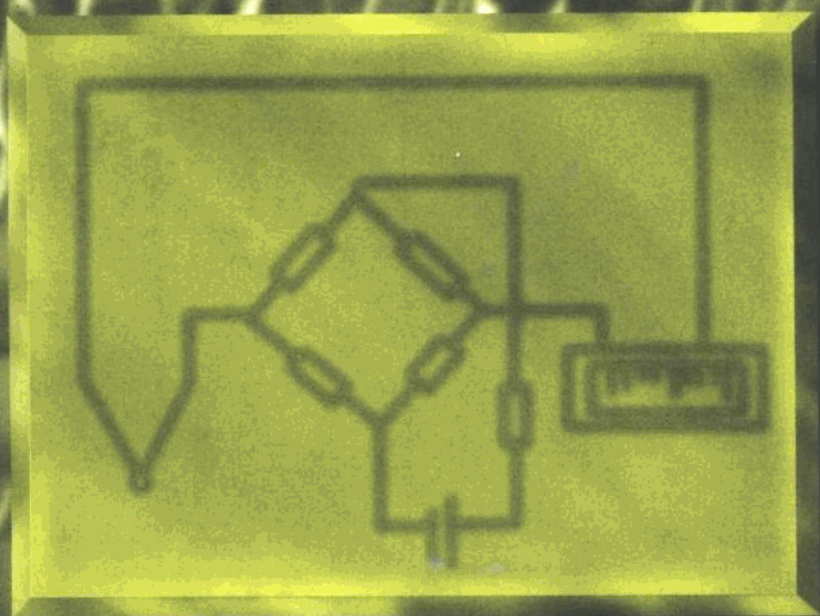


金属材料 成形过程检测技术

主编 孟繁琴



哈尔滨工程大学出版社

145
M58

425700

高等学校教材

金属材料 成形过程检测技术

主 编 孟繁琴
副主编 姚 伟 金云学 范 伟
主 审 宋 强



00425700



哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书作为材料成形及控制工程专业的教材,主要讲述了非电量的电测技术的基本知识;材料成形过程中的一些基本参量的测试原理和方法;测温技术的原理及应用;热分析技术的原理及应用;测试仪表的基本电路、原理及应用;零件无损探伤技术;微机在测试中的应用。

本书内容丰富、具体,论述简练,对各种测试原理、方法阐述清楚,图表和数据齐全。适于作为高等院校、职工大学、中等专业学校的教学用书。也适合于金属热加工科技工作者、工程技术人员及有关人员阅读。

金属材料成形过程检测技术

Jinshu Cailiao Chengxing Guocheng Jiance Jishu

主 编 孟繁琴

责任编辑 程小东

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南通街145号哈工程大学11号楼

发行部电话(0451)2519328 邮编:150001

新 华 书 店 经 销

哈 尔 滨 市 书 刊 印 刷 厂 印 刷

开本 787 mm×1 092 mm 1/16 印张 11.75 字数 280 千字

1998 年 4 月第 1 版 1998 年 4 月第 1 次印刷

印数:1~500 册

ISBN 7-81007-851-8
TG·15 定价:28.00 元

前 言

金属材料成形过程检测技术,作为一门新兴学科越来越受到重视。因为它是产品质量控制和科研的重要手段。改革开放以来,与我国金属材料成形技术的快速发展相适应,金属材料成形过程检测技术也有了长足的进步。为了尽快培养既有扎实理论基础,又有较强实践能力的检测人才,实现我国金属材料成形过程检测技术现代化,因此,我们编写了本书,作为高校金属材料成形与控制工程专业本科教材。

本书经过反复修改和试用,在内容上力求把知识性、先进性、实用性相结合,吸取了近年来国内外一些新的理论和技术,注重理论与实践相结合,力争满足教学、生产和科研多方面的需要。

本书由佳木斯大学工学院孟繁琴副教授主编,并分工编写第一章第二、三节;第三章;第四章第三、四节;第五章第一、二节;第六章第二、三节;第七章。姚伟副教授分工编写第一章第一、四节;第二章。金云学副教授编写第四章第一、二节;第五章第三、四节。范伟副教授编写了第六章第一节,第五章第五、六节及附录。全书由佳木斯大学工学院宋强副教授审阅,并提出了修改意见。在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,教材中可能存在缺点和不足,希望广大读者批评指正。

编 者

1998 年 1 月

目 录

绪 论	(1)
第一章 非电量电测技术的基本知识	(3)
第一节 基本概念	(3)
第二节 电测系统的组成及其基本要求	(6)
第三节 电测技术的常用电路	(9)
第四节 传感器概述	(19)
思考题	(21)
第二章 常用传感器的变换原理	(22)
第一节 电阻应变片式拉压力传感器	(22)
第二节 电感式传感器	(32)
第三节 光电传感器	(45)
第四节 电容式传感器	(49)
第五节 其它类型传感器	(55)
思考题	(57)
第三章 测温技术	(58)
第一节 概 述	(58)
第二节 热电偶测温	(60)
第三节 热电阻测温	(75)
第四节 辐射式测温仪表	(77)
思考题	(85)
第四章 合金成分、气体含量、处理效果等检验	(86)
第一节 铸铁化学成分炉前检验	(86)
第二节 铸钢化学成分炉前检验	(88)
第三节 有色合金炉前检验	(89)
第四节 球墨铸铁球化率检验	(94)
思考题	(107)
第五章 记录、显示仪表	(108)
第一节 测温毫伏计	(108)
第二节 电位差计	(113)
第三节 函数记录仪	(123)
第四节 电阻应变仪	(126)

第五节 光线示波器.....	(130)
第六节 数字式仪表.....	(132)
思考题.....	(136)
第六章 无损检测技术.....	(137)
第一节 磁粉检测.....	(137)
第二节 X 射线检测.....	(139)
第三节 超声波检测.....	(144)
思考题.....	(146)
第七章 微型计算机热分析技术应用举例.....	(147)
第一节 概 述.....	(147)
第二节 热分析法在铸造生产中的应用.....	(151)
第三节 微型计算机铸铁成分热分析.....	(156)
思考题.....	(166)
附录 I 热电偶温度与毫伏对照表.....	(167)
附录 I 热电阻分度表.....	(177)
附录 II 国产振动子技术参数表.....	(180)
参考文献	(181)

绪 论

金属材料在液态成形(铸造)、塑性成形(锻压)及焊接成形过程中,其组织、结构发生了一系列变化。产品的质量和性能在很大程度上受这些变化的影响。为了使产品的质量和性能达到设计的要求,有必要对影响产品质量的材料在成形过程中的各种参数进行控制,尤其在优质、高产、低消耗的现代化大批量生产中,对材料成形过程的控制更是必不可少的。而检测技术作为实验科学的一个方面,不但是控制工程的组成部分,而且也是科学研究的重要手段。它能揭示出成形过程中的各种参数及其变化,从而为人们对成形过程及其结果的分析、评价和改进提供科学依据。而将成形过程中的各种参数及其变化作为信号提供给成形过程控制系统,即可实现成形过程的优化及自动控制。

在材料成形过程中,影响成形过程及其产品质量的参数很多,常需检测的主要参数有以下几种:

1. 应力与应变 在金属材料成形过程中,由于其温度、金相组织的变化及变化的不均匀性,可导致其形成应力与应变,从而直接影响产品形状的精度和稳定性。检测材料成形过程中的应力和应变,是研究成形工艺及零件结构合理性的需要。

2. 位移和重量 在材料成形工艺涉及的材料、设备及自动控制中,常需检测位移量和重量,如料位、设备中运动机构的位置、物料的重量等。

3. 温度 温度是热加工工艺中重要的参数,如铸造合金的浇注温度、型芯的烘干温度、锻压中始锻和终锻温度、焊接中母材的温度以及金属材料成形过程中温度的变化速度等,对零件的质量、性能和成本都有十分重要的影响。对各种温度进行检测,不但能帮助我们了解温度的影响,也能使我们把材料的成形过程控制在最佳的温度区间。

4. 金相组织 它是与金属力学性能及缺陷等有关的参量。对零件或制品的质量控制,除了在其形成过程中的控制之外,对成形后的零件进行检测也是重要的质量控制手段。通过对零件金相组织、力学性能及缺陷等的检测,可以准确地评定零件的质量等级,也可分析所测参数偏离标准的程度和原因,帮助人们制定改进措施。

检测方法按被测量及转换量的不同,分为非电量非电测法和非电量电测法。非电量电测法是用机械的方法直接检测被测量,或将被测量转换成另一种非电量,再用机械方法对转换量检测的方法,如用杠杆秤或弹簧秤称物体重量。如果将被测量转换成电量(如电压、电流、电阻、电感、电容等),再用电测仪表测量该电量,那么这种间接地测量非电量的方法则是非电量电测法,如用电子秤称重量,用热电测温仪测温等。电测法与非电测法相比,具有以下比较突出的优点:

1. 根据需要,信号可以很容易地进行加工处理,如放大、缩小、变形等;
2. 电子装置轻便,惯性小,磨损低,反应速度快,准确,动、静态测试均方便;
3. 信号可以远距离传递、显示和记录,易于实现遥测和集中控制;
4. 信号采集、处理、测量、显示、记录等各个部分可以分开,便于对各种复杂现场进行测

量,具有极大的灵活性;

5. 易于实现自动化和智能化。

人们在长期的生产实践和科学研究中,逐渐地摸索了一整套检测各种参量的方法,并随着科学技术的进步,不断的改进和完善这些方法,形成了从参量信号采集,转换处理,测量到显示记录一整套学术和技术系统。

检测技术的服务对象几乎遍及国民经济的各个领域,受到生产、科研、教育部门的普遍重视。在我国,其发展速度也是很快的。尤其改革开放以来,检测方法、检测仪器仪表的研究、开发和推广已具有较强的实力。在金属材料成形及控制工程中,检测技术的研究与应用也得到了较快的发展。许多工厂在生产过程中实现了局部参数检测,有些工厂已实现了生产过程的自动检测与控制。

目前传感器信号的处理和变送方式一般仍为模拟信号方式,但随着科学技术的发展,数字化、智能化、网络化、信源压缩已成为发展趋势。因此,传感器技术和数字化技术,计算机技术的结合将成为检测技术发展的一种必然的结果。这一结论已在国际上形成了共识。只有很好地解决信号来源,电子计算机才能发挥它的高超效能;只有通过各种各样的传感器,将金属成形过程中的各种物理参数及时、准确、迅速地转变为电信号,才能送至电子计算机进行运算处理,以调节到最佳的参数,然后命令执行机构动作。智能传感器对于推广电子计算机的应用以及实现检测技术的高度自动化具有重要的意义。

国外检测技术发展得较早,有一定的优势,但尖端技术我国也有,只不过是普及罢了。我国也有暂时落后的地方,但要历史地、辩证地看问题,不要盲目崇拜,要树立起我们的民族自尊心和自信心,并要有赶超世界先进水平的雄心,为国争光。

检测技术今后的任务有以下几个方面:一是要更新观念,将检测技术应用于生产过程中,而不只是最后对废品率的检验;二是要注重检测人才的培养,普及检测技术的应用;三是逐步向自动化、智能化方向发展,实现目标管理。

第一章 非电量电测技术的基本知识

第一节 基本概念

一、测试与标准

1. 测试概念

测试就是用专门的设备或技术,通过实验和必要的数学处理求得被测量的量值的过程。也有人认为测试就是有其特殊意义和具有实验性质的测量。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比值。

测试结果一般可以表示为

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

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)通常称为测试的基本方程。由此可见, g 的大小完全取决于测试单位 v 的大小。所采用的测试单位愈小,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;其二是相应的测试单位,不注明单位,该测试结果将失去意义。

2. 测试标准

测试总得有一个标准做参考,以便拿被测量去同这个参考标准比较。这样的参考标准一般可分为三种类型。

(1)理论真值 A_0 (或称定义值) 如平面三角形内角之和为 180° ;又如安培作为电流的计量标准,其定义为:若在真空中有两根截面无限小的、相距 2 m 的无限长平行导体,在其上通过 1 A 的恒定电流时,则在两导体间产生 10^{-7} N/m 的相互作用力。

实际上,以这样的定义值作为参考标准是不可取的,它只存在于纯理论之中。要知道它,就必须测量它,而测量它又需要某种参考标准,这样就会陷入无穷的循环之中,因此绝对的真值是不可知的,但可以无限地逐渐逼近它。

(2)指定真值 A_1 指定真值是国际上约定的或由国家设立的各种尽可能维持不变的实物基准和标准器,指定以它的数值作为参考标准。如指定长度单位米为氪 86 原子的 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能量级之间跃迁所对应的辐射在真空中 $1\,650\,763.73$ 个波长的长度。又如指定时间单位秒是铯 133 原子基态的两个超精细能量级之间跃迁所对应的辐射 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间。当然还有许多指定真值。

(3)实际真值 A 实际真值也叫相对真值。高级计量标准器是相对于低级计量标准器或普通仪表而言,高级计量标准器的数值可以认为是真值。在测量系统中,前一级的输出可作

为后一级的标准。这里所谓高级、低级和普通以及前一级和后一级的概念都是相对的。在实际测试工作中,实际真值得较多。

二、误差与分类

1. 测试误差

测试是一个变换、选择、放大、比较及显示的综合过程。如果这些过程在理想的环境和条件下进行,即不受任何因素影响,那么测得的值将是十分精确的,也就是说没有误差。但实际上无论采用怎样完善的测量方法和多么精密的测量设备,由于种种原因,被测量的示值与真值之间总是存在着差异,这就是误差存在的普遍性。

测试误差(简称为误差)是指用测试仪器进行测试时,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试辅助设备、测量方法、外界环境、操作技术等误差因素共同作用的结果。

在科学实验和生产上对测试技术的要求是:能得出与被测对象精度要求相适应的某一精确程度的测试结果。因此,问题在于要确定某一测试结果的误差。

要客观、科学地评定某一测试结果的误差,首先必须分析研究测试误差产生的原因及其出现的规律,然后寻求相应的解决措施,并对这些测试误差作定性分析和定量计算。

2. 误差的分类

(1) 绝对误差和相对误差 设被测量的真值为 A , 测得值为 X , 则绝对误差 δ 为

$$|\delta| = |X - A| \quad (1-2)$$

测得误差绝对值的大小,表明了测得值偏离实际值的大小。 δ 愈大,则测试的精确度愈低;反之,则愈高。

被测量的实际值(真值),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 A , 只要将测得值加修正值就能得到:

$$A = X + C \quad (1-3)$$

式中, C 为修正值。

这说明,一个测试仪表通过检测,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。一个错误的修正值反而会得到更坏的结果,因此,对修正值应谨慎小心。

修正值与 δ 大小相等,符号相反。

$$C = -\delta \quad (1-4)$$

如某电流表的量程为 1 mA, 通过检测得到其修正值为 0.02 mA。用这种仪表测试一未知电流,其测得值为 0.76 mA, 于是得到被测电流的实际值为

$$A = 0.76 + 0.02 = 0.78 \text{ mA}$$

很明显,绝对误差不便于作为同类仪表不同量程以及不同类仪表之间测试精度的比较。以测温为例,同样是 1 °C 的绝对误差,测 1 000 °C 的温度时,就比测 100 °C 温度时的精度高。为了解决这个问题,必须引入相对误差的概念。

相对误差 ϵ 是绝对误差 δ 与被测量真值 A 的比值,即

$$\epsilon = \delta/A \quad (1-5)$$

当真值 A 不知道,绝对误差又比较小时,一般就采用测得值 X 代替 A , 即

$$\epsilon \approx \delta/X \quad (1-6)$$

(2)系统误差 按误差的性质及其产生原因不同,误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三种类型。

在测试过程中,凡误差的数值大小和符号固定不变,或者按一定规律变化的误差叫做系统误差。不变的误差又称为恒差或定值误差;变化的系统误差则称为系统变差。系统变差按其变化规律又可分为累进性的、周期性的以及按复杂规律变化的几种。

系统误差可能是由于测试理论的近似性或测试方法的不完善所造成的;也可能是由于温度、湿度、电磁场等环境的影响所造成;当然,工具、仪表等本身的不完善或安装调试不当以及测试者的分辨能力、反应速度和读数习惯等都有可能造成系统误差。

系统误差的出现是有规律的,多数情况下可以通过技术措施来抵偿或减弱。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消除。

(3)随机误差 消除系统误差之后,在对同一物理量进行多次重复测试时,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。

随机误差的产生可能是由于仪器、仪表中传动部件间的间隙和摩擦,连接件的变形而引起的示值不稳,实验条件的波动,外界环境的无规律变化等原因引起。随机误差是由许多无法预测和控制的因素造成的。它无法事先消除,只能根据其统计规律估计其误差的分布范围。它与测试次数有关。随着测试次数的增加,随机误差的算术平均值逐渐接近于零。

(4)粗大误差 粗大误差是明显歪曲测试结果的大误差,是由操作者的疏忽或失误所造成的,也称为过失误差。它是由于操作者的读数错误、记数错误、计算错误、操作不小心而造成。

粗大误差因数值很大,容易从测量结果中发现,一经发现就应从测试数据中剔除。

三、测试的精确度

1. 准确度

准确度是表示测量结果中系统误差的大小的程度。它是指在规定的条件下,测量中所有系统误差的综合。系统误差大,则测量的准确度低;反之,准确度则高。

2. 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试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,测试的重复性就差;反之,重复性好。

3. 精确度(精度)

精确度是准确度和精密度的综合反映,它综合表示测试结果与实际值的偏差程度,即测试结果的优良程度。通常人们所指的精度往往包含精密度与准确度两种意思。

从图 1-1 可看出这三个概念之间的关系。图中 A_0 表示被测量的真值,各小黑点表示测试值的位置。图(a)表示精密度和准确度都差。图(b)表示了精密度好,但准确度差。图(c)表示了精密度和准确度都好,因而精度也好。

在工程上,为了简便,引入了仪表精度等级的概念来表示仪表测量结果的可靠程度。这个仪表精度等级用 D 来表示,它以一系列标准百分比数值(0.001, 0.005, 0.02, ..., 2.5, 4.0, 6 等)来进行分档。这个数值通常是在仪表规定的条件下,仪表最大绝对允许误差值相

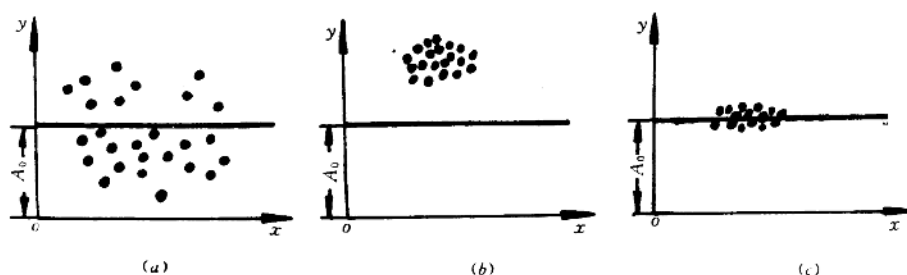


图 1-1 精密度、准确度的概念

对于仪表测量范围的百分数。它可以表示为

$$D = \delta_{\max} / (X_{\max} - X_{\min}) \times 100\% \quad (1-7)$$

式中 $\delta_{\max}$ ——仪表在全刻度范围内最大绝对允许误差；

$X_{\max}$ ——仪表刻度盘的上限值；

$X_{\min}$ ——仪表刻度盘的下限值；

D——仪表精度等级。

第二节 电测系统的组成及其基本要求

一、电测系统的组成

1. 电测系统的定义

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,把获得的信息进行中间变换;再用指示仪表或记录仪表将信息显示出来。我们把从被测量转换为电量开始一直到显示出测试结果所包括的整体叫做电测系统。

2. 电测系统的组成

电测系统的组成见电测系统方框图(图 1-2)。

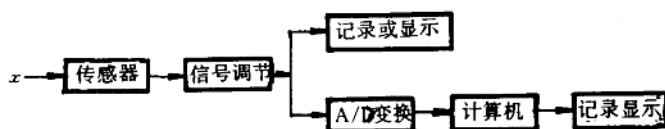


图 1-2 电测系统方框图

传感器的作用是将非电量信号变为电量信号。如温度、压力、浓度、流量、位移等非电量转换为电压、电流等电量信号,以便送至测试系统或计算机系统。

信号调节主要的作用是将传感器送来的电量信号放大或衰减,进行阻抗变换。

显示或记录的目的是要反映出被测的数值。目前常用的显示方式有三类:模拟显示、数

字显示和图像显示。如毫伏表、毫安表、微安表等指示仪表是属于模拟显示,它是利用指针相对于标尺的相对位置来表示读数。数字显示是用数字形式来显示读数,如数字电压表、数字频率计等。图像显示是用屏幕显示读数或被测参数变化的曲线。有的测试必须了解它的变化过程,特别是动态过程的变化,这就必须采用自动记录仪器,如电子电位差计、 $x-y$ 函数记录仪、光线示波器、磁带记录仪、电传打字机等。

测试系统一般分为手动和自动测试系统两类。手动测试系统是指测试过程中的全部或大部分操作、调整及计算工作,是由测试人员直接参与并取得结果的。自动测试系统又分全自动和半自动测试系统。全自动测试系统是指所有仪器及设备都必须与计算机联合工作,整个测试过程由计算机控制,测量数据是以模拟或数字形式输出,供存储、处理、显示或打字之用。

二、测试系统的静、动态特性

一般来讲,任何一个测试系统,应具有如下一些基本要求:

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不应因测试系统各环节的接入而使被测量受到影响,以保证测试的精度。

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能力的提高而急剧上升。此外误差理论指出,由若干仪器所组成的测量系统,其测试结果的精度取决于其中精度最低的环节。因此在满足一定测试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。

为满足测试系统的基本要求,应从以下两方面的特性来保证,即测试系统的静态特性和测试系统的动态特性。

1. 测试系统的静态特性

当输入信号不随时间变化(或变化极其缓慢)时,测试系统的输出与输入之间的关系称为测试系统的静态特性。实际测试系统(装置)的静态特性主要用灵敏度和线性度来表示。

(1)灵敏度 灵敏度有两种表示方法。

①灵敏度为在静态条件下输出变化与输入变化的比值,可用下式表示

$$K = \text{输出信号变化量} / \text{输入信号变化量} = \Delta y / \Delta x \quad (1-8)$$

对于线性测试系统,灵敏度为常数,即 $K=y/x$, 如图 1-3(a) 所示。对于非线性测试系统,灵敏度为变量,随输入量的变化而变化,即 $K_i=\Delta y/\Delta x|_{x=x_i}$, 如图 1-3(b) 所示。如对应于 1 mm 的位移(输入信号变化),能得到 2 mV 的输出电压变化的测试系统,其灵敏度为 $K=2 \text{ mV/mm}$ 。

②用测量系统所能够测出的被测量的最小变化或最小变化量来表示灵敏度。如应变片的灵敏度为 10^{-6} , 即应变片能测出的最小应变等于 $1 \mu\epsilon$ 。这种灵敏度是测试系统有确切的读

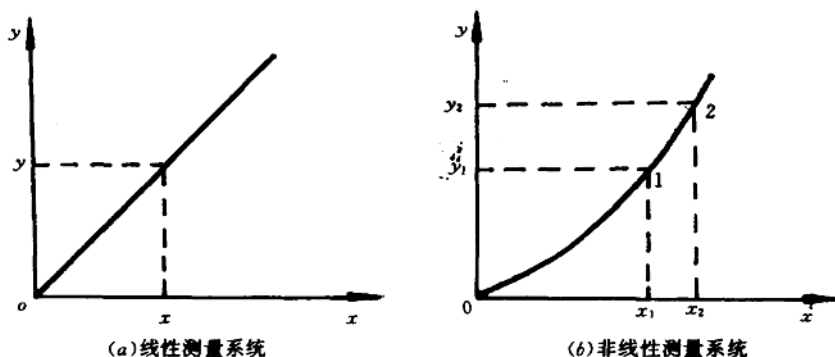


图 1-3 灵敏度定义

数时所对应的被测值,因此它是在测试下限表示输出与输入之间的关系。

(2) 线性度 在静态测试中,传感器或仪器特性曲线的线性度是说明输出量与输入量的实际关系曲线与直线偏离的程度,如图 1-4 所示。设线性度用 S 表示,则

$$S = \frac{|y' - y_i|_{\max}}{|y_{\max}|} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 S ——线性度(非线性误差);

$|y' - y_i|_{\max}$ ——特性曲线与其拟合直线之间的最大偏差;

$y_{\max}$ ——最大输出值。

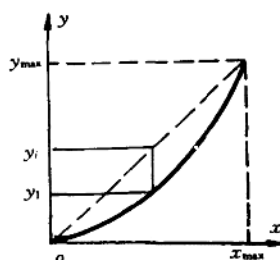


图 1-4 线性度的示意图

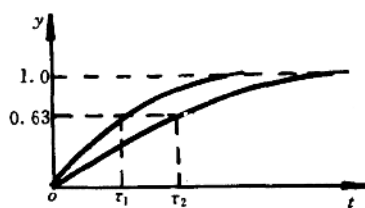


图 1-5 一阶系统的阶跃响应

2. 测试系统的动态特性

所谓测试系统的动态特性,是指输入量随时间变化时,测量系统输出与输入之间的关系。这种动态响应特性是指测量系统对动态信号的幅度、时间的响应特性。

大部分模拟测试系统输出与输入之间的关系可以用微分方程来描述。如果这微分方程是一阶微分方程,称为一阶测试系统;是二阶微分方程,称为二阶测试系统;以此类推。但通常测试系统多为一阶或二阶系统,或者是由若干一阶、二阶组成的系统。

用微分方程来分析研究系统的动态特性直观性很差,系统的动态特性也很难用实验的方法求得。因此,常用典型输入信号和给定初始条件下的特解来描述测试系统的动态特性。

这里仅简要介绍一阶、二阶测试系统在阶跃输入时描述动态特性的方法。

(1) 一阶测试系统的阶跃响应 图 1-5 所示为一阶系统的阶跃响应曲线, 纵坐标 y 为输出值, 横坐标 t 为时间。它有以下特点:

① 阶跃响应函数是指数函数曲线, 初始值为零, 随着时间 t 的增大, 数值不断增大, 最终趋于值 1。由此可以明显地看出输出、输入间的差异。输入是一阶阶跃曲线, 而输出则是指数函数曲线。可见, 输出不能马上达到输入值, 而是需要经过一段时间才能达到输入值。这种差异就造成了动态误差。

② 指数曲线的变化率, 取决于常数 τ 。从图 1-5 可以看出, τ 值越大, 曲线趋于 1 的时间越长, 输出与输入的差异也越大; τ 值越小, 曲线趋于 1 的时间越短, 输出与输入的差异也就越小。

τ 有决定响应速度的重要作用, 定义 τ 为时间常数。在 $t=\tau$ 时, $y=0.63$, 即 τ 时刻后, 输出仅达到输入的 63% 左右, 4τ 时达到 98% 左右。通常用达到最终值的 95% 或 98% 所需要的时间作为响应快慢的指标, 它们分别对应 3τ 和 4τ 。有时也采用所谓的上升时间 τ_r 来表示响应的快慢。从最终值的 10% 增加到最终值的 90% 所经过的时间称为上升时间。

(2) 二阶测试系统的阶跃响应 二阶测试系统的动态特性, 常用单位阶跃信号 (其初始条件为零) 为输入信号时输出的变化曲线 $y(t)$ 来表示, 如图 1-6 所示。通常用上升时间 t_r , 响应时间 t_s , 过冲量 C 等参数来综合描述。

上升时间 t_r 是测试系统的示值从最终值的 $a\%$ 变化到最终值的 $b\%$ 所需要的时间。 $a\%$ 的值通常采用 5% 或 10%; 而 $b\%$ 值通常采用 90% 或 95%。如从最终值的 5% 变化到 95% 的时间为 0.15 s 时, 可写成 $t_r=0.15 \text{ s} (5\% \sim 95\%)$ 。

响应时间 t_s 是指输出量 y 从开始变化到示值进入最终值的规定范围内所需要的时间。最终值的规定范围通常取测量系统的允许误差值。它还应与响应时间一起写出, 可如此表示 $t_s=0.4 \text{ s} (\pm 5\%)$ 。

过冲量 C 是指输出最大振幅与最终值之间的差值, 通常以对最终值的百分数来表示。

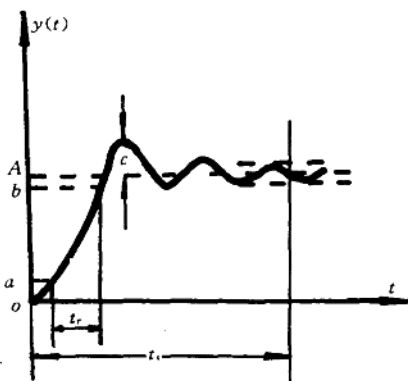


图 1-6 二阶系统的阶跃响应

第三节 电测技术的常用电路

一、电桥电路

电桥是将电阻、电感、电容等参数的变化变换为电压或电流输出的一种测量电路, 也是记录、显示仪表中的重要电路。由于电桥电路具有灵敏度高, 测量范围宽, 容易实现温度补偿等优点, 因此被广泛应用。

根据电桥电源性质不同, 电桥分为两类: 直流电桥和交流电桥。

1. 直流电桥

(1) 直流电桥的工作原理 图 1-7 是直流电桥的基本形式。它的四个桥臂由电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 组成。 AB 两端接在直流电源 U , CD 两端接二次仪表, 其内阻为 R_L , 流过电流为 I_L 。

图 1-8 为电桥的等效电路, 根据等效电源法原理可得空载电压为

$$U_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}U - \frac{R_4}{R_3 + R_4}U \quad (1-10)$$

等效电阻为

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \quad (1-11)$$

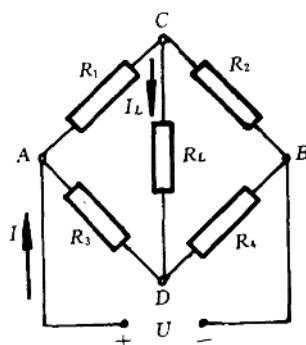


图 1-7 电桥电路

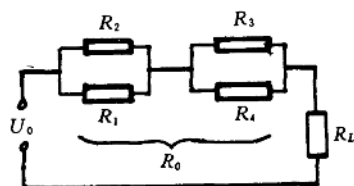


图 1-8 电桥的等效电路

则流过 R_L 的电流为

$$I_L = \frac{U_0}{R_L + R_0} = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_L(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2(R_3 + R_4) + R_3 R_4(R_1 + R_2)} \quad (1-12)$$

R_L 两端的电压为

$$U_L = I_L R_L \quad (1-13)$$

当电桥输出端 CD 接上输入电阻极大的仪表或放大器时, 则可以近似认为 $R_L \rightarrow \infty$ 。由式(1-12)和式(1-13)得

$$U_L = (R_1 R_3 - R_2 R_4)U / (R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_2 R_3 + R_2 R_4) \quad (1-14)$$

由式(1-14)可以看出, 若要使电桥输出为 0, 应满足

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

因此, 适当选择各桥臂电阻值, 可使输出电压只与被测量引起的电阻变化量有关。这样只要测出输出电压的变化就可知道相对应的被测物理量的变化。

为了简化桥路设计, 通常使四臂电阻相等, 即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 。根据工作中电阻值参与变化的桥臂数可分为单臂工作、双臂工作和四臂全桥工作方式。

(2) 电桥的和差特性 以全等电桥的电压输出为例分析四个桥臂的电阻变化, 从而说明电桥的和差特性。当工作时, 如果各臂的电阻都发生变化, 即 $R_1 \rightarrow R_1 + \Delta R_1$, $R_2 \rightarrow R_2 + \Delta R_2$,

$R_3 \rightarrow R_3 + \Delta R_3, R_4 \rightarrow R_4 + \Delta R_4$, 电桥将有电压输出, 若 $\Delta R_i \ll R, R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, 且忽略所有 ΔR 的高次项及其分母中的 ΔR 项, 则式(1-14)即可写为

$$U_L = U(\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4)/4R \quad (1-15)$$

①单臂工作时, 即电桥只有桥臂 R_1 为工作臂, 其余各臂为固定电阻 R , 则式(1-15)可写成

$$U_L = U\Delta R/4R \quad (1-16)$$

②两个相邻臂工作时, 即电桥 R_1, R_2 为工作臂, 且工作时增量分别为 $\Delta R_1, \Delta R_2$, 而 R_3 和 R_4 两臂固定电阻为 R , 则式(1-15)可写成

$$U_L = U(\Delta R_1 - \Delta R_2)/4R \quad (1-17)$$

当 $\Delta R_1 = \Delta R_2$ 时

$$U_L = 0$$

当 $\Delta R_1 = \Delta R, \Delta R_2 = -\Delta R$ 时

$$U_L = 2U\Delta R/4R$$

此时电桥的输出比单臂工作时增大一倍, 提高了测试的灵敏度。

③两个相对臂工作时, R_1, R_3 为工作臂, 且工作时增量分别为 ΔR_1 和 ΔR_3 , 而 R_2, R_4 为固定电阻 R , 则式(1-15)可写成

$$U_L = U(\Delta R_1 + \Delta R_3)/4R \quad (1-18)$$

当 $\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R$ 时

$$U_L = 2U\Delta R/4R$$

当 $\Delta R_1 = \Delta R, \Delta R_3 = -\Delta R$ 时

$$U_L = 0$$

④四臂为全桥差动时, R_1, R_2, R_3, R_4 均为工作臂, 且电阻增加量分别为 $\Delta R_1 = \Delta R, \Delta R_2 = -\Delta R, \Delta R_3 = \Delta R, \Delta R_4 = -\Delta R$, 则式(1-15)可写成

$$U_L = 4U\Delta R/4R = U\Delta R/R \quad (1-19)$$

这时电桥的输出为单臂测试时的四倍, 大大提高了测试的灵敏度。

2. 交流电桥

为了克服零点漂移, 常采用正弦交流电压作为电桥的电源, 这样的电桥称为交流电桥。由于是交流供电, 所以连接导线之间存在分布电容和分布电感。实践证明, 分布电容的影响比分布电感的影响大得多, 因此这里着重分析分布电容对电桥平衡和输出的影响。对纯电阻交流电桥, 由于导线之间存在分布电容, 故相当于在桥臂上并联了一个电容。

如图 1-9 所示, 供桥电压为

$$U = U_m \sin \omega t \quad (1-20)$$

式中 U_m ——供桥交流电压的最大振幅;

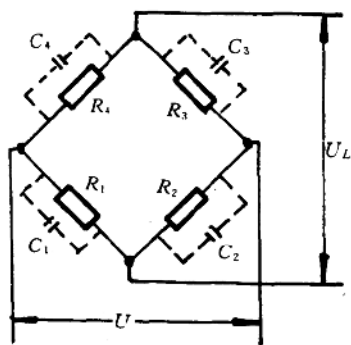


图 1-9 电阻交流电桥的分布电容