

JIZAI JISUANJI
YUANLI YU YINGYONG



机载计算机 原理与应用

朱国军 王志敏 编著
雷 辉 于坤林

国防科技大学出版社

责任编辑：何晋

ISBN 7-81024-940-1



ISBN 7-81024-940-1/TP · 208

定价：24.00 元

机载计算机原理与应用

朱国军 王志敏 编著
雷 辉 于坤林

国防科技大学出版社
·湖南长沙·

内 容 简 介

本书比较全面地介绍了飞机机载计算机所涉及的计算机和通信等方面的知识。全书共分为三个部分:第一部分为计算机基本知识,包括计算机硬件(以 8086 为例)组成、中断、指令系统和程序设计等(第二、三、四、六章);第二部分为计算机通信基本知识,介绍了通信系统的组成、数字基带和频带通信、差错控制编码等(第五章);第三部分介绍了机载计算机总线 1553B、ARINC429 知识,并介绍了国内外常见的机载计算机组成、结构、作用和原理等(第一、七、八章)。

本书自成体系,注重理论联系实际,力求通俗易懂,便于自学,主要作为航空计算机、航空电子设备维修等专业教材,也可供从事航空装备维修的工程技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机载计算机原理与应用/朱国军等编著. —长沙:国防科技大学出版社,2002.12
ISBN 7-81024-940-1

I.机… II.朱… III.①计算机原理②计算机应用 IV.TP 368

国防科技大学出版社出版发行
电话:(0731)4572640 邮政编码:410073
E-mail: gfkdebs@public.cs.hn.cn
责任编辑:何晋 责任校对:肖滨
新华书店总店北京发行所经销
国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:13 字数:333千
2002年12月第1版第1次印刷 印数:1-1300册

*

定价:24.00元

前 言

为适应空军新装备维修对人才的要求,满足以新装备为对象的教学需要,长沙航空职业技术学院组织并资助了本书的编写和出版。本教材的主要对象是航空计算机、航空电子设备维修等专业的高年级学生,也可供从事航空装备维修工程技术人员和管理人员使用。

现代飞机的机载电子设备除了传统的电子产品外,还含有大量的计算机或类计算机产品,而且随着飞机机载设备水平进一步提高,计算机产品在其中的作用更加重要。本教材以目前国内外常见的机载计算机产品为对象,比较全面地介绍了计算机软硬件组成与原理、通信、机载计算机总线和常见机载计算机结构原理等方面的知识。各章节介绍力求通俗易懂,便于自学。

本书由朱国军主编。第五章和第七章由朱国军编写,第一章和第八章由王志敏编写,第二章和第三章由雷辉编写,第四章和第六章由于坤林编写。

限于时间和水平,加之历史和保密等诸多原因,难免有错误和遗漏之处,希望读者不吝指正。

编著者

2002年10月于长沙

目 录

第一章 机载计算机概述	(1)
1.1 机载计算机技术简介	(1)
1.1.1 机载计算机技术的范畴	(1)
1.1.2 国外机载计算机的发展	(2)
1.1.3 国外机载计算机的应用现状	(3)
1.1.4 新一代机载计算机的主要特点	(3)
1.1.5 我国空军机载计算机的现状	(5)
1.2 机载计算机基础	(5)
1.2.1 进位记数制	(5)
1.2.2 二进制数的表示	(8)
1.3 机载计算机硬件体系	(12)
1.3.1 机载计算机基础理论概述	(12)
1.3.2 机载计算机硬件体系	(19)
1.3.3 Intel 8086/8088 微处理器	(25)
第二章 8086/8088 指令系统	(34)
2.1 寻址方式	(34)
2.1.1 立即寻址方式	(34)
2.1.2 寄存器寻址方式	(35)
2.1.3 直接寻址方式	(35)
2.1.4 寄存器间接寻址方式	(36)
2.1.5 寄存器相对寻址方式	(36)
2.1.6 基址变址寻址方式	(37)
2.1.7 基址变址相对寻址方式	(37)
2.2 指令系统	(39)
2.2.1 数据传送指令	(39)
2.2.2 算术运算指令	(45)
2.2.3 逻辑运算和移位指令	(52)
2.2.4 串操作指令	(56)
2.2.5 控制转移指令	(59)
2.2.6 处理器控制指令	(65)
第三章 汇编语言程序设计	(67)
3.1 机载计算机汇编语言简介	(67)
3.2 汇编语言语法	(67)

3.2.1	汇编语言语句的类型和组成	(68)
3.2.2	伪操作	(69)
3.3	汇编语言程序设计	(72)
3.3.1	汇编语言程序设计步骤	(72)
3.3.2	顺序程序设计	(72)
3.3.3	分支程序设计	(74)
3.3.4	循环程序设计	(76)
3.3.5	子程序设计	(82)
第四章	半导体存储器	(94)
4.1	半导体存储器简介	(94)
4.1.1	存储器的分类	(94)
4.1.2	存储器的主要性能指标	(95)
4.1.3	存储器系统的多层结构	(95)
4.2	随机存取存储器(RAM)	(96)
4.2.1	静态 RAM(SRAM)	(96)
4.2.2	动态 RAM(DRAM)	(97)
4.3	只读存储器(ROM)	(97)
第五章	计算机通信原理	(100)
5.1	计算机通信概述	(100)
5.1.1	通信系统的组成	(100)
5.1.2	计算机通信	(101)
5.1.3	主要概念和性能指标	(104)
5.2	数字基带传输系统	(106)
5.2.1	数字基带传输系统的组成	(106)
5.2.2	数字基带信号	(107)
5.2.3	数字基带信号的传输	(109)
5.3	数字频带传输系统	(111)
5.3.1	引言	(111)
5.3.2	二进制数字调制原理	(112)
5.3.3	多进制数字调制简介	(116)
5.4	多路复用	(117)
5.5	差错控制编码	(119)
5.5.1	概述	(119)
5.5.2	差错控制编码基本原理	(120)
5.5.3	常见的差错控制编码	(122)
第六章	输入输出与中断	(124)
6.1	输入/输出(I/O)端口的寻址方式	(124)

6.1.1	I/O 单独编址方式	(124)
6.1.2	存储器统一编址方式	(124)
6.2	CPU 与外设数据传送的方式	(125)
6.2.1	CPU 与 I/O 设备之间的接口信息	(125)
6.2.2	CPU 与外设传送数据的控制方式	(125)
6.2.3	中断传送方式	(128)
6.2.4	直接存储器存取(DMA)方式	(128)
6.3	中断概述	(129)
6.4	机载计算机中断系统	(131)
6.4.1	8086 的中断类型	(131)
6.4.2	8086 的中断向量表	(132)
6.4.3	8259A 中断控制器	(132)
6.5	机载计算机的中断结构	(139)
6.5.1	机载计算机的中断矢量	(139)
6.5.2	8259A 与机载计算机系统总线的连接	(140)
第七章	机载计算机总线与接口	(143)
7.1	航空总线概述	(143)
7.2	MIL - STD - 1553B 军用航空总线协议标准	(143)
7.3	MIL - STD - 1553B 总线接口 MBI 原理及应用	(147)
7.4	ARINC429 航空机载总线及接口电路	(150)
第八章	国内外歼击机机载计算机设备介绍	(155)
8.1	平显火控系统	(155)
8.1.1	平显火控系统的组成	(155)
8.1.2	平显火控系统中电子组件的工作原理	(156)
8.2	机载 ADC 计算机	(164)
8.2.1	概述	(164)
8.2.2	大气数据计算机系统的组成和工作原理	(165)
8.2.3	大气数据计算机的数值计算	(171)
8.2.4	大气数据计算机软件功能	(172)
8.3	机载计算机 1750A 硬软件结构	(172)
8.3.1	机载计算机 1750A 的 CPU	(172)
8.3.2	1750A 中断/故障处理系统	(175)
8.3.3	1750A 存储体系及扩展方法	(176)
8.3.4	1750A 多机系统的构造	(179)
8.3.5	1750A 指令系统	(182)
8.4	苏 - 27 综合通讯计算机软硬件系统	(188)
8.4.1	苏 - 27 综合通讯计算机系统结构	(188)
8.4.2	苏 - 27 综合通讯计算机指令系统	(192)

第一章 机载计算机概述

1.1 机载计算机技术简介

1.1.1 机载计算机技术的范畴

机载计算机是指战斗/攻击型飞机上的数字计算机系统,一般有两个部分:一部分是中心任务处理机,另一部分是嵌入到各个设备中的处理机,它们通过相互的多路通讯网络,构成物理上资源分布的实时处理系统。它的作用是进行飞行、火力、推进的管理与控制,如图 1-1 所示。

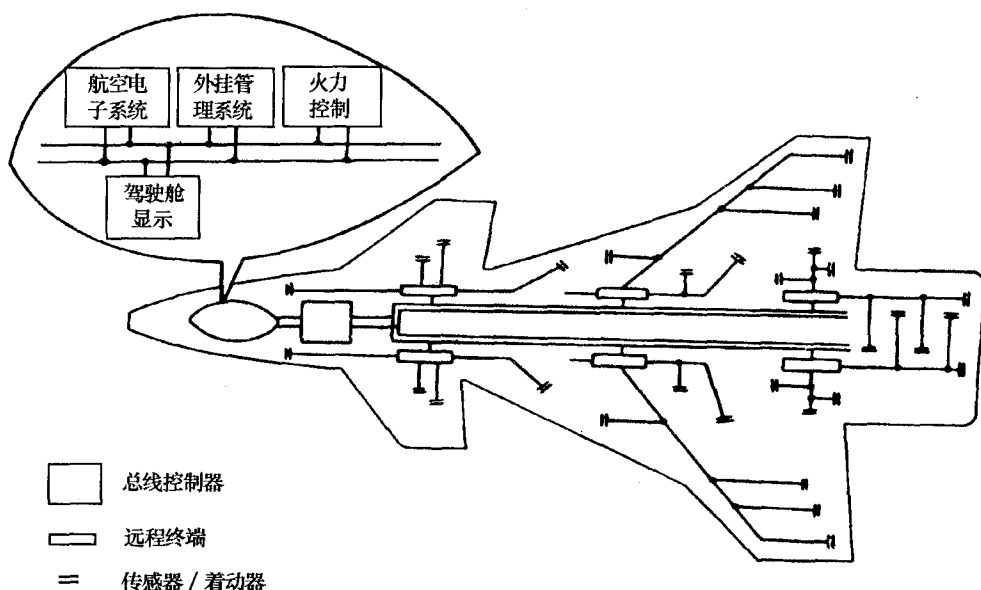


图 1-1 典型的机载计算机局域网配置

新型的机载计算机系统有四个基本标准:

1. 标准的多路数据总线

如 1553B 是总线接口规律和信号特性标准,它在物理层上对硬件所产生的电信号特性作了严格的规定,在数据链路和网络层对错误检测的方法和指令响应的格式也作了定义。1553B 总线是机载计算机系统的信息交换通道。

2. 标准计算机指令集结构

如 1750 定义了一个标准的计算机指令集,可以相当准确地把此指令集看成是嵌入式机载计算机的硬件与航空电子软件之间的接口,它实际上是一个导致硬件设计的“软件”。

3. 标准的高级语言

如 1589 作为一个特定标准的高级语言,自然对航空电子的软件结构具有相当的影响。这

种语言结构是高效率的码,使用这种语言将会导致一个广泛使用的公用编译器,意义十分重要。由于 1589 语言不包含实时结构,因此对它的进一步改进是 Ada 高级语言,Ada 将会影响到嵌入式计算机操作系统的设计。

4. 标准的飞机/外挂物接口

如 1760 在总的信号和电源的供给上对飞机外挂武器之间加以了接口的定义,以满足飞机、武器之间的“适应性”。外挂物可以是单个武器到复杂的航空电子吊舱,1760 使用了 1553 总线作为它的数据通道接口。

典型的机载计算机系统结构图如图 1-2 所示。

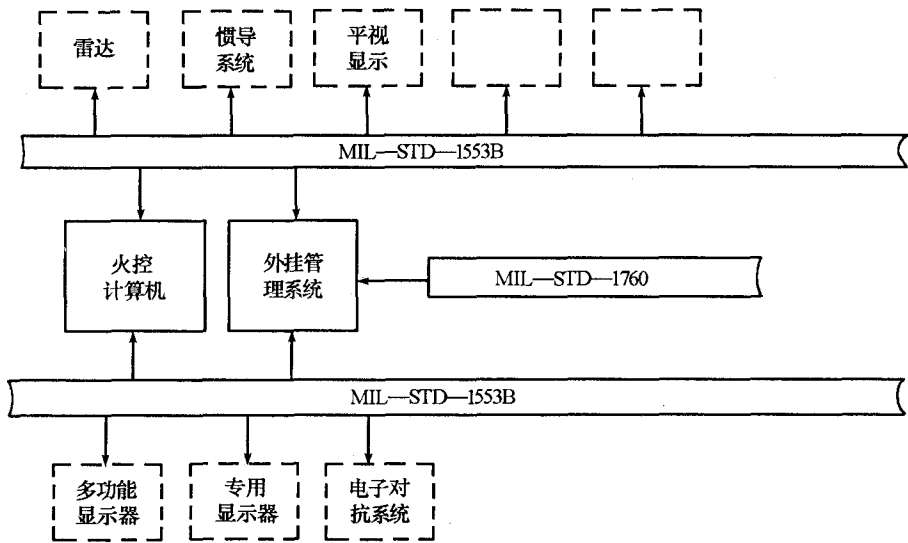


图 1-2 典型的机载计算机系统结构

1.1.2 国外机载计算机的发展

一、模拟式机载计算机

20 世纪 60 年代,航空电子系统由一些分散、功能单一的系统组成,其代表性的飞机有 F-100、F-4。随着数字技术迅猛的发展,数字计算机开始应用于机载导航和火控计算。

二、数字式机载计算机

20 世纪 70 年代,美国空军制订了数字式航空电子设备信息计划,提出了从系统的观点来统筹设计航空电子系统,同时用多路传输总线将机上的各个计算机连成分布的网络,实现了座舱的综合显示和控制。计算机采用标准化、模块化设计,通过总线实现信息共享,使系统有重构容错能力,从而形成了新型的航空电子综合化系统。

数字式计算机开始应用于航空领域后,战斗/攻击机的机载计算机分为两类:一类为中央任务处理机,即主子系统;另一类是大量嵌入式微处理机,即子系统处理机。这两类处理机通过 1553B 总线互联,构成分布式机载处理系统。中央处理机主要完成与飞机作战任务有关的计算,对各个子系统进行管理、调度和控制,对多路总线进行控制,另外还在检测、故障隔离以及系统重构和性能降级中使用。而各子系统处理机则完成各个子系统的信号处理和数据处理任务。此时的计算机大部分以单一任务为主,如导航计算机、火控计算机等。

目前在西方现役作战飞机上使用的任务计算机有三种代表机型:AN/AYK-14、SKC-3121和1750A机载计算机。其中以1750A应用最为广泛,分别应用于A-10、B-1B、F-111、F-16、F-4G以及ATF等飞机上。

三、分布式机载计算机

20世纪80年代,美国空军莱特实验室提出了“宝石柱”计划。它利用当时发展起来的分布式综合航空电子系统,突破了原有的子系统概念,整个结构按功能划分为三个资源共享的功能管理区,即任务管理区、传感管理区和飞机管理区。各个功能区之间通过高速多路传输总线互联。这种结构以高速集成电路和通用模块为基础,实现了航空电子系统的高度综合。它不仅提高了故障检测和隔离能力,还简化了维护工作,减少了全寿命的维护费用。这种计划现已用于F-22和RAN-66飞机上。

四、高度综合化机载计算机

20世纪90年代,美国空军莱特实验室又提出了“宝石台”计划。“宝石台”计划的出现使人们看到了21世纪先进作战飞机的雏形。它是在“宝石柱”计划的基础上,进一步扩大了任务功能的范围,提高了系统处理能力,采用了人工智能算法和神经网络等新技术,实现了模块化、综合化、通用化和智能化高度综合的航空电子系统。它的结构主要由综合射频部分和综合核心处理机组成。ICP是此结构的主要部件之一,它是一个模块化的处理机,由12个多芯片(MCP)和8种通用单个标准电子模块(SEME)组成。信号处理硬件采用综合的多功能芯片如32/64位RISC CPU芯片,每片的处理能力可达每秒150 000 000条指令。因此,机载计算机已成为新一代航空电子综合系统的核心。

航空电子系统综合化程度越高,对机载计算机的要求也就越高。美国国防部联合综合航空电子工作小组(JIAWG)根据美国国会对新一代军用飞机上使用的通用组件要求,选择标准的处理机芯片,例如INTEL公司的80960芯片和MIPS公司的芯片。这两种芯片均为32位RISC CPU。其中,麦道公司LHX承包组、偌斯罗普公司ATF承包组和控制数据公司为E-3预警机研制的计算机都选用MIPS公司的芯片。目前应用的32位R3000芯片每秒能处理200 000 000条指令,R4000芯片运算能力可达4000~5000万条指令。

1.1.3 国外机载计算机的应用现状

目前,国外的先进作战飞机已广泛应用机载计算机,有的飞机竟装备了上百台机载计算机,如美国B-2轰炸机装备了200多台机载计算机。

美国F-111攻击机中的中央控制计算机是PLESSY ELECTRONIC SYSTEM公司研制的AN/AYK-18计算机,运算速度达3MIPS,存储容量为256M。

美国F-16战斗机,其火控计算机是M372,它包括4个CPU模块、2个1553B模块。

F-22战斗机的任务数据处理机包括多个1750A处理机模块。模块之间用PI总线和TM总线互联。它不仅能完成任务数据处理机功能,还能满足1553B数据总线、TM总线以及HSDB接口的需要。

1.1.4 新一代机载计算机的主要特点

一、高速RISC CPU

由于航空电子系统的不断发展,所需要处理的信息不断增加,从而对计算机运算的要求也

不断提高。如 ATF 飞机的航空电子系统若要实现自动目标识别、红外跟踪报警、雷达引导和合成孔径雷达等先进功能,要求核心处理机每秒能执行 2 亿条以上指令的通用数据处理能力和每秒 100 亿次的信息处理运算,因此必须尽可能采用高速的微处理机。对于 RISC CPU 芯片,因其精简了指令系统,并采用了一系列并行处理的体系结构,如超标量、超长指令字和超流水线等,可在一个时钟周期执行一条或几条指令,从而实现高速处理。它还具有结构简单、易于实现和研制周期短等特点,所以采用 RISC CPU 已成为机载计算机发展的必然趋势。

二、并行处理技术

并行处理技术是利用多个微处理机获得高速处理速度的有效手段。目前实现万亿次运算的并行处理技术逐渐完成。在实现实时决策动态目标的高速图像处理、支持传感器高速信号处理方面,都要求计算机处理速度必须达到每秒数百亿次运算,而单机和多机系统是不可能达到如此高的性能,惟有并行处理系统才可能达到这一要求。现有的并行系统有 INTEL860 64 位、SPACE 32 位以及 ALPHA 64 位 RISC 芯片制造的并行处理系统。

三、多重处理机系统结构和 PI 总线微处理机

单一处理机仍然难以满足航空电子系统的速度要求,尤其不能满足容错或可重构的需求,因此,模块式航空电子综合系统采用了可重构多处理机系统。这一系统由若干通用处理机模块和通用接口模块组成,各模块之间通过一条标准的双余度高速并行底板总线互联,并配以实时多任务多处理机操作系统,采用 Ada 高级语言。为了实现故障检测与隔离分层维修的需要,还设有一条测试总线,即 TM 总线。当工作中的某一台处理机发生故障时,热备份的处理机可接替其工作,从而提高系统的可靠性。这种 PI 总线接口芯片是一个智能的总线控制器,它能处理多种 PI 总线消息而无须处理机干预。

目前在 F-15、F-16 的改型以及 ATF、ATA 和 LHX 飞机上采用了 PI 总线。

四、高速数据总线

目前最流行的是军用 MIL-STD-1553B 和民用 ARINC429 标准总线。1553B 总线传输速度只有 1MB/s,支持 31 个远程终端。随着计算机之间信息的迅猛增加,1553B 总线已无法满足要求。新研制的 HSDB 总线能实现容错、重构和资源共享,并具有很高的数据传输能力。HSDB 总线与 1553B 总线相比,其性能要求和实现途径都发生了飞跃。HSDB 总线采用光纤作为传输媒介,具有更宽的带宽、较小的体积和重量、更好的电隔离性,大大地提高了抗电磁干扰能力,加强了数据传输的保密性。HSDB 总线传输速率可达 50~200MB/s,支持 64 个远程终端,消息长度为 1~4096 个字。

五、通用模块

由于航空电子综合系统的综合程度愈来愈高,所以要求同样模块具有很强的故障检测、诊断、隔离及恢复功能。随着集成电路的飞速发展,航空电子系统的各种完整功能可以浓缩在一个 SEM-E 的封装内。它包括完整数据处理机、存储器、电源 HSDB 控制器和其他主要航空电子设备功能,并且任何故障都能检测出来并隔离到这些模块上。这些模块具有很好的可用性,可使通用模块的种类减少到最低限度。因而具有完善的自我检测能力而不需要任何辅助地面设备,大大减轻地面维护费用。

六、人工智能技术

人工智能技术是由最新的计算机技术和微电子技术而形成的一种尖端技术,它在很大程

度上依赖于计算机技术的发展。美国研制的飞机助手系统就是这一技术的代表。它可以完成数据的收集、推理和判断并做出决定,可以直接给出控制指令,也可以向飞行员提出处理建议,由飞行员决定及实施控制。它还具有自学习和自适应能力。智能化系统使飞行员从过量的任务中解脱出来,集中精力用于高层的判断,并可避免人脑在某些方面的不足。这种技术美军已应用于 F-22 和 RAH-66 飞机上。

1.1.5 我国空军机载计算机的现状

20 世纪 80 年代,我国也开始了机载计算机技术的研究,根据外国空军机载计算机的应用,结合我国计算机技术的现实,国产机载计算机技术的主要性能为:计算机硬件——通用微处理器(如 CPU 采用 INTEL8086、8051、8098 等);计算机语言——汇编语言;多路数据总线——ARINC-429 标准。总之,我国机载计算机技术还处于研制、试验阶段。

20 世纪 90 年代,一些机载计算机设备已开始装配新机,如:平视显示器、大气数据计算机、高精度高度表、651 电台等。

1.2 机载计算机基础

1.2.1 进位记数制

一、计算机中的进位记数制

(一)进位记数制的表示方法

人们习惯使用的十进制数有以下特点:

1. 用 10 个符号表示数。即用 0,1,2,⋯,9 共 10 个阿拉伯数字(符号)来表示。数码的个数叫基数。十进制的基数是 10。

2. 在任何一个数中,每个数码表示的值不仅取决于数码的本身,还取决于它所处的位置,即个位、百位⋯,每一位都有自己的权。例如 $123 = 1 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 3 \times 10^0$ 。其中的 10^2 、 10^1 、 10^0 即分别为百位、十位、个位的权。

3. 遵从“逢十进一”规则。

任何一个十进制数 N 均可表示为:

$$\begin{aligned} N &= \pm (A_{n-1} \times 10^{n-1} + A_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + A_0 \times 10^0 + A_{-1} \times 10^{-1} + \cdots + A_{-m} \times 10^{-m}) \\ &= \pm \sum_{i=-m}^{n-1} A_i \times 10^i \end{aligned}$$

上式可以推广到任意进位记数制。设基数为 R ,则任意数 N 为

$$N = \pm \sum A_i \times R^i$$

对于二进制, $R = 2$, A_i 为 0 或 1,“逢二进一”。

$$N = \pm \sum A_i \times 2^i$$

对于八进制, $R = 8$, A_i 为 0 ~ 7 中的任何一个,“逢八进一”。

$$N = \pm \sum A_i \times 8^i$$

对于十六进制进制, $R = 16$, A_i 为 0 ~ 9, A, B, C, D, E, F 中任何一个,“逢十六进一”。

$$N = \pm \sum A_i \times 16^i$$

上述几种进位记数制有以下共同点:(1) 每种记数制有一个确定的基数 R , 每一位的系数 A_i 有 R 种可能值。(2) 按“逢 R 进一”方式记数。在混合小数中, 小数点右移一位相当于乘以 R , 反之相当于除以 R 。

(二) 进位记数制之间的转换

1. R 进制数转换为十进制数, 其基本方法是按权展开计算出 N 。

例如

$$(10.01)_2 = 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = 3.25$$

2. 十进制数转换为 R 进制数, 需要对整数和小数分别进行转换。

(1) 十进制整数转换为二进制数。

采用“除 2 取余法”, 即逐次用 2 去除要转换的十进制数, 直至商为 0, 每次所得的余数即为二进制数码, 最先得到的为整数的最低有效位 K_0 , 最后得到的为最高有效位 K_{N-1} 。记作:

$$(N)_{10} = (K_{N-1} \cdots K_0)_2$$

(2) 十进制小数转换为二进制数

采用“乘 2 取整法”, 即逐次用 2 去乘要转换的十进制数, 将每次所得的整数 0 或 1, 依次记作 $K_{-1}K_{-2} \cdots$, 若最后一次乘积的整数部分记作 K_{-M} , 即为:

$$(0.K_{-1} \cdots K_{-M})$$

十进制小数并不是都能用有限位的二进制数精确表示, 这时只要有精度要求, 转换到一定的位数即可。

对于一个具有整数和小数的十进制数, 在转换为二进制数时, 只要分别把整数和小数部分转换成二进制数, 最后用小数点把这两部分连接起来即可。

(3) 十进制数转换为十六进制数、八进制数

十进制数转换为十六进制数、八进制数和转换为二进制数类似, 对于整数部分采用“除基取余法”, 对于小数部分采用“乘基取整法”。

3. 十六进制与二进制数之间的转换

因为 4 位二进制数表示 1 位十六进制数。所以十六进制数与二进制数之间的转换以小数点为界, 整数部分自右向左每 4 位为一组, 不够则前面加 0; 小数部分自左向右为一组, 不够则后面加 0。例

$$(1001010.1011101)_2 = (01001010.10111010)_2 = (4A.BA)_{16}$$

十六进制数到二进制数的转换为上述转换的逆过程。八进制数和二进制数、十六进制数之间的转换与此类似。

一般地, 在数值后加字母“B”表示二进制数; 加字母“Q”表示八进制数; 加字母“H”表示十六进制数; 加字母“D”表示十进制数, 但“D”常常省略。

二、二进制数的运算

(一) 二进制数的算术运算

1. 二进制加法

二进制加法运算规则为:

$$0 + 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 0(\text{进位 } 1)$$

2. 二进制减法

二进制减法运算规则为:

$$0 - 0 = 0$$

$$1 - 1 = 0$$

$$1 - 0 = 1,$$

$$0 - 1 = 1(\text{有借位})$$

3. 二进制乘法

二进制乘法运算规则为:

$$0 \times 0 = 1 \times 0 = 0 \times 1 = 0$$

$$1 \times 1 = 1$$

4. 二进制除法

二进制除法是乘法的逆运算。

(二) 二进制数的逻辑运算

1. “与”运算(AND)

“与”运算又称为逻辑乘,可用符号“ \cdot ”或“ \wedge ”表示。两个逻辑变量进行“与”运算的规则如下:

$$0 \wedge 0 = 0 \wedge 1 = 1 \wedge 0 = 0$$

$$1 \wedge 1 = 1$$

由上可知,只有当两个变量皆为“1”时,“与”的结果才为“1”。

2. “或”运算(OR)

“或”运算又称为逻辑加,可用符号“ $+$ ”或“ \vee ”表示。两个逻辑变量进行“或”运算的规则如下:

$$0 \vee 0 = 0$$

$$0 \vee 1 = 1 \vee 0 = 1 \vee 1 = 1$$

由上可知,两个变量中只要有 1 个变量为“1”,“或”运算的结果就是“1”。

3. “非”运算(NOT)

变量 A 的“非”运算的结果用 \bar{A} 表示,“非”运算规则如下:

$$\bar{0} = 1$$

$$\bar{1} = 0$$

4. “异或”运算(XOR)

“异或”运算用“ \oplus ”表示,两个逻辑变量进行“异或”运算的规则如下:

$$0 \oplus 0 = 1 \oplus 1 = 0$$

$$0 \oplus 1 = 1 \oplus 0 = 1$$

由上可知,两个变量取值相同时,“异或”结果为“0”,取值相异时,“异或”结果为“1”。换句话说,一个逻辑变量和“0”异或结果不变,和“1”异或则取反。

以上四种逻辑运算都是按位进行的,任何时候都不发生进位。下面举一个逻辑运算的例子,已知 $A = 11110101B$, $B = 00110000B$,则:

$$\bar{A} = 00001010B$$

$$A \wedge B = 00110000B$$

$$A \vee B = 11110101B$$

$$A \oplus B = 11000101B$$

1.2.2 二进制数的表示

一、数的定点和浮点表示

所谓定点表示,就是小数点在数中的位置是固定不变的;所谓浮点表示,就是小数点在数中的位置是浮动的。

1. 定点表示

通常,对于任意一个二进制数 N 总可以表示为纯整数或纯小数和一个 2 的整数次幂的乘积

$$N = S \times 2^P$$

其中, S 为尾数, P 为阶码, 2 为阶码的底。此处 P 、 S 都用二进制数表示。

尾数 S 表示 N 的全部有效数字, 阶码 P 指明小数点的位置, 当阶码为固定值时, 数的这种表示法称为定点表示。这样的数称为定点数。表示方法如下:

纯整数

符号位	数值位	小数点
-----	-----	-----

纯小数

小数点	符号位	数值位
-----	-----	-----

定点数的两种表示方法在计算机中均有采用。究竟用哪一种方法, 是事先约定的。值得注意的是, 小数点的位置是约定的, 实际上不用表示出来, 所以它不占有有效位数。

实际数值不一定是整数或小数, 所以采用定点表示法, 在运算之前要选择“比例因子”, 使所有原始数据化为整数或小数, 计算结果又用比例因子恢复成实际值。如果在运算中产生溢出, 则需要调整比例因子。

2. 浮点表示

如果阶码是可变的, 这种表示称为浮点表示。用浮点表示的数, 称为浮点数。这时

$$N = S \times 2^P$$

其中: 阶码 P 为可变整数, 可为正数, 也可为负数; 尾数 S 可为正数, 也可为负数。通常分别用一位二进制数表示阶码的符号位, 一位二进制数表示尾数的符号位, 0 为正, 1 为负。

浮点数表示方法如下:

阶符	阶码	尾符	尾数
----	----	----	----

浮点数能表示的数值范围大, 但运算复杂。为了提高运算速度通常采用规格化浮点数。所谓浮点数规格化, 就是尾数 S 的绝对值大于等于 0.5 而小于 1。

二、带符号数的表示方法

(一) 机器数与真值

为了表示一个带符号数, 除数值位外, 还应指定符号位, 通常以这个数的最高位为符号位。

一般符号位为 1 时表示负,为 0 时表示正。在计算机中,符号位和数值位一起表示的一个数称为机器数,而把它的数值称为机器数的真值。

(二) 带符号数的三种表示方法

日常生活中遇到的数,除上述的无符号数外,还有大量的带符号数。数的符号在计算机中也用二进制数表示,通常用二进制数的最高位表示数的符号。机器数可以用不同方法表示,常用的有原码、反码和补码表示法。

1. 原码

数 X 的原码记作 $[X]_{\text{原}}$,如机器字长为 n ,则原码的定义如下:用符号位表示数的符号,用数的绝对值表示数值部分。

例如,当机器字长 $n = 8$ 时,

$$[+1]_{\text{原}} = 00000001\text{B}, [+127]_{\text{原}} = 01111111\text{B}$$

$$[-1]_{\text{原}} = 10000001\text{B}, [-127]_{\text{原}} = 11111111\text{B}$$

当机器字长 $n = 16$ 时,

$$[+1]_{\text{原}} = 0000000000000001\text{B}, [+32767]_{\text{原}} = 0111111111111111\text{B}$$

$$[-1]_{\text{原}} = 1000000000000001\text{B}, [-32767]_{\text{原}} = 1111111111111111\text{B}$$

由此看出,原码表示法中,最高位符号位,正数为 0,负数为 1。其余 $n - 1$ 位表示数的绝对值。原码表示数的范围是 $-(2^{n-1} - 1) \sim +(2^{n-1} - 1)$ 。8 位二进制原码表示数的范围是 $-127 \sim +127$,16 位二进制原码表示数的范围是 $-32767 \sim +32767$ 。原码表示法简单直观,但不便于进行加减运算。

注意,“0”的原码有两种表示方法:

$$[+0]_{\text{原}} = 00000000\text{B}, [-0]_{\text{原}} = 10000000\text{B}$$

2. 反码

数 X 的反码记作 $[X]_{\text{反}}$,如机器字长为 n ,反码定义如下:正数的反码表示与原码相同,负数的反码是它的原码数值部分按位取反,符号位仍为 1,或者说负数的反码是它的正数(包括符号位)按位取反。

例如,当机器字长 $n = 8$ 时,

$$[+1]_{\text{反}} = 00000001\text{B}, [+127]_{\text{反}} = 01111111\text{B}$$

$$[-1]_{\text{反}} = 11111110\text{B}, [-127]_{\text{反}} = 10000000\text{B}$$

从反码表示法中可见,最高位仍为符号位,正数为 0,负数为 1。反码表示数的范围是 $-(2^{n-1} - 1) \sim +(2^{n-1} - 1)$ 。8 位二进制数反码表示数的范围是 $-127 \sim +127$,16 位二进制数反码表示数的范围是 $-32767 \sim +32767$ 。

注意,“0”的反码有两种表示方法:

$$[+0]_{\text{反}} = 00000000\text{B}$$

$$[-0]_{\text{反}} = 11111111\text{B}$$

3. 补码

(1) 补码表示法

数 X 的补码记做 $[X]_{\text{补}}$,当机器字长为 n 时,补码定义如下:正数的补码表示与原码相同;负数的补码表示,符号位为 1,其余部分必须按位取反再加 1。

例如:当机器字长 $n = 8$ 时,