COMP4007: 并行处理和体系结构

第二章: 并行计算机体系结构

授课老师：王强、施少怀
助　　教：刘虎成、田超

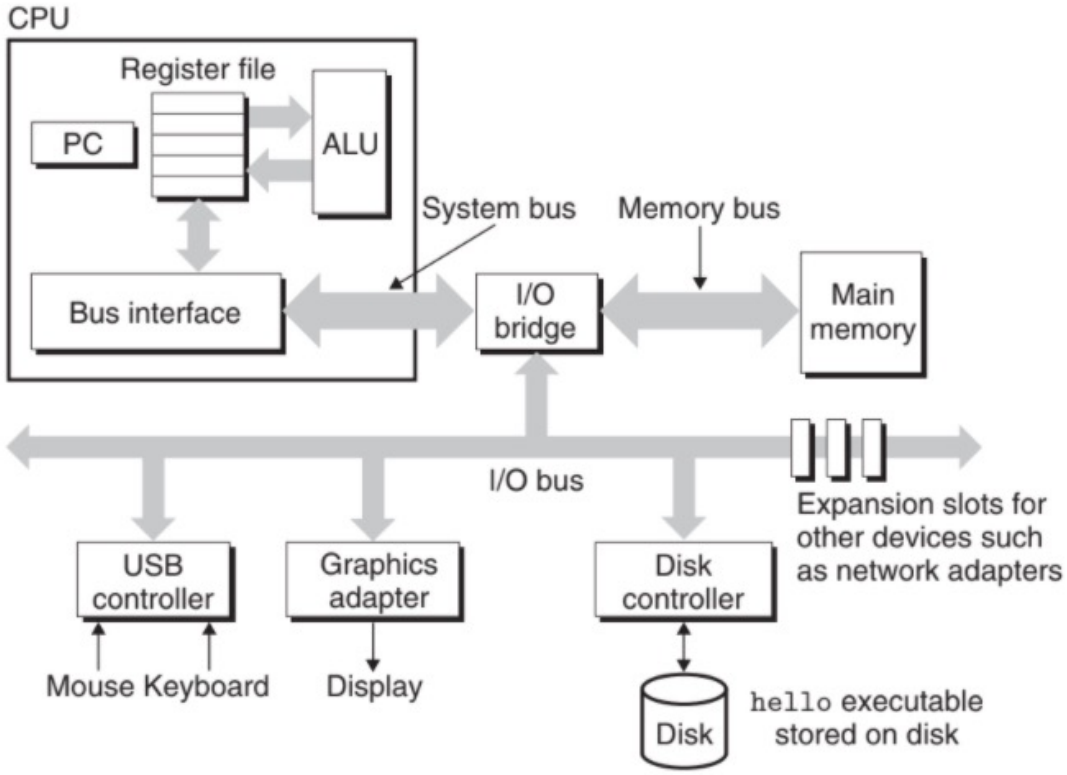
哈尔滨工业大学（深圳）

内容大纲

- 现代计算机体系结构
- 共享内存系统
- 分布式内存系统
- Flynn分类法
- 向量化方法及SIMD

现代计算机体系结构

- CPU
  - 中央处理单元
  - 负责运行程序
- 内存 (or RAM)
  - 随机存取存储器
  - 程序和数据的短暂存储
- 总线
  - 数据的传输
- 输入输出 (I/O) 设备
  - 磁盘：长期存储
  - 鼠标、键盘、显示器

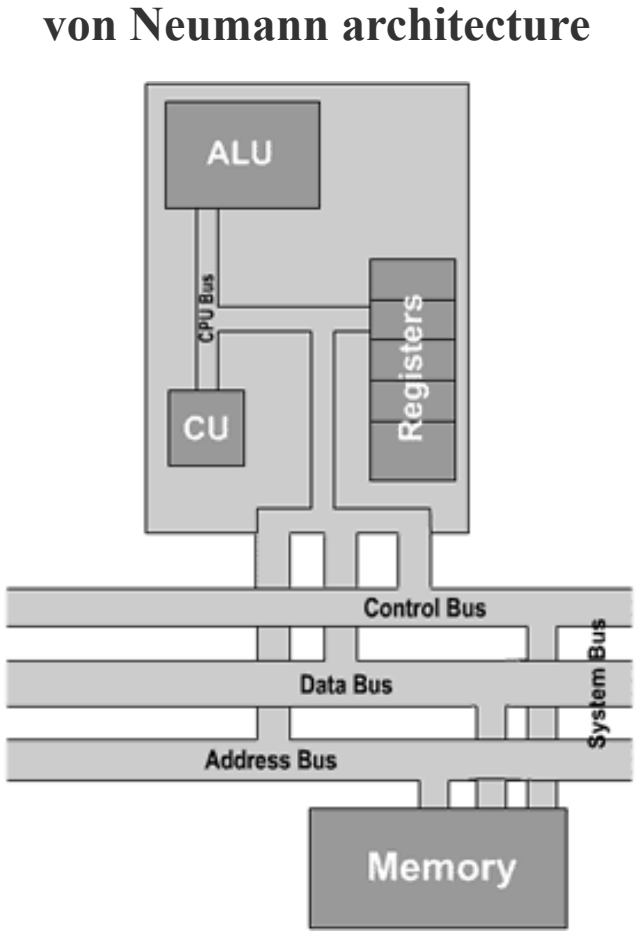


典型计算机系统的硬件架构 [1]

[1] Bryant, Randal E., O'Hallaron David Richard, and O'Hallaron David Richard. Computer systems: a programmer's perspective. Vol. 2. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

处理器

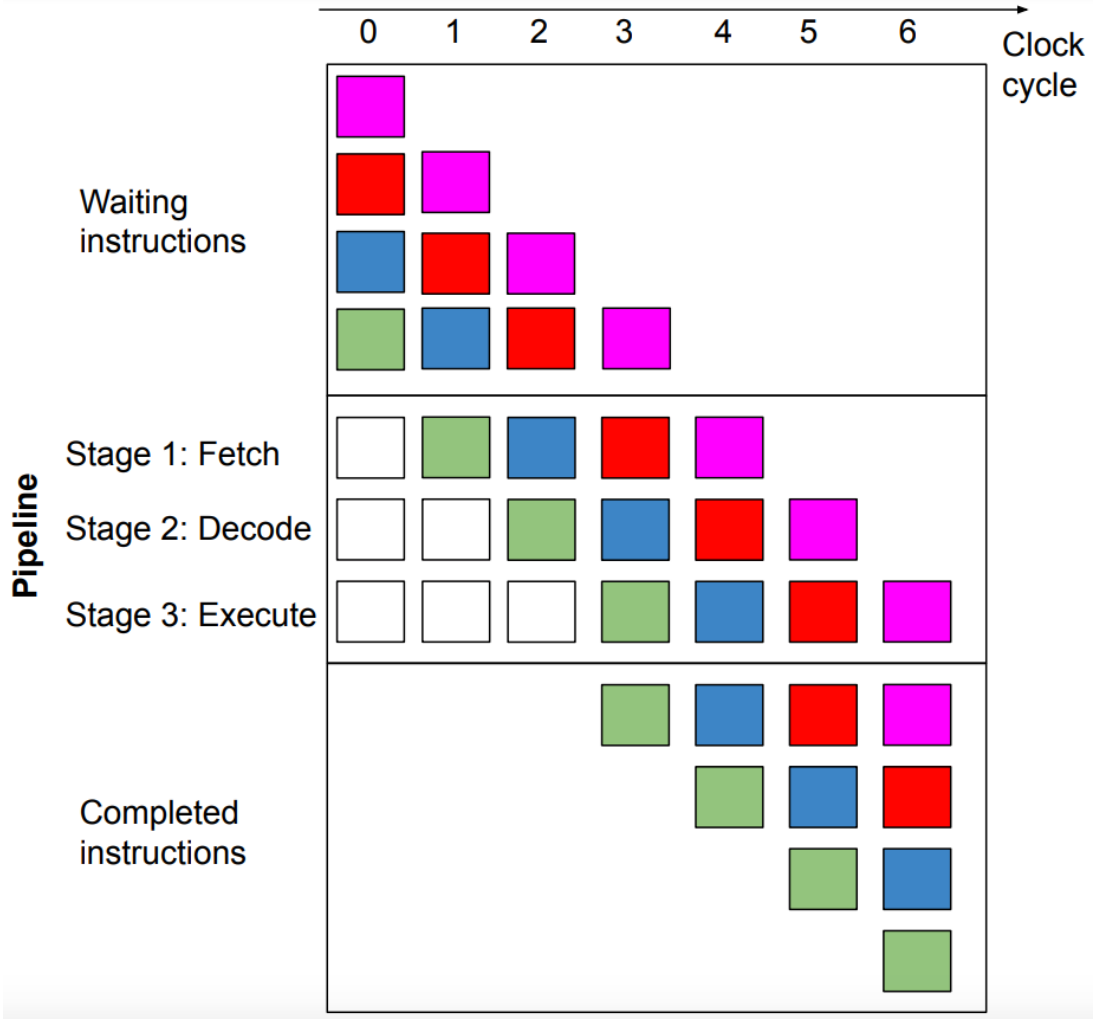
- 算术逻辑单元 (ALU)
  - 处理算术和逻辑操作
- 控制单元 (CU)
  - 定向指令进出处理器
  - 向 ALU 发送控制信号
- 寄存器
  - 指令寄存器
  - 程序计数器 (PC)
  - 通用寄存器



Source: http://computerscience.chemeketa.edu/cs160Reader/ComputerArchitecture/Processor.html

指令周期与流水线

- 每一条指令都有下列周期
  - 获取指令
    - 从 PC 获取下一条指令的内存地址
  - 分析指令
    - 放置在指令寄存器中的指令被 CU 解释
  - 执行指令
    - ALU 执行算术或逻辑函数
- 流水线
  - 处于不同周期的不同指令可以同时执行

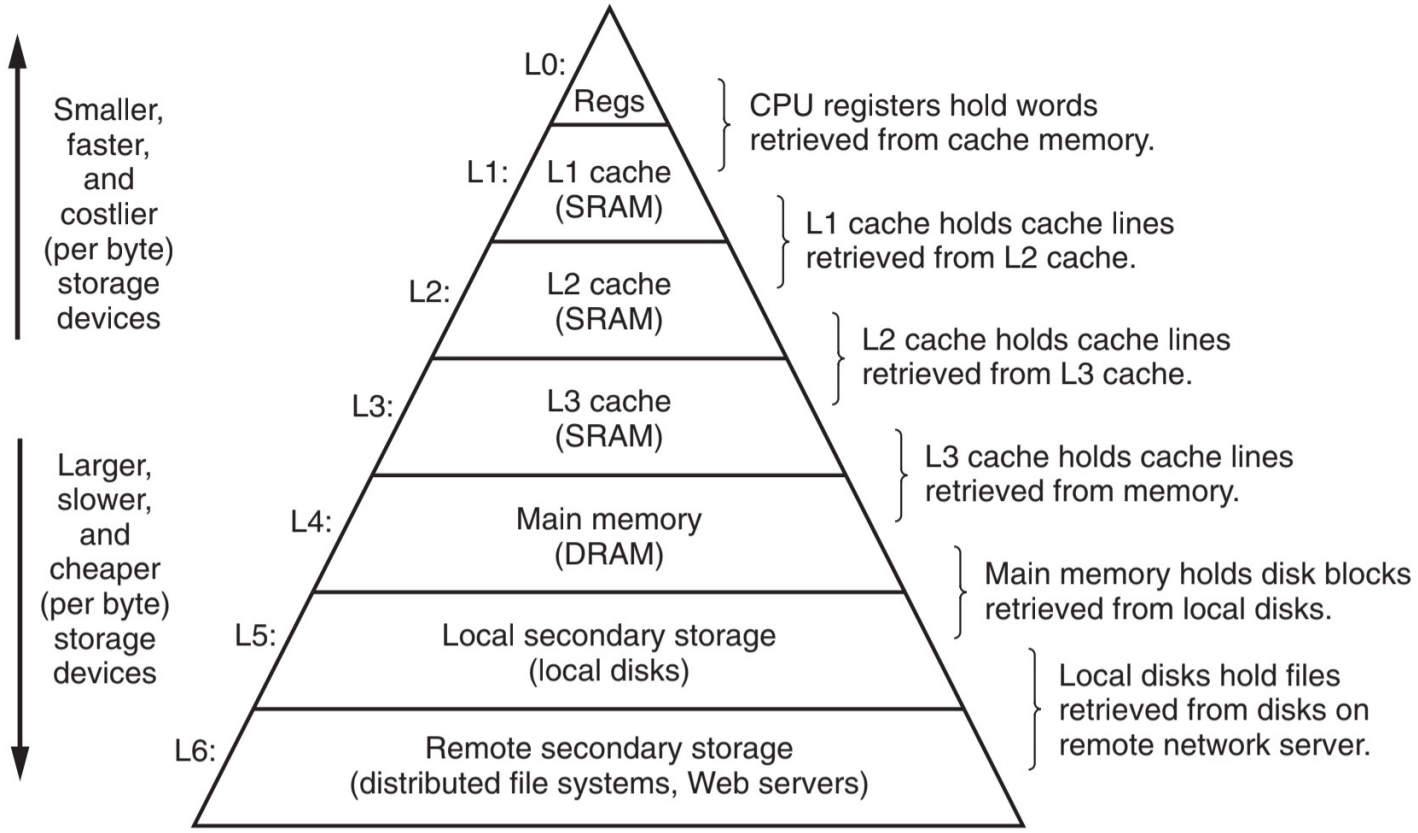


存储层次结构

- 通过减少数据移动来保持处理器持续工作

- 高速存储非常昂贵
  - L0 (Registers): 1ns, KB
  - L1, L2, L3: 10ns, MB
  - Main memory: 100ns, GB
  - Disk: 10ms, TB
  - Remote: 10sec, PB

- 动态随机存取存储器 (DRAM)
  - Double Data Rate (DDR)
  - High Bandwidth Memory (HBM)

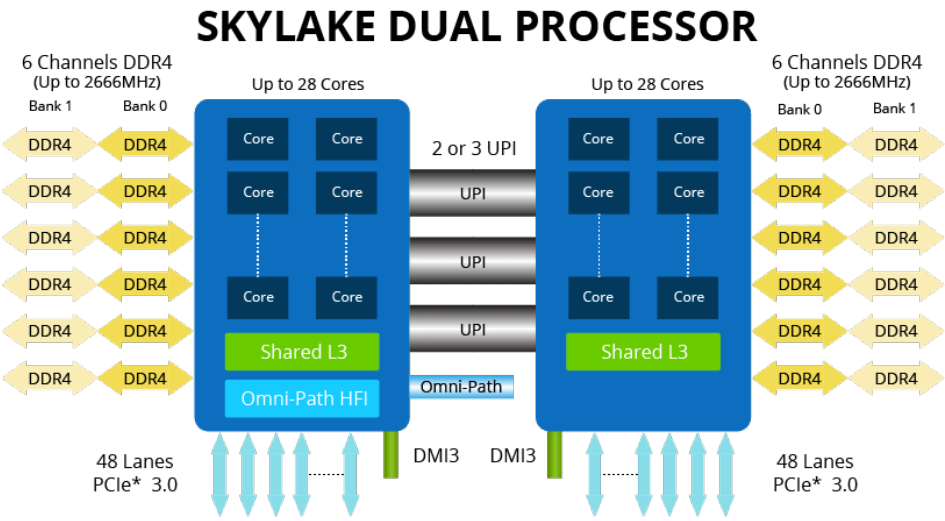


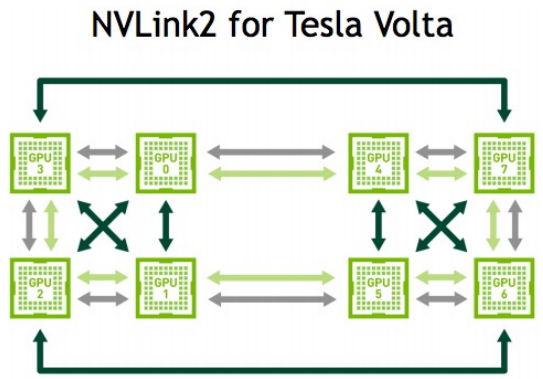
Memory hierarchy of modern computers [1]

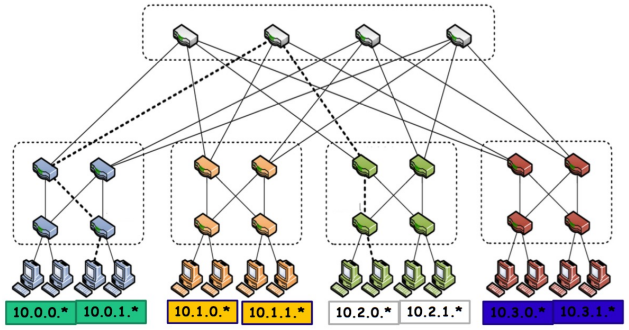
[1] Bryant, Randal E. and O'Hallaron David Richard. Computer systems: a programmer's perspective. Vol. 2. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

所有计算机都在并行化

- 从手机到超级计算机
  - 手机： 如Apple A9, ARMv8-A dual-core
  - 桌面电脑：如 Intel Core i3, 2 Cores
  - 服务器
    - 多核 CPU： 如 Intel(R) Xeon(R) Gold 6230 CPU: 20 Cores
    - 多 CPU：如 Intel(R) Xeon(R) Gold 6230, 20
      - QPI: Intel QuickPath Interconnect (Unidirectional Speed: 6.4 GT/s)
      - UPI (starting at 2017): Intel Ultra Path Interconnect (Unidirectional Speed: 10.4 GT/s)
    - 多 GPU：
      - GPU 或其他附加设备使用 PCIe 总线：如 PCIe3.0x16 (8 GT/s per lane, ~1GB/s per lane)
      - Nvidia GPU 也可使用 NVLink 总线：如 NVLink 3.0 (can be up to 96 lanes) for Nvidia A100 GPUs (50 Gbit/s per lane)
  - 集群
    - 多台服务器通过高速互联 (如 Mellanox 100 Gbit/s EDR InfiniBand ConnectX-5) 连接在一起

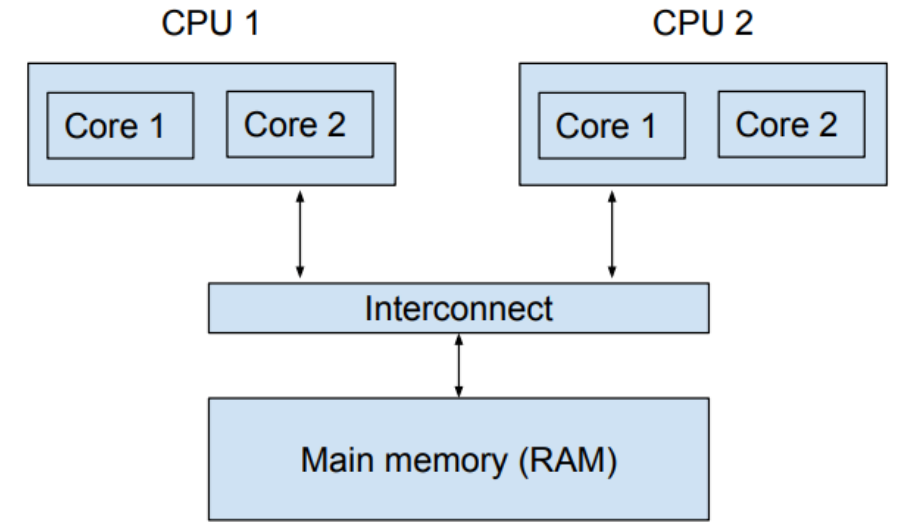




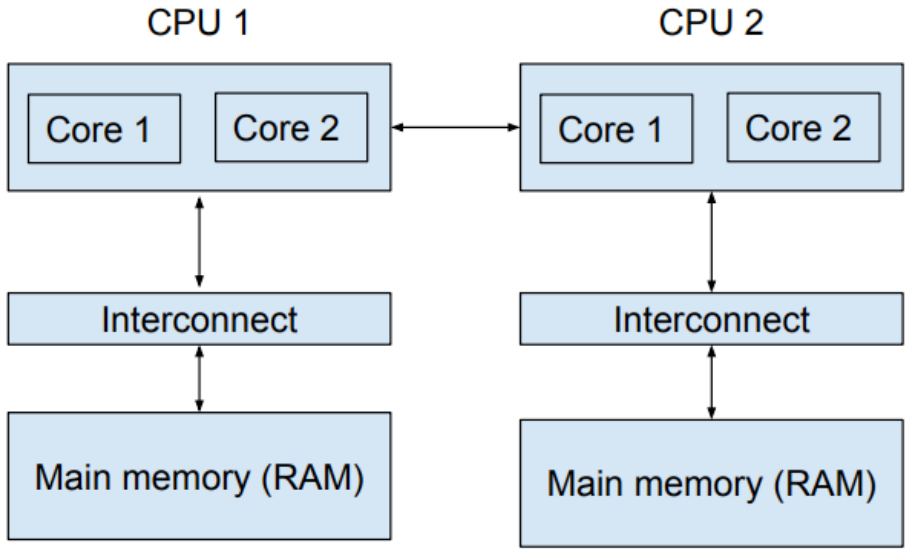


共享内存系统

- 统一内存访问 (UMA)
  - 所有处理器可直接访问主内存
  - 每个处理器具有同等的内存访问延迟和访问速度
  - 如 Sun Starfire servers、Compaq alpha server 以及 HP-v series
  - 低扩展性
    - 随着 CPU 核心数增加，硬件上为它们提供共享内存变得困难
- 非一致性内存访问 (NUMA)
  - 每个处理器可通过特定硬件 (如 QPI, UPI) 访问彼此的部分主内存
  - 访存的延迟取决于处理器的放置位置
  - 如 BBN, TC-2000, SGI Origin 3000, Cray



UMA



NUMA

分布式内存系统

- 一系列的处理节点通过网络进行互联
  - 网络的构成部件
    - 接线
    - 交换机
    - 网卡 (NIC)
  - 网络通信速度影响因素
    - 连接速度
    - 路由
    - 网络拓扑
      - Fat tree, Bcube, Torus, …

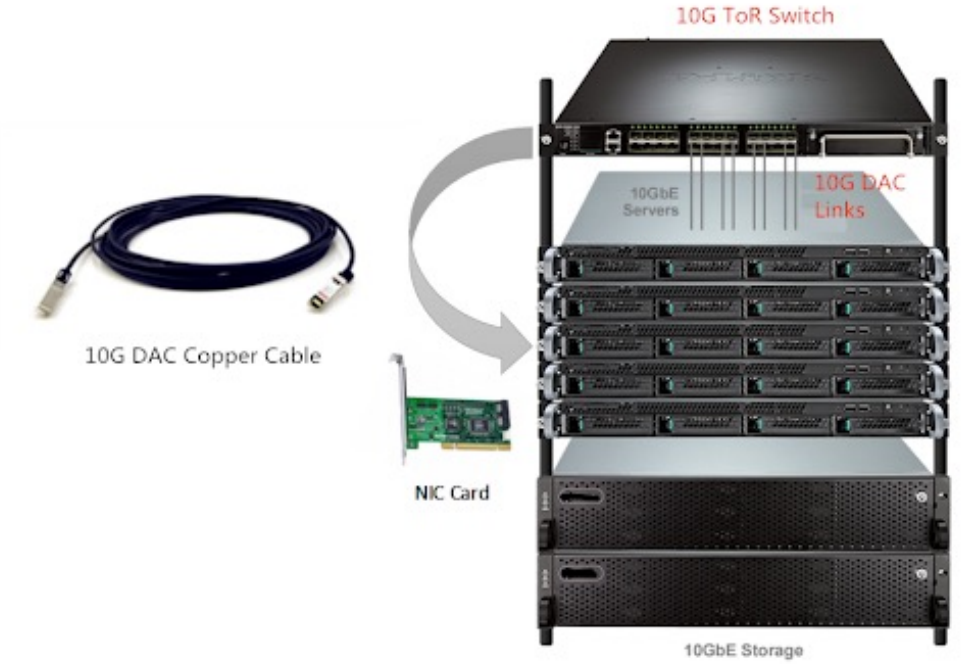
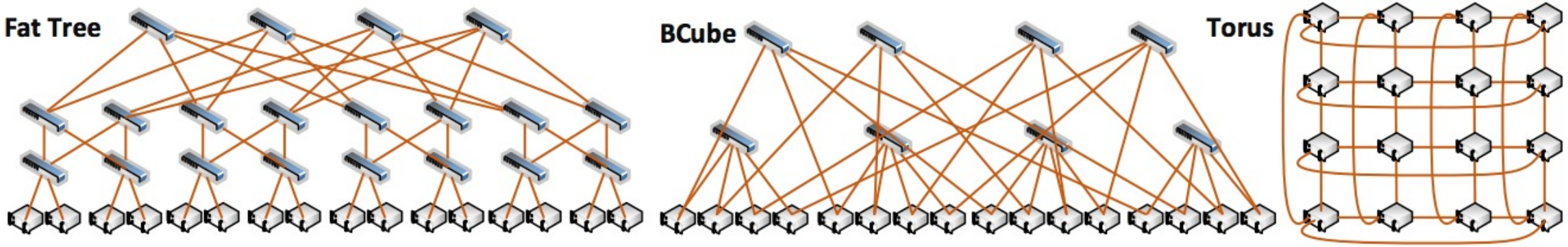


Image credit [1]



[1] http://www.cables-solutions.com/connectivity-options-comparison-10g-serversswitches-networking.html

并行硬件的Flynn分类法，1966

- Michael J. Flynn: 斯坦福大学名誉教授

SISD Single instruction stream Single data stream No parallelism!	(SIMD) Single instruction stream Multiple data stream Popular: SSE, AVX, GPU
MISD Multiple instruction stream Single data stream Uncommon	(MIMD) Multiple instruction stream Multiple data stream Popular: multi-core, cluster

SISD

- 指令与数据都是并行处理
- 单个控制单元从存储获取一条指令流 (IS)
- 控制单元产生相应的控制信号引导单个处理部件 (PE) 操作单个数据流 (DS)

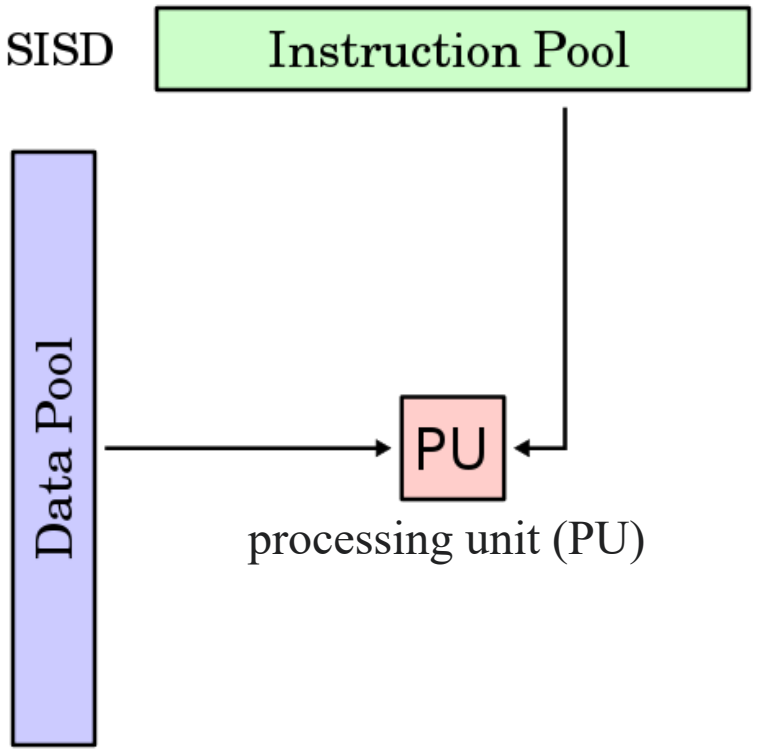


Image credit: https://en.wikipedia.org/wiki/Flynn%27s_taxonomy

SIMD

- 通过数据并行将数据分配给处理器实现并性
- 对多组数据应用相同的指令
- SIMD 架构的典型例子
  - Intel x86 CPUs: MMX, SSE, and AVX
    - MMX: MultiMedia eXtension, 诞生于 1997
      - 一条指令可以被同时应用于 2 个 32-bit、4 个 16-bit 或8 个 8-bit 整型数据
    - SSE: Streaming SIMD Extensions, 诞生于 1999
      - 一条 SSE 指令可以完成 4 个单精度 或 2 个双精度运算
    - AVX (Advanced Vector Extensions), AVX2, AVX-512, 2008
      - 一条 AVX-256 指令可以完成 8 个单精度 或 4 个双精度运算
      - 一条 AVX-512 指令可以完成 16 个单精度 或 8 个双精度运算
  - GPU: Graphics Processing Unit

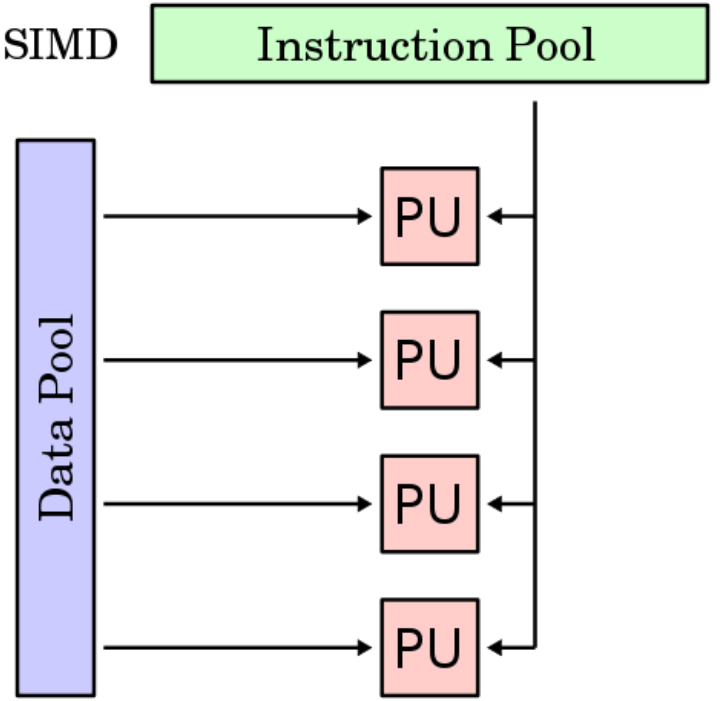
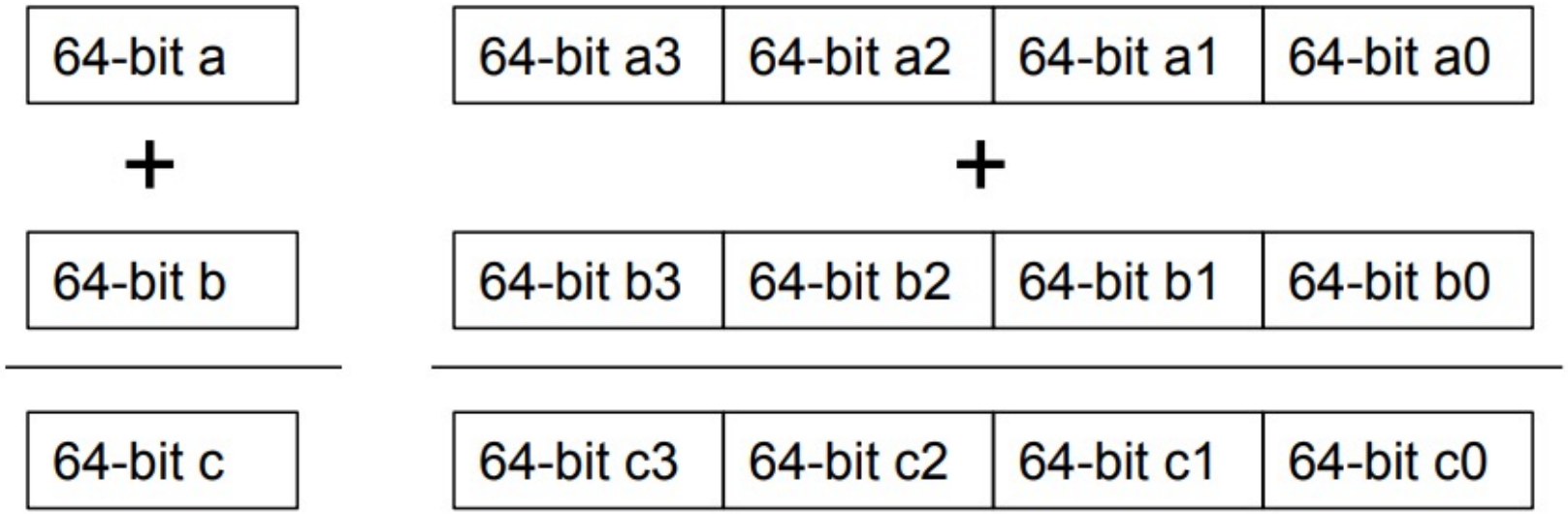


Image credit: https://en.wikipedia.org/wiki/Flynn%27s_taxonomy

对比示例：SISD vs. SIMD

- SISD
  - 传统模式
  - 一次操作产生一个结果
- SIMD
  - 例如 Sandy Bridge (如 2 代酷睿): AVX (256 bits) 或 Cascade Lake (如 i9-10980XE): AVX-512 (512 bits)
  - 一次操作 (256-bit AVX) 产生 256/64 = 4 results (double-precision, 64bits)



MIMD

- 支持在多个数据流上执行多个同步指令流
- 它是集成了多个完全独立的处理单元或核心，每一个都有自己的控制单元与 ALU
- 共享内存系统
  - 每一个处理器都可以利用所有内存
- 分布式内存系统
  - 通过互联网络连接

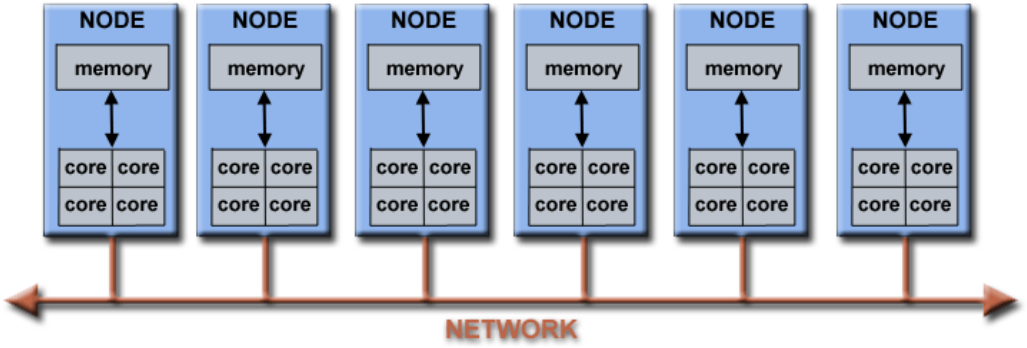


Image credit: https://hpc.llnl.gov/training/tutorials/introduction-parallel-computing-tutorial

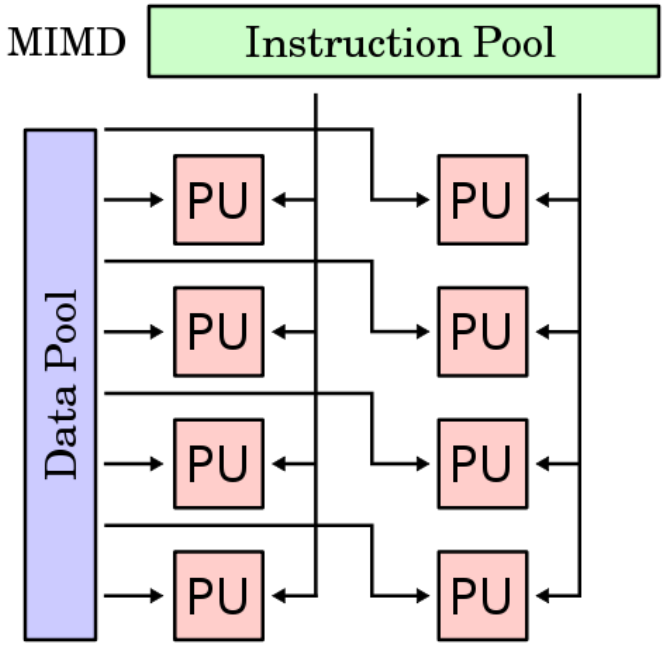


Image credit: https://en.wikipedia.org/wiki/Flynn%27s_taxonomy

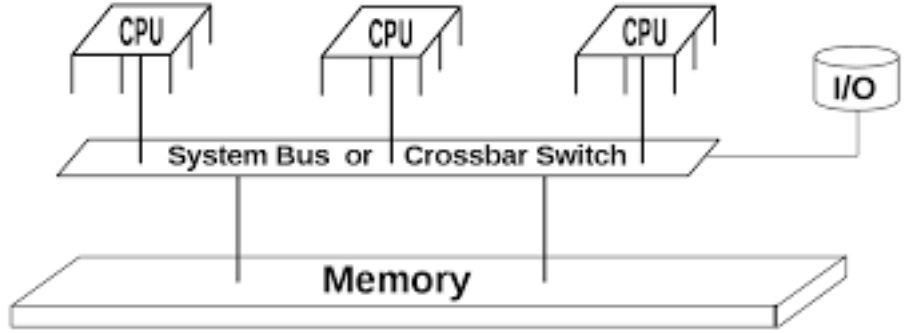


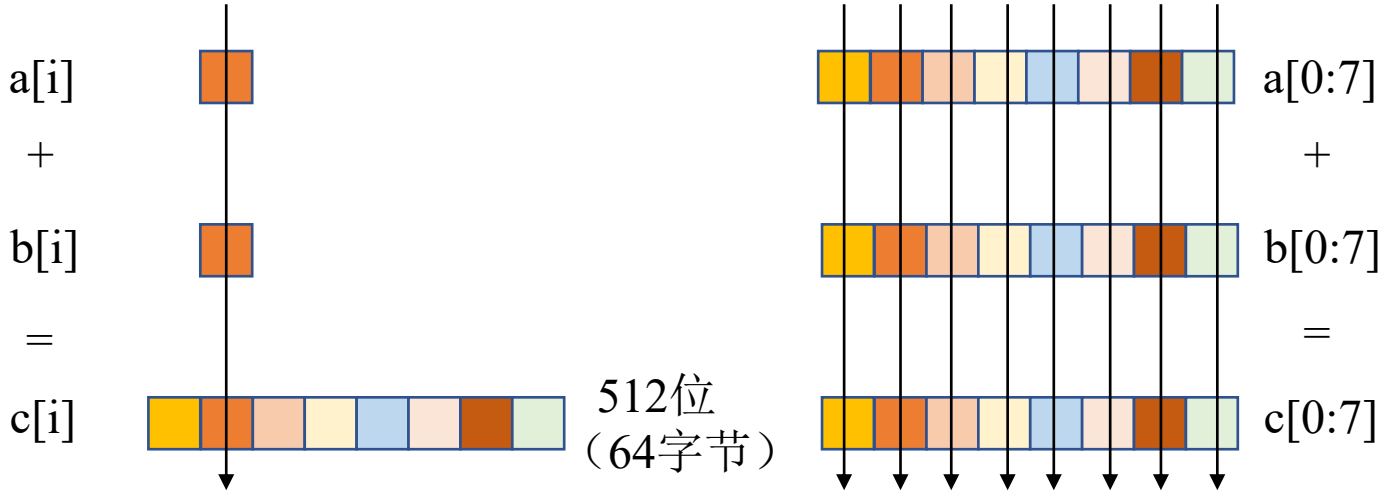
Image credit: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Shared_memory.svg

向量及SIMD概要

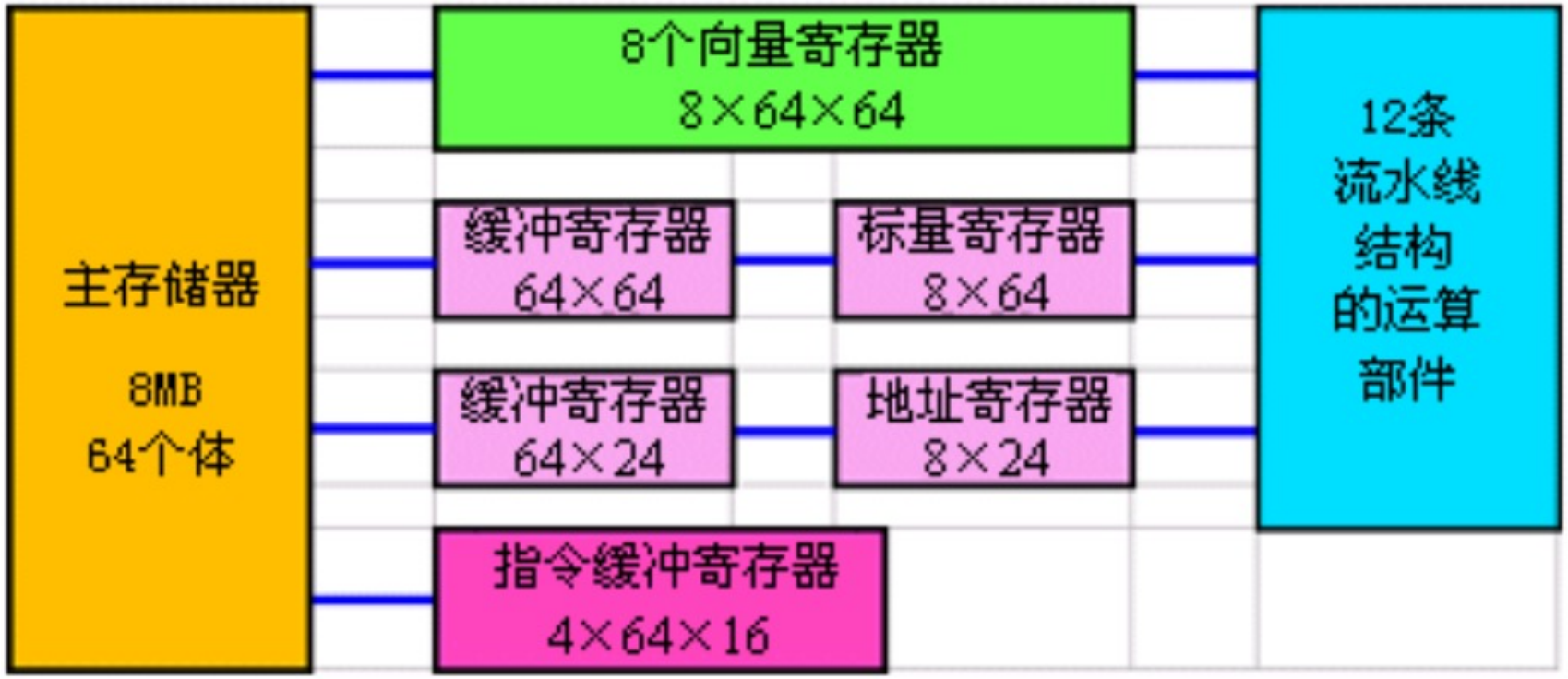
- 通过处理器特殊的向量单元，可以同时加载和操作多个数据元素

- 向量化术语
  - 向量通道
  - 向量宽度
  - 向量长度
  - 向量指令集

- 向量化的实现方式
  - 软件：向量指令由编译器生成
  - 硬件：指令与处理器的向量单元进行匹配



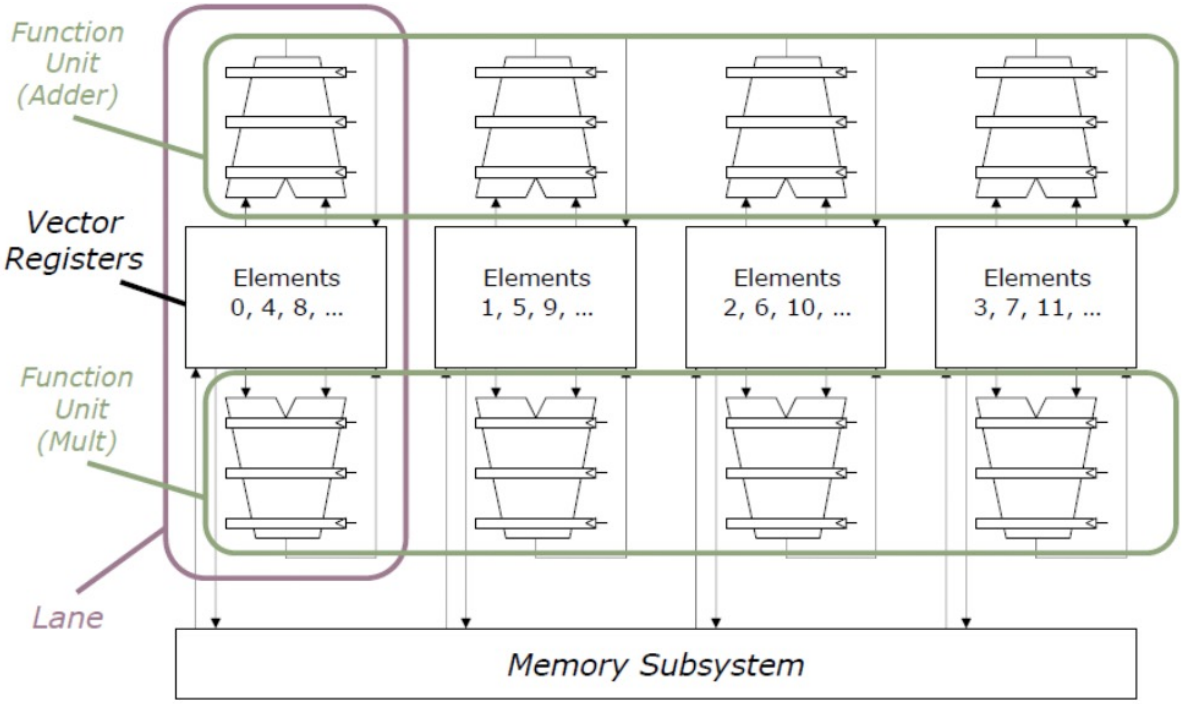
最早的向量机Cray-1（1976）

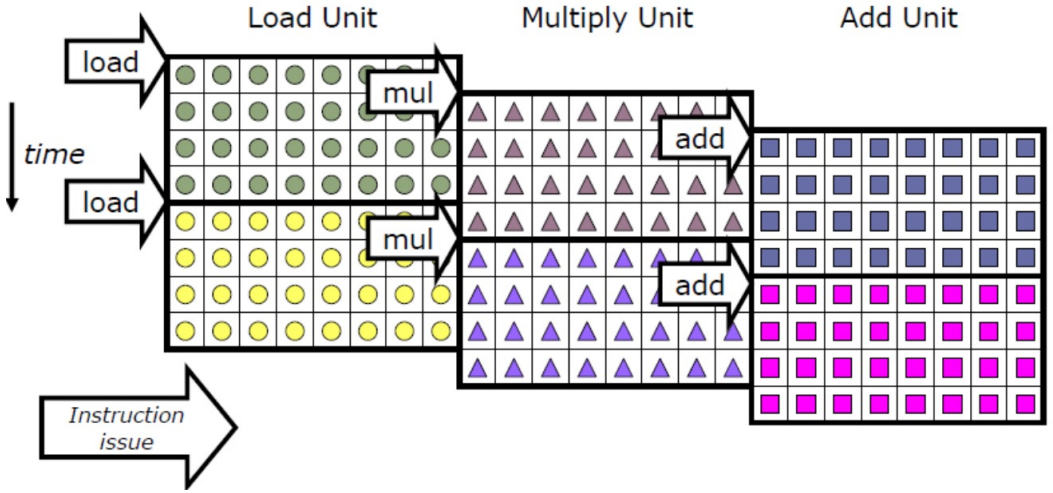


- ✓ “存储器-存储器”结构优化为“寄存器-寄存器”结构
- ✓ 运算部件所需要的操作数从向量寄存器中读取，运算的中间结果也写到向量寄存器中
- ✓ 操作数，数值都存储在寄存器中读写

向量运算执行的特点

- ✓ 使用深度流水执行元素操作
- ✓ 简化深度流水的控制（因为一个向量内元素是独立的）
- ✓ 多个向量指令可以重叠执行

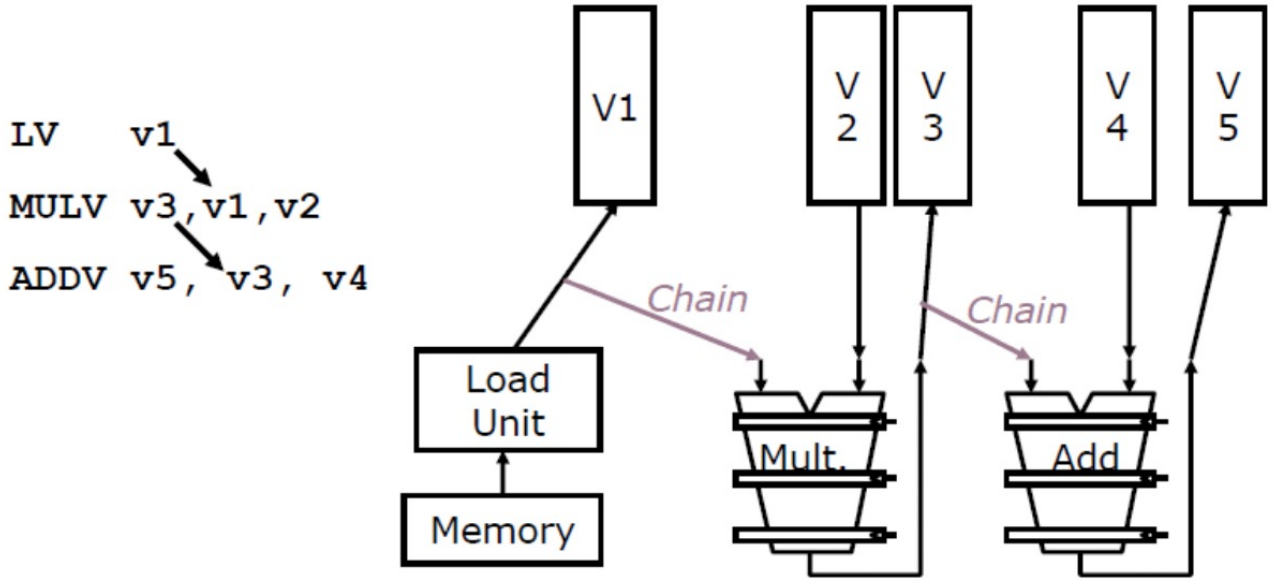


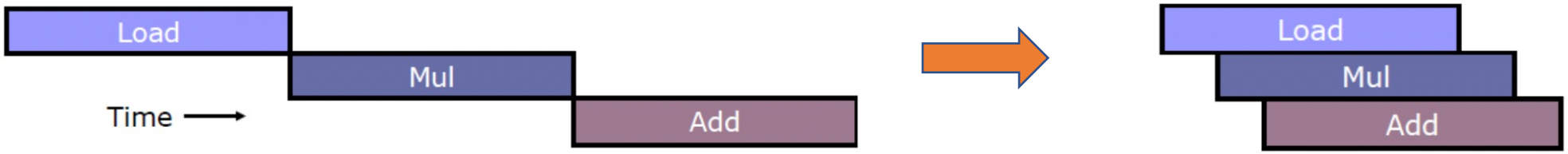


向量运算执行的特点

链化执行

- ✓ 如果没有链，在开始下一个以来的指令是，必须等待结果中的最后一个元素被写入。
- ✓ 有了链化执行，只要写过中第一个元素被写入就可以开始下一个依赖操作。



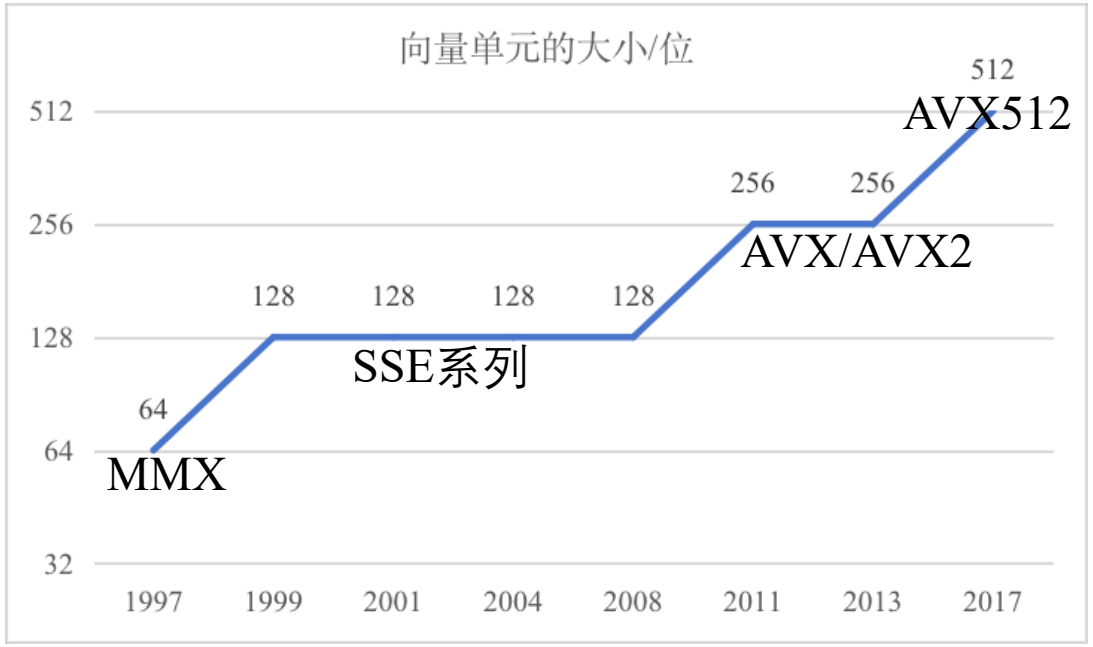


无链化执行　　有链化执行

向量化的硬件趋势

过去10年，向量硬件的发展极大地完善了向量功能

发行版	功能
SSE（单指令多数据流扩充）	Intel首个提供带有单精度支持的浮点运算的向量单元
SSE2	增加对双精度的支持
AVX（高级向量扩展）	提供两倍向量长度，AMD在其具有竞争力的硬件中添加了融合乘加（FMA）运算向量指令，有效地使某些环路的性能翻倍
AVX2	Intel为其向量处理器添加了乘积累加运算FMA
AVX512	首次出现在Knights Landing处理器上。 并在2017年进入多核处理器主线硬件产品阵容。 作为向量硬件架构的持续改进，从2018年起， Intel和AMD已经实现了AVX512的多个版本



向量化方法

- 优化软件库
  - Intel处理器：MKL提供了BLAS、LAPACK、SCALAPACK、FFT和Sparse Solvers
  - GPU处理器：CUBLAS、CUFFT和CUTLASS
- 自动向量化
  - __restrict__关键字
  - 编译器标志：-ftree-vectorize -fopt-info-vec-optimized
- 在编译器中使用hints
  - #pragma omp simd
  - 同样的需要加入编译器标志
- 向量内在函数
  - kahan sum向量库（Intel和AMD x86的向量库）
- 汇编指令
  - vmovapd，vaddsd，vsubsd，vxorpd …

阅读列表

- Thomas Sterling, Matthew Anderson and Maciej Brodowicz (2018), “High Performance Computing: Modern Systems and Practices,” Morgan Kaufmann, **Chapter 2**. [PDF: https://www.sciencedirect.com/book/9780124201583/high-performance-computing]

- Duncan, R. (1990). “A survey of parallel computer architectures”. *Computer*, *23*(2), 5-16. [PDF: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=44900]

总结

- 计算机体系结构
  - CPU
  - 内存
  - 指令周期
  - 指令流水线
- 并行计算机体系结构
  - Flynn 分类
    - SISD、SIMD、MISD 以及 MIMD
  - 共享内存与分布式内存系统
  - 网络拓扑
- 向量化方法及SIMD
  - 常见硬件结构
  - 常用向量化方法