

博弈论和 SG 函数

必胜点和必败点

- \$P\$ 点：必败点，换而言之，就是谁处于此位置，则在双方操作正确的情况下必败。
- \$N\$ 点：必胜点，处于此情况下，双方操作均正确的情况下必胜。

必胜点和必败点的性质：

- 所有终结点是必败点 \$P\$
- 从任何必胜点 \$N\$ 操作，至少有一种方式可以进入必败点 \$P\$
- 无论如何操作，必败点 \$P\$ 都只能进入必胜点 \$N\$

NIM 游戏

两个人玩这个游戏，他们轮流操作。

有若干堆石子，每堆石子的数量都是有限的。

一次合法的移动是“选择一堆石子并拿走若干颗（不能不拿）”。

如果轮到某个人时所有的石子堆都已经被拿空了，则判负。

如果双方都按照最优策略，谁必胜？

Bouton's Theorem

对于一个 nim 游戏的局面 (a_1, a_2, \dots, a_n) 它是 \$P\$ 点当且仅当 $a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_n = 0$ 【证明】

1. 终结点只有一种，就是 $(0, 0, \dots, 0)$ 显然符合异或和为 \$0\$，为 \$P\$ 点。
2. 对于 (a_1, a_2, \dots, a_n) 且 $a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_n \neq 0$ 经一次移动后必然到达 (b_1, b_2, \dots, b_n) 其中 $b_1 \oplus b_2 \oplus \dots \oplus b_n = 0$ 从而到达 \$N\$ 点。
3. 对于 (a_1, a_2, \dots, a_n) 且 $a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_n = 0$ 必存在移动方法可以到达 \$P\$ 点。

我们设 $a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_n = k$ 那么设 k 的二进制表示下最高位的 \$1\$ 为第 p 位。

那么 a_1, a_2, \dots, a_n 中必定存在至少一个 a_i 使得 a_i 二进制表示下第 p 位为 \$1\$。

从而，将第 i 堆石头取 $a_i - k$ 个石头即可保证一定到达 \$P\$ 点。

首先，由于 $a_i \oplus k$ 第 p 位为 \$0\$，所以 $a_i \oplus k < a_i$ 从而 $a_i - k > 0$ 符合游戏规则。

并且，取 $a_i - k$ 个石头后，第 i 堆石头变为 $a_i \oplus k$ 对于新局面 $(a_1, a_2, \dots, a_i \oplus k, \dots, a_n)$ $a_1 \oplus a_2 \oplus \dots \oplus a_i \oplus k \oplus \dots \oplus a_n = k \oplus k = 0$ 从而一定为 \$P\$ 点。

有向图移动游戏

有向图移动游戏可以看作所有 **Impartial Combinatorial Games** 的抽象模型。

NIM 游戏就是 **Impartial Combinatorial Games** 其中的一种。

也就是说，所有 **ICG** 游戏都可以看成：

给定一个 **DAG** 及一个点上的一个棋子，两名选手交替将棋子沿边移动，无法移动判负。

我们把 **NIM** 游戏的每一个状态看成一个点，把这个状态和其可以转移到的下一个状态连边。那么 **NIM** 游戏也被抽象成了一个有向图移动游戏！

SG 函数

定义 $\text{mex}(S) = k$ 为最小的不属于集合 S 的非负整数。

SG 函数的定义：对于任意一个状态 x 都定义一个 SG 函数。

我们先给出定义式，再具体说明意义。

对于任意状态 x 设 x 的后继状态集合为 S 则：
 $\text{sg}(x) = \text{mex}(S)$ 如果一个状态为终结点，则 $S = \emptyset$ 从而 $\text{sg}(x) = 0$

有向图移动游戏

事实上，如果把所有 **ICG** 游戏抽象成有向图移动游戏，那么 sg 函数就是
 $\text{sg}(x) = \text{mex}\{\text{sg}(y) \mid x \rightarrow y\}$ 我们有这样的结论
 $\text{sg}(x) = 0 \Leftrightarrow x \sim P \quad \text{sg}(x) \neq 0 \Leftrightarrow x \sim N$ 对于这个结论的正确性显然：

对于 $\text{sg}(x) = 0$ 的结点，显然根据定义 x 的后继中一定不存在 $\text{sg}(y) = 0$ 的结点 y

同时，对于 $\text{sg}(x) \neq 0$ 的结点，根据定义，一定存在一个 x 的后继 y 使 $\text{sg}(y) = 0$

取石子游戏

两个人取石子，每个人可以取 1, 3, 4 个石子。

共有 n 个石子，求是先手必胜还是后手必胜。

$\text{sg}(0) = 0, \text{sg}(i) = \text{mex}\{\text{sg}(i-1), \text{sg}(i-3), \text{sg}(i-4)\}$

SG 定理

假设一个游戏可以分成若干个子游戏，这些子游戏的 sg 函数值为 s_1, s_2, \dots, s_k 则：整个游戏

的 sg 函数为 $sg(A) = s_1 \oplus s_2 \oplus \dots \oplus s_k$ 我们设 $sg(x) = a$ 那么也就是说 x 的后继结点 y 能取遍 $1, 2, \dots, a-1$

那么我们选取后继，事实上可以看成“取石子”的过程。

这样想的话，就可以利用 **Bouton's Theorem** 的证明来理解 SG 定理了。

例题

[HDU 1848 Fibonacci again and again](<http://acm.hdu.edu.cn/showproblem.php?pid=1848>)

题意

+ 这是一个二人游戏，两人轮流走；+ 一共有 3 堆石子，数量分别是 m, n, p 个；+ 每走一步可以选择任意一堆石子，然后取走 f 个；+ f 只能是斐波那契数列中的元素；+ 最先取光所有石子的人为胜者；+ 假设双方都使用最优策略，请判断先手的人会赢还是后手的人会赢 $n, m, p \leq 1000$

题解

分成三个子游戏，分别求出每个子游戏的 SG 函数，异或得总游戏 SG 函数即可。

是一个 SG 函数和 SG 定理的简单应用。

代码

```
```c++ #include<bits/stdc++.h> using namespace std; int f[1005], p; bool s[1005]; int sg[1005]; void SG(){
```

```
 for(int i=1; i<=1000; i++){
 memset(s, 0, sizeof(s));
 for(int j=1; j<=p; j++){
 if(f[j]>i) break;
 s[sg[i-f[j]]]=1;
 }
 for(int j=0; j<=1000; j++){
 if(!s[j]){
 sg[i]=j;
 break;
 }
 }
 }
}
```

```
} int main(){
```

```
 f[1]=1, f[2]=2;
 for(int i=3;; i++){
 f[i]=f[i-1]+f[i-2];
 if(f[i]>1000){
 p=i-1;
 break;
 }
 }
 SG();
```

```
int m,n,p;
while(scanf("%d %d %d",&m,&n,&p)){
 if(!m&&!n&&!p) break;
 int ret=0;
 ret=sg[m]^sg[n]^sg[p];
 if(ret) puts("Fibo");
 else puts("Nacci");
}
return 0;
```

} ``` [HackerRank Bob and Ben](#)

## 题意

给出一片森林，每棵树有两个参数，结点数  $n$  和特殊参数  $k$  其中  $k$  意义为：第  $i$  个结点的父亲为第  $\max(1, \lfloor \frac{i}{k} \rfloor \rfloor$  个结点。两人进行游戏，每次可以删除一棵树（该树必须存在非叶子）或树中的一个叶子。其中，叶子定义为度数为 1 的点。无法操作的人输，询问先手是否必胜。

## 题解

考虑一棵大小为  $n$  的树。

当  $n=1$  时， $\text{sg}(1)=1$

当  $n=2$  时， $\text{sg}(2)=0$

当  $n \geq 3$  时，一定存在非叶子结点  $\text{sg}(n)=\text{mex}\{\text{sg}(n-1), 0\}$

归纳知  $n \geq 3$  时， $\text{sg}(2k)=2, \text{sg}(2k+1)=1$

利用 SG 定理合并即可。

（事实上，我们发现此题中  $k$  并没有作用）

## 代码

```
#include<bits/stdc++.h>
using namespace std;
int main(){
 int t;
 scanf("%d",&t);
 while(t--){
 int m;
 scanf("%d",&m);
 int ret=0;
 for(int i=1;i<=m;i++){
 int n,k;
 scanf("%d %d",&n,&k);
 if(n==1) ret^=1;
 else if(n==2) ret^=0;
 else if(n&1) ret^=1;
 else ret^=2;
 }
 }
}
```

```

 }
 if(ret) puts("BOB");
 else puts("BEN");
}
return 0;
}

```

HDU 6892 Lunch

## 题意

有  $n$  堆石头，每堆有  $m_i$  个石头，两个人轮流进行操作，如果有谁不能操作了，则判负。操作为：选择其中一个堆，将这个堆分为  $t(t \neq 1)$  堆，且每堆的石头数量相同。

## 题解

通过打表找规律发现结论  $sg(x) = x \bmod 2$  的奇质因子个数 +  $[x \bmod 2 == 0]$

## 打表代码

```

#include<iostream>
#include<algorithm>
#include<cstdio>
#include<cstring>
#include<stack>
#include<vector>
#include<unordered_set>
#include<unordered_map>
using namespace std;

typedef long long ll;
const int maxn=4e4+10;
const int maxm=1e4+10;
#define ios ios::sync_with_stdio(false);cin.tie(0);cout.tie(0);
int n,m;
int f[maxm];

int sg(int x){
 if(f[x]!=-1) return f[x];
 unordered_set<int> S;
 vector<int> q;
 for(ll i=2;i<=sqrt(x);++i){
 if(x%i==0){
 q.push_back(i);
 if(i*i!=x) q.push_back(x/i);
 }
 }
 q.push_back(x);
 for(int i=0;i<q.size();++i)
 {
 if(q[i]%2==0) S.insert(0);
 else S.insert(sg(x/q[i]));
 }
 f[x]=S.size();
}

```

```
 }
 for(int i=0;;++i){
 if(!S.count(i)) return f[x] = i;
 }
}

int main(void)
{
 memset(f, -1, sizeof(f));
 f[1]=0;
 for(int i=1;i<=30;i++) cout << i << ' ' << sg(i) << " ";
}
```

## AC 代码

```
#include<bits/stdc++.h>
using namespace std;
const int N=3.2e4+5;
int p[N];
bool b[N];
int SG(int x){
 int ret=0,cnt=0;
 if(x%2==0) ret=1;
 for(int i=1;i<=p[0];i++){
 if(x%p[i]==0){
 while(x%p[i]==0){
 x/=p[i];
 if(p[i]!=2) cnt++;
 }
 }
 if(x==1) break;
 }
 if(x!=1) cnt++;
 return cnt+ret;
}
int main(){
 for(int i=2;i<N;i++){
 if(!b[i]) p[++p[0]]=i;
 for(int j=1;j<=p[0]&&i*p[j]<N;j++){
 b[i*p[j]]=1;
 if(i%p[j]==0) break;
 }
 }
 int t;
 scanf("%d",&t);
 while(t--){
 int n;
 scanf("%d",&n);
 int ret=0;
 for(int i=1;i<=n;i++){
 if(SG(i)==0) ret++;
 }
 cout << ret << endl;
 }
}
```

```
int x;
scanf("%d",&x);
ret^=SG(x);
}
if(ret) puts("W");
else puts("L");
}
return 0;
}
```

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

Permanent link:  
[https://wiki.cvbbacm.com/doku.php?id=2020-2021:teams:legal\\_string:lgwza:%E5%8D%9A%E5%BC%88%E8%AE%BA&rev=1601026780](https://wiki.cvbbacm.com/doku.php?id=2020-2021:teams:legal_string:lgwza:%E5%8D%9A%E5%BC%88%E8%AE%BA&rev=1601026780)

Last update: 2020/09/25 17:39

