# 计算机系统结构的相关概念

计算机系统结构：机器语言程序员所看到的传统机器级所具有的属性，它包含概念性结构和功能特性两个方面。

计算机系统结构（computer architecture）、计算机组织（computer organization，计算机组成）、计算机实现（computer implementation）

计算机系统结构分类：性能与价格的综合指标（巨型、大型、中型、小型、微型、单片机等）、用途（科学计算、事务处理、实时控制、家用等）、处理机个数（单处理机、多处理机）、种类（标量处理机、超标量处理机、超流水处理机、向量处理机、阵列处理机、对称多处理机、大规模并行处理机、机群系统等）。

Flynn分类法：单指令流单数据流SISD（single instruction stream single datastream）、单指令流多数据流SIMD（single instruction stream multiple datastream）、多指令流单数据流MISD（multiple instruction stream single datastream）、多指令流多数据流MIMD（multiple instruction stream multiple datastream）。

SISD：传统的顺序处理计算机。

SIMD：阵列处理机。

MISD：流水线结构的机器。

MIMD：多处理机。

Händler分类法（处理控制器PCU、栓数落及部件ALU（运算部件PE）、位级电路BLC）：处理控制器PCU的数目、可组成流水线的PCU数目、每个PCU所控制的ALU（PE）数目、可组成流水线的ALU数目、ALU（PE）的字长、在所有ALU（PE）中的流水段数目。

软件是促使计算机系统结构发展的最重要因素。

系列机：在一个厂家内生产的具有相同的系统结构，但具有不同组成和实现的一系列不同型号的机器。

向上（下）兼容、向前（后）兼容

兼容机：不同厂家生产的具有相同系统结构的计算机称为兼容机。

模拟、宿主机、虚拟机

仿真、宿主机、目标机、仿真微程序。

应用需求是促使系统结构发展的最根本动力。

器件是促使系统结构不断发展的最活跃因素。

系统设计的定量原理

大概率事件优先原理：对于大概率事件（最常见的事件），赋予它优先的处理权和资源使用权，以获得全局的最优结果。

Amdahl定律：加快某部件执行速度所获得的系统性能加速比，受限于该部件在系统中的重要性。

CPU性能公式：T\_CPU=CPU时钟周期数N\_C\*时钟周期长度t。

时钟周期：大多数计算机的时钟速率是固定的，它的运行周期。ns、MHz

程序访存的局部性原理：一个程序用90%的执行时间去执行仅占10%的程序代码。

时间上的局部性：最近访问过的代码是不久将被访问的代码。

空间上的局部性：地址上邻近的代码可能会被一起访问。

性能评价标准

性能指标

时间（速度）是衡量计算机性能的主要指标。

MIPS（million instructions per second）

MFLOPS（million floating point operations per second）

测试程序：真实程序、核心程序、小测试程序、综合测试程序。

性能比较

算术平均值法

加权算数平均值

调和平均值法

加权调和平均值

几何平均值

加权几何平均值

原料成本、直接成本、毛利、平均销售价格、标价

并行性：同时性、并发性。

并行性等级：处理数据角度（字串位串、字串位并、字并位串、全并行）、执行程序角度（指令内部并行、指令级并行、任务级或过程级并行、作业或程序级并行）。

进入并行处理领域：处理数据的并行性达到字并位串级，或者执行程序的并行性达到任务或过程级。

提高并行性的技术途径：时间重叠、资源重复、时间重叠+资源重复、资源共享。

耦合度

紧耦合系统（直接耦合系统）、松耦合系统（间接耦合系统）

异构型多处理机系统、容错系统、可重构系统、同构型多处理机系统

并行处理机的系统结构类型：SISD、SIMD、MISD、MIMD。

# 时间并行技术

流水线技术：把一个重复的过程分解为若干子过程，每个子过程与其他子过程并行进行。

流水线技术是一种时间并行技术。

指令流水线、操作部件流水线、访存部件流水线、宏流水线

顺序执行方式、重叠执行方式

（一个）流水阶段（流水节拍、流水步、流水段、功能段、流水级）：流水线中的每一个阶段。一个流水阶段与另一个流水阶段相连接形成流水线。

流水线的表示方法：连接图、时空图。

流水线的特点：每一个功能段部件后面都要有一个缓冲寄存器（锁存器、闸门寄存器），其作用是保存本流水段的结果；各功能段的时间应尽量相等，否则将引起阻塞、断流；只有连续不断地提供同一种任务时才能发挥流水线的效率；需要有装入时间和排空时间。

流水线的性能指标

吞吐率P：在单位时间内流水线所完成的任务数量。

解决流水线瓶颈：将流水线的“瓶颈”部分再细分；由于结构等方面的原因，瓶颈段不能再细分时，可通过重复设置瓶颈流水段，让多个瓶颈流水段并行工作。数据分配器、数据收集器

加速比S：完成同样一批任务，不使用流水线所用的时间与使用流水线所用的时间之比。

效率E：流水线的设备利用率。在时空图上，完成n个任务占用的时空区有效面积与n个任务所用的时间和k个流水段所围成的矩形时空区总面积之比。

流水线最佳段数PCR（Performance Cost Ratio）：最大吞吐率/流水线的总价格C=a+bk

超流水线：8段或超过8段的流水线。

超流水线处理机：采用8段以上流水线的处理机。

结构相关

（流水线有）结构相关：某些指令组合在流水线重叠执行过程中，如果硬件资源满足不了指令重叠执行的要求，便会产生资源冲突。

解决方法：

使指令停顿（空闲）一个时钟周期。

如果指令和数据放在同一个存储器，可使用双端口存储器。

设置两个存储器，其中一个作为数据存储器，另一个作为指令存储器。

数据相关：当指令在流水线中重叠执行时，流水线有可能改变指令读/写操作数的顺序，使得读/写操作顺序不同于它们非流水实现的顺序，从而导致数据供求关系上的冲突。

解决方法：

后推法：遇到数据相关时，就停顿后继指令的执行，直至前面指令的结果产生为止。

定向技术（旁路技术、专用通路技术）：如果后续指令要使用前面指令的运算结果值，则通过硬件专门电路将该运算结果值提前传送到有关缓冲寄存器，使后续指令得以不停顿地进入流水线，并及时得到所需要的操作数。

连锁硬件（空闲周期法）：有时无法使用内部定向传送，因为这等于要求数据读出的时间为零。使用流水线连锁硬件，由它来检测这种情况，并使流水线暂停流动一个时钟周期。流水线空闲周期：这种停顿延迟周期，表示流水线装入延迟或进行空操作。

软件优化编译法：通过指令重新排序的方法来尽可能消除空闲周期。

理想流水线：没有任何延迟，CPI为1的流水线。

控制相关

（流水线的）控制相关：因为程序执行转移类指令而引起的相关。

局部相关：数据相关影响到的仅仅是本条指令附近少数几条指令。

全局相关：控制相关影响的范围要大得多，它会引起程序执行方向的改变，使流水线损失更多的性能。

流水线吞吐率下降百分比D：(最大吞吐率-有条件转移影响的流水线最大吞吐率)/最大吞吐率

静态分支技术

尽早判别转移是否发生，尽早生成转移目标地址

提前形成条件码

在硬件上设置两个指令缓冲栈

延迟转移（delayed branching）技术：由编译程序重排指令序列来实现。从逻辑上“延长”转移指令的执行时间，即发生“转移成功  
时并不排空指令流水线，而是让紧跟在转移指令I之后已进入流水线的少数几条指令继续完成。延迟转移槽

改进循环程序的处理方法

动态分支预测技术

当执行转移指令时，转移成功或转移失败的信息可记录在一个所谓的“转移历史表”BHT（branch history table）中。BHT是一个小容量的高速cache。

转移目标缓冲栈BTB（branch target buffer）：一个内部Cache，其结构类似于BHT结构，只不过每项的转移指令字段改为转移指令地址字段。

转移目标指令缓冲栈BTIB（branch target instruction buffer）：为了能够在转移成功方向上也预取一部分指令，把“转移目标地址”部分改为存放转移目标地址之后的n条指令。

中断处理

常规I/O设备申请的中断服务：不精确断点法。

程序性错误和机器故障引起的中断：精确断点法。后援寄存器

# 指令级并行技术

并行性分类：

粗粒度并行性（coarse-grained parallelism）：在多处理机上分别运行多个进程，由多台处理机合作完成一个程序。

细粒度并行性（fine-grained parallelism）：在一个进程中进行指令一级或操作一级的并行处理。

指令级并行性（instruction-level parallelism）：程序中的指令是顺序安排的，这些指令间不存在相关而能在流水线中通过时间重叠方法来并行执行。

机器并行性（machine parallelism）：处理机获取指令级并行性好处的能力大小。

CPI：流水线中执行一条指令所需的机器周期数。

指令级并行度（instruction level parallelism）：在一个时钟周期内流水线上流出的指令数。

超标量（superscalar）、超流水线（superpipelining）、超标量超流水线（superscalarsuperpipelining）

数据相关（数据冒险，data hazard）：程序原有先后顺序的两条指令，它们要对共享变量进行读、写操作，如果在指令流水线中实际完成的顺序与原有顺序不一致，那么流水线就可能输出错误的结果。

数据相关分类：写后读相关（WR）、读后写相关（RW）、写后写相关（WW）。

寄存器重命名（register renaming）技术：如果遇到RW或WW相关，引起相关的目的寄存器要重新命名。引起RW或WW相关的指令的运算结果不能直接写到它指定的寄存器中，而应该写到另外一个动态分配的备用寄存器中。重命名缓冲栈

指令调度技术分类：静态指令调度、动态指令调度

静态调度（static scheduling）：由优化的编译程序重排指令序列，拉开具有数据相关的有关指令间的距离。

动态调度：对指令流水线互锁控制进一步改进，能实时地判断出是否有WR、RW、WW相关存在，利用硬件绕过或防止这些相关的出错，并允许多条指令在具有多功能部件的执行段中并行操作，从而提高流水线的利用率且减少停顿现象。Tomasulo令牌法采用分散控制的办法处理数据相关。CDC计分牌法采用集中控制的办法处理数据相关，提出定向逻辑和寄存器打标记方法，类似数据流的驱动机制。

超标量流水处理机

指令发射（instruction issue）：启动指令进入执行段的过程。

指令发射策略：指令发射所用的协议或规则。

按序发射（in-order issue）：指令按程序的次序发射。

乱序发射（out-of-order issue）：为改善流水线性能，可以将存在相关性的指令推后发射，而将后面无相关性的指令提前发射，即不按程序原有次序发射指令。

指令的完成：按序完成、无序完成。

一般而言，无序发射总导致无序完成。

指令窗口（instruction window）是一个缓冲栈。

无序发射无序完成和静态调度技术（优化编译程序）相结合

单流水线普通标量处理机的指令集并行度（||（1，1））

超标量处理机的指令集并行度（||（m，1））

超标量处理机相对于单流水线普通标量处理机的加速比（||S（m，1））：T（1，1）/T（m，1）

超流水线处理机：在一个时钟周期内能够发射多条指令的处理机。指令流水线的段数大于等于8的流水线处理机。将1个流水段再细分为多个流水级。

超标量处理机主要开发空间并行性，依靠重复设置的操作部件上同时执行多个操作来提高程序的执行速度。

超流水线处理机主要开发时间并行性：在同一个操作部件上重叠多个操作，通过使用较快时钟周期的深度流水线来加快程序的执行速度。

超长指令字处理机

超长指令字（very long instruction word，VLIW）方法：由编译程序在编译时找出指令间潜在的并行性，进行适当调度安排，把多个能并行执行的操作组合在一起，成为一条具有多个操作段的超长指令。

VLIW处理机是一种单指令多操作码多数据的系统结构。

表调度的编译方法

多线程与超线程处理机

超线程（hyper threading，HT）技术的处理机

垂直浪费：资源冲突导致处理机流水线不能继续执行新的指令。

水平浪费：指令相关导致多条流水线中部分流水线被闲置。

线程级并行（thread-level parallelism）技术

线程：在操作系统中描述能被独立执行的程序代码的基本单位。

进程

进程作为资源分配的单位，每个进程拥有若干线程，线程是调度和执行的基本单位。

硬件线程，用来描述一个独立的指令流，而多个指令流能共享同一个支持多线程的处理机。

多线程处理机具体的实现方法：

细粒度多线程（交错多线程）处理机：在每个时钟周期都进行线程切换。

粗粒度多线程（阻塞多线程）处理机：只有在遇到代价较高的长延迟操作时才由处理机硬件进行线程切换，否则一直执行同一个线程的指令。

由于相互独立的线程共享执行单元的处理时间，并且能够进行快速的线程切换，因而多线程处理机能够有效地减少垂直浪费情况，从而利用线程级并行来提高处理机资源的利用率。

同时多线程结构

同时多线程（simultaneous multithreading，SMT）技术，结合了超标量技术和细粒度多线程技术的优点，允许在一个时钟周期内发射多个线程的多条指令，因而可以同时减少水平浪费和垂直浪费。

多核处理机：多个相同时钟频率处理机组合而成。

# 向量处理机

标量：单个量。

向量：一组标量。

向量指令

向量处理：一条向量指令可以处理N个或N对操作数，对这样一组数的运算。

向量处理方法

横向处理方法：向量计算按行的方式从左至右横向进行。

横向处理方法不适合于向量流水处理。

纵向处理方法：向量计算是按列的方式自上而下纵向地进行。

存储器-存储器工作方式的向量处理机都采用纵向处理方法。

纵横处理方法（分组处理方法）：组内采用纵向处理，组间采用横向处理。

纵横处理方法适合于寄存器-寄存器工作方式的向量处理机。

向量和标量的平衡点：一个程序中向量代码所占的百分比。

存储器-存储器结构：存储器系统的带宽至少3倍于一般的存储器系统、可变延迟缓冲器

寄存器-寄存器结构：中间存储器起着数据的中间存储作用，功能上相当于寄存器；成组传送方式。

多功能部件的并行操作：向量寄存器使用冲突、功能部件使用冲突。

链接技术：利用向量指令间存在的先写后读的数据相关性来加快向量指令序列执行速度的技术。

超级向量操作：使向量寄存器在同一时钟周期内，既接收1个功能部件送来的运算结果，又可把这一结果作为下一个向量指令运算所需的源操作数传送给另一个功能部件，那就可使这两个部件链接起来进行操作。

分段开采技术：一次处理一个向量段。

向量循环：处理长向量的程序结构。

分段开采技术适用于寄存器-寄存器型向量处理机。

采用多处理机系统结构

一条向量指令的执行时间：流水线建立时间+第一对向量元素通过流水线的时间+(n-1)\*流水线的时钟周期

一组向量操作的执行时间：编队数\*一个编队的执行时间。

一组向量操作的执行时间取决于：向量的长度、向量操作之间是否存在流水线功能部件的使用冲突、数据相关性。

编队：几条能在一个时钟周期内一起开始执行的向量指令。同一个编队中的向量指令一定不存在功能部件的使用冲突和数据相关性。

一个编队的执行时间与向量长度n无关。

（向量的）启动时间：向量操作流水线的延迟，也就是流水线的建立时间，它等于流水功能部件的流水段数，它和向量流水线的流过时间几乎相等。

分段开采时一组向量操作的执行时间：向量长度/向量寄存器长度\*(执行标量代码的开销+向量启动开销)+向量长度\*编队数。

最大性能R\_∞和半性能向量长度n\_1/2

R\_∞：当向量长度为无穷大时向量流水线的最大性能，lim\_n→∞（一轮循环浮点运算次数\*时钟频率/一轮循环所花费的时钟周期数）=lim\_n→∞（一轮循环浮点运算次数/一轮循环时间）。MFLOPS。常在评价峰值性能时使用。

半性能向量长度n\_1/2：为达到一半R\_∞值所需的向量长度。评价向量流水线建立时间对性能影响的参数。表示为建立流水线而导致的性能损失。

# 互连网络

互连网络：一种由高速开关元件按照一定的拓扑结构和控制方式构成的网络，用来实现计算机系统内部多个处理机或多个功能部件之间的相互连接。

互联网络的特征：定时方式（同步、异步）、交换方法（线路交换（circuit switching）、分组交换（packet switching））、控制策略（集中式、分散式）、拓扑结构（静态、动态）。

互连网络的链路：连接网络中相邻结点所用的通信线路，网络的相邻结点间进行数据和控制信息传送时所使用的通路。

互连网络的表示方法：互联函数表示法、图形表示法。

常用的基本互连函数：

交换函数C：实现二进制地址编码中第k位位置不同的输入端与输出端之间的连接。

均匀洗牌函数（均匀混洗函数）S：把输入端二进制地址循环左移一位。

逆均匀洗牌函数

蝶式函数B：将输入二进制地址的最高位和最低位互换位置。

反位序函数R：将输入端二进制地址的位序颠倒过来求得相应输出端的地址。

移数函数

PM2I函数：将输入端数组循环移动一定的位置向输出端传输。PM2\_+i（x）=x+2^i mod N，PM2\_-i（x）=x-2^i mod N。

互连网络的特性参数

网络规模

结点度

距离

网络直径

结点间的线长

等分宽度

通道等分宽度b：当某一网络被切成相等的两半时，沿切口的最小边数（通道）。

线等分宽度B=b\*w。主要反映了网络最大流量。

w为通道宽度。位

对称性

互连网络分类：

静态网络（static networks）：处理单元间有着固定连接的一类网络，在程序执行期间，这种点到点的链接保持不变。

动态网络（dynamic networks）：是用交换开关构成的，可按运行程序的要求动态地改变连接状态。

静态互联网络

维数（dimension）：画在n维空间时才能使各条链路不会相交。

二维网格：在网格中的外围结点不卷绕相接、把外围结点卷绕相接（圆环体卷绕：同一行的结点相接，同一列的结点相接。网格卷绕：一行的尾与下一行的头，一列的尾与下一列的头相接。）。

n维立方体网络。

带环三维立方体（CCC，cube-connected cycles）

动态互连网络

总线网络

总线系统：一组导线和插座用于处理与总线相连的处理机、存储模块和外围设备间的数据业务。总线用于从源（主部件）和目的（从部件）之间确立关系后处理一次业务。

总线被称为多个功能模块键的争用总线或时分总线。

多级网络

MIMD和SIMD计算机都使用多级互连网络（multistage interconnection network，MIN）。

各种多级网络的区别：所用开关模块：控制方式、级间连接（ISC）模式。

控制方式：对各个开关模块进行控制的方式。级控制、单元控制、部分级控制。

常用的ISC模式：均匀洗牌、蝶式、多路洗牌、纵横交叉、立方体连接等。

2\*2开关：直送、交叉、下播、上播。

交叉开关网络：可看作是一个单级开关网络。交叉点开关能在对偶（源、目的）之间形成动态连接，每个交叉点开关在对偶间提供一条专用连接通路，开关可根据程序的要求动态地设置“开”或“关”。

路由选择（routing）（通路选择、路径选择|寻径）：用来实现经中间结点传递功能的通信方法和算法。

网络结点间建立通信通路：静态方法、动态方法。

通路选择方法：

确定性（deterministic）方法：完全由源地址和目的地址来决定路由。一对源地址和目的地址间只有一条通路可选。

自适应（adaptive）方法：通信的通路每次都要根据通信资源或者网络的情况来选择。

X-Y寻径算法、E-立方路由算法

消息传递方式

消息：结点间通信的逻辑单位，常常由任意数目的长度固定的包组成。

（一个）消息包：每个分组，由一个报头和一批数据组成。

进程ID：哪一个结点，在这个结点中的哪一个进程。

线路交换（circuit switch）、存储转发（store and forward）、虚拟直通（virtual circuit through）、虫孔（wormhole）方式（片（flit）：队列或通路所能处理的最小信息单位）。

虚拟通道：两个结点间的逻辑链，由源结点的片缓冲区、结点间的物理通道以及接收结点的片缓冲区组成。

死锁、通道相关

流量控制：把后一个包暂时存放在缓冲区、阻塞后一个包、丢弃后一个包、阻塞绕道。

通信模式：单播（unicast）、选播（multicast）、广播（broadcast）、会议（conference）。

描述效率常用的两个参数：通道流量、通信时延。

# 阵列处理机

SIMD=（机器的处理单元数N，控制部件CU直接执行的指令集C，CU广播至所有PE进行并行执行的指令集I，屏蔽方案集M，数据寻径功能集R）。

分布式存储器的阵列机、共享存储器的阵列机