

压力-频率转换器*

孔德浴 林其华

(中国科学院海洋研究所)

本文叙述一种用圆金属波纹膜片做为一次仪表而将被测量压力转换为频率信号的远测传感器^[2]。它具有构造简单、性能稳定、灵敏度高和抗干扰能力强等特点。该传感器原是用干近岸波浪遥测系统中,但对测量水深、潮汐、气压、重力等同样可以应用。运用数字方法可以很方便对信号进行处理,分辨率可达1/10毫米^[1]。

一、工作原理及实验

转换器由两部分组成。一部分是一膜片,中心固定一定长度的金属弦,将此弦置于一强磁场中。弦的另一端固定并连接第二部分晶体管反馈放大器。当一交变电流通过金属弦时,此磁场中的弦即振动,称为振弦,通过反馈放大器使振荡持续并输出一信号。弦的振动频率与由膜片受压而使振弦上的张力大小有关。

传感器的第一部分如图1所示。

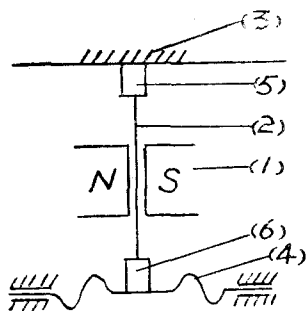


图 1

(1) 为永久磁铁, NS 间隙约1毫米, 磁场强度为 8,000—12,000 高斯。(2) 是钨丝 $\phi 0.02—0.04$ 毫米, 长约2厘米。(3) 为绝缘支架。(4) 为圆形波纹膜片。(5)、(6) 为固定钨丝用的夹钳, (5) 与放大器相连, (6) 与地相连。

当外界压力使膜片产生位移时, 弦(2)的张力亦即变化^[2]。这时:

$$f^2 = f_0^2 - \beta P \quad (1)$$

$$\text{式中, } f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{F_0/m} \quad (2)$$

$$\beta = 0.04 \frac{r_m^4}{l^3 t^3 m} \cdot \frac{E_c}{E_m} \quad (3)$$

式中, F_0 为在一定条件下弦的起始张力, l 为弦的有效长度, r_m 为膜片的有效半径, m 为弦的质量, t 为膜片厚度, E_c 为弦材料的弹性模量, E_m 为膜片材料的弹性模量。

由(1)式, 如测知输出频率即可得到膜片上所受的壓力, 进而可得知与此压力有关的其它物理量。表1为实验室中所得的数据:

据表1, 作出传感器静态特性曲线, 见图2-a。

表 1

P (kg/cm ²)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
f(HZ)	7564	7236	6896	6540	6118	5614	5272	4782	4228

由(1)式, 传感器的压力灵敏度为:

$$\frac{\Delta f}{\Delta p} = - \frac{\beta}{2f} \quad (4)$$

式(4)为非线性关系, 当频率低时灵敏度高。由此可以加大膜片尺寸, 减少其厚度以及加长振弦等来提高传感器的灵敏度, 但不能高于所使用的二次仪表的精度。该传感器可测得小于1厘米的水位变化。

为了改善传感器的线性关系, 可以采用非

* 本文在1979年4月召开的中国仪器仪表学会成立大会上宣读过; 在整理时承袁业立同志提出宝贵意见, 特此感谢。

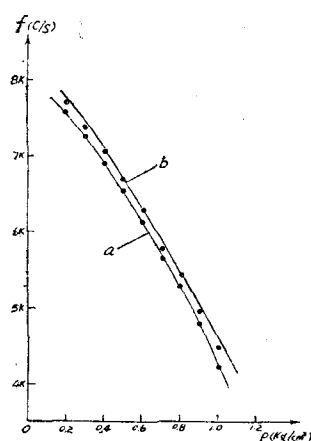


图 2

线性圆形平板膜片做为一次仪表，其频率特性能得到很好的改善，表 2 为采用圆形平板膜片时测得的频率。

根据表 2 作出的静态特性曲线见图 2-b，b 比 a 已有所改善。

温度变化对这一部件的影响是必须考虑的，各金属零件的尺寸都随温度而改变。如图 3 l_1 为固定钨丝支架的总长度， l_2 、 l_4 为固定钨丝夹钳的长度， l_3 为钨丝的长度。

表 2

P (kg/cm ²)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
f (HZ)	7693	7361	7035	6691	6257	5735	5412	4940	4389

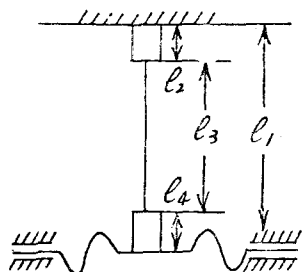


图 3

如在选用材料中满足式 (5) 关系，即可消除或减少温度影响。

$$\Delta l_1 = \Delta l_2 + \Delta l_3 + \Delta l_4 \quad (5)$$

式中 Δl 为零件的温度变量。在此，我们选用了 45# 钢作为图 1 中的绝缘支架，而 l_3 及 l_4 采用黄铜，可以得到较满意的结果。这时在 0—40°C 范围内，频率变化 13 周。

疲劳效应会使传感器频率发生不可逆变

化，它影响到夹钳钨丝的材料、夹钳处的压力和夹钳点的位置亦即 l_3 的确切长度。因此，钨丝两端最好是焊接在钨件上后再做固定。

二、晶体管反馈放大器

在压力-频率转换器中，晶体管反馈放大器和压力传感器构成一个不可分割的部件。

当闭合回路的一部分导线在磁场中作切割磁力线运动时，导线两端就会产生感应电动势，闭合回路就有感生电流。将此电流接至一个放大器的反馈槽路中，它们就可构成一个很好的调频自激振荡器。

图 4 为振弦与放大器结合构成调频自激振荡器的原理图。

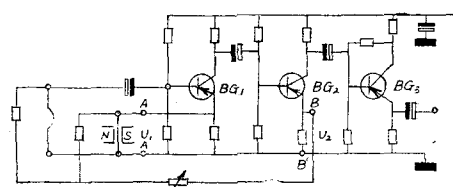


图 4

假定有一电信号 u_1 从 A—A' 输入，则放大器 BG_2 的发射极 B—B' 就有 u_2 输出。第一级是共基极线路。第二级是共集电极线路。因此， u_1 和 u_2 的相位是相同的。在具有正反馈的放大器的反馈槽路中，接上一个选频网络，当满足一定的条件时，这种线路就可产生单一频率的正弦波。

下面讨论由 R_1 、振弦、永久磁铁和 R_2 构成的线路。如图 5 所示。

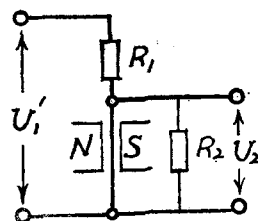


图 5

这个电路的输出电压 u_2' 可写成：

$$u_2' = \frac{u_1'}{R_1 + (r + R_2)/r \cdot R_2} \times$$

$$\times \frac{R_2 + r}{r \cdot R_2} + \frac{\varepsilon}{r \cdot R_2} \cdot R_2 \quad (6)$$

式中, r 为振弦的直流电阻, u_1' 为输入电压, u_2' 为输出电压, ε 为振弦在磁场中切割磁力线所产生的感生电动势。

为了说明这个电路具有选频特性, 让我们来求感生电动势 ε 是怎样随输入信号频率改变而改变的。

为了计算方便, 假定磁力线与弦的轴线垂直, 磁场分布是正弦的, 即中心位置磁场强度最大, 两端逐渐减少。

它的密度可写成:

$$B = B_0 \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (7)$$

式中, B_0 为最大的磁场强度, l 为振弦在磁场中切割磁力线的有效长度, x 为距固定端沿弦方向某一位置的距离, $n=1, 2, 3, \dots, n$, 为模数。

由数理方程可知弦的振动方程, 可写为:

$$F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - 2km \frac{\partial y}{\partial t} = -I_0 B_0 \sin \frac{n\pi}{l} x \times p^{j\omega_0 t} \quad (8)$$

方程的解是:

$$y(x, t) = \frac{I_0 B_0 \sin \frac{n\pi}{l} x}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_c^2)^2 + (2k\omega_c)^2}} \times e^{j(\omega_0 t - \theta)} \quad (9)$$

式中, $\theta = \arctan 2k\omega_0/(\omega_0^2 - \omega_c^2)$ (10)

$$\omega_0 = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{F}{m}} \text{——弦的固有频率, } I_0 \text{ 为}$$

在振弦上通过弦电流的峰值, ω_c 为在振弦上通过的电流角频率, m 为弦的单位质量, k 为振弦的阻尼系数, F 为弦的张力。

由法拉第感应定律, 可以求出振弦在磁场中振动切割磁力线所产生的感应电动势:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= B \cdot l \cdot v = \\ &= \frac{j\omega_c I_0 B_0^2 l \sin^2 \frac{n\pi}{l} x}{2m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega_c^2)^2 + (2k\omega_c)^2}} \times e^{j(\omega_0 t - \theta)} \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)代入式(6)就可求出这个线路的

输出电压 u_2' 。即:

$$\begin{aligned} u_2' &= \frac{u_1'}{R_1 + \left(\frac{r+R_2}{R_2 \cdot r} \right)} \cdot \frac{R_2 \cdot r}{R_2 + r} + \\ &+ \frac{j\omega_c I_0 B_0^2 l \sin^2 \frac{n\pi}{l} x}{2m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega_c^2)^2 + (2k\omega_c)^2}} \times \\ &\times \frac{R_2}{r + R_2} \cdot e^{j(\omega_0 t - \theta)} \end{aligned} \quad (12)$$

从(12)式可以看出, 输出电压 u_2' 随输入电流的频率 ω_c 改变而改变。当 $\omega_c = \omega_0$ 时, 输出电压 u_2' 最大。这时振弦发生共振。其值是:

$$\begin{aligned} u_{2M}' &= \frac{u_1'}{R_1 + \left(\frac{r+R_2}{r \cdot R_2} \right)} \cdot \frac{R_2 \cdot r}{R_2 + r} + \\ &+ \frac{jI_0 B_0^2 l}{4k^2 m^2} \cdot \frac{R_2}{r + R_2} e^{j(\omega_0 t - \theta)} \end{aligned} \quad (13)$$

由此可见这个线路具有选频的特性。

如果把这个选频网络接至 A—B 间, 当它的正反馈足以补偿振弦由于阻尼所损耗的能量时, 图 4 就可构成一个自激振荡器。

为了减少波形的失真和防止晶体管过载, 在图 4 中引入了一个负反馈, 这个负反馈是由 R 和非振动的补偿弦组成。非振动弦是用钨丝做的, 长度与振弦相当。

从 B—B' 端可以得到这个振荡器的输出, 但是这个电压的幅值不能满足要求, 为了充分利用 BG_2 , 输出信号从 BG_2 的集电极取得。

最后一级 BG_3 采用了共集电极线路。它可消除或降低外界因素如电缆阻抗对前一级的影响。

这个线路的温度和电源变化的实验表明, 在 $0^\circ\text{C}—45^\circ\text{C}$ 的温度范围内工作正常, 它的输出幅度和电频率变化可以忽略。电源电压变化在 10%, 输出电压幅度变化 7%, 而频率只变 1 周。

这个电路耗电小, 只需要 9 伏 7 毫安, 因此它很适用于频率远测系统。

(下转第 19 页)

钾、溴、碘等化学元素含量均较海水高,利用井水提取钾、溴、碘等化学元素,比直接用海水提取经济。如果和我国内地四川、湖南、内蒙等省的井盐(包括岩盐和卤水盐矿),湖盐矿相比较,这里的地下卤水特点是:埋藏浅,易开采,化学成分稳定,卤水中诸离子间比例和海水相似。而内地的井盐矿,一般埋藏较深,井深数百米甚至上千米,开采较困难,成本较高。内地的湖盐矿一般含钙、镁等杂质多,工艺处理较麻烦,质量一般不及沿海区井盐。从以上对比说明,莱州湾地下卤水是我国发展盐业和盐化工业的一项重要资源,有广阔的发展前景。

关于莱州湾滨海平原丰富的地下卤水资源的成因机理、储量、生成时代和开采后的补给等问题,涉及到海洋、地质、水文、盐田工艺等许多学科的有关理论和专业知识。目前,已经引起了我国科研工作者的重视和关注。莱州湾地下卤水的成因机理初步认为:莱州湾滨海平原的地下卤水属于蒸发沉积岩矿床,成因类型主要为潮间浅滩和沙坝泻湖类型。根据国内外对蒸发沉积岩矿床(如石膏、盐矿等)形成的研究,一般认为形成此矿床必须具备三个基本条件:一是有盐类的物质来源,二是要有干旱或半干旱的气候条件,三是要有一定的封闭条件免于排泄和淡化。从盐类物质来源讲,莱州湾沿岸的卤水区既和古渤海的海陆变迁相关,又和现渤海海水紧紧相连,因此,有盐类物质来源。近十万年来,渤海的三次海侵,给

这个区域留下了三个海相沉积层。在沉积过程中,留下的海水经蒸发浓缩成卤水,将盐赋存于岩层中。这个区域普遍存在的3—4个卤水含水层内,富含海生贝壳碎片,据初步分析,和三次海相沉积层相关(尚待进一步研究证实)。由于本区和现渤海相连,海水潮汐的涨落运动,在日、月、年的高潮位期间,海水覆盖的潮间浅滩和临近区域,会得到海水的垂直和水平方向的渗透补给。从气候条件讲,世界上北半球的岩盐矿床和盐湖带,大都集中在北纬 30° — 50° 之间,莱州湾沿岸卤水区为北纬 $36^{\circ}55'$ — $37^{\circ}40'$,位于北半球的盐带内。这里全年蒸发量为2,000—2,200毫米,降水量为600毫米左右。蒸发量大于降水量,属半干旱温带性气候,为海水浓缩蒸发成卤水创造了有利条件。从封闭条件讲,莱州湾沿岸属滨海平原,地势平坦,坡降一般在0.2—0.3‰,地下卤水的水位坡降相应平缓,下游又有海水的顶托,致使地下卤水水平方向排泄困难。在各卤水含水层上下部位一般均有粘土、亚粘土陆相红层的隔层。这样利于卤水的埋藏,而不被淡化消融。从以上三点分析,说明莱州湾沿岸由于地理位置和古地理环境、地质构造、气候等各方面因素,具备了形成蒸发沉积岩矿床的基本条件。国内外对沉积岩和蒸发矿床成因的研究,虽历时一百多年,但至今尚无统一认识,有待我国科学工作者进一步研究后确定。随着我国科学事业的发展,莱州湾滨海平原地下卤水资源将在祖国“四化”建设中,发挥它应有的作用。

(上接第24页)

三、讨 论

1. 当 $\omega_0 = \omega_0$ 时,方程(13)并不是最大,只是近似。实际上 $\omega_0 = \sqrt{\omega_0^2 - 2k^2}$ 时最大,也就是说振动频率与阻尼系数有关。因此,传感器必须保持在清洁、干燥和不要有水气或其它油气质气体的地方。

2. 钨丝是用夹紧方法固紧的,固紧不当会增大阻尼系数 k ,也会使振荡器停振。我们认为最好用焊接的方法固紧。

3. 本文叙述的压力-频率转换器是压力式海浪测量中的量测元件。因此,它的灵敏度要求较高,但测量范围小。若测量其它形式的作用力时,需要扩大它的测量范围,可以根据(4)式,减少膜片的有效半径,增加膜片的厚度和缩短膜片的有效长度。

参 考 文 献

- [1] Frank E. Snodgrass, 1964. Science 146(3641):199—205.
- [2] Шендеровия, И. М., 1962. Приборостроение 7:2—3.