

第 11 章 查找

11.1 静态查找



查找表分类

- 静态查找表

仅作查询和检索操作的查找表。

- 动态查找表

“查询” 结果 “不在查找表中” → 数据元素插入到查找表中；

“查询” 结果为 “在查找表中” 的数据元素 → 删除。



查找过程中，往往是依据数据元素的某个数据项进行查找，这个数据项通常是数据的**关键字**。

关键字：是数据元素中某个**数据项**的值，用以**标识**一个数据元素。

若关键字能**标识唯一**的一个数据元素，
则称谓**主关键字**。

若关键字能**标识若干**个数据元素，
则称谓**次关键字**。

张三 2016010002 男 成都 1.75



平均查找长度 ASL

$$ASL = P_1 C_1 + P_2 C_2 + \dots + P_n C_n$$

P_i ——查找第 i 个元素的概率

C_i ——查找第 i 个元素需要的比较次数

提纲

11.1.1 顺序查找

11.1.2 折半查找

11.1.3 索引查找

11.1.4 作业



11.1.1 顺序查找

	52	7	13	9	41
--	----	---	----	---	----



11.1.1 顺序查找

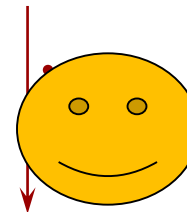
顺序查找基本思想

从表中指定位置（一般为最后一个或第0个位置设为岗哨）的记录开始，沿某个方向将记录的关键字与给定值相比较，若某个记录的关键字和给定值相等，则**查找成功**；

反之，若找完整个顺序表，都没有与给定关键字值相等的记录，则此顺序表中没有满足查找条件的记录，**查找失败**。



11.1.1 顺序查找



R

64	21	37	88	19	92	05	64	56	80	75	13	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

key=64

R.Length

R	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	
60	21	37	88	19	92	05	64	56	80	75	13	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	

key=60

R.Length



11.1.1 顺序查找

性能分析

空间复杂度： $O(1)$

时间复杂度：

查找算法的基本运算是给定值与顺序表中记录关键字值的比较。

最好情况： $O(1)$

最坏情况： $O(n)$

平均情况： $O(n)$



11.1.1 顺序查找

顺序表上顺序查找的平均查找长度

平均查找长度 (ASL)：给定值与关键字比较次数的期望值。对于具有n个记录的顺序表，查找成功时的平均查找长度为：

$$ASL = \sum_{i=1}^n P_i C_i$$

P_i ——查找第*i*个记录的概率

C_i ——找到第*i*个记录数据需要比较的次数，
对于顺序表， $C_i = n - i + 1$



11.1.1 顺序查找

等概率情况

$$P_i = \frac{1}{n}$$

$$ASL = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (n - i + 1) = \frac{n + 1}{2}$$

不等概率

- 每个元素的查找概率已知
- 每个元素的查找概率未知



顺序查找的应用：查找最大值

问题描述：查找序列（顺序表） $a[1 \dots n]$ ($n > 0$)中的最大元素。

```
1. max_val ← a[1]    //最大元素的初始值
2. for i ← 2 to n do  //依次比较每个元素
3. |   if max_val < a[i] then
4. |   |   max_val ← a[i]
5. |   end
6. end
```

- 比较次数： $n-1$



顺序查找的应用：查找最大和最小值

问题描述：查找序列（顺序表） $a[1 \dots n]$ ($n > 0$) 中的最大元素和最小元素，比较次数不超过 $\frac{3}{2}n$ 。



顺序查找的应用：查找最大和最小值

问题描述：查找顺序表 $a[1 \dots n]$ ($n > 0$)中的最大值和最小值，比较次数不超过 $\frac{3}{2}n$ 。

- **算法1：**朴素查找法

每次循环只与单个元素比较



比较次数： $2(n-1)$ （最坏情况）

```
1. max_val ← a[1]  //最大元素的初始值
2. min_val ← a[1]  //最小元素的初始值
3. for i ← 2 to n do //对每个元素依次判断
4. | if max_val < a[i] then //比较1
5. | | max_val ← a[i]
6. | else if min_val > a[i] then //比较2
7. | | min_v ← a[i]
8. | end
9. end
```



顺序查找的应用：查找最大和最小值

问题描述：查找顺序表 $a[1 \dots n]$ ($n > 0$)中的最大值和最小值，比较次数不超过 $\frac{3}{2}n$ 。

- 每次只与序列中的一个元素比较，总的比较次数达到 $2(n-1)$
- 可以考虑每次同时比较多个元素，从中找最大值和最小值
- **思考：**为更新当前的最大值和最小值，与序列多少个元素一起比较效率高？如何比较？



顺序查找的应用：查找最大和最小值

问题描述：查找顺序表
 $a[1 \dots n]$ ($n > 0$) 中的最大值和
最小值，比较次数不超过 $\frac{3}{2}n$ 。

- **算法2：**快速查找法

比较次数： $\frac{3}{2}n$

- 思考题：如果每次同时比较三个元素，能否进一步减少比较次数？

```
1. max_val ← a[1]
2. min_val ← a[1]
3. k ← (n % 2) + 1 //n是奇数, k 从2开始; 否则从1开始
4. while k < n do
5.   | if a[k] < a[k+1] then //比较1: 两个元素先比较
6.   |   | if min_val > a[k] then //比较2:
7.   |   |   | min_val ← a[k] //较小值与min_val比较
8.   |   | end
9.   |   | if max_val < a[k+1] then //比较3:
10.  |   |   | max_val ← a[k+1] //较大值与max_val比较
11.  |   | end
12.  | else //a[k] > a[k+1] //比较1'
13.  |   | if min_val > a[k+1] then //比较2'
14.  |   |   | min_val ← a[k+1]
15.  |   | end
16.  |   | if max_val < a[k] then //比较3'
17.  |   |   | max_val ← a[k]
18.  |   | end
19.  | end
20.  | k ← k + 2 //每次同时比较两个元素
21. end
```



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 1$)内的所有质数。

质数筛选的意义：

- 质数是数论研究的基础---费马大定理、黎曼猜想等
- 质数在密码学中具有重要的应用---RSA加密算法基于质数的乘法和因数分解
- 算法设计中广泛使用了质数的概念和性质---哈希表、哈希函数等

因特网梅森素数大搜索 (GIMPS, Great Internet Mersenne Prime Search)



- ✓ 世界上第一个基于互联网的分布式计算项目，参与者可自行下载prime95和MPrime软件（开放源代码）来搜索梅森素数；成功者可获5-10万美金的奖励！
- ✓ 梅森素数是可以被写成 $2^n - 1$ 形式的质数，以17 世纪的法国数学家马丁·梅森命名
- ✓ 中国数学家周海中于1992年首次给出了梅森素数分布的准确表达式，被国际上命名为“周氏猜测”



顺序查找的应用：查找区间内所有质数



2024年10月最新发现的最大质数

图源：澎湃新闻

这是第52个已知的梅森素数，长度达到41,024,320个数位，比2018年发现的上一纪录多了整整1600万位！



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 1$)内的所有质数。

- **算法1：试除法** 时间复杂度： $O(n\sqrt{n})$
---小学生都会，但也只有小学生才用吧？！ (^_^)
- **算法2：埃氏筛选法** 时间复杂度： $O(n \log \log(n))$
---不是最优，但最为经典，算法简洁，使用广泛！
- ***算法3：合数限定法** 时间复杂度： $O(n)$
---时间最优，但空间复杂度高，纯自研（嗨）算法，仅供参考（拍砖）(@~_~@)
- ***算法4：欧拉筛选法** 时间复杂度： $O(n)$
---时间最优，大师创作，但算法较复杂， n 越大效率越高！



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 1$)内的所有质数。

算法2：埃氏筛选法

- 由希腊数学家Eratosthenes在公元250年提出的一种简单检定质数的算法
- **思路：**把整数2到 n 排列起来，首先标记2是最小的质数，然后删除2后面所有2的倍数（偶数）。可以发现，2后面第一个没删除的数是3，标记3是下一个质数，再把3后面3的倍数都删除；质数3后面第一个未删除的数是5，说明5是质数，再把5后面所有能被5整除的数都删除。。。这样一直做下去，就会把不超过 n 的**全部合数都筛掉**，留下的就是不超过 n 的全部质数。
- **关键数据结构：**顺序表 `is_prime[1...n]`

`is_prime[k] = true/false` 标注 正整数 k 是否质数



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 1$)内的所有质数。

算法2：埃氏筛选法

- 时间复杂度：

$$O\left(\frac{n}{2} + \frac{n}{3} + \frac{n}{5} + \dots\right) = O(n \log \log(n))$$

```
1. is_prime[1] ← false //1不是质数，也不是合数
2. for k ← 2 to n do
3. | is_prime[k] ← true //初始化，先假设[2...n]都是质数
4. end
5. for k ← 2 to n do
6. | if is_prime[k] = true then //k是质数
7. | | m ← 2 * k //k的最小倍数
8. | | while m ≤ n do
9. | | | is_prime[m] = false //k的倍数都不是质数，删除
10. | | | m ← m + k //下一个倍数
11. | | end
12. | end
13.end
```



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 1$)内的所有质数。

算法2：埃氏筛选法

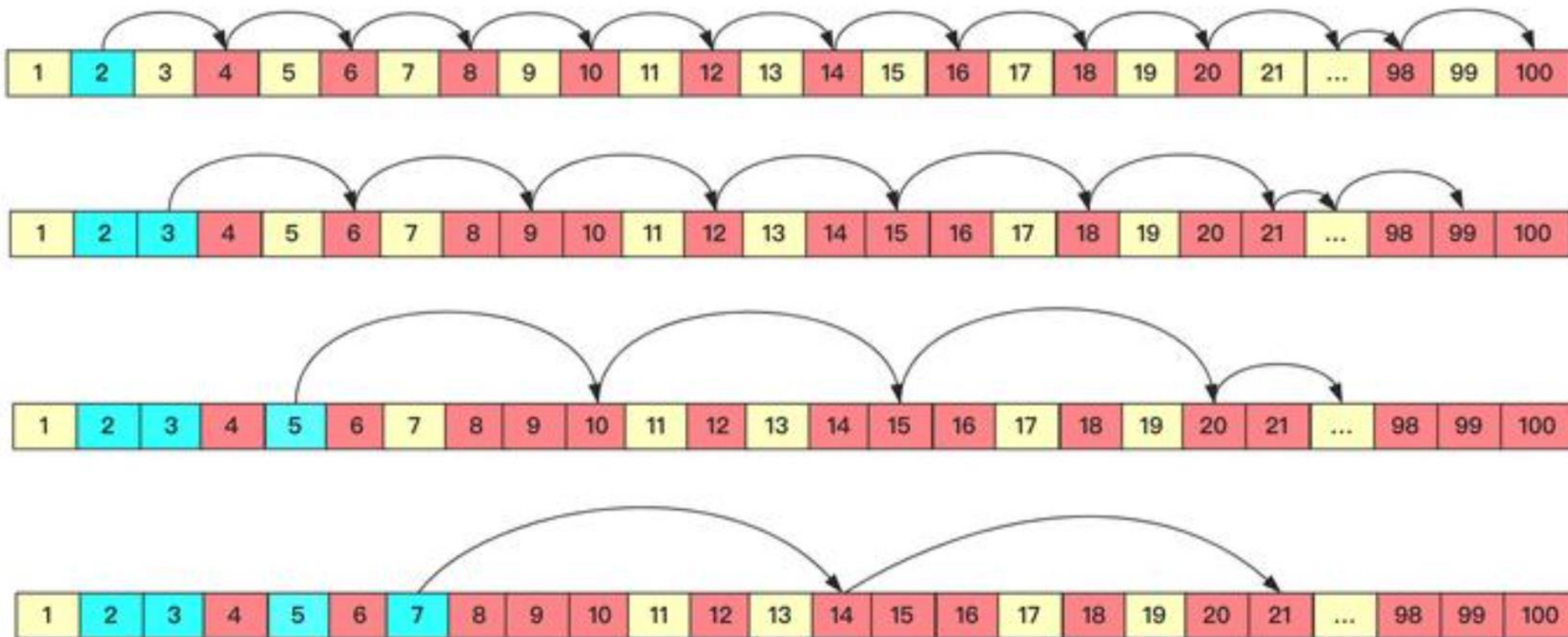
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Prime numbers
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	
101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	
111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 1$)内的所有质数。

算法2：埃氏筛选法



将整数 $a \in [1 \dots n]$ 因数分解, 得到 $a = p_1^{n_1} p_2^{n_2} \dots p_k^{n_k}$, 其中 p_1, \dots, p_k 是不同的质数 ($k > 1$) 且指数 n_1, \dots, n_k 都大于0。则在埃氏筛选法中, a 会被删除几次? 即 $is_prime[a] \leftarrow false$ 被执行几次?

- ☒ A k
- ☐ B $n_1 + n_2 + \dots + n_k$
- ☐ C $\max\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$
- ☐ D $p_1 + p_2 + \dots + p_k$

提交



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法3：合数限定法

- 筛选法的问题在于一个合数会被**多次删除**，造成时间浪费。如 6, 12, 18, 36 是质数 2 和 3 的倍数

问：整数 k 会被删除几次？

答：有多少个**不同的质因数**就被删除几次

如 $12 = 2 \times 2 \times 3$ ，会被删除 2 次

- 思路：**为使每个合数**只删除一次**，不能简单地删除质数的所有倍数，而是删除由当前找到的质数**合成的数**。



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法3：合数限定法

- **思路：**为使每个合数只删除一次，不能简单地删除质数的所有倍数，而是删除由当前找到的质数合成的数。
 - **关键数据结构：**
 - (1) 顺序表 `is_prime[1...n]`
 - (2) 队列 `M`
 - 设当前找到 $k-1$ 个质数: $p_1 < p_2 < \dots < p_{k-1}$
 - 用队列 `M` 存放由这些质数合成的数值
- 即 $M = \{ p_1^{n_1} p_2^{n_2} \dots p_{k-1}^{n_{k-1}} \leq n \mid \forall i \in [1, k): n_i \geq 0 \}$



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法3：合数限定法

- 关键步骤：更新合数队列M

```
    //设找到第k个素数 $p_k$  ( $\text{is\_prime}[p_k] = \text{true}$ )  
     $Q \leftarrow M$  //新建队列Q, 然后将M中的所有合数移到Q  
    while IsEmpty(Q) = false do  
    |  $m \leftarrow \text{DeQueue}(Q)$  //取出合数, 与 $p_k$ 相乘  
    | while  $m * p_k \leq n$  do //相乘结果在区间范围内  
    | |  $\text{is\_prime}[m * p_k] \leftarrow \text{false}$  //删除 $m * p_k$ , 且该合数是第一次删除 (?)  
    | | EnQueue(M,  $m$ ) //将合数m放入队列M  
    | |  $m \leftarrow m * p_k$  //更新合数, 继续与 $p_k$ 相乘  
    | end  
end
```

算法细节省略，因为更牛的在后面。。。



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 1$)内的所有质数。

算法4：欧拉筛选法（线性筛选法）



Leonhard Euler

- **思路：**在埃氏筛选法的基础上，让每个合数只被它的**最小质因数**删除一次，以达到不重复的目的
- **关键数据结构：**（1）顺序表 `is_prime[1...n]`
`is_prime[k] = true/false` 标注 正整数 k 是否质数
（2）**线性表** `prime_list`：按升序存储筛选出的**质数**



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 1$)内的所有质数。

算法4：欧拉筛选法

欧拉对质数 p 的倍数 $k * p$ ($k > 1$) 的分析与思考

Q1: 在埃氏筛选法中，合数 $k * p$ 什么情况下会被多次删除？

A1: 将 k 质因数分解为 $k = q_1 q_2 \dots q_j$ 且 $q_1 \leq q_2 \leq \dots \leq q_j$

如果 $\exists i \in [1..j]: q_i \neq p$, 则 $k * p$ 至少会被 p 和 q_i 删除两次

Q2: 合数 $k * p$ 第一次被删除是在找到哪个质数后发生的？

A2: $k * p = \min\{q_1, p\} * q_2 \dots q_j * \max\{q_1, p\}$

因此, $k * p$ 第一次删除发生在找到质数 $\min\{q_1, p\}$ 时!



如果 $q_1 < p$, p 的倍数 $k * p$ 在筛选出 p 之前就已经被删除了!

欧拉定理

对于每个正整数 k , 它只需与小于等于其最小质因数的质数相乘, 并删除相乘后的合数





顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 1$)内的所有质数。

算法4：欧拉筛选法

- 如果 k 是质数，已添加至`prime_list`末尾
- 如果 k 是合数，则其最小质因数一定在`prime_list`中 (?)

因此，用 k 删除合数的运行时间为 $O(|\text{prime_list}|)$

```
1. InitList(prime_list) //初始化存放质数的线性表
2. is_prime[1] ← false
3. for k ← 2 to n do
4. | is_prime[k] ← true //初始化，先假设[2...n]都是质数
5. end
6. for k ← 2 to n do //从2开始筛选
7. | if is_prime[k] = true then //k是质数
8. | | Append(prime_list, k) //将k从后添加至线性表（升序排列）
9. | end
    //判断k是否质数后，再作为系数与已找到的质数相乘，并删除合数
10. | j ← 0 //从线性表中的最小质数2开始
11. | while k * prime_list[j] ≤ n do //合数在[1...n]区间内
12. | | is_prime[ k * prime_list[j] ] ← false //删除合数
13. | | if k % prime_list[j] == 0 then //prime_list[j] 是k的最小质因数
14. | | | break //结束删除
15. | | else
16. | | | j ← j + 1 //否则，k继续与下一个质数相乘
17. | | end
18. | end
19. end
```



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

算法4：欧拉筛选法

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
using namespace std;
int main()
{
    int n, cnt = 0; // n是要找的素数范围, cnt代表在这个范围内素数的个数

    int prime[100001]; // 用来保存素数

    bool visited[100001]; // 记录一个数是否是某个素数的倍数, 标记它

    scanf("%d", &n); // 输入查找的范围

    memset(visited, false, sizeof(visited)); // 初始化

    memset(prime, 0, sizeof(prime)); // 初始化
```



```
for(int i = 2; i <= n; i++)
{
    if(!visited[i])// 如果没有被标记过

    {
        prime[cnt++] = i;// 素数, 存起来
    }
    for(int j = 0; j<cnt && i*prime[j]<=n; j++) //
    {

        visited[i*prime[j]] = true;// 标记素数倍数

        if(i % prime[j] == 0) break;// 欧拉筛法高效率的关键,
                                   // 也是同一个合数只被标记一次的关键
    }
}
return 0;
}
```



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 1$)内的所有质数。

算法4：欧拉筛选法

s1：建立**标记**^Q数列（从2到n的自然数）和素数数列；

s2：第一个数字是2（看标记是素数），把素数2放进**素数数列**^Q，标记 2×2 为非素数；

s3：第二个数字是3（看标记是素数），把素数3放入素数数列，标记 3×2 、 3×3 为**非素数**^Q；

s4：第三个数字是4（看标记是合数），标记 4×2 为非素数，break；

s5：第四个数字是5（看标记是素数），把素数5放入素数数列，标记 5×2 、 5×3 、 5×5 为非素数；

s6：第五个数字是6（看标记是合数），标记 6×2 为非素数，break；

s7：第六个数字是7（看标记是素数），把素数7放入素数数列，标记 7×2 、 7×3 、 7×5 、 7×7 为非素数；



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 1$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

对于每个正整数 k ，它只需与小于等于其最小素因子的质数相乘，并删除相乘后的合数

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	○		×																	

$$k = 2$$

最小质因数：2



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

对于每个正整数 k ，它只需与小于等于其最小素因子的质数相乘，并删除相乘后的合数

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	○	○	×		×			×												

$$k = 3$$

最小质因数：3



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

对于每个正整数 k ，它只需与小于等于其最小素因子的质数相乘，并删除相乘后的合数

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	○	○	×		×		×	×												

$$k = 4$$

最小质因数：2



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

对于每个正整数 k ，它只需与小于等于其最小素因子的质数相乘，并删除相乘后的合数

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	○	○	×	○	×		×	×	×					×						

$$k = 5$$

最小质因数：5



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

对于每个正整数 k ，它只需与小于等于其最小素因子的质数相乘，并删除相乘后的合数

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	○	○	×	○	×		×	×	×		×			×						

$$k = 6$$

最小质因数：2



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

对于每个正整数 k ，它只需与小于等于其最小素因子的质数相乘，并删除相乘后的合数

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	○	○	×	○	×	○	×	×	×		×		×	×						×

$$k = 7$$

最小质因数：7



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

对于每个正整数 k ，它只需与小于等于其最小素因子的质数相乘，并删除相乘后的合数

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	○	○	×	○	×	○	×	×	×		×		×	×	×					×

$$k = 8$$

最小质因数：2



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

对于每个正整数 k ，它只需与小于等于其最小素因子的质数相乘，并删除相乘后的合数

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	○	○	×	○	×	○	×	×	×		×		×	×	×		×			×

$$k = 9$$

最小质因数：3



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

对于每个正整数 k ，它只需与小于等于其最小素因子的质数相乘，并删除相乘后的合数

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	○	○	×	○	×	○	×	×	×		×		×	×	×		×		×	×

$$k = 10$$

最小质因数：2



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

对于每个正整数 k ，它只需与小于等于其最小素因子的质数相乘，并删除相乘后的合数

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	○	○	×	○	×	○	×	×	×	○	×		×	×	×		×		×	×

$$k = 11$$

最小质因数：11



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

对于每个正整数 k ，它只需与小于等于其最小素因子的质数相乘，并删除相乘后的合数

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	○	○	×	○	×	○	×	×	×	○	×	○	×	×	×	○	×	○	×	×

$k = 12, 13, \dots, 21$ （倍数都大于21！）



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

***算法证明：**

- 正确性： $[1, n]$ 中所有合数都被删除

（证明） 设合数 $a \in [1, n]$ ，且 $a = p_1 p_2 \dots p_j$ (质因数 $p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_j$)



因为 $j > 1$ (?), 设 $k = p_2 \dots p_j$ ，得到 $a = k * p_1$



由于整数 k 的最小质因数 $p_2 \geq p_1$ ，根据算法，一定和 p_1 相乘得 a



合数 a 被删除



顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法4：线性筛选法（欧拉筛选法）

***算法证明：**

- 线性时间效率： $[1, n]$ 中所有合数只被删除1次！

（**反证法**）假设合数 $a \in [1, n]$ 被删除两次，即存在整数 $k_1 < k_2$ ，使得 $a = k_1 * p_1 = k_2 * p_2$ (p_1, p_2 都是质数，且 $p_1 > p_2$)

根据算法， $k_1 * p_1$ 说明 k_1 的最小质因数大于等于 p_1 (?),
证明 p_1 是合数 a 的**最小质因数**

同理， p_2 也是合数 a 的**最小质因数**

$p_1 = p_2$

矛盾

顺序查找的应用：查找区间内所有质数

问题描述：查找正整数区间 $[1, n]$ ($n > 0$)内的所有质数。

算法比较：

	埃氏筛选法	合数限定法	欧拉筛选法	质数总数
$n = 10^2$	0.006ms	0.01ms	0.013ms	25
$n = 10^4$	0.14ms	0.27ms	0.28ms	1229
$n = 10^6$	10.6ms	15.8ms	13.6ms	78498
$n = 10^8$	1.8s	1.7s	1.4s	5761455
$n = 10^9$	23s	20s	14s	50847534

硬件配置：2.3 GHz 双核 Intel Core i5，8GB内存；编译工具：Xcode；编程语言：C++



11.1.2 折半查找（二分查找）

11.1.2 折半查找

有序表：如果顺序表中的记录按关键字值有序，
即： $R[i].key \leq R[i+1].key$ （或 $R[i].key \geq R[i+1].key$ ），
 $i=1,2,\dots,n-1$ ，则称顺序表为**有序表**。

1 3 7 10 12 124 有序表

1 3 7 13 12 124 无序表



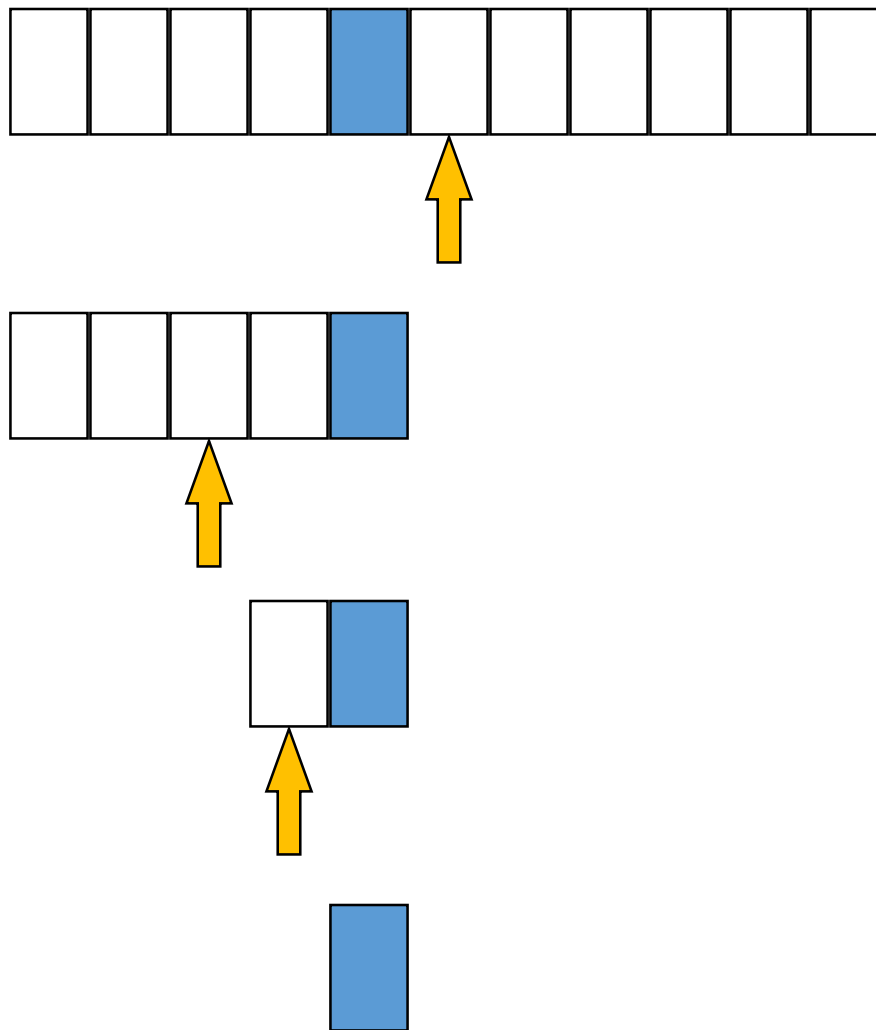
11.1.2 折半查找（二分查找）

查找过程：

将待查关键字与有序表**中间位置的记录**进行比较，

- 若相等，**查找成功**
- 若小于，则只可能在**有序表的前半部分**
- 若大于则只可能在**有序表的后半部分**

因此，经过一次比较，就将查找范围**缩小一半**，这样一直进行下去直到找到所需记录或记录不在查找表中。





11.1.2 二分查找的基本实现

查找过程：

将待查关键字与有序表**中间位置**的记录进行比较，

- 若相等，**查找成功**
- 若小于，则只可能在有序表的**前半部分**
- 若大于则只可能在有序表的**后半部分**

因此，经过一次比较，就将查找范围**缩小一半**，这样一直进行下去直到找到所需记录或记录不在查找表中。

算法：BinarySearch(A, left, right, key)

输入：顺序表A，数据按升序排列，整数left, right，数据key

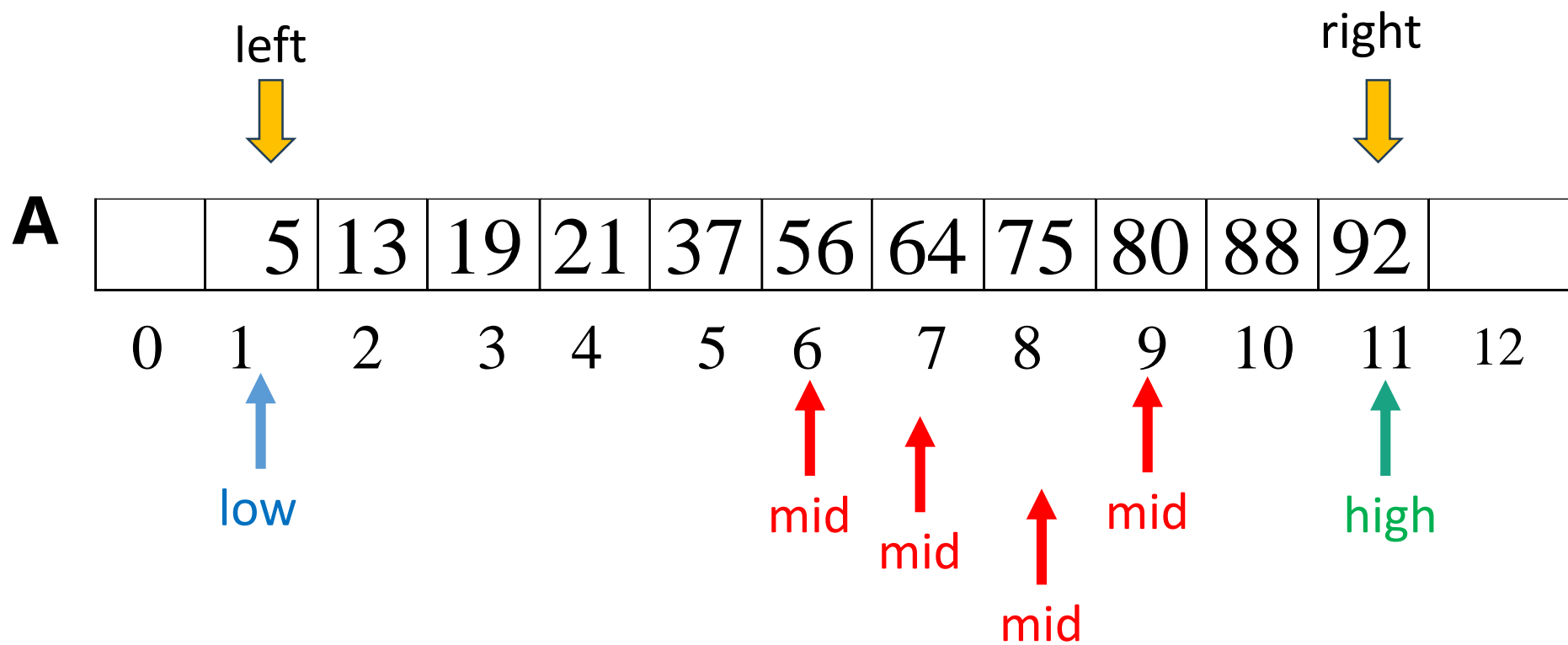
输出：如果key在子表A[left...right]中，返回位置；否则返回-1

```
1. low ← left    //low和high分别指向查找区域左右两端
2. high ← right   //查找区间 [low, high]
3. while low ≤ high do
4.   | mid ← (low + high) / 2 //中间位置
5.   | if A[mid] = key then
6.   |   | return mid
7.   | else if key < A[mid] then
8.   |   | high ← mid - 1 //查找前半区间 [low, mid-1]
9.   |   | else //key > A[mid]
10.  |   | low ← mid + 1 //查找后半区间 [mid+1, high]
11.  | end
12. end
13. return -1
```

时间复杂度：O(log(n))



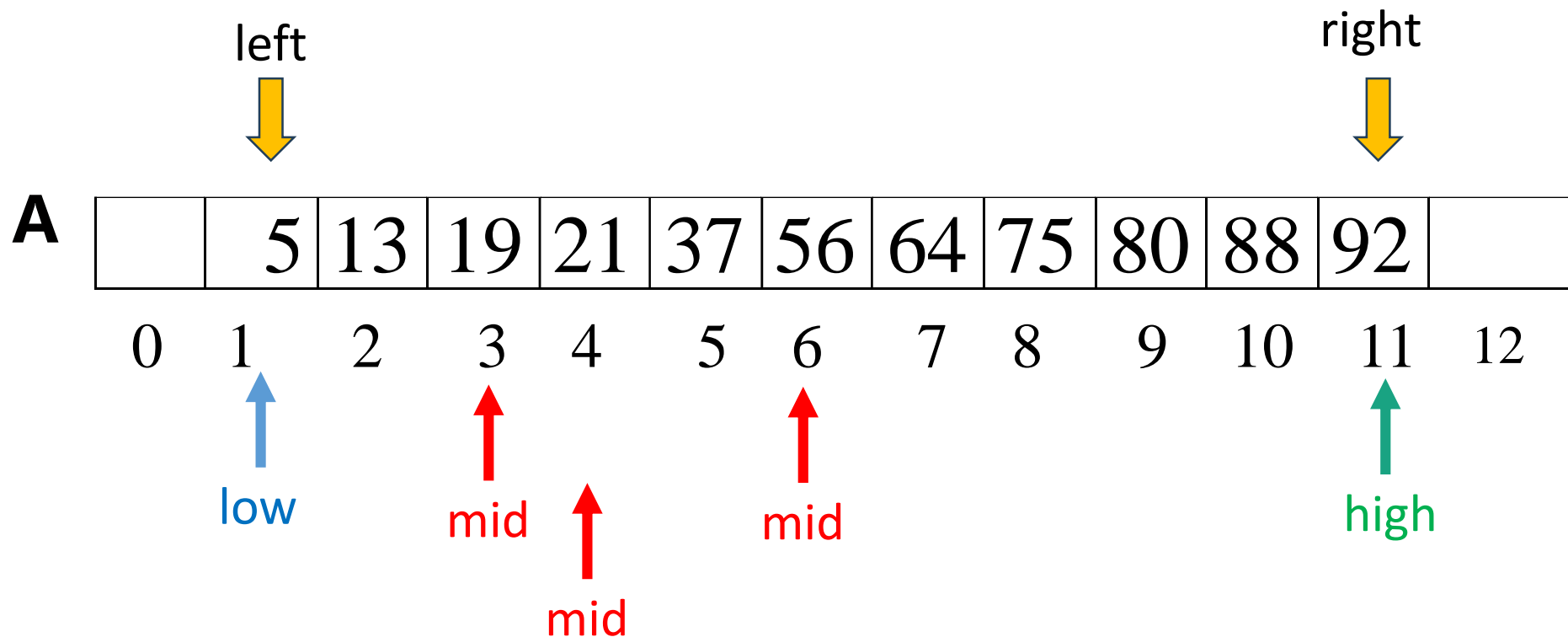
例如: **key=75** 的查找过程如下:



return 8



例如: **key=20** 的查找过程如下:



high < low: 查找失败!

return -1



11.1.2 二分查找的简单实现

查找过程：

将待查关键字与有序表**中间位置**的记录进行比较，

- 若相等，**查找成功**
- 若小于，则只可能在有序表的**前半部分**
- 若大于则只可能在有序表的**后半部分**

因此，经过一次比较，就将查找范围**缩小一半**，这样一直进行下去直到找到所需记录或记录不在查找表中。

算法：BinarySearch(A, left, right, key)

输入：顺序表A，非负整数left, right，数据key

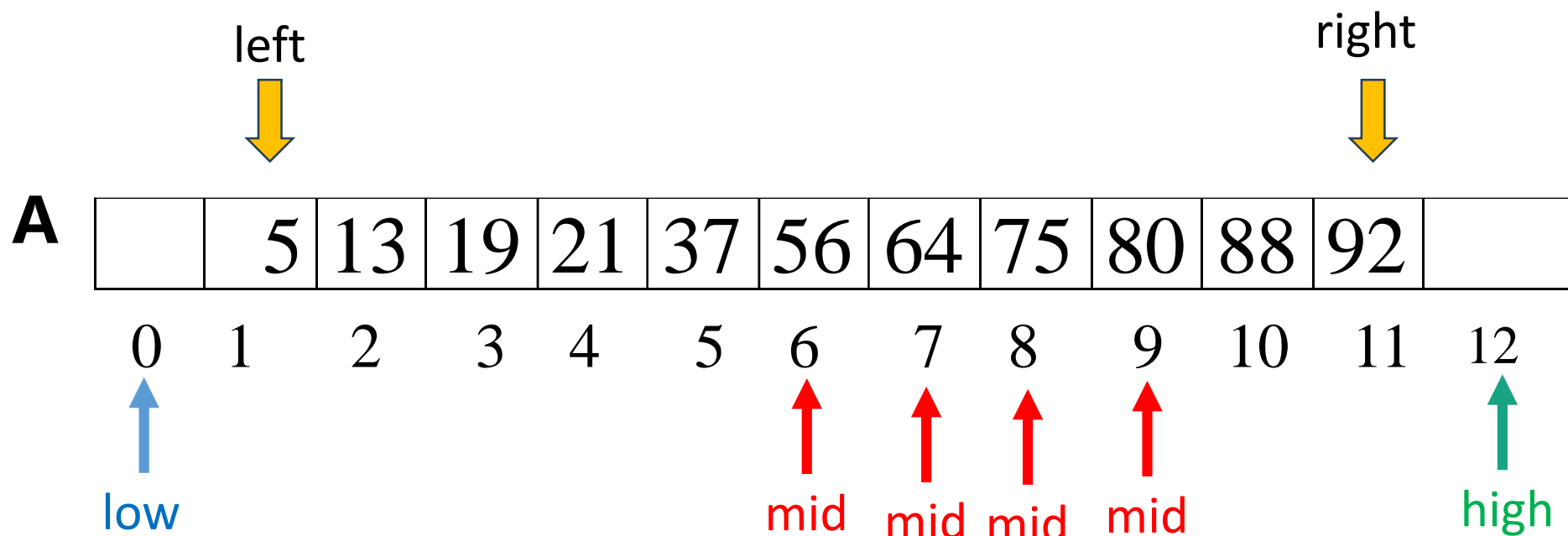
输出：如果key在子表A[left...right]中，返回位置；否则返回-1

```
1. low ← left - 1    //low和high放在查找区域外边！
2. high ← right + 1  //查找区间 (low, high)
3. while high - low > 1 do
4.   | mid ← (low + high) / 2 //中间位置: low < mid < high
5.   | if A[mid] = key then
6.   |   | return mid
7.   | else if key < A[mid] then
8.   |   | high ← mid    //查找前半区间 (low, mid)
9.   |   | else         //key > A[mid]
10.  |   | low ← mid     // 查找后半区间 (mid, high)
11.  | end
12. end
13. return -1
```

时间复杂度：O(log(n))



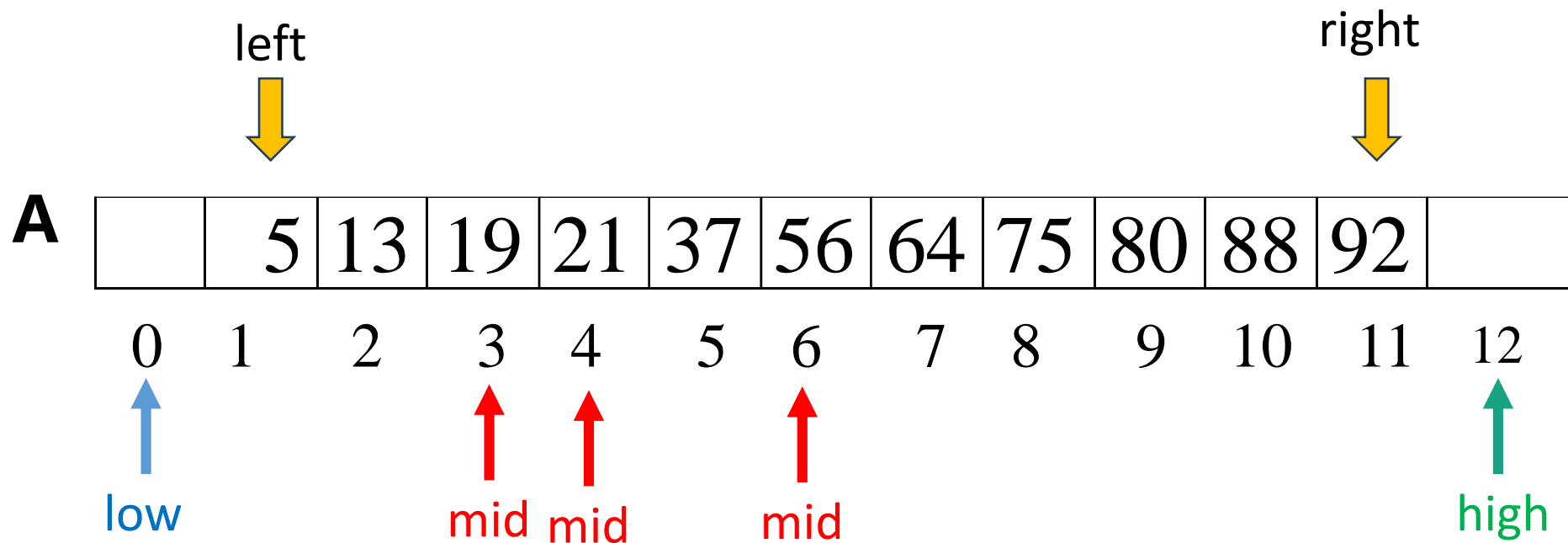
例如: **key=75** 的查找过程如下:



return 8



例如: **key=20** 的查找过程如下:



high - low = 1 查找失败!

return -1

在未排序的数组上作顺序查找和在排好序的数组上作二分查找，下面的说法中，哪些是错误的

- ☒ A 顺序查找一定比二分查找慢
- ☒ B 顺序查找在最好情况下只需比较1次，而二分查找做不到
- ☒ C 如果查找的元素不在数组中，两个算法的时间效率基本相同
- ☒ D 二分查找也可以在双向链表上执行

提交



11.1.2 二分查找的应用：区间查询

问题描述：假设序列（顺序表） $A[1...n]$, 满足 $A[1] \leq A[2] \leq \dots \leq A[n]$, 求A中所有大小在区间 $[a, b)$ 中的数据。

思路：求序列A中 $\geq a$ 的最小值位置和 $< b$ 的最大值位置

关键算法：

- 假设 $A[\text{left} - 1] = -\infty, A[\text{right} + 1] = +\infty$

(1) 开始时, $\text{low} \leftarrow \text{left} - 1, \text{high} \leftarrow \text{right} + 1$

(2) 计算区间 $(\text{low}, \text{high})$ 的中间位置 $\text{mid} \leftarrow (\text{low} + \text{high}) / 2$

➤ $A[\text{high}] \geq \text{key}$

➤ $A[\text{low}] < \text{key}$

保持

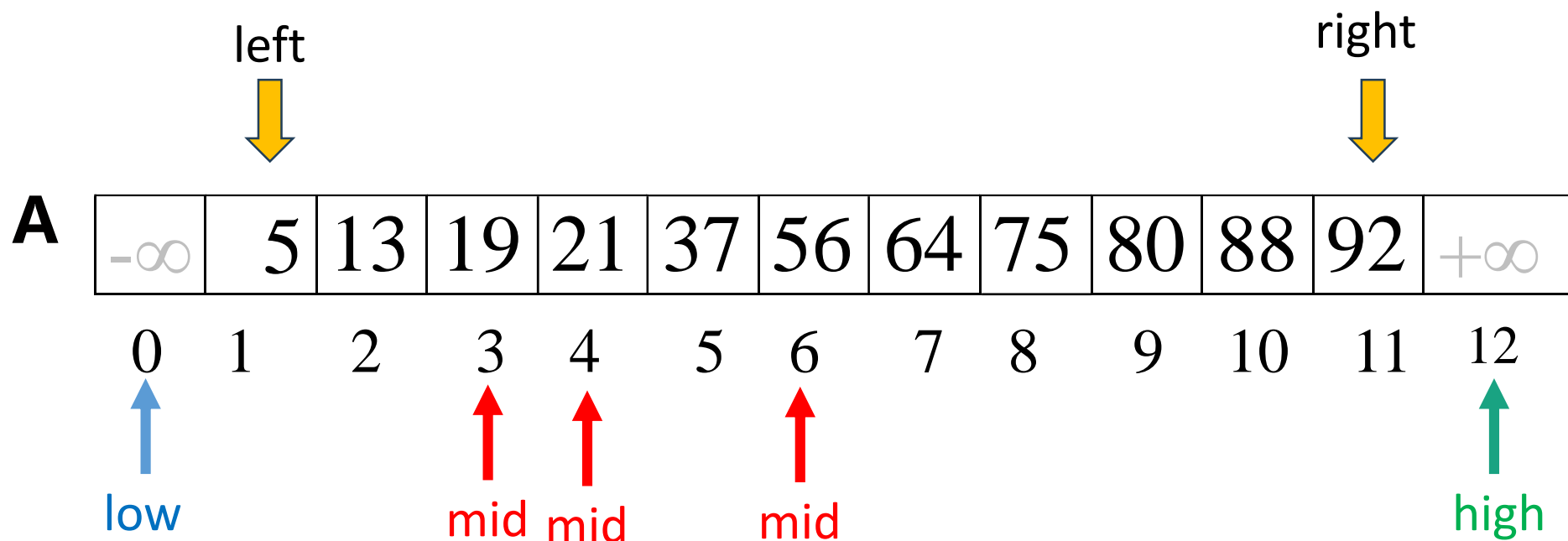
(3) 如果 $A[\text{mid}] \geq \text{key}$, $\text{high} \leftarrow \text{mid}$; 若 $A[\text{mid}] < \text{key}$, $\text{low} \leftarrow \text{mid}$

(4) 如果 $\text{high} - \text{low} > 1$, 回到(2), 继续查找; 否则结束操作

思考：当 $\text{high} = \text{low} + 1$ 时, $A[\text{high}]$ 和 $A[\text{low}]$ 与key是什么关系?



例如: **key=20** 的查找过程如下:



high - low = 1 : 19是小于20的最大值, 21是大于等于20的最小值!



11.1.2 二分查找的应用：区间查询

问题描述：假设序列（顺序表） $A[1...n]$, 满足 $A[1] \leq A[2] \leq \dots \leq A[n]$, 求A中所有大小在区间 $[a, b)$ 中的数据。

思路：求序列A中 $\geq a$ 的**最小值**位置和 $< b$ 的**最大值**位置

思考：如何求A中大小在区间 $(a, b], (a, b), [a, b]$ 内的数据？

关键算法

```
1. low ← left - 1
2. high ← right + 1
3. while high - low > 1 do
4.   | mid ← (low + high) / 2
5.   | if key ≤ A[mid] then
6.   |   | high ← mid
7.   | else //key > A[mid]
8.   |   | low ← mid
9.   | end
10. end
11. return high // ≥ key的最小值位置
    或
    low // < key的最大值位置
```



11.1.2 二分查找的应用：快速求幂

---不似“二分”，恰是二分

问题描述：给定正整数 a 和 n ，求 a^n 的值 例如：求 $3^{1000000000}$

- 直接迭代： $a^n = a^{n-1} * a$

时间复杂度（相乘次数） $O(n)$

- 二分递归： $a^n = a^{\frac{n}{2}} * a^{\frac{n}{2}} * a^{n\%2}$

时间复杂度: $O(\log(n))$

算法： Power(a, n)

输入：正整数a, n

输出： a^n

1. **if** $n = 1$ **then**

2. | **return** a

3. **end**

4. $\text{pow} \leftarrow \text{Power}(a, n/2)$ //递归计算 $a^{\frac{n}{2}}$ (二分)

5. $\text{pow} \leftarrow \text{pow} * \text{pow}$

6. **if** $n \% 2 = 1$ **then** //n是奇数

7. | $\text{pow} \leftarrow \text{pow} * a$

8. **end**

9. **return** pow



11.1.2 二分查找的应用：快速查找

---不似“二分”，恰是二分

问题描述：查找未排序序列 $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$ 中的第 k 小元素 ($1 \leq k \leq n$)。

算法1：循环 k 次选择排序或冒泡排序 ---时间复杂度: $O(kn)$

思考：插入排序是否可用？

算法2：快速或递归排序 ---时间复杂度: $O(n \log(n)) + O(1)$
排序 找第 k 小元素

算法3：快速建最小堆 + k 次出堆（调整）

---时间复杂度: $O(n) + O(k \log(n))$

思考：能否实现 $O(n)$ 时间的快速查找？



11.1.2 二分查找的应用：快速查找

---不似“二分”，恰是二分

问题描述：查找未排序序列 $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$ 中的第 k 小元素 ($1 \leq k \leq n$)。

思考：能否实现 $O(n)$ 时间的快速查找？

思路：

- 对序列 $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$ 快速排序时，首先选择一个基准值pivot对序列进行划分
- **划分结果：** $\leq \text{pivot}$ 的所有数据排在它前面， $> \text{pivot}$ 的数据全部排在后面，然后返回pivot在序列中的**排位** m
- 如果 $m = k$ ，说明pivot就是第 k 小元素
- 如果 $m < k$ ，第 k 小元素在pivot的后半段
- 相反，若 $m > k$ ，第 k 小元素在pivot的前半段

二分原则！



11.1.2 二分查找的应用：快速查找

---不似“二分”，恰是二分

问题描述：查找未排序序列 $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$ 中的第 k 小元素 ($1 \leq k \leq n$)。

算法：

时间复杂度：

- 最好情况： $O(1)$
- 最坏情况： $O(n^2)$
- 平均情况：??

算法：QuickSearch(A, l, r, k)

输入：序列A, 整数l, r, k, 满足 $1 \leq l \leq k \leq r$

输出：在子串A[l...r]中查找A的第k小元素

```
1. if l < r then //子串A[l...r]含多个元素
2. | m ← Partition(A, l, r) //选A[r]为pivot进行划分,
3. | //返回基准值的排位 ( $l \leq m \leq r$ )
4. | if m = k then
5. | | return A[m]
6. | end
7. | if m < k then //  $m < k \leq r$  成立
8. | | return QuickSearch(A, m+1, r, k) //A[m+1...r]中查找
9. | else //  $l \leq k < m$ 
10. | | return QuickSearch(A, l, m-1, k) //A[l...m-1]中查找
11. | end
12.end
13.return A[l] //子串只含一个元素, 即  $l = r = k$ 
```



11.1.2 二分查找的应用：快速查找

---不似“二分”，恰是二分

问题描述：查找未排序序列 $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$ 中的第 k 小元素 ($1 \leq k \leq n$)。

算法：

时间复杂度：

- 最好情况： $O(1)$
- 最坏情况： $O(n^2)$
- 平均情况： ??

- 随机选择基准值对序列划分，两个子序列的平均长度比为 1 : 3
- 并且 90% 以上的概率，子序列的长度比不低于 1 : 19!
- 因此，90% 以上的概率，查找的时间 $T(n)$ 满足

$$\begin{aligned}
 T(n) &\leq T\left(\frac{19}{20}n\right) + O(n) \\
 &\leq T\left(\frac{19^2}{20^2}n\right) + O\left(\frac{19}{20}n + n\right) \\
 &\leq T\left(\frac{19^k}{20^k}n\right) + O\left(\frac{19^{k-1}}{20^{k-1}}n + \dots + \frac{19}{20}n + n\right) \\
 &\leq T(1) + O\left(\dots + \frac{19^k}{20^k}n + \dots + \frac{19}{20}n + n\right) \\
 &= O(n)
 \end{aligned}$$

线性时间



例如: 查找第4小元素的过程如下:

6	8	1	2	4	7	5	3
---	---	---	---	---	---	---	---

↓ 用3划分

2	1	3	6	4	7	5	8
---	---	---	---	---	---	---	---

↓ 用8划分

2	1	3	6	4	7	5	8
---	---	---	---	---	---	---	---

↓ 用5划分

2	1	3	4	5	7	6	8
---	---	---	---	---	---	---	---

↓ 用4划分

2	1	3	4	5	7	6	8
---	---	---	---	---	---	---	---

查找成功, 返回4



二分查找的应用：一道趣题*

问题描述：

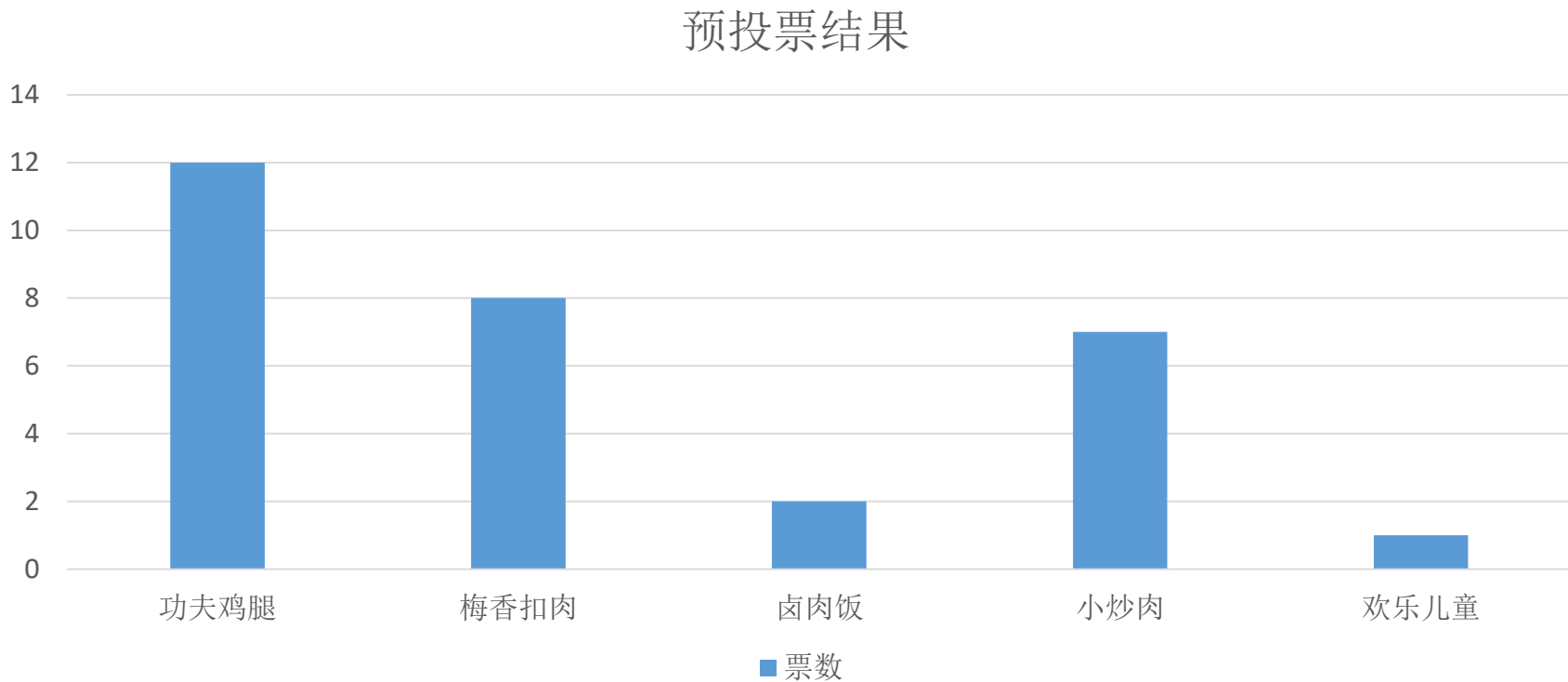


- z.y.班n个人在实验室学习，到了中午，大家决定一起从乡村基点外卖。
- 按照惯例，大家一人一票投票表决，然后一起点获票数最多的套餐！
- 但今天，班长突然“萌发奇想”，想尝尝**儿童套餐**，怎么办呢？
- 为“梦想成真”，精明的班长先做了一次预投票，提前了解到每个人想投的套餐。
- 要让儿童套餐获票最多，必须“以理服人”，让足够多的人改选儿童套餐，但思想工作难做（zy班没有省油的灯！！！）
- 因此，班长让你设计一个拉票方案，使**儿童套餐**的**获票最多**（不允许票数并列），同时“说服”的人数最少。



二分查找的应用：一道趣题*

问题描述：

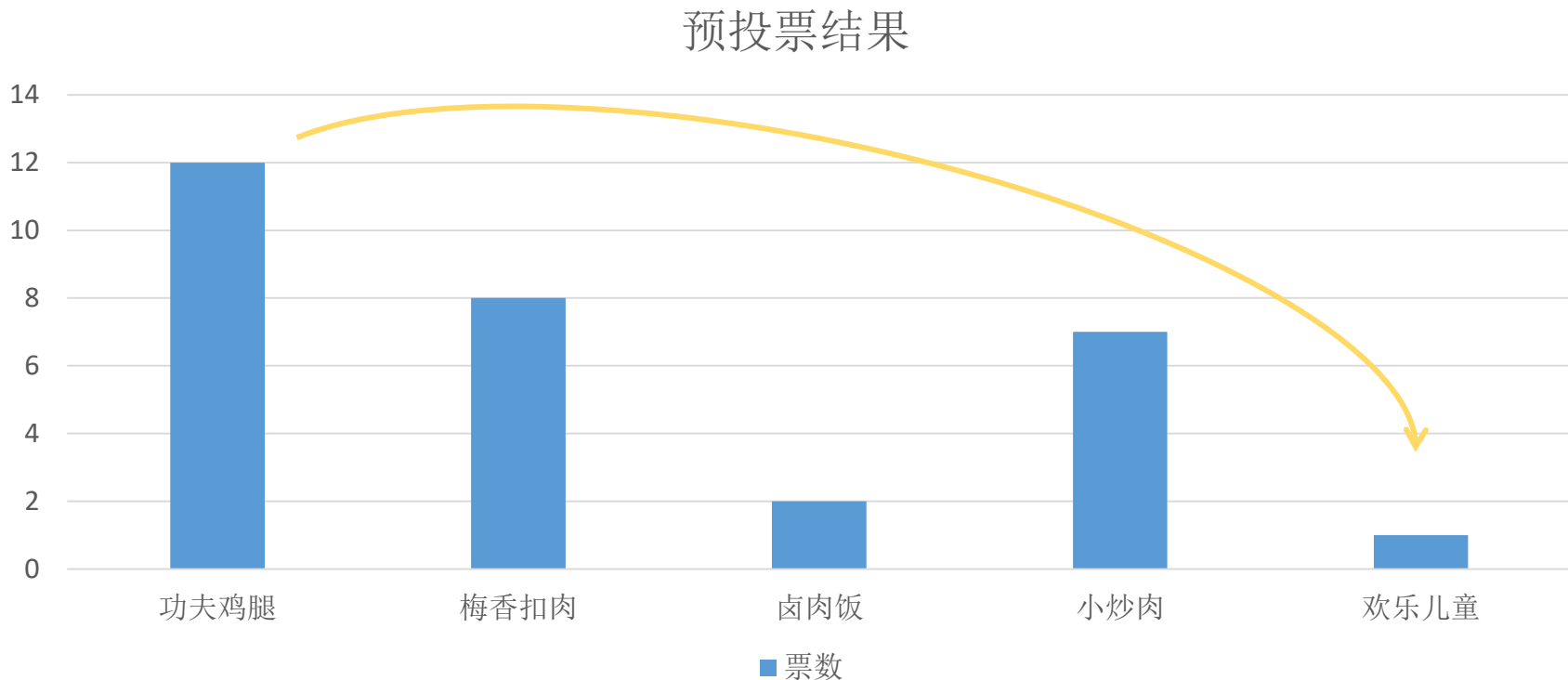


Q：要使儿童套餐获得最多的票，最少需要拉多少票？应该拉哪些套餐的投票？



二分查找的应用：一道趣题*

问题描述：



- **贪心法：**每次选择当前**获票最多的套餐**，从中拉1票过来，重复该过程，直到儿童套餐的得票超过其它套餐

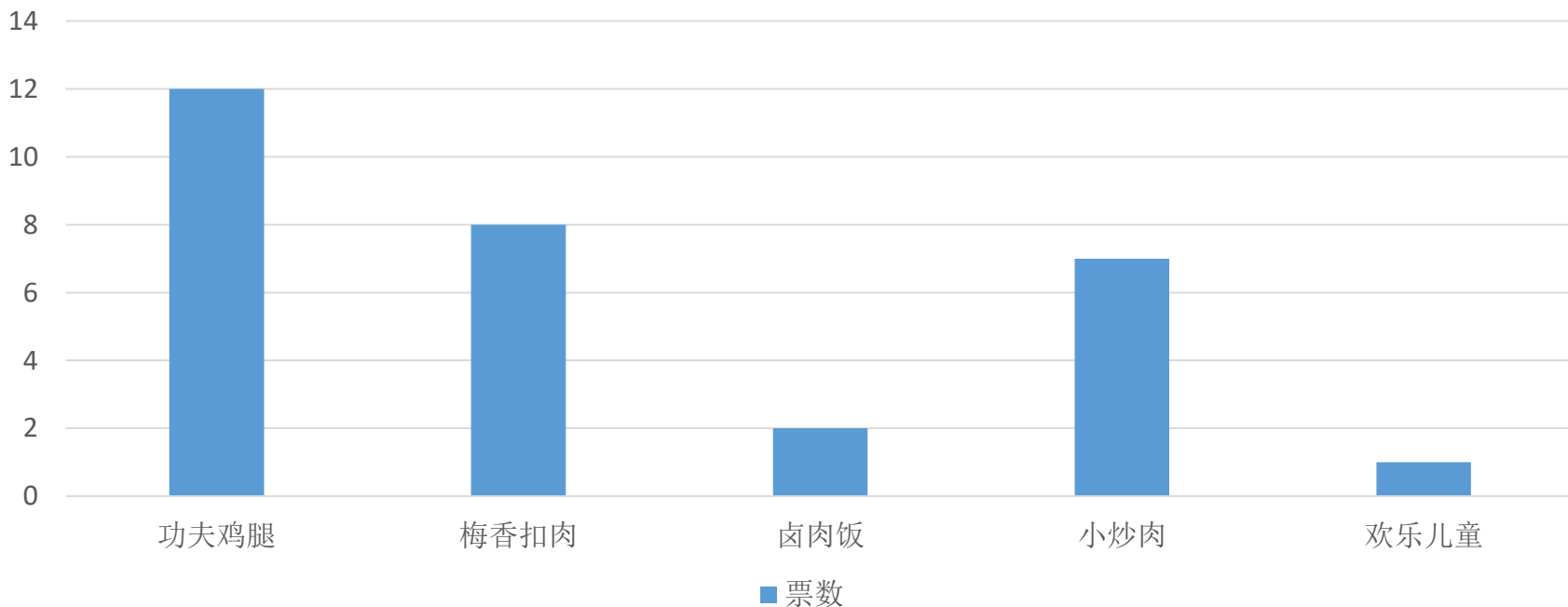
- 可以用最大堆维护当前得票最多的套餐
- **时间复杂度：** $O(m \log n)$ ，其中 m 是总票数（人数）， n 是套餐数



二分查找的应用：一道趣题*

问题描述：

预投票结果



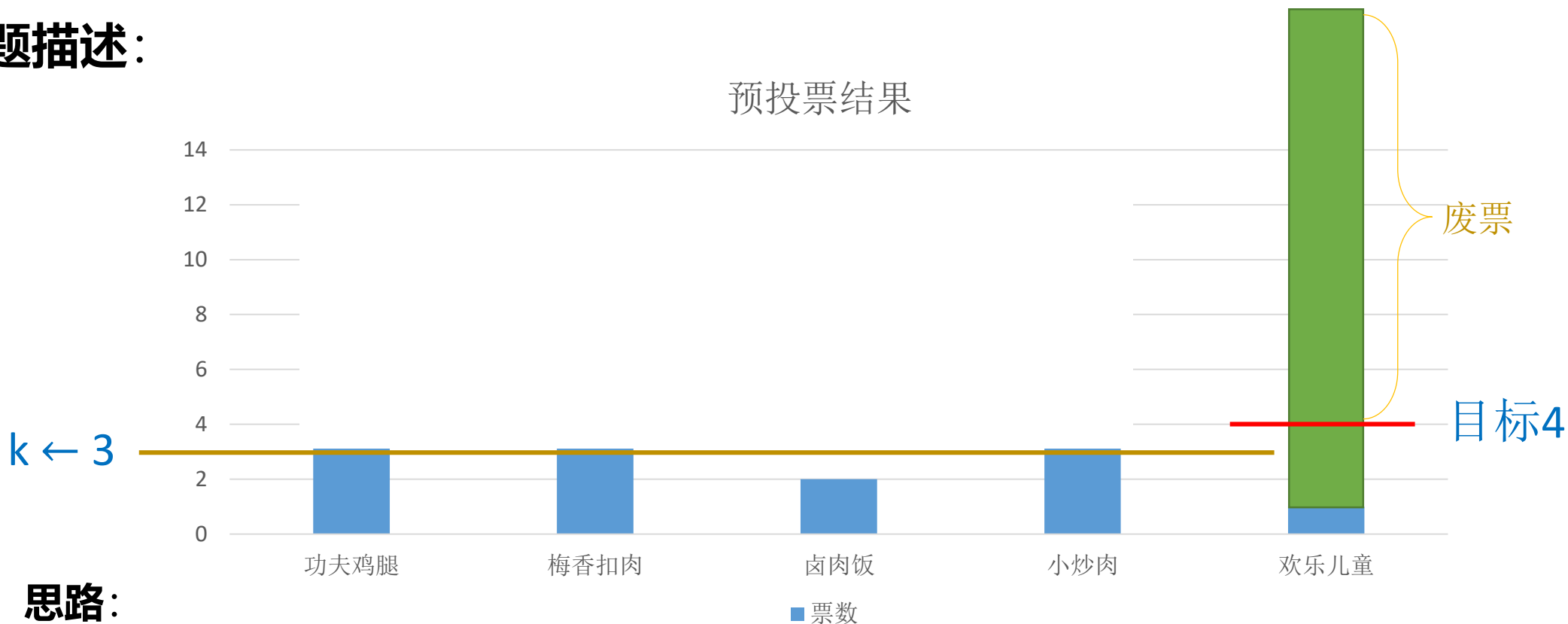
思路：

- (1) 设置票数上限 k
- (2) 如果套餐的得票超过 k ，将多余的票全部转给儿童套餐
- (3) 设置儿童套餐的目标票数为 $k+1$ ，如果加上(2)转来的票后票数超过 $k+1$ ，超出的票成为废票；相反，如果票数不够 $k+1$ ，还需要从其它套餐拉不足的票！



二分查找的应用：一道趣题*

问题描述：



思路：

- (1) 设置票数上限 k
- (2) 如果套餐的得票超过 k ，将多余的票全部转给儿童套餐
- (3) 设置儿童套餐的目标票数为 $k+1$ ，如果加上(2)转来的票后票数超过 $k+1$ ，超出的票成为废票；相反，如果票数不够 $k+1$ ，还需要从其它套餐补齐不足的票！

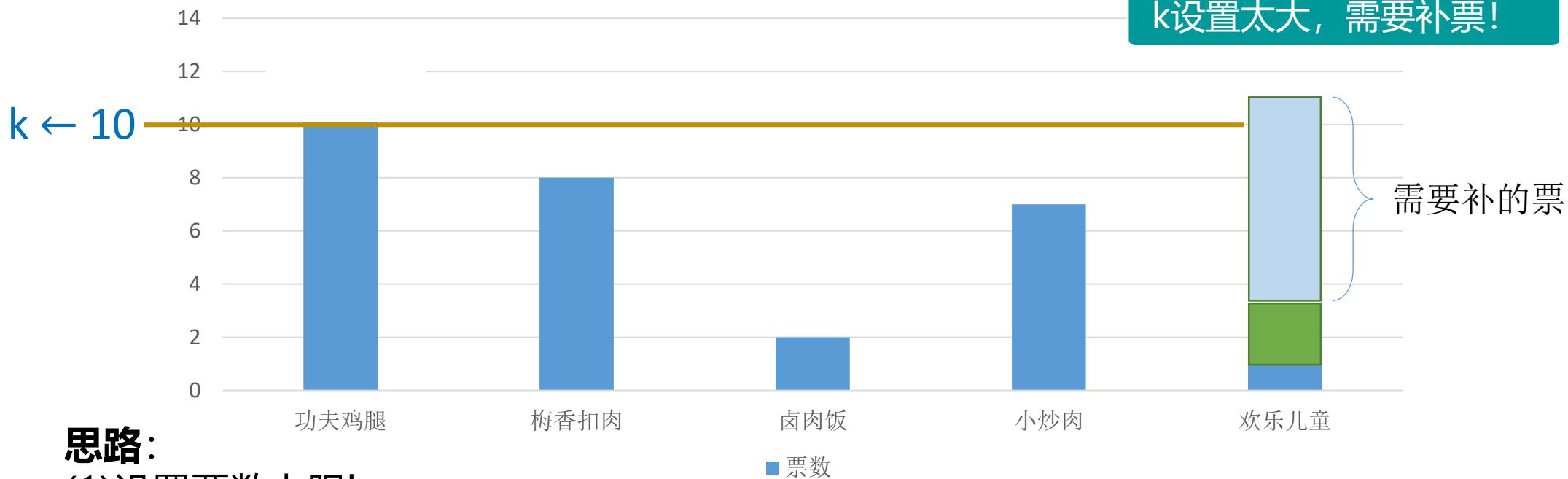


二分查找的应用：一道趣题*

问题描述：

- 思考：如何求最优的k值？

预投票结果



思路：

- (1) 设置票数上限k
- (2) 如果套餐的得票超过k，将多余的票全部转给儿童套餐
- (3) 设置儿童套餐的目标票数为k+1，如果加上(2)转来的票后票数超过k+1，超出的票成为废票；相反，如果票数不够k+1，还需要从其它套餐补齐不足的票！



11.1.2 二分查找的应用：一道趣题*

---不似“二分”，恰是二分

- 思考：如何求最优的k值？

二分法思路：

- (1) 设置 $\text{low_k} \leftarrow 0$, $\text{high_k} \leftarrow m$ (总票数) //k=0表示所有票都给儿童套餐
- (2) 计算 $\text{mid_k} = (\text{low_k} + \text{high_k}) / 2$ //设置mid_k为当前的k值 (上限值)
- (3) 查找得票数超过mid_k的套餐，并统计多出的票的总和extra_sum
 - 如果 $\text{extra_sum} + \# \text{儿童} \leq \text{mid_k} + 1$, $\text{high_k} \leftarrow \text{mid_k}$
//k太大，可能需要补票，可以减小k
 - 如果 $\text{extra_sum} + \# \text{儿童} > \text{mid_k} + 1$, $\text{low_k} \leftarrow \text{mid_k}$
//k太小，有废票，继续测试更大的k
- (4) 如果 $\text{low_k} + 1 = \text{high_k}$, 结束查找，返回high_k (最优k)；否则，回到(2)继续查找

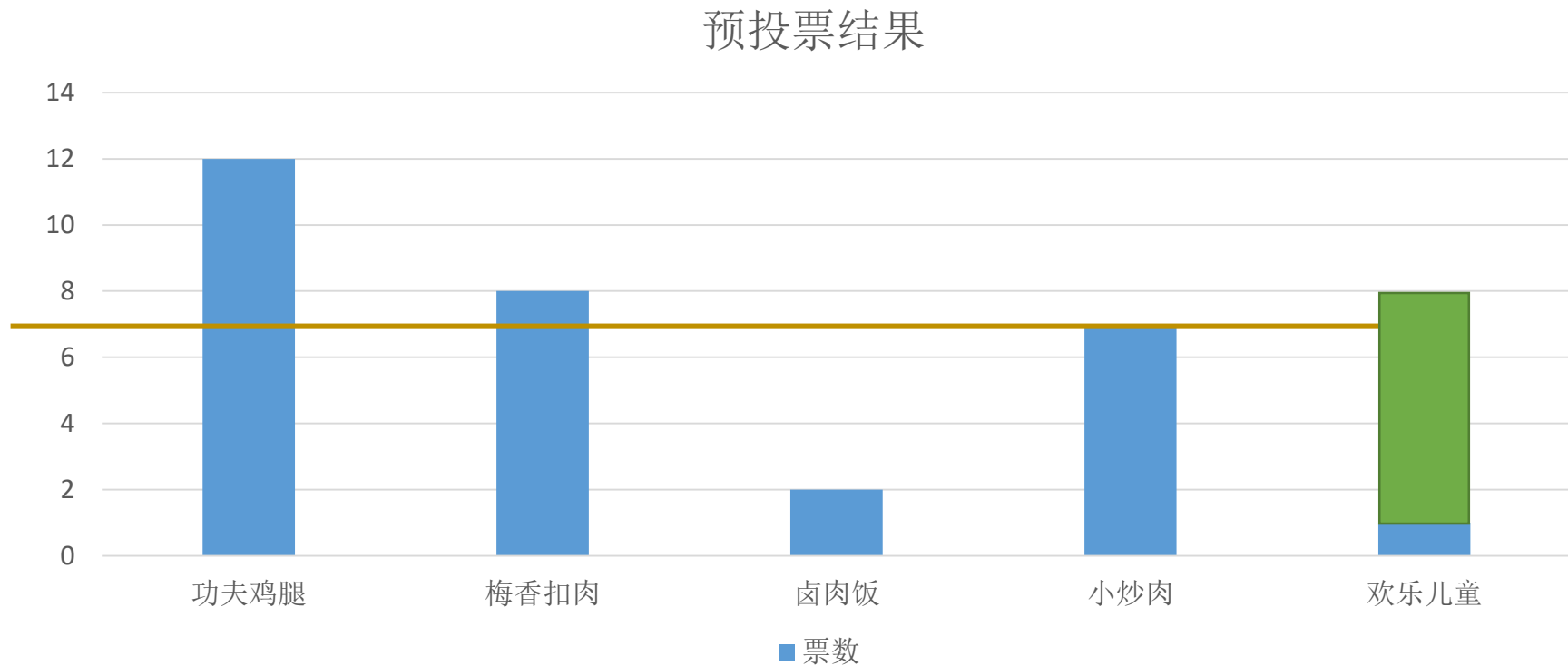
- 时间复杂度： $n \log(m)$ 或 $\log(m) * \log(n) + n \log(n)$



二分查找的应用：一道趣题*

问题描述：

最优： $k \leftarrow 7$





11.1.3 索引表查找

数据太多，杂乱无章，查找困难！





建立索引!





索引使用方法

先分析数据规律，建立索引
再根据索引进行快速定位
在定位的地方进行细致搜索



4 70 8 90 88 89



先分块，块间有序，就
可以快速定位到块

第一个块地址	第一个块最大关键字	第二个块地址	第二个块最大关键字	第n个块地址	第n个块最大关键字
--------	-----------	--------	-----------	-------	-------	--------	-----------



索引表的构建

1) 分块:

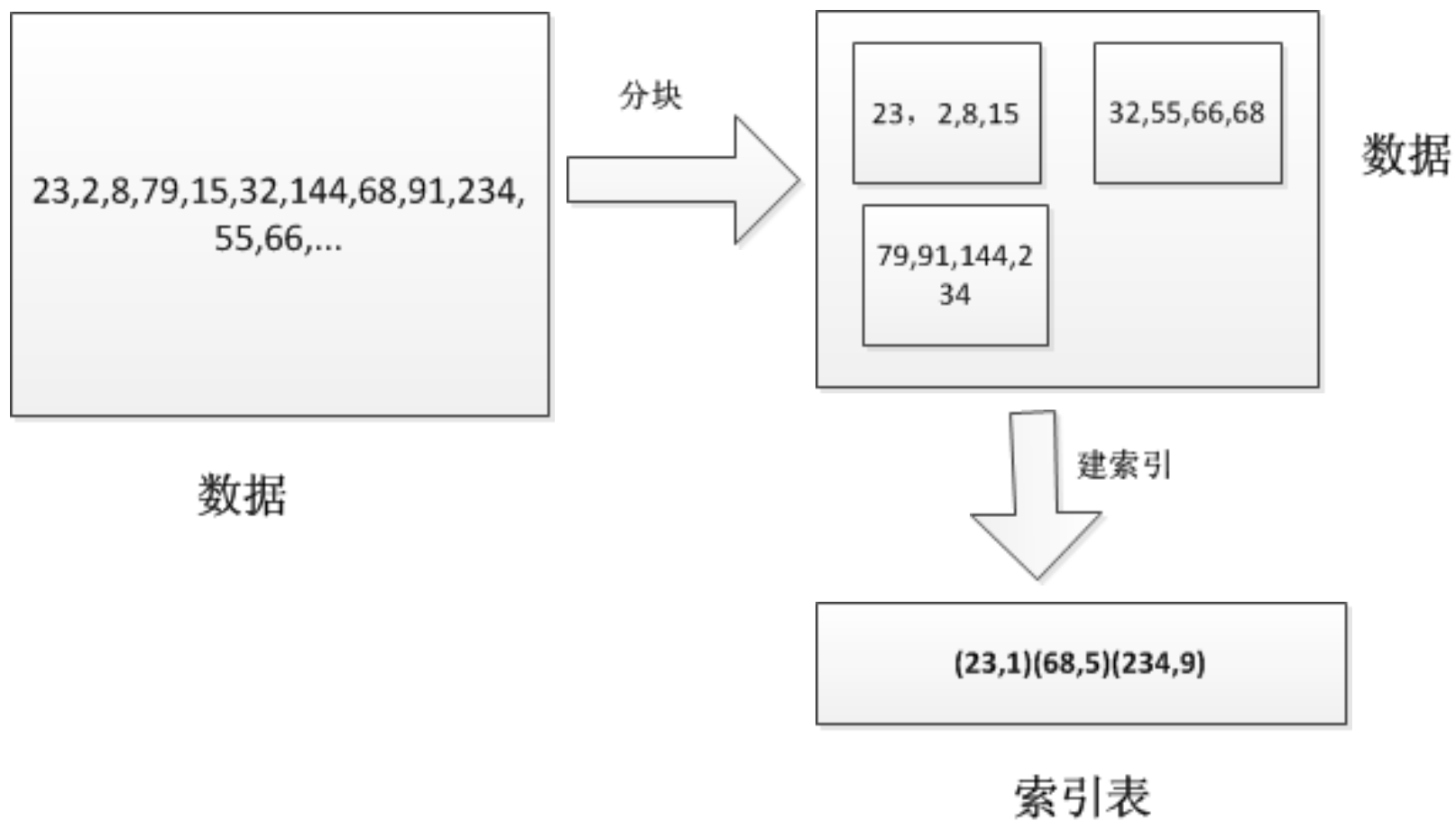
第 R_k 块中**所有关键字** $<$ R_{k+1} 块中所有关键字, $(k=1, 2, \dots, L-1)$

2) 建立索引项:

关键字项: 记载该块中最大关键字值;

指针项: 记载该块第一个记录在表中位置。

3) 所有索引项组成**索引表**。





索引表的查找



查找表的查找

索引表有序

索引表的查找



例子:

建立索引表

查找表

关键字	22	48	86	
指针	1	7	13	19(n+1)

22, 12, 13, 8, 9, 20, 33, 42, 44, 38, 24, 48, 60, 58, 74, 49, 86, 53





例子:

查找关键字 $k=38$

关键字	22	48	86	
指针	1	7	13	19(n+1)

22, 12, 13, 8, 9, 20, 33, 42, 44, 38, 24, 48, 60, 58, 74, 49, 86, 53



例子:

查找关键字 $k=50$

关键字	22	48	86	
指针	1	7	13	19(n+1)

22, 12, 13, 8, 9, 20, 33, 42, 44, 38, 24, 48, 60, 58, 74, 49, 86, 53



例子：

关键字	22	48	86	
指针	1	7	13	19(n+1)

22, 12, 13, 8, 9, 20, 33, 42, 44, 38, 24, 48, 60, 58, 74, 49, 86, 53

思考：块内查找如何结束？



11.1.4 作业

1、对有 n 个元素的有序顺序表和无序顺序表进行顺序搜索,试就下列三种情况分别讨论两者在等搜索概率时的平均搜索长度是否相同?

- (1) 搜索失败;
- (2) 搜索成功,且表中只有一个关键码等于给定值 k 的对象;
- (3) 搜索成功,且表中有若干个关键码等于给定值 k 的对象,要求一次搜索找出所有对象。

2、假定对有序表: (3,4,5,7,24,30,42,54,63,72,87,95) 进行折半查找,试回答下列问题:

- (1) 画出描述折半查找过程的判定树;
- (2) 若查找元素54,需依次与哪些元素比较?
- (3) 若查找元素90,需依次与哪些元素比较?
- (4) 假定每个元素的查找概率相等,求查找成功时的平均查找长度。

The background is a solid teal color with a subtle pattern of thin, light teal lines forming a grid and perspective lines. Several 3D cubes of varying sizes are scattered across the scene, some in darker teal and others in a lighter teal, creating a sense of depth and geometric design.

谢谢观看