

趋势观察：

RISC-V 架构芯片研究进展*

RISC-V，即第五代精简指令集，是一种基于精简指令集计算机（RISC）原理的开源指令集架构（ISA），由美国加州大学伯克利分校研究团队于2010年设计。相对于X86指令集的完全封闭及ARM指令集高昂的授权使用费，RISC-V指令集通过支持自由开放的指令集体系架构及架构扩展以提供软件和硬件自由。RISC-V的主要优点为完全开源、架构简单、易于移植、模块化设计，以及具有完整的工具链。

处理器芯片是中国半导体产业的软肋，是中国半导体产业面临的“卡脖子”问题。近年来，国内芯片领域学术界和产业界都在积极探索实践，力求突破。中国在芯片研发领域的4个技术关卡分别为光刻机、电子设计自动化（EDA）软件、晶圆和指令集。由此可见，开源RISC-V指令集架构对我国在芯片指令集方面技术破围意义重大。我国有望通过RISC-V摆脱国外的指令集垄断，打破技术封锁。

RISC-V自诞生以来取得了突飞猛进的发展，随着物联网、5G通信、人工智能等技术的兴起，物联网和嵌入式设备成为RISC-V最先落地的领域和最大的应用市场。各国研究机构及企业纷纷加入研究和开发行列，RISC-V不仅打破了现有指令集架构环境下英国ARM公司和美国Intel公司的两强垄断格局，而且建

立了一个开放的生态及框架来推动全球合作和创新。

1 主要国家战略举措及特点

开源技术作为全球科技产业发展的一大驱动力，在新兴领域倍受推崇，开源RISC-V指令集架构尤为受到关注。目前，全球范围内已有部分国家根据自身需要布局卡位，支持RISC-V架构芯片研究及生态构建。

（1）美国强调RISC-V指令集在智能装备芯片领域的战略应用。2017年6月，美国国防高级研究计划局（DARPA）启动“电子复兴计划”（Electronics Resurgence Initiative），该计划旨在解决半导体制程瓶颈以应对半导体产业快速发展的挑战。“电子复兴计划”连续多年对RISC-V指令集的研究和产业化应用给予专项支持。其中，实现更快速集成电路项目、Posh开源硬件项目和电子资产的智能设计项目明确指明需要基于RISC-V指令集进行开发。2021年3月，SciFive公司与DARPA达成开放许可协议授权，SciFive加入“DARPA工具箱计划”（DARPA Toolbox Initiative）为DARPA项目参与者提供基于RISC-V的32位和64位内核访问，以支持DARPA项目中应用程序和嵌入式应用的研发。

（2）欧盟注重RISC-V与高性能计算的结

* 本文由中国科学院文献情报中心咨询服务部信息学科情报团队撰稿，执笔人包括：李海英、闫亚飞、何泉

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20211215001

修改稿收到日期：2022年1月4日

合。2018 年 12 月，欧盟推出“欧洲处理器计划”（European Processor Initiative），拟开发面向欧洲市场的自主可控低功耗微处理器，降低欧洲超级计算行业对外国科技公司的依赖。其中，“欧洲处理器加速器”（European Processor Accelerator）项目作为该计划的重要组成部分，其核心是采用免费和开源的 RISC-V 指令集架构，用于在欧洲境内开发和生产高性能芯片。2021 年 9 月，该项目的最新成果是交付了 143 个欧洲处理器加速器芯片样本，这些加速器芯片专为高性能计算（HPC）应用程序设计。此外，2021 年 1 月开始的 Euro HPC eProcessor 项目旨在基于 RISC-V 指令集体系架构构建一个完全开源的欧洲全堆栈生态系统以适用于 HPC 和嵌入式应用。

（3）印度将 RISC-V 指令集定位为国家事实指令集。2011 年，印度开始实施处理器战略计划，每年资助 2—3 个处理器研究项目。该计划下的 SHAKTI 处理器项目旨在开发第一个印度本土的工业级处理器；其目标是研制 6 款基于 RISC-V 指令集的开源处理器核，其中涵盖了 32 位单核微控制器、64 核 64 位高性能处理器和安全处理器等。2016 年 1 月，印度电子信息技术部资助 4 500 万美元研制一款基于 RISC-V 指令集的 2 GHz 四核处理器。2017 年，印度政府表示将大力资助基于 RISC-V 的处理器项目，使 RISC-V 成为印度的国家事实指令集。2020 年 8 月，印度政府在全国发起“微处理器挑战”（Microprocessor Challenge）项目，以推动 RISC-V 微处理器的自主研发，提高国家的半导体设计和制造能力。

（4）以色列、巴基斯坦、俄罗斯寻求多元化指令集架构共同发展。2017 年，以色列国家创新局成立 GenPro 工作组，旨在开发基于 RISC-V 的快速、高效且独立的处理平台。2019 年，巴基斯坦政府宣布将 RISC-V 列为国家级“首选架构”（preferred architecture）。2021 年，俄罗斯公布了一项以 RISC-V 部件为中心的国家数字化计划，该计划基

于俄罗斯自研 Elbrus 芯片进行 RISC-V 部件扩展研究。

（5）中国试图通过 RISC-V 打破芯片领域技术封锁。2021 年，在《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，我国首次明确将“开源”列入五年发展规划；“十四五”期间，将支持数字技术开源社区等创新联合体发展，完善开源知识产权和法律体系，鼓励企业开放软件源代码、硬件设计和应用服务。同时，各级政府也积极布局 RISC-V 架构芯片。2018 年 7 月，上海市经济和信息化委员会发布的《上海市经济信息化委关于开展 2018 年度第二批上海市软件和集成电路产业发展专项资金（集成电路和电子信息制造领域）项目申报工作的通知》将 RISC-V 相关产业列入政府产业扶持对象，而从事 RISC-V 架构相关设计和开发的公司将获得政策倾斜。2020 年 2 月，广东省人民政府办公厅印发的《加快半导体及集成电路产业发展若干意见的通知》中明确将 RISC-V 芯片设计列入广东省重点发展方向。2021 年 11 月，北京市委市政府印发《北京市“十四五”时期国际科技创新中心建设规划》，明确指出要研发基于 RISC-V 的区块链专用加速芯片，进一步提高芯片集成度，提高大规模区块链算法性能。

2 我国 RISC-V 架构芯片领域的重要研究方向态势与热点

（1）学术界和产业界日益重视 RISC-V 的安全体系结构设计及验证。处理器安全对设备隐私信息的保护至关重要；设计 RISC-V 安全处理器及安全验证是 RISC-V 领域乃至体系结构领域的研究热点。特权模式和物理内存保护是安全嵌入式处理器的必备特性，RISC-V 指令集架构也采用特权模式来保障处理器的安全；同时，该架构提供了物理内存保护单元（PMP）实现内存访问控制以保证内存安全。其中，北京信息科技大学和清华大学微电子学研究所焦芃源等^[1]以一款 32 位 RISC-V 安全处理器为研究对象，通过异常处

理程序对处理器状态、异常信息进行观测，提出了一套 RISC-V 特权模式和物理内存保护功能的测试方案；天津大学微电子学院刘强等^[2]设计了一种抗功耗分析攻击的 RISC-V 处理器的实现方法；上海交通大学并行与分布式系统研究所开发了基于 RISC-V 架构的全新可信执行环境“蓬莱”。同时，产业界许多公司以扩展硬件 IP 模块的方式推出安全解决方案，包括加密库、信任根、安全库等。

（2）深耕物联网等新兴领域，特定领域专用 RISC-V 芯片蓬勃发展。当前，X86 和 ARM 两大指令集分别主宰了服务器+个人电脑（PC）和嵌入式移动设备；同时，物联网（IoT）、智联网（AIoT）等应用领域正在为 RISC-V 的发展提供新的机遇。RISC-V 架构能为物联网行业带来显著的灵活性和成本优势，同时也能推动异构计算系统的快速发展，因而能够适应智能物联网时代下的大容量万亿设备互联，场景丰富及碎片化和多样化需求。RISC-V 在加速器和专用处理器领域，主要应用包括航天器的宇航芯片设计，面向物联网的智能芯片，面向安全的芯片，用作服务器上的主板管理控制器，以及图形处理器（GPU）和硬盘内部的控制器等。学术界，如中国科学院计算技术研究所（以下简称“计算所”）泛在计算团队，开展了基于 RISC-V 核心的轻量级神经网络处理器的研究，探索了 RISC-V 内核在物联网设备中的应用；上海市北斗导航与位置服务重点实验室则开展了基于 RISC-V 指令集的基带处理器扩展研究项目。而产业界则在控制领域与物联网领域涌现出大量的基于 RISC-V 的产品和应用案例。例如，阿里平头哥半导体有限公司的开源玄铁 RISC-V 系列处理器已应用于微控制器、工业控制、智能家电、智能电网、图像处理、人工智能、多媒体和汽车电子等领域。

（3）寻求突破物联网生态，探索进入服务器、高性能处理器领域。目前，RISC-V 的研究及应用领域主要集中在以物联网为基础的工业控制、智能电

网等多场景。但 RISC-V 因其本身低功耗、低成本特性，具备进入服务器、高性能领域的潜力。服务器定制化及 HPC 对加速器和异构平台的需求增加，为 RISC-V 进入服务器和 HPC 领域提供了机会。计算所包云岗提出产业界可利用 AMD 公司的 Chiplet（小芯片）方式将中央处理器（CPU）、加速器、输入/输出（I/O）放在不同晶圆上，其中 CPU 部分使用 RISC-V 架构，用 Chiplet 方式组成一个服务器芯片，以进入服务器市场。2021 年 6 月，计算所包云岗团队推出“香山”开源高性能 RISC-V 处理器核。它第一版架构代号“雁栖湖”，基于 28 nm 工艺流片。这标志着在计算所、鹏城实验室的技术支持下，国内发起的高性能 RISC-V 处理器开源项目正式诞生。

3 我国发展 RISC-V 架构芯片的问题与建议

（1）积极参与构建 RISC-V 生态，争取更多 RISC-V 生态话语权。CPU 架构的影响力主要依赖其生长的一整套生态系统。2015 年，RISC-V 基金会成立，RISC-V 很快便获得多家半导体企业及多国政府的支持，拥有了大量开源实现和流片案例，产业生态逐步进入快速发展期。目前，我国本土已建立了两大 RISC-V 联盟，阿里巴巴公司、华为公司、计算所、中国科学院软件研究所、清华大学、浙江大学等国内机构也已相继加入 RISC-V 芯片研发阵营并发布多款 RISC-V 芯片产品。虽然中国学术界和产业界已成为推动 RISC-V 生态发展的重要力量，但在两方面仍有很大的进步空间：**① 原始创新。**目前，国内 RISC-V 开源社区的参与者数量较多，但原始创新较少，应用较多。因而，社区参与者应当更加注重原始创新，助力我国由开源大国迈向开源强国。**② 前沿研究。**目前，国内学术界基于 RISC-V 开展的前沿研究依然偏少。**建议：**我国应从产业和学术界发力原创性研究及前沿研究，促进更多有影响力的研究产出，增加 RISC-V 生态话语权。此外，软件生态的构建也至关重要。例如，

在 EDA 领域，目前 RISC-V 处理器应用场景对芯片制程要求较低。国内可以借此通过开源方式建立 EDA 社区，汇聚人才，加速国内 EDA 行业发展。

(2) 适当聚焦 RISC-V 架构，加快发展中国芯片产业体系。目前，国内处理器产业及科研领域所采用的指令集包罗万象，学术界和产业界基于 ARM、MIPS、PowerPC、SPARC、RISC-V、X86 等多种指令集进行了扩展。但多样化的指令集必然会分散基础软件开发力量，导致编译、操作系统等基础软件开发者由于精力有限而无法兼顾多种指令集的优化，延缓自主生态的建设。近几年，随着 RISC-V 基金会从美国迁至瑞士，其治理架构发生重大变化，我国科研机构和企业 RISC-V 基金会理事会高级别会员的比例显著提高。我国在 RISC-V 生态中的影响力日益增长，这为我国芯片产业的发展提供了新的机遇，以及开发新赛道的可能性。**建议：**我国在目前暂无成熟自主指令集架构的情况下，应抓住开源 RISC-V 架构兴起的机遇，调整芯片领域技术路线和产业政策，适当聚焦 RISC-V 架构，加快发展中国芯片产业体系。

(3) 促进 RISC-V 在处理器教育领域的应用，培养芯片设计人才。芯片领域的创新门槛高、投入大，严重阻碍了领域创新研究。芯片设计及制造的多个环节都需要巨额的资金与大量的人力投入。这种高门槛导致人才储备不足，因此如何能够降低芯片设计门槛成为亟待解决的问题。RISC-V 的开源性降低了创新投入门槛，发展开源芯片/硬件成为中国培育设计人才的新发展模式。2019 年 8 月，中国科学院大学启动了“一生一芯”计划，其目标是通过让本科生设计处理器芯片并完成流片，培养具有扎实理论与实践经验的处理器芯片设计人才。该计划是国内首次以流片为目标的计划，由 5 位 2016 级本科生主导完成一款 64 位 RISC-V 处理器 SoC 芯片设计并实现流片。事实上，学生是 RISC-V 整个生态建设中不可或缺的力量；

包括上海科技大学在内的许多国内院校都在与企业一同培养人才，通过课程作业设计与企业研发相关联，将企业最新的技术及时引入课堂，充分发挥开源化的优势。**建议：**国家教育管理机构应当积极推进 RISC-V 产学研相结合的发展模式，培育更多芯片设计人才。

(4) 政府在大力支持 RISC-V 发展的同时应对其保持一定的警戒。RISC-V 虽然开源，但其最初的研究得益于美国 DARPA 的支持。2020 年，基于持续保证对开源技术和软件的支持及规避可能带来的政治风险等诸多因素的综合考量，RISC-V 基金会总部由美国搬迁到瑞士。2021 年，Intel 公司提出以 20 亿美元的收购 RISC-V 领域的明星公司 SiFive，引发业界担忧。该笔交易可能会像 NVIDIA 公司欲收购 ARM 而影响 ARM 的中立性那样，让原本开源的 RISC-V 新增专利壁垒。**建议：**我国政府和业界应当保持一定的危机感和警戒性，时刻关注 RISC-V 全球动态，快速分析可能存在的风险并及时做出调整。

参考文献

- 1 焦芃源, 李涵, 李翔宇, 等. 一款安全 RISC-V RISC-V 处理器特权模式和内存保护测试. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(3): 82-87.
- Jiao P Y, Li H, Li X Y, et al. Tests of privileged modes and memory protection for a secure RISC-V processor. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2021, 36(3): 82-87. (in Chinese)
- 2 刘强, 刘斌, 草卢世雄, 等. 抗功耗分析攻击的安全 RISC-V 处理器研究. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(8): 868-874.
- Liu B, Shi X, Sai B, et al. Research on the secure RISC-V processor against a power analysis attack. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(8): 868-874. (in Chinese)

■ 责任编辑：文彦杰