

第 1 章 检测理论基础

人类在观察和测量自然界各种现象时，需要借助于仪器仪表以及由仪器仪表组成的检测系统，它们是人类感官极其重要的扩展和延伸。曾有学者这样认为：“仪器仪表是对测量方法和仪器仪表设计的共同理论进行研究的一门科学。”自动检测或称仪器仪表学，是自动化科学技术的一个重要分支学科，是在仪器仪表的研制、生产、使用的基础上发展起来的一门综合性技术科学。

测量和检测问题广泛存在于各行各业，存在于生产、生活等领域，而且随着生产力水平与人类生活水平的不断提高，对测量和检测问题提出了越来越高的要求。除了要求能准确、迅速、可靠地完成检测任务之外，还要求能实现自动与智能化的检测，即如何使用各种先进技术、现代化的检测工具和手段来组建先进的自动检测系统，因此自动检测已越来越显示出它的重要性。

检测技术的发展，即仪器仪表的发展大致经历了三个重要的时期。

(1) 手工艺时期

20 世纪以前，搞科学研究的人多数是个体脑力劳动者。理论研究常常需要实验研究，大多数科学家是自己设计实验，自己动手制作测试仪器。工业生产上使用的仪表大多数属于机械指示式的仪表，主要作为主机的配套设备来使用。因此，这个时期的仪器仪表功能较简单，用途专一，仪器仪表间的互相联系很少。

(2) 仪器工程时期

随着电子技术的发展，由于晶体管、电子管的应用以及光电、压电、热电等效应的广泛应用，出现了大量的电测仪表和自动记录仪表，在科研、生产上逐步形成了一个由测量点到记录仪表的检测系统。由各种电测仪表、自动记录仪表、自动显示仪表、自动调节仪表等组合而成的自动检测系统，能实现对被控对象的监测、控制等目标。

(3) 仪器科学时期

近年来，因各种新理论、新技术、新材料、新器材和新工艺的不断出现及微机的广泛应用，使仪器仪表及相关的检测技术得到飞速发展，设计和制造仪器仪表已不再是一门工艺而是一门综合技术。正确应用各种仪器仪表，根据检测对象的特性和检测的具体问题来组建科学的检测系统，是获得有关被测对象信息的基本前提。在仪器仪表的设计、制造和使用过程中，需要涉及众多的知识领域和先进技术，包括物理学、化学、精密机械设计、电子技术、微机技术、信息处理技术、数据通信技术、自动控制技术等。科学技术的发展又不断地对检测技术的发展提出了更严格的要求，比如需要不断地发现和研究和新的和不易觉察到的物理、化学、生物等现象和效应，要求进行更快、更准、更灵敏、更可靠的检测和测量，要求研制和设计智能化、多功能化、数字化、集成化、微型或小型化的智能仪器仪表、智能检测系统等等。

因此，作为一门综合性技术科学的检测技术（或仪器仪表学），有众多的技术问题需要研究，有广泛的应用前景。随着现代科学技术的发展，其重要作用和地位会越来越突出。

1.1 检测与自动检测

测量是人类认识事物本质所必不可少的手段和方法。通过测量和试验能使人们对事物获得定性或定量的概念，并发现客观事物的规律性。科学发展史充分说明，实验或试验是人类认识客观世界、改造客观世界的必然途径，而实验或试验离不开测量。因此，可以毫不夸张地说，人类的一切活动领域都离不开测量。例如，用游标卡尺测工件的长度或直径；用体温表测量人体的体温；在商场用电子秤称量顾客所购买商品的重量；在加油站用自动加油机为各种机动车辆自动加油，自动记录并显示加油的数量和金额；卫星测控站对所观察的卫星的飞行高度、速度、方位、轨道等大量的信息进行遥测并施以遥控等等。

那么，什么是测量呢？广义而言，测量就是使用专门的技术工具，依靠实验和计算，找到被测量值（包括大小和正负）的过程。通过测量，人们能在限定的时间内，尽可能正确、可靠地收集到被测对象的未知信息，以便及时掌握被测对象的参数和变化情况，便于及时控制其变化过程。为了检查、监督和控制某一生产过程或某一对象，使其处于预定的最佳运行状态，也必须掌握描述这些特性的各种参数变化，为此必须对这些参数，如大小、方向、变化速度等进行测量。

“测量是以确定量值为目的的一组操作”。所谓“量值”即物理量。对于每一种物理量，它不仅具有一些物理对象共有的定性性质，如温度、质量、长度等，还有它的定量性质，如温度的高低、质量的大小、长度的长短等。日本标准 JISZ9001《抽样检测通则》中对测量 (Measurement) 的定义为：“按某种方法用量来表示其性质的一种操作。”为了确定某一物理量的大小，就要进行比较，因此，有人把测量定义为“实验比较过程”，即“用同性质的标准量与被测量比较，并确定被测量对标准量的倍数”（标准量应是国际上或国家所公认的、性能稳定的量），这一定义可用数学公式表示为

$$g = \frac{x}{V} \quad (1-1)$$

式中， g 为比值，无量纲； x 为被测量； V 为标准量。

从这个式子可以看出，同一物理量测量的结果，因所选用的单位不同其数值会不同。所以在给出测量值大小时，一定要同时给出所用的测量单位。比如，

$$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2 \approx 0.1\text{mm 水柱高}$$

整个测量过程包括对比、示差、平衡和读数 4 个基本动作，它贯穿于一切测量过程中。要改进测量，就应简化和完善这些基本动作。

与测量概念相近的一个概念是测试 (Test and Measurement)，它是测量和试验的合称，有时把比较复杂的测量称为测试。国标 GB6583《质量—术语》中对试验 (Test) 的定义是：“对产

品、过程或服务的特性进行的实验和测定。”试验一词常用于对产品的额定值、极限值验证的场合。

在生产过程中还常用到另一个与测量概念相近的术语——检验。检验常常不需要被测参数的准确值，但要分辨参数所在的某一范围。例如，机械加工中，检验某零件尺寸是否在公差带之内，此时并不要求确切各零件尺寸值；又如电子工业中对电器元件虚焊的检验，这里只要发现有无虚焊点的存在等等。检验在生产过程中与测量有着同样重要的作用，除了可单独离线在实验室检验外，在生产过程中也常采用在线检验。为了概括这一工作，人们常把检验和测量结合在一起，统称为检测。

在整个测量过程中，对比、示差、平衡和读数 4 个基本动作以及检验过程完全不需要或仅需要很少的人工干预，由系统自动完成，这就是自动检测。实现自动检测可以提高自动化水平和程度，减少人为的干扰因素和人为的差错，提高生产过程或设备的可靠性及运行效率。自动检测的任务主要分为两种：一是将被测参数直接测量并显示出来，以告诉人们或其他系统有关被测对象的变化情况（即通常而言的自动检测或自动测试，又称自动监测等）；二是用做自动控制系统的前端系统，以便根据参数的变化情况作出相应的控制决策，实施自动控制。例如，在机械加工中的自动检测任务，主要分为机械加工过程中的自动检测和机器运行过程中的自动检测两方面。机械加工过程中的自动检测与自动化的内容是：加工准备阶段的自动检测，如加工前对坯件、所使用的加工设备进行各种自动检查，加工设备是否正常，刀具、坯件是否已准备好等；对工作状况的自动检测及检验，对工件尺寸、加工粗糙度、形状、位置公差等的自动测量和检验，由结果判定是否是合格产品；对加工条件（包括加工规范和环境条件）的自动检测，比如加工中经常对切削速度、切削力、进给速度、温度、压力、振动等参数进行自动检测，以便及时确认变化情况，将测量信息反馈给加工机械进行及时调整；控制加工机械自身运动的自动控制。精密机床、数控机床的定位和位移动作，都需要通过一定的检测系统检测其运动部件的位置及动作情况，如转速、刀具位移、方向夹角、转矩、尺寸等，并将测量结果和给定值进行比较，若有偏差，则通过反馈控制自动调节。机械运行过程中的自动检测系统，是故障监测和故障诊断系统，其目的是提高设备运行的可靠性和安全性，用于设备的运行管理和长期的状态监测，及时发现异常情况，对故障进行预防和早期诊断。例如，美国 K&T 公司的“机床诊断通信系统”（DCS），专门用做小型数控加工中心的遥控诊断设备。

由于测量领域不断扩大，参数范围也在不断延伸。另外，很多情况下需要测试的信息往往与其他背景物理量掺杂在一起，用简单的测量很难完成任务，这时需要用若干测量仪器或仪表，以及附加设备来构成一个有机的整体，才能完成检测任务，这就是检测系统。检测系统应能完成对被测对象进行检测、变换、分析、处理、判断、比较、存储、控制、显示等功能，即一个完整的检测系统包括 4 大部分：信息的获取部分、信息的变换、处理部分、信息的传输、记录或显示部分、附加设备（如电源、控制部分等）。检测系统是检测技术发展到一定阶段的必然产物，特别是在自动化生产过程中，要求过程参数的检测能自动地进行，这就产生了自动检测系统。

1.2 基本检测方法

为了获得被测对象的真实值(真实信息)需要对被测对象进行检测。为了达到上述目的,要采用适当的变换原理,选用合适的测量工具或设备,设计合理的测量方案,即要选择合理的检测方法。检测方法的选择是信号检测中的重要问题。如果检测方法选择不当,即使选用了高精度的仪器仪表也不一定能获得满意的测量结果,甚至不能把被测信号检测出来。

检测方法的分类方法很多,从不同的角度出发,有不同的分类方法。下面介绍一些常用的基本检测方法。

1.2.1 直接按照物理定律检测法

直接按照物理定律检测法是把从被测对象中取得的一部分能量作用到检测元件上,在检测元件上使其按照一定的物理定律转换为易于测量和传输的量,再对这一经变换所得的量进行直接测量,其大小就代表了被测对象的值。采用这种检测方法时,从被测对象中取得能量时不应影响被测对象的物理状态。

根据是否需要外加辅助能源,这种检测方法又可分为两种形式。

1. 无需辅助能源的直接变换式

这种检测形式是从被测对象取得一部分能量作用到检测元件上,从检测元件得到反映被测量大小的输出值。如图 1-1 所示 设被测量为 x 输出值为 y 则有 $y=f(x)$ 。例如,用热电偶测量加热炉的炉膛温度,将热电偶插入炉膛内,使它感受到炉膛温度,热电偶从炉内取得能量后经金属导体(热电偶)的热电效应转换为热电势 其值大小可表示为

$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \quad (1-2)$$

式中, $E_{AB}(T, T_0)$ 为热电偶输出热电势; $e_{AB}(T)$ 为被测温度产生的热电势; $e_{AB}(T_0)$ 为热电偶冷端温度产生的热电势。

其检测系统如图 1-2 所示。

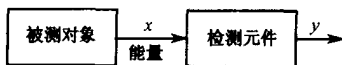


图 1-1 直接变换式

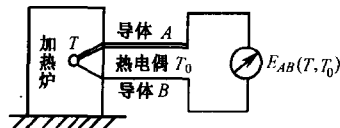


图 1-2 热电偶测量系统

2. 需要辅助能源的调制变换式

这种检测形式反映出被测对象的输出值 y 的能量，它由两部分组成：一部分从被测对象取得，另一部分由辅助能源供给。输出值 y 由被测量决定，辅助能源是为了便于检测而加入的。其结构形式如图 1-3 所示。例如，用霍尔元件测量磁场，将用半导体材料制成的片状霍尔元件垂直置于被测磁场中，给霍尔元件通以电流（辅助能源）。霍尔元件在垂直于电流方向和磁场方向的端面上出现电位差，即半导体材料的霍尔效应，这个电位差称为霍尔电势 U_H ，它的大小由下式决定

$$U_H = K_H IB \quad (1-3)$$

式中 U_H 为霍尔电势； K_H 为霍尔系数； I 为辅助能源所供给的电流； B 为被测磁场的磁感应强度。

当霍尔元件选定后， K_H 为确定的数值。当辅助能源所供给的电流 I 不变时，霍尔电势 U_H 只取决于被测磁场 B ，从而实现了磁场的测量。其检测系统结构如图 1-4 所示。

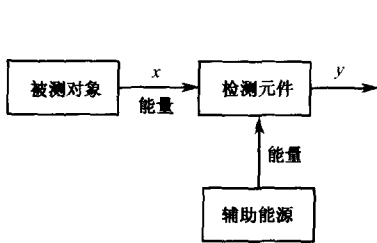


图 1-3 调制变换式

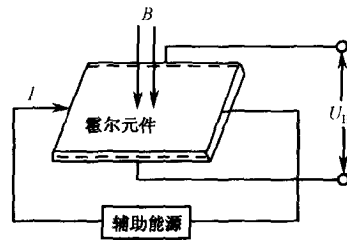


图 1-4 霍尔元件测量磁场系统

1.2.2 探查型检测法

应用这种检测方法的检测系统的输入信号，是由探查部件发出的探查信号与被测物体的被测量以某种规律变换而成的，如图 1-5 所示。例如用超声波法探测密闭容器的液位如图 1-6 所示。超声波发生器发出的超声波从容器底部发射，经被测液体至其上表面，再由被测液体上表面反射回来，被超声波探测器所接收。设超声波在被测液体中的传播速度为 v ，被测液体的液位高度为 H ，超声波从发射到接收所经历的时间为 t ，则有

$$H = \frac{t}{2} v \quad (1-4)$$

式中 t 为测量所得值。

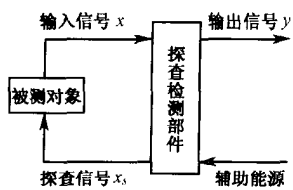


图 1-5探查型检测系统

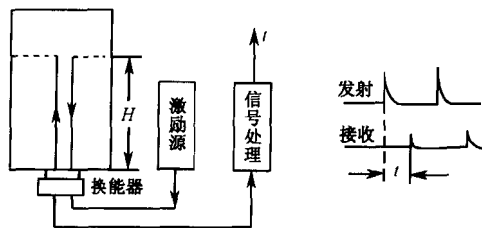


图 1-6超声波液位检测系统

1.2.3比较型检测法

这种检测方法是将被测量 x 与标准量 N 进行比较而实现对被测量进行测量的方法，如图 1-1 所示，具体实施方案有三种。

1.平衡法

所谓平衡法就是把被测量与标准量进行直接比较。若有差值 则调整标准量 使标准量与被测量达到平衡 即两者相等 这时标准量的示值 就代表被测量的大小。例如 用平衡电桥测电阻，如图 1-8 所示。电桥由被测电阻 R_x 可调的标准电阻 R_N 及桥臂电阻 R_1, R_2 组成。检流计 G 用以指示电桥平衡状态。测量时 在电桥上接入 R_x 看检流计是否指零。若不指零 说明电桥不平衡 需调整 R_N 使检流计指零 即电桥平衡。这时有

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N \quad (1-5)$$

式中 R_1/R_2 为已知 R_N 从标准电位器读出 被测电阻 R_x 的值即可测得。

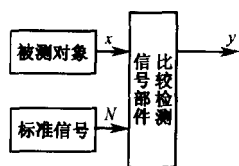


图 1-7比较型检测系统

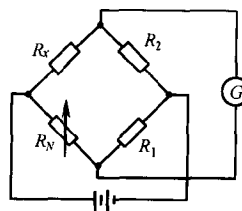


图 1-8平衡电桥

用电位差计测量未知电压也是应用平衡法。图 1-1 是其原理示意图，图中 E 为工作电源，测量前调节 R_s ，以便校准工作电流 I_s ，使其达到标准值，在电位器 R_s 上将产生标准电压降 $U_{s0} (U_{s0} = R_s I_s)$ 。接入被测电压后调节电位器的动触点，使检流计 G (指零机构) 的示值返回零点，这时 A, B 两点间产生标准电压降 U_s ，检流计 G 指零表明 AC 支路中没有电流流过，从而

精确地保证 A 点和 C 点等电位, 则有 $U_x = U_s$ 。从图中可知 $U_s = \frac{R_2}{R_s} U_{s0}$ 所以标准电压降 U_s 随动触点的位置而变。平衡法仪表中必须有一个可变化的标准量, 指零机构 G 检查标准值 s 和待求量 x 对它的正、反作用是否相等 指零机构愈灵敏 这两个作用相等的判断愈准确 愈有利于提高测量精度。

采用平衡法测量时, 必须执行调节标准量 (在本例中调节工作电流 I_s 和电位器动触点得到一个精确的 U_s 的操作 这就需要一定的时间历程 因而平衡法仪表就难以测量变化较快的被测量, 即使做成自动平衡式仪表, 其测量速度也受到一定限制。

2. 偏差法

当测量仪表用指针相对于刻度线的位移 (偏差) 来直接表示被测量大小时, 这种方法就是偏差式测量法 (简称偏差法) 在使用偏差法测量时 指针式仪表内没有标准量具 而只有经过标准量具标定过的刻度尺。由于刻度尺的精确度不能做得很高, 所以这种测量方法的测量精度一般不高于 0.5% 经过特殊设计时可达 0.1%。

在偏差法测量仪表中, 被测量的作用为仪表中某个元件的反作用 (这个反作用常与指针位移或偏转角度成线性关系) 所平衡。被测量增大, 所需平衡的反作用相应增大, 因此指针的偏转随之按比较增大。最常见的例子是动圈毫伏表。

3. 微差法

微差法是偏差法和平衡法的组合 被测量 x 的大部分作用先与已知标准量 s 的作用相抵消 剩余部分即两者的差值 $d = x - s$ 再用偏差法测量。微差法总使差值 d 很小 (微差之名由此而得) 因此 即使差值测量的精度不高 但是最终结果仍可达到较高精度。 d 愈小, 它的测量误差对总的误差影响就愈小。微差法的另一个优点是不需要可调节的标准量具, 也无需平衡操作。这样 标准量的精度容易做得高 对被测量的反应也可以快 比较适用于工程测试。

例如 检测标准电池时 用一具有标准电势 U_N 的标准电池、电位差计及被测电池组成检测系统 如图 1-10 所示。

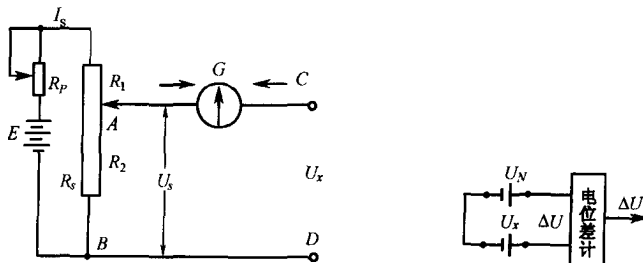


图 1-9 电位差计原理示意图 图 1-10 微差法检定标准电池

用被检电池与标准电池直接进行比较 即两者相减 取得差值 $U = U_x - U_N$ 用电位差计测量出 U 的数值 则被检电池的电动势为

$$U_x = U_N + \Delta U \quad (1-6)$$

工业上使用的偏差指示仪表就属于这种类型。

1.2.4 信息处理型检测法

用这种方法对被测对象进行检测时，检测量不是直接转换成所需的被测量，而是经过对检测所得信息进行处理分析后，才能得到所需的被测量的检测方法，其原理如图 1-11 所示。例如用相关法检测旋转体的转速测量原理框图如图 1-12 所示。用检测器（如测振仪）收集被测旋转体的随机信号并转换成电压信号 $U(t)$ 。电压信号 $U(t)$ 中包括周期的转速信号 $N(t)$ 和噪声电信号 $S(t)$

$$U(t) = N(t) + S(t) \quad (1-7)$$

$N(t)$ 和 $S(t)$ 是两个互不相关的随机过程，当取延时时间 t 足够大时，因为 $N(t)$ 和 $S(t)$ 互相关函数为零， $S(t)$ 的自相关函数因 τ 足够大而趋近于零，所以 $U(t)$ 的自相关函数为

$$R_U(\tau) \approx R_N(\tau) \quad (1-8)$$

$R_U(\tau)$ 为 $U(t)$ 的自相关函数， $R_N(\tau)$ 为 $N(t)$ 的自相关函数，经过信息处理系统对随机信号 $U(t)$ 进行自相关运算，并测量出自相关函数 $R_U(\tau)$ 的频率 f ，就可得到被测旋转体的转速 n 。即

$$n = 60f \text{ (r/min)}$$

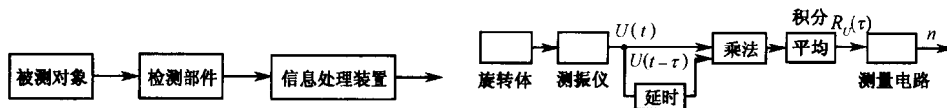


图 1-11 信息处理型检测系统 图 1-12 相关法转速检测系统

检测方法的选择应根据被测量类型、被测量的现场条件（如空间位置、机械振动、热辐射、电磁场等干扰）以及量程、精度、反应速度等方面的要求进行。以上介绍的只是检测方法中常用的几种基本类型，在实际工作中，应对被测对象做具体分析，才能确定出合理的检测方法，设计出合理的检测系统。

1.3 常规检测系统基本结构

检测各种被测参数时，为了实现检测的目的，检测系统可以使用各种各样的结构形式。但归纳起来，广泛采用的结构形式主要有以下几种。

1.3.1 重复（串联）结构

一般检测系统由传感器或敏感元件（或称检测元件）、信号处理装置和显示装置组成。为

了提高检测系统的灵敏度和抗干扰能力 常采用多个基本元件的串联 重复 结构形式。例如，用热电堆检测温度时，基本检测元件是热电偶，热电堆由多个单个热电偶串联而成，其输出是各单个热电偶输出热电热之和。对同一被测温度，采用热电堆比采用单个热电偶，其输出电势提高了若干倍。由于输出信号强了 从而提高了抗干扰能力。

1.3.2 反馈结构

这里所说的“反馈”，主要是指负反馈在放大器和自动控制系统中的应用。将反馈技术引入到检测技术中，不仅可以提高测量精度，改善检测系统的性能，而且能使某些用传统检测系统无法解决的问题得以解决。

典型的反馈结构检测系统原理图如图 1-13 所示。由图可以看出，反馈检测系统与一般检测系统的区别在于 它具有一个由‘逆传感器’构成的反馈回路 由闭环系统的性质可知 反馈型检测系统的特性基本上是由逆传感器的特性所决定。

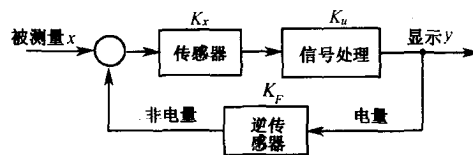


图 1-13 反馈型检测系统

“逆传感器”可视为将电量转换为被测非电量的传感器。反馈型检测系统中所采用的比较和平衡方式有 力和力矩平衡、电流平衡、电压平衡、热流平衡、温度平衡等。

反馈型检测系统的静态特性可由式 (1-9) 描述

$$y = \frac{K_x \cdot K_u}{1 + K_x \cdot K_u \cdot K_F} x \quad (1-9)$$

当 $K_x \cdot K_u$ 足够大 使 $K_x \cdot K_u \cdot K_F \gg 1$ 时 则

$$y \approx \frac{1}{K_F} x \quad (1-10)$$

式中 K_x 为传感器的静态传递系数 K_u 为信号处理部分的静态变换系数 K_F 为逆传感器的静态传递系数。

例如 力平衡式加速度检测系统 如图 1-14 所示 由惯性质量 m 弹性支承 3 位移传感器 2, 阻尼器 1 伺服放大器和磁电式力发生器 逆传感器 4 组成。

在检测加速度时，将力平衡式加速度传感器固定在被测物体上。在加速度 a 作用下 惯性质量 m 偏离零点位置 偏离量为 x 。用高灵敏度的位移传感器检测 x 值并送出与位移成正比的信号 u ， u 经伺服放大器变换成电流 I 送给磁电式力发生器。磁电式力发生器产生一个与位移方向相反的电磁力，力图使 m 趋向零点位置。当磁电式力发生器产生的力与作用在 m 上的加速度 a 所产生的力平衡时，伺服放大器输出电流 I 经显示装置显示出来 将代表被测加

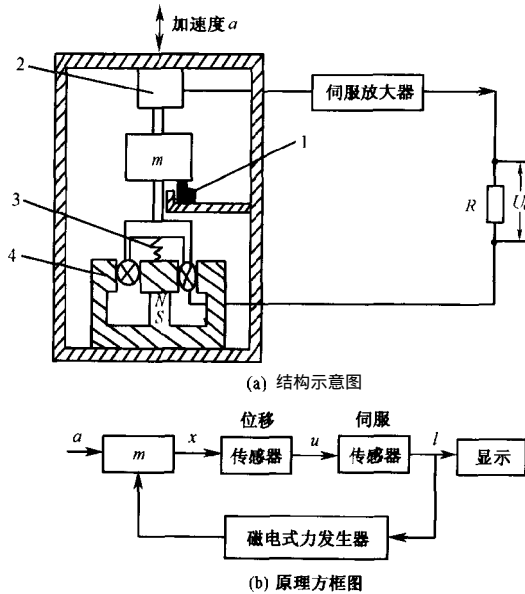


图 1-14 力平衡式加速度检测系统

速度 a 。

1.3.3 差动结构

差动结构的检测系统如图 1-15 所示。被测量为 u_1 ，干扰量（或称影响量）为 u_2 ，传感器（或称变换器）有 A、B 两个变换器，A 输出为 y_1 ，变换器 B 输出为 y_2 ，总的输出 $y = y_1 - y_2$ ，这就是所谓的差动结构。

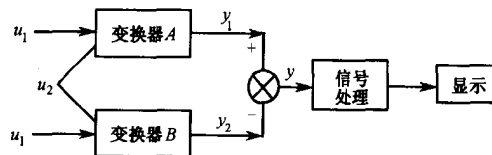


图 1-15 差动结构检测系统

采用差动结构的目的是消除或减弱干扰量的影响，同时对有用信号即被测信号的灵敏度要有相应的提高。为此变换器 A 和 B 采用对称结构，被测量 u_1 反负对称地作用于变换器 A 和 B，干扰量 u_2 对称地作用于变换器 A 和 B。设 A 和 B 均为线性变换器，则有静态关系式

$$y_1 = f(u_1, u_2) = K_A u_1 + K'_A u_2$$

$$y_2 = f'(u_1, u_2) = -K_B u_1 + K'_B u_2$$

$$y = y_1 - y_2 = (K_A + K_B)u_1 + (K'_A - K'_B)u_2$$

因变换器 A 和 B 为对称结构， $K_A \approx K_B$ ， $K'_A \approx K'_B$ ，这时，

$$y \approx 2K_{Au_1} \quad (1-11)$$

从式(1-11)可见灵敏度提高了一倍同时克服了干扰量对测量值的影响因此是在工程检测中广泛被采用的结构形式之一。例如,位移检测系统的差动电感式、差动变压器式、差动电容式检测系统都采用的是差动结构。

1.3.4 扫描结构

欲对某物体一定面积上的参数进行检测或对具有一定宽度的运动物体的某参数进行检测时,要使所采用的传感器能把被测物体所需检测的部分全部覆盖住,这是有困难的,而且会增加设备成本。通常采用扫描结构检测,使传感器在被检测物体上按直角坐标系做有规律的(即有两个自由度)运动,把被测物体上所有应该检测的位置都检测到。特别地,图像检测系统几乎都采用扫描结构形式。

1.3.5 多次测量操作结构

对于某些被测量必须进行两次或多次测量操作,才能得到测量结果。例如,功率测量时,需要测量电流、电压经运算之后才能得到被测量的功率。

对同一被测参数进行多次采样,求取其平均值,可以减少偶然误差的影响,这种检测系统也是多次测量操作结构形式的一种。

1.4 检测系统的特性

对检测系统的认识是通过对它的特性分析实现的。了解和掌握检测系统的特性可采用实验方法和理论分析方法。实验方法是对已实现的检测系统用适当的仪器、设备直接测试,这种方法直观,不必对检测系统内部结构进行剖析,这是工程上常采用的方法之一。工程上常采用的另一个重要方法是理论分析法,它是通过对检测系统的研究、进行动力学分析、建立数学模型,再对数学模型进行适当处理来完成特性分析。这种方法对深入分析研究检测系统和设计检测系统是非常重要的。

检测系统的特性分为静态特性和动态特性。

1.4.1 检测系统的数学模型

模型是系统基本特性的数学表示方法,即用数学表达式,如微分方程、差分方程或其他有特定含义的符号的组合以表征系统的特性,用数学方法求解,并对所得的结果进行物理意义的解释。模型是对实体特征及其内部变化规律的一种抽象或描述。根据研究系统的实际需要提

取数学模型是必要的。运用数学模型进行实验和分析计算，可以模仿或模拟系统的特征和行为，使所研究的系统的主要特征和主要变化规律、变量之间的关系，尽可能真实地表现出来或描述出来，即根据数学模型对系统进行仿真或模拟。比如，设计完某个检测系统之后，由检测系统的数学模型进行仿真实验，检测该系统是否能达到预期的（或设计的）各项技术指标，系统是否能良好可靠地运行等。否则，再次修改系统的设计参数，或修改系统的结构与方案，重新进行仿真实验，直至满意为止。此外，可由系统的数学模型实现预测或预报，即由现在和过去某几个或若干个时刻的值根据系统模型推算出下一个时刻系统的输出值。比如由中国人口发展数学模型推算未来 20 年的中国人口增长情况，为政府提供计划生育、经济发展等诸多政策制订的参考依据；森林火灾的监测预报系统；银河系中某未知天体出现的时间、位置预报；地震预测预报系统等均属于此类应用。因此，检测系统数学模型的建立，对于检测系统的分析、研究、设计、实验等大有助益。

系统的数学模型通常按系统过程的性质划分为静态模型和动态模型。

1. 静态数学模型

系统的静态特性通常用输入信号稳态值 x 和输出信号稳态值 y 的相互关系即静态特性曲线来表示。例如当系统中的基本条件如输入原料量、流量、输出产量或控制变量如温度、压力等保持不变时系统处于稳定状态系统的输出量只决定于当时的输入变量。此时各变量稳态值之间的数学关系，就是静态数学模型。

系统的静态数学模型一般多采用最小二乘法原理进行回归分析。由此求出的系统特性与实际特性有差异，一般必须对模型的系数作修正。修正方法是：用计算机分析比较在同一参数输入系统后即系统输入不变的条件下系统的输出 y 与模型的输出 y_m 比较。若两者的差值为零则模型和系统的特性是一致的如果两者有差值（即模型误差 ϵ ）取 $J = \epsilon^2$ 作为模型质量评比函数。当 $J = \epsilon^2 \rightarrow$ 最小时模型与系统的特性很接近否则模型的参数或系数必须进行修改。设模型为 $y = f(x)$ 对系统的第 i 个系统系数 a_i 按式 (1-12) 进行修正

$$a_i'(k+1) = a_i(k) + \Delta a_i$$

$$\Delta a_i(k+1) = -f \frac{\partial J}{\partial a_i}$$

所以

$$a_i(k+1) = a_i(k) - a_i f \frac{\partial J}{\partial a_i} \quad (1-12)$$

式中 a_i 为灵敏度系数； Δa_i 为模型系数的增量。

模型系数修改原理如图 1-16 所示。

2. 动态数学模型

当系统输出变量在任何时刻的值都与输入变量的过去值有关，即加在系统上的变量与所得到的随时间变化的响应变量之间有时间延迟时，这种系统即为动态系统

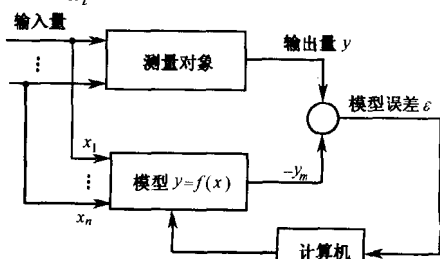


图 1-16 模型系数修改原理

(或有记忆系统)动态系统的输出与输入信号之间随时间变化的关系式称为动态模型。动态数学模型的理论基础是守恒定律如质量、能量、动量守恒定律等。根据守恒原理可求出系统的动态模型。

1.4.2 检测系统的静态特性

检测系统的静态特性可以用静态特性曲线来描述。当被测量是恒定量或缓变量时，可以只考虑静态性能指标。静态性能指标主要有以下几种。

1 精确度

与精确度有关的指标有三个：精密度、正确度和精确度等级。

(1) 精密度

它说明检测系统示值的不一致程度。即对某一稳定的被测量在相同的规定工作条件下，由同一测量者用同一检测系统在相当短的时间内连续重复测量多次，其测量结果的不一致程度。不一致程度越小，说明检测系统越精密。

(2) 正确度

它说明检测系统示值有规律地偏离真值（或约定真值）大小的程度。正确度反映了检测系统的系统误差的大小。

(3) 精确度等级

它是精密度与正确度两者的总和，即检测系统给出接近于被测量真值的能力。精密度高和正确度高是精确度高的必要条件。

在工程测试中为了简化表示测量结果的可靠程度引入一个精确度等级（简称精度等级）概念用 A 表示精度等级。 A 以一系列标准百分比数值（0.001, 0.005, 0.02, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0, 6.0 等）进行分档。精度等级 A 通常是检测系统在规定工作条件下，其最大绝对允许误差 $\Delta_{g\max}$ 相对于检测系统测量范围的百分比。

$$A = \frac{\Delta_{g\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (1-13)$$

式中 x_{\max}, x_{\min} 为测量范围的上下限值； $\Delta_{g\max}$ 为最大绝对允许误差值。

2. 稳定性

检测系统的稳定性是指在规定时间内，在规定工作条件保持恒定时，检测系统性能保持不变的能力；当外部环境和工作条件发生变化时，引起测量结果的不稳定程度的大小。

3. 分辨率

检测系统可有意义地区分两个紧邻所示量值的定量表示。分辨率说明检测系统能够检测到被测量最小变化的本领。为了保证检测系统的精度，分辨率应小于系统允许误差的 $1/3$ 或

1/5 或 1/10。

4. 灵敏度

它是检测系统在稳态下输出增量对输入增量的比值，用 K 表示 即 $K = \Delta y / \Delta x$ 它是静态特性曲线上相应点的斜率。如果特性曲线是一条直线，如图 1-17(a) 所示 各点斜率相等 则 K 为一常数。如果静态特性曲线不是直线 如图 1-17(b) 所示 说明灵敏度将随被测量的大小 而变。如图 1-17(b) 中 x_1 和 x_2 处的 K 值不等。

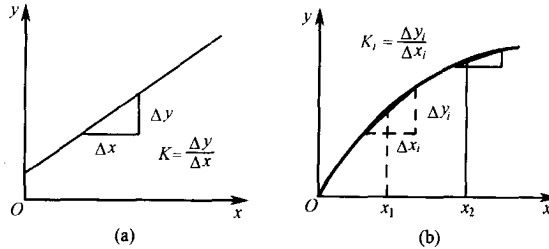


图 1-17 灵敏度曲线

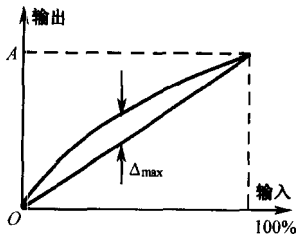


图 1-18 线性度

在表示灵敏度时，输入量和输出量必须用实际物理单位。

5. 线性度

检测系统的线性度指系统的实际输入输出特性对理想直线性输入输出特性的近似程度 用两者的最大偏差 Δ_{\max} 对量程 B 之比的百分数表示 如图 1-18 所示。线性度为

$$a = \frac{\Delta_{\max}}{B} \times 100\% \quad (1-14)$$

量程 B 指检测系统 或仪表 能够测量被测量的范围 用被测量的上限 x_{\max} 和下限 x_{\min} 之差来表示 即 $B = x_{\max} - x_{\min}$ 。

6. 重复性

重复性是指检测系统在同一工作条件下，输入量按同一方向做全量程变化，进行多次（三次以上）测量 确定输入输出特性的不一致程度。重复性 b 用输入输出特性的最大偏差 Δ_{\max} 对量程 B 的百分数表示 如图 1-19 所示 即

$$b = \frac{\Delta_{\max}}{B} \times 100\% \quad (1-15)$$

7. 再现性

再现性是指检测系统对被测量进行一次测量之后，经过一段时间，在同样的条件下再进行测量，确定输入输出特性的不一致程度。它用在规定时间内再次测量的输入输出特性最大非再现性误差 Δ_{\max} 对量程 B 之比的百分数表示 如图 1-20 所示。再现性 c 为

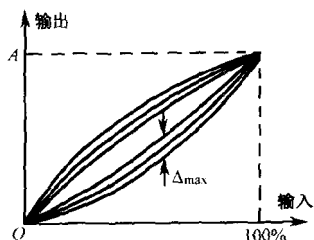


图 重复性

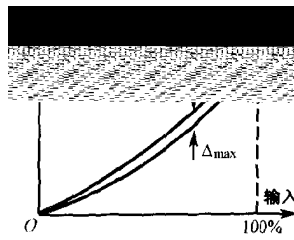


图 1-20 再现性

1.4.3 检测系统的动态特性

检测系统的动态特性是检测系统在动态工作中所呈现的特性。动态特性决定了检测系统测量快变参数的精度，因此，当被测量变化较快时，必须考虑检测系统输入输出量之间的动态关系和由于动态性能不好引起的动态附加误差。输入输出量之间的关系由微分方程表示，含有时间变量，并用传递函数对检测系统动态特性进行分析。

1 常见的检测系统特性

(1) 一阶检测系统

一阶检测系统又称惯性系统，它的运动方程为

$$f \frac{dy}{dx} + Ry = Rx$$

式中， y 为输出量； x 为输入量； f 为阻尼系数； R 为常数。

检测系统的传递函数 $W(S)$ 为

$$W(S) = \frac{1}{fS + 1} = \frac{1}{TS + 1} \quad (1-17)$$

式中， $T = f/R$ 称为时间常数，表示检测系统的滞后程度。

检测系统的输入量 x 为阶跃信号时，其输出量 y 的波形如图 1-21 所示。

带纯滞后的一阶检测系统的传递函数 $W(S)$ 为

$$W(S) = \frac{K}{TS + 1} e^{-\tau s} \quad (1-18)$$

式中， K 为比例系数或放大倍数； T 为时间常数； τ 为滞后时间。带纯滞后的一阶检测系统的阶跃响应如图 1-22 所示。

(2) 二阶检测系统

二阶检测系统又称二阶振荡系统，它的传递函数 $W(S)$ 为

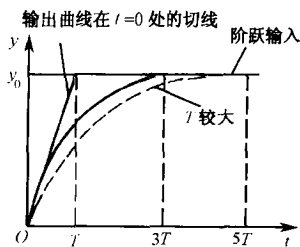


图 1-21 一阶系统的阶跃响应

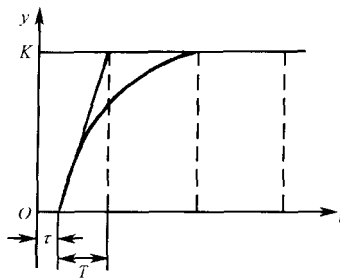


图 1-22 带纯滞后的一阶检测系统的阶跃响应

$$W(S) = \frac{K}{T^2 S^2 + 2\xi TS + 1} \quad (1-19)$$

式中, K 为放大倍数 (比例系数); T 为时间常数; ξ 为阻尼系数。

二阶检测系统的输入量 x 为阶跃信号 它的输出 y 随阻尼比 ξ 的不同而不同 如图 1-23 所示。

另外一种情况是带纯滞后的二阶检测系统, 其传递函数 $W(S)$ 为

$$W(S) = \frac{K}{T^2 S^2 + 2\xi TS + 1} e^{-\tau S} \quad (1-20)$$

式中, τ 为滞后时间。

带纯滞后的二阶检测系统的阶跃响应曲线如图 1-24 所示。 ξ 值不同 其响应曲线的形状各异。

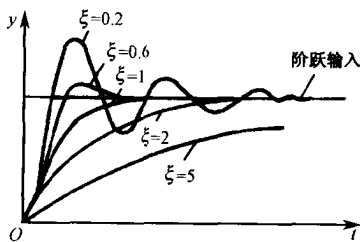


图 1-23 不同 ξ 值的二阶检测系统的阶跃响应曲线

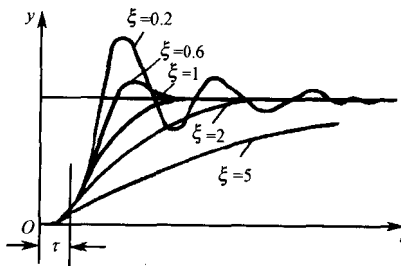


图 1-24 带纯滞后二阶检测系统的阶跃响应曲线

2. 检测系统的动态误差

动态误差是检测系统测量随时间变化的被测量时所特有的误差, 其数值是动态与静态测量结果的差值。动态误差不仅与检测系统动态特性有关, 还与被测量随时间变化的规律有关。在分析动态误差时, 为了方便起见, 一般假定无静态误差。动态误差是由检测系统惯性引起

的,即由于检测系统的传递函数不是比例环节而引起的。

最理想的情况下 检测系统输出 $Y(t) = Kx(t)$, K 为比例常数 故有

$$Y(S) = W_i(S)X(S) \quad (1-21)$$

式中 $W_i(S)$ 为检测系统理想的传递函数 据此有

$$X(S) = Y(S)/W_i(S) \quad (1-22)$$

但实际的检测系统传递函数为 $W_g(S)$ 因此 只能得到

$$Y(S) = W_g(S)X_g(S) \quad (1-23)$$

将此 $Y(S)$ 代入 (1-22) 式得

$$X_g(S) = \frac{W_i(S)X(S)}{W_g(S)} \quad (1-24)$$

如果把动态误差折算到输入端 可写成

$$\Delta X_d(S) = X_g(S) - X(S) = \frac{W_i(S)X(S)}{W_g(S)} - X(S) \quad (1-25)$$

即

$$\Delta X_d(S) = \left[\frac{W_i(S)}{W_g(S)} - 1 \right] X(S) = W_\Delta(S)X(S) \quad (1-26)$$

式中, $W_\Delta(S) = \left[\frac{W_i(S)}{W_g(S)} - 1 \right]$ 为检测系统的动态误差传递函数。

对式 1-26 求拉氏反变换 可得到动态误差的时间表达式 即

$$\Delta x_d(t) = \mathcal{L}^{-1}[W_\Delta(S)X(S)] \quad (1-27)$$

在实际测试中 人们一直在设法消除动态误差。其中一种方法是动态校正 即用一个附加的校正环节与检测系统相配合,使合成的传递函数达到理想要求,以消除动态误差;其次是当检测系统动态特性可知时,可应用动态采样法,即在检测系统过渡过程未完成之前,根据过渡过程的动态采样求出被测参数的稳态值。上述方法的工程运用还需要解决一些具体问题。

1.5 检测系统的特性测定

检测系统特性的实验分析法 即用实验测定检测系统特性的实验测定法 是工程上常采用的方法 该方法直观 无需对检测系统内部结构进行剖析。通过实验 对实验结果分析处理 进而找到检测系统的特性。

实验测定法的基本方法是 给检测系统加以激励信号 观测其输出响应 由输入和输出的关系确定系统的特性。经常采用的激励信号有 脉冲信号(或方波信号)正弦波、梯形波或矩形波信号 通过一系列给定频率的正弦波 或梯形波、矩形波 信号对检测系统激励 在稳态下求输入、输出的幅值比和相位差 得出检测系统的频率特性的表达式 白噪声(伪随机)信号,利用自然的无规则的随机干扰信号作为检测系统的输入信号,用统计的方法测出输出与输入