

普通生成函数

算法简介

形如 $F(x)=\sum_{n=0}^{\infty}a_nx^n$ 的函数 a_n 可以提供关于这个序列的信息，一般用于解决组合计算问题。

算法例题

例题一

[洛谷p2000](#)

题意

已知如下约束条件：

- $6 \mid a$
- $b \leq 9$
- $c \leq 5$
- $4 \mid d$
- $e \leq 7$
- $2 \mid f$
- $0 \leq g \leq 1$
- $8 \mid h$
- $10 \mid i$
- $j \leq 3$
- $a+b+c+d+e+f+g+h+i+j=n$
- 所有数非负整数

问满足以上约束的所有情况数。

题解

根据上述条件，可以得到如下生成函数：

- $1+x^6+x^{12}+\dots=\frac{1}{1-x^6}$
- $1+x+x^2+\dots+x^9=\frac{1-x^{10}}{1-x}$
- $1+x+x^2+\dots+x^5=\frac{1-x^6}{1-x}$
- $1+x^4+x^8+\dots=\frac{1}{1-x^4}$
- $1+x+x^2+\dots+x^7=\frac{1-x^8}{1-x}$
- $1+x^2+x^4+\dots=\frac{1}{1-x^2}$
- $1+x=\frac{1-x^2}{1-x}$
- $1+x^8+x^{16}+\dots=\frac{1}{1-x^8}$
- $1+x^{10}+x^{20}+\dots=\frac{1}{1-x^{10}}$

• $1+x+x^2+x^3=\frac{1-x^4}{1-x}$

全部相乘得到 $\frac{1}{(1-x)^5}=\sum_{n=0}^{\infty} \binom{n+4}{n}x^n=\sum_{n=0}^{\infty} \binom{n+4}{4}x^n$

于是答案为 $\binom{n+4}{4}$

例题二

题意

已知卡特兰数定义

$$c_n = \begin{cases} 1, & n=0 \\ \sum_{i=0}^{n-1} c_i c_{n-i-1}, & n > 0 \end{cases}$$

求 c_n 通项公式。

题解

解得 $F(x)=\frac{1-\sqrt{1-4x}}{2x}$ 又有 $F(0)=c_0=1$ 于是发现只有 $F(x)=\frac{1-\sqrt{1-4x}}{2x}$ 一种可能。

所以有 $\sqrt{1-4x}=\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2} \binom{2n}{n} (-4x)^n$
 $=1+\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} (2n-3)!!}{2^{n-1} n!} (-4x)^n$
 $=1+\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1} (2n-2)!}{2^{n-1} (n-1)! n!} (-4x)^n$
 $=1-2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-2)!}{(n-1)! n!} x^n$
 $=1-2x\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n)!}{n!(n+1)!} x^n$ 所以有 $F(x)=\frac{1-\sqrt{1-4x}}{2x}$
 $=\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n)!}{n!(n+1)!} x^n$ 于是有 $c_n = \frac{(2n)!}{n!(n+1)!} = \frac{1}{n+1} \binom{2n}{n}$

例题三

题意

求满足下列条件的序列数：

- $a_1+a_2+\dots+a_k=n$
- $a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_k \geq 1$

题解

先考虑 $a_1 \le t$ 的情况。

只选择 \$1\$ 的方案生成函数为 $1+x+x^2+\dots=\frac{1}{1-x}$

只选择 \$2\$ 的方案生成函数为 $1+x^2+x^4+\dots=\frac{1}{1-x^2}$

以此类推，只选择 \$t\$ 的方案生成函数为 $1+x^t+x^{2t}+\dots=\frac{1}{1-x^t}$

于是 $a_1 \le t$ 的生成函数为 $P_t(x)=\prod_{i=1}^t \frac{1}{1-x^i}$ 无限制时生成函数为 $P(x)=\prod_{i=1}^{\infty} \frac{1}{1-x^i}$

答案即为 $[x^n]P(x)$ 接下来考虑如何展开 $P(x)$

这里给出五边形数定理和证明

$$\prod_{i=1}^{\infty} (1-x^i) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k x^{k(3k \pm 1)/2} = 1 - x - x^2 + x^5 - x^7 + x^{12} - x^{15} + \dots$$

于是有 $P(x) \prod_{i=1}^{\infty} (1-x^i) = 1$ 展开

$$\begin{matrix} P(x) & p_0 & p_1x & p_2x^2 & p_3x^3 & p_4x^4 & p_5x^5 & \dots \\ -xP(x) & & -p_0x & -p_1x^2 & -p_2x^3 & -p_3x^4 & -p_4x^5 & \dots \\ x^2P(x) & & & p_0x^2 & p_1x^3 & p_2x^4 & p_3x^5 & \dots \\ \dots & & & & & & & \dots \end{matrix}$$

于是 $p_n = [n=0] + p_{n-1} + p_{n-2} - p_{n-5} - p_{n-7} + \dots$

例题四

牛客暑期多校(第五场) C 题

题意

已知 $\sum_{i=1}^k a_i = n, \sum_{i=1}^k b_i = m, P = \sum_{i=1}^k \min(a_i, b_i)$ 求 $\sum_{a,b} P$

题解

令 $F(x) = \sum_{i=1, j=1}^{\infty} x^i y^j$ 于是答案为 $[x^n y^m] F^k(x)$

考虑求出 $F(x)$ 的封闭式。

$$\begin{aligned} F(x) &= xy + xy^2 + xy^3 + xy^4 + \dots + x^2y + 2x^2y^2 + 2x^2y^3 + 2x^2y^4 + \dots + x^3y + 2x^3y^2 + 3x^3y^3 + 3x^3y^4 + \dots \end{aligned}$$

先想办法将系数化为 \$1\$，考虑相邻行之间错位相减，有

$$(1-x)F(x) = xy + xy^2 + xy^3 + xy^4 + \dots + x^2y^2 + x^2y^3 + x^2y^4 + \dots + x^3y^3 + x^3y^4 + \dots$$
 然后发现每行均成为等比数列，直接求和得 $(1-x)F(x) = \frac{xy}{1-y} + \frac{x^2y^2}{1-y} + \frac{x^3y^3}{1-y} + \dots$ 发现结果仍然为等比数列，继续求和得 $(1-x)F(x) = \frac{xy}{(1-x)(1-xy)}$ 于是有
$$F^k(x) = \frac{x^k y^k}{(1-x)^k (1-xy)^k} = x^k y^k \sum_{a=0, b=0, c=0}^{\infty} \binom{k+a-1}{a} x^{k+b-1} \binom{k+b-1}{c} y^{k+c}$$

考虑枚举 c 的同时计算出 a, b 即可，时间复杂度 $O(n)$

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

Permanent link: https://wiki.cvbbacm.com/doku.php?id=2020-2021:teams:legal_string:jxm2001:%E7%94%9F%E6%88%90%E5%87%BD%E6%95%B0_1&rev=1596957786

Last update: 2020/08/09 15:23