

Contents

1 字串

1.1	最長迴文子字串	1
1.2	Manacher	1
1.3	KMP	1
1.4	Z Algorithm	1
1.5	Suffix Array	2

2 math

2.1	公式	3
2.2	Rational	3
2.3	乘法逆元、組合數	3
2.4	歐拉函數	3
2.5	質數與因數	4
2.6	高斯消去	4
2.7	Extended GCD	4
2.8	大步小步	5
2.9	Pisano Period	5
2.10	矩陣快速幂	5

3 algorithm

3.1	greedy	6
3.2	JosephusProblem	6
3.3	二分搜	7
3.4	三分搜	7
3.5	dinic	7
3.6	dijkstra	8
3.7	SPFA	8
3.8	SCC Kosaraju	8
3.9	SCC Tarjan	8
3.10	BCC 邊	9
3.11	BCC 點	9
3.12	ArticulationPoints Tarjan	9
3.13	最小樹狀圖	10
3.14	KM	10
3.15	二分圖最大匹配	10
3.16	差分	10
3.17	MCMF	11
3.18	Blossom Algorithm	11
3.19	Dancing Links	12
3.20	LCA 倍增法	12
3.21	LCA 樹壓平 RMQ	13
3.22	LCA 樹鍊剖分	13

4 DataStructure

4.1	帶權併查集	14
4.2	Trie	14
4.3	AC Trie	14
4.4	線段樹 1D	15
4.5	線段樹 2D	15
4.6	權值線段樹	16
4.7	單調隊列	16

5 Geometry

5.1	公式	17
5.2	Template	17
5.3	旋轉卡尺	17
5.4	半平面相交	18
5.5	Polygon	18
5.6	凸包	18
5.7	最小圓覆蓋	18
5.8	交點、距離	18

6 DP

6.1	背包	19
6.2	Deque 最大差距	20
6.3	string DP	20
6.4	LCS 和 LIS	20
6.5	樹 DP 有幾個 path 長度為 k	20
6.6	WeightedLIS	20

1 字串

1.1 最長迴文子字串

```

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
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
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

```

1.2 Manacher

s: 增長為兩倍的字串, 以 '@' 為首, 以 '\$' 為間隔, 以 '\0' 節尾

p: 以 s[i] 為中心, 半徑為 p[i] 是迴文

return: 最長的迴文長度

```

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
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
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

```

1.3 KMP

```

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
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
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442

```

1.5 Suffix Array

- $O(n \log(n))$
- SA：後綴數組
- HA：相鄰後綴的共同前綴長度
(Longest Common Prefix)
- maxc：可用字元的最大 ASCII 值
- maxn \geq maxc
- 記得先取 n 的值 (strlen(s))

```

1 const int maxn = 2e5 + 10;
2 const int maxc = 256 + 10;
3
4 int n;
5 int SA[maxn], HA[maxn];
6 int rk[maxn], cnt[maxn], tmp[maxn];
7 char s[maxn];
8
9 void getSA() {
10     int mx = maxc;
11     for(int i=0; i<mx; cnt[i++]=0);
12
13     // 第一次 stable counting sort, 編 rank 和 sa
14     for(int i=0; i<n; i++) cnt[rk[i]=s[i]]++;
15     for(int i=1; i<mx; i++) cnt[i] += cnt[i-1];
16     for(int i=n-1; i>=0; i--) SA[--cnt[s[i]]]=i;
17
18     // 倍增法運算
19     for(int k=1, r=0; k<n; k<=<=1, r=0) {
20         for(int i=0; i<mx; cnt[i++]=0);
21         for(int i=0; i<n; i++) cnt[rk[i]]++;
22         for(int i=1; i<mx; i++) cnt[i] += cnt[i-1];
23         for(int i=n-k; i<n; i++) tmp[r++] = i;
24         for(int i=0; i<n; i++) {
25             if(SA[i] >= k) tmp[r++] = SA[i] - k;
26         }
27
28         // 計算本回 SA
29         for(int i=n-1; i>=0; i--) {
30             SA[--cnt[rk[tmp[i]]]] = tmp[i];
31         }
32
33         // 計算本回 rank
34         tmp[SA[0]] = r = 0;
35         for(int i=1; i<n; i++) {
36             if((SA[i-1]+k >= n) ||
37                (rk[SA[i-1]] != rk[SA[i]]) ||
38                (rk[SA[i-1]+k] != rk[SA[i]+k])) r++;
39             tmp[SA[i]] = r;
40         }
41         for(int i=0; i<n; i++) rk[i] = tmp[i];
42         if((mx=r+1) == n) break;
43     }
44 }
45
46 void getHA() { // HA[0] = 0
47     for(int i=0; i<n; i++) rk[SA[i]] = i;
48     for(int i=0, k=0; i<n; i++) {
49         if(!rk[i]) continue;
50         if(k) k--;
51         while(s[i+k] == s[SA[rk[i]-1]+k]) k++;
52         HA[rk[i]] = k;
53     }
54 }

```

2 math

2.1 公式

1. Most Divisor Number

Range	最多因數數	因數個數
10^9	735134400	1344
2^{31}	2095133040	1600
10^{18}	897612484786617600	103680
2^{64}	9200527969062830400	161280

2. Catalan Number

$$C_n = \frac{1}{n} \binom{2n}{n}, C_{n+1} = \frac{2(2n+1)}{n+2} C_n$$

$$C = 1, 1, 2, 5, 14, 42, 132, 429, 1430, 4862, \dots$$

3. Faulhaber's formula

$$\sum_{k=1}^n k^p = \frac{1}{p+1} \sum_{r=0}^p \binom{p+1}{r} B_r n^{p-r+1}$$

$$\text{where } B_0 = 1, B_r = 1 - \sum_{i=0}^{r-1} \binom{r}{i} \frac{B_i}{r-i+1}$$

也可用高斯消去法找 $deg(p+1)$ 的多項式，例：

$$\sum_{k=1}^n k^2 = a_3 n^3 + a_2 n^2 + a_1 n + a_0$$

$$\begin{bmatrix} 0^3 & 0^2 & 0^1 & 0^0 \\ 1^3 & 1^2 & 1^1 & 1^0 \\ 2^3 & 2^2 & 2^1 & 2^0 \\ 3^3 & 3^2 & 3^1 & 3^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0^2 & 0^2 \\ a_2 & 0^2 + 1^2 \\ a_1 & 0^2 + 1^2 + 2^2 \\ a_0 & 0^2 + 1^2 + 2^2 + 3^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 8 & 4 & 2 & 1 & 5 \\ 27 & 9 & 3 & 1 & 14 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 4 & 6 & 7 & 3 \\ 0 & 0 & 6 & 11 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1/3 \\ 1/2 \\ 1/6 \\ 0 \end{bmatrix}, \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{1}{3} n^3 + \frac{1}{2} n^2 + \frac{1}{6} n$$

4. Lagrange Polynomial

拉格朗日插值法：找出 n 次多項函數 $f(x)$ 的點
 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$

$$L(x) = \sum_{j=0}^n y_j l_j(x)$$

$$l_j(x) = \prod_{i=0, i \neq j}^n \frac{x - x_i}{x_j - x_i}$$

5. SG Function

$$SG(x) = mex\{SG(y) | x \rightarrow y\}$$

$$mex(S) = \min\{n | n \in \mathbb{N}, n \notin S\}$$

6. Fibonacci

$$\begin{bmatrix} f_{n-1} & f_n \\ f_n & f_{n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}^p = \begin{bmatrix} f_{n+p} & f_{n+p+1} \end{bmatrix}, p \in \mathbb{N}$$

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right]$$

7. Pick's Theorem

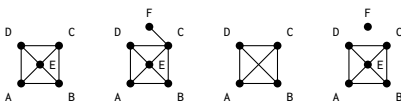
給定頂點座標均是整點（或正方形格子點）的簡單多邊形，
 其面積 A 和內部格點數目 i 、邊上格點數目 b 的關係為

$$A = i + \frac{b}{2} - 1$$

8. Euler's Formula

對於有 V 個點、 E 條邊、 F 個面（含外部）的連通平面圖

$$F + V - E = 2$$



(1)、(2) ○；(3) ×， \overline{AC} 與 \overline{BD} 相交；(4) ×，非連通圖

9. Simpson Integral

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{6} \left[f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right]$$

2.2 Rational

```

1 const char sep = '/'; // 分數的分隔符
2 bool div0; // 要記得適時歸零
3 using ll = long long;
4
5 struct Rational {
6     ll p, q;
7
8     Rational(ll a=0, ll b=1) {
9         p = a, q = b;
10        reduce();
11    }
12
13    Rational(string s) {
14        if(s.find(sep) == string::npos) {
15            p = stoll(s);
16            q = 1;
17        } else {
18            p = stoll(s.substr(0, s.find(sep)));
19            q = stoll(s.substr(s.find(sep)+1));
20        }
21        reduce();
22    }
23
24    void reduce() {
25        ll t = abs(__gcd(p, q));
26        if(t == 0) {
27            div0 = true;
28            return;
29        }
30        p /= t, q /= t;
31        if(q < 0) p = -p, q = -q;
32        return;
33    }
34
35    string toString() {
36        if(q == 0) {
37            div0 = true;
38            return "INVALID";
39        }
40        if(p%q == 0) return to_string(p/q);
41        return to_string(p) + sep + to_string(q);
42    }
43
44    friend istream& operator>>(
45        istream& i, Rational& r) {
46        string s;
47        i >> s;
48        r = Rational(s);
49        return i;
50    }
51
52    friend ostream& operator<<(
53        ostream& o, Rational r) {
54        o << r.toString();
55        return o;
56    }
57 }
58
59 Rational operator+(Rational x, Rational y) {
60     ll t = abs(__gcd(x.q, y.q));
61     if(t == 0) return Rational(0, 0);
62     return Rational(
63         y.q/t*x.p + x.q/t*y.p, x.q*t*y.q);
64 }
65
66 Rational operator-(Rational x, Rational y) {
67     return x + Rational(-y.p, y.q);
68 }
69
70 Rational operator*(Rational x, Rational y) {
71     return Rational(x.p*y.p, x.q*y.q);
72 }
73
74 Rational operator/(Rational x, Rational y) {
75     return x * Rational(y.q, y.p);
76 }

```

2.3 乘法逆元、組合數

$$x^{-1} \bmod m = \begin{cases} 1, & \text{if } x = 1 \\ -\left\lfloor \frac{m}{x} \right\rfloor (m \bmod x)^{-1}, & \text{otherwise} \end{cases} \pmod{m}$$

$$= \begin{cases} 1, & \text{if } x = 1 \\ (m - \left\lfloor \frac{m}{x} \right\rfloor) (m \bmod x)^{-1}, & \text{otherwise} \end{cases} \pmod{m}$$

若 $p \in \text{prime}$ ，根據費馬小定理，則

$$\begin{aligned} \therefore ax &\equiv 1 \pmod{p} \\ \therefore ax &\equiv a^{p-1} \pmod{p} \\ \therefore x &\equiv a^{p-2} \pmod{p} \end{aligned}$$

```

1 using ll = long long;
2 const int maxn = 2e5 + 10;
3 const int mod = 1e9 + 7;
4
5 int fact[maxn] = {1, 1}; // x! % mod
6 int inv[maxn] = {1, 1}; // x^(-1) % mod
7 int invFact[maxn] = {1, 1}; // (x!)^(-1) % mod
8
9 void build() {
10     for(int x=2; x<maxn; x++) {
11         fact[x] = (ll)x * fact[x-1] % mod;
12         inv[x] = (ll)(mod-mod/x)*inv[mod%x]%mod;
13         invFact[x] = (ll)invFact[x-1]*inv[x]%mod;
14     }
15 }
16
17 // 前提：mod 為質數
18 void build() {
19     auto qpow = [&](ll a, int b) {
20         ll res = 1;
21         for(; b; b>>=1) {
22             if(b & 1) res = res * a % mod;
23             a = a * a % mod;
24         }
25         return res;
26     };
27
28     for(int x=2; x<maxn; x++) {
29         fact[x] = (ll)x * fact[x-1] % mod;
30         invFact[x] = qpow(fact[x], mod-2);
31     }
32 }
33
34 // C(a, b) % mod
35 int comb(int a, int b) {
36     if(a < b) return 0;
37     ll x = fact[a];
38     ll y = (ll)invFact[b] * invFact[a-b] % mod;
39     return x * y % mod;
40 }

```

2.4 歐拉函數

```

1 //計算閉區間 [1,n] 中有幾個正整數與 n 互質
2
3 int phi(){
4     int ans=n;
5     for(int i=2;i*i<=n;i++){
6         if(n%i==0){
7             ans=ans-ans/i;
8             while(n%i==0) n/=i;
9         }
10    }
11    if(n>1) ans=ans-ans/n;
12    return ans;

```

2.5 質數與因數

```

1 歐拉篩O(n)
2 #define MAXN 47000 //sqrt(2^31)=46,340...
3 bool isPrime[MAXN];
4 int p[MAXN];
5 int pSize=0;
6 void getPrimes(){
7     memset(isPrime,true,sizeof(isPrime));
8     isPrime[0]=isPrime[1]=false;
9     for(int i=2;i<MAXN;i++){
10         if(isPrime[i]) p[pSize++]=i;
11         for(int j=0;j<pSize&&i*p[j]<=MAXN;++j){
12             isPrime[i*p[j]]=false;
13             if(i%p[j]==0) break;
14         }
15     }
16 }
17
18 最大公因數 O(log(min(a,b)))
19 int GCD(int a, int b){
20     if(b == 0) return a;
21     return GCD(b, a%b);
22 }

```

質因數分解

```

24 void primeFactorization(int n){
25     for(int i=0; i<p.size(); ++i) {
26         if(p[i]*p[i] > n) break;
27         if(n % p[i]) continue;
28         cout << p[i] << ' ';
29         while(n%p[i] == 0) n /= p[i];
30     }
31     if(n != 1) cout << n << ' ';
32     cout << '\n';
33 }
34 }

```

擴展歐幾里得算法 $ax + by = \text{GCD}(a, b)$

```

36 擴展歐幾里得算法 ax + by = GCD(a, b)
37 int ext_euc(int a, int b, int &x, int &y) {
38     if(b == 0){
39         x = 1, y = 0;
40         return a;
41     }
42     int d = ext_euc(b, a%b, y, x);
43     y -= a/b*x;
44     return d;
45 }
46 int main(){
47     int a, b, x, y;
48     cin >> a >> b;
49     ext_euc(a, b, x, y);
50     cout << x << ' ' << y << endl;
51     return 0;
52 }
53 }

```

歌德巴赫猜想

解：把偶數 N ($6 \leq N \leq 10^6$) 寫成兩個質數的和。

```

54 #define N 2000000
55 int ox[N], p[N], pr;
56 void PrimeTable(){
57     ox[0] = ox[1] = 1;
58     pr = 0;
59     for(int i=2;i<N;i++){
60         if(!ox[i]) p[pr++] = i;
61         for(int j=0; i*p[j]<N&&j<pr; j++){
62             ox[i*p[j]] = 1;
63         }
64     }
65 }
66 int main(){
67     PrimeTable();
68     int n;
69     while(cin>>n, n){
70         int x;
71         for(x=1;; x+=2)
72             if(!ox[x] && !ox[n-x]) break;
73         printf("%d = %d + %d\n", n, x, n-x);
74     }
75 }
76 }

```

```

77
78 problem :
79 給定整數 N，求N最少可以拆成多少個質數的和。
80 如果N是質數，則答案為 1。
81 如果N是偶數( $N!=2$ )，則答案為2(強歌德巴赫猜想)。
82 如果N是奇數且 $N-2$ 是質數，則答案為2(2+質數)。
83 其他狀況答案為 3 (弱歌德巴赫猜想)。
84
85 bool isPrime(int n){
86     for(int i=2;i<n;++i){
87         if(i*i>n) return true;
88         if(n%i==0) return false;
89     }
90     return true;
91 }
92 int main(){
93     int n;
94     cin>>n;
95     if(isPrime(n)) cout<<"1\n";
96     else if(n%2==0||isPrime(n-2)) cout<<"2\n";
97     else cout<<"3\n";
98 }

```

2.6 高斯消去

計算 $AX = B$

傳入：

M = 增廣矩陣 $[A|B]$
 equ = 有幾個 equation
 var = 有幾個 variable

回傳： $X = (x_0, \dots, x_{n-1})$ 的解集

>>無法判斷無解或無限多組解<<

```

1 using DBL = double;
2 using mat = vector<vector<DBL>>;
3
4 vector<DBL> Gauss(mat& M, int equ, int var) {
5     auto dcmp = [](DBL a, DBL b=0.0) {
6         return (a > b) - (a < b);
7     };
8
9     for(int r=0, c=0; r<equ && c<var; ) {
10         int mx = r; // 找絕對值最大的 M[i][c]
11         for(int i=r+1; i<equ; i++) {
12             if(dcmp(abs(M[i][c]),abs(M[mx][c]))==1)
13                 mx = i;
14         }
15         if(mx != r) swap(M[mx], M[r]);
16
17         if(dcmp(M[r][c]) == 0) {
18             c++;
19             continue;
20         }
21
22         for(int i=r+1; i<equ; i++) {
23             if(dcmp(M[i][c]) == 0) continue;
24             DBL t = M[i][c] / M[r][c];
25             for(int j=c; j<M[c].size(); j++) {
26                 M[i][j] -= t * M[r][j];
27             }
28         }
29         r++, c++;
30     }
31
32     vector<DBL> X(var);
33     for(int i=var-1; i>=0; i--) {
34         X[i] = M[i][var];
35         for(int j=var-1; j>i; j--) {
36             X[i] -= M[i][j] * X[j];
37         }
38         X[i] /= M[i][i];
39     }
40     return X;
41 }

```

2.7 Extended GCD

題目要求：解 $ax + by = n, a, b \in \mathbb{Z}^{0+}$

已知題幹 $ax + by = n$ 滿足丟番圖方程式

同時利用貝祖等式 $ax_1 + by_1 = \text{gcd}(a, b)$

觀察兩式可知將 $ax_1 + by_1 = \text{gcd}(a, b)$ 兩邊乘上 $\frac{n}{\text{gcd}(a, b)}$

得 $a \frac{n x_1}{\text{gcd}(a, b)} + b \frac{n y_1}{\text{gcd}(a, b)} = n$

此時可看成 $x = \frac{n x_1}{\text{gcd}(a, b)}, y = \frac{n y_1}{\text{gcd}(a, b)}$

可以找出一通解

$$x = \frac{n x_1}{\text{gcd}(a, b)} + k \times \frac{b}{\text{gcd}(a, b)}$$

$$y = \frac{n y_1}{\text{gcd}(a, b)} - k \times \frac{a}{\text{gcd}(a, b)}$$

$$k \in \mathbb{Z}$$

(以上通解帶回 $ax + by = n$ 會發現 k 會被消除)

由於 $x \geq 0, y \geq 0$ 所以

$$x = \frac{n x_1}{\text{gcd}(a, b)} + k \times \frac{b}{\text{gcd}(a, b)}$$

$$y = \frac{n y_1}{\text{gcd}(a, b)} - k \times \frac{a}{\text{gcd}(a, b)}$$

經過移項運算可得

$$-\frac{n x_1}{b} \leq k \leq \frac{n y_1}{a}$$

```

1 ll exgcd(ll a, ll b, ll& x, ll& y) {
2     if (b == 0) {
3         x = 1, y = 0;
4         return a;
5     }
6     ll gcd = exgcd(b, a % b, x, y);
7     ll y1 = y;
8     y = x - (a / b) * y;
9     x = y1;
10    return gcd;
11 }
12 int main() {
13     ll n;
14     ll x, y;
15     ll c1, c2, a, b;
16     while (~scanf("%lld", &n) && n) {
17         scanf("%lld %lld", &c1, &a);
18         scanf("%lld %lld", &c2, &b);
19         ll gcd = exgcd(a, b, x, y);
20         if (n % gcd != 0) {
21             printf("failed\n");
22             continue;
23         }
24         ll l = ceil((double)(-n) * x / b);
25         ll r = floor((double)(n) * y / a);
26         if (l > r) {
27             printf("failed\n");
28             continue;
29         }
30         if (c1 * b < c2 * a) { //斜率正or負
31             //斜率負，帶入k的上界
32             x = n * x / gcd + b / gcd * r;
33             y = n * y / gcd - a / gcd * r;
34         }
35         else {
36             //斜率正，帶入k的下界
37             x = n * x / gcd + b / gcd * l;
38             y = n * y / gcd - a / gcd * l;
39         }
40         printf("%lld %lld\n", x, y);
41     }
42     return 0;
43 }

```

2.8 大步小步

```

1  題意
2  給定 B,N,P, 求出 L 滿足  $B^L \equiv N \pmod{P}$ 。
3  題解
4  餘數的循環節長度必定為 P 的因數，因此
    $B^0, B^1, B^2, \dots, B^{P-1}$ ，
5  也就是說如果有解則  $L < N$ ，枚舉 0,1,2,L-1
   能得到結果，但會超時。
6  將 L 拆成  $mx+y$ ，只要分別枚舉 x,y 就能得到答案，
7  設  $m=\sqrt{P}$  能保證最多枚舉  $2\sqrt{P}$  次。
8   $B^x(mx+y) \equiv N \pmod{P}$ 
9   $B^x(mx)B^y \equiv N \pmod{P}$ 
10  $B^y \equiv N(B^x)^{-1} \pmod{P}$ 
11 先求出  $B^0, B^1, B^2, \dots, B^{m-1}$ ，
12 再枚舉  $N(B^x)^{-1}, N(B^x)^{-2}, \dots$  查看是否有對應的
    $B^y$ 。
13 這種算法稱為大步小步演算法，
14 大步指的是枚舉 x (一次跨 m 步)，
15 小步指的是枚舉 y (一次跨 1 步)。
16 複雜度分析
17 利用 map/unordered_map 存放
    $B^0, B^1, B^2, \dots, B^{m-1}$ ，
18 枚舉 x 查詢 map/unordered_map 是否有對應的  $B^y$ ，
19 存放和查詢最多  $2\sqrt{P}$  次，時間複雜度為
    $O(\sqrt{P} \log \sqrt{P}) / O(\sqrt{P})$ 。
20
21 using LL = long long;
22 LL B, N, P;
23 LL fpow(LL a, LL b, LL c){
24     LL res=1;
25     for(; b >= 1; b >>= 1){
26         if(b&1)
27             res=(res*a)%c;
28         a=(a*a)%c;
29     }
30     return res;
31 }
32 LL BSGS(LL a, LL b, LL p){
33     a%=p, b%=p;
34     if(a==0)
35         return b==0?1:-1;
36     if(b==1)
37         return 0;
38     map<LL, LL> tb;
39     LL sq=ceil(sqrt(p-1));
40     LL inv=fpow(a, p-sq-1, p);
41     tb[1]=sq;
42     for(LL i=1, tmp=1; i<sq; ++i){
43         tmp=(tmp*a)%p;
44         if(!tb.count(tmp))
45             tb[tmp]=i;
46     }
47     for(LL i=0; i<sq; ++i){
48         if(tb.count(b)){
49             LL res=tb[b];
50             return i*sq+(res==sq?0:res);
51         }
52         b=(b*inv)%p;
53     }
54     return -1;
55 }
56 int main(){
57     IOS; //輸入優化
58     while(cin>>P>>B>>N){
59         LL ans=BSGS(B,N,P);
60         if(ans!=-1)
61             cout<<"no solution\n";
62         else
63             cout<<ans<<"\n";
64     }
65 }

```

2.9 Pisano Period

```

1  #include <cstdio>
2  #include <vector>
3  using namespace std;
4
5  /*
6  Pisano Period + 快速幂 + mod
7  Pisano Period:
8  費氏數列在 mod n 的情況下會有循環週期，
9  且週期的結束判斷會在 fib[i - 1] == 0 &&
   fib[i] == 1 時，
10  此時循環週期長度是 i - 1
11
12  所以這題是在找出循環週期後，
13  用快速幂並 mod(循環週期長度)即可 AC(快速幂記得 mod)，
14  此外 fib 要 mod n，也要找週期，所以用預處理的方式列表
15  */
16
17 #define maxn 1005
18
19 /*
20 Pisano period 可證一個週期的長度會在 [n, n^2] 之間
21 */
22 //很可惜，會爆
23 // int fib[maxn][maxn * maxn];
24 //改用 vector
25 vector<int> fib[maxn];
26 int period[maxn];
27
28 int qpow(int a, unsigned long long b, int
   mod)
29 {
30     if (b == 0) return a;
31     long long res = 1;
32     while (b) {
33         if (b & 1)
34             res = ((a % mod) * (res % mod)) % mod;
35         a = ((a % mod) * (a % mod)) % mod;
36         b >>= 1;
37     }
38     return res;
39 }
40
41 int main()
42 {
43     int t;
44     unsigned long long a, b;
45     int n;
46
47     //注意：這裡沒算 mod 1 的循環長度，
48     //因為 mod 1 都等於 0，沒有週期
49     for (int i = 2; i < maxn; ++i)
50     {
51         fib[i].emplace_back(0);
52         fib[i].emplace_back(1);
53         for (int j = 2; j < maxn * maxn; ++j)
54         {
55             fib[i].emplace_back(
56                 (fib[i][j-1] + fib[i][j-2]) % i
57             );
58             if (fib[i][j-1] == 0 && fib[i][j] == 1)
59             {
60                 period[i] = j - 1;
61                 break;
62             }
63         }
64     }
65
66     scanf("%d", &t);
67
68     while (t--)
69     {
70         scanf("%llu %llu %d", &a, &b, &n);
71         if (a == 0)
72             puts("0");
73         else if (n == 1) //當 mod 1 時任何數都是 0，

```

```

74     puts("0");
75     //所以直接輸出 0，避免我們沒算
76     else //fib[1][i] 的問題 (Runtime
77         error)
78         printf("%d\n",
79             fib[n][qpow(a % period[n], b,
80                 period[n])]);
81     }
82     return 0;
83 }

```

2.10 矩陣快速幂

```

1  using ll = long long;
2  using mat = vector<vector<ll>>;
3  const int mod = 1e9 + 7;
4
5  mat operator*(mat A, mat B) {
6      mat res(A.size(), vector<ll>(B[0].size()));
7      for(int i=0; i<A.size(); i++) {
8          for(int j=0; j<B[0].size(); j++) {
9              for(int k=0; k<B.size(); k++) {
10                 res[i][j] += A[i][k] * B[k][j] % mod;
11                 res[i][j] %= mod;
12             }
13         }
14     }
15     return res;
16 }
17
18 mat I = ;
19 // compute matrix M^n
20 // 需先 init I 矩陣
21 mat mpow(mat& M, int n) {
22     if(n <= 1) return n ? M : I;
23     mat v = mpow(M, n>>1);
24     return (n & 1) ? v*v*M : v*v;
25 }
26
27 // 迴圈版本
28 mat mpow(mat M, int n) {
29     mat res(M.size(), vector<ll>(M[0].size()));
30     for(int i=0; i<res.size(); i++)
31         res[i][i] = 1;
32     for(; n >= 1; n >>= 1) {
33         if(n & 1) res = res * M;
34         M = M * M;
35     }
36     return res;
37 }

```

3 algorithm

3.1 greedy

```

1 刪數字問題
2 //problem
3 給定一個數字  $N(\leq 10^{100})$ ，需要刪除  $K$  個數字，
4 請問刪除  $K$  個數字後最小的數字為何？
5 //solution
6 刪除滿足第  $i$  位數大於第  $i+1$  位數的最左邊第  $i$ 
7 位數，
8 扣除高位數的影響較扣除低位數的大。
9 //code
10 int main(){
11     string s;
12     int k;
13     cin>>s>>k;
14     for(int i=0;i<k;++i){
15         if((int)s.size()==0) break;
16         int pos =(int)s.size()-1;
17         for(int j=0;j<(int)s.size()-1;++j){
18             if(s[j]>s[j+1]){
19                 pos=j;
20                 break;
21             }
22         }
23         s.erase(pos,1);
24     }
25     while((int)s.size()>0&&s[0]=='0')
26         s.erase(0,1);
27     if((int)s.size()) cout<<s<<'\n';
28     else cout<<0<<'\n';
29 }
30 最小區間覆蓋長度
31 //problem
32 給定  $n$  條線段區間為  $[Li,Ri]$ ，
33 請問最少要選幾個區間才能完全覆蓋  $[0,S]$ ？
34 //solution
35 先將所有區間依照左界由小到大排序，
36 對於當前區間  $[Li,Ri]$ ，要從左界  $>Ri$  的所有區間中，
37 找到有著最大的右界的區間，連接當前區間。
38 //problem
39 長度  $n$  的直線中有數個加熱器，
40 在  $x$  的加熱器可以讓  $[x-r,x+r]$  內的物品加熱，
41 問最少要幾個加熱器可以把  $[0,n]$  的範圍加熱。
42 //solution
43 對於最左邊沒加熱的點 $a$ ，選擇最遠可以加熱 $a$ 的加熱器，
44 更新已加熱範圍，重複上述動作繼續尋找加熱器。
45 //code
46 int main(){
47     int n, r;
48     int a[1005];
49     cin>>n>>r;
50     for(int i=1;i<=n;++i) cin>>a[i];
51     int i=1,ans=0;
52     while(i<=n){
53         int R=min(i+r-1,n),L=max(i-r+1,0)
54         int nextR=-1;
55         for(int j=R;j>=L;--j){
56             if(a[j]){
57                 nextR=j;
58                 break;
59             }
60         }
61         if(nextR!=-1){
62             ans++;
63             break;
64         }
65         ++ans;
66         i=nextR+r;
67     }
68     cout<<ans<<'\n';
69 }
70 最多不重疊區間
71 //problem
72 給你  $n$  條線段區間為  $[Li,Ri]$ ，
73 請問最多可以選擇幾條不重疊的線段(頭尾可相連)？

```

```

74 //solution
75 依照右界由小到大排序，
76 每次取到一個不重疊的線段，答案 +1。
77 //code
78 struct Line{
79     int L,R;
80     bool operator<(const Line &rhs)const{
81         return R<rhs.R;
82     }
83 };
84 int main(){
85     int t;
86     cin>>t;
87     Line a[30];
88     while(t--){
89         int n=0;
90         while(cin>>a[n].L>a[n].R,a[n].L||a[n].R){
91             ++n;
92         }
93         sort(a,a+n);
94         int ans=1,R=a[0].R;
95         for(int i=1;i<n;i++){
96             if(a[i].L>R){
97                 ++ans;
98                 R=a[i].R;
99             }
100         }
101         cout<<ans<<'\n';
102     }
103 }
104 最小化最大延遲問題
105 //problem
106 給定  $N$  項工作，每項工作的需要處理時長為  $Ti$ ，
107 期限是  $Di$ ，第  $i$  項工作延遲的時間為
108  $Li=\max(0,Fi-Di)$ ，
109 原本 $Fi$  為第  $i$  項工作的完成時間，
110 求一種工作排序使  $\max Li$  最小。
111 //solution
112 按照到期時間從早到晚處理。
113 //code
114 struct Work{
115     int t, d;
116     bool operator<(const Work &rhs)const{
117         return d<rhs.d;
118     }
119 };
120 int main(){
121     int n;
122     Work a[10000];
123     cin>>n;
124     for(int i=0;i<n;++i)
125         cin>>a[i].t>>a[i].d;
126     sort(a,a+n);
127     int maxL=0,sumT=0;
128     for(int i=0;i<n;++i){
129         sumT+=a[i].t;
130         maxL=max(maxL,sumT-a[i].d);
131     }
132     cout<<maxL<<'\n';
133 }
134 最少延遲數量問題
135 //problem
136 給定  $N$  個工作，每個工作的需要處理時長為  $Ti$ ，
137 期限是  $Di$ ，求一種工作排序使得逾期工作數量最小。
138 //solution
139 期限越早到期的工作越先做。
140 將工作依照到期時間從早到晚排序，
141 依序放入工作列表中，如果發現有工作預期，
142 就從目前選擇的工作中，移除耗時最長的工作。
143 上述方法為 Moore-Hodgson s Algorithm。
144 //problem
145 給定烏龜的重量和可承受重量，問最多可以疊幾隻烏龜？
146 //solution
147 和最少延遲數量問題是相同的問題，只要將題敘做轉換。
148 工作處理時長  $\rightarrow$  烏龜重量
149 工作期限  $\rightarrow$  烏龜可承受重量
150 多少工作不延期  $\rightarrow$  可以疊幾隻烏龜
151 //code

```

```

151 struct Work{
152     int t, d;
153     bool operator<(const Work &rhs)const{
154         return d<rhs.d;
155     }
156 };
157 int main(){
158     int n=0;
159     Work a[10000];
160     priority_queue<int> pq;
161     while(cin>>a[n].t>>a[n].d)
162         ++n;
163     sort(a,a+n);
164     int sumT=0,ans=n;
165     for(int i=0;i<n;++i){
166         pq.push(a[i].t);
167         sumT+=a[i].t;
168         if(a[i].d<sumT){
169             int x=pq.top();
170             pq.pop();
171             sumT-=x;
172             --ans;
173         }
174     }
175     cout<<ans<<'\n';
176 }
177 任務調度問題
178 //problem
179 給定  $N$  項工作，每項工作的需要處理時長為  $Ti$ ，
180 期限是  $Di$ ，如果第  $i$  項工作延遲需要受到  $pi$ 
181 單位懲罰，
182 請問最少會受到多少單位懲罰。
183 //solution
184 依照懲罰由大到小排序，
185 每項工作依序嘗試可不可以放在
186  $Di-Ti+1, Di-Ti, \dots, 1, 0$ ，
187 如果有空間就放進去，否則延後執行。
188 //problem
189 給定  $N$  項工作，每項工作的需要處理時長為  $Ti$ ，
190 期限是  $Di$ ，如果第  $i$  項工作在期限內完成會獲得  $ai$ 
191 單位獎勵，
192 請問最多會獲得多少單位獎勵。
193 //solution
194 和上題相似，這題變成依照獎勵由大到小排序。
195 //code
196 struct Work{
197     int d,p;
198     bool operator<(const Work &rhs)const{
199         return p>rhs.p;
200     }
201 };
202 int main(){
203     int n;
204     Work a[100005];
205     bitset<100005> ok;
206     while(cin>>n){
207         ok.reset();
208         for(int i=0;i<n;++i)
209             cin>>a[i].d>>a[i].p;
210         sort(a,a+n);
211         int ans=0;
212         for(int i=0;i<n;++i){
213             int j=a[i].d;
214             while(j--){
215                 if(!ok[j]){
216                     ans+=a[i].p;
217                     ok[j]=true;
218                     break;
219                 }
220             }
221         }
222     }
223     cout<<ans<<'\n';
224 }

```


3.2 JosephusProblem

```

1 //JosephusProblem, 只是規定要先砍1號
2 //所以當作有 n - 1個人, 目標的13順移成12
3 //再者從0開始比較好算, 所以目標12順移成11
4
5 // O(n)
6 int getWinner(int n, int k) {
7     int winner = 0;
8     for (int i = 1; i <= n; ++i)
9         winner = (winner + k) % i;
10    return winner;
11 }
12
13 int main() {
14     int n;
15     while (scanf("%d", &n) != EOF && n){
16         --n;
17         for (int k = 1; k <= n; ++k){
18             if (getWinner(n, k) == 11){
19                 printf("%d\n", k);
20                 break;
21             }
22         }
23     }
24     return 0;
25 }
26
27 // O(k log(n))
28 int josephus(int n, int k) {
29     if (n == 1) return 0;
30     if (k == 1) return n - 1;
31     if (k > n) return (josephus(n-1,k)+k)%n;
32     int res = josephus(n - n / k, k);
33     res -= n % k;
34     if (res < 0)
35         res += n; // mod n
36     else
37         res += res / (k - 1); // 还原位置
38     return res;
39 }

```

3.3 二分搜

```

1 // 以下經過check()後 . 為false, o 為true
2 //皆為[l, r]區間
3 //.....voooooo 即答案左邊界, 符合條件最小的
4 int bsearch(int l, int r)
5 {
6     while (l < r)
7     {
8         int mid = (l + r) >> 1;
9         if (check(mid)) r = mid;
10        else l = mid + 1;
11    }
12    return l;
13 }
14
15 //ooooov..... 即答案右邊界, 符合條件最大的
16 int bsearch(int l, int r)
17 {
18     while (l < r)
19     {
20         int mid = (l + r + 1) >> 1;
21         if (check(mid)) l = mid;
22         else r = mid - 1;
23     }
24     return l;
25 }

```

3.4 三分搜

```

1 題意
2 給定兩射線方向和速度, 問兩射線最近距離。
3 題解
4 假設 F(t) 為兩射線在時間 t 的距離, F(t)
5 為二次函數,
6 可用三分搜找二次函數最小值。
7 struct Point{
8     double x, y, z;
9     Point() {}
10    Point(double _x, double _y, double _z):
11        x(_x), y(_y), z(_z){}
12    friend istream& operator>>(istream& is,
13        Point& p) {
14        is >> p.x >> p.y >> p.z;
15        return is;
16    }
17    Point operator+(const Point &rhs) const{
18        return Point(x+rhs.x, y+rhs.y, z+rhs.z);
19    }
20    Point operator-(const Point &rhs) const{
21        return Point(x-rhs.x, y-rhs.y, z-rhs.z);
22    }
23    Point operator*(const double &d) const{
24        return Point(x*d, y*d, z*d);
25    }
26    Point operator/(const double &d) const{
27        return Point(x/d, y/d, z/d);
28    }
29    double dist(const Point &rhs) const{
30        double res = 0;
31        res += (x-rhs.x)*(x-rhs.x);
32        res += (y-rhs.y)*(y-rhs.y);
33        res += (z-rhs.z)*(z-rhs.z);
34        return res;
35    }
36 };
37 int main(){
38     IOS; //輸入優化
39     int T;
40     cin>>T;
41     for(int ti=1; ti<=T; ++ti){
42         double time;
43         Point x1, y1, d1, x2, y2, d2;
44         cin>>time>>x1>>y1>>x2>>y2;
45         d1=(y1-x1)/time;
46         d2=(y2-x2)/time;
47         double L=0, R=1e8, m1, m2, f1, f2;
48         double ans = x1.dist(x2);
49         while(abs(L-R)>1e-10){
50             m1=(L+R)/2;
51             m2=(m1+R)/2;
52             f1=((d1*m1)+x1).dist((d2*m1)+x2);
53             f2=((d1*m2)+x1).dist((d2*m2)+x2);
54             ans = min(ans, min(f1, f2));
55             if(f1<f2) R=m2;
56             else L=m1;
57         }
58         cout<<"Case "<<ti<<": ";
59         cout << fixed << setprecision(4) <<
60             sqrt(ans) << '\n';
61     }
62 }
63 //oi wiki模板, [l, r]
64 //只要是單峰函數, 三分可找最大或最小, 以下為最小化
65 //計算lmid以及rmid時要避免數字溢出
66 while (r - l > eps) {
67     mid = (l + r) / 2;
68     lmid = mid - eps;
69     rmid = mid + eps;
70     if (f(lmid) < f(rmid)) r = rmid;
71     else l = lmid;
72 }

```

3.5 dinic

```

1 const int maxn = 1e5 + 10;
2 const int inf = 0x3f3f3f3f;
3 struct Edge {
4     int s, t, cap, flow;
5 };
6 int n, m, S, T;
7 int level[maxn], dfs_idx[maxn];
8 vector<Edge> E;
9 vector<vector<int>> G;
10 void init() {
11     S = 0;
12     T = n + m;
13     E.clear();
14     G.assign(maxn, vector<int>());
15 }
16 void addEdge(int s, int t, int cap) {
17     E.push_back({s, t, cap, 0});
18     E.push_back({t, s, 0, 0});
19     G[s].push_back(E.size()-2);
20     G[t].push_back(E.size()-1);
21 }
22 bool bfs() {
23     queue<int> q({S});
24     memset(level, -1, sizeof(level));
25     level[S] = 0;
26     while(!q.empty()) {
27         int cur = q.front();
28         q.pop();
29         for(int i : G[cur]) {
30             Edge e = E[i];
31             if(level[e.t]==-1 &&
32                 e.cap>e.flow) {
33                 level[e.t] = level[e.s] + 1;
34                 q.push(e.t);
35             }
36         }
37     }
38     return ~level[T];
39 }
40 int dfs(int cur, int lim) {
41     if(cur==T || lim==0) return lim;
42     int result = 0;
43     for(int& i=dfs_idx[cur]; i<G[cur].size()
44         && lim>0; i++) {
45         Edge& e = E[G[cur][i]];
46         if(level[e.s]+1 != level[e.t])
47             continue;
48         int flow = dfs(e.t, min(lim,
49             e.cap-e.flow));
50         if(flow <= 0) continue;
51         e.flow += flow;
52         result += flow;
53         E[G[cur][i]^1].flow -= flow;
54         lim -= flow;
55     }
56     return result;
57 }
58 int dinic() { // O((V^2)E)
59     int result = 0;
60     while(bfs()) {
61         memset(dfs_idx, 0, sizeof(dfs_idx));
62         result += dfs(S, inf);
63     }
64     return result;
65 }

```

3.6 dijkstra

```

1 struct edge{
2     int v,w;
3 };
4
5 struct Item{
6     int u,dis;
7     bool operator<(const Item &rhs)const{
8         return dis>rhs.dis;
9     }
10 };
11
12 vector<edge> G[maxn];
13 int dist[maxn];
14
15 void dijkstra(int s){ // O((V + E)log(E))
16     memset(dist,INF,sizeof(dist));
17     dist[s]=0;
18     priority_queue<Item> pq;
19     pq.push({s,0});
20     while(!pq.empty()){
21         Item now=pq.top();
22         pq.pop();
23         if(now.dis>dist[now.u]) continue;
24         for(edge e:G[now.u]){
25             if(dist[e.v]>dist[now.u]+e.w){
26                 dist[e.v]=dist[now.u]+e.w;
27                 pq.push({e.v,dist[e.v]});
28             }
29         }
30     }
31 }
32
33 int main(){
34     int t,cas=1;
35     cin>>t;
36     while(t--){
37         int n,m,s,t;
38         cin>>n>>m>>s>>t;
39         for(int i=0;i<n;i++) G[i].clear();
40         int u,v,w;
41         for(int i=0;i<m;i++){
42             cin>>u>>v>>w;
43             G[u].push_back({v,w});
44             G[v].push_back({u,w});
45         }
46         dijkstra(s);
47         cout<<"Case #"<<cas++<<"<<" ";
48         if(dist[t]==INF)
49             cout<<"unreachable\n";
50         else cout<<dist[t]<<endl;
51     }
52 }

```

3.7 SPFA

```

1 struct Edge{
2     int t;
3     long long w;
4     Edge(){};
5     Edge(int _t, long long _w) : t(_t),
6         w(_w) {}
7 };
8
9 bool SPFA(int st) // 平均O(V + E) 最糟O(VE)
10 {
11     vector<int> cnt(n, 0);
12     bitset<MXV> inq(0);
13     queue<int> q;
14     q.push(st);
15     dis[st] = 0;
16     inq[st] = true;
17     while (!q.empty()){
18         int cur = q.front();
19         q.pop();
20         inq[cur] = false;
21         for (auto &e : G[cur]){
22             if (dis[e.t] <= dis[cur] + e.w)
23                 continue;
24             dis[e.t] = dis[cur] + e.w;
25             if (inq[e.t]) continue;
26             ++cnt[e.t];
27             if (cnt[e.t] > n)
28                 return false; // negative cycle
29             inq[e.t] = true;
30             q.push(e.t);
31         }
32     }
33     return true;
34 }

```

3.8 SCC Kosaraju

```

1 //做兩次dfs, O(V + E)
2 //g 是原圖, g2 是反圖
3 //s是dfs離開的節點
4 void dfs1(int u) {
5     vis[u] = true;
6     for (int v : g[u])
7         if (!vis[v]) dfs1(v);
8     s.push_back(u);
9 }
10
11 void dfs2(int u) {
12     group[u] = sccCnt;
13     for (int v : g2[u])
14         if (!group[v]) dfs2(v);
15 }
16
17 void kosaraju() {
18     sccCnt = 0;
19     for (int i = 1; i <= n; ++i)
20         if (!vis[i]) dfs1(i);
21     for (int i = n; i >= 1; --i)
22         if (!group[s[i]]) {
23             ++sccCnt;
24             dfs2(s[i]);
25         }
26 }

```

3.9 SCC Tarjan

```

1 //單純考SCC, 每個SCC中找成本最小的蓋, 如果有多個一樣小
2 //的要數出來, 因為題目要方法數
3 //注意以下程式有縮點, 但沒存起來,
4 //存法就是開一個array -> ID[u] = SCCID
5 #define maxn 100005
6 #define MOD 1000000007
7 long long cost[maxn];
8 vector<vector<int>> G;
9 int SCC = 0;
10 stack<int> sk;
11 int dfn[maxn];
12 int low[maxn];
13 bool inStack[maxn];
14 int dfsTime = 1;
15 long long totalCost = 0;
16 long long ways = 1;
17 void dfs(int u) {
18     dfn[u] = low[u] = dfsTime;
19     ++dfsTime;
20     sk.push(u);
21     inStack[u] = true;
22     for (int v: G[u]) {
23         if (dfn[v] == 0) {
24             dfs(v);
25             low[u] = min(low[u], low[v]);
26         }
27         else if (inStack[v]) {
28             //屬於同個SCC且是我的back edge
29             low[u] = min(low[u], dfn[v]);
30         }
31     }
32     //如果是SCC
33     if (dfn[u] == low[u]) {
34         long long minCost = 0x3f3f3f3f;
35         int currWays = 0;
36         ++SCC;
37         while (1) {
38             int v = sk.top();
39             inStack[v] = 0;
40             sk.pop();
41             if (minCost > cost[v]) {
42                 minCost = cost[v];
43                 currWays = 1;
44             }
45             else if (minCost == cost[v]) {
46                 ++currWays;
47             }
48             if (v == u)
49                 break;
50         }
51         totalCost += minCost;
52         ways = (ways * currWays) % MOD;
53     }
54 }
55
56 int main() {
57     int n;
58     scanf("%d", &n);
59     for (int i = 1; i <= n; ++i)
60         scanf("%lld", &cost[i]);
61     G.assign(n + 5, vector<int>());
62     int m;
63     scanf("%d", &m);
64     int u, v;
65     for (int i = 0; i < m; ++i) {
66         scanf("%d %d", &u, &v);
67         G[u].emplace_back(v);
68     }
69     for (int i = 1; i <= n; ++i) {
70         if (dfn[i] == 0)
71             dfs(i);
72     }
73     printf("%lld %lld\n", totalCost, ways % MOD);
74     return 0;
75 }

```


3.10 BCC 邊

```

1 //oi-wiki, 找無向圖的邊雙連通分量個數,
2 //並輸出每個邊雙連通分量
3 //對於任意  $u \sim v$ , 刪去哪個邊都不會不連通
4 //-> 邊雙連通 ( $V + E$ )
5 constexpr int N = 5e5 + 5, M = 2e6 + 5;
6 int n, m, ans;
7 int tot = 1, hd[N];
8
9 struct edge {
10     int to, nt;
11 } e[M << 1];
12
13 void add(int u, int v) { e[++tot].to = v,
14     e[tot].nt = hd[u], hd[u] = tot; }
15
16 void uadd(int u, int v) { add(u, v), add(v,
17     u); }
18
19 bool bz[M << 1];
20 int bcc_cnt, dfn[N], low[N], vis_bcc[N];
21 vector<vector<int>> bcc;
22
23 void tarjan(int x, int in) {
24     dfn[x] = low[x] = ++bcc_cnt;
25     for (int i = hd[x]; i; i = e[i].nt) {
26         int v = e[i].to;
27         if (dfn[v] == 0) {
28             tarjan(v, i);
29             if (dfn[x] < low[v]) bz[i] = bz[i ^ 1]
30                 = true;
31             low[x] = min(low[x], low[v]);
32         } else if (i != (in ^ 1))
33             low[x] = min(low[x], dfn[v]);
34     }
35 }
36
37 void dfs(int x, int id) {
38     vis_bcc[x] = id, bcc[id - 1].push_back(x);
39     for (int i = hd[x]; i; i = e[i].nt) {
40         int v = e[i].to;
41         if (vis_bcc[v] || bz[i]) continue;
42         dfs(v, id);
43     }
44 }
45
46 int main() {
47     cin.tie(nullptr) -> sync_with_stdio(false);
48     cin >> n >> m;
49     int u, v;
50     for (int i = 1; i <= m; i++) {
51         cin >> u >> v;
52         if (u == v) continue;
53         uadd(u, v);
54     }
55     for (int i = 1; i <= n; i++)
56         if (dfn[i] == 0) tarjan(i, 0);
57     for (int i = 1; i <= n; i++)
58         if (vis_bcc[i] == 0) {
59             bcc.push_back(vector<int>());
60             dfs(i, ++ans);
61         }
62     cout << ans << '\n';
63     for (int i = 0; i < ans; i++) {
64         cout << bcc[i].size();
65         for (int j = 0; j < bcc[i].size(); j++)
66             cout << ' ' << bcc[i][j];
67         cout << '\n';
68     }
69     return 0;
70 }

```

3.11 BCC 點

```

1 //oi-wiki, 找無向圖的點雙連通分量個數,
2 //並輸出每個點雙連通分量
3 //對於任意  $u \sim v$ , 刪去哪個點(只能刪一個)都不會不連通
4 //-> 點雙連通 ( $V + E$ )
5 constexpr int N = 5e5 + 5, M = 2e6 + 5;
6 int n, m;
7
8 struct edge {
9     int to, nt;
10 } e[M << 1];
11
12 int hd[N], tot = 1;
13
14 void add(int u, int v) { e[++tot] = edge{v,
15     hd[u]}, hd[u] = tot; }
16
17 void uadd(int u, int v) { add(u, v), add(v,
18     u); }
19
20 int ans;
21 int dfn[N], low[N], bcc_cnt;
22 int sta[N], top, cnt;
23 bool cut[N];
24 vector<int> dcc[N];
25
26 void tarjan(int u) {
27     dfn[u] = low[u] = ++bcc_cnt, sta[++top] =
28         u;
29     if (u == root && hd[u] == 0) {
30         dcc[++cnt].push_back(u);
31         return;
32     }
33     int f = 0;
34     for (int i = hd[u]; i; i = e[i].nt) {
35         int v = e[i].to;
36         if (!dfn[v]) {
37             tarjan(v);
38             low[u] = min(low[u], low[v]);
39             if (low[v] >= dfn[u]) {
40                 if (++f > 1 || u != root) cut[u] =
41                     true;
42                 cnt++;
43                 do dcc[cnt].push_back(sta[top--]);
44                 while (sta[top + 1] != v);
45                 dcc[cnt].push_back(u);
46             }
47         } else
48             low[u] = min(low[u], dfn[v]);
49     }
50 }
51
52 int main() {
53     cin.tie(nullptr) -> sync_with_stdio(false);
54     cin >> n >> m;
55     int u, v;
56     for (int i = 1; i <= m; i++) {
57         cin >> u >> v;
58         if (u != v) uadd(u, v);
59     }
60     for (int i = 1; i <= n; i++)
61         if (!dfn[i]) root = i, tarjan(i);
62     cout << cnt << '\n';
63     for (int i = 1; i <= cnt; i++) {
64         cout << dcc[i].size() << ' ';
65         for (int j = 0; j < dcc[i].size(); j++)
66             cout << dcc[i][j] << ' ';
67         cout << '\n';
68     }
69     return 0;
70 }

```

3.12 ArticulationPoints Tarjan

```

1 vector<vector<int>> G;
2 int N, timer;
3 bool visited[105];
4 int dfn[105]; // 第一次visit的時間
5 int low[105];
6 //最小能回到的父節點
7 //(不能是自己的parent)的visTime
8 int res;
9 //求割點數量
10 void tarjan(int u, int parent) {
11     int child = 0;
12     bool isCut = false;
13     visited[u] = true;
14     dfn[u] = low[u] = ++timer;
15     for (int v: G[u]) {
16         if (!visited[v]) {
17             ++child;
18             tarjan(v, u);
19             low[u] = min(low[u], low[v]);
20             if (parent != -1 && low[v] >=
21                 dfn[u])
22                 isCut = true;
23         }
24         else if (v != parent)
25             low[u] = min(low[u], dfn[v]);
26     }
27     //If u is root of DFS
28     //tree->有兩個以上的children
29     if (parent == -1 && child >= 2)
30         isCut = true;
31     if (isCut) ++res;
32 }
33
34 int main() {
35     char input[105];
36     char* token;
37     while (scanf("%d", &N) != EOF && N) {
38         G.assign(105, vector<int>());
39         memset(visited, false,
40             sizeof(visited));
41         memset(low, 0, sizeof(low));
42         memset(dfn, 0, sizeof(dfn));
43         timer = 0;
44         res = 0;
45         getchar(); // for \n
46         while (fgets(input, 105, stdin)) {
47             if (input[0] == '\0')
48                 break;
49             int size = strlen(input);
50             input[size - 1] = '\0';
51             --size;
52             token = strtok(input, " ");
53             int u = atoi(token);
54             int v;
55             while (token = strtok(NULL, " ")) {
56                 v = atoi(token);
57                 G[u].emplace_back(v);
58                 G[v].emplace_back(u);
59             }
60             tarjan(1, -1);
61             printf("%d\n", res);
62         }
63     }
64     return 0;
65 }

```

3.13 最小樹狀圖

```

1 const int maxn = 60 + 10;
2 const int inf = 0x3f3f3f3f;
3 struct Edge {
4     int s, t, cap, cost;
5 }; // cap 為頻寬 (optional)
6 int n, m, c;
7 int inEdge[maxn], idx[maxn], pre[maxn],
    vis[maxn];
8 // 對於每個點，選擇對它入度最小的那條邊
9 // 找環，如果沒有則 return;
10 // 進行縮環並更新其他點到環的距離。
11 int dirMST(vector<Edge> edges, int low) {
12     int result = 0, root = 0, N = n;
13     while(true) {
14         memset(inEdge, 0x3f, sizeof(inEdge));
15         // 找所有點的 in edge 放進 inEdge
16         // optional: low 為最小 cap 限制
17         for(const Edge& e : edges) {
18             if(e.cap < low) continue;
19             if(e.s!=e.t &&
20                 e.cost<inEdge[e.t]) {
21                 inEdge[e.t] = e.cost;
22                 pre[e.t] = e.s;
23             }
24         }
25         for(int i=0; i<N; i++) {
26             if(i==root && inEdge[i]==inf)
27                 return -1; //除了root 還有點沒有 in
28                             edge
29         }
30         int seq = inEdge[root] = 0;
31         memset(idx, -1, sizeof(idx));
32         memset(vis, -1, sizeof(vis));
33         // 找所有的 cycle，一起編號為 seq
34         for(int i=0; i<N; i++) {
35             result += inEdge[i];
36             int cur = i;
37             while(vis[cur]!=i &&
38                 idx[cur]==-1) {
39                 if(cur == root) break;
40                 vis[cur] = i;
41                 cur = pre[cur];
42             }
43             if(cur!=root && idx[cur]==-1) {
44                 for(int j=pre[cur]; j!=cur;
45                     j=pre[j])
46                     idx[j] = seq;
47                 idx[cur] = seq++;
48             }
49         }
50         if(seq == 0) return result; // 沒有
51                             cycle
52         for(int i=0; i<N; i++)
53             // 沒有被縮點的點
54             if(idx[i] == -1) idx[i] = seq++;
55         // 縮點並重新編號
56         for(Edge& e : edges) {
57             if(idx[e.s] != idx[e.t])
58                 e.cost -= inEdge[e.t];
59             e.s = idx[e.s];
60             e.t = idx[e.t];
61         }
62         N = seq;
63         root = idx[root];
64     }
65 }

```

3.14 KM

```

1 #define maxn 505
2 int W[maxn][maxn];
3 int Lx[maxn], Ly[maxn];
4 bool S[maxn], T[maxn];
5 //L[i] = j -> S_i配給T_j, -1 for 還沒匹配
6 int L[maxn];
7 int n;
8 bool match(int i) {
9     S[i] = true;
10     for (int j = 0; j < n; ++j) {
11         // KM重點
12         // Lx + Ly >= selected_edge(x, y)
13         // 要想辦法降低Lx + Ly
14         // 所以選Lx + Ly == selected_edge(x, y)
15         if (Lx[i] + Ly[j] == W[i][j] &&
16             !T[j]) {
17             T[j] = true;
18             if ((L[j] == -1) || match(L[j])) {
19                 L[j] = i;
20                 return true;
21             }
22         }
23     }
24     return false;
25 }
26 //修改二分圖上的交錯路徑上點的權重
27 //此舉是在通過調整vertex labeling看看
28 //能不能產生出新的增廣路
29 //KM的增廣路要求Lx[i] + Ly[j] == W[i][j]
30 //在這裡優先從最小的diff調看，才能保證最大權重匹配
31 void update() {
32     int diff = 0x3f3f3f3f;
33     for (int i = 0; i < n; ++i) {
34         if (S[i]) {
35             for (int j = 0; j < n; ++j) {
36                 if (!T[j])
37                     diff = min(diff, Lx[i] +
38                                 Ly[j] - W[i][j]);
39             }
40         }
41         for (int i = 0; i < n; ++i) {
42             if (S[i]) Lx[i] -= diff;
43             if (T[i]) Ly[i] += diff;
44         }
45     }
46 }
47 void KM() {
48     for (int i = 0; i < n; ++i) {
49         L[i] = -1;
50         Lx[i] = Ly[i] = 0;
51         for (int j = 0; j < n; ++j)
52             Lx[i] = max(Lx[i], W[i][j]);
53     }
54     for (int i = 0; i < n; ++i) {
55         while(1) {
56             memset(S, false, sizeof(S));
57             memset(T, false, sizeof(T));
58             if (match(i)) break;
59             else update(); //去調整vertex
60                             labeling以增加增廣路徑
61         }
62     }
63 }
64 int main() {
65     while (scanf("%d", &n) != EOF) {
66         for (int i = 0; i < n; ++i)
67             for (int j = 0; j < n; ++j)
68                 scanf("%d", &W[i][j]);
69         KM();
70         int res = 0;
71         for (int i = 0; i < n; ++i) {
72             if (i != 0)
73                 printf("%d", Lx[i]);
74             else
75                 printf("%d", Lx[i]);
76             res += Lx[i];
77         }
78     }
79 }

```

```

74     }
75     puts("");
76     for (int i = 0; i < n; ++i) {
77         if (i != 0)
78             printf(" %d", Ly[i]);
79         else
80             printf("%d", Ly[i]);
81         res += Ly[i];
82     }
83     puts("");
84     printf("%d\n", res);
85 }
86 return 0;
87 }

```

3.15 二分圖最大匹配

```

1 /* 核心：最大點獨立集 = |V| -
2    /最大匹配數/，用匈牙利演算法找出最大匹配數 */
3 vector<Student> boys;
4 vector<Student> girls;
5 vector<vector<int>> G;
6 bool used[505];
7 int p[505];
8 bool match(int i) {
9     for (int j: G[i]) {
10         if (!used[j]) {
11             used[j] = true;
12             if (p[j] == -1 || match(p[j])) {
13                 p[j] = i;
14                 return true;
15             }
16         }
17     }
18     return false;
19 }
20 void maxMatch(int n) {
21     memset(p, -1, sizeof(p));
22     int res = 0;
23     for (int i = 0; i < boys.size(); ++i) {
24         memset(used, false, sizeof(used));
25         if (match(i)) ++res;
26     }
27     cout << n - res << '\n';
28 }

```

3.16 差分

```

1 用途：在區間 [l, r] 加上一個數字v。
2 b[l] += v; (b[0~l] 加上v)
3 b[r+1] -= v; (b[r+1~n] 減去v (b[r] 仍保留v) )
4 給的 a[] 是前綴和數列，建構 b[]，
5 因為 a[i] = b[0] + b[1] + b[2] + ... + b[i]，
6 所以 b[i] = a[i] - a[i-1]。
7 在 b[l] 加上 v，b[r+1] 減去 v，
8 最後再從 0 跑到 n 使 b[i] += b[i-1]。
9 這樣一來，b[] 是一個在某區間加上v的前綴和。
10 int a[1000], b[1000];
11 // a: 前綴和數列, b: 差分數列
12 int main(){
13     int n, l, r, v;
14     cin >> n;
15     for(int i=1; i<=n; i++){
16         cin >> a[i];
17         b[i] = a[i] - a[i-1]; //建構差分數列
18     }
19     cin >> l >> r >> v;
20     b[l] += v;
21     b[r+1] -= v;
22     for(int i=1; i<=n; i++){
23         b[i] += b[i-1];
24         cout << b[i] << ' ';
25     }
26 }

```

3.17 MCMF

```

1 #define maxn 225
2 #define INF 0x3f3f3f3f
3 struct Edge {
4     int u, v, cap, flow, cost;
5 };
6 //node size, edge size, source, target
7 int n, m, s, t;
8 vector<vector<int>> G;
9 vector<Edge> edges;
10 bool inqueue[maxn];
11 long long dis[maxn];
12 int parent[maxn];
13 long long outFlow[maxn];
14 void addEdge(int u, int v, int cap, int cost) {
15     edges.emplace_back(Edge{u, v, cap, 0, cost});
16     edges.emplace_back(Edge{v, u, 0, 0, -cost});
17     m = edges.size();
18     G[u].emplace_back(m - 2);
19     G[v].emplace_back(m - 1);
20 }
21 //一邊求最短路的同時一邊MaxFlow
22 bool SPFA(long long& maxFlow, long long& minCost) {
23     // memset(outFlow, 0x3f, sizeof(outFlow));
24     memset(dis, 0x3f, sizeof(dis));
25     memset(inqueue, false, sizeof(inqueue));
26     queue<int> q;
27     q.push(s);
28     dis[s] = 0;
29     inqueue[s] = true;
30     outFlow[s] = INF;
31     while (!q.empty()) {
32         int u = q.front();
33         q.pop();
34         inqueue[u] = false;
35         for (const int edgeIndex: G[u]) {
36             const Edge& edge = edges[edgeIndex];
37             if ((edge.cap > edge.flow) && (dis[edge.v] > dis[u] + edge.cost)) {
38                 dis[edge.v] = dis[u] + edge.cost;
39                 parent[edge.v] = edgeIndex;
40                 outFlow[edge.v] = min(outFlow[u], (long long)(edge.cap - edge.flow));
41                 if (!inqueue[edge.v]) {
42                     q.push(edge.v);
43                     inqueue[edge.v] = true;
44                 }
45             }
46         }
47     }
48     //如果dis[t] > 0代表根本不賺還倒賠
49     if (dis[t] > 0)
50         return false;
51     maxFlow += outFlow[t];
52     minCost += dis[t] * outFlow[t];
53     //一路更新回去這次最短路流完後要維護的
54     //MaxFlow演算法相關(如反向邊等)
55     int curr = t;
56     while (curr != s) {
57         edges[parent[curr]].flow += outFlow[t];
58         edges[parent[curr] ^ 1].flow -= outFlow[t];
59         curr = edges[parent[curr]].u;
60     }
61     return true;
62 }

```

```

63 long long MCMF() {
64     long long maxFlow = 0;
65     long long minCost = 0;
66     while (SPFA(maxFlow, minCost))
67         ;
68     return minCost;
69 }
70 int main() {
71     int T;
72     scanf("%d", &T);
73     for (int Case = 1; Case <= T; ++Case){
74         //總共幾個月，囤貨成本
75         int M, I;
76         scanf("%d %d", &M, &I);
77         //node size
78         n = M + M + 2;
79         G.assign(n + 5, vector<int>());
80         edges.clear();
81         s = 0;
82         t = M + M + 1;
83         for (int i = 1; i <= M; ++i) {
84             int produceCost, produceMax, sellPrice, sellMax, inventoryMonth;
85             scanf("%d %d %d %d %d", &produceCost, &produceMax, &sellPrice, &sellMax, &inventoryMonth);
86             addEdge(s, i, produceMax, produceCost);
87             addEdge(M + i, t, sellMax, -sellPrice);
88             for (int j = 0; j <= inventoryMonth; ++j) {
89                 if (i + j <= M)
90                     addEdge(i, M + i + j, INF, I * j);
91             }
92         }
93         printf("Case %d: %lld\n", Case, -MCMF());
94     }
95     return 0;
96 }

```

3.18 Blossom Algorithm

```

1 const int maxn = 500 + 10;
2
3 struct Edge { int s, t; };
4
5 int n;
6 int base[maxn], match[maxn], p[maxn], inq[maxn];
7 bool vis[maxn], flower[maxn];
8 vector<Edge> G[maxn];
9 queue<int> q;
10
11 int lca(int a, int b) {
12     memset(vis, 0, sizeof(vis));
13     while(1) {
14         a = base[a];
15         vis[a] = true;
16         if(match[a] == -1) break;
17         a = p[match[a]];
18     }
19     while(1) {
20         b = base[b];
21         if(vis[b]) return b;
22         b = p[match[b]];
23     }
24     return -1;
25 }
26
27 void set_path(int x, int father) {
28     int tmp;
29     while(x != father) {
30         tmp = match[x];
31         flower[base[x]] = flower[base[tmp]] = 1;
32         tmp = p[tmp];
33         if(base[tmp] != father) p[tmp] = match[x];
34         x = tmp;
35     }
36 }
37
38 void blossom(int x, int y) {
39     memset(flower, 0, sizeof(flower));
40     int father = lca(x, y);
41     set_path(x, father);
42     set_path(y, father);
43     if(base[x] != father) p[x] = y;
44     if(base[y] != father) p[y] = x;
45     for(int i=1; i<=n; i++) {
46         if(!flower[base[i]]) continue;
47         base[i] = father;
48         if(!inq[i]) {
49             q.push(i);
50             inq[i] = true;
51         }
52     }
53 }
54
55 bool bfs(int root) {
56     int cur, y, nxt;
57     q = queue<int>();
58     q.push(root);
59     memset(inq, 0, sizeof(inq));
60     memset(p, -1, sizeof(p));
61     for(int i=1; i<=n; i++) base[i] = i;
62
63     while(!q.empty()) {
64         cur = q.front();
65         q.pop();
66         inq[cur] = false;
67
68         for(auto e : G[cur]) {
69             if(base[e.s] == base[e.t]) continue;
70             if(match[e.s] == e.t) continue;
71             if(e.t == root || (~match[e.t] && ~p[match[e.t]])) {
72                 blossom(cur, e.t);
73             } else if(p[e.t] == -1) {
74                 p[e.t] = cur;
75                 if(match[e.t] == -1) {

```

```

77     cur = e.t;
78     while(cur != -1) {
79         y = p[cur];
80         nxt = match[y];
81         match[cur] = y;
82         match[y] = cur;
83         cur = nxt;
84     }
85     return true;
86 } else {
87     q.push(match[e.t]);
88     inq[match[e.t]] = true;
89 }
90 }
91 }
92 }
93 return false;
94 }
95 }
96 int maxMatch() {
97     int res = 0;
98     memset(match, -1, sizeof(match));
99     for(int i=1; i<=n; i++) {
100         if(match[i]==-1 && bfs(i)) res++;
101     }
102     return res;
103 }

```

3.19 Dancing Links

```

1 struct DLX {
2     int seq, resSize;
3     int col[maxn], row[maxn];
4     int U[maxn], D[maxn], R[maxn], L[maxn];
5     int rowHead[maxn], colSize[maxn];
6     int result[maxn];
7     DLX(int r, int c) {
8         for(int i=0; i<=c; i++) {
9             L[i] = i-1, R[i] = i+1;
10            U[i] = D[i] = i;
11        }
12        L[R[seq]=0]=c;
13        resSize = -1;
14        memset(rowHead, 0, sizeof(rowHead));
15        memset(colSize, 0, sizeof(colSize));
16    }
17    void insert(int r, int c) {
18        row[++seq]=r, col[seq]=c,
19        ++colSize[c];
20        U[seq]=c, D[seq]=D[c], U[D[c]]=seq,
21        D[c]=seq;
22        if(rowHead[r]) {
23            L[seq]=rowHead[r],
24            R[seq]=R[rowHead[r]];
25            L[R[rowHead[r]]]=seq,
26            R[rowHead[r]]=seq;
27        } else {
28            rowHead[r] = L[seq] = R[seq] =
29            seq;
30        }
31    }
32    void remove(int c) {
33        L[R[c]] = L[c], R[L[c]] = R[c];
34        for(int i=D[c]; i!=c; i=D[i]) {
35            for(int j=R[i]; j!=i; j=R[j]) {
36                U[D[j]] = U[j];
37                D[U[j]] = D[j];
38                --colSize[col[j]];
39            }
40        }
41    }
42    void recover(int c) {
43        for(int i=U[c]; i!=c; i=U[i]) {
44            for(int j=L[i]; j!=i; j=L[j]) {
45                U[D[j]] = D[U[j]] = j;
46                ++colSize[col[j]];
47            }
48        }
49    }
50 }

```

```

43     }
44     L[R[c]] = R[L[c]] = c;
45 }
46 bool dfs(int idx=0) { // 判斷其中一解版
47     if(R[0] == 0) {
48         resSize = idx;
49         return true;
50     }
51     int c = R[0];
52     for(int i=R[0]; i; i=R[i]) {
53         if(colSize[i] < colSize[c]) c = i;
54     }
55     remove(c);
56     for(int i=D[c]; i!=c; i=D[i]) {
57         result[idx] = row[i];
58         for(int j=R[i]; j!=i; j=R[j])
59             remove(col[j]);
60         if(dfs(idx+1)) return true;
61         for(int j=L[i]; j!=i; j=L[j])
62             recover(col[j]);
63     }
64     recover(c);
65     return false;
66 }
67 void dfs(int idx=0) { // 判斷最小 dfs
68     depth 版
69     if(R[0] == 0) {
70         resSize = min(resSize, idx); //
71         // 注意init值
72         return;
73     }
74     int c = R[0];
75     for(int i=R[0]; i; i=R[i]) {
76         if(colSize[i] < colSize[c]) c = i;
77     }
78     remove(c);
79     for(int i=D[c]; i!=c; i=D[i]) {
80         for(int j=R[i]; j!=i; j=R[j])
81             remove(col[j]);
82         dfs(idx+1);
83         for(int j=L[i]; j!=i; j=L[j])
84             recover(col[j]);
85     }
86     recover(c);
87 }

```

3.20 LCA 倍增法

```

1 //倍增法預處理O(nlogn), 查詢O(logn),
2 //利用lca找樹上任兩點距離
3 #define maxn 100005
4 struct Edge { int u, v, w; };
5 vector<vector<Edge>> G; // tree
6 int fa[maxn][31]; //fa[u][i] -> u的第2^i個祖先
7 long long dis[maxn][31];
8 int dep[maxn]; //深度
9 void dfs(int u, int p) { //預處理fa
10     fa[u][0] = p; //因為u的第2^0 = 1的祖先就是p
11     dep[u] = dep[p] + 1;
12     //第2^i的祖先是(第2^(i-1)個祖先)的
13     //第2^(i-1)的祖先
14     //ex: 第8個祖先是 (第4個祖先)的第4個祖先
15     for(int i = 1; i < 31; ++i) {
16         fa[u][i] = fa[fa[u][i-1]][i-1];
17         dis[u][i] = dis[fa[u][i-1]][i-1]
18         + dis[u][i-1];
19     }
20     //遍歷子節點
21     for (Edge& edge: G[u]) {
22         if (edge.v == p) continue;
23         dis[edge.v][0] = edge.w;
24         dfs(edge.v, u);
25     }
26 }
27 long long lca(int x, int y) {

```

```

27 //此函數是找lca同時計算x、y的距離 -> dis(x,
28 //lca) + dis(lca, y)
29 //讓y比x深
30 if (dep[x] > dep[y])
31     swap(x, y);
32 int deltaDep = dep[y] - dep[x];
33 long long res = 0;
34 //讓y與x在同一個深度
35 for (int i = 0; deltaDep != 0; ++i,
36     deltaDep >>= 1)
37     if (deltaDep & 1)
38         res += dis[y][i], y = fa[y][i];
39 if (y == x) //x = y -> x、y彼此是彼此的祖先
40     return res;
41 //往上找，一起跳，但x、y不能重疊
42 for (int i = 30; i >= 0 && y != x; --i) {
43     if (fa[x][i] != fa[y][i]) {
44         res += dis[x][i] + dis[y][i];
45         x = fa[x][i];
46         y = fa[y][i];
47     }
48 }
49 //最後發現不能跳了，此時x的第2^0 =
50 //1個祖先(或說y的第2^0 =
51 //1的祖先)即為x、y的lca
52 res += dis[x][0] + dis[y][0];
53 return res;
54 }
55 int main() {
56     int n, q;
57     while (~scanf("%d", &n) && n) {
58         int v, w;
59         G.assign(n + 5, vector<Edge>());
60         for (int i = 1; i <= n - 1; ++i) {
61             scanf("%d %d", &v, &w);
62             G[i + 1].push_back({i + 1, v + 1, w});
63             G[v + 1].push_back({v + 1, i + 1, w});
64         }
65         dfs(1, 0);
66         scanf("%d", &q);
67         int u;
68         while (q--) {
69             scanf("%d %d", &u, &v);
70             printf("%lld%c", lca(u + 1, v +
71                 1), (q) ? ' ' : '\n');
72         }
73     }
74 }

```

3.21 LCA 樹壓平 RMQ

```

1 //樹壓平求LCA RMQ(sparse table
  O(nlogn)建立, O(1)查詢), 求任意兩點距離,
2 //如果用笛卡兒樹可以壓到O(n)建立, O(1)查詢
3 //理論上可以過, 但遇到直鏈的case dfs深度會stack
  overflow
4 #define maxn 100005
5 struct Edge {
6     int u, v, w;
7 };
8 int dep[maxn], pos[maxn];
9 long long dis[maxn];
10 int st[maxn * 2][32]; //sparse table
11 int realLCA[maxn * 2][32];
    //最小深度對應的節點, 及真正的LCA
12 int Log[maxn]; //取代std::log2
13 int tp; // timestamp
14 vector<vector<Edge>> G; // tree
15 void calLog() {
16     Log[1] = 0;
17     Log[2] = 1;
18     for (int i = 3; i < maxn; ++i)
19         Log[i] = Log[i / 2] + 1;
20 }
21 void buildST() {
22     for (int j = 0; Log[tp]; ++j) {
23         for (int i = 0; i + (1 << j) - 1 < tp;
          ++i) {
24             if (st[i - 1][j] < st[i - 1][j + (1 <<
              j - 1)]) {
25                 st[i][j] = st[i - 1][j];
26                 realLCA[i][j] = realLCA[i - 1][j];
27             }
28             else {
29                 st[i][j] = st[i - 1][j + (1 << i -
                  1)];
30                 realLCA[i][j] = realLCA[i - 1][j + (1
                    << i - 1)];
31             }
32         }
33     }
34 } // O(nlogn)
35 int query(int l, int r) { // [l, r] min
    depth即為Lca的深度
36     int k = Log[r - l + 1];
37     if (st[l][k] < st[r - (1 << k) + 1][k])
38         return realLCA[l][k];
39     else
40         return realLCA[r - (1 << k) + 1][k];
41 }
42 void dfs(int u, int p) { //euler tour
43     pos[u] = tp;
44     st[tp][0] = dep[u];
45     realLCA[tp][0] = dep[u];
46     ++tp;
47     for (int i = 0; i < G[u].size(); ++i) {
48         Edge& edge = G[u][i];
49         if (edge.v == p) continue;
50         dep[edge.v] = dep[u] + 1;
51         dis[edge.v] = dis[edge.u] + edge.w;
52         dfs(edge.v, u);
53         st[tp++][0] = dep[u];
54     }
55 }
56 long long getDis(int u, int v) {
57     if (pos[u] > pos[v])
58         swap(u, v);
59     int lca = query(pos[u], pos[v]);
60     return dis[u] + dis[v] - 2 *
        dis[query(pos[u], pos[v])];
61 }
62 int main() {
63     int n, q;
64     calLog();
65     while (~scanf("%d", &n) && n) {
66         int v, w;
67         G.assign(n + 5, vector<Edge>());

```

```

68     tp = 0;
69     for (int i = 1; i <= n - 1; ++i) {
70         scanf("%d %d", &v, &w);
71         G[i].push_back({i, v, w});
72         G[v].push_back({v, i, w});
73     }
74     dfs(0, -1);
75     buildST();
76     scanf("%d", &q);
77     int u;
78     while (q--) {
79         scanf("%d %d", &u, &v);
80         printf("%lld", getDis(u, v),
            (q ? ' ' : '\n'));
81     }
82 }
83 return 0;
84 }

```

3.22 LCA 樹鍊剖分

```

1 #define maxn 5005
2 //LCA, 用來練習樹鍊剖分
3 //題意: 給定樹, 找任兩點的中點,
4 //若中點不存在(路徑為even), 就是中間的兩個點
5 int dfn[maxn];
6 int parent[maxn];
7 int depth[maxn];
8 int subtreeSize[maxn];
9 //樹鍊的頂點
10 int top[maxn];
11 //將dfn轉成node編碼
12 int dfnToNode[maxn];
13 //重兒子
14 int hson[maxn];
15 int dfsTime = 1;
16 //tree
17 vector<vector<int>> G;
18 //處理parent、depth、subtreeSize、dfnToNode
19 void dfs1(int u, int p) {
20     parent[u] = p;
21     hson[u] = -1;
22     subtreeSize[u] = 1;
23     for (int v: G[u]) {
24         if (v != p) {
25             depth[v] = depth[u] + 1;
26             dfs1(v, u);
27             subtreeSize[u] += subtreeSize[v];
28             if (hson[u] == -1 ||
                subtreeSize[hson[u]] <
                subtreeSize[v]) {
29                 hson[u] = v;
30             }
31         }
32     }
33 }
34 //實際剖分 <- 參數t是top的意思
35 //t初始應為root本身
36 void dfs2(int u, int t) {
37     top[u] = t;
38     dfn[u] = dfsTime;
39     dfnToNode[dfn[u]] = u;
40     ++dfsTime;
41     //葉子點 -> 沒有重兒子
42     if (hson[u] == -1)
43         return;
44     //優先對重兒子dfs, 才能保證同一重鍊dfn連續
45     dfs2(hson[u], t);
46     for (int v: G[u]) {
47         if (v != parent[u] && v != hson[u])
48             dfs2(v, v);
49     }
50 }
51 //不斷跳鍊, 當跳到同一條鍊時, 深度小的即為LCA
52 //跳鍊時優先鍊頂深度大的跳
53 int LCA(int u, int v) {
54     while (top[u] != top[v]) {

```

```

55         if (depth[top[u]] > depth[top[v]])
56             u = parent[top[u]];
57         else
58             v = parent[top[v]];
59     }
60     return (depth[u] > depth[v]) ? v : u;
61 }
62 int getK_parent(int u, int k) {
63     while (k-- && (u != -1))
64         u = parent[u];
65     return u;
66 }
67 int main() {
68     int n;
69     while (scanf("%d", &n) && n) {
70         dfsTime = 1;
71         G.assign(n + 5, vector<int>());
72         int u, v;
73         for (int i = 1; i < n; ++i) {
74             scanf("%d %d", &u, &v);
75             G[u].emplace_back(v);
76             G[v].emplace_back(u);
77         }
78         dfs1(1, -1);
79         dfs2(1, 1);
80         int q;
81         scanf("%d", &q);
82         for (int i = 0; i < q; ++i) {
83             scanf("%d %d", &u, &v);
84             //先得到LCA
85             int lca = LCA(u, v);
86             //計算路徑長(經過的邊)
87             int dis = depth[u] + depth[v] - 2
                * depth[lca];
88             //讓v比u深或等於
89             if (depth[u] > depth[v])
90                 swap(u, v);
91             if (u == v) {
92                 printf("The fleas meet at
                    %d.\n", u);
93             }
94             else if (dis % 2 == 0) {
95                 //路徑長是even -> 有中點
96                 printf("The fleas meet at
                    %d.\n", getK_parent(v,
                        dis / 2));
97             }
98             else {
99                 //路徑長是odd -> 沒有中點
100                 if (depth[u] == depth[v]) {
101                     int x = getK_parent(u, dis
                        / 2);
102                     int y = getK_parent(v, dis
                        / 2);
103                     if (x > y) swap(x, y);
104                     printf("The fleas jump
                        forever between %d
                        and %d.\n", x, y);
105                 }
106                 else {
107                     //技巧: 讓深的點v往上dis /
                        2步 = y,
108                     //這個點的parent設為x
109                     //此時的x、y就是答案要的中點兩點
110                     //主要是往下不好找, 所以改用深的點往上
111                     int y = getK_parent(v, dis
                        / 2);
112                     int x = getK_parent(y, 1);
113                     if (x > y) swap(x, y);
114                     printf("The fleas jump
                        forever between %d
                        and %d.\n", x, y);
115                 }
116             }
117         }
118     }
119     return 0;
120 }

```


4 DataStructure

4.1 帶權併查集

$val[x]$ 為 x 到 $p[x]$ 的距離 (隨題目變化更改)

$merge(u, v, w)$
 $u \xrightarrow{w} v$
 $pu = pv$ 時, $val[v] - val[u] \neq w$ 代表有誤

若 $[l, r]$ 的總和為 w , 則應呼叫 $merge(1-1, r, w)$

```
1 const int maxn = 2e5 + 10;
2
3 int p[maxn], val[maxn];
4
5 int findP(int x) {
6     if(p[x] == -1) return x;
7     int par = findP(p[x]);
8     val[x] += val[p[x]]; //依題目更新 val[x]
9     return p[x] = par;
10 }
11
12 void merge(int u, int v, int w) {
13     int pu = findP(u);
14     int pv = findP(v);
15     if(pu == pv) {
16         // 理論上 val[v]-val[u] == w
17         // 依題目判斷 error 的條件
18         return;
19     }
20     val[pv] = val[u] - val[v] + w;
21     p[pv] = pu;
22 }
```

4.2 Trie

```
1 const int maxc = 26; // 單字字符數
2 const char minc = 'a'; // 首個 ASCII
3
4 struct TrieNode {
5     int cnt;
6     TrieNode* child[maxc];
7
8     TrieNode() {
9         cnt = 0;
10        for(auto& node : child) {
11            node = nullptr;
12        }
13    };
14 };
15
16 struct Trie {
17     TrieNode* root;
18
19     Trie() { root = new TrieNode(); }
20
21     void insert(string word) {
22         TrieNode* cur = root;
23         for(auto& ch : word) {
24             int c = ch - minc;
25             if(!cur->child[c])
26                 cur->child[c] = new TrieNode();
27             cur = cur->child[c];
28         }
29         cur->cnt++;
30     }
31
32     void remove(string word) {
33         TrieNode* cur = root;
34         for(auto& ch : word) {
35             int c = ch - minc;
36             if(!cur->child[c]) return;
37             cur = cur->child[c];
38         }
39         cur->cnt--;
40     }
41
42     // 字典裡有出現 word
43     bool search(string word, bool prefix=0) {
44         TrieNode* cur = root;
45         for(auto& ch : word) {
46             int c = ch - minc;
47             if(!cur->child[c]) return false;
48             cur = cur->child[c];
49         }
50         return cur->cnt || prefix;
51     }
52
53     // 字典裡有 word 的前綴為 prefix
54     bool startsWith(string prefix) {
55         return search(prefix, true);
56     }
57 };
```

4.3 AC Trie

```
1 const int maxn = 1e4 + 10; // 單字字數
2 const int maxl = 50 + 10; // 單字字長
3 const int maxc = 128; // 單字字符數
4 const char minc = ' '; // 首個 ASCII
5
6 int trie[maxn*maxl][maxc]; // 原字典樹
7 int val[maxn*maxl]; // 結尾(單字編號)
8 int cnt[maxn*maxl]; // 結尾(重複個數)
9 int fail[maxn*maxl]; // failure link
10 bool vis[maxn*maxl]; // 同單字不重複
11
12 struct ACTrie {
13     int seq, root;
14
15     ACTrie() {
16         seq = 0;
17         root = newNode();
18     }
19
20     int newNode() {
21         for(int i=0; i<maxc; trie[seq][i++]=0);
22         val[seq] = cnt[seq] = fail[seq] = 0;
23         return seq++;
24     }
25
26     void insert(char* s, int wordId=0) {
27         int p = root;
28         for(; *s; s++) {
29             int c = *s - minc;
30             if(!trie[p][c]) trie[p][c] = newNode();
31             p = trie[p][c];
32         }
33         val[p] = wordId;
34         cnt[p]++;
35     }
36
37     void build() {
38         queue<int> q({root});
39         while(!q.empty()) {
40             int p = q.front();
41             q.pop();
42             for(int i=0; i<maxc; i++) {
43                 int& t = trie[p][i];
44                 if(t) {
45                     fail[t] = p?trie[fail[p]][i]:root;
46                     q.push(t);
47                 } else {
48                     t = trie[fail[p]][i];
49                 }
50             }
51         }
52     }
53
54     // 要存 wordId 才要 vec
55     // 同單字重複match要把所有vis取消掉
56     int match(char* s, vector<int>& vec) {
57         int res = 0;
58         memset(vis, 0, sizeof(vis));
59         for(int p=root; *s; s++) {
60             p = trie[p][*s-minc];
61             for(int k=p; k && !vis[k]; k=fail[k]) {
62                 vis[k] = true;
63                 res += cnt[k];
64                 if(cnt[k]) vec.push_back(val[k]);
65             }
66         }
67         return res; // 匹配到的單字量
68     }
69 };
70
71 ACTrie ac; // 建構, 初始化
72 ac.insert(s); // 加字典單字
73 // 加完字典後
74 ac.build(); // !!! 建 failure link !!!
75 ac.match(s); // 多模式匹配(傳入vec可以存編號)
```


4.4 線段樹 1D

```

1 #define MAXN 1000
2 int data[MAXN]; //原數據
3 int st[4 * MAXN]; //線段樹
4 int tag[4 * MAXN]; //懶標
5 inline int pull(int l, int r) {
6     // 隨題目改變sum~max~min
7     // l~r是左右樹的index
8     return st[l] + st[r];
9 }
10 void build(int l, int r, int i) {
11     // 在[l, r]區間建樹，目前根的index為i
12     if (l == r) {
13         st[i] = data[l];
14         return;
15     }
16     int mid = l + ((r - l) >> 1);
17     build(l, mid, i * 2);
18     build(mid + 1, r, i * 2 + 1);
19     st[i] = pull(i * 2, i * 2 + 1);
20 }
21 int qry(int ql, int qr, int l, int r, int i) {
22     // [ql,qr]是查詢區間，[l,r]是當前節點包含的區間
23     if (ql <= l && r <= qr)
24         return st[i];
25     int mid = l + ((r - l) >> 1);
26     if (tag[i]) {
27         //如果當前懶標有值則更新左右節點
28         st[i * 2] += tag[i] * (mid - l + 1);
29         st[i * 2 + 1] += tag[i] * (r - mid);
30         tag[i * 2] += tag[i];
31         tag[i * 2 + 1] += tag[i];
32         tag[i] = 0;
33     }
34     int sum = 0;
35     if (ql <= mid)
36         sum += query(ql, qr, l, mid, i * 2);
37     if (qr > mid)
38         sum += query(ql, qr, mid + 1, r, i * 2 + 1);
39     return sum;
40 }
41 void update(
42     int ql, int qr, int l, int r, int i, int c) {
43     // [ql,qr]是查詢區間，[l,r]是當前節點包含的區間
44     // c是變化量
45     if (ql <= l && r <= qr) {
46         st[i] += (r - l + 1) * c;
47         //求和,此需乘上區間長度
48         tag[i] += c;
49         return;
50     }
51     int mid = l + ((r - l) >> 1);
52     if (tag[i] && l != r) {
53         //如果當前懶標有值則更新左右節點
54         st[i * 2] += tag[i] * (mid - l + 1);
55         st[i * 2 + 1] += tag[i] * (r - mid);
56         tag[i * 2] += tag[i]; //下傳懶標至左節點
57         tag[i * 2 + 1] += tag[i]; //下傳懶標至右節點
58         tag[i] = 0;
59     }
60     if (ql <= mid) update(ql, qr, l, mid, i * 2, c);
61     if (qr > mid) update(ql, qr, mid + 1, r, i * 2 + 1, c);
62     st[i] = pull(i * 2, i * 2 + 1);
63 }
64 //如果是直接改值而不是加值，query與update中的tag與st
65 //改值從+=改成=

```

4.5 線段樹 2D

```

1 //純2D segment tree 區間查詢單點修改最大最小值
2 #define maxn 2005 //500 * 4 + 5
3 int maxST[maxn][maxn], minST[maxn][maxn];
4 int N;
5 void modifyY(int index, int l, int r, int
    val, int yPos, int xIndex, bool
    xIsLeaf) {
6     if (l == r) {
7         if (xIsLeaf) {
8             maxST[xIndex][index] =
                minST[xIndex][index] = val;
9             return;
10        }
11        maxST[xIndex][index] =
            max(maxST[xIndex * 2][index],
                maxST[xIndex * 2 + 1][index]);
12        minST[xIndex][index] =
            min(minST[xIndex * 2][index],
                minST[xIndex * 2 + 1][index]);
13    }
14    else {
15        int mid = (l + r) / 2;
16        if (yPos <= mid)
17            modifyY(index * 2, l, mid, val,
                yPos, xIndex, xIsLeaf);
18        else
19            modifyY(index * 2 + 1, mid + 1,
                r, val, yPos, xIndex,
                xIsLeaf);
20    }
21    maxST[xIndex][index] =
        max(maxST[xIndex][index * 2],
            maxST[xIndex][index * 2 + 1]);
22    minST[xIndex][index] =
        min(minST[xIndex][index * 2],
            minST[xIndex][index * 2 + 1]);
23 }
24 void modifyX(int index, int l, int r, int
    val, int xPos, int yPos) {
25     if (l == r) {
26         modifyY(1, 1, N, val, yPos, index,
            true);
27     }
28     else {
29         int mid = (l + r) / 2;
30         if (xPos <= mid)
31             modifyX(index * 2, l, mid, val,
                xPos, yPos);
32         else
33             modifyX(index * 2 + 1, mid + 1,
                r, val, xPos, yPos);
34         modifyY(1, 1, N, val, yPos, index,
            false);
35     }
36 }
37 void queryY(int index, int l, int r, int
    yql, int yqr, int xIndex, int& vmax,
    int& vmin) {
38     if (yql <= l && r <= yqr) {
39         vmax = max(vmax,
            maxST[xIndex][index]);
40         vmin = min(vmin,
            minST[xIndex][index]);
41     }
42     else
43     {
44         int mid = (l + r) / 2;
45         if (yql <= mid)
46             queryY(index * 2, l, mid, yql,
                yqr, xIndex, vmax, vmin);
47         if (mid < yqr)
48             queryY(index * 2 + 1, mid + 1, r,
                yql, yqr, xIndex, vmax,
                vmin);
49     }
50 }

```

```

51 }
52 void queryX(int index, int l, int r, int
    xql, int xqr, int yql, int yqr, int&
    vmax, int& vmin) {
53     if (xql <= l && r <= xqr) {
54         queryY(1, 1, N, yql, yqr, index,
            vmax, vmin);
55     }
56     else {
57         int mid = (l + r) / 2;
58         if (xql <= mid)
59             queryX(index * 2, l, mid, xql,
                xqr, yql, yqr, vmax, vmin);
60         if (mid < xqr)
61             queryX(index * 2 + 1, mid + 1, r,
                xql, xqr, yql, yqr, vmax,
                vmin);
62     }
63 }
64 int main() {
65     while (scanf("%d", &N) != EOF) {
66         int val;
67         for (int i = 1; i <= N; ++i) {
68             for (int j = 1; j <= N; ++j) {
69                 scanf("%d", &val);
70                 modifyX(1, 1, N, val, i, j);
71             }
72         }
73         int q;
74         int vmax, vmin;
75         int xql, xqr, yql, yqr;
76         char op;
77         scanf("%d", &q);
78         while (q--) {
79             getchar(); //for \n
80             scanf("%c", &op);
81             if (op == 'q') {
82                 scanf("%d %d %d %d", &xql,
                    &yql, &xqr, &yqr);
83                 vmax = -0x3f3f3f3f;
84                 vmin = 0x3f3f3f3f;
85                 queryX(1, 1, N, xql, xqr,
                    yql, yqr, vmax, vmin);
86                 printf("%d %d\n", vmax, vmin);
87             }
88             else {
89                 scanf("%d %d %d", &xql, &yql,
                    &val);
90                 modifyX(1, 1, N, val, xql,
                    yql);
91             }
92         }
93     }
94     return 0;
95 }

```

4.6 權值線段樹

4.7 單調隊列

```

1 //權值線段樹 + 離散化 解決區間第k小問題
2 #define maxn 30005
3 int nums[maxn];
4 int getArr[maxn];
5 int id[maxn];
6 int st[maxn << 2];
7 void update(int index, int l, int r, int qx){
8     if (l == r) {
9         ++st[index];
10        return;
11    }
12    int mid = (l + r) / 2;
13    if (qx <= mid)
14        update(index * 2, l, mid, qx);
15    else
16        update(index * 2 + 1, mid + 1, r, qx);
17    st[index] = st[index * 2] + st[index * 2
18        + 1];
19 }
20 //找區間第k個小的
21 int query(int index, int l, int r, int k) {
22     if (l == r) return id[l];
23     int mid = (l + r) / 2;
24     //k比左子樹小
25     if (k <= st[index * 2])
26         return query(index * 2, l, mid, k);
27     else
28         return query(index * 2 + 1, mid + 1,
29             r, k - st[index * 2]);
30 }
31 int main() {
32     int t;
33     cin >> t;
34     bool first = true;
35     while (t--) {
36         if (first) first = false;
37         else puts("");
38         memset(st, 0, sizeof(st));
39         int m, n;
40         cin >> m >> n;
41         for (int i = 1; i <= m; ++i) {
42             cin >> nums[i];
43             id[i] = nums[i];
44         }
45         for (int i = 0; i < n; ++i)
46             cin >> getArr[i];
47         //離散化
48         //防止m == 0
49         if (m) sort(id + 1, id + m + 1);
50         int stSize = unique(id + 1, id + m +
51             1) - (id + 1);
52         for (int i = 1; i <= m; ++i) {
53             nums[i] = lower_bound(id + 1, id
54                 + stSize + 1, nums[i]) - id;
55         }
56         int addCount = 0;
57         int getCount = 0;
58         int k = 1;
59         while (getCount < n) {
60             if (getArr[getCount] == addCount)
61             {
62                 printf("%d\n", query(1, 1,
63                     stSize, k));
64                 ++k;
65                 ++getCount;
66             }
67             else {
68                 update(1, 1, stSize,
69                     nums[addCount + 1]);
70                 ++addCount;
71             }
72         }
73     }
74 }

```

```

1 //單調隊列
2 "如果一個選手比你小還比你強，你就可以退役了。"
3
4 example:
5 給出一個長度為 n 的數組，
6 輸出每 k 個連續的數中的最大值和最小值。
7
8 #define maxn 1000100
9 int q[maxn], a[maxn];
10 int n, k;
11 //得到這個隊列裡的最小值，直接找到最後的就行了
12 void getmin() {
13     int head=0,tail=0;
14     for(int i=1;i<=n;i++) {
15         while(head<=tail&&a[q[tail]]>=a[i])
16             tail--;
17         q[++tail]=i;
18     }
19     for(int i=k; i<=n;i++) {
20         while(head<=tail&&a[q[tail]]>=a[i])
21             tail--;
22         q[++tail]=i;
23         while(q[head]<=i-k) head++;
24         cout<<a[q[head]]<<" ";
25     }
26     cout<<endl;
27 }
28 //和上面同理
29 void getmax() {
30     int head=0,tail=0;
31     for(int i=1;i<=n;i++) {
32         while(head<=tail&&a[q[tail]]<=a[i])tail--;
33         q[++tail]=i;
34     }
35     for(int i=k;i<=n;i++) {
36         while(head<=tail&&a[q[tail]]<=a[i])tail--;
37         q[++tail]=i;
38         while(q[head]<=i-k) head++;
39         cout<<a[q[head]]<<" ";
40     }
41     cout<<endl;
42 }
43 int main(){
44     cin>>n>>k; //每k個連續的數
45     for(int i=1;i<=n;i++) cin>>a[i];
46     getmin();
47     getmax();
48 }

```

5 Geometry

5.1 公式

1. Circle and Line

點 $P(x_0, y_0)$

到直線 $L: ax + by + c = 0$ 的距離

$$d(P, L) = \frac{|ax_0 + by_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

兩平行直線 $L_1: ax + by + c_1 = 0$

與 $L_2: ax + by + c_2 = 0$ 的距離

$$d(L_1, L_2) = \frac{|c_1 - c_2|}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

2. Triangle

設三角形頂點為 $A(x_1, y_1), B(x_2, y_2), C(x_3, y_3)$

點 A, B, C 的對邊長分別為 a, b, c

三角形面積為 Δ

重心為 (G_x, G_y) ，內心為 (I_x, I_y) ，

外心為 (O_x, O_y) 和垂心為 (H_x, H_y)

$$\Delta = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}$$

$$G_x = \frac{1}{3} (x_1 + x_2 + x_3)$$

$$G_y = \frac{1}{3} (y_1 + y_2 + y_3)$$

$$I_x = \frac{ax_1 + bx_2 + cx_3}{a + b + c}$$

$$I_y = \frac{ay_1 + by_2 + cy_3}{a + b + c}$$

$$O_x = \frac{1}{4\Delta} \begin{vmatrix} x_1^2 + y_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & x_3 & 1 \end{vmatrix}$$

$$O_y = \frac{1}{4\Delta} \begin{vmatrix} x_1 & x_1^2 + y_1^2 & 1 \\ x_2 & x_2^2 + y_2^2 & 1 \\ x_3 & x_3^2 + y_3^2 & 1 \end{vmatrix}$$

$$H_x = -\frac{1}{2\Delta} \begin{vmatrix} x_2x_3 + y_2y_3 & x_1 & 1 \\ x_1x_3 + y_1y_3 & x_2 & 1 \\ x_1x_2 + y_1y_2 & x_3 & 1 \end{vmatrix}$$

$$H_y = -\frac{1}{2\Delta} \begin{vmatrix} x_1 & x_2x_3 + y_2y_3 & 1 \\ x_2 & x_1x_3 + y_1y_3 & 1 \\ x_3 & x_1x_2 + y_1y_2 & 1 \end{vmatrix}$$

任意三角形，重心、外心、垂心共線

$$G_x = \frac{2}{3}O_x + \frac{1}{3}H_x$$

$$G_y = \frac{2}{3}O_y + \frac{1}{3}H_y$$

3. Quadrilateral

任意凸四邊形 $ABCD$ 的四邊長分別為 a, b, c, d
且已知 $\angle A + \angle C$ ，則四邊形 $ABCD$ 的面積為

$$\sqrt{(s-a)(s-b)(s-c)(s-d) - \Delta}$$

where

$$s = \frac{a + b + c + d}{2}$$

$$\Delta = abcd \cos^2 \left(\frac{A + C}{2} \right)$$

特例：若 $ABCD$ 為圓內接四邊形，則 $\Delta = 0$

若只知道其中一角，則可用餘弦定理

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(\angle C)$$

求出對角線長，再用海龍計算兩個三角形面積即可。

5.2 Template

Predefined Variables

```
1 using DBL = double;
2 using Tp = DBL; // 存點的型態
3
4 const DBL pi = acos(-1);
5 const DBL eps = 1e-9;
6 const Tp inf = 1e30;
7 const int maxn = 5e4 + 10;
```

Vector、Point

```
1 struct Vector {
2     Tp x, y;
3     Vector(Tp x=0, Tp y=0): x(x), y(y) {}
4     DBL length();
5 };
6
7 using Point = Vector;
8 using Polygon = vector<Point>;
9
10 Vector operator+(Vector a, Vector b) {
11     return Vector(a.x+b.x, a.y+b.y);
12 }
13
14 Vector operator-(Vector a, Vector b) {
15     return Vector(a.x-b.x, a.y-b.y);
16 }
17
18 Vector operator*(Vector a, DBL b) {
19     return Vector(a.x*b, a.y*b);
20 }
21
22 Vector operator/(Vector a, DBL b) {
23     return Vector(a.x/b, a.y/b);
24 }
25
26 Tp dot(Vector a, Vector b) {
27     return a.x*b.x + a.y*b.y;
28 }
29
30 Tp cross(Vector a, Vector b) {
31     return a.x*b.y - a.y*b.x;
32 }
33
34 DBL Vector::length() {
35     return sqrt(dot(*this, *this));
36 }
37
38 Vector unit_normal_vector(Vector v) {
39     DBL len = v.length();
40     return Vector(-v.y/len, v.x/len);
41 }
```

Line

```
1 struct Line {
2     Point p;
3     Vector v;
4     DBL ang;
5     Line(Point _p={}, Vector _v={}) {
6         p = _p;
7         v = _v;
8         ang = atan2(v.y, v.x);
9     }
10     bool operator<(const Line& l) const {
11         return ang < l.ang;
12     }
13 };
```

Segment

```
1 struct Segment {
2     Point s, e;
3     Vector v;
4     Segment(): s(0, 0), e(0, 0), v(0, 0) {}
5     Segment(Point s, Point e): s(s), e(e) {
6         v = e - s;
7     }
8     DBL length() { return v.length(); }
9 };
```

Circle

```
1 struct Circle {
2     Point o;
3     DBL r;
4     Circle(): o(0, 0), r(0) {}
5     Circle(Point o, DBL r=0): o(o), r(r) {}
6     Circle(Point a, Point b) { // ab 直徑
7         o = (a + b) / 2;
8         r = dis(o, a);
9     }
10    Circle(Point a, Point b, Point c) {
11        Vector u = b-a, v = c-a;
12        DBL c1=dot(u, a+b)/2, c2=dot(v, a+c)/2;
13        DBL dx=c1*v.y-c2*u.y, dy=u.x*c2-v.x*c1;
14        o = Point(dx, dy) / cross(u, v);
15        r = dis(o, a);
16    }
17    bool cover(Point p) {
18        return dis(o, p) <= r;
19    }
20 };
```

5.3 旋轉卡尺

```
1 // 回傳凸包內最遠兩點的距離^2
2 int longest_distance(Polygon& p) {
3     auto test = [&](Line l, Point a, Point b) {
4         return cross(l.v, a-l.p) <= cross(l.v, b-l.p);
5     };
6     if(p.size() <= 2) {
7         return cross(p[0]-p[1], p[0]-p[1]);
8     }
9     int mx = 0, n = p.size();
10    for(int i=0, j=1; i<n; i++) {
11        Line l(p[i], p[(i+1)%n] - p[i]);
12        for(; test(l, p[j], p[(j+1)%n]); j=(j+1)%n);
13        mx = max(mx,
14            dot(p[(i+1)%n]-p[j], p[(i+1)%n]-p[j]),
15            dot(p[i]-p[j], p[i]-p[j]));
16    }
17    return mx;
18 }
19
20 }
```

5.4 半平面相交

Template

```
1 using DBL = double;
2 using Tp = DBL; // 存點的型態
3 const int maxn = 5e4 + 10;
4 const DBL eps = 1e-9;
5 struct Vector;
6 using Point = Vector;
7 using Polygon = vector<Point>;
8 Vector operator+(Vector, Vector);
9 Vector operator-(Vector, Vector);
10 Vector operator*(Vector, DBL);
11 Tp cross(Vector, Vector);
12 struct Line;
13 Point intersection(Line, Line);
14 int dcmp(DBL, DBL); // 不見得會用到
```

Halfplane Intersection

```
1 // Return: 能形成半平面交的凸包邊界點
2 Polygon halfplaneIntersect(vector<Line>&nar){
3     sort(nar.begin(), nar.end());
4     // p 是否在 l 的左半平面
5     auto lft = [&](Point p, Line l) {
6         return dcmp(cross(l.v, p-l.p)) > 0;
7     };
8
9     int ql = 0, qr = 0;
10    Line L[maxn] = {nar[0]};
11    Point P[maxn];
12
13    for(int i=1; i<nar.size(); i++) {
14        for(; ql<qr&&!lft(P[qr-1], nar[i]); qr--);
15        for(; ql<qr&&!lft(P[ql], nar[i]); ql++);
16        L[++qr] = nar[i];
17        if(dcmp(cross(L[qr].v, L[qr-1].v))==0) {
18            if(lft(nar[i].p, L[qr-1].v)) L[qr]=nar[i];
19        }
20        if(ql < qr)
21            P[qr-1] = intersection(L[qr-1], L[qr]);
22    }
23    for(; ql<qr && !lft(P[qr-1], L[ql]); qr--);
24    if(qr-ql <= 1) return {};
25    P[qr] = intersection(L[qr], L[ql]);
26    return Polygon(P+ql, P+qr+1);
27 }
```

5.5 Polygon

```
1 // 判斷點 (point) 是否在凸包 (p) 內
2 bool pointInConvex(Polygon& p, Point point) {
3     // 根據 Tp 型態來寫，沒浮點數不用 dblcmp
4     auto dblcmp = [](DBL v){return (v>0)-(v<0)};
5     // 不包含線上，改 '>=' 為 '>'
6     auto test = [&](Point& p0, Point& p1) {
7         return dblcmp(cross(p1-p0, point-p0))>=0;
8     };
9     p.push_back(p[0]);
10    for(int i=1; i<p.size(); i++) {
11        if(!test(p[i-1], p[i])) {
12            p.pop_back();
13            return false;
14        }
15    }
16    p.pop_back();
17    return true;
18 }
19
20 // 計算簡單多邊形的面積
21 // ! p 為排序過的點 !
22 DBL polygonArea(Polygon& p) {
23     DBL sum = 0;
24     for(int i=0, n=p.size(); i<n; i++)
25         sum += cross(p[i], p[(i+1)%n]);
26     return abs(sum) / 2.0;
27 }
```

5.6 凸包

• Tp 為 Point 裡 x 和 y 的型態

• struct Point 需要加入並另外計算的 variables:

1. ang, 該點與基準點的 atan2 值
2. d2, 該點與基準點的 (距離)²

• 注意計算 d2 的型態範圍限制

Template

```
1 using DBL = double;
2 using Tp = long long; // 存點的型態
3 const DBL eps = 1e-9;
4 const Tp inf = 1e9; // 座標極大值
5 struct Vector;
6 using Point = Vector;
7 using Polygon = vector<Point>;
8 Vector operator-(Vector, Vector);
9 Tp cross(Vector, Vector);
10 int dcmp(DBL, DBL);
```

Convex Hull

```
1 Polygon convex_hull(Point* p, int n) {
2     auto rmv = [](Point a, Point b, Point c) {
3         return cross(b-a, c-b) <= 0; // 非浮點數
4         return dcmp(cross(b-a, c-b)) <= 0;
5     };
6
7     // 選最下裡最左的當基準點，可在輸入時計算
8     Tp lx = inf, ly = inf;
9     for(int i=0; i<n; i++) {
10         if(p[i].y<ly || (p[i].y==ly&&p[i].x<lx)){
11             lx = p[i].x, ly = p[i].y;
12         }
13     }
14
15     for(int i=0; i<n; i++) {
16         p[i].ang=atan2(p[i].y-ly, p[i].x-lx);
17         p[i].d2 = (p[i].x-lx)*(p[i].x-lx) +
18                 (p[i].y-ly)*(p[i].y-ly);
19     }
20     sort(p, p+n, [&](Point& a, Point& b) {
21         if(dcmp(a.ang, b.ang))
22             return a.ang < b.ang;
23         return a.d2 < b.d2;
24     });
25
26     int m = 1; // stack size
27     Point st[n] = {p[n] = p[0]};
28     for(int i=1; i<n; i++) {
29         for(; m>1&&rmv(st[m-2], st[m-1], p[i]); m--);
30         st[m++] = p[i];
31     }
32     return Polygon(st, st+m-1);
33 }
```

5.7 最小圓覆蓋

```
1 vector<Point> p(3); // 在圖上的點
2 Circle MEC(vector<Point>& v, int n, int d=0){
3     Circle mec;
4     if(d == 1) mec = Circle(p[0]);
5     if(d == 2) mec = Circle(p[0], p[1]);
6     if(d == 3) return Circle(p[0], p[1], p[2]);
7     for(int i=0; i<n; i++) {
8         if(mec.cover(v[i])) continue;
9         p[d] = v[i];
10        mec = MEC(v, i, d+1);
11    }
12    return mec;
13 }
```

5.8 交點、距離

```
1 int dcmp(DBL a, DBL b=0.0) {
2     if(abs(a-b) < eps) return 0;
3     return a<b ? -1 : 1;
4 }
5 bool hasIntersection(Point p, Segment s) {
6     if(dcmp(cross(s.s-p, s.e-p))) return false;
7     return dcmp(dot(s.s-p, s.e-p)) <= 0;
8 }
9 bool hasIntersection(Point p, Line l) {
10    return dcmp(cross(p-l.p, l.v)) == 0;
11 }
12 bool hasIntersection(Segment a, Segment b) {
13     // 判斷在 X 軸 Y 軸的投影是否相交
14     auto intr1D = [](DBL w, DBL x, DBL y, DBL z){
15         if(w > x) swap(w, x);
16         if(y > z) swap(y, z);
17         return dcmp(max(w, y), min(x, z)) <= 0;
18     };
19
20     DBL a1 = cross(a.v, b.s-a.s);
21     DBL a2 = cross(a.v, b.e-a.s);
22     DBL b1 = cross(b.v, a.s-b.s);
23     DBL b2 = cross(b.v, a.e-b.s);
24
25     return intr1D(a.s.x, a.e.x, b.s.x, b.e.x)
26         && intr1D(a.s.y, a.e.y, b.s.y, b.e.y)
27         && dcmp(a1) * dcmp(a2) <= 0
28         && dcmp(b1) * dcmp(b2) <= 0;
29 }
30 Point intersection(Segment a, Segment b) {
31     Vector v = b.s - a.s;
32     DBL c1 = cross(a.v, b.v);
33     DBL c2 = cross(v, b.v);
34     DBL c3 = cross(v, a.v);
35
36     if(dcmp(c1) < 0) c1=-c1, c2=-c2, c3=-c3;
37     if(dcmp(c1) && dcmp(c2)>=0 && dcmp(c3)>=0
38         && dcmp(c1, c2)>=0 && dcmp(c1, c3)>=0)
39         return a.s + (a.v * (c2 / c1));
40     return Point(inf, inf); // a 和 b 共線
41 }
42 Point intersection(Line a, Line b) {
43     // cross(a.v, b.v) == 0 時平行
44     Vector u = a.p - b.p;
45     DBL t = 1.0*cross(b.v, u)/cross(a.v, b.v);
46     return a.p + a.v*t;
47 }
48 DBL dis(Point a, Point b) {
49     return sqrt(dot(a-b, a-b));
50 }
51 DBL dis(Point p, Line l) {
52     return abs(cross(p-l.p, l.v))/l.v.length();
53 }
54 DBL dis(Point p, Segment s) {
55     Vector u = p - s.s, v = p - s.e;
56     if(dcmp(dot(s.v, u))<=0) return u.length();
57     if(dcmp(dot(s.v, v))>=0) return v.length();
58     return abs(cross(s.v, u)) / s.length();
59 }
60 DBL dis(Segment a, Segment b) {
61     if(hasIntersection(a, b)) return 0;
62     return min({
63         dis(a.s, b), dis(a.e, b),
64         dis(b.s, a), dis(b.e, a)
65     });
66 }
67 DBL dis(Line a, Line b) {
68     if(dcmp(cross(a.v, b.v)) == 0) return 0;
69     return dis(a.p, b);
70 }
71 Point getPedal(Line l, Point p) {
72     // 返回 p 在 l 上的垂足 (投影點)
73     DBL len = dot(p-l.p, l.v) / dot(l.v, l.v);
74     return l.p + l.v * len;
75 }
```

6 DP

6.1 背包

0-1 背包

複雜度： $O(NW)$

已知：第 i 個物品重量為 w_i ，價值 v_i ；背包總容量 W

意義：dp[前 i 個物品][重量] = 最高價值

maxn: 物品數量

maxw: 背包最大容量

```
1 int W;
2 int w[maxn], v[maxn];
3 int dp[maxw];
4
5 memset(dp, 0, sizeof(dp));
6 for(int i=1; i<=n; i++) {
7     for(int j=W; j>=w[i]; j--) {
8         dp[j] = max(dp[j], dp[j-w[i]]+v[i]);
9     }
10 }
```

價值為主的 0-1 背包

複雜度： $O(NV)$

已知：第 i 個物品重量為 w_i ，價值 v_i ；物品最大總價值 V

意義：dp[前 i 個物品][價值] = 最小重量

maxn: 物品數量

maxv: 物品最大總價值

$V = \sum v_i$

```
1 int w[maxn], v[maxn];
2 int dp[maxv];
3
4 memset(dp, 0x3f, sizeof(dp));
5 dp[0] = 0;
6 for(int i=0; i<n; i++) {
7     for(int j=V; j>=v[i]; j--) {
8         dp[j] = min(dp[j], dp[j-v[i]]+w[i]);
9     }
10 }
11
12 int res = 0;
13 for(int val=V; val>=0; val--) {
14     if(dp[val] <= w) {
15         res = val;
16         break;
17     }
18 }
```

完全背包（無限背包）

複雜度： $O(NW)$

已知：第 i 個物品重量為 w_i ，價值 v_i ；背包總容量 W

意義：dp[前 i 個物品][重量] = 最高價值

maxn: 物品數量

maxw: 背包最大容量

```
1 int W;
2 int w[maxn], v[maxn];
3 int dp[maxw];
4
5 memset(dp, 0, sizeof(dp));
6 for(int i=1; i<=n; i++) {
7     for(int j=w[i]; j<=W; j++) {
8         dp[j] = max(dp[j], dp[j-w[i]]+v[i]);
9     }
10 }
```

多重背包

複雜度： $O(W \sum cnt_i)$

已知：第 i 個物品重量為 w_i ，價值 v_i ，有 cnt_i 個；
背包總容量 W

意義：dp[前 i 個物品][重量] = 最高價值

maxn: 物品數量

maxw: 背包最大容量

```
1 int W;
2 int w[maxn], v[maxn], cnt[maxn];
3 int dp[maxw];
4
5 memset(dp, 0, sizeof(dp));
6 for(int i=1; i<=n; i++)
7     for(int j=W; j>=w[i]; j--)
8         for(int k=1; k*w[i]<=j&&k<=cnt[i]; k++)
9             dp[j] = max(dp[j], dp[j-k*w[i]]+k*v[i]);
```

混合背包（0-1/完全/多重）

複雜度： $O(W \sum cnt_i)$

已知：第 i 個物品重量為 w_i ，價值 v_i ，有 cnt_i 個；
背包總容量 W

意義：dp[前 i 個物品][重量] = 最高價值

maxn: 物品數量

maxw: 背包最大容量

$cnt_i = 0$ 代表無限

```
1 int W;
2 int w[maxn], v[maxn], cnt[maxn];
3 int dp[maxw];
4
5 memset(dp, 0, sizeof(dp));
6 for(int i=1; i<=n; i++) {
7     if(cnt[i]) {
8         for(int j=W; j>=w[i]; j--) {
9             for(int k=1; k*w[i]<=j&&k<=cnt[i]; k++) {
10                 dp[j] = max(dp[j], dp[j-k*w[i]]+k*v[i]);
11             }
12         }
13     } else {
14         for(int j=w[i]; j<=W; j++) {
15             dp[j] = max(dp[j], dp[j-w[i]] + v[i]);
16         }
17     }
18 }
```

二維費用背包

複雜度： $O(NCT)$

已知：第 k 個任務需要花費 c_k 元，耗時 t_k 分鐘；
總經費 C ，總耗時 T

意義：dp[前 k 個任務][花費][耗時] = 最多任務數

maxc: 最大花費

maxt: 最大耗時

```
1 int C, T;
2 int c[maxn], t[maxn];
3 int dp[maxc][maxt];
4
5 memset(dp, 0, sizeof(dp));
6 for(int k=1; k<=n; k++)
7     for(int i=C; i>=c[k]; i--)
8         for(int j=T; j>=t[k]; j--)
9             dp[i][j] = max(
10                 dp[i][j], dp[i-c[k]][j-t[k]] + 1);
```

分組背包

複雜度： $O(W \sum M)$

已知：第 i 組第 j 個物品重量為 w_{ij} ，價值 v_{ij} ；
背包總容量 W ；每組只能取一個

意義：dp[前 i 組物品][重量] = 最高價值

maxn: 物品組數

maxm: 每組物品數

maxw: 背包最大容量

```
1 int W;
2 int dp[maxw];
3 vector<vector<int>> w, v;
4
5 memset(dp, 0, sizeof(dp));
6 for(int i=0; i<n; i++)
7     for(int j=W; j>=0; j--)
8         for(int k=0; k<w[i].size(); k++)
9             if(j >= w[i][k])
10                 dp[j] = max(
11                     dp[j], dp[j-w[i][k]] + v[i][k]);
```

依賴背包

已知：第 j 個物品在第 i 個物品沒選的情況下不能選

做法：樹 DP，有爸爸才有小孩。轉化為分組背包。

意義：dp[選物品 i 為根][重量] = 最高價值

過程：對所有 $u \rightarrow v$ ，dfs 計算完 v 後更新 u

背包變化

1. 求最大價值的方法總數 cnt

```
1 for(int i=1; i<=n; i++) {
2     for(int j=W; j>=w[i]; j--) {
3         if(dp[j] < dp[j-w[i]]+v[i]) {
4             dp[j] = dp[j-w[i]] + v[i];
5             cnt[j] = cnt[j-w[i]];
6         } else if(dp[j] == dp[j-w[i]]+v[i]) {
7             cnt[j] += cnt[j-w[i]];
8         }
9     }
10 }
```

2. 求最大價值的一組方案 pick

```
1 memset(pick, 0, sizeof(pick));
2 for(int i=1; i<=n; i++) {
3     for(int j=W; j>=w[i]; j--) {
4         if(dp[i][j] < dp[i-1][j-w[i]]+v[i]) {
5             dp[i][j] = dp[i-1][j-w[i]] + v[i];
6             pick[i] = 1;
7         } else {
8             pick[i] = 0;
9         }
10     }
11 }
```

3. 求最大價值的字典序最小的一組方案 pick

```
1 // reverse(item), 要把物品順序倒過來
2 memset(pick, 0, sizeof(pick));
3 for(int i=1; i<=n; i++) {
4     for(int j=W; j>=w[i]; j--) {
5         if(dp[i][j] <= dp[i-1][j-w[i]]+v[i]) {
6             dp[i][j] = dp[i-1][j-w[i]] + v[i];
7             pick[i] = 1;
8         } else {
9             pick[i] = 0;
10         }
11     }
12 }
```

6.2 Deque 最大差距

```

1 /*定義dp[l][r]是l ~ r時與先手最大差異值
2 轉移式: dp[l][r] = max{a[l] - solve(l + 1,
   r), a[r] - solve(l, r - 1)}
3 裡面用減的主要是因為求的是相減且會一直換手,
4 所以正負正負...*/
5 #define maxn 3005
6 bool vis[maxn][maxn];
7 long long dp[maxn][maxn];
8 long long a[maxn];
9 long long solve(int l, int r) {
10     if (l > r) return 0;
11     if (vis[l][r]) return dp[l][r];
12     vis[l][r] = true;
13     long long res = a[l] - solve(l + 1, r);
14     res = max(res, a[r] - solve(l, r - 1));
15     return dp[l][r] = res;
16 }
17 int main() {
18     ...
19     printf("%lld\n", solve(1, n));
20 }

```

6.3 string DP

Edit distance S_1 最少需要經過幾次增、刪或換字變成 S_2

$$dp[i, j] = \begin{cases} i + 1, & \text{if } j = -1 \\ j + 1, & \text{if } i = -1 \\ dp[i - 1, j - 1], & \text{if } S_1[i] = S_2[j] \\ \min \begin{cases} dp[i, j - 1] \\ dp[i - 1, j] \end{cases} + 1, & \text{if } S_1[i] \neq S_2[j] \end{cases}$$

Longest Palindromic Subsequence

$$dp[l, r] = \begin{cases} 1 & \text{if } l = r \\ dp[l + 1, r - 1] & \text{if } S[l] = S[r] \\ \max\{dp[l + 1, r], dp[l, r - 1]\} & \text{if } S[l] \neq S[r] \end{cases}$$

6.4 LCS 和 LIS

```

1 //LCS 和 LIS 題目轉換
2 LIS 轉成 LCS
3 1. A 為原序列, B=sort(A)
4 2. 對 A,B 做 LCS
5 LCS 轉成 LIS
6 1. A, B 為原本的兩序列
7 2. 最 A 序列作編號轉換, 將轉換規則套用在 B
8 3. 對 B 做 LIS
9 4. 重複的數字在編號轉換時後要變成不同的數字,
10  越早出現的數字要越小
11 5. 如果有數字在 B 裡面而不在 A 裡面,
12  直接忽略這個數字不做轉換即可

```

6.5 樹 DP 有幾個 path 長度為 k

```

1 #define maxn 50005
2 #define maxk 505
3 //dp[u][u的child且距離u長度k的數量]
4 long long dp[maxn][maxk];
5 vector<vector<int>> G;
6 int n, k;
7 long long res = 0;
8 void dfs(int u, int p) {
9     //u自己
10    dp[u][0] = 1;
11    for (int v: G[u]) {
12        if (v == p)
13            continue;
14        dfs(v, u);
15        for (int i = 1; i <= k; ++i) {
16            //子樹v距離i - 1的等於對於u來說距離i的
17            dp[u][i] += dp[v][i - 1];
18        }
19    }
20    //統計在u子樹中距離u為k的數量
21    res += dp[u][k];
22    long long cnt = 0;
23    for (int v: G[u]) {
24        if (v == p)
25            continue; //重點算法
26        for (int x = 0; x <= k - 2; ++x) {
27            cnt +=
28                dp[v][x] * (dp[u][k - x - 1] - dp[v][k - x - 2]);
29        }
30    }
31    res += cnt / 2;
32 }
33 int main() {
34     ...
35    dfs(1, -1);
36    printf("%lld\n", res);
37    return 0;
38 }

```

6.6 Weighted LIS

```

1 #define maxn 200005
2 long long dp[maxn];
3 long long height[maxn];
4 long long B[maxn];
5 long long st[maxn << 2];
6 void update(int p, int index, int l, int r,
   long long v) {
7     if (l == r) {
8         st[index] = v;
9         return;
10    }
11    int mid = (l + r) >> 1;
12    if (p <= mid)
13        update(p, (index << 1), l, mid, v);
14    else
15        update(p, (index << 1) + 1, mid + 1, r, v);
16    st[index] =
17        max(st[index << 1], st[(index << 1) + 1]);
18 }
19 long long query(int index, int l, int r, int
   ql, int qr) {
20     if (ql <= l && r <= qr)
21         return st[index];
22     int mid = (l + r) >> 1;
23     long long res = -1;
24     if (ql <= mid)
25         res =
26             max(res, query(index << 1, l, mid, ql, qr));
27     if (mid < qr)
28         res =
29             max(res, query((index << 1) + 1, mid + 1, r, ql, qr));
30     return res;
31 }

```



```
32 int main() {
33     int n;
34     scanf("%d", &n);
35     for (int i = 1; i <= n; ++i)
36         scanf("%lld", &height[i]);
37     for (int i = 1; i <= n; ++i)
38         scanf("%lld", &B[i]);
39     long long res = B[1];
40     update(height[1], 1, 1, n, B[1]);
41     for (int i = 2; i <= n; ++i) {
42         long long temp;
43         if (height[i] - 1 >= 1)
44             temp =
45                 B[i]+query(1,1,n,1,height[i]-1);
46         else
47             temp = B[i];
48         update(height[i], 1, 1, n, temp);
49         res = max(res, temp);
50     }
51     printf("%lld\n", res);
52     return 0;
53 }
```