

非电量电测法

在汽车和发动机试验中的应用

顾柏良 刘家鹤 陈法成等编著

机械工业出版社

序 言

“非电量电测法”是近代试验研究的重要手段之一。我国汽车行业自五十年代末期就已开始使用应变测量这种非电量电测法。二十多年来，随着电子工业及仪器仪表工业的发展，我国汽车工业的试验研究中所用的非电量电测法无论在范围方面还是在深度方面都有了较快的发展。现在，这种方法已经成为汽车及发动机试验研究中必不可少的一种的重要手段。

为了对我厂有关人员进行电测基础知识的普及教育，1978年我们编写出这本书的初稿。五年来，我们先后对本书进行了三次大幅度修改，并由机械工业出版社聘请清华大学李修曾工程师对本书进行了几次细致认真的校审。我们的目的是想使本书能成为一名既是非电量电测法在汽车和发动机试验中的应用方面的教材，又是有关行业技术人员和试验工人的参考书。在本书编写过程中我们力求做到：知识面宽并且理论与实践相结合。

本书主要编撰者是第二汽车制造厂原产品设计处电测试验室的顾柏良、刘家鹤和陈法成，该室还有一部分同志（如曹士俭、鞠盛文、姚自申、陈建新、杨正江、徐滇、胡建芝等）曾参与了部分工作或者是对本书提出了一些修改意见。在本书定稿过程中还得到了汽车设计试验室等单位不少同志在描图、照相和抄写等工作上的支持。

由于我们的水平有限，因此书中谬误之处在所难免，敬希读者批评指正。

第二汽车制造厂技术中心

一九八三年九月廿八日

本书第一章至第四章属于基础理论部分。其中介绍了非电量电测法常用的传感器和仪器、应变测量、温度测量、噪声和振动测量等方面的基本知识。这些知识对机械、航空、建筑、铁道、船舶等有关行业也是同样适用的。

本书第五章、第六章是非电量电测法在汽车和发动机试验中的应用实例。这部分内容是作者十几年来电测工作经验总结的一部分。

本书最后一章则是介绍试验数据处理的基本知识和一些实践体会。

非电量电测法

在汽车和发动机试验中的应用

顾柏良 刘家鹤 陈法成等编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 $20\frac{1}{2}$ 插页·1 ·字数 505 千字

1986年 10 月北京第一版·1986年 10 月北京第一次印刷

印数 0,001—1,980 ·定价4.95元

*

统一书号: 15033·6109

目 录

第一章 常用传感器和仪器简介

第一节 概述	1	五、其它传感器	30
第二节 传感器的基本工作原理	2	第四节 几种常用仪器简介	31
一、发电式传感器的基本工作原理	2	一、放大器	31
二、参量式传感器的基本工作原理	4	二、光线示波器	31
第三节 几种常用的传感器简介	7	三、磁带记录仪	38
一、力和压力传感器	7	四、贮存示波器	49
二、扭矩传感器和集流环	12	五、数字式记录仪	55
三、加速度、位移及速度传感器	18	六、笔录式记录仪	57
四、转速及扭振传感器	27	七、数据处理机	58

第二章 应变测量

第一节 电阻应变片	59	二、静态电阻应变仪	78
一、几种常见的电阻应变片	59	三、动态电阻应变仪	82
二、电阻应变片的粘贴技术	64	第三节 应变测量	88
第二节 电阻应变仪简介	68	一、静态应变测量	88
一、电桥理论	68	二、动态应变测量	100

第三章 温度测量技术

第一节 测温仪表概述	103	第三节 热电阻测温法	120
第二节 热电偶测温法	104	一、工作原理、分类及构造	121
一、热电偶的测温原理	104	二、热电阻测温	124
二、热电偶的种类	107	三、热电阻测温中的故障及其排除	126
三、热电偶的构造类型	108	第四节 其它测温法	127
四、热电偶的绝缘材料和保护管材料	111	一、易熔合金测温法	127
五、热电偶的制作与安装	112	二、硬度塞测温法	129
六、热电势的测量	114	三、示温涂料法	130
七、热电偶测温误差	119		

第四章 振动和噪声测量

第一节 振动测量	131	一、噪声的主要物理参数	144
一、振动的基本参数及其表示方法	131	二、噪声的评价指标	150
二、振动的测量方法	134	三、噪声的频谱与倍频程	153
第二节 噪声测量	144	四、噪声测量方法	156

第五章 电测法在发动机测试中的应用

第一节 压力测量——发动机气缸压

力的测量	170
一、测量气缸压力的目的	170
二、气缸压力图种类	171
三、气缸压力的测录方法	172
四、测量误差因素分析	176
五、试验结果的整理与分析	179

第二节 振动测量

一、气门运动规律的测量	181
二、发动机曲轴扭转振动的测量	189
三、发动机缸体横向振动的测量	194

第三节 温度测量

一、汽油机各缸混合气分配均匀性的测定	197
二、排气阀温度的测定	201
三、活塞温度的测量	202

第六章 电测法在汽车试验中的应用

第一节 传动系负荷状况的测定

一、概述	208
二、测试和标定方法的几点说明	208
三、测试简介	210

第二节 制动系负荷状况的测定

一、概述	220
二、有关测试方法的几点说明	220
三、测试简介	221
四、实例	222

第三节 转向系负荷状况的测定

一、概述	227
二、说明	227
三、测试简介	228

第四节 行路承载系负荷状况的

测定

一、概述	229
二、几点说明	229
三、测试	231
四、实例	233

第五节 汽车操纵性稳定性试验

简介

一、汽车操纵性稳定性的基本概念	237
二、陀螺仪原理简介	238
三、几项典型的操纵性稳定性试验介绍	241
四、有关参数的标定方法	248

第六节 汽车噪声测试和分析

一、概述	249
二、EQ140载重汽车的噪声试验	250

第七章 误差分析与数据处理

第一节 误差分析的基本知识

一、基本概念	267
二、电测误差分析	270

第二节 有关数据处理的几个基本概

念

一、数据的分类	272
二、随机数据的基本特性	276

第三节 数据处理的基本过程

一、数据准备

二、数据检验	288
三、数据分析处理使用的仪器简介	302

第四节 数据处理的几个例子

一、应用专用数据处理机进行处理几例	314
二、概率密度函数应用一例	315
三、汽车变速箱使用工况测定后的数据处理	317

主要参考文献

第一章 常用传感器和仪器简介

第一节 概 述

顾名思义,“非电量电测法”乃是一种利用电或电子技术的先进手段对各种非电参量进行测量的方法。典型的测量方法可按图 1-1 所示的途径去进行。

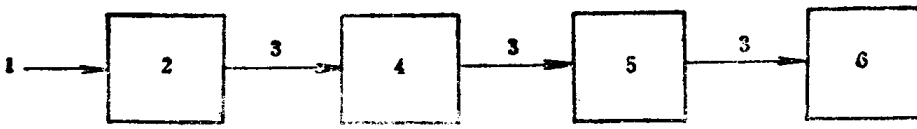


图1-1 非电量电测法方框图

1—非电量 2—传感器 3—电量 4—放大器 5—记录仪 6—数据处理机

在这个测量链中,首先,是要把欲测的非电量转换为电量,而后再经电子仪器予以放大、记录及数据处理。本章将从传感器入手,对这个测量系统中各个环节做一简要叙述。

能把被测非电量转换为与之有确定对应关系的有用电量的装置或器件就叫传感器。它是实现非电量电测的第一个环节,也是十分重要的一个环节。它所产生的误差在整个非电量电测系统中占有相当的比例。还应当指出的是:在汽车及发动机电测工作中需要用到的传感器,有一部分能直接采用市售商品,但也有一部分传感器需根据测试要求自行设计制造。

可从两个不同角度来对传感器进行分类。一种是从工作原理来分,如分成:压电式、磁电式、热电式、光电式、电阻式、电容式及电感式等等。另一种是从传感器的用途来分,如分成:测力传感器、扭矩传感器、扭振传感器、加速度传感器、速度传感器、位移传感器及温度传感器等等。

在选用或自制传感器时应注意以下几个方面:

1. 传感器的输出电量 y 应是输入非电量 x 的线性函数,即 $y = Ax$ 。(A 是常量)。

2. 被测量的幅值和频率的允许工作范围。

3. 传感器的绝对灵敏度 S_0 和相对灵敏度 S : $S_0 = \frac{\Delta y}{\Delta x}$; $S = \frac{\Delta y}{y} / \frac{\Delta x}{x}$ 。

4. 基本误差的大小。

5. 对外界条件(如温度、湿度、气压、振动、磁场等)的敏感性。

6. 与放大器、记录仪接配的可能性。

7. 传感器自身的尺寸重量及它与被测体的固结安装方式;在被测体上安装传感器之后是否会影响其工作状况,等等。

第二节 传感器的基本工作原理

传感器之所以能把各种非电量转换为电量是因为它利用了物理现象中非电量向电量的转变以及非电量对电参量的影响作用。作为前者的例子可以举出磁电效应、光电效应、某些晶体的压电效应、某些材料的热电效应及某些物质的霍耳效应等等。而作为后者的例子我们可以举出电阻丝如受拉伸，其电阻值会随之改变；电容器如极板间距改变或极板面积改变则其电容量会随之改变；温度变化时电阻丝的电阻值也会随之改变等等。下面我们分别叙述之。

一、发电式传感器的基本工作原理

(一) 磁电式传感器

这种传感器的工作原理是基于电磁感应定律、如图 1-2 所示。当传感器中的永久磁铁（或电磁铁）和线圈有相对运动，使线圈切割磁力线时，就会在线圈中产生感应电动势、根据楞次定律，此感生电动势与线圈对磁场的相对速度成正比，即：

$$e = -BLv \quad (\text{V}) \quad (1-1)$$

式中 B ——磁通密度 (T)

L ——线圈在磁场中的导线长度 (m)

v ——相对速度 (m/s)

当传感器结构已定，即 B 、 L 恒定时，感生电势 e 与相对速度 v 成正比。

这种传感器的优点是：输出功率大，不需要放大，可直接用指示电表或示波器来记录。

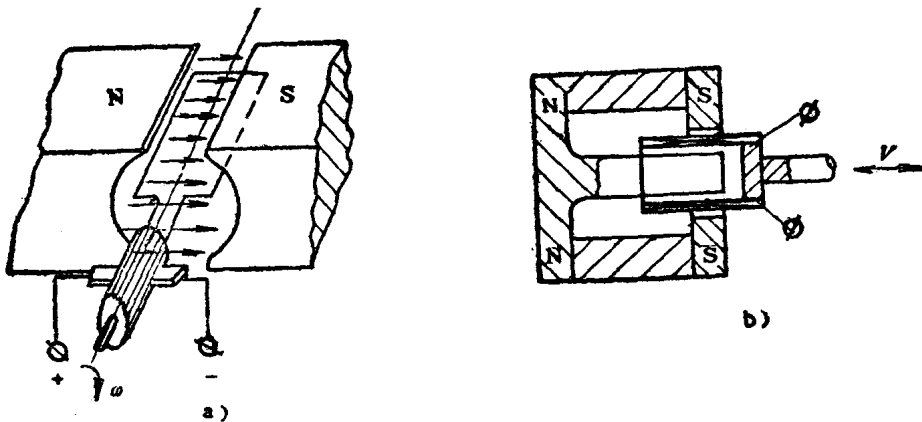


图1-2 磁电式（感应式）传感器原理图

a) 测转速 b) 测线速度

其缺点是：与被测对象有机械交连；引入附加的质量；並消耗少许功率。故不宜用于小型测试对象——如：微电机的转速，小构件的振动等。

在汽车、发动机试验中，这类传感器得到广泛采用，用它来测量发动机的转速、车轮的转速、减振器的线速度、机件的振动等。

(二) 光电式传感器

其工作原理是光电效应：当某些金属或半导体的表面受光照射的时候，带有辐射能量的微粒透入受光物质的表面层，赋予这些物质的电子以附加的能量，于是，这些电子能够开始移动并跃出原子原先的结构。如果被释放的电子滞留在物质之中，从而提高物质的电导，则这种光电效应称之为内部光电效应（如：光敏电阻）；如果这些电子离开受光物质，则这种光电效应就称之为外部光电效应（如：光电管）。图 1-3 所示为光电传感器的示例和接线图。

这种传感器的优点是：结构简单，灵敏度高，惯性小，同被测物体无机械交连。其主要缺点是：光电流太小，需放大或采用高灵敏的测量装置。在汽车、发动机测试中常用它来测量转速和燃油消耗。

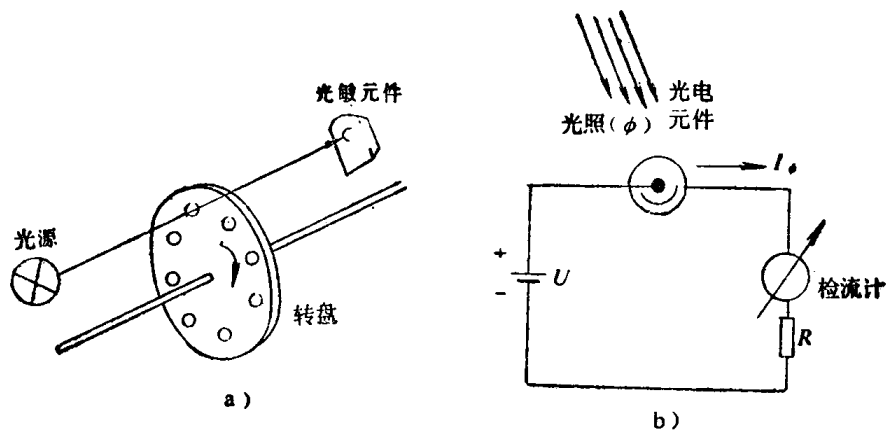


图1-3 光电传感器的示例和接线图
a) 结构示意图 b) 接线图

(三) 热电式传感器（热电偶）

热电传感器（热电偶）的原理及具体用法在第三章中将专门论述，这里暂略。

(四) 压电式传感器

工作原理基于一些晶体的压电效应。当晶体沿一定方向受压力 P （或受拉力）产生变形时，在晶体内部产生极化现象，并且在其表面出现电荷 Q 。 P 和 Q 有如下关系：

$$Q = kP \tag{1-2}$$

式中 k ——压电常数，表明晶体的压电灵敏度，以 pC/kg （或 pC/kg/cm^2 ）表示。当外

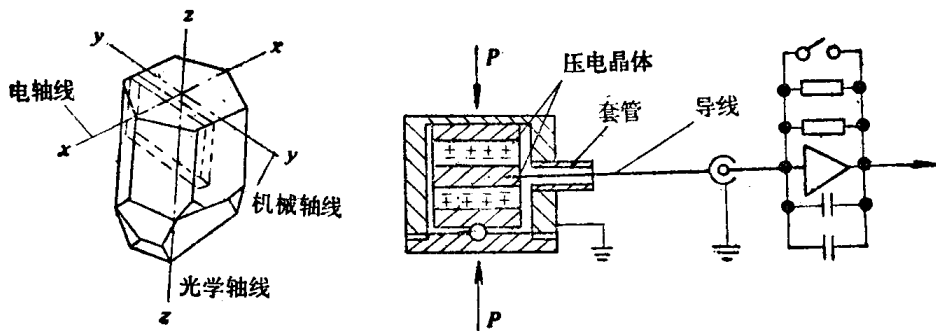


图1-4 压电传感器工作原理图

力去掉时晶体重新回到不带电的状态。天然的压电晶体材料是石英，目前用得最多的是人工压电晶体，一般称为压电陶瓷，如：钛酸钡、钛酸铅、铌酸锂、钽酸锂等。图 1-4 所示为其工作原理。

利用压电效应做成的传感器可用来测量压力（如气缸爆发压力）、力和振动加速度；其突出的优点是自振频率高、体积小、重量轻、稳定性较好，但它要求测量电路必须有很高的输入阻抗；传感器中的压电晶体和引出导线也应有很高的绝缘电阻，以便使电荷不致迅速洩漏。

二、参量式传感器的基本工作原理

这种传感器是把待测的非电量转换成某种电参数（电阻、电容或电感）的变化。

（一）电阻式传感器：把待测非电量变成与它成一定函数关系的电阻变化量（ ΔR ）。

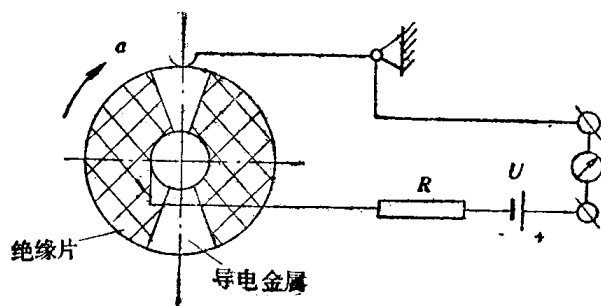


图1-5 接触式传感器原理图

1. 接触传感器：利用触头的接通和断开把机械位移转换为电脉冲，如图 1-5 所示。当轴转过角 α 时，电路闭合，电流计（或光线示波器振子）得到脉冲，其延续时间相当于图中接触盘空白扇形的角度。

这种传感器结构简单，工作可靠，广泛应用于轴的转数测量。

2. 变阻式传感器

最常用的是线绕式变阻器。其滑动触头在被测机械量的作用下移动，由此引起传感器的电阻变化，从而使流过测量器（电流表或振子）的电流发生变动，其工作原理如图 1-6 所示。

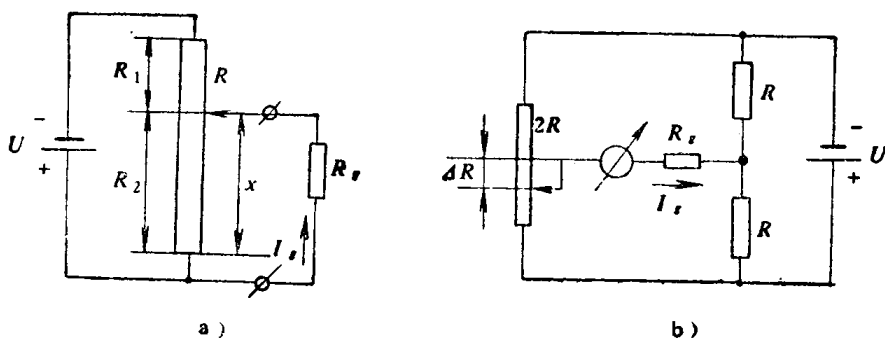


图 1-6 变阻式传感器工作原理图

a) 电位计式 b) 电桥式

这种传感器的设计要点是：根据所要求的灵敏度、线性和量程正确地选定测量回路中的电阻、电源和测量器三者之间的关系。当然，流过变阻器的电流应不至使它过热。计算方法在一般电工学书籍中均有介绍，此处从略。

这种传感器因结构简单，并且在输出端可以得到较大的功率——可不需放大直接用电表或振子加以记录，因而在汽车试验中得到广泛采用。例如，用它来测量：踏板、方向盘、车轮、拖钩、桥壳等的位移。

变阻式变换器的缺点是有滑动触头，其接触电阻的变化将引起误差；另外，频响较低，当滑动速度很大时，变阻器摩擦部分的磨损会加剧。

3. 电阻应变片式传感器

应变测量中广泛采用电阻应变片作为传感器的敏感元件。电阻应变片的典型结构如图 1-7 所示。它由线栅 1、基底 2 和引线 3 组成。线栅是用高电阻率金属丝绕成粘贴在基底上（两张纸片之间），基底用来使线栅与试件绝缘。线栅的两端焊接两根较粗导线作为引线，以便与测量电路相接。测量时先把应变片粘贴在试件上，当试件受力变形时，贴在其上的应变片内的线栅亦随之发生变形，线栅的电阻因而发生变化。通过放大器测出该电阻变化即可得到试件受力的大小和变化情况。关于电阻应变片的详细工作原理和测量电路的连接将在第二章中介绍。

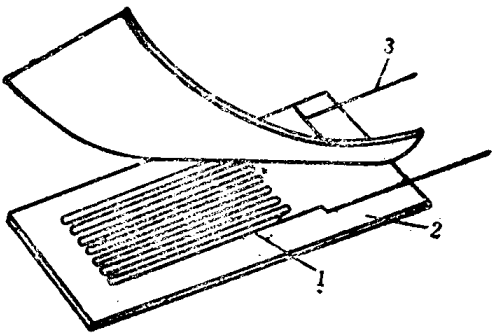


图1-7 应变片结构
1—线栅 2—基底 3—引线

4. 热电阻传感器（电阻温度计）

这种传感器是利用导线或某些半导体材料的电阻会随温度变化而发生变化的特性来测量温度的。关于它的详细原理及测量线路将在第三章中阐述。

（二）电容式传感器：把待测的非电量转换成电容的变化量（ ΔC ）。

任何电容器的电容取决于下列三个基本参数：极板的面积 S 、极板间距离 d 和介质的介电常数 ϵ 。因此，待测的机械量只要能改变上述三个参数中的任一个就能达到转换的目的。测量原理如图 1-8 所示：

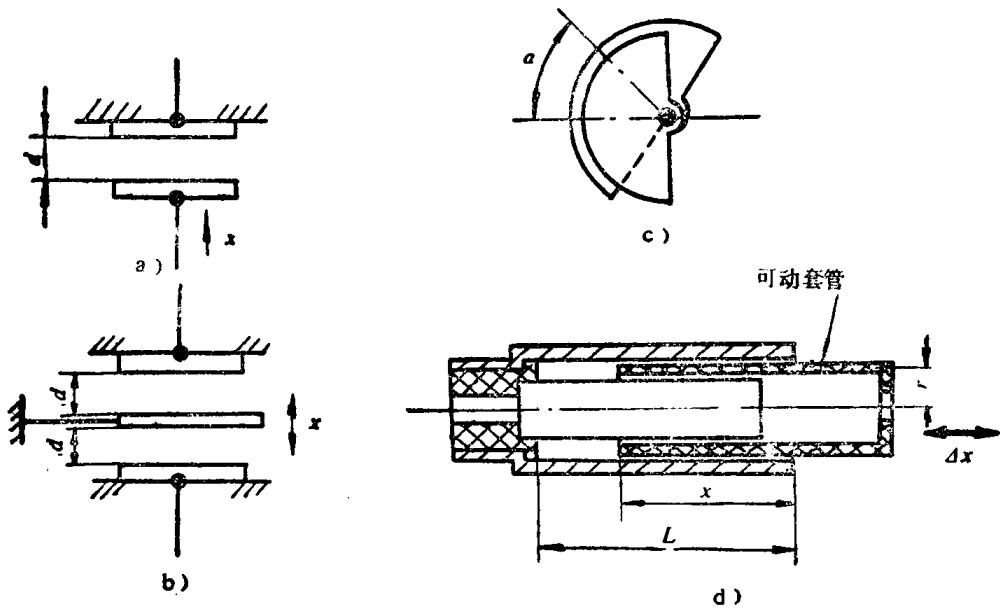


图1-8 电容式传感器的测量原理图

a)、b) 改变间距 c) 改变面积S d) 改变介电常数 ϵ

图 1-8a) 所示的平板电容器可用如下的关系式表示:

$$C_0 = \frac{\epsilon S}{d} \quad (1-3)$$

若极板位移 x 之后, 电容量为:

$$C = \frac{\epsilon S}{d-x} = \frac{\epsilon S}{d(1-\frac{x}{d})} = \frac{C_0}{(1-\frac{x}{d})} \quad (1-4)$$

把上式中的分子分母同乘以 $(1+\frac{x}{d})$ 项则上式变为: $C = \frac{(1+\frac{x}{d})}{1-(\frac{x}{d})^2} \cdot C_0$ 。当 $x \ll d$ 时,

分母中的高次项 $(\frac{x}{d})^2$ 可以略去, 即得:

$$C \approx C_0 (1 + \frac{x}{d}) \quad (1-5)$$

由此式可知 C 和 x 有线性关系的前提条件是 $x \ll d$, 若无此条件则 C 和 x 是非线性关系。

由 (1-3) 式看出, 为提高传感器灵敏度应使 d 别太大, 但要满足 x 和 C 的线性关系又必须使 $d \gg x$, 这就是互相矛盾的要求。为解决此矛盾并提高传感器的灵敏度可采用图 1-8b) 所示的结构。当中板移动时, 这种传感器的一半电容增加, 另一半电容减少。这样的结构比之图 a) 的结构, 灵敏度增加了一倍。

图 1-8c) 所示为电容量大小依赖于两极板相互作用面积的传感器。它的电容量等于:

$$C = \frac{S_m \epsilon}{d} (1 - \frac{\alpha}{\pi}) \quad (1-6)$$

式中 S_m 是 $\alpha=0$ 时两极板间有效面积;

d ——两极板间的距离。

这类传感器的突出优点是电容改变量 ΔC 和两组极板相对转角 α 呈线性关系。

图 1-8d) 所示的电容传感器是一种靠介电常数 ϵ 起作用的典型例子。该传感器的外壳和芯棒构成电容器的两个极板, 可动套筒 (其材料的介电常数为 ϵ_m) 能左右滑动。经简单推导可以求出该传感器的总电容量为:

$$C = \frac{2\pi r L \epsilon_0}{d} + \frac{2\pi r \cdot x (\epsilon_m - \epsilon_0)}{d} \quad (1-7)$$

式中 d ——外壳和芯棒表面间的距离;

ϵ_0 ——空气的介电常数。

从 (1-7) 式可以明显看出电容 C 是和可动套管插入深度 x 有着线性关系的。

电容式传感器的优点是: 结构简单、可靠、灵敏度高、频响宽。在汽车和发动机试验中被用来测量微小和中等程度的位移 (线位移、角位移) 及气体液体压力等。这类传感器的主要缺点是测量电路的构造和调整较为复杂, 易受寄生电容和外界电场的影响, 故需仔细屏蔽。另外, 如前所述, 它容易产生非线性误差。

(三) 电感式传感器: 它把待测的非电量转换成电感的变化量 (ΔL)。

图 1-9 a)、b) 中的衔铁移动时, 线圈的电感会发生变化。图 1-9c)、d) 中的铁芯在线圈中作相对运动时, 该线圈的电感也会变化。

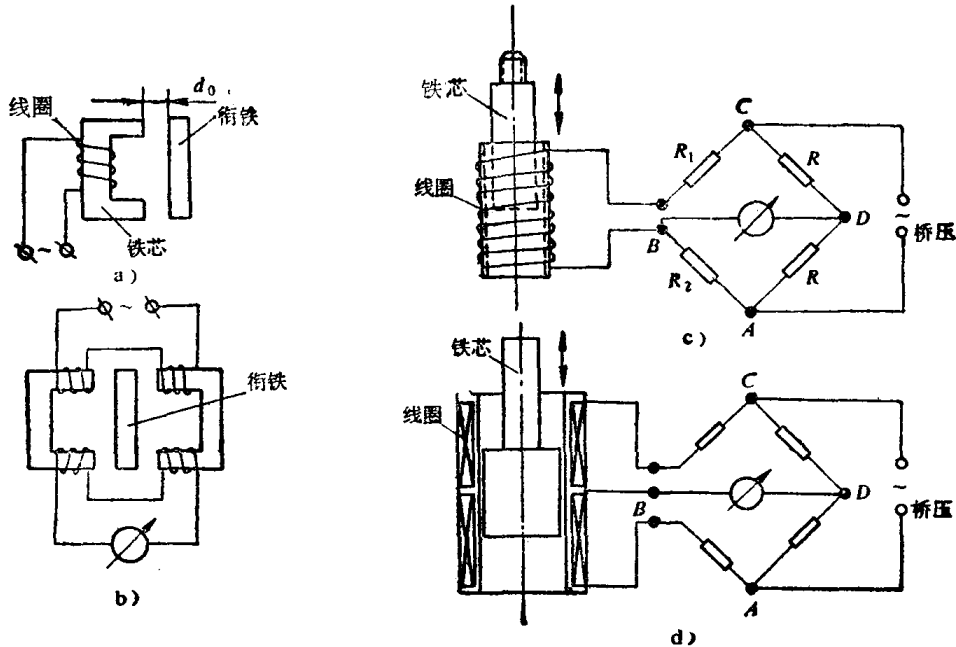


图 1-9 电感式传感器的工作原理图

a)、b) 衔铁移动, 引起线圈电感改变 [b) 为差动式]

c)、d) 铁芯相对线圈运动, 引起电感变化 [d) 为差动式]

图 1-9 a) 的结构虽然简单, 但很少采用, 因为线圈总阻抗与空气隙的关系呈双曲线特性。只有当衔铁的变化量 Δd 为原始间隙 d_0 的 $0.1 \sim 0.15$ 时, 才可认为是线性关系。同时这种传感器因温度变化、电源电压和频率的不稳定会产生很大的误差。而图 1-9b) 所示的差动式结构, 则在很大程度上可消除上述缺点。在其它条件相同时, 其灵敏度比图 1-9a) 大一倍, 其工作间隙可在很大的变化范围内使输出与输入呈线性关系。

电感式传感器的优点是: 结构简单, 做到非接触测量, 因而工作可靠; 可以接配现成的应变仪作二次仪表, 灵敏度高, 频率范围宽, 也可以不用放大而直接记录读数。

在汽车、发动机试验中常用它来测量小至零点几个 μ 、大至几百 mm 的位移。

第三节 几种常用的传感器简介

一、力和压力传感器

在汽车和发动机试验中常常要用到各种力传感器和压力传感器。例如, 测汽车牵引力时可在汽车和被牵引体之间安装拉力传感器; 在野外工作无大型地磅时也可用荷重传感器去测量汽车的轴荷、轮荷; 如欲测量发动机运转时各缸缸内燃气燃烧爆发的压力情况则需使用压力传感器; 若要研究汽车制动系统中的工作状况则必须用压力传感器去测各有关部位 (总泵、分泵、管路中、气室等) 的气压或油压……。

作这些测量时所要用到的力或压力传感器大多可以买到现成商品。国产 BLR 系列的拉压力传感器、BHR 系列的荷重传感器、BPR 系列压力传感器以及丹麦 DISA 公司的电容

式压力传感器、瑞士 Kistler 公司的石英压力传感器等商品都是汽车和发动机试验中常常要用的，现摘要分别介绍之。

(一) BLR 系列拉压力传感器

BLR 系列拉压力传感器既可测拉力，也可测压力，共有十多种规格，额定测量范围由 0.1~100t。这种传感器采用电阻应变片做敏感元件，使用时需配接电阻应变仪。图 1-10 是该系列中的一种——BLR—1/500 型拉压力传感器的外形和结构图。它的额定载荷是 500kgf^①。

由图 1-10b) 可以看出这种传感器里的弹性元件 1 是圆管形的。这是为了获得较大的外表面以利电阻应变片的粘贴，却又不会造成横截面太大以致弹性元件加工过程中热处理困难及传感器灵敏度过低。在弹性元件 1 的外表面上沿纵向及横向各贴四片应变片。弹性元件 1 的两端有两个法兰盘、它们和外壳 2、密封圈 3 一起起到了保护和密封作用。被测载荷通过两端法兰盘的螺孔而作用到弹性元件上。

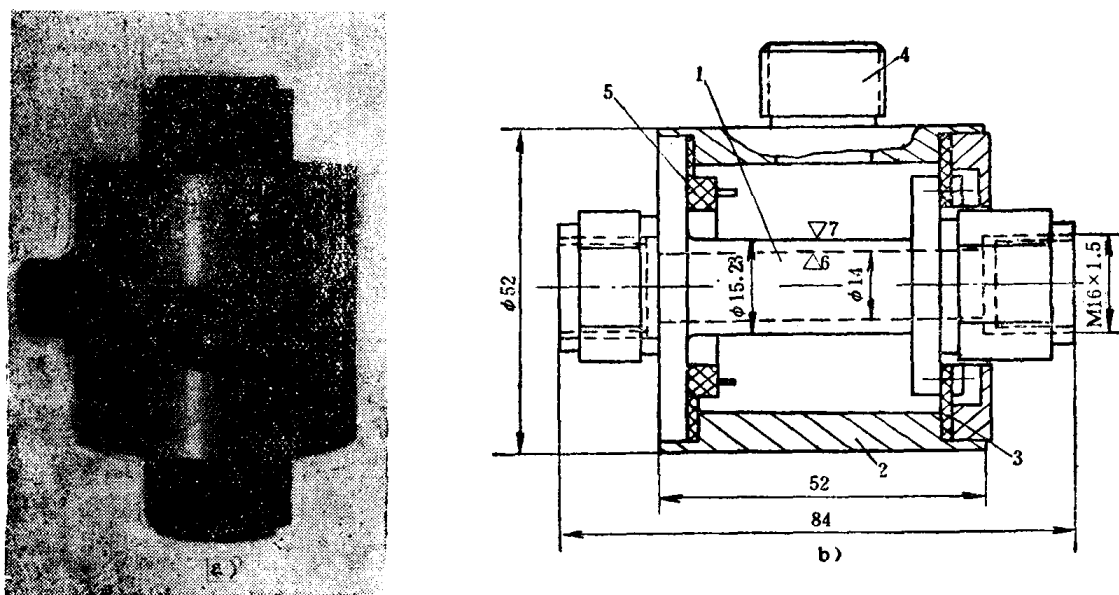


图 1-10 BLR—1/500 型拉压力传感器

a) 外形照片 b) 内部结构

1—弹性元件 2—外壳 3—橡胶密封圈 4—引线插座 5—内部焊线座

这种传感器能在 $-10 \sim +50^{\circ}\text{C}$ 条件下工作。购买及使用它时应注意根据载荷情况选择合适的型号。实际使用的载荷如超过该传感器的额定载荷则会造成传感器损坏，但若实际载荷远小于传感器的额定载荷则又会使输出过小，致使测量误差太大。一般选用时应尽可能使实际载荷最大值达到该传感器额定载荷的 80% 左右。除此之外，在使用中还要注意传感器两端的传力连接，应尽量做到使力同心传递，避免偏心、扭转等情况出现。

(二) BHR 系列荷重传感器

BHR 系列荷重传感器是测压力的，也有十多种规格，额定载荷由 0.1~100t。它们也是电阻应变片做敏感元件，使用时需接电阻应变仪。图 1-11 是其中的一种——BHR-4 型荷重传感器的外形及构造示意图。由于这种传感器只用来测压力，而实际使用时压力 P 又

① 1kgf=9.80665N，下同。——编者注

常常会或多或少地与轴线不完全同心或成某一角度。于是，弹性元件 1 除受压力外，实质上还受到横向力和弯矩。电阻应变片 2 在弹性元件 1 表面粘贴的位置要恰当地安排、应变片的接桥方法要合理联接（详见第二章），并且弹性元件 1 采用空心结构以提高抗弯截面系数降低弯曲应力，这些都会大大减小横向力和弯矩的影响。这些措施在上述 BLR 拉压力传感器中都采用了。除此之外，BHR 传感器还采用了装在刚性外壳上的抗弯膜片 M（见图 1-11 b）），它对 P 方向的载荷刚度很小而对与 P 垂直方向的载荷刚度甚大，故膜片 M 可承受大部分横向力和弯矩，从而使弹性元件 1 受横向力和弯矩的影响减至最低。

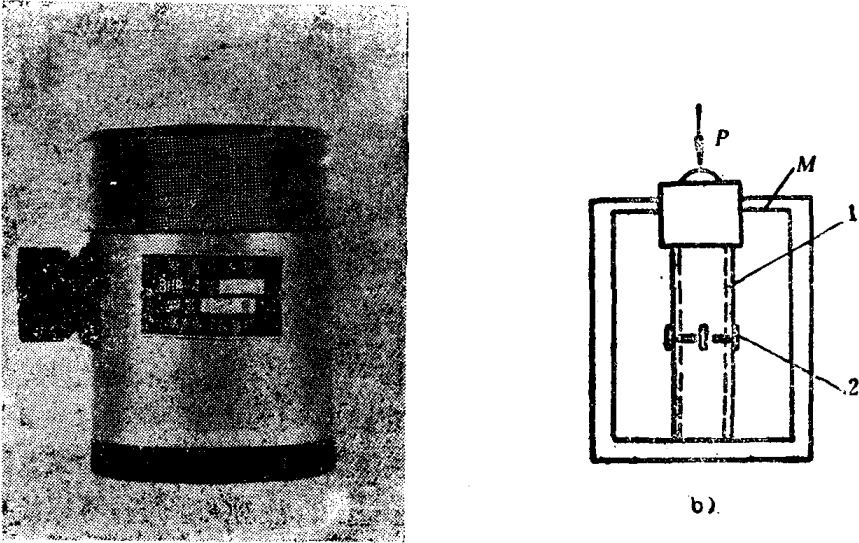


图1-11 BHR-4型荷重传感器

a) 外形照片 b) 构造示意图

1—弹性元件 2—应变片 M—承弯膜片

使用这种传感器时，除了要注意传感器的额定载荷是否适当之外，尤应注意实际载荷 P 要尽可能与传感器轴线吻合，以免因加载不同心而带来的测量误差。

（三）BPR 系列压力传感器

BPR 系列压力传感器可用来测量气体、液体的压力，也有十几种规格，测量范围从 10kgf/cm^2 到 250kgf/cm^2 。它们也是用电阻应变片做敏感元件，使用时需接配电阻应变仪。为了能适应高温测量（如测发动机气缸内压力时），有的压力传感器还能用压缩空气或水进行强制冷却。

图 1-12 是两种 BPR 压力传感器的照片和结构示意图。图 1-12 a) 是 BPR-2 型压力传感器，如用风冷它能在 180°C 下正常工作。图 1-12 b) 是 BPR-3 型压力传感器，如用水冷，它的工作温度能达 1100°C 。

应变片式压力传感器因采用弹性元件的不同而可分为膜片式、筒式及各种组合式（包括膜片——梁式、波纹管式、波纹膜片式、波登管式、膜片——圆筒式）。由图 1-12c) 结构示意图可见，BPR 型压力传感器是属于膜片——圆筒式组合。它的感受元件是双垂直曲线膜片，后者能与圆筒很好地接合。电阻应变片贴在圆筒上，不贴在感受元件上，故它的温度较

⊖ $1\text{kgf/cm}^2 = 10^5\text{Pa}$ ，下同。——编者注

低且易于采取风冷或水冷措施。这种传感器由于其自振频率高（约 35kHz）、有宽广的工作温度范围和足够的灵敏度，因而在汽车和发动机试验中被广泛地采用。

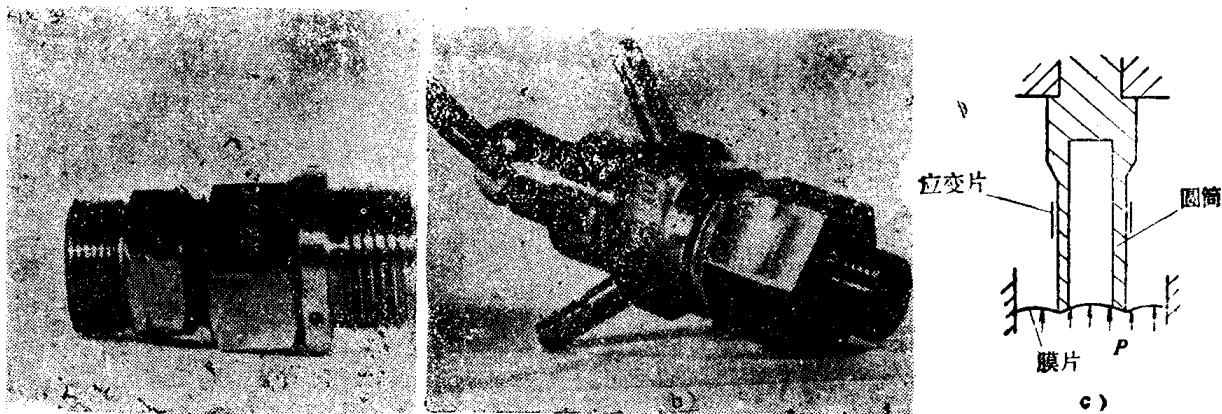


图1-12 BPR型压力传感器

a) BPR-2外形图 b) BPR-3外形图 c) 结构示意图

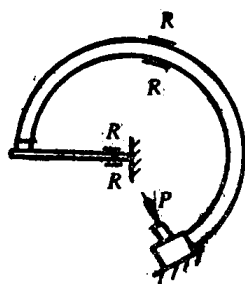


图1-13 真空表中的波登管

此外还有数种电阻应变片式压力传感器，因各有若干严重缺点未被广泛使用，所以我们不一一介绍了，但还需提一句的是：我们曾多次在真空表中的波登管（图 1-13）上贴电阻应变片 R ，用来测量发动机进气管里的真空度，获得成功。对这种用法要注意事先进行标定。鉴于波登管的自振频率较低，故对瞬态过程不宜使用它。

（四）DISA 电容式压力传感器

丹麦 DISA 公司生产的 51B00 万能指示仪是进行发动机测试时使用的一种多功能的测试仪器。它所配用的传感器几乎全是电容式的。图 1-14 是 DISA 压力传感器的外形及结构图。由图 1-14 b) 可见，传感器由内壳 1 与待测气室（或油缸）相连，流体通过腔道作用在膜片 3 上，使膜片与中心电极 4 之间的间隙发生变化，引起电容变化，此电容变化与压力变化成正比。中心电极 4（黄铜）用云母玻璃绝缘物 5 与外壳 2 绝缘。信号经同轴插塞 6 引出。此传感器的可变电容 C 和仪器主机里的电感 L 、固定电容 C_0 组成一个谐振电路。若 C 变化则此电路的谐振频率 f 会随之改变，这种变化再经若干电路上的转变最后可在仪器主机的示波管屏幕上以光点（或亮线）的跳动形式显示出来。如欲记录则可用照像机拍下屏幕上显示的图形。

Pu1a 型传感器是用来测高压的。其中膜片 3 是可更换的，不同厚度的膜片适用于不同的测量压力范围。当膜片从 0.8mm 厚换至 1.5mm 厚时可测的压力范围由 $0 \sim 24 \text{ kgf/cm}^2$ 变换到 $0 \sim 98 \text{ kgf/cm}^2$ 。这种传感器的使用温度范围上限主要取决于与传感器相接的调谐棒。图 1-14 中插塞 6 的温度不超过 150°C 即可（必要时可采用局部冷却措施）。内壳 1、膜片 3 的许用温度不受此限，它们均能适应内燃机工作时的燃气高温。

Pu2a 型传感器是用来测低压的，其构造及原理与 Pu1a 传感器完全一样。图 1-14 c) 中看到的三通阀是进行标定时要用到的。Pu2a 的膜片也可更换。当膜片从 0.14mm 厚换到 0.80mm 厚时，Pu2a 型传感器的测压范围从 $-0.11 \sim +0.11 \text{ kgf/cm}^2$ 变到 $-1.0 \sim +18 \text{ kgf/cm}^2$ 。这种传感器主要用来测内燃机的进气压力和排气压力。

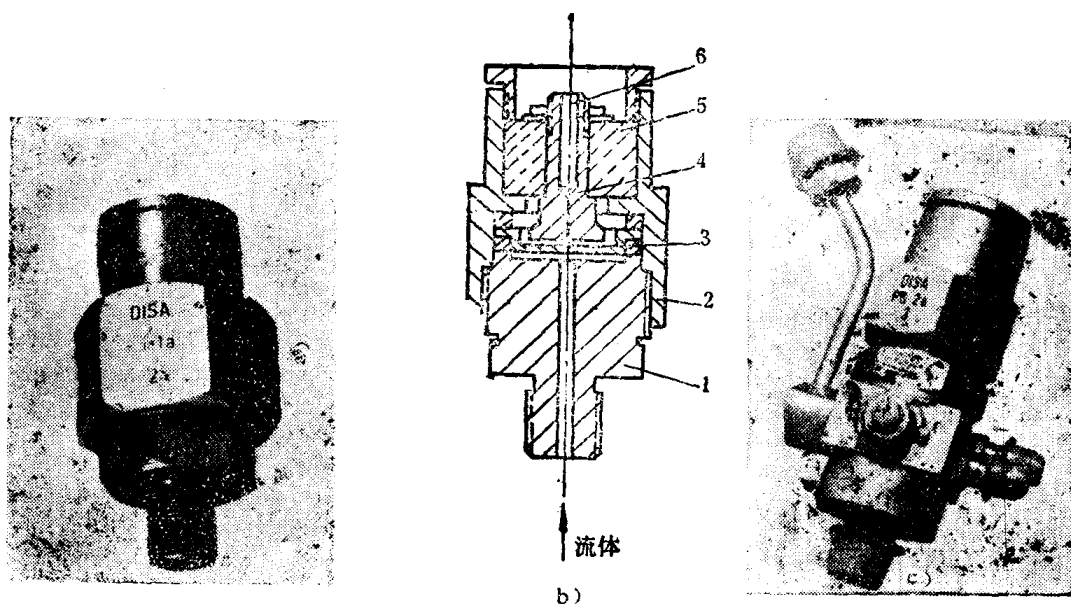


图1-14 DISA 压力传感器的外形及结构图

a) Pu1a 型高压传感器外形图 b) Pu1a 型高压传感器结构图 c) Pu2a 型低压传感器外形图

1—内壳 2—外壳 3—膜片 4—中心电极 5—绝缘物 6—同轴插塞

本传感器有一个重要的特点：不管使用的膜片厚度怎样，传感器均可承受高达 150 kgf/cm^2 的压力负荷。这是因为在高压作用下，膜片会抵在电极上，而由后者来承受过大的载荷。这样，本传感器就有可能用来研究发生在强大压力峰值之间的某个压力现象（如内燃机中的换气过程）。因为当膜片抵触到电极的短路瞬间，在万能指示器屏幕上会显示出一条很容易识别的水平线。当然，测量将只是在所指的压力范围内保证精度。

（五）Kistler 压电式压力传感器

利用压电石英材料制成的压力传感器，由於它具有结构紧凑、稳定性好、固有频率高等优点，並且与之接配的二次仪表（电荷放大器）的性能也逐年改进，因而这一测量体系在内燃机示功图测试中开始占有领先地位。

图1-15 是典型压电式压力传感器的结构示意图。由图可见它的主要组成部件有三：石英晶体6——提供与压力成比例的电荷。

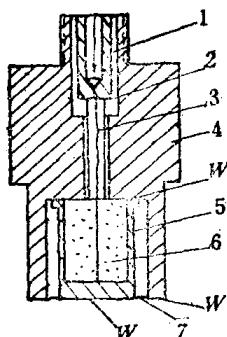


图1-15 压电式压力传感器结构示意图

1—导线接头 2—绝缘体 3—电极
4—壳体 5—予压套筒 6—石英晶体
7—膜片 W—焊接



图1-16 Kistler 6121 型压力传感器

膜片 7——它把欲测的压力传递到石英晶体上，该膜片与传感器外壳是紧密焊接的。
传感器壳体 4——用来安装並密封石英晶体。

瑞士 Kistler 公司所生产的压电式压力传感器品种繁多，各有特点。例如图 1-16 所示的 6121 型压力传感器，由于它采用了“多种稳定性”石英元件，采用耐腐蚀的镍合金钢作外壳，采用陶瓷做绝缘材料，因此，即使在高的机械负荷和高温同时作用下仍能可靠工作。它经得起高达 2500℃ 的间歇瞬间高温。它的测量范围为 0~250bar[⊖]、自重 9.5g、长 33mm。通常多把它用在内燃机、火箭、爆炸室等测试场合。又如图 1-17 所示的 601H 型压力传感器，它的测量范围为 0~1000bar，能工作在 -150~+240℃ 的温度范围内，自重只有 1.7g，长 15mm。由於它的固有频率高（130kHz）而外形尺寸小，所以對於那些安装空间

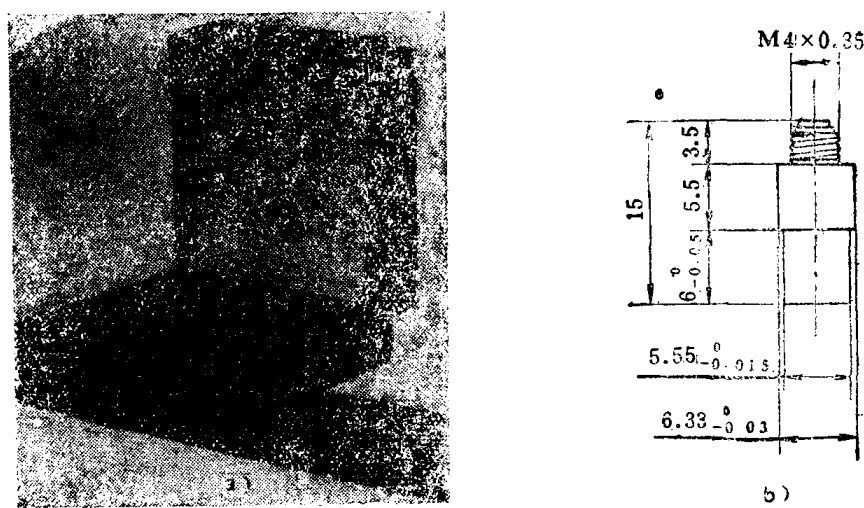


图 1-17 Kistler 601H 型压力传感器
a) 外形照片 b) 外形尺寸

小而频响又需要很高的测试场合（如对高速内燃机进行测试时），用它来进行动态测量是十分适宜的。对 Kistler 公司的其它型号压力传感器，我们不再一一介绍了，读者如欲详细了解可去查阅该公司的样本。近年来，我国也开始生产技术指标比较先进的类似产品。如上海内燃机研究所、711 所、南昌传感器厂等单位研制的 SYC 系列、QPT 系列等均已陆续投放市场。

二、扭矩传感器和集流环

（一）扭矩传感器

在非电量电测法中，测量旋转轴扭矩的方法很多，如：电磁感应法、电感法，磁致伸缩法等，但最简单实用的方法仍是电阻应变片法：在被测机器的轴上或与机器相联结的弹性元件上粘贴应变片，通过测量应变来测出扭矩。

因此，在被测轴上按测量扭矩的方法贴片、组桥並经机械标定，该轴就可作为一个扭矩传感器来用于测试。为了提高灵敏度，常把被测轴在贴应变片的区段车细一些，但这样做的时候应注意机械强度是否够。

下面介绍一种发动机试验中常用的扭矩传感器：相位式传感器。它的结构原理如图 1-18 所示。在弹性轴两端安装有两只齿轮，齿轮上方分别置有两条磁钢，磁钢上各绕有一组信

⊖ 1bar=10⁵Pa，下同。——编者注