

第 3 章 测 量

本章重点介绍几种为过程控制系统提供流量、温度、压力和电压的测量技术的现场设备。本章的目的是让新的工程师了解这几种在工业环境中测量过程状态的现场设备。

用来测量过程运行条件的现场设备通常被称为变送器。

变送器(Transmitter):一种由外壳、电子部件和传感元件组成的现场设备,用于测量过程运行状态并把这些测量值传送到过程控制系统。

控制系统的性能水平受所选用的变送器的测量局限性的影响。例如,为了达到目标产品的规范要求,生产过程可能必须保持流体温度在 0.1°C 的变化幅度以内。然而,如果用于测量的变送器(包括传感元件或传感器)无法设计成能提供这个精度或重复性等级的温度值,那么就无法达到目标产品的规格要求。

精度(Accuracy):测量值与实际值的接近程度。

可重复性(Repeatability):同一输入条件下测量获得的多次连续输出结果之间的一致性程度。

工厂的设计阶段,设计工程师需要选择满足工艺条件的变送器和执行机构。他们通常有多年的不同应用的工作经验。基于在该领域的经验和制造商的推荐,他们决定哪一个测量技术能最好地满足应用的测量要求。这一决定通常经过很多考虑,其目标是为特定工况提供必要的测量精度和可重复性,易于维护。

变送器的局限性将在后续的控制相关章节详细阐述。特别是用于测量的变送器的分辨率和精度的显示值直接影响到控制质量。在工厂设计阶段,变送器的选型很重要,因为这些决定将会长期影响到工厂运行、过程控制中控制系统或控制技术的独立性。本章节将从影响控制性能的角度研究每种测量技术的局限性。

3.1 电磁流量计

在过程工业中,测量液体的体积流量是最基本的过程测量之一。某些应用场合,液体的体积流量可以用电磁流量计(Magnetic Flowmeter)来测量。电磁流量计的显著特征之一是:管道中没有阻流部件,液体可以不受限制地通过仪表(而这点某些流量计则做不到)。因此,几乎没有测量导致的附加的压力损失。这点非常重要,因为阻流部件会使泵驱动流体过程变得更加困难。此外,如果上游的液体温度接近沸点,为了避免工艺管道内的闪蒸现象,最大限度地减少压降是很重要的。

闪蒸(Flashing):从高压液体到低压气液混合物的变化。

工作范围宽泛且要求精确测量的场合,如果液体的属性允许使用电磁流量计,电磁流量计通常是首选。图 3-1 是一个电磁流量计的案例。



图 3-1 电磁流量计

顾名思义,电磁流量计检测体积流量的基本原理是基于导电介质通过磁场时产生的感应电压。流体在通过流量计中心的管道时,安装在电磁流量计外壳上的电磁线圈在流体内产生非常强的磁场。对发电机来说,导线切割电磁场就会产生感应电压。同样的,当导电的流体通过一个强磁场时,流体中就会产生一个电压,这个电压可以用一个小电极来测量,而这个电极被安装成与流量计同一高度。液体的流量是基于感应电压和已知电磁场而确定的。

具有低电导率特性的液体,如纯净水,就不适合用电磁流量计来测量其流量。液体需要是能导电的,这个要求限制了电磁流量计的应用。

电磁流量计需要本地电源。也就是说,这种变送器通常被设计成“四线制”设备。

四线制设备(Four-Wire Device): 这种现场设备除了要求本地电源线外,还要求一对线缆用于与控制系统的通信。

四线制设备术语的含义是:两根导线用于把数字信号或与行业测量标准成比例的 $4\sim 20\text{mA}$ 信号传输到控制系统;第二组导线是交流电源线,用于给电磁流量计提供电源。大部分能量被用来给电磁流量计提供磁场。

电磁流量计制造商会提供一个详细描述安装要求的应用指南。这些信息包括对流体组成和操作环境的限制,例如对工作压力和流体温度的要求。当使用电磁流量计时,流体在所有运行条件下都必须充满管道。流体中的气泡可能导致流量测量结果出现很大的尖峰值。也就是说,流量应该是连续的,但是气泡可能会导致一个虚假的高流量指示。如果在控制系统中使用一个虚假的流量值,然后采取不恰当的操作,就会影响整个过程。为了确保得到可靠的测量值,注意设备安装的细节是非常必要的。

在安装电磁流量计的管道处通常会配备一个法兰。这使得管道法兰之间的仪表能安装到位。为了避免可能扰乱测量的湍流,通常要求测量点上游有一个最短直线管道。这个直流管道的最短距离可以表达为管道直径的倍数,或者通常在设备安装指南中指出。

3.2 涡街流量计

涡街流量计(Vortex Flowmeter)可以用来测量液体或气体。这种测量方法是基于液体或气体在旋涡发生体周围会产生漩涡的现象。液体或气体产生的震荡能被测量元件测出。体积流量的测量值由震荡频率、流体组成、操作温度和压力决定。为了确保测量的可靠性,涡街流量计的设计用到了大量的工程和工业技术,因为这种类型的设备可能会被安装在由泵或其他设备运行而产生震动的过程中。

涡街流量计的压力和温度等级由设备制造商决定。例如,大多数制造商可能会标注出流量测量的常见运行条件。但是,仅少量制造商会提供用于高压和高温条件的设备,如蒸汽流量的测量。涡街流量计的案例如图 3-2 所示。



图 3-2 涡街流量计

涡街流量计可以用于测量大的流程范围。流量测量的设备生产商通常用调节比来表达期望的操作范围。例如,一个涡街流量计的产品数据表指出设备的调节比为 38 : 1。结合流量测量,调节比被定义为设备能可靠测量出的最大流量与最小流量的比率。

调节比(Turndown): 可被变送器测量出来的最大流量和最小流量的比率。

当谈论流量测量时,有些人可能会说“这个设备的调节比相当的低,只有 5 : 1”。在这种情况下,5 : 1 的设备调节比意味着该设备不能可靠地测量出比最大流量的 20% 低的流量。如果一个工业过程中的流量变化非常大,那么使用大调节比特性的涡街流量计就变得很重要了。例如,为了测量最大流量为 380 升/秒的流量,如果安装一个变送器和一个 38 : 1 的涡街流量计,那么流量从 380 升/秒到 10 升/秒的流量都可以被可靠地测量出。

一些流量变送器的特征之一是用户可以设定“小信号切除”,即流体的流量低于某个值时流量变送器的测量值被认为不可靠,这时变送器的测量值将指示为零。

小信号切除(Zero Cutoff): 流量低于设定值时测量值显示为零。

流量测量值乘以时间,即可得出过程工业中使用或生产的原材料总量。流量测量中设定小信号切除值的能力可以帮助确保原材料总量的正确计算。大多数情况下,由于在正常运行条件下过程的流量应该大于指定的小信号切除流量,所以这个功能对过程控制没有影响。

涡街流量计是典型的两线制设备。术语两线制意味着两根导线,流量值能以电流信号或数字信号的方式在这两根导线上传送,从而指示流量。同时,这两根导线也用于给变送器相关的电子设备提供所需的电压和电流。

两线制设备(Two-Wire Device):一种现场设备,这种设备通过一对导线获取电源,同时也利用这对导线实现其与控制系统间的通信。

当两线制变送器用于测量时,它不需要像电磁流量计一样的四线制设备那样提供本地电源。

在两线制现场设备中,一种独特的电路设计使得设备能利用同一对导线获取电源和通信。为了将测量值按照 4~20mA 电流信号的方式(在数字变送器之前的常用方式)传输到控制系统,变送器在控制系统提供的 24V 直流电源回路中充当一个可变电阻。例如,如果某个变送器的最大流量刻度值为 380 升/秒,那么当流量为 380 升/秒时,变送器调节出的电阻能产生 20mA 的电流信号。如果变送器感应到的是最小流量,也就是说流量值为零或低于小信号切除,那么该流量对应的电流值应该为 4mA。在控制系统内,现场设备提供的电流信号被测量,然后被转换成可以用于显示或控制的数字信号。或者,现场设备的测量值可以被变送器直接转换成数字信号。

3.3 基于差压的测量

通常测量气体或液体流量最经济的方法是基于流体通过一个限流元件后产生的相应压降(差压)。因此,过程工业中大多数气体或液体的体积流量测量都是采用这种方法。这个限流元件是一个流体能够通过的孔板-孔板的直径比管道直径小。液体或气体通过这个孔时将会产生一个压降。随着流量的上升,压降将按照流量的平方增长。

这种现象叫伯努利(Bernoulli)原理。基于此流量的线性特征可以通过取流过孔板的差压的平方根来获得。

孔板的制造商用流量的最大期望值、流体组成和运行条件来确定孔的大小。孔板的数据手册需要提供在标准运行条件下对压差预期感应的信息,这个信息被用于设置差压变送器以提供一个流量指示。

现代数字差压变送器能被设置成取差压的平方根并输出该流量。或者,我们可以用控制系统的处理能力将差压测量结果转换成线性流量值。然而,当进行这样的转换时,实际工作压力和温度与孔板生产商假设的常规工作压力和温度之间会存在一定的偏差。通过测量孔板上游压力、下游温度,以及用这些测量值估算出的修正因子,可以对这个偏值进行补偿。差压流量测量的例子和孔板示意图如图 3-3 所示。

差压变送器的压力测量范围是基于安装在管道中的孔板引起的预期压降来确定的。差压变送器在工业现场的校准将依据这个压力范围。对用于差压测量的模拟式或数字式变送



图 3-3 基于差压的流量测量和孔板

器的校准可以通过测量一个已知差压来进行。变送器的校准也可以利用某些准确的参考输入信号来进行。

变送器校准 (Calibrating a Transmitter): 利用准确的参考输入值、已知压差或其他过程测量值对变送器进行调整的过程。

校准模拟式变送器包括一个调整变送器偏值和增益在内的手工操作程序。手持式工具或控制系统内置的工具都能用于检查和调整数字式变送器的校准。手提式校准设备的例子如图 3-4 所示。

使用通过孔板的差压来测量气体或液体流量时,局限之一是其流量测量调节比只有 5 : 1。因此,比最大流量的 20% 低的流量,原本可被其他设备准确地、可重复地测量出,但是由于采用差压测量方式而导致其测量的不可靠。这样也会影响基于这个测量值的控制和计算。批量过程操作必须能工作于各种各样的条件,无法接受调节比的限制,因此可能需要选择别的测量技术。

对于很多连续过程,工厂正常的生产率是其设计生产率的 80%~100%,所以有限的调节比在流量测量中并不是一个问题。然而,连续过程的工厂必须定期停工进行维护或修理。在重启过程的最



图 3-4 用于检查和设置变送器校准的手持设备

初阶段,经过该过程的流量会大大地低于正常生产时的流量。在工业过程的开工期间,流量测量值对于自动控制系统可能是不可用的。当发生这种情况时,工厂操作员必须手动控制该过程,以调整阀门来控制通过该过程的流量。在做这些调整的过程中,操作员必须依靠其他测量值例如液位和压力(工厂开车过程中的一个副作用是它比工厂正常运行时需要更多的操作员)。这是测量设备用于过程自动化控制系统时自身局限的一个例子。

通过压差测量可以推导出流量。这种方式的主要优点是这种类型的设备比其他流量测量设备的安装成本低。在许多行业中,多达 70%~80% 的流量测量是基于差压技术而不是电磁、涡街或其他流量测量技术。

3.4 科式质量流量计



图 3-5 科式质量流量计

正如已经提到的,在批量过程和一些连续过程中通常需要测量流体、气体或水泥浆的流量。在某些情况下,流体的物理性质不允许使用电磁、涡街或压差流量计来测量流量。在这样的情况下科式质量流量计(Coriolis Mass Flowmeter)可以提供一种有效的方法来测量质量流量。如图 3-5 所示,驱动线圈同磁铁一起使科式传感器流量管产生振动。通电线圈使管子保持自然振动。流量管两边的电磁探测器将会产生一些信号。变送器通过测量这些信号间的相位差可以确定该质量流量。

我们必须特别注意这些设备的安装以得到最佳结果。另外,这些设备的价格通常比其他传统方法的流量测量计贵。但是,在某些应用中,质量流量计是获得流量值的唯一合适的手段。科式质量流量计也可能因为它能提供精确的流量值而被优先考虑。此外,其变送器也能提供密度测量,这在一些需要用密度来推算浓度的应用中非常有用。

3.5 压力测量

对过程压力的测量在工厂运行里维持运行状态往往是十分关键的。管道或容器内的压力可由暴露在过程中的薄膜上引起的电容或张力变化来准确地测量。在大多数情况下压力变送器是两线装置。图 3-6 显示压力变送器的例子。

在该例子中,压力变送器的预期性能表现在量程和可调范围上。

量程(Span): 压力传感器输出信号的最小值和最大值的差值。



图 3-6 压力变送器

可调范围(Rangeability): 流量计最高满刻度范围和最低满刻度范围的比率。

一个压力变送器可以设置成提供表压或绝压。表压是参考大气压的压力。设置成表压的压力变送器用测量值零来表示过程是在大气压力下。然而,如果压力变送器设置成用绝压测量,在同等条件下会显示大约 14.7psi。大气压力的确切压力读数依赖于工厂的海拔和大气条件。

通常测量单位会显示是否采用了绝压。例如,如果压力测量单位是 psi(每平方英寸磅),表压的单位将是 psig,绝压的单位将是 psia。压力变送器采用哪个单位取决于正确操作所需要的过程条件。在许多情况下,绝压和表压可以用于同一过程。例如,供应蒸汽的压力可能是用表压。容器中的压力在大气压力或大气压力以下运作,就可能用绝压测量。

3.6 温度测量

温度变送器所用的传感元件(传感器)可以被设计成集成到变送器中或者被安装在远离变送器的位置。用于温度测量的最常见传感器是电阻式温度探测器(Resistance Temperature Device,RTD)和热电偶。温度测量的传感器选取主要基于变送器能提供的温度测量范围。此外,当电阻式和热电偶式温度传感器中的任何一种被用于工业过程测量时,安装成本和精度要求也很重要。当传感器被放在远离变送器的位置,RTD 或热电偶的安装成本通常会更高。

使用 RTD 的变送器能提供最精确的温度测量方法,但是它的工作范围有限。RTD 包括一种细金属丝,例如铂金制造的金属丝,该细金属丝可提供一个已知电阻,而这个电阻随温度的变化是可预知的。一个给定的电流流过 RTD,通过测量 RTD 的电压,变送器可以计算出该金属线的电阻值。

为避免因变送器和 RTD 之间的线路所具有的电阻导致的误差,一个额外的导线被用于测量传感器电压。这种三线制技术的使用允许将高阻抗设备用于电压测量。使用四线制

装置可以获得最好的精度,其中两根导线用于给传感器提供电流,另一组导线用于测量传感器两端的电压。我们也可以购买 RTD 然后采用两线制、三线制或四线制方式来安装。在大多数情况下,温度变送器支持任何远程安装的元器件。

为保护传感器不受损害,可以将它安装在套管里。套管看起来像伸入到工业过程中的重型管。当气体或流体经过这个套管,套管里的温度即反映了过程的温度。为了确保被测量的温度即为过程的温度,在安装测量部件时需要将测量部件与套管连接起来。即使如此,大部分套管会延缓对过程温度变化的测量响应。温度变送器的例子如图 3-7 所示。



图 3-7 温度变送器

另一种非常常见的温度测量传感器是热电偶。热电偶包括两根连在一起的用不同金属做成的导线。基于温度和所选金属,热电偶产生的电压可用于计算温度。热电偶是用不同金属材料合成的,并根据传感器类型来设计的。例如,J 型热电偶可以用于很多常见的过程应用。但是,为了测量锅炉和热水器中的高温,K 型热电偶可能是首选。我们可以根据应用要求和制造商的推荐选取一个合适的热电偶。有时候,变送器的设置必须根据所选传感器的类型进行改变。热电偶也可以安装在套管内。

3.7 液位测量

用于测量水箱或容器液位的变送器有许多,也使用不同的技术。正如其他测量设备,液位测量设备的正确选择很大程度上是依赖于应用需求。测量液位的最常见方法是使用压力变送器测量液位产生的静压差。

静压差 (Pressure Head): 由一定高度(深度)的液体柱在其底部形成的压力。

当罐或容器敞开于空气中时,待测量的压力由液体的密度和液体表面到变送器的距离(假定校准正确)决定。如果压力变送器位于罐底,那么液位在大多数情况下都可以被探测到,也就是说,液位的可探测范围可以从空到满。然而,如果固体材料被放置在罐底,那么把压力变送器安装在底部可能存在问题。为此,压力变送器可以位于罐中较高的位置。而这样会导致低于这个位置的液位将不能被探测到。另一个常见的问题是罐内部或传感器外部的材料会导致一个虚假的液位指示。在存在堆积和堵塞等问题的地方,可能需要安装一个清洗装置。这种清洗装置是一种小导管。通过这个导管,可以定期用水来清洗传感器。大多数工业过程都是使用水来清洗传感器。

当采用压力方式来测量加压罐或容器的液位时,罐底的压力等于液体压力差和液体表面气体压力之和。为了克服气体压力的影响,差压变送器可被用于液位的测量。也就是说,差压变送器的一端暴露于液体表面的气体中,另一端放置于液压头。使用带有远传密封的

差压变送器可以实现这样的安装。

远传密封(Remote Seal): 将膜片安装在容器上,用充满液体的细软管连接到差压变送器。
基于压力的液位测量计如图 3-8 所示。



图 3-8 基于压力的液位测量计

正如我们看到的,当采用压力或差压方式测量开放或密闭罐中的液位时,为了设置好变送器以提供一个精确的液位指示,有必要知道和说明罐中液体的密度。这是因为液体底部的压力不仅仅与传感器到液体表面的距离相关,而且与液体的密度相关。当有人说“我不得不重新校准压力变送器以得到正确的液位”时,他们真正的意思是(除了传感器和变送器的问题外)有必要补偿液体密度的变化。

为了测量罐中干料的高度或者密度可变的液体液位,雷达液位测量计可能是适合的。顾名思义,雷达液位测量计使用电子束测量液位,其基本原理与使用雷达装置探测飞行在空中的飞机相似。电磁波被雷达变送器(注意,在设备中,雷达变送器是传感元件的一部分)发射出,并由被探测物理表面反射到接收器。基于电磁波的发射和反射时间差,设备就可以测定到液体或固体材料表面的距离。雷达液位测量计如图 3-9 所示。

雷达液位设备包含了一种提供可靠测量的高技术。例如,这种设备能够让用户识别出由罐中的障碍物,如支架,造成的反射而在计算液位时忽略它们。即便如此,这种设备在液位测量方面的成功与具体应用非常有关。例如,在一些情况中,液体或固体表面上方的蒸汽或灰尘可能会妨碍好的测量结果。在选取这种技术来测量液位时应考虑到制造商的推荐和类似应用经验。



图 3-9 雷达液位测量计

3.8 其他测量技术

本章简要概述了一些在过程工业中用于基本测量的常用变送器。一些已公开发表的优秀的参考资料详细评价了各种各样的测量和测量技术^[1]。

参 考 文 献

1. McMillan, Gregory K. *Essentials of Modern Measurements and Final Elements in the Process Industry: A Guide to Design, Configuration, Installation, and Maintenance*, Research Triangle Park: ISA, 2010 (ISBN: 978-1-936007-23-3).