嵌入式系统设计与应用

第五章 程序设计与分析（3）

西安交通大学电信学院

任鹏举

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

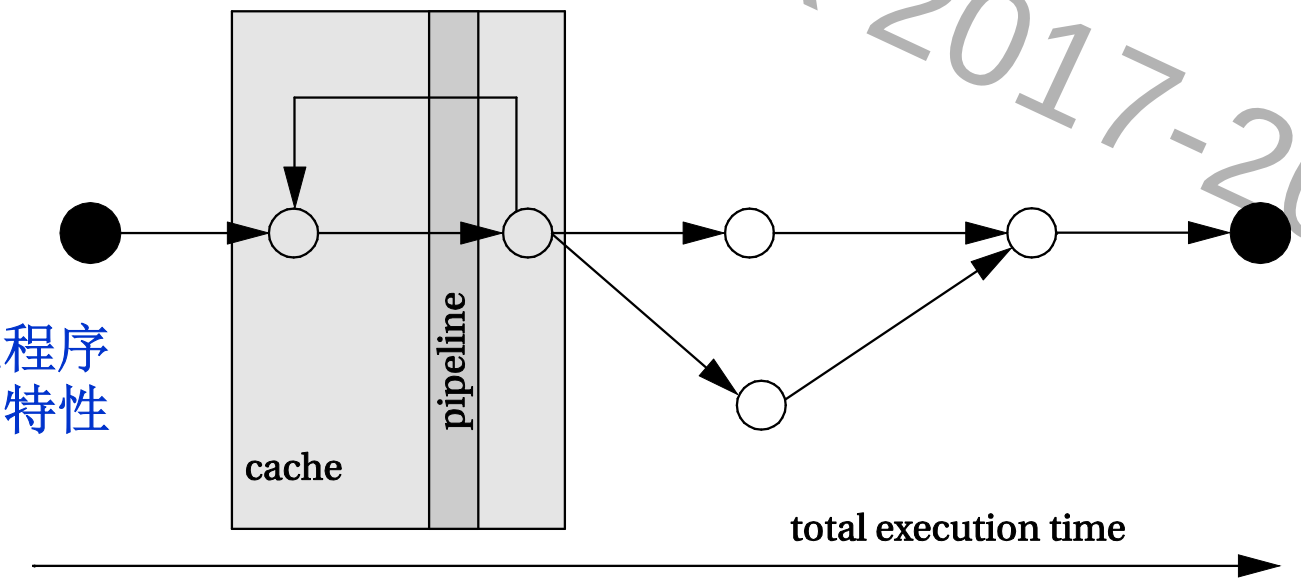
6 程序级性能分析

- 嵌入式软件为何需要性能分析？
  - 嵌入式系统必须满足一定的截止时限
    - 很快不一定代表一定足够快。
  - 需要能够分析程序执行时间
    - 最差情况，不是典型情况
  - 需要技术来可靠的改进程序执行的时间

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

程序级性能分析

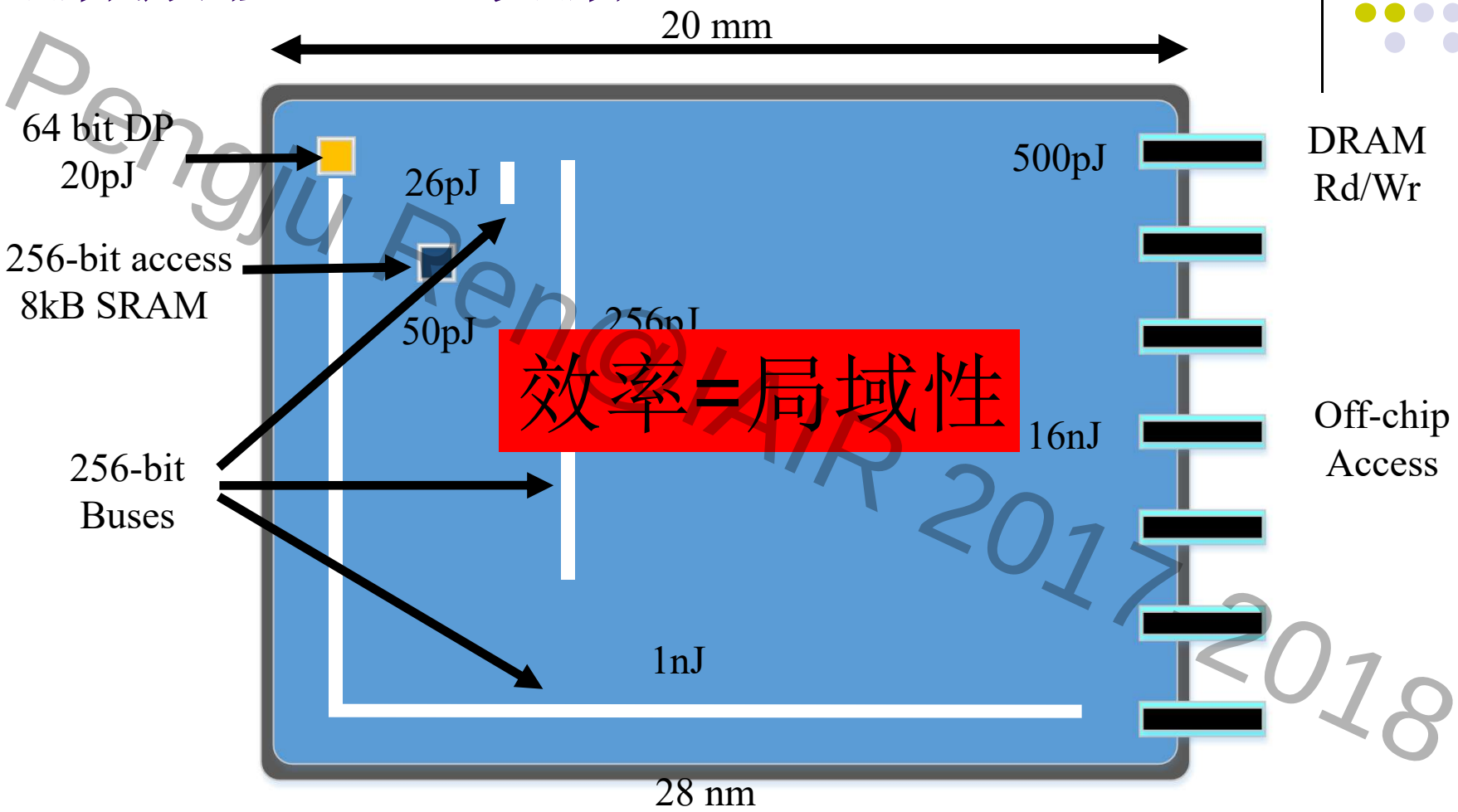
- 我们需要详细的分析程序性能，优化依赖于分析：
  - 实时性能行为，不仅仅是典型性能
  - 面对复杂平台的分析
- 程序性能 ≠ **CPU**性能：
  - **Pipeline, cache**是程序中的窗口
  - 我们必须了解整个程序的执行时间，必须分析程序的全局特性



执行时间是程序的一个全局特性

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

数据搬移 v.s 数据处理



计算系统需要大量的处理单元(提供潜在的并行性), 显式的存储层次化结构(提供计算局域性) 高效的通讯系统 (提高系统协同效率)，多种方法协同的容错机制（系统可靠性）

1Gb 2GHz Embedded DRAM in 22nm Tri-Gate (Intel 2014 ISSCC)

Source from Professor Bill Dally (Chief scientist of Nvidia)

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

确定程序性能的困难度

- 程序执行时间随输入数值的改变而改变，因为:
  - 不同的数值可导致程序选择不同的路径：
    - 循环执行次数的改变
    - 不同的分支执行不同复杂度的语句块
  - 高速缓存的行为部分依赖于输入
  - 指令级执行的时间也有可能不同：
    - 浮点预算对数值最敏感
    - 引入数据相关（**data-dependent**），引起流水线互锁
    - 改变指令获取的次数

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

如何测量程序性能？

- 利用**CPU**仿真器模拟程序的执行
  - 有些仿真器可以度量程序执行时间，可以使**CPU**的内部状态可见
  - 速度慢，并非**100%**精确，且仿真**I/O**敏感代码很难
- 利用**CPU**总线上的定时器**timer**
  - 需修改程序控制，且被测程序长度受限于定时器精度
- 利用**CPU**外部总线上连接的逻辑分析仪
  - 依赖于能在总线上产生可识别事件的代码来区分代码的启动和停止
  - 被测量代码长度受限于逻辑分析仪缓冲区大小

Pengju Ren@IAIP 2017-2018

程序性能的指标

- 平均执行时间(**average-case execution time**)
  - 执行典型输入数据的典型执行时间
- 最坏执行时间(**worst-case execution time**)
  - 最长执行时间对有时限要求的系统很重要
- 最佳执行时间(**best-case execution time**)
  - 任务级的交互可能导致最佳程序行为转变为最坏的系统行为
  - 对于多速率实时系统非常重要

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

程序性能的要素

- 程序执行时间可以看做:
  - 执行时间 = 程序路径 + 指令耗时
- 独立解决上述两个问题可以帮助简化分析
  - 高级语言规格说明可以追踪程序的执行路径
  - 但是，很难直接准确估计程序的总体执行时间
- 精确的程序性能分析要依赖:
  - 汇编或二进制目标代码
  - 执行平台

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

If语句中的数据相关路径

```
if (a || b) { /* T1 */
    if ( c ) /* T2 */
        x = r*s+t; /* A1 */
    else y=r+s; /* A2 */
    z = r+s+u; /* A3 */
    }
else {
    if ( c ) /* T3 */
        y = r-t; /* A4 */
}
```

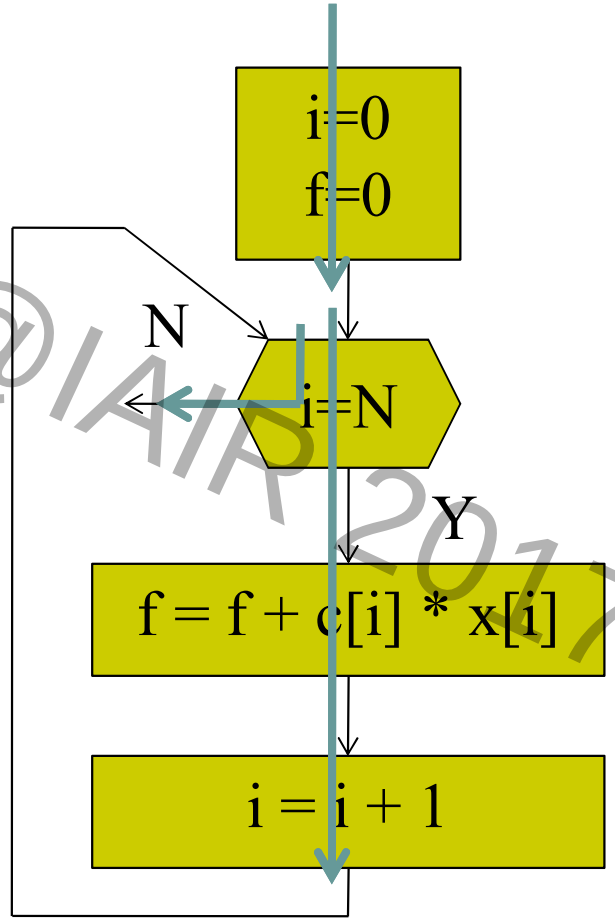
a	b	c	path
0	0	0	T1=F, T3=F: no assignments
0	0	1	T1=F, T3=T: A4
0	1	0	T1=T, T2=F: A2, A3
0	1	1	T1=T, T2=T: A1, A3
1	0	0	T1=T, T2=F: A2, A3
1	0	1	T1=T, T2=T: A1, A3
1	1	0	T1=T, T2=F: A2, A3
1	1	1	T1=T, T2=T: A1, A3

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

循环中的路径

```
for (i=0, f=0; i<N; i++)
    f = f + c[i] * x[i];
```

通过检查**CDFG**,可以确定不同的语句执行了多少次：右图中循环初始模块只执行了**1**次，判断执行了**N+1**次，循环体和循环变量的更新执行了**N**次。



循环初始化代码

循环测试

循环体

循环变量更新

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

指令耗时

- 并不是所有的指令都花费相同的时间
  - 多重装入-存储指令：**LDMXX, STDXX**
  - 预取指令**(Fetches)**
- 指令的执行时间不是独立的
  - 流水线互锁
  - 高速缓存的影响
- 指令的执行时间可能依赖于操作数的值
  - 浮点指令
  - 某些多周期整数操作指令
  - **For** 循环条件判断等

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

回顾：多时钟处理器流水线性能

- SPECINT2000 benchmark:
  - 25% loads
  - 10% stores
  - 11% branches
  - 2% jumps
  - 52% R-type
- Suppose:
  - 40% of loads used by next instruction (40% 2 cycles, 60% 1 cycles)
  - 25% of branches mispredicted (75% 1cycle; 25% 2 cycles)
  - All jumps flush next instruction (2 cycles)
- **What is the average CPI?**
  - Load/Branch CPI = 1 when no stalling, 2 when stalling
  - $CPI_{lw} = 1(0.6) + 2(0.4) = 1.4$
  - $CPI_{beq} = 1(0.75) + 2(0.25) = 1.25$

Average CPI = (0.25)(1.4) + (0.1)(1) + (0.11)(1.25) + (0.02)(2) + (0.52)(1) = 1.15

Renju Ren@IAIR 2017-2018

回顾：流水线处理器性能

Program with 100 billion instructions:

Execution Time = (# instructions) $\times$ CPI $\times$ T_c

$= (100 \times 10^9)(1.15)(550 \times 10^{-12})$

= 63 seconds

流水线处理器性能

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

测量驱动的性能分析

- 确定程序执行时间最直接的方法就是测量，但听起来容易做起来难！
  - 必须可以访问**CPU**
  - 必须使内部状态可见：需要仿真器
  - 必须知道可以提供最坏/最佳性能的输入数据集！

- 尽管如此，测量仍然是确定嵌入式软件执行时间最常用的方法。

Pengju Ren@IVP 2017-2018

提供输入数据

- 问题一：确定期望的输入集
  - 使用基准数据集(**benchmark**)
  - 从运行系统中捕获数据
  - 用算法分析最差执行时间的输入
- 问题二：需要软件支架(**software scaffolding**)来将数据输入程序并且得到输出数据。
  - 对于大型系统，将软件的一部分提取出来进行独立测量很难，需要添加新的测试模块。

Pengju Ren@XIR 2017-2018

Benchmark SPEC-2017

SPEC是标准性能评估公司（**Standard Performance Evaluation Corporation**）的简称。**SPEC**是由计算机厂商、系统集成商、大学、研究机构、咨询等多家公司组成的非营利性组织，这个组织的目标是建立、维护一套用于评估计算机系统的标准。

整型测试举例：

- **Bzip2**：压缩算法；
- **Gcc: C**编译器；
- **Hmmer**：基因序列搜索；
- **H264ref**：视频压缩；

浮点测试举例：

- **Bwaves**：流体力学；
- **Gromacs**：生物化学/分子力学；
- **Wrf**：天气预报
- **Dealll**：有限元分析；

Peiqiu Chen@IAIR 2017-2018

轨迹驱动的测量

- 程序执行路径的记录成为轨迹（**Trace**）
  - 通过设备或软件来监测程序
  - 保存关于路径的信息
- 需要修改程序
- 轨迹文件通常都很大
- 常用于高速缓存分析

```
tick 5
src 0x08 dst 0x24 packet-size 5
tick 8
src 0x20 dst 0x16 packet-size 3
src 0x03 dst 0x04 packet-size 16
tick 15
src 0x08 dst 0x24 packet-size 5
tick 16
src 0x11 dst 0x06 packet-size 3
src 0x13 dst 0x24 packet-size 8
……
```

Pengfu.Ren@IAIR 2017-2018

物理测量

- 利用内部定时器，但是无法跟踪轨迹
- 在线调试器（**In-circuit emulator, ICE**）可以允许跟踪轨迹
- 逻辑分析仪：内存有限
  - 通过地址总线分析事件
  - 需要修改代码使事件可以观察

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

CPU仿真

- 我们需要周期精确的仿真器（**cycle-accurate simulator**），可以确定执行所需的确切时钟周期数目。
  - 仿真器具有完备的处理器模型，能够对**CPU**内部进行足够详细的仿真
  - 仿真器开发者必须知道**CPU**内部是如何工作的

- **Simplescalar**, http://www.simplescalar.com

  SimpleScalar simulators can emulate the Alpha, PISA, ARM, and x86 instruction sets.

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

举例：SimpleScalar的FIR滤波器仿真

```
int x[N] = {8, 17, … };
int c[N] = {1, 2, … };
main() {
    int i, k, f;
    for (k=0; k<COUNT; k++)
        for (i=0; i<N; i++)
            f += c[i]*x[i];
}
```

COUNT	total sim cycles	sim cycles per filter execution
100	25854	259
1,000	155759	156
1,0000	1451840	145

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

举例：Hornet的片上互连网络仿真(1)

```
~/bin$ darsim output.img --events sample.evt --cycles=1000000
```

Below are the simulation parameters that can be specified (you can also see this information by doing "darsim -h"):

```
USAGE: darsim SYSTEM_IMAGE
Options:
--cycles arg          simulate for arg cycles (0 = until drained)
--packets arg         simulate until arg packets arrive (0 = until drained)
--stats-start arg     start statistics after cycle arg (default: 0)
--no-stats            do not report statistics
--no-fast-forward     do not fast-forward when system is drained
--events arg          read event schedule from file arg
--memory-traces arg   read memory traces from file arg
--log-file arg        write a log to file arg
--vcd-file arg        write trace in VCD format to file arg
--vcd-start arg       start VCD dump at time arg (default: 0)
--vcd-end arg         end VCD dump at time arg (default: end of simulation)
--verbosity arg       set console verbosity
--log-verbosity arg   set log verbosity
--random-seed arg     set random seed (default: use system entropy)
--concurrency arg     simulator concurrency (default: automatic)
--sync-period arg     synchronize concurrent simulator every arg cycles (default: ↩
    0 = every posedge/negedge)
--tile-mapping arg    specify the tiles-to-threads mapping; arg is one of: ↩
    sequential, round-robin, random (default: random)
--version             show program version and exit
-h [ --help ]         show this help message and exit
```

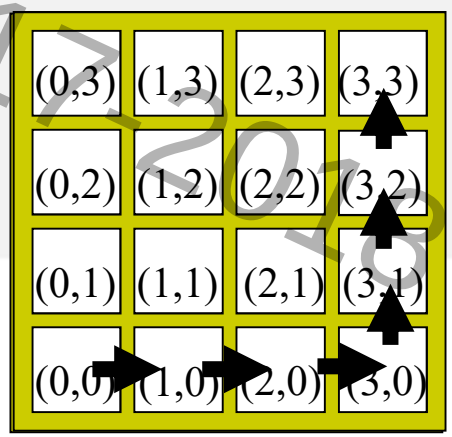
Pengju Ren@IAIR 2017-2018

http://csg.csail.mit.edu/hornet/

举例：Hornet的片上互连网络仿真(2)

```
flit counts:
  flow 00010000: offered 58, sent 58, received 58 (0 in flight)
  flow 00020000: offered 44, sent 44, received 44 (0 in flight)
  flow 00030000: offered 34, sent 34, received 34 (0 in flight)
  flow 00040700: offered 32, sent 32, received 32 (0 in flight)
  flow 00050700: offered 34, sent 34, received 34 (0 in flight)
  .....
  all flows counts: offered 109724, sent 109724, received 109724 (0 in flight)

in-network sent flit latencies (mean +/- s.d., [min..max] in # cycles):
  flow 00010000: 4.06897 +/- 0.364931, range [4..6]
  flow 00020000: 5.20455 +/- 0.756173, range [5..9]
  flow 00030000: 6.38235 +/- 0.874969, range [6..10]
  flow 00040700: 6.1875 +/- 0.526634, range [6..8]
  flow 00050700: 5.11765 +/- 0.32219, range [5..6]
  .....
  all flows in-network flit latency: 9.95079 +/- 20.5398
```



Pengju Ren@IAIR 2013-2014

http://csg.csail.mit.edu/hornet/

7 软件性能优化

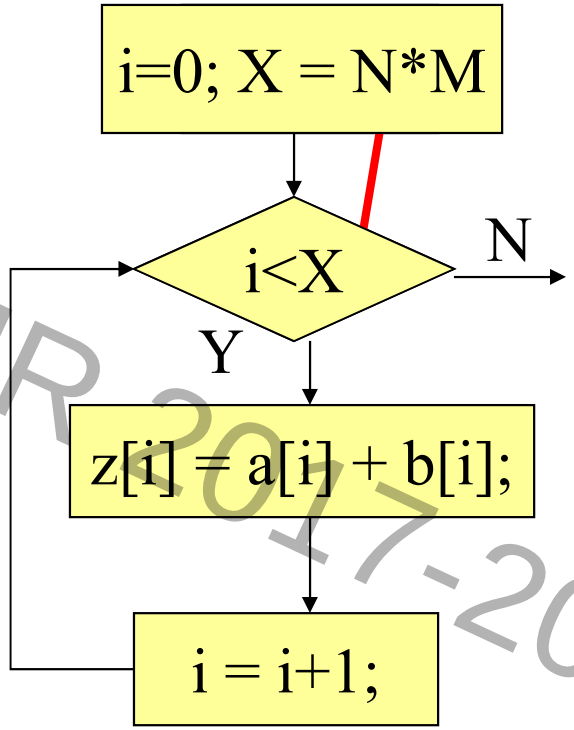
- 循环是优化的重要对象，带有循环结构的程序需要花费较长的执行时间。

- 基本的循环优化技术:
  - 代码移出（**code motion**）
  - 归纳变量消除（**induction-variable elimination**）
  - 强度削减（**strength reduction (x*2 -> x<<1)**）

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

代码移出(Code motion)

```
for (i=0; i<N*M; i++)
    z[i] = a[i] + b[i];
```



Pengju Ren@IAIR 2017-2018

归纳变量消除(induction variable elimination)

- 归纳变量源于循环变量的值: **loop index.**

```
for (i=0; i<N; i++)
    for (j=0; j<M; j++)
      z[i,j] = b[i,j];
```

```
zbinduct = i*M + j;
*(zptr + zbinduct) = *(bptr + zbinduct);
```

- 改变每次都重新计算**i*M+j**，利用数组的步进顺序遍历.

```
for (i=0; i<N; i++)
    for (j=0; j<M; j++)
      *(zptr + zbinduct) = *(bptr + zbinduct);
      zbinduct ++;
```

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

强度削减(Strength reduction)

- **y = x*2;**
- 用左移替代乘**2**

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

高速缓存优化

- 循环嵌套：一系列循环，一个包着一个。

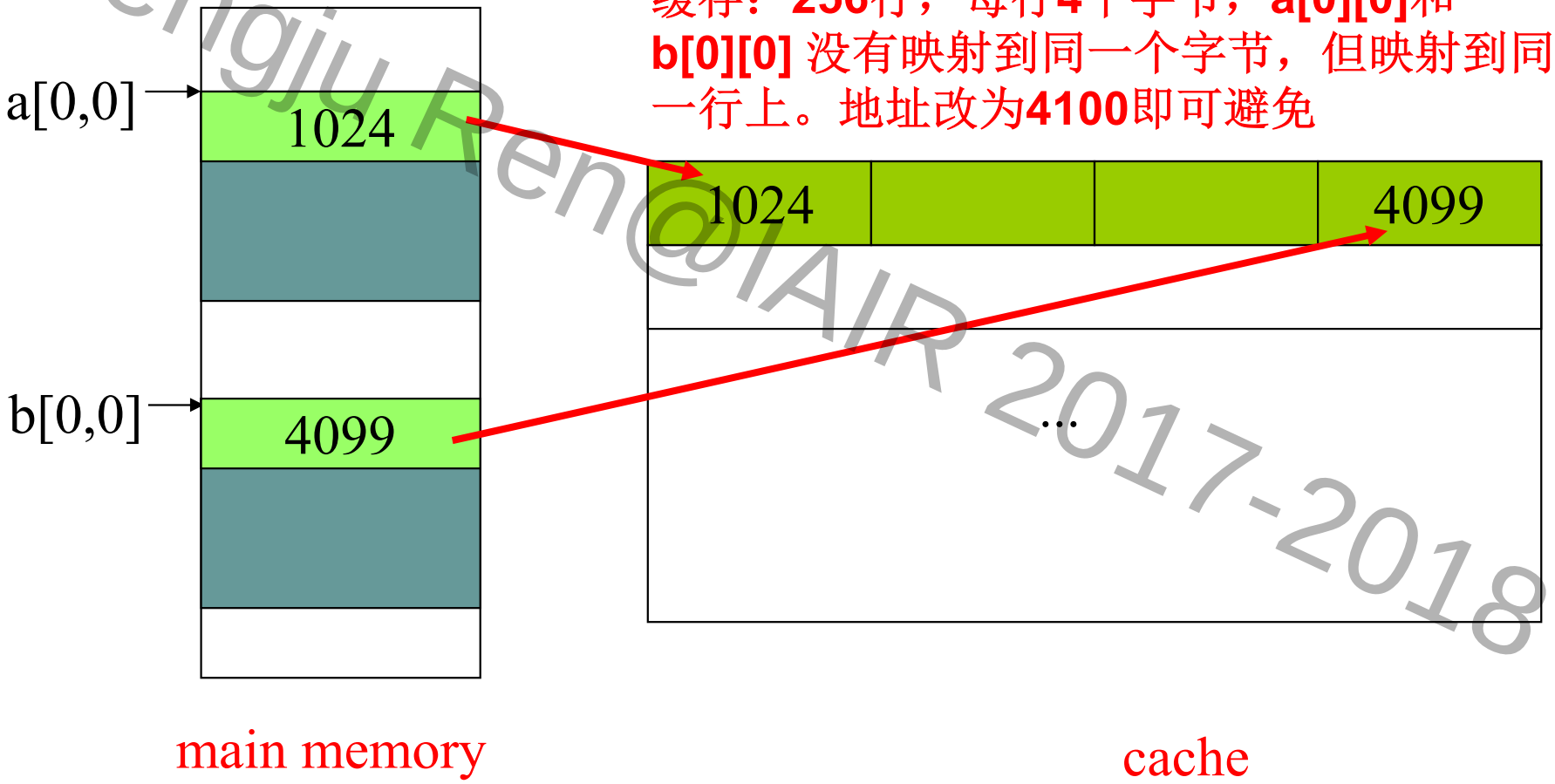
- 由于循环通常使用大量数据，因此受高速缓存影响大。

```
for (j=0; j<M; j++)
        for (i=0; i<N; i++)
                b[j][i] = a[j][i] * c;
```

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

高速缓存中的数组冲突(1)

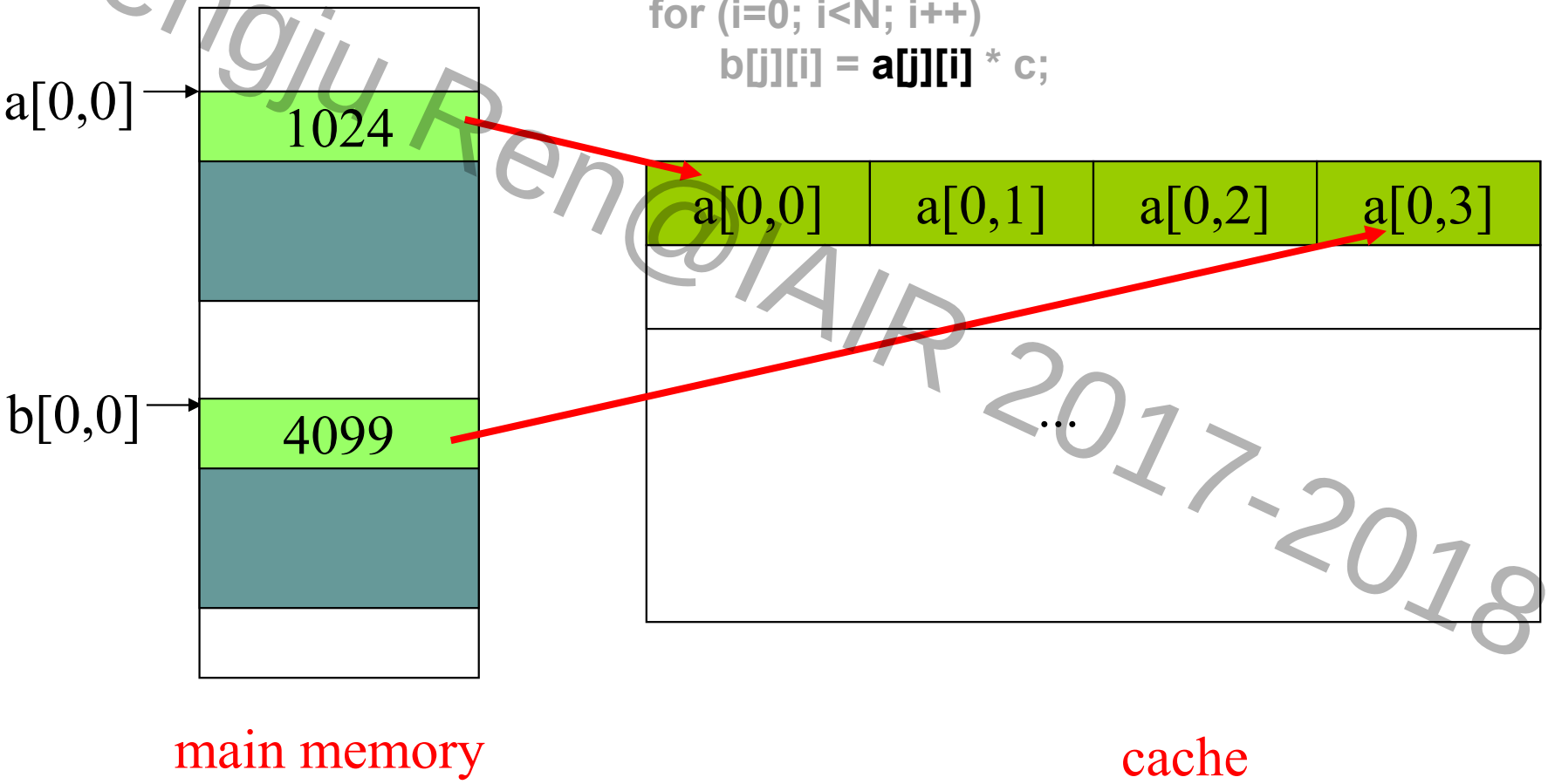
数组：**M = 256, N = 4**
缓存：**256**行，每行**4**个字节，**a[0][0]**和**b[0][0]** 没有映射到同一个字节，但映射到同一行上。地址改为**4100**即可避免



Pengju Ren@IAIR 2017-2018

高速缓存中的数组冲突(2)

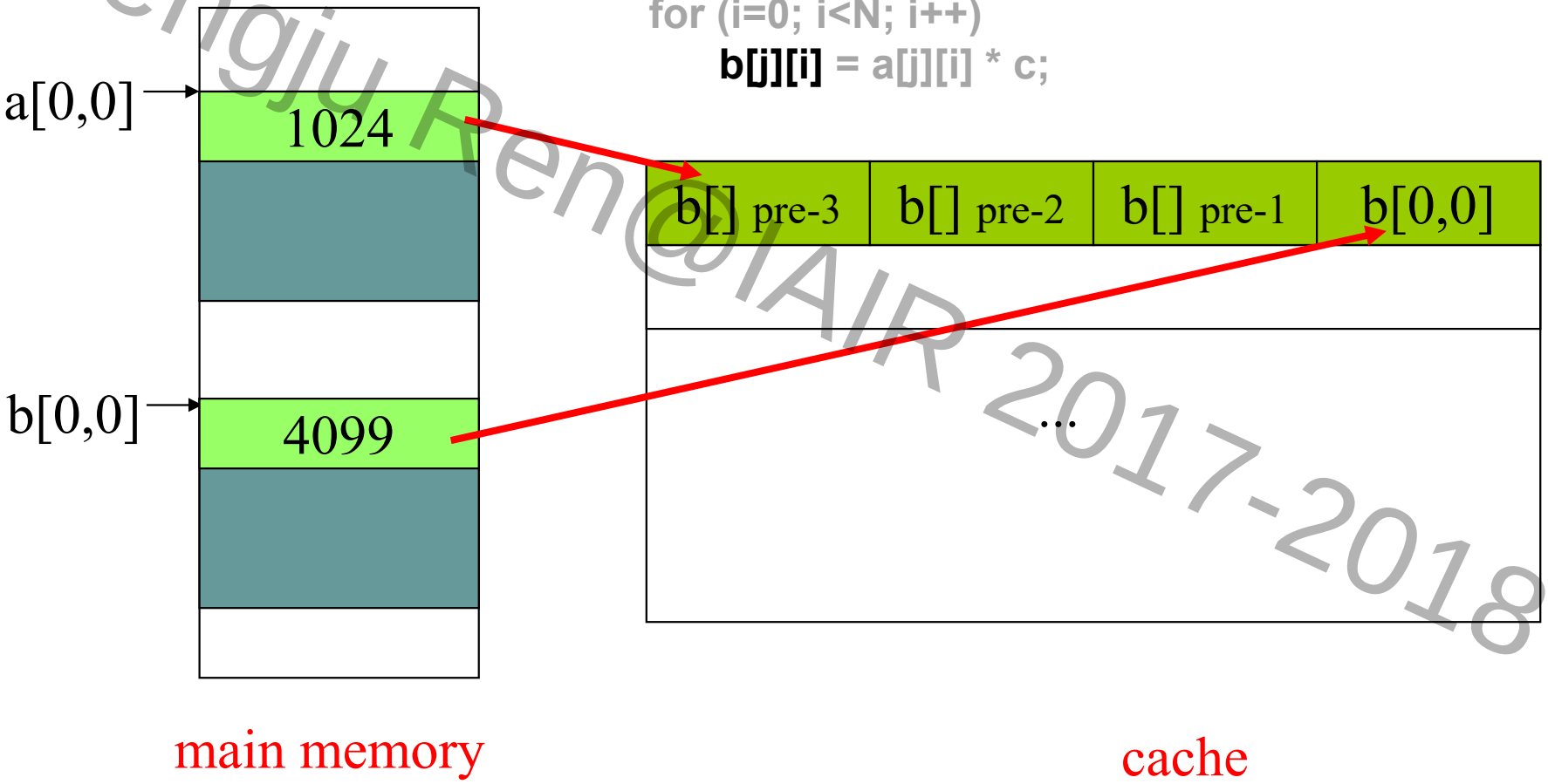
```
for (j=0; j<M; j++)
    for (i=0; i<N; i++)
        b[j][i] = a[j][i] * c;
```



Pengju Ren@IAIR 2017-2018

高速缓存中的数组冲突(3)

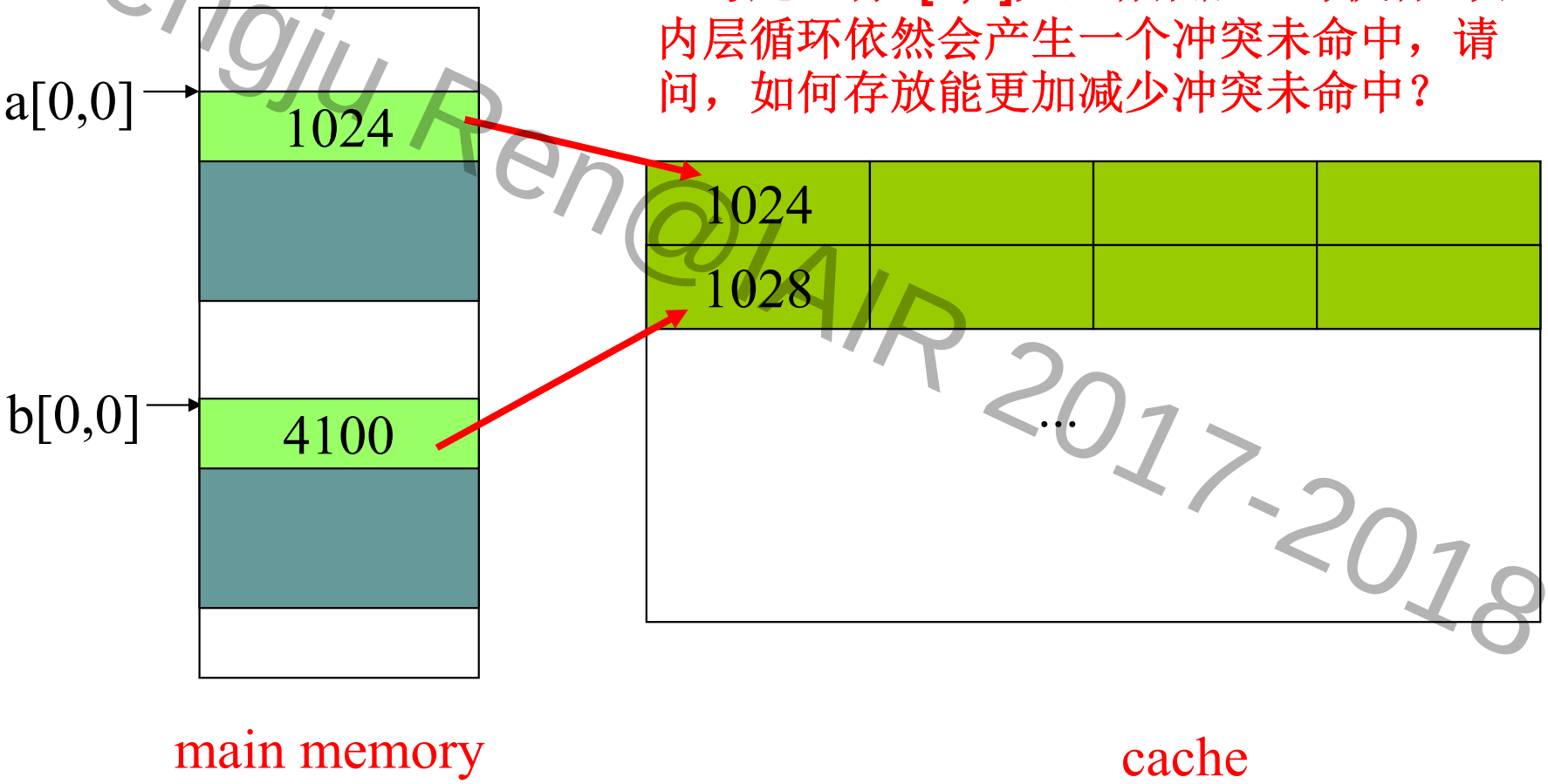
```
for (j=0; j<M; j++)
    for (i=0; i<N; i++)
        b[j][i] = a[j][i] * c;
```



Pengju Ren@IAIR 2017-2018

高速缓存中的数组冲突(4)

思考题：将**b[0,0]**如此存放后，每执行**4**次内层循环依然会产生一个冲突未命中，请问，如何存放能更加减少冲突未命中？



Pengju Ren@IAIR 2017-2018

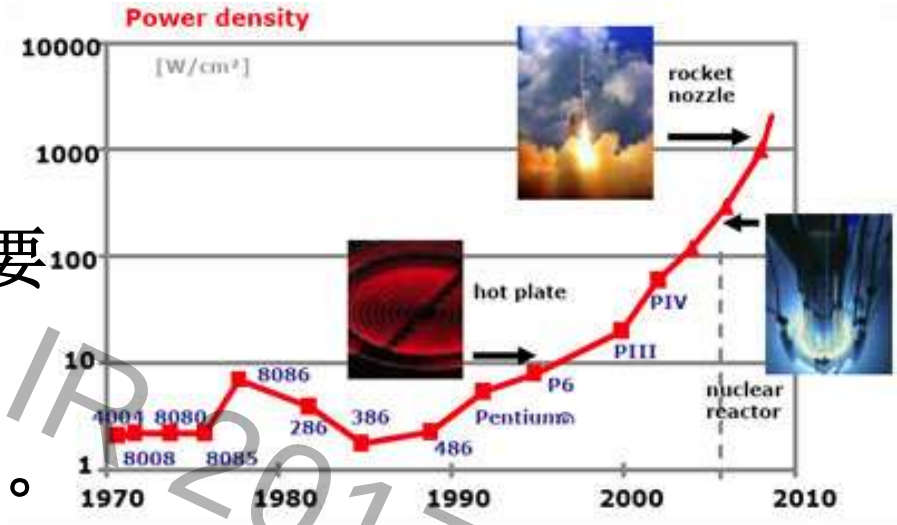
性能优化策略

- 尽量有效的使用寄存器
- 尽可能在存储系统中利用页访问模式的优势
- 分析高速缓存行为查找主要的缓存冲突:
  - 指令冲突：小段代码，重写使其更小，尽量装进缓存中，必要时使用汇编；大段代码，移出冲突指令或填充**NOP**。
  - 标量数据冲突：将数据搬移到不同的存储单元
  - 数组数据冲突：搬移数组或改变数组的访问模式

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

8 能量和功率的分析与优化

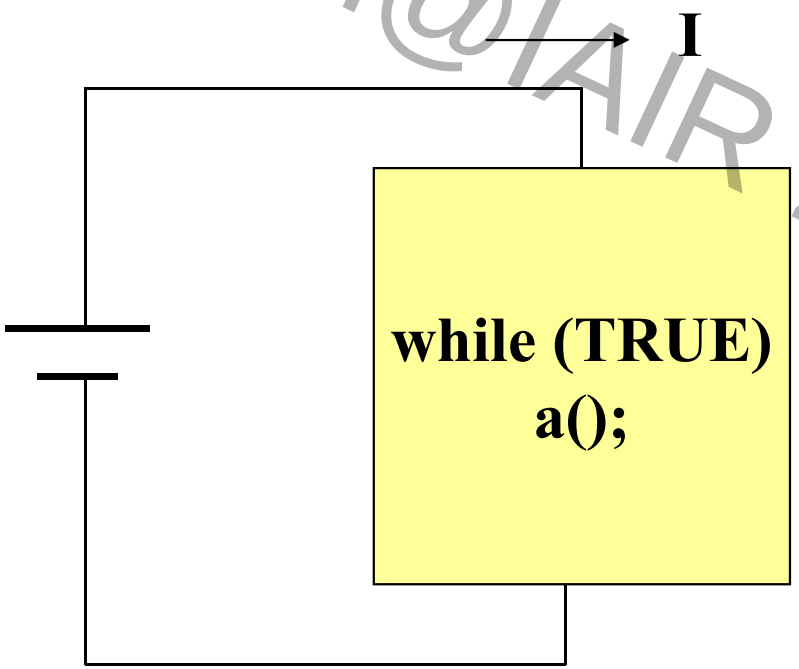
- 能量**Energy**: 做功的能力。
  - 对于电池供电的系统最为重要
- 功率**Power**: 单位时间能量。
  - 即使对于电网供电系统也很重要 --- 高速芯片发热量大，控制功耗是提高可靠性降低系统成本的重要因素。



Pengju Ren@IAIR 2017-2018

测量能耗

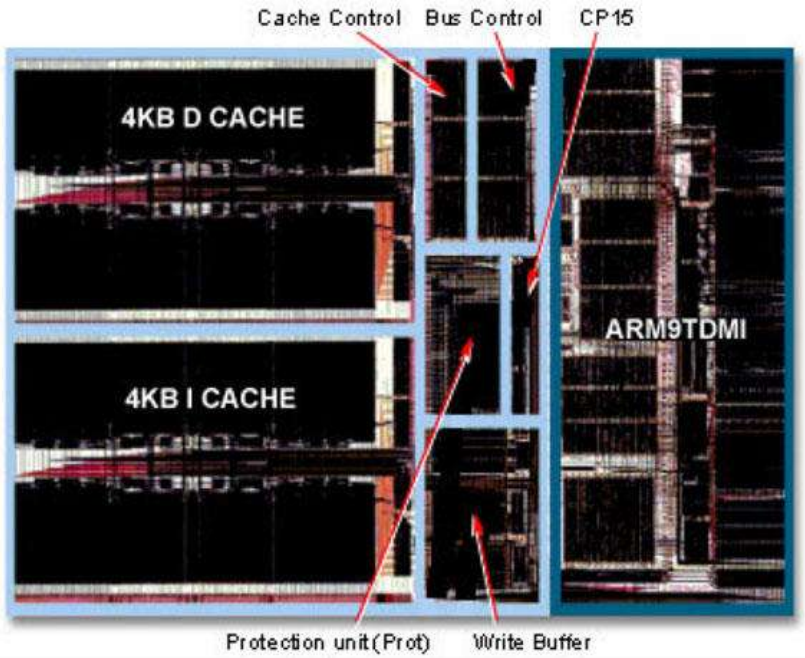
- 在循环中反复执行测试代码，测量电流。
- 单独测量没有循环体的空循环，测量电流。

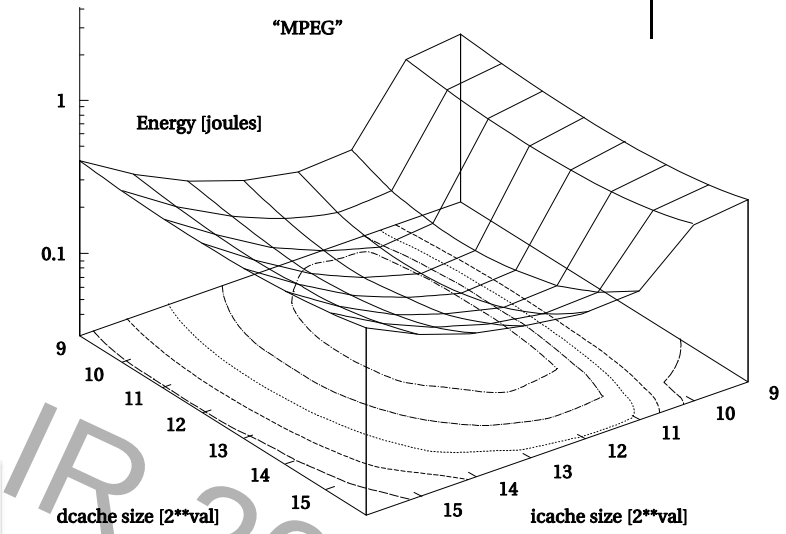


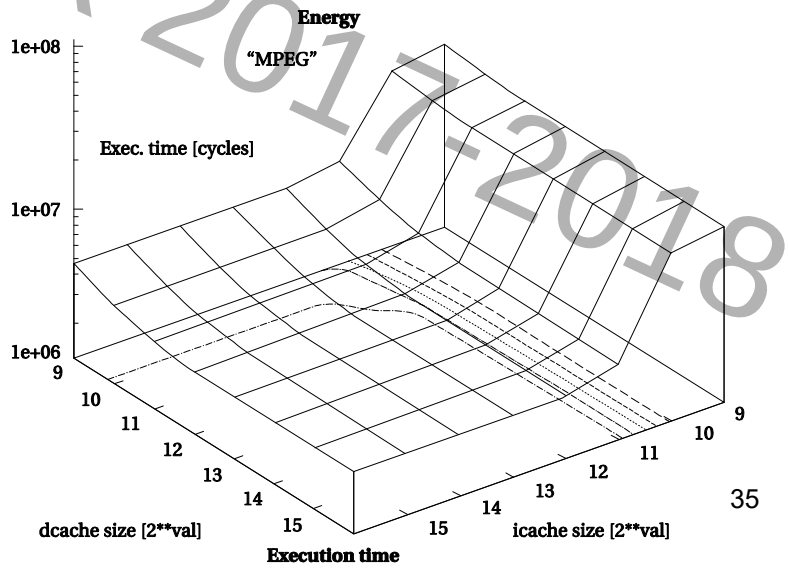
Pengju Ren@IAIR 2017-2018

高速缓存是能耗的重要因素

- 随着高速缓存大小变化的能耗最佳点:
  - **cache too small: program thrashes, burning energy on external memory accesses;**
  - **cache too large: cache itself burns too much power.**







Pengju Ren@IAIR 2017-2018

能耗优化（1）

- 最好的总体建议：高性能 、低能耗
  - **high performance 、 low energy.**

- 性能优化的策略对降低能耗经常也有效
  - 尽量有效的使用寄存器
  - 分析、发现并避免主要的高速缓存冲突
  - 尽可能在存储系统中利用页模式访问

Pengju Ren@IWR 2017-2018

能耗优化（2）

- 适当的循环展开可以消除一些循环控制开销
  - 但是展开过多，会由于高速缓存命中率降低而使功耗增加
- 软件流水减少了流水线的停顿，因此减少每条指令的平均功耗.
- 尽可能的消除递归调用，节省函数调用的开销。伪递归通常可以被消除；某些编译器会自动消除它。
- 内嵌调用：减少调用耗费，但可能导致缓存冲突

Pengju Ren@IAIR 2011/2018

中科院寒武纪芯片

Yunji Chen, 32

Improvements in artificial intelligence call out for new hardware.

by Christina Larson

MIT Technology Review

35 Innovators Under 35

- **DianNao**要解决的核心问题是如何使有限的内存带宽满足运算功能部件的需求，使运算和访存之间达到平衡，从而实现高效能比。其难点在于选取运算功能部件的数量、组织策略以及片上随机存储器(**RAM**)的结构参数。
- 对神经网络进行分块处理，将不同类型的数据块存放在不同的片上随机存储器中，并建立理论模型来刻画随机存储器与随机存储器、随机存储器与运算部件、随机存储器与内存之间的搬运次数，进而优化神经网络运算所需的数据搬运次数。相对于**CPU/GPU**上基于缓存层次的数据搬运，**DianNao**可将数据搬运次数减少至前者的**1/30~1/10**。

Pengju Ren@AIR 2017-2018

Google TPU'2017

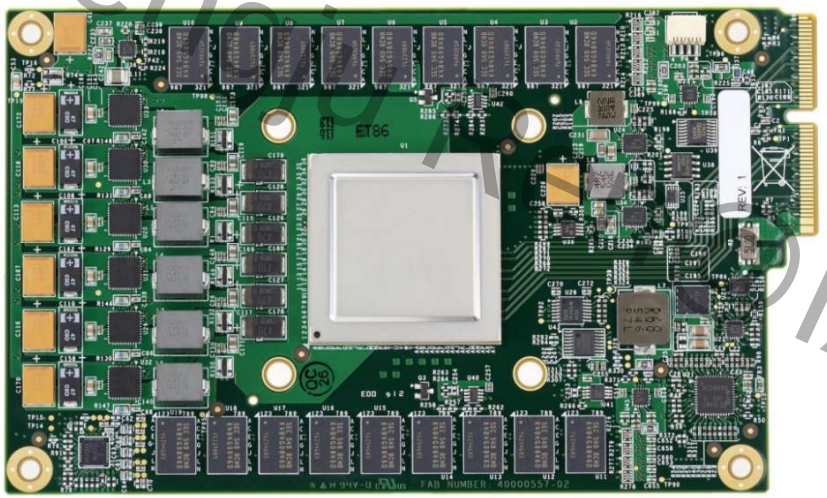


Figure 3. TPU Printed Circuit Board. It can be inserted in the slot for an SATA disk in a server, but the card uses PCIe Gen3 x16.

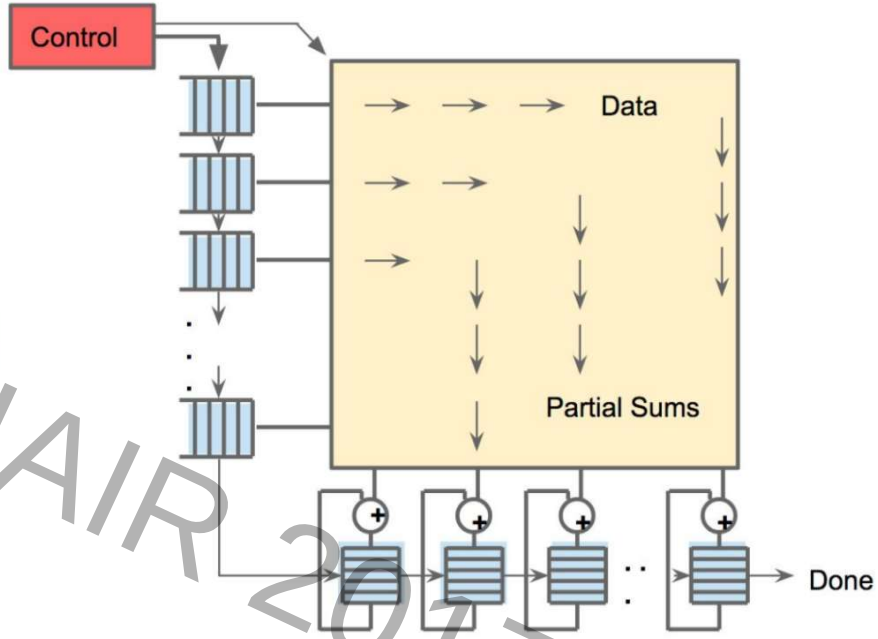


Figure 4. Systolic data flow of the Matrix Multiply Unit. Software has the illusion that each 256B input is read at once, and they instantly update one location of each of 256 accumulator RAMs.

TPU is on average about 15X - 30X faster than its contemporary GPU or CPU, with TOPS/Watt about 30X - 80X higher. Moreover, using the GPU's GDDR5 memory in the TPU would triple achieved TOPS and raise TOPS/Watt to nearly 70X the GPU and 200X the CPU.

In-Datacenter Performance Analysis of a Tensor Processing Unit, ISCA'17

Pensio KEDIAIR 2017-2018

程序大小的优化

- 目标:
  - 减少存储器的硬件耗费
  - 减少存储部分的功耗

- 两个机会:
  - 数据**Data**
  - 指令**Instruction**

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

Data size最小化

- 识别并去除低效率程序保存的数据副本
- 小心确定缓冲区的大小，不要定义程序永远用不到的大数组
- 数据压缩：几个标志位存在在一个字中
- 重用**constants, variables, data buffers**
  - **Requires careful verification of correctness.**
- 运行时用代码创建数据而不是存储数据
  - 创建数据的代码占空间，但是当使用复杂数据结构时，用代码创建数据更省空间。

Pengju Ren@IWR 2017-2018

减小code size

- 代码大小优化需要同时考虑高级语言程序变换和指令选择。
  - 将函数封装在子例程中：最小函数体要求？传递参数
  - 用汇编编写可变长度指令的代码
  - 合理选择指令：乘加代替普通算术运算
  - 合理使用子例程，很重要！！！
  - 密集指令集（**dense instruction set**）：**ARM Thumb**指令集和**MIPS**的**MIPS-16**指令集。
    - 密集指令程序大致是标准指令程序的**70%-80%**。

Pengju Ren@XIR 2017-2018

10 程序验证与测试

- 这里我们主要关注的是功能验证
- 两种主要测试策略分别是：
  - 黑盒（**Black box**）测试：测试方法的产生无须/无法了解程序的内容结构。
  - 白盒（**Clear box or white box**）：测试方法的产生要以程序结构为基础。
- 两者以不同的方式测试程序而互为补充。

Pengju Xenon/AIR 2017-2018

白盒测试(Clear-box testing)

- 控制/数据流图是开发程序白盒测试的重要工具。
- **Examine the source code to determine whether it works:**
  - **Can you actually exercise a path?**
  - **Do you get the value you expect along a path?**
- 测试过程包括:
  - 能控性**Controllability**: 给程序提供感兴趣的输入
  - 执行程序来进行测试
  - 能观性**Observability**: 检查输出

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

控制和观察程序

```
firout = 0.0;
for (j=curr, k=0; j<N; j++, k++)
    firout += buff[j] * c[k];
for (j=0; j<curr; j++, k++)
    firout += buff[j] * c[k];
if (firout > 100.0) firout = 100.0;
if (firout < -100.0) firout = -100.0;
```

测试限制代码是否有效？

- 能控性:
  - 为**firout**建立两组越界值
  - 必须用**N**个期望值填充循环缓冲区
- 能观性:
  - 在限制代码执行前需要查看**firout**的值

```
/* assert example */
#include <stdio.h>      /* printf */
#include <assert.h>     /* assert */

void print_number(int* myInt) {
  assert (myInt!=NULL);
  printf ("%d\n",*myInt);
}
```

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

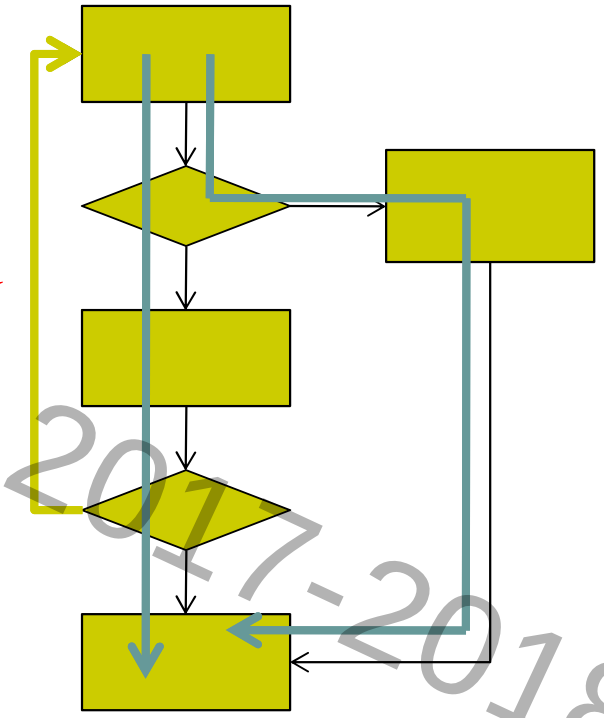
执行路径与测试

- 与性能分析一样，路径在功能测试中也很重要。
  - 测试是否覆盖了所有的路径？
  - 什么方法确保路径确实被执行？
- 我们是否有可能执行完每一条路径？
  - **while**循环
  - 流数据
  - 通常，整个程序中路径数是指数级的。
- 如何选择测试路径的子集？

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

选择测试路径

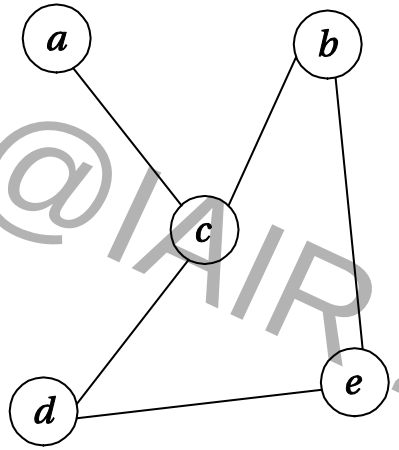
- 合理的选择:
  - 每条语句至少执行一次
  - 每条分支至少执行一次
- 对于结构化编程语言是等效的。
- 但是，对非结构化语言（汇编）和**goto**语句不同.



Pengju Ren@IAIR 2017-2018

基本路径

- Approximate CDFG with undirected graph.
- Undirected graphs have basis paths:
  - All paths are linear combinations of basis paths.



Graph

$$\begin{array}{c|ccccc} & a & b & c & d & e \\ \hline a & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ b & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ c & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ d & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ e & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{array}$$

Incidence matrix

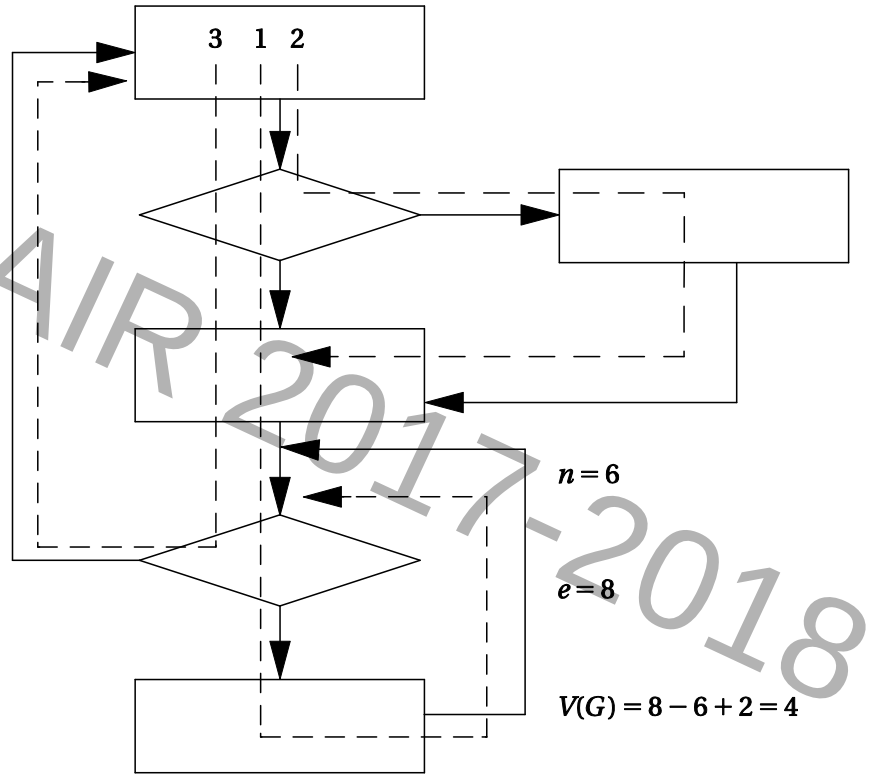
$$\begin{array}{c} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{array} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Basis set

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

环路复杂度

- Cyclomatic complexity is a bound on the size of basis sets:
  - e = # edges
  - n = # nodes
  - p = number of graph components
  - M = e – n + 2p.



Pengju Ren@IAIR 2017-2018

分支测试的例子1

- Correct:
  - if (a || (b >= c)) { printf("OK\n"); }
- Incorrect:
  - if (a && (b >= c)) { printf("OK\n"); }
- Test:
  - a = F
  - (b >=c) = T
- Example:
  - Correct: [0 || (3 >= 2)] = T
  - Incorrect: [0 && (3 >= 2)] = F

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

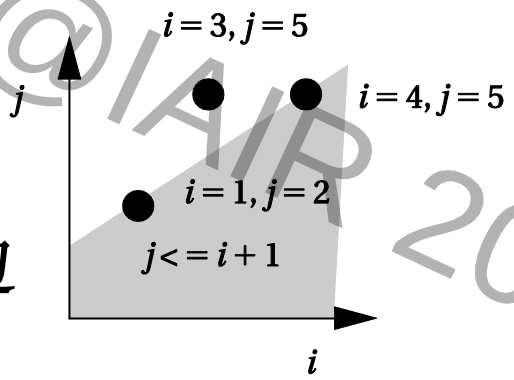
分支测试例子2

- Correct:
  - if ((x == good_pointer) && x->field1 == 3))
    { printf("got the value\n");
  }
- Incorrect:
  - if ((x = good_pointer) && x->field1 == 3))
    { printf("got the value\n");
  }
- Incorrect code changes pointer.
  - Assignment returns new LHS in C.
- Test that catches error:
  - (x != good_pointer) && x->field1 = 3)

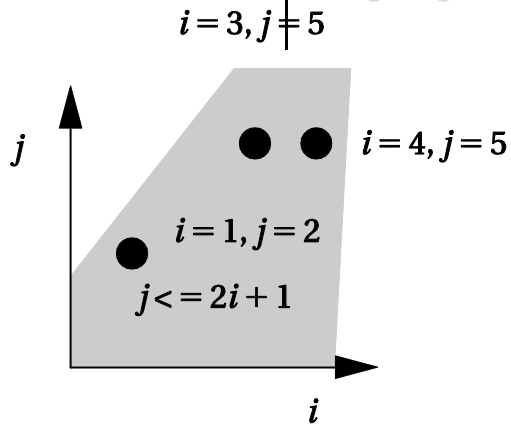
Pengju Ren@IAIR 2017-2018

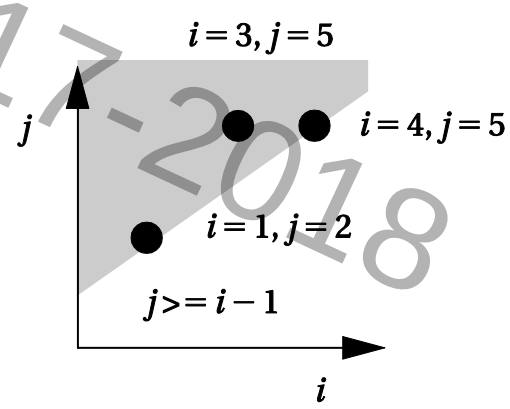
域测试(Domain Testing)

- 主要用于测试线性不等式
- 测试不等式的每一边 + 边界



Correct test





Incorrect tests

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

定义-使用对(Def-use analysis)

- Variable def-use:
  - Def when value is assigned (defined).
  - Use when used on right-hand side.
- Exercise each def-use pair.
  - Requires testing correct path.

```
a = mypointer;
if (c > 5){
    while (a->field1 != val1)
        a = a->next;
}
if (a->field2 == val2)
    someproc(a,b);
```

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

循环测试(1)

```
for (i = 0; i < terminate(); i++)
    proc(i, array);
```

- 循环需要专门的测试，来调高其测试效率.
- 启发式测试策略:
  - 跳过整体循环.
  - 一次循环迭代.
  - 两次循环迭代.
  - 如果循环迭代次数有一个上限**Max**, 取大大低于**Max**的一个数值.
  - **n-1, n, n+1 (n is max)**，测试接近循环迭代次数上限的值。

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

循环测试(2)

```
for (i = 0; i < terminate1(); i++)
    for(j=0; j< terminate2(); j++)
        for(k=0; k<terminate3(); k++)
            proc (i,j,k,array)
```

对于循环嵌套，我们可以从内到外的用多重可变迭代边界来测试循环。

- 集中测试最内层循环-外层循环控制在最少的迭代次数；
- 充分测试内层循环之后，再测试相邻的外层循环；
- 重复直到所有的嵌套循环均测试完毕；

Pengju Ren@IAIR 2017-2018

黑盒测试

- 在对代码不了解的情况下进行的测试就是黑盒测试。

- 如单独使用，黑盒测试发现程序全部错误的概率很低。但可作为对白盒测试的补充。
  - 更容易发现那些从代码结构抽象出的测试方法不易发现的程序错误。

Pengju Ren@IAIP 2017-2018

黑盒测试向量

- 随机测试**Random tests.**
  - 随机值按照给定分布创建。期望值可以独立于系统计算出来，然后使用测试输入。
- 回归测试**Regression tests.**
  - 使用程序早期版本的测试来测试新版本程序。

Pengli Ren@IAIR 2017-2018

多少次测试才算充分?

- 彻底详尽的测试是不切实际的。
- 对测试质量评估的一项重要指标：有多少**bugs**躲过测试到达应用现场。
- 错误注入分析测试覆盖率:
  - 向原有代码中加入已知程序错误，记住位置
  - 运行测试
  - 计算通过测试发现的注入错误的 占全部注入错误的**%**

Pengju Ren@XIR 2017-2018