



导 论

现代加工制造业已步入精密、超精密时代,精确的测量与准确的控制成为现代制造技术的重要基础。随着计算机及网络技术的快速发展与应用,实际工业应用中的自动化系统,不仅有传统意义上的自动控制系统,如开环控制系统、闭环控制系统以及各种各样的计算机控制系统,也有仅实现测量功能的系统,如图像采集与处理系统。通常所说的测控系统一般是指基于计算机的测量与控制系统的集成系统。它广泛地应用于工农业生产、国防、科学研究、生物和医学等各个领域。本书拟通过对基本知识的讲述及实际应用例子的分析,帮助读者掌握测控系统的基础理论、技术与方法,提高解决实际具体测控问题的能力。

信号与系统的概念是测控技术的基础。本章将介绍一些信号与系统的基础知识,并就如何在实际中学习与应用测控系统的专业知识给出一些建议。

1.1 信号的形式

当今社会已经进入信息时代,可以说,人们每时每刻都在获得各种各样的信息,信息在人类的生活中已经处于举足轻重的地位。控制论的创始人维那认为,信息是人和物体与外部世界交换内容的名称,内容是事物的原形,交换即信息载体将事物原形映射到人或其他物体的感觉器官,人们把这种映射的结果认为是获得了信息。实际上,不仅人类能够接受信息,其他生物、非生物也都能接受信息,只是在不同的领域中对应的具体名称不同而已。

信息是多种多样、丰富多彩的,其具体的物理形态也千差万别。例如,语音信息表现为声压的变化,视觉信息则表现为亮度或色彩的变化。通常人们把信息的具体物理表现形式称为信号。在数学上,信号常表达为一个或多个变量的函数,该函数包含了某个或某些现象性质的信息。函数的引入为利用信号对信息进行描述带来了很大方便:信号的具

体物理表现形态并不影响该信号所包含的信息内容,且不同的物理表现形态之间可以相互转换。例如,利用麦克风可将以声压表示的语音信息转换成以电压或电流表示的语音信号,二者虽然物理形态不同,但都包含了同样的信息。

系统这一术语在众多的工程领域,甚至社会经济和文化领域被广泛使用。那么,什么是系统?在金山词霸上给出的解释是“按一定的关系组成的同类事物”。而英文解释则为“A group of interacting, interrelated, or interdependent elements forming a complete whole”。这个解释与郑君里在《信号与系统》一书中给出的解释基本相同,即系统是“由若干相互作用和相互依赖的事物组合而成的具特定功能的整体”。实际上,系统常常被看做为实现某种目的而互相作用的一组事物的集合,是人们从周围世界中孤立出来的、相对于环境而存在的、具有一定结构的元素所组成的集合。从这个意义上讲,大到通信系统、控制系统、计算机系统,小到由若干个元件组成的电路,都可以称为系统。系统的种类繁多,规模与复杂程度也不一样。想要完整地了解一个系统的性质,自然是考虑的因素越全面越好。但考虑的因素过多无疑会增加系统分析的难度,甚至以目前的知识及分析手段无法得到有用的分析结论。因此,在解决具体工程问题时,常常把考虑问题的范围缩小。这样,虽然会在一定程度上损害对系统了解的完整性和精确性,但却比较容易对系统特性得到一个有实用意义的分析结论。

实际上,在现实生活中,人们更关心的是系统的特定功能,对系统的了解与描述也往往是针对这些特定功能来展开的。比如说,提到黑板,人们就会想到“黑色、平面、硬的、用粉笔可写字”等。从对系统进行描述的角度来看,这些概念实际上是通过“黑板”这个系统施加信号,并进一步总结其对输入信号的响应而得到的。“黑色、平面”是因为有光信号入射到黑板表面时,人对黑板反射出的光信号进行观察得到的结论。“硬”则是由于当压力信号作用在黑板表面时,人对相应的表面变形情况进行观察得到的结论。所以,对系统的了解与描述都离不开信号;系统对施加于其上的信号(激励或输入信号)做出响应,产生出与输入信号及系统性质有关的另外的信号(输出信号或系统响应)。在具体工程应用中,信号与系统二者有着非常密切的联系。对一个系统进行分析所经常采用的方法是:分析该系统对某个输入信号或激励的响应,确定系统的性能与系统中某些部件或参数的关系,达到选择部件、确定参数、揭露系统缺陷、解释系统的某些特殊性能等目的。

为了正确地研究和分析系统,需要研究信号以什么形式通过系统。如前所述,函数的引入使得信号所包含的信息内容与其具体物理表现形态脱开,这给利用信号对系统进行描述带来了很大方便。从数学角度上看,信号与函数是通用的。在实际工程应用中,信号可以用一个数学函数式表示,在不能用数学函数式表示时,也可以用信号的图形来表示,信号的图形有时也称为信号的波形。

在许多情况下,对信号的数学描述是通过函数实现的。信号可以是一个或多个自变量的函数。例如,语音信号可以表示为信号振幅随时间变化的单变量函数,也可表示为信

号振幅随时间和三维空间变量变化的多变量函数。由于本书中所涉及的大量信号限于单变量函数,而且一般总是用时间来表示自变量,如随时可听到的语音信号、伴随着我们生命始终的心电信号、脑电信号以及心音、脉搏、血压、呼吸等众多的生理信号,都表现为时间的函数,因此常见的信号形式可根据其与时间的关系分为 3 类:

- (1) 连续时间信号;
- (2) 离散时间信号(离散时间序列);
- (3) 准数字信号。

1.1.1 连续时间信号

连续时间信号是在连续时间 t 内定义的函数,简称连续信号。其数学表示为

$$f(t) \text{——} t \text{ 可为任意实数值}$$

如图 1-1 所示,连续信号允许存在有限个不连续点,在这些点上,函数值发生跳变(如图 1-1(a)中的 $t=0$ 及 $t=T$ 两点),而在不连续点以外的其他时间 t ,函数值均是确定的。应当指出,连续信号的函数值 $f(t)$ 可以是连续的,也可以是离散的。时间 t 和函数值 $f(t)$ 都为连续的信号称为模拟信号。如果时间 t 连续,但函数值 $f(t)$ 离散(只取某些规定值),则称为量化信号,例如某些数字显示仪表中所显示的数字就是这种信号;时间 t 作为自变量是连续的,而所显示的函数值 $f(t)$ 则是经过量化的信号,如图 1-2(b)所示。但在实际应用中,模拟信号和连续信号常不加区分。

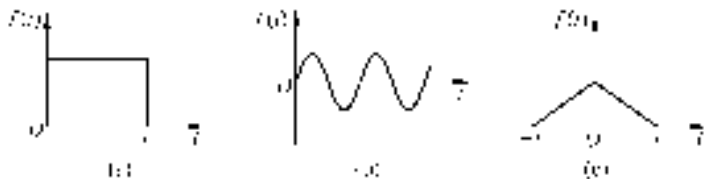


图 1-1 连续时间信号

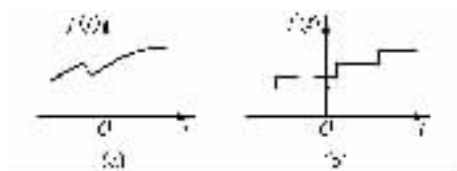


图 1-2 两种连续信号

(a) 模拟信号; (b) 量化信号

特别地,在进行系统的分析与设计过程中,常常假设在给定 t 范围内(如 $t < 0$), $f(t)$ 为 0,如图 1-1 中(a),(b)所示。

需要指出的是,在实际工程应用中遇到的信号,自变量不一定是时间,还可以是其他空间变量,如高度或深度等,因此这里所说的时间 t 也可换成其他物理量。如 t 为距离,则为空域信号。物理信号一般都是实信号,而建立在数学模型基础上的信号则可能是复信号。

1.1.2 离散时间信号

顾名思义,离散时间信号是离散时间的函数,简称离散信号。具体来讲,在一些离散的时间瞬间才有确定值的信号称为离散信号,因此“离散”一词是指在某些不连续的时间瞬间($t_k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$)具有函数值,而在其他时间,函数没有定义。 t_k 与 t_{k+1} 之间的间隔可以是相等的,也可以是不等的。在测控系统中一般只讨论间隔相等的情况。

离散信号也常称为时间序列。实际上,离散信号在生活中经常遇到,例如工厂中设备巡检人员对设备的某个参数,如温度、压力等进行定时检查记录所得到的就是随离散时间变化的信号。离散信号的数学表示为

$$x[n] \text{——} n \in \{\dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$$

其中,整数 n 与连续时间信号的时间 t 相对应。

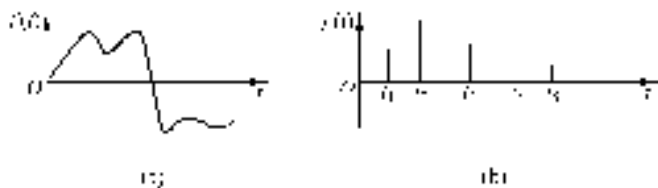


图 1-3 连续信号与离散信号

连续信号与离散信号的区别如图 1-3 所示,离散信号仅在特定离散瞬时的 $t_1, t_2, \dots$ 上是时间的函数,而两瞬时点之间的信号值则不确定。因此虽然从表面上看离散信号的包络线就是连续信号,但所包含的信息却少了许多。

有许多离散信号是连续信号在时间上离散化的结果,离散信号的函数值 $x(n)$ 可以是连续的,也可以是离散的。如果离散信号的函数值是连续的,如图 1-4 所示,由连续信号通过采样开关获得离散时间信号,称为抽样信号或取样信号。

离散信号的另一种更常见的情况是其幅值被限定为某些离散值,即时间与函数值均为离

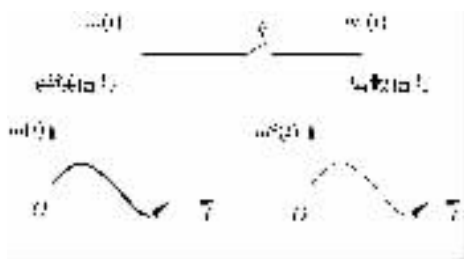


图 1-4 连续信号通过采样得到离散信号

散值,这种信号称为数字信号。简单地说,只有在时间和幅度上都取离散值的信号才称为数字信号。

1.1.3 准数字信号

随着数字传输技术的发展,在模拟信号与数字信号之外,还有一种信号经常遇到,一般称为准数字信号(见图 1-5)。如振荡器输出的频率信号、串行数字信号等。准数字信号的特点在于其幅值是二值化的(高、低电平),但在时间轴上的取值却是连续的。与前述两种信号不同,信号中的有用信息体现为电平上升/下降沿之间的时间长度,而对信号幅值的小范围波动则不敏感。从信号传输的抗干扰性及与数字电路接口的友好性来讲,这种信号类似于数字信号。但由于时间上是连续取值的,因此对信号进行分析处理所需要的电路及算法均与前述两种信号不同。



图 1-5 准数字信号

频率信号是传感器与检测系统中最常见的一种准数字信号,目前见诸文献报道的许多数字化传感器的输出信号大多属于这种类型。如石英晶体微天平(quartz crystal microbalance, QCM)、谐振器式声表面波压力传感器、调频式电涡流传感器等的输出量均为频率信号。此外,由于频率信号抗干扰性强,易于传输,可以达到较高准确度的测量,尤其是可以不需要通过 A/D 环节直接接入单片机进行测量,有些本来是模拟量输出的传感器也往往采用电压-频率转换器件将输出量转换为频率量输出,以求降低总体测控系统的成本。因此,在测控系统中,频率的测量及应用越来越受到重视。

近年来,由于单片机内部含有稳定度较高的标准频率源、定时/计数器等硬件,能很方便地对外部信号或标准频率信号进行计数,并且可以进行计数的逻辑控制以及数据存储运算等,基于单片机的频率测量系统可以具有更小的体积、更实用的功能及更便宜的价格,故以单片机为核心器件的频率测量系统得到了广泛的应用。

信号的频率是指信号每秒变化的次数,单位为 Hz。根据这一定义,对准数字信号的频率进行测量,实际上就是要测量在单位时间内信号的脉冲个数,即

$$f_x = N/T \quad (1-1)$$

式中: f_x ——信号的频率;

N ——时间长度 T 内信号的脉冲个数。

因此,欲测量 f_x ,必须选择一个时间长度作为测量闸门或基准,才能利用数字电路中的计数器进行测量。根据测量基准的不同,可将频率测量方法分为频率测量法与周期测量法

两种。

图 1-6(a)所示为频率测量法。以给定时间长度为测量基准,将被测的频率信号加到计数器的计数输入端上,让计数器在标准时间 T_s 内进行计数,所得的计数值 N_{xf} 与被测信号的频率 f_x 有如下关系:

$$f_x = N_{xf} / T_s \quad (1-2)$$

图 1-6(b)所示为周期测量法。以被测信号的周期 T_x 作为测量基准,将标准频率信号送到计数器的计数输入端,让被测频率信号控制计数器的计数时间,所得的计数值 N_{xp} 与 f_x 有如下关系:

$$f_x = f_s / N_{xp} \quad (1-3)$$

式中: f_s ——作为测量基准的标准频率信号的频率。

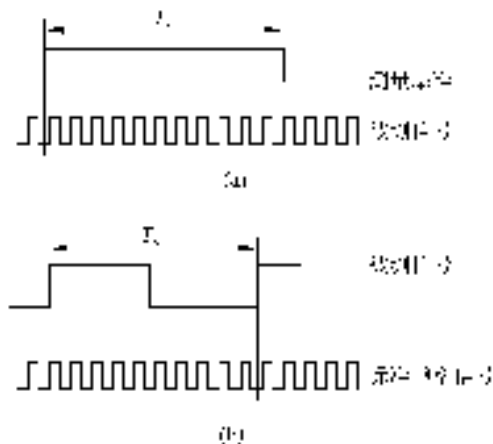


图 1-6 频率测量原理

(a) 频率测量法; (b) 周期测量法

以上两种方法无论用哪种方法,频率测量的主要误差源都是由于计数器只能进行整数计数而引起的 ± 1 误差:

$$\epsilon = \frac{\Delta N}{N} = \pm \frac{1}{N} \quad (1-4)$$

对于频率测量法,有

$$\epsilon_f = \pm \frac{1}{N_{xf}} = \pm \frac{1}{T_s f_x} = \pm \frac{f_s}{f_x} \quad (1-5)$$

对于周期测量法,有

$$\epsilon_p = \pm \frac{1}{N_{xp}} = \pm \frac{1}{T_x f_s} = \pm \frac{f_x}{f_s} \quad (1-6)$$

由式(1-4)可见,绝对误差与被测信号频率无关,均为 ± 1 。测量的相对误差与信号频率有关:在同样的 T_s 下,信号频率越低,频率测量法的测量误差越大;而周期测量法则正好相反,被测信号频率越高测量误差越大。因此,频率测量法多用于测量高频信号,一般来说,被测信号频率在5kHz以上时,可保证足够的测量精度及测量速度。而周期测量法则用于测量低频信号,一般被测信号频率不高于500Hz时可得到比较理想的测量结果。显然,增大作为测量基准的时间长度有助于降低测量误差。例如周期测量法中,采用多个周期(M 个)代替单个周期作为测量基准,则测量误差降低为原来的 $1/M$,即

$$\epsilon_{Mp} = \pm \frac{1}{(MT_x)f_s} = \pm \frac{f_x}{Mf_s} \quad (1-7)$$

增加频率测量法的 T_s 同样可降低测量误差,在通用频率计中一般在控制面板上设有0.1s,1s,10s等档位开关,供用户根据具体测试频率进行选择。但这是以牺牲测量速度为代价的。在频率测量中,测量速度是个非常重要但又经常被人忽视的参数。频率测量法由于测量的闸门时间 T_s 是固定的,所以测量速度也是固定不变的。如欲达到1Hz的频率分辨率,则闸门时间为1s。而欲达到0.1Hz频率分辨率,闸门时间为10s。这对于一般的显示仪表而言属于比较慢的速度,对于需要进行实时控制的系统则几乎是无法容忍的速度。周期测量法由于测量的闸门时间是被测信号的周期,所以其测量速度是由被测信号的频率决定的。当被测信号的频率变化范围较大时,测量速度的大范围波动很可能对测控系统的性能产生影响,在实际应用中需要特别注意。

在实际应用中,由于被测量的变化范围及传感器的灵敏度一般是固定的,被测信号的频率变化范围波动不会很大,但传感器中电路器件参数的不一致性往往会导致实际输出信号的基础频率在很大范围内波动。上述两种测量方法的测量误差均与被测信号的频率有关,用起来很不方便,因此近年来出现了许多改进的测量方法。

图1-7所示为一种利用单片机实现的测频-测周法的程序流程图。这实际上是一种根据实际信号频率在两种测量方式之间进行自动切换的方法。通过软件编程,控制单片机中定时/计数器的工作方式,实现频率测量法和周期测量法之间的动态切换。因而,这种测量系统可适应宽量程范围的频率测量需求。其中根据实际应用中对测量误差或测量速度的要求,选择合适的切换频率点 f'_x 是此方法的关键。另外,切换频率点处频率测量的连续性也是需要重点考虑的问题。如图1-7所示,通过人为设定一个周期测量法的上限频率 f'_{x2} 和一个频率测量法的下限频率 f'_{x1} ,使得 f'_{x1}, f'_{x2} 在 f'_x 附近,并有

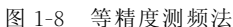
$$f'_{x1} < f'_x < f'_{x2} \quad (1-8)$$

由于切换频率点附近存在一个切换范围,当被测信号频率在该频率点附近变动时,可保证两种测量方法的平滑切换。

针对频率测量误差与被测信号频率有关这一问题,在频率测量法的基础上提出了等



等精度测频的实现方法可简化为图 1-8 所示的框图。CNT1 和 CNT2 是两个可控计数器,标准频率(f_s)信号从 CNT1 的时钟输入端 CLK 输入;被测信号(f_x)从 CNT2 的时钟输入端 CLK 输入。每个计数器中的 CEN 输入端为时钟使能端,控制时钟输入。当预置闸门信号为高电平(预置时间开始)时,被测信号的上升沿通过 D 触发器的输出端,同时启动两个计数器计数;同样,当预置闸门信号为低电平(预置时间结束)时,被测信号的上升沿通过 D 触发器的输出端,同时关闭计数器的计数。该方法的时序如图 1-9 所示。



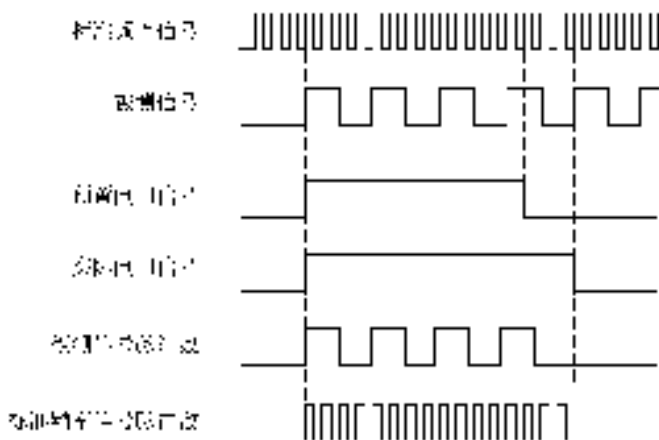


图 1-9 等精度测频法时序图

在测量过程中, CNT1 和 CNT2 两个可控计数器分别对标准信号和被测信号同时计数。

闸门开启信号(预置闸门上升沿)到来时,由于 D 触发器的采用,此时计数器并不开始计数,而是等到被测信号的上升沿到来时,计数器才真正开始计数。预置闸门关闭信号(下降沿)到来时,计数器同样并不立即停止计数,而是等到被测信号的上升沿到来时才结束计数,完成一次测量过程。可以看出,由于计数器的开始与停止均由被测信号的上升沿控制,实际闸门时间不是固定的值,而是被测信号周期的整数倍,即与被测信号同步,因此 CNT2 中所记录的被测信号脉冲数无截断误差,而 CNT1 中所记录的标准频率信号脉冲数则有截断误差 ± 1 。

设在一次实际闸门时间 τ 中计数器对被测信号的计数值为 N_x , 对标准频率信号的计数值为 N_s , 标准信号的频率为 f_s , 则被测信号的频率为

$$f_x = \frac{N_x}{N_s} f_s \quad (1-9)$$

若忽略标准频率 f_s 的误差,由式(1-9)可得

$$df_x = -\frac{N_x}{N_s^2} f_s dN_s \quad (1-10)$$

由于 $dN_s = \pm 1$, $\tau = N_x / f_x$, $N_s \approx \tau / f_s$, 等精度测频可能产生的相对误差为

$$\epsilon = \left| \frac{df_x}{f_x} \right| \approx \frac{\frac{\tau f_x}{(\tau / f_s)^2} f_s |dN_s|}{f_x} = \frac{1}{\tau f_s} \quad (1-11)$$

由于实际闸门时间 τ 与预置闸门时间的差不超过一个被测信号的周期,基本可视为常数,因此式(1-11)所示的相对误差仅与闸门时间和标准信号频率有关,而与被测信号频率的大小无关,即实现了整个测试频段的等精度测量。闸门时间越长,标准频率越高,测

频的相对误差就越小。标准频率可由稳定度好、精度高的高频率晶体振荡器产生,在保证测量精度不变的前提下,提高标准信号频率,可使闸门时间缩短,即提高测试速度。

1.2 系统的性质与分类

工程中所应用的具体系统,从一块最简单的电路板到大型测试仪器设备、工厂的自动化监控系统等,实际上都是由一些元件、器件或子系统互联而成的。如前所述,信号通过某一系统的过程,可视为该信号(输入信号)到另一信号(输出信号)的转换过程。在过程中,系统对信号产生影响,输出新的信号。而系统本身的性质则体现在输入输出信号之间的关系中。任一个大系统(如通信系统、控制系统、电力系统、计算机系统等)可分解为若干个互相联系、互相作用的子系统。各子系统之间通过信号联系,信号在系统内部及各子系统之间流动。根据系统的输入信号与输出信号的形式,系统可分为连续时间系统、离散时间系统与混合系统三种形式(见图 1-10)。连续时间系统的输入输出信号都是连续信号,而离散时间系统的输入输出信号都为离散信号。混合系统的输入输出信号则是连续时间信号与离散时间信号的组合。由于计算机技术在测控系统中的广泛应用,大量的实用测控系统中既有连续信号,也有离散信号,即属于混合系统。

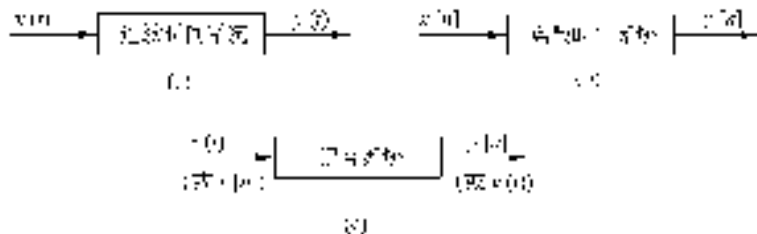


图 1-10 连续时间系统、离散时间系统与混合系统

(a) 连续时间系统; (b) 离散时间系统; (c) 混合系统

图 1-11 所示为恒温恒湿箱测控系统硬件框图。ICL7135 为 A/D 转换器件,负责将与温度、湿度值对应的连续信号转换为数字信号,输入后续数字电路进行处理后输出控制信号,控制加热器、制冷器等设备的动作。系统中既有连续信号,又有数字信号,是一个典型的混合系统。

描述系统的最简单数学形式就是函数。对于单输入、一维连续时间系统可表示为

$$y(t) = T\{x(t)\} \quad (1-12)$$

同样地,对数字系统有

$$y(n) = T\{x(n)\} \quad (1-13)$$

将系统视为“黑箱”,这一过程可以用方框图表示,如图 1-12。