▪ ▪ **文章编号：1000—3428(201)01—00—0** **文献标识码：A** **中图分类号：**

基于有穷自动机的“牛九占牌”机器博弈模型

张传玺 李冬梅

（北京林业大学信息学院，北京 100083）

摘　要：机器博弈是人工智能学科研究的载体。“牛九占牌”作为一种高度复杂的博弈牌种，其博弈模型的研究可以为非零和不完全信息牌类游戏的机器博弈系统的研究建立坚实的理论基础。本文首先给出了牌类游戏机器博弈系统的组成要素，提出了一种基于 Moore 自动机的“牛九占牌”机器博弈模型，并提出了一种基于 IMP-minimax 算法的搜索策略，在此基础上，实现了牛九头家最少占牌、最优占牌的博弈过程。实验结果表明，本文提出的模型和搜索算法具有可行性和有效性。

关键词：有穷自动机；牛九占牌；机器博弈；IMP-minimax 搜索算法；审局函数

Finite Automaton Based Computer Game Model for Occupancy of Niujiu Card

Chuanxi ZHANG; Dongmei LI

（School of Information and technology in Beijing Forestry University， Beijing， China 100083）

【**Abstract**】（Computer Game is a carrier of artificial intelligence research. Niujiu Card as a highly complex card of computer game, the research of its game model can establish a sound theoretical foundation for the research of non-zero-sum card games with imperfect information. First, this paper discusses the components of card game model. Second, it proposes a game model based on the finite Moore automaton for occupancy of Niujiu Card, and then presents an IMP-minimax based search algorithm. Finally, this paper designs and implements the game algorithm, which simulates the process of minimal occupancy and optimal occupancy of first player. Experiments show that the proposed model and algorithm are feasible and effective.）

【**Key words**】Finite automaton; Niujiu card; computer game; IMP - minimax algorithm; evaluation function

1　引言

机器博弈是人工智能研究的重要分支，它研究的主要内容是让计算机模拟人的思维进行博弈游戏，人类在机器博弈的研究中衍生了大量的研究成果，这些研究成果对更广泛的领域产生了重要的影响[1-5]。因此，就像果蝇被遗传学视为最理想的遗传学研究载体一样，机器博弈也被称为人工智能学科研究的载体[6-8]。

但是，目前国内外对于机器博弈的研究多数集中于搜索算法和评估函数方面[9-12]，对于机器博弈模型化的研究较少。

另外，研究者对于两人零和完全信息的机器博弈问题关注的较多[12-17]，而多人非零和不完全信息机器博弈问题的研究较少。牌类游戏基本上都属于这种多人非零和不完全信息机器博弈问题，牌类游戏相关的研究没有棋类这种完全信息游戏研究的深入和成熟。因此，研究多人非零和不完全信息牌类游戏的机器博弈模型是非常有意义的。

有穷自动机是一种研究离散事件动态系统的数学模型，目前，基于自动机的博弈领域已经取得了丰硕的成果[18-20]，为机器博弈中自动机的建模提供了很好的参考。牛九牌是一种流行于中国西北部的古老牌种，其历史悠久，迄今约有 1000 年的历史的，其占牌逻辑复杂缜密、灵活多变。牛九占牌的博弈问题属于多人非零和不完全信息动态博弈，通过对牛九占牌博弈模型的研究，可以为多人非零和不完全信息牌类游戏的博弈模型的研究建立理论基础，为机器博弈系

基金项目：

作者簡介：(19－)

收稿日期：　**修回日期：**　**E-mail：**

统建立利于学习和研究的理论化模型。本文针对三人的牌类游戏的机器博弈系统进行建模分析，给出了牌类游戏机器博弈系统的形式化定义，然后利用Moore自动机为“牛九占牌”机器博弈系统建立了理论模型。针对IMP-minimax搜索算法可以为不完全信息的博弈问题提供一种适时的线性搜索树策略[20-21]，提出了一种基于IMP-minimax算法下的特殊牌型识别的搜索方法。最后实现了牛九头家最少占牌、最优占牌的博弈过程，验证了本文所提出的模型以及相应搜索算法的可行性和有效性。

2 牌类游戏机器博弈系统的组成

机器博弈主要是指由计算机完成日常生活中的棋牌类游戏，由于棋牌类游戏具有规则明确，行进过程较为典型的特点，非常适合由计算机实现[23-24]。

对于国际象棋、五子棋、中国象棋等此棋类游戏，都属于常见的两人零和的完全信息博弈。文献[23]针对两人棋类游戏，给出了一种机器博弈系统模型。而对于桥牌、扑克牌等牌类游戏，则属于多人不完全信息博弈。本文主要针对三人的牌类游戏的机器博弈系统进行建模分析，下文提到的机器博弈系统均指该系统。

定义 1 牌类游戏机器博弈系统由一个七元组{H_a，H_b，R_i，γ，S，C，W}组成，其中:

（1）H_a代表所持牌型，即当前每位参与者手持牌型的总和。H_a同时对其他参与者是不可见的，描述了每个参与者尚未打出的牌型状态。

（2）H_b代表已打牌型，即当前所有参与者已经打出的牌型总和。H_b同时对所有参与者均是可见的，描述了所有参与者打出的牌型的状态。

(3) R_i(i=1,2,3)代表博弈规则，由一个四元组{d，p，t，l}组成，其中d代表博弈中每个参与者行动的顺序、p代表出牌方法、t代表时间限制、l代表信息给出方式。用=>表示推导过程，则有当R_1:p=>d有效时，有R_2:d=>t，当R_2有效时，有R_3:t=>l。该规则使得当前所有参与者的对弈背景和对弈过程是公平合理的，程序还可以通过博弈规则来生成所有可用牌型打法。

（4）γ代表审局函数，为当前的局势进行综合预估，结合搜索算法，程序选出最优的出牌方法。目前已有将遗传算法等应用到审局函数中的做法[25]。

（5）S代表搜索技术，由一个四元组{e，s，v，o}组成，其中e表示待输入牌型，指需要搜索的牌型。s代表搜索算法，通常用IMP-minimax算法或者蒙特卡略算法进行搜索[17]，v表示验证函数，验证搜索结果的正确性，o表示输出牌型，在搜索树结束搜索后，选择最佳出牌策略。

（6）C代表控制器，由C={C_1，C_2，C_3}，C_1表示控制器初始阶段，主要工作为对控制器所需函数和参数的初始化。C_2为控制器执行阶段，主要对玩家所持牌中有效牌型进行筛选，C_3为控制验证阶段，在C_2执行无误的情况下，向审局函数传递有效牌型。

（7）W 代表博弈界面。

3 基于有穷自动机的牌类游戏机器博弈系统模型

有穷自动机是一种具有离散输入输出系统的数学模型.它具有任意有限数量的内部状态，以此来记忆过去输入的有关信息.根据当前的输入可确定下一步的状态和行为。在牌类游戏的机器博弈系统中，打牌状态是有穷的，并且是可以枚举的，所以可以采用有穷自动机对其进行建模。

在机器博弈中，博弈的多方均需要根据牌局的变化改变自己的出牌策略，为了完成实时并且应对这种变化，故选择选 Moore 自动机为核心建模。故提出了如图 1 所示的模型。

图 1 中 C 表示玩家 P 所有牌型产生控制器，用来识别玩家在发牌后所有的有效牌型。x1 代表了应对库对检测到的有效牌型的输出。y1 代表了随着牌型的输出调整相应的牌型检测函数，x2 表示 M1 向审局函数的输入识别到的牌型，y2 代表从审局函数反馈信息输出至 M1。

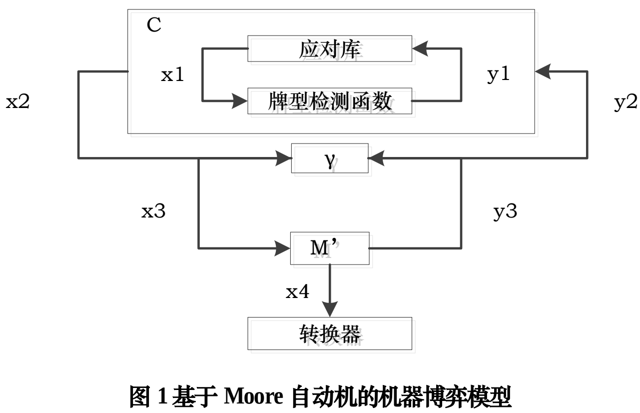

图 1 基于 Moore 自动机的机器博弈模型

审局函数作为整个模型的核心，一方面接收来自 M1 的牌型输出，同时将审局的信息传递给 M1，另一方面，将审局结果 x3 传递给 Moore 机 M’，同时 M’将搜索的结果 y3 反馈给审局函数。

M’表示玩家 P 牌型识别 Moore 机，其构造由图 2 所示。

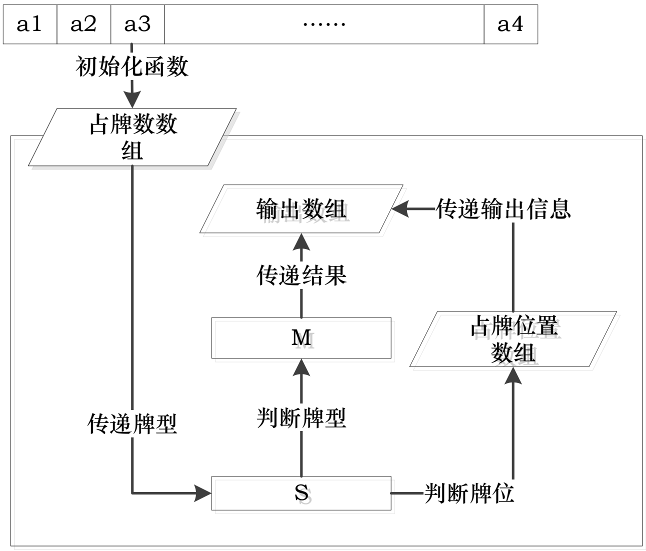

图 2 基于 Moore 的自动机 M’结构

图 2 中 M 为有穷自动机，{a1，a2，a3，……，an}表示只读带从审局函数处获取的有效牌型。初始化完毕后，引入占牌数数组对相应的牌号一一进行存储。当存储过程完成时，将对应的牌号信息传递给牌型识别算法，利用搜索技术 S 对其中的牌型进行识别过滤，得到有效的待打出牌型。若识别到系统要求的待打出指定牌型，便将识别的牌号的占位交给占牌位置数组。由占牌位置数组进行标记，同时，识别的牌型交给有穷自动机，有穷自动机在状态转换后将结果交至输出数组，输出至博弈界面。

机器博弈的参与方P的M有穷自动机可以用一个五元组M={A，∑，f_i，B，Z}表示。

A为玩家P所能到达的有穷状态集合，A={A_1，A_2，A_3，A_4……A_n}，$A_i \in A$。

B 是非空初始状态，Z 为终止状态的集合。均有 $B \in A$，$Z \in A$。

∑为有穷元素集合，f 为状态转移函数，即：f:Ai$\times$∑→Aj。

当 M’得到审局函数传来的信息后，如果信息有效，则审局函数将得到的结果 x4 传递至转换器，由转换器转换为友好，易识别的自然语言呈现给界面 W，反馈给玩家。

4 牛九牌术语

3.1 本文所用符号及公式定义

牛九牌由一副去除大小王及牌号为 4 的 48 张扑克牌构成，在介绍牛九牌术语前，约定如下定义：

定义 2 牌号 x∏，在一副扑克牌中，唯一区别该牌数学大小的标记，x 即该扑克牌左上角及右下角的符号(x∈{1，2，3，5，6，7，8，9，10，J，Q，K})，∏为牌号标记。

定义 3 牌数符号→，在一副扑克牌中，用来标记某确定牌号数量的符号，符号的左边为数量变量，用 n，m，r 表示，符号的右边为被标记的牌号。

定义 4 牌数表达式，一个含有数量变量，被标记牌号和牌数符号的完整表达式。如：在牌数表达式 n→1∏中，表示牌号为 1∏的牌有 n 张。

定义 5 花色符号，若有花色区别需要时，在牌数表达式前添加+或-分别表示该牌号红色的牌或黑色的牌有几张。如：在牌数表达式-n→1∏中，表示牌号为 1∏的黑色牌有 n 张。

定义 6 牌型φ，由指定的同一牌号或不同牌号的不同牌数构成的集合，叫做牌型，记作φ。

3.2 牛九牌术语

根据以上定义，现给出牛九牌型的术语：

(1)牛牌：若有牌号 9∏，并且有φ_1={9∏| n→9∏∧n=1}，则称之为牛牌。单独的牛牌相当于单张 9，但有φ_{1a}={9∏|(-n→9∏∧n=1)∧(+m→9∏∧m=1)}，称之为二牛牌。二牛牌可以吃除了天和喜以外的任何同一牌号的对牌。又有φ_{1b}={9∏| n→9∏∧n=3}称之为三牛牌，三牛牌可以吃除了天和喜以外的任何三张同一牌号的牌。

(2) 喜牌：若有牌号 5∏，并且有φ_2={5∏| n→5∏∧n=1}，则称之为喜牌。单独的喜牌相当于单张 5，但有φ_{2a}={5∏|(-n→5∏∧n=1)∧(+m→5∏∧m=1)}，称之为二喜牌。又有φ_{2b}={5∏| n→5∏∧n=3}称之为三喜牌。二喜牌和三喜牌不能被吃同时也不能吃别的牌。

(3) 亮子：若有牌号x∏，并且有φ_3={x∏| n→x∏∧n=4}，则被称为亮子。

(4) 鱼牌：若有牌号 1∏，2∏，3∏，并且有φ_4={1∏，2∏，3∏| n→1∏∧m→2∏∧r→3∏∧n=m=r=1}则被称为鱼牌。鱼只能被摆吃。由此衍生出的 2φ_4被称为双鱼牌，同理 3φ_4与 4φ_4称为三鱼牌和四鱼牌。若有φ_{4a}={1∏，2∏，3∏|n→1∏∧m→2∏∧r→3∏∧n=m=1∧r=4}，φ_{4b}={1∏，2∏，3∏n→1∏∧m→2∏∧r→3∏∧n=r=1∧m=4}，φ_{4c}={1∏，2∏，3∏|n→1

$\prod\wedge m\rightarrow 2\prod\wedge r\rightarrow 3\prod\wedge r=m=1\wedge n=4\}$则$\varphi_{4a}\vee\varphi_{4b}\vee\varphi_{4c}$称之为鱼亮，鱼亮只能被摆亮吃。

(5) 摆牌：若有牌号 $8\prod,10\prod,K\prod$，并且有$\varphi_5=\{8\prod,10\prod,K\prod|n\rightarrow 8\prod\wedge m\rightarrow 10\prod\wedge r\rightarrow K\prod\wedge n=m=r=1\}$，则被称为摆牌，摆能吃鱼。由此衍生出的$2\varphi_5$被称为双摆牌，同理$3\varphi_5$与$4\varphi_5$称为三摆牌和四摆牌。若有$\varphi_{5a}=\{8\prod，10\prod，K\prod|\ n\rightarrow 8\prod\wedge m\rightarrow 10\prod\wedge r\rightarrow K\prod\wedge n=m=1\wedge r=4\}$，$\varphi_{5b}=\{8\prod，10\prod，K\prod|\ n\rightarrow 8\prod\wedge m\rightarrow 10\prod\wedge r\rightarrow K\prod\wedge n=r=1\wedge m=4\}$，$\varphi_{5c}=\{8\prod,10\prod,K\prod|\ n\rightarrow 8\prod\wedge m\rightarrow 10\prod\wedge r\rightarrow K\prod\wedge r=m=1\wedge n=4\}$则$\varphi_{5a}\vee\varphi_{5b}\vee\varphi_{5c}$称之为摆亮，摆亮能吃鱼亮。特殊的，$\varphi_{5d}=\{8\prod，10\prod，K\prod|\ n\rightarrow 8\prod\wedge m\rightarrow 10\prod\wedge r\rightarrow K\prod\wedge n=m=1\wedge(r=1\vee r=2\vee r=3\vee r=4)\}$，则$\varphi_{5d}$均为必够牌型（关于$K\prod$的特殊性，在后面的天牌中会讲到)。

(6) 喜包亮：若有$\varphi_6=\{\varphi_2，\varphi_3|(\varphi_2\wedge\varphi_3)\vee(\varphi_3\wedge\varphi_2)\}$，则被称为喜包亮，喜包亮只能被喜包亮吃。

(7)天牌：若有牌号$K\prod$，并且有$\varphi_7=\{K\prod|n\rightarrow K\prod\wedge n=1\}$，则被称为天牌，天牌不能被任何牌吃。同理，$2\varphi_7$，$3\varphi_7$，$4\varphi_7$被称为两天，三天，四天，其中 $4\varphi_7$无论出牌时是否一起打出，均按照亮子算分。

(8)虎牌：若有牌号$Q\prod$，并且有$\varphi_8=\{Q\prod|\ n\rightarrow Q\prod\wedge n=1\}$，则被称为虎牌，虎牌能被天牌和牛排吃。同理，$2\varphi_8$，$3\varphi_8$，$4\varphi_8$被称为两虎、三虎、四虎。

(9)3 和 6 一般大：若有牌号 $3\prod$与 $6\prod$，并且有$\varphi_{9a}=\{3\prod|\ n\rightarrow 3\prod\wedge n=1\}$，$\varphi_{9b}=\{6\prod|\ n\rightarrow 6\prod\wedge n=1\}$，规定则有$\varphi_{9a}=\varphi_{9b}$，同样适用于 $2\varphi_{9a}=2\varphi_{9b}$，$3\varphi_{9a}=3\varphi_{9b}$，$4\varphi_{9a}=4\varphi_{9b}$。

(10)花 10 和莫 10 一般大：若有牌号 $10\prod$与$J\prod$，并且有$\varphi_{10a}=\{10\prod|\ n\rightarrow 10\prod\wedge n=1\}$，$\varphi_{10b}=\{J\prod|\ n\rightarrow J\prod\in n\wedge n=1\}$，规定则有$\varphi_{10a}=\varphi_{10b}$，同样适用于 $2\varphi_{10a}=2\varphi_{10b}$，$3\varphi_{10a}=3\varphi_{10b}$，$4\varphi_{10a}=4\varphi_{10b}$。

(11)普通牌：设有$P=\{x\prod|，n\rightarrow x\prod\wedge(n=1\vee n=2\vee n=3\vee n=4)\}$均有$P\rightarrow Q(Q\not\subset(\varphi_1\vee\varphi_2\vee\varphi_3\vee\varphi_4\vee\varphi_5\vee\varphi_6\vee\varphi_7\vee\varphi_8))$，$Q=\{K\prod>Q\prod>J\prod=10\prod>9\prod>8\prod>7\prod>6\prod>5\prod>3\prod>2\prod>1\prod\}$则称做普通牌。

5 基于有穷自动机的“牛九占牌”机器博弈模型的实现

5.1 确定型有穷自动机 M 的构建

当每个玩家接牌结束之后，每个玩家将拥有 16 张牌。根据规则，最终占牌总数上限应为总牌数 1/3，即同样为 16 张。为了维持最多两家够牌原则，则单家所占牌数在 6 张以上即接受为一个终止状态。考虑到可用于占牌的牌号会随着轮次的变化产生变化，因此，在此只讨论头家牌理想的占牌方法，即头家牌 6 张必够策略。

所谓“六牌必够”策略是指用绝对大的六张牌来完成初期的占牌工作，恰好占够 6 张使玩家在最大限度上有可操作的余地，自动机构建过程如下：

（1）确定头家牌的行进状态，根据过程中占牌数量划分其状态。

A_0：场上不存在任何的有效牌

A_1：场上存在头家一张有效牌

A_2：场上存在头家两张有效牌

A_3：场上存在头家三张有效牌

A_4：场上存在头家四张有效牌

A_5：场上存在头家五张有效牌

A_6：场上存在头家六张有效牌

（2）构造有穷自动机的字母表，根据占牌的标准牌型划分有穷自动机的字母表，标准牌型的对应关系沿用上文中所设立的符号模型，大括号中为所出牌号，无先后顺序。

φ_{1a}:二牛牌，即$\{-9\prod，+9\prod\}$

φ_{1b}:三牛牌，即$\{-9\prod，+9\prod，+9\prod\}$或$\{-9\prod，-9\prod，+9\prod\}$

φ_{2a}:二喜牌，即$\{-5\prod，+5\prod\}$

φ_{2b}:三喜牌，即$\{-5\prod，+5\prod，+5\prod\}$或$\{-5\prod，-5\prod，+5\prod\}$

φ_3:亮子，即$\{x\prod，x\prod，x\prod，x\prod\}$

φ_4:鱼牌，即$\{1\prod，2\prod，3\prod\}$

φ_{4abc}:鱼亮牌，即$\{1\prod，1\prod，1\prod，1\prod，2\prod，3\prod\}$或$\{1\prod，2\prod，2\prod，2\prod，2\prod，3\prod\}$或$\{1\prod，2\prod，3\prod，3\prod，3\prod，3\prod\}$

φ_5:摆牌，即$\{8\prod，10\prod，K\prod\}$

φ_{5abc}:摆亮牌即$\{8\prod，8\prod，8\prod，8\prod，10\prod，K\prod\}$或$\{8\prod，10\prod，10\prod，10\prod，10\prod，K\prod\}$或$\{8\prod，10\prod，K\prod，K\prod，K\prod，K\prod\}$

φ_6:喜包亮，即$\{+5\prod，-5\prod，x\prod，x\prod，x\prod，x\prod\}$

φ_7:天牌，即$\{K\prod\}$

φ_8:虎牌，即$\{Q\prod\}$

（3）根据该有穷自动机和字母表的特性，设计以下等价字母代换：

令$a=\varphi_7$

令$b=\varphi_{1a}\mid\varphi_{2a}$

令$c=\varphi_{1b}\mid\varphi_{2b}\mid\varphi_{5}$

令$d=\varphi_{3}$

令$e=\varphi_{4abc}\mid\varphi_{5abc}\mid\varphi_{6}$

（4）设计有穷自动机 M，如图 3 所示。

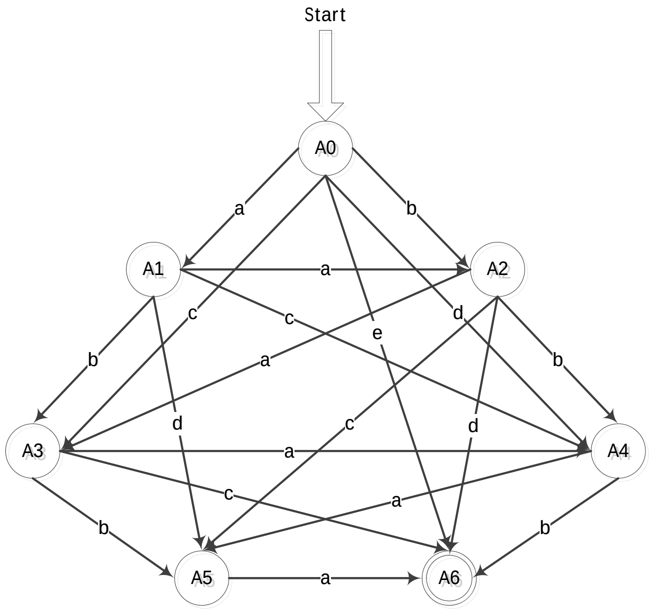

图 3 六牌必够有穷自动机状态转换图

如图 3 所示，在有穷自动机 M 中，状态转移函数的具体调用过程如下：

步骤 1 初始状态根据玩家所持手牌自动调用不同种类的状态转移函数，状态转移函数包括摆牌，牛牌，喜牌三种，若符合其中任意一种状态转移函数，则进行状态跳转。

步骤 2 每当跳转至下一状态后，继续根据状态转移函数进行跳转，直到达到终止状态为止。

步骤 3 若状态在状态跳转的过程中不符合任意种类的状态转移函数，则输出“未形成标准牌型”字样。

5.2 必够牌型识别算法的设计

自动机控制器中的牌型识别算法用来判断自动机的在“必够牌型”出现下的条件转移。以摆牌的判断为例，为了标记一副牌中已经被使用的牌，定义一个长为 16 的数组，且数组各个位置取值均为 0。若该数组所在牌位被占用，则标记对应数组位置为 1。在摆牌的判断中，要判断是否同时存在 8∏，10∏，K∏三种牌型，则需要一个数值变量 λ。每得到一种牌型则令 λ 加 1，当其值为 3 时将其存入输出数组中，并根据所占牌数跳转至下一个状态，若不为 3，将 K∏牌型存入输出数组中，并根据所占牌数跳转至下一个状态，如图 4 所示。

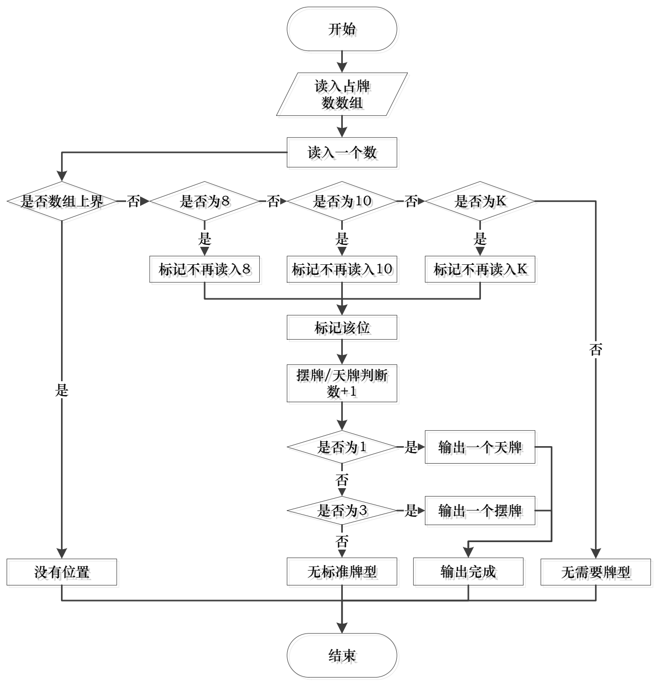

图 4 摆牌牌型识别算法流程图

牛牌喜牌加和取余算法，由于牛牌和喜牌的判断上有许多种情况，该算法巧妙地利用了数字取余的过程模拟了不同种情况。以牛牌为例，定义一个数值变量 μ 用来接收总值，定义遇到牌型+9∏时，该值 7，遇到-9∏该值 9，若有沿用之前的定义，这样就存在以下几种情况：

$\varphi_{1}=\{9\prod\mid n\rightarrow 9\prod\wedge n=1\}$

$\varphi_{1-1}=\{9\prod\mid n\rightarrow 9\prod\wedge n=-1\}$：$\mu\%10=9$

$\varphi_{1-2}=\{9\prod\mid n\rightarrow 9\prod\wedge n=-2\}$：$\mu\%10=8$

$\varphi_{1-3}=\{9\prod\mid n\rightarrow 9\prod\wedge n=+1\}$：$\mu\%10=7$

$\varphi_{1-4}=\{9\prod\mid n\rightarrow 9\prod\wedge n=+2\}$：$\mu\%10=4$

$\varphi_{1a}=\{9\prod\mid(-n\rightarrow 9\prod\wedge n=1)\wedge(+m\rightarrow 9\prod\wedge m=1)\}$：$\mu\%10=6$

$\varphi_{1b-1}=\{9\prod\mid n\rightarrow 9\prod\wedge n=2+(-1)\}$：　$\mu\%10=3$

$\varphi_{1b-2}=\{9\prod\mid n\rightarrow 9\prod\wedge n=(-2)+1\}$：　$\mu\%10=5$

$2\varphi_{1a}$：$\mu\%10=2$

可以看到，所有的可能组合均不出现相同的值，这样就可以方便对牛牌或者喜牌的判断，该函数便可以鉴别出所有的该牌号下的所有牌型。

基于以上的策略分析，可以得到所有的可以接受的字符表，如表 1 所示（集合内值不分先后）：

表 1　六牌必够有穷自动机可识别字符表

{K∏，K∏，K∏，K∏，-9∏，+9∏}	{K∏，-9∏，+9∏，-5∏，+5∏，+5∏}

{K∏，K∏，K∏，K∏，-5∏，+5∏}	{K∏，-9∏，+9∏，+5∏，-5∏，-5∏}
{K∏，K∏，K∏，8∏，10∏，K∏}	{K∏，-5∏，+5∏，-9∏，+9∏，+9∏}
{K∏，K∏，K∏，-9∏，+9∏，+9∏}	{K∏，-5∏，+5∏，+9∏，-9∏，-9∏}
{-9∏，+9∏，+9∏，-5∏，+5∏，+5∏}	{K∏，10∏，8∏，-9∏，+9∏，+9∏}
{-9∏，+9∏，+9∏，+5∏，-5∏，-5∏}	{K∏，10∏，8∏，+9∏，-9∏，-9∏}
{+9∏，-9∏，-9∏，-5∏，+5∏，+5∏}	{K∏，10∏，8∏，-5∏，+5∏，+5∏}
{+9∏，-9∏，-9∏，+5∏，-5∏，-5∏}	{K∏，10∏，8∏，+5∏，-5∏，-5∏}
{K∏，K∏，K∏，+9∏，-9∏，-9∏}	{K∏，10∏，8∏，K∏，10∏，8∏}
{K∏，K∏，K∏，-5∏，+5∏，+5∏}	{-9∏，+9∏，-5∏，-5∏，+5∏，+5∏}
{K∏，K∏，K∏，+5∏，-5∏，-5∏}	{-5∏，+5∏，-9∏，-9∏，+9∏，+9∏}
{K∏，K∏，9∏，9∏，5∏，5∏}	{K∏，K∏，10∏，8∏，-5∏，+5∏}
{K∏，K∏，-9∏，-9∏，+9∏，+9∏}	{K∏，K∏，10∏，8∏，-9∏，+9∏}
{K∏，K∏，-5∏，-5∏，+5∏，+5∏}	{K∏，K∏，x∏，x∏，x∏，x∏}
{-5∏，+5∏，x∏，x∏，x∏，x∏}	{1∏，1∏，1∏，1∏，2∏，3∏}
{1∏，2∏，2∏，2∏，2∏，3∏}	{1∏，2∏，3∏，3∏，3∏，3∏}
{8∏，8∏，8∏，8∏，10∏，K∏}	{8∏，10∏，10∏，10∏，10∏，K∏}
{K∏，K∏，K∏，K∏，-9∏，+9∏}	{K∏，-9∏，+9∏，-5∏，+5∏，+5∏}

5.3 基于 IMP-minimax 搜索算法的特殊牌型识别

在占牌的过程中，除去必够的占牌情况，在一些特定的情况下还有一些牌型也是绝对大的。

由于发牌的过程包含有隐藏信息，所以该机器博弈系统下的牌类博弈为一个不完全信息博弈。因此，将该打牌过程用 IMP-minimax 搜索算法来描述打出的特殊的组合牌型。

IMP-minimax 搜索算法为不完全信息的博弈提供一种适时的线性搜索策略，且在该算法下此策略是最佳的。特别的，在博弈中处于头家出牌阶段并且具备某种自然性质的情况下，提出了基于 IMP-minimax 的特殊牌型识别的搜索算法。

在牛九占牌中，若玩家持有一定数量的 9∏，8∏，10∏，K∏的牌型，则会出现在特定情况下鱼牌和虎牌也可以占牌的情况，基于这种情况，设 $3\varphi_8=1$，$2\varphi_8=2$，$\varphi_8=3$，$\varphi_4=4$，取所有的左分枝叶子节点的值为 9∏，8∏，10∏，K∏牌型的张数，右分支叶子节点值为上述四种牌型设的值。下面给出最大集两种极端情况的搜索算法。

（1）最大集上界最理想情况，如图 5 所示。

图 5 中，搜索树的所有左分支为该牌型的张数，取牌型 9∏和 K∏均为 4 张，此时根据 IMP-alpha-beta 剪枝算法，得到公式（1）。

$$V(X)=\begin{cases} max\{extend(Y)\} \\ \sum P\pi(\omega)H(\omega) \end{cases} \qquad (1)$$

在该搜索树中设期望值为 V(X)，所有节点用ω表示，$P\pi(\omega)$表示 X 的π集，在$max\{extend(Y)\}$中，当 Y 是 X 的子节点且 X 是一个π集的时候，用公式替换$\sum P\pi(\omega)H(\omega)$替换。$P\pi(\omega)$表示所有节点的$\pi$集的取值，$H(\omega)$表示确定数值叶子节点下的取值。

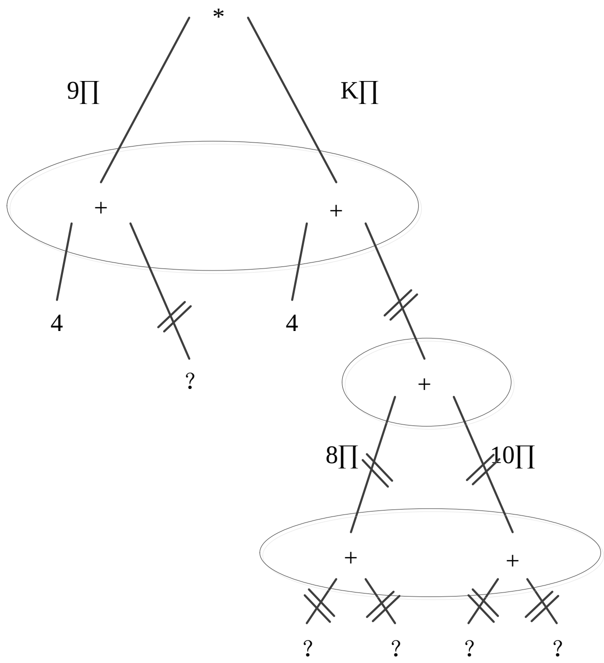

图 5 最理想最大集上界搜索树

在图 5 中，所有的左子树叶子节点的$P\pi(\omega)$取值为$\frac{4+4}{2}$=4。根据同一牌型只能最多有四张的限制可以知道，当牌型 K∏取值为 4 的时候，8∏，10∏两个分支的左子树叶子节点$P\pi(\omega)$最大值为$\frac{4+4}{2}$=4≤ 4，因此 8∏，10∏左子树可以被剪去。将上述对四种牌型所设的值带入右子树的叶子节点，最极端情况，在三个右子树均取得值 4，则所有右子树的叶子节点$P\pi(\omega)$取值为$\frac{4+4}{2}$=4≤ 4，故右子树全部被剪去，此时 V(X)取值为 2。

由上述推导可知，在玩家同时持有 $4\varphi_1$和 $4\varphi_7$牌型时，此时 $3\varphi_8$，$2\varphi_8$，φ_8，φ_4四种牌型均为特殊的够牌牌型，均可作为占牌出现。

（2）最大集上界最不理想情况，如图 6 所示。

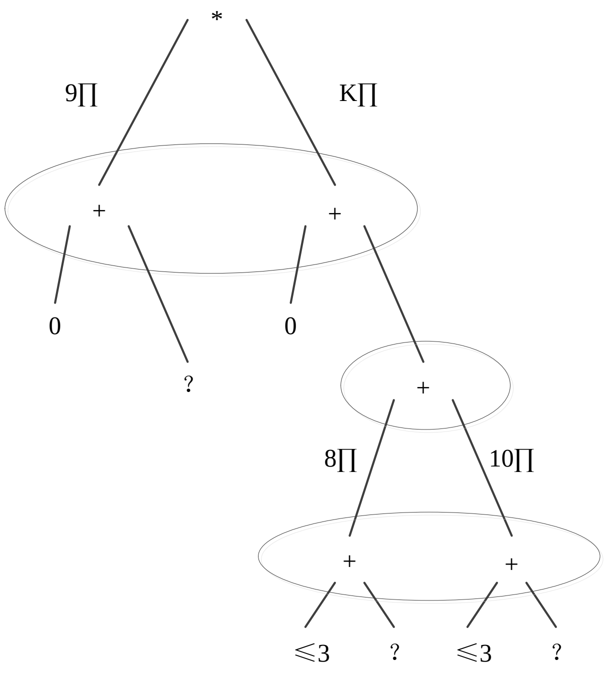

图 6 最不理想最大集上界搜索树

根据上述推导，要想使右子树叶子节点的值被剪去，则其$P\pi(\omega)$取值应小于等于左子树叶子节点的$P\pi(\omega)$，所以最极端情况下只有当图 8 中”? ”处全部取 0 的时候，满足$P\pi(\omega)=\frac{0+0}{2}=0$，此时 V(X)取值为 0。

由上述推导可知，在玩家同时持有 0φ_1和 0φ_7时，8∏，10∏的张数在 3 张以内，此时 3φ_8，2φ_8，φ_8，φ_4四种牌型均构不成特殊的够牌牌型，均不可作为占牌出现。

以上为最大集的两种极端情况，在打牌过程中，随着玩家的手牌的不同，V(X)在 V(X)=0 到 V(X)=2 之间变化。

6 结束语

多人非零和不完全信息牌类游戏的博弈模型的研究是机器博弈研究中的一个难点问题。本文以古老扑克牌游戏“牛九占牌”为例，总结了牌类游戏机器博弈系统的组成要素，提出了一种基于 Moore 自动机的“牛九占牌”机器博弈模型，提出了一种基于 IMP-minimax 算法的搜索策略，并给出了头家牌在特殊牌型下的最优解。该模型为多人非零和不完全信息动态博弈提出一个参考，并为“牛九占牌”机器博弈相关研究的开展奠定了理论基础。下一步将在“牛九占牌”机器博弈系统中特殊牌型搜索算法改进方面进行深入研究，现阶段的机器博弈系统中的搜索算法为单纯 IMP-minimax 算法的套用，后期则考虑改进 IMP-minimax 算法并引入蒙特卡洛算法来提高识别的效率和有效性。

参考文献

[1] Teck-Hua Ho. Finite automata play repeated prisoner’s dilemma with information processing costs [J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 1996, 20: 173-207.

[2] Derderian, K Hierons RM, Harman M, etc. Estimating the feasibility of transition path in extended finite state machines [J]. Automated Software Engineering, 2010, 17(1):33-56.

[3] Li Y M. Approximation and robustness of fuzzy finite automaton [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2008, 47(2):247-257.

[4] Tao Renji, Chen Shihua, Chen Xuemei.FAPKC3: a New Finite Automaton Public Key Cryptosystem [J].Journal of Computer science and Technology, 1997, 12(4):289-304.

[5] Li Huiba. A Language for Subset Matching in Poker Games [C]//2010 2nd International Conference on Intellectual Technique in Industrial Practice. China: ITIP, 2010.

[6] Yuhua Li Lulu,Yin. Research on the Forming Process of Creative Industrial Cluster Based on the Game Model [C]//2012 French Atlantis. French: Atlantis Press, 2012.

[7] Lin Fuhong, Liu Qian, Zhou Xianwei, Xiong Ke. Towards green for relay in Inter Pla Netary Internet based on differential game model [J].Science China Information Sciences,2014,57(4): 42306:1–042306:9

[8] Hua Dayin. Hysteresis behavior and non-equilibrium phase transition in a one-dimensional evolutionary game model∗[J].Chinese Physics B, 2013, 22(4):040512:1–040512:5

[9] Jim Mutch, David G. Lowe. Object class recognition and localization using sparse features with limited respective fields [J]. International Journal of Computer Vision, 2008, 80(1):45-57

[10] Shilpa Bhalerao, Maya Ingle. Agile Estimation using CAEA: A Comparative Study of Agile Projects [C]//2009 International Conference on Engineering and Applications. Singapore: IACSIT, 2011.

[11] John H Miller. The coevolution of automata in the repeated prisoners’ dilemma [J]. Journal of Economic Behavior

Organization, 1996, 29(4):87 -112.

[12] 郭琴琴，李淑琴，包华. 亚马逊棋机器博弈系统中评估函数的研究[J].计算机工程与应用. 2012, 48(34):50-87

[13] 徐心和,郑新颖.棋牌游戏与事件对策[J].控制与决策,2007,22(7):787-790

[14] 沈浩，孙永强. 自动机,逻辑与博弈[J].计算机工程,2003,20(29):9-11

[15] 徐心和,邓志力，王骄等. 机器博弈研究面临的各种挑战[J].智能系统学报,2008,3(4):288-293.

[16] 张小川,唐艳,梁宁宁. 采用时间差分算法的九路围棋机器博弈系统[J].智能系统学报,2012,3(7):278-282.

[17] Petr Svarny. The Russian Poker Game[C]//2012 3rd international Conference on Information Security and Artificial Intelligence. Singapore: IACSIT, 2012.

[18] Abraham Neyman, Daijiro Okada. Two-person repeated games with finite automata [J]. International Journal of Game Theory, 2000, 29(3):309 -325.

[19] Piccione M,Rubinstein A. Finite automata play a repeated extensive Game [J]. Journal of Economic Theory, 1993, 61(1):160 -168.

[20] Itzhak G. The complexity of computing best-response automata in repeated Games [J]. Journal of Economic Theory, 1988, 45(2):342 -352.

[21] BruceW.Ballard. The*-minimax search procedure for trees containing chance nodes [J].Artificial Intelligence, 1983, 21(1, 2):327-350

[22] Donald E,Knuthand Ronald W,Moore. An analysis of alpha-beta pruning [J].Artificial Intelligence, 1975, 6(4): 293-326

[23] 张雪峰，连莲，徐心和. 基于有限自动机的“点点连格”机器博弈系统的建模与分析[J].沈阳建筑大学学报（自然科学版）,2009,25(4):796-801

[24] 刘贞，任玉珑，唐松林.基于Mealy自动机的重复囚徒困境博弈模型[J].管理科学, 2006, 19（5）:66-70

[25] Wang jue,Miao Duoqian. Analysis on attribute reduction strategies of rough set [J]. Journal of Computer Science and Technology, 1998, 13 (2):189-192