

电阻应变式传感器

南京航空学院 陶宝祺 王 妮 编著



国防工业出版社

电阻应变式传感器

陶宝祺 王 妮 编著

国防工业出版社

(京) 新登字106号

内 容 简 介

本书是一本全面而又系统地论述电阻应变式传感器的著作。书中介绍了国内外的新技术，还编入了著者多年来的研究成果和实践经验。其内容包括电阻应变式传感器的静态和动态特性及标定装置、电阻应变敏感元件、变换电路、弹性元件的材料与制造工艺、电阻应变式传感器设计中的关键问题，以及力、位移、压力、密度、加速度传感器的结构和设计计算方法。实用性强是本书的特点。

本书可供从事仪器仪表、测试、计量、自动化、衡器、传感器等方面的研究人员及大专院校有关师生参考。

电阻应变式传感器

陶宝祺 王 妮 编著

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168毫米 32开本 印张10⁵/₈ 277千字

1993年8月第一版 1993年8月第一次印刷 印数：0001—3000册

ISBN 7-118-01058-8/TP·135 定价：10.50元

前 言

微电子技术及电子计算机的迅速发展和应用，冲击了传统工业，促进了机械电子工业的兴起和发展。机械电子工业包括：各种类型的机器人，用于航空、航天飞行器上的自动控制装置以及各种数控设备等。如果说机器人的大脑是微型计算机，则机器人的五官是传感器，没有高质量的传感器就不能准确地识别信息，也就没有高质量的自动控制装置及各种数控设备。因此，技术先进的国家非常重视传感技术的发展。美国在新技术预测中认为当代是传感元器件技术的年代，宇宙飞船是高性能传感器的综合体。

电阻应变式传感器由弹性元件、电阻应变敏感元件及变换电路组成。被测的物理量作用在弹性元件上，安装在弹性元件上的电阻应变敏感元件将物理量转换为电阻变化，又通过变换电路将电阻变化转换为电压变化。使用时，根据传感器标定的数据，由传感器的电压变化值确定出被测物理量的值。电阻应变片是目前电阻应变式传感器中使用最广泛的一种电阻应变敏感元件，经过人们的长期研究和应用，并对材料和制造工艺不断改进，研制出了高性能的电阻应变片和高质量的胶粘剂，使传感器的性能提高1~2个数量级；溅射薄膜和扩散型压阻式电阻应变敏感元件的制造工艺不断成熟，使得传感器的尺寸减小，生产方式由手工进入半自动化，提高了电阻应变式传感器的精度和稳定性，降低了成本。

本书系统地介绍了电阻应变式传感器的标定，电阻应变敏感元件、变换电路、弹性元件的材料与制造工艺，传感器设计中的一些关键问题以及力、位移、压力、密度、加速度等电阻应变式传感器的结构和设计计算方法。在书中还介绍了作者的研究成果及国内外的新技术，如谐振式正弦压力发生器、溅射式敏感元件、

双恒流电源电路、柔索张力传感器、多分力传感器、双向位移传感器、最大应变记忆元件、腰形微压传感器、压差式密度计以及弹性元件的新结构和制造中的新工艺。

传感器技术发展迅速，种类繁多。电阻应变式传感器线性好、精度高、稳定性好、应用面广，并且在制造工艺上比较成熟，是目前应用最广泛的一种传感器，它将随着新材料、新工艺、新技术的出现而不断发展。

目 录

第一章 电阻应变式传感器的静态和动态特性	1
§ 1-1 静态特性	2
一、校准曲线及工作特性	2
二、性能指标	6
三、精度	10
§ 1-2 静态力与压力标定装置	11
一、静态力标定装置	11
二、静态压力标定装置	18
§ 1-3 动态特性	24
一、传感器的稳态响应特性	24
二、传感器的瞬态响应特性	26
§ 1-4 动态压力标定装置	27
一、稳态响应特性的标定装置	27
二、瞬态响应特性的标定装置	34
第二章 电阻应变敏感元件	38
§ 2-1 应变电阻转换原理	38
§ 2-2 电阻应变敏感元件	41
一、电阻应变片式敏感元件	41
二、溅射式敏感元件	46
三、半导体电阻应变片式敏感元件	55
四、硅弹性元件上扩散半导体应变薄膜	62
第三章 变换电路	65
§ 3-1 恒压电桥电路	65
一、原理	65
二、电桥的平衡电路	70
三、应用恒压电桥电路的传感器的电路补偿	76
§ 3-2 恒流电桥电路	83
§ 3-3 双恒流源电路	84
一、原理	84
二、应用双恒流源电路的传感器的电路补偿	88

§ 3-4 双恒流源测量电路与恒压电桥测量电路的优缺点比较	90
第四章 电阻应变式力传感器	92
§ 4-1 拉压式力传感器	92
§ 4-2 剪切式力传感器	97
一、梁式	97
二、轮辐式	110
§ 4-3 弯曲式力传感器	112
一、圆环式	112
二、弓形式	115
三、悬臂梁式	116
四、双孔平行梁式	119
五、S型	120
六、柔索张力传感器	126
§ 4-4 扭力传感器	129
一、圆轴式扭力传感器	129
二、杆式扭力传感器	132
三、其他形式的扭力传感器	133
§ 4-5 多分力传感器	135
一、扁环式	135
二、组合式	138
三、四杆式六分力传感器	143
第五章 电阻应变式位移传感器	149
§ 5-1 悬臂梁式位移传感器	149
§ 5-2 弓形位移传感器	159
一、弓形引伸计	159
二、粘贴式弓形位移传感器	166
三、多弓形大位移传感器	170
§ 5-3 双向位移传感器	174
一、测量材料机械性能的双向引伸计	174
二、测量试件拉伸和扭转组合变形的传感器	184
§ 5-4 最大应变记忆元件	185
一、最大应变记忆元件的结构和制作	186
二、最大应变记忆元件的原理	188
三、实验结果	194
第六章 电阻应变式压力传感器	197
§ 6-1 圆膜式压力传感器	200

§ 6-2 圆筒式压力传感器	209
一、圆筒内作用压力	210
二、圆筒外作用压力	214
三、双圆筒压力传感器	214
§ 6-3 腰形筒微压传感器	216
§ 6-4 组合式压力传感器	223
一、隔膜与其他弹性元件组合的压力传感器	223
二、波纹管与梁组合的压力传感器	226
三、弹簧管与悬臂梁组合的压力传感器	229
四、悬挂应变丝的压力传感器	231
第七章 电阻应变式密度计和加速度传感器	232
§ 7-1 电阻应变式密度计	232
一、液体密度的概念	232
二、悬臂梁沉子式密度计	234
三、压差式密度计	237
四、测量容器内液体重量(或液位)的传感器	242
§ 7-2 电阻应变式加速度传感器	243
一、悬臂梁式加速度传感器	247
二、柱式加速度传感器	250
第八章 弹性元件的材料与制造工艺	252
§ 8-1 弹性元件的材料	252
一、对弹性元件材料的要求	252
二、弹性元件的几种常用材料	253
§ 8-2 弹性元件的特殊加工方法	262
一、电火花钼丝切割	262
二、电解加工	263
§ 8-3 电阻应变式传感器中的焊接工艺	265
§ 8-4 弹性元件中的残余应力	274
一、弹性元件中残余应力的来源	273
二、检测弹性元件表面残余应力的方法	280
三、减少弹性元件中残余应力的措施	290
第九章 电阻应变式传感器设计中的几个问题	295
§ 9-1 电阻应变式传感器的使用要求	295
§ 9-2 设计弹性元件时应注意的几个问题	296
一、弹性元件的型式	296

目 录

二、弹性元件上的最大应变	297
三、弹性元件的应变分析	302
§ 9-3 电阻应变片及变换电路的选择	304
一、电阻应变片的选择	305
二、变换电路的选择	315
§ 9-4 传感器外壳及连接件	317
一、力传感器的外壳及连接件	317
二、压力传感器的连接元件	324
参考文献	330

第一章 电阻应变式传感器的 静态和动态特性

理想传感器的输入与输出之间应当是线性关系，并且当输入为零时，输出也为零，即

$$y = ax$$

式中 x 和 y 是不同物理量，例如 x 是力， y 是输出电压， a 是灵敏系数。

实际上传感器的输入与输出之间关系为

$$y = [a_0 + f(x, q, t)]x + s(q, t)$$

式中 a_0 ——设计时的灵敏系数；

q ——随环境变化的部分；

t ——时间。

其中 $f(x, q, t)$ 是传感器的非线性及环境变化对灵敏系数的影响值； $s(q, t)$ 是传感器的零点随着环境的变化值。上式表明实际上传感器的灵敏系数不是定值，而是随环境和时间变化的，而且零点也随环境和时间的变化而变化。

电阻应变式传感器经过人们的长期研究和使用，在弹性元件、电阻敏感元件、电路补偿等方面积累了丰富的经验，使得上式中 $f(x, q, t)$ 和 $s(q, t)$ 控制在很小值，接近于理想传感器。

传感器的输入可分为稳定状态输入和随时间变化输入两种情况。通常将被测量值处于稳定状态时的输入-输出关系称为“传感器的静态特性”；输出量与随时间变化输入量的响应关系称为“传感器的动态特性”。

本章介绍力学量传感器的静态和动态特性以及它们的标定装置。

§ 1-1 静 态 特 性

衡量力学量传感器静态特性的重要指标是满量程输出、非线性及滞后。静态特性的校准方法很多，下面仅介绍常用的方法。

一、校准曲线及工作特性

如果在传感器的测量范围内取 m 个校准点，并进行 n 次循环的校准，则一个校准点上有 n 个正行程校准值和 n 个反行程校准值，全部 m 个校准点共有 $2nm$ 个校准值。

正行程的算术平均值为

$$\bar{y}_{1j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N y_{1ji} \quad (1-1)$$

式中 \bar{y}_{1j} ——第 j 个校准点上正行程校准值的算术平均值，

y_{1ji} ——第 j 个校准点上正行程的第 i 个校准值。

反行程的算术平均值为

$$\bar{y}_{Dj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N y_{Dji} \quad (1-2)$$

式中 \bar{y}_{Dj} ——第 j 个校准点上反行程校准值的算术平均值，

y_{Dji} ——第 j 个校准点上反行程的第 i 个校准值。

校准点 j 上正反行程的平均值为

$$\bar{y}_j = \frac{1}{2} (\bar{y}_{1j} + \bar{y}_{Dj}) \quad (1-3)$$

连接各个校准点上正行程校准点的平均值 $\bar{y}_{11}, \bar{y}_{12}, \dots, \bar{y}_{1m}$ 的曲线称为正行程校准曲线；连接各个校准点上反行程校准点的平均值 $\bar{y}_{D1}, \bar{y}_{D2}, \dots, \bar{y}_{Dm}$ 的曲线称为反行程校准曲线；连接各个校准点上正反行程的平均值 $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_m$ 的曲线称为正反行程的平均校准曲线，或简称为平均校准曲线。

力学量传感器的校准曲线总可以用下面多项式代数方程来表示，即

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (1-4)$$

式中 x —— 输入量;

y —— 输出量;

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ —— 标定系数 (由校准点上正反行程的平均值 \bar{y}_j 求得)。

式 (1-4) 描述了传感器的工作特性。图 1-1(a) 是一般情况下的工作特性, 常见的还有下列三种情况。

(1) 图 1-1(b) 是仅有式 (1-4) 中 x 的奇次项分量, 即

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots \quad (1-5)$$

(2) 图 1-1(c) 是仅有式 (1-4) 中 x 的偶次项分量, 即

$$y = a_2x^2 + a_4x^4 + a_6x^6 + \dots \quad (1-6)$$

(3) 图 1-1(d) 是理想线性情况, 即

$$y = a_1x \quad (1-7)$$

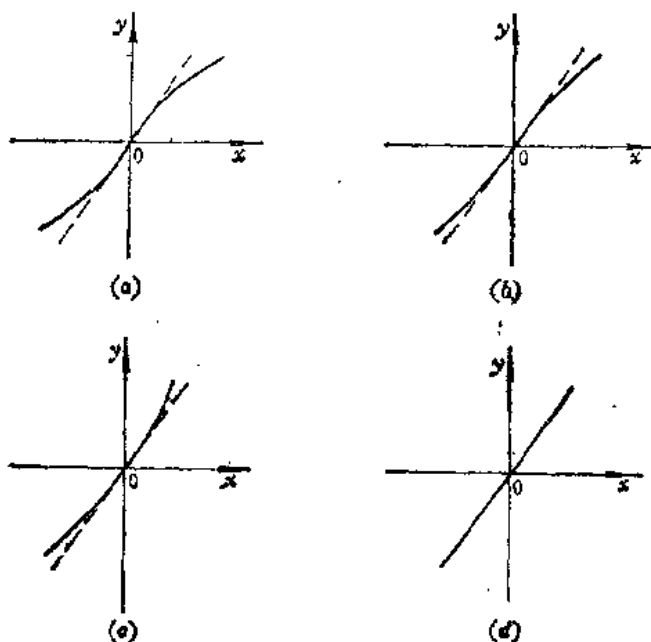


图1-1 传感器的工作特性曲线

式中 a_1 称为灵敏度，它的值为

$$a_1 = \frac{y}{x} = \text{常数} = K \quad (1-8)$$

为了使用上的方便，我们希望传感器的工作特性是线性情况，如果减少测量范围，这时 a_2, a_3, \dots, a_m 很小，可以用式 (1-7) 线性工作特性来代表传感器的输出特性曲线，这个过程称为线性化。线性化的方法有以下几种。

1. 端点连线

它是将力学量传感器测量下限处的平均值 y_L 与测量上限处平均值 y_H 连成直线，作为该力学量传感器的工作特性曲线，见图 1-2 中的直线 CD 。

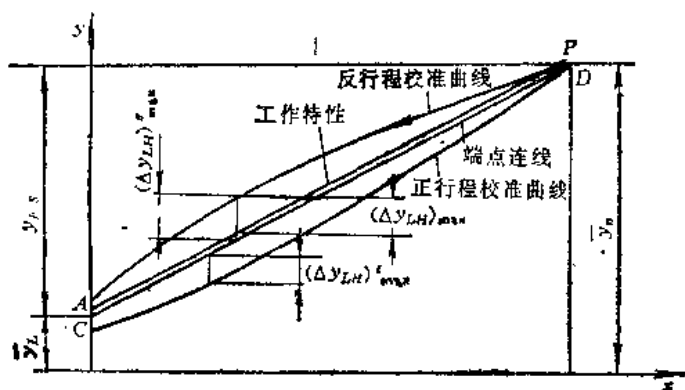


图1-2 力学量传感器的工作特性曲线

设力学量传感器下限处的输入值为 x_L ，该处的输出正、反行程校准平均值为 \bar{y}_{IL} 和 \bar{y}_{DL} ，两者的均值为

$$y_L = \frac{1}{2} (\bar{y}_{IL} + \bar{y}_{DL})$$

又力学量传感器上限处的输入值为 x_H ，该处的输出正、反行程校准平均值为 \bar{y}_{IH} 和 \bar{y}_{DH} ，两者的均值为

$$y_H = \frac{1}{2} (\bar{y}_{IH} + \bar{y}_{DH})$$

连接 (x_L, y_L) 和 (x_H, y_H) 的直线称为端点连线, 用它作为工作特性的方程为

$$y = y_L + \frac{y_H - y_L}{x_H - x_L} x = y_L + \frac{y_{F.S.}}{x_H - x_L} x \quad (1-9)$$

式中 $y_{F.S.}$ 称为满量程输出值。

采用端点连线作为工作特性曲线的原因是计算比较方便, 但它与平均校准曲线的偏差较大。

2. 端点连线平移线

根据端点连线和正行程校准曲线可以求得它们之间的最大偏差 $(\Delta y_{LH})'_{\max}$, 又由端点连线和反行程校准曲线求得两者之间的最大偏差 $(\Delta y_{LH})''_{\max}$ 。然后将端点连线沿着垂直方向平移

$$-\frac{1}{2} [|(\Delta y_{LH})''_{\max}| - |(\Delta y_{LH})'_{\max}|]$$

就得到端点连线平移线, 见图 1-2 中 AP 直线。

端点连线平移线与端点连线平行, 与正行程校准曲线及反行程校准曲线的最大偏差均为

$$(\Delta y_{LH})_{\max} = \frac{1}{2} [|(\Delta y_{LH})''_{\max}| + |(\Delta y_{LH})'_{\max}|]$$

用端点连线平移线作为工作特性方程为

$$y = y_L + \frac{1}{2} [|(\Delta y_{LH})''_{\max}| - |(\Delta y_{LH})'_{\max}|] + \frac{y_{F.S.}}{x_H - x_L} x \quad (1-10)$$

3. 最小二乘法直线

如果有 m 个校准点, 在其中某个 j 校准点上输入值 x_j 时, 正、反行程校准的平均值为 y_j , 则用最小二乘法得出的工作特性方程为

$$y = a + bx \quad (1-11)$$

式中

$$a = \frac{\sum_{j=1}^m x_j^2 \sum_{j=1}^m y_j - \sum_{j=1}^m x_j \sum_{j=1}^m x_j y_j}{m \sum_{j=1}^m x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^m x_j \right)^2}$$

$$b = \frac{m \sum_{j=1}^m x_j y_j - \sum_{j=1}^m x_j \sum_{j=1}^m y_j}{m \sum_{j=1}^m x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^m x_j \right)^2}$$

二、性能指标

力学量传感器的静态性能指标很多，根据传感器的用途还会提出一些特殊的性能指标。这里仅介绍主要性能指标，即满量程输出 $y_{F.S}$ 、直线度 L 、滞后 H 、重复性 R 、零点输出 Z 、零点温度影响 Z_t 、零点漂移 Z_d 、输出温度影响 s_t 、蠕变 c_p 、稳定度 s_b 。

1. 满量程输出 $y_{F.S}$

满量程输出就是测量上限和测量下限处的输出值的差值，即

$$y_{F.S} = y_H - y_L \quad (1-12)$$

式中 y_H ——测量上限处输出的平均值；

y_L ——测量下限处输出的平均值。

y_H 和 y_L 均按校准点来确定。

2. 直线度 L

直线度是表征正行程平均校准曲线与工作特性不一致的程度。如果采用端点连线作为工作特性，见图 1-3。图中正行程校准曲线与工作特性曲线的最大偏差值为 $\Delta\theta_L$ ，则直线度定义为

$$L = \frac{\Delta\theta_L}{y_{F.S}} \times 100 (\% F.S) \quad (1-13)$$

3. 滞后 H

滞后是表征正、反行程校准曲线不重合程度的性能指标。它

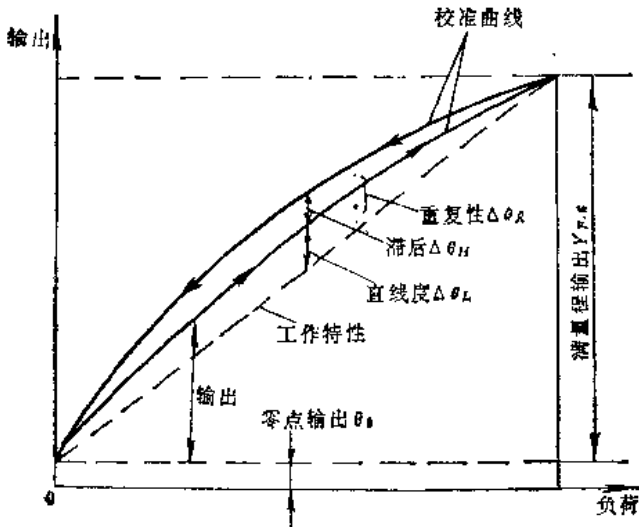


图1-3 直线度、滞后、重复性、零点输出性能指标

是由于力学量传感器中弹性元件、敏感元件及固结材料内摩擦及材料拉、压弹性模量不相同而引起的，计算公式为

$$H = \frac{\Delta\theta_H}{Y_{F.S.}} \times 100 [\% F.S.] \quad (1-14)$$

式中 $\Delta\theta_H$ ——量程内正、反行程校准曲线之间的最大偏差值。

4. 重复性R

重复性是表征在相同条件下输出值重复程度的指标，实际上是精密度指标。计算公式为

$$R = \frac{\Delta\theta_R}{Y_{F.S.}} \times 100 [\% F.S.] \quad (1-15)$$

式中 $\Delta\theta_R$ ——进程重复校准时各点输出极差的最大值。

5. 零点输出Z

如果在没有负荷下测量 m 次，则零点输出为

$$\theta_0 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \theta_{0j}$$

式中 θ_{0j} ——第 j 次校准时，零负荷输出读数。

通常用满量程输出的百分比表示零点输出，即

$$Z = \frac{\theta_0}{y_{F.S}} \times 100 [\% F.S.] \quad (1-16)$$

对于负荷传感器的零点输出应满足表 1-1 的规定。

表 1-1 不同传感器等级要求的零点输出

传感器等级	A	B	C
Z (%F.S)	±1.0	±2.0	±5.0

6. 零点温度影响 Z_t

按下式计算出在上限温度下的影响

$$Z_{tH} = \frac{\theta_{0H} - \theta_{0t}}{\frac{y_{F.S}}{T_H - T_t}} \times 100 [\% F.S./10K] \quad (1-17a)$$

按下式计算出下限温度时的影响

$$Z_{tL} = \frac{\theta_{0L} - \theta_{0t}}{\frac{y_{F.S}}{T_L - T_t}} \times 100 [\% F.S./10K] \quad (1-17b)$$

式中 T_H , T_t , T_L ——分别为校准时的上限温度、标准校准温度和下限温度；

θ_{0H} , θ_{0t} , θ_{0L} ——分别为与 T_H , T_t 和 T_L 相对应的零点输出的平均值。

校准结果处理时，取 Z_{tH} 和 Z_{tL} 两者绝对值较大者作为最后的零点温度影响 Z_t 。

7. 零点漂移 Z_d

传感器预热后，测量传感器在 2h 内的零点漂移量，计算公式为