

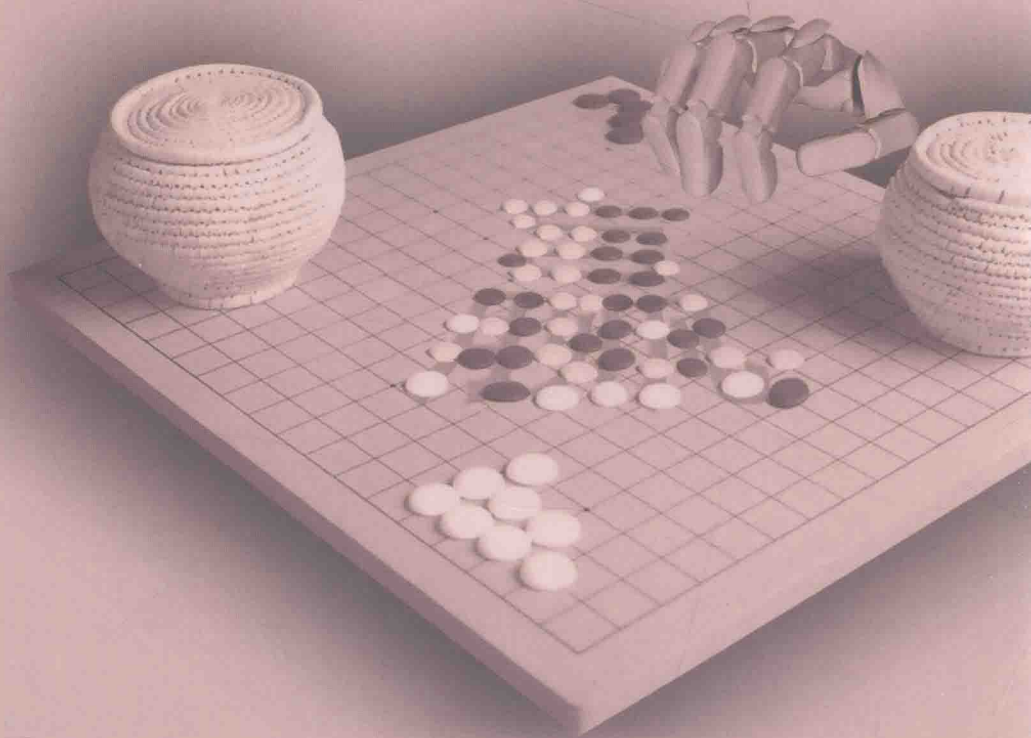
中国科协大众创业万众创新项目
中国人工智能学会系列研究报告

CHINESE ASSOCIATION
FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE

中国机器博弈

2017发展报告

- 主 编 徐心和
- 副主编 杨放春 王亚杰 邱虹坤



中国工信出版集团



电子工业出版社
THE CHINESE HOUSE OF ELECTRONICS PUBLISHING
<http://www.phei.com.cn>

中国科协大众创业万众创新项目
中国人工智能学会系列研究报告

中国机器博弈2017发展报告

徐心和 主 编
杨放春 王亚杰 邱虹坤 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

机器博弈是人工智能领域的重要应用之一,也是研究人工智能技术的重要载体。本书主要介绍机器博弈的发展概况、主要技术和国内外赛事,共分为9章。第1章为引言;第2章介绍机器博弈的发展概况;第3章分析机器博弈的状态复杂度、博弈树复杂度和计算复杂性等;第4章描述机器博弈常用的搜索、评估和优化技术,包括穷尽搜索、裁剪搜索、启发式算法、迭代算法、最佳优化算法、随机搜索算法、遗传算法、并行计算、神经网络、机器学习等;第5章论述开发机器博弈平台系统的意义、分类、设计规范和相关技术;第6章以六子棋、围棋、点格棋和爱因斯坦棋为代表,介绍完备信息机器博弈的关键技术;第7章以德州扑克、军棋、桥牌为代表,介绍非完备信息机器博弈的关键技术;第8章介绍机器博弈的国内外赛事;第9章为结束语。

本书可作为高等院校人工智能相关课程的参考资料,也可从事机器博弈及其相关领域的科研和应用人员提供参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

中国机器博弈 2017 发展报告 / 徐心和主编. —北京: 电子工业出版社, 2018.6

ISBN 978-7-121-34017-8

I. ①中… II. ①徐… III. ①人工智能—技术发展—研究报告—中国—2017 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 070371 号

策划编辑: 章海涛

责任编辑: 章海涛 文字编辑: 刘 珺

印 刷: 北京虎彩文化传播有限公司

装 订: 北京虎彩文化传播有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 7 字数: 125.7 千字

版 次: 2018 年 6 月第 1 版

印 次: 2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: 192910558 (QQ 群)。

中国人工智能学会系列研究报告 编委会

主任：李德毅

执行主任：王国胤

副主任：杨放春 谭铁牛 黄河燕 焦李成 马少平 刘宏

蒋昌俊 任福继 杨强 胡郁

委员：陈杰 董振江 杜军平 桂卫华 韩力群 何清

黄心汉 贾英民 李斌 刘民 刘成林 刘增良

鲁华祥 马华东 马世龙 苗夺谦 朴松昊 乔俊飞

任友群 孙富春 孙长银 王轩 王飞跃 王捍贫

王万森 王卫宁 王小捷 王亚杰 王志良 吴朝晖

吴晓蓓 夏桂华 严新平 杨春燕 余凯 余有成

张学工 赵春江 周志华 祝烈煌 庄越挺

本书编委会

主编：徐心和

副主编：杨放春 王亚杰 邱虹坤

编委：王骄 徐长明 李淑琴 李学俊 吴愚

梅险 高强

前 言

机器博弈是人工智能领域的重要应用之一，也是研究人工智能技术的重要载体。它以高对抗性的棋牌类游戏项目为研究对象，具有怡神益智、评判客观、挑战无穷的特点，被誉为人工智能领域的“果蝇”，是研究人类思维和实现机器思维最好的实验载体。

本书编写的指导思想是，将通识技术和专项技术相结合，依托具体的棋牌类项目，介绍国内外相关技术的应用方法与进展。本书主要介绍机器博弈的发展历程、国内外研究现状、复杂度分析、典型技术、平台技术，以及完备信息机器博弈和非完备信息机器博弈的关键技术及国内外赛事等，提出机器博弈未来的发展趋势。希望本书的出版能增强全社会对机器博弈和人工智能的整体认知。

本书的编写者全部是机器博弈领域资深的教师，而且都在不同时期指导过学生参加全国机器博弈大赛（并获重要奖项），具有较强的理论水平和实践经验。本书的编写分工如下：第1章由东北大学徐心和编写；第2章和第4章由沈阳航空航天大学邱虹坤编写；第3章由沈阳大学高强编写；第5章由哈尔滨理工大学梅险编写；6.1节由东北大学秦皇岛分校徐长明编写；6.2节和7.1节由东北大学王骄编写；6.3节由北京信息科技大学李淑琴编写；6.4节由安徽大学李学俊编写；7.2节由重庆三峡学院吴愚编写；7.3节由北京邮电大学杨放春编写；第8章和第9章由沈阳航空航天大学王亚杰编写。全书由王亚杰和邱虹坤完成统稿。

本书在编写过程中得到了很多专家的指导和支持，在此表示诚挚的感谢！由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章	引言	1
第 2 章	机器博弈的发展状况	5
2.1	机器博弈历史	5
2.2	机器博弈研究现状	8
2.2.1	国外的研究现状	8
2.2.2	国内的研究现状	10
2.3	机器博弈产业现状	11
2.4	问题与展望	13
第 3 章	机器博弈的复杂度	16
3.1	概述	16
3.2	博弈问题的状态复杂度及其估算方法	18
3.2.1	博弈问题的状态复杂度	18
3.2.2	博弈问题的博弈树复杂度	22
3.3	博弈问题的计算复杂性	26
第 4 章	机器博弈的典型技术	30
4.1	概述	30
4.2	穷尽搜索	31
4.3	裁剪搜索	31
4.4	启发式算法	32
4.5	迭代深化	33
4.6	最佳优先算法	34
4.7	随机搜索算法	35

4.8	并行计算	36
4.9	遗传算法	37
4.10	神经网络	38
4.11	机器学习	38
第 5 章	机器博弈的平台技术	41
5.1	机器博弈平台概述	41
5.2	机器博弈平台的分类	42
5.3	机器博弈平台的设计规范	43
5.3.1	人机交互接口规范	43
5.3.2	平台与引擎通信的协议规范	44
5.4	机器博弈平台的相关技术	44
5.5	机器博弈平台应用实例	45
第 6 章	完备信息机器博弈的专项技术	47
6.1	六子棋机器博弈	47
6.1.1	概述	47
6.1.2	六子棋机器博弈的主要技术	48
6.2	围棋机器博弈	51
6.2.1	概述	51
6.2.2	围棋机器博弈的主要技术	52
6.3	点格棋机器博弈	55
6.3.1	概述	55
6.3.2	点格棋机器博弈的主要技术	56
6.4	爱恩斯坦棋机器博弈	59
6.4.1	概述	59
6.4.2	爱恩斯坦棋机器博弈的主要技术	61
第 7 章	非完备信息机器博弈的专项技术	65

7.1	德州扑克机器博弈	65
7.1.1	概述	65
7.1.2	非完备信息动态博弈解的主要技术	67
7.2	军棋机器博弈	69
7.2.1	概述	69
7.2.2	军棋机器博弈的主要技术	70
7.3	桥牌机器博弈	73
7.3.1	概述	73
7.3.2	桥牌机器博弈的主要技术	74
第 8 章	机器博弈的国内外赛事	78
8.1	国际机器博弈赛事	78
8.1.1	国际象棋计算机博弈大赛	78
8.1.2	围棋计算机博弈大赛	80
8.1.3	桥牌计算机博弈大赛	81
8.1.4	德州扑克计算机博弈大赛	82
8.1.5	其他赛事与研究成果	83
8.2	国内机器博弈赛事	83
8.2.1	中国象棋计算机博弈大赛	83
8.2.2	中国计算机博弈大赛	84
第 9 章	结束语	86
	参考文献	88

第 1 章 / 引言

Chapter 1

机器博弈也称计算机博弈 (Computer Games)，英文直译为计算机游戏，其覆盖面非常广泛。然而，从事计算机棋牌竞技研究的科学家们，很早便将 Computer Games 定义为“让计算机像人一样进行思考和决策”，为此还成立了国际机器博弈协会 (International Computer Games Association, ICGA)，专门组织世界范围内的棋类 (后又加入牌类) 博弈竞赛和学术交流。为了和计算机游戏区别开，Computer Games 的中文名字为机器博弈，或计算机博弈。国内负责组织全国范围内的棋牌类博弈竞赛和学术交流的群众组织是中国人工智能学会下属的机器博弈专业委员会。

机器博弈的第一个里程碑成果是 1997 年 IBM “深蓝” 战胜世界棋王卡斯帕罗夫。虽然此项成果震惊了全世界，但在中国只是一条广为流传的消息，

并没有引起学术界足够的重视和兴趣。除台湾地区之外，在大陆，研究机器博弈还只是极个别人的个人行为。近几年，当谷歌的 AlphaGo 战胜了围棋世界冠军李世石，AlphaGo 的升级版 Master 横扫了包括中国高手在内的 60 位世界顶尖高手后，中国人才认识到机器博弈的可怕，而我们在这一领域已经落后了太多。

人生如棋，世事如棋，而围棋又是各种棋类中公认的最难以驾驭的棋种。机器博弈在围棋上的骄人战绩，无疑显示出人工智能即将来到登峰造极的时代，人工智能将改变人类的生产和生活方式。后来，人们开始研究 AlphaGo 的技术和能力，这也把机器博弈推向了新的高度。

如果要盘点一下中国机器博弈领域的成果，那最值得一提的就是计算机围棋先行者中山大学化学系陈志行（1931—2008）教授的研究。陈教授 1991 年退休后潜心研究计算机围棋，在 Mac 机上用汇编语言编写了博弈程序“手谈”，并且赢得了 1995—1997 年连续 3 年的 6 项世界冠军，成为机器博弈史上的一代传奇。当晚年的陈老得知国内组织了机器博弈全国锦标赛时，兴奋不已，他抱病参加了 2007 年在重庆理工大学举行的第二届机器博弈全国锦标赛（不计名次），还亲自指导年轻人开发软件。陈教授是我们的楷模，也是中国人的骄傲。

再值得提及的便是许峰雄博士，他从台湾大学毕业后到美国卡耐基梅隆大学攻读博士学位，特别钟爱国际象棋的机器博弈。毕业后，他到 IBM 公司组织了“深蓝”课题组，并在 1997 年以战胜卡斯帕罗夫的辉煌战绩赢得了世人的尊重。

机器博弈在中国大陆虽然姗姗来迟，但发展非常迅速。2005 年，中国人工智能学会成立了机器博弈专业委员会，一批热衷于这一领域的科技工作者开始学习国际先进的理论与算法，很快便把国际象棋的算法移植到中国象棋的计算机程序当中，并取得了令人瞩目的成果。东北大学的“棋天大圣”代表队夺得了 2006 年、2007 年由 ICGA 组织的国际棋类奥林匹克大赛中国

象棋冠军。2006年，首届中国象棋机器博弈锦标赛在北京科技馆成功举办，期间进行了人机大战，计算机程序挑战了中国象棋的顶尖高手许银川、柳大华、徐天红、卜凤波等人，并取得势均力敌的战绩，令人刮目相看。这场比赛虽未掀起预期的热潮，但也推动了全国锦标赛每年一届的举办。2011年，机器博弈专业委员会得到了教育部计算机类专业教学指导委员会的支持，两个委员会开始共同主办中国大学生计算机博弈大赛。近年来，其比赛项目数量不断增加，参加的队伍规模也不断壮大，比赛棋种不仅有完备信息博弈项目，如中国象棋、围棋、点格棋、亚马逊棋等，还有非完备信息博弈项目，如幻影围棋、军棋等，还有考虑随机因素的爱因斯坦棋。自2013年起，比赛还增加了多人博弈的扑克项目，如斗地主和桥牌，使博弈算法的研究更加全面和深入。特别值得提及的是，2015年，国家体育总局棋牌运动管理中心将该项比赛纳入第三届全国智力运动会，进一步扩大了比赛的影响力和知名度。

十年来，机器博弈在中国大地上蓬勃发展，很多院校开展了以机器博弈为内容的学生科技竞赛活动，很好地带动了校园科技活动的氛围，培养了学生的科研能力和创新意识。机器博弈活动在中国从无到有，从小到大。至今，中国可以说是世界上机器博弈活动参与人数最多、比赛规模最大的国家。

中国大学生计算机博弈大赛之所以能不断发展，最关键的原因是机器博弈有着强大的生命力，契合了大学生对棋牌游戏天然的兴趣和喜爱。从表面上看，受限于比赛规则和条件，其每届参与的人数有限，但据保守估计，实际到场参赛的人数是实际参与这项科技活动人数的1/5，那么，实际参加机器博弈活动的人数是数以千计的。

机器博弈的强大生命力主要源于以下几个方面：

- 参赛成本低，学生只要有一台计算机就可以开展研究，参加比赛；
- 没有专业限制，会下棋或者会编程，就可以参与这项活动；
- 下棋本身就是游戏，活动本身具有很好的趣味性和吸引力；
- 比赛具有强挑战性和不确定性，例如这届获胜，并不能保证下届仍获

胜，因此，研究没有止境，不是一蹴而就的，是创新活动的不竭宝库；

- 下棋规则简单、输赢结果立判，不需要专家评审、打分，真正实现公开、公平、公正；
- 适合分工合作和团队作战，在研究与开发中使学生的技能和素质得到全面锻炼；
- 有一定的网络化和产业化前景，很容易进入信息化和“互联网+”的项目当中；
- 能够培养学生的创新能力、职业素养，极大促进学生就业能力。

此外，中国要想成为机器博弈强国，就要加强博弈理论和算法的深入研究。为此，机器博弈专业委员会在中国控制与决策学术年会（CCDC）上开辟了“机器博弈特邀专题”，开展成果交流，提高我国在该领域的学术水平和学术影响。

本书是机器博弈宣传和普及工作的继续和深化，为此，机器博弈专业委员会邀请了这一领域的同行专家共同撰写。首先，本书介绍了机器博弈的发展过程、国内外赛事、博弈棋种和比赛平台，然后结合相关棋种介绍了各种博弈技术，既包括完备信息的棋类比赛，还包括不完备信息的牌类游戏搜索算法，当然还包括目前最先进的 AlphaGo 的深度学习算法、最新的桥牌和德州扑克博弈算法等。

机器博弈的产业化前景也很可观。AlphaGo 的成功，标志着人工智能进入了新的阶段，深度学习算法得以在各个领域被广泛重视和应用。丰富多彩的博弈搜索算法无疑可以应用到面对决策优化的各种场合，随着不完全信息博弈、随机环境博弈搜索算法的不断完善，它也将在兵棋推演及战略、战役和战术博弈中加以应用。博弈在人类经济、政治、军事、反恐、治霾和日常生活中无所不在，机器博弈的概念和技术也必然大有用武之地。

让机器博弈活动在更多的学校中生根、开花、结果，是我们一直追求的目标。让我们走出去，在国际大赛中夺取更多的奖牌，为国争光，同时，借助机器博弈活动，促进产学研结合，推动我国人工智能技术发展，使我国早日成为人工智能领域的大国、强国。

第2章

Chapter 2

机器博弈的发展状况

2.1 机器博弈历史

早在人类文明发展初期，人们就开始玩棋类博弈的游戏。1928年，被称为计算机之父的冯·诺依曼（John von Neumann）通过对二人零和博弈游戏的分析，提出了极大极小定理，证明了博弈论的基本原理。在冯·诺依曼和摩根斯特恩合著的《博弈论和经济行为》中，将二人博弈推广到了 n 人博弈，并将博弈论系统应用于经济领域，从而奠定了机器博弈研究的基础和理论体系。

近代机器博弈的研究，是从20世纪50年代开始的。许多世界上著名的

科学家，如数学家和计算机学家阿兰·图灵（Alan Turing），信息论创始人科劳德·香农（Claude E. Shannon），人工智能创始人麦卡锡（John McCarthy）等人都曾经涉足机器博弈领域的研究工作，并为之作出过非常重要的贡献。

1950年，香农提出了象棋博弈的编程方案。1953年，阿兰·图灵设计了一个能够下国际象棋的纸上程序，并经过一步步的人为推演，实现了第一个国际象棋的程序化博弈。1958年，IBM推出名为“思考”的IBM704，成为了第一台与人类进行国际象棋对抗的计算机。虽然它被人类棋手打得丢盔卸甲，但许多科学家却对此欢欣鼓舞。1959年，人工智能的创始人之一塞缪（A. L. Samuel）编写了一个能够战胜设计者本人的西洋跳棋计算机程序，1962年，该程序击败了美国一个州的冠军，这是机器博弈发展历程中一个重要的里程碑。

随着计算机硬件和软件技术的不断发展，通过人机对弈或者机机对弈，实现了计算机硬件性能和计算机软件水平的较量。科学家们开始对计算机能否战胜人脑这个话题产生了浓厚的兴趣，提出以棋类对弈的方式，向人类智能发起挑战。

20世纪80年代中期，美国卡耐基梅隆大学开始研究世界级的国际象棋计算机程序；1988—1989年间，IBM“深思”分别与丹麦特级大师拉尔森、世界棋王卡斯帕罗夫进行了人机大战。

从20世纪90年代起，Tesauro的TD-GAMMON西洋双陆棋程序经过上百万盘棋的学习训练，达到了世界水平。“深思”二代产生，吸引了前世界棋王卡尔波夫和世界优秀女棋手小波尔分别前来与之对抗（1990年和1993年）。特别是“深蓝”（1996年）、“超级深蓝”（1997年）与卡斯帕罗夫的两场比赛，引起全球媒体的关注。在随后的几年里，计算机与卡斯帕罗夫、克拉姆尼克等世界顶级棋手进行了一系列的比赛，计算机逐渐败少胜多，表现得越来越聪明。

经过多年对机器博弈进行的系统的理论研究，在国际象棋、中国象棋等

棋种的人机大战中，从最初人类完胜计算机，到如今计算机击败人类顶级高手，机器博弈水平迅速上升。特别是2016—2017年，AlphaGo分别与李世石、柯洁进行人机围棋大战并取得胜利，这可谓是人机对战史上的最强之战，从而掀起了全球人工智能热潮。

除AlphaGo在完备信息机器博弈领域的成就之外，2007年1月30日，美国卡耐基梅隆大学开发的德州扑克博弈系统“冷扑大师”(Libratus)与4名人类顶尖德州扑克选手进行了人机大战，宣告在“多人”博弈的非完备信息机器博弈领域，人工智能同样取得了胜利。2017年4月6日至10日，备受关注的亚洲首度人工智能与真人对弈的扑克大赛——“‘冷扑大师’与‘中国龙之队’”扑克巅峰表演赛在海南收官，最终“冷扑大师”获胜，赢得200万元奖金，这是人工智能在各种棋牌博弈上取得的又一次胜利，再次在全球范围内加剧了人们对人工智能的敬畏。

在国内，也有一些学者从事机器博弈方面的研究。例如，南开大学黄云龙教授和他的学生吴韧在20世纪80年代开发了一系列中国象棋程序；中山大学化学系陈志行教授在20世纪90年代初开发了围棋程序“手谈”，并获得世界冠军；21世纪初，东北大学徐心和教授和他的学生王骄、徐长明等研究开发了象棋软件“棋天大圣”，并在2006年的人机大战中，展现了具有挑战国内象棋顶级高手的实力；南京航空航天大学夏正友教授指导学生研究开发了具有一定智能的四国军棋博弈系统；北京邮电大学的刘知青教授带领学生开发的“本手”(LINGO)围棋程序，能够战胜具有一定水平的业余围棋选手；哈尔滨工业大学王轩教授的团队开发的德州扑克博弈系统，在2013—2016年间多次参加ACPC二人非限制性、三人及多人德州扑克比赛，均进入决赛前4名。

我国机器博弈领域有两个重要的事件。一是由东北大学徐心和教授发起成立了中国人工智能学会机器博弈专业委员会，二是从2006年起每年举办一届的中国大学生计算机博弈大赛暨中国计算机博弈锦标赛^[1]，至今已经举

办了 12 届。此外，沈阳航空航天大学王亚杰教授在国内大力推广机器博弈活动，规范比赛规则，吸引了越来越多的高校师生参与到机器博弈相关研究中来，中国机器博弈进入了快速发展阶段^[2]。特别是教育部高等学校计算机类专业教学指导委员会参与进来成为了大赛的共同主办单位，这些对我国机器博弈技术的研究与发展起了极大的促进作用。

近几年，国内许多企业如腾讯、百度、联众、新睿等纷纷加入到机器博弈的研究大军中，开发出一些具有较高智能水平的产品，如腾讯人工智能实验室（AI Lab）研发的围棋人工智能程序“绝艺”（Fine Art），夺得了 2017 年第 10 届 UEC 杯计算机围棋大赛冠军；北京邮电大学的刘玉璋和杨放春教授带领创业团队开发的新睿桥牌机器人，在 2017 年第 21 届世界计算机桥牌锦标赛中获得亚军。

2.2 机器博弈研究现状

DeepMind 公司创始人 Demis Hassabis 曾言：“游戏是测试人工智能算法的完美平台”。而机器博弈被誉为是人工智能学科的“果蝇”，通过机器博弈的过程来理解智能的实质，是研究人类思维和实现机器思维最好的实验载体。

2.2.1 国外的研究现状

在机器博弈研究的早期阶段，研究的主要内容涉及如何建立有效、快速的评价函数和评价方法，使评价的效率更高，花费的时间和空间代价更小，以及如何在生成的博弈树上更准确、有效地找到最优解，并由此衍生出搜索算法。在随后的几十年里，专家和学者们在机器博弈搜索与评估方面进行了大量深入的探索和实质性的研究，产生了许多机器博弈技术，如极大极小搜索、负极大值搜索、Alpha-Beta 剪枝、并行搜索算法等^[3-7]。

特别值得一提的是，2006年，多伦多大学教授 Geoffery Hinton 发表文章，提出了基于深度信念网络（Deep Belief Networks, DBN）可使用非监督的逐层贪心训练算法^[8,9]，在学术界掀起了深度学习（Deep Learning）的研究热潮。并行计算、基于人工神经网络的深度学习^[10,11]等技术的突破性进展，成功解决了机器博弈中抽象认知的难题，使深度学习等技术被成功应用于机器博弈及相关领域，从而将机器博弈水平带上了一个新的台阶。

谷歌、百度等国际大公司争相跟进，研发出了相关的机器博弈产品。尤其是谷歌公司的围棋软件 AlphaGo，作为完备信息机器博弈代表，它具有极强的自学能力，图 2-1 所示是 AlphaGo 的算法组成。

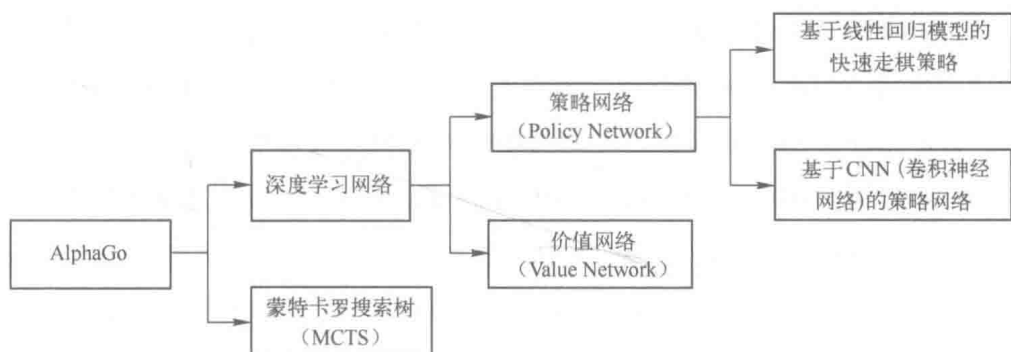


图 2-1 AlphaGo 的算法组成

AlphaGo 的技术突破被学者们总结为两个关键技术：棋感直觉和搜索验证。其中，棋感直觉通过深度学习获得，它分为落子棋感和胜负棋感。AlphaGo 通过对 3000 万盘经典棋局进行深度学习，得到快速走棋网络和策略网络，而快速走棋网络就是落子棋感。胜负棋感是通过深度学习得到的策略网络不断进行自对弈而获得的。搜索验证是指采用蒙特卡罗搜索树根据落子棋感和胜负棋感不断展开搜索树^[12]。围棋程序 AlphaGo 的成功充分验证了深度学习与机器博弈技术相结合的实用性。谷歌公司后来宣布将其应用于医疗诊断等领域，以扩大深度学习应用领域。