# 第2章 传感器的基本特性及其校准

本章内容：

* 传感器系统的基本特性
* 传感器的标定与校准
* 传感器的性能改善措施
* 传感器的选用原则
* 性能指标的Python计算方法

智能传感器是在经典传感器的基础上发展起来的，二者之间存在着密切的联系。智能化技术的重要任务之一是提高传感器的精度，改善传感器的性能。因此，我们首先通过对传感器系统的静态特性和动态特性进行回顾，了解决定传感器性能和精度的静态技术指标与动态技术指标，并对传感器的标定与校准进行了简要介绍。然后在此基础上，阐述了传感器的性能改善措施和选用原则。最后，对性能指标的Python计算方法进行了简要的介绍。

# §2.1 传感器系统的基本特性

传感器是一种以一定的精确度将被测量转换为与之有确定对应关系的、易于精确处理和测量的某种物理量（如电量）的测量部件或装置。通常，传感器会将非电量转换为电量进行输出。

传感器的基本特性是指传感器的输入-输出关系特性。这种特性是传感器内部结构参数作用关系的外部特性表现，如图2-1所示。

  
图2-1 传感器的基本特性

对传感器基本特性的研究主要应用于以下两个方面：

（1）用于建立一个测量系统。这时必须已知传感器系统的基本特性并测量输出信号，通过基本特性和输出来推断导致该输出的系统的输入。这就是未知被测物理量的测量过程。

（2）用于系统本身的研究、设计与建立。这时必须观测系统的输入及与其相应的输出，才能推断建立系统的特性。如果系统特性不满足要求，则应修改相应的内部参数，直到满足要求为止。

传感器所测量的物理量基本上有两种形式：稳态（静态或准静态）和动态（周期变化或瞬态）。稳态的信号不随时间变化，或变化很慢。相反，动态的信号是随时间变化而变化的。为了准确反映输入物理量的状态，传感器应具有不同的输入输出特性，包括静态特性和动态特性。一个高精度的传感器，要求具有良好的静态特性和动态特性，以确保检测信号能够无失真地转换，并尽量反映被测量物体的原始特征。

## 2.1.1 静态特性

传感器的静态特性是指在稳态信号下，传感器输入与输出之间的关系。静态特性所描述的传感器的输入-输出关系式中不含时间变量。通常使用标定曲线来评估检测系统的静态特性。对于理想的线性设备，其标定曲线是一条直线。然而，实际的检测系统的标定曲线可能并非一条直线。通常采用静态测量的方法获取输入-输出关系曲线，并作为标定曲线。

衡量传感器静态特性的主要指标包括测量范围、线性度、灵敏度、迟滞、重复性、分辨力、阈值、稳定性、漂移和精度。

### 2.1.1.1 测量范围

测量范围是指传感器所能测量到的最小被测输入量（下限）至最大被测输入量（上限）之间的范围，即（，）。

### 2.1.1.2 线性度

线性度描述了传感器输出与输入之间的线性关系程度。传感器的理想输入输出特性应是线性的，因为这有助于简化传感器的理论分析、数据处理、制作标定和测试。然而，传感器的实际输入-输出特性大都具有一定程度的非线性。如果传感器的非线性项的阶次不高，在输入量变化范围不大的条件下，可以用切线或割线拟合、过零旋转拟合、端点连线拟合等来近似地代表实际曲线的一段（多数情况下是用最小二乘法来求出拟合直线），这就是传感器非线性特性的“线性化”，如图2-2所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| （a）切线或割线 | （b）过零旋转 | （c）端点连线 |

图2-2 输入-输出特性的线性化

所采用的直线称为拟合直线，而实际特性曲线与拟合直线间的偏差称为传感器的非线性误差。为了评价非线性误差（或线性度），我们将其最大值与输出满刻度值之比作为指标。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.1） |

式中：—非线性误差（线性度）；

—最大非线性绝对误差；

—满量程输出值，指被测量达到最大值时，传感器对应的输出值。

### 2.1.1.3 灵敏度

灵敏度（Sensitivity）是指传感器在稳态下输出量变化与输入量变化的比值，如图2-3所示。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）传感器线性测量系统 | （b）传感器非线性测量系统 |

图2-3 传感器灵敏度

对于图2-3（a）所示的传感器线性测量系统，其灵敏度是一个常数，即它的输入-输出曲线斜率，可以用增量的形式进行表示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.2） |

很明显，曲线越陡峭，灵敏度越大；曲线越平坦，则灵敏度越小。

对于图2-3（b）所示的传感器非线性测量系统，其灵敏度为一变量，此时应以微量式表示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.3） |

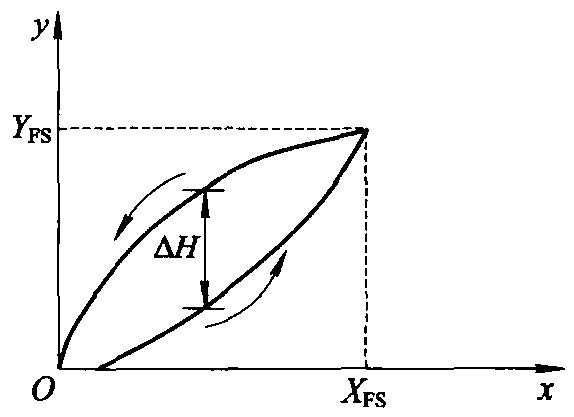
通常，用拟合直线的斜率来表示系统的平均灵敏度。一般希望传感器的灵敏度高，且在全量程的范围内是恒定的，即输入-输出特性为线性。但要注意，灵敏度越高，就越容易受外界干扰的影响，系统的稳定性就越差。

### 2.1.1.4 迟滞

迟滞也称为“滞后量”或“滞环”，它表征系统在全量程范围内，输入量由小到大(正行程)或由大到小(反行程)两个静态特性一致的程度，如图2-4所示。其值用引用误差形式表示:

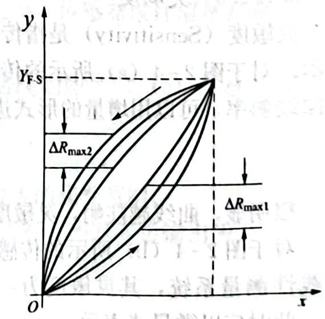
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.4） |

式中：表示同一输入量对应正、反行程输出量的最大差值。

  
图2-4 迟滞特性

### 2.1.1.5 重复性

重复性表示系统输入量按同一方向作全量程、连续多次变动时，静态特性之间一致的程度，如图2-5 所示。

  
图2-5 重复性

如图2-5所示，正行程的最大重复性偏差为，反行程的最大重复性偏差为，取这两个最大偏差之中的较大者为。重复性误差一般采用输出最大不重复误差与满量程输出的百分比表示，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.5） |

式中：反映了同一输入量对应多次循环的同向行程输出量的分散程度。这种输出量之值的相互偏离反映了传感器的随机误差，故亦可按随机误差处理法则来确定。

### 2.1.1.6 分辨力

分辨力是指传感器能够感知或检测到的最小输入信号增量，反映传感器能够分辨被测量微小变化的能力。分辨力可以用能够分辨最小增量的绝对值表示；也可以用能够分辨最小增量与满量程的百分比来表示，此时也可称为分辨率。通常，模拟式传感器的分辨力被规定为最小刻度分格值的一半，而数字式传感器的分辨力则被规定为能引起数字输出末位数改变所对应的输入增量。

### 2.1.1.7 阈值

阈值是指传感器的输入从零开始缓慢增加时，只有当其超过某一特定值时，传感器的输出才会发生可观测的变化。这个使传感器输出端产生可观测变化的最小被测输入量值，称为阈值，即零位附近的分辨力。

阈值也可以被称为灵敏度界限（灵敏限）、门槛灵敏度、灵敏阈、失灵区或死区等。某些传感器在零位附近具有严重的非线性特性，形成所谓的‘死区’，则可将死区的大小作为阈值。在大多数情况下，阈值主要取决于传感器的噪声水平，因此一些传感器仅提供噪声电平。

### 2.1.1.8 稳定性

稳定性指的是传感器在相当长的工作时间内保持其性能的能力。因此，稳定性又可以被称为长期稳定性。

稳定性误差通常是在室温条件下，经过一定工作时间间隔后，用传感器的输出与起始标定时的输出之间的差值来表示。稳定性误差即可用相对误差表示，也可用绝对误差表示。

### 2.1.1.9 漂移

漂移是指传感器在输入保持不变的情况下，输出会随着时间或温度等因素的变化而发生变动的现象。漂移与被测输入量无关，将影响传感器的稳定性或可靠性。

产生漂移的原因主要有两个：一是传感器自身的敏感材料特性和结构参数会随着时间缓慢变化（即发生老化），称为时间漂移（简称时漂），可以分为零点漂移和灵敏度漂移。零点漂移是在规定条件下，一个恒定的输入在规定时间内的输出在标称范围最低值处（即零点）的变化；灵敏度漂移是指灵敏度随时间而产生的变化。二是在测试过程中周围环境（如温度、湿度、压力等）发生变化，最常见的情况是温度漂移（简称温漂），这是由周围环境温度变化引起的输出变化。温度漂移通常用传感器工作环境温度偏离标准环境温度（一般为20℃）时输出值变化量与温度变化量之比来表示。

### 2.1.1.10 精度

精度指标有三个：精密度、正确度和精确度。

### 1. 精密度

它说明测量结果的分散性，即对某一稳定的对象（被测量）由同一测量者用同一检测系统和测量仪表在相当短的时间内连续重复测量多次（等精度测量），其测量结果的分散程度。值越小，测量结果的精密度越高（对应随机误差）。

### 2. 正确度

它说明测量结果偏离真值大小的程度，即示值有规则偏离真值的程度。它是指所测量与真值的符合程度（对应系统误差）。

### 3. 精确度

它含有精密度与正确度两者之和的意思，即测量的综合优良程度。在简单的场合下，可取两者的代数和，即。通常，我们用测量误差的相对值来表示精确度。

在工程应用中，为了简单表示测量结果的可靠程度，引入一个精确度等级概念，用A来表示。检测系统与测量仪表精确度等级A以一系列标准百分数值（0.001，0.005，0.02，0.05，…，1.5，2.5，4.0…）进行分挡。这个数值是检测系统和测量仪表在规定条件下，其允许的最大绝对误差值相对其测量范围的百分比。它可以表示为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.5） |

式中：—检测系统的精度；

—测量范围内允许的最大绝对误差；

检测系统设计和出厂检验时，其精度等级代表的误差指的是检测系统测量的最大允许误差。

**例2-1** 有一个位移传感器，对在0mm～5mm范围的位移进行了两个循环的测量，测量数据如表2-1所示。请以输出的平均值求端点连线拟合直线，并计算传感器的线性度、灵敏度、迟滞和重复性误差。

表2-1 某位移传感器当x在0mm～5mm之间变化时测得的输出情况

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|  | 上行程 | 0 | 4 | 9 | 14 | 20 | 25 |
| 下行程 | 0 | 5 | 10 | 16 | 21 | 25 |
| 上行程 | 0 | 5 | 10 | 15 | 19 | 25 |
| 下行程 | 0 | 5 | 11 | 16 | 20 | 25 |
|  | | 0 | 4.75 | 10 | 15.25 | 20 | 25 |

解：拟合直线由（0,0）和（5,25）两个端点确定，直线方程为：

比较线性化后的（，）各点对应的输出与实际测得的输出，最大线性误差为：

则线性度为：

灵敏度为：

最大迟滞误差发生在第一循环测量处，为:

则迟滞为：

对比上行程之间、下行程之间各点的输出偏差，最大重复性误差为:

则重复性误差为：

## 2.1.2 动态特性

大部分被测物理量是随时间变化的动态信号。这意味着输入信号是时间的函数，而不是常量。对动态信号的测量需要精确地测量信号幅值的大小，并记录反映动态信号变化过程的波形。这就要求传感器能迅速准确地测出信号幅值，并无失真地再现被测信号的波形。

检测系统的动态特性反映了其对动态信号进行准确测量的能力。理想情况下，当输入量发生变化时，检测系统的输出量应该能够立即、准确地跟随输入量的变化，而不会引入任何失真。然而，在实际的检测过程中，如果选用的检测系统不合适，其输出量可能无法良好地追随输入量的快速变化，从而导致较大的测量误差。因此，研究检测系统的动态特性对于确保准确测量动态信号非常重要。

系统的动态响应特性一般通过描述系统的微分方程、传递函数和频率响应函数等数学模型来进行研究。

### 2.1.2.1 微分方程

忽略非线性和随机变化的因素，传感器系统的微分方程为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.6） |

式中：，，…，，和，，…，，为与系统结构参数有关的常数。

### 2.1.2.2 传递函数

设输入的拉氏变换为，输出的拉氏变换为，对式（2.6）两边同时取拉氏变换，并设初始条件为零，得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.7） |

式中：为复变量，,。

定义与 之比为传递函数，并记为，则：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.8） |

### 1. 传递函数的特点

（1）传递函数表示了系统本身的动态性能，与输入量大小及性质无关。对于具体的系统，其传递函数不因输入的变化而不同，对任何一个输入都有确定的输出。

（2）传递函数不拘泥于被描述系统物理结构而只反映其动态性能。不同的物理系统，可以用相同的传递函数来描述，称为相似系统。

（3）传递函数可以有单位，也可以无单位。

（4）传递函数是复变量的有理分式。对于实际系统，分子阶次，分母最高阶次为输出量最高阶导数的阶次，也确定系统的阶次，定义为阶系统。

### 2．常见测试装置的传递函数

（1）一阶系统。传递函数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.9） |

式中：—时间常数，单位为s。

（2）二阶系统。 传递函数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.10） |

式中：—系统的灵敏度；

—系统的阻尼比；

—系统的无阻尼固有频率。

### 2.1.2.3 频率响应函数

在初始条件为零的情况下，输出信号的傅里叶变换与输入信号的傅里叶变换之比为系统的频率特性，记为或：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.11） |

下面比较拉普拉斯变换与傅里叶变换的形式。

拉普拉斯变换:

傅里叶变换：

对比可见，频率响应函数是实部时的传递函数。我们可以令，直接由传递函数即可写出频率响应函数。

（1）一阶系统。频率响应函数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.12） |

其幅频特性和相频特性分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.13） |
|  |  | （2.14） |

其中，负号表示输出信号滞后输入信号。

一阶系统的幅频、相频特性如图2-6所示。

  
（a）幅频特性  
  
（b）相频特性  
图2-6 一阶系统的频率特性

由图2-6可见，随着的增加，一阶系统的幅频特性曲线呈单调衰减，衰减速度很快，所以一阶系统具有低通滤波的特性。在一阶系统特性中，应特别注意以下几点：

1）当激励频率远小于时，输出与输入的幅值几乎相等，接近1。而当，系统相当于一个积分器，几乎与激励频率成反比，相位滞后近，故一阶系统适合测试缓变或低频的被测量。

2）时间常数是反映一阶系统特性的重要参数，其值决定系统适用的频率范围。

（2）二阶系统。频率响应函数为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2.15） |

相应的幅频特性和相频特性分别为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2.16） |
|  | （2.17） |

二阶系统的幅频、相频特性如图2-7所示。

  
（a）幅频特性  
  
（b）相频特性  
图2-7 二阶系统的频率特性

由图2-7可见，二阶系统具有以下的特点：

1）当，时，，很小，，即相位差与频率呈线性关系。在这种情况下，系统的输出可以真实准确地再现输入的波形。然而，当时，。

2）影响二阶系统动态特性的参数是固有频率和阻尼比，其固有频率的选择应以工作频率范围为依据。需要注意的是，当时，，，系统会发生共振，幅频特性受阻尼系数的影响极大。因此，在实际测量时，应避免这种情况。

3）当时，很小，且和频率近似成正比增加。当时，趋近于，即输出信号几乎与输入反相。需要注意的是，在趋近区间，会随频率的变化而剧烈变化，而且越小，变化越剧烈。

4）二阶系统是一个振荡环节，要选择一个恰当的固有频率和阻尼比的组合，以获得较小的误差。

通过上面的分析可以得出结论：为了使测试结果能够精确地再现被测信号的波形，在传感器设计时，必须使其阻尼系数，固有角频率至少应大于被测信号频率的3～5倍，即。

在实际测试时，如果被测量为非周期信号，可将其分解为各次谐波，从而得到其频谱。实践证明，如果被测信号的波形与正弦波相差不大，则被测信号谐波中最高频率可以用其基频的2~3倍代替。因此，选用和设计传感器时，要保证传感器固有角频率。

# §2.2 传感器系统的标定与校准

为了确保传感器测量结果的可靠性和精度，国家制定了各类传感器的检定标准，并配备了标准的测试装置和仪器作为测量值传递的基准。新生产的传感器或使用过一段时间的传感器都可以进行灵敏度、频率响应、线性度等校准，以确保测量数据的可靠性。这不仅有利于统一测量方法，也方便了测量值的传递。

## 2.2.1 传感器的静态特性标定

### 2.2.1.1 静态标定条件

静态标定是在输入信号不随时间变化的静态标准条件下，确定传感器的静态特性指标，如线性度、灵敏度、迟滞、重复性等。静态标定的条件包括：无加速度、无振动、无冲击、环境温度通常为室温、相对湿度不大于，以及大气压为kPa。

### 2.2.1.2 标定仪器设备精度等级的确定

对传感器进行静态特性标定是指根据实验数据确定其性能指标和测量精度。因此，在标定传感器时，测量仪器的精度应至少比传感器的精度高一个等级。只有这样，通过标定确定的传感器的静态性能指标才是可靠的，所确定的精度才是可信的。

### 2.2.1.3 静态特性标定的方法

对传感器进行静态特性标定，首先要创造一个静态标定条件，然后选择一个与传感器精度匹配的标准设备，最后才能对传感器进行静态特性标定。

标定过程如下：

（1）将传感器的全量程分成若干等间距的点。

（2）根据传感器的量程分点，逐渐从小到大输入标准量程，并记录下每个输入值对应的输出值。

（3） 逐渐将输入值从大到小减小，并同时记录下每个输入值对应的输出值。

（4）按步骤（2）和（3）所述的过程，对传感器进行多次正、反行程测试，并将得到的输出/输入测试数据列入表格或绘制成曲线。

（5）对测试数据进行必要的处理，并根据处理结果确定传感器的线性度、灵敏度、迟滞和重复性等静态性能指标。

## 2.2.2 传感器的动态特性标定

动态标定主要是研究传感器的动态响应特性。根据传感器的动态性能指标，传感器的动态标定主要涉及一阶传感器的时间常数、二阶传感器的固有角频率和阻尼系数等参数的确定。对传感器进行动态标定时，需要对其输入一个已知的标准激励信号源，如正弦信号和阶跃信号。

对于一阶传感器，可以通过施加阶跃信号并测量其阶跃响应来确定时间常数，该时间常数是输出值达到最终值的所经历的时间。然而，为了准确确定一阶传感器的时间常数，通常需要考察传感器的阶跃响应。一阶传感器的单位阶跃响应函数为:

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2.18） |

整理后可得：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2.19） |

或，即和呈线性关系，且有

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2.20） |

因此，只要测量出一系列的-对应值，就可以通过数据处理，由式（2.20）确定一阶传感器的时间常数。

# §2.3 传感器性能改善措施与传感器的选用原则

## 2.3.1 提高传感器性能的途径

随着传感器发展的进程，相关工作者始终不渝地以提高传感器性能为目标，致力于提高其稳定性、可靠性、精度以及宽的频带等特性。其主要途径如下：

### 1. 合理选择结构、材料和参数

传感器的性能指标涵盖了广泛的范围。如果要求一个传感器在所有指标上都表现优秀，那么在设计和制造过程中将面临巨大的挑战，而且这也是不实用的。因此，我们应该根据实际需求和可能性，对传感器的结构、材料和参数做出合理的选择。

选择传感器的原则是：根据实际需要，优先保证主要指标，适度放宽次要指标，以获得更高的性价比。对于从事传感器研究和生产的部门，他们应该提供一系列满足不同使用需求的产品供用户选择。对于用户来说，他们应该根据实际需求，选择能满足使用要求的产品，避免在选择主要性能指标时盲目追求高标准。

### 2．使用差动技术

在传感器系统中，由于各种因素的影响，如温度、压力、电磁场等，导致传感器输出的信号可能会发生偏移或者失真。差动技术通过比较两个不同位置的传感器信号之间的差异，可以有效地消除这些干扰因素，从而提高传感器的测量精度和稳定性。

### 3．应用平均技术

传感器中广泛采用的平均技术可产生平均效应。这种技术的原理是：多个传感器单元同时进行测量，输出则是这些单元输出的平均值。如果我们假设每个单元可能产生的误差是服从正态分布的随机误差，那么根据误差理论，总误差将减小为：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2.21） |

式中：—传感器单元数。

可见，在传感器中利用平均技术不仅可以减小传感器误差，还可以增大信号量，从而提高传感器的灵敏度。

### 4．采用补偿和修正技术

当传感器或测试系统的系统误差变化规律过于复杂时，可以采用一定的方法进行补偿或修正。

补偿与修正技术的运用大致针对以下两种情况：

（1）针对传感器特性，找出误差的变化规律或测出其大小和方向，采用适当的方法加以补偿或修正。

（2）针对传感器工作条件或外界环境进行误差补偿，也是提高传感器精度的有力技术措施。不少传感器对温度敏感，由于温度变化引起的误差十分可观。为了解决这个问题，必要时可以控制温度，搞恒温装置，但往往费用太高或使用现场不允许，而在传感器内引入温度误差补偿又常常是可行的，这时应找出温度对测量值影响的规律，然后引入温度补偿措施。

补偿与修正，可以利用硬件电路实现，也可以采用软件编程来实现。

### 5．进行稳定性处理

传感器作为长期测量或反复使用的设备，其稳定性至关重要。在那些难以或无法定期标定的场合，传感器的稳定性更显得尤为关键。传感器的各种材料与元器件的性能可能会随着时间的推移和环境条件的变化而发生变化，这就是导致传感器性能不稳定的原因。因此，为了提高传感器性能的稳定性，需要对材料、元器件和传感器整体进行必要的稳定性处理。提高传感器性能稳定性的措施包括：对结构材料进行时效处理和低温处理；对永磁材料进行时间老化、温度老化、机械老化和交流稳磁处理；对电气元件进行老化筛选等。如果测量要求较高，也需要对附加的调整元件和后续电路的关键元器件进行老化处理。

### 6．实施屏蔽隔离和干扰抑制

传感器大都要在现场工作，现场的条件往往是难以充分预料的，有时是极其恶劣的。各种外界因素会影响传感器的精度和相关性能。为了减少测量误差并保持传感器的性能，就应设法削弱或消除外界因素对传感器的影响。其方法有：

（1）降低传感器对影响因素的灵敏度。

（2）减弱外界因素对传感器实际作用的程度。

对于电磁干扰，可以采用屏蔽、隔离措施，也可用滤波等方法抑制；对于如温度、湿度、机械振动、气压、声压、辐射、甚至气流等，可采用相应的隔离措施，如隔热、密封。隔振等，或在变换成为电量后对干扰信号进行分离或抑制，以减小其影响。

## 2.3.2 传感器的选用原则

现代传感器在原理与结构上千差万别，如何根据具体的测量目的、测量对象以及测量环境合理地选用传感器，是在进行某个量的测量时首先要解决的问题。当传感器确定后，与之相配套的测量方法和测量设备也就随之可以确定。测量结果的成败在很大程度上取决于传感器的选用是否合理。

选择传感器时，需要考虑的事项往往很多，但不可能面面俱到，也无需满足所有的事项要求。我们需要根据实际使用的传感器的目的、指标、环境等因素，来选择侧重点。例如，对于机械加工或化学分析等时间较短的工序过程，我们需要选择具有较好灵敏度和动态特性的传感器。而对于长时间连续使用的传感器，我们则需要重点考虑其是否能经得起时间的考验，即长期稳定性问题。此外，我们还需要考虑合理选择设置场所，注意传感器的安装方法，了解传感器的外形尺寸、重量等因素。通过这些因素的综合考虑，我们可以最终确定选择哪一种传感器最为合适。一般来说，正确选择传感器主要需要从以下几个方面来考虑。**1．灵敏度的选择**

通常来说，传感器的灵敏度越高越好。因为较高的灵敏度意味着传感器能够感知到更小的变化。只要被测物体有微小变化，传感器就能产生较大的输出。但是，在确定灵敏度时，要考虑以下问题：

（1）当传感器的线性工作范围一定时，灵敏度越高，干扰噪声就越大。这可能导致传感器的输入难以在线性区域内工作。因此，过高的灵敏度可能会限制其适用的测量范围。在这种情况下，应优先考虑提高传感器的信噪比。

（2）如果被测量是一个单向量，那么传感器的单向灵敏度应尽可能高，而横向灵敏度应尽可能低。如果被测量是二维或三维的向量，那么传感器的交叉灵敏度应尽可能低。

### 2．频率响应特性

传感器的频率响应特性是指在所测频率范围内，能够保持不失真测量的条件。然而，实际上传感器的响应都会有一定延迟，尽管我们希望这种延迟的时间越短越好。

一般物性型传感器，如光电效应式传感器、压电效应式传感器等，响应时间短，工作频率宽；而结构型传感器，如电感式传感器、电容式传感器、磁敏式传感器等，由于受到结构特性的影响或机械系统惯性质量的限制，其固有频率低、工作频率范围窄。在动态测量中，传感器的频率响应特性对测试结果有直接的影响，选用时，应充分考虑到被测物理量的变化特点（如稳态、瞬变、随机等）。

### 3．线性范围

在传感器的线性范围内，输出与输入成比例关系。线性范围越宽，说明传感器的工作量程越大。传感器工作在线性区域内是保证测量精度的基本条件。以机械式传感器为例，其材料的弹性极限决定了测力量程。如果超出了测力元件的弹性范围，就会产生非线性误差。

在某些情况下，确保传感器完全工作在线性区域内可能会有困难。但在允许的范围内，可以选择其近似线性区域。例如，对于变间隙型的电容或电感式传感器，工作区域通常选择在初始间隙附近。同时，必须考虑被测量的变化范围，以确保非线性误差在允许范围内。

### 4．稳定性

传感器的稳定性是经过长期使用以后，其输出特性不发生变化的性能。为了保证传感器长期稳定地工作，而不需经常地更换或校准，在选择和使用传感器时应注意以下两个问题：

（1）根据环境条件选择传感器。例如，如果选择电阻应变式传感器，应考虑湿度的影响。对于变极距型电容式传感器和光电传感器，如果环境中的灰尘或油剂浸入间隙，会改变电容器的介质和感光性质。对于磁电式传感器或霍尔效应元件，应考虑周围电磁场可能带来的测量误差。如果滑线电阻式传感器的表面有灰尘，可能会引入噪声。

（2）要创造或保持良好的使用环境。

### 5．精确度

传感器的精确度是表示传感器的输出与被测量的对应程度。

传感器处于测试系统的输入端，因此，传感器能否真实地反映被测量，对整个测试系统具有直接的影响。

在某些情况下，要求传感器的精确度越高越好。例如，在测量现代超精密切削机床的运动部件的定位精度，主轴的回转运动误差、振动及热形变等时，通常要求测量精确度在0.1～0.001mm范围内。

在实际中，需要同时兼顾测量目的和经济性。对于定性分析的实验研究，应要求传感器的重复精度高，而不要求测试的绝对量值准确；对于定量分析，那么必须获得精确量值。

### 6．测量方式

传感器在实际条件下的工作方式多种多样，包括接触式和非接触式测量、破坏性和非破坏性测量以及在线和非在线测量等。这些工作方式的选择取决于具体的应用场景和需求。

例如，在机械系统中，对于运动部件的参数，通常采用非接触测量方式。对于回转轴的误差、振动、扭矩等，非接触式传感器如电容式、涡流式、光电式等是非常方便的选择。如果选用电阻应变片，就需要配置遥测应变仪。在生产过程监测或产品质量在线检测中，建议采用非破坏性检验方式，如涡流探伤、超声波探伤、核辐射探伤和声发射检测等，以直接获得经济效益。

在线测试是一种与实际情况保持一致性的测试方法，这在自动化过程检测与控制系统中尤为重要。然而，实现在线检测是比较困难的，因为这对传感器与测试系统都有一定的特殊要求。例如，在加工过程中，要实现表面粗糙度的检测，传统的光切法、干涉法、触针法等都无法运用，而需要使用激光、光纤或图像检测法。因此，研制适用于在线检测的新型传感器是当前测试技术发展的一个重要方向。

除了以上选用传感器时应充分考虑的一些因素外，还应尽可能兼顾结构简单、体积小、重量轻、价格便宜、易于维修、易于更换等条件。

以上是有关选择传感器时主要考虑的因素。另外，为了提高测量精度，应选择显示值在满量程的50%左右的传感器，并相应地选择测量范围或刻度范围。选择传感器时，应考虑其响应速度。这样可以利用输入信号的频带宽度，从而获得高信噪比。对于高精度传感器，需要谨慎使用，并合理选择测试现场，同时详细了解其安装方法。总之，综合考虑各种因素，以选择最适合的传感器。

根据以上原则，可将选择传感器的一般步骤总结如下：

（1）借助于传感器的分类表，根据被测量的性质，找出符合用户需要的传感器类别，再从典型应用中初步确定几种传感器。

（2）借助于常用传感器的比较表和价格表，根据被测量的测量范围、测量精度、测量要求和环境要求，再次确定传感器的类别。

（3）借助于传感器的产品目录选用样本或传感器的手册，查出传感器的规格型号，性能参数及结构尺寸。

# §2.4 技术指标的Python计算方法

在标定传感器时，如果面临大量测试数据，手动计算性能指标可能会变得非常困难。因此，本节将简要介绍如何利用Python编程来高效地计算这些指标。

## 2.4.1 相关python基础知识

采用Python编程方法计算传感器的性能指标，需要用到两个第三方库：用于数组计算的numpy库和机器学习库sklearn。为此，我们必须首先使用pip命令（也可以采用其它的安装方法）安装这两个库。

numpy的安装方法是：

pip install numpy

sklearn的安装方法是：

pip install scikit-learn

一旦安装完成，就可以在Python程序中引入这两个库，并在后续的程序中使用它们。

numpy的引用代码如下：

import numpy as np

在本节，我们只用了sklearn库的线性回归子模块linear\_model，因此只需要引用这一个子模块即可，其引用代码如下：

from sklearn import linear\_model

在本节中，numpy库的主要作用是将测试数据存储到变量中。具体的代码如下：

x=np.array([元素值])

在这句代码中，x是存储测试数据的变量名，可以用任意合法的标识符代替；元素值用具体的测试数据值代替。

对于一维数据，其实例代码如下：

x=np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5])

对于二维数据，其实例代码如下：

x1=np.array([[0, 1], [1, 1], [2, 1], [3, 1], [4, 1], [5, 1]])

在本节中，sklearn库的主要作用是训练线性回归模型并进行预测。首先，需要定义一个回归模型对象，其代码如下：

clf = linear\_model.LinearRegression() # clf为定义的对象名

模型的训练，需要用到对象的fit方法。该方法有两个参数，分别是模型的输入和输出。但是要注意的是，sklearn库接受的输入变量是二维变量或以上，如果是一维变量，比如采用reshape方法把它变成二维变量。

对于二维输入变量xx，输出变量yy，模型训练的代码为：

clf.fit(xx, yy) # clf为前面定义的模型对象名

对于一维输入变量xx，输出变量yy，模型训练的代码为：

clf.fit(xx .reshape(-1, 1), yy)

训练后，即可得的拟合直线的斜率k和截距b，具体的代码如下：

|  |
| --- |
| k=clf.coef\_[0] |
| b=clf.intercept\_ #下划线不可以省略不写 |

模型训练好后，即可采用对象的predict方法进行预测。该方法只需要一个一个参数，即模型的输入。与fit方法类似，此参数的维度也必须大于等于2。

对于二维输入变量x，其预测代码为：

y\_pre=clf.predict(x)

对于一输入变量x，其预测代码为：

y\_pre=clf.predict(x.reshape(-1, 1))

其中，y\_pre即为每一个测试数据在拟合直线上的纵坐标，可以由其计算出非线性绝对误差，进而计算线性度。

另外，在计算传感器的性能指标时，经常需要求取一个数组的绝对值、最大值和最小值，这就用到abs函数、max方法和min方法，具体的代码可以参见下一小节的内容。

## 2.4.2 性能指标的Python求取方法

### 1. 线性度

根据公式（2.1），求取线性度的代码如下：

|  |
| --- |
| **deltay= abs(y\_pre-y)**  **deltay\_max= deltay.max()**  **xxd=deltay\_max/max(y)** |

### 2. 灵敏度

根据公式（2.2），求取线性度的代码如下：

lmd=(y.max()-y.min())/(x.max()-x.min())

### 3. 迟滞和重复性误差

由公式2.4和公式2.5可知，计算迟滞和重复性误差可以相同的程序代码，两者的区别是求取偏差代入的数据不同，即y1和y2的值不同。求取迟滞时，代入的分别上行程和下行程的数据；求取重复性误差时代入的是同为上行程数据或下行程的数据，其代码如下：

**delta= abs(y1-y2)**

**delta\_max= delta.max()**

**cz=deltay\_max/max(y)**

**例2-2** 有一个位移传感器，对在0mm～5mm范围的位移进行了两个循环的测量，测量数据如表2-2所示。请采用Python编程的方法求取以输出的平均值求端点连线的拟合直线，并计算传感器的线性度、灵敏度、迟滞和重复性误差。

表2-2 某位移传感器当x在0mm～5mm之间变化时测得的输出情况

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|  | 上行程 | 0 | 4 | 9 | 14 | 20 | 25 |
| 下行程 | 0 | 5 | 10 | 16 | 21 | 25 |
| 上行程 | 0 | 5 | 10 | 15 | 19 | 25 |
| 下行程 | 0 | 5 | 11 | 16 | 20 | 25 |

解：相关代码如下：

|  |
| --- |
| #引用第三方库  **import numpy as np**  **from sklearn import linear\_model**  #将表中测试数据存入python变量  **x=np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5])**  **y01=np.array([0, 4, 9, 14, 20, 25])**  **y11=np.array([0, 5, 10, 16, 21, 25])**  **y02=np.array([0, 5, 10, 15, 19, 25])**  **y12=np.array([0, 5, 11, 16, 20, 25])**  #求取输出平均值  **y=(y01+y11+y02+y12)/4**  #求取端点坐标  **xx=np.array([x.min(), x.max()])**  **yy=np.array([y.min(), y.max()])**  #求取拟合直线  **clf = linear\_model.LinearRegression()**  **clf.fit(xx.reshape(-1, 1),yy)**  **k=clf.coef\_[0]**  **b=clf.intercept\_**  **y\_pre=clf.predict(x.reshape(-1, 1))**  #打印拟合直线的斜率和截距  **print("拟合直线的斜率: ", k)**  **print("拟合直线的截距: ", b)**  #计算性能指标  **deltay\_max=np.array([abs(y\_pre-y01),abs(y\_pre-y02), \**  **abs(y\_pre-y11),abs(y\_pre-y12)]).max()**  **xxd=deltay\_max/max(y)**  **lmd=(y.max()-y.min())/(x.max()-x.min())**  **deltah\_max=np.array([abs(y11-y01),abs(y12-y02)]).max()**  **cz=deltah\_max/max(y)**  **cf\_max=np.array([abs(y02-y01),abs(y12-y11)]).max()**  **cfwc=cf\_max/max(y)**  #打印性能指标  **print("线性度: ", xxd)**  **print("灵敏度: ", lmd)**  **print("迟滞: ", cz)**  **print("重复性误差: ", cfwc)** |

执行上述代码，我们可以得到以下结果：

|  |
| --- |
| 拟合直线的斜率: 5.0  拟合直线的截距: 0.0  线性度: 0.04  灵敏度: 5.0  迟滞: 0.08  重复性误差: 0.04 |

这些结果与例2-1中手工计算的结果完全一致。这验证了Python程序的正确性。事实证明，使用Python进行这类计算不仅准确，而且效率高，非常可行。这对于处理大量数据或复杂计算尤其有用。

# 习题2

1. 传感器的静态特性指标主要有哪些？写出说明及相关表达式。

2. 什么是传感器的动态特性？如何分析传感器的动态特性？

3. 请简述传感器静态标定的过程。

4. 提高传感器性能的途径有哪些？

5. 应当如何正确选择传感器？

6. 某位移传感器，在输入量变化5mm时，输出电压变化为200mV，求其灵敏度。

7. 某压力传感器的测试数据如下表示，试据此计算某压力传感器的迟滞误差和重复性误差。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 行 程 | 输入压力  （×105Pa） | 输出电压(mV) | | |
| （1） | （2） | （3） |
| 正行程 | 2.0 | 190.9 | 191.1 | 191.3 |
| 4.0 | 382.8 | 383.2 | 383.5 |
| 6.0 | 575.8 | 576.1 | 576.6 |
| 8.0 | 769.4 | 769.8 | 770.4 |
| 10.0 | 963.9 | 964.6 | 965.2 |
| 反行程 | 10.0 | 964.4 | 965.1 | 965.7 |
| 8.0 | 770.6 | 771.0 | 771.4 |
| 6.0 | 577.3 | 577.4 | 578.4 |
| 4.0 | 384.1 | 384.2 | 384.7 |
| 2.0 | 191.6 | 191.6 | 192.0 |