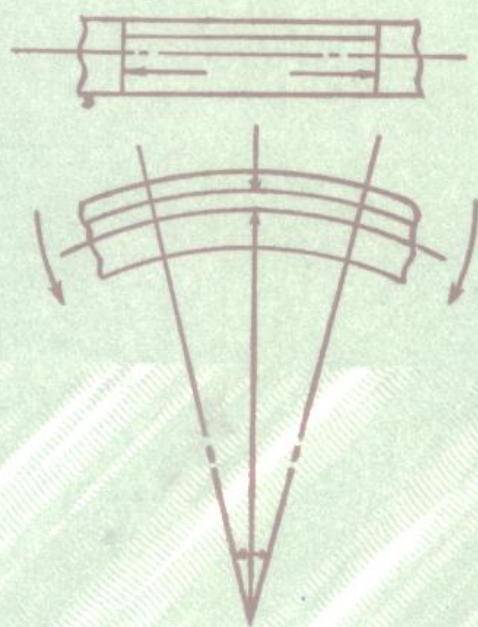


计量检定参考丛书

电阻应变仪

检定技术



张功铭 赵复真 著

中国计量出版社

{计量检定参考丛书}

电阻应变仪检定技术

张功铭 赵复真 著

中国计量出版社

新登(京)字 024 号

内 容 简 介

本书概述了电阻应变仪的基本概念、基本原理及电阻应变仪标准建立的理论和技術,和电阻应变仪计量检定系统的建立和传递方法。配合计量检定规程 JJG 533—88《标准模拟应变量校准器》和 JJG 623—89《电阻应变仪》的内容,对检定方法、误差处理和测量结果的评定,作了系统的阐述。

本书对从事力学计量人员和实验力学、工程试验人员有参考价值。

0.574/02

计量检定参考丛书 电阻应变仪检定技术

张功铭 赵复真 著
责任编辑 孙维民

—*—

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—*—

开本 787×1092/32 印张 11.625 字数 269 千字

1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷

印数 1—6 000

ISBN 7-5026-0441-1/TB·348

定价 6.50 元

前 言

在工程力学和材料测量学领域，电阻应变仪由于它有方便、准确和实用的特点，获得广泛的应用。在国际上电阻应变仪的生产，日益先进。随着科学技术的发展，电阻式传感器的广泛应用，数字测量系统的开发，对电阻应变仪的计量标准、技术和方法都提出了新的要求，所以无论是以电阻应变计为代表的一次仪表、以静态和动态应变仪为代表的二次仪表以及由它们组成的应变测量系统，都需要进一步革新。过去作为电阻应变计的模拟应变量标准，仅局限于简单的电阻网络，准确度在 $\times 10^{-3}$ 量级。然而由于数字式应变测量系统的引用误差已达 5×10^{-4} 的水平，所以必须建立新的计量标准，才能满足现代应变计量的要求。本书就这方面的新标准、新理论和相应的技术措施作了详细的叙述。

本书从比率计量观点和电测方法的特点出发，提出了“感应分压器-电阻器匹配网络”理论，建立了交流模拟应变量基准器和检定装置；提出了“电阻增量比率网络比率臂”理论建立了交直流通用的模拟应变量标准器，使我国电阻应变仪计量水平提高到 1×10^{-4} 的水平。

由于这些基、标准都达到了国际先进水平，并具有中国特色，所以相应地建立起我国电阻应变仪计量检定系统，并具体地由我国 JJG 533—88 标准模拟应变量校准器检定规程及 JJG 623—89 电阻应变仪检定规程来贯彻。为了进一步贯彻这两个检定规程，本书对有关内容作了详细的论述。

本书共分八章，第一章是有关电阻应变仪计量的基础，

包括定义、方法、特点及应变仪的基本组成部分的概念。第二章介绍一次仪表的计量学特点、标准设备、方法及正确使用方法。第三章介绍二次仪表的计量学特点、典型的结构原理、技术要求、检定设备和方法以及电阻应变仪的正确使用方法，第四章内容是模拟应变计量标准的建立原理、装置组成以及装置的误差分析，第三、四章是本书的重点。第五章介绍了我国电阻应变仪检定规程和量值传递系统，对两个规程作了相应的解释，说明它的基本内容和贯彻方法。第六章对电阻应变仪配套设备的技术要求和检定方法作相应的介绍，帮助计量人员增加一些计量检定知识。第七章介绍比率计量和技术，是本书的主要技术基础；包括感应比率器、变压器比率电桥等在应变计量领域的发展，帮助读者对本书的特点作进一步的理解。第八章是有关测量及测量结果的评定方法，结合电阻应变仪计量的需要，介绍有关名词术语的定义和误差评定方法，特别强调采用国际计量局建议的误差合成方法，以求应变计量和测量结果评定的进一步统一。

本书的各章内容基本上是独立的，但各章内容又是相互连系的，如果按章节通读本书获得全面了解以后，再重点阅读第三章、第四章、第五章和第八章，则对我国电阻应变仪计量工作可以获得一个新的概念，并能通过理论联系实际，加深对本书内容的理解，从而推陈出新，开发出更多的成果，促进我国计量事业的发展，这正是作者所期望的。

作者虽然从事计量科学研究工作多年，但对电阻应变仪这一门边缘科学贡献还是很少。承蒙各级领导和国内外同行的热心支持，本书才有机会出版与广大读者见面，特此致谢。

作者

1990年5月1日

目 录

前言	(1)
第一章 概述	(1)
一、应变计量的单位及定义	(1)
二、电测方法的特点	(3)
三、电阻应变仪的基本概念及组成部分	(4)
(一) 基本概念	(4)
(二) 电阻应变仪的基本组成部分	(6)
第二章 一次仪表	(25)
一、金属丝应变计	(25)
(一) 金属丝应变计的主要技术参量	(26)
(二) 金属丝应变计的电学方程	(27)
(三) 金属丝应变计的数学模型	(29)
二、标定梁	(30)
(一) 对称加载的纯弯梁	(30)
(二) 等强度梁	(34)
(三) 圆柱体曲梁	(37)
三、金属丝应变计的测试条件及程序	(44)
四、一次仪表的正确使用	(48)
(一) 电阻应变计电阻名义值的影响	(48)
(二) 灵敏系数 K 值误差	(48)
(三) 贴片误差	(52)
第三章 二次仪表	(53)
一、二次仪表的基本概念及组成部分	(53)
(一) 接线盒	(53)
(二) 测量桥	(53)
(三) 放大器	(73)
二、数字式应变仪	(78)

(一) 概述	(78)
(二) 数字式应变仪的基本原理及组成部分	(79)
三、电阻应变仪的种类及技术规格	(93)
(一) 电阻应变仪的分类	(93)
(二) 电阻应变仪的技术规格	(96)
四、检定应变仪用的标准器及应变仪的检定方法	(97)
(一) 检定应变仪用的标准器	(97)
(二) 应变仪的检定方法	(133)
五、应变仪的正确使用	(171)
(一) 零位调节	(171)
(二) 输出负载匹配问题	(172)
(三) 引线影响的消除	(173)
(四) 温度影响	(181)
(五) 电源电压变化影响	(181)
(六) 外部电磁场的干扰	(183)
(七) 灵敏系数 K 值的修正	(183)
(八) 几种典型应变仪的正确使用	(184)
第四章 模拟应变量检定装置	(211)
一、交流模拟应变量基准检定装置	(211)
(一) 装置的结构原理及组成部分	(211)
(二) 装置各部件的测试及误差分析	(216)
二、直流模拟应变量基准检定装置	(235)
(一) 装置的结构原理及组成部分	(235)
(二) 装置各部件的测试及误差分析	(238)
三、应变仪标准检定装置	(256)
第五章 标准模拟应变量检定规程及应变仪	
检定系统表	(259)
一、检定的基本原则	(259)
二、标准模拟应变量校准器检定规程简介	
(JJG 533—88)	(259)

三、电阻应变仪检定规程和检定系统表	(261)
(一) 电阻应变仪检定规程 (JJG 623—89)	(261)
(二) 电阻应变仪检定系统表	(262)
第六章 电阻应变仪外圈设备的检定	(264)
一、直流毫安表的检定	(264)
(一) 高精度直流毫安表示值误差的检定	(264)
(二) 毫安表内阻的检定	(265)
二、直流数字电压表的检定	(266)
(一) 直流标准电压发生器法	(266)
(二) 直流比较法 (标准数字表法)	(267)
(三) 直流标准仪器法	(268)
三、磁带记录仪的检定	(272)
四、光线示波器的检定	(273)
(一) 灵敏度的检定	(273)
(二) 振动子的非线性误差的检定	(274)
(三) 振动子幅频特性的检定	(274)
(四) 阻尼系数的检定	(275)
(五) 零漂的检定	(277)
五、间接动作电测量记录仪的检定	(277)
(一) 基本误差的检定	(277)
(二) 动态特性的检定	(279)
(三) 记录质量的检定	(280)
(四) 各种影响量下被测量、守时及其它参数的 变差的测定	(282)
(五) 稳定度及可靠性要求	(288)
第七章 比率计量技术基础	(291)
一、比率技术的概念	(291)
(一) 比率测量的客观存在性	(291)
(二) 比率技术的主要内容	(292)
二、感应比率器件的技术和工艺	(295)

(一) 单个十进盘感应分压器	(295)
(二) 多个十进盘感应分压器	(298)
(三) 感应分压器分布参量对比率准确度的影响	(304)
(四) 感应分压器的铁芯材料	(307)
三、感应分压器的绝对检定	(308)
(一) 单个十进盘感应分压器的绝对检定	(308)
(二) 多个十进盘感应分压器的检定方法	(312)
四、变压器比率臂电桥	(319)
(一) 变压器比率臂电桥原理	(319)
(二) 变压器比率臂电桥的平衡条件	(321)
(三) 自动平衡的变压器比率臂电桥	(324)
(四) 电流比较仪式匝比电桥	(325)
(五) 应变计标定电桥	(326)
五、阻抗增量比率网络比率臂差动电桥	(327)
六、比率技术的新成就	(330)
第八章 测量及测量结果的评定	(333)
一、概念和名词术语	(333)
二、等精度观测	(346)
(一) 期望值的估算	(346)
(二) 期望值的置信范围	(347)
三、不等精度观测	(349)
四、间接测量结果的评定	(350)
五、国际计量局建议的误差合成方法	(351)
(一) A类不确定度	(351)
(二) B类不确定度	(352)
六、测量装置误差和被测对象不稳定性误差	(353)
七、测量装置的误差合成	(354)
八、组合测量中的误差分配	(356)
参考文献	(361)

第一章 概 述

一、应变计量的单位及定义

在材料力学中，研究的对象是物体在外力的作用下的变形和破坏。并且假定研究对象是变形体，即具有弹性、均匀连续和各向同性的。换句话说，研究对象当受外力作用下，产生一定的变形，如在弹性限度内，当外力作用除去后，它会恢复到原来状态。这类物体，以金属为代表。

一个弹性体当受外力作用下，会产生变形，变形体内任意一点都受力的作用。如把某一截面内产生的内力称之为应力，则截面内某一点的应力可定义为：

$$F = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1.1)$$

如图 1-1 所示，A 点的面积为 ΔA ，应力 F 是矢量，它的单位是 kg/mm^2 。

弹性体的变形，可以进一步区分为体积变形和表面变形。体积变形具有三维，表面变形属于二维，显然它们的变

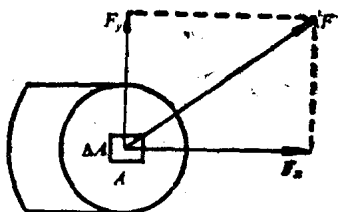


图 1-1

形有不同的定义，按照我国计量单位，也就是 SI 单位制的概念，它们应当有不同的定义，如以 σ_v 代表体积变形，则有：

$$\sigma_v = \frac{\Delta V}{V} \quad (1.2)$$

9210072

式中: ΔV ——体积变化量;

V ——体积。

因此表面变形应当有另一个符号和定义。然而在实际测量和应用中,两维的变量测定不如一维的变量测定来得容易,因此在实验力学的应力测量方面,采用近似于一维变形的电阻应变计(片)来作为敏感器件(一次仪表)去测量弹性体表面的线变形。例如一个杆件,长度为 L , 受力 F 作用时,产生长度变化量 ΔL , 则可用 ΔL 相对于 L 的比值来确定,并以 ϵ 来定义,即:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.3)$$

不言而喻,当弹性杆和应变计的横向变形不需要另外考虑,而且如果电阻应变计的横向效应可以忽略的话,则 ϵ 可以准确测得。

由此可见, ϵ 只是定义弹性体在主轴上的变形,而且是限定在虎克定律的作用范围内才成立。

如果线性应变变量 ϵ 如式 (1.3) 所定义,则进一步可以弄清 ϵ 的性质和单位。由于长度的计量单位为米 (m); 则 ϵ 的量纲方程为:

$$[\epsilon] = \left[\frac{\Delta L}{L} \right] \cdot \left[\frac{m}{m} \right] \quad (1.4)$$

m 和 m 的比值是 ϵ 的单位,所以 ϵ 的测量单位是无量纲的,

目前国内外习惯地使用 $\mu\epsilon$ 为应变计量单位,从量纲方程来研究是不成立的。为区别 ϵ 和 ϵ ,用字母 ε 作为 ϵ 定义量的计量单位,于是下面的关系成立:

$$1\varepsilon = 1 \cdot \frac{m}{m}$$

$$1 \mu\epsilon = 10^{-6} \frac{m}{m}$$

至于应变计量单位的正式名称，还有待国家有关标准中加以明确。

二、电测方法的特点

按应变量 ϵ 的定义，它可以用长度测量方法去实现。然而通常变形体的长度变化 ΔL 数值都很微小，所以用简单的长度测量方法是不容易保证准确度的。由于非电量电测量技术的进步，采用适当的敏感器件把 ΔL 量转变为电学量，然后通过信号处理系统，便可获得精确的测量数据。在敏感器件中最常用的一种便是电阻应变计（片）。采用电阻应变计作为一次仪表与电阻应变仪作为二次仪表，便可组成一个应变量的电学测量系统，这个系统具有如下优点：

1. 灵敏度高：分辨率在 $1 \mu\epsilon$ 内。
2. 准确度合适：若能保证粘贴质量，测量系统的不确定度可保证小于 1%。
3. 应变计体积小：轻便灵活，可以测量微小区域内的应变，而且频率特性好。
4. 应变计功耗小：相对于二次仪表可以忽略。
5. 多功能：可以测量静态和动态应变，如果配合相应的传感器可测其它物理量的变化过程。
6. 测量范围宽： $0 \sim 10^5 \mu\epsilon$ 。
7. 经济。
8. 寿命长。

当然，采用电阻应变计的电测量方法也有一些缺点：例如，不能测出应变的梯度和体应变等；有些场合易受外界环境影响。例如，湿度的变化可引起应变计的粘贴质量和绝缘

电阻的变化。环境参量也可影响二次仪表的不稳定度，以致影响到电测系统的测量可靠性。

三、电阻应变仪的基本概念及组成部分

(一) 基本概念

应变电测方法中最典型和常用的仪器就是电阻应变仪。但对电阻应变仪应当广义地去了解，它不仅包括一次仪表的敏感器件，而且还包括二次仪表的电测系统。

交流供桥电阻应变仪的方框图如图 1-2 所示。

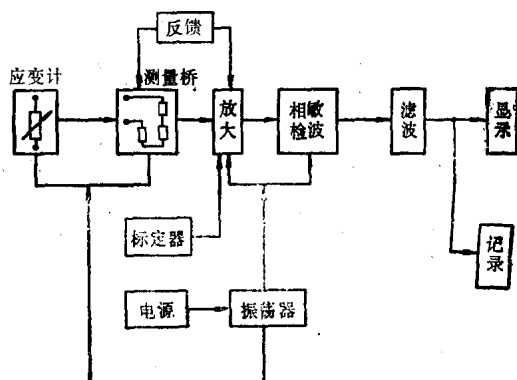


图 1-2

直流供桥电阻应变仪的方框图如图 1-3 所示。

从以上方框图可见，电阻应变仪的基本组成部分有测量桥、放大器、检波器、显示器、标定器和电源。对于数字自动化的电阻应变仪还具有 A/D 变换器、逻辑电路、运算器、控制器等部分。从保证线性范围来考虑，还应附有衰减器。对交流供桥应变仪来说，还应有滤波器。一个交流供桥

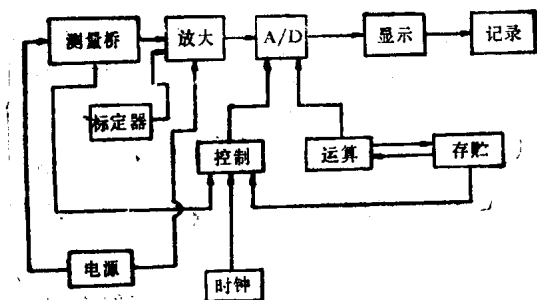


图 1-3

电阻应变仪的工作过程如图 1-4 所示。

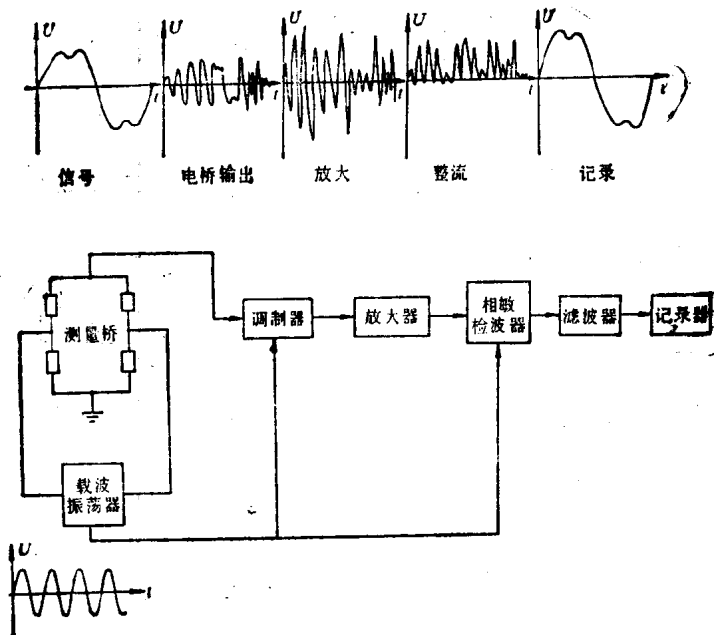


图 1-4

(二) 电阻应变仪的基本组成部分

1. 测量桥

最常用的测量桥是四臂惠斯登电桥，但视测量要求及应变计本身的补偿方式有各种连接方法，如图 1-5 所示。

(1) 1/4 桥 它的输出-输入曲线是非线性的。

$$\frac{U_{\text{出}}}{U_{\lambda}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R} \quad (1.5)$$

(2) 半桥 它的输出-输入曲线近似线性的。

$$\frac{U_{\text{出}}}{U_{\lambda}} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \quad (1.6)$$

(3) 全桥 它的输出-输入曲线近似线性的。

$$\frac{U_{\text{出}}}{U_{\lambda}} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (1.7)$$

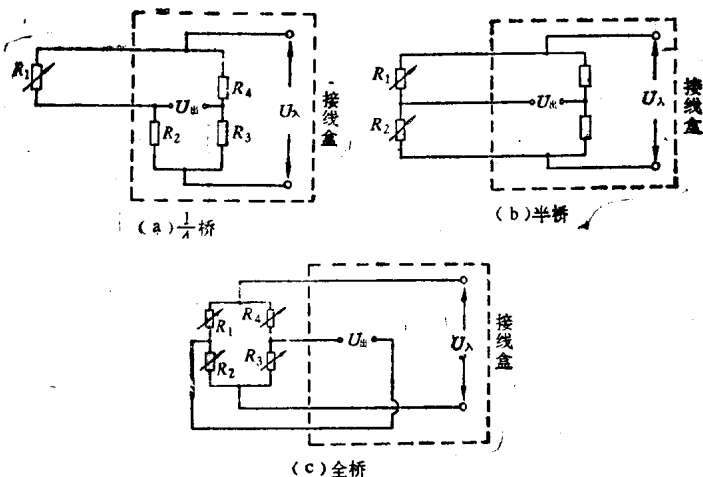


图 1-5

各种连接方法都有它的用途。有的场合要求用 1/4 桥，例如标定电阻应变计的灵敏系数 K 值时。半桥适用于电阻应变计自身补偿的场合或应变仪标定的场合。全桥适用于电阻应变计自身补偿的场合以及在传感器中使用。

2. 调制器

利用非线性检波元件，将一个已知频率和幅值恒定的载波与输入应变信号相乘，相乘的结果得到了包括输入信号的信息，但它的振幅和频率与原来信号不同，这种作用称为振幅调制。如图 1-6 所示。

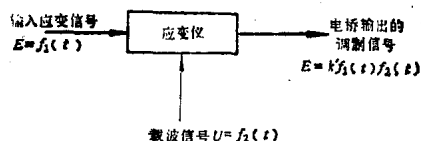


图 1-6

调制用的载波通常有正弦波、方波和脉冲三种。

(1) 正弦波调制：载波是单一频率，把它加在电桥的电源端时，电桥的输出电压为：

$$\Delta E_{\text{出}} = U f(t) \frac{a}{(1+a)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} + \dots \right] \quad (1.8)$$

如图 1-7 所示，调制信号为包络线。

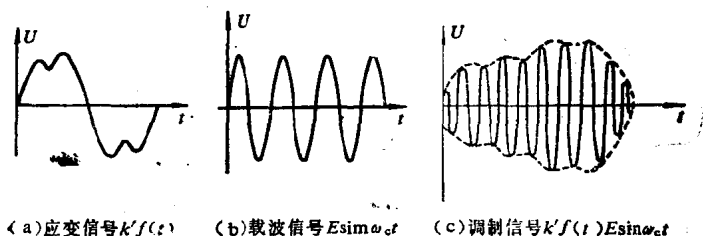


图 1-7

(2) 方波调制：用傅立叶函数分析，应变信号相当于一系列正弦波。

设应变信号为： $B + A \cos \Omega t$

B 是应变仪电桥的不平衡输出量， A 为应变信号的振幅，调制载波为 $E \sin \omega_c t$ 时，则电桥的输出为：

$$E_m = [E \sin \omega_c t] \cdot [B + A \cos \Omega t]$$

$$= EB \sin \omega_c t + \frac{EA}{2} (2 \sin \omega_c t \cos \Omega t) \quad (1.9)$$

如果载波频率 ω_c 低于后面所接放大器的截止频率，则电桥的输出信号包括：

- 载波频率 ω_c ；
- 应变信号频率和载波频率之和 $(\omega_c + \Omega)$ ；
- 应变信号频率和载波频率之差 $(\omega_c - \Omega)$ 。

此时放大器的幅频特性将发生变化，如图 1-8 所示。

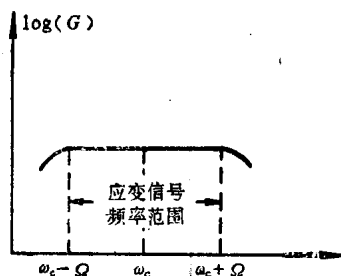


图 1-8

当调制时，所有正弦频率都出现在以 ω_c 为中心的通频带内，如放大器通频带不够宽，则会产生信号失真。

方波载波振幅调制，如图 1-9 所示。它与正弦振幅调制相似，但具有无限多个正弦波，采用低通滤波器输出基波。

(3) 脉冲型载波振幅调制：如图 1-10 所示。采用脉冲调制可以减少电桥功耗，提高桥压，增加灵敏度。其次是可获得稳定的零位，并能正确表示应变符号。