

OLYMPUS

Your Vision, Our Future

相控阵检测 在工业应用方面的基本理论



NDT Field Guides

相控阵检测

在工业应用
方面的基本理论

Olympus NDT

《相控阵检测：在工业应用方面的基本理论》

系列手册负责人：Meindert Anderson

科技审稿人员及顾问：Daniel Kass、Michael Moles PhD、Tom Nelligan

格式、图形处理、编辑、校对及索引选编：Olympus NDT 技术交流服务部

出版：Olympus NDT 公司，地址为 48 Woerd Avenue, Waltham, MA 02453, USA

营销及发行：Olympus NDT 公司

本手册中所含信息会随时变化或修改，恕不事先通知。

Olympus NDT 手册编号：DMTA-20003-01ZH，版本 A

© 2012 年，Olympus NDT, Inc.，保留所有权利。没有 Olympus NDT, Inc. 明确的书面同意，手册中的任何部分不可被复制、翻译或发行。

译自英文原版手册：*Phased Array Testing: Basic Theory for Industrial Applications* (DMTA-20003-01EN – 版本 A，2010 年 11 月)

© 2010 Olympus NDT, Inc.

在中国印刷

第一版，2012 年 5 月

声明

就我们所知而言，手册中的信息准确无误；但是针对手册中信息的精确性、完整性，以及由此引发的后果，出版方不会承担任何责任和赔偿的义务。出版手册的唯一目的是提供信息。用户针对手册信息的适用性、要使用的设备及使用的方式，所做出的最后决定，独家负有责任。出版方建议，用户在打算根据手册中的说明选择材料或进行操作时，应该对将使用的材料及将执行的步骤的适用性完全满意，此外，还需满足所有适用的安全和健康标准。

所有品牌为它们各自拥有者和第三方实体的商标或注册商标。

目录

前言	1
关于手册	1
关于 Olympus	2
关于术语	2
1. 引言	5
1.1 相控阵检测的一般介绍	5
1.2 什么是相控阵系统?	7
1.3 如何利用超声相控阵技术进行检测?	8
1.4 相控阵超越常规超声的优势	9
2. 相控阵探头	11
2.1 超声声束的特性	11
2.2 声波的基本属性	14
2.3 相控阵探头特性	20
2.4 相控阵楔块	22
2.5 相控阵脉冲	23
2.6 声束形成和电子偏转	26
2.7 相控阵探头的声束聚焦	29
2.8 栅瓣和旁瓣	30
2.9 选择相控阵探头的总结	31
3. 相控阵成像的基本原理	33
3.1 A 扫描数据	34
3.2 单值 B 扫描	35
3.3 横截面 B 扫描	36
3.4 线性扫描	37
3.5 C 扫描	39
3.6 S 扫描	41
3.7 融合图像形式	43
3.8 扫查速度和数据采集	44
4. 相控阵仪器	47
4.1 重要技术规格	47
4.2 校准和规范化方法	54

5. 相控阵检测设置和显示格式	59
5.1 设置仪器要考虑的因素	59
5.2 垂直声束线性扫查	62
5.3 角度声束线性扫查	65
5.4 S 扫描显示示例	67
5.5 反射体的定位	72
附录 A: 有关常量及适用公式的表	77
附录 B: 单位换算	83
附录 C: 技术支持与培训	85
附录 D: 现有设备类型	87
D.1 EPOCH 1000 系列 — 带有相控阵成像功能的高级超声探伤 仪	88
D.2 OmniScan 系列 — 利用 UT、PA、EC、ECA 技术的模块化高 级探伤仪	90
D.3 TomoScan FOCUS LT — 强大、灵活、小巧的 UT 数据采集 系统	91
D.4 TomoView — UT 数据采集和分析软件	92
相控阵术语表	93
所选参考文献	97
索引	99

前言

在人类跨进二十一世纪之时，工业超声检测领域中最重要的发展体现在便携式相控阵成像仪器的大量涌现以及人们对这类产品的逐步接受。相控阵检测仪器同已经进入商业市场五十多年的常规探伤仪和测厚仪一样，都是基于基本波动物理学。然而，相控阵检测所具有的更高性能，时常要求进行相控阵检测的操作人员掌握更高水平的技术，且更深入地理解操作原理。因此，随着新型相控阵仪器的出现，培训资源也需要不断地更新发展。

Olympus 非常自豪地向广大客户及任何对相控阵技术富有兴趣的人推荐这本阅读方便的新版《相控阵检测》现场指南。出版这本手册的目的是向相控阵技术的新用户和希望回顾相控阵基本原理的经验较丰富的老用户，简单易懂地介绍超声相控阵检测知识。这本指南首先解释什么是相控阵检测以及如何进行检测，然后概括说明在选择探头和仪器时需要考虑的一些因素，手册最后为用户提供了更详细的参考信息，以及“相控阵术语表”。

关于手册

这本指南手册分为以下几个部分：

第 1 章，“引言”，对常规超声及相控阵检测的历史进行了简要的说明。此外，还对照常规超声技术，陈述了相控阵检测所具有的优势特点。

第 2 章，“相控阵探头”，说明了超声探头和相控阵探头的构造，并对这些探头的特性进行解释。此外，读者还会了解到聚焦法则序列、声束成形和电子偏转、以及探头聚焦等方面的知识。

第 3 章，“相控阵成像的基本原理”，通过从常规超声和相控阵仪器中截取的简单易懂的示意图对各种显示检测数据的图像格式进行说明。这些图像包括：A 扫描、B 扫描、C 扫描、线性扫描和扇形扫描。

第 4 章，“相控阵仪器”，简要概述市场上销售的仪器类别。并且说明了在选择常规超声仪器和相控阵仪器时所需考虑的重要仪器规格和性能。

第 5 章，“相控阵检测设置和显示格式”，为解读图像显示及进行测量操作提供更进一步的帮助。

附录中的几个部分为读者提供了各种参考信息，其中包括重要的超声公式、材料声速、声学阻抗信息、单位转换、用于进一步培训和参考的资

料出处，以及使用相控阵技术的设备类型。

“**相控阵术语表**”部分列出了方便读者查阅的常规超声及相控阵超声检测的术语定义。

我们希望这本指南手册能在您进行相控阵超声检测的过程中提供帮助。欢迎广大读者提出宝贵的评价和建议，您可以使用以下邮箱地址与我们联系：info@olympusndt.com。

关于 Olympus

Olympus 集团是一家国际公司，其产品销售于工业、医疗及消费市场，其专业涉及光学、电子及精密工程。Olympus 生产的仪器有助于提高产品质量，增强基础设施和设备的安全性。

Olympus 公司是全球领先的创新型无损检测和测量仪器的制造企业。其生产的仪器应用于包括航空航天、电力生产、石油化工、民用基础设施、汽车以及消费产品在内的各种工业和研究领域。其尖端检测技术包括超声、超声相控阵、涡流、涡流阵列、显微镜、光学计量学及 X 射线荧光等。其产品包括探伤仪、测厚仪、工业 NDT 系统及扫查器、视频镜、管道镜、高速视频摄像机、显微镜、探头及各种仪器配件。

Olympus NDT 公司的总部设在美国马萨诸塞州的沃尔瑟姆，并在世界范围内的各大主要工业地区都设有销售和服务中心。要获得有关应用和销售方面的帮助，请访问我们的网站：www.olympus-ims.com。

关于术语

由于相控阵检测的广泛应用相对来说是超声 NDT 领域中的新现象，因此这个领域中的术语一直在不断更新。还会出现这样的情况：某些如核电的特种工业、某些如 ASME 的制定标准的组织，以及相控阵设备的制造商，会使用不同的术语定义相同的事物。这些意思不同的不同术语集中表现在有关“S 扫描”的许多术语中，以及对术语“**线性扫查**”的使用上。出现在这本指南最后部分的“相控阵术语表”为读者提供了更详细的参考信息。这本指南中使用的术语与 Olympus NDT 相控阵仪器附带的说明手册中的术语一致，如：OmniScan 和 EPOCH 1000 系列仪器的手册。

- 术语“**线性扫查**”用于描述激活声束孔径，在声波垂直入射或以固定角度斜射的情况下，以电子方式沿线性阵列探头的长度方向移动的扫查方式。这个扫查方式在某些 ASME 和 IIW 文献中被称为“E 扫查”。
- 一个被编程为在向前进行线性扫查的探头，还可以机械方式在焊缝或类似焊缝的被测工件的长度方向上移动，进行“**编码线性扫查**”。这种扫查被称为“单线扫查”，其显示在仪器屏幕上的图像被称为“C 扫描”。
- 术语“**S 扫描**”用于描述以电子方式变换声束角度，使声束按所选角度范围内的所有角度进行扫查的方式。这种方式还被称为“扇形”、

“扇面”、“方位角”或“连续变换角度”扫查。对某些仪器而言，术语“S 扫描”还被用于指任何叠层 A 扫描显示，其中包括线性扫查。

- 时变增益（TVG）也称作时间校正增益（TCG）。

具体操作事项	核能工业	ASME
沿焊缝方向的机械扫查（编码）	单线扫查	线性扫查
以固定角度进行的电子扫查	线性扫查	E 扫查
S 扫描	扇面扫查，扇形扫查，或 S 扫描	S 扫描：也称作扇形扫查、扇面扫查或连续变换角度的扫查
C 扫描	单线扫查，或者多线扫查	C 扫描

在这本指南中，我们使用术语“S 扫描”表示“连续变换角度的扫查”，术语“线性扫查”表示“连续变换孔径的扫查”，术语“C 扫描”或“单线扫查”表示所有“编码器扫查”。

1. 引言

1.1 相控阵检测的一般介绍

很多人都熟悉超声波成像在医学上的应用，即利用高频声波生成人体内部器官的高清晰横截面图像。医学声波图通常是由被称为“相控阵”的特制多晶片探头¹以及与其配套使用的硬件和软件生成。然而，超声相控阵技术的应用并不只限于医学诊断。近年来，相控阵系统在工业领域中的应用越来越多，从而将包括焊缝检测、粘接检测、厚度测量、在役裂缝探测在内的普通超声检测应用中的信息获取和成像操作提高到了新的水平。

在最初的二十几年中，商业超声仪器完全依靠以下几种类型的探头：使用一个压电晶体生成并接收声波的单晶探头，将发送晶片与接收晶片分开的双晶探头，以及以串联方式使用一对单晶探头的一发一收或穿透系统。当前为工业缺陷检测及厚度测量而设计的大多数商业超声仪器仍然在使用上述这些方法。不过在超声无损检测（NDT）领域中，使用相控阵技术的仪器正在逐步彰显其重要性。

1801年，英国科学家托马斯·杨在其著名的试验中通过使用两点光源生成干涉图形的方法向世人演示了波的相互加强和相互抵消作用的原理。在传播中同相位的波的能量得到增强，而不同相位的波的能量被减弱（参见图 1-1）。

1. 作为全球性的大公司，Olympus NDT 选择使用 ISO 术语定义各种设备，例如：这本指南手册特别将阵列称为“探头”，而不是“换能器”。

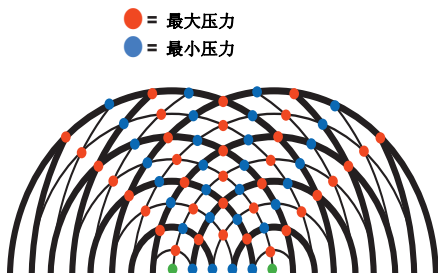


图 1-1 两点源干涉模式

“相移”，或称“定相”，是一种对干涉模式进行控制的操作，方法是为两点源或多点源发出的声束设定不同的时间延迟，从而使每条声束的波前具有不同的相位。对相位的控制可以弯曲、偏转或聚焦波前的能量。二十世纪六十年代，研究人员开始开发超声相控阵系统。这些系统使用脉冲触发多点源探头，所生成的声束传播情况都如上述受控干涉模式。二十世纪七十年代初期，首次出现用于医疗诊断的商业相控阵系统，这些系统通过控制声束的传播方向，生成人体各个部位的横截面图像（参见图 1-2）。



图 1-2 用于医学诊断的相控阵

最初，超声相控阵系统的应用主要集中在医学领域。出现这种情况的一个原因是人体具有可预见的组织和结构，因而使仪器的设计及图像的解读相对来说更简便直接。而相控阵技术在工业方面的应用则没有这么简单。由于金属、复合材料、陶瓷、塑料、纤维玻璃等材料在声学特性方面的多样性，以及工业检测中不同被检工件在厚度及几何形状上的巨大差异，相控阵技术在工业上的应用具有更大的挑战性。第一批工业相控阵系统问世于二十世纪八十年代。这些系统的形体极大，而且需要将数据传输到计算机中进行处理并显示图像。这些系统一般用于电力工业中的在役检测。在很大程度上，相控阵技术在核能市场上得到了大力开

发，因为提高关键性评估中检出率的目标极大地促进了这项前沿技术的使用。其它早期的应用还包括一些对大型锻轴和低压涡轮机部件的检测。

二十一世纪的初期出现了用于工业领域的便携式、电池供电的相控阵仪器。模拟电路式设计要求相当的功率及空间，才可建立声束偏转所需要的多通道配置。然而，随着数字化时代的到来，以及价格便宜的嵌入式微处理器的迅速发展，新一代相控阵设备也得到了突飞猛进的发展。此外，低功耗电子部件的出现和更节电的仪器结构的实现，以及表面安装式印刷电路板的设计在工业领域中的广泛应用，也促使这项先进的技术得以应用在小型仪器中。由此问世了集电子设置、数据处理、显示、分析于单一便携式设备的相控阵工具，从而拓宽了相控阵技术在工业领域中的应用范围。这些发展进而又为普通应用规范了相控阵探头的标准。

1.2 什么是相控阵系统？

无损检测中使用的常规超声探头就晶片数量而言通常有两种：一种是只包含一个晶片，这个晶片既用于生成又用于接收高频声波；另一种包含一对晶片，一个晶片用于发射声波，另一个用于接收声波。而相控阵探头一般是一个换能器组件，这个组件包含 16 到 256 个数量不等的小型单个晶片，每个晶片可被分别触发（参见图 1-3 和图 1-4）。这些晶片的排列方式可以是条状（线性阵列）、2 维矩阵、环状（环形阵列）、圆盘矩阵（圆盘阵列）或更复杂的形状。与常规探头相同，相控阵探头可以安装楔块，形成一个角度声束组件，用于直接接触法的检测；也可以利用水作为耦合剂，用于水浸法检测中。探头频率通常在 2 MHz 到 10 MHz 范围内。相控阵系统还包含一个基于计算机的复杂的仪器，可用于驱动多晶片探头，接收回波并将回波数字化，然后再以不同的标准格式绘制回波信息的图像。与常规探伤仪不同的是，相控阵系统可以使一束声波以多个不同的折射角度进行扫查，或沿一条直线进行扫查，还可以使一条声束在一系列不同的深度位置动态聚焦，从而增强了检测设置的灵活性和性能。



图 1-3 典型的相控阵探头组件

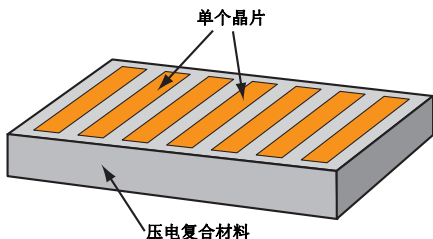


图 1-4 典型的多晶片结构

1.3 如何利用超声相控阵技术进行检测？

从最基本的意义上说，相控阵系统利用了波动物理学的相位调整原理，即通过改变一系列超声脉冲的发射时间，使阵列中的每个晶片生成的单个波前交汇在一起。这个操作以可以预见的方式加强或减弱声波的能量，从而使声波有效地偏转并形成声束。要达到这个目的，需要以极小的时间差分别对探头的晶片进行脉冲触发。

通常将晶片分组进行脉冲发射，每组包含 4 到 32 个数量不等的晶片。通过加长孔径的方法，可以减少不希望发生的声束扩散，完成锐利度更强的聚焦，从而有效地提高灵敏度。被称为“**聚焦法则计算器**”的软件根据探头和楔块的特性以及被测材料的几何形状和声学属性，建立发射每组晶片的特定延迟时间，以生成想要的声束形状。然后，由仪器的操作软件所选择的已编好程序的脉冲发射序列，在被测材料中生成一系列单个波前。这些交汇在一起的波前的能量在某些位置得到加强，在另一些位置被减弱，从而形成一个单一的主波前。这个主波前在被测材料内部传播，而且与常规超声波一样，在遇到裂缝、不连续性缺欠、底面及其它材料边界时会得到反射。声束可以不同的角度、不同的焦距，以及不同的焦点大小被动态偏转，其目的是使用单个探头组合件就可以通过一系列不同的视角完成对整个被测材料的检测。声束的这种电子偏转完成得非常迅速：一瞬间就可以完成多个角度或多个聚焦深度的扫描。

回波被不同的晶片或不同的晶片组接收，然后经过必要的时间偏移计算，以补偿楔块延迟的改变，最后再进行叠加。相控阵探头与常规单晶探头的不同点在于，它可以根据声波返回到每个晶片的时间和波幅，在空间上对返回的波前进行分拣，而常规单晶探头实质上只是将发射到被测区域的所有声束的结果融合在一起。仪器软件对返回的聚焦法则进行处理时，将每个返回的聚焦法则看作声束以某个具体角度、从线性声程上的某个点、和 / 或从某个具体的聚焦深度反射的声束（参见图 1-5 和图 1-6）。然后，仪器会将回波信息以多种显示形式的一种呈现在屏幕上。

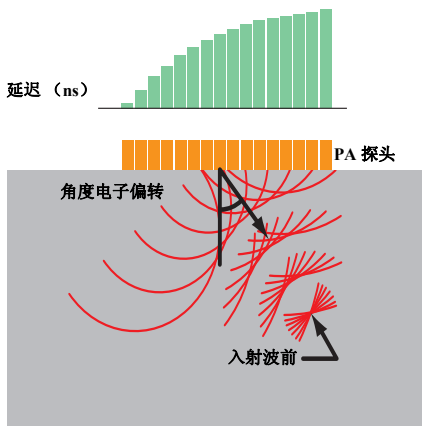


图 1-5 平面探头通过可变延迟生成的角度声束示例

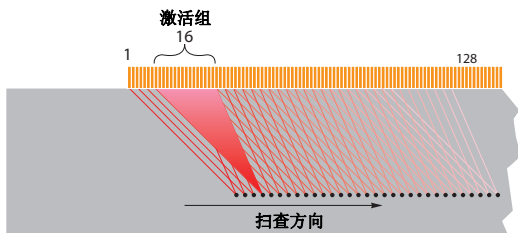


图 1-6 聚焦角度声束线性扫查的示例

1.4 相控阵超越常规超声的优势

超声相控阵系统可被用于几乎任何在传统意义上可以使用常规超声探伤仪的检测应用中。焊缝检测和裂缝检测为两项最重要的应用，因为在包括航空航天、电力生产、石油化工、金属坯材和管件商品供应、输运管线建造与维护、结构金属，以及一般制造业在内的各种工业领域中都会用到这两项检测。相控阵技术还可有效地用于腐蚀测量应用，以纵剖面图形式表现材料的剩余壁厚。

相控阵技术优于常规超声技术之处在于它可以使用单个探头组合件中的多个晶片使声束进行偏转、聚焦和扫查。利用通常被称为“S 扫查”（扇形扫查）的声束偏转，可以适当的角度生成被测工件的图像。这样就极大地简化了检测几何形状较为复杂的工件的过程。此外，在检测

空间有限，不能方便地进行机械扫查的情况下，探头的狭小底面及其无需被移动即可以不同角度发射声束的能力更有助于检测这类形状复杂的工件。扇形扫查一般还用于焊缝检测。使用单个探头以多个角度检测焊缝的能力极大地提高了探测焊缝异常状态的几率。电子聚焦可在会出现缺陷的位置处优化声束的形状和大小，从而可进一步提高检出率。在多个深度位置上聚焦的能力，还可提高体积检测中定量关键性缺陷的能力。这种聚焦特点可以显著改进挑战性应用中的信噪比，而且沿多组晶片进行的电子偏转还可以迅速生成 C 扫描图像。同时以多角度进行检测，和 / 或通过线性扫查覆盖被测工件更大区域的能力加快了检测速度。与常规 UT 相比，相控阵检测速度要快上 10 倍，因此应该说这一点是相控制技术的一个主要优势。

相控阵系统的潜在弱势是相对较高的成本，以及对操作人员进行培训的要求。然而，由于相控阵技术具有较大的灵活性以及在具体检测中可以节省很多时间，因此成本较高这个缺点常常会得到补偿。

2. 相控阵探头

2.1 超声声束的特性

常规纵波超声探头工作的方式如同可发出高频机械振动的活塞，探头产生的这种振动即为声波。在压电换能器晶片（通常被称作晶片）被施与电压时，垂直于晶片表面的方向会受压变形。电压消失后，一般在一微秒之内，晶片反弹，产生机械能脉冲，形成超声波（参见图 2-1）。同样道理，如果晶片受到射入超声波的压力，也会在其表面产生电压。这样，同一个压电晶片既可以作为超声脉冲的发射器，又可以充当超声脉冲的接收器。

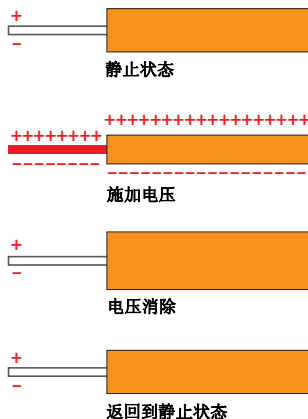


图 2-1 压电换能器晶片的原理

所有最常用于超声无损检测的探头在功能方面都具有以下基本属性：

类型：根据探头的功能可将探头划分为接触式、延迟线式、角度声束、或水浸式等类型。在具体应用中，被测材料的特性，如：表面粗糙度、温度、可达性、材料内缺陷的位置、检测速度等，都会影响用户对探头类型的选择。

尺寸：尺寸是指激活探头晶片的直径，或者晶片的长度和宽度。晶片通常被置于比它稍大一点的外壳中。

频率：频率是指一秒钟内声波完成振动周期的次数，通常用千赫（kHz）或兆赫（MHz）表示。大多数工业超声检测在 500 kHz 到 20 MHz 频率范围内进行，因此大多数探头的频率处于这个范围内。不过，用户也可以买到频率范围在 50 kHz 以下及 200 MHz 以上的商业探头。频率越低，穿透力越强；频率越高，分辨率和聚焦力度越高。

带宽：带宽是指处于特定波幅范围内的频率响应的部分。在这种情况下，应该注意的是典型的 NDT 探头不会生成单一频率的声波，而只能在以额定的频率值为中心的频率范围内生成声波。工业标准将这个带宽确定在 -6 dB（或半波幅）的位置处。

波形持续：波形持续是指每次探头被脉冲触发后生成的波动周期的数量。窄带宽探头要比宽带宽探头生成的波动周期数量多。晶片直径、基底材料、电子调谐、探头激励的方式都会影响波形持续。

灵敏度：灵敏度是指激励脉冲波幅与从指定目标反射的回波波幅之间的关系。

声束形状：我们用以下这个比喻可以有效地说明这个概念。发来自典型的未聚焦圆盘探头的声束经常被想象成一束源自激活晶片区域的能量柱，这个能量柱在直径方向上扩散，最后消失（参见图 2-2）。



图 2-2 声束形状

实际上，真正的声束形状要比这复杂，因为压力在横向和轴向上都会逐渐发生变化。在下面的声束形状（图 2-3）中，红色代表能量最高的区域，而绿色和蓝色代表能量较低的区域。



图 2-3 声束形状中不同能量的分布区域

探头的声场被分为两个区域：近场和远场（参见图 2-4）。近场是指接近探头的区域。在这个区域中声压反复几次达到最大值、最小值。这个区域的终端为轴上最后一次出现最大声压值的位置。这个位置到探头表面的距离表示为 N ，即近场距离。近场距离 N 代表探头的自然焦距。

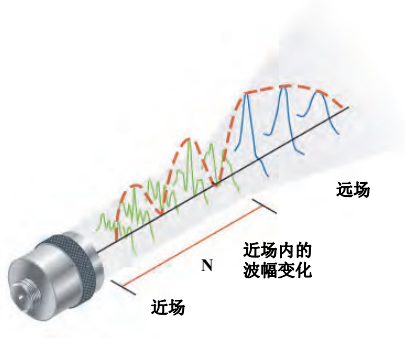


图 2-4 探头的声场

远场是近场距离（N 值）以外的区域。在这个区域，随着声束直径的扩展及声能的消散，声压逐渐降低为零。近场距离是探头频率、晶片大小以及被测材料的声速互相作用的一个函数。通过以下公式，可以为相控阵检测中常用的正方形或长方形晶片，计算出这个函数值：

$$N = \frac{kL^2 f}{4c} \quad \text{或} \quad N = \frac{kL^2}{4\lambda}$$

其中：

- N = 近场距离
- k = 宽高比常量（见下面的表述）
- L = 晶片或孔径的长度
- f = 频率
- c = 检测材料的声速
- λ = 波长 = $\frac{c}{f}$

宽高比常量如表 2-1 所示。这些数值基于晶片或孔径的短边和长边的长度比率计算而得。

表 2-1 宽高比常量

短边 / 长边的比率	k
1.0	1.37（正方形晶片）
0.9	1.25
0.8	1.15
0.7	1.09

表 2-1 宽高比常量 (接上页)

短边 / 长边的比率	k
0.6	1.04
0.5	1.01
0.4	1.00
0.3 或更小	0.99

如果是圆晶片，则不使用 k 值，而是使用晶片直径 (D) 代替长度项：

$$N = \frac{D^2 f}{4c} \quad \text{或} \quad N = \frac{D^2}{4\lambda}$$

由于近场中声压的不同，很难使用基于波幅的技术精确评价缺陷（尽管近场中的厚度测量不成问题）。此外， N 值代表通过声学透镜或相位调整技术使探头声束聚焦的最大距离。第 29 页的 2.7 部分对聚焦有更详细的叙述。

2.2 声波的基本属性

波前形成：如果把单晶探头看做一个向被测介质推动的活塞声源、单片磁盘、或平板，则其产生的声波从数学角度上看可以被定型为从大量点源发出的声波的总和。这种理解源自惠更斯原理。惠更斯原理在 17 世纪首次由荷兰物理学家克里斯蒂安·惠更斯提出。他认为前进波前上的每一点都可被想象为一个发射新的球面波的点源，而且最终得到统一后的波前是所有这些单个球面波的总和。

声束扩散：原则上讲，由探头产生的声波会沿直线传播，直到遇到材料介质的边缘（接下来要发生的情况在后面有叙述）。但是如果声波的声程长度比其近场距离长，则声束的直径还会增加，会像聚光灯的光束一样发生扩散（参见图 2-5）。

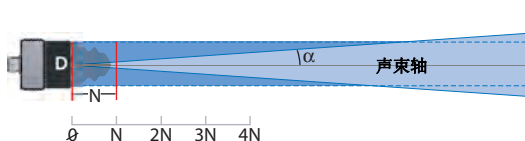


图 2-5 声束扩散

非聚焦的圆晶片探头的声束扩散角度可以按以下方式计算：

$$\text{近场距离} = \frac{D^2 f}{4c} = \frac{D^2}{4\lambda}$$

- D = 晶片直径或孔径
- f = 频率
- c = 被测介质中的声速
- λ = 波长 = $\frac{c}{f}$

一个非聚焦探头的 -6 dB 半声束扩散角度 (α):

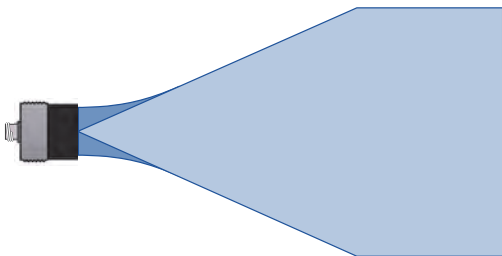
$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{0.514c}{fD}\right)$$

由这个等式可以得出结论: 频率越低, 直径越小, 声束扩散的角度会越大。较大的声束扩散角度会使每个单位区域的声能随着距离的增加而迅速降低。在某些涉及长声程的应用中, 这种情况会在检测较小的反射体时降低检测的灵敏度。要解决这个问题, 可以提高频率和 / 或增加探头的直径, 以增强回波的响应。

如果晶片为矩形, 则声束扩散会呈不对称形, 因为声束的短边方向上会有较大声束扩散角度。使用以下公式可以计算每个轴的角度, 公式中的 L 项为适当的长度或宽度。

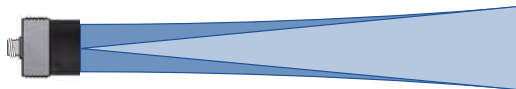
$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{0.44c}{fL}\right) \quad \text{或} \quad \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{0.44\lambda}{L}\right)$$

以下图形表明随着探头直径和频率的变化, 声束扩散会发生的一般性变化。如果频率为常量, 则声束扩散会随着探头直径的增加而降低 (参见图 2-6 和图 2-7)。



声速: 5850 m/s (0.230 in./ μ s) 直径: 3 mm (0.125 in.)
频率: 5.0 MHz

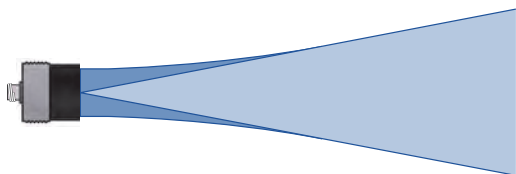
图 2-6 3 毫米晶片的声束扩散



声速：5850 m/s (0.230 in./ μ s) 直径：13 mm (0.5 in.)
频率：5.0 MHz

图 2-7 13 毫米晶片的声束扩散

如果探头直径为常量，则在频率增加时声束扩散会降低（参见图 2-8 和图 2-9）。



声速：5850 m/s (0.230 in./ μ s) 直径：13 mm (0.5 in.)
频率：2.25 MHz

图 2-8 频率为 2.25 兆赫晶片的声束扩散



声速：5850 m/s (0.230 in./ μ s) 直径：13 mm (0.5 in.)
频率：10.0 MHz

图 2-9 频率为 10 兆赫晶片的声束扩散

衰减：随着声波在介质中的传播，由于声能在通过材料的微结构时不能得到完全传播，由超声探头生成的有组织的波前便会衰弱下来。有组织的机械振动（声能）会转化为无序的机械振动（热能），直到不能再探测到波前为止。这个过程被称为**声衰减**。

声衰减和声散射的数学理论较为复杂。声束经过特定声程时出现衰减而引起的波幅损失是材料吸收和声束散射共同作用的结果。吸收程度会随着频率的增加而呈线性增加，而散射情况则根据波长对晶粒边界大小的比率，或对其它散射体的比率，在通过 3 个区域时会发生变化。在所有情况下，散射程度都会随频率的更加而增强。在某种特定的温度下，以某种特定的频率进行检测的某种特定的材料，都有一个特定的衰减系数，这个系数通常以 Np/cm 为单位表示，即每厘米耗损的奈培。知道了这个衰减系数后，就可以根据下面的公式计算出声束在通过特定的声程

时会产生的损耗量：

$$p = p_0 e^{-ad}$$

其中：

- P = 声程末端的声压
- p_0 = 声程开始处的声压
- e = 自然对数的底数
- a = 衰减系数
- d = 声程长度

在实际超声 NDT 应用中，通常的做法是测量出衰减系数，而不是计算出衰减系数。在任何介质中，较高的频率都会比较低的频率衰减得更快，因此在检测具有高衰减系数的材料时，通常使用较低检测频率，如对低密度的塑料和橡胶的检测。

垂直界面的反射与透射：当在某种介质中传播的声波遇到介质不同且与声波传播方向垂直的材料时，声能的一部分会被直接反射回来，另一部分会继续向前传播。这种反射与透射的比率与两种材料各自的声阻抗相关，而声阻抗被定义为材料密度乘以声速。根据以下公式可以计算出平面边界的反射系数（被反射回源材料中的声能的百分比）：

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

其中：

- R = 反射系数，以百分比表示。
- Z_1 = 第一介质的声阻抗
- Z_2 = 第二介质的声阻抗

从上面的公式我们可以得出这样的结论：两种材料的声阻抗越接近，反射系数就会越低，而两种材料的声阻抗差别越大，反射系数会越高。理论上说，从两种具有相同声阻抗的材料边界产生的反射为零，而两种声阻抗极为不同的材料边界的反射系数会接近 100%，如：钢与空气。

非垂直界面的反射和模式转换：当在某种材料中传播的声波遇到一个介质不同且与声波传播方向成一定角度（角度不为零）的材料时，声能的一部分会以与入射角度相同的角度反射。与此同时，另一部分在第二种材料中传播的声能会根据斯涅尔定律产生折射。斯涅尔定律是由至少两个 17 世纪的数学家分别推导出的定律。斯涅尔定律将入射角和折射角的正弦与每种材料的声速联系起来，如下图所示。

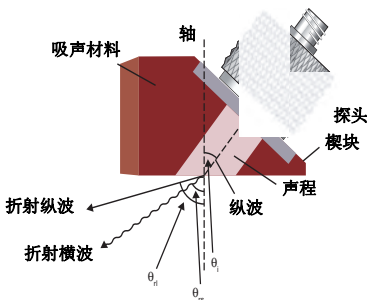


图 2-10 声波折射与模式转换

$$\frac{\sin\theta_i}{c_i} = \frac{\sin\theta_{rl}}{c_{rl}} = \frac{\sin\theta_{rs}}{c_{rs}}$$

其中:

- θ_i = 楔块入射角
- θ_{rl} = 折射纵波角度
- θ_{rs} = 折射横波角度
- c_i = 入射材料的声速 (纵波)
- c_{rl} = 材料声速 (纵波)
- c_{rs} = 被测材料的声速 (横波)

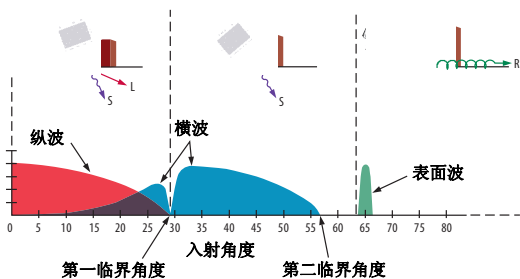


图 2-11 声波模式的相关波幅

如果第二介质的声速高于第一介质, 则在超出某些特定的角度时, 折射

现象还会伴有模式转换，最常见的转换为纵波模式转换为横波模式。广泛应用的角度声束检测技术就是基于这个现象。随着在第一个较慢介质（如：楔块或水）中入射角度的增加，在第二个较快介质（如：金属）中的折射纵波角度也会相应增加。当折射纵波角度接近 90 度时，越来越多的声能被转换为以斯涅尔定律规定的角度折射的、声速较低的横波。如果入射角度高于可以生成 90 度折射纵波的角度，则折射波会被完全转换为横波。更高的入射角度在理论上会生成以 90 度折射的横波，在这种情况下，在第二种材料中会生成表面波。图 2-12、图 2-13 和图 2-14 显示了一个典型的角度声束探头组件与钢耦合时产生的效果。

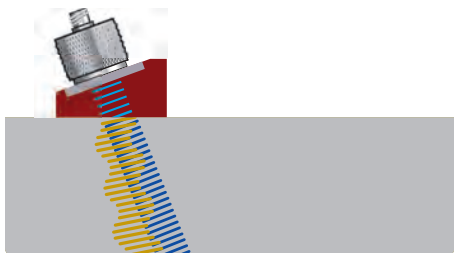


图 2-12 入射角度为 10° 时产生的强纵波与弱横波



图 2-13 入射角度为 30°，超出这个第一临界角度，纵波将不再存在，所有折射能量都被包含在横波中

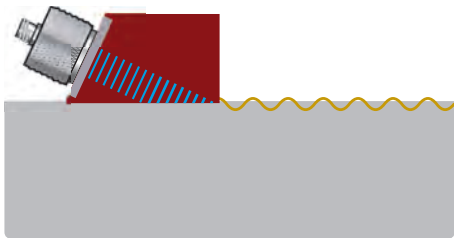


图 2-14 入射角度为 65° ，超出这个第二临界角度，横波将不再存在，所有折射能量都被包含在表面波中

2.3 相控阵探头特性



图 2-15 相控阵探头

阵列是大量的同类物体排列组合的方式。NDT 超声阵列的最简单的形式应该是以增加检测的覆盖范围和 / 或提高检测速度为目的，将一系列单晶探头排列在一起的形式。以下为应用这种阵列探头的示例：

- 管件检测：在探测管件的裂缝与分层缺陷，以及测量管件的总体厚度时经常会使用多个探头。
- 锻件金属工件的检测：在这种检测中，通常需要使用多个探头在不同深度聚焦以探测出以带状形式排列的细小缺陷。
- 复合材料及金属检测：在材料的表面上线性排列多个探头可以提高对复合材料中的分层缺陷或金属中的腐蚀的检测能力。

进行这些检测，不仅需要高速、多通道超声设备带有适当的脉冲发生器、接收器，以及可对每个通道进行处理的逻辑门，还需要将每个探头仔细固定好，以正确设置检测区域。

我们可以将这种最简单的相控阵探头的排列形式想象成包装为一体化的一系列单个晶片（参见图 2-16）。实际情况是这些晶片要比常规探头小得多，脉冲可以对这些被编成组的晶片进行激励，以产生可直接进行控制的波前。这种“电子声束形成”的方式可以在不移动探头的情况下高

速对多个检测区域进行检测与分析。后面的章节对此有更详细的介绍。



图 2-16 相控阵探头

相控阵探头可以有各种尺寸、形状、频率及晶片数量，所有这些探头的共同特点是都装有一个被分割成若干段的压电晶片。

用于工业 NDT 的现代相控阵探头一般由压电复合材料构建，具体地说就是许多细小、极薄的压电陶瓷棒被嵌在聚合物矩阵中。虽然制造这种探头会复杂一些，但是与在其它方面设计相似的压电陶瓷探头相比，这种复合材料探头在一般情况下可提供的灵敏度会高出 10 dB 到 30 dB。分成小段的金属镀层用于将条状的复合材料分割成若干可单独接收电子脉冲激励的晶片个体。这个被分割成小段的晶片被装入探头组合件中。探头组合件包含一个保护性匹配层、一个背衬层、线缆连接器以及一个外壳（参见图 2-17）。

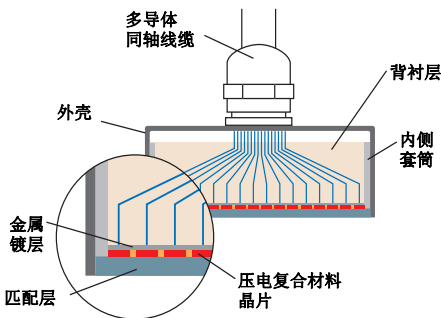


图 2-17 相控阵探头横截面图

相控阵探头根据以下基本参数从功能上被分成不同的类别：

类型：大多数相控阵探头属于角度声束类型，与塑料楔块、平直塑料靴（即零度楔块）或延迟块一起使用。此外，还有直接接触式探头和水浸式探头。

频率：超声缺陷探测一般使用 2 MHz 到 10 MHz 之间的频率，因此大多数相控阵探头都属于这个频率范围。此外，还有频率更低或更高的探头。使用常规探头，穿透性能会随着频率的降低而增加，而分辨率及聚焦锐利度会随着频率的升高而增强。

晶片数量：最常用的相控阵探头一般有 16 到 128 个晶片，有些探头的晶片多达 256 个。随着晶片数量的增多，声波聚焦与电子偏转的能力会

增强，同时检测所覆盖的区域也会扩大，然而探头和仪器的成本费用也会增加。每个晶片被单独脉冲激励，以创建希望得到的波前。因此这些晶片排列方向的维度通常被称为**主动方向**或**偏转方向**。

晶片尺寸：随着晶片宽度的减小，声束电子偏转的性能会增强，但是要覆盖大区域就需要有更多的晶片，因此费用也会增加。

相控阵探头的维度参数一般被定义如下：

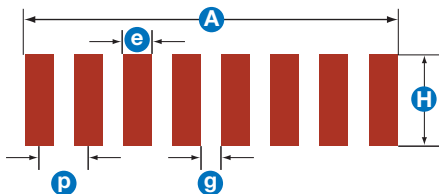


图 2-18 相控阵探头的维度参数

- A = 主动偏转方向上的总孔径
- H = 晶片高度或长度。由于这个尺寸是固定的维度，因此经常将其与超声轴组成的平面称为被动面。
- P = 晶片间距，即两个相邻晶片的中心到中心之间的距离。
- e = 单个晶片的宽度。
- g = 晶片之间的距离。

仪器软件利用这些信息生成所需的声束形状。如果探头识别软件没有将这些信息自动输入到仪器中，则用户在设置过程中要输入这些信息。

2.4 相控阵楔块

相控阵探头的组合件通常包括一个塑料楔块。楔块用于利用横波和纵波的检测应用中，其中包括垂直声波的线性扫查。这些应用于相控阵系统的楔块与常规单晶片缺陷探测中使用的楔块基本上具有相同的功能。用户需要耦合从探头到测试样件之间的声能，以根据斯涅尔定律在适当的角度位置使声波进行模式转化和 / 或折射。相控阵系统可以利用声束偏转在多个角度上通过单一楔块创建声束，因此所产生的折射效果也是声束形成过程的一部分。横波楔块在外表上与那些常规探头使用的楔块极为相似，而且与常规楔块一样，横波楔块也有各种尺寸和类型。有些楔块还带有耦合剂补给孔，以方便扫查应用。图 2-19 为一些典型的相控阵探头楔块。



图 2-19 相控阵探头楔块

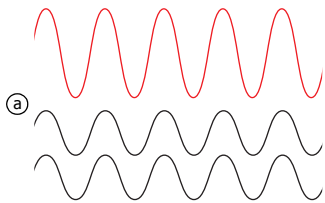
零度楔块是一些平面塑料块，在垂直线性扫查和小角度纵波扫查中，起到耦合声能作用和保护探头面不受刮擦或磨蚀（参见图 2-20）。



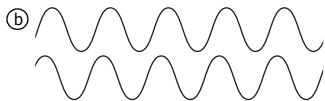
图 2-20 零度楔块

2.5 相控阵脉冲

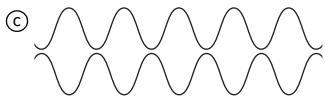
如果来自两个或两个以上声源的声波交织在一起，就会在声波相交处产生声能增强或削弱的相位效果。相同频率的弹性波相交时，如果它们的位移完全同步（即相位重合，或相位角为零度），则它们的声能会累加在一起，创建一个波幅更大的声波（参见图 2-21a）。如果它们的位移正好相反（相位完全不重合，或相位角为 180 度），则它们的声能会互相抵消（参见图 2-21c）。如果相位角处于 0 度到 180 度之间，则声能的变化处于完全累加与完全抵消的中间状态（参见图 2-21b）。**通过使每个声波从它们各自声源发出的时间各不相同，可以利用上述的相位效果，对所产生的组合波前进行偏转和聚焦。这就是相控阵检测的基本原理。**



相位重合声波：声能加强



中间状态



相位相反声波：声能抵消

图 2-21 相位效果：组合和抵消

如果使用常规探头，这种建设性和抵消性干涉效果会创建近场和远场区域，以及这些区域中逐渐变化的声压。此外，常规角度声束探头使用单个晶片向楔块中发射一束声波。根据楔块的形状，这束声波波前上的各个点会有不同的时间延迟。这些延迟属于机械延迟，而相控阵检测中所用的延迟为电子延迟。根据惠更斯原理，当波前触到底面时，会表现为一系列点源。根据斯涅尔定律，从这些点发出的理论上的球面波会互相互作用，形成一个带有一定角度的单一声波。

在相控阵检测中，通过控制相位，产生可预见性的声能增强效果和抵消效果，可形成和偏转超声波束。以不同时间延迟触发单个晶片或晶片组会生成一系列的点源声波，而这些声波会汇集成为以所选角度传播的单一波前（参见图 2-22）。以电子方式得到的延迟与借助常规楔块得到的机械延迟相似，不同的是，在相控阵检测中还可以通过改变延迟的方式进一步控制声波的偏转。通过积极干涉，这种组合波的波幅会比形成组合波的每个单个波的波幅高出很多。同理，不同的延迟被应用于阵列的每个晶片所接收的回波。这些回波被累加在一起，得到一个具有单一角度

和 / 或单一聚焦值的统一声束。除了可以改变主要波前的方向，这种将多个单声束组合在一起的方式还可以使声束在近场内的任何一点聚焦。

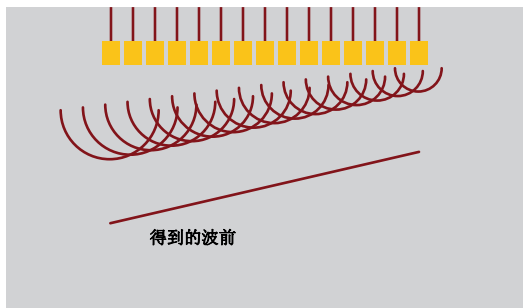


图 2-22 角度波形

通常将晶片分组进行脉冲发射，每组包含 4 到 32 个数量不等的晶片。通过增加孔径的方法，可以减少不希望发生的声束扩散，完成更清晰的聚焦，从而有效地提高灵敏度。

回波被不同的晶片或晶片组接收，并在必要时进行时间偏移计算，以补偿这些变化着的楔块延迟，然后再进行汇总。与常规单晶探头实际上将触及被测区域的所有声束的效果融合在一起不同的是，相控阵探头可以根据回波到达每个晶片的时间和波幅，在空间上对返回的波前进行分拣。仪器软件对声束进行处理时，会将每个返回的聚焦法则认作是以某个具体角度、从线性声程上的某个点、和 / 或从某个具体的聚焦深度反射回来的声束。然后，回波信息可以几种形式的任何一种显示出来。

如前所述，以某种特殊的方式对单个探头晶片或晶片组进行脉冲触发可以生成相控阵声束。相控阵仪基于用户输入的信息决定这些脉冲触发的方式。

被称为**聚焦法则计算器**的软件根据探头和楔块的特性以及被测材料的几何形状和声学属性，确定向每组晶片发射脉冲的特定延迟时间，以通过声波的互相作用生成想要的声束形状。然后由仪器操作软件选择的已编好程序的脉冲发射序列，会在被测材料中发射一系列单个的波前。这些交汇在一起的波前在某些位置得到加强，在另一些位置被减弱，从而形成一个单一的主要波前。这个主波前在被测材料内部传播，而且与任何常规超声波一样在遇到裂缝、不连续性缺欠、底面及其它材料边界时会产生回波。声束可以不同的角度、不同的焦距以及不同的焦点大小被动态偏转，这样做所要达到的目标是单个探头组合件可以通过一系列不同的视角检测到整个被测材料。声束的这种电子偏转完成得非常迅速：一瞬间就可以完成多个角度或多个聚焦深度的扫查。

2.6 声束形成和电子偏转

任何超声检测系统的响应都取决于对以下因素的综合考虑：所用的探头、所用的仪器类型及其设置、被测材料的声学特性。相控阵探头所做出的响应与任何其它 NDT 超声探头所做出的响应一样，既与探头设计参数（如：频率、大小、机械阻尼）相关，也与用于驱动探头的激励脉冲的参数相关。

有四个重要的探头参数会互相作用，对探头的性能产生影响。

频率：如前面章节中所述，检测频率对近场长度和声束散播有极大的影响。实际上，与低频率相比，高频率会产生更好的信噪比，因为高频率可以提供锐利度更高的聚焦，从而得到更集中、更具优化性的焦点。同时，当频率提高时，声波在任何检测材料中的穿透能力都会降低，因为材料的衰减性会随着频率的增高而增强。在检测应用中如果声程很长，或测试材料具有极高的衰减性或散射性，就需要使用较低的频率。一般来说，我们所提供的工业相控阵探头的频率在 1 MHz 到 15 MHz 之间。

晶片大小：随着阵列中单个晶片尺寸的减小，声束电子偏转能力会得到增强。商业探头的实际最小晶片尺寸一般接近 0.2 毫米。然而，如果晶片尺寸大于二分之一波长，则会产生不希望出现的较强的旁波瓣。

晶片数量：随着阵列中晶片数量的增加，探头所能覆盖的物理范围、灵敏度、聚焦能力以及电子偏转能力也相应增加。然而，使用较大的阵列经常会伴随出现系统的复杂性及费用较高等问题。

晶片间距和孔径：晶片间距是指两个相邻单个晶片之间的距离；孔径是指同时得到脉冲激励的一组单个晶片的总和尺寸（虚拟孔径）。要优化电子偏转的范围，需要较小的晶片间距。要得到最佳灵敏度、最小的声束扩散、较强的聚焦，则需要较大的孔径。当今的相控阵仪器通常支持孔径最多为 16 个晶片的聚焦法则。更为高级的系统最多会支持含有 32 个晶片或者 64 个晶片的孔径。

用于全面理解相控阵声束的主要概念可总结如下：一组晶片根据设置好的聚焦法则得到脉冲触发，从而建立所需的探头孔径和声束特性。

晶片数量不变，降低晶片间距和晶片宽度	增加声束电子偏转能力
增加晶片间距或频率	生成不希望出现的栅瓣
增加晶片宽度	生成旁瓣（如在常规 UT 中），降低声波电子偏转能力
使用晶片间距较小的很多小晶片以增加活动孔径	增强聚焦能力（声束的锐利度）

如前面几页所述，相控阵检测的核心内容是通过改变单个晶片或晶片组的脉冲激励延迟时间，以电子方式控制超声声束偏转的方向（折射角度）和聚焦情况。利用声束的这种电子偏转特点，使用单个探头在不改变探头位置的情况下，就可进行多角度检测和 / 或多点检测（参见图 2-23）。

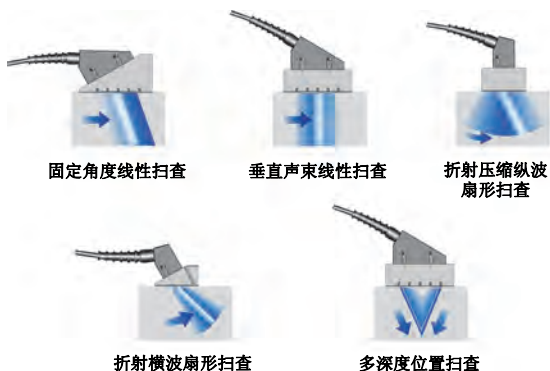


图 2-23 聚焦法则序列

如前面的解释，超声声束的特性取决于很多因素。相控阵探头的性能除了受晶片尺寸、频率、阻尼的影响（这点与常规单晶探头的性能相同）外，如何对较小单个晶片进行定位、定量、编组也会影响到探头的性能，从而创建出与常规探头效果相同的有效孔径。

在相控阵探头中，若干晶片被编成一组，形成有效孔径，这种孔径在声束传播中的作用与各种常规探头类型极为相似（参见图 2-24）。

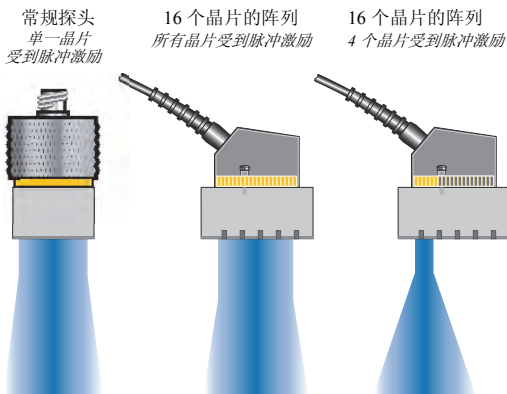


图 2-24 有效孔径

对于相控阵探头来说，某种特定情况下的最大电子偏转角度（在 -6 dB 处）可以从声束扩散等式导出。不难发现，小晶片会产生更多的声束扩

散现象，因此会产生更高的角度声能，这些声能被汇合在一起，可使声束的电子偏转达到最佳状态。随着晶片尺寸的减小，需要对更多晶片进行脉冲激励，从而保持灵敏度。

$$\sin\theta_{st} = 0.514 \frac{\lambda}{e}$$

其中：

$\sin\theta_{st}$ = 最大电子偏转角度的正弦

λ = 被测材料的波长

e = 晶片宽度

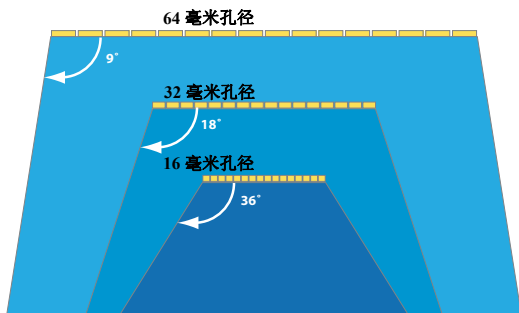


图 2-25 声束的电子偏转极限：当晶片数量固定时，如图中的 16 个晶片，最大声束电子偏转角度会随着孔径尺寸的减少而增加。

请大家注意，在制造相控阵探头时，一般将最小单个晶片的宽度限制在 0.2 毫米，这样含有 16 个宽度为 0.2 毫米晶片的激活孔径的长度就为 3.2 毫米。要创建 6.4 毫米长的孔径则需要 32 个晶片。这些孔径较长的探头毫无疑问会增加电子偏转的性能，而小孔径则会限制静态覆盖区域、灵敏度、穿透能力及聚焦能力。

用角度楔块来改变声束的入射角度，可以增加声束偏转的范围，从而不不过多依赖电子偏转。

根据声束扩散的角度，可以算出到探头任何距离的声束直径。在使用正方形或长方形相控阵探头的情况下，声束在被动面上的扩散与未聚焦的探头相似。在电子偏转面（或称主动面）上，声束可被电子聚焦，其声能在适当的深度被汇集在一起。聚焦探头的波束形状一般为椎体（在单轴聚焦的情况下为楔形），声束被汇集成焦点后，再从焦点处以相同的角度扩散，如下面所述：

近场长度以及超声声束的自然扩散由孔径（等同于常规整体式探头的晶片直径）和波长（声速除以频率）决定。对于未聚焦的圆晶片探头，可以根据以下公式计算出探头的近场长度、声束扩散角度及声束直径：

$$\text{近场长度} = \frac{D^2 f}{4c} = \frac{D^2}{4\lambda}$$

其中：

- D = 晶片直径或孔径
- f = 频率
- c = 被测介质中的声速
- λ = 波长 = $\frac{c}{f}$

有关正方形或长方形晶片的计算公式，请参阅 13 ~ 14 页。

2.7 相控阵探头的声束聚焦

声束可以像光线一样被聚焦，生成一个如沙漏形状的声束，这条成锥形的声束在聚焦点处直径达到最小，然后从这个焦点处再次扩散向更远处传播（参见图 2-26）。

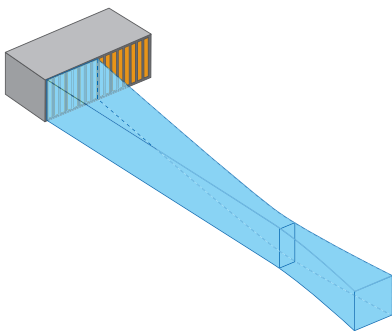


图 2-26 聚焦的声束

通过改变脉冲延迟可以改变相控阵列所发出的声束的聚焦深度。特定材料内的近场长度决定声束可被聚焦的最大深度。声束不能在超过被测材料内近场边缘以外的区域聚焦。

聚焦探头的有效灵敏度受缺陷位置处的声束直径的影响。声束直径越小，小缺陷所反射的能量就会越大。此外，焦点处的小直径声束可以改进横向分辨率。聚焦探头在焦点处的 -6 dB 声束直径或宽度的计算如下：

$$-6 \text{ dB 声束直径或宽度} = \frac{1.02 Fc}{fD}$$

其中:

- F = 被测介质的聚焦长度
- c = 被测介质的声速
- D = 晶片直径或孔径

对于矩形晶片, 需要将主动方向和被动方向分开计算。

从这些公式可以看出, 随着晶片尺寸和 / 或频率的增加, 声束散播的角度会降低。由于较小的声束散播角度会使声能消散的更慢一些, 因此在远场区域内会产生更有效的灵敏度。在近场区域内, 探头可被聚焦创建一条将声能汇聚在一起而不是使声能发散的声束。在将声束直径或宽度减少到焦点的过程中, 在聚焦区域内声束每前进一步声能就会增加一点, 从而可提高探测小反射体的灵敏度。常规探头通常会使用声学折射透镜达到这个目的, 而相控阵探头则通过电子方式实现这个目的, 即以相控脉冲激励的方式获得想要的声束形状。

最常用的带有长方形晶片的线性相控阵探头所发出的声束会在电子偏转主动方向上聚焦, 而在被动方向上不会聚焦。增加孔径尺寸会增加聚焦声束的锐利度, 如这些声束形状所示 (参见图 2-27)。红色为声压最高的区域, 蓝色为声压较低的区域。

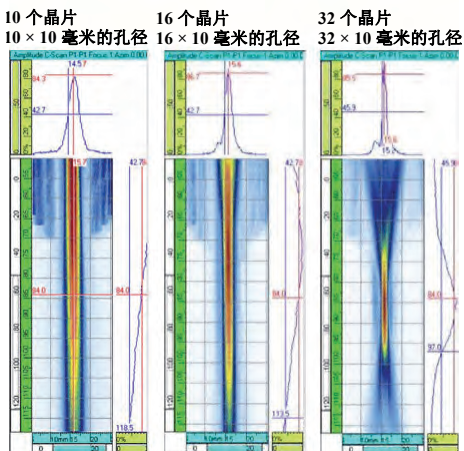


图 2-27 不同孔径尺寸的声束聚焦

2.8 栅瓣和旁瓣

使用相控阵探头会产生的另一个现象是会生成不希望出现的栅瓣和旁瓣。出现栅瓣和旁瓣这两个紧密相关的现象是由于探头发出的部分声能

以不同于主声程的角度传播造成的。旁瓣现象不仅限于相控阵系统，在使用常规探头时，随着晶片大小的增加也会出现旁瓣现象。栅瓣现象只会由相控阵探头产生，因为相控阵探头上距离恒定的单个小晶片会生成单独的声波，这些声波会导致出现栅瓣。这些不希望出现的声波会从被测工件的表面反射，并会使图像中出现虚假缺陷指示。晶片间距、晶片数量、频率和带宽都会对栅瓣的波幅有很大的影响。图 2-28 比较了两种声束形状：在探头孔径近似的情况下，左图中的声束由间距为 0.4 毫米的 6 个晶片生成，右图中的声束由间距为 1 毫米的 3 个晶片生成。左侧图中的声束形状有些像锥形，右侧图中的声束在其中中心轴两侧约 30 度方向生出两个多余的波瓣。

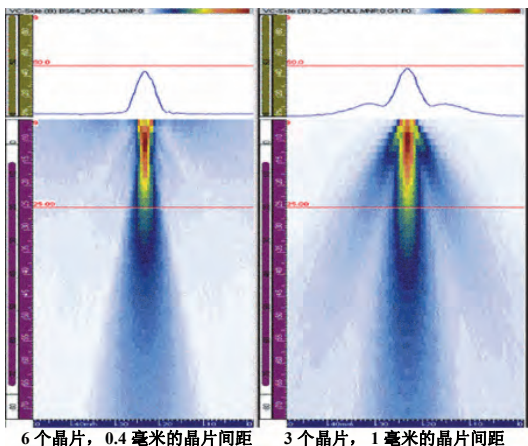


图 2-28 不同晶片数量生成的声束形状

只要阵列中单个晶片的尺寸等于或大于波长，就会产生栅瓣。当晶片尺寸小于波长的一半时，不会产生栅瓣。（晶片尺寸在半个波长和一个波长之间时，是否产生栅瓣取决于电子偏转的角度。）因此在具体应用中使栅瓣最小化的最简单的方法是使用小晶片间距的探头。使用特别设计的探头，如：将大晶片分割为较小的晶片，或改变晶片间距，也可以减少不需要的波瓣。

2.9 选择相控阵探头的总结

设计相控阵探头时，往往要权衡适当的晶片间距、晶片宽度及孔径等因素。使用大量的小晶片可以增加电子偏转能力，减少旁瓣并增强聚焦，但是会有制造费用高、仪器较为复杂等局限性。很多标准仪器都支持最多含 16 个晶片的孔径。增加晶片之间的距离似乎是增加孔径大小的较为容易的方法，但是又会产生不想要的栅瓣。

需要注意的是相控阵探头的销售人员经常会向用户提供标准的探头，这些探头的设计通常都考虑到上面提到的因素，可以根据预期使用目的发挥最佳性能。实际的探头选择最终会由具体的应用需要决定。在某些应用中，会要求在小的金属声程上进行多角度的电子偏转，因此就不需要大孔径的探头。在另一些应用中，可能会需要覆盖较大的区域以探测出分层缺陷，因此要求使用大孔径探头，并且将晶片分成多组进行线性扫查，这样就根本不需要电子偏转。一般来说，用户可以根据自己掌握的常规 UT 知识，在考虑了频率和孔径因素后，选择最适宜自己应用的探头进行检测。

Olympus 相控阵探头的产品目录登载在以下网站中：

www.olympus-ims.com/en/probes/pa/

请登录我们的网站，了解我们公司提供的所有探头和模块产品。

3. 相控阵成像的基本原理



常规超声仪器和相控阵超声仪器都使用高频声波，核查被测样件的内部结构或测量样件的厚度。它们都以物理学中支配声波传播的相同的基本法则为基础。这两种超声技术都使用相似的概念表示超声数据。

无损检测中使用的常规超声仪器通常包含一个既用于生成又用于接收高频声波的单激活晶片，或者包含一对晶片，一个用于发射，另一个用于接收。一套典型的仪器设备包含一个用于生成和接收超声信号的单通道脉冲发生器和接收器，以及一个与在机显示和测量模块配合使用的整合型数字式采集系统。在较高级的设备中，多个脉冲发生器和接收器通道可与一组探头一起使用，以增加覆盖区域，评价不同的深度或缺陷方向，而且可提供更多的报警输出。在更高级的系统中，常规超声技术可与定位编码器、控制器，以及作为成像系统一部分的软件结合在一起使用。

而相控阵仪器由于要为带有 16 个晶片到 256 个晶片的探头提供脉冲激励的方式（聚焦法则），一般来说都具有多通道的性能。与常规探伤仪不同的是，相控阵系统可以使来自一个探头的声波以多种不同的折射角度进行扫查，或沿线性声程进行扫查，还可以使声波在一系列不同的深度位置上动态聚焦，从而增强了检测设置的灵活性和性能。相控阵仪器这种使用单个探头生成多个声程的超常能力，不仅增强了在探测方面的优势，而且还自然获得了“显示”检测过程的特点，即为检测区域创建图像的能力。相控阵成像的特性可以使用户观察到相对的点到点的变化以及多角度的缺陷响应，从而有助于缺陷的辨别与定量。这种技术本身从表面上看似极具复杂性，但它无需使用常规 UT 检测方法经常需要使用的复杂的支架与多个探头，从而在实际上不仅简化了扩大检测覆盖

区域的过程，而且还提高了检测的性能。

以下各个小节进一步说明了常规超声与相控阵超声数据表达的基本形式。

3.1 A 扫描数据

所有超声仪器一般都会记录回波的两项基本参数：回波的大小（即波幅）以及在时间轴上相对于零点产生回波的位置（脉冲传送时间）。而脉冲传送时间通常又与反射体的深度或距离相关，并以被测材料的声速为基础。这三者之间的关系表现为以下公式：

$$\text{距离} = \text{声速} \times \text{时间}$$

超声波形数据最基本的表现形式是 *A 扫描*，或称波形显示。在波形显示图中竖轴代表波幅，横轴代表时间，回波波幅及其渡越时间数据在横轴和竖轴形成的简单的栅格中被绘制成曲线图形。图 3-1 中的示例为显示检波波形的 A 扫描；A 扫描中也会使用未经检波的射频波形。屏幕上的红色线段表示闸门，闸门的作用是选择波形曲线的一部分进行分析，一般是对回波波幅和 t 或深度进行测量。

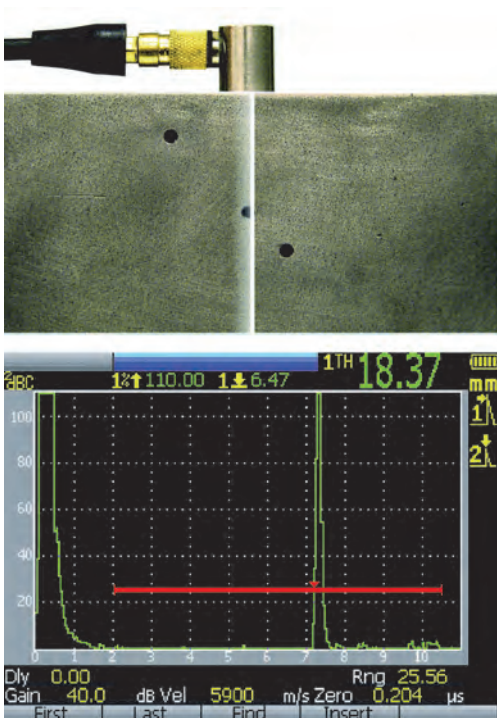


图 3-1 A 扫描数据

3.2 单值 B 扫描

表现 A 扫描数据的另一种方式是通过 *单值 B 扫描*。这种图像形式通常出现在常规探伤仪和腐蚀测厚仪的屏幕上，表现反射体的深度相对于它们的线性位置产生变化的情况。当探头在工件上扫查时，厚度数据会随着时间或探头位置的变化被绘制成图像，从而可提供工件的深度剖面图。将超声数据与探头的实际位置结合起来，可以绘出一个成比例的图形。在这个图形中，可以找到并跟踪被测工件上的具体区域所对应的数据。这种位置跟踪一般是通过被称为 *编码器* 的电子机械装置来完成的。有些编码器被置于支架上，需要进行手动扫查。有些编码器被置于自动系统中，探头的移动由可编程电动控制扫查器来完成。在这两种情况下，编码器都会根据用户定义的扫查方式以及步进分辨率，记录下每次进行数据采集的位置。

图 3-2 中的 B 扫描显示了对应于试块中横通孔位置的两个较深的反射体和一个较浅的反射体。

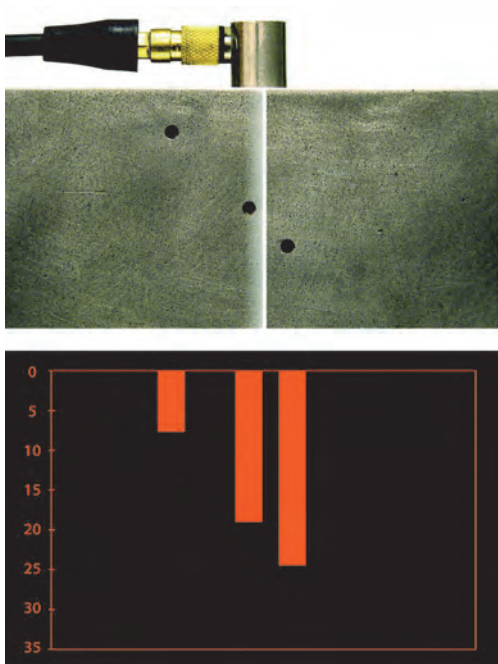


图 3-2 B 扫描数据

3.3 横截面 B 扫描

*横截面 B 扫描*是提供测试样件在单轴方向上的详细信息的端视图。这种图像较前面介绍的单值 B 扫描提供了更多的信息。绘制这种图像，不能仅使用闸门区域内的单一测量值，而需将每个探头位置的所有 A 扫描波形都数字化。在对应于渡越时间或探头的实际编码位置上，可以绘出连续的 A 扫描，从而生成扫描所经过区域的横截面图像。这样用户就可以看到样件内近表面和远表面中反射体的图像。使用这个技术，通常可存储每个位置的完整波形数据，还可以从图像中调用这些数据用于进一步评价或验证。

要做到这点，需要将波形中的每一个数字化的点绘制成图，以使代表信

号波幅的不同颜色出现在适当的深度位置上。

相继出现的 A 扫描被数字化，不同的数据被分配给不同的颜色，并以用户定义的间隔（渡越时间或位置）被“排列”在一起，形成一个真实的横截面图像（参见图 3-3）。

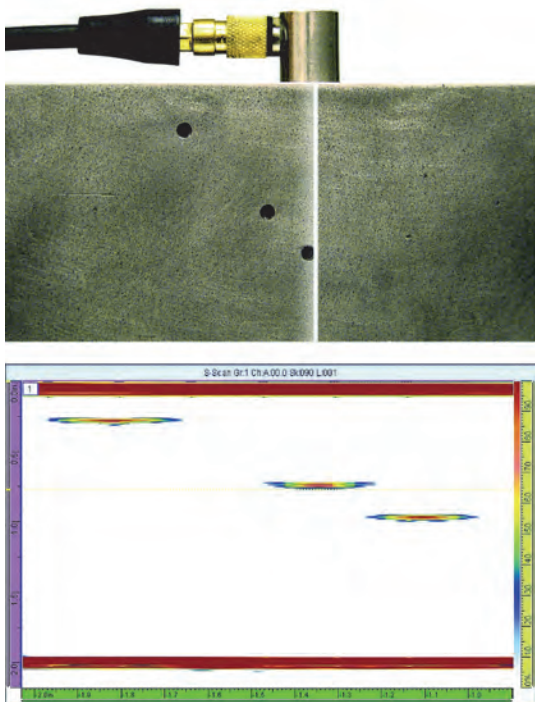


图 3-3 横截面 B 扫描

3.4 线性扫描

相控阵系统通过沿线性阵列探头的长边所进行的电子扫描，在无需移动探头的情况下，可创建一个横截面剖面图。当以序列方式应用每个聚焦法则时，相关的 A 扫描被数字化并被绘制成图。相继的孔径被“排列”在一起，生成一幅实时横截面图像。实际上，这种电子扫描是实时进行的，因此在探头进行物理位移的同时，用户会在屏幕中连续看到实时横

截面图像。图 3-4 为一幅使用 64 晶片线性相控阵探头进行检测时得到的图像。在这个示例中，用户将聚焦法则以如下方式编程：16 个晶片为一个孔径，下一个孔径包含向前错一个晶片的 16 个晶片，依次类推，序列发射是对这些孔径按顺序连续触发的过程。这样会生成 49 个单个波形，这些波形排列在一起，可以创建一个在探头 1.5 英寸长边方向上的实时横截面图像。

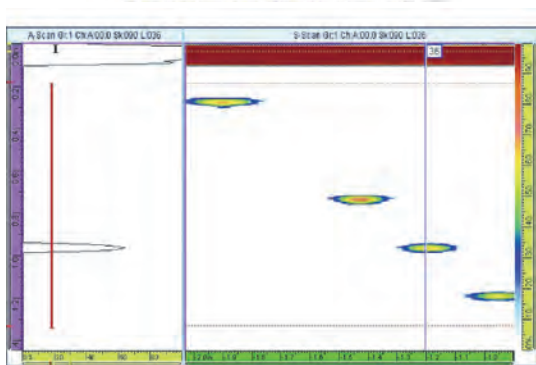
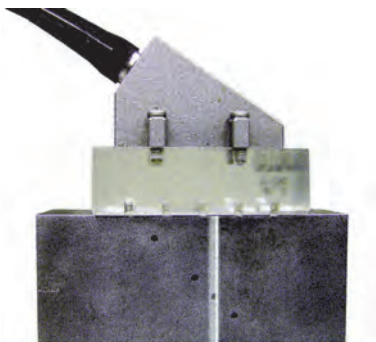


图 3-4 垂直声束线性扫查

也可使所有晶片以某个固定角度发出声束进行扫查（参见图 3-5）。如在 65 页中的 5.3 小节中所述，这种方法在自动焊缝检测中非常有用。使用带楔块的 64 晶片线性相控阵探头，可以用户定义的角度（通常为 45、60 或 70 度）生成横波。通过在探头长边方向上对孔径进行序列触发，无需在扫查过程中增加探头到焊缝中线之间物理意义上的距离，即可采集到完整的焊缝体积数据。这样就完成了在焊缝长度方向上的单扫描测。

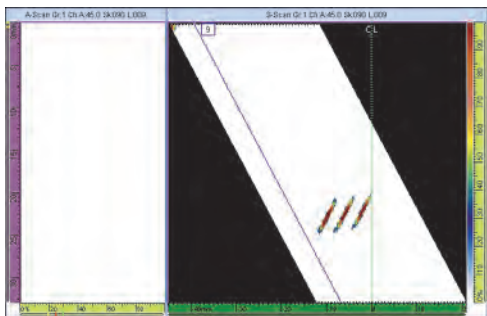
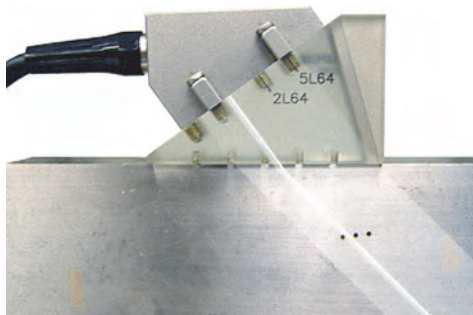


图 3-5 角度声束线性扫查

3.5 C 扫描

检测数据的另一个图像表现形式是 *C 扫描*。*C 扫描* 是一个二维数据图像，表现为被测样件的顶视图或平面图。*C 扫描* 在图像显示方面与 X 光图像极为相似，被测样件的每一点都被映射到图中相应的位置，每个位置会由不同的颜色表现其在闸门内信号的波幅或深度。通过跟踪数据在 XY 坐标平面上的位置，可以为平面工件生成平面图像；通过跟踪轴位置与角度位置，可以为柱面工件生成平面图像。对于常规超声，使用带有编码器的机械扫查器，可根据适当的步进分辨率（步距），跟踪探头的坐标位置。

由相控阵系统生成的 *C 扫描* 与常规探头生成的 *C 扫描* 极为相似。使用相控阵系统，一般情况是探头沿一个轴做物理意义上的位移，而在另一个轴的方向上，声束会根据聚焦法则序列进行电子扫查。同常规 *C 扫描* 一样，闸门内有可能存在缺陷的区域的信号波幅或深度数据会被收集起来。进行相控阵检测时，在使用编制好的声束孔径进行每个聚焦法则序

列触发的过程中，所采集的数据被绘制成图。

图 3-6 是使用装有零度角楔块的 64 晶片 5 MHz 线性阵列探头进行检测时为试块生成的 C 扫描。每个聚焦法则的孔径由 16 个晶片组成，每次脉冲触发时，孔径会向前移动一个晶片。这样会生成 49 个数据点，这些数据点会被绘制成沿探头的 37 毫米（1.5 英寸）长度方向上的图像（图 3-6 中，水平方向）。当探头以直线方式向前移动时，会出现平面 C 扫描视图。在需要将扫描图像中的几何图形点与实际工件上的位置精确对应时，通常要使用编码器，虽然在很多情况下，通过非编码的手动扫描也可以得到有用的信息。

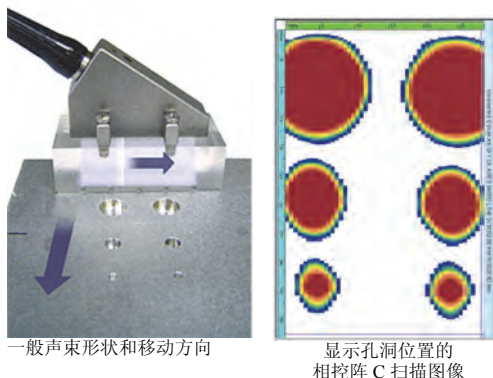


图 3-6 使用 64 晶片线性相控阵探头得到的 C 扫描数据图像

虽然由于相控阵的有效声束尺寸较大，其图像的分辨率可能不会完全与常规 C 扫描图像等同，但是我们要考虑到相控阵技术的其它优点。相控阵系统为便携式设备，可被方便地携带到检测现场，而常规系统不能做到这点，而且购买相控阵系统的费用只为购买常规系统的三分之一。此外，通常来说只需几秒钟即可生成相控阵图像，而常规水浸扫描图像的生成需要几分钟。

线性相控阵探头还经常用于在焊缝长度方向上进行的折射横波检测。图 3-7 显示一个安装在角度楔块上的 64 晶片 2.25 MHz 相控阵探头，这个探头可以用用户定义的角度，一般为 45、60 或 70 度，创建横波。如果探头垂直于焊缝放置，则其孔径会在探头的长边方向上被序列触发。这样，无需以机械方式在垂直于焊缝中线的方向上移动探头，就可以有效地使折射横波通过整个焊缝体积。通过在平行于焊缝的方向上滑动探头，可使整个焊缝体积的数据显示在屏幕中。使用编码器，数据可被绘制成如 C 扫描形式的图像。这类图像中反映反射体的波幅随孔径位置（Y 轴）及在焊缝方向上经过的距离（X 轴）而变化的情况。这种扫描形式通常被称为“单线扫查”。要生成可重现的结果，建议使用一个机

械扫查器。在图 3-7 中，视图上部表现的是声波在整个焊缝长度方向上遇到未磨平的焊缝底部得到反射而生成的图像。图中的 A 扫描与光标标出了对应于焊缝区域中侧壁未融合缺陷的一个较大的信号指示。

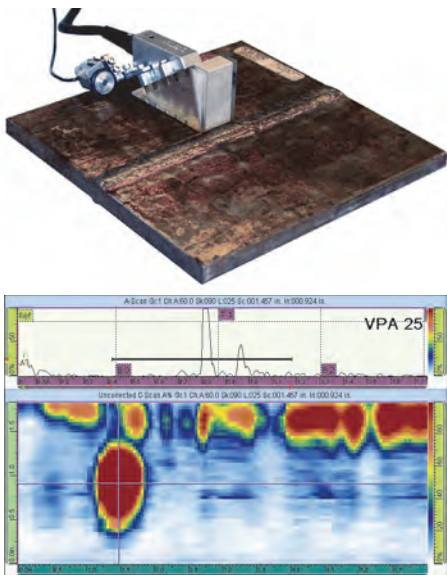


图 3-7 使用 64 晶片 2.25 MHz 编码探头以 60 度角对焊缝进行单线扫查检测

3.6 S 扫描

在到目前为止所有已经介绍的图像模式中，只有 *S 扫描* 是相控阵设备特有的图像。在线性扫描中，所有聚焦法则以一个固定角度对各个孔径序列进行脉冲触发。而 *S 扫描* 则是使用固定孔径，在序列变换的不同角度下，以电子方式偏转声束。

这种扫描一般使用两种主要形式。最熟为人知的，在医学成像中最常见的形式是使用零度界面楔块，以电子方式在不同角度上偏转纵波，生成一个扇形图像，以显示分层缺陷和稍微偏斜的缺陷（参见图 3-8）。

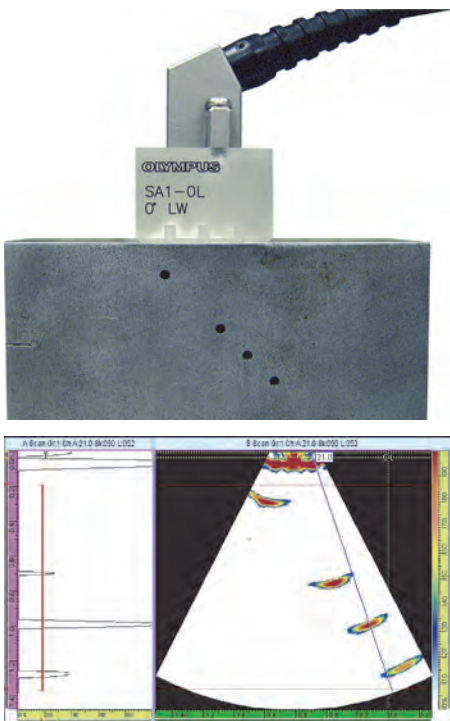


图 3-8 -30° 到 $+30^{\circ}$ 范围内的 S 扫描

第二种形式使用塑料楔块增加入射声束的角度，以生成横波。最常见的折射角度范围在 30 到 70 度之间。这种技术与常规角度声束检测相似，不同的是声束以一系列不同的角度扫射，而不是以通过楔块形成的单一固定角度传播。其图像显示与线性扇形扫查图像相同，也是被测工件的检测区域的横截面图（参见图 3-9）。

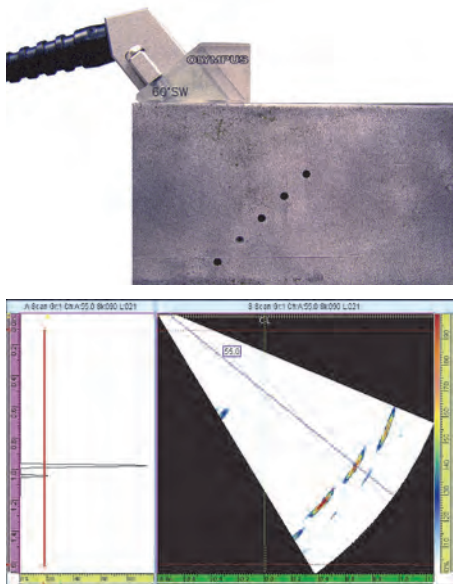


图 3-9 +35° 到 +70° 范围内的 S 扫描

生成图像的实际过程也是基于 A 扫描排列原理，这个原理在前面章节中线性扫描部分中做过介绍。用户定义起始角度、终止角度，以及角度步进分辨率，以生成 S 扫描图像。要注意孔径需保持不变，每个定义的角度生成一个相应的声束，声束的特性由孔径、频率、阻尼等因素定义。每个角度（聚焦法则）的波形响应被数字化，以颜色编码，并在屏幕上以适当的对应角度绘制，生成一个横截面图像。

实际上，S 扫描是实时生成的，因此 S 扫描是一个会随着探头的移动，持续发生动态变化的图像。这个特点在显示缺陷以及提高缺陷探出率方面非常有用，特别是在探测方向杂乱的缺陷时，因为在检测过程中会同时使用很多检测角度。

3.7 融合图像形式

相控阵图像在实时显示体积数据方面的能力极为强大。在电子扫查中，成像过程成为真正的数据实时显示过程，而且可被用于手动和自动两种系统中，以提高缺陷的检出率。特别需要指出的是，功能更为强大的自动相控阵仪器不仅具有显示多个图像类型的功能，还可存储整个检测过

程中得到的完整原始波形信息，从而可以在扫查完成后，对检测结果进行分析。因为所有超声波形数据都被收集、存储起来，因此在任何检测地点进行的扫查后分析，都可以使用相应的 A 扫描信息重建 S 扫描、C 扫描和 / 或 B 扫描。例如，图 3-10 的屏幕同时显示了焊缝形状的检波 A 扫描波形、S 扫描以及平面 C 扫描图像。

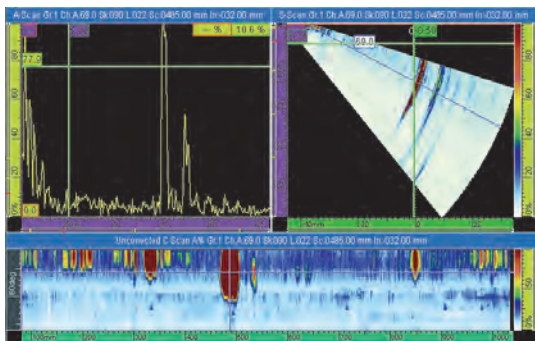


图 3-10 多图像类型的显示

3.8 扫查速度和数据采集

在生成 B 扫描或 C 扫描时，可以用手移动相控阵探头，也可以通过自动扫查固定装置移动相控阵探头。在这两种情况下，数据采集都可以仅基于仪器的刷新率自由进行，也可以通过使用电子机械编码器，基于探头的位置进行。如前面所述，使用基于探头实际位置所采集的超声数据可以绘制成比例的视图，而且还可在被测工件中找到超声数据所对应的具体位置。编码器会记录下相对于用户定义的扫查方式与步进分辨率的每次数据采集的位置。

为了避免数据采集过程中出现空白，必须要考虑探头移动的速度以及编码器的距离分辨率（步距）。简言之，仪器的数据采集速率必须高于扫查速度除以编码器分辨率的商。采集速率由仪器的设计和设置决定，其中最重要的两个因素是脉冲重复频率（PRF）和每次采集生成的聚焦法则数量，这两个因素都属于设置变量。脉冲重复频率除以聚焦法则数量得出相控阵系统所允许的最快采集速率。然而所得到的数值还可以根据其它因素如：平均、数字式采样率及处理时间，进一步得到调整。要了解详细情况，请咨询仪器制造商。

采集速率被确定后，就可以基于所需的编码器分辨率，计算出最大扫查速度，反之亦然。在扫查速度相对于特定的编码器分辨率过高的情况下出现的扫查效果如图 3-11 中的扫描图像所示。



重要事项

1. $\text{采集速率} > \frac{\text{扫查速度}}{\text{扫查轴分辨率}}$
2. 如果为所有 A 扫描都设置了相同的脉冲重复频率，则：
 $\text{采集速率} < \frac{\text{重复频率}}{\text{聚焦法则数量}}$

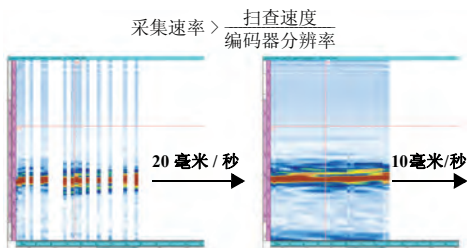


图 3-11 扫查速度影响采集速率的示例

4. 相控阵仪器

商业市场上有各种各样的相控阵探头出售。线性阵列探头无疑是最常用的配置，但市场上也提供带有大量晶片，具有不同晶片排列方式的自行定制探头。设计这些自行定制探头的目的通常是要满足那些要求更为苛刻的应用，如：要求速度高、全体积覆盖，和 / 或声束电子偏转更为复杂的应用。目前，为满足这些应用的需要，商业市场上提供了不同级别的相控阵仪器。这些仪器大体可被分为三个级别：野外使用的便携式手动仪器、野外使用的便携式自动仪器，以及用于在线检测的架式仪器。

4.1 重要技术规格

在评价常规探伤仪时，需要考虑仪器的一些功能性特点。相控阵仪器一般也具有这些特性。以下所列的每个特性不一定会出现在所有仪器中。

脉冲发生器和接收器

这两个参数在很大程度上定义了可以与仪器一起使用的探头的操作范围。

脉冲发生器	接收器
提供尖波脉冲发生器	整个带宽
提供方波脉冲发生器	具有窄带滤波器
脉冲重复频率	时变增益
	整个动态范围

测量与显示

这两个参数用于定义仪器的一般测量和显示模式：

- 报警 / 测量闸门的数量
- A 扫描显示模式：检波（射频、全波、半波）、最大值、复合、平均、中空、填充及峰值记忆
- 范围
- 测量分辨率
- 测量类型（即声程、深度、到探头前沿的距离、dB、到曲线的 dB 等）
- 单值 B 扫描模式（大多数探伤仪中都没有这个功能）

定量选项

多种缺陷探测标准与规范已经被开发制定，并在利用常规超声技术的实际检测应用中被用于定量不同的缺陷。这些标准与规范不仅应用于焊缝检测，还应用于各种金属材料与复合材料结构的检测。某些检测要求按照特定的规范进行。因此，目前常规数字探伤仪添加了各种功能，以完成这些规范所要求的自动数据采集和记录测试结果的操作。

输入与输出

输入与输出这两个参数一般用于定义仪器与其外部装置和 / 或软件一起使用的方式：

- 报警输出的数量和类型
- 用于打印、保存或数据传输的 USB
- 用于链接数据与位置的编码器输入
- 用于对脉冲发生器触发和采集循环进行外部控制的触发器输入

附加相控阵技术规格

鉴于相控阵仪器具有多晶片的特性，用户在检测过程中需要进一步考虑和核查其它一些重要的技术规格。

脉冲发生器数量：定义可被编组以形成激活孔径（也被称为虚拟探头孔径）的最大晶片数量。

通道数量：定义可用于序列触发孔径的通道总数量，以使扫查覆盖的区域从单个探头的覆盖区域最大限度地增加。

XX:YY：使用的命名惯例，其中 XX = 脉冲发生器数量，YY = 可用通道的总数量。通道数量总会大于或等于脉冲发生器数量。野外便携式套装仪器的 XX:YY 技术规格在 16:16 到 32:128 范围之内。对于在线检测系统和 / 或使用晶片数量更多的探头的系统，需要数值更大的脉冲发生器和接收器组合。

聚焦法则：我们通常要确定被组合在一起生成图像的聚焦法则的数量。一般来说，较高的 XX:YY 配置可以支持更多的聚焦法则，因为较高的配置可以在线性扫查中支持更多的晶片孔径和 / 或孔径步距。注意：聚焦法则数量多并不意味着功能性更强。例如：使用一个 64 晶片的探头对 3 个横通孔进行 40 度到 70 度的扇形扫查，比较在 2 英寸（50 毫米）的金属声程中分别以 1 度（31 个法则）、2 度（16 个法则）和 4 度（8 个法则）的步距进行电子扫查所生成的图像效果（参见图 4-1、图 4-2 和图 4-3）。随着角度步距的减小，图像只会稍微略显清晰，而以较大步距扫查得到的检测图像已经足够清晰。而且根据图像定量的结果也不会有明显的变化，除非在聚焦过程中声束直径急剧减少的情况下。

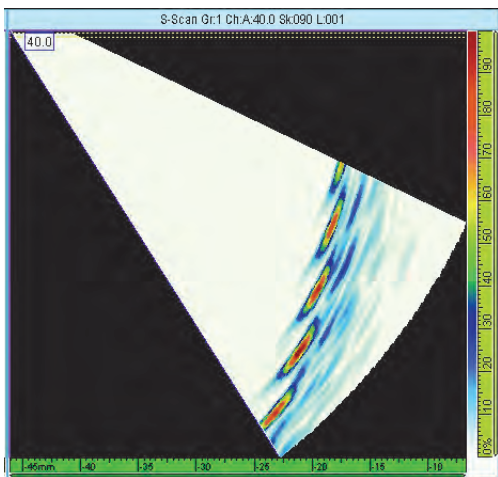


图 4-1 40 度到 70 度的 S 扫描：扫查步距为 1 度（31 个法则）

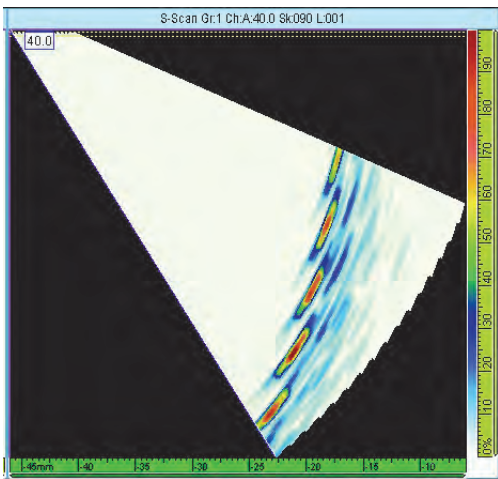


图 4-2 40 度到 70 度的 S 扫描：扫查步距为 2 度（16 个法则）

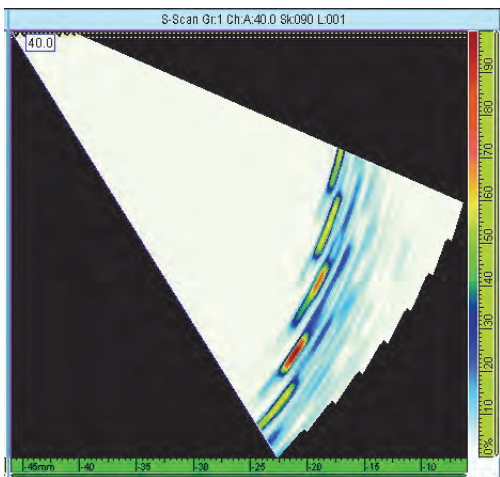


图 4-3 40 度到 70 度的 S 扫描：扫描步距为 4 度（8 个法则）

表 4-1 表明随着虚拟探头孔径和晶片总量的组合变化，进行线性扫描生成的聚焦法则数量。

表 4-1 线性扫描中晶片数量和聚焦法则数量之间的关系

线性扫描			
孔径	晶片总量	晶片步距	法则数量
4	16	1	13
8	16	1	9
4	32	1	29
8	32	1	25
16	32	1	17
4	64	1	61
8	64	1	57
16	64	1	49
8	128	1	121
16	128	1	113
8	256	1	249
16	256	1	241

显而易见，孔径越小，或者晶片数量越多，则为每次扫描生成的聚焦法则数量就越多。孔径与晶片数量的配置也会影响显示刷新率，计算方法如下。

脉冲重复频率 / 显示刷新率：在不同的图像模式下，仪器的显示刷新率会有很大的不同。下面的公式用于相控阵成像模式：

$$\text{图像显示的最大刷新率} = \text{脉冲重复频率} \div \text{聚焦法则数量}$$

图 4-4 使用只包含 4 个聚焦法则的较短的线性扫描序列和 60 Hz 的图像显示刷新率说明这个概念。

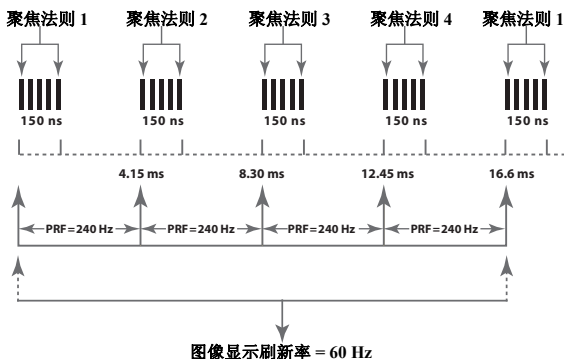


图 4-4 较短的 4 个聚焦法则线性扫描序列

实际的图像显示刷新率还会受其它参数的影响。各种仪器的单个聚焦法则的 A 扫描刷新率会有所不同。在某些仪器中，A 扫描的脉冲重复频率会受最大图像显示刷新率的限制，无论这个 A 扫描与相控阵图像一起显示，还是被最大化到全屏显示的 A 扫描。因此，在某些应用中，在不同的图像显示模式下，可能需要验证从同一个聚焦法则序列推导出的 A 扫描脉冲重复频率。

探头识别：识别相控阵探头的能力会自动为仪器选择正确的晶片数量及探头的几何形状，从而节省了设置仪器的时间，并避免了可能会发生的错误。

图像类型：相控阵仪器中的典型图像类型为扇形和线性扫描图像。将这些图像叠放在一起可以创建波幅和深度 C 扫描，形成平面图像，并提供更多的定量缺陷的方法。

波形存储：这个存储原始 RF 波形的能力可使操作人员离线查看数据。这个功能在采集较大区域的检测数据时非常有用。

多组支持：性能更为强大的相控阵仪器可以使多组聚焦法则以序列方式应用于一个或多个相连的探头上。在必须采集体积数据用于离线分析

时，这个功能极为有用。例如：一个 5 MHz，64 晶片探头可被配置为使用 1 到 16 个晶片进行 40 度到 70 度的扇形扫查，同时第二个组可以在所有 64 个晶片的长度上进行 60 度的线性扫查，每个孔径含 16 个晶片，步距为 1 个晶片。

编码：一般将仪器分为两个级别：手动和编码。

在提供实时数据方面，手动相控阵仪器与常规探伤仪的操作过程相似。仪器在显示 A 扫描的同时，还会显示实时 S 扫描或线性扫描图像。这种同时显示图像的特性有助于探测和分析缺陷及不连续性。在检测中可同时使用并显示多个角度或位置的性能是用户选用这类仪器的主要原因。在某些应用中，如：裂纹定量，这些图像可用做定量裂缝深度的工具。

带有编码器接口的相控阵仪器将探头位置数据、探头几何形状、编好程序的聚焦法则序列融合在一起，生成测试样件的顶视图、端视图和侧视图。如果仪器中还存储了完整的波形数据，则可以重新创建在扫查长度方向上的横截面图像，或重新生成各种水平上的平面 C 扫描。根据这些编码图像，可以对缺陷进行平面定量测量。

参考光标：仪器带有可在图像中使用的各种光标，这些光标有助于对缺陷进行判读、定量及深度测量。在 S 扫描中，可以使用光标测量裂纹高度。使用编码数据设置，可以测量出缺陷的大约尺寸。下面几张图像以示例说明不同光标的作用。

在下面最简单的图像中（图 4-5），蓝色光标显示 S 扫描的角度分量，这个分量由 A 扫描体现；红色水平线标出了用于测量的数据闸门的起点和终点；绿色垂直线标出了图像上对应于楔块前沿的位置。后者一般被用作计算反射体位置的参考点，需注意近表面反射体可能位于楔块的下面，因为相控阵探头的确切声束入射点（BIP）会随角度和 / 或孔径组的变化而不同。

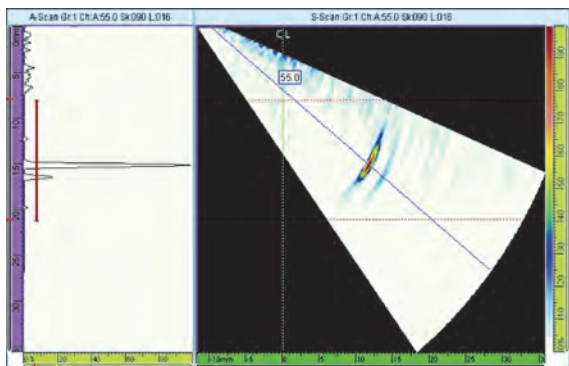


图 4-5 角度光标

图 4-6 中的 S 扫描图像中有两条水平光标，代表被测材料中声程的第一个和第二个跨的终点位置。图中还有角度光标，标出了三个最常用的检测角度：45 度、60 度、70 度。此外，A 扫描中的 80% 波幅位置处还有一条垂直光标，标出了通常被用作参考水平的位置。

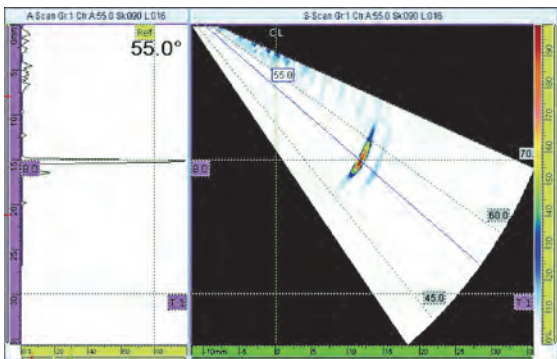


图 4-6 角度和水平光标

某些高级判读软件还会进一步提高图像的可视性及分析能力。图 4-7 中包含一个单角度 A 扫描，一个 S 扫描，一个带有焊缝覆盖并显示焊缝中反射体位置的声线跟踪图，以及一个缺陷总结报表。这个报表显示每个缺陷指示的测量波幅及通过计算得出的缺陷位置。

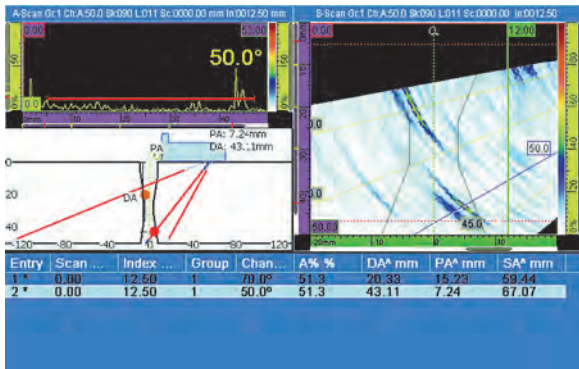


图 4-7 多图显示格式

4.2 校准和规范化方法

零位校准: 由于楔块延迟会随相控阵系统中角度的不同而变化, 因此需要针对不同的角度改变探头的零位偏置。一般来说, 仪器软件会基于楔块的几何形状编制默认的零位偏置曲线, 不过还可以通过使声束扫过固定深度或距离上的参考反射体的校准过程, 调整这些默认的偏置曲线, 以提高检测的精确性。

增益规范化: 相控阵声束的形成有赖于晶片延迟和晶片组合的变化, 因此使来自每个聚焦法则的波幅响应一致化至关重要, 因为这样既可以补偿阵列探头中晶片到晶片之间灵敏度的差异, 又可以补偿在不同折射角度上楔块衰减和能量传输效率的不同。在整个检测序列过程中进行的楔块延迟校准和灵敏度校准, 不仅可提供更清晰的图像可视性, 还可使操作人员根据任何聚焦法则对缺陷进行测量和定量。Olympus 无损检测仪器可提供全面校准, 而业内的很多其它仪器只能一次校准一个聚焦法则。Olympus 的仪器提供全角度校正增益 (ACG) 和时间校正增益 (TCG), ASME 的第五节中提到了对这两个增益的要求。

从图 4-8 中的示例可以看到, 在增益规范化以前, 65 度声束从参考反射体得到的响应明显低于 45 度声束从相同反射体得到的响应。

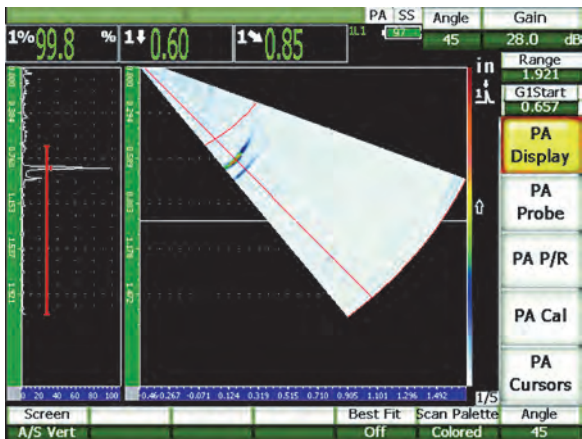


图 4-8 增益规范化以前的响应

增益规范化以后，仪器会调整参考增益，使所有角度声束从参考反射体得到的响应都相同，如图 4-9 所示。

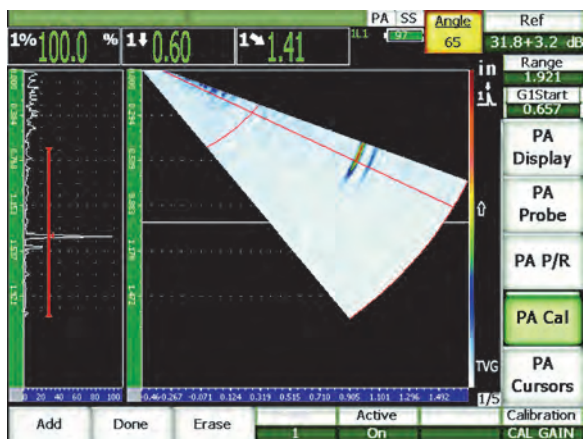
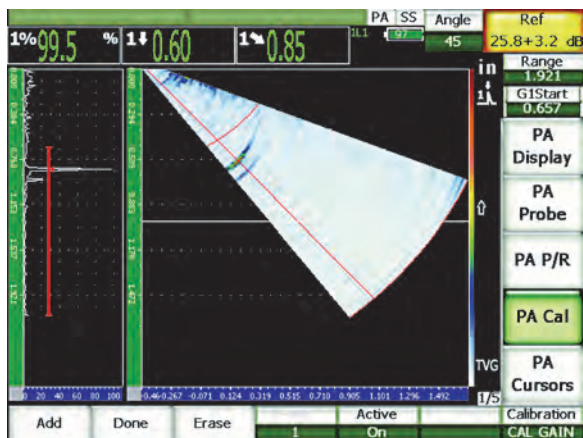


图 4-9 增益规范化后的响应

相控阵的 TVG/DAC: 使用 DAC 曲线或时间校正增益的 A 扫描波幅技术，是定量缺陷的较常用方法。这些方法可以补偿材料衰减作用以及声束散射现象，具体的操作方法是补偿增益水平 (TVG/TCG)，或基于相同尺寸反射体随不同距离而产生的不同响应，划出一条参考 DAC 曲线。与常规 UT 灵敏度校准相同，某些相控阵仪器还可以为所有定义的聚焦

法则在多个点的位置绘制一条 TVG 曲线。在这些仪器中，可以随时在 TVG 和 DAC 曲线之间切换。这样就可以在 S 扫描中或在线性扫描的任何虚拟孔径中，使用不同角度上的定量曲线。TCG/TVG 的应用，极大地增强了对整个被测样件体积中的缺陷进行探测和显示的性能。

5. 相控阵检测设置和显示格式

本章更进一步地说明创建相控阵图像的方法。特别是进一步解释了需要输入的信息，以及在使用不同具体探头组件和被测工件的情况下，不同相控阵视图类型之间的关系。本章还说明了与相控阵图像相关的典型的A扫描视图。

5.1 设置仪器要考虑的因素



图 5-1 使用 OmniScan 进行典型的相控阵检测

如前所述，要成功完成任何超声检测，需在检测设置中确认许多因素。简言之，要进行正常检测，就需要校准仪器，在校准仪器的过程中需要确认检测材料的特性以及探头的特性。

材料

1. 需设置被测材料的声速，以正确测量反射体在材料中的深度。必须谨慎地选择正确的声速模式（纵波或横波）。压缩垂直声束检测一般使用纵波，而角度声束检测常常会使用横波。
2. 在设置中，一般要输入工件厚度信息。在角度声束检测中，厚度信息特别有用，因为借助厚度信息可以得到相对于各个跨的正确深度测量值。厚度信息还有助于在 S 扫描中做出正确的位置标记。
3. 在检测非平面的工件时，需要考虑曲率半径。这个曲率可以通过算术方法得到补偿，以得到更精确的深度测量值。

探头

1. 要得到正确的脉冲发生器参数和接收器的滤波器设置，就必须知道探头的频率。
2. 必须建立零位偏移，以补偿因耦合、匹配层、线缆连接而产生的电气和机械偏移，以及以电子方式产生的偏移，从而得到正确的厚度读数。
3. 需设置由已知反射体产生的波幅响应，并将其作为参考值，以便使用一般的波幅定量技术。
4. 需设置声波入射到被测材料中的角度。
5. 使用相控阵探头时，需要知道晶片的数量和晶片的间距。

楔块

1. 声波在楔块中传播的速度。
2. 楔块入射角度。
3. 声束入射点或探头前沿的参考点。
4. 相控阵检测中，第一晶片高度偏移。

在常规超声检测中，检测之前必须要对以上所列参数进行设置，以保证得到正确的检测结果。由于单晶探头只有一个固定的孔径，因此入射角度的选择、零位偏移以及波幅校准都只针对单个探头或探头 / 楔块组合件。每次更换探头或楔块时，都必须重新进行校准。

使用相控阵探头时，用户需遵守这些相同的原则。相控阵检测的主要优势是可以动态改变孔径、焦点和 / 或角度，实质上是可以一次性使用多个探头。这就需要对相控阵探头的每个状态（一般指聚焦法则）在更多方面进行额外的校准与设置。这样不仅可通过设置好的整体聚焦序列得到精确的波幅和深度测量值，而且相控阵仪器还会生成数据更为精确、可视性更强的图像。

常规检测和相控阵检测的一个主要差别出现在角度声束检测中。在常规 UT 应用中，输入一个不正确的楔块角度或材料声速会在定位缺陷的过程中产生错误，但是不会影响基本的声波传播（因此不会影响得到的 A 扫描），因为声波传播只与机械折射因素相关。但是在相控阵应用中，需要输入正确的材料和楔块声速，以及有关探头和楔块的参数，才可以得到正确的聚焦法则，从而通过电子偏转方式以想要的折射角度改变声束的传播方向，创建有效的图像。某些性能更强的仪器还具有探头识别能力，可以自动传输关键性的相控阵探头信息，并利用编排有序的设置

库中的信息，帮助用户选择正确的楔块参数。

要为一次相控阵扫查进行设置，一般需为以下参数输入参数值：

探头参数

- 频率
- 带宽
- 尺寸
- 晶片数量
- 晶片间距

楔块参数

- 楔块的入射角度
- 楔块的额定声速
- 偏移 Z = 到第一个晶片中心的高度
- 步进偏移 X = 楔块前沿到第一晶片的距离
- 扫查偏移 Y = 楔块侧面到晶片中心的距离

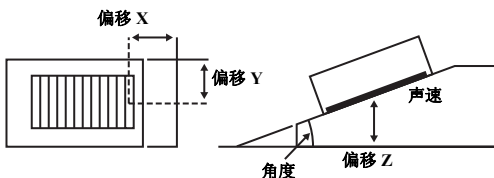


图 5-2 楔块参数

聚焦法则的设置

必须以手动方式或通过自动探头识别功能为仪器输入探头和楔块的基本设置。除了在脉冲发生器、接收器及测量闸门方面的典型 UT 设置，用户还必须设置有关探头声束及其电子偏转方向（聚焦法则）的值。

需要用户输入的信息

- 材料声速
- 晶片数量（用于形成探头孔径的晶片数量）
- 选择用于设置探头孔径的全部晶片数量
- 线性扫查的晶片步距（确定所定义的孔径在探头中移动的方式）
- 所需的聚焦深度，这个深度需小于近场长度（N），以有效地建立焦点。

- 检测角度

对于 S 扫描，这个参数包含 3 个参数的设置：

- 扫查的第一角度
- 扫查的最后角度
- 角度步距

5.2 垂直声束线性扫查

垂直声束的线性扫查通常比较容易通过视图得到概念化的体现，因为其扫查图像一般为测试样件简洁的横截面视图。如在第 3 章中所述，相控阵系统通过沿线性阵列探头的长边所进行的电子扫查，无需移动探头，即可创建一个横截面剖面图。当以序列方式使用每个聚焦法则时，相关的 A 扫描被数字化并被绘制成图。连续的孔径被“排列”在一起，生成一幅实时横截面图像。其效果与通过在测试样件上移动常规单晶探头并以所选的间隔保存数据的方法创建的 B 扫描相似。要发挥线性阵列扫查的全部优势，一般最少需要 32 个晶片。更常使用的是 64 个晶片。晶片越多，可供声束步进移动的孔径会越多，从而可提高灵敏度，增强聚焦能力，还可扩大检测区域。

实际上，这种电子扫查是实时进行的，因此在探头进行物理位移的同时，会在屏幕中连续看到工件的实时横截面图像。实时横截面图中显示材料中反射体的真实深度，以及一般来说相对于探头组合件前沿的实际位置。图 5-3 中的图像显示了检测试块中的几个孔洞。检测所使用的线性相控阵探头型号为 5L64-A2，含 64 个晶片，频率为 5 MHz。探头的晶片间距为 0.6 毫米。

在这个示例中，用户将聚焦法则编程如下：16 个晶片为一个孔径，下一个孔径包含向前错一个晶片的 16 个晶片，序列发射是按顺序连续触发这些孔径的过程。因此孔径 1 包含晶片 1 到 16，孔径 2 包含晶片 2 到 17，孔径 3 包含晶片 3 到 18，依次类推。这样会生成 49 个单个波形，这些波形排列在一起，可以创建一个在探头长边方向上的实时横截面图像。

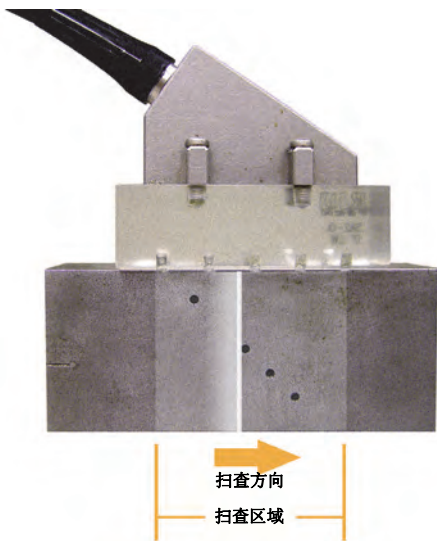


图 5-3 垂直声束的线性扫查

得到的图像可清晰显示扫查区域内 3 个孔的相对位置（参见图 5-4）。在这个图像旁还显示有由一个所选孔径生成的 A 扫描波形图。本例中的所选孔径为第 30 个孔径（共有 49 个孔径），这个孔径所包含的晶片编号从 30 到 46，由用户可控制的蓝色光标标示。声束与工件中第二个孔洞相交的点显示在 A 扫描波形图中。

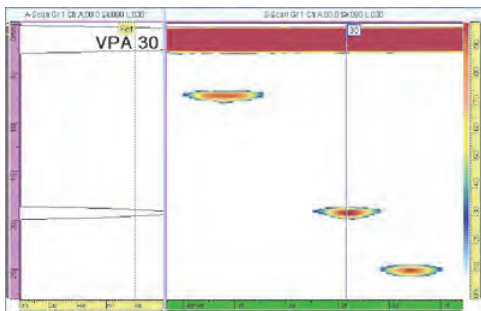


图 5-4 垂直声束的线性扫描图

屏幕左侧的垂直标尺表明 A 扫描中特定峰值对应的反射体的深度或距离。A 扫描中的水平标尺表明相对的回波波幅。线性扫描图像下方的水平标尺表明反射体相对探头前沿的位置，屏幕右侧的彩色标尺将图像的色彩与信号波幅联系起来。

此外，还可以对仪器进行设置，使一个包含“所有法则”的 A 扫描出现在屏幕上。这个 A 扫描是一个显示来自所有孔径的波形的复合图像。在本例中，A 扫描包含来自闸门区域内所有 4 个孔的指示信号。这种模式在零度检测中尤其有用，不过对于能产生多重回波的形状复杂的工件来说，这种图像会显得有些混乱。在图 5-5 示例中，屏幕上显示的是一个包含“所有法则”的 A 扫描。在这个 A 扫描中，来自全部孔径的信号被汇总在一起，因此可以同时显示所有 3 个孔的缺陷指示信号。

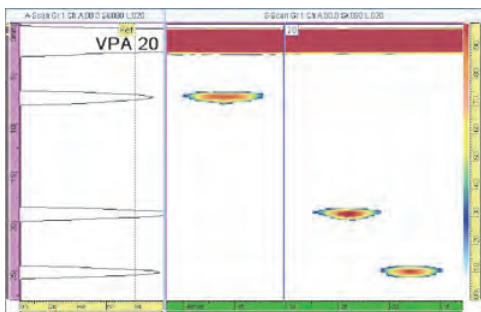


图 5-5 垂直声束的线性扫描图及包含所有法则的 A 扫描

此外，某些更高级的仪器还有另一种 A 扫描源模式。在这种模式下，A 扫描源于闸门区域内的第一个信号或最大波幅信号。

5.3 角度声束线性扫查

我们还可以一个固定的角度进行线性扫查，这种情况很像使用一个常规单晶角度声束探头进行扫查。声束以单一固定角度沿探头长边进行扫查，可使用户在不移动探头的情况下，探测到材料中更大的体积范围（参见图 5-6）。这种扫查模式可以节省检测时间，特别是在使用一个探头以一个固定的距离对整个焊缝体积进行焊缝扫查的应用中。

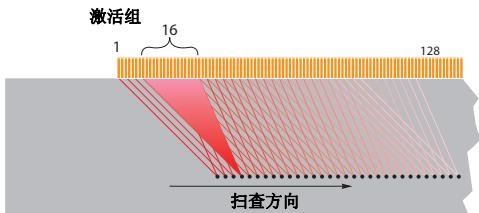


图 5-6 沿探头长边进行的单角度声束扫查

在图 5-7 的示例中，声束以 45 度角对被测样件进行扫查，并逐一与 3 个孔相交（上图）。在进行每个序列的扫查时，声束入射点（BIP），即声能离开楔块的点位置，也会从左向右移动。A 扫描表现在任一时刻当前孔径的回波情况，而 S 扫描显示来自所有声束位置的汇总图像（下图）。

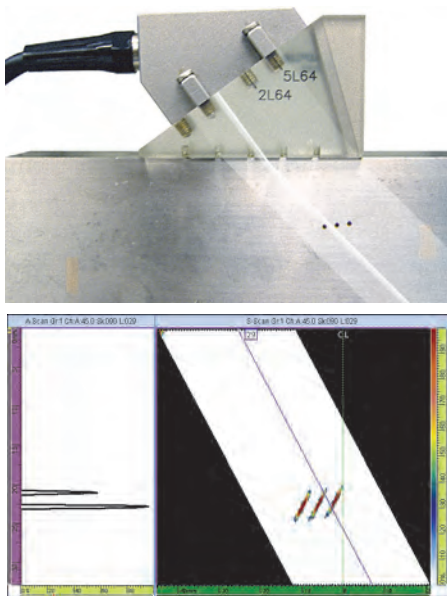


图 5-7 角度声束线性扫查 (上图), A 扫描和线性扫描视图 (下图)

在对不是很厚的材料进行角度扫查时,还必须考虑到落在第一个跨度以外的反射体的实际位置,这是声束第一次碰到被测工件的底面得到反射的位置。通常在检测某些典型的管材或板材时,会出现这种情况。在图 5-8 的示例中,当声束从左向右扫查时,从探头中心发出的声束遇到钢板的底部反射回来,并在第二个跨度上碰到参考孔。

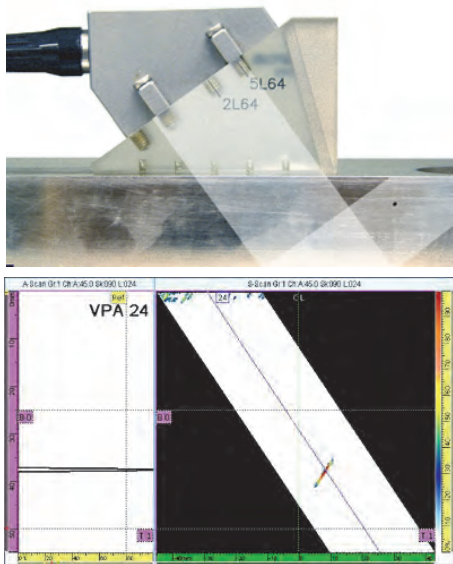


图 5-8 对第二跨度上的反射体的测量

在这个屏幕视图中，两条水平虚线光标表明图像中第一个跨度的终点和第二个跨度的终点位置。因此，这个落在两条水平光标之间的孔的指示信号被确定为出现在第二个声束跨度上。注意，屏幕左侧的深度标尺只可对第一个跨度中的信号指示直接进行精确的测量。要测量第一个跨度以外的缺陷指示的深度，还需减去被测样件的厚度（本例中样件的厚度为 25 毫米）。如果缺陷指示在第二个跨度上，则减去一个厚度；如果缺陷指示在第三个跨度上，则需减去 2 倍的厚度。大多数仪器都可以自动进行计算，并将结果显示在屏幕上，如第 4 章所述。

5.4 S 扫描显示示例

对 S 扫描的判读工作可能会更复杂一些，因为视图中会汇集多个从被测样件底部及顶部发出的信号。针对第一个跨度（声束从入射点到第一次到达样件底部并得到反射之间的声程部分），视图显示为被测样件的简单的楔形横截面图。然而，针对第一个跨度以外的区域，就需要更仔细地对视图进行判读，正如使用常规探伤仪进行检测的情况。

与普通角度声束组合件一起使用的常规探伤仪会显示一个单一角度的 A

扫描。新式数字式仪器则使用三角函数计算方法，基于测得的声程长度和在仪器中设定的工件厚度，计算反射体的深度和表面距离。工件的几何形状可能会在屏幕上的第一个跨度和第二个跨度上同时产生指示信号，如图 5-9 所示，此图中使用的是 5 MHz 探头和 45 度楔块。在本例中，声束的一部分碰到工件底部的刻槽得到反射，声束的另一部分被向上反射，然后碰到工件左上方的棱角。在这种情况下，可以使用跨度指示器和距离计算器确定反射体的位置（参见图 5-10）。



图 5-9 常规角度声束检测

第一个跨度上的较大反射信号指示源自被测工件底部的刻槽。图 5-10 中，深度指示器（位于屏幕图像的左上角）显示对应于 25 毫米厚的工件底部位置的数值，跨度指示器（位于屏幕图像的右下角）显示信号来自第一个跨度。

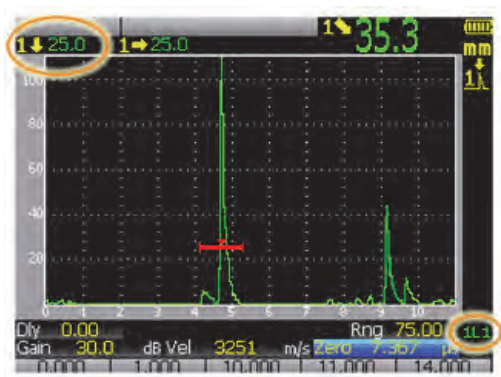


图 5-10 第一个跨度上的缺陷指示

第二个跨度上的缺陷指示是源自工件上面棱角的较弱反射。在图 5-11 中，深度指示器显示对应于 25 毫米厚的样件顶部位置的数值，跨度指示器显示信号来自第二个跨度。（由于声束扩散的特点，实际深度和等效距离的测量值会分别与所期望的 0 毫米和 50 毫米额定值有些许差异）。

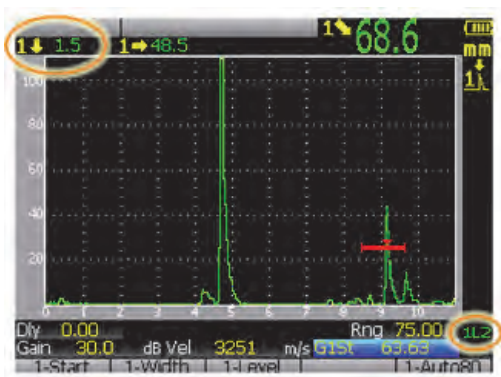


图 5-11 第二跨度上的缺陷指示

当使用 5 MHz 相控阵探头组合件做相同的检测，扫查角度范围在 40 度到 70 度之间时，屏幕上会出现根据在这个角度范围内得到的数据绘出的 S 扫描，同时还会伴随出现一个 A 扫描，这个 A 扫描一般代表在一

个所选角度分量下进行扫查获得的信息。三角函数算法使用测得的声程长度和在仪器中设定的工件厚度，计算每个角度下反射体的深度和表面距离。在这类检测中，由于工件的几何形状，可能会在屏幕上同时生成第一跨度和第二跨度指示，以及来自单一角度的多个反射体的指示。跨度指示器以水平线的形式叠加在波形和图像之上，将屏幕分割成第一、第二、第三个跨度区域，而距离计算器则有助于确定反射体的位置。

在图 5-12、图 5-13 和图 5-14 的 S 扫描示例中，我们可以看到在探头处于同一个位置，以 40 度到 70 度范围内的角度进行扫查的过程中，探测到的 3 个指示信号。以 58 度角度扫查的声束在试块底部刻槽处发生反射，在第一个跨度区域内生成指示信号。以 69 度角度扫查的声束在试块底部边角处发生反射，在第一跨度区域内生成了另一个缺陷指示。同时，以 42 度角度扫查的声束在碰到试块底部得到反射，再碰到试块表面得到反射，生成了另一个反射于试块底部边角的指示信号，这个信号在第 3 个跨度区域中。

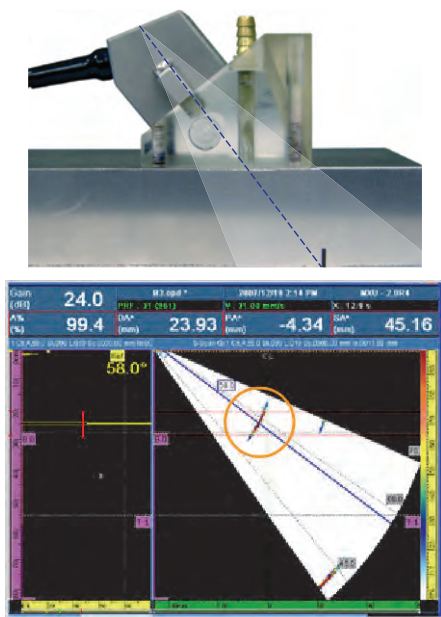


图 5-12 58° 声束的扫查情况

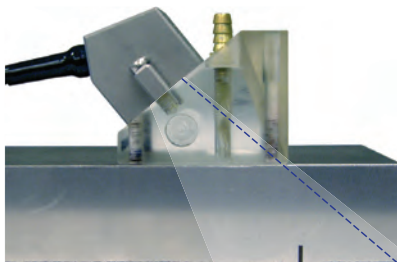


图 5-13 69° 声束的扫查情况

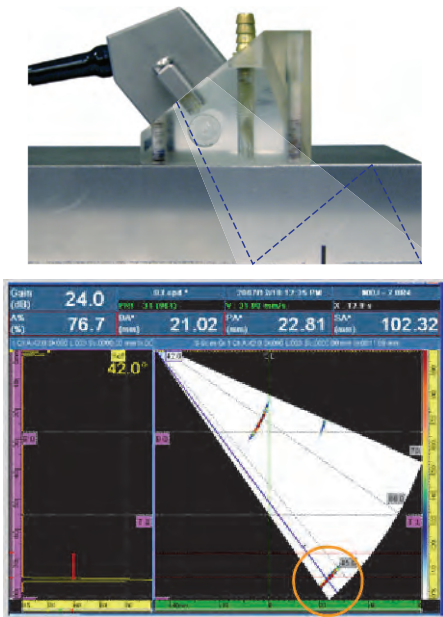


图 5-14 42° 声束的扫查情况

5.5 反射体的定位

相控阵仪器与高质量的常规超声探伤仪一样，都提供用于定位缺陷以及其它反射体的软件工具。一般来说，这些仪器都可进行以下定位操作：（1）反射体相对于探头的水平位置；（2）反射体相对于材料表面的深度；（3）声束入射点到反射体的声程距离。此外，在使用反射跳跃声程时，仪器会确认反射体所处的跳跃跨度的区域。

首先需要注意的是：声束入射点（声束中心离开楔块的点）对于常规楔块来说是一个固定的点（图 5-15a），而对于相控阵楔块来说，是一个移动的点（图 5-15b）。在线性扫查过程中，声束入射点会随着扫查的进行，沿探头长边循序移动。在扇形扫查的过程中，以不同角度发射的声束在楔块上不同的点处穿出楔块。

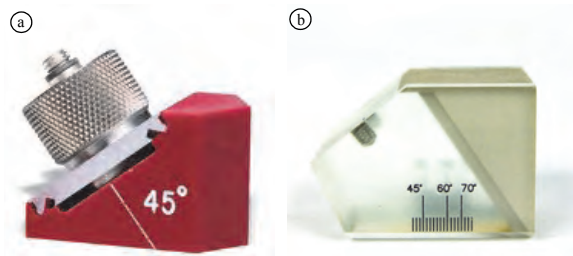


图 5-15 常规楔块上的声束入射点（图 a）及相控阵楔块（图 b）

常规探伤仪一般将楔块上的单一声束入射点作为参考点，计算深度和距离。由于相控阵探头的声束入射点会发生变化，因此常用的做法是基于楔块前沿的位置而不是 BIP 点计算缺陷的位置。可以根据声束信息计算图 5-16 中显示的几个距离：

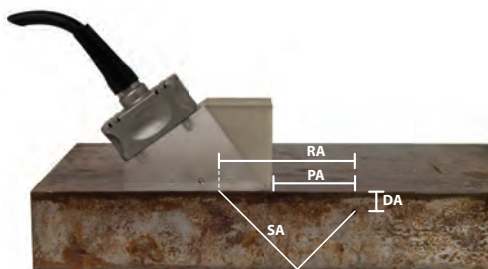


图 5-16 说明缺陷位置的几个距离

- DA = 闸门 A 中反射体的深度
- PA = 楔块尖端到反射体的水平距离
- RA = 楔块参考点到反射体的水平距离
- SA = 到反射体的声程长度

在这种显示视图中，第一跨度和第二跨度区域之间的界限，以及第二跨度和第三跨度区域之间的界限由水平虚线标出。在下面的示例中，试块底面边角的反射体出现在第一和第二跨度区域的过渡边界上（图 5-17），试块顶部边角的反射体出现在第二和第三跨度区域的过渡边界上（图 5-18）。此外，屏幕上部的读数显示反射体的位置。



图 5-17 底面边角位置的反射体



图 5-18 上面边角位置的反射体

在某种意义上，我们可以说第二个跨度被作为声束以直线传播的连续部分投射在屏幕的图像中。实际上，在被测样件中声束应从底部向上反射，而在屏幕图像中，声束被显示为沿着同一个轴持续传播的状态（参见图 5-19）。

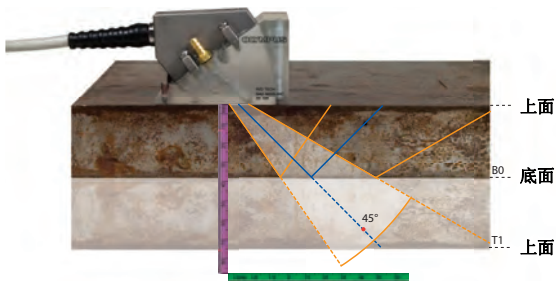


图 5-19 对应于测试样件中的声程的第二跨度的显示

附录 A：有关常量及适用公式的表

表 A-1 主要超声参数及其定义或关系

参数	定义 / 公式 / 单位 / 注释
纵波（压缩） 声速 （表 A-2）	$v_L = \left[\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)} \right]^{0.5}$ （米 / 秒；毫米 / 秒；英寸 / 秒） 其中： E = 弹性模量（杨氏模量） [N/m ²] ρ = 质量密度 [kg/m ³] μ = 泊松比； $\mu = \frac{(E-2G)}{2G}$ G = 剪切模量 [N/m ²]
横波（剪切波） 声速 （表 A-2）	$v_T = \left[\frac{E}{2\rho(1+\mu)} \right]^{0.5}$ （米 / 秒；毫米 / 秒；英寸 / 秒）
瑞利波声速	$v_R = \left[\frac{(0.87 + 1.12\mu)}{(1+\mu)} \right] v_T$ （米 / 秒；毫米 / 秒；英寸 / 秒）
频率	$f = \frac{n}{t}$ ； 特定时间内震动的次数； $\text{MHz} = 10^6 \text{ Hz} = \frac{10^6}{\text{s}}$ ； 以及： $f = \frac{c}{\lambda}$
波长 （表 A-3）	$\lambda = \frac{v}{f}$ ； 以及 $\lambda = \frac{PL}{CN}$ （毫米 / 英寸） PL = 脉冲长度 ($v \cdot \Delta t - 20 \text{ dB}$) （毫米 / 英寸） CN = 周期次数

表 A-1 主要超声参数及其定义或关系 (接上页)

参数	定义 / 公式 / 单位 / 注释
近场长度 (圆盘) (表 A-4)	$N_0 = \frac{(D^2 - \lambda^2)}{4\lambda} ;$ 在 $\frac{D}{\lambda} > 10$ 情况下, $N_0 = \frac{D^2 f}{4v}$ (毫米 / 英寸) D = 激活晶片直径 (毫米 / 英寸)
近场长度 (矩形) (表 A-5)	$N_{\text{矩形}} = \frac{k_{\square} L^2 f}{4v}$ (毫米 / 英寸)
近场长度 (有效值)	当晶片为圆盘时, $N_{\text{eff}} = \left(\frac{D^2 f}{4v} \right) \cdot \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \right)^2$ (毫米 / 英寸); 当楔块上为矩形晶片探头时, $N_{\text{eff } \square} = \frac{k_{\square} \left(\frac{L_{\text{探头}} \cos \beta}{\cos \alpha} \right)^2 f}{4v_{\text{测试样件}}} - \frac{L_{\text{楔块}} v_{\text{楔块}}}{v_{\text{测试样件}}}$ D = 激活晶片直径 (毫米 / 英寸) α = 入射 (楔块) 角度 [°] β = 被测样件的折射角度 [°] L = 晶片长度 (毫米 / 英寸) $L_{\text{楔块}}$ = 楔块中的 UT 声程 (毫米 / 英寸) $v_{\text{楔块}}$ = 楔块中的声速 (米 / 秒; 毫米 / 微秒; 英寸 / 微秒) $v_{\text{被测样件}}$ = 被测样件的声速 (米 / 秒; 毫米 / 微秒; 英寸 / 微秒) k_{\square} = 近场校正因子
声束直径 (圆盘)	$\Phi_{-\Delta \text{dB}} = \frac{2k_{\text{自由场}} \lambda z}{D}$ [1] (毫米 / 英寸) z = UT 声程 (毫米 / 英寸); $\Phi_{(-6 \text{ dB}) \text{ PE}} = \frac{\lambda z}{D}$
声束宽度 (矩形)	$\Phi_{(-\Delta \text{dB}) \text{ W}} = \frac{2k_{\text{自由场}} \lambda z}{W}$ (毫米 / 英寸) W = 晶片宽度 (毫米 / 英寸)

表 A-1 主要超声参数及其定义或关系 (接上页)

参数	定义 / 公式 / 单位 / 注释
声柱长度 (矩形)	$\Phi_{(-\Delta\text{dB})L} = \frac{2k_{\text{自由场}}\lambda z}{L}$ (毫米 / 英寸)
半角声束散射 (圆盘)	$\gamma_{-\Delta\text{dB}} = \text{asin}\left(\frac{k_{-\Delta\text{dB}}\lambda}{D}\right)$ [rad/°]; $\gamma_{(-3\text{ dB})\text{自由场}} = \gamma_{(-6\text{ dB})\text{脉冲回波}} \approx \frac{0.5\lambda}{D}$ [rad / °] $k_{-\Delta\text{dB}}$ = 半角声束散射常量 [1]
半角声束散射 (矩形)	$\gamma_{(-6\text{ dB})L} = \text{asin}(0.44\lambda/L)$ [rad/°] $\gamma_{(-6\text{ dB})W} = \text{asin}(0.44\lambda/W)$ [rad/°]
声阻抗	$Z = v \cdot \rho$ [kg/m ² s = Rayl] (一般为 10 ⁶ [MRayl]) (参见表 A-2)
反射系数	$R = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_1 + Z_2)}$
透射系数	$T = \frac{2Z_2}{(Z_1 + Z_2)}$
传输损耗	$\Delta G_{\text{传输}} = -10 \log_{10} \left[\frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right]$ [dB]
斯涅尔定律	$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}$

表 A-2 材料的声学特性

材料	纵波声速		横波声速		声学阻抗
	in./ μ s	m/s	in./ μ s	m/s	kg/m ² s $\times 10^6$
丙烯酸 (类) 树脂 (有机玻璃)	0.107	2,730	0.056	1,430	3.22
铝	0.249	6,320	0.123	3,130	17.06
铍	0.508	12,900	0.350	8,880	23.50
船用黄铜	0.174	4,430	0.083	2,120	37.30
铜	0.183	4,660	0.089	2,260	41.61
金刚石	0.709	18,000	0.485	12,320	63.35
甘油	0.076	1,920	-----	-----	2.42
铬镍铁合金	0.229	5,820	0.119	3,020	49.47
铸铁 (慢浇筑 / 软质)	0.138	3,500	0.087	2,200	25.00
铸铁 (快浇注 / 硬质)	0.220	5,600	0.126	3,200	40.00
氧化铁 (磁铁)	0.232	5,890	0.128	3,250	30.70
铅	0.085	2,160	0.028	700	24.29
人造荧光树脂	0.106	2,680	0.050	1,260	3.16
钼	0.246	6,250	0.132	3,350	63.75
发动机油 (SAE 20 / 30)	0.069	1,740	-----	-----	1.51
纯镍	0.222	5,630	0.117	2,960	49.99
聚酰胺 (慢)	0.087	2,200	0.043	1,100	2.40
聚酰胺 (尼龙, 快)	0.102	2,600	0.047	1,200	3.10
高密度聚乙烯 (HDPE)	0.097	2,460	0.051	1,295	2.36
低密度聚乙烯 (LDPE)	0.082	2,080	0.025	645	1.91
聚苯乙烯	0.092	2,340	0.046	1,160	2.47
聚氯乙烯 (硬 PVC)	0.094	2,395	0.042	1,060	3.35
Rexolite	0.092	2,330	0.045	1,155	2.47
橡胶 (聚丁二烯)	0.063	1,610	-----	-----	2.43
硅	0.379	9,620	0.206	5,230	22.50
硅酮	0.058	1,485	-----	-----	1.56
1020 钢	0.232	5,890	0.128	3,240	45.41
4340 钢	0.230	5,850	0.128	3,240	45.63
302 奥氏体不锈钢	0.223	5,660	0.123	3,120	45.45
347 奥氏体不锈钢	0.226	5,740	0.122	3,090	45.40
锡	0.131	3,320	0.066	1,670	24.20
钛, Ti 150A	0.240	6,100	0.123	3,120	27.69
钨	0.204	5,180	0.113	2,870	99.72
水 (20 °C)	0.058	1,480	-----	-----	1.48
锌	0.164	4,170	0.095	2,410	29.61
锆	0.183	4,650	0.089	2,250	30.13

表 A-3 工业 UT 检测中最常用检测材料的波长

频率 [MHz]	波长			
	纵波		横波	
	[mm]	[in.]	[mm]	[in.]
水 耦合剂 				
1	1.5	0.059	-	-
2	0.75	0.030	-	-
4	0.4	0.016	-	-
5	0.3	0.012	-	-
10	0.15	0.006	-	-
甘油 (Hamikleer) 耦合剂 				
1	1.9	0.075	-	-
2	0.95	0.037	-	-
4	0.48	0.019	-	-
5	0.38	0.015	-	-
10	0.19	0.008	-	-
有机玻璃 楔块 				
1	2.7	0.106	-	-
2	1.35	0.053	-	-
4	0.75	0.030	-	-
5	0.54	0.021	-	-
10	0.27	0.011	-	-
Rexolite 楔块 				
1	2.3	0.091	-	-
2	1.15	0.045	-	-
4	0.58	0.023	-	-
5	0.46	0.018	-	-
10	0.23	0.009	-	-
钢 被测样件 				
1	5.9	0.232	3.2	0.126
2	3	0.118	1.6	0.063
4	1.5	0.059	0.8	0.032
5	1.2	0.047	0.6	0.024
10	0.6	0.024	0.3	0.012
铝 被测样件 				
1	6.1	0.240	3	0.118
2	3	0.118	1.5	0.059
4	1.5	0.059	0.8	0.032
5	1.2	0.047	0.6	0.024
10	0.6	0.024	0.3	0.012

表 A-4 圆晶片的近场长度（单位为毫米）

频率 [MHz]	晶片直径 [mm]					
	5	6	10	12	20	24
水；纵波；$v = 1.5 \text{ mm/s}$						
1	4.2	6	17	24	68	96
2	8.4	12	34	48	136	192
4	17	24	68	96	272	384
5	21	30	85	120	340	480
10	42	60	170	240	680	920
钢；纵波；$v = 5.9 \text{ mm/s}$						
1	1	1.5	4	6	16	24
2	2	3	8	12	32	48
4	4	6	16	24	64	96
5	5	7	20	30	80	120
10	10	15	40	60	160	240
钢；横波；$v = 3.2 \text{ mm/s}$						
1	2	3	8	12	32	48
2	4	6	16	24	64	96
4	8	12	32	48	128	192
5	10	15	40	60	160	240
10	20	30	80	120	320	480
铜；纵波；$v = 4.7 \text{ mm/s}$						
1	1.3	2	5	8	20	32
2	2.6	4	10	16	40	64
4	5	8	20	32	80	128
5	6.5	10	26	40	104	160
10	13	20	52	80	208	320
铝；纵波；$v = 6.3 \text{ mm/s}$						
1	1	1.4	4	6	16	24
2	2	3	8	12	32	48
4	4	6	16	24	64	96
5	5	7	20	30	80	120
10	10	14	40	60	160	240

表 A-5 矩形晶片的近场长度（mm × mm）和在 -6 dB [°] 下的声束半角散射 — 钢中横波（ $v = 3,250 \text{ m/s}$ ）

频率 [MHz]	6 × 6		8 × 9		16 × 16		20 × 22	
	N_0	γ	N_0	γ	N_0	γ	N_0	γ
1	N/A	N/A	8	10	32	5	45	4
2	9	6	15	5	64	2.5	90	2
4	N/A	N/A	30	2.5	128	1.2	180	1
5	20	2.5	40	2	160	1	225	0.8

附录 B：单位换算

本附录将手册中使用的公制单位换算为美制单位。

表 B-1 公制单位到美制单位的换算

测量类别	公制单位	美制单位
长度	1 mm (毫米)	= 39.37 mils (英里) = 0.03937 in. (英寸)
	1 cm (厘米)	= 0.3937 in. (英寸)
	1 m (米)	= 39.37 in. (英寸) = 3.28 ft (英尺)
面积	1 cm ² (平方厘米)	= 0.155 in. ² (平方英寸)
	1 m ² (平方米)	= 10.7639 ft ² (平方英尺)
声速	1 mm/ μ s (厘米 / 微秒)	= 0.03937 in./ μ s (英寸 / 微秒)
	1 m/s (米 / 秒)	= 3.28 ft/s (英尺 / 秒) = 196.85 ft/min (英尺 / 分)
质量	1 g (克)	= 0.03527 oz (盎司)
	1 kg (公斤)	= 35.2739 oz (盎司) = 2.20462 lb (磅)
质量密度	1 kg/m ³ (公斤 / 立方米)	= 0.062428 lb/ft ³ (磅 / 立方英尺)

表 B-1 公制单位到美制单位的换算 (接上页)

测量类别	公制单位	美制单位
声阻抗	1 kg/m ² s (公斤 / 平方米 · 秒)	= 0.001423 lb/in. ² s (磅 / 平方英寸 · 秒) = 0.204816 lb/ft ² s (磅 / 平方英尺 · 秒)
温度	°C	= (5/9) × (°F - 32)
	°C × 1.8 + 32	= °F

附录 C：技术支持与培训

支持

Olympus 为广大用户提供了在网上论坛参加讨论的机会。参加撰写《相控阵检测：在工业应用方面的基本理论》指导手册的专家会在线解答您的问题，而且会贴入有关相控阵技术及其实际应用方面的更多信息。

尽情浏览这个属于我们大家的论坛上的庞大信息吧，您可以贴入自己的问题，也可以发表自己的观点。

我们的网站论坛链接地址如下：

www.olympus-ims.com/en/forum/

培训

Olympus IMS 网站 (www.olympus-ims.com) 提供各种信息，旨在帮助用户了解相控阵产品及其它 Olympus 的检测和维护仪器。

初级和高级相控阵培训课程由 Olympus 的培训伙伴在世界各地的培训基地提供。这些课程除了讲解基本理论知识以外，还为学员提供亲手实际操作、解决具体问题的训练机会。查找网站上详细培训信息的路径如下：

主页 > 技术支持 > 培训学院

我们还提供交互式自学基本相控阵理论的辅导课程，路径如下：

主页 > 知识 > 相控阵 > 相控阵辅导

我们的在线研讨会涉及多个相关的技术主题，其路径如下：

主页 > 知识 > 相控阵 > 在线研讨会

Olympus IMS 网站的应用注解部分中有多篇说明具体的相控阵检测应用的文章。其路径如下：

主页 > 应用

最后，您还可以通过填写“应用支持”表格，获得有关 Olympus 的无损检测设备、产品发布、应用及技术支持的更详细信息。找到表格的路径如下：

附录 D： 现有设备类型

正如其它类别的超声检测设备，相控阵系统同样具有各种各样的型号。随着各种型号设备复杂性的增加，设备的性能也越来越强大。相控阵仪器的基本型号使用 16 晶片的探头可以进行简单的扇形和线性扫查；而高级相控阵系统具有多通道性能，带有高级解读软件，并可以使用多达 256 个晶片的探头进行检测。

Olympus 提供一套完整的 NDT 系列设备。要了解更详细的信息，请查询我们的网站：

www.olympus-ims.com/en

本附录对以下设备进行概括介绍：

- EPOCH 1000 系列 — 带有相控阵成像功能的高级超声探伤仪
- OmniScan 系列 — 利用 UT、PA、EC、ECA 技术的模块化高级探伤仪
- TomoScan FOCUS LT — 强大、灵活、小巧的 UT 数据采集系统
- TomoView — UT 数据采集和分析软件

D.1 EPOCH 1000 系列 — 带有相控阵成像功能的高级超声探伤仪

EPOCH 1000 系列探伤仪将常规便携式探伤仪的顶级性能和相控阵成像功能结合在一起。EPOCH 1000、1000iR、1000i 的机身结构横宽竖窄，配有全 VGA 显示、飞梭和用于参数调节的浏览箭头，且完全符合 EN12668-1 标准。EPOCH 1000 系列的高级常规超声性能在具有相控阵成像功能的 EPOCH 1000i（见下图）中得到了加强。



主要特性

- 配有相控阵成像套装功能
- 符合 EN12668-1 标准
- 37 个数字式接收器滤波器选项
- 6 kHz 脉冲重复频率，用于高速扫查
- 自动相控阵探头识别
- 直观的楔块延迟和灵敏度校准，针对所有聚焦法则
- 可编程模拟 / 报警输出
- 符合 IP66 环境评级，可用于恶劣的检测环境
- 横宽竖窄的仪器面板设计，可利用浏览键区和飞梭旋钮对参数进行调节
- 数字式高动态范围接收器
- 阳光下可读的全 VGA 显示屏
- ClearWave Visual Enhancement（视觉增强）软件包，用于常规 A 扫描解读
- SureView 显示功能
- 参考光标和测量光标

- 标准动态 DAC/TVG
- 标准机载 DGS/AVG

D.2 OmniScan 系列 — 利用 UT、PA、EC、ECA 技术的模块化高级探伤仪

OmniScan（见下图）是 Olympus NDT 公司最成功的便携式模块化相控阵和涡流阵列检测仪器，目前在世界各地有数千台仪器在使用中。OmniScan 的系列模块产品包括创新型相控阵和涡流阵列检测模块，以及常规涡流和超声模块。所有这些模块的设计宗旨是要满足无损检测操作中最苛刻的要求。

便携式模块化的 OmniScan 仪器具有很高的采集速率和强大的软件功能，可以有效地执行手动和自动检测。



主要特性

- 坚固、便携、电池供电
- 机形小巧、重量极轻（仅 4.6 公斤，合 10.1 磅）
- 8.4 英寸显示屏，实时显示（60 Hz 的 A 扫描刷新率），SVGA 分辨率为 800 × 600
- 相控阵模块与软件：
16:16、16:16M、16:64M、16:128、32:32、32:128 相控阵模块
- 功能完善的 A 扫描、B 扫描和 C 扫描显示
- 功能完善的 S 扫描显示
- 实时体积校正显示
- 高级实时数据处理
- 采集数据时，实时数据插值改进了缺陷的空间显示
- 用户可选的高通、低通滤波器提高了 A 扫描和其它图像的质量
- 用于配置组和聚焦法则的向导

D.3 TomoScan FOCUS LT — 强大、灵活、小巧的 UT 数据采集系统

TomoScan FOCUS LT（见下图）的设计宗旨是满足用户在自动 UT 检测方面所提出的极为严苛的要求。这款作为超声领域新基准的超声相控阵仪器，可以使用多种探头配置，进行性能极高的常规 UT 和超声相控阵检测。

这款 TomoScan FOCUS LT 仪器重量更轻便、机形更小巧，可为更高级的检测应用提供更可靠的解决方案。TomoScan FOCUS LT 还具有 3U 架式款型。



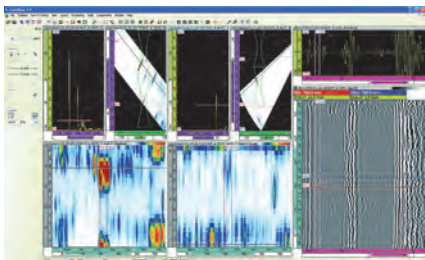
主要特性

- 功能齐全、基于 PC 机的软件，可进行数据采集及分析（TomoView）
- 多通道或相控阵探头的配置
- 将相控阵与常规 UT 配置结合在一起（TOFD + P/E）
- 文件大小可达 1 GB
- 快速 100Base-T 数据传输（4 MB/s）
- 配置可达 64:128
- 脉冲重复频率（PRF）高达 20 kHz
- 实时数据压缩及信号平均
- 可与外置电机控制器和扫查器相接

D.4 TomoView — UT 数据采集和分析软件

TomoView 是一个基于 PC 机的软件，用于超声信号的数据采集和显示。由于这个软件对超声参数的配置具有很大的灵活性，而且可以显示不同的视图，因此可被用于工业及研究领域的很多应用中。TomoView 软件的设计目的是用于多款 Olympus 相控阵（PA）或常规超声（UT）仪器，进行超声检测应用的数据采集。

TomoView 可与 Microsoft Windows、XP、Windows Vista、Windows 7 兼容，既可以在标准笔记本电脑中有效运行，也可以用于高端台式工作站中。它可以处理大容量的数据文件（容量最大为 1 GB）。此外，TomoView 读取 OmniScan（.oud、.opd）数据文件的能力以及方便使用的报告能力使其成为解读 OmniScan 数据的一个理想工具。



- 分析 UT 数据的强大工具
- 采集和分析
- 灵活的数据成像能力
- 轻易生成综合性报告的能力
- 对 OmniScan 的完美补充
- 离线对 A 扫描、B 扫描、C 扫描、D 扫描和 S（扇形）扫描进行分析
- 测量工具、放大功能，以及可自行定制的彩色调色板
- 与高级聚焦法则计算器相兼容

除了功能齐全的 TomoView 软件程序，Olympus 还提供 TomoView Lite 软件和 TomoVIEWER 软件。

TomoView Lite 是一个主要用于分析 OmniScan 数据文件的 TomoView 版本。这个软件汇集了 TomoView 的主要功能，如：体积视图、融合视图及多组显示。

TomoVIEWER 是一个用于观察相控阵和超声数据的免费软件。这个软件可以导入由 TomoView 或 OmniScan PA 和 UT 软件生成的数据文件。

相控阵术语表

A 扫描

根据随时间而变化的波幅绘出的超声波形。这个波形可以被校正，也可以保持非校正状态（RF）。

角度校正增益（ACG）

这是一种应用于S扫描的增益补偿，目的是使来自同一特定反射体的响应在组成S扫描的每个角度上都达到一样的波幅。

衍射控像法

是由计算机控制的一个功能：将较低的激励电压施加到阵列边缘处的晶片，以降低不想要的旁瓣的波幅。

孔径

在相控阵检测中，同时被脉冲激励的晶片或晶片组的宽度。

方位角扫描

S扫描的另一种说法。这是一个二维视图，包含来自一个相控阵探头的全部聚焦法则的全部波幅和时间或深度数据，这个视图已经过延迟及折射角度的校正。此外，S扫描还可理解为扇形扫描，即声束以不同的角度扫描工件的操作。

B 扫描

超声数据的两维图像，表现相对于声束位置的反射体的深度或距离。B扫描可以是单值B扫描，也可以是横截面B扫描。

横截面 B 扫描

超声数据的两维图像，在每个数据点保存完整的波形，可以显示出横截面中的所有反射体，而不是只显示第一个或最大的一个反射体。这种图像可以显示样件内部近表面和远表面的反射体。

单值 B 扫描

基于闸门内第一个或最大的一个反射体绘出的两维图像。这种图像形式一般用于超声探伤仪和高级测厚仪中，只显示每个数据点上的一个反射体。

带宽

处于特定波幅范围内的频率响应的部分。在这种情况下，应该注意典型的NDT探头不会在单一的频率下生成声波，而只能在以额定的频率值为中心的频率范围内生成声波。工业标准将这个带宽确定在

-6 dB（或半波幅）的位置处。一般来讲，带宽越宽，近表面轴向分辨率越好；带宽越窄，能量输出越高，因此灵敏度也越高。

声束形成

在相控阵检测中，通过对阵列探头中各个晶片的序列脉冲激励，会在特定位置、以特定角度、和 / 或特定的聚焦形式，生成声束。

声束扩散角度

声束在其远场从其中心线算起的扩散角度。

声束电子偏转

改变由相控阵探头生成的声束的折射角度的能力。

灵敏度校准

在相控阵扫查中，以电子方式使所有声束的波幅响应一致化的过程。这种灵敏度校准一般可补偿晶片到晶片的灵敏度差异，以及不同折射角度上能量传输的差异。

楔块延迟校准

以电子方式补偿不同声束在楔块中的不同声程之间的差异，用于使所测量的、到反射体的声程长度一致化。

C 扫描

超声波幅或时间 / 深度数据的二维视图，显示为被测样件的顶视图。

E 扫查

也称为 *电子扫查*，*步进点扫查*或*电子栅格扫查*。在某些工业中，E 扫查被称为“线性扫查”或“线性电子扫查”。这是一种在不进行任何机械运动的情况下，使声束移动的性能。等效聚焦法则在一组激活晶片之间被多路转换；E 扫查以恒定的角度，沿相控阵探头的长边进行。对于角度声束扫查，聚焦法则一般可补偿楔块厚度的变化。

远场

超过最后一个声轴上最大压力的那部分声束。声束扩散出现在远场中。

聚焦法则

聚焦法则是指在脉冲激励与接收时，对阵列探头的每个晶片所设置的时间延迟模式，进而可以电子方式对声束和回波响应进行偏转和 / 或聚焦。

焦点

在超声学中，焦点指声束汇聚并达到最小直径和最大声压的点，超过这点，声束开始扩散。

栅瓣

声束扩散到能量中心以外的突波部分，由在探头不同晶片上所进行的均匀采样引起。只有相控阵探头会产生栅瓣，小晶片之间规则和周期性的间距致使它们的声束分量合成栅瓣。另见“旁瓣”。

惠更斯原理

声波的一种数学表现模式，即行进中的波前上的每一个点可被想象成一个会产生新的球面波的点源，最后得到的统一波前就是所有这些单个球面波的总和。

线性扫查

不通过机械方式使声束沿阵列主轴移动的性能。等效的聚焦法则在一组激活晶片之间被多路转换；线性扫查以恒定的角度，沿相控阵探头的长边进行。对于角度声束扫查，聚焦法则一般可补偿楔块厚度的变化。在某些工业中，这个术语被用于说明单线扫查。

近场

探头与声轴上最后一个最大声压之间的那部分声束。探头只可在近场聚焦。

单线扫查

相控阵探头在平行于焊缝或被检区域的方向上进行的单次机械扫查。这种扫查一般使用线性阵列探头，生成一种如 C 扫描的图像，其中波幅或深度数据随电子孔径位置相对机械位置变化而变化。

相控阵探头

一种多晶片超声探头（一般为 16、32 或 64 个晶片），通过定相脉冲激励与接收方式生成电子偏转声束。

相控

两个或更多具有相同频率，但是具有不同时间延迟的声波相互作用，可以产生相互增强或抵消的干涉。

晶片间距

相控阵探头上的单个晶片之间的距离。

主动平面

平行于包含多个晶片的相控阵探头轴的方向。

被动平面，

与单个晶片的长度或探头的宽度平行的方向。

电子偏转平面

相控阵探头工作时，在其声束方向上发生变化的平面。

脉冲持续时间

波形的上升沿上代表某个波幅（一般来说是相对于峰值的 -20 dB）的一点到其下降沿上代表相同波幅的点之间的时间间隔。较宽的带宽一般可减少脉冲持续时间，而较窄的带宽会增加脉冲持续时间。脉冲持续时间与脉冲发生器的设置紧密相关。

角度分辨率

在相控阵系统中，角度分辨率是指两个 A 扫描之间的最小角度值，这两个 A 扫描能够分辨出处于同一深度的不同相邻缺陷。

轴向分辨率

两个特定反射体之间的、可以清晰辨别每个缺陷的最小深度间距。较高的频率和 / 或较高的带宽一般可增加轴向间距。

远表面分辨率

到底面的最小距离，在这个位置的特定反射体的回波波幅至少比底面回波的上升沿多 6 dB。更概括地说是可识别反射体的、到底面最近的位置。

横向分辨率

在相控阵系统中，两个特定的反射体之间的、使反射体被分别识别的最小横向距离。横向分辨率与阵列探头的设计以及所选聚焦法则的配置有关。

近表面分辨率

到声束入射面的最小距离，在这个位置的特定反射体的回波波幅至少比激励脉冲、延迟块或楔块回波的下降沿大 -6 dB。更概括地说，近表面分辨率是可识别反射体的、到声束入射面的最近距离。这个点以外的区域被称为盲区，而且随着增益的提高，这个点也会向外扩展。

S 扫描

也被称为*扇形扫查*、*角度扫查*、*角度电子扫查*，或*方位角扫查*。S 扫描是一个二维视图，包含来自一个相控阵探头的所有聚焦法则的全部波幅和时间或深度数据，经过延迟及折射角度的校正。此外，S 扫描还指声束以一系列不同的角度扫查工件的操作。

旁瓣

声束扩散到能量中心以外的突波部分，从探头晶片泄露的声压以不同于主波瓣的角度传播而生成突波。所有类型的超声探头都会生成旁瓣。另见“栅瓣”。

虚拟孔径

被同时触发的一组相控阵晶片的整个宽度。

所选参考文献

1. Olympus NDT. *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline* (相控阵超声技术应用入门手册), Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. xviii, 356 p.
2. Olympus NDT. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications* (相控阵超声技术的高级应用), Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. xvi, 394 p.
3. R/D Tech Corp. *Phased Array Technical Guidelines: Useful Formulas, Graphs, and Examples* (相控阵技术指导: 实用的公式、图表、示例), Waltham, MA: R/D Tech Corp., 2005. x, 186 p.
4. Olympus NDT. *EPOCH 1000 Series: User's Manual* (EPOCH 1000 系列: 用户手册), 手册编号: 910-269-EN. Waltham, MA: Olympus NDT, 2009 年 2 月, x, 358 p.
5. Olympus NDT. *OmniScan MXU-M Software: User's Manual* (OmniScan MXU-M 软件: 用户手册), 手册编号: DMTA081-01EN. Québec, Canada: Olympus NDT, 2009 年 10 月. x, 284 p.
6. Olympus NDT. *TomoView: User's Manual* (TomoView: 用户手册), 手册编号: DMTA079-01EN. Waltham, MA: Olympus NDT, 2009 年 11 月. viii, 160 p.
7. Olympus NDT. *Phased Array Probes and Wedges* (相控阵探头与楔块) 手册编号: 920-165C-EN. Waltham, MA: Olympus NDT, 2009 年. 24 p.
8. Olympus NDT. *Panametrics® Ultrasonic Transducers: Wedges, Cables, Test Blocks* (Panametrics 超声探头: 楔块、线缆、试块), 手册编号: 920-041D-EN. Waltham, MA: Olympus NDT, 2009 年. ii, 50 p.
9. Davis, J. M. *Advanced Ultrasonic Flaw Sizing Handbook* (高级超声缺陷定量手册), USA: The Art Room Corporation, 1998. 38 p.
10. Krautkrämer, Josef, and Herbert Krautkrämer; in collaboration with W. Grabendörfer... [et al.]. *Ultrasonic testing of materials* (材料的超声检测), Translation by J. D. Hislop in consultation with J. Krautkrämer. 4th fully rev. ed. Berlin; New York: Springer-Verlag, c1990. xvi, 677 p.

索引

数字

2 维矩阵 7

字母

ACG (角度校正增益) 54

定义 93

ASME 第五节 54

A 扫描 34

定义 93

数据 34, 35 (图 3-1)

BIP (声束入射点) 52, 60, 65, 72, 73 (图 5-15)

B 扫描

单值 B 扫描 35

定义单值 B 扫描 93

定义 93

横截面 B 扫描 36, 37 (图 3-3)

定义 93

数据 36 (图 3-2)

CN (周期次数) 77

C 扫描 2, 39

定义 94

数据 40 (图 3-6)

图像 10

DAC 57

另见 TVG

E (弹性模量) 77

EPOCH 1000 系列 88

主要特性 88

E 扫查 2

定义 94

FOCUS LT, TomoScan 91

主要特性 91

G (剪切模量) 77

m (泊松比) 77

NDT (无损检测) 5

Olympus 2

OmniScan 系列 90

主要特性 90

.opd 数据文件 92

.oud 数据文件 92

PL (脉冲长度) 77

PRF (脉冲重复频率) 44

r (质量密度) 77

S 扫描 3, 9, 10, 41

-30° 到 +30° 42 (图 3-8)

-35° 到 +70° 43 (图 3-9)

定义 96

扫查步距为 1 度 49

(图 4-1)

扫查步距为 2 度 49

(图 4-2)

扫查步距为 4 度 50

(图 4-3)

显示 67

TCG (时间校正增益) 3, 54, 57

TomoScan FOCUS LT 91

主要特性 91

TomoView Lite 软件 92

TomoVIEWER 软件 92

TomoView 软件 92

主要特性 92

TVG (时变增益) 3

TVG/DAC 57

B

半角声束散射 79

被动平面, 定义 95

比率, 信噪比 10, 26

比率常量, 宽高比 13

编码 52

编码器 35, 44

编码线性扫查 2

便携式仪器

初级 88

一般用途 90

表 77

波长 81

材料的声学特性 80

单位换算 83

核能与 ASME 的术语总结

- 近场长度
 - 矩形晶片 82
 - 圆形晶片 82
- 主要超声特性 77
- 波瓣, 光栅 31
 - 定义 94
- 波瓣, 旁瓣 31
 - 定义 96
- 波长 77, 81
- 波幅响应 60
- 波前 14
 - 形成 14
- 波形
 - 存储 51
 - 角度波形 25 (图 2-22)
 - 探头波形持续 12
 - 显示 (A 扫描) 34
- 泊松比 (m) 77
- C**
- 材料 60
- 材料, 声学特性 80
- 采集, 数据 44
- 采样率, 数字式 44
- 参考光标 52
- 参数
 - 探头 61
 - 相控阵探头的维度参数 22 (图 2-18)
 - 楔块 61, 61 (图 5-2)
- 测量技术规格 47
- 长度, 近场 78
 - 矩形晶片 82
 - 圆形晶片 82
- 长度, 声束 79
- 常量 77
 - 宽高比常量 13
- 场, 近场 12
 - 定义 95
- 场, 远场 13
 - 定义 94
- 超声定相 8
- 超声声束的特性 11
- 超声特性 77
- 成像, 相控阵基本原理 33
- 持续时间, 脉冲
 - 定义 95
- 尺寸, 探头 12
- 处理时间 44
- 传输损耗 79
- 垂直界面的反射 17
- 垂直界面的透射 17
- 垂直声束的线性扫描图
 - 包含所有法则的 A 扫描 64 (图 5-5)
- 垂直声束线性扫描 38 (图 3-4), 62, 63 (图 5-3)
- 垂直声束线性扫描图像 64 (图 5-4)
- 存储, 波形 51
- D**
- 带宽
 - 定义 93
 - 探头带宽 12
- 单角度声束扫描 65
- 单位换算 83
- 单线扫描 2, 41, 95
 - 定义 95
 - 焊缝检测 41 (图 3-7)
- 单值 B 扫描 35
- 弹性 (E), 模量 77
- 弹性模量 (E) 77
- 底面边角位置的反射体 74 (图 5-17)
- 地址, 网页 2, 85
- 第二跨度
 - 缺陷指示 69 (图 5-11)
 - 显示 75 (图 5-19)
- 第一晶片高度偏移 60
- 第一跨度上的缺陷指示 69 (图 5-10)
- 电子偏转, 声束 10, 26
 - 定义 94
 - 晶片大小 26
 - 晶片间距和孔径 26
 - 晶片数量 26
 - 频率 26
- 电子偏转极限, 声束 28 (图 2-25)
- 电子偏转平面, 定义 95
- 电子扫描
 - 定义 94
- 电子声束形成 21
- 定量 10
- 定量选项 48
- 定律, 斯涅尔 17, 24
- 定相 6
 - 超声定相 8
 - 定义 95
- 对第二跨度上的反射体的测量 67 (图 5-8)
- 对相控阵检测的介绍 5

- 多晶片结构 8 (图 1-4)
- 多图显示格式 53 (图 4-7)
- 多图像类型的显示 44 (图 3-10)
- 多组支持 52
- F**
- 法则, 聚焦 60
 - 定义 94
 - 计算器 8, 25
 - 技术规格 48
 - 设置 61
 - 序列 27 (图 2-23)
- 法则, 斯涅尔 79
- 反射体
 - 底面边角 74 (图 5-17)
 - 上部边角 74 (图 5-18)
- 反射体的定位 72
- 反射系数 17, 79
- 方位角扫查 3, 96
 - 定义 93
- 非垂直边界的反射 17
- 分辨率
 - 横向分辨率, 定义 96
 - 角度分辨率, 定义 95
 - 远表面分辨率, 定义 96
 - 周向分辨率, 定义 95
- 辅导 85
- 附录
 - 参数及其适用公式表 77
 - 单位换算 83
 - 技术支持与培训 85
 - 设备类型 87
- 复合材料探头 21
- G**
- 干涉模式 6 (图 1-1)
- 干涉效果 24 (图 2-21)
- 高度偏移, 第一晶片 60
- 高级仪器 91
- 工件厚度 60
- 公式 77
 - 另见特殊公式条目
 - 超声特性 77
- 光标
 - 参考 52
 - 角度 52 (图 4-5)
 - 角度和水平 53 (图 4-6)
- 光栅波瓣
 - 定义 94
- 规范化, 增益 54
 - 增益规范化后的响应 56 (图 4-9)
- 规范化, 增益规范化以前的响应 55 (图 4-8)
- 规范化方法 54
- H**
- 焊缝检测 9
- 横波 60
- 横波声速 77, 80
- 横截面 B 扫描 36
 - 定义 93
- 横通孔 36
- 横向分辨率, 定义 96
- 厚度, 工件 60
- 换能器 11
- 换算, 单位 83
- 惠更斯, 克里斯蒂安 (物理学家) 14
- 惠更斯原理 14, 24
 - 定义 95
- J**
- 计算器, 聚焦法则 8, 25
- 技术规格, 相控阵
 - 编码 52
 - 波形存储 51
 - 参考光标 52
 - 多组支持 52
 - 聚焦法则 48
 - 脉冲发生器数量 48
 - 脉冲重复频率 / 显示刷新率 51
 - 命名惯例 48
 - 探头识别 51
 - 通道数量 48
 - 图像类型 51
- 技术规格, 相控阵列 48
- 技术规格, 相控阵仪器 47
 - 测量与显示 47
 - 定量选项 48
 - 脉冲发生器和接收器 47
 - 输入与输出 48
- 技术支持与培训 85
 - 减少 31
 - 剪切模量 (G) 77
- 检测, 相控阵参见相控阵检测
- 检测设置 59
- 焦点, 定义 94
- 角度, 入射 60
- 角度波形 25 (图 2-22)
- 角度电子扫查 96
- 角度分辨率, 定义 95
- 角度光标 52 (图 4-5)
- 角度和水平光标 53 (图 4-6)

- 角度扫查 96
- 角度声束 9 (图 1-5)
- 角度声束检测 60
- 角度声束检测, 常规 68 (图 5-9)
- 角度声束线性扫查 65
 - 图像 66 (图 5-7)
- 角度校正增益 (ACG) 54
 - 定义 93
- 接收器技术规格 47
- 近场 12
 - 定义 95
- 近场长度
 - 环形晶片 82
 - 矩形 78
 - 有效 78
 - 圆形 78
 - 圆形晶片 82
- 晶片 11
 - 圆形晶片近场长度 82
- 晶片, 矩形
 - 近场长度 82
 - 散射声束 82
- 晶片, 数量 26
- 晶片尺寸, 探头 22
- 晶片大小 26
- 晶片间距 26, 60
 - 定义 95
- 晶片数量 21, 26, 60
- 矩形晶片 15
 - 近场长度 82
 - 散射声束 82
- 矩阵, 2 维 7
- 矩阵, 圆形 7
- 聚焦, 声束 29
 - 不同孔径尺寸 30 (图 2-27)
- 聚焦法则 60
 - 定义 94
 - 计算器 8, 25
 - 技术规格 48
 - 设置 61
 - 线性扫查所要求的数量 50
 - 序列 27 (图 2-23)
- 聚焦角度声束线性扫查 9 (图 1-6)
- 聚焦声束 29 (图 2-26)
- K**
 - 克里斯蒂安·惠更斯 (物理学家) 14
 - 孔径 26
 - 定义 93
 - 虚拟孔径 26
 - 定义 96
 - 有效孔径 27, 27 (图 2-24)
- 跨度
 - 第二跨度的显示 75 (图 5-19)
 - 第二跨度缺陷指示 69 (图 5-11)
 - 第一跨度上的缺陷指示 69 (图 5-10)
- 宽度, 声束 78
- 宽高比常量 13
- 扩散, 声束 14
 - 定义 94
- L**
 - 类型, 探头 11, 21
 - 连续变换角度扫查 3
 - 裂缝探测 9
 - 灵敏度, 探头 12
 - 灵敏度校准 94
 - 零度楔块 23
 - 零位偏移 60
 - 零位校准 54
 - 论坛, 网站 85
- M**
 - 脉冲, 相控 23
 - 脉冲长度 (PL) 77
 - 脉冲持续时间, 定义 95
 - 脉冲发生器技术规格 47, 48
 - 脉冲重复频率 (PRF) 44
 - 脉冲重复频率 / 显示刷新率 51
 - 密度, 质量 (ρ) 77
 - 命名惯例 48
 - 模量 (E), 杨氏 77
 - 模量 (G), 剪切 77
 - 模式转换 18 (图 2-10), 19
 - 非垂直边界 17
- P**
 - 旁瓣 31
 - 定义 96
 - 培训 85
 - 培训学院 85
 - 偏移, 第一晶片高度 60
 - 偏移, 零位 60
 - 频率 26, 60, 77
 - 探头频率 12, 21
 - 探头频率范围 7
 - 平均 44
 - 平面

- 被动平面, 定义 95
 - 电子偏转平面, 定义 95
 - 主动平面, 定义 95
- Q**
- 曲率, 半径 60
 - 缺陷位置, 说明 73 (图 5-16)
 - 缺陷指示
 - 第二跨度的缺陷指示 69 (图 5-11)
 - 第一跨度 69 (图 5-10)
- R**
- 融合图像形式 44
 - 入射角度 60
 - 软件
 - TomoView 92
 - 主要特性 92
 - TomoView Lite 92
 - TomoVIEWER 92
 - 数据采集和分析 92
 - 瑞利波声速 77
- S**
- 散射, 半角声束 79
 - 散射声束, 矩形晶片 82
 - 扫查
 - 编码线性 2
 - 垂直声束线性 62
 - 图像 64 (图 5-4)
 - 单线 2, 41, 95
 - 定义 95
 - 方位角 3, 96
 - 定义 93
 - 角度声束线性 65
 - 连续变换角度 3
 - 扫查角度 96
 - 扇面 3
 - 扇形 3, 96
 - 另见 S 扫描
 - 线性 2, 38
 - 定义 95
 - 扫查, 垂直声束线性 63 (图 5-3)
 - 扫查, 角度电子 96
 - 扫查, 扇形 10
 - 扫查速度 44
 - 扫查速度对采集率的影响 45 (图 3-11)
 - 扫描
 - S 扫描 另见 S 扫描
 - 扇面扫查 3
 - 另见 S 扫描
 - 扇形扫查 3, 10, 96
 - 另见 S 扫描
 - 上部边角位置的反射体 74 (图 5-18)
 - 设备类型 87
 - 初级便携式仪器 88
 - 高级仪器 91
 - 数据采集和分析软件 92
 - 一般用途便携式仪器 90
 - 设置, 检测 59
 - 设置, 聚焦法则 61
 - 设置, 仪器 59
 - 材料 60
 - 探头 60
 - 楔块 60
 - 声波
 - 属性 14
 - 折射 18 (图 2-10)
 - 声波模式的相关波幅 18 (图 2-11)
 - 声波入射角 60
 - 声场, 探头 13 (图 2-4)
 - 声束
 - 长度 79
 - 聚焦声束 29 (图 2-26)
 - 宽度 78
 - 散射, 半角声束 79
 - 直径 78
 - 声束, 聚焦 29 (图 2-26)
 - 声束的电子偏转极限 28 (图 2-25)
 - 声束的线性扫查, 垂直 62
 - 声束电子偏转 10
 - 定义 94
 - 声束分量
 - 42°72 (图 5-14)
 - 58°70 (图 5-12)
 - 69°71 (图 5-13)
 - 声束聚焦 29
 - 不同孔径尺寸 30 (图 2-27)
 - 声束扩散 14, 14 (图 2-5)
 - 定义 94
 - 角度 14 (图 2-5)
 - 声束入射点 (BIP) 52, 60, 65, 72, 73 (图 5-15)
 - 声束散播
 - 10 MHz 晶片 16 (图 2-9)
 - 13 mm 晶片 16 (图 2-7)
 - 2.25 MHz 晶片 16 (图 2-8)
 - 3 mm 晶片 15 (图 2-6)

- 声束扫查, 单角度 65
- 声束线性扫查, 角度 65
 - 图像 66 (图 5-7)
- 声束线性扫查, 线性扫查, 垂直
- 声束 63 (图 5-3)
- 声束形成
 - 电子声束形成 21
 - 定义 94
- 声束形成和电子偏转 26
 - 晶片大小 26
 - 晶片间距和孔径 26
 - 晶片数量 26
 - 频率 26
- 声束形状 12 (图 2-2)
 - 不同晶片数量 31 (图 2-28)
 - 能量分布区域 12 (图 2-3)
 - 探头声束形状 12
- 声束形状, 声束
 - 不同晶片数量 31 (图 2-28)
 - 能量区域 12 (图 2-3)
- 声衰减 16
- 声速 60
 - 材料 60
 - 横波 77, 80
 - 模式 60
 - 瑞利波 77
 - 纵波 80
 - 纵向 77
- 声阻抗 79, 80
- 时变增益 (TVG) 3
- 时间校正增益 (TCG) 3, 54, 57
- 识别, 探头 51
- 输入与输出技术规格 48
- 属性, 探头 11
- 术语, 注释 2
- 术语表, 相控阵 93
- 术语注释 2
- 数据, A 扫描 34
- 数据采集 44
- 数据采集和分析软件 92
- 数据采集中的空白 44
- 数字采样率 44
- 衰减 16
 - 系数 17
- 水平和角度光标 53 (图 4-6)
- 说明缺陷位置 73 (图 5-16)
- 说明缺陷位置的维度 73 (图 5-16)
- 斯涅尔定律 17, 24, 79
- 速度, 扫查 44
- 速率, 脉冲重复频率 / 显示刷新 51
- 速率, 数字采样 44
- T**
- 探头 5, 7, 22 (图 2-18)
 - 另见换能器
 - 波形持续 12
 - 参数 61
 - 尺寸 12
 - 带宽 12
 - 复合材料 21
 - 干涉效果 24 (图 2-21)
 - 晶片尺寸 22
 - 晶片数量 21
 - 类型 11, 21
 - 灵敏度 12
 - 频率 12, 21
 - 频率范围 7
 - 声场 13 (图 2-4)
 - 声束扩散角度 14 (图 2-5)
 - 声束形状 12
 - 识别 51
 - 属性 11
 - 特性 20
 - 压电换能器晶片的原理 11 (图 2-1)
 - 压电陶瓷 21
 - 仪器设置 60
- 探头, 相控阵 7, 11, 21 (图 2-16)
 - 超声声束的特性 11
 - 横截面 21 (图 2-17)
 - 楔块 23 (图 2-19)
 - 选择 31
 - 组装件 7 (图 1-3)
- 特性, 超声 77
- 特性, 探头 20
- 体积检测 10
- 条状 7
- 通道技术规格 48
- 透射系数 79
- 图像类型 51
- 图像形式, 融合 44
- 图形, 声束 12 (图 2-2)
 - 探头声束形状 12
- 托马斯·杨 (科学家) 5
- W**
- 网站 85, 87

- 论坛 85
- 网址 2
- 文件
 - .opd 92
 - .oud 92
- 无损检测 (NDT) 5
- X**
- 系数, 反射 17
- 系数, 衰减 17
- 系统, 相控阵 7
- 显示, S 扫描 67
- 显示格式 59
- 显示技术规格 47
- 线性扫查 2, 38
 - 垂直声束 62
 - 垂直声束图像 64
 - (图 5-4)
 - 垂直声束线性扫查 38
 - (图 3-4)
 - 定义 95
 - 角度声束线性扫查 39
 - (图 3-5), 65
 - 图像 66 (图 5-7)
 - 聚焦法则数量 50
 - 序列 51 (图 4-4)
- 线性阵列 7
- 相控脉冲 23
- 相控阵
 - 定义 95
 - 检测设置 59
 - 术语表 93
 - 维度参数 22 (图 2-18)
 - 显示格式 59
- 相控阵, 用于医学诊断 6
 - (图 1-2)
- 相控阵成像, 基本原理 33
- 相控阵的弱势 10
- 相控阵的优势 9
- 相控阵技术规格 48
 - 编码 52
 - 波形存储 51
 - 参考光标 52
 - 多组支持 52
 - 聚焦法则 48
 - 脉冲发生器 48
 - 脉冲重复频率 / 显示刷新率 51
 - 命名惯例 48
 - 探头识别 51
 - 通道 48
 - 图像类型 51
- 相控阵检测
 - 超声定相 8
 - 设备类型 87
 - 系统 7
 - 相控阵的弱势 10
 - 相控阵的优势 9
 - 一般介绍 5
- 相控阵探头 7, 11, 20 (图 2-15), 21 (图 2-16)
 - 超声声束的特性 11
 - 横截面 21 (图 2-17)
 - 维度参数 22 (图 2-18)
 - 楔块 23 (图 2-19)
 - 选择 31
 - 组装件 7 (图 1-3)
- 相控阵探头的维度参数 22
 - (图 2-18)
- 相控阵系统 7
- 相控阵楔块 22
- 相控阵仪器 47
 - 校准和规范化方法 54
 - 重要技术规格 47
- 相位
 - 效果 24 (图 2-21)
- 相移 6
- 响应, 波幅 60
- 校准
 - 方法 54
 - 灵敏度校准 94
 - 零位校准 54
 - 楔块延迟校准 94
- 楔块 60
 - 参数 61, 61 (图 5-2)
 - 零度 23
 - 相控阵 22
 - 相控阵探头 23 (图 2-19)
 - 楔块延迟校准 94
- 信噪比 10, 26
- 形成 26
- 形成, 声束
 - 定义 94
 - 晶片大小 26
 - 晶片间距和孔径 26
 - 晶片数量 26
 - 频率 26
- 虚拟孔径 26
 - 定义 96
- 序列, 聚焦法则 27 (图 2-23)
- 选择, 相控阵探头 31
- Y**
- 压电复合材料 21

压电换能器晶片 11
 原理 11 (图 2-1)
压电陶瓷探头 21
压缩垂直声束检测 60
衍射控像法, 定义 93
杨, 托马斯 (科学家) 5
杨氏模量 (E) 77
仪器, 相控阵
 校准和规范化方法 54
 重要技术规格 47
仪器, 阵列 47
仪器设置 59
 材料 60
 探头 60
 楔块 60
移动, 相位 6
应用 85
 焊缝检测 9
 裂缝探测 9
应用支持 85
有效孔径 27, 27 (图 2-24)
原理, 惠更斯 14, 24
 定义 95
圆环矩阵 7
圆环阵列 7
圆形 7
圆形晶片, 近场长度 82
圆形阵列 7

远表面分辨率, 定义 96
远场 13
 定义 94
在线研讨会 85
Z
增益规范化 54
 增益规范化后的响应 56
 (图 4-9)
 增益规范化以前的响应 55
 (图 4-8)
闸门 34
栅瓣 31
折射, 声波 18 (图 2-10)
折射波
 10° 入射角 19 (图 2-12)
 30° 入射角 19 (图 2-13)
 65° 入射角 20 (图 2-14)
阵列 20
 圆形阵列 7
直径, 声束 78
质量密度 (ρ) 77
周期次数 (CN) 77
周向分辨率, 定义 95
主动平面, 定义 95
转换, 模式 18 (图 2-10), 19
纵波 60
纵波声速 77, 80
阻抗, 声学 79, 80

相控阵检测：工业应用的基本理论

第一版，2012年5月

印刷：Olympus NDT，48 Woerd Avenue, Waltham, MA 02453, USA



NDT Field Guides

出版这本《相控阵检测》现场指导手册的目的是对相控阵检测进行简单易懂的介绍。这本手册既适合初涉相控阵技术的新用户，也适合希望回顾相控阵基本原理的经验较丰富的老用户。手册为读者解释了什么是相控阵检测及如何进行相控阵检测，并概括介绍了在选择探头和仪器时要考虑的各项因素。为便于用户更进一步地了解相控阵知识，手册后面还列出了参考书目。

此外，手册中还附有一个相控阵术语表。



OLYMPUS NDT INC.

48 Woerd Avenue
Waltham, MA 02453

USA

电话：(1) 781-419-3900

www.olympus-ims.com