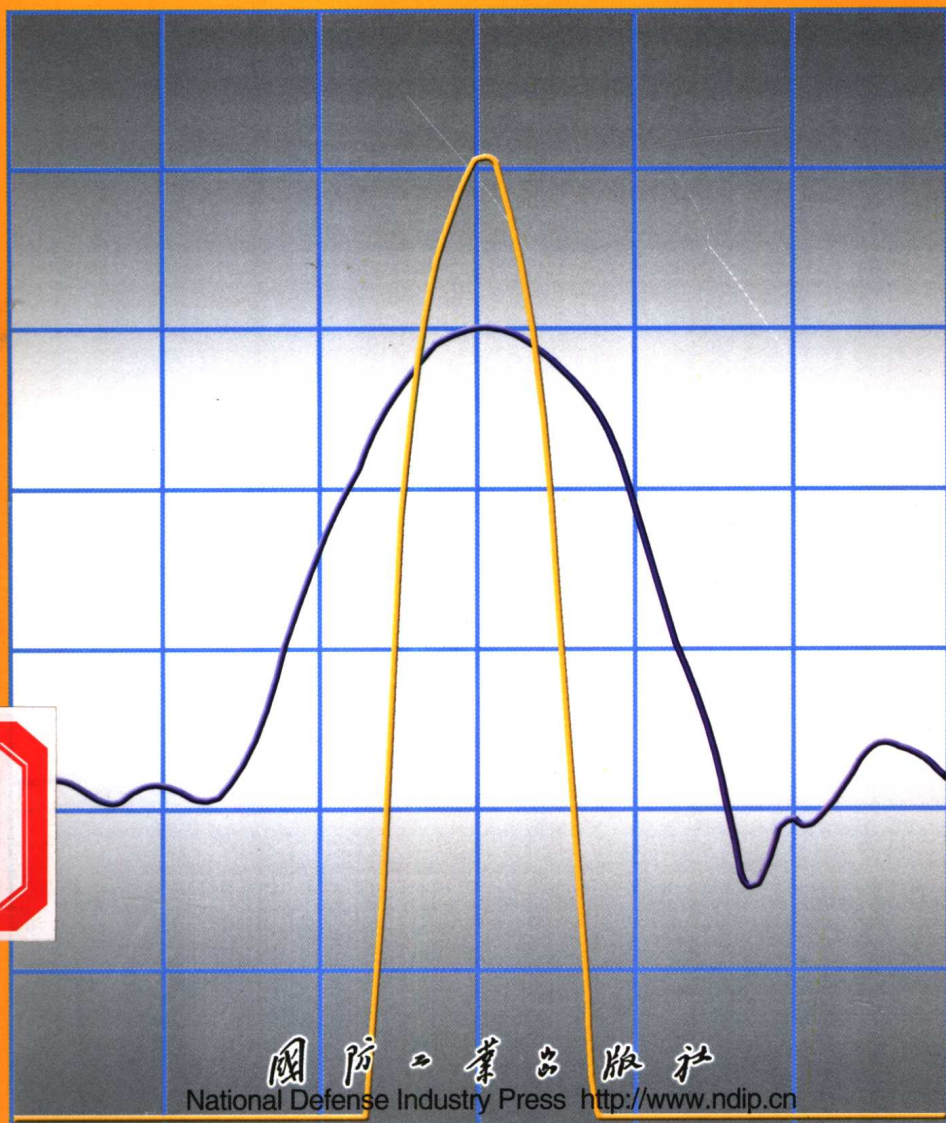


声表面波式小波变换器件与应用

朱长纯 卢文科 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press <http://www.ndip.cn>

声表面波式 小波变换器件与应用

朱长纯 卢文科 等著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

声表面波式小波变换器件与应用/朱长纯等著. —北京:国防工业出版社, 2004. 1

ISBN 7-118-03274-3

I. 声... II. 朱... III. 声表面波器件—研究
IV. TN65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 087186 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 4 $\frac{1}{4}$ 116 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:10.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

在 1882 年,傅里叶(Fourier)出版了《The Analytic Theory of Heat》著作以后,傅里叶变换一直是诸多研究领域工作者喜欢使用的数学工具,尤其在信号处理领域中是一种最完美、应用最广泛,而且效果最好的分析手段。傅里叶认为任何一个周期函数都能表示为一组正弦函数和余弦函数之和,这一无限和,现称为傅里叶级数。也就是说,任何一条周期曲线,无论多么跳跃或不规则,都能表示成一组光滑的曲线之和。实际上是函数投影在由正弦函数和余弦函数组成的正交基上,实施对信号的傅里叶变换。对于非周期函数,通过傅里叶变换或周期延展转化为周期函数即可。

但傅里叶变换是一种纯频率域中的分析方法,它反映在整个信号全部时间下的整体频域特征,而不能提供任何局部时间段上的频率信息,即傅里叶变换没有时一频局部化特性。通常把时间频率有局部化特性的信号叫非平稳信号,如音乐信号,在不同时间对应不同音节;探矿信号,在目标出现的位置对应一个回波信号等;还有一些心理学、生理学等信号也是非平稳信号。

为了研究信号的时一频局部化特征,在 1946 年,由 Gabor 提出了短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform),也叫窗口傅里叶变换。为了看清楚信号局部化特征,给信号开了一个局部化窗口,但其窗口函数的大小形状均与时间和频率无关,此窗口是保持固定不变的。对于分析时变信号,如果是高频信号一般持续时间很短,我们期望采用短时间窗;而对于低频率信号一般持续时间很长,我们期望采用长时间窗进行分析。

小波变换的优点是不仅继承和发展了短时傅里叶变换的局部化的思想,而且克服了短时傅里叶变换的窗口不随频率变化的缺

点,即在时变信号中,如果是高频率信号一般持续时间短,采用短时间窗;如果是低频率信号一般持续时间长,采用长时间窗,以便清楚地看到信号的变化情况。所以,小波变换特别适应于探测正常信号中夹杂的瞬态反常现象,并可展开其成分,因而被誉为分析信号的显微镜。

在小波变换理论的发展过程中,发现它与工程技术上的一些实际问题是紧密相关的。在 20 世纪 60 年代法国地球物理学家 J. Morlet 在地下找石油时,向地下打炮或发射脉冲波,通过对反射的信号分析,为小波分析学科的诞生和发展做出了最重要的贡献;随后, Mallat、Daudechies、Chui 等人的工作联合奠定了小波分析的基础。

小波分析是在解决实际问题的过程中产生和发展的,而后上升为理论,辐射多学科,是多学科关注的热点。应用领域十分广泛,涉及诸如语音、图像、通信、雷达、水声、地震、生物医学、机械振动、化工、湍流分析等。

从上面分析知道小波分析技术把信息工业推向了一个新的时代。现在小波分析已发展到了一个比较成熟的阶段。小波分析的算法复杂,其算法运算目前绝大部分是在计算机中完成的,因而编程工作量大;也有一些正在研究利用大规模集成电路进行小波变换计算,但还不成熟。所以科学家和工程技术人员正在努力寻找一种简便的方法进行小波变换的计算,企图避免复杂的、繁琐的数学计算。我们通过大量分析和探讨,首次发现声表面波器件的脉冲响应包络与小波函数包络相一致时(即声表面波器件的脉冲响应函数等于小波函数时),声表面波器件能够实现小波变换及重构运算,为小波变换器件及重构器件开避了一条新的制造途径,避免了小波变换及重构中的复杂算法运算,减轻了计算工作量。

另外,随着科学技术的发展,半导体制造工艺日渐成熟,并且计算机日益广泛应用,目前声表面波器件已经发展到了成熟阶段。由于声表面波器件具有体积小、质量小、耗能低、生产重复性好,无需调整以及温度稳定性优良等特点。还有一个更重要的特点就是

响应速度快,在现代战争中,往往是分秒必争,而声表面波器件制作的小波变换器件及重构器件具有声表面波器件的所有优点。

因此,用声表面波器件制作的小波变换器件及重构器件具有重要的应用价值和实际应用意义。

本书的内容得到了国家自然科学基金(No. 6017020)、863 计划项目(No.2001AA313090)、博士点基金项目(No.20020698014)的资助;刘清洪高级工程师在器件的制作过程中提供了许多宝贵的意见;魏培永博士做了前期的工作,并且编写第七章第九节;文常保、张静端硕士为本书的出版作了许多有益的工作,为此表示衷心感谢!

由于笔者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳切希望读者予以指正。

作 者

目 录

第一章 声表面波及声表面波换能器	1
第一节 声与声波	1
一、声音	1
二、体声波	3
三、声表面波	4
第二节 传播声表面波的基本材料	5
一、压电效应	5
二、声表面波器件所用的各种压电材料	9
(一)压电单晶体材料	9
(二)压电陶瓷材料	13
(三)压电薄膜材料	15
第三节 叉指换能器	16
一、声表面波器件的基本结构.....	16
二、叉指换能器的工作原理.....	17
三、叉指换能器的基本参数.....	19
(一)基本参数	19
(二)频率特性	19
四、几种常见的叉指换能器.....	20
(一)指条相等重叠、均匀周期的叉指换能器	21
(二)变指长叉指换能器	21
第二章 小波变换器件及其重构器件的工作原理	24
第一节 二进小波变换及其重构	24
第二节 二进小波变换器件及其重构器件的工作原理	26
一、二进小波变换器件的工作原理.....	26

二、二进小波变换的重构器件工作原理·····	29
三、用两只声表面波式小波变换器件实现小波 变换的重构·····	32
第三章 小波式叉指换能器脉冲响应数学模 型的建立 ·····	37
第一节 叉指换能器脉冲响应的数学模型 ·····	37
一、叉指换能器脉冲响应与换能器几何结构的关系···	38
二、发射和接收换能器为指条相等重叠、均匀周期 的叉指换能器的脉冲响应数学模型的建立·····	40
第二节 小波式叉指换能器脉冲响应数学模型的建立 ···	42
第三节 接收叉指换能器脉冲响应的数学模型 ·····	45
第四章 声表面波式小波变换器件及其重构器件在设计中 存在的问题及其解决的方法 ·····	47
第一节 信号源内阻对叉指换能器的影响及其解决 的方法 ·····	47
一、信号源内阻对叉指换能器的影响·····	47
二、解决此问题的方法·····	48
第二节 声电再生效应问题的影响及其解决的方法 ·····	49
一、声电再生效应问题的影响·····	49
二、解决此问题的方法·····	50
第三节 叉指电极反射问题的影响及其解决的方法 ·····	51
一、叉指电极反射问题的影响·····	51
二、解决此问题的方法·····	51
第四节 三次行程反射问题及其解决的方法 ·····	53
一、三次行程反射问题的影响·····	53
二、解决此问题的方法·····	54
(一)同相位法·····	54
(二)双接收换能器并联法·····	56
(三)涂吸声材料法·····	56
第五节 波形失真问题的影响及其解决的方法 ·····	57

一、波形失真问题的影响	57
二、解决此问题的方法	57
第六节 衍射问题的影响及其解决的方法	58
一、衍射问题的影响	58
二、解决此问题的方法	58
第七节 体声波问题的影响及其解决方法	58
一、体声波问题的影响	58
二、解决此问题的方法	59
第八节 损耗问题及其解决的方法	59
一、插入损耗	59
(一)插入损耗定义	59
(二)声表面波滤波器的带宽与插入损耗的关系及减小 插入损耗的方法	61
二、反射损耗问题及其解决的方法	64
三、传输损耗问题及其解决的方法	64
第五章 声表面波式小波变换器件及其重构器件的制作	66
第一节 制作方案	66
一、传播声表面波的基片材料选择	66
二、声表面波式小波变换器件及其重构器件 制作方案	66
第二节 声表面波式小波变换器件及其重构器件 的制作	67
一、基片准备	67
二、制作电极膜——金属膜	69
三、涂光刻胶	69
四、制作掩膜版	70
五、曝光、显影、坚膜	70
六、腐蚀	71
七、去胶	71
第六章 器件测试及其误差的分析	72

第一节	声表面波式小波变换器件的测试	72
第二节	声表面波式小波变换器件的误差分析	73
	一、叉指换能器的二阶效应产生的误差及其减小 误差的方法	73
	(一)叉指电极反射产生的误差及其减小误差的方法	73
	(二)三次行程反射产生的误差及其减小误差的方法	74
	(三)波形失真产生的误差及其减小误差的方法	74
	(四)衍射产生的误差及其减小误差的方法	74
	(五)体声波产生的误差及其减小误差的方法	74
	(六)声电再生产生的误差及其减小误差的方法	75
	二、制作工艺产生的误差及其减小误差的方法	75
	三、信号源内阻对叉指换能器产生的误差及其减小 误差的方法	75
第三节	小波变换的重构器件的误差分析	76
	一、叉指换能器的二阶效应产生的误差及其减小 误差的方法	76
	二、制作工艺产生的误差及其减小误差的方法	76
	三、信号源内阻对叉指换能器产生的误差及其减小 误差的方法	76
	四、外围电路产生的误差及其减小误差的方法	76
	五、小波变换及其重构算法本身产生的误差	77
第七章	应用	78
第一节	在可燃性气体探测器中的应用	78
	一、测量原理	78
	二、存在的问题及其解决方法	82
	(一)消除干扰信号的方法	82
	(二)安全栅的设计	82
	(三)熔断器的作用	82
	(四)本质安全型电路的设计	83
	(五)低温性能	83

(六)高温性能	83
(七)高湿度性能	84
(八)长期稳定性	85
三、实验结果及其误差分析	85
(一)KC-1 型可燃性气体传感器的技术指标	85
(二)探测器实验结果及误差分析	85
第二节 在直流变换器中的应用	86
一、大电流变换器	87
(一)霍尔直接式测量大电流原理	87
(二)在测量中存在的几个问题及其解决的方法	88
二、小电流变换器	94
(一)霍尔检零式测量电流原理	94
(二)霍尔检零系统误差的分析	95
(三)在测量中存在的几个问题及其解决的方法	97
第三节 在倾斜度测量中的应用	99
一、测量原理	100
二、存在的问题及其解决的方法	103
(一)消除干扰信号的方法	103
(二)供电电源的选择	103
(三)浮动电极的选择	105
(四)电阻 R_3 、 R_4 的选择	105
(五)抗共模干扰问题	105
(六)交直流电压转换器	105
第四节 在水位测量中的应用	106
一、电容式水位传感器	106
二、测量电路	108
三、在测量中存在的问题及其解决的方法	110
(一)消除干扰信号的方法	110
(二)温度对结构尺寸的影响	110
(三)提高灵敏度、减小寄生电容及漏电的影响	110

第五节 在温度、压力、流量测量中的应用	111
一、温度测量	111
(一)测量原理	111
(二)存在的问题及其解决的方法	113
二、压力测量	114
(一)测量原理	114
(二)存在的问题及其解决的方法	116
(三)主要的调试步骤	117
三、流量测量	117
(一)测量原理	117
(二)存在的问题及其解决的方法	118
第六节 在机械零件硬度测量中的应用	118
一、霍尔检零式机械零件硬度测量原理	120
二、霍尔检零式机械零件硬度测量系统稳态 误差的计算	122
三、在设计中存在的问题及其解决的方法	123
(一)干扰信号的影响及其解决的方法	123
(二)磁路 L_1 、 L_3 材料的选择	124
(三)磁化恒流源和霍尔元件的恒流	124
(四)放大器 A_1 、 A_2 的选择	124
(五)电阻 R_1 的选择	124
第七节 在石油勘探中的应用	124
第八节 在钢丝绳断丝测量中的应用	125
一、测量原理	125
二、存在的问题及其解决的方法	127
(一)霍尔元件的恒流源的设计	127
(二)高频交流恒流源的设计	127
第九节 小波变换在雷达中的应用	127
一、雷达系统的结构	128
二、雷达系统的主要性能参数和技术参数	130

三、用于雷达目标识别的小波变换	130
四、硬件设计	133
参考文献	135

第一章 声表面波及声表面波换能器

本章阐述声与声波的基本特性,通过体声波的特性,来理解声表面波的概念,并且介绍传播声表面波的基体材料,详细论述声表面波器件——叉指换能器的工作原理及其一些基本特性。

第一节 声与声波

一、声音

从自然界到人们的日常生活中,声音这个亲密的朋友时刻伴随着人们。一个人听到声音之后,可以感到高兴或者感到恐惧,譬如说,听见孩子的笑声会感到高兴,听见狼嗥则感到恐惧。我们所说的音乐是一种复杂声音的复合体,它能引起我们感情的千变万化。声音又是作为人类社会主要交际工具的语言基础,指出这一点是很重要的。还有一种特殊形式的声音,即噪声。如工厂的机器声;很多人聚集在一起的喧哗声,这些都是噪声。噪声能引起各种痛苦的感觉,在某些情况下,甚至能对听觉造成不可能挽回的损伤。

“声”的产生 当你去敲击鼓或铃时,你去摸一下正在发音的物体,你会感觉到该物体在振动;如果你的敲击力越大,那么振动越大,发出的声音越大。由此可见,声音是由声源物体的振动产生的,当振动的幅值越大,声音就越大。

声音只能在媒介(如空气、水、钢等)中传播。通常我们能听到各种声音,实际上是靠空气来传播的,所以说在真空中声音是不能传播的,例如在月球上由于没有空气,声音就无法传播。那么声音

在媒介中的传播过程如图 1-1 所示。在图 1-1 中的声源是周期振动的膜片(类似扬声器的纸盒或耳膜)。当振动膜片向右移动时, a 区空气被压缩, a 区是稠密区; 振动膜片向左振动时, a 区空气变为疏散区, 同时向临近的 b 区压过去, 使 b 区变为稠密区; 接着 a 区又被压缩, b 区变为疏散区, 同时向 c 区压过去, 使 c 区变为稠密区; 又接着 a 区变为疏散区, …… , 如此循环反复下去, 空气层就密疏相间地向右传播, 也就是声音向右传播出去了。所以说声波的传播就是空气质点振动的传递。

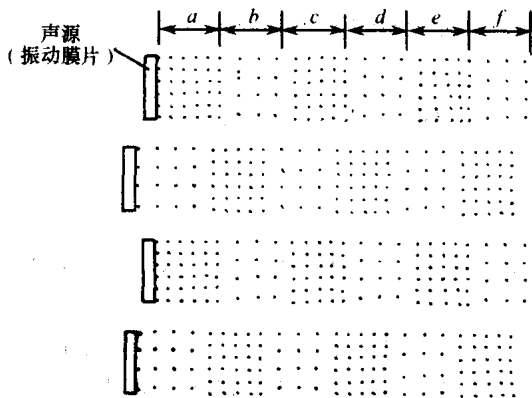


图 1-1 声波在媒介中(如空气)传播过程示意图

把图 1-1 所示空气质点振动向右传递快慢用声速来定义。声音在介质中的传播取决于介质的密度和弹性, 在任何媒介中, 声速可表示为

$$\text{声速} \propto \sqrt{\text{弹性}/\text{密度}}$$

因此, 声速随着弹性增加和密度的减小而增大。单从密度来看, 固体和液体的密度大, 气体的密度小。似乎可以说, 声速在固体和液体中要小一些, 但是, 固体和液体的弹性要超过气体的弹性许多倍, 这又决定了声速在固体和液体中比气体中更大。例如, 声速在钢中为 5050m/s, 在水中约为 1400m/s, 而在空气中约为 340m/s。但是另一方面, 由于铅的弹性很小, 声音在铅中的传播速度只有 1200m/s, 几乎等于声音在氢中的速度(1270m/s), 氢是

一种密度非常低的气体。

声音波长与声速和周期的关系为

$$\lambda = v_s T \quad (1-1)$$

式中 v_s ——声速(m/s);

λ ——波长,是从密(或疏)至密(或疏)的长度;

T ——周期(s),是从密(或疏)至密(或疏)所经过的传播时间。

另外,声音传播的频率为:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-2)$$

声音的频率是指每秒振动数或每秒通过平衡点的次数(Hz)。

图 1-2 是声波按照频率划分的波段示意图。其中频率小于 20Hz 的 A 段为我们通常所称的次声波段, B 段 20Hz ~ 20kHz 为人耳所能听到的声波频率范围; C 段频率大于 20kHz 为超声波段。

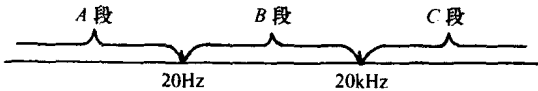


图 1-2 声波频率范围示意图

二、体声波

体声波和声表面波都是声波家族的成员。为了更好理解声表面波,这里先介绍体声波。声波振动时,如果发出的声波能够向四面八方传播,那么就称这种声波为体声波。例如铃声、喇叭声、机器声、讲话声、鸟的欢叫声都是体声波。

体声波包括声纵波和声横波。在图 1-1 所示的声波示意图中,当传播质点疏密相间的向外推移,即就是质点的移动方向和声波的传播方向一致(即平行),这就是声纵波。

如图 1-3 所示,如果绳子一端固定,另一端用人手上下晃动,那么绳子上每一个质点也是上下振动,而波的传播方向是水平的,

就是说如果声波的质点振动方向和波的传播方向是垂直的,那么该声波就是声横波。

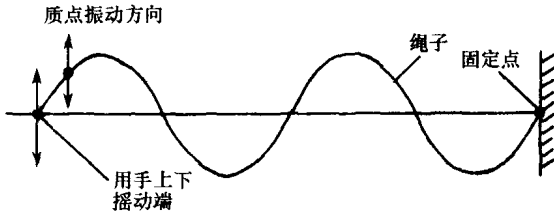


图 1-3 声横波传播示意图

体声波(包括声纵波和声横波)在传播中像光波一样,具有反射、折射、衍射等特性。

三、声表面波

除了体声波以外,声波家族还有一个成员就是声表面波。声表面波包括瑞利波、电声波、乐甫波、广义瑞利波和粒姆波等。声表面波技术所应用的绝大部分是瑞利波,所以下面主要论述瑞利型声表面波(以下简称声表面波)。

声表面波质点的运动是一种椭圆的偏振,它是纵波和横波两种质点振动运动合成的结果。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决定衰减,如图 1-4 所示。

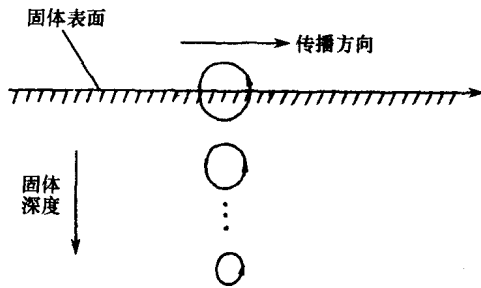


图 1-4 声表面波幅度在固体深度方向衰减示意图

从图 1-4 和图 1-5(横坐标单位 λ 为波长)中知道:声表面波