



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

中山大学本科生毕业论文

基于蒙特卡洛方法的炉石传说人工智能
Hearthstone AI based on Monte Carlo methods

院 系：_____

专 业：_____

学 生 姓 名：_____

学 号：_____

指 导 教 师：_____

年 月 日

摘 要

本论文将讨论如何使用蒙特卡洛搜索方法为《炉石传说：魔兽英雄传》开发人工智能，进而指出作为博弈游戏，《炉石传说》十分适合用于人工智能研究。

《炉石传说》目前已包含超过700张不同的卡牌，所有的这些卡牌都能够在不同程度上改变游戏的规则，这使得要为其开发一个完备的人工智能变得十分困难（尽管本文中只考虑《炉石传说》的一小部分卡牌）。除此之外，《炉石传说》的复杂度以及其作为卡牌游戏固有的随机性也为人工智能的开发增加了难度，这其中包括了不完全信息的搜索以及对手行为的预测。

蒙特卡洛搜索一直以来便是人工智能领域的著名算法，其延伸算法蒙特卡洛树搜索更是被用于构建了著名的围棋人工智能AlphaGo。作为一个搜索算法，它保证其能在任何时候结束搜索并返回当前已知的最优解，而且它是非启发的-在不加入任何领域特定知识的情况下它也能有很好的表现。在能够进行足够多数量的游戏模拟的情况下，蒙特卡洛搜索保证能够找出当前的最优步骤。

本论文构建了完全随机、基于规则以及基于蒙特卡洛搜索的三种炉石传说人工智能，并通过实验对比了它们的决策强度差异。同时，通过添加启发式的优化与剪枝策略，展示了向蒙特卡洛搜索中加入领域特定知识是否能提高搜索算法的表现。

关键词：人工智能、蒙特卡洛搜索、炉石传说

Abstract

In this paper, we present Hearthstone: Heroes of Warcraft, a famous online card game, as an interesting test bed for AI research. Hearthstone has already released over 700 different kinds of cards. All these cards change the rules of the game to some extent, which causes developing a completed AI for this game extremely difficult (though this paper only takes into account a very small amount of all these Hearthstone cards), not to consider the stochastic and imperfect information characteristics of the game.

We discuss how to use Monte Carlo Search to develop AI player for Hearthstone. Monte Carlo Search has always been a classic algorithm in the field of AI research, as its descendant – Monte Carlo Tree Search – being the major component of the famous Go AI player – AlphaGo. As a search algorithm, Monte Carlo Search guarantees to return an temporarily-optimal result at any moment in time, while allowing the algorithm to run for longer period often improves the result. Additionally, Monte Carlo Search is a heuristic – the lack of domain-specific knowledge cannot prevent it from finding the optimal result.

For the experiment, we construct three different AI players for Hearthstone, being complete-random AI, rule-based AI and Monte Carlo AI respectively. Games between different AI players will be carried out to demonstrate the strength of these players. Heuristic optimizations will also be added to the Monte Carlo AI to examine if the additional domain-specific knowledge can improve the performance of Monte Carlo AI.

Keywords: Artificial Intelligence, Monte Carlo Search, Hearthstone

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第一章 引言	1
1.1 背景	1
1.2 研究现状	2
1.3 论文结构	5
第二章 预备知识	6
2.1 蒙特卡洛方法	6
2.2 赌博机方法	6
第三章 炉石传说基本规则	9
第四章 基于规则的智能体	15
第五章 蒙特卡洛智能体	18
5.1 蒙特卡洛搜索智能体	18
第六章 实验结果	19
6.1 智能体之间的决策强度差异	19
6.2 迭代次数对蒙特卡洛智能体决策强度的影响	20
第七章 结语	23
7.1 结论	23
7.2 未来的工作方向	23
参考文献	25
致 谢	29

第 1 章 引言

1.1 背景

《炉石传说：魔兽英雄传》（Hearthstone: Heroes of Warcraft，下简称“炉石传说”）是由暴雪娱乐推出的线上集换式卡牌游戏。2014 年 3 月 11 日，炉石传说登陆 Microsoft Windows 平台并在全世界发行。此后，炉石传说相继登陆了 OS X、iOS 和安卓平台，吸引了大批的忠实玩家。截止至 2015 年的 11 月，炉石传说已拥有超过 4 千万的注册用户，并为暴雪娱乐带来了每月超过 2 千万美金的利润。与此同时，暴雪娱乐也为炉石传说举办了世界级的比赛以吸引人气。两届炉石传说世界锦标赛分别于 2014 年和 2015 年的暴雪嘉年华上举行，两届的冠军选手均获得了 10 万美元的奖金，奖金池总额更是达到了 25 万美元。炉石传说在 2014 年游戏大奖（the Game Awards）上被评选为年度最佳手机游戏，并在 2015 年游戏大奖上被提名为年度电子竞技游戏。

作为卡牌游戏，炉石传说也有着像桥牌那样的随机性和不完全信息性。与桥牌等传统扑克牌游戏不同的是，玩家在游戏中使用的卡组不会是固定的标准卡组，而是由他根据情况自行构建的卡组。炉石传说中的卡牌都能够在不同程度上改变游戏的规则，不同卡牌之间的相互影响更是大大提高了游戏的多样性。在本论文所讨论的炉石传说构筑模式中，玩家需要从炉石传说的所有可用的卡牌中选取 30 张构成自己的卡组。而炉石传说中所有可用的所有卡牌种数已经达到了 743，且每年均会有 200 ~ 300 张新的卡牌被加入到游戏中。游戏本身有着极高的多样性，不同的卡组可能意味着完全不同的打法，因此要一个相对有竞争力的炉石传说人工智能更类似于开发一个普适游戏人工智能（General Game Playing）[1]。本质上，炉石传说的核心规则其实极为简单，其规则的多样性主要来自于卡组的变化。由此，炉石传说十分适合作为不完全信息、普适游戏以及对手模拟的人工智能的研究对象。

这篇论文将讨论如何用蒙特卡洛方法搜索炉石传说的最优策略。基于蒙特卡

洛搜索的炉石传说智能体将与基于规则的智能体进行对弈，以判明何种数量的对弈模拟可以使得蒙特卡洛智能体拥有与规则智能体同等的对弈能力。在实验中，蒙特卡洛智能体会先使用较弱的（随机）智能体进行模拟，以验证在模拟数量足够大的情况下，蒙特卡洛智能体是否能打败较强的规则智能体；同时，规则智能体也会在后面的实验中被用于蒙特卡洛智能体的模拟策略，以验证在为蒙特卡洛智能体的模拟策略加入更多的启发知识的情况下，蒙特卡洛智能体的对弈能力是否能有所提高。鉴于炉石传说本身的特性，本文中将使用基于 UCB 算法的蒙特卡洛搜索，而不使用更为强大的基于 UCT 的蒙特卡洛搜索。基于 UCT 的蒙特卡洛搜索算法在炉石传说的应用将属于本文可选的后续工作。

1.2 研究现状

卡牌游戏是典型的不完全信息随机游戏，包括了由对手手牌的不可见带来的信息隐藏，以及由下一张抽到的牌的不可知带来的随机性。信息隐藏与随机性两者相结合，使得卡牌游戏对于人类玩家或是人工智能开发来说都是十分有趣的领域[2]。其中，被大量用于人工智能研究的卡牌游戏包括扑克牌和桥牌[3]。

扑克牌是一款多人卡牌游戏，通常一局对弈最多可同时包含8名玩家。扑克牌的对弈包含了概率分析以及对手行为预测等方面[4, 5]。要成为一个扑克牌高手通常需要根据自己现有的手牌来正确估计自己的当前形势，并据此来决定自己跟或不跟。相关的人工智能研究多数集中在研究如何通过基于现有的手牌进行多次模拟来判断当前有多大几率获胜[6]。除此之外，也有相关研究在探索如何判断对手的决策强度，并以此对智能体进行调整。研究显示，贝叶斯分析可被用于根据玩家已有的出牌方式来判断他正在使用的策略，甚至判断出他何时会改变自己的策略[7, 8]。

桥牌同属卡牌游戏，一局对弈包含 4 名被分为两队的玩家。在考虑到应用蒙特卡洛搜索算法可能可以使桥牌人工智能拥有更强的决策强度后，Ginsberg 运用了包含蒙特卡洛搜索算法、分部搜索[9]以及各类优化算法在内的相关技术开发出了一款名为 GIB 的桥牌人工智能。GIB 也是首款在决策强度上能与人类桥牌大师

相提并论的桥牌人工智能。

事实证明，部分传统最小最大搜索算法所不能应付的游戏，使用蒙特卡洛搜索算法时可以有不错的效果。围棋本身属于完全信息游戏，但它与国际象棋[10]等不同的地方在于，其过大的分支系数使得运用暴力搜索的人工智能难以获得良好的表现。在无法使用简单的搜索算法来开发围棋人工智能的情况下，人们提出了蒙特卡洛方法[11]。自此，各种不同的基于蒙特卡洛方法的搜索算法被相继提出[12]，其中包括了将蒙特卡洛方法与策略搜索相结合的搜索算法[13]以及后来的蒙特卡洛树搜索算法[14]。所有的这些算法都基于蒙特卡洛方法的基本思想：与其在决策时考虑未来每一步所有可能的走法（进而产生一棵巨大的对弈树），倒不如只考虑第一步所有可能的走法，然后使用一个随机或是基于规则的策略产生器将对弈模拟到结束状态，并根据模拟的对弈结果来更新该走法的收益值。这背后的本质在于，当我们无法验证未来所有可能的对弈状态变化时，为数众多的模拟对弈的结果可以反映该走法的期望收益。

除此之外，研究人员还提出了一种名为赌博机决策（bandit based planning）的方法[15]。方法的名称来源于概率论中著名的多臂赌博机问题（multi-armed bandit problem）。该问题的内容大致如下：给定一排若干数量的赌博机，所有的这些赌博机都有着各自不同的出奖几率，那么为了获取最高的期望收益，你应该以何种顺序和次数去尝试这些不同的赌博机呢？Kocsis et al[15]利用了一个可以用于在多次尝试赌博机后获取最大收益的算法并将其利用于对弈树搜索中，以找到当前的最优策略。由此，一个名为 UCT（Upper Confidence Bounds for Trees）的算法被提出。算法首先会对当前所有可用的策略进行一次采样，然后在一个概率模型的指导下再在所有这些策略中选取某个策略来再次采样。如此一来，算法便能很好地在穷尽某个策略（exploitation）和探索其他策略（exploration）之间获得良好的平衡，因为拥有高收益的策略将会被更多地采样，其他收益相对较低的策略也不会被完全抛弃，也会被不时地进行采样。该决策方法也在围棋上获得了巨大的成功[16, 17]。

与此同时，UCT 算法还被应用于普适游戏领域并获得了不错的成果[18]。

一款游戏人工智能的核心在于搜索和估价，其中搜索功能可用于预测游戏未来的走向而估价功能则可被运用于评估搜索功能发现的策略的收益。在普适游戏（general game playing）中，人工智能无法使用任何先验的与游戏有关的特定知识来对对弈状态进行估价，所有可用的知识只可以通过对弈的过程自行推断[19]。由于蒙特卡洛搜索算法和 UCT 算法均无需依赖于任何启发式的估价函数，它们最终都能够在普适游戏领域获得巨大的成功[20]。

在炉石传说中进行决策，最大的难点仍然在于隐藏的信息（对手的手牌不可见）以及随机性（对手和自己抽到的下一张牌不可知）。我们需要考虑到对手的手牌可能是炉石传说 743 种卡牌中的任何一张，所有暴力的枚举算法最终都必须应对无比巨大的分支系数（考虑到正是分支系数的巨大正是无法为围棋开发基于暴力搜索算法的人工智能的主要原因）。除此之外，在没有将对弈模拟至游戏结束的情况下，也难以对炉石传说的某个中间状态进行估价。

实际上，炉石传说并不是第一种这种类型的游戏。早在炉石传说之前，同为集换式卡牌游戏的万智牌就已经风靡全球。尽管在规则上存在着不同点，人们看到更多的是万智牌和炉石传说之间的相似之处：无论是英雄角色的定位、卡牌种类的差异还是生物对战，万智牌和炉石传说可谓是一脉相承。最关键的是，两款游戏同样有着极大的随机性和分支系数。在 2009 年，Cowling 和 Ward 将蒙特卡洛搜索应用于万智牌的手牌决策，通过与随机或基于规则的生物攻击和防御智能体进行相互组合构建出了 9 种不同的智能体，并进行相互对弈[21]。对弈的结果显示，比起使用随机或是预定义规则进行决策的智能体，使用蒙特卡洛搜索进行手牌决策的智能体都有着相对较高的胜率，胜率的提高在 4% ~ 7% 之间。到了 2012 年，他们和 Powley 一起深入研究，进而将蒙特卡洛树搜索算法应用于万智牌的手牌决策[22]。在论文中，他们使用了确定化（Determinization）的方法来处理万智牌中带有随机效果的操作。文中，他们对比了对蒙特卡洛树搜索智能体的各种调整的效果。结果显示，各项调整都使得智能体在胜率上有了 5% ~ 20% 的提升。

实际上，确定化的思想并不新鲜，早前，该方法便已被用于处理一些概率决

策问题[23]以及同为卡牌游戏的斗地主[24]。除此之外，上述的研究中只将蒙特卡洛方法应用于了万智牌的手牌决策。万智牌和炉石传说的区别在于，万智牌的玩家回合分为多个阶段，包括出牌阶段以及生物攻击阶段。玩家只能在回合的出牌阶段打出手牌，在生物攻击阶段指派进行攻击的生物。上述的研究并未将蒙特卡洛方法应用于生物的攻击和防御决策，因此其对万智牌决策的应用是不完全的。炉石传说的玩家回合并不包含多个阶段，手牌的使用和随从的攻击可以以任意顺序进行，进行的顺序不同会导致不同的结果。这也就导致了炉石传说智能体无法将手牌决策与攻击决策相互割裂。

最近，已有相关的研究团队开始将机器学习算法应用于炉石传说[25]。尽管实验的结果并不理想，机器学习智能体在面对规则智能体时只能获得10%的胜率，但随着游戏进行次数的提升，智能体的胜率也有了上升的趋势，可见智能体已具备一定的学习能力。除此之外，也有研究团队在进行炉石传说卡组自动构建的研究[26]。可见，作为一款新兴的卡牌游戏，炉石传说已经吸引了大批研究人员的目光。

本文将在 Cowling 和 Ward 的研究的基础上，将蒙特卡洛搜索和蒙特卡洛树搜索分别应用于炉石传说，并对智能体进行部分的配置调优以测试各种不同的优化能在何种程度上提高智能体的决策强度。

1.3 论文结构

本文余下部分结构如下：第2章将用于讲述本文将使用的蒙特卡洛搜索算法的基本概念；第3章讲述本文实验的基本方法，包括了对实验所使用的不同人工智能的描述以及将蒙特卡洛搜索算法应用至炉石传说的基本方法描述；第4章将给出实验的具体结果；第5章给出实验的结论以及未来的工作方向。

第2章 预备知识

2.1 蒙特卡洛方法

蒙特卡洛方法（Monte Carlo methods）实际上为一类计算算法，这些算法依赖于重复的随机采样来求取数值结果。蒙特卡洛方法主要起源于统计物理领域，被用于求出某些不可解的积分方程的近似值，现多被用于求解那些无法通过数学方法求解的物理或数学问题，而其重复采样求取近似值的思想更是被延伸到了其他各种领域。

Abramson[27] 首次展示了蒙特卡洛方法的随机采样可以被用于近似某个对弈决策的理论收益。使用 Gelly 和 Silver 所提出的代数符号[28]，那么某个对弈操作的期望收益可以表示为 Q 值如下：

$$Q(s, a) = \frac{1}{N(s, a)} \sum_{i=1}^{N(s)} \mathbb{I}_i(s, a) z_i \quad (2.1)$$

其中 $N(s, a)$ 为操作 a 在状态 s 下被选择的次数， $N(s)$ 为游戏从状态 s 被模拟的总次数， z_i 为从状态 s 开始的第 i 次模拟的结果；当操作 a 在第 i 次模拟被从状态 s 选中时， $\mathbb{I}_i(s, a)$ 为1，否则为0。

有一些蒙特卡洛方法在给定的对弈状态下会对所有的可以进行的操作进行均匀采样，这样的蒙特卡洛方法被称为平蒙特卡洛方法（flat Monte Carlo）。Ginsberg曾利用这样的蒙特卡洛方法开发出了能与世界级选手相竞的桥牌人工智能[29]，可见这样的蒙特卡洛方法已有一定的实力。这样的方法的不足之处也是显而易见的：它完全无法对对手的行为进行任何预测[30]。然而，在模拟时根据以往的经验偏向某些操作是完全可以提高所得的操作期望收益的准确度的。根据已有的操作期望收益，我们完全可以选择偏向那些拥有较高收益的操作。

2.2 赌博机方法

赌博机问题（bandit problems）是概率论中的经典问题。问题给定 K 个操作

（例如， K 个不同的赌博机），要求参与者在这些操作中进行选择，以使得在重复选取最优收益后获取最高的累计收益。每个操作所对应的收益分布是未知的，这使得参与者难以在这些操作中进行选择，而他只能通过曾经进行的尝试的结果来估算每个操作背后可能对应的收益。这就产生了经典的穷尽-探索困境（exploitation-exploration dilemma）：参与者必须在“穷尽（exploitation）当前已知的最优操作”与“探索（exploration）其他现在不是最优但有可能在多次模拟后成为最优操作的操作”之间进行取舍。

一个 K 臂赌博机可被定义为随机变量 $X_{i,n}$ ，其中 $i \in [1, K]$ 代表第 i 个赌博机（赌博机的第 i 个“臂”）[15, 31, 32]， $X_{i,1}, X_{i,2}, \dots$ 依次为尝试第 i 个赌博机时得到的结果，它们之间相互独立且一致地遵循着某个未知的分布法则，且有着未知的期望值 μ_i 。通过定义一个可以根据赌博机过往给出的奖励决定该尝试哪个赌博机的策略（policy）可以解决 K 臂赌博机问题。

2.2.1 后悔程度

给定的策略应能使得玩家的后悔程度（regret）最小。在 n 次尝试后，玩家的后悔程度可定义如下：

$$R_N = \mu^* n - \mu_j \sum_{j=1}^K \mathbb{E}[T_j(n)] \quad (2.2)$$

其中 μ^* 为期望收益最高的赌博机的期望收益， $\mathbb{E}[T_j(n)]$ 代表在这 n 次尝试中尝试了第 j 个赌博机的期望次数。换句话说，玩家的后悔程度可以被理解为因没能尝试收益最高的赌博机所带来的损失期望。值得注意的是，无论为任何时候，任何一个赌博机被选中的几率都不能为零，否则收益最高的赌博机可能会因为其他暂时拥有较高收益的赌博机而被搜索算法所忽略。为了保证这一点，我们应为每一个赌博机所观察到的收益值加上置信上界（upper confidence bound）。

2.2.2 置信上界

为了解决 K 臂赌博机问题，搜索算法有必要引入置信上界，因为在任何时候，任何一个赌博机都可能是最优的赌博机。由Auer et al提出的名为UCB1的策

略[31]可以在未预先设置任何与收益分布有关的启发知识的情况下使玩家的后悔程度随尝试次数 n 呈对数级增长（ $O(\ln n)$ ）。该策略在每次选取赌博机时都会按照给定的公式为每个赌博机计算其对应的值，并选取所对应的值最大的赌博机。

该公式定义如下：

$$UCB1 = \bar{X}_j + \sqrt{\frac{2 \ln n}{n_j}} \quad (2.3)$$

其中 \bar{X}_j 为第 j 个赌博机的平均收益， n_j 为第 j 个赌博机被尝试的次数， n 为尝试的总次数。不难看出，收益项 \bar{X}_j 鼓励搜索算法穷尽（exploitation）目前平均收益最高的赌博机，而 $\sqrt{\frac{2 \ln n}{n_j}}$ 项则鼓励搜索算法探索（exploration）其他尝试次数较少的赌博机。

第3章 炉石传说基本规则

《炉石传说：魔兽英雄传》，简称“炉石传说”，是由暴雪娱乐推出的一款免费线上卡牌游戏。炉石传说的世界观依托于暴雪推出的另一款经典游戏《魔兽世界》，将魔兽世界中的英雄、职业及其对应的法术技能变成了炉石传说中的卡牌。炉石传说包括多种游戏模式，有构筑模式、单人模式、竞技场模式和乱斗模式，而本论文只考虑其中的构筑模式。

在构筑模式中，玩家可以使用自己预先构筑好的卡组来匹配对手，进行游戏。玩家在选定卡组对应的英雄职业后，可以在该英雄的所有职业专属卡和中立卡之中精心挑选，构成一副由30张卡牌组成的卡组。每副卡组中，同种的卡牌最多只能存在两张。除此之外，稀有等级为“传说”的卡牌，一种最多只能存在一张。“传说”卡牌为炉石传说中稀有度最高的卡牌，与其他卡牌相比也有着强得多的效果。

炉石传说的完整游戏规则是十分复杂的，考虑到现存的 743 张卡牌大多数都能够在一定程度上改变游戏的规则，卡牌与卡牌之间的组合更是可以让游戏千变万化。其中尤以“传说”卡牌为甚。“传说”卡牌的效果多为随机效果，运气的好坏很可能直接决定玩家最终会赢还是输。图 3.1 为炉石传说中一张很经典的传说卡牌，炎魔之王拉格纳罗斯。不难想象，玩家花费大量费用召唤出拉格纳罗斯以后，其随机攻击目标的价值将直接决定玩家此次召唤是否值得。除此之外，不同卡组之间的强度存在着本质的区别，使用不同的卡组进行测试可能导致实验结果产生差异。因此，本论文的实验只保留炉石传说最基本的规则，并选取部分具有代表性的卡牌组成一副固定的测试卡组进行测试。

炉石传说的一局对局由两名相互敌对的玩家构成。一名玩家所拥有的游戏实体包括英雄、英雄能力、英雄武器、法力水晶、手牌、牌堆以及在场的随从。图 3.2 给出了炉石传说对弈局面的基本表示。

双方的目标均是将对方英雄的生命值下降至0以下，英雄生命值首先到达0以



图 3.1: 炎魔之王拉格纳罗斯

下的玩家输掉对局，两名英雄的生命值同时到达0以下则双方都输掉对局。炉石传说的对局采用回合轮换制，两名玩家先后轮流地进入自己的回合。玩家只能在自己的回合中进行操作，当进入对方的回合时则无法进行任何操作。

在对局开始时随机决定两名玩家的先后手。先手玩家可以抽3张牌，并在这3张牌中选择任意的牌将其重新洗入牌堆，再抽牌直到手中有3张牌作为自己的起始手牌。后手玩家则可以在对局开始时抽4张牌，并在进行同样的选牌过程后将其作为自己的起始手牌。同时，后手玩家还会额外获得一张“硬币”卡¹。随后，对局先从先手玩家的回合开始。

在对局中两名玩家都会拥有各自的法力水晶。双方在对局开始前均不拥有任何法力水晶，但每次回合开始时，玩家均获得一枚额外的法力水晶。法力水晶的数量代表着玩家在每个回合可支配的法力数。每一张卡牌都有着其对应的法力消耗，玩家使用卡牌将会消耗对应数量的法力值。通常消耗越大的卡牌会有着越强的效果。

¹硬币：0费用法术卡，使玩家当前回合的法力值+1

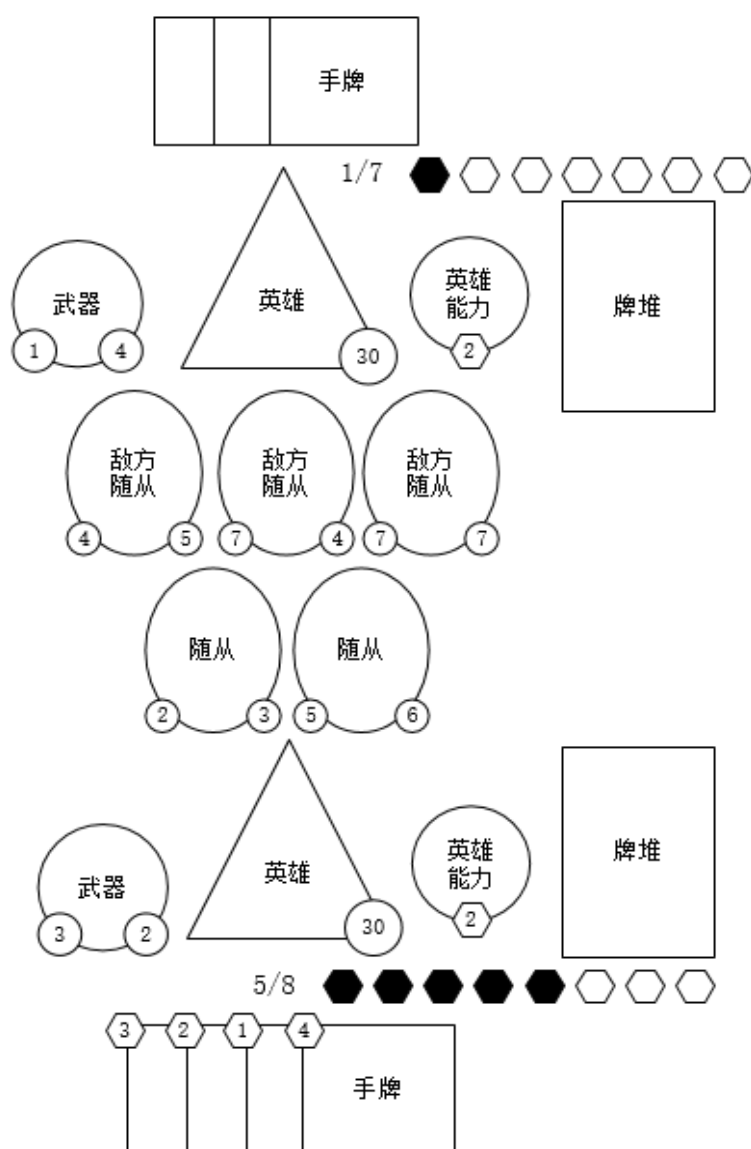


图 3.2: 炉石传说局面基本表示

在玩家的回合开始时，玩家从牌堆中抽一张牌，且所有法力水晶将重新充满。如果玩家的牌堆已经被抽空，那么玩家将会在每次试图抽卡时受到疲劳伤害。疲劳伤害从 1 点伤害开始，每次玩家试图抽卡，疲劳伤害都会向上递增（2 点、3 点、4 点...）。除此之外，玩家的手中最多容纳 10 张牌。当手牌数达到上限后，玩家从牌堆中抽出的卡都将被直接烧毁（消失）。因此，根据对方卡组的策略适当控制抽卡次数也是很重要的决策。在炉石传说中便存在着名为“爆牌贼”的盗贼卡组。该卡组最主要的策略是通过大量触发对手的抽牌动作，烧毁对手牌堆中大部分的卡牌，并最终令对手死于疲劳伤害。

进入己方回合后，玩家即可任意进行操作，包括使用卡牌、命令随从和英雄攻击以及使用英雄能力。不同的卡牌有着不同的效果。按类别来分的话，可以分为法术卡、随从卡和武器卡，分别可用于使用法术、召唤随从或为英雄装备武器以进行攻击。正如前文所说，消耗越大的卡牌意味着越强的效果，也就是越强的法术、越强的随从和越强的武器。



图 3.3: 炉石传说卡牌基本信息

图 3.1 与图 3.3 给出了炉石传说中三类卡牌的实例。其中，图 3.1 给出的“炎魔之王拉格纳罗斯”为随从卡，使用随从卡可以召唤对应的随从。每张随从卡都包含五个基本信息：位于牌面中部的随从名称、位于牌面左上角的法力消耗 C 、位于牌面左下角的攻击力 A 、位于牌面右下角的生命值 H 和位于牌面下侧中部的效果描述。在接下来的内容中，若未加额外说明，随从将用 $C/A/H$ 来表示。若法力消耗本身无关紧要时，也可能直接表示为 A/H 。

图 3.3 的左图给出的“鹰角弓”为武器卡，使用武器卡可为己方英雄装备对应的武器。每张武器卡同样包含五个基本信息，但位于牌面右下角的是武器的耐久度 D 。在一般状态下，英雄的攻击力为 0，无法进行攻击。英雄装备武器后，

英雄将获得武器的攻击力加成，并可以进行攻击。在每次攻击后，武器都会失去 1 点耐久度。当耐久度为 0 时，武器将会损毁，英雄本身也将扣除对应的攻击力。除了武器以外，少部分法术同样可以提高英雄的攻击力。同样，武器可以被表示为 $C/A/D$ 或 A/D 。

图 3.3 的右图给出了名为“冰冻陷阱”的法术卡。法术卡只包含名称、法力消耗和效果三个信息，使用法术卡可以施放对应的法术。除此之外，“冰冻陷阱”为奥秘卡。使用奥秘卡可以为我方设置一个奥秘。奥秘会在敌方回合时激活，并在满足特定条件时触发。

在命令随从和英雄进行攻击时，可以对对方的随从或是英雄进行攻击。当攻击对方攻击力不为 0 的随从时，攻击的随从或英雄会受到对方随从的反击，受到与目标随从攻击力等同的伤害。随从在生命值下降到 0 以下时会死亡。考虑到一名玩家同时只能控制 7 个随从，当达到上限时将无法召唤更多的随从，因此适当地牺牲随从也有一定的战略意义。通常来讲，同一个英雄或随从在一个回合中都只能攻击一次，合理地选择它们各自的攻击目标和顺序也可能带来截然不同的战术收益。

英雄能力的使用同样需要消耗一定的法力，且通常每回合只能使用一次。与卡牌不同的是，卡牌在使用过后便会消失，某一张卡牌在一场对局中可用的次数是有限的，而英雄能力在整场对局中的使用次数则是没有限制的。

图 3.4 给出了炉石传说中一个回合的基本流程。

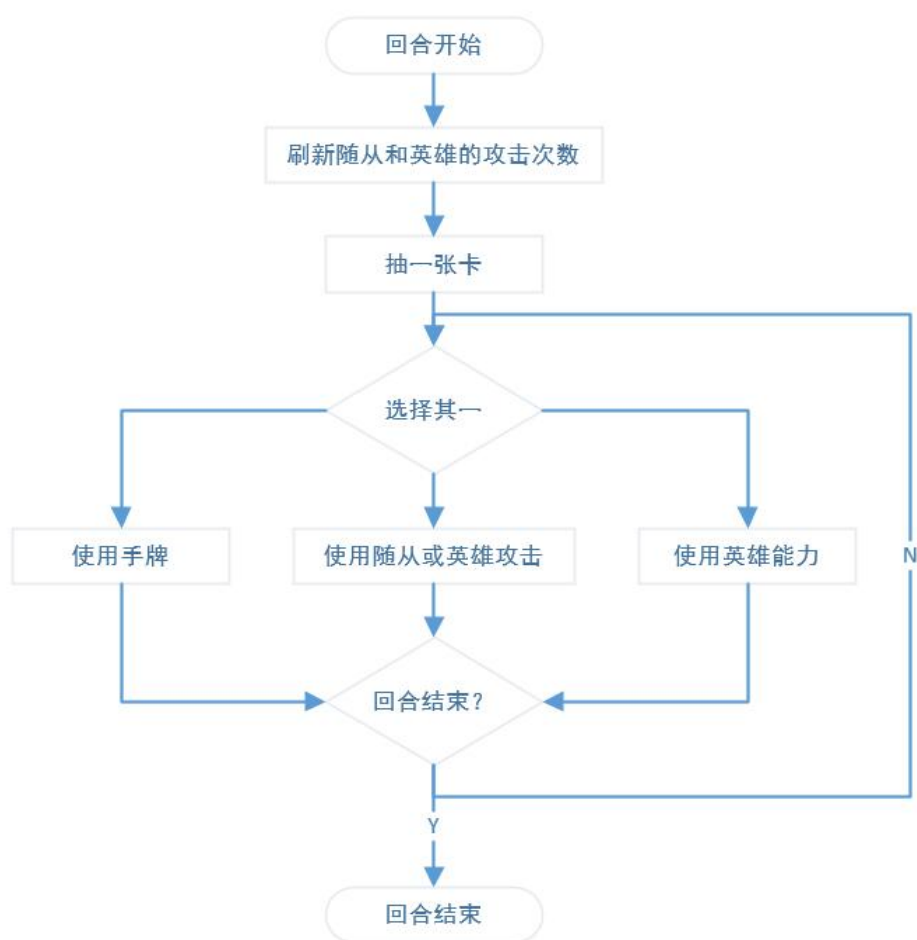


图 3.4: 炉石传说基本流程

第4章 基于规则的智能体

在炉石传说中，不同卡组的强度是不一致的，部分卡组会本质上强于其他卡组。因此，本论文所有的智能体均会使用相同的卡组，卡组的组成如表格 4.1 所示。该卡组借鉴了以往出现过的许多胜率稳定的猎人卡组，其中包含的卡牌的法

表 4.1: 测试智能体使用的猎人职业卡组

名称	类型	消耗	攻击	生命	效果	数量
猎人印记	法术	0			使一个随从的生命值变为1	2
奥术射击	法术	1			造成2点伤害	2
叫嚣的中士	随从	1	2	1	战吼： 本回合中，使一个随从获得+2攻击力	2
狼人渗透者	随从	1	2	1	潜行	2
爆炸陷阱	法术	2			奥秘： 当你的英雄受到攻击时，对所有敌人造成2点伤害	2
冰冻陷阱	法术	2			奥秘： 当一个敌方随从进攻时，将其移回到所有者手中，并使其法力值消耗增加(2)	2
鬼灵爬行者	随从	2	1	2	亡语： 召唤两个1/1的鬼灵蜘蛛	2
鹰角弓	武器	3	3	2	每当有一张你的 奥秘 牌被揭示时，便获得+1耐久度	2
杀戮命令	法术	3			造成3点伤害。如果你控制野兽，则改为造成5点伤害	2
关门放狗	法术	3			战场上每有一个敌方随从，便召唤一个1/1并具有 冲锋 的猎犬	2
蜘蛛坦克	随从	3	3	4		2
冰风雪人	随从	4	4	5		2
火车王里艾诺	随从	5	6	2	冲锋，战吼： 为你的对手召唤两只1/1的雏龙	1
石拳食人魔	随从	6	6	7		2
加兹瑞拉	随从	7	6	9	每当该随从受到伤害，便获得攻击力翻倍	1
强袭坦克	随从	8	7	7	圣盾	2

力消耗跨度较大，包括了从消耗小同时体量小的随从卡到消耗大且体量大的随从卡，以及一定的法术卡。除了法术消耗的跨度，随从卡的效果包含了炉石传说中

绝大部分的典型随从效果，其中包括战吼¹、亡语²、潜行³、冲锋⁴以及圣盾⁵；法术卡则包含了指向性与非指向性法术，以及部分奥秘卡。卡组中甚至还包括了名为“火车王里艾诺”和名为“加兹瑞拉”的传说卡牌。作为传说卡牌，“火车王里艾诺”和“加兹瑞拉”对于猎人卡组都是很有用处的卡牌，同时也拥有比其他卡牌更复杂的效果。综上所述，这个卡组十分适合用于测试智能体对各种不同效果的卡牌的处理能力。

在给定的测试环境下，智能体需要进行的决策包括如下：

1. 决定使用哪张手牌；
2. 决定使用哪个随从或英雄进行攻击，以及攻击的目标；
3. 决定是否使用英雄能力，以及英雄能力的目标。

除此之外，智能体还需要决定上述操作的先后次序。

英雄或随从的攻击决策是完全信息的：所有可进行攻击的角色和可被攻击的目标都是可见的，攻击后的效果也是确定的。大部分英雄能力使用后的效果也是确定的，但少部分职业的英雄能力本身也存在一定的随机性。手牌使用的决策则是不完全信息的：是否使用某一张手牌还需要考虑下一张可能抽到的牌，因为特定卡牌之间的配合可以在炉石传说之中打出更好的效果；除此之外，对方的手牌和牌堆的信息也是隐藏的，我方手牌的使用同样需要考虑这些信息。

除了一个完全随机的智能体，本文还使用了一个基于规则的智能体进行试验。该智能体会按照预先设定的启发规则进行上述的决策。首先它会根据对方在场随从和英雄的攻击力计算出对方的场攻。如果对方的场攻数高于当前我方英雄剩余生命值，即我方形势已十分险峻，那么便会首先决定是否要打出某些满足条

¹战吼效果会在随从被召唤时触发。

²亡语效果会在随从阵亡时触发。

³潜行随从无法作为敌方法术或随从直接攻击的目标。潜行随从在进行攻击后将不再潜行。

⁴随从被召唤后会进入疲劳状态，无法攻击，直至下一回合。拥有冲锋效果的随从在被召唤后不会进入疲劳状态，可以直接攻击。

⁵拥有圣盾的随从将免疫下一次受到的伤害，并失去圣盾。

件的手牌进行自保，如召唤一个嘲讽¹随从。而后，智能体会根据手牌的优先级打出优先级最高的手牌。对于绝大多数卡牌而言，法力消耗越高的卡牌拥有越高的优先级。在完成手牌的决策后，智能体会根据规则来判断哪些敌方随从对己方威胁较大。威胁较大的随从包括攻击力或生命值过高的随从。当存在威胁较大的敌方随从时，智能体将在我方可进行攻击的随从中选取最优的攻击者，以求能以最小的代价杀死该威胁较大的敌方随从²。当不存在这样的敌方随从时，我方所有可攻击的随从和英雄都会直接攻击敌方英雄，以求通过激进地压低敌方生命值为对方增加压力，从而拉大优势、赢得对局。最终，如仍有充足的法力剩余，智能体将使用英雄能力。

正如前文所述，炉石传说是很复杂的游戏，如此简单的规则智能体固然无法与人类玩家相提并论。实际上，鉴于炉石传说的受欢迎程度之大，在进行排名比赛时往往可以在较低的排名中匹配到使用规则智能体进行自动游戏以获益的玩家，即所谓的“脚本”。在与这些脚本进行对战时，我们的规则智能体往往表现不俗，并在多数情况下取胜。由此，尽管确实无法与人类玩家相提并论，本文使用的规则智能体已具有一定的决策强度。

¹当对方拥有一个被标记为“嘲讽”的随从时，我方英雄和随从无法对对方其他随从或英雄进行直接攻击，直到对方所有的嘲讽随从阵亡。

²随从进行攻击时会受到敌方随从的反击。优先以生命值远小于敌方随从攻击力的随从进行攻击可以使得我方生命值较高的随从得以保留，从而控制损失。

第 5 章 蒙特卡洛智能体

5.1 蒙特卡洛搜索智能体

除了随机和规则智能体外，本文主要测试的智能体由蒙特卡洛搜索进行实现。具体而言，本文使用的蒙特卡洛智能体实现了可用于解决多臂赌博机问题的 UCB1 算法[31]。在多臂赌博机问题中，参与者需要在若干个随机出奖的赌博机之间进行选择，而使用 UCB1 算法能确保参与者在足够多次的尝试后获得最高的收益。

UCB1 算法的基本过程如下所述：

初始化 对每个赌博机各尝试一次；

循环 选取使得公式

$$\bar{x}_j + C\sqrt{\frac{\ln n}{n_j}} \quad (5.1)$$

最大化的赌博机 j 进行尝试。其中 \bar{x}_j 为赌博机 j 过往的平均收益， C 为一个0和1之间的常数，决定搜索算法尝试其他赌博机的可能性大小； n_j 为赌博机 j 过去被尝试的次数， $n = \sum_i n_i$ 为尝试次数的总和。

根据 UCB1 算法的基本过程，将其应用于炉石传说也并非难事。蒙特卡洛智能体的决策过程基本如下：

1. 根据当前游戏状态枚举出智能体在当前回合可以进行的所有操作序列；
2. 为每个可进行的操作序列均将游戏模拟至游戏结束，并保存模拟的结果；
3. 进入UCB1算法的循环阶段，使用公式5.1选取操作序列并将游戏模拟至游戏结束，然后保存模拟的结果；
4. 在满足一定的预设条件后结束循环，并返回平均收益 \bar{x}_j 最高的操作序列。

第 6 章 实验结果

本论文的实验将测试4节和??节提到的三个智能体，分别为随机智能体、基于规则智能体和蒙特卡洛智能体。智能体将使用同一副卡组进行对弈，以免不同卡组之间的强度差异导致实验结果发生偏移。测试卡组的组成已在表4.1中给出。除此之外，随机智能体和规则智能体将会分别作为蒙特卡洛智能体的模拟规则，以测试启发式的先验知识是否能提高蒙特卡洛智能体的决策强度。

表 6.1: 测试智能体

智能体名称	智能体描述
Random	完全随机的智能体
Rule-based	基于预定义规则的智能体
MC Random	使用随机智能体进行模拟的基于蒙特卡洛搜索的智能体
MC Rule-based	使用规则智能体进行模拟的基于蒙特卡洛搜索的智能体

6.1 智能体之间的决策强度差异

本实验将用于测试不同智能体之间的决策强度的差异。智能体们将会进行相互对战。每组智能体各进行200次对战，并最终给出各个智能体在各种不同的组合中的胜场数。其中，蒙特卡洛智能体默认在对所有操作进行一次尝试后会额外进行500次迭代。测试时使用的计算机¹可以在1秒内完成500次的模拟游戏。后面的实验结果也表明500次的迭代已足以让蒙特卡洛智能体做出足够强度的决策。本实验的结果也将用作后续实验的基准数据。

表 6.2: 智能体对弈胜场数

VS.	Random	Rule-based	MC Random	MC Rule-based
Random	100	2	0	0
Rule-based	198	100	88	60
MC Random	200	112	100	140
MC Rule-based	200	140	60	100

¹Intel Core i5-3210M @ 2.50GHz 2.50GHz

表6.2给出了此次实验的结果。不难看出，随机智能体比起规则智能体和蒙特卡洛智能体都弱得多。基于随机模拟的蒙特卡洛智能体在面对规则智能体时可以有56%的胜率，可见即使是未添加任何先验知识的蒙特卡洛智能体已能与拥有大量先验知识的规则智能体并驾齐驱。值得注意的是，当采用规则智能体进行模拟时，蒙特卡洛智能体拥有了来自规则智能体的先验知识，同时也拥有了蒙特卡洛搜索返回最优解的保证，因此可以看到，基于规则模拟的蒙特卡洛智能体在面对规则智能体时的胜率比起基于随机模拟的蒙特卡洛智能体有了显著的提升（提升至70%）。更为有趣的是，基于规则模拟的蒙特卡洛智能体与基于随机模拟的蒙特卡洛智能体直接对战时，基于规则的智能体反而处于劣势。

6.2 迭代次数对蒙特卡洛智能体决策强度的影响

由第??章可知，蒙特卡洛搜索通过不断地重复采样以近似每个操作的期望收益，采样次数越多意味着得到的期望收益越准确。该过程类似于近似值逐渐逼近正确值的过程，理论上可知当采样次数达到一定程度后，采样次数的提高所能带来的可靠性的提高会变得微乎其微。本次实验将调整上述实验中使用的两个蒙特卡洛智能体的迭代次数，以测试蒙特卡洛智能体在模拟次数逐渐增加时会有怎样的表现。

图6.1为基于规则模拟的蒙特卡洛智能体与规则智能体进行对战时，蒙特卡洛智能体的胜场数的变化。尽管变化不是很大，但仍能清楚地看到，随着迭代次数的增多，蒙特卡洛智能体的胜场数有上升的趋势。蒙特卡洛智能体的胜场数在迭代数超过100后趋于稳定，稳定在了70%胜率附近。这个数字与6.1节得出的胜率极为接近。

图6.2为基于随机模拟的蒙特卡洛智能体与规则智能体进行对战时，蒙特卡洛智能体的胜场数的变化。同样，从图中可以清晰地看到，蒙特卡洛智能体的胜场数在随着迭代次数的增多而增多。尽管由于测试对弈的次数不足导致曲线有明显的波动，但仍可以看到，在迭代次数达到500以上时，蒙特卡洛智能体的胜场数开始趋于稳定，稳定在65%胜率附近。

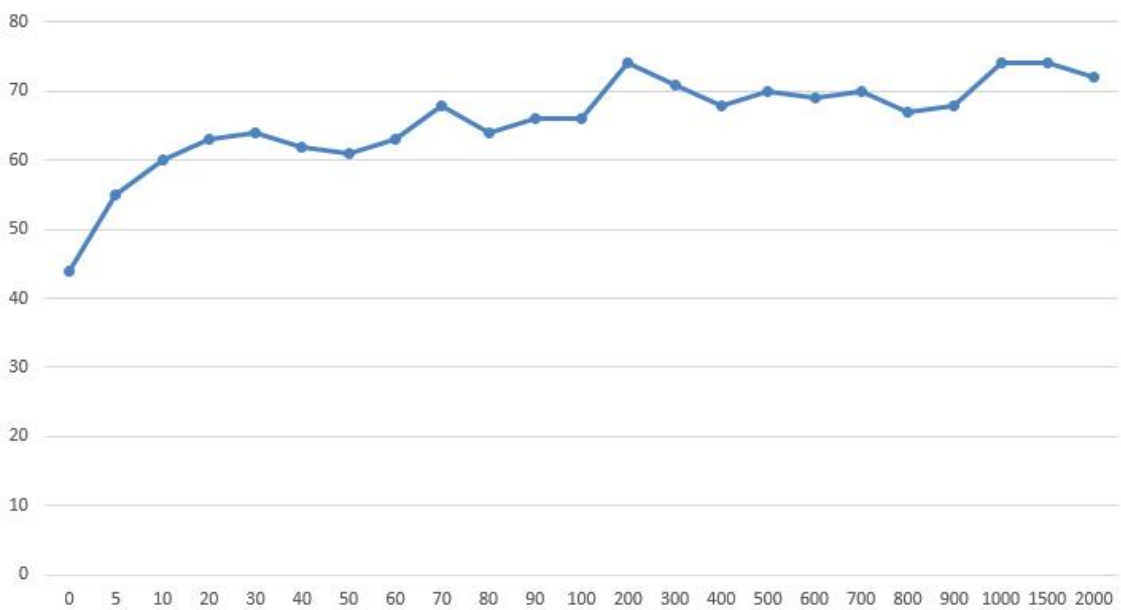


图 6.1: 基于规则模拟的蒙特卡洛智能体vs. 规则智能体

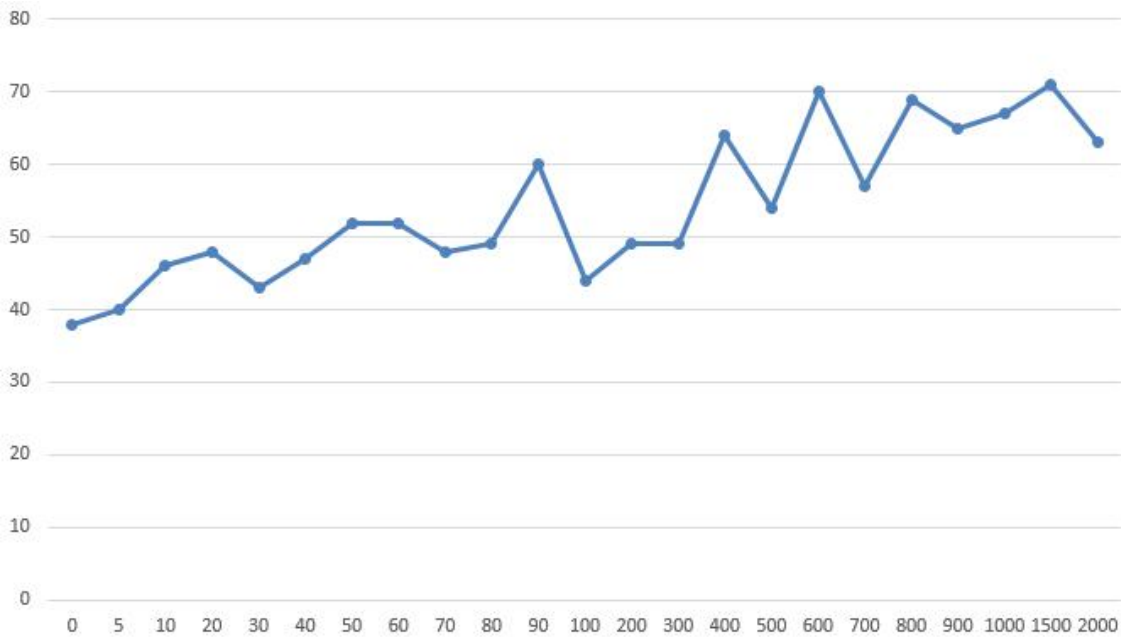


图 6.2: 基于随机模拟的蒙特卡洛智能体vs. 规则智能体

图6.3为规则蒙特卡洛智能体与随机蒙特卡洛智能体进行对战时，规则蒙特卡洛智能体的胜场数的变化。与猜想的结果截然不同，随着两个智能体的迭代次数的增加，规则蒙特卡洛智能体的胜场数在逐渐下降。当迭代次数达到500以上时，规则蒙特卡洛智能体的胜率已经下降到了35%附近。

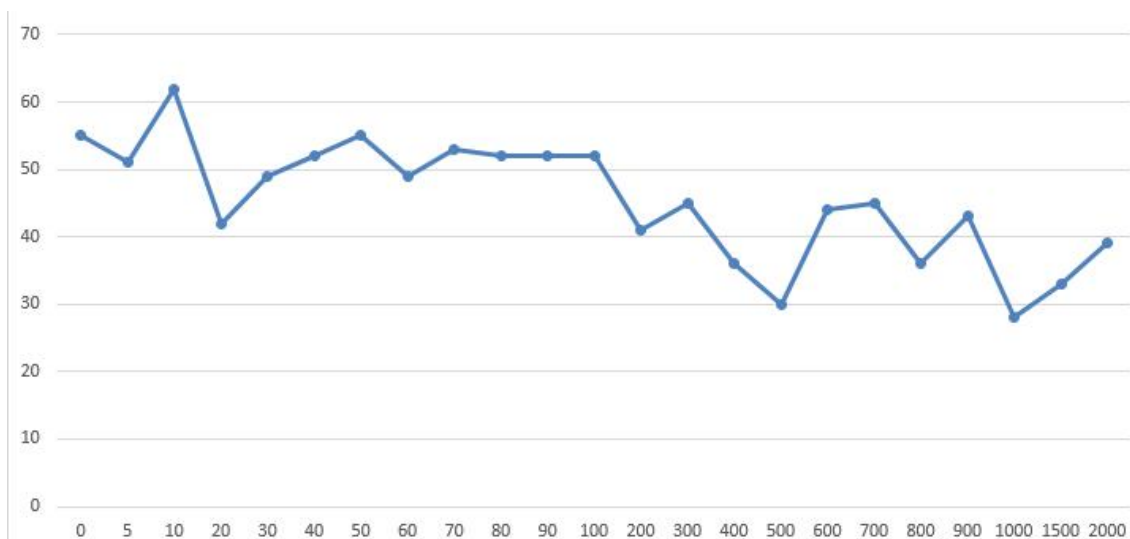


图 6.3: 基于规则模拟的蒙特卡洛智能体vs. 基于随机模拟的蒙特卡洛智能体

以上三次对弈的结果显示出了十分有趣的规律。首先比起随机蒙特卡洛智能体，规则蒙特卡洛智能体在与规则智能体对弈时，其胜率可以以更少的迭代次数（100）稳定在较高的胜率（70%）。尽管随机蒙特卡洛智能体表现不如规则蒙特卡洛智能体，但随机蒙特卡洛智能体也在一定的迭代次数后（500），胜场数也趋于稳定（65%）。更为有趣的是，规则蒙特卡洛智能体与随机蒙特卡洛智能体对弈时，规则蒙特卡洛智能体反而处于劣势，且随着迭代次数的增加，差距仍在逐渐扩大。

蒙特卡洛搜索算法本身无法对对手的行为作出任何预测。完全随机的蒙特卡洛智能体由于不包含任何启发知识，在无法对对手的行为作出预测的情况下，它得出的操作序列的期望收益可能是不准确的。但随着迭代次数的增加，大量的随机采样往往能保证期望收益最终趋近于真实值。大概也正因如此，随机模拟的蒙特卡洛智能体需要更多的迭代来让胜场数趋于稳定，稳定后的胜场数也与规则蒙特卡洛智能体较为接近。规则蒙特卡洛智能体由于加入了启发知识，它能更好地预测规则智能体的行为。但正是由于启发知识的加入，规则蒙特卡洛智能体的迭代采样不是随机的，这就导致了它得出的期望收益是有偏差的，不适用于所有类型的对手，而随机蒙特卡洛智能体没有这样的局限。因此随着迭代次数的增加，规则蒙特卡洛智能体渐渐被随机蒙特卡洛智能体超越，且差距越来越大。

第7章 结语

7.1 结论

本文在第3章介绍了炉石传说的基本规则，并介绍了为了炉石传说开发基于蒙特卡洛搜索的智能体的基本方法。

第6章构建了四个不同的炉石传说智能体并使其进行两两对弈。最终得知，本文使用的规则智能体比普通的随机智能体有强得多的决策强度。完全不包含先验知识的随机模拟的蒙特卡洛智能体能够轻易击败最弱的随机智能体，与拥有大量先验知识的规则智能体对弈时亦能拥有不错的表现。基于规则模拟的蒙特卡洛智能体加入了规则智能体所拥有的先验知识，在决策强度上有了一定的提升，能比随机蒙特卡洛智能体更快趋于稳定，稳定后的胜率也比随机蒙特卡洛智能体稍高。这意味着，蒙特卡洛搜索的加入能够提高智能体的决策强度，规则智能体的先验知识的加入同样能够提高智能体的决策强度，而先验知识的加入与蒙特卡洛搜索算法之间并不冲突。蒙特卡洛搜索意味着无启发知识的搜索型智能体，规则智能体则意味着依赖启发知识的启发型智能体。它们代表着截然不同的人工智能研究方向，而两者相结合所带来的成功意味深远。不幸的是，先验知识的加入导致规则蒙特卡洛智能体的表现发生了偏差：它能比随机蒙特卡洛智能体更好地应对规则智能体，但在面对其他类型的对手时的表现却有所下降。

除此之外，实验部分还验证了迭代次数对蒙特卡洛智能体决策强度的影响。可见，对于每回合可进行的操作序列的总数普遍维持在50以内的炉石传说而言，500次的蒙特卡洛迭代已足以让蒙特卡洛搜索算法近似求得各个操作的期望收益，更多的迭代已不能继续得到更好的结果。考虑到500次的迭代对现代计算机而言只需要1秒的处理时间，蒙特卡洛人工智能在性能上也是可以接受的。

7.2 未来的工作方向

蒙特卡洛搜索固然能带来智能体决策强度的提高，但先验知识的加入对蒙特

卡洛智能体的提升却是显而易见的。炉石传说人工智能仍然可以通过各种方式加入更多的先验知识：无论是基于规则的智能体，还是利用学习算法使得智能体拥有学习能力，本文的实验结果都确保了它们的加入能够更好地模拟对手的行为，为智能体的决策强度带来提高。在炉石传说这样的不完全信息游戏中，对手行为预测是十分重要的。而要对对手进行预测，加入启发知识并不是唯一的方法。

前文提到了蒙特卡洛搜索的延伸算法，蒙特卡洛树搜索。蒙特卡洛树搜索与蒙特卡洛搜索类似，但其同时考虑了对手即将可能进行的操作，将其构造成了一个博弈树，并使用UCT算法来选择模拟的叶子节点。考虑到炉石传说的隐藏信息太多，直接使用蒙特卡洛树搜索构造博弈树将面临比围棋大得多的分支系数，因此本文并未使用蒙特卡洛树搜索。但毋庸置疑，蒙特卡洛树搜索也是十分有价值的研究方向。

参考文献

- [1] Björnsson Y, Finnsson H. Cadiaplayer: A simulation-based general game player [J]. Computational Intelligence and AI in Games, IEEE Transactions on, 2009, 1(1):4–15.
- [2] Bowling M, Johanson M, Burch N, et al. Strategy evaluation in extensive games with importance sampling [C]. Proceedings of the 25th international conference on Machine learning. ACM. 2008: 72–79.
- [3] Schaeffer J. A gamut of games [J]. AI Magazine, 2001, 22(3):29.
- [4] Billings D, Burch N, Davidson A, et al. Approximating game-theoretic optimal strategies for full-scale poker [C]. IJCAI. 2003: 661–668.
- [5] Billings D, Davidson A, Schaeffer J, et al. The challenge of poker [J]. Artificial Intelligence, 2002, 134(1):201–240.
- [6] Billings D, Davidson A, Schauenberg T, et al. Game-tree search with adaptation in stochastic imperfect-information games [C]. Computers and Games. Springer, 2004: 21–34.
- [7] Baker R J, Cowling P I. Bayesian opponent modeling in a simple poker environment [C]. Computational Intelligence and Games, 2007. CIG 2007. IEEE Symposium on. IEEE. 2007: 125–131.
- [8] Baker R J, Cowling P I, Randall T W, et al. Can opponent models aid poker player evolution? [C]. Computational Intelligence and Games, 2008. CIG'08. IEEE Symposium On. Ieee. 2008: 23–30.
- [9] Ginsberg M L. Partition search [C]. AAAI/IAAI, Vol. 1. 1996: 228–233.

-
- [10] Campbell M, Hoane A J, Hsu F h. Deep blue [J]. Artificial intelligence, 2002, 134(1):57–83.
- [11] Brüggmann B. Monte carlo go [R]. Citeseer, 1993.
- [12] Chaslot G, Saito J T, Bouzy B, et al. Monte-carlo strategies for computer go [C]. Proceedings of the 18th BeNeLux Conference on Artificial Intelligence, Namur, Belgium. 2006: 83–91.
- [13] Cazenave T, Helmstetter B. Combining Tactical Search and Monte-Carlo in the Game of Go [J]. CIG, 2005, 5:171–175.
- [14] Chaslot G, Winands M, Uiterwijk J, et al. Progressive strategies for monte-carlo tree search [C]. Proceedings of the 10th Joint Conference on Information Sciences (JCIS 2007). 2007: 655–661.
- [15] Kocsis L, Szepesvári C. Bandit based monte-carlo planning [C]. Machine Learning: ECML 2006. Springer, 2006: 282–293.
- [16] Wang Y, Gelly S. Modifications of UCT and sequence-like simulations for Monte-Carlo Go [J]. CIG, 2007, 7:175–182.
- [17] Lee C S, Wang M H, Chaslot G, et al. The computational intelligence of MoGo revealed in Taiwan’s computer Go tournaments [J]. Computational Intelligence and AI in Games, IEEE Transactions on, 2009, 1(1):73–89.
- [18] Finnsson H, Björnsson Y. Simulation-Based Approach to General Game Playing [C]. AAAI. vol 8. 2008: 259–264.
- [19] Clune J. Heuristic evaluation functions for general game playing [C]. AAAI. vol 7. 2007: 1134–1139.

-
- [20] Sharma S, Kobti Z, Goodwin S. Knowledge generation for improving simulations in uct for general game playing [C]. AI 2008: Advances in Artificial Intelligence. Springer, 2008: 49–55.
- [21] Ward C D, Cowling P I. Monte Carlo search applied to card selection in Magic: The Gathering [C]. Computational Intelligence and Games, 2009. CIG 2009. IEEE Symposium on. IEEE. 2009: 9–16.
- [22] Cowling P I, Ward C D, Powley E J. Ensemble determinization in monte carlo tree search for the imperfect information card game magic: The gathering [J]. Computational Intelligence and AI in Games, IEEE Transactions on, 2012, 4(4):241–257.
- [23] Yoon S W, Fern A, Givan R. FF-Replan: A Baseline for Probabilistic Planning. [C]. ICAPS. vol 7. 2007: 352–359.
- [24] Powley E, Whitehouse D, Cowling P. Determinization in Monte-Carlo tree search for the card game Dou Di Zhu [J]. Proc. Artif. Intell. Simul. Behav., York, United Kingdom, 2011, 17–24.
- [25] Taralla D, Qiu Z, Sutera A, et al. Decision Making from Confidence Measurement on the Reward Growth using Supervised Learning: A Study Intended for Large-Scale Video Games [C]. Proceedings of the 2016 International Conference on Agents and Artificial Intelligence.
- [26] Goes L W, da Silva A R, Rezende J, et al. HoningStone: Building Creative Combos with Honing Theory for a Digital Card Game [J].
- [27] Abramson B. Expected-outcome: A general model of static evaluation [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1990, 12(2):182–193.

-
- [28] Gelly S, Silver D. Monte-Carlo tree search and rapid action value estimation in computer Go [J]. *Artificial Intelligence*, 2011, 175(11):1856–1875.
- [29] Ginsberg M L. GIB: Imperfect information in a computationally challenging game [J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2001, 303–358.
- [30] Browne C. The dangers of random playouts [J]. *ICGA Journal*, 2011, 34(1):25–26.
- [31] Auer P, Cesa-Bianchi N, Fischer P. Finite-time analysis of the multiarmed bandit problem [J]. *Machine learning*, 2002, 47(2-3):235–256.
- [32] Kocsis L, Szepesvári C, Willemson J. Improved monte-carlo search [J]. *Univ. Tartu, Estonia, Tech. Rep*, 2006, 1.

致 谢

在此论文完成之际，谨向我的导师致以衷心的感谢和崇高的敬意。我的导师教导了我学术论文的基本写作过程，给予了大量的指导，特别是在毕业论文的选题过程中，给了非常多有效的指引和建议，使得这篇论文能以较高水平顺利完成。

衷心感谢我的家人对我的关心和理解，感谢你们一直以来的支持和鼓励。

最后，向百忙中审阅论文的各位老师致以崇高的敬意和深深的感谢。

论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文使用授权声明

本人完全了解中山大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文并向国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆、院系资料室被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，可以采用复印、缩印或其他方法保存学位论文；可以为建立了馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。

保密论文保密期满后，适用本声明。

学位论文作者签名：

导师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日