

第四章 处理器体系结构

教师：史先俊
计算机科学与技术学院
哈尔滨工业大学

课程概况

- 背景
 - 指令集
 - 逻辑设计
- 串行实现
 - 简单但是速度较慢的处理器设计
- 流水线
 - 使得更多事务同时进行
- 流水线实现
 - 实现流水线的思想
- 高级话题
 - 性能分析
 - 高性能处理器设计

内容

■ 我们的方法

- 研究对指定指令集的设计
 - Y86-64: 一个Intel x86-64的简单版本
 - 如果你理解一种, 那么你基本就了解所有种类
- 研究微体系结构层
 - 将各个硬件块聚合成一个处理器结构
 - 内存, 功能单元等
 - 通过控制逻辑来确保每条指令正确的运行
- 用简单的硬件描述语言描述控制逻辑
 - 可以扩展和修改
 - 通过仿真进行测试
 - 通过VHDL进行设计的路线 参见Web aside ARCH:VLOG

日程安排

■ 第一周

- 指令集体系结构
- 逻辑设计

目标: 编写并且测试汇编程序

■ 第二周

- 串行实现
- 流水线和初级流水线实现

目标: 在串行实现上增加指令集

■ 第三周

- 使流水线运行
- 现代处理器设计

目标: 优化程序+流水线的设计使其达到高性能

第四章 处理器体系结构

——指令集体系结构/架构

功能转换：上层是下层的**抽象**，下层是上层的**实现**
底层为上层提供支撑环境！



教师：史先俊
计算机科学与技术学院
哈尔滨工业大学

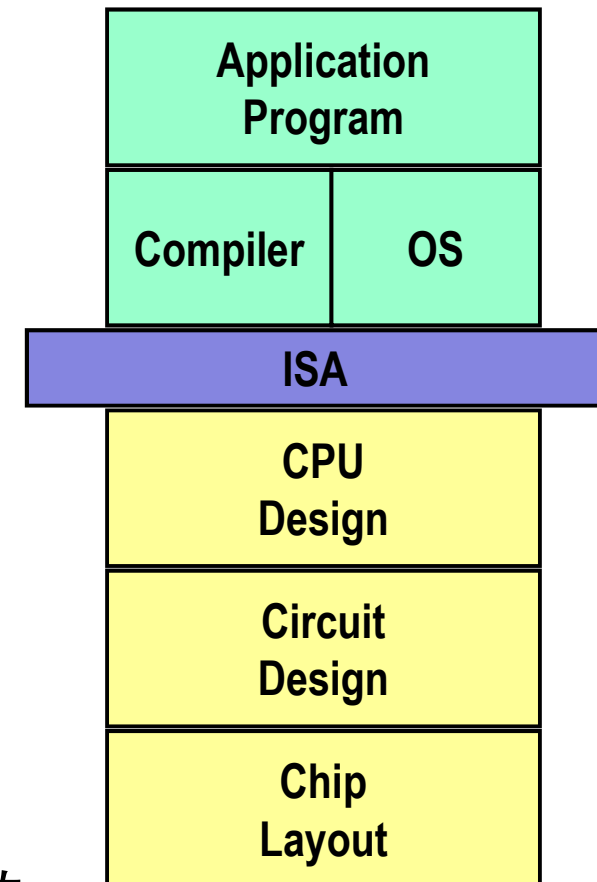
指令集架构

■ 汇编语言视角

- 处理器状态
 - 寄存器, 内存, ...
- 指令
 - `addq, pushq, ret, ...`
 - 指令是如何编码成字节的

■ 抽象层

- 上: 如何对机器进行编程
 - 处理器顺序执行指令
- 下: 什么需要建立
 - 用多样的技巧使得机器快速运转
 - 比如 同时处理多条指令



Y86-64 处理器状态

RF: 程序寄存器/寄存器文件
(Program registers)

%rax	%rsp	%r8	%r12
%rcx	%rbp	%r9	%r13
%rdx	%rsi	%r10	%r14
%rbx	%rdi	%r11	

CC: 条件码
(Condition codes)

ZF	SF	OF
----	----	----

PC

Stat: 程序状态
(Program status)

--

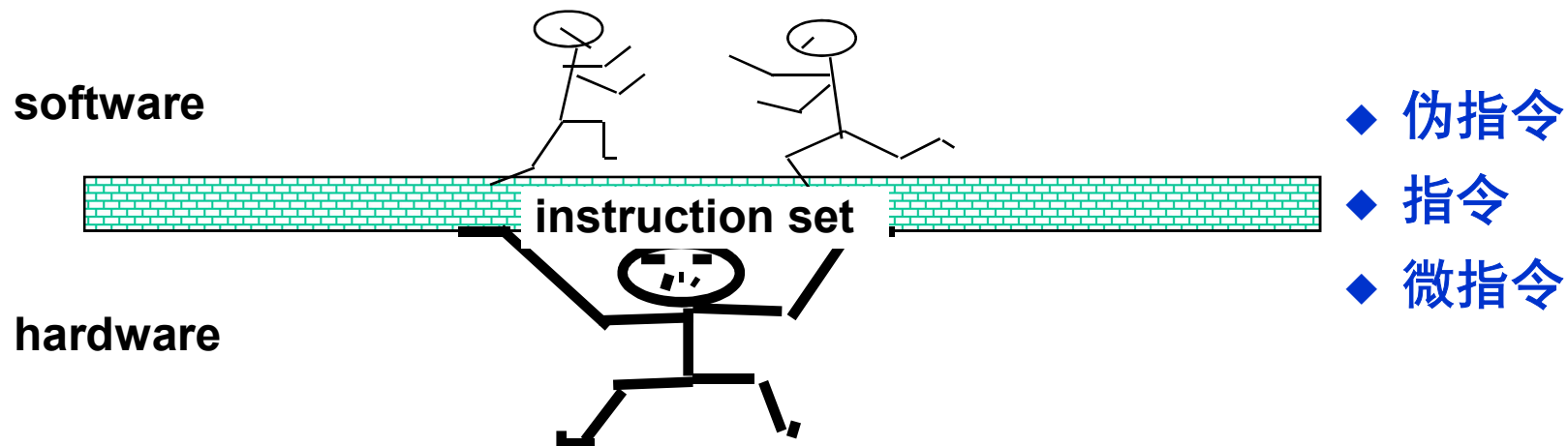
DMEM: 内存
(Memory)

--

- **程序寄存器：15 个寄存器 (除了 %r15)，每个64位**
- **条件码：由算术指令或逻辑指令设置的1-bit 标识(flag)**
 - ZF: 零(Zero) SF:负 (Negative) OF: 溢出(Overflow)
- **程序计数器：保存下一条指令的地址**
- **程序状态：指示是正常操作或一些错误状态**
- **内存：可字节编址的存储阵列，小端字节顺序存储的字**

指令的层次

- 指令系统处在软/硬件交界面，同时被硬件设计者和系统程序员看到
- 硬件设计者角度：指令系统为**CPU**提供功能需求，要求易于硬件设计
- 系统程序员角度：通过指令系统来使用硬件，要求易于编写编译器
- 指令系统设计的好坏还决定了：计算机的性能和成本



ISA指令系统的设计原则

- **RICS还是CISC?**
 - 还是Risc+Cisc
- **完备性：ISA的指令足够使用**
 - 功能齐全：不能没有加法指令，但可以没有inc指令
- **有效性：程序能够高效率运行**
 - 生成代码小：频率高的操作码、操作数短
- **规整性：对称性、匀齐性、一致性**
 - `push rsp / pop rsp` 应保证栈顶恢复
- **兼容性：相同的基本结构、共同的基本指令集**
- **灵活性：**
 - 如操作数的寻址方式：满足基本的数据类型访问
- **可扩充性：操作码字段预留一定的空间**

ISA指令格式的选择应遵循的几条基本原则

- 应尽量短
- 要有足够的操作码位数
- 指令编码必须有唯一的解释，否则是不合法的指令
- 指令字长应是字节的整数倍
- 合理地选择地址字段的个数
- 指令尽量规整

与指令集设计相关的重要方面

- 操作码的全部组成：操作码个数 / 种类 / 复杂度

LD/ST/INC/BRN 四种指令已足够编制任何可计算程序，但程序会很长

- 数据类型：对哪几种数据类型完成操作
- 指令格式：指令长度 / 地址码个数 / 各字段长度
- 通用寄存器：个数 / 功能 / 长度
- 寻址方式：操作数地址的指定方式
- 下条指令的地址如何确定：顺序，PC+1；条件转移；无条件转移；
一般通过对操作码进行不同的编码来定义不同的含义，
操作码-指令码相同时，再由功能码定义不同的含义！

一条指令包含的信息

- 操作码：指定操作类型—指令类型
(操作码长度：固定 / 可变)
数据类型bwlq, 短/近/远, 方向, 寻址方式, 条件码等
- 源操作数参照：一个或多个源操作数所在的地址
(操作数来源：内存/寄存器/I/O端口/指令本身)
- 结果值参照：产生的结果存放何处（目的操作数）
(结果地址：内存/寄存器/I/O端口)
- 下一条指令地址：下条指令存放何处
(下条指令地址：内存)
(正常情况隐含在PC中, 改变顺序时由指令给出)

指令的地址可以多个：0、1、2、3、……

Y86-64 指令集 1

字节	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
halt	0	0								
nop	1	0								
cmovXX rA, rB	2	fn	rA	rB						
irmovq V, rB	3	0	F	rB	V					
rmmovq rA, D(rB)	4	0	rA	rB	D					
mrmmovq D(rB), rA	5	0	rA	rB	D					
OPq rA, rB	6	fn	rA	rB						
jXX Dest	7	fn	Dest							
call Dest	8	0	Dest							
ret	9	0								
pushq rA	A	0	rA	F						
popq rA	B	0	rA	F						

F指的是R15的编码1111

或者就是16进制的F

Y86-64 指令集

■ 格式

- 1-10字节的信息，从内存读取
 - 根据第一字节可判断指令长度
 - 比x86-64的指令类型少
 - 比x86-64的编码简单
- 每次存取更改程序状态的一些部分

Y86-64 指令集 2

字节	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
halt	0	0								
nop	1	0								
cmovXX rA, rB	2	fn	rA	rB						
irmovq V, rB	3	0	F	rB			V			
rmmovq rA, D(rB)	4	0	rA	rB						D
rmovq D(rB), rA	5	0	rA	rB						D
OPq rA, rB	6	fn	rA	rB						
jXX Dest	7	fn								Dest
call Dest	8	0								Dest
ret	9	0								
pushq rA	A	0	rA	F						
popq rA	B	0	rA	F						

rrmovq 2 0
cmovle 2 1
cmovl 2 2
cmove 2 3
cmovne 2 4
cmovge 2 5
cmovg 2 6

Y86-64 指令集 3

字节	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
halt	0	0								
nop	1	0								
cmovXX rA, rB	2	fn	rA	rB						
irmovq V, rB	3	0	F	rB			V			
rmmovq rA, D(rB)	4	0	rA	rB			D			
mrmmovq D(rB), rA	5	0	rA	rB			D			
OPq rA, rB	6	fn	rA	rB						
jXX Dest	7	fn								
call Dest	8	0								
ret	9	0								
pushq rA	A	0	rA	F						
popq rA	B	0	rA	F						

addq 6 0
subq 6 1
andq 6 2
xorq 6 3

Y86-64 指令集 4

字节	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
halt	0	0								
nop	1	0								
cmovXX rA, rB	2	fn	rA	rB						
irmovq V, rB	3	0	F	rB						V
rmmovq rA, D(rB)	4	0	rA	rB						D
mrmmovq D(rB), rA	5	0	rA	rB						D
OPq rA, rB	6	fn	rA	rB						
jXX Dest	7	fn								Dest
call Dest	8	0								Dest
ret	9	0								
pushq rA	A	0	rA	F						
popq rA	B	0	rA	F						

jmp 7 0
 jle 7 1
 jl 7 2
 je 7 3
 jne 7 4
 jge 7 5
 jg 7 6

寄存器编码

- 每个寄存器都有1个4-bit的 ID

%rax	0	%r8	8
%rcx	1	%r9	9
%rdx	2	%r10	A
%rbx	3	%r11	B
%rsp	4	%r12	C
%rbp	5	%r13	D
%rsi	6	%r14	E
%rdi	7	No Register	F

- 和在 x86-64 编码一样
- 寄存器 ID 15 (0xF) 意味着“无寄存器”
 - 会在硬件设计中的许多地方用到

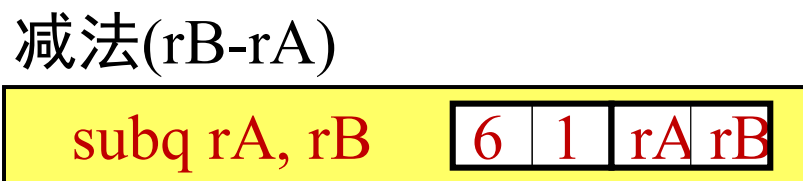
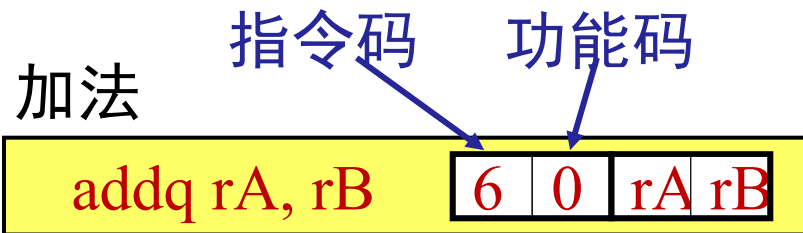
指令示例

■ 加法指令



- 将rA中的值加到rB中
 - 结果存储到rB中
 - 注意Y86-64仅允许在寄存器数据中应用加法
- 根据结果设置条件码
- e.g., **addq %rax,%rsi** 编码: 60 06
- 两字节编码
 - 第一字节指出指令类型
 - 第二字节指出源和目的寄存器

算数和逻辑操作



- 通常以“OPq”表述
- 编码区别仅在于“功能码”
 - 指令第一个字的低4位
- 设置条件码作为指令执行的副作用

传送操作

寄存器 → 寄存器

rrmovq rA, rB 2 0

立即数 → 寄存器

irmovq V, rB 3 0 F rB V

寄存器 → 内存

rmmovq rA, D(rB) 4 0 rA rB D

内存 → 寄存器

rmrmovq D(rB), rA 5 0 rA rB D

- 与x86-64中`movq`指令类似
- 内存地址：更简单的格式
- 赋予不同名称，以保持他们的唯一性

传送指令示例

X86-64

movq \$0xabcd, %rdx

编码: 30 82 cd ab 00 00 00 00 00 00

movq %rsp, %rbx

编码: 20 43

movq -12(%rbp),%rcx

编码: 50 15 f4 ff ff ff ff ff ff

movq %rsi,0x41c(%rsp)

编码: 40 64 1c 04 00 00 00 00 00 00

Y86-64

irmovq \$0xabcd, %rdx

rrmovq %rsp, %rbx

mrmovq -12(%rbp),%rcx

rmmovq %rsi,0x41c(%rsp)

条件传送指令

无条件传送

<code>rrmovq rA, rB</code>	2	0	rA	rB
----------------------------	---	---	----	----

当小于或等于时传送

<code>cmovle rA, rB</code>	2	1	rA	rB
----------------------------	---	---	----	----

当小于时传送

<code>cmovl rA, rB</code>	2	2	rA	rB
---------------------------	---	---	----	----

当等于时传送

<code>cmove rA, rB</code>	2	3	rA	rB
---------------------------	---	---	----	----

当不等于时传送

<code>cmovne rA, rB</code>	2	4	rA	rB
----------------------------	---	---	----	----

当大于或等于时传送

<code>cmovge rA, rB</code>	2	5	rA	rB
----------------------------	---	---	----	----

当大于时传送

<code>cmovg rA, rB</code>	2	6	rA	rB
---------------------------	---	---	----	----

- 通常表示为“**cmovXX**”
- 指令编码仅在“功能码”上有区别
- 以条件码的值为依据
- **rrmovq** 指令的变体
 - (有条件地)从源寄存器复制到目的寄存器

跳转指令

跳转（有条件地）



- 通常表示为 “jXX”
- 指令编码仅在“功能码” 上有区别
- 以条件码的值为依据
- 和x86-64中的操作相同
- 对目的地址进行完整编码
 - 和x86-64中的PC相对地址编码不一样

跳转指令

无条件跳转

jmp Dest 7 0 Dest

当小于或等于时跳转

jle Dest 7 1 Dest

当小于时跳转

jl Dest 7 2 Dest

当等于时跳转

je Dest 7 3 Dest

当不等于时跳转

jne Dest 7 4 Dest

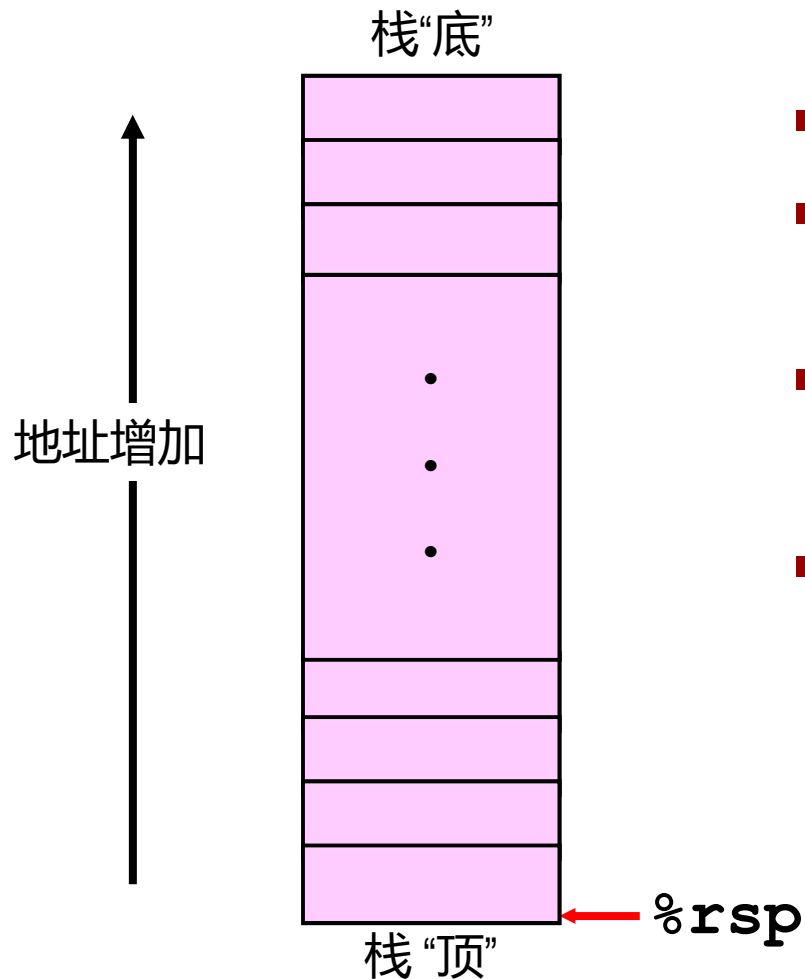
当大于或等于时跳转

jge Dest 7 5 Dest

当大于时跳转

jg Dest 7 6 Dest

Y86-64 程序栈



- 存储程序数据的内存区域
- 在 Y86-64 (和 x86-64) 中用于支持过程调用
- $\%rsp$ 指向栈顶
 - 栈顶元素的地址
- 栈向低地址的方向增长
 - 入栈操作必须先减小栈指针
 - 出栈操作后，增加栈指针

栈操作

pushq rA

A	0	rA	F
---	---	----	---

- %rsp 减 8
- 将rA 中保存的字，存储到内存中 %rsp 处
- 与 x86-64 相似

popq rA

B	0	rA	F
---	---	----	---

- 从内存中的 %rsp 位置读取字
- 存放到 rA 中
- %rsp 加 8
- 与 x86-64 相似

子程序调用和返回

call Dest

8 0 Dest

- 将下一条指令的地址入栈
- 开始执行位于 Dest 的指令
- 与 x86-64 相似

ret

9 0

- 从栈中弹出值
- 用作下一条指令的地址
- 与 x86-64 相似

其他指令

nop

1 0

- 不作任何事

halt

0 0

- 停止执行指令
- x86-64 有类似指令，但是不能在用户模式下执行
- 我们将会用这条指令来终止模拟器
- 编码确保：命中初值为0的内存时，程序会停止

状态条件

名字	编码
AOK	1

名字	编码
HLT	2

名字	编码
ADR	3

名字	编码
INS	4

- 正常操作
- 遇到停止指令halt
- 遇到错误地址 (指令或者数据)
- 遇到无效的指令
- 预期行为
 - 如果是AOK, 继续执行
 - 否则, 停止程序执行

编写 Y86-64 代码

■ 尽量多用C编译器

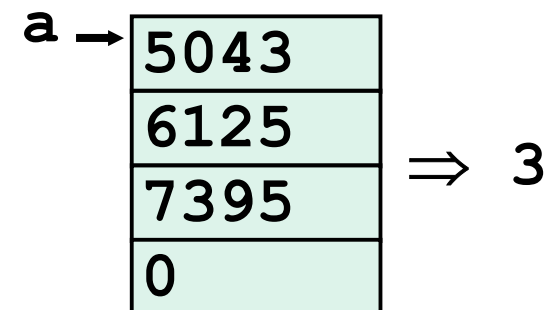
- 用 C 编码
- 在 x86-64 中用 `gcc -Og -S` 编译
- 把 X86-64 的 `asm` 直译到 Y86-64 中
- 现代编译器使得这个过程更加复杂

留个奢望：
做个Y86-64
的C编译器
？

■ 编码示例

- 计算以 NULL-0 结尾的列表中元素的个数

```
int len1(int a[]);
```



Y86-64 代码生成示例

■ 首先尝试

- 编写典型的数组代码

```
/* Find number of elements in
   null-terminated list */
long len(long a[])
{
    long len;
    for (len = 0; a[len]; len++)
        ;
    return len;
}
```

- 用 `gcc -Og -s` 编译

■ 问题

- 在 Y86-64 上难以做数组的索引
 - 因为没有带比例因子的寻址模式

L3:

```
addq $1,%rax
cmpq $0, (%rdi,%rax,8)
jne L3
```

Y86-64 代码生成示例 2

■ 然后尝试

- 用 C 语言模仿 Y86-64 的代码

```
long len2(long *a){  
    long ip = (long) a;  
    long val = *(long *) ip;  
    long len = 0;  
    while (val) {  
        ip += sizeof(long);  
        len++;  
        val = *(long *) ip;  
    }  
    return len;  
}
```

■ 结果

- 编译器生成和之前一模一样的代码
- 编译器将两个版本转换成相同的中间形式

Y86-64 代码生成示例 3

```

len:
    irmovq $1, %r8          # Constant 1
    irmovq $8, %r9          # Constant 8
    irmovq $0, %rax         # len = 0
    mrmovq (%rdi), %rdx     # val = *a
    andq %rdx, %rdx         # Test val
    je Done                 # If zero,
goto Done
Loop:
    addq %r8, %rax          # len++
    addq %r9, %rdi          # a++
    mrmovq (%rdi), %rdx     # val = *a
    andq %rdx, %rdx         # Test val
    jne Loop                # If !0, goto
Loop
Done:
    ret

```

寄存器	用途
%rdi	a
%rax	len
%rdx	val
%r8	1
%r9	8

Y86-64 程序结构 1

```

init:                # Initialization
    ...
    call Main
    halt
    .align 8          # Program data
array:
    ...
Main:                # Main function
    ...
    call len
    ...
len:                 # Length function
    ...
    .pos 0x100        # Placement of stack
Stack:

```

- 程序从地址0处开始
- 一定要建立栈
 - 位于哪里
 - 指针的值
 - 确保不要覆盖代码区域
- 一定要初始化数据

Y86-64 程序结构 2

init:

```
# Set up stack pointer
irmovq Stack, %rsp
# Execute main program
call Main
# Terminate
halt
```

```
# Array of 4 elements + terminating 0
.align 8
```

Array:

```
.quad 0x000d000d000d000d
.quad 0x00c000c000c000c0
.quad 0x0b000b000b000b00
.quad 0xa000a000a000a000
.quad 0
```

- 程序从地址0处开始
- 一定要建立栈
 - 位于哪里
 - 指针的值
 - 确保不要覆盖代码区域
- 一定要初始化数据
- 可以用符号化名字

Y86-64 程序结构 3

Main:

```
irmovq array,%rdi  
# call len(array)  
call len  
ret
```

- 建立对 len 的调用
 - 遵循 x86-64 的过程约定
 - 将数组地址做为实参

汇编 Y86-64 程序

```
unix> yas len.y
```

- 生成“目标代码”文件 `len.yo`
 - 实际上看起来像反汇编程序的输出

```
0x054: | len:
0x054: 30f80100000000000000 |   irmovq $1, %r8           # Constant 1
0x05e: 30f90800000000000000 |   irmovq $8, %r9           # Constant 8
0x068: 30f00000000000000000 |   irmovq $0, %rax          # len = 0
0x072: 50270000000000000000 |   mrmovq (%rdi), %rdx       # val = *a
0x07c: 6222 |   andq %rdx, %rdx          # Test val
0x07e: 73a000000000000000 |   je Done                  # If zero, goto Done
0x087: | Loop:
0x087: 6080 |   addq %r8, %rax           # len++
0x089: 6097 |   addq %r9, %rdi           # a++
0x08b: 50270000000000000000 |   mrmovq (%rdi), %rdx       # val = *a
0x095: 6222 |   andq %rdx, %rdx          # Test val
0x097: 748700000000000000 |   jne Loop                  # If !0, goto Loop
0x0a0: | Done:
0x0a0: 90 |   ret
```

模拟 Y86-64 程序

```
unix> yis len.yo
```

- 指令集模拟器
 - 每条指令在不同处理器状态的计算效果
 - 打印状态的变化

Stopped in 33 steps at PC = 0x13. Status 'HLT', CC Z=1 S=0 O=0

Changes to registers:

%rax:	0x0000000000000000	0x0000000000000004
%rsp:	0x0000000000000000	0x0000000000000100
%rdi:	0x0000000000000000	0x0000000000000038
%r8:	0x0000000000000000	0x0000000000000001
%r9:	0x0000000000000000	0x0000000000000008

Changes to memory:

0x00f0:	0x0000000000000000	0x0000000000000053
0x00f8:	0x0000000000000000	0x0000000000000013

CISC 指令集

- 复杂指令集计算机
 - IA32-64 是一个例子
- 基于栈的指令集
 - 用栈来传参数，保存程序计数器
 - 明确的入栈、出栈指令
- 算术指令可以访存
 - `addq %rax, 12(%rbx,%rcx,8)`
 - 需要读写内存
 - 复杂地址计算
- 条件码
 - 设定为算术和逻辑指令的副作用
- 理念
 - 添加指令以便执行“典型”的编程任务

RISC 指令集

- 精简指令集计算机
- IBM的内部项目，后来被 Hennessy (斯坦福大学) 和 Patterson (伯克利大学)推广
- 更少、更简单的指令
 - 需要用更多的指令来完成任务
 - 可以用小且快速的硬件来执行
- 基于寄存器的指令集
 - 更多（一般32个)的寄存器
 - 用于存储参数、返回指针和临时存储
- 仅加载（load）和存储(store)指令能够访存
 - 与Y86-64中的 `rmovq` 和 `rmmovq` 类似
- 没有条件码：测试指令用寄存器返回0或1

MIPS 寄存器

\$0	\$0	常数0
\$1	\$at	保留 (暂时)
\$2	\$v0	函数调用返回值
\$3	\$v1	
\$4	\$a0	
\$5	\$a1	过程参数
\$6	\$a2	
\$7	\$a3	
\$8	\$t0	调用者保存暂存单元, 被调用函数可覆盖写
\$9	\$t1	
\$10	\$t2	
\$11	\$t3	
\$12	\$t4	
\$13	\$t5	
\$14	\$t6	
\$15	\$t7	

\$16	\$s0	被调用者保存暂存单元, 调用过程不可以覆盖写
\$17	\$s1	
\$18	\$s2	
\$19	\$s3	
\$20	\$s4	
\$21	\$s5	
\$22	\$s6	
\$23	\$s7	调用者保存的暂存单元
\$24	\$t8	
\$25	\$t9	操作系统的保留区域
\$26	\$k0	
\$27	\$k1	全局指针
\$28	\$gp	
\$29	\$sp	栈指针
\$30	\$s8	子程序的临时寄存器
\$31	\$ra	返回地址

MIPS 指令示例

寄存器-寄存器

Op	Ra	Rb	Rd	00000	Fn
----	----	----	----	-------	----

addu \$3,\$2,\$1 # 寄存器加: $\$3 = \$2 + \$1$

寄存器-立即数

Op	Ra	Rb	Immediate
----	----	----	-----------

addu \$3,\$2, 3145 # 立即数加: $\$3 = \$2 + 3145$

sll \$3,\$2,2 # 左移: $\$3 = \$2 \ll 2$

分支 (branch)

Op	Ra	Rb	Offset
----	----	----	--------

beq \$3,\$2,dest # 当 $\$3 = \2 时分支

加载/存储

Op	Ra	Rb	Offset
----	----	----	--------

lw \$3,16(\$2) # 加载字: $\$3 = M[\$2 + 16]$

sw \$3,16(\$2) # 存储字: $M[\$2 + 16] = \3

CISC vs. RISC

■ 起初的辩论

- 强硬的观点
- CISC 支持者---容易编译, 代码的字节数更少
- RISC 支持者---能更好地优化编译器, 用简单的芯片设计能快速运行

■ 目前的状态

- 对于台式机处理器来说, 指令集架构的选择不是技术问题
 - 拥有足够的硬件, 可以让任何程序快速运行
 - 代码的兼容性更重要
- x86-64吸纳了很多RISC特性
 - 更多的寄存器; 用寄存器传递参数
- 对于嵌入式处理器, RISC 更适合
 - 更小、更便宜、功耗更低
 - 大部分手机用ARM处理器

总结

■ Y86-64 指令集架构

- 和x86-64类似的状态、指令
- 更简单的编码
- 介于CISC 和 RISC 之间

■ ISA设计有多重要？

- 没有以前更重要
 - 拥有足够的硬件资源，几乎可以让任何程序都能快速运行