

本周教学内容

贪心法的设计要素

得不到最优解的处理：
找零钱问题的参数化分析

贪心法证明：按步骤归纳
活动选择

贪心法证明：按规模归纳
装载问题

贪心法证明：交换论证
最小延迟调度

贪心法的例子：活动选择问题

贪心法的例子： 活动选择问题

活动选择问题

输入： $S = \{1, 2, \dots, n\}$ 为 n 项活动的集合， s_i, f_i 分别为活动 i 的开始和结束时间。

活动 i 与 j 相容 $\Leftrightarrow s_i \geq f_j$ 或 $s_j \geq f_i$ 。

求：最大的两两相容的活动集 A

输入实例：

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s_i	1	3	2	5	4	5	6	8	8	2
f_i	4	5	6	7	9	9	10	11	12	13

解： $\{1, 4, 8\}$

贪心算法

挑选过程是多步判断，每步依据某种“短视”的策略进行活动选择，选择时注意满足相容性条件.

策略1： 开始时间早的优先

排序使 $s_1 \leq s_2 \leq \dots \leq s_n$ ，从前向后挑选

策略2： 占用时间少的优先

排序使得 $f_1 - s_1 \leq f_2 - s_2 \leq \dots \leq f_n - s_n$ ，
从前向后挑选

策略3： 结束早的优先

排序使 $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n$ ，从前向后挑选

策略1的反例

策略1：开始早的优先

反例： $S = \{1, 2, 3\}$

$s_1=0, f_1=20, s_2=2, f_2=5, s_3=8, f_3=15$

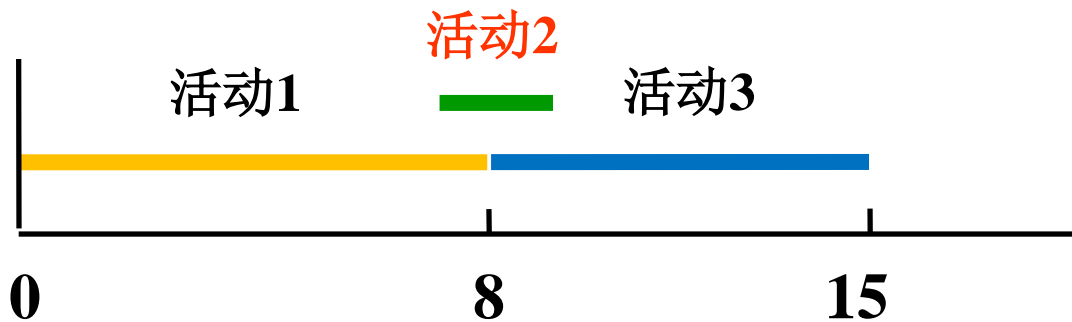


策略2的反例

策略2：占时少的优先

反例： $S = \{ 1, 2, 3 \}$

$s_1=0, f_1=8, s_2=7, f_2=9, s_3=8, f_3=15$



策略3伪码

算法 Greedy Select

输入：活动集 S , s_i, f_i ,

$i = 1, 2, \dots, n, f_1 \leq \dots \leq f_n$

输出： $A \subseteq S$, 选中的活动子集

1. $n \leftarrow \text{length}[S]$

2. $A \leftarrow \{1\}$

已选入的
最后标号

3. $j \leftarrow 1$

4. for $i \leftarrow 2$ to n do

5. if $s_i \geq f_j$

判相容

6. then $A \leftarrow A \cup \{i\}$

7. $j \leftarrow i$

8. return A

完成时间 $t = \max \{f_k : k \in A\}$

运行实例

输入: $S = \{ 1, 2, \dots, 10 \}$

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s_i	1	3	0	5	3	5	6	8	8	2
f_i	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

解: $A = \{1, 4, 8\}$, $t = 11$

时间复杂度

$$O(n \log n) + O(n) = O(n \log n)$$



如何证明该算法对所有的实例
都得到正确的解?

贪心算法的特点

设计要素：

- (1) 贪心法适用于组合优化问题.
- (2) 求解过程是多步判断过程，最终的判断序列对应于问题的最优解.
- (3) 依据某种“短视的”贪心选择性质判断，性质好坏决定算法的成败.
- (4) 贪心法必须进行正确性证明.
- (5) 证明贪心法不正确的技巧：举反例.

贪心法的优势：算法简单，时间和空间复杂性低

贪心法正确性 证明：活动选择

一个数学归纳法的例子

例：证明对于任何自然数 n ,

$$1+2+\dots+n = n(n+1)/2$$

证 $n=1$, 左边=1, 右边= $1 \times (1+1)/2=1$

假设对任意自然数 n 等式成立, 则

$$1+2+\dots+(n+1)$$

$$= (1+2+\dots+n) + (n+1)$$

$$= n(n+1)/2 + (n+1)$$

$$= (n+1)(n/2+1)$$

$$= (n+1)(n+2)/2$$

归纳假设代入

第一数学归纳法

适合证明涉及自然数的命题 $P(n)$

归纳基础： 证明 $P(1)$ 为真 (或 $P(0)$ 为真).

归纳步骤： 若对所有 n 有 $P(n)$ 为真，证明
 $P(n+1)$ 为真

$$\forall n, P(n) \rightarrow P(n+1)$$

$$P(1)$$

$$n=1, P(1) \Rightarrow P(2)$$

$$n=2, P(2) \Rightarrow P(3)$$

...

第二数学归纳法

适合证明涉及自然数的命题 $P(n)$

归纳基础： 证明 $P(1)$ 为真 (或 $P(0)$ 为真).

归纳步骤： 若对所有小于 n 的 k 有 $P(k)$ 真,
证明 $P(n)$ 为真

$$\forall k (k < n \wedge P(k)) \rightarrow P(n)$$

$$P(1)$$

$$n=2, \quad P(1) \Rightarrow P(2)$$

$$n=3, \quad P(1) \wedge P(2) \Rightarrow P(3)$$

...

两种归纳法的区别

归纳基础一样 $P(1)$ 为真

归纳步骤不同

证明逻辑

归纳法1: $P(1) \Rightarrow P(2) \Rightarrow P(3) \dots$

归纳法2:

$$\begin{array}{c} P(1) \\ P(1) \Rightarrow P(2) \end{array} \Bigg\} \Rightarrow \begin{array}{c} P(1) \\ P(2) \\ P(3) \end{array} \Bigg\} \Rightarrow P(4) \dots$$

算法正确性归纳证明

证明步骤:

1. 叙述一个有关自然数 n 的命题, 该命题断定该贪心策略的执行最终将导致最优解. 其中自然数 n 可以代表算法步数或者问题规模.
2. 证明命题对所有的自然数为真.
归纳基础(从最小实例规模开始)
归纳步骤(第一或第二数学归纳法)

活动选择算法的命题

命题

算法 Select 执行到第 k 步, 选择 k 项活动

$$i_1 = 1, i_2, \dots, i_k$$

则存在最优解 A 包含活动 $i_1=1, i_2, \dots, i_k$.

根据上述命题: 对于任何 k , 算法前 k 步的选择都将导致最优解, 至多到第 n 步将得到问题实例的最优解

归纳证明： 归纳基础

令 $S=\{1,2,\dots,n\}$ 是活动集, 且 $f_1 \leq \dots \leq f_n$

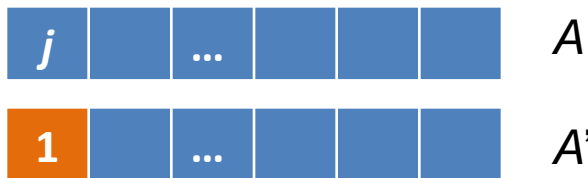
归纳基础: $k=1$, 证明存在最优解包含活动 1

证 任取最优解 A , A 中活动按截止时间递增排列. 如果 A 的第一个活动为 j , $j \neq 1$, 用 1 替换 A 的活动 j 得到解 A' , 即

$$A' = (A - \{j\}) \cup \{1\},$$

由于 $f_1 \leq f_j$, A' 也是最优解, 且含有 1.

$$f_1 \leq f_j$$



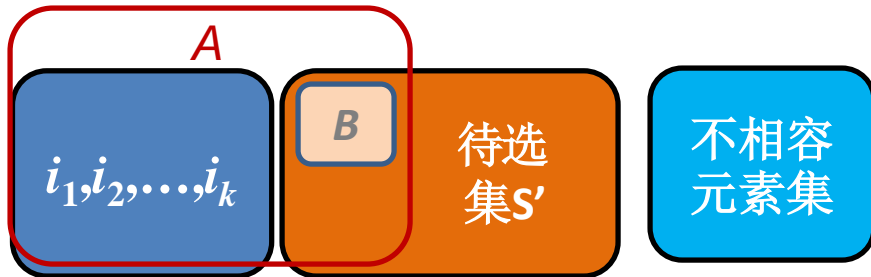
归纳步骤

假设命题对 k 为真, 证明对 $k+1$ 也为真.

证 算法执行到第 k 步, 选择了活动 $i_1=1, i_2, \dots, i_k$, 根据归纳假设存在最优解 A 包含 $i_1=1, i_2, \dots, i_k$, A 中剩下活动选自集合 S'

$$S' = \{ i \mid i \in S, s_i \geq f_k \}$$

$$A = \{ i_1, i_2, \dots, i_k \} \cup B$$

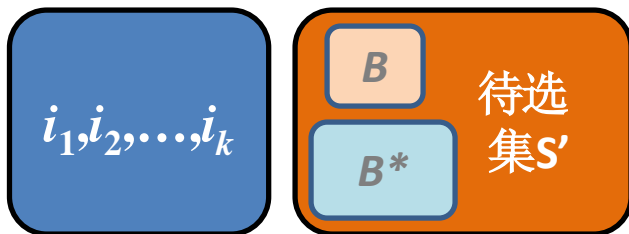


归纳步骤（续）

B 是 S' 的最优解.（若不然, S' 的最优解为 B^* , B^* 的活动比 B 多, 那么

$$B^* \cup \{1, i_2, \dots, i_k\}$$

是 S 的最优解, 且比 A 的活动多, 与 A 的最优性矛盾.)

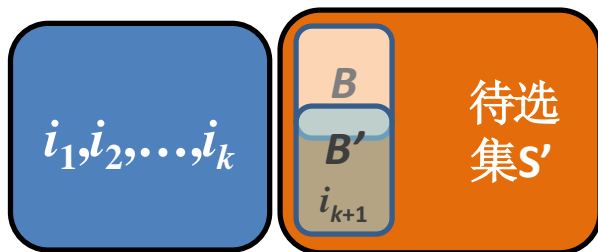


归纳步骤 (续)

将 S' 看成子问题，根据归纳基础，
存在 S' 的最优解 B' 有 S' 中的第一个
活动 i_{k+1} ，且 $|B'| = |B|$ ，于是

$$\begin{aligned} & \{i_1, i_2, \dots, i_k\} \cup B' \\ &= \{i_1, i_2, \dots, i_k, i_{k+1}\} \cup (B' - \{i_{k+1}\}) \end{aligned}$$

也是原问题的最优解.



小结

- 贪心法正确性证明方法：数学归纳法
第一数学归纳法、第二数学归纳法
- 活动选择问题的贪心法证明：
叙述一个涉及步数的算法正确性命题
证明归纳基础
证明归纳步骤

最优装载问题

最优装载问题

问题:

n 个集装箱 $1, 2, \dots, n$ 装上轮船, 集装箱 i 的重量 w_i , 轮船装载重量限制为 C , 无体积限制. 问如何装使得上船的集装箱最多? 不妨设每个箱子的重量 $w_i \leq C$.

该问题是0-1背包问题的子问题. 集装箱相当于物品, 物品重量是 w_i , 价值 v_i 都等于1, 轮船载重限制 C 相当于背包重量限制 b .

建模

设 $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ 表示解向量, $x_i = 0, 1$,
 $x_i = 1$ 当且仅当第 i 个集装箱装上船

目标函数 $\max \sum_{i=1}^n x_i$

约束条件 $\sum_{i=1}^n w_i x_i \leq C$

$$x_i = 0, 1 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

算法设计

- 贪心策略：轻者优先
- 算法设计：
将集装箱排序，使得

$$w_1 \leq w_2 \leq \dots \leq w_n$$

按照标号从小到大装箱，直到装入下一个箱子将使得集装箱总重超过轮船装载重量限制，则停止.

正确性证明思路

- **命题：**对装载问题任何规模为 n 的输入实例，算法得到最优解。
- 设集装箱从轻到重记为 $1, 2, \dots, n$.

归纳基础 证明对任何只含 1 个箱子的输入实例，贪心法得到最优解。
显然正确。

- **归纳步骤** 证明：假设对于任何 n 个箱子的输入实例贪心法都能得到最优解，那么对于任何 $n+1$ 个箱子的输入实例贪心法也得到最优解。

归纳步骤证明思路

$N=\{1,2,\dots,n+1\}, w_1\leq w_2\leq\dots\leq w_{n+1}$



去掉箱子1, 令 $C' = C - \{w_1\}$,
得到规模 n 的输入 $N' = \{2,3,\dots,n+1\}$



关于输入 N' 和 C' 的最优解 I'



在 I' 加入箱子1, 得到 I



证明 I 是关于输入 N 的最优解

正确性证明

假设对于 n 个集装箱的输入，贪心法都可以得到最优解，考虑 输入

$$N = \{ 1, 2, \dots, n+1 \}$$

其中 $w_1 \leq w_2 \leq \dots \leq w_{n+1}$.

由归纳假设，对于

$$N' = \{ 2, 3, \dots, n+1 \}, \quad C' = C - w_1,$$

贪心法得到最优解 I' . 令

$$I = I' \cup \{1\}$$

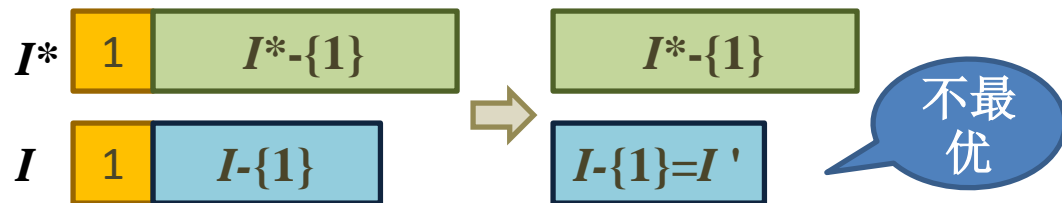
正确性证明 (续)

I (算法解) 是关于 N 的最优解.

若不然, 存在包含 1 的关于 N 的最优解 I^* (如果 I^* 中没有 1, 用 1 替换 I^* 中的第一个元素得到的解也是最优解), 且 $|I^*| > |I|$; 那么 $I^* - \{1\}$ 是 N' 和 C' 的解且

$$|I^* - \{1\}| > |I - \{1\}| = |I'|$$

与 I' 是关于 N' 和 C' 的最优解矛盾.



小结

- 装载问题是0-1背包的子问题 (每件物品重量为1)，NP难的问题存在多项式时间可解的子问题.
- 贪心法证明：对规模归纳

最小延迟调度问题

最小延迟调度

问题:

客户集合 A , $\forall i \in A$, t_i 为服务时间, d_i 为要求完成时间, t_i, d_i 为正整数. 一个调度 $f: A \rightarrow \mathbb{N}$, $f(i)$ 为客户 i 的开始时间. 求最大延迟达到最小的调度, 即求 f 使得

$$\min_f \{ \max_{i \in A} \{ f(i) + t_i - d_i \} \}$$

$$\forall i, j \in A, i \neq j, f(i) + t_i \leq f(j)$$

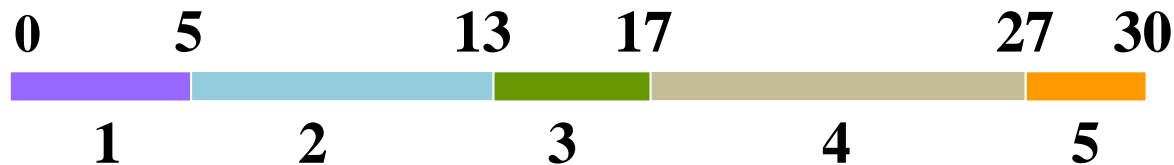
$$\text{or } f(j) + t_j \leq f(i)$$

实例：调度1

$A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $T = \langle 5, 8, 4, 10, 3 \rangle$,
 $D = \langle 10, 12, 15, 11, 20 \rangle$

调度1：顺序安排

$f_1(1)=0, f_1(2)=5, f_1(3)=13, f_1(4)=17, f_1(5)=27$



各任务延迟：0, 1, 2, **16**, 10;

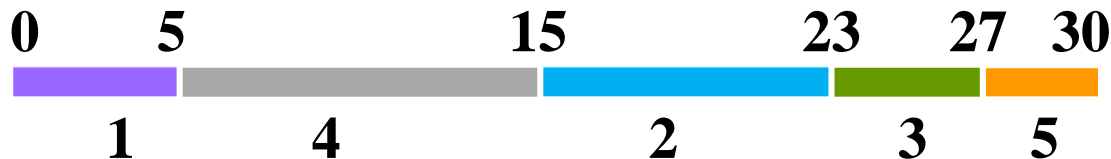
最大延迟：16

更优的调度2

$A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $T = \langle 5, 8, 4, 10, 3 \rangle$,
 $D = \langle 10, 12, 15, 11, 20 \rangle$

调度2: 按截止时间从前到后安排

$f_2(1)=0, f_2(2)=15, f_2(3)=23, f_2(4)=5, f_2(5)=27$



各任务延迟: 0, 11, 12, 4, 10;

最大延迟: 12

贪心策略

贪心策略1: 按照 t_i 从小到大安排

贪心策略2: 按照 $d_i - t_i$ 从小到大安排

贪心策略3: 按照 d_i 从小到大安排

策略1 对某些实例得不到最优解.

反例: $t_1=1, d_1=100, t_2=10, d_2=10$

策略2 对某些实例得不到最优解.

反例: $t_1=1, d_1=2, t_2=10, d_2=10$

策略3伪码

算法 Schedule

输入: A, T, D

输出: f

1. 排序 A 使得 $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_n$

2. $f(1) \leftarrow 0$

从0时
刻起

3. $i \leftarrow 2$

4. while $i \leq n$ do

5. $f(i) \leftarrow f(i-1) + t_{i-1}$

没有
空闲

6. $i \leftarrow i + 1$

设计思想: 按完成时间从早到晚安排任务, 没有空闲.

交换论证：正确性证明

证明思路：

- 分析一般最优解与算法解的区别（成分,排列顺序不同）
- 设计一种转换操作（替换成分或交换次序），可以在有限步将任意一个普通最优解逐步转换成算法的解
- 上述每步转换都不降低解的最优性质

贪心算法的解的性质：

没有空闲时间，没有逆序。

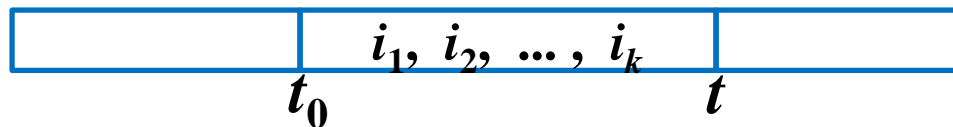
逆序 (i, j) : $f(i) < f(j)$ 且 $d_i > d_j$

引理

引理1 所有没有逆序、没有空闲时间的调度具有相同的最大延迟.

证: 设 f 没有逆序, 在 f 中具有相同完成时间 d 的客户 i_1, i_2, \dots, i_k 连续安排, 其开始时刻为 t_0 , 完成这些任务的时刻是 t , 最大延迟为最后任务延迟 $t-d$, 与 i_1, i_2, \dots, i_k 的排列次序无关.

$$t = t_0 + (t_{i_1} + t_{i_2} + \dots + t_{i_k})$$



证明要点

从一个没有空闲的最优解出发，逐步转变成没有逆序的解。根据引理 1，这个解和算法解具有相同的最大延迟。

- (1) 如果一个最优调度存在逆序，那么存在 $i < n$ 使得 $(i, i+1)$ 构成一个逆序，称为相邻的逆序。
- (2) 交换相邻逆序 i 和 j ，得到的解仍旧最优。
- (3) 每次交换后逆序数减 1，至多经过 $n(n-1)/2$ 次交换得到一个没有逆序的最优调度——等价于算法的解。

交换相邻逆序仍旧最优

设 f_1 是一个任意最优解，存在相邻逆序 (i, j) 。交换 i 和 j 的顺序，得到解 f_2 。那么 f_2 的最大延迟不超过 f_1 的最大延迟。

理由：

- (1) 交换 i, j 与其他客户延迟时间无关
- (2) 交换后不增加 j 的延迟，但可能增加 i 的延迟
- (3) i 在 f_2 的延迟小于 j 在 f_1 的延迟，因此小于 f_1 的最大延迟 r

i 在 f_2 的延迟不超过
 j 在 f_1 的延迟



$$\text{delay}(f_2, i) = \underline{s + t_j + t_i} - d_i$$

$$\text{delay}(f_1, j) = \underline{s + t_i + t_j} - d_j$$

$$d_j < d_i$$

$$\text{delay}(f_2, i) < \text{delay}(f_1, j) \leq r$$

小结

贪心法正确性证明方法：交换论证

- 分析算法解与一般最优解的区别, 找到把一般解改造成算法解的一系列操作(替换成份、交换次序)
- 证明操作步数有限
- 证明每步操作后的得到解仍旧保持最优

得不到最优解 的处理方法

得不到最优解的处理

- 输入参数分析：
考虑输入参数在什么取值范围内使用贪心法可以得到最优解
- 误差分析：
估计贪心法——近似算法所得到的解与最优解的误差（对所有的输入实例在最坏情况下误差的上界）

找零钱问题

问题 设有 n 种零钱，重量分别为 w_1, w_2, \dots, w_n ，价值分别为 $v_1 = 1, v_2, \dots, v_n$ 。需要付的总钱数是 y 。不妨设币值和钱数都为正整数。问：如何付钱使得所付钱的总重最轻？

实例

$v_1=1, v_2=5, v_3=14, v_4=18, w_i=1, i=1,2,3,4.$
 $y=28$

最优解： $x_3=2, x_1=x_2=x_4=0$ ，总重2

建模

令选用第 i 种硬币的数目是 x_i ,

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$\min\{\sum_{i=1}^n w_i x_i\}$$

$$\sum_{i=1}^n v_i x_i = y, \quad x_i \in \mathbf{N}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

动态规划算法

设 $F_k(y)$ 表示用前 k 种零钱，总钱数为 y 的最小重量

$$F_k(y) = \min_{0 \leq x_k \leq \left\lfloor \frac{y}{v_k} \right\rfloor} \{F_{k-1}(y - v_k x_k) + w_k x_k\}$$

$$F_1(y) = w_1 \left\lfloor \frac{y}{v_1} \right\rfloor = w_1 y$$

贪心法

单位价值重量轻的货币优先，设

$$\frac{w_1}{v_1} \geq \frac{w_2}{v_2} \geq \dots \geq \frac{w_n}{v_n}$$

使用前 k 种零钱，总钱数为 y
贪心法的总重为 $G_k(y)$,

$$G_k(y) = w_k \left\lfloor \frac{y}{v_k} \right\rfloor + G_{k-1}(y \bmod v_k) \quad k > 1$$

$$G_1(y) = w_1 \left\lfloor \frac{y}{v_1} \right\rfloor = w_1 y$$

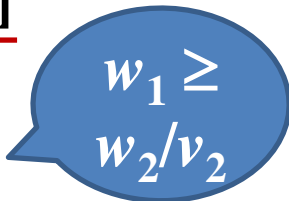
$n=1,2$ 贪心法是最优解

$n = 1$ 只有一种零钱, $F_1(y) = G_1(y)$

$n = 2$, x_2 越大, 得到的解越好

$$F_2(y) = \min_{0 \leq x_2 \leq \lfloor y/v_2 \rfloor} \{F_1(y - v_2 x_2) + w_2 x_2\}$$

$$\begin{aligned} & F_1(y - v_2(\underline{x_2 + \delta})) + w_2(\underline{x_2 + \delta}) \\ & - [F_1(y - v_2 \underline{x_2}) + w_2 \underline{x_2}] \\ = & [w_1(\underline{y - v_2 x_2 - v_2 \delta}) + \underline{w_2 x_2 + w_2 \delta}] \\ & - [w_1(\underline{y - v_2 x_2}) + \underline{w_2 x_2}] \\ = & -w_1 v_2 \delta + w_2 \delta \\ = & \delta(-w_1 v_2 + w_2) \leq 0 \end{aligned}$$


$$w_1 \geq w_2/v_2$$

判别条件

定理 对每个正整数 k , 假设对所有非负整数 y 有 $G_k(y) = F_k(y)$, 且存在 p 和 δ 满足

$$v_{k+1} = pv_k - \delta,$$

其中 $0 \leq \delta < v_k$, $v_k \leq v_{k+1}$, p 为正整数,

则下面的命题等价:

- (1) $G_{k+1}(y) = F_{k+1}(y)$ 对一切正整数 y ;
- (2) $G_{k+1}(pv_k) = F_{k+1}(pv_k)$;
- (3) $w_{k+1} + G_k(\delta) \leq pw_k$.

几点说明

- 根据条件(1)与(3)的等价性，可以对 $k = 3, 4, \dots, n$ ，依次利用条件(3)对贪心法是否得到最优解做出判别.
- 条件(3)验证 1 次需 $O(k)$ 时间， $k = O(n)$ ，整个验证时间 $O(n^2)$
- 条件(2)是条件(1) 在 $y = pv_k$ 时的特殊情况. 若条件(1)成立，显然有条件(2)成立. 反之，若条件(2)不成立，则条件(1)不成立，钱数 $y = pv_k$ 恰好提供了一个贪心法不正确的反例.

验证实例

$$v_{k+1} = pv_k - \delta, \quad 0 \leq \delta < v_k, \quad p \in \mathbb{Z}^+$$
$$w_{k+1} + G_k(\delta) \leq pw_k$$

例 $v_1=1, v_2=5, v_3=14, v_4=18, w_i=1, i=1,2,3,4$. 对一切 y 有

$$G_1(y)=F_1(y), \quad G_2(y)=F_2(y).$$

验证 $G_3(y) = F_3(y)$

$$v_3 = pv_2 - \delta \Rightarrow p = 3, \delta = 1.$$

$$w_3 + G_2(\delta) = 1 + 1 = 2$$

$$pw_2 = 3 \times 1 = 3$$

$$w_3 + G_2(\delta) \leq pw_2$$

贪心法对于 $n=3$ 的实例得到最优解

验证实例

$$\begin{aligned}v_{k+1} &= pv_k - \delta, \quad 0 \leq \delta < v_k, \quad p \in \mathbb{Z}^+ \\ w_{k+1} + G_k(\delta) &\leq pw_k\end{aligned}$$

例 $v_1=1, v_2=5, v_3=14, v_4=18, w_i=1,$

$i=1,2,3,4$. 对一切 y 有

$$G_1(y)=F_1(y), G_2(y)=F_2(y), G_3(y)=F_3(y)$$

验证 $G_4(y) = F_4(y)$

$$v_4 = pv_3 - \delta \Rightarrow p=2, \delta=10$$

$$w_4 + G_3(\delta) = 1 + 2 = 3$$

$$pw_3 = 2 \times 1 = 2$$

$$w_4 + G_3(\delta) > pw_3$$

$n=4, y=pv_3=28,$

最优解: $x_3=2$, 贪心法: $x_4=1, x_2=2$ 11

小结

- 贪心策略不一定得到最优解，在这种情况下可以有两种处理方法：
 - (1) 参数化分析：分析参数取什么值可得到最优解
 - (2) 估计贪心法得到的解在最坏情况下与最优解的误差
- 一个参数化分析的例子:找零钱问题