

第 2 章 传感器及工程应用概述

2.1 传感器概述

传感器是人类为了从繁重的体力劳动中解救出来,实现工农业生产及国防科技自动化所必须的一类器件或装置。它不但能实现对特定参数的精确测量,还能把测量结果转换成便于远距离传输和处理的信号,是自动监测控制系统中不可缺少的核心部件。

2.1.1 传感器的定义

我国国家标准(GB7665—1987)中指出:凡是能够把规定的被测量(如物理量、化学量、生物量等)按一定规律转换成某种可用信息输出的器件或装置,统称为传感器。但在不同的学科领域它又有不同的称谓,比如有些学科把传感器称作检测器、转换器、敏感元件等等。

由于电量具有便于转换、处理、传输、显示和应用等特点,通常需要把传感器的输出转换成一个电量输出。因此,人们又把传感器狭义地定义为:能把非电量信息转换成电量信息输出的器件或装置。它在我国国民经济和国防建设的各个领域正发挥着巨大的作用。毫不夸张地说,传感器是一切自动化的基石,没有传感器及其技术就不可能实现自动化,也就没有现代科学技术的迅速发展。

2.1.2 传感器的组成

按照传感器的狭义定义,传感器的一般组成如图 2-1 所示,它主要由敏感元件、测量转换电路及壳体构成。

其中,敏感元件是指传感器中能直接感受到被测信号的部分;测量转换电路是指传感器中能够将敏感元件感受到的被测信号转换成电量的部分;壳体是指能够把敏感元件和测量转换电路组合固定在一起的部分。但有些敏感元件本身输出就是电量,不需要测量转换电路;而有些传感器工作时还需要外加辅助电源,故这两部分都用虚线框表示。

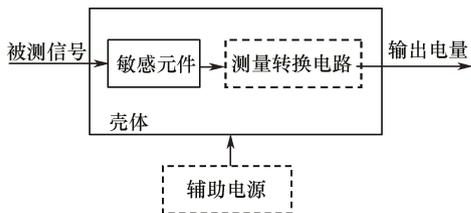


图 2-1 传感器组成方框图

2.1.3 传感器的分类

传感器是一门知识密集型学科,它用途广泛,原理各异,形式多样,其分类方法很多,但目前常见的分类方法有下列两种。

一种是按传感器的工作原理分类,可分为应变式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器等。

另一种是按被测参数分类,可分为温度传感器、压力传感器、流量传感器、位移传感器、速度传感器等。

生产厂家和用户就是按第二种分类分法进行设计制造和使用的,为了使初学者了解工程应用中各种各样的被测参数,学会合理选择和使用传感器,提高实际应用能力,本书也是按后一种分类方法来叙述传感器及工程应用的。

2.2 传感器的特性

传感器的特性主要是指它的输出与输入之间的关系。这种关系一般分为两种：当被测信号不随时间变化(或随时间变化很缓慢)时，这一关系称作静态特性；当被测信号随时间变化较快时，这一关系就称作动态特性。不同传感器有着不同的内部结构参数，它们的静态特性和动态特性也表现出不同的特点，对测量结果的影响也就各不相同。在工农业生产过程和科学实验中，要对各种各样的参数进行精确测量和控制，就必须了解传感器的静态特性和动态特性。下面就传感器的静态特性和动态特性作以简单介绍。

2.2.1 传感器的静态特性

1. 传感器的静态数学模型

传感器的静态数学模型是描述被测信号不随时间变化时，传感器输出与输入之间的数学表达式。若用 x 表示输入， y 表示输出，则传感器的输入/输出关系通常为一条曲线，一般可用下面的 n 次函数式来表示

$$y=f(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\cdots+a_nx^n \quad (2-1)$$

式中， a_0 为输入量 x 为零时的输出量； a_1 为线性项系数； a_2, \dots, a_n 为非线性项系数。

式(2-1)称作传感器的静态数学模型，各项系数的大小决定了静态特性曲线的具体形状。

2. 传感器的静态特性指标

传感器的静态特性指标是指被测信号不随时间变化时，传感器的输出与输入之间关系曲线的特征。传感器的静态特性指标比较多，常用的指标主要有线性度、灵敏度、迟滞和重复性等。

1) 线性度

传感器的线性度是指传感器实测静态特性曲线的线性程度。通常人们期望传感器的输出与输入之间呈线性关系，但实际的传感器输出与输入关系大多为非线性。如果传感器非线性项的方次不高，在输入量变化范围不大的条件下，为了标定和使用的方便，可用它的拟合直线来近似地代表实测静态特性曲线，如图 2-2 所示，这种方法称作传感器非线性特性的线性化。为了反映线性化直线与实测静态特性曲线的偏离程度，引入了线性度的概念。线性度也称作非线性误差。

一般地，传感器的线性度是指实测静态特性曲线与拟合直线之间的最大偏差值 ΔY_{\max} 与满量程输出值 ΔY_{FS} 的百分比，用 γ_L 来表示，即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{\Delta Y_{FS}} \times 100\% \quad (2-2)$$

拟合直线的选取方法很多，图 2-3 给出了同一个传感器的静态特性曲线，在选取端点连线拟合、过零旋转拟合及最小二乘拟合三种不同的拟合直线时，求出的最大偏差值 ΔY_{\max} ，显然它们是不一样的。由于非线性误差的大小是以某一拟合直线为基准直线计算出来的，所以说即使是同一个传感器，拟合方法不同，其线性度也不一样。因此，在提到线性度或非线性误差时，必须指明其拟合方法。为了准确描述线性度，以端点连线拟合直线计算出来的线性度称作端基线性度；以过零旋转拟合直线计算出来的线性度称作过零旋转线性度；以最小二乘拟合直线计算出来

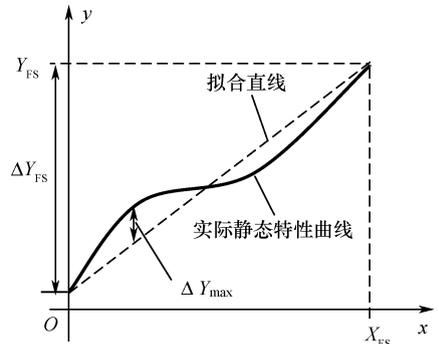


图 2-2 线性度示意图

的线性度称作最小二乘线性度。在上述几种线性度中,最小二乘线性度最小,过零旋转线性度次之,端点连线线性度最大。但最小二乘线性度的计算也最麻烦。

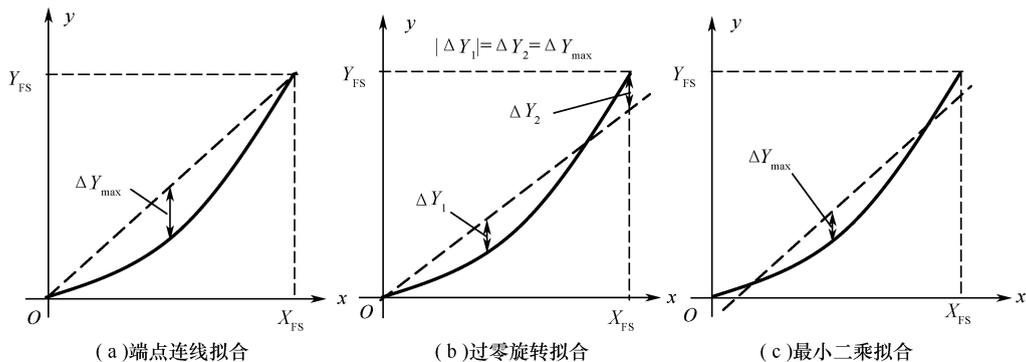


图 2-3 几种不同拟合方法线性度的比较

2) 灵敏度

传感器的灵敏度是指传感器在静态下输出变化量 Δy 与引起该变化量的输入微小变化量 Δx 之比。用 S 表示,即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2-3)$$

很显然,灵敏度 S 越大,表示传感器对输入信号的反应越灵敏。

由图 2-4 可知,线性传感器的灵敏度 S 就是其静态特性的斜率,即 $S=k$ 是一个常数;而非线性传感器的灵敏度 S 是一个变量,它与输入量 x 的大小有关,可写成 $S = dy/dx = f'(x)$,实际上它就是静态特性曲线上某点切线的斜率。

例如,某位移线性传感器在位移变化 1mm 时,输出电压变化量为 300mV,则其灵敏度为 300mV/mm。

3) 迟滞性

迟滞性表征了传感器输入量在正向行程(由小到大)和反向行程(由大到小)变化期间,输出/输入特性曲线不重合的程度。即在外界条件不变的情况下,对应于同一大小的信号,传感器在正、反行程时输出信号的数值不相等。这种现象称为迟滞性,如图 2-5 所示。

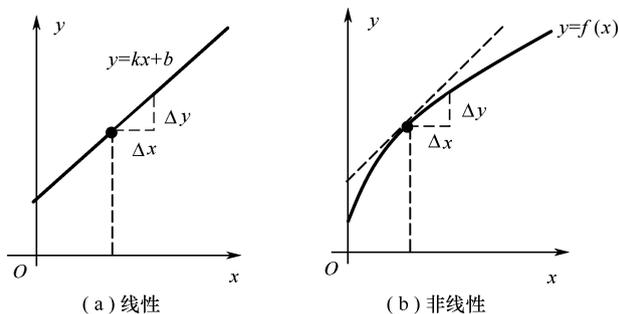


图 2-4 传感器的灵敏度

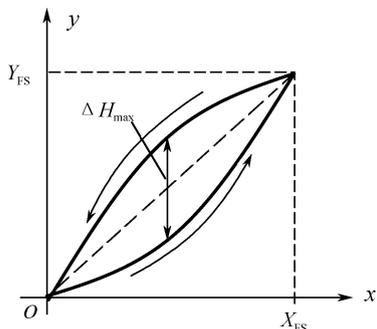


图 2-5 迟滞性

迟滞现象的产生,主要是由于传感器内有吸收能量的元件(如弹性元件等)存在着间隙、内摩擦和阻尼效应等,使得加载时进入这些元件的全部能量,在卸载时不能完全恢复所致。迟滞的大小一般由实验确定,其值定义为:在满量程范围内,正、反行程间的最大误差 ΔH_{\max} 与满量程输出值 Y_{FS} 的百分比,用 γ_H 表示,即

$$\gamma_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2-4)$$

4) 重复性

重复性表示传感器在同一工作条件下,输入量按同一方向作全量程连续多次变动时,所得特性曲线不一致的程度,如图 2-6 所示。

重复性误差属于随机误差,常用 3 倍的标准差 3σ 与满量程输出值 Y_{FS} 的百分比表示;也可用正向行程多次重复测量时不重复误差的最大值 $\Delta R_{1\max}$ 和反向行程多次重复测量时不重复误差的最大值 $\Delta R_{2\max}$ 中较大者与满量程输出值 Y_{FS} 的百分比来表示,即

$$\gamma_R = \pm \frac{3\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2-5)$$

或

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2-6)$$

式中, γ_R 为重复性误差; $\Delta R_{\max} = \max[\Delta R_{1\max}, \Delta R_{2\max}]$ 。

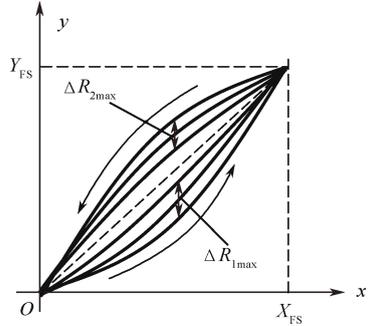


图 2-6 重复性

2.2.2 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指当输入量随时间变化时,它的输出量跟随输入量变化的情况。即使静态性能很好的传感器,当被测物理量随时间变化时,如果传感器的输出量不能很好地跟随输入量的变化而变化,也有可能产生较大的误差。因此,在研究、生产和应用传感器时,要特别注意其动态特性。动态特性好的传感器,其输出量能够快速的跟随被测量的变化。否则,输出与输入之间就有差异,这个差异就称作传感器的动态误差。由于传感器的输入/输出情况与它的结构形式有关,要了解传感器的动态特性,必须知道传感器的动态数学模型,下面先来讨论传感器的动态数学模型。

1. 传感器的动态数学模型

传感器的动态数学模型是描述传感器输出与输入之间随时间变化的数学表达式。虽然传感器的种类和结构多种多样,但经过理论推导发现,它们一般都可以用下面的一个 n 阶线性常微分方程来描述

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (2-7)$$

式中, $x = x(t)$ 为输入信号; $y = y(t)$ 为输出信号; $a_0 \sim a_n, b_0 \sim b_m$ 为由传感器结构特性决定的常数。

通常把式(2-7)称作传感器的动态数学模型。假设传感器的初始状态为零,对式(2-7)两边进行拉氏变换,得

$$[a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0] Y(s) = [b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0] X(s) \quad (2-8)$$

令

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2-9)$$

则 $G(s)$ 称作传感器的传递函数,它是复变量 s 的函数,表示输出拉氏变换与输入拉氏变换之比。是传感器动态数学模型的另一种表达形式。只要对式(2-7)或式(2-9)求解,即可得到传感器的动态性能指标。下面介绍几种常见传感器的数学模型。

1) 零阶传感器

在传感器的动态数学模型中,若除了 a_0 和 b_0 外,其他系数均为零,则式(2-7)变成

$$y=kx \quad (2-10)$$

传递函数式(2-9)变成

$$G(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{b_0}{a_0}=k \quad (2-11)$$

式中, $k=b_0/a_0$,为传感器的静态灵敏度或比例系数。

具有该数学模型的传感器称作零阶传感器。因为该传感器不管输入 $x=x(t)$ 如何变化,其输出总是与输入成比例关系,所以人们又把它称作比例传感器。

2) 一阶传感器

如果传感器动态数学模型除了 a_0 、 a_1 和 b_0 外,其他系数均为零,则式(2-7)变成

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = kx \quad (2-12)$$

传递函数式(2-9)变成

$$G(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{k}{\tau s + 1} \quad (2-13)$$

式中, $\tau=a_1/a_0$,为传感器的时间常数; $k=b_0/a_0$,为传感器的静态灵敏度或放大系数。

具有该数学模型的传感器称作一阶传感器。特别是当 $k=1$ 时称作标准一阶传感器,又称作惯性传感器。

3) 二阶传感器

如果传感器动态数学模型除了 a_0 、 a_1 、 a_2 和 b_0 外,其他系数均为零,则式(2-7)变成

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dy}{dt} + y = kx \quad (2-14)$$

传递函数式(2-9)变成

$$G(s)=\frac{k}{s^2/\omega_n^2 + 2\zeta s/\omega_n + 1} \quad (2-15)$$

式中, $k=b_0/a_0$,为传感器的静态灵敏度或放大系数; $\zeta=a_1/(2\sqrt{a_0 a_2})$,为传感器的阻尼比; $\omega_n=\sqrt{a_0/a_2}$,为传感器的固有频率。

具有该数学模型的传感器称作二阶传感器。特别是当 $k=1$ 时称作标准二阶传感器,且当 $\zeta \geq 1$ 时称作二阶惯性传感器,当 $0 < \zeta < 1$ 时称作二阶振荡传感器。显然,传感器数学模型的阶次越高,传感器的动态特性越复杂。常见的传感器一般为一阶或二阶。对于三阶以上的传感器,可以把它分解成几个标准一阶、二阶传感器和比例传感器的连乘积。因此,了解并掌握标准一阶、二阶传感器系统的动态特性是关键。为了叙述方便,本教材在没有特别说明的情况下,通常说的一阶、二阶传感器都是指标准一阶、二阶传感器。

2. 传感器的时域特性

一般来说,传感器的输入信号是各种各样的。为了评价传感器性能的优劣,在研究动态特性时通常选择某些典型的输入信号进行分析。一个常用的典型输入信号是单位阶跃信号,它的图像如图 2-7(a)所示,即

$$x(t)=\begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases} \quad (2-16)$$

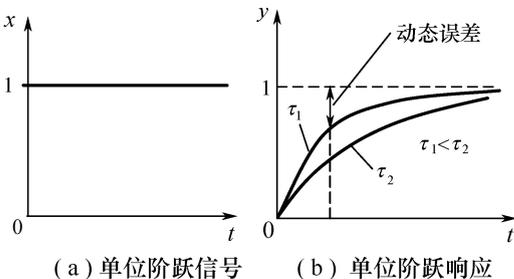


图 2-7 一阶传感器的单位阶跃响应

传感器对单位阶跃输入信号的输出称作单位阶跃响应,它通常是一个随时间变化的函数。实践证明,跟踪和复现单位阶跃输入信号是对传感器的较高要求,故通常以单位阶跃响应来衡量传感器的性能优劣,并用它来定义时域特性指标。

1) 标准一阶传感器的单位阶跃响应

在一阶传感器的微分方程式(2-12)中,令 $k=1$,则得标准一阶传感器的微分方程式为

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = x \quad (2-17)$$

若输入 $x(t)$ 为单位阶跃信号,假定输入为零时,传感器的输出为零,则求解式(2-17)得标准一阶传感器的单位阶跃响应为

$$y(t) = 1 - e^{-t/\tau} (t \geq 0) \quad (2-18)$$

画出式(2-18)的图像曲线如图 2-7(b)所示。由图可见,输出 $y(t)$ 不能立即复现输入信号,而是从零开始,随着时间的推移,无限接近于输入值 1。人们把它的这个特性称作惯性;把这种传感器又称作惯性传感器;把输入信号与输出信号的差值称作动态误差。显然,时间越长,动态误差就越小。经计算可知,当 $t=\tau$ 时, $y=0.632$; 当 $t=2\tau$ 时, $y=0.865$; 当 $t=3\tau$ 时, $y=0.950$; 当 $t=4\tau$ 时, $y=0.982$, 此时输出与输入已相差无几。由此可知,系统时间常数 τ 越小,响应就越快,故时间常数 τ 是决定响应速度快慢的重要参数。

2) 标准二阶传感器的单位阶跃响应

在二阶传感器的微分方程式(2-14)中,令 $k=1$,则得标准二阶传感器的微分方程式为

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dy}{dt} + y = x \quad (2-19)$$

假定输入为零时,传感器的输出也为零,当输入 $x(t)$ 为单位阶跃信号时,对 ζ 分 4 种情况讨论。

① 当 $0 < \zeta < 1$ 时,求解微分方程式(2-19)得

$$y(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left[\omega_d t + \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right] \quad (t \geq 0) \quad (2-20)$$

式中, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$, 为阻尼振荡角频率。

由式(2-20)可知,在 $0 < \zeta < 1$ 的情形下,当单位阶跃信号输入时,传感器的输出从零开始,以振荡衰减的形式迅速地无限接近于输入信号 1。且阻尼比 ζ 越大,阻尼振荡角频率 ω_d 就越小,衰减也就越快。人们把这种振荡衰减状态称作欠阻尼状态。把这种传感器又称作二阶振荡传感器。

② 当 $\zeta=0$ 时,求解微分方程式(2-19)得

$$y(t) = 1 - \cos\omega_n t (t \geq 0) \quad (2-21)$$

显然,它是一个以 1 为中心的等幅振荡,其振荡角频率就是传感器的固有振荡角频率 ω_n 。人们把这种等幅振荡状态称作无阻尼状态,也称作自激振荡状态。由于它的输出不能反映输入信号,故不能作为传感器使用。使用中应该避免此种情况发生。

③ 当 $\zeta=1$ 时,求解微分方程式(2-19)得

$$y(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t) (t \geq 0) \quad (2-22)$$

式(2-22)表明,该传感器输出从零开始,以无超调也无振荡的方式无限接近于输入信号 1。人们把这种状态称作临界阻尼状态。

④ 当 $\zeta > 1$ 时,求解微分方程式(2-19)得

$$y(t) = 1 - \frac{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} + \frac{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{-(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} (t \geq 0) \quad (2-23)$$

式(2-23)表明,该传感器等同于两个一阶传感器串联。此时输出也不产生振荡,但比 $\zeta=1$ 时接近输入信号 1 的速度要慢,并且 ζ 越大,接近 1 的速度就越慢。人们把这种情况称作过阻尼状态。

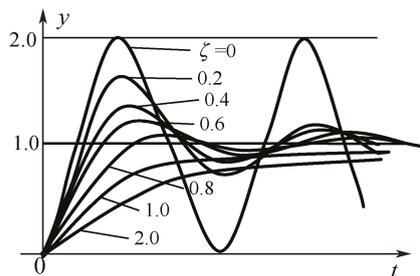


图 2-8 二阶系统的单位阶跃响应曲线

由于 $\zeta \geq 1$ 的传感器输出特性都具有惯性特性,故又把它称作二阶惯性传感器。

对应不同 ζ 值的二阶系统单位阶跃响应曲线簇如图 2-8 所示。由于横坐标是无量纲变量 $\omega_n t$, 所以曲线族只与 ζ 有关。由图 2-8 可见, ζ 值过大或过小都不易快速地到达稳态值 1.0; 理论分析可知, 当 $\zeta=0.707$ 时, 传感器接近稳态值的平稳性和快速性最理想, 故称 $\zeta=0.707$ 时为最佳阻尼比。为此传感器通常设计成欠阻尼系统, ζ 取值在 0.6~0.8 之间比较适宜。

3) 传感器的时域特性指标

传感器的时域特性指标是在初始条件为零时, 用它的单位阶跃响应曲线 $y(t)$ 上的某些特征点来定义的(见图 2-9)。表征时域特性的主要指标有以下几个。

① 上升时间 t_r : 是指传感器的单位阶跃响应从稳态值的 10% 上升到 90% 所需的时间。

② 调节时间 t_s : 是指在单位阶跃响应稳态值附近取 $\pm 5\%$ 的误差带, 响应曲线进入并不再穿出该误差带所需的最短时间, 调节时间也称作过渡时间。

③ 峰值时间 t_p : 是指单位阶跃响应曲线超过其稳态值后到达第一个峰值所需的时间。

④ 超调量 σ_p : 是指单位阶跃响应超过稳态值的最大偏差值与稳态值的百分比, 即

$$\sigma_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (2-24)$$

总之, 上升时间 t_r 和调节时间 t_s 是表征传感器响应速度性能的参数; 超调量 σ_p 是表征传感器稳定性性能的参数。通过这几个方面就能完整地描述它的动态特性。

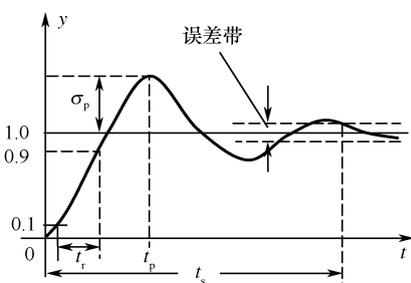


图 2-9 传感器的时域特性指标

3. 传感器的频域特性

传感器的另一个典型输入信号是正弦输入。它对不同频率的正弦输入信号的输出称作频率响应。实验证明, 当给传感器输入正弦信号 $x = \sin \omega t$ 时, 经过一定时间后, 传感器的稳定输出量 y 与输入量 x 是同频率的正弦信号, 但输出与输入的幅值不等, 相位也不一样, 并且输出的幅值和相位都是频率 ω 的函数, 即 $y = A(\omega) \sin(\omega t + \varphi(\omega))$ (见图 2-10)。其中, 幅值 $A(\omega)$ 随 ω 变化的特性称作传感器的幅频特性, 相位差 $\varphi(\omega)$ 随 ω 变化的特性称作传感器的相频特性。快速跟踪和复现正弦输入信号是对传感器的基本要求, 所以也可以用频率响应来衡量传感器的性能优劣, 并用它来定义频域特性指标。

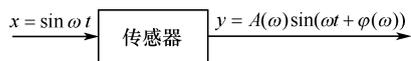


图 2-10 传感器在正弦输入时的输出情况

设传感器的传递函数为 $G(s)$, 将 $s = j\omega$ 代入它得复数 $G(j\omega)$ 。理论推导可以证明: 传感器的幅频特性 $A(\omega)$ 就是复数 $G(j\omega)$ 的模, 即 $A(\omega) = |G(j\omega)|$; 相频特性 $\varphi(\omega)$ 就是复数 $G(j\omega)$ 的辐角, 即 $\varphi(\omega) = \angle G(j\omega)$ 。由此可知, 只要知道了传递函数, 就可以非常方便地写出它的幅频特性和相频特性。

1) 标准一阶传感器的频率响应

在一阶传感器的传递函数式(2-13)中,令 $k=1$,则得标准一阶传感器的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2-25)$$

将 $s=j\omega$ 代入上式得标准一阶传感器的频率特性表达式为

$$G(j\omega) = \frac{1}{j\omega\tau + 1} \quad (2-26)$$

其幅频特性和相频特性的表达式分别为

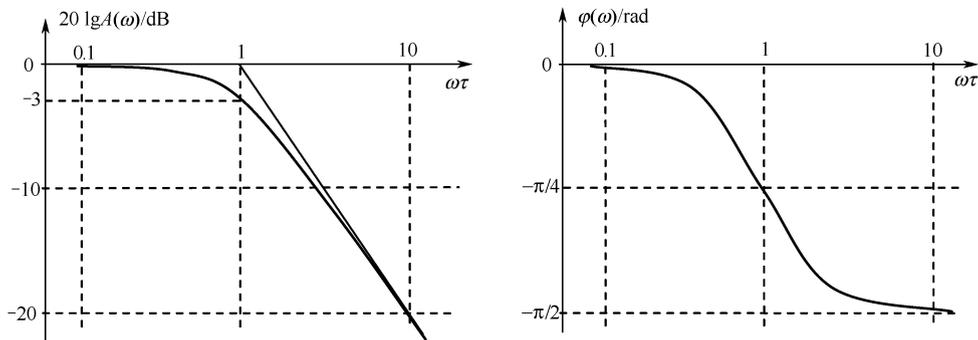
$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \quad (2-27)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \quad (2-28)$$

为了分析频率特性的方便,常用对数幅频特性 $20\lg A(\omega)$ 代替幅频特性 $A(\omega)$,它的单位是分贝(dB)。标准一阶传感器的对数幅频特性表达式为

$$20\lg A(\omega) = 20\lg \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} = -20\lg \sqrt{1+(\omega\tau)^2} \text{ (dB)} \quad (2-29)$$

若横坐标 ω 取对数刻度,纵坐标取等分刻度,则标准一阶传感器的对数幅频、相频特性曲线如图 2-11 所示。



(a) 对数幅频特性

(b) 相频特性

图 2-11 标准一阶传感器的对数频率特性曲线

从式(2-28)、式(2-29)和图 2-11 可以看出,当输入信号的角频率 $\omega < 0.4/\tau$ 时, $20\lg A(\omega) \approx 0$, $\varphi(\omega) \approx 0$,它表明传感器的输出 $y(t)$ 与输入 $x(t)$ 近似相等,输出 $y(t)$ 基本能反映输入 $x(t)$ 的变化规律。故在一阶传感器设计和使用时,必须使 $1/\tau > 2.5\omega$,通常取 $1/\tau = (3 \sim 5)\omega$ 。

2) 标准二阶传感器的频率响应

在二阶传感器的传递函数式(2-15)中,令 $k=1$,则得标准二阶传感器的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{s^2/\omega_n^2 + 2\zeta s/\omega_n + 1} \quad (2-30)$$

将 $s=j\omega$ 代入上式得标准二阶传感器的频率特性表达式为

$$G(j\omega) = \frac{1}{1 - (\omega/\omega_n)^2 + j2\zeta(\omega/\omega_n)} \quad (2-31)$$

其幅频特性和相频特性的表达式分别为

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + 4\zeta^2(\omega/\omega_n)^2}} \quad (2-32)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \left[\frac{2\zeta(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \right] \quad (2-33)$$

对数幅频特性表达式为

$$20\lg A(\omega) = 20\lg \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + 4\zeta^2 (\omega/\omega_n)^2}}$$

$$= -20\lg \sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + 4\zeta^2 (\omega/\omega_n)^2} \quad (2-34)$$

给 ζ 不同值, 作出标准二阶传感器的对数幅频特性和相频特性曲线簇如图 2-12 所示。

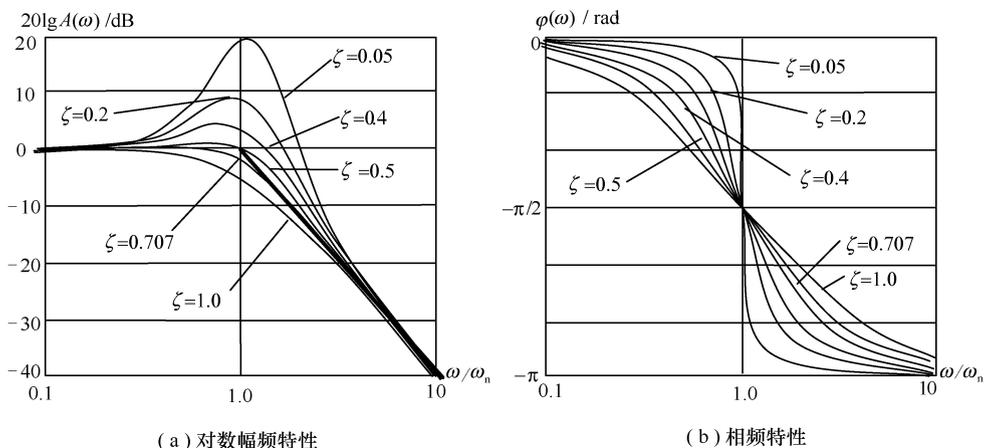


图 2-12 标准二阶传感器的对数频率特性曲线

由图 2-12 可见, 传感器频率响应特性的好坏, 主要取决于传感器的固有振荡频率 ω_n 和阻尼比 ζ 。当 $0.6 < \zeta < 0.8$, 且输入信号的角频率 $\omega < 0.4\omega_n$ 时, 传感器的输出 $y(t)$ 基本上再现输入 $x(t)$ 的波形, 这正是我们所需要的传感器性能。通过上面的分析可知: 为了使传感器能精确地再现被测信号的波形, 在传感器的设计和使用时, 通常取阻尼比 $\zeta = 0.6 \sim 0.8$, $\omega_n = (3 \sim 5)\omega$ 。

实践表明, 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 ω_{\max} 可以用其基频 ω_1 的 3~5 倍代替。这样, 选用和设计传感器时, 保证传感器固有频率 ω_n 不低于被测信号基频 ω_1 的 10 倍即可。

3) 传感器的频域特性指标

传感器的频域特性指标是在初始条件为零时, 用它的幅频特性曲线和相频特性曲线上的某些特征点来定义的(见图 2-13)。

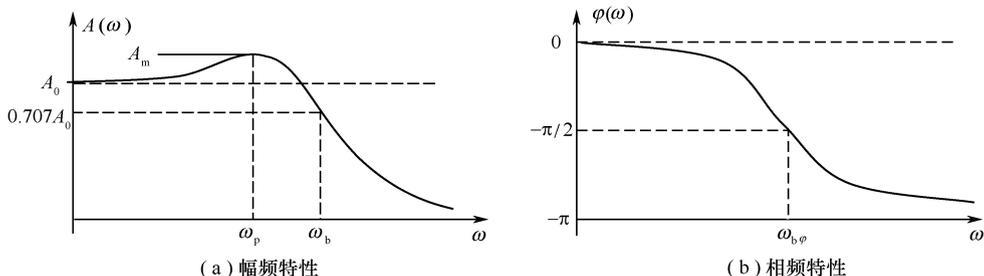


图 2-13 传感器的频域特性指标

表征频域特性的主要指标有:

① 零频幅值 A_0 ——是指传感器的幅频特性在输入信号频率 $\omega = 0$ 时的值, 即 $A_0 = A(0)$ 。对于标准的一阶、二阶传感器来说, 则有 $A_0 = 1$ 。

② 峰值 A_m ——是指幅频特性的最大值, 即 $A_m = A(\omega_p)$ 。峰值 A_m 大, 表明传感器对某个频

率的正弦输入信号反应强烈,传感器的稳定性差,有共振的倾向。在设计和选用时,一般要求 $A_m < 1.5A_0$ 比较适宜。对于标准一阶传感器来说, $A_m = 0$; 对于标准二阶传感器来说, 则 $A_m = 1/(2\zeta \sqrt{1-\zeta^2}) (0 < \zeta \leq 0.707)$ 。

③ 频带 ω_b ——是指幅频特性的数值衰减到 $0.707A_0$ 时所对应的角频率。 ω_b 越大, 则 $A(\omega)$ 曲线由 A_0 到 $0.707A_0$ 所占的频率区间 ($0 \sim \omega_b$) 就越宽。这表明传感器复现快速变化的信号能力越强, 失真也越小。对于标准一阶传感器来说, $\omega_b = 1/\tau$; 对于标准二阶传感器来说, 当 $\zeta = 0.707$ 时, $\omega_b = \omega_n$ 。

④ 相频宽 $\omega_{b\varphi}$ ——是指相频特性 $\varphi(\omega)$ 等于 $-\pi/2$ 时对应的角频率。相频特性 $\varphi(\omega)$ 为负值, 表明系统的稳态输出在相位上落后于输入。对于标准一阶传感器来说, $\omega_{b\varphi} = \infty$; 对于标准二阶传感器来说, $\omega_{b\varphi} = \omega_n$ 。

⑤ 幅值误差——是指传感器的幅频特性曲线 $A(\omega)$ 与 A_0 之差, 通常用百分数表示。

⑥ 相位误差——是指传感器的输出相位与输入相位之差。

2.3 传感器的标定

所谓传感器的标定是指在传感器的工作环境下, 利用一定等级的仪器及设备产生已知的标准非电量(如标准压力、加速度、位移等)作为传感器的输入量, 通过实验测得其输出量; 然后绘制出它的输入/输出特性曲线(称为标定曲线); 再通过对曲线的分析处理, 得到传感器特性指标的过程。传感器的标定主要分为静态特性标定和动态特性标定两种。

2.3.1 传感器的静态特性标定

传感器的静态特性标定主要是检验、测试传感器的静态特性指标, 如灵敏度、非线性、迟滞性、重复性等。静态特性的标定过程必须在标准条件下进行。所谓标准条件, 是指没有加速度、振动、冲击(除非这些量本身就是被测物理量), 环境温度一般为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, 相对湿度不大于 85% , 大气压力为 $(101.3 \pm 8)\text{kPa}$ 时的情况。传感器静态标定的步骤如下:

① 将待标定的传感器与标定所需仪器及设备连接好;

② 将传感器量程(测量范围)分为若干等份, 从小到大逐步加载, 记录待标定传感器在各输入点的输出稳定值, 直到满量程为止;

③ 按上述过程, 对传感器进行多次往复循环测试, 将得到输入/输出测试数据组, 用表格列出或画成曲线;

④ 对数据进行必要的处理, 根据处理结果就可以得到传感器的灵敏度、线性度、重复性和迟滞等静态特性指标。

2.3.2 传感器的动态特性标定

传感器的动态特性标定主要是检验、测试传感器的动态响应特性, 即传感器的时域特性和频域特性。也就是根据实测的时域响应曲线和频域响应曲线确定其时域指标和频域指标。由上面分析可知, 对于一阶、二阶传感器, 可以根据其时域指标和频域指标进一步确定出动态参数。

1. 传感器的时域标定步骤

① 将待标定的传感器与标定所需仪器及设备连接好。

② 用标准仪器产生一个单位阶跃信号, 加到传感器输入端, 用双踪示波器或记录仪记录待标定传感器的输出波形。

③ 对传感器输出波形进行分析处理,得到它的真实输出波形。

④ 根据真实输出波形就可以得到传感器的各个时域指标,如超调量 σ_p 、上升时间 t_r 、过渡时间 t_s 等,从而计算出一阶传感器的时间常数 τ 、二阶传感器的固有频率 ω_n 和阻尼比 ζ 。

2. 传感器的频域标定步骤

① 将待标定的传感器与标定所需仪器及设备连接好。

② 用标准仪器产生一个振幅为 1、初始相位为 0 和角频率 ω 可调的正弦信号,加到传感器输入端,用双踪示波器或记录仪记录待标定传感器的输出波形。

③ 保持输入信号的振幅和初相位不变,逐次改变输入信号的角频率 ω ,测出传感器一系列输出波形的振幅 $A(\omega)$ 和相位 $\varphi(\omega)$ 。

④ 根据上面的测量数据,画出传感器的幅频特性曲线和相频特性曲线图,就可以得到传感器的各个频域指标,如峰值 A_m 、频带 ω_b 、相频宽 ω_{bp} 等,从而计算出一阶传感器的时间常数 τ 、二阶传感器的固有频率 ω_n 和阻尼比 ζ 。

2.4 传感器及工程应用的发展方向

传感器是自动监测控制系统的感觉器官,如果把计算机比作自动监测控制系统的“大脑”,而传感器就是它的“五官”。自动化的程度要求愈高,系统对传感器的依赖性就愈大,传感器对系统的性能起着决定性的作用。没有传感器,就不可能实现自动化。因此,许多国家都将传感器列为尖端技术。如在美国、日本等发达国家,传感器倍受重视,常有人说:“如果征服了传感器,就等于征服了科学技术”。

2.4.1 传感器的发展方向

1. 发现新现象

利用物理现象、化学反应和生物效应是各种传感器工作的基本原理。所以说发现新现象、新效应是发展传感器的重要工作,是研制新型传感器的重要基础,其意义极为深远。如日本夏普公司利用超导技术研制成功高温超导磁传感器,是传感器技术的重大突破,其灵敏度比霍尔器件高,仅次于超导量子干涉器件,而其制造工艺远比超导量子干涉器件简单,它可用于磁成像技术,具有广泛的推广价值。

2. 开发新材料

传感器材料是传感器技术的重要基础。如半导体氧化物可以制造各种气体传感器,而陶瓷传感器工作温度远高于半导体,光导纤维的应用是传感器材料的重大突破,用它研制的传感器与传统的相比有突出的特点。有机材料做传感器材料的研究,也引起国内外学者的极大兴趣。

3. 研发集成传感器

集成传感器具有体积小、重量轻、价格便宜、便于安装和使用等优点,备受人们青睐。特别是有的一块芯片可以集成几种传感器,实现几个参数的综合测量。如日本丰田研究所开发的同时检测 Na^+ 、 K^+ 、 H^+ 等多离子传感器。传感器芯片面积为 $(2.5 \times 0.5) \text{mm}^2$,仅用一滴血液即可同时快速检测出其中 Na^+ 、 K^+ 、 H^+ 的浓度,对医院临床非常适用与方便。

4. 研发数字传感器

智能化传感器是一种带微处理器的传感器,它兼有检测、判断和信息处理功能。其典型产品,如美国霍尼韦尔公司的 ST-3000 智能传感器,其芯片尺寸为 $(3 \times 4 \times 2) \text{mm}^3$,采用半导体工艺,在同一芯片上制作 CPU、EPROM 和静压、差压、温度等三种敏感元件。

5. 研发仿生传感器

仿生传感器也是目前研究发展的方向,它是模仿人类感觉器官的传感器,即视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉传感器等。目前只有视觉和触觉传感器解决得比较好。

6. 提高传感器的精度和稳定性

提高现有传感器的精度和稳定性,也是提高自动监测控制系统精度的一种方法,这一直是传感器技术的研究方向。

2.4.2 传感器工程应用的发展方向

1. 智能化

随着微电子技术、计算机技术、传感器技术的不断发展,将多种技术结合在一起,构成新一代智能化的自动监测控制系统,是今后一段时期传感器工程应用发展的一个方向。如智能机器人、无人驾驶战斗机及航天器等。

2. 数字化

将数字式传感器和单片机嵌入式系统组合在一起,构成各种各样的自动测量辨识系统也是今后传感器应用的发展方向。如美国的 GPS 定位系统、我国研发的北斗定位系统、ATM 自动柜员机等。

3. 网络化

将各种各样的传感器与 Internet 有机地结合在一起,就可以在更大的范围内实现物联,实现远程遥测和遥控,这就是目前正在兴起的物联网。

2.5 传感器工程应用系统典型结构

在工农业生产过程中,为了实现生产的自动化,就需要对各种非电参数(如压力、温度、流量、物位等)进行监测,这就要用到传感器。把传感器与其他装置有机地结合在一起,组成一个系统,就可实现对非电量参数的监测与控制。为了实现监测和控制系统中各种设备间的互连互通,方便更换,国际电工委员会(IEC)推荐各种设备间通信都采用标准电信号。并规定标准电流信号为 4~20mA,标准电压信号为 1~5V。但一般来说,传感器的输出信号大多数为非标准电信号,通常需要把它转换成标准电信号后再和其他设备连接。这个把非标准信号转换成标准电信号的器件就称作变送器(或变送器模块)。这样,无论是传感器、仪表还是计算机,只要有同样的接口电路,就可以非常方便地互连成一个系统。目前我国执行的是国际电工委员会(IEC)推荐的国际标准。

传感器工程应用系统的典型结构主要有两种,一种是测量显示系统,另一种是监测控制系统。

2.5.1 测量显示系统的结构

测量显示系统是指对被测对象的特征量进行测量、传输、处理及显示的系统。测量显示系统可分为开环测量显示系统和闭环测量显示系统两种。

1. 开环测量显示系统

开环测量显示系统的结构如图 2-14 所示。它的全部信息走向只沿着一个方向进行,其中 $x(t)$ 为被测信号,也称作输入量, $y(t)$ 为输出信号,也称作输出量。

在这个系统里,变送器的作用是将传感器输出的微弱信号转换成便于传输、处理和使用的标



图 2-14 开环测量显示系统框图

准电信号。信号处理模块是将变送器输出的信号进行处理和变换,以便用于显示和记录。显示装置是将被测信号变换成人的感官能接受的形式,以达到监视、控制或分析的目的。测量结果可以采用模拟显示,也可采用数字显示或图形显示,还可以由记录装置进行自动记录或由打印机将数据表格打印出来。

开环测量显示系统结构简单,但各个环节特性的变化都会引起测量误差,测量精度相对较低。

2. 闭环测量显示系统

闭环测量显示系统结构如图 2-15 所示。它有两个通道,信号从左向右的通道为正向通道,信号从右向左的通道为反馈通道,其中 $x_1(t)$ 为传感器的输出量, $\Delta x(t)$ 为变送器的输入量, $y(t)$ 既是正向通道的输出量又是反馈通道的输入量, $x_f(t)$ 为反馈通道的输出量,且

$$\Delta x(t) = x_1(t) - x_f(t) \quad (2-35)$$

显然,这时整个系统的输入/输出关系不仅与正向通道有关,也与反馈通道有关。可以证明,这时整个系统的输出 $y(t)$ 与输入 $x(t)$ 的关系主要由反馈环节的特性决定,而变送器、信号处理环节的特性变化对测量结果几乎没有影响。故闭环测量显示系统的测量误差比开环测量显示系统的测量误差要小得多,但它比开环测量显示系统结构要复杂。

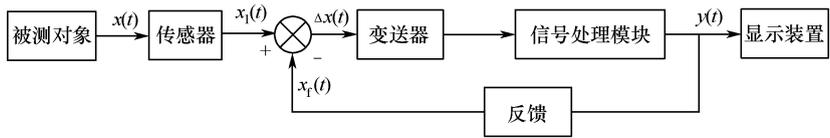


图 2-15 闭环测量显示系统框图

综上所述,开环测量系统与闭环测量系统各有其优缺点。在构建测量系统时,应根据实际测量精度要求,本着既节约、经济又满足测量精度要求的原则合理选择。如有必要,还可以将开环和闭环巧妙地结合起来使用。

2.5.2 监测控制系统的结构

用传感器构建自动监测控制系统是传感器的主要任务,也是现代工农业生产和国防科技向自动化要效益的必然需求。目前监测控制系统可分为开环监测控制系统和闭环监测控制系统两种。

1. 开环监测控制系统

开环监测控制系统的结构如图 2-16 所示。它的特点是被测对象和受控对象不是同一个,并且全部信息走向只沿着一个方向进行。

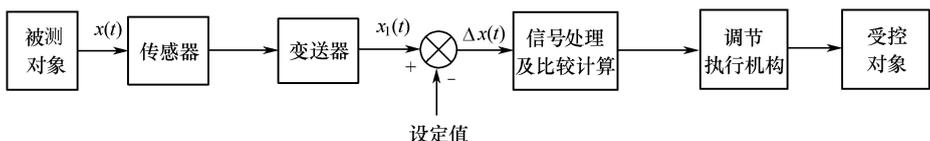


图 2-16 开环监测控制系统框图

该系统中调节执行机构的作用是根据信号处理及比较计算的结果,对受控对象执行必要的控制动作,而其他环节的作用与测量显示系统类同。它结构简单,但控制精度不高,广泛应用于开关控制系统,如自动门控制系统、光控开关控制系统等。

2. 闭环监测控制系统

闭环监测控制系统的结构如图 2-17 所示。它的特点是被测对象和受控对象是同一个,被测参数和受控参数也是同一个,并且信息走向形成了一个封闭的环路,故称作闭环。而控制是根据被控量 $x(t)$ 的测量转换值 $y(t)$ 与设定值的偏差 $\Delta x(t)$ 大小进行调节。

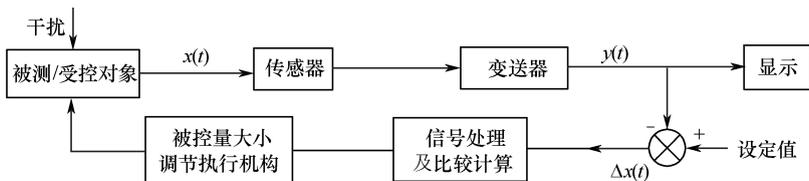


图 2-17 闭环监测控制系统框图

显然,被测/受控对象无论是受到干扰,还是结构参数变化,只要使得偏差 $\Delta x(t)$ 不为零,系统就自动纠正。这种系统提供了实现高精度控制的可能,在工程中得到了广泛应用,如恒温控制系统、恒速控制系统等。

思考题及习题 2

2-1 什么叫传感器? 它由哪几部分组成? 它们的作用及相互关系如何?

2-2 什么是传感器的静态特性? 它有哪些性能指标? 分别说明这些性能指标的含义。

2-3 什么是传感器的动态特性? 它有哪些分析方法? 它们各有哪些性能指标?

2-4 设被测介质温度为 $x(t)$, 温度传感器显示温度为 $y(t)$, 当把温度传感器放入被测介质后, 温度传感器显示温度 $y(t)$ 与被测介质温度 $x(t)$ 有下列关系

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$$

式中, τ 为温度传感器的时间常数; t 为时间。

试问当 $\tau=120\text{s}$ 时, 把该温度传感器从 25°C 拿到 300°C 介质中, 经过 350s 后的动态误差是多少?

2-5 已知某传感器属于一阶环节, 现用于测量 100Hz 的正弦信号, 如幅值误差限制在 $\pm 5\%$ 以内, 时间常数 τ 应取多少? 若用该传感器测量 50Hz 的正弦信号, 问此时的幅值误差和相位差各为多少?

2-6 简述传感器应用的发展方向。

2-7 什么叫传感器的标定? 为什么要标定?

2-8 何谓传感器的静态标定和动态标定? 试述传感器的静态标定过程。

2-9 简述传感器工程应用系统的典型结构。