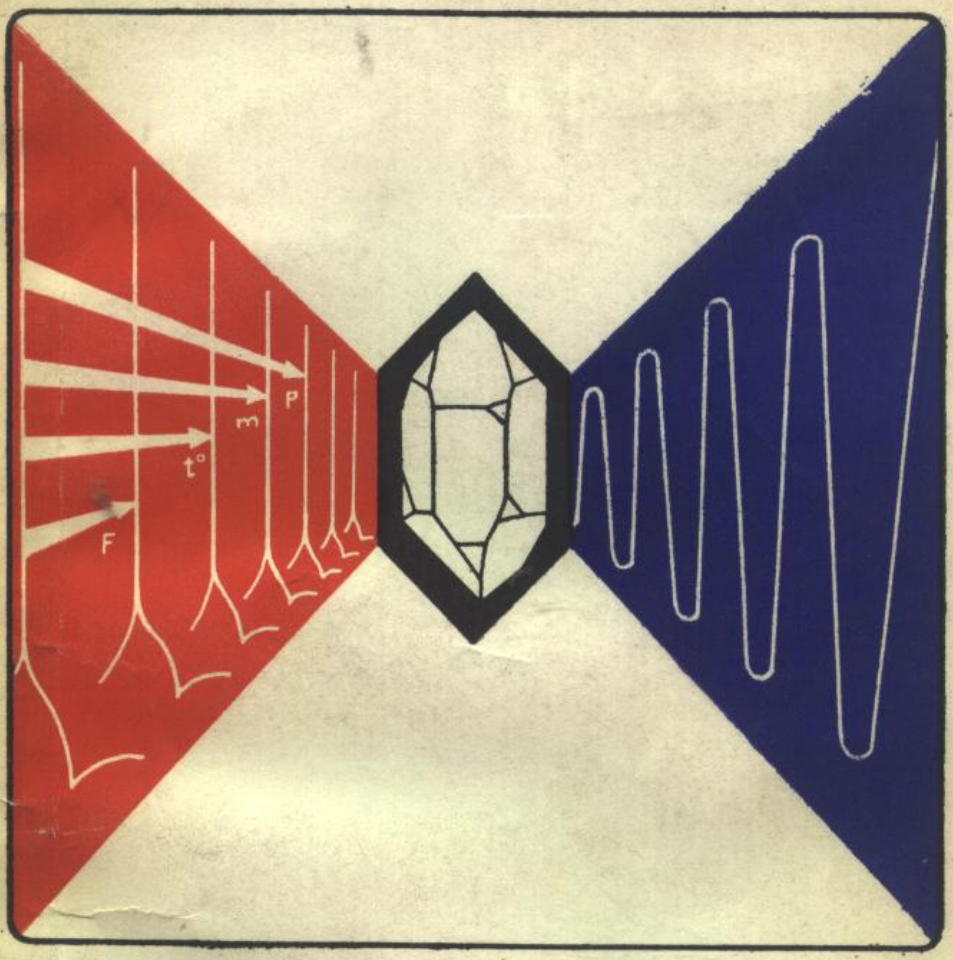

〔苏〕B.B. 马洛夫 著

压电谐振传感器

翁善臣 等译

TP212
2

压电谐振传感器

〔苏〕B.B.马洛夫 著

翁善臣 等译

国防工业出版社

内容简介

本书叙述了可控压电谐振器型测量传感器的工作原理及其应用，讨论了控制谐振器参数的方式，并提出高精度地测量机械量、热学量、电学量和其它量值的压电谐振传感器以及高灵敏度的物理-化学分析仪的制造方法。书中还列举了压电谐振频率与幅值传感器的许多应用实例。

本书可供从事仪器制造、自动化、无线电、测量技术、实验物理、化学分析等方面工作的工程技术人员参考使用。也可作为高等学校有关专业的教学参考书。

ZZ78/28 of

ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫЕ ДАТЧИКИ
В. В. Малов
Издательство《Энергия》, 1978

*

压电谐振传感器
〔苏〕B. B. 马洛夫 著
俞善臣 等译

*

国防工业出版社出版
新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32　印张8 1/4　171千字
1984年1月第一版　1984年1月第一次印刷　印数：0,001—5,500册
统一书号：15034·2599　定价：0.87元

译 者 序

压电谐振传感器是本世纪六十年代发展起来的新型检测器件。这类传感器与采用其它物理原理制成的传感器相比，具有一系列独特的优点，它主要表现在：应用范围广，可以做成各种机械量、热工量、电学量、湿度、微小质量等物理参量的测量传感器；测量精度高，误差可达万分之一甚至更低；频率量输出，便于进行数字显示和数据处理。因此，压电谐振传感器已经在许多技术领域中得到了应用。

本书对压电谐振传感器的理论、制造和应用等方面进行了系统的阐述，书末并列出了比较完整的参考文献。这对于从事仪器仪表、测量和实验技术等工作的工程技术人员来说，可以从中得到启发和帮助。

参加本书翻译的有翁善臣、蔡素勤和徐振廷等同志。由于译者水平所限，难免会出现一些错误之处，欢迎读者批评指正。

前　言

本书试图系统阐述和总结压电谐振传感器的理论问题、制造方法及实际应用，其主要目的是把压电谐振传感器的最新发展动向、应用范围以及这个领域的现状介绍给广大的工程技术人员。我们力求把注意力集中到压电谐振传感器性能的最本质方面，因此，舍弃了对不可控压电谐振器一系列重要的理论问题、制造工艺等的研究。这些问题在 A.Г.斯马金和 M.И.亚罗斯拉夫斯基的专题著作中，在 B.M.普鲁日尼科夫和 B.C.谢麦诺夫合著的《压电陶瓷固态系统》一书中，以及在 У.凯基、У.默佐恩、X.齐尔斯金的专题论著和多卷论文集《物理声学》的俄文译本中已经进行了非常详细的论述。

编写本书的主要目的在于全面叙述压电谐振传感器的理论和实际问题，这就在很大程度上决定了本书的结构。可以把本书大致分成三个基本部分：第一部分(第一章和第二章)叙述在测量装置中应用压电谐振器的物理原理；第二部分(第三章)讨论一般性的电路技术问题；第三部分(第四至七章）介绍各种不同类型压电谐振传感器的制作原理、结构及其应用。本书最后列出了相当完整的参考文献，供读者查阅所关心的压电谐振传感器方面的著作。

在本书编写过程中，莫斯科工程物理学院自动化与遥控教研室的 B.H.西蒙诺夫（§2-2和§2-4）和列宁格勒加里

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

宁工学院信息测量技术教研室的技术科学硕士 Э. A. 库德利亚索夫（§4-3）参加了部分的工作。

对在本书编写过程中热情提供资料和给予支持的所有人员表示深切的感谢!

殷切希望读者批评指正。

作　　者

目　录

绪论 …… 1
第一章　压电谐振传感器的结构原理 …… 3
1-1　压电谐振器的等效电路 …… 3
1-2　控制压电谐振器方法的一般特性　压电谐振传感器的分类 …… 10
1-3　压电材料的弹性压电性能和介电性能 …… 17
1-4　压电谐振传感器中压电谐振器的主要类型 …… 30
第二章　可控压电谐振器的物理性能 …… 47
2-1　石英压电谐振器的热敏感性 …… 47
2-2　石英压电谐振器的应变敏感性 …… 61
2-3　压电谐振器质量敏感性的物理原理 …… 85
2-4　压电谐振器的声敏感性 …… 94
2-5　压电传感器回转敏感性的物理原理 …… 100
2-6　周围介质对压电谐振器的影响 …… 102
第三章　压电谐振传感器的电子线路 …… 107
3-1　测量传感器中压电谐振器的各种接法 …… 107
3-2　压电稳频自激振荡器的工作原理 …… 109
3-3　压电谐振传感器的自激振荡线路 …… 114
3-4　压电谐振传感器的仪器结构 …… 121
第四章　热敏压电谐振器在测量技术中的应用 …… 130
4-1　石英温度计 …… 130
4-2　旁热式热敏压电谐振器 …… 141
4-3　热电功率计 …… 149

4-4 压电谐振真空计……155
4-5 旁热式压电谐振器的一些应用……159
第五章 应变敏感型压电谐振传感器 ……164
5-1 压电谐振应变传感器的一般特性……164
5-2 压电谐振力敏感元件……169
5-3 压电谐振压力传感器……178
5-4 压电谐振加速度计……186
5-5 压电谐振器在力测量技术中的应用……197
5-6 力敏压电谐振器的各种应用……199
第六章 石英微量称重法的实际应用 ……200
6-1 方法的一般特性……200
6-2 石英厚度计……203
6-3 压电谐振湿度传感器……208
6-4 选择吸附检测器……216
6-5 石英微量天平在实验研究中的应用……224
第七章 声敏压电谐振器型和回转敏感压电谐振器型
测量传感器 ……226
7-1 气体压力声传感器……226
7-2 力传感器……227
7-3 小位移传感器……229
7-4 露点湿度计……231
7-5 声敏谐振器在物理研究中的应用……232
7-6 压电振动式陀螺仪……233
参考文献 ……239

绪　论

最近十年来，可控压电谐振器型传感器（变换器）得到了十分广泛的应用。这种类型的传感器是机电调制传感器的一种，大家知道的振弦、振杆、振膜和振筒等振动频率传感器就属于这类机电调制传感器。

研制和应用振动频率传感器的实践表明，改进并完善传感器的关键部件——机电振动系统，是提高其精确度指标的根本性措施之一。

在这些系统之中，目前说来，压电石英谐振器具有最完美的特性，它是压电谐振器中的一种主要类型。它的品质因数高、重复性好、没有迟滞、时间稳定性好、耐化学腐蚀、耐放射性、紧凑、工艺性好、整体结构、成本低、适宜于成批生产等，上述这些还远非压电石英谐振器的全部优点。

压电谐振变换器已有六十余年的历史。压电谐振变换器最先应用在频率的选择和稳定问题上，这些年来，提高频率稳定性的问题，始终是摆在研制者面前的重要课题之一。这个问题可以通过选择适当的技术方法予以解决，这些方法应能降低温度、压力、周围介质成分及紧固件各向作用力等的不稳定影响。

通常是研究压电元件在不稳定因素作用下的工作特性，从而有可能应用各种已经发现的效应去制做测量传感器。

压电谐振传感器的研制工作始于本世纪四十年代末。但

只是到了六十年代初，出现了价廉的数字仪表；改进了谐振器的生产技术以及在工业生产中开始人工生长压电石英晶体之后，压电谐振传感器才得到了实际应用。

目前，压电谐振传感器就其解决问题的多样性来说，已经成为应用最广泛的一种。它可以做成多种机械量测量仪表（应力、应变、压力、角速度和线加速度等）；热工仪表（温度传感器、流速传感器、气体分析器、真空计、电流、电压和功率测量仪）；湿度、微小质量和厚度测量装置，以及用于物质的物理化学性能实验研究的仪器等等。

某些这类测量仪器就其精确度和其它使用指标来说，已超过用他种物理原理制成的传感器。

近十年来的事实证明，测量误差为万分之几甚至更低、灵敏度阈为被测量上限的10^{-6}～10^{-7}的压电谐振传感器是可以做出来的。

压电谐振传感器的应用范围正在不断扩大。它可以用于生产和科学研究、航空及火箭技术、环境控制系统、低温技术、气象学、海洋学、医学以及其它许多领域之中。

第一章　压电谐振传感器的结构原理

1-1　压电谐振器的等效电路

压电谐振器（ПР）是机电型变换器的一种类型。压电谐振器的主要部分是一个用单晶或多晶压电材料做成的机械振子。通常，把它做成形状规则的元件（矩形薄片、圆盘、杆等）。将两个或两个以上的电极加到振子（压电元件）上，用来激励振子中的机械振动。压电谐振器通过导线与电源连接，用紧固件固定到结构物上。压电谐振器的工作是以压电效应为基础的，利用压电效应可将电极的输入电压转换成振子中的机械应力（反压电效应）；反之在机械应力的作用下，振子发生变形，在电极上产生输出电荷（正压电效应）。压电变换器的可逆性使我们把它视为二端网络，从这两端既可输入电激励信号产生机械振动，又可取出与振幅成正比的电信号。

同所有的弹性体一样，压电振子具有一系列机械振动的固有频率。其固有频谱由振子和电极的尺寸与结构、固定方式、压电材料的弹性以及振动过程中元件的变形型式等所决定。

为了激励出给定的振型，根据反压电效应，必须用一个由所加电信号产生的电场去激励振子，以产生相应的变形型式。压电材料是各向异性的，它们的电物理性能和机械性能沿不同的方向是不同的。因此，对具体的压电谐振器来说，

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

由于压电效应，只有在某些机械振动固有频率上才可以被电激励。

偏离谐振频率时，激励电极回路中的电流变小，它基本上由极间电容所确定。当激励电压的频率接近于压电谐振器的某一谐振频率 f_p 时，机械振动的振幅加大，并且在该频率上达到最大值。电极上的电荷也按比例地增加，电荷 Q 的极性随输入信号的频率而改变。因此，流过压电元件的是正比于机械振动幅值的交变电流。

如果我们把谐振器看作二端电网络，在其输入端加频率为 f 的交变电压 U，把电极回路中电流 I 看为输出特征量，那么，谐振器可以用与频率有关的复阻抗 $Z=U/I$ 来表征。

接近谐振频率时，$|Z|$ 值最小，通过谐振器的电流最大。

从本书论述的测量传感器作用原理的角度来看，压电谐振器幅值-频率特性（АЧХ）的谐振区是它频谱中最重要的部分。

为了确定压电谐振器的幅值-频率特性及其在谐振区的等效电路，可以采用 Y. 默佐恩的通用法。这种方法能用于各种类型的机电变换器，其中也包括压电谐振变换器。根据文献〔1〕和〔2〕中详述的方法，要做出压电谐振变换器的等效电路，必须建立起振子的运动方程和压电效应方程。如果给出了谐振器两个主动面的边界条件，那么，在积分之后可以得到描述变换器电气和机械过程的由三个方程式组成的方程组。根据这些方程式可以做出谐振器的等效电路。在一维近似情况下，该等效电路具有一对电气端子、两对机械端子和一个“理想”的机电转换器，该机电转换器可以把谐振器的机械回路和电气回路相互联系起来。下一步是将“混合”

等效电路（在这种电路中，其过程一方面用电流、电压和阻抗来表示；而另一方面却用机械应力和振动速度来表示）。转换成单一等效电路。这种电路中的元件，具有和本身的物理性质无关的阻抗特性（有效电阻和电抗）。为了实现这样的转换，我们采用机械量和电学量间的类比方法（表1-1）。

表 1-1

机械量		电学量	
力	F	电压	U
位移速度	V	电流	I
机械阻抗	$Z_M=F/V$	电阻	$Z_e=U/I$
表面		连接端子	
质量	M	电感	L
柔度	S	电容	C

由于采用了类比法，对于任意型式的只有两个工作表面承载（一维情况●）的变换器来说，都可以用两种等效电路之一来描述，而这两种等效电路彼此之间只相差一个元件——静态电容 C_0（见图1-1）。当电容 C_0 短路时，对弹性波沿垂直激励电场方向传播的变换器来说，电路是正确的。"理想"的机电转换器可以用系数N表征，系数N由静态外力与其激励内电压之比值确定。转换系数N和变换器的结构及振型有关，并且由材料的弹性、压电特性和介电性能决定。

实际上，我们感兴趣的是变换器的下述三种工作状态●：

（1）固紧或开路状态　这时，表面的位移速度等于零，而负载的复阻抗为无穷大（$U_1=U_2=0$；$Z_{M_1}=Z_{M_2}=\infty$）；

● 具有两个以上工作表面或者两个以上电极的系统，可参阅文献〔3〕和〔4〕。

● 在描述压电谐振器时，采用文献〔6〕中的标准符号。

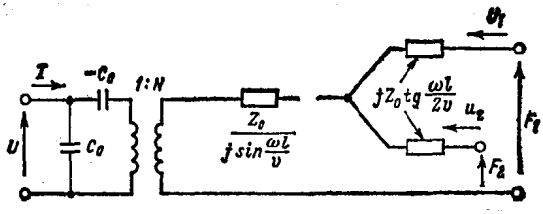

图1-1 压电变换器的等效电路

v—弹性波的传播速度；l—谐振尺寸。

（2）无负载或短路状态 这时，作用在表面上的力F_1和F_2以及负载的复阻抗都等于零($F_1=F_2=Z_{M_1}=Z_{M_2}=0$)；

（3）中间状态 对于这种情况，表面的作用力和位移速度均为有限值。

（一）固紧的压电变换器

对于这种情况，机械部分的夹头是固紧的($Z_M=\infty$)，因而等效电路只有一个元件——静态极间电容C_0。

（二）无负载变换器

在真空状态下工作的谐振器可以作为这种变换器的例子。这种情况下，机械夹头脱开（$Z_{M_1}=Z_{M_2}=0$），因而等效电路得到了简化（见图1-2）。在下列条件下，

$$tg\frac{\omega l}{v}=\frac{\pi}{2},\ \frac{3\pi}{2},\ \cdots,\ \frac{2n-1}{2}\ \frac{\pi}{2}$$

机电转换器的机械部分被短路。这相当于串联谐振的情况，此时，电流I最大。

为了得出在谐振基频ω_p附近的无负载变换器的等效电路，我们可以采用下列关系式：

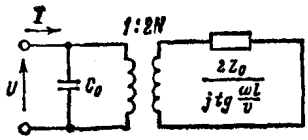

图1-2 无负载压电变换器的等效电路

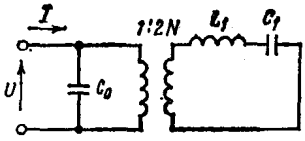

图1-3 无负载变换器的导出等效电路

$$\frac{2Z_0}{j\mathrm{tg}\frac{\pi}{2}\frac{\omega}{\omega_p}}=\frac{2Z_0}{j\mathrm{tg}\frac{\pi}{2}\left(1+\frac{\varepsilon}{\omega_p}\right)}$$

$$=j\pi Z_0\left(\frac{\varepsilon}{\omega_p}+\frac{\pi^2}{12}\frac{\varepsilon^3}{\omega_p^3}+\cdots\right) \qquad (1\text{-}1)$$

式中 $\omega_p=2\pi f_p=\pi v/l$;

$\omega=\omega_p+\varepsilon$。

如果用一个集中电感 L_1 和电容 C_1 的串联电路来代替阻抗 $2Z_0/j\,\mathrm{tg}\frac{\pi}{2}\frac{\omega}{\omega_p}$，而$\omega_p=1/\sqrt{L_1C_1}$，那么，不难证明，这种电路的复阻抗 $Z=j\,(\omega L_1-1/\omega C_1)$ 也可以表示为类似于式（1-1）的级数形式。因此，图 1-2 所示的电路能够简化成具有集中参量的电路（图 1-3）。集中“机械”电感L_1和电容 C_1 的物理意义是显而易见的。按照表 1-1 所述，电感正比于压电元件的质量，而电容正比于它的柔度。从线路中除去转换器，我们就得到了无负载压电谐振器的等效电路（图1-4）。在此图中，

$$L_K=L_1/4N^2 \qquad (1\text{-}2)$$

$$C_K=4N^2C_1 \qquad (1\text{-}3)$$

在一次近似的情况下，阻抗 R_K 可认为是有功机械损耗。

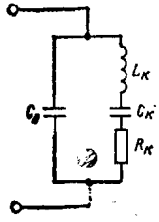

图1-4 无负载压电谐振器的等效电路

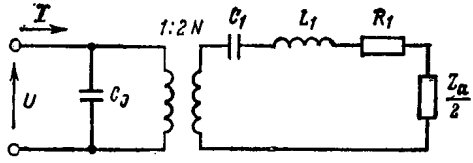

图1-5 负载压电谐振器的等效电路

(三) 有负载变换器

对于上面讨论的第三种状态——有负载变换器来说，其特点是存在声负载（$F_{1.2} \neq 0$；$U_{1.2} \neq 0$），其等效电路如图1-5所示。一个工作表面的声负载 Z_a 可以是完全无功的(只改变振动系统的等效柔度)、完全有功的（改变谐振器的辐射能量损耗）以及综合的(同时影响柔度和谐振器的等效损耗)三种情况。有关声负载的影响问题将在下面章节中进行讨论(参阅§2-4和第七章)。这里同样可以指出，在阻抗 R_K（损耗）和电容 C_K（柔度）的数值中引入相应的修正之后，有负载谐振器也可以用类似于无负载压电谐振器的等效电路来表示。

(四) 等效电路分析

具有损耗的压电谐振器的导纳矢量图如图1-6所示。其中，B_p 为电导；G_p 为电纳（当 $B_p > 0$ 时，电纳 G_p 具有电容特性；当 $B_p < 0$ 时，则具有电感特性[1]）。

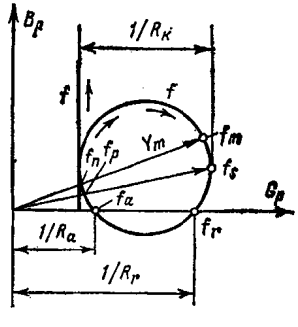

图1-6 压电谐振器的导纳矢量图

为了更加明确地表示导纳和频率的特征关系，可以采用三维

图解法[5]。从矢量图中可以看出，除机械谐振频率f_r附近的狭窄区域之外，矢量终端沿垂直线向上移动。在机械谐振频率附近，导纳矢量的终端可以用所谓的“动态导纳圆”来描述。

在大部分频谱中，电纳具有电容特性，只有在很窄的$f_r \sim f_a$频率范围内，谐振器才和电感一样。在频率为f_r和f_a时，导纳的电纳分量等于零。按照文献〔6〕，把下频f_r取做谐振频率，上频f_a取做反谐振频率。

其他两个频率f_s和f_p也具有各自的特点。当频率为f_s时，在动态分路L_K、C_K和R_K中观察到导纳的最大值；在频率f_p时，导纳出现最小值。频率f_s称为串联谐振频率，这个频率是和压电谐振器的机械谐振频率相吻合的。因此，压电谐振器的机械性能可以非常精确地表示为：

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K C_K}} \tag{1-4}$$

频率f_p称为并联谐振频率，

$$f_p = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{1}{L_K C_K}\left(1 + \frac{C_K}{C_0}\right)\right]^{1/2} \tag{1-5}$$

把关系式（1-4）和（1-5）相比较可以看出，两个谐振频率间的差值$\Delta f = f_p - f_s$由电容比确定：

$$m = C_K / C_0 \tag{1-6}$$

通常，$m \ll 1$，因此

$$\frac{f_p - f_s}{f_s} = \frac{m}{2} \tag{1-7}$$

一般来说，串联谐振频率f_s不同于谐振频率f_r，而并联谐振频率f_p也不同于反谐振频率f_a。但当$m \ll 1$时，可

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com