

石英晶体压力传感器的研制及其应用

孙 立 人

摘 要

本文介绍了应用广泛的石英晶体压力传感器的结构、安装、标定和使用。该压力传感器具有结构小、重量轻、抗振动耐腐蚀和性能稳定、工作可靠、寿命长等优点。文中提供的自行设计的 FeCY_4-1B 石英晶体压力传感器, 通过在航天与航空发动机上的试验考核, 证明其精度、灵敏度、频响范围和可靠性等指标均达到国内先进水平。

一、概 述

石英晶体压力传感器是利用石英晶体的纵向压电效应和横向压电效应制成的动态压力传感器。传感器由膜片、石英换能元件、壳体、薄壁筒、电极等主要部件组成。由于用石英晶体制成的压力传感器的动态范围很宽, 频响特性好, 所以能测量准静态的压力和低频变化的动态压力。另外, 传感器结构坚实、体积小、重量轻、使用寿命长, 被广泛地应用于航天和飞机工业上。例如, 通过它来测量液体火箭推进装置的燃烧室压力, 从而评定推进装置不稳定燃烧的情况。在高超音速脉冲风洞中, 用它来测量风洞的冲击波压力等。在其它工业部门也都能使用。例如, 内燃机的气缸、油管、进排气管的压力测量, 各种高压容器和高压管道内腔动态压力的测量, 枪(炮)弹在腔中击发一瞬间的腔压变化及空气或水下爆炸冲击波压力的测量等等。随着工业的发展, 石英晶体压力传感器的应用也越来越广。但由于再好的石英晶体压力传感器也不能把绝缘阻抗做得无穷大, 因此不适合长时间地使用在静态压力测量中。

二、结 构 特 征

1. 特点

在航天工业中使用的动力装置上, 测量压力要考虑的主要特点有三个: 振动大, 高的稳

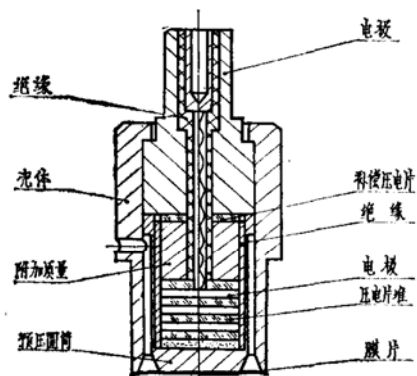


图1 压电式压力传感器结构示意图

态压力和小的脉动压力同时存在, 环境温度和工作温度高, 因此石英晶体压力传感器在结构上也必须采取相应的措施以满足测量的要求。

图1所示的是一种先进的石英晶体压力传感器的结构简图。现将这种传感器的结构特点简述如下。

1) 全密封的测压芯体:

传感器的所有测压元件, 补偿元件均被全封闭地装在由壳体和薄壁筒通过焊接组成的容腔内, 结构紧凑, 体积小。传感器石英元件的

预紧力是通过金属薄壁筒的拉力来实现的,只要预紧力稳定,传感器的线性和动态性能就能大大改善。其一是传感器精度高、线性好,其二是传感器的量程范围宽,可在不同的量程范围内(10倍设计量程或1/10设计量程)均能达到相同的精度。此外全密封的测压芯体有效地防止了由于环境条件变化而对传感器带来的影响。

2) 传感器灵敏度的提高和加速度补偿原理

i) 灵敏度的提高:在动态压力测量的许多场合,所测压力的脉动量是很小的,为了提高传感器的分辨率,必须提高传感器的灵敏度,也就是要提高传感器在感受到单位压力时输出的电荷量,一种方法是利用石英晶体的横向压电效应。X零度切割的长方形石英片当Y轴方向的长度大于X轴方向的长度时石英片在受到Y方向力时所产生的电荷量会随着它们长度比的增加而增加。采用这种方法制成的传感器横向灵敏度较小,安装方便,晶体片的加工也较容易。另一种方法是利用石英晶体的纵向压电效应,采用多片压电元件叠加的办法来提高传感器的灵敏度,能获得和上一种方法同样的效果,但晶体片加工和传感器装配都较困难。

ii) 加速度补偿原理:随着测试对象的不同,传感器感受到的振动小则几个或几十个重力加速度,大则几百个重力加速度,而石英晶体压力传感器是一个弹簧质量系统,压电元件、膜片的硬芯都有一定的质量,在有振动的测压条件下,压电元件及膜片硬芯部分的振动会导致压电式压力传感器产生与振动加速度相对应的输出讯号,对压力测量带来误差。在中压和高压测量中,由于由加速度造成的误差讯号与压力讯号相比很小,所以不一定要考虑加速度补偿。但在小压力的测量中,对于处在较大振动条件下测压的传感器,必须引入加速度补偿,才能保证测试的精度。

引入加速度补偿的方法是在传感器内部设置一个附加质量和一组(一片或数片叠加)极性相反的补偿压电片,在有振动的工况下,附加质量使补偿压电片产生的电荷与测量压电片因振动而产生的电荷相互抵消,从而达到补偿的目的,如果合理的调整补偿的附加质量,可以使传感器对加速度的敏感度仅为无加速度补偿时的几十分之一甚至全部抵消。

图2所示是一个用附加质量补偿加速度影响的原理图

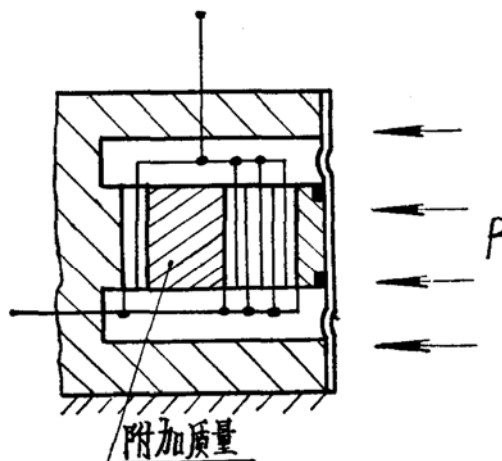


图2 用附加质量补偿加速度影响

3) 传感器的温度补偿:

石英晶体压力传感器在进行较长时间的高温压力测量时,性能会变坏。主要表现为灵敏度的变化和漂移严重,引起上述变化的主要原因是由于温度的变化影响传感器各部件热膨胀及热应力的变化,从而影响了预紧力的稳定。一般说来,石英晶体的热膨胀系数较小,而金属外壳的热膨胀系数较大,当传感器长期工作于某一恒定高温之下时,由于传感器金属外壳膨胀多,石英晶体膨胀少而使预紧力下降,从而影响了传感器的性能。对这种情况,必须进行长期温度补偿,进行温度补偿的办法是在传感器芯体内设置一块温度补偿块,它的膨胀系数要比壳体材料的膨胀系数大,在长期温度的作用下,使芯体内各元件的伸长与壳体的伸长完全一致,使预紧力保持不变(实际情况是变化极微)从而消除了长期温度影响引起的漂移。

如果传感器的金属壳体所选用的材料其膨胀系数小于石英晶体的膨胀系数,则要用一块

膨胀系数小于金属外壳膨胀系数的材料来做温度补偿元件，在长期温度的作用下使传感器的预紧力保持不变。在这种情况下，温度补偿元件一般选用陶瓷材料。选用陶瓷材料有二个好处：一是调整补偿片的厚度使其起补偿作用，二是陶瓷的导热系数很小，是热的不良导体，能起隔热作用。

另外，当传感器受到瞬时的温度冲击时，应进行短期的温度补偿。通常使用的方法是用某种材料制造一种特殊的传感器膜片，使受热均匀，尽量使石英晶体元件上受到的力的变化极小。

2. 技术性能

这种具有加速度补偿和温度补偿的性能优良的石英晶体压力传感器能使用于各种测试场合并可获得准确的测试数据。现将这一类型的压力传感器的技术性能简述如下，以供参考。

瑞士 Kistler 公司生产的 7031 型及我所研制的 FcCY4-2 型传感器均属这一类型的传感器。

		7031	FcCY4-2
校准压力范围	公斤/厘米 ²	0 - 25	0 - 30
分辨率	公斤/厘米 ²	0.0005	0.0008
灵敏度	电量/公斤·厘米 ⁻²	65	65
固有频率	千赫	80	80
线性	%	± 1	± 1
绝缘电阻	欧	10 ¹⁴	10 ¹⁴
加速度感度	公斤·厘米 ⁻² /g	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
温度系数	%℃	- 0.02	- 0.02
工作温度范围	℃	- 150 ~ + 240	- 60 ~ + 200
重量	克	10.8	12

三、传感器的安装及标定

1. 传感器的安装:

传感器在实际使用时由于安装的条件不同，测量的要求不同，一般可分如下几种情况：

1) 测量物供传感器安装的壁较厚，这种传感器可直接安装于测量物的壁上，只需加工一个压紧接头就可以了。安装方法如下：

- i) 只用一个压紧接头(图 3)。
- ii) 为便于电缆安装使用带有转接头的压紧接头(图 4)。
- iii) 在测量温度在 200℃ 左右时使用带有转接头及散热器的压紧接头(图 5)。

2) 当测量物提供的传感器安装壁较薄时，传感器不能直接安装于测量物的壁上，必须通过传感器安装转接座进行安装，再用上述三种压紧接头压紧，具体结构如图 6 所示。

3) 当测量高温燃气时，应使用一种带有冷却水管的传感器安装转接座，结构如图 7、图 8 所示。

对于另外一些更为特殊的使用安装的情况，可以根据具体情况来设计传感器转接座。在一般动压测量中，为了满足测试系统的频率响应要求，传感器都必须齐平安装，在设计各种特殊用途的转接座时也必须考虑这一要求。

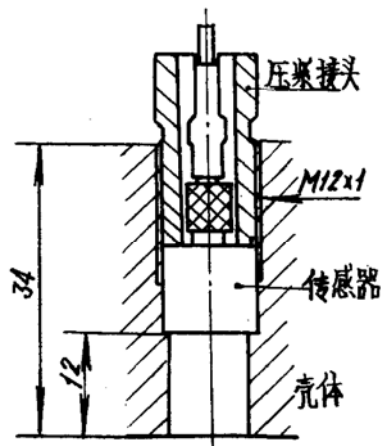


图 3

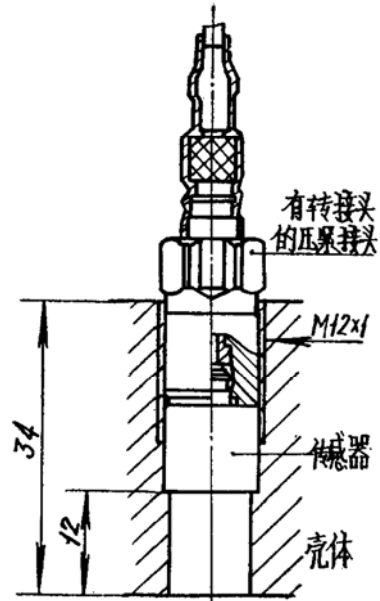


图 4

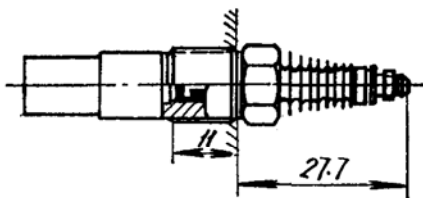


图 5

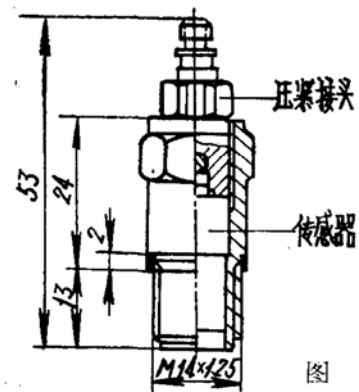


图 6

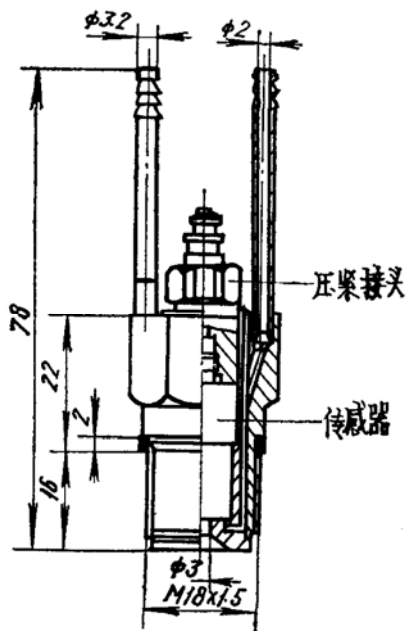


图 7

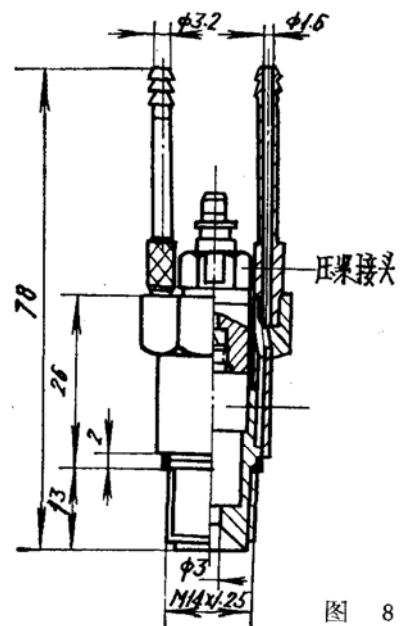


图 8

2. 传感器的标定:

传感器在实际使用中, 主要通过两个基本特性——静态特性和动态特性来反映被测压力的变化。

1) 静态特性的标定: 传感器的静态特性表示传感器在被测物理量各个值处于稳定状态时的输出关系, 其主要指标是: 线性度、迟滞、重复性和灵敏度, 标定系统的框图如图 9 所示:

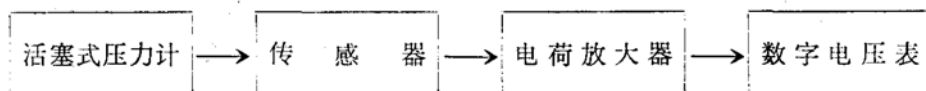


图9 静态标定装置方框图

为了保证标定结果具有一定的精度, 活塞式压力计, 电荷放大器, 数字电压表应有足够高的精度。一般使用的国产 YU 型活塞式压力计具有万分之五精度, 国产 1503 数字电压表也达万分之五的精度, 国产电荷放大器的精度较低 (3%) 一般不适合用作传感器标定用。国外瑞士 Kistler 公司生产的电荷放大器 5006 或 5007 线性也达到万分之五, 可以用以标定传感器。可见用 YU 型活塞压力计, 5006 或 (5007) 电荷放大器, 1503 数字电压表组成的测试系统的系统精度在 1% 以内, 可以用以标定精度为 1% 的传感器。

现将静态特性的主要指标简述如下: 评定传感器的静态基本性能指标和精度计算, 应按部标 QJ28-81 处理, 但计算甚为复杂, 在生产或实验室条件下可用以下方法进行处理。

i) 线性度: 传感器测出的输出-输入校准曲线与其理论拟合直线之间的偏差就称为该传感器的线性度, 通常用相对误差来表示其大小, 即相对应的最大偏差与传感器满量程 (FS) 输出之比:

$$ef = \pm \frac{\Delta_{\max}}{\Delta F \cdot S} \times 100\%$$

式中: ef——线性度

$\Delta_{\max}$ ——输出平均值与理论值的最大偏差

$\Delta F \cdot S$ ——传感器满量程输出平均值。

ii) 迟滞: 传感器在正 (输入量增大) 反 (输入量减小) 行程期间输出, 输入曲线不重合的程度, 也用百分比表示。

$$et = \pm \frac{\delta_{\max}}{\Delta F \cdot S} \times 100\%$$

式中: et——迟滞

$\delta_{\max}$ ——输出值在正反行程间的最大差值。

iii) 重复性: 传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度。用百分比表示:

$$ez = \pm \frac{2\sigma}{\Delta F \cdot S} \times 100\%$$

式中: ez——重复性

σ ——标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

y_i ——测量值

$\bar{y}$ ——测量值的算术平均值

n ——测量次数

iv) 灵敏度：线性传感器标准线的斜率就是静态灵敏度，石英晶体压力传感器灵敏度的单位是：微微库仑/公斤/厘米²。

2) 动态特性的标定：

动态特性是指传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。

i) 目的：对于动态压力测量，估计和控制动态误差是一个特别重要的问题，因此就需要通过动态标定的方法来了解测量系统动态响应特性。

ii) 压力动态标定装置：目前用于传感器动态校验的压力动态标定装置种类很多，但较为广泛应用的要算激波管了，它适用于标定高频率响应的测压系统。激波管是一个理想的阶跃函数发生器，由激波管产生的一个阶跃压力来激励被测压力传感器，并用适当的记录设备来记录在这一阶跃压力激励下被测压力传感器所产生的过渡过程，依据这一过渡过程，运用适当的计算方法，求得被测压力传感器的幅频特性和相频特性。

压力传感器的动态校验装置如图10所示，除激波管本身外，整个装置可分成气源，测速和纪录三个部分。

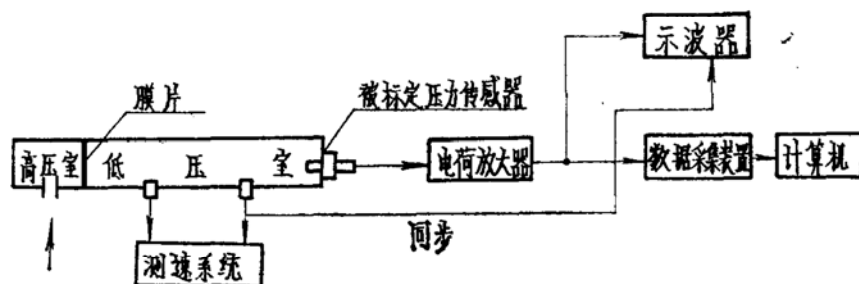


图10 激波管标定系统

另一种为快速开启阀门，这种装置压力上升较慢，通常为几十到几百个微秒，甚至更长一些，但阶跃的持续时间却很长，事实上可以认为是无限长的，因此比较适用于标定频响较低的传感器或测压系统（结构略）。

iii) 传感器的动态响应特性：如果把传感器简化为单自由度的振动系统，那么传感器在振幅不变的正弦压力作用下的响应特性为：

幅频特性

$$G = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_n^2)^2 + (2\xi\omega/\omega_n)^2}}$$

相频特性

$$\varphi = \arctg\left(\frac{2\xi\omega/\omega_n}{1 - \omega^2/\omega_n^2}\right)$$

式中 ω ——角频率

ξ ——阻尼比

$$\xi = c/C_c$$

c ——阻尼

C_c ——临界阻尼

$$C_c = 2\sqrt{km}$$

k ——弹簧刚度

m ——质量

ω_n ——无阻尼固有频率

$$\omega_n = \sqrt{k/m}$$

四、石英晶体压力传感器的正确使用和维护

1. 使用:

石英晶体压力传感器特别适合于动态压力的测量和时间不长的准静态压力的测量,测试系统一般由传感器、电荷放大器及记录显示仪表组成。石英晶体压力传感器的输出量是电荷,这是一种静电现象,它的输出功率极其微小。在没有泄漏时,当作用于压电元件的压力保持不变时,则压电元件产生的电荷量也为常数。如果发生泄漏,电荷量将逐渐减少,这样,电荷量将不能与压力值保持一个确定的比例关系,从而造成误差。因此除了与传感器联结的电缆及放大器必须有极高的阻抗外,传感器本身必须保持高的绝缘阻抗。为此必须注意以下几点:

- 1) 传感器在不使用时必须置于盛有干燥剂的密闭容器中;
- 2) 使用前测量传感器的绝缘阻抗,必须大于 10^{12} 欧姆;
- 3) 使用前进行静态特性的标定,必须符合技术条件中规定的各项性能指标;
- 4) 传感器在安装到被测物体上后,若不立即进行测试,必须将保护螺帽拧在插头上,

以防湿气和灰尘进入。

2. 维护

石英晶体压力传感器在使用以后,必须按下列步骤进行清洗保管,以保证下次使用:

- 1) 用无水乙醇(化学纯)进行清洗;
- 2) 烘干;
- 3) 将传感器置于盛有干燥剂的密闭容器内。

五、FcCY₄-1B石英晶体压力传感器

1. 简介:

FcCY₄-B石英晶体压力传感器是利用石英晶体的正压电效应而制成的压力-电荷转换的有源式传感器。

本传感器机械性能好,没有自发的极化效应,尤其没有热释电现象,它的灵敏度在长期使用中十分稳定,因此它具有很好的线性,滞后效应小,适应使用的温度范围大,温度系数小,频响宽,体积小,耐腐蚀性好,替换方便,能在恶劣的环境下使用等优点,因而是理想的压力换能器件。

FcCY₄-1B压力传感器已于八二年第四季度在上海由航天部系统传感器设计研究、计量、使用、资料等部门及国防科技大学共17个单位参加的鉴定会上通过了现场性能测试,资料完

整性的审查等内容，一致通过了鉴定结论。

由于石英晶体动态压力传感器组成的测试系统的零位是可浮动的，可以根据需要选择任一状态作为零点，因此石英晶体动态压力传感器在使用上更增加了它的灵活性和应用面。该传感器可广泛应用于火箭、航空、内燃机、钢铁、机械等工业部门，用以测量各种气体和液体的短时间静态，准静态压力，尤其适用于各种气体和液体的动态压力测试，图11所示为FcCY₄-1B的外形图

传感器的技术性能如下：

量程	0 ~ 150公斤/厘米 ²
灵敏度	≥ 16电量/公斤·厘米 ⁻²
精度	≤ ± 1 %
绝缘电阻	≥ 10 ¹³ 欧姆
电容	≤ 14微微法
谐振频率	≥ 65千赫
工作温度范围	- 30℃ ~ + 1100℃
阻尼系数	≤ 0.09
重量	≤ 32克
纵向加速度感度	≤ 0.002公斤厘米 ⁻² /g
横向加速度感度	≤ 0.0005公斤厘米 ⁻² /g
温度系数	≤ 0.01%/℃
寿命	> 10万次(满量程寿命试验)
安装力矩	≤ 7 公斤·米

传感器抗湿性能良好

传感器能经受500个重力加速度的振动试验

传感器的密封面上开有密封槽，密封可靠，在六角面上开有二个对称的铅封孔，如测试过程中振动较大，可打铅封，以防松动。

2. 应用

FcCY₄-1B石英晶体压力传感器使用于航天和航空动力装置的压力测量。通过多次长时间的使用说明性能良好，工作可靠。

1) 在航天动力装置上使用它进行动态压力测量时，传感器要承受强烈的振动和很大的压力，经过特定的试验，传感器在200g的振动环境下工作，附加输出仅为0.35公斤/厘米²左右。在120公斤/厘米²，且有大振动的情况下工作，传感器密封性能极好。

2) 用于航空发动机燃烧室压力测量。发动机的中心工作温度为1200℃连续工作长达六小时以上。这时传感器通过冷却水管通水冷却，进水管和出水管的水温之差为3℃，传感器工作正常密封性能好。

这种传感器性能稳定，使用寿命长，传感器每次使用后经清洗再进行静态标定，它的灵敏度不变，其它性能指标也均符合技术条件规定的各项指标，是一种较为理想的动态压力传感器。

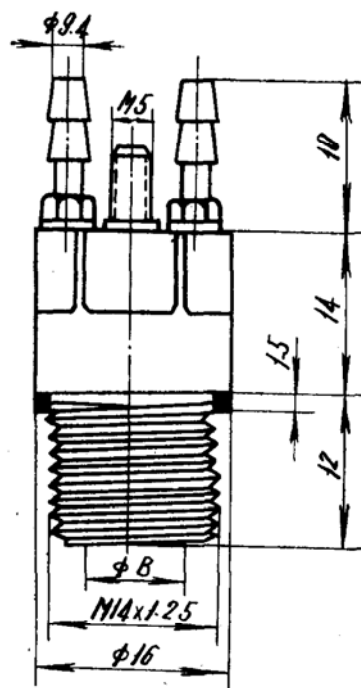


图 11 FcCY₄-1B外形图