

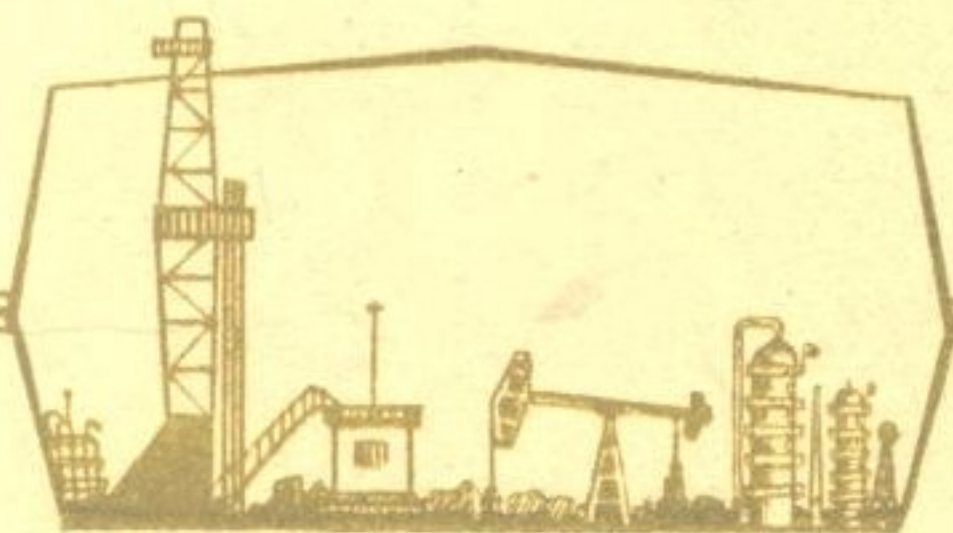
高等学校教学用书

# 数字地震仪

上册

## 集成电路基础

《数字地震仪》编写组编



石油工业出版社

6208

# 数字地震仪

上册

集成电路基础

《数字地震仪》编写组 编



00285391

5973/15



200294911



石油工业出版社

## 内 容 提 要

全书分上、下两册。本册着重介绍半导体数字集成电路和模拟集成电路及其应用。第一篇数字集成电路，较系统地介绍了数字逻辑的基本知识和各种逻辑电路的工作原理、主要电气特性及参数测试。第二篇模拟集成电路，以集成运算放大器为主，对电路的功能、典型电路的原理、参数测试及一般应用作了较详细的阐述。书末并附有集成电路的命名方法、电平转换电路及国内外部分集成电路产品对照表。

本书可供从事数字地震仪、电子计算机及其它数字化设备的操作、维修人员和有关院校师生参考。

数字地震仪

上册

集成电路基础

《数字地震仪》编写组 编

\*

石油工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

大厂县印刷厂印刷

\*

开本787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>印张35<sup>1</sup>/<sub>4</sub>字数882千字印数5,951—8,150

1979年7月北京第1版 1980年6月北京第2次印刷

书号15037·2027 定价3.60元

限国内发行

# 前 言

随着我国石油地震勘探技术和装备的不断革新和发展，数字地震仪和数字电子计算机越来越广泛地用于地震勘探和资料处理。为了适应新的形势，满足石油物探工作人员的需要，在石油工业部勘探司的大力支持下，由大港油田地质调查指挥部、胜利油田地质调查指挥部、华东石油学院勘探系和江汉石油学院勘探系组成《数字地震仪》编写组，编写了《数字地震仪》一书，全书分两册出版。

上册《数字地震仪——集成电路基础》的第一篇数字集成电路，由董栋、饶文松、陈重明同志编写，经潘正良同志审阅。第二篇模拟集成电路，由徐孝文同志编写，原稿经周宁华同志审阅。

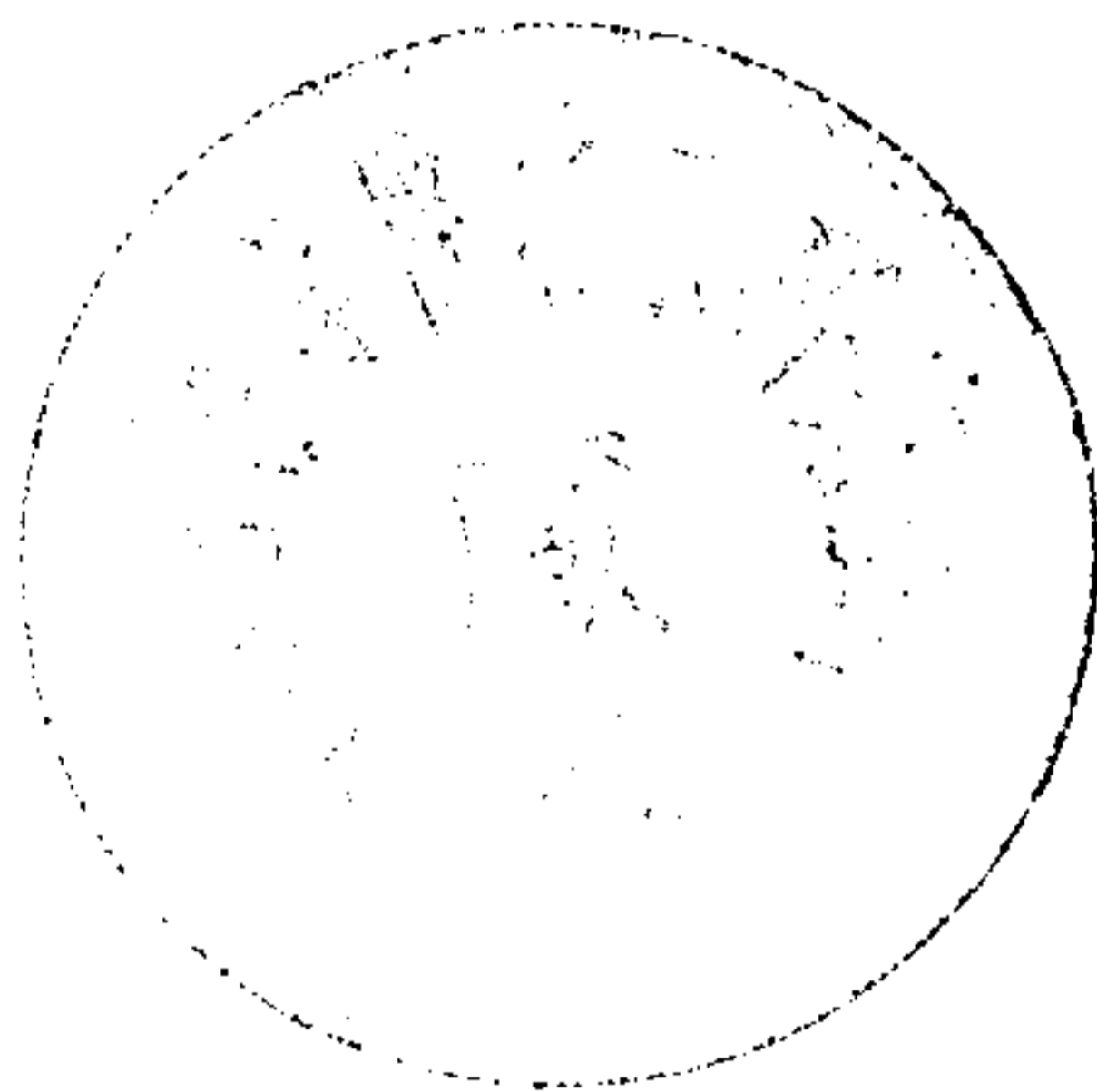
下册《数字地震仪——电路原理》由张昌义、陈正华、陈其威、王本善、宋金印、王安南、张均林、周宝成等同志编写，经张昌义和陈正华两同志审阅定稿。

全书在编写过程中，得到了西安石油勘探仪器总厂、重庆地质仪器厂、北京半导体元件二厂、上海元件五厂、北京大学、复旦大学、北京航空学院等单位的大力支持，在此顺致谢意。

由于编写水平有限，书中难免出现错误和不足之处，恳请读者批评指正。

《数字地震仪》编写组

一九七八年五月



# 目 录

## 第一篇 数字集成电路

<b>第一章 数字逻辑的基本知识</b> .....	1
<b>第一节 常用的四种进位计数制</b> .....	1
一、十进制数.....	1
二、二进制数.....	1
三、八进制和十六进制数.....	3
<b>第二节 各种数制之间的相互转换</b> .....	4
一、十进制数与二进制数的相互转换.....	4
二、十进制数与八进制、十六进制数的相互转换.....	6
三、八进制数与二进制数的相互转换.....	8
四、十六进制数与二进制数的相互转换.....	9
<b>第三节 数的定点和浮点表示</b> .....	10
<b>第四节 原码、补码、反码</b> .....	12
一、原码.....	12
二、补码.....	13
三、反码.....	15
<b>第五节 基本逻辑电路</b> .....	16
一、“或”门.....	16
二、“与”门.....	17
三、“非”门.....	17
四、“或非”门.....	18
五、“与非”门.....	18
六、“异或”门和“异或非”门.....	18
<b>第六节 正逻辑和负逻辑</b> .....	19
<b>第二章 门电路</b> .....	21
<b>第一节 二极管-晶体管逻辑 (DTL) “与非”门电路</b> .....	21
一、电路组成.....	21
二、DTL 与非门的工作原理.....	22
三、DTL 与非门的性质.....	22
<b>第二节 晶体管-晶体管逻辑 (TTL) “与非”门电路</b> .....	23
一、电路组成.....	23
二、电路的工作原理.....	24
三、电压传输特性.....	27
四、输入特性和输出特性.....	28

五、开关特性	30
第三节 改进电路	32
一、高抗干扰逻辑 (HTL) 门电路	32
二、改进的TTL电路	32
第四节 TTL“与非”门电路的参数与测试	35
一、通导电源电流 $I_{CCL}$ 和截止电源电流 $I_{CCH}$	36
二、输入短路电流 $I_{SE}$ 和输入交叉漏电流 $I_{RE}$	36
三、输出高电平 $V_{OH}$ 和输出低电平 $V_{OL}$	37
四、扇出系数 $N_O$	37
五、输出漏电流 $I_{OH}$ 和输出短路电流 $I_{OS}$	37
六、平均传输延迟时间 $t_{pd}$	37
第五节 TTL门电路种类简介	38
一、与扩展器	38
二、与或非门电路	39
三、与或扩展器	40
四、驱动器	41
五、集电极开路与非门	41
六、异或门电路	44
七、异或非门电路	45
第六节 电流型逻辑 (CML) 门电路	45
一、电流型开关基本电路	46
二、电流型“或非”门电路	47
三、电流型开关门电路的性质	48
第七节 MOS逻辑门电路	48
一、MOS晶体管的一般知识	49
二、MOS反相器	54
三、图腾柱输出电路	56
四、MOS基本门电路	56
第八节 门电路在脉冲电路中的应用	58
一、多谐振荡器	58
二、单稳态触发器	63
三、脉冲延时电路	66
四、鉴幅器	68
附录 三态逻辑 (TSL) 门电路	72
第三章 门电路的组合应用	74
第一节 逻辑代数的基本原理	74
一、基本逻辑运算	74
二、逻辑代数的基本公式	76
第二节 逻辑表达式的化简和转换	80
一、公式化简法	81

二、图解化简法·····	84
三、逻辑表达式的转换·····	92
<b>第三节 组合逻辑应用</b> ·····	99
一、数据选择器·····	100
二、数码比较器·····	102
三、数码转换器·····	108
四、奇偶校验-发生器·····	117
五、半加器、全加器和全加-减器·····	121
六、二-十进制全加-减器·····	126
七、并行进位四位全加器和快速进位扩展器·····	129
八、算术和逻辑运算器·····	134
<b>第四章 触发器</b> ·····	143
<b>第一节 触发器的基本形式</b> ·····	143
一、与非门组成的基本触发器·····	143
二、或非门组成的基本触发器·····	145
<b>第二节 R-S 触发器</b> ·····	146
一、R-S 触发器的逻辑功能·····	146
二、R-S 触发器的激励表和状态表达式·····	148
三、触发器的“空翻”问题·····	149
<b>第三节 D 触发器</b> ·····	150
一、概述·····	150
二、维持-阻塞型D触发器的工作原理·····	150
三、D触发器的置“0”、置“1”方式·····	153
<b>第四节 J-K 触发器</b> ·····	154
一、概述·····	154
二、J-K 触发器的逻辑功能·····	154
三、J-K 触发器的工作原理·····	155
<b>第五节 T 触发器</b> ·····	157
一、概述·····	157
二、不同功能触发器之间的转换·····	157
<b>第六节 触发器的参数和测试</b> ·····	162
<b>第七节 触发器的应用</b> ·····	165
<b>第五章 译码器和编码器</b> ·····	168
<b>第一节 译码器</b> ·····	168
一、译码器的基本原理·····	168
二、译码器的种类·····	174
<b>第二节 编码器</b> ·····	185
<b>第三节 数字显示</b> ·····	189
一、数字显示器·····	189
二、译码驱动线路·····	190

<b>第六章 计数器</b> .....	196
<b>第一节 串行计数器</b> .....	196
一、二进制串行计数器.....	196
二、十进制串行计数器.....	198
三、任意进制串行计数器.....	201
<b>第二节 同步计数器</b> .....	210
一、二进制同步计数器.....	210
二、十进制同步计数器.....	213
三、减法和可逆同步计数器.....	221
四、同步计数分频器.....	229
<b>第三节 具有强制条件的计数器</b> .....	239
<b>第七章 寄存器和存贮器</b> .....	243
<b>第一节 数码寄存器</b> .....	243
<b>第二节 移位寄存器</b> .....	245
<b>第三节 移位寄存器型计数器</b> .....	246
一、环行计数器.....	247
二、约翰逊计数器.....	249
<b>第四节 随机存取存贮器 (RAM)</b> .....	254
一、双极型随机存贮器.....	255
二、MOS 型随机存贮器 .....	259
<b>第五节 唯读存贮器 (ROM)</b> .....	264
一、固定掩膜型唯读存贮器.....	264
二、可编程序唯读存贮器.....	264
三、电可再编程序唯读存贮器.....	268

## 第二篇 模拟集成电路

<b>第八章 运算放大器的基础知识</b> .....	271
<b>第一节 集成运算放大器使用的感性认识</b> .....	271
<b>第二节 负反馈放大器的复习</b> .....	274
一、反馈的基本概念.....	274
二、负反馈的四种基本形式.....	276
三、负反馈对放大器输入、输出阻抗的影响.....	279
四、负反馈对非线性失真的影响.....	282
五、负反馈对放大器带宽的影响.....	283
<b>第三节 运算放大器的基本概念</b> .....	288
一、相加点抑制原理.....	288
二、运用相加点抑制原理简化运放的计算.....	290
三、在相加点看到的反馈阻抗的密勒效应.....	291
四、所谓理想运算放大器的条件.....	292
<b>第四节 小结</b> .....	293

<b>第九章 集成运算放大器电路分析</b> .....	295
第一节 差分放大器的复习.....	295
一、差分放大器的差模放大倍数和差模输入阻抗.....	295
二、差分放大器的共模抑制特性.....	299
三、差分放大器的转移特性——跨导的概念.....	301
第二节 XFC-751 型电路工作原理.....	304
一、XFC-751 型电路图与原理框图.....	304
二、电路工作原理.....	305
第三节 集成运算放大器常用单元电路介绍.....	309
一、差分输入级及其变型.....	309
二、电流源偏置电路.....	312
三、双端变单端电路.....	318
四、电平移动电路.....	320
五、有源负载电路.....	321
六、输出级电路.....	323
七、各种保护电路.....	325
<b>第十章 集成运算放大器的频率特性与补偿技术</b> .....	327
第一节 闭环放大器稳定工作条件.....	327
一、二个极点以上系统的开环幅频特性和相频特性.....	327
二、闭环放大器稳定工作的条件.....	330
第二节 频率补偿技术介绍.....	332
一、对地并联电容实现滞后补偿.....	332
二、在电平移动电阻上并联电容实现超前补偿.....	334
三、阻容串联网络实现滞后-超前补偿.....	336
四、内部反馈补偿法.....	339
五、高速运放中应用的正反馈补偿法简介.....	342
第三节 运算放大器闭环频率响应.....	343
一、双极点放大器的闭环频响.....	343
二、由闭环频响凸峰了解相位裕度.....	344
三、附录.....	346
第四节 运算放大器闭环后的小信号瞬态响应.....	347
一、闭环瞬态响应特性分析.....	347
二、瞬态响应中几个参量的应用.....	349
三、附录.....	351
<b>第十一章 集成运算放大器的一般应用</b> .....	353
第一节 集成运放在小信号放大电路中的应用.....	353
一、宽带放大器.....	353
二、电压跟随器.....	354
三、调谐放大器和变频器.....	355
四、高阻抗放大器.....	356

第二节	集成运放在各种变换电路中的应用	359
一、	电压源	359
二、	电流源	359
三、	电流-电压变换器	361
四、	高精度整流电路	363
五、	电压-时间变换器(VTC)	365
六、	在模-数(A/D)和数-模(D/A)变换中的应用	367
第三节	集成运放在信号发生器和脉冲电路中的应用	371
一、	方波和三角波发生器	372
二、	锯齿波和阶梯波发生器	374
三、	RC正弦波振荡器	377
四、	单稳态触发器	378
五、	施密特电路	380
第四节	集成运放在模拟运算电路中的应用	381
一、	比例放大器	381
二、	加法和减法器	381
三、	积分与微分器	383
四、	对数与指数放大器	384
五、	乘法与除法器	385
六、	绝对值放大器	388
第五节	扩大集成运放功能的几种方法	389
一、	输入失调电压和输入偏置电流的补偿	389
二、	扩大集成运放的输出功率	393
三、	差动输出扩大输出摆幅	395
<b>第十二章</b>	<b>集成运算放大器的技术指标和测试方法</b>	<b>397</b>
第一节	概述	397
第二节	极限使用指标及其测定	398
一、	静态功耗与最大允许功耗	398
二、	最大输入差模电压和最大输入共模电压	398
三、	最大输出电压及电流范围	400
四、	工作电压范围与输出短路保护	400
第三节	输入误差信号及其测量	400
一、	输入失调电压 $V_{os}$	400
二、	输入偏置电流 $I_{ib}$ 和输入失调电流 $I_{os}$	401
三、	输入失调的漂移	402
四、	输入噪声电压 $V_{FN}$	403
第四节	直流开环增益及其测量	404
一、	交流开环、直流闭环法	404
二、	交流反馈测试法	405
三、	通过开环转移特性测量法	406

第五节	差模输入电阻与开环输出电阻的测定	406
一、	差模输入电阻 $R_{id}$ 及其测量	407
二、	开环输出电阻 $R_o$ 及其测量	407
第六节	共模特性的测定	408
一、	直流共模抑制比 $CMRR_0$ 及其测定	408
二、	共模输入阻抗	410
第七节	利用辅助放大器测量集成运放的直流参数	410
一、	输入失调电压 $V_{os}$ 的测量	410
二、	输入失调电流 $I_{os}$ 的测量	411
三、	输入偏置电流 $I_{ib}$ 的测量	412
四、	开环电压放大倍数 $K_{od}$ 的测量	412
五、	最大输出幅度 $V_{OM}$ 的测量	413
六、	共模抑制比 $CMRR_0$ 的测量	413
七、	电源电压抑制比 $VSR$ 的测量	414
第八节	集成运放的交流特性指标及测定	415
一、	上升速率 $S_r$	415
二、	全功率输出频率 $f_p$	416
三、	建立时间 $T_s$	417
四、	过载恢复时间 $T_d$	417
<b>第十三章</b>	<b>集成运算放大器构成有源滤波器</b>	<b>418</b>
第一节	概述	418
一、	有源滤波器的概念	418
二、	有源滤波器的分类	418
三、	传输函数对滤波器设计与特性研究的意义	420
第二节	简单的无源 $RC$ 滤波网络	422
一、	$RC$ 无源低通滤波器	422
二、	$RC$ 无源高通滤波器	423
三、	文氏电桥构成的带通滤波器	425
四、	对称双 $T$ 网络构成的带阻滤波器	427
五、	无源 $RC$ 滤波器传输函数的小结	429
六、	提高二阶无源 $RC$ 滤波网络 $Q$ 值的途径	429
第三节	单端正反馈有源 $RC$ 低(高)通滤波器	430
一、	单端正反馈二阶有源滤波器	430
二、	单端正反馈有源低通滤波器分析举例	431
三、	单端正反馈有源高通滤波器分析举例	433
第四节	$RC$ 带通和带阻有源滤波器	435
一、	有源 $RC$ 带通滤波器	435
二、	有源 $RC$ 带阻滤波器	437
第五节	实际应用中的一些问题	441
一、	有源滤波器的调整	441

二、集成运放性能对滤波特性的影响·····	441
三、滤波器试验电路介绍·····	442
<b>第十四章 集成稳压电源</b> ·····	<b>445</b>
<b>第一节 稳压电源一般原理的复习</b> ·····	<b>445</b>
一、稳压电源的原理框图及其分类·····	445
二、W <sub>1</sub> 型集成稳压电源电路工作原理·····	446
<b>第二节 典型集成稳压电源电路分析</b> ·····	<b>447</b>
一、5G14型小功率集成稳压电源·····	447
二、XWY-10型全采样集成稳压电源·····	450
<b>第三节 集成稳压电源的应用举例</b> ·····	<b>453</b>
一、一般常用接法·····	453
二、扩大电流的方法·····	454
三、限流和短路截流保护·····	455
四、利用基准电压输出端的问题·····	457
五、开关电源·····	458
<b>第四节 集成稳压电源的指标与测试</b> ·····	<b>459</b>
一、集成稳压电源特性参数的介绍·····	459
二、主要指标的测试方法与步骤·····	461
<b>第十五章 电子模拟开关</b> ·····	<b>465</b>
<b>第一节 双极型晶体管开关</b> ·····	<b>465</b>
一、双极型晶体管的饱和压降与C、E极的接法有关·····	465
二、双极型晶体管开关的通导电阻和开关速度·····	467
三、应用举例·····	468
<b>第二节 结型场效应晶体管开关</b> ·····	<b>469</b>
一、结型场效应晶体管的工作原理·····	469
二、J-FET电压开关应用举例·····	472
<b>第三节 MOS场效应晶体管开关</b> ·····	<b>473</b>
一、MOS场效应晶体管工作原理·····	474
二、MOS晶体管开关应用举例·····	477
<b>附录一 本书常用逻辑符号及主要文字符号说明</b> ·····	<b>483</b>
<b>附录二 我国半导体集成电路型号命名方法</b> ·····	<b>485</b>
<b>附录三 数字集成电路使用中的电平转换问题</b> ·····	<b>486</b>
<b>附录四 国内外部分中规模TTL集成电路对照</b> ·····	<b>493</b>
<b>附录五 国内外常用部分模拟集成电路对照</b> ·····	<b>520</b>

# 第一篇 数字集成电路

## 第一章 数字逻辑的基本知识

在这一章里，我们首先介绍数字逻辑的基本知识——数制、码制、基本逻辑电路及正负逻辑的定义等等。这些内容既是数字集成电路的初学者必不可少的入门知识，又是进一步研究和讨论较为复杂的数字电路的基础。

### 第一节 常用的四种进位计数制

#### 一、十进制数

人们在阶级斗争、生产斗争和科学实验中创造了许多计数方法，各种不同的计数方法称为计数制。日常生活中最常用最熟悉的一种计数方法就是十进位计数制。这种计数制有三个特点：

1. 它采用十个不同的数字符号 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 来表示数值部分，我们把这些数字符号叫做数码。数码不同的组合表示不同的数值，如用三个不同的数码 1, 2, 3 可以组合成六个不同的数值：123, 132, 213, 231, 321, 312。

2. 它的计数规律是“逢十进一”。即低位计满“十”，就向高位进“一”，低位记零。

3. 数码处于不同的位置（不同的数位），它所代表的意义是不同的。例如在 555 这个数中，虽然用的数码都是“5”，但每个“5”代表着不同的意义：右边的“5”表示个位（即  $10^0$  位），其值为  $5 \times 10^0$ ；中间的“5”表示十位（即  $10^1$  位），其值为  $5 \times 10^1$ ；左边的“5”表示百位（即  $10^2$  位），其值为  $5 \times 10^2$ 。“555”这个数读作五百五十五，用数学表达式可写成

$$555 = 5 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 5 \times 10^0$$

对于任意一个十进制数  $R$ ，都可以写成以“10”为底的幂的和式

$$\begin{aligned} (R)_{10} &= \pm [K_n(10)^n + K_{n-1}(10)^{n-1} + \dots + K_1(10)^1 + K_0(10)^0 + K_{-1}(10)^{-1} + \dots + K_{-m}(10)^{-m}] \\ &= \pm \sum_{i=-m}^n K_i(10)^i \end{aligned}$$

式中  $m, n$  为正整数； $K_i$  可取 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 十个数码中的任意一个，它由  $R$  决定；圆括号内的“10”称为计数制的基数。所谓基数，就是在计数制中所用到数码的个数。当基数是十，每位计满十就向高位进一，即“逢十进一”，这种进位制就是十进制。字母  $R$  括号外边的“10”，用来表示括号内的数为十进制数。

除了十进制数之外，人们在日常生活和工作中还采用许多其它的进位计数制。例如时钟，六十秒为一分，六十分为一小时，它是六十进制的；旧秤十六两为一斤，它是十六进制的；数字系统中广泛采用的是二进制。

#### 二、二进制数

与十进制数类似，二进制数也具有三个特点：

1. 它采用两个不同的数字符号 0、1 来表示数值部分，我们也称这两个数字符号为

数码。

2. 它的计数规律是“逢二进一”。即低位计满二，向高位进一，低位记零。

3. 数码的位置（数位）不同，所代表的意义也不同。例如二进制数111，它的各位虽然都是1，但各个1代表不同的意义：右边的“1”表示 $2^0$ 位，其值为 $1 \times 2^0$ ；中间的“1”表示 $2^1$ 位，其值为 $1 \times 2^1$ ；左边的“1”表示 $2^2$ 位，其值为 $1 \times 2^2$ 。二进制数111可写成下面的数学表达式

$$(111)_2 = 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

对于“1111.11”这个数，它在十进制和二进制中各个“1”所表示的数值是很不相同的

$$\begin{array}{rcccccc} \text{数:} & 1 & 1 & 1 & 1 & . & 1 & 1 \\ \text{十进制:} & 10^3 & 10^2 & 10^1 & 10^0 & & 10^{-1} & 10^{-2} \\ \text{二进制:} & 2^3 & 2^2 & 2^1 & 2^0 & & 2^{-1} & 2^{-2} \end{array}$$

由此可列出十进制数与二进制数的对应关系表（见表1.1）。

表 1.1

整 数		小 数	
二进制数	十进制数	二进制数	十进制数
1	1	0.1	0.5
10	2	0.01	0.25
100	4	0.001	0.125
1000	8	0.0001	0.0625
10000	16	0.00001	0.03125
100000	32	0.000001	0.015625
1000000	64	0.0000001	0.0078625
10000000	128	0.00000001	0.00390625
⋮	⋮	⋮	⋮

任意二进制数 $R$ ，都可以写成以2为底的幂的和式

$$\begin{aligned} (R)_2 &= \pm [R_n(2)^n + R_{n-1}(2)^{n-1} + \dots + \\ & K_1(2)^1 + K_0(2)^0 + K_{-1}(2)^{-1} + \dots + K_{-m}(2)^{-m}] \\ &= \pm \sum_{i=-m}^n K_i(2)^i \end{aligned}$$

式中 $m$ ， $n$ 为正整数； $K_i$ 是0、1两个数码中的任意一个，它由 $R$ 决定；括号内的2称为二进制计数制的基数；字母 $R$ 括号外的数“2”表示括号里的数是二进制数。各种不同进位制的数均以括号外的数加以注明。

二进制数对于我们来说虽然很不习惯，但在数字系统中，却具有重要的实用价值。它在数字电子计算机、数字地震仪和其它数字仪器中，得到了广泛使用。其优点如下：

1. 每个二进制数只有两个数码（“0”或“1”），所以每位数都可以用具有两种不同稳定状态的元件来表示。制造具有两种稳态的元件比制造多种稳态的元件容易得多。事实上，许多元件本身都具备两种稳定状态。例如晶体管的饱和与截止；继电器的吸合与释放；指示灯的亮与灭……，只要确定其中一种状态表示“1”，另一种状态表示“0”，它就可以表示一位二进制数。

2. 采用二进制运算可节省设备。例如用十进制表示从0~999的数，必须用三位十进制数，而且每位必须具备十种不同稳定状态，因此共需三十种稳定状态。如果用二进制表示这些数，只用十位二进制数就足够了，因为十位二进制数按不同的组合方式可以表示1024个数，它的每一位只需两种稳定状态，故总共仅需二十种稳定状态。由此可见，用二进制数可以节省设备。

3. 因为二进制数中的“0”、“1”采用了两种差异很大的状态来表示，如脉冲的有无，晶体管的饱和截止，电位的高低等，所以机器工作稳定、可靠、抗干扰性强。

4. 采用二进制后能够应用逻辑代数来研究逻辑线路,而逻辑代数为逻辑线路的设计和分析提供了强有力的工具。

5. 在二进制数中只有“0”、“1”两个数码,它的加、减、乘、除等算术运算规则要比十进制简单得多。二进制的运算法则,只要记住加法三条,乘法三条就可以了,不象十进制那样,加法、乘法各有几十条法则。二进制运算法则如下

$$\begin{array}{ll} \text{加法: } 0+0=0 & \text{乘法: } 0\times 0=0 \\ 0+1=1+0=1 & 0\times 1=1\times 0=0 \\ 1+1=10 & 1\times 1=1 \end{array}$$

由于减法和除法分别是加法和乘法的逆运算,所以它们没有新的运算规则,下面仅举几个例子,看看二进制运算法则的具体应用

**加法**

$$\begin{array}{r} 1111 \\ +) 1010 \\ \hline 11001 \end{array}$$

**减法**

$$\begin{array}{r} 1101 \\ -) 1011 \\ \hline 0010 \end{array}$$

**乘法**

$$\begin{array}{r} 1101 \\ \times) 1010 \\ \hline 0000 \\ 1101 \\ 0000 \\ 1101 \\ \hline 1000010 \end{array}$$

**除法**

$$\begin{array}{r} 11100 \\ 1101 \overline{) 101110101} \\ \underline{1101} \\ 10100 \\ \underline{1101} \\ 1111 \\ \underline{1101} \\ 1001 \end{array}$$

从乘法的例题中可以看出,二进制数的乘法是这样进行的:当乘数为1时,把被乘数照抄一遍,它的最后一位与相应的乘数位对齐;当乘数为“0”时,其积全为“0”,不起任何作用;当所有的乘数位算完之后,只要把各个部分乘积相加就得到最终结果。可见,二进制数的乘法实际是由“加法”和“移位”两种操作实现的。

从除法的例题中可以看出,二进制数的除法实质上是由“减法”(减除数)和“移位”两种操作来实现的。

二进制虽然具有这些独特的长处,但它也有一些短处。如二进制数书写起来很长;只有0、1两种数码,容易写错;另外它与十进制的转换也不太直观。例如二进制数1100011,不能立即写出它所表示的十进制数,而必须经过一定的换算才能得出所对应的十进制数是99。为了弥补这些不足,还会经常用到八进制和十六进制。

### 三、八进制和十六进制数

比较十进制数与二进制数的数学表达式,发现它们之间除了十进制数的基数为“10”,二进制数的基数为“2”以外,几乎没有什么区别,即

$$(R)_+ = \pm [K_n(10)^n + K_{n-1}(10)^{n-1} + \dots + K_1(10)^1 + K_0(10)^0 + K_{-1}(10)^{-1} + \dots + K_{-m}(10)^{-m}]$$

$$(R)_- = \pm [K_n(2)^n + K_{n-1}(2)^{n-1} + \dots + K_1(2)^1 + K_0(2)^0 + K_{-1}(2)^{-1} + \dots + K_{-m}(2)^{-m}]$$

由此可以得出任意Q进制数R的数学表达式

$$(R)_Q = \pm [K_n Q^n + K_{n-1} Q^{n-1} + \dots + K_1 Q^1 + K_0 Q^0 + K_{-1} Q^{-1} + \dots + K_{-m} Q^{-m}]$$

式中 $m, n$ 为正整数;Q是进位制的基数; $K_i$ 可以是Q个数码中的任一个,它由R决定。

显然,当 $Q=8$ 时,它就是八进制数, $K_i$ 可以是0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7八个数码中的任一个,它的基数是8,计数规则是“逢八进一”。对于任意一个八进制数R,均可写成以8为底的幂的和式

$$(R)_8 = \pm [K_n(8)^n + K_{n-1}(8)^{n-1} + \dots + K_1(8)^1 + K_0(8)^0 + K_{-1}(8)^{-1} + \dots + K_{-m}(8)^{-m}]$$

$$= \pm \sum_{i=-m}^n K_i(8)^i$$

当  $Q=16$  时, 它就是十六进制数,  $K_i$  可取  $0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, \overline{0}, \overline{1}, \overline{2}, \overline{3}, \overline{4}, \overline{5}$  十六个数码中的任一个。其中  $\overline{0}, \overline{1}, \overline{2}, \overline{3}, \overline{4}, \overline{5}$  分别代表  $10, 11, 12, 13, 14, 15$ , 也有用  $A, B, C, D, E, F$  表示的。它的基数是  $16$ , 计数规则是“逢十六进一”。对任意一个十六进制数  $R$ , 均可写成以  $16$  为底的幂的和式

$$(R)_{16} = \pm [K_n(16)^n + K_{n-1}(16)^{n-1} + \dots + K_1(16)^1 + K_0(16)^0 + \dots + K_{-m}(16)^{-m}]$$

$$= \pm \sum_{i=-m}^n K_i(16)^i$$

通过对以上各种不同进制的讨论可以看出它们有两个共同规律:

1. 每一种进位制都有一个固定的基数  $Q$ , 它的每一位可取  $Q$  个不同的数码中的任一个, 计数规则是“逢  $Q$  进一”, 即低位计满  $Q$ , 向高位进一, 低位记零。
2. 每种进位制都可写成以  $Q$  为底的幂的和式。每一位数码  $R_i$  对应于一个固定的值  $Q^i$ ,  $Q^i$  称为  $R_i$  的“权”。所以又称以  $Q$  为底的幂的和式为按“权”展开式。如  $8 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 1$  码的四位二进制数  $1111$ , 自左向右, 每位数码对应的“权”分别是  $8 (2^3), 4 (2^2), 2 (2^1), 1 (2^0)$ 。

## 第二节 各种数制之间的相互转换

同一客观事物的数量可以用各种不同的进位制数表示, 那么它们之间究竟存在什么内在的联系呢? 下面就来讨论它们相互转换的规律。本节将把十进制数与二进制数之间的转换作为重点, 分析它们之间转换的原理及方法, 并由此导出十进制数与其它进制数间的转换方法。

### 一、十进制数与二进制数的相互转换

#### 1. 十进制数转换成二进制数

将一个简单的十进制数, 如  $0 \sim 9$  用二进制数表示出来是很容易的。根据二进制数“逢二进一”的计数规则, 它们分别是  $0, 1, 10, 11, 100, 101, 110, 111, 1000, 1001$ 。写成数学式便是

$$\begin{aligned} (0)_+ &= (0)_= \\ &\vdots \\ (5)_+ &= (101)_= \\ &\vdots \\ (9)_+ &= (1001)_= \end{aligned}$$

但是, 要将一个十进制整数如  $97$  转换成二进制整数, 显然就不能象前面那样一一写出十进制数  $0 \sim 97$  与二进制数的对照表, 下面我们就来讨论实现这种转换的原理和方法。

$$\text{设} \quad (97)_+ = (K_n K_{n-1} \dots K_1 K_0)_= \quad (1-1)$$

由于任何一个二进制数都可以写成它的按权展开式, 因此 (1-1) 式可以写成

$$(97)_+ = K_n(2)^n + K_{n-1}(2)^{n-1} + \dots + K_1(2)^1 + K_0(2)^0 \quad (1-2)$$

现在的问题是如何确定  $K_n, K_{n-1}, \dots, K_1, K_0$  的数值究竟是“0”, 还是“1”呢? 可将 (1-2) 式两边同除以  $2$  得

$$48 \frac{1}{2} = [K_n(2)^{n-1} + K_{n-1}(2)^{n-2} + \dots + K_1] + \frac{K_0}{2} \quad (1-3)$$

在 (1-3) 式右边括号里,  $K_n \sim K_1$  各位的数值不是“0”便是“1”,  $2^{n-1} \sim 2^1$  都是  $2$  的正整

数幂，故括号内的数为整数。根据等式两边整数和小数部分必须分别对应相等的性质，可以得到

$$\frac{1}{2} = \frac{K_0}{2} \quad \text{即确定出 } K_0 = 1, \text{ 它正好是 } \frac{97}{2} \text{ 的余数。}$$

现将  $K_0 = 1$  代入 (1-3) 式，并移项到等式左边可得

$$48 = 2[K_n(2)^{n-2} + K_{n-1}(2)^{n-3} + \dots + K_2] + K_1 \quad (1-4)$$

同样将 (1-4) 式两边同除以 2，可得

$$24 = [K_n(2)^{n-2} + K_{n-1}(2)^{n-3} + \dots + K_2] + K_1 \quad (1-5)$$

由 (1-5) 式可知  $K_1 = 0$ ，它正好是  $\frac{48}{2}$  的余数。

用类似的方法继续进行下去，可求得  $K_0 \sim K_n$ ，用竖式表示为

2	97	
2	48	余 1 …… $K_0$
2	24	余 0 …… $K_1$
2	12	余 0 …… $K_2$
2	6	余 0 …… $K_3$
2	3	余 0 …… $K_4$
2	1	余 1 …… $K_5$
	0	余 1 …… $K_6$

因为商为 0，再继续除 2，其余数永远为 0，即  $K_6$  已是最高位的系数。最后按  $K_6 \sim K_0$  的顺序排列起来，便得转换后的二进制数，即

$$(97)_+ = (K_6 K_5 K_4 K_3 K_2 K_1 K_0)_- = (1100001)_-$$

这个例子具有一般性，它告诉我们，当把十进制整数转换为二进制整数时，只要把该数除以 2，其余数就是二进制数的末位数  $K_0$ ，以后依次除 2，可分别求出  $K_1 \sim K_n$ ，直到商为“0”时结束，最后按  $K_n, K_{n-1}, \dots, K_1, K_0$  的顺序排列起来，便得到转换后的二进制数。把这个方法总结成一句话就是“除 2 取余”。

假如被转换的是十进制小数，则采取另一种方法。

例如将十进制小数 0.375 转换为二进制小数。

$$\text{设} \quad (0.375)_+ = (0.K_{-1}K_{-2}\dots K_{-m})_- \quad (1-1')$$

把 (1-1') 式写成按权展开式，得

$$(0.375)_+ = K_{-1}(2)^{-1} + K_{-2}(2)^{-2} + \dots + K_{-m}(2)^{-m} \quad (1-2')$$

将 (1-2') 式两边同乘以 2 得

$$0.75 = K_{-1} + [K_{-2}(2)^{-1} + K_{-3}(2)^{-2} + \dots + K_{-m}(2)^{-m+1}] \quad (1-3')$$

由于等式两边整数和小数部分必须分别对应相等，所以  $K_{-1} = 0$ 。同时 (1-3') 式又可以写成

$$0.75 = K_{-2}(2)^{-1} + K_{-3}(2)^{-2} + \dots + K_{-m}(2)^{-m+1} \quad (1-4')$$

再将 (1-4') 式两边同乘以 2 得

$$1.50 = K_{-2} + [K_{-3}(2)^{-1} + K_{-4}(2)^{-2} + \dots + K_{-m}(2)^{-m+2}] \quad (1-5')$$

同理由 (1-5') 式可得  $K_{-2} = 1$ 。同时 (1-5') 式又可写成

$$0.5 = K_{-3}(2)^{-1} + K_{-4}(2)^{-2} + \dots + K_{-m}(2)^{-m+2} \quad (1-6')$$

用类似的方法继续下去，便可求出  $K_{-1} \sim K_{-m}$ ，用竖式表示为