

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS



铸造非电量 电测量

ZHUZAO FEIDIANLIANG DIANCELIAN

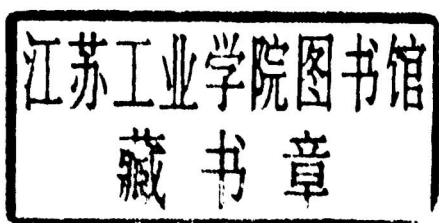
李大勇 张沛红

华中理工大学出版社

高等学校教材

铸造非电量电测量

李大勇 张沛红



华中理工大学出版社

高等学校教材
铸造非电量电测量
李大勇 张沛红
责任编辑 叶翠华

*

华中理工大学出版社出版发行
(武昌喻家山)
新华书店湖北发行所经销
华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.5 字数: 326 000

1994年5月第1版 1994年5月第1次印刷

印数: 1-1 000

ISBN 7-5609-1000-9/TG·38

定价: 8.10元

(鄂)新登字第10号

前 言

科学技术的不断进步，对铸造生产提出了越来越高的要求。作为一门新兴技术学科的铸造检测技术，无论是在生产过程控制，还是在铸件质量检验中，均显示出了它的重要性和必要性。随着电子技术和计算机技术的飞速发展，铸造检测技术也有了长足的进步，传统的铸造生产与当代先进的电测技术有了更加紧密的结合。可以预见，铸造电测技术将在未来的铸造生产和科学研究中发挥越来越大的作用。

为了满足实际生产的需要，铸造专业工程技术人员必须掌握先进的铸造检测手段，以便更好地组织和管理生产。近年来，我国一部分高校在铸造专业中开设了铸造测试技术课程，其目的在于使学生掌握现代铸造检测技术的基本知识和具备应用这种技术的能力。我们在总结十余年铸造测试技术课教学经验和多项铸造电测技术科研成果的基础上，编写了这本《铸造非电量电测量》。本书可作为高等学校铸造专业本科生及研究生教材，亦可供铸造生产和科研部门的工程技术人员及有关人员阅读参考。

全书以介绍当今较为先进实用的铸造非电量电测技术为主，其中包括非电量电测技术基础知识；常用传感器变换原理及其信号检测；常用测量仪表及微机测试系统；铸造生产过程中的非电量电测技术和铸件质量电测技术。收入本书的电测技术实例，均取自科研成果和实际生产，因此具有较高的实用价值。

本书由哈尔滨科学技术大学铸造教研室孟繁玉教授审阅，并提出许多宝贵建议，其他同志也对本书编写给予了大力支持，在此一并致谢。由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，诚恳欢迎同行批评指正。

作 者

1993年2月于哈尔滨科技大学

内 容 提 要

本书以传感器变换原理为基础,以铸造生产过程电测技术为主线,介绍了从原材料准备到生产出合格铸件所涉及到的多项电测技术。全书共分五章,可归结为两大部分。第一部分为基础篇(第一章、第二章、第三章),主要介绍电测技术基础知识,传感器变换原理及其信号检测,常用测量仪表及微机测试系统。第二部分为应用篇(第四章、第五章),主要介绍铸造生产过程中造型材料、液态金属质量电测技术以及铸件质量电测技术。

本书可作为高等学校铸造专业本科生及研究生教材,亦可供其它专业师生和铸造工程技术人员参考。

目 录

第一章 非电量电测量的基本知识	(1)
第一节 测量的基本概念	(1)
一、测量与真值	(1)
二、测量误差及其分类	(1)
三、准确度、精密度及精度	(2)
四、灵敏度与线性度	(3)
五、动态响应特性	(3)
第二节 电测系统组成和基本测量电路	(4)
一、电测系统组成	(4)
二、传感器输出信号的分类及其测量	(5)
三、电桥电路	(6)
四、放大电路	(10)
五、电流、电压转换电路	(14)
六、相敏检波电路	(14)
七、滤波电路	(15)
第二章 常用传感器变换原理及其信号检测	(16)
第一节 传感器概述	(16)
一、传感器的分类	(16)
二、对传感器的要求	(16)
三、传感器的发展趋势	(16)
第二节 电阻式传感器	(17)
一、电位器式传感器	(17)
二、电阻应变式传感器	(20)
三、热电阻和热敏电阻	(30)
第三节 电容式传感器	(33)
一、改变极板间距离的电容式传感器	(33)
二、改变极板有效面积的电容式传感器	(34)
三、改变介质介电常数的电容式传感器	(35)
四、电容式传感器信号的测量	(35)
第四节 电感式传感器	(38)
一、自感式传感器	(38)
二、互感式传感器	(41)
三、电涡流式传感器	(45)
四、压磁式传感器	(49)

第五节 磁电式传感器	(50)
一、基本原理	(50)
二、磁电式传感器的结构	(51)
三、测量电路	(52)
第六节 压电式传感器	(53)
一、压电效应	(53)
二、压电材料	(54)
三、压电传感器的结构	(55)
四、压电信号测量电路	(55)
第七节 光电式传感器	(58)
一、光电效应	(58)
二、光电管及光电倍增管	(59)
三、光敏电阻	(60)
四、光敏晶体管	(60)
五、光电池	(61)
第八节 热电式传感器	(61)
一、热电偶	(61)
二、辐射式热电变换器	(68)
第三章 常用测量仪表及微机测试系统	(70)
第一节 磁电动圈式仪表	(70)
一、磁电动圈式仪表的结构和工作原理	(70)
二、磁电动圈式仪表的调校与使用	(74)
第二节 手动直流电位差计	(75)
一、直流电位差计的组成和工作原理	(75)
二、直流电位差计的线路	(75)
三、直流电位差计的分类及其精度等级	(76)
第三节 电子自动平衡记录仪	(77)
一、电子自动平衡记录仪基本结构及工作原理	(77)
二、电子自动平衡记录仪测量电路	(78)
三、晶体管放大器	(80)
四、可逆电机与记录机构	(80)
五、电子自动平衡记录仪的校验	(80)
第四节 光线示波器	(81)
一、光线示波器的组成及工作原理	(81)
二、光线示波器的光学系统和磁系统	(81)
三、振动子的结构及工作原理	(82)
四、振动子的选择	(83)

第五节 微机化非电量测试系统	(84)
一、微机化测试系统的基本构成	(84)
二、微机化测试系统的主要特点	(84)
三、微处理机控制模/数转换器	(85)
四、微处理机控制按键开关、拨盘和键盘	(90)
五、微处理机控制发光二极管显示器	(95)
六、微处理机控制微型打印机	(99)
七、微机测试系统抗干扰问题	(103)
第四章 铸造生产过程中的非电量电测技术	(110)
第一节 铸造材料定量检测技术	(110)
一、炉料定量检测技术	(110)
二、造型材料定量检测技术	(121)
三、液态金属的定量检测	(123)
第二节 流体流量及压力检测技术	(126)
一、冲天炉风量的检测	(126)
二、液体造型材料流量检测	(128)
三、流体压力的检测	(129)
第三节 介质温度电测技术	(130)
一、金属液出炉温度的电测量	(130)
二、铸件温度场的电测量	(132)
三、循环砂温度的电测量	(136)
四、铸造生产中的特殊测温技术	(138)
第四节 铸造合金质量电测技术	(140)
一、铸铁化学成分和机械性能的电测量	(140)
二、铸造合金凝固特性电测量	(150)
三、铸造铝合金质量炉前电测量	(155)
四、球墨铸铁球化率电测量	(158)
第五节 型砂质量电测技术	(165)
一、型砂含水率电测量	(165)
二、型砂及铸型透气性电测量	(171)
三、型砂强度电测量	(175)
四、型砂质量综合参数电测量	(177)
第五章 铸件质量电测技术	(179)
第一节 铸造表面粗糙度电测技术	(179)
一、常用评定参数	(179)
二、铸造表面粗糙度电测量	(179)
第二节 铸件表面缺陷电测技术	(185)

一、磁力探伤法检验.....	(185)
二、涡流探伤法检验.....	(189)
第三节 铸件材质与性能电测技术.....	(193)
一、铸件材质的评定.....	(193)
二、钢铁件硬度检测.....	(194)
三、铸件应力及残余应力的检测.....	(195)
四、铸件抗拉强度及延伸率的检测.....	(196)
第四节 铸件内部缺陷电测技术.....	(197)
一、X 射线探伤.....	(197)
二、超声波探伤.....	(200)
参考文献.....	(205)

第一章 非电量电测量的基本知识

第一节 测量的基本概念

一、测量与真值

所谓测量就是借助于专门设备或技术工具，通过必要的实验和数据处理求得被测量值的过程。其实质在于以同性质的标准量与被测量比较，并确定出两者间的比值。因此，测量必须有一个标准作参考，这个参考标准常常被称为真值，一般可分为以下三种类型。

1. 理论真值 A_0

理论真值又称为定义值，它是人们根据测量需要所定义出的参考标准。如平面三角形三内角和 π 、电流计量单位安培等均为理论真值。理论真值只存在于纯理论定义之中，是不可量知的真值，因为不存在理论真值的参考标准，所以在测量时只能无限地逼近理论真值。

2. 指定真值 A_s

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或标准器的数值。如时间单位秒为指定真值，它被指定为铯 133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射 9, 192, 631, 770 个周期的持续时间。

3. 实际真值 A_r

实际真值又称为相对真值。在实际测量中，人们一般把高一级的计量标准器的数值认为是“真值”，可供低级计量标准器或普通仪器仪表测量时参考，因此这个“真值”是相对而言的。

二、测量误差及其分类

测量的最终目的在于求得被测量真值。如果测量工作可在理想环境和条件下进行，则所测数值将十分准确。但事实上无论如何完善测量方法和测量设备，由于种种因素的影响，都会使得被测量的示值与真值之间存在一定差异，这个差异即被称为测量误差。

就电测而言，其装置质量的高低或测量结果的好坏，是以测量误差大小来衡量的。造成测量误差的原因有多方面，按其特征不同可作如下分类。

1. 装置误差和方法误差

由于元器件和装置本身质量不高而产生的误差称为装置误差。如测量电路中，变阻器式传感器的阻值不仅受被测量变化的影响，而且还受环境温度变化的影响，从而使测量结果产生误差。

在应用理想元器件或检测装置的条件下，由于测量方法不当而产生的测量误差称为方法误差。如用热电偶测温，尽管采用了高精度热电元件，但对热电偶冷端不作补偿处理，也会对测量结果造成较大误差。

2. 基本误差及附加误差

任何一种测量装置，均在变化的条件下应用，测试现场有各种干扰源存在。而测量装置的使用说明书中，一般规定只允许干扰信号在很窄的范围内变化。我们称这种限定为参比条件，在参比条件下，由于干扰信号影响而产生的误差称为基本误差。

在装置的使用过程中，由于现场条件偏离参比条件而产生的测量误差往往大于基本误差，

我们称之为附加误差。

3. 系统误差和随机误差

凡误差数值固定或按一定规律变化,称为系统误差,其中数值固定者为恒值误差,按一定规律变化者为变值误差。

系统误差决定了测量的准确度,系统误差越小,则测量结果越准确。由于系统误差具有一定规律性,因此可以通过试验或引入修正值的方法加以消除。

随机误差又称偶然误差,是大量偶然因素影响而引起的测量误差,其数值和性质均不固定,因此难以估计,我们只能从理论上估测其对测量结果的影响。随机误差决定了测量的精密度,随机误差越小,测量精密度越高。

4. 绝对误差和相对误差

绝对误差定义为示值与真值(或理想值)之间的差值,以公式表示为:

$$\pm \Delta = x - A \quad (1-1)$$

式中, Δ 为绝对误差; x 为示值,即测量值; A 为真值,即理想值。

显然,绝对误差不能作为测量精确度的尺度。例如,对于同一绝对误差 $\Delta = 0.5\text{mm}$,当 $A = 100\text{mm}$ 时,误差不算大,但当 $A = 1\text{mm}$ 时,其误差就相当可观。为此引出了相对误差的概念。

相对误差定义为绝对误差与约定值之比,用 δ 表示。约定值可以是被测量真值、装置示值或装置的满刻度值。其中,绝对误差与被测量真值之比称为实际相对误差;绝对误差与装置示值之比称为标称相对误差;绝对误差与装置满刻度值之比称为引用相对误差。

例如,用一满刻度为 100mA 的电流表进行测量,电流表指针读数为 41mA ,而真值为 40mA ,则误差计算如下:

$$\text{绝对误差: } \Delta = 41 - 40 = 1\text{mA}$$

$$\text{实际相对误差: } \delta_1 = \frac{1}{40} \times 100\% = 2.5\%$$

$$\text{标称相对误差: } \delta_2 = \frac{1}{41} \times 100\% = 2.4\%$$

$$\text{引用相对误差: } \delta_3 = \frac{1}{100} \times 100\% = 1\%$$

5. 静态误差与动态误差

与被测量变化速度无关的测量误差称为静态误差。当被测量随时间迅速变化时,由于元件具有一定惯性,故其输出量在时间上不能与被测量变化精确吻合,由此而造成的测量误差称为动态误差。

6. 粗大误差

粗大误差又称为疏失误差,是由于读数错误、记录错误、操作不正确、测量过程中的失误及计算错误而造成的。就数值大小而言,粗大误差一般远远超过同一条件下的系统误差或随机误差。

三、准确度、精密度及精度

衡量测量结果好坏常用精度,精度包含有精密度和准确度两重含义。

准确度是测量值与真值的接近程度,系统误差是准确度的标志,系统误差小,说明准确度高,通常以绝对误差 Δ 表示。

精密度是指在测量中所测数值重复一致的程度,即所谓重复性。随机误差大小是精密度的标志,随机误差小,意味着精密度高,通常用标准误差(均方根误差)表征。

不难理解，准确度高不一定精密，同样精密度高也未必准确。因此必须用精确度来评价测量装置或测量结果，精确度高意味着随机误差和系统误差均很小。

在工程中，通常以仪表的精度等级来表征其性能的优劣。用 D 所表示的仪表精度等级是一系列标准百分数比值 (0.001, 0.005, 0.02, ..., 2.5, 4.0, 6.0 等)，它是在规定条件下，仪表最大绝对允许误差值相对于仪表量程的百分数，以公式表示为：

$$D = \frac{\Delta_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \tag{1-2}$$

式中， D 为仪表精度等级； $\Delta_{\max}$ 为仪表在全量程范围内的最大绝对允许误差； $x_{\max}$ 为仪表量程上限值； $x_{\min}$ 为仪表量程下限值。

例如，一台测温仪表，量程为 1000~1500℃，全量程最大绝对允许误差为 0.5℃，则该测温仪表的精度等级为 0.1 级。

四、灵敏度与线性度

1. 灵敏度

灵敏度是指传感器或测量系统在稳定状态下输出变化值对输入变化值的比值，以公式表示即为：

$$K = \frac{dy}{dx} \tag{1-3}$$

式中， K 为灵敏度； dy 为输出量变化值； dx 为输入量变化值。

对于线性元件或线性系统， K 为常数，而对于非线性元件或非线性系统， K 则是变数，因此，在表示灵敏度时，应同时标出输入量的大小，即 $K_i = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_i}$

2. 线性度

线性度又称非线性误差，它说明了输出量与输入量的实际关系曲线偏离直线的程度，如图 1-1 所示。如果用 S 表示线性度， $y_{\max}$ 表示最大输出值， $|y'_i - y_i|_{\max}$ 表示特性曲线与拟合直线的最大偏差，则有：

$$S = \frac{|y'_i - y_i|_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \tag{1-4}$$

S 值愈大说明线性度愈差，通常希望仪器有较高的线性度，这样不仅装置简单，而且调试方便。

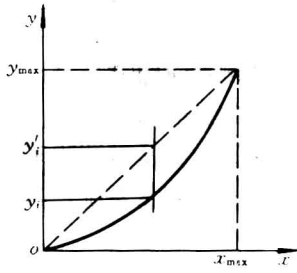


图 1-1 线性度示意图

五、动态响应特性

动态响应特性是指测量系统对动态信号的幅值、时间的响应能力。

测量系统输出值与动态信号之间的关系可用微分方程或传递函数来描述，依据微分方程的阶数可以有一阶测量系统、二阶测量系统，依此类推。

实际工作中，为研究方便，常用典型输入信号和给定初始条件下的特解来描述测量系统的动态特性。

如图 1-2 (a) 所示，给测量系统一个突然升高的输入信号（阶跃信号），则系统的输出一般都有一个过渡的变化过程。图 1-2 (b) 中的两条曲线分别代表两种仪器的输出值，曲线 1 的输出最初有一个较大的波动，然后逐渐减弱，直至达到稳定值。而曲线 2 的输出为一个逐渐上升达到稳定值的过渡过程。说明两种仪器对动态信号的响应特性不同。

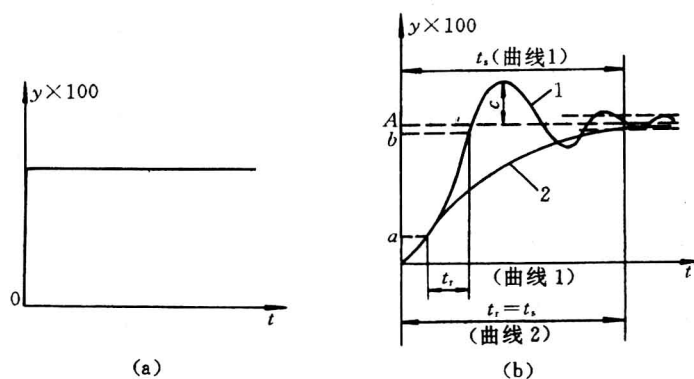


图 1-2 测量系统对阶跃信号的响应

动态响应特性一般用图 1-2 (b) 中的上升时间 t_r ，响应时间 t_s 以及过冲量 c 来直观表示。

上升时间 t_r 是指系统示值从最终稳定值 A 的 $a\%$ 变化到 $b\%$ 所需要的时间， a 值通常定为 5 或 10，而 b 值通常定为 90 或 95。如果示值从稳定值 A 的 5% 上升到 95% 的时间为 0.15s，则上升时间 $t_r = 0.15s$ 。

响应时间 t_s 是指输出量从开始变到所规定的最终稳定值 A 范围内所需要的时间，这一规定范围通常取测量系统的允许误差值。写响应时间时，要求同时标出允许误差值。如 $t_s = 0.05s$ ($\pm 2\%$)。

过冲量 c 是指输出最大振幅与最终稳定值 A 之间的差值。

第二节 电测系统组成和基本测量电路

一、电测系统组成

1. 单参数测量系统

电测系统包括从被测物理量转换到用数字或函数图形显示测量结果的各个环节，其中最简单的是单参数测量系统，其组成如图 1-3 所示。



图 1-3 单参数电测系统方框图

图中所示各环节的作用如下：

传感器：将被测物理量（非电量）转换成电学量。

信号调节器：将传感器输出的电信号变换为测试装置所需要的电量（电流、电压或频率等）。

模拟记录仪：以指针或图形等方式显示或记录被测物理量的数值。

模-数转换器：将模拟量转换为数字量，以便送计算机进行数据采集与处理。

计算机：完成对信号的采集、数据的处理以及对外部设备的管理。

数字显示器：将测量结果直接以数字形式显示（液晶显示、发光二极管显示或荧光屏显示）。

微型打印机：对测试结果进行数据打印或图形打印。

2. 多参数测量系统

一些测量系统能够同时检测和处理两个或两个以上的传感器信号，称为多参数测量系统。被测信号可以是相同性质的，也可以是不同性质的，如温度、压力、位移、成分等非电信号。不管传感器形式如何及量程如何，经过信号调节器，均可实现模拟信号输出的标准化。多参数电测系统组成如图 1-4 所示。

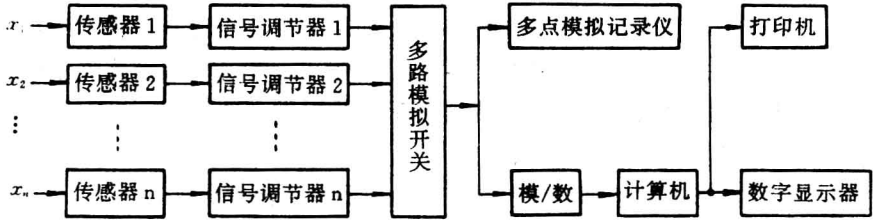


图 1-4 多参数电测系统方框图

3. 遥测系统

有些情况下，测量结果需要远距离显示或记录，具有这种功能的测量系统一般称作遥测系统。但实际上遥测系统多指那些用调制高频载波传送测量数据的多路数据测量系统，通常的遥测系统组成如图 1-5 所示。

二、传感器输出信号的分类及其测量

传感器输出的电信号一般可分为直流、交流和脉冲信号三大类。直流信号和交流信号为模拟量，测量繁杂，而脉冲信号可以看作数字量，测量方法较为简单。

1. 直流信号及其测量

传感器输出的直流信号可分为电流源信号和电压源信号两种。图 1-6 (a) 示出了电流源等效电路，电流源内阻为 r ，电流为 i ，负载电阻为 R （测量输入阻

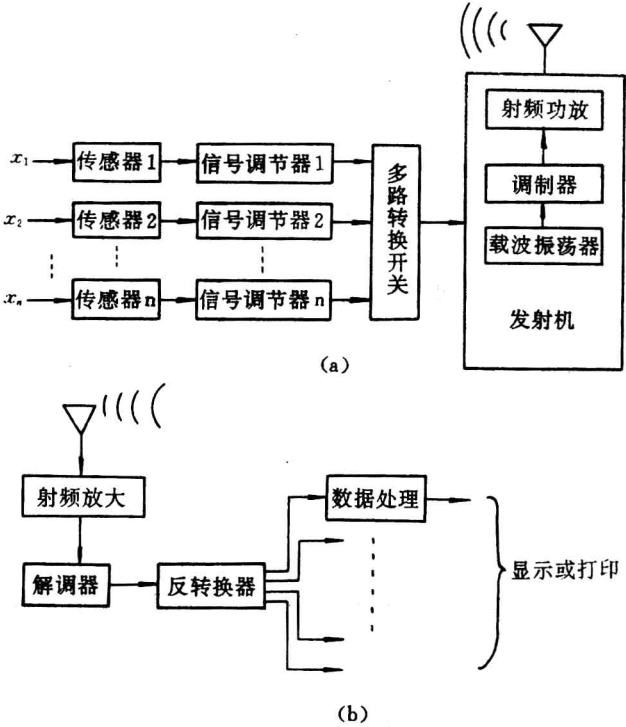


图 1-5 遥测系统方框图

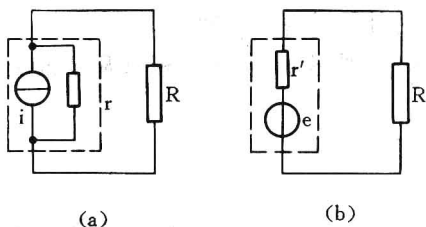


图 1-6 直流信号等效电路

由上述分析可知，要保证测量误差在要求的范围内，必须注意传感器内阻及测量仪器输入阻抗的影响。对于长距离测量，一般采用直流电流信号传输，利用负反馈使电流源的内阻达到很高数值，提高 r/R 值，从而降低测量误差。如果采用电压信号传输方法，传输线阻抗必然加到信号源内阻上去，形成等效内阻 r' ，而 r' 通常有几千欧姆，欲将读数差控制在千分之几以下，则负载阻抗应在兆欧范围，而这在实际上是难以做到的。

2. 交流信号及其测量

交流电压信号的波形通常近似为正弦波，准确地测量交流信号比较困难，一般以其峰值、平均值、有效值（均方值）等参数来描述。

(1) 峰值：在观察的时间或一个周期内，信号由零值到偏移的最大值称为峰值或振幅，通常以 A 表示。

(2) 平均值：非电测量中的平均值定义为波形的平均系数。如果是正弦波，由于波形对称，则半个周期内的平均系数为：

$$\frac{\pi}{\omega} \int_0^{\pi/\omega} A \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} A \quad (1-5)$$

即平均系数为峰值的 $2/\pi$ 倍，式中 ω 为角频率， A 为振幅（峰值）。

在测量时，通常是利用一个线性整流电路，先将负极性信号倒相，然后再求出整个周期内的平均值。

(3) 有效值（均方根值）：交流电流或电压在一个周期内，如果通过某一线电阻负载所造成的功率损失或产生的平均热量，与某一直流电流或电压所产生的效果相同，则该直流量即为交流量的有效值（均方根值），一个正弦波的有效值为

$$\sqrt{\frac{2\pi}{\omega} \int_0^{2\pi/\omega} A^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} A \quad (1-6)$$

即有效值为峰值的 $1/\sqrt{2}$ 倍。

在交流信号的测量中，一般都假定被测信号为良好的正弦波，应用整流器将被测信号变成直流信号，然后加到直流指示器上。如果被测信号较弱，必须首先进行交流放大，然后再进行整流，以免波形失真。

3. 脉冲信号及其测量

脉冲信号可以看作数字量，一般用数字频率计或自制计数电路即可完成测量，不仅测量系统简单，而且测试精度高，测试结果直观。

三、电桥电路

电桥电路（简称电桥）是将电阻、电容或电感等参数的变化转换成电流或电压输出的一种桥型测量电路，与记录或显示仪表相配合，可以完成多种参数的测量。电桥电路具有灵敏度高、测量范围宽和容易实现温度补偿等特点，因而得到了广泛应用。根据电源的性质，电桥可分为直流电桥和交流电桥两大类。

1. 直流电桥

(1) 工作原理

直流电桥基本形式如图 1-7 所示，四只桥臂由电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 组成，电桥电源电压为 U ，与桥路配接仪表的内阻为 R_L ，流过电流为 I_L 。

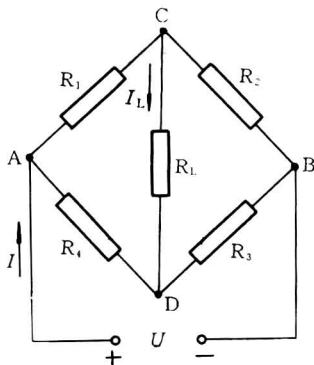


图 1-7 直流电桥

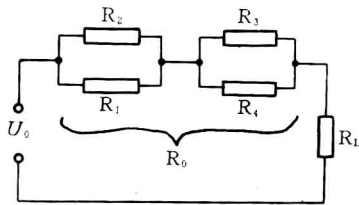


图 1-8 电桥等效电路

电桥等效电路如图 1-8 所示，根据等效电源原理有：

空载电压：

$$U_0 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U \quad (1-7)$$

等效电阻：

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \quad (1-8)$$

流过 R_L 的电流：

$$I_L = \frac{U_0}{R_L + R_0} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_L (R_1 + R_2) (R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} \quad (1-9)$$

R_L 两端电压： $U_L = I_L R_L$

当桥路所接仪表的内阻足够大时，可认为 $R_L \rightarrow \infty$ ，因此有：

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

由上式可以看出，欲使电桥平衡，即 $U_L = 0$ ，应满足 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ ，或 $R_1/R_2 = R_4/R_3$ 。为简化桥路设计，通常选 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 。

电桥四臂中任一只电阻的阻值发生变化，都会破坏桥路平衡，即有不平衡电压输出。因此，只要测出电桥输出电压 U_L 的变化量，就可以测知桥臂电阻的变化，这就是直流电桥的工作原理。根据需要，桥路四臂可以是单臂工作，也可以是双臂、三臂或四臂工作。

(2) 和差特性

在 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 的条件下，如果被测物理量的变化，使得桥臂电阻的阻值 R_i 发生

一个微小变化 ΔR_i ，且 $\Delta R_i \ll R$ ，则经过适当整理和变换后，式 (1-10) 可以写成：

$$U_L = \frac{U}{4R} (\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4) \quad (1-11)$$

式 (1-11) 称为直流电桥的和差特性公式，了解电桥的和差特性，对于正确设计检测电路具有重要意义。以下分别讨论不同桥臂工作时的桥路输出情况。

(i) 单臂工作

只有一臂的电阻值发生微小变化，其余三臂均为固定电阻，此时 R_L 两端的电压为：

$$U_L = \frac{U}{4R} \Delta R \quad (1-12)$$

(ii) 邻臂工作

R_i 和 R_{i+1} 为工作臂，且阻值变化分别为 ΔR_i 和 ΔR_{i+1} ，其余两臂为固定电阻 R ，此时 R_L 两端的电压为：

$$U_L = \frac{U}{4R} (\Delta R_i - \Delta R_{i+1}) \quad (1-13)$$

显然，若 $\Delta R_i = \Delta R_{i+1} = \Delta R$ ，则 $U_L = 0$ ，若 $\Delta R_i = -\Delta R_{i+1} = \Delta R$ ，则 $U_L = (U/2R) \Delta R$ 。

(iii) 对臂工作

R_i 和 R_{i+2} 为工作臂，且阻值变化分别为 ΔR_i 和 ΔR_{i+2} ，其余两臂为固定电阻，则 R_L 两端电压为：

$$U_L = \pm \frac{U}{4R} (\Delta R_i + \Delta R_{i+2}) \quad (1-14)$$

与邻臂工作相仿，若 $\Delta R_i = \Delta R_{i+2} = \Delta R$ ，则 $U_L = (U/2R) \Delta R$ ，若 $\Delta R_i = -\Delta R_{i+2} = \Delta R$ ，则 $U_L = 0$ 。

(iv) 四臂工作

R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 均为工作臂，假如电阻变化能够满足如下关系，即

$$\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R_2, \quad \Delta R_2 = \Delta R_4 = -\Delta R,$$

则 R_L 两端的电压为：

$$U_L = \frac{U}{R} \Delta R \quad (1-15)$$

可见，增加桥路电阻的工作臂数，可使输出信号增大，从而提高测量系统的灵敏度。

2. 交流电桥

以正弦交流电压作为供桥电源的电桥被称为交流电桥。采用交流电源供电后，可以克服直流电桥的零点漂移，此外，交流电桥除能测量电阻变化之外，还能测量电感、电容的变化。

(1) 交流电阻电桥

由于分布电容和电感的影响，增加了交流电桥设计与分析的复杂性，而分布电容影响比分布电感的影响大得多，因此，在交流电桥的分析中，一般只考虑分布电容对电桥平衡和输出的影响。有分布电容存在的电阻电桥如图 1-9 所示。

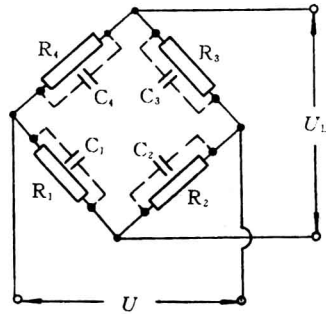


图 1-9 交流电阻电桥