

复杂结构中线性与非线性导波的高效模拟方法

申岩峰

(上海交通大学密西根学院, 上海 200240)

摘要: 介绍了一种基于有限差分形式和锐界面模型 (SIM) 的局部作用模拟法 (LISA), 用于模拟超声导波在复杂结构中的传播, 以及与损伤的非线性作用。囊括了典型算例和实验对比结果, 多方面展示了 LISA 在模拟复杂结构中导波传播方面的优势。首先, 讨论了超声导波在各向异性碳纤维层压复合板中的传播。将扫描式激光测振仪测得的实验波场与模拟结果进行对比。其次, 介绍了超声导波与疲劳裂纹非线性作用的模拟。给出了 LISA 用于模拟复杂几何形态结构中非线性超声导波传播的案例—钢轨中多模态超声导波的传播。研究表明, LISA 是一种针对超声现象的高效模拟方法, 在利用超声导波的结构健康监测系统的设计与信号解析中具有重要的理论价值和广阔应用前景。

关键词: 超声导波, 非线性超声, 结构健康监测, 局部作用模拟法, 复杂结构

引言

超声导波以其传播距离远、能量衰减小、对损伤敏感等多种优点在结构健康监测技术中被广泛关注。但是, 又因其多模态、频散等特性, 以及与复杂结构和损伤的线性与非线性作用, 在工程实践中面临诸多挑战。对超声导波的高效模拟具有重要意义: 首先, 它可以给结构健康监测系统的设计提供有效指导; 其次, 它可以帮助洞悉与理解复杂的传感信号。超声导波的模拟方法在应用实践中需要满足以下几点要求: (1) 对高频、短波长、长距离传播的超声现象要具有足够的精度; (2) 运算效率要高, 计算机资源占用要少;

(3) 面向不同的材料、传感器布设、损伤类型等多种组合工况要足够灵活。然而, 现有的商业数值仿真工具, 如各种大型有限元仿真平台, 无法同时满足以上需求。通常遇到因模拟的结构尺寸大、几何形态复杂, 仿真的超声成分频率高、波长短, 而使最终问题的计算量过大, 计算时间过长, 甚至无法实现。

为了应对工程实践中的模拟需求, 学者们提出了很多超声导波的高效模拟方法。Shen 和 Giurgiutiu 利用 Lamb 波的解析解模拟超声波在各项同性的板状结构中的主动传感, 并且将该方法实体化, 形成基于解析模型的仿真平台 WaveFormRevealer^[1]。Kundu 等以及 Clushkov 等利用格林函数构建了分布点源方法 (DPSM) 并且实现了 Lamb 波一维传播的高效仿真^[2,3]。学者们也将多种传统模拟方法进行有机的融合, 并提出了混合高效模拟方法。半解析半有限元法将传统有限元与解析解在频域内进行结合, 完成了一维导波的传播以及与损伤作用的模拟^[4-6]。Gresil 和 Giurgiutiu 将解析解与有限元方法在时域内融合, 用于模拟超声导波的二维传播以及与损伤的相互作用^[7,8]。Shen 和 Giurgiutiu 将此概念拓展到频域融合层面, 达到了更高的模拟效率, 并且进行了实验验证^[9]。

然而, 以上方法大多针对结构形态简单、材料各项同性的工况。在需要考虑材料各向异性、阻尼影响、复杂形态、超声与损伤非线性作用的情况下, 它们却大多捉襟见肘。近期, 一种基于有限差分法和锐界面模型的局部作用模拟法 (LISA) 因其快速的发展与丰富的功能受到广泛关注。Delsanto 等率先推出一维、二维、三维的局部作用模拟法的基础公式, 用于模拟超声波在各项同性多相材料中的传播, 并在并行计算机中运行^[10-12]。LISA 在近期得到了长足的发展, 具体表现在广泛应用于模拟金属结构的超声监测^[13,14], 向各向异性材料模拟的拓展^[15-17], 耦合场分析能力的提升^[18], 与传统数值方法的有机融合^[19,20], 以及并行计算构架 (CUDA) 技术下基于显卡的大规模高效运算^[21-23]。本文作者的最新研究将罚函数法引入局部作用模拟法中, 实现了声学接触非线性的模拟与仿真^[24]。

本文将介绍 LISA 用于模拟线性与非线性超声导波在复杂结构中的传播。LISA 由基本的弹性动力学方程推导而来, 通过 Kelvin-Voigt 粘弹性模型考虑材料各向异性与阻尼的影响。LISA 可以与压电耦合场有限元模型进行融合, 以捕捉作动器对导波的激发特性。通过向模型中引入罚函数法, 可以模拟疲劳裂纹与超声相互作用时的声学接触非线性效应, 并通过库仑模型, 捕捉裂纹界面的粘滑运动形式。整个求解过程以 C++ 编写, 通过并行计算构架技术 (CUDA) 在显卡上实现。LISA 的显式求解形式和基于显卡的大规模并行运算构架使其计算效率远远高出传统的数值模拟方法。本文将囊括典型算例和实验对比结果, 多方面展示 LISA 在模拟复杂结构中导波传播方面的优势。首先, 本项工作将讨论超声导波在各向异性碳纤维层压复合板中的传播。将扫描式激光测振仪测得的实验波场与模拟结果进行对比。其次, 本文将介绍超声导波与疲劳裂纹非线性作用的模拟。将给出 LISA 用于模拟复杂几何形态波导中非线性超声波传播的模案例—钢轨中多模态超声导波的传播。

1 局部作用模拟法的基本构架与基于显卡的并行运算

本小节将介绍局部作用模拟法的基本原理与实现构架。图 1 展示的是局部作用模拟法的推到过程和基本功能。LISA 以有限差商形式近似弹性动力学方程，得到的方程系数仅取决于材料的力学属性。利用锐界面（SIMI）模型实现网格单元节点的位移与应力的连续协调。因此，任意计算节点周边的材料多相性可以通过方程系数进行捕捉。读者可在文献[16]中找到 LISA 方程的具体推演过程。超声导波的激发可由局部有限元模型耦合场分析获得，并输入到 LISA 运算模块中。Kelvin-Voigt 粘弹性模型将各向异性阻尼效应引入到模型之中。这些使模拟超声导波在各向异性复合材料中的激发、传播、衰减成为可能。文献[20]对这一工作进行了具体的理论推导和论述。LISA 构架与商业有限元软件前处理模块紧密结合，可以方便的对实体模型进行建立、网格划分以及材料布设，这使得 LISA 构架能够轻松的模拟复杂几何形态和材料分布的工程结构。通过向模型中引入罚函数法，可以模拟疲劳裂纹与超声相互作用产生的声学接触非线性效应，并通过库仑模型，捕捉裂纹界面的粘滑运动形式。LISA 构架中还囊括了吸收边界功能，可以去除边界反射对传感信号的不良影响，利用有限尺寸的模型模拟无限波场的传播，大大提高运算效率，突出主要研究对象。

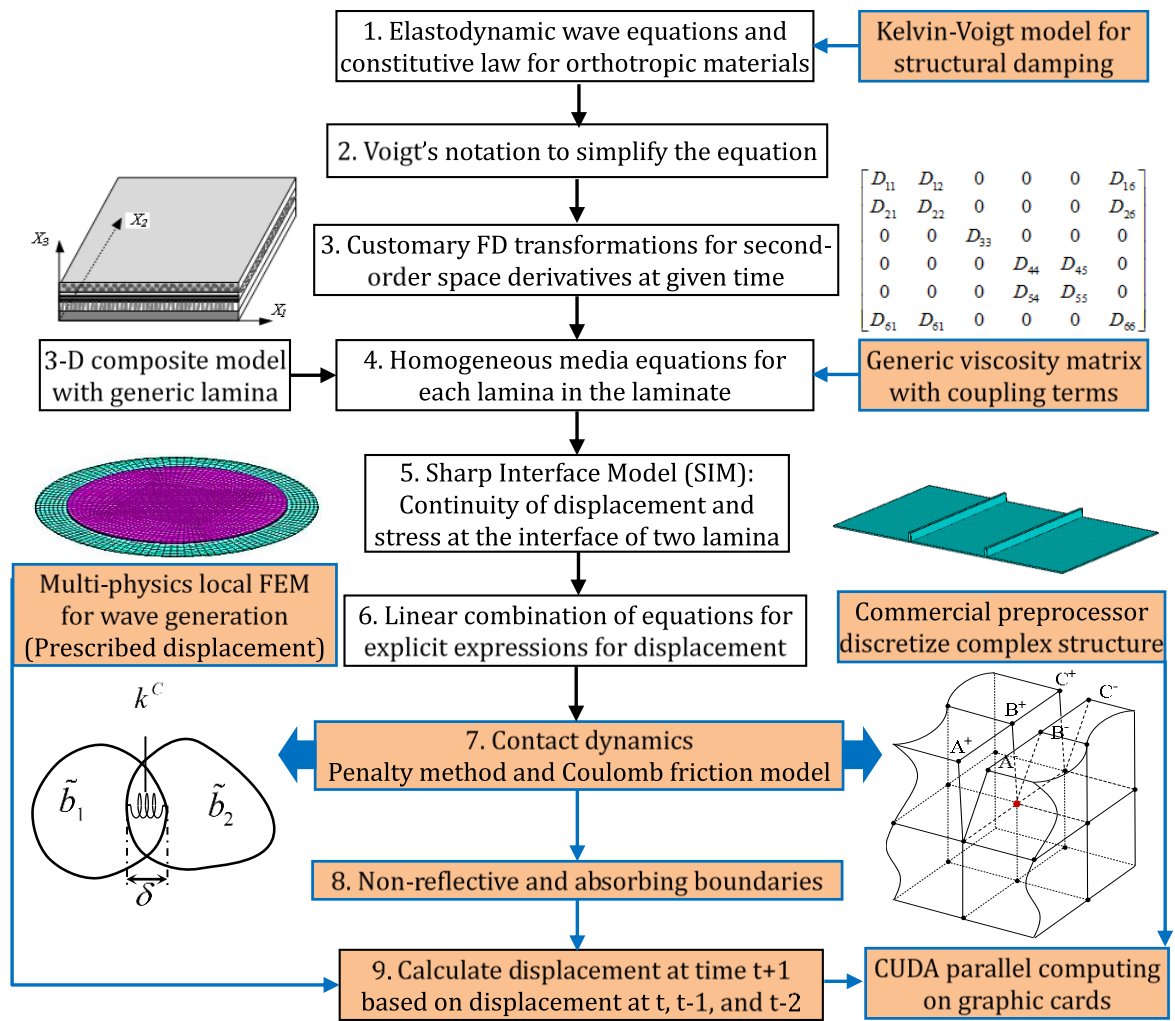


图 1 模拟复杂结构中超声导波的激发、传播、与损伤非线性作用的 LISA 模型构架

Fig.1 LISA framework for modeling guided wave generation, propagation, and nonlinear interaction with damage in complex structures

LISA 模型的高效运算在显卡（GPU）中利用并行运算构架（CUDA）得以实现。LISA 模型的以下两个特点使其具备了显卡并行计算的适用性：其一，LISA 方程求解是显式、大规模并行化的，这是因为每一个计算节点在当前时间步的计算结果只取决于其相邻 18 个节点在前三步的结果。也就是说，在计算目标时

间步，所有的计算节点是相互独立的。其二，超声导波的数值模型要求对模拟域进行细致的离散划分，这使最终的问题计算量非常之重。显卡，以其众多平行同步线程的特点，极为适合将运算工作量分配到各个功能单元之中，实现并行运算。为了利用 GPU 并行计算的优越性能，LISA 通过 CUDA 并行构架技术进行高效的显卡运算。所有参数现在中央处理器中建立，然后传输至显卡内存中。LISA 模型中的每一个节点都在相应的同步线程中进行运算。该线程收集目标计算节点的 18 个相邻节点前三步的结果信息与周围八个相邻单元的材料参数信息，通过 LISA 方程进行并行显式运算。在 GPU 内存中产生的结果文件最终被传输回主机内存和硬盘当中。需要指出，利用显卡进行并行计算的速度瓶颈一般在主机内存与显卡内存数据的交互上，所以 LISA 构架只在需要的目标时间间隔才向主机内存传送结果，以提高整体的运算效率。

2 超声导波在各向异性复合材料中的衰减与传播

复合材料在航空航天与民用高端设备中的广泛应用给基于导波的结构健康监测技术带来了很多挑战。复合材料的各向异性使导波的激发、传播都具有很强的方向特征。相比于传统金属材料，复合材料的阻尼影响明显，不可忽略。因此，对超声导波在复合材料中的主动传感的模拟可以为复合材料的结构健康监测提供重要的理论支撑和设计指导。本小节介绍 LISA 模拟超声导波在复合材料中激发、传播、衰减的案例以及与实验数据的对比结果。

图 2 描述的是利用扫描式激光测振仪测量超声导波在碳纤维复合材料板中传播的实验设置。本项研究中以两种不同铺层的纤维板作为对象，分别是单向铺层 $[0]_{12T}$ 与交叉铺层 $[0/90]_{3S}$ 两种 1.5mm 厚的复合纤维板。由 Agilent 33522A 函数发生器产生的三周期脉冲信号经过 Krohn-hite 7500 功率放大器的放大，施加到直径为 12.8 mm 厚度为 0.23 mm 的压电片状传感器上。压电传感器激发出超声导波，沿版面传播开来，其面外振动成分被 PSV-400-M4 扫描式激光测振仪接收。为了提高信号质量，在扫描区域粘贴了反光图层。

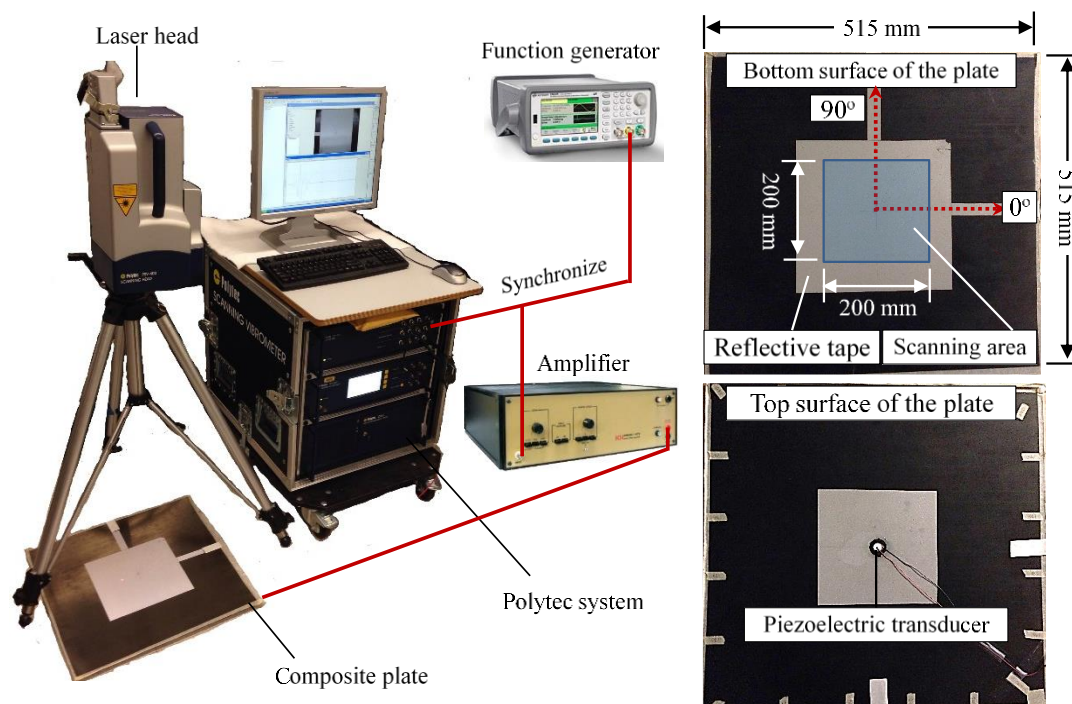


图 2 利用扫描式激光测振仪测量超声导波在复合材料中的传播的实验设置

Fig.2 Experimental setup using Scanning Laser Doppler Vibrometry for wave propagation in composite panels

图 3 展示的是频率为 75kHz 的超声导波在两种铺层的复合材料板中传播的模拟结果和实验结果的对比。第一行对应的是单向铺层的结果；第二行对应的是交叉铺层的结果。第一列显示的是利用作者开发的基于半解析半有限元法的模拟软件 (SAFE-DISPERSION) 得到的基本模式 (S_0, A_0, SH_0) 的群速度图^[25]；第二列显示的是激光测振仪测得的实验波场；第三列显示的是 LISA 的模拟结果。群速度图表明在单向铺层 $[0]_{12T}$ 复合材料中， S_0 波沿着纤维方向具有很大的传播速度，并远远高于 A_0 波。 S_0 波与 A_0 波沿着纤维

方向的传播速度最快，远远高于垂直于纤维方向的速度。这体现出了明显的各向异性特征。在交叉铺层 $[0/90]_{ss}$ 复合材料中沿着 0 度和 90 度纤维布设方向，导波的传播速度最快，而且沿着这两个方向的速度基本相当。从导波的传播波场分析，在单向铺层复合板中主要的能量的激发方向沿着纤维方向，而在 90 度方向振幅较小。而在交叉铺层复合板中的导波则在 0 度和 90 度方向都有较高的幅值。同时值得注意的是，在复合材料中导波沿着传播方向衰减较快，而对比结果显示 LISA 模型可以很好的捕捉各向异性阻尼对衰减的影响。图 3 显示 LISA 的模拟结果与激光测振仪的实验结果非常吻合。可见，LISA 模型对导波方向性激发的强度，传播的速度，衰减的幅度都实现了精确的模拟。值得指出的是，针对该问题的 LISA 模型对每一层材料都进行了离散，采用了 0.25 mm 面内尺寸与 0.125 mm 厚度尺寸的微小网格。这对于传统有限单元法无疑是非常沉重的计算量，即使在高性能工作站中也要进行十几个小时以上的运算。然而基于显卡的并行计算构架使 LISA 得以实现高效的运算，总体的计算时间在半个小时左右。本算例展示了 LISA 用于模拟在各向异性、高阻尼材料中的超声导波主动传感的优越、高效的仿真能力。

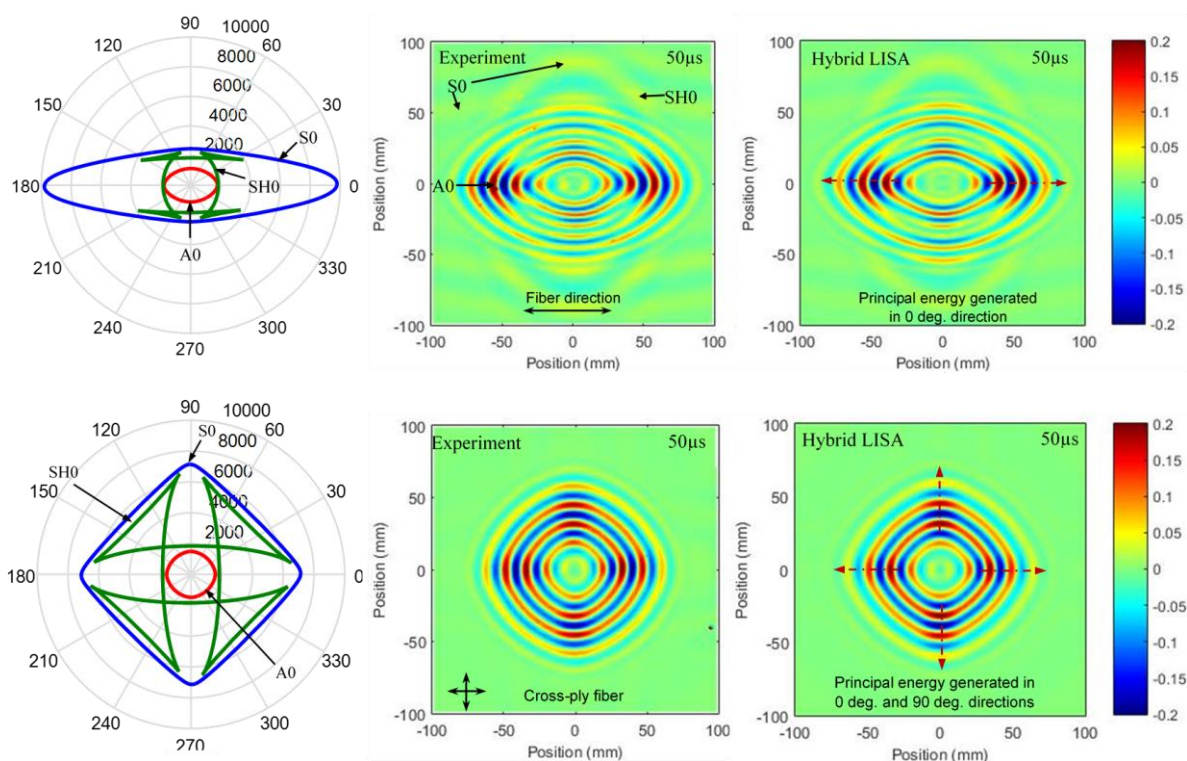


图 3 超声导波在单向铺层（第一行）与交叉铺层（第二行）复合材料中传播的模拟结果与实验结果对比
Fig.3 Comparison of guided wave propagation patterns between LISA solution and SLDV measurement in a unidirectional composite panel (first row) and a cross-ply composite panel (second row)

3 复杂集合形态结构中非线性超声导波的模拟

针对超声导波的数值模拟技术在工程实践中遇到的最普遍的挑战就是结构复杂的几何形态对导波的影响。正如引言中提及的，新兴的模拟技术大多存在应对复杂结构的局限性。LISA 由于其离散化数值模拟方法可以有效的应对复杂几何形态带来的挑战。另外，非线性超声传感技术的发展也对各种模拟方法提出了新的要求^[26-28]。然而针对超声导波与疲劳裂纹的非线性相互作用的模拟是非常具有挑战性的工作。本小节将通过钢轨中超声导波的传播以及与疲劳裂纹非线性作用的模拟来展示 LISA 在面向复杂结构和非线性超声仿真方向的卓越能力和优势。

3.1 钢轨结构的 LISA 模型

图 4 展示的是导波在钢轨中传播以及与疲劳裂纹作用的 LISA 模型。两处 100 kHz, 10 周期的表面脉冲荷载模拟传感器对导波的激发。超声导波以其多模态与频散特性沿着钢轨传播开来，与疲劳裂纹作用，

并最终在传感点被接收。在模型的两端布设了渐增阻尼法的吸收边界，用于去除边界反射对传感型号的影响。这样，利用有限尺寸的数值模型，可以完成对导波在无限长钢轨中传播的模拟。钢轨横截面的离散尺寸为 1 mm，沿着钢轨长度方向的离散尺寸为 2 mm。根据 Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) 条件，对应 CFL 数为 0.9 的时间步长为 110.33 ns。该三维模型显示，LISA 的离散网格可以捕捉复杂的几何形态。

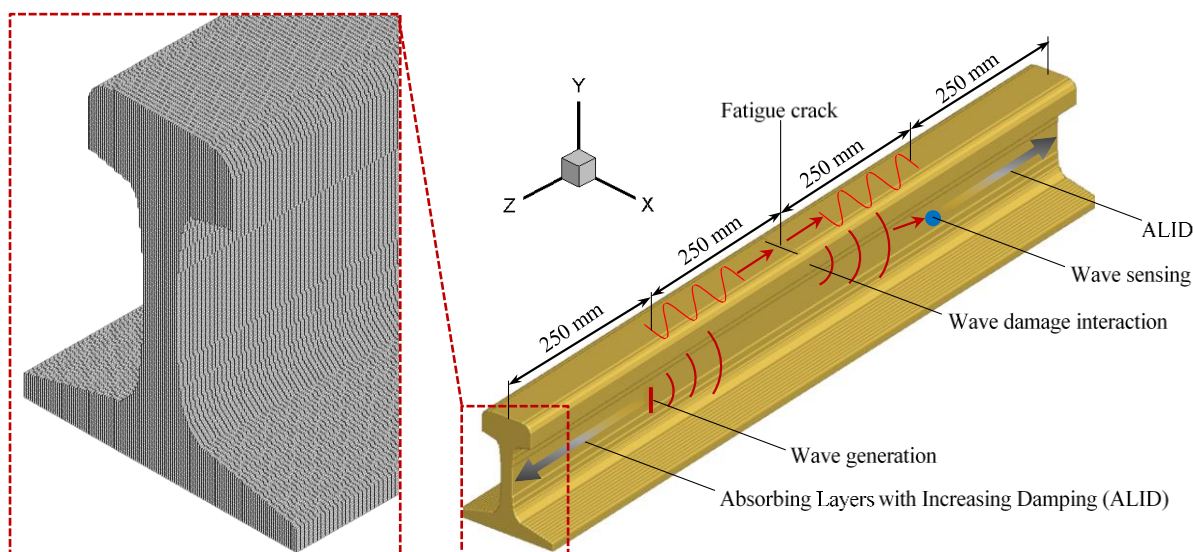


图 4 导波在钢轨中传播以及与疲劳裂纹作用的 LISA 模型

Fig.4 LISA model for guided wave propagation and interaction with a fatigue crack in a rail track

为了模拟疲劳损伤，LISA 模型采用参数化方法定义疲劳裂纹区域。图 5 (a) 展示的是钢轨中典型的疲劳区域。图 5 (b) 显示的是名义尺寸为 a 的损伤区域的参数化模型。本算例将展示超声导波在无损伤 ($a=0$ mm) 和严重损伤 ($a=20$ mm) 两种工况下，超声导波的传播特点以及信号特征，以突出导波与裂纹非线性作用模拟效果。

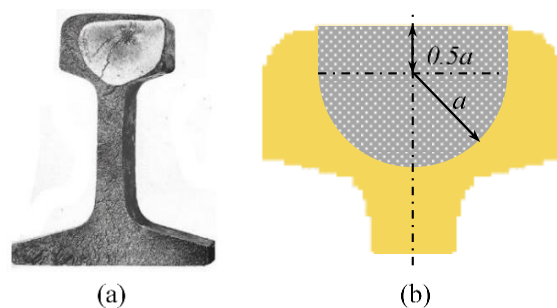


图 5 (a) 钢轨中典型的疲劳区域^[29]; (b) LISA 模型中模拟疲劳区域的参数化模型

Fig.5 (a) Typical fatigue zone in a rail track^[29]; (b) parametric fatigue crack zone in the LISA model

3.2 超声导波在钢轨中的传播以及与损伤的非线性作用

图 6 展示了超声导波在钢轨中的激发、传播以及与损伤相互作用的 LISA 仿真结果。图 6 (a) 展示的是不同时刻的波场图像：在 50 μ s 时，超声波被激发出来并且开始向结构中传播；150 μ s 时，导波的多模、频散态特性充分体现，其在钢轨中传播开来并且与损伤相互作用；300 μ s 时，可以观察到，超声导波被钢轨两端的吸收边界有效的吸收殆尽。模拟结果显示，在复杂结构形态的钢轨中导波的模态非常复杂。图 6 (b) 展示的是导波与损伤相互作用的细节。裂纹在导波周期作用下开闭的现象非常明显。正是这种裂纹开闭现象向超声信号中引入了非线性成分。模拟结果同时表明，LISA 可以充分模拟裂纹界面在超声作用下的非线性接触动力学现象。

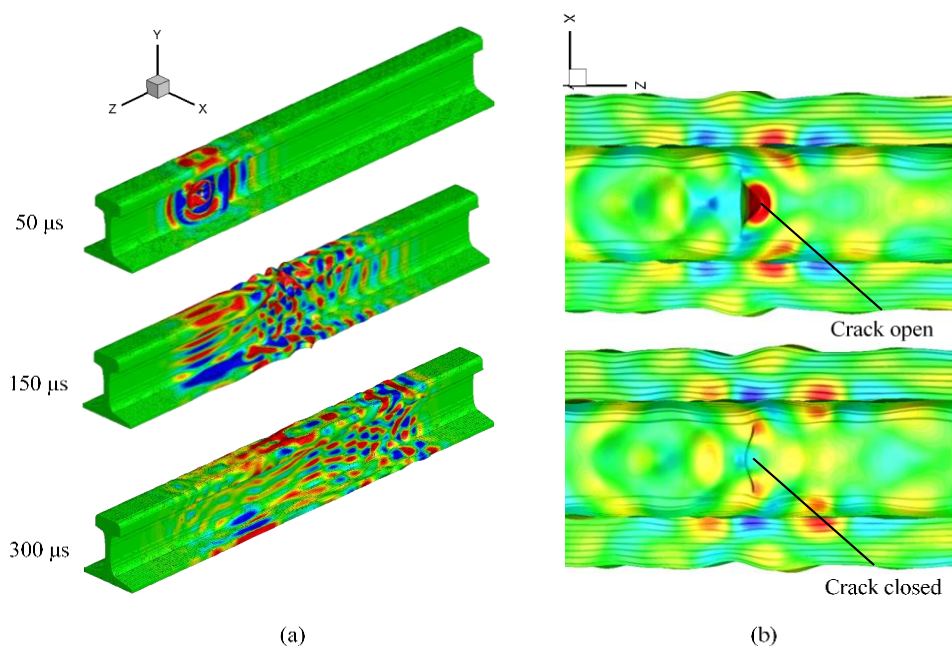


图 6 (a) 导波在钢轨中的激发、传播、与疲劳裂纹的相互作用；(b) 导波与裂纹的非线性作用过程中裂纹的开闭现象

Fig.6 (a) Guided wave generation, propagation, and interaction with a fatigue crack in the rail track; (b) guided wave crack nonlinear interactions with crack open and close phenomenon

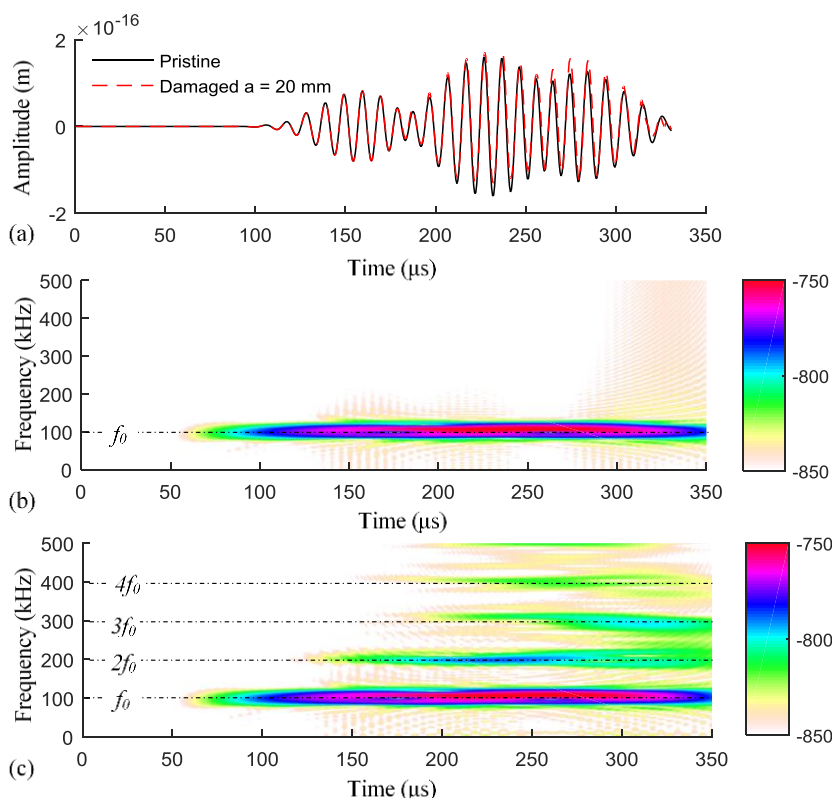


图 7 (a) 无损伤与损伤工况下时域信号的比较；(b) 无损伤工况信号的时频特征；(c) 有损伤工况信号的时频特征。注意有损伤工况中出现了明显的非线性高阶谐波成分。

Fig.7 (a) Comparison of time domain sensing signals between pristine and damaged case; (b) time-frequency domain presentation of the pristine case sensing signal; (c) time-frequency domain presentation of the damaged case sensing signal. Note the appearance of super-harmonic components in the damaged case signal

图 7 展示的是对应无损伤 ($a=0$ mm) 和严重损伤 ($a=20$ mm) 两种工况下的传感信号以及其时频分析结果。可以观察到, 时域信号由于多模态和频散等导波特性和而显得十分复杂, 具有多个波包。传统的线性导波结构健康监测技术是根据信号的幅值变化、相位偏移或能量散射等特征来作出诊断的。然而对于疲劳裂纹这类损伤, 其时域信号的变化非常不明显 (如图 7 (a) 所示)。相反, 如果利用传感信号的非线性特征, 损伤的影响就被凸显出来了。图 7 (b)、(c) 展示的是无损伤工况和严重损伤工况传感信号的时频分析结果。对于无损伤工况, 在其频域内只有对应于 100 kHz 激励的频率成分。然而, 严重损伤的工况信号的频域成分除了激励频率 100 kHz 之外, 还存在有 200 kHz、300 kHz、400 kHz 等明显的非线性高阶谐波成分。这也说明了非线性超声方法对诊断疲劳裂纹的敏感优势。

本算例说明 LISA 能够模拟在复杂几何形态中超声导波的传播以及与损伤的非线性作用。值得强调的是本实例中钢轨的模型尺寸达到了一千万个自由度。对于传统有限元分析来说, 这中计算量的模拟工作基本无法企及。然而 LISA 通过显卡的并行计算使针对如此巨大计算量的仿真可以在短时间内高效完成。

4 结 论

本文介绍了一种基于有限差分形式和锐界面模型 (SIM) 的局部作用模拟法 (LISA), 用于模拟超声导波在复杂结构中的传播, 以及与损伤的非线性作用。通过典型算例和实验对比结果, 多方面展示了 LISA 在模拟复杂结构中导波传播方面的优势。超声导波在各向异性碳纤维层压复合板中传播的研究中, LISA 模拟结果与扫描式激光测振仪测得的实验波场达到了很高的吻合度和模拟精度。实验验证表明: LISA 能够精确捕捉超声导波在复合材料中激发、传播、衰减等各向异性特征。其次, 本文介绍了超声导波与疲劳裂纹非线性作用的模拟。给出了 LISA 用于模拟复杂几何形态结构中非线性超声波传播的案例—钢轨中多模态超声导波的传播以及与疲劳裂纹的非线性作用。该算例展示了 LISA 对于模拟复杂结构形态和损伤界面声学接触非线性的强大功能。LISA 由于其基于显卡的大规模并行运算构架达到了传统有限元分析难以实现的模拟效率。研究表明, LISA 是一种针对超声现象的高效模拟方法, 在利用超声导波的结构健康监测系统的设计与信号解析中具有重要的理论价值和广阔的应用前景。

参考文献

- 1 Shen Y. and Giurgiutiu V., WaveFormRevealer: An analytical framework and predictive tool for the simulation of multi-modal guided wave propagation and interaction with damage, *Structural Health Monitoring: An International Journal*, 2014, vol. 13, no. 5, pp. 491-511
- 2 Rahani E. and Kundu T., Modeling of Transient Ultrasonic Wave Propagation Using the Distributed Point Source Method, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2011, vol. 58, no. 10
- 3 Glushkov E., Glushkova N., Lammering R., Eremin A. and Neumann M., Lamb wave excitation and propagation in elastic plates with surface obstacles: proper choice of central frequency, *Smart Materials and Structures*, 2011, 1-11
- 4 Srivastava A., Quantitative structural health monitoring using ultrasonic guided waves, PhD Thesis, University of California, San Diego, CA, 2009
- 5 Benmeddour F., Treysse F. and Laguerre L., Numerical modeling of guided wave interaction with non-axisymmetric cracks in elastic cylinders, *International Journal of Solids and Structures*, 2011, pp. 764-774
- 6 Ahmad Z., Vivar-Perez J. and Gabbert U., Semi-analytical finite element method for modeling of Lamb wave propagation, *CEAS Aeronaut Journal*, 2013, vol. 4, pp. 21-33
- 7 Gresil M. and Giurgiutiu V., Time-domain global-local concept for guided-wave propagation with piezoelectric wafer active sensor, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, vol. 24, no. 15, pp. 1897-1911
- 8 Gresil M. and Giurgiutiu V., Time-domain global-local prediction of guided waves interaction with damage, *Key Engineering Materials*, 2013, vol. 559, pp. 116-127
- 9 Shen Y. and Giurgiutiu V., Combined analytical FEM approach for efficient simulation of Lamb wave damage detection, *Ultrasonics*, 2016, vol. 69, pp. 116-128
- 10 Delsanto P., Whitcombe T., Chaskelis H. and Mignogna R., Connection machine simulation of ultrasonic wave propagation in materials. I: The one-dimensional case, *Wave Motion*, 1992, vol. 16, no. 1, pp. 65-80
- 11 Delsanto P., Schechter R., Chaskelis H., Mignogna R. and Kline R., Connection machine simulation of ultrasonic wave propagation in materials. II: The two-dimensional case, *Wave Motion*, 1994, vol. 20, no. 4, pp. 295-314

- 12 Delsanto P., Schechter R. and Mignogna R., Connection machine simulation of ultrasonic wave propagation in materials III: The three-dimensional case, *Wave Motion*, 1997, vol. 26, no. 4, pp. 329-339
- 13 Lee B. and Staszewski W., Modeling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part I. wave propagation, *Smart Materials and Structures*, 2003, vol. 12, no. 5, pp. 804-814
- 14 Lee B. and Staszewski W., Modeling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part II. wave interactions with damage, *Smart Materials and Structures*, 2003, vol. 12, no. 5, pp. 815-824
- 15 Sundararaman S. and Adams D., Modeling guided waves for damage identification in isotropic and orthotropic plates using a local interaction simulation approach, *Journal of Vibration and Acoustics*, 2008, vol. 130, no. 4, pp. 1-16
- 16 Nadella K. and Cesnik C.E.S., Numerical simulation of wave propagation in composite plates, in *SPIE Smart Structures and NDE*, 2012, San Diego
- 17 Nadella K. and Cesnik C.E.S., Local interaction simulation approach for modeling wave propagation in composite structures, *CEAS Aeronautical Journal*, 2013, vol. 4, no. 1, pp. 35-48
- 18 Nadella K. and Cesnik C.E.S., Effect of piezoelectric actuator modeling for wave generation in LISA, in *SPIE Smart structures and NDE*, 2014, San Diego
- 19 Obenchain M., Nadella K. and Cesnik C.E.S., Hybrid global matrix/local interaction simulation approach for wave propagation in composites, *AIAA Journal*, 2014, p. DOI: 10.2514/1.J053101
- 20 Shen Y. and Cesnik C.E.S., Hybrid local FEM/global LISA modeling of damped guided wave propagation in complex composite structures, *Smart Materials and Structures*, 2016, vol. 25, no. 9, pp. 1-20
- 21 Packo P., Bielak T., Spencer A. B., Uhl T., Staszewski W. J., Worden K., Barszcz T., Russek P. and Wiatr K., Numerical simulations of elastic wave propagation using graphical processing units -- Comparative study of high-performance computing capabilities, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 2015, vol. 290, no. 1, pp. 98-126
- 22 Kijanka P., Radecki R., Packo P., Staszewski W. and Uhl T., GPU-based local interaction simulation approach for simplified temperature effect modelling in Lamb wave propagation used for damage detection, *Smart Materials and Structures*, 2013, vol. 22, no. 3, pp. 1-16
- 23 Packo P., Bielak T., Spencer A., Staszewski W., Uhl T. and Worden K., Lamb wave propagation modelling and simulation using parallel processing architecture and graphical cards, *Smart Materials and Structures*, 2012, vol. 21, no. 7, pp. 1-13
- 24 Shen Y. and Cesnik C.E.S., Modeling of nonlinear interactions between guided waves and fatigue cracks using local interaction simulation approach, *Ultrasonics*, 2017, vol. 74, pp. 106-123
- 25 Shen Y. and Giurgiutiu V., Excitability of guided waves in composites with PWAS transducers 41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, *AIP Conf. Proc.*, 2015, 1650 658-67
- 26 Biwa S., Nakajima S. and Ohno N., On the Acoustic Nonlinearity of Solid-Solid Contact With Pressure-Dependent Interface Stiffness, *Journal of Applied Mechanics*, 2004, vol. 71, no. 4, pp. 508-515
- 27 Dutta D., Sohn H., Harries K. A. and Rizzo P., A nonlinear acoustic technique for crack detection in metallic structures, *Structural Health Monitoring, An International Journal*, 2009, vol. 8, no. 3, pp. 251-262
- 28 Su Z., Zhou C., Hong M., Cheng L., Wang Q. and Qing X., Acousto-ultrasonics-based fatigue damage characterization: linear versus nonlinear signal features, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, vol. 45, no. 1, pp. 225-239
- 29 Kingery R., Berg R. and Schilling E., *Men and Ideas in Engineering*, University of Illinois Press, 1967

AN EFFICIENT MODELING STRATEGY FOR LINEAR AND NONLINEAR GUIDED WAVE PROPAGATION IN COMPLEX STRUCTURES

Yanfeng Shen

(*UM-SJTU Joint Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

Abstract: This paper presents a Local Interaction Simulation Approach (LISA) based on the Finite Difference (FD) method and Sharp Interface Model (SIM) for the efficient modeling of ultrasonic guided wave propagation and nonlinear interaction with damage in complex structures. Case studies and experimental verifications are carried out to demonstrate LISA's prowess for wave modeling tasks. First, the case study for ultrasonic guided wave propagation in anisotropic carbon fiber composite panels are presented. The simulation results are compared with experimental measurements using Scanning Laser Doppler Vibrometry (SLDV). Then, the case study on guided wave propagation in complex structures and nonlinear wave damage interactions is presented. It addresses the wave propagation in a rail track with a fatigue crack. This research shows that LISA is a highly efficient modeling technique for guided wave simulations and possesses great application potential in structural health monitoring (SHM) for system design and sensing signal interpretation.

Key words: ultrasonic guided waves, nonlinear ultrasonics, structural health monitoring, local interaction simulation approach, complex structure