

第1章 绪 论

1.1 本书研究背景

1. 铝材无损检测技术的广泛普及是保障能源安全储运的重要举措

在我国经济和高新技术日益发展的今天,铝材由于其强抗腐蚀性、高电导率、高导热系数、非铁磁性、质量轻、易加工、易于回收等特点在各行各业中被广泛使用。铝板是一种由铝锭轧制加工而成的常见的矩形板材,是应用于军事国防、工业生产、航空航天、铁路交通等领域的重要结构材料。然而,在铝板的生产加工和实际使用中,由于制造条件的限制和相对恶劣外界环境的影响,铝板表面和内部可能会出现开裂、腐蚀、贯穿孔等缺陷。这些缺陷会降低铝板的机械强度,导致使用这些铝板的设备可靠性降低(如化工管道包覆、化工容器、航天器导油管等),可能进一步造成由于油气泄漏、化学品污染导致的火灾和爆炸等事故,从而威胁到重要设施和相关人员的安全。因此,在铝板出厂前和在役期间对其进行缺陷检测是控制铝板质量的前提,也是保障能源安全储运相关设备安全稳定可靠运行的重要手段。

无损检测(nondestructive testing, NDT)技术是一种在不损坏被检材料性能的前提下对材料进行缺陷探测与质量评估的手段,主要方法包括磁粉检测、渗透检测、射线检测、涡流检测、超声检测等。然而在对铝板的检测中,上述方法各有其应用局限性。磁粉检测对小裂纹缺陷不敏感,且无法用于非铁磁性材料的检测;渗透检测作为磁粉检测方法的有力补充,可用于非铁磁性材料表面缺陷的检测,但该方法检测效率低、灵敏度低、试剂成本高,难以检出微小的裂纹缺陷;射线检测方法具有成像效果明显、缺陷识别简单和适用性广等优点,但是应用该检测方法需要特别注意辐射安全,否则容易发生安全事故;涡流检测方法具有较高的缺陷识别精度,但其仅对表面或近表面缺陷敏感,且需要进行逐点检测,对于传感器难以接触到的位置无法进行有效探查;超声检测法是通过反射回波信号进行分析以识别和

定位缺陷的方法,具有检测速度快、精度高、安全性高、便于操作等优点,在铝板缺陷检测领域得到了广泛的应用。因此,以超声检测为代表的无损检测方法可以为铝材在重要领域的有效应用提供安全保障,如长循环寿命太阳能储存新材料^[1]、油气输运管道外包覆、交通运输与载人航天等。

2. 超声聚焦检测方法的深度发展为其工程化应用催生了新的解决方案

采用单个压电晶片的单声束常规超声、多压电晶片阵列的多声束相控阵超声、复杂多模态长距离的超声导波是现代超声无损检测技术的主流载体。常规超声由于其激发和接收模式的单一性仅适用于检测常规缺陷,并通过对反射回波信息进行分析以进一步识别缺陷特征,其原理如图 1.1 所示。而随着人们对设备与能源安全的日益重视,对微小缺陷的检测需求逐渐扩大,因此对超声检测灵敏度提出了更高的要求。相控阵超声可以实现阵列超声的波束偏转、扫描与聚焦,相比于常规超声检测法,缺陷的误检率和漏检率明显降低,其原理如图 1.2 所示。相控阵超声方法通过波束聚焦使试样局部的缺陷检测精度得到明显提高。但限于换能器的体积,相控阵超声大多采用基于压电激励的方法,因此依赖声耦合剂来降低超声激励端到试样表面的声阻抗,不利于高温、高速等恶劣环境下的缺陷检测。

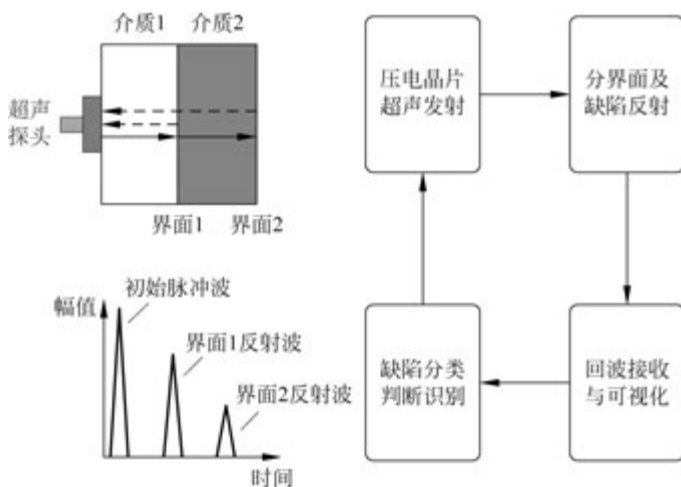


图 1.1 常规超声检测原理

超声导波作为一种体波在波导边界发生反射与折射形成的复杂波模态,具有能量衰减低、传播距离长等特性,并且非常适用于电磁超声的激发

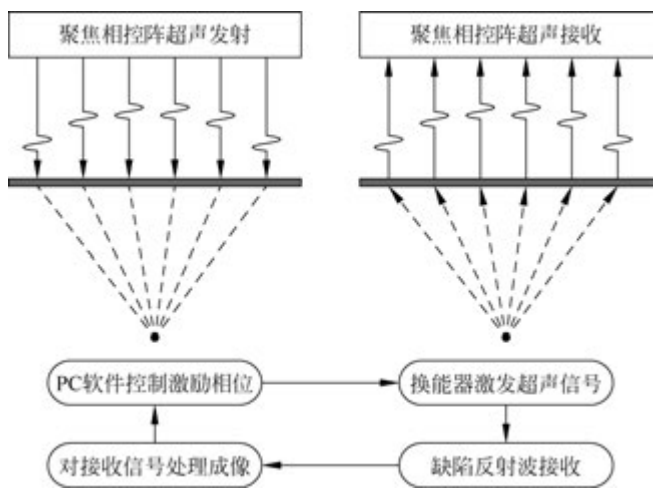


图 1.2 相控阵超声检测原理

方式,其原理如图 1.3 所示。基于电磁耦合的换能器,即电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 具有非接触特性,在工程检测中具有较强的适应能力。但在面向微小缺陷的检测场景中,EMAT 固有的低能量转换效率严重影响了其检测效果。对这一问题传统的解决方法是提高激励功率并引入额外的运放装置,而该方法的采用又带来了额外的问题,如操作安全、设备散热、运行功耗、其他噪声等,不仅削弱了 EMAT 的

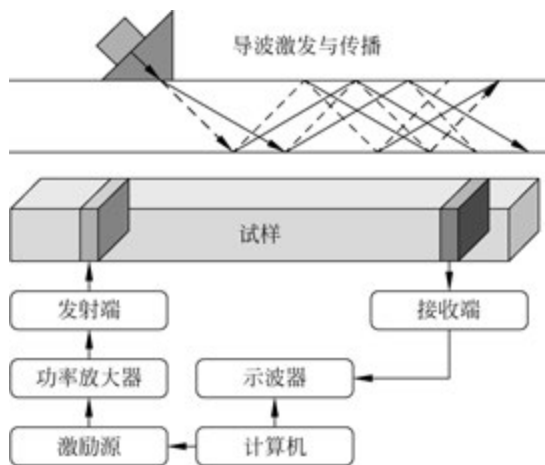


图 1.3 超声导波检测原理

便携性,还使缺陷信号更加难以从噪声中分离。而超声导波聚焦方法在保留了传统导波检测方法优势的同时,面向 EMAT 的微小缺陷检测场景提供了新的解决方案,从而为铝材在高精尖领域的工程化应用提供了质量和安全保障。

3. 未来智能无损检测技术将实现检测理论和工业数据的深度融合

当下,无损检测领域大多仍采用人工分析法来识别检测信号中的缺陷特征,部分较为先进的计算机辅助方法如阈值判别、专家系统等也在其中发挥着重要的作用。但这些方法存在较高的漏检率和误检率,可信程度较低,仅仅能实现对疑似缺陷的初步辅助判别,后续仍需要富有经验的无损检测领域从业人员的主观判断与计算才能使缺陷检测精度达到工程使用标准。此外,人工缺陷识别效率较低,用人成本较高,且容易受主观因素影响,缺陷的识别和量化精度也因此受到了限制,难以达到较高水平^[2-3]。

随着深度学习理论不断发展,智能超声无损检测技术的前景也逐渐广阔。在工业数据的支撑下,基于深度神经网络的缺陷特征自动提取方法在超声无损检测领域表现优异。但网络的“黑箱”特性不利于人们了解其内部机理,限制了神经网络在某些敏感领域的应用;此外,大规模地获取有效的、带有准确标注的工业检测数据通常很困难。针对上述问题,将超声检测理论融合到基于深度神经网络的智能无损检测技术中既可以提高网络的可解释性,也会降低深度神经网络对大规模数据集的需求。因此,如何实现将传统的超声无损检测理论与先进的人工智能方法相融合,以实现缺陷准确识别与高精度量化,将是检测工程领域关注的重点与热点。

综上,铝材在能源储运、航空航天等领域的应用规模正在逐步扩大,采用聚焦超声无损检测技术以保证其质量和安全是铝材得以工程化应用的可行手段,以超声检测为代表的无损检测智能化正成为未来相关工程领域发展的必然趋势,物理启发式深度神经网络与工业数据的有机融合将为铝材缺陷识别与量化提供新的解决途径。本书针对铝板缺陷无损检测技术,设计了一种全新的水平剪切(shear horizontal, SH)导波聚焦换能器并研究了其内在机理与影响参数;定义了以聚焦超声导波为核心的缺陷识别与量化方法,并基于该方法提出了物理启发式深度神经网络以提高缺陷量化精度;针对常规体积缺陷和裂纹缺陷量化理论分别提出了递进残差深度卷积网络、门控循环单元网络,构建了以检测理论为核心、创新设计为驱动、深度学习为手段的智能超声无损检测模型框架。研究工作在推进超

声导波缺陷高精度智能识别和量化研究中具有重要的理论意义和工程实际价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 SH 导波换能器结构

1. 基于压电材料的 SH 导波换能器

压电换能器(piezoelectric transducer, PZT)利用了压电陶瓷材料的特性,实现了电能与机械能之间的转换,并通过耦合剂来传递压电材料和待测试件之间的振动^[4]。SH 导波在传播过程中不会产生离面位移,在激发过程中需要合理设计发射换能器结构以尽可能减小试样法向方向的振动。尽管基于电磁耦合的 EMAT 在导波模态控制中具有显著优势,但 PZT 由于其换能效率高、结构简单、造价低等优势在无损检测、医学超声、水下声雷达等领域仍被广泛应用。为了使 PZT 激发出纯净或相对纯净的 SH 导波,换能器结构一般需要合理的设计。目前常用的 SH 导波 PZT 结构主要包括楔型、法向剪切型和平面剪切型,本节将对上述基于压电材料的 SH 导波换能器结构与原理进行综述。

楔型 PZT 一般由发射探头、楔块、剪切耦合材料构成,并可以通过改变超声发射探头的激发方式控制超声模态,如图 1.4 所示为一种典型的 SH 导波楔型 PZT 结构。其工作原理为:当探头激发超声纵波时,试样中会产生 Lamb 波^[5-6];当探头激发超声横波时,若横波振动方向在 x - z 平面内,该横波称为垂直剪切波(shear vertical, SV),试样中会产生 Lamb 波;若横波仅在 y 轴往复振动,该横波称为 SH 波,因此试样中会产生 SH 导波^[7-8]。

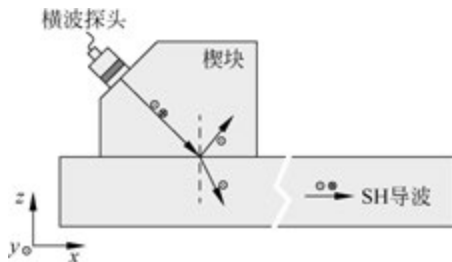


图 1.4 SH 导波楔型 PZT 原理图

根据 Snell 定律,超声波在不同介质分界面的入射角与声波在相邻介质中的传播速度有关,因此,可以通过改变超声入射角或楔块的材料来控制激发超声导波的波长和模态。

法向剪切型(也称厚度剪切型)PZT 则是横波探头的一种特殊应用形式,该种探头将产生沿试样厚度方向传播的 SH 波,如图 1.5(a)所示^[9]。这种厚度剪切型 PZT 主要由阻尼层、压电层和耦合层构成。其中阻尼层用于吸收反向传播的 SH 波以减小干扰;压电层即厚度剪切型压电板,其材料可以选用 Y 型石英晶体或 d15 型压电陶瓷,这些材料可以在外加电场作用下产生剪切应力^[10-13]。然而,伴随 SH 波而产生的 Lamb 波会降低 SH 波的信噪比,尤其是构成换能器阵列的情况下^[14-15]。Boivin 等发现可以通过调整压电晶片的尺寸来削弱额外产生的 Lamb 波^[16],Chen 等则提出了一种基于单晶片的单侧激发 SH 波换能器减小 Lamb 波的影响^[17]。Jen 等发现采用纵波探头和楔块的组合同样可以激发出法向 SH 波,该方法利用了超声波的模式转换特性,实现了从超声纵波到厚度剪切波的转换,并具有高达 80% 的能量转换效率,其原理如图 1.5(b)所示^[18]。类似于楔型 PZT 的 SH 导波换能结构,模式转换型厚度剪切 SH 波的波长同样可以被有效控制。但由于压电晶片固有共振频率比较低,激发的超声波传播距离较短,因此该换能器尚未得到广泛应用^[19-22]。在应用厚度剪切型 PZT 激发 SH 导波的相关研究中,Rajagopal 等摒弃了楔块,直接采用了厚度剪切型 PZT 探头以激发 SH₀ 模态的导波^[23-25]。他们通过在大型金属板的侧面激发出厚度剪切型 SH 波,并通过剪切型耦合剂将周期性的应力传导至金属板上以激发 SH 导波,从而实现了厚度方向上 SH 体波向 SH 导波在波导中传播方式的转换。在此基础上,Nazeer 等利用该种 SH 导波激发方式研究了 SH₀ 模态导波在弯曲板上的缺陷检测情况,研究发现,SH₀ 导波对外表面裂纹检测的敏感性随频率的增加而增大^[26]。

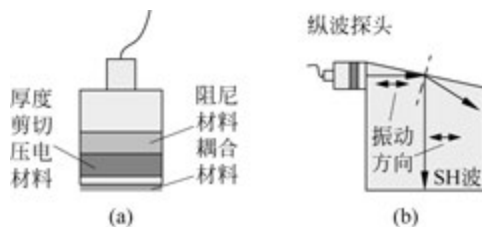


图 1.5 厚度剪切型 PZT 原理图

(a) 无楔块厚度剪切型; (b) 基于楔块的模式转换型

相比于厚度剪切型 PZT,平面剪切型 PZT 具有更高的能量转换效率,但是该种换能器对压电晶片的性能有更高的要求。近年来,学者们研究并制备了多种具有不同功能、性能和形状的压电晶片以满足不同测试工况的需求,包括具有较大 d_{36} 系数的 PMN-PT 晶片^[27]、平面剪切 d_{36} 模式的压电晶片、用于双向 SH0 波激发的 d24 压电晶片^[28]等。这种具有双侧激发特性的平面剪切型 SH 导波换能器具有激发频率高、模态纯净、无 Lamb 波影响、能量转换效率高等优点,可用于平板、弯曲板和管状金属构件的缺陷检测,具有较大的应用潜力^[29-30]。

2. 基于电磁耦合的 SH 导波换能器

PZT 依赖耦合剂实现弹性波在不同介质之间的传递,这种传递方式不仅影响了超声检测的灵活性,也限制了 PZT 的使用环境与应用范围。而 EMAT 主要采用电磁耦合的方式直接在试样表面或内部激发质点的振动,实现了超声波无接触式的激发与接收。目前,EMAT 根据机理不同可以分为两类:洛伦兹力型与磁致伸缩型^[31-32]。洛伦兹力型 EMAT 仅可在电导率较高的试样中激发超声波,该 EMAT 通过在试样附近的线圈中施加高频电流,使试样表面感应出涡流,并在永磁体施加的背景磁场下感应出周期性变化的洛伦兹力。洛伦兹力施加于被测试样表面,并根据质点振动方式的不同产生特定类型的弹性波^[33]。磁致伸缩型 EMAT 一般适用于铁磁性材料的超声激励,并且在磁致伸缩带敷设的条件下对非铁磁性材料也具有良好的适应性。由于 EMAT 主要由电磁激励组成,而激发频率、线圈布置、永磁体结构均是可以灵活调节的,因此,可以较方便地调节所激发超声的模式^[34-39],并且其非接触特性也显著扩展了 EMAT 的适用范围,如高温、高压、高速等恶劣工况^[40-46]。SH 导波检测方法是本书研究的核心内容,其优势在于衰减小、无离面位移、信号纯净易于分析、SH0 模态的无频散等,在金属板的检测中具有较大优势^[47-52]。本节将特别针对可激发 SH 导波 EMAT 的线圈与永磁体结构及 SH 导波特性进行综述。

图 1.6(a)展示了基于周期性永磁体(periodic permanent magnet,PPM)和密绕线圈的洛伦兹力型 EMAT,该种结构的换能器包括多匝密绕式线圈和极性呈周期变化的 PPM。感应涡流的方向与激励电流方向相反,根据洛伦兹力原理,在外加磁场的作用下,SH 导波沿着线圈缠绕方向沿两侧传播^[53]。超声波的接收过程为激发的逆过程,因此超声发射换能器也同时具

备接收功能,同时适用于同发同收、一发一收和一发多收等多种换能器的布置形式。然而,密绕型线圈 EMAT 的结构较为复杂,其 PPM 与线圈是不可分割的整体,因此 PPM 与线圈难以灵活调节,从而导致换能器的超声激发和模态调控能力大幅受限。为解决这一问题,Hirao 等提出了一种基于跑道型线圈的分离式 EMAT 结构,如图 1.6(b)所示^[54]。其中,柔性电路板(flexible printed circuit,FPC)取代了传统意义上的线圈作为激励电流的载体,在提高线圈结构设计灵活性的同时,通过跑道型的线圈布置成倍增加了振源数量,从而提高了所激发超声导波的强度。此外,PPM 结构可以通过周期性的线圈设计来简化,从而降低了永磁体的制造和设计成本,如图 1.6(c)所示^[55-56]。但该种换能器难以产生较强的超声振动,且复杂的线圈设计会引入额外的 Lamb 波或其他超声波模态,不利于后续的信号处理与缺陷定位识别,因此在实际检测中很少被使用。一般而言,基于 PPM 的洛伦兹力型 SH 导波 EMAT 普遍工作于 SH₀ 模态,这是由于其具有无频散、不易发生模态转换等利于缺陷检测等优势。另外,如果 SH 导波的频厚积高于 SH₁ 模态的截止频率,则会在试样中产生额外的高阶 SH 导波^[57]。一方面,高阶模态导波会影响 SH₀ 模态导波的缺陷识别准确度,为缺陷检测带来不利影响;另一方面,高阶模态导波由于其高激发频率,因此对微小缺陷更加敏感,适用于小缺陷的高精度检测^[58-60]。因此,研究和选择面向不同缺陷检测场景的 SH 导波激发模态十分重要。

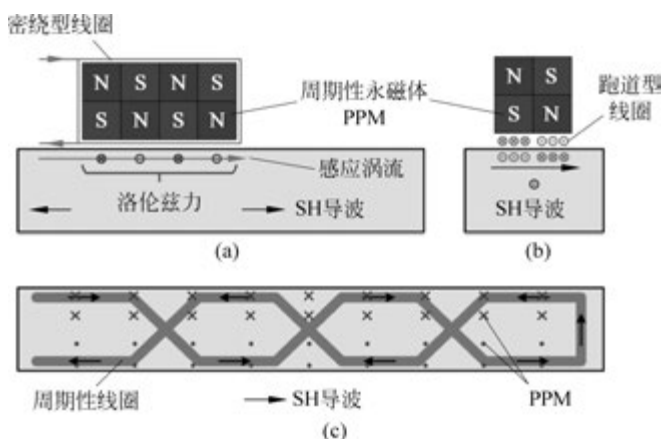


图 1.6 洛伦兹力型 SH 导波 EMAT 结构

(a) EMAT 整体结构; (b) 侧视图; (c) 俯视图

图 1.7 展示了两种磁致伸缩型 SH 导波 EMAT。该种类型的换能器最早由 Thompson 设计,如图 1.7(a)所示,其具有不同极性的永磁体置于线圈两侧,在试样中提供沿着 x 轴方向的背景静态磁场,因此大部分感应电流的方向平行于背景磁场,几乎不存在洛伦兹力的影响。此外,线圈中周期变化的电流会产生垂直于背景磁场的动态磁场,则根据 Wiedemann 效应,铁磁性材料试样中会产生与合成磁场方向相关的往复振动,从而在 y 方向产生双向传播的 SH 导波^[61-62]。这种换能器设计方式仅可以在铁磁性材料表面应用,且换能器的性能会受材料磁导率的影响。因此,将高磁致伸缩性能的材料敷设于被测试样表面,通过环氧树脂等耦合剂传递振动,可以有效地提高磁致伸缩型 EMAT 的能量转换效率,且待测试样也不再受铁磁性材料的限制。但如果被测试样是铁磁性材料,磁致伸缩带的厚度至少应超过被测材料集肤深度的 3 倍,以避免试样中动态磁场的影响。如图 1.7(b)所示,该种 EMAT 一般被称为磁致伸缩薄片式换能器(magnetostrictive patch transducer, MPT),目前在超声导波无损检测领域得到了广泛应用。但是,这种换能器结构也失去了 EMAT 本身具备的非接触特性带来的优势,因此,在实际检测中应用何种类型的换能器需要加以权衡。

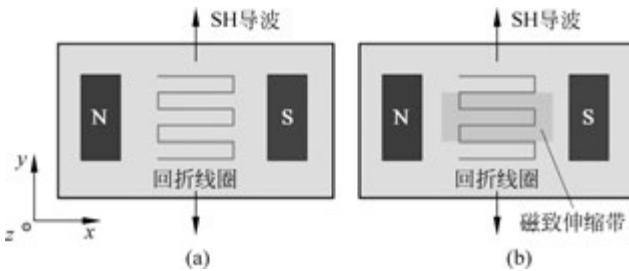


图 1.7 磁致伸缩型 SH 导波 EMAT 结构

(a) 传统磁致伸缩式; (b) 磁致伸缩薄片式

1.2.2 无损检测中的超声聚焦

1. 超声合成聚焦技术

超声合成聚焦技术是超声检测与成像的后处理方法之一,广泛应用于医学治疗、雷达探测、无损检测等领域。区别于主动聚焦方法,合成聚焦的实现不依赖声束的聚焦,而是采用信号处理算法等价地提高成像分辨率。

无损检测超声合成聚焦方法按换能器的数量和布置情况可以分为合成孔径聚焦、共源式聚焦、全矩阵聚焦三种,如图 1.8 所示。

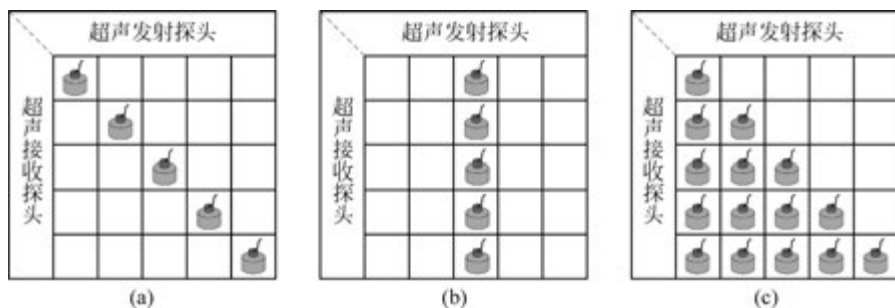


图 1.8 三种不同超声合成聚焦方法示意图,每个探头标记表示发射—接收换能器组的时序

(a) 合成孔径聚焦; (b) 共源式聚焦; (c) 全矩阵聚焦

合成孔径聚焦方法最初被应用于合成孔径雷达技术,后发展至超声成像领域^[63]。该方法采用一发一收型超声换能器进行缺陷的扫查,可以分别实现超声发射的聚焦与超声接收的聚焦。合成孔径聚焦方法的原理是将换能器沿着扫查方向线性移动、逐点采样,在每个孔径位置依次向聚焦区域发射超声信号,随后对不同位置与时刻接收到的声信号的时空相关性进行时延处理、信号叠加、相位加权调制,从而提高聚焦区域内缺陷成像的信噪比。在无损检测领域,Yang 等采用基于激光超声(laser ultrasonic,LU)检测的合成孔径聚焦方法对曲面铝制试样的亚毫米级缺陷进行了有效成像,为LU合成孔径聚焦方法的实际应用提供了重要参考^[64];在此基础上,Ni 等同样采用LU合成孔径聚焦方法,通过在声波信号中进行频率范围选择,实现了微小缺陷的三维可视化,并进一步修正了缺陷的位置,从而提高了缺陷成像分辨率^[65];罗嵘等在合成孔径聚焦方法的基础上采用角谱运算对频域内声场进行重建,实现了钢制主轴缺陷的高精度检测^[66];冯全威针对电磁超声 Lamb 波缺陷检测对合成孔径聚焦方法进行了改进,使板状材料缺陷成像的横向尺寸精度提高了约 20%^[67]。合成孔径聚焦方法在超声无损检测领域已经得到了广泛应用,并在缺陷高精度检测与成像方面发挥着重要作用。

与合成孔径聚焦方法相比,共源式聚焦算法采用了一发多收型换能器阵列对超声检测信号进行多维度的采集和处理,因此会获取到更多关于缺陷的信息。共源式聚焦方法在超声无损检测领域中同样被广泛使用。