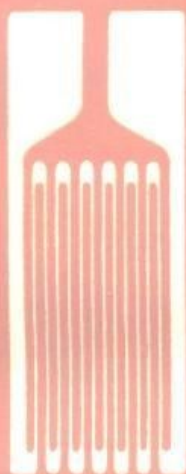


电阻应变计及其应用

沈观林 马良琨 编



清华大学出版社



电阻应变计及其应用

沈观林 马良瑾 编

清华大学出版社

内 容 简 介

本书系统介绍电阻应变计的工作原理、种类、常用材料、制法、各项工作特性及其检定方法、中高温电阻应变计和特殊应变计的特点、所使用测量仪器以及应变计在各种应力应变测量和传感器中应用的技术。主要适用于中等文化程度以上的研制、生产、检验和使用各种电阻应变计的技术人员阅读，并可作为培训的教材，对应用各种应变计的工程强度测试技术人员有参考价值。本书有助于研制各种电阻应变计、提高电阻应变计的生产质量以及电阻应变计专业标准的实施。

电阻应变计及其应用

沈观林 马良理 编

*

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京朝阳区关西庄印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本：787×1092 1/32 印张：8 3/16 字数：177千

1983年7月第一版 1983年7月第一次印刷

印数 1—35000

统一字号：15235·75 定价：1.05元

前 言

电阻应变计是实验应力分析中进行应力应变测量的关键元件，也是用来制造测量许多物理量的传感器的敏感元件，在国民经济的各个部门中得到广泛的应用，应变计电测技术也不断地得到发展。我国从五十年代中期开始研制，生产电阻应变计和应变测量仪器，经过二十多年的发展，目前已有一百多个单位直接从事这方面的研制和生产工作，形成了一支包括数千名工人和技术人员的专业队伍，另外还有更多的人员利用电阻应变计进行电测应力试验工作。

随着电阻应变计研制和生产规模的日益扩大，产品品种的逐渐增多，对质量的要求也不断提高。一方面迫切需要制订全国统一的电阻应变计技术标准，同时需要进一步提高有关人员的技术水平。经过几年的努力，我国已有了电阻应变计的专业标准。为了配合该标准的实施，普及电阻应变计的基本知识，我们编写这本小册子。主要介绍电阻应变计的工作原理、分类、制造方法、所用的原材料、工作特性和检定方法，以及各种应力应变测量和传感器应用等方面的内容。与其他同类参考书籍比较，本书较详细地介绍了各种电阻应变计的特点及常用的制造方法，并特别增加了电阻应变计的工作特性及其检定方法等具体内容，有助于大家学习和掌握专业标准。

本书主要针对从事电阻应变计研制、生产和检验工作的

中等专业技术人员和工人的需要，可作为进行培训的教材，对于其他从事应变计电测技术的人员，亦可供参考。由于我们的水平所限，编写的时间比较仓促，书中肯定会有不少缺点或错误，尚请有关专家和读者批评指正。

本书的照片由清华大学工程力学系葛占基同志协助摄制，在编写过程中，曾得到上海华东电子仪器厂等单位的支持，在此一并表示感谢。

编者

1982年4月

目 录

绪论	(1)
第一章 电阻应变计的工作原理及分类	(5)
§ 1-1 金属丝的应变电阻效应	(5)
§ 1-2 电阻应变计的典型构造	(8)
§ 1-3 电阻应变计的工作原理及灵敏系数	(10)
§ 1-4 电阻应变计的分类	(15)
§ 1-5 电阻应变计的横向效应	(22)
§ 1-6 电阻应变计的温度效应	(26)
第二章 常温电阻应变计的制造方法	(29)
§ 2-1 常温丝绕式应变计的制造方法	(29)
§ 2-2 胶膜基短接式应变计的制造方法	(33)
§ 2-3 箔式应变计的制造方法	(40)
第三章 电阻应变计的常用材料	(46)
§ 3-1 敏感栅材料	(46)
§ 3-2 引线材料	(52)
§ 3-3 应变粘结剂	(53)
§ 3-4 基底材料	(62)
第四章 电阻应变计的工作特性及检定方法	(85)
§ 4-1 电阻应变计的工作特性	(85)
§ 4-2 常温应变计工作特性的检定方法	(80)
§ 4-3 中温、高温和低温应变计工作特性的检定方法	(91)
§ 4-4 电阻应变计精度等级的评定方法	(98)
第五章 中温、高温和低温电阻应变计	(103)
§ 5-1 概述	(103)
§ 5-2 温度自补偿应变计的原理及类型	(106)

§5—3	中温电阻应变计	(115)
§5—4	高温电阻应变计	(117)
§5—5	低温电阻应变计	(122)
第六章	半导体电阻应变计和特殊应变计	(123)
§6—1	半导体电阻应变计工作原理	(123)
§6—2	半导体电阻应变计的工作特性和种类	(126)
§6—3	大应变电阻应变计和应力计	(132)
§6—4	防水应变计、抗磁应变计和抗核辐射应变计	(137)
§6—5	裂纹扩展计和疲劳寿命计	(138)
§6—6	测温计和测压计	(142)
第七章	电阻应变仪等测量仪器	(146)
§7—1	概述	(146)
§7—2	电阻应变仪的基本原理、种类和组成	(148)
§7—3	静态电阻应变仪的主要性能指标及其校验	(169)
§7—4	动态电阻应变仪的主要性能指标及其校验	(178)
§7—5	光线示波器等记录仪器简介	(178)
第八章	各种条件下的应力应变测量	(186)
§8—1	静态应力应变测量	(186)
§8—2	动态应力应变测量	(203)
§8—3	高温条件下的应变测量	(210)
§8—4	高压液下应变测量	(220)
第九章	各种电阻应变计式传感器	(229)
§9—1	电阻应变计式传感器的基本原理	(229)
§9—2	测力传感器	(235)
§9—3	压力传感器	(240)
§9—4	位移传感器	(244)
§9—5	扭矩传感器	(246)
§9—6	加速度传感器	(247)
附录	电阻应变计专业标准中的名词术语	(249)
主要参考资料		

绪 论

实验应力分析是研究用实验方法测定机械设备和结构构件中应力和变形的一门学科，它是解决结构和机械强度问题的一种重要手段。应用实验应力分析方法可测定设计过程中模型的应力和变形以选择合理尺寸和形状，也可测定运行中的机械设备的实际应力，以评价其安全程度和承载能力。此外可对于被破坏的构件进行分析和改进设计，并对应力分析的计算方法进行实验校核。

实验应力分析的方法从材料力学、弹性力学开始形成的时期以来就不断发展，现在已有十几种实验应力分析的方法，其中主要有电阻应变测量法、光弹性实验法、脆性涂层法、云纹法、激光全息干涉法和激光散斑干涉法等。从发展历史看，最早出现的是光弹性实验法，其原理是1816年前后D. Brewster等人发现的，即玻璃板在偏振光场中受力时出现彩色条纹，条纹分布与板的形状和受力大小有关。但是直到1906年赛璐珞被用作光弹性材料后，这种方法才进入实用阶段。后来环氧树脂等光敏材料的出现，光弹性实验法便逐渐发展成为一种成熟的实验方法。

1856年W. Thomson发现海底电缆的电阻值随海水的深度不同而变化，并对铜丝和铁丝进行了拉伸试验，他的结论是：它们的应变与其电阻变化有函数关系，铜丝和铁丝的电阻变化对应变有不同的灵敏度，并且可用电桥测量这些电

阻变化。由此得出了电阻应变测量方法的基本原理。到1936~1938年E. Simmons和A. Ruge分别研制出纸基丝绕式电阻应变计，并由美国Baldwin-Lima-Hamilton公司专利生产，型号命名为SR—4。1952年英国P. Jackson首先研制出箔式电阻应变计，1954年C. S. Smith发现硅和锗半导体的压阻效应，1957年出现了半导体电阻应变计，并逐渐用于各种传感器。随着各种测量仪器的出现，以应变计为传感元件的电阻应变测量方法迅速发展成为实验应力分析中最广泛应用的一种重要方法。

电阻应变测量系统主要由三个部分组成：1. 电阻应变计。作为传感元件，它将构件表面的应变转换成电阻的相对变化。2. 电阻应变仪。它将应变计电阻的相对变化转换成电压或电流信号，或者直接以应变值指示出来，或者再输送给记录仪器。3. 记录仪器。它把电阻应变仪输出的电压或电流信号通过电磁或机械的转换进行记录、打印或者画成曲线。

电阻应变测量方法主要用于测量构件表面的应变，它具有下列优点：

1. 测量方法简单，易于掌握，所用电阻应变计和应变仪等国内外均有工厂出售，价格较低廉。

2. 电阻应变计尺寸小、重量轻，粘贴在构件表面上对其工作状态和应力分布的影响很小。

3. 测量应变的灵敏度可达1微应变（ $=10^{-6}$ 毫米/毫米）准确度可高达1~2%。

4. 频率响应好，可测量0~500000赫芝的动态应变，惯性极小。

5. 测量应变范围大，一般的应变计可测量几千到两万微应变（2%），特制的大应变电阻应变计可测量5~20%的应变。

6. 可以在高温（800~1000℃）、低温（-100~-270℃）、高压液下（高达到上万个大气压）、高速旋转（几千转~几万转/分）、强磁场、核辐射等特殊条件下进行应变测量。

7. 由于电阻应变测量方法的输出是电信号，测量易于自动化、远距离传递，测量数据可数字显示、自动打印，或记录在磁带上或穿孔在纸带上送入计算机处理，也可用无线电发报方式对信号进行远距离遥测。

8. 用电阻应变计作为传感元件可制成各种传感器，用于测量力、压强、扭矩、位移、加速度等物理量，工业上可广泛用作自动化监测控制装置，科学实验中可用于自动化实验控制和测量，商业上普遍用于自动化称重和检测计量（如电子秤等）。应用于传感器的精度可达0.05~1%。

这种测量方法的主要缺点有：

1. 电阻应变计测出的是构件表面一小块面积中的平均应变，一般不易显示应力集中处的梯度和分布，特制的微型应变计可测量局部应变，但应变计尺寸很小时粘贴使用较难。这方面不象光弹性实验法等能显示全域性应力分布。

2. 一般只能反映构件表面应变，而难于测量构件内部应变。

3. 电阻应变计对温度等环境反应较敏感，高温等条件下的应变测量需采用各种措施才能得到较高测量精度。高于800~1000℃时，国外正发展用电容应变计进行测量。

电阻应变测量方法在工程强度测试和实验应力分析中应用最为广泛，其中电阻应变计的质量和正确使用非常重要。随着科学技术发展和工程建设的进展，这种测量方法将继续更广泛和有效地应用，各种新型电阻应变计将研制、生产出来提供科学实验使用；更高精度的电阻应变仪和自动测量记录处理数据装置也将不断出现以满足实验研究的需要。

第一章 电阻应变计 的工作原理及分类

§ 1—1 金属丝的应变电阻效应

学过物理的同志都知道，金属导线的电阻值 R 与线的长度 L 成正比，而与其截面积 A 成反比，有下列公式：

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1-1)$$

式中 ρ 是金属的电阻率，又称电阻系数，对于很细的金属丝也具有这一关系。

当金属细丝由于受拉力而伸长时，长度增大和截面积减小，其电阻值就增大；反之如细丝因受压力而缩短，即长度减小和截面变粗时，则电阻值就减小。这种金属丝材的有规律的现象称为金属丝的应变电阻效应（见图1-1）

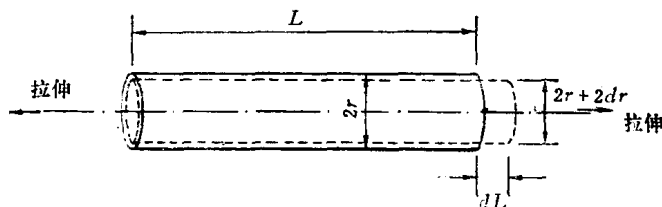


图1—1 金属丝伸长后几何尺寸变化

为了具体分析其规律性，需从数学上进行推导，可将式(1-1)两边取对数，得下式：

$$\ln R = \ln \rho + \ln L - \ln A$$

再对此式两边进行微分，则得出：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (1-2)$$

式中 $\frac{dR}{R}$ 表示电阻的相对变化， $\frac{d\rho}{\rho}$ 是电阻率的相对变化，

$\frac{dL}{L}$ 是金属丝的长度相对变化，这就是力学中称为应变的

量，用 ε 表示， $\varepsilon = \frac{dL}{L}$ ，又称为金属丝长度方向的应变或轴向应变。

$\frac{dA}{A}$ 是截面积的相对变化，因为 $A = \pi r^2$ ， r 是金属丝的半径，则 $dA = 2\pi r dr$ ， $\frac{dA}{A} = 2 \frac{dr}{r}$ ， $\frac{dr}{r}$ 是金属丝半径的相对变化，即径向应变 ε_r 。

由材料力学知道，在弹性范围内金属丝沿长度方向伸长时，径向（横向）尺寸缩小，反之亦然。即轴向应变 ε 与径向应变 ε_r 有下列关系式。

$$\varepsilon_r = -\mu \varepsilon \quad (1-3)$$

式中 μ 叫金属材料的泊松比，这是因法国科学家泊松 (Poisson) 最早发现此现象而得名。

此外，根据有人进行实验研究的结果，金属材料电阻率相对变化与其体积相对变化之间有下列关系：

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \frac{dV}{V} \quad (1-4)$$

式中 c 是金属材料的某个常数,例如康铜(一种铜镍合金)丝 $c \approx 1$ 。 $\frac{dV}{V}$ 中 V 是体积,体积相对变化 $\frac{dV}{V}$ 与应变 ϵ , ϵ ,之间有下列关系:

$$V = A \cdot L$$

$$\begin{aligned} \frac{dV}{V} &= \frac{dA}{A} + \frac{dL}{L} = 2\epsilon_r + \epsilon = -2\mu\epsilon + \epsilon \\ &= (1 - 2\mu)\epsilon \end{aligned}$$

由此得出, $\frac{d\rho}{\rho} = c \frac{dV}{V} = c(1 - 2\mu)\epsilon$

将上述几个关系式代入(1-2)式得出,

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R} &= c(1 - 2\mu)\epsilon + \epsilon + 2\mu\epsilon \\ &= [(1 + 2\mu) + c(1 - 2\mu)]\epsilon = K, \epsilon \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中 K ,对于一种金属材料在一定应变范围内是一常数,将微分 dR 、 dL 改写成增量 ΔR 、 ΔL ,可写成下列公式:

$$\frac{\Delta R}{R} = K, \frac{\Delta L}{L} = K, \epsilon \quad (1-6)$$

即金属丝电阻的相对变化与金属丝伸长或缩短之间存在比例关系,比例系数 K ,称为金属丝的灵敏系数,它的物理意义是单位应变引起的电阻相对变化。从式(1-5)可见, K ,由两部分组成,前一部分单由金属丝的几何尺寸变化引起,一般金属的 μ 在0.3左右,因此 $(1 + 2\mu) \approx 1.6$ 。后一部分是电阻率随应变而引起变化的部分,它除与金属丝几何尺寸变化

有关外，还与金属本身的特性有关，例如康铜 $c \approx 1$ ， $K_t = 2.0$ ，而其它金属、合金则 K_t 在 $1.8 \sim 4.8$ 范围内变动，具体数字见第三章。

利用某些金属细丝的应变电阻效应，以及它们具有稳定的灵敏系数和较高的电阻率等特点，可以制成电阻应变计，广泛应用于测量结构构件或机械零件表面的应变。

§ 1—2 电阻应变计的典型构造

利用金属丝的应变电阻效应，制成测量构件表面应变用的转换元件，将构件表面应变转换成金属丝的电阻相对变化，这种元件称为电阻应变计（或电阻应变片）简称应变计（或应变片）。较早出现的丝式电阻应变计的典型构造见图1-2所示。它包括下列四个基本组成部分：

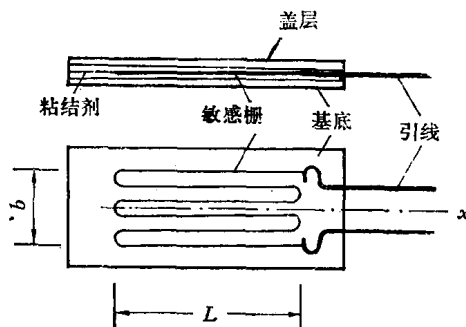


图1—2 电阻应变计的典型构造

1. 敏感栅——它是电阻应变计最重要的组成部分，它由某种金属细丝绕成栅形（或用金属箔腐蚀成栅形），栅形

比直丝可大大减小应变计的长度。一般用于制造应变计的金属细丝的直径在 $0.015\sim 0.05$ 毫米之间，根据测量电阻相对变化的仪器——电阻应变仪（将在第七章中介绍）的要求，电阻应变计的电阻值通常为120欧姆左右，至少为60欧姆，也有200欧姆等多种规格。敏感栅的纵向轴线称为应变计的轴线，即图1-2中所示的 x 轴线。敏感栅在纵轴方向的长度称为栅长，对于图1-2中所示带有圆弧端的敏感栅，栅长指两端圆弧内侧之间的最大距离，图中用 L 表示栅长。在与应变计轴线相垂直的方向上，敏感栅外侧之间的距离称为栅宽，图中用 b 表示。应变计栅长大小关系到所测量应变的准确度，应变计所测出的应变其实是应变计栅长和栅宽所在面积内平均的轴向应变。栅长大的可达100、200毫米，小的可达1、0.5、0.2毫米，分别适应于不同的用途。

2. 基底和盖层——基底用于保持敏感栅、引线的几何形状和相对位置，盖层既保持敏感栅和引线的形状和相对位置，又保护敏感栅。最早基底和盖层用专门的薄纸制成，后来广泛采用各种粘结剂和有机树脂的薄膜制成。前者称为纸基，后者称为胶基，基底厚度一般为 $0.02\sim 0.04$ 毫米。基底的全长称为基底长，其宽度称为基底宽。

3. 粘结剂——用于将敏感栅固定于基底上和将盖层与基底粘结在一起。使用电阻应变计时，也需用粘结剂将应变计基底粘贴在构件表面的某个方向和位置上，以便将构件受力后的表面应变传递给应变计的基底和敏感栅。对粘结剂的要求及其种类将在第三章中介绍。

4. 引线——应变计中从敏感栅引出的细金属线，常用的是直径约 $0.1\sim 0.15$ 毫米的镀锡铜线，也有用扁带形的其

他金属材料作引线。

随着工程技术和科学研究的发展，电阻应变计的种类，和规格虽然很多，但基本上都由这几部分组成。

§ 1—3 电阻应变计的工作原理及灵敏系数

利用金属细丝的应变电阻效应，制成典型构造的电阻应变计，它具有初始电阻值 R ，当将应变计用粘结剂粘贴在构件表面上时，构件受力产生的表面应变 ε （在应变计轴线方向上的应变）传递到应变计的敏感栅，使敏感栅产生的电阻相对变化 $\frac{\Delta R}{R}$ 与 ε 之间有下列关系：

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon \quad (1-7)$$

式中 K 为电阻应变计的灵敏系数，在一定的应变范围内，灵敏系数是一常数， $\frac{\Delta R}{R}$ 与 ε 呈线性关系。应变计的灵敏系数与构成敏感栅的金属丝的灵敏系数 K ，不完全相同，它还与敏感栅形状和尺寸、粘结剂、基底等有关。由于敏感栅除了轴线方向的栅条外，还具有栅宽方向的横栅部分，例如图1-2所示的电阻应变计敏感栅两端圆弧部分，因此应变计的电阻相对变化不仅反映轴向应变，而且受横向应变的影响，这样应变计的灵敏系数还与应变计粘贴位置的不同方向的应变大小有关。

电阻应变计的灵敏系数一般用实验方法测定，而且由于