



声表面波传感器

陈 明 范东远 李岁劳 著



447076

声表面波传感器

陈 明 范东远 李岁劳 著

西北工业大学出版基金资助出版

西北工业大学出版社

1997年11月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】 本书是关于声表面波传感器理论及其应用方面的一部专著,是作者近 10 年来研究成果的总结。

全书共 8 章,内容包括声表面波技术基础,声表面波传感器理论分析,声表面波压力、加速度、流量、气体及角速度等传感器设计计算、工作机理、结构特点,用于声表面波传感器的各种温度补偿方法以及浮动零点法在声表面波传感器中的应用等。

本书可作为高等院校自动控制、电子工程、计算机应用等有关专业研究生的专题阅读教材,也可供从事测控技术、仪器仪表、计量等方面的科技人员学习参考。

声表面波传感器

陈 明 范东远 李岁劳 著

责任编辑 刘 红

责任校对 钱伟峰

*

©1997 西北工业大学出版社出版发行
(710072 西安市友谊西路 127 号 电话 8493844)

陕西省新华书店经销

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0930-4/TN·55

*

开本:850×1168 毫米 1/32

印张:6.875 字数:165 千字

1997 年 11 月第 1 版

1997 年 11 月第 1 次印刷

印数:1—2 000 册

定价:12.00 元

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

前 言

在当代科学技术中,以计算机为基础的测控系统,都需要传感器提供赖以作出实时决策的信息。随着系统自动化程度和复杂性的增加,对传感器的精度、可靠性和动态响应要求越来越高。声表面波传感器就是在这种背景下出现的。

作者紧跟国际上传感器发展方向,10年来积极开展声表面波传感器的理论与实践研究,获得了一些成果和经验,从而撰写了这本专著。

本书第一章主要论述声表面波技术基础及声表面波传感器理论基础。这是研制声表面波传感器的共同理论基础。

第二章至第六章主要分析研究了各类声表面波传感器的工作原理、设计计算、结构特点等。

第七章对声表面波传感器常用的温度补偿方法进行了分析,尤其是用声表面波器件控制计数门时间同时受温度影响的特点,来进行温度补偿。这对声表面波传感器具有特殊意义。

第八章将浮动零点的概念用于声表面波传感器,使传感器零点漂移对测量精度的影响大大降低。

虽然声表面波在19世纪80年代就已被英国物理学家瑞利发现,但用声表面波器件研制、开发新型传感器还是20世纪80年代的事。从80年代开始,声表面波传感器发展十分迅速。目前已出现近20种类型声表面波传感器,特别是声表面波气体传感器发展尤为突出。尽管声表面波传感器的发展历史并不长,真正应用的面还不广,但由于它符合信号系统数字化、微机控制化和高精度的发展方向,因而受到人们的高度重视。

本书的最后附有必要的参考文献。

由于水平有限,不妥之处,敬请读者批评指正。

本书的出版得到国家自然科学基金“声表面波中陀螺效应研究”,国防科技预研基金“声表面波加速度计的研制”,航空科学基金“声表面波传感器理论研究”,航空工业总公司科技局测控处“声表面波压力传感器的理论及应用研究”项目的资助。同时,有关科研项目的研究工作也得到航空工业总公司 618 所的资助。

作 者

1996 年 10 月

目 录

第一章 声表面波传感器概论	1
一、引言	1
二、声表面波技术基础	3
三、声表面波传感器理论基础	27
第二章 声表面波谐振式压力传感器	37
一、压力的基本定义及各种单位	37
二、声表面波谐振式压力传感器的组成及工作机理	38
三、声表面波谐振式压力传感器敏感元件的理论设计	45
四、声表面波谐振式压力传感器敏感元件的有限元设计	65
五、声表面波谐振式压力传感器信号检测电路的设计	130
六、声表面波谐振式压力传感器的误差分析	140
第三章 声表面波加速度传感器	149
一、概述	149
二、声表面波加速度传感器的工作机理	150
三、声表面波加速度传感器的结构形式	154
四、声表面波加速度传感器误差分析	156
五、声表面波加速度传感器的测试	159

第四章 声表面波流量传感器	165
一、概述	165
二、声表面波流量传感器的工作机理	165
三、声表面波流量传感器的理论分析	166
四、声表面波流量传感器的动态响应	168
第五章 声表面波气体传感器	171
一、概述	171
二、声表面波气体传感器的工作机理	172
三、敏感薄膜与传感器特性之间的关系	175
第六章 声表面波角速度传感器	177
一、概述	177
二、声表面波中陀螺效应的理论推导	178
三、声表面波中陀螺效应的大小及方向的分析	187
四、声表面波中陀螺效应产生原因的定性分析	192
第七章 声表面波传感器温度补偿方法的研究	195
一、利用差动结构进行温度补偿	195
二、利用频率测量时计数门时间与温度有关进行 温度补偿	197
三、利用单片机实现温度补偿	200
第八章 浮动零点法及其在声表面波传感器中的应用	203
一、概述	203
二、差动原理	203
三、浮动坐标原理	205
四、浮动零点法	207

第一章

声表面波传感器概论

一、引言

声表面波(简写 SAW) 是英国物理学家瑞利在 19 世纪 80 年代研究地震波过程中发现的一种能量集中于地表面传播的声波。近几十年来,人们对 SAW 基本性质的认识越来越深入,特别是在 1965 年,美国的 R. M. White 和 F. M. Voltmov 发明了能在压电材料表面激励 SAW 的金属叉指换能器(简写 IDT) 之后,大大加速了声表面波技术的发展,相继出现了许多各具特色的 SAW 器件,使这门年轻的学科逐步发展成为新兴的、声学 and 电子学相结合的边缘学科。现在 SAW 技术的应用已涉及许多学科领域,例如:地震学、天文学、雷达通讯及广播电视中的信号处理、航空航天、石油勘探、无损检测等。

然而,用 SAW 器件研制、开发新一代传感器还是 20 世纪 80 年代的事。起初,人们发现外界因素(如温度、压力、磁场、电场、某种气体等)对 SAW 传播特性会造成影响,进而研究这些影响与外界因素的关系。根据这些函数关系,设计了各种所需结构,用于测量各种化学的、物理的被测参数。从 80 年代至 90 年代,SAW 传感器在欧美,特别是在日本,发展十分迅速,已出现了十几种类型 SAW 传感器。尽管 SAW 传感器的历史并不长,在实用化方面尚有很多困难,但由于它符合信号系统数字化、微机控制化和集成化、高精度的发展方向,因而世界上许多国家对 SAW 传感器的开发

研究极为关注,受到人们的高度重视。SAW 传感器具有以下一些独特的优点:

(1) 高精度、高灵敏度: SAW 传感器是继陶瓷、半导体、光纤等传感器之后的一支后起之秀。一般陶瓷或半导体材料制成的传感器,大多采用电阻式或电容式,以模拟信号输出,需经模 / 数转换才能与计算机接口;而 SAW 技术制成的传感器,工作时,以频率信号输出,不需经 A/D(模 / 数)转换便可与计算机接口,因而精度高。例如:SAW 压力传感器,其精度可达 0.01%,灵敏度可达 0.3×10^{-6} /Pa。若传感器的中心频率为 300 MHz,检测器能检测出 1 Hz 的频率变化,那么该传感器可反应出 1 Pa 的压力变化。这是非常适用于微压测量的。再如 SAW 温度传感器,其理论分辨率可达 10×10^{-6} °C。法国 Ilmenau 技术研究所于 1992 年已研制出能分辨 1×10^{-3} K 温度变化的 SAW 传感器,并能在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内进行精确测量。

(2) 便于大批量生产: SAW 传感器中的关键部件——SAW 谐振器或延迟线,采用半导体平面制作工艺,极易集成化、一体化,各种功能电路易组合和简化,结构牢固,质量稳定,重复性及可靠性好,易于大批量生产,为电子技术发展,为表面安装及组装技术都提供了方便的条件。

(3) 体积小、重量轻、功耗低:从理论分析可知,SAW 角速度传感器,不仅其转速灵敏度比激光陀螺高出一个数量级,还比激光陀螺省去了一个分束器和若干反射镜,且不需专门的导光介质,所以它的体积小,重量轻,结构简单。又因为 SAW 90% 以上的能量集中在距表面一个波长左右的深度内,因而损耗低;加上 SAW 传感器电路简单,所以整个传感器的功耗很小。这对于煤矿、油井或其他有防爆要求的场合特别重要。

(4) 结构工艺性好: SAW 传感器是平面结构,设计灵活;片状外形,易于组合;能比较方便地实现单片多功能化、智能化;安装容易,并能获得良好的热性能和机械性能。

另外,SAW 传感器可以直接将被测量变化转换成频率变化,便于传输、处理,极易与微机直接配合,组成自适应实时处理系统。

二、声表面波技术基础

(一) 声表面波的类型

在无边界各向同性固体中传播的声波(称为体波或体声波),根据质点的偏振方向(即质点振动方向)可分为两大类,即纵波与横波。纵波质点振动平行于传播方向,横波质点振动垂直于传播方向。两者的传播速度取决于材料的弹性模量和密度,即

纵波速度

$$v_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1-1)$$

横波速度

$$v_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (1-2)$$

式中 E —— 材料弹性模量;

μ —— 材料泊松比;

ρ —— 材料密度。

由于固体材料的泊松比 μ 一般在 $0 \sim 0.5$ 之间,所以从式(1-1)和式(1-2)可看出,横波一般比纵波传播速度慢。

在一般晶体(均属于各向异性固体材料)中,质点振动方向与声波传播方向的关系比较复杂。一般情况,质点振动方向既不平行也不垂直于波的传播方向,且质点振动有三个相互垂直的偏振方式。将偏振方向较接近于传播方向的波称为“准纵波”,两个较接近垂直于传播方向的波称为“准横波”。这三种波的速度各异,准纵波最快。两个准横波中,速度较快的一个称准快横波,较慢的一个称为准慢横波。这三种波的波前法线方向,即波的相速度方向与波的

能量方向不一致,如图 1-1 所示,这种现象称为“波束偏离”。只有在某些特殊的方向,才能得到纯纵波与纯横波,即波的能量方向与波的相速度方向(即波前法线方向)一致,这些方向称之为纯波方向。

图 1-1 中, n 为波前的法线方向,即波的相速度方向; r_L, r_{S1}, r_{S2} 分别为准纵波、准快横波、准慢横波的能流方向。一般这三束波是不共面的; 距离 OL, OS_1, OS_2 分别正比于 r_L, r_{S1}, r_{S2} 的相速度。

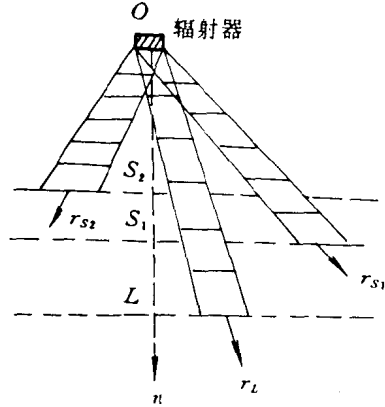


图 1-1 在各向异性固体中声波的传播

对于压电晶体, 由于压电效应, 在声波传播过程中, 将有一个电势随同传播, 且使声波速度变快, 这种现象称为“速度劲化”。

当固体有界时, 由于边界变化的限制, 可出现各种类型的声表面波, 如瑞利波、电声波、乐甫波、广义瑞利波、拉姆波等。

1. 瑞利波 SAW 技术所应用的绝大部分是这种类型的波。它的传播速度计算公式比较复杂, 即使在最简单的非压电各向同性固体中, 其速度 v_R 也是下列 6 次方程的解:

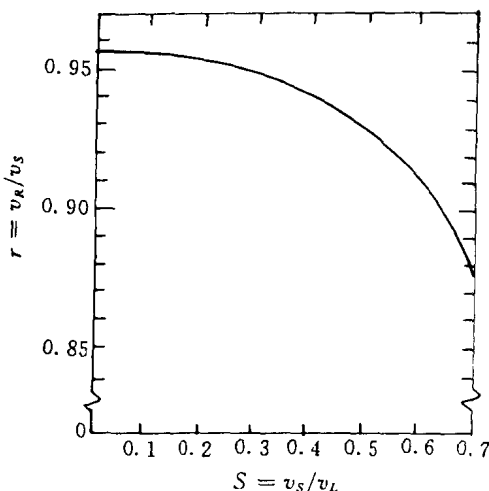
$$r^6 - 8r^4 + 8r^2(3 - 2S^2) - 16(1 - S^2) = 0 \quad (1-3)$$

式中 $r = v_R/v_S$;

$$S = v_S/v_L = \left[\frac{1 - 2\mu}{2(1 - \mu)} \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$\mu = 0 \sim 0.5。$$

解方程式(1-3)可得 r 值在 $0.87 \sim 0.96$ 之间(见图 1-2)。由此可得瑞利波的两个性质: ① 瑞利波速度与频率无关, 即瑞利波是非色散波; ② 瑞利波速度比横波要慢。

图 1-2 各向同性固体中 r 与 S 的关系

由计算可证明,瑞利波质点的运动是一种椭圆的偏振,它是相位差为 90° 的纵振动和横振动合成的结果。表面质点作反时针方向的椭圆振动,其振幅随离开表面的深度而衰减(见图 1-3)。但纵振动与横振动的衰减不一致,其衰减规律如图 1-4 所示。

从图 1-3 和图 1-4 可得出以下两个特点:① 在约 0.2λ 深度处,纵振动振幅衰减到零,在这个深度只剩下横振动。过此深度,纵振动反向,这时质点作顺时针方向的椭圆振动。② 纵、横振动的振幅均随深度很快衰减。通过计算可证明能量流平行于传播方向,但随深度很快衰减(见图 1-5)。因此,瑞利波能量集中在约一个波长深的表面层内。频率愈高,集中能量层愈薄。这一特点使 SAW 较体波更易获得高声强,同时该特点也使基片背面对 SAW 传播的影响很小,因而就 SAW 器件本身而言,对基片的厚度及背面质量无严格要求。但若用该器件做力传感器,则应根据设计计算来严格控制基片厚度。

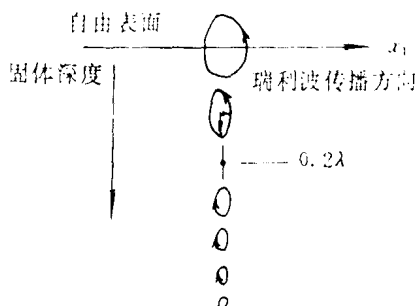


图 1-3 在各向同性固体中,瑞利波质点运动随深度的变化

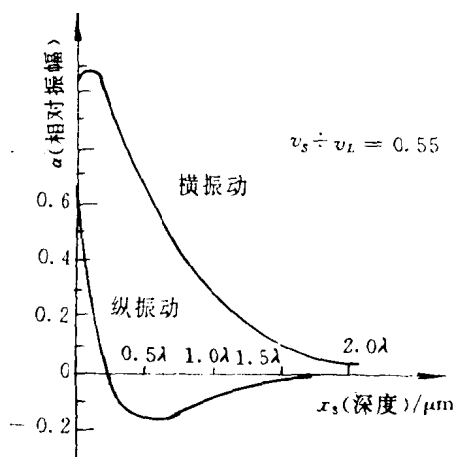


图 1-4 在各向同性固体中,瑞利波的纵振动
与横振动分量随深度的变化

在各向异性晶体中,瑞利波基本上保持了上述一些特点:相速度与频率无关,其速度比同一方向上的体波速度要慢,质点作椭圆偏振,质点的位移随深度衰减,波的能量限制在靠近表面的区域内等。但也有如下一些差别:① 瑞利波的相速度依赖于传播方向;② 除沿纯波方向外,能量流一般不平行于传播方向;③ 质点椭圆偏振平面不一定在弧矢平面(即传播方向与表面法线决定的平面)

内,椭圆的主轴也不一定与传播方向或表面法线平行;④ 质点位移随深度的衰减呈阻尼振荡形式(见图 1-6)。

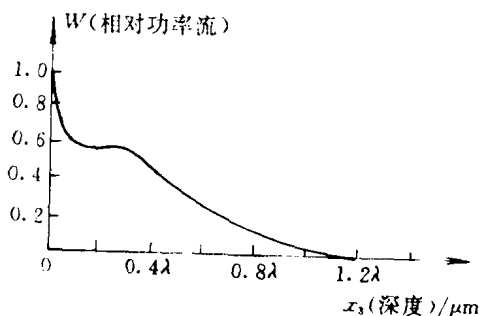


图 1-5 各向同性固体中,瑞利波功率流随深度的变化

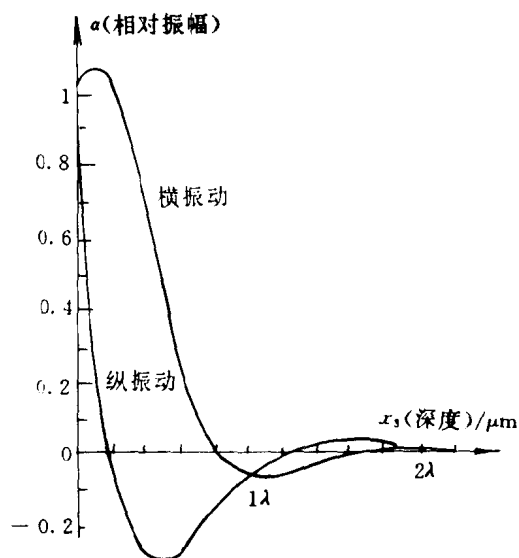


图 1-6 在单晶硅的基平面上,沿立方轴传播的瑞利波其位移分量随深度的衰减

在压电晶体中,瑞利波和体波一样,有一个电势随同声波传播。这时波的传播速度与表面处的声条件有关。例如在 Y 切 LiNbO_3 表面沿 z 轴传播的瑞利波,当表面为自由状态时,其速度为 3 485 m/s;而当表面为电短路(蒸镀一层导体)时,波速度为 3 405 m/s。

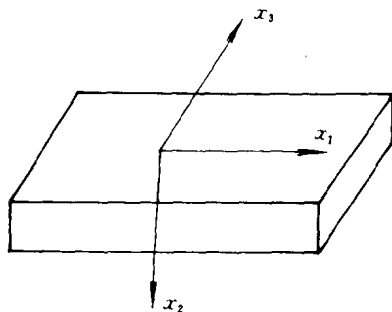


图 1-7 电声波传播的坐标系

2. 电声波 它是一种质点振动垂直于传播方向和表面法线的横表面波。由于它是 Bleustein 及 Gulyaev 首先于 1968 年发现的,因此又称 B-G 波。

电声波传播的坐标系如图 1-7 所示。 x_1 是波的传播方向, x_2 是表面法线方向, x_3 是 6 mm 类压电晶体的六重对称轴或铁电陶瓷的极化方向,也就是电声波的质点振动方向。

若材料表面是电自由的,则沿 x_1 方向传播速度为

$$v = v_s \left[1 - \frac{K^4}{(1 + \epsilon_{11})^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-4)$$

式中 v_s —— 同方向传播的体横波速度;

ϵ_{11} —— 相应的介电常数;

K —— 这种几何结构中体横波的机电耦合系数, $K^2 = e_{15}^2 / \epsilon_{11} \bar{C}_{44}$ (e_{15} —— 相应的压电常数);

$\bar{C}_{44}$ —— 材料的劲化弹性模量, $\bar{C}_{44} = C_{44} + e_{15}^2 / \epsilon_{11}$, (C_{44} —— 相应的弹性模量)。

电声波在这种表面为电自由的材料中传播时,沿深度 x_2 方向的衰减系数为

$$\xi_2 = \left[\frac{K^4}{1 + \epsilon_{11}} \right] \xi_1 \quad (1-5)$$

式中 $\xi_1 = 2\pi/\lambda$;

λ ——电声波波长。

当晶体材料表面短路时,沿 x_1 方向传播的电声波波速为

$$v = v_s(1 - K^4)^{\frac{1}{2}} \quad (1-6)$$

衰减系数为

$$\xi_2 = K^2 \xi_1 \quad (1-7)$$

由于一般压电晶体的介电常数 $\epsilon_{11} \gg 1$, 故在表面为电自由晶体中传播的电声波速度更接近于体横波的速度, 而电声波在电自由晶体中渗透的深度比在表面电短路的晶体中深得多。

当 $v \rightarrow v_s, \xi_2 \rightarrow 0$ 时, 即电声波退化为体横波。

3. 乐甫波 在SAW器件中, 常见到一种复合结构, 即在基片上面覆盖一层薄膜。在这种结构中, 解波动方程要满足两个边界条件: ① 膜的自由表面; ② 膜与基片的分界面。在这种情况下可出现两种类型的波, 一是质点作椭圆偏振的瑞利型波, 另一个是当薄膜材料的体横波速度 v_s' 小于基片材料的体横波速度 v_s 时而出出现的横表面波, 其质点振动垂直于传播方向 x_1 和表面法线方向 x_2 , 该波称为乐甫波。

乐甫波是色散波, 即波速与频率有关。在截止频率附近, 波透入基片很深, 其传播速度接近于基体中横波的速度。随着频率的增高, 波速逐渐减小, 透入基体的深度也逐渐减小, 即波的能量逐渐集中到薄膜层。当波长比薄膜层厚度小很多时, 波基本上集中在薄膜层中。这时, 波在由薄膜材料组成的薄片传播, 薄片的一面为自由表面, 另一面受到基体的微扰。这时波的传播速度接近薄膜材料中的横波速度。

对于各向异性材料或压电材料, 情况较复杂, 除某些特定方向外, 乐甫波与瑞利型波耦合在一起出现。

4. 瑞利型波(广义瑞利波) 瑞利型波的某些传播特点与前面所述的瑞利波不一样, 这里将其不同点作简要介绍。

出现瑞利型波, 没有乐甫波中 $v_s' < v_s$ 的限制, 即不论薄膜材

料的体横波速度 v_s' 大于还是小于基体中的体横波速度 v_s , 都可能出现瑞利型波。当 $v_s' > v_s$ 时, 称膜劲化基体; 当 $v_s' < v_s$ 时, 称膜加载基体。不论哪种情况, 瑞利型波均为色散波。对于 $v_s' > v_s$ 的情况, 只有一种模式, 即基本模式, 不存在高次模式。在这种情况下, 当基体上不存在膜时, 基体中传播的即为瑞利波; 当膜层增厚或频率增高, 瑞利型波速也逐渐增加, 直至与基体的体横波速度相同。这时波的透入深度很深, 类似于体横波。对于 $v_s' < v_s$ 的情况, 则类似于乐甫波(只是质点作椭圆振动), 除色散外, 还存在高次模式。

5. 拉姆波 这是一种在薄板中传播的板波。固体板存在着上下两个自由表面, 解波动方程并使其满足这上下两个自由表面的边界条件, 即可得到两类在板中传播的波。一类是质点振动平行于表面而垂直于传播方向的横板波(或称 SH 波); 另一类是质点在弧矢平面内作椭圆偏振(类似于瑞利波)的波, 称为拉姆波。这两类波又各具有两种基本类型, 一是对称型, 另一是反对称型。对称型的拉姆波有时也称纵板波(或膨胀板波); 反对称型的拉姆波则称为弯曲板波。这两种类型的拉姆波在各向同性板中传播时振动情况如图 1-8 所示。



图 1-8 板中传播拉姆波时的振动情况

(a) 对称型(又称膨胀型)拉姆波 (b) 非对称型(又称弯曲型)拉姆波

拉姆波与乐甫波一样, 也存在许多高次波。这些高次波的质点振幅在板内的分布是振荡的, 且每种高次波均有一定的临界频率, 即当板厚一定时, 只有频率达到一定值时, 板内才能传播这种高次波。