

纵向压电换能器的预应力控制

荣 德 新

(721 厂)

1982 年 1 月 22 日收到

纵向压电换能器的性能和施加的预应力大小有很大关系。因此，必须对预应力进行控制。本文在文献[1]的基础上，进一步阐明了控制预应力的基本原理，并根据换能器装配时的实际情况，提出了实现预应力控制的具体操作步骤。

一、纵向压电换能器中的预应力

在换能器生产中，换能器性能常不一致，其原因除了机械另件加工和陶瓷元件性能的不一致之外，预应力的大小也有很大影响。因此，有些工厂规定空气中的谐振频率或谐振时的阻抗来控制预应力。但这一方法有其局限性，因为换能器性能有一定的离散是不可免的，合理的设计应该允许在性能上有一定的离散。如果靠调节螺杆来调整预应力大小而使换能器的性能一致，则有时螺杆内应力已接近材料的疲劳强度，就会成为一个隐患。

换能器中心部位的疲劳强度 T_f 、预应力 T_0 和允许的最大应力 T_{cmax} 之间的关系，可用图 1 三种典型情况表示：^[1]

图 1(a) 表示，当换能器不加预应力时，换能器中所允许的最大应力 T_{cmax} 很小，它主要受陶瓷或胶粘层的疲劳强度限制，尤其是因为前后金属盖板和陶瓷的热膨胀系数差异很大，胶粘层内存在较大的静态热应力，使其疲劳强度急剧下降，因此这种换能器不能在大功率激励下使用。

图 1(b) 表示，当换能器的预应力接近最大动张应力时，换能器的最大应力 T_{max} 是受预应力杆的疲劳强度限制的。此类情况在脉冲工作方式的水声换能器中是常见的，因为水声换能器周围是水介质，散热情况良好，而且脉冲宽度

和周期的比值较小，所以换能器中预应力杆的疲劳往往出现于换能器热极限之前。

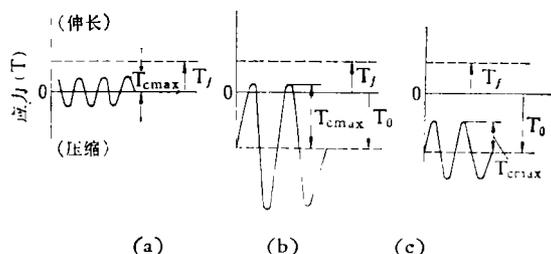


图 1 换能器中心部位的疲劳强度 T_f ，预应力 T_0 和所允许的最大应力 T_{cmax} 之间的关系。

(a) $T_0 = 0$, (b) $T_0 \approx T_{cmax}$, (c) $T_0 > T_{cmax}$

图 1(c) 表示，换能器中已施加了预应力，但在连续工作或长脉冲工作状况下，最大应力 T_{cmax} 决定于电和机械损耗所产生的过热现象。这在超声清洗换能器和长脉冲工作方式的水声换能器中是常见的。

从图 1 可见，较高的预应力是有利的。但过高的预应力会使应力杆断裂，也会使陶瓷材料的性能产生明显的不可逆变化，即退极化。对于用 PZT-4 材料做成的换能器，一般选取 $T_0 \approx 250 \text{kg/cm}^2$ 为宜。如果预应力 T_0 取得太小，则由于不同界面的损耗的增加，换能器的机械阻增加，电声效率相应下降。

综上所述，纵向压电换能器的预应力控制包括如下两个方面的工作：

1. 根据具体的换能器结构和使用场合确定合适的预应力范围。

2. 用方便可靠之方法施加预应力.

二、预应力控制方法

测量换能器中预应力的一种可靠方法是在短路条件下测量在陶瓷材料中产生的电荷的方法,而电荷的测量可通过测量与陶瓷片或陶瓷环并联的大电容 C 上的电压来进行.如图 2 所示,由 n 片面积为 S 的 PZT-4 陶瓷片组成的压电换能器,在力 F 作用下,在并接的直流电压表上可得一直流电压 V .图中, C 为 $10\mu\text{F}$ 的油浸电容, V 为高输入阻抗电压表上的电压值.

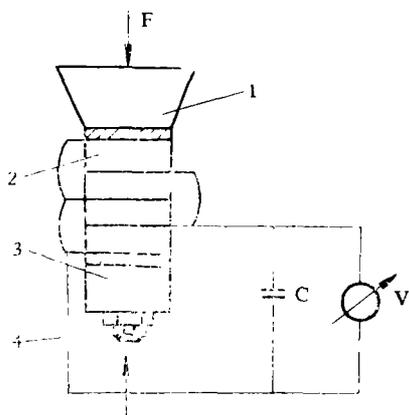


图 2 预应力控制示意图

1.前盖板, 2.陶瓷堆, 3.后盖板, 4.预应力杆

我们采用输入阻抗 $\geq 20\text{M}\Omega$ 的 605 型电子管繁用表来指示电压.对于绝大多数纵向压电换能器来说,陶瓷片静态电容 C_0 与大电容 C 相比较是可以忽略的,因此该回路的充放电时间常数 $RC \geq 200\text{s}$,这对单螺钉结构的换能器装配来说已大于所需的操作时间.而对多螺钉结构的换能器来说,应尽可能地缩短操作时间或采用输入阻抗更高的直流电压表.

按熟知的压电原理和静电学原理,电容 C 上的电荷为:

$$q = dFn$$

式中, q 为电荷量, d 为材料的压电模量.又由于 $q = CV$, 而 $F = T_0S$ 于是,

$$T_0 = CV/nSd$$

式中陶瓷片片数 n , 陶瓷片截面积 S 均为换能

器设计中已确定的数字,预应力 T_0 .也是设计者根据所设计的换能器的最大动张应力来决定的.按理,在测得电压后即可按公式计算陶瓷堆上所受的力了.但是材料的压电模量 d 不仅是外加压力的函数,而且在施加压力后尚需经一定时间才能趋于稳定.为此,我们不是按公式计算而是模拟实际换能器装配情况,事先作出压力 F 和电压 V 的关系曲线,而后再根据这一曲线来控制预应力.在装配时,一方面为了防止拧紧中间预应力杆时换能器跟着旋转,另一方面为了防止胶粘层破坏,常将换能器预先用夹具压紧,待预应力杆拧紧后再将夹具退去.装配夹具对陶瓷堆的压力以及拧紧预应力杆时陶瓷堆上所受压力均能由事先作出的 $F \sim V$ 曲线来确定.在纵向压电换能器中,陶瓷堆的刚度往往比预应力杆系统(包括螺杆、螺母和碟形弹簧垫圈)的刚度大得多,因此在装配夹具夹紧时陶瓷堆的形变量与预应力杆拧紧时预应力杆系统的形变量相比是可以忽略的.所以当退去装配夹具后,陶瓷堆上仅保留拧紧预应力杆时陶瓷堆所受的那部分压力.

比测量电荷更简单的方法是:使用力矩扳手,用规定力矩大小的方法来控制预应力.但压力 F 和力矩 M 的关系在很大程度上取决于另件表面的光洁度,因此这种方法是比较粗糙的.在条件许可情况应尽可能采用第一种方法.但对大批量生产的换能器来说,当各机械另件的加工精度比较一致时,用这种方法还是简便而合适的.我们通过测量 V 和 F 以及 V 和 M 的关系,得到了 F 和 M 的关系.

三、预应力控制举例

对于由 8 片外径为 32mm; 内径为 10mm; 厚度为 5mm 的 PZT-4 陶瓷片组成的陶瓷堆为激励元件的换能器,我们用实验方法得到了上述的 V 和 F 的关系曲线,如图 3. 图中,曲线 I 是从自由状态开始加压时的压力 F 和加压后立即测量得到的电压 V 的关系.曲线 II 是 1000 kg (放电后)开始加压时测得的.

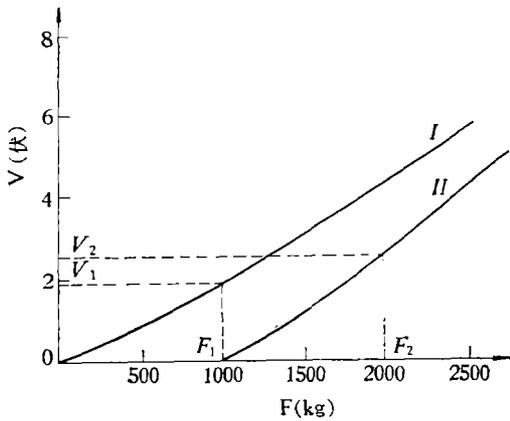


图3 一个实例中 V 和 F 的关系

之所以要测量曲线 II 是因为我厂的纵向压电换能器装配夹具一般均加预压力 $F_1 = 1000$ kg 之后再拧紧预应力杆的。有了图 3 的曲线，可按下列步骤根据电压 V 来控制预应力了。

1. 将前后盖板和陶瓷堆在胶合面上涂胶后用定位杆在中心部位定位，然后拧紧装配夹具至电压 $V_1 = 1.90V$ (此时预压力 $F_1 = 1000kg$)

2. 将大电容 C 短路，抽出中心定位杆，拧紧预应力杆，使电压达规定值 V_2 ，此时即可按图 3 中曲线 II 得到 F_2 。

3. 取下换能器，置于烘箱内加热，固化陶瓷堆和金属盖板之间的胶粘层。显然，此时陶瓷堆所受预应力 $T_0 = (F_2 - F_1)/S$ 。

我们又测得了在预应力 $F_1 = 1000kg$ 时对应力杆所施力矩 M 和大电容 C 上的电压 V 的关

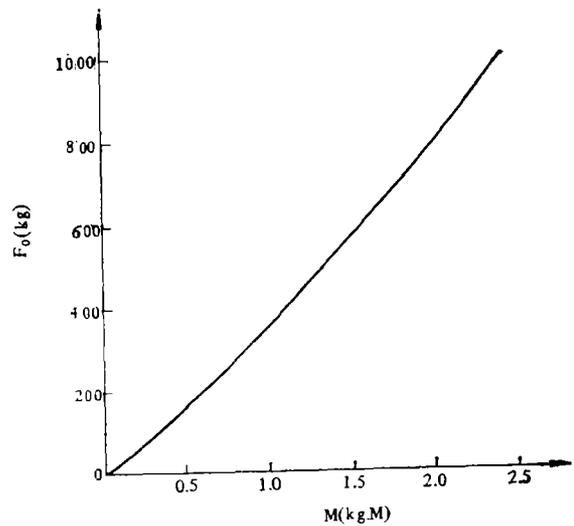


图4 一个实例中 F_0 和 M 的关系

系，从而得到 F_0 和力矩 M 之间的关系并绘在图 4：借助图 4 就能用规定力矩 M 大小的方法来控制预应力 $T_0 (= F_0/S)$ 了。

我们采用了上述两种方法成批生产了一些水声换能器和超声换能器，证明方法是可行的。

在工作中得到了邱永德同志的指导，还与张余丰、莫善钰等同志进行过有益的讨论，杨进、楼强华等同志协助做过一些试验工作，特此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] J. Van Randerat, R. E. Settingington. "PIEZOELECTRIC CERAMICS", 1974. 136—142.
- [2] Horitta, R. E., *J. Acous. Soc. Am.* 41(1967), 158—166.

超 声 压 强 计

美国国家标准局的 Charles Tilford 等人研制出一种超声干涉仪压强计，在 10 kpa(0.1atm) 以下的低温范围，它确立了一个新的压强测量标准。这个装置可作为一级标准，用它来校准工业和科学中应用的高质量传感器；在精度、速度和计算机兼容性有要求的地方，它可直接用于压强的测量。

自 1644 年 Evangelista Torricelli 发明气压计以来，测量压强最精密的方法，是对升高的已知密度的液柱所产生的压力进行平衡。这就要求精密测量液柱的高度和液体的温度。

超声压强计的核心是改进了测量液柱高度的方法，它发射一高频超声脉冲波，使其垂直通过液柱，并测量由液柱反射回来的超声波信号的相位。在微处理机的控制下，用四个选择参考频率可快速重复这一测量过程，用代数算法和小型联机，由测量的相位可求得液柱的高度和压强。

不需要视觉或机械的接近液柱，超声信号的损耗可以忽略，所有这些都极大地简化了液体温度的控制和测量。结果这个压强计在分辨力和精密度方面，超过

(下转第 19 页)