

测量仪器中的电子技术

李振玉 史大亮 张绍泉 编译

国防工业出版社

测量仪器中的电子技术

人箇中

[illegible]

李振玉 史大亮 张绍泉 编译

[illegible]

《燕京雜記》中載：「燕京人好飲酒，酒後必飲茶，以解酒氣。其茶名曰：『燕京茶』。其茶之味，清香而醇，不似他處之茶，其味苦澀。其茶之製法，亦與他處不同。其茶之葉，小而圓，色綠而光。其茶之湯，白而清，不似他處之茶，其湯黃而濁。其茶之飲法，亦與他處不同。其茶之飲法，以沸水沖之，其味自出。其茶之飲法，以沸水沖之，其味自出。」

在江蘇路過人平遊浙江杭州西湖遊覽記

国防工業出版社

(京) 新登字106号

内 容 简 介

本书主要讲述测量、控制与通信等方面的电子学原理、实用电子技术、新型电子器件及测量仪器方面的知识。

全书共分十四章。第一至第四章介绍了电气测量参数、周期信号的特性、电源技术以及传感器的基本知识。第五至第九章介绍了伺服系统、开关技术、运算放大器的各种应用、以及频率和时间的测量技术等。第十至第十三章介绍了各种数字逻辑电路和时序电路、微处理机的有关知识、以及A/D、D/A转换和输入输出接口。第十四章从系统的角度介绍了最佳测量系统的有关问题。

书中每章都有实验和习题,以及应用实例。内容深入浅出,图文并茂。

本书主要是面向非电类专业的科技工作人员的,也可作为电子测量、控制与通信专业的工程技术人员的参考书。

测量仪器中的电子技术

李振孟 史大亮 张绍泉 编著

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京市大兴兴达印刷厂印装

787×1092毫米 16开本 印张22¹/₂ 526千字

1993年4月第一版 1993年4月第一次印刷 印数: 00001—1000册

ISBN 7-118-00936-9/TN·159 定价: 19.00元

前 言

随着科学技术的发展和普及，没有哪一门学科或哪一个生产、科研单位不用到电子测量仪器。越来越多的非电子专业的电子测量仪器使用者已不满足“知其然、不知其所以然”，希望深入学习与电子测量仪器有关的电子学基础知识，以期在电子测量仪器的使用、维修和开发等方面大显身手。为此，我们参照了美国霍华德V. 斐尔姆斯坦特等编著的《电子学与测量仪器》一书，编译了这本书，供广大非电子专业的科技人员、仪器仪表的使用者和维护人员、以及电子技术爱好者学习参考。

本书的第一、二、五、六章由张绍泉编译；第七、八、九、十章由李振玉编译；第十一、十二章由卢玉民编译；第三、四、十三、十四章由史大亮编译。在本书的编译过程中，张钰元高级工程师帮助整理了部分章节，汤国权高级工程师审阅了全书，在此一并表示感谢。

限于编译者水平，书中定有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编译者

目 录

第一章 电子编码的信息	1
1-1 电气数据域	1
1-2 电测量中的域转换	4
1-3 模拟式万用表	8
1-4 数字万用表	10
实验建议	12
习题	13
第二章 周期性波形及示波器	15
2-1 电信号的频率成分	15
2-2 周期信号幅度测量	18
2-3 电抗电路	20
2-4 用数字万用表测量交流信号	23
2-5 示波器	25
实验建议	30
习题	31
第三章 电源	33
3-1 交直流变换	33
3-2 过载保护	34
3-3 电源变压器	35
3-4 整流器电路	36
3-5 电源滤波电路	40
3-6 稳压	42
3-7 稳流源	45
3-8 电池	46
3-9 应用: 双输出稳压电源	49
实验建议	49
习题	50
第四章 输入传感器与测量系统	52
4-1 测量原理	52
4-2 计数测量	54
4-3 时间和频率测量	58
4-4 能量转换传感器	60
4-5 电阻性传感器	63
4-6 限流传感器	66
4-7 应用: 检测离散事件	70
实验建议	72

习题	73
第五章 运算放大器和伺服系统	75
5-1 伺服系统和自动零点测量	75
5-2 零点比较法测量电压	76
5-3 电压跟随器	80
5-4 电流跟随器和加法放大器	83
5-5 积分器 (电荷跟随器)	87
5-6 放大器线路的实用考虑	89
5-7 应用: 极谱分析法	94
实验建议	95
习题	96
第六章 可编程模拟开关	98
6-1 开关的工作原理	98
6-2 机械开关	100
6-3 固态开关	103
6-4 开关电路的瞬态特性	105
6-5 可编程电压开关和定时电路	109
6-6 取样测量	114
6-7 应用: 可编程增益放大器	116
实验建议	117
习题	118
第七章 固体开关和放大器	121
7-1 双极器件	121
7-2 场效应器件	125
7-3 模拟开关	128
7-4 电源控制开关	130
7-5 晶体管放大器	133
7-6 反馈放大器	138
7-7 运算放大器	139
7-8 应用: 稳压和可调电源	141
实验建议	142
习题	143
第八章 线性及非线性运算放大器的应用	145
8-1 差分放大器	145
8-2 整形	147
8-3 模拟乘法器	150
8-4 有源滤波器和调谐放大器	153
8-5 再生振荡器	158
8-6 幅度调制	160
8-7 应用: 锁相放大器	162
实验建议	165

习题	166
第九章 频率、时间和积分的数字式电压表	168
9-1 频率和时间的数字式测量	168
9-2 比较器和施密特触发器	171
9-3 电压-频率转换器	173
9-4 双斜率转换器	177
9-5 时域运算	179
9-6 频率调制与解调	183
9-7 应用: 按键式译码器	184
实验建议	185
习题	186
第十章 逻辑门、触发器和计数器	189
10-1 逻辑门	189
10-2 逻辑门的应用	195
10-3 锁存器和寄存器	199
10-4 触发器	202
10-5 计数电路	204
10-6 移位寄存器	210
10-7 应用: 逻辑探测器	211
10-8 应用: 状态计数器的定序器	212
实验建议	214
习题	214
第十一章 数字器件及数字信号	217
11-1 逻辑系列	217
11-2 集电极开路门和三态逻辑门	224
11-3 数字信号调整	227
11-4 数字数据传输	232
11-5 应用: 某些MSI和LSI器件	238
实验建议	243
习题	244
第十二章 微型计算机	247
12-1 微处理机	248
12-2 数字数据和算术运算	255
12-3 存储器	258
12-4 输入输出操作	263
12-5 外围设备	266
12-6 程序设计、语言和操作系统	270
实验建议	275
习题	276
第十三章 数-模、模-数转换器及输入/输出接口	278
13-1 微型计算机的输入输出接口	279

13-2 实时时钟	283
13-3 数-模转换器	287
13-4 模-数转换器	293
13-5 取样保持电路	297
13-6 模拟输入输出系统	299
13-7 转换系统的应用	303
实验建议	306
习题	307
第十四章 最佳测量与控制系统	310
14-1 时变信号的取样	310
14-2 用压缩带宽提高信噪比	315
14-3 用相关技术提高信噪比	322
14-4 速率的测量	330
14-5 控制	335
14-6 自动优化系统	343
14-7 结束语	347
实验建议	347
习题	349

第一章 电子编码的信息

我们生活在电子工业蓬勃发展的时代。在专业、社会及业余生活等各方面，几乎没有不受电子装置重大渗透影响的领域。这种情况的出现，是由于近代电子装置能极方便地把一种形式的信息，转换成另一种形式的信息。例如，像在测量、控制、传输系统中那样，它还能在计算、相关、诊断系统中处理信息。在一个电子系统中，要转换或处理的信息，是作为电信号的一种特定性质而编码的。这里编码是指把一种通信系统中的信息形式转换为另一种信息形式。由于信号和数据以电量来编码的方法是很有限制的，因此复杂电子系统的功能可按其所用的电数据编码和变换的方式理解。电子部件的研究，也可按它们在数据编码和变换过程中所起的作用来分，尽管它们花样很多、发展很快，但按这样分类以后可大大简化了。

本章从描述每种数据编码方式的主要特性开始，这些方式我们称之为数据域，可把电信号分为模拟域、时间域及数字域三类。电量有四种：电荷、电流、电压及功率，以阐明代表信息的信号特性。然后用数据变换或数据域转换来介绍电子测量过程，这些转换是电子测量过程本身所涉及的。本章的最后，是讨论基本的计量仪表和万用表（动圈指针式及数字式），其中包括研究直流电路、电流和电压的测量原理。

1-1 电气数据域

电气数据域是电量或电量组合和变形的信息编码方式。例如，光电池的电压，与照射在电池上的光强有关，并可用光强来表示，如图 1-1 所示。光强、电压及表头指示为数据域，光电池和电压表为域间转换器。因而电压是用作表征数据—编码的电量或域。同样，从盖格管出来的电压脉冲频率与到达管子的辐射强度有关，这种关系是已知的。此时，频率是传递信息的信号特征或表征电数据域。

当然，并非所有的数据域都是电气的。信息可由光、物理配置、电阻、温度、磁场强度、化学成份、空气压力、印刷符号及其它许多量来表示。这些非电数据域的信息可用一种称为输入传感器的域间转换器把它变换成某一种电数据域。光电池和盖格管是输入传感器的两个例子。把电气编码信息变换成非电域的域间转换器，称为输出传感器。例如，数字显示器、电动机、扬声器及电视图像显示管等，都是输出传感器。电气数据域可分成三类：模拟、时间及数字。下面将用每类的域及它们所共有的特性来讨论每类数据。理解和应用

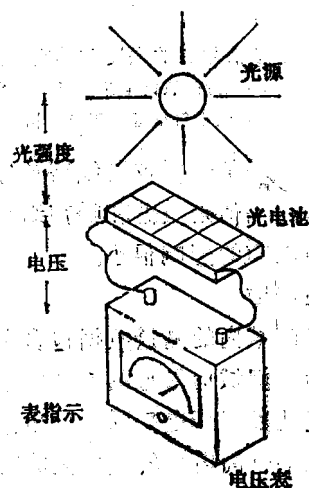


图1-1 简单光测量系统的装置及数据域

数据域的概念，就更加便于研究和现代电子部件、仪器和系统了。

模拟域

模拟域的数据是用幅值表示的下列四种电量：电荷、电流、电压或功率中的一种。当今使用的大多数输入传感器，都把测量数据从非电域转换成一种模拟域。第四章将介绍一些模拟输入传感器的例子。模拟域数据是用电信号的幅值来表示的，因为电荷的最小单位比起由大多数信号源所存储或传输的总电荷数来说是极小的，故模拟信号的幅值本质上是可以无限小地变化的。所以，模拟信号的幅值是连续可变的。

输出传感器把模拟数据转换成表盘上表示的数或位置，用以测量电量。例如本章介绍的电流表及数字电压表、第二章中的示波器、第五章中的记录仪等。模拟信号的幅值可在一段时间里连续地测量，也可在任何时刻进行测量。连续测量时，信号幅值的变化可以对时间、波长、磁场强度、温度或其它试验参数画出。如图 1-2 所示的波形。画出的幅值和时间坐标都是连续的。这类信息包括观察，如峰高、峰值位置、峰的数目，或一些更复杂的关系，如峰的面积、波峰间隔等，并可与其它图中获得的数据进行比较。对不同时间所取得的数据作相关技术处理，即数据处理，它与把数据从一个域转换至另一个域的转换技术是有区别的。

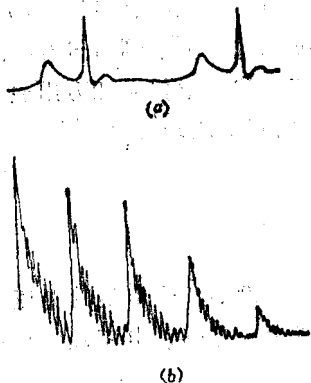


图1-2 模拟信号源的幅度对其它参数的比

- (a) 心脏-肌肉电流与时间的关系；
(b) 光电倍增管电流与波长的关系。

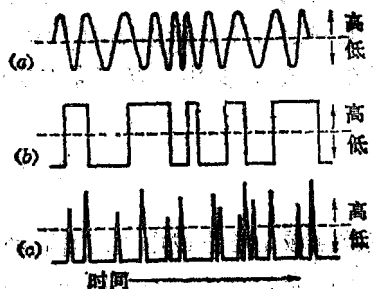


图1-3 时间域信号

- (a) 正弦波频率编码信号；(b) 脉冲宽度编码信号；(c) 任一定时事件检测器的输出信号。

模拟域信号对仪器线路及连接件中固有的或感生的电噪声是很敏感的。任何时刻合成信号的幅值是数据和噪声组合之和。以时间域或数字域进行编码的数据是一种信号，它受电噪声的影响很小。

时间域

时间域内的测量数据包含在信号变化的时间关系中，而并不包含在变化的幅值中。典型的时间域信号如图 1-3 所示，这些信号是逻辑电平信号，即其信号幅值不是在高电平区就是处于低电平区。而数据就包含在逻辑电平转换的时间关系之中，诸如在以相继的低电平→高电平转换之间的时间表示周期，以低电平→高电平及高电平→低电平转换之间的时间表示脉冲宽度，用单位时间内低电平→高电平转换的数目表示频率或速率。产生时间域信号的输入传感器的例子有前面提到的盖格管以及晶体振荡器，由于石英晶体具有温度特性，故该振荡器的频率还与温度有关。模拟域和时间域之间的转换器的例

子有可控电压振荡器或电压-频率转换器,其输出频率与输入电压有关。

通过逻辑电平阈值区的信号斜率(改变速率)越大,则逻辑电平的过渡时间便能确定得越严格。因为时间域里的信号其编码量与模拟域信号中的编码量相比与幅值的关系更少,故时间域内的信息受电噪声的影响较少。很普通的例子是调频无线电信号(频率域)与易受噪声影响的调幅无线电信号(模拟域)相比,其噪声灵敏度较低。高或低信号的平均电平幅值同逻辑电平阈值之间的差越大,则引入的噪声对信号的影响就越小。噪声信号的阈值交越时间的不明确性见图1-4。

时间域信号与模拟域一样,是连续变量,因为频率或脉冲宽度可无限小地变化。但时间域里的信号其编码变量既不能随时间连续测量,也不能在任何时刻测量。把时间域信号转换成别的域值信号所需的最小时间至少应有一个周期或一个脉冲宽度。

数字域

数字域内的测量数据是包含在二值信号

(高电平/低电平, 1/0, 开/关, 等)之中的

的,再将其编码明确地代表一个特定的整数(或字符)。数字域内的信号可在一个通道中编码成一串逻辑电平(串行数字信号),也可编码成同步多通道的一组逻辑电平(并行数字信号)。因为数字编码的信号严格地代表一特定数,故数据实际上是数字形成的。因而数字域内编码数据的信号特性的单位是“数”。由于它对所有类型的数字编码都是真实的,故所有数字信号都在单一域值内,称为数字域。数字域内的数据要转换成一个数时,不必再进行数据域变换,而只需要对信号进行译码(翻译)并显示该数即可。有代表性的数字信号波形见图1-5。图中(a)为计数串行信号,数被编码成系列脉冲或脉冲串中的高-低电平转换。(b)为二进制编码串行信号,脉冲的位置按基为2的数进行加权。脉冲的有无表示每个位置或每一位处为1或0。图中波形表示的二进制数为 10110101_2 ,用十进制数表示时为 181_{10} 。除了按BCD码来加权以外,二-十进制(BCD)信号是与它相似的。并行信号(d)可以采用任何编码,但每一位有独立的导线。图中(d)表示连到指示灯上的8位二进制并行数据源,它可同时表示所有8根数据线上数据逻辑电平的情况。

为了使数字编码时的不确定性减到最小,对每一类逻辑电路来说,必须仔细地规定高-低逻辑电平的信号幅值。例如,普通的晶体管-晶体管逻辑(TTL),低电平为 $0.0 \sim +0.4\text{V}$ 之间,而高电平为 $+2.4 \sim +4.5\text{V}$ 之间。因为TTL逻辑电路对幅度在 0.8V 和 2.4V 之间的信号的响应是不确定的,因而要避免这种信号,而且在阈值区内的过渡应当很快,一般小于 10ns 。TTL的特性以及其它各类逻辑电路的特性将在第十一章内作介绍。

计数波形(图1-5(a))为一串脉冲,脉冲的开始和结束是很明确的。图1-5的计数波形可以代表由单次火花激发时测量的某一特定能量的光子数目。计数脉冲形式虽然简单,但并不很有效。为了获得千分之一的分辨率,每串脉冲必须维持至少能出现一千个脉冲的一段时间。

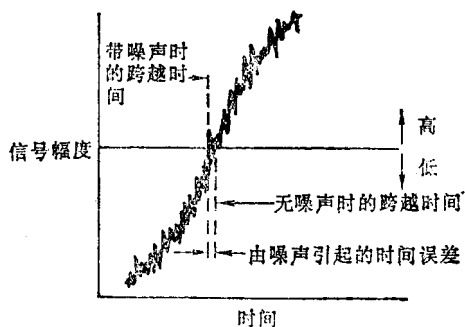


图1-4 噪声引起的阈值跨越时间误差

二进制编码串行信号中的每个脉冲所在位置表示一特定的二进制位，在二进制数中称比特。此时，数据并不是像时间域中那样由脉冲出现的准确时间来表示的，而是由给定的一个时间段内呈现的逻辑电平来表示的。10个脉冲串的一段时间所具有分辨率为 $1/2^{10}$ 。一个20位的数其分辨率优于百万分之一。对于只有二种电平的信号来说，最有效的编码方式便是二进制码。

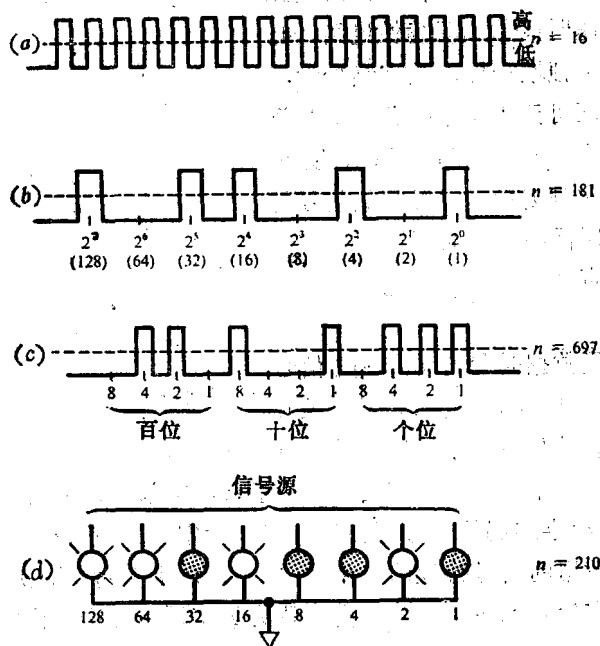


图1-5 数字域信号

按二进制编码的十进制数串行形式其效率稍低，但当要求输出十进制数时却很方便。每四位一组便表示一个十进制数，12位可表示三位十进制数，其分辨率为千分之一。

并行数的主要优点是速度快。整个一个字（一组二进制数）能以串行接法中传输一位的速度从某一电路传送至另一电路。图1-5(d)示出了二进制码，而二-十进制编码及其它编码方案是用于并行数字数据传输的。并行数据接法在所有近代快速的计算机中得到使用。串行数据接法则常用于长距离通信以及数据传输速率要求较低的场合。

1-2 电测量中的域转换

所谓测量，就是要确定某一试样的某个特性，并用该特性的标准单位数来表示。例如，电位测量是决定二个采样点之间电位差的伏特数。从数据域的意义看，这种测量涉及把电压域信息转换成数字域信息。各类电位计，电压至数字的域间转换并不是一步就完成的，而是经过一些中间的数据域如电荷、脉冲宽度、或频率经几步才完成转换的。

为了看清电子系统及仪器中的电数据域及域间转换，最好把数据域画成如图1-6那样的图。注意，数字域不仅包括显示数字和打印数字，也包括以电量编码的数字。普通类型的输出传感器是控制指针或笔的位置。这种数据域在图上称为度盘位置域。本节我

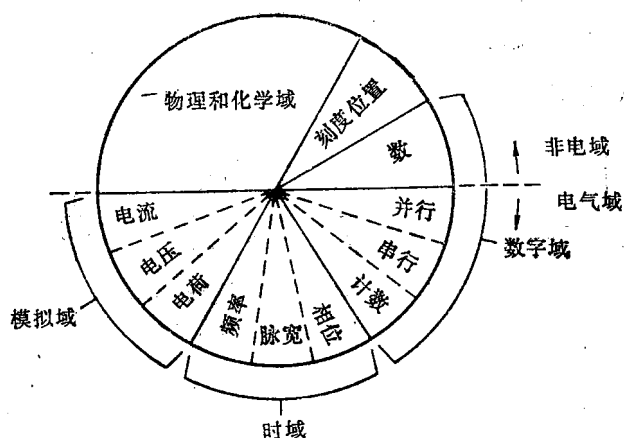


图1-6 数据域图

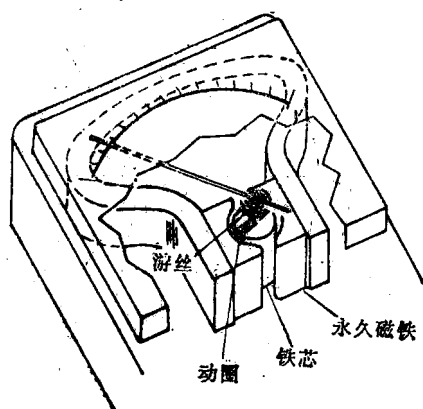


图1-7 动圈式表头

们将研究二种普通的电测量装置，即电流表和数字电压表，用它们的工作所涉及的数据域来研究它们。这些装置是这一章最后几节所介绍的模拟式万用表和数字式万用表的基础。

电流表

动圈式电流表是常用的一种幅值输出指示装置。指针位置受电流幅值的影响。指针后面的刻度盘可根据所要求单位来标定。动圈仪表的应用很普遍，因为它很简单，价格也便宜，能以指针的移动来指示数值的改变。

指针的偏转 D'Arsonval型动圈表如图1-7所示。绕在一个矩形铝框架上的细导线动圈安装在一马蹄形磁铁的两极之间。动圈框架上装有一淬过火的钢轴尖，安放在宝石轴承中，因而在动圈偏转时摩擦力很小。动圈上还装有一指示用的指针，框架上装有游丝，使指针（即动圈）回到固定的基准点。当线圈中有电流流过时，偏转的方向和大小决定于电流的方向和大小。

因此动圈式表头是电流-刻度盘位置的域间转换器。观察指针在刻度盘上的位置，便可把指针位置转化成数字。表头的输出并不是数字域，因为它并未量化为整数，而是在指示盘上可变化无限小，且需要由读数的人来判定，以得到数字。用动圈式表头测量时所涉及的数据域的转换如图1-8中箭头所示。

电流测量 假设用电流表来测量电池的电流和灯泡电路中的电流，见图1-9。该图表明了电流表头的电阻 R_m 是加到电路的总电阻之中。若表头内阻只有 0.1Ω ，则最后的电流将为 $1.5V/(2.5\Omega + 0.1\Omega) = 0.577A$ ，而不是无表头时的计算值 $0.600A$ ，如果希望在电流表上所读的电流值是无表头时的电流值，那么表头内阻比起与它串联的电阻(R_1)来说应当是小得可忽略。

数字电压表

近年来，电压及其它电量的直接数字显示比起动圈式电流表来是很便宜的。顾名思义，DVM(数字电压表)是一种带有被测量数字显示的电压驱动装置，所有DVM的基本要求都是要把被测模拟电压转换成精确的数字表示，这是由模-数转换器(ADC)来实现的，有时也称作数字转换器，因为它决定了包括待测电压的单位数目或增量。一旦

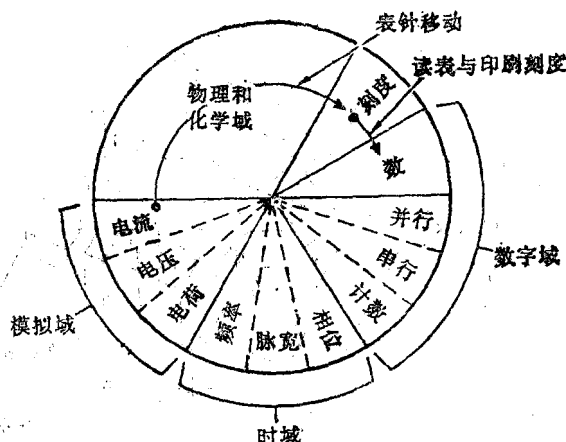


图1-8 使用电流表时数据域的转换

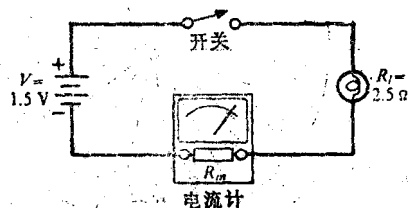


图1-9 电流测量

数据以数字域来表示，就可用一种普通显示器如发光二极管（LED）或液晶（LCD）显示，以向使用人员提供可视数字指示。

模拟电压的精确数字表示可由多种方法来实现。在DVM中，数字化通常是通过把输入电压转换成电荷离散增量的数目，并对这些增量计数来实现的。这里将介绍这些数字电荷测量技术，其详细情况将在第九章中叙述。

双斜率转换 这是一种普通的数字化技术，称之为双斜率转换器，它把输入电压 V_{in} 转换成一个成比例的电流，该电流以精确的时间周期对电容器充电（图1-10）。与 V_{in} 和 i_{in} 成正比的电荷 q_{in} （ $q = i_{in} t_{in} = k V_{in} t_{in}$ ）在 t_{in} 期间积累在电容器上。然后，时钟把开关 S 与输入源断开，把一恒定的参考电流源 I_r 接入电容器，并发出起始信号。当监测电容器电压的阈值检测器指出电容器已放电完毕时，就在标有“停止”的输出端发现一脉冲，因而从未知源对电容器充电，并从参考源放电的过程重复进行。

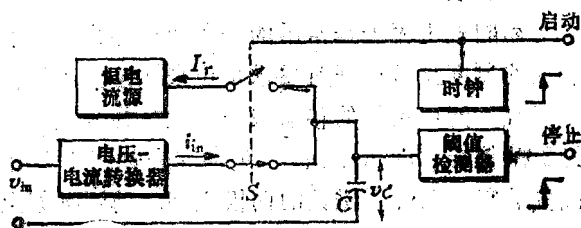


图1-10 双斜率转换技术

因为电容器放电所需要的电荷量等于储藏于其上电荷量，故对参考电流放电所需的时间 t_r 与 q_{in} 成比例，因此它也与 V_{in} 成比例。故有

$$I_r t_r = q_{in} = k V_{in} t_{in} \quad \text{或} \quad t_r = V_{in} (k t_{in} / I_r)$$

式中， k 是 i_{in} 和 V_{in} 之间的比例常数； t_r 是出现起始输出与停止输出脉冲之间的时间。故双斜率转换器产生电压-时间间隔域间转换。

对标准时钟振荡器的脉冲进行计数，即可测量时间间隔 t_r ，如图1-11所示。起始脉冲打开计数门，并使时钟脉冲通过计数器。而停止脉冲使时钟与计数器断开。当计数停止时，计数器的数字输出便显示在显示器上显示出来。在实践中，正确选择与输入电压之间的各种比例因子，使显示读数直接为伏。双斜率DVM中所发生的各种数据域转换示于图1-12。在电荷-脉宽转换之前有两次模拟量的域间转换：由计数门把脉宽转换成计数数字信号，并由计数器实现在数字域内串行-并行的域间转换。

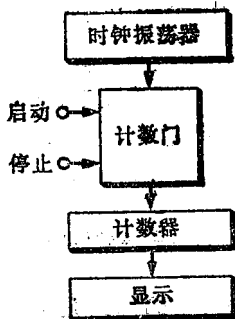


图1-11 时间间隔测量

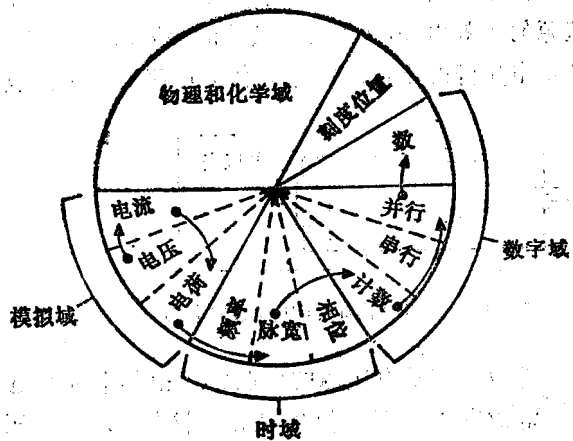


图1-12 双斜率DVM的数据域转换

电压频率转换器 第二种常用的DVM转换器是电压-频率转换器（VFC）。这种转换器中的未知电压也转换成一定比例的电流，该电流对电容不断充电，为了在电容器上保持恒定电压，产生一个极性与输入电荷相反的脉冲电荷增量。

值得注意的是在双斜率转换器中，电压-频率转换器的输出是在一种时间域中；此时它是频率域信号。对从电荷发生器出来的脉冲以每单位时间进行计数，就很容易测得频率。这种计数器结构称为频率计，如图1-13所示，并将在第四章、第九章中作详细的讨论。

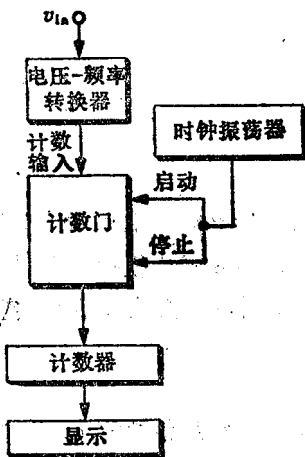


图1-13 采用VFC和频率计的DVM

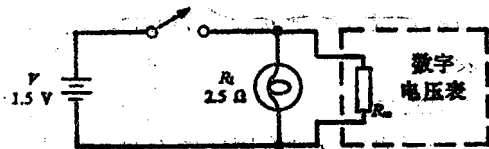


图1-14 用DVM测量电压

电压测量 假定要用DVM来测量电路中灯泡上的电压降，测量线路见图1-14。因为电压表与被测装置是并联的，故电压表的内阻必须比被测装置的内阻大得多。这样就能保证被测装置二端的IR降不因接上测量仪表而变化。若要使电压表所读的IR降值跟不接上电压表时的值一样，则应使被测装置的电阻值与电压表的电阻值相比可以忽略。

加载误差 通常，要求测量具有较大内阻 R_e 的电压源的电压，如图1-15所示。因为电压表的电阻和 R_e 形成电压分压器，故当要求读出正确的无载电压时，电压表的电阻显然比内阻 R_e 应大得多。

电学中有一条很重要的定理，即戴维南定理，该定理阐明，具有两端输出的由电阻

和电池组成的电压源等效于如图1-16所示的一个简单的电池、电阻串联电路。该复合电压源的等效电压 V_e 为没有负载时该两端子间的电压（两端子间不接任何装置）。但为了测量电压源的电压，电压表作为电路的一个负载接入，如图1-15所示。

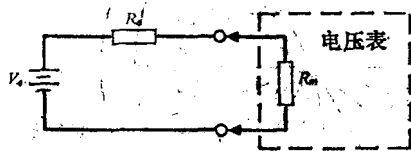


图1-15 电压表与有内阻的电压源的联接

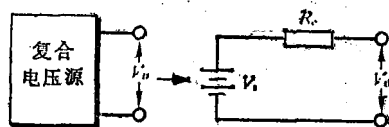


图1-16 电压源等效电路

等效电压及电压源的电阻常可由其本身的电路来决定。图1-17中的网络是电压分压器。等效电压 V_e 是计算出来的无载电压，由分压器方程可知， $V_e = V R_2 / (R_1 + R_2)$ 。等效电阻 R_e 是当电压源由短接线来代替时在两端子之间计算的电阻。在分压器中两输出端之间的电阻是 R_1 和 R_2 并联的阻值， $R_e = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$ 。

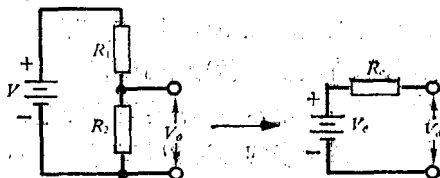


图1-17 戴维南定理应用于电压分压器

1-3 模拟式万用表

前节所讨论的动圈式仪表不仅用以测量电流，还常用来测量电阻、电压及其它电量。当用一个仪器作多种测量功能时，此种装置称为万用表。动圈式或模拟式万用表的另一名称是伏-欧-毫安表（VOM）。附加的简单电阻网络把动圈表头变成灵活的实验室万用表。

电流量程

动圈式表本身具有固定的全量程电流范围，这是由线圈、游丝及磁铁的设计所决定的。

为了使测量很宽量程的电流时不必用每个表头对应每个量程，而必须采用所谓分流技术。分流器是一个并联的导电通路，它并接在电流表头上，接上后使得只有一部分电流流过表头。简单的分流情况见图1-18。按电流分流关系，流过表头的电流 i_m 只有总电流 i 的一部分。

$$\frac{i_m}{i} = \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_m}$$

式中 R_{sh} 为分流电阻。

灵活的万用表通常具有好几个不同的满量程电流范围，可由开关来选择。当电流范围很大时， R_{sh} 就太低了，此时要用一电阻与 R_m 串联以提高表头的有效电阻。

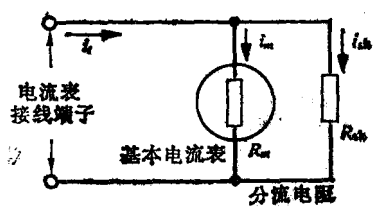


图1-18 电流表分流以扩展量程

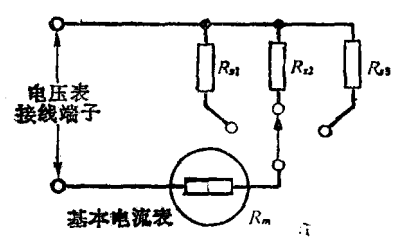


图1-19 用电流表头测量电压

电压测量

动圈式表头易于测量电压。因为表头的电阻值是固定的，故流过表头的电流比例于其上的电压降。满量程电压的灵敏度 V_{fs} 等于满量程偏转电流 I_{fs} 乘以表头电阻 R_m 。为获得多重电压量程，只需在图1-19所示的表头电路中加串联电阻即可。接入串联电阻 R_s 后，满量程的电压灵敏度是 $V_{fs} = I_{fs}(R_s + R_m)$ 。

注意给定表针偏转的比率 $(R_s + R_m)/V_{fs}$ 为常数。该常数是电压表的每伏欧姆数。给定度盘上的电压表其电阻是每伏的欧姆数乘以该度盘的满量程偏转电压。因此，当满量程为1V时20000Ω/V表头的电阻为20kΩ。表头的电流灵敏度是每伏欧数的倒数。如上所述，要精确测量电压时，电压表的电阻比起被测电路的电阻来应很大，这一点是很重要的。

电阻测量

一个器件的电阻可用动圈式表头由附加的电池及其它电阻来测出，图1-20示出了串接式欧姆表。未知电阻 R_u 与表头及量程选择电阻串接。当测试表杆短接 ($R_u = 0$) 时，转动“欧姆调整”电位器，使流过串联电阻 $R = R_m + R_f + R_a$ 的电流 I_{fs} 正好使表针偏转满量程。当表杆接到未知电阻 R_u 的两端时，表头内的电流减少到某一值 i ，其值决定于 R_u 的值。因为在上述两种情况下，1.5V电池都是加到总电阻上的。

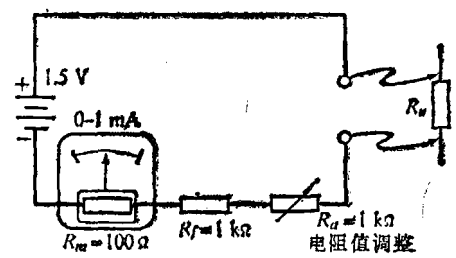


图1-20 串接型欧姆计

$$I_{fs}R = 1.5V \quad \text{及} \quad iR + iR_u = 1.5V$$

结合此二式，可求得未知电阻：

$$R_u = \left(\frac{I_{fs}}{i} - 1 \right) R$$

这种类型和其它的欧姆表其刻度是非线性的，即当 i 从 0 变至 I_{fs} 时，其读数自 ∞ 变至 0。 R_u 的值远大于 R 时，处于刻度末端的无限大欧姆处，刻度值变得很挤，而很低的值同零又不易分开。为此就要用各种可选择的分流，以改变表头的满量程电流灵敏度，故可有几个电阻量程。

典型模拟式万用表示于图1-21。图中示出了功能选择开关及各满量程的范围，某些功能和量程需用专门的输入插座。