

980844

测试技术理论与实践

谢锡纯 等 编著

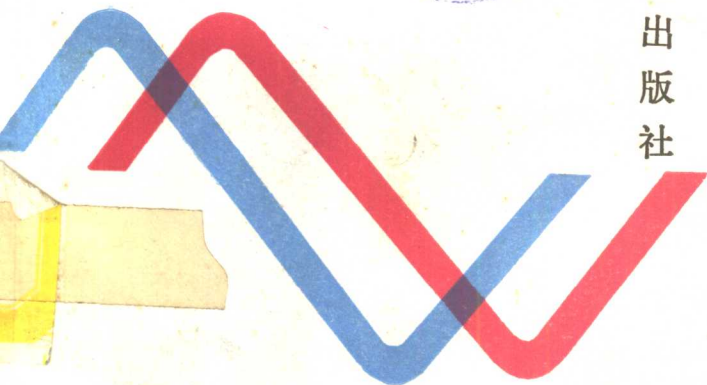
煤炭工业出版社

CE SHI

JI SHU

LI LUN YU

SHI JIAN



测试技术理论与实践

谢锡纯 等编著

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

图书在版编目(CIP)数据

测试技术理论与实践/谢锡纯等编著. —北京:煤炭工业出版社, 1994

ISBN 7-5020-1029-7

I.测… II.谢… III.工程测量-测试技术-基础理论-方法 IV.TB22

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第08628号

测试技术理论与实践

谢锡纯等编著
责任编辑:施文华

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本787×1092mm^{1/32} 印张8²/₁₆ 插页2

字数186千字 印数1—1,000

1994年12月第1版 1994年12月第1次印刷

书号3797 G0304 定价9.80元

前 言

测试技术是一门理论性和实践性都很强的综合性技术基础学科，是检验、完善、创立和发展理论、技术及产品的重要手段。

通过十几年的教学和科研工作，编者感到从事测试工作，不仅需要正确和完善的理论作指导，而且要有先进和经济的方法去实现，两者不可偏废，同时还互相关联。因此，本书力求做到理论和实践并重、内容简明扼要，具有一定的完整性和系统性。即详细介绍了各种常用工程参量的测试方法，并附有测试实例，这些大部分是编者作过的科研工作。

编者还注意到，虽然静态测试是基础，但在实际现场测试中，动态参量往往占多数。为要较好地地完成一项测试工作，保证测试的正确性及有较高的精度，不仅要精心地实施现场测量，还要仔细地进行标定。除此，选择恰当的传感器和适宜的测试系统也是很重要的。为此，根据我们在测试工作实践中的体会，对这些方面作了相应的阐述。

本书介绍测试方法的参量包括：力、扭矩、位移、速度、功率、效率、振动量、噪声、温度、流体压力、流量和物位等。还对常用的电阻应变测试技术、信号及系统和近些年来已开始普遍应用的微机测试作了专门的叙述。

各部分的内容是按照基本原理、传感器及其测试系统，标定、实例的顺序编排的。

本书要求读者已经初步掌握高等数学，物理学，力学，

EAC43/75

电子学等基础知识。为了节省篇幅，本书未列入国内外传感器和仪器的规格，读者如果需要，可查阅其它文献。对仪器的介绍，本书略去了具体的电路及结构阐述，着重介绍其基本原理、性能及应用。

本书第一、二、三章由王启广编写，第四、五、六章由谢锡纯编写，第七章由柴光远编写。全书由谢锡纯拟订纲要及审校定稿。

本书可供高等院校工程类各专业研究生、大学生以及从事测试工作的工程技术人员参考。

编写本书过程中，参阅了许多资料，对提供帮助的同志在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限及从事测试工作实践的局限性，书中难免有不当和错误之处，恳请读者批评指正。

内 容 提 要

本书扼要系统地阐述了测试的基本原理和方法，详细介绍了各种常用工程参量的测试方法，并给出了一些测试实例。

本书介绍的被测试量有：力、扭矩、位移、速度、功率、效率、振动能、噪声、温度、流体压力、流量、物位等；对电阻应变测试技术，信号及测试系统，微机测试作了专门的叙述，对动态测试及标定等问题也给予了适当的阐述。

本书可供高等院校工程类各专业的研究生、大学生以及从事测试工作的工程技术人员参考。

目 录

前 言

第一章 测试基础理论	1
第一节 电阻应变片.....	1
第二节 电阻应变测量电路.....	4
第三节 测试系统的标定	13
第四节 高速摄影及暗室技术	16
第五节 信号记录	23
第二章 信号及测量系统	31
第一节 信号	31
第二节 测量系统的基本特性	45
第三章 机械量测量	60
第一节 力值测量	60
第二节 扭矩测量	69
第三节 零件应力的测量	77
第四节 位移测量	79
第五节 转速测量	86
第六节 速度测量	90
第七节 功率及效率测量	94
第四章 振动测量和结构动态特性测定	98
第一节 测振传感器	98
第二节 激振装置及激振器的安装	110
第三节 振动测试系统及标定	113
第四节 振动基本参数的测量	119

第五节	结构动态特性参数的测定	123
第六节	机械阻抗及参数识别	128
第七节	振动测量实例	146
第五章	噪声测试及分析	152
第一节	噪声及其度量	152
第二节	噪声测量仪器及系统	159
第三节	噪声的测量及分析	164
第四节	噪声测量实例	168
第六章	流体参量测量	174
第一节	温度测量	174
第二节	压力测量	183
第三节	流量测量	194
第四节	物位测量	204
第五节	流体参量测量的实例	207
第七章	微机测试系统	216
第一节	概述	216
第二节	输入输出接口	219
第三节	输入信号的调理技术	236
第四节	数据采集系统	244
第五节	测试数据处理	249
第六节	微机测试及控制实例	257
参考文献		265

第一章 测试基础理论

第一节 电阻应变片

电阻应变片具有体积小，动态响应快，测量精度高，使用简便等优点，因而在航空、船舶、机械、建筑等行业获得了广泛应用。

一、工作原理

用电阻应变片测量应变时，其作用是将应变转换成电阻的变化。当被测试件受力发生变形，粘贴在试件表面的应变片也随着变形，从而引起应变片的阻值变化，此电阻的变化值和应变成正比，即：

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (1-1)$$

式中 ΔR ——应变片电阻随变形产生的变化值；

R ——应变片的初始电阻值；

K ——应变片的灵敏系数；

ε ——应变值。

灵敏系数 K 的物理意义是单位应变所引起的电阻变化。

二、应变片的构造和分类

应变片因用途及使用材料不同而形式各异，但基本结构是一样的，一般由基底1、敏感栅2及引出线3组成（图1-1）。敏感栅用来感受应变，按其材料种类可分为金属应变片和半导体应变片。金属应变片又分为金属丝式和箔式两

种。基底用来保护敏感栅、传递应变并使敏感栅和试件之间具有极好的绝缘性能。基底按其材料不同可分为纸基、胶基和金属基。引出线用来将敏感栅感受的应变接到测量电路中去，由 $0.15\sim 0.18\text{mm}$ 的镀银铜丝制成，高温应变片的引出线常用镍铬铝丝制成。

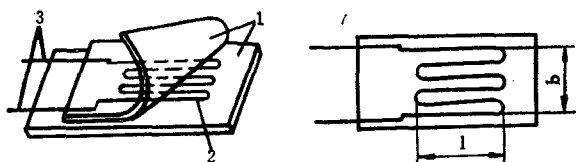


图 1-1 应变片构造

1—基底；2—敏感栅；3—引出线

三、应变片工作特性

1. 应变片灵敏系数

应变片灵敏系数规定为在沿应变片轴线方向的单向应力作用下，应变片的电阻变化率与试件表面轴向应变的比值，以 K 表示。测定 K 值时，规定所用试件材料的泊松比 $\mu = 0.285$ 。

K 值误差的大小是衡量应变片质量的重要标志。理论分析和实验表明，影响应变片 K 值大小和精度的主要因素是敏感栅材料的性能和几何形状，粘结剂和基底材料的性能与厚度；应变片的制造、粘贴工艺以及被测试件的材料和测点的应力状态等。

2. 应变片的横向效应

应变片的敏感栅除纵向部分外，还有圆弧形或直线形的横向部分。横向部分既对应变片轴线方向的应变敏感，又对

垂直于轴线方向的横向应变敏感，从而降低了应变片的灵敏系数，这就是应变片的横向效应，其影响程度以横向效应系数表示。

在单向应力状态下，若应变片的纵向应变为 ε_x ，纵向灵敏系数为 K_x ，横向应变为 $\varepsilon_y = -\mu\varepsilon_x$ ，横向灵敏系数为 K_y 时，则应变片的电阻变化率为：

$$\frac{\Delta R}{R} = K_x \varepsilon_x + K_y \varepsilon_y = K_x \varepsilon_x \left(1 + \frac{K_y}{K_x} \cdot \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right) \quad (1-2)$$

横向灵敏系数与纵向灵敏系数的比值称横向效应系数，以 H 表示，从而：

$$\Delta R/R = K_x \varepsilon_x (1 - \mu H) \quad (1-3)$$

由标定梁确定的电阻变化率与纵向应变的关系为：

$$\Delta R/R = K \varepsilon_x \quad (1-4)$$

由式(1-3)和(1-4)得：

$$K = K_x (1 - \mu H) \quad (1-5)$$

实测条件与 K 值测定条件不一致时，则会出现误差。设此时测点的真实应变为 ε_x 和 ε_y ，应变仪指示的应变为 ε_R ，则：

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} / K = \frac{K_x (\varepsilon_x + H \varepsilon_y)}{K_x (1 - \mu H)} = \frac{\varepsilon_x + H \varepsilon_y}{1 - \mu H} \quad (1-6)$$

指示应变与真实应变的相对误差为：

$$\delta_H = \frac{\varepsilon_R - \varepsilon_x}{\varepsilon_x} \times 100\% = \frac{H}{1 - \mu H} \left(\mu + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right) \times 100\% \quad (1-7)$$

上式即为计算横向效应误差的一般公式，其中横向效应系数 H 由实验确定。

3. 应变片的温度特性

粘贴在试件上的应变片，在环境温度变化时，其电阻将随着发生变化，产生虚假应变，这种现象称为温度效应。温度变化引起电阻变化的原因是：

- 1) 由于敏感栅材料的电阻温度系数 α_t 的影响，即

$$\Delta R_{t1} = \alpha_t R \Delta t \quad (1-8)$$

- 2) 敏感栅材料和试件材料的线膨胀系数不同，应变片产生附加的伸长（或缩短），即

$$\Delta R_{t2} = KR(\beta_m - \beta_s)\Delta t \quad (1-9)$$

式中 K ——应变片的灵敏系数；

β_m 、 β_s ——分别为试件和应变片敏感栅的线膨胀系数。

由于温度变化引起的应变为：

$$\varepsilon_t = \left[\frac{\alpha_t}{K} + (\beta_m - \beta_s) \right] \Delta t \quad (1-10)$$

为消除此项误差，要采取温度补偿措施。常见的补偿方法有桥路补偿和应变片自补偿两类。

应变片的工作特性还有许用电流、滞后、蠕变、应变极限、疲劳寿命、绝缘电阻及频率响应特性等。

第二节 电阻应变测量电路

在被测试件的弹性变形范围内，应变片的电阻变化率非常小。假如被测试件的材料为45号钢，调质处理，屈服极限为360MPa，弹性模量为 2×10^5 MPa，在外载荷作用下产生应力 $\sigma = 200$ MPa。我们采用金属应变片，灵敏系数 $K = 2$ ，初始电阻为120 Ω ，那么应变片的电阻变化率 $\Delta R/R = 2 \times 10^{-3}$ ，电阻变化量 $\Delta R = 0.24 \Omega$ 。对于这么小的电阻变化量，用一般的仪表是很难实现精确测量和动态测量的，必须通过

专门的测量电路来解决。测量电路的作用就是把应变片的电阻变化转换成电压或电流的变化，以便信号放大和记录。最常用的测量电路是电桥电路。

电桥电路根据供桥电压不同，有直流电桥和交流电桥两种，但基本原理一致，我们用直流电桥来分析电桥的工作原理和特性。

一、直流电桥

图1-2为直流电桥的原理图， R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为桥臂电阻， u 为供桥电压。AC端接电源称供桥端，BD端称输出端。在实际测量中，经常是采用同一规格的应变片，即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，组成全等臂电桥。

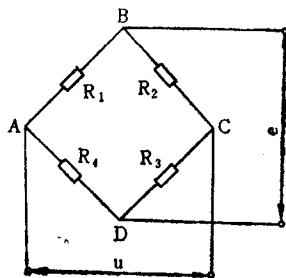


图 1-2 直流电桥

1. 电桥的输出电压

电桥的输出端一般接应变仪的放大器，放大器输入阻抗很高，所以输出端相当于开路，输出电压 e 等于D点与B点间的电位差。

$$\begin{aligned} e &= u_{AB} - u_{AD} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u - \frac{R_4}{R_3 + R_4} u \\ &= \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} u \end{aligned} \quad (1-11)$$

组成桥臂的电阻没有变化时，要求电桥平衡，输出电压为零。由式(1-11)得到电桥平衡的条件为：

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (1-12)$$

在外载荷作用下应变片发生变形，各自有微小增量，此时电桥的输出电压为：

$$e = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} u - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} u$$

首先将其进行通分，由于 $\Delta R \ll R$ ，为了简化计算，忽略分母中的 ΔR 项，分子中的 ΔR_2 项，并考虑到初始电桥平衡，则

$$e = \frac{R_1 \Delta R_3 + R_3 \Delta R_1 - R_2 \Delta R_4 - R_4 \Delta R_2}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} u$$

对于全等臂电桥

$$e = \frac{u}{4R} (\Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_2 - \Delta R_4) \quad (1-13)$$

$$\text{或} \quad e = \frac{Ku}{4} (\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - \varepsilon_2 - \varepsilon_4) \quad (1-14)$$

这就是用应变片组成电桥电路测量试件应力时产生输出电压的关系式。根据该式可以得出不同桥臂电阻发生变化时的输出电压如下：

组 桥 方 式	单 臂	邻臂异号	邻臂同号	对臂同号	对臂异号	四邻臂号
输出电压	$\frac{\Delta R}{4R} u$	$\frac{\Delta R}{2R} u$	0	$\frac{\Delta R}{2R} u$	0	$\frac{\Delta R}{R} u$
与单臂输出比较	1	2	0	2	0	4

从表中可知，相邻臂有异号、相对臂有同号电阻变化时，输出电压相加；相邻臂有同号、相对臂有异号电阻变化时，输出电压相减。这就是电桥的和差特性。

2. 电桥的灵敏度

电桥的灵敏度 S 定义为：

$$S = \frac{e}{\Delta R/R} = \frac{e}{K\varepsilon} \quad (1-15)$$

从式(1-15)可以发现:

1) 电桥灵敏度正比于供桥电压 供桥电压愈高,电桥灵敏度愈高,但供桥电压的提高受两方面的限制,一是应变片的允许温升,二是应变电桥电阻的温度误差。

2) 应变片在桥臂上的位置 等臂电桥中相邻臂有异号、相对臂有同号电阻变化时,灵敏度提高2~4倍。当并联或串联排列组成电桥时,灵敏度较等臂电桥时下降。

3. 输出电压的非线性

分析各种情况输出电压的非线性误差,应利用电桥输出电压的基本公式

$$e = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} u \quad (1-16)$$

1) 电桥单臂工作时 等臂电桥在初始平衡的条件下,其中一个桥臂发生 ΔR 的电阻变化时,其输出电压为:

$$e = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} u \quad (1-17)$$

分母中含有 ΔR 项,所以输出电压与 ΔR 是非线性的。只有当 ΔR 很小时 e 与 u 的关系才趋于线性。在精确测量时,就要估算单臂工作时的非线性误差。将式(1-17)展开成泰勒级数

$$\begin{aligned} e &= \frac{\Delta R}{4R} u \left[1 - \left(\frac{\Delta R}{2R} \right) + \left(\frac{\Delta R}{2R} \right)^2 - \dots \right] \\ &= \frac{K\varepsilon}{4} u \left[1 - \frac{1}{2} K\varepsilon + \frac{1}{4} (K\varepsilon)^2 - \dots \right] \quad (1-18) \end{aligned}$$

上式即为电桥单臂工作时输出电压的精确表达式,第一

项为线性部分，其它各项为非线性部分。非线性部分产生的相对误差为：

$$\delta = -\frac{1}{2}K\varepsilon + \frac{1}{4}(K\varepsilon)^2 - \dots$$

由此可见， ε 越大非线性误差越大。通常取第一项估算非线性误差，即：

$$\delta = \left| \frac{1}{2}K\varepsilon \right| \quad (1-19)$$

2) 电桥邻臂工作时 等臂电桥在初始平衡的条件下，桥臂电阻 R_1 有 ΔR 、 R_2 有 $-\Delta R$ 变化时，输出电压为：

$$e = \frac{\Delta R}{2R} u \quad (1-20)$$

从上式可以看出，当电桥相邻臂有异号电阻变化时，如变化值相等，则输出电压与 ΔR 完全是线性关系。如当相邻臂有异号电阻变化，其变化值不相等时，非线性误差不能完全消除，但可使非线性误差减小。

同理可以证明，电桥相对臂工作，且有同号电阻变化时，绝对误差是单臂工作的两倍，相对误差与单臂相同。电桥四臂工作，且四邻臂异号电阻变化时，电桥线性好，灵敏度最高。

在实际测量中，经常是采用相邻臂异号电阻变化的阻桥方式来克服非线性，并获得较高的输出电压。

二、交流电桥

通常电桥的输出电压很小，不能直接推动记录仪器，因此必须把输出电压放大。若采用高稳定性直流放大器既复杂又昂贵，目前多采用交流放大器，因而电桥也多用交流电桥。

交流电桥的一般形式如图1-3a所示，四臂均由阻抗组成，输出电压公式的推导和直流电桥相同，得到平衡条件：

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad (1-21)$$

用复数的指数形式表示为：

$$Z_1 Z_3 e^{j(\phi_1 + \phi_3)} = Z_2 Z_4 e^{j(\phi_2 + \phi_4)}$$

从而得到交流电桥的平衡条件：

$$\left. \begin{aligned} Z_1 Z_3 &= Z_2 Z_4 \\ \phi_1 + \phi_3 &= \phi_2 + \phi_4 \end{aligned} \right\} \quad (1-22)$$

即相对臂阻抗模的乘积相等及阻抗角的和相等，交流电桥才能平衡。

实测中经常遇到的是由应变片构成的电桥（图1-3b）， R_1 、 R_2 为应变片， R_3 、 R_4 是应变仪中的标准电阻，同样可得到平衡条件：

$$\left. \begin{aligned} R_1 R_3 &= R_2 R_4 \\ C_1 R_4 &= C_2 R_3 \end{aligned} \right\} \quad (1-23)$$

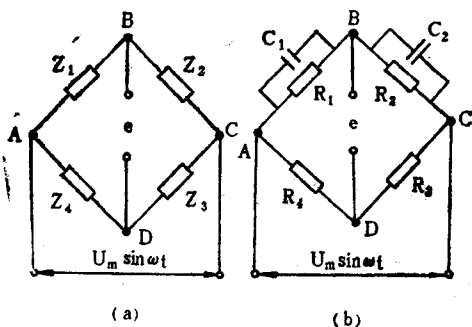


图 1-3 交流电桥

因此应变仪的电桥上，通常设有电阻平衡和电容平衡装置（或电容平衡补偿电路）。