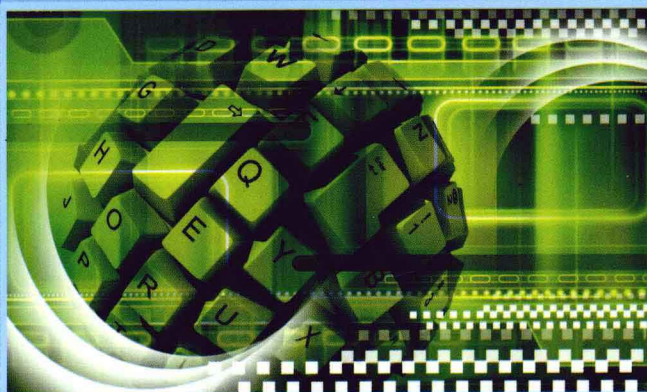
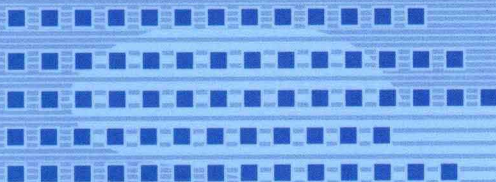




面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果



YZLI 0890088027

数字化测量技术

SHUZHUA CELIANG JISHU

主 编 周 严

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

数字化测量技术

主 编 周 严

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

前 言

测量是人们认识世界的一种不可缺少的重要手段,当今社会已进入信息时代,信息技术成为新技术革命的关键技术,而测量技术是信息技术的关键和基础。随着微电子技术、计算机技术、网络通信技术的飞速发展,现代测控系统的自动化与智能化水平日益提高,数据采集、以网络技术为基础的集散测控技术成为现代测控仪器与系统的关键技术之一,因而数字化测量技术作为主要研究自动测试技术、智能测试技术的测量技术分支,将在相当长的时期内是测控技术的重要技术,也将是测控专业的重要教学内容。

本教材是为“测控技术与仪器”专业的测控电子技术类课程而编写,是测控电路的拓展与延伸,又是智能仪器设计及自动测试系统的先导与内涵。本书是作者多年教学实践的基础上修改、充实完成。

本书从基础及基本原理入手,结合典型集成芯片,详细介绍了多种数字化单元测量电路的基本原理及分析设计方法,强化数字化测量技术的基础教学环节。在此基础上,以大量的实例介绍了多种工程参量的数字化测量电路,突出理论教学与对象的结合,使教学工程实际化。最后两章以实际科研为背景,在基本原理与理论的基础上,结合实际案例详细介绍了数据采集系统与集散测控系统的设计,既是前面基础内容的深入实际应用,更是测控电路、微机原理与接口技术、程序设计等的综合应用。

本教材由南京理工大学周严老师主编,在编写的过程中得到了朱欣华教授、吕富勇博士的许多帮助,研究生张明、吴鹏、苗锋伟、张小永完成了书中许多电路的调试实验、程序设计与调试的工作,确保了本书内容的实用性。

尽管在本书的编写过程中,力求分析深入,内容新颖,贴近工程实际,但由于电子技术、编程技术、嵌入式技术与网络通信技术发展迅速,新型的专用芯片、传感器、执行器不断出现,加之编者专业知识所限,书中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 数字化测量系统的构成	1
1.2 数字化测量系统的特点	2
1.3 数字化测量系统的发展历程	2
1.4 数字化测量技术的技术要素	4
思考题与习题	5
第2章 数字化测量技术基础	6
2.1 数字化测量技术的几个基本概念	6
2.2 时钟基准源	16
2.3 数控开关	27
2.4 采样/保持器	38
2.4.1 采用保持器的基本结构及工作原理	38
2.4.2 采样/保持器的主要技术特性	40
2.4.3 集成采样/保持器及控制	40
2.5 数字显示技术	47
2.5.1 LED 显示器及显示技术	47
2.5.2 LCD 显示器及显示技术	49
思考题与习题	52
第3章 准数字信号的数字测量	53
3.1 频率、周期、脉宽、时间间隔和频率比的测量	53
3.1.1 频率测量原理	53
3.1.2 频率测量的测量误差	54
3.1.3 周期、脉宽、时间间隔和频率比的测量	54
3.2 多功能数字频率计	56
3.3 相位差的测量	61
3.3.1 鉴相器	61
3.3.2 相位差的准数字化测量法	63

3.3.3 相位差准数字化测量的误差分析	65
3.4 转速的测量与数字控制	67
3.4.1 转速的测量	67
3.4.2 电动机稳速伺服控制	68
3.5 流量的测量	69
3.6 转角的测量	71
3.7 心率及呼吸频率的测量	73
3.7.1 心率的测量	73
3.7.2 呼吸频率的测量	75
思考题与习题	76
第4章 数/模转换技术及应用	78
4.1 概 述	78
4.1.1 D/A 转换器的基本表达式	78
4.1.2 D/A 转换器的基本工作原理和组成	79
4.1.3 D/A 转换器的分类	80
4.2 典型并行 D/A 转换器及工作原理	80
4.2.1 T 形电阻网络 D/A 转换器	81
4.2.2 反 T 形电阻网络 D/A 转换器	81
4.2.3 $2^n R$ 电阻分压式 D/A 转换器	83
4.3 集成 D/A 转换器	84
4.3.1 D/A 转换器的性能指标	84
4.3.2 集成 D/A 转换器	88
4.4 集成 D/A 转换器应用	104
4.5 数字电位器	116
思考题与习题	124
第5章 模/数转换技术及应用	126
5.1 逐次逼近式 A/D 转换器	126
5.2 积分式 A/D 转换器	132
5.3 并行式高速 A/D 转换器	139
5.4 新型 $\Sigma-\Delta$ 型模数转换器	142
5.5 集成 A/D 转换器及应用	147
思考题与习题	192
第6章 数据采集系统	195
6.1 概 述	195

6.2 数据采集原理	196
6.2.1 采样与量化过程	196
6.2.2 孔径时间(转换时间)、分辨率以及信号频率对转换振幅误差的影响	197
6.2.3 采样定理	199
6.3 数据采集系统的结构原理	203
6.3.1 模拟信号输入通道的基本结构	203
6.3.2 模拟信号输出通道的基本结构	205
6.3.3 数据采集系统的控制结构原理	206
6.4 数据采集系统设计	208
6.4.1 基于 80X86 的通用数据采集系统	208
6.4.2 基于 80X86 的自动量程数据采集系统	211
6.4.3 基于通道表结构的数据采集系统	217
思考题与习题	220
第 7 章 集散测控系统	222
7.1 概 述	222
7.2 基于 IPC 与 PLC 的集散测控系统	223
7.2.1 系统构成	224
7.2.2 螺杆冷水机组远程监控系统	224
7.3 基于 IPC 与分布式测控模块的集散测控系统	239
7.3.1 分布式模块	240
7.3.2 基于分布式模块的测控系统实例——北京某冰场温度自动监测系统设计	246
思考题与习题	252
参考文献	253

第1章 绪 论

20 世纪 50 年代数字电压表的问世，标志着数字化技术进入测控技术领域。伴随着数字集成电路及数字电子计算机技术的飞速发展，数字化测控技术在测控技术领域中的地位日益重要，目前数字化测控系统已基本取代传统的模拟式测控系统，成为现代测控系统的重要标志。在相关技术的发展与推动下，现代测控系统的自动化、智能化水平不断提高，已发展到前所未有的高度。可以毫不夸张地说数字化技术使测控技术产生了质的飞跃，导致了测控技术的革命。

数字化测控技术是研究将被测量信息数字化，进而进行数字传输、数字存储、数字处理、数字输出和数字控制的技术。数字化测控技术与计算机技术相结合，已广泛应用于工业、农业、交通、通信、国防、金融、文教及家庭等各个领域，已成为常规测控系统、遥测遥控系统和网络化测控系统的主要技术保障。

1.1 数字化测量系统的构成

常规数字化测量系统的构成如图 1.1.1 所示。传感器及信号调理电路位于系统的最前

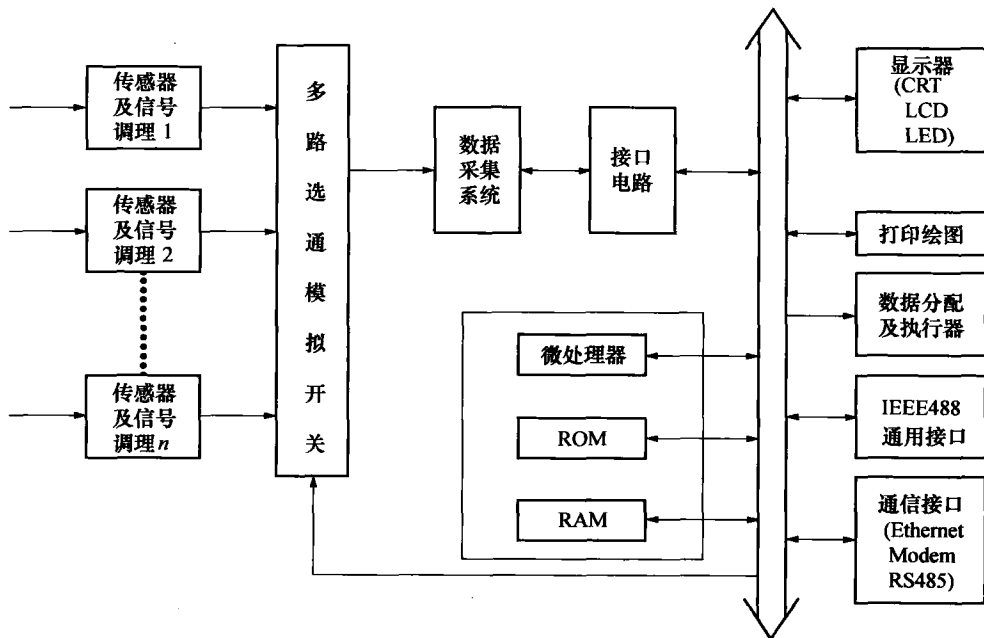


图 1.1.1 常规数字化测量系统构成原理图

端，负责将各种被测量信号转换成电压信号，被转换后的电压信号传输至多路选通模拟开关的输入端，软件控制将各路模拟信号分时加至数据采集系统并被转换成数字量，数字量经接口电路传输至 RAM 中，由微处理器进行处理。处理后的信息其作用有二，如果是单纯测量，则通过显示器显示或打印输出，并在需要网络传输时通过通信接口将测量结果传输出去。如果测量的结果需用于控制，则由微处理器根据测量值及确定的算法计算出控制量通过数据分配系统输出控制量驱动执行器动作。

显然整个测控系统各个环节的工作均处于微处理器子系统的控制之下，微处理器系统是整个测控系统的核心环节。

1.2 数字化测量系统的特点

1. 测量准确度高、分辨力高

目前数字仪器的直流测量准确度可达 $\pm 1 \sim 2 \text{ ppm}^*$ ，分辨力可达 10 nV 。

2. 具有高速数据采集及存储能力

现代数字化测量系统的采集速度可达每秒数千万次 ($10^7/\text{s}$)，可以实时采集冲击、爆破等快速变化过程的瞬态数据以及视频数据，并存储起来供后续处理。

3. 强大的数据处理功能

测控系统可自动进行测控过程中所要求的数学及逻辑运算，并执行相应的动作，实现了测控过程的自动化。

4. 先进的显示方式

可以以数码、数字曲线或数字图像等多种方式显示测量结果，以数码及数字图形显示控制过程及控制结果。

5. 智能化的特征

数字化测控系统具有自检测、自诊断、自校正等功能实现系统的自我自动维护，确保系统的性能保持在正常水平。

6. 网络化远程测控能力

可以实现多种仪器的联网现场测控及异地远程测控。

1.3 数字化测量系统的发展历程

数字化测控技术的发展大致经历了以下几个阶段：

1. 数字仪器阶段

该阶段以 20 世纪 50 年代的数字电压表及后来的数字万用表为标志，这是数字化测控技术发展的初级阶段。

注：* $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$ 。

2. 非计算机化总线制数据采集系统阶段

这一阶段以多路巡回检测系统为标志。系统由主控制器、总线及功能组件组成,主控制器通过总线以命令的形式控制协调各功能组件的工作,从而实现数字控制的多路巡回检测。其设计思想较之单一功能的数字仪器有了质的飞跃,已具有现代数据采集系统的雏形。

3. 计算机为基的测控系统阶段

以微机化数字仪器及现代数据采集系统为标志,其基本特征是将微处理器应用于测控系统中作为系统的主控制器,以监控程序或控制程序取代以往由硬件实现的功能。使得系统数据处理能力、自动化程度大大提高,系统功能的扩展十分灵活方便,系统的可靠性大大加强,成本大幅度降低。

4. 自动测试系统阶段

将具有标准通用接口(如 IEEE-488)的微机化仪器通过标准总线连接起来,指定其中的某一设备为“控”者,其余设备为“讲”或“听”者即构成了自动测试系统。因此,所谓自动测试系统就是由多种具有标准通用接口的数字仪器通过标准通用总线构成的集合体。自动测试系统可以实现多台仪器在控者的控制下对多种参量实施自动测量,可以实现多种仪器的自动校验,可以实现测量数据的共享。自动测试系统实现了单一功能仪器的功能延伸。

5. 虚拟仪器阶段

将自动测试系统中的微机化仪器缩小成功能模块,挂接在标准化、通用化的总线上,并配之以系统软件即构成了虚拟仪器。因而虚拟仪器可以定义为基于标准通用总线的,功能模块化并可任意扩展的,“即插即用”式的数字化测控系统。

虚拟仪器使测控系统从传统的“多机箱堆放式”发展成“单机箱多模块式”,其结构紧凑,功能全面,扩展灵活。虚拟仪器中的标准通用总线没有统一的定义,可以是任何通用标准总线,例如 ISA 总线、PCI 总线等。

当今虚拟仪器采用的总线首推 VXI (VMEbus Extension for Instrumentation) 总线, VXI 总线系统是在 VME 计算机总线系统的基础上,增加了为适应仪器系统所需的总线而构成的新型测量仪器的标准总线。它是由 Colorado Data Systems, HP 等国际五家著名的测试和仪器公司组成的联合体共同制定的行业标准。

第二种虚拟仪器总线是在 CompactPCI 总线基础上演变而来的 PXI 总线,由于其体积小,速度快,近年来日益引起国际测试与控制业界的重视。

与常规数字化仪器相比虚拟仪器的特点在于:

①虚拟仪器的面板是虚拟的。虚拟仪器面板上的各种“部件”只是各种“控件”,是虚拟的部件,通过鼠标单击各个“部件”,执行相应的测量或控制程序,实现测量或控制功能。

②虚拟仪器的测量功能是由软件编程实现的。在以 PC 机为核心的硬件平台的支持下,通过软件编程设计来实现仪器的测试功能,而且可以通过具有不同测试功能的软件模块的组合实现多种测试功能。

③虚拟仪器开放性强,有极强的扩展性,可以以较低的代价实现高性能的仪器功能。

6. 集散测控系统阶段

集散测控系统是在分布式测控系统和集中测控系统的基础上发展而来的。分布式测控系统的特点是物理量的测量与控制分散在各个测量点进行,优点是各个测量设备独立,局部设备的故障不影响全局,缺点是设备分散,各测量点的信息必须到测量点才能获得,数据获取

及设备管理相对困难。集中测控系统的特点是检测或控制设备集中设置,现场数据通过安置在现场的传感器转换后经电缆传输至测量设备处进行测量,其优点是数据获取及设备管理容易,缺点是由于测量仪器往往远离测量点,测量的精确性受到环境影响的程度较大,相对分布式测量系统低,此外设备的任何故障可能导致测控系统不能正常工作。前述的虚拟仪器是典型的集中测控系统。

集散测控系统综合了分布式和集中测控系统的优点,参数的测量由靠近测量点的专门仪器或测量模块承担,这些仪器或模块通过现场总线联成网络,并与中央计算机相连,各测量模块测量得到的数据通过现场总线传输至中央计算机,中央计算机可以通过现场总线设置各个测量仪器或模块,这种结构的特点如下:

- ①实现了在测量仪器分布式现场安置情况下测量数据的集中自动获取。
- ②避免了因长距离模拟信号的传输而导致的测量精度的下降。
- ③实现了测量与控制的系统的集中控制,提高了系统运行的可靠性,便于系统的运行管理。

7. 网络化测试系统阶段

这一阶段是伴随着网络技术出现及发展到来的。网络化测试系统实现了大型复杂系统的远程测试,是信息时代的必然趋势。网络化测试仪器是能将测试信息上载到网络,并能从网上下载测量信息的仪器。测试仪器接入网络有两种方法:一是仪器通过已联网的计算机联入互联网,即采用胖服务器的基于计算机的网络化测试仪器;另一种是仪器本身带有完整的网络接口,具有 IP 地址,能直接同互联网相连,即采用瘦服务器方式的嵌入式网络化测试仪器。

综上所述,数字化测控技术是伴随着信息技术的发展而不断走向更高层次,它的发展离不开信息技术各项分支技术的支撑;反之数字化测控技术的发展对信息技术的快速发展起到了极其重要的推动作用,两者相辅相成互为支撑。

1.4 数字化测量技术的技术要素

数字化测量技术的主要技术要素如下:

- ①数字逻辑电路技术。
- ②计算机及接口技术。
- ③特制集成电路(ASIC)技术。
- ④仪器总线与现场总线技术。
- ⑤网络技术。
- ⑥数字信号处理技术。

因此要能够系统掌握数字化测控技术,需要多种相关技术作为支撑,数字化测控技术是多种现代电子及计算机技术的集成。

思考题与习题

- 1.1 说明数字化测量系统的基本构成，并说明其中每一部分的功用。
- 1.2 说明数字化测量系统的基本特点。
- 1.3 说明数字化测量系统的发展历程与趋势。
- 1.4 在数字测量技术高度发展的今天是否可以淘汰传统的模拟测量系统？谈谈你的看法。
- 1.5 以你自己的语言说明什么是虚拟仪器。
- 1.6 简述集散测控系统的基本特点。
- 1.7 简述网络化仪器的特点。

第 2 章 数字化测量技术基础

2.1 数字化测量技术的几个基本概念

1. 两种计量体制

1) 模拟量

模拟量是指数值上连续变化的量，它既包括数值与时间上均连续的连续时间函数，也包括时间上离散而数值上连续的瞬时连续函数。工程领域中常见的电压、电流、压力、温度、流量、位移、加速度、长度等都是连续的时间函数；而经过采样后的各种物理量的瞬时值都是瞬时模拟量。

2) 数字量

数字量是以一定步长步进的离散量。例如，汽车的数量、飞机的架数、零件的件数等都是数字量，这些量只有用数字量来计量才有实际意义。

2. 量化和量化误差

1) 量化

量化是将模拟量变换成数字量表示的过程，其实质是将经采样得到的信号的实际幅度值，用最靠近的离散电平值代替（见图 2.1.1），离散电平值就是数字值。其结果是可以取无穷多个的连续实际采样幅度值变为有限数目的离散电平了。在图 2.1.1 中假设某一信号的幅度值位于 0~7 的范围，每隔 T_s s 采样一次，所得到的实际准确幅度值（取三位有效数字）为 0.56 V、3.91 V、3.2 V、2.32 V、2.88 V 和 6.21 V，把最靠近的一组量化电平（电平台阶定为 1 V 代替这些准确值，就得到 1 V、4 V、3 V、2 V、3 V 和 6 V。

量化所得到的数字量具有抽象的数学意义，要真正表示对应的模拟量，还必须赋予数字量以码制和量化物理单位，赋予码制的过程称之为编码，其实质是用代码表示采样值。例如，物体的质量是模拟量，为了确定其对应的数字量，可以采用天平通过比较法实现。将物体放在天平的一端；另一端放砝码，砝码的最小单位是“克”，共使用四种砝码即 1 g、10 g、

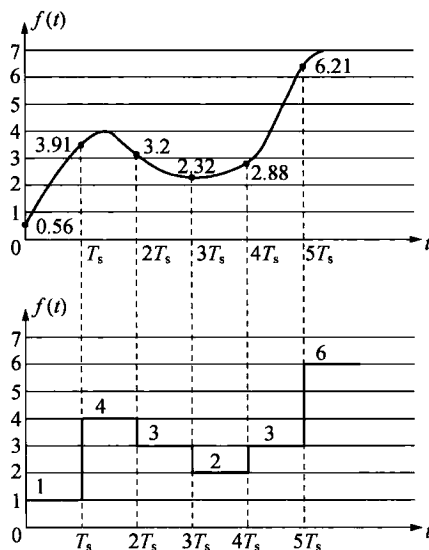


图 2.1.1 信号的量化过程

100 g 和 1 000 g, 天平达到平衡时共用了 1 g 砝码 d_0 个, 10 g 砝码 d_1 个, 100 g 砝码 d_2 个, 1 000 g 砝码 d_3 个, 这样物体的质量被转换成了 4 个抽象的数字 d_3, d_2, d_1, d_0 。显然这 4 个数字要能真正代表质量必须赋予它们码制和量化单位, 这里物体的质量应被表示为:

$$M = d_3 \times 10^3 + d_2 \times 10^2 + d_1 \times 10 + d_0 (\text{g}) \quad (2.1.1)$$

这里量化单位是“克”, 码制是十进制。因此数字量 $d_3 d_2 d_1 d_0$ 代表了物体的质量这一模拟量。

数码中的每一位叫码位或码元, 在二进制中又称比特 (bit)。一个数码中所有码元的总合称为码字或码组, 码字中的码元数称为码长或字长。在数字系统中由于二进制采用数字电路实现最为容易, 因此二进制是最常用的码制。由 n 个码元组成的二进制码组 (码字) 的个数共有

$$N = 2^n \quad (2.1.2)$$

如果信号被量化的电平数目为 L , 用二进制来表示此数目时, 所需要的字长 n 可按下式求出

$$L \leq N = 2^n \quad (2.1.3)$$

2) 量化误差

用数字量计量模拟量时, 一般情况下不会是正好相等, 存在误差。这种由量化而造成的计量或测量误差称为量化误差。量化误差可以表示为:

$$\Delta = \text{被测模拟量值} - \text{量化数字量对应的模拟量值} \quad (2.1.4)$$

设模拟信号为 $f(t)$, 量化信号为 $f_q(t)$, 则式 (2.1.4) 可表示为

$$\Delta = f(t) - f_q(t) \quad (2.1.5)$$

显然, 量化误差的最大值就是量化单位。量化误差是固有的, 无法消除的, 其大小取决于量化单位的大小和测量点的位置, 量化单位越小, 测量点越接近量化数字量的对应点, 则量化误差越小。在上例中当量化单位为 1 g 时, 对质量为 8.37 g 的物体其量化误差为 -0.63 g 或 $+0.37$ g; 而当量化单位为 0.1 g 时, 对质量为 8.37 g 的物体其量化误差为 -0.03 g 或 $+0.07$ g, 后者的量化误差远小于前者。

量化误差与被测信号的数值大小有关, 是随机的, 而最大量化误差是个确定的量, 两者是有区别的, 一般在数字化测控系统中所说的量化误差是指最大量化误差。由于量化误差是随机的, 因此它对测试系统所造成的影响大小一般应采用统计方法估计, 如果一律采用最大量化误差评估所受的影响, 有时候偏于保守。通常最大量化误差是量化步进值 q , 但是可以采用 $1/2$ 偏置的方法使其降低为 $q/2$, 这样量化误差的变化范围为

$$-\frac{q}{2} \leq \Delta \leq \frac{q}{2} \quad (2.1.6)$$

假设被测模拟量 $f(t) = x$ 连续变化, 各测试点出现的概率均匀分布, 则概率密度函数 $p(x)$ 为常数:

$$p(x) = \frac{1}{q} \quad (2.1.7)$$

根据随机变量均值的定义, 此系统产生的量化误差之均值为

$$\bar{\Delta} = \int_{-q/2}^{+q/2} x p(x) dx = \frac{1}{q} \int_{-q/2}^{+q/2} x dx = 0 \quad (2.1.8)$$

此时量化误差均方差为

$$\overline{\Delta^2} = \int_{-q/2}^{+q/2} (x - \bar{\Delta})^2 p(x) dx = \int_{-q/2}^{+q/2} x^2 p(x) dx = \frac{q^2}{12} \quad (2.1.9)$$

量化误差的标准偏差为

$$\sigma = \sqrt{\overline{\Delta^2}} \approx 0.289q \quad (2.1.10)$$

结果说明, 采用了 $1/2$ 偏置之后, 数字化测试系统的量化误差的有效值只占量化单位的 $1/3$ 。实际上量化误差的均方差就是量化误差的平均功率, 如果将量化误差视为量化噪声, 则转换系统的信噪比为

$$\frac{S}{N_q} = \frac{\overline{f^2(t)}}{\overline{\Delta^2}} = \frac{12 \overline{f^2(t)}}{q^2} \quad (2.1.11)$$

式 (2.1.11) 表明, 要提高转换系统的输出信噪比, 必须减小量化的步进值 q , 也即提高数字系统的分辨率或码字的字长。

3. 数制与编码

一个数可以采用各种不同的数制以约定的代码表示, 究竟采用何种数制及编码, 需要根据实际的应用环境确定, 人们最为熟知的数制是十进制, 然而由于二进制在数字电子线路中最易实现, 因此数字计算机领域均采用二进制或以二进制码为基础的派生码, 数字测量与数字计算机密切相关, 在数字测量领域中同样采用二进制码或以二进制码为基的派生码。

数字编码分为两类, 第一类是具有数量概念的编码, 它代表具体的数值; 第二类是没有数量概念的数字编码, 这类数字编码仅仅含有代表某种信息的意义, 使用它的目的只是为了实现传递信息或者按照信息进行控制的功能, 它们没有数量概念, 不可运算, 如 ASCII 码等。

1) 自然二进制小数码

在数字电子系统中, 二进制是最准确、可靠, 也是最方便的一种数制, 任何一个数都可以用 n 位以高、低电平状态代表的 “1”、“0” 两个数所组成的代码来表示。自然二进制数是一种最简单的二进制数, 对于 n 位的自然二进制数, 其表示数的范围为 $2^n - 1$ 。

在测试系统中, 由于大多数情况下其输出数据 (即测试与转换结果) 都是与输入量/满量程的数值成某种函数关系。多数情况下, 要求输出量与输入量/满量程的数值成正比, 即

$$\text{输出量} = k \cdot \frac{\text{输入量}}{\text{满量程}}$$

式中 k 为常数。

上式说明测试系统的输出量的数值就是表示输出量占满量程值的份额数, 因为输入量总是小于满量程值, 因此他们的比值总是小于 1, 为此输出量采用自然二进制小数表示相比采用自然二进制数表示更为贴切, 更能说明测量过程的本质。采用自然二进制小数码来表示测量系统的输出输入关系有更为明确的物理意义。

虽然通常采用自然二进制小数表示输出结果, 但为方便起见在形式上仍然采用自然二进制整数, 只是其中隐含了除 2^n 的运算, 即输出或转换的结果是 n 位自然二进制整数 D , 其实际的含义是 $D/2^n$ 。

2) 双极性二进制数码

在许多情况下, 不但要求用数字量表示模拟量的幅度大小, 还要包含极性信息, 为此需要采用双极性二进制数码表示测量或转换结果。在数字系统中常用的双极性二进制数码有如下几种:

(1) 符号—数值二进制码

规定最高有效数位标志符号信息，“0”为正号，“1”为负号，除 MSB 位外的各位数位组成数值码。数值码表示数的大小，按自然二进制规则建数。

(2) 偏移二进制码

这是一种数据转换系统中最常见的双极性码。它也是按自然二进制规则建数，不同的是将零点位置向上移动半满量程（标称满量程的一半）。量程范围内所有的负数的 MSB 位均为“0”，所有正数的 MSB 位均为“1”，最大的正数为 111…1，最小的负数为 000…0。

(3) 2 的补码

它的 MSB 为代表符号位，“0”代表正号，“1”代表负号，其余各位组成数值位，正数的 2 的补码的数值位与自然二进制数原码相同；负数的 2 的补码的数值位是原码经过求反后再加 1 得出的代码。

表 2.1.1 常用双极性代码

数	十进制分数	符号—数值码	偏移二进制码	2 的补码
+7	+7/8	0111	1111	0111
+6	+6/8	0110	1110	0110
+5	+5/8	0101	1101	0101
+4	+4/8	0100	1100	0100
+3	+3/8	0011	1011	0011
+2	+2/8	0010	1010	0010
+1	+1/8	0001	1001	0001
0	0+	0000	1000	0000
	0—	1000		
−1	−1/8	1000	0111	1111
−2	−2/8	1010	0110	1110
−3	−3/8	1011	0101	1101
−4	−4/8	1100	0100	1100
−5	−5/8	1101	0011	1011
−6	−6/8	1110	0010	1010
−7	−7/8	1111	0001	1001
−8	−8/8		0000	1000

表 2.1.1 给出了上述双极性二进制数码的汇总，比较列表代码的相互关系，可得出如下结论：

①任何一种 n 位双极性代码中，总有一位作为符号位，通常取 MSB 位为符号位，其余 $n-1$ 位是数值位。

②偏移二进制码与2的补码的区别仅仅在于符号位相反，两者数值位是相同的，因此两者之间的转换十分简单，只要把符号位求反即可实现。由于数据转换电路容易处理偏移二进制码，而数字计算机中采用2的补码作为数据数制，因此这两种双极性二进制数码在数字测试系统中成为主要的编码制式。

③由于双极性二进制码的数值只有 $(n-1)$ 位，因此对单极性域来说，它只能包含 2^{n-1} 个量化单位。更具一般的分辨率定义，其分辨率应为 $1/2^{n-1}$ 。如果把它与 n 位单极性码相比，其分辨率是后者的一半。

④符号—数值二进制码的零码有两个，在数值处理上不方便，因此使用较少。

3) 格雷码 (Gray Code)

格雷码是一种无权二进制码。它的编码特点是相邻的两个数码只有其中的某一位系数有变化，其余各位的系数均不变，如表 2.1.2 所示。这种编码技术主要用于某些直接数字式传感器中。

表 2.1.2 格雷码与二进制小数码对照

十进制分数	自然二进制小数码	格雷码	十进制分数	自然二进制小数码	格雷码
0	0000	0000	8/16	1000	1100
1/16	0001	0001	9/16	1001	1101
2/16	0010	0011	10/16	1010	1111
3/16	0011	0010	11/16	1011	1110
4/16	0100	0110	12/16	1100	1010
5/16	0101	0111	13/16	1101	1011
6/16	0110	0101	14/16	1110	1001
7/16	0111	0100	15/16	1111	1000

格雷码与自然二进制码之间可以互相转换，转换遵循以下原则：

(1) 自然二进制码至格雷码的转换原则

最高位相同，其余位转换时凡是自然二进制码中的某一位码与前一位码相异，则对应该位的格雷码为“1”；凡是自然二进制码中的某一位码与前一位码相同，则对应该位的格雷码为“0”。

例如自然二进制码为 10110110，转换的格雷码为 11101101。

(2) 格雷码至自然二进制码的转换原则

最高位相同，其余位转换时凡是格雷码中的某一位码为“1”，则对应该位的自然二进制码与前一位码相反；凡是格雷码中的某一位码为“0”，则对应该位的自然二进制码与前一位码相同。

例如格雷码为 111000100111，转换的自然二进制码为 101111000101。

上述转换规则可由异或门实现，具体电路见图 2.1.2。

4) 二—十进制 (BCD) 码

二—十进制 (BCD) 码实际是以二进制码的形式表示的十进制码，它以 4 位二进制码表

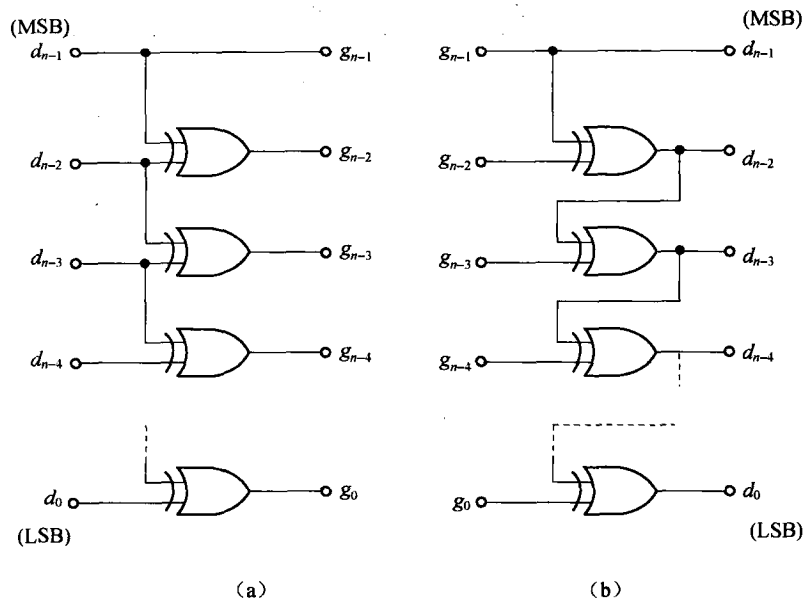


图 2.1.2 n 位格雷码与自然二进制数码之间的转换电路
(a) 自然二进制码转格雷码；(b) 格雷码转自然二进制码

示 1 位十进制数，4 位二进制码对应的权值组合方式有多种，使用较多的是 8421 码与 2421 码，其中，8421 码的各位权值与自然二进制码相同，因此是最常用的一种 BCD 码。凡是不作说明的 BCD 码均是指 8421 码。

例如：8421 码的 0001 代表 1，1001 代表 9；2421 码的 0001 代表 1，1111 代表 9。

自然二进制码与 BCD 码之间的转换可采用程序实现，也可由专门的集成电路实现。如二进制—BCD 码转换芯片 54/74185 或 BCD—二进制码转换芯片 54/74184。二进制—BCD 码转换芯片 54/74185 的引脚及 6 位二进制数—BCD 码转换的原理图见图 2.1.3。

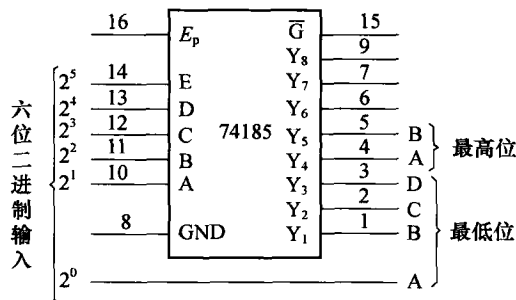


图 2.1.3 74185 的引脚及 6 位二进制数—BCD 码转换

芯片共有 5 位二进制数输入，由于二进制数与 BCD 数的最低位相等，因此两种码的最低位不经过芯片而是直接相通。BCD 码输出有 8 位，其中 Y_8 、 Y_7 不使用， $\overline{G}$ 为允许输入端，当它为高电平时，功能被禁止，并使所有输出端变为高电平。芯片功能表见表 2.1.3。