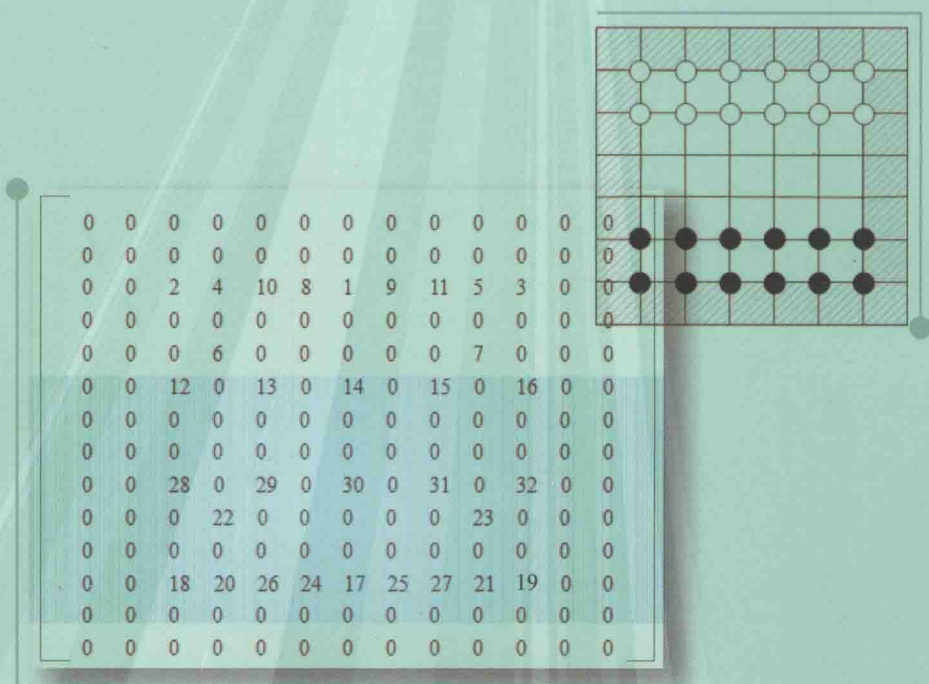




● 张利群 编著

机器博弈中的 数据结构与基本方法

Data Structure and Basic Methods in Computer Games



辽宁省优秀自然科学著作

机器博弈中的数据结构与 基本方法

张利群 编著

辽宁科学技术出版社

沈 阳

© 2014 张利群

图书在版编目 (CIP) 数据

机器博弈中的数据结构与基本方法 / 张利群编著. — 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2014.11

(辽宁省优秀自然科学著作)

ISBN 978-7-5381-8904-9

I. ①机… II. ①张… III. ①数据结构 ②算法分析
IV. ①TP311.12

中国版本图书馆CIP数据核字 (2014) 第252134号



出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路29号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳旭日印刷有限公司

经销者: 各地新华书店

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 10.5

字 数: 218千字

印 数: 1 ~ 1000

出版时间: 2014年11月第1版

印刷时间: 2014年11月第1次印刷

责任编辑: 李伟民

特邀编辑: 王奉安

封面设计: 蝶 蝶

责任校对: 周 文

书 号: ISBN 978-7-5381-8904-9

定 价: 30.00元

联系电话: 024-23284526

邮购热线: 024-23284502

<http://www.lnkj.com.cn>

前 言

人工智能是一门多学科交叉的综合学科，主要研究计算机实现智能的基本原理。机器博弈是人工智能学科的组成部分，而且是人工智能领域的重要研究方向之一。机器博弈是对计算机硬件性能、软件水平的综合检测，其关键技术是棋局的存储表示、巨大状态空间内的搜索以及如何对局面做出最优的评价。

国际象棋的计算机博弈已经有了很长的历史，并且经历了一场波澜壮阔的“搏杀”，“深蓝”计算机最终战胜了国际象棋世界冠军，成为计算机博弈历史的经典，给人类留下了难以忘怀的记忆。

现代计算机围棋的主要标志是把人工智能领域中机器学习的UCT算法成功地应用于计算机围棋博弈，从而极大地提高了计算机围棋的水平。

2007年，加拿大阿尔伯塔大学的学者在《Science》期刊上发表论文，宣称已在数学上证明了西洋跳棋的可解性，该论文被《Science》期刊评为当年十大科学进步之一。

总体而言，在世界范围内机器博弈研究有了长足的发展，但是在我国研究人员仍然偏少，成果不多。近10年来，情况有所改观，机器博弈的研究工作及大赛活动开展得越来越好，成绩的取得主要在于东北大学的徐心和教授在机器博弈方面的杰出工作：2005年发起组织和领导了中国人工智能学会机器博弈专业委员会；2006年发起组织和领导了全国的计算机博弈锦标赛与学术研讨会；2011年通过和教育部高等学校计算机类专业教学指导委员会协商取得共识，发起并组织了每年一届的全国大学生计算机博弈大赛；在国内50多所院校开展关于计算机博弈、事件对策和作战模拟方面的讲座；积极申办和出色承办了国际机器博弈协会（ICGA）高水平的国际赛事和学术会议，为中国赢得了地位和荣誉。

为了能够使更多的计算机爱好者参与到机器博弈的活动中来，进一步促进机器博弈活动的开展，作者编著了本书。本书是以作者的教学、研究工作为基础，结合作者担任计算机博弈大赛裁判的经验而编著的。

本书由辽宁省石油化工大学计算机与通信工程学院张利群编著。本书在编著过程中，得到前国际计算机博弈协会副主席、中国人工智能学会常务理事、机器博弈专业委员会主任委员徐心和教授的指导和帮助；山东大学软件学院张玮聪完成了书中实例程序的调试、运行和测试工作；辽宁石油化工大学计算机与通信工程学院吕宝志、苏金芝、

刘培胜完成了资料收集与附录的整理工作。

作者所在单位辽宁石油化工大学计算机与通信工程学院的领导、同事，以及作者的家人和朋友，都给予了作者大力的支持、帮助和鼓励。在此一并向他们表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免有错误和疏漏，希望广大读者批评指正。

作 者

2014年6月

目 录

1 机器博弈概述	001
1.1 博弈的基本概念	001
1.2 计算机博弈技术发展中的几个重要人物和事件	003
1.3 研究机器博弈的意义	004
1.3.1 对计算机科学有重要影响	004
1.3.2 推动了人工智能学科的发展	005
1.3.3 有利于科技创新意识的培养	005
1.3.4 为IT公司展示自己建立了平台	005
2 机器博弈中的数据结构	007
2.1 棋类的三要素	007
2.1.1 中国象棋	007
2.1.2 苏拉卡尔塔棋	012
2.1.3 牛角棋	012
2.2 3种棋的逻辑结构	013
2.3 物理结构及3种棋的存储结构	014
2.3.1 线性结构的存储及运算	015
2.3.2 树形结构的存储及运算	020
2.3.3 图形结构的存储及运算	023
2.3.4 3种棋的存储结构	027
2.3.5 辅助的存储结构	030
2.4 排序运算	033
2.4.1 选择排序	033
2.4.2 冒泡排序	033

2.4.3	插入排序	034
2.4.4	Shell 排序	035
2.4.5	快速排序	035
2.4.6	归并排序	036
2.5	哈希表及其查找	037
2.5.1	哈希表的概念	037
2.5.2	哈希函数的构造方法	038
2.5.3	哈希冲突的处理	038
2.6	递归程序设计方法	039
2.6.1	递归程序设计的要点	039
2.6.2	递归程序设计举例	040
3	着法生成	050
3.1	着法表示	050
3.2	着法生成	050
3.2.1	中国象棋的着法生成	051
3.2.2	苏拉卡尔塔棋的着法生成	063
3.2.3	牛角棋的着法生成	067
3.3	棋局的全部着法生成	070
3.3.1	中国象棋的棋局全部着法生成	070
3.3.2	苏拉卡尔塔棋的棋局全部着法生成	072
3.3.3	牛角棋的棋局全部着法生成	073
3.4	开局着法和残局着法	073
4	博弈树	077
4.1	状态空间	077
4.2	博弈树	079
4.3	博弈树的作用	081
5	评估函数	084
5.1	评估函数的概念	084
5.2	棋局评价的主要特征	085
5.3	棋局特征、分值举例	085
5.3.1	中国象棋	085
5.3.2	苏拉卡尔塔棋	087
5.4	评估函数的调试和优化	088

5.4.1	手工调试方法	088
5.4.2	爬山法	088
5.4.3	模拟退火算法	089
5.4.4	遗传算法	090
6	基本搜索方法	091
6.1	盲目搜索	091
6.1.1	深度优先搜索	092
6.1.2	具有深度界限的深度优先搜索	093
6.1.3	迭代加深搜索	093
6.1.4	广度优先搜索	094
6.1.5	应用实例	096
6.2	最重要的启发式搜索	106
6.2.1	极大极小法	107
6.2.2	极大极小法应用实例	111
6.2.3	α - β 剪枝技术	122
6.3	负极大值搜索计算算法及应用实例	127
6.3.1	负极大值搜索计算算法	127
6.3.2	负极大值搜索计算算法应用实例	127
7	计算机博弈程序的构成	133
7.1	程序设计语言的选择	133
7.2	博弈程序界面设计	134
7.3	博弈程序设计	135
7.3.1	博弈程序的构成	135
7.3.2	博弈程序功能设计	136
8	计算机博弈对战平台的构建	137
8.1	计算机博弈对战平台要解决的问题及其优点	137
8.1.1	传统的机机博弈的缺点	137
8.1.2	计算机博弈对战平台要解决的问题及优点	137
8.2	计算机博弈对战平台的设计	138
8.2.1	计算机博弈对战平台的硬件环境	138
8.2.2	计算机博弈对战平台的功能	138
8.2.3	关键问题的处理	139
8.3	通信接口模块设计	141

8.3.1 客户端程序的改进	141
8.3.2 数据发送和接收	141
8.4 理想对战平台模型	143
附录1 常用机器博弈术语中英文对照表	144
附录2 2014年全国大学生计算机博弈大赛暨全国计算机博弈锦标赛竞赛规则	148
附录3 2014年全国计算机博弈锦标赛竞赛项目规则	150
附录4 2014年全国大学生计算机博弈大赛竞赛项目规则	153
参考文献	160

1 机器博弈概述

现实生活中，博弈无处不在，而机器博弈是博弈游戏和计算机技术相结合的产物，它是人工智能领域的重要研究方向，并且机器博弈被认为是人工智能领域最具挑战性的研究方向之一，它是机器智能、智能决策系统等人工智能领域的重要科研基础。

1.1 博弈的基本概念

“博”在《现代汉语词典》中解释为“古代的一种棋戏”；“弈”解释为“围棋或下棋”。“博弈”一词通常解释为“局戏、围棋、赌博”。博弈就是通过棋牌这种媒介，实现人与人之间的智力、规则、运算及技能的比拼。由于是双方智力上的竞赛，所以受到大众的欢迎，参与的人很多，目前棋牌游戏是大众最为普及的娱乐活动。

从参与的人数方面可以将博弈划分为单人博弈、双人博弈和多人博弈。如华容道（图1.1）游戏是单人博弈，国际象棋（图1.2）是双人博弈，桥牌是多人博弈。



图1.1 华容道

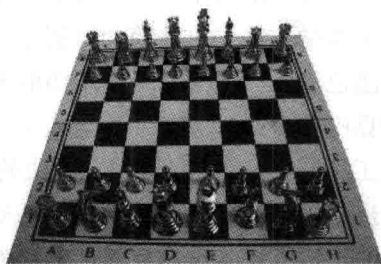


图1.2 国际象棋

按照参与人对其他参与人的了解程度分为完全信息博弈和不完全信息博弈。完全信息博弈是指在博弈过程中，每一位参与人对其他参与人的特征、策略空间及收益函数有准确的信息。如果参与人对其他参与人的特征、策略空间及收益函数信息了解得不够准确，或者不是对所有参与人的特征、策略空间及收益函数都有准确的信息，在这种情况下进行的博弈就是不完全信息博弈。

在不完全信息博弈里，参与人并不完全清楚有关博弈的一些信息。例如，大多数纸牌游戏是不完全信息博弈，在桥牌里，你并不知道你伙伴手中的牌，也并不知道坐在左右两位对手手里的牌。在你做某种决策时，你没有确切的信息，这时需要你对另外3个

人的牌做一个评估。

零和博弈是指参与博弈的各方，在严格竞争下，一方的收益必然意味着另一方的损失，博弈各方的收益和损失相加总和永远为“零”。

二人棋类博弈问题是一种特殊的对策问题，它是由A、B行为主体参与的一类具有竞争性的完全信息的智能活动。

A、B双方具有完备信息的博弈，其特征如下：

(1) A、B双方博弈的结果为3种之一：A方胜（B方输），B方胜（A方输），双方和局，这是一类零和博弈。

(2) 博弈的任何一方，不仅了解当前的格局，了解对方过去走过的棋步，而且能估算对方未来可能的走步。

(3) 不存在任何带有机遇的成分，即不考虑碰运气的走步。

1946年，第一台电子计算机ENIAC在美国诞生了，几十年来，计算机技术有了迅猛的发展。今天，计算机技术已应用到各个领域，包括棋牌类游戏，很多计算机专业人士和博弈爱好者相应开发了许多计算机博弈程序，运行计算机博弈程序的计算机能和人进行下棋等，这就实现了人机对弈。机器博弈指的就是计算机博弈。

人工智能，英文缩写为AI，对它的定义不尽相同。它是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门技术科学。人工智能是计算机科学的一个分支，它企图了解智能的实质，并生产出一种新的能以人类智能相似的方式做出反应的智能机器。

人工智能在计算机上实现时有两种不同的方式。其中一种是采用传统的编程技术，使系统呈现智能的效果，而不考虑所用方法是否与人或动物机体所用的方法相同。这种方法叫工程学方法，机器博弈就属于这种。另一种是模拟法，它不仅要看效果，还要求实现方法也和人类或生物机体所用的方法相同或相类似。

计算机博弈是计算机学科与人工智能学科的交叉，是知识工程演绎的绝佳平台，不愧为人工智能学科的“果蝇”。着法的变化对应着突变性状，而变化莫测的棋局又对应着个体进化，每一种残局的应对都需要一些新的知识，而数以万计的经典棋谱又成为知识挖掘的丰富资源。突出象棋博弈中人类的战略构思与智能活动，必定能促进知识工程跨越式的发展。如果能够掌握下棋的本质，也许就掌握了人类智能行为的核心。

目前，计算机博弈程序在某些棋类方面已经达到或超过人类的水平，也就是大师们有时也下不过计算机了，比如中国象棋和国际象棋。

为了实现计算机博弈程序之间的博弈，通常以人为中间媒介，实现两者对弈，我们把这种博弈称之为“机机博弈”，机机博弈实现的是两台计算机之间硬件和软件的综合较量。在每年由ICGA举办的Computer Olympiad以及由中国人工智能协会机器博弈专业委员会举办的全国计算机博弈锦标赛暨全国大学生计算机博弈大赛中，进行的就是机机博弈，主要比拼的是软件设计的好坏。

1.2 计算机博弈技术发展中的几个重要人物和事件

在计算机博弈技术发展的过程中,有许多重要的人物和事件,在此仅列举几个。

冯·诺依曼(图1.3),20世纪最重要的数学家之一,在现代计算机、博弈论和核武器等诸多领域内有杰出建树的最伟大的科学全才之一,被称为“计算机之父”和“博弈论之父”。原籍匈牙利,布达佩斯大学数学博士。早期以算子理论、量子理论、集合论等方面的研究闻名,开创了冯·诺依曼代数。第二次世界大战期间为第一颗原子弹的研制做出了贡献。1944年与摩根斯特恩合著《博弈论与经济行为》,是博弈论学科的奠基性著作。也是他提出了用于博弈的极大极小定理,他参与了第一台电子计算机的研制,并创立了从ENIAC到当前最先进的计算机都采用的冯·诺依曼体系结构。晚年,研究自动机理论,著有对人脑和计算机系统进行精确分析的著作《计算机与人脑》。



图1.3 冯·诺依曼

克劳德·艾尔伍德·香农(图1.4)是美国数学家、信息论的创始人。1940年在麻省理工学院获得硕士和博士学位,1941年进入贝尔实验室工作。他提出了信息熵的概念,为信息论和数字通信奠定了基础。主要论文有:1938年的《继电器与开关电路的符号分析》,1948年的《通信的数学原理》和1949年的《噪声下的通信》。1950年关于计算机国际象棋博弈论文《Programming a Computer for Playing Chess》是最早期的经典博弈论文。

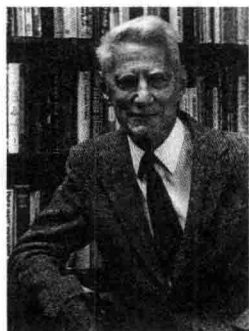


图1.4 克劳德·艾尔伍德·香农

约翰·麦卡锡(图1.5)是美国著名的计算机科学家、认知科学家。在加州理工学院获数学学士学位,在普林斯顿大学获数学博士学位。麦卡锡在1955年的达特茅斯会议上首次提出了“人工智能”一词,被誉为“人工智能之父”。人工智能逐渐成为计算机科学中一门独立的科学,他将数学逻辑应用到了人工智能的早期形成中,发明了著名的 α - β 搜索算法。在1958年发明了LISP语言,并于1960年将其设计发表在《美国计算机学会通信》上。因在人工智能领域的贡献于1971年获得了计算机界的最高奖项“图灵奖”。

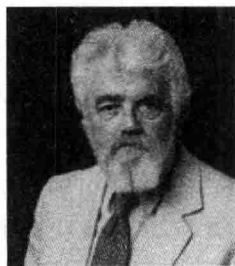


图1.5 约翰·麦卡锡

1997年5月11日,一台名为“深蓝”的超级电脑击败了人类有史以来最伟大的国际象棋世界冠军卡斯帕罗夫,世纪末的一场人机大战终于以计算机取胜而告终。击败卡斯帕罗夫的“深蓝”电脑的设计者是许峰雄(图1.6)。他出生于中国台湾省,毕业于台湾大学电机系,获得了电子工程学士学位,之后获得美国卡内



图1.6 许峰雄

基美隆大学计算机科学博士学位。“深蓝”开辟了机器棋手战胜世界棋王的历史。不过，许峰雄认为，他对“弈棋电脑”的研究与传统的“人工智能”毫无关系。许峰雄表示，“深蓝”不是基于AI技术构建的。

2006年8月9日，中国象棋人机大战开战（图1.7），由“浪潮天梭”计算机和全国锦标赛前5名选手卜凤波、徐天红、柳大华、张强、汪洋5位大师进行比赛，比赛结果电脑：人脑=11：9，计算机获胜。

2007年12月21日，《科学》杂志评出了2007年十大科技突破，第10个便是挑战人类智力的电脑程序（图1.8）。经过18 a的努力，加拿大一个研究小组证实，如果两名棋手都不犯错误的话，最后只能以平局结束。这一证据让西洋跳棋这种最复杂的游戏终于有解了。

1.3 研究机器博弈的意义

研究机器博弈的意义有很多，不同的人从不同的角度有不同的看法。

1.3.1 对计算机科学有重要影响

众所周知，棋艺的好坏取决于你对棋类博弈的理解深浅及能否正确地判断出双方博弈若干回合后，取得大于对方的最大优势。计算机博弈的水平很大程度上取决于计算机搜索的广度和深度，也就是计算机的计算能力和存储能力。20世纪60年代中期，有科学家断言，计算机将无法击败一位年仅10岁的棋手。因为当时机器的计算能力仅达到每秒200步，它的搜索深度最多也就达到6层。到了1997年的“超级深蓝”则可以达到2亿步每秒，这时的搜索深度可以达到14层，局部高达40层。

十几年过去了，情况有了巨大的变化，计算机技术迅猛发展，数以十计、百计的多处理器系统的研制成功，云计算技术的广泛应用等，都使得计算机的计算能力得到数量级上的长进。

合理精巧的数据结构和先进有效的搜索算法仍然是最为关键的研究内容，因为它们直接关系到搜索的广度与深度。可以说，在这方面的研究是永无止境的。例如，多CPU协同工作；如何使计算机的运算性能发挥到极限；最优使用计算机内存；多线程程序设计；知识学习等，都可以在机器博弈这个平台得以应用，机器博弈大大促进了计算机技



图 1.7 中国象棋人机大战开战



图 1.8 挑战人类智力的电脑程序

术的完善和发展。

1.3.2 推动了人工智能学科的发展

人工智能的研究领域非常广泛,主要包括计算智能、专家系统、机器学习、自然语言理解、机器人、计算机视觉、分布式人工智能、数据挖掘、模式识别等。

就目前而言,无论计算机的处理能力、计算能力怎样提高,也难以具备人类棋手所擅长的战略构思。尽管计算机在几分钟内的思考步数可以超越人类棋手一生的思考步数,但它还是难以穷尽棋手的灵感与变异。如何提高计算机的“智力”,这便是人工智能学科的精髓所在,即人类的智能与理解。

1959年,美国的塞缪尔设计了一个下棋程序,这个程序具有学习能力,它可以在不断地对弈中改善自己的棋艺。4 a后,这个程序战胜了设计者本人。又过了3 a,这个程序战胜了美国一个冠军。

计算机博弈是人工智能学科的“果蝇”。机器学习、数据挖掘等都可以在计算机博弈中得到应用,反过来,它又促进了机器学习、数据挖掘等人工智能领域中相关理论和技术的发展。

1.3.3 有利于科技创新意识的培养

创新是民族进步的灵魂,是社会发展的不竭动力。在广大科技青年中酝酿着巨大的创新热情,但很少能够得以激发和协调。许多青年学生喜爱电脑,却沉醉于网络游戏之中。

开展各级计算机博弈大赛,无疑是一个能够引起他们兴趣而又具有挑战性的研究课题,向各种棋类的世界冠军挑战,无疑会动员数以百计的院校与机构和数以万计的科技工作者加入到这“划时代”的科研工作中。

1.3.4 为IT公司展示自己建立了平台

“深蓝”的成就是IBM公司的巨大胜利,就在击败世界棋王的当天,IBM公司的股票就上涨了15%,受益上亿美元。在国际象棋计算机博弈的过程中,诸多大公司都曾斥巨资支持这项运动。1993年,INTEL公司就曾举行国际象棋邀请赛,邀请卡斯帕罗夫与其“天才1号”即兴表演。各种棋类的人机大战需要雄厚的资金支持,当然,它也为那些知名的IT公司提供了绝好的商机。

机器博弈为人类文化生活提供了新的模式,目前很多游戏已经发展为更高智能的交互式文化娱乐手段。机器博弈游戏也为互联网公司带来了巨大的经济效益,特别是智能终端设备的迅猛发展,机器博弈对经济的影响将更加深远。

总之,机器博弈对社会、经济以及军事都有深刻的影响。

在青少年中,特别是大学生中,如何引导他们将单纯地玩游戏过渡到计算机游戏编程是目前急需解决的一个课题。这也是本书编著的目的之一。

事实上，仅仅掌握一门计算机编程语言是编不出来好的计算机博弈程序的，还需要掌握计算机博弈中使用的数据结构知识、搜索技术以及对这种棋的精深理解。因此，计算机博弈程序的开发往往是一个团队，有负责系统设计人员，代码编写人员，对棋类精通人士、大师等，只有这些人的协同工作，才可能使编制出来的计算机博弈程序有一定的水平。介绍计算机博弈中使用的数据结构知识、基本技术以及它们的应用是本书编著的目的之二。

2 机器博弈中的数据结构

由数据元素依据某种逻辑联系组成了数据结构。对数据元素间逻辑关系的描述称为数据的逻辑结构；用计算机处理数据，就必须把数据在计算机内存储，数据的存储结构是数据逻辑结构的实现形式，是逻辑结构在计算机内的表示；研究一种数据结构，同时也要研究定义在该数据结构上的运算及实现方法。一种逻辑数据结构可以有多种存储结构，且各种存储结构影响运算的实现和效率。机器博弈中大量使用各种数据结构，掌握好机器博弈中的数据结构，对实现计算机博弈程序，以及提升程序的运行速度都至关重要。

2.1 棋类的三要素

棋类的三要素指的是棋盘、棋子和棋规。下面通过3种典型棋类的介绍，了解棋类的三要素。

2.1.1 中国象棋

中国象棋是全国计算机博弈锦标赛暨全国大学生计算机博弈大赛比赛棋种。中国象棋的棋盘和棋子如图2.1和图2.2所示。

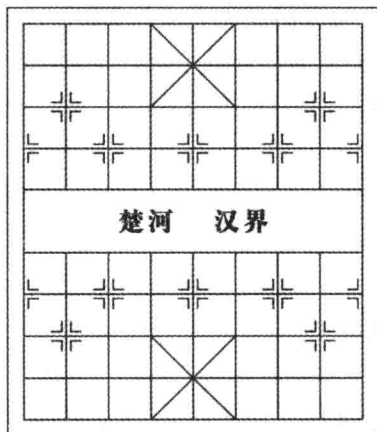


图2.1 中国象棋棋盘



图2.2 中国象棋棋子

现将国家体育总局审定、中国象棋协会编写的1999年版竞赛规则摘录如下：

一、行棋规定

第1条 棋盘和棋子

(1) 象棋盘由9道直线和10道横线交叉组成。棋盘上共有90个交叉点，象棋子就

摆在和活动在这些交叉点上。

棋盘中间没有画通直线的地方，叫作“河界”；划有斜交叉线的地方，叫作“九宫”。

9道直线，红棋方面从右到左用中文数字一至九来代表；黑棋方面用阿拉伯数字1~9来代表。

(2) 棋子共有32个，分为红、黑两组，每组共16个，各分7种，其名称和数目如下：

红棋子：帅1个，车、马、炮、相、士各2个，兵5个。

黑棋子：将1个，车、马、炮、象、士各2个，卒5个。

(3) 对局开始前，双方棋子在棋盘上的摆法见图2.3所示。

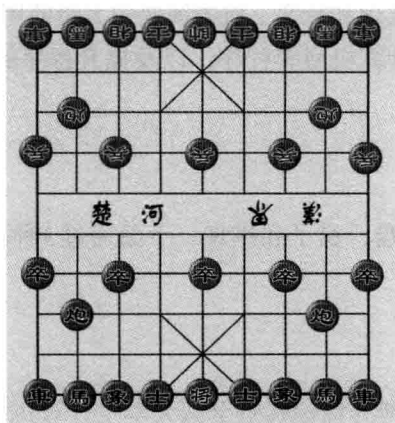


图2.3 双方棋子在棋盘上的摆法

(4) 比赛用的标准棋盘，应每格都为正方形，每方格长宽均应为3.2~4.6 cm。每个平面圆形棋子直径应为2.7~3.2 cm，大小与棋盘合适配套。棋盘和棋子底色，均应为白色或浅色。棋盘上直线和横线应为红色或深色，四周应有适当空白面积。棋子面色分为红黑两组，字体和圆框应当醒目。

演示比赛用的大棋盘为直式，红方在下，黑方在上。棋盘和棋子大小，应配合场所相应增大。

第2条 走棋和吃子

(1) 对局时，由执红棋的一方先走，双方轮流各走一着，直至分出胜、负、和，对局即终了。

轮到走棋的一方，将某个棋子从一个交叉点走到另一个交叉点，或者吃掉对方的棋子而占领其交叉点，这都被认为走了一着。双方各走一着，称为一个回合。

(2) 各种棋子的走法

帅（将）每一着只许走一步，前进、后退、横走都可以，但不能走出“九宫”。帅和将不准在同一直线上直接对面，如一方已先占据，另一方必须回避。

士每一着只许沿“九宫”斜线走一步，可进可退。