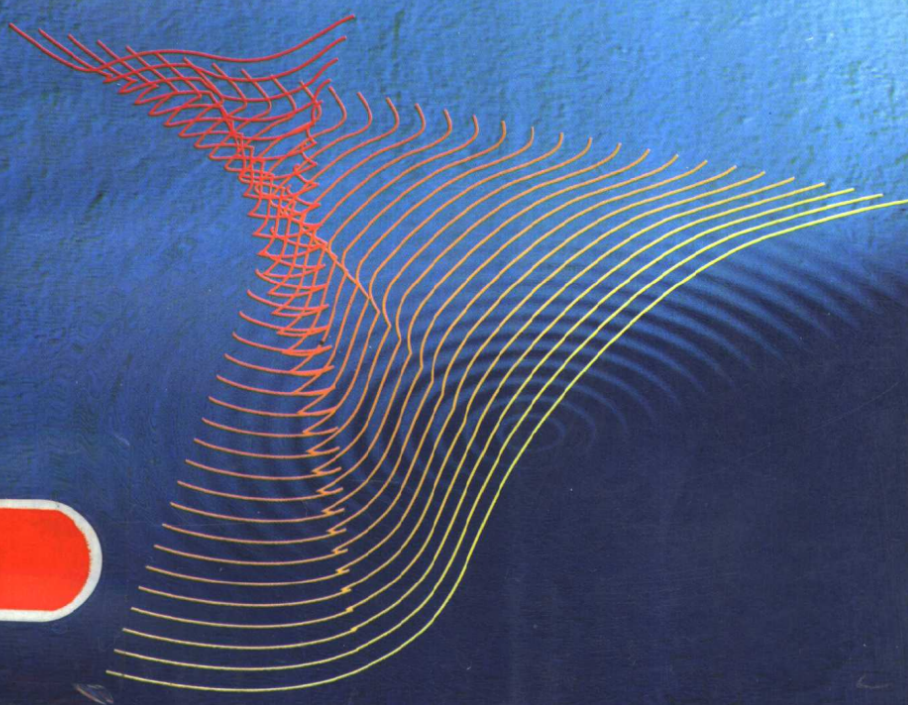


谐振式传感器理论 及测试技术

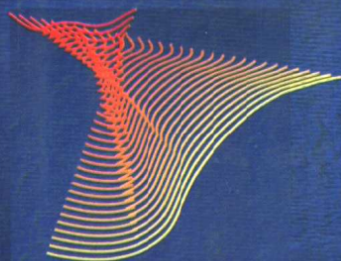
崔玉亮 邓铁六 于 凤 著



煤炭工业出版社

责任编辑：姜庆乐

封面设计：解 冰



ISBN 7-5020-1361-X



9 787502 013615 >

ISBN 7-5020-1361-X/TP212

书号：4130 定价：8.20元

TP
221

图书在版编目 (CIP) 数据

谐振式传感器理论及测试技术/崔玉亮等著. —北京:
煤炭工业出版社, 1996. 10

ISBN 7-5020-1361-X

I. 谐… II. 崔… III. 传感器, 谐振式 IV. TP212
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 21258 号

谐振式传感器理论及测试技术

崔玉亮 邓铁六 于凤 著

责任编辑: 姜庆乐

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街 21 号)

北京房山宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092 \text{ mm}^{1/32}$ 印张 $4\frac{1}{2}$

字数 88 千字 印数 1—660

1997 年 3 月第 1 版 1997 年 3 月第 1 次印刷

书号 4130 定价 8.20 元

内 容 提 要

本书专门介绍了传感器电子学这门新兴交叉学科的重要分支——谐振式传感器电子学。全书共分八章，主要内容包括：谐振式传感器敏感机理，典型谐振式传感器设计依据，两种矿用大量程谐振弦式传感器设计，谐振式传感器信号测量方法，非线性传感器（含谐振式传感器）静态总误差合成理论，智能化非电量电测仪器设计，谐振传感器集散式远距离实时监测系统设计与应用等。

本书可作为高等学校传感器专业本科生及研究生的教学参考书，也可供检测技术与仪器专业、自动控制专业的学生及有关工程技术人员参考。

前 言

随着数字技术及计算机技术的广泛应用,以频率量作为输出的准数字式传感器——谐振式传感器受到特别重视。它是基于正反馈原理,由激励器、检测器、机械谐振器和放大器构成的机电一体化高品质闭环谐振系统。与传统的幅值敏感类模拟式传感器不同,谐振式传感器频率输出的固有特征,决定了它具有不必经过 A/D 转换器件就可以直接与数字系统及计算机接口的优势,并且信号不会因传输而降低其精度,能够无失真地远距离传输和实现高精度的测量。其高品质的谐振特性,决定了传感系统功耗小,抗干扰性强,稳定性好。谐振式传感器所具有的诸多优点是目前其它各种模拟式传感器所不能比拟的,因而成为传感器技术重点发展的方向之一。

本书以谐振式传感器为讨论对象,对谐振式传感器的发展、工作原理、结构、设计理论、测试技术及应用技术等内容进行了系统的总结和论述,以进一步推动传感器电子学这门新兴交叉学科的发展。

该书主要内容是作者多年科研成果的总结,同时考虑到本书的系统性,吸收了国内外同行专家的部分研究成果。

全书由八章组成,涉及概论、理论、测试技术及测试系统等。第一章是在广泛参阅国内外大量资料的基础上,对谐振式传感器的发展进行了全面的总结;第二章至第四章对谐振式传感器敏感机理及设计依据进行阐述,并介绍两种矿用

大量程谐振弦式传感器的设计；第五章及第六章论述了利用单片机及F/D专用集成电路(ASIC)实现谐振式传感器信号采集的方法，并对非线性传感器(含谐振式传感器)静态总误差合成理论进行了介绍；第七章及第八章介绍传感器二次仪表及监测系统设计，包括智能化非电量电测仪器设计以及集散式远距离实时监测系统设计。

由于作者水平所限，书中难免存在不当之处，恳请读者不吝赐教。

作 者

1996.9

目 录

第一章 概论	1
第一节 引言	1
第二节 谐振式传感器简介	2
第二章 谐振式传感器敏感机理	13
第一节 谐振技术的特征	13
第二节 谐振式传感器的分类	18
第三节 谐振式传感器频率敏感机理	19
第四节 谐振式传感器相位敏感机理	22
第五节 谐振传感系统的自激振荡器	24
第三章 典型谐振式传感器设计依据	32
第一节 谐振筒式传感器	32
第二节 谐振膜式传感器	37
第三节 谐振弦式传感器	41
第四章 两种矿用大量程谐振弦式传感器设计	53
第一节 大量程谐振弦式位移传感器设计	53
第二节 活塞传压大量程谐振弦式液压传感器设计	68
第三节 谐振弦式传感器理论公式修正	71
第四节 传感器标定数据处理	75
第五节 传感器温度补偿方法	77
第五章 谐振式传感器信号测量方法	78
第一节 引言	78
第二节 单片机多倍周期同步测频技术	80
第三节 采用 F/D 专用集成电路 (ASIC) 实现频率 信号采集	85

第六章 非线性传感器（含谐振式传感器）静态	
总误差合成理论	93
第一节 静态建模	93
第二节 总误差的平方和合成	94
第三节 总误差的均方和合成	97
第四节 各档系统误差与随机误差合成总误差的 方法	97
第七章 智能化非电量电测仪器设计	100
第一节 概述	100
第二节 智能化非电量电测仪器组成	101
第三节 智能化非电量电测仪器设计	102
第八章 谐振传感器集散式远距离实时监测系统	
设计及应用	111
第一节 监测系统结构框图	111
第二节 监测系统硬件设计	112
第三节 监测系统软件设计	114
第四节 监测系统抗干扰技术	119
第五节 典型应用	122
参考文献	125

第一章 概 论

第一节 引 言

传感技术是当代信息技术重要支柱之一。现在,传感技术已处于与微电子技术同步发展,与通信技术和计算机技术协调发展的阶段。尽管应用于各技术领域的基于计算机的测量与控制系统对传感器性能要求有所侧重和不同,但是希望输出数字量则是共同的。

实际上,除了检测线位移和角位移的编码器外,几乎没有其它的直接数字式传感器。而传统的模拟式传感器,需要经过A/D转换器才能与数字系统相连。这使电路在一定程度上变得复杂,并且不可避免地要在稳定性、可靠性、精度、响应速度等方面付出代价。考虑到与计算机之间的接口问题,开发直接输出频率信号的传感器势在必行。它不必经过A/D转换器就可以方便地与计算机连接,组成高精度的测量与控制系统。谐振式传感器就是具备这一特点十分重要的一类传感器。

谐振式传感器是利用某种谐振器的固有频率随被测物理量的变化而变化从而进行测量的一类装置。它的主要技术关键在于利用正反馈原理,构成包括机械谐振器在内的机电一体的高品质闭环谐振系统。其频率输出的固有特征,决定了谐振式传感器易于和数字系统及计算机结合的优势,并且不会因传输而降低其精度,适合于进行长距离的信号传输。其

高品质的谐振特性,决定了传感系统功耗小,抗干扰性强,稳定性好。其处于谐振自激状态的闭环结构特征,决定了传感器输出对输入的自动跟踪。谐振式传感器是一种牢固的整体式结构,所以工作可靠性好。由于比其它各种模拟式传感器(常用的幅值敏感类传感器)具有诸多优势,因此谐振式传感器成为传感技术重点发展的方向之一。

第二节 谐振式传感器简介

自70年代以来,应用于各领域中的测控系统对数字处理的依赖性越来越大,从而要求传感器能直接提供数字输出。建

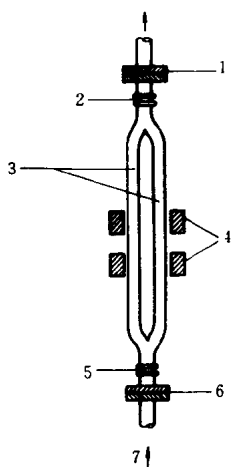


图 1—1 双管谐振式液体密度传感器

1—固定件; 2—柔性连接; 3—挠曲振管; 4—电磁驱动与拾振变换器;
5—柔性连接; 6—固定件;
7—液体流向

立在时间测量基础上的传感器,其输出以频率或相位为特征,比传统的模拟式传感器优越,因为这种传感器的输出能被数字系统利用脉冲计数方式直接进行测量。谐振式传感器,在结构上提供与被测参数有关的机械谐振频率或相对振荡相位,对其研究具有重要的理论和实际意义。为方便讨论,以下将根据被测参数类型进行分类介绍。

一、谐振式密度、液位、粘度和流量传感器

(一) 谐振式密度传感器

图 1—1 是双管谐振式液体密度传感器原理图,被测介质流过两根具有公共固定点的平行振

动管。在外部驱动器激励下，两段管子以挠曲方式沿互为相反的方向振动。谐振频率 f 与液体密度 ρ 之间的关系如下：

$$f = f_0 / (1 + \rho / \rho_0)^{1/2} \quad (1-1)$$

式中 f_0 ——管子无任何液体时的谐振频率；

ρ_0 ——管子几何结构决定的常数。

可见，谐振频率与液体密度成非线性关系。这种仪器精度可达 0.1%，而且对管内液体的性质相当不敏感，故只能测量纯液体及含悬浮状物的液体。

这种双管式密度传感器能克服单管式的不足之处，即两管振动方向相反，它们对固定基座的作用力相互抵消，从而提高了谐振频率的稳定性。但由图 1—1 可以看出，需要加柔性连接（如波纹管）将振动部分与管道的其余部分隔离，以防止外部管道的应力和热膨胀对管子谐振频率产生影响。图 1—2 所示结构克服了这一问题。在这种结构中，液体在两段相同的固定在公共支架上的 U 形管内流动。U 形管象音叉中的叉一样以悬臂方式沿相反方向振动。由于所有管子都固定在公共支架上，因此不存在支撑引入的应力，同时这种结构对温度变化也较稳定。

一般来说，谐振管系统的缺点是当管道的直径较大时，系

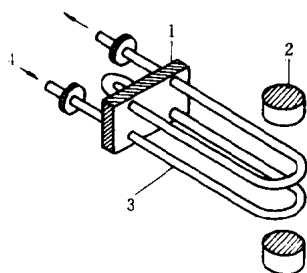


图 1—2 “音叉”式谐振管液体密度传感器

- 1—刚性固定件；2—电磁驱动与拾振变换器；3—以“音叉”模式沿相反方向挠曲振动的管子；
4—液体流向

统体积变得相当庞大。图1—3给出一种特别紧凑的结构。这里,振动结构是安装在管道内轴线上的一段薄壁金属圆筒。金属管的一端牢牢固定在安装环上,另一端以挠曲方式自由振动。圆筒由安装在流体管子外部的电磁激励器和拾振器维持振动。在这种结构中,液体在圆筒的两个表面上流过,所以不存在径向压差分量,频率的压力系数很小。由于管壁做得很薄,所以谐振频率对密度的微小变化极为灵敏。

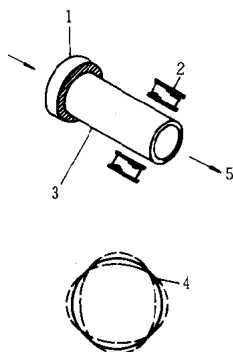


图1—3 安装在管道内部的谐振式液体和气体密度传感器

1—固定环; 2—管道外的激励器和拾振器; 3—固定于管道内的振动圆筒; 4—圆筒振动模式; 5—液体流向

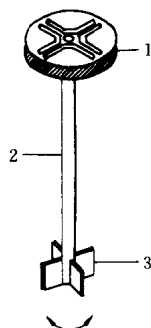


图1—4 浆轮扭振式液体密度传感器

1—装有扭振压电驱动器的固定件; 2—扭振管; 3—在液体中振动的浆轮

当测量腐蚀性液体密度时,不能使用金属谐振器,而应使用玻璃或陶瓷材料的谐振器。由非金属材料做成的谐振器不能用电磁装置驱动,但可选择锆钛酸铝压电陶瓷。陶瓷块粘贴在谐振器表面,根据所需要的特定振动模式,产生纵向

张屈、挠曲或扭转。图 1—4 是非金属谐振式液体密度传感器的一个例子，用来测量铅酸电池中电解质密度。玻璃浆轮形状的谐振器固定在玻璃棒的底端，浆轮沿棒的轴线作扭转振动。当把它插入液体中时，扭转谐振频率是液体密度的特性函数。

（二）谐振式液位传感器

利用与谐振管式密度计相似的原理可测量液位。基本设计示意图如图 1—5 所示。以挠曲模式振动的长管子部分浸入液体中，被液体覆盖的管子下部，由于其横向挠曲运动引起与之接触的液体的运动，从而单位长度的惯性质量比上部的要高，而挠曲振动波的传播速度在插入部分要低些。因此，挠曲振动从管子一端传到另一端的传播时间取决于管子浸入的深度。若管子以其挠曲模式之

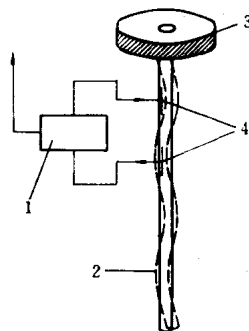


图 1—5 挠曲波式液位传感器

1—锁相环振荡电路；2—挠曲振动管；
3—固定法兰盘；4—安装在管内的压电驱动器与敏感变换器

一振动，则谐振频率是插入深度的函数，为液位测量提供一个频率输出信号。驱动挠曲振动的有效方法是在管内壁安装压电变换器，这样封闭管子端部后变换器与液体完全隔离。

（三）谐振式粘度传感器

利用插入液体的振荡物体进行粘度测量，可用于实验室例行测量和工业过程控制中的在线测量。用于在线测量的一个例子如图 1—6 所示。位于输液管内的小球，在驱动器作用下以大约 200Hz 频率作线性振荡，通过测量振荡衰减时间常

数可计算液体粘度。

更适于实验室用的紧凑粘度传感器是采用薄片伸缩振荡结构。图1—7 给出在膜片中心固定一个矩形板组成的特殊装置。矩形板由安装在膜片上部密封盒中的磁致伸缩装置激励，以基本伸缩振荡模式振荡。膜片下部的板子插入液体，振荡由于粘性剪力而衰减。用某种标准技术测出衰减系数，据此可算出粘度。还研制出了与上述装置类似的以音叉模式工作的石英晶体振动式粘度传感器。

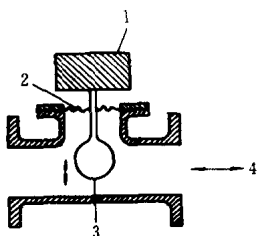


图 1—6 在线测量振荡球式
液体粘度传感器

1—电磁驱动与敏感变换器；2—膜片；3—振荡球；4—液体流向

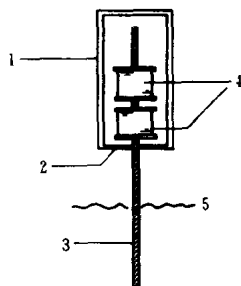


图 1—7 振动叶片式液体
粘度传感器

1—外壳；2—膜片；3—纵向振动片；4—磁致伸缩驱动及敏感变换器；5—液面

(四) 谐振式流量传感器

振动管式流量计的结构如图 1—8 所示。其中安装的一段管子以挠曲模式谐振。驱动振荡器在适当位置提供振动能量以维持振荡。装在管子两端用于测量管子位移的变换器与相位计相连。两个信号间的相位差或时间差提供了一个正比于流量的输出。

实际应用中,为了在低流体速度时能得到足够的灵敏度,要求管子相当长。因此,更适合的结构是将管子弯曲成U型管,如图1—9所示。管子两端与支架刚性连接,U型段由位于中点的电磁驱动器驱动以悬臂梁模式振动。当液体流过管子时,沿中心轴扭振而产生相位差。安装在U型管两边的位移变换器提供了一个时间差供测量,利用测量结果能计算出质量流速。这种流量计的优点是对液体的性质相当不敏感,能对粘稠液体及含悬浮物液体的质量流量进行测量。主要缺点是当管道直径大时,仪器体积变大,使用不方便。

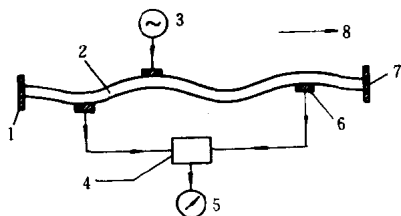


图1—8 振动管式流量计工作原理

- 1—固定支架；2—挠曲谐振器；3—
驱动振荡器与变换器；4—相位比较器；
5—输出指示器；6—管位移变换器；
7—固定支架；8—液体流向

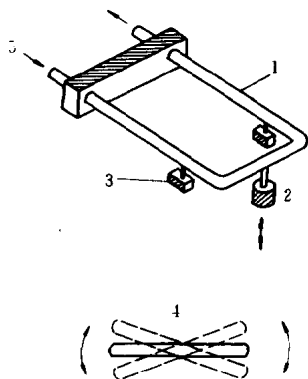


图1—9 U型振管式质量
流量传感器

- 1—悬臂型振管；2—驱动器；
3—扭转位移敏感元件；4—
管子扭振；5—流动方向

结构更紧凑的流量计是把一个小型独立振动传感器置入流体管道内,如图1—10所示,在管道轴线上安装一个振动叶片。叶片是一个薄金属片或陶瓷片,端部固定,中间部分

可以自由振动。利用压电变换器激励振片以大约 1kHz 频率作挠曲谐振。当液体流过管道时，固定在叶片两端的位移变换器拾取的信号间存在一个相位差，在相位计中进行比较后给出与流速有关的输出。

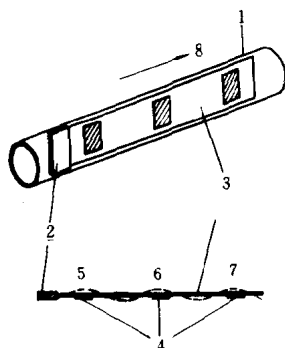


图 1-10 振动叶片式流量传感器结构

1—流体管道；2—叶片固定件；3—装在管内轴线上的挠曲振动叶片；4—压电驱动和敏感换能器；5—敏感元件；6—驱动器；7—敏感元件；8—液体流向

二、谐振式力、压力和加速度传感器

(一) 谐振弦式力、压力传感器

谐振弦式力传感器示意图如图 1-11 所示。在激振电路作用下振弦以其基本横向模式振动。其振动频率 f 为：

$$f = (1/2L) \cdot (T/\rho_1)^{1/2} \quad (1-2)$$

式中 L ——弦有效工作长度；

ρ_1 ——弦线密度；

T ——弦张力。

当用作力传感器时，谐振频率与施加力之间的关系仅与弦长和密度有关。

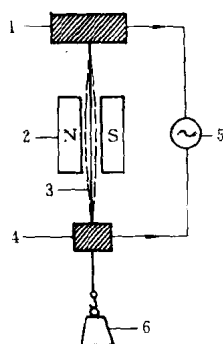
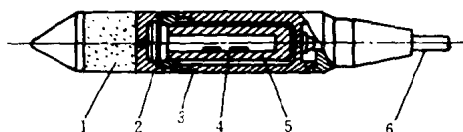


图 1-11 谐振弦式力传感器

1—支架；2—永久磁铁；
3—振弦；4—支架；5—驱动
振荡器；6—外加负载

图 1-12 钢弦式压力传感器
示意图

1—透水体；2—承压膜；3—
钢弦；4—线圈；5—支架；
6—屏蔽电缆

谐振弦（钢弦）式压力传感器（竖式结构型）结构示意图如图 1-12 所示。承压膜受到压力作用引起钢弦自振频率发生变化，通过测量频率可求出被测压力。振弦式传感器具有高分辨力和长期稳定性好等优点，可用于水利、水电、铁道、交通、矿山、石油等土工建筑物及地基内结构中，还可作为高精度压力传感器使用。

（二）谐振筒式压力传感器

谐振筒式压力传感器结构示意图如图 1-13 所示。常用振型如图 1-14 所示。谐振筒式压力传感器主要用于测量气体压力，具有长期的稳定性和可靠性，而且在很宽的温度范围内有很高的精度，可用于高性能飞机控制系统及核电厂反应堆污染泄漏检测系统等。该传感器存在一些问题，诸如磁