

在自动控制系统中,检测仪表完成对各种过程参数的测量,并实现必要的数据处理。用来将这些参数转换为一定的便于传送的信号的仪表通常称为传感器。当传感器的输出为规定的标准信号时,通常称为变送器。本章主要介绍检测仪表分类、测量误差、检测仪表基本概念以及常用的评价仪表性能优劣的指标。

3.1 检测仪表分类

检测仪表按照技术特点或使用范围的不同有各种分类方法,以下是常见的分类方法。

1. 按被测参数分类

每个检测仪表一般被用来测量某个特定的参数,根据这些被测参数的不同,检测仪表可分为温度检测仪表、压力检测仪表、流量检测仪表、物位检测仪表等。

2. 按对被测参数的响应形式分类

检测仪表可分为连续式检测仪表和开关式检测仪表。

前者是指检测仪表的输出值随被测参数的变化连续地改变。例如,常见的水银温度计,当温度计附近温度发生变化时,温度计中的水银因热胀冷缩而导致水银柱高度的变化,从而改变了温度计的读数,因此,这是一种连续式的检测仪表。

开关式检测仪表是指在被测参数整个变化范围内其输出响应只有两种状态,这两种状态可以是电路的“通”或“断”,可以是电压或空气压力的“高”或“低”。例如,冰箱压缩机的间歇启动,电饭煲的自动保温等都是利用开关式温度仪表实现的。

3. 按仪表使用的能源和主要信息类型分类

检测仪表可分为机械式仪表、电式仪表、气式仪表和光式仪表。

机械式仪表一般不需要使用外部能源,通常利用敏感元件的位移带动仪表的传动机构,使指针产生偏转,通过仪表盘上的刻度显示被测参数的大小。这种仪表一般安装在现场,属就地显示式仪表。如弹簧管压力表。

电式仪表又称电动仪表,这类检测仪表用电源作为能源,其输出信号也是电信号。电动仪表所使用的电源电压和标准传输信号主要有两种:一是电源电压 24V DC,标准传输信号 4~20mA DC,1~5V DC;二是电源电压 220V AC,标准传输信号 0~10mA DC。现在绝大部分使用的检测仪表都为电式仪表,因为电式仪表所需电源容易得到,输出信号可以方便地传输和显示。信号的远传采用导线,成本较低;但较气动仪表防爆能力差。

气式仪表又称气动仪表,用净化的压缩空气作为能源并进行信号的传递。气源压力为 140kPa(0.14MPa),标准传输信号为 20~100kPa(0.02~0.1MPa)。由于仪表中没有使用电源,这类仪表可以使用在周围环境有易燃易爆气体或粉尘的场所。但是用压缩空气传递信号滞后比较大。传递信号的气管路上的任何泄漏或堵塞会导致信号的衰减或消失。

光式仪表是近年来发展起来的一种新型检测仪表,它不仅有气式仪表的优点,而且信号传递的速度非常快。目前,光电结合形成了新的光电式仪表,它充分利用了光的良好抗干扰和绝缘隔离能力,以及电的易放大和处理能力强的特点,实现仪表的信号处理、信号隔离、信号传输和信号显示。

4. 按是否具有远传功能分类

检测仪表可分为就地显示仪表和远传式仪表。有些检测仪表的敏感元件与显示是一个整体,例如,日常生活中经常看到的玻璃温度计;有些检测仪表的敏感元件将被测参数转换成位移量,而位移的变化进一步通过机构装置带动指针或机械计数装置直接指示被测参数的大小,例如,家用水表、电表、弹簧管压力表,把这类仪表称为就地显示仪表。就地显示仪表的特点是显示装置与敏感元件不能分离,仪表不具有其他形式的输出功能。

远传式仪表是指显示装置可以远离敏感元件。在这种检测仪表中,敏感元件在信息变换后,进一步进行信号的放大和转换,使之成为可以远传的信号。远传信号的形式一般有空气压力、电压、电流、电抗、光强等。随着科学技术的发展,远传信号还可以是无线的。为了便于现场观察和维护,有些远传式检测仪表不仅能将信号远传,在远距离显示被测参数值,就地也有相应的显示装置。

5. 按信号的输出(显示)形式分类

检测仪表可分为模拟式仪表和数字式仪表。

模拟式仪表指仪表的输出或显示是一个模拟量,我们通常看到的指针式显示仪表,如电压表、电流表等均为模拟式仪表。

数字式仪表是指仪表的显示直接以数字(或数码)的形式给出,或是以二进制等编码形式输出和传输。

由于目前绝大多数的敏感元件、传感器以及变送器都是模拟式的,所以在数字式仪表中一般要有模/数(A/D)转换器件,实现从模拟信号到数字信号的变换。也有一些传感器的输出直接是数字量,而不需要 A/D 转换,例如,用来测风速的风速仪将风速转换成叶片的转动速度,而叶片每转动一周,风速仪就输出一个脉冲,其频率正比于风速的大小。随着计算机技术的应用日益普遍,数字式仪表将迅速增多。

另外,为了满足使用者的需要,有些仪表既有数字功能,同时又有模拟式仪表的功能。例如,现在使用的很多变送器除了有现场数字显示(参数设定)功能外,还能产生可以远传的 4~20mA 的模拟信号。这类仪表一般也归为数字仪表,但严格说应该是数字-模拟混合型仪表。20 世纪 90 年代发展起来的总线式仪表被认为是全数字式的仪表。

6. 按使用的场所分类

检测仪表按照其所使用的场所也有各种分类方法。

根据安装场所有无易燃易爆气体及危险程度,检测仪表有普通型,隔爆型及本安型(安全火花型)。

产生爆炸必须同时存在三个条件：(1)存在可燃性气体或蒸气；(2)上述物质与空气混合且其浓度在爆炸极限以内；(3)有足以点燃爆炸性混合物的火花、电弧或高温。防止爆炸就要使上述三个条件同时出现的可能性减到最小程度。可燃性气体、蒸气与空气的混合物浓度高于其爆炸上限或低于其爆炸下限时，都不会发生爆炸。国际上主要工业国家对爆炸性危险场所都有标准划分，针对不同的场所，仪表有不同的形式。

普通型仪表不考虑防爆措施，只能用在非易燃易爆场所；隔爆型仪表又称为耐压防爆型仪表，这类仪表在其内部电路和周围易燃介质之间采取了隔爆措施。它把能点燃爆炸性混合物的仪表部件封闭在一个外壳内，这个外壳特别牢固，能承受内部爆炸性混合物的爆炸压力，并阻止向壳外的爆炸性混合物传爆。这种仪表各部件的接合面都有严格的防爆要求，允许使用在有一定危险性的环境里；本安型(安全火花型)仪表依靠特殊设计的电路保证在正常工作及意外故障状态下都不会引起燃爆事故，可用在易燃易爆严重的场所，适用于一切危险场所而不会引燃爆炸性混合物。

根据使用的对象不同，检测仪表有民用的、工业用的和军事用的。民用仪表一般在常温、常压下工作，对仪表的准确度要求较低。工业用仪表由于应用场合的千差万别，一般对仪表测量对象的温度、压力、腐蚀性有各自的规定，从而出现了许多系列仪表，如耐高温仪表、耐腐蚀仪表、防水仪表等。工业仪表一般对仪表准确度和可靠性均有较高要求。军事用仪表的性能有更高的要求，除了工业用仪表中要考虑的各种因素外，还要特别考虑仪表的抗震性能、抗电磁干扰性能，另外还要求仪表有很高的可靠性和较短的响应时间。

7. 按仪表的结构方式分类

检测仪表可分为开环型检测仪表与闭环型检测仪表。见 2.3 节。

3.2 测量误差

测量过程就是将被测物理量转换为转角、位移、能量等的过程，而检测仪表就是实现这一过程的工具。

在工程技术和科学研究中，对一个参数进行测量时，总要提出如下问题：所获得的测量结果是否就是被测参数的真实值？它的可信赖程度究竟如何？

人们对被测参数真实值的认识，虽然随着实践经验的积累和科学技术的发展会越来越接近，但绝不会达到完全相等的地步，这是由于测量过程中始终存在着各种各样的影响因素。例如，没有考虑到某些次要的、影响小的因素，对被测对象本质认识的不够全面，采用的检测工具不十分完善，以及观测者技术熟练程度不同等，均可使获得的测量结果与真实值之间总是存在着一定的差异，这一差异就是误差。可见，在测量过程中自始至终存在着误差。

仪表指示的被测值称为示值，它是被测量真值的反映。被测量真值是指被测物理量客观存在的真实数值，严格地说，它是一个无法得到的理论值，因为无论采用何种仪表测到的值都有误差。实际应用中常用精度较高的仪表测出的值，称为约定真值来代替真值。例如，使用国家标准计量机构标定过的标准仪表进行测量，其测量值即可作为约定真值。

由仪表读得的被测值和被测量真值之间，总是存在一定的差距，这就是测量误差。

测量误差通常有两种表示方法，即绝对误差和相对误差。



视频讲解

3.2.1 绝对误差

绝对误差是指仪表指示值与公认的约定真值之差,即

$$\Delta = x - x_0 \quad (3-1)$$

式中, Δ ——绝对误差;

x ——示值,被校表的读数;

x_0 ——约定真值,标准表的读数。

绝对误差又可简称为误差。绝对误差是可正可负的,而不是误差的绝对值,当误差为正时表示仪表的示值偏大,反之偏小。绝对误差还有量纲,它的单位与被测量的单位相同。

仪表在其测量范围内各点读数绝对误差的最大值称为最大绝对误差,即

$$\Delta_{\max} = (x - x_0)_{\max} \quad (3-2)$$

3.2.2 相对误差

为了能够反映测量工作的精细程度,常用测量误差除以被测量的真值,即用相对误差来表示。

相对误差也具有正负号,但无量纲,用百分数表示。由于真值不能确定,因此实际上是用约定真值。在测量中,由于所引用真值的不同,所以相对误差有以下两种表示方法:

实际相对误差

$$\delta_{\text{实}} = \frac{\Delta}{x_0} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% \quad (3-3)$$

示值相对误差

$$\delta_{\text{示}} = \frac{\Delta}{x} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x} \times 100\% \quad (3-4)$$

示值相对误差也称为标称相对误差。

3.2.3 基本误差与附加误差

任何测量都与环境条件有关。这些环境条件包括环境温度、相对湿度、电源电压和安装方式等。

仪表应用时应严格按照规定的环境条件即参比工作条件进行测量,此时获得的误差称为基本误差。在非参比工作条件下测量所得的误差,除基本误差外,还会包含额外的误差,称为附加误差,即

$$\text{误差} = \text{基本误差} + \text{附加误差} \quad (3-5)$$

以上讨论都是针对仪表的静态误差,即仪表静止状态时的误差,或变化量十分缓慢时所呈现的误差,此时不考虑仪表的惯性因素。仪表还有动态误差,动态误差是指仪表因惯性延迟所引起的附加误差,或变化过程中的误差。

3.3 检测仪表基本概念及性能指标

下面讨论和介绍测控仪表基本概念,以及常用的评价仪表性能优劣的指标,包括测量范围、上下限及量程,零点迁移和量程迁移,灵敏度、分辨率及分辨力,线性度,精度和精度等级等。

3.3.1 测量范围、上下限及量程

每台用于测量的仪表都有测量范围,定义如下:

测量范围就是指仪表按规定的精度进行测量的被测量的范围。

测量范围的最大值称为测量上限值,简称上限。

测量范围的最小值称为测量下限值,简称下限。

仪表的量程可以用来表示其测量范围的大小,是其测量上限值与下限值的代数差,即

$$\text{量程} = \text{测量上限值} - \text{测量下限值} \quad (3-6)$$

例 3-1 一台温度检测仪表的测量上限值是 500°C , 下限值是 -100°C , 则其测量范围和量程各为多少?

解 该仪表的测量范围为 $-100^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ 。

$$\text{量程} = \text{测量上限值} - \text{测量下限值} = 500^{\circ}\text{C} - (-100^{\circ}\text{C}) = 600^{\circ}\text{C}$$

仪表的量程在检测仪表中是一个非常重要的概念,它与仪表的精度、精度等级及仪表的选用都有关。

仪表测量范围的另一种表示方法是给出仪表的零点及量程。仪表的零点即仪表的测量下限值。由前面的分析可知,只要仪表的零点和量程确定了,其测量范围也就确定了。这是一种更为常用的表示方法。

例 3-2 一台温度检测仪表的零点是 -50°C , 量程是 300°C , 则其测量范围为多少?

解 零点是 -50°C , 说明其测量下限值为 -50°C 。

由

$$\text{量程} = \text{测量上限值} - \text{测量下限值}$$

有

$$\text{测量上限值} = \text{量程} + \text{测量下限值} = 300^{\circ}\text{C} + (-50^{\circ}\text{C}) = 250^{\circ}\text{C}$$

这台温度检测仪表的测量范围为 $-50^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ 。

3.3.2 零点迁移和量程迁移

在实际使用中,由于测量要求或测量条件的变化,需要改变仪表的零点或量程,可以对仪表的零点和量程进行调整。

通常将零点的变化称为零点迁移,量程的变化称为量程迁移。

以被测变量相对于量程的百分数为横坐标,记为 X , 以仪表指针位移或转角相对于标尺长度的百分数为纵坐标,记为 Y , 可得到仪表的输入输出特性曲线 X - Y 。假设仪表的特性曲线是线性的,如图 3-1 中线段 1 所示。

单纯零点迁移情况如图 3-1 中线段 2 所示。此时仪表量程不变,其斜率也保持不变,线段 2 只是线段 1 的平移,理论上零点迁移到了原输入值的 -25% , 上限值迁移到了原输入值的 75% , 而量程则仍为 100% 。

单纯量程迁移情况如图 3-1 中线段 3 所示。此时仪表零点不变,线段仍通过坐标系原点,但斜率

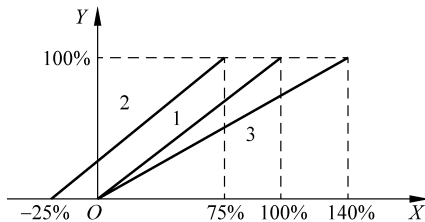


图 3-1 零点迁移和量程迁移示意图



视频讲解



视频讲解

发生了变化,上限值迁移到了原输入值的 140%,量程变为 140%。

零点迁移和量程迁移可以扩大仪表的通用性。但是,在何种情况下可以进行迁移,以及能够有多大的迁移量,还需视具体仪表的结构和性能而定。



视频讲解

3.3.3 灵敏度、分辨率及分辨力

用来描述仪表的灵敏程度和分辨能力的性能指标是灵敏度、分辨率和分辨力。

1. 灵敏度

灵敏度 S 是表示仪表对被测量变化的灵敏程度,常以在被测量改变时,经过足够时间仪表指示值达到稳定状态后,仪表输出的变化量 Δy 与引起此变化的输入变化量 Δx 之比,即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (3-7)$$

由上面的定义可知,灵敏度实际上是一个有量纲的放大倍数。在量纲相同的情况下,仪表灵敏度的数值越大,说明仪表对被测参数的变化越灵敏。

若为指针式仪表,则灵敏度在数值上等于单位被测参数变化量所引起的仪表指针移动的距离(或转角)。

灵敏度即为图 3-1 中的斜率,零点迁移灵敏度不变,而量程迁移则意味着灵敏度的改变。

2. 分辨率

分辨率又称灵敏限,是仪表输出能响应和分辨的最小输入变化量。

通常仪表的灵敏限不应大于允许绝对误差的一半。从某种意义上讲,灵敏限实际上是死区。

分辨率是灵敏度的一种反映,一般说仪表的灵敏度高,其分辨率也高。在实际应用中,希望提高仪表的灵敏度,从而保证其有较高的分辨率。

上述指标适用于指针式仪表,在数字式仪表中常常用分辨力来描述仪表灵敏度(或分辨率)的高低。

3. 分辨力

对于数字式仪表而言,分辨力是指该表的最末位数字间隔所代表的被测参数变化量。

如数字电压表末位间隔为 $10\mu\text{V}$,则其分辨力为 $10\mu\text{V}$ 。对于有多个量程的仪表,不同量程的分辨力是不同的,相应于最低量程的分辨力称为该表的最高分辨力,对数字仪表而言,也称该表的灵敏度。例如,某表的最低量程是 $0\sim 1.00000\text{V}$,显示六位数字,末位数字的等效电压为 $10\mu\text{V}$,则该表的灵敏度为 $10\mu\text{V}$ 。

数字仪表的分辨率为灵敏度与它的量程的相对值。上述仪表的分辨率为 $10\mu\text{V}/1\text{V}=10^{-5}$,即十万分之一。

3.3.4 线性度

线性度又称为非线性误差。

对于理论上具有线性特性的检测仪表,往往由于各种因素的影响,使其实际特性偏离线性,如图 3-2 所示。线性度是衡量实际特性偏离线性程度的指标,其定义为:仪表输出-输入校准曲线与理论拟合直线之间的绝对误差的最大值 $\Delta'_{\max}$ 与仪表的量程之比的百分数,即

$$\text{非线性误差} = \frac{\Delta'_{\max}}{\text{量程}} \times 100\% \quad (3-8)$$

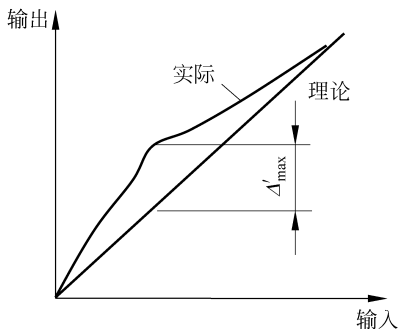


图 3-2 线性度示意图

3.3.5 精度和精度等级

既然任何测量过程中都存在测量误差,那么在应用测量仪表对工艺参数进行测量时,不仅需要知道仪表的指示值,还应知道该测量仪表的精度,即所测量值接近真实值的准确程度,以便估计测量误差的大小,进而估计测量值的大小。

测量仪表在其测量范围内各点读数的绝对误差,一般是标准表和被校表同时对一个参数进行测量时所得到的两个读数之差。由于仪表的精确程度(准确程度)不仅与仪表的绝对误差有关,还与仪表的测量范围有关,因此不能采用绝对误差来衡量仪表的准确度。例如,在温度测量时,绝对误差 $\Delta = 1^{\circ}\text{C}$,对体温测量来说是不允许的,而对测量钢水温度来说却是一个极好的测量结果。又例如,有一台金店用的秤,其测量范围为 $0 \sim 100\text{g}$,另一台人体秤,测量范围为 $0 \sim 100\text{kg}$,如果它们的最大绝对误差都是 $\pm 10\text{g}$,则很明显人体秤更准确。就是说,采用绝对误差表示测量误差,不能很好地说明测量质量的好坏。两台测量范围不同的仪表,如果它们的最大绝对误差相等,那么测量范围大的仪表较测量范围小的精度高。

那么是否可以用相对误差来衡量仪表的准确度呢? 相对误差可以用来表示某次测量结果的准确性,但测量仪表是用来测量某一测量范围内的被测量,而不是只测量某一固定大小的被测量的。而且,同一仪表的绝对误差,在整个测量范围内可能变化不大,但测量值变化可能很大,这样相对误差变化也很大。因此,用相对误差来衡量仪表的准确度是不方便的。为方便起见,通常用引用误差来衡量仪表的准确性能。

1. 引用误差

引用误差 δ 又称为相对百分误差,用仪表的绝对误差 Δ 与仪表量程之比的百分数来表示,即

$$\delta = \frac{\Delta}{\text{量程}} \times 100\% \quad (3-9)$$

2. 最大引用误差

仪表在其测量范围内的最大绝对误差 $\Delta_{\max}$ 与仪表量程之比的百分数来表示,即

$$\delta_{\max} = \frac{\Delta_{\max}}{\text{量程}} \times 100\% \quad (3-10)$$

3. 允许的最大引用误差

根据仪表的使用要求,规定一个在正常情况下允许的最大误差,这个允许的最大误差就称为允许误差($\Delta_{\max\text{允}}$)。允许误差与仪表量程之比的百分数表示就是仪表允许的最大引用



视频讲解

误差,是指在规定的正常情况下,允许的相对百分误差的最大值,即

$$\delta_{允} = \frac{\Delta_{max允}}{\text{量程}} \times 100\% \quad (3-11)$$

4. 精度

精度又称为精确度或准确度,是指测量结果和实际值一致的程度,是用仪表误差的大小来说明其指示值与被测量真值之间的符合程度。通常用允许的最大引用误差去掉正负号(±)号和百分号(%)号后,剩下的数字来衡量。其数值越大,表示仪表的精度越低,数值越小,表示仪表的精度越高。

5. 精度等级

按照仪表工业的规定,仪表的精度划分为若干等级,称精度等级。

我国常用的精度等级有:

0.005, 0.01, 0.02, 0.05,	0.1, 0.2, (0.4), 0.5,	1.0, 1.5, 2.5, (4.0)
I 级标准表	II 级标准表	工业用表

括号内等级必要时采用。所谓 1.0 级仪表,即该仪表允许的最大相对百分误差为 ±1%,其余类推。

仪表精度等级是衡量仪表质量优劣的重要指标之一。精度等级的数字越小,仪表的精度等级就越高,也说明该仪表的精度高。

仪表精度等级一般可用不同符号形式标志在仪表面板或铭牌上,如 1.0 级仪表表示为 $\odot_{1.0}$ 、 $\triangle_{1.0}$ 或 ±1.0% 等。

下面几个例题进一步说明了如何确定仪表的精度等级。

例 3-3 有两台测温仪表,测温范围分别为 0℃~100℃ 和 100℃~300℃,校验时得到它们的最大绝对误差均为 ±2℃,试确定这两台仪表的精度等级。

解 $\delta_{max1} = \frac{\pm 2}{100-0} \times 100\% = \pm 2\%$

$\delta_{max2} = \frac{\pm 2}{300-100} \times 100\% = \pm 1\%$

去掉正负号和百分号,分别为 2 和 1。因为精度等级中没有 2 级仪表,而该表的误差又超过了 1 级表所允许的最大误差,取 2 对应低等级数上接近值 2.5 级,所以这台仪表的精度等级是 2.5 级,另一台为 1 级。

从此例中还可以看出,最大绝对误差相同时,量程大的仪表精度高。

例 3-4 某台测温仪表的工作范围为 0℃~500℃,工艺要求测温时的最大绝对误差不允许超过 ±4℃,试问如何选择仪表的精度等级才能满足要求?

解 根据工艺要求

$$\delta_{允} = \frac{\pm 4}{500-0} \times 100\% = 0.8\%$$

0.8 介于 0.5 与 1.0 之间,若选用 1.0 级仪表,则最大误差为 ±5℃,超过工艺允许值。为满足工艺要求,应取 0.8 对应高等级数上接近值 0.5 级。故应选择 0.5 级表才能满足要求。

由以上的例子可以看出,根据仪表的校验数据来确定仪表的精度等级和根据工艺要求来选择仪表精度等级,要求是不同的。

(1) 根据仪表的校验数据来确定仪表的精度等级时,仪表允许的最大引用误差要大于或等于仪表校验时所得到的最大引用误差。

(2) 根据工艺要求来选择仪表的精度等级时,仪表允许的最大引用误差要小于或等于工艺上所允许的最大引用误差。

例 3-5 现有精度等级为 0.5 级的 $0^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 和精度等级为 1.0 级的 $0^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的两个温度计,要测量 80°C 的温度,试问采用哪一个温度计更好?

解 0.5 级, $0^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 温度计可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta_{\max 1} = \pm 0.5\% \times 300 = \pm 1.5^{\circ}\text{C}$$

可能出现的最大示值相对误差为

$$\delta_{\text{示}\max 1} = \frac{\Delta_{\max 1}}{x} \times 100\% = \frac{\pm 1.5}{80} \times 100\% = \pm 1.88\%$$

1.0 级 $0^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$ 温度计可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta_{\max 2} = \pm 1.0\% \times 100 = \pm 1^{\circ}\text{C}$$

可能出现的最大示值相对误差为

$$\delta_{\text{示}\max 1} = \frac{\Delta_{\max 2}}{x} \times 100\% = \frac{\pm 1}{80} \times 100\% = \pm 1.25\%$$

计算结果表明,用 1.0 级表比用 0.5 级表的标称相对误差的绝对值反而更小,所以更合适。

由上例可知,在选用仪表时应兼顾精度等级和量程两个方面。

3.3.6 死区、滞环和回差

在实际应用中,由于构成仪表的元器件大都具有磁滞、间隙等特性,使得检测仪表出现死区、滞环和回差的现象。



视频讲解

1. 死区

仪表输入在小到一定范围内不足以引起输出的任何变化,这一范围称为死区,在这个范围内,仪表的灵敏度为零。

引起死区的原因主要有电路的偏置不当,机械传动中的摩擦和间隙等。

死区也称不灵敏区,它会导致被测参数的有限变化不易被检测到,要求输入值大于某一限度才能引起输出变化,它使得仪表的上升曲线和下降曲线不重合,如图 3-3 所示。理想情况下,死区的宽度是灵敏限的 2 倍。死区一般以仪表量程的百分数来表示。

2. 滞环

滞环又称为滞环误差。由于仪表内部的某些元件具有储能效应,如弹性元件的变形、磁滞效应等,使得仪表校验所得的实际上升(上行程)曲线和实际下降(下行程)曲线不重合,使仪表的特性曲线成环状,如图 3-4 所示,这一现象就称为滞环。

在有滞环现象出现时,仪表的同一输入值对应多个输出值,出现误差。

这里所讲的上升曲线和下降曲线是指仪表的输入量从量程的下限开始逐渐升高或从上限开始逐渐降低而得到的输入输出特性曲线。

滞环误差为对应于同一输入值下上升曲线和下降曲线之间的最大差值,一般用仪表量程的百分数表示。

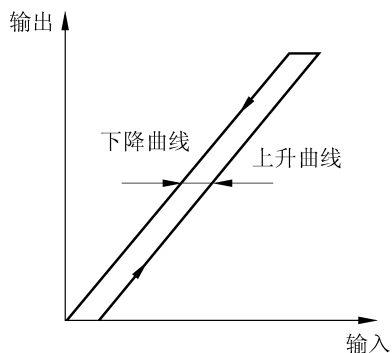


图 3-3 死区效应示意图

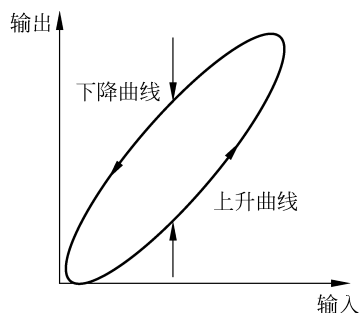


图 3-4 滞环效应示意图

3. 回差

回差又称变差或来回差,是指在相同条件下,使用同一仪表对某一参数在整个测量范围内进行正、反(上、下)行程测量时,所得到的在同一被测值下正行程和反行程的最大绝对差值,如图 3-5 所示。回差一般用上升曲线与下降曲线在同一被测值下的最大差值与量程之比的百分数表示,即

$$\text{回差} = \frac{|\text{正行程测量值} - \text{反行程测量值}|_{\max}}{\text{量程}} \times 100\% \quad (3-12)$$

回差是滞环和死区效应的综合效应。造成仪表回差的原因很多,如传动机构的间隙,运动部件的摩擦,弹性元件的弹性滞后等。在仪表设计时,应在选材上、加工精度上给予较多考虑,尽量减小回差。一个仪表的回差越小,其输出的重复性和稳定性越好。一般情况下,仪表的回差不能超出仪表的允许误差。

例 3-6 如图 3-6 是根据仪表校验数据所画出的输入输出关系曲线。请按图中标字写出该仪表的滞环、死区和回差。

解 滞环为 $a+c$, 用输出量程的百分数表示为 $\frac{a+c}{N} \times 100\%$ 。

死区为 d , 用输入范围的百分数表示为 $\frac{d}{M} \times 100\%$ 。

回差为 $a+b+c$, 用输出量程的百分数表示为 $\frac{a+b+c}{N} \times 100\%$ 。

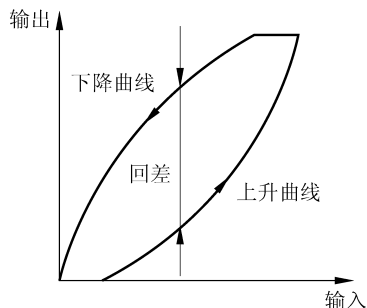


图 3-5 死区和滞环综合效应示意图

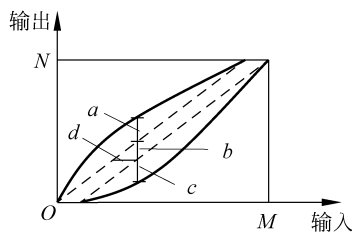


图 3-6 例 3-6 图



视频讲解

3.3.7 反应时间

当用仪表对被测量进行测量时,被测量突然变化后,仪表指示值总是要经过一段时间以后才能准确地显示出来。反应时间就是用来衡量仪表能不能尽快反映出被测量变化的指标。

反应时间长,说明仪表需要较长时间才能给出准确的指示值,那就不宜用来测量变化频繁的参数。在这种情况下,当仪表尚未准确地显示出被测值时,参数本身就已经变化了,使仪表始终不能指示出参数瞬时值的真实情况。因此,仪表反应时间的长短,实际上反映了仪表动态性能的好坏。

仪表的反应时间有不同的表示方法。当输入信号突然变化一个数值后,输出信号将由原始值逐渐变化到新的稳态值。仪表的输出信号(指示值)由开始变化到新稳态值的63.2%所用的时间,可用来表示反应时间。也有用变化到新稳态值的95%所用的时间来表示反应时间的。

3.3.8 重复性和再现性

重复性是衡量仪表不受随机因素影响的能力,再现性是仪表性能稳定的一种标志。

1. 重复性

在相同测量条件下,对同一被测量,按同一方向(由小到大或由大到小)连续多次测量时,所得到的多个输出值之间相互一致的程度称为仪表的重复性,它不包括滞环和死区。

所谓相同的测量条件应包括相同的测量程序、相同的观测者、相同的测量设备,在相同的地点以及在短时间内重复。

仪表的重复性一般用上升曲线和下降曲线的最大离散程度中的最大值与量程之比的百分数来表示,如图3-7所示。

2. 再现性

仪表的再现性是指在相同的测量条件下,在规定的相对较长的时间内,对同一被测量从两个方向上重复测量时,仪表实际上升和下降曲线之间离散程度的表示。

常用两种曲线之间离散程度的最大值与量程之比的百分数来表示,如图3-7所示。它包括了滞环和死区,也包括了重复性。

在评价仪表的性能时,常常同时要求其重复性和再现性。重复性和再现性的数值越小,仪表的质量越高。

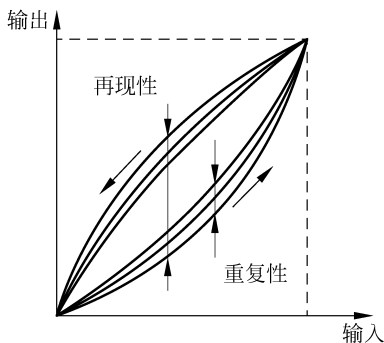


图 3-7 重复性和再现性示意图

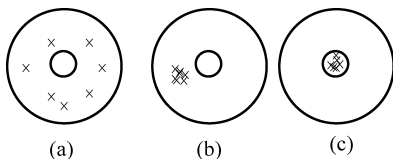


图 3-8 重复性和精度关系示意图

那么重复性和再现性与仪表的精度有什么关系呢?我们用打靶的例子来进行说明。A、B和C三人的打靶结果分别如图3-8(a)、(b)和(c)所示,可以看出,A的重复性不好,精度也不高;B的重复性好,但精度不高;C的重复性好,精度也高。从这个例子可以看出,重复性好,精度不一定高。

因此,重复性和再现性优良的仪表并不一定精度

高,但高精度的优质仪表一定有很好的重复性和再现性。重复性和再现性的优良只是保证仪表准确度的必要条件。

3.3.9 可靠性

可靠性是反映仪表在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力的一种综合性质量指标。

在现代工业生产中,仪表的故障可能会带来严重的后果,这就需要对可靠性进行研究,并建立一套科学评价的技术指标。仪表的使用可以认为是这样的过程,仪表投入使用→故障→检修→继续投入使用。在这种循环过程中,希望仪表使用的时间越长,故障越少越好;如果产生故障,则应该很容易维修,并能很快重新投入使用,只有达到这两种要求才能认为可靠性是高的。

可靠性的衡量有多种尺度。定量描述可靠性的度量指标有可靠度、平均无故障工作时间、故障率、平均故障修复时间和有效度。

1. 可靠度

可靠度 $R(t)$ 是指仪表在规定的工作时间内无故障的概率。

如有 100 台同样的仪表,工作 1000 小时后,有 99 台仍能正常工作,就可以说这批仪表在 1000 小时后的可靠度是 99%,即 $R(t)=99\%$;反之这批仪表的不可靠度 $F(t)$ 就是 1%。显然 $R(t)=1-F(t)$ 。

2. 平均无故障工作时间

平均无故障工作时间是仪表在相邻两次故障间隔内有效工作时的平均时间,用 MTBF(Mean Time Between Failure)来表示。对于不可修复的产品,把从开始工作到发生故障前的平均工作时间用 MTTF(Mean Time To Failure)表示。两者可统称为“平均寿命”。

3. 故障率

故障率 λ 是指仪表工作到 t 时刻时单位时间内发生故障的概率。平均无故障工作时间的倒数就是故障率。例如,某种型号仪表的故障率为 $5\%/kh$,就是说 100 台这样的仪表运行 1000 小时后,会有 5 台发生故障。那么,它们的平均无故障工作时间 MTBF 是多少呢?应该是 $1/(5\%/kh)=10^5 h/5=2\times 10^4 \approx 2.5$ 年。

4. 平均故障修复时间(MTTR)

平均故障修复时间是仪表故障修复所用的平均时间,用 MTTR (Mean Time to Repair) 表示。

例如,某种型号的仪表 $MTTR=48h$,就是说如发生故障,可联系生产厂商,获得备件,经过修理并重新校准后投入使用共需 2 天(48 小时)。

5. 有效度

综合评价仪表的可靠性,要求平均无故障工作时间尽可能长的同时,又要求平均故障修复时间尽可能短,引出综合性能指标有效度,也称为可用性,它表示仪表的工作时间在整个时间中所占的份额,即

$$\text{有效度(可用性)} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\% \quad (3-13)$$

有效度表示仪表的可靠程度,数值越大,仪表越可靠,或者说可靠度越高。

可靠性目前是一门专门的科学,它涉及三个领域。一是可靠性理论,它又分为可靠性数学和可靠性物理。其中可靠性数学是研究如何用—个数学的特征量来定量地表示仪表设备的可靠程度,这个特征量表示在规定条件下、规定时间内完成规定功能的概率,因此可以用概率统计的方法进行估算,上面简要介绍的内容就是这种方法。二是可靠性技术,它又分为可靠性设计、可靠性试验和可靠性分析等,其中可靠性设计包括系统可靠性设计、可靠性预测、可靠性分配、元器件散热设计、电磁兼容性设计、参数优化设计等。三是可靠性管理,它包括宏观管理和微观管理两个层面。

3.3.10 稳定性

仪表的稳定性可以从两个方面来描述:一是时间稳定性,它表示在工作条件保持恒定时,仪表输出值(示值)在规定时间内随机变化量的大小,一般以仪表示值变化量和时间之比来表示;二是使用条件变化稳定性,它表示仪表在规定的使用条件内,某个条件的变化对仪表输出值的影响。

以仪表的供电电压影响为例,实际电源电压在 220~240V AC 范围内时,可用电源电压每变化 1V 时仪表输出值的变化量来表示仪表对电源电压的稳定性。

思考题与习题

- 3-1 什么是仪表的测量范围、上下限和量程?它们之间的关系如何?
- 3-2 某台温度测量仪表的测量范围是 $-50^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$,则该仪表的测量上、下限和量程各为多少?
- 3-3 一台温度检测仪表的零点是一 100°C ,量程是 200°C ,则其测量范围为多少?
- 3-4 何谓仪表的零点迁移和量程迁移?其目的是什么?
- 3-5 什么是仪表的灵敏度和分辨率?两者之间关系如何?
- 3-6 在量纲相同的情况下,仪表灵敏度的数值越大,仪表对被测参数的变化越灵敏。这种说法对吗?为什么?
- 3-7 什么是真值、约定真值和误差?
- 3-8 误差的表示方法主要有哪两种?各是什么意思?
- 3-9 用一只标准压力表检定甲、乙两台压力表时,标准表的指示值为 50kPa,甲、乙表的读数各为 50.4kPa 和 49.4kPa,求它们在该点的绝对误差和示值相对误差。
- 3-10 什么是仪表的基本误差和附加误差?
- 3-11 什么是仪表的线性度?
- 3-12 什么是仪表的引用误差、最大引用误差和允许的最大引用误差?
- 3-13 某台温度测量仪表的测量范围是 $0^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$,在 300°C 处的检定值为 297°C ,求在 300°C 处仪表的引用误差。
- 3-14 何谓仪表的精度和精度等级?如何确定?工业仪表常用的精度等级有哪些?
- 3-15 某采购员分别在三家商店购买 100kg 大米、10kg 苹果、1kg 巧克力,发现均缺少 0.5kg,但该采购员对卖巧克力的商店意见最大,是何原因?

3-16 一台精度为 0.5 级的仪表,下限刻度值为负值,为量程的 25%,该表允许绝对误差为 1℃,试求这台仪表的测量范围。

3-17 有两台测温仪表,其测量标尺的范围分别为 0℃~500℃和 0℃~1000℃,已知其最大绝对误差均为 5℃,试问哪一台测温更准确?为什么?

3-18 有 A、B 两个电压表,测量范围分别为 0~600V 和 0~150V,精度等级分别为 0.5 级和 1.0 级。若待测电压约为 100V,从测量准确度来看,选用哪一台电压表更好?

3-19 设有一台精度为 0.5 级的测温仪表,测量范围为 0℃~1000℃。在正常情况下进行校验,测得的最大绝对误差为 +6℃,问该仪表是否合格?

3-20 某控制系统根据工艺设计要求,需要选择一个测量范围为 0~100m³/h 的流量计,流量检测误差小于 ±0.6m³/h,试问选择何种精度等级的流量计才能满足要求?

3-21 某公司生产温度的测量仪表,引用误差均为 1.1%~1.6%,该系列产品属于哪一级精度的仪表?若希望温度测量仪表的引用误差控制为 1.1%~1.6%,则应购买哪一级精度的仪表?

3-22 某被测温度信号在 70℃~80℃范围内变化,工艺要求测量的示值相对误差不得超过 ±1%。现有两台温度测量仪表 A 和 B,精度等级均为 0.5 级,A 表的测量范围是 0℃~100℃,B 表的测量范围是 0℃~200℃,试问这两台仪表能否满足上述测量要求?

3-23 某反应器压力的最大允许绝对误差为 0.01MPa。现用一台测量范围为 0~1.6MPa,精度为 1.0 级的压力表来进行测量,问能否符合工艺上的误差要求?若采用一台测量范围为 0~1.0MPa,精度为 1.0 级的压力表,能否符合误差要求?试说明理由。

3-24 某温度控制系统的温度控制在 700℃左右,要求测量的绝对误差不超过 ±8℃,现有测量范围分别为 0℃~1600℃和 0℃~1000℃的 0.5 级温度检测仪表,试问应该选择哪台仪表更合适?如果有测量范围为 0℃~1000℃,精度等级分别为 1.0 级和 0.5 级的两台温度检测仪表,那么又应该选择哪台仪表更合适?试说明理由。

3-25 某台测温范围为 0℃~1000℃的温度计出厂前经校验,各点测量结果分别为:

标准表读数/℃	0	200	400	600	800	900	1000
被校表读数/℃	0	201	402	604	805	903	1001

试求:(1)该温度计的最大绝对误差。

(2)该温度计的精度等级。

(3)如果工艺上允许的最大绝对误差为 ±8℃,问该温度计是否符合要求?

3-26 何谓仪表的死区、滞环和回差?

3-27 校验一台测量范围为 0~250mmH₂O 的差压变送器,差压由 0 上升至 100mmH₂O 时,差压变送器的读数为 98mmH₂O。当从 250mmH₂O 下降至 100mmH₂O 时,读数为 103mmH₂O。问此仪表在该点的回差是多少?

3-28 有一台压力表,其测量范围为 0~10MPa,经校验得出下列数据:

标准表读数/MPa		0	2	4	6	8	10
被校表读数	正行程/MPa	0	1.98	3.96	5.94	7.97	9.99
	反行程/MPa	0	2.02	4.03	6.06	8.03	10.01

- 试求：(1) 该表的变差。
- (2) 该表是否符合 1.0 级精度？
- 3-29 什么是仪表的反应时间？它反映了仪表的什么性能？
- 3-30 什么是仪表的重复性和再现性？它们与精度的关系如何？
- 3-31 衡量仪表的可靠性主要有哪些指标？试分别加以说明。