  }
  bool mark;
  Node *suf, *nxt, *ch[SIGMA];
};
void insert(Node *x, char *s) {
  for (int i = 0; s[i]; i++) {
    int c = s[i] - 'a';
    if (!x->ch[c]) x->ch[c] = new Node;
    x = x->ch[c];
  }
  x->mark = true;
}
void build_automaton(Node *r) {
  queue<Node *> q;
  for (int c = 0; c < SIGMA; c++) {
    if (!r->ch[c]) continue;
    r->ch[c]->suf = r;
    q.push(r->ch[c]);
  }
  while (!q.empty()) {
    Node *x = q.front();
    q.pop();
    for (int c = 0; c < SIGMA; c++) {
      Node *v = x->ch[c]; if (!v) continue;
      Node *y = x->suf;
      while (y != r && !y->ch[c]) y = y->suf;
      if (y->ch[c]) y = y->ch[c];
      v->suf = y;
      if (y->mark) v->nxt = y;
      else v->nxt = y->nxt;
      q.push(v);
}}}
void search(Node *x, char *s) {
  for (int i = 0; s[i]; i++) {
    int c = s[i] - 'a';
    while (x->suf && !x->ch[c]) x = x->suf;
    if (x->ch[c]) x = x->ch[c];
    if (x->mark) print(i + 1, x->data);
    for (Node *y = x->nxt; y; y = y->nxt) print(i + 1, y->data);
}}
```

12. 后缀排序：倍增算法

倍增法后缀排序，时间复杂度为 $\Theta(n\log n)$。suffix_sort 是本体，结果输出到 sa 数组和 rk 数组（排名数组）。参数 s 是字符串，下标从 0 开始，n 是字符串长度，m 是字符集大小（一般为 255，字符集为 $\Sigma=\{0,1,2,\ldots,m\}$，0 是保留的 $ 字符）。算法运行完毕后 sa 数组里面存的是从 0 开始的下标，rk 数组里面存的是从 1 开始的排名值。

另外附带一个线性求 lcp 数组的代码。lcp 数组下标从 1 开始，实际上只有在 2 到 n 范围内的才是有效值。参数意义与 suffix_sort 相同。

```
static int sa[NMAX + 10], rk[NMAX + 10], lcp[NMAX + 10];
void suffix_sort(const char *s, int n, int m) {
  static int x[NMAX + 10], y[NMAX + 10], cnt[NMAX + 10], i;
  for (i = 0; i < n; i++) cnt[s[i]]++;
  for (i = 1; i <= m; i++) cnt[i] += cnt[i - 1];
  for (i = 0; i < n; i++) sa[--cnt[s[i]]] = i;
  for (i = 1, m = 1, rk[sa[0]] = 1; i < n; i++) {
    if (s[sa[i - 1]] != s[sa[i]]) m++;
    rk[sa[i]] = m;
  }
  for (int l = 1; l < n; l <<= 1) {
    memset(cnt, 0, sizeof(int) * (m + 1));
    for (i = 0; i < n; i++) cnt[y[i] = i + l < n ? rk[i + l] : 0]++;
    for (i = 1; i <= m; i++) cnt[i] += cnt[i - 1];
    for (i = n - 1; i >= 0; i--) x[--cnt[y[i]]] = i;
    memset(cnt, 0, sizeof(int) * (m + 1));
    for (i = 0; i < n; i++) cnt[rk[i]]++;
    for (i = 1; i <= m; i++) cnt[i] += cnt[i - 1];
    for (i = n - 1; i >= 0; i--) sa[--cnt[rk[x[i]]]] = x[i];
    for (i = 1, m = 1, x[sa[0]] = 1; i < n; i++) {
      if (rk[sa[i - 1]] != rk[sa[i]] || y[sa[i - 1]] != y[sa[i]]) m++;
      x[sa[i]] = m;
    }
    memcpy(rk, x, sizeof(int) * n);
}}
void compute_lcp(const char *s, int n) {
  int j = 0, p;
  for (int i = 0; i < n; i++, j = max(0, j - 1)) {
    if (rk[i] == 1) {
      j = 0;
      continue;
    }
    p = sa[rk[i] - 2];
    while (p + j < n && i + j < n && s[p + j] == s[i + j]) j++;
    lcp[rk[i]] = j;
}}
```

13. 后缀排序：SA-IS

SA-IS 后缀数组排序。字符串存在 str 中，下标从 1 开始，长度为 n，并且 str[n + 1] 为哨兵字符，编号为 1。后缀数组放在 sa 中，下标从 1 开始。时空复杂度为 $\Theta(n)$。其中使用了 vector<bool> 来优化缓存命中率。

```
#define rep(i, l, r) for (register int i = (l); i <= (r); ++i)
#define rrep(i, r, l) for (register int i = (r); i >= (l); --i)
#define PUTS(x) sa[cur[str[x]]--] = x
#define PUTL(x) sa[cur[str[x]]++] = x
#define LMS(x) (!type[x - 1] && type[x])
#define RESET memset(sa + 1, 0, sizeof(int) * (n + 1));
  memcpy(cur + 1, cnt + 1, sizeof(int) * m);
#define INDUCE rep(i, 1, m) cur[i] = cnt[i - 1] + 1;
  rep(i, 1, n + 1) if (sa[i] > 1 && !type[sa[i] - 1]) PUTL(sa[i] - 1);
  memcpy(cur + 1, cnt + 1, sizeof(int) * m);
  rrep(i, n + 1, 1) if (sa[i] > 1 && type[sa[i] - 1]) PUTS(sa[i] - 1);
void sais(int n, int m, int *str, int *sa) {
  static int id[NMAX + 10];
  vector<bool> type(n + 2);
  type[n + 1] = true;
  rrep(i, n, 1) type[i] = str[i] == str[i + 1] ? type[i + 1] : str[i] < str[i + 1];
  int cnt[m + 1], cur[m + 1], idx = 1, y = 0, rt, lrt, *ns = str + n + 2, *nsa = sa + n + 2;
  memset(cnt, 0, sizeof(int) * (m + 1));
  rep(i, 1, n + 1) cnt[str[i]]++;
  rep(i, 1, m) cnt[i] += cnt[i - 1];
  RESET rep(i, 2, n + 1) if (LMS(i)) PUTS(i); INDUCE
  memset(id + 1, 0, sizeof(int) * n);
  rep(i, 2, n + 1) if (LMS(sa[i])) {
    register int x = sa[i];
    for (rt = x + 1; !LMS(rt); rt++) ;
    id[x] = y && rt + y == lrt + x && !memcmp(str + x, str + y, sizeof(int) * (rt - x + 1)) ? idx : ++idx;
    y = x, lrt = rt;
  }
  int len = 0, pos[(n >> 1) + 1];
  rep(i, 1, n) if (id[i]) {
    ns[++len] = id[i];
    pos[len] = i;
  }
  ns[len + 1] = 1, pos[len + 1] = n + 1;
  if (len == idx - 1) rep(i, 1, len + 1) nsa[ns[i]] = i;
  else sais(len, idx, ns, nsa);
```

```
  RESET rrep(i, len + 1, 1) PUTS(pos[nsa[i]]); INDUCE
}
static int str[NMAX * 3 + 10], sa[NMAX * 3 + 10];
```

14. pam

```

#include <stdio.h>
#include <algorithm>
#include <string.h>
using namespace std;
const int NN = 310000;
struct node {
  int len , cnt,ch[30] , fail;
} p[NN];
int top,n,last;
char z[NN];
long long ans;
void work () {
  int i , tmp;
  scanf ( "%s" , z + 1 );
  n = strlen ( z + 1 );
  top = 2;
  p[1].fail = 2; p[2].fail = 1;
  p[1].len = 0; p[2].len = -1;
  z[0] = '$';
  last = 1;
  for ( i = 1 ; i <= n ; i++ ) {
    while ( z[i] != z[i-p[last].len-1] ) last = p[last].fail;
    if ( !p[last].ch[z[i]-'a'+1] ) {
      p[last].ch[z[i]-'a'+1] = ++top;
      p[top].len = p[last].len + 2;
      tmp = p[last].fail;
      while ( z[i] != z[i-p[tmp].len-1] ) tmp = p[tmp].fail;
      if ( p[top].len > 1 && p[tmp].ch[z[i]-'a'+1] ) p[top].fail = p[tmp].ch[z[i]-'a'+1];
      else p[top].fail = 1;
    }
    last = p[last].ch[z[i]-'a'+1];
    p[last].cnt++;
  }
  for ( i = top ; i >= 1 ; i-- ) p[p[i].fail].cnt += p[i].cnt;
  for ( i = 1 ; i <= top ; i++ ) {
    //printf ( "%d %d\n" , p[i].len , p[i].cnt );
    ans = max ( ans , (long long)p[i].len * p[i].cnt );
  }
  printf ( "%lld\n" , ans );
}
int main () {
  work ();
  return 0;
}
```

15. ntt

```
#include <stdio.h>
#include <algorithm>
using namespace std;
const long long maxn = 120000;
const long long mod = 998244353;
const long long omega = 3;
long long a[maxn*4] , b[maxn*4] , c[maxn*4] , d[maxn*4];
long long n , m , N , in;
long long pow ( long long f , long long x ) {long long s = 1;while ( x ) {if ( x % 2 ) s = (s*f) % mod;f = (f*f) % mod; x >>= 1;}return s;}
long long inv ( long long x ) {return pow ( x , mod - 2 );}
long long rev ( long long x ) {long long i , y;i = 1; y = 0;while ( i < N ) {y = y * 2 + (x%2);i <<= 1; x >>= 1;}return y;}
void br ( long long *x ) {long long i;for ( i = 0 ; i < N ; i++ ) d[rev(i)] = x[i];for ( i = 0 ; i < N ; i++ ) x[i] = d[i];}
void FFT ( long long *x , long long f ) {
  long long i , j , s , k;
  long long w , wm , u , t;
  br ( x );
  for ( s = 2 ; s <= N ; s *= 2 ) {
    k = s / 2;
    wm = pow ( omega , (mod-1) / s );
    if ( f == -1 ) wm = inv ( wm );
    for ( i = 0 ; i < N ; i += s ) {
      w = 1;
      for ( j = 1 ; j <= k ; j++ ) {
        u = x[i+j-1]; t = (x[i+j-1+k]*w) % mod;
        x[i+j-1] = (u + t) % mod;
        x[i+j-1+k] = (u - t + mod) % mod;
        w = (w*wm) % mod;
      }
    }
  }
  if ( f == -1 ) for ( i = 0 ; i < N ; i++ ) x[i] = (x[i] * in) % mod;
}
void work () {
  long long i;
  scanf ( "%lld%lld" , &n , &m );
  N = 1;
  while ( N < n + m + 2 ) N = N * 2;
  for ( i = 0 ; i <= n ; i++ ) scanf ( "%lld" , &a[i] );
  for ( i = 0 ; i <= m ; i++ ) scanf ( "%lld" , &b[i] );
  in = inv ( N );
  FFT ( a , 1 ); FFT ( b , 1 );
  for ( i = 0 ; i < N ; i++ ) c[i] = (a[i]*b[i]) % mod;
  FFT ( c , -1 );
  for ( i = 0 ; i <= n + m ; i++ ) printf ( "%lld%c" , c[i] , i==n+m?'\n':' ' );
}
int main () {
  work ();
  return 0;
}
```

16. fft

```
#include <stdio.h>
#include <algorithm>
#include <math.h>
using namespace std;
const int maxn = 120000;
const double pi = acos(-1);
struct complex {
  double r , i;
} a[maxn*4] , b[maxn*4] , c[maxn*4] , d[maxn*4];
complex operator + ( complex x1 , complex x2 ) {complex y;y.r = x1.r + x2.r;y.i = x1.i + x2.i;return y;}
complex operator - ( complex x1 , complex x2 ) {complex y;y.r = x1.r - x2.r;y.i = x1.i - x2.i;return y;}
complex operator * ( complex x1 , complex x2 ) {complex y;y.r = x1.r * x2.r - x1.i * x2.i;y.i = x1.r * x2.i + x1.i * x2.r;return y;}
int n , m , N;
int rev ( int x ) {int i , y;i = 1; y = 0;while ( i < N ) {y = y * 2 + (x%2);x >>= 1; i <<= 1;}return y;}
void br ( complex *x ) {int i;for ( i = 0 ; i < N ; i++ ) d[rev(i)] = x[i];for ( i = 0 ; i < N ; i++ ) x[i] = d[i];}
void FFT ( complex *x , int f ) {
  int i , j , s , k;
  complex w , wm , u , t;
  br ( x );
  for ( s = 2 ; s <= N ; s *= 2 ) {
    k = s / 2;
    wm.r = cos(2*pi/s); wm.i = sin(2*pi/s) * f;
    for ( i = 0 ; i < N ; i += s ) {
      w.r = 1.0; w.i = 0.0;
      for ( j = 1 ; j <= k ; j++ ) {
        u = x[i+j-1]; t = x[i+j-1+k] * w;
        x[i+j-1] = u + t;
        x[i+j-1+k] = u - t;
        w = w * wm;
      }
    }
```

```
  }
  if ( f == -1 ) for ( i = 0 ; i < N ; i++ ) x[i].r = x[i].r / N;
}
void work () {
  int i;
  scanf ( "%d%d" , &n , &m );
  N = 1;
  while ( N < n + m + 2 ) N = N * 2;
  for ( i = 0 ; i <= n ; i++ ) scanf ( "%lf" , &a[i].r );
  for ( i = 0 ; i <= m ; i++ ) scanf ( "%lf" , &b[i].r );
  FFT ( a , 1 ); FFT ( b , 1 );
  for ( i = 0 ; i < N ; i++ ) c[i] = a[i] * b[i];
  FFT ( c , -1 );
  for ( i = 0 ; i <= n + m ; i++ ) printf ( "%d%c" , int (c[i].r + 0.5) , i==n+m?'\n':' ' );
}
int main () {
  work ();
  return 0;
}
```

17. lct

```
struct node {
  long long x;
  long long lm , lp , rev;
  long long s , siz;
  long long ch[4] , fa;
} p[maxn];
void cut ( long long x , long long kind ) {
  p[p[x].ch[kind]].fa *= -1;
  p[x].ch[kind] = 0;
  update ( x );
}
void down ( long long x ) {
  if ( p[x].fa > 0 ) down ( p[x].fa );
  pushdown ( x );
}
void rotate ( long long x , long long kind ) {
  long long y = p[x].fa;
  if ( p[y].fa > 0 ) p[p[y].fa].ch[y==p[p[y].fa].ch[1]] = x;
  p[x].fa = p[y].fa;
  if ( p[x].ch[kind^1] ) p[p[x].ch[kind^1]].fa = y;
  p[y].ch[kind] = p[x].ch[kind^1];
  p[y].fa = x;
  p[x].ch[kind^1] = y;
  update ( y ); update ( x );
}
void splay ( long long x ) {
  down ( x );
  for ( ; p[x].fa > 0 ; rotate ( x , x==p[p[x].fa].ch[1]) )
    if ( p[p[x].fa].fa > 0 && (x==p[p[x].fa].ch[1]) == (p[x].fa==p[p[p[x].fa].fa].ch[1]) )
      rotate ( p[x].fa , x==p[p[x].fa].ch[1] );
}
void access ( long long x ) {
  splay ( x );
  cut ( x , 1 );
  for ( ; p[x].fa != 0 ; ) {
    splay ( -p[x].fa );
    cut ( -p[x].fa , 1 );
    p[-p[x].fa].ch[1] = x;
    update ( -p[x].fa );
    p[x].fa *= -1;
    splay ( x );
  }
}
void makeroot ( long long x ) {
  access ( x );
  p[x].rev ^= 1;
  swap ( p[x].ch[0] , p[x].ch[1] );
}
void link ( long long x , long long y ) {
  makeroot ( y );
  p[y].fa = -x;
}
```

18. 左偏树

核心操作split和merge，merge时候让小的当堆顶，继续合并右子树和另外一棵树，之后维护左偏性质。

```
struct node {
  int x , i , dist;
  node *ll , *rr;
} pool[maxn] , *t[maxn];
int n , m;
int a[maxn];
int c[maxn] , f[maxn];
int getdist ( node *id ) {
  if ( id == NULL ) return -1;
  return id -> dist;
}
node *merge ( node *id1 , node *id2 ) {
  if ( id1 == NULL ) return id2;
  if ( id2 == NULL ) return id1;
  if ( id1 -> x > id2 -> x ) swap ( id1 , id2 );
  id1 -> rr = merge ( id1 -> rr , id2 );
  if ( getdist ( id1 -> ll ) < getdist ( id1 -> rr ) ) swap ( id1 -> ll , id1 -> rr );
  id1 -> dist = getdist ( id1 -> rr ) + 1;
  return id1;
}
int find ( int x ) {
  int i , t;
  for ( i = x ; c[i] > 0 ; i = c[i] ) ;
  while ( x != i ) {
    t = c[x];
    c[x] = i;
    x = t;
  }
  return i;
}
void Union ( int x , int y ) {
  t[x] = merge ( t[x] , t[y] );
  c[x] += c[y];
  c[y] = x;
}
```

19. 单纯型

```
#define EPS 1e-10
#define INF 1e100

class Simplex {
 public:
  void initialize() {
    scanf("%d%d%d", &n, &m, &t);
    memset(A, 0, sizeof(A));
    for (int i = 1; i <= n; i++) {
      idx[i] = i;
      scanf("%Lf", A[0] + i);
    }
    for (int i = 1; i <= m; i++) {
      idy[i] = n + i;
      for (int j = 1; j <= n; j++) {
        scanf("%Lf", A[i] + j);
        A[i][j] *= -1;
      }
      scanf("%Lf", A[i]);
  }}
  void solve() {
    srand(time(0));
    while (true) {
      int x = 0, y = 0;
      for (int i = 1; i <= m; i++)
        if (A[i][0] < -EPS && (!y || (rand() & 1))) y = i;
      if (!y) break;
      for (int i = 1; i <= n; i++)
        if (A[y][i] > EPS && (!x || (rand() & 1))) x = i;
      if (!x) {
        puts("Infeasible");
        return;
      }
      pivot(x, y);
    }
    while (true) {
      double k = INF;
      int x, y;
      for (x = 1; x <= n; x++)
```

```
    if (A[0][x] > EPS) break;
      if (x > n) break;
      for (int i = 1; i <= m; i++) {
        double d = A[i][x] > -EPS ? INF : -A[i][0] / A[i][x];
          if (d < k) {
            k = d;
            y = i;
      }}
      if (k >= INF) {
        puts("Unbounded");
        return;
      }
      pivot(x, y);
    }
    printf("%.10Lf\n", A[0][0]);
    if (t) {
      static double ans[NMAX + 10];
      for (int i = 1; i <= m; i++)
        if (idy[i] <= n) ans[idy[i]] = A[i][0];
      for (int i = 1; i <= n; i++)
        printf("%.10Lf ", ans[i]);
      printf("\n");
  }}
 private:
  void pivot(int x, int y) {
    swap(idx[x], idy[y]);
    double r = -A[y][x];
    A[y][x] = -1;
    for (int i = 0; i <= n; i++) A[y][i] /= r;
    for (int i = 0; i <= m; i++) {
      if (i == y) continue;
      r = A[i][x];
      A[i][x] = 0;
      for (int j = 0; j <= n; j++)
        A[i][j] += r * A[y][j];
  }}
  int n, m, t;
  double A[NMAX + 10][NMAX + 10];
  int idx[NMAX + 10], idy[NMAX + 10];
};
```

- `lmj/treehash.md`:
- `lmj/matrix_tree_theorem.md`:

  K=度数矩阵-邻接矩阵，K的任意代数余子式（一般删最后一行一列，取正号）即为生成树数量。
- `lmj/virtual_tree.md`:

  把需要的点按照dfs序排序，把相邻的lca求出来，塞进去重新排序，之后按照顺序维护当前的链，如果不是链就pop当前的点，在虚树上面加边。
- `lmj/dominator_tree.md`:
- `lmj/sam.md`:
- `lmj/cdq.md`:
- `lmj/tree_divide_and_conquer(edge_and_node).md`:
- `lmj/number_theory.md`:

  反演/筛
- `lmj/bounded_flow.md`:

  无源汇可行流

  建模方法：

  首先建立一个源ss和一个汇tt，一般称为附加源和附加汇。

  对于图中的每条弧，假设它容量上界为c，下界b，那么把这条边拆为三条只有上界的弧。

  一条为，容量为b；

  一条为，容量为b；

  一条为，容量为c−b。

  其中前两条弧一般称为附加弧。

  然后对这张图跑最大流，以ss为源，以tt为汇，如果所有的附加弧都满流，则原图有可行流。

  这时，每条非附加弧的流量加上它的容量下界，就是原图中这条弧应该有的流量。

  理解方法：

  对于原图中的每条弧，我们把c−b

  称为它的自由流量，意思就是只要它流满了下界，这些流多少都没问题。

  既然如此，对于每条弧，我们强制给v提供b单位的流量，并且强制从u那里拿走b单位的流量，这一步对应着两条附加弧。

  如果这一系列强制操作能完成的话，也就是有一组可行流了。

  注意：这张图的最大流只是对应着原图的一组可行流，而不是原图的最大或最小流。

  有源汇可行流

  建模方法：

  建立弧，容量下界为0，上界为∞。

  然后对这个新图（实际上只是比原图多了一条边）按照无源汇可行流的方法建模，如果所有附加弧满流，则存在可行流。

  求原图中每条边对应的实际流量的方法，同无源汇可行流，只是忽略掉弧

  就好。

  而且这时候弧的流量就是原图的总流量。

  理解方法：

  有源汇相比无源汇的不同就在于，源和汇是不满足流量平衡的，那么连接

  之后，源和汇也满足了流量平衡，就可以直接按照无源汇的方式建模。

  注意：这张图的最大流只是对应着原图的一组可行流，而不是原图的最大或最小流。

  有源汇最大流

  建模方法：

  首先按照有源汇可行流的方法建模，如果不存在可行流，更别提什么最大流了。

  如果存在可行流，那么**在运行过有源汇可行流的图上（就是已经存在流量的那张图，流量不要清零）**，跑一遍从s到t的最大流（这里的s和t是原图的源和汇，不是附加源和附加汇），就是原图的最大流。

  理解方法：

  为什么要在那个已经有了流量的图上跑最大流？因为那张图保证了每条弧的容量下界，在这张图上跑最大流，实际上就是在容量下界全部满足的前提下尽量多得获得“自由流量”。

  注意，在这张已经存在流量的图上，弧也是存在流量的，千万不要忽略这条弧。因为它的相反弧的流量为的流量的相反数，且的容量为0，所以这部分的流量也是会被算上的。

  有源汇最小流

  有源汇最小流的常见建模方法比较多，我就只说我常用的一种。

  建模方法：

  首先按照有源汇可行流的方法建模，但是**不要建立这条弧**。

  然后在这个图上，跑从附加源ss到附加汇tt的最大流。

  这时候再添加弧，下界为0，上界为∞。

  在现在的这张图上，从ss到tt的最大流，就是原图的最小流。

  理解方法：

  我们前面提到过，有源汇可行流的流量只是对应一组可行流，并不是最大或者最小流。

  并且在跑完有源汇可行流之后，弧的流量就是原图的流量。

从这个角度入手，我们想让弧的流量尽量小，就要尽量多的消耗掉那些“本来不需要经过”的流量。

于是我们在添加之前，跑一遍从ss到tt的最大流，就能尽量多的消耗那些流量啦QwQ。

https://www.cnblogs.com/mlystdcall/p/6734852.html

◦ `lmj/Mo's_algorithm.md`:

带修莫队：把时间当成一维，排序时左右端点的块和时间一起排序，模拟时间。

树上莫队：按照欧拉序，如果询问x,y,若lca(x,y)=x，则查询st[x]到st[y]，否则ed[x],st[y]，再加上lca，出现两次的点不算。

◦ `lmj/idea.md`:

启发式合并

离线

hash

数据结构上跑图论算法