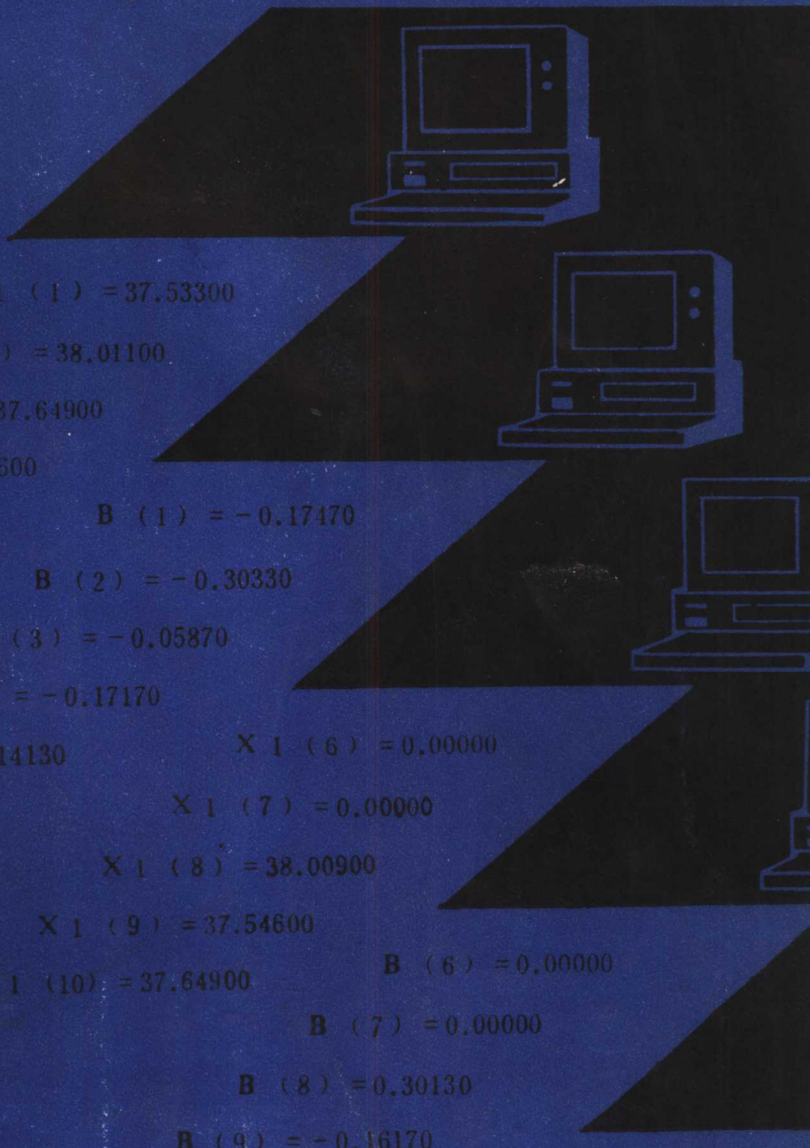
A.J. 鲍文斯 著



X1（1）=37.53300

X1（2）=38.01100

X1（3）=37.64900

X1（4）=37.53600

X1（5）=37.84900

B（1）=−0.17470

B（2）=−0.30330

B（3）=−0.05870

B（4）=−0.17170

B（5）=0.14130

X1（6）=0.00000

X1（7）=0.00000

X1（8）=38.00900

X1（9）=37.54600

X1（10）=37.64900

B（6）=0.00000

B（7）=0.00000

B（8）=0.30130

B（9）=−0.16170

B（10）=−0.05870

数字测量仪器教程

中国计量出版社

数字测量仪器教程

A.J.鲍文斯 著

张乃国 等译　　倪伟清 等校

中国计量出版社

内 容 提 要

本书是菲利浦测试仪器公司数字测量仪器课的教材．全书重点讲述测量方法，基础知识写得精练，讲述方法新颖，应用篇着重阐述仪器准确度及防护技术等内容．书末附有丰富的题及解答，可供大专院校师生及从事电子测量技术、数字仪器研制和生产的科技人员自学，尤其适于工厂培训技术人员使用。

DIGITAI INSTRVMENTATION

A.J.Bouwens

McGraw-Hill 1984

数字测量仪器教程

A.J.鲍文斯 著

张乃国 等译 倪伟清 等校

中国计量出版社出版

（北京和平里11区7号）

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本787×1092 1/16 印张 15.75

字数 380 千字 印数1—8000

1987年5月第一版 1987年5月第一次印刷

统一书号 15210·702

定价 3.60 元

译 者 序

本书是菲利浦测试仪器公司数字测量仪器课的教材，是作者在该公司多年从事数字测量仪器研制与教学经验的总结。全书以讲述基本测量方法为重点，基础知识部分写得比较精练，选材新颖，理论联系实际。特别对测量准确度、仪器准确度以及防护技术的阐述，更有特点。书末附有测量系统、IEC总线及术语解释等内容，对读者甚有裨益。每章都附有丰富的习题和解答（不只是给出答案），这对于自学者很有好处。所以我们翻译出来以飨读者。

本书可供大专院校有关师生及从事电子测量技术、数字仪器研制和生产的科技人员学习或培训使用。

参加本书初稿翻译的有张乃国、戴世铮、李厚福、梁任秋、张中一、杜龙生、倪建农、张邦灿、张祖刚、黄志杰、金恺、苟剑波、谭林、韩伟、邱虹、张丹虹、沈立颖、杜军、郑焱、杨为民、王跃、刘建。参加初稿校订的有倪伟清、罗什一、梁任秋、张中一 最后由张乃国通审定稿。杜龙生、吉长泽、胡剑林、张亮参加誊稿，北方交通大学蒋焕文教授曾对此书给予推荐，在此一并表示感谢。

限于译校审者水平，缺点与不妥之处恳请读者批评指正。

张 乃 国

1986年6月于清华大学

前　　言

当今，日益增多的电子测量仪器正趋于数字化，在一台仪器里包含有数字电路、数字式显示装置以及数字式遥控装置。初次涉足于数字应用技术的人会碰到许许多多关于数字电路基础知识的文章和课程，却较少见到探讨数字电路在测量仪器中应用的专论，但这种知识对于数字仪器的使用者是非常重要的，它能帮助使用者详细地了解仪器的各种功能，使用起来才能得心应手。

本书将对这方面技术进行详尽的讨论，在内容上分成三大部分：

在第一篇“二进制基础理论与逻辑电路”中论述逻辑元件的基本原理。先介绍数制和布尔代数，再详细地讨论各种逻辑元件。

在第二篇“数字计数器与计时器”中讨论数字仪器的核心问题。虽然数字计数器问世不久，但它已经在电子测量领域里引起了一场革命。因为有了计数器，要使仪器达到以往在实验室的严格条件下才能实现的准确度，已不是什么难事了。大约30多年前出现了第一代数字计数器，但由于使用的是电子管，所以它的体积、重量和耗电量均较大。在60年代初期出现了第二代数字计数器，由于采用了晶体管电路，使仪器变得相当轻巧，但其基本技术指标仍然保持在与电子管型式大致相同的水平上。60年代末期数字集成电路的发展，导致第三代计数器诞生。同时更先进的集成技术（金属氧化物半导体电路，能在一个基片上制作出数字计数器的整个电路——即所谓的大规模集成电路）又促使生产出更新的计数器，最先研制的几种产品已经投放市场。

在第三篇“数字式电压表与万用表”中将要研究数字电压表（DVM）的工作原理。虽然最早的数字电压表体积大，而且价钱昂贵，但不久它们就越来越流行，其根本原因就是对这种仪器不断增加的需求和制造技术的发展，两者相互促进，使当今的数字电压表和数字万用表（DMM）成为成本低、应用广的精密仪器。

与模拟式电压表和万用表相比，数字式仪表为测量技术的发展开辟了新天地，首先在测量准确度上，模拟式显示装置（大多采用动圈式表头）的测量准确度主要由量程及使用者能否正确读取示值所决定。采用数字式显式装置就避免了分辨力的问题，因为我们可以按需要扩大量程的十进制位数，这样就发挥了精密测量技术的各种优点，使得六位数字显示的数字电压表在目前得到了广泛的应用。

数字式仪表的另一个重要特点是采用模-数转换技术，可以把测量数据进行长距离传送，输入到计算机里去处理并储存起来，还可以把它们和预置的参数进行比较，这样就为实现自动控制开辟了道路。

最后一个方面将留在附录中论述，帮助读者更深入地了解测量系统和IEC/IEEE总线。

本书以菲利浦（Philips）测试仪器公司工程师数字测量仪器课为基础而编写的，该课中各种有价值的论述为本书提供了巨大帮助。

鲍文斯

目　　录

第二篇　数字计数器与计时器

第三篇 数字电压表与万用表

第 一 篇

二进制基础理论与逻辑电路

第一章 数 制

凡数字设备几乎都采用二进制，因为它很简单．二进制只用两个数字符号就能表示出任意一个数．由于数字仪器通常用不同的电平代表数．因此，使用二进制比较方便．如果采用十进制，电路必须准确地表达不同数的十个电平．当然，精心设计这种电路也是可能的，但电路极为复杂而且可靠性很差．

1.1 几种主要数制

在详细分析二进制之前，我们首先简要复习一下目前通用的几种数制．

一、十 进 制

十进制是最常用的数制，因为人皆有十个手指．大家都知道数1972的构成是：右边最低数位LSD(least significant digit）表示10的0次方（10^0）的若干倍，右边第二位表示10^1的若干倍，等等，直到左边的最高数位MSD（most significant digit）为止，该数位在上例中表示10^3的若干倍．因此，该数可以表示为：

$$1972 = 1\times10^3 + 9\times10^2 + 7\times10^1 + 2\times10^0$$
$$= 1000 + 900 + 70 + 2$$

任何一个数（包括所有自然数）都可以表示成上面的形式，小数也可以表示成类似的形式．例如：

$$19.72 = 1\times10^1 + 9\times10^0 + 7\times10^{-1} + 2\times10^{-2}$$
$$= 10 + 9 + 7/10 + 2/100$$

同罗马数字比较，十进制的优点是：十进制的位以10为倍数，所以算术运算相当简单．例如，乘以10，则数的各位向左移一位，而除以10，就向右移一位．例如：

1972向左移位得19720　　　1972向右移位得197.2

一般，可以把r进制数表示成如下形式：

$$a_n\times r^n + a_{n-1}\times r^{n-1} + \cdots + a_2\times r^2 + a_1\times r + a_0$$
$$+ a_{-1}\times r^{-1} + a_{-2}\times r^{-2}\cdots a_{-m}\times r^{-m}$$

系数 a 可以在 0 到 $r-1$ 的范围内取值。因此，二进制（$r=2$）a 可以取两个值：0 和 1；八进制（$r=8$）可以取八个值：0 到 7；十进制（$r=10$）可以取十个值：0 到 9；十六进制（$r=16$）可取16个值：0到F（见表1.1），因为只有十个数字符号可用于记数，所以，我们借用字母表中的前六个字母作为十六进制的另外六个符号。

二、二 进 制

为了简化电路设计，提高电路可靠性，数字设备通常采用二进制数制。二进制是以 2 为基数，所以只有两个数字符号：0和1。仪器只需辨别两种独立状态即可。这两种状态可以是无脉冲（0）或有脉冲（1）；低电平（0）或高电平（1）；开关打开（0）或开关闭合(1)；无电流（0）或有电流（1）等等。

它所用的记数法如表 1.1 所示，该表列出了对应于一系列十进制数的二进制数。从表中可以看出，十进制数100需要用 7 位二进制数表示。通常把二进制的 0 和 1 统称作“位”

表 1.1　不同基数的数值

十进制			二进制							八进制			十六进制	
10^2	10^1	10^0	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	8^2	8^1	8^0	16^1	16^0
	0	0				0	0	0	0		0	0		0
	0	1				0	0	0	1		0	1		1
	0	2				0	0	1	0		0	2		2
	0	3				0	0	1	1		0	3		3
	0	4				0	1	0	0		0	4		4
	0	5				0	1	0	1		0	5		5
	0	6				0	1	1	0		0	6		6
	0	7				0	1	1	1		0	7		7
	0	8				1	0	0	0		1	0		8
	0	9				1	0	0	1		1	1		9
	1	0				1	0	1	0		1	2		A
	1	1				1	0	1	1		1	3		B
	1	2				1	1	0	0		1	4		C
	1	3				1	1	0	1		1	5		D
	1	4				1	1	1	0		1	6		E
	1	5				1	1	1	1		1	7		F
1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	4	4	6	4
1	2	7	1	1	1	1	1	1	1	1	7	7	7	F

(bits)，这是二进制数字（binary digits）的缩写。

我们可以看到最低数位（LSD）仍在最右边。当我们从右向左移一位时，每位数字对应的以 2 为基数的幂次数加 1。如果使用逐次降幂的负指数，也可以表示小数；小数点右边的

数字按幂次递减顺序排列，每一位对应的以 2 为底的幂是其前一位幂的一半。因此，二进制数

$$1.1101 = 1 \times 2^{0} + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} + 0 \times 2^{-3} + 1 \times 2^{-4}$$

用十进制可表示为：

$$1 + 1/2 + 1/4 + 0 + 1/16 = 1.8125$$

应该注意到，尽管用二进制形式可以精确地表示十进制整数，但十进制小数一般却只能近似地转换为二进制数。实际误差将取决于使用的二进制数字，其值通常很小。尽管如此，这并不意味二进制的准确度低于十进制；要表示相同准确度的一个量，二进制要求的位数要比十进制多。

三、八 进 制

广泛用于计算机技术的数制是八进制。该数制易于进行二进制与八进制间的相互转换。因此，有较大的实用性。八进制包括以下几个数字符号：0，1，2，3，4，5，6，7。大于7的数用八进制表示时，需要用几个数字符号。例如：

$$\begin{aligned} 765_8{}^* &= 7 \times 8^2 + 6 \times 8^1 + 5 \times 8^0 \\ &= 7 \times 64 + 6 \times 8 + 5 \times 1 = 501_{10} \end{aligned}$$

因为八进制的基数为 8，而 $8 = 2^3$，所以，利用表1.2很容易将八进制转换为二进制。

表 1.2　八进制与二进制的关系

二进制	八进制	二进制	八进制
0 0 0	0	1 0 0	4
0 0 1	1	1 0 1	5
0 1 0	2	1 1 0	6
0 1 1	3	1 1 1	7

例如，把二进制数101011分成 3 位一组，直接转换为八进制：

二进制：101/011

八进制：5　　3

检验一下，二进制数101011等于

$$1 \times 2^5 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 43_{10}$$

八进制53等于

$$5 \times 8^1 + 3 \times 8^0 = 43_{10}$$

四、十 六 进 制

应用于计算技术的另一种数制是十六进制。该数制以 16 为基数，表1.1已列出所使用的符号。正如八进制一样，十六进制与二进制之间的转换也很容易。因为$2^4 = 16$，所以十六进制的一位数对应于二进制的四位数字。转换可参考表1.1进行，例如：

* 765_8表示以八进制书写的数765

$$225_{10} = 11100001_2 = E1_{16} = 341_8$$

1.2 数制的转换

一、二进制/八进制转换为十进制

1. 最高数位乘以8。
2. 乘积与下一数位相加，再乘以8。
3. 重复步骤2，直到最低数位.
4. 将最低数位值与最后得到的乘积相加.
5. 得到的结果就是所要求的十进制数. 例如:

二进制　111/011/101/001

八进制　7　3　5　1

转换方法　$[(7\times8+3)\times8+5]\times8+1$

$$7\times8+3=59$$
$$\times 8$$
$$472+5=477$$
$$\times 8$$
$$3816+1=3817_{10}$$

这种方法不仅适用于整数，也适用小数，例如:

二进制　111/011. 101/001

八进制　7　3 .　5　1

转换方法　$(7\times8+3)+(1\times8^{-1}+5)8^{-8}=$

59.641

同理，对于以 r 为基数的数，用 r 去乘整数部分的每个数，用 r 去除小数部分的每个数，两部分结果相加，就是其等效十进制数.

二、十进制转换为八进制/二进制

1. 十进制数除以8，并记下余数（r_1）.
2. 前一步所得的商再除以8，并记下余数（r_2）.
3. 重复步骤2，直至商为0.
4. 所要求的数就是$r_n r_{n-1}\cdots r_2 r_1$.

例如，十进制数3817_{10}转换为八进制数

$$3817\div8=477\div8=59\div8=7\div8=0$$

32	40	56	0
61	77	$3=r_3$	$7=r_4$
56	72		
57	$5=r_2$		
56			
$1=r_1$			

结果为7351（八进制）或111/011/101/001（二进制）。

用类似的方法，可以将十进制小数转换为二进制/八进制/十六进制小数，不同之处只是除法变乘法，用乘积的整数部分代替余数。例如，十进制数59.641_{10}的转换

$$59 \div 8 = 7 \div 8 = 0$$

$$\begin{array}{cc} \underline{56} & \underline{0} \\ 3 & 7 \end{array}$$

$$0.641 \times 8 = 5.128$$

$$0.128 \times 8 = 1.024$$

$$0.024 \times 8 = 0.192$$

$$0.192 \times 8 = 1.536$$

结果为 73.5101（八进制），3B.A41（十六进制）或111/011/101/001/000/001(二进制)。一般来说，十进制转化为 r 进制，除了用 r 代替上例的 8 以外，转换方法相同。

1.3 二进制数的算术运算

二进制运算的基本规则与十进制完全相同。因为二进制以 2 为基数，所以乘以 2 就向左移位一次，除以 2 就向右移位一次。例如，二进制数 $1001 = 9_{10}$，向左移一位，变为：

$$\begin{aligned} 10010 &= 1\times 2^4 + 0\times 2^3 + 0\times 2^2 + 1\times 2^1 + 0\times 2^0 \\ &= 16_{10} + 0 + 0 + 2_{10} + 0 \\ &= 18_{10} \end{aligned}$$

即该数增加了一倍。

向右移一位，得到：

$$\begin{aligned} 100.1 &= 2\times 2^2 + 0\times 2^1 + 0\times 2^0 + 1\times 2^{-1} \\ &= 4 + 0 + 0 + \frac{1}{2} \\ &= 4\frac{1}{2_{10}} \end{aligned}$$

即该数减小了一半。

这种标准运算适用于任何进制数，但二进制的运算规则尤为简单。

一、加　法

加法规则只有四种：

$$0 + 0 = 0 \qquad 1 + 0 = 1$$

$$0 + 1 = 1 \qquad 1 + 1 = 0 \text{ 并进位 } 1$$

举例：

$$\begin{array}{l} 00111 = 7_{10} \\ \underline{00101 = 5_{10}} \\ 01100 = 12_{10} \text{（第二位、第三位、第四位得到进位）} \end{array}$$

二、减 法

减法运算时，有时需要向前一位借位，例如：

$$\begin{array}{r} 01100 = 12_{10} \\ -\ 00111 = 7_{10} \\ \hline 00101 = 5_{10} \end{array}$$
（向第二位、第三位、第四位借位）

三、乘 法

二进制乘法非常简单，它有四个运算规则：

$0\times0=0 \qquad 0\times1=0$

$1\times0=0 \qquad 1\times1=1$

例如：

$$\begin{array}{r} 111 = 7_{10} \\ \times\ 101 = 5_{10} \\ \hline 111 \\ 000 \\ 111 \\ \hline 10011 = 35_{10} \end{array}$$
（给前四位进位）

四、除 法

除了中间过程的乘法和减法必须按二进制规则运算外，二进制除法与十进制除法方法相同。例如：

$$\begin{array}{r} 10101 = 21_{10} \\ \div\ 11 = 3_{10} \\ \hline 111 = 7_{10} \end{array}$$

或者

$$\begin{array}{r} 111 \longrightarrow 7_{10} \\ 11\overline{)10101} \\ \underline{11} \\ 100 \\ \underline{11} \\ 011 \\ \underline{11} \\ 0 \end{array}$$

1.4 补 码

在算术运算中，把减法转化为补码的加法运算更为方便。r进制有两种补码形式：r进制补码及（$r-1$）补码。

r 补码

整数部分是n位数字的正数N，其r进制补码定义为r^n-N。

1279_{10}的10进制补码为：$10^4-1279=8721_{10}$

127_8的 8 进制补码为：$10_8^3-127_8=651_8$

101_2的 2 进制补码为：$10_2^3-101_2=011_2$

小数部分的r进制补码根据同样道理定义为(r^0-N)：

0.1279_{10}的r进制补码为：$1-0.1279=0.8721_{10}$

0.127_8的r进制补码为：$1-0.127_8=0.651_8$

0.101_2的r进制补码为：$1-0.101_2=0.011_2$

二、$(r-1)$补码

$(r-1)$补码的定义较为复杂。对于以r为基数，整数部分n位、小数部分为m位的正数N，$(r-1)$补码定义为：

$$r^n-r^{-m}-N$$

举例说明如下：

1279_{10}的9补码为$10^4-1-1279=8720_{10}$（无小数部分，所以$m=0$，$r^{-m}=1$）。

0.1279_{10}的 9 补码为：$1-10^{-4}-0.1279=0.8720$（无整数部分，所以$n=0$，$r^n=1$）

12.79_{10}的 9 补码为：$10^2-10^{-2}-12.79=87.20$

八进制举例：

127_8的 7 补码为：$10_8^3-1-127_8=650_8$

0.127_8的 7 补码为：$1-10_8^{-3}-0.127_8=0.65_8$

1.27_8的 7 补码为：$10_8-10_8^{-2}-1.27_8=6.50_8$

二进制举例：

101_2的 1 补码为：$10_2^3-1-101=010_2$

0.101_2的 1 补码为：$1-10_2^{-3}-0.101_2=0.010_2$

1.01_2的 1 补码为：$10_2-10_2^{-2}-1.01_2=0.10_2$

二进制	1 补码	2 补码
101	010	011
0.101	0.010	0.011
1.01	0.10	0.11

八进制	7 补码	8 补码
127	650	651
0.127	0.650	0.651
1.27	6.50	6.51

由此可知，只要 $(r-1)$ 补码的最低数位加1，即可得到 r 进制补码。对于二进制，只要将二进制各位求反，就可得到1补码，再加1，就可得到2进制补码；例如，对于二进制数11011011将其1补码00100100加1，就得到它的2进制补码00100101。

上表列出了另外一些例子。

三、用 r 进制补码做减法

两个正数相减 $(M-N)$ 方法如下：首先将减数 N 的 r 进制补码与被减数 M 相加。如果有进位，舍去；如果没有进位，将所得的数取 r 进制补码，并添以负号。举例说明如下：

$M=1972$

$N=1279$　十进制补码为8721

$$\begin{array}{r} 1972 \\ +8721 \\ \hline (1)0693 \end{array}$$

进位为1，结果为

$$\underline{\underline{+693}}$$

$M=1279$

$N=1972$　十进制补码为8028

$$\begin{array}{r} 1279 \\ +8028 \\ \hline 9307 \end{array}$$

因为无进位，所以取补码，结果为

$$\underline{\underline{-693}}$$

二进制举例：

$M=1100$

$N=0111$　二进制补码1001

$$\begin{array}{r} 1100 \\ +1001 \\ \hline (1)0101 \end{array}$$

进位为1，结果为

$$\underline{\underline{+101}}$$

$M=0111$

$N=1100$　2进制补码0100

$$\begin{array}{r} 0111 \\ +0100 \\ \hline 1011 \end{array}$$

无进位，结果为

$$\underline{\underline{-101}}$$

四、用 $(r-1)$ 补码做减法

除了使用循环进位外，方法与用 r 进制补码做减法相同。两个正数相减 $(M-N)_r$，首先将减数 N 的 $(r-1)$ 补码与被减数相加，如果有进位，将其加到最低数位上，如果无进位，将所得数取 $(r-1)$ 补码，并添以负号。例如：

$M=19.72$

$N=12.79$　9补码

$$\begin{array}{r} 19.72 \\ +87.20 \\ \hline 106.92 \end{array}$$

加进位

$$\begin{array}{r} +\quad \rightarrow 1 \\ \hline \underline{\underline{6.93}} \end{array}$$

$M=12.79$

$N=19.72$　9补码

$$\begin{array}{r} 12.79 \\ +80.27 \\ \hline 93.06 \end{array}$$

无进位，取补码

$$\underline{\underline{-6.93}}$$