

# 石英压力传感器

曹重华

(中国科学院力学研究所)

最近,我们研制了一种压电式的石英压力传感器。由于在结构上作了较大改进,传感器的线性好、自振频率高、灵敏度稳定。本传感器可以用来进行气体和液体介质中 600 个大气压以下的各种动态和准静态压力测量,也可以用来测力。可以广泛应用于气动力学实验、爆炸力学实验、各种压气机和内燃机等的实验研究之中。

## 原理

石英压力传感器是利用石英晶体固有的压电效应,将力的信号转变成电的信号装置。描述压电效应的公式如下:

$$Q = K \cdot F \quad (1)$$

式中,  $F$  是施加在石英晶体上的压力,  $Q$  是由于力  $F$  的作用,在晶体上所产生的束缚电荷(见图 1),  $K$  是比例系数,即压电系数或叫压电灵敏度。

石英晶体的压电效应是线性的,一直到压碎为止(1000 公斤/厘米<sup>2</sup>以上)它的压电系数是个常数。而且温度系数很小(每摄氏一度约 -0.016%),再加上石英的刚度大,因此可用来制作性能良好的压力传感器。

跟石英压力传感器配套的二次仪表必须是高输入阻抗的电路,不然加压后石英上产生的束缚电荷所感生的自由电荷将很快漏失。现在,一般都用电荷放大器来作阻抗变换后,再将信号送示波器或数字电压表显示、记录。由于线路的阻抗和传感器本身的阻抗总是有限的

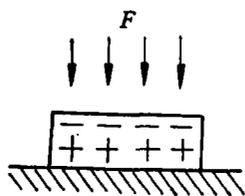


图 1

( $10^{13}$  欧姆左右),所以从原则上讲压电式的压力传感器一般不用来作静态测量。

## 传感器机械结构的刚度和自振频率

过去,我们的传感器是采用图 2 所示的结构。先用环氧树脂将晶体片、电极片粘结在螺

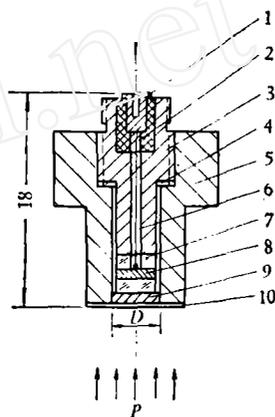


图 2

1 引电极 2 垫套 3 螺纹底座 4 调节垫圈 5 外壳 6 导线 7 石英晶体片 8 电极片 9 垫片 10 膜片

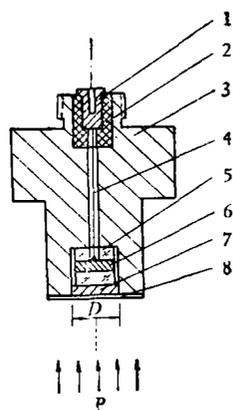


图 3

1 引电极 2 垫套 3 外壳 4 导线 5 石英晶体片 6 电极片 7 垫片 8 膜片

纹底座上,然后拧入壳体,即成。

照理,如果把晶体片和螺纹底座看作是一个谐振系统,按产生纵波的粗略估算,传感器自振频率可以高达 170kHz ( $f = v/2t$ ;  $f$  为频率、 $t$  为晶体片和螺纹底座的总厚度、 $v$  为声速)。但实测结果只有几十 kHz,这只能用螺纹结构刚度不高来解释。而且,下面还将提到刚度不高还会对传感器的线性等产生不利影响。

这次我们的传感器采用了图 3 的结构。取消了螺纹,底座和壳体做成一个整体。由于此种结构提高了刚度,自振频率大大提高达到了 250kHz 左右,上升时间也缩短到小于 2 微秒。这就大大扩展了传感器的高频运用范围。

### 灵敏度、线性及灵敏度的稳定度

由图 2 所示,当外压强为  $P$  时,作用在直径为  $D$  的圆以外的压力由传感器外壳承受,跟晶体片无关;作用在  $D$  圆内的压力将全部由晶体片承受,此晶体片所受的作用力与外压的关系为:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} P \quad (2)$$

定义受力面积  $S$ :  $S = \frac{\pi D^2}{4}$

由(1)、(2)得:

$$Q = (n \cdot K \cdot S) \cdot P \quad (3)$$

式中  $n$  是传感器内按装的晶体片的片数。

(3) 式表明: 传感器产生的电荷  $Q$  和外压强  $P$  成正比,  $(n \cdot K \cdot S)$  是比例系数,也就是传感器的“灵敏度”。

(3) 中,  $n$ 、 $K$  均为常数,显而易见,此种结构的传感器其线性好坏的关键在于受力面积  $S$  是否是常数。如果  $S$  在全量程范围内变化很小,传感器线性就好,否则线性就差,这取决于传感

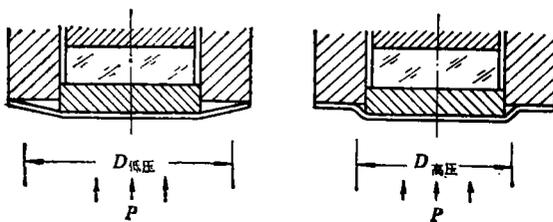


图 4

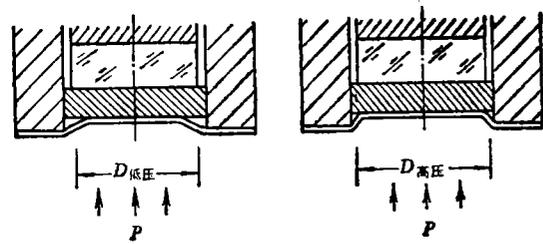


图 5

器的结构设计和按装工艺。

按图 2 设计的传感器结构,轴间的按装尺寸靠调节“调节垫圈”的厚度来控制,不能十分精确。如果传感器的“头部”没有装平,而是“中心突出”如图 4 所示。那么由于膜片是个弹性体,传感器在低压测量时晶体片的有效受力面积  $S_{低} = \frac{\pi}{4} D_{低}^2$  (左图),显然要大于该传感器在高压时的有效受力面积(右图)。这类传感器的灵敏度将必然随着被测量压力的上升而下降!

反之,如果传感器的头部如图 5 所示“中心凹入”。那末由于膜片是个弹性体,传感器在低压测量时,晶体片的有效受力面积(左图)显然要小于高压测量时的有效受力面积(右图)。那么,这类传感器的灵敏度将随着被测量压力的上升而上升!

再有,如果图 4、图 5 这两类传感器在各种压力下多次反复使用,膜片还可能产生范性形变。这时膜片在低压时也呈图 4、图 5 中右图的形状。这样,传感器的线性倒是会好些,但传感器低压时的灵敏度却跟原先不一样了。传感器的灵敏度是否稳定当然也是传感器的主要性能指标之一。

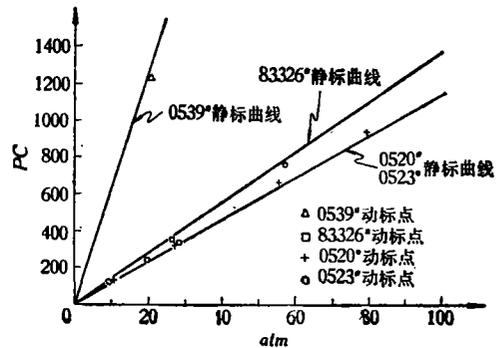


图 6

由以上分析可以推断：一般说来，线性好的传感器，其灵敏度的稳定度往往会好些。

由以上分析，还可以得到另一个更重要的启示，那就是：传感器结构设计时，除了要考虑垫片和外壳易于“装平”之外，还必须让晶体片座落在一个刚度很高的结构上，以免在高压时底座“后退”，变成图4所示“中心凹入”的样子。由此可见：尽最大可能提高晶体片后面的机械结构的刚度，不只能提高传感器的自振频率，而且有利于改善传感器的线性和灵敏度的稳定度，是传感器设计的主要关键之一。

根据以上讨论，这次我们的传感器采取了图3的设计。晶体片、电极片和垫片用环氧树脂粘入外壳，待环氧树脂固化后，再上车床将垫片和外壳端面一刀车平。最后才焊上0.05毫

米厚的不锈钢膜片。这样的结构和工艺既保证了“装平”，又保证了不“后退”，传感器的主要技术指标都得到了保证。

另外，由于膜片未加预紧力，传感器的瞬时热效应也较小。

### 传感器的标定和结果

用YS-60型、YS-600型砷码式压力计；静电计管前置放大器和数字电压表系统做了传感器的静标。

在JF<sub>4A</sub>激波管上做了传感器的动标。激波管内径为80毫米，入射激波马赫数为1.7左右，传感器被按装在激波管的尾端盖上。表1、图6、图7、图8给出了本传感器静标和动标的结果，并跟瑞士Kistler 6005型、6031型石英压力传感器进行了比较。

表1 静、动标结果

| 传感器           | Kistler 6031型 | Kistler 6005型 |            |            |            | 本文        |           |           |
|---------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
|               | 83326*        | 84848*        | 84850*     | 84851*     | 84852*     | 0520*     | 0523*     | 0539*     |
| 灵敏度 $P_c/nt$  | 14            | 9.7           | 10.7       | 9.6        | 9.9        | 11.5      | 11.4      | 65        |
| 线性 %          | 2.6           | 1.5           | 7.5        | 5          | 1.6        | 3.3       | 1.5       | 7         |
| 主自振频率 kHz     | 170           | —             | 120        | 120        | 155        | 290       | 240       | 65        |
| 绝缘阻抗 $\Omega$ | $>10^{13}$    | $>10^{13}$    | $>10^{13}$ | $>10^{13}$ | $>10^{13}$ | $10^{13}$ | $10^{13}$ | $10^{13}$ |

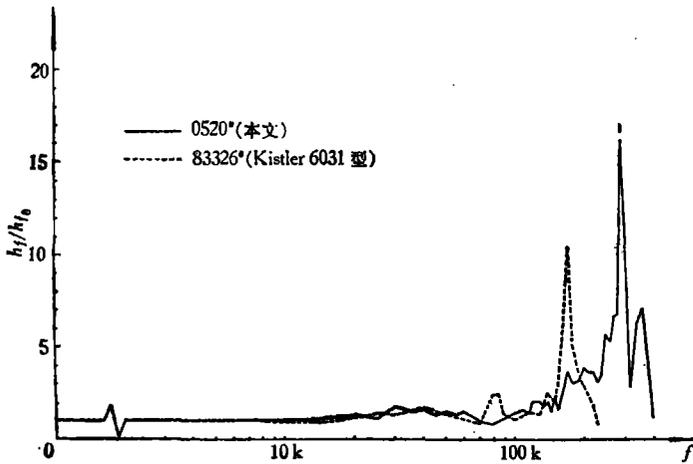


图7 频响曲线

(此频响曲线是请七机部一院计量站将激波管动标曲线上机算得的)

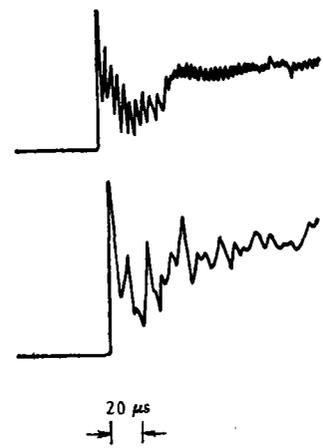


图8

由于某种原因，由激波管尾端盖上测得的反射激波后的压力曲线，出现一个50 $\mu$ s左右的“坑”。图中上面的曲线是0520\*传感器测得的，下面的曲线是用Kistler6005型传感器测得的。显然，用0520\*传感器测量较高频率的压力波动，优点是明显的。

(下转第43页)

(条纹级数), 我们用  $n_i$  表示在给光波下的条纹级数, 那么

$$n_i = R_i / \lambda, \quad (13)$$

用 (13) 式计算出在上述四种光波下的  $n_i$  随  $i$  的变化值也列成表, 这样在使用时相当方便。

至于测量除了上述四种波长之外的其他波长下的光程差, 可利用插值法<sup>[3]</sup>。

波长在  $F$ 、 $C$  之间及超过  $F$ 、 $C$  之外不大于  $0.1\mu$  各波长下的光程差, 可用普通的线性插值法。超过  $F$ 、 $C$  之外  $0.1\mu$  以上的各波长下的光程差要求使用非线性插值法。详见文献[3]。此法有两种形式:

$$\text{其一, } R_i = H + \frac{\alpha}{\lambda^2}$$

式中  $\alpha$  和  $H$  是常数

$$\alpha = (R_F - R_C) \frac{\lambda_C^2 \cdot \lambda_F^2}{\lambda_C^2 - \lambda_F^2}$$

$$H = R_C - \frac{\alpha}{\lambda_C^2}$$

$$\text{其二, } R_i = R_C + (R_F - R_C) \cdot A_i$$

$$\text{式中 } A_i = \frac{\lambda_F^2}{\lambda_C^2 - \lambda_F^2} \left( \frac{\lambda_C^2}{\lambda} - 1 \right)$$

(三) 补偿原理 在正交偏光镜中, 使被测晶体切片的两主轴(或两次主轴)方向与补偿器

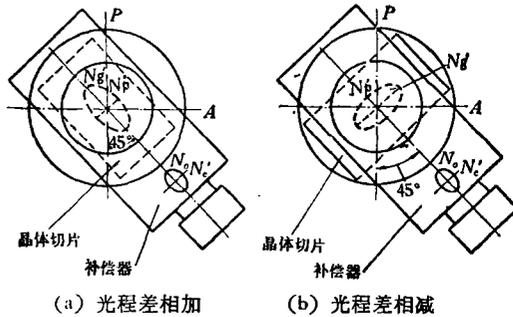


图 5 补偿器与被测晶体切片光程差叠加的两种情况

补偿时的两主轴方向一致, 而与上下偏振镜的偏振方向成  $45^\circ$  夹角。见图 5。此时光通过被测晶体切片和补偿片后产生的光程差 ( $R_{总}$ ) 必然等于单独通过被测晶体切片的光程差 ( $R_{晶}$ ) 与单独通过补偿片的光程差 ( $R_{补}$ ) 之代数和。

$$R_{总} = R_{晶} \pm R_{补}$$

此时将出现两种情况: 其一, 补偿片的快光方向(即补偿片倾斜时转动轴的方向)与被测晶体切片的快光方向平行, 则:  $R_{总} = R_{晶} + R_{补}$  故此时不能消光(即不能补偿)。其二, 补偿片的快光方向与被测晶体切片的慢光方向平行, 则

$$R_{总} = R_{晶} - R_{补}$$

当  $R_{晶} = R_{补}$  时, 则  $R_{总} = 0$ , 此时即消光(实现补偿)。补偿片的光程差值即代表了被测晶体切片的光程差值。

## 讨 论

与 Berek 旋转补偿器比较有如下的主要优缺点: (一) 制片工艺性好, 一般光弹试验单位均可自行制造补偿片。(二) 可根据需要制造较大尺寸的补偿片, 故能用于光弹性试验的各种仪器上。

缺点是, 塑料补偿片的双折射率比天然晶体的双折射率低, 故其量程受到了限制。

需要定期标定, 每两年标定一次即可。

## 参 考 文 献

- [1] 季寿元、王德滋, 晶体光学, 人民教育出版社(1961)。
- [2] Procht, M. M. 光测弹性力学 I、II, 陈森、黎仲鼎译, 科学出版社(1964)。
- [3] Table of Function for the Variable Compensator O... 130λ, Ehringhaus Rotary Compensator, CARL ZEISS JENA.

(上接第 49 页)

在整个标定过程中, 本传感器和 Kistler 传感器一样, 压电灵敏度相当稳定。

标定结果表明: 本传感器主要技术指标: 线性与 Kistler 传感器相当, 自振频率是 Kistler 6005 型 6031 型传感器的 1.6 倍左右, 是一种

性能比较理想的压力传感器。

本文工作过程中, 得到了俞鸿儒同志、韩文成同志的许多指导, 袁生学、张峰、陆林森、翟曼玲同志的许多帮助, 特此致谢!