

D

DIANZITISUANTI

电子计算机

及其在医学中的应用

方 积 乾 杨 周 南 等编
王 齐 琳 秦 笃 烈

人 民 卫 生 出 版 社

电子计算机 及其在医学中的应用

编 著

王齐琳	北京第二医学院
王继中	中国医学科学院基础医学研究所
方积乾	北 京 医 学 院
杨周南	北京市计算中心
姚金华	北 京 医 学 院
秦笃烈	北京第二医学院
栗载福	武 汉 医 学 院
彭立言	中国医学科学院基础医学研究所

审 阅

蒋大宗 秦治纯

人 民 卫 生 出 版 社

特约编辑 马斌荣

电子计算机及其在医学中的应用

方积乾 杨周南 王齐琳 秦笃烈等 编

人民卫生出版社出版
(北京市崇文区天坛西里10号)

北京通县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米16开本 18 $\frac{1}{2}$ 印张 4插页 423千字

1981年12月第1版第1次印刷

印数: 1—5,400

统一书号: 14048·4050 定价: 2.00元

《电子计算机及其在医学中的应用》

内 容 简 介

本书是国内第一本关于电子计算机在医学中应用的书籍。除扼要介绍数字机与模拟机的基本知识外，以大量篇幅介绍了自动诊断、图象识别、模型与模拟、实验室小型机、医院管理、数据库、情报检索、医学教育等主要应用。

全书材料新颖，深入浅出，语言生动，插图丰富，趣味盎然；各章相对独立，大多通过一系列医学中应用的实例阐明基本概念和思路，力图展示方法论和发展线索；大部分内容取材于国外文献、会议集和专著，但较之国外同类书籍全面、集中，便于阅读借鉴。

对于临床和基础医学、生物学工作者以及高等医学院校学生、研究生，本书可作为科研和教学参考书。对于有志于医学信息科学的计算机科学、数理科学工作者和工程技术人员，本书将起到桥梁的作用。对于希望了解计算机在医学中应用的一般读者阅读本书也颇有裨益。

序

电子计算机的问世对科学技术的发展和人类生活所产生的重大意义已为人所共知。计算机进入医学领域也已经历了大约二十个春秋。在这短暂的时间里所取得的进展和成就已证明,计算机在为医生提供更佳的诊疗工具、提高医院工作效率、促进医学科学研究和实现医学重大技术革新等方面带来很大的好处。医学信息科学已成为医学发展中富于生命力的一个方面军,它推动了医学、数理科学、工程技术等不同领域的专业人员协同工作,促进了这些学科之间的沟通和渗透。由国际医学信息学联合会(IMIA)和世界卫生组织(WHO)发起,已召开了三届世界医学信息学大会(World Conference on Medical Informatics,简称 MEDINFO),集中交流计算机在医学领域各方面应用的学术进展和经验。国际上已出版了多种计算机医学应用的专门性学术刊物,在不少著名的医学学术刊物上也时有计算机应用于医学的论文发表。显而易见,计算机在医学领域的进展正方兴未艾。

回顾计算机在医学中应用的进程,不难看出计算机的医学应用正在日趋广泛和深入,已在不同程度上渗透到几乎所有的医疗卫生领域,从预防医学、基础医学到临床医学,从医疗、科研、教学到医学情报检索以及行政业务管理方面,都已有了不少成功的先例。在医学领域中计算机最早应用于医院财务结帐和其他业务方面。在五十年代后期和六十年代初期,计算机化的心电及脑电分析、放射治疗计划、肺功能分析、多项体检普查、医学统计及临床化验室的应用等先后开始萌芽,相继开始了试验性应用。对整个计算机化医院信息系统的实验工作,也在这时开始尝试;但由于当时使用的还是价格昂贵的老式大型计算机,技术上不够先进,加上经验不足,对医院复杂环境的特殊性也缺乏认识,因此这项实验工作在早期未能取得预期效果,但毕竟还是积累了一些宝贵经验,促进了后来的模块式医院信息系统的发展。这个时期还建立了一些医学计算中心,设计了专用的生物医学统计程序包和最初的医学文献检索系统。六十年代中期,小型计算机崭露头角以后,在经济上和技术上都使计算机的应用有了更有利的条件,使生物信号的检测和分析自动化进入了新阶段,可以用它组成实时联机应用的系统,例如计算化的监护系统因可由大型机改用小型机而得到实际采用。与此同时,医学图象处理与识别等研究发展工作也得以相继展开。进入七十年代后,计算机在医学中的应用更有了进一步的发展,例如,采用计算机实现的多项体检系统、心电图自动解释、临床化验室自动化和各科监护系统已进入实用阶段。特别是微处理器的出现和迅速发展,这就使一些分散的、小型数据处理、数值计算和控制功能,可以采用价格低廉、工作可靠而又方便好用的微型计算机系统来实现,从而开创了医疗仪器智能化的新时期。第一台装有微处理器的生物医学仪器出现在市场上是在1975年,那时主要用于实验室类型的仪器,但随即影响到所有的医学仪器。近几年来已出现了一批作为商品出售的内装有微处理器或微型计算机的医学仪器,其中有肺功能测定仪、血气分析仪、自动血细胞分类计数仪、自动血液化学分析仪、血压监护系统、危重病人监护系统等一批高水平的新产品;而且还在进行诸如采用微型计算机的可携带式心律失常监护仪、脑电信号处理系统、麻醉仪和各

种人工假肢等研究发展新项目。七十年代在计算机体层摄影扫描仪 (CT) 方面的突出成就和迅速换代, 标志着计算机的医学应用达到了更高水平的阶段。在软件方面, 原来为医学计算机应用设计发展起来的 MUMPS 语言, 现在已为医学领域以外的用户所采用, 并已被正式批准为和 FORTRAN 等少数几个语言一样的标准语言, 推广使用。在医学信息学方面也取得了引人注目的进展。例如美国医学文献与分析检索系统 (MEDLARS) 现已包含有 19 个以上的数据库, 1000 多个美国国内终端和 11 个外国的中心可通过电话网络联机检索, 向这个系统每年检索的医学文献查询次数已达 150 万次以上, 而且目前正在酝酿和着手发展自动化程度更高的 MEDLARS-III 系统, 新系统预计将在八十年代中完成和投入运行。各种医学记录数据库系统也在积极发展之中, 集中式的医院信息系统已在一些大型现代化医院中建立和试用。和数据库有关的新技术如自然语言分析、光录象盘等新型大容量存储技术等研究工作正在活跃进行。在计算机辅助诊断和医学决策方面的研究, 如人工智能应用于医学, 已越来越引起人们的兴趣和关注, 并已有了一些新的苗头。在医学信号分析方面, 不少研究单位正在继续大力开展包括医学图象模式识别和信息处理在内的各种新技术的研究发展工作。可以预期在八十年代和九十年代, 计算机在医学中的应用, 将会取得更可观的成就和长足的进步。

最近几年来, 我国在医学应用计算机方面也有了可喜的开端, 关心和从事这方面工作的人数日渐增多。我们有必要从我国的实际情况出发, 有分析地吸取国外经验, 埋头苦干, 打好基础, 以点带面, 取得实效; 使计算机应用于医学的工作, 能在深度和广度上都能更切合实际需要地取得迅速进展。正是为了这一目的, 我们编写了本书, 希望有助于读者较全面地了解计算机及其在医学中应用的现状、进展、实例、问题和趋势, 有助于有志于此的同志在各自的实践中进一步推动计算机医学应用工作。

本书是在各位作者的集体努力下完成的, 大家为此付出了辛勤劳动。从内容来说, 有的章节是介绍计算机的基本知识和概念的 (如第一章和第十一章), 其余各章具有相对独立性, 读者可根据自己的兴趣和需要阅读有关部分。需要说明的一点是, 各章的先后次序, 不意味它们的重要性的次序。

由于计算机在医学中应用涉及的领域很宽, 它的发展非常迅速, 许多方面尚未成熟和定型; 加上我们自己水平有限, 实践经验还少, 也未能收全新的材料, 因此在本书内容的选择和编写中, 难免有所遗漏和差错, 谨请读者不吝指正和提出宝贵意见。

最后, 我们感谢人民卫生出版社编辑部对本书出版工作中自始至终的大力支持, 感谢西安交通大学蒋大宗教授和中国科学院生理学研究所秦治纯教授先后在百忙中审阅了全书, 并感谢北京医疗器械研究所陈国维同志审阅了部分内容。还要感谢北京第二医学院马斌荣同志校阅了本书, 并对北京第二医学院教材科绘图组同志表示谢意, 他们为本书绘制了大量插图。

目 录

序 (王继中)	[1]
第一章 电子计算机的基本知识 (杨周南)	1
§1 什么叫电子计算机	1
§2 电子计算机发展概述	3
§3 电子计算机中数的表示方法	4
§4 电子计算机的组成部分及其功能	12
§5 软件、程序及计算机语言概述	20
§6 电子计算机的应用	26
§7 计算机网络	23
§8 人工智能及其应用	29
第二章 计算机辅助诊断 (方积乾、姚金华)	30
§1 计算机诊病对话录	30
§2 一个最早的概率模型——贝叶斯 (Bayes) 公式	31
§3 贝叶斯公式的简化——评分法	34
§4 训练迭代法	39
§5 判别分析	41
§6 序贯诊断	44
§7 非统计学观点的判别树	49
§8 小结	53
第三章 计算机与医学图象识别 (方积乾)	55
§1 计算机的“看”和“听”	55
§2 医学图象自动识别	56
§3 臂脉搏图的自动识别	57
§4 心电图的自动识别	59
§5 胸部X线摄片的自动识别	64
§6 血细胞的自动识别	71
§7 染色体的自动识别	76
§8 小结	79
第四章 数学模型、数字机模拟与生物医学 (方积乾)	82
§1 数学模型	82
§2 流行病学的数学模型	85
§3 药运学数学模型——室分析	86
§4 药效学的数学模型	90
§5 肿瘤化疗的数字机模拟	92
§6 患者-人工肾系统的数字机模拟	94
§7 结语	98
第五章 电子模拟计算机及其应用 (王齐琳)	100
§1 模拟计算机的工作原理	100
§2 模拟计算机的基本部件	103
§3 模拟计算机在医学中的应用	109
§4 模拟计算机上的数学模拟	112
§5 模拟机模型的形成	116

第六章 计算机在实验室的应用 (王齐琳)	125
§1 小型机和微型机	125
§2 微处理机和测试自动化	127
§3 实验室数据处理系统的基本结构	130
§4 实验室常用的几种数据处理方法	137
§5 计算机与实验室仪器的接口	146
§6 实验室计算机应用的几种方式	150
第七章 电子计算机与生理监护系统 (秦笃烈)	155
§1 生理监护系统及其组成部分	155
§2 监护系统的数据收集和信息显示	157
§3 监护参数的测定	160
§4 监护系统的控制作用	167
第八章 医院计算机系统 (秦笃烈)	169
§1 医院计算机系统的发展和基本要求	169
§2 应用计算机辅助采集病史	173
§3 计算机病历管理	181
§4 计算机辅助开处方	186
§5 病人管理的信息处理	188
§6 血液学和生化实验室计算机系统	191
§7 放射科信息管理	202
§8 自动化健康检查实验室	208
第九章 计算机化的X线层面扫描系统 (CT) (粟载福)	216
§1 CT产生的历史背景	216
§2 CT原理及装置	217
§3 重建图象的数学方法	222
§4 CT的物理性能	227
§5 CT在医学中的应用介绍	229
§6 CT发展动态	234
第十章 电子计算机在医学教育中的应用 (秦笃烈)	237
§1 计算机辅助教学概述	237
§2 实验室数据查询程序	238
§3 诊断查询程序	240
§4 计算机辅助临床教学——病人模拟	244
第十一章 医学数据处理系统和数据库 (杨周南)	255
§1 医学数据处理系统	255
§2 数据库系统的常用术语介绍	256
§3 数据库产生的历史背景	258
§4 数据库系统概述	258
§5 医用数据库实例简介	265
第十二章 医学情报检索系统 (王继中、彭立言)	271
§1 引言	271
§2 MEDLARS系统	276

第一章 电子计算机的基本知识

§1 什么叫电子计算机

1. 现代化的计算工具

人类在从事生产劳动的过程中，创造了各种生产工具，大致可分为两类。一类是完成人本身不能完成的工作，例如，锯子、刨子等，因为人没有具备进行这种工作的器官。另一类是完成人能做的工作，但效率比人高得多，各种计算工具就是帮助人们提高计算效率的工具。

古人为了计算，发明了算筹计数法，算筹是一些小木棍，用几根木棍拼成各种形状来表示不同的数字。在此基础上，约在两千多年前，我国劳动人民创造了算盘。算盘是一种最简单的数字式计算机，用珠数表示数字，直到今天，仍是一种方便的计算工具。到16世纪初，英国人发明了计算尺，这是一种简单的模拟式计算机，以长度表示数字，适用于各种简单而粗略的计算。以后又发明了手摇计算机等。随着现代科学技术和国民经济的不断发展，越来越复杂的计算任务要求发展具有更迅速更精确的计算工具。电子计算机就是为适应更精确更快地完成繁重计算任务的要求而产生的一种现代化计算工具。

电子计算机问世以来发展极为迅速，应用日益广泛，并随之开拓了一门叫作计算机科学的崭新的科技领域。如果说人类发明了锯子、刨子之类的劳动工具是手的延长，而第一次工业革命是以蒸汽机为代表的动力革命，是人的器官、四肢和体力的全面延伸，那么当今人类进入广泛使用电子计算机的阶段就是人的大脑和智力的延展。因为电子计算机可在短时间内完成亿万次计算，它不仅代替了人们大量重复烦琐的手工计算，而且可以模拟人的感觉和思维，代替人的部分脑力劳动，还可以逾越人体的机能和生命的限制，在计算、判断、检测等方面完成人们化毕生的时间也无法完成的任务，因此电子计算机在各行各业特别在尖端科技领域中发挥着重要的作用。例如，由于计算机能迅速而准确地计算宇宙飞船的轨道参数和纠正偏差，促使空间技术飞速发展，人类到太空中翱翔以至登上月球成为现实。电子计算机能作大量的数据积累、分析、计算、判断、分类的工作，再加上其他的控制设备，构成了理想的实时控制系统，使工业实现高度自动化；再配上一些通讯设备和终端装置，又可构成一种数据处理系统，可为各种管理和判断业务服务。总之，电子计算机的使用大大提高了劳动生产率，推动了科技研究和对自然规律的探索，因此，有人认为电子计算机的问世和广泛使用是一场重大技术革命，甚至称之为第二次工业革命。当前，电子计算机已成为一个国家科学技术现代化水平的重要标志。

2. 电子计算机的种类

电子计算机按原理的不同可分为模拟式和数字式两类。模拟式计算机是在计算尺的基础上发展起来的，它用电压等模拟量的大小来表示数字的大小，它不但能帮助人们进行各种模拟试验，还能进行各种复杂的数学运算。数字式计算机是在算盘的基础上发展

起来的，它用电信号的有、无及电信号的个数来表示数字，并且根据算术法则进行计算，其运算方式同人的计算很相似。

上述两种形式的计算机原理各不相同，各有其自身的优缺点，因此用途也各不相同。关于模拟式计算机详见第五章；本书除该章外，指的均是数字式电子计算机，简称电子计算机或计算机。

电子计算机按速度、体积的不同，可分为巨型机、大型机、中型机、小型机、微型机。其中，巨型机的速度最快，存贮容量最大，体积也较大；微型机的体积很小，可做一片硅单晶片上。近年来，各种不同的应用对计算机的大小提出了不同的要求，其中，特别重视巨型机和微、小型机的研制。例如，在宇航事业及其他尖端科学中的计算任务，要求计算机向超高速方向发展，而信息处理部门要求计算机向大容量方向发展；又如，为了存贮一本一千页的字典，需要一亿个左右的二进制字位。为此国外已研制成每秒运算速度达亿万次以上的超高速大容量的巨型机或计算机群，这些巨型机大多用于宇航事业、军事部门以及计算中心等。与此同时，小型计算机和微型机也起着重要的作用，因为这种计算机造价便宜，生产周期短，结构简单，体积小，重量轻，环境适应性强，操作简便，一般可不需要受过专门训练的程序员来使用。小型机和微型机由于上述许多优点，它们受到了普遍的欢迎，并广泛渗入工农业、军事、民用等领域，获得了极为迅速的发展。

电子计算机按工作特点和用途的不同，可分为通用机和专用机。通用机可完成各种不同类型的计算任务，只需编制相应的不同的应用程序即可。它要求存贮容量较大，运行速度和计算精度较高，常用于科学技术计算、数据处理系统以及实时控制系统等。专用机只能完成某些固定的计算任务，因此机器的结构简单，指令系统也较精简，针对性强，一般常配有专用的外围设备，计算程序一般是固定的，因此使用方便，常用于专门的计算系统或自动控制系统。

3. 电子计算机的特点和功能

电子计算机称得上是一个现代化的计算工具的主要原因，是它具有下列特点和功能。

(1) 运算速度快。电子计算机的运算速度通常用平均每秒能做多少次算术运算和逻辑运算来表示。对于一般的中小型机，运算速度可达每秒几十万次左右，巨型机的速度可达每秒1亿次以上。例如，美国在1973年制成了一台每秒运算速度为1亿5千万次的巨型机。这样，电子计算机在几分钟内所完成的工作，若用人工计算需要几十年、几百年甚至更长的时间才能完成。

(2) 计算精度高。电子计算机的计算精度比现有任何其他计算工具的计算精度高得多。电子计算机的计算精度取决于电子计算机的字长，字长就是机器内表示一个数的长度，常用二进制的多少位来表示，因此，为了提高计算精度，只需尽可能设计较长的字长即可。又由于可以把一个数分段进行计算，所以在电子计算机里还可以得到二倍、多倍于字长的精度。

(3) 存贮容量大。一般的大、中型电子计算机的内存贮量可达几十万或几百万个二进制位，也就是说可以同时有几十万个数据在机器内进行处理。为了节省计算机主机的制造成本，一般不提倡无限制地扩大计算机主机存贮器的存贮容量，而是以发展价格低

廉、制造方便的辅存贮器为主，辅存贮器的存贮容量可以远远超过主机内的存贮器的容量。

(4) 具有记忆能力。从某种意义上说，电子计算机具有类似于人的大脑的记忆能力。众所周知，任何一个人只有记住了九九表后才能进行乘、除运算，因此，电子计算机为了进行各种运算，必须具有记忆能力，这种记忆能力是指电子计算机能记住输入的各种程序、原始数据、中间结果、最终结果以及常用函数表（如三角函数、对数函数等）、常用算法（如高斯求解法、最小二乘法等）等。电子计算机的记忆能力主要靠存贮器，记得多少和存贮器的容量有关，而记得是否牢靠和机器的稳定性有关。

(5) 具有逻辑运算和逻辑判断能力。电子计算机不仅能进行各种算术运算，能解复杂的算式，还能进行逻辑运算，具有一定的逻辑判断能力。例如，能按照当前的计算结果来判定后面的计算进程。

§ 2 电子计算机发展概述

在本世纪三十年代以前各类计算装置均属机械装置，直到三十年代才开始发展电气机械的计算装置，以后又发展了纯粹是电气的装置，电气装置的计算机便导致在二十世纪中期近代快速电子计算机的出现。

1946年美国研制成功第一台电子计算机，电子计算机的发展十分迅速，三十多年经历了三代更新。

第一代（1946~1957年）。以电子管为主要元件，形成了电子管计算机体系，在此期间，计算机数量较少，应用范围有限。

第二代（1958~1964年）。以晶体管为主要元件，形成了晶体管计算机体系。由于晶体管的特性使计算机的可靠性提高，体积缩小，运行速度提高到每秒百万次左右。

第三代（1965~1972年）。采用集成电路。集成电路是在六十年代晶体管生产工艺基础上发展起来的新工艺。集成电路可将晶体管和电阻、电容等电子元件以及联接导线都做在一片小小的单晶片上。采用集成电路后，电子计算机的体积很小，耗电量也小，可靠性高，计算速度大为提高。

第四代（1972年以来）。采用大规模集成电路后，计算机的速度和体积缩小又提高了几个数量级，给制造巨型机和微型机创造了技术条件。

值得指出的是，近几年已出现了一种一片芯片的微型计算机，这种微型机的运算速度可达每秒十万次。同世界上第一台电子管计算机相比，微型机的运算速度提高了二十倍，可靠性提高了约一万倍，而微型机的体积只有电子管机的三十万分之一，重量为六千分之一，耗电量为五万六千分之一，价格更为百万至千万分之一。而这一切仅仅经历了三十年左右。由此可见，电子计算机发展速度是多么惊人！从计算机的运算速度讲，在过去三十年中提高了六个数量级。电子计算机的发展不仅表现在使用的电子元件上，也表现在计算机本身的结构上。为了提高速度，在运算器部分加进了乘法器和除法器，有的计算机采取多运算器形式。为了解决速度和存贮量的矛盾，产生了分级存贮体系，直接与运算器联系的存贮器速度快而存贮量小，而其他的后备存贮器速度慢而存贮容量大。为了解决外部设备和主机间运行速度的矛盾，出现了交换器和外部设备脱机的概念，即主机以较快的速度将输入和输出负载交给交换器，然后由交换器缓慢地和各种外

部设备打交道。为了解决几个用户同时享受计算机资源的问题，就产生了多通道、中断控制和分时操作系统的概念。

电子计算机的发展也表现在相应软件*的发展。最早人们使用计算机时，需要和数码形式的机器指令打交道，这种机器指令既不直观且易出错，调试困难，一般只能由专业人员掌握。为了使没有受过专门训练的广大实际工作者能方便地使用计算机，产生了各种自动化语言。为了适应越来越多的数据处理业务，又发展了数据库管理系统软件。

在硬件设备和软件系统发展的基础上，电子计算机可通过通讯设备互相联系起来，形成计算机综合处理网络**，如把各计算中心及各大学、各研究所的计算机联接起来，以充分发挥计算机的作用。在实现了电子计算机网络化后，人们可以通过各种终端设备，像使用电话一样，在自己办公室里达到使用计算机的目的。

电子计算机今后的发展方向有四个方面：第一是向巨型发展，这是一种每秒钟可以进行几亿次运算的计算机，它可用于武器的研制，天气预报。以及信息处理等；第二是向微型发展，微型计算机装在电视机上可安排节目，装在收音机上能自动找台，装在汽车上能自动调节油门，装在电梯上能自动升降，装在炊具上能自动烹调等；第三是向网络方向发展，使计算机的使用网络化，有了计算机网络就能很快了解全国情况；第四就是向智能模拟***方向发展，通过智能模拟可以更好地实现各种自动化。

我国的电子计算机工业，从1956年开始研制以来得到了较大的发展，已能自行设计各种类型的晶体管和集成电路的计算机，目前正在研制千万次以上的大型机。在电子计算机普及推广使用方面也取得了初步的成绩。随着社会主义建设的发展，电子计算机事业必将更快地发展。

§3 电子计算机中数的表示方法

人们在日常生活中，一般都采用十进制记数法，十进制记数法为世界各国统一使用，大约已有八百年的历史了。但也有一些非十进制记数法，如时间是采用六十进制记数法。在电子计算机技术里，却采用了二进制记数法，而且计算机的硬指令、地址、操作码等也都是用二进制数码来表示，称一位二进制数为一个“字位” (bit)。

1. 二进制记数法

首先让我们回顾熟悉的十进制记数法。十进制记数法是采用十个基本数码：0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9以及进位法则逢“十”进“一”来表示任意数的一种记数法，按上述十个基本数码的顺序分别表示零和前九个正整数，从第十个正整数开始不再选新字来表示，而是利用进位法来记数，因此用“10”来表示第十个整数，也就是十个“1”进成“10”，十个“10”进成100等，这表示了十进制记数法以10为基数，按照逢“十”进“一”的法则组成数的个位、十位、百位、千位等。

二进制记数法是德国数学家莱布尼茨在十七世纪末发明的，其所以称为二进制，是因为这种记数法是以2为基数，它只有两个基本数码：0, 1。其进位法则是逢“二”进“一”，因此在二进制记数法中“10”不再表示十个“1”，而是表示二个“1”了。即

* 见本章§5。

** 见本章§7。

*** 见本章§8。

$1+1=10$ ，这里的 10 表示十进制数中的 2，因此，3 就是 10 再加 1 就是 11，4 就是 11 再加 1 并运用逢“二”进“一”的进位法则应记为 100，用同样的运算法则可推算出 5，6，7…等的二进制记数法的表示形式，下面列出一些简单的十进制数所对应的二进制表示法，望读者能熟悉它。

表 1-1

十进制	二进制	十进制	二进制	十进制	二进制
0	0	6	110	12	1100
1	1	7	111	13	1101
2	10	8	1000	14	1110
3	11	9	1001	15	1111
4	100	10	1010		
5	101	11	1011		

读者可按二进制记数法的规则继续写出其后续表。

懂得了二进制记数法的基本道理后，需要说明为什么在电子计算机技术里要采用二进制记数法。这是由于二进制记数法具有如下许多优点：

在二进制记数法中，任意一个数的每一位不是 0 就是 1，因此只要某个物理元件具有两个稳定状态，就可以用来表示一位二进制数，在实际生活中寻找具有二种稳定状态的物理元件是很方便的。例如，指示灯的“亮”和“灭”，开关的“接通”和“断开”，晶体管的“导通”或“截止”，磁蕊的两种不同磁化方向等等。如果规定其中一种稳定状态表示“1”，则另一状态表示“0”，例如，可将指示灯的“亮”，开关的“接通”，晶体管的“导通”表示“1”，则指示灯的“灭”，开关的“断开”，晶体管的“截止”表示“0”。

在电子计算机里，常采用电位的“高”和“低”，或电脉冲的“有”和“无”两种稳定状态的电子元件。具有这种性能的电子元件有开关、磁元件、触发继电器、晶体管、集成电路所构成的单元电路等。穿孔纸带和穿孔卡片也具有穿孔和未穿孔的两个稳定状态。当然，我们也可以设计一种具有十个稳定状态，用以表示十进制记数法的物理元件。但实践证明，这要比设计只具有二种稳定状态的物理元件复杂得多，而且会导致设备的浪费。因为，为了表示十进制中不同的十个基本数码，需要制造一个电子元件具有十个稳定状态，但在二进制记数法中，从表 1-1 可见，一个元件具有两个稳定状态，可以表示两个不同的二进制数，两个元件具有四个稳定状态，可以表示四个不同的二进制数，三个元件具有六个稳定状态可以表示八个不同的二进制数，四个元件具有八个稳定状态，可以表示十六个不同的二进制数。显然，二进制记数法具有节约设备的优点。

二进制记数法的运算法则非常简便（详见本节的 3），这一特点可使在计算机中实现二进制运算的线路结构做得比较简单，有利于工作可靠性的提高。

采用二进制记数法还可应用逻辑代数的理论来设计电子计算机的逻辑线路，便于机器结构的简化。

总之，二进制记数法具有容易实现，节约设备，运算简便等许多优点，所以在电子计算机里采用这种记数法。

2. 二进制记数法和十进制记数法的互相转换

二进制记数法和十进制记数法只是两种不同的记数法，也就是数的两种不同表示形式。例如十进制中的 8 和二进制中的 1000 虽然形式相差很大，但它所代表的实际内容是完全一样的，它们都表示数“八”。虽然，两种数制的表示方法和计数规则是有区别的，但它们之间却存在着规律性的联系。下面介绍两种数制间的转换，为简便起见，只讲述关于整数的换算方法。为此，首先要熟练记住关于 2 的各次幂的值。两种数制表示法的对应规则，列表如下：

表 1-2

十进制	二进制	十进制	二进制
$1=2^0$	1	$32=2^5$	100000
$2=2^1$	10	$64=2^6$	1000000
$4=2^2$	100	$128=2^7$	10000000
$8=2^3$	1000	$\vdots$	$\vdots$
$16=2^4$	10000		

由上表可得出一个规律： $2_{10}^n = \overbrace{100\cdots 0_2}^{n \text{ 个}}$ ，上式中右下角的脚码表示不同的数制，脚码为 10 者表示十进制数，脚码为 2 者表示二进制数。可见，一个恰为 2 的某方次的十进制整数其对应的二进制数是“1”后面带有若干个“0”，“0”的个数恰为方次数。根据表 1-2 中所揭示的规律就可实现二种数制间的转换，现举例如下：

(1) 十进制转换为二进制

$$\begin{aligned}
 \text{例 1}^* \quad 67_{10} &= 64_{10} + 2_{10} + 1_{10} \\
 &= 2_{10}^6 + 2_{10}^1 + 2_{10}^0 \\
 &= 1000000_2 + 10_2 + 1_2 \\
 &= 1000011_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{例 2} \quad 195_{10} &= 128_{10} + 67_{10} \\
 &= 2_{10}^7 + 1000011_2 \\
 &= 10000000_2 + 1000011_2 \\
 &= 11000011_2
 \end{aligned}$$

(2) 二进制转换为十进制

$$\begin{aligned}
 \text{例 3} \quad 1011_2 &= 1000_2 + 10_2 + 1_2 \\
 &= 2_{10}^3 + 2_{10}^1 + 2_{10}^0 \\
 &= 8_{10} + 2_{10} + 1_{10} \\
 &= 11_{10}
 \end{aligned}$$

查看表 1-1 可验证本例的正确性。

$$\text{例 4} \quad 100110101_2 = 100000000_2 + 100000_2 + 10000_2 + 100_2 + 1_2$$

* 例 1 至例 3 使用了二进制加法，其原理见本节 3。

$$\begin{aligned}
 &= 2_{10}^5 + 2_{10}^4 + 2_{10}^3 + 2_{10}^2 + 2_{10}^0 \\
 &= 256_{10} + 32_{10} + 16_{10} + 4_{10} + 1_{10} \\
 &= 309_{10}
 \end{aligned}$$

由上述四个例子可见，从二进制数转换为十进制数较为容易，只需仔细计算 2 的各方次值即可，但由十进制数转换为二进制数略有一些困难，关键在于对于一个较大的十进制数不能一眼看出它的关于 2 的各方次的分解式，因此我们引入另一方法：先将该数除以 2，得到一个商和余数，此余数即为所对应的二进制数的最低位，然后把商数再用 2 除，又得到一个商数和余数，该余数即为第二位数码，依次类推，直到除完为止，即不够 2 除为止，这时的商数就是所求二进制数的最后一位数码（最高位），现举例如下：

例 5	$9_{10} = ?$	可用竖式表示之。
	$\begin{array}{r} 2 \overline{) 9} \\ \underline{2} \\ 4 \\ \underline{2} \\ 2 \\ \underline{2} \\ 0 \end{array}$	余数 1 二进制数的第一位 0 二进制数的第二位 0 二进制数的第三位 二进制数的第四位

则 $9_{10} = 1001_2$

下面举一个偶数的例子。

例 6	$12_{10} = ?$	
	$\begin{array}{r} 2 \overline{) 12} \\ \underline{2} \\ 6 \\ \underline{2} \\ 3 \\ \underline{2} \\ 1 \\ \underline{1} \\ 0 \end{array}$	余数 0 二进制数的第一位 0 二进制数的第二位 1 二进制数的第三位 二进制数的第四位

则 $12_{10} = 1100_2$

例 7	$19_{10} = ?$	
	$\begin{array}{r} 2 \overline{) 19} \\ \underline{2} \\ 9 \\ \underline{2} \\ 4 \\ \underline{2} \\ 2 \\ \underline{2} \\ 1 \\ \underline{1} \\ 0 \end{array}$	余数 1 二进制数第一位 1 二进制数第二位 0 二进制数第三位 0 二进制数第四位 二进制数第五位

则 $19_{10} = 10011_2$

3. 二进制数的算术运算

(1) 加法。二进制的加法运算法则，见表 1-3

利用表 1-3 可方便地进行加法运算

例 1 求 $7 + 3 = ?$

表 1-3

$0+0=0$
$0+1=1$
$1+0=1$
$1+1=10$

十进制	二进制
7	1 1 1
+ 3	+ 1 1
10	1 0 1 0

(2) 减法。二进制减法运算法则，见表 1-4

表 1-4

$0-0=0$
$1-1=0$
$1-0=1$
$10-1=1$

利用表 1-4 可方便地进行二进制记数法的减法。但需注意表 1-4 中的最后一个算式，由于 $0-1$ 不够减，需向高位借“1”，并用借“1”当“2”的口诀。

例 2 $16-7=?$

十进制	二进制
1 6	1 0 0 0 0
- 7	- 1 1 1
9	1 0 0 1

被减数的最低位小于减数的最低位，故需向高位借 1 当 2，差为 1，但被减数的第二低位是“0”，故需继续向其相邻的高位借数。

(3) 乘法。二进制乘法运算法则，见下表 1-5

表 1-5

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

由此可见，二进制的乘法口诀比十进制的九九表简单得多，读者若已熟悉二进制的加法运算，则乘法运算将便于掌握。

例 3 $12\times 5=?$

十进制	二进制
$\begin{array}{r} 12 \\ \times 5 \\ \hline 60 \end{array}$	$\begin{array}{r} 1100 \\ \times 101 \\ \hline 1100 \\ 0000 \\ 1100 \\ \hline 111100 \end{array}$

验算 $60_{10} \neq 111100_2$

因为 $111100_2 = 100000_2 + 10000_2 + 1000_2 + 100_2$
 $= 2^5_{10} + 2^4_{10} + 2^3_{10} + 2^2_{10}$
 $= 32_{10} + 16_{10} + 8_{10} + 4_{10}$
 $= 60_{10}$

(4) 除法。二进制的除法运算类似于十进制的除法运算，除法是乘法的逆运算，读者只需掌握乘法及减法运算，则除法运算便易于掌握。

例4 $60 \div 5 = ?$

十进制	二进制
$\begin{array}{r} 12 \\ 5 \overline{) 60} \\ \underline{5} \\ 10 \\ \underline{10} \\ 0 \end{array}$	$\begin{array}{r} 1100 \\ 101 \overline{) 111100} \\ \underline{101} \\ 101 \\ \underline{101} \\ 000 \end{array}$

则 $60_{10} \div 5_{10} = 12_{10}$

或 $111100_2 \div 101_2 = 1100_2$

由上可知，乘法可以通过反复的加法和移位来实现，除法可由反复的减法和移位来实现。因此，在电子计算机中，对于四则运算可归结为加法、减法和移位操作。为了进一步简化设备，往往不直接进行减法，而是用加“补数”的方法来实现减法。在十进制中一个数所对应的补数就是该数加上其补数之和应为10（或100，1000……，零的个数等于原数的位数），因此，7的补数是3，26的补数是74等。例如， $86 - 34$ ，可先用86加上34的补数66， $86 + 66 = 152$ ，然后去掉进位得52，即 $86 - 34 = 52$ 。对于二进制记数法也可以引进补数的概念而使减法化为加法。在二进制记数法中求补数有一个简便的方法：即将二进制数各位中的“1”换成“0”，而“0”换成“1”，然后在最低位上加1。例如1001的补数是111，用0、1对换原则先将1001换为0110，然后在最低位上加1及0111，左零省去得111。由于： $1001 + 111 = 10000$ 符合补数的定义，因此1001的补数为111，但111的补数不是1001而是1，这和十进制数中97是3的补数，但3的补数是7而不是97的道理一样。

引入补数的概念后，在电子计算机里只要能实现加法，求补，移位的操作，便可实现对二进制数的一切四则运算。

4. 二进制代码的逻辑运算