# 第6章 基本智能化功能与python实现

本章内容：

* 非线性校正技术
* 自校零与自校准技术
* 噪声抑制技术
* 多传感器数据融合
* 频率自补偿技术
* 增益的自适应功能
* 自诊断
* 曲线拟合的Python实现

上一章主要介绍了测量、测量系统的基本概念，测量方法及其分类，测量误差，测量系统的结构、基本类型，以及常见物理量的测量方法。本章将重点介绍智能传感器的相关技术，包括非线性校正技术、自校零与自校准技术、噪声抑制技术、多传感器数据融合、频率自补偿技术、增益的自适应功能及自诊断等。同时，还将介绍曲线拟合的Python实现。通过对这些技术的学习，可以更好地理解和掌握智能传感器的特点和优势，并在实际应用中更好地运用这些技术。

# §6.1 非线性校正技术

非线性是描述传感器输入-输出特性曲线与所选定的拟合直线之间吻合程度的性能指标。智能传感器能够通过软件技术等方法来校正非线性输入-输出关系导致的误差，进而提高测量精度。

目前，大多数电子传感器都是采用半导体工艺制造的。在理想情况下，信号处理单元期望传感器的输入输出特性能够呈现线性关系。然而，实际上，很多传感器的输入输出特性都是非线性的，这与理想情况有所偏离。智能传感器系统，无论前端传感器的输入-输出特性有多复杂，如图6-1（a）所示，它都应该能够自动按照图6-1（b）所示的反非线性特性进行刻度的转换，使转换后输出与输入呈理想的直线关系，如图6-1（c）所示。智能传感器系统进行非线性转换的框图如图6-2所示。

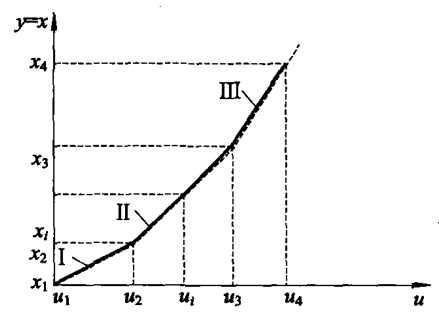
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| （a） | （b） | （c） |

图6-1 智能传感器系统非线性转换示意图

  
图6-2 智能传感器系统进行非线性转换的框图

## 6.1.1 查表法

查表法是一种分段线性插值法。它根据精度的要求对反非线性曲线进行分段，用若干段折线逼近曲线，如图6-3所示。将折点坐标存入数据表中。测量时，查找出输入值​对应的电压值处在哪一段折线上。根据这段折线的斜率进行线性插值，求得输出值。

  
图6-3 反非线性的折线逼近

逼近反非线性特性曲线的折线数量越多，输出值越接近实际值。然而，这也会使程序代码的编写变得更复杂。下面以三段为例，折点坐标值为：

横坐标:、、、；

纵坐标:、、、；

各线性段的输出表达式为：

|  |  |
| --- | --- |
| 第I段 |  |
| 第II段 |  |
| 第III段 |  |

输出表达式的通式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.1） |

式中：k—折点的序数，3条折线有4个折点，。

由求的非线性自校正流程图如图6-4所示。

  
图6-4 非线性自校正流程图

折线和折点的确定有两种方法：近似法与截线近似法，如图 6-5 所示。无论哪种方法，所确定的折线段与折点坐标值都与所要逼近的曲线之间存在误差。按照精度要求，各点误差都不得超过允许的最大误差界，即。

|  |  |
| --- | --- |
| (a) Δ近似法 | (b) 截线近似法 |

图 6-5 曲线的折线逼近

1. Δ近似法

折点处误差最大，折点在误差界上。折线与逼近的曲线之间的误差最大值为，且有正有负。

2. 截线近似法

在曲线上的折点，误差达到最小值，这个折点的坐标值是利用标定值得到的。折线与被逼近的曲线之间的最大误差出现在折线段的中部，我们应该控制这个误差值，使其小于允许的误差界。每个折线段的误差符号都是相同的，要么全部为正，要么全部为负。

## 6.1.2 曲线拟合法

曲线拟合法采用次多项式来逼近反非线性曲线。这个多项式的系数是通过最小二乘法确定的，具体步骤如下：

1. 对传感器及其调理电路进行静态实验标定，得到校准曲线。标定点的数据如下：

|  |  |
| --- | --- |
| 输入： | ，，，， |
| 输出： | ，，，， |

2. 假设反非线性特性曲线的拟合方程为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.2） |

其中的数值由所要求的精度确定。如果，则由式(6.2)得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.3） |

式中：、、、—待求解常数。

3. 根据最小二乘法原则确定常数、、、。这个方法的基本思想是：由式（6.3）确定的各个的值，与各个点的标定值的均方差最小，即：

为了找到使函数最小化的常数、、、，需要对函数求导并令其为零，即：

令，得：

令，得：

令，得：

令，得：

整理后可得矩阵方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.4） |

式中：—静态实验标定点的个数；

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

求解式(6.4)可得待定系数、、、。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |

4. 存储常系数、、、，并据此求取输入被测量值。重写式(6.3)为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.5） |

每次只需要将采样值代入式(6.5)中即可求得对应于电压的输入被测值。

# §6.2 自校零与自校准技术

自校零与自校准功能的核心思想是:不论何种因素，如温度、电源电压波动或自身的老化，引起了传感器输入输出特性发生漂移，偏离了初始标定曲线。只要现场实时进行标定实验，测出漂移后的输入-输出特性，并按其进行刻度转换，就能消除特性漂移引入的测量误差，输出的被测量值更接近实际的真实值。智能传感器系统具有自校零与自校准功能，不仅可以消除零点漂移、灵敏度漂移，而且同时进行非线自校正的刻度转换，因此系统稳定性与综合测量精度均大大提高。

这种智能化技术的优势在于，即使测量系统的精度、重复性和稳定性较低，也能获得较高精度的测量结果。这是因为测量精度主要取决于作为标准量的基准，而非测量系统本身。因此，无需在每一个测量环节都追求高精度、高稳定性和高重复性，而是应主要集中精力在获取高精度、高稳定性的参考基准上。这样，既节省了精力，又提高了测量结果的精度。

根据现场实时需要建立的输入输出特性是线性的还是非线性的，所需的标定点数和基准数目会有所不同。对于具有线性特性的系统，我们采用两基准法，需要两个基准。而对于具有非线性特性的系统，我们采用多基准法，至少需要三个基准。

## 6.2.1 两基准法

两基准法也被称为三步测量法，适用于测量系统的正模型可用线性方程表示的系统。

假设有一传感器系统，其经标定实验得到的静态输入-输出特性为如下线性方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.6） |

式中：—零位值，即当输入时的输出值；

—灵敏度，也被称为传感器系统的转换增益。

对于一个理想的传感器系统，与应为保持恒定不变的常量。但是实际上，由于各种内在和外来因素的影响，、都不可能保持恒定不变。例如，决定放大器增益的外接电阻的阻值会因温度的变化而变化，并引起放大器增益改变，从而使得传感器系统总增益改变，也就是系统总的灵敏度发生变化。设,其中为增益的恒定部分，为变化量；又设，为零位值的恒定部分，为变化量，则：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.7） |

式中：—零位漂移；

—灵敏度漂移。

由式（6.7）可见，零位漂移会引入零位误差，灵敏度漂移会引入测量误差。

传统的传感器技术一直追求精心设计与制作、严格挑选高质量的材料及元器件，以期望将及控制在某一限度内。但这需要以高成本作为代价。

智能传感器系统是传感器与微处理器赋以智能的结合，它通过两个基准对系统进行实时标定以实现自动校正由零位漂移或灵敏度漂移引入的误差。

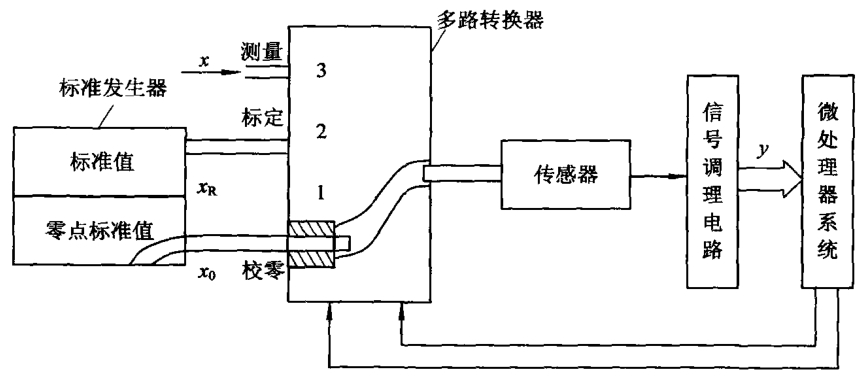
以压力传感器的自校准为例，智能压力传感器系统实现自校准功能的原理框图如图6-6所示。微处理器系统在每一特定的周期内发出指令，控制多路转换器执行三步测量法，使自校准环节接通不同的输入信号。因为本系统的输入信号为压力，故多路转换器实际上就是一个压力扫描阀。

1. 测量系统的零点（校零）

输入信号是零点标准值。以压力传感器为例，当测量的是相对于大气压的表压时，零点标准值即为大气压。这样，压力测量系统的输入就被设定为，从而保证系统的输出值。如果在零输入条件下，系统的输出值不为零，那么这种情况必然是由系统的误差源引起的，则有：

式中：—系统的增益；

—系统的误差源。

  
图6-6 智能传感器系统实现自校准功能原理框图

2. 实时测量系统的增益/灵敏度（标定）

输入信号是标准值，由标准压力发生器产生标准压力值，系统的输出值为。因此，被校准系统的增益/灵敏度可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.8） |

由于输出值也会受到误差源的影响，，故差值，即消除了误差源的影响。

3. 测量

输入信号为被测目标参量压力，测量系统相应的输出值为。因为：

故：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.9） |

传感器系统的精度取决于标准发生器的精度。只要系统的各环节，例如传感器、放大器、 A/D 转换器，在所需的三步测量时间内能保持稳定，就能达到较高的测量精度。在三步测量所需时间间隔之前和之后产生的零点漂移、灵敏度时间漂移、温度漂移等都不会引入测量误差。这种实时在线自校准，即使采用低精度的传感器、放大器、 A/D 转换器等环节，也能实现高精度测量。因此，智能传感器系统通过自校准功能可以实现高精度测量。

上面所述实现自校准功能的方法要求被校系统的输入输出特性呈线性，即符合式（6.6） 线性方程所描述的特性。这样，只需要两个标准值(其中一个是零点标准值)就可以完善地标定系统的增益/灵敏度。然而，对于非线性的输入输出系统，仅使用两个标准值进行三步测量的自校准方法可能无法达到理想的精度。

## 6.2.2 多基准法

当输出与输入特性出现零点或灵敏度的漂移时，仅依据标定时的输出和输入特性进行读数可能会导致较大的误差。如果在测量时的工作条件下，能对传感器系统进行实时在线标定实验，确定当前的输出/输入特性及其反非线性特性拟合方程式，并按其读数，就可以消除干扰。这是智能传感器系统实现自校准功能的理想方法。为了缩短实时在线标定的时间，虽然标定点数不能太多，但为了反映输出输入特性的非线性，标定点至少需要三个。因此，标准发生器需要至少提供三个标准值。按照这个思路实现实时在线自校准功能的步骤如下：

（1）在测量前，对传感器系统进行现场、在线的实时三点标定，即依次输入三个标定值、、，测得相应输出值、、。

（2）列出反非线性特性拟合曲线方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.10） |

（3）使用标准值来求解反非线性特性曲线拟合方程的系数、、。这里采用最小二乘法原则，使其方差和最小，即：

为了求得函数的极值（最小值），需要令其偏导数为零，即：

令，得：

令，得：

令，得：

整理后得到矩阵方程：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.11） |

式中：—在线实时标定点个数，；

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | |  | |  |
|  | |  | |  | |

由标定值计算出、、、、、、后，解式（6.11）矩阵方程可得待定常系数、、的表达式：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

一旦确定、、的数值，就可以确定反非线性特性拟合方程式（6.10）。此时，智能传感器系统可以通过转换开关切换到测量状态，并根据公式（6.10）计算出输出值x(y)，这个值就代表了系统测量的输入目标参数x。因此，只要传感器系统在实时标定与测量期间保持其输出／输入特性不变，那么传感器系统的测量精度就完全取决于实时标定的精度。其他任何时间特性的漂移带来的不稳定性都不会引入测量误差。

# §6.3 噪声抑制技术

传感器获取的测量信号中常常会混入各种噪声和干扰信号。智能传感器系统不仅具有获取信息的功能，还具有信息处理的功能。这使得它能够从噪声中自动准确地提取出表征被检测对象特征的定量有用信息。如果信号和噪声的频谱不重合，那么可以使用滤波器来消除噪声。如果信号和噪声的频带重叠，或者噪声的幅值比信号大，就需要采用其他的噪声抑制方法来消除噪声。

## 6.3.1 干扰与噪声

### 6.3.1.1 干扰与噪声的区别

噪声是绝对的，它的产生或存在不受接收者的影响，是独立的，与有用信号无关。干扰是相对有用信号而言的，只有噪声达到一定数值，并和有用信号一起进入仪器并影响其正常工作才形成干扰。

噪声与干扰是因果关系，噪声是干扰之因，干扰是噪声之果，是一个量变到质变的过程。

干扰在满足一定条件时才可以消除，噪声在一般情况下难以消除只能抑制。

### 6.3.1.2 形成干扰的三个因素

噪声形成干扰必须具备三个条件，主要包括噪声源、对噪声敏感的接收电路和噪声源到接收电路之间的耦合通道，其关系如图6-7所示。

  
图6-7 干扰的三要素

（1）干扰源。产生干扰信号的设备被称为干扰源，如变压器、继电器、微波设备、电机、无线电话和高压电线等产生的空间电磁信号等。

（2）传播途径。传播途径是指干扰信号的传播路径。

（3）接收载体。接收载体是指受影响的设备的某个环节。这个环节能够吸收干扰信号，并将其转化为能对系统造成影响的电器参数。

## 6.3.2 传感器的噪声

在传感器系统中，除了被检测信号等有用信号外，所有不需要的信号，也就是不希望出现的动态分量，都被统称为传感器噪声。传感器噪声的表现形式通常是不规则和随机的。然而，也存在一些规则的表现形式，如电压纹波和放大器自激振荡。

### 6.3.2.1 放电噪声

电子设备的噪声干扰通常是由电气放电现象引起的。在电气放电过程中，会向周围空间辐射出一系列从低频到高频的电磁波，这些电磁波能够传播得很远。这种由电气放电产生的干扰电磁波对各种电子设备，如通信设备、计算机设备等，都有影响。这种影响主要表现为电晕放电噪声、放电管（如日光灯、霓虹灯）放电噪声和火花放电噪声等几种形式。

### 6.3.2.2 电气干扰源

电气噪声干扰主要包括工频、电子开关和脉冲发生器的感应干扰等几种。

（1）工频干扰。大功率输电线是典型的工频噪声源。低电平的信号线只要一定距离与输电线相平行，就会受到明显的干扰。如果工频的波形失真较大（如供电系统接有大容量的晶闸管设备），高次谐波分量的增多可能引起更大的干扰。

（2）射频干扰。高频感应加热、高频焊接等工业电子设备以及广播机、雷达等通过辐射或通过电源线会给附近的电子测量仪器带来干扰。

（3）电子开关。电子开关虽然在通断时并不产生火花，但由于通断的速度极快，使电路中的电压和电流发生急剧的变化，形成冲击脉冲，成为噪声干扰源。在一定电路参数条件下，电子开关的通断还会带来相应的阻尼振荡，从而转化为高频干扰源。

### 6.3.2.3 固有噪声源

检测装置内部元件因其物理性质引起的无规则波动形成的固有噪声主要可以分为：热噪声、散粒噪声和接触噪声。

1. 热噪声。

热噪声，亦称电阻噪声，是由电阻中电子的热运动形成的。由于电子的热运动是无规则的，因此在电阻两端形成的噪声电压也是无规则的，并且包含了复杂的频率成分。电阻两端的热噪声的电压有效值可表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.12） |

式（6.12）表明，热噪声电压的有效值与电阻值的平方根成正比。因此减小电阻、带宽和降低温度有利于降低热噪声。

2. 散粒噪声。

散粒噪声存在于电子管和晶体管中，是由于晶体管基区的载流子的无规则扩散，以及电子一空穴对的无规则运动和复合形成的。散粒效应的均方根噪声电流为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.13） |

式（6.13）表明，散粒噪声与电流的有效值与直流电流和带宽的平方根成正比。因此减小直流电流和带宽有助于降低散粒噪声。

3. 接触噪声。

接触噪声是由于两种材料之间接触不完全，导致电导率的起伏而产生的。这种噪声主要发生在两个导体连接的地方，如继电器的接点、电位器的滑动接点等。接触噪声正比于直流电流的大小，其功率密度正比于频率的倒数，大小服从正态分布。每平方根带宽的噪声电流可近似地表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.14） |

式中：—平均直流电流；

—由材料和几何形状确定的常数；

—频率；

—带宽。

由于接触噪声功率密度正比于频率的倒数，因此在低频时接触噪声可能是很大的。接触噪声通常是低频电路中最重要的噪声源之一。

4. 噪声电压的叠加。

如果噪声电压（或噪声电流）的产生是彼此独立的，即不相关的，那么其总噪声电压可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.15） |

如果是两个相关的噪声电压，那么可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.16） |

式中：—相关系数，其取值范围为。当时，表示两个电压是不相关的；当在0和或0和之间时，表示两个电压是部分相关的。

## 6.3.3 噪声的耦合方式

干扰源通过一定的耦合形式对设备形成干扰通道，研究干扰的耦合途径以切断干扰通道，被认为是解决干扰问题的最有效途径。

噪声的耦合方式主要有以下几种。

### 6.3.3.1 共阻抗耦合

共阻抗耦合发生在多个电路共享一个阻抗的情况下。具体来说，当电流通过其中一个电路，它会在这个共享阻抗上形成一个压降。这个压降可以干扰与共享阻抗连接的其他电路。这种干扰耦合形式主要产生在以下几种情况中：

（1）电源内阻共阻抗耦合。当一个电源对几个电子线路或传感器供电时，电源内阻抗产生共阻抗耦合。

（2）公共地线的耦合。在传感器系统的公共地线上，有各种信号电流流过。由于地线本身具有一定的阻抗，在其上必然形成压降，该压降就形成对有关电路的干扰电压。

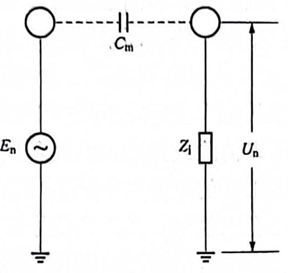
（3）信号输出电路的相互干扰。当传感器系统的信号电路有几路负载时，任何一个负载的变化都会通过输出阻抗的共阻抗耦合而影响其它输出电路。

（4）模拟系统与数字系统共地耦合干扰。通常数字系统的入地电流比模拟系统大得多，并且有较大的波动噪声，数字电路和模拟电路共地时尤为严重。

消除或减小电阻耦合的方法是采用单点供电和单点接地。在必须采用公共电源线和公共地线时，应尽量缩短公共线的长度，并加粗线径。

### 6.3.3.2 静电耦合

静电耦合是由于两个电路之间存在着寄生电容，使一个电路的电荷影响到另一个电路的现象。通常，静电耦合的等效电路如图6-8所示。

  
图6-8 静电耦合的等效电路

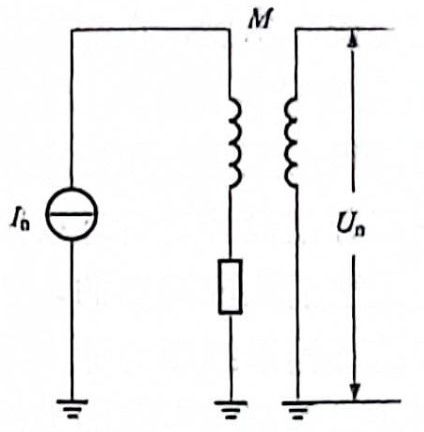
根据电路理论，上的干扰电压可表为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.17） |

式（6.17）表明，静电耦合的干扰电压与频率，寄生电容，阻抗和电场强度的乘积呈正比。因此，降低这些参数中的任何一个或多个都有助于减小静电耦合的影响。在实际应用中，调整电场强度是最为直接且有效的方式，而优化电路设计以减少寄生电容、阻抗和频率也是十分有效的方法。

### 6.3.3.3 电磁耦合

电磁耦合，也被称为互感耦合，是由于两个电路之间存在有互感，使得一个电路的电流变化能够通过磁交链影响到另一个电路的现象。电磁耦合的等效电路如图6-9所示。

   
图6-9 电磁耦合的等效电路

根据交流电路理论，可将表达式为：

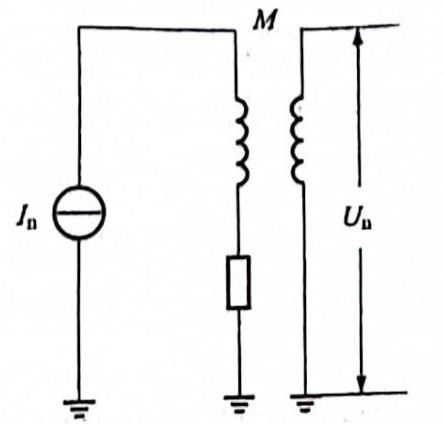
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.18） |

式中：—噪声源电流的角频率。

式（6.18）表明，干扰电压正比于噪声源电流角频率、互感系数和噪声电流。因此，降低这些参数中的任何一个或多个都有助于减小电磁耦合的影响。在实际应用中，频率的调整以及对电路进行优化设计来减小互感系数和噪声电流，将是非常有效的策略。

### 6.3.3.4 漏电流耦合

当绝缘性能不佳时，流经绝缘电阻的漏电流会引起噪声干扰，这种现象被称为漏电流耦合。漏电流耦合的等效电路如图6-10所示。

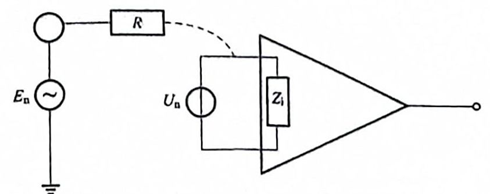
  
图6-10 漏电流耦合的等效电路

根据电路理论可得的表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.19） |

漏电流耦合经常发生在：用仪表测量较高的直流电压时；检测装置附近有较高的直流电压源时；高输入阻抗的直流放大器中。

例如：设直流放大器的输入阻抗，干扰源电动势，绝缘电阻，如图6-11所示。

  
图6-11 高输入阻抗放大器漏电干扰

根据上述给出的数据可以得出：

从上述估算可知，对于高输入阻抗放大器，即使是微弱的漏电流干扰，也将造成严重的后果，所以必须严密注意与输入端有关的电路的绝缘水平。

### 6.3.3.5 传导耦合

传导耦合是一种噪声耦合方式，它通过导线检测到噪声，并将其传输到接收电路，从而形成干扰。最常见的情况是电源线通过噪声环境，将交变电磁场感应到电源回路中，形成感应电势。然后，这个感应电势通过电源线传送到各处，进入电子装置，造成干扰。这种干扰往往不易被发现，因此容易被忽视。

## 6.3.4 传感器低噪化方法

为了抑制噪声干扰，需要对其进行准确的分析。分析的内容应该包括干扰的来源、性质、传播途径、耦合方式以及传感器电路中形成和接收干扰的电路等。抑制干扰的基本方法需要考虑形成干扰的“三要素”，在噪声源、耦合通道和干扰接收电路方面采取措施。

### 6.3.4.1 消除或抑制噪声源

消除或抑制噪声源是抑制噪声干扰的最积极主动的措施。这是因为它能从根本上消除或减少干扰。在实际工作中，只有一部分在设计者管理权限范围内的噪声源可以消除或抑制，而大多数噪声源是独立存在的，是无法消除或抑制的。例如，自然噪声源、周围工厂的电器设备产生的噪声等。还有一种信号，传感器系统将其视为噪声，而其它设备则可能视为有用信号，对这类信号就不能进行抑制。总之，消除或抑制噪声源的方法是有一定限度的。

### 6.3.4.2 破坏干扰的耦合通道

干扰的耦合通道，按传递方式可分为两大类：以“路”的形式和以“场”的形式。对这两种不同传递形式的干扰，可以采用不同的对策来抑制噪声干扰。

（1）对于以“路”的形式侵入的干扰，可以采用阻截或给予低阻通路的方法，使干扰不能进入接收电路。例如提高绝缘电阻以抑制漏电干扰；采用隔离技术来切断环路干扰；采用滤波、屏蔽、接地等技术给干扰以低阻通路，将干扰引开；采用整形、限幅等措施切断数字信号干扰传递的途径等。

（2）对于以“场”的形式侵入的干扰，一般采用屏蔽措施并兼用“路”的抑制干扰措施，使干扰受到阻截并难以以“路”的形式侵入电路。

### 6.3.4.3 消除接收电路对于干扰的敏感性

不同的电路结构形式对于干扰的敏感程度不同。一般来说，高输入阻抗电路比低输入阻抗电路易接收干扰；模拟电路比数字电路易于接收干扰；布局松散的电子装置比结构紧凑的易于接收干扰。为了削弱电路对干扰的敏感性，可以采用滤波、选频、双绞线、对称电路和负反馈等措施。

### 6.3.4.4 采用软件抑制干扰

对于一些已经进入电路的干扰，使用硬件抑制措施可能不容易实现或效果不佳。可以考虑在采用微处理器的智能传感器系统中，通过编入一定的程序进行信号处理和分析判断，以达到抑制干扰的目的。比如小波消噪技术。

# §6.4 多传感器数据融合

当今，多传感器智能化技术迅速发展，已成为改善传感器系统性能的最有效的手段。多传感器智能化技术包括两大方面：

其一，将多个传感器与计算机（或微处理器）组建智能化多传感器系统；其深刻内涵是提高某点位置处（单点）某一个参量（单参量）的测量准确度，而不是一般意义的多点多参量测量系统。

其二，将多个传感器获得多个信息的数据进行融合处理，实现某种改善传感器性能的智能化功能，在抑制交叉敏感改善传感器稳定性的同时，系统的线性度也可以得到改善。

## 6.4.1 单传感器系统

通常的测量系统都是由单传感器系统组成的。它有两个基本组成部分：传感器与数据处理单元，其框图如图6-12所示。

  
图6-12 单传感器测量系统框图

### 6.4.1.1 单传感器系统的正模型与逆模型

在单传感器系统中，传感器部分和数据处理部分的输入输出关系均可通过数学模型进行描述。传感器部分通常使用正模型进行描述，而数据处理单元则使用逆模型进行描述。

（1）传感器部分，包含传感器及其调理电路，主要用于执行获取信息的任务。集成了调理电路的传感器部分能感知并检测物理量，并按照一定的规律将转换为有用输出量。有用输出量，是指便于远距离传输的量，目前多为电量，如电压、电流、电脉冲的频率。输入与输出遵从一定的规律，这意味着它们具有一定的重复性，并且可以用数学表达式来描述。这种描述传感器部分输入输出-关系的数学表达式，被称为传感器系统的正模型。对于单个传感器系统，其正模型通常为一元多项式。

（2）数据处理单元部分负责信息处理、分析和显示功能，其主要任务是从传感器的输出信号数据中提取代表被测量的有效信息，并进行显示。简单来说，其最基本的功能是将传感器部分的输出量转换为被测量，并进行显示。显示的值与真值之间存在一定的偏差，而目标是尽可能地减小这个偏差。数据处理单元部分的这个基本功能被称为“刻度转换”。在智能传感器系统中，刻度转换通常是由计算机或微处理器中的软件实现的。数据处理单元部分输出与输入关系的数学描述被称为逆模型。对于单传感器系统，逆模型是正模型的反函数，通常表现为一元多项式。

### 6.4.1.2单传感器系统的应用

单传感器系统不仅可用于单点单参量测量系统，还可以组建多点多参量测量系统。

1. 单点单参量测量系统

选用标称的目标参量与被测参量同名的传感器，例如使用压力传感器来测量压力一个参量，并且仅在压力传感器所在位置（单点）处进行压力测量。常见的压力测量系统、位移测量系统、液位测量系统等一般都是基于单传感器系统的。

2. 多点多参量测量系统

多点多参量测量系统是由多个单传感器测量系统组成的，其原理框图如图6-13所示。

  
图6-13 由单传感器系统组成的多点多参量测量系统

在图6-13所示的系统中，每个传感器只能完成单点单参数的测量，如果要测量两个位置点的压力，则需要两个压力传感单元。通过一个多路模拟开关，可以将各点传感器输出的信号，，，按一定的顺序或同时并行地输入到微处理器中。然后，进行独立的数据处理，按照各自的逆模型完成刻度转换，并输出被测参量,，，。在图6-13中，每个单传感器系统的正模型，，都与各自的逆模型，，相对应。由于模型的数学表达式都是一元多项式，所以图6-13所示的多点多参量测量系统在本质上仍然是单传感器系统。

## 6.4.2 交叉敏感与传感器系统的稳定性

### 6.4.2.1 交叉敏感现象

无论是传统工艺制作的经典传感器，还是半导体工艺制作的现代传感器，都存在交叉敏感。交叉敏感是导致单传感器系统不稳定的主要因素。交叉敏感现象的主要表现是：当传感器的目标参数保持不变，而其他非目标参数发生变化时，传感器的输出值会发生变化。例如，湿度传感器的目标参数是湿度。但是，如果环境温度发生变化，传感器的输出值也会发生变化。这就是湿度传感器对非目标参数—环境温度的交叉敏感性。

大多数传感器不仅对温度有交叉敏感性，而且还有其他交叉敏感量。以压力传感器为例，其目标参数是压力。但是，当环境温度或供电电压/电流发生变化时，传感器的输出电压值也会发生变化。这表明压力传感器对环境温度和供电电压/电流这两个非目标参数有交叉敏感性。

### 6.4.2.2 交叉敏感带来的问题

交叉敏感现象表明，用一元多项式方程来表征单传感器系统的正模型和逆模型是不完备的。对于上述对温度和供电电流具有交叉敏感的压力传感器，其正模型至少应用三元多项式来表征，而逆模型至少应用三元多项式来表征，才可以达到较完备的效果。否则，如果正模型不能完全代表具有多元交叉敏感的实际传感器系统，那么根据这个不完备的正模型建立的逆模型得到的测量值将会有很大的误差。例如，当供电电流I恒定时，上述压力传感器在不同温度条件下的正模型和逆模型如图6-14所示。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）不同温度条件下的正模型 | （b）不同温度条件下的逆模型 |

图6-14 不同温度条件下压力传感器的正模型与逆模型

从图6-14可以看出，当传感器系统的工作环境温度从变至时，其特性也会随之漂移。如果仍然按照时的正、逆模型来求取测量值，那么它与实际值之间将存在很大的偏差。具有交叉敏感性的传感器系统性能不稳定，准确性差，这是常规单传感器系统普遍存在的问题。

## 6.4.3 多传感器技术改善传感器系统性能的基本方法

多传感器技术改善传感器系统性能的基本方法有模型法和冗余法两种。

### 6.4.3.1 模型法

采用模型法消除干扰量影响，改善传感器稳定性的基本思路是：当主测参量为的传感器存在干扰量时，如果想要消除干扰量的影响，就需要监测该干扰参量，并建立一个测量与的多传感器系统。如果想要消除个干扰量的影响，就需要建立一个测量个参量的多传感器系统。基于模型法改善稳定性，消除两个干扰量影响的三传感器-智能传感器系统框图如图6-15所示。

   
图6-15 基于模型法的三传感器-智能传感器系统

1. 传感器单元

为主传感器及其调理电路单元。其目标参量为压力。、分别为辅传感器及其调理电路单元，它们的目标参量分别是温度和电流，这些参量是主传感器的干扰量。每个传感器的输出分别为：

主传感器（压力），是三元函数模型；

辅传感器（温度），可用一元函数模型近似；

辅传感器（电流），可用一元函数模型近似。

图6-15中的多传感器-智能传感器系统，是为消除个干扰量（温度、电流）改善压力传感器（压力）而建立的（）三传感器-智能传感器系统。系统中传感器的总数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.20） |

式中：—欲消除的干扰量数。

2. 数据融合处理单元

图6-15中的数据融合处理单元是存入计算机内进行数据融合的智能化软件模块。该模块实现了一种由个传感器输出的数据、和求目标参量的融合算法。根据已建立的逆模型

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.21） |

计算被测目标参量，其计算所得的值消除了干扰量与的影响，更接近实际值。

模型法不仅消除了交叉敏感性以提高传感器系统的稳定性，而且进行了非线性校正，从而改善了系统的线性度。

建立逆模型的方法有很多，本书将介绍两种常用的方法：多元回归分析法和机器学习算法（如神经网络和支持向量机）。

### 6.4.3.2 冗余法

采用冗余法消除干扰量影响，改善传感器稳定性的基本思路是：使用至少三个与主测参数相同类型的传感器来建立一个多传感器系统，以测量主测参数，而不是监测主测参数的传感器的干扰量或探究干扰量对主测参数传感器的影响规律。这种方法可以消除干扰量的影响，从而改善传感器的稳定性。基于冗余法消除传感器漂移改善稳定性的多传感器-智能传感器系统框图如图6-16所示。

  
图6-16 基于冗余法的三传感器一智能传感器系统框图

1. 传感器单元

传感器单元均为主测同一参量的传感器，它们的输出均受干扰量，，的影响，每个传感器的输出分别为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 传感器 |  |  |
| 传感器 |  |  |
|  |  |  |
| 传感器 |  |  |

2. 数据融合处理单元。

图6-16中的数据融合处理单元是在计算机中进行数据融合处理的智能化软件模块，比如主成分分析法。

# §6.5 频率自补偿技术

## 6.5.1 传感器系统的动态误差

假设一个传感器系统的频率特性为，其理想频率特性为，两者之间存在误差。则动态幅值误差可以表示为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.22） |

式中：—动态幅值误差；

—测量系统频率特性的模；

—理想频率特性的模。

### 6.5.1.1 一阶系统的动态误差

一阶系统的工作频段满足：

式中：—被测信号的角频率；

—系统转折角频率，，其中为系统的时间常数。

对于一阶系统，其频率特性为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.23） |

式中：—直流放大倍数；

令 ，则的幅频特性为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.24） |

一阶系统理想的频率特性的模为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.25） |

式中：—时一阶测量系统的直流放大倍数，为一常量。

将式（6.24）和式（6.25）代入式（6.22），可得一阶系统动态幅值误差表达式为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.26） |

### 6.5.1.2 二阶系统的动态误差

二阶系统的工作频段满足：

式中：—无阻尼固有振荡角频率。

对于二阶系统，其频率特性为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.27） |

式中：—直流放大倍数；

—阻尼比。

令，则的幅频特性为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.28） |

二阶系统理想的频率特性的模为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.29） |

式中：—时二阶测量系统的直流放大倍数，为一常量。

将式（6.28）和式（6.29）带入式（6.22），可得二阶系统动态幅值误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.30） |

系统对不同角频率的输入信号会产生程度不同的动态误差。对于动态幅值误差，根据式（6.26）和式（6.30），有表6-1所示的关系。

表6-1 信号频率与动态幅值误差的关系

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 一阶系统 | 频率比 | 1/10 | 1/7 | 1/6 | 1/5 | 1 |
| 动态幅值误差 | 0.5% | 1% | 1.4% | 2% | 29.3% |
| 二阶系统 | 频率比 | 1/10 | 1/7 | 1/6 | 1/5 | 1/3 |
| 动态幅值误差 | 1% | 2% | 3% | 5% | 10% |

由表6-1可见，如果想要保证动态幅值误差，则一阶系统的转折频率应比信号频率大5倍，即。若是二阶系统，则无阻尼固有频率应比信号频率大7倍，即；所以，当信号的频率高，而测量传感器的工作频带不能满足测量允许误差的要求时，则希望扩展系统的频带，以改善系统的动态性能。智能传感器系统具有强大的软件优势，能够补偿原有系统动态性能不足。通常，主要采用两种方法实现频率补偿：数字滤波法和频域校正法。

## 6.5.2 数字滤波法

数字滤波法的补偿思想是：在现有的传递函数为的传感器系统中，附加一个传递函数为H(s)的环节，使系统总传递函数满足动态性能的要求。这个附加的串联环节，可以由软件编程设计的等效数字滤波器来实现。

### 6.5.2.1 工作原理

以一阶环节为例，说明数字滤波法扩展频带的原理。已知传感器为一阶系统，其传递函数和频率特性分别为：

现欲将其频带扩展倍，即转折角频率为：

也就是将它的时间常数减小倍，即：

通过附加一个串联环节（称为校正环节）达到上述目的。

1. 校正环节的传递函数

串入一个校正环节后，与原传感器系统组成一个新的系统，如图6-17所示。

|  |  |
| --- | --- |
| （a）系统框图 | C:\Users\qq251\Desktop\1111111111111111111111111111.jpg （b） |

图6-17 串联校正环节

应具有希望的动态特性，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.31） |

于是校正环节的传递函数为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.32） |

2. 校正环节的实现

由后向差分法求得模拟滤波器的等效数字滤波器为：

其编程算式为：

再将上式改写为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.33） |

其中：

式中：—采样时序序号；

—采样间隔。

通过编程实现公式（6.33），就能构建所需的串联校正环节的等效数字滤波器。然而，为了实现这一点，必须了解扩展频带环节的原始动态特性。具体来说，需要知道表征一阶惯性环节动态特性的特征参数。确定值的方法有两种：一是频率特性法，要求输入信号为频率可调、幅值恒定的正弦波信号；二是阶跃响应法，要求输入信号为阶跃信号。对于被测量是非电量的传感器系统，通常采用阶跃响应法。这是因为获得非电量，如温度、压力的阶跃信号比获得正弦信号要容易得多。

### 6.5.2.2 阶跃响应法测定时间常数

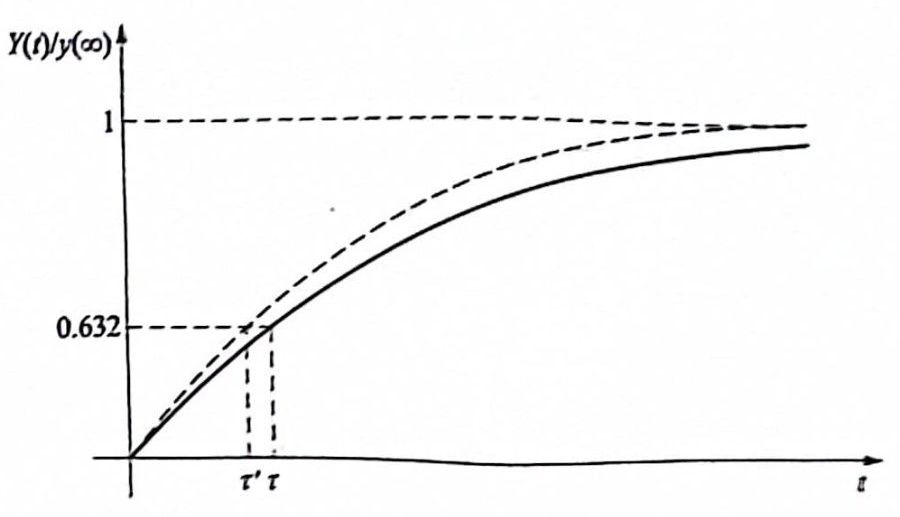
1. 阶跃响应特性。

一阶系统的输入信号为如下阶跃函数时：

该一阶系统的输出为一指数函数：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.34） |

为一阶系统的阶跃响应，如图6-18所示。

  
图6-18 一阶系统的阶跃响应

初始状态，，随时间增加按指数规律上升，时趋于稳态值。

时间常数是这样一个时间，当 时

输出值到达的时间越短，则值越小，系统的动态性能越好，对信号的响应越快。

2. 时间常数的确定

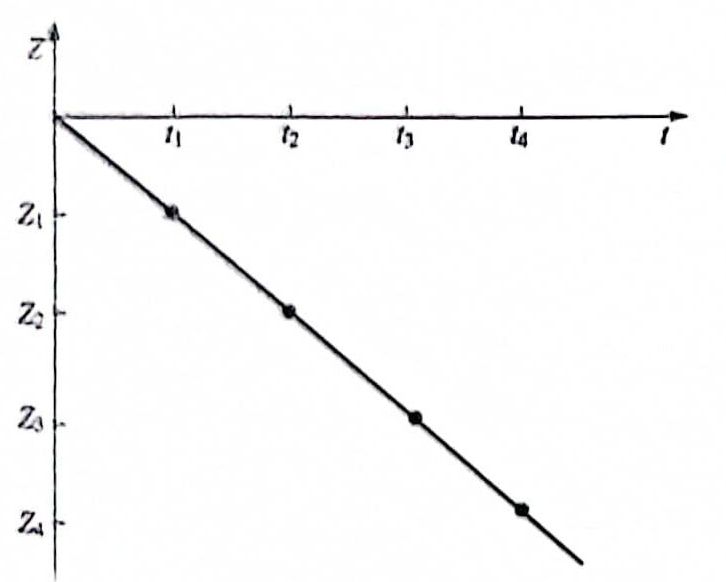
将式（6.34）改写为：

两边取对数得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.35） |

其中：

式（6.35）表明，与时间呈线性关系，如图6-19所示。

  
图6-19 -图

故由-图可求时间常数为:

## 6.5.3 频域校正法

系统动态特性频域校正法的过程如图6-20所示。

  
图6-20 系统动态特性频域校正法的过程

与数字滤波一样，这种方法也必须已知原系统的传递函数。否则，需要事先通过实验测定表征动态特性的特征参数，从而得出原系统的传递函数和频率特性，进而用软件实现频域校正。

频域校正步骤如下：

1. 采样

对输入信号的输出响应信号进行采样，得时间序列，，1，2，，。信号记录长度，为采样间隔，为采样频率。采样频率必须满足采样定理：

式中：—输入信号的最高频率。

2. 频谱分析

对采样信号进行频谱分析，即进行快速傅里叶变换（FFT），得出它的频谱，，1，，，其基波频率。

3. 做复数除法运算

已知系统频率特性为：

式中：—系统的输出信号的频谱；

—系统输入信号的频谱。

由于计算机是离散时间系统，只能得到离散的谱线，即：

式中：—谱线序号，，1，，。

故系统频率特性的离散时间表达式为：

将与做复数除法，可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.36） |

式中：—系统被测输入信号频谱。

4．进行傅里叶反变换

对频谱进行傅里叶反变换（IFFT）即可得原函数的离散时间序列，，1，2，，。这个原函数正是要测量的系统的输入信号的真值。这就意味着：若不施行频域校正，传感器系统输出的响应信号就会发生畸变，用畸变了的代表被测的输入信号，当然会存在误差。频域校正是把畸变的经过处理找到被测输入信号的频谱，进而获得了被测的输入信号的真值，于是便可以消除测量系统的误差。

# §6.6 增益的自适应功能

对智能传感器系统增益的设置需要综合考虑多个因素。这些因素包括系统自身的数据容量、被测量的范围、系统的精度、信噪比、灵敏度和分辨率等。增益过小可能导致数据信息容量浪费，信噪比降低，测量误差增大，无法满足测量要求。相反，增益过大可能导致系统内的数据信息容量不足，从而损失信息。因此，增益设置需要仔细权衡各种因素，根据具体情况进行折中确定，没有通用的规则。接下来，将通过一个例子来说明增益选择的基本规则。

**【例6-1】**考虑一个增益可控放大器跟随一个8位A/D转换器组成的子系统。由A/D转换器量化噪声产生的相对误差不得大于0.5％，试确定量程切换的判据。

解： 已知位A/D转换器的量化值为:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.37） |

式中：—A/D转换器满刻度输出时对应电压值；

—转换器的位数。

尽管输入的是从连续变化的模拟量，但是A/D转换器的输出只能将 的电压值用个离散值来表示。如果某一输入电压在与之间，则：

（1）当时，A/D转换器输出为；

（2）当时，A/D转换器输出为。

因此，在A/D转换过程产生的量化误差可以看作随机变量—噪声。由于采取四舍五入形式，量化误差在之内。在最坏的情况下，有：

则最大量化误差为：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.38） |

根据题意要求，由A/D转换器量化噪声产生的相对误差不得大于0.5％，则有：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.39） |

则输入电压：。

上述表明：输入电压的最小值不得小于100bit。也就是说，当输入电压经A/D转换后的数字量少于100bit时，必须指令前级放大器自动切换至高一档的增益。如果允许输入电压最大值，那么8位A/D转换器的输出将达到，这样会不可避免地损失信息，因为大于的值，也只能输出，所以应将上限切换电压设置得小于， 例如如：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6.40） |

这样，当时，系统自动切换量程将前级放大器的增益换小一挡。

综上所述，可得到量程切换的判据为：时，换小量程，增大增益；时，换大量程，减小增益。

由于增益自适应控制的情况千变万化，没有一个统一的规则，因此应当根据实际情况进行分析处理。但是，通过上述例子可以清楚地看出，增益自适应控制的出发点是固定增益电路出现了难以避免的不足，而增益自适应控制的优点也正是弥补了这个不足。需要强调的是：增益自适应控制是随着微控制器、大规模集成电路技术的发展应运而生的，这是实现增益自适应控制的硬件平台。

# §6.7 自诊断

科技的发展催生了各种航天器，如火箭和导弹等。这些航天器的控制系统中广泛使用了各种传感器，用于实时监测其运行状态。当这些传感器在使用过程中出现故障时，无论是硬故障（传感器损坏）还是软故障（传感器性能变差），都可能对整个系统的运行产生不利影响。因此，对于任何传感器故障，都需要及时进行检测和隔离，这项工作的重要性正在日益被认识到。

目前，传感器故障诊断主要采用三种方法：硬件冗余方法、解析冗余方法和人工神经网络方法。每种方法都有其优点和缺点。接下来，将简要介绍硬件冗余方法和解析冗余方法的优缺点。

## 6.7.1 硬件冗余方法

硬件冗余方法是最早采用的诊断方法，其核心思想是为容易失效的传感器设置备份，并通过表决器进行管理。换句话说，硬件由两个或更多完全相同的设备组成，这些设备测量的是相同的参数。通过比较冗余设备的输出，可以验证系统输出的一致性。

通常，双重冗余配置可以判断是否存在传感器故障，但无法分离故障；而三重冗余系统即可以判断故障的存在，还可以进行故障分离。硬件冗余方法的优点在于不需要被控对象的数学模型，并且具有很强的鲁棒性；然而，其缺点在于设备复杂，体积和质量较大，且成本较高。对于一些重要的系统，如火箭和航天飞机，硬件冗余备份方法是可行的。然而，在大多数情况下，特别是当需要大量参数时，硬件冗余方法的不足就变得明显。

## 6.7.2 解析冗余方法

解析冗余方法的核心是构建包含传感器的被测对象的动态模型。然后，通过比较模型输出和实际输出的差异，来判断传感器是否发生故障。其原理框图如图6-21所示。

  
图6-21 解析冗余方法原理框图

由图6-21可以看出，解析冗余方法的主要步骤如下：

（1）模型设计

根据被控对象的特性、传感器的类型、故障类型和系统要求等，建立相应的被控对象的数学模型。

（2）设计与传感器故障相关的残差

在相同控制量的作用下，传感器输出信号和模型预测值之差，即为残差。如果传感器没有故障，那么残差应该为零。然而，如果传感器出现故障，残差就不再为零，因为它包含了传感器的故障信号。

（3）进行统计检验和逻辑分析，以诊断某些类型的传感器故障

根据数学模型产生方式的不同，解析冗余方法可以分为多种不同的类型，如观测器组方法、故障检测滤波器方法、一致性空间方法、状态和参数辨识方法和基于知识的方法等。总的来说，解析冗余方法进行传感器故障诊断，能够定位故障来源，确定哪个传感器发生了故障，估计故障大小和严重程度。同时，该方法不需要增加硬件设备，因此成本较低。

然而，这种方法也有其局限性。当系统参数存在不确定性、随时间变化或系统中存在未知的输入干扰时，都会对诊断结果产生负面影响。这就要求方法具备鲁棒性，即传感器故障诊断和检验算法必须能够抑制系统参数时变、未知输入干扰等干扰因素的影响。此外，该方法还需要获得被控对象的精确数学模型。因此，当系统存在高度非线性，或者难以得到系统的精确数学模型时，这种方法就无能为力了。需要注意的是，该方法仅能用于传感器的故障诊断，而无法恢复故障传感器的信号。

要了解解析冗余方法的具体步骤，可以参阅容错控制方面的书籍。

# §6.8 曲线拟合的Python实现

在Python中，通常使用numpy库来实现曲线拟合。在前面的章节中，已经介绍过numpy库的安装与引用，这一节，将重点介绍两个用于曲线拟合的函数：polyfit()和polyval()。

在这两种函数中，polyfit()函数的功能是根据给定的数据点找到一个合适的多项式函数，以便尽可能地拟合数据点的分布。其函数原型为：

numpy.polyfit(x, y, deg, rcond=None, full=False, w=None, cov=False)

输入参数为：

x：采样点的横坐标数组；

y：采样点的纵坐标数组；

deg：多项式的阶数。阶数越高，拟合精度越高，但会增加计算时间，甚至可能导致过拟合，因此需要权衡选择。

rcond：相对条件数，用于控制奇异值分解；

full：是否返回诊断信息；

w：y坐标的权重数组；

cov：是否返回估计值及其协方差矩阵

输出参数为：

p：一维数组，包含多项式的系数，按降幂排列；

V：只有当 full == False 和 cov == True 时才存在。这是多项式系数估计值的协方差矩阵，其中矩阵的对角线是每个系数的方差估计值。

另一个函数，polyval()，其功能是根据给定的多项式系数计算多项式在x中的点处的值。其函数原型为：

numpy.polyval(p, x)

输入参数为：

p：向量，表示多项式的系数，按降幂排序；

x：一个数，表示多项式的自变量。

输出参数为：

y: 函数返回多项式在x处的值。

实例代码如下：

# 引用第三方库

|  |
| --- |
| **import numpy as np**  # 定义输入样本数据  **x = np.array([0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0])**  **y = np.array([0.0, 0.8, 0.9, 0.1, -0.8, -1.0])**  # 使用numpy的polyfit函数进行数据拟合，得到多项式的系数  **coefficients = np.polyfit(x, y, 3)**  # 使用numpy的poly1d函数生成多项式方程  **polynomial\_equation = np.poly1d(coefficients)**  # 使用numpy的polyval函数进行预测  **y1= np.polyval(coefficients, 3.5)** |

# 输出显示多项式方程和预测结果

**print("多项式方程为：", polynomial\_equation)**

**print("预测结果为：", y1)**

执行上述代码，我们可以得到以下结果：

|  |
| --- |
| 多项式方程为:  预测结果为： -0.3473 |

# 习题6

1．什么是非线性校正技术？它的目的是什么？

2．什么是查表法？它的基本原理是什么？

3．什么是曲线拟合法？它的优点是什么？。

4．请简述自校零与自校准功能的核心思想。

5．以压力传感器为例，简要说明两基准法的基本步骤。

6．形成干扰的三个因素是什么？它们之间有什么关系？

7. 请简述抑制噪声干扰的措施。

8. 什么是多传感器数据融合，它包括哪两大方面？

9. 什么是交叉敏感现象？它会给传感器系统带来什么问题？

10. 什么是频域校正法？它的基本步骤有哪些？

11. 什么是解析冗余方法？它的主要步骤有哪些？