

工程测试技术丛书

# 电阻应变式 压力传感器



人民铁道出版社

8

## 内 容 简 介

本书介绍工程测试中常用的电阻应变式压力传感器的构造、原理和使用方法，包括弹性元件，土压传感器，气体、液体压力传感器，荷重传感器，量测钢筋和混凝土的应变、应力传感器，传感器在静力触探中的应用，以及传感器的组装工艺及其检验与标定等内容。

本书供工程测试有关人员参考。

工程测试技术丛书

### 电阻应变式压力传感器

铁道部科学研究院铁道建筑研究所编

人民铁道出版社出版

责任编辑 蒋传漪

封面设计 翟 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{2}$  印张：7.625 字数：168 千

1979年12月 第1版 1979年12月 第1次印刷

印数：0001—11,500册

统一书号：15043·6193 定价：0.63 元

## 前 言

目前在铁路桥梁、隧道、房屋建筑等工程结构的研究、设计、建造和使用当中，为了验证设计理论，选定设计方案，鉴定工程质量和分析使用中产生的问题等，往往需要对工程结构进行静态或动态试验。测试技术，特别是电测技术，乃是获得各种试验数据的基本手段。此外，电测技术在机车、车辆、飞机、船舶和各种机械设备的研究试验工作中，也得到了广泛的应用。

随着我国社会主义建设事业的迅速发展，国防、工农业生产 and 科学研究部门，需要进行工程结构的试验日益增多，测试技术本身也相应地向前发展。为了便于有关从事工程结构测试人员初步掌握测试技术，并不断总结和提高测试技术水平，我们根据各兄弟单位的宝贵经验和有关资料，同时加上自己在实际工作中的粗浅体会，编写了这套工程测试技术丛书，计划包括电阻应变片，电阻应变仪，光线示波器，电阻应变式压力传感器，振动测试和分析，试验数据处理等册，重点介绍测试技术中的基本知识和仪器的原理、使用方法和一般维修技术。

本书初稿由刘宝有同志写成，参加补充修改的有下列同志：邵根大（第一章和第五章第一节），胡中玉（第五章第二、三节），骆文海（第二章和第七章），张畚（第三章），赵庆新（第四章和第六章）。袁祖荫等同志参加了本书的审阅工作。

编 者

## 目 录

第一章 概述	1
第一节 传感器在量测系统中的重要作用	1
第二节 常用传感器的分类及其工作原理	3
第三节 电阻应变式传感器的广泛应用	13
第二章 弹性元件	21
第一节 弹性范围内的应力和应变	21
第二节 弹性元件的作用和基本特性	25
第三节 弹性元件的热处理及制造工艺	30
第四节 弹性元件的形式及其计算	35
第三章 电阻应变式土压传感器	60
第一节 电阻应变式土压传感器的结构形式	62
第二节 电阻应变式土压传感器的设计	72
第三节 土压传感器的埋设	104
第四章 电阻应变式气体、液体压力传感器	109
第一节 薄板式压力传感器	109
第二节 薄壁圆筒式压力传感器	116
第三节 双弹性元件压力传感器	126
第四节 孔隙水压力传感器	127
第五章 其它用途的电阻应变式传感器	131
第一节 电阻应变式荷重传感器	131
第二节 量测钢筋和混凝土的应变、应力传感器	147
第三节 电阻应变式传感器在静力触探中的应用	157

第六章 传感器的组装工艺 .....	163
第一节 传感器组装前的准备 .....	163
第二节 传感器的组装 .....	171
第七章 传感器的检验和标定 .....	181
第一节 传感器性能的检验 .....	181
第二节 传感器的静标定 .....	187
第三节 传感器的动标定 .....	210
附录 I 波纹管标准 .....	221
附录 II 无油腔土压传感器的弹性薄板厚度 计算表 .....	228
附录 III 薄板式压力传感器的弹性薄板的频 率计算表 .....	231
附录 IV 耐油橡胶 O 型密封圈的规格尺寸 .....	235
附录 V 圆形箔式应变片的设计和制造方法 .....	236

# 第一章 概 述

## 第一节 传感器在量测系统中的重要作用

### 一、非电量电测法和传感器

在工程结构试验中，除用机械式量测法外，还广泛采用一种非电量电测法，进行各种力学参数的测定。

所谓非电量电测法，是把需要量测的非电量（如压力、应力、应变、加速度、位移等），通过一种器件转换成电量（如电阻、电容、电感、电压等），再依一定的关系换算成需要测定的力学参数的量测方法。其中把非电量转换成电量的器件称为传感器，也称换能器，或称探头。

非电量电测法的主要优点是：

- (一) 灵敏度高，量程范围大；
- (二) 量测结果精度高；
- (三) 能远距离量测，且可在同一时间内进行多点测量；
- (四) 既能用于静态量测，又能用于动态量测。

正因为非电量电测法有以上的优点，所以它已成为工程测试中的一个主要量测手段。随着现代工业生产和科学技术的发展以及工程结构的研究对量测提出更高和更精确的要求，非电量电测法也在不断完善和迅速发展。

非电量电测法通常按下面的步骤开展工作：

- (一) 根据测试目的和内容选定传感器、放大器和记录仪器成套的量测系统，并确定电源供给方式；
- (二) 对传感器进行系统标定后才能测试；

(三) 测试后对数据进行判读和处理。

## 二、传感器的作用 and 对其质量的要求

在传感器、放大器和记录仪器组成的量测系统中，传感器是核心部分，因为它是与被测物直接接触的，它能不能真实地把被测物的受力状态感受且按恒定的关系反映出来，在很大程度上决定着测试工作的好坏。经验说明，有些量测工作的失败，原因很多，而传感器的是否正常工作，往往是一个重要方面，因此为了保证量测工作能够取得满意的结果，从事量测工作的人员的首要任务是选定或设计制造出质量优良的传感器。

工程结构的试验，尽管测试目的和工作条件不同，例如有的是验证设计理论，有的是为了进行施工安全管理，有的是为了了解结构在使用时的工作状态；又如，有的是在实验室内进行试验，有的是在野外进行长期观测试验；但是，对所使用的传感器的基本要求却是一样的，是应该满足的。

评定传感器质量优劣的主要指标是：

1. 精确度要高。这是要求传感器所测定的值既准确又精密，也就是要求测定值和真值的偏差尽可能小，而且，在重复测定时，测定值的一致程度要好。

2. 灵敏度要高。这是要求传感器能够反应最小非电量的能力要高。

3. 线性度要好。这是要求传感器的输出量的变化和相应的输入量的变化之间呈直线关系。

4. 稳定性要好。这是要求传感器在指定的条件下，在较长的时间内正常地工作。

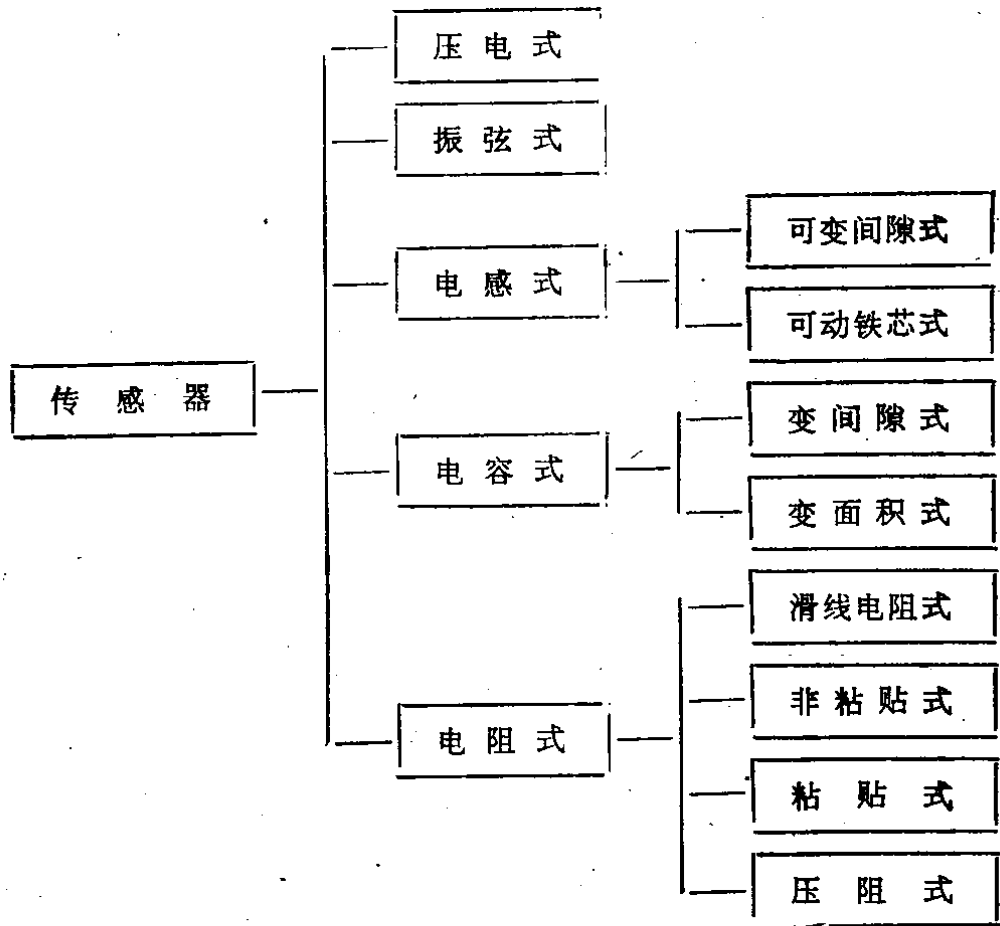
5. 动态特性要好。这是对用于进行动态试验的传感器的特殊要求，传感器的自振频率和被测信号频率之比要符合

一定要求，以减小由振幅和相位的畸变所造成的误差。

除此以外，还要求传感器结构简单，经久耐用、密封防潮，且具有一定的抗震性能和对量测环境有较强的适应性。

## 第二节 常用传感器的分类及其工作原理

随着非电量电测法在测试技术中的广泛应用，量测各种参数的传感器也获得了日新月异的发展，如今传感器的名目种类极其繁多，分类标准也不统一。现就工程测试中常用的传感器的工作原理、特点和应用范围作一概要的介绍。



### 一、压电式传感器

当沿着某些晶体介质的电轴线方向施加作用力时，在垂



直于电轴线的晶体平面上即产生电荷。当作用力除去时，电荷也随之消失。通常把晶体的这个特性称作压电效应，见图 1—1。应用晶体压电效应原理制成的传感器称作压电式传感器。

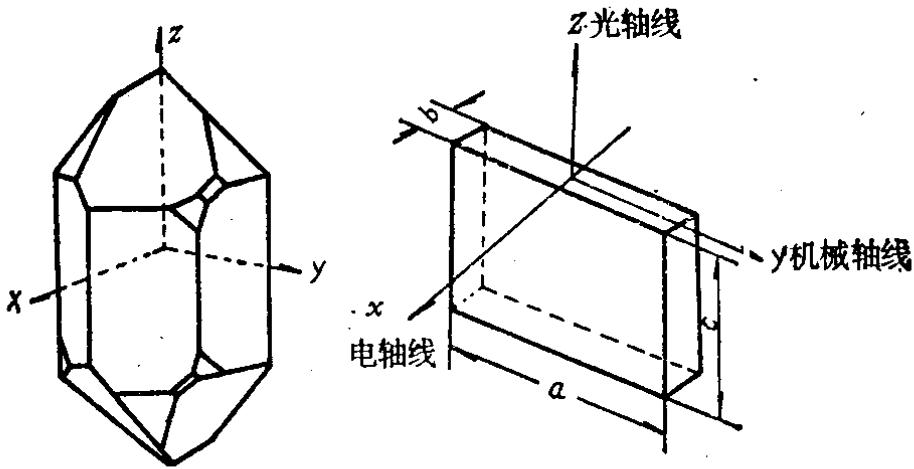


图 1—1 天然石英与晶体片

沿晶体电轴线施加作用力，在垂直于电轴的平面上产生的电荷可用下式表示：

$$Q = K_1 P \quad (1-1)$$

式中  $Q$  —— 电荷 (库伦)；

$K_1$  —— 压电常数 (库伦/公斤)；

$P$  —— 作用力 (公斤)。

用在传感器中的压电晶体材料要求：

1. 具有特别强的压电效应 (即压电常数要大) 和特别大的介电常数；
2. 在高温下不失去压电性能；
3. 具有一定的机械强度。

表 1—1 列出常用晶体材料的特性。

压电式传感器的主要特点是动态特性好，是其他传感器所不能比拟的，它一般常用于量测快速变化过程的信号，如

常用晶体材料特性

表 1—1

特 性	晶 体				
	石 英	电 气 石	铌 酸 锂	锆 钛 酸 铅 (PZT)	锆 钛 锡 酸 铅 (ZTS)
压 电 常 数 (库伦/克重)	$2.3 \times 10^{-14}$	$1.9 \sim 2.08 \times 10^{-14}$	$6 \times 10^{-14}$	$400 \times 10^{-14}$	$60 \times 10^{-14}$
密 度 (克/厘米 <sup>3</sup> )	2.6	5.5	4.6	7.0~7.5	7.5~8.0
介 电 常 数	4.55	6.3	32	1200	300~500
弹 性 模 量 (达因/厘米 <sup>2</sup> )	$8.6 \times 10^{11}$	$17 \times 10^{11}$	$25 \times 10^{11}$	$8 \times 10^{11}$	/
允许机械应力 (克重/厘米 <sup>2</sup> )	$10^8$	$2.8 \times 10^8$	$\geq 0.5 \times 10^8$	$2.0 \times 10^8$	/

在化学爆炸试验中量测压力或加速度时，即可选用压电式传感器。但是出现在晶体上的电荷容易在量测电路中消耗掉，也容易受外界电场作用的影响。因此对传感器的绝缘性能和量测系统中的屏蔽性能，需要提出较高的要求。

压电式传感器一般与直流电荷放大器、电子示波器组成量测系统进行测试。

利用晶体压电效应原理制成的压电式压力传感器见图 1—2。

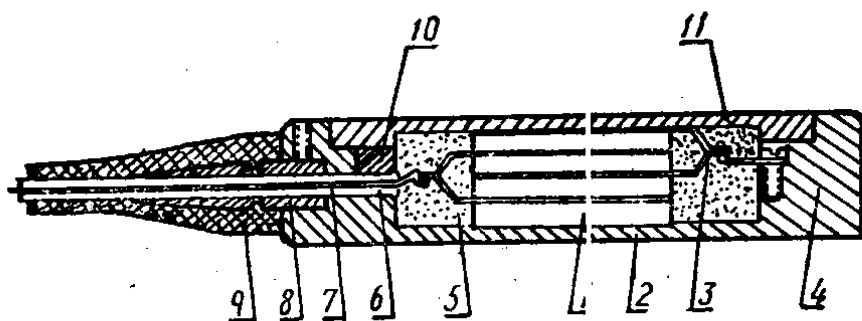


图 1—2 压电式土压传感器

- 1——石英晶体片；2——弹性薄板；3——圆形铜箔电极；4——外壳；5——防水材料；6——绝缘套；7——导线；8——导线塞子；9——导线外皮；10——压线板；11——上盖。

## 二、振弦式传感器

一根钢弦拉紧程度的变化，其自振频率将随之发生相应变化，利用这一原理制成的传感器称作振弦传感器。

钢弦的自振频率和它的应力之间的关系可用下式表示：

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (1-2)$$

式中  $f$  —— 钢弦的自振频率（赫芝）；  
 $l$  —— 钢弦在两支点之间的长度（厘米）；  
 $\sigma$  —— 弦中应力（公斤/厘米<sup>2</sup>）；  
 $\rho$  —— 弦的材料密度（公斤·秒<sup>2</sup>/厘米<sup>4</sup>）。

振弦式土压力传感器如图 1—3 所示。其工作过程是，当弹性薄板 1 受力弯曲后，钢弦 7 的内应力将发生变化，弦的自振频率也发生相应的变化，利用脉冲发生器对钢弦进行脉冲励磁产生振动，调振荡器的振荡频率使之与传感器中钢弦的振动频率相一致，从刻度盘上读出频率大小，然后根据

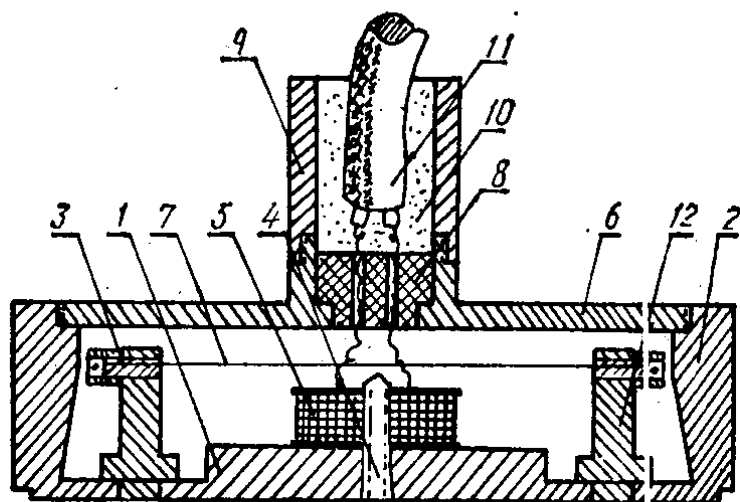


图 1—3 振弦式土压传感器

1 —— 弹性薄板； 2 —— 底座； 3 —— 钢弦夹紧装置； 4 —— 铁芯；  
 5 —— 电磁线圈； 6 —— 封盖； 7 —— 钢弦； 8 —— 塞子； 9 —— 引  
 线管套； 10 —— 防水材料； 11 —— 电缆； 12 —— 钢弦支架。

事先标定的弦的自振频率和薄板上压力的关系曲线，即可定出压力值的大小。

振弦式传感器与脉冲发生器，标准振荡器和低频放大器组成量测系统。

振弦式传感器的特点是稳定性能好，对量测环境的适应能力较强，并有较高的灵敏度，所以它特别适用于长期观测试验，国内外隧道衬砌周边压力的量测，往往采用这种传感器。

### 三、电感式传感器

接在交流电路中绕有线圈的铁心与衔铁之间间隙的变化，或是可动铁心在绕有线圈的螺线管中位置的变化，都会使线圈中的阻抗产生相应变化。基于这一原理制成的传感器，称电感式传感器。其基本形式见图 1—4。

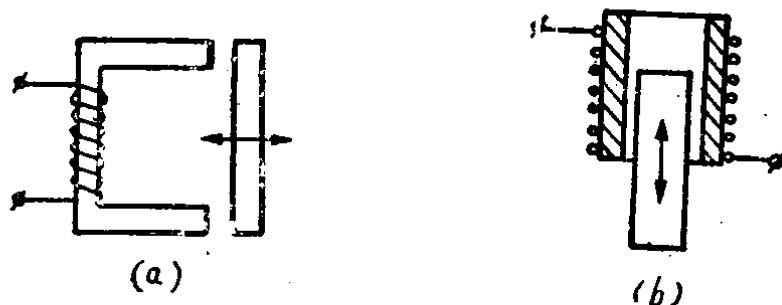


图 1—4 电感式传感器简图  
(a) 可变间隙式；(b) 可动铁心式。

传感器的总阻抗和线圈中的电感、电阻及输入电压频率的关系可用下式表示。

$$Z = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} \quad (1-3)$$

当输入高频电压，而线圈的品质因素较高时，上式可简化写成：

$$Z = \omega L \quad (1-4)$$

线圈中电感的变化决定于磁阻  $R_m$  的变化，影响磁阻变化的因素用下式表示：

$$R_m = \frac{l}{\mu S} + \frac{l_0}{\mu_0 S_0} \quad (1-5)$$

上述三式中， $Z$  —— 线圈中总阻抗（欧）；

$L$  —— 线圈中的电感（亨）；

$R_c$  —— 线圈的电阻（欧）；

$\omega$  —— 输入电压圆频率（弧度/秒）；

$R_m$  —— 磁阻（欧）；

$l$  和  $l_0$  —— 分别为铁心和空气间隙长度（厘米）；

$S$  和  $S_0$  —— 分别为铁心和空气间隙的横截面积（厘米<sup>2</sup>）；

$\mu$  和  $\mu_0$  —— 分别为铁心和空气间隙的导磁率（亨/厘米）。

在可变间隙式的传感器中，由于  $\mu \gg \mu_0$ ，当  $\mu_0, S_0$  不变时，磁阻的变化，主要决定于空气间隙  $l_0$  的变化，因此也可以说，传感器的总阻抗  $Z$  与空气间隙  $l_0$  存在一定的关系。在实际应用中，往往采用如图1—5

所示的可变间隙式传感器。这种结构形式既能改善传感器的线性度，又提高了灵敏度。

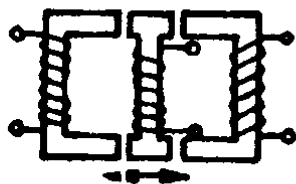


图 1—5 可变间隙式传感器简图

可动铁心式传感器可以是一个铁心在一个线圈中移动的形式，见图 1—6 (a)，也可以是一个铁心在两个或三个线圈中移动的所谓差动式，见图 1—6 (b) 和图 1—6 (c)。采用差动式可提高传感器的灵敏度。

电感式传感器的特点是，在量测系统中可不用放大器，传感器的输出量直接用示波器记录，它的性能比较稳定，可测多种参数。可动铁心式传感器特别适合量测大位移，当位移值

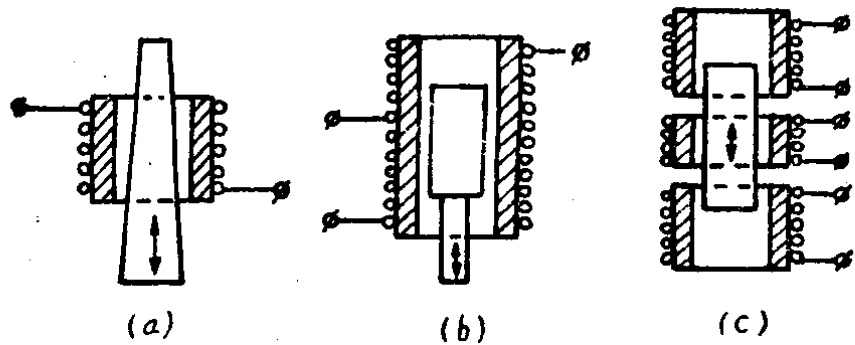


图 1—6 可动铁心式传感器简图

达到几个厘米时，仍能保持良好的线性度。

电感式土压力传感器见图 1—7。

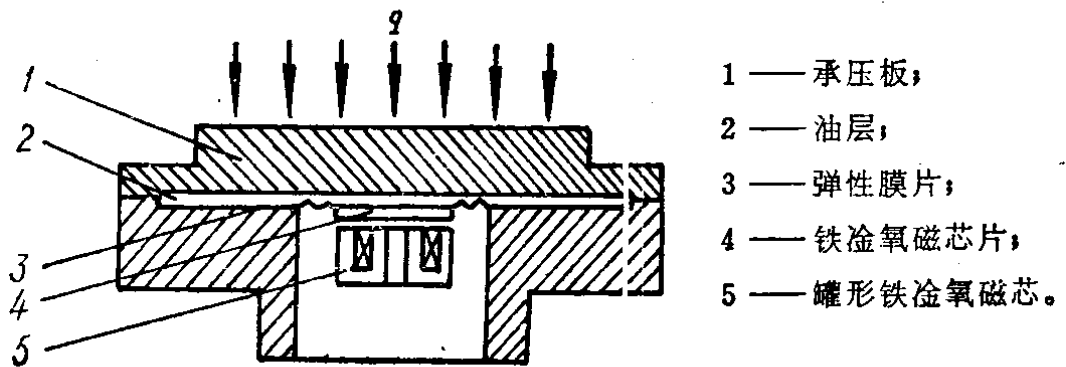


图 1—7 电感式土压传感器

#### 四、电容式传感器

两块极板之间间隙变化，或是表面积变化，将使电容量改变。根据这一原理制成的传感器称电容式传感器，其基本形式如图 1—8 所示。

电容量和两极板的间隙、表面积之间的关系可用下式表示：

$$C = \frac{\epsilon S_b}{3.6\pi d_b} \quad (1-6)$$

式中  $C$  —— 电容（微微法）；  
 $\epsilon$  —— 电介质常数；  
 $S_b$  —— 极板的面积（厘米<sup>2</sup>）；

$\delta_b$ ——极板间隙（厘米）。

可变间隙式的传感器，通常采用薄膜式的结构形式，一个极板固定，另一个极板与薄膜连在一起运动，以使间隙变化。由于电容量和极板间隙之间存在着反比的双曲线关系，只有把极板间的间隙做得很小时，才能保证传感器有良好的线性度和较高的灵敏度。但是微小的极板间隙必须采用电介质常数较高的介质如云母片隔开，否则容易被击穿，云母片的厚度可按图 1—9 中曲线 3 选取。图中曲线 1 为云母片厚度  $h$  和极板间隙  $h'$  之比大于 1 的情况，曲线 2 为云母片厚度  $h$  和极板间隙  $h'$  之比小于 1 的情况。

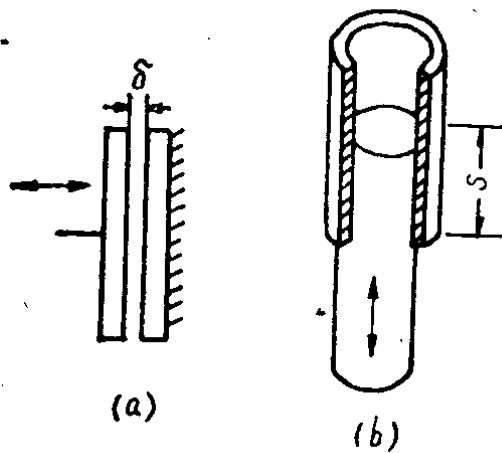


图 1—8 电容式传感器简图  
(a) 可变间隙式；(b) 可变面积式。

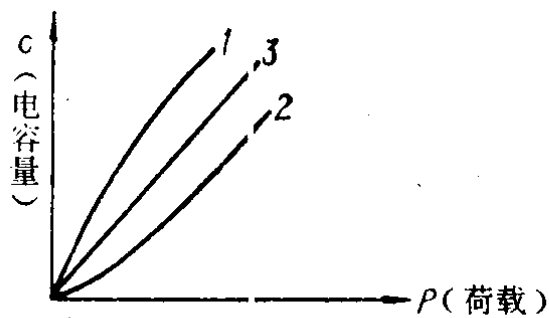


图 1—9 电容式传感器输出特性和云母片厚度的关系曲线

可变面积式传感器的结构比较复杂，但电容量变化较大。

电容式传感器的特点是灵敏度高，可以量测百分之几微米数量级的位移值，但是，它对量测系统的屏蔽性能的要求较高，要尽量减少量测系统中分布电容对量测值的影响。

电容式压力传感器见图 1—10。

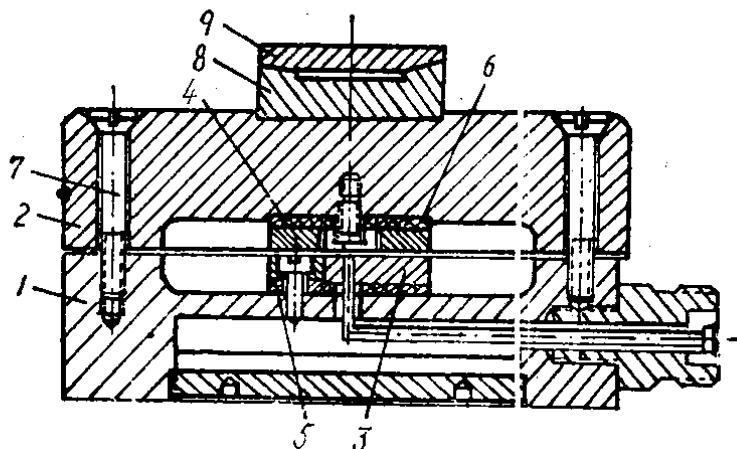


图 1—10 电容式压力传感器

1——传感器体；2——承压板；3和4——电容器平板；5和6——硬橡胶板；7——螺钉；8和9——加载枢轴。

## 五、电阻式传感器

利用改变金属丝长度或横截面积而使金属丝电阻值发生相应变化的原理制成的传感器称电阻式传感器。金属丝的电阻可用下式表示：

$$R = \rho_r \frac{l}{S_1} \quad (1-7)$$

式中  $R$ ——金属丝电阻（欧）；  
 $\rho_r$ ——电阻系数（欧·毫米<sup>2</sup>/米）；  
 $l$ ——金属丝长度（米）；  
 $S_1$ ——金属丝截面积（毫米<sup>2</sup>）。

电阻式传感器主要有以下几种形式。

### （一）滑线电阻式传感器

滑线电阻式传感器主要由一个线绕电阻器和一个与被测物相连接的滑动接触点组成。它常用于量测变形量较大的参数，其测试结果精度主要决定于接触电阻值的大小，故滑动接触点与电阻器要紧密接触。

### （二）非粘贴式电阻传感器



非粘贴式电阻传感器，是将电阻丝缠绕在能产生相对运动的支点上，当外力作用时，电阻丝产生变形，电阻值发生变化。采用这种结构形式制成的差动电阻式土压传感器见图 1—11。这种传感器的特点是灵敏度高，性能稳定，适用于长期观测，但传感器的制造较为复杂。

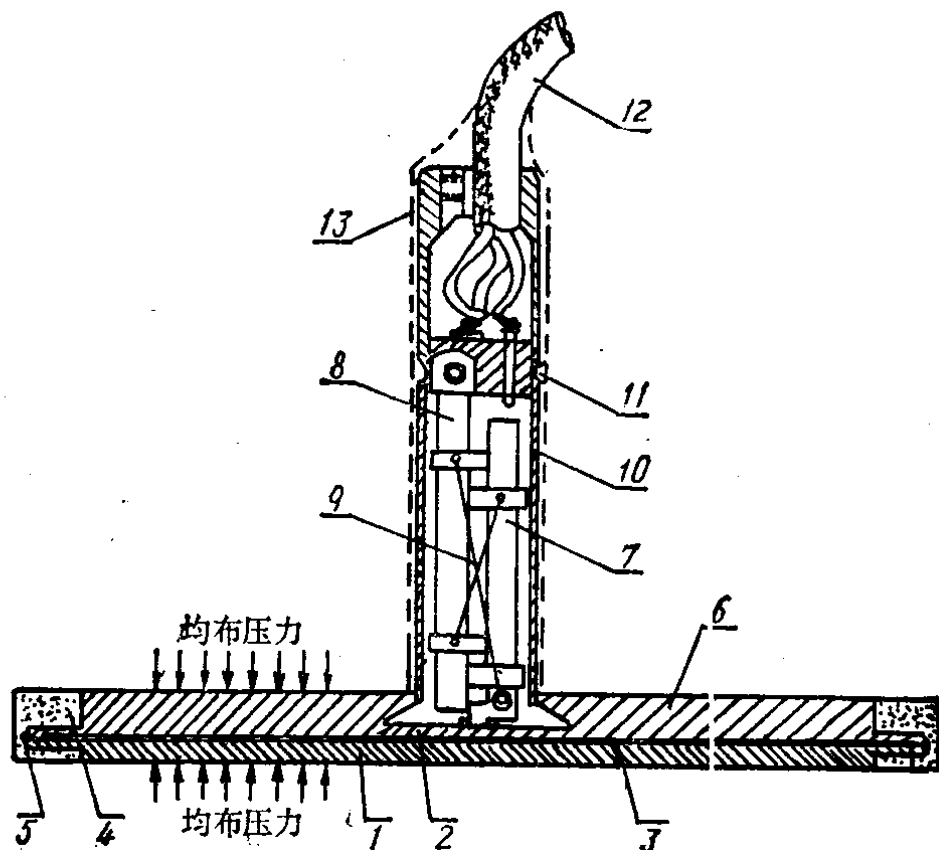


图 1—11 差动电阻式土压传感器

1 —— 承压板； 2 —— 弹性薄板； 3 —— 充水银的传力层； 4 —— 可压缩性材料； 5 —— 锤弧焊缝； 6 —— 上盖板； 7 —— 可动支架； 8 —— 不动支架； 9 —— 电阻丝； 10 —— 导线管； 11 —— 接线板； 12 —— 三芯电缆线； 13 —— 保护套。

### (三) 粘贴式电阻传感器

这种传感器是利用电阻应变片粘贴在弹性元件上制成的，当弹性元件变形时，电阻应变片的电阻值将产生相应的变化。（详见本章第三节）。

### (四) 压阻式传感器