

浅谈RISC-V指令集



中国科学院 信息工程研究所
INSTITUTE OF INFORMATION ENGINEERING, CAS

宋威

2018年6月22日

内容简介

- RISC-V指令集
计算机体系结构与微结构、指令集分类、扩展、指令集设计思路等等。
- RISC-V基金会
RISC-V基金会、RISC-V的商业模式、RISC-V商标和兼容性测试。
- RISC-V在中国的发展

什么是RISC-V

- RISC-V是加州伯克利大学研发的第五代精简指令集（RISC）。
 - Krste Asanovic, 加州伯克利教授, RISC-V基金会主席。
 - David Patterson, 量化分析一书的作者, RISC概念的提出者, 图灵奖获得者。
 - Andrew Waterman, SiFive首席工程师, Rocket处理器的作者。
 - Yunsup Lee, SiFive首席技术官, Rocket处理器的作者。
- RISC-V是一个开放指令集。
 - 体系结构≠处理器设计。
 - RISC-V只定义了软件和硬件的接口, 而并不定义具体处理器实现。
 - RISC-V的设计是仔细考虑了硬件和软件实现的代价。
 - RISC-V是开放的, 免费的, 但是遵循RISC-V标准设计的CPU不一定开放并免费。
- RISC-V是一个全新的指令集
 - RISC-V在加州伯克利内部使用了好几年, 然后于2014年公开。
 - RISC-V指令集的设计吸取了过去几十年来各类指令集（Alpha, ARM, MIPS, Power, x86等）成功和失败的经验教训
 - RISC-V是一个模块化可扩展的指令集。能够支撑面向从IoT到高性能计算的所有应用。

RISC-V的设计思路

- 简单的硬件支持最核心的指令功能。
 - 基本指令集的编码设计支持高效的指令解码硬件。
 - 所有基本指令都是单周期指令（不支持多周期指令）。
 - 不使用条件执行指令，简化处理器控制逻辑。
 - 不支持缓存直接控制指令，简化一致性处理。
 - 支持安全的新特性（SMAP/SMEP/KPTI）。
 - 简单的通过16/32-bit混和指令长度就可以达到和X86、ARMv8同样的指令密度
- 可扩展的指令集设计
 - 两个基本指令集（RV32和RV64）支持所有的基本功能。
 - 支持多种指令长度（16/32/48/64）
 - C：压缩指令集,16比特比特指令，面向超小系统和高性能系统。
 - A：原子操作指令集；M：整数乘除指令集。
 - F：单精度浮点计算；D：64位双精度浮点计算；Q：128位浮点计算指令集。
 - B：比特处理指令集；P：Packed SIMD指令集；V：vector指令集。
 - J：动态翻译（Dynamic Binary Translation）指令集。

RISC-V的编码设计

- 指令功能编码在地位（提前辨别16/32/48比特指令）。
- 源/目的寄存器地址位置恒定，便于硬件提取。
- 立即数比特位置尽量对齐，便于硬件提取。

31	30	25	24	21	20	19	15	14	12	11	8	7	6	0	
funct7				rs2			rs1	funct3		rd			opcode		R-type
imm[11:0]							rs1	funct3		rd			opcode		I-type
imm[11:5]				rs2			rs1	funct3		imm[4:0]			opcode		S-type
imm[12]	imm[10:5]			rs2			rs1	funct3		imm[4:1]	imm[11]	opcode			B-type
imm[31:12]										rd			opcode		U-type
imm[20]	imm[10:1]			imm[11]			imm[19:12]			rd			opcode		J-type

RISC-V 指令编码

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10		
-	-	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	UNALLOCATED
-	-	-	1	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Data processing - immediate
-	-	-	1	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Branch, exception generation and system instructions
-	-	-	-	1	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Loads and stores
-	-	-	-	1	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Data processing - register
-	-	-	0	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Data processing - SIMD and floating point
-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Data processing - SIMD and floating point

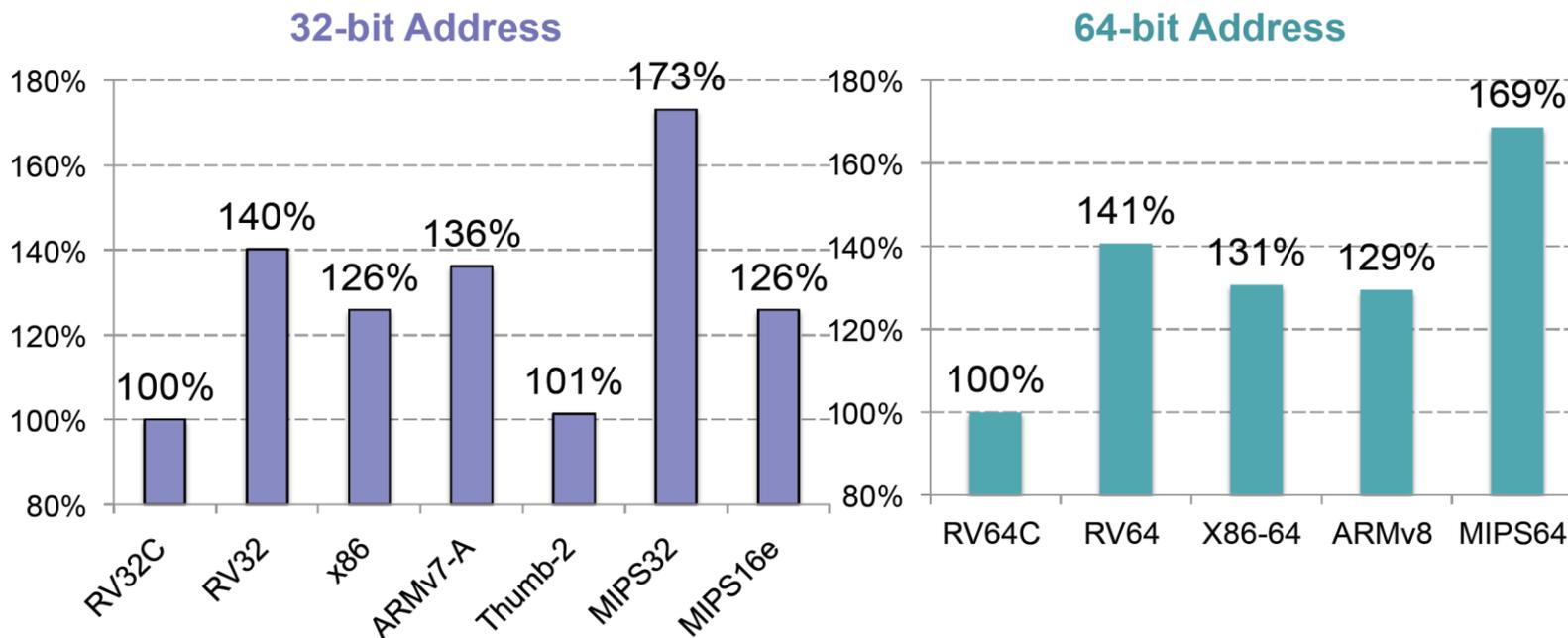
ARM v8-A 指令编码

RISC-V指令的选取

- RV32/64I 指令数<50, 简单的硬件支持最核心的指令功能。
- 支持高性能乱序处理器
 - 所有的指令都是单周期指令
方便指令调度。
 - 没有条件执行指令 (Predicated instructions)
条件执行指令将控制引入了数据依赖, 调度复杂, 只在短小的条件执行片段有优势。当分支预测准确度提升之后, 没有性能提高。
 - 没有多寄存器压栈和取栈指令
多周期指令使得调度更加复杂, 硬件更加复杂, 可以通过millicode达到类似的代码密度, 没有实际优势。
- 支持嵌入式处理器
 - 所有的指令都是单周期指令
执行时间确定。
 - 支持压缩指令
通过benchmark选择最常用的压缩指令子集。
 - 支持RV32E嵌入式指令集
通过减少通用寄存器数量至16减小指令编码空间。

RVC压缩指令

- 每一条RVC指令对应一条RV指令
 - 硬件只需要扩展处理器缓存对RVC的翻译即可，不需更改解码和执行单元
 - RVC指令的插入变成了简单替换，可由连接器完成
 - 支持RVC和RV指令的混放



支持micro-op fusion

- 处理器在一个周期执行两条指令
 - 不引入新的依赖关系
 - 不引入新的寄存器读口
 - 当作一条新的指令处理，只需扩展指令译码器
- 例子：
 - 远函数调用 `jal 0xFFFFF804`
`lui ra, 0xFFFF; jalr ra, ra, 0x804`
 - 数组下标取值
`// rd = array[offset], x1 = &(array), x2 = offset`
`add x1, x1, x2; ld rd, 0(x1)`
`c.add x1, x1, x2; c.ld rd, 0(x1) // 32-bit`
- 使用micro-op fusion + RVC可以构造新的32bit指令

支持系统页表分离KPTI

- 为了防止攻击者利用Meltdown漏洞读取系统页数据，RISC-V将在RISC-V priv (特权)标准 v1.2中加入KPTI支持，分离系统页表和用户也表。
 - 所有的进程共享一个系统页表(satp)
 - 每一个用户进程使用独立的用户也表(suatp)
 - 仍然支持共享页表系统
- RISC-V的实现方式
 - 系统写satp时会同时写suatp: 当系统页表被初始化时，默认用户页表失效，选择共享页表模式
 - 系统写suatp则只改变用户也表: 支持用户也表只需要多一条CSR写操作
 - 如果使用共享页表方式，使用satp即可
 - 如果使用分离页表，进程上下文保存suatp即可（上下文操作没有本质改变）
 - 系统和用户使用不同的ASID
- RISC-V在定义扩展时会充分考虑兼容现有处理器实现

缓存控制指令

- RISC-V现在并没有缓存控制指令：flush, prefetch
- 支持微处理器（scratchpad）和高性能服务器（榨取cache性能）
- 缓存控制指令的草案第5版
 - FENCE(有的架构也叫barrier)
 - 预取
 - 缓存锁定(把部分缓存的区域变成scratchpad)
 - 缓存清理(flush)
 - 其他破坏性缓存操作
 - MEM.DISCARD 直接失效缓存区域（数据丢失，用于抛弃无用数据而避免写回）
 - MEM.REWRITE 为写操作直接初始化缓存区域而不读取数据（已知数据会被彻底覆盖时，可以直接创建缓存数据同时标记已修改）
- 基本原则
 - 所有的缓存指令都必须是hint，可以当作NOP处理

其他已接受/讨论中的扩展

- 调试指令扩展
 - 支持semi-host, 使用调试器当I/O
- 内存模型定义
 - 默认RVWMO 弱内存模型, 可支持RVSTO 强模型
- Vector/Packed-SIMD
- Microcontroller profile (RV32E)
- 快速中断

RISC-V的组织形式

- Krste Asanovic 是RISC-V商标的所有者。
 - Krste授权RISC-V基金会使用RISC-V商标。
 - 防止RISC-V基金会被大公司或者政府控制，最后的杀手锏。
- RISC-V基金会是RISC-V标准的管理机构
 - 在美国成立的非盈利组织，采取会员制。
 - RISC-V董事会成员在RISC-V的白金会中差额选举产生。
 - RISC-V董事会审核由工作小组提交的指令集扩展草案并组织投票。
 - RISC-V下设技术委员会和市场委员会。
- RISC-V技术委员会和市场委员会
 - 由RISC-V的可投票会员选举产生，负责管理RISC-V工作小组和市场营销。
- RISC-V工作小组
 - 由RISC-V会员组成，讨论并起草RISC-V指令集扩展草案。

RISC-V的会员

- RISC-V独立会员 (Individual)
 - 可以参加工作小组讨论。
 - 99美元每年。
- RISC-V旁观会员 (Audit)
 - 可以参加工作小组和委员会，但不可以投票。
 - 2,500美元每年。
- RISC-V白银会员 (Silver)
 - 可以参与投票。
 - 5,000美元每年。
- RISC-V黄金会员 (Gold)
 - 可以成为工作小组主席。
 - 10,000美元每年。
- RISC-V白金会员 (Platinum)
 - 可以入选为RISC-V董事会成员。
 - 25,000美元每年。

RISC-V的会员（非官方解释）

- 所有的RISC-V会员都必须签署RISC-V的会员协议（by-law）。
 - 会员协议规定了会员的年费、投票权、参与权等等。
 - 会员协议规定了会员不可以保护其对RISC-V标准的贡献。即会员不可以专利化其对RISC-V标准的贡献，从而在将来索取专利费。
 - 会员之间不可以互诉对方侵犯其关于RISC-V的专利。

RISC-V扩展指令集的产生

- RISC-V技术委员会或市场委员会成立工作小组。
- 工作小组选取自己的主席（必须是黄金或白金会员）和副主席，制定标准扩展草案的轮廓。
- 当工作小组完成标准草案，草案向公众（非基金会成员）公布45天，搜集意见。
- 45天后，工作小组根据搜集的意见，选择做出改动然后递交基金会审阅，或重新编写草案重新公布。
- 如果提交基金会，工作小组必须对公示期内的所有意见提供反馈，并且对组内的反对意见给出解释。
- 如果草案被提交基金会，基金会董事会将根据草案和意见反馈决定是否展开投票。（董事会每月会举行一次）
- 如果投票通过，草案成为标准的一部分。

RISC-V的商业模式

- RISC-V是一个非盈利组织。
 - RISC-V基金会管理RISC-V指令集标准的制定，本身不从标准获利。
 - RISC-V基金会保证RISC-V指令集标准是开放并免费获取的。
 - RISC-V指令集的使用是免费的（有条件，见下）。
 - 声称兼容RISC-V指令集的处理器需要通过RISC-V兼容性测试。
 - 在商业产品中使用RISC-V商标需要成为RISC-V基金会成员。
 - （例外）在非商业研究和学术项目中可以免费使用RISC-V商标。
 - RISC-V对处理器本身的商业形式没有任何限制。

RISC-V的主要会员

- 白金会员：
 - 谷歌: TPU
 - Microsemi: FPGA
 - nVidia: GPU controller, (安全扩展)
 - 西部数据: SD controller
 - 高通, Rambus, Marvell, Micron Technology, NXP, 三星, SiFive, UC Berkeley, 中兴微电子
- IC公司
 - BAE Systems, 晶心科技(快速中断, ABI, GCC, LLVM), MediaTek, Lattice, 西门子, 华为, VeriSilicon, CEVA, Dolphin Integration, GlobalFoundries, IAR Systems, QuickLogic, 希捷, C-sky
- EDA公司
 - Bluespec, UltrasoC, Imperas, Mentor
- 其他
 - IBM, 特斯拉
- 中国公司
 - 华为, VeriSilicon, 中科院计算所, 中兴微电子, C-sky

一些较有名的RISC-V处理器实现

- Rocket
 - UC Berkeley, SiFive, lowRISC
 - 6级有序流水线, Chisel实现, SiFive的主打产品, 对标ARM Cortex-A53
 - 多次流片
- BOOM
 - UC Berkeley
 - 乱序流水线, Chisel实现, 对标ARM Cortex-A57
 - 多次流片
- PULP
 - ETH Zurich
 - 从1级到5级流水线, SystemVerilog实现, AXI总线, 低功耗, 微控制器。
 - 多次流片验证。

一些较有名的RISC-V处理器实现

- GRVI
 - Jan Gray针对FPGA高度优化的微处理器
 - Verilog设计，250~320 LUT
 - 在一个FPGA上实现1240个处理器的互联。
 - 商用授权，非开源。
- PicoRV32
 - Clifford Wolf设计的可流片的微处理器小核
 - Verilog设计，700~2000 LUT
 - >1GHz 主频，但是CPI在4~6之间。
- SHAKTI
 - 印度的国家处理器计划，选择RISC-V为国家指令集
 - 从微处理到服务器级别的处理器设计
 - Bluespec设计

CNRV

- CNRV: RISC-V @ China
 - CNRV通过微信群、网站和公众号，与大部分国内RISC-V的使用者、参与者和爱好者建立了联系，包括软件/IC/硬件开发者、爱好者、相关公司高管、高校研究人员以及投资人等。
 - 每两周通过网站和公众号发布《CNRV双周简报》，向中文读者介绍和总结RISC-V相关领域的最新进展，可理解为RISC-V大参考~
 - CNRV网站搜集关于RISC-V的各种信息，为国内的RISC-V使用人员提供帮助。
- CNRV的主要成员
 - **郭雄飞**: 景略半导体（上海）设计总监，RISC-V独立会员，CNRV微信群的管理员，RISC-V双周简报编辑，国内最早接触和推广RISC-V的人。
 - **黄柏玮**: 国立台湾大学咨询网路与多媒体研究所硕士，RISC-V独立会员，RISC-V调试小组和原比特操作小组成员，脸书RISC-V@Taiwan小组管理员。
 - **宋威**: 中科院信工所副研究员，原lowRISC工程硬件负责人，RISC-V双周简报编辑。

CNRV的网站

- <https://cnrv.io/>
- RISC-V双周简报
- 资源列表
- RISC-V镜像服务

- 访问量：
每月访问次数~1100次

关于

本站点希望能够为国内的RISC-V开发者和爱好者提供便利。

RISC-V双周简报

国内的RISC-V爱好者利用Github协作的方式，以双周简报的方式为大家带来最新的RISC-V相关资讯，同时在微信公众号和CNRV站点上发布。内容覆盖RISC-V邮件列表、行业新闻、项目进展以及各类点评。也欢迎大家关注CNRV公众号获取最新信息。

- [第0x15弹\(2018-04-13\): 第八届Workshop会议议程公布](#)
- [第0x14弹\(2018-03-30\): 宗师获图灵奖实质名归](#) [繁体]
- [第0x13弹\(2018-03-16\): 想把事情做简单可不是那么简单的事情](#) [繁体]
- [第0x12弹\(2018-03-02\): 看看AI和RISC-V碰撞出的火花](#) [繁体]
- [第0x11弹\(2018-02-15\): 跑Linux的CPU一次来俩](#) [繁体]
- [第0x10弹\(2018-02-01\): 走在'时尚的前沿'](#) [繁体]
- [第0x09弹\(2018-01-18\): Google开源RISC-V CPU](#) [繁体]
- [第0x0e弹\(2018-01-04\): Intel漏洞是非多!](#) [繁体]
- [第0x0d弹\(2017-12-21\): Esperanto Technologies会成功么?](#) [繁体]
- [第0x0c弹\(2017-12-07\): Workshop上干活多多](#) [繁体]
- [第0x0b弹\(2017-11-23\): 3家RISC-V相关的公司上榜'EE Times Silicon 60: Startups to Watch'](#) [繁体]
- [往期存档](#)

文章列表

- [2017-10-12: RISC-V 双周简报问卷调查结果分析](#)

资源列表

- [RISC-V 资料搜集页面](#)
- [RISC-V 参考文献页面](#)

如何在国内快速搭建SiFive的Freedom环境

下载freedom/rocket-chip/riscv-tools完整压缩包

因为国内用户访问github比较慢，而且clone过后submodule更加慢，以下的压缩包是在clone了freedom之后，执行git submodule update --init --recursive之后打包的。所以已经以submodule的形式包含了rocket-chip和riscv-tools以及下面的诸多submodules。

网盘中还新增了freedom-e-sdk和freedom-u-sdk的完整压缩包。

- [百度网盘freedom/rocket-chip/riscv-tools完整打包文件](#)
 - GitHash: ec70d85
 - MD5Sum: b3643841ff41083f004871359dd3ffe4
 - 打包时间: 2017-Aug-19
- [百度网盘freedom-e-sdk完整打包文件](#)
 - GitHash: fcbcd44
 - MD5Sum: 1b5c97dd71918cfaa1c43fb7f38ecade

CNRV的资源列表

- <https://cnrv.io/resource>
- 已经搜集了26个RISC-V处理器设计。其中开源设计23个。
- 操作系统
- 开发工具
- 验证环境
- 文档

CNRV
为推广RISC-V尽微薄力

View On GitHub

RISC-V资源列表

处理器实现

- BOOM: Christopher Celic的RV64乱序处理器实现。Chisel, BSD Licensed。 [GitHub] [Doc]
- BottleRocket: RV32IMC微处理器。Chisel, Apache Licensed。 [GitHub]
- bwitherspoon: RV32微处理器。SystemVerilog, ISC Licensed。 [GitHub]
- Clarvi: 剑桥大学教学用RISC-V处理器。SystemVerilog, BSD Licensed。 [GitHub]
- F32: 针对FPGA的RV32微处理器。VHDL, BSD Licensed。 [GitHub]
- GRV1: Gray Research LLC. 针对FPGA优化的RV32微处理器, commercial licensed。 [Web]
- Hummingbird E200. 二级流水线, 目标替代Cortex-M0/8051, Verilog, Apache 2.0 licensed。 [GitHub]
- invicta: 一级流水线的RV32微处理器。Verilog, BSD Licensed。 [GitHub]
- Kamikaze: RV32微处理器。Verilog, MIT Licensed。 [GitHub]
- KCP53000: Samuel A. Falvo II的RV64处理器实现。Verilog, MPL Licensed。 [GitHub]
- nanorv32: 2机流水线的RV32实现。Verilog, GPLv2 Licensed。 [GitHub]
- OpenV: 支持RV32的开源微处理器, Verilog, MIT Licensed, OnChipUIS, 来源于哥伦比亚的Universidad Industrial de Santander。 [GitHub]
- ORCA: 支持RV32的开源微处理器, VHDL, BSD Licensed, VectorBlox。 [GitHub]
- PicoRV32: Clifford Wolf设计的(针对FPGA)RV32微处理器, Verilog, ISC Licensed。 [GitHub]
- Potato: 针对FPGA的RV32微处理器。VHDL, BSD Licensed。 [GitHub]
- RISCY: 支持RV32的开源微处理器
 - PULPino: SystemVerilog, Solderpad Licensed, 来源于苏黎世理工和博洛尼亚大学的PULP项目。 [GitHub] [Web]
- RIDERCORE: RISC-V乱序处理器设计。Verilog, BSD Licensed。 [GitHub]
- River: GNSS Sensor Ltd. 基于Rocket架构开发的RV64处理器。VHDL, BSD Licensed。 [GitHub]
- Rocket: 支持RV64/32的开源处理器
 - Rocket-Chip: Chisel, BSD Licensed, Free chips project, UC Berkeley分离的开源工程。 [GitHub]
 - Freedom: Chisel, Apache Licensed, SiFive, UC Berkeley分离的初创企业。 [GitHub] [Web]
 - lowRISC: Chisel+SystemVerilog, Solderpad Licensed, 从剑桥大学发起的非盈利组织。 [GitHub] [Web]
 - RoCC: the Rocket customized coprocessor interface 和Rocket处理器紧密互联的协处理器接口。 [BSG]
- RV12: RoaLogic的RV32微处理器。Verilog, RoaLogic non-commercial Licensed。 [GitHub]
- SCR1: Syntacore的RV32开源微处理器。SystemVerilog, Solderpad Licensed。 [GitHub]

CNRV的微信群和双周简报

- 受500人人数上限限制，现在已经有3个子群，约1000人。
- 每天的活跃用户~100人，消息约500~2000条每天。
- 微信公众号的关注到~1100人，日增长~10人。
- 双周简报的阅读数量在~600人，已经有了21期。

RISC-V在中国的发展情况

- 大家都非常关心，讨论热烈。
- 小公司已经启用，大公司蠢蠢欲动。
- 已有自己的能跑RISC-V的处理器
 - 蜂鸟200系列（胡振波） https://github.com/SI-RISCV/e200_opensource
 - 对标ARM Cortex-M0
- 6月30日，上海 RISC-V Day!
 - <https://tmt.knect365.com/risc-v-day-shanghai/>
 - 16个主题演讲



中国科学院 信息工程研究所
INSTITUTE OF INFORMATION ENGINEERING, CAS

Thank You!