超声相控阵检测技术在复杂形面和波状面工件检测中的最新进展

论文发表于第十届欧洲无损检测大会,

莫斯科 (俄罗斯), 2010年6月7-10日

超声相控阵检测技术在复杂形面和波状面工件检测中的最新进展

Patrick Tremblay, Stéphane Turgeon, David Reilly, Guy Maes (Zetec Inc., 加拿大)

摘要

超声相控阵技术用于核电及传统能源行业的超声检测已经超过10年。类似线阵探头进行扇形扫查或多角度栅格扫查等简单的应用已经被广泛的接受与使用。但是无损检测行业不断在寻找更具有挑战性的应用并提出解决方案，因此需要更强大的软件及相控阵硬件系统。

本文将以复杂形面及波状表面工件检测为例介绍超声相控阵技术的一些前沿应用。本文将详细阐述相控阵硬件系统及最先进的专用软件是如何帮助实现这些创新的相控阵检测理念的。

一维线阵与两维面阵柔性探头有助于提高复杂形面工件的检测能力。整合型楔块与自定义轮廓型楔块可用于相控阵探头与特殊波状面进行耦合。这两种情况下都需要进行聚焦法则的优化以实现好的聚焦效果。因此会采用多种方法将工件表面的精确信息导入到聚焦法则计算器内部。

探头所处的任意位置都会得到经计算后的优化聚焦法则，且在检测之前这些聚焦法则会被存储起来。在检测过程中，相控阵系统的处理能力可实现聚焦法则的快速优化与应用。该特性称为“基于位置的聚焦法则实时调整”。

本文呈现的例子将包括关于相控阵探头设计、聚焦法则选择与生成以及检测结果的考虑。

引言

众所周知超声检测技术的检测能力很大程度上取决于检测部件或焊缝的表面状况。在近乎平面或圆柱面的工件上进行检测，超声技术的检测能力通常能得到很好的利用。但是在进行一些重要结构部件或焊缝的检测时，其表面状况通常无法满足上述检测要求。例如有些工件表面还处于刚焊接完的状态，有些可能焊缝余高被打磨光滑但是表面呈现波浪状的曲面，还有一些接管甚至存在锥形焊接区域的情况。

在这些情况下，超声技术的检测能力大打折扣。首先，对于直接接触法检测糟糕的耦合状况将不可避免地对波束覆盖造成影响。其次，即使采用水浸或局部水浸的方法解决了耦合问题，超声波也会因工件表面不平整而发生路径的改变造成检测无法按照预期进行。其次，按照预期可能出现的缺陷显示也会因此发生错位。

因此也就很难对缺陷进行定性。

当使用常规超声技术进行检测时，部分解决方案是减小探头接触面或改变探头表面轮廓, 但这通常会带来波束覆盖差甚至检测效果差的后果。

本文将展示相控阵技术在进行复杂形面波状面工件超声检测的潜力。

相控阵探头解决方案

在相控阵超声探头设计方面, 曾提出过多种方案用于解决复杂形面的耦合问题。

柔性阵列探头已被成功用于实验室研究超过5年之久[1]。第一代柔性阵列探头体积较大不适合现场检测使用。但经改良后的一维及两面柔性探头可接收工业检测环境下的考验[1]。本文将给出柔性阵列探头在不规则表面检测中的应用实例。

在电站处于运行阶段时，完全采用水浸的方式进行超声检测往往是不可取的。实际可替代的方案是采用局部水浸的方式，通过“水楔块”将刚性的相控阵探头耦合到工件表面。通过往柔性耐磨薄膜内注水的方式实现局部水浸的目的。最新的研究表明此方案具有较好成本效益和可行性[3]。然而柔性薄膜用于现场检测时可能仍存在耐磨性问题。

对于不规则表面仅限于单个平面的工件，例如轴对称锥状接管，可使用定制楔块代替柔性楔块。尽管这个设计存在一些固有的限制, 但它能为某些检测配置提供切实可行的方案[4]。

硬件及软件的创新

相控阵探头设计仅仅是整个检测方案的一小部分。即使超声波能够很好的从工件表面进入工件内部，不规则的工件结构仍然会对检测区域的波束聚焦造成一定阻碍。

但是相控阵技术具有一个很大的优势：那就是可以通过调节单个晶片的延时对复杂表面轮廓进行补偿从而实现较好的波束聚焦。

为实现更加优化的晶片延时组成可采用不同的方法。通过对原始A扫描信号的离线后处理，FMC全矩阵捕捉已经被视为最终的解决方案了[3],[5]。实际上,这种方法可以实现对各种可能的波型，折射角度及聚焦位置进行波束离线重构。相应的，这种方法会需要耗费更多时间可能不太适合工业检测。

因此, 预定义的聚焦法则方案就值得更进一步的探索。

2007年末,Zetec发布了全新的DYNARAY®相控阵检测系统，不久后DYNARAY® Lite又迅速加入到该产品系列之中。这两款性能强大的超声相控阵数据采集系统可以支持最多256个(DYNARAY Lite为64个) 通道同时激发且最多可支持4096个聚焦法则, 能最大程度发挥2D面阵探头的实用性。

DYNARAY产品系列可为复杂形面及波状面工件检测提供足够的支持。归功于其强大的原始数据分析能力，该系统可实现基于位置的聚焦法则计算。这也就意味着检测过程中，可以将预先定义的聚焦法则施加到相控阵探头，且聚焦法则为探头位置的函数故可以根据探头的位置进行实时调整。

UltraVision® 3软件具备高级数据采集与分析功能，可用于驱动DYNARAY系统。UltraVision 3包含了UltraVision 1所有被广泛使用的功能特性, 除此之外还具备3D工作环境用于工件生成，3D ray-tracing波束跟踪，聚焦法的生成以及检测数据可视化显示。尤其对于复杂表面工件检测来说,UltraVision 3内置聚焦法则计算器可对波束进行计算实现检测优化。此外,该软件还可以获取波束出射点的空间位置信息,从而正确定位相控阵数据在工件内的位置显示。

为开发出支持高级检测技术与相控阵探头的3D工具用于复杂形面的检测并进行验证，UltraVision 3仍有有许多待解决的问题。下文提到的ray-tracing波束追踪,模型建立及实验为即将进行的内部验证过程的一部分。

图 1: DYNARAY 与 DYNARAY Lite 超声相控阵检测系统

实验试块

为实施内部验证程序设计并制作了许多试块，所有试块均为铝制且含有人工反射体。由于实验的目的是研究表面状况的影响，因此将忽略材料及缺陷形态所带来的潜在影响。在整个实验过程种, 表面的复杂性仅限于单个平面。

多个试块被加工成周期性波浪状扫查面，且具有不同的起伏高度与周期。如图2所示的波状面试块具有50 mm的起伏周期且波峰-波谷高度差达4 mm. 表面的起伏模拟了焊接后的余高及两侧因焊接后发生的收缩。试块上包含两个直径为2 mm的横通孔与一个高为10 mm的底面刻槽。此外，试块两端被做成了30°与60°的斜面。

同时，一个具有同样人工反射体的平面试块被用作对比。

图3为模拟更真实检测状况，还采用了具有同样人工反射体的锥形面试块。试块的外形轮廓是为了模拟压水堆稳压器接管处的异种金属焊缝。

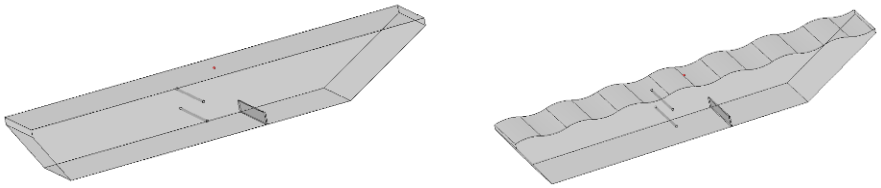


图 2: 平面参考试块(左) & 波状面参考试块(右)

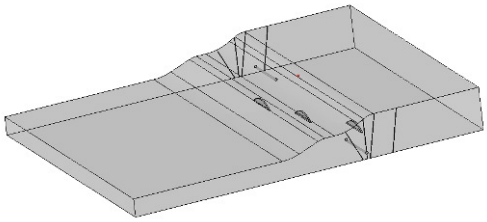


图 3: 真实锥形试块

3D 波束追踪

作为UltraVision 3软件内部的一个强大工具，3D波束追踪允许用户在CAD模型内部生成波束并观察波束与内部反射体之间的相互作用情况。该软件还支持不同种类的工件及坡口形状，用户可根据需求设定相应的参数。此外, UltraVision 3还支持导入*.SAT格式的文件生成自定义的工件。此方法已被用于波状面工件检测实验过程。

图4展示了波状面工件与锥状面工件的3D波束追踪过程。对于工件上任意位置，都可以通过波束追踪来确定合适的入射角度（波束与垂直于底面法线所成夹角）与相应的折射角（波束与垂直波束出射点所在检测面的法线所成夹角）。

此外，3D波束追踪工具还可用于制定扫查计划，波束覆盖评估，确定复杂工件内部的波束路径以及模拟常规超声或相控阵探头与反射体的相互作用。所有这些功能均可在UltraVision 3友好的用户界面内实现而不需要任何CAD相关的软件知识 。

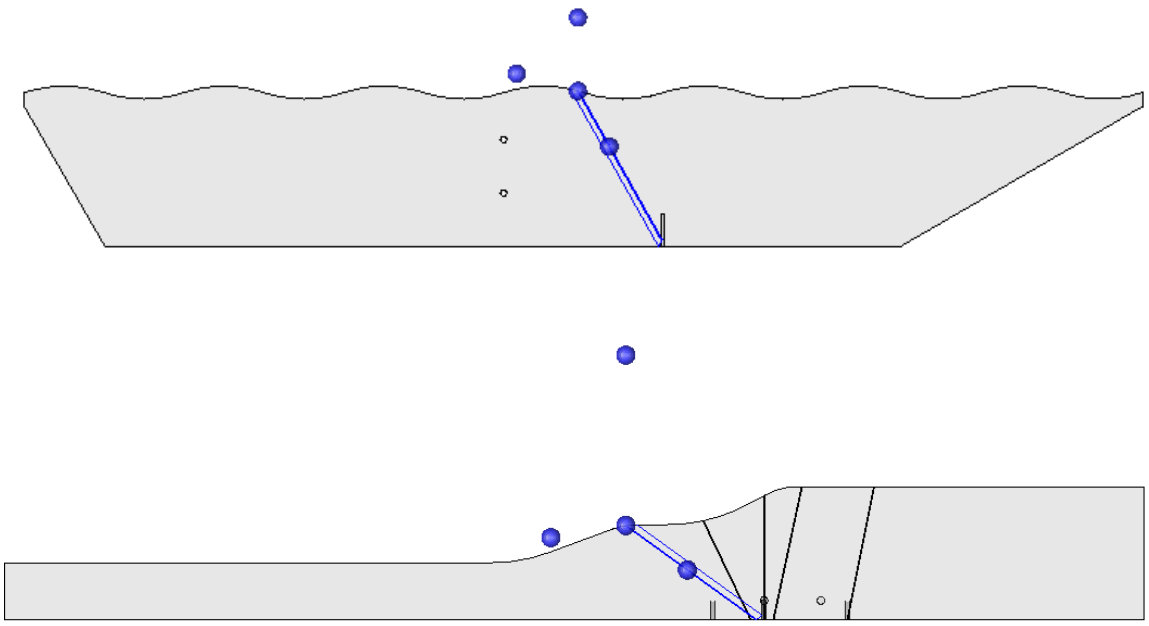


图 4: 复杂工件波束追踪

聚焦法则建模与实验验证

UltraVision 3内高级聚焦法则计算器为用户提供了3D图形界面,用户非常轻松就可以根据所用探头与检测对象生成所需的聚焦法则。图5为UltraVision 3内可视化聚焦法则典型图像，左图为一维柔性阵列探头，右图为硬质探头搭配常用楔块。

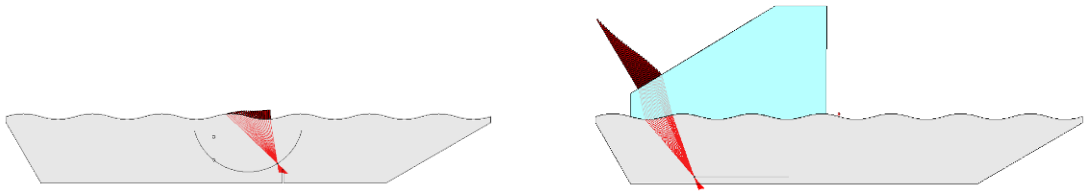


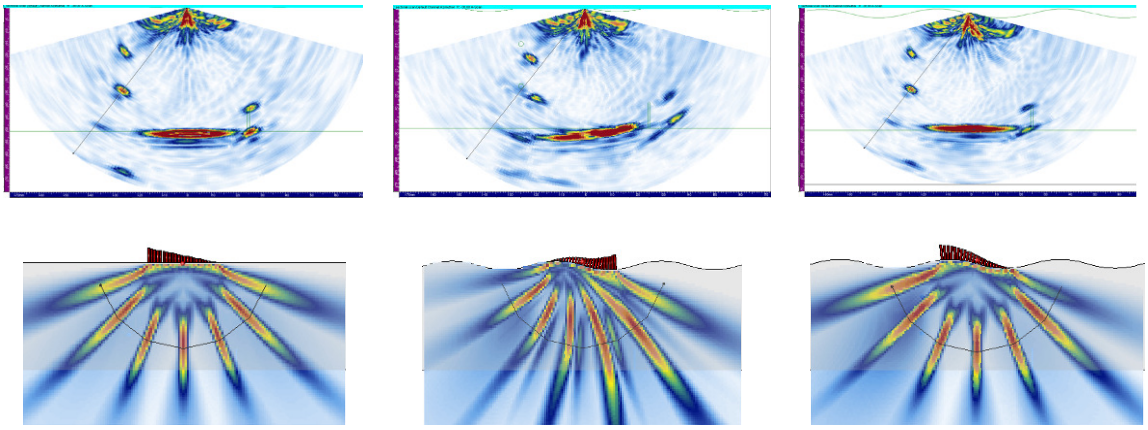
图 5: 复杂工件内的聚焦法则生成及可视化

图 6为一维柔性阵列探头三种不同检测设置下的检测结果(2 MHz, 24晶片, 中心间距1.4 mm)。左边的图像是使用-75°~75°LW扇扫在平面试块上的真实检测数据与声场仿真结果。两个横通孔(左)与刻槽(右)被很好的检测到了且具有精确的定位。正如预期一样, 工件表面为平面时超声波可以很好的入射并且路径不受表面影响。

中间图像为柔性阵列探头在波状面试块上未使用聚焦法则调整功能的检测结果。出人意料的可以发现, 这种情况下人工反射体的检测结果仍然十分的良好,只是存在超过5 mm的定位误差。这个结果可由声场仿真给出解释: 观察声场仿真结果可发现虽然声束在工件内具有还不错的聚焦，但是波束路径却偏离了预定的方向。

右图未柔性阵列探头在波状面试块上使用优化后的聚焦法则根据表面状况对扇扫图像进行实时调整的结果。就反射体的检测与位置而言，成像质量与平面试块十分接近。且声场仿真的结果同样与平面试块非常接近。

图 7 为柔性阵列探头在锥状面试块上的检测结果。左边是柔性阵列探头未使用聚焦法则实时调整功能的实际检测图像与声场仿真结果。可以发现，加工刻槽(h= 5mm)并未被检测到，很有可能是因为锥状面导致波束走向发生了偏离。右边则是采用了优化后的聚焦法则对扇扫进行实时调整的结果: 刻槽的尖端衍射与端角信号可以被很好的检测并精确的定位到;同时波束在经过工件的复杂表面入射之后路径正常。

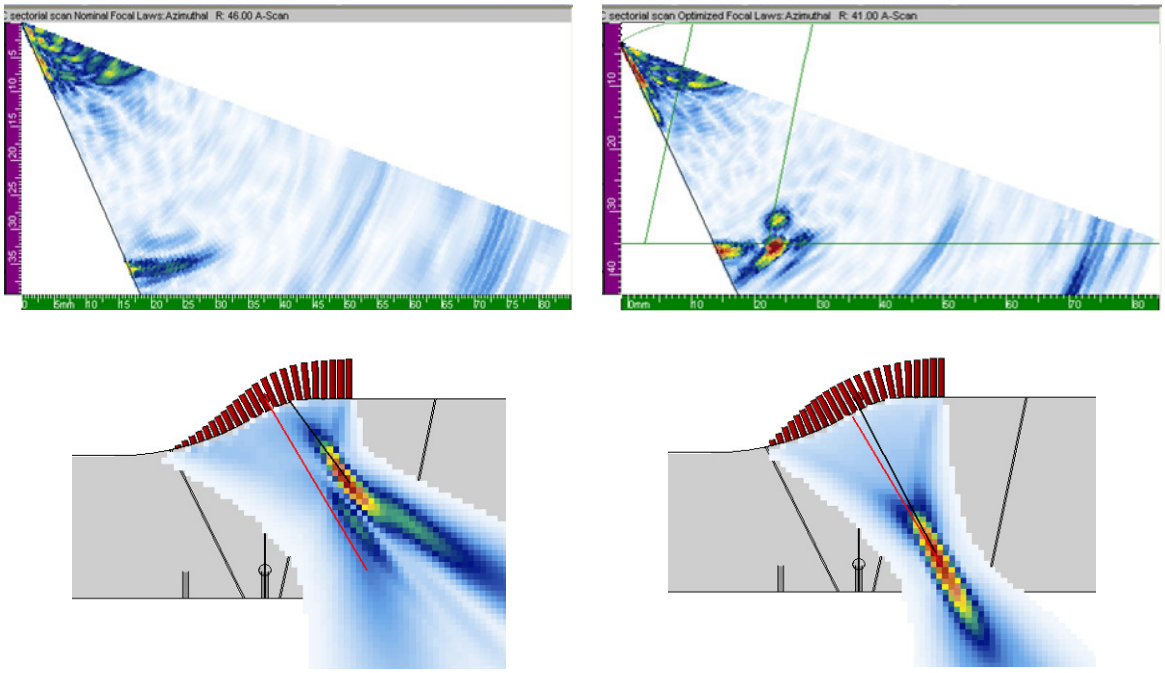


平面参考试块

波状面试块
普通的聚焦法则

波状面试块
优化后的聚焦法则
扇扫实时调整

图 6: 柔性阵列探头在试块上扇形扫查的实际检测数据 (上)
与相对应的声场仿真模型 (下)



实际锥状面试块
普通的聚焦法则

实际锥状面试块
优化后的聚焦法则
扇扫实时调整

图 7: 柔性阵列探头在锥状面试块上扇形扫查的刻槽实际检测数据 (上)
与相应的声场仿真模型 (下)

优化后的聚焦法则可以针对探头所处特定位置的表面轮廓进行专门的补偿，但这也意味着这些聚焦法则不适用于其它位置。这个难题可以通过使用基于位置的聚焦法则组来克服。

UltraVision®3软件的这一高级功能允许用户将复杂检测面划分具有连续不变的特点的多个区域,如图8所示。针对每个区域都会生成优化后的聚焦法则组并存储下来。

DYNARAY相控阵检测系统可在检测过程中，动态的选择聚焦法则作为探头位置的函数施加到相控阵探头上。单个检测设置可最多具有4,096不同的聚焦法则。由于位置编码器会不断给系统反馈探头实时位置信息，故检测系统可以根据检测免得轮廓实时调整合适的聚焦法则。

每个区域采集到的数据可进行离线融合或作为单个数据显示成像, 如图9所示。

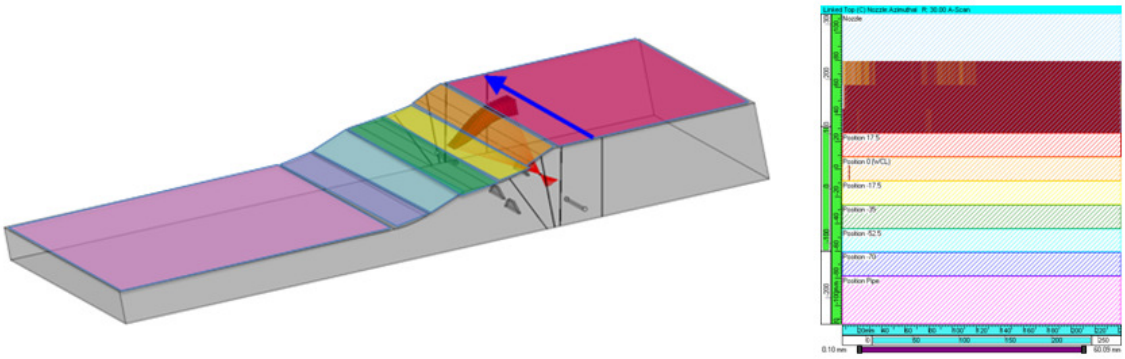


图 8: 锥状面工件表面不同区域的定义

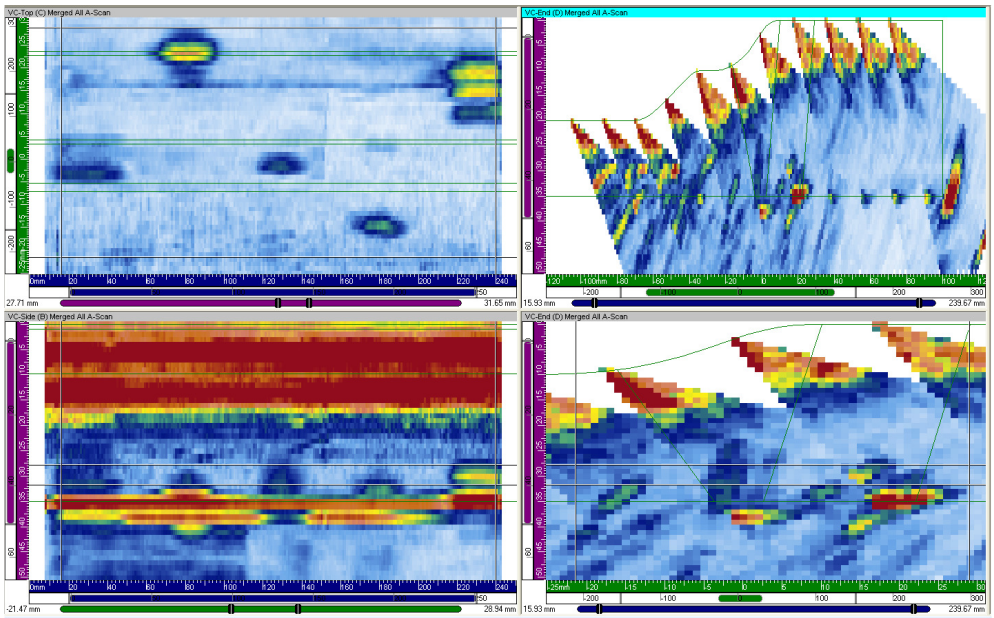


图 9: 柔性阵列探头在锥状面试块上使用基于位置的聚焦法则计算工具检测结果

一般性观察结论

- 基于柔性阵列探头检测系统的检测能力受限于柔性探头与波状面的贴合程度。
- 若工件表面没有较大的不连续性，基于复杂形面的优化聚焦法则生成会变得简单直接。
- 产生垂直偏振横波的能力非常受限，因此难以实现用扇扫完成整个检测区域的覆盖。
- 通过使用基于位置的聚焦法则计算，可获得复杂工件不同位置的实时检测数据且可单独作为数据文件进行成像。

相控阵数据三维成像

为了促进与加快复杂工件相控阵检测的数据分析过程, the Volumetric Merge tool in UltraVision 3内置的体积融合工具可实现相控阵数据在CAD模型内的3D可视化。

图10为采用一维线阵探头与定制楔块在锥状面接管上50°SW的相控阵数据融合结果。很显然，这种成像方式有助于缺陷显示更精确的定位与定量,即使是复杂工件也能同样大幅的提高检测效果。

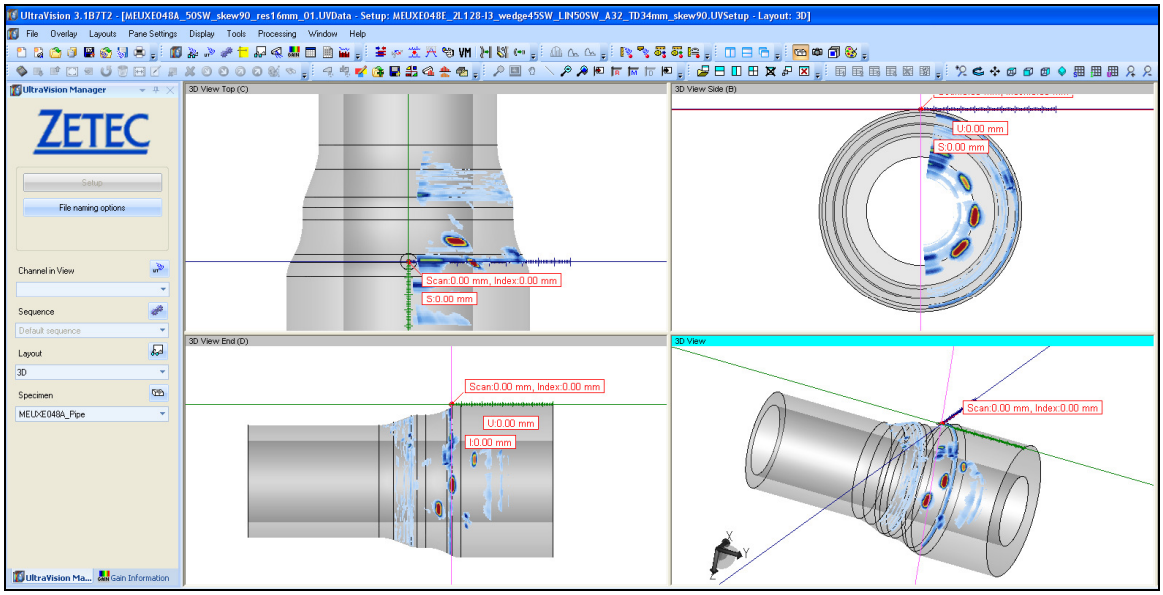


图 10: 3D 数据融合成像
使用定制楔块在锥状面接管工件上的相控阵检测数据

结论

通过本文的实验论证, 可得到以下一些结论:

1. 相控阵技术有足够的潜力能为复杂形面及波状面工件提供合适的超声检测方案。
2. 就探头设计而言具有多个可行的替代方案: 柔性阵列探头, 普通刚性探头结合柔性或定制楔块。
3. 使用基于位置的聚焦法则对不规则工件表面各个区域进行补偿可获得更好的检测效果。
4. 考虑到工件表面的几何形状，更好的成像技术可大幅提高数据分析能力。
5. 支持这些高级检测方案的强大软件已进入商用，且更多新的功能正在进一步开发当中。

参考文献

[1] G. Toullelan, A. Nadim, O. Casula, E. Abittan, “Piping Inspection using a 3D Smart Flexible Phased Array Transducer”, 6th Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, Budapest, October 2007.

[2] Imasonic, “Sondes miniatures et flexibles, les nouveaux défis de la technologie multiéléments", Journées COFREND, Toulouse, May 2008.

[3] R. Long, J. Russel, P. Cawley, “Non-Destructive Inspection of Components with Irregular Surfaces using a Conformable Ultrasonic Phased Array”, 6th Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, Budapest, October 2007.

[4] G. Maes, S. Turgeon, D. Reilly, “Advanced Phased Array UT Inspection through Complex Surfaces”, 7th Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, Yokohama, April 2009.

[5] C. Holmes, B. W. Brinkwater, P. D. Wilcox, “Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation”, NDT&E International, 38, 2005, pp.701-711.