

算法设计与分析

第12讲 平摊分析

汪小林

北京大学 信息科学技术学院

主要内容

- 平摊分析的概念
- 平摊分析的三种方法
 - 聚集分析
 - 记账法
 - 势能法
- 动态表及其上的平摊分析

平摊分析

- 在平摊分析中，执行一系列数据结构操作所需要的时间是通过执行的所有操作求平均而得出的。平摊分析可以用来证明在一系列操作中，通过对所有操作求平均之后，即使其中单一的操作具有较大的代价，平均代价还是很小的。
- 平摊分析不牵涉到概率，平摊分析保证在最坏情况下，每个操作具有的平均性能。

平摊分析——聚集分析

栈S上的三种操作

- **PUSH(S, x):** 将 x 压入 S
 - 运行时间 $O(1)$
- **POP(S):** 弹出栈顶
 - 运行时间 $O(1)$
- **MULTIPOP(S, k):** 弹出栈顶 k 个对象

MULTIPOP(S, k)

1 while not STACK-EMPTY(S) and $k \neq 0$

2 do POP(S)

3 $k \rightarrow k - 1$

- 运行时间 $O(\min(k, s))$, s 为栈中对象个数

n 个栈操作的平摊时间

- 设有 n 个栈操作（**PUSH**、**POP**、**MULTIPOP**）的序列，作用于初始为空的栈 S 。
- 总的运行时间的界是什么？
 - 每个操作都可能是**MULTIPOP**
 - 每个**MULTIPOP**的运行时间是 $O(\min(k, s))=O(n)$
 - 总的运行时间的上界为 $O(n^2)$
 - 这是一个紧的上界吗？

n 个栈操作的平摊时间

- 只有PUSH操作增加栈S中的对象个数
- 所有POP和MULTIPOP 弹出的对象数不会弹出多于PUSH入栈的对象数
- 故总的运行时间为 $O(n)$
 - 所有PUSH入栈的对象数为 $O(n)$
 - 所有POP和MULTIPOP 弹出的对象数也为 $O(n)$
- 每个PUSH、 POP和MULTIPOP 操作的平摊时间
 - $O(n)/n = O(1)$
- 聚集法：通过总运行时间求平均得到平摊时间，不需要对操作序列的概率分布做假设。

二进制计数器

- 计数器 $A[0 \cdots k-1]$ 表示为 k 位二进制位的数组

$$x = \sum_{i=0}^{k-1} A[i] \cdot 2^i$$

- 操作 INCREMENT 实现计数器加一

- 运行时间 $O(k)$

- n 个 INCREMENT 操作 INCREMENT(A)

- 序列的运行时间

- $O(nk)$ (紧吗?)

- 1 $i \leftarrow 0$

- 2 while $i < \text{length}[A]$ and $A[i] = 1$

- 3 do $A[i] \leftarrow 0$

- 4 $i \leftarrow i + 1$

- 5 if $i < \text{length}[A]$

- 6 then $A[i] \leftarrow 1$

INCREMENT操作的平摊时间

- n 个INCREMENT操作序列的运行时间应为： $O(n)$

- 观察INCREMENT 操作序列

- 每次操作， $A[0]$ 都反转；
- 每两次操作， $A[1]$ 反转；
- 每 2^i 次操作， $A[i]$ 反转；

- 于是，总反转次数为

$$\sum_{i=0}^{\lceil \log(n) \rceil} \left\lfloor \frac{n}{2^i} \right\rfloor < n \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{2^i} = 2n$$

- 总时间 $O(n)$
- 每个操作平摊时间 $O(n)/n = O(1)$

Counter value	A[7]	A[6]	A[5]	A[4]	A[3]	A[2]	A[1]	A[0]	Total cost
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
2	0	0	0	0	0	0	1	0	3
3	0	0	0	0	0	0	1	1	4
4	0	0	0	0	0	1	0	0	7
5	0	0	0	0	0	1	0	1	8
6	0	0	0	0	0	1	1	0	10
7	0	0	0	0	0	1	1	1	11
8	0	0	0	0	1	0	0	0	15
9	0	0	0	0	1	0	0	1	16
10	0	0	0	0	1	0	1	0	18
11	0	0	0	0	1	0	1	1	19
12	0	0	0	0	1	1	0	0	22
13	0	0	0	0	1	1	0	1	23
14	0	0	0	0	1	1	1	0	25
15	0	0	0	0	1	1	1	1	26
16	0	0	0	1	0	0	0	0	31

平摊分析——记账法

记账法

- 对不同的操作赋予不同的费用，某些操作的费用比它们的实际代价或多或少。
- 我们对一个操作的收费的数量称为平摊代价。
 - 当一个操作的平摊代价超过了它的实际代价时，两者的差值就被当作存款，并赋予数据结构中的一些特定对象，可以用来补偿那些平摊代价低于其实际代价的操作。
 - 记账法与聚集分析的区别：
聚集分析中的所有操作都具有相同的平摊代价。
- 数据结构中存储的总存款等于总的平摊代价和总的实际代价之差。注意：总存款不能是负的。(?)

n 个栈操作的平摊时间

操作	实际代价	平摊代价
PUSH	1	2
POP	1	0
MULTIPOP	$\min(k, s)$	0

- 对PUSH操作多收费，多出来的1元钱放在入栈的对象上，待POP和MULTIPOP把该对象弹出栈时，恰好每个对象上的1元前抵消了操作的实际代价
- 因为栈S中对象数不可能为负，即存款不会小于0
 - 保证 n 个操作平摊时间之和是 n 个操作实际时间的上界

二进制计数器上的记账法分析

- 两个问题
 - 如何对**INCREMENT**收费？（平摊代价）
 - 收的费用放在哪里？（如何平摊）

二进制计数器上的记账法分析

- 注意到，每次INCREMENT只会把一个0反转为1，但可能把多个1反转为0。
 - INCREMENT的实际代价为反转的次数
 - INCREMENT平摊代价为2，用于把0反转为1，并把剩余的1元前存放在反转成1的位上。
 - 把1反转成0的实际代价由存放在1上的1元钱支付
- $A[1..k-1]$ 数组中，1的个数（=存款）不可能为负

练习题

- 假设我们希望不仅能使一个计数器增值，也能使之复位至零。请说明如何将计数器实现为一个位数组，使得对一个初始为零的计数器，任一包含 n 个INCREMENT和RESET操作的序列的时间为 $O(n)$

平摊分析——势能法

势能法（potential method）

- 不是将已预付的费用作为存在数据结构特定对象中存款来表示，而是表示成一种“势能”或“势”，它在需要时可以释放出来，以支付后面操作的额外开销。
- 势是与整个数据结构而不是其中的个别对象发生联系的。（区别于记账法）

势函数 Φ

- 对一个初始数据结构 D_0 执行 n 个操作。对每个 i ，设 c_i 为每个操作的实际代价， D_i 为对数据结构 D_{i-1} 执行第 i 个操作的结果。
 - 势函数 Φ 将每个数据结构 D_i 映射为一个实数 $\Phi(D_i)$ ，即与 D_i 相联系的势。
 - 第 i 个操作的平摊代价 a_i 根据势函数 Φ 定义为
- 即每个操作的平摊代价为其实际代价 c_i 加上由于该操作所增加的势。 n 个操作的总的平摊代价为

$$a_i = c_i + \Phi(D_i) - \Phi(D_{i-1})$$

$$\sum a_i = \sum c_i + \Phi(D_n) - \Phi(D_0)$$

势函数 Φ

- 如果势函数 Φ 使得对所有 n ，有 $\Phi(D_n) \geq \Phi(D_0)$ ，
则总平摊代价 $\sum a_i$ 就是总实际代价 $\sum c_i$ 的一个上界
 - 通常为了方便起见会定义 $\Phi(D_0) = 0$ （不是必须的）
 - 正的势差存储势
 - 如果第 i 个操作的势差 $\Phi(D_i) - \Phi(D_{i-1})$ 是正的，则平摊代价 a_i 表示对第 i 个操作多收了费，同时数据结构的势也随之增加了。
 - 负的势差不足收费
 - 如果势差是负值，则平摊代价就表示对第 i 个操作的补足收费，这是通过减少势来支付该操作的实际代价。
 - 平摊代价依赖于所选择的势函数 Φ 。
 - 不同的势函数可能会产生不同的平摊代价，但它们都是实际代价的上界。最佳势函数的选择取决于所需的时间界。

栈操作——势能法分析

- 定义势函数为栈中对象的个数
 - 开始时要处理是空栈 D_0 ，所以 $\Phi(D_0)=0$
 - 栈中的对象数始终非负，所以 $\Phi(D_i) \geq 0 = \Phi(D_0)$
 - 以 Φ 表示的 n 个操作的平摊代价的总和，那么 Φ 就是总的实际代价的一个上界
- 对于作用于一个包含 s 个对象的栈上的第 i 个操作
- 如果PUSH，则
 - 势差为 $\Phi(D_i) - \Phi(D_{i-1}) = (s+1) - s = 1$
 - 平摊代价为 $a_i = c_i + \Phi(D_i) - \Phi(D_{i-1}) = 1+1=2$

栈操作——势能法分析

- 如果是MULTIPOP(S, k)
 - 该操作的实际代价为 $c_i = \min(s, k)$
 - 势差为 $\Phi(D_i) - \Phi(D_{i-1}) = -\min(s, k)$
 - 平摊代价为
$$a_i = c_i + \Phi(D_i) - \Phi(D_{i-1}) = \min(s, k) - \min(s, k) = 0$$
- 类似的，如果是POP，平摊代价也为0
- 三种栈操作每种的平摊代价都是 $O(1)$ ，这样包含 n 个操作的序列的总平摊代价就是 $O(n)$ 。已经证明 n 个操作的平摊代价的总和是总的实际代价的一个上界。所以 n 个操作的最坏情况代价为 $O(n)$

二进制计数器——势能法分析

- 计数器 $A[0 \cdots k-1]$ 表示为 k 位二进制位的数组

$$x = \sum_{i=0}^{k-1} A[i] \cdot 2^i$$

- 操作 INCREMENT 实现计数器加一

- 如何定义势？

INCREMENT(A)

1 $i \leftarrow 0$

2 while $i < \text{length}[A]$ and $A[i] = 1$

3 do $A[i] \leftarrow 0$

4 $i \leftarrow i + 1$

5 if $i < \text{length}[A]$

6 then $A[i] \leftarrow 1$

二进制计数器——势能法分析

- 定义势函数为数组 $A[0...k-1]$ 中 1 的个数
计算 INCREMENT 的平摊代价
 - 设第 i 次操作把 t_i 个 1 反转为 0，则实际代价为 $t_i + 1$
 - 设第 i 次操作后数组中 1 的个数为 b_i
 - 如果 $b_i = 0$ ，则第 i 次操作反转了 k 个 1，有 $b_{i-1} = t_i = k$ ；
 - 如果 $b_i > 0$ ，则 $b_i = b_{i-1} - t_i + 1$ 。
 - 两种情形下都有： $b_i \leq b_{i-1} - t_i + 1$
- 势差为 $\Phi(D_i) - \Phi(D_{i-1}) \leq (b_{i-1} - t_i + 1) - b_{i-1} = 1 - t_i$
- 平摊开销为 $a_i = c_i + \Phi(D_i) - \Phi(D_{i-1}) \leq (t_i + 1) + (1 - t_i) = 2$

二进制计数器——初值非零

- 设计数器中初始有 b_0 个1， n 次INCREMENT操作后有 b_n 个1。
($0 \leq b_0, b_n \leq k$, k 为计数器位数)

对所有的 i , $a_i \leq 2$

$$\Phi(D_n) = b_n, \quad \Phi(D_0) = b_0$$

n 次INCREMENT操作总代价

$$\sum c_i = \sum a_i - \Phi(D_n) + \Phi(D_0) \leq \sum 2 - b_n + b_0 = 2n - b_n + b_0$$

- 只要 $k \leq O(n)$, 则总代价就为 $O(n)$
- 这里并没有要求 $\Phi(D_n) \geq \Phi(D_0)$, 也没有要求 $\Phi(D_0) = 0$

练习题

- 考虑普通二叉最小堆上最坏运行时间为 $O(\log n)$ 的操作 INSERT 和 EXTRACT-MIN。请给出势函数 Φ ，使得 INSERT 操作的平摊代价为 $O(\log n)$ ，EXTRACT-MIN 的平摊代价为 $O(1)$ 。
- 说明如何用两个普通的栈来实现一个队列，使得每个 ENQUEUE 和 DEQUEUE 操作的平摊代价都为 $O(1)$ 。

动态表及其上的平摊分析

动态表

- 在有些应用中，在开始的时候无法预知在表中要存储多少个对象。这就希望能根据对象的多少调整所需要的存储空间（多退少补）
- 表的动态扩张和收缩——动态表
 - 用平摊分析证明插入、删除操作的平摊代价是 $O(1)$
 - 动态表的具体结构可以是堆、栈、散列表等等
 - 假设我们用数组来存储动态表（不是链表）
 - 通过插入扩张和删除搜索
 - 保证未使用空间总是不多于整个分配空间的一定比例
- 先看只有插入操作的情形，再拓展也有删除操作

插入算法

Insert(T, x)

- 1 if $size[T]=0$
- 2 then 给 $table[T]$ 分配一个槽的空间
- 3 $size[T] \leftarrow 1$
- 4 if $num[T]=size[T]$
- 5 then 分配一个有 $2*size[T]$ 个槽的空间的新表
- 6 将 $table[T]$ 中所有的项插入到新表中
- 7 释放 $table[T]$
- 8 $table[T]$ 指向新表的存储块地址
- 9 $size[T] \leftarrow 2*size[T]$
- 10 将 x 插入 $table[T]$
- 11 $num[T] \leftarrow num[T]+1$

一次插入操作的代价

- 简单分析，一次插入操作的代价为 $O(n)$
 - 于是 n 次插入操作总代价为 $O(n^2)$
- 聚集分析，一次插入操作的代价为
 - 当 $i-1$ 是 2 的幂时： $c_i = i$
 - 其他时候： $c_i = 1$
 - 总代价 $\sum_{i=0}^n c_i \leq n + \sum_{i=0}^{\lfloor \log(n) \rfloor} 2^i \leq n + 2n = 3n$
 - 平摊代价为 $3n/n = 3$
- 记账法，插入收费 3，其中 2 元钱分别赋给表中最后插入的对象和一个已经没有存款的对象

当需要扩张表时，每个对象被复制一次，恰好用完存款

表扩张时插入操作的平摊代价

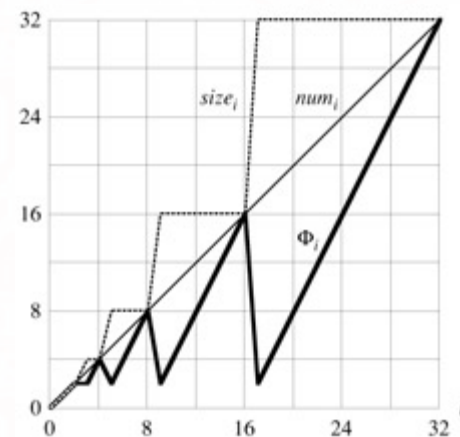
- 势函数： $\Phi(T) = 2num[T] - size[T]$

- 当第 i 个操作不触发表扩张，则

$$\begin{aligned}a_i &= c_i + \Phi_i - \Phi_{i-1} \\&= 1 + (2 \cdot num_i - size_i) - (2 \cdot num_{i-1} - size_{i-1}) \\&= 1 + (2 \cdot num_i - size_i) - (2(num_i - 1) - size_i) \\&= 3\end{aligned}$$

- 当第 i 个操作触发表扩张，则

$$\begin{aligned}a_i &= c_i + \Phi_i - \Phi_{i-1} \\&= num_i + (2 \cdot num_i - size_i) - (2 \cdot num_{i-1} - size_{i-1}) \\&= num_i + (2 \cdot num_i - 2(num_i - 1)) - (2(num_i - 1) - (num_i - 1)) \\&= num_i + 2 - (num_i - 1) = 3\end{aligned}$$



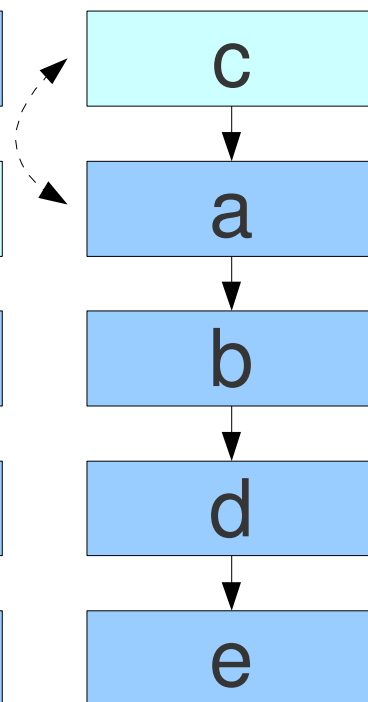
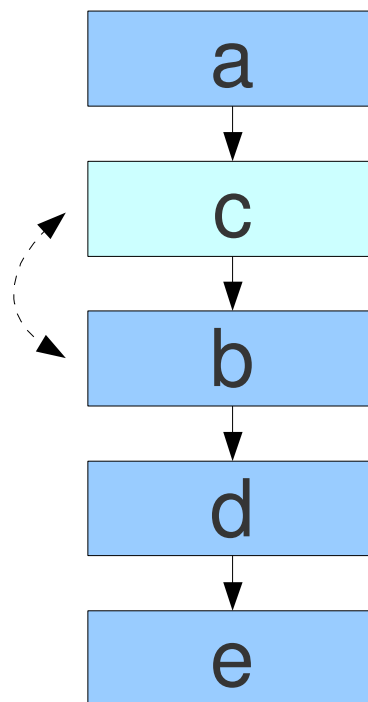
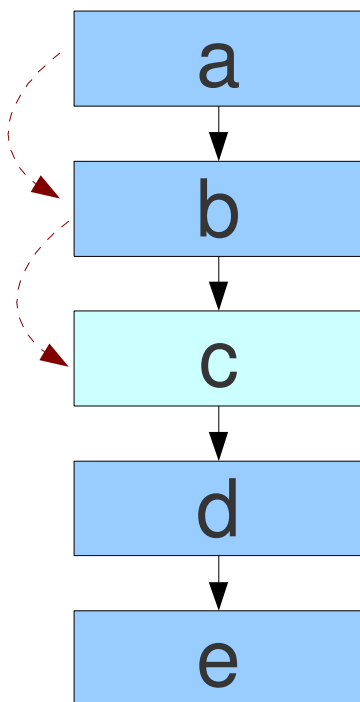
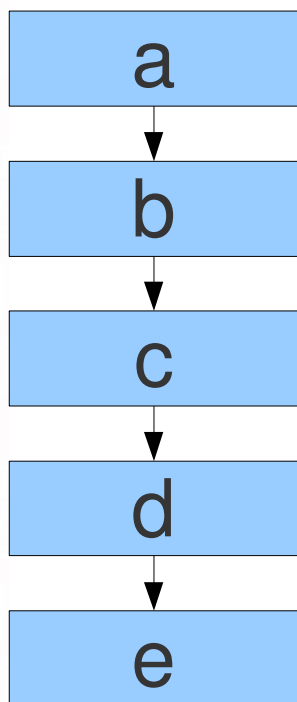
表扩张和收缩时的平摊代价

- 插入/删除操作：满时扩张、小于1/4时收缩
- 势函数
 - $\Phi(T) = \max(2num[T] - size[T], size[T]/2 - num[T])$
- 插入操作的平摊代价都小于3
 - 根据是否引起扩张来分别计算
- 删除操作的平摊代价都小于2
 - 根据是否引起收缩来分别计算
- 总平摊代价为 $O(n)$
- 插入/删除操作：满时扩张、小于1/3时收缩，势函数？

MTF (move-to-front) 链表访问

- 在一个单链表（singly-linked list）上
 - 访问第 i 个元素的访问代价为 i
 - 交换两个相邻元素的代价为某个固定常数值
 - 给定链表的初始状态
 - 目标：通过“交换”调整链表，使得 n 次访问的总访问代价最小？
 - 如果访问序列已知，可以设计一个最优调整策略！（如何做？）
 - 如果访问序列是在线的，该如何调整？
 - 假设访问具有局部性
 - 采用move-to-front（MTF）方式调整链表

Move-to-front 示例



MTF链表访问有多好？

- 平摊分析能告诉我们
 - **MTF** 不会比任何其他调整策略（包括最优策略）效率的4倍更差
- 关键：定义势函数
 - 设任意调整策略的算法为**A**
 - **MTF**在时刻 t 的当前链表，相对于算法**A**在时刻 t 的当前链表，其中顺序不同的元素对的个数的2倍（ $\Phi(t)$ ，相对于**A**的2倍逆序对数）

考察访问引起的势的变化

- 设访问 x 前, x 在MTF中的第 k 个位置, 在A中的第 i 个位置。
- 则访问后势的变化情况
 - 最多增加 $\min\{k-1, i-1\}$ 个新逆序对
 - 至少减少 $k-1-\min\{k-1, i-1\}$ 个旧逆序对
 - 势的变化最多为2倍的两者的之差: $4\min\{k-1, i-1\}-2(k-1)$
 - 于是

$$\begin{aligned}\hat{c} &= c + \Delta\Phi \\ &\leq (2k-1) + 4\min(k-1, i-1) - 2(k-1) \\ &\leq 4\min(k-1, i-1) + 1 \\ &\leq 4i\end{aligned}$$

- 思考: 如果算法A也会交换其他元素怎么办?

更多平摊分析经典问题

- Splay trees
- Red-black trees
- Fibonacci heaps
- Disjoint sets
- Maximum flow
- Hash table
- Scapegoat trees

平摊分析小结

- 平摊分析的概念
- 平摊分析的三种方法
 - 聚集分析
 - 记账法
 - 势能法
- 动态表及其上的平摊分析
- MTF链表访问的平摊分析