

我国智能机器人核心芯片技术发展战略研究

莫洋^{1,2}, 王耀南^{1,2}, 刘杰^{1,2}, 缪志强^{1,2}, 张鑫^{1,2}, 江未来^{1,2}

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心, 长沙 410082)

摘要: 智能机器人正在引领全球新一轮的科技革命和产业变革, 培育并推进我国智能机器人核心芯片技术及产业发展, 有助于产业优化升级并实现生产力跃升。本文阐述了智能机器人核心芯片技术对于推动技术自主可控、实现经济高质量发展、满足居民美好生活需要、提升国家核心竞争力等方面的重要价值; 梳理了相关政策、技术、产业等的国际进展, 分析了我国发展智能机器人核心芯片的基础优势和面临的问题; 以多架构路线、技术方案比对的方式, 论证了我国智能机器人芯片技术发展路线, 据此提出领域发展策略, 形成面向2035的重点任务与发展路线图。研究建议, 将智能机器人芯片自主可控发展上升为国家战略, 明确顶层设计; 设立智能机器人芯片重大科技专项, 加大科研经费投入; 出台激励智能机器人芯片技术研究和产业应用的政策, 牵引产业链升级; 落实智能机器人芯片人才培养和发展措施, 推动技术及产业健康发展。

关键词: 智能机器人; 芯片技术; 产业链; 自主可控; 发展路线图

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Development Strategy for the Core Chip Technology of Intelligent Robot in China

Mo Yang^{1,2}, Wang Yaonan^{1,2}, Liu Jie^{1,2}, Miao Zhiqiang^{1,2}, Zhang Xin^{1,2}, Jiang Weilai^{1,2}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. National Engineering Research Center of Robot Visual Perception and Control Technology, Changsha 410082, China)

Abstract: Intelligent robots are leading a new round of technological revolution and industrial transformation. Promoting the intelligent robot core chip technology and industry is strategically significant for industrial upgrading and productivity improvement in China. In this study, we illustrate the strategic significance of the intelligent robot core chip technology in China in promoting technological independence, realizing high-quality economic development, satisfying residents' need for a better life, and promoting a nation's core competitiveness. Additionally, we review the development status of chips for intelligent robots in terms of policy, technology, and industry, and analyze the advantages and problems of developing intelligent robot chips in China. On this basis, the development route of intelligent robot chips is analyzed, and the development strategic goals of intelligent robot chip technology for 2025, 2030, and 2035 are proposed. Moreover, we propose the key tasks and strategic goals of intelligent robot core chips in China. We suggest that the independent and controllable development of intelligent robot chips should be elevated to a national strategy; major scientific and technological projects should be established for intelligent robot chips; policies should be introduced to encourage intelligent robot chip technology research and industrial applications; and high-level talent training should be implemented.

Keywords: intelligent robot; chip technology; industrial chain; independently controllable; development roadmap

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-06-20

通讯作者: 王耀南, 湖南大学电气与信息工程学院教授, 中国工程院院士, 研究方向为机器人技术与智能控制; E-mail: yaonan@hnu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目(2021-XY-41)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

智能机器人作为新一轮科技革命和产业革命的代表性成果,其研发与制造涉及人工智能、机械工程、控制论、材料、计算机等多学科领域,产业链覆盖面广、带动性强,是推动我国工业、农业、国防等各大行业转型升级的战略性产业,也是衡量国家科技创新实力的重要标志。随着智能机器人逐渐融入到人类的生产与生活中,其面临的环境愈发多样,从事的任务愈发复杂,高可靠、高动态、强对抗的应用需求对智能机器人的算法与算力提出了高要求,但我国在机器人所需的核心高性能芯片领域仍相对薄弱,核心部件的自主研发生产能力与国际领先水平相差较大,算力、稳定性和集成化程度等方面表现不佳。伴随着国际形势日益严峻,中美贸易摩擦升级,逆全球化趋势愈演愈烈,加强国产制造能力,掌握新兴产业主导权,实现智能机器人芯片技术及其产业链的自主可控刻不容缓。

目前,我国智能机器人核心芯片领域的研究仍处于起步阶段,制定合理的战略规划对于其发展具有至关重要的作用。已有研究较为系统地梳理了智能机器人与芯片技术的发展现状并提出发展策略建议。相关研究围绕当前人工智能核心软硬件在技术、产业和政策的发展情况,梳理总结了我国面临的生态体系不完整、基础理论研究存在短板、创新环境不完善等问题,为其技术和产业发展提出了思路与目标 [1]。文献 [2] 瞄准陆空协同多模态智能机器人,分析了该种机器人的发展现状,指出其缺乏系统的发展规划,没有形成全链条式的发展模式,软硬件结合度不够等问题,并给出相应发展建议。文献 [3] 对人工智能芯片的概念、分类、发展历程进行介绍,对其产业发展现状与趋势进行调研与判别,并围绕人工智能芯片产业发展提出了建议。“先进半导体材料及辅助材料”编写组提出了半导体材料与辅助材料的体系化发展、上下游协同发展与可持续发展思路,形成了集成电路发展的相关对策建议 [4]。工业和信息化部、发展和改革委员会、科学技术部等 15 个部门联合印发了《“十四五”机器人产业发展规划》[5],为我国智能机器人产业提供了发展路线指引。

机器人是芯片技术研究的载体,芯片是机器人功能实现的保障,两者发展具有深刻的内在联系,这是当前研究未能深入探讨之处。为此,中国工程

院及时针对智能机器人核心芯片自主可控发展的全局性和关键性问题,启动了相关研究,旨在梳理战略规划、论证技术路径、提出技术方案。本文分析了智能机器人核心芯片的重要价值与国际进展,总结我国的基础优势与面临的问题,着重论证技术发展路线并提出面向 2035 年的发展路线图,以期为国家产业政策、技术规划、技术攻关等研究提供参考。

二、智能机器人核心芯片发展的战略意义

智能机器人核心芯片是一种专门用于实现感知、控制、导航、决策、规划等机器人计算功能的高性能处理器,是机器人在复杂环境完成各类作业任务的关键。通过对智能机器人核心芯片技术发展战略的研究,能够为相关技术的研究提供思路,推动技术链、产业链的自主可控,促进经济高质量发展。

(一) 推动技术自主可控的重要赛道

目前智能机器人核心芯片产业面临着严重的内忧外患。内忧在于机器人芯片产业链核心技术严重不足,国产化率很低,国内芯片封装测试初步可控,但设计与制造等高端环节自主可控率严重不足;外患在于目前大国博弈的国际形势,西方国家对我国高端设备、材料与技术进行封锁,对先进芯片实施禁运,以遏制中国的发展。因此,亟需开展智能机器人核心芯片技术方案论证,根据算法模型特点设计芯片计算架构,根据计算架构优化算法模型与编译,以实现高性能、低功耗、低延时的目标,推动“直道追赶”和“换道超车”双线并行,积极抢占集成电路技术创新竞争高地,增强智能机器人核心芯片技术链、产业链自主可控能力。

(二) 实现经济高质量发展的重要支撑

智能机器人是集成众多领域技术的高端装备,是产业间技术融合和创新的产物,核心芯片技术的发展能够提升智能机器人的作业能力与适应能力,进一步释放智能机器人的需求,从而带动整条产业链的技术升级和产品结构优化,对实体经济振兴起到明显效果,进而成为经济脱虚向实的重要手段。大力发展智能机器人及其核心芯片技术能够带动制造业的全面提升,成为制造强国建设的突破口。此

外，作为信息革命的代表性产业，智能机器人核心芯片产业的发展能够进一步整合大数据、云计算、物联网，5G通信等新兴技术，构建新型工业体系，成为推动我国经济高质量发展的“火车头”。

（三）满足人民对美好生活需要的重要保障

我国社会的主要矛盾已转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分发展之间的矛盾。智能机器人核心芯片技术的发展能够提升智能机器人的应用范围，大大提升社会生产力，将人民从重复机械性劳动中解脱出来，创造更多更高层次与质量的工作岗位；智能机器人适应性的提升也能加大特种作业需求，使人远离危险作业任务，如何在消防、治安、搜救、排爆等工作中发挥出重要作用；智能机器人的大规模利用能够有效提升生产效率，从而减少生产过程中的消耗和污染。推动智能机器人产业的发展，能够有效节约资源、减少排放，成为建设“两型社会”的重要支撑。

（四）提升国家核心竞争力的重要载体

大力推进智能机器人核心芯片技术与产业的发展，有助于保障我国国防安全、抢占全球科技制高点，从而有效提升国家核心竞争力。目前无人化战争已逐步成为现代战争的主流，无人系统作为一类具备自主移动能力的智能机器人，其态势感知、规划决策、多机协同、运动控制等都离不开智能机器人核心芯片的计算处理能力，本项目的研究有助于推动军事智能化的发展，推动我国国防现代化进程。而机器人核心芯片作为新一轮科技革命的典型产品，是衡量国家科技创新实力的重要标志，目前我国在这个方面具有很大的发展潜力，大力发展机器人核心芯片能够快速推动我国相关高技术产业发展，提升国家核心竞争力。

三、智能机器人核心芯片的国际发展现状

（一）政策规划方面

近年来，全球性的芯片短缺给所有智能化产业都带来了严重的影响，世界各主要发达国家和地区针对芯片发展制定了一系列政策规划，围绕技术革新、接口标准、财政计划等全面布局，抢占芯片技术发展主导权。

美国2020年推出《2020美国晶圆代工法案》，建议国会收紧芯片制造技术的瓶颈，以防止中国在未来几年内超越美国。随后又推出《2021年美国创新与竞争法案》(USICA)主张对我国采取强硬的反制措施，提高美国与中国科技竞争的能力。欧盟委员会2020年发表了《欧洲处理器和半导体科技计划联合声明》，预计投入1450亿欧元助力半导体产业发展。日本2020年发布了“绿色增长战略”，将半导体产业作为重点发展领域。韩国2020年宣布，将在未来5年内投资950万美元，发展5nm以下半导体光刻工艺的材料技术。

各传统芯片强国意图依靠其丰富的经验，强大的创新能力，以及雄厚的经济实力，在政策法规的引导下，凭借国家战略达成各方共识，将优势资源引导至芯片领域，从而引领新一轮科技革命，进一步加强其竞争优势。

（二）技术方面

在新一轮科技革命的浪潮中，机器人的应用场景与作业需求日益复杂，对其环境感知、决策规划、导航定位、运动控制的算法算力提出了更高的要求。目前基于通用嵌入式处理器和可编程逻辑控制器的计算系统，不能满足未来机器人的感知能力、认知能力、灵敏运动能力需求。因此，亟需研发新形势下机器人核心芯片，融合最新的人工智能算法，提升机器人智能自主能力[6]。

在机器人智能算法方面，人工智能的赋能带来了突飞猛进式的发展[7]：①人工智能提高环境感知效率。面向目标识别，提出了诸如SSD、YOLO、R-CNN等系列经典框架，让智能机器人可以模拟人类大脑的计算方式，依靠多层卷积神经网络大幅增强感知环境能力；②人工智能提升规划决策能力。人工智能技术的迅速发展大大提升了智能机器人规划决策的自主性，面向高动态、高复杂、强对抗环境依然能够正常开展作业任务；③人工智能强化多机协同能力。以“机动能量和信息互联”为基础、围绕“模型算法与数据计算”的核心，智能机器人能够实现自主作业为主，人机协同、机机协同的合作，这将成为未来智能机器人运用的主要方式。人工智能技术在互操作、自主决策、集群控制算法等方面提供了强大的技术支撑。

在智能机器人计算硬件方面，正面临摩尔定律

失效的问题，并逐步朝着高能效、专用化、定制化等多元方向发展：①在通用人工智能芯片架构上，逐渐向类脑化和神经形态演化。2019年清华大学发布全球首款异构融合类脑芯片——“天机”，让自行车真正实现自动行驶，登上*Nature*封面[8]；②在制造工艺上，芯片制造进入原子时代。2021年湖南大学、韩国三星高等技术研究院等在*Nature*上发表综述文章，文章讨论了二维半导体和传统三维半导体的关键材料参数，总结了推动二维晶体管极限的途径[9]；③在芯片设计上，未来人工智能（AI）自动设计或将实现。2021年谷歌大脑团队联合斯坦福大学在*Nature*上发表一篇论文，基于AI的芯片设计方法进行了改进，并将其应用于Google I/O 2021大会上正式发布的下一代张量处理单元（TPU v4）加速器的产品中[10]。

在机器人智能算法与芯片硬件融合方面，类脑芯片是一种具有天然高能效优势的智能算法实体化解决方案。众所周知，算法、算力与数据是人工智能技术发展的三架马车，人工智能技术的引入增强了机器人的算法效能，各类传感器为机器人引入了海量的数据，类脑芯片的出现成为了承接算法与数据的载体。智能机器人芯片信息处理单元的架构也逐渐向仿生大脑结构的方向转变，“存算一体”的类脑芯片成为了人工智能技术创新的基础，在运行一些智能算法上具有高能效优势。其底端的非易失性核心器件也正逐步取代易失性核心器件，从而更好地实现非结构化环境和复杂任务的智能计算功能。

（三）产业方面

智能机器人核心芯片技术涉及到半导体、机器人以及人工智能等多个产业。在半导体领域，加工制造设备的市场集中度较高，荷兰、美国、日本的企业垄断了全球芯片制造市场超过9成的份额[11]。在芯片产业链上，国外整体上都处于强势地位，在芯片设计、制造、封测上中下三个主要环节都占据着主导地位。机器人方面，目前工业机器人巨头企业主要集中在日本、美国、德国等工业发达国家。

因此，国际上智能机器人核心芯片产业已经形成了一系列商业化平台。2017年11月，英特尔中国研究院正式发布HERO机器人平台，是专为智能机器人（包括服务机器人、医疗机器人、自动驾驶

汽车等）打造的一套低功耗、高性能、体积小的异构系统平台方案。在该方案中，中央处理器（CPU）作为控制中心，与现场可编程逻辑门阵列（FPGA）和其他专用加速器芯片搭配，能够提供优异的性能。2018年12月，英伟达发布世界首款专为机器人设计的芯片Jetson AGX Xavier。作为首款专为自主机器设计的计算机，Jetson AGX Xavier的性能足以完成视觉测距、传感器融合、定位与建图、障碍物检测以及对新一代机器人至关重要的路线规划等任务。2020年6月，美国高通推出迭代产品机器人RB5平台，成为高通专为机器人设计的最先进和高集成度整体解决方案，其在RB3基础上提供了丰富的硬件、软件和开发工具组合，助力开发者与厂商研制具有低功耗、高算力的下一代智能机器人，满足消费级、企业级、工业级以及专业服务领域的要求。

四、我国发展智能机器人核心芯片的基础优势及面临的问题

（一）基础优势

1. 我国积极营造智能机器人核心芯片发展环境
国家历来重视基础科技和高新技术产业的发展，在历次国家顶层宏观政策中，都重点突出对机器人/芯片等高新技术产业的支持。2021年3月发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中更是提出在科技前沿领域要攻关集成电路技术，推动集成电路、机器人等产业创新发展，提升制造业核心竞争力。与此同时，国家相关部委也在专项规划、政策扶持、进出口投资、区域发展和产业配套等方面提出了一系列政策文件，为国内机器人/芯片产业发展培育市场和人才提供政策与资金保障。相较于其他国家，中国特色社会主义制度也能够最大限度地整合社会资源，通过宏观调控、政策规划、金融财政等手段集中力量办大事，为智能机器人核心芯片发展保驾护航。

2. 我国巨大的内需市场为智能机器人核心芯片发展提供强大动力

目前我国芯片市场规模正在扩大，芯片产值逐年增加。统计显示，在过去的五年时间中，我国芯片产业年复合增值率超过了21%，达到了同期全球

增速的近5倍。依据世界半导体行业协会的统计，我国市场规模实现了跨越式的快速增长，市场份额达到了50.7%，高居全球第一。中国已经成为了全球芯片市场不可或缺的重要组成。据有关部门统计，近年来我国机器人产业体系年均复合增长率超过15%，产业规模也已突破1000亿元。而集成应用的大幅拓展，使得国内制造业机器人密度早在2019年就已达到187台/万人，明显高于全球平均水平。在服务机器人领域，市场扩张速度更加迅猛。据相关资料显示，2013—2021年全球服务机器人销售额年均复合增长率为19.2%，2021年其所占机器人市场的比重就已达36%。巨大的内需市场是智能机器人核心芯片产业发展的最强大动力[12]。

3. 我国拥有最为完整的工业体系，具备良好的产业基础

中国是全球最大的制造业国家，工业门类齐全，拥有联合国工业分类中39个工业大类、191个工业中类、525个工业小类的完整工业体系，产值规模高居世界第一。完整的工业体系能够大大降低生产成本，提高生产效率，为智能机器人核心芯片产业的发展提供底层支撑。芯片关联产业尤其是机器人产业链水平持续提升，我国机器人产业规模得到快速增长并已初步形成较为完整的机器人产业体系，机器人行业发展水平已进入世界第一方阵，随着中国5G、人工智能、云计算等“新基建”的快速发展，将进一步加快智能机器人核心芯片产业的发展。

4. 我国高学位的“人口红利”，形成独特的人力资源优势

我国在科学、技术、工程和数学领域（STEM）的毕业生常年高居世界首位，据《中国科技人才发展报告（2020）》显示，我国研究与试验发展人员数量快速增长，年均增速超过7%，截至2020年，人数达到了509.2万，连续多年居世界第一。《中国集成电路产业人才白皮书（2019—2020年版）》的统计显示，截至2019年年底，中国集成电路行业的直接从业人员规模达到了51.19万人。根据当前的发展态势以及人均产值计算，截至2022年年底，该行业人才需求将突破74.45万人。2021年国内各大高校集成电路学院也如雨后春笋般成立，其中包括多所国家“双一流”建设高校。从中长期看，基于持续的工程师红利和世界前列的人工智能技术优势，中

国有望比肩发达国家，引领未来机器人及芯片产业的发展。

5. 国内智能机器人芯片产业迈出升级新步伐

近年来，我国机器人核心芯片产业在政策支持与市场需求的带动下正快速发展[13]。目前国内在芯片设计、芯片制造和机器人应用等方面涌现了一批优秀企业。芯片设计领域是国内发展最成熟，技术最全面，也是和国际一流水平最接近的领域。主要有深圳市海思半导体有限公司、中科寒武纪科技股份有限公司、北京地平线机器人技术研发有限公司等芯片设计公司。在芯片制造领域我国与世界领先水平还存在较大差距，但也在这个领域站稳了脚跟，目前中芯国际集成电路制造（上海）有限公司、上海华虹（集团）有限公司和合肥晶和集成电路股份有限公司三家公司位列全球芯片制造代工企业十强。在机器人领域我国也有长足的进步，随着市场进一步扩增，政策、研发投入力度持续加大，我国机器人发展迅速走强，出现了深圳市大疆创新科技有限公司、埃夫特智能装备股份有限公司，沈阳新松机器人自动化股份有限公司等一大批领域内的优秀企业。这些公司的快速发展，展示了我国智能机器人芯片产业迈出新步伐。

（二）面临的主要问题

虽然我国在智能机器人核心芯片方面已经取得了显著的成效，但对比全球产业同期发展现状，为实现相关技术、产业自主可控，仍然存在着一系列问题需要克服。

1. 针对性的顶层设计缺失，战略目标不清晰

国家全局的顶层战略如“全面深化改革”“中国制造2025”“十四五规划”均对智能机器人芯片发展具有重要意义。然而，智能机器人芯片由于与机器人技术以及芯片技术关系紧密，具有其独特的发展规律，上述国家全局战略对于智能机器人芯片领域发展难以起到精准战略指导作用。近几年，国家陆续出台多项政策支持机器人和人工智能芯片产业发展，尤其是2009年后政府明显加快了政策措施出台速度和力度，从顶层设计、财税金融、示范应用、人才培养等多角度发力支持机器人产业发展，政策叠加效应为我国机器人产业营造了良好的发展氛围。然而，各部委制定的机器人和人工智能产业政策与当前智能机器人及其核心芯片的关联性不

完全匹配，缺乏针对智能机器人芯片的指向性政策，难以起到整体战略的引领作用。

2. 多个技术环节自主可控率普遍较低，受制于人

国外智能机器人芯片的设计、制造、测试、生态构建等，由于发展较早，技术壁垒较高，而国内起步较晚，且严重依赖进口，关键核心环节难以实现自主可控，诸多方面技术难题亟需突破。主要问题在于平台核心支撑能力不足，缺少支撑智能机器人芯片技术跨领域、跨行业的互联互通的平台和集成开发环境；核心软硬件产业基础薄弱，对国外产品依赖度高，特别是电子设计自动化（EDA）、知识产权（IP）核、光刻机、硅晶圆、光刻胶等环节产业基础薄弱，自主可控率非常低（ $\leq 5\%$ ），几乎全部依赖进口；当前我国芯片设计业发展迅速但总体小而分散，仅有三家公司营收过百亿，与国际领先的高通公司、博通公司超 1000 亿元的营收差距依旧很大，存在着多而不强，大而不强，快而不优的问题，制约了智能机器人系统芯片技术的发展。

3. 高层次人才短缺严重，学科发展不平衡

随着芯片行业的持续发展，我国迫切需要一大批芯片行业领军者。但由于各种内外因素，特别是外国政府和领先的国际企业的限制。海外的高层次领军人才很少回国效力。国内高层次人才短缺严重的原因一方面是由于国内芯片产业发展时间段，经验不足，在技术创新、产品研发、制造管理等方面的产业人才缺乏；另一方面是芯片专业的人才培养需要雄厚的学术基础，开设相关专业的师资队伍不齐全，没有足够数量的高校，难以有效满足快速扩张的芯片制造企业对人才的庞大需求。

4. 各行业环节发展不均衡，核心技术储备不足

我国智能机器人芯片企业普遍弱小而分散，产品线少，资金实力不强，未形成合力，综合竞争力远弱于国外芯片企业，并且国内产品仍然主要集中在中低端市场，很多高端芯片核心技术仍待攻关突破和创新引领。国内在智能机器人芯片 EDA 设计工具、芯片体系架构、芯片制造工艺、关键原材料以及软硬件生态等芯片产业链核心环节，尚无法脱离国外核心技术，尤其是高端芯片 EDA 设计工具与高工艺光刻机必须依赖进口，国内在打通整个智能机器人芯片产业链方面还有很长一段路要走。

五、我国智能机器人核心芯片技术发展路线论证分析

智能机器人有相对发达的“大脑”，在脑中起主要作用的是 CPU。智能机器人智能程度的提高依赖于芯片处理能力的增强，现实是我国智能机器人系统芯片，特别是处理功能芯片等关键部件存在自给率低、性能不高等突出问题。因此，提出可行的智能机器人自主可控专用芯片技术发展路线，对解决机器人发展的“卡脖子”问题，提高我国机器人的智能化和安全性具有重要的产业价值和战略意义。

（一）技术体系框架

本文从智能机器人处理功能的芯片纯设计方面着手，进行算法芯片化设计技术体系规划。该技术体系建议：从现有技术基础（科学研究和产业技术）出发，剖析机器人关键算法，澄清关键算法芯片化技术，结合特定应用领域技术，开展算法、电路、架构、系统的软硬件协同设计研究，在技术节点不占优势的前提下，通过其他层面的变革性创新实现系统性能提升，并试图找到我国智能机器人系统芯片自主可控发展的最优方案。

（二）多架构路线全面推进智能机器人核心芯片发展

算法是决定机器人功能的重要因素，如果把机器人与人类比，可以说算法相当于人类的智慧与灵魂思想。按照功能类别来分，主流机器人算法主要可分为感知算法、规划算法、控制算法等几类。未来的智能机器人发展需要先进的算法，同时应着重于芯片的能效比，因此，通过软硬件协同的算法芯片化设计是趋势，也是以差异化方式实现我国智能机器人系统芯片自主可控的必经途径。

为推动智能机器人核心芯片发展，建议采用以下几类处理技术体系模式（异构并行方式）的并行发展路线。CPU 作为计算系统（智能机器人也属于一种计算系统）的运算和控制核心，是信息处理、程序运行的最终执行单元，它是对系统内的所有硬件资源进行控制调配、执行通用运算的核心硬件单元。本文从处理角度出发，所有技术路线都包含 CPU 作为主处理器。其中，图形处理器（GPU）、FPGA 均是前期较为成熟的芯片架构，属于通用型

芯片。专用集成电路（ASIC）属于为AI特定场景定制化的芯片，可将ASIC分为全数字ASIC AI芯片和数模混合存算一体AI芯片 [14,15]。

1. 路线1：CPU主处理器+GPU协处理器

AI算法均可以通过CPU实现，但CPU缺乏并行性，对于AI算法中需要大量的并行计算方式并不友好。GPU则具备并行的处理能力，也是目前实现AI计算最广泛的方式。

2. 路线2：CPU主处理器+FPGA协处理器

FPGA可设计为非冯·诺依曼架构，使得其在运算单元和存储单元间的信息交换量大幅降低，因此具有流水线处理和响应迅速的特点。

3. 路线3：CPU主处理器+ASIC协处理器

AI算法稳定后，AI芯片可采用ASIC设计方法进行全定制，使性能、功耗和面积等指标面向深度学习算法做到最优。

(1) 路线3.1：CPU主处理器+全数字ASIC AI协处理器。AI算法中很多的乘累加操作（MAC）可采用“类存算一体”方式进行全数字ASIC设计，具有更高的能效性能。

(2) 路线3.2：CPU主处理器+数模混合存算一体AI协处理器。通用处理架构存在冯·诺依曼瓶颈，即运算与存储分离，导致大部分的能量消耗在运算单元和存储单元的通信上。成熟非易失性存储器件或新兴非易失性存储器件结合交叉阵列架构具有天然的一步实现AI算法中密集的MAC操作的特性，从而具有实现完全“存算一体”新计算范式的能力。

（三）技术路径与技术方案分析

分析智能机器人系统芯片技术路线，其实就是分析路线中协处理器运行AI算法的特点和他们的自主程度，智能机器人系统芯片自主可控技术路线分析如下 [16~19]。

1. 路线1：CPU主处理器+GPU协处理器

该路线是目前最成熟、最易于实现相对自主可控的方式，短期可通过自研算法实现相对自主可控，长期需自研芯片实现自主可控。但也应该注意存在一定的风险，因为国产CPU没有自主指令集系统，并不能说是完全的自主可控产品，而景嘉微电子股份有限公司作为唯一的自主GPU生产商，竞争风险过于集中。

CPU和GPU都是通用处理器，技术成熟，国外有先发优势，国内受到严重的技术限制，国内外差距大。虽然在该技术路线上很容易被“卡脖子”，但在该技术路线上实现智能机器人芯片自主可控非常有必要：一是反哺增强CPU和GPU的自主可控能力；二是结合特定应用实现协同优化提高智能机器人芯片的安全性和智能性。这也是在现阶段基础上最现实的技术路线，针对特定应用场景，依靠自研算法提升性能，有利于AI算法技术的提升，以“直道追赶+差异化应用”方式突破封锁。

2. 路线2：CPU主处理器+FPGA协处理器

理论上，FPGA可以实现任意ASIC和数字信号处理（DSP）的逻辑功能。而实际应用中，开发人员可通过FPGA的EDA软件来修改芯片，而不是替换和重新设计芯片。FPGA的开发流程不涉及掩模和流片等步骤，使得开发周期可以缩减。在当前AI企业级应用中，FPGA占据了主导地位。

FPGA流片成本高昂，实现同样的AI应用，制作FPGA芯片的成本可能会超过ASIC的成本10倍以上。为适应下游用户复杂多样的需求和应用，FPGA的门电路集成度往往很高，然而具体到某一应用，冗余的门电路会提升FPGA的功耗。在功耗敏感的领域中，这是非常致命的缺陷。而另一方面，作为AI算法ASIC芯片化的前期验证路线，FPGA具有较短的研究周期和较低的成本。

3. 路线3：CPU主处理器+ASIC协处理器

路线3.1属于电路级“存算一体”路线，即用数字“类存算一体”方式实现MAC操作，相对于路线3.2，该路线实现稳定性较高，但并行性和能效比要低。路线3.2是器件级“存算一体”路线，即采用的固定存储器（NVM）本身具有存储和计算功能，这些器件结合Crossbar array架构在MAC操作上具有天然的优势，并且单位器件可具有多级状态，发展潜力巨大。两种ASIC AI芯片技术路线具有针对特定应用执行智能机器人边缘（在机器人领域，这里边缘指代近感知端）部署的潜力，简单的任务可以自行处理，提高系统效率。国外AI芯片尚未形成明显压倒性优势，国内起步不算晚，国外尚未完全形成技术垄断，有利于在工艺制程技术不占优势的基础上实现系统性能的超越。

总体上，在成熟度方面：路线1>路线2>路线3.1>路线3.2（能效比/自主可控）；在潜力方面：

路线 3.2>路线 3.1>路线 2>路线 1（见表 1）。虽然路线 3 的成熟度相对较低，但也意味着该领域存在着更多的技术自主可控机会，在这些领域也涌现了有代表性的中国公司。建议加大力度布局前沿技术研究，实现“换道超车”。同时，在通用芯片领域受限于摩尔定律放缓，而机器学习规模指数级增长的机遇下，紧抓高端芯片先进工艺制程关键、核心技术攻关，由“直道追赶”到“直道赶超”。全面布局，为实现智能机器人系统芯片自主可控打下坚实的基础。

六、我国智能机器人核心芯片发展思路、重点任务与战略目标

（一）基本策略

紧密围绕解决智能机器人芯片“卡脖子”难题，服务我国科技稳步快速发展的总目标，在分析总结国内外芯片产业发展态势、发展方向，调研我国在机器人芯片领域所存在的优势和不足的基础上，提出以下五个方面的发展思路。

直面困难，自力更生。当前国际形势风云变幻，国家安全和环境复杂多变，未来一个时期又是我国实现中华民族伟大复兴的关键期，对我国各个领域的科技支撑能力提出了更高的要求。我国智能机器人芯片发展战略首要就是在当前时代背景和国际环境下，正视我国在芯片领域面临的“卡脖子”问题。自觉践行和大力弘扬“两弹一星”精神、载人航天精神等新时代科学家精神。制定长期发展战略，做好打持久战的准备，举国家之力，打破国外对高端芯片的技术封锁，实现新时代科技新长征的最终胜利。

顶层设计，战略布局。智能机器人芯片产业的发展与机器人技术、机器人应用技术、芯片产业、芯片应用产业等诸多行业密切相关，关乎我国国防装备、工业生产、居民生活等方方面面。需真正从

国家的高度对机器人芯片的发展提出纲领性、统揽性的谋划。不能将该领域的发展寄希望于外来的技术支持，寄希望于设备的进口，而是将其作为国家科技重要支柱性产业来抓。做好从基础理论研究、关键技术突破到产业应用落地的全链条总体规划，注重对国家长期发展的支持。

强调整体，重点突破。机器人芯片产业的发展是涉及面广、影响力大、关联性强、制约关系复杂的系统工程，某一环节不足很容易形成木桶效应。发展自主可控的智能机器人芯片需要重视其相关各方面的有机联系，做到整体推进。同时，系统工程需要重点突破，善于抓“牛鼻子”，找突破点，或“剥茧抽丝”，或“快刀斩乱麻”，方式方法得当，就能起到“四两拨千金”的作用。

夯实基础，扩大优势。近几十年，我国机器人、芯片等领域的技术及应用更多是规模上“量”的增长，走的是“买来主义”路线，实际的机器人芯片基本技术和工艺，高端芯片的设计研究和应用虽有进步，但跟国外先进水平还有很大差距。要实现关键技术自主可控的转变，需要充分挖掘和发挥我国所具有的集中力量办大事体制优势，继续扩大我国在市场需求、生产加工、人才储备、基础设施建设等方面的发展优势，尤其注重在全球竞争的环境中扬长避短，积极抢占新一轮科技与产业的制高点。

深耕本土，面向世界。我国拥有世界最大的智能机器人芯片既有市场和潜在市场，这成为我国芯片发展的不竭动力。我国芯片产业应该充分立足本国市场，挖掘好本国需求，发挥好本土优势，从本土市场起步才能最终走向世界。同时我国科技与社会发展对机器人芯片需求迫切，也需要在借鉴欧洲、美国、日本等发达国家和地区经验的基础上，充分立足我国国情，处理好产品进口、技术引进与自主研发之间的关系，勇敢探索一条适合我国国情的机器人专用芯片发展道路。

表 1 技术路径特点与比较分析

路线	成熟度	潜力（能效比/自主可控）	协处理器芯片架构特点
1	高	低	冯·诺依曼架构，存算分离
2	中	中低	非冯·诺依曼架构，近存计算
3.1	中低	中	非冯·诺依曼架构，类存算一体
3.2	低	高	非冯·诺依曼架构，存算一体

总之，需认真总结提炼我国在机器人芯片发展过程中的经验和教训，准确把握世界发展趋势和新时代国家整体发展需求和方向，立足新时代我国基本国情，充分发挥我国在机器人芯片方面的各种优势并将之与现阶段芯片技术发展的本质规律有机结合，探索出一条具有中国特色的智能机器人芯片发展之路。

（二）重点任务与发展路线图

我国智能机器人芯片发展要准确把握全球信息技术、机器人技术、人工智能等领域发展赋予的重大机遇，站在机器人产业和芯片产业融合发展全局的角度，充分总结历史发展经验教训，瞄准未来科技发展战略制高点，以问题为牵引，以需求为导向，围绕自主可控发展中国智能机器人芯片的总目标，着力布局以下重点任务：①做好中国智能机器人芯片发展的顶层设计。②制定智能机器人芯片的发展路线。③做好智能机器人芯片的产业布局。④构建智能机器人芯片产业协同优化的产业结构。⑤制定释放市场和人才创新活力的协同创新机制。⑥明确自主可控与国际协作发展的边界。⑦重点推动智能机器人芯片的应用落地。

我国智能机器人芯片发展就是以实现解决机器人专用芯片“卡脖子”难题、服务中国科技稳步快速发展为总目标，力争到2035年左右建设成为智能机器人芯片强国，机器人芯片产业自主、可控、完善、协同、高效，对国家经济社会发展支撑作用显著增强。我国智能机器人核心芯片发展路线图如图1所示，实现总目标可分“三步走”。

第一步，到2025年，全国上下自主可控发展机器人芯片的共识强烈，自主创新能力显著增强，掌握一批关键核心技术，优势领域竞争力进一步增强，尤其在芯片设计、中低端芯片的加工、芯片的产业化融合等领域进步明显，机器人芯片对机器人产业的提质增效作用逐步凸显。自主可控智能机器人芯片与发达国家芯片产业跟跑差距不断缩小。

第二步，到2030年，建成自主创新的机器人芯片研发体系，关键核心技术和应用达到世界领先水平，全产业链实现安全可控，在全球价值链中的地位明显提升，新型机器人芯片产业生态基本形成，低中高全覆盖的芯片设计、加工、制造、应用完整产业集群涌现，机器人芯片对机器人产业、国家经

济和社会发展的支撑作用持续增强。自主可控智能机器人芯片与发达国家芯片产业并跑态势基本达成。

第三步，到2035年，形成创新引领优势，建成全球领先的机器人芯片体系，新型机器人芯片产业生态逐步完善，芯片技术、机器人技术与各个领域全面实现协调发展，芯片对经济社会发展的支撑作用大幅提升。自主可控智能机器人芯片实现全球领跑。

七、对策建议

（一）将智能机器人芯片自主可控上升为国家战略

建议制定“智能机器人芯片自主可控发展战略”，明确智能机器人芯片的自主可控发展在国家总体规划中的突出地位。成立智能机器人芯片发展领导小组，负责对机器人产业和芯片产业发展的统一规划和统筹实施。组织涵盖科技、经济、能源、环境、交通、通信、城市规划等不同领域的顶级专家成立智能机器人芯片自主可控发展专家咨询委员会，为智能机器人芯片发展提供决策支撑，统筹推进机器人技术及产业、芯片技术及产业的协同发展，围绕体制机制改革、特色市场环境搭建、自主创新体系建设、智能机器人产业生态、专用智能芯片产业和集群等重点任务，制定目标清晰、方向明确、措施得力的顶层设计。

（二）设立智能机器人芯片重大科技专项

面向各大应用领域对机器人及机器人芯片的重大迫切需求，抓住机器人与芯片不断深入融合发展的重大变革机遇，设立智能机器人芯片重大科技专项，实现智能机器人芯片领域核心和关键技术全面自主可控。智能机器人芯片重大科技专项要以战略性、全局性、前瞻性、关键性技术需求为牵引，发挥国家实验室、国家工程研究中心等平台优势，重点围绕芯片基础科学及工艺的芯片设计、芯片制造、芯片封测技术，围绕智能感知、认知、交互、规划、控制、协同的机器人技术，围绕算法芯片融合的模式压缩、算法融合、新型架构设计技术，以及围绕工业机器人、服务机器人、自主无人系统、特种机器人、智慧交通系统的智能机器人芯片应用技术等为重点，为智能机器人芯片做好技术储备，促进我国机器人领域在核心理论和关键技术方面全

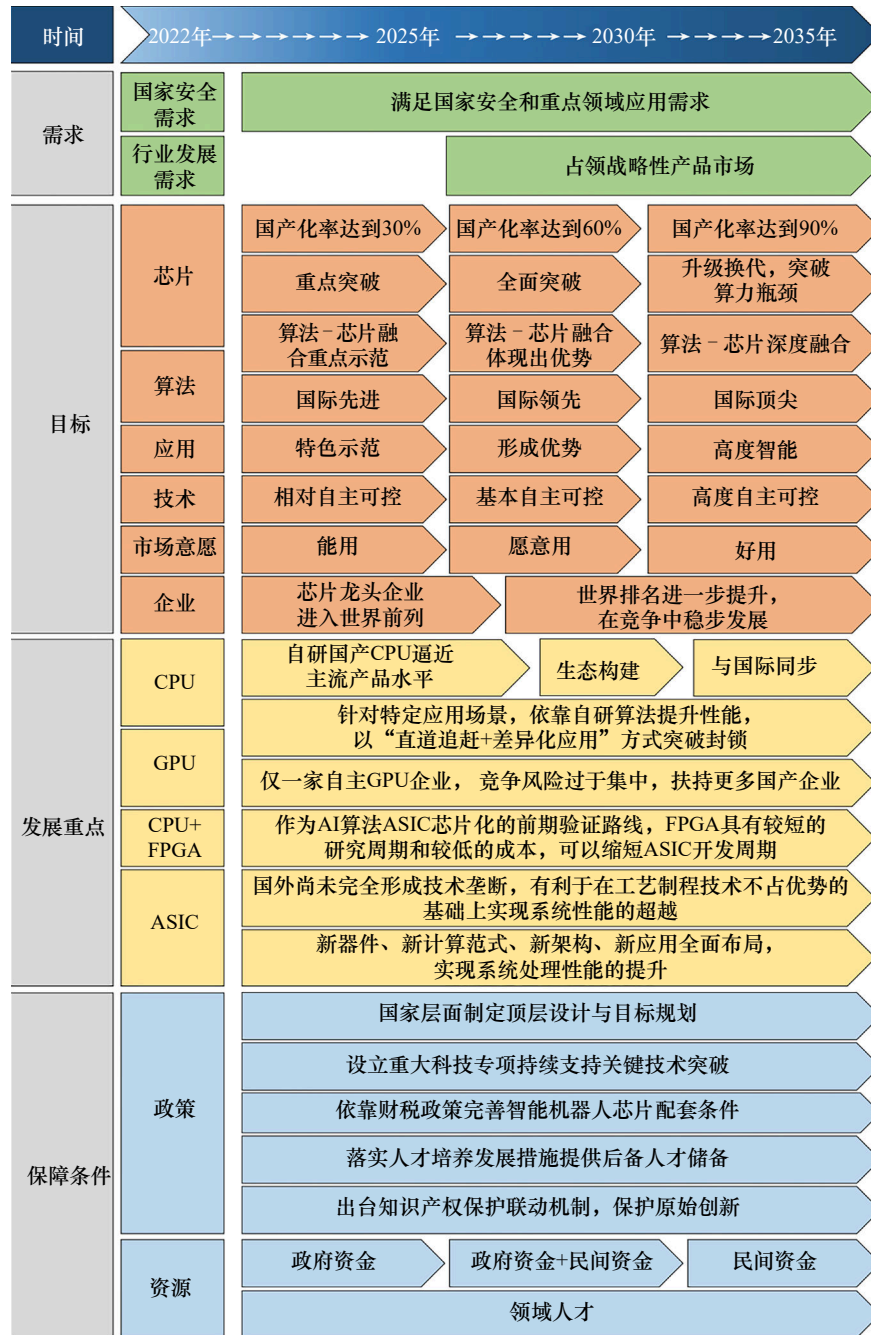


图1 我国智能机器人核心芯片发展路线图

面赶超世界先进水平。智能机器人芯片重大科技专项资金来源可从应用市场获取，主要依托机器人应用的相关产业产生的税收红利，在确保一定政府资金投入的基础上，形成多元化的投入机制。

(三) 出台激励智能机器人芯片技术研究和产业应用政策

国务院印发的《新时期促进集成电路产业和软

件产业高质量发展的若干政策》(2020年)[20]强调，集成电路产业和软件产业是信息产业的核心，是引领新一轮科技革命和产业变革的关键力量。随后，我国集成电路产业和软件产业快速发展，有力支撑了国家信息化建设，促进了国民经济和社会持续健康发展。建议在此框架内，突出“自主可控”的总体指导思想，重点强调基础研究与应用研究并重发展，出台面向智能机器人领域的芯片产业发展

详细落地政策,在财税、投融资、研究开发、进出口、人才、知识产权、市场应用、国际合作等方面继续明确在机器人专用芯片领域的专项措施。由智能机器人芯片发展领导小组推进各部门、各地方尽快制定具体配套政策,加快政策落地,确保取得实效,推动我国智能机器人芯片领域实现高质量发展。

(四) 落实智能机器人芯片人才培养发展措施

支撑和决定智能机器人芯片产业发展的关键在于人才。建议我国出台政策措施,重点推进“政产学研”多方协同的研发机制,不断加强芯片产业人才的培养力度、提升产业研发能力、缩小产业的技能缺口。首先,推动深层次产学研合作,促进产业人才培养。重视和加快机器人、半导体、集成电路相关学科的人才培养开发,鼓励各类研发机构、高校、科研院所与高新区企业、基地载体等各类组织开展多种形式的高层次、紧缺和骨干专业技术人才培养合作。另外,完善人才评价和激励机制,完善鼓励创新创造的分配激励机制,形成有效的正向激励,使人才能够充分发挥创新潜能。全面调动人才的积极性,发挥创新潜能与活力。再者,积极引进高端人才,完善人才集聚机制,加大对全球芯片产业高端人才的吸引力度,根据产业发展需求开展人才与企业、人才与项目对接活动,拓展全球技术研发、制造等理工科类人才流入国内芯片行业的渠道。最后,构建专业化人才服务体系,为芯片产业高层次人才的科技研发、成果转化、市场拓展等提供深层次增值服务,支持打造适合人才长期发展的良好生态,聚集人才并留住人才。

参考文献

- [1] 高蕾,符永铨,李东升,等.我国人工智能核心软硬件发展战略研究[J].中国工程科学,2021,23(3):90-97.
Gao L, Fu Y Q, Li D S, et al. Development strategy for the core software and hardware of artificial intelligence in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(3): 90-97.
- [2] 黄强,孟非,余张国,等.陆空协同多模态智能机器人系统发展战略研究[J].中国工程科学,2021,23(5):116-121.
Huang Q, Meng F, Yu Z G, et al. Development strategy for air-ground collaborative multi-modal intelligent robot system [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 116-121.
- [3] 商惠敏.人工智能芯片产业技术发展研究[J].全球科技经济瞭望,2021,36(12):24-30.
Shang H M. Research on technology development of artificial intelligence chip industry [J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2021, 36(12): 24-30.
- [4] “先进半导体材料及辅助材料”编写组.中国先进半导体材料及辅助材料发展战略研究[J].中国工程科学,2020,22(5):10-19.
Writing Group of Advanced Semiconductor Materials and Auxiliary Materials. Strategic study on the development of advanced semiconductor materials and auxiliary materials in China [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 10-19.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部.十五部门关于印发《“十四五”机器人产业发展规划》的通知[EB/OL].(2021-12-21)[2022-03-23].http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/28/content_5664988.htm.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Notice of fifteen departments for regarding the issuance of the 14th Five-Year Plan for robot industry development plan [EB/OL]. (2021-12-21)[2022-03-23]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/28/content_5664988.htm.
- [6] Murray S, Floyd-Jones W, Qi Y, et al. Robot motion planning on a Chip [C]. Ann Arbor: Robotics: Science and Systems, 2016.
- [7] 王耀南.人工智能赋能无人系统[J].智能系统学报,2021,16(1):6.
Wang Y N. Artificial intelligence enhances unmanned systems [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2021, 16(1): 6.
- [8] Pei J, Deng L, Song S, et al. Towards artificial general intelligence with hybrid tianjic chip architecture [J]. Nature, 2019, 572(7767): 106-111.
- [9] Liu Y, Duan X, Shin H J, et al. Promises and prospects of two-dimensional transistors [J]. Nature, 2021, 591(7848): 43-53.
- [10] Mirhoseini A, Goldie A, Yazgan M, et al. A graph placement methodology for fast chip design [J]. Nature, 2021, 594(7862): 207-212.
- [11] 前瞻产业研究院.2020年中国半导体设备行业市场研究报告[R].深圳:前瞻产业研究院,2020.
Prospective Industry Research Institute. Market research report of Chinese semiconductor equipment industry in 2020 [R]. Shenzhen: Prospective Industry Research Institute, 2020.
- [12] 中国电子学会.2021年中国机器人产业发展报告[R].北京:中国电子学会,2021.
Chinese Institute of Electronics. Development report of Chinese robot industry in 2021 [R]. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2021.
- [13] 陶建华,陈云霁.类脑计算芯片与类脑智能机器人发展现状与思考[J].中国科学院院刊,2016,31(7):803-811.
Tao J H, Chen Y J. Development status and thinking of brain like computing chip and brain like intelligent robot [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(7): 803-811.
- [14] Lung H L. AI: From deep learning to in-memory computing [C]. San Jose: Conference on Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography, 2019.
- [15] Hung J M, Li X, Wu J, et al. Challenges and trends in developing nonvolatile memory-enabled computing chips for intelligent edge devices [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(4): 1444-1453.
- [16] 林钰登,高滨,王小虎,等.基于新型忆阻器的存内计算[J].微纳电子与智能制造,2019,1(2):35-46.
Lin Y D, Gao B, Wang X H, et al. In-memory computing based on novel memristor [J]. Micro/nano Electronics and Intelligent

- Manufacturing, 2019, 1(2): 35–46.
- [17] Yao P, Wu H Q, Gao B, et al. Fully hardware-implemented memristor convolutional neural network [J]. *Nature*, 2020, 577(7792): 641–646.
- [18] Le Gallo M, Sebastian A, Mathis R, et al. Mixed-precision in-memory computing [J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(4): 246–253.
- [19] Wu P, Su J W, Chung Y L, et al. A 28nm 1Mb time-domain computing-in-memory 6T SRAM macro with 6.6ns latency 1241 GOPS and 37.01 TOPS/W for 8b-MAC operations for Edge-AI devices [C]. Beijing: IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2022: 190–192.
- [20] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展若干政策的通知 [EB/OL]. (2020-08-04)[2022-03-23]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-08/04/content_5532370.htm.
- General Office of the State Council. Opinion of General Office of the State Council for promoting the high-quality development of integrated circuit industry and software industry in the new period [EB/OL]. (2020-08-04)[2022-03-23]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-08/04/content_5532370.htm.