

# 压电石英多分量力传感器及其应用

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

**【摘要】** 本文针对工程结构动态特性研究所提出的多分量动态力的测量问题，介绍了以石英晶体为敏感组件的压电石英多分量力传感器的工作原理、结构特点；石英晶体特性；多个石英芯片组合及测试技术；石英芯片装配工艺要点，重点工序理论基础；多个多分量压电石英力传感器并联组成测量系统（测力平台）的特性与受力分析。并简要的介绍了压电石英多分量力传感器在动态测试中的应用。

**【关键词】** 多分量力传感器；动态特性；石英晶体；压电效应；电荷灵敏度；电荷放大器；测力平台

## 一、概述

进入 21 世纪以来，随着科学技术的进步，在一些结构设计与测试中，用工程动力学代替工程静力学解决问题，研究结构的动态特性以保证结构的安全性和可靠性越来越被人们所重视。在动态力、动态压力等参数测量中，由于被测力、压力不断变化，动态测量系统的响应能否及时跟上这种变化？这是动态测力、测压力和其它动态参数测量必须特别注意的问题。这就对结构的动态特性研究、动态测试技术与装备提出了许多新要求，其中对动态测力、测压力的传感器要求比较苛刻。动态测力、测压力等传感器应具备体积小、重量轻，刚度大，固有频率高，动态范围广，输出灵敏度高等特点。动态参数测量的核心是选对传感器，并研究传感器动态误差出现原因和消除方法。国际上工业发达国家在动态测试中，多采用以石英晶体为敏感组件的压电石英力、压力传感器。由于石英晶体材料具有其它材料无可比拟的特性，因此在传感器研制领域被广泛的用作力—电转换组件，其优点是固有线性好，几乎无滞后；刚度大，石英的弹性模量  $E=8000\text{kg/mm}^2$ ，因石英晶体片的厚度只有  $0.4\sim 1\text{mm}$ ，所以整个传感器和实心小钢块相似，固有频率高，一般都在几十千赫以上；频率响应范围宽，特别适合用于动态测量；无热释电现象，时间老化率低，稳定性好；居里点高达  $573^\circ\text{C}$ ，受温度影响小，灵敏度稳定性好；绝缘电阻高，体积电阻率  $> 10^{12}\Omega\text{ m}^2/\text{m}$ 。选配适当的电荷放大器后，能在低至接近零周，高达十千周的频率范围内工作，尤其适合测量速变参数。当用于动态力测量时，其测力值可达兆牛量级，又能分辨出小至几毫牛的力。特别是在测量运载火箭发动机的推力向量（力的大小、方向和位置）；测量金属切削机床切削过程的切削力；测量汽车高速旋转时轮胎与路面之间产生的接触力、摩擦力；航天飞行器、飞机、无人机等进行空气动力试验的六分力天平，

均采用压电石英多分量力传感器。研究压电石英多分量力传感器的动态测量误差就是要研究动态测量中各个测量环节如压电石英力传感器、电缆、电荷放大器、记录器、数据处理、各种安装方法和防干扰等的动态响应问题。

## 二、压电石英多分量力传感器的工作原理与技术要求

石英晶体是单晶体中具有代表性的同时也是应用最广泛的一种压电晶体。它是物理、化学特性极其稳定的  $\text{SiO}_2$  单晶，熔点为  $1750^\circ\text{C}$ ，密度为  $2.65 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，强度高、硬度大，其拉伸强度  $9800 \text{N/cm}^2$ ，压缩强度  $19600 \text{N/cm}^2$ ，莫氏硬度可达 7 度。在传感器中使用的石英晶体是  $\alpha$ -石英 ( $\text{SiO}_2$ )，它是石英晶体的低温相，当温度升高到  $573^\circ\text{C}$  时，即转变为  $\beta$ -石英 ( $\text{SiO}_2$ )，其压电效应基本消失，一般称压电效应消失的温度转变点为居里点。石英晶体在常温下除氢氟酸外几乎不溶解于任何酸类，长期保持稳定的结晶状态。所以用石英晶体制造的传感器具有许多独特的优点，即体积小、高度低、重量轻；工作频率稳定性，重复性好，滞后小；并具有理想的弹性和极高的 Q 值，对杂散电磁场不敏感。由晶体学可知，石英晶体既是压电体又是弹性电介质，所以在应力和电场分别作用下将产生多方向压电效应，可制造各种压电石英传感器。由于石英晶体是各向异性的，沿直角坐标轴的不同方向切割产生三种压电效应，即纵向效应、横向效应和剪切效应。

纵向效应——当石英晶体沿  $X0^\circ$  晶轴的垂直方向切割出来的芯片受到力  $F_x$  作用时，在其表面上产生电荷  $Q$ ，它与作用力  $F_x$  成正比而于芯片的几何尺寸无关。一般在沿  $X0^\circ$  晶轴的垂直方向切割出来的石英晶体圆盘上施加压缩力，它将产生 2.31 皮库仑/牛顿的电荷。石英晶体的  $X0^\circ$  切割如图 1 所示，其电荷  $Q$  计算公式为：

$$Q=d_{11}F_x$$

式中： $d_{11}$ —石英晶体的纵向压电模数，其值为  $2.31 \text{PC/N}$ 。

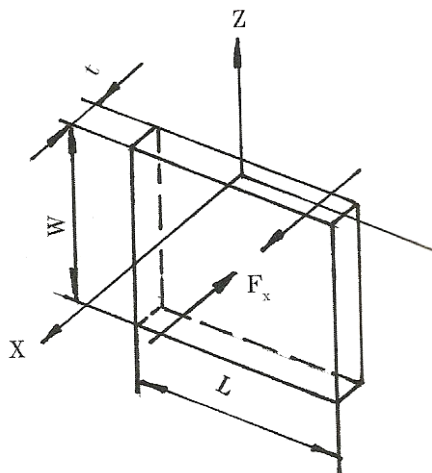


图 1 石英晶体的  $X0^\circ$  切割

横向效应——当石英晶体沿 Y 轴方向受外力  $F_y$  作用时，在垂直于 X 轴的平面上产生与作用力

$F_Y$  成正比的电荷  $Q$ ，且与芯片的尺寸有关。电荷计算公式为：

$$Q = -d_{11} \frac{L}{t} F_Y$$

式中： $L$ —石英芯片长度；

$t$ —石英芯片厚度。

如果切割石英晶体圆盘的方向与  $Y$  晶轴垂直，在某一个特定方向上施加剪切力，它产生 4.52 皮库仑/牛顿的电荷，而在其它方向上施加的力则不产生电荷，无输出信号。

剪切效应——在剪切型  $Y0^\circ$  切割的芯片中，当石英晶体在垂直于  $Y$  轴的平面内，沿  $X$  轴的方向作用剪切力  $T$  时，在受力表面上产生电荷  $Q$ ，它与剪切力  $T$  成正比，而与石英晶体片的几何尺寸无关。电荷计算公式为：

$$Q = d_{26} T = -2d_{11} T$$

式中： $d_{26}$ —石英晶体的剪切压电模数。

石英晶体的压电效应如图 2 所示。

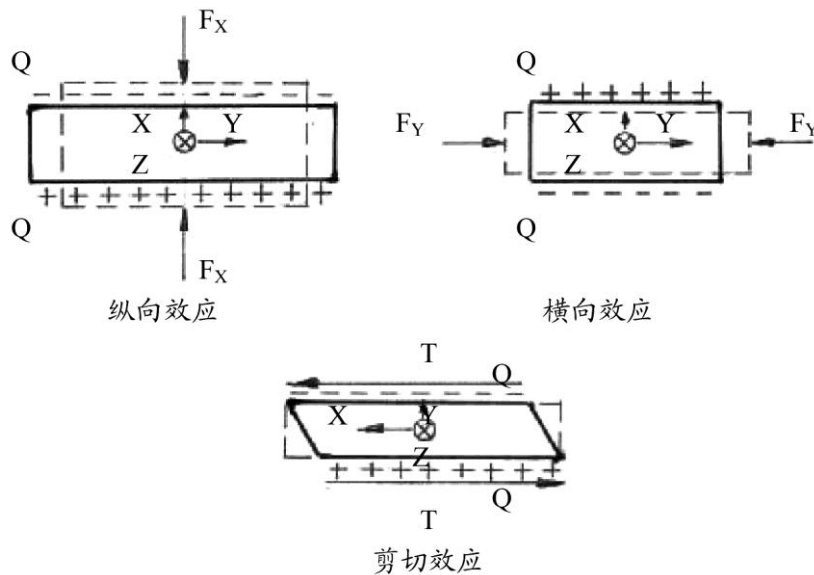


图 2 石英晶体的压电效应

石英晶体的压电效应虽然只是三个，但它却是测量多分量力与力矩最重要的效应。动态力的测量就是直接利用石英晶体的压电效应，即直接利用纵向效应可以测量压向力，直接利用剪切效应可以测量某一方向上的剪切力。石英晶体中硅原子和氧原子的位置及其在加载状况下产生的相对变形，可用硅原子和氧原子的相对变形图表示出来，其纵向压电效应如图 3 所示，横向压电效应如图 4 所示。

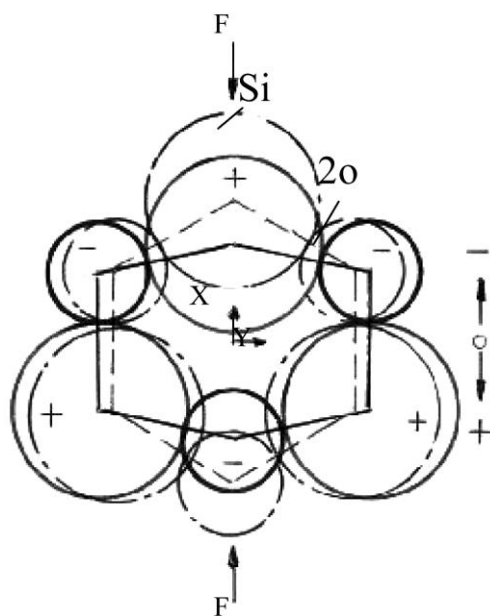


图3 石英晶体纵向效应原理图

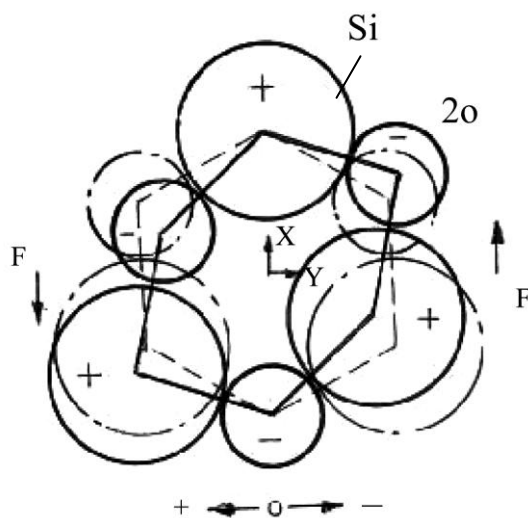


图4 石英晶体横向效应原理图

由图3、图4可以看出硅原子把其外层的四个电子转交给氧原子，而每个氧原子用两个电子把其外层填满。这样硅原子有四价正电荷，氧原子有二价负电荷。电荷由覆盖在石英晶体表面上的电极进行收集。用电荷放大器（带有电容反馈的运算放大器），将石英晶体产生的电荷转换为成比例的电压，即可以完成多分量动态力的测量任务。为了减少电荷的泄露，放大器的输入端需要有很高的绝缘电阻，一般要求为  $10T\Omega$ （兆兆欧）。

压电石英多分量力传感器的核心组件是石英晶片组。在测力范围内，任何一个动态力作用在传

传感器的承载面上时，它便能及时、准确、灵敏的将其分解成两个、三个或六个分力、分力矩给予输出。以压电石英三分力传感器为例，对其主要技术性能指标的要求是：测力范围 X、Y、Z 向分别是多少 N（牛）；灵敏度 X、Y、Z 向分别是多少 Pc/N；分辨率 0.01N；线性、重复性、滞后 $\leq (0.5\sim 1)\%$ ；绝缘电阻 $>10^{13}\Omega$ ；固有频率 14~28KH<sub>z</sub>；温度系数 $<-0.02\%/^{\circ}\text{C}$ ；工作温度范围 $-60^{\circ}\text{C}\sim 140^{\circ}\text{C}$ 。

### 三、压电石英多分量力传感器的结构与芯片组合特点

压电石英单向、二向、三向力传感器的总体结构基本相同，只是石英芯片的数量不同。它由壳体、绝缘套、石英芯片或芯片组、电极片、电极引线、上盖、密封膜片和接线插头等组成。电极片分别夹在石英芯片之间，在较高的预紧力作用下，将上盖与外壳用电子束焊接使其成为一个坚实的整体结构。当外力作用在压电石英多分量力传感器上时，石英芯片各方向的压电效应会在表面产生与其相对应外力成正比的电荷。不同压电效应所产生的电荷，由电极分别传至信号输出插头，再由低噪声同轴电缆送入电荷放大器，按比例的转换成电压输出，即完成多分力的测量任务。

#### 1. 测量 $F_x$ 和 $F_y$ 的压电石英二分量力传感器

压电石英二分量力传感器由产生剪切效应的两个石英芯片组成。当石英芯片沿 X 轴的方向受力  $F_x$  时，在垂直于 X 轴的平面上产生电荷；当石英芯片在垂直于 Y 轴的平面内，沿 X 轴的方向受剪切力作用时，在受力表面上产生电荷。将这两个石英芯片，以其敏感轴按同一方向定位，机械的并联排列在同一个圆环上，在电路上也机械并联，组成二分量力传感器的敏感组件。由于两组圆环的敏感轴相互成  $90^{\circ}$ ，又置于同一个壳体内，即可完成  $F_x$ 、 $F_y$  二分力的测量任务。其石英芯片排列如图 5 所示。

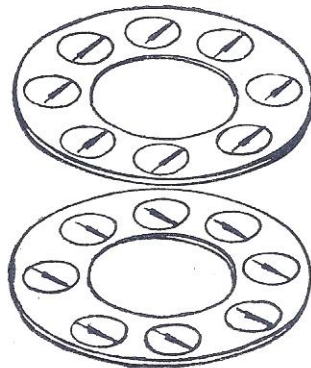


图 5 测量  $F_x$  和  $F_y$  的石英芯片排列示意图

#### 2. 测量 $F_z$ 和绕此轴转矩 $M_z$ 的压电石英二分量力传感器

与测量  $F_x$  和  $F_y$  压电石英二分量力传感器相同，在同一个壳体内，安装一组由许多纵向效应的小石英芯片组成的圆环，用以感受垂直力  $F_z$ ，同时再安装一组由许多剪切效应的小石英芯片组成的圆环。剪切型石英芯片以其剪切敏感轴按圆环的切向定位，以感受 Z 轴的转矩  $M_z$ 。将两组纵向效应和剪切效应的小石英芯片机械的并联在一起，其电路也是并联。同样在较高的预紧力作用下，将

上盖与外壳用电子束焊接使其成为一个坚实的整体结构，就形成了对  $F_z$  和  $M_z$  进行测量的压电石英二分量力传感器。其石英芯片排列如图 6 所示。

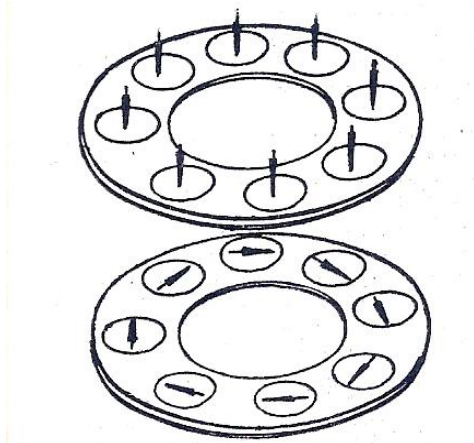


图 6 测量  $F_z$  和  $M_z$  的石英芯片排列示意图

### 3. 测量 $F_x$ 、 $F_y$ 和 $F_z$ 的压电石英三分量力传感器

采用两对产生剪切效应的石英芯片感受力  $F_x$  和  $F_y$ ，一对产生纵向压缩效应的石英芯片感受力  $F_z$ 。在排列以上三对石英芯片时，应严格定向并将对压力敏感的一组石英芯片置于中间，以保证弯曲应力作用时的中立位置，最后按上述相同要求将其安装在同一壳体内。在力传感器测量范围内，空间任何一个动态力作用在压电石英力传感器的承载面上，它就能及时、准确的将此外力分解成三个相互垂直的分力给予输出，且测量出来的  $F_x$ 、 $F_y$  和  $F_z$  分力与此外力的作用点无关。其石英芯片和电极排列示意图如图 7 所示。压电石英三分量力传感器的结构如图 8 所示。

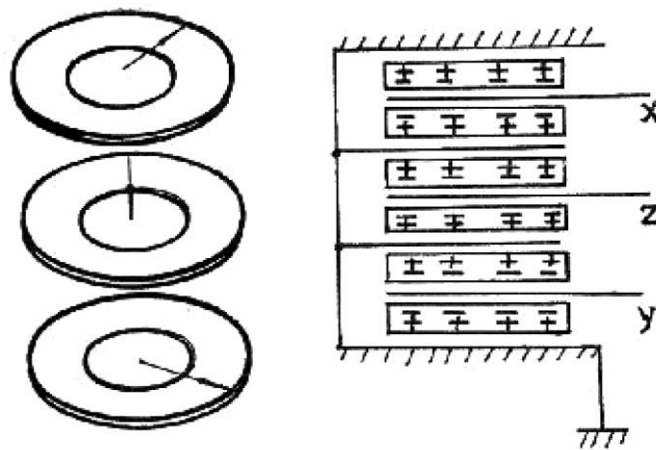


图 7 电石英芯片和电极排列示意图

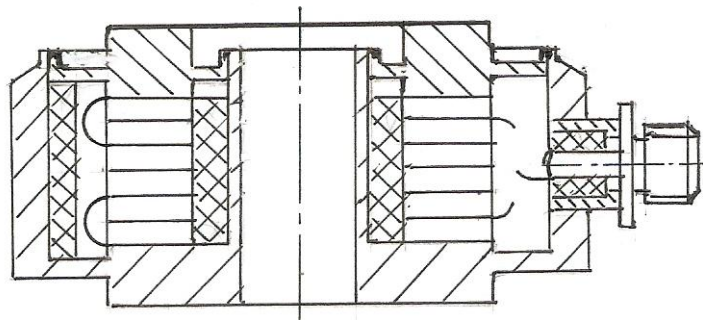


图8 压电石英三分量力传感器结构图

设计上述石英晶体多分量力传感器应注意的问题是：每一种多分量压电石英力传感器在装配时，都需要较高的预紧力，以保证正压力和剪切力都能完全加载到石英片上”；某一些压电石英晶体圆环可以采用整片，也可以由若干个小圆片拼装，由于大块石英晶体来源上的困难，在实际工作中以小圆片拼装较多；测量每一个分力的石英圆环，可以用单片也可以用双片，采用双片时，两片之间应有公共电极，以使灵敏度提高一倍。

#### 四、压电石英多分量力传感器制造工艺要点

压电石英多分量力传感器制造工艺特点是：对压电石英芯片、电极板等装配组件加工质量要求较高；装配工序多、工艺路线长；装配过程测试环节多，需要环环相扣步步把关；装配精度高、难度大，特别是压电石英芯片的组装精度直接影响力传感器的质量。现就重点制造工序及其机理进行简要说明。

##### 1. 石英芯片的极性判断

不同切片类型的石英芯片受到某一个方向的力作用时，由于石英晶格的变形，在石英芯片的上下表面形成带有正负电荷的电极。尽管石英芯片在出厂前对  $X0^\circ$  和  $Y0^\circ$  切片作过标志，但为了精确起见，还需要对它们逐个进行极性判断。极性判断一般是在一个专用的可以通过上下圆盘施加轴向力和剪切力的测试台上进行，下圆盘有  $360^\circ$  刻度线可以在底座上任意转动，这就可以将任意方向的剪力加到被测量石英芯片上。上下压板和被测石英芯片应置于屏蔽罩内，保证测量的准确性和多片测量的均一性。此装置除能判断单片石英晶体的极性外，还能对双芯片组、六芯片组以及单向力、二分力、三分力传感器的灵敏度、线性误差、横向干扰等进行测试。

##### 2. 了解电荷灵敏度的变化规律

电荷灵敏度及其与载荷的关系是压电石英力传感器的重要技术性能指标，掌握不同切片类型石英芯片的电荷灵敏度分布与变化规律，对芯片的选择与定向、芯片的组合、提高灵敏度和降低干扰等具有指导意义，可以说这是芯片正确组合的理论基础。试验证明， $X0^\circ$  切片灵敏度并不是一个恒定值，它与芯片受到的垂直方向预加载荷的大小有关。开始时随着预加载荷的增大，电荷灵敏度也增大；但预加载荷达到一定程度后，随着预加载荷的增加，电荷灵敏度呈现缓慢下降趋势。其原因是初期实施预加载荷时主要用来消除接触面的间隙，所以预载增加时电荷灵敏度也随着增大，当预载增加到一定程度后，使力传感器整体刚度不断增加，在同样的应力作用下晶格的变形比以前减小



了，所以电荷灵敏度也就有所下降。由此不难得出，适当的选择预加载荷值，不但可以改善压电石英力传感器的线性，而且还可以提高电荷灵敏度。

### 3. 掌握石英芯片组合原则

石英芯片组合原则即灵敏度方向标志原则。所谓石英芯片组合是指两个相同切型的石英芯片（ $X0^\circ - X0^\circ$ ； $Y0^\circ - Y0^\circ$ ），极性相对并按照一定方向的组合。石英芯片组合时灵敏度方向标志原则是：对  $X0^\circ - X0^\circ$  双片组合时，主要考虑使力传感器的横向干扰最小，在组合时尽量使两个单片的横向灵敏度相互抵消，保证组合片的横向灵敏度为最小。其组合规律是：由于存在误差，组合片的灵敏度往往低于两个单片灵敏度的代数和；不管装配误差大小，最小灵敏度方向总是存在的，而且是唯一的，组合片灵敏度分布规律与单片基本相同。

## 五、压电石英多分量力传感器的特性

### 1. 量程与鉴别阈之比

石英晶体力传感器最突出的特点是测量范围非常宽，量程与鉴别阈之比高达  $10^8$ 。这就是说，利用测量范围为 200KN 压电石英力传感器，对只有几 N 的动态力进行测量是没有问题的。

### 2. 温度影响

与其它压电晶体（例如电气石）或压电陶瓷不同，石英晶体不是热电物质。石英晶体的灵敏度温度系数取决于晶体的切割方式和温度的高低，在  $-200^\circ\text{C} \sim +200^\circ\text{C}$  温度范围内使用的大多数力传感器，其温度系数大致为  $-10^{-4}/^\circ\text{C}$ 。压电石英多分量力传感器的使用温度范围为  $-270^\circ\text{C} \sim +400^\circ\text{C}$ 。

### 3. 频率范围

压电石英多分量力传感器的固有频率范围大约为  $20 \sim 200\text{KHz}$ 。实际上这个频率并不重要，更为重要的是刚度，刚度决定了力传感器的谐振频率。一般压电石英多分量力传感器的恒定频率范围在 200 和 2000Hz 之间，主要取决于力传感器的结构和尺寸。欧美学者的试验证明压电石英力传感器不仅可用于动态测量，而且还可以用做准静态测量。

### 4. 交叉干扰

压电石英多分量力传感器的另一个引人注目的特性是它的交叉干扰很小。交叉干扰的定义为：作用在力传感器上的每一个被测变量在别的输出端上所产生的信号。一般交叉干扰小于 1%，如此优良的性能，是由于石英晶体的固有特性能把一个力分解成几个独立的分量。交叉干扰的大小主要取决于晶轴和力传感器轴线之间的对准精度。

在实际测量过程中，加力轴线与力传感器轴线不重合或者出现二次效应，就会使其不完全符合上述规律，其交叉干扰并不为零。压电石英多分量力传感器交叉干扰的检测非常困难，一般多在专用的多分量力标准机上进行校准，要求交叉干扰的检测精度为  $\pm 0.2\%$ 。

### 5. 线性

为了达到较好的线性度，所有石英晶体的承压面和安装石英晶体的金属表面都必须进行抛光处理。组合石英芯片、装配力传感器时，必须在洁净度高完全干燥的环境中进行，即使微小的灰尘夹在石英芯片承压面间，也会使力传感器产生较大的线性误差。



## 6. 灵敏度

石英芯片的灵敏度应控制在较小的离散范围内，尤其是人造石英晶体的结构比较均匀，离散程度更小。值得注意的是压电石英力传感器的灵敏度除石英芯片本身的影响外，还与纵向横向压电效应、芯片数量、装配质量等有关。

## 7. 刚度

在外力作用下，石英晶体的位移非常小，一般在几微米以内。这种几乎没有位移的测量，对于缓慢的准静态过程测量误差很小。对于快速动态过程的测量，由于石英晶体具有很高的刚度和固有频率，其动态响应之快是其它材料所无法比拟的。

## 8. 绝缘性能

石英晶体的比电阻在  $10^{14} \sim 10^{15} \Omega/\text{cm}^2$  之间，温度升高绝缘电阻值下降， $100^\circ\text{C}$  时其比电阻为  $10^{13} \Omega$ 。为保证力传感器均匀优良的绝缘性能，石英晶体片必须安装在密封壳体内，并通过圆膜片采用电子束焊接密封，这样可以保证力传感器的绝缘电阻在  $10^{13} \Omega$  以上。为保证测量精度，压电石英力传感器在准静态测量时绝缘电阻  $\geq 10^{13} \Omega$ ，进行动态测量时绝缘电阻  $\geq 10^9 \Omega$ 。

## 六、多分量测量系统

三个或四个压电石英多分量力传感器成等边三角形或正方形放置，并在较高的预紧载荷下将其固定在底板和承载板之间，按一定方式连接后，即可组成不同用途的多分量测量系统。现以四个压电石英三分量力传感器组成的三分量测量系统为例，介绍其测量原理。四个压电石英三分量力传感器组成的测量系统如图 9 所示。

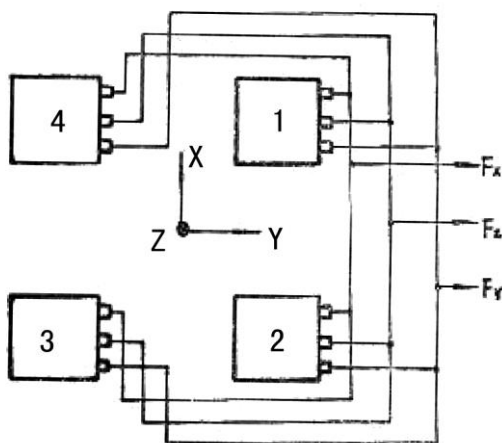


图 9 四个三分量力传感器组成的测量系统

由于压电石英力传感器能在电路上并联，只要将各个力传感器上的相应通道相连接，并将相同方向的输出传送到同一个电荷放大器中，直接相加后即为该方向上的总力值。测量三个分量的力值时，需要三个电荷放大器，最好采用具有正、负输入信号的加法放大器。

若每个压电石英力传感器所测力的分量用  $F_{x1}$ 、 $F_{x2}$ 、……， $F_{y1}$ 、 $F_{y2}$ 、……， $F_{z1}$ 、 $F_{z2}$ 、……表示，则作用力  $F$  的三个分量可以写为：

$$F_x = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4}$$

$$F_y = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4}$$

$$F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4}$$

因此，系统给出相对于（X、Y、Z）坐标系的三个分力的合力为：

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

合力的方向为：

$$\cos \alpha = \frac{F_x}{F}$$

$$\cos \beta = \frac{F_y}{F}$$

$$\cos \gamma = \frac{F_z}{F}$$

由四个压电石英三分量力传感器组成的测量系统，除测量三个相互垂直的分量外，还可以测量围绕这三个轴的转动力矩  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ 。

## 七、压电石英多分量力传感器的应用

利用石英晶体作为敏感组件的多分量力传感器，非常适用于在极宽的频率范围内测量动态力和准静态力，唯一的不足之处是不能在无限长的时间内进行静态测量，因此多用于动态力和动态力矩测量。

### 1. 金属切削机床的切削力测量

机床切削力的测量不仅在一般的研究工作中是一个非常有用的工具，而且在实际工作中，例如选择切削条件和冷却液体、确定使用的刀具及其几何尺寸、研究刀具合理磨损问题等也是及其重要的数据。压电石英三分量力传感器以其体积小、高度低、重量轻，固有频率高、动态响应快等特点，在三分量切削力测量中得到较为广泛的应用。美国、德国学者分别利用三分量切削力传感器，对动态切削力做了频谱分析，把被测力编入计算机程序，对在各种工作条件下所要求的切削力进行快速计算。

### 2. 汽车二分量冲击力及轮胎接触力测量

在国内外汽车制造业中，一般都采用石英压力传感器测量发动机点火压力，而用压电石英多分量力传感器组成测力平台，作为二分量冲击力测量系统，测量汽车纵向和横向冲击力。将针对每一种汽车设计的多分量测力平台，安放在汽车通过的试验轨道上，就可以测量该汽车轮胎和路面之间的接触力。此方法不仅费用昂贵，而且费时费力，因此国外汽车制造厂多采用将一个压电石英六分量力与力矩传感器安装在汽车轮缘上，通过一个转换连接器，测量各种汽车轮胎与路面的接触力。当然此种测量方法应解决好坐标系统转换问题，国外资料给出需要利用坐标变换电路和电荷信号传输装置。

### 3. 空气动力测量

任何一个物体与空气有相对运动时，即产生空气动力。一般的说，此力是空间中作用点、方向和大小都未知的力。由空气动力学知，这样的力可以按某一个选定的坐标系分解为三个沿坐标轴方向的力和围绕三个坐标轴的力矩，一共六个分量。在空气动力学中，比较多的试验对象是运载火箭、飞机、无人机等飞行器的细长体模型。由于细长体模型的升阻比较高，但又要求阻力测量有较高的准确度，所以应尽量排除升力对阻力的干扰。采用应变式多分量力传感器进行测量时，其弹性组件的变形必然产生各分量之间的相互干扰，实际上此干扰又无法消除，所以多采用压电石英多分量力与力矩传感器进行动态力测量。因为，压电石英力传感器具有按石英的固有特性对力进行分解的特性。位于苏黎世的瑞士联邦技术研究所利用压电石英力与力矩传感器，建造了一台六分量风洞天平。当风洞内气流运动时，模型感受的升力、阻力即传递给六分量风洞天平，可以同时测量出力值大小，并给出空气动力特性。

### 4. 测量缆车钢索制动器的摩擦力和磨损

在世界各国的旅游场所，有许多运送游客的架空缆车索道，为确保运行安全，必须检测缆索制动器的紧急制动衬带上的摩擦力和磨损。一般多采用为缆车专门设计的压电石英二分量力传感器，将其牢固的夹持在缆车系统的驱动缆索上，检测摩擦力和监视紧急制动衬带磨损情况，取得了很好的检测和监视效果。

### 5. 生物力学和体育运动中的测量

通过压电石英多分量力传感器或测量平台，对生物力学中的运动矫形术、整形、康复训练、姿势控制、推拿按摩等多分力进行测量与控制；对体育运动中的跳高、跳远、推铅球、起跑器踏力等单向、多向力进行测量。为了交换这方面的信息，国际生物力学学会成立一个测力平台小组，不定期的发布生物力学实验室和测力平台信息。

### 6. 在军事工业中的应用

压电石英单向或多向力传感器在军事工业中的应用也比较广泛，例如测量运载火箭发动机的推力量（力的大小、方向和位置）；枪、炮发射时的后座力测量；各种炮弹高速飞行碰撞试验时冲击力测量；军用车辆撞击试验时的冲击力测量等。

## 八、结束语

利用石英晶体、电阻、电容或电感器件来设计多分量力传感器都是可行的。但除了石英晶体外，所有其它器件都不能直接进行测力，它们必须通过外力引起的其它量变化间接测力。与电阻应变计不同，石英晶体是测量应力，它产生的电荷对应于应力的平均值，也就是说，石英晶体具有把敏感组件（石英晶体圆盘）整个表面上的载荷进行积分的能力。因此石英晶体测力系统具有其它测力系统无法比拟的特点，主要是：测量范围广，量程与鉴别阈之比高，在大多数应用中比值超过  $10^6$ ；具有把一个力分解成正交分力的能力，不必设计复杂的结构进行机械的分解成多个分力；测量组件结构小巧紧凑，晶轴排列合理，稳定性好；使用温度范围宽， $-200\sim+200^{\circ}\text{C}$ ；刚性极好，谐振频率很高；动态交叉干扰小，在低频时，应变式力传感器的交叉干扰达到 20%，谐振频率达到 100Hz。而

压电石英力传感器的交叉干扰达到 800Hz 时仍然低于 10%，当达到 400Hz 时其交叉干扰大约小于 2%。这就是科技人员将压电石英三分量力传感器，扩展为六分量力与力矩传感器并得到广泛发展与应用的理由。

### 参考文献

1. K. H. Martini. Multi-Component Dynamometer Using Quartz Crystal as a Sensitive Element. ISA Transactions. Vol. 22, No. 1.
2. 孙宝元、张贻恭. 压电石英三向力传感器工艺理论基础 [J]. 传感器应用技术. 1984 年第 1 期。
3. 韩锡振. 压电石英晶体发展概况及趋势 [J]. 电子组件与材料. 1993 年第 1 期。
4. 陈裕泉. 现代传感器原理及应用 [M]. 科学出版社, 2007 年 8 月。

### 作者简介

刘九卿 ( 1937 ~ ) , 男 ( 汉族 ) , 辽宁省海城市 , 中国运载火箭技术研究院第 702 研究所研究员 , 享受国务院政府特殊津贴专家 , 在职时从事各型号运载火箭结构强度试验应力分析等工作 , 现为中国衡器协会技术顾问。