



Reinforcement Learning: An Introduction

强化学习导论第二版习题解答

作者：吕昀璿

组织：UESTC

时间：March 24, 2020



Victory won't come to us unless we go to it. — M. Moore

目录

1	介绍	1
1.1	强化学习	1
1.2	例子	1
1.3	强化学习的要素	1
1.4	局限和范围	1
1.5	拓展例子：井字游戏	1
1.6	总结	2
1.7	强化学习的早期历史	2
	第一部分 表格解决方法	3
2	多臂赌博机	4
2.1	k 臂赌博机问题	4
2.2	动作值方法	4
2.3	10 臂试验	4
2.4	渐增实现	5
2.5	非平稳问题	5
2.6	乐观初始值	5
2.7	置信上限动作选择	6
2.8	梯度赌博机算法	6
2.9	关联搜索（上下文赌博机）	7
2.10	总结	7
3	有限马尔可夫决策过程	8
3.1	Agent-环境接口	8
3.2	目标和奖励	9
3.3	回报和 episode	9
3.4	回合和连续任务的统一符号	10
3.5	策略和值函数	10
3.6	最优策略和最优值函数	13
3.7	最优和近似	16
3.8	总结	16

4	动态规划	17
4.1	策略评估	17
4.2	策略改进	18
4.3	策略迭代	18
4.4	值迭代	19
4.5	异步动态规划	20
4.6	广义策略迭代	20
4.7	动态规划效率	20
4.8	总结	20
5	蒙特卡罗方法	21
5.1	蒙特卡洛预测	21
5.2	动作值的蒙特卡洛估计	21
5.3	蒙特卡洛控制	22
5.4	无探索起点的蒙特卡洛控制	22
5.5	重要性采样的 off-policy 预测	22
5.6	渐增实现	23
5.7	Off-policy 蒙特卡洛控制	24
5.8	* 折扣的重要性采样	25
5.9	* 每决策的重要性采样	25
5.10	总结	25
6	时间差分学习	26
6.1	TD 预测	26
6.2	TD 预测方法的优势	27
6.3	TD(0) 的最优性	28
6.4	Sarsa: on-policy TD 控制	29
6.5	Q-learning: off-policy TD 控制	29
6.6	期望 Sarsa	30
6.7	最大化偏差与 Double Learning	30
6.8	游戏、后期状态和其他特殊情况	30
6.9	总结	30
7	n 步自举	31

第一章 介绍

1.1 强化学习

1.2 例子

1.3 强化学习的要素

1.4 局限和范围

1.5 拓展例子：井字游戏

🔥 **练习 1.1** : *Self-Play* 假设上面描述的强化学习算法不是与随机对手对战，而是与自身对战，双方都在学习。你认为在这种情况下会发生什么？它会学习一个不同的策略来选择动作吗？ □

解 当与自身对战时：

- 比起固定的对手，与自身对战将学习不同的策略，因为在这种情况下，对手也会有所变化。
- 由于对手也在不断变化，因此可能无法学习最佳策略。
- 可能卡在循环中。因为与自身博弈，自身策略和对手策略都在优化。
- 策略可以保持静态，因为就平均而言，通过每次迭代它们处于平局。

🔥 **练习 1.2** : *Symmetries* 许多井字游戏的位置看起来不同，但由于对称性实际上是一样的。我们如何修改上述学习过程来利用这一点？这种变化会在哪些方面改善学习过程？现在再想想。假设对手没有利用对称性。那样的话，我们应该吗？那么，对称相等的位置必然具有相同的值，这是真的吗？ □

解 我们可以将状态标记为对称的唯一状态，这样我们的搜索空间更小，这样我们就可以更好地估计最佳玩法。

如果我们面对的对手在比赛时没有考虑对称性，那么我们也不应将状态标记为相同。因为对手也是环境的一部分，而环境给出的这些状态并不一致。

🔥 **练习 1.3** : *Greedy Play* 假设强化学习玩家是贪婪的，也就是说，他总是做出让他达到最佳位置的移动。它会比不贪婪的玩家学得更好或更差吗？可能会发生什么问题？ □

解 贪婪的玩家不会探索，因此通常会比非贪婪的玩家表现更差。

如果贪婪的玩家对状态的价值有一个完美的估计，那它将更好。


🔥 **练习 1.4** : *Learning from Exploration* 假设学习更新发生在所有移动之后，包括探索移动。如果随时间逐步减小步长参数（而不是探索的趋势），则状态值将收敛到一组不同的概率。当我们从或者不从探索性动作中学习时对应的两组概率是什么（概念上）？假设我们

确实在继续进行探索移动，那么哪一组概率可能更好学习？哪个会带来更多胜利？ □

解 如果我们不从探索性动作中学习，那么所学到的状态概率将是随机的，因为我们不会更新在给定状态下采取给定动作时会发生的情况。

如果我们从探索性动作中进行学习，那么我们的极限概率应该是状态和动作选择的期望分布。

显然，由于玩家更好地理解正在玩的“游戏”，因此对概率密度的更全面的了解应该会带来更好的玩法。

 **练习 1.5: Other Improvements** 你还能想出其他方法来提高强化学习玩家吗？你能想出更好的办法来解决所提出的井字游戏问题吗？ □

解 一种可能的方法是持有已保存的玩法库。例如，当在一组已知状态中，始终执行库中所对应的移动。这有点像国际象棋游戏，其中有很多“开场”位置被专家玩家认为是好的。这可以加快整个学习过程，或至少改善强化学习玩家的初期发挥。

由于井字游戏是如此简单，我们可以使用递归解决此问题，并计算所有可能的对手移动，并在每一步中选择能最大化我们获胜机会的移动。

1.6 总结

1.7 强化学习的早期历史


第一部分

表格解决方法

第二章 多臂赌博机

2.1 k 臂赌博机问题


2.2 动作值方法

 **练习 2.1** 在 ε -greedy 动作选择中，对于两个动作和 $\varepsilon = 0.5$ 的情况，选择贪婪动作的概率是多少？ □

解 设动作集合中总共具有 n 个动作。在 ε -greedy 方法中，agent 有 ε 的概率机会从动作集合中随机选择，有 $1 - \varepsilon$ 的概率机会选择贪婪动作。已知 $\varepsilon = 0.5$ 和 $n = 2$ ，那么选择贪婪动作的概率为：

$$\frac{1}{n} \times \varepsilon + (1 - \varepsilon) = \frac{1}{2} \times 0.5 + (1 - 0.5) = 0.75$$


2.3 10 臂试验

 **练习 2.2** : *Bandit example* 考虑一个具有 $k = 4$ 个动作的 k 臂赌博机问题，分别表示为 1、2、3 和 4。考虑对该问题应用赌博机算法，该算法使用 ε -greedy 动作选择，样本平均动作值估计和对于所有 a ， $Q_1(a) = 0$ 。假设动作和奖励的初始序列为 $A_1 = 1, R_1 = -1, A_2 = 2, R_2 = 1, A_3 = 2, R_3 = -2, A_4 = 2, R_4 = 2, A_5 = 3, R_5 = 0$ 。在某些时间步上， ε 情况可能已经发生，导致随机选择一个动作。这肯定发生在哪些时间步？在哪些时间步这可能已经发生？ □

解 根据题意列出每一步的动作值，已选择的动作，和选择该动作的原因如下：

时间步	动作值	已选择的动作	选择原因	原因说明				
1	<table><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	0	0	0	1	贪婪或随机	所有动作值相等，都为 0
0	0	0	0					
2	<table><tr><td>-1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	-1	0	0	0	2	贪婪或随机	2、3、4 的动作值相等
-1	0	0	0					
3	<table><tr><td>-1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	-1	1	0	0	2	贪婪	2 的动作值最大
-1	1	0	0					
4	<table><tr><td>-1</td><td>-1/2</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	-1	-1/2	0	0	2	随机	2 的动作值最小
-1	-1/2	0	0					
5	<table><tr><td>-1</td><td>1/3</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	-1	1/3	0	0	3	随机	2 的动作值最大
-1	1/3	0	0					

由表可知， ε 情况肯定在 A_4 和 A_5 发生，可能在 A_1 和 A_2 发生。

 **练习 2.3** 在图 2.2 所示的比较中，就累积奖励和选择最佳动作的概率而言，哪种方法在长期内表现最好？它会好多少？量化地表达你的答案。 □

解 $\varepsilon = 0.01$ 将有更好的表现，因为在两种情况下，当 $t \rightarrow \infty$ 时，我们都有 $Q_t \rightarrow q_*$ 。因此，在这种情况下，总奖励和选择最佳行动的可能性将比 $\varepsilon = 0.1$ 大 10 倍。

2.4 渐增实现

2.5 非平稳问题

练习 2.4 如果步长参数 α_n 不恒定，则估计值 Q_n 是先前接收的奖励的加权平均值，其权重与 (2.6) 给出的权重不同。就步长参数的序列而言，对于一般情况，类似于 (2.6)，每个先前奖励的权重是多少？

解 推导过程与 (2.6) 类似：

$$\begin{aligned} Q_{n+1} &= Q_n + \alpha_n[R_n - Q_n] \\ &= \alpha_n R_n + (1 - \alpha_n)Q_n \\ &= \alpha_n R_n + (1 - \alpha_n)[\alpha_{n-1}R_{n-1} + (1 - \alpha_{n-1})Q_{n-1}] \\ &= \alpha_n R_n + (1 - \alpha_n)\alpha_{n-1}R_{n-1} + (1 - \alpha_n)(1 - \alpha_{n-1})Q_{n-1} \\ &= \alpha_n R_n + (1 - \alpha_n)\alpha_{n-1}R_{n-1} + (1 - \alpha_n)(1 - \alpha_{n-1})\alpha_{n-2}R_{n-2} + \cdots + \\ &\quad (1 - \alpha_n)(1 - \alpha_{n-1})(1 - \alpha_{n-2}) \cdots (1 - \alpha_2)(1 - \alpha_1)Q_1 \\ &= \left(\prod_{i=1}^n (1 - \alpha_i) \right) Q_1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i R_i \prod_{k=i+1}^n (1 - \alpha_k) \end{aligned}$$

练习 2.5 (编程) 设计并进行实验，以证明样本平均方法对于解决非平稳问题的困难。使用 10 臂试验的修改版本，其中起初所有 $q_*(a)$ 均相等，然后进行独立的随机游走（比如在每一步对所有 $q_*(a)$ 加上均值为零且标准差为 0.01 的正态分布增量）。绘制类似图 2.3 所示的图，为使用样本平均值进行增量计算的动作值方法，和另一使用恒定步长参数 $\alpha = 0.1$ 的动作值方法去准备图。使用 $\varepsilon = 0.1$ 和更长的运行时间，比如 10,000 步。

解 见 `exercise-programming/exercise2.5.py`。

2.6 乐观初始值

练习 2.6: *Mysterious Spikes* 图 2.3 中显示的结果应该是相当可靠的，因为它们是 2000 多个单独的、随机选择的 10 臂赌博机任务的平均值。那么，为什么乐观方法的曲线的早期部分会有振荡和尖峰呢？换句话说，是什么让这种方法在特定的早期步骤上表现得更好或更差呢？

解 在步骤 10 之后的某个时刻，agent 将找到最优值。然后它将贪婪地选择此值。小步长参数（相对于初始值 5 较小）意味着最优值的估计值将朝着其真实值缓慢收敛。

该真实值可能小于 5。这意味着，由于步长较小，其中一个次优动作的值仍接近 5。因此，在某个时刻，agent 又开始次优动作。

练习 2.7: *Unbiased Constant-Step-Size Trick* 在本章的大部分内容中，我们使用样本平均来估计动作值，因为样本平均不会产生恒定步长所产生的初始偏差（参见导致 (2.6) 的

分析)。然而，样本平均并不是一个完全令人满意的解决方案，因为它们在非平稳问题上的表现可能很差。是否有可能避免固定步长的偏差，同时保持它们在非平稳问题上的优势？一种方法是使用步长为

$$\beta_n \doteq \alpha / \bar{o}_n, \quad (2.1)$$

来处理特定动作的第 n 次奖励，其中 $\alpha > 0$ 是常规的恒定步长，而 \bar{o}_n 是从 0 开始的跟踪：

$$\bar{o}_n \doteq \bar{o}_{n-1} + \alpha(1 - \bar{o}_{n-1}), \quad \text{对于 } n \geq 0, \quad \bar{o}_0 \doteq 0. \quad (2.2)$$

进行类似 (2.6) 中的分析，表明 Q 值是没有初始偏差的指数近期加权平均。

解 考虑练习 2.4 的答案。由于 $\beta_1 = 1$ ，因此对于 $k > 1$ ， Q_k 与 Q_1 无关。现在有迹象表明，随着我们往前看，剩余总和中的权重会降低。即

$$\omega_i = \beta_i \prod_{k=i+1}^n (1 - \beta_k)$$

对于固定的 n 随 i 而增加。为此，观测到

$$\frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} = \frac{\beta_{i+1}}{\beta_i(1 - \beta_{i+1})} = \frac{1}{1 - \alpha} > 1$$

如果假定 $\alpha < 1$ 时。如果 $\alpha = 1$ ，那么对于 $\forall t$ ， $\beta_t = 1$ 。

2.7 置信上限动作选择

练习 2.8: UCB Spikes 在图 2.4 中，UCB 算法在第 11 步显示了明显的峰值性能。这是为什么？请注意，为了让你的答案完全令人满意，必须解释为什么奖励在第 11 步增加，为什么在随后的步减少。提示：如果 $c = 1$ ，则尖峰不那么突出。□

解 在前 10 个步中，agent 会循环执行所有动作，因为当 $N_t(a) = 0$ 时， a 被认为是最大值。然后，在第 11 步，agent 通常会贪婪地选择。agent 将继续贪婪地选择，直到 $\ln t$ 超过 $N_t(a)$ 进行其他动作之一为止，在这种情况下，agent 将开始再次探索，从而减少了奖励。

请注意，从长远来看， $N_t = O(t)$ 和 $\ln(t)/t \rightarrow 0$ 。因此，该 agent 是“渐近贪婪的”。

2.8 梯度赌博机算法


练习 2.9 证明了在两种动作情况下，soft-max 分布与统计学和人工神经网络中常用的 logistic 函数或 sigmoid 函数的分布相同。□

解 令这两个动作分别用 0 和 1 表示。现在

$$\Pr\{A_t = 1\} = \frac{e^{H_t(1)}}{e^{H_t(0)} + e^{H_t(1)}} = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

其中 $x = H_t(1) - H_t(0)$ 是 1 相对于 0 的相对偏好。


2.9 关联搜索（上下文赌博机）

 **练习 2.10** 假设你面对的是一个 2 臂赌博机任务，其真实动作值随时间步而随机变化。具体地说，假设对于任何时间步，动作 1 和 2 的真值分别为 0.1 和 0.2，概率为 0.5（情况 A），以及 0.9 和 0.8，概率为 0.5（情况 B）。如果你在任何一步都不能说出你面对的是哪种情况，你能达到的最好的成功期望是什么，你应该如何行动来实现它？现在假设在每一步中都被告知您面对的是情况 A 还是情况 B（尽管您仍然不知道真实的动作值）。这是一个关联搜索任务。在这个任务中，你能达到的最好的成功期望是什么？你应该如何行动才能达到这个目标？ □

解 假定奖励平稳。应该选择具有最高期望奖励的动作。对于第一种情形，动作 1 和 2 的期望值都为 0.5，即 $0.5 \times (0.1 + 0.9) = 0.5$ ， $0.5 \times (0.2 + 0.8) = 0.5$ 。因此这两个动作可以随机进行选择。

针对第二种情形，应该对每种颜色分别运行正常的赌博机方法。在每种情况下确定最佳动作的期望奖励为 0.55，即 $0.5 \times 0.2 + 0.5 \times 0.9 = 0.55$ 。

2.10 总结

 **练习 2.11**（编程）对于练习 2.5 中概述的非平稳情况，制作类似于图 2.6 的图。包括 $\alpha = 0.1$ 的步长不变的 ϵ -greedy 算法。使用 200,000 步的运行，并作为每个算法和参数设置的性能度量，使用最近 100,000 步的平均奖励。 □

解 见 `exercise-programming/exercise2.11.py`。

第三章 有限马尔可夫决策过程

3.1 Agent-环境接口

- 练习 3.1 设计三个符合 MDP 框架的您自己的示例任务，为每个任务确定状态、动作和奖励。尽可能使这三个例子各不相同。该框架是抽象且灵活的，可以以多种不同的方式应用。在你的至少一个例子中，以某种方式扩展它的限制。 □

解 (1) 网格迷宫：状态为格子编号，动作为东西南北移动，奖励为到达出口；

(2) 棋类游戏：状态为棋子在棋盘上的位置，动作为棋子的移动，奖励为游戏结果；

(3) 自动驾驶：状态为周围环境、视觉、雷达等传感器信息，动作为转向、加速、刹车等，奖励为到达目的地、避免撞车；

(4) Atari 游戏：状态为屏幕像素输入，动作为键盘/鼠标移动，奖励为游戏增加分数。

- 练习 3.2 MDP 框架是否足以有效地代表所有以目标为导向的学习任务？你能想出任何明确的例外吗？ □

解 不足以。当我们没有足够的计算能力去定义状态和奖励时，例如围棋，必须通过深度学习框架来解决。还比如射击游戏，由于视线限制，agent 没有关于其他玩家的直接信息，但状态会受到队友和对手的影响，使 agent 无法确定先前的动作对当前情况的影响，这使得不是 MDP。

- 练习 3.3 考虑一下驾驶问题。您可以根据油门、方向盘和制动器来定义动作，即身体与机器接触的地方。或者您可以将它们定义为，例如橡胶与道路相接的地方，将您的动作视为轮胎扭矩。或者您还可以定义它们为，例如大脑与身体接触的地方，这些动作是肌肉抽搐来控制您的四肢。或者您可以提高到一个很高的层次，并说您的动作是您选择开车前往的地方。在 agent 与环境之间划清界限的正确层次和正确地方是什么？在什么基础上线路的一个位置优于另一个位置？有没有什么基本的理由让你更喜欢一个位置，或者这是一个自由的选择？ □

解 这个问题是要求正确的线路来定义环境和 agent。正确的划分界限应该可以观察到 agent 的动作对状态的影响。


- 练习 3.4 针对 $p(s', r|s, a)$ 给出一个类似于例 3.3 中的表。它应该具有 s, a, s', r 和 $p(s', r|s, a)$ 的列，以及 $p(s', r|s, a) > 0$ 的每个 4 元组的行。

解 表格如下：

s	a	s'	r	$p(s', r s, a)$
high	search	high	r_{search}	α
high	search	low	r_{search}	$1 - \alpha$
low	search	high	-3	$1 - \beta$
low	search	low	r_{search}	β
high	wait	high	r_{wait}	1
high	wait	low	-	0
low	wait	high	-	0
low	wait	low	r_{wait}	1
low	recharge	high	0	1
low	recharge	low	-	0


3.2 目标和奖励

3.3 回报和 episode

 **练习 3.5** 3.1 节中的方程式适用于连续的情况，需要进行修改（非常轻微）以适用于回合任务。通过给出 (3.3) 的修改版本，表明您知道所需的修改。 □

解

$$\sum_{s' \in \mathcal{S}^+} \sum_{r \in \mathcal{R}} p(s', r|s, a) = 1, \quad \text{for all } s \in \mathcal{S}^+, a \in \mathcal{A}(s) \text{ and } \mathcal{S}^+ \doteq \{\text{all states plus terminal state}\}$$

 **练习 3.6** 假设您将杆子平衡视为回合任务，且使用折扣，除了失败奖励设为-1，所有其他奖励设为 0。那么每个时间的回报是什么？这个回报与这个任务的折扣的、连续的形式有什么不同？ □

解 对于回合任务，回报为：

$$G_t \doteq R_{t+1} + R_{t+2} + R_{t+3} + \cdots + R_T$$


使用折扣后，回报为：

$$G_t \doteq R_{t+1} + \gamma R_{t+2} + \gamma^2 R_{t+3} + \cdots + \gamma^{T-t-1} R_T = \sum_{k=0}^{T-t-1} \gamma^k R_{t+k+1}$$

由于失败时奖励为-1，其他情况奖励设置为 0，所以每个时间的回报为：


$$G_t = -\gamma^{T-t-1}$$

该回报实际上与折扣的、连续的情况下的回报 $-\gamma^K$ 相同，其中 K 是失败之前的时间步长。

 **练习 3.7** 想象一下，您正在设计一个运行迷宫的机器人。您决定逃脱迷宫时给予它 +1 的奖励，在其他所有时间给予零的奖励。这项任务似乎自然地分解为 episodes，即连续穿过迷宫，因此您决定将其视为回合性任务，目标是最大化期望的总奖励 (3.7)。在运行学习 agent 一段时间后，您发现它在逃离迷宫方面没有任何改善。这出了什么问题？您是否已有效地向 agent 传达了您想要实现的目标？ □


解 如果您不使用 γ 来执行折扣，则无论 agent 花费多长时间，最大的回报始终为 +1。与

agent 进行沟通的正确方法是在逃离前的每个时间步加-1 的惩罚或增加折扣。

 **练习 3.8** 假设 $\gamma = 0.5$, 以及收到 $T = 5$ 的如下奖励序列, $R_1 = -1, R_2 = 2, R_3 = 6, R_4 = 3, R_5 = 2$ 。那么 G_0, G_1, \dots, G_5 是什么? 提示: 向后工作。 □


解

$$\begin{aligned} G_5 &= 0 \\ G_4 &= R_5 + \gamma G_5 = 2 + 0.5 \times 0 = 2 \\ G_3 &= R_4 + \gamma G_4 = 3 + 0.5 \times 2 = 4 \\ G_2 &= R_3 + \gamma G_3 = 6 + 0.5 \times 4 = 8 \\ G_1 &= R_2 + \gamma G_2 = 2 + 0.5 \times 8 = 6 \\ G_0 &= R_1 + \gamma G_1 = -1 + 0.5 \times 6 = 2 \end{aligned}$$

 **练习 3.9** 假设 $\gamma = 0.9$, 以及奖励序列为 $R_1 = 2$, 然后是 7s 的无限序列。那么 G_1 和 G_0 是什么? □

解

$$\begin{aligned} G_1 &= 7 \times \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{k+2} = 7 \times \frac{1}{1-\gamma} = 7 \times \frac{1}{1-0.9} = 70 \\ G_0 &= R_1 + \gamma \times 7 \times \sum_{k=1}^{\infty} \gamma^k R_{k+1} = 2 + 7 \times \frac{\gamma}{1-\gamma} = 2 + 7 \times \frac{0.9}{1-0.9} = 2 + 7 \times 90 = 65 \\ G_0 &= R_1 + \gamma G_1 = 2 + 0.9 \times 70 = 65 \end{aligned}$$


 **练习 3.10** 证明 (3.10) 中的第二个等式。 □

解 因为奖励为不为 0 的常数, 以及 $\gamma < 1$, 则:

$$\begin{aligned} S_N &\doteq \sum_{k=0}^N \gamma^k \\ \gamma S_N - S_N &= \gamma^{N+1} - 1 \\ S_N &= \frac{1 - \gamma^{N+1}}{1 - \gamma} \\ G_t &\doteq \lim_{N \rightarrow \infty} S_N = \frac{1}{1 - \gamma} \end{aligned}$$

3.4 回合和连续任务的统一符号

3.5 策略和值函数

 **练习 3.11** 如果当前状态为 S_t , 并且根据随机策略 π 选择动作, 那么根据 π 和四参数函数 p (3.2), R_{t+1} 的期望是什么? □

解

$$\mathbb{E}_{\pi}[R_{t+1}|S_t = s] = \sum_a \pi(a|s) \sum_{s', r} p(s', r|s, a)r$$

 **练习 3.12** 用 q_{π} 和 π 给出 v_{π} 的等式。 □

解

$$v_{\pi}(s) \doteq \sum_a \pi(a|s) q_{\pi}(s, a)$$

练习 3.13 用 v_{π} 和四个参数 p 给出 q_{π} 的等式。

解

$$q_{\pi}(s, a) \doteq \sum_{s', r} p(s', r|s, a) [r + \gamma v_{\pi}(s')]$$

练习 3.14 对于例 3.5 的图 3.2 (右) 中所示的值函数 v_{π} , 对于每个状态, Bellman 方程 (3.14) 必须成立。从数字上显示此方程适用于值为 +0.7 的中心状态, 相对于它的四个相邻状态, 值分别为 +2.3、+0.4、-0.4 和 +0.7。(这些数字仅精确到小数点后一位。) □

解 由题意知: $\pi(a|s) = \frac{1}{4}, p(s', r|s, a) = 1, r = 0, \gamma = 0.9$, 那么:

$$\begin{aligned} v_{\pi}(\text{center}) &\doteq \sum_a \pi(a|s) \sum_{s', r} p(s', r|s, a) [r + \gamma v_{\pi}(s')] \\ &= \frac{1}{4} \times 0.9 \times [2.3 + 0.4 - 0.4 + 0.7] \\ &= \frac{1}{4} \times 0.9 \times 3 \\ &= 0.675 \\ &\approx 0.7 \end{aligned}$$

练习 3.15 在 Gridworld 示例中, 奖励对于目标为正, 对于进入世界的边缘为负, 其余时间为零。这些奖励的标记是否重要, 或者只是它们之间的间隔重要? 使用 (3.8) 证明, 将常数 c 添加到所有奖励中会为所有状态的值添加常数 v_c , 因此不会影响任何策略下任何状态的相对值。就 c 和 γ 而言, v_c 是什么? □

解 G_t 的定义如下:

$$G_t \doteq R_{t+1} + \gamma R_{t+2} + \gamma^2 R_{t+3} + \cdots = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1}$$

添加常数 c 后:

$$\begin{aligned} G_t^* &\doteq (c + R_{t+1}) + \gamma(c + R_{t+2}) + \gamma^2(c + R_{t+3}) + \cdots \\ &= G_t + \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k c \\ &= G_t + \frac{c}{1-\gamma} \end{aligned}$$

$$v_{\pi}^*(s) = \mathbb{E}_{\pi}[G_t^*|S_t = s] = \mathbb{E}_{\pi}\left[G_t + \frac{c}{1-\gamma} \middle| S_t = s\right] = \mathbb{E}_{\pi}[G_t|S_t = s] + \frac{c}{1-\gamma}$$

所以添加常数后不会影响状态的相对值, 另外, v_c 为:

$$v_c = \frac{c}{1-\gamma}$$

练习 3.16 现在考虑将常数 c 添加到回合任务 (例如迷宫赛跑) 中的所有奖励中。这会产生影响吗, 还是会像上面的连续任务中那样使任务保持不变? 为什么或者为什么不? 举个例子。 □

解 回合任务中 G_t 为:

$$G_t = R_{t+1} + \gamma R_{t+2} + \gamma^2 R_{t+3} + \cdots + \gamma^{T-t-1} R_T = \sum_{k=0}^{T-t-1} \gamma^k R_{t+k+1}$$

加入常数 c 后:

$$\begin{aligned} G_t^* &= (c + R_{t+1}) + \gamma(c + R_{t+2}) + \gamma^2(c + R_{t+3}) + \cdots + \gamma^{T-t-1}(c + R_T) \\ &= G_t + \sum_{k=0}^{T-t-1} \gamma^k c \\ &= G_t + c \frac{1 - \gamma^{T-t}}{1 - \gamma} \end{aligned}$$

由上述等式可以看出, 回合任务中加入常数会产生影响。它会增加 v 的值。

例如假设我们有一个回合任务, 其只有一个状态 S 和两个动作 A_0, A_1 。采取 A_0 动作会导致从 S 状态进入终止状态, 此时得到的奖励为 +1。采取 A_1 动作会回到 S 状态, 奖励为零。在这种情况下 agent 应采取动作 A_0 进入终止状态以最大化奖励。

如果我们给每个奖励加 +1, 那么一直采取动作 A_1 获得的回报为 $\frac{1}{1-\gamma}$, 当选择的折扣因子小于 $\frac{1}{2}$, 那么获得的回报将大于 2。在这种情况下 agent 的最优策略是一直采取动作 A_1 。

练习 3.17 动作值, 即 q_π 的 Bellman 方程是什么? 它必须根据状态-动作对 (s, a) 的可能后继动作值 $q_\pi(s', a')$ 给出动作值 $q_\pi(s, a)$ 。提示: 右边的备份图与此方程式相对应。展示类似于 (3.14) 的方程序列, 但针对动作值。□

解

$$\begin{aligned} G_t &\doteq \mathbb{E}_\pi[G_t | S_t = s, A_t = a] \\ &= \mathbb{E}_\pi[R_{t+1} + \gamma G_{t+1} | S_t = s, A_t = a] \\ &= \sum_{s', r} p(s', r | s, a) \left[r + \gamma \sum_{a'} \pi(a' | s') q_\pi(s', a') \right] \end{aligned}$$

练习 3.18 状态的价值取决于该状态下可能采取的动作的价值, 以及取决于在当前策略下采取每种动作的可能性。我们可以从植根于该状态的小备份图来考虑这一点, 并考虑每个可能的动作:

给定 $S_t = s$, 根据期望叶节点的值 $q_\pi(s, a)$, 给出与该直觉和示意图相对应的等式, 以表示根节点的值 $v_\pi(s)$ 。这个等式包括以遵循策略 π 为条件的期望。然后给出第二个等式, 其中用 $\pi(a|s)$ 明确写出期望值, 使得等式中不出现期望值符号。□

解

$$\begin{aligned} v_\pi(s) &= \mathbb{E}_\pi[q_\pi(s, a)] \\ &= \sum_a \pi(a|s) q_\pi(s, a) \end{aligned}$$

练习 3.19 动作的值 $q_\pi(s, a)$ 取决于期望的下一个奖励和剩余奖励的期望总和。同样, 我们可以用一个小的备份图来考虑这一点, 该备份图扎根于一个动作 (状态-动作对) 并分支到可能的下一个状态:

给定 $S_t = s$ 和 $A_t = a$, 根据期望的下一个奖励 R_{t+1} 和期望的下一个状态值 $v_\pi(S_{t+1})$,

给出与该直觉和示意图相对应的等式的动作值 $q_\pi(s, a)$ 。此等式应包括不应以遵循该策略为条件的期望。然后给出第二个方程，用 (3.2) 定义的 $p(s', r|s, a)$ 显式写出期望值，这样方程中就不会出现期望值符号。 \square

解

$$\begin{aligned} q_\pi(s, a) &= \mathbb{E}[R_{t+1} + \gamma v_\pi(S_{t+1}) | S_t = s, A_t = a] \\ &= \sum_{s', r} p(s', r|s, a)[r + \gamma v_\pi(s')] \end{aligned}$$

3.6 最优策略和最优值函数

练习 3.20 画出或描述 golf 示例中的最优状态值函数。 \square

解 最佳状态值函数在绿地外时根据发球杆给出值，然后在绿地时根据推杆给出值。

练习 3.21 画出或描述 golf 示例中用于推杆的最优动作值函数 $q_*(s, \text{putter})$ 轮廓。 \square

解 应与始终使用推杆的策略的值相同，即图 (3.3) 中的 v_{putt} 图。

练习 3.22 考虑右图所示的连续 MDP。唯一要做出的决定是顶部状态，其左右有两个动作可用即 left 和 right，数字表示每次动作后确定收到的奖励。有两种确定性策略， π_{left} 和 π_{right} 。如果 $\gamma = 0$ ，哪种策略最优？如果 $\gamma = 0.9$ 呢？如果 $\gamma = 0.5$ 呢？ \square

解 设顶部状态为 A，采取 left 和 right 动作后分别到达状态 B 和 C。由题意知： $R_{A, \text{left}, B} = +1, R_{B, \text{left}, A} = 0, R_{A, \text{right}, C} = 0, R_{C, \text{right}, A} = +2$ ，那么顶部状态的回报为：

$$\begin{aligned} G_{\pi_{\text{left}}} &= R_{A, \text{left}, B} + \gamma R_{B, \text{left}, A} + \gamma^2 R_{A, \text{left}, B} + \gamma^3 R_{B, \text{left}, A} + \gamma^4 R_{A, \text{left}, B} + \cdots \\ &= R_{A, \text{left}, B} + \gamma^2 R_{A, \text{left}, B} + \gamma^4 R_{A, \text{left}, B} + \cdots \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^{2k} \\ &= \frac{1}{1 - \gamma^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{\pi_{\text{right}}} &= R_{A, \text{right}, C} + \gamma R_{C, \text{right}, A} + \gamma^2 R_{A, \text{right}, C} + \gamma^3 R_{C, \text{right}, A} + \gamma^4 R_{A, \text{right}, C} + \cdots \\ &= \gamma R_{C, \text{right}, A} + \gamma^3 R_{C, \text{right}, A} + \gamma^5 R_{C, \text{right}, A} + \cdots \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} 2\gamma^{1+2k} \\ &= \frac{2\gamma}{1 - \gamma^2} \end{aligned}$$

根据上述每种策略的回报公式， $\gamma = 0.5$ 是临界点。如果 $\gamma > 0.5$ ，则 right 为最优动作。如果 $\gamma < 0.5$ ，则 left 为最优动作。如果 $\gamma = 0.5$ ，则两者均为最优动作。

练习 3.23 给出 recycling robot 中 q_* 的 Bellman 方程。 \square

解 q_* 的 Bellman 方程为：

$$\begin{aligned}
q_* &= \mathbb{E}[R_{t+1} + \gamma \max_{a'} q_*(S_{t+1}, a') | S_t = s, A_t = a] \\
&= \sum_{s', r} p(s', r | s, a) [r + \gamma \max_{a'} q_*(s', a')]
\end{aligned} \tag{3.1}$$

为了简洁，将两个状态 high、low 和三个动作 search、wait、recharge 分别表示为 h, l, s, w, re ，那么 Bellman 方程为：


$$\begin{aligned}
q_*(h, s) &= p(h|h, s)[r_s + \gamma \max(q_*(h, s), q_*(h, w))] + \\
&\quad p(l|h, s)[r_s + \gamma \max(q_*(l, s), q_*(l, w), q_*(l, re))] \\
&= \alpha[r_s + \gamma \max(q_*(h, s), q_*(h, w))] + \\
&\quad (1 - \alpha)[r_s + \gamma \max(q_*(l, s), q_*(l, w), q_*(l, re))]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_*(l, s) &= p(h|l, s)[-3 + \gamma \max(q_*(h, s), q_*(h, w))] + \\
&\quad p(l|l, s)[r_s + \gamma \max(q_*(l, s), q_*(l, w), q_*(l, re))] \\
&= (1 - \beta)[-3 + \gamma \max(q_*(h, s), q_*(h, w))] + \\
&\quad \beta[r_s + \gamma \max(q_*(l, s), q_*(l, w), q_*(l, re))]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_*(h, w) &= p(h|h, w)[r_w + \gamma \max(q_*(h, s), q_*(h, w))] \\
&= r_w + \gamma \max(q_*(h, s), q_*(h, w))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_*(l, w) &= p(l|l, w)[r_w + \gamma \max(q_*(l, s), q_*(l, w), q_*(l, re))] \\
&= r_w + \gamma \max(q_*(l, s), q_*(l, w), q_*(l, re))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_*(l, re) &= p(h|l, re)[0 + \gamma \max(q_*(h, s), q_*(h, w))] \\
&= \gamma \max(q_*(h, s), q_*(h, w))
\end{aligned}$$


 **练习 3.24** 图 3.5 给出了 gridworld 最优状态的最优值为 24.4，保留了一位小数。使用您对最优策略的知识，并使用 (3.8) 以符号方式表示该值，然后将其计算到小数点后三位。□
解 v_* 的 Bellman 方程为：

$$v_*(s) = \max_a \mathbb{E}_{\pi_*}[G_t | S_t = s, A_t = a]$$

根据图 3.5 中的 v_* 和 π_* ，到达 A 后的最佳解决方案是移至 A 后快速返回 A。这需要 5 个时间步。所以我们将有

$$\begin{aligned}
G_t^* &= 10 + \gamma \times 0 + \gamma^2 \times 0 + \gamma^3 \times 0 + \gamma^4 \times 0 + \gamma^5 \times 10 + \gamma^6 \times 0 + \dots \\
&= 10 + \gamma^5 \times 10 + \dots \\
&= \sum_{k=0}^{\infty} 10\gamma^{5k} \\
&= \frac{10}{1 - \gamma^5}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$v_*(A) = G_t^*$, 状态 A 的理论值是 $10/(1 - \gamma^5)$ 。通过用 python 写一个小函数（循环 100 次就足够了）或使用计算器，我们得到的答案是 24.419428096993954。保留三位小数为 24.419。

 **练习 3.25** 给出用 q_* 表示的 v_* 方程。

□

解

$$v_*(s) = \max_a (q_*(s, a))$$

 **练习 3.26** 给出用 v_* 和四参数 p 表示的 q_* 方程。

□

解

$$q_*(s, a) = \sum_{s', r} p(s', r | s, a) [r + \gamma v_*(s')]$$

 **练习 3.27** 给出用 q_* 表示的 π_* 方程。

□

解


$$\pi_*(s) = \arg \max_a q_*(s, a)$$

 **练习 3.28** 给出用 v_* 和四参数 p 表示的 π_* 方程。

□

解

$$\pi_*(s) = \arg \max_a \sum_{s', r} p(s', r | s, a) [r + \gamma v_*(s')]$$

 **练习 3.29** 根据三参数函数 p (3.4) 和两参数函数 r (3.5) 重写四个值函数 (v_π, v_*, q_π, q_*) 的四个 Bellman 方程。

□

解

$$\begin{aligned}
v_\pi(s) &= \mathbb{E}_\pi[G_t | S_t = s] \\
&= \sum_a \pi(a | s) \sum_{s'} p(s' | s, a) [r(s, a) + \gamma v_\pi(s')]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_*(s) &= \max_a \mathbb{E}_{\pi_*}[G_t | S_t = s, A_t = a] \\
&= \max_a \sum_{s'} p(s' | s, a) [r(s, a) + \gamma v_*(s')]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_\pi(s, a) &= \mathbb{E}_\pi[G_t | S_t = s, A_t = a] \\
&= \sum_{s'} p(s' | s, a) [r(s, a) + \gamma \sum_{a'} \pi(a' | s') q_\pi(s', a')]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_*(s, a) &= \mathbb{E}[R_{t+1} + \gamma \max_{a'} q_*(S_{t+1}, a') | S_t = s, A_t = a] \\ &= \sum_{s'} p(s' | s, a) [r(s, a) + \gamma \max_{a'} q_*(s', a')] \end{aligned}$$

3.7 最优和近似

3.8 总结



第四章 动态规划

4.1 策略评估

🔥 **练习 4.1** 在例 4.1 中, 如果 π 是等概率随机策略, 那么 $q_\pi(11, \text{down})$ 是什么? $q_\pi(7, \text{down})$ 是什么? □

解 已知用 v_π 表示 q_π 为:

$$q_\pi(s, a) = \sum_{s', r} p(s', r | s, a) [r + \gamma v_\pi(s')]$$

根据题意, 已知 $p(s', r | s, a) = 1, \gamma = 1$, 根据公式可得:

$$q_\pi(11, \text{down}) = -1 + v_\pi(T) = -1 + 0 = -1$$

$$q_\pi(7, \text{down}) = -1 + v_\pi(11) = -1 - 14 = -15$$

🔥 **练习 4.2** 在例 4.1 中, 假设在状态 13 下方的网格世界中添加了一个新状态 15, 并且其动作 (left, up, right, down) 分别使该 agent 进入状态 12、13、14 和 15。假设从原始状态的转移未更改。那么, 等概率随机策略的 $v_\pi(15)$ 是什么? 现在假设状态 13 的动态也发生了变化, 以至于从状态 13 向下执行的动作将使 agent 到达新的状态 15。在这种情况下, 等概率随机策略的 $v_\pi(15)$ 是什么? □

解 已知 v_π 的 Bellman 方程为:

$$v_\pi(s) = \sum_a \pi(a | s) \sum_{s', r} p(s', r | s, a) [r + \gamma v_\pi(s')]$$


由题意知 $\pi(a | s) = 1/4 = 0.25, p(s', r | s, a) = 1, \gamma = 1$, 那么 $v_\pi(15)$ 的值为:

$$\begin{aligned} v_\pi(15) &= 0.25 \times [-1 + v_\pi(12)] + 0.25 \times [-1 + v_\pi(13)] + 0.25 \times [-1 + v_\pi(14)] \\ &\quad + 0.25 \times [-1 + v_\pi(15)] \\ &= -1 + 0.25 \times [v_\pi(12) + v_\pi(13) + v_\pi(14)] + 0.25 \times v_\pi(15) \\ &= -1 + 0.25 \times [-22 - 20 - 14] + 0.25 \times v_\pi(15) \\ &= -15 + 0.25 \times v_\pi(15) \end{aligned}$$

解得: $v_\pi(15) = -15/0.75 = -20$

改变动态不会导致整个游戏的重新计算: 状态 15 与状态 13 完全相同。因此, 它们

的状态值都相同且仍为-20。


 **练习 4.3** 对于动作值函数 q_π 及其通过序列函数 q_0, q_1, q_2, \dots 进行的逐次逼近，类似于 (4.3)，(4.4) 和 (4.5) 的方程是什么？ □

解


$$\begin{aligned}
 q_\pi(s, a) &\doteq \mathbb{E}_\pi[G_t | S_t = s, A_t = a] \\
 &= \mathbb{E}_\pi[R_{t+1} + \gamma G_{t+1} | S_t = s, A_t = a] \\
 &= \mathbb{E}_\pi[R_{t+1} + \gamma \sum_{a'} q_\pi(S_{t+1}, a') | S_t = s, A_t = a] \\
 &= \sum_{s', r} p(s', r | s, a) \left[r + \gamma \sum_{a'} \pi(a' | s') q_\pi(s', a') \right] \\
 q_{k+1}(s, a) &\doteq \mathbb{E}_\pi[R_{t+1} + \gamma \sum_{a'} q_\pi(S_{t+1}, a') | S_t = s, A_t = a] \\
 &= \sum_{s', r} p(s', r | s, a) \left[r + \gamma \sum_{a'} \pi(a' | s') q_k(s', a') \right]
 \end{aligned}$$

4.2 策略改进

4.3 策略迭代

 **练习 4.4** 第 80 页上的策略迭代算法有一个细微的错误：如果策略在两个或两个以上同样良好的策略之间连续切换，它可能永远不会终止。这可以用于教学，但不适用于实际使用。修改伪代码，以确保收敛。 □

解 将第 3 步策略改进中如果 $old-action \neq \pi(s)$ 改为，如果 $old-action \notin \{a_i\}$ ，其为所有 $\pi(s)$ 下的等价最优解。

 **练习 4.5** 如何为动作值定义策略迭代？给出用于计算 q_* 的完整算法，类似于第 80 页的计算 v_* 的算法。请特别注意此练习，因为所涉及的思想将在本书的其余部分中使用。 □

解

Policy Iteration for estimating $q \approx q_*$

1. 初始化

对于所有 $s \in \mathcal{S}, a \in \mathcal{A}$ ，任意选取 $Q(s, a) \in \mathbb{R}$ 和 $\pi(s) \in \mathcal{A}(s)$

2. 策略评估

循环：

$\Delta \leftarrow 0$

对于每个 $s \in \mathcal{S}$ 和 $a \in \mathcal{A}$ 循环：

$q = Q(s, a)$

$Q(s, a) \leftarrow \sum_{s', r} p(s', r | s, a) [r + \gamma \sum_{a'} \pi(a' | s') Q(s', a')]$

$$\Delta \leftarrow \max(\Delta, |q - Q(s, a)|)$$

直到 $\Delta < \theta$ (决定估计精度的一个小的正数)

3. 策略改进

$policy-stable \leftarrow true$

对于每个 $s \in \mathcal{S}$ 和 $a \in \mathcal{A}$


$old-action \leftarrow \pi(s)$

$\pi(s) \leftarrow \arg \max_a \sum_{s', r} p(s', r | s, a) [r + \gamma \sum_{a'} \pi(a' | s') Q(s', a')]$

如果 $old-action \notin \{a_i\}$, 其为 $\pi(s)$ 下的等价最优解集合,

那么 $policy-stable \leftarrow false$


如果 $policy-stable$, 那么停止并返回 $Q \approx q_*$ 和 $\pi \approx \pi_*$; 否则转到 2

 **练习 4.6** 假设您只考虑仅使用 ε -soft 的策略, 这意味着在每个状态 s 中选择每个动作的概率至少为 $\varepsilon/|\mathcal{A}(s)|$ 。请定性描述第 80 页上针对 v_* 的策略迭代算法在步骤 3、2 和 1 的每个步骤中所需的更改。 □

解 第 3 步改变: 我们只会在不探索策略的情况下, 判断 $policy-stable$ 为 $false$ 。


第 2 步改变: θ 的设置不应超过任何 ε -soft 的限制。

第 1 步改变: π 应该很好地定义为 ε -soft 方法。应该给予 ϵ 。

 **练习 4.7 (programming)** 编写用于策略迭代的程序, 并通过以下更改重新解决杰克的租车问题。杰克在第一地点的一名员工每晚晚上乘汽车回家, 且住在第二地点附近。她很乐意免费将一辆汽车送往第二个地点。每辆额外的汽车仍需花费 2 美元, 所有朝另一方向行驶的汽车也是如此。另外, 杰克在每个位置都有有限的停车位。如果在一个地点过夜的汽车停放了十辆以上 (在任何车辆移动之后), 则使用第二个停车场 (与那里停放的汽车数量无关) 必须产生 4 美元的额外费用。这些类型的非线性和任意动态通常发生在实际问题中, 除动态规划外, 其他优化方法无法轻松解决。要检查您的程序, 请首先复制针对原始问题给出的结果。 □

解 见 `exercise-programming/exercise4.7.py`。

4.4 值迭代


 **练习 4.8** 为什么赌徒问题的最优策略会有如此奇怪的形式? 特别是, 对于 50 的资本, 它将全部的赌注都押注在一个翻转上, 而对于 51 的资本, 则并非如此。为什么这是个好策略? □

解 赌徒的问题具有最优策略的奇特形式, 因为资产为 50, 您可能以 0.4 的概率突然获胜。因此, 当资产为 50 时, 最好的策略将其全押。

可以将 51 的资本当作 50 加 1。当然, 当我们拥有 51 时, 我们可以全部下注, 但是最好的策略是看看我们是否可以从这额外的 1 美元中赚取更多。如果此带来的回报为正数, 我们可以说我们会多余的钱, 然后再次下注直至 75, 直到突然获胜的机会来临。这意

味着，我们有从 75 中获胜的额外机会。相反，如果我们在 51 的资产中首先下注 50，我们的获胜机会仅为 0.4，而且我们会失去达到 75 的机会。相反，如果我们输了赌注，我们必须尽力以 1 美元达到 25，这是一个更糟糕的情况。

结论：最优策略表明了更多的获胜机会，并保证了赌徒在输时会更好。

 **练习 4.9** (programming) 为赌徒的问题实施值迭代，并针对 $ph = 0.25$ 和 $ph = 0.55$ 进行求解。在编程中，您可能会发现引入与终止相对应的两个虚拟状态会很方便，其资本分别为 0 和 100，分别赋予它们 0 和 1 的值。以图形方式显示结果，如图 4.3 所示。当 $\theta \rightarrow 0$ 时，您的结果稳定吗？ □

解 当 $ph < 0.5$ 时，结果是稳定的。

见 exercise-programming/exercise4.9.py。

 **练习 4.10** 什么是动作值 $q_{k+1}(s, a)$ 的值迭代更新 (4.10) 的类似物？ □

解

$$\begin{aligned} q_{k+1}(s, a) &\doteq \mathbb{E}[R_{t+1} + \gamma \max_{a'} q_k(s', a') | S_t = s, A_t = a] \\ &= \sum_{s', r} p(s', r | s, a) [r + \gamma \max_{a'} q_k(s', a')] \end{aligned}$$

4.5 异步动态规划

4.6 广义策略迭代

4.7 动态规划效率

4.8 总结

第五章 蒙特卡罗方法

5.1 蒙特卡罗预测

🔥 **练习 5.1** 考虑图 5.1 右侧的图。为什么估计值函数在后面的最后两行跳起来？为什么它在左侧的整个最后一行掉落？为什么在上方的图中最前面的值比在下方的图中高？ □

解 这是由于这种策略，玩家直到满足 20 或 21 时才会停止。这表明玩家将面临命中失败的风险，这将导致在 20 和 21 点之前的低值部分。然而，在 20 和 21 点时，玩家会停下来，并且有很高的获胜机会，尤其是当发牌者将停在 17 点或更高的时候。

左图最后一行下降，是因为如果庄家显示王牌，当它计数为 11 时，它比玩家有很高的概率得到更高的分数。因此，发牌者的 A 值包含了庄家使其可用或不可用的赢率。其他的纸牌没有这样的条件，因此 A 很特殊并产生了差距。

在上图中，最前面的值较高，因为 A 表示在上图中用作 1 和 11 的对偶值。它使玩家更好，并且与最左边的行下降的情况类似。

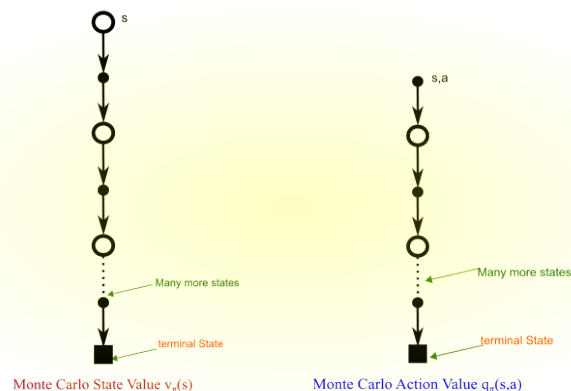
🔥 **练习 5.2** 假设在 21 点任务中使用了每次访问 MC 而不是首次访问 MC。您期望结果会有很大不同吗？为什么或者为什么不？ □

解 不会。在任何回合中，21 点都不包含两个重复的状态，因此首次访问和每次访问方法本质上是相同的。


5.2 动作值的蒙特卡罗估计

🔥 **练习 5.3** 蒙特卡罗估计 q_π 的备份图是什么？ □

解



5.3 蒙特卡洛控制


 **练习 5.4** 蒙特卡洛 ES 的伪代码是无效的，因为对于每个状态-动作对，它都会维护所有回报的列表，并反复计算其均值。使用与第 2.4 节中介绍的技术类似的技术来使得更有效，以便仅维护均值和计数（针对每个状态-行为对）并增量地更新它们。描述如何更改伪代码以实现此目的。 □

解 蒙特卡洛 ES 的伪代码应该以以下方式更新：

$$\begin{aligned}
 Q_n(S_t, A_t) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i(S_t, A_t) \\
 &= \frac{1}{n} \left(G_n(S_t, A_t) + \sum_{i=1}^{n-1} G_i(S_t, A_t) \right) \\
 &= \frac{1}{n} \left(G_n(S_t, A_t) + (n-1) \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} G_i(S_t, A_t) \right) \\
 &= \frac{1}{n} (G_n(S_t, A_t) + (n-1)Q_{n-1}(S_t, A_t)) \\
 &= \frac{1}{n} (G_n(S_t, A_t) + nQ_{n-1}(S_t, A_t) - Q_{n-1}(S_t, A_t)) \\
 &= Q_{n-1}(S_t, A_t) + \frac{1}{n} (G_n(S_t, A_t) - Q_{n-1}(S_t, A_t))
 \end{aligned}$$

5.4 无探索起点的蒙特卡洛控制

5.5 重要性采样的 off-policy 预测


 **练习 5.5** 考虑具有单个非终止状态和单个动作的 MDP，该动作以概率 p 转移回非终止状态，并以概率 $1-p$ 转移到终止状态。设所有转移的奖励为 +1，设 $\gamma = 1$ 。假设您观察到一个持续 10 步，回报为 10 的回合，那么非终止状态值的首次访问和每次访问估计量是什么？ □

解 对于首次访问估计，仅考虑状态的首次访问：

$$V(s) = G(S_0) = 10$$

对于每次访问估计，每个状态都被考虑：

$$\begin{aligned}
 V(s) &= \frac{1}{10} [G(S_0) + G(S_1) + \cdots + G(S_{10})] \\
 &= \frac{1}{10} (10 + 9 + 8 + 7 + 6 + 5 + 4 + 3 + 2 + 1) = 5.5
 \end{aligned}$$

 **练习 5.6** 同样给定使用 b 生成的回报，对于动作值 $Q(s, a)$ 而不是状态值 $V(s)$ ，类似于 (5.6) 的方程是什么？ □

解

$$Q(s, a) \doteq \frac{\sum_{t \in \mathcal{T}(s, a)} \rho_{t+1:T(t)-1} G_t}{\sum_{t \in \mathcal{T}(s, a)} \rho_{t+1:T(t)-1}}$$

🔴 **练习 5.7** 在如图 5.3 所示的学习曲线中，误差通常随训练而减少，这确实是普通重要性采样方法所发生的。但是对于加权重要性采样方法，误差首先增加然后减少。您认为为什么发生这种事？ □

解 加权平均算法将需要几个回合来减少其偏差。特别是当 $\rho_{t:T(t)-1}$ 很大时，通过这些数据加权平均算法将发生偏移。当获得足够多的回合时，平均值开始稳定并减少偏差。

🔴 **练习 5.8** 例 5.5 的结果如图 5.4 所示，使用了首次访问 MC 方法。假设在同一问题上使用了每次访问 MC 方法。估计量的方差是否仍然是无限的？为什么或者为什么不？ □

解 对于每次访问：

$$\begin{aligned} & \left[\left(\frac{1}{T-1} \sum_{k=1}^{T-1} \prod_{t=0}^k \frac{\pi(A_t, S_t)}{b(A_t, S_t)} G_t \right)^2 \right] \\ &= 0.5 \cdot \left(\frac{1}{0.5} \right)^2 \quad (\text{回合长度为 1}) \\ &+ \frac{1}{2} \left[0.5 \cdot 0.9 \cdot 0.5 \cdot 0.1 \cdot \left(\frac{1}{0.5} \frac{1}{0.5} \right)^2 + 0.5 \cdot 0.1 \left(\frac{1}{0.5} \right)^2 \right] \quad (\text{回合长度为 2}) \\ &+ \frac{1}{3} \left[0.5 \cdot 0.9 \cdot 0.5 \cdot 0.9 \cdot 0.5 \cdot 0.1 \left(\frac{1}{0.5} \frac{1}{0.5} \frac{1}{0.5} \right)^2 + 0.5 \cdot 0.9 \cdot 0.5 \cdot 0.1 \cdot \left(\frac{1}{0.5} \frac{1}{0.5} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 0.5 \cdot 0.1 \left(\frac{1}{0.5} \right)^2 \right] \quad (\text{回合长度为 3}) \\ &+ \dots \\ &= 0.1 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sum_{l=0}^{k-1} 0.9^l \cdot 2^l \cdot 2 \\ &= 0.2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sum_{l=0}^{k-1} 1.8^l = \infty \end{aligned}$$

5.6 渐增实现

🔴 **练习 5.9** 修改首次访问 MC 策略评估的算法（第 5.1 节），以对第 2.4 节中描述的样本平均值使用渐增实现。 □

解


$$\begin{aligned} V_n(S_t) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i(t) \\ &= V_{n-1}(S_t) + \frac{1}{n} (G_n(t) - V_{n-1}(S_t)) \end{aligned}$$

🔴 **练习 5.10** 从 (5.7) 推导加权平均更新规则 (5.8)。遵循未加权规则 (2.3) 的推导模式。 □


解

$$\begin{aligned}
V_{n+1} &\doteq \frac{\sum_{k=1}^n W_k G_k}{\sum_{k=1}^n W_k} \\
&= \frac{W_n G_n + \sum_{k=1}^{n-1} W_k G_k}{\sum_{k=1}^{n-1} W_k G_k} \frac{\sum_{k=1}^{n-1} W_k G_k}{\sum_{k=1}^n W_k G_k} \\
&= \left[\frac{W_n G_n}{C_{n-1}} + V_n \right] \frac{C_{n-1}}{C_n} \\
&= \frac{W_n G_n}{C_n} + \frac{V_n C_{n-1}}{C_n} \\
&= V_n + \frac{W_n G_n}{C_n} + \frac{V_n C_{n-1}}{C_n} - V_n \\
&= V_n + \frac{W_n G_n}{C_n} + \frac{V_n C_{n-1} - V_n C_n}{C_n} \\
&= V_n + \frac{W_n G_n}{C_n} - \frac{V_n W_n}{C_n} \\
&= V_n + \frac{W_n}{G_n} [G_n - V_n]
\end{aligned}$$

5.7 Off-policy 蒙特卡洛控制

 **练习 5.11** 在用于 off-policy 的 MC 控制的方框中的算法中，您可能已经期望 W 更新涉及重要性采样率 $\frac{\pi(A_t, S_t)}{b(A_t, S_t)}$ ，但是涉及 b 。为什么这是正确的？ \square


解 如果 $A_t = \pi(S_t)$ ，则仅允许 A_t 改变 W 。由于 π 是确定性的，因此可以肯定地说在更新 W 期间 $\pi(A_t|S_t) = 1$ 。

 **练习 5.12 : Racetrack (programming)** 考虑如图 5.5 所示的驾驶赛车转弯。您想跑得尽可能快，但又不能跑得太快，以免冲出跑道。在我们简化的赛道中，赛车位于一组离散的网格位置之一，即图中的单元格中。速度也是离散的，每个时间步长有许多网格单元在水平和垂直方向上移动。动作是速度分量的增量。在每一步中，每个动作可以更改 +1、1 或 0，总共执行九（3 \times 3）个动作。两个速度分量均被限制为非负且小于 5，并且除了起始线外，它们都不能均为零。每个回合都以某个随机选择的起始状态开始，其两个速度分量均为零，并在赛车越过终点线时结束。直到汽车越过终点线，每一步的奖励都是 -1。如果汽车撞到了轨道边界，则会将其移回到起跑线上的随机位置，两个速度分量都减小为零，并且回合继续。在每个时间步更新赛车的位置之前，请检查赛车的投影路径是否与轨道边界相交。如果与终点线相交，则回合结束；如果它与其他任何地方相交，则认为该汽车已撞到赛道边界，并被送回到起跑线。为了使任务更具挑战性，每步的概率为 0.1，速度增量均为零，与预期的增量无关。将蒙特卡洛控制方法应用于此任务，以从每个起始状态计算最优策略。展示遵循最优策略的几条轨迹（但是将这些轨迹的噪声调低）。 \square

解 见 [exercise-programming/exercise5.12.py](#)。

5.8 * 折扣的重要性采样


5.9 * 每决策的重要性采样

 **练习 5.13** 显示从 (5.12) 推导 (5.14) 的步骤。

解 t 之后, 任何重要性采样率都与 R_{t+1} 无关。这必须遵循:

$$\mathbb{E}[XY] = \mathbb{E}[X]\mathbb{E}[Y],$$

使用 5.13 代入 5.12, 确实会有 5.14。


 **练习 5.14** 修改 off-policy 蒙特卡洛控制的算法 (第 111 页), 以使用截断的加权平均估计 (5.10) 的思想。请注意, 您首先需要将此方程式转换为动作值。

解 content...

5.10 总结

第六章 时间差分学习

6.1 TD 预测


 **练习 6.1** 如果 V 在回合中发生变化, 那么 (6.6) 只能近似成立; 两边之间的差异是什么? 让 V_t 表示在 TD 误差 (6.5) 和 TD 更新 (6.2) 中时间 t 处使用的状态值数组。重新进行上述推导, 以确定必须添加到 TD 误差之和中的附加量, 以便等于蒙特卡洛误差。 □

解 δ 定义: $\delta_t \doteq R_{t+1} + \gamma V(S_{t+1}) - V(S_t)$

TD 更新: $V(S_t) \leftarrow V(S_t) + \alpha[R_{t+1} + \gamma V(S_{t+1}) - V(S_t)]$

由此得:


$$\begin{aligned} G_t - V_t(S_t) &= R_{t+1} + \gamma G_{t+1} - V_t(S_t) + \gamma V_t(S_{t+1}) - \gamma V_t(S_{t+1}) \\ &= \delta_t + \gamma G_{t+1} - \gamma V_t(S_{t+1}) \\ &= \delta_t + \gamma G_{t+1} - \gamma V_t(S_{t+1}) + \gamma V_{t+1}(S_{t+1}) - \gamma V_{t+1}(S_{t+1}) \\ &= \delta_t + \gamma[G_{t+1} - V_{t+1}(S_{t+1})] + \gamma[V_{t+1}(S_{t+1}) - V_t(S_{t+1})] \\ &= \delta_t + \gamma[G_{t+1} - V_{t+1}(S_{t+1})] + \gamma\alpha[R_{t+2} + \gamma V_t(S_{t+2}) - V_t(S_{t+1})] \\ &= \delta_t + \gamma[\delta_{t+1} + \gamma[G_{t+2} - V_{t+2}(S_{t+2})]] + \gamma\alpha[R_{t+3} + \gamma V_{t+1}(S_{t+3}) \\ &\quad - V_{t+1}(S_{t+2})] + \gamma\alpha[R_{t+2} + \gamma V_t(S_{t+2}) - V_t(S_{t+1})] \\ &= \delta_t + \gamma\delta_{t+1} + \gamma^2[G_{t+2} - V_{t+2}(S_{t+2})] + \alpha\gamma^2[R_{t+3} + \gamma V_{t+1}(S_{t+3}) - V_{t+1}(S_{t+2})] \\ &\quad + \alpha\gamma[R_{t+2} + \gamma V_t(S_{t+2}) - V_t(S_{t+1})] \\ &\quad \vdots \\ &= \sum_{k=t}^{T-1} \gamma^{k-t} \delta_k + \alpha \sum_{k=t}^{T-2} \gamma^{k-t+1} [R_{k+2} + \gamma V_k(S_{k+2}) - V_k(S_{k+1})] \end{aligned}$$

 **练习 6.2** 这是一个练习, 有助于您了解为什么 TD 方法通常比蒙特卡洛方法更有效。考虑一下开车回家的例子, 以及如何用 TD 和蒙特卡洛方法解决它。您能想象一个场景, 其中 TD 更新平均要比蒙特卡洛更新更好吗? 举例说明过去的经验和当前的状态, 您可能希望 TD 更新会更好。提示: 假设您有很多下班开车回家的经验。然后, 您移至新建筑物和新停车场 (但您仍在同一位置进入高速公路)。现在, 您开始学习有关新建筑物的预测。您能理解为什么在这种情况下, 至少在最初的时候, TD 更新可能会好得多吗? 在原始场景中可能会发生同样的事情吗? □

解 所提到的方案对于 TD 非常有效, 因为高速公路部分的状态没有更改, 我们仍然可以对其状态值抱有坚定的信念。利用 TD 将加快我们对新状态的调整。然后, 每个更新的状态都会加速之前的状态。另一方面, 蒙特卡洛必须走到尽头, 并带来所有状态的平均改善, 尤其是那些高速路段, 这些路段根本不需要太多调整, 但仍会因蒙特卡洛方法而波动。

TD 更有效的另一种情况是，我们很难有终止状态。即使在我们不考虑状态值衰减过小的方法下，原始的蒙特卡洛方法仍然不够有效，甚至不实用。

6.2 TD 预测方法的优势

 **练习 6.3** 从随机行走示例左图所示的结果可以看出，第一个回合仅导致 $V(A)$ 的变化。这告诉您第一回合发生了什么？为什么仅对该状态的估计值进行了更改？到底发生了多少变化？ □


解 它告诉我们第一个回合在左端终止状态结束。但是，我们没有关于中间转移如何的任何信息。因为这些奖励是 0 且 γ 是 1，并且非终止状态都初始化为 0.5，终止状态初始化为 0。因此，TD(0) 更新对不能直接导致终止的状态没有任何作用。即，对于 A、E 外的非终止状态：

$$\begin{aligned} V_1(S_t) &= V_0(S_t) + \alpha[0 + \gamma V_0(S_{t+1}) - V_0(S_t)] \\ &= V_0(S_t) \end{aligned}$$


对于状态 A：

$$\begin{aligned} V_1(A) &= V_0(A) + \alpha[0 + \gamma \cdot 0 - V_0(A)] \\ &= (1 - \alpha)V_0(A) \\ &= 0.9 \times 0.5 \\ &= 0.45 \end{aligned}$$

A 的估计值减少为 $\alpha V_0(A) = 0.05$ 。

 **练习 6.4** 随机行走示例右图所示的特定结果取决于步长参数 α 的值。您是否认为，如果使用更大范围的 α 值，将会得出关于哪种算法更好的结论？是否存在一个固定的 α 值，而每种算法在该值处的表现都明显好于所示？为什么或者为什么不？ □

解 不会。对于 TD 和蒙特卡洛，足够小的 α 是收敛要求。因此，从长远来看，可以说较小的 α 对于 TD 和蒙特卡洛总是比较大的 α 更好，并且达到了它可以达到的最低误差。结果所示已触及每种方法性能的极限。因此，我们可以得出结论，没有任何固定 α 可以改善的魔术。另一方面，人们可能会希望更改不同状态的 α 或更改权重。

 **练习 6.5** 在随机行走示例的右图中，TD 方法的 RMS 误差似乎先下降然后再上升，尤其是在高 α 值时。是什么原因造成的？您是否认为这总是发生，或者可能是近似值函数如何初始化的函数？ □

解 状态 C 恰好已经初始化为其真实值。随着训练的开始，外部状态会发生更新（使各个状态更加准确），从而减少所有状态的误差。直到外部状态的误差传播到 C 为止，这种情况将一直发生。较高的 α 值使该效应更加明显，因为 C 的值估计在这些情况中更容易改变。

 **练习 6.6** 在例 6.2 中，我们声明了状态 A 到 E 的随机行走示例的真实值为 $\frac{1}{6}, \frac{2}{6}, \frac{3}{6}, \frac{4}{6}, \frac{5}{6}$ 。描

述至少两种可以计算出的方式。您猜我们实际使用了哪一个? 为什么? \square

解 一种方法是使用计算能力 (例如 DP) 来精确计算结果。由于我们没有策略, 因此只会导致长期而精确的状态评估。

由于 $V(s) = \mathbb{E}[\mathbb{I}\{\text{从 } s \text{ 到右端终止}\}] = P(\text{从 } s \text{ 到右端终止})$, 根据对称性意味着 $V(C) = 0.5$, 那么

$$\begin{aligned} V(E) &= \frac{1}{2} \times 1 + \frac{1}{2} \times V(D) \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{4} [V(C) + V(E)] \end{aligned}$$

可得 $V(E) = \frac{5}{6}$, 进而可得 $V(D) = \frac{4}{6}$ 。我们可以用相同的方式计算其他状态的值。

然而, 另一种方法在于数学。考虑状态 E, 如果从 E 开始, 进入左端 $P_E(L)$ 的概率是多少, 进入右端 $P_E(R)$ 的概率是多少?

$$\begin{aligned} P_E(R) &= 1 - P_E(L) \\ &= 1 - P_E(D) * P_D(L) \\ &= 1 - P_E(D) * [P_D(C)P_C(L) + P_D(E) * P_E(L)] \end{aligned}$$

由于对称性, 我们直到 $P_C(L) = 0.5$, 列等式可解出。

6.3 TD(0) 的最优性

练习 6.7 设计 TD(0) 更新的 off-policy 版本, 可与任意目标策略 π 一起使用, 并覆盖行为策略 b , 并在每一步 t 都使用重要性采样率 $\rho_{t:t}$ (5.3)。 \square

解 令 G_t 为 b 产生的回合的回报。那么

$$\begin{aligned} v_\pi(s) &= \mathbb{E}[\rho_{t:T-1}G_t | S_t = s] \\ &= \mathbb{E}[\rho_{t:T-1}R_{t+1} + \gamma\rho_{t:T-1}G_{t+1} | S_t = s] \\ &= \rho_{t:t}\mathbb{E}[R_{t+1} | S_t = s] + \gamma\rho_{t:t}\mathbb{E}[\rho_{t+1:T-1}G_{t+1} | S_t = s] \\ &= \rho_{t:t}(\mathbb{E}[R_{t+1} | S_t = s] + \gamma\mathbb{E}[\rho_{t+1:T-1}G_{t+1} | S_t = s]) \\ &= \rho_{t:t}(r(s, A_t) + \gamma v_\pi(S_{t+1})) \end{aligned}$$

因此, off-policy 版本的 TD(0) 的更新 (通过采样近似) 为:

$$V(S_t) \leftarrow V(S_t) + \alpha[\rho_{t:t}R_{t+1} + \rho_{t:t}V(S_{t+1}) - V(S_t)]$$

6.4 Sarsa: on-policy TD 控制

- 🔴 **练习 6.8** 证明 (6.6) 的动作值形式适用于 TD 误差 $\delta_t = R_{t+1} + \gamma Q(S_{t+1}, A_{t+1}) - Q(S_t, A_t)$ 的动作值形式，再次假设值不会逐步改变。 □

解

$$\begin{aligned} G_t - Q(S_t, A_t) &= R_{t+1} + \gamma G_{t+1} - Q(S_t, A_t) + \gamma Q(S_{t+1}, A_{t+1}) - \gamma Q(S_{t+1}, A_{t+1}) \\ &= \delta_t + \gamma[G_{t+1} - Q(S_{t+1}, A_{t+1})] \\ &= \delta_t + \gamma\delta_{t+1} + \gamma^2[G_{t+2} - Q(S_{t+2}, A_{t+2})] \\ &= \sum_{k=t}^{T-1} \gamma^{k-t} \delta_k \end{aligned}$$

- 🔴 **练习 6.9** : Windy Gridworld with King's Moves (programming) 假设有八种可能的动作（包括对角线移动），而不是通常的四项，重新解决风的网格世界。您可以通过这些额外的动作来改善多少？除了由风引起的动作外，您是否可以通过包含不会引起任何移动的第九个动作来做得更好呢？ □

解 最优轨迹现在是 7 步，而不是 15 步。在此示例中，包括空动作没有帮助，因为风垂直吹，并且目标位置未与起始位置垂直分离。但是，它在其他风环境中可能很有用。

见 exercise-programming/exercise6.9.py。

- 🔴 **练习 6.10** : Stochastic Wind (programming) 假设风的影响是随机的，有时与每列给出的平均值相差 1，则用 King 的动作重新解决有风的网格世界任务。也就是说，三分之一的时间完全按照这些值移动，就像上一个练习中一样，但是三分之一的时间将移动一个单元格到达其上方，而三分之一的时间将移动一个单元格到达其下方。例如，如果您位于目标右边一个单元格中，而您向左移动，那么三分之一的时间您将移动一个单元格移至目标上方，三分之一的时间您将移动两个单元格移至目标上方，以及三分之一的时间移至目标。 □

解 见 exercise-programming/exercise6.10.py。

6.5 Q-learning: off-policy TD 控制

- 🔴 **练习 6.11** 为什么 Q-learning 被视为 off-policy 控制方法？ □

解 Q-learning 被视为 off-policy 的原因是它使用下一个状态 s 和贪婪动作 a 的 Q 值更新其当前 Q 值。换句话说，它通过假设遵循贪婪策略来估计状态-动作对的回报（未来奖励折扣总额），尽管实际上它遵循的不是贪婪策略。Sarsa 是 on-policy 的原因是它使用下一个状态 s 和当前策略的动作 a 的 Q 值更新其当前 Q 值。它通过假设继续遵循当前策略来估算状态-动作对的回报。


- 🔴 **练习 6.12** 假设动作选择是贪婪的。那么 Q-learning 和 Sarsa 完全一样吗？他们会做出完全相同的动作选择和权重更新吗？ □

解 一般来说，它们似乎是相同的方法。但是偶尔情况会有所不同。在某些步骤中考虑 $S = S'$ 。在更新期间，Sarsa 将使用从 S' 获得的先前的贪婪动作 A' ，并前进到 $Q(S', A')$ 。

但是 Q-learning 将使用更新的 Q 重新选择贪婪 A^* 。由于 A' 可能与使 $Q(S', A^*)$ 最大化的新贪婪动作 A^* 的动作不同，因此这两种方法是不同的。

6.6 期望 Sarsa

6.7 最大化偏差与 Double Learning

 **练习 6.13** 带有 ε -greedy 目标策略的 Double 期望 Sarsa 的更新方程是什么?

□

解

$$Q_1(S_t, A_t) \leftarrow Q_1(S_t, A_t) + \alpha \left[R_{t+1} + \gamma \sum_a \pi(a|S_{t+1}) Q_2(S_{t+1}, a) - Q_1(S_t, A_t) \right]$$

$$\pi(a|s) = \begin{cases} 1 - \varepsilon, & \text{if } a = \arg \max_{a'} (Q_1(s, a') + Q_2(s, a')) \\ \frac{\varepsilon}{|\mathcal{A}(s)|}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.1)$$

6.8 游戏、后期状态和其他特殊情况

6.9 总结

第七章 n 步自举

