

32|字符串匹配基础（上）：如何借助哈希算法实现高效字符串匹配？

从今天开始，我们来学习字符串匹配算法。字符串匹配这样一个功能，我想对于任何一个开发工程师来说，应该都不会陌生。我们用的最多的就是编程语言提供的字符串查找函数，比如Java中的`indexOf()`，Python中的`find()`函数等，它们底层就是依赖接下来要讲的字符串匹配算法。

字符串匹配算法很多，我会分四节来讲解。今天我会讲两种比较简单的、好理解的，它们分别是：BF算法和RK算法。下一节，我会讲两种比较难理解、但更加高效的，它们是：BM算法和KMP算法。

这两节讲的都是单模式串匹配的算法，也就是一个串跟一个串进行匹配。第三节、第四节，我会讲两种多模式串匹配算法，也就是在一个串中同时查找多个串，它们分别是Trie树和AC自动机。

今天讲的两个算法中，RK算法是BF算法的改进，它巧妙借助了我们前面讲过的哈希算法，让匹配的效率有了很大的提升。那RK算法是如何借助哈希算法来实现高效字符串匹配的呢？你可以带着这个问题，来学习今天的内容。

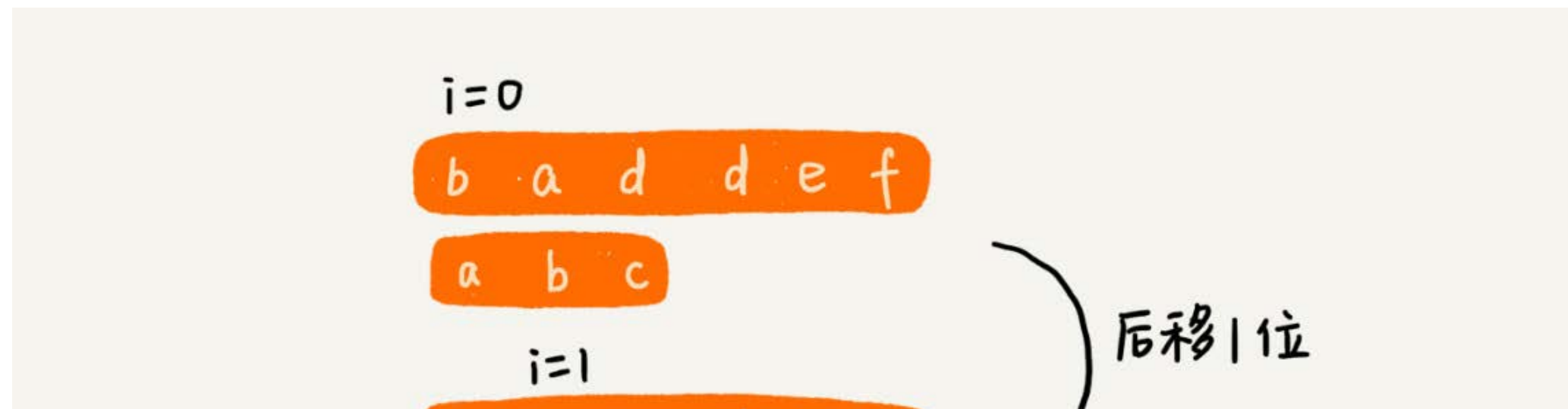
BF算法

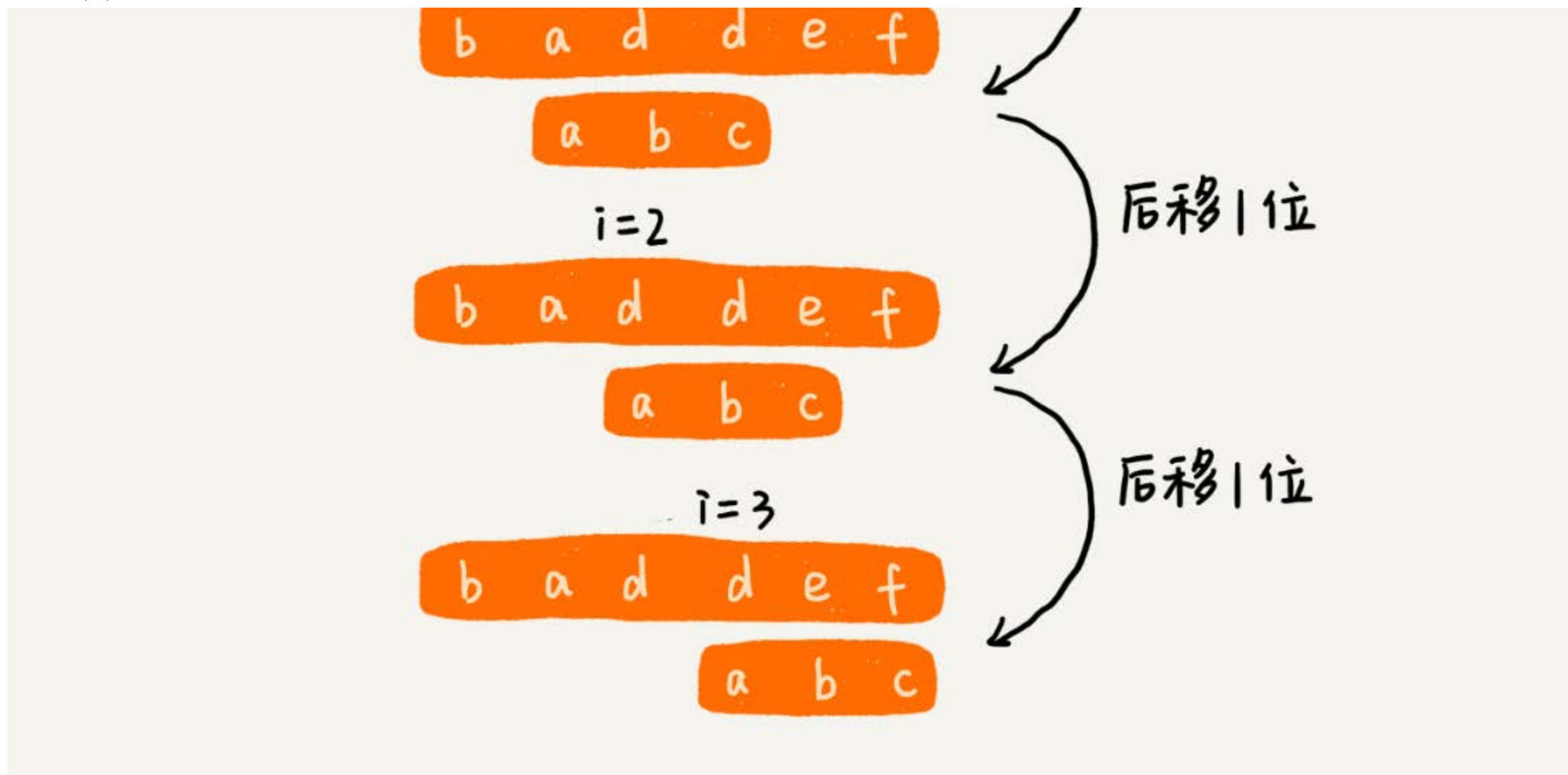
BF算法中的BF是Brute Force的缩写，中文叫作暴力匹配算法，也叫朴素匹配算法。从名字可以看出，这种算法的字符串匹配方式很“暴力”，当然也就会比较简单、好懂，但相应的性能也不高。

在开始讲解这个算法之前，我先定义两个概念，方便我后面讲解。它们分别是主串和模式串。这两概念很好理解，我举个例子你就懂了。

比方说，我们在字符串A中查找字符串B，那字符串A就是主串，字符串B就是模式串。我们把主串的长度记作 n ，模式串的长度记作 m 。因为我们是在主串中查找模式串，所以 $n > m$ 。

作为最简单、最暴力的字符串匹配算法，BF算法的思想可以用一句话来概括，那就是，我们在主串中，检查起始位置分别是0、1、2... $n-m$ 且长度为 m 的 $n-m+1$ 个子串，看有没有跟模式串匹配的。我举一个例子给你看看，你应该可以理解得更清楚。





从上面的算法思想和例子，我们可以看出，在极端情况下，比如主串是“aaaaa...aaaaa”（省略号表示有很多重复的字符a），模式串是“aaaaab”。我们每次都比对 m 个字符，要比对 $n-m+1$ 次，所以，这种算法的最坏情况时间复杂度是 $O(n*m)$ 。

尽管理论上，BF算法的时间复杂度很高，是 $O(n*m)$ ，但在实际的开发中，它却是一个比较常用的字符串匹配算法。为什么这么说呢？原因有两点。

第一，实际的软件开发中，大部分情况下，模式串和主串的长度都不会太长。而且每次模式串与主串中的子串匹配的时候，当中途遇到不能匹配的字符的时候，就可以就停止了，不需要把 m 个字符都比对一下。所以，尽管理论上的最坏情况时间复杂度是 $O(n*m)$ ，但是，统计意义上，大部分情况下，算法执行效率要比这个高很多。

第二，朴素字符串匹配算法思想简单，代码实现也非常简单。简单意味着不容易出错，如果有bug也容易暴露和修复。在工程中，在满足性能要求的前提下，简单是首选。这也是我们常说的[KISS \(Keep it Simple and Stupid\) 设计原则](#)。

所以，在实际的软件开发中，绝大部分情况下，朴素的字符串匹配算法就够用了。

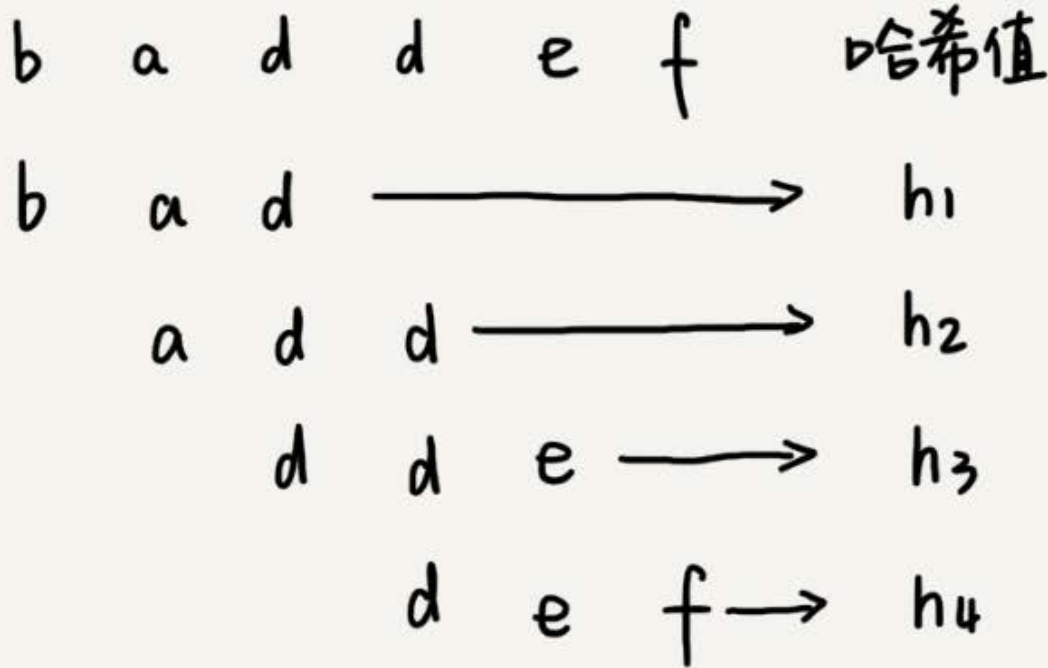
RK算法

RK算法的全名叫Rabin-Karp算法，是由它的两位发明者Rabin和Karp的名字来命名的。这个算法理解起来也不是很难。我个人觉得，它其实就是刚刚讲的BF算法的升级版。

我在讲BF算法的时候讲过，如果模式串长度为m，主串长度为n，那在主串中，就会有n-m+1个长度为m的子串，我们只需要暴力地对比这n-m+1个子串与模式串，就可以找出主串与模式串匹配的子串。

但是，每次检查主串与子串是否匹配，需要依次比对每个字符，所以BF算法的时间复杂度就比较高，是O(n*m)。我们对朴素的字符串匹配算法稍加改造，引入哈希算法，时间复杂度立刻就会降低。

RK算法的思路是这样的：我们通过哈希算法对主串中的n-m+1个子串分别求哈希值，然后逐个与模式串的哈希值比较大小。如果某个子串的哈希值与模式串相等，那就说明对应的子串和模式串匹配了（这里先不考虑哈希冲突的问题，后面我们会讲到）。因为哈希值是一个数字，数字之间比较是否相等是非常快速的，所以模式串和子串比较的效率就提高了。



不过，通过哈希算法计算子串的哈希值的时候，我们需要遍历子串中的每个字符。尽管模式串与子串比较的效率提高了，但是，算法整体的效率并没有提高。有没有方法可以提高哈希算法计算子串哈希值的效率呢？

这就需要哈希算法设计的非常有技巧了。我们假设要匹配的字符串的字符集中只包含K个字符，我们可以用一个K进制数来表示一个子串，这个K进制数转化成十进制数，作为子串的哈希值。表述起来有点抽象，我举了一个例子，看完你应该就能懂了。

比如要处理的字符串只包含a~z这26个小写字母，那我们就用二十六进制来表示一个字符串。我们把a~z这26个字符映射到0~25这26个数字，a就表示0，b就表示1，以此类推，z表示25。

在十进制的表示法中，一个数字的值是通过下面的方式计算出来的。对应到二十六进制，一个包含a到z这26个字符的字符串，计算哈希的时候，我们只需要把进位从10改成26就可以。

$$"657" = 6 * 10 * 10 + 5 * 10 + 7 * 1$$

$$"cba" = "c" * 26 * 26 + "b" * 26 + "a" * 1$$

$$= 2 * 26 * 26 + 1 * 26 + 0 * 1$$

$$= 1353$$

这个哈希算法你应该看懂了吧？现在，为了方便解释，在下面的讲解中，我假设字符串中只包含a~z这26个小写字符，我们用二十六进制来表示一个字符串，对应的哈希值就是二十六进制数转化成十进制的结果。

这种哈希算法有一个特点，在主串中，相邻两个子串的哈希值的计算公式有一定关系。我这有个例子，你先找一下规律，再来看我后面的讲解。

dbc edb

$3 \times 26 \times 26 + 1 \times 26 + 2$

dbc edb

$1 \times 26 \times 26 + 2 \times 26 + 4$

从这里例子中，我们很容易就能得出这样的规律：相邻两个子串 $s[i-1]$ 和 $s[i]$ （ i 表示子串在主串中的起始位置，子串的长度都为 m ），对应的哈希值计算公式有交集，也就是说，我们可以使用 $s[i-1]$ 的哈希值很快的计算出 $s[i]$ 的哈希值。如果用公式表示的话，就是下面这个样子：

$h[i-1]$ 对应子串 $S[i-1, i+m-2]$ 的哈希值, $h[i]$ 对应子串 $S[i, i+m-1]$ 的哈希值

$$h[i-1] = 26^{m-1} \times (S[i-1] - 'a') + \underbrace{26^{m-2} \times (S[i] - 'a') + \dots + 26^0 \times (S[i+m-2] - 'a')}_A$$

$$h[i] = \underbrace{26^{m-1} \times (S[i] - 'a') + \dots + 26^1 \times (S[i+m-2] - 'a')}_B + 26^0 \times (S[i+m-1] - 'a')$$

从公式中可以看出： $B = A \times 26$ 。所以， $h[i]$ 和 $h[i-1]$ 的关系如下：

$$h[i] = (h[i-1] - 26^{m-1} \times (S[i-1] - 'a')) \times 26 + 26^0 \times (S[i+m-1] - 'a')$$

不过，这里有一个小细节需要注意，那就是 $26^{(m-1)}$ 这部分的计算，我们可以通过查表的方法来提高效率。我们事先计算好 26^0 、 26^1 、 26^2 $26^{(m-1)}$ ，并且存储在一个长度为 m 的数组中，公式中的“次方”就对应数组的下标。当我们需要计算 26 的 x 次方的时候，就可以从数组的下标为 x 的位置取值，直接使用，省去了计算的时间。



我们开头的时候提过，RK算法的效率要比BF算法高，现在，我们就来分析一下，RK算法的时间复杂度到底是多少呢？

整个RK算法包含两部分，计算子串哈希值和模式串哈希值与子串哈希值之间的比较。第一部分，我们前面也分析了，可以通过设计特殊的哈希算法，只需要扫描一遍主串就能计算出所有子串的哈希值了，所以这部分的时间复杂度是 $O(n)$ 。

模式串哈希值与每个子串哈希值之间的比较的时间复杂度是 $O(1)$ ，总共需要比较 $n-m+1$ 个子串的哈希值，所以，这部分的时间复杂度也是 $O(n)$ 。所以，RK算法整体的时间复杂度就是 $O(n)$ 。

这里还有一个问题就是，模式串很长，相应的主串中的子串也会很长，通过上面的哈希算法计算得到的哈希值就可能很大，如果超过了计算机中整型数据可以表示的范围，那该如何解决呢？

刚刚我们设计的哈希算法是没有散列冲突的，也就是说，一个字符串与一个二十六进制数一一对应，不同的字符串的哈希值肯定不一样。因为我们是基于进制来表示一个字符串的，你可以类比成十进制、十六进制来思考一下。实际上，我们为了能将哈希值落在整型数据范围内，可以牺牲一下，允许哈希冲突。这个时候哈希算法该如何设计呢？

哈希算法的设计方法有很多，我举一个例子说明一下。假设字符串中只包含a~z这26个英文字母，那我们每个字母对应一个数字，比如a对应1，b对应2，以此类推，z对应26。我们可以把字符串中每个字母对应的数字相加，最后得到的和作为哈希值。这种哈希算法产生的哈希值的数据范围就相对要小很多了。

不过，你也应该发现，这种哈希算法的哈希冲突概率也是挺高的。当然，我只是举了一个最简单的设计方法，还有很多更加优化的方法，比如将每一个字母从小到大对应一个素数，而不是1, 2, 3.....这样的自然数，这样冲突的概率就会降低一些。

那现在新的问题来了。之前我们只需要比较一下模式串和子串的哈希值，如果两个值相等，那这个子串就一定可以匹配模式串。但是，当存在哈希冲突的时候，有可能存在这样的情况，子串和模式串的哈希值虽然是相同的，但是两者本身并不匹配。

实际上，解决方法很简单。当我们发现一个子串的哈希值跟模式串的哈希值相等的时候，我们只需要再对比一下子串和模式串本身就好了。当然，如果子串的哈希值与模式串的哈希值不相等，那对应的子串和模式串肯定也是不匹配的，就不需要对比子串和模式串本身了。

所以，哈希算法的冲突概率要相对控制得低一些，如果存在大量冲突，就会导致RK算法的时间复杂度退化，效率下降。极端情况下，如果存在大量的冲突，每次都要再对比子串和模式串本身，那时间复杂度就会退化成 $O(n*m)$ 。但也不要太悲观，一般情况下，冲突不会很多，RK算法的效率还是比BF算法高的。

解答开篇&内容小结

今天我们讲了两种字符串匹配算法，BF算法和RK算法。

BF算法是最简单、粗暴的字符串匹配算法，它的实现思路是，拿模式串与主串中是所有子串匹配，看是否有能匹配的子串。所以，时间复杂度也比较高，是 $O(n*m)$ ， n 、 m 表示主串和模式串的长度。不过，在实际的软件开发中，因为这种算法实现简单，对于处理小规模字符串匹配很好用。

RK算法是借助哈希算法对BF算法进行改造，即对每个子串分别求哈希值，然后拿子串的哈希值与模式串的哈希值比较，减少了比较的时间。所以，理想情况下，RK算法的时间复杂度是 $O(n)$ ，跟BF算法相比，效率提高了很多。不过这样的效率取决于哈希算法的设计方法，如果存在冲突的情况下，时间复杂度可能会退化。极端情况下，哈希算法大量冲突，时间复杂度就退化为 $O(n*m)$ 。

课后思考

我们今天讲的都是一维字符串的匹配方法，实际上，这两种算法都可以类比到二维空间。假设有下面这样一个二维字符串矩阵（图中的主串），借助今天讲的处理思路，如何在其中查找另一个二维字符串矩阵（图中的模式串）呢？

主串

d

a

b

c

e

f

a

d

c

c

a

f

d

e

f

c

模式串

c

a

e

f

欢迎留言和我分享，也欢迎点击“请朋友读”，把今天的内容分享给你的好友，和他一起讨论、学习。



数据结构与算法之美

为工程师量身打造的数据结构与算法私教课

王争
前 Google 工程师



新版升级：点击「 请朋友读」，10位好友免费读，邀请订阅更有**现金**奖励。

精选留言：

- Jerry银银 2018-12-05 13:35:55
觉得今天的hash算法真是巧妙 [22赞]

• P@tricK 2018-12-05 08:51:56

思考题：

假设二维主串和模式串的维度分别是 $m \times n$ 和 $i \times j$ ，横向在 $[0, m-i]$ ，纵向在 $[0, n-j]$ 取起始点，然后取同样的子串窗口对比，共有 $(m-i+1) \times (n-j+1)$ 个子串。

ps：

文中计算子串哈希值 $h[i]$ 的公式中，第二个 $h[i-1]$ 和后面的 $h[i+m-1]$ ，应该是主串中的第 $i-1$ 个和第 $i+m-1$ 个字符的哈希值... [12赞]

• Alan 2018-12-05 10:33:50

$h[i] = 26 * (h[i-1] - 26^{(m-1)} * h[i-1]) + h[i+m-1];$

其中， $h[i]$ 、 $h[i-1]$ 分别对应 $s[i]$ 和 $s[i-1]$ 两个子串的哈希值

文中这个公式， $26 * (h[i-1] - 26^{(m-1)} * h[i-1])$ 可以化简为 $26 * h[i-1] * (1 - 26^{(m-1)})$ ，所以这里是不是应该改为 $26 * (h[i-1] - 26^{(m-1)} * s[i-1])$ ，用 $s[i-1]$ 代表当前位置的字符串的值，例如图中 d 的值是 3，同样的公式后面加 $h[i+m-1]$ 是不是也是 $s[i+m-1]$ 呢 [6赞]

作者回复 2018-12-05 13:28:21

写错了 感谢指正 已经改了

• Smallfly 2018-12-05 22:36:56

思考题：

以模式串矩阵的大小，去匹配主串矩阵，每个小矩阵可以构建成字符串，就能用 RK 算法做字符串匹配了。

如果主串的大小是 $M \times N$ ，模式串大小为 $m \times n$ ，则时间复杂度为 $(M - m + 1) * (N - n + 1)$ 。 [5赞]

• ZX 2018-12-06 22:17:32

RK 算法，在对主串构建的时候，就对比是不是一样的，一样就不继续计算后面的 hash，这样会不会更快一点 [3赞]

作者回复 2018-12-07 10:12:17

你说的很对 代码实现就是这样处理的

• 煦暖 2018-12-05 15:58:13

“ $h[i] = 26 * (h[i-1] - 26^{(m-1)} * h[i-1]) + h[i+m-1]$ ；其中， $h[i]$ 、 $h[i-1]$ 分别对应 $s[i]$ 和 $s[i-1]$ 两个子串的哈希值。”老师你好， $26^{(m-1)} * h[i-1]$ 中的 $h[i-1]$ 和 $h[i+m-1]$ 应该是一个字符的哈希值而不应该是子串的哈希值吧？？PS：用您的例子套用公式： $h_0 = 3 * 26 * 26 + 1 * 26 + 2 = 2056$ ； $h_1 = 26 * (h_0 - 26 * 26 * h_0) + (4 * 26 * 26 + 3 * 26 + 4) = -36080014$ 和期望的哈希值 $1 * 26 * 26 + 2 * 26 + 4 = 732$ 不符。

[3赞]

- qinggeouye 2018-12-31 22:06:56
RK 算法，计算相邻两个子串哈希值的规律，比如，相邻两个子串分别为 "dbc" 和 "bce"，那么 $s[i-1] = 'd'$ ， $s[i] = 'b'$ ，与 'a' 相减意思是，它们的 ASCII 码值的差值正好表示字母的数值；
评论中有同学不明白老师给的哈希值 $h[i]$ 和 $h[i-1]$ 之间的关系，我想应该是 $s[i]$ 和 $s[i-1]$ 代表什么这点没明白。 [2赞]
- 大刚 2018-12-20 09:44:31
老师，下面的不懂，能不能在详细讲解下
 $h[i] = 26 * (h[i-1] - 26^{(m-1)} * (s[i-1] - 'a')) + (s[i+m-1] - 'a')$; [2赞]
- coulson 2018-12-05 17:31:43
老师，前天面试被问到一个问题，关于地图算法的，比如线路推荐。请问地图算法会讲到么 [2赞]
- 作者回复 2018-12-06 10:12:55
在高级篇那部分会涉及一点
- 王婵 2018-12-05 11:12:14
思考题二维数组用RK算法计算哈希值要复杂一些， $i-1$ $j-1$ 不越界的情况下，如果模式串的行数大于列数可以通过 $h[i-1, j]$ 计算 $h[i, j]$ ，如果列数大于行数可以通过 $h[i, j-1]$ 计算 $h[i, j]$ 还有更好的方法计算哈希值吗？
另外正文里的计算哈希值的公式貌似写错了，应该是
 $h[i] = 26 * (h[i-1] - 26^{(m-1)} * (s[i-1] - 'a')) + (s[i+m-1] - 'a')$; [2赞]
- yaya 2018-12-05 10:07:08
二维矩阵只要如果以 i, j 为左上角，即可定义一个 i, j $i+1, j$ $i, j+1$ $i+1, j+1$ 的子串，其本质是和字符串相同的，即可以由rf又可以由bf解 [2赞]
- 蒋礼锐 2018-12-05 09:02:54
思考题：
可以先查找第一行的字符串，假设长度为m，用bf或者rk都可以，假设是 $n * n$ 的数组，
bf的复杂度是 $(n-m) * n$
rk的复杂度为n

如果有匹配，则依次匹配第 2 到 m 行字符串。每次的复杂度与第一次的相同

最坏时间复杂度为
bf: $(m-n)^2 * n^2$

rk:n^2

但是如果第一行不匹配的话是不会进行第二行的匹配的，平均复杂度会小很多。 [2赞]

• Flash 2019-01-27 15:25:29

看了很多评论后，发现思考题其实就是举一反三，我们可以在比较时，将二维串矩阵看作是字符串来处理，至于怎么转换成一维字符串，应该有很多方法，比如子串矩阵和模式串矩阵都用同样的规则来组成一个字符串，从左到右，再从上到下遍历取矩阵的元素a[i][j]。转换为一维字符后，就可以用BF或者RK算法了。

复杂度分析，假设二维主串矩阵和模式串矩阵的维度分别是 m*n 和 i*j，按一个个矩阵来看子串的话，共有(m-i+1) * (n-j+1)个子串矩阵。用RK算法的话，复杂度就是O((m-i+1) * (n-j+1))。 [1赞]

• 星君 2018-12-12 20:43:59

好几期没看了，感觉跟不上了 [1赞]

作者回复2018-12-13 09:53:45

不着急 慢慢来 没必要一直紧跟着

• Smallfly 2018-12-07 09:44:27

用 K 进制表示字符串应该不会出现哈希冲突吧，比如“0”到“F”的字符，用 16 进制表示，有且仅有 "FFFF" 的结果是 0xFFFF 的值呀。 [1赞]

• hunterlodge 2018-12-07 09:03:46

RK算法和布隆过滤器的思想是一致的 [1赞]

• 朱月俊 2018-12-05 16:34:56

以前刷题的时候，遇到过rk算法，当时是没太考虑hash冲突，一个字母对应一个数字，子串的hash值就是子串中的字母对应的数字相加。今天大佬将之抽象提炼出来，还专门提到冲突解决方法，不可谓不妙！ [1赞]

• 青铜5 周群力 2018-12-05 09:02:34

二维字符串匹配能用rk算法解决，那么能用kmp解决么? [1赞]

• 許敲敲 2018-12-05 08:56:03

主串m*n把主串分割成m-1*n-1个子串 每个子串计算哈希值，再与模式串的哈希值比较 [1赞]

• Liam 2018-12-05 08:44:56

BF：遍历主串，以矩阵左上角元素作为矩阵起始位，从 (0, 0) 到 (rowN - rowM, colN - colM), 取行列长度与模式相等的子矩阵串进行比较

hash算法同理 [1赞]