

# 应变计技术

[英] A.L. 温杜 G.S. 霍里斯特

朱品松 等译

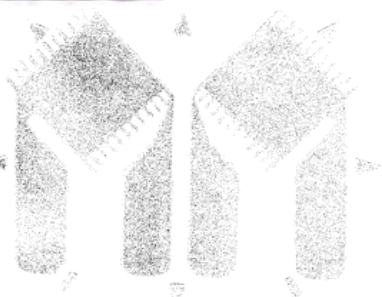


中国计量出版社

# 计技术

杜 G.S. 霍里斯特

朱品松 等译



中国计量出版社

## 内 容 提 要

本书由英、美两国多年从事应变计研究工作的专家撰写,书中集中了国外多年来在应变计技术研究方面的新成果,内容包括:电阻应变计的敏感材料、结构、性能、粘结剂的选择;应变计在恶劣条件下的安装与防护;测试仪器、应变计的测试误差分析处理;半导体应变计;高温下使用的电容式应变计;混凝土中使用的振弦式应变计。上述后三类应变计在国内出版的有关书籍中很少包括。

本书内容新颖、资料丰富,是从事各类应变计设计、安装、使用和维护的工程技术人员供有价值的参考书。

## STRAIN GAUGE TECHNOLOGY

A.L.Window G.S.Holister

Applied Science Publishers Ltd 1982

## 应 变 计 技 术

(英)A.L.温杜 G.S.霍温斯特

朱鼎铭等译

—\*—

中国计量出版社出版

北京和平门内大街13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 11.375 字数 256 千字

1989年4月第1版 1989年4月第1次印刷

印数 1—6 000

ISBN 7-5026-0215-1/TB·187

定价 7.00 元

## 译者序

《应变计技术》一书，系英英应用科学出版公司1982年出版，是应变计技术方面的最新著作。本书的特点在于填补了应变计的一般理论（教科书）与应变计制造厂家技术资料（操作指南）之间的空白，使两者很好地结合起来，具有重要的实际应用价值。

本书各章节分别由从事这一领域的有丰富实践经验的专家、工程师撰写，从而提供了许多实际知识和宝贵经验。

本书可作为从事应变计、传感器技术的研究、生产人员的参考书，高等学校教学参考书，从事实验应力分析人员的技术指导资料以及作为有关人员的培训教材。

本书各章节的译、校者依次为：

|          |         |
|----------|---------|
| 编者序、作者介绍 | 朱鼎铭     |
| 第一章      | 孙维民 林自强 |
| 第二章、第三章  | 朱鼎铭     |
| 第四章      | 包建忠 易本忠 |
| 第五章      | 施昌彦 李振明 |
| 第六章      | 邹炳易     |
| 第七章      | 黄晓宝     |
| 第八章      | 韩雅芳     |

全书由朱鼎铭负责校订。

由于译、校者水平有限，若有错误之处，希读者指正。

## 编者序

实验应力分析是应力分析中最具有实用意义的分支，它的绝大多数问题均依靠应变测量技术加以解决。其中应用最广的是各种应变计，特别是电阻应变计。这些小巧而又简单的敏感元件已经使用多年，不仅在所有的工程技术领域，而且几乎包括所有工业部门，涉及所有的学科。尽管它应用极广（也许正是由于这个缘故），但有关应变计的著作只出版过很少几本。这些著作中，多半属于某些特殊问题或个别的工业部门中的技术论文和报告。

《应变计技术》一书，来源于应用科学出版社的应力分析进展丛书，它不是来代替现有的教科书和参考书的。虽然应变计的基本理论没有改变，但书中所述及的目前可提供的应变计性能，以及安装、标定、数据采集等技术却与几年前的应变计大不一样了。在此之前，在应变计技术方面没有出现重大的进展，而现在在材料、制造工艺及安装技术方面有了重要的突破，从而使应变计更加可靠、精密及具有多种功能。应变计现已成为从事设计、样机试验、研制及破坏分析等领域的工程技术人员的日常应用的工具。

诸如称重传感器等精密传感器和各种电子秤的性能现已有了很大的提高，这是无庸置疑的。然而人们常常忘记，也或许由于不了解，在这些装置中所使用的敏感元件通常就是电阻应变计。在零售商店所使用的商用秤，现已具有0.03%的精度并接近0.02%，这正是电阻应变计的性能和可靠性的真实反映。

书中第一部分叙述电阻应变计。内容包括：应变计的材料、结构和性能特性；各种粘接剂和在各种应用、性能要求下的安装方法；在困难和恶劣环境条件下的特殊安装问题；详述应变计仪表装置，除了综述熟知的、传统的设备外，还着重介绍用计算机进行数据采集和处理。以及应用高速数字系统的发展方向；最后给出关于误差分析的方法，以供从事应变计的技术人员参考。

书中第二部分包括三种重要的但不经常使用的应变计类。内容涉及：介绍半导体或压阻应变计的性能特性及最新资料；综述电容应变计。它在温度突变条件下静态应变测量中应用甚广，叙述并讨论振弦应变计的应用，它特别适用于在土木工程中测量长时期的静态应变。

本书试图填补一个重要的空白，即在应变计制造厂家的著作和一般教科书之间，前者着重详细给出掌握一种个别产品的指导，而后者则仅涉及应变测量的基本理论和一般原理。本书通过一些在应变计实践的各个方面的先行者给读者带来许多必要的实际知识和经验，书中所有的作者均是工业界中的从事实际工作的工程师，其中有些人早就有著作而为人们所熟知，而另外一些人则受托第一次把他们的知识和经验奉献给本书。诚希本书无论对“实干家”还是“专家”均能提供有益的帮助。

A.L.温杜（英国 Welwyn 应变测量公司）

G.S.霍里斯特（英国奥本大学机械系）

## 作者介绍

M. A. 贝克 (Baker)

英国 Maywood 仪表公司技术经理

G. F. 查默斯 (Chalmers)

美国 Measurements (测量) 集团副总经理, 国际市场  
经理

I. W. 霍恩比 (Hornby)

英国中央电气研究实验室混凝土技术组组长

G. C. 莫登 (Mordan)

英国 Welwyn 应变测量公司对外服务经理

A. 欧文斯 (Owens)

英国应力工程服务公司分析服务经理

J. 波普利 (Pople)

英国 Vickers 造船及工程公司仪表实验室副主任

E. 普鲁克特 (Procter)

英国 Berkeley 核实验室中央发电管理局实验结构分析  
部主任

K. 斯科特 (Scott)

英国 Welwyn 应变测量公司技术代表

J. T. 斯特朗 (Strong)

英国 Berkeley 核实验室中央发电管理局研究员

# 目 录

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| 第一章 材料、结构及特性 .....          | ( 1 )  |
| 引言 .....                    | ( 1 )  |
| 简史 .....                    | ( 1 )  |
| 基本工作原理 .....                | ( 3 )  |
| 材料 .....                    | ( 5 )  |
| 应变计结构 .....                 | ( 10 ) |
| 性能特性 .....                  | ( 17 ) |
| 应变计的一般工作特性 .....            | ( 26 ) |
| 应变计参数的选择 .....              | ( 31 ) |
| 其它特殊类型的电阻应变计 .....          | ( 34 ) |
| 第二章 粘接剂和安装技术 .....          | ( 37 ) |
| 引言 .....                    | ( 37 ) |
| 计划 .....                    | ( 39 ) |
| 粘接剂的选择 .....                | ( 40 ) |
| 试验表面的准备 .....               | ( 47 ) |
| 应变计的准备 .....                | ( 52 ) |
| 上夹具夹紧 .....                 | ( 58 ) |
| 固化 .....                    | ( 62 ) |
| 引线 .....                    | ( 64 ) |
| 绝缘 .....                    | ( 64 ) |
| 导线 .....                    | ( 66 ) |
| 引线的连接 .....                 | ( 69 ) |
| 保护 .....                    | ( 77 ) |
| 检验 .....                    | ( 79 ) |
| 第三章 在恶劣环境条件下应变计的安装和保护 ..... | ( 87 ) |

|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| 引言 .....                       | (87)         |
| 材料的选择 .....                    | (90)         |
| 安装技术 .....                     | (108)        |
| 保护 .....                       | (117)        |
| 可靠数据的获得 .....                  | (133)        |
| <b>第四章 仪表装置 .....</b>          | <b>(139)</b> |
| 引言 .....                       | (139)        |
| 惠斯登电桥 .....                    | (140)        |
| 放大器 .....                      | (157)        |
| 传输和噪声 .....                    | (159)        |
| 显示器 .....                      | (168)        |
| 实时处理 .....                     | (175)        |
| 数据储存 .....                     | (186)        |
| 系统的选择 .....                    | (197)        |
| <b>第五章 应变测量中的误差和不确定度 .....</b> | <b>(208)</b> |
| 引言 .....                       | (208)        |
| 误差来源 .....                     | (210)        |
| 误差分类 .....                     | (211)        |
| 误差的避免和补偿 .....                 | (214)        |
| 核准方法 .....                     | (240)        |
| 误差的影响、量值和修正 .....              | (260)        |
| 仪器误差 .....                     | (265)        |
| <b>第六章 半导体应变计 .....</b>        | <b>(268)</b> |
| 引言 .....                       | (268)        |
| 制造 .....                       | (270)        |
| 灵敏度 .....                      | (273)        |
| 线性 .....                       | (274)        |
| 温度特性 .....                     | (277)        |
| 其它的特性 .....                    | (285)        |
| 半导体应变计的安装 .....                | (286)        |
| 其它粘贴方法 .....                   | (287)        |

|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| 半导体应变计在传感器中应用的优点 .....            | (289) |
| 第七章 电容式应变计 .....                  | (291) |
| 引言 .....                          | (291) |
| HUGHES(休斯) CSG-201 型高温应变传感器 ..... | (293) |
| Boeing/Hitec 应变计 .....            | (307) |
| 应变计电容, 线性及应变计灵敏系数 .....           | (310) |
| Cerl/Planer 电容式应变计 .....          | (315) |
| 第八章 振弦应变计 .....                   | (329) |
| 引言 .....                          | (329) |
| 历史的回顾 .....                       | (330) |
| 设计 .....                          | (331) |
| 制造 .....                          | (336) |
| 安装 .....                          | (337) |
| 标定 .....                          | (338) |
| 准确度 .....                         | (341) |
| 试验设备 .....                        | (343) |
| 应用 .....                          | (346) |

# 第一章 材料、结构及特性

G.F 查默斯 美国 Measurements 集团

## 引 言

从 1940 年以来, 粘贴式电阻应变计一直是实验应力分析领域内最有用的简单工具。它是一种最精确、灵敏、多用途及使用方便的敏感元件。它比较便宜, 输出为线性, 安装简便并适用于各种结构尺寸和材料。因而它能满足各种温度范围的大型试件的测量要求。

由于商业、工业及研究部门的不断改进, 应变计已经获得极为优越的工作特性——特别是在稳定性、温度补偿和蠕变性能方面。这就又使得应变计成为高精度负荷传感器和称重系统中的基本敏感元件。近年来在这些方面得到了迅速发展。

尽管应变计的使用相当容易, 但要用得正确、有效, 仍需对其特性、使用技术以及有关的仪表装置有透彻的了解。本章专门涉及影响电阻应变计本身性能的要点。后面的章节将论述粘接剂、安装和保护技术、仪表及误差等。

## 简 史

今天所见到的粘贴式电阻应变计的基本形式是 1938 年在美国首先使用的。加州理工学院的西蒙斯 (Simmons) 和麻省理工学院的鲁奇 (Ruge) 发现把由电阻合金 (例如铜镍合

金)制成的细金属丝用粘接剂粘贴在构件上,就可以测量其表面应变。

然而在此之前,非粘贴丝式应变计已经用了好些年。它由电阻丝绕制而成,电阻丝被绕在若干销钉上,而销钉则由联动装置驱动,该装置的任何移动将使电阻丝受拉并改变其阻值。这实质上是一个电子引伸计,其原理至今还用于某些专门类型的传感器中。

远比这更早的时候,1856年开尔文(Kelvin)首先报导了关于电阻丝的阻值与应变之间的关系。他发现在电阻丝受拉状态不同时,会影响其电阻的测量值。这使他感到不便,于是他注意力图使这种影响减至最小。

粘贴式电阻应变计早在1930年获得首次应用,了解这方面情况也很重要。它是涂在一块绝缘片上的碳化物电阻器。用于测量高性能的飞机推进器叶片的振动应变。然而这种碳质片仅限于指示动态应变和中等精度的测量。因为其阻值随时间和温度的稳定性都较差。

随着由西蒙斯和鲁奇发明的把电阻丝粘贴到构件上的技术的发展,在第二次世界大战中航空工业迅速发展期间,应变计测量技术很快地被用于结构试验。它们连续地在航空工业中被大规模地使用了多年。也正是由于该工业的需要,1952年,箔式应变计有了重大进展。英国的Saunders-Roe公司试图对粘贴型丝式片进行改进,因为这种片在直升飞机或飞船的恶劣试验环境条件下存在一些问题。那时印刷电路技术正在出现,于是Saunders-Roe提出从一个适当电阻材料制成的薄的箔材上用刻蚀丝的方法制造应变计这一概念。这种箔式应变计有许多特别的优点,并很快地被制造厂和用户,特别是美国的制造厂和用户所采用。它为应变计技术在更广泛的工业领域内使用开辟了道路。如今,这类应变计是

世界范围内最广泛应用的一种应变计。

制造箔式应变计的其它方法还有与腐蚀法不同的冲模法和真空沉积法。这些方法将在后面讨论。但自从箔式应变计推广以来，大多数研究工作已转向改进应变计的材料、特性以及结构的控制和了解。

## 基 本 工 作 原 理

所有的导电材料均具有应变灵敏度——它定义为导体电阻的相对变化与其长度的相对变化之比——因而均可以考虑用作应变计的材料。应变灵敏度是当导体承受弹性拉伸时产生尺寸变化的一个函数（它对于不同的材料基本相同）加上材料基本的电阻率随应变的变化。

导体的电阻值由下式给出：

$$R = \rho L / A \quad (1-1)$$

式中：

$R$ ——电阻值；

$L$ ——长度；

$A$ ——横截面积；

$\rho$ ——电阻率。

应变灵敏度（对于一个应变计，被定义为应变计灵敏系数）是一个无量纲量，由下列数学式表达：

$$F = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (1-2)$$

式中：

$F$ ——应变灵敏度；

$R$ ——初始阻值；

$\Delta R$ ——阻值的变化;

$L$ ——初始长度;

$\Delta L$ ——长度的变化。

从这两个公式可见, 设电阻率 ( $\rho$ ) 保持不变, 基本的应变灵敏度由尺寸的变化来确定。如果导体被弹性伸长, 由于泊松效应, 长度的增加 ( $\Delta L$ ) 伴随着横截面积的减小。这两个效应的迭加将使导体的阻值增加。设泊松比为 0.3 (几乎大多数电阻材料比值都大致相同), 则灵敏系数约为 1.6, 也就是  $F = 1 + 2\nu$ 。

然而, 实际上试验表明不同的电阻材料其应变灵敏系数有相当大的差别 (表 1)。

表 1 不同材料的应变灵敏度

| 材 料                        | 商 品 名 称      | 典型应变灵敏度 |
|----------------------------|--------------|---------|
| 铜-镍 (55-45)                | 康 铜          | + 2.1   |
| 镍-铬 (80-20)                | Advance 镍铬合金 | + 2.2   |
| 镍-铬 (75-20)<br>加 铁 和 铝     | 卡 玛          | + 2.1   |
| 镍-铬-铝 (70-20-10)           | Armour D     | + 2.2   |
| 镍-铬-铁-钼<br>(36-8-55.5-0.5) | 恒弹合金         | + 3.5   |
| 铂-钨 (92-8)                 | —            | + 4.0   |
| 铜-镍-锰 (84-4-12)            | 锰 铜          | + 0.6   |
| 镍                          | —            | - 12.0  |
| 铁                          | —            | + 4.0   |

这些差别表明, 材料的电阻率势必受到应变的影响, 或许更直接的是受材料内应力的影响。因此, 应变灵敏度是由几何尺寸的变化及由内应力变化所引起的电阻率变化的综合

效应。

但在超出材料的弹性极限时，内应力的变化趋近于零，而泊松比 ( $\nu$ ) 约为 0.5。在这种情况下，由应变引起的阻值变化主要是由于尺寸的变化所引起的。因而应变灵敏度 ( $F = 1 + 2\nu$ ) 约为 2.0。

这意味着在弹性范围内应变灵敏度同 2.0 相差甚大的材料，到塑性范围都有近似 2.0 的应变灵敏度。这表明有附加的非线性。最常用的应变计材料一般正是这样的。一些在弹性范围内具有很高灵敏度的材料，实际上也具有高的非线性。这就是说它们的灵敏度将随应变而变化。对于应变计来说，这类材料是不合要求的。

## 材 料

制作电阻应变计的材料主要是丝栅材料（对应变灵敏的电阻元件）和基底材料，分别记述于下。

### 应变灵敏电阻元件

对于应变灵敏电阻元件，希望它具有下列特性：

(1) 在弹性范围内具有线性应变灵敏度——为了得到好的准确度和重复性；

(2) 高电阻率——为了减小尺寸；

(3) 小的滞后——为了得到好的重复性和准确度；

(4) 高的应变灵敏度——对一给定的应变，可给出最大的电输出；

(5) 低的和可控的电阻温度系数——便于温度补偿；

(6) 较宽的工作温度范围——以便有最宽的使用范围；

(7) 疲劳寿命长——能用于动态测量。

表 1 给出了一些可以考虑用作应变计材料的应变灵敏度。实际上仅有少数合金满足上述特性。下面介绍其中主要

的几种合金。

## 铜-镍合金

这种应变计合金通常称作康铜，用于热电偶合金。其它的商品名称包括 Advance, Cnpron, Copel。

所有现代的应变计合金中，铜镍（55-45）合金是使用历史最久且至今仍然应用最为广泛的一种。这正说明了它具有许多应变计所需各种特性的最佳综合。例如，这种合金具有足够高的应变灵敏度，且与应变、温度无关。它的电阻率很高，足以在很小的丝栅上获得合适的阻值，并且它的电阻温度系数不十分大。此外，它有适中的疲劳寿命以及较高的变形能力。很重要的是它能对很宽范围的试件材料的膨胀系数实现温度自补偿。

它的工作温度范围通常在  $-50^{\circ}\text{C}$  到  $+150^{\circ}\text{C}$  之间。但在温度超过  $70^{\circ}\text{C}$  时，这种合金可能表现出阻值随时间有连续的微小变化。在较高的温度时它逐渐被氧化，从而导致阻值随时间的明显变化。

标准状态铜镍合金的应变范围为  $\pm 5\%$ ，优质退火状态的可达  $20\%$ 。

## 镍铬合金

镍铬合金是应变材料中常用的第二种材料。改型卡玛或 K 合金是 75-20 的镍-铬并加以少量的铁和铝。它是最重要的应变计合金之一。它有良好的疲劳寿命。与铜镍合金相比，其特别之处是具有极好的稳定性，且其全面性能比通常使用的其它合金都优越。

它的电阻温度系数可以通过热处理加以调整，以便在很宽的应变范围内对不同的材料实现温度补偿。它随温度增高而减小的应变灵敏度可以控制在某些范围以内以便补偿制造高精度传感器材料的弹性模量随温度的降低。

它有很高的电阻率，与铜镍合金相比，它可做出阻值一定而尺寸更小的应变计，或者对于给定的尺寸、阻值较高的片子。

它的工作温度范围对于静态测量，在  $-269^{\circ}\text{C}$  到  $+290^{\circ}\text{C}$  之间。并且可以在  $+400^{\circ}\text{C}$  高温下短期使用。

其它类型的镍铬合金有时可用于高温（超过  $+400^{\circ}\text{C}$ ），但由于在这样的温度下阻值不断变化，它们一般限于用在连续的阻值变化影响不大的动态测量中。

### 铂-8%钨合金

铂-8%钨是为了克服镍铬合金存在的问题而发展起来的高温应变计合金。与镍铬合金不同，它在高达  $+900^{\circ}\text{C}$  的温度下并没有任何金相变化，所以在高温下其阻值仍不随时间而发生明显的变化。它具有极高的、却是无法调整的电阻温度系数；但它是重复的。此外，它有高于铜-镍和镍-铬合金的应变灵敏系数；但它是非线性的。因此，它应用的应变范围通常限于  $\pm 0.3\%$ 。

### 恒弹合金

这是一种镍、铁、铬和锰合金，它有极好的疲劳寿命和较高的应变灵敏度。然而它有很高的电阻温度系数，并且同高灵敏度有关的情况是在应变超过  $0.5\%$  时，应变灵敏系数是非线性的。它主要用于动态测量。在动态试验条件下，其极好的疲劳寿命和高的灵敏度有助于取得较好的测量结果。

### 其它合金

如表 1 所示，有许多材料和合金可用作应变计的合金。其中大多数由于种种原因而不适用。因为它们的综合性能不如前面介绍的那些合金。虽然，对用于高温的材料已进行了大量的研究，但大多数材料有各种缺点。目前，在已被评价

的各种材料中，铂-8%钨可提供最佳的折衷性能。

## 基底材料

基底或应变计的载体材料应具有若干非常重要的功能，它包括：

(1) 用作控制应变计和坚固地支承丝栅和焊接端子或引线的工具；

(2) 提供一个容易粘贴的表面，以便将应变计粘贴至试验材料上；

(3) 在丝栅和试验材料之间提供一个电绝缘层；

(4) 可靠地把应变从试验材料通过粘接剂传递到应变计丝栅；

这些基本功能引起了对基底材料的性能提出某些特殊要求的必要性，以获得最佳综合应变计性能，它们是：

(1) 高剪切弹性模量，厚度最薄，以保证完全地传递应变；

(2) 强度和柔性，以减少安装期间损坏的可能性并允许在弯曲表面上安装；

(3) 高的延伸能力，以便能用于塑性区的大应变测量；

(4) 很好的粘接性能，以使丝栅与基底之间有很高的“剥离”强度，并使基底与试件之间有良好的粘接；

(5) 固有的高绝缘阻抗，以消除由于低绝缘度造成的并联效应引起的测量困难和误差；

(6) 好的稳定性，蠕变最小；

(7) 在尽可能宽的温度范围内保持其所有的特性。

各种类型的现代基底胶可基本上满足上述各项要求。下面将概述用作应变计基底胶的主要材料。

## 硝化纤维-纸

最初的“纸基”电阻应变计使用的就是这种基底。它是