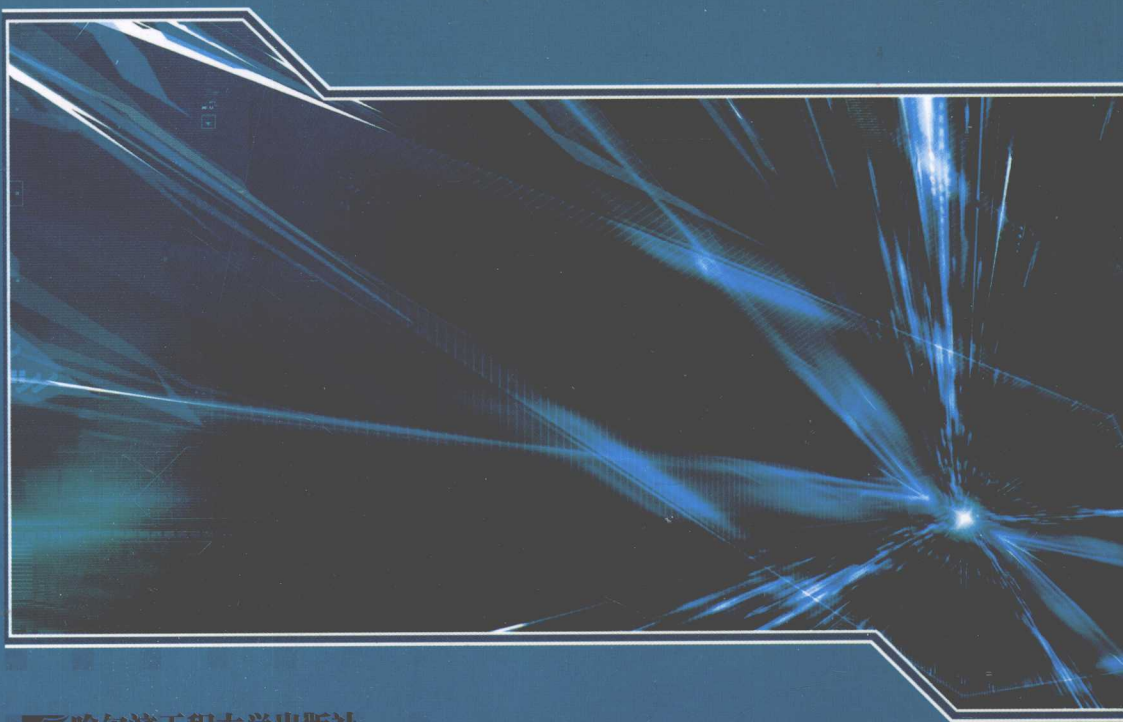




国防特色教材·核科学与技术

核工程检测技术

主 编 夏 虹



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社



国防特色教材·核科学与技术

核工程检测技术

主 编 夏 虹

副主编 刘永阔 曹欣荣

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书共分8章,着重叙述了温度、压力、流量、液位、位移、振动、转速及中子通量等核动力工程中主要参数的测量原理、测量方法、测量系统的组成及误差分析,并对目前发展迅速的计算机测试技术作了概要介绍。

本书可作为高等学校核工程与核技术专业及热动力工程类等相关专业的教学用书,也可作为从事相关专业的研究生、工程技术人员参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

核工程检测技术/夏虹主编.—哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-81133-536-1

I.核… II.夏… III.核工程—检测 IV.TL

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 157352 号

核工程检测技术

主编 夏虹

责任编辑 石岭

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街 124 号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

肇东粮食印刷厂 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:19.5 字数:340千字

2009年9月第1版 2009年9月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-81133-536-1 定价:41.00元

前 言

随着科学技术的迅速发展以及当今社会对高等教育提出的要求,培养学生掌握一定的实验测试知识与技能是十分重要的,而且已成为高等学校不可缺少的教学环节;尤其是当今计算机技术、传感器技术、激光技术等新技术的应用,为测试技术注入了大量新的内容。为此本教材既注重保持基础性的、广泛应用的一些测试技术的理论和知识,又力求反映测试技术的新成就、新发展和新趋势,特别是结合了核电站中过程参数的检测技术。

本教材是在前一版教材(2002年版)的基础上结合教学实践和核工程检测技术的发展进行了修订,并根据教材修订审评专家的意见增加了两相流测量的内容,删减了流速测量内容,每章后面都附有习题和思考题。本教材共分九章,主要包括热工参数(温度、压力、流量、液位)、机械量(位移、转速、振动)及核参量(中子通量、辐射剂量)等核工程与核技术主要参数的测量技术,并对目前发展迅速的计算机测试技术进行了概略介绍。本书可作为核工程与核技术专业及热能动力工程类专业的教学用书,也可供相关专业的研究生、科研人员参考。

本书是由哈尔滨工程大学的几位教师在多年科研和教学实践基础上合作编写而成的。第一版的第1,5,6,7章由夏虹编写;第2,3,4,9章由董惠编写;第8章由曹欣荣编写。第二版将第一版中的第4章流速检测删除,增加了气液两相流检测的内容。在第一版的基础上,第1,4,5,6章由夏虹执笔修改,第2,3,8章以及各章所附思考题由刘永阔执笔修改,第7章由曹欣荣执笔修改,夏虹教授统稿。感谢慕昱、李伟哲、张亚男、罗端、黄华等研究生对本书再版修订工作所给予的帮助。

本书在编写过程中,参考了很多兄弟院校编写的教材,在此一并致谢。

限于编者们的学识有限,本书所存在的不足或不妥之处恳请读者给予批评和指正。

编 者

2008年10月于哈尔滨工程大学

目 录

第 1 章 检测的基本知识	1
1.1 测量及测量方法	1
1.2 测量系统的组成	3
1.3 误差的基本概念	5
1.4 测量仪表的质量指标	7
思考题与习题	13
第 2 章 温度检测	14
2.1 概述	14
2.2 热电偶温度计	17
2.3 膨胀式温度计	29
2.4 电阻式温度计	34
2.5 测温显示仪表	39
2.6 温度变送器	48
2.7 接触式测温技术	52
2.8 非接触式温度计	64
2.9 温度检测仪表在压水堆核电站的应用	71
思考题与习题	75
第 3 章 压力检测	77
3.1 概述	77
3.2 液柱式压力计	79
3.3 弹性式压力计	82
3.4 电气式压力计	87
3.5 测压仪表的选择、安装与标定	99
3.6 气流压力测量	106
3.7 反应堆冷却剂回路压力测量	112
思考题与习题	113
第 4 章 流量检测	114
4.1 差压式流量计	114

4.2	速度式流量计	141
4.3	质量流量计	159
4.4	主冷却剂流量测量	169
4.5	流量测量仪表的校验与分度	170
4.6	气液两相流流量测量	172
	思考题与习题	185
第5章	液位测量	187
5.1	静压式液位计	187
5.2	电容式液位计	190
5.3	超声波液位计	194
5.4	核辐射式液位计	199
	思考题与习题	202
第6章	机械量检测仪表	204
6.1	位移检测仪表	204
6.2	转速测量仪表	213
6.3	振动测量传感器	218
	思考题与习题	222
第7章	反应堆核测量与辐射监测	223
7.1	核仪表的工作原理	223
7.2	核反应堆核测量系统	236
7.3	辐射监测系统	247
	思考题与习题	259
第8章	计算机测试技术与系统	260
8.1	智能传感器	260
8.2	自动数据采集系统	263
8.3	计算机辅助测试系统	267
8.4	虚拟仪器及系统	272
	思考题与习题	273
附录		274
参考文献		304

第 1 章 检测的基本知识

核工程检测仪表是用于检测核岛及常规岛中有关参数的仪表,是核设备安全、可靠及经济运行的重要装备之一。核工程检测仪表的主要功能是检测核电站在启动、停闭和正常运行过程中的温度、压力、流量、液位、中子通量、辐射剂量及机械量等参数,并为自动调节和控制这些参数,乃至整个系统运行过程提供精确可靠的信息,进而保证核电站的安全、可靠、正常运行。检测参数信号分别送往指示、记录、报警、控制、保护和计算机系统。大多数常规仪表可以用于反应堆参数检测,但应满足核电站检测的特殊环境和要求,主要应注意以下几个问题:

(1)仪表的量程与精度必须符合被测参数的指标要求,并考虑极端事故条件下的需要,用于安全保护的仪表,其响应速度必须满足保护系统的要求;

(2)那些在事故状态下仍然必须继续执行规定任务的仪表,必须能适应事故状态下的恶劣环境,包括耐高压、高温、高辐照,以及必须维持的工作时间等;

(3)放入冷却剂管道内的探测器的任何元部件,应不妨碍对管道的检修,使用的材料应与燃料元件和冷却剂相容;

(4)主冷却剂流量测量的方法应是最直接的,并且在整个运行范围内能给出可靠的指示,选择的测量位置应能反映出泵速与阀位变化所引起的流量变化;

(5)启动保护动作的热工参数测量应符合保护系统设计原则,如重复性、多样性、独立性、可试验性和可维修性等。

1.1 测量及测量方法

1.1.1 测量的概念

测量就是用实验的方法和专门的设备,取得某项需要确定其数量概念的参数(称为被测量)与定义其数值为 1 的同类参数(称为单位)的比值,它可用下式表达:

$$a \approx \frac{A}{U} \quad (1.1)$$

式中, A 为被测量; U 为选用的单位; a 为比值。

被测量的测得值为比值乘以单位,即 $a \cdot U$ 。式(1.1)取近似相等是因为任何测量都必然存在误差,测量方法和所用的设备都不可能是尽善尽美的。测量工作包括测量方法和测量设备的选择,以及测量数据的处理(确定误差的界限和测量结果的可靠程度)等。

1.1.2 测量方法

测量方法的选择对测量工作是十分重要的,如果方法不当,即使有精密的测量仪器和设备也不能得到理想的结果。测量方法的分类有许多种,根据具体研究问题的不同而采用不同的分类方法。按如何取得测量结果进行分类测量方法有如下几种:

(1)直接测量法。用基准量值定度好的测量仪表对被测量直接进行测量,直接得到被测量的数值,如用压力表测量容器中气体的压力等,此法简单迅速。

(2)间接测量法。利用被测量与某些量具有确知的函数关系,用直接测量法测得这些有关量的数值,代入已知的函数关系式中算出被测量的数值,例如在稳定流动的情况下,通过测量流过某截面流体的质量和时间来精确地测量流量,因为称重和计时都可以达到很高的精度。

(3)组合测量法。当被测量与直接测量的一些量不是一个简单的函数关系,需要求解一个方程组才能取得该值时采用组合测量法。如测量某电阻的温度系数,其电阻值与温度的关系为 $R_t = R_0(1 + at + bt^2)$,式中 R_t 是温度为 t °C 时电阻的数值,可以直接测得;温度也可直接测得。要取得系数 a 和 b ,需要解一个二元方程组。

上述分类是计算误差时应用的。考虑测量的综合性能,确定测量方案或仪表的设计方案时,按测量方式来分类。

(1)偏差式测量法。这种方法是利用测量仪表指针位移大小来表示被测量数值的方法,此法简单迅速,但不易达到高的精度。如用弹簧管压力表测量压力就是这种测量方法的例子。

(2)零位式测量法(补偿式测量法)。此法是用已知数值的标准量具与被测量直接进行比较,调整标准量具的量值,用指零仪表判断二者是否达到完全平衡(完全补偿),这时标准量具的数值即为被测量的数值。如用天平称量就是零位式测量法。此法可以获得较高的测量精度,但操作麻烦,测量费时间。

(3)微差式测量法。它是偏差法与零位法的结合。用量值接近被测量的标准量具与被测量进行比较,再用偏差式测量仪表指示两者的差值。被测量的值即是标准量具之值与偏差式仪表的示值之和。此法精度较高且测量简单迅速。因为不用经常调整标准量具,而且偏差值小,从而提高了偏差式测量的精度。X 射线测厚仪即是应用这种方法的一个例子。测量前用标准厚度的钢板调零,测量时仪表指示的是被测钢板厚度的偏差值。这种测量方法可满足轧钢过程钢板厚度测量既要测量迅速又要精度高的要求。

此外,按被测量在测量过程中的状态分类,分为静态测量、动态测量;按测量条件相同与否分类,可以分为等精度测量、不等精度测量。

1.2 测量系统的组成

1.2.1 测量系统的组成

一般说来,为了测量某一被测量的值,总是要将若干测量设备(含测量仪表、装置、元件及辅助设备)按照一定的方式连接组合起来,即构成了一种测量系统。例如,在测量蒸汽时,常用标准孔板来获取与流量有关的差压信号,然后将其送入差压变送器,经过转换和运算变成电信号,连接导线再将电信号送至显示仪表,最后显示出被测流量值,这一系统可用图 1.1 来表示。

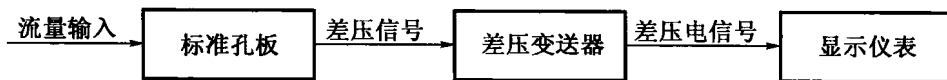


图 1.1 蒸汽流量测量系统框图

由于测量原理的不同或对测量准确度要求的不同,有可能形成测量系统的极大不同。有的可能简单到只由一种测量仪表就可组成简单的测量系统,而有的则可能复杂到要用许多设备构成极其复杂的测量系统。如使用微机对核电厂或热力发电厂各测点的工况参数进行采集与处理,这就是一个比较复杂的测量系统。

测量系统一般可表示成图 1.2 所示的系统框图。

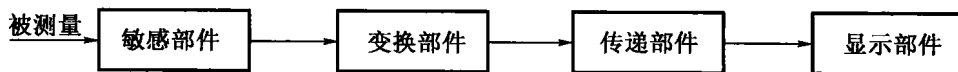


图 1.2 测量系统框图

这就是说,测量系统是由测量环节组成的,所谓环节即建立输入与输出两种量之间某种函数关系的基本部件。

1.2.2 测量环节的作用与要求

1. 敏感部件

敏感部件与被测对象直接发生联系,按照被测介质的能量,使其产生一个以某种方式与被

测量有关的输出信号。例如,采用标准孔板测量管道蒸汽流量时,标准孔板的差压信号 ΔP 就与被测流量 q_v 的平方成正比,即 $\Delta P \propto q_v^2$ 。

敏感部件能否精确且快速地产生产生与被测信号相应的信号,对测量系统的测量质量有着决定性的影响。因此严格地讲,对敏感部件有以下的要求:

- (1)敏感部件的输入与输出应有确定的单值函数关系;
- (2)敏感部件应只对被测量的变化敏感,而对其他一切非被测的信号(包括干扰噪音信号)不敏感;
- (3)敏感部件应该不影响或尽可能不影响被测介质的状态。

但是完全符合上述三个要求的敏感部件实际上是不存在的。比如,对于第二个要求只能通过限制无用的非被测信号在全部信号中的份额,并采用试验的方法或理论计算的方法将它消除来解决。对于第三个要求则只能通过改进敏感部件的结构、原理、性能来解决。这些均属于传感技术研究的范畴。

2. 变换部件

敏感部件输出的信号一般与显示部件所能接收的信号有所差异,甚至差异很大,这是因为前者所输出的信号与后者所能接收的信号往往是属于两种性质不同的物理量;因此有必要对敏感部件输出的信号在送往显示部件之前进行适当的变换,这就是变换部件所起的作用。信号变换包含以下可能的形式:

- (1)对信号的物理性质进行变换,即将一种物理量变换为性质上完全不同的另一种物理量,比如从非电量变换成电量;
- (2)对信号的数值进行变换,即依据某种特定的规律在数值上使某种物理量发生变化,但其物理性质仍保持不变;
- (3)以上两者兼而有之。

仍以上述标准孔板测量蒸汽流量系统为例。差压变送器为该测量系统的变换部件,当它接收到敏感部件(标准孔板两侧取压孔)输出的信号值,即将其转换成与被测流量的平方成正比的电信号,然后再将该电信号在数值上进行开平方,最后通过传输电缆输送给显示部件。这就是标准孔板测量蒸汽流量系统中变换部件的作用。

3. 传递部件

简单地讲,传递部件就是传输信号的通道。一般情况下测量系统的各个环节都是分离的,这就需要用传递部件来联系。传递部件可以是导管、导线、光导纤维和无线电通信等,这要由被传送信号的物理性质而定,有时可能很简单,有时可能相当复杂。比如在标准孔板测量蒸汽流量系统中,标准孔板输出的差压信号靠导管传送到差压变送器,而差压变送器输出的电信号靠导线传送到显示部件。

4. 显示部件

显示部件是测量系统与观测者的界面,它将被测量的信号以某种形式显示给观测者的记录显示,甚至还有调节的功能。在电气显示部件中,有模拟显示(模拟显示仪表通过指针、液面、光标或图形等形式,反映被测量的连续变化)、数字显示(数字显示仪表用数字量显示出被测量值的大小)与屏幕显示(屏幕显示仪表通过液晶屏或 CRT 显示屏以图形、数字等多种形式显示被测量的大小)之分。

1.3 误差的基本概念

测量的目的是希望通过测量获取被测量的真实值。但由于种种原因,例如仪表本身性能不十分优良,测量方法不十分完善,外界干扰的影响等,都会造成被测参数的测量值与真实值不一致,两者不一致的程度用测量误差来表示。

测量误差就是测量值与真实值之间的差值,它反映了测量质量的好坏。

测量的可靠性至关重要,不同场合对测量结果可靠性的要求也不同。例如,在量值传递、经济核算、产品检验等场合应保证测量结果有足够的准确度。当测量值用作控制信号时,则要注意测量的稳定性和可靠性。因此,测量结果的准确程度应与测量的目的和要求相联系、相适应,那种不惜工本、不顾场合,一味追求越准越好的做法是不可取的,要有技术与经济兼顾的意识。

1.3.1 测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有多种,含义各异。

1. 绝对误差

绝对误差可用下式定义:

$$\Delta = x - x_0 \quad (1.2)$$

式中, Δ 为绝对误差; x 为测量值; x_0 为真实值。

对测量值进行修正时,要用到绝对误差。修正值是绝对误差大小相等、符号相反的值,实际值等于测量值加上修正值。

采用绝对误差表示测量误差,不能很好地说明测量质量的好坏。例如,在温度测量时,绝对误差 $\Delta = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,对体温测量来说是不允许的,而对测量钢水温度来说却是一个极好的测量结果。

2. 相对误差

相对误差的定义由下式给出:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_0} \times 100\% \quad (1.3)$$

式中, δ 为相对误差, 一般用百分数给出; Δ 为绝对误差; x_0 为真实值。

由于被测量的真实值 x_0 无法知道, 实际测量时用测量值 x 代替真实值 x_0 进行计算, 这个相对误差称为标称相对误差, 即

$$\delta = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \quad (1.4)$$

3. 引用误差

引用误差是仪表中通用的一种误差表示方法。它是相对仪表满量程的一种误差, 一般也用百分数表示, 即

$$\gamma = \frac{\Delta}{\text{测量范围上限} - \text{测量范围下限}} \times 100\% \quad (1.5)$$

式中, γ 为引用误差; Δ 为绝对误差。

在使用仪表时, 经常也会用到基本误差和附加误差两个概念。

4. 基本误差

基本误差是指仪表在规定的标准条件下最大的引用误差。例如, 仪表是在电源电压 $(220 \pm 5)\text{V}$ 、电网频率 $(50 \pm 2)\text{Hz}$ 、环境温度 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、湿度 $65\% \pm 5\%$ 的条件下标定的。如果这台仪表在这个条件下工作, 则仪表所具有的最大引用误差为基本误差。测量仪表的精度等级就是由基本误差决定的。

5. 附加误差

附加误差是指当仪表的使用条件偏离规定条件下出现的误差。例如, 温度附加误差、频率附加误差、电源电压波动附加误差等。

1.3.2 误差的分类与处理

根据测量数据中的误差所呈现的规律, 将误差分为三种, 即系统误差、随机误差和粗大误差。这种分类方法便于测量数据的处理。

1. 粗大误差

测量结果显著偏离被测量的实际值所对应的误差, 称为粗大误差。由于这种误差严重歪曲测量结果, 故应通过理论分析或统计学方法发现并舍弃不用。

2. 随机误差

对某被测量进行多次等精度测量,只要测量仪表灵敏度足够高,则一定会发现这些测量结果有一定的分散性,这就是随机误差造成的。在剔除粗大误差和修正了系统误差之后,各次测量结果的随机误差一般是服从正态分布规律的。应用统计学方法处理随机误差,即以测量结果的算术平均值作为被测实际值的最佳估计值,以算术平均值均方根偏差的2~3倍作为随机误差的置信区间,相应的概率作为置信概率,可以提高测量精度。随机误差决定测量结果的精密度。

3. 系统误差

对某被测量进行多次等精度测量,如各测量结果的误差大小和符号均保持不变或按某确定规律变化,称此种误差为系统误差。系统误差不可能通过统计方法消除,也不一定能用统计方法发现它,因此发现系统误差很重要。可以通过校准比对、改变测量条件、理论分析和计算等方法来发现它,用改正值加以削弱。系统误差决定测量结果的准确度。

1.4 测量仪表的质量指标

1.4.1 仪表的静态特性

1. 精确度(简称精度)

精确度是仪表精密度与准确度之和,用相对误差来表示。

$$\text{满度相对误差} = \frac{\text{所有示值绝对误差中最大值}}{\text{仪表量程}} \times 100\%$$

自动检测仪表的精度等级,是按规定满度相对误差的一系列标准值来分级的(0.001,0.005,0.02,0.05,0.1,0.2,0.35,0.5,1.0,1.5,2.5,4.0)。仪表精度等级规定了仪表在额定使用条件下最大引用误差不得超过的数值,此数值称为允许误差,而允许误差去掉百分号之后的数值即为仪表的精度等级。

2. 稳定性

稳定性是指仪表示值不随时间和使用条件变化的性能。时间稳定性以稳定度表示,即示值在一段时间内随机变动量的大小。使用条件变化的影响用影响误差表示,如环境温度的影响,是以温度每变化一度示值变化多少来表示的。

3. 灵敏度

灵敏度是仪表在稳定状态下输出微小变化与输入微小变化之比,即 $S = \frac{dy}{dx}$ 。式中 dy 是仪表表示值的微小变化; dx 是被测量的微小变化。灵敏度是仪表输出输入特性曲线上各点的斜率。

4. 变差(迟滞)

变差是指仪表正向特性与反向特性不一致的程度,以正、反向特性之差的最大值与仪表量程之比的百分数表示,即 $E_b = \frac{\Delta_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\%$ 。式中 $\Delta_{\max}$ 是正、反向特性之差的最大值; $x_{\max}$ 是仪表刻度上限值; $x_{\min}$ 是仪表刻度下限值。

5. 分辨率

分辨率是表明仪表响应输入量微小变化的能力指标,即不能引起输出发生变化的输入量幅度与仪表量程范围之比的百分数。分辨率的好坏对应着分辨率的大小,分辨误差在调节仪表中常称为死区(或不灵敏区),它对调节质量的影响非常大。在模拟仪表中分辨率又被称为鉴别域或灵敏域;在数字仪表中分辨率又被定义为显示数的最后一位数字变动“1”所代表的被测量增量。

6. 重复性

重复性是指同一测量条件下,对同一数值的被测量进行重复测量时其测量结果的一致程度,即

$$E_r = \frac{\Delta_{r\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\%$$

式中 $\Delta_{r\max}$ 是全程中重复测量差值最大者。

1.4.2 仪表的动态特性

仪表的动态特性是指其输出对于随时间变化的输入量的响应特性。当被测量随时间变化为时间的函数时,则仪表的输出量也是时间的函数,其间的关系要用动态特性来表示。一个动态特性好的仪表,其输出将再现输入量的变化规律,即具有相同的时间函数。实际上除了具有理想的比例特性外,输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数,这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

动态特性除了与仪表的固有因素有关之外,还与仪表输入量的变化形式有关。也就是说,

在研究仪表动态特性时,通常是根据不同输入变化规律来考察仪表的响应的。

虽然仪表的种类和形式很多,但它们一般可以简化为一阶或二阶系统(高阶可以分解成若干个低阶环节),因此一阶和二阶仪表是最基本的。仪表的输入量随时间变化的规律是各种各样的,下面在对仪表动态特性进行分析时,采用最典型、最简单、最易实现的正弦信号和阶跃信号作为标准输入信号。对于正弦输入信号,仪表的响应称为频率响应或稳态响应;对于阶跃输入信号,则称为仪表的阶跃响应或瞬态响应。

1. 瞬态响应特性

仪表的瞬态响应是时间响应。在研究仪表的动态特性时,有时需要从时域中对仪表的响应和过渡过程进行分析,这种分析方法是时域分析法。在时域中仪表对所加激励信号的响应称为瞬态响应。常用的激励信号有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数等。下面以仪表的单位阶跃响应为例来评价仪表的动态性能。

(1) 一阶仪表的单位阶跃响应

在工程上,一般将下式:

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t) \quad (1.6)$$

视为一阶仪表单位阶跃响应的通式。式中 $x(t)$, $y(t)$ 分别为仪表的输入量和输出量,均是时间的函数, τ 表征仪表的时间常数,具有时间“秒”的量纲。

一阶仪表的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (1.7)$$

对初始状态为零的仪表,当输入一个单位阶跃信号 $x(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$ 时,由于 $x(t) = 1(t)$,

$X(s) = \frac{1}{s}$, 仪表输出的拉氏变换为

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (1.8)$$

一阶仪表的单位阶跃响应信号为

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.9)$$

相应的响应曲线如图 1.3 所示。由图可见,仪表存在惯性,它的输出不能立即复现输入信号,而是从零开始按指数规律上升,最终达到稳态值。理论上仪表的响应只在 t 趋于无穷大时才达到稳态值,但实际上当 $t = 4\tau$ 时其输出达到稳态值的 98.2%, 可以认为已达到稳态。 τ 越小,响应曲线越接近于输入阶跃曲线,因此 τ 的值是一阶仪表重要的性能

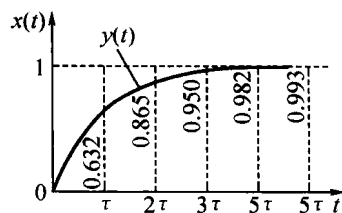


图 1.3 一阶仪表单位阶跃响应

参数。

(2) 二阶仪表的单位阶跃响应

二阶仪表的单位阶跃响应的通式为

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 x(t) \quad (1.10)$$

式中, ω_n 为仪表的固有频率; ξ 为阻尼比。

二阶仪表的传递函数为

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

仪表输出的拉氏变换为

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1.12)$$

二阶仪表对阶跃信号的响应在很大程度上取决于阻尼比 ξ 和固有频率 ω_n 。固有频率 ω_n 由仪表主要结构参数所决定, ω_n 越高, 仪表的响应越快。当 ω_n 为常数时, 仪表的响应取决于阻尼比 ξ 。图 1.4 为二阶仪表的单位阶跃响应曲线。阻尼比 ξ 直接影响超调量和振荡次数。 $\xi = 0$, 仪表表现为无阻尼, 超调量为 100%, 产生等幅振荡, 达不到稳态。 $\xi = 1$, 仪表表现为临界阻尼, 无超调也无振荡, 但达到稳态所需时间较长。 $\xi < 1$, 仪表表现为欠阻尼, 衰减振荡, 达到稳态值所需时间随 ξ 的减小而加长。 $\xi > 1$, 仪表表现为过阻尼, 响应时间最短。但实际使用中常按稍欠阻尼调整, ξ 取 0.7 ~ 0.8 为最好。

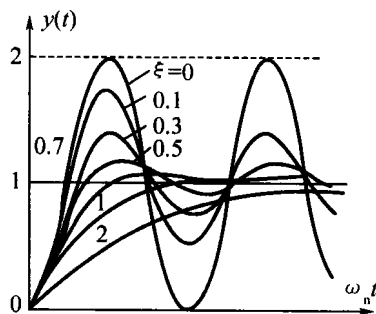


图 1.4 二阶仪表单位阶跃响应

(3) 瞬态响应特性指标

① 时间常数 τ 一阶仪表时间常数 τ 越小, 响应速度越快。

② 延时时间 t_d 仪表输出达到稳态值的 50% 所需时间。

③ 上升时间 t_r 仪表输出达到稳态值的 90% 所需时间。

④ 峰值时间 t_p 仪表输出超过稳态值的最大值所需时间。

⑤ 最大超调量 M_p 仪表输出超过稳态值的最大值, $M_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$ 。

⑥ 稳定时间 t_s 测量系统响应曲线达到并保持在其最终值周围的某一允许误差范围之内所需的时间。

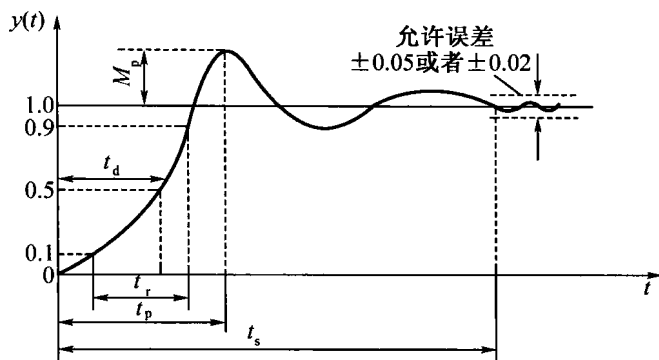


图 1.5 响应特性曲线

2. 频率响应特性

仪表对正弦输入信号的响应特性称为频率响应特性。频率响应法是从仪表的频率特性出发研究仪表的动态特性的方法。

(1) 一阶仪表的频率响应

将一阶仪表传递函数中的 s 用 $j\omega$ 代替后,即可得频率特性表达式,即

$$H(j\omega) = \frac{1}{\tau(j\omega) + 1} \quad (1.13)$$

幅频特性

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

相频特性

$$\Phi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \quad (1.15)$$

图 1.6 为一阶仪表的频率响应特性曲线。

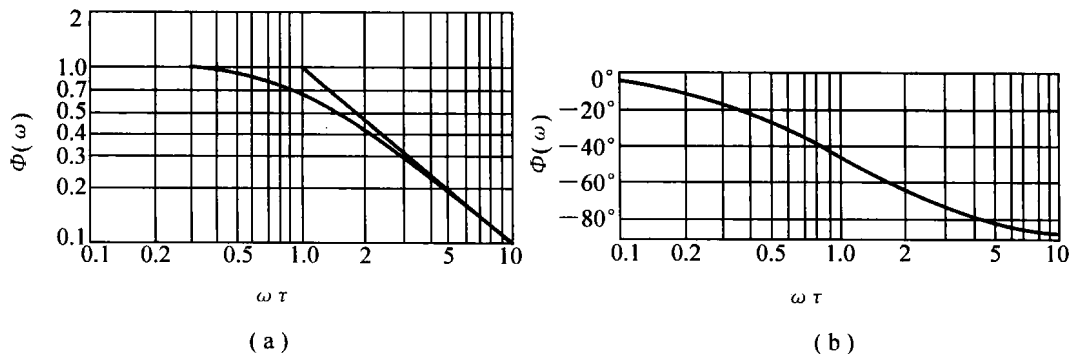


图 1.6 一阶仪表频率响应特性