



装备科技译著出版基金

[美]李斯特·W.斯克姆尔·Jr.(Lester W. Schmerr Jr.) 著

徐春广 李卫彬 译 肖定国 主审

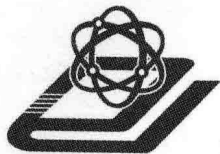
超声相控阵原理

Fundamentals of Ultrasonic
Phased Arrays



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

超声相控阵原理

Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays

[美] 李斯特·W. 斯克姆尔·Jr. (Lester W. Schmerr Jr.) 著

徐春广 李卫彬 译

肖定国 主审

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2016-103号

图书在版编目(CIP)数据

超声相控阵原理/(美)李斯特·W. 斯克姆尔·Jr.
著;徐春广,李卫彬译.—北京:国防工业出版社,
2017.3

书名原文:Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays
ISBN 978-7-118-11154-5

I. ①超… II. ①李… ②徐… ③李… III. ①相控阵—
超声成像—超声检测 IV. ①TB553

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第052630号

Translation from English language edition:

Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays

By Lester W. Schmerr Jr.

Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2015.

Springer International Publishing is a part of Springer Science+Business Media

All rights reserved.

本书简体中文版由 Springer 授权国防工业出版社独家出版。
版权所有,侵权必究。

※

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100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 21¼ 字数 402 千字

2017年3月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价98.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

超声相控阵检测技术是近年来发展起来和广泛应用的一项新兴无损检测技术,其基本原理是利用指定顺利排列的线阵列或面阵列的阵元按照一定时序来激发超声脉冲信号,使超声波阵面在声场中某一点形成聚焦,增强对声场中微小缺陷检测的灵敏度,同时,可以利用对阵列的不同激励时序在声场中形成不同空间位置的聚焦而实现较大范围的声束扫查。因此,在超声相控阵换能器不移动的前提下就可以实现大范围内高灵敏度的动态聚焦扫查,这正是超声相控阵检测技术的优越特点,是常规超声检测不具备的,也是该技术广泛发展和应用的重要原因。

本书原著作者 Lester W. Schmerr Jr. 教授长期从事超声无损检测和超声相控阵检测原理和技术的研究,著有多本超声无损检测学术专著。本书是作者多年科研和教学的经验积累和研究成果。由于原著作者在超声无损检测的长期努力工作,并取得优异的研究成果,所以他在国际上享有很高的声誉。

本译著是国内第一本详细阐述超声相控阵检测基本原理的专著,全面阐述了其基本工作原理、基本构成和相关数学模型和基础理论,对我国超声相控阵检测技术、检测仪器和相控阵探头的发展具有重要参考价值和借鉴意义。

徐春广完成了本书第7~12章、第14章和附录的翻译整理及初校工作,李卫彬负责完成第1~6章和第13章的翻译整理及初校工作。全书译文由肖定国审核校正。

本书的翻译工作历时一年多,蔡海潮、朱延玲、杨超和杨柳等多位博士和硕士研究生以及周世圆副教授等也参加了本书的部分前期准备和协助翻译工作,对本书翻译过程给予过帮助的人,在此一并表示感谢!

最后,特别感谢对本书进行全面审核和校对的肖定国副教授为本书的正确翻译和顺利出版做出的重要贡献!

译者

2016年3月

前 言

这是本人关于超声波理论及其在材料和构件无损评估中应用的第三本专著。第一本专著《超声无损评估基础——一种建模方法》(1998年由Plenum出版社出版),阐述了超声无损评估系统中弹性波(主要是体波)的力学行为,包括波的产生、传播、散射和接收,并描述了不同超声波模型在缺陷类别、尺寸的辨识上的应用。第二本专著《超声无损评估系统——模型与测量》(2007年由Springer出版社出版),是我和S. J. Song教授一起完成的。这本书完整、系统地把理论模型和无损检测结合起来,详细介绍了超声无损检测中影响声信号发生与传播的各种因素。这两本专著涉及的重点是利用单个换能器进行超声检测。目前,超声相控阵技术在工业无损检测中得到越来越广泛的应用。然而,针对超声相控阵独有的特征和理论的介绍和阐述,除在一些期刊和学术会议有介绍外,还没有一本专门的著作进行详细论述,基于以上考虑,我编写了此书。

在整理出版此书时,有三个方面的目的考虑。第一,我不只是想仅仅出版一本教材,而是希望通过介绍关于超声相控阵的基本物理学知识,以便于让学生、工程师以及技术人员理解超声相控阵的概念和内涵,进而清楚知道一维阵列和二维散射波阵列中的如声束偏转、延时法则和变迹技术等重要的理论和概念。第二,我遵循了前两本书编著的理念,通过结合互易理论、线性系统理论、波的传播和散射理论来阐述超声相控阵系统中各个部分或整体系统是如何测量或建模的。这样读者就可以仿照以前单个换能器超声检测模型建立基于超声相控阵的超声检测模型。这些测量模型清楚地解释超声信号是如何从相控阵系统中产生的,特别是传播过程中遇到缺陷后信号的变化。进而,可以通过提取信号遇到缺陷后的变化信息对缺陷大小、特征等进行定量化的评估与检测。第三,由于相控阵成像具有重要的应用价值,我希望提出一个合理的新方法来解释图像是如何生成以及图像的代表意义。目前,相控阵图像通常由延时叠加方法如合成孔径聚焦技术(SAFT)和全聚焦方法(TFM)形成。我重新研究了它们的成像过程,结合测量过程中的物理机理为基本背景,深入探究了为什么这些延时叠加方法如此有效。另外,特别要提出的是,读者可以基于成像原理以较少的假设条件建立起基于声波成像的超声测量模型,利用测量模型实现缺陷的成像。缺陷图像是

缺陷反射率和表面几何特征的显式函数。图像取决于选择的测量模型,包括测量得到的信号、声波的传播过程和相控阵成像测量模型中的电声元件。本书对 SAFT 和 TFM 算法进行概括开发了成像测量模型,并对这两种方法进行了推广。这些模型解释了图像产生过程一些参数的物理属性,并且定义了 SAFT 和 TFM 成像过程中所忽略的一些因素。基于对物理光学远场逆散射(POFFIS)方法的概括,本书也开发了针对小缺陷的成像测量模型。这种方法最早由 Bojarski 提出,并由 Bleistein 加以完善。因此,本书介绍的成像测量模型,第一次系统地介绍了无损检测评估领域最常用的超声相控阵成像方法的框架。

为了让读者更容易理解本书中所描述的相控阵模型,本书提供了基于 MATLAB 函数和脚本,这些函数和脚本简单描述了二维和三维标量参数问题,读者可以改变参数进行学习和研究。作者的目的是提供一套完整的相控阵软件,而是以这些软件作为工具,方便读者验证和理解相控阵原理。MATLAB 函数和脚本在附录 C 中。另外,读者可以发邮件至 lschmerr@cnde.iastate.edu 索要 m-文件,请在邮件的标题上注明“Phased Array Codes”。

最后,我要感谢与我长期合作的同事和朋友——Alex Sedov,他审阅并校订了全书。我也感谢 Ruiju Huang 和 Brady Engle 博士,他们的研究工作帮助我完成了这本书。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 线阵和二维阵列	4
1.3 相控阵系统模型	6
1.4 各章内容概览	11
参考文献	12
第 2 章 一维阵列声场	14
2.1 单源换能器模型	14
2.2 远场声波	19
2.3 活塞波的数值模型	22
2.4 线源模型	28
2.5 波在平界面上的辐射	30
参考文献	36
第 3 章 大尺寸单阵元换能器模型	37
3.1 近轴近似和非涅尔积分模型	37
3.2 大阵元的波束偏转和聚焦	39
3.2.1 波束偏转	39
3.2.2 远场声波的偏转	41
3.2.3 声束聚焦	42
3.2.4 声束偏转与聚焦	47
3.3 幅值加权	49
3.4 多高斯声束模型	55
3.5 总结	60
参考文献	60
第 4 章 相控阵波束模型(一维单元)	62
4.1 阵列波束模型	62

4.1.1 单个阵列的远场特性	65
4.2 阵列波束偏转	68
4.3 阵列波束聚焦	72
4.4 阵列幅值加权	74
4.5 阵列声束建模案例	75
4.6 相控阵声束场的高斯模型	78
4.7 阵列波束在平界面上的偏转和聚焦	81
参考文献	84
第5章 延时法则(二维)	86
5.1 单一介质中延时法则	86
5.2 透过平界面的转向和聚焦	89
参考文献	95
第6章 二维阵列的声场	96
6.1 单阵元换能器模型(三维)	96
6.2 远场声波	99
6.3 点源活塞模型数值解	101
6.4 接触式换能器阵元模型	104
6.5 波在平界面上的辐射	105
6.6 高斯声束等效点源模型	117
参考文献	125
第7章 相控阵声束建模(二维阵元)	126
7.1 相控阵波束模型——单一介质	126
7.1.1 阵列的远场特征	129
7.1.2 三维情况下的波束偏转	131
7.2 波在平界面上的辐射	134
7.3 阵列声束建模实例	137
参考文献	144
第8章 延时法则(三维)	145
8.1 三维波束控制	145
8.2 三维空间中的波束偏转与聚焦	146
8.3 透过平面界面的波束偏转	148

8.4 透过平面界面的波束偏转和聚焦	149
参考文献	153
第9章 相控阵线性系统模型	154
9.1 线性系统建模和声波生成	154
9.2 线性系统建模和声波接收	158
9.3 接收过程和声束栅瓣	162
9.4 完整超声测量过程的线性系统模型	164
参考文献	166
第10章 超声相控阵系统函数	167
10.1 声/弹性传递函数模型	167
10.2 振元的系统函数	176
参考文献	179
第11章 超声相控阵检测模型	180
11.1 互易关系	180
11.2 液浸式超声检测模型	184
11.3 接触式超声检测模型	185
11.4 简化的小缺陷检测模型	186
11.5 定量成像的检测模型	191
11.6 二维问题的测量模型	199
参考文献	204
第12章 相控阵成像导论	205
12.1 合成孔径成像	205
12.2 全聚焦成像	207
12.3 成像过程	209
12.4 远场成像检测模型	212
12.5 成像仿真	224
参考文献	236
第13章 成像测量模型	238
13.1 脉冲回波成像	238
13.2 全矩阵成像	245
13.3 基于线阵的二维成像	250

13.4	讨论	258
13.5	成像测量模型总结	259
	参考文献	264
第 14 章	阵元边界条件和其他建模问题	267
14.1	有限阻抗障板模型	267
14.2	有限阻抗障板上阵元的线源模型	270
14.3	其他建模问题	277
	参考文献	278
附录 A	Beylkin 行列式	279
A.1	三维成像的 Beylkin 行列式(一般情况)	279
A.2	三维成像的 Beylkin 行列式(脉冲回波情况)	281
A.3	二维成像的 Beylkin 行列式	282
	参考文献	284
附录 B	角度面积比	285
B.1	单一介质中检测时的角度面积比	285
B.2	通过平界面检测时的角度面积比	286
	参考文献	289
附录 C	MATLAB 函数与脚本	290
C.1	单阵元的声束模型	290
C.2	延时法则和变迹法则	290
C.3	阵列声束模型	291
C.4	其他函数	291
C.5	程序列表	292

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

医学领域,超声波在无创伤检查方面得到了广泛应用;同样,工业领域,利用超声波对材料和结构进行无损评估(NDE)的应用也越来越广泛。使用超声波检测方式具备迅速、安全且成本相对较低的特点。相对成本较低这一特点,也使得超声波成为医学及工业中最频繁使用的技术手段之一。然而,正如许多诊断及检测方式一样,超声波检测技术属于一种间接检测技术,“间接”是指检测到的输出信号多为电压-时域信号,该信号来源于经过复杂转换产生和接收的声能量。因此,建立测得信号与被测物体特性之间的直接关系变得非常困难。为阐明上述难点,先来看图 1.1 所示的简单超声波系统,单个超声波换能器置于液体介质中。

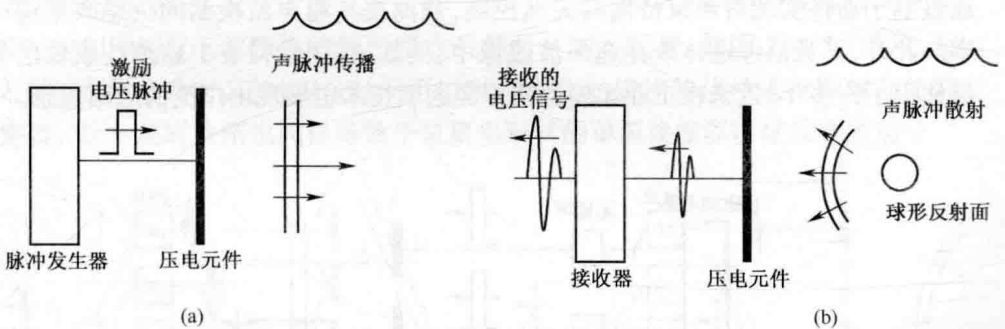


图 1.1 (a) 单个超声波换能器产生行波;(b) 换能器接收由球面反射体而来的反射波

换能器通常由压电材料制成,这种材料可以将电能量转化为机械运动,反之亦然。如图 1.1(a)所示,当换能器接收到电信号激励时,将会在液体中以声波的形式发出一个声脉冲。当该声脉冲撞击到图 1.1(b)所示的球形反射体时,声波将会由球形反射体向各个方向散射。其中一部分散射的声能将会返回换能器再次被转换为电信号并放大,且以电压-时域信号的方式输出。当获取了液体中的声波速度以及脉冲的返回时刻之后,就可以很容易地计算得到换能器与球面反射体之间的距离。但是其他定量信息如球面直径、机械特性等则无法从检测信号中直接获取。假如通过移动单源换能器并使得物理位置和/或方位发生改变,则可以得到一组测试数据,这些数据可以帮助人们更好地确定上述定量信

息。事实上,通过换能器的机械运动获取了充足的数据信息之后,甚至可以利用综合信息得到球面的超声波成像。尽管如此,通过单源换能器进行机械扫描成像的方法既耗费时间又价格昂贵,因此衍生出利用超声相控阵进行更有效的检测及成像方法,这个方法中声束可以通过电子元件来操纵。然而,即使采用相控阵的技术,也必须克服测试过程中不可避免的间接性。因此,本书的首要目的在于阐述超声相控阵系统中信号及图像是如何生成的,进而通过相控阵测得的数据和图像提取定量信息。

在相控阵中(图 1.2),超声波换能器包括一组小型压电元件,这些元件可以进行单独控制并独立接收反馈信号。假如对每一个元件输入相同的控制信号,那么驱动电脉冲将会步调一致并同时抵达各压电元件(假设脉冲间无延时)。相控阵中的每个元件都可以视作一个点波源并发射出球面波(图 1.2 中的虚线为球面波)。这些球面波相互叠加,形成行波脉冲,如图 1.2 所示。在这种情况下,除非常接近相控阵的区域外,在其他区域内换能器阵列产生的声束与整个阵列大小相同的单源换能器产生的声束相似。然而,通过改变阵列中不同阵元之间驱动脉冲信号的相对延时 Δt_i (称为延时法则),就可以使得相控阵通过电子元件在不改变阵元运动状态的情况下声束朝不同方向偏转,如图 1.3(a)所示。通过非线性延时法则,还可以使上述相控阵产生声束聚焦,如图 1.3(b)所示。利用这些延时法则的复杂搭配,可以同时实现声束的偏转和聚焦。相控阵可以通过电子器件实现对声束特性的灵活控制,从而提高超声波检测的信息收集速率。此外,其灵活性还体现在超声波成像中,例如,在医学检查中超声波成像已经使用了许多年,近来在工业无损检测方面这项技术也展现出广泛的应用前景。

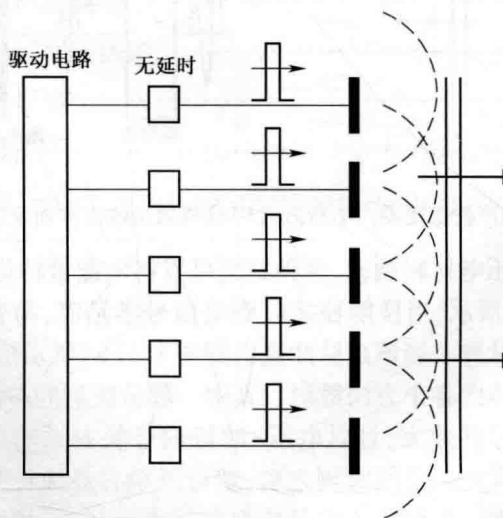


图 1.2 超声相控阵控制每个阵元的电脉冲同时到达,也就是阵元间无相对延时

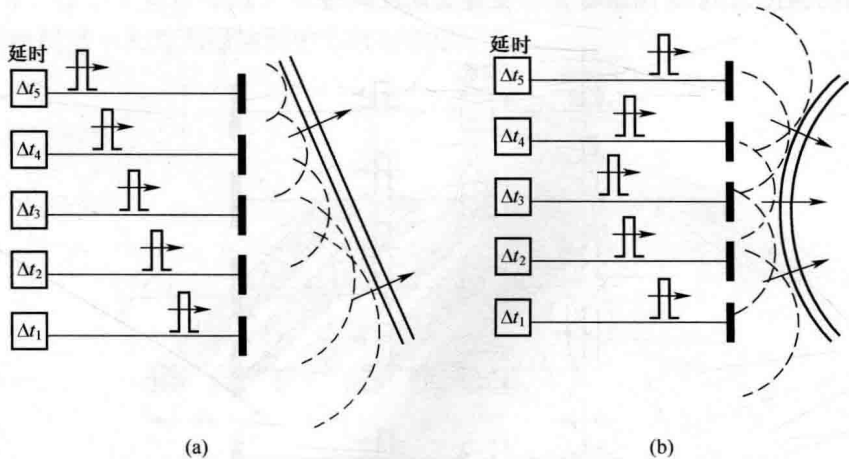


图 1.3 (a) 超声相控阵中使用一组延时使声束产生偏转;(b)使用一组延时使声束产生聚焦

每个换能器的相对延时同时可以用来改变相控阵接收信号的特性。图 1.4 (a) 为平面波阵面到达相控阵的例子。当该波冲击到相控阵中的每个换能器时,将会产生图中所示的一系列电脉冲信号。假如对接收到的信号施加延时 Δt_i , 则这一系列信号将会叠加形成一个大的输出信号。需要注意的是,上述叠加信号与入射波法向上的单源换能器测得的信号相似,并且此时该换能器整个接收面都同时被入射波所激发。这样一来,延时法则可使得相控阵在面向入射波时与相同情况下单源换能器所接收的信号一致。同理,如图 1.4(b) 所示,当入射波发生弯曲时,延时相对时间可以对每个阵元接收的信号进行调整并使其叠加。这一延时法则也同样等效于呈聚焦形状的单源换能器所接收到的信号。

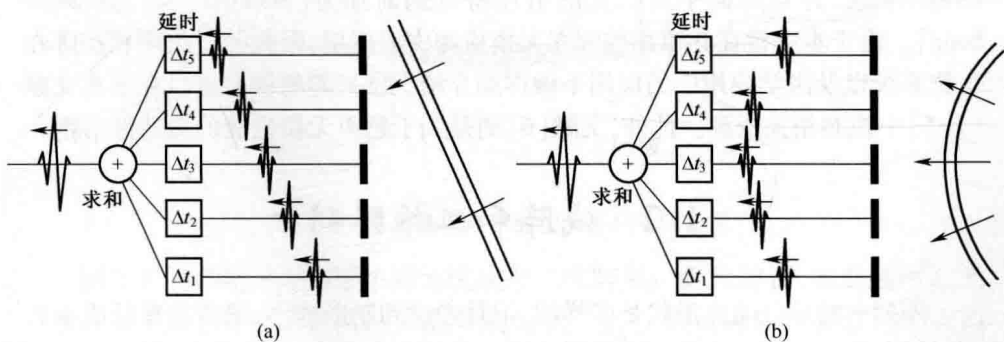


图 1.4 (a) 对以特定角度到达阵列的波形可变延时并叠加;
(b) 对呈曲线形式到达阵列的波形可变延时并叠加

由于在相控阵中可以独立传输/接收每个换能器阵元的信号并不受其他阵元的影响,因此可以在声波发出或接收时对每个换能阵元施加单独的幅值加权(图 1.5)。这些幅值加权总体称为变迹法则。第 3 章将主要以相控阵声波辐射

特性的调控为例,介绍最常见的变迹法则及应用。

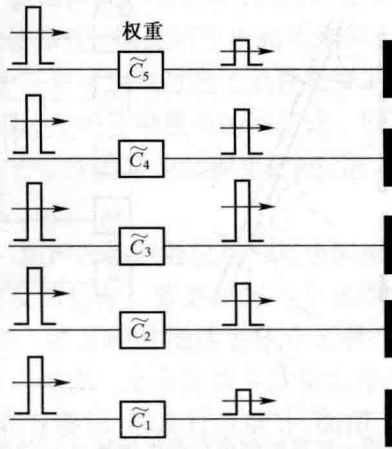


图 1.5 对超声相控阵的激励脉冲幅值加权,对应在接收阵元上的变迹法则

如果能够掌握延时法则和变迹法则在超声相控阵波形生成与接收过程中的普遍原理,那么超声相控阵将会是超声波检测中功能多样的有效工具。对于使用超声相控阵技术的科技工作者们而言,理解并掌握相控阵运转的基本原则以及如何控制重要性能参数是非常必要的。如上所述,理解如何利用相控阵的特点来克服超声波响应中间接测量本质所带来的影响,从而更好地检测物体特性也是非常基本的。

相控阵的一个主要用途是对被测物材料和结构的无损检测。本书将从数学模型及检测应用两个方面进行介绍。后面将会多次引述本章所列文献[1,2]中的基本概念,并且后面中对二文的引述将分别简称为[Schmerr]及[Schmerr-Song]。由于本书旨在介绍相控阵在无损检测中的应用,因此关于超声相控阵在生物系统以及医学应用中的应用不做详细介绍。感兴趣的读者可以在本章文献[3-5]中找到相关资源。此外,文献[6]则是关于超声无损检测的概述性书籍。

1.2 线阵和二维阵列

阵列中的压电晶片形状是多样的,但是考虑到制造成本,通常选择低成本的矩形压电晶片。图 1.6 为一组相同的压电晶片,从图 1.6 可以看出,每个阵元在 x 轴方向上的长度 l_x 远小于在 y 轴上的长度 l_y 。这样的配置称作线阵。在线阵中,两两阵元之间的 x 轴方向间隙 g_x 是一致的。这个间隙也称为线阵的切口。另外一个重要参数是阵元之间的距离 s_x ,如图 1.6 所示,称为阵元间距。显然,从几何关系可以得到 $s_x = l_x + g_x$ 。由于在线阵中只有一个维度上有多个阵元排列,因此通过施加延时法则只能在 x, z 方向上使声束发生偏转。这样的偏转将

会产生平行于 y 轴且穿过 $x-z$ 平面上多个点的圆柱聚焦。即使存在这样的限制,线阵仍然不失为无损检测中非常有效的手段。

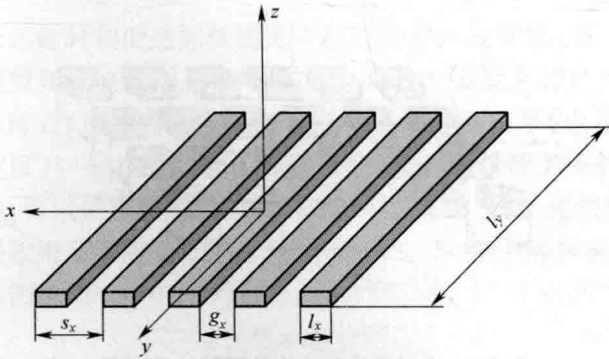


图 1.6 线阵中的阵元

下面就上述线阵的简单应用进行介绍。图 1.7 为与固体接触的一个低波速楔块,线阵排列在楔块斜面上。这样就形成了基于角度声束的垂直剪切(SV)波阵列检测装置,其中阵列的相位可以使得剪切波在固体中产生角度 θ 的偏转和聚焦。

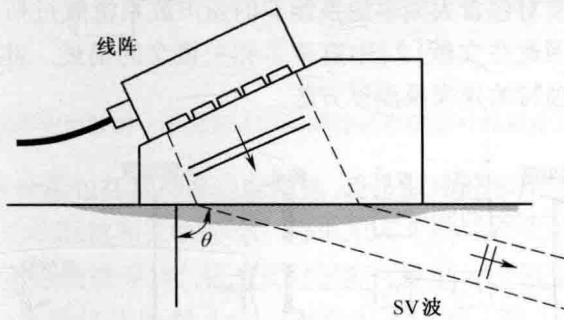


图 1.7 基于角度声束剪切波阵列检测装置

图 1.8 为由相同的矩形小阵元组成的二维阵列。阵元的长、宽分别用 l_x 、 l_y 表示。在 x 、 y 方向上阵元间的间隙分别为 g_x 、 g_y 。因此可以得到在两个方向上的阵元间距: $s_x = l_x + g_x$, $s_y = l_y + g_y$ 。对于二维阵元而言,在 x 、 y 方向上对阵元施加不同的延时,所以通过一般方法从二维阵列中可得到声束的偏转和聚焦。

其他的阵列形式(如环形阵列、扇形阵列等)都可以作为工具。图 1.6 及图 1.8 中分别展示的线阵以及二维矩形阵列是在无损检测中最经常使用的形式。本书将以上述两种阵列形式为主要研究对象。

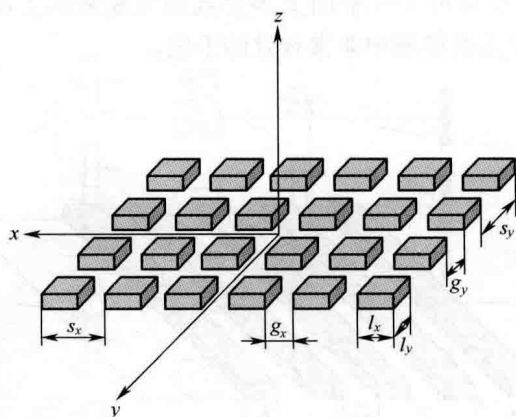


图 1.8 平均分布且大小均等的二维阵列

1.3 相控阵系统模型

本书详细介绍超声相控阵检测系统(图 1.9)中的各个组成部分,以及组成部分的模型和测试方法。首先建立简易模型,该模型包含相控阵及相关仪器如何生成及接收声波、超声波声束在被测物体中如何传播以及波形如何从损伤处反射等内容。之前对包含大型单源换能器的超声波系统做过研究^[2],本书将采用类似的方法。因此在文献[2]中有许多相关概念的描述。此外,本书还介绍许多针对相控阵独特的建模及测试方法。

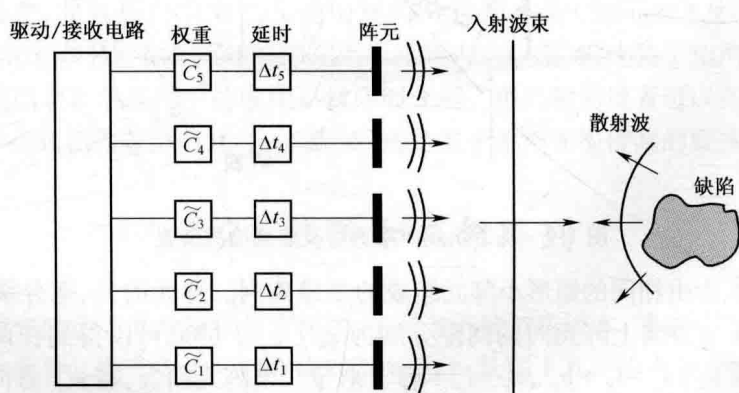


图 1.9 超声相控阵检测系统部件

在超声相控阵中,时变行波是通过时变(时域)驱动电信号产生的。通过换能器,时变波形信号反过来又转换为时变电压信号。然而,实际应用中往往不直接建立时域信号模型,而是利用更容易的方法通过快速傅里叶变换(FFT)得到

的频率分量(频域)信号模型^[2]。因此,在本书将使用频域描述相控阵中的所有参数。这些系统参数将用关于频率 f 的函数来表示,度量单位通常为兆赫(MHz)。

首先分析无延时和变迹加权情况下相控阵在声波激励(图 1.10)及接收过程中的电子模型和机电模型。在声波产生过程中,驱动芯片产生电压脉冲并通过线缆传输至阵元(通常为压电材料),这样就使得电信号(电压、电流)转换为声脉冲(力、速度)。假设激励源是线性的,则对于激励源的阵列中第 n 个阵元(图 1.10(a)),可以采用戴维宁等效电压源 $V_n^i(f)$ ^[2],对上述激励源中的电源进行建模。该等效电压源将会在第 n 阵元表面产生时域内的传递性压力,该压力的频域信号为图 1.10(a)中的 $F_n^i(f)$ 。这个压力信号可以表示为

$$F_n^i(f) = t_n^g(f) V_n^i(f) \quad (1.1)$$

式中: $t_n^g(f)$ 为声波产生传递方程。

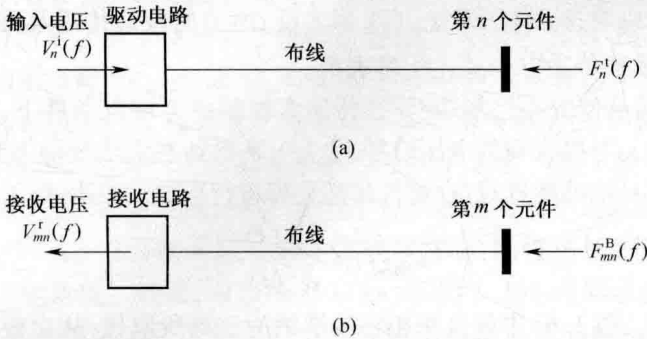


图 1.10 (a)阵元产生声波的一维模型;(b)阵元接收声波信号并转化为电信号的一维模型

该传递函数变量包括激励源的电阻抗、连接激励源和压电元件线缆的电学特性,以及阵元的电阻抗和灵敏度^[2]。当由第 n 个阵元产生的声脉冲遇到障碍物(如被测物表面或裂缝等)时,将会反射回阵列被第 m 个阵元接收并转换为电压信号。可以建立接收信号 $V_m^r(f)$ 与阻滞力 $F_m^B(f)$ (图 1.10(b))的函数关系。阻滞力是由每对发射及接收阵元产生的反射波通过声波接收传递方程 $t_m^r(f)$ 得到的,即

$$V_m^r(f) = t_m^r(f) F_m^B(f) \quad (1.2)$$

上述接收传递方程的变量包括接收元件和线缆中的电阻抗与增益,以及第 m 个压电元件的电阻抗和灵敏度^[2]。式(1.2)中的阻滞力是元件接触面完全约束的情况下在该接触面上施加的力。在文献[2]及第 9 章对该力在超声波系统的声波接收中的产生过程做了详细介绍。

从式(1.1)和式(1.2)中可以看出,在涉及一对阵元的超声波检测过程中,波形由第 n 个阵元产生并被第 m 个阵元接收。接收到的电压 V_m^r 可表示为