

# 彻底讲清电气比例阀和压力传感器 测控精度的基本概念及其使用方法

## Thoroughly Explain the Basic Concepts of Electrical Proportional Valve and Pressure Sensor Measurement and Control Accuracy and How To Use Them

摘要：本文针对真空压力控制过程中用到各种真空压力传感器和电气比例阀，详细解释了线性度、迟滞、重复性和灵敏度等有关测控精度的基本概念，并介绍了如何有效正确使用这些精度指标。

### 一、背景介绍

在真空压力控制过程中，常会用到各种真空压力传感器和电气比例阀。这些传感器和电气比例阀一般都会在精度指标中标示出各种内容，如线性度、迟滞、重复性和灵敏度等，有些只给出一个笼统的精度指标。这些精度指标的定义往往代表着不同含义，在使用过程中要明确区分，这对于真空压力的精密测量和控制尤为重要。

本文针对真空压力控制过程中用到各种传感器和电气比例阀，详细解释了线性度、迟滞、重复性和灵敏度等参数的基本概念，解释了如何有效正确的使用这些精度指标。

### 二、涉及精度的基本概念

精度是一种俗称叫法，更专业的称谓是准确度 (accuracy)。国际电工委员会 (IEC) 将精度定义为“在特定条件下通过特定程序测试设备时观察到的与特定特性曲线的最大正负偏差”。但对于压力传感器及其电气比例阀的精度定义要复杂得多，因为误差的来源可能包括非线性、迟滞、重复性、温度、零平衡、校准和湿度影响。精度对压力传感器和比例阀的成本有很大影响，更重要的是，对其测量过程的质量或效率有很大影响。选择传感器和比例阀时，了解哪些因素决定精度就显着非常重要。

尽管压力传感器和电气比例阀的精度没有一个标准定义，但有一个 IEC 标准定义了构成精度的因素。IEC 61298-2规定精度必须包括非线性、迟滞和重复性。因此大多数压力传感器和电气比例阀制造商将“精度”主要指定为非线性、迟滞和重复性的综合效应，其他误差可单独指定。下面将逐项介绍与精度有关的误差源及其相应的测量方法。

#### 2.1 非线性及其测量方法

非线性很多时候也称之为线性度、直线度或线性误差。非线性是指压力传感器在所测压力范围内电信号输出曲线与指定直线的偏差，或电气比例阀在所输入的电信号范围内压力输出曲线与指定直线的偏差，即表示线性设备的输出偏离理想性能的程度。

计算线性误差常用的一种方法是最小二乘法，它在数学上为数据点提供了一条最佳的拟合直线，如图1所示。定义线性误差的另一种方法是终端基线线性度，如图2所示。终端线性是通过在输出曲线上的两个终端数据点之间画一条直线 (L1) 来确定的。接下来画一条从直线 L1 到输出曲线上数据点的垂直线。选择数据点以达到垂直线的最大长度。垂直线的长度代表终端直线线性误差。终端线性大约是最佳拟合线性的两倍。

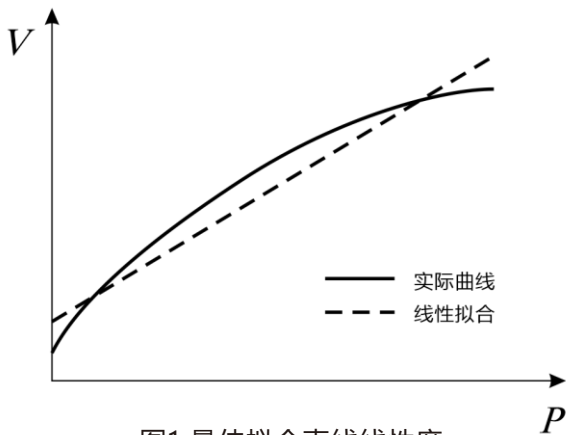


图1 最佳拟合直线线性度

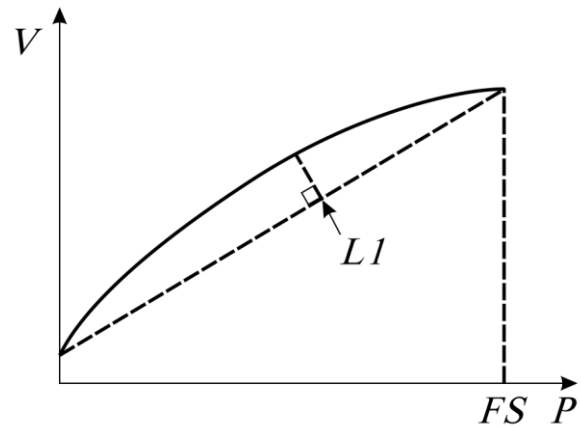


图2 终端直线线性度

非线性通常用满量程输出的百分比来表达，单位为 %FS，相应的非线性误差=量程×非线性。如量程为1MPa，非线性为0.05%FS，非线性误差即为： $1\text{MPa} \times 0.05\% = 0.5\text{kPa}$ 。

要确定压力传感器和电气比例阀的非线性，首先必须收集测量数据。执行此操作的典型方法是在零到满量程压力的范围内以固定间隔施加压力，或在零到满量程模拟电信号范围内以固定间隔加载模拟信号，并在每个压力和模拟信号设定点测量输出。压力点越多，非线性计算就越准确。确定非线性的最少点数为3个点，最大没有限制，但一组压力点通常为5~10个点。

一旦测量值被记录下来，就需要确定将测试数据与哪条直线进行比较。有几种不同的线可用于计算压力传感器的线性误差，以下是最广泛使用的三种：

### (1) 最佳拟合直线

最佳拟合直线通常会产生最小的误差，因为它针对所有测量点进行了优化以产生最小的平均偏差。可以利用各种数学方法来确定线的偏移和斜率，从在包含所有点的两条平行线之间绘制的简单线到最小二乘法拟合计算。

### (2) 终端直线

虽然这不会产生最小的误差，但它对于显示型传感器的实际线性性能非常有用。如将压力传感器连接到测量仪器时，压力传感器的输出通过设置零和全量程压力并假设两点之间的直线来转换为读数。这是最简单、最方便的校准方法。

### (3) 完美直线

每个测量点的输出直接与更高精度的压力传感器输出进行比较：如0~5bar范围内0~10V输出将在1.25bar时准确产生2.5V电压信号。

完美直线很少用于压力传感器，因为这种直线通常不包括用于调整零偏移和跨度增益的微调组件。另外，没有两个压力传感器完全相同，它们都具有不同的零位和跨度特性，其偏差可能比线性误差大得多。因此，对于一批压力传感器，线性误差规格需要更大，以包括零和跨度特性的变化。但还是有一些应用需要完美直线，例如在需要直接更换失效压力传感器的应用中，则不需要任何零点和量程设置的校准。

在压力传感器和电气比例阀技术参数数据表中，使用哪种方法来指定线性误差并不总是很明显。因此，如果精度是一个重要因素，应该询问制造商使用了哪种直线方法。

## 2.2 重复性

重复性误差是在其他条件保持不变的情况下连续多次测量任何给定输入压力时的输出读数偏差，对于电气比例阀则是连续多测量任何给定输入电压信号是的压力输出读数偏差。

重复性误差可分为可重复性误差和不可重复性误差。

可重复误差是指可预测的不确定度，这些不确定度可以通过额外的模拟调节或基于微处理器的电子设备从测量中表征或消除。通常，对于压力传感器和电气比例阀，可重复误差是线性度和热零/跨度偏移误差。

压力传感器重复性误差有时包括短期重复性误差，这表明压力传感器在一系列压力循环后的稳定性，它是通过在第一次收集后不久收集第二次和第三次校准点而获得的。将每个压力点与第2和第3循环中的同一点进行比较，以确定可重复性误差，即将每个压力循环的相同压力点与第一个循环进行比较以确定变化量。短期重复性很少在技术参数表上显示为单独的误差，通常包含在组合的非线性、滞后和可重复性误差中。

不可重复误差是复杂而无法预测和表征的测量不确定度，例如迟滞、短期重复性和长期稳定性。不可重复误差因压力变化、压力循环的次数和频率而异，由此因不同应用而异。

长期稳定性是衡量输出信号在正常工作条件下随时间漂移的程度。长期漂移表示为一段时间内满量程的百分比，通常为12个月。有时零和跨度长期稳定性会单独引用，特别是如果一个比另一个大得多。长期漂移实际上只是将一种技术与另一种技术进行比较的一个数字，不能依赖于特定应用。这是因为压力传感器在其使用寿命期间将承受的压力循环、温度循环、振动和冲击的数量不容易预测。所有这些因素都会根据幅度和频率不同程度影响着压力传感器的性能。

总之，在一般压力传感器和电气比例阀的精度声明中，重复性指标一般是指可重复性，这里的可重复性一般是指短期可重复误差。

## 2.3 迟滞

迟滞误差通常表示为机械迟滞和温度迟滞的组合。机械迟滞是在某个输入压力下的输出偏差，当该输入首先随着压力增加然后随着压力降低而接近时。同理，温度迟滞是温度循环前后某个输入处的输出偏差。如图3所示将迟滞表示为两种效应的组合。

温度迟滞不太可能在压力传感器技术参数中提及，因此很难确定它是否已包含在整体温度误差中。如果指示温度迟滞，它将表示为补偿温度范围内满量程的百分比。

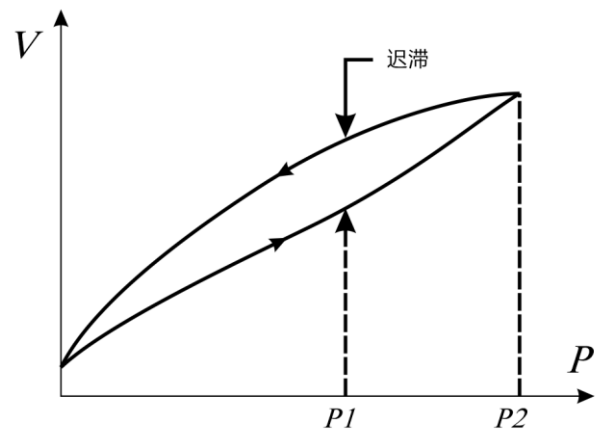


图3 迟滞误差

单独测量迟滞误差是通过比较一组增加和减少的压力数据中相同压力点的输出信号来计算的。然而，当滞后与其他数据一起计算以计算整体精度性能时，每个点都被单独考虑并与最佳直线进行比较。

测量压力传感器和电气比例阀迟滞的方法是施加从零到满量程的压力或控制电压，通常在5个等距步长处停止而不会过冲来测量值。然后从满量程到零以相反的方向重复该过程。为确保获得最佳结果，重要的是要仔细控制压力或电压，使其不会超过测量点，因为施加压力和电压方向的变化会引入二次迟滞效应。

迟滞误差将是在同一步进点测量的增加和减少压力或电压值之间的值偏差。然后通过取最大偏差并将其除以全量程压力来确定迟滞百分比。如图3所示，具体计算过程为：

迟滞百分比 =  $((V_{p1} - dV_{p1})/FRO) \times 100$

$V_{p1}$  = 压力增加过程中压力P1时的电压输出。

$dV_{p1}$  = 减压过程中压力 P1时的电压输出。

FRO = 满量程压力时的电压输出。

## 2.4 分辨率和灵敏度

分辨率是指传感器可能感受到的被测量的小变化的能力。也就是说，如果输入量从某一非零值缓慢地变化，当输入变化值未超过某一数值时，传感器的输出不会发生变化，即传感器对此输入量的变化是分辨不出来的。只有当输入量的变化超过分辨率时，其输出才会发生变化。

通常传感器在满量程范围内各点的分辨率并不相同，因此常用满量程中能使输出量产生阶跃变化的输入量变化值作为衡量分辨率的指标，即分辨率=输出的被测量变化量/被测量变化量。

灵敏度是指压力传感器在稳态工作情况下电压输出量变化 $\Delta V$ 对压力输入量变化 $\Delta P$ 的比值，即灵敏度=响应变化量/被测量变化量。灵敏度是输出输入特性曲线的斜率。如果压力传感器的输出和输入之间显线性关系，则灵敏度是一个常数。否则，它将随输入量的变化而变化。

当传感器的输出、输入量的量纲相同时，灵敏度可理解为放大倍数。一般来说，灵敏度越高，分辨率越好，可得到较高的测量精度。但灵敏度愈高，测量范围愈窄，稳定性也往往愈差。

分辨率和灵敏度指标在电气比例阀压力控制应用中非常重要，它往往决定了比例阀压力控制的最终精度。特别是在外接PID控制器的压力控制过程中，比例阀的灵敏度越高，比例阀就越可以接收PID控制器输出更微小的控制电压信号，从而实现更高精度的压力调节和控制。

## 三、确定整体精度

每个制造商都给出了太多的精度术语，如重复性、滞后、非线性、稳定性、温度引起的变化，但在实际应用中往往需要得出整体精度以对压力传感器和电气比例阀做出合理的判断和选择。尽管IEC 61298-2确定了哪些主要因素构成了精度（非线性、迟滞和重复性），但IEC标准没有定义这些因素如何组合成整体精度。组合这些值的方法会对总精度产生重大影响，一些制造商只是简单地将这三个因素相加，而其他制造商则使用数学方程（例如和平方根或均方根）将它们组合成整体精度。以下示例显示了同一传感器如何根据不同公式得出三种精度百分比。

如对于某一压力传感器或电气比例阀，技术指标为：

非线性为0.5% FS、重复性为0.05% FS、迟滞为0.1% FS。

(1) 按照均方根进行计算，得：

$$RMS = \sqrt{\frac{(\text{非线性})^2 + (\text{迟滞})^2 + (\text{重复性})^2}{3}} = \sqrt{\frac{(0.5)^2 + (0.1)^2 + (0.05)^2}{3}} = 0.30\%$$

(2) 按照平方和根进行计算，得：

$$RSS = \sqrt{(\text{非线性})^2 + (\text{迟滞})^2 + (\text{重复性})^2} = \sqrt{(0.5)^2 + (0.1)^2 + (0.05)^2} = 0.51\%$$

(3) 按照求和进行计算，得：

$$SUM = \text{非线性} + \text{迟滞} + \text{重复性} = 0.5 + 0.1 + 0.05 = 0.65\%$$

## 四、总误差与精度的关系

在选择使用压力传感器和电气比例阀时，精度通常是需要考虑的主要因素。然后需要注意的是，精度只是总误差的一部分，总误差有时也会出现在传感器和比例阀的技术指标中。

总误差取决于各种因素，例如传感器的使用条件等。如图4所示，总误差主要包括三个方面内容：可调误差，精度和温度效应。

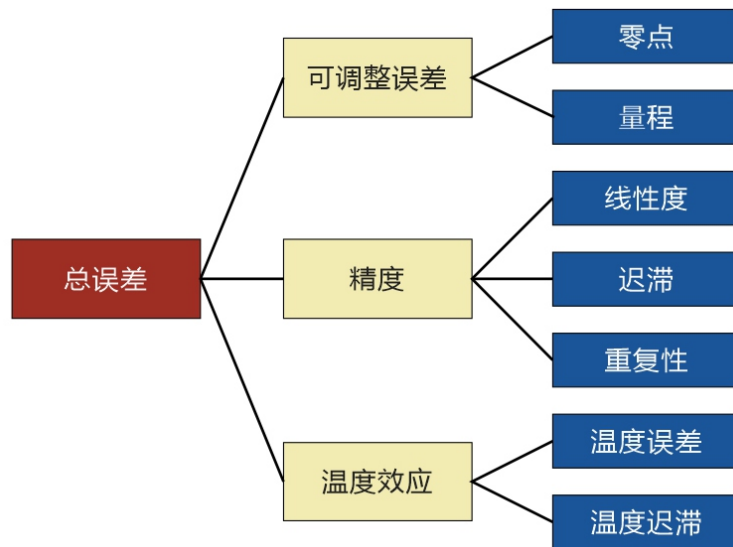


图4 总误差中的相关误差源

如图4所示，可调误差由零点和量程误差组成。可调误差可以很容易的识别和调整。在出厂前和校准过程中，一般都会对压力传感器和电气比例阀的这两项指标进行校正。

长期稳定性也称之为长期误差或长期漂移，是操作过程中出现零点和量程误差的原因。这意味着这两个可调误差可能会在长时间使用传感器后重新出现甚至“恶化”。通过校准和其后的调整，这种长期漂移可以被重新校正。

有关精度所涉及的内容，前面已经进行过详细描述，这里不再赘述。

总误差中的温度效应误差，主要是温度波动会影响到压力传感器和电气比例阀的测量值。还有一种称之为温度迟滞的影响。一般来说，迟滞表示的是通过正向和反向路径，测量相同的点所产生的系统偏差。关于温度迟滞，这里的迟滞描述的是当特定温度增加或降低时，在某一温度下的输出信号的差值（即偏差）。

## 五、总结

在压力传感器和电气比例阀实际应用中，所面临的首要问题是选择传感器和比例阀时应该最关注什么，这需要具体情况具体分析。由于可调误差已经由厂商校正，所以只起到次要作用。另外，压力传感器通常在使用过程中需要定期校准和调试。

由此，在实际应用中，精度和热效应往往起到决定性作用。关键问题是：是否在受控条件下使用？这意味着在校准期间（通常25°C）在基准温度附近进行测量时，温度效应基本上可以忽略不计，总误差的主要内容就只有精度影响。然而，当在较大温度范围内进行压力测量和控制时，温度效应则变得非常重要。