

第四章 乘法和除法指令

若非必要，勿增实体。——奥卡姆的威廉（William of Occam），1320

4.1 引言

RV32M 向 RV32I 中添加了整数乘法和除法指令。图 4.1 是 RV32M 扩展指令集的图形表示，图 4.2 列出了它们的操作码。

除法是直截了当的。可以回想起如下的式子：

商 = (被除数 - 余数) ÷ 除数

或者

被除数 = 除数 × 商 + 余数

余数 = 被除数 - (商 × 除数)

RV32M 具有有符号和无符号整数的除法指令：divide(div)和 divide unsigned(divu)，它们将商放入目标寄存器。在少数情况下，程序员需要余数而不是商，因此 RV32M 提供 remainder(rem)和 remainder unsigned(remu)，它们在目标寄存器写入余数，而不是商。

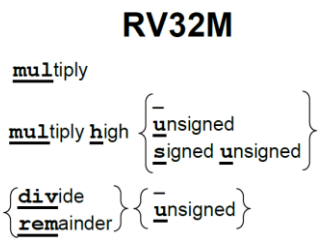


图 4.1: RV32M 指令的图示

31	25 24	20 19	15 14 12 11	7 6	0	
0000001	rs2	rs1	000	rd	0110011	R mul
0000001	rs2	rs1	001	rd	0110011	R mulh
0000001	rs2	rs1	010	rd	0110011	R mulhsu
0000001	rs2	rs1	011	rd	0110011	R mulhu
0000001	rs2	rs1	100	rd	0110011	R div
0000001	rs2	rs1	101	rd	0110011	R divu
0000001	rs2	rs1	110	rd	0110011	R rem
0000001	rs2	rs1	111	rd	0110011	R remu

图 4.2: RV32M 操作码映射包含指令布局，操作码，指令格式类型和它们的名称（[Waterman and Asanovic 2017]的表 19.2 是此图的基础。）

乘法的式子很简单：

积 = 被乘数 × 乘数

它比除法要更为复杂，是因为积的长度是乘数和被乘数长度的和。将两个 32 位数相乘得到的是 64 位的乘积。为了正确地得到一个有符号或无符号的 64 位积，RISC-V 中带有四个乘

法指令。要得到整数 32 位乘积（64 位中的低 32 位）就用 mul 指令。要得到高 32 位，如果操作数都是有符号数，就用 mulh 指令；如果操作数都是无符号数，就用 mulhu 指令；如果一个有符号一个无符号，可以用 mulhsu 指令。在一条指令中完成把 64 位积写入两个 32 位寄存器的操作会使硬件设计变得复杂，所以 RV32M 需要两条乘法指令才能得到一个完整的 64 位积。

对许多微处理器来说，整数除法是相对较慢的操作。如前述，除数为 2 的幂次的无符号除法可以用右移来代替。事实证明，通过乘以近似倒数再修正积的高 32 位的方法，可以优化除数为其它数的除法。例如，图 4.3 显示了 3 为除数的无符号除法的代码。

```
# Compute unsigned division of a0 by 3 using multiplication.
0: aaaab2b7    lui    t0,0xaaaab # t0 = 0xaaaaaab
4: aab28293    addi   t0,t0,-1365 #    = ~ 2^32 / 1.5
8: 025535b3    mulhu  a1,a0,t0   # a1 = ~ (a0 / 1.5)
c: 0015d593    srli   a1,a1,0x1  # a1 = (a0 / 3)
```

图 4.3: RV32M 中用乘法来实现除以常数操作的代码。要证明该算法适用于任何除数需要仔细的数值分析，而对于其它除数，其中的修正步骤更为复杂。算法正确性的证明以及产生倒数和修正步骤的算法在 [Granlund and Montgomery 1994] 中可以找到。

有什么不同之处？ 长期以来，ARM-32 只有乘法而无除法指令。直到第一台 ARM 处理器诞生的大约 20 年后（2005 年），除法指令才成为 ARM 的必要组成部分。MIPS-32 使用特殊寄存器（HI 和 LO）作为乘法和除法指令的唯一目标寄存器。虽然这种设计降低了早期 MIPS 处理器实现的复杂性，但它需要额外的移动指令以使用乘法或除法的结果，这可能会降低性能。HI 和 LO 寄存器也会增加架构状态，使得在任务之间切换的速度稍慢。

批注 [GL1]: increase the architectural state（不解）

补充说明：mulhsu 对于多字有符号乘法很有用

当乘数有符号且被乘数无符号时，mulhsu 产生乘积的上半部分。当乘数的最高有效字（包含符号位）与被乘数的较低有效字（无符号）相乘时，它是多字有符号乘法的子步骤。该指令将多字乘法的性能提高了约 15%。

补充说明：检查是否除零也很简单

要测试除数是否为零，只需要在除法操作之前加入一条用于测试的 beqz 指令。RV32I 不会因为除零操作而 trap，因为极少数程序需要这种行为，而且在那些软件中可以很容易地检查是否除零。当然，除以其它常数永远不需要检查。

补充说明：mulh 和 mulhu 可以检查乘法的溢出

如果 mulhu 的结果为零，则在使用 mul 进行无符号乘法时不会溢出。类似地，如果 mulh 结果中的所有位与 mul 结果的符号位匹配（即当 mul 结果为正时 mulh 结果为 0，mul 结果为负时 mulh 结果为十六进制的 ffffffff），则使用 mul 进行有符号乘法时不会溢出。

4.2 结束语

最便宜，最快，并且最可靠的组件是那些没有出现的组件。
——C. Gordon Bell，著名小型计算机的架构师

为了为嵌入式应用提供最小的 RISC-V 处理器，乘法和除法被归入 RISC-V 的第一个可选标准扩展的一部分。然而，许多 RISC-V 处理器将包括 RV32M。

4.3 更多请见

T. Granlund and P. L. Montgomery. Division by invariant integers using multiplication. In *ACM SIGPLAN Notices*, volume 29, pages 61–72. ACM, 1994.

A. Waterman and K. Asanović, editors. *The RISC-V Instruction Set Manual, Volume I: User-Level ISA, Version 2.2*. May 2017. URL <https://riscv.org/specifications/>.