



华为智能计算技术丛书

徐直军

华为轮值董事长

高文

中国工程院院士

毛军发

中国科学院院士

联袂

作序

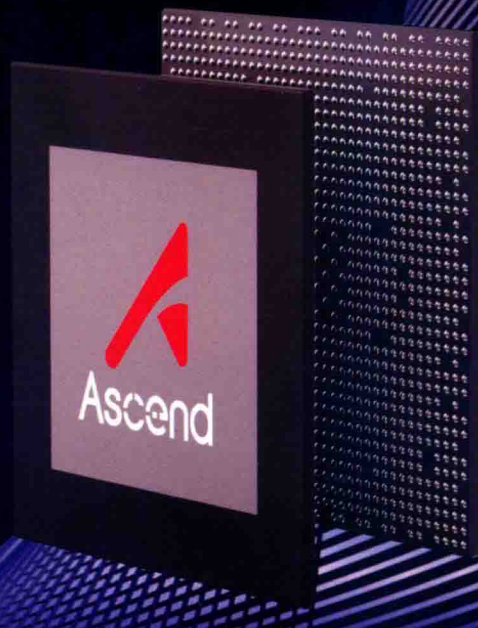
Ascend AI Processor Architecture and Programming
Principles and Applications of CANN

昇腾AI处理器 架构与编程

深入理解CANN技术原理及应用

梁晓峤◎编著

Liang Xiaoyao



揭开达芬奇架构的神秘面纱 | 掌握强大算力的使用方法



清华大学出版社

非外借

华为智能计算技术丛书



Ascend AI Processor Architecture and Programming
Principles and Applications of CANN

昇腾AI处理器 架构与编程

深入理解CANN技术原理及应用

梁晓晓◎编著

Liang Xiaoyao

清华大学出版社
北京



清华大学出版社

内 容 简 介

本书系统论述了基于达芬奇架构的昇腾(Ascend)AI处理器的原理、架构与开发技术。全书共分6章,内容涵盖了神经网络理论基础、计算芯片与开源框架、昇腾AI处理器软硬件架构、编程理论与方法,以及典型案例等。为便于读者学习,书中还给出了基于昇腾AI处理器的丰富的技术文档、开发实例等线上资源。

本书可以作为普通高等学校人工智能、智能科学与技术、计算机科学与技术、电子信息工程、自动化等专业的本科生及研究生教材,也适合作为从事人工智能系统设计的科研和工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

昇腾AI处理器架构与编程:深入理解CANN技术原理及应用/梁晓晓编著. —北京:清华大学出版社,2019(2019.10重印)

(华为智能计算技术丛书)

ISBN 978-7-302-53452-5

I. ①昇… II. ①梁… III. ①移动终端—应用程序—程序设计 IV. ①TN929.53

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第162823号

责任编辑:盛东亮

封面设计:吴刚

责任校对:李建庄

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市龙大印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:186mm×240mm 印 张:18

字 数:330千字

版 次:2019年10月第1版

印 次:2019年10月第3次印刷

定 价:69.00元

产品编号:085312-01

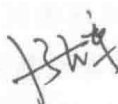
FOREWORD

序一 昇腾加速普惠 AI

AI (人工智能) 作为一种新的通用技术, 正在推动各行各业发生前所未有的改变。AI 不仅使我们能以更高的效率解决已可解决的问题, 而且也使我们解决很多以前难以解决的问题, 这其中的关键就是算力。近年来, 随着深度学习的推进, AI 领域对算力的需求每年增加 10 倍左右。对于 AI 探索研究, 越来越多的新算法 (如自动机器学习)、新探索 (如高阶自动微分) 等对算力的需求甚至成百倍增长, 算力与论文的发表速度及数量均已呈正比关系; 对于 AI 商业应用, 充沛且经济的算力是 AI 发挥价值的基本条件, 算力的性价比越高, AI 的应用就会越广泛。AI 全面发展需要的算力, 应该如同今天的电力一样, 真正普惠, 触手可及。

如果说算力的进步是当下 AI 发展的主要驱动因素, 那么算力的稀缺和昂贵正成为 AI 全面发展的核心制约因素。算力供给的关键在于处理器的效能, 当前 AI 算力需求的增速远超摩尔定律, 而现有的 AI 处理器的体系结构并非围绕 AI 计算来设计的, 这就导致了 AI 算力的稀缺与昂贵; 以现有的算力水平, 训练某些复杂模型往往需要数天甚至数月的时间, 而一次成功的发现与创新往往需要多次反复迭代, 这种算力水平严重制约了理论的创新和应用的落地。因此, 充沛且经济的 AI 算力必须要在处理器架构上寻求突破, 要用新的 AI 处理器架构来匹配算力的增速。

为了实现普惠 AI, 为了提供充足的 AI 算力, 华为图灵团队自 2017 年初开始探索新的 AI 处理器体系结构, 并创建了达芬奇架构 AI 处理器。2017 年 6 月, 我到上海时, 华为图灵团队非常期望公司投资基于达芬奇架构开发 AI 处理器, 我支持了他们, 就有了今天的昇腾 AI 处理器——能满足当前及未来 AI 对算力的极致需求。华为还围绕昇腾处理器构建了全栈、全场景的 AI 解决方案。本书系统地介绍了昇腾处理器体系结构与编程方法, 希望在 AI 的基础研究与编程领域, 给 AI 研究与应用开发者提供参考, 共同推进 AI 产业和 AI 研究的发展。

 (徐直军)

华为投资控股有限公司副董事长、轮值董事长

2019 年 8 月

FOREWORD

序二

近十年，全球人工智能热潮一浪高过一浪，专用人工智能从算法到系统，再到应用、风险投资，最后得到社会的普遍关注，其势头之猛，规模之大，是很多人始料未及的。中国和美国现在已经成为人工智能发展的两个超级大国。中国在数据规模和产业应用、青年人才储备方面具有优势；美国在原创算法与核心元器件、开源开放平台方面具有优势。如何尽快补上短板，使我国的人工智能可以健康发展、长久不衰，是我们需要认真思考与布局的大事。

新一代人工智能的蓬勃发展依赖于三个要素——数据、算法和算力。所谓算力，就是超强的计算能力。目前，人工智能系统的算力大都构建在 CPU + GPU 之上，计算的主体是 GPU。GPU 原本是为图形处理与显示而设计的，大多用在显卡上。随着时间的推移，GPU 处理向量、处理矩阵，甚至处理张量的能力越来越强。除了显卡，高档 GPU 也经常被用作图像处理与科学计算的协处理器。英伟达公司就是因为提供高档 GPU 而在几年间成为（协）处理器市场上成长最快的公司。虽然用 GPU 进行深度神经网络的训练和推理速度很快，但由于 GPU 需要支持的计算类型繁多，所以芯片规模大、功耗高。为了提高深度神经网络训练和推理的效率，几年前人们就开始考虑设计专用深度神经网络学习和推理的芯片。例如，谷歌和寒武纪公司均推出了深度学习专用芯片，大大提升了运行主流智能算法的性能。华为发布的昇腾 910 和昇腾 310 两颗人工智能芯片分别面向深度神经网络训练与推理，其设计理念更有利于打造完整的生态链，可以为中国乃至全球开发者和企业提供新的选择。

当然，一个专用处理器家族从完成设计，到得到市场认可并获得成功应用是一个漫长的过程。这个过程包含诸多环节，其中最重要的一个环节就是教育，包括培训用户理解芯片原理、掌握如何编程、学会如何设计板卡和设计系统等。教育的手段既可以通过开设课程给工程师、本科生与专科生提供培训，也可以是通过编程比赛甚至创业比赛的形式获得众人的关注，还可以是通过开源平台提供丰富的编程

案例给潜在用户提供参考。

总而言之，为教育界提供一本满足上述需求的教材是必不可少的。我很高兴，作者能在昇腾 AI 处理器面世的短短时间内就完成了这样一本教材，可以帮助人工智能专业的研究生、本科生和从事人工智能领域工作的工程师，让他们能够理解昇腾处理器基本概念，掌握使用昇腾处理器的方法，找到大部分相关问题的解决方案。

希望本书能够帮助读者了解专用人工智能，帮助读者进入华为人工智能生态，进入中国人工智能生态，进入未来智能时代。

高文

中国工程院院士

2019 年 8 月

FOREWORD

序三

人工智能正在赋能各行各业，人工智能芯片是实现人工智能的物理载体，华为的昇腾 AI 处理器则是重要的人工智能芯片之一。《昇腾 AI 处理器架构与编程——深入理解 CANN 技术原理及应用》第一次向外界全面介绍了华为昇腾 AI 处理器，特别是翔实地介绍了其设计理念、体系结构与 CANN 编程方法，包括 TBE 算子编程、调度及 CUBE 矩阵运算单元等，这些都是华为的原创成果。本书能够让读者快速了解昇腾 AI 处理器的软硬件架构和基本编程方法，帮助读者在该芯片上进行编程实践，适合用作高年级本科生或研究生学习人工智能芯片的教材。对于希望在人工智能和并行编程领域有所建树的研发人员，本书也是一部很好的参考书。

毛军发

中国科学院院士

2019 年 8 月

PREFACE

前 言

日出东方，其道大光；鲲鹏展翅，旭日昇腾！

一款芯片的研发，是一个漫长的过程；一款芯片的研发，也许就是一代人的心路历程。

随着深度学习在人工智能诸多领域的异军突起，从 CPU 到 GPU，再到各类专属领域的定制芯片，我们迎来了计算机体系结构的黄金时代！然而一款处理器芯片的研发周期，少则数年，多则数十年。在滚滚向前的时代大潮中，只有那一批最耐得住寂寞，经得起诱惑的匠人，才能打造出计算机行业皇冠上最闪亮的明珠。

所以，当华为邀请我为昇腾 AI 处理器写一本教材时，我毫不犹豫地答应了。也许是出于对硬科技公司的高度认同，也许是出于对同道中人的由衷尊敬，更可能是出于一种骨子里的使命感，我深深地觉得我们这个时代太需要一颗代表国内科技最高水平的中国“芯”了！

华为推出面向人工智能计算场景的昇腾 AI 处理器，是希望通过更强的算力、更低的功耗，为深度学习的各类应用场景铺平道路。但是“千里之行，始于足下”，昇腾的使命任重道远。对于一款高端处理器来说，生态圈的培养和用户编程习惯的养成可谓重中之重，也是决定该款产品生死存亡的关键。编写本书的目的就是第一次向世人揭开昇腾 AI 处理器的神秘面纱，探索其内在的设计理念，从软硬件两方面阐述其架构特点，教会读者上手使用昇腾系列开发平台。“不积跬步，无以至千里”，如果把打造昇腾生态圈当作千里之行，那么本书便是尝试迈出的第一步。

本书定位人工智能芯片领域选修教材，面向工程科技类普通读者，尽可能删减繁杂抽象的公式、定理和理论推导。读者除需要具备基本的数学知识和编程能力外，无须预修任何课程。本书特别理想的受众是人工智能、计算机科学、电子工程、生物医药、物理、化学、金融统计等领域需要用到大规模深度学习计算的研发人员；本书也为 AI 处理器的设计公司和开发者提供了有价值的参考。

本书共分 6 章，内容涵盖了神经网络理论基础、计算芯片与开源框架、昇腾 AI

处理器软硬件架构、编程理论与方法，以及典型案例等，希望能够从理论到实践，帮助读者了解昇腾 AI 处理器所使用的达芬奇架构，并掌握其具体的编程和使用方法，助力读者打造属于自己的人工智能应用。

空谈误国，实干兴邦。愿与诸位读者共勉。

感谢江子山和李兴对本书撰写工作做出的极大贡献，他们在资料整理与文字编排上注入了极大精力，并且编写和校对了本书中所有的程序示例代码。如果没有他们的全心投入，本书将很难顺利完成。

感谢陈子渊等对本书中的插图进行精心编辑和修改，使得本书的内容更加清晰形象、概念的解释更加具体明确。

感谢华为公司在本书写作过程中提供的资源和支持。

感谢清华大学出版社盛东亮老师和钟志芳老师等的大力支持，他们认真细致的工作保证了本书的质量。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正！

作 者

2019 年 8 月

CONTENTS

目 录

第 1 章 基础理论	001
1.1 人工智能简史	001
1.2 深度学习概论	006
1.3 神经网络理论	010
1.3.1 神经元模型	011
1.3.2 感知机	013
1.3.3 多层感知机	015
1.3.4 卷积神经网络	018
1.3.5 应用示例	035
第 2 章 行业背景	038
2.1 神经网络芯片现状	038
2.1.1 CPU	038
2.1.2 GPU	039
2.1.3 TPU	041
2.1.4 FPGA	042
2.1.5 昇腾 AI 处理器	044
2.2 神经网络芯片加速理论	045
2.2.1 GPU 加速理论	045
2.2.2 TPU 加速理论	052
2.3 深度学习框架	059
2.3.1 MindSpore	060
2.3.2 Caffe	061
2.3.3 TensorFlow	065
2.3.4 PyTorch	067
2.4 深度学习编译框架——TVM	068

第 3 章 硬件架构	071
3.1 昇腾 AI 处理器总览	071
3.2 达芬奇架构	073
3.2.1 计算单元	075
3.2.2 存储系统	081
3.2.3 控制单元	086
3.2.4 指令集设计	088
3.3 卷积加速原理	090
3.3.1 卷积加速	091
3.3.2 架构对比	093
第 4 章 软件架构	096
4.1 昇腾 AI 软件栈总览	096
4.2 神经网络软件流	100
4.2.1 流程编排器	101
4.2.2 数字视觉预处理模块	107
4.2.3 张量加速引擎(TBE)	110
4.2.4 运行管理器	112
4.2.5 任务调度器	114
4.2.6 框架管理器	118
4.2.7 神经网络软件流应用	125
4.3 开发工具链	128
4.3.1 功能简介	128
4.3.2 功能框架	129
4.3.3 工具功能	129
第 5 章 编程方法	132
5.1 深度学习开发基础	132
5.1.1 深度学习编程理论	132

5.1.2	深度学习推理优化原理	146
5.1.3	深度学习推理引擎	162
5.2	昇腾 AI 软件栈中的技术	178
5.2.1	模型生成阶段	179
5.2.2	应用编译与部署阶段	184
5.3	自定义算子开发	188
5.3.1	开发步骤	188
5.3.2	AI CPU 算子开发	194
5.3.3	AI Core 算子开发	201
5.4	自定义应用开发	205
第 6 章	实战案例	212
6.1	评价标准	215
6.1.1	精度	215
6.1.2	交并比	218
6.1.3	均值平均精度	220
6.1.4	吞吐量和时延	223
6.1.5	能效比	223
6.2	图像识别	225
6.2.1	数据集: ImageNet	225
6.2.2	算法: ResNet	228
6.2.3	模型迁移实践	233
6.3	目标检测	242
6.3.1	数据集: COCO	242
6.3.2	算法: YoloV3	245
6.3.3	自定义算子实践	249
附录 A	缩略词列表	269
附录 B	Ascend 开发者社区及资料下载	272
附录 C	智能开发平台 ModelArts 简介	274

基础理论

人工智能的发展历经了一个跌宕起伏的过程,但始终向前迈进。由生物神经元抽象后开始萌芽,神经元模型初步诞生,再发展到可以应用在简单实际问题的感知机。为了突破感知机的局限性,又演化出多层感知机,给复杂的问题提供了一种解决方法。后续又出现了各种神经网络,如卷积神经网络等,打破了多层感知机的计算复杂性限制,为人工智能理论在各个领域中的应用提供了一种崭新的实现方式。

1.1 人工智能简史

历史长流,中西并进,日新月异,智能源起,盘根于民,神乎其技。

技艺发展到一个高峰就体现出高度仿人化的智能,从西周偃师的能歌善舞木偶到阿拉伯加扎利(Jazari)的自动人偶(如图 1-1 所示)代表了人类对智能的不懈追求。人类希望赋予智慧和思想于机器工具,用以解放生产力,便利人们生活,推动社会发展。人工智能(Artificial Intelligence, AI)诞生的过程缓慢而悠长,从源远流长的神话,到天马行空的科幻,再到鬼斧神工的科技,无不包含着人类对智能的渴望。但是人工智能的



图 1-1 加扎利的自动人偶^①

^① 图片参考链接: https://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:Al-jazari_robots.jpg。

实现紧跟人类知识的发展,复现甚至超越人类的智慧。早期,形式推理(Formal Reasoning)的发展,为人类思维的机械化提供了研究的方向。

17 世纪中期戈特弗里德·威廉·莱布尼茨(Gottfried Wilhelm Leibniz)、勒内·笛卡尔(René Descartes)和托马斯·霍布斯(Thomas Hobbes)(图 1-2)致力于理性思考系统化研究工作,催生了形式符号系统,成为人工智能研究的灯塔。到了 20 世纪,伯特兰·阿瑟·威廉·罗素(Bertrand Arthur William Russel)、阿弗烈·诺夫·怀特海(Alfred North Whitehead)和库尔特·哥德尔(Kurt Gödel)对数理逻辑的贡献,为数学推理机械化提供了理论的基础。随之图灵机的创造从符号学本质上为机器思考提供了可能。工程学上,由最初的查尔斯·巴贝奇(Charles Babbage)的“分析机”设想,到服役二战的 ENIAC 大型译码机器,见证了艾伦·图灵(Alan Turing)和约翰·冯·诺依曼(John von Neumann)的计算机科学理论,见图 1-3,将计算机科学理论工程化,加快了人工智能的发展。



图 1-2 莱布尼茨、笛卡尔、霍布斯(从左到右)^①

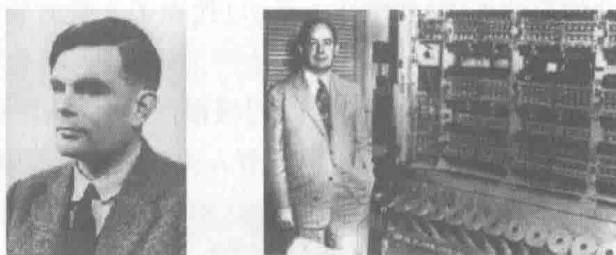


图 1-3 图灵和冯·诺依曼(从左到右)^②

^① 莱布尼茨图片来源: <https://mally.stanford.edu/leibniz.html>。

笛卡尔图片来源: https://en.wikipedia.org/wiki/Ren%C3%A9_Descartes。

霍布斯图片来源: <https://baike.baidu.com/item/%E9%9C%8D%E5%B8%83%E6%96%AF%E6%96%87%E5%8C%96/15394739>。

^② 图灵图片来源: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a1/Alan_Turing_Aged_16.jpg/220px-Alan_Turing_Aged_16.jpg。

冯·诺依曼图片来源: <https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/soco/projects/1998-99/game-theory/neumann.html>。

1. AI 诞生

20 世纪中期,不同领域的科学家为人工智能的诞生进行了一系列的研究和准备。从 20 世纪 30 年代到 50 年代,诺伯特·维纳(Norbert Wiener)的控制论,克劳德·香农(Claude Shannon)的信息论,图灵的计算理论以及神经学的发展为人工智能破土而出提供了阳光和土壤。

1950 年,图灵发表《计算机与智能》(*Computing Machinery and Intelligence*),提出了著名的图灵测试:如果机器与人类进行对话而人无法辨别机器身份,则该机器具有智能。图灵测试的提出对后来人工智能的发展具有不可忽略的意义。1951 年,年仅 24 岁的马文·闵斯基(Marvin Minsky)与迪恩·埃德蒙兹(Dean Edmonds)建造了神经网络机器 SNARC(Stochastic Neural Analog Reinforcement Calculator)。随后闵斯基在人工智能领域不断耕耘,对人工智能的发展起到巨大推动作用,并因此荣膺图灵奖。1955 年,一个名为“逻辑理论家”(Logic Theorist)的程序以更加新颖精巧的方法证明了《数学原理》中 52 个定理中的 38 个。这项工作的缔造者艾伦·纽厄尔(Allen Newell)和赫伯特·西蒙(Herbert Simon)等开辟了智能机器的一条新途径。

紧接着一年后,如图 1-4 所示,在达特茅斯会议参与者闵斯基、约翰·麦卡锡(John McCarthy)、香农和纳撒尼尔·罗切斯特(Nathan Rochester)等 10 位倡导者讨论后提



图 1-4 达特茅斯会议参与者合影^①

^① 图片参考链接: https://pic3.zhimg.com/80/v2-14ec945ffa59a1541b4cef043e7a6bba_hd.jpg。

出“学习或者智能的任何一个方面都应能被精确地描述,使得人们可以制造一台机器来模拟它”。人工智能从此带着使命和活力进入人类世界,正式形成一门学科,开辟了一片崭新的科学天地。

2. 扬帆起航

达特茅斯会议之后,人工智能如同火山爆发,它掀起的浪潮席卷全球,同时也带来了累累硕果。计算机能够完成更多人类的高级任务,如解决代数应用题、几何证明以及语言领域的拓展。这些进步使得研究者热情高涨,对人工智能的完善充满信心,同时也吸引着大量资金进入该研究领域。

1958年,赫伯特·吉宁特(Herbert Gelernter)基于搜索算法实现了几何定理证明机。纽厄尔和西蒙通过“通用解题器(General Problem Solver)”程序将搜索式推理应用范围扩大。同时,搜索式推理在搜索目标和子目标决策方面取得应用成效,如斯坦福大学的机器人——STRIPS系统。在自然语言领域,罗斯·奎利恩(Ross Quillian)开发了第一个语义网。接着,约瑟夫·维森鲍姆(Joseph Weizenbaum)缔造了第一个对话机器人 ELIZA。ELIZA 能让人误以为是和一个人在交流,而不是一台机器。ELIZA 的问世,标志着人工智能取得了重大进步。1963年6月,麻省理工学院从美国高等研究计划局(ARPA)获得经费,让 MAC(The Project on Mathematics and Computation)项目落地前行。闵斯基和麦卡锡也是这一项目的主要参与者。MAC 项目在人工智能史上占有重要地位,对计算机科学的发展产生了重要影响,并催生了后来著名的麻省理工学院计算机科学与人工智能实验室。

这个时期,正如1970年闵斯基预测“在三到八年的时间里我们将得到一台具有人类平均智能的机器”的情形一样,人类期待加速人工智能历史发展进程,但是人工智能发展是一个不断完善成熟的过程,意味着之后将是一个缓慢前行的阶段。

3. 遭遇瓶颈

20世纪70年代初,人工智能的发展速度逐渐变缓,当时最好的人工智能程序只能在某个点上解决问题,难以满足人们的需求。这是由于人工智能的发展碰到了难以轻松突破的瓶颈。在计算机能力上,由于人工智能对硬件资源要求高,当时的计算机内存和处理器速度难以满足实际的人工智能要求。很明显的一个例子就是在自然语言的研究上只能对20个单词的词汇表进行处理。在计算复杂性方面也受到了阻碍。1972年理查德·卡普(Richard Karp)证明了很多问题的计算时间与输入量的幂成正比

比,这暗示着人工智能对于很多类似指数大爆炸问题的求解近乎不可能。在自然语言和机器视觉等领域,需要有大量的外界认知信息作为基础进行识别与认知。研究者发现,即使达到儿童程度的认知水平,人工智能数据库的构建也十分艰巨。对计算机来说,在定理证明和几何等数学问题上显示出的能力要远远强于处理在人类看来极其简单的任务,如物体辨识的能力,这使得研究者们近乎望而却步。

由于以上一系列因素,政府机构逐渐对人工智能的前景失去了耐心,开始转换资助方向,将资金转向其他项目。与此同时,人工智能研究者也备受冷落,人工智能渐渐淡出人们的视野。

4. 再次前行

经历了数年的低谷之后,伴随着“专家系统”的横空出世和神经网络的复燃,人工智能蓄力再度上路启程,重新成为热点。最早出现了由爱德华·费根鲍姆(Edward Feigenbaum)主导开发的能够根据一组特定逻辑规则来解决特定领域问题的程序系统。随后出现了可以诊断血液传染病的 MYCIN 系统,增大了人工智能特定领域应用的影响力。1980年,XCON(eXpert CONfigurer,专家设置)程序因在自动根据需求选择计算机部件的方向上为客户节约了4000万美元的成本并带来了巨大商用价值而闻名于世,同时也大大提升了专家系统的研发热度。1981年,日本对第五代计算机项目加大资助,定位于实现人机交互、机器翻译、图像识别以及自动推理功能,投入资金达到8.5亿美元。英国注入3.5亿英镑到Alvey工程,美国也加大了对人工智能领域的资助,一时群雄逐鹿。1982年,约翰·霍普菲尔(John Hopfield)的神经网络使得机器对信息的处理方式发生了跨越性的改变。1986年,大卫·鲁梅尔(David Rumelhart)将反向传播算法应用到神经网络中,形成了一种通用的训练方法。技术革新浪潮推动着人工智能不断向前发展。

但好景不长,人工智能之冬又一次悄然而至。以XCON程序为代表的专家系统应用的局限性以及高昂的维护成本,使其在市场上逐渐失去了当初的竞争力。初期对第五代工程的狂热投入没有收获期望的回报后,研发资金也逐渐枯竭。研究者的热情也随之顿减,一时人工智能饱受争议,陷入寒冬。

5. 黎明日升

饱受岁月磨炼,历经时光浮沉,秉承着对人类智能奥秘的追求,人工智能一直未停止前进的步伐。人工智能在发展过程中也增加了其他领域(如统计理论与优化理论等)