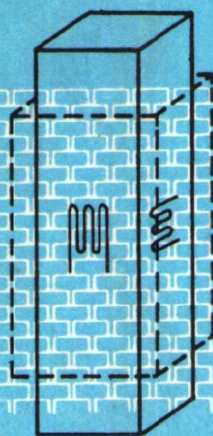


计量检定参考丛书

负荷传感器检定 测试技术

李庆忠 编著



931

33

国 计 量 出 版 社

(计)(量)(检)(定)(参)(考)(丛)(书)

负荷传感器检定测试技术

李庆忠 编著

中国计量出版社

内 容 提 要

本书结合有关国家标准和检定规程,全面系统地论述了负荷传感器的名词术语,试验方法和检定技术,简单地介绍了负荷传感器的用途、种类、组成以及应变式负荷传感器的基本原理。本书对力值计量中必不可少的各种力标准机的工作原理、误差分析和检定测试方法给予了详细地论述。本书对帮助广大读者解决力值的计量检定、实际使用和测试维护中的具体问题有很强的科学性和实用性。

本书可供计量系统、生产科研部门、厂矿企业及商业运输等有关工程技术人员阅读,可作为负荷传感器培训班教材,也可供高等院校有关专业的师生参考。

计量检定参考丛书 负荷传感器检定测试技术

李庆忠 编著
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 6.125 字数136千字
1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷
印数 1—55 00
ISBN 7-5026-0371-9/TB·303
定价 4.30 元

序 言

自从1938年美国科学家爱德瓦尔德·埃和西蒙斯(Edward · E, Simmons · JR)发明了粘贴式电阻应变计并用于静态和动态应变测量以来,用应变计测量力值的技术在全世界范围内获得了广泛而迅速的发展。应变式负荷传感器是应用最多的元件。

我国从60年代初开始研究和生产负荷传感器。到目前,我国在引进国外高精度传感器(主要从美国、西德及日本等国引进)的同时,自己的研究、制造和检测技术有了很大发展。近十余年,计量部门、机械电子行业以及冶金、国防系统均研制了量程从几十牛到几兆牛,单项指标达 10^{-4} 或更高的多种型号、多种用途的应变式传感器,并得到了广泛地应用。

各种负荷传感器生产与使用的迅速发展,要求计量部门对其进行全面、准确的测试、检定,并给出一致可靠的技术指标。为此,我国有关单位建立了各种力标准机和其它检定设备。为了对负荷传感器名词术语、检定测试方法、数据处理及检定结果的评估能有权威性的统一规定,国家技术监督局颁布了《JJG 391—85负荷传感器试行检定规程》。由于篇幅所限,无法将国内外有关测试检定技术纳入其内。

鉴于上述情况,作者在大量查阅国内外有关资料的同时,总结了若干系统试验和多年检定测试经验,经过整理于1982年写出初稿。先后于1982年冬、1983年春、1988年和1989年夏举办的全国测力称重计量人员学习班宣讲,获得

良好效果。其间，作者注意到了国内外有关技术的最新发展，对本书稿多次修改，并征求了有关专家意见，于1989年秋定稿。作者将本书作为《负荷传感器检定规程》的参考书奉献给读者，以便正确理解和执行该规程。

本书引用了国内外同行专家大量科研成果，并将有关资料目录附于书后。在此对这些资料的作者表示衷心感谢。在本书撰写过程中得到郭景刚、潘子琦、杜铭心、吴德礼、范永轩、唐煜等同志的大力帮助和支持，在此表示诚挚的谢意！

李庆忠

1990年5月于意大利都灵

目 录

第一章 绪 论	(1)
§ 1.1 传感器的用途.....	(1)
§ 1.2 传感器的种类.....	(2)
§ 1.3 负荷传感器的分类.....	(5)
§ 1.4 传感器的组成.....	(8)
§ 1.5 应变式负荷传感器的基本原理.....	(9)
第二章 名词术语	(16)
§ 2.1 各种负荷.....	(16)
§ 2.2 拟合直线.....	(18)
§ 2.3 负荷特性.....	(30)
§ 2.4 其它特性.....	(43)
第三章 试验方法	(16)
§ 3.1 试验条件.....	(46)
§ 3.2 力标准机.....	(56)
§ 3.3 负荷试验.....	(79)
§ 3.4 电气试验.....	(88)
§ 3.5 温度试验.....	(91)
§ 3.6 蠕变试验.....	(95)
§ 3.7 固有频率试验.....	(105)
§ 3.8 非轴向负荷试验.....	(108)
第四章 检定	(115)
§ 4.1 技术要求.....	(115)
§ 4.2 检定.....	(126)
参考文献.....	(135)
附录	(139)
附录一 JJG 391—85负荷传感器试行检定规程	(139)
附录二 负荷传感器名词术语	(162)
附录三 负荷传感器试验方法的内容	(173)

第一章 绪 论

§ 1.1 传感器的用途

传感器是一个完整的测量装置（或系统），它能 把 被测物理量转换为与之有确定对应关系的电量、机械量或其它输出量，以满足信息的传输、处理、记录、显示和控制等要求。

传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。如果没有传感器对原始参数进行精确可靠的测量，那末，无论是信号转换或信息处理，或者最佳数据的显示与控制，都将难以实现。因此可以说，没有精确可靠的传感器就没有精确可靠的自动检测和控制系统。近代的电子技术和电子计算机为信息的转换与处理提供了极其完善的手段，近代检测与控制系统正经历着重大的变革，但是，如果没有各种传感器去检测大量原始数据并提供信息，那么电子计算机也无法发挥其应有作用。

负荷传感器是传感器的一种，在力的测量、传递、校准和称重技术中有着广泛地应用。例如，在国内外的各种力标准机的力值比对中，用负荷传感器可以使比对精度由 10^{-4} 提高到 10^{-5} 量级。因此，稳定度高、蠕变小的负荷传感器已成为力值传递不可缺少的手段。性能良好并且用途广泛的电子材料试验机的力值、变形、应变的测量和控制也是由相应的传感器完成，因而使得静态电子试验机、动静万能试验机得到愈来愈广泛地发展。机床车刀的切削力测量由多分量

的压电式负荷传感器来完成。钻机钻头的扭矩和压力、轮船锚链的拉力、机车和拖拉机的牵引力、轧机的轧制力、火箭的发射力、核爆炸的冲击力，以及运动员的蹬力、肌肉纤维的拉力、牙齿的作用力、血管的压力……的测量均由各种各样的传感器来完成。同样，在各种称量技术中也大量地使用着负荷传感器。例如：导弹、卫星、火箭的称重，飞机、火车、汽车的称重，钢铁、煤炭、矿石的称重，石油、化工产品的称重，各种工业原料、材料、成品的称重，各种农副产品，粮食、食油、蔬菜、水果等物品的称重，所有这些称重正在与日剧增地采用负荷传感器，以便提高精度，实现自动测量、显示与控制。因此可以说，在整个测力与称量技术中，负荷传感器几乎涉及到它的每一个部门。

§1.2 传感器的种类

利用传感器可以检测各种物理量，传感器本身又是按不同工作原理构成，根据传感器的输入、输出及结构原理等的不同，对其有不同的分类方法。

一、按传感器输出量性质分类

(1) 参量传感器 属于参量传感器的有：触点传感器、电阻传感器（电位器、热电阻、光敏电阻、气敏电阻、压敏电阻传感器等）、电感传感器（自感、差动变压器、压磁、涡流传感器等）、电容传感器、气动传感器等等；

(2) 发电传感器 属于发电传感器的有：光电池、热电偶、磁电传感器、压电传感器、霍尔传感器等；

(3) 脉冲传感器 属于脉冲传感器的有光栅、磁栅和感应同步器等；

(4) 特殊传感器 不属于以上三种的皆属于特殊传感器，如振弦、振筒传感器、超声波探头、核辐射探测器、电

磁检测装置、激光检测装置、工业电视检测装置等。

二 按被测量（即输入量）的性质分类

(1) 机械量传感器——几何尺寸、几何形状、力、速度、加速度、振动、粗糙度、产品计数传感器等。

(2) 热工量传感器——温度、温差、压力、压差、流量、气体成分传感器等。

(3) 探伤传感器——表面探伤、内部探伤等传感器。

三 按传感器的结构分类

(1) 直接传感器 这种传感器是一个单独而又直接将
被测量转换成所需输出量的传感器。

图 1-1 (a) 所示为一电位器式压力直接传感器，它是由三个简单的元件（波纹管、杠杆和电位器）串联而成，其方块图见图 1-1 (b)，它的变换顺序是：先将压力 p 的变化变成位移 X_1 ，位移 X_1 又变成位移 X_2 ，再将位移 X_2 转换成电阻 R 的变化。传感器中最重要的是敏感元件（波纹管），其它部分是中间元件。

直接传感器的结构最简单，在一些场合下由于它灵敏度低，易于受外界干扰影响往往不能满足要求。

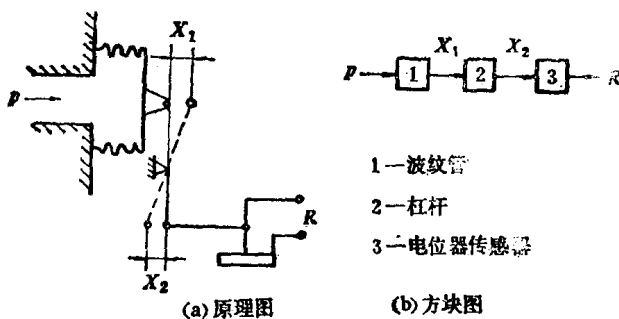
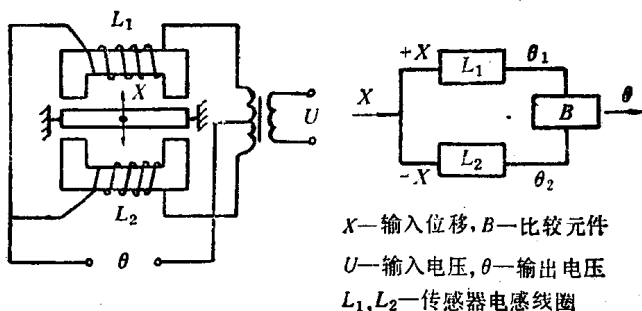


图 1-1 电位器式压力直接传感器

(2) 差动传感器 差动传感器组成的基本原理是：把两个相同类型的传感器接在输出回路中，使两个传感器所经受的相同干扰信号相减，而有用的被测信号相加。这种要求不仅能用相应电路来实现，还可用两个传感器在结构上组成差动形式来完成。在图 1-2 中给出了传感器的原理图和方块图。另外，应变式传感器组成全桥电路也是一种差动补偿措施。



(a) 原理图

(b) 方块图

图 1-2 自感差动传感器

差动传感器可以获得对温度等干扰量的补偿。当输出为某一定值时还能得到全补偿。传感器差动接法可使特性曲线的非直线性得到改善，差动传感器的灵敏度比直接传感器的灵敏度高一倍。

(3) 补偿传感器 这种传感器是一个显示装置的指示自动地跟随被测量变化的位式随动系统。因此，它的静态特性和动态特性较好。其特点有：在输出端可以获得足够大的功率；负载变化很少影响输出量；在所有量程内能够补偿由于干扰产生的误差；输入量和输出量间可以是任何形式的函数转换关系等。但是补偿传感器结构复杂，成本较高。

§ 1.3 负荷传感器的分类

负荷传感器——在负荷作用下能输出与其成一定对应关系的电信号的装置。它实际上就是被测量为力或重量的传感器。其输出也可以是机械的、气动的或液压的。目前的负荷传感器绝大多数都是转换成电信号。

按着目前的习惯，根据测量原理不同，负荷传感器又分为若干种。

一 应变式负荷传感器 (Strain Gage Load Cell)

利用应变的变化进行负荷测量的传感器。目前这种传感器占负荷传感器95%以上。因此是我们校准的重点。应变式传感器和其它类型传感器相比有以下特点：

- (1) 测量范围广 目前测力范围已达 $0.05\text{ N} \sim 10^7\text{ N}$;
- (2) 测量精度高 单项指标已达 10^{-5} 量级;
- (3) 性能稳定 工作可靠;
- (4) 适应性好 能在各种环境条件下工作。这类传感器可在大加速度和振动条件下工作，只要进行适当的结构设计及选用合适的材料，应变式负荷传感器能在高低温、强腐蚀及核辐射等条件下可靠地工作。

二 压电式负荷传感器 (Piezoelectric Load Cell)

压电效应——某些电介质物质，在沿一定方向受到外力的作用而变形时，内部会产生极化现象，同时在其表面上产生电荷，当外力去掉后，又重新回到不带电的状态。这种将机械能转变为电能的现象，称为“顺压电效应”。相反，在电介质的极化方向上施加电场，它会产生机械变形。这种将电能转换为机械能的现象称为“逆压电效应”。具有压电效应的电介质称为压电材料。在自然界中，石英等几十种晶体的压电效应比较强，可用于实际测量中。另外人工制造的

压电陶瓷，如钛酸钡、硝钛酸铅等多晶压电材料相继问世，获得了越来越广泛的应用。压电式负荷传感器的测量见图 1-3。

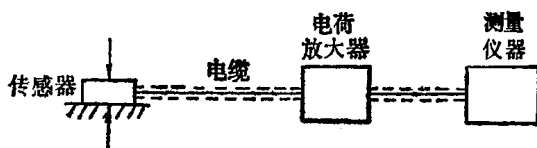


图 1-3 压电传感器的测量

由于压电式传感器的信号较小，内阻抗相当高。因此，要求用低噪声的电缆线传输信号，电荷放大器的输入阻抗要足够高。测量仪器一般用峰值电压表或峰值指示器。

压电式传感器的特点：固有频率高（30~60 kHz），上升时间短（7~20 μs ），频率特性好，能测量从准静态力到疲劳力、冲击力等高速动态力。此外，这种传感器还具有结构坚实、体积小、重量轻（400 kN 的传感器的重量约为 365g），使用寿命长等优点。Kistler 公司已成批供应 15 kN~1 MN 传感器（Type 9001-9091）。

三 压磁式负荷传感器 (Magneto-elastic Load Cell)

压磁效应——铁磁体受到机械应力的作用时，铁磁元素利用这部分机械能改变各磁畴的磁矩，在机械应力作用的方向上引起了磁性的变化，这种现象称为压磁效应或称磁弹性效应。压磁效应是磁滞伸缩效应的逆效应。

磁滞伸缩效应——在外磁场作用下，铁磁材料外形尺寸会发生变化，这种现象被称为磁滞伸缩效应。

这种传感器的量程，目前国内为 10 kN~25 MN。单项

指标为 $(1 \sim 0.5) \times 10^{-2}$ 。瑞士 ASEA 所制 $0.1 \sim 1 \text{ MN}$ 的传感器，单项指标达 5×10^{-4} 。其优点是：输出功率大（可不加放大器，直接读取信号）；内阻低；抗干扰力强；对使用条件要求低，一般可在有灰尘、水蒸汽和腐蚀性气体等恶劣工业环境中使用；过载能力强（安全过载负荷率为 $300\% \text{FS}$ ）。

传感器的供电一般用交流恒流源。输出经相敏整流、平滑滤波，得到直流电压后由数字表测读或作为控制信号控制有关仪表和机器。这种传感器主要用于冶金工业中轧钢机轧制压力的测量，以便实现轧机的自动化和钢板厚度的自动控制。

四 电感式负荷传感器 (Inductive Load Cell)

此类传感器利用电感的变化进行负荷测量。

五 电容式负荷传感器 (Capacitive Load Cell)

该类传感器利用电容的变化进行负荷测量。

电感式和电容式两种负荷传感器分辨率高，适用于小负荷测量。例如：HBM 公司生产的 Q 11 型传感器，最小额定负荷达到 0.05 N 。

六 压阻式负荷传感器 (Piezoresistive Load Cell)

利用压阻效应进行负荷测量的传感器。

这种传感器虽然精度指标不高，但由于灵敏度高（约为应变式传感器的几十倍甚至上百倍），测量简单，因此在测量精度要求不高的地方得到了广泛地应用。

此外，负荷传感器还可以按量程分类：大量程大于 1 MN ；中量程 $1 \text{ MN} \sim 10 \text{ kN}$ ；小量程 $10 \text{ N} \sim 10 \text{ kN}$ ；微小量程 $< 10 \text{ N}$ ；

按指标优劣分类——高精密级，精密级，普通级；

按使用温度分类——高温 $> 100^\circ\text{C}$ ；常温 $100 \sim -40^\circ\text{C}$ ；低温 $< -40^\circ\text{C}$ 。按用途分类，分为测力传感器和称重传感

器。还有些其它分类方法。

§ 1.4 传感器的组成

传感器作为一个完整的测量装置一般由敏感元件、传感元件和测量电路三部分组成，有时还加上辅助电源。其方块图见图 1-4。

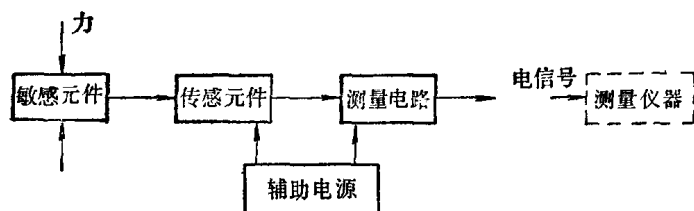


图 1-4 传感器的组成

敏感元件 (Sensing element)——传感器中直接感受负荷的元件。例如：应变式负荷传感器的弹性体；压磁式负荷传感器的铁磁体；压电石英负荷传感器中的压电石英，它同时也是传感元件。这种直接输出电量，即敏感元件同时又是传感元件的还有温度传感器中热电偶和热敏电阻等。

传感元件 (Transition element)——在传感器中产生输出信号的电气部分，又称变换器。

传感元件在许多情况下不直接感受负荷，只感受与被测负荷成确定关系的其它非电量，然后输出电量。例如应变式负荷传感器中的应变计，它感受敏感元件——弹性体的应变后，其阻值变化，使电路输出电压。

如上所述，传感元件又可以直接感受被测负荷，输出与被测负荷成确定关系的电量，如压电石英传感器中的石英晶体。

测量电路——能把传感元件输出的信号转换成便于显示、记录、控制和处理的有电信号的电路。测量电路视传感元件的类型而定。例如应变式传感器的测量电路除包括传感元件——应变计的全桥外，还包括若干调整与补偿元件。

此外，无源传感器如应变式、压磁式、电感式等传感器尚需供电电源，为传感元件和测量电路供电。在应变式负荷传感器中即为桥压源。

在传感器的校准中，输出的电信号一般均送到数字仪表中进行测量显示。

§ 1.5 应变式负荷传感器的基本原理

该种传感器是将被测量负荷所产生的金属弹性变形转换成电阻变化的负荷检测元件。它由弹性体、应变计和测量电桥三部分组成。现以圆筒状应变式传感器（图 1-5）为例说明各部分的基本工作原理。

在圆柱形弹性体中部，对称的贴四个应变计，其中两个

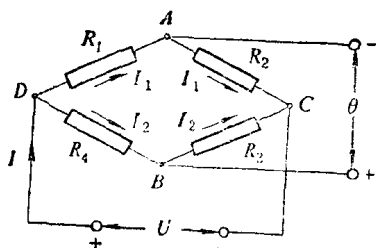
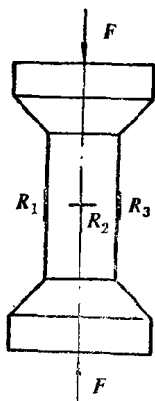


图 1-5 圆筒状应变式传感器

图 1-6 传感器应变计全桥

相对的应变计沿圆筒轴线贴，另外两个相对的应变计垂直圆筒轴线贴。四个应变计组成全桥（图 1-6）。

一 电阻丝的应变效应

电阻应变计是用直径约为 $0.020\text{ mm} \sim 0.030\text{ mm}$ 的具有高阻率的电阻丝制成，如图 1-7 所示。为了获得较高电阻

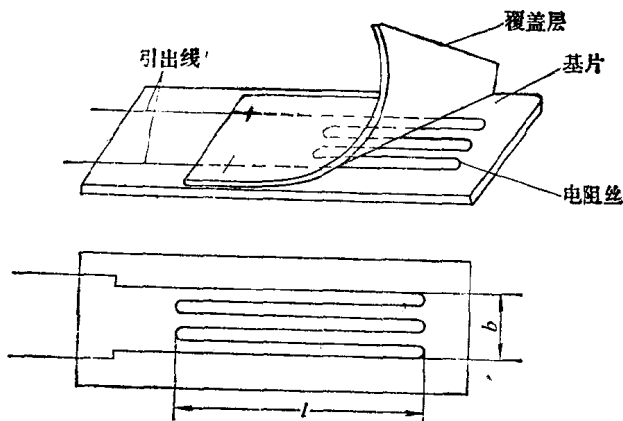


图 1-7 电阻应变计

值，电阻丝排列成栅网状，并粘贴在绝缘的基片上，电阻丝两端焊有引出导线，栅网上面涂有覆盖层（保护用）。图中， l 称为应变计的标距或工作基长； b 称为应变计的工作宽度； $b \times l$ 称为应变计的使用面积；应变计的规格一般以使用面积和电阻值来表示，如 $3 \times 5\text{ mm}^2$ ， $120\ \Omega$ 。

单根导线的电阻 R 由下式表示

$$R = \rho \frac{l}{a}$$

式中：

ρ ——电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)，

l ——电阻丝长度 (m);

a ——电阻丝的截面积 (m^2)。

如果沿整条电阻丝长度作用均匀应力, 由于 l 、 ρ 、 a 的变化引起电阻 R 的变化, 对上式取自然对数和全微分得:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{da}{a} + \frac{d\rho}{\rho}$$

或

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1-1)$$

对于直径为 d 的圆形截面的电阻丝

$$\frac{\Delta a}{a} = 2 \frac{\Delta d}{d}$$

根据材料力学理论, 横向收缩和纵向伸长之比为泊松比:

$$\frac{\Delta d}{d} = -\mu \frac{\Delta l}{l}$$

代入式 (1-1) 得:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \\ &= \left(1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} \right) \frac{\Delta l}{l} = K \frac{\Delta l}{l} = K\varepsilon \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中:

ε ——应变丝的纵向应变。

此式即是应变效应的表达式。应变灵敏系数 (又称应变率 Gage factor):