
计算机组成原理与系统结构

解题辅导

胡越明 编著



清华大学出版社

计算机组成原理与系统结构解题辅导

胡越明 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍计算机组成原理和计算机系统结构的习题解答方法。全书分为 10 章, 分别介绍该课程中每部分的基本内容和解题方法。本书主要为学习计算机组成原理和系统结构课程的本科生以及报考计算机及相关专业的硕士研究生的考生提供学习辅导, 帮助学生和考生较全面地掌握本课程的内容, 理清课程中的基本概念, 并掌握习题的解答方法。本书将计算机组成原理和系统结构课程的内容归结为 10 章, 每章先对相关的内容进行简单地归纳, 介绍一些要点、难点, 然后是基本习题和典型习题。基本习题以选择题、填空题、名词解释和问答题的形式, 使学生理清基本的概念。典型习题是一些计算型、分析型和设计型的习题。一部分习题取自全国重点大学的近年研究生入学考试题。为了帮助学生和考生解答这些习题, 以及检查自己的学习情况, 本书给出了所有习题的解答过程, 并对部分习题的解答方法做了说明。

本书可作为计算机专业大学本科生学习的参考书。也可以作为报考计算机专业或相关专业硕士研究生的复习资料。

版权所有, 翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签, 无标签者不得销售。

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机组成原理与系统结构解题辅导/胡越明编者.—北京: 清华大学出版社, 2002

ISBN 7-302-05978-0

I. 计... II. 胡... III. 计算机体系结构-高等学校-解题 IV. TP303-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 078737 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦, 邮编 100084)

[http:// www. tup. tsinghua. edu. cn](http://www.tup.tsinghua.edu.cn)

责任编辑: 于希滢

印 刷 者: 国防工业出版社印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 **印张:** 18.75 **字数:** 427 千字

版 次: 2002 年 11 月第 1 版 2003 年 4 月第 2 次印刷

书 号: ISBN 7-302-05978-0/TP·3563

印 数: 5001~8000

定 价: 26.00 元

编者的话

计算机组成和系统结构课程是一门理论性和实践性都很强的课程，它涉及的知识面广，内容多、更新快。课程中涉及许多名词和概念，学好这门课程不仅需要相关专业基础，还需要了解一些实际机型、器件和标准。课程中每一章节的内容和解题方法又有较大不同，涉及的概念不同，需要的基础知识和解题方法不同。因此，学生在学习过程会遇到许多困难，帮助同学们解决学习中的困难是本书的宗旨。

在计算机组成和系统结构课程方面，国内已有许多不同的教材。由于不同的教材有不同的特色，涉及对不同的计算机产品、芯片和标准内容的介绍，为了使本书能够适合尽可能多的学生，本书侧重对基本概念、基本原理和基本方法的学习辅导，避免涉及具体机型产品、芯片和标准的内容。

对于本书中存在的问题和错误，欢迎读者提出批评。希望读者能够对本书提出改进的建议，作者在此表示衷心的感谢。

胡越明
2002年8月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 知识点.....	1
1.1.1 计算机硬件的基本知识.....	1
1.1.2 计算机软件的概念.....	3
1.1.3 程序设计语言的概念.....	4
1.1.4 计算机系统结构的概念.....	5
1.1.5 计算机系统性能评价.....	6
1.2 基本习题解答.....	9
1.3 习题解析.....	20
第 2 章 数据编码和数据运算	31
2.1 知识点.....	31
2.1.1 数据与文字的编码.....	31
2.1.2 定点加减法运算.....	36
2.1.3 定点乘除法运算.....	37
2.1.4 逻辑运算.....	38
2.1.5 浮点运算方法和浮点运算器.....	38
2.2 基本习题解答.....	39
2.3 习题解析.....	48
第 3 章 存储系统	66
3.1 知识点.....	66
3.1.1 存储器的构成.....	66
3.1.2 高速缓存.....	69
3.1.3 虚拟存储器.....	75
3.2 基本习题解答.....	77
3.3 习题解析.....	86
第 4 章 指令系统	110
4.1 知识点.....	110
4.1.1 指令编码.....	110

4.1.2	操作数的存储与寻址	111
4.1.3	操作码的编码	112
4.1.4	指令系统	113
4.2	基本习题解答	115
4.3	习题解析	122
第5章	控制器	139
5.1	知识点	139
5.1.1	中央处理器	139
5.1.2	指令的执行过程	140
5.1.3	硬连线控制器	141
5.1.4	微程序控制器	142
5.1.5	阵列逻辑控制器	144
5.2	基本习题解答	144
5.3	习题解析	151
第6章	系统总线	170
6.1	知识点	170
6.1.1	总线的概念	170
6.1.2	总线控制	171
6.1.3	总线接口	172
6.2	基本习题解答	172
6.3	习题解析	179
第7章	输入输出系统	184
7.1	知识点	184
7.1.1	输入输出设备	184
7.1.2	基本的输入输出方式	185
7.1.3	程序中断方式	186
7.1.4	DMA 方式	188
7.1.5	通道方式	189
7.2	基本习题解答	190
7.3	习题解析	200
第8章	流水技术	210
8.1	知识点	210
8.1.1	流水线工作原理	210
8.1.2	标量流水技术	213
8.1.3	向量流水技术	217

8.2 基本习题解答	218
8.3 习题解析	225
第9章 并行计算机的互连网络	250
9.1 知识点	250
9.1.1 互连网络结构分类	250
9.1.2 互连网络的特性	251
9.1.3 静态互连网络	251
9.1.4 单级动态互连网络	253
9.1.5 多级动态互连网络	255
9.2 基本习题解答	257
9.3 习题解析	263
第10章 并行计算机系统	273
10.1 知识点	273
10.1.1 阵列并行计算机系统	273
10.1.2 多处理机系统结构	273
10.1.3 分布式计算机系统	275
10.2 基本习题解答	276
10.3 习题解析	285
参考文献	289

第 1 章 概 论

计算机组成原理和系统结构课程是计算机专业本科生的核心课程之一。学习本课程需要具备程序设计和数字逻辑方面的基础知识。本课程的内容与工程实践相关，不是一个理论体系，而是综合运用各种基础知识，来阐述计算机设计的原理。在本课程中，每一章都围绕一个主题，采用不同的研究方法，故章节之间相对较独立。

本章的内容主要涉及一些基本概念，把学习的重点应放在对基本概念的理解上。在本课程后面的各个章节中讲述的内容都是既独立又相互联系的，故学习这些章节需要具备一些基础知识。本章首先介绍这些计算机基础知识，接着介绍计算机系统结构的概念、计算机性能评价的概念和可靠性的概念。

1.1 知 识 点

1.1.1 计算机硬件的基本知识

计算机的发展经历了电子管、晶体管、集成电路、大规模集成电路和超大规模集成电路等阶段。计算机可分为数字计算机、模拟计算机以及数字模拟混合计算机；可分为通用计算机和专用计算机；还可分为巨型机、大型机、中型机、小型机、微型计算机等。

1. 计算机的 5 个基本功能部件及其相互关系

(1) 计算机的 5 个基本部件

- 输入部件：接收外界的信息；
- 输出部件：将计算的结果以一定的形式向外界表示出来；
- 存储器：对信息的存储，包括从外界输入的信息、控制程序以及运算结果信息等；
- 运算器：信息的处理，主要是各种运算操作；
- 控制器：控制所有操作的自动进行。

这些部件之间相互协调地进行工作，工作中需要交换许多数据信息，为此需要用数据线路连接这些部件。

(2) 总线的概念

- 总线：计算机中一般采用公共的数据线路连接各个部件，这种公共线路称为总线。不同的连接方式构成了不同的计算机结构，不同的连接结构形成具有不同特征、不同性能的计算机系统。

计算机中可以采用不同数量的总线。采用不同的总线连接方式连接不同的部件，从而

形成不同的计算机结构。

(3) 冯·诺依曼结构

- 概念：在各个基本部件中，通常把运算器和控制器合在一起称为中央处理器（CPU）。还把 CPU、存储器和输入输出接口电路合在一起构成的处理系统称为主机。外围设备一般包含一些机械部件等难以与主机集成的部件，所以常常与主机分离。这种计算机结构是著名计算机科学家冯·诺依曼等人在早期计算机设计中采用的结构，而且在后来的计算机中不断沿用，被称做冯·诺依曼结构。
- 主要特点：采用 5 个基本部件，采用二进制的数据表示方式，采用存储程序的工作方式，程序中的各条指令按顺序串行地执行。存储程序方式是指在计算机完成指定功能之前，先将实现该功能的程序（即软件）装入内存，然后根据程序的规定一步一步地完成操作。计算机中存储的程序和数据都是二进制形式的代码。

2. 计算机各功能部件的基本功能

(1) 运算器的基本功能

- 运算器：完成运算功能的部件，主要包括算术逻辑单元和寄存器。

① 算术逻辑单元：一个组合数字电路，一般有两个数据信号输入端和一个数据信号输出端，可同时输入两个参加运算的操作数。

算术逻辑单元的功能：执行各种数据运算操作，包括算术运算和逻辑运算。

a. 算术运算：对二进制表示的数据进行算术计算，如加减乘除四则运算。

b. 逻辑运算：主要是一些布尔运算和移位运算，布尔运算按位对数据进行运算。

➤ 按位运算：同时对数据的各个二进制位进行相同的与、或、非运算，运算数据的每一个位是相互无关的，没有进位或者借位的操作。

➤ 移位运算：按一定的规律移动数据的位，改变数据的二进制位的位置。

② 寄存器：为了保存运算中所需要的数据，在运算器中一般都有一些临时存放数据的寄存器。寄存器由若干个触发器构成，一个寄存器可存放一个字的数据。

(2) 存储器的基本功能

存储器是存储程序和数据部件，包括主存储器和辅助存储器。

- 主存储器：计算机主机内部的存储器，可以被 CPU 直接访问，用于存放运行的程序和数据。

- 辅助存储器：主机外部的存储器，CPU 不能直接访问。当 CPU 需要访问存放在外存中的数据或者程序时，需要通过输入输出部件先将程序和数据传输到内存中。

为了确定存储器中的某个存储位置，需要给每个存储单元指定一个地址。一般用一个二进制编号表示每个存储单元的地址。地址可分为字地址和字节地址两种。如果一个字等于 4 个字节，那么每个字单元中包含 4 个字节的存储单元，将字地址乘以 4 就得到这个字的字节地址。

对于存储器的操作有两种。

- 写操作：将数据放入某个存储单元中，称为写操作。
- 读操作：将存储单元中的数据取出，称为读操作。

读操作和写操作统称为对存储器的访问。

(3) 控制器的基本功能

控制器对各个部件的操作进行控制,使得它们协作完成某一件事情。它根据**指令**控制各个部件的操作。在计算机中,每条指令表示一个简单的功能,许多条指令的功能构成了计算机实现的复杂功能。

在计算机的工作过程中,控制器不断地从存储器读取指令,在指令的执行过程中又不断地从存储器读取数据以及将数据写入存储器。这样,在计算机的各部件之间就形成了指令流和数据流。指令流从存储器流向控制器;数据流在运算器与存储器以及输入输出设备之间流动。

1.1.2 计算机软件的概念

1. 软件和硬件的关系

(1) 计算机从功能上分成两个层次

- 硬件层次:完成指令规定的基本功能;
- 软件层次:负责将指令组合起来完成复杂的功能。

(2) 指令与兼容

- 指令是硬件和软件之间的界面。在计算机设计中一般用指令规定比较简单的基本功能,然后由软件组合这些指令完成各种不同的复杂功能。
- 不同的计算机一般有不同的指令。如果一种计算机采用与另一种计算机完全相同的指令,从而能够执行另一种计算机的程序,并得到相同的结果,这样就称这两种计算机是兼容的。
- 计算机产品通常构成一个系列。在这个系列产品中,后继产品与先前的产品兼容,这种兼容性称为向后兼容。对应地,先前产品与后继的产品兼容,称为向前兼容。在一个产品系列中,低档机器上的软件能够在高档机器上运行,称为向上兼容,反之则称为向下兼容。

2. 系统软件与应用软件

计算机软件一般可分为系统软件和应用软件两类。

- 系统软件:是整个计算机系统的一部分,为应用软件的开发和运行提供支持,为用户操作计算机以及应用程序的运行提供一个方便的界面。

主要的系统软件有两类,一类是操作系统软件,负责计算机系统的运行控制;另一类是对程序设计语言进行处理的软件,包括编译程序、解释程序、汇编程序等。操作系统的主要功能是存储管理、命令处理、设备管理和进程管理等。操作系统还可具有系统维护、网络通信等功能。

- 应用软件:是完成用户所需功能的软件,专门为解决某个应用领域中的具体任务而编写。

应用软件是每个计算机用户所必需的。应用软件的种类繁多,文字处理软件(如 Word)、游戏软件、计算机辅助设计(CAD)软件、财务管理软件等都属于应用软件。随着计算机应用的不断发展,应用软件不断涌现,使得计算机的功能不断增加。

3. 虚拟机的概念

- 虚拟机：用户从某个角度看到的计算机的形象，这个形象是由软件构成的。

操作系统在硬件的基础上构成了一个虚拟机，能够接受用户的操作命令，控制硬件的操作。应用软件是建立在高级语言和操作系统基础上的软件，它在操作系统的基础上建立了一个更加完善的虚拟机。同样，高级语言建立起高级语言虚拟机，汇编语言建立起汇编语言虚拟机。

计算机系统是一个非常复杂的数字系统，一般用户不需要了解计算机底层的结构。在计算机设计中一般将整个系统分成几个层次，使得从某一较高层次上观察计算机时看不到较低层次的细节。在计算机科学中，把用户看不到某种特征的现象称为该特征对用户是透明的。计算机硬件的特征是它对于操作系统用户和应用程序用户都是透明的。操作系统虚拟机对应用程序用户是透明的。

4. 软件与硬件的等价性

计算机的硬件和软件在功能上是等价的，因为计算机系统硬件的功能可以用软件实现，软件的功能也可以用硬件来实现。用硬件实现的功能具有较高的执行速度，同时成本也相对较高，而且硬件不易改变，通常实现一些基本的功能。

计算机系统软、硬件之间的功能分配可以在很宽的范围内变化。随着集成电路技术的不断发展，用硬件实现的成本不断下降，硬件实现的功能不断增加，性能则不断提高。

1.1.3 程序设计语言的概念

1. 机器语言、汇编语言、高级语言和应用语言

- 机器语言：计算机硬件能够直接理解的语言称为机器语言。机器语言是一种用二进制代码表示的语言，适合于机器的阅读和理解，但是不便于人类的阅读和理解。
- 汇编语言：用容易记忆的字符来表示计算机的指令，这就构成了计算机的汇编语言。汇编语言程序中的指令可以转换成相应的机器指令代码。不同的计算机有不同的指令代码，不同的计算机有不同的汇编语言。汇编语言程序设计与计算机的结构相关，程序员必须熟悉计算机硬件结构的配置、指令系统和指令格式。
- 高级语言：与计算机的硬件结构无关的程序设计语言。在计算机中，有许多种高级语言。程序设计一般都采用高级语言。
- 应用语言：用于表示人们应用计算机完成各种任务的要求，而不一定用于程序设计。应用语言可以更加接近于人类的自然语言，因而使用更方便。如数据库系统中的查询语言 SQL 是一种具有逻辑关系描述能力的语言，它可以方便地表示数据之间的关系。计算机程序根据它所描述的数据之间的关系对数据进行处理。

2. 计算机语言的编译和解释

用高级语言或者汇编语言编写的源程序需要转换成机器语言程序才能被硬件直接执行。汇编语言程序要用汇编程序进行转换，形成机器可以执行的程序代码。执行高级语言编写的源程序可以有两种方法。

- 编译程序：事先通过编译程序将源程序全部转换成机器语言程序，然后在计算机

上运行。

- 解释程序：用一个解释程序直接对源程序进行解释执行。解释程序的执行方式是读一条源程序的语句，便分析该语句的含义，根据语句的要求执行相应的操作。

1.1.4 计算机系统结构的概念

1. 计算机系统结构研究的内容

- 计算机实现：研究计算机的物理设计，包括器件的设计与选择、各模块的机械参数设计、印刷电路板的设计与制作、机箱物理特性的设计和选择，以及组装技术的设计和选择，还有电源、冷却方式的设计和选择等。
- 计算机组成：从逻辑角度研究计算机系统中各个组成部分的构成方法，包括数据通路的构成、存储系统的设计、运算功能部件的设计、控制器的控制方式以及输入输出接口的设计等。
- 计算机系统结构：对程序员所能看到的计算机的基本属性进行研究，研究计算机的概念性结构和功能特性。这些特性构成计算机系统的外特性。计算机外特性包括计算机的指令系统、数据表示、寻址方式、寄存器定义，中断机构，以及输入输出系统和保护机制等的定义。此外，系统结构还研究计算机软硬件界面的设计、新型计算机系统的设计和计算机系统的性能、成本和可靠性的分析和评价。

2. 冯·诺依曼结构计算机主要的外特性

- 指令和数据都以字的方式存放在同一存储器中，然后才能运行。从数据和指令本身看不出相互间的区别，程序需要对指令和数据加以区别。
- 指令按顺序串行地执行，并由控制器集中控制，采用一个 PC 计数器构成指令在存储器中的地址。
- 存储器是一个一维的空间，二维或者多维的数据要映射到这个一维的存储空间。
- 使用低级机器语言，指令和数据以二进制形式表示。
- 单 CPU 结构，以运算器为中心，采用单指令流单数据流模式。

3. 影响计算机系统结构的因素

影响计算机系统结构的因素有程序设计语言、软件、应用需求、器件。

- 程序设计语言：不同的程序设计语言代表着不同的计算模型，不同的计算模型需要不同结构的计算机系统来支持；
- 软件需求：不同的编译程序产生不同特征的程序结构和数据结构，不同的操作系统采用不同的策略进行系统管理，这些都需要系统结构提供相应的支持。同时，系统结构的设计也需要系统软件提供相应的配合，如编译优化等。
- 应用：不同的应用需求也对不同的系统结构产生影响，适合于应用需求的计算机系统必将得到广泛的应用。
- 器件：器件的发展使得硬件的成本不断降低，从而影响软硬件界面的划分，同时器件发展速度之间的不平衡性也导致了系统结构的变化。如 CPU 和存储器速度之间的差异导致了 cache 的出现。此外，器件的发展还影响到计算机系统的

开发手段。

4. 并行性的概念

并行性是指在同一时刻或同一时间间隔内发生两个或者两个以上的事件的特性。两个或两个以上的事件在同一时刻发生，称为同时性；两个或两个以上的事件在同一时间间隔内发生称为并发性。并行性包含了同时性和并发性这两个含义。

在计算机系统中，并行性可以发生在运算操作的层次、指令执行的层次以及程序执行的层次，分别构成部件级、指令级和任务级的并行性。从计算机系统处理数据的角度看，并行性的层次可分为位串行字串行（字长 1 位）、位并行字串行（字长若干位）、位串行字并行（位片式）和全并行 4 种。

开发并行性的方法有 3 条基本途径。

- 资源重复：用硬件设备的多重设置，即增加相同硬件设备的数量，并使这些硬件设备同时工作，以提高系统的处理能力。典型的资源重复方式如采用许多 ALU 的阵列并行处理机系统。
- 时间重叠：多个处理过程在时间上错开，轮流地使用同一个设备，而不是增加设备的数量。典型的时间重叠方式是流水处理方式。
- 资源共享：主要采用软件手段让多个程序按时间片来轮流使用同一套硬件资源，以提高利用率。典型的通过资源共享实现并行处理的例子是多进程或多线程的计算机系统。

5. Flynn 分类法

按指令流和数据流的多倍性将计算机系统划分成 4 类：单指令流单数据流（SISD）、单指令流多数据流（SIMD）、多指令流单数据流（MISD）以及多指令流多数据流（MIMD）。

1.1.5 计算机系统性能评价

1. 计算机性能评价的方法

计算机性能评价的方法有分析、模拟和测试 3 种。

- 分析的方法：采用数学模型，通常采用概率论、排队论和随机过程等数学方法进行分析。分析结果的精度比较低。
- 模拟的方法：用软件建立系统的逻辑模型，并对该模型的行为进行研究。模拟结果的精度可以较高，但建立和验证模拟模型一般需要较长的时间。
- 测试的方法：用工作负载对计算机的性能进行实际衡量。测试过程在实际计算机系统或者物理模型样机中进行，可得到更实际的运算性能，但它只能在计算机建成之后进行，而且测试结果与选择的工作负载有关。

2. 简单的性能分析

程序在 CPU 上运行所需的时间 T_{cpu} 为：

$$T_{\text{cpu}} = I_n \times \text{CPI} \times T_c$$

其中 I_n 表示要执行程序中的指令总数，CPI 表示执行每条指令所需的平均时钟周期数，而 T_c 则表示时钟周期的时间长度。

CPI 是各种指令 CPI 的加权平均, 可由下式表示:

$$CPI = \frac{\sum_{i=1}^n CPI_i \times I_i}{IN}$$

其中 I_i 表示第 i 类指令在程序中执行的次数, 而 CPI_i 表示执行一条第 i 类指令所需的平均时钟周期数, n 为程序中所有的指令种类数。

- MIPS 指标:

$$MIPS = \frac{IN}{T_E \times 10^6} = \frac{IN}{IN \times CPI \times T_c \times 10^6} = \frac{R_c}{CPI \times 10^6}$$

上式假定 $T_E = T_{cpu}$, 即计算机的指令时间就是 CPU 的执行时间。上式还反映了 MIPS 值与 CPI 的关系。

- MFLOPS 指标:

$$MFLOPS = \frac{I_{FN}}{T_E \times 10^6}$$

其中 I_{FN} 指程序中浮点运算的数量。

由于程序中浮点运算所占的比例各不相同, MFLOPS 值也会不同, 所以 MFLOPS 指标与程序中浮点操作的数量有关。由于各种浮点运算的复杂性不同, 为了公正地评价浮点运算性能。通常对程序中每种实际浮点操作乘以一个正则化值, 然后再求 MFLOPS 值。

- (1) 衡量计算机系统性能的衡量尺度是响应时间和吞吐率

- 响应时间: 在用户向计算机系统发送一个请求后, 到系统对该请求做出响应并获得他所需要的结果所需的等待时间。其中包括了访问磁盘和访问主存储器时间、CPU 运算时间、输入输出动作时间以及操作系统工作的时间开销等。
- 吞吐率: 系统响应用户请求的速率。对于 CPU, 吞吐率可表示为每秒钟可执行的指令数, 或每秒执行的浮点操作次数。

- (2) 计算机的性能评价有峰值性能和持续性能两个指标

- 峰值性能: 反映出在理想情况下计算机系统可获得的最高性能。实际上由于程序运行时的资源冲突等因素使得计算机不能充分发挥其最大的计算能力。
- 持续性能: 实际性能指标。它是计算机运行程序时实际能测量到的性能。

(3) 事务处理是指计算机在商业、金融、证券、贸易等应用场合的处理方式, 一般运行大型数据库, 进行大量运算简单的事务处理。事务处理计算机系统的性能指标是每秒处理的事务数 (TPS)。

3. 性能测试方法

(1) 用于测试计算机性能的工作负载类型有指令混合、核心程序、合成程序和应用测试程序。

- 指令混合: 将各种指令按其使用频率混合而成。
- 核心程序: 从实际应用程序中提取出来的运行时间最长的核心部分, 代表了应用程序中的常用操作。
- 合成程序: 人为合成的对计算机系统的各方面性能进行测试的程序, 用参数反映实际应用程序特征的程序, 设置不同的参数可以构成具有不同特征的测试程序。

- 应用测试程序：从实际应用的程序中选取的典型程序。

(2) 基准测试程序

标准化的性能测试程序。通常由一组核心程序、合成程序和应用测试程序构成，如 SPEC 制订的 SPEC95。其中每个程序代表不同的应用程序特征，用基准测试程序中的这些程序进行运行测试可得到一组测试数据，对这些数据进行统计的方法有算术平均、几何平均和调和平均 3 种求平均值的方法。

- 算术平均值 A_m ：

$$A_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \cdots + \frac{1}{T_n} \right)$$

- 几何平均值 G_m ：

$$G_m = \sqrt[n]{\left(\prod_{i=1}^n R_i \right)} = \sqrt[n]{\left(\prod_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \right)} = R_1^{\frac{1}{n}} \times R_2^{\frac{1}{n}} \times \cdots \times R_n^{\frac{1}{n}}$$

- 调和平均值 H_m ：

$$H_m = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n T_i} = \frac{n}{T_1 + T_2 + \cdots + T_n}$$

- 加权的算术平均值 A_m ：

$$A_m = \sum_{i=1}^n w_i R_i = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{T_i}$$

- 加权的几何平均值 G_m ：

$$G_m = \prod_{i=1}^n R_i^{w_i} = R_1^{w_1} \times R_2^{w_2} \times \cdots \times R_n^{w_n}$$

- 加权的调和平均值 H_m ：

$$H_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{R_i}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i T_i} = \frac{1}{w_1 T_1 + w_2 T_2 + \cdots + w_n T_n}$$

不同的基准测试程序采用不同的统计方法，如 SPEC 采用调和平均、iCOMP 采用几何平均等。

4. 阿姆达尔定律

阿姆达尔定律：系统中对某一部件采用某种更快的执行方式所能获得的系统性能的提高程度，取决于这种执行方式被使用的频度，或所占总执行时间的比例。即性能加速比 S_p 为：

$$S_p = \frac{T_o}{T_e} = \frac{1}{1 - f_e + \frac{f_e}{r_e}}$$

其中， f_e 表示可采取增强功能措施的部件的使用频度 ($0 \leq f_e \leq 1$)，而 r_e 表示采用增强功能措施比不采用增强功能可加快部件执行的倍数。

5. 可靠性的概念

(1) 计算机系统向用户提供的服务的质量受故障 (fault)、错误 (error) 和失效 (failure) 现象的影响。

- 错误: 导致系统故障的因素。例如, 某一个存储器单元中出现了固定为 1 的情况。错误可以是潜在的, 也可以是活跃的。
- 故障: 由于系统中某一部分的错误因素而引起的物理紊乱现象, 它是显现出来的错误。
- 失效: 系统在规定的条件下和规定的时间内丧失了规定的功能。系统的失效是由故障引起的。

(2) 对于故障现象可以有两种解决方法

- 避错: 避免故障的出现;
- 容错: 容许故障的出现, 但防止其不利影响。容错技术通常采用信息冗余、部件冗余的方法进行检查和纠正错误, 从而提高可靠性。

(3) 衡量系统故障行为的常用指标有可靠性、平均无故障时间、平均故障间隔时间和可用性等。

- 可靠性: 系统投入使用后在给定时间区间内和环境条件下不发生故障的概率, 即系统投入服务之后在一定时间内按预期方式正确工作的概率。
- 平均无故障时间 (MTTF): 系统第一次出现故障的时间。它是从大量相同系统中统计得到的从系统建成到第一次故障间隔时间的期望值。
- 平均故障间隔时间 (MTBF): 在可修复的系统中, 两次故障之间时间的间隔平均值, 包括系统平均修复时间 (MTTR) 和修复后的平均无故障时间。
- 可用性: 可修复的系统能够正常使用的概率。

1.2 基本习题解答

一、名词解释

ALU——算术逻辑单元, 是计算机中进行算术运算和逻辑运算的电路。它由组合电路构成, 一般有两个输入端和一个输出端。

寄存器——CPU 中用于临时存放数据的高速存储器件。寄存器是由一组 D 触发器组成的时序电路, 通常由许多触发器构成, 可保存一个字的信息。

主机——CPU、存储器和输入输出接口合起来构成计算机的主机, 主机能够独立完成数据的运算。

CPU——中央处理器, 是计算机的核心部件, 由运算器和控制器构成。

运算器——计算机中完成运算功能的部件, 由 ALU 和寄存器等构成。

ALU——算术逻辑运算单元, 执行各种算术运算和逻辑运算。

外围设备——计算机的输入设备、输出设备和外存储设备。

数据——在计算机中, 编码形式的各种信息作为程序的操作对象。

指令——表示成二进制数编码的操作命令, 是构成计算机软件的基本元素。

- 透明——在计算机学科中,从某个角度看不到的特性称为该特性是透明的。
- 位——计算机中的一个二进制数据代码(0或1),是数据的最小表示单位。
- 字——数据运算和存储单位,其位数取决于计算机,通常由16位或32位构成。
- 字节——衡量数据量以及存储器容量的基本单位,1字节等于8位二进制信息。
- 字长——一个数据字中包含的位数,一般为8位、16位、32位和64位等。
- 地址——给主存储器中不同的存储位置指定的一个二进制编号,存储器地址从0开始编址。
- 存储器——计算机中存储程序和数据部件,分为内存和外存两种。
- 主存储器——计算机主机内部的存储器,用于存储程序运行时需要的程序和数据,一般用速度较高的集成电路实现。
- 辅助存储器——计算机主机外部的存储器,用于存储计算机运行时不常用的程序和数据,一般用成本低、容量大的设备(如磁盘)实现。
- 存储器的访问——对存储器中数据的读操作和写操作。
- 顺序存取存储器——一种访问方式的存储器,信息以串行的方式从存储介质的开始端开始按顺序写入,访问时间与数据在存储介质中的位置有关。
- 总线——计算机中用于在两个或多个部件之间传递数据的一组公共线路。
- 硬件——由物理元器件构成的系统,计算机硬件是一个能够执行指令的设备。
- 软件——由程序构成的系统,分为系统软件和应用软件两种。
- 兼容——计算机部件的通用性。一个计算机硬件部件或者软件能在另一个计算机系统上正确运行,并且得到相同的结果,则称这个硬件部件或软件在这两个计算机上是兼容的。
- 操作系统——主要的系统软件,控制其他程序的运行,管理系统资源并且为用户提供操作界面。
- 汇编程序——将汇编语言程序翻译成机器语言程序的计算机软件。
- 汇编语言——采用文字方式(助记符)表示的程序设计语言,其中大部分指令和机器语言中的指令一一对应。
- 编译程序——将高级语言的程序转换成机器语言程序的计算机软件。
- 解释程序——解释执行高级语言程序的计算机软件,解释并执行源程序的语句。
- 系统软件——计算机系统的一部分,进行命令解释、操作管理、系统维护、网络通信、软件开发和输入输出管理的软件。
- 应用软件——完成应用功能的软件,专门为解决某个应用领域中的具体任务而编写。
- 指令流——在计算机的存储器与控制单元之间形成的不断传递的指令序列。
- 数据流——在计算机的存储器与运算单元之间形成的不断传递的数据序列。
- 接口——部件之间的连接电路,如输入输出接口是主机与外围设备之间传递数据与控制信息的电路。
- 虚拟机——用户从某个角度看到的计算机的形象,由应用软件、系统软件等构成。
- 处理机——CPU、存储器和输入输出接口合起来构成计算机的主机。
- 处理器——中央处理器的简称,是计算机的核心部件,由运算器和控制器构成。