

高等学校教材

铸造 非电量测试技术

吴建生 主编

西北工业大学出版社

高等学校教材

铸造非电量测试技术

吴建生 主编

西北工业大学出版社

1989年3月 西安

内 容 简 介

本书作为航空工业部各院校铸造专业的统编教材,主要讲述铸造非电量的电测技术的基本概念;铸造中一些基本参数的测试原理及方法;铸造行业中常见的热分析法及差热分析的测试原理和应用范围;测试仪表中常用的测量线路;测试中常用的显示、记录仪表的基本原理及应用;铸件常见缺陷的无损检测技术。在书末的附录中,介绍了最新颁布的几种常用热电偶分度表和热电阻的有关数据及常用仪表的有关资料,便于读者工作中查阅。

全书概念清楚,论述精练、深入浅出。书中还介绍了许多铸造生产中的实例及有关资料,对生产单位、科研单位及从事铸造检测技术的工程技术人员也有一定的参考价值。

本书也可作为一般院校、职工大学、中等专业学校铸造专业的教学用书。

高等学校教材 铸造非电量测试技术

主 编 吴建生

责任编辑 刘 红

责任校对 蔡增寿

西北工业大学出版社出版

(西安市友谊西路127号)

陕西省新华书店发行

航空航天工业部〇一二基地印刷厂印装

ISBN 7-5612-0127-3/TG·10 (课)

开本787×1092毫米 1/16 14.125印张 340千字

1989年3月第1版 1989年3月第1次印刷

印数1—1000册 定价:2.40元

前 言

本书系高等院校铸造专业方面的教材，它是根据航空工业部1985年9月热加工教材工作会议所审定的教学大纲编写的。

本课程的教学时数为40学时。全书内容共七章。主要讲授铸造非电量的电测技术，包括常见的非电量参数的测试原理、测试方法；测试用的传感器、显示记录仪表的工作原理、应用方法、应用范围及常见故障的排除；铸件中常见的各种缺陷的无损检测原理、检测方法及所用的检测装置。对于实验设计及实验数据处理、微处理机在铸造生产中的应用，考虑到有其它有关课程专门讲授，本书不做专门研究，以便使本课程所讲内容更加突出、更有实用性。

本书由西北工业大学铸造教研室吴建生主编，并分工编写第二、三、六章及附录部分；张津生编写第四、五章；南昌航空工业学院铸造教研室金传伟编写第一、七章。

全书由陕西机械学院林尤栋副教授审阅，对本书提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中的缺点和错误在所难免，希望读者批评指正。

编 者

1988年4月

目 录

概论.....	1
第一章 非电量电测技术的基本知识.....	3
§ 1-1 测量的概念	3
§ 1-2 测量系统的组成及基本要求	5
§ 1-3 测量系统的静态特性	6
§ 1-4 测量系统的动态特性	7
第二章 基本参量的测试.....	15
§ 2-1 概述	15
§ 2-2 膨胀与收缩的测试	17
§ 2-3 力的测量	31
§ 2-4 速度量的测量	39
§ 2-5 振动量的测试	41
§ 2-6 型砂含水量的测试	45
§ 2-7 铸型内金属液面上升速度的测试	51
§ 2-8 耐火材料抗热震性的测试	52
第三章 温度的测量与控制.....	54
§ 3-1 温度与温标	54
§ 3-2 常用温度计简介	56
§ 3-3 热电偶测温	57
§ 3-4 热电阻测温	74
§ 3-5 非接触式测温仪表	77
§ 3-6 温度控制	85
第四章 热分析法测试技术.....	95
§ 4-1 热分析测试的基本理论	95
§ 4-2 热分析测试装置	97
§ 4-3 热分析法在铸造生产中的应用	99
§ 4-4 差热分析原理及其应用	102
第五章 铸造显示记录仪表中常用的电子器件.....	108
§ 5-1 测量电桥	108
§ 5-2 JF-12 型晶体管放大器	111

§ 5-3 可逆电机和同步电机	117
§ 5-4 相敏检波电路	118
§ 5-5 滤波器	119
第六章 记录、显示仪表	122
§ 6-1 测温毫伏计	122
§ 6-2 直流电位差计	126
§ 6-3 电子电位差计	127
§ 6-4 电阻应变仪及其使用	136
§ 6-5 光线示波器	143
§ 6-6 函数记录仪	147
§ 6-7 数字式仪表	150
第七章 铸件无损检测技术	156
§ 7-1 X 射线检测	156
§ 7-2 磁粉检测	165
§ 7-3 渗透法检测	168
§ 7-4 超声波检测	169
附 录	179
附录一 热电偶分度曲线、分度号及分度表	179
附录二 标准型热电偶用补偿导线	207
附录三 热电偶常见故障及处理方法	211
附录四 晶体管自动平衡式显示仪表型号命名	212
附录五 各种常用显示记录仪表的性能及技术参数	213
参考文献	219

概 论

一、测试工作的重要性

测试工作是实验科学的一个重要组成部分，主要研究各种物理参量的测量原理和方法，是科学实验和生产过程对各种参量进行检测必不可少的手段。

测试是人们认识客观事物的重要手段。通过测试可以揭示事物的内在联系和发展规律，从而去利用它并改进它，推动科学的发展。科学发展的历史事实说明，许多新的发现和发明，都与测试工作分不开，并且科学技术的发展又为测试技术提供了新的测试方法和装置，促进测试技术的发展。

对于铸造生产来说，测试工作的重要作用也不例外。不论是对现有工艺、设备、产品质量的剖析，以求进一步明确改进方向和改进方案，还是对新的理论、设备和工艺过程的研究及分析，都离不开测试工作。通过对测试结果的综合分析，可为验证现有理论和建立新理论、确定最佳设计方案、选择最佳工艺流程提供可靠的科学依据。

当新的铸件制造完毕，为了检验其性能好坏，一般也要进行鉴定性试验，对其主要部位的各种参量进行测试，从而确定该铸件的性能是否符合原设计要求。

对工艺问题更是这样。如浇注一个新的合金零件，到底需要多高的浇注温度？砂型水分到底多少最佳？浇注过程中金属液流动性如何？需要多大的补缩？等等，都是铸造生产中最简单的工艺问题。要解决这些问题、单纯依靠纯理论计算，目前尚有许多困难，而用试验的方法来确定却比较直观、简单。而且通过实验还能找出各种因素的影响规律，促进理论工作的完善和发展。

在铸造生产自动化控制系统中，也需要对有关参数进行测试或检测，作为系统和反馈信号，实现自动控制。如对炉温控制就必须不断测试炉中温度，与预控温度信号进行比较，再将比较后的差值信号，反馈到控制系统来进行自控。

二、需要测量的参量

在科研、实验和生产过程中需要测量的参量很多，对铸造专业主要测试的参数有以下三类：

1. 应力和应变参量 研究铸件的成形及铸件的强度均涉及到应力、应变的测量。
2. 各种力的参量 研究铸件的负荷力及其变形力时，必须对一些力的参量进行测试。
3. 温度、时间、金属的力学性能及金相组织等参量，铸件的浇注温度、成型时间及成型后各部位金相组织的变化以及铸件缺陷的形成及其对铸件质量的影响等等都需要对温度等参量进行严格的测试。

三、测试的方法

测试上述参量的方法很多，按照其测量原理可以分为：机械测量法、电测法、光测法等。

机械测量法是利用机械器具对被测参量进行直接测量，如用杠杆应变仪测量应变。

电测法是将被测参量转换成电量，再用电测仪表进行测量的方法。如用热电高温计测量温度，用电阻应变仪测量应变应力。电测法是目前应用最广泛的测试方法，也是本课程的主要学习内容。

光测法是利用光学原理对被测参量进行测量的方法。如用光学高温计测温度。

四、课程内容

因教学课时的限制及各课程的分工，本课程不可能对各种参量的全部测试方法及所用测试仪表一一进行介绍。本课程主要侧重于与铸造有关的基本参量的非电量的电测技术、显示记录仪表、温度控制及铸件的无损检测等内容。

测试技术所涉及的知识面较宽，需要数学、力学、电学、光学等方面的知识。在学习过程中，应了解各种参量的测试原理、测试方法和所用仪表，并能运用所学知识来解决实际问题。

非电量电测技术是一门实践性比较强的课程，必须与实验课密切配合。只有理论联系实际，才能做到在理论上掌握测试原理和方法，在实践上掌握测试的技能，从而灵活运用所学知识去解决实际工作中所遇到的测试问题。

第一章 非电量电测技术的基本知识

§ 1-1 测量的概念

一、测量的基本概念

测量是人们认识和改造自然的重要手段，是对自然界的客观事物取量数量观念的一种认识过程。在这个过程中，人们借助于专门的技术工具，通过实验的方法来确定被测物理参量与所采用的测量单位的数值之间的数学比值。

测量的结果一般可以用下面的公式来表示：

$$g = x/v \quad (1-1)$$

式中： x ——被测量的数值；

v ——测量单位（标准量）；

g ——所求的数学比值。

式（1-1）通常被称为测量的基本方程式。由此可见， g 的大小完全取决于测量单位 v 的大小。所采用的测量单位愈小，对某一被测量而言，其数值愈大。因此在表示测量结果时，必须包含二个要素：其一是数值的大小及符号（正或负）；其二是相应的测量单位，不注明测量单位，该测量结果将失去意义。

随着科学的迅速发展，对测量的精度要求愈来愈高，尤其对动态变化的物理过程进行测量，以及对物理量的远距离测量控制，用早期的测量方法已不能满足要求。例如，机械量（位移、速度、应变、应力、振动等），热工量（温度、压力、风速、流量等）等。这些非电量都必须通过相应的传感器转换成电量才能进行测量。因此，在近代测量中，用得最多的是非电量电测法，它有如下优点：

- （1）测量的精度和灵敏度高，测量范围广；
- （2）由于被测量转换成电量后测量，因而信号可作远距离传输，便于远距离测量与控制；
- （3）可对被测量进行动态测量，记录其瞬间值与变化过程；
- （4）便于与计算机联用，进行数据的自动运算，分析与处理。

二、测量误差及其分类

（一）测量误差

测量误差是指用测量仪器进行测量时，所得到的数值与被测量的实际值之差。它是测量仪器本身的误差以及测量辅助设备、测量方法、外界环境、操作技术等误差因素共同作用的结果，当不致引起混淆时，测量误差也简称误差，用公式表示即为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-2)$$

式中： Δx ——误差；

x ——示值；

A_0 ——实际值。

式(1-2)所表示的误差 Δx 是与仪表表示值 x 同量纲的,称为绝对误差,它反映示值偏离实际值的大小。

被测量的实际值,一般情况下往往是未知的,要想经过修正以后直接得到被测量的实际值,即示值 x 加修正值 c ,就能得到实际值 A_0 。

$$\text{即: } x + c = A_0. \quad (1-3)$$

这说明,一个测量仪表通过检定,可以由上一级标准给出修正值,利用修正值便可求出实际值。一个错误的修正反而会得到更坏的结果,因此,对修正值应谨慎小心。

比较式(1-2)和式(1-3)可知,修正值与绝对误差大小相等,符号相反。

$$\text{即: } c = -\Delta x \quad (1-4)$$

如某电流表的量程为1mA,通过检定得到其修正值为 -0.02mA 。如用这只电流表测一未知电流,其示值为 0.78mA ,于是得被测电流的实际值为: $A_0 = 0.78 + (-0.02) = 0.76\text{mA}$ 。

(二) 误差的分类

按误差的性质及产生原因,可分三类。

1. 系统误差 系统误差是指在整个测量过程中某种未发现或未确认的因素所引起的误差。误差值的大小和符号在同一实验中是固定不变的,或按一定的规律变化的。因此可通过实验的方法,找出并予以消除,或加修正值对测量结果予以修正。

例如,用有零位偏差的测微计进行位移测量时,就有偏移零位的误差产生。这个误差,可以通过调整到零位重合的方法来消除。

2. 随机误差 在消除系统误差之后,对同一物理量进行多次重复测量时,误差的大小和符号都游移不定,无法预测,具有随机性,这样的误差就称为随机误差。

随机误差是由许许多多无法预测和控制的因素综合影响造成的。它无法事先消除,而只能根据其统计规律估计其误差的分布范围。它与测量次数有关。随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值将逐渐接近于零。

3. 粗大误差 粗大误差是由操作者的疏忽或失误所造成的误差。

粗大误差因误差数值很大,容易从测量结果中发现,一经发现就应从测量数据中剔除。

三、测量的准确度、精密度和精密度

(一) 准确度

准确度是表示测量结果中系统误差大小的程度。它是指在规定的条件下,在测量中所有系统误差的综合。系统误差大,意味着测量的准确度就低,反之就高。

(二) 精密度

精密度是表示随机误差大小的程度,它是指使用同一仪器由同一操作者进行多次测量所得结果彼此之间接近的程度。测量重复性的好坏,通常是由随机误差来描述的。随机误差大,测量的重复性就差,反之重复性好。

(三) 精确度(精度)

精确度是准确度和精密度的综合反映,它综合表示测量结果与实际值的偏差程度。

准确度、精密度和精确度三者的含义,可用图1-1所示打靶的情况来比喻。

图中,(a)表示精密度和准确度高,随机误差和系统误差均较小,即精度高;(b)表示精密度很高,即随机误差小,但不准,所有击中点均同样偏离靶心较远,也就是存在一较大的

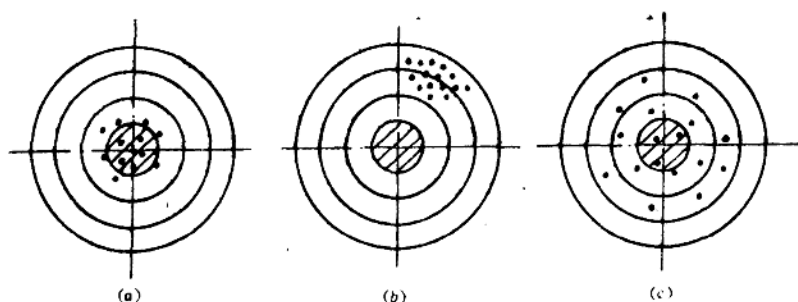


图 1-1 准确度、精密度和精度

系统误差，准确度低，(c)表示精密度不如(b)，击中点较分散，但准确度较(b)高，即系统误差较(b)要小。

§ 1-2 测量系统的组成及基本要求

一、测量系统的组成

在非电量电测技术中，首先要解决的关键问题，是获得被测量的信息，并把它变换成电量，然后通过信息的转换，把获得的信息变换、放大，再用指示仪表或记录仪表将信息显示出来，有的还需要把信息加以处理。因此，一个完善的测量系统如图1-2所示，它由传感器、

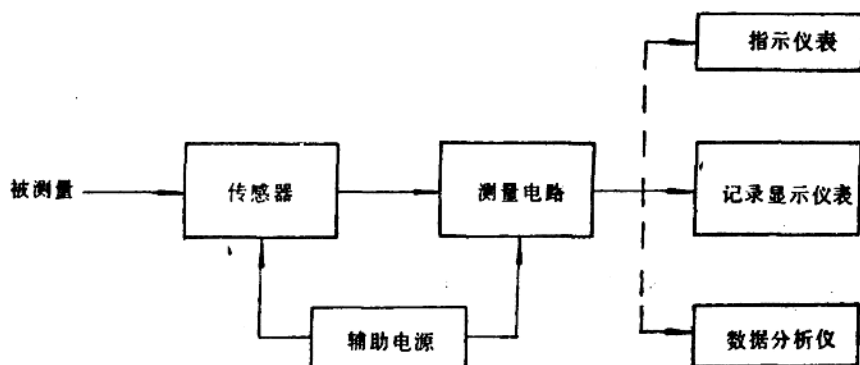


图 1-2 测量系统的组成

测量电路、指示记录仪表组成，也有人把这三部分分别称为一次仪表、二次仪表、三次仪表。

二、对测量系统的基本要求

一般地讲，任何一个测量系统，应具有如下几个基本要求。

- (1) 测量系统应具有较高的灵敏度，惯性小，响应速度快，能及时地反应出被测量的

瞬变过程;

(2) 测量系统的各个环节要在线性状态下工作, 输入与输出之间成比例关系, 直线性好, 以保证不产生非线性失真;

(3) 测量系统应具有良好的工作稳定性和抗干扰能力, 内部发生的噪声小, 不从外部引进噪声;

(4) 测量系统的各环节, 不因接入而使被测量受到影响, 以保证测量的精度。

需要指出的是, 在选择测量系统时, 必须根据测量的目的和要求, 尽量做到技术上合理, 经济上节约。因为仪器的成本随它的精度以及适应恶劣工作条件的能力提高而急剧上升。此外误差理论指出, 由若干仪器所组成的测量系统, 其测量结果的精度取决于其中精度最低的环节。因此在满足一定测量精度和工作环境的条件下, 应尽可能选用相同精度的测量系统, 而不应盲目追求某些仪器的高性能指标。

§ 1-3 测量系统的静态特性

当输入信号不随时间变化(或变化极其缓慢)时, 测量系统的输出与输入之间的关系称为测量系统的静态特性。

实际测量装置的静态特性主要以灵敏度、线性和滞后量为表征。

一、灵敏度

灵敏度有二种表示方法。

(1) 灵敏度为测量在静态条件下输出变化对输入变化的比值, 可用下式表示:

$$K = \text{输出信号变化量} / \text{输入信号变化量} = \Delta y / \Delta x \quad (1-5)$$

对于线性测量系统, 灵敏度为常数, 即 $K = y/x$, 如图1-3(a)所示。对于非线性测量系统, 灵敏度为变量, 随输入量的变化而变化, 即 $K = (\Delta y / \Delta x)|_{x=x_1}$ 。

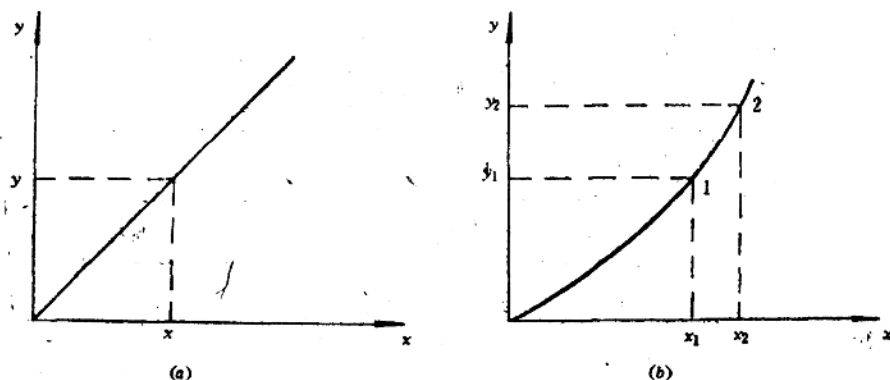


图 1-3 灵敏度定义

(a) 线性测量系统 (b) 非线性测量系统

如对应于1mm的位移(输入信号变化), 能得到2mV的输出电压变化(输出信号变化)的测量系统, 其灵敏度为: $K = 2\text{mV}/\text{mm}$ 。

(2) 灵敏度为测量系统所能测出的被测量的最小变化或最小变化量。

如应变片的灵敏度为 10^{-6} ，即应变片能检出的最小应变等于1微应变。

这种灵敏度是测量系统有确切的读数时所对应的被测值，因此它是在测量下限表示输出与输入间的关系。

二、线性

在静态测量中，测量系统的输出信号与输入信号间的静态特性关系用图1-4的方式表示。

在理想的情况下，两者关系为一条直线，即灵敏度为一个常值，但一般却常常是图中所示的曲线，为此把曲线与直线的相近程度称为测量系统的线性。线性表示在输出输入变化范围内两者的关系。

线性的好坏用线性度表示。线性度的计算式为

$$\text{线性度} = B \times 100\% / A \quad (1-6)$$

式中：B——曲线与直线的最大偏差；

A——输出信号的变化范围。

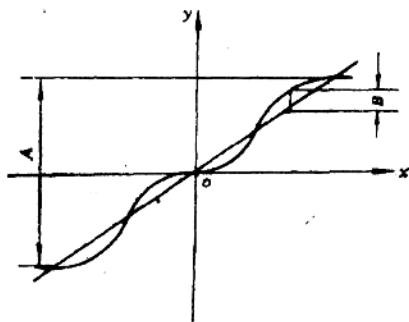


图 1-4 测量系统的线性

三、滞后量

在测量中，常会出现这样的情况，当输入信号逐渐增加和逐渐减小时，对应于同一大小的输入信号却会出现不同大小的输出信号。

如图1-5所示。

产生滞后量的原因是由于测量仪器内部存在着摩擦、间隙，存在着机械材料或电气材料的滞后特性等。当然滞后量越小越好。

需要指出的是，为了使测量结果正确，要求测量系统有足够的灵敏度。在选择测量系统的灵敏度时，应当注意合理性。一般说来，灵敏度愈高，就容易引入噪声或干扰，测量的稳定性就愈差，测量范围愈窄，而线性度与滞后量要可能小。

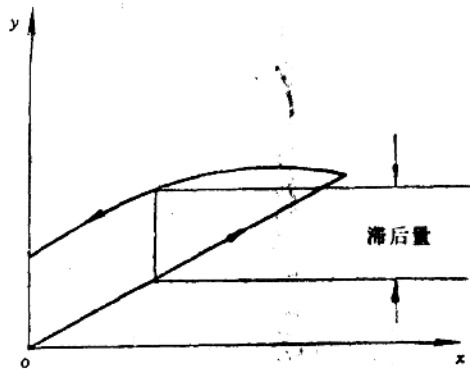


图 1-5 滞后量

§ 1-4 测量系统的动态特性

所谓测量系统的动态特性，是指输入量随时间变化时，测量系统输出与输入的关系。

研究测量系统动态特性的目的，就是研究动态输出与输入之间的差异。研究的方法是通过系统的阶跃响应和频率响应，来表示测量系统的动态特性。研究的工具是用微分方程和传递函数来描述。

一、微分方程法

传递函数就是在零初始条件下，系统或元件的输出和输入的拉氏变换之比。

传递函数是一阶微分方程时，称为一阶测量系统；是二阶微分方程时，称为二阶测量系统。我们常用的测量系统一般就是一阶测量系统和二阶测量系统。

下面先以液柱温度计测量温度为例，通过用微分方程建立数学模型的方法，进而导出一阶测量系统的传递函数一般形式。

如图 1-6 所示，为液柱式温度计。

根据热力学， q 、 x_i 、 x_o 三者间的关系可由下列两式表示：

$$q = (x_i - x_o)/R \quad (1-7)$$

$$q = C dx_o/dt \quad (1-8)$$

合并式 (1-7) 与式 (1-8)，并且令 $\tau = RC$ ，则得下式：

$$\tau dx_o/dt + x_o = x_i \quad (1-9)$$

使用微分运算符 $D = d/dt$ ，上式便可改写为：

$$(\tau D + 1)x_o = x_i$$

$$x_o/x_i = 1/(\tau D + 1) \quad (1-10)$$

如式 (1-10) 所示，输出信号对输入信号之比，这就是一阶测量系统的传递函数。

典型的二阶测量系统为弹簧-质量-阻尼系统，如图 1-7 所示。

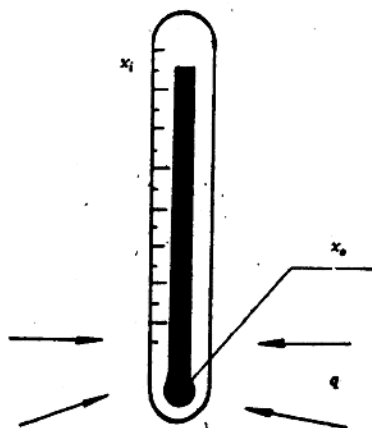


图 1-6 液柱式温度计

x_i —被测温度 (输入量) x_o —指示温度 (输出量)
 q —热流 C —热容量 R —热阻

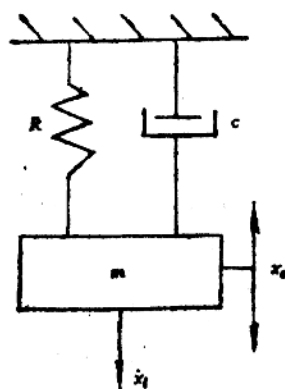


图 1-7 典型的二阶系统

对于这个系统来说，当系统受外力作用时，外力与惯性力、阻尼力和弹簧反之相平衡，这时，可用一个二阶微分方程来描述：

$$m d^2 x_o/dt^2 + C dx_o/dt + R x_o = x_i \quad (1-11)$$

式中， x_o ——位移量 (输出信号)；

x_i ——外力（输入信号）；
 m ——系统质量；
 C ——阻尼系数；
 R ——弹簧刚度。

使用微分运算符，则上式可改写为：

$$(mD^2 + CD + R)x_o = x_i$$

$$x_o/x_i = 1/(mD^2 + CD + R) = K\omega_n^2 / (D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2) \quad (1-12)$$

式中： $\zeta = C/2\sqrt{Rm}$ 为系统的阻尼比；

$\omega_n = \sqrt{R/m}$ 为系统的固有角频率；

$K = 1/R$ 为系统的灵敏度。

式 (1-12) 为输出信号对输入信号之比，这就是二阶测量系统的传递函数。

对于一般测量系统来说，通常可以用常系数线性微分方程来描述测量系统的输入信号 x_i 与输出信号 x_o 的关系。方程的通式为：

$$\begin{aligned} a_n d^n x_o / dt^n + a_{n-1} d^{n-1} x_o / dt^{n-1} + \dots + a_1 dx_o / dt + a_0 x_o \\ = b_n d^n x_i / dt^n + b_{n-1} d^{n-1} x_i / dt^{n-1} + \dots + b_1 dx_i / dt + b_0 x_i \end{aligned} \quad (1-13)$$

使用微分运算符 $D^* = d^*/dt^*$ ，则一般测量系统的传递函数为：

$$\begin{aligned} x_o/x_i = (b_n D^n + b_{n-1} D^{n-1} + \dots + b_1 D + b_0) / (a_n D^n \\ + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0) \end{aligned} \quad (1-14)$$

由此可见，前述一阶、二阶测量系统的传递函数，皆属上式的特例。

二、测量系统的频率响应

当输入 $x_i = A \cos \omega t$ ，刚加入余弦信号时，由于过渡响应的影响，刚开始时输出并不是余弦波。随着时间的增加，过渡响应部分逐渐衰减以至消失，经过一段时间后进入稳定响应阶段，就只剩下余弦波，这时输出信号可用 $x_o = B \cos(\omega t + \phi)$ 表示。

现使输入信号的振幅 A 一定而令 ω 有所变化，则输出信号的振幅和相位也发生变化。所谓频率响应，就是在稳定状态下， B/A 和相位 ϕ 随频率 ω 而变化的状况。其频率响应如图 1-8 所示。

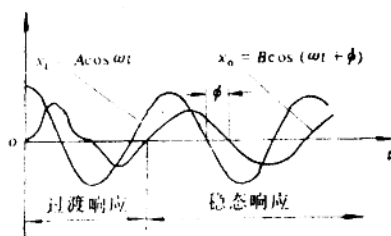


图 1-8 余弦波的响应

用复数来处理频率响应问题，其数学表达式就非常简便。现用 $Ae^{j\omega t}$ 来代替图 1-8 中所示的输入信号 $A \cos \omega t$ 进行讨论。

(一) 一阶测量系统的频率响应

根据一阶测量系统的传递函数式 (1-11)，若加入输入信号 $x_i = Ae^{j\omega t}$ ，则有：

$$(\tau D + 1)x_o = Ae^{j\omega t} \quad (1-15)$$

式 (1-15) 为线性一阶非齐次微分方程。

求式 (1-15) 的齐次方程的通解 x_{o1} ，它的特征方程为 $\tau D + 1 = 0$

则 D 的根 r 为 $r = -1/\tau$

所以通解为 $x_0 = Re^{i\omega t} + Re^{-i\omega t}$ (1-16)

由式 (1-16) 可知, 响应的这一部分, 是按负指数规律变化。随着时间的增大, x_0 (渐趋近于零, 这说明 x_0 是过渡响应部分。至于频率响应, 因为是研究稳定状态下的情况, 所以只要求出式 (1-15) 非齐次方程的特解就可以了。

求式 (1-15) 的特解 x_0 , 采用待定系数法。根据微分方程式右边为 $Ae^{i\omega t}$ 形式, 则特解为:

$$x_0 = Be^{i(\omega t + \phi)} \quad (1-17)$$

式 (1-17) 就是测量系统在稳态阶段的频率响应。

要表示输出信号与输入信号的振幅比 B/A , 输出信号与输入信号的相位差 ϕ 随频率 ω 变化关系的频率响应函数, 只要把两式:

$$x_0 = Be^{i(\omega t + \phi)} \quad (1-18)$$

$$dx_0/dt = j\omega B e^{i(\omega t + \phi)} = j\omega x_0 = D x_0,$$

代入式 (1-15), 整理后可得

$$(j\omega\tau + 1)Be^{i(\omega t + \phi)} = Ae^{i\omega t}$$

所以 $(B/A)e^{i\phi} = 1/(j\omega\tau + 1) = 1/\sqrt{\omega^2\tau^2 + 1} L - tg^{-1}\omega\tau$ 于是就有振幅比

$$B/A = 1/\sqrt{\omega^2\tau^2 + 1} \quad (1-19)$$

式 (1-19) 称为一阶测量系统的幅频特性表达式, 它表示振幅比与频率的关系。

$$\text{相位差 } \phi = -tg^{-1}\omega\tau \quad (1-20)$$

式 (1-20) 称为一阶测量系统的相频特性表达式, 表示相位差与频率的关系。式中负号表示输出滞后于输入。

为直观起见, 将式 (1-19) 和式 (1-20) 分别用曲线表示。以 $\omega\tau$ 为横坐标, 以振幅 B/A 和相位 ϕ 为纵坐标, 就得出如图 1-9 所示的幅频特性和相频特性图。

由图可见, 一阶测量系统的频率响应, 振幅比 B/A 随 ω 增大而减小, 相位差 ϕ 随 ω 增大而增大。输出信号与输入信号之间存在稳态响应误差。而系统的响应速度取决于时间常数 τ ; 当 $\omega\tau < 0.3$ 时, 振幅与相位失真都小, 若系统的时间常数 τ 越小, 则 ω 可大; τ 越大, 则 ω 就要小。这说明时间常数 τ 越小, 工作频率范围越宽; 反之, τ 越大, 工作频率范围越窄。

于是, 对于一阶测量系统, 减小这种动误差的措施, 是尽可能采用时间常数 τ 小的测量系统。

(二) 二阶测量系统的频率响应

根据二阶测量系统的传递函数:

$$x_0/x_i = K\omega_s^2 / (D^2 + 2\zeta\omega_s D + \omega_s^2)$$

由推导一阶测量系统频率响应函数中式 (1-18) 可见, 只要把传递函数式中 D 用 $j\omega$ 代替, 二阶测量系统的频率响应函数可直接写出 (为分析方便设 $K = 1$), 则:

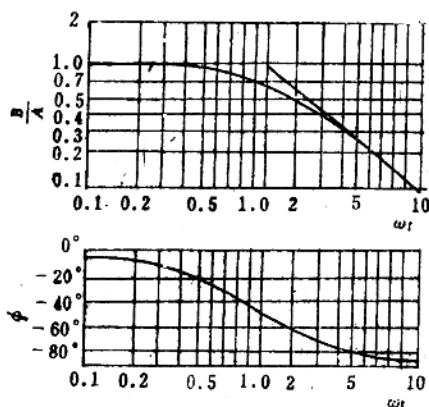


图 1-9 一阶测量系统的频率响应特性

$$x_0/x_1 = \omega^2 / (-\omega^2 + j2\zeta\omega_n\omega + \omega_n^2) = 1 / [1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2 + 2j\zeta(\omega/\omega_n)] \quad (1-21)$$

由式 (1-21) 可得

$$B/A = 1 / \sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + [2\zeta(\omega/\omega_n)]^2} \quad (1-22)$$

式 (1-22) 称为二阶测量系统的幅频特性表达式, 它表示振幅比与频率的关系。

$$\phi = -\operatorname{tg}^{-1} \left\{ 2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) / [1 - (\omega/\omega_n)^2] \right\} \quad (1-23)$$

式 (1-23) 称为二阶测量系统的相频特性表达式, 它表示相位差与频率的关系。

为直观起见, 把幅频特性式 (1-22) 和相频特性式 (1-23) 用曲线表示。仍然以 $\omega\tau$ 为横坐标, 以振幅比 B/A 和相位 ϕ 为纵坐标, 就可得到如图 1-10 所示的幅频特性和相频特性。

由图可见, 二阶测量系统的频率响应随阻尼比 ζ 的大小而不同。 $\zeta > 1$, 为过阻尼; $\zeta = 1$, 为临界阻尼; $\zeta < 1$, 为欠阻尼。当 $\zeta < 1$ 时, 在较宽的频率内 $B/A > 1$; 当 $\zeta \geq 1$ 时, 则 $B/A < 1$ 。当选取 ζ 在 0.6~0.8 范围内时, $B/A = 1$ 的频率范围最大, 并且 ϕ 与 ω/ω_n 近似线性关系, 也就是说, 在这种情况下, 稳态响应的动误差较小。而系统的频率响应随固有角频率 ω_n 的大小不同。固有角频率 ω_n 越高, 稳态响应动误差小的工作频率范围愈宽, 反之, ω_n 愈低, 则此工作频率范围愈窄。

所以, 对于二阶测量系统, 减小这种动误差的措施, 是测量系统的阻尼比应为 $\zeta = 0.6 \sim 0.8$, 固有角频率 ω_n 应尽可能的高。

三、测量系统的阶跃响应

测量系统的阶跃响应, 是指对输入信号为阶跃状态变化时的响应。

阶跃脉冲信号的形状如图 1-11 所示。用 $Au(t)$ 来表示高度为 A 的阶跃信号, 其函数表达式为

$$Au(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ A & t > 0 \end{cases}$$

(一) 一阶测量系统的阶跃响应

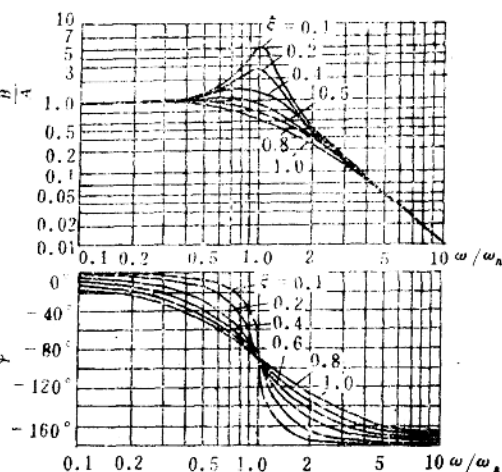


图 1-10 二阶测量系统的频率响应特性

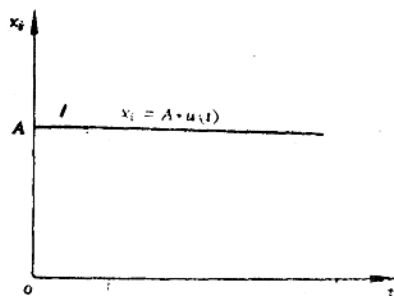


图 1-11 高度为 A 的阶跃脉冲信号