

过程检测控制 技术与应用

王耀南 主编

● ● ● ● ● ● ● ●

过程检测控制技术与应用

主 编 朱晓青

副主编 曹王剑

秦 斌

彭 涛

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

， 2002

内 容 提 要

本书分上下两篇共五章。上篇为过程检测,内容包括:测量、误差的基本概念;常用检测原理及方法;实际检测过程的解决方案。下篇为过程控制,内容包括:过程控制方法与发展趋势,以 PID 控制为主线,介绍各种控制方法与控制算法在各种控制器中的实现;实际过程控制解决方案,介绍了几套具有现场总线功能的控制系统,以及一些实际对象的解决方案,其中包括一个大型现场总线控制系统的成功实例。

本书可供科研开发人员和工程技术人员参考,亦可供高等学校相关专业教学和培训之用。

图书在版编目(CIP)数据

过程检测控制技术与应用/朱晓青主编.—北京:冶金工业出版社,2002.6

ISBN 7-5024-3045-8

I.过… II.朱… III.①自动检测 ②过程控制
IV.TP27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 046014 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 宋 良 美术编辑 王耀忠 责任校对 栾雅谦 责任印制 李玉山

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2002 年 6 月第 1 版,2002 年 6 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;17.25 印张;414 千字;265 页;1-3000 册

34.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

过程检测与控制是一门比较成熟的技术,随着电子技术、信息技术和网络技术的发展,它又是一门不断发展并且发展的速度可谓日新月异的技术。特别是近年来检测控制技术与信息网络技术的结合,使其在传统产业和新兴产业中的应用范围不断扩大。这些新技术也更加深入地融入实际的检测装置和控制装置当中。为使从事工程应用的工程技术人员对实际解决方案的理论依据和新技术的发展有较好的理解,也为了便于从事教学或刚步入实际工程应用的人员对传统理论及其发展,以及将这些理论如何运用于实际工程的解决方案当中有较好的了解,特编本书。

本书集作者多年来从事检测控制技术应用与教学的经验和体会,在参考了大量检测控制理论和应用技术的基础上,引证了检测控制技术的经典结论和主要推导过程,介绍了这些理论在检测控制装置中的实现方法,以及在实际工业对象中的解决方案与应用实例。书中还特别介绍和讨论了控制系统网络化和现场总线化技术的发展,同时介绍了运用网络技术和现场总线技术对工业对象进行监控的解决方案,以及某大型项目的成功应用。

本书定位于使大专院校学生了解检测控制理论的实际应用过程和对具体工业对象的解决方案;使从事实际应用开发的科技工作者和工程技术人员了解所用成果的理论依据,以及现场应用中易出现的问题和解决办法。

本书编写分工为:第一章 曹王剑;第二、三章 朱晓青、曹王剑;第四章 朱晓青、秦斌、彭涛;第五章 朱晓青,参加第五章编写工作的还有易英敏、文智佳、郭跃平、肖云贵、苏亚南等。全书由朱晓青任主编并统稿,曹王剑、秦斌、彭涛任副主编,朱晓青、曹王剑审校。

本书初稿由刘辉、吴建宏等帮助录入,在此表示感谢。同时还要感谢为本书提供建议与帮助的人们。

由于编者学识所限,书中不当之处,敬请读者批评指正。

主 编
2002年4月

目 录

上篇 过程检测

第一章 过程检测技术基础	1
第一节 检测概论	1
一、过程检测的对象与需求	1
二、检测装置的组成与功能	1
三、检测系统的类型	2
第二节 检测系统的特性	3
一、检测系统的静态特性	4
二、检测系统的动态特性	6
第三节 检测系统的误差理论	7
一、误差的定义	7
二、误差的表达方法	8
三、误差的分类	9
四、误差的发现、判别及提高精确度的方法	11
五、测量结果的数据处理	14
第四节 检测系统的可靠性	16
一、可靠性的基本概念与特征量	16
二、可靠性设计	19
三、软件可靠性	19
参考文献	20
第二章 实现检测的方法	21
第一节 常规检测方法及其实现	21
一、信号感应	21
二、信号的适调	38
三、信号的处理	42
四、信号的显示与记录	44
第二节 流量检测方法及其实现	50
一、体积流量检测方法	50
二、质量流量检测方法	71
参考文献	78

第三章 实际检测过程的解决方案	79
第一节 检测方法和仪表的选型设计与应用思路	79
一、选型设计基本程序	79
二、安装与应用	81
三、被测介质的特性问题	82
第二节 清洁介质的流量检测	84
一、节流装置的选型	84
二、均速管流量计	92
三、变送器的选型设计	96
四、智能计算器的选型与组态	98
第三节 含杂质煤气的流量检测	103
一、采用节流装置检测	103
二、点流速测量法	104
三、径流速测量法——均速管流量计	104
第四节 管外非接触流量检测	105
一、非接触测量方法及仪表的选择	105
二、多普勒超声波流量计的应用	105
三、对于非满管流动的流体测量	106
第五节 明渠流量检测	106
一、堰式流量计	107
二、槽式流量计	107
三、潜水型电磁流量计	108
四、流速—面积测量法	109
五、平均流速公式法	109
六、流速—液位复合传感器	109
第六节 大流量高温气体检测	110
第七节 腐蚀与矿浆介质的流量检测	111
一、电磁流量计的选型设计	111
二、差压式流量计	115
三、科氏力式流量计	115
四、液固两相流中固体量的测量	115
第八节 黏性介质的流量检测	116
第九节 微小流量的检测	119
一、常用小口径流量计种类	119
二、设计选型及应重点关注的问题	120
第十节 粉尘物料物位检测	123
第十一节 物料检测	125
一、动态称量	125
二、静态称量	129

第十二节 溶液成分分析	132
一、98%硫酸浓度检测	132
二、93%硫酸浓度检测	134
三、低含量成分分析	135
第十三节 气体成分分析	140
一、含氧量分析	140
二、红外气体分析	143
三、取样系统	144
第十四节 检测实验室的建立	145
一、检测的溯源性要求	145
二、检测实验室标准器的配置	145
参考文献	150

.....

下篇 过程控制

.....

第四章 过程控制方法与发展趋势	153
第一节 过程模型	153
一、模型简介	153
二、静态模型	154
三、动态模型	154
四、阶跃响应	155
五、其他模型	155
第二节 简单 PID 控制	156
一、PID 控制原理	156
二、Z-N 整定方法	158
三、自整定 PID 控制策略	162
四、自整定 PID 控制结构	163
五、基于启发式推理技术的参数自整定	164
第三节 复杂控制系统	164
一、前馈-反馈控制系统	165
二、前馈-串级控制系统	166
三、伪微分反馈控制系统	167
四、专家式智能 PID 控制系统	167
五、基于神经网络的 PID 控制系统	169
六、模糊 PID 控制系统	170
第四节 控制算法的实现	174
一、回路功能图	174

二、控制功能的实现	174
第五节 执行机构	180
一、调节阀的计算	180
二、调节阀的结构	182
第六节 控制系统网络化、现场总线化的发展	186
一、网络体系结构	186
二、现场总线控制系统	191
(一)现场总线技术的一些基本问题	191
(二)现场总线设备	191
(三)Foundation Fieldbus	194
(四)Profibus	195
(五)ControlNet	197
(六)LonWorks	197
(七)CC - Link	198
(八)其他总线	199
三、控制网络的开放	201
参考文献	203
第五章 实际过程控制的解决方案	204
第一节 几种典型的控制系统	204
一、ABB 公司的 Freelance2000 控制系统	204
二、EMERSON PROCESE MANAGEMENT 公司的 DeltaV 控制系统	208
三、ROCKWELL AUTOMATION 公司的 ProcessLogix 控制系统	211
四、SIEMENS 公司的 PCS7 控制系统	213
五、SMAR 公司的 System302 控制系统	216
第二节 工业过程控制的解决方案实例	219
一、单回路调节器实现炉膛标温控制	219
二、单回路调节器实现 pH 值检测与控制	222
三、工控机实现反射炉专家控制	225
四、集散系统实现焙烧炉及余热锅炉控制	228
五、计算机控制系统实现浸出过程控制	236
六、基于现场总线技术的工厂 Web 控制网络集成	243
参考文献	264

上篇 过程检测

第一章 过程检测技术基础

第一节 检测概论

一、过程检测的对象与需求

在工业生产中,反映过程状况的参数有很多,常见的有温度、压力、流量、料量、物位、成分、密度等。这些参数的检测构成了过程检测的基本内容,这对于保证产品的产量与质量,对于企业节能降耗增效、提高市场竞争力,对于保障安全与清洁生产,都起着十分重要的作用。

过程检测是生产过程自动控制系统的重要组成部分。要实施任何一种控制,首要问题是要准确及时地把被控参数检测出来,并变换成调节、控制装置可识别的方式,作为过程控制装置判断生产过程的依据。因此,过程检测是实现生产过程自动化、改善工作环境、提高劳动生产率的重要环节。例如,加热炉的温度控制,首先应对被测对象——炉膛进行测定,将测定的数据——炉温——供岗位操作人员或生产管理人员掌握炉况,并将此工况值送入调节或控制装置以便实施自动控制。

二、检测装置的组成与功能

检测装置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(如热工参数——温度、压力、流量;力参数——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。

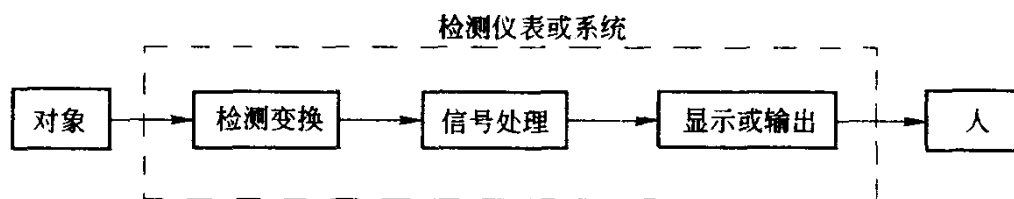


图 1-1 测量装置组成框图

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,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,变换成标准的信号输出给测量链中后续仪表。如电动差压变送器将输入的差压信号经变换、放大转换为标准的电流信号(0~10mA、4~20mA)输出。

显示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、安装时如不按规范要求布置、匹配和选择,则易造成失真或引入干扰等。

三、检测系统的类型

在企业生产中,不同行业生产流程复杂多样,被测对象的多样性和复杂化对过程检测提出了诸多要求。从企业的原辅材料、燃料进厂到生产过程安全、环保、质量、产品监控,直至产成品出厂,无一不涉及检测问题。下面介绍常见的检测分类方法。

1. 按被测参数分类

常见的被测参数有过程参数、电气参数和机械参数等几大类:

电气参数有电能(功率)、电流(含大直流)、电压、频率等;

机械参数有重量、距离、振动、缺陷检查、故障诊断等。

过程参数主要是热工参数,通常又可细分为温度、压力、流量、物位、密度、成分分析等,每一种参数又因被测对象范围、特性不同需采用不同的检测方法和装置。因过程参数检测仪表用量大、检测介质多变、所处环境恶劣(如强腐蚀、烟尘多、温度高、易结晶等),故作为本书的重点内容。

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,通常可据此分为标准表、实验室表和工业用表三种。

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

(2)实验室仪表精确度较工业仪表高,但对使用环境(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)标准表是专用于校准工业用表和实验室仪表的。各企业在用计量标准表或最高标准表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。

3. 按是否接触被测介质分类

可分为接触式和非接触式检测仪表。

(1)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)非接触式仪表不直接接触被测对象(或介质),而是间接感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物直接接触,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。其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。

4. 按被测对象状态分类

检测仪表按被测对象状态可分为静态和动态测量。静态测量是指被测对象处于稳定状态,其被测参数不随时间变化;动态检测则是指被测对象处于不稳定状态,或被测参数随时间变化的情况下实施的测量。

在通常情况下,过程检测实际上都应属于动态测量,因为生产过程的各种参数大多是随时间变化,运动是绝对的,但要测量瞬态值极为困难。因此,若被测参数随时间作缓慢变化、检测仪表响应或测量时间相对很短时,可将被测对象视为稳态,即将测量视为静态测量。

5. 按仪表各环节连接方式分类

如前所述,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与闭环式之分。

(1)开环式仪表。仪表中各环节按开环方式连接,如图 1-2 所示,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。

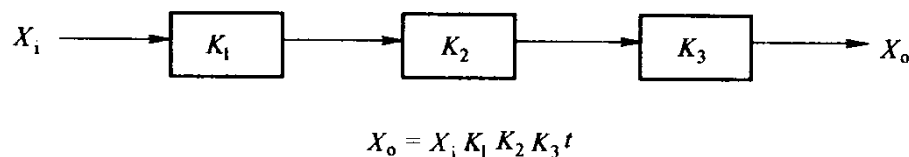


图 1-2 开环式仪表方框图

(2)闭环式仪表。又称反馈式仪表,如图 1-3 所示。闭环式仪表的最大特点是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,故在很大程度上消除或减小了其他环节的影响。

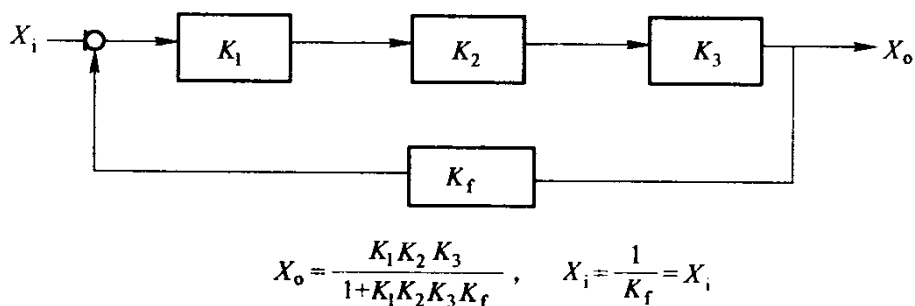


图 1-3 闭环式仪表方框图

6. 按获得检测结果的手段分类

可分为直接测量、间接测量和组合测量。

(1)直接测量系指可通过测量直接在仪表上获得被测量值,而不需通过补充计算。

(2)间接测量系统则是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)组合测量是为了同时确定多个未知量,可以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。

第二节 检测系统的特性

为了获得准确的测量结果,检测系统应满足一定的特性要求,大多数场合,此特性常常是针对输入-输出特性而言的。检测系统输入-输出特性主要包括两方面,即静态特性和

动态特性。要认识检测系统,就需通过特性分析实现。

一、检测系统的静态特性

当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稳态关系,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、灵敏度、分辨率、线性度和滞环等。

1. 精确度

精确度是指检测装置给出接近于被测量真值的示值的能力。所谓示值,是指由测量装置提供的被测量的量值,包括记录仪表的记录值、测量装置的测量输出等。精确度等级则是指检测装置符合一定的测量要求使其误差保持在规定极限以内的级别。常用的精确度等级有:0.1,0.2,0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,4.0等。

2. 灵敏度

灵敏度是测量装置或系统响应变化(输出量增量)与相应激励变化(输入量增量)之间的函数关系,它表示单位被测量的变化所引起的检测系统输出量的变化量。

对于线性测量系统,其灵敏度

$$S = Y/X = K \quad (1-1)$$

式中, K 为传递系数,且为常数。

对于非线性测量系统

$$S = \Delta Y/\Delta X = f'(x) = \tan \varphi \quad (1-2)$$

此时灵敏度是个变量,它与激励量有关。

在测量范围内,灵敏度不是常数,如图1-4所示。

3. 分辨率

分辨率是指测量装置能够区分被测量最小变化量的能力。如使指针开始发生可察觉的偏摆量,使测量系统的响应产生可感知的变化 $\Delta Y_{\min}$ 的最小激励(输入)变化 $\Delta X_{\min}$,称为灵敏阈或灵敏限。如使天平指针产生可感知的位移的最小激励变化 $\Delta X_{\min}$ 为90mg,此值即为该天平的灵敏限。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;有些仪表则以它的输入端不确定区的1/2作为分辨率指标,如图1-5所示。

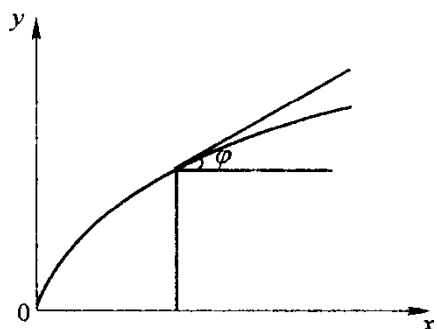


图1-4 测量装置的灵敏度

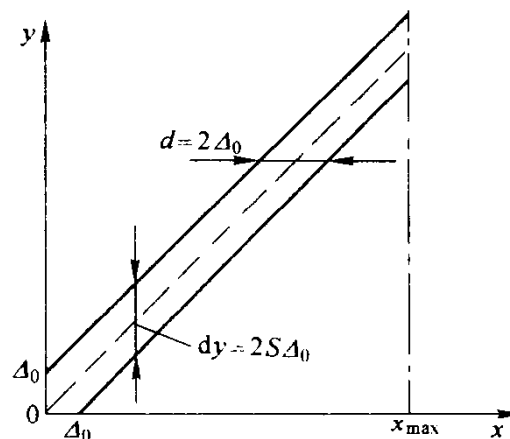


图1-5 具有恒定绝对误差的仪表静特性

4. 线性度

线性度是指测量系统的输出值与被测量间的实际曲线偏离理想直线型输入输出特性的程度。常用实测输入-输出特性与理想输入-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 1-6 所示。图中量程用 A 表示,最大偏差用 $\Delta y_{\max}$ 表示,线性度 a 为

$$a = \frac{|\Delta y_{\max}|}{A} \times 100\% \quad (1-3)$$

线性度差会降低仪表精确度。

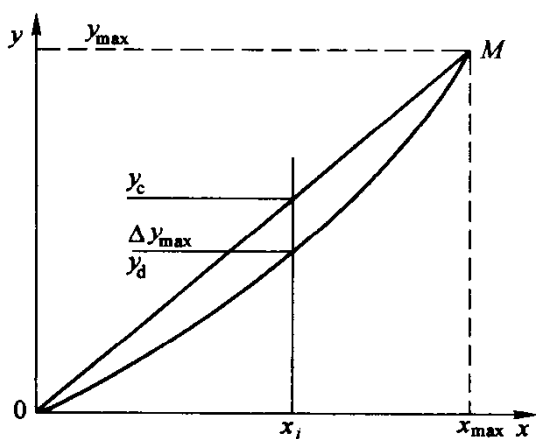


图 1-6 求取仪表线性度的示意图

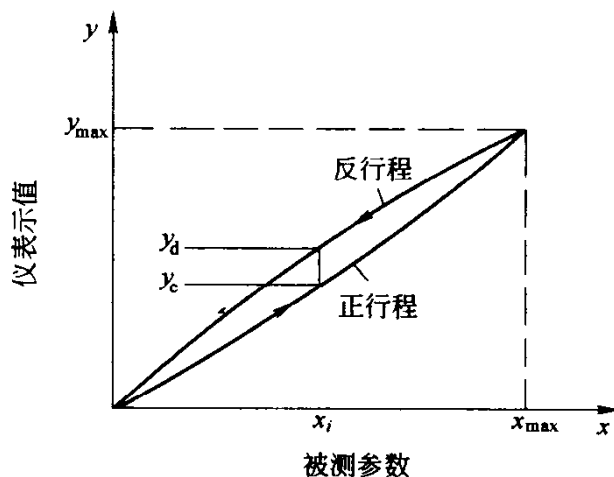


图 1-7 滞环误差示意图

5. 变差

变差表示在外界条件不变的情况下,一个测量装置的输入作增大与减小变化时,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 1-7 所示。假设当被测量或输入量由小于 x_i 点连续增大到 x_i 点时的输出为 y_c ,而当被测量由大于 x_i 点连续下降到 x_i 点时的输出为 y_d ,两者的差值称为回差(又称滞环误差、回程误差) δ_n :

$$\delta_n = |y_d - y_c| \quad (1-4)$$

产生误差的原因一般是由于传动机构的间隙、运动部件的摩擦、弹性元件的弹性滞后等影响。变差一般不应超过仪表的允许基本误差。

6. 重复性

重复性有别于变差,是指测量装置在同一工作环境、被测对象参量不变条件下,输入量按同一方向作全量程变化,进行多次(三次以上)测量,其输入-输出特性不一致的程度。重复性误差用输入-输出特性的最大偏差 $\Delta y_{\max}$ 对量程的百分数表示,如图 1-8 所示。在实际应用中,重复性误差可按标准差计算,即

$$\delta_z = \pm (2 \sim 3) \frac{\delta}{A} \times 100\% \quad (1-5)$$

7. 再现性

再现性是指测量装置对被测量进行同一次测量之后,经过一段时间后再在原测量条件相同的情况下,再次进行测量时,其输入输出特性不一致的程度。用规定时间内两次测量的输入输出特性最大非再现性误差对量程 A 之比用百分数表示,如图 1-9 所示。

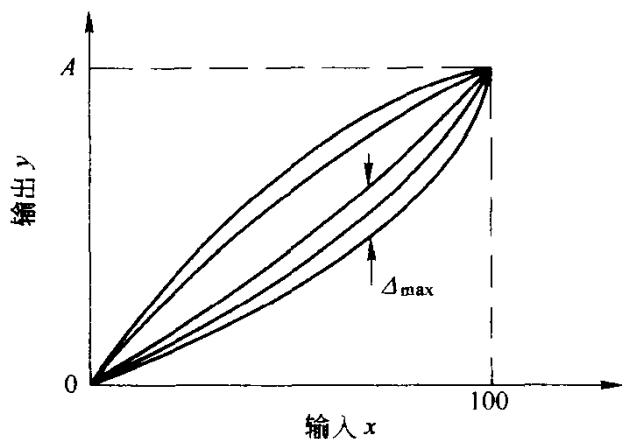


图 1-8 重复性

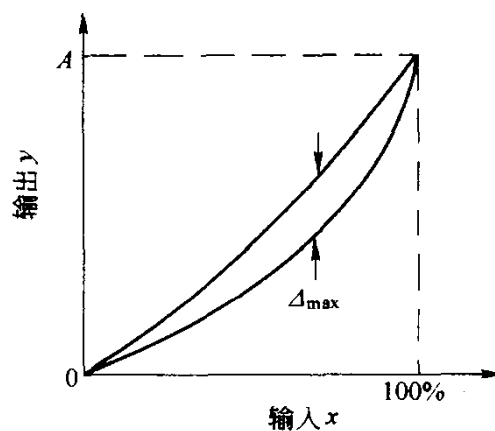


图 1-9 再现性

二、检测系统的动态特性

动态特性是指检测系统对随时间而变化的被测量所响应的性能。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。因为实际生产过程中,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。因此许多被测参数往往是稳中有变,而它的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、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。

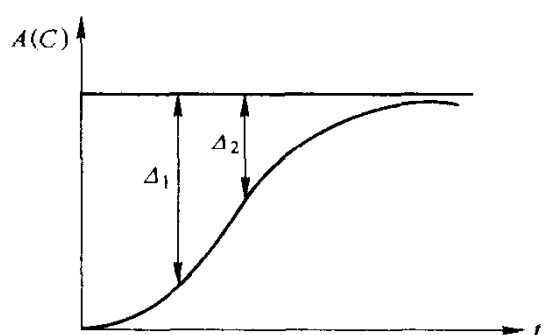


图 1-10 输入阶跃变化时体温表的动态响应

(一) 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差异。例如用水银温度计插入一杯沸水中测量温度,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,就会如图 1-10 温度曲线所示,出现较大的动态误差 Δ_1 和 Δ_2 ,因为此时沸腾水热量传递给温度计的过程尚未结束、没达到热平衡状态,故有动态误差存在。

动态误差产生原因一般是由于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所造成。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。

(二) 瞬态响应特性与稳态响应特性

确定测量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,二是在振幅稳定不变的正弦激励作用下。前者通常称为瞬态响应特性,后者则称为稳态响应特性。瞬态响应特性有如下两个参数。

1. 瞬态响应特性

(1) 时间常数。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反应曲线将按一定规律变化(如图 1-11 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,它是表征温度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,数值越大;若 T 越小,曲线上升越快,动态误差存在时间越短,数值越小。在检测系统中,人们希望 T 小为好。

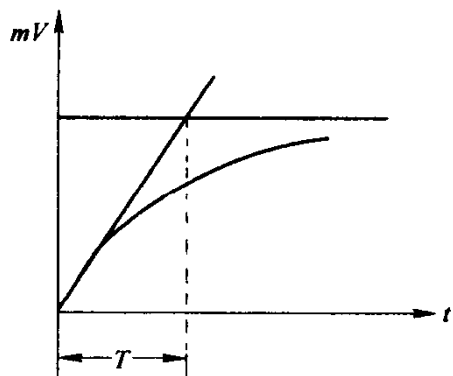


图 1-11 检测系统的反应曲线

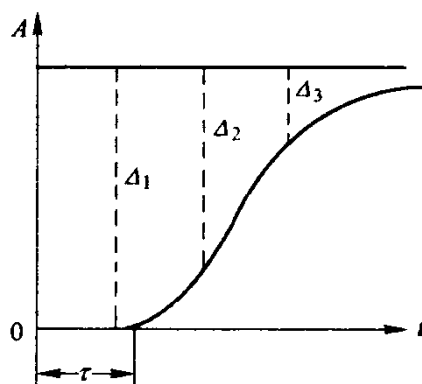


图 1-12 具有滞后的反应曲线

(2) 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。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 1-12 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。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 1-13 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特性为

$$H(j\omega) = \frac{K}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2 + 2\xi j(\frac{\omega}{\omega_0})} \quad (1-6)$$

式中, ω_0 为系统无阻尼时的固有振动角频率; ξ 为比阻尼系数, $\xi = c/2\sqrt{kn}$ 。

频率响应一般是个复数,可用指数式表达为

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (1-7)$$

式中, $A(\omega)$ 为频响的模,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 $\varphi(\omega) = \arg H$,称为检测系统的相频特性。以 ω 为自变量, A (或 φ) 为应变量的曲线,称为检测系统的幅频或相频特性曲线。

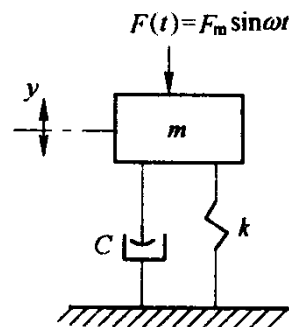


图 1-13 单自由度二阶振荡系统图

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

第三节 检测系统的误差理论

一、误差的定义

所谓误差,就是测量值与该被测量真实值之间的差异,即

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

如真值为 6.42A 的电流,在电流表上的示值为 6.34,则电流表此时误差为 -0.08。公式

中的测量值是测量系统或仪表检测被测量的显示值,在不同场合称谓略有不同。常用的有给出值、实验值、示值、标称值、预置值、计算近似值等。

真值是在某一时刻和某一位置或状态下,某量的效应体现出的客观值或实际值,这是一个理想的概念。一般说来,真值是未知的。但从相对的意义来说,下列情况的真值被认为是可知的:

(1)理论真值,包括理论设计值、理论公式表达值,如平面三角形三个内角之和恒为 180° 。

(2)计量学约定真值,如国际计量大会决议的长度、质量、时间、电流强度等七个基本单位;

(3)标准器相对真值。高一级标准仪器的误差为低一级标准仪器或普通仪器仪表的误差的 $1/5$ (或 $1/3 \sim 1/20$)时,则可认为前者是后者的相对真值。例如,铂电阻温度计复现的温度值,相对于普通温度计指示的温度值而言是真值。

二、误差的表达方法

在实际测量中,误差的表示方法有多种,其含义、用途各有不同。通常分为绝对误差和相对误差。

(一)绝对误差

绝对误差是某被测量的测量结果与被测量的真值之间的代数差,可用下式表示

$$\Delta = X - A \quad (1-8)$$

式中, Δ 为测量数值的绝对误差; X 为测量结果,即用仪表测量未知参数时的读数; A 为真值,该式所表达的误差和测量值同单位(量纲),可反映测量值偏离真值的大小和方向(正或负)。

绝对误差一般适用于标准器具或仪表的标准。在精密测量中,通常为消除误差的影响,采用加修正值的方法,即真值 = 测量值 + 修正值,修正值与绝对误差大小相等、符号相反。如用一支温度计测温,当实际温度为 65°C 时,而温度计示值却为 65.5°C ,其相对误差为 $\Delta = +0.5^\circ\text{C}$,则修正值 C 为 $-\Delta = -0.5^\circ\text{C}$,实际值 = 示值 + $C = 65.5 + (-0.5) = 65^\circ\text{C}$ 。

但要注意:①修正值只能消除系统误差造成的影响。②测量仪表的示值在各处出现的误差有规律(重复性);③由于修正值不准或标准仪器操作方法欠妥,虽经修正仍不是真值或错误修正(符号、数值弄错),反而会得到更坏的结果,应谨慎小心。

用绝对误差来说明测量精确度的高低,在被测量值大小相近时是比较清楚的。但是当被测量相差悬殊时,单纯用误差的绝对大小就很难确切地说明哪一个测量质量更高了。例如称重 50g 时的绝对误差为 $\pm 1\text{g}$,而称重 20kg 时的绝对误差为 $\pm 5\text{g}$,自然绝对误差 1g 要比 5g 小,但在两个重量相差悬殊的前提下是不宜用绝对误差比较的。为此,从被测量大,容许有较大的绝对误差这一相对性出发,提出了相对误差的概念。

(二)相对误差

相对误差可用三种方式表示。

1. 实际相对误差

$$\text{相对误差 } \delta = \frac{\text{绝对误差 } \Delta}{\text{真值 } A} \times 100\% \quad (1-9)$$

2. 示值相对误差

由于被测量的真值 A 需用极精确的仪表才能获得真的近似值,因此一般工程上所指的

相对误差都以测量仪表的示值代替真值,这样计算所得的相对误差实际上是示值相对误差。

$$\text{示值相对误差 } \delta_G = \frac{\text{测量示值的绝对误差 } \delta}{\text{测量示值 } G} \times 100\% \quad (1-10)$$

3. 引用误差

这是一种简化的相对误差,常常在多挡或连续刻度的仪器仪表中应用。因为这类仪表可测量的不是一个点,而是一个范围、一个量程段,整个量程内各刻度点上的示值和相对应的真值都不一样。示值相对误差不一定是一个固定值,若同一台仪表在全部量程内的绝对误差是一个变化不大的值,则在测量示值较小时,其相对误差显然就大,这还是不便于进行比较。为了工程上计算简便、合理,计算和划分精确度等级一律取该仪表量程中的最大值(满刻度值)作分母,由此引出引用误差的定义为:

$$\text{引用误差} = \frac{\text{绝对误差 } \Delta}{\text{仪表量程}} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中,量程为仪表同一测量挡刻度上限值与刻度下限值之差。

在实际测量中,为更好地说明测量结果,有时同时使用相对误差与绝对误差。如用数字电压表测量电压,由于原理上的原因,数字电压表工作时的最后一位总在 ± 1 位数字范围内不停地跳动,它的测量误差常表示为 $\Delta = 1 \times 10^{-4} u_x \pm 1$ 位数字,其中 $1 \times 10^{-4} u_x$ 即为相对误差。

三、误差的分类

从不同角度出发,测量误差有不同的分类方法。下面介绍几种最常用的分类方法。

(一)按误差产生的来源分类

1. 测量装置误差

测量装置误差又称工具误差,是指测量装置本身不完善引起的误差,例如仪表各部件或元件配合不稳定、变形、沾污,刻度或分度欠准确、读数分辨率有限、设计制造缺陷等均会引起误差。装置误差又可细分为标准器误差:如标准电阻、标准砝码本身体现出的量值也不可避免地含有误差;仪表误差:任何测量都离不开测量装置或仪表,凡是用于直接或间接测量的检测系统或仪表本身都具有误差;附件误差:仪表测量时所需某些附件如转换开关也会造成测量误差。装置误差一般表现为机构误差(如等臂天平不等臂,量块不平行性或不平面度,触点和连接导线的接触电阻等)、调整误差(如偏心、不水平)、量值误差(提供标准量值本身的准确性及随时间的不稳定性、空间位置变化的不均匀性,如电池的老化、晶振器频率的长期漂移和短时波动)和变形误差等形式。

2. 方法误差

方法误差是因测量方法欠完善或所依据的理论欠严密等因素所产生的误差。这在工程测量中也常遇到,例如用内阻较小的电压表去测量较大电阻值两端的电压时,显然电压表的接入改变了电路中电压分布,这样测得的电压值必然欠准确。

3. 人员误差

人员误差是由于测量操作人员在测量过程中受分辨能力的限制、因工作疲劳引起视觉器官的生理变化或固有习惯引起读数误差以及精神上的因素产生的一时疏忽等所引起的误差。如记录某一信号时,测量者对准标志读数时始终偏左或偏右、偏上或偏下。