



应变电测与传感技术

马良瑾 主编

冯仁贤 徐德炳 沈观林 陆志方 编著

中国计量出版社



79.8293
444

应变电测与传感技术

主编 马良珺

编著 冯仁贤 徐德炳

沈观林 陆志方

2k220/06

中国计量出版社

前 言

以应变-电阻变换原理为基础的应变电测及传感技术,近20年来得到了非常迅速的发展,逐步形成了一个跨学科的专业分支,成为实验力学、测试计量技术以及自动检测与控制等专门学科的基本组成部分。作为一种有效的测试与转换技术,可用于进行各种机械和工程结构强度及寿命的诊断与评估,用于多种物理量的检测与计量,实现生产过程或科学实验过程的测量与控制。应变电测及传感技术在国民经济的各个部门,以及在大多数的科学技术领域中得到极为广泛的应用。其中包括航空航天技术、核工程技术、兵器与舰船技术、动力机械与热力工程技术、石油化工技术、交通与建筑技术、纺织与轻工技术、农林与牧业工程技术、生物医学工程与运动生物力学等众多领域。而且,随着科学技术的日益发展,这种技术将有更加广阔的发展和前景。

应变电测及传感技术的基本内容包括有:应变电测与信号变换的基本原理;各种应变计、片式检测元件、应变式传感器的基本类型与工作特性;应变等测量信号的调理电路与测试系统;不同环境条件下的应力应变测量方法与应用等。本书力图在总结作者多年实践工作经验的基础上,尽力反映国内外的最新成果,全面而系统地论述这方面的技术及其发展趋势。在介绍有关的检测元件时,大大充实了这些元件的设计计算方法、材料选择与制造工艺、使用与标定时采用的方法及误差分析等内容。在信号调理电路及测量系统部分,尽量介绍新的并且实用的数据采集与处理系统,以及提高测试精度的途径。我们希望本书能够为在有关技术领域中从事教学、科研与生产应用的教师、科技人员,以及大专院校有关专业的本科生与研究生,提供这一领域更为全面和实用的专业知识,从而起到参考或指导学习的作用。

本书共分五篇,各篇的作者如下:

第一篇 电阻应变计

冯仁贤(清华大学工程力学系)

第二篇 其他应变计及片式检测元件

马良理(北京航空航天大学测控技术研究所)

第三篇 应变信号调理电路和应变测量系统

徐德炳(北京航空航天大学测控技术研究所)

第四篇 不同条件下的应力应变测量

沈观林(清华大学工程力学系)

第五篇 电阻应变式传感器

陆志方(国家技术监督局)

主编 马良理

在本书编写过程中,陶宝祺、王妮、张如一、陈惠南、洪水棕、张开达、樊英民等同志给予

了许多帮助，谨向他们表示衷心的感谢。

由于我们的水平所限，书中不可避免会出现一些疏漏或错误，热忱欢迎专家与读者们批评指正。

作者

1992.5.于北京

目 录

第一篇 电阻应变计

第一章 电阻应变计的工作原理和类型	(3)
第一节 电阻应变计的基本构造	(3)
第二节 电阻应变计的工作原理	(4)
第三节 电阻应变计的主要性能	(7)
第四节 电阻应变计的类型	(13)
第二章 电阻应变计的常用材料	(22)
第一节 敏感栅材料	(22)
第二节 基底与粘结剂材料	(25)
第三节 引线材料	(32)
第四节 表面覆盖物材料	(33)
第三章 电阻应变计的制造技术	(35)
第一节 电阻应变计的结构设计	(35)
第二节 箔式应变计的制造方法	(42)
第三节 丝式应变计的制造方法	(48)
第四节 薄膜电阻应变计的制造	(50)
第四章 电阻应变计的工作特性及检定方法	(52)
第一节 电阻应变计的工作特性	(52)
第二节 电阻应变计工作特性的检定方法	(59)
第三节 电阻应变计精度等级的评定	(70)
第五章 用于非常温环境下的电阻应变计	(73)
第一节 非常温环境对电阻应变计的影响	(73)
第二节 减少应变计热输出影响的方法	(74)
第三节 中、高温电阻应变计	(79)
第四节 低温电阻应变计	(82)
第六章 电阻应变计的常规使用技术	(84)
第一节 电阻应变计的选用原则	(84)
第二节 粘贴式应变计的使用技术	(88)
第三节 非粘贴式电阻应变计的安装方法	(96)
第七章 特殊用途的电阻应变计	(99)
第一节 大应变电阻应变计	(99)
第二节 残余应力应变计	(100)

第三节	应力计	(101)
第四节	防水应变计	(104)
第五节	抗辐射电阻应变计	(105)
第六节	抗磁场电阻应变计	(106)

第二篇 其他应变计及片式检测元件

第八章	弓形应变计	(111)
第一节	弓形应变计的工作原理	(111)
第二节	弓形应变计的结构型式	(112)
第三节	弓形应变计的主要特点与用途	(113)
第九章	半导体应变计	(117)
第一节	半导体应变计的工作原理	(117)
第二节	半导体应变计的工作特性	(119)
第三节	半导体应变计的种类	(122)
第四节	半导体应变计的特点及粘贴技术	(127)
第十章	电容式应变计	(129)
第一节	电容式应变计的工作原理	(129)
第二节	菱形框架式电容应变计	(130)
第三节	筒形差动式电容应变计	(133)
第四节	弓形电容应变计	(136)
第十一章	振弦应变计	(139)
第一节	振弦应变计的工作原理	(139)
第二节	内埋式钢弦应变计的设计特点	(140)
第三节	振弦应变计的标定及主要工作特性	(142)
第十二章	磁致伸缩应变计	(145)
第一节	磁致伸缩应变计的工作原理	(145)
第二节	磁致伸缩应变计的灵敏系数及特点	(146)
第十三章	片式检测元件	(148)
第一节	概述	(148)
第二节	测温片	(148)
第三节	测压片	(151)
第四节	裂纹扩展片	(154)
第五节	疲劳寿命计	(158)

第三篇 应变信号调理电路和测量系统

第十四章	概述	(167)
第一节	应变测量仪器及测量系统的发展	(167)
第二节	应变测量装置的主要性能指标及功能要求	(169)
第三节	应变测量装置的种类及特点	(170)

第十五章 应变测量电桥及恒流源测量电路	(174)
第一节 概述	(174)
第二节 平衡电桥及零读数双电桥	(175)
第三节 不平衡电桥	(179)
第四节 交流载波电桥	(187)
第五节 恒流源测量电路	(195)
第十六章 应变信号调理电路	(196)
第一节 恒压电源——四线供电	(196)
第二节 电桥非线性输出的线性化	(198)
第三节 应变测量用恒流源	(199)
第四节 载波桥源	(202)
第五节 模块式应变信号调理器	(208)
第十七章 电阻应变仪	(213)
第一节 电阻应变仪原理简介	(213)
第二节 应变仪电路分析	(214)
第三节 电阻应变仪的校准	(224)
第四节 应变模拟仪及标准应变量校准装置	(227)
第十八章 数字应变仪和应变测量数据采集系统	(231)
第一节 数字应变仪的原理及构成	(231)
第二节 数据采集系统的原理及其基本部件	(236)
第三节 数据采集系统实例	(253)

第四篇 不同条件下的应力应变测量

第十九章 应力应变测量概论	(261)
第一节 应力应变的各种测量方法	(261)
第二节 应变电测方法的优缺点	(267)
第三节 应力应变换算	(267)
第二十章 常温下的静态应力应变测量	(269)
第一节 测量目的及一般步骤	(269)
第二节 应变花计算公式	(270)
第三节 应变计栅长的选择和粘贴方向的影响	(272)
第四节 环境温度和湿度影响	(274)
第五节 长导线影响及其修正	(275)
第六节 接触电阻的影响	(276)
第七节 应变计横向效应的修正	(277)
第八节 塑性应变测量	(278)
第九节 静态应力应变测量的误差分析	(279)
第二十一章 动态应变测量	(282)
第一节 动态应变及其频谱	(282)

第二节	应变计的动态响应和疲劳寿命	(284)
第三节	动态应变测量的仪器系统	(284)
第四节	动态应变波形图	(286)
第五节	动态应变的数据分析	(286)
第二十二章	非常温环境中的应力应变测量	(290)
第一节	测量特点	(290)
第二节	应变计的选用、安装和导线连接	(291)
第三节	三线法及温度测量	(293)
第四节	数据处理及误差分析	(294)
第五节	快速升温条件下的应变测量	(296)
第六节	应用举例	(297)
第二十三章	运动构件的应变测量	(304)
第一节	概述	(304)
第二节	温度影响和补偿技术	(305)
第三节	应变计和导线的保护	(305)
第四节	旋转构件的应变信号传递装置	(307)
第五节	运动构件的遥测技术	(311)
第二十四章	高压液下的应变测量	(315)
第一节	应变计和导线的安装与防护	(315)
第二节	高压液下导线密封装置	(316)
第三节	压力效应	(318)
第四节	应用举例	(319)
第二十五章	钻孔法测量残余应力	(324)
第一节	概述	(324)
第二节	钻孔法测量残余应力的基本原理	(324)
第三节	释放系数的标定	(328)
第四节	试验技术和误差分析	(330)
第五节	应用举例	(333)
第二十六章	塑料模型的应变测量	(340)
第一节	概述	(340)
第二节	塑料蠕变的影响	(341)
第三节	温度和湿度的影响	(343)
第四节	应变计对塑料模型的加强效应	(344)
第五节	模型的相似问题	(344)
第二十七章	应变电测在其他领域中的应用	(347)
第一节	材料的热学、力学性能测量	(347)
第二节	复合材料的应变测量	(348)
第三节	应变电测在断裂力学中的应用	(353)
第四节	应变电测在生物医学工程中的应用	(356)

第五节	应变电测在运动生物力学中的应用	(359)
-----	-----------------------	-------

第五篇 电阻应变式传感器

第二十八章	概述	(365)
第一节	传感器技术的发展	(365)
第二节	传感器的一般概念	(366)
第三节	传感器的分类	(369)
第二十九章	称重传感器原理	(372)
第一节	变换原理	(372)
第二节	结构与设计	(375)
第三节	弹性材料与应变计的粘贴	(388)
第四节	基本特性及定义	(396)
第五节	传感器特性的补偿	(402)
第三十章	称重传感器的检验与评价	(409)
第一节	检验的依据	(409)
第二节	检验程序	(411)
第三节	校验装置	(412)
第四节	误差与准确度等级	(415)
第三十一章	传感器的安装、使用和维修	(420)
第一节	传感器的选择	(420)
第二节	力引入装置	(423)
第三节	传感器并联技术	(426)
第四节	传感器的故障和修理	(429)
第三十二章	测力传感器	(431)
第一节	标准测力传感器	(431)
第二节	多分量力传感器	(433)
第三十三章	压力传感器	(439)
第一节	弹性元件设计	(439)
第二节	压力传感器的结构和原理	(441)
第三十四章	其它测量传感器	(445)
第一节	应变式扭矩传感器	(445)
第二节	应变式引伸计	(447)
第三节	加速度传感器	(451)
附录	(453)
附录一	OIML 国际建议 No. 60	(453)
附录二	部分电阻应变计及传感器参数表	(462)
主要参考文献	(469)

第一篇 电阻应变计

第一章 电阻应变计的工作 原理和类型

第一节 电阻应变计的基本构造

电阻应变计（俗称电阻应变片）是一种能将被测试件的应变转换为电阻变化量的敏感元件。自1930年左右，粘贴式碳膜电阻应变计制成以来，随着应变测量和传感器制造技术的发展，由于工作条件、制造材料、工作特性和应用场合等的不同，电阻应变计的结构型式已发展为多种多样。图1-1列举了其中典型的几种结构型式。它们的结构型式不同，但基本构造大致相同，主要由敏感栅、基底、引线、粘结剂和表面覆盖物五部分组成（见图1-2）。

一、敏感栅

它是构成电阻应变计的主要部分。当敏感栅与被测试件一起变形时，其电阻值将产生与变形对应的、成比例的变化。它的材料为金属（丝、箔）或半导体，形状一般呈栅状或条状

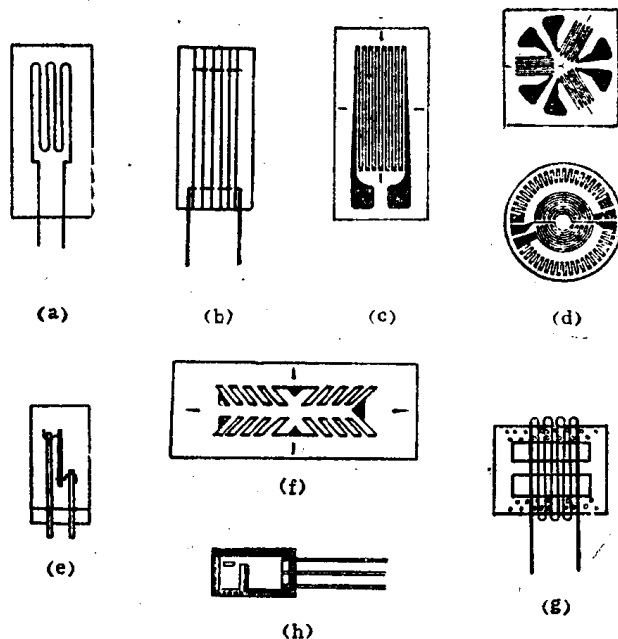


图1-1 电阻应变计的几种典型结构型式

- (a) 丝绕式应变计
- (b) 短接式应变计
- (c) 箔式应变计
- (d) 多轴应变计
- (e) 半导体应变计
- (f) 复式应变计
- (g) 临时基底应变计
- (h) 焊接式应变计

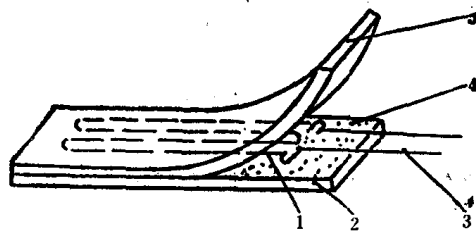


图 1-2 电阻应变计的基本构造示意图

1. 敏感栅 2. 基底 3. 引线 4. 粘结剂 5. 表面覆盖物

(见图1-1)。敏感栅的电阻值通常为 $60\sim 350\ \Omega$ ，最高达 $5\ 000\ \Omega$ 。

二、基 底

为了保持敏感栅具有一定形状，通常采用粘结剂将敏感栅固定在一定尺寸的纸、有机树脂膜、复合材料或金属薄片等材料上。这些材料称为应变计的基底。由于试件的变形将通过基底传递给敏感栅，基底的性能、制造工艺和几何尺寸等，对应变计测量应变的准确性和稳定性都有较大影响。有时，基底仅起应变计使用前临时固定敏感栅的作用，待敏感栅安装到试件上之后，用溶剂将基底从敏感栅上取下，这种基底称为临时基底。

三、引 线

引线是采用焊接方法与敏感栅相连、比敏感栅栅丝尺寸大几倍的金属导线。敏感栅的电阻变化通过引线引导到测试仪器中。为了减少引线带来的误差，通常采用低电阻率和电阻温度系数较小的材料制成。其形状有细丝或扁带两种。

四、粘 结 剂

电阻应变计的敏感栅在基底上的固定或在敏感栅表面覆盖保护物时，通常均用粘结剂。根据应变计的工作条件和测量精度要求，所采用的粘结剂是不同的。粘结剂在电阻应变计构造中的作用，以及对应变测量的影响，与基底相同。对于箔式或薄膜式电阻应变计，敏感栅在基底上的固定，是在基底成膜过程或薄膜形成过程中实现的，不需另外使用粘结剂。

五、表面覆盖物

为了防止敏感栅受到周围介质的侵蚀，或安装时机械损伤而影响电阻应变计的正常工作，通常在敏感栅表面覆盖一层保护物(即覆盖物)。它的材料可采用与基底材料相同(或特制的)粘结剂胶膜、浸胶玻璃纤维布、呢绒等。覆盖物对敏感栅的变形影响应尽可能小。在要求精度很高的传感器中，电阻应变计的敏感栅表面有时不加覆盖物，而采取其他方法保护其正常工作。

第二节 电阻应变计的工作原理

本节以金属电阻应变计为例叙述其工作原理(半导体电阻应变计的工作原理见第九章)。

由物理学可知，金属导线的电阻变化量是与金属材料特性和几何尺寸的变化成比例。设有一长度为 l 、截面积为 A 的金属导线，其电阻率为 ρ ，则导线的电阻 R 可用下式表示：

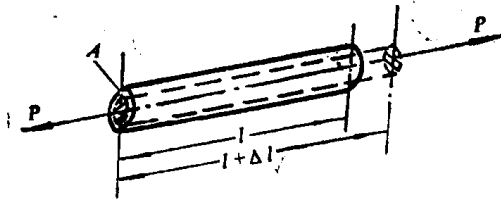


图 1-3 金属导线受力后变形示意图

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

当导线受力而变形时，导线电阻发生变化（见图 1-3）。其电阻相对变化量可通过对式 (1-1)

微分求得：

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

由于
$$\frac{dA}{A} = -2\mu \frac{dl}{l} \quad (1-3)$$

式中： μ ——金属材料的泊松比。

将式 (1-3) 代入式 (1-2)，经整理得：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \frac{dl}{l} \quad (1-4)$$

根据在高压下对金属导线性能的研究，发现导线的电阻率是随其体积变化而变化的。可用下式表示：

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} \quad (1-5)$$

式中： V ——金属导线的初始体积， $V = A \times l$ ，

C ——比例系数，对于一种材料和加工方法来说，在一定应变范围内，它为常数。

而
$$\frac{dV}{V} = \frac{dA}{A} + \frac{dl}{l} = (1 - 2\mu) \frac{dl}{l} \quad (1-6)$$

将式 (1-6) 代入式 (1-5) 得：

$$\frac{d\rho}{\rho} = C(1 - 2\mu) \frac{dl}{l} \quad (1-7)$$

再将式 (1-7) 代入式 (1-4) 得：

$$\frac{dR}{R} = [C(1 - 2\mu) + (1 + 2\mu)] \frac{dl}{l} \quad (1-8)$$

设 $K = C(1 - 2\mu) + (1 + 2\mu)$ ，则

$$\frac{dR}{R} = K \frac{dl}{l} = K\epsilon_s \quad (1-9)$$

式中： ϵ_s ——金属导线的线应变， $\epsilon_s = \frac{dl}{l}$ 。

由此可见，金属导线的电阻相对变化与它的线应变成正比。其比例系数 K 通称金属导线的灵敏系数，它与导线材料的成分、加工过程和热处理状态有关，而与受力状态（即拉伸或压缩）无关。几种常用金属材料的灵敏系数见表 1-1。

对于康铜（55%Cu, 45%Ni）合金来说， $C=1$ ，所以 $K=2$ 。即在相当大的应变范围内，它的电阻相对变化与应变呈线性关系（见图 1-4）。

表 1-1 几种常用金属材料的灵敏系数

材料名称	主要成分 (%)	灵敏系数 K
康铜合金	Cu 55, Ni 45	2.1~2.2
卡玛合金	Ni 74, Cr 20, Al 3, Fe 3	2.4~2.6
镍铬合金	Ni 80, Cr 20	1.9~2.5
铁铬铝合金	Fe 75, Cr 20, Al 5	2.6~2.8
铂钨合金	Pt 92, W 8	3.0~3.5

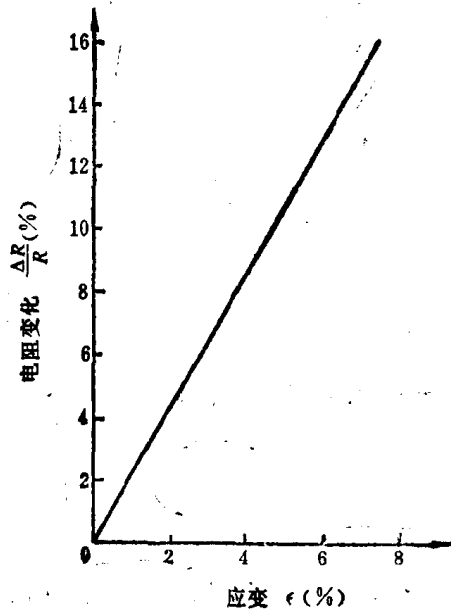


图 1-4 康铜合金的电阻变化与变形的关系

对于其他金属材料来说，当发生塑性大变形时，其电阻相对变化与应变呈非线性关系。

这时，电阻相对变化用 $\frac{\Delta R}{R}$ 表示，则

$$\frac{\Delta R}{R} = \int_R^{R+\Delta R} \frac{dR}{R} \quad (1-10)$$

由于

$$R = \rho \frac{l^2}{V}$$

所以

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + 2 \frac{dl}{l} - \frac{dV}{V} \quad (1-11)$$

当导线发生塑性大变形时， $d\rho \rightarrow 0$ ， $dV = 0$ ，

因此

$$\frac{dR}{R} = 2 \frac{dl}{l}$$

$$\int_R^{R+\Delta R} \frac{dR}{R} = 2 \int_l^{l+\Delta l} \frac{dl}{l}$$

$$\ln\left(1 + \frac{\Delta R}{R}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta l}{l}\right)^2$$

所以

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 2 \frac{\Delta l}{l} + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 \quad (1-12)$$

设 $K_0 = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l}$, 则

$$K_0 \approx 2 + \frac{\Delta l}{l} \approx 2 + \epsilon \quad (1-13)$$

由此可见, 一般金属导线发生塑性大变形时, 其灵敏系数并非常数, 而是随导线的变形而变化, 近似线性关系。

综上所述, 当敏感栅为金属材料的电阻应变计被粘贴到构件表面后, 构件受力而变形时, 应变计的敏感栅也随之变形。从而, 应变计的电阻发生变化。然后, 用测试仪器测得应变计的电阻相对变化, 并事先标定得到应变计的灵敏系数, 就可测得构件的应变。

第三节 电阻应变计的主要性能

不同工作条件下, 电阻应变计满足正常工作要求而应具有的性能项目很多, 本节仅叙述其中主要性能的含义、对应变测量的影响和影响性能的因素等。

一、灵敏系数

由上已知, 电阻应变计的灵敏系数 K 可用下式表示:

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta L}{L}$$

即

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \epsilon \quad (1-14)$$

式中: $\frac{\Delta R}{R}$ —— 电阻应变计的电阻相对变化;
 ϵ —— 构件表面沿敏感栅丝栅方向(又称轴向)的应变, $\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$ 。

因此, K 是反映电阻应变计对应构件表面单位应变所产生的电阻相对变化量。它的大小与应变计敏感栅材料本身的灵敏系数 K_0 值不同。由于呈栅状的敏感栅是用粘结剂固定在基底上, 使用时又用粘结剂安装在被测构件表面。而基底和粘结剂与敏感栅材料的弹性模量相差较大, 以及基底上敏感栅端部处应力集中的影响, 因此, 当构件变形时, 基底和粘结剂在传递变形给敏感栅的过程中, 出现变形传递过渡区(见图 1-5 中 a 和 b 区)。因而, 应变计敏

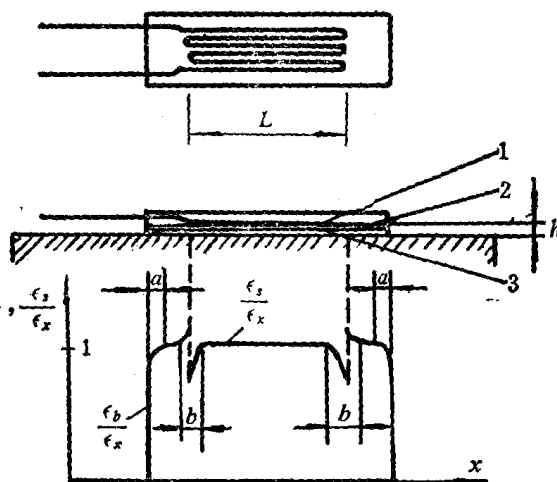


图 1-5 构件表面变形传递过程

1. 敏感栅 2. 基底 3. 粘结剂

感栅所感受的构件应变与将敏感栅展开成单根金属丝直接承受与构件变形相同的应变时，所产生的电阻相对变化量是不同的。它与敏感栅的结构、尺寸，基底和粘结剂的材料性能、厚度，以及应变计制造工艺等有关。当基底尺寸远大于敏感栅尺寸时，电阻应变计的灵敏系数 K 和敏感栅材料的灵敏系数 K_0 之间的关系可用下式表示：

$$K = K_0 \left/ \left[1 + \frac{4h}{Zb} \cdot \frac{A}{L} (1 + \mu_b) \frac{E_b}{E_s} \right] \right. \quad (1-15)$$

式中： h ——基底和粘结剂层的总厚度；

Z ——过渡区的有效宽度；

b ——过渡区的长度；

A ——敏感栅的丝栅截面积；

L ——敏感栅的栅长；

μ_b ——基底和粘结剂层的泊松比；

E_b ——基底和粘结剂层的弹性模量；

E_s ——敏感栅材料的弹性模量。

其中，过渡区的长度 b 和宽度 Z 可通过试验得到。它们随敏感栅的弹性模量和厚度、粘结剂和基底的厚度的增加而增大；随粘结剂和基底的弹性模量、泊松比的增大而减小。 b 约等于敏感栅厚度的 10 倍。 Z 约等于敏感栅厚度的 7.5 倍。

实际上，电阻应变计的灵敏系数 K 值的确定，是在专用测试设备上，通过抽样检定试验测定的（见第四章）。因为 K 值不仅与应变计结构材料和尺寸有关，而且与安装工艺和使用条件有关。

二、横向效应

金属电阻应变计的敏感栅一般都呈栅状。它由轴向和横向两部分丝栅组成（见图1-6）。因此，它能同时感受两个方向的应变。通常要求应变计的指示应变值只反映构件表面的轴向

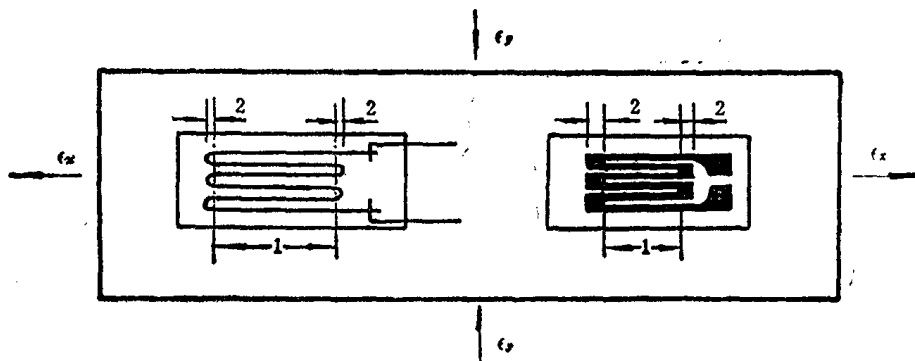


图 1-6 金属电阻应变计敏感栅的组成

1. 轴向丝栅 2. 横向丝栅

应变。然而，由于应变计敏感栅横向丝栅的电阻变化是由于构件表面轴向和横向应变共同作用的结果，因此，必须修正敏感栅的横向丝栅对应变计指示应变的影响。这种影响称为电阻应变计的横向效应。横向效应的大小用横向效应系数 H 表示：