



南京大學
NANJING UNIVERSITY

人工智能导论

无信息搜索

郭兰哲

南京大学 智能科学与技术学院

<https://www.lamda.nju.edu.cn/guolz/IntroAI/fall2025/index.html>

Email: guolz@nju.edu.cn

提纲

□ 搜索问题

□ 无信息搜索

- 宽度优先搜索
- 深度优先搜索
- 迭代加深的深度优先搜索
- 一致性代价搜索

提纲

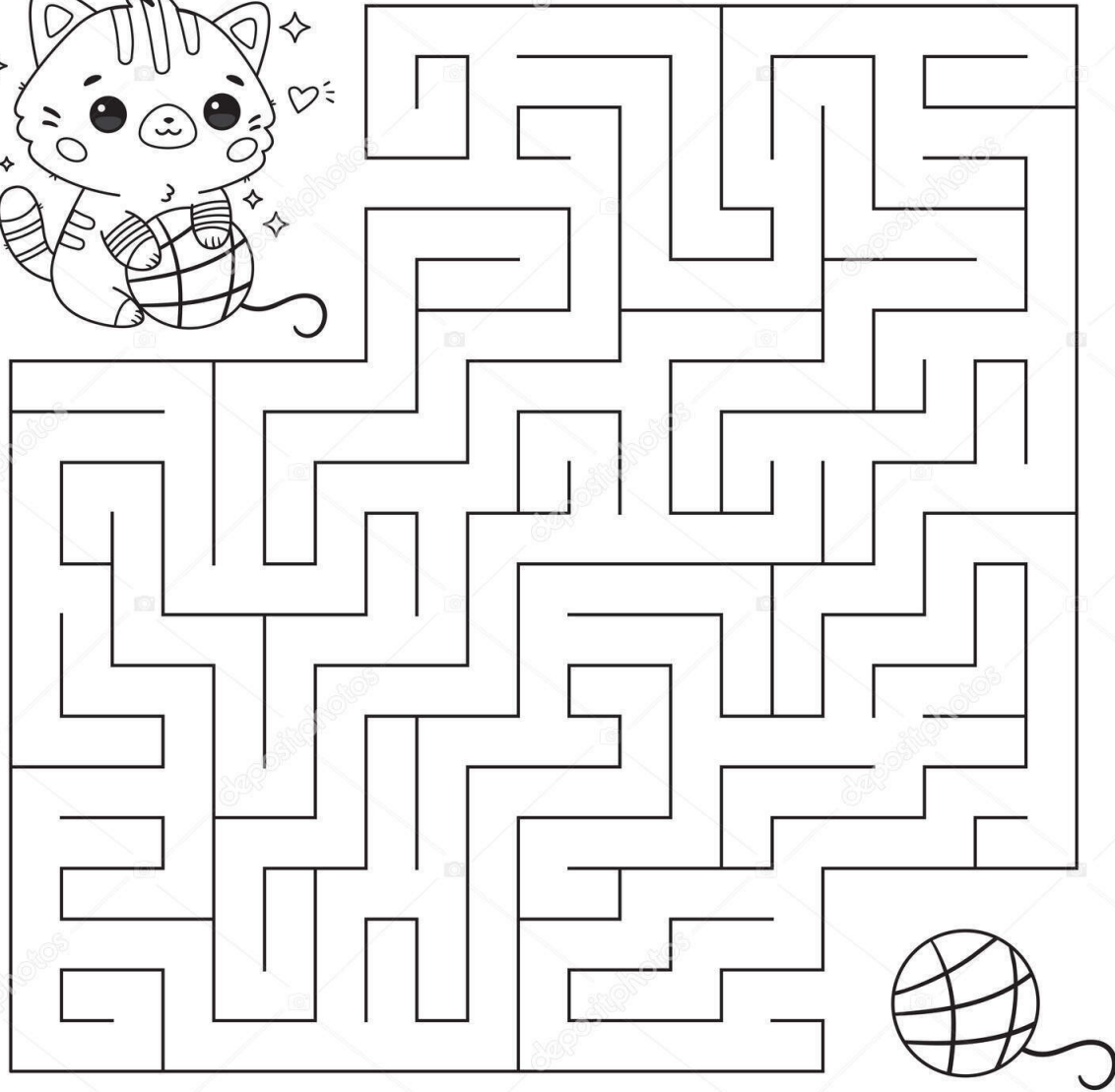
□ 搜索问题

□ 无信息搜索

- 宽度优先搜索
- 深度优先搜索
- 迭代加深的深度优先搜索
- 代价一致性搜索

搜索问题

□ 走迷宫



搜索问题

□ 八数码

7	2	4
5		6
8	3	1

初始状态

1	2	3
4	5	6
7	8	

目标状态

搜索问题

□ 华容道



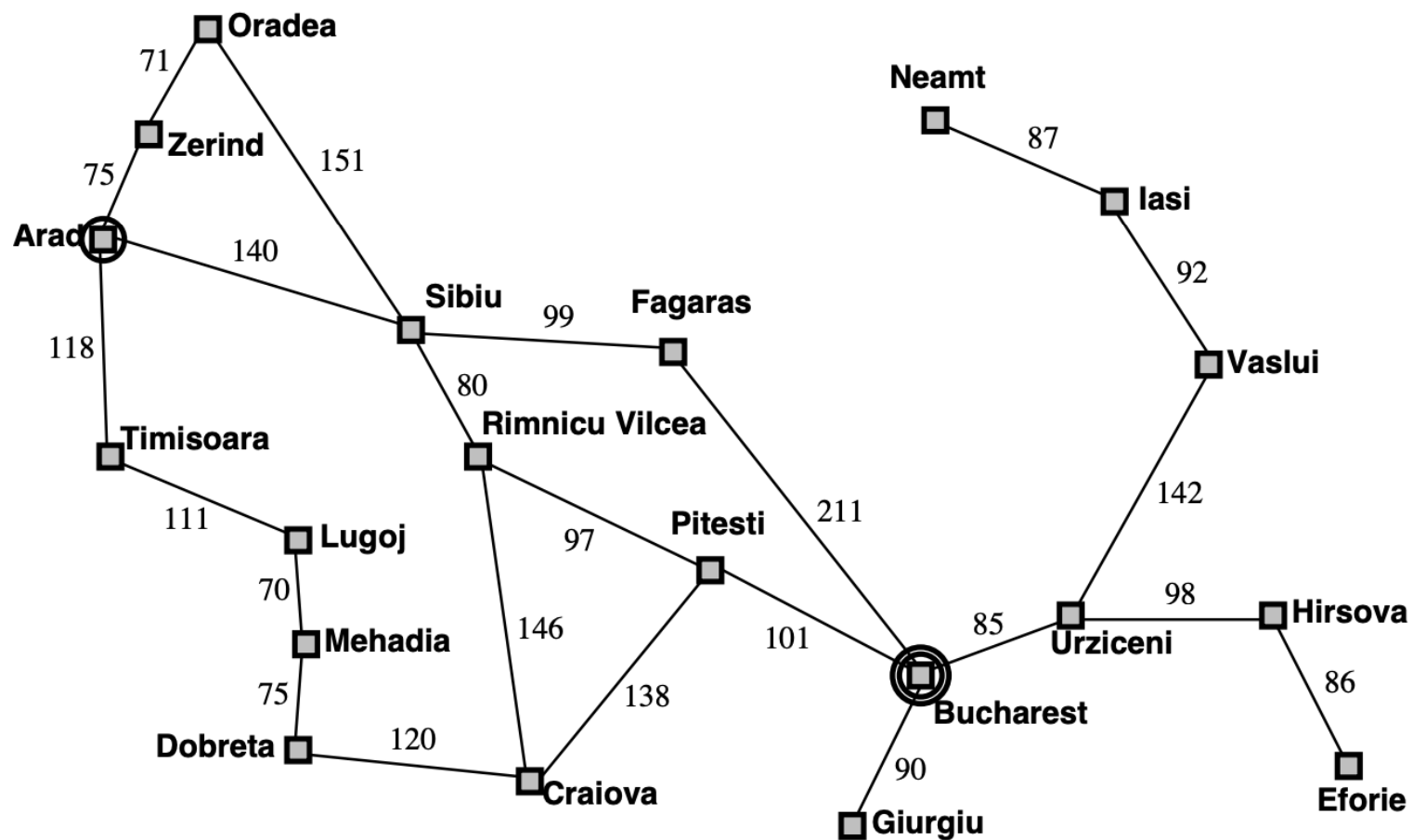
搜索问题

□ 吃豆人



搜索问题

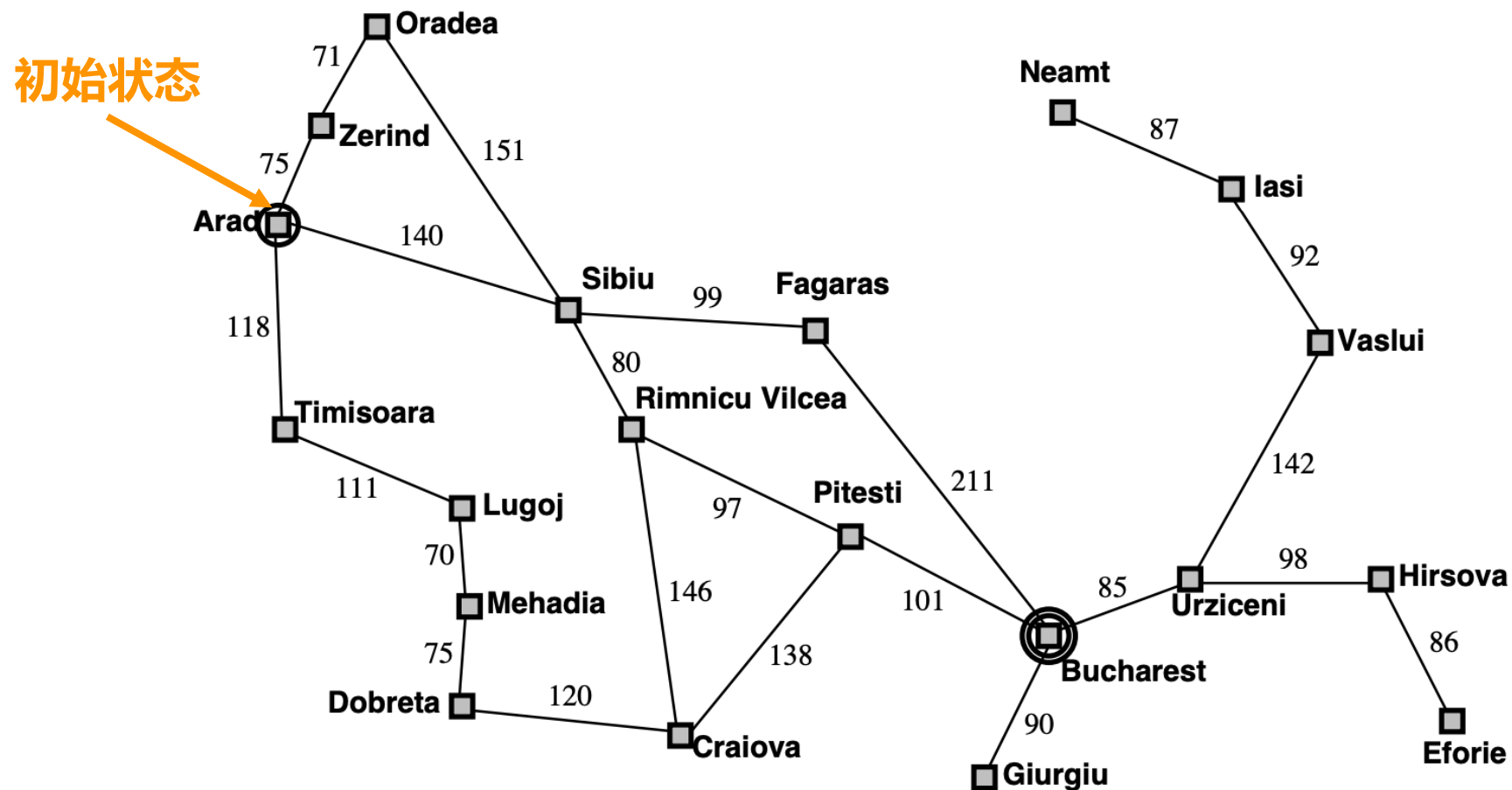
□ 路径规划



搜索问题

一个搜索问题可以用5个组成部分形式化描述

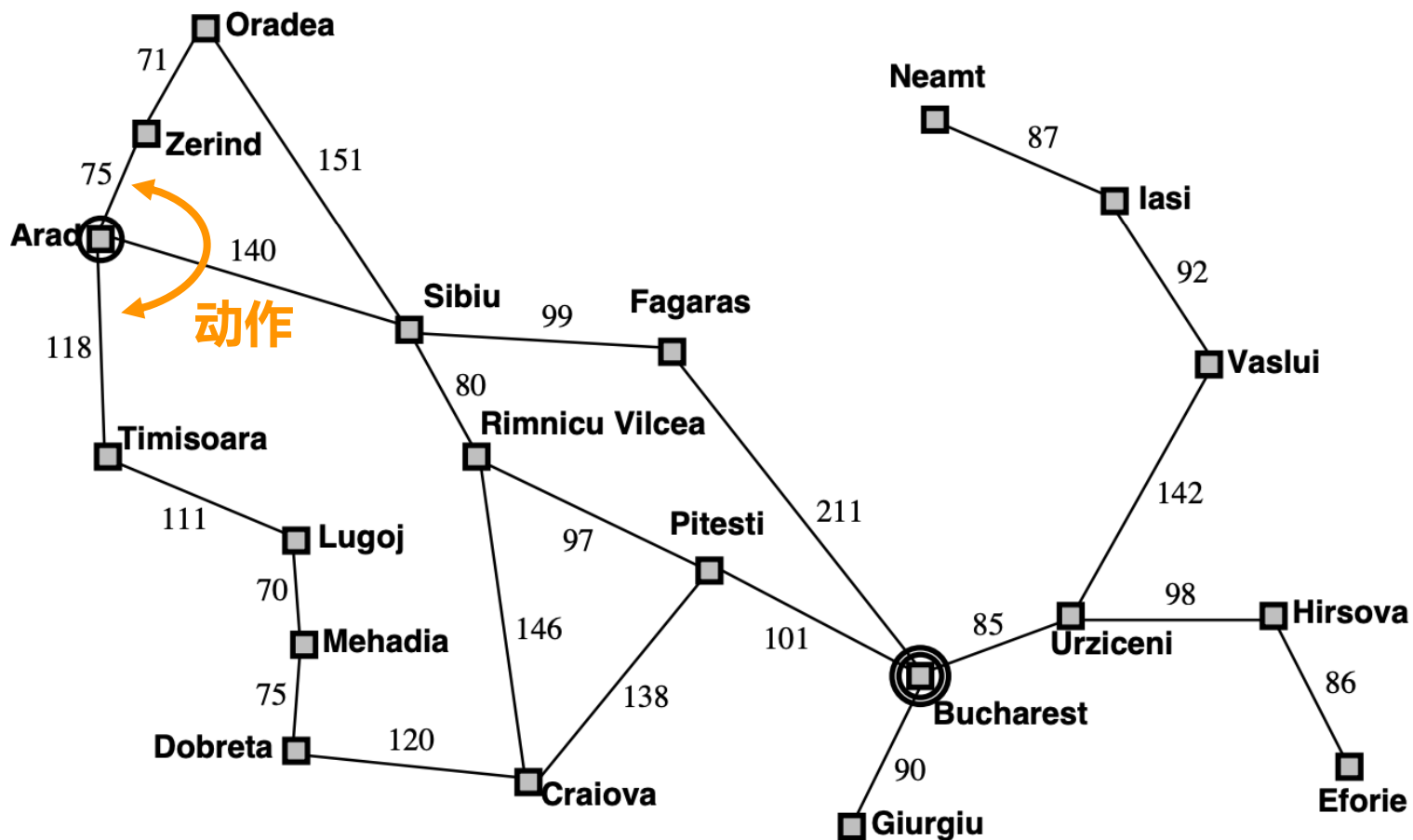
- 状态空间
- 初始状态
- 动作
- 状态转移
- 目标测试
- 路径/代价



搜索问题

一个搜索问题可以用5个组成部分形式化描述

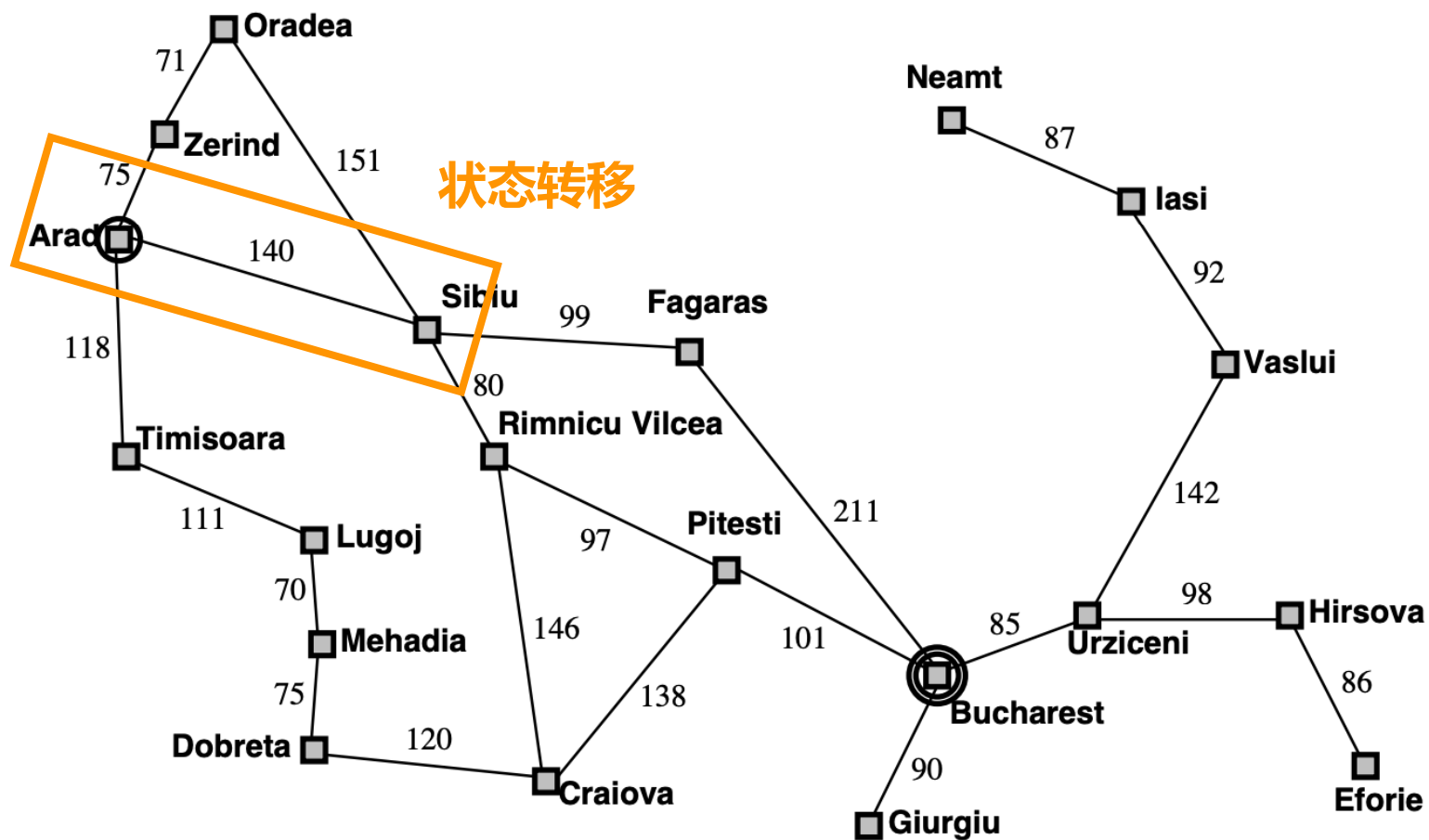
- 状态空间
- 初始状态
- 动作
- 状态转移
- 目标测试
- 路径/代价



搜索问题

一个搜索问题可以用5个组成部分形式化描述

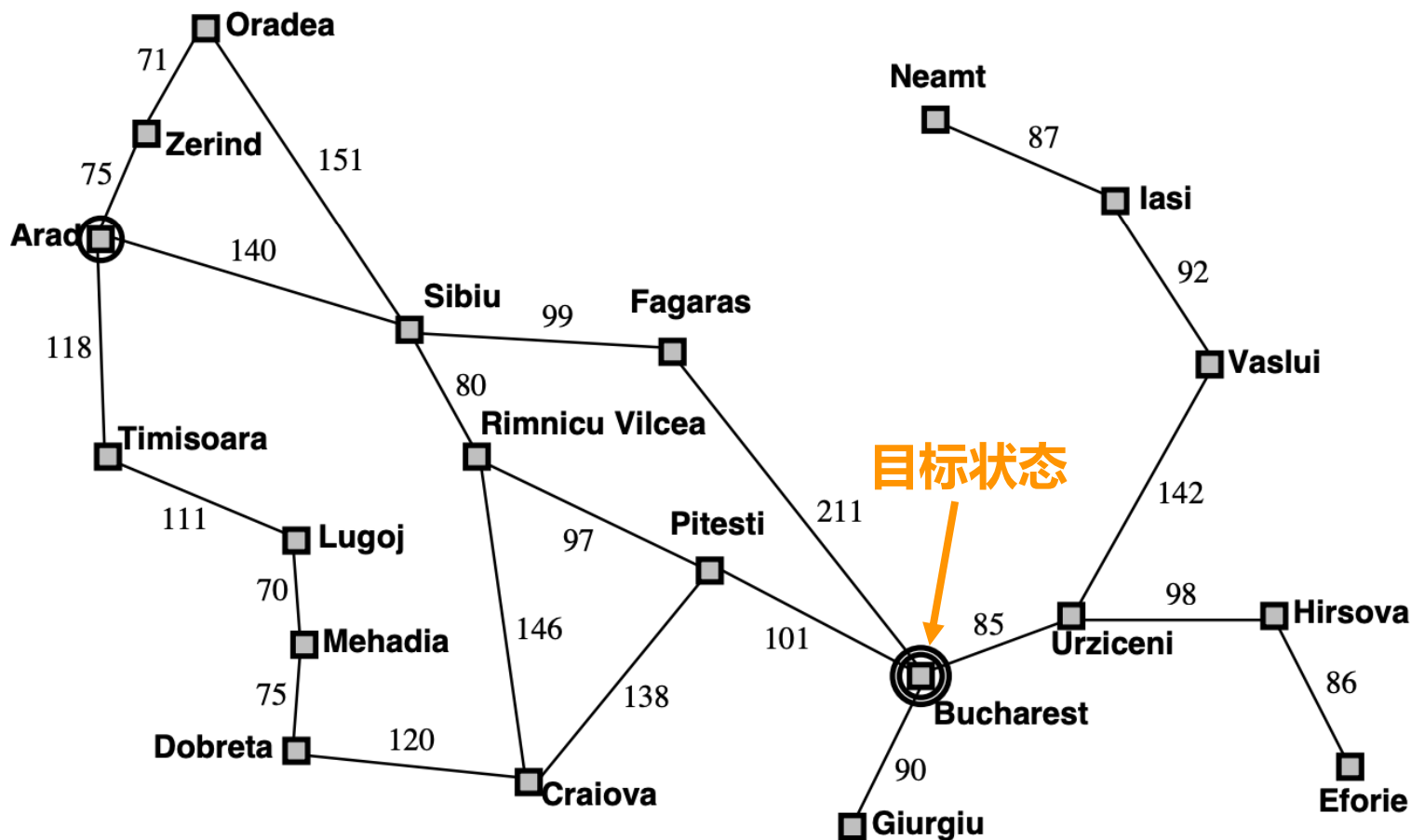
- 状态空间
- 初始状态
- 动作
- 状态转移
- 目标测试
- 路径/代价



搜索问题

一个搜索问题可以用5个组成部分形式化描述

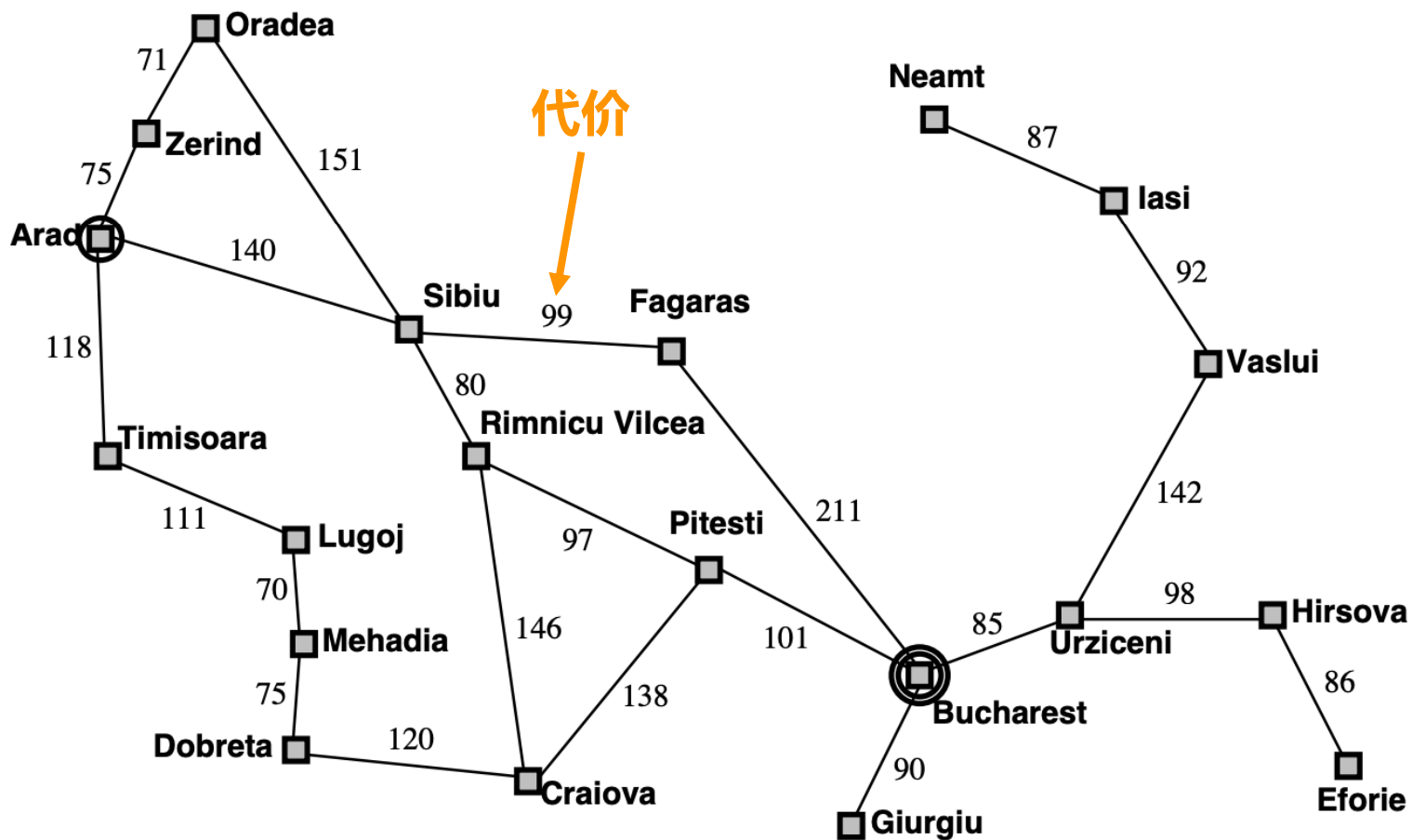
- 状态空间
- 初始状态
- 动作
- 状态转移
- 目标测试
- 路径/代价



搜索问题

一个搜索问题可以用5个组成部分形式化描述

- 状态空间
- 初始状态
- 动作
- 状态转移
- 目标测试
- 路径/代价



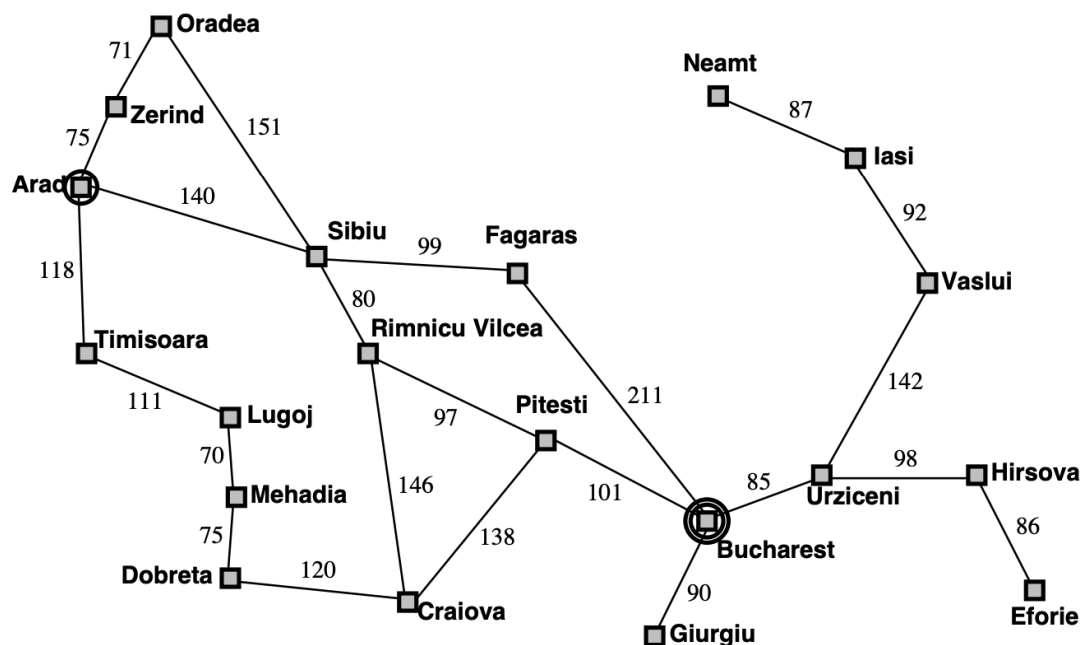
搜索问题

一个搜索问题可以用5个组成部分形式化描述

- 状态空间
- 初始状态
- 动作
- 状态转移
- 目标测试
- 路径/代价

问题的解就是从初始状态到目标状态的一组行动序列

所有解里面代价最小的解即为最优解



搜索问题

□ 八数码

- 状态：8个数字方块和空格在棋盘上的分布
- 初始状态：任何状态都可能是初始状态
- 动作：移动空格
- 目标测试：检查是否到达目标状态
- 路径代价：每一步的代价为1

7	2	4
5		6
8	3	1

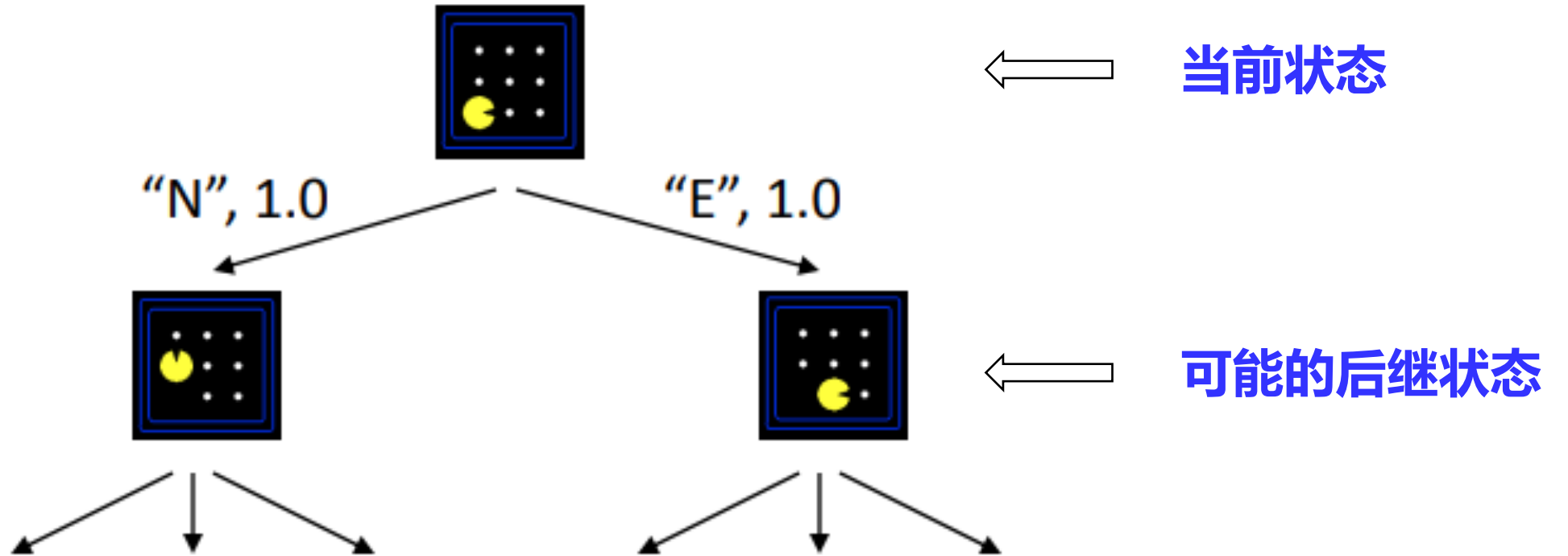
1	2	3
4	5	6
7	8	

现实世界的搜索问题

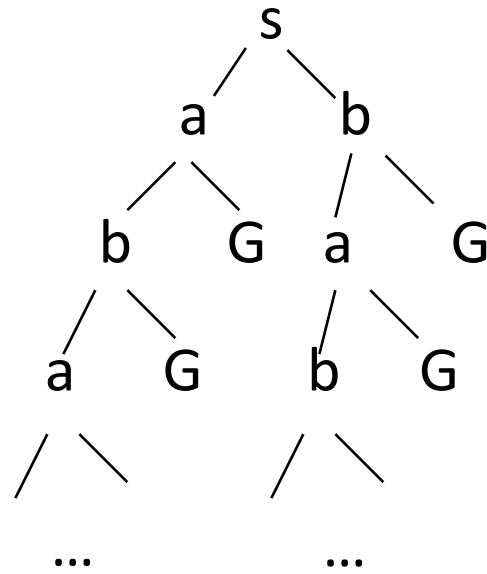
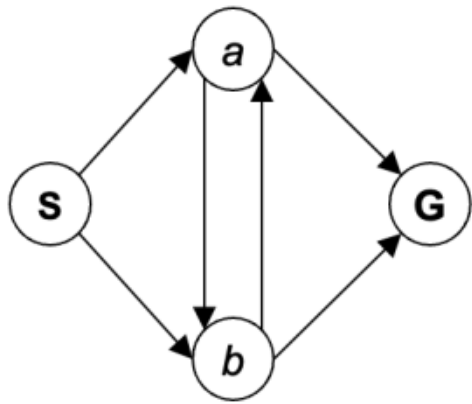
- 游戏
- 旅行规划问题
- 旅行商问题
- 芯片布线问题
- 机器人导航问题
- 蛋白质设计问题
- ...



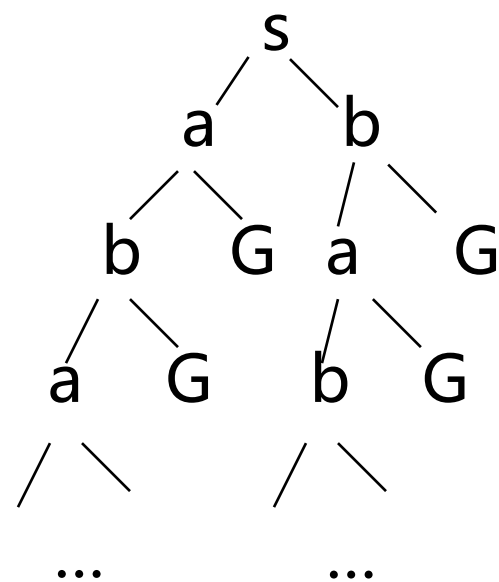
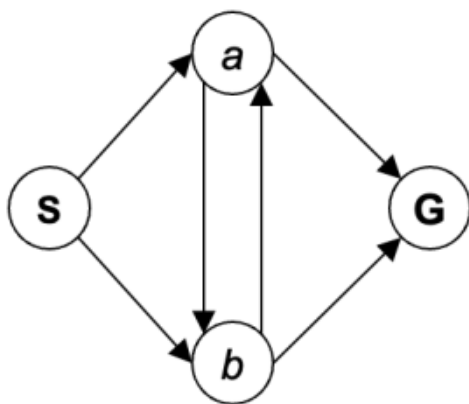
搜索树



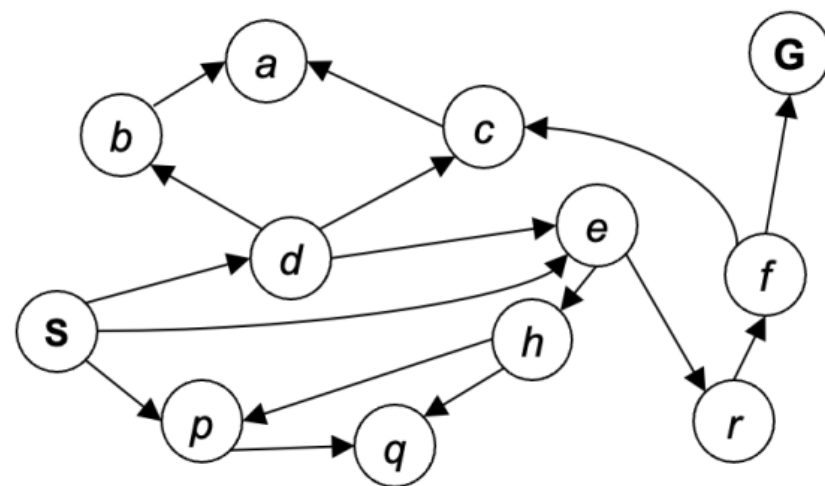
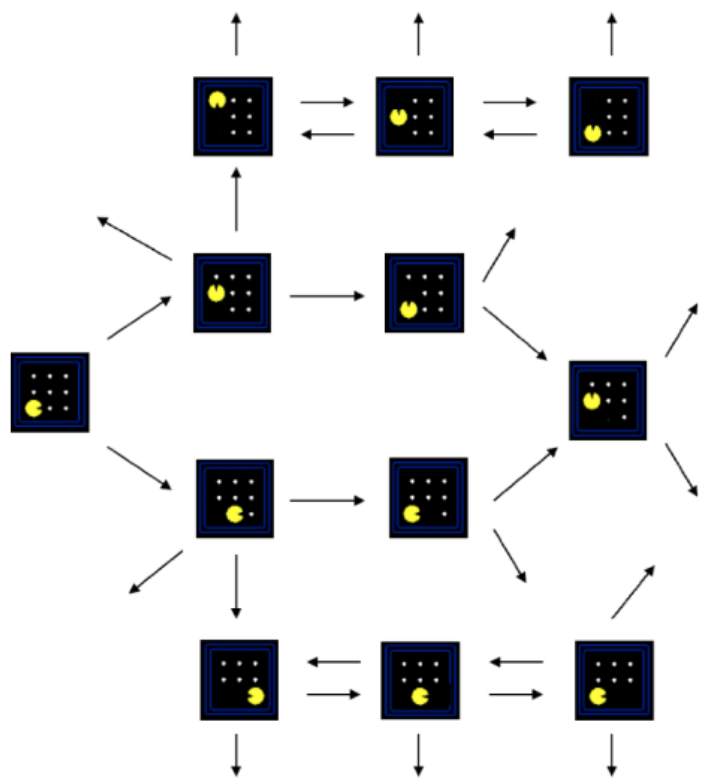
搜索树的深度



搜索树的深度



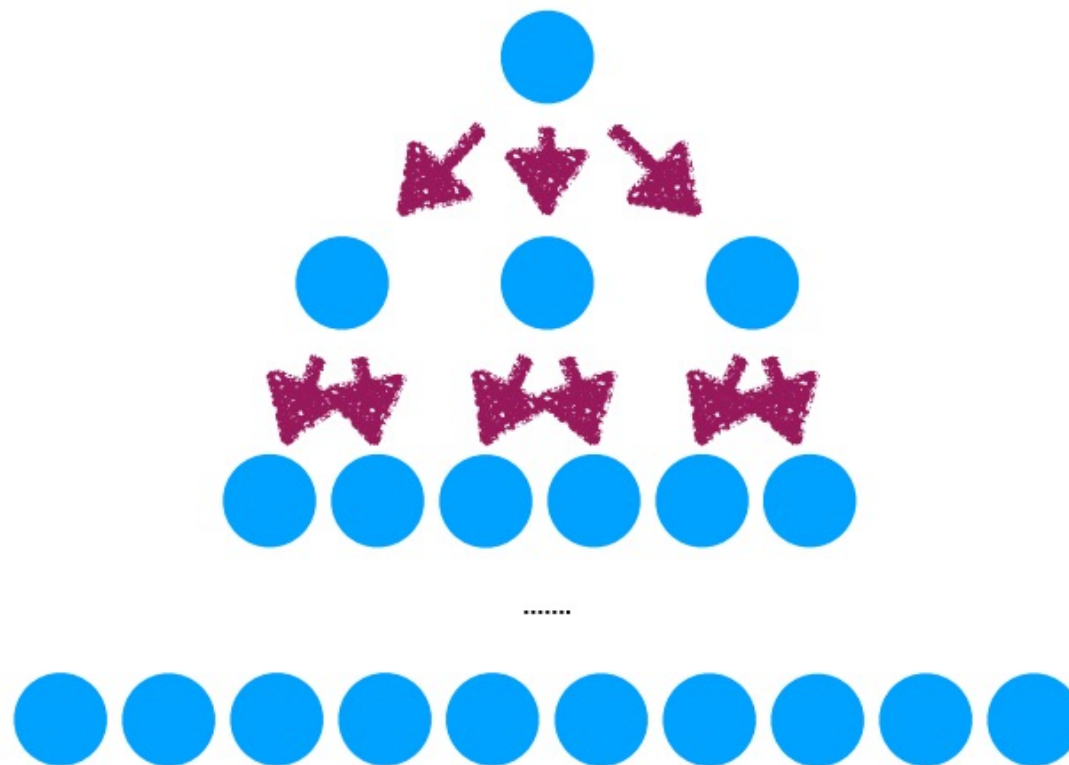
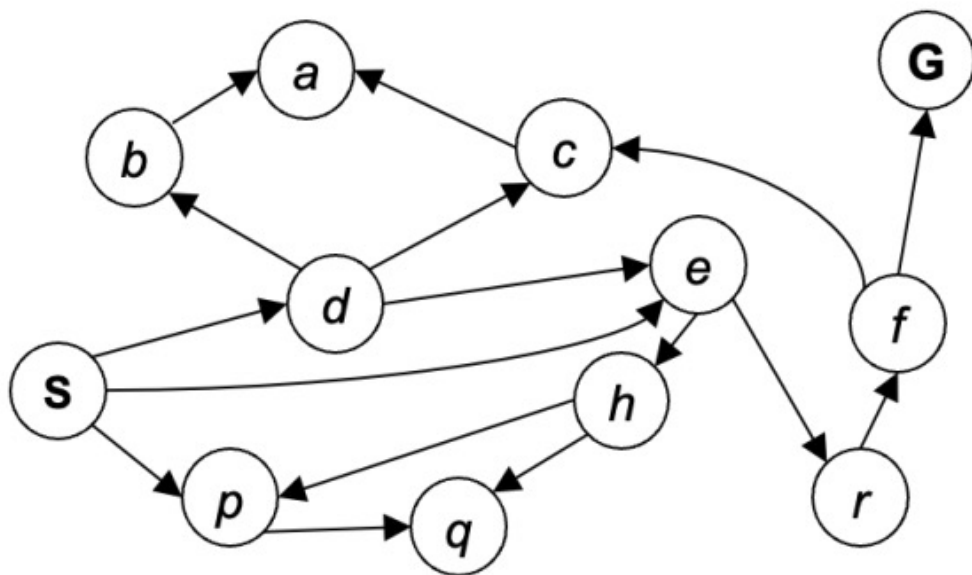
搜索图



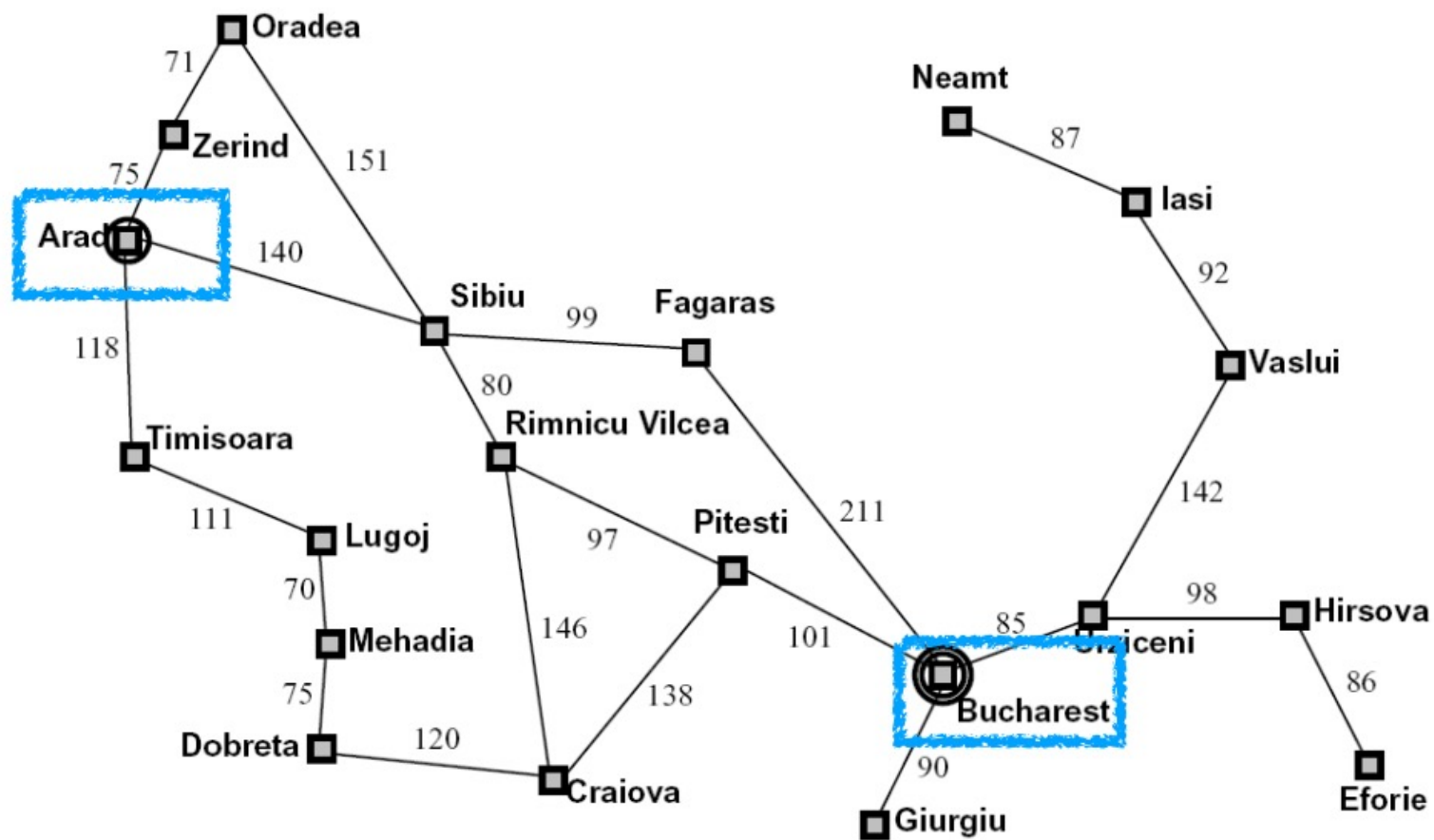
每个节点都是一个状态，图中的边体现了状态的转移

搜索图和搜索树

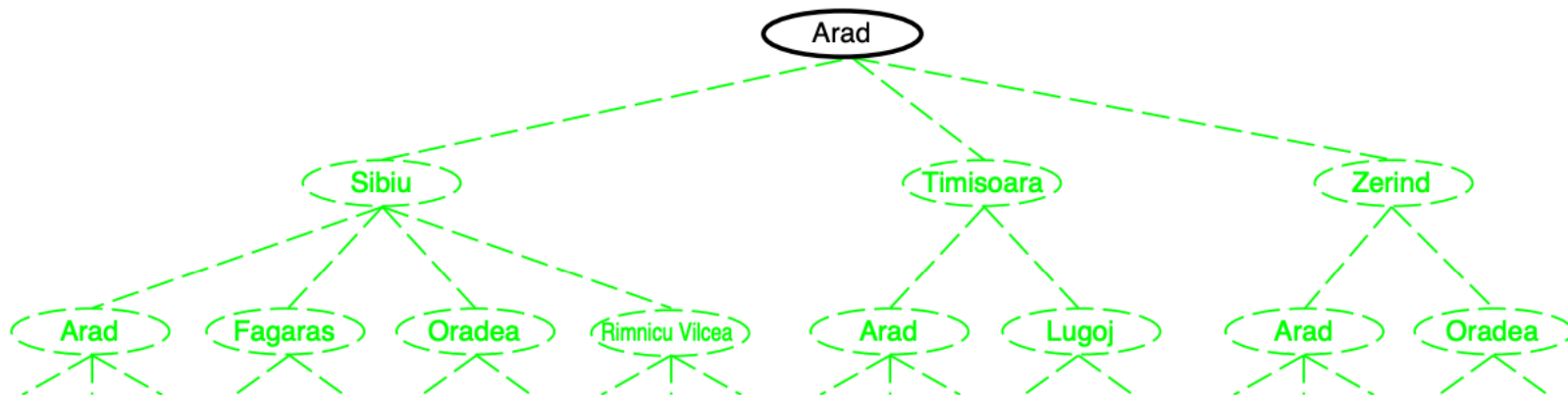
一个解是一个行动序列，搜索算法的工作就是考虑各种可能的行动序列



搜索问题求解

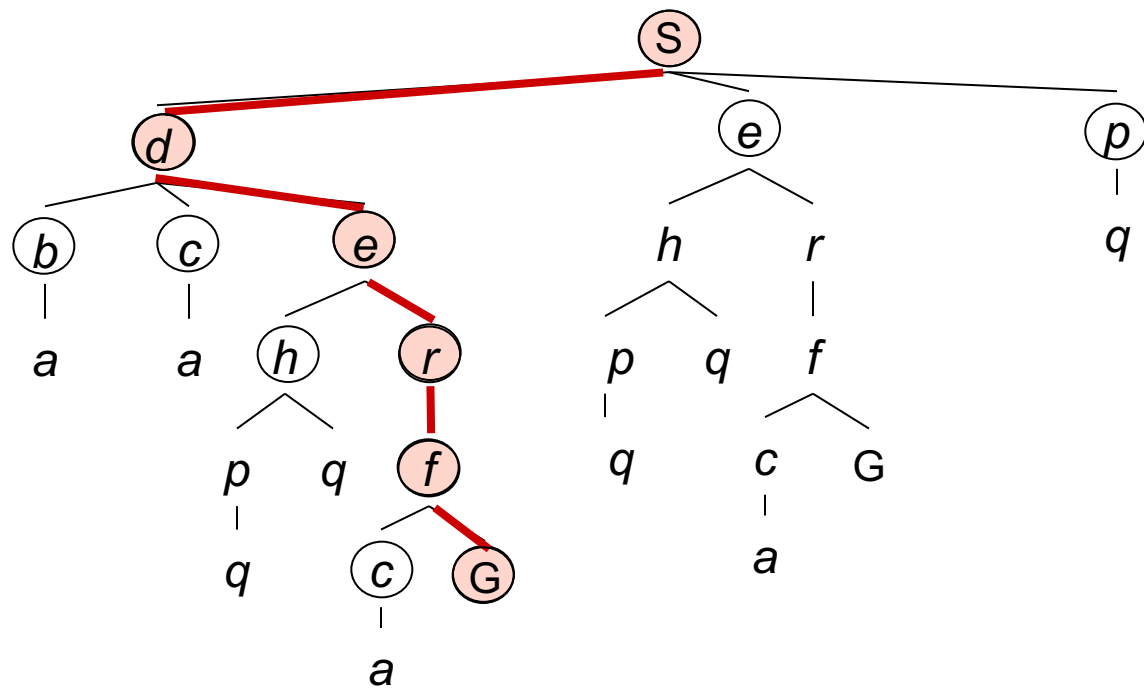
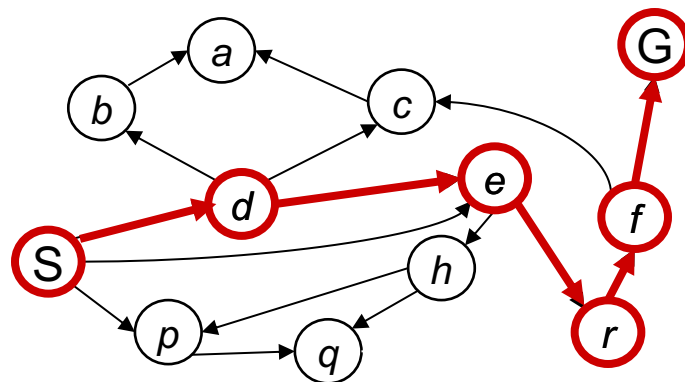


搜索问题求解



- 扩展当前的状态，在当前状态下采用各种行动，生成新的状态
- 所有待扩展的节点称为**边缘节点**
- 不断从边缘节点中选择节点并扩展，直到到达目标状态，或者没有状态可以扩展

树搜索算法



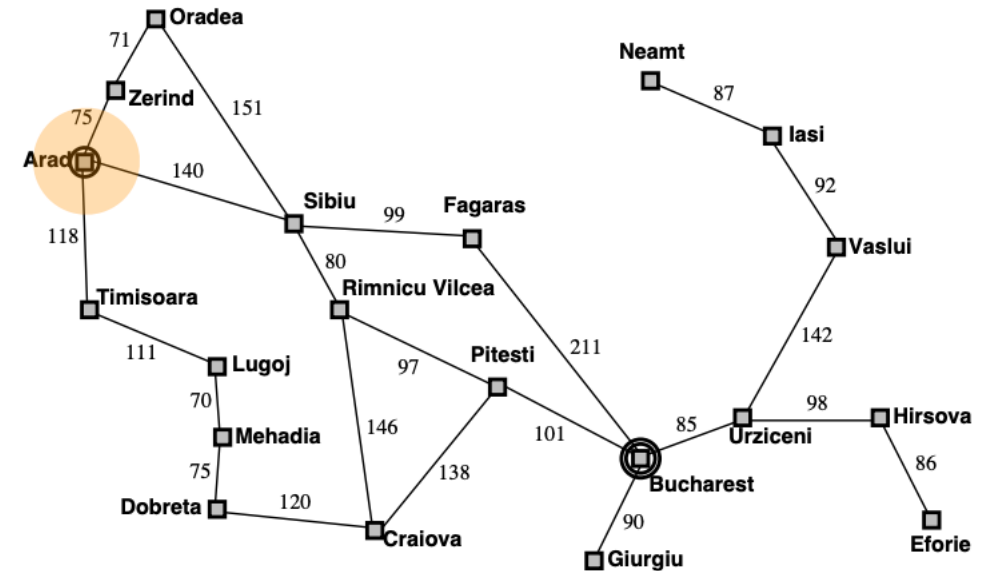
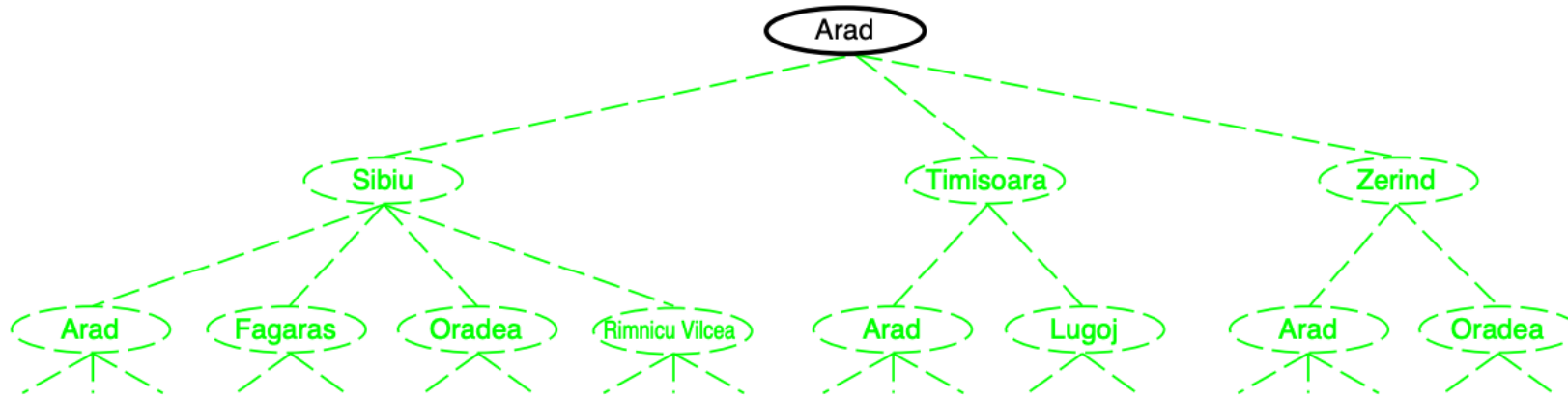
~~s~~
~~s → d~~
s → e
s → p
s → d → b
s → d → c
~~s → d → e~~
s → d → e → h
~~s → d → e → r~~
~~s → d → e → r → f~~
s → d → e → r → f → c
~~s → d → e → r → f → G~~

树搜索算法

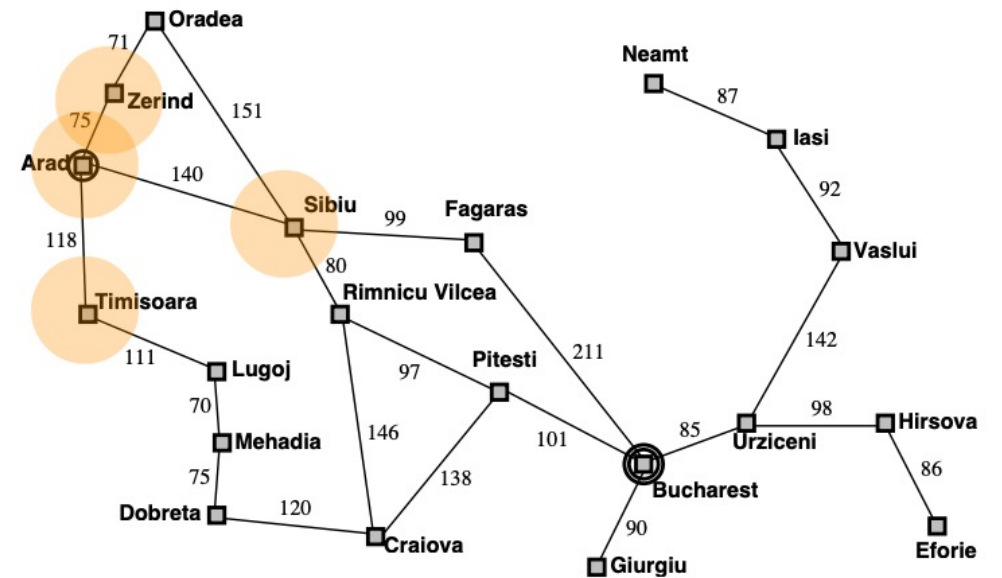
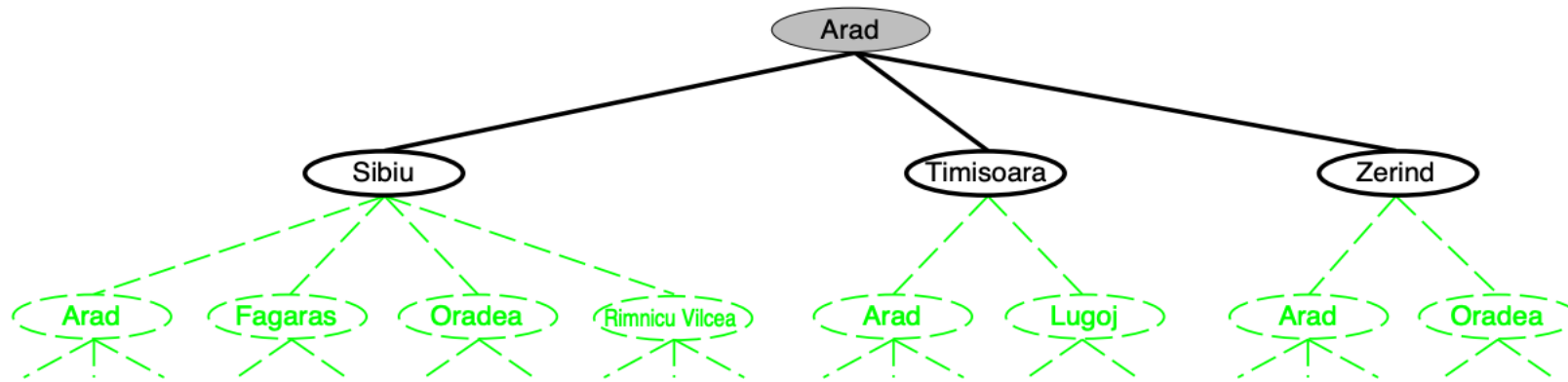
```
function TREE-SEARCH(problem, strategy) returns a solution, or failure
  initialize the search tree using the initial state of problem
  loop do
    if there are no candidates for expansion then return failure
    choose a leaf node for expansion according to strategy
    if the node contains a goal state then return the corresponding solution
    else expand the node and add the resulting nodes to the search tree
  end
```

不同搜索策略的核心区别在于如何选择要扩展的边缘节点

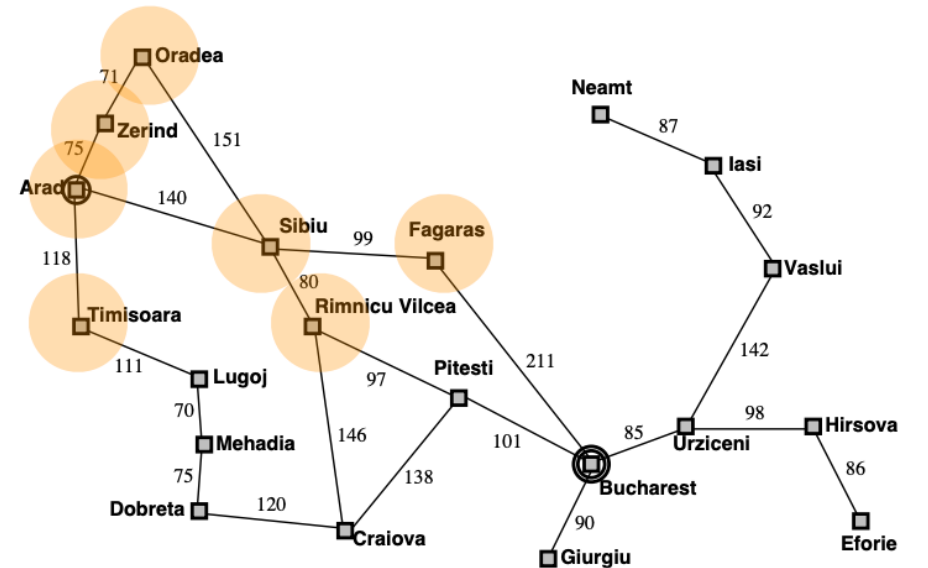
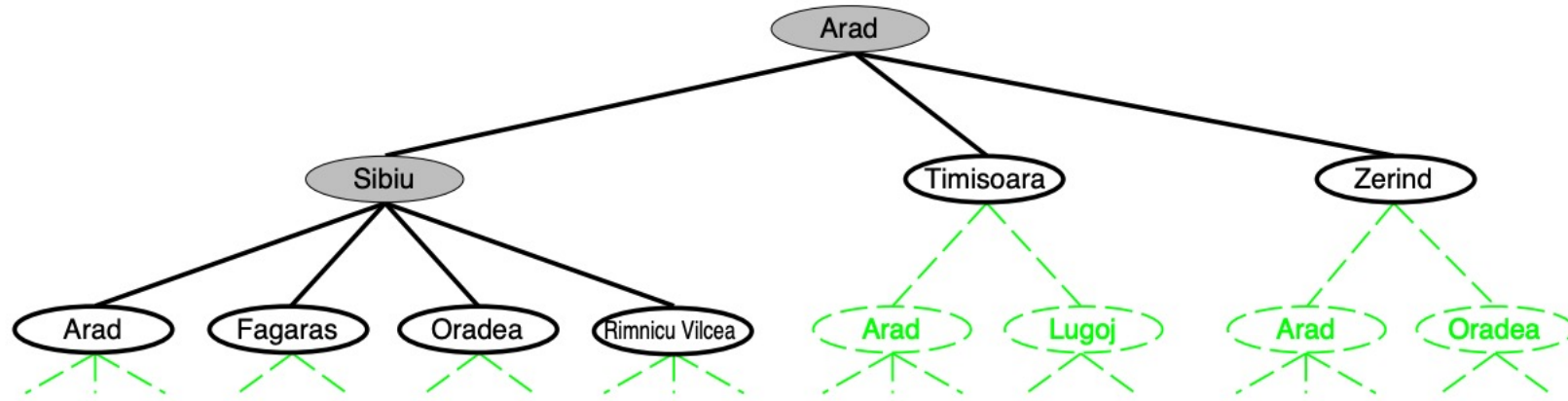
树搜索算法



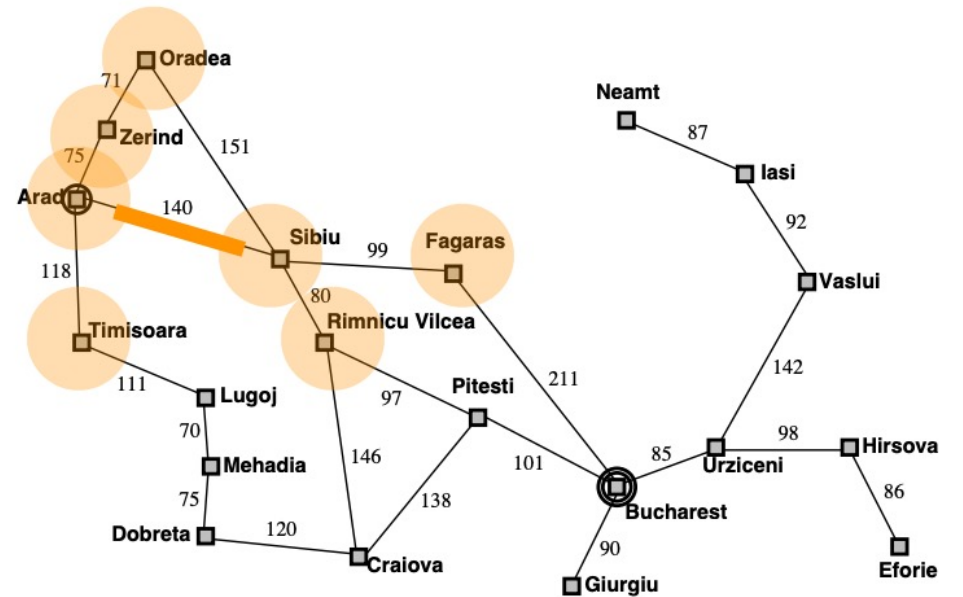
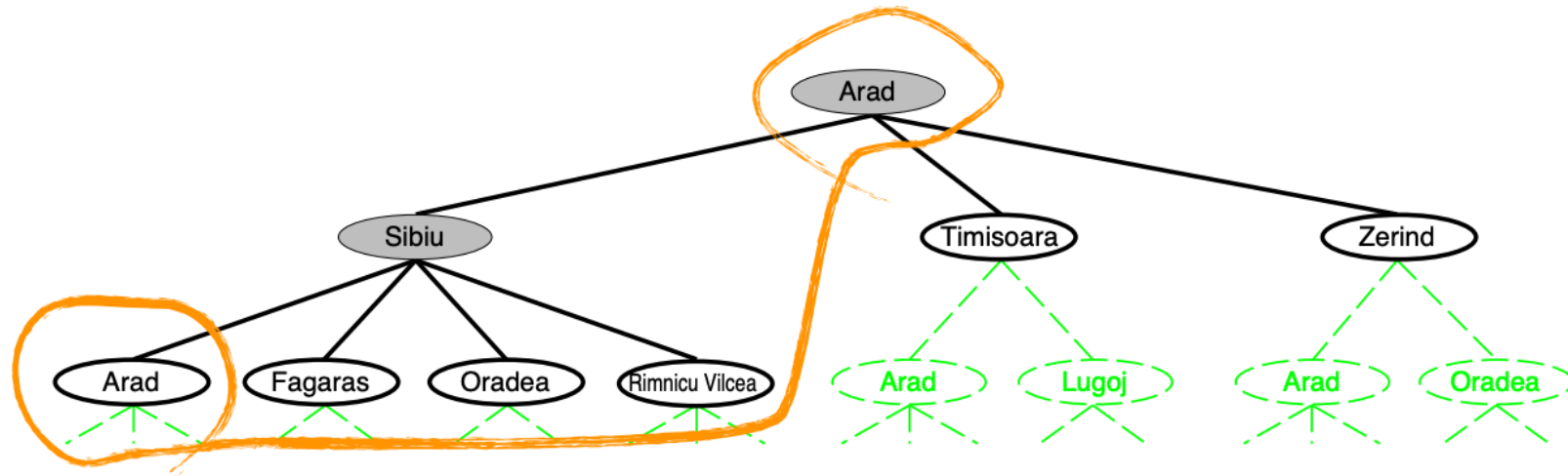
树搜索算法



树搜索算法



树搜索算法



图搜索算法

```
function TREE-SEARCH(problem, strategy) returns a solution, or failure
  initialize the search tree using the initial state of problem
  loop do
    if there are no candidates for expansion then return failure
    choose a leaf node for expansion according to strategy
    if the node contains a goal state then return the corresponding solution
    else expand the node and add the resulting nodes to the search tree
  end
```

```
function GRAPH-SEARCH(problem, fringe) returns a solution, or failure
  closed ← an empty set
  fringe ← INSERT(MAKE-NODE(INITIAL-STATE[problem]), fringe)
  loop do
    if fringe is empty then return failure
    node ← REMOVE-FRONT(fringe)
    if GOAL-TEST(problem, STATE[node]) then return node
    if STATE[node] is not in closed then
      add STATE[node] to closed
      fringe ← INSERTALL(EXPAND(node, problem), fringe)
  end
```

搜索策略

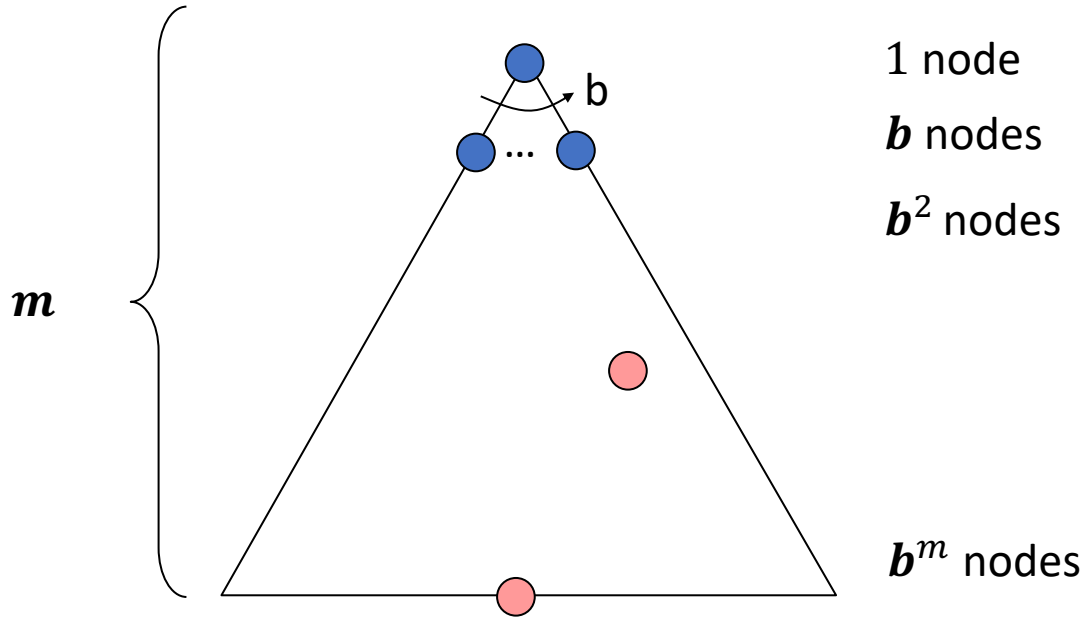
搜索策略的主要区别在于**如何选择要扩展的状态**

如何评估搜索算法的性能？

- ✓ **完备性**：当问题有解时，这个算法是否能保证找到解？
- ✓ **最优性**：搜索策略是否能找到最优解？
- ✓ **时间复杂度**：找到解需要花费多长时间？
- ✓ **空间复杂度**：在执行搜索的过程总需要多少存储空间？

搜索策略性能分析

符号	含义
b	分支因子，即搜索树中每个节点最大的分支数目
d	根节点到最浅的目标结点的路径长度
m	搜索树中路径的最大可能长度
n	状态空间中状态的数量



$$1 + b + b^2 + \dots + b^m = O(b^m)$$

提纲

□ 搜索问题

□ 无信息搜索

- 宽度优先搜索
- 深度优先搜索
- 迭代加深的深度优先搜索
- 代价一致性搜索

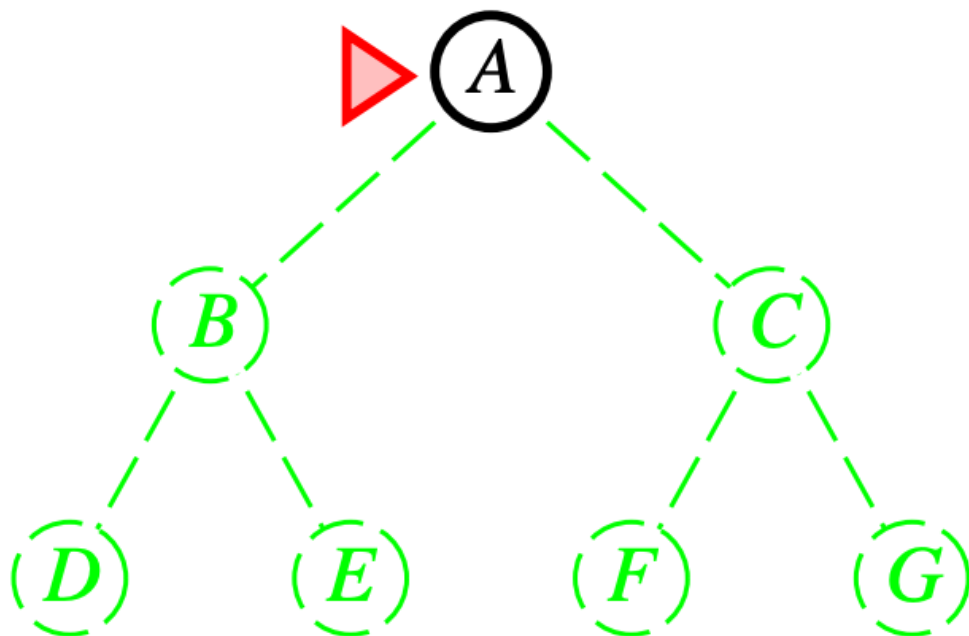
除了问题定义中给定的状态信息外没有任何附加信息



宽度优先搜索 (breadth-first search, BFS)

先扩展根节点，接着扩展根节点的所有后继节点，然后再扩展它们的后继，以此类推

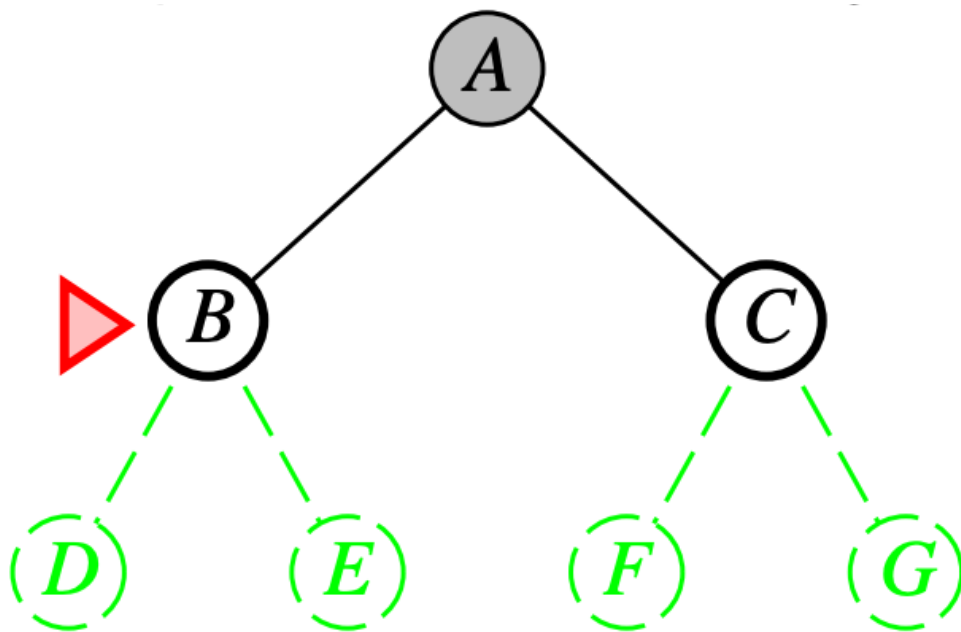
一般地，在下一层的任何节点扩展之前，搜索树本层深度的所有节点应该都已经扩展过



宽度优先搜索 (breadth-first search, BFS)

先扩展根节点，接着扩展根节点的所有后继节点，然后再扩展它们的后继，以此类推。

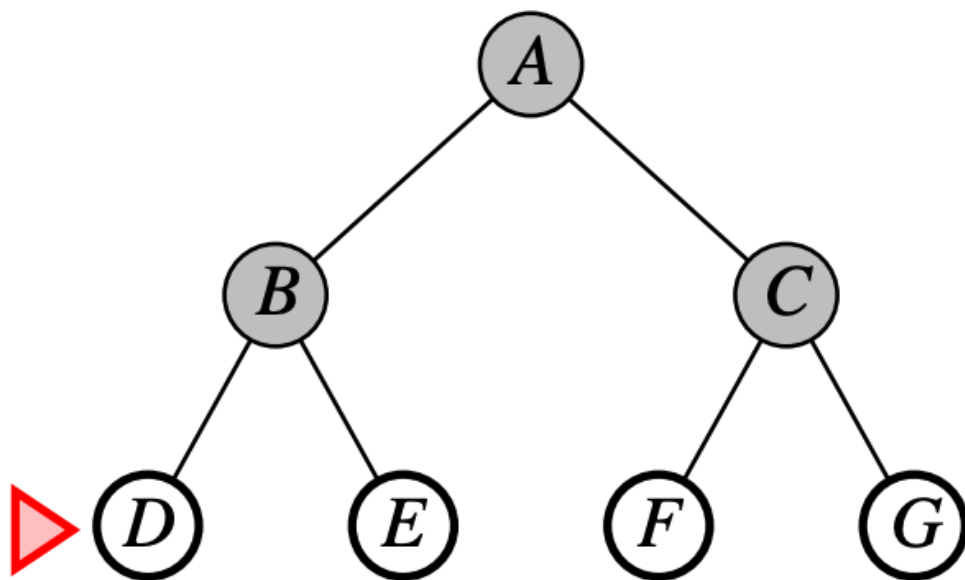
一般地，在下一层的任何节点扩展之前，搜索树本层深度的所有节点应该都已经扩展过。



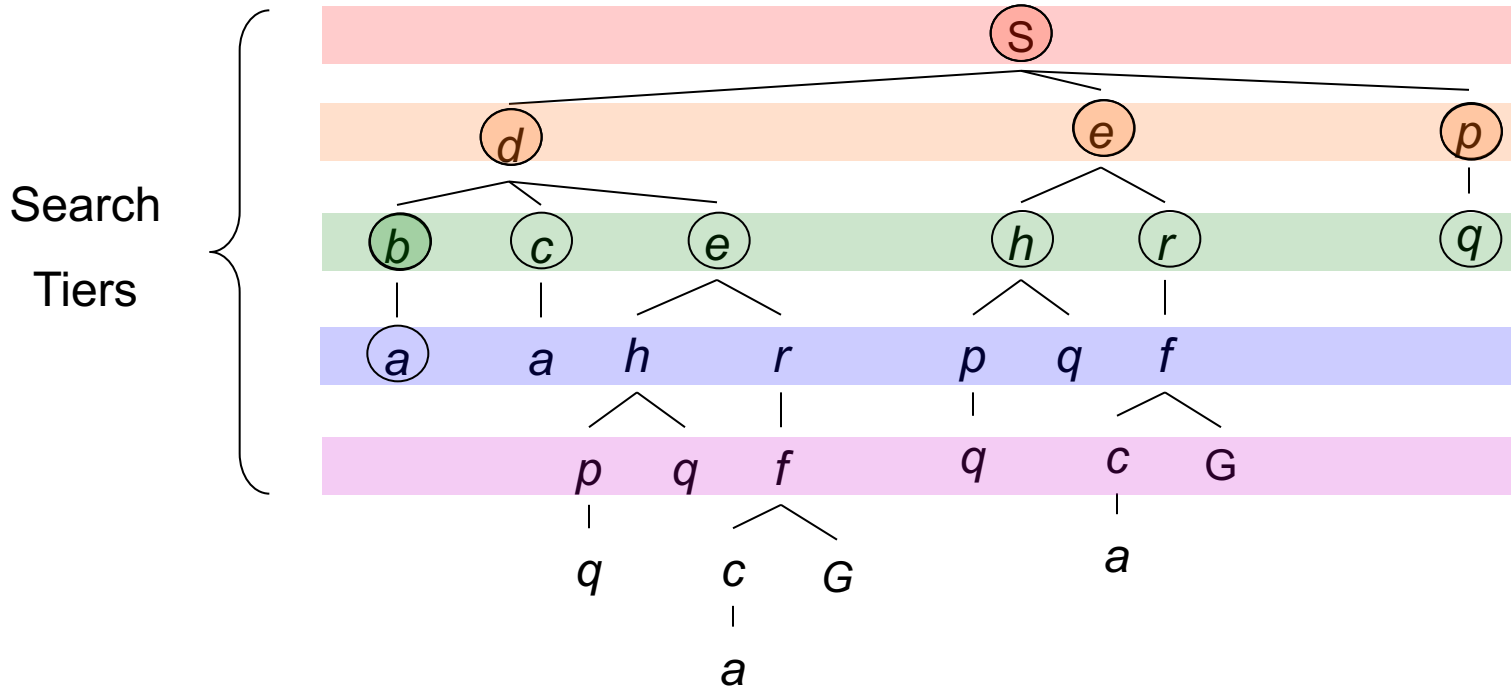
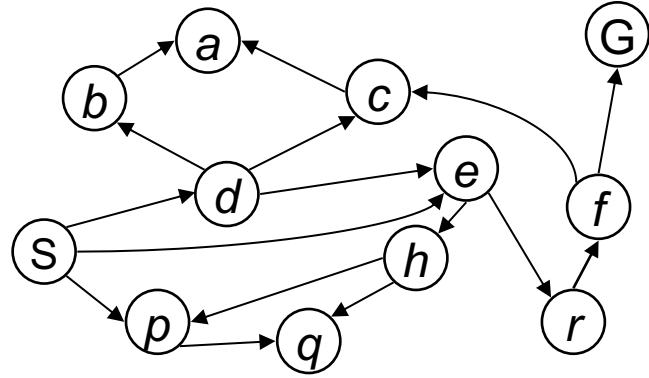
宽度优先搜索 (breadth-first search, BFS)

先扩展根节点，接着扩展根节点的所有后继节点，然后再扩展它们的后继，以此类推。

一般地，在下一层的任何节点扩展之前，搜索树本层深度的所有节点应该都已经扩展过。



宽度优先搜索 (breadth-first search, BFS)



性能分析

- 时间复杂度?

- $1 + b + b^2 + b^3 + \dots + b^d = O(b^d)$

- 空间复杂度?

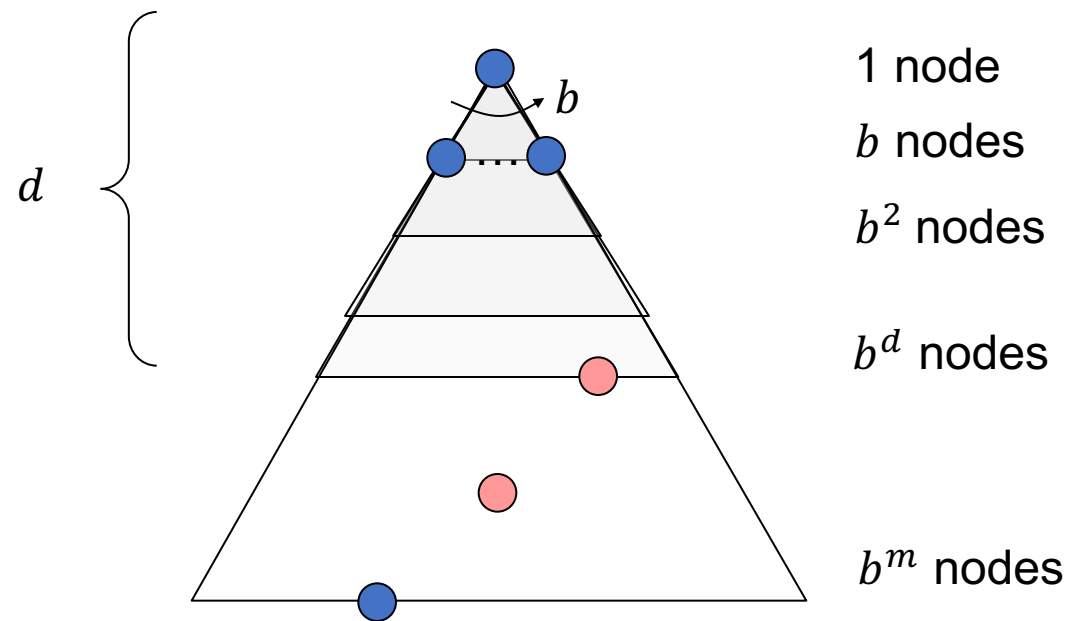
- $O(b^d)$

- 完备性?

- Yes

- 最优性?

- Yes, 如果所有行动代价相同



提纲

□ 搜索问题

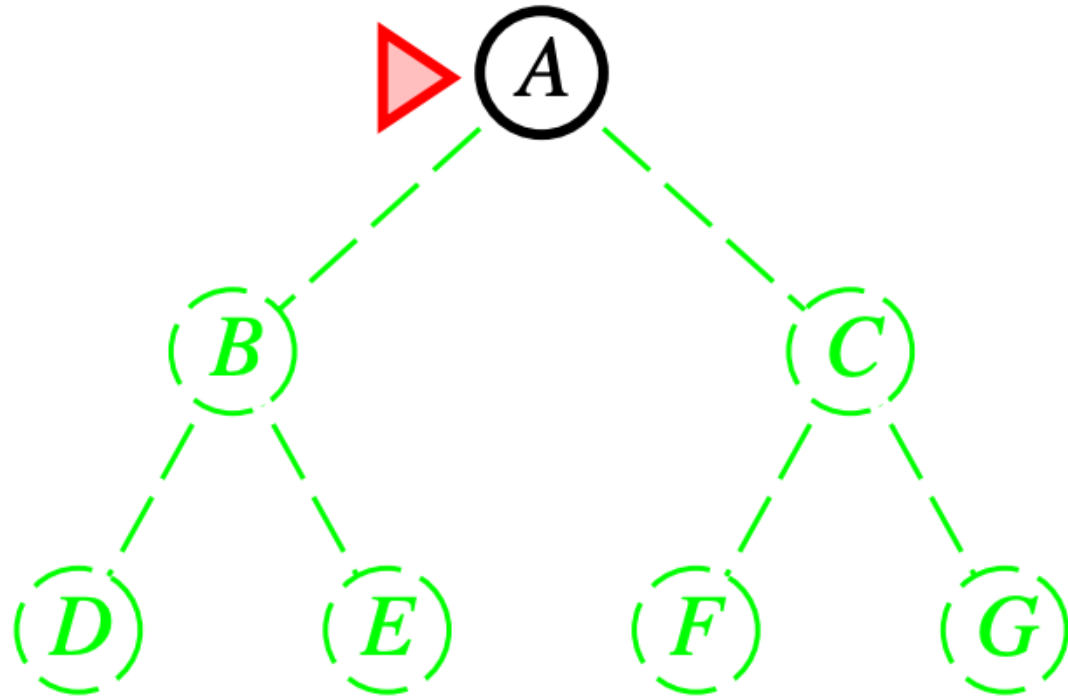
□ 无信息搜索

- 宽度优先搜索
- 深度优先搜索
- 迭代加深的深度优先搜索
- 一致性代价搜索



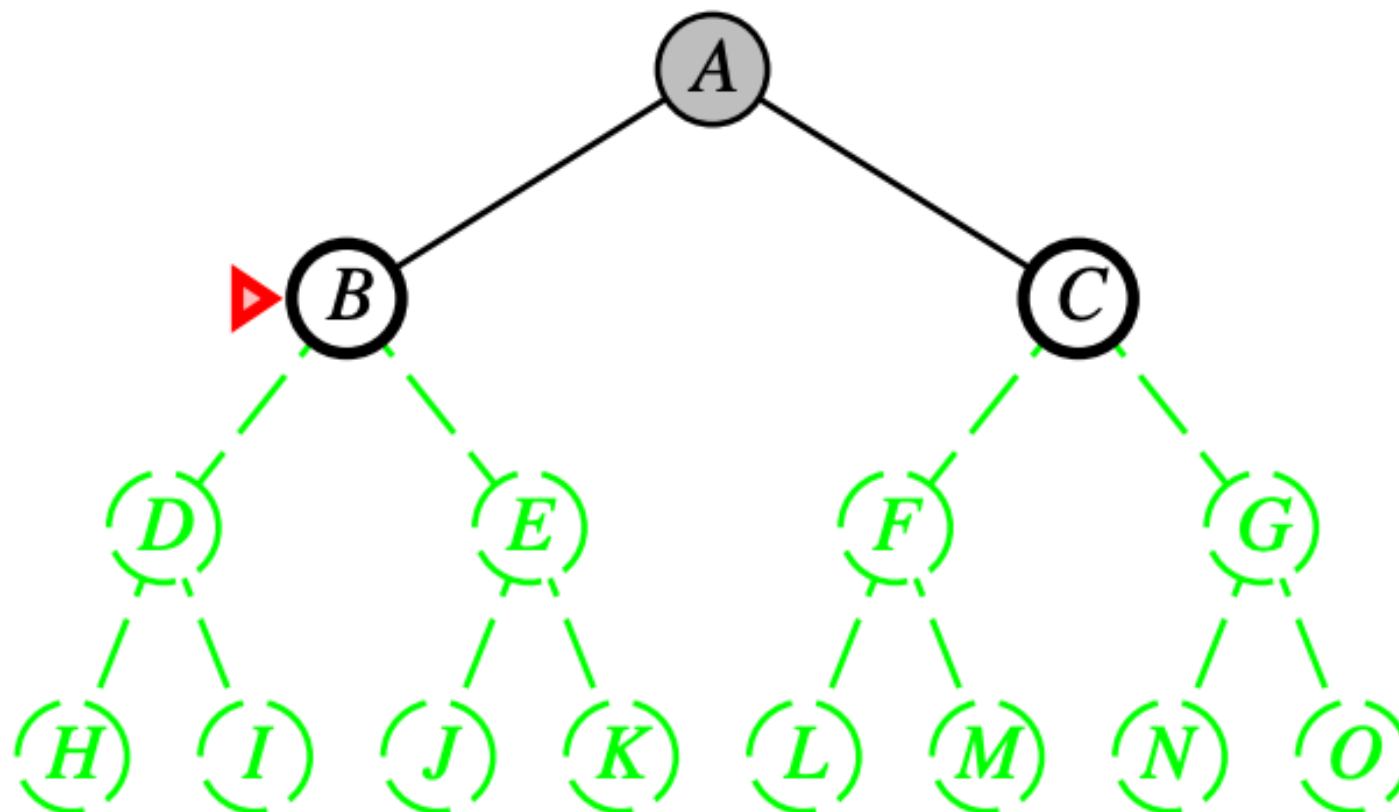
深度优先搜索 (depth-first search, DFS)

总是扩展当前边缘节点集中最深的节点



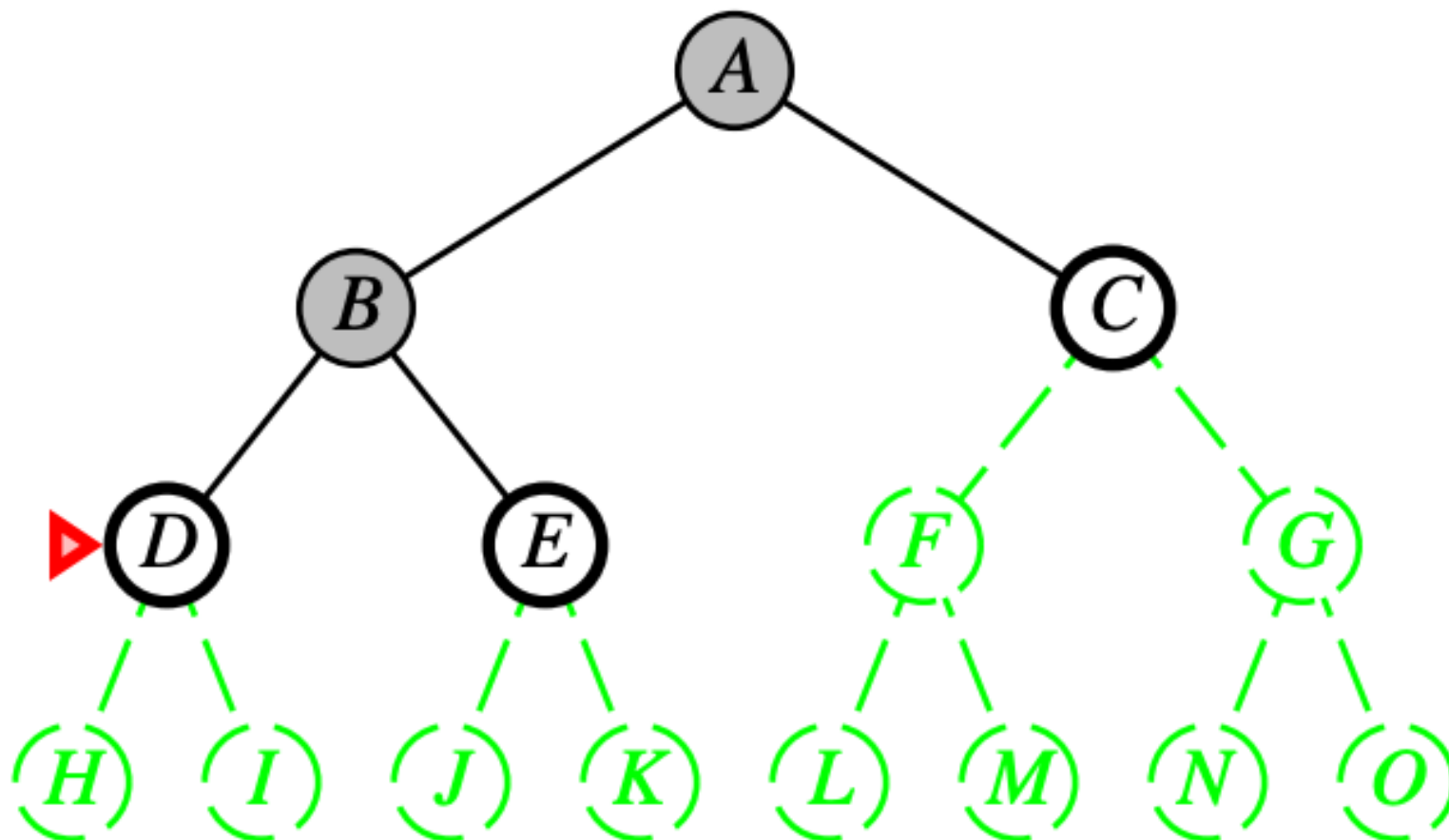
深度优先搜索 (depth-first search, DFS)

总是扩展当前边缘节点集中最深的节点



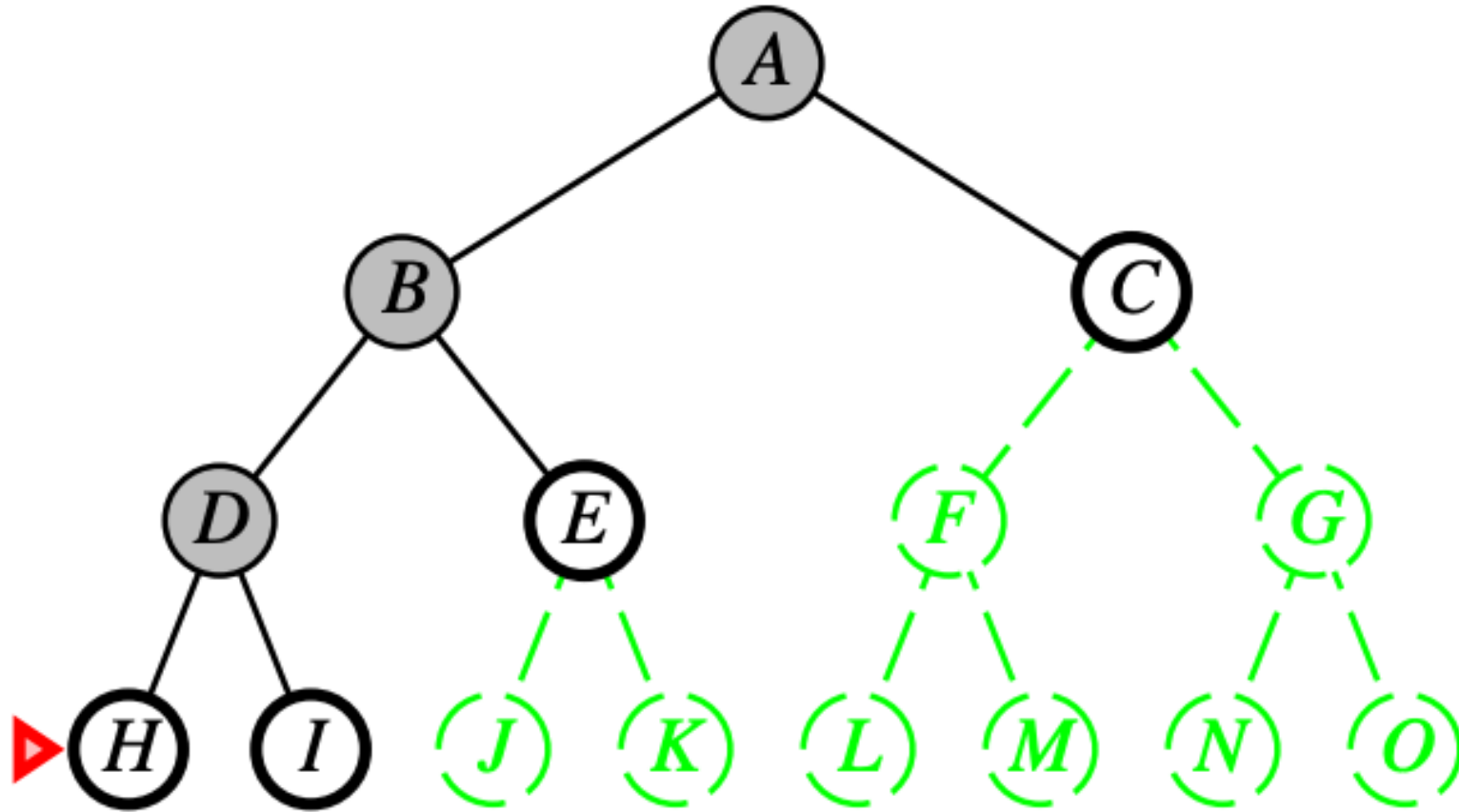
深度优先搜索 (depth-first search, DFS)

总是扩展当前边缘节点集中最深的节点



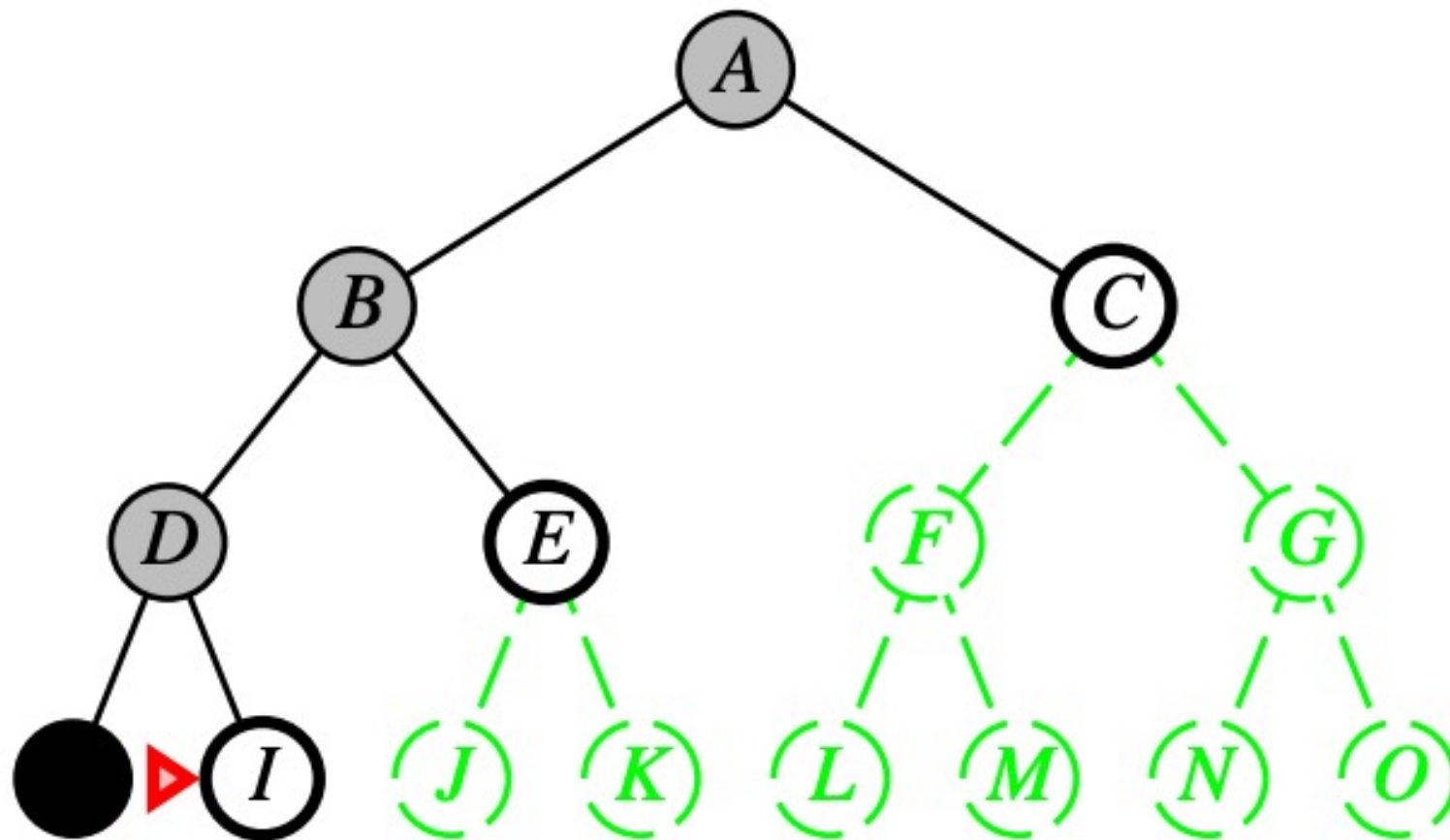
深度优先搜索 (depth-first search, DFS)

总是扩展当前边缘节点集中最深的节点



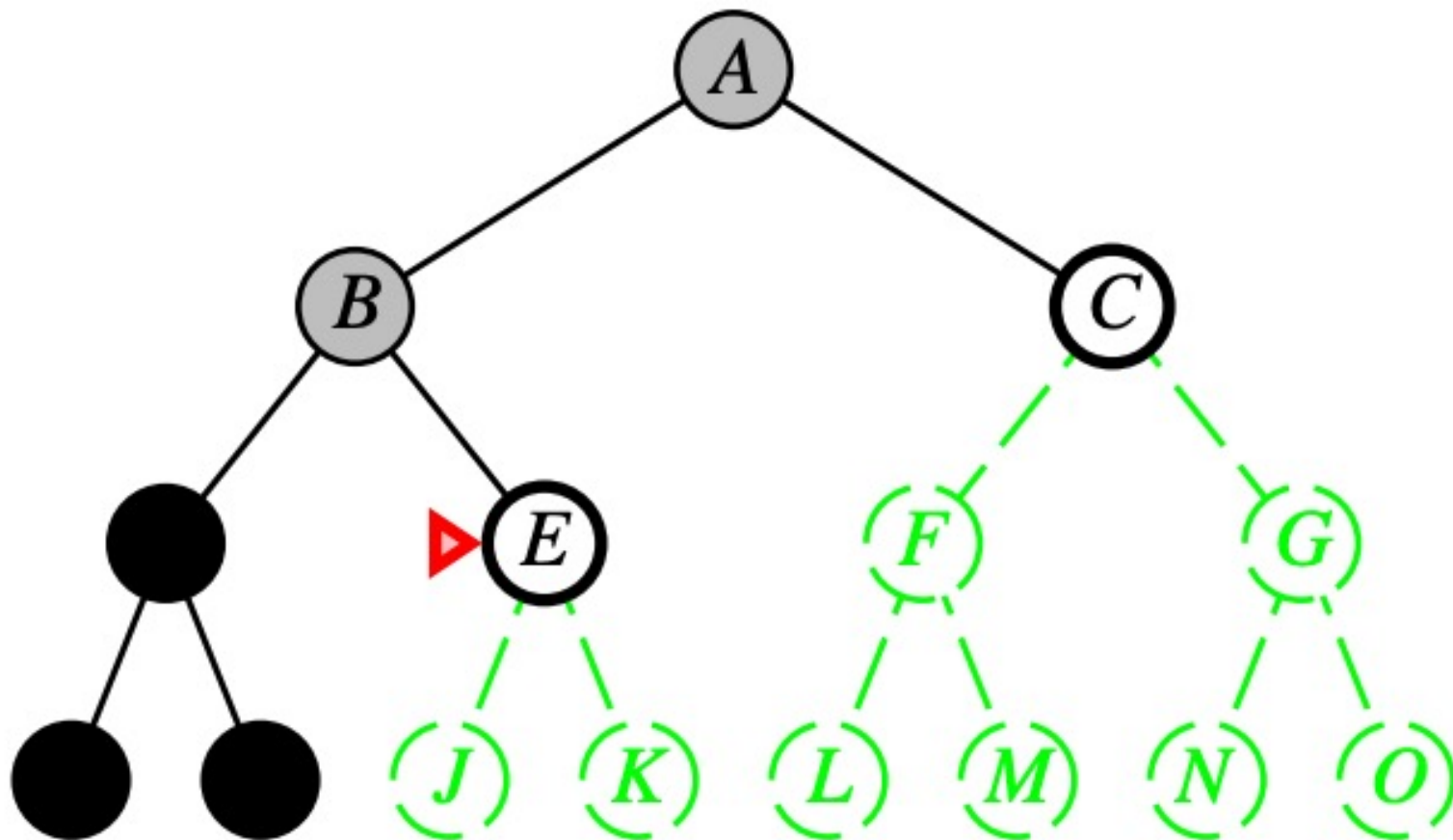
深度优先搜索 (depth-first search, DFS)

总是扩展当前边缘节点集中最深的节点



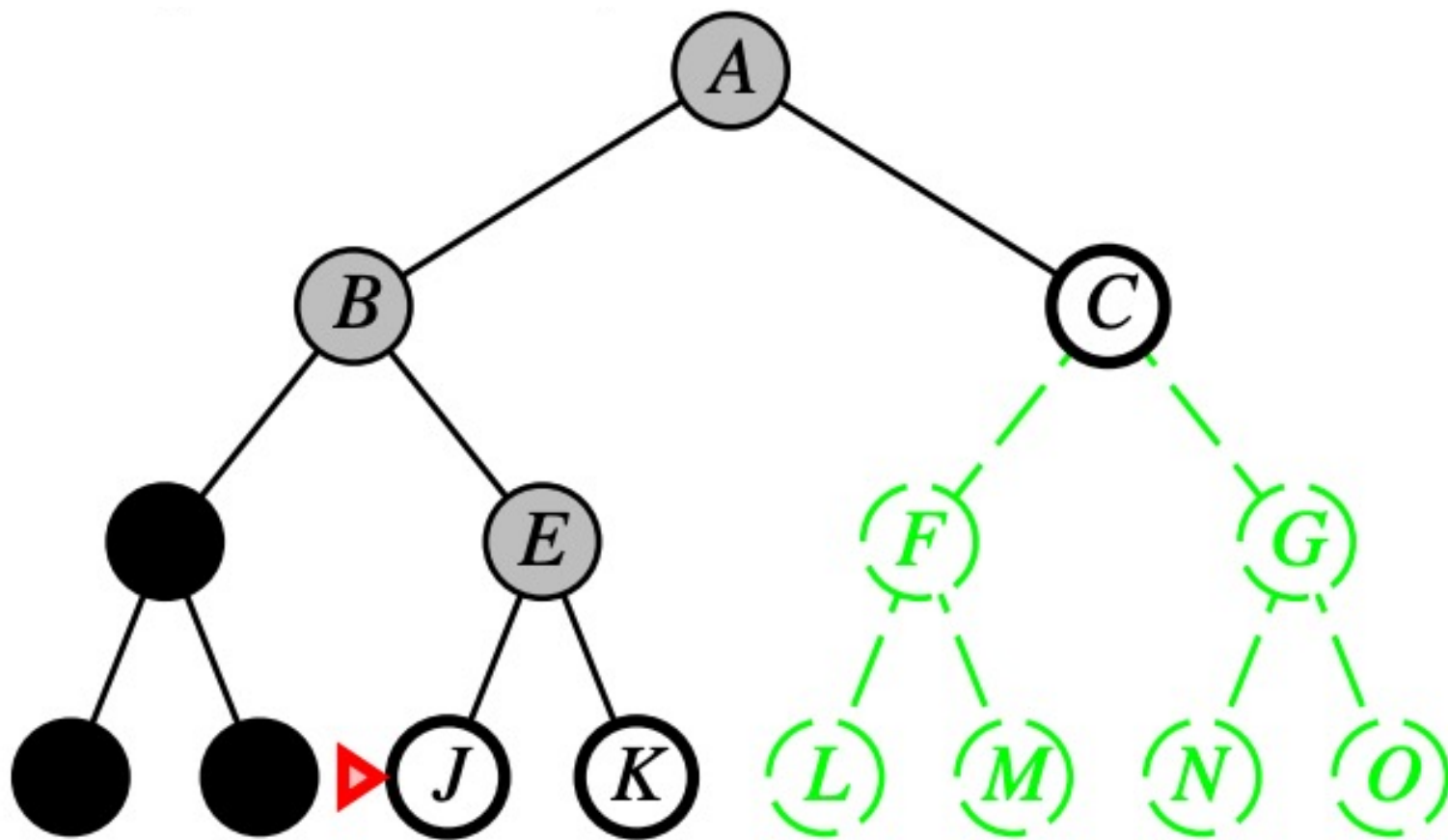
深度优先搜索 (depth-first search, DFS)

总是扩展当前边缘节点集中最深的节点



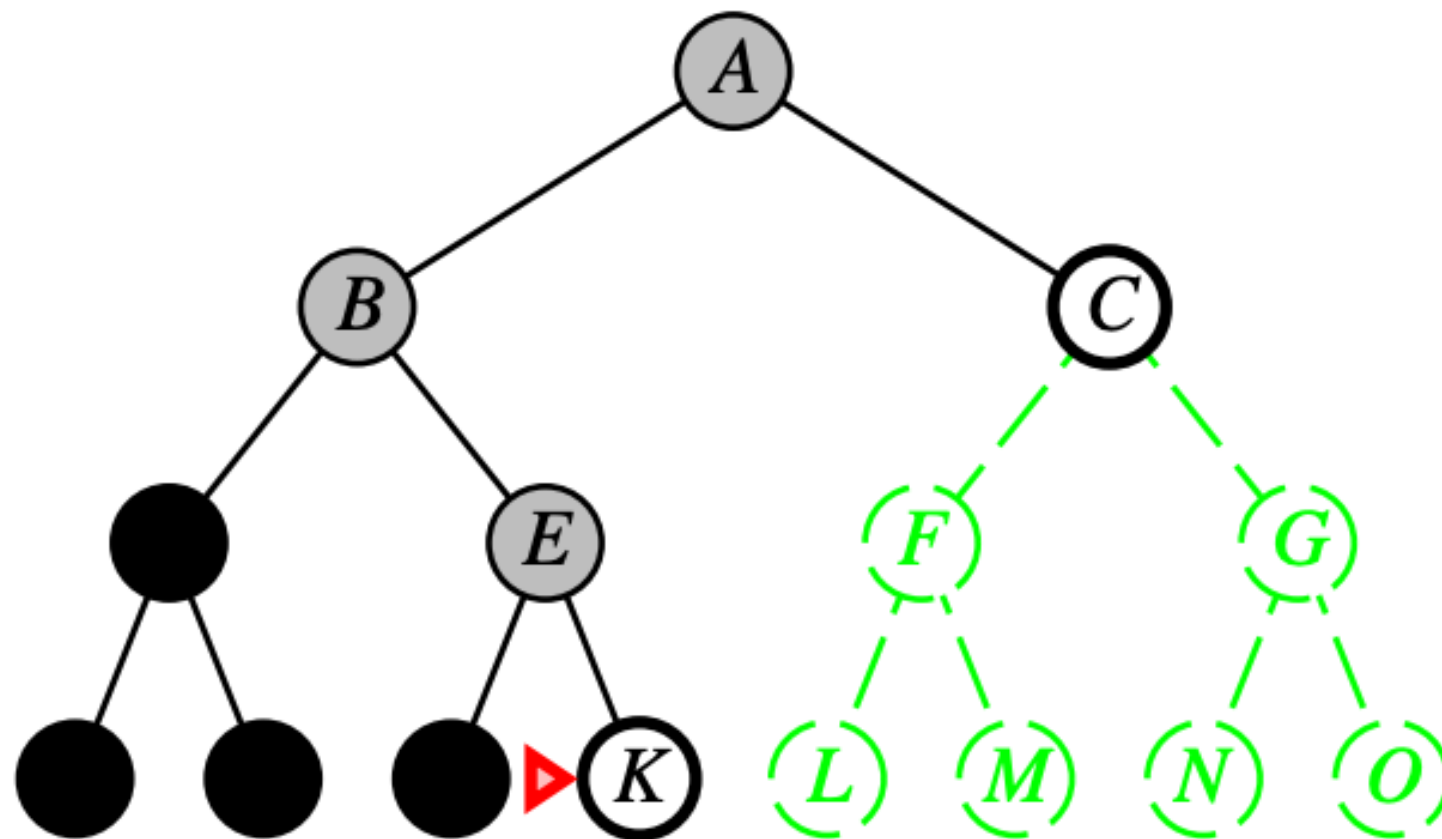
深度优先搜索 (depth-first search, DFS)

总是扩展当前边缘节点集中最深的节点



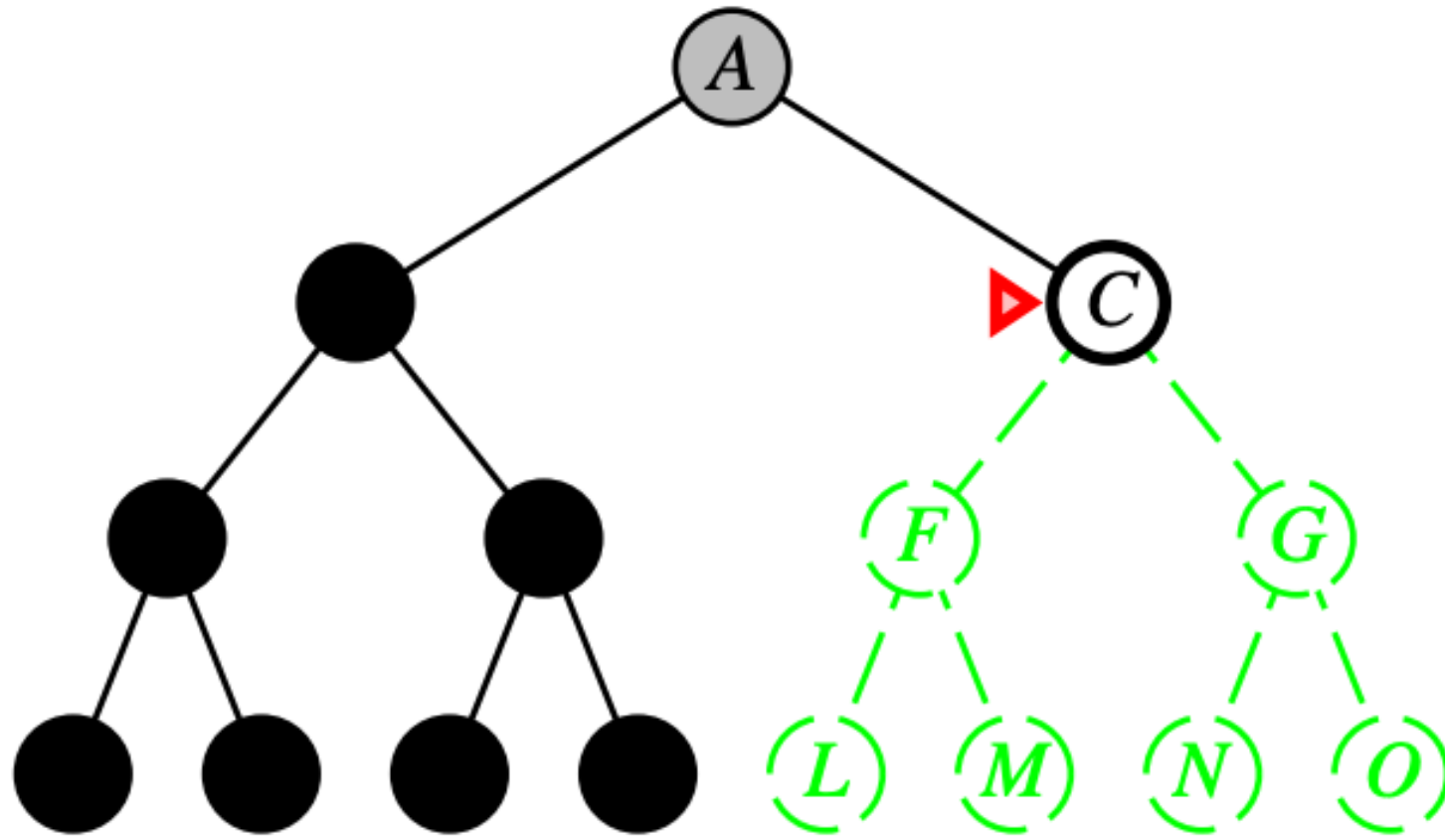
深度优先搜索 (depth-first search, DFS)

总是扩展当前边缘节点集中最深的节点

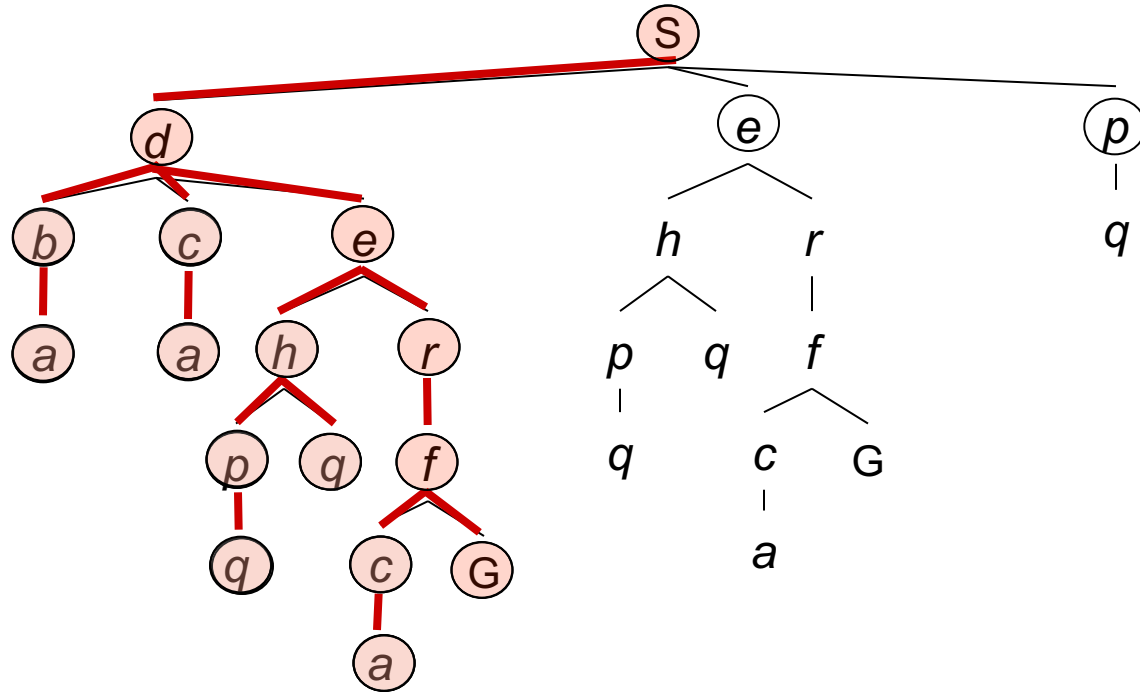
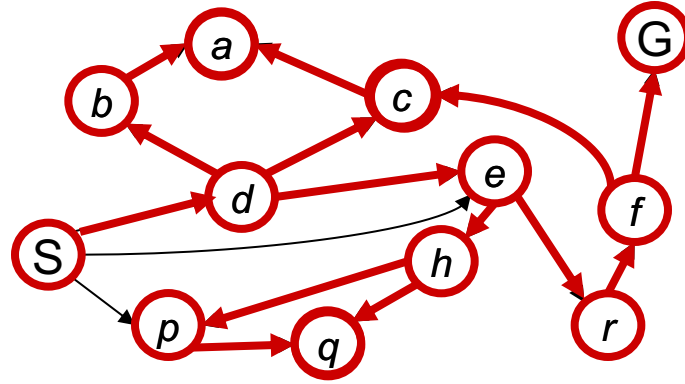


深度优先搜索 (depth-first search, DFS)

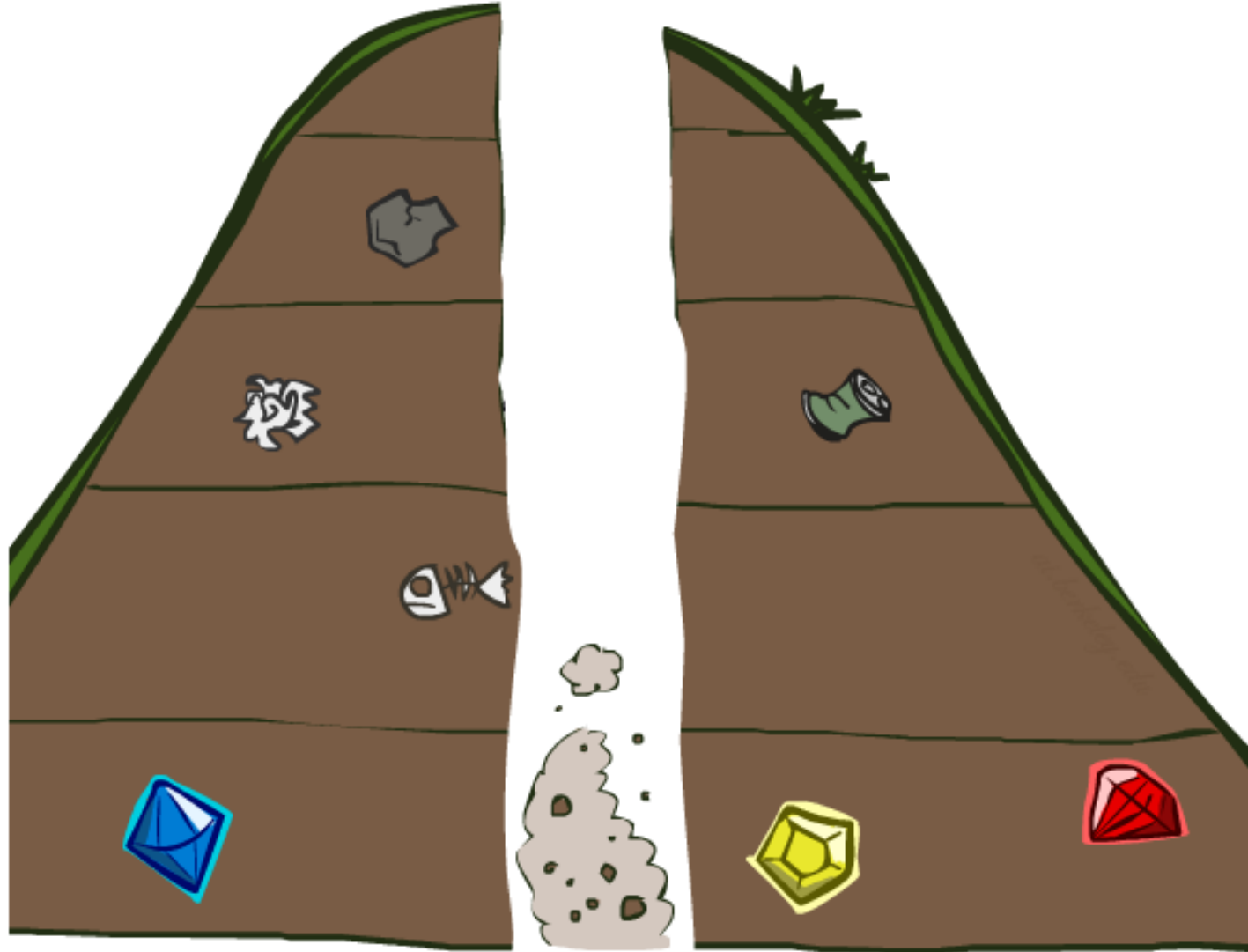
总是扩展当前边缘节点集中最深的节点



深度优先搜索 (depth-first search, DFS)



深度优先搜索 (depth-first search, DFS)



性能分析

- 时间复杂度?

- $O(b^m)$

- 空间复杂度?

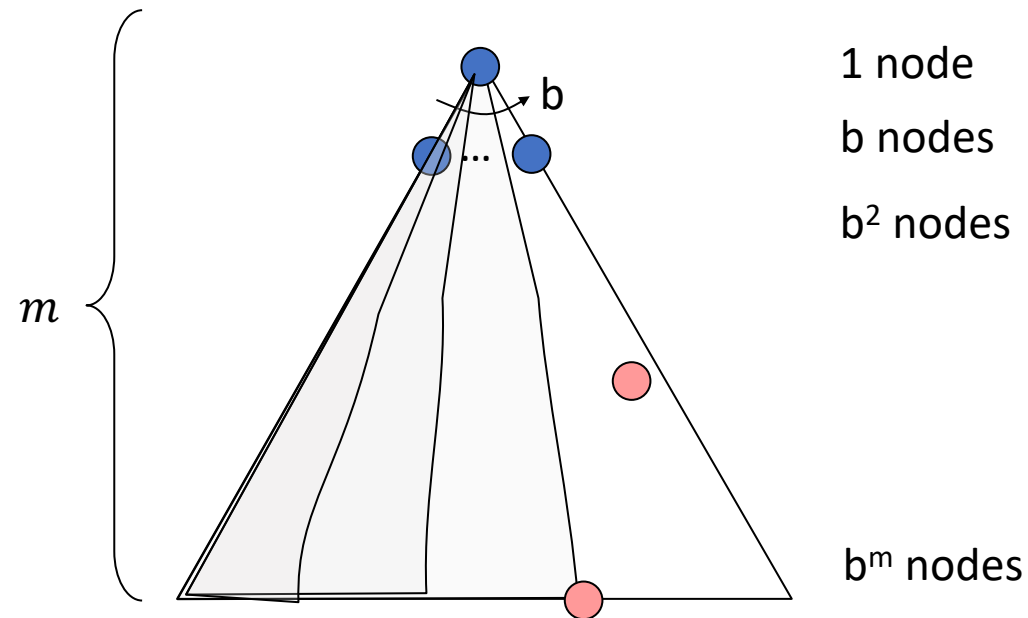
- 只需要存储一条从根节点到叶节点的路径，以及该路径上每个节点的所有未被扩展的兄弟节点 $O(bm)$

- 完备性?

- No

- 最优性?

- NO



BFS v.s. DFS



□ 什么情况下，DFS比BFS更好？

□ 什么情况下，BFS比DFS更好？

Video of Demo Maze Water DFS/BFS



Video of Demo Maze Water DFS/BFS



提纲

□ 搜索问题

□ 无信息搜索

➤ 宽度优先搜索

➤ 深度优先搜索

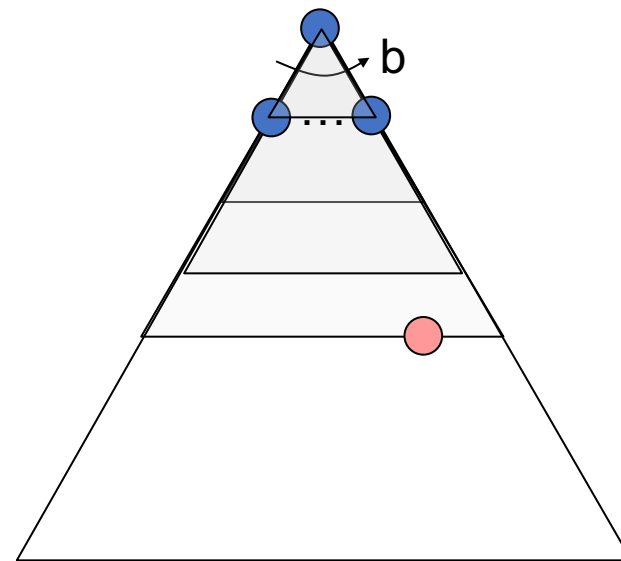
➤ 迭代加深的深度优先搜索

➤ 一致性代价搜索

迭代加深的深度优先搜索 (iterative deepening search)

- 能否兼顾DFS和BFS的优势?

- Run a DFS with depth limit 1. If no solution...
- Run a DFS with depth limit 2. If no solution...
- Run a DFS with depth limit 3.



迭代加深的深度优先搜索 (iterative deepening search)

Limit = 0

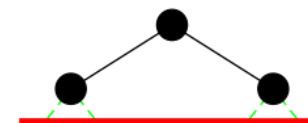
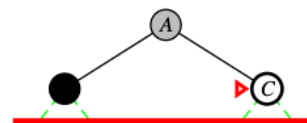
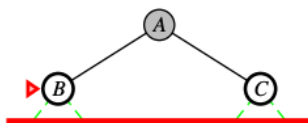
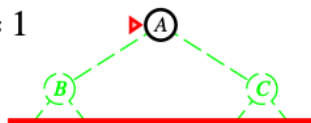


迭代加深的深度优先搜索 (iterative deepening search)

Limit = 0

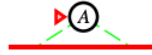


Limit = 1

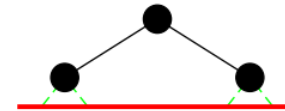
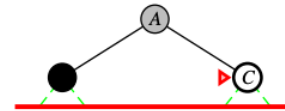
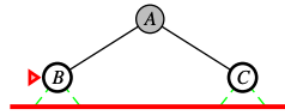
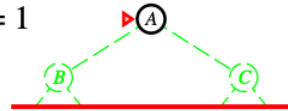


迭代加深的深度优先搜索 (iterative deepening search)

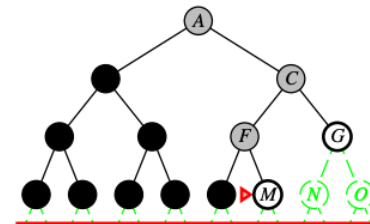
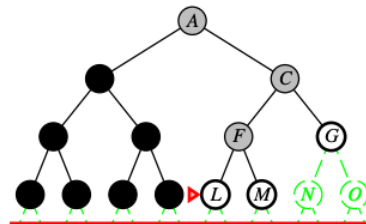
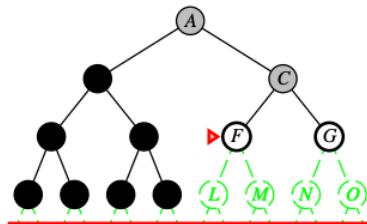
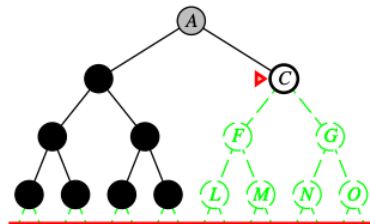
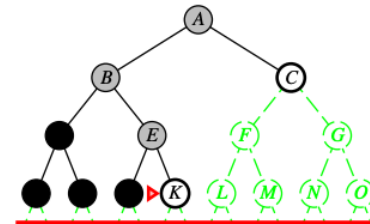
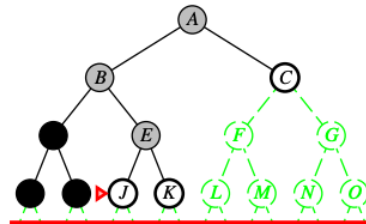
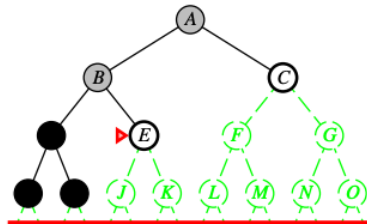
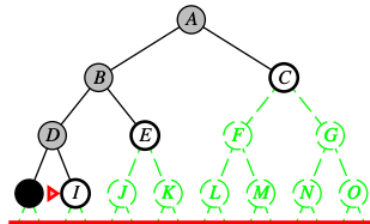
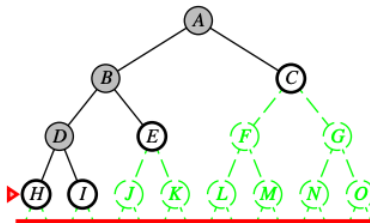
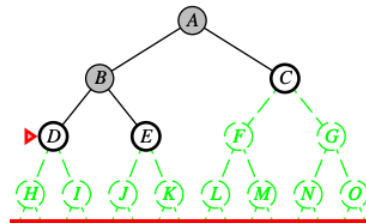
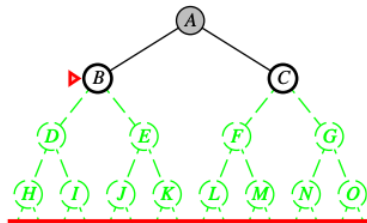
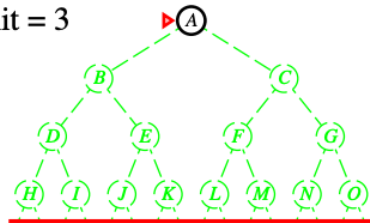
Limit = 0



Limit = 1



Limit = 3



迭代加深的深度优先搜索 (iterative deepening search)

部分节点被多次生成，是否会造成浪费？

在迭代加深的深度优先搜索中，底层（深度 d ）节点只被生成一次，倒数第二层的节点被生成两次，以此类推，一直到根节点，被生成 d 次

$$d(b) + (d - 1)b^2 + \cdots (1)b^d$$

绝大多数重复的节点都在上层，上层节点的重复生成影响不大

性能分析

- 时间复杂度?

- $O(b^d)$

- 空间复杂度?

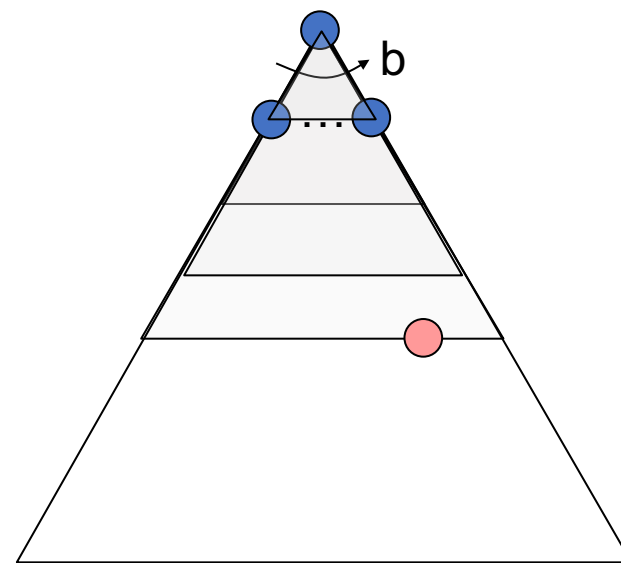
- $O(bd)$

- 完备性?

- Yes

- 最优性?

- Yes, 如果所有行动代价相同



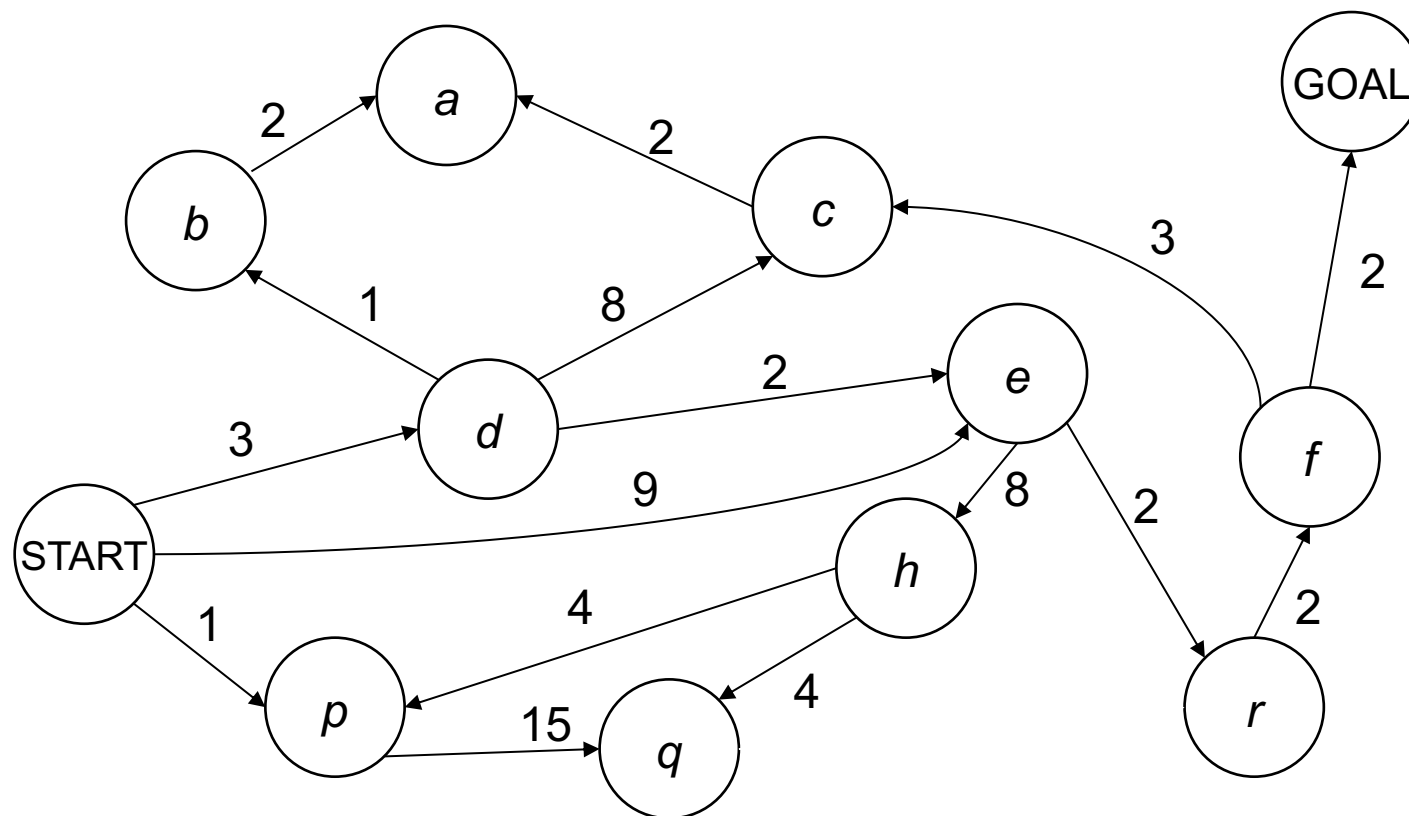
提纲

□ 搜索问题

□ 无信息搜索

- 宽度优先搜索
- 深度优先搜索
- 迭代加深的深度优先搜索
- 一致性代价搜索

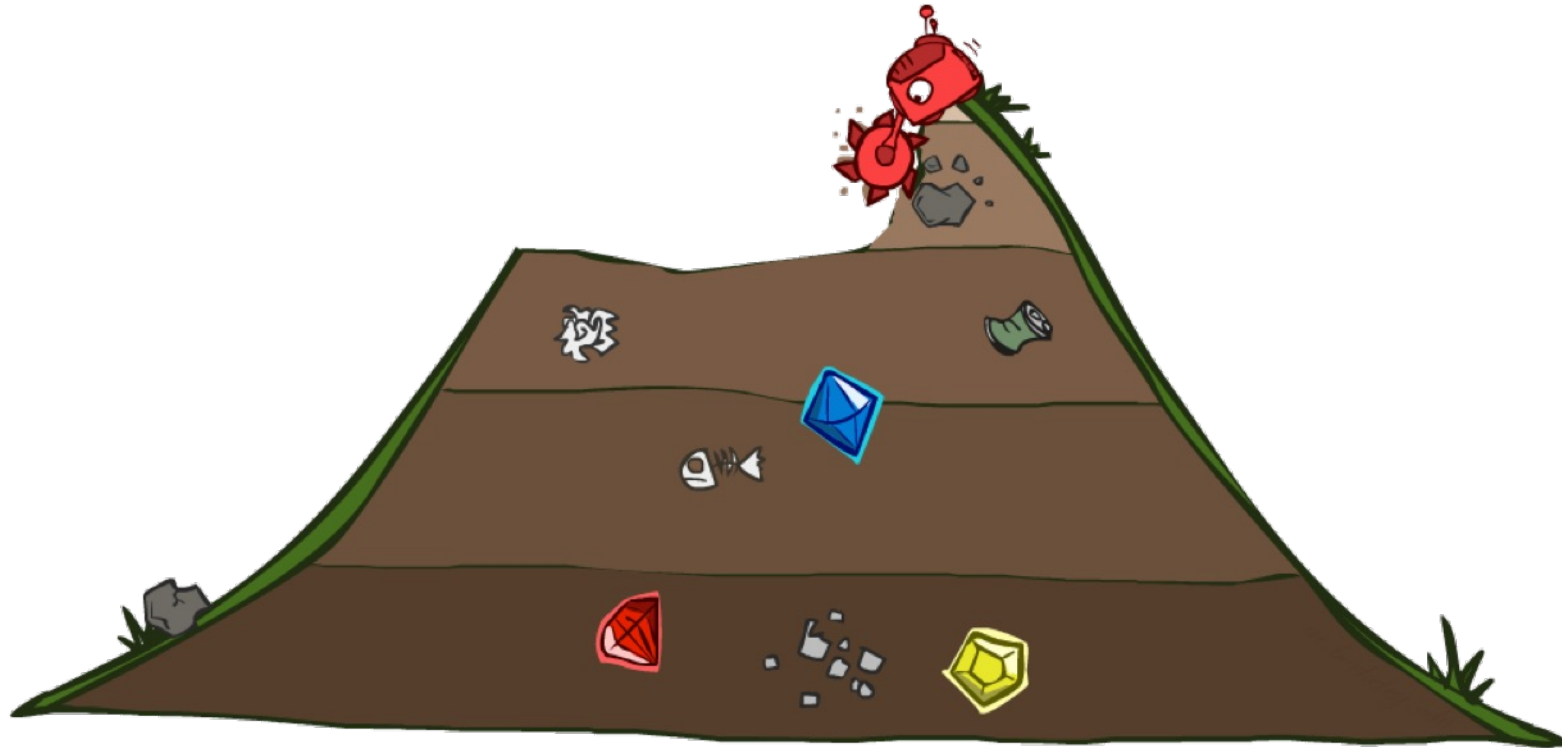
代价敏感搜索



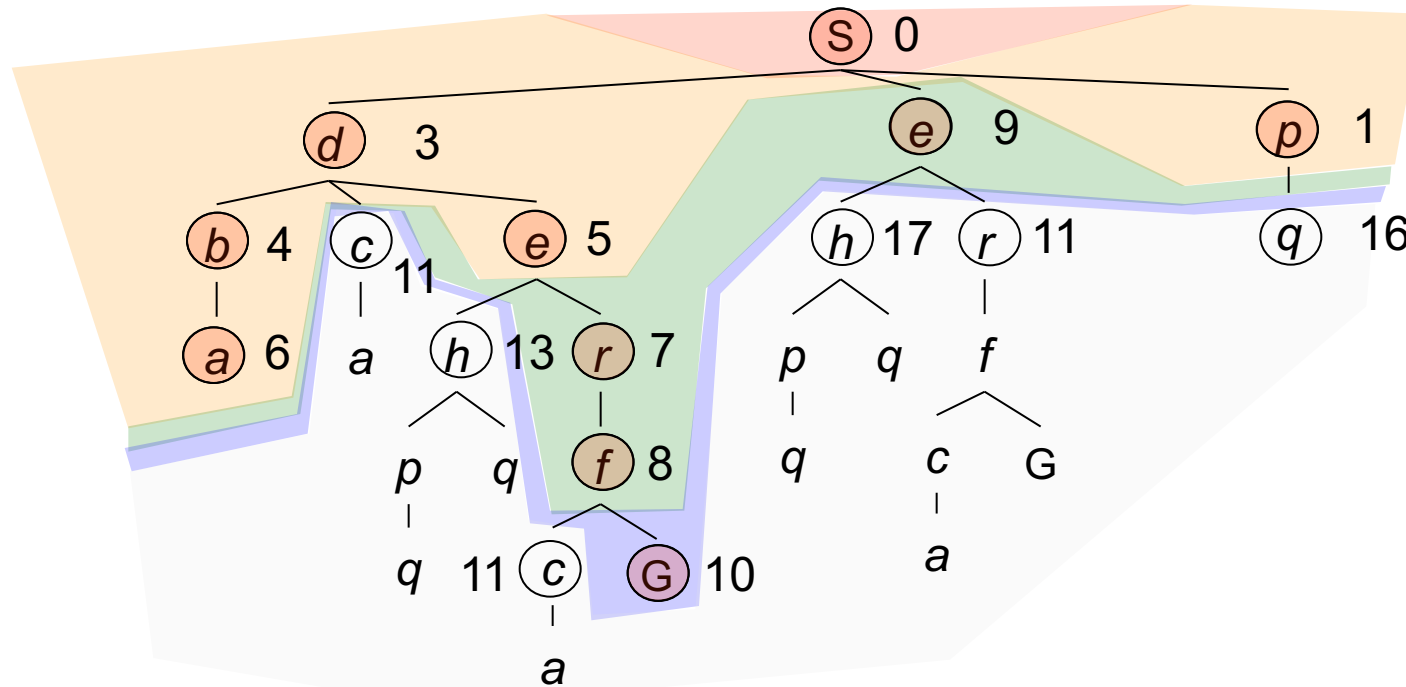
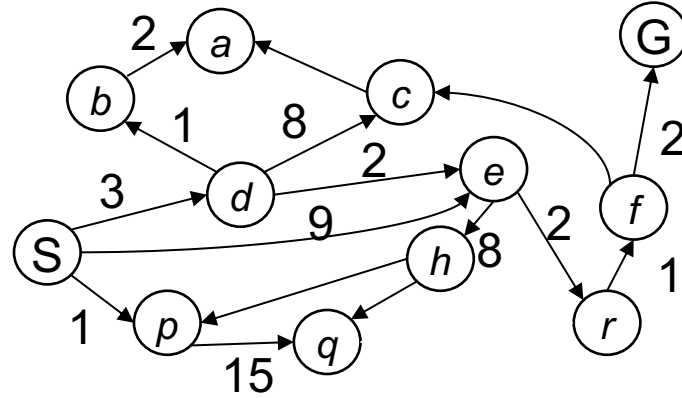
如何寻找代价最小的路径？

一致代价搜索 (uniform-cost search)

一致代价搜索扩展路径消耗最小的节点



一致代价搜索 (uniform-cost search)



性能分析

假设最优解代价为 C^* , ϵ 为每个动作代价的下界

- 时间复杂度?

- $O(b^{\frac{C^*}{\epsilon}})$

- 空间复杂度?

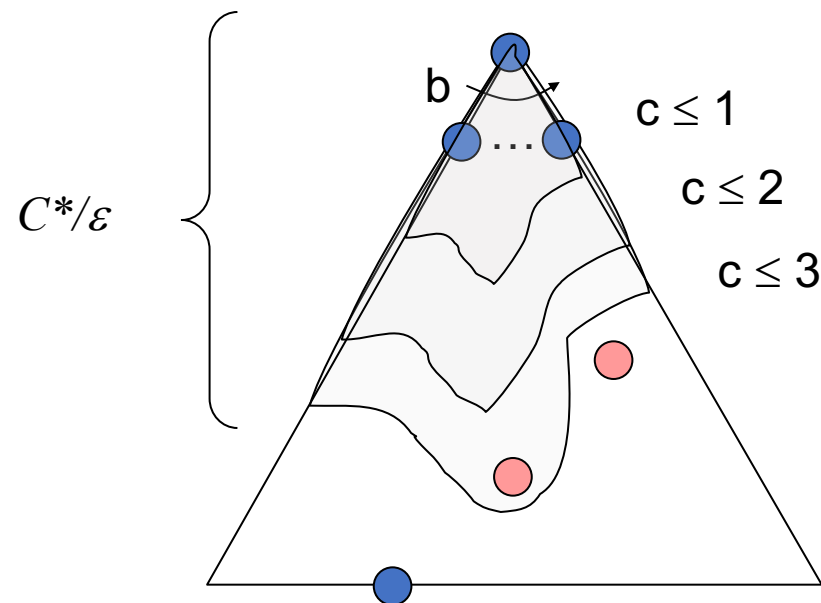
- $O(b^{\frac{C^*}{\epsilon}})$

- 完备性?

- Yes, 如果每一步的代价 $\geq \epsilon (\epsilon > 0)$

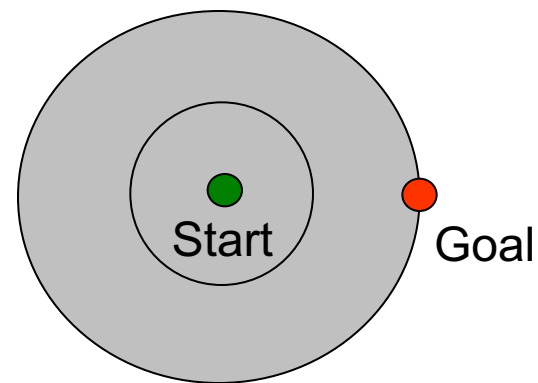
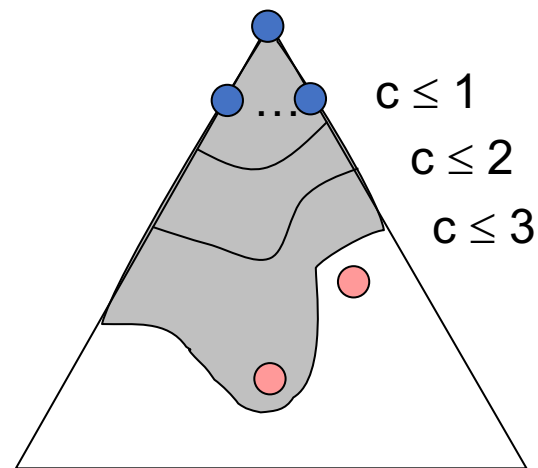
- 最优性?

- Yes



存在的问题

- UCS 按照路径代价进行探索
- 局限：
 - 需要在所有方向上进行探索
 - 没有利用关于目标状态的信息



提纲

□ 搜索问题

□ 无信息搜索

- 宽度优先搜索
- 深度优先搜索
- 迭代加深的深度优先搜索
- 一致性代价搜索

本章小结

- 搜索问题：初始状态、动作、状态转移、目标测试、路径代价
- 宽度优先搜索：逐层扩展节点
- 深度优先搜索：优先扩展最深的节点
- 迭代加深的深度优先搜索：限制深度的DFS
- 一致性代价搜索：优先扩展路径代价最小的节点