

· 高等学校教材 ·

Guocheng Canshu Jiance Jishu Ji Yibiao

过程参数 检测技术及仪表

李忠虎 李希胜 主编



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

高等学校教材

过程参数检测技术及仪表

主 编 李忠虎 李希胜
副主编 李文涛 潘 炼
主 审 王绍纯

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

过程参数检测技术及仪表/李忠虎, 李希胜主编. —北京: 中国计量出版社, 2009. 1
高等学校教材

ISBN 978-7-5026-2908-3

I. 过… II. ①李…②李… III. 计量—参数—检测 IV. TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 170949 号

内 容 提 要

本书从信息的获取、转换、处理、传输及显示等角度, 全面系统地介绍了过程参数检测的相关技术、仪器仪表和检测系统, 具体内容包括: 温度检测技术及仪表、压力检测技术及仪表、流量检测技术及仪表、物位检测技术及仪表、成分分析技术及仪表、机械量检测技术及仪表等。

本书可作为高等学校测控技术与仪器、自动化等专业的教材, 也可供相关领域的工程技术人员学习参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市密东印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 15 字数 360 千字

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 000 定价: 26.00 元

前 言

“过程参数检测技术及仪表”是测控技术与仪器、自动化等专业的一门主干课程，其内容与工业生产过程联系非常密切，应用性很强。本书从当前实际应用和技术发展的角度出发，全面系统地介绍了过程参数检测的相关技术、仪器仪表和检测系统，具体内容包括目前已成熟的检测技术和仪器仪表以及刚开始使用或即将使用的新技术、新方法和新设备等。

本书是编者在多年的教学 and 实际工程工作的基础上总结而成的，内容编排重在基本理论和实践应用环节。在保证教学大纲所规定的理论深度的前提下，尽量用更多的篇幅来介绍实践应用知识。同时，所介绍的实践应用知识大多来自工业现场，符合当前技术和生产的实际，实用性强。

本书由李忠虎和李希胜担任主编，李文涛和潘炼担任副主编。第1章由北京科技大学李希胜教授编写；第2章和第4章第14节由内蒙古科技大学李文涛教授编写；第3章和第4章第1~13、15、16节由武汉科技大学潘炼教授编写；第5章、第6章第6~12节和附录由内蒙古科技大学李忠虎副教授编写；第6章第1~5节和第7章第2、5、7节由南京师范大学程继红副教授编写；第7章第1、3、4、6节由青岛科技大学袁有臣副教授编写。此外，冀书霞、魏浩、曹天扬、李宝成、于磊、张丽娟、刘国君、李波、曹思飞、陈亚琴等同志参加了部分章节的资料收集和文字录入等工作。北京科技大学王绍纯教授审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵的意见和建议，特此致谢。

本书参阅了大量相关书籍及国家标准，在此对相关作者和单位表示诚挚的感谢！

为了方便教学，本书配有电子课件，欢迎读者通过电子邮件索取。电子邮箱：L_zh_hu115@sina.com。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2009年1月

目 录

1 绪论	(1)	3.6 电阻应变式压力计	(90)
1.1 过程参数检测		3.7 振频式压力计	(93)
基本概念	(1)	3.8 压力检测仪表的选用	(94)
1.2 检测仪表(方法)的		思考题	(96)
分类	(2)	4 流量检测技术及仪表	(98)
1.3 检测仪表的性能指标	(5)	4.1 概述	(98)
1.4 检测技术及仪表的		4.2 节流式流量计	(99)
发展	(9)	4.3 电磁流量计	(105)
1.5 测量误差	(11)	4.4 涡街式流量计	(109)
思考题	(16)	4.5 涡轮流量计	(112)
2 温度检测技术及仪表	(17)	4.6 超声波流量计	(113)
2.1 概述	(17)	4.7 光纤流量计	(115)
2.2 膨胀式温度计	(20)	4.8 质量流量计	(116)
2.3 热电阻温度计	(22)	4.9 靶式流量计	(120)
2.4 热电偶温度计	(30)	4.10 均速管流量计	(121)
2.5 辐射式温度计	(47)	4.11 容积式流量计	(122)
2.6 光纤温度计	(58)	4.12 弯管流量计	(124)
2.7 集成温度传感器	(65)	4.13 转子流量计	(125)
2.8 温度检测仪表的选用	(71)	4.14 相关流量计	(128)
思考题	(73)	4.15 流量标准装置	(131)
3 压力检测技术及仪表	(75)	4.16 流量检测仪表的选用	(134)
3.1 概述	(75)	思考题	(135)
3.2 液柱式压力计	(76)	5 物位检测技术及仪表	(137)
3.3 弹性式压力计	(77)	5.1 概述	(137)
3.4 光纤压力计	(83)	5.2 直读式液位计	(138)
3.5 差压变送器	(83)	5.3 静压式液位计	(139)
		5.4 浮力式液位计	(146)

5.5	电气式物位计	(151)	6.10	钠表	(197)
5.6	超声波物位计	(157)	6.11	溶氧表	(198)
5.7	核辐射式物位计	(163)	6.12	成分分析仪表的选用	(199)
5.8	机械接触式物位计	(165)	思考题		(200)
5.9	雷达物位计	(167)	7 机械量检测技术及仪表		(201)
5.10	磁致伸缩式液位计	(170)	7.1	概述	(201)
5.11	物位检测仪表的选用	(171)	7.2	位移检测仪表	(202)
思考题		(172)	7.3	厚度检测仪表	(207)
6 成分分析技术及仪表		(174)	7.4	力、应力与力矩 检测仪表	(209)
6.1	概述	(174)	7.5	转速检测仪表	(214)
6.2	热导式气体分析仪	(175)	7.6	转矩检测仪表	(216)
6.3	红外线气体分析仪	(177)	7.7	振动与加速度 检测仪表	(219)
6.4	色谱分析仪	(179)	思考题		(224)
6.5	氧分析仪	(182)	附录		(226)
6.6	工业电导仪	(188)	参考文献		(233)
6.7	浓度计	(192)			
6.8	pH计	(193)			
6.9	硅酸根表	(196)			

1 绪 论

1.1 过程参数检测基本概念

在生产过程中，人们需要对生产过程中的工艺参数进行检测，以实现生产过程的监控和自动控制；需要对能源、材料进行检测，以实现低成本、优化管理；对产品进行监测监控，以提高产品的合格率。检测的目的是为了获得定量分析和定性判断的信息，作为分析、判断的依据，为决策提供保障。

现代化的生产过程是高效、连续的生产过程，为了确保安全，保证产品的产量和质量，减少能源消耗和降低成本，必须对反映生产过程进行情况的诸参数，如温度、压力、流量、物位、成分量、机械量等进行自动检测和控制。过程检测技术就是研究对生产过程和运动对象实施自动定性检查和定量测量的技术。

检测技术是人们为了对自然界的物质进行定量掌握或定性判断所采取技术措施的总称。它是在测量、检验、检定等概念和技术基础上发展起来的综合性技术学科。测量是以确定量值为目的的一组操作，它是将被检测参数的量值与作为单位的标准量进行比较，得出相应的倍数，即测量结果的数值。检验是用来判断或分辨被检测物质参数是否合格或某种现象的有无，它区分的是被检参数量值所属的某一范围带，而不是某一具体量值。检定则是用来对在用仪器仪表定期与标准仪器仪表进行比对，判定被检仪器仪表的准确度是否合格的一种操作。

在生产或科学实验中经常会遇到检测任务。在检测任务面前首先要考虑的是应用什么样的测量原理，采用什么样的测量方法；同时，还要考虑使用什么技术工具进行测量。检测仪表就是进行测量所需要的技术工具的总称。广义概念下的检测仪表包括敏感元件、传感器、变换器、运算器、显示器、数据处理装置等。检测仪表的性能好坏直接影响测量结果的可信度。全面掌握检测仪表的功能和构成原理，有助于正确选用仪表。

在检测过程中的仪表要完成的主要功能有：物理量的变换、信号的传输和处理、测量结果的显示。物理量变换功能是将非电量形式的被测量（如热工参数中的温度、压力、流量；机械量参数中的转速、力、位移；物性参数中的酸碱度、相对密度、成分含量等）转换为易于处理、传输和测量的电信号形式（如电压、电流信号等）。信号的处理功能是将转换后的电信号经过信号调理电路进行放大、阻抗变换，若被测量需要送入计算机进行处理，还要通过 A/D 转换将其转换为数字信号。传输功能是将经变换后的信号不失真地传输一定距离，并送给显示装置或上位机，传输方式包括有线传输和无线传输。显示功能是将测量结果用便于人眼观察的形式表示出来。

检测系统是检测仪表的有机组合。对于比较简单的测量工作只需一台仪表就可以解决问题。但是对于比较复杂、要求高的测量工作，往往需要使用多台检测仪表，并按照一定规则

将它们组合起来，构成一个有机的整体——检测系统。

检测系统的主要作用在于测量各种参数以用于显示或控制。这些参数包括电量（电流、电压、频率等）和非电量（如温度、压力、流量、物位、成分、应力、振幅、重量等）。为实施测量，无论是一块简单的检测仪表，还是一套复杂的检测系统，一般都包括以下几部分：检测变换部分、信号处理部分、显示或输出部分，如图 1-1 所示。

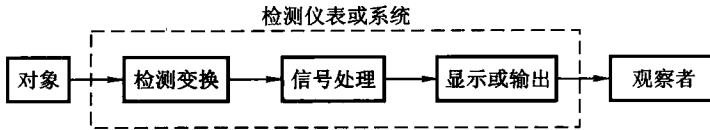


图 1-1 检测装置组成框图

检测变换部分的作用在于感受被测量的变化，并输出一个相对应的信号（电信号或非电信号）。检测部分通常又被称为敏感元件、检测元件、传感器、一次元件等，如热电偶温度计中的热电偶，节流式流量计中的孔板等。

信号处理部分包括变送器、转换器、变换器等，其作用是将传感器的输出信号进行放大、线性化、转换等处理后，变换成标准信号输出给测量链中的后续仪表。如电动差压变送器将输入的差压信号经变换、放大等处理后转换为标准的电流信号（4~20 mA DC）输出。

显示或输出部分习惯上又称为二次仪表，是检测系统向观察者显示或输出被测量数值的装置。当该部分作为独立的一块仪表且只做显示器使用时，则称为显示仪表。根据显示方式的不同，显示仪表可分为指针式、数字式或屏幕式。

此外，检测系统中还有一个连接输入、输出各环节的通道，即传输通道。它是导线、导管以及信号所通过的空间。尽管比较简单，但在系统设计、安装时若不按规范要求布置、匹配和选择，则易造成失真或引入干扰等。

在现代化的生产过程和实验中，过程参数的检测都是自动进行的，即检测任务是由系统自动完成的。因此，研究和掌握检测系统的功能、性能指标和构成原理十分必要。

1.2 检测仪表（方法）的分类

1.2.1 按被测参数分类

常见的被测参数有电气参数、机械参数和过程参数等几大类：

- (1) 电气参数。包括电能（功率）、电流、电压、频率等。
- (2) 过程参数。主要是指热工参数，通常又可分为温度、压力、流量、物位、密度和成分等。
- (3) 机械参数。包括重量、距离、振动等。

1.2.2 按使用性质分类

检测仪表使用场合的不同决定了其使用性质的差异，通常可据此分为工业用表、实验室仪表和标准表三类。

(1) 工业用表。指在实际工业现场长期使用的仪表。这类仪表为数最多，根据安装地点的不同又分为现场安装仪表与控制室安装仪表。

(2) 实验室仪表。实验室仪表的精确度较工业用仪表高，但对使用环境（如温湿度、振动等）要求较严，往往无特殊的防水、防尘措施，一般不适宜信号的远传，宜在实验室条件下使用。

(3) 标准表。标准表专用于检定工业用表和实验室仪表。各企业在用计量标准表或最高标准表时须经所在地计量部门的定期检定，获得有效检定合格证书方可使用。

1.2.3 按是否接触被测物质分类

检测仪表按是否接触被测物质可分为接触式和非接触式两类。

(1) 接触式仪表。接触式仪表的检测元件与被测对象（或介质）直接接触，感受被测量的作用或变化，从而获得测量信号。例如，热电阻温度计测温、电容式物位计测量物位等都是接触式，其测量结果较准确，但易受介质物理、化学性质影响。

(2) 非接触式仪表。非接触式仪表不直接接触被测对象（或介质），而是间接受被测量的作用或变化，达到检测目的。例如，辐射温度计不与被测对象直接接触，而是接受被测对象热辐射的能量并转换成电信号，再按辐射定律以温度值显示出来。非接触式仪表的特点是不受被测对象污染或影响，使用寿命长，适用于某些接触式检测仪表难以胜任的场合，但测量精度一般比接触式略低。

1.2.4 按仪表各环节连接方式分类

检测仪表由检测元件（传感器）、变换器及显示输出部分等环节组成，这些内部环节的连接方式不同，又使检测仪表有开环式和闭环式之分。

(1) 开环式仪表。开环式仪表中各环节按开环方式连接，如图 1-2 所示。

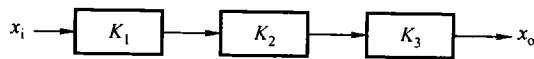


图 1-2 开环式仪表方框图

仪表中前一环节的输出是后一环节的输入，首尾相接形成测量链，信号从输入端到输出端沿一个方向传递，传递函数为

$$x_o = K_1 K_2 K_3 \cdot x_i \quad (1-1)$$

(2) 闭环式仪表。闭环式仪表又称反馈式仪表，如图 1-3 所示。

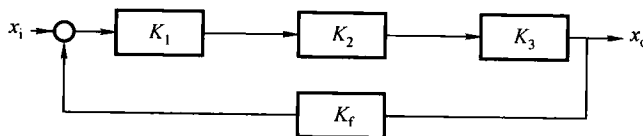


图 1-3 闭环式仪表方框图

这种仪表的传递函数为

$$x_o = \frac{K_1 K_2 K_3}{1 + K_1 K_2 K_3 K_f} \cdot x_i \quad (1-2)$$

当 $K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \gg 1$ 时, 有

$$x_o = \frac{1}{K_f} \cdot x_i \quad (1-3)$$

即整个仪表的传递函数只与反馈环节传递函数 K_f 有关, 而与各串联环节无关。这是闭环式仪表的最大特点, 它可在很大程度上消除或减小其他环节的影响。

1.2.5 按获得检测结果的手段分类

按获得检测结果的手段, 检测仪表可分为直接测量式、间接测量式和组合测量式。

(1) 直接测量。指可以通过测量, 直接在仪表上获得被测量值, 而无需通过补充计算。

(2) 间接测量。指先对几个与被测量有确定函数关系的量进行测量, 在此基础上利用数学模型来推导被测量。

(3) 组合测量。指为了同时确定多个未知量, 利用各个未知量以不同的组合形式, 用直接或间接测量方法获得一组数据, 通过解方程求出未知量的方法。

1.2.6 按检测方式分类

按检测方式, 检测仪表可分为偏差式、零位式和微差式三种。

(1) 偏差式。在检测过程中, 用仪表指针的偏移 (即偏差) 决定被测量的方法称为偏差式检测法。应用这种方法进行检测时, 标准量具不装在仪器内, 而是事先用标准量具对仪表刻度进行校准。在检测时, 输入被测量, 按照仪表指针在标尺上的示值来决定被测量的数值, 如玻璃温度计。

偏差式检测仪表是以直接方式实现被测量与标准量的比较, 检测过程比较简单、迅速, 但是, 检测结果的精度较低。这种方法广泛用于工程检测中。

(2) 零位式。在检测过程中, 用指零仪表的零位指示检测系统的平衡状态, 在监测系统达到平衡时, 用已知的基准量决定被测未知量的方法称为零位式检测法。应用这种方法检测时, 标准量具装在仪表内, 在检测过程中, 标准量直接与被测量相比较, 调整标准量直到被测量与标准量相等, 使指零仪表回零。

零位式检测法的优点是可以获得比较高的检测精度。但是检测过程比较复杂, 要进行平衡操作, 花费时间很长。采用自动平衡操作以后, 可以加快检测过程, 但其反应速度由于工作原理所限, 不会很高。因此, 这种检测方法不适用于迅速变化的信号, 只适用于变化较缓的信号。这种检测方法在工程实践和实验室中应用很普遍。用平衡电桥检测电阻、电容、电感就是典型的应用实例。

(3) 微差式。微差式检测法是综合了偏差式与零位式的优点而提出的检测方法。这种方法将被测的未知量与已知的标准量进行比较, 取得差值后用偏差法测得此差值。应用这种方法进行检测时, 标准量具装在仪表内, 并且在检测过程中, 标准量具直接与被测量进行比较。由于二者的值很接近, 因而检测过程中不需要调整标准量, 而只需检测二者的差值。

设 N 为标准量, x 为被测量, Δ 为二者的偏差值, 则 $x=N+\Delta$, 即被测量是标准量与偏差值之和。由于 N 为标准量, 其误差很小, 并且 $\Delta \ll N$, 因而可以选用高灵敏度的偏差式仪表测量 Δ 。即使检测 Δ 的精度较低, 但因 $\Delta \ll x$, 故总的检测精度很高。

微差式检测法的优点是反应快且检测精度高, 它特别适用于在线控制参数的检测。

1.2.7 按检测系统是否向被测对象施加能量分类

按检测系统是否向被测对象施加能量可分为主动式和被动式。

(1) 主动式。在检测过程中, 主动检测需要外加辅助能源。因为检测系统的输出信号强弱(大小)除了反映被测量的大小, 还依赖于辅助能源的大小, 检测系统施加的能量会影响输出信号的大小, 故称其为主动式检测。例如, 用霍尔元件检测磁场强度 B , 需要外加一个稳定的电流 I 。霍尔电势 $U_H=KBI$, U_H 除了正比于被测量 B 外, 还正比于辅助电流 I 。

(2) 被动式。在检测过程中, 检测系统的输出只与被测量有关, 即只从被测对象处获得能量, 不需要加入辅助能源, 故称其为被动式检测。例如, 用热电偶检测温度, 热电偶只从被测温度场获得热能, 通过热电效应转换为热电势。热电势是温度的单值函数, 没有其他辅助能量成分。

1.3 检测仪器的性能指标

通常所说的仪表指标是指技术指标中的性能指标, 包括静态特性与动态特性两方面。

1.3.1 检测仪器的静态特性

用检测系统进行测量时, 若被测参数不随时间变化或随时间变化比较缓慢, 可不必考虑系统输入量与输出量之间的动态关系(或称瞬态响应), 而只需考虑输入量与输出量之间的静态关系。此时, 表示输入—输出关系的数学模型为代数方程, 不含时间变量, 这样的特性称为静态特性。静态特性一般包括精确度、线性度、灵敏度、分辨率、变差、重复性、漂移和再现性等。

(1) 精确度

精确度是指仪表给出接近于被测量真值的示值的能力。示值是指由仪表提供的被测量的量值, 包括记录仪表的记录值、检测仪器的测量输出等。精确度等级是仪表符合一定的测量要求, 使其误差保持在规定的极限以内的级别。

精确度等级通常采用仪表允许的最大绝对误差与仪表量程之比的百分数表示, 称为相对百分误差, 即

$$\delta = \frac{\text{仪表允许的最大绝对误差}}{\text{仪表量程}} \times 100\% \quad (1-4)$$

将仪表的相对百分误差去掉“±”号和“%”号, 便可用于确定仪表的精确度等级。目前, 常用仪表的精确度等级有: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0等。工业自动化仪表的精确度等级一般为0.2~4.0级。

例如, 一台仪表的相对百分误差为±1.0%, 则其精确度等级为1.0级; 另一台仪表的

相对百分误差为±0.3%，由于国家规定的标准精确度等级中没有0.3级，所以该仪表的精确度等级为0.5级。

(2) 线性度

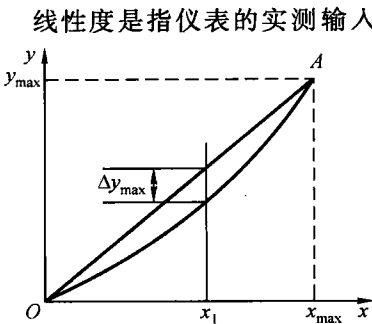


图 1-4 仪表的线性度

线性度是指仪表的实测输入输出特性曲线偏离理想直线型输入、输出特性曲线的程度。线性度常用实测输入、输出特性曲线与理想输入、输出特性曲线（直线型）的最大偏差对量程之比的百分数表示，如图 1-4 所示。量程用 A 表示，最大偏差用 Δy_{\max} 表示，则线性度 a 为

$$a = \frac{|\Delta y_{\max}|}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

线性度差会降低仪表精确度。

测量装置中也有很多其测量原理是非线性的。例如，对于孔板流量计，其流量变送器的输入是压差，输出电流信号则代表流量，二者呈平方根关系，此时不必提及线性度。

(3) 灵敏度

灵敏度是指仪表的响应变化（输出量增量）与相应激励变化（输入量增量）之比，它表示单位被测量的变化所引起的仪表输出量的变化量。对于线性仪表，其灵敏度

$$S = \frac{y}{x} = K \quad (1-6)$$

式中， K 为传递系数，且为常数。

对于非线性仪表，其灵敏度

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = f'(x) = \tan \varphi \quad (1-7)$$

此时，灵敏度是个变量，它与激励量有关，如图 1-5 所示。

一般来说，灵敏度是有单位的量。例如，某温度检测电桥的灵敏度是 $0.12 \text{ mV/V/}^\circ\text{C}$ ，表明当电桥电源为 5 V 时，温度每变化 1°C ，会产生 0.60 mV 的输出变化。

通常希望灵敏度在整个测量范围内是常数，以便读数。所以，在设计检测仪表时，应尽可能将输入输出关系 (x, y) 设计为 y 是 x 的线性函数。

对于测量原理呈非线性的情况，需要具体指明是在某一点处的灵敏度。而且要在可能出现极大、极小灵敏度的区域做相应的数据处理。

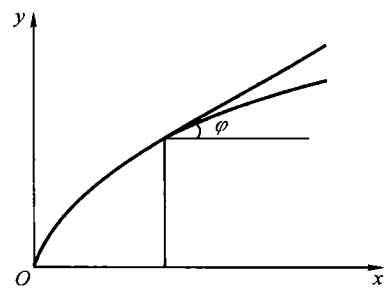


图 1-5 仪表的灵敏度

(4) 灵敏度阈、分辨率

由于仪表结构的各个环节可能会存在死区，如传递角位移的齿轮之间的啮合间隙，传力机构的静摩擦力等，并非任何微小的输入量都能够转化为输出量的变化。只有当输入量的变化大于某个限值以后，才会引起输出量的变化。这个限值就称为仪表的灵敏度阈，其单位与

输入量的单位相同。

分辨率是指测量装置能够区分被测量最小变化量的能力。使测量装置的响应产生可感知的变化 Δy_{\min} 的最小激励（输入）变化 Δx_{\min} ，称为灵敏限或分辨率。例如，使天平指针产生可感知的位移的最小激励变化 Δx_{\min} 为 90 mg，此值即为该天平的分辨率。为保证检测系统的测量准确度，工程上常规定分辨率应小于系统允许误差的 1/5。有些仪表则以其输入端不确定区的 1/2 作为分辨率指标。

(5) 变差

变差也称回差，表示在外界条件不变的情况下，同一仪表对某一参数进行正、反行程（即被测参数逐渐由小到大和逐渐由大到小）测量时，其输出特性（仪表的正向特性与反向特性）不一致的程度，如图 1-6 所示。

仪表的变差特性通常用最大相对变差来表示，它是指在仪表全部测量范围内，被测参数正、反行程所得两条曲线之间的最大偏差的绝对值与仪表量程之比的百分数，即

$$\text{变差} = \frac{\text{最大绝对偏差}}{\text{仪表量程}} \times 100\% \quad (1-8)$$

变差一般是由传动机构的间隙、运动部件的摩擦、弹性元件的弹性滞后等因素引起的。变差一般不应超过仪表的允许基本误差。

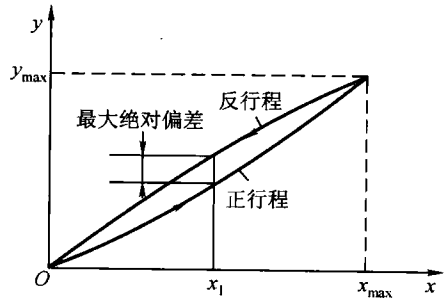


图 1-6 仪表的变差

(6) 重复性

重复性是指仪表在同一工作环境且被测对象参数不变的条件下，输入量按同一方向进行多次（三次以上）全程（0~100%）测量，其输入、输出特性曲线不一致的程度。仪表的重复性用输入、输出特性曲线间的最大偏差 Δ_{\max} 与量程 A 之比的百分数表示，如图 1-7 所示。

(7) 漂移

漂移是指在一定的输入信号和工作环境条件下，经过一段时间后输出的变化量。漂移一般用输出的变化量与量程之比的百分数表示。

(8) 再现性

再现性是指仪表对被测参数进行一次测量后，经过一段时间再在与原测量条件相同的情况下进行同样的测量，其输入、输出特性不一致的程度。再现性用规定时间内两次测量的输入、输出特性曲线的最大绝对误差与量程之比的百分数表示，如图 1-8 所示。

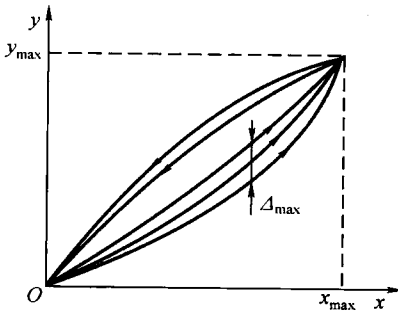


图 1-7 仪表的重复性

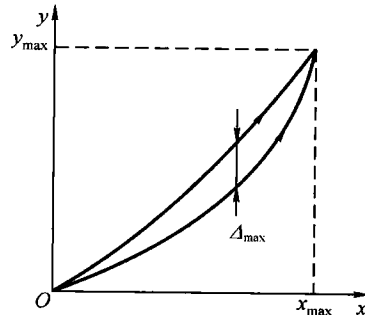


图 1-8 仪表的再现性

1.3.2 检测仪表的动态特性

动态特性是指检测仪表对随时间而变化的被测参数进行响应的性能。动态特性与静态特性的区别在于其输出量与输入量之间的关系并非一个定值，而是时间的函数，并随输入信号的频率不同而不同。在实际生产过程中，系统随时都存在着破坏平衡状态的扰动作用。平衡的稳定状态是相对的、暂时的，而不平衡的变化状态则是绝对的。许多被测参数往往是稳中有变，而其变化情况又是需要测量或研究的，有的参数还可能按正弦、脉动或阶跃等规律变化。显然，检测仪表或系统在测量动态（或非稳态、非静态）参数时，除了存在静态误差（或稳态误差）外，还可能产生动态误差。

(1) 动态误差

动态误差是指测量系统中被测参数信息处于变动状态下仪表示值与被测参数实际值之间的

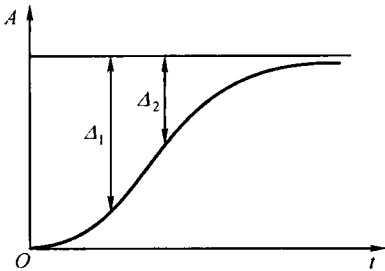


图 1-9 输入阶跃变化时水银温度计的动态响应曲线

的差异。例如，用水银温度计插入一杯沸水中测量温度时，需要等 3 分钟以上，温度计读数才能稳定，如果在 1 分钟或 2 分钟时便读数，就会有如图 1-9 所示的温度曲线，出现较大的动态误差 Δ_1 和 Δ_2 。这是因为此时沸腾水热量传递给温度计的过程尚未结束，还没达到热平衡状态，故有动态误差存在。

动态误差一般是由感测元件和测量系统中各种运动惯性及能量传递需要时间造成的。衡量各种运动惯性的大小及能量传递的快慢常采用时间常数 T 和传递滞后时间 τ 这两个参数。

(2) 瞬态响应特性与稳态响应特性

确定检测仪表或系统的动态特性通常有两种方法：一是在突然瞬变的非周期（如阶跃、脉冲、斜坡）激励作用下确定其动态特性；二是在振幅稳定不变的正弦激励作用下确定其动态特性。前者通常称为瞬态响应特性，后者则称为稳态响应特性。

① 瞬态响应特性参数

a. 时间常数 T 。以采用热电偶和自动平衡记录仪组成的检测系统为例，如被测参数有一阶跃变化，则记录仪所显示出来的响应曲线将按一定规律变化，如图 1-10 的指数曲线所示。图中， T 为热电偶与自动平衡记录仪的时间常数，它是表征曲线上上升快慢的一个指标。 T 越大，曲线上升越慢，动态误差存在的时间越长；反之，则曲线上升就快，动态误差存在时间就短。在检测系统中，人们希望 T 越小越好。

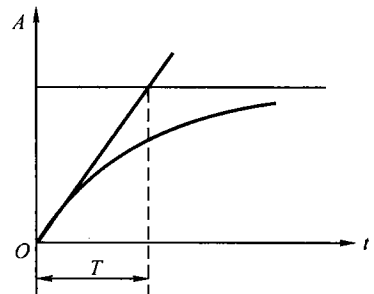


图 1-10 检测系统的响应曲线

b. 滞后时间 τ 。当被测参数作阶跃变化时，感测元件不能立即反映出其变化，而是要滞后一段时间才能开始反映。例如，在气体成分分析仪中，由于存在较长的取样管路，气体要经过这段管线进行预处理（除尘、除水等）后才进入分析仪中，这就产生了滞后，如图 1-11 所示。在滞后时间 τ 内，动态误差最大，且一直存在，而不像时间常数 T 对动态误差的影响那样是逐渐减小的，

故对测量或控制对象而言，要求 τ 越小越好。

② 稳态响应特性

系统在正弦输入信号作用下的稳态输出响应称为系统的频率响应。用频率响应来表达系统的动态性能，就产生了一种新的线性系统数学模型——频率特性。例如，指针式检测仪表或机械式传感器通常都包含有相对基座的可动部件，弹性部件和阻尼装置。假定系统限于在一个活动轨道上活动，这时该检测仪表就组成了一个单自由度的二阶系统，如图 1-12 所示。在外力 $F(t)$ 的作用下，质量为 m 的运动部件产生位移 y ，可得出任一单自由度二阶系统的频率响应特性为

$$H(j\omega) = \frac{k}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2\epsilon j \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)} \quad (1-9)$$

式中， ω_0 为系统无阻尼时的固有振动角频率； ϵ 为阻尼系数， $\epsilon = \frac{C}{2} \sqrt{\frac{1}{kn}}$ 。

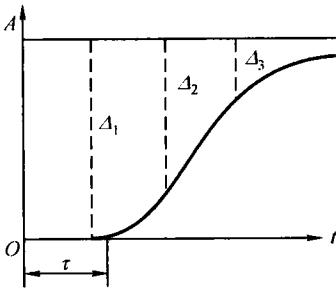


图 1-11 具有滞后的检测系统的响应曲线

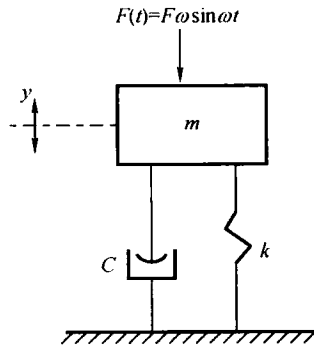


图 1-12 单自由度二阶振荡系统
C—阻尼系数；m—运动部件质量；k—弹性元件刚度；
y—位移；F(t)—按正弦规律变化的输入作用力

频率响应一般是个复数，可用指数式表达为

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

式中， $A(\omega)$ 为频率响应的模，即 $A(\omega) = |H(j\omega)|$ ，称为测量系统的幅频特性； $\varphi(\omega)$ 称为频率响应的复角，即 $\varphi(\omega) = \arg H(j\omega)$ ，称为检测系统的相频特性。以 ω 为自变量、 A (或 φ) 为因变量的曲线称为检测系统的幅频 (或相频) 特性曲线。

1.4 检测技术及仪表的发展

随着控制理论及电子技术的高速发展，在检测领域中出现了许多新的概念、新的理论和新的技术。

(1) 虚拟仪器

虚拟仪器是通过应用程序将计算机与功能硬件结合起来，形成的一种多功能、高精度、可灵活组合并带有通信功能的测试技术平台。其特点是：具有强大的运算、存储和通信能

力；通过功能硬件完成信号的获取、转换和调理；将测量和转换能力融合为一体。

虚拟仪器一般由计算机、功能模块和应用软件三大部分组成，它们之间通过标准总线进行数据交换。常用的虚拟仪器系统通常是经过信号调理的数据采集系统，带有通用仪器总线（GPIB）的测试系统，VXI 仪器测试系统以及它们三者的任意组合。

（2）软测量技术

软测量技术就是选择与被测变量（无法直接测量）相关的一组变量，构造某种以可测变量为输入，被测变量为输出的数学模型，用计算机进行数值运算，从而得到被测变量的估值过程。被测变量称为主导变量，可测变量称为二次变量或辅助变量。所建立的数学模型及相应的计算机软件被称为软测量估计器或软测量仪表。软测量的估计值可作为控制系统的被测变量或反应过程特征的工艺参数，为优化控制与决策提供重要信息。

软测量技术主要包括三部分内容：一是根据某种最优原则，研究建立软测量数学模型的方法，这是软测量技术的核心；二是模型实时运算的工程化实施技术，这是软测量技术的关键；三是模型自校正（模型维护）技术，这是提高软测量精度的有效方法。软测量的建模方法通常有两种：机理建模方法和辨识建模方法。

（3）模糊传感器

模糊传感器是以数值检测为基础，并能产生和处理相关的检测符号信息的装置，即以经典传感器数据检测为基础，通过运用模糊理论进行模糊推理与知识集成，以自然语言符号描述形式输出的一种传感器。

模糊传感器具有如下的特点：

① 以人的丰富知识和经验为基础，使用自然语言的方法，不依赖于系统精确的数学模型，最适用于无法精确解析建模的非线性复杂系统。

② 设计有人机接口，使有经验的操作者可通过人机界面把人的经验加入到测控系统中去。

③ 可吸收专家的操作者的经验，构成模糊规则并进行合成推理操作，通过自学习使规则不断地更新。因此，它具有知识性和自学习性。

④ 当采用不同的知识和经验对同一个被控对象进行控制时，可以调整不同的隶属度函数和模糊规则库，使它们都能达到良好的控制效果。

⑤ 在对非线性复杂系统或信息不足过程进行控制运算时，所用时间大大减少，提高了系统的实效。

（4）多传感器数据融合

多传感器数据融合是一种信息处理过程。它利用计算机技术，对按时间序列和空间序列获得的若干传感器观测信息，通过一定准则进行自动分析和综合，来完成所需的决策和估计任务。也就是将来自多传感器或多源的信息和数据，利用人类专家的综合信息处理能力进行智能化处理，从而获得更为广泛全面、准确可信的结论。由此可见，多传感器系统是多传感器数据融合的基础，多元信息是多传感器数据融合的加工对象，协调优化和综合处理是多传感器数据融合的核心。

多传感器数据融合系统主要有局部式数据融合和全局式数据融合两种形式。局部式也称自备式，是通过收集单个平台上的多个传感器数据，形成局部单元的信息显示的一种相对单一的智能检测系统。全局式也称区域式，是通过组合相关空间和时间内各不相同的多个平台

上的多个传感器的数据，形成多参数或参数间交叉影响的一种大型智能检测系统。

1.5 测量误差

测量误差是指检测仪表的测量值与被测量的真实值之间的差值。它的大小反映检测仪表的检测精度。在实际测量过程中，测量误差必然存在，环境中各种各样的干扰、所选仪表的精度等级、测量手段、测量技术水平等多种因素都可能造成测量误差。

1.5.1 测量误差的表示方法

(1) 绝对误差

被测量的测量值 x 与真实值 x_0 之间的差值称为绝对误差，记作 Δx ，即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-11)$$

绝对误差直接说明了仪表测量值偏离真实值的大小。对同一个真实值来说，测量产生的绝对误差小即说明测量结果比较准确。但绝对误差不能作为不同量程的同类仪表和不同类型仪表之间测量质量好坏的比较尺度，且不同量纲的绝对误差无法比较。

(2) 相对误差

为了更准确地描述测量结果的可信程度，通常把绝对误差与被测量的真实值（或测量值）作一比较，这就引入了相对误差的概念。相对误差比绝对误差更能说明测量值的准确程度。

① 实际相对误差

指被测量的绝对误差与真实值的比值，用百分数表示为

$$\delta_0 = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-12)$$

② 示值相对误差

示值相对误差也叫标称相对误差，是指被测变量的绝对误差与测量值的比值，用百分数表示为

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_x} \times 100\% \quad (1-13)$$

③ 引用相对误差

引用相对误差也叫相对百分误差，是指被测变量的绝对误差与仪表量程比值的百分数，可表示为

$$\delta_M = \frac{\Delta x}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中 x_{\max} ——仪表标尺上限刻度值；

x_{\min} ——仪表标尺下限刻度值；

A ——仪表量程。

在实际应用中，通常采用最大引用相对误差来描述测量的准确程度，可表示为