

附录 A RISC-V 指令列表

Coco Chanel (1883–1971) 香奈儿时装品牌的创始人，她对昂贵的简约的追求塑造了 20 世纪的时尚。



简约是一切真正优雅的要义。——Coco Chanel, 1923

本附录列出了 RV32/64I 的所有指令、本书中涵盖的所有扩展 (RVM、RVA、RVF、RVD、RVC 和 RVV) 以及所有伪指令。每个条目都包括指令名称、操作数、寄存器传输级定义、指令格式类型、中文描述、压缩版本 (如果存在)，以及一张带有操作码的指令布局图。我们认为这些摘要对于您了解所有的指令已经足够，但如果您想了解更多细节，请参阅 RISC-V 官方规范 [Waterman and Asanovic 2017]。

为了帮助读者在本附录中找到所需的指令，左侧 (奇数) 页面的标题包含该页顶部的第一条指令，右侧 (偶数) 页面的标题包含该页底部的最后一条指令。格式类似于字典的标题，有助于您搜索单词所在的页面。例如，下一个偶数页的标题是 **AMOADD.W**，这是该页的第一条指令；下一个奇数页的标题是 **AMOMINU.D**，这是该页的最后一条指令。如下是你在这两页中找到的指令：amoadd.w、adoand.d、amoadn.w、amomax.d、amomax.w、amomaxu.d、amomaxu.w、amomin.d、amomin.w 和 amominu.d。

add rd, rs1, rs2

$$x[rd] = x[rs1] + x[rs2]$$

加 (Add). R-type, RV32I and RV64I.

把寄存器 $x[rs2]$ 加到寄存器 $x[rs1]$ 上，结果写入 $x[rd]$ 。忽略算术溢出。

压缩形式: **c.add** rd, rs2; **c.mv** rd, rs2

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000000	rs2	rs1	000	Rd	0110011	

addi rd, rs1, immediate

$$x[rd] = x[rs1] + \text{sext}(\text{immediate})$$

加立即数 (Add Immediate). I-type, RV32I and RV64I.

把符号位扩展的立即数加到寄存器 $x[rs1]$ 上，结果写入 $x[rd]$ 。忽略算术溢出。

压缩形式: **c.li** rd, imm; **c.addi** rd, imm; **c.addi16sp** imm; **c.addi4spn** rd, imm

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
immediate[11:0]	rs1	000	rd	0010011	

addiw rd, rs1, immediate

$$x[rd] = \text{sext}((x[rs1] + \text{sext}(\text{immediate})))[31:0]$$

加立即数字 (Add Word Immediate). I-type, RV64I.

把符号位扩展的立即数加到 $x[rs1]$ ，将结果截断为 32 位，把符号位扩展的结果写入 $x[rd]$ 。忽略算术溢出。

压缩形式: **c.addiw** rd, imm

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
immediate[11:0]	rs1	000	rd	0011011	

addw rd, rs1, rs2

$$x[rd] = \text{sext}((x[rs1] + x[rs2]))[31:0]$$

加字 (Add Word). R-type, RV64I.

把寄存器 $x[rs2]$ 加到寄存器 $x[rs1]$ 上，将结果截断为 32 位，把符号位扩展的结果写入 $x[rd]$ 。忽略算术溢出。

压缩形式: **c.addw** rd, rs2

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000000	rs2	rs1	000	rd	0111011	

amoadd.d rd, rs2, (rs1)

$$x[rd] = \text{AMO64}(\text{M}[x[rs1]] + x[rs2])$$

原子加双字 (Atomic Memory Operation: Add Doubleword). R-type, RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的双字记为 t ，把这个双字变为 $t+x[rs2]$ ，把 $x[rd]$ 设为 t 。

31	27	26	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
00000	aq	rl	rs2	rs1	011	rd	0101111	

amoadd.w rd, rs2, (rs1)

$$x[rd] = \text{AMO32}(M[x[rs1]] + x[rs2])$$

原子加字 (*Atomic Memory Operation: Add Word*). R-type, RV32A and RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的字记为 t ，把这个字变为 $t+x[rs2]$ ，把 $x[rd]$ 设为符号位扩展的 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
00000	aq	rl	rs2	rs1	010	rd	0101111						

amoand.d rd, rs2, (rs1)

$$x[rd] = \text{AMO64}(M[x[rs1]] \& x[rs2])$$

原子双字与 (*Atomic Memory Operation: AND Doubleword*). R-type, RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的双字记为 t ，把这个双字变为 t 和 $x[rs2]$ 位与的结果，把 $x[rd]$ 设为 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
01100	aq	rl	rs2	rs1	011	rd	0101111						

amoand.w rd, rs2, (rs1)

$$x[rd] = \text{AMO32}(M[x[rs1]] \& x[rs2])$$

原子字与 (*Atomic Memory Operation: AND Word*). R-type, RV32A and RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的字记为 t ，把这个字变为 t 和 $x[rs2]$ 位与的结果，把 $x[rd]$ 设为符号位扩展的 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
01100	aq	rl	rs2	rs1	010	rd	0101111						

amomax.d rd, rs2, (rs1)

$$x[rd] = \text{AMO64}(M[x[rs1]] \text{ MAX } x[rs2])$$

原子最大双字 (*Atomic Memory Operation: Maximum Doubleword*). R-type, RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的双字记为 t ，把这个双字变为 t 和 $x[rs2]$ 中较大的一个（用二进制补码比较），把 $x[rd]$ 设为 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
10100	aq	rl	rs2	rs1	011	rd	0101111						

amomax.w rd, rs2, (rs1)

$$x[rd] = \text{AMO32}(M[x[rs1]] \text{ MAX } x[rs2])$$

原子最大字 (*Atomic Memory Operation: Maximum Word*). R-type, RV32A and RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的字记为 t ，把这个字变为 t 和 $x[rs2]$ 中较大的一个（用二进制补码比较），把 $x[rd]$ 设为符号位扩展的 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
10100	aq	rl	rs2	rs1	010	rd	0101111						

amomaxu.d rd, rs2, (rs1) $x[rd] = \text{AMO64}(M[x[rs1]] \text{ MAXU } x[rs2])$

原子无符号最大双字 (*Atomic Memory Operation: Maximum Doubleword, Unsigned*). R-type, RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的双字记为 t ，把这个双字变为 t 和 $x[rs2]$ 中较大的一个（用无符号比较），把 $x[rd]$ 设为 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
11100	aq	rl	rs2	rs1	011	rd	0101111						

amomaxu.w rd, rs2, (rs1) $x[rd] = \text{AMO32}(M[x[rs1]] \text{ MAXU } x[rs2])$

原子无符号最大字 (*Atomic Memory Operation: Maximum Word, Unsigned*). R-type, RV32A and RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的字记为 t ，把这个字变为 t 和 $x[rs2]$ 中较大的一个（用无符号比较），把 $x[rd]$ 设为符号位扩展的 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
11100	aq	rl	rs2	rs1	010	rd	0101111						

amomin.d rd, rs2, (rs1) $x[rd] = \text{AMO64}(M[x[rs1]] \text{ MIN } x[rs2])$

原子最小双字 (*Atomic Memory Operation: Minimum Doubleword*). R-type, RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的双字记为 t ，把这个双字变为 t 和 $x[rs2]$ 中较小的一个（用二进制补码比较），把 $x[rd]$ 设为 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
10000	aq	rl	rs2	rs1	011	rd	0101111						

amomin.w rd, rs2, (rs1) $x[rd] = \text{AMO32}(M[x[rs1]] \text{ MIN } x[rs2])$

原子最小字 (*Atomic Memory Operation: Minimum Word*). R-type, RV32A and RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的字记为 t ，把这个字变为 t 和 $x[rs2]$ 中较小的一个（用二进制补码比较），把 $x[rd]$ 设为符号位扩展的 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
10000	aq	rl	rs2	rs1	010	rd	0101111						

amominu.d rd, rs2, (rs1) $x[rd] = \text{AMO64}(M[x[rs1]] \text{ MINU } x[rs2])$

原子无符号最小双字 (*Atomic Memory Operation: Minimum Doubleword, Unsigned*). R-type, RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的双字记为 t ，把这个双字变为 t 和 $x[rs2]$ 中较小的一个（用无符号比较），把 $x[rd]$ 设为 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
11000	aq	rl	rs2	rs1	011	rd	0101111						

amominu.w rd, rs2, (rs1)

$x[rd] = \text{AMO32}(M[x[rs1]] \text{ MINU } x[rs2])$

原子无符号最大字 (*Atomic Memory Operation: Minimum Word, Unsigned*). R-type, RV32A and RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的字记为 t ，把这个字变为 t 和 $x[rs2]$ 中较小的一个（用无符号比较），把 $x[rd]$ 设为符号位扩展的 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
11000	aq	rl	rs2	rs1	010	rd	0101111						

amoor.d rd, rs2, (rs1)

$x[rd] = \text{AMO64}(M[x[rs1]] \mid x[rs2])$

原子双字或 (*Atomic Memory Operation: OR Doubleword*). R-type, RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的双字记为 t ，把这个双字变为 t 和 $x[rs2]$ 位或的结果，把 $x[rd]$ 设为 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
01000	aq	rl	rs2	rs1	011	rd	0101111						

amoor.w rd, rs2, (rs1)

$x[rd] = \text{AMO32}(M[x[rs1]] \mid x[rs2])$

原子字或 (*Atomic Memory Operation: OR Word*). R-type, RV32A and RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的字记为 t ，把这个字变为 t 和 $x[rs2]$ 位或的结果，把 $x[rd]$ 设为符号位扩展的 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
01000	aq	rl	rs2	rs1	010	rd	0101111						

amoswap.d rd, rs2, (rs1)

$x[rd] = \text{AMO64}(M[x[rs1]] \text{ SWAP } x[rs2])$

原子双字交换 (*Atomic Memory Operation: Swap Doubleword*). R-type, RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的双字记为 t ，把这个双字变为 $x[rs2]$ 的值，把 $x[rd]$ 设为 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
00001	aq	rl	rs2	rs1	011	rd	0101111						

amoor.w rd, rs2, (rs1)

$x[rd] = \text{AMO32}(M[x[rs1]] \text{ SWAP } x[rs2])$

原子字交换 (*Atomic Memory Operation: Swap Word*). R-type, RV32A and RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的字记为 t ，把这个字变为 $x[rs2]$ 的值，把 $x[rd]$ 设为符号位扩展的 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
00001	aq	rl	rs2	rs1	010	rd	0101111						

amoxor.d rd, rs2, (rs1) $x[rd] = \text{AMO64}(M[x[rs1]] \wedge x[rs2])$

原子双字异或 (*Atomic Memory Operation: XOR Doubleword*). R-type, RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的双字记为 t ，把这个双字变为 t 和 $x[rs2]$ 按位异或的结果，把 $x[rd]$ 设为 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
00100	aq	rl	rs2	rs1	011	rd	0101111						

amoxor.w rd, rs2, (rs1) $x[rd] = \text{AMO32}(M[x[rs1]] \wedge x[rs2])$

原子字异或 (*Atomic Memory Operation: XOR Word*). R-type, RV32A and RV64A.

进行如下的原子操作：将内存中地址为 $x[rs1]$ 中的字记为 t ，把这个字变为 t 和 $x[rs2]$ 按位异或的结果，把 $x[rd]$ 设为符号位扩展的 t 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
00100	aq	rl	rs2	rs1	010	rd	0101111						

and rd, rs1, rs2 $x[rd] = x[rs1] \& x[rs2]$

与 (*And*). R-type, RV32I and RV64I.

将寄存器 $x[rs1]$ 和寄存器 $x[rs2]$ 位与的结果写入 $x[rd]$ 。

压缩形式：**c.and** rd, rs2

31	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
0000000	rs2	rs1	111	rd	0110011						

andi rd, rs1, immediate $x[rd] = x[rs1] \& \text{sext}(\text{immediate})$

与立即数 (*And Immediate*). I-type, RV32I and RV64I.

把符号位扩展的立即数和寄存器 $x[rs1]$ 上的值进行位与，结果写入 $x[rd]$ 。

压缩形式：**c.andi** rd, imm

31	20	19	15	14	12	11	7	6	0
immediate[11:0]	rs1	111	rd	0010011					

auipc rd, immediate $x[rd] = pc + \text{sext}(\text{immediate}[31:12] \ll 12)$

PC 加立即数 (*Add Upper Immediate to PC*). U-type, RV32I and RV64I.

把符号位扩展的 20 位（左移 12 位）立即数加到 pc 上，结果写入 $x[rd]$ 。

31	12	11	7	6	0
immediate[31:12]	rd	0010111			

beq $rs1, rs2, offset$ if ($rs1 == rs2$) $pc += sext(offset)$
 相等时分支 (*Branch if Equal*). B-type, RV32I and RV64I.
 若寄存器 $x[rs1]$ 和寄存器 $x[rs2]$ 的值相等, 把 pc 的值设为当前值加上符号位扩展的偏移 $offset$ 。
 压缩形式: **c.beqz** $rs1, offset$

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[12 10:5]	rs2	rs1	000	offset[4:1 11]	1100011	

beqz $rs1, offset$ if ($rs1 == 0$) $pc += sext(offset)$
 等于零时分支 (*Branch if Equal to Zero*). 伪指令(Pesudoinstruction), RV32I and RV64I.
 可视为 **beq** $rs1, x0, offset$.

bge $rs1, rs2, offset$ if ($rs1 \geq_s rs2$) $pc += sext(offset)$
 大于等于时分支 (*Branch if Greater Than or Equal*). B-type, RV32I and RV64I.
 若寄存器 $x[rs1]$ 的值大于等于寄存器 $x[rs2]$ 的值 (均视为二进制补码), 把 pc 的值设为当前值加上符号位扩展的偏移 $offset$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[12 10:5]	rs2	rs1	101	offset[4:1 11]	1100011	

bgeu $rs1, rs2, offset$ if ($rs1 \geq_u rs2$) $pc += sext(offset)$
 无符号大于等于时分支 (*Branch if Greater Than or Equal, Unsigned*). B-type, RV32I and RV64I.
 若寄存器 $x[rs1]$ 的值大于等于寄存器 $x[rs2]$ 的值 (均视为无符号数), 把 pc 的值设为当前值加上符号位扩展的偏移 $offset$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[12 10:5]	rs2	rs1	111	offset[4:1 11]	1100011	

bgez $rs1, offset$ if ($rs1 \geq_s 0$) $pc += sext(offset)$
 大于等于零时分支 (*Branch if Greater Than or Equal to Zero*). 伪指令(Pesudoinstruction), RV32I and RV64I.
 可视为 **bge** $rs1, x0, offset$.

bgt $rs1, rs2, offset$ if ($rs1 >_s rs2$) $pc += sext(offset)$
 大于时分支 (*Branch if Greater Than*). 伪指令(Pesudoinstruction), RV32I and RV64I.
 可视为 **blt** $rs2, rs1, offset$.

bgtu $rs1, rs2, offset$ if ($rs1 >_u rs2$) $pc += sext(offset)$
 无符号大于时分支 (*Branch if Greater Than, Unsigned*). 伪指令(Pesudoinstruction), RV32I and RV64I.
 可视为 **bltu** $rs2, rs1, offset$.

bgtz $rs1, offset$ if ($rs2 >_s 0$) $pc += sext(offset)$
大于零时分支 (*Branch if Greater Than Zero*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
可视为 **blt** $x0, rs2, offset$.

ble $rs1, rs2, offset$ if ($rs1 \leq_s rs2$) $pc += sext(offset)$
小于等于时分支 (*Branch if Less Than or Equal*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
可视为 **bge** $rs2, rs1, offset$.

bleu $rs1, rs2, offset$ if ($rs1 \leq_u rs2$) $pc += sext(offset)$
小于等于时分支 (*Branch if Less Than or Equal, Unsigned*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
可视为 **bgeu** $rs2, rs1, offset$.

blez $rs2, offset$ if ($rs2 \leq_s 0$) $pc += sext(offset)$
小于等于零时分支 (*Branch if Less Than or Equal to Zero*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
可视为 **bge** $x0, rs2, offset$.

blt $rs1, rs2, offset$ if ($rs1 <_s rs2$) $pc += sext(offset)$
小于时分支 (*Branch if Less Than*). B-type, RV32I and RV64I.
若寄存器 $x[rs1]$ 的值小于寄存器 $x[rs2]$ 的值（均视为二进制补码），把 pc 的值设为当前值加上符号位扩展的偏移 $offset$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[12 10:5]		rs2	rs1	100	offset[4:1 11]	1100011

bltz $rs2, offset$ if ($rs1 <_s 0$) $pc += sext(offset)$
小于零时分支 (*Branch if Less Than Zero*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
可视为 **blt** $rs1, x0, offset$.

bltu $rs1, rs2, offset$ if ($rs1 <_u rs2$) $pc += sext(offset)$
无符号小于时分支 (*Branch if Less Than, Unsigned*). B-type, RV32I and RV64I.
若寄存器 $x[rs1]$ 的值小于寄存器 $x[rs2]$ 的值（均视为无符号数），把 pc 的值设为当前值加上符号位扩展的偏移 $offset$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[12 10:5]		rs2	rs1	110	offset[4:1 11]	1100011

bne $rs1, rs2, offset$ if ($rs1 \neq rs2$) $pc += sext(offset)$

不相等时分支 (*Branch if Not Equal*). B-type, RV32I and RV64I.

若寄存器 $x[rs1]$ 和寄存器 $x[rs2]$ 的值不相等, 把 pc 的值设为当前值加上符号位扩展的偏移 $offset$ 。

压缩形式: **c.bnez** $rs1, offset$

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[12 10:5]	rs2	rs1	001	offset[4:1 11]	1100011	

bnez $rs1, offset$ if ($rs1 \neq 0$) $pc += sext(offset)$

不等于零时分支 (*Branch if Not Equal to Zero*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.

可视为 **bne** $rs1, x0, offset$.

c.add $rd, rs2$ $x[rd] = x[rd] + x[rs2]$

加 (*Add*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **add** $rd, rd, rs2$. $rd=x0$ 或 $rs2=x0$ 时非法。

15	13	12	11	7 6	2 1	0
100	1	rd	rs2	10		

c.addi rd, imm $x[rd] = x[rd] + sext(imm)$

加立即数 (*Add Immediate*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **addi** rd, rd, imm .

15	13	12	11	7 6	2 1	0
000	imm[5]	rd	imm[4:0]	01		

c.addi16sp imm $x[2] = x[2] + sext(imm)$

加 16 倍立即数到栈指针 (*Add Immediate, Scaled by 16, to Stack Pointer*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **addi** $x2, x2, imm$. $imm=0$ 时非法。

15	13	12	11	7 6	2 1	0
011	imm[9]	00010	imm[4 6 8:7 5]	01		

c.addi4spn $rd', uimm$ $x[8+rd'] = x[2] + uimm$

加 4 倍立即数到栈指针 (*Add Immediate, Scaled by 4, to Stack Pointer, Nondestructive*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **addi** $rd, x2, uimm$, 其中 $rd=8+rd'$. $uimm=0$ 时非法。

15	13 12	5 4	2 1	0
000	uimm[5:4 9:6 2 3]	rd'	00	

c.addiw rd, imm

$$x[rd] = sext((x[rd] + sext(imm))[31:0])$$

加立即数字 (*Add Word Immediate*). RV64IC.

扩展形式为 **addiw** rd, rd, imm. rd=x0 时非法。

15	13	12	11	7 6	2 1	0
001	imm[5]		rd	imm[4:0]		01

c.and rd', rs2'

$$x[8+rd'] = x[8+rd'] \& x[8+rs2']$$

与 (*AND*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **and** rd, rd, rs2, 其中 rd=8+rd', rs2=8+rs2'.

15	10 9	7 6	5 4	2 1	0
100011		rd'	11	rs2'	01

c.addw rd', rs2'

$$x[8+rd'] = sext((x[8+rd'] + x[8+rs2'])([31:0]))$$

加字 (*Add Word*). RV64IC.

扩展形式为 **addw** rd, rd, rs2, 其中 rd=8+rd', rs2=8+rs2'.

15	10 9	7 6	5 4	2 1	0
100111		rd'	01	rs2'	01

c.andi rd', imm

$$x[8+rd'] = x[8+rd'] \& sext(imm)$$

与立即数 (*AND Immediate*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **andi** rd, rd, imm, 其中 rd=8+rd'.

15	13	12	11	10 9	7 6	2 1	0
100	imm[5]		10	rd'	imm[4:0]		01

c.beqz rs1', offset

$$\text{if } (x[8+rs1'] == 0) \text{ pc} += sext(offset)$$

等于零时分支 (*Branch if Equal to Zero*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **beq** rs1, x0, offset, 其中 rs1=8+rs1'.

15	13 12	10 9	7 6	2 1	0
110	offset[8:4:3]	rs1'	offset[7:6:2:1:5]	01	

c.bnez rs1', offset

$$\text{if } (x[8+rs1'] \neq 0) \text{ pc} += sext(offset)$$

不等于零时分支 (*Branch if Not Equal to Zero*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **bne** rs1, x0, offset, 其中 rs1=8+rs1'.

15	13 12	10 9	7 6	2 1	0
111	offset[8:4:3]	rs1'	offset[7:6:2:1:5]	01	

c.ebreak

RaiseException(Breakpoint)

环境断点 (*Environment Breakpoint*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **ebreak**.

15	13	12	11	7	6	2	1	0
100	1	00000	00000	10				

c.fld rd', uimm(rs1')

$f[8+rd'] = M[x[8+rs1'] + uimm][63:0]$

浮点双字加载 (*Floating-point Load Doubleword*). RV32DC and RV64DC.

扩展形式为 **fld** rd, uimm(rs1), 其中 $rd=8+rd'$, $rs1=8+rs1'$.

15	13	12	10	9	7	6	5	4	2	1	0
001	uimm[5:3]	rs1'	uimm[7:6]	rd'	00						

c.fldsp rd, uimm(x2)

$f[rd] = M[x[2] + uimm][63:0]$

栈指针相关浮点双字加载 (*Floating-point Load Doubleword, Stack-Pointer Relative*). RV32DC and RV64DC.

扩展形式为 **fld** rd, uimm(x2).

15	13	12	11	7	6	2	1	0
001	uimm[5]	rd	uimm[4:3 8:6]	10				

c.flw rd', uimm(rs1')

$f[8+rd'] = M[x[8+rs1'] + uimm][31:0]$

浮点字加载 (*Floating-point Load Word*). RV32FC.

扩展形式为 **flw** rd, uimm(rs1), 其中 $rd=8+rd'$, $rs1=8+rs1'$.

15	13	12	10	9	7	6	5	4	2	1	0
011	uimm[5:3]	rs1'	uimm[2 6]	rd'	00						

c.flwsp rd, uimm(x2)

$f[rd] = M[x[2] + uimm][31:0]$

栈指针相关浮点字加载 (*Floating-point Load Word, Stack-Pointer Relative*). RV32FC.

扩展形式为 **flw** rd, uimm(x2).

15	13	12	11	7	6	2	1	0
011	uimm[5]	rd	uimm[4:2 7:6]	10				

c.fsd rs2', uimm(rs1')

$M[x[8+rs1'] + uimm][63:0] = f[8+rs2']$

浮点双字存储 (*Floating-point Store Doubleword*). RV32DC and RV64DC.

扩展形式为 **fsd** rs2, uimm(rs1), 其中 $rs2=8+rs2'$, $rs1=8+rs1'$.

15	13	12	10	9	7	6	5	4	2	1	0
101	uimm[5:3]	rs1'	uimm[7:6]	rs2'	00						

c.fsdsp_{rs2, uimm(x2)}

$$M[x[2] + uimm][63:0] = f[rs2]$$

栈指针相关浮点双字存储 (*Floating-point Store Doubleword, Stack-Pointer Relative*). RV32DC and RV64DC.

扩展形式为 **fsd** *rs2*, *uimm(x2)*.

15	13 12	7 6	2 1	0
101	uimm[5:3 8:6]	rs2	10	

c.fsw_{rs2', uimm(rs1')}

$$M[x[8+rs1'] + uimm][31:0] = f[8+rs2']$$

浮点字存储 (*Floating-point Store Word*). RV32FC.

扩展形式为 **fsw** *rs2*, *uimm(rs1)*, 其中 $rs2=8+rs2'$, $rs1=8+rs1'$.

15	13 12	10 9	7 6	5 4	2 1	0
111	uimm[5:3]	rs1'	uimm[2 6]	rs2'	00	

c.fswsp_{rs2, uimm(x2)}

$$M[x[2] + uimm][31:0] = f[rs2]$$

栈指针相关浮点字存储 (*Floating-point Store Word, Stack-Pointer Relative*). RV32FC.

扩展形式为 **fsw** *rs2*, *uimm(x2)*.

15	13 12	7 6	2 1	0
111	uimm[5:2 7:6]	rs2	10	

C.j_{offset}

$$pc += sext(offset)$$

跳转 (*Jump*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **jal** *x0*, *offset*.

15	13 12	2 1	0
101	offset[11 4 9:8 10 6 7 3:1 5]	01	

C.jal_{offset}

$$x[1] = pc+2; pc += sext(offset)$$

链接跳转 (*Jump and Link*). RV32IC.

扩展形式为 **jal** *x1*, *offset*.

15	13 12	2 1	0
001	offset[11 4 9:8 10 6 7 3:1 5]	01	

C.jalr_{rs1}

$$t = pc+2; pc = x[rs1]; x[1] = t$$

寄存器链接跳转 (*Jump and Link Register*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **jalr** *x1*, 0(*rs1*). 当 $rs1=x0$ 时非法。

15	13	12	11	7 6	2 1	0
100	1	rs1	00000	10		

c.jr_{rs1}

$$pc = x[rs1]$$

寄存器跳转 (*Jump Register*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **jalr** x0, 0(rs1). 当 rs1=x0 时非法。

15	13	12	11	7	6	2	1	0
100	0	rs1	00000	10				

c.ld_{rd', uimm(rs1')}

$$x[8+rd'] = M[x[8+rs1'] + uimm][63:0]$$

双字加载 (*Load Doubleword*). RV64IC.

扩展形式为 **ld** rd, uimm(rs1), 其中 rd=8+rd', rs1=8+rs1'.

15	13	12	10	9	7	6	5	4	2	1	0
011	uimm[5:3]	rs1'	uimm[7:6]	rd'	00						

c.ldsp_{rd, uimm(x2)}

$$x[rd] = M[x[2] + uimm][63:0]$$

栈指针相关双字加载 (*Load Doubleword, Stack-Pointer Relative*). RV64IC.

扩展形式为 **ld** rd, uimm(x2). rd=x0 时非法。

15	13	12	11	7	6	2	1	0
011	uimm[5]	rd	uimm[4:3 8:6]	10				

c.li_{rd, imm}

$$x[rd] = sext(imm)$$

立即数加载 (*Load Immediate*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **addi** rd, x0, imm.

15	13	12	11	7	6	2	1	0
010	imm[5]	rd	imm[4:0]	01				

c.lui_{rd, imm}

$$x[rd] = sext(imm[17:12] << 12)$$

高位立即数加载 (*Load Upper Immediate*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **lui** rd, imm. 当 rd=x2 或 imm=0 时非法。

15	13	12	11	7	6	2	1	0
011	imm[17]	rd	imm[16:12]	01				

c.lw_{rd', uimm(rs1')}

$$x[8+rd'] = sext(M[x[8+rs1'] + uimm][31:0])$$

字加载 (*Load Word*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **lw** rd, uimm(rs1), 其中 rd=8+rd', rs1=8+rs1'.

15	13	12	10	9	7	6	5	4	2	1	0
010	uimm[5:3]	rs1'	uimm[2 6]	rd'	00						

c.lwsp rd, uimm(x2) $x[rd] = sext(M[x[2] + uimm][31:0])$

栈指针相关字加载 (*Load Word, Stack-Pointer Relative*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **lw** rd, uimm(x2). rd=x0 时非法。

15	13	12	11	7	6	2	1	0
010	uimm[5]	rd	uimm[4:2 7:6]	10				

c.mv rd, rs2 $x[rd] = x[rs2]$

移动 (*Move*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **add** rd, x0, rs2. rs2=x0 时非法。

15	13	12	11	7	6	2	1	0
100	0	rd	rs2	10				

c.or rd', rs2' $x[8+rd'] = x[8+rd'] \mid x[8+rs2']$

或 (*OR*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **or** rd, rd, rs2, 其中 rd=8+rd', rs2=8+rs2'.

15	10	9	7	6	5	4	2	1	0
100011	rd'	10	rs2'	01					

c.sd rs2', uimm(rs1') $M[x[8+rs1'] + uimm][63:0] = x[8+rs2']$

双字存储(*Store Doubleword*). RV64IC.

扩展形式为 **sd** rs2, uimm(rs1), 其中 rs2=8+rs2', rs1=8+rs1'.

15	13	12	10	9	7	6	5	4	2	1	0
111	uimm[5:3]	rs1'	uimm[7:6]	rs2'	00						

c.sdsp rs2, uimm(x2) $M[x[2] + uimm][63:0] = x[rs2]$

栈指针相关双字存储 (*Store Doubleword, Stack-Pointer Relative*). RV64IC.

扩展形式为 **sd** rs2, uimm(x2).

15	13	12	7	6	2	1	0
111	uimm[5:3 8:6]	rs2	10				

c.slli rd, uimm $x[rd] = x[rd] \ll uimm$

立即数逻辑左移 (*Shift Left Logical Immediate*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **slli** rd, rd, uimm.

15	13	12	11	7	6	2	1	0
000	uimm[5]	rd	uimm[4:0]	10				

c.srai rd', uimm

$$x[8+rd'] = x[8+rd'] >>_s \text{ uimm}$$

立即数算术右移 (*Shift Right Arithmetic Immediate*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **srai** rd, rd, uimm, 其中 $rd=8+rd'$.

15	13	12	11	10 9	7 6	2 1	0
100	uimm[5]	01	rd'	uimm[4:0]	01		

c.srli rd', uimm

$$x[8+rd'] = x[8+rd'] >>_u \text{ uimm}$$

立即数逻辑右移 (*Shift Right Logical Immediate*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **srli** rd, rd, uimm, 其中 $rd=8+rd'$.

15	13	12	11	10 9	7 6	2 1	0
100	uimm[5]	00	rd'	uimm[4:0]	01		

c.sub rd', rs2'

$$x[8+rd'] = x[8+rd'] - x[8+rs2']$$

减 (*Subtract*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **sub** rd, rd, rs2. 其中 $rd=8+rd'$, $rs2=8+rs2'$.

15	10 9	7 6	5 4	2 1	0
100011	rd'	00	rs2'	01	

c.subw rd', rs2'

$$x[8+rd'] = \text{sext}((x[8+rd'] - x[8+rs2'])[31:0])$$

减字 (*Subtract Word*). RV64IC.

扩展形式为 **subw** rd, rd, rs2. 其中 $rd=8+rd'$, $rs2=8+rs2'$.

15	10 9	7 6	5 4	2 1	0
100111	rd'	00	rs2'	01	

C.SW rs2', uimm(rs1')

$$M[x[8+rs1'] + \text{uimm}][31:0] = x[8+rs2']$$

字存储 (*Store Word*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **sw** rs2, uimm(rs1), 其中 $rs2=8+rs2'$, $rs1=8+rs1'$.

15	13 12	10 9	7 6	5 4	2 1	0
110	uimm[5:3]	rs1'	uimm[2:6]	rs2'	00	

c.swsp rs2, uimm(x2)

$$M[x[2] + \text{uimm}][31:0] = x[rs2]$$

栈指针相关字存储 (*Store Word, Stack-Pointer Relative*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **sw** rs2, uimm(x2).

15	13 12	7 6	2 1	0
110	uimm[5:2 7:6]	rs2	10	

C.xor rd', rs2'

$$x[8+rd'] = x[8+rd'] \wedge x[8+rs2']$$

异或 (*Exclusive-OR*). RV32IC and RV64IC.

扩展形式为 **xor** rd, rd, rs2, 其中 $rd=8+rd'$, $rs2=8+rs2'$.

15	10 9	7 6	5 4	2 1	0
100011	rd'	01	rs2'	01	

call rd, symbol

$$x[rd] = pc+8; pc = \&symbol$$

调用 (*Call*). 伪指令(Pesudoinstruction), RV32I and RV64I.

把下一条指令的地址 ($pc+8$) 写入 $x[rd]$, 然后把 pc 设为 $symbol$ 。等同于 **auipc** rd, offsetHi, 再加上一条 **jalr** rd, offsetLo(rd). 若省略了 rd , 默认为 x1.

csrr rd, csr

$$x[rd] = CSRs[csr]$$

读控制状态寄存器 (*Control and Status Register Read*). 伪指令(Pesudoinstruction), RV32I and RV64I.

把控制状态寄存器 csr 的值写入 $x[rd]$, 等同于 **csrrs** rd, csr, x0.

csrc csr, rs1

$$CSRs[csr] \&= \sim x[rs1]$$

清除控制状态寄存器 (*Control and Status Register Clear*). 伪指令(Pesudoinstruction), RV32I and RV64I.

对于 $x[rs1]$ 中每一个为 1 的位, 把控制状态寄存器 csr 的对应位清零, 等同于 **csrrc** x0, csr, rs1.

csrci csr, zimm[4:0]

$$CSRs[csr] \&= \sim zimm$$

立即数清除控制状态寄存器 (*Control and Status Register Clear Immediate*). 伪指令(Pesudoinstruction), RV32I and RV64I.

对于五位的零扩展的立即数中每一个为 1 的位, 把控制状态寄存器 csr 的对应位清零, 等同于 **csrrci** x0, csr, zimm.

csrrc rd, csr, rs1

$$t = CSRs[csr]; CSRs[csr] = t \& \sim x[rs1]; x[rd] = t$$

读后清除控制状态寄存器 (*Control and Status Register Read and Clear*). I-type, RV32I and RV64I.

记控制状态寄存器 csr 中的值为 t 。把 t 和寄存器 $x[rs1]$ 按位与的结果写入 csr , 再把 t 写入 $x[rd]$ 。

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
csr	rs1	011	rd	1110011	

csrrci rd, csr, zimm[4:0] $t = \text{CSRs}[\text{csr}]; \text{CSRs}[\text{csr}] = t \&\sim\text{zimm}; x[\text{rd}] = t$
立即数读后清除控制状态寄存器 (*Control and Status Register Read and Clear Immediate*). I-type, RV32I and RV64I.

记控制状态寄存器 *csr* 中的值为 *t*。把 *t* 和五位的零扩展的立即数 *zimm* 按位与的结果写入 *csr*，再把 *t* 写入 *x[rd]* (*csr* 寄存器的第 5 位及更高位不变)。

31	20	19	15	14	12	11	7	6	0	
csr			zimm[4:0]		111		rd		1110011	

csrrs rd, csr, rs1 $t = \text{CSRs}[\text{csr}]; \text{CSRs}[\text{csr}] = t \mid x[\text{rs1}]; x[\text{rd}] = t$
读后置位控制状态寄存器 (*Control and Status Register Read and Set*). I-type, RV32I and RV64I.
记控制状态寄存器 *csr* 中的值为 *t*。把 *t* 和寄存器 *x[rs1]* 按位或的结果写入 *csr*，再把 *t* 写入 *x[rd]*。

31	20	19	15	14	12	11	7	6	0	
csr			rs1		010		rd		1110011	

csrrci rd, csr, zimm[4:0] $t = \text{CSRs}[\text{csr}]; \text{CSRs}[\text{csr}] = t \mid \text{zimm}; x[\text{rd}] = t$
立即数读后设置控制状态寄存器 (*Control and Status Register Read and Set Immediate*). I-type, RV32I and RV64I.

记控制状态寄存器 *csr* 中的值为 *t*。把 *t* 和五位的零扩展的立即数 *zimm* 按位或的结果写入 *csr*，再把 *t* 写入 *x[rd]* (*csr* 寄存器的第 5 位及更高位不变)。

31	20	19	15	14	12	11	7	6	0	
csr			zimm[4:0]		110		rd		1110011	

csrrw rd, csr, zimm[4:0] $t = \text{CSRs}[\text{csr}]; \text{CSRs}[\text{csr}] = x[\text{rs1}]; x[\text{rd}] = t$
读后写控制状态寄存器 (*Control and Status Register Read and Write*). I-type, RV32I and RV64I.
记控制状态寄存器 *csr* 中的值为 *t*。把寄存器 *x[rs1]* 的值写入 *csr*，再把 *t* 写入 *x[rd]*。

31	20	19	15	14	12	11	7	6	0		
csr					rs1		001		rd	1110011	

csrrwi rd, csr, zimm[4:0] $x[\text{rd}] = \text{CSRs}[\text{csr}]; \text{CSRs}[\text{csr}] = \text{zimm}$
立即数读后写控制状态寄存器 (*Control and Status Register Read and Write Immediate*). I-type, RV32I and RV64I.

把控制状态寄存器 *csr* 中的值拷贝到 *x[rd]* 中，再把五位的零扩展的立即数 *zimm* 的值写入 *csr*。

31	20	19	15	14	12	11	7	6	0	
csr			zimm[4:0]		101		rd		1110011	

csrs *csr, rs1*

$CSRs[csr] \leftarrow x[rs1]$

置位控制状态寄存器 (*Control and Status Register Set*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.

对于 $x[rs1]$ 中每一个为 1 的位, 把控制状态寄存器 *csr* 的对应位置位, 等同于 **csrrs** *x0, csr, rs1*.

csrsi *csr, zimm[4:0]*

$CSRs[csr] \leftarrow zimm$

立即数置位控制状态寄存器 (*Control and Status Register Set Immediate*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.

对于五位的零扩展的立即数中每一个为 1 的位, 把控制状态寄存器 *csr* 的对应位清零, 等同于 **csrrsi** *x0, csr, zimm*.

csrw *csr, rs1*

$CSRs[csr] = x[rs1]$

写控制状态寄存器 (*Control and Status Register Set*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.

对于 $x[rs1]$ 中每一个为 1 的位, 把控制状态寄存器 *csr* 的对应位置位, 等同于 **csrrs** *x0, csr, rs1*.

csrwi *csr, zimm[4:0]*

$CSRs[csr] = zimm$

立即数写控制状态寄存器 (*Control and Status Register Write Immediate*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.

把五位的零扩展的立即数的值写入控制状态寄存器 *csr* 的, 等同于 **csrrwi** *x0, csr, zimm*.

div *rd, rs1, rs2*

$x[rd] = x[rs1] \div_s x[rs2]$

除法(*Divide*). R-type, RV32M and RV64M.

用寄存器 $x[rs1]$ 的值除以寄存器 $x[rs2]$ 的值, 向零舍入, 将这些数视为二进制补码, 把商写入 $x[rd]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000001	rs2	rs1	100	rd	0110011	

divu *rd, rs1, rs2*

$x[rd] = x[rs1] \div_u x[rs2]$

无符号除法(*Divide, Unsigned*). R-type, RV32M and RV64M.

用寄存器 $x[rs1]$ 的值除以寄存器 $x[rs2]$ 的值, 向零舍入, 将这些数视为无符号数, 把商写入 $x[rd]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000001	rs2	rs1	101	rd	0110011	

divuw $rd, rs1, rs2$ $x[rd] = sext(x[rs1][31:0] \div_u x[rs2][31:0])$
 无符号字除法 (*Divide Word, Unsigned*). R-type, RV64M.
 用寄存器 $x[rs1]$ 的低 32 位除以寄存器 $x[rs2]$ 的低 32 位，向零舍入，将这些数视为无符号数，把经符号位扩展的 32 位商写入 $x[rd]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000001	rs2	rs1	101	rd	0111011	

divw $rd, rs1, rs2$ $x[rd] = sext(x[rs1][31:0] \div_s x[rs2][31:0])$
 字除法 (*Divide Word*). R-type, RV64M.
 用寄存器 $x[rs1]$ 的低 32 位除以寄存器 $x[rs2]$ 的低 32 位，向零舍入，将这些数视为二进制补码，把经符号位扩展的 32 位商写入 $x[rd]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000001	rs2	rs1	100	rd	0111011	

Ebreak $\text{RaiseException(Breakpoint)}$
 环境断点 (*Environment Breakpoint*). I-type, RV32I and RV64I.
 通过抛出断点异常的方式请求调试器。

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000000000001	00000	000	00000	1110011	

ecall $\text{RaiseException(EnvironmentCall)}$
 环境调用 (*Environment Call*). I-type, RV32I and RV64I.
 通过引发环境调用异常来请求执行环境。

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000000000000	00000	000	00000	1110011	

fabs.d $rd, rs1$ $f[rd] = |f[rs1]|$
 浮点数绝对值 (*Floating-point Absolute Value*). 伪指令 (Pseudoinstruction), RV32D and RV64D.
 把双精度浮点数 $f[rs1]$ 的绝对值写入 $f[rd]$ 。
 等同于 **fsgnjx.d** $rd, rs1, rs1$ 。

fabs.s $rd, rs1$ $f[rd] = |f[rs1]|$
 浮点数绝对值 (*Floating-point Absolute Value*). 伪指令 (Pseudoinstruction), RV32F and RV64F.
 把单精度浮点数 $f[rs1]$ 的绝对值写入 $f[rd]$ 。
 等同于 **fsgnjx.s** $rd, rs1, rs1$ 。

fadd.d rd, rs1, rs2 f[rd] = f[rs1] + f[rs2]
双精度浮点加(*Floating-point Add, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.
把寄存器 f[rs1]和 f[rs2]中的双精度浮点数相加, 并将舍入后的和写入 f[rd]。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000001	rs2	rs1	rm	rd		1010011

fadd.s rd, rs1, rs2 f[rd] = f[rs1] + f[rs2]
单精度浮点加(*Floating-point Add, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.
把寄存器 f[rs1]和 f[rs2]中的单精度浮点数相加, 并将舍入后的和写入 f[rd]。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000000	rs2	rs1	rm	rd		1010011

fclass.d rd, rs1, rs2 x[rd] = classify_d(f[rs1])
双精度浮点分类(*Floating-point Classify, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.
把一个表示寄存器 f[rs1]中双精度浮点数类别的掩码写入 x[rd]中。关于如何解释写入 x[rd]的值, 请参阅指令 **fclass.s** 的介绍。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1110001	00000	rs1	001	rd		1010011

fclass.s rd, rs1, rs2 x[rd] = classify_s(f[rs1])
单精度浮点分类(*Floating-point Classify, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.
把一个表示寄存器 f[rs1]中单精度浮点数类别的掩码写入 x[rd]中。x[rd]中有且仅有一位被置上, 见下表。

x[rd]位	含义
0	f[rs1]为 $-\infty$ 。
1	f[rs1]是负规格化数。
2	f[rs1]是负的非规格化数。
3	f[rs1]是-0。
4	f[rs1]是+0。
5	f[rs1]是正的非规格化数。
6	f[rs1]是正的规格化数。
7	f[rs1]为 $+\infty$ 。
8	f[rs1]是信号(signaling)NaN。
9	f[rs1]是一个安静(quiet)NaN。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1110000	00000	rs1	001	rd		1010011

fcvt.d.l rd, rs1, rs2

$$f[rd] = f64_{s64}(x[rs1])$$

长整型向双精度浮点转换(*Floating-point Convert to Double from Long*). R-type, RV64D.

把寄存器 $x[rs1]$ 中的 64 位二进制补码表示的整数转化为双精度浮点数，再写入 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1101001	00010	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.d.lu rd, rs1, rs2

$$f[rd] = f64_{u64}(x[rs1])$$

无符号长整型向双精度浮点转换(*Floating-point Convert to Double from Unsigned Long*). R-type, RV64D.

把寄存器 $x[rs1]$ 中的 64 位无符号整数转化为双精度浮点数，再写入 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1101001	00011	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.d.s rd, rs1, rs2

$$f[rd] = f64_{f32}(f[rs1])$$

单精度向双精度浮点转换(*Floating-point Convert to Double from Single*). R-type, RV32D and RV64D.

把寄存器 $f[rs1]$ 中的单精度浮点数转化为双精度浮点数，再写入 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0100001	00000	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.d.w rd, rs1, rs2

$$f[rd] = f64_{s32}(x[rs1])$$

字向双精度浮点转换(*Floating-point Convert to Double from Word*). R-type, RV32D and RV64D.

把寄存器 $x[rs1]$ 中的 32 位二进制补码表示的整数转化为双精度浮点数，再写入 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1101001	00000	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.d.wu rd, rs1, rs2

$$f[rd] = f64_{u32}(x[rs1])$$

无符号字向双精度浮点转换(*Floating-point Convert to Double from Unsigned Word*). R-type, RV32D and RV64D.

把寄存器 $x[rs1]$ 中的 32 位无符号整数转化为双精度浮点数，再写入 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1101001	00001	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.l.d rd, rs1, rs2 x[rd] = s64_{f64}(f[rs1])

双精度浮点向长整型转换(*Floating-point Convert to Long from Double*). R-type, RV64D.
把寄存器 f[rs1]中的双精度浮点数转化为 64 位二进制补码表示的整数，再写入 x[rd]中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1100001	00010	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.l.s rd, rs1, rs2 x[rd] = s64_{f32}(f[rs1])

单精度浮点向长整型转换(*Floating-point Convert to Long from Single*). R-type, RV64F.
把寄存器 f[rs1]中的单精度浮点数转化为 64 位二进制补码表示的整数，再写入 x[rd]中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1100000	00010	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.lu.d rd, rs1, rs2 x[rd] = u64_{f64}(f[rs1])

双精度浮点向无符号长整型转换(*Floating-point Convert to Unsigned Long from Double*). R-type, RV64D.
把寄存器 f[rs1]中的双精度浮点数转化为 64 位无符号整数，再写入 x[rd]中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1100001	00011	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.lu.s rd, rs1, rs2 x[rd] = u64_{f32}(f[rs1])

单精度浮点向无符号长整型转换(*Floating-point Convert to Unsigned Long from Single*). R-type, RV64F.
把寄存器 f[rs1]中的单精度浮点数转化为 64 位二进制补码表示的整数，再写入 x[rd]中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1100000	00011	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.s.d rd, rs1, rs2 f[rd] = f32_{f64}(f[rs1])

双精度向单精度浮点转换(*Floating-point Convert to Single from Double*). R-type, RV32D and RV64D.
把寄存器 f[rs1]中的双精度浮点数转化为单精度浮点数，再写入 f[rd]中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0100000	00001	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.s.l rd, rs1, rs2 $f[rd] = f_{32s64}(x[rs1])$

长整型向单精度浮点转换(*Floating-point Convert to Single from Long*). R-type, RV64F.

把寄存器 $x[rs1]$ 中的 64 位二进制补码表示的整数转化为单精度浮点数，再写入 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1101000	00010	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.s.lu rd, rs1, rs2 $f[rd] = f_{32u64}(x[rs1])$

无符号长整型向单精度浮点转换(*Floating-point Convert to Single from Unsigned Long*). R-type, RV64F.

把寄存器 $x[rs1]$ 中的 64 位的无符号整数转化为单精度浮点数，再写入 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1101000	00011	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.s.w rd, rs1, rs2 $f[rd] = f_{32s32}(x[rs1])$

字向单精度浮点转换(*Floating-point Convert to Single from Word*). R-type, RV32F and RV64F.

把寄存器 $x[rs1]$ 中的 32 位二进制补码表示的整数转化为单精度浮点数，再写入 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1101000	00000	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.s.wu rd, rs1, rs2 $f[rd] = f_{32u32}(x[rs1])$

无符号字向单精度浮点转换(*Floating-point Convert to Single from Unsigned Word*). R-type, RV32F and RV64F.

把寄存器 $x[rs1]$ 中的 32 位无符号整数转化为单精度浮点数，再写入 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1101000	00001	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.w.d rd, rs1, rs2 $x[rd] = sext(s_{32f64}(f[rs1]))$

双精度浮点向字转换(*Floating-point Convert to Word from Double*). R-type, RV32D and RV64D.

把寄存器 $f[rs1]$ 中的双精度浮点数转化为 32 位二进制补码表示的整数，再写入 $x[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1100001	00000	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.w.d rd, rs1, rs2 $x[rd] = sext(u32_{f64}(f[rs1]))$

双精度浮点向无符号字转换(*Floating-point Convert to Unsigned Word from Double*). R-type, RV32D and RV64D.

把寄存器 $f[rs1]$ 中的双精度浮点数转化为 32 位无符号整数，再写入 $x[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1100001	00001	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.w.s rd, rs1, rs2 $x[rd] = sext(s32_{f32}(f[rs1]))$

单精度浮点向字转换(*Floating-point Convert to Word from Single*). R-type, RV32F and RV64F.

把寄存器 $f[rs1]$ 中的单精度浮点数转化为 32 位二进制补码表示的整数，再写入 $x[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1100000	00000	rs1	rm	rd		1010011

fcvt.wu.s rd, rs1, rs2 $x[rd] = sext(u32_{f32}(f[rs1]))$

单精度浮点向无符号字转换(*Floating-point Convert to Unsigned Word from Single*). R-type, RV32F and RV64F.

把寄存器 $f[rs1]$ 中的单精度浮点数转化为 32 位无符号整数，再写入 $x[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1100000	00001	rs1	rm	rd		1010011

fdiv.d rd, rs1, rs2 $f[rd] = f[rs1] \div f[rs2]$

双精度浮点除法(*Floating-point Divide, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.

把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的双精度浮点数相除，并将舍入后的商写入 $f[rd]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0001101	rs2	rs1	rm	rd		1010011

fdiv.s rd, rs1, rs2 $f[rd] = f[rs1] \div f[rs2]$

单精度浮点除法(*Floating-point Divide, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.

把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的单精度浮点数相除，并将舍入后的商写入 $f[rd]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0001100	rs2	rs1	rm	rd		1010011

fence *pred, succ* Fence(*pred, succ*)

同步内存和 I/O(*Fence Memory and I/O*). I-type, RV32I and RV64I.

在后续指令中的内存和 I/O 访问对外部（例如其他线程）可见之前，使这条指令之前的内存及 I/O 访问对外部可见。比特中的第 3,2,1 和 0 位分别对应于设备输入，设备输出，内存读写。例如 **fence r, rw**，将前面读取与后面的读取和写入排序，使用 *pred*=0010 和 *succ*=0011 进行编码。如果省略了参数，则表示 **fence iorw, iorw**，即对所有访存请求进行排序。

31	28 27	24 23	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000	pred	succ	00000	000	00000	0001111	

fence.i Fence(Store, Fetch)

同步指令流(*Fence Instruction Stream*). I-type, RV32I and RV64I.

使对内存指令区域的读写，对后续取指令可见。

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
00000000000000	00000	001	00000	0001111	

feq.d *rd, rs1, rs2* $x[rd] = f[rs1] == f[rs2]$

双精度浮点相等(*Floating-point Equals, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.

若寄存器 *f[rs1]* 和 *f[rs2]* 中的双精度浮点数相等，则在 *x[rd]* 中写入 1，反之写 0。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1010001	rs2	rs1	010	rd	1010011	

feq.s *rd, rs1, rs2* $x[rd] = f[rs1] == f[rs2]$

单精度浮点相等(*Floating-point Equals, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.

若寄存器 *f[rs1]* 和 *f[rs2]* 中的单精度浮点数相等，则在 *x[rd]* 中写入 1，反之写 0。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1010000	rs2	rs1	010	rd	1010011	

fld *rd, offset(rs1)* $f[rd] = M[x[rs1] + sext(offset)][63:0]$

浮点加载双字(*Floating-point Load Doubleword*). I-type, RV32D and RV64D.

从内存地址 $x[rs1] + sign-extend(offset)$ 中取双精度浮点数，并写入 *f[rd]*。

压缩形式: **c.fldsp** *rd, offset*; **c.fld** *rd, offset(rs1)*

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[11:0]	rs1	011	rd	0000111	

fle.d rd, rs1, rs2

$$x[rd] = f[rs1] \leq f[rs2]$$

双精度浮点小于等于 (*Floating-point Less Than or Equal, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.

若寄存器 $f[rs1]$ 中的双精度浮点数小于等于 $f[rs2]$ 中的双精度浮点数，则在 $x[rd]$ 中写入 1，反之写 0。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1010001	rs2	rs1	000	rd	1010011	

fle.s rd, rs1, rs2

$$x[rd] = f[rs1] \leq f[rs2]$$

单精度浮点小于等于 (*Floating-point Less Than or Equal, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.

若寄存器 $f[rs1]$ 中的单精度浮点数小于等于 $f[rs2]$ 中的单精度浮点数，则在 $x[rd]$ 中写入 1，反之写 0。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1010000	rs2	rs1	000	rd	1010011	

fle.d rd, rs1, rs2

$$x[rd] = f[rs1] < f[rs2]$$

双精度浮点小于 (*Floating-point Less Than, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.

若寄存器 $f[rs1]$ 中的双精度浮点数小于 $f[rs2]$ 中的双精度浮点数，则在 $x[rd]$ 中写入 1，反之写 0。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1010001	rs2	rs1	001	rd	1010011	

fle.s rd, rs1, rs2

$$x[rd] = f[rs1] < f[rs2]$$

单精度浮点小于 (*Floating-point Less Than, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.

若寄存器 $f[rs1]$ 中的单精度浮点数小于 $f[rs2]$ 中的单精度浮点数，则在 $x[rd]$ 中写入 1，反之写 0。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1010000	rs2	rs1	001	rd	1010011	

flw rd, offset(rs1)

$$f[rd] = M[x[rs1] + \text{sext}(\text{offset})][31:0]$$

浮点加载字 (*Floating-point Load Word*). I-type, RV32F and RV64F.

从内存地址 $x[rs1] + \text{sign-extend}(\text{offset})$ 中取单精度浮点数，并写入 $f[rd]$ 。

压缩形式: **c.flwsp** rd, offset; **c.flw** rd, offset(rs1)

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[11:0]	rs1	010	rd	0000111	

fmadd.d $rd, rs1, rs2, rs3$ $f[rd] = f[rs1] \times f[rs2] + f[rs3]$
 双精度浮点乘加 (*Floating-point Fused Multiply-Add, Double-Precision*). R4-type, RV32D and RV64D.

把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的双精度浮点数相乘，并将未舍入的积和寄存器 $f[rs3]$ 中的双精度浮点数相加，将舍入后的双精度浮点数写入 $f[rd]$ 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
rs3	01	rs2	rs1	rm	rd	1000011							

fmadd.s $rd, rs1, rs2, rs3$ $f[rd] = f[rs1] \times f[rs2] + f[rs3]$
 单精度浮点乘加 (*Floating-point Fused Multiply-Add, Single-Precision*). R4-type, RV32F and RV64F.

把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的单精度浮点数相乘，并将未舍入的积和寄存器 $f[rs3]$ 中的单精度浮点数相加，将舍入后的单精度浮点数写入 $f[rd]$ 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
rs3	00	rs2	rs1	rm	rd	1000011							

fmax.d $rd, rs1, rs2$ $f[rd] = \max(f[rs1], f[rs2])$
 双精度浮点最大值 (*Floating-point Maximum, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.
 把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的双精度浮点数中的较大值写入 $f[rd]$ 中。

31	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
0010101	rs2	rs1	001	rd	1010011						

fmax.s $rd, rs1, rs2$ $f[rd] = \max(f[rs1], f[rs2])$
 单精度浮点最大值 (*Floating-point Maximum, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.
 把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的单精度浮点数中的较大值写入 $f[rd]$ 中。

31	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
0010100	rs2	rs1	001	rd	1010011						

fmin.d $rd, rs1, rs2$ $f[rd] = \min(f[rs1], f[rs2])$
 双精度浮点最小值 (*Floating-point Minimum, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.
 把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的双精度浮点数中的较小值写入 $f[rd]$ 中。

31	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
0010101	rs2	rs1	000	rd	1010011						

fmin.s rd, rs1, rs2

$$f[rd] = \min(f[rs1], f[rs2])$$

单精度浮点最小值(*Floating-point Minimum, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.

把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的单精度浮点数中的较小值写入 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0010100	rs2	rs1	000	rd	1010011	

fmsub.d rd, rs1, rs2, rs3

$$f[rd] = f[rs1] \times f[rs2] - f[rs3]$$

双精度浮点乘减(*Floating-point Fused Multiply-Subtract, Double-Precision*). R4-type, RV32D and RV64D.

把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的双精度浮点数相乘，并将未舍入的积减去寄存器 $f[rs3]$ 中的双精度浮点数，将舍入后的双精度浮点数写入 $f[rd]$ 。

31	27	26	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
rs3	01	rs2	rs1	rm	rd	1000111		

fmsub.s rd, rs1, rs2, rs3

$$f[rd] = f[rs1] \times f[rs2] - f[rs3]$$

单精度浮点乘减(*Floating-point Fused Multiply-Subtract, Single-Precision*). R4-type, RV32F and RV64F.

把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的单精度浮点数相乘，并将未舍入的积减去寄存器 $f[rs3]$ 中的单精度浮点数，将舍入后的单精度浮点数写入 $f[rd]$ 。

31	27	26	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
rs3	00	rs2	rs1	rm	rd	1000111		

fmul.d rd, rs1, rs2

$$f[rd] = f[rs1] \times f[rs2]$$

双精度浮点乘(*Floating-point Multiply, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.

把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的双精度浮点数相乘，将舍入后的双精度结果写入 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0001001	rs2	rs1	rm	rd	1010011	

fmul.s rd, rs1, rs2

$$f[rd] = f[rs1] \times f[rs2]$$

单精度浮点乘(*Floating-point Multiply, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.

把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的单精度浮点数相乘，将舍入后的单精度结果写入 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0001000	rs2	rs1	rm	rd	1010011	

fmv.d $rd, rs1$ $f[rd] = f[rs1]$

双精度浮点移动 (*Floating-point Move*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32D and RV64D.

把寄存器 $f[rs1]$ 中的双精度浮点数复制到 $f[rd]$ 中, 等同于 **fsgnj.d** $rd, rs1, rs1$.

fmv.d.x $rd, rs1, rs2$ $f[rd] = x[rs1][63:0]$

双精度浮点移动(*Floating-point Move Doubleword from Integer*). R-type, RV64D.

把寄存器 $x[rs1]$ 中的双精度浮点数复制到 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1111001	00000	rs1	000	rd	1010011	

fmv.s $rd, rs1$ $f[rd] = f[rs1]$

单精度浮点移动 (*Floating-point Move*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32F and RV64F.

把寄存器 $f[rs1]$ 中的单精度浮点数复制到 $f[rd]$ 中, 等同于 **fsgnj.s** $rd, rs1, rs1$.

fmv.d.x $rd, rs1, rs2$ $f[rd] = x[rs1][31:0]$

单精度浮点移动(*Floating-point Move Word from Integer*). R-type, RV32F and RV64F.

把寄存器 $x[rs1]$ 中的单精度浮点数复制到 $f[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1111000	00000	rs1	000	rd	1010011	

fmv.x.d $rd, rs1, rs2$ $x[rd] = f[rs1][63:0]$

双精度浮点移动(*Floating-point Move Doubleword to Integer*). R-type, RV64D.

把寄存器 $f[rs1]$ 中的双精度浮点数复制到 $x[rd]$ 中。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1110001	00000	rs1	000	rd	1010011	

fmv.x.w $rd, rs1, rs2$ $x[rd] = \text{sext}(f[rs1][31:0])$

单精度浮点移动(*Floating-point Move Word to Integer*). R-type, RV32F and RV64F.

把寄存器 $f[rs1]$ 中的单精度浮点数复制到 $x[rd]$ 中, 对于 RV64F, 将结果进行符号扩展。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
1110000	00000	rs1	000	rd	1010011	

rd, rs1

$$f[\text{rd}] = -f[\text{rs1}]$$

双精度浮点取反 (*Floating-point Negate*). 伪指令(Pesudoinstruction), RV32D and RV64D.

把寄存器 `f[rs1]` 中的双精度浮点数取反后写入 `f[rd]` 中，等同于 `fsgnjn.d rd, rs1, rs1`。

rd, rs1

$$f[rd] = -f[rs1]$$

单精度浮点取反 (*Floating-point Negate*). 伪指令(Pesudoinstruction), RV32F and RV64F

把寄存器 `f[rs1]` 中的单精度浮点数取反后写入 `f[rd]` 中，等同于 `fsgnjn.s rd, rs1, rs1`。

rd, rs1, rs2, rs3

$$f[r_d] = f[r_{s1}] \times f[r_{s2}] + f[r_{s3}]$$

双精度浮点乘取反加(*Floating-point Fused Negative Multiply-Add, Double-Precision*). R4-type. RV32D and RV64D.

把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的双精度浮点数相乘, 将结果取反, 并将未舍入的积和寄存器 $f[rs3]$ 中的双精度浮点数相加, 将舍入后的双精度浮点数写入 $f[rd]$ 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
rs3		01		rs2		rs1		rm		rd		1001111	

rd, rs1, rs2, rs3

$$f[rd] = -f[rs1] \quad f[rs2] - f[rs3]$$

单精度浮点乘取反加(*Floating-point Fused Negative Multiply-Add, Single-Precision*). R4-type. RV32F and RV64F.

把寄存器 $[rs1]$ 和 $[rs2]$ 中的单精度浮点数相乘, 将结果取反, 并将未舍入的积和寄存器 $[rs3]$ 中的单精度浮点数相加, 将舍入后的单精度浮点数写入 $[rd]$ 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
rs3		00		rs2		rs1		rm		rd		1001111	

rd, rs1, rs2, rs3

$$f[\text{rd}] = -f[\text{rs1}] \quad f[\text{rs2}] + f[\text{rs3}]$$

双精度浮点乘取反减(*Floating-point Fused Negative Multiply-Subtract, Double-Precision*). R4-type, RV32D and RV64D.

把寄存器 `f[rs1]` 和 `f[rs2]` 中的双精度浮点数相乘，将结果取反，并将未舍入的积减去寄存器 `f[rs3]` 中的双精度浮点数，将舍入后的双精度浮点数写入 `f[rd]`。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
rs3		01		rs2		rs1		rm		rd		1001011	

fnmsub.s $rd, rs1, rs2, rs3$ $f[rd] = -f[rs1] \times f[rs2] + f[rs3]$

单精度浮点乘取反减(*Floating-point Fused Negative Multiply-Subtract, Single-Precision*). R4-type, RV32F and RV64F.

把寄存器 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 中的单精度浮点数相乘，将结果取反，并将未舍入的积减去寄存器 $f[rs3]$ 中的单精度浮点数，将舍入后的单精度浮点数写入 $f[rd]$ 。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0	
rs3				00	rs2			rs1		rm		rd		1001011

frcsr rd $x[rd] = CSRs[fcsr]$

浮点读控制状态寄存器 (*Floating-point Read Control and Status Register*). 伪指令 (Pseudoinstruction), RV32F and RV64F.

把浮点控制状态寄存器的值写入 $x[rd]$ ，等同于 **csrrs** $rd, fcsr, x0$.

frflags rd $x[rd] = CSRs[f flags]$

浮点读异常标志 (*Floating-point Read Exception Flags*). 伪指令 (Pseudoinstruction), RV32F and RV64F.

把浮点异常标志的值写入 $x[rd]$ ，等同于 **csrrs** $rd, f flags, x0$.

frmm rd $x[rd] = CSRs[frm]$

浮点读舍入模式 (*Floating-point Read Rounding Mode*). 伪指令 (Pseudoinstruction), RV32F and RV64F.

把浮点舍入模式的值写入 $x[rd]$ ，等同于 **csrrs** $rd, frm, x0$.

fscsr $rd, rs1$ $t = CSRs[fcsr]; CSRs[fcsr] = x[rs1]; x[rd] = t$

浮点换出控制状态寄存器 (*Floating-point Swap Control and Status Register*). 伪指令 (Pseudoinstruction), RV32F and RV64F.

把寄存器 $x[rs1]$ 的值写入浮点控制状态寄存器，并将浮点控制状态寄存器的原值写入 $x[rd]$ ，等同于 **csrrw** $rd, fcsr, rs1$ 。 rd 默认为 $x0$ 。

fsd $rs2, offset(rs1)$ $M[x[rs1] + sext(offset)] = f[rs2][63:0]$

双精度浮点存储(*Floating-point Store Doubleword*). S-type, RV32D and RV64D.

将寄存器 $f[rs2]$ 中的双精度浮点数存入内存地址 $x[rs1] + sign-extend(offset)$ 中。

压缩形式: **c.fsdsp** $rs2, offset; c.fsd$ $rs2, offset(rs1)$

31	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
offset[11:5]				rs2	rs1		011	offset[4:0]		0100111	

fsflags rd, rs1 $t = \text{CSRs}[\text{fflags}]; \text{CSRs}[\text{fflags}] = x[\text{rs1}]; x[\text{rd}] = t$
浮点换出异常标志 (*Floating-point Swap Exception Flags*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32F and RV64F.
把寄存器 $x[\text{rs1}]$ 的值写入浮点异常标志寄存器, 并将浮点异常标志寄存器的原值写入 $x[\text{rd}]$, 等同于 **csrrw** rd, fflags, rs1。rd 默认为 x0。

fsgnj.d rd, rs1, rs2 $f[\text{rd}] = \{f[\text{rs2}][63], f[\text{rs1}][62:0]\}$
双精度浮点符号注入(*Floating-point Sign Inject, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.
用 $f[\text{rs1}]$ 指数和有效数以及 $f[\text{rs2}]$ 的符号的符号位, 来构造一个新的双精度浮点数, 并将其写入 $f[\text{rd}]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0010001	rs2	rs1	000	rd	1010011	

fsgnj.s rd, rs1, rs2 $f[\text{rd}] = \{f[\text{rs2}][31], f[\text{rs1}][30:0]\}$
单精度浮点符号注入(*Floating-point Sign Inject, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.
用 $f[\text{rs1}]$ 指数和有效数以及 $f[\text{rs2}]$ 的符号的符号位, 来构造一个新的单精度浮点数, 并将其写入 $f[\text{rd}]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0010000	rs2	rs1	000	rd	1010011	

fsgnjn.d rd, rs1, rs2 $f[\text{rd}] = \{\sim f[\text{rs2}][63], f[\text{rs1}][62:0]\}$
双精度浮点符号取反注入(*Floating-point Sign Inject-Negate, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.
用 $f[\text{rs1}]$ 指数和有效数以及 $f[\text{rs2}]$ 的符号的符号位取反, 来构造一个新的双精度浮点数, 并将其写入 $f[\text{rd}]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0010001	rs2	rs1	001	rd	1010011	

fsgnjn.s rd, rs1, rs2 $f[\text{rd}] = \{\sim f[\text{rs2}][31], f[\text{rs1}][30:0]\}$
单精度浮点符号取反注入(*Floating-point Sign Inject-Negate, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.
用 $f[\text{rs1}]$ 指数和有效数以及 $f[\text{rs2}]$ 的符号的符号位取反, 来构造一个新的单精度浮点数, 并将其写入 $f[\text{rd}]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0010000	rs2	rs1	001	rd	1010011	

fsgnjx.d $rd, rs1, rs2$

$$f[rd] = \{f[rs1][63] \wedge f[rs2][63], f[rs1][62:0]\}$$

双精度浮点符号异或注入(*Floating-point Sign Inject-XOR, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.

用 $f[rs1]$ 指数和有效数以及 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 的符号的符号位异或, 来构造一个新的双精度浮点数, 并将其写入 $f[rd]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0010001	rs2	rs1	010	rd	1010011	

fsgnjx.s $rd, rs1, rs2$

$$f[rd] = \{f[rs1][31] \wedge f[rs2][31], f[rs1][30:0]\}$$

单精度浮点符号异或注入(*Floating-point Sign Inject-XOR, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.

用 $f[rs1]$ 指数和有效数以及 $f[rs1]$ 和 $f[rs2]$ 的符号的符号位异或, 来构造一个新的单精度浮点数, 并将其写入 $f[rd]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0010000	rs2	rs1	010	rd	1010011	

fsqrt.d $rd, rs1, rs2$

$$f[rd] = \sqrt{f[rs1]}$$

双精度浮点平方根(*Floating-point Square Root, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D. 将 $f[rs1]$ 中的双精度浮点数的平方根舍入和写入 $f[rd]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0101101	00000	rs1	rm	rd	1010011	

fsqrt.s $rd, rs1, rs2$

$$f[rd] = \sqrt{f[rs1]}$$

单精度浮点平方根(*Floating-point Square Root, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F. 将 $f[rs1]$ 中的单精度浮点数的平方根舍入和写入 $f[rd]$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0101100	00000	rs1	rm	rd	1010011	

fsrm $rd, rs1$

$$t = \text{CSRs}[frm]; \text{CSRs}[frm] = x[rs1]; x[rd] = t$$

浮点换出舍入模式 (*Floating-point Swap Rounding Mode*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32F and RV64F.

把寄存器 $x[rs1]$ 的值写入浮点舍入模式寄存器, 并将浮点舍入模式寄存器的原值写入 $x[rd]$, 等同于 **csrrw** $rd, frm, rs1$ 。 rd 默认为 $x0$ 。

fsub.d rd, rs1, rs2 f[rd] = f[rs1] - f[rs2]
双精度浮点减(*Floating-point Subtract, Double-Precision*). R-type, RV32D and RV64D.
把寄存器 f[rs1]和 f[rs2]中的双精度浮点数相减, 并将舍入后的差写入 f[rd]。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000101	rs2	rs1	rm	rd	1010011	

fsub.s rd, rs1, rs2 f[rd] = f[rs1] - f[rs2]
单精度浮点减(*Floating-point Subtract, Single-Precision*). R-type, RV32F and RV64F.
把寄存器 f[rs1]和 f[rs2]中的单精度浮点数相减, 并将舍入后的差写入 f[rd]。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000100	rs2	rs1	rm	rd	1010011	

fsw rs2, offset(rs1) M[x[rs1] + sext(offset)] = f[rs2][31:0]
单精度浮点存储(*Floating-point Store Word*). S-type, RV32F and RV64F.
将寄存器 f[rs2]中的单精度浮点数存入内存地址 x[rs1] + sign-extend(offset)中。
压缩形式: **c.fswsp** rs2, offset; **c.fsw** rs2, offset(rs1)

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[11:5]	rs2	rs1	010	offset[4:0]	0100111	

j offset pc += sext(offset)
跳转 (*Jump*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
把 pc 设置为当前值加上符号位扩展的 offset, 等同于 **jal** x0, offset.

jal rd, offset x[rd] = pc+4; pc += sext(offset)
跳转并链接 (*Jump and Link*). J-type, RV32I and RV64I.
把下一条指令的地址(pc+4), 然后把 pc 设置为当前值加上符号位扩展的 offset。rd 默认为 x1。
压缩形式: **c.j** offset; **c.jal** offset

31	12 11	7 6	0
offset[20 10:1 11 19:12]	rd	1101111	

jalc rd, offset(rs1) $t = pc + 4; pc = (x[rs1] + sext(offset)) \& \sim 1; x[rd] = t$
 跳转并寄存器链接 (*Jump and Link Register*). I-type, RV32I and RV64I.
 把 pc 设置为 $x[rs1] + sign_extend(offset)$, 把计算出的地址的最低有效位设为 0, 并将原 $pc+4$ 的值写入 $f[rd]$ 。rd 默认为 x1。
 压缩形式: **c.jr** rs1; **c.jalc** rs1

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[11:0]	rs1	010	rd	1100111	

jr rs1 $pc = x[rs1]$
 寄存器跳转 (*Jump Register*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
 把 pc 设置为 $x[rs1]$, 等同于 **jalc** x0, 0(rs1)。

la rd, symbol $x[rd] = \&symbol$
 地址加载 (*Load Address*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
 将 $symbol$ 的地址加载到 $x[rd]$ 中。当编译位置无关的代码时, 它会被扩展为对全局偏移量表(Global Offset Table)的加载。对于 RV32I, 等同于执行 **auipc** rd, offsetHi, 然后是 **lw** rd, offsetLo(rd); 对于 RV64I, 则等同于 **auipc** rd, offsetHi 和 **ld** rd, offsetLo(rd)。如果 offset 过大, 开始的算加载地址的指令会变成两条, 先是 **auipc** rd, offsetHi 然后是 **addi** rd, rd, offsetLo。

lb rd, offset(rs1) $x[rd] = sext(M[x[rs1] + sext(offset)] [7:0])$
 字节加载 (*Load Byte*). I-type, RV32I and RV64I.
 从地址 $x[rs1] + sign_extend(offset)$ 读取一个字节, 经符号位扩展后写入 $x[rd]$ 。

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[11:0]	rs1	000	rd	0000011	

lbu rd, offset(rs1) $x[rd] = M[x[rs1] + sext(offset)] [7:0]$
 无符号字节加载 (*Load Byte, Unsigned*). I-type, RV32I and RV64I.
 从地址 $x[rs1] + sign_extend(offset)$ 读取一个字节, 经零扩展后写入 $x[rd]$ 。

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[11:0]	rs1	100	rd	0000011	

ld rd, offset(rs1) $x[rd] = M[x[rs1] + sext(offset)][63:0]$

双字加载 (*Load Doubleword*). I-type, RV32I and RV64I.

从地址 $x[rs1] + sign_extend(offset)$ 读取八个字节，写入 $x[rd]$ 。

压缩形式: **c.ldsp** rd, offset; **c.ld** rd, offset(rs1)

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[11:0]		rs1	011	rd	0000011

lh rd, offset(rs1) $x[rd] = sext(M[x[rs1] + sext(offset))][15:0]$

半字加载 (*Load Halfword*). I-type, RV32I and RV64I.

从地址 $x[rs1] + sign_extend(offset)$ 读取两个字节，经符号位扩展后写入 $x[rd]$ 。

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[11:0]		rs1	001	rd	0000011

lhu rd, offset(rs1) $x[rd] = M[x[rs1] + sext(offset)][15:0]$

无符号半字加载 (*Load Halfword, Unsigned*). I-type, RV32I and RV64I.

从地址 $x[rs1] + sign_extend(offset)$ 读取两个字节，经零扩展后写入 $x[rd]$ 。

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[11:0]		rs1	101	rd	0000011

li rd, immediate $x[rd] = immediate$

立即数加载 (*Load Immediate*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.

使用尽可能少的指令将常量加载到 $x[rd]$ 中。在 RV32I 中，它等同于执行 **lui** 和/或 **addi**；对于 RV64I，会扩展为这种指令序列 **lui, addi, slli, addi, slli, addi, slli, addi**。

lla rd, symbol $x[rd] = \&symbol$

本地地址加载 (*Load Local Address*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.

将 *symbol* 的地址加载到 $x[rd]$ 中。等同于执行 **auipc** rd, offsetHi, 然后是 **addi** rd, rd, offsetLo。

lr.d rd, (rs1) $x[rd] = LoadReserved64(M[x[rs1]])$

加载保留双字 (*Load-Reserved Doubleword*). R-type, RV64A.

从内存中地址为 $x[rs1]$ 中加载八个字节，写入 $x[rd]$ ，并对这个内存双字注册保留。

31	27	26	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
00010	aq	rl	00000	rs1	011	rd	0101111	

lr.w rd, (rs1) $x[rd] = \text{LoadReserved32}(M[x[rs1]])$

加载保留字 (*Load-Reserved Word*). R-type, RV32A and RV64A.

从内存中地址为 $x[rs1]$ 中加载四个字节，符号位扩展后写入 $x[rd]$ ，并对这个内存字注册保留。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
00010	aq	rl	00000	rs1	010	rd	0101111						

lw rd, offset(rs1) $x[rd] = \text{sext}(M[x[rs1] + \text{sext}(\text{offset})])[31:0]$

字加载 (*Load Word*). I-type, RV32I and RV64I.

从地址 $x[rs1] + \text{sign-extend}(\text{offset})$ 读取四个字节，写入 $x[rd]$ 。对于 RV64I，结果要进行符号位扩展。

压缩形式: **c.lwsp** rd, offset; **c.lw** rd, offset(rs1)

31	20	19	15	14	12	11	7	6	0
offset[11:0]				rs1	010	rd	0000011		

lwu rd, offset(rs1) $x[rd] = M[x[rs1] + \text{sext}(\text{offset})][31:0]$

无符号字加载 (*Load Word, Unsigned*). I-type, RV64I.

从地址 $x[rs1] + \text{sign-extend}(\text{offset})$ 读取四个字节，零扩展后写入 $x[rd]$ 。

31	20	19	15	14	12	11	7	6	0
offset[11:0]				rs1	110	rd	0000011		

lui rd, immediate $x[rd] = \text{sext}(\text{immediate}[31:12] \ll 12)$

高位立即数加载 (*Load Upper Immediate*). U-type, RV32I and RV64I.

将符号位扩展的 20 位立即数 *immediate* 左移 12 位，并将低 12 位置零，写入 $x[rd]$ 中。

压缩形式: **c.lui** rd, imm

31	12	11	7	6	0
immediate[31:12]			rd	0110111	

mret ExceptionReturn(Machine)

机器模式异常返回 (*Machine-mode Exception Return*). R-type, RV32I and RV64I 特权架构

从机器模式异常处理程序返回。将 *pc* 设置为 $\text{CSRs}[\text{mepc}]$ ，将特权级设置成

$\text{CSRs}[\text{mstatus}].\text{MPP}$, $\text{CSRs}[\text{mstatus}].\text{MIE}$ 置成 $\text{CSRs}[\text{mstatus}].\text{MPIE}$ ，并且将

$\text{CSRs}[\text{mstatus}].\text{MPIE}$ 为 1；并且，如果支持用户模式，则将 $\text{CSR}[\text{mstatus}].\text{MPP}$ 设置为 0。

31	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
0011000	00010	00000	000	00000	1110011						

mul rd, rs1, rs2

$$x[rd] = x[rs1] \times x[rs2]$$

乘 (*Multiply*). R-type, RV32M and RV64M.

把寄存器 x[rs2] 乘到寄存器 x[rs1] 上，乘积写入 x[rd]。忽略算术溢出。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000001	rs2	rs1	000	rd	0110011	

mulh rd, rs1, rs2

$$x[rd] = (x[rs1]_s \times_s x[rs2]) \gg_s \text{XLEN}$$

高位乘 (*Multiply High*). R-type, RV32M and RV64M.

把寄存器 x[rs2] 乘到寄存器 x[rs1] 上，都视为 2 的补码，将乘积的高位写入 x[rd]。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000001	rs2	rs1	001	rd	0110011	

mulhsu rd, rs1, rs2

$$x[rd] = (x[rs1]_s \times_u x[rs2]) \gg_s \text{XLEN}$$

高位有符号-无符号乘 (*Multiply High Signed-Unsigned*). R-type, RV32M and RV64M.

把寄存器 x[rs2] 乘到寄存器 x[rs1] 上，x[rs1] 为 2 的补码，x[rs2] 为无符号数，将乘积的高位写入 x[rd]。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000001	rs2	rs1	010	rd	0110011	

mulhu rd, rs1, rs2

$$x[rd] = (x[rs1]_u \times_u x[rs2]) \gg_u \text{XLEN}$$

高位无符号乘 (*Multiply High Unsigned*). R-type, RV32M and RV64M.

把寄存器 x[rs2] 乘到寄存器 x[rs1] 上，x[rs1]、x[rs2] 均为无符号数，将乘积的高位写入 x[rd]。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000001	rs2	rs1	011	rd	0110011	

mulw rd, rs1, rs2

$$x[rd] = \text{sext}((x[rs1] \times x[rs2])[31:0])$$

乘字 (*Multiply Word*). R-type, RV64M only.

把寄存器 x[rs2] 乘到寄存器 x[rs1] 上，乘积截为 32 位，进行有符号扩展后写入 x[rd]。忽略算术溢出。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000001	rs2	rs1	000	rd	0111011	

mv rd, rs1

$$x[rd] = x[rs1]$$

移动 (*Move*). 伪指令 (*Pseudoinstruction*), RV32I and RV64I.

把寄存器 x[rs1] 复制到 x[rd] 中。实际被扩展为 **addi** rd, rs1, 0

neg $rd, rs2$ $x[rd] = -x[rs2]$
取反(*Negate*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
把寄存器 $x[rs2]$ 的二进制补码写入 $x[rd]$ 。实际被扩展为 **sub** $rd, x0, rs2$ 。

negw $rd, rs2$ $x[rd] = sext((-x[rs2])[31:0])$
取非字(*Negate Word*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV64I only.
计算寄存器 $x[rs2]$ 对于 2 的补码, 结果截为 32 位, 进行符号扩展后写入 $x[rd]$ 。实际被扩展为 **subw** $rd, x0, rs2$ 。

nop *Nothing*
无操作(*No operation*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
将 *pc* 推进到下一条指令。实际被扩展为 **addi** $x0, x0, 0$ 。

not $rd, rs1$ $x[rd] = \sim x[rs1]$
取反(*NOT*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
把寄存器 $x[rs1]$ 对于 1 的补码 (即按位取反的值) 写入 $x[rd]$ 。实际被扩展为 **xori** $rd, rs1, -1$ 。

or $rd, rs1, rs2$ $x[rd] = x[rs1] | x[rs2]$
取或(*OR*). R-type, RV32I and RV64I.
把寄存器 $x[rs1]$ 和寄存器 $x[rs2]$ 按位取或, 结果写入 $x[rd]$ 。
压缩形式: **c.or** $rd, rs2$

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000000	rs2	rs1	110	rd	0110011	

ori $rd, rs1, immediate$ $x[rd] = x[rs1] | sext(immediate)$
立即数取或(*OR Immediate*). R-type, RV32I and RV64I.
把寄存器 $x[rs1]$ 和有符号扩展的立即数 *immediate* 按位取或, 结果写入 $x[rd]$ 。
压缩形式: **c.or** $rd, rs2$

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
Immediate[11:0]	rs2	rs1	110	rd	0010011	

rdcycle rd $x[rd] = CSRS[cycle]$
读周期计数器(*Read Cycle Counter*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
把周期数写入 $x[rd]$ 。实际被扩展为 **csrrs** $rd, cycle, x0$ 。

rdcycleh _{rd} x[rd] = CSRs[cycleh]
读周期计数器高位(*Read Cycle Counte High*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I only.
把周期数右移 32 位后写入 x[rd]。实际被扩展为 **csrrs** rd, cycleh, x0。

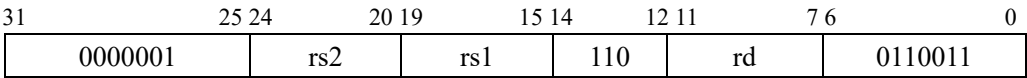
rdinstret _{rd} x[rd] = CSRs[instret]
读已完成指令计数器(*Read Instruction-Retired Counter*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
把已完成指令数写入 x[rd]。实际被扩展为 **csrrs** rd, instret, x0。

rdinstreth _{rd} x[rd] = CSRs[instreth]
读已完成指令计数器高位(*Read Instruction-Retired Counter High*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I only.
把已完成指令数右移 32 位后写入 x[rd]。实际被扩展为 **csrrs** rd, instreth, x0。

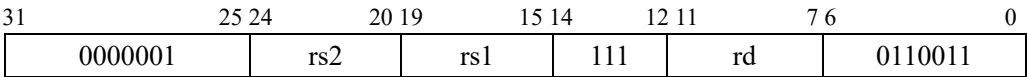
rdtime _{rd} x[rd] = CSRs[time]
读取时间(*Read Time*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
把当前时间写入 x[rd]，时间频率与平台相关。实际被扩展为 **csrrs** rd, time, x0。

rdtimeh _{rd} x[rd] = CSRs[timeh]
读取时间高位(*Read Time High*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I only.
把当前时间右移 32 位后写入 x[rd]，时间频率与平台相关。实际被扩展为 **csrrs** rd, timeh, x0。

rem rd, rs1, rs2 x[rd] = x[rs1] %_s x[rs2]
求余数(*Remainder*). R-type, RV32M and RV64M.
x[rs1]除以 x[rs2]，向 0 舍入，都视为 2 的补码，余数写入 x[rd]。



remu rd, rs1, rs2 x[rd] = x[rs1] %_u x[rs2]
求无符号数的余数(*Remainder, Unsigned*). R-type, RV32M and RV64M.
x[rs1]除以 x[rs2]，向 0 舍入，都视为无符号数，余数写入 x[rd]。



remuw rd, rs1, rs2 $x[rd] = \text{sext}(x[rs1][31:0] \%_u x[rs2][31:0])$
 求无符号数的余数字(*Remainder Word, Unsigned*). R-type, RV64M only.
 x[rs1]的低 32 位除以 x[rs2]的低 32 位, 向 0 舍入, 都视为无符号数, 将余数的有符号扩展写入 x[rd]。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000001	rs2	rs1	111	rd	0111011	

remw rd, rs1, rs2 $x[rd] = \text{sext}(x[rs1][31:0] \%_s x[rs2][31:0])$
 求余数字(*Remainder Word*). R-type, RV64M only.
 x[rs1]的低 32 位除以 x[rs2]的低 32 位, 向 0 舍入, 都视为 2 的补码, 将余数的有符号扩展写入 x[rd]。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000001	rs2	rs1	110	rd	0111011	

ret $pc = x[1]$
 返回(*Return*). 伪指令(*Pseudoinstruction*), RV32I and RV64I.
 从子过程返回。实际被扩展为 **jalr** x0, 0(x1)。

sb rs2, offset(rs1) $M[x[rs1] + \text{sext}(\text{offset})] = x[rs2][7:0]$
 存字节(*Store Byte*). S-type, RV32I and RV64I.
 将 x[rs2]的低位字节存入内存地址 x[rs1]+sign-extend(offset)。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[11:5]	rs2	rs1	000	offset[4:0]	0100011	

sc.d rd, rs2, (rs1) $x[rd] = \text{StoreConditonal64}(M[x[rs1], x[rs2]])$
 条件存入双字(*Store-Conditional Doubleword*). R-type, RV64A only.
 如果内存地址 x[rs1]上存在加载保留, 将 x[rs2]寄存器中的 8 字节数存入该地址。如果存入成功, 向寄存器 x[rd]中存入 0, 否则存入一个非 0 的错误码。

31	27 26 25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
00011	aq rl rs2	rs1	011	rd	0101111	

SC.W rd, rs2, (rs1) $x[rd] = \text{StoreConditional32}(M[x[rs1]], x[rs2])$

条件存入字 (*Store-Conditional Word*). R-type, RV32A and RV64A.

内存地址 $x[rs1]$ 上存在加载保留, 将 $x[rs2]$ 寄存器中的 4 字节数存入该地址。如果存入成功, 向寄存器 $x[rd]$ 中存入 0, 否则存入一个非 0 的错误码。

31	27	26	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
00011	aq	rl	rs2	rs1	010	rd	0101111						

sd rs2, offset(rs1) $M[x[rs1] + \text{sext}(\text{offset})] = x[rs2][63:0]$

存双字 (*Store Doubleword*). S-type, RV64I only.

将 $x[rs2]$ 中的 8 字节存入内存地址 $x[rs1] + \text{sign-extend}(\text{offset})$ 。

压缩形式: **c.sdsp** rs2, offset; **c.sd** rs2, offset(rs1)

31	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
offset[11:5]	rs2	rs1	011	offset[4:0]	0100011						

seqz rd, rs1 $x[rd] = (x[rs1] == 0)$

等于 0 则置位 (*Set if Equal to Zero*). 伪指令 (*Pseudoinstruction*), RV32I and RV64I.

如果 $x[rs1]$ 等于 0, 向 $x[rd]$ 写入 1, 否则写入 0。实际被扩展为 **sltiu** rd, rs1, 1。

sext.w rd, rs1 $x[rd] = \text{sext}(x[rs1][31:0])$

有符号字扩展 (*Sign-extend Word*). 伪指令 (*Pseudoinstruction*), RV64I only.

读入 $x[rs1]$ 的低 32 位, 有符号扩展, 结果写入 $x[rd]$ 。实际被扩展为 **addiw** rd, rs1, 0。

sfence.vma rs1, rs2 Fence(Store, AddressTranslation)

虚拟内存屏障 (*Fence Virtual Memory*). R-type, RV32I and RV64I 特权指令。

根据后续的虚拟地址翻译对之前的页表存入进行排序。当 $rs2=0$ 时, 所有地址空间的翻译都会受到影响; 否则, 仅对 $x[rs2]$ 标识的地址空间的翻译进行排序。当 $rs1=0$ 时, 对所选地址空间中的所有虚拟地址的翻译进行排序; 否则, 仅对其中包含虚拟地址 $x[rs1]$ 的页面地址翻译进行排序。

31	25	24	20	19	15	14	12	11	7	6	0
0001001	rs2	rs1	000	00000	1110011						

sgtz rd, rs2 $x[rd] = (x[rs1] >_s 0)$

大于 0 则置位 (*Set if Greater Than Zero*). 伪指令 (*Pseudoinstruction*), RV32I and RV64I.

如果 $x[rs2]$ 大于 0, 向 $x[rd]$ 写入 1, 否则写入 0。实际被扩展为 **slt** rd, x0, rs2。

sh $rs2, offset(rs1)$ $M[x[rs1] + sext(offset) = x[rs2][15:0]$

存半字 (*Store Halfword*). S-type, RV32I and RV64I.

将 $x[rs2]$ 的低位 2 个字节存入内存地址 $x[rs1] + sign-extend(offset)$ 。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[11:5]	rs2	rs1	001	offset[4:0]	0100011	

SW $rs2, offset(rs1)$ $M[x[rs1] + sext(offset) = x[rs2][31:0]$

存字 (*Store Word*). S-type, RV32I and RV64I.

将 $x[rs2]$ 的低位 4 个字节存入内存地址 $x[rs1] + sign-extend(offset)$ 。

压缩形式: **c.swsp** $rs2, offset; c.sw$ $rs2, offset(rs1)$

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
offset[11:5]	rs2	rs1	010	offset[4:0]	0100011	

sll $rd, rs1, rs2$ $x[rd] = x[rs1] \ll x[rs2]$

逻辑左移 (*Shift Left Logical*). R-type, RV32I and RV64I.

把寄存器 $x[rs1]$ 左移 $x[rs2]$ 位, 空出的位置填入 0, 结果写入 $x[rd]$ 。 $x[rs2]$ 的低 5 位 (如果是 RV64I 则是低 6 位) 代表移动位数, 其高位则被忽略。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000000	rs2	rs1	001	rd	0110011	

slli $rd, rs1, shamt$ $x[rd] = x[rs1] \ll shamt$

立即数逻辑左移 (*Shift Left Logical Immediate*). I-type, RV32I and RV64I.

把寄存器 $x[rs1]$ 左移 $shamt$ 位, 空出的位置填入 0, 结果写入 $x[rd]$ 。对于 RV32I, 仅当 $shamt[5]=0$ 时, 指令才是有效的。

压缩形式: **c.slli** $rd, shamt$

31	26 25	20 19	15 14	12 11	7 6	0
000000	shamt	rs1	001	rd	0010011	

slliw $rd, rs1, shamt$ $x[rd] = sext((x[rs1] \ll shamt)[31:0])$

立即数逻辑左移字 (*Shift Left Logical Word Immediate*). I-type, RV64I only.

把寄存器 $x[rs1]$ 左移 $shamt$ 位, 空出的位置填入 0, 结果截为 32 位, 进行有符号扩展后写入 $x[rd]$ 。仅当 $shamt[5]=0$ 时, 指令才是有效的。

31	26 25	20 19	15 14	12 11	7 6	0
000000	shamt	rs1	001	rd	0011011	

slw rd, rs1, rs2 $x[rd] = \text{sext}((x[rs1] \ll x[rs2][4:0])[31:0])$

逻辑左移字 (*Shift Left Logical Word*). R-type, RV64I only.

把寄存器 $x[rs1]$ 的低 32 位左移 $x[rs2]$ 位，空出的位置填入 0，结果进行有符号扩展后写入 $x[rd]$ 。 $x[rs2]$ 的低 5 位代表移动位数，其高位则被忽略。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000000	rs2	rs1	001	rd	0111011	

slt rd, rs1, rs2 $x[rd] = (x[rs1] <_s x[rs2])$

小于则置位 (*Set if Less Than*). R-type, RV32I and RV64I.

比较 $x[rs1]$ 和 $x[rs2]$ 中的数，如果 $x[rs1]$ 更小，向 $x[rd]$ 写入 1，否则写入 0。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000000	rs2	rs1	010	rd	0110011	

slti rd, rs1, immediate $x[rd] = (x[rs1] <_s \text{sext}(\text{immediate}))$

小于立即数则置位 (*Set if Less Than Immediate*). I-type, RV32I and RV64I.

比较 $x[rs1]$ 和有符号扩展的 *immediate*，如果 $x[rs1]$ 更小，向 $x[rd]$ 写入 1，否则写入 0。

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
immediate[11:0]	rs1	010	rd	0010011	

sltiu rd, rs1, immediate $x[rd] = (x[rs1] <_u \text{sext}(\text{immediate}))$

无符号小于立即数则置位 (*Set if Less Than Immediate, Unsigned*). I-type, RV32I and RV64I.

比较 $x[rs1]$ 和有符号扩展的 *immediate*，比较时视为无符号数。如果 $x[rs1]$ 更小，向 $x[rd]$ 写入 1，否则写入 0。

31	20 19	15 14	12 11	7 6	0
immediate[11:0]	rs1	011	rd	0010011	

sltu rd, rs1, rs2 $x[rd] = (x[rs1] <_u x[rs2])$

无符号小于则置位 (*Set if Less Than, Unsigned*). R-type, RV32I and RV64I.

比较 $x[rs1]$ 和 $x[rs2]$ ，比较时视为无符号数。如果 $x[rs1]$ 更小，向 $x[rd]$ 写入 1，否则写入 0。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000000	rs2	rs1	011	rd	0110011	

sltz rd, rs1 $x[rd] = (x[rs1] <_s 0)$

小于 0 则置位(*Set if Less Than to Zero*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.

如果 $x[rs1]$ 小于 0, 向 $x[rd]$ 写入 1, 否则写入 0。实际扩展为 **slt** rd, rs1, x0。

snez rd, rs2 $x[rd] = x[rs2] \neq 0$

不等于 0 则置位(*Set if Not Equal to Zero*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.

如果 $x[rs1]$ 不等于 0, 向 $x[rd]$ 写入 1, 否则写入 0。实际扩展为 **sltu** rd, x0, rs2。

sra rd, rs1, rs2 $x[rd] = (x[rs1] \gg_s x[rs2])$

算术右移(*Shift Right Arithmetic*). R-type, RV32I and RV64I.

把寄存器 $x[rs1]$ 右移 $x[rs2]$ 位, 空位用 $x[rs1]$ 的最高位填充, 结果写入 $x[rd]$ 。 $x[rs2]$ 的低 5 位 (如果是 RV64I 则是低 6 位) 为移动位数, 高位则被忽略。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0100000	rs2	rs1	101	rd	0110011	

srai rd, rs1, shamt $x[rd] = (x[rs1] \gg_s \text{shamt})$

立即数算术右移(*Shift Right Arithmetic Immediate*). I-type, RV32I and RV64I.

把寄存器 $x[rs1]$ 右移 *shamt* 位, 空位用 $x[rs1]$ 的最高位填充, 结果写入 $x[rd]$ 。对于 RV32I, 仅当 *shamt*[5]=0 时指令有效。

压缩形式: **c.srai** rd, shamt

31	26 25	20 19	15 14	12 11	7 6
010000	shamt	rs1	101	rd	0010011

sraiw rd, rs1, shamt $x[rd] = \text{sext}(x[rs1][31:0] \gg_s \text{shamt})$

立即数算术右移字(*Shift Right Arithmetic Word Immediate*). I-type, RV64I only.

把寄存器 $x[rs1]$ 的低 32 位右移 *shamt* 位, 空位用 $x[rs1][31]$ 填充, 结果进行有符号扩展后写入 $x[rd]$ 。仅当 *shamt*[5]=0 时指令有效。

压缩形式: **c.srai** rd, shamt

31	26 25	20 19	15 14	12 11	7 6
010000	shamt	rs1	101	rd	0011011

sraw rd, rs1, rs2

$$x[rd] = \text{sext}(x[rs1][31:0] \gg_s x[rs2][4:0])$$

算术右移字 (*Shift Right Arithmetic Word*). R-type, RV64I only.

把寄存器 $x[rs1]$ 的低 32 位右移 $x[rs2]$ 位，空位用 $x[rs1][31]$ 填充，结果进行有符号扩展后写入 $x[rd]$ 。 $x[rs2]$ 的低 5 位为移动位数，高位则被忽略。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0100000	rs2	rs1	101	rd	0111011	

sret

ExceptionReturn(Supervisor)

管理员模式例外返回 (*Supervisor-mode Exception Return*). R-type, RV32I and RV64I 特权指令。

从管理员模式的例外处理程序中返回，设置 pc 为 $CSRs[spec]$ ，权限模式为 $CSRs[sstatus].SPP$ ， $CSRs[sstatus].SIE$ 为 $CSRs[sstatus].SPIE$ ， $CSRs[sstatus].SPIE$ 为 1， $CSRs[sstatus].spp$ 为 0。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0001000	00010	00000	000	00000	1110011	

srl rd, rs1, rs2

$$x[rd] = (x[rs1] \gg_u x[rs2])$$

逻辑右移 (*Shift Right Logical*). R-type, RV32I and RV64I.

把寄存器 $x[rs1]$ 右移 $x[rs2]$ 位，空出的位置填入 0，结果写入 $x[rd]$ 。 $x[rs2]$ 的低 5 位（如果是 RV64I 则是低 6 位）代表移动位数，其高位则被忽略。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000000	rs2	rs1	101	rd	0110011	

srli rd, rs1, shamt

$$x[rd] = (x[rs1] \gg_u \text{shamt})$$

立即数逻辑右移 (*Shift Right Logical Immediate*). I-type, RV32I and RV64I.

把寄存器 $x[rs1]$ 右移 shamt 位，空出的位置填入 0，结果写入 $x[rd]$ 。对于 RV32I，仅当 $\text{shamt}[5]=0$ 时，指令才是有效的。

压缩形式: **c.srli** rd, shamt

31	26 25	20 19	15 14	12 11	7 6	0
000000	shamt	rs1	101	rd	0010011	

srliw rd, rs1, shamt

$$x[rd] = \text{sext}(x[rs1][31:0] \gg_u \text{shamt})$$

立即数逻辑右移字 (*Shift Right Logical Word Immediate*). I-type, RV64I only.

把寄存器 $x[rs1]$ 右移 shamt 位，空出的位置填入 0，结果截为 32 位，进行有符号扩展后写入 $x[rd]$ 。仅当 $\text{shamt}[5]=0$ 时，指令才是有效的。

31	26 25	20 19	15 14	12 11	7 6	0
000000	shamt	rs1	101	rd	0011011	

srlw rd, rs1, rs2 $x[rd] = \text{sext}(x[rs1][31:0] \gg_u x[rs2][4:0])$
 逻辑右移字(*Shift Right Logical Word*). R-type, RV64I only.
 把寄存器 $x[rs1]$ 的低 32 位右移 $x[rs2]$ 位, 空出的位置填入 0, 结果进行有符号扩展后写入 $x[rd]$ 。 $x[rs2]$ 的低 5 位代表移动位数, 其高位则被忽略。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0000000	rs2	rs1	101	rd	0111011	

sub rd, rs1, rs2 $x[rd] = x[rs1] - x[rs2]$
 减(*Subtract*). R-type, RV32I and RV64I.
 $x[rs1]$ 减去 $x[rs2]$, 结果写入 $x[rd]$ 。忽略算术溢出。
 压缩形式: **c.sub** rd, rs2

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0100000	rs2	rs1	000	rd	0110011	

subw rd, rs1, rs2 $x[rd] = \text{sext}((x[rs1] - x[rs2])[31:0])$
 减去字(*Subtract Word*). R-type, RV64I only.
 $x[rs1]$ 减去 $x[rs2]$, 结果截为 32 位, 有符号扩展后写入 $x[rd]$ 。忽略算术溢出。
 压缩形式: **c.subw** rd, rs2

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0100000	rs2	rs1	000	rd	0111011	

tail symbol $pc = \&\text{symbol}; \text{clobber } x[6]$
 尾调用(*Tail call*). 伪指令(Pseudoinstruction), RV32I and RV64I.
 设置 pc 为 symbol , 同时覆写 $x[6]$ 。实际扩展为 **auipc** $x6, \text{offsetHi}$ 和 **jalr** $x0, \text{offsetLo}(x6)$ 。

wfi $\text{while}(\text{noInterruptPending}) \text{idle}$
 等待中断(*Wait for Interrupt*). R-type, RV32I and RV64I 特权指令。
 如果没有待处理的中断, 则使处理器处于空闲状态。

31	25 24	20 19	15 14	12 11	7 6	0
0001000	00101	00000	000	00000	1110011	

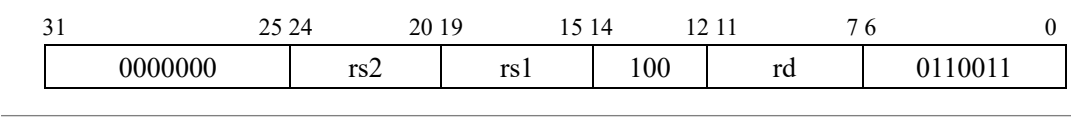
xor rd, rs1, rs2

$x[rd] = x[rs1] \wedge x[rs2]$

异或(*Exclusive-OR*). R-type, RV32I and RV64I.

$x[rs1]$ 和 $x[rs2]$ 按位异或，结果写入 $x[rd]$ 。

压缩形式: **c.xor** rd, rs2



xori rd, rs1, immediate

$x[rd] = x[rs1] \wedge \text{sext}(\text{immediate})$

立即数异或(*Exclusive-OR Immediate*). I-type, RV32I and RV64I.

$x[rs1]$ 和有符号扩展的 *immediate* 按位异或，结果写入 $x[rd]$ 。

压缩形式: **c.xor** rd, rs2

