

高等学校教材

传感器

杨福宝 主编

测试技术



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



014004477

TP212.06  
06

高等学校教材

# 传感器与测试技术

杨福宝 主编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



北航

C1691633

TP212.06  
06

777300410

## 图书在版编目(CIP)数据

传感器与测试技术/杨福宝主编. — 武汉:武汉大学出版社,2013.5  
高等学校教材  
ISBN 978-7-307-10777-9

I. 传… II. 杨… III. 传感器—测试技术—高等学校—教材 IV. TP212.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 100452 号

责任编辑:余 梦      责任校对:希 文      装帧设计:吴 极

---

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: whu\_publish@163.com 网址: www.stmpress.cn)

印刷:湖北睿智印务有限公司

开本:787×1092 1/16      印张:12.75      字数:302千字

版次:2013年5月第1版      2013年5月第1次印刷

ISBN 978-7-307-10777-9      定价:32.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

# 前 言

传感器是获取自然和生产领域中信息的主要媒介,几乎每一个现代化项目,都离不开各种各样的传感器。要准确、真实地获取这些信息,就必须合理地选择和应用各种传感器以及与之相应的测试技术。21世纪是信息化时代,传感器及测试技术在发展经济、推动社会进步方面的重要性更为突出。

本书是编者在多年科研及教学经验的基础上编写而成的。本书在介绍传感器原理的基础上,着重介绍测试调理电路以及保证测试精度所要注意的问题和相应的解决方法。本书突出应用性,强化实践能力的培养,将传感器和测试方面的知识有机地联系起来,使学生在掌握传感器原理的基础上,进一步应用这方面的知识去解决工程测试中的具体问题。

全书共分6章,主要内容包括:测试技术基础、传感器原理、常用非电参数测试、微弱信号检测、测试系统干扰抑制、测试信号调理。

本书内容全面实用,适用面广,可作为自动化类、测控技术与仪器等专业本科以及电子信息类研究生相关课程的教材,也可作为从事测试工作的专业工程技术人员的参考书。

由于时间仓促,编者水平有限,书中不足之处在所难免,欢迎读者提出各种批评指正意见。

编 者

2013年2月



# 目 录

1 测试技术基础 .....	(1)
1.1 测试系统的组成 .....	(1)
1.2 线性时不变系统及其主要性质 .....	(2)
1.3 检测系统的静态特性与性能指标 .....	(3)
1.4 检测系统的动态特性与性能指标 .....	(5)
1.4.1 系统的微分方程 .....	(5)
1.4.2 传递函数 .....	(5)
1.4.3 频率响应函数 .....	(6)
1.4.4 实现不失真测量的条件 .....	(9)
1.5 测量误差的合成 .....	(10)
1.5.1 测量误差的基本概念 .....	(10)
1.5.2 随机误差的处理 .....	(13)
1.5.3 系统误差的处理 .....	(18)
1.5.4 测量粗大误差的存在判定准则 .....	(23)
1.5.5 测量系统的误差计算方法 .....	(24)
1.5.6 测量系统最佳测量方案的确定 .....	(26)
2 传感器原理 .....	(29)
2.1 电阻式传感器 .....	(29)
2.1.1 金属电阻应变片 .....	(29)
2.1.2 半导体应变片 .....	(31)
2.1.3 应变片的命名规则 .....	(32)
2.1.4 电阻式传感器的测量电路 .....	(32)
2.1.5 电阻式传感器的应用 .....	(35)
2.2 电容式传感器 .....	(35)
2.2.1 基本工作原理和结构 .....	(36)
2.2.2 电容式传感器测量电路 .....	(38)
2.2.3 电容式传感器的应用 .....	(40)
2.3 电感式传感器 .....	(41)
2.3.1 自感式传感器 .....	(41)



2.3.2	互感型变压器式电感传感器	(43)
2.3.3	电感式传感器的应用	(46)
2.4	电涡流式传感器	(47)
2.4.1	高频反射式电涡流传感器	(47)
2.4.2	低频透射式电涡流传感器	(48)
2.4.3	测量电路	(48)
2.4.4	电涡流传感器的应用	(49)
2.5	压电式传感器	(50)
2.5.1	压电效应	(51)
2.5.2	压电式传感器的等效电路和测量电路	(52)
2.5.3	压电式力传感器的合理使用	(53)
2.5.4	压电式传感器的应用	(55)
2.6	磁电式传感器	(55)
2.6.1	动圈式磁电传感器	(56)
2.6.2	磁阻式磁电传感器	(57)
2.6.3	磁电式传感器的测量电路	(57)
2.7	热电式传感器	(58)
2.7.1	热电偶传感器	(58)
2.7.2	热电阻传感器	(63)
2.8	光电式传感器	(66)
2.8.1	光电效应	(67)
2.8.2	光电导器件	(68)
2.8.3	光生伏特器件	(68)
2.8.4	光电耦合器件	(69)
2.8.5	电荷耦合器件(CCD)	(71)
2.8.6	光电式传感器的其他应用	(72)
2.9	霍尔式传感器	(73)
2.9.1	霍尔元件	(73)
2.9.2	霍尔集成传感器	(77)
2.9.3	霍尔式传感器的应用	(78)
2.10	光纤传感器	(79)
2.10.1	光纤传感器的组成	(79)
2.10.2	光纤传感器的分类	(79)
2.10.3	光纤传感器的工作原理	(80)
2.10.4	光纤传感器的实际应用	(81)
2.11	超声波传感器	(83)
2.11.1	超声检测的物理基础	(83)
2.11.2	超声波传感器的原理与结构	(85)



2.11.3 超声波传感器基本应用电路 .....	(86)
2.12 红外传感器 .....	(88)
2.12.1 红外传感器 .....	(88)
2.12.2 红外传感器的应用 .....	(89)
<b>3 常用非电参数测试</b> .....	(91)
3.1 力、压力和转矩的测量 .....	(91)
3.1.1 力的测量 .....	(91)
3.1.2 压力的测量 .....	(94)
3.1.3 转矩测量 .....	(96)
3.2 位移、物位和厚度的测量 .....	(101)
3.2.1 位移测量 .....	(102)
3.2.2 物位测量 .....	(110)
3.2.3 厚度测量 .....	(112)
3.3 速度、加速度与振动的测量 .....	(112)
3.3.1 速度的测量 .....	(113)
3.3.2 加速度与振动测量 .....	(117)
3.4 转速的测量 .....	(120)
3.4.1 磁电式传感器数字转速仪 .....	(120)
3.4.2 霍尔转速测量装置 .....	(121)
3.5 温度的测量 .....	(122)
3.5.1 温度的概念和测量方法 .....	(122)
3.5.2 接触式温度测量 .....	(123)
3.5.3 非接触式温度测量 .....	(126)
3.6 流量的测量 .....	(129)
3.6.1 流量概述和测量方法 .....	(129)
3.6.2 转速(速度)法测量流量 .....	(130)
3.6.3 差压(力)法测量流量 .....	(132)
3.6.4 频率法测量流量 .....	(132)
3.6.5 时差法测量流量 .....	(134)
<b>4 微弱信号检测</b> .....	(136)
4.1 微弱信号检测的基本概念 .....	(136)
4.1.1 微弱信号检测 .....	(136)
4.1.2 噪声的基本性质 .....	(136)
4.1.3 微弱信号检测方法概述 .....	(142)
4.2 频域的窄带化检测原理 .....	(143)
4.2.1 噪声中微弱信号波形的恢复 .....	(143)



4.2.2	选频检测的局限性与相干检测原理 .....	(146)
4.3	时频的取样平均检测原理——取样积分器 .....	(148)
4.3.1	取样积分器的基本原理 .....	(148)
4.3.2	模拟式取样积分器 .....	(151)
4.3.3	数字多点平均器 .....	(154)
<b>5</b>	<b>测试系统干扰抑制 .....</b>	<b>(156)</b>
5.1	干扰的分类 .....	(156)
5.1.1	外部干扰 .....	(156)
5.1.2	内部干扰 .....	(156)
5.2	干扰的引入 .....	(158)
5.2.1	串模干扰 .....	(158)
5.2.2	共模干扰 .....	(158)
5.3	干扰的抑制方法 .....	(160)
5.3.1	计算机测试系统的接地 .....	(160)
5.3.2	接地的类型 .....	(160)
5.3.3	隔离与耦合 .....	(164)
5.3.4	布线抗干扰措施 .....	(165)
5.3.5	软件抗干扰措施 .....	(166)
<b>6</b>	<b>测试信号调理 .....</b>	<b>(171)</b>
6.1	信号放大电路 .....	(171)
6.1.1	测量放大器 .....	(171)
6.1.2	程控增益放大器 .....	(173)
6.1.3	隔离放大器 .....	(174)
6.2	信号滤波电路 .....	(175)
6.2.1	二阶 RC 有源滤波器 .....	(176)
6.2.2	集成有源滤波器 .....	(178)
6.3	信号转换电路 .....	(181)
6.3.1	采样/保持器(S/H) .....	(181)
6.3.2	模/数与数/模转换器 .....	(182)
6.3.3	电压/频率转换电路 .....	(185)
6.3.4	交流/直流转换电路 .....	(186)
6.4	信号的非线性校正与补偿 .....	(188)
6.4.1	模拟线性化 .....	(188)
6.4.2	数字线性化 .....	(194)
	<b>参考文献 .....</b>	<b>(196)</b>

# 1 测试技术基础

测试或检测技术几乎已应用于所有的行业,它是多学科知识的综合应用,涉及半导体技术、激光技术、光纤技术、声控技术、遥感技术、自动化技术、计算机应用技术以及数理统计、控制论、信息论等近代新技术和新理论。其最终目的就是从小测量对象中获取反映其变化规律的有用信息。

## 1.1 测试系统的组成

广义的测试系统一般由激励装置、测试装置、数据处理与记录装置组成,如图 1.1 所示。

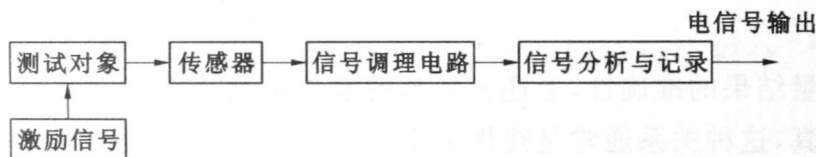


图 1.1 测试系统原理图

### (1) 激励信号

激励信号由激励装置产生,采用激励装置是为了使被测对象处于预定状态下,并将其有关方面的内在联系充分显示出来,以便于有效地进行测量。当测试工作所希望获取的信息并没有直接载于可检测的信号中,就需要激励被测对象,使其既能表示相关信息又便于检测。对于能量控制型传感器中的一些类型,如超声波探伤、激光散斑技术测量应变,就是由外部能源供给激励信号发生器,而激励信号发生器以信号激励被测对象,输入传感器的信号就是被测对象对激励信号的响应,它反映了被测对象的性质或状态。

### (2) 测试对象

测试对象的特性均以信号的形式给出,被测信号一般都是随时间变化的动态量,即使在检测不随时间变化的静态量时,由于混有动态的干扰噪声,通常也按动态量进行检测。由于被测信号描述了被测对象的特征信息,且信号本身的结构对所选用的测试装置有重大影响,因此,应当熟悉和了解各种信号的基本特征和分析方法。

### (3) 传感器

传感器是检测系统的第一个环节,其主要作用是将感知的被测非电量按一定的规律转化为某一种量值输出,通常是电信号。由于传感器种类繁多,因此几乎能检测所有非电量参量。但因传感器输出的电信号种类多、功率小,故一般不能直接将这种电信号传输到后续的信号处理电路或输出元件中去,必须经过信号的调理。



#### (4) 信号调理电路

信号调理电路主要有两方面的作用,一是把来自于传感器的信号进行转换和放大,使其更适合于进一步处理和传输,多数情况下是将各种电信号转换为电压、电流、频率等少数几种便于测量的电信号,输出功率可达到毫瓦级;二是进行信号处理,即对经过信号调理的信号,进行滤波、调制和解调、衰减、运算、数字化处理等。

#### (5) 信号分析与记录

信号调理电路输出的测量结果是对被测信号的真实记录,为了显示其变化过程,可以采用光线示波器、屏幕显示器、打印机等输出装置。此外,还可以用磁记录器来存储被测信号,以便于检测工作完成后反复使用信号。但要从客观记录的信号中找出反映被测对象的本质规律,还必须对信号进行分析(如信号强度分析、信号的频谱分析、信号的相关分析、信号的概率密度谱分析等),从而提取有用信息。信号分析的设备各式各样,有专用的分析仪(如相关分析仪、概率密度分析仪、频谱分析仪、传递函数分析仪等),也有进行综合分析的信号处理机和数字信号处理系统。现代检测系统采用了计算机和网络技术,将调理电路输出的信号直接送到信号分析设备中,进行在线处理,已在工程检测和工业控制中得到广泛的应用。

为了保证测量结果的准确性,上述各环节的输出量与输入量之间应保持一一对应的关系并尽量不失真,这种关系通常是线性关系,而且必须尽可能地减小或消除各种干扰。

## 1.2 线性时不变系统及其主要性质

在信号传输通道中,检测系统是指连接输入、输出并具有特定功能的部分。在工程测试实践中,大多数检测系统属于线性时不变系统。线性时不变系统的分析方法已形成了完整严密的体系,即使是一些非线性系统或时变系统,在限定条件下,也遵循线性时不变的规律。故下面重点讨论线性时不变系统的主要性质。

当系统的输入  $x(t)$  和输出  $y(t)$  之间的关系可用常系数线性微分方程来描述时,则称该系统为线性时不变系统,也称为定常线性系统。即:

$$\begin{aligned} & a_n \frac{dy(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1}y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ & = b_m \frac{d^m(x)t}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1}x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中  $t$ ——时间变量;

$a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1, a_0$ ——常数;

$b_m, b_{m-1}, \cdots, b_1, b_0$ ——常数。

线性时不变系统具有以下主要性质:

#### (1) 叠加性

设  $x(t)$  为输入,  $y(t)$  为输出,若:

$$x_1(t) \rightarrow y_1(t)$$

$$x_2(t) \rightarrow y_2(t)$$

则有：

$$x_1(t) \pm x_2(t) \rightarrow y_1(t) \pm y_2(t) \quad (1.2)$$

满足叠加原理,意味着作用于线性系统的各个输入所产生的输出是互不影响的,所以在分析有多个输入作用的系统输出时,可以分别求出在单个输入的作用下系统的输出,然后再进行叠加。

(2) 比例性(齐次性)

设  $x(t)$  为输入,  $y(t)$  为输出,若  $x(t) \rightarrow y(t)$ ,则对于任何一个常数  $k$ ,有:

$$kx(t) \rightarrow ky(t) \quad (1.3)$$

(3) 微分性

在零初始条件下,系统对原输入微分的响应等于原输出的微分。即  $x(t)$  为输入,  $y(t)$  为输出,若  $x(t) \rightarrow y(t)$ ,则有:

$$\frac{x(t)}{dt} \rightarrow \frac{y(t)}{dt} \quad (1.4)$$

(4) 积分性

在零初始条件下,系统对原输入积分的响应等于原输出的积分。即  $x(t)$  为输入,  $y(t)$  为输出,若  $x(t) \rightarrow y(t)$ ,则有:

$$\int_0^t x(\tau) d\tau \rightarrow \int_0^t y(\tau) d\tau \quad (1.5)$$

(5) 频率保持特性

对于线性定常系统,若输入为某一频率的简谐(正弦或余弦)信号  $x(t) = X_0 \cos \omega t$ ,则系统的稳态输出必定是与输入同频率的简谐信号,即  $y(t) = Y_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$ ,此规律称为频率保持特性。但其幅值和初相位将发生变化。

线性定常系统的这些主要性质,特别是叠加性和频率保持特性,在工程测试中具有重要意义。例如,当检测系统的输入信号是由多个信号叠加而成的复杂信号时,根据叠加性可以把复杂信号的作用看成若干简单信号的单独作用之和,就可以简化问题。又例如,已知线性系统的输入频率,根据频率保持特性,可确定该系统输出信号中只有与输入同频率的成分才可能是该输入信号引起的输出,其他频率成分的输出都是噪声干扰,故可以采用相应的滤波技术,在很强的噪声干扰下,把有用的信息提取出来。

### 1.3 检测系统的静态特性与性能指标

静态检测是指测量时,检测系统的输入、输出信号不随时间变化或变化很缓慢。静态检测时,系统所表现出的响应特性称为静态响应特性。通常用来描述静态响应特性的指标有测量范围、灵敏度、非线性度、回程误差等。一般用标定曲线来评定检测系统的静态特性,理想的线性装置的标定曲线是直线,而实际检测系统的标定曲线并非如此。通常采用静态测量的方法求取输入、输出关系曲线,作为标定曲线。在多数情况下还需要按最小二乘法原理求出标定曲线的拟合直线。其主要技术指标有:



## (1) 测量范围

测量范围指检测系统能正常测量的最小输入量和最大输入量之间的范围。

## (2) 灵敏度

灵敏度指输出的增量与输入的增量之比,即:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.6)$$

如图 1.2 所示,线性系统的灵敏度  $S$  为常数,即输入、输出关系直线的斜率,斜率越大,其灵敏度就越高。非线性系统的灵敏度  $S$  是变量,是输入、输出关系曲线的斜率,输入量不同,灵敏度就不同,通常用拟合直线的斜率表示系统的平均灵敏度。要注意的是,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,测量范围相应就越小。

## (3) 非线性度

如图 1.3 所示,标定曲线与拟合直线的偏离程度就是非线性度。如果在全量程  $A$  输出范围内,标定曲线偏离拟合直线的最大偏差为  $B$ ,则定义非线性度为:

$$\text{非线性度} = \frac{B}{A} \times 100\% \quad (1.7)$$

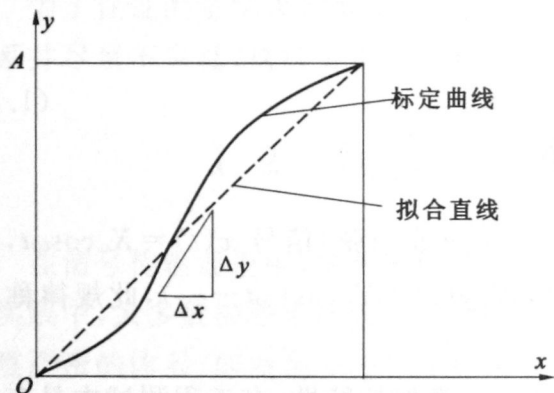


图 1.2 灵敏度

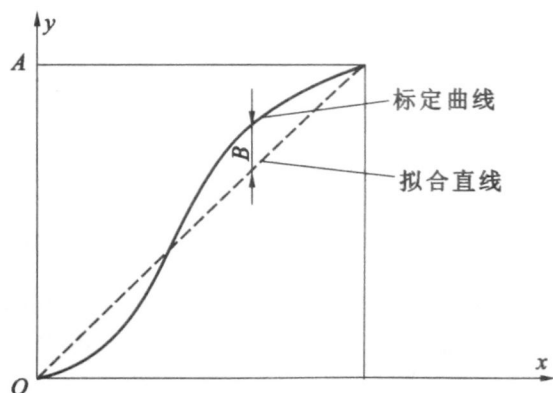


图 1.3 非线性度

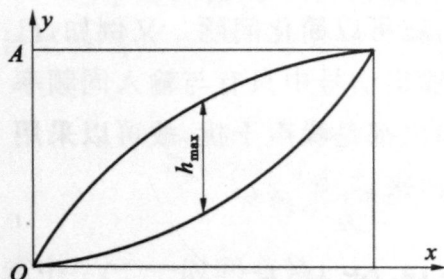


图 1.4 回程误差

## (4) 回程误差

如图 1.4 所示,回程误差也称为滞后或变差。实际测量系统在相同的测量条件下,当输入量由小增大,或由大减小时,同一输入量所得到的两个输出量存在差值,则定义回程误差为:

$$\text{回程误差} = \frac{h_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1.8)$$

## (5) 稳定性和漂移

稳定度通常是相对时间而言的,指检测系统在规定的条件下保持其测量特性恒定不变的能力。

漂移指检测系统随时间的慢变化。在规定条件下,对于一个恒定的输入,在规定时间内输出在标称范围最低值处的变化,称为零点漂移,简称零漂。温度变化引起的漂移称为温漂。

### (6) 精度

精度是精确度的简称,是表示随机误差和系统误差的综合评定指标。

### (7) 可靠性

可靠性是与检测系统无故障工作时间长短有关的一种描述。

### (8) 分辨率

分辨率指能引起输出变化的输入的最小变化量,表示检测系统分辨输入量微小变化的能力。

### (9) 灵敏阈

灵敏阈又称为死区,是用来衡量检测起始点不灵敏的程度。

## 1.4 检测系统的动态特性与性能指标

在进行动态测量时,被测信号随时间迅速变化,输出要受检测系统动态特性的影响,因此需要了解检测系统的动态特性。对于测量动态信号的检测系统,要求检测系统在输入量改变时,其输出量能立即随之不失真地改变。在实际检测过程中,如果检测系统选用不当,输出量不能良好地随输入量的快速变化而变化,会导致较大的测量误差。因此,研究检测系统的动态特性有着十分重要的意义。系统的动态响应特性一般可通过描述系统的微分方程、传递函数、频率响应函数、单位脉冲响应函数等数学模型来进行研究。

### 1.4.1 系统的微分方程

检测系统用于动态测量时,输入  $x(t)$ 、输出  $y(t)$  均随时间变化,其关系用式(1.1)的微分方程描述,即:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned}$$

式中  $t$ ——时间变量;

$a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1, a_0$ ——常数;

$b_m, b_{m-1}, \cdots, b_1, b_0$ ——常数。

此系统称为线性定常系统。

### 1.4.2 传递函数

虽然微分方程中含有描述检测系统的动态响应特性的信息,但使用时不是很方便,所以常采用传递函数来描述系统的动态特性。

#### (1) 传递函数的定义

在零初始条件下,线性定常系统输出量的拉氏变换和输入量的拉氏变换之比称为系统传递函数。在零初始条件下,对式(1.1)两边同时作拉氏变换,则有:



$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0) y(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0) x(s)$$

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (1.9)$$

(2) 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 传递函数可以有量纲,也可以无量纲。

④ 传递函数是复变量  $s$  的有理分式。

(3) 常见测试装置的传递函数

① 一阶系统传递函数。

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{1}{TS+1} \quad (1.10)$$

式中  $T$ ——时间常数,  $s$ 。

**【例 1.1】** 液柱式水银温度计如图 1.5 所示。

设  $x(t)$  为被测环境温度,  $y(t)$  为水银柱高度指示温度值,  $c$  表示比热容,  $R$  表示热阻,由热力学方程有:

$$\frac{x(t) - y(t)}{R} = c \frac{dy(t)}{dt}$$

令  $T=Rc$ , 两边同时作拉氏变换, 整理得:

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{1}{TS+1}$$

② 二阶系统传递函数。

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \quad (1.11)$$

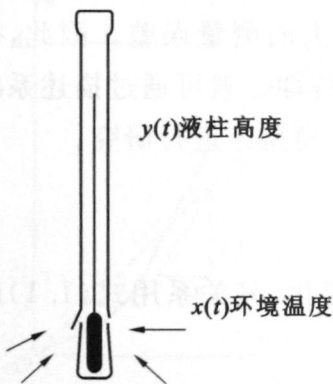


图 1.5 液柱式水银温度计

式中  $K$ ——系统的灵敏度;

$\xi$ ——系统的阻尼比;

$\omega_n$ ——系统的无阻尼固有频率。

### 1.4.3 频率响应函数

根据线性定常系统的同频性,如果输入信号为  $x(t) = X_0 e^{j\omega t}$ , 则输出信号为  $y(t) = Y_0 e^{j(\omega t + \varphi)}$ , 代入式(1.1), 可得:

$$y(t) = H(j\omega) x(t) \quad (1.12)$$

其中:

$$H(j\omega) = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \dots + b_1 j\omega + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots + a_1 j\omega + a_0}$$

$H(j\omega)$  称为测量系统的频率响应函数。即:

$$H(j\omega) = \frac{y(t)}{x(t)} = |H(j\omega)| e^{j\angle H(j\omega)} \quad (1.13)$$

$|H(j\omega)|$  是频率响应函数的模, 为  $\omega$  的函数, 也是动态检测系统的灵敏度, 随着频率变化而变化, 故称为幅频特性, 与静态测量中灵敏度为常数有显著的区别。

$\angle H(j\omega)$  为频率响应函数的相角, 它表示检测系统输出信号相对于输入信号初始相位的迁移量, 也是  $\omega$  的函数, 所以也称为相频特性。

常见系统的频率响应函数有一阶系统的频率响应函数和二阶系统的频率响应函数。

### (1) 一阶系统的频率响应函数

一阶系统的频率响应函数为:

$$H(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega T}$$

其幅频特性与相频特性分别为:

$$A(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega T)^2}} \quad (1.14)$$

$$\phi(\omega) = -\arctan \omega T \quad (1.15)$$

其中负号表示输出信号滞后于输入信号。一阶系统奈氏图、波特图分别如图 1.6、图 1.7 所示; 一阶系统的幅频、相频特性图如图 1.8 所示。

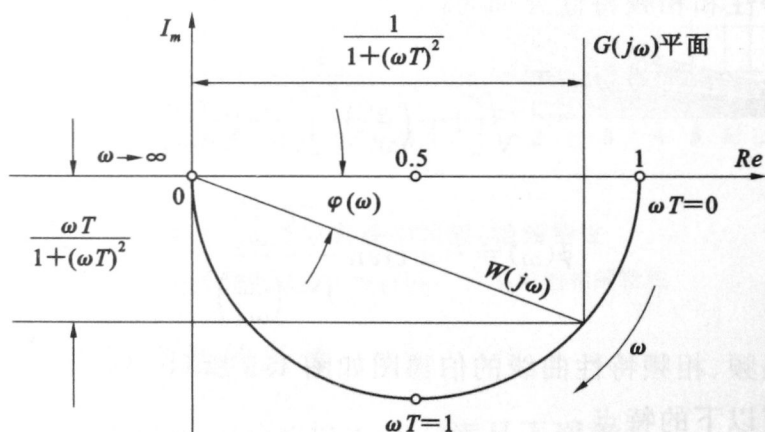


图 1.6 一阶系统的奈氏图

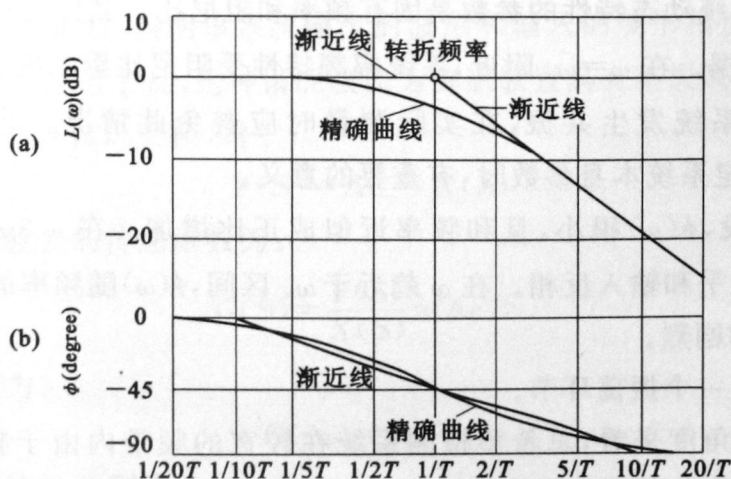


图 1.7 一阶系统的波特图



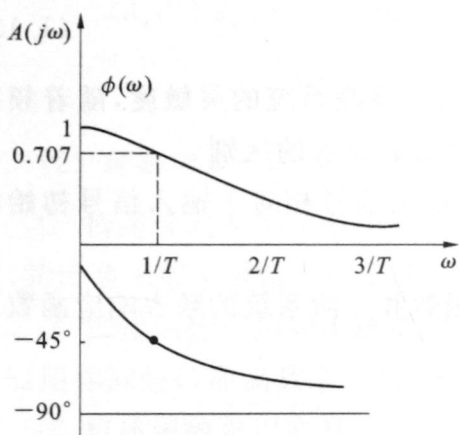


图 1.8 一阶系统的幅频、相频特性

由图 1.8 可见,一阶系统的幅频特性曲线随着  $\omega$  的增加单调减小,衰减很快,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  $1/T$  时,输出与输入的幅值几乎相等,  $A(j\omega)$  接近于 1。当  $\omega T > 1$  时,  $H(j\omega) = 1/j\omega T$ , 系统相当于一个积分器。其中  $A(j\omega)$  几乎与激励频率成反比,相位滞后近  $90^\circ$ 。故一阶系统适合测试缓变或低频的被测量。

② 时间常数  $T$  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) 二阶系统的频率响应函数

由二阶系统的传递函数  $G(S) = \frac{k\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2}$ , 可得二阶系统的频率响应函数为:

$$H(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{(\omega_n^2 - \omega^2) - j2\omega\zeta + \omega_n^2}$$

相应的幅频特性和相频特性分别为:

$$A(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (1.16)$$

$$\phi(\omega) = -\arctan \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (1.17)$$

二阶系统的幅频、相频特性曲线的伯德图如图 1.9 所示。

二阶系统具有以下的特点:

① 当  $\omega \ll \omega_n$  时,  $A(j\omega) \approx 1$ ; 当  $\omega \gg \omega_n$  时,  $A(j\omega) \approx 0$ 。

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  $\omega_n$  的选择应以工作频率范围为依据。在  $\omega = \omega_n$  附近,系统幅频特性受阻尼比影响极大。

当  $\omega \approx \omega_n$  时,系统发生共振,在实际测量时应避免此情况。此时  $A(\omega) = 0.5\xi$ ,  $\phi(\omega) = -90^\circ$ ,在测定系统本身参数时,有重要的意义。

③ 在  $\omega \ll \omega_n$  段,  $\phi(\omega)$  很小,且和频率近似成正比增加。在  $\omega \gg \omega_n$  段,  $\phi(\omega)$  趋近于  $180^\circ$ ,即输出信号几乎和输入反相。在  $\omega$  趋近于  $\omega_n$  区间,  $\phi(\omega)$  随频率的变化而剧烈变化,而且  $\xi$  越小,变化越剧烈。

④ 二阶系统是一个振荡环节。

从检测工作的角度来看,总希望检测系统在较宽的频带内由于频率特性不理想所引起的误差尽可能小。因此,要选择恰当的固有频率和阻尼比的组合,以获得较小的误差。

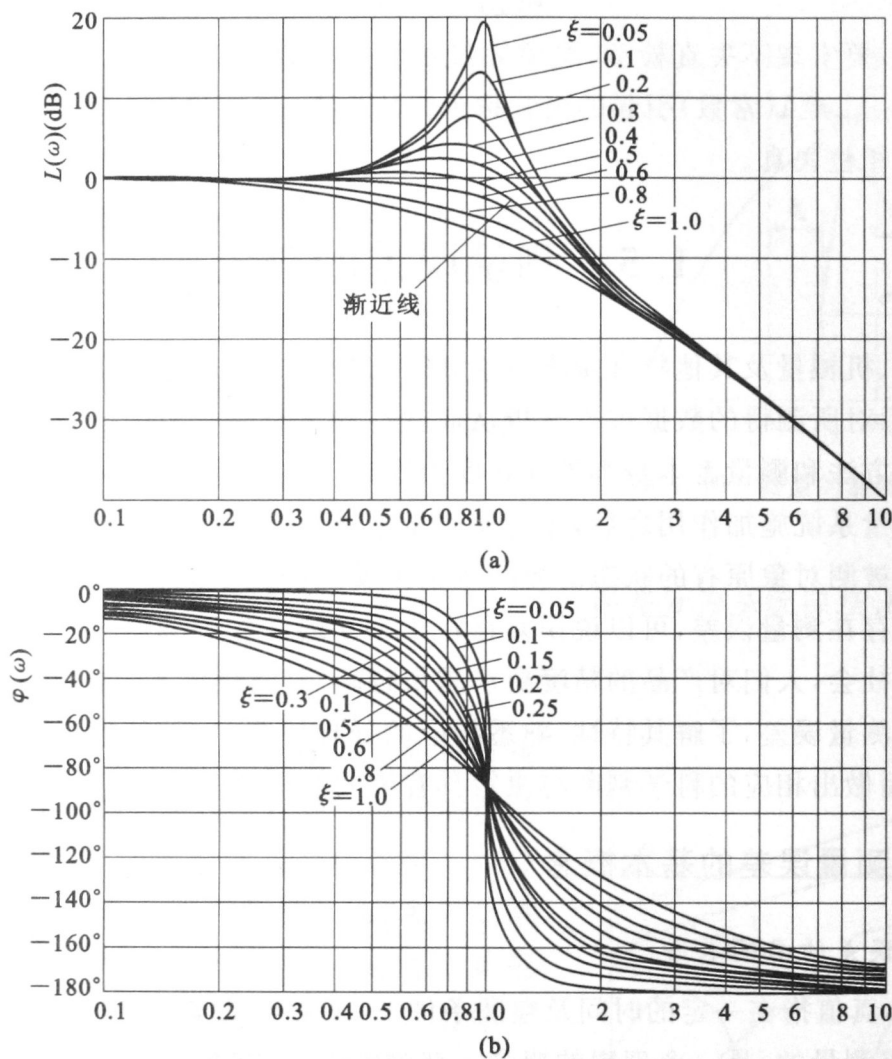


图 1.9 二阶系统的幅频、相频特性

(a) 二阶系统的幅频特性;(b) 二阶系统的相频特性

#### 1.4.4 实现不失真测量的条件

如果一个检测系统,其输出  $y(t)$  和输入  $x(t)$  满足下列关系:

$$y(t) = Ax(t - t_0) \quad (1.18)$$

其中  $A$  和  $t_0$  都是常数,表明该系统输出的波形和输入的波形精度相一致,只是幅值放大了  $A$  倍和时间上延迟了  $t_0$ ,这种情况被认为测试装置具有不失真测量的特性。

对式(1.18)两边取拉氏变换,得:

$$Y(S) = Ae^{-st_0} X(S)$$

故不失真测试装置的传递函数为:

$$G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = Ae^{-st_0} \quad (1.19)$$

频率响应函数为:

$$G(j\omega) = Ae^{-j\omega t_0} \quad (1.20)$$

其幅频与相频特性分别为:

$$A(j\omega) = |G(j\omega)| = A(\text{常数}) \quad (1.21)$$