



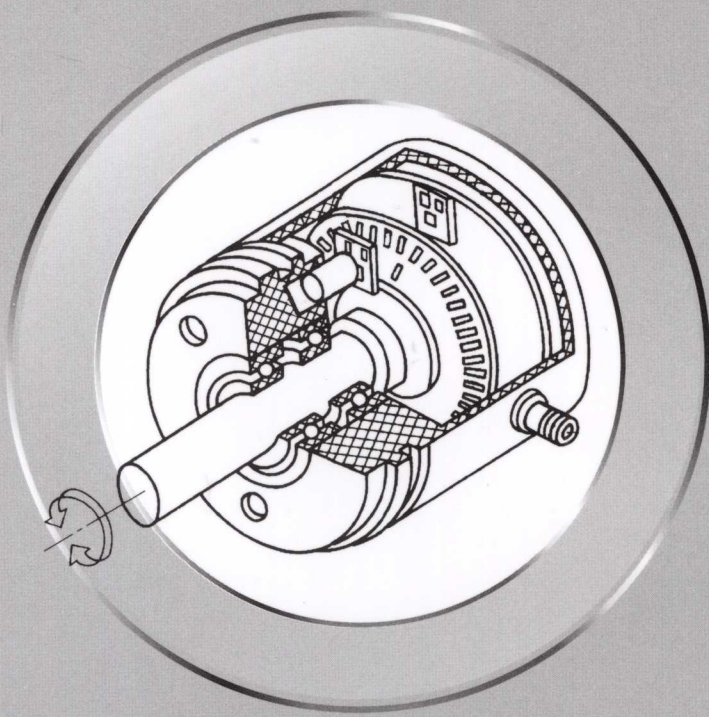
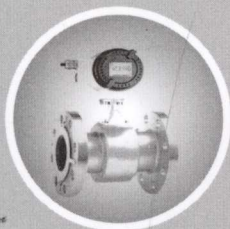
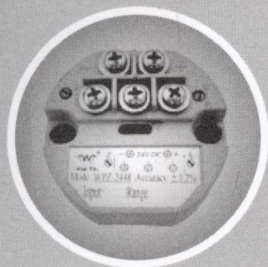
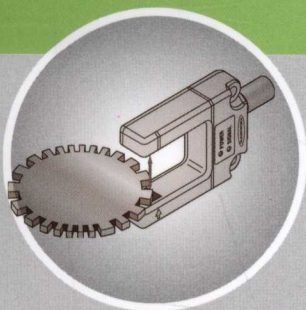
高职高专“十一五”规划教材

自动检测与转换技术

ZIDONG JIANCE YU
ZHUANHUAN JISHU

罗振成 张桂枝 主 编 ●

杨 兴 郭俊杰 副主编 ●



化学工业出版社

配套电子教案



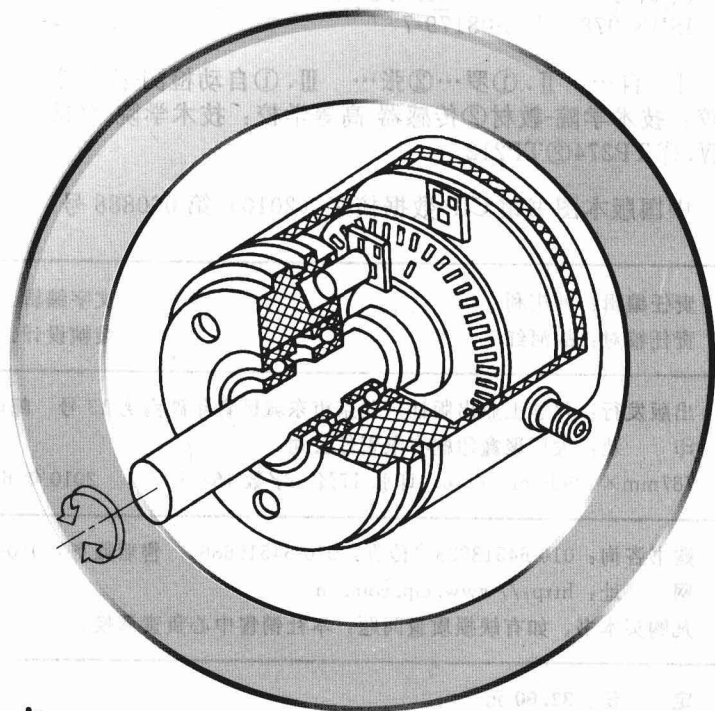
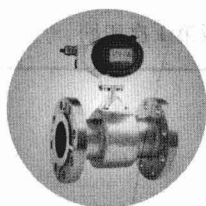
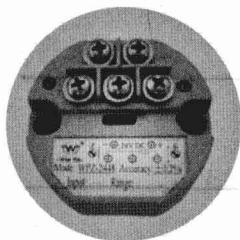
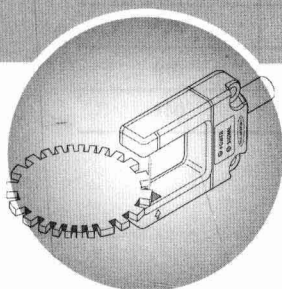
高职高专“十一五”规划教材

自动检测与转换技术

ZIDONG JIANCE YU
ZHUANHUAN JISHU

罗振成 张桂枝 主 编 ●

杨 兴 郭俊杰 副主编 ●



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在介绍了检测技术、信号处理技术、传感器技术基本概念的基础上,对电阻式、电容式、电感式、磁电式、光电式、热电式、数字式传感器和超声波传感器的基本工作原理、使用方法和应用作了全面的阐述,在最后介绍了检测技术中常用的抗干扰措施,并对虚拟仪器技术作了简单介绍。书中理论知识以必需、够用为度,突出传感器的应用和使用方法,理论联系实际,图文并茂,易于自学,方便教学。

本书可作为高职高专院校机电类相关专业的教材,也可作为工程技术人员学习检测技术的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自动检测与转换技术/罗振成,张桂枝主编. —北京:
化学工业出版社,2010.6

高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-122-08179-7

I. 自… II. ①罗…②张… III. ①自动检测-高等学校:技术学院-教材②传感器-高等学校:技术学院-教材
IV. ①TP274②TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第060888号

责任编辑:韩庆利

文字编辑:徐卿华

责任校对:战河红

装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张17 $\frac{3}{4}$ 字数467千字 2010年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 32.00 元

版权所有 违者必究

前 言

自动检测就是在测量和检验过程中完全不需要或仅需要很少的人工干预而自动进行并完成的。实现自动检测可以提高自动化水平和程度,减少人为干扰因素和人为差错,可以提高生产过程或设备的可靠性及运行效率。它是自动化科学技术的一个重要分支学科,是在仪器仪表的使用、研制、生产的基础上发展起来的一门综合性技术。

自动检测的任务主要有两个:一是将被测参数直接测量并显示出来,以告诉人们或其他系统有关被测对象的变化情况,即通常而言的自动检测或自动测试;二是用作自动控制系统的的前端系统,以便根据参数的变化情况做出相应的控制决策,实施自动控制。由此可以看出,自动检测的核心任务之一就是获取信息。获取信息的手段就是传感器技术,它是信息获取的源头和基础,是自动化系统的关键技术之一。

本书的编写是为了满足高职、高专教学改革发展的需要,使教材更加贴近教学的实际要求。本书介绍了检测技术的基本概念、信号分析方法、常用传感器的基本工作原理和应用、虚拟仪器技术和抗干扰技术。为了方便教学,在附录中给出了常用传感器的特点和热电阻、热电偶分度表。本书理论知识以必需、够用为度,突出传感器的应用和使用方法,理论联系实际,图文并茂,易于自学,方便教学。

本书共13章:第1章由杨兴编写;第2章由陶富贵编写;第3~5章由张桂枝编写;第6章由贾玉芬编写;第7、9、10章由罗振成编写;第8章由王广权、王永琴编写;第11章由郭俊杰编写;第12、13章由闫哲峰编写。全书由罗振成、张桂枝主编。编写过程中得到了周芝田、王小平的大力帮助,在此表示感谢。

本书有配套电子教案,可赠送给用本书作为授课教材的院校和老师,如果有需要,可发邮件至 hqlbook@126.com 索取。

由于编者水平有限,书中不妥之处敬请读者指正。

编者

2010年4月

目 录

● 第1章 检测技术的基本概念	1
1.1 检测技术的基本概念	1
1.2 检测系统的特性	3
1.3 测量误差	9
1.4 检测系统的考虑因素	11
1.5 检测技术的地位和作用	12
1.6 检测技术的发展	13
1.7 本课程的学习方法	15
思考与练习	15
● 第2章 传感器与信号处理	17
2.1 传感器概述	17
2.2 信号分类与信号分析方法	20
2.3 常用信号处理电路	22
2.4 传感器的使用	30
思考与练习	32
● 第3章 电阻传感器	33
3.1 电位器式电阻传感器	33
3.2 应变式电阻传感器	37
3.3 固态压阻式电阻传感器	47
3.4 气敏电阻传感器	49
3.5 湿敏电阻传感器	52
思考与练习	55
● 第4章 电感式传感器	57
4.1 自感式电感传感器	57
4.2 差动变压器	61
4.3 电涡流传感器	68
4.4 接近开关	74
思考与练习	78

● 第5章 电容式传感器	80
5.1 电容式传感器的工作原理与类型	80
5.2 电容式传感器的特点及等效电路	83
5.3 电容式传感器的测量转换电路	86
5.4 电容式传感器的应用	90
5.5 集成电容式加速度传感器	94
5.6 容栅传感器	97
5.7 电容式触摸传感器	100
思考与练习	102
● 第6章 压电式传感器	105
6.1 压电式传感器的工作原理	105
6.2 压电式传感器的等效电路与常用结构形式	108
6.3 测量转换电路	110
6.4 压电式传感器的应用	113
6.5 压电式传感器在其他方面的应用	116
思考与练习	118
● 第7章 磁电式传感器	119
7.1 磁电感应式传感器	119
7.2 电磁流量计	122
7.3 霍尔式传感器	125
7.4 磁敏电阻与磁敏管	134
思考与练习	141
● 第8章 超声波传感器	143
8.1 超声波的物理基础	143
8.2 超声波探头	146
8.3 超声波传感器的应用	150
8.4 超声波焊接	153
8.5 超声波清洗及应用	157
8.6 超声波的无损探伤	158
8.7 超声波雾化与应用	162
思考与练习	163
● 第9章 热电式传感器	165
9.1 温度测量的基本概念	165
9.2 电阻式温度传感器	167
9.3 热电偶	173
9.4 集成温度传感器	178
9.5 红外测温传感器	182

思考与练习	188
● 第 10 章 光电式传感器	191
10.1 光电效应与光电器件	191
10.2 光电器件的应用电路	205
10.3 光电式传感器	206
10.4 光电式传感器的应用	209
10.5 光纤传感器	216
10.6 固态图像传感器	221
思考与练习	225
● 第 11 章 数字式传感器	228
11.1 感应同步器	228
11.2 磁栅传感器	234
11.3 光栅传感器	237
11.4 数字编码器	243
思考与练习	248
● 第 12 章 检测系统的抗干扰技术	251
12.1 干扰的类型	251
12.2 干扰的抑制	255
思考与练习	261
● 第 13 章 虚拟仪器技术	262
13.1 虚拟仪器概述	262
13.2 虚拟仪器的组成	264
13.3 虚拟仪器的结构	265
13.4 虚拟仪器的软件开发平台	267
13.5 虚拟仪器的应用	270
思考与练习	271
● 附录	272
附录 A 常用传感器的性能及选择	272
附录 B 常用位移传感器及其主要参数	274
附录 C 热电阻分度表	274
附录 D 镍铬-镍硅 K 型热电偶分度表 (自由端温度为 0℃)	276
● 参考文献	278

第1章

检测技术的基本概念

1.1 检测技术的基本概念

1.1.1 检测技术的定义

检测技术是指利用各种物理、化学效应，选择合适的方法与装置，将生产、科研、生活等各方面的有关信息通过检查与测量的方法，赋予定性或定量结果的过程。这包含两层含义：一是检，即利用传感器获得信息；二是测，即通过信号处理给信息一个数值量或信息的有无。能够自动地完成整个检测处理过程的技术称为自动检测技术。

在现代社会，从日常生活到现代工业过程控制、自动化生产、科学研究、宇宙开发、海洋探测、石油化工、生物工程、桥梁建设等许多方面都离不开检测技术。检测技术给生产和科学研究提供先进的工具和手段，推动科学的发展，科学的发展不断地向检测技术提出新的要求，推动检测技术的进步，它们互相依赖、互相促进。

1.1.2 工业检测的内容与方法

工业检测的内容广泛，常见的工业检测内容如表 1-1 所示。

表 1-1 工业检测的内容

被测量类型	被 测 量	被测量类型	被 测 量
热工量	温度、热量、比热容、热流、热分布、压力(压强)、压差、真空度、流量、流速、物位、液位、界面	物体的性质和成分量	气体、液体、固体的化学成分、浓度、黏度、湿度、密度、酸碱度、浊度、透明度、颜色
机械量	直线位移、角位移、速度、加速度、转速、应力、应变、力矩、振动、噪声、质量(重量)	状态量	工作机械的运动状态(启停等)、生产设备的异常状态(超温、过载、泄漏、变形、磨损、堵塞、断裂等)
几何量	长度、厚度、角度、直径、间距、形状、平行度、同轴度、粗糙度、硬度、材料缺陷	电工量	电压、电流、功率、电阻、阻抗、频率、脉宽、相位、波形、频谱、磁场强度、电场强度、材料的磁性能

为了适应千变万化的被测量和检测对象，适应错综复杂的测量环境，检测的方法也有多种分法，如表 1-2 所示。



表 1-2 常用的一般检测方法

分类依据	名称	意 义	说 明
是否施加能量	有源式	测量中需从外部向对象施加能量	
	无源式	测量中不需从外部向对象施加能量	
是否与被测对象接触	接触式	检测元件与被测对象接触	对被测对象有干扰,当被测对象有特殊性质时检测元件要求高
	非接触式	检测元件与被测对象不接触	不干扰被测对象
得到测量结果的手段	直接法	直接获得被测量的测量结果	操作简单
	间接法	直接获得的是与被测量有函数关系的量,然后带入函数关系式得出结果	过程较复杂
测量结果的显示方式	模拟测量	被测量以模拟量的形式输出	计算机处理需要 A/D
	数字测量	被测量以数字量的形式输出	直观、便于计算机处理显示、抗干扰能力强
测量的具体手段	零值法	调节已知的标准量与被测量平衡,当平衡时,二者的偏差为零,此时的标准量就是被测量值	精度高、操作复杂、速度慢
	偏差法	由检测仪表指针偏移量来显示测量值	操作简单、快,但精度低
	微差法	预先将被测量的标准量和被测量平衡,当被测量有微小变化,失去平衡,用偏差法获得较小的差值	综合零值法和偏差法的优点,需定期校准
	计算法	用标准脉冲的个数来表示被测量	准确度高、直观
被测量的变化	静态测量	被测量随时间变化缓慢或不变	准确度高
	动态测量	被测量随时间变化快	被测量系统的动态特性要求高

1.1.3 检测系统的组成

一般的检测系统的结构简图如图 1-1 所示。由图可知系统由传感器、信号处理电路、显示装置、数据处理装置和执行机构组成。

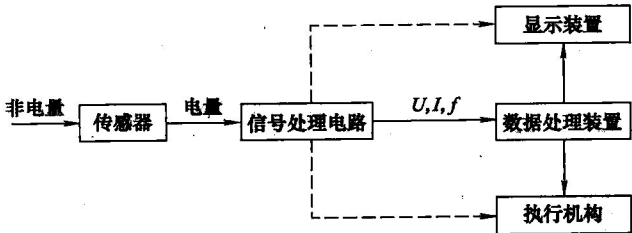


图 1-1 检测系统的组成原理简图

(1) 传感器

传感器是系统的第一个环节，将被测量转换成电量，通常称为一次变换，因此传感器也叫一次变换仪表。

(2) 信号处理电路

由于传感器变换原理和特征的限制以及外界影响，一次变换的结果通常不能满足控制系统的要求，通过信号处理电路完成，如将 R 、 L 、 C 的电路参数变换成 U 、 I 、 f ，这就是二次变换，同时可以完成电平转换、阻抗匹配、干扰抑制和处理。



(3) 显示装置

用来显示数值,常用的显示装置有4类:模拟显示、数字显示、图像显示及记录仪等。模拟显示是利用指针对标尺的相对位置来显示读数,比较直观,读数不准确。如指针式的万用表、电压表、电流表等。数字显示是采用发光二极管和液晶显示器等显示读数,显示的数据准确,使用方便,但最后一位经常跳动不止。图像显示是用显像管或彩色LCD来显示读数或被测参数的变化曲线,能显示复杂的、多个参数的图形和曲线,但价格昂贵。记录仪主要用来记录被检测对象的动态变化过程。常用的记录仪有笔式记录仪、绘图仪、磁带记录仪、无纸记录仪等。

(4) 数据处理装置

利用微机技术,对被测结果进行处理、运算、分析,对动态测试结果进行频谱、幅值和能量分析等。数据处理的结果通常送到显示器和执行机构中去,以显示运算的各种数据或用以控制被控对象。没有数据处理装置的检测系统,通常信号处理环节输出的信号满足显示器和执行机构的要求。如图1-1中的虚线所示。

(5) 执行机构

执行机构通常是指各种继电器、电磁铁、电磁阀门、电磁调节阀、伺服电动机等,它们在电路中是起通断、控制、调节、保护等作用的电气设备。对于检测系统有的没有执行机构,有的有执行机构,主要依赖系统的要求。

1.1.4 检测系统的分类

检测系统按照信号传输方式、系统实现方式和应用场合等可按表1-3分类。

表 1-3 检测系统分类

分 类		特 点
信号传输方式	开环系统	系统的输入和输出没有联系
	闭环系统	系统输出的一部分或全部作为输入的一部分
实现方式	手动	有人参与的检测
	自动	一般检测系统
		计算机检测系统
应用场合	生产现场	系统通用性强、可靠性高、性能稳定、标准信号输出
	科学研究	专用性强、性能高、适应性差

1.2 检测系统的特性

检测系统的输入是被测参数,检测结果是系统的输出,因此实质上它是一个传递信息的通道,当被测信号为定值或变化比较缓慢时表现为静态特性,若为随时间变化较快的信号则表现为动态特性。因此系统的特点不同,衡量系统的特性偏重也就不同,系统的特性是通过参数来衡量的,这也是检测系统的性能指标,是系统的使用说明中的核心内容的一部分。

1.2.1 检测系统的静态特性

检测系统的静态特性就是在静态测量情况下描述实际检测系统与理想线性时不变系统的接近程度。此时系统的输入 x 和输出 y 都是不随时间变化的常量或变化极慢,因此系统的

特性可用式 (1-1) 表示。

$$y = a_0 + kx \quad (1-1)$$

式中 a_0 ——零偏；

k ——系统常数。

该式表明理想的静态量的测试系统其输出与输入之间呈单调、线性比例关系。但实际的测试系统并非理想的线性时不变系统，二者之间就存在差别。所以常用灵敏度、非线性度和回程误差等主要定量指标来表征实际的测试系统的静态特性。

(1) 灵敏度

灵敏度 S 表征的是系统输出对输入信号变化的一种反应能力。

$$S = \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-2)$$

例如，某位移传感器在位移变化 1mm 时，输出电压变化 300mV，则该传感器的灵敏度 $S = 300\text{mV/mm}$ 。也有些仪器的灵敏度与定义相反，它描述在给定指示量的变化下被测量变化了多少。例如某笔式记录仪的灵敏度 $S = 0.05\text{V/cm}$ ，则表示输入量（位移）变化 1cm 时，输出量变化 0.05V。

对灵敏度的说明如下。

① 对于线性系统，灵敏度为常数。

② 灵敏度的量纲取决于输出/输入的量纲。无量纲时可以叫增益或放大倍数。例如一个最小刻度值为 0.001mm 的千分表，若其刻度间隔为 1mm，则放大倍数 $= 1\text{mm}/0.001\text{mm} = 1000$ 倍。

③ 系统总的灵敏度等于系统各环节灵敏度的连乘积。

④ 灵敏度有正负号，但是正负号不表示数值的正负，表示输入与输出的变化方向。正号代表输入、输出的变化方向相同，即输入增大输出也增大，输入减小输出也减小。负号代表输入、输出变化方向相反，即输入增大输出就减小，输入减小输出增大。

例 1-1 用压电式加速度计及电荷放大器测量振动加速度，若传感器的灵敏度为 70pC/g (g 为重力加速度)，电荷放大器灵敏度为 10mV/pC ，试确定系统的灵敏度。

解 总灵敏度 = 传感器的灵敏度 $\times$ 电荷放大器灵敏度 $= 70 \times 10 = 700\text{mV/g}$

在选择系统的灵敏度时，要充分考虑其合理性。因为系统的灵敏度和系统的量程及固有频率等是相互制约的，一般说来，系统的灵敏度越高，则其测量范围往往越窄，稳定性也往往越差。

(2) 线性度

线性度也叫非线性误差，是指系统的输出/输入之间保持常值比例关系（线性关系）的一种度量。在静态测量中，通常用实验的办法获取系统的输入/输出关系曲线，并称之为“标定曲线”。采用拟合方法得到的输入/输出之间的线性关系，称为“拟合直线”。线性度就是标定曲线偏离其拟合直线的程度，如图 1-2 所示。

线性度是采用在系统的全量程内，标定曲线与该拟合直线的最大偏差与输出的比值，即

$$\delta = \frac{B_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-3)$$

(3) 回差

回差也称滞差或迟滞，表征系统在全量程范围内输入

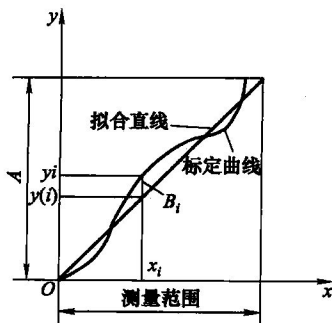


图 1-2 线性度示意图

量递增变化（由小变大）中的标定曲线和递减变化（由大变小）中的标定曲线二者静态特性不一致的程度，如图 1-3 所示。

回差计算表达式：

$$\gamma_h = \pm \frac{1}{2} \times \frac{h_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-4)$$

回差可以由摩擦、间隙、材料的受力变形或磁滞等因素引起，也可能反映着仪器的不工作区的存在，所谓不工作区就是输入变化对输出无影响的范围，也称死区。

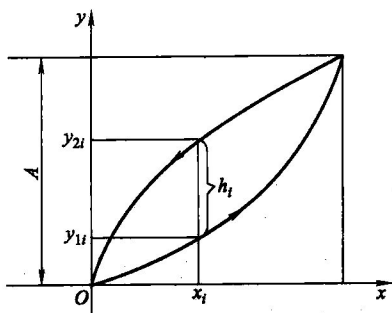


图 1-3 回差示意图

(4) 分辨力

分辨力是指系统能检出被测信号的最小变化量。当被测量的变化小于分辨力时，系统没有输出。对数字式输出的系统一般可认为数字量的最后一位所表示的数值就是系统的分辨力。将分辨力除以满量程就是系统的分辨率。

(5) 稳定性

稳定性是指系统在检测同一物理量时每次测量的不一致程度，也叫重复性。系统的稳定性与外界环境的变化有关，环境的变化会引起系统的零点漂移。零点漂移就是系统输入为零而输出不为零。因此，为了使系统的测量数值稳定，需要采取一些措施来补偿由于零点漂移产生的差值。

(6) 精度

系统总会存在误差，精度就是用来衡量误差对检测结果影响的大小。数值越小精度越高。误差的性质不同，对测量结果的影响也不同，描述也有差别。

精密度指对某一稳定被测量，在短时间内在相同条件下检测结果示值的不一致程度。这主要是随机误差造成的影响。

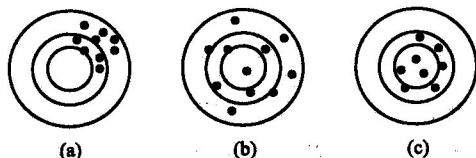


图 1-4 精密度、正确度、准确度示意图

正确度是指检测结果有规律地偏离被测量真实值的大小程度。这主要是系统误差造成的影响。

准确度是精密度和正确度的综合。

精密度、正确度和准确度三者的示意图如图 1-4 所示。图 1-4 (a) 精密度高；图 1-4 (b) 正

确度高；图 1-4 (c) 准确度高。

1.2.2 检测系统的动态特性

一般来说，当检测系统输入是随时间变化的动态信号 $x(t)$ 时，其相应的输出 $y(t)$ 或多或少总是与 $x(t)$ 不一致，两者之间的差异即为动态误差。研究系统的动态特性，有利于了解动态输出与输入之间的差异以及影响差异大小的因素，以便于减少动态误差。

一般来说，在所考虑的测量范围内，实际的检测系统总是被处理为线性时不变系统，因而总可以用常系数线性微分方程来描述系统与输出/输入的关系。但为了研究和运算的方便，常通过拉普拉斯变换在复数域 s 中建立其相应的“传递函数”，并在频域中用传递函数的特殊形式——频率响应，在时域中用传递函数的拉普拉斯逆变换——权函数，来简便、明了地描述测试系统的动态特性。

(1) 系统一般数学模型

一般可把系统近似看成常系数线性系统, 如式 (1-5) 所示。

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-5)$$

式中

x ——系统输入信号;

y ——系统输出信号;

$a_0, a_1, \cdots, a_{n-1}, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_{m-1}, b_m$ ——常系数。

(2) 传递函数

当线性系统的初始条件为零, 即在考察时刻以前, 其输入量、输出量及其各阶导数均为零, 且检测系统的输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 在 $t > 0$ 时均满足狄利克雷条件, 则定义输出 $y(t)$ 的拉普拉斯变换 $Y(s)$ 与输入 $x(t)$ 的拉普拉斯变换 $X(s)$ 之比为系统的传递函数, 并记为 $H(s)$ 。即

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1-6)$$

根据拉普拉斯变换的微分性质, 在初始值为零的条件下对式 (1-5) 进行拉普拉斯变换得

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0) Y(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0) X(s) \quad (1-7)$$

所以

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-8)$$

传递函数以代数式的形式表征了系统对输入信号的传输、转换特性。它包含了瞬态和稳态时间响应的全部信息。

(3) 频率响应函数

传递函数是在复数域中描述和考察系统的特性。频率响应函数是在频域中描述和考察系统特性。在已知传递函数 $H(s)$ 的情况下, 令 $H(s)$ 中拉普拉斯算子 s 的实部为零, 即 $s = j\omega$, 传递函数式则变为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1 (j\omega) + a_0} \quad (1-9)$$

通常称这种特殊形式的传递函数 $H(j\omega)$ 就为系统的频率响应函数, 简称为“频率响应”或“频率特性”。尽管对微分方程进行拉普拉斯变换来求传递函数非常简单, 但要完整地列出很多工程中的实际系统的微分方程, 是一件很困难的事情, 通常只能通过实验的方法来确定系统的动态特性, 所以频率响应非常具有实用价值。需要注意的是, 频率响应函数是描述系统的简谐输入和其稳态输出的关系, 因此, 在测量系统频率响应函数时, 必须在系统响应达到稳态时才测量。

频率响应 $H(j\omega)$ 是复数, 它可以用复指数形式来表达, 也可以写成实部和虚部之和, 即

$$H(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)} = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega) \quad (1-10)$$

式中, $\text{Re}(\omega)$ 为复数 $H(j\omega)$ 的实部, $\text{Im}(\omega)$ 为复数 $H(j\omega)$ 的虚部, 都是频率 ω 的实函数。

$A(\omega)$ 是频率响应 $H(j\omega)$ 的模, 即

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{[\text{Re}(\omega)]^2 + [\text{Im}(\omega)]^2} \quad (1-11)$$

$A(\omega)$ 表达了系统的幅值比随频率变化的关系, 称为幅频特性; $A(\omega)$ - ω 图形则称为幅

频特性曲线。

$\varphi(\omega)$ 是频率响应的 $H(j\omega)$ 幅角, 即

$$\varphi(\omega) = \angle |H(j\omega)| = \arctan \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)} \quad (1-12)$$

它表达了系统的输出对输入的相位差随频率的变化关系, 称为相频特性, $\varphi(\omega)-\omega$ 图形则称为相频特性曲线。

(4) 单位脉冲响应函数 (权函数)

由系统的传递函数可得

$$Y(s) = H(s)X(s) \quad (1-13)$$

如果输入信号为单位脉冲函数, 由于单位脉冲函数的拉氏变换为 1, 所以

$$Y(s) = H(s) \quad (1-14)$$

时域内

$$h(t) = L^{-1}[H(s)] = L^{-1}[Y(s)] \quad (1-15)$$

$h(t)$ 就是脉冲响应函数也叫权函数。由拉普拉斯变换的卷积特性可得

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (1-16)$$

系统的输出等于 $h(t)$ 与输入的卷积。可见权函数与传递函数一样, 也反映了系统的输入/输出关系, 因而也可以用来表征系统的动态特性。

从纯数学的角度来看, $h(t)$ 是 $H(s)$ 的拉普拉斯逆变换, 而从物理意义的角度来看, 如果某线性系统的输入为单位脉冲函数, 该系统的输出应当是

$$y(t) = h(t) * \delta(t) \quad (1-17)$$

由 δ 函数与其他函数卷积的性质, 可知卷积的结果就是简单地将其他函数的图形搬移到脉冲函数的坐标位置上, 因而有

$$y_0(t) = h(t) * \delta(t) = h(t) \quad (1-18)$$

这表明, 权函数也就等于系统的输入为单位脉冲函数时的响应, 因此, 也把权函数称为“单位脉冲响应函数”。

(5) 检测系统动态特性的测量方法

对检测系统动态特性, 其测量方法复杂多样, 下面就简述测量方法。

① 频率响应法 通过稳态正弦激励可以求得系统的动态特性。方法是对系统输入正弦激励信号 $x(t) = A \sin(2\pi ft)$, 在系统达到稳态后测量输出和输入的幅值比和相位差。这样可以得到频率 f 下系统的传输特性。从系统的最低测量频率 $f_{\min}$ 到系统的最高测量频率 $f_{\max}$, 按一定的增量方式逐步增加正弦激励信号频率 f , 记录各频率对应的幅值比和相位差, 绘制在图上就可以得到系统的幅频和相频特性曲线。

② 阶跃响应法 用阶跃响应法求系统的动态特性是一种简单易行的时域测量方法。测试时, 根据系统可能存在的最大超调量来选择阶跃信号的幅值, 超调量大时应选择较小的输入幅值。

③ 白噪声信号测量法 由系统传输特性, 若系统输入为 $x(t)$, 系统时域特性为 $h(t)$, 系统输出为 $y(t)$, 则系统的输出为系统输入和系统时域特性的卷积积分, 有

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (1-19)$$

系统输出的频谱为

$$Y(f) = X(f)H(f) \quad (1-20)$$

若选择系统输入为白噪声信号, 即在所有频率成分处 $X(f) = 1$, 有

$$Y(f) = X(f)H(f) = H(f) \quad (1-21)$$



这时系统的频率特性等价于系统输出的频率特性,因此可以通过测量输出信号的频率特性来得到系统的频率特性。

1.2.3 系统实现动态测试不失真的条件

检测的目的是应用检测系统精确地复现被测的特征量或参数,获取原始信息。然而事实上并不是所有系统都能毫无条件地做到这一点。这就要求在检测过程中采取相应的技术手段,使系统的输出信号能够真实、准确地反映出被测对象的信息,这称为不失真测试。

一个系统,在什么条件下才能保证测量的准确性?如图 1-5 所示中的输入信号 $x(t)$,系统的输出 $y(t)$ 可能出现以下的三种情况。

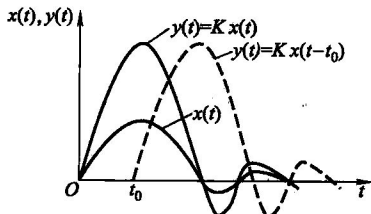


图 1-5 检测系统的
输入、输出信号

① 最理想的情况,输出波形与输入波形完全一致,仅仅只有幅值按比例常数 K 进行放大,即输出与输入之间满足下列关系式:

$$y(t) = Kx(t) \quad (1-22)$$

② 输出波形与输入波形相似的情况,输出不但按比例常数对输入进行了放大,而且还相对于输入滞后了时间,即满足下列关系式:

$$y(t) = Kx(t - t_0) \quad (1-23)$$

③ 失真情况,输出与输入完全不一样,产生了波形畸变。显然,这是系统不希望有的情况。

很显然,系统在进行动态测试时,理想状态是满足第一种情况。一般也应当满足第二种情况。可求得系统的幅频特性和相频特性在满足不失真测试要求时应具有的条件。由此分别对式 (1-22) 和式 (1-23) 作傅里叶变换得

$$Y(j\omega) = KX(j\omega)$$

$$Y(j\omega) = KX(j\omega)e^{-j\omega t_0} \quad (1-24)$$

要满足第一种不失真测试情况,系统的频率响应为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = K = Ke^{j0} \quad (1-25)$$

而要满足第二种不失真测试情况,系统的频率响应为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = Ke^{-j\omega t_0} \quad (1-26)$$

从式 (1-25) 和式 (1-26) 可以看出,系统要实现动态测试不失真,其幅频特性和相频特性应满足下列条件:

$$A(\omega) = K$$

$$\varphi(\omega) = 0$$

$$(1-27)$$

或

$$\varphi(\omega) = -\omega t_0$$

$$(1-28)$$

这表明,系统实现动态测试不失真的幅频特性曲线应当是一条平行于 ω 轴的直线。相频特性曲线应是与水平坐标重合的直线(理想条件)或是一条通过坐标原点的斜直线,如图 1-6 所示。

任何一个检测系统不可能在无限宽广的频带范围内满足不失真的测试条件。将由于幅值特性不等于常数所引起的失真称为幅值失真,由相位特性之间的非线性关系而引起的失真称



为相位失真。上述动态不失真的条件,是针对系统的输入为多频率成分构成的复杂信号而言的。对于单一成分的正弦型信号的测量,尽管系统由于其幅频特性曲线不是水平直线或相频特性曲线与 ω 不成线性,这样致使不同频率的正弦信号作为输入时,其输出的幅值误差和相位差会有所不同,但只要知道了系统的幅频特性和相频特性,就可以求得输入某个具体频率的正弦信号时系统输出与输入的幅值比和相位差,因而仍可以精确地获得输入信号的波形。

所以,对于简单周期信号的测量,从理论上讲,对上述动态不失真的条件可以不作严格要求。

由于检测系统通常是由若干个环节组成,因此,只有保证所使用的每一个环节满足不失真的测试条件,才能使最终的输出波形不失真。

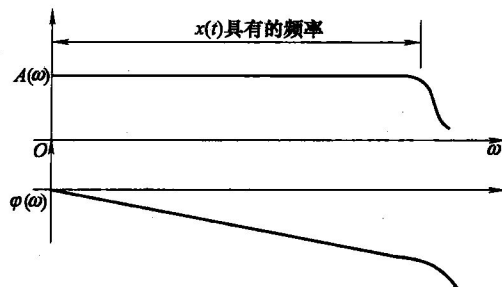


图 1-6 不失真检测的条件

1.2.4 负载效应

在实际工作中,检测系统和被测对象之间、系统内部各环节相互连接必然产生相互作用。接入的装置构成被测对象的负载;后接环节成为前面环节的负载。由于彼此间存在能量交换和相互影响,以致系统的传递函数不再是各组成环节传递函数的叠加(并联)或连乘(串联)。

现以简单的电阻传感器测量直流电路为例来看负载效应的影响。

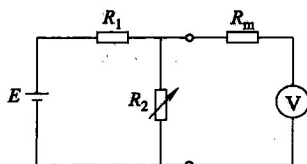


图 1-7 直流电路

如图 1-7 所示, R_2 是阻值随被测物理量变化的电阻传感器,通过直流电路将电阻变换转化为电压变化,通过电压表进行显示。未接入电压表测量电路时,电阻 R_2 上的电压降为

$$U_0 = \frac{ER_2}{R_1 + R_2} \quad (1-29)$$

接入电压表测量电路时,电阻 R_2 上的电压降为

$$U_1 = \frac{ER_2 R_m}{R_1(R_2 + R_m) + R_2 R_m} \quad (1-30)$$

为了定量说明这种负载效应的影响程度,令 $R_1 = 100\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 150\text{k}\Omega$ 、 $R_m = 150\text{k}\Omega$ 、 $E = 150\text{V}$ 。代入上式计算,得到 $U_0 = 90\text{V}$ 、 $U_1 = 64.3\text{V}$,误差达到 28.6%。若将电压表测量电路负载电阻加大到 $1\text{M}\Omega$,则 $U_1 = 84.9\text{V}$,误差减小为 5.76%。此例充分说明了负载效应对测量结果的影响是很大的。

减小负载效应误差的措施如下。

- ① 提高后续环节(负载)的输入阻抗。
- ② 在原来两个相连接的环节中,插入高输入阻抗、低输出阻抗的放大器,以便减小从前一环节吸取的能量,减轻负载效应的影响。
- ③ 使用反馈或零点测量原理,使后面环节几乎不从前面环节吸取能量。

总之,在组成系统时,要充分考虑各组成环节之间连接时的负载效应,尽可能地减小负载效应的影响。

1.3 测量误差

测量是检测系统的组成部分,在检测系统的静态特性指标中的准确度就是对测量误差的

衡量。每一个物理量都是客观存在，在一定的条件下具有不依人的意志为转移的客观大小，人们将它称为该物理量的真值。进行测量是想要获得待测量的真值。然而测量要依据一定的理论或方法，使用一定的仪器，在一定的环境中，由具体的人进行。由于实验理论上存在着近似性，方法上难以很完善，实验仪器灵敏度和分辨能力有局限性，周围环境不稳定等因素的影响，待测量的真值是不可能测得的，测量结果和被测量真值之间总会存在或多或少的偏差，这种偏差就叫测量误差。误差存在于一切测量之中，测量与误差形影不离，分析测量过程中产生的误差，将影响降低到最低程度，并对测量结果中未能消除的误差作出估计，是测量中不可缺少的一项重要工作。

1.3.1 绝对误差与相对误差

(1) 绝对误差

在一定条件下，某一物理量所具有的客观大小称为真值。测量结果与真值之间总有一定的差异，即总存在测量误差。设测量值为 A_x ，相应的真值为 A_0 ，测量值与真值之差 Δ 称为测量误差，又称为绝对误差，简称误差，即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-31)$$

(2) 相对误差

绝对误差愈小，说明指示值越接近真值，测量精度愈高。但这一结论只适用于被测量值相同的情况，而不能说明不同值的测量精度。例如，某测量长度的仪器测量 10mm 的长度，绝对误差为 0.001mm。另一仪器测量 200mm 长度，误差为 0.01mm；这就很难按绝对误差的大小来判断用不同仪器测量结果的精度高低了，这是因为后者的绝对误差虽然比前者大，但它相对于被测量的值却显得较小。这时绝对误差不足以反映测量值偏离真值程度的大小，所以引入相对误差。绝对误差与真值之比的百分数叫作相对误差。用 E 表示：

$$E = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-32)$$

这种相对误差叫实际相对误差，由于真值无法知道，所以计算相对误差时常用 A_x 代替 A_0 。在这种情况下相对误差就叫标称相对误差。如果 A_0 是仪器仪表的满度值，此时的相对误差叫引用相对误差。通常用来确定仪器仪表的准确度等级，简称精度等级。

中国的仪表的精度等级和相对误差见表 1-4。

表 1-4 仪表精度等级和相对误差

等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
相对误差	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 2.5\%$	$\pm 5.0\%$

例 1-2 某压力表的精度等级为 2.5 级，量程为 0~1.5MPa，测量结果为 0.7MPa，试求可能出现的最大满度相对误差；测量可能出现的最大绝对误差；测量的示值相对误差。

解 可能出现的最大满度相对误差为 $\pm 2.5\%$ 。

$$\text{最大绝对误差} = \pm 2.5\% \times 1.5 = 0.0375 \text{MPa}$$

$$\text{示值相对误差} = 0.0375 / 0.7 \times 100 = 5.36\%$$

1.3.2 粗大误差、系统误差和随机误差

(1) 系统误差

系统误差是由仪器制造或校正不完善、测量人员的习惯、测量时外界条件、仪器检定时不一致等原因引起。在同一条件下获得的观测列中，其数据、符号或保持不变，或按一定的