字符串 3

后缀数组

算法简介

后缀树的一种替代品，可以用于解决各种字符串问题。

算法实现

后缀数组的核心为 sa 数组，rk 数组以及 height_i 数组。

其中 sa_i 表示排名为 i 的后缀的起始位置，rk_i 表示起始位置为 i 的后缀的排名。

sa 数组可以通过倍增法和基数排序求解，时间复杂度 $O(n\log n)$，根据 $rk_{sa_i}=i$ 可以 $O(n)$ 求解 rk 数组。

height_i 表示 $\text{LCP}(S[sa_i,n],S[sa_{i-1},n])$ 的长度，给出引理

$$\text{height}_{rk_i}\ge \text{height}_{rk_{i-1}}-1$$

显然 $\text{height}_{rk_i}=\text{LCA}(S[i,n],S[sa_{rk_i-1},n]),\text{height}_{rk_{i-1}}=\text{LCP}(S[i-1,n],S[sa_{rk_{i-1}-1},n])$，

假设 $S[i-1,i-1+k]=S[j,j+k]$，显然有 $S[i,i-1+k]=S[j+1,j+k]$，于是上述引理得证。

根据引理，可以 $O(n)$ 求解 height_i 数组。

同时有引理

$$\text{LCP}(S[sa_i,n],S[sa_j,n])=\min_{i\lt k\le j} \text{height}_k$$

可以感性理解为 k 指针从 $i+1$ 滑到 j，期间 LCP 不增且总是取最小，于是上述结论成立。

根据该结论建立 ST 表即可 $O(1)$ 求解每个后缀 LCP 的询问。

接下来考虑任意两个子串 $S_1=S[a,b],S_2=S[c,d]$ 的大小。

若 $\text{LCP}(S[a,n],S[b,n])\ge \min(S_1,S_2)$，显然只需要比较 $|S_1|,|S_2|$，否则比较 rk_a,rk_c 即可。

```
namespace SA{
    int sa[MAXN],rk[MAXN],height[MAXN],x[MAXN],y[MAXN],c[MAXN];
    void get_sa(char *s,int n,int m){//s下标从1开始
        _rep(i,0,m)c[i]=0;
        _rep(i,1,n)c[x[i]=s[i]]++;
        _rep(i,1,m)c[i]+=c[i-1];
        for(int i=n;i;i--)sa[c[x[i]]--]=i;
```

```
        for(int k=1;k<n;k<<=1){
            int pos=0;
            _rep(i,n-k+1,n)y[++pos]=i;
            _rep(i,1,n)if(sa[i]>k)y[++pos]=sa[i]-k;
            _rep(i,0,m)c[i]=0;
            _rep(i,1,n)c[x[i]]++;
            _rep(i,1,m)c[i]+=c[i-1];
            for(int i=n;i;i--)sa[c[x[y[i]]]--]=y[i],y[i]=0;
            swap(x,y);
            pos=0,y[n+1]=0;
_rep(i,1,n)x[sa[i]]=(y[sa[i]]==y[sa[i-1]]&&y[sa[i]+k]==y[sa[i-1]+k])?pos:++p
os;
            if(pos==n)break;
            m=pos;
        }
        _rep(i,1,n)rk[sa[i]]=i;
    }
    void get_height(char *s,int n){//必须先得到sa数组和rk数组
        for(int i=1,k=0;i<=n;i++){
            if(k)k--;
            while(s[i+k]==s[sa[rk[i]-1]+k])k++;
            height[rk[i]]=k;
        }
    }
}
```

算法例题

例题一

洛谷p4051

题意

给定字符串 $S=s_1s_2\cdots s_n$ 将其视为一个环，任意选择环的起点，可以得到 n 个新字符串 $T_k=s_ks_{k+1}\cdots s_{k-1}$

询问将所有 T_i 按字典序从小到大排序后依次取每个 T_i 的最后一个字母构成的字符串。

题解

考虑将 S 倍长为 SS 求 SS 每个后缀的排名，即可得到每个字符串 T_i 的排名。

关于正确性，考虑字符串 abc 于是 T_2 代表的字符串 bca 变为 $bcabc$ 实际上这相当于 T_2 再与 T_2 的前缀拼接而成，不影响排序结果。

时间复杂度 $O(n\log n)$

```
const int MAXN=2e5+5;
namespace SA{
    int sa[MAXN],x[MAXN],y[MAXN],c[MAXN];
    void get_sa(char *s,int n,int m){
        _rep(i,0,m)c[i]=0;
        _rep(i,1,n)c[x[i]=s[i]]++;
        _rep(i,1,m)c[i]+=c[i-1];
        for(int i=n;i;i--)sa[c[x[i]]--]=i;
        for(int k=1;k<n;k<<=1){
            int pos=0;
            _rep(i,n-k+1,n)y[++pos]=i;
            _rep(i,1,n)if(sa[i]>k)y[++pos]=sa[i]-k;
            _rep(i,0,m)c[i]=0;
            _rep(i,1,n)c[x[i]]++;
            _rep(i,1,m)c[i]+=c[i-1];
            for(int i=n;i;i--)sa[c[x[y[i]]]--]=y[i],y[i]=0;
            swap(x,y);
            pos=0,y[n+1]=0;
_rep(i,1,n)x[sa[i]]=(y[sa[i]]==y[sa[i-1]]&&y[sa[i]+k]==y[sa[i-1]+k])?pos:++
pos;
            if(pos==n)break;
            m=pos;
        }
    }
}
char buf[MAXN];
int main()
{
    scanf("%s",buf+1);
    int n=strlen(buf+1);
    _rep(i,1,n)buf[i+n]=buf[i];
    buf[2*n+1]='\0';
    SA::get_sa(buf,n<<1,'z');
    _rep(i,1,2*n){
        if(SA::sa[i]<=n)
        putchar(buf[SA::sa[i]+n-1]);
    }
    return 0;
}
```

例题二

洛谷p2870

题意

给定一个字符串 S 和一个空串 T。每个可以选择 S 的首字符或末字符，将其删去后加入到 T 末尾。

问所有可能的 T 中字典序最小的。

题解

考虑贪心，假设现在字符串为 $s_{L}s_{L+1}\cdots s_{R-1}s_R$。显然选取 s_L,s_R 中字典序最小的最优。

如果 $s_L=s_R$。接下来考虑选择 s_{L+1},s_{R-1} 中字典序最小的，直到比较到端点为止。

上述操作等价于比较 $S[L,n]$ 和 $S[1,R]$ 的字典序。考虑构造字符串 $s_1s_2\cdots s_n+\text{\0}+s_n\cdots s_2s_1$。

于是可以通过后缀数组得到 $S[L,n]$ 和 $S[1,R]$ 的排名，时间复杂度 $O(n\log n)$。

```
const int MAXN=1e6+5;
namespace SA{
    int sa[MAXN],rk[MAXN],x[MAXN],y[MAXN],c[MAXN];
    void get_sa(char *s,int n,int m){
        _rep(i,0,m)c[i]=0;
        _rep(i,1,n)c[x[i]=s[i]]++;
        _rep(i,1,m)c[i]+=c[i-1];
        for(int i=n;i;i--)sa[c[x[i]]--]=i;
        for(int k=1;k<n;k<<=1){
            int pos=0;
            _rep(i,n-k+1,n)y[++pos]=i;
            _rep(i,1,n)if(sa[i]>k)y[++pos]=sa[i]-k;
            _rep(i,0,m)c[i]=0;
            _rep(i,1,n)c[x[i]]++;
            _rep(i,1,m)c[i]+=c[i-1];
            for(int i=n;i;i--)sa[c[x[y[i]]]--]=y[i],y[i]=0;
            swap(x,y);
            pos=0,y[n+1]=0;
_rep(i,1,n)x[sa[i]]=(y[sa[i]]==y[sa[i-1]]&&y[sa[i]+k]==y[sa[i-1]+k])?pos:++
pos;
            if(pos==n)break;
            m=pos;
        }
        _rep(i,1,n)rk[sa[i]]=i;
    }
}
char buf[MAXN];
int main()
{
    int n=read_int(),len=2*n+1;
    _rep(i,1,n)buf[i]=buf[len+1-i]=get_char();
    buf[n+1]=0;
    SA::get_sa(buf,len,'Z');
```

```
    int L=1,R=n,cnt=0;
    while(L<=R){
        if(SA::rk[L]<SA::rk[len+1-R])
        putchar(buf[L++]);
        else
        putchar(buf[R--]);
        if((++cnt)%80==0)putchar('\n');
    }
    return 0;
}
```

例题三

洛谷p2408

题意

给定一个字符串 S 求本质不同的子串个数。

题解

子串相当于某个后缀的前缀，于是考虑依次枚举 sa_i 代表的后缀，加上新增的本质不同的前缀。

根据 LCP 性质不难得到属于 sa_i 后缀的新增的本质不同于 $sa_1\cdots sa_{i-1}$ 的所有前缀的子串数为 $n+1-sa_i-\text{height}_i$

于是最终答案为 $\sum_{i=1}^n n+1-sa_i-\text{height}_i=\frac {n(n+1)}2-\sum_{i=1}^n\text{height}_i=\frac {n(n+1)}2-\sum_{i=2}^n\text{height}_i$

```
const int MAXN=1e5+5;
namespace SA{
    int sa[MAXN],rk[MAXN],height[MAXN],x[MAXN],y[MAXN],c[MAXN];
    void get_sa(char *s,int n,int m){
        _rep(i,0,m)c[i]=0;
        _rep(i,1,n)c[x[i]=s[i]]++;
        _rep(i,1,m)c[i]+=c[i-1];
        for(int i=n;i;i--)sa[c[x[i]]--]=i;
        for(int k=1;k<n;k<<=1){
            int pos=0;
            _rep(i,n-k+1,n)y[++pos]=i;
            _rep(i,1,n)if(sa[i]>k)y[++pos]=sa[i]-k;
            _rep(i,0,m)c[i]=0;
            _rep(i,1,n)c[x[i]]++;
            _rep(i,1,m)c[i]+=c[i-1];
            for(int i=n;i;i--)sa[c[x[y[i]]]--]=y[i],y[i]=0;
            swap(x,y);
            pos=0,y[n+1]=0;
```

```
_rep(i,1,n)x[sa[i]]=(y[sa[i]]==y[sa[i-1]]&&y[sa[i]+k]==y[sa[i-1]+k])?pos:++pos;
            if(pos==n)break;
            m=pos;
        }
        _rep(i,1,n)rk[sa[i]]=i;
    }
    void get_height(char *s,int n){
        for(int i=1,k=0;i<=n;i++){
            if(k)k--;
            while(s[i+k]==s[sa[rk[i]-1]+k])k++;
            height[rk[i]]=k;
        }
    }
}
char buf[MAXN];
int main()
{
    int n=read_int();
    scanf("%s",buf+1);
    SA::get_sa(buf,n,'z');
    SA::get_height(buf,n);
    LL ans=1LL*n*(n+1)/2;
    _rep(i,2,n)ans-=SA::height[i];
    enter(ans);
    return 0;
}
```

例题四

洛谷p2852

题意

给定一个字符串 S求至少出现 k 次的最长子串的长度。

题解

考虑至少出现 k 次的子串，他一定是至少连续 $k-1$ 个 height 数组代表的 k 个后缀的公共前缀。

于是求出 height 数组后单调队列维护每个长度为 $k-1$ 的连续区间的 height 数组的最小值的最大值即可。

时间复杂度 $O(n\log n)$

```
const int MAXN=2e4+5;
namespace SA{
    int sa[MAXN],rk[MAXN],height[MAXN],x[MAXN],y[MAXN],c[MAXN];
    void get_sa(int *s,int n,int m){
        _rep(i,0,m)c[i]=0;
        _rep(i,1,n)c[x[i]=s[i]]++;
        _rep(i,1,m)c[i]+=c[i-1];
        for(int i=n;i;i--)sa[c[x[i]]--]=i;
        for(int k=1;k<n;k<<=1){
            int pos=0;
            _rep(i,n-k+1,n)y[++pos]=i;
            _rep(i,1,n)if(sa[i]>k)y[++pos]=sa[i]-k;
            _rep(i,0,m)c[i]=0;
            _rep(i,1,n)c[x[i]]++;
            _rep(i,1,m)c[i]+=c[i-1];
            for(int i=n;i;i--)sa[c[x[y[i]]]--]=y[i],y[i]=0;
            swap(x,y);
            pos=0,y[n+1]=0;
_rep(i,1,n)x[sa[i]]=(y[sa[i]]==y[sa[i-1]]&&y[sa[i]+k]==y[sa[i-1]+k])?pos:++
pos;
            if(pos==n)break;
            m=pos;
        }
        _rep(i,1,n)rk[sa[i]]=i;
    }
    void get_height(int *s,int n){
        for(int i=1,k=0;i<=n;i++){
            if(k)k--;
            while(s[i+k]==s[sa[rk[i]-1]+k])k++;
            height[rk[i]]=k;
        }
    }
}
int a[MAXN],b[MAXN],q[MAXN];
int main()
{
    int n=read_int(),k=read_int()-1;
    _rep(i,1,n)a[i]=b[i]=read_int();
    sort(b+1,b+n+1);
    int m=unique(b+1,b+n+1)-b;
    _rep(i,1,n)a[i]=lower_bound(b+1,b+m,a[i])-b;
    SA::get_sa(a,n,m);
    SA::get_height(a,n);
    int ans=0,tail=1,head=0;
    _rep(i,1,n){
        while(tail<=head&&i-q[tail]>=k)tail++;
        while(tail<=head&&SA::height[i]<=SA::height[q[head]])head--;
        q[++head]=i;
        if(i>=k)ans=max(ans,SA::height[q[tail]]);
    }
    enter(ans);
```

```
    return 0;
}
```

From:
https://wiki.cvbbacm.com/ - **CVBB ACM Team**

Permanent link:
https://wiki.cvbbacm.com/doku.php?id=2020-2021:teams:legal_string:jxm2001:%E5%AD%97%E7%AC%A6%E4%B8%B2_3&rev=1598789415

Last update: **2020/08/30 20:10**