# 绪　　论

一、化工自动化意义及目的

化工生产过程自动化，就是在化工设备、装置及管道上，配置一些自动化装置，替代操作工人的部分直接劳动，使生产在不同程度上自动地进行。这种部分地或全部地用自动化装置来管理化工生产过程的办法，就称为化工生产过程自动化，简称为化工自动化。

自动化是提高社会生产力的有力工具之一。实现化工生产过程自动化的主要目的如下。

（1）加快生产速度、降低生产成本、提高产品产量和质量。在人工操作的生产过程中，由于人的五官、手、脚，对外界的观察与控制的精确度和速度是有一定限度的。而且由于体力关系，人直接操纵设备的力量也是有限的。如果用自动化装置代替人的操纵，则以上情况可以得到避免和改善，并且通过自动控制系统，使生产过程在最佳条件下进行，从而可以大大加快生产速度、降低能耗、实现优质高产。

（2）减轻劳动强度、改善劳动条件。多数化工生产过程是在高温、高压或低温低压下进行，还有的是易燃、易爆或有毒、有腐蚀性、有刺激性气味。实现了化工自动化，工人只要对自动化装置的运转进行监控，而不需要再直接从事大量而又危险的现场操作。

（3）能够保证生产安全，防止事故发生或扩大，达到延长设备使用寿命、提高设备利用率、保障人生安全的目的。

（4）生产过程自动化的实现，能根本改变劳动方式，提高工人文化技术水平，以适应当代信息技术革命和信息产业革命的需要。

二、化工自动化的发展概况

在化工生产过程自动化的发展初级阶段，首先是应用一些自动检测仪表来监视生产。在二十世纪四十年代以前，绝大多数化工生产处于手工操作状况，操作工人根据反映主要工艺参数的仪表指示情况，用人工来改变操作条件，生产过程单凭经验进行。对于那些连续生产的化工厂，在进出物料彼此联系中装设了大的贮槽，起着克服干扰影响及稳定生产的作用，显然生产的效率很低，花在设备上的投资很大。

五十年代和六十年代，人们对化工生产的各种单元操作进行了大量的开发工作，使得化工生产过程朝着大规模、高效率、连续生产、综合利用方向迅速发展。因此，要使这类工厂生产运行正常，如果没有先进的自动检测仪表和控制系统，几乎是不可能的事。此时，在实际生产中应用的自动控制系统主要是压力、流量、液位和温度四大参数的简单控制。同时，串级、比值、多冲量等复杂控制系统也得到了一定程度的发展。所应用的自动化技术工具主要是基地式电动、气动仪表及膜片式的单元组合仪表。此时期由于对化工对象的动态特性了解不够深入，因此，半经验、半理论的设计准则和整定公式，在自动控制系统设计和参数整定中起了相当重要的作用，解决了许多实际问题。

七十年代以来，化工自动化技术水平得到了很大的提高。在自动化技术工具方面，新产品像雨后春笋，气动Ⅱ型和电动Ⅰ型单元组合式仪表刚投入生产不久，气动Ⅲ型和电动Ⅱ型单元组合式仪表就相继问世，并已进一步发展到具有多功能的组装仪表、智能式仪表，为实现各种特殊控制规律提供了条件。新型智能传感器和控制仪表的问世使仪表与计算机之间的

直接联系极为方便。在自动控制系统方面，由于控制理论和控制技术的发展，给自动控制系统的发展创造了各种有利的条件，各种新型控制系统相继出现，控制系统的设计与整定方法也有了新的发展。近年来，科学技术的发展与革新极为迅速，特别是电子计算机在自动化中发挥越来越巨大的威力，这对常规仪表产生了一系列的影响，促进常规仪表不断变革，以满足生产过程中对能量利用、产品质量、收率等各个方面的越来越高的要求。

化工生产过程自动化是一门综合性的技术学科。它是利用自动控制学科、仪器仪表学科及计算机学科的理论与技术服务于化学工程学科。随着现代科学技术的进步，本学科将不断发展并日益被人们所重视。在化工生产过程中，由于实现了自动化，人们通过自动化装置来管理生产，自动化装置与工艺及设备已结合成为有机的整体。因此，越来越多的工艺技术人员认识到：学习仪表及自动化方面的知识，对于管理与开发现代化化工生产过程是十分必要的。

三、化工仪表及自动化系统的分类

在化工生产过程中，需要测量与控制的参数是多种多样的，但主要的有热工量（压力、流量、液位、温度等）和成分（或物性）量。因而化工自动化仪表按其功能不同，大致分成四个大类：即检测仪表（包括各种参数的测量和变送）；显示仪表（包括模拟量显示和数字量显示）控制仪表（包括气动、电动控制仪表及数字式控制器）和执行器（包括气动、电动、液动等执行器）。这四大类仪表之间的关系如图 0-1 所示。

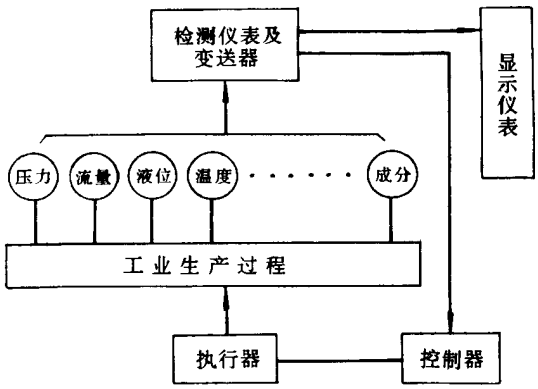



图 0-1　各类仪表之间的关系

利用上述各类仪表，可以构成自动检测、自动操纵、自动保护和自动控制这样四种自动化系统。它们的主要作用如下。

1. 自动检测系统

利用各种仪表对生产过程中主要工艺参数进行测量、指示或记录的，称为自动检测系统。它代替了操作人员对工艺参数的不断观察与记录，因此起到对过程信息的获取与记录作用。这在生产过程自动化中，是最基本的也是十分重要的内容。

图 0-2 的热交换器是利用蒸汽来加热冷液的，冷液经加热后的温度是否达到要求，可用测温元件配上平衡电桥来进行测量、指示和记录；冷液的流量可以用孔板配上流量计进行检测；蒸汽压力可以用压力表来指示。这些就是自动检测系统。

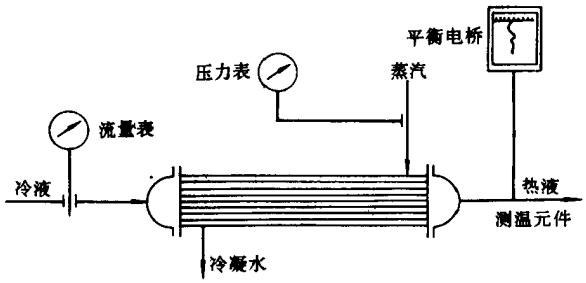



图 0-2　热交换器自动检测系统示意图

自动检测系统中主要的自动化装置为敏感元件、传感器与显示仪表。

敏感元件亦称检测元件，它的作用是对被测的变量作出响应，把它转换为适合测量的物理量。例图 0-2 所示系统中可用孔板将流量转换为差压信号，用热电偶将温度转换为电（毫伏)信号。

传感器可以对检测元件输出的物理量信号作进一步信号转换，当转换后的信号为标准的统一信号(例 0～10mA、4～20mA、0.02～0.1MPa 等)时,此时的传感器一般称为变送器。例流量变送器常采用差压变送器。

显示仪表的作用，是将检测结果以指针位移、数字、图象等形式，准确地指示、记录或储存，使操作人员能正确了解工艺操作情况和状态。例图 0-2 所示系统中的平衡电桥就属于显示记录仪表。

2. 自动信号和联锁保护系统

生产过程中，有时由于一些偶然因素的影响，导致工艺参数超出允许的变化范围而出现不正常情况时，就有可能引起事故。为此，常对某些关键性参数设有自动信号联锁保护装置。当工艺参数超过了允许范围，在事故即将发生以前，信号系统就自动地发出声光信号警报，告诫操作人员注意，并及时采取措施。如工况已到达危险状态，联锁系统立即自动采取紧急措施，打开安全阀或切断某些通路，必要时紧急停车，以防止事故的发生和扩大。它是生产过程中的一种安全装置。例如某反应器的反应温度超过了允许极限值，自动信号系统就会发出声光信号，报警给工艺操作人员以及时处理生产事故。由于生产过程的强化，往往靠操作人员处理事故已成为不可能，因为在一个强化的生产过程中，事故常常会在几秒钟内发生，由操作人员直接处理是根本来不及的。而自动联锁保护系统可以圆满地解决这类问题。如当反应器的温度或压力进入危险限时，联锁系统可立即采取应急措施，加大冷却剂量或关闭进料阀门，减缓或停止反应，从而可避免引起爆炸等生产事故。

自动信号联锁保护电路按其主要构成元件的不同，可分为有触点式和无触点式两类（有时可采用混合式）。有触点式电路是由各种继电器、按钮、开关等电器组成的继电线路，它是依靠各种电器的触点开合来完成电路的通断和切换。无触点式电路是利用由二极管、晶体管以及集成电路等电子器件构成具有一定功能的电子线路，利用电子器件的导通或阻断特性来实现自动信号的报警和联锁保护作用的。随着电子技术和计算机技术的不断发展，自动信号联锁保护系统可以利用更为先进的可编程控制器(PLC)来实现,比起传统的电路来说,它具有操作方便、应用灵活、安全可靠和维修简单等优点。

3. 自动操纵及自动开停车系统

自动操纵系统可以根据预先规定的步骤自动地对生产设备进行某种周期性操作。例如合成氨造气车间的煤气发生炉，要求按照吹风、上吹、下吹制气、吹净等步骤周期性地接通空气和水蒸汽，利用自动操纵机可以代替人工自动地按照一定的时间程序扳动空气和水蒸汽的阀门，使它们交替地接通煤气发生炉，从而极大地减轻了操作人员的重复性体力劳动。

自动开停车系统可以按照预先规定好的步骤，将生产过程自动地投入运行或自动停车。

4. 自动控制系统

生产过程中各种工艺条件不可能是一成不变的。特别是化工生产，大多数是连续生产，各设备相互关联着，当其中某一设备的工艺条件发生变化时，都可能引起其他设备中某些参数或多或少的波动，偏离了正常的工艺条件。为此，就需要用一些自动控制装置，对生产中某些关键性参数进行自动控制，使它们在受到外界干扰的影响而偏离正常状态时，能自动地调回到规定的数值范围内，为此目的而设置的系统就是自动控制系统。

由以上所述可以看出，自动检测系统只能完成“了解”生产过程进行情况的任务；自动信号联锁保护系统只能在工艺条件进入某种极限状态时，采取安全措施，以免发生生产事故；自动操纵系统只能按照预先规定好的步骤进行某种周期性操纵；只有自动控制系统才能自动地排除各种干扰因素对工艺参数的影响，使它们始终保持在预先规定的数值上，保证生产维持在正常或最佳的工艺操作状态。因此，自动控制系统是自动化生产中的核心部分。

本门课程重点介绍自动检测系统与自动控制系统。

本课程分为两篇，第一篇是化工检测仪表，第二篇是化工自动化基础。实际上，第一篇是研究如何获取化工生产过程中的“信息”；第二篇是研究如何对化工生产过程进行有效的“控制”。所以，从这个意义上来说，“化工仪表及自动化”课程是研究生产过程的“信息与控制”的。

通过本门课程的学习，应能了解主要工艺参数（温度、压力、流量及物位）的测量方法及其仪表的工作原理及特点；能根据工艺要求，正确地选用和使用常见的测量仪表及控制仪表；能了解化工自动化的初步知识，理解基本控制规律，懂得控制器参数是如何影响控制质量的；能根据工艺的需要，和自控设计人员共同讨论和提出合理的自动控制方案；能为自控设计提供正确的工艺条件和数据；能在生产开停车过程中，初步掌握自动控制系统的投运及控制器的参数整定。

# 第一篇　化工测量仪表

在化工生产过程中，为了有效地进行生产操作和自动控制，需要对工艺生产中的一些主要参数进行自动测量。用来测量这些参数的仪表称为化工测量仪表。本篇将在介绍有关测量和测量仪表的基本知识的基础上，介绍有关压力、流量、液位、温度等参数的测量方法及其相应的测量仪表。

## 第一章　测量仪表基本知识

### 一、测量过程与测量误差

所谓测量，就是用实验的方法，求出某个量的大小。比如我们要测量一段导线的长度，就需要用一把米尺与它比试一下，看它有多少米长，即可测知该段导线的长度。用数学式子表示如下：

$$Q=qV$$

式中　$Q$ ——被测值；

$q$ ——测量值，即被测量与所选测量单位的比值；

$V$ ——测量单位。

上述这种测量方法，通常叫做直接测量，除此之外，还有间接测量的测量方法。

无论采用哪种方法进行测量的过程，实质上都是将被测参数与其相应的测量单位进行比较的过程。而测量仪表就是实现这种比较的工具。各种测量仪表不论采用哪一种原理，它们都是要将被测参数经过一次或多次的信号能量的转换，最后获得便于测量的信号能量形式，并由指针位移或数字形式显示出来。例如各种炉温的测量，常常是利用热电偶的热电效应，把被测温度转换成直流毫伏信号（电能），然后变为毫伏测量仪表上的指针位移，并与温度标尺相比较而显示出被测温度的数值。

在测量过程中，由于所使用的测量工具本身不够准确、观测者的主观性和周围环境的影响等等，使得测量的结果不可能绝对准确。由仪表读得的被测值（测量值）与被测参数的真实值之间，总是存在一定的差距，这种差距就称为测量误差。

测量误差按其产生原因的不同，可以分为三类。

（1）系统误差（又称规律误差）这种误差的大小和方向（即符号）均不随测量过程而改变。产生这种误差的原因，主要有仪表本身的缺陷，观测者的习惯或偏向，单因素环境条件的变化等。由于这种误差是有一定规律的，所以在测量过程中是容易消除或加以修正的。

（2）疏忽误差　产生这种误差的原因，是由于测量者在测量过程中疏忽大意所致的。它比较容易被发觉，并应将它从测量结果中去掉。只要我们在测量过程中认真、仔细，就可以避免产生这类误差。

（3）偶然误差　就是在同样的测量条件下，反复多次，每次结果都不重复的误差。这种误差是由一些随机的偶然原因引起的，因此它不易被发觉和修正。偶然误差的大小反映了测量过程的精度。

测量误差通常有两种表示方法，即绝对表示法和相对表示法。

绝对误差在理论上是指仪表指示值 $x_I$ 和被测量的真实值 $x_t$ 之间的差值，可表示为：

$$\Delta = x_I - x_t$$

在工程上，要知道被测量的真实值 $x_t$ 是困难的。因此，所谓测量仪表在其标尺范围内各点读数的绝对误差，一般是指用被校表（准确度较低）和标准表（准确度较高）同时对同一参数测量所得到的两个读数之差，可用下式表示：

$$\Delta = x - x_0$$

式中 $\Delta$ —— 绝对误差；

$x$ —— 被校表的读数值；

$x_0$ —— 标准表的读数值。

测量误差还可以用相对误差来表示。某一被测量的相对误差等于这一点的绝对误差 $\Delta$ 与它的真实值 $x_t$（或 $x_0$）之比。可用式子表示：

$$A = \frac{\Delta}{x_0} = \frac{x - x_0}{x_0} \text{或} \frac{x_I - x_t}{x_t}$$

式中 $A$ —— 仪表在 $x_0$ 处的相对误差。

求取测量误差的目的在于判断测量结果的可靠程度。

二、测量仪表的品质指标

一台仪表的优劣，可用它的品质（性能）指标来衡量。现将几项常见的指标简介如下。

1. 测量仪表的准确度（习惯上称精确度）

前面已经说过，仪表的测量误差可以用绝对误差 $\Delta$ 来表示。但是，必须指出，仪表的绝对误差在测量范围内的各点上是不相同的。因此，我们常说的“绝对误差”指的是绝对误差的最大值 $\Delta_{max}$。

事实上，由于仪表的准确度不仅与绝对误差有关，而且还与仪表的标尺范围有关。例如，两台标尺范围（即测量范围）不同的仪表，如果它们的绝对误差相等的话，标尺范围大的仪表准确度较标尺范围小的为高。因此，工业仪表经常将绝对误差折合成仪表标尺范围的百分数表示，称为相对百分误差 $\delta$，即：

$$\delta = \frac{\Delta_{max}}{\text{标尺上限值} - \text{标尺下限值}} \times 100\%$$

仪表的标尺上限值与下限值之差，一般称为仪表的量程（Span）。

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叫允许误差。允许误差一般用相对百分误差来表示，即某一台仪表的允许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：

$$\delta_{允} = \pm \frac{\text{仪表允许的最大绝对误差值}}{\text{标尺上限值} - \text{标尺下限值}} \times 100\%$$

仪表的 $\delta_{允}$ 越大，表示它的准确度越低；反之，仪表的 $\delta_{允}$ 越小，表示仪表的准确度越高。

事实上，国家就是利用这一办法来统一规定仪表的准确度（精度）等级的。将仪表的允许相对百分误差去掉“±”号及“%”号，便可以用来确定仪表的准确度等级。目前，我国生产的仪表常用的准确度等级有 0.005，0.02，0.05，0.1，0.2，0.4，0.5，1.0，1.5，2.5，4.0 等。如果某台测温仪表的允许误差为 $\pm 1.5\%$，则认为该仪表的准确度等级符合 1.5 级。为了进一步说明如何确定仪表的准确度等级，下面再举一个例子。

［例］某台测温仪表的测温范围为 200～700℃，仪表的最大绝对误差为 ±4℃，试确定该仪表的相对百分误差与准确度等级。

解：仪表的相对百分误差为

$$\delta=\frac{\pm 4}{700-200}\times 100\%=\pm 0.8\%$$

如果将仪表的 $\delta$ 去掉“±”号与“%”号，其数值为 0.8。由于国家规定的精度等级中没有 0.8 级仪表，同时，该仪表的误差超过了 0.5 级仪表所允许的最大误差，所以，这台测温仪表的精度等级为 1.0 级。

仪表准确度等级是衡量仪表质量优劣的重要指标之一。一般数值越小，仪表准确度等级越高，仪表的准确度也越高。工业现场用的测量仪表，其准确度大多是 0.5 级以下的。

必须指出：在工业上应用时，对测量仪表准确度的要求，应根据生产操作的实际情况和该参数对整个工艺过程的影响程度所提供的误差允许范围来确定，这样才能保证生产的经济性和合理性。

仪表的准确度等级一般可用不同的符号形式标志在仪表面板上，如 (0.5) △1.0 等。

2. 测量仪表的恒定度

测量仪表的恒定度常用变差（又称来回差）来表示。它是在外界条件不变的情况下，用同一仪表对某一参数值进行正反行程（即被测参数逐渐由小到大和逐渐由大到小）测量时，仪表正、反行程指示值之间存在的差值，此差值即为变差，如图 1-1 所示。

造成变差的原因很多，例如传动机构的间隙、运动件间的摩擦、弹性元件弹性滞后的影响等。变差的大小，用仪表测量同一参数值，正、反行程指示值间的最大绝对差值与仪表标尺范围之比的百分数表示，即：

$$\text{变差}=\frac{\text{最大绝对差值}}{\text{标尺上限值}-\text{标尺下限值}}\times 100\%$$

必须注意，仪表的变差不能超出仪表的允许误差，否则，应及时检修。

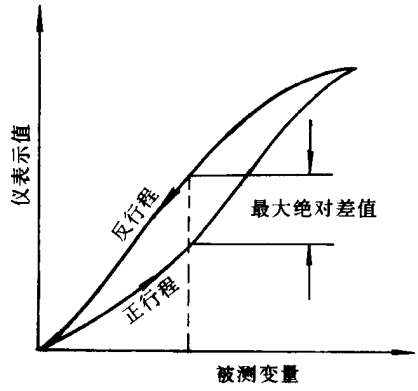


图 1-1　测量仪表的变差

3. 灵敏度与灵敏限（也叫灵敏阈）

仪表指针的线位移或角位移，与引起这个位移的被测参数变化量的比值称为仪表的灵敏度，用公式表示如下

$$S=\frac{\Delta\alpha}{\Delta x}$$

式中　$S$ ——仪表的灵敏度；

$\Delta\alpha$ —— 指针的线位移或角位移；

$\Delta x$ ——引起 $\Delta\alpha$ 所需的被测参数变化量。

所以，仪表的灵敏度，在数值上就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)。例一台测量范围为 0～100℃ 的测温仪表，其标尺长度为 20mm，则其灵敏度 $S$ 为 0.2mm/℃，即温度每变化 1℃ 指针移动了 0.2mm。

所谓仪表的灵敏限，是指引起仪表指针发生动作的被测参数的最小变化量。通常仪表灵

敏限的数值应不大于仪表允许绝对误差的一半。

值得注意的是，上述指标一般只适用于指针式仪表。在数字式仪表中，往往用分辨率来表示仪表灵敏度（或灵敏限）的大小。数字式仪表的分辨率就是在仪表的最低量程上最末一位改变一个数所表示的被测参数变化量。以七位数字电压表为例，在最低量程满度值为 1V 时，它的分辨率则为 0.1μV。数字式仪表能稳定显示的位数越多，则分辨率越高。

4. 反应时间

当用仪表对被测量进行测量时，被测量突然变化以后，仪表指示值总是要经过一段时间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应出参数变化的品质指标。反应时间大，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。因为在这种情况下，当仪表尚未准确显示出被测值时，参数本身却早已改变了，使仪表始终指示不出参数瞬时值的真实情况。所以，仪表反应时间的长短，实际上反映了仪表动态特性的好坏。

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（即指示值）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。

5. 线性度

线性度用来说明输出量与输入量的实际关系曲线偏离直线的程度。通常我们总是希望测量仪表的输出与输入之间呈线性关系。因为在线性情况下，模拟式仪表的刻度就可以做成均匀刻度，而数字式仪表就可以不必采取线性化措施。此外，当线性的测量仪表作为控制系统的一个组成部分时，往往可以使整个系统的分析设计得到简化。

线性度通常用实际测得的输入－输出特性曲线(称为标定曲线)与理论拟合直线之间的最大偏差与测量仪表满量程输出范围之比的百分数来表示，如图 1-2 所示：

$$\delta f = \frac{\Delta f_{max}}{\text{仪表量程}} \times 100\%$$

式中 $\delta f$ ——线性度(又称非线性误差)；

$\Delta f_{max}$ ——标定曲线对于理论拟合直线的最大偏差（以仪表示值的单位计算）。

6. 重复性

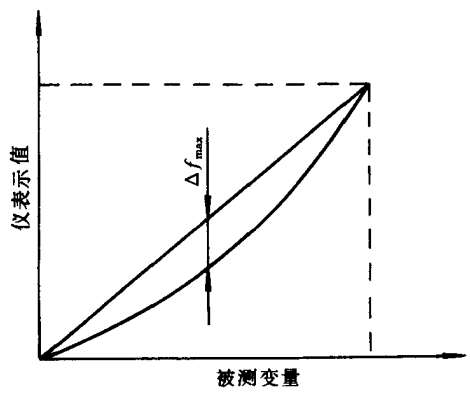



图 1-2 线性度示意图

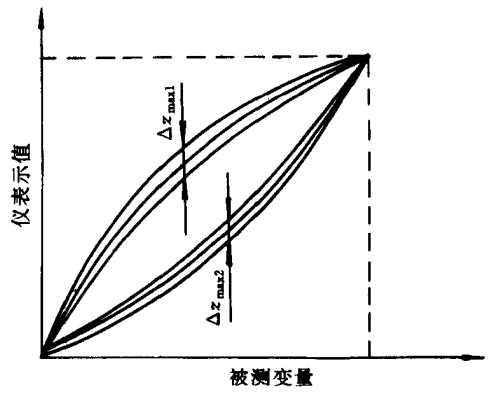



图 1-3 重复性示意图

重复性表示测量仪表在被测参数按同一方向作全量程连续多次变动时所得标定特性曲线不一致的程度。若标定的特性曲线一致，重复性就好，重复性误差就小。如图 1-3 所示，分别求出沿正反行程多次循环测量的各个测试点仪表示值之间的最大偏差 $\Delta z_{max1}$ 和 $\Delta z_{max2}$ ，再取这两个最大偏差中之较大者为 $\Delta z_{max}$。重复性误差 $\delta z$ 通常用 $\Delta z_{max}$ 与测量仪表满量程输出范围之比的百分数来表示：

$$\delta z = \frac{\Delta z_{max}}{\text{仪表量程}} \times 100\%$$

式中 $\delta z$ —— 重复性误差；

$\Delta z_{max}$ —— 同方向多次重复测量时仪表示值的最大偏差值（以仪表示值的单位计算）。

三、测量系统中的常见信号类型

作用于测量装置输入端的被测信号，通常要转换成以下几种便于传输和显示的信号类型。

1. 位移信号

位移信号包括直线位移和角位移两种形式，它属于一种机械信号。在测量力、压力、质量、振动等物理量时，通常都首先要把它们转换成位移量，然后再作进一步处理。例如，当被测量是力或压力时，可以通过适当的弹性元件转换成位移。在测量系统中，位移信号可以利用杠杆、齿轮副等机构进行机械放大和传送，也可以利用一定的元件变换为气压信号（例如喷嘴挡板机构），或者转换为电信号（例如变极距型电容传感器或位移型电感传感器）。

2. 压力信号

压力信号包括气压信号和液压信号，工业检测中主要应用气压信号。在气动检测系统中，以净化的恒压空气作为能源，气动传感器（或变送器）将被测参数转换为与之相应的气压信号。在测量系统中，气压信号可以通过气动功率放大器放大，也可以通过气动计算单元进行加、减、乘、除、开方、乘方等数学运算，还可通过气路输送给显示单元进行指示、记录、报警，或用于自动控制。采用气-电转换器，可将气压信号转换为电信号。

3. 电气信号

常用的电气信号有电压信号、电流信号、阻抗信号和频率信号等。

电气信号传送快、滞后小、可以远距离传递，便于和电子计算机联接，在检测技术中应用越来越广，并已逐渐形成一个重要的分支 ——非电量电测技术。将被测工艺参数的变化直接或间接地转换为电信号的传感器，近年来也发展很迅速。

4. 光信号

光信号包括光通量信号、干涉条纹信号、衍射条纹信号、莫尔条纹信号等等。随着激光、光导纤维和计量光栅等新兴技术的发展，光学检测技术也得到了很大的发展，特别是在高精度、非接触测量方面，占有十分重要的地位。利用各种光学元件构成的光学系统可将光信号进行传递、放大和处理。

在非电量电测技术中，利用光电元件可以将光信号转换成电信号。光信号的形式，既可以是连续的，又可以是断续(脉冲)式的。

四、测量系统中信号的传递形式

从传递信号的连续性的观点来看，在检测系统中传递信号的形式可以分为模拟信号、数字信号和开关信号。

1. 模拟信号

在时间上是连续变化的，亦即在任何瞬时都可以确定其数值的信号，称为模拟信号。在生

产过程中常遇到的各种连续变化的物理量和化学量皆属于模拟信号。模拟信号可以变换为电信号,即是平滑地、连续地变化的电压或电流信号。例如,连续变化的温度信号可以利用热电偶转换为与之成比例的连续变化的电势信号。

2. 数字信号

数字信号是一种以离散形式出现的不连续信号，通常用二进制数“ 0”和“ 1”组合的代码序列来表示。数字信号变换成电信号就是一连串的窄脉冲和高低电平交替变化的电压信号。

连续变化的工艺参数（模拟信号）可以通过数字式传感器直接转换成数字信号。然而，大多数情况是首先把这些参数变换成电形式的模拟信号，然后再利用模-数(A/D)转换技术把电模拟 量再转换成数字量。将一个模拟信号转换为数字信号时，必须用一定的计量单位使连续参数整量化，亦即用最接近的离散值（数字量）来近似表示连续量的大小。由于数字量只能增大或减小一个单位，因此，计量单位越小，整量化所造成的误差也就越小。

3. 开关信号

用两种状态或用两个数值范围表示的不连续信号叫做开关信号。例如，用水银触点温度计来检测温度的变化时，可以利用水银触点的“ 断开 ”与“ 闭合 ”来判断温度是否达到给定值。在自动检测技术中，利用开关式传感器（如干簧管、电触点式传感器）可以将模拟信号变换成开关信号。

五、测量仪表与测量方法的分类

1. 测量仪表的分类

化工生产中使用的仪表类型繁多、结构复杂，因而分类方法也不少，现将常见的几种分类方法简介如下。

(1) 依据所测参数的不同,可分成压力(包括差压、负压)测量仪表、流量测量仪表、物位（液位）测量仪表、温度测量仪表、物质成分分析仪表及物性检测仪表等。

(2) 按表达示数的方式不同，可分成指示型、记录型、讯号型、远传指示型、累积型等。

(3) 按精度等级及使用场合的不同，可分为实用仪表、范型仪表和标准仪表，分别使用在现场、实验室和标定室。

2. 测量方法的分类

按照测量结果的获得过程，测量方法可以分为直接测量和间接测量。

(1) 直接测量　利用经过标定的仪表对被测参数进行测量，并可以直接从显示结果获得被测参数的具体数值，这种测量方法叫直接测量。

根据被测参数获得方式的不同，直接测量又有偏差法与平衡法（零位法）之分。

偏差法测量时仪表示值偏离零位或静态平衡位置的具体数值，就反映了被测参数的大小。这种仪表的分度是预先用标准仪表标定的，偏差的大小直接反映了被测参数所包含的基准单位数。指针式仪表是最为常用的一种偏差测量装置，测量时直接驱动仪表指针偏转，并通过指针与标定的刻度线重合位置确定被测量的大小。

偏差法的优点是仪表的结构比较简单、读数简便、直观。缺点是一般来说，精度较低。

平衡法是将被测量与标准量进行比较，二者的差值为零值时，标准量的读数就是被测量的大小。这就要求标准量可以连续变化并具有精细的分度，同时要有一个灵敏度很高的指零机构。电位差计是一种典型的平衡法测量仪表，它是利用标准电阻上取出的标准电压去平衡被测电压，从而获得被测电压的具体数值。

平衡法具有很高的测量精度，但响应较慢、测量时间较长。

除此之外，还有一种将平衡法与偏差法结合起来的一种组合测量方法，在测量过程中将被测量的大部分用标准信号去抵消，而剩余部分再用偏差法测量，这种方法称为微差法。它的测量精度较高，响应比较快。

(2) 间接测量　当被测量不宜直接测量时，可以通过测量与被测量有关的几个相关量后，再经过计算来确定被测量的大小。这种间接测量方法一般比直接测量要复杂一些，但随着计算机的应用，仪表功能的加强，测量过程中的数据处理完全可以由计算机快速而准确地完成，因而间接测量方法的应用也正在扩大。

六、化工检测的发展趋势

由于化工生产过程中被测介质形态多样（气态、液态、固态及混合体）；有时还具有特殊性质（强腐蚀、强辐射、高温、高压、深冷、真空、高粘度等）；检测环境比较恶劣，存在众多的影响和干扰，如电源电压、频率波动，温度、压力变化，水汽、湿度、光照、辐射、盐雾、烟雾、粉尘等。这些情况都要求化工检测仪表有稳定的工作特性、高的抗干扰能力和相应的防护措施。

近年来，检测技术及仪器仪表的发展是十分迅速的。这主要表现在两方面。

1. 检测技术的现代化

随着科学技术的发展，新技术、新材料、新工艺不断涌现，新的检测方法也不断得到开发。例如，激光、微波、超声波、红外线、放射性同位素等非接触检测技术，近年来都得到了较大的发展。随着半导体陶瓷、光导纤维以及其他新型材料的使用，使得许多新型传感器不断出现。许多基于物质本身内在性质的检测器件，例如压敏、热敏、光敏、湿敏、化学敏等器件，被不断应用于新型传感器中。此外，仿生传感学作为一门新型学科也正在得到迅速发展。

2. 检测仪表的集成化、数字化、智能化

六十年代集成电路问世以来，由小规模电路发展为中规模电路、大规模电路以至超大规模电路，经历了四代变化，半导体技术的发展促进了仪表的更新换代。在半导体技术的基础上，进一步实现“材料、器件、电路、仪表”一体化的固态传感器的出现，开创了检测仪表的新途径，使整体检测仪表构造简单、体积小、使用方便、抗干扰能力强，有利于改善性能和降低成本。

由于电子技术和数字化技术的迅速发展，采用数字式传感器直接输出数字量，是近年来检测仪表发展的动向之一，这样可以提高仪表的精度，便于直接与计算机衔接。此外，为了将数字仪表的高精度和模拟仪表的连续直观结合起来，人们正将模拟数字混合测量法和模型图象测量法运用于新型仪表中。将光导纤维传输技术和信息处理技术应用于仪表，也必将推动检测技术和检测仪表的新发展。

微处理机的普及应用将导致仪表的技术革命。在检测仪表中，采用以大规模集成电路为基础的微处理器或单片微型计算机，可以使仪表具有自校准、自调零、自选量程、自动测试以及信息变换、统计处理数据等多种功能，从而实现智能化。智能传感器被普遍地应用于计算机控制系统中。

## 例 题 分 析

1. 某台具有线性关系的温度变送器，其测温范围为 0～200℃，变送器的输出为 4～20mA。对这台温度变送器进行校验，得到下列数据：

| 输入信号 | 标准温度/℃ | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 输出信号/mA | 正行程读数 $x_{正}$ | 4 | 8 | 12.01 | 16.01 | 20 |
| | 反行程读数 $x_{反}$ | 4.02 | 8.10 | 12.10 | 16.09 | 20.01 |

试根据以上校验数据确定该仪表的变差、准确度等级与线性度。

解：该题的解题步骤如下。

(1) 根据仪表的输出范围确定在各温度测试点的输出标准值 $x_{标}$。任一温度值的标准输出信号(mA) 为：

$$\frac{\text{温度值（输出上限值—输出下限值）}}{\text{输入上限值—输入下限值}}+4$$

例温度为 50℃时，对应的输出应为：

$$\frac{50(20-4)}{200-0}+4=8(\text{mA})$$

其余类推。

(2) 算出各测试点正、反行程时的绝对误差 $\Delta_{正}$ 与 $\Delta_{反}$，并算出正、反行程之差 $\Delta_{变}$，分别填入下表内(计算 $\Delta_{变}$ 时可不考虑符号，取正值)。

| 输入信号/℃ | | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 输出信号/mA | 正行程读数 $x_{正}$ | 4 | 8 | 12.01 | 16.01 | 20 |
| | 反行程读数 $x_{反}$ | 4.02 | 8.10 | 12.10 | 16.09 | 20.01 |
| | 标准值 $x_{标}$ | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 |
| 绝对误差/mA | 正行程 $\Delta_{正}$ | 0 | 0 | 0.01 | 0.01 | 0 |
| | 反行程 $\Delta_{反}$ | 0.02 | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.01 |
| 正反行程之差 $\Delta_{变}$ | | 0.02 | 0.10 | 0.09 | 0.08 | 0.01 |

(3) 由上表找出最大的绝对误差 $\Delta_{max}$，并计算最大的相对百分误差 $\delta_{max}$。由上表可知：

$$\Delta_{max}=0.10(\text{mA})$$

$$\delta_{max}=\frac{0.10}{20-4}\times 100\%=0.625\%$$

去掉 $\delta_{max}$ 的正、负号及%号后，其数值为 0.625，该数值在 0.5至1.0之间，由于该表的 $\delta_{max}$ 已超过 0.5级表所允许的 $\delta_{允}$，故该表的准确度等级为 1.0级。

(4) 计算变差 $\delta_{变}=\frac{\Delta_{变max}}{20-4}\times 100\%=0.625\%$，由于该变差数值在 1.0级表允许的误差范围内，故不影响表的准确度等级。注意若变差数值 $\Delta_{变max}$ 超过了绝对误差 $\Delta_{max}$，则应以 $\Delta_{变max}$ 来确定仪表的准确度等级。

(5) 由计算结果可知，非线性误差的最大值 $\Delta f_{max}=0.10$，故线性度 $\delta f$ 为：

$$\delta f=\frac{\Delta f_{max}}{\text{仪表量程}}\times 100\%=\frac{0.10}{20-4}\times 100\%=0.625\%$$

注意的是，在具体校验仪表时，为了可靠起见，应适当增加测试点与实验次数，本例题只是简单列举几个数据说明问题罢了。

2. 某台测温仪表的测温范围为 200～1000℃，工艺上要求测温误差不能大于 ±5℃，试确定应选仪表的准确度等级。

解：工艺上允许的相对百分误差为

$$\delta_{允}=\frac{\pm 5}{1000-200}\times 100\%=0.625\%$$

要求所选的仪表的相对百分误差不能大于工艺上的 $\delta_{允}$，才能保证测温误差不大于 ±5℃，所以所选仪表

的准确度等级应为 0.5级。当然仪表的准确度等级越高，能使测温误差越小，但为了不增加投资费用，不宜选过高准确度的仪表。

## 习题与思考题

1. 何谓测量与测量误差？

2. 根据测量误差产生的原因，测量误差有哪几种？

3. 某温度表的测温范围为 0～1000℃,准确度等级为 0.5级，试问此温度表的允许最大绝对误差为多少？在校验点为 500℃时，温度表的指示值 504℃，试问该温度表在这一点上准确度是否符合 1级，为什么？

4. 在测量系统中，常见的信号传递形式有哪几种？

5. 根据被测参数获得方式的不同，直接测量有哪几种方法？各有什么优缺点？

# 第二章　压力测量

化工生产中，所谓压力是指由气体或液体均匀垂直地作用于单位面积上的力。在工业生产过程中，压力往往是重要的操作参数之一。特点是在化工、炼油等生产过程中，经常会遇到压力和真空度的测量，其中包括比大气压力高很多的高压、超高压和比大气压力低很多的真空度的测量。如高压聚乙烯，要在 150MPa 或更高压力下进行聚合；氢气和氮气合成氨气时，要在 15MPa 或 32MPa 的压力下进行反应；而炼油厂减压蒸馏，则要在比大气压低很多的真空下进行。如果压力不符合要求，不仅会影响生产效率，降低产品质量，有时还会造成严重的生产事故。在化学反应中，压力既影响物料平衡关系，也影响化学反应速度。所以，压力的测量与控制，对保证生产过程正常进行，达到高产、优质、低消耗和安全是十分重要的。

## 第一节　压力单位及测压仪表

由于压力是指均匀垂直地作用在单位面积上的力，故可用下式表示：

$$P=\frac{F}{S} \tag{2-1}$$

式中 $P$ 表示压力，$F$ 表示垂直作用力，$S$ 表示受力面积。

根据国际单位制（代号为 SI）规定，压力的单位为帕斯卡，简称帕(Pa)，1 帕为 1 牛顿每平方米，即：

$$1\text{Pa}=1\text{N/m}^2 \tag{2-2}$$

帕所代表的压力较小，工程上经常使用兆帕（MPa）。帕与兆帕之间的关系为：

$$1\text{MPa}=1\times10^6\text{Pa} \tag{2-3}$$

过去使用的压力单位比较多，根据 1984 年 2 月 27 日国务院“关于在我国统一实行法定计量单位的命令”的规定，这些单位将不再使用。但为了使大家了解国际单位制中的压力单位（Pa 或 MPa）与过去的单位之间的关系，下面给出几种单位之间的换算关系表 2-1。

表 2-1　各种压力单位换算表

| 压力单位 | 帕 Pa | 兆　帕 MPa | 工程大气压 kgf/cm² | 物理大气压 atm | 汞　柱 mmHg | 水　柱 $mH_2O$ | 磅/英寸² lb/in² | 巴 bar |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 帕 | 1 | $1\times10^{-6}$ | $1.0197\times10^{-5}$ | $9.869\times10^{-6}$ | $7.501\times10^{-3}$ | $1.0197\times10^{-4}$ | $1.450\times10^{-4}$ | $1\times10^{-5}$ |
| 兆帕 | $1\times10^6$ | 1 | 10.197 | 9.869 | $7.501\times10^3$ | $1.0197\times10^2$ | $1.450\times10^2$ | 10 |
| 工程大气压 | $9.807\times10^4$ | $9.807\times10^{-2}$ | 1 | 0.9678 | 735.6 | 10.00 | 14.22 | 0.9807 |
| 物理大气压 | $1.0133\times10^5$ | 0.10133 | 1.0332 | 1 | 760 | 10.33 | 14.70 | 1.0133 |
| 汞柱 mm | $1.3332\times10^2$ | $1.3332\times10^{-4}$ | $1.3595\times10^{-3}$ | $1.3158\times10^{-3}$ | 1 | 0.0136 | $1.934\times10^{-2}$ | $1.3332\times10^{-3}$ |
| 水柱，m | $9.806\times10^3$ | $9.806\times10^{-3}$ | 0.1000 | 0.09678 | 73.55 | 1 | 1.422 | 0.09806 |
| 磅/英寸² | $6.895\times10^3$ | $6.895\times10^{-3}$ | 0.07031 | 0.06805 | 51.71 | 0.7031 | 1 | 0.06895 |
| 巴 | $1\times10^5$ | 0.1 | 1.0197 | 0.9869 | 750.1 | 10.197 | 14.50 | 1 |

在压力测量中，常有表压、绝对压力、负压或真空度之分，其关系见图 2-1。

工程上所用的压力指示值，大多为表压(绝对压力计的指示值除外)。表压是绝对压力和大气压力之差，即：

$$P_{表压}=P_{绝对压力}-P_{大气压力}$$

当被测压力低于大气压力时，一般用负压或真空度来表示，它是大气压力与绝对压力之差，即：

$$P_{真空度}=P_{大气压力}-P_{绝对压力}$$

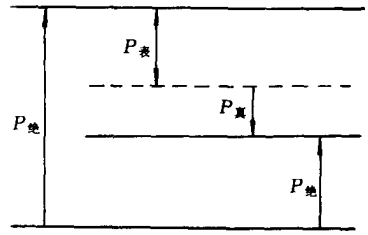



图 2-1 绝对压力、表压、负压(真空度)的关系

因为各种工艺设备和测量仪表通常是处于大气之中，本身就承受着大气压力。所以，工程上经常用表压或真空度来表示压力的大小。 以后所提到的压力，除特别说明外，均指表压或真空度。

测量压力和真空度的仪表很多，按照其转换原理的不同，大致可分为四大类。

1. 液柱式压力计

它是根据流体静力学原理，将被测压力转换成液柱高度进行测量的。按其结构形式的不同，有 U 型管压力计、单管压力计和斜管压力计等。这种压力计结构简单、使用方便。但其精度受工作液的毛细管作用、密度及视差等因素影响，测量范围较窄，一般用来测量低压力或真空度。

2. 弹性式压力计

它是将被测压力转换成弹性元件变形的位移进行测量的。例如弹簧管压力计、波纹管压力计及膜式压力计等。

3. 电气式压力计

它是通过机械和电气元件将被测压力转换成电量(如电压、电流、频率等)来进行测量的仪表，例如电容式、电阻式、电感式、应变片式和霍尔片式等压力计。

4. 活塞式压力计

它是根据水压机液体传送压力的原理，将被测压力转换成活塞上所加平衡砝码的重量进行测量的。它的测量精度很高，允许误差可小到 0.05%～0.02%。但结构较复杂，价格较贵。一般作为一种标准型压力测量仪器，可检验其他类型的压力计。

## 第二节　弹性式压力计

弹性式压力计是利用各种形式的弹性元件，在被测介质压力的作用下，使弹性元件受压后产生弹性变形的原理而制成的测压仪表。这种仪表具有结构简单、使用可靠、读数清晰、牢固可靠、价格低廉、测量范围广以及有足够的精度等优点。若增加附加装置，如记录机构、电气变换装置、控制元件等，则可以实现压力的记录、远传、信号报警、自动控制等。弹性式压力计可以用来测量几百帕到数千兆帕范围内的压力，因此在工业上是应用最为广泛的一种测压仪表。

### 一、弹性元件

弹性元件是一种简易可靠的测压敏感元件。它不仅是弹性式压力计的测压元件，也经常用来作为气动单元组合仪表的基本组成元件。当测压范围不同时，所用的弹性元件也不一样，

常用的几种弹性元件的结构如图 2-2 所示。

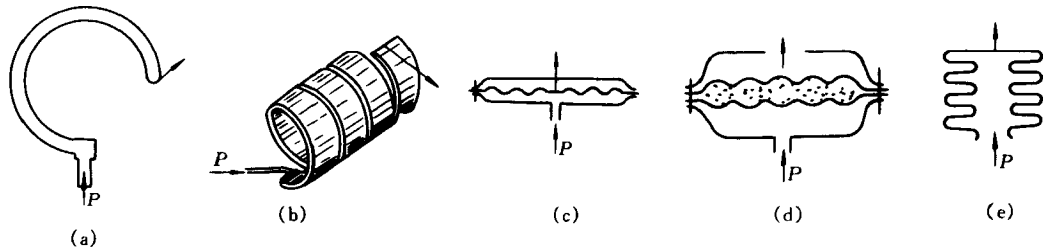



图 2-2　弹性元件示意图

1. 弹簧管式弹性元件

弹簧管式弹性元件的测压范围较宽，可测量高达 1000MPa 的压力。单圈弹簧管是弯成圆弧形的金属管子，它的截面做成扁圆形或椭圆形，如图 2-2(a)所示。当通入压力 $P$ 后，它的自由端就会产生位移。这种单圈弹簧管自由端位移较小，因此能测量较高的压力。为了增加自由端的位移，可以制成多圈弹簧管，如图 2-2(b)所示。

2. 薄膜式弹性元件

薄膜式弹性元件根据其结构不同还可以分为膜片与膜盒等。它的测压范围较弹簧管式的为低。图 2-2(c）为膜片式弹性元件，它是由金属或非金属材料做成的具有弹性的一张膜片（有平膜片与波纹膜片两种形式），在压力作用下能产生变形。有时也可以由两张金属膜片沿周口对焊起来，成一薄壁盒子，内充液体（例硅油），称为膜盒，如图 2-2(d)所示。

3. 波纹管式弹性元件

波纹管式弹性元件是一个周围为波纹状的薄壁金属筒体，如图 2-2(e)所示、这种弹性元件易于变形，而且位移很大，常用于微压与低压的测量（一般不超过 1MPa)。

二、弹簧管压力表

弹簧管压力表的测量范围极广，品种规格繁多。按其所使用的测压元件不同，可有单圈弹簧管压力表与多圈弹簧管压力表。按其用途不同，除普通弹簧管压力表外，还有耐腐蚀的氨用压力表、禁油的氧气压力表等。它们的外形与结构基本上是相同的，只是所用的材料有所不同。

弹簧管压力计的结构原理如图 2-3 所示。

弹簧管 1 是压力计的测量元件。图中所示为单圈弹簧管，它是一根弯成 270。圆弧的椭圆截面的空心金属管子。管子的自由端 B 封闭，管子的另一端固定在接头 9 上。当通入被测的压力 $P$ 后，由于椭圆形截面在压力 $P$ 的作用下，将趋于圆形，弯成圆弧形的弹簧管随之产生向外挺直的扩张变形。由于变形，使弹簧管的自由端 B 产生位移。输入压力 $P$ 越大，产生的变形也越大。由于输入压力与弹簧管自由端 B 的位移成正比，所以只要测得 B 点的位移量，就能反映压力 $P$ 的大小，这就是弹簧管压力计的基本测量原理。

弹簧管自由端 B 的位移量一般很小，直接显示有困难，所以必须通过放大机构才能指示出来。具体过程是这样的：弹簧管自由端 B 的位移通过拉杆 2(见图 2-3)使扇形齿轮 3 作逆时针偏转，于是指针 5 通过同轴的中心齿轮 4 的带动而作顺时针偏转，在面板 6 的刻度标尺上显示出被测压力 $P$ 的数值。由于弹簧管自由端的位移与被测压力之间具有正比关系，因此弹簧管压力表的刻度标尺是线性的。

游丝 7用来克服因扇形齿轮和中心齿轮间的传动间隙而产生的仪表变差。改变调整螺钉8的位置（即改变机械传动的放大系数），可以实现压力表量程的调整。

在化工生产过程中，常常需要把压力控制在某一范围内，即当压力低于或高于给定范围时，就会破坏正常工艺条件，甚至可能发生危险。这时就应采用带有报警或控制触点的压力表。将普通弹簧管压力表稍加变化，便可成为电接点信号压力表，它能在压力偏离给定范围时，及时发出信号，以提醒操作人员注意或通过中间继电器实现压力的自动控制。

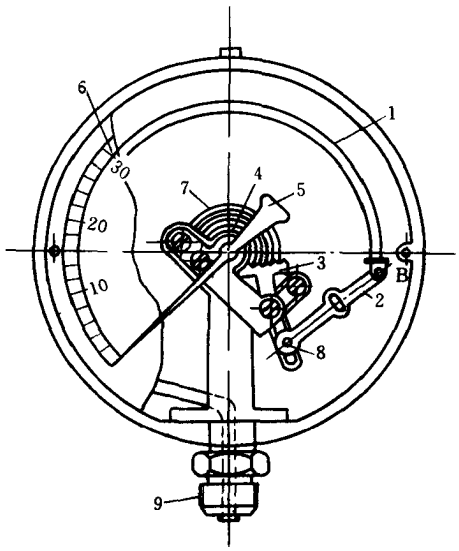



图 2-3　弹簧管压力表

1—弹簧管；2—拉杆；3—扇形齿轮；4—中心齿轮；5—指针；6—面板；7—游丝；8—调整螺钉；9—接头

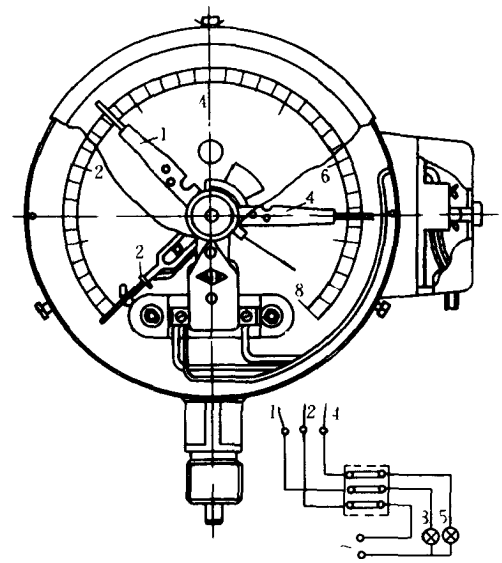



图 2-4　电接点信号压力表

4—静触点；2—动触点；3—绿灯；5—红灯

图 2-4是电接点信号压力表的结构和工作原理示意图。压力表指针上有动触点 2，表盘上另有两个可调节的指针，上面分别有静触点 1 和 4。当压力超过上限给定数值（此数值由静触点 4 的指针位置确定)时，动触点 2 和静触点 4 接触，红色信号灯 5 的电路被接通，使红灯发亮，若压力低到下限给定数值时，动触点 2 与静触点 1 接触，接通了绿色信号灯 3 的电路。静触点 1、4 的位置可根据需要灵活调节。

## 第三节　电气式压力计

把压力转换为电信号输出，然后测量电信号的压力表叫电气式压力计。这种压力计的测量范围较广，分别可测 $7\times10^{-5}$Pa至 $5\times10^{2}$MPa 的压力，允许误差可至 0.2%。由于可以远距离传送信号，所以在工业生产过程中可以实现压力自动控制和报警，并可与工业控制机联用。

电气式压力计一般由压力传感器、测量电路和信号处理装置所组成。常用的信号处理装置有指示器、记录仪、应变仪以及控制器、微处理机等。图 2-5 是电气式压力计的组成方框图。

压力传感器的作用是把压力信号检测出来，并转换成电信号输出。为此，常在弹簧管压力计中附加一些变换装置，把弹簧管自由端的机械位移转换为某些电量的变化，从而构成各种弹簧管式的电气压力计，如电阻式、电感式和霍尔片式等。但是，这类压力计都是先经弹簧管把压力变换成位移后再转化为电量而进行测量的。所以，它们不能适应快速变化的脉动