

文章编号: 1671-7449(2026)01-0010-07

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(1): 10-16.

螺栓连接接触区域对导波传播特性影响分析

董 晗¹, 李佳鑫^{2,3}, 史维佳^{2,3}, 赵 勃^{2,3}, 杨 彬^{1*}, 谭久彬^{2,3}

(1. 哈尔滨工业大学 精密声光仪器研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

3. 哈尔滨工业大学 超精密仪器技术及智能化工部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 螺栓连接广泛应用于航空航天、机械和土木工程中, 其失效会严重影响系统可靠性与安全性。因此, 螺栓预紧力的在线监测至关重要。超声导波因穿透性强、传播距离远、检测灵敏度高, 被广泛用于螺栓监测, 但导波与螺栓连接界面相互作用机制尚不清晰。为此, 建立二维频域有限元模型, 通过扫频分析验证模型准确性, 并研究不同激励频率下 A0 和 S0 模态的最优激发频率。仿真结果表明, 导波与连接界面作用时发生模态转换, 各模态能量传输系数随接触长度呈周期性变化。当激励频率为 255 kHz 时, A0 模态对接触长度变化更敏感, 适用于早期松动检测; 当频率为 345 kHz 时, S0 模态周期更长, 适合螺栓从紧固到完全松动的全过程监测。

关键词: 超声导波; 传输系数; 螺栓连接; 有限元仿真; 结构健康监测

中图分类号: TB551

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026005

引用格式: 董晗, 李佳鑫, 史维佳, 等. 螺栓连接接触区域对导波传播特性影响分析[J]. 测试技术学报, 2026, 40(1): 10-16.

DONG Han, LI Jiaxin, SHI Weijia, et al. Analysis of influence of bolt connection contact area on guided wave propagation characteristics[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(1): 10-16.

Analysis of Influence of Bolt Connection Contact Area on Guided Wave Propagation Characteristics

DONG Han¹, LI Jiaxin^{2,3}, SHI Weijia^{2,3}, ZHAO Bo^{2,3}, YANG Bin^{1*}, TAN Jiubin^{2,3}

(1. Institute of Precision Acousto-optic Instrument, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Center of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

3. Key Lab of Ultra-Precision Intelligent Instrumentation, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Bolt connections are widely used in aerospace, mechanical, and civil engineering, and their failure can significantly impact system reliability and safety. Therefore, online monitoring of bolt preload is crucial. Due to their strong penetration ability, long propagation distance, and high detection sensitivity, ultrasonic guided waves are widely applied in bolt monitoring. However, the interaction mechanism between guided waves and bolt connection interfaces remains unclear. To address this issue, a two-dimensional frequency-domain finite element model is developed and its accuracy is validated through fre-

【收稿日期】2025-01-08

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(2022YFB3403904)

【作者简介】董 晗(1995—), 女, 博士生, 主要从事螺栓松动结构健康检测研究。E-mail: donghan@stu.hit.edu.cn。

*【通信作者】杨 彬(1972—), 男, 教授, 博士, 主要从事功能材料物理学、超声检测等研究。E-mail: ljx_hit@hit.edu.cn。

quency sweep analysis, and the optimal excitation frequencies is studied for A0 and S0 modes under different excitation frequencies. Simulation results show that guided waves undergo mode conversion when interacting with the connection interface, and the energy transmission coefficients of each mode exhibit periodic changes with contact length. At an excitation frequency of 255 kHz, the A0 mode is more sensitive to changes in contact length, suggesting that it is suitable for early looseness detection. At 345 kHz, the S0 mode exhibits a longer periodicity, demonstrating that it is more suitable for monitoring the entire process from tightening to complete loosening.

Key words: ultrasonic guided wave; transmission coefficient; bolted connection; finite element simulation; structural health monitoring

0 引言

在航空航天工程、机械工程等多个工程领域,螺栓连接作为一种常用的紧固件,已被广泛用于将不同的部件固定在一起^[1]。然而,随着使用时间的增加,螺栓在机械振动、化学腐蚀或者外力的作用下会产生松动,导致螺栓连接结构失效,这对如飞机运行系统、输电铁塔工作系统、风电塔筒运维系统等系统的可靠性和安全性都会产生很大影响,甚至导致严重的灾难^[2-3]。因此,对螺栓连接结构预紧力进行在线监测具有重要意义。

螺栓预紧力检测方法主要有振动检测法、压电阻抗法以及超声导波法。其中,由于超声导波具有穿透性强、传播距离远、检测灵敏度高、应用范围广等优点^[4],被广泛应用于螺栓连接结构的在线监测^[5-6]。当螺栓预紧力发生变化时,结构中传播的导波特性会发生复杂的改变,不仅包含导波参数(如导波幅值、导波波速、导波频率等)的变化,也存在不同导波信号之间的模态转换。根据分析的导波参数不同,目前超声导波法主要分为基于能量的主动传感法、基于超声波速的声弹性效应法和基于谐波的方法^[7-8]。其中,基于超声波速的声弹性效应法的核心部分需要获取相移,而由于螺栓松动引起的相移相当小,需要高灵敏度设备^[9]。基于谐波的螺栓预紧力测量方法具有较高的测量灵敏度,但仅适用于测量单个螺栓松动^[10]。基于能量的主动传感法螺栓预紧力监测依据是波能量耗散法^[11]。由于螺栓连接表面粗糙,存在超声波能量消耗,当结构保持稳定时,能量的消耗量也恒定,当螺栓连接面积发生变化时,能量耗散也会发生变化。因此,基于能量的主动传感法测量螺栓松动更加直观,而且适用于多螺栓松动检测,得到了许多学者的广泛研究。

Su 等^[12]提出了一种评估螺栓扭矩水平和热防

护板螺栓松动位置的波能量耗散(Wave Energy Dissipating, WED)方法。该方法采用导波通过螺栓连接界面时的衰减能量和衰减速度来进行螺栓松动表征。基于微接触理论和实验理论解释表明,传递的导波能量与连接界面的实际接触面积成正比,而真接触面积取决于接触压力。在此基础上,Wang 等^[13]通过螺栓连接传递的波能检测螺栓预紧力,验证了螺栓扭矩面积显著影响螺栓界面传递的导波能量。实验结果表明,传递的波能量与扭矩大小成正比,但当施加较大扭矩时,传递的波能量不再发生变化,这被称为饱和现象。Amerini 等和 Jiang 等同样使用透射导波能检测不同锚杆节点的锚杆预紧力,也观察到饱和现象^[14-16]。因此,使用 WED 方法很难对螺栓松动进行早期监测。

根据文献调研^[17-18],螺栓预紧力检测存在过饱和问题的主要原因包括:1) 预紧力达到一定值后,螺栓连接界面实际接触面积趋于稳定,不再随预紧力增大而变化;2) 超声导波的多模态和频散特性导致导波与连接界面作用后模态信号复杂化,不同模态的能量和相移变化叠加干涉,影响透射信号的能量分析,降低检测灵敏度。原因1) 难以人为改善,因此,需通过分析导波与连接结构的作用机制选择敏感模态,提高检测灵敏度。本文通过构建螺栓连接二维频域有限元模型,仿真分析激励频率对导波激励效率的影响,以及不同接触面积下各模态导波的能量传输系数,确定了最佳激励频率和对接触面积敏感的导波模态,为螺栓预紧力监测系统的设计优化提供依据。

1 方法论述

1.1 有限元仿真模型构建

为分析导波在螺栓连接结构中的传播特性,利

用COMSOL建立二维有限元模型(见图1)。使用二维简化模型可以在保证导波传输机制完整性的前提下显著提升计算效率。尤其在扫频分析中,三维模型因需处理多自由度接触动力学问题,会引发网格规模与求解时间的指数级增长,故本研究无需依赖三维全特征仿真即可实现目标参数的精准提取。同时,为降低计算成本,螺栓连接部分简化为两块铝板的接触区域,通过改变接触长度模拟预紧力变化。根据弹性波的传播过程,将结构分为传输、接触和

接收区域。由于铝板接触界面粗糙度和气隙尺寸远小于导波波长,接触区域被建模为光滑表面,不考虑粗糙接触。仿真模型中,两铝板间设有间隙,接触区域边界通过不同条件模拟接触与分离。为消除边界反射干扰,两侧添加完美匹配层,并设置低反射边界条件。宽度7 mm、厚度1 mm的压电晶片(PZT-5A)置于传输区域作为激励源激发导波信号。因铝板阻尼较小,模型中忽略阻尼,6061铝板材料与几何参数如表1所示。

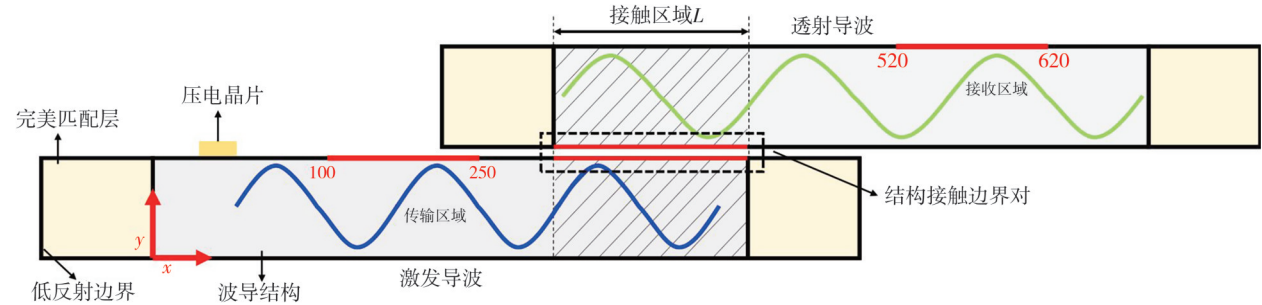


图1 超声导波在螺栓连接中的传播示意图

Fig. 1 Diagram of ultrasonic guided wave propagation in bolted joint.

表1 铝板材料参数和几何参数

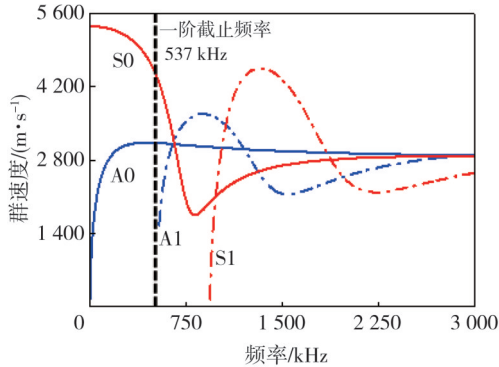
Tab. 1 Aluminum plate material parameters and geometric parameters

杨氏模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	长度/mm	厚度/mm
69	0.33	2 700	400	3

1.2 有限元仿真模型准确性验证

由于超声导波具有频散多模态特性,因此,利用Dispersion Calculator软件对3 mm厚的铝板进行频散特性分析,计算得到相速度和群速度频散曲线如图2所示。

图2展示了各模态相速度和群速度随频率变化的关系曲线。其中,A0、A1模态分别指零阶、一阶反对称兰姆波模态,S0、S1模态分别指零阶、一阶对称兰姆波模态。通过分析该频散曲线,可以获取一阶截止频率。

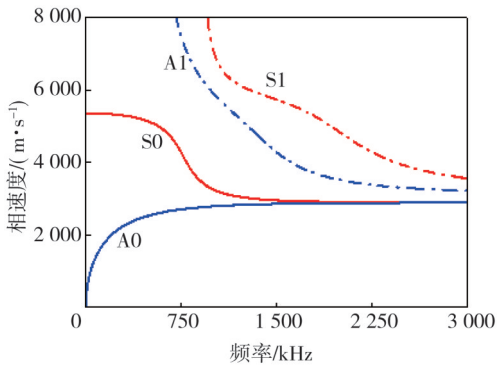


(b) 群速度频散曲线

图2 3 mm厚铝板频散特性曲线

Fig. 2 Dispersion characteristic curve of 3 mm thick 6061 aluminum plate

导波具有多模态特性,并且当导波与连接结构相互作用时,会产生复杂的模态转换,由此引起的波形混叠问题会导致在信号后处理过程中无法准确提取目标模态的声学特征。因此,为在实际应用中提高信号的可解释性,避免产生高阶模态,本文仅对低于一阶截止频率的模态进行研究。由图2可知,本仿真模型所分析的频率区间应低于537 kHz。



(a) 相速度频散曲线

为了验证所建模型的准确性,对自由铝板中导波的传播特性进行分析。将接触区域的结构接触边界对设置为接触对,使上下两块铝板之间振动相互独立,互不干扰,从而不考虑两个铝板之间的相互作用。

整个模型通过频域研究进行分析,在不同频率以谐波激励得到结构的线性响应。本文对 150 kHz 和 450 kHz 两个激励频率下的结果进行分析,分别提取两个频率下铝板传输区域 100~250 mm 处沿传播方向的正应变分量,其稳态振型和空间位移分布如图 3 所示。由图 3(a) 和图 3(d) 的铝板稳态振型可以看出,在完美匹配层区域,导波信号被快速衰减

吸收,因此,铝板左右两端基本没有反射波的干扰,板中的导波完全由压电晶片激励得到。在图 3(b) 和图 3(e) 中,应变分量分布随空间位置变化虽然表现出一定的周期规律,但是由于多模态信号彼此混叠,无法直观体现各模态信息,因此,利用傅里叶变换将空间分布的信号转换至波数域进行讨论。两个频率下的波数谱结果分别如图 3(c) 和图 3(f) 所示。由波数图可以看出,在一阶截止频率范围内,仅能够激发出两种模态,即 A0 模态和 S0 模态。两个模态信号能够被有效区分,波数大的对应的是 A0 模态,波数小的对应的是 S0 模态。而且,同一模态波数随着频率增大而增大,与理论预期一致。

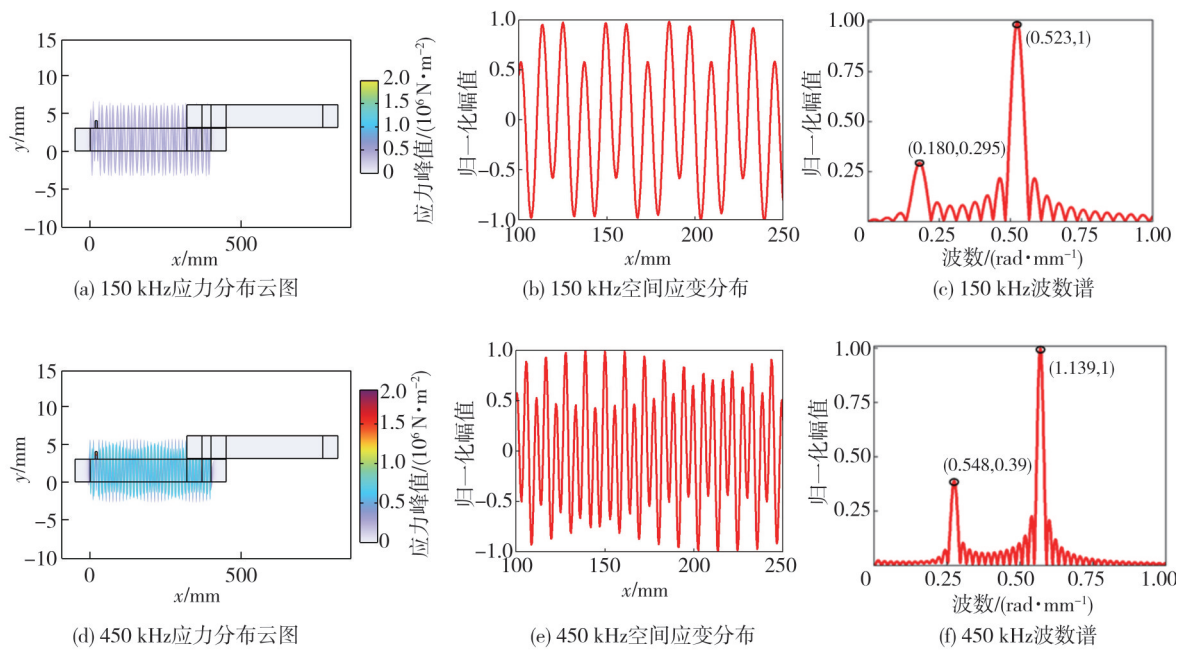


图 3 自由铝板的传播特性分析

Fig. 3 Analysis of propagation characteristics in free aluminum plate

接下来在 150~450 kHz 范围内,以 5 kHz 为步进对自由铝板结构进行扫频分析。提取所有离散频率激励下铝板传输区域 150~250 mm 处的正应变信号,并将其转换至波数域,然后根据波数谱中的两个主瓣获取两个模态对应波数,分析波数随频率的变化关系。利用 Dispersion Calculator 软件计算 3 mm 铝板的频率-波数图,并采用插值方法得到各激励频率下的波数,然后与有限元仿真结果对比,结果如图 4 所示。其中,实线代表由开源软件计算的频率-波数曲线,点线代表有限元仿真结果下的频率-波数曲线。

由图 4 可知,有限元仿真结果与开源软件计算结果完全一致,验证了所建模型的准确性。

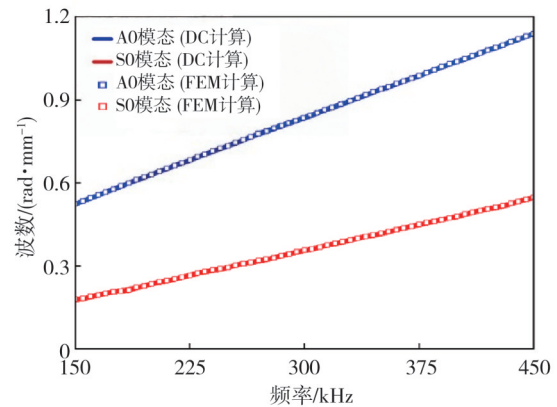


图 4 有限元仿真结果与 DC 计算结果波数图

Fig. 4 Wavenumber spectrum diagram obtained from DC calculation and FDFEM results.

2 螺栓连接板作用机制仿真分析

2.1 各模态激发效率分析

在基于能量的主动传感方法中,提高导波激发能量能增强透射能量,从而提高对环境扰动的鲁棒性。因此,需分析自由铝板中各模态导波的激发效率,确定最佳激励频率以获取高强度的A0和S0模态。根据图3(c)和图3(f),通过波数域分析可区分模态并提取其激发强度,得到如图5所示的模态激发强度随频率变化图。

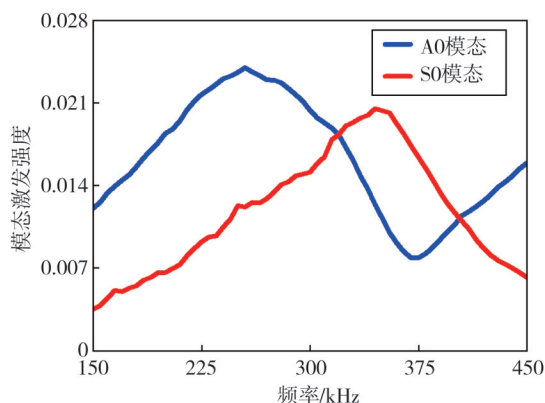


图5 不同频率下各模态激发强度分析

Fig. 5 Analysis of excitation intensity of each mode at different frequencies

结果显示,A0模态激发强度随频率增大先升后降,在255 kHz处达到峰值,对应波长为8.42 mm;S0模态激发强度在345 kHz处达最大值,对应波长为15.2 mm。显然,高激发效率模态的波长与压电晶片长度不完全符合模态整定规律,这是因导波激发效率同时受波导结构特性和加载源分布影响,仅考虑加载特性会产生偏差。本文有限元模型综合两者影响,提供了更准确的激发效率分析结果。

2.2 各模态导波能量传输特性分析

为有效分析各模态导波与螺栓连接板之间的作用机制,研究A0模态和S0模态的能量透射强度以及A0向S0模态、S0向A0模态的转换强度,需要激发较为纯净的A0模态或S0模态。为激发出纯净的单一模态,在图1所示的有限元仿真模型中,设置一对沿铝板中截线对称的压电晶片,通过对两个压电晶片施加相同或相反电场信号,可以激发出单一A0模态或S0模态。对称压电晶片激发单一S0模态信号和A0模态信号的示意图如图6所示。

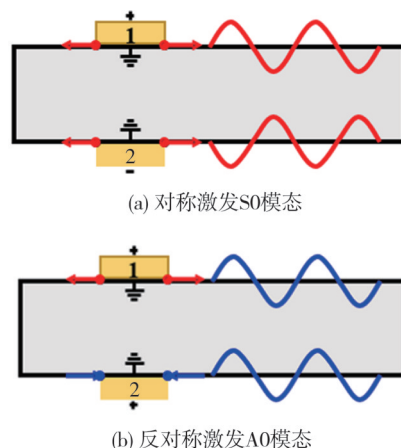


图6 单一模态激发原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of single mode excitation principle

在两种情况下,压电晶片1的下表面和压电晶片2的上表面接地。设置压电晶片1的上表面和压电晶片2的下表面电势相反激发S0模态,电势相同激发A0模态。当接触区域长度为60 mm时,以255 kHz激发A0模态和345 kHz激发S0模态的波场如图7所示。在图7(a)中,由传输区域的稳态波场振型可以看出,波形以反对称形式的A0模态为主,但是其中仍存在S0模态成分干扰,这里的S0模态成分不是由压电晶片激发产生的,而是由A0模态在接触区域发生模态转换产生的;同理,在图7(b)中,传输区域也同时存在S0模态和模态转换后的A0模态成分。

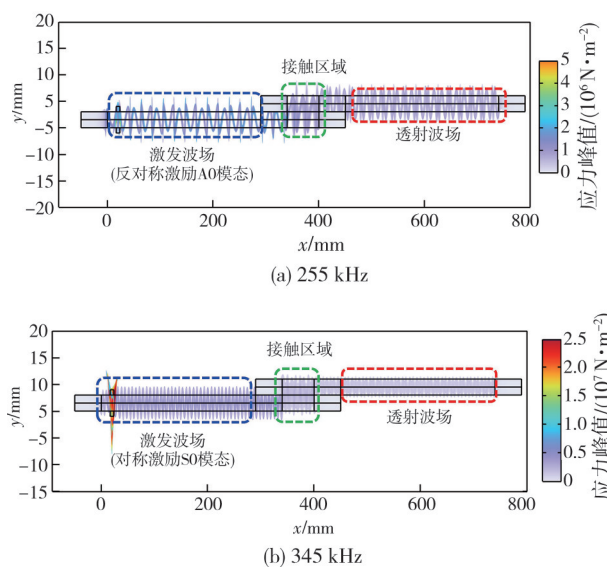


图7 不同频率下的波场信息

Fig. 7 Wave field information at different frequency

接下来仿真分析螺栓接触区域长度 L 对各模态导波能量传输系数的影响。设置 L 变化区间为 $[10, 70]$ mm,步进为1 mm。在255 kHz和345 kHz

激励频率下,分别对两个压电晶片进行反对称激励和对称激励,对 L 进行参数化扫描。

提取铝板接收区域(520, 620)mm处的正应变分量,并进行傅里叶变换转换至波数域。计算激发A0模式下,A0模式自身的能量传输系数 T_{A2A} 和向S0模式转换的传输系数 T_{A2S} ;计算单独激发S0模式下,S0模式自身的能量传输系数 T_{S2S} 和向A0模式转换的传输系数 T_{S2A} 。由于激励频率均低于一阶模式截止频率,因此不可能存在向高阶模式的转换。计算得到随接触长度 L 变化的能量传输系数示意图如图8所示。

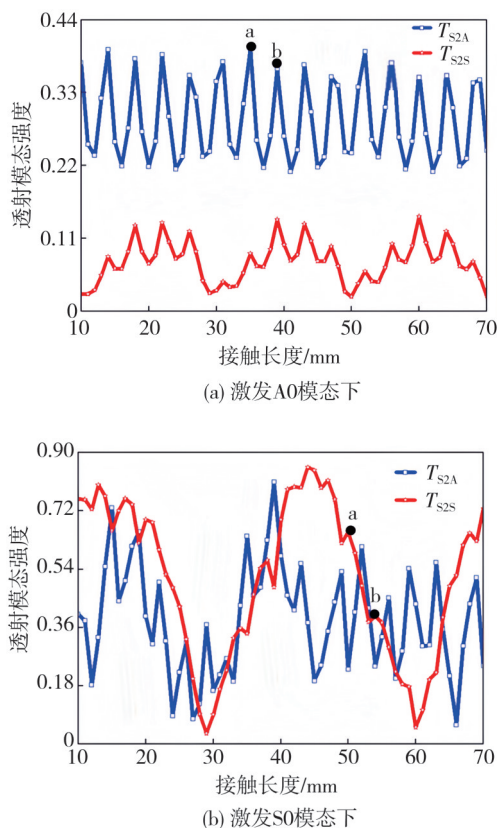


图8 激发不同模式下的能量传输系数

Fig. 8 Energy transfer coefficient in different excited modes

从图8可以看出,无论是激发单一A0模式还是激发单一S0模式,导波与螺栓接触区域相互作用后均存在模式转换,而且接收区域A0和S0模式信号的透射系数均随接触长度发生周期性变化。从透射强度来看,在相同激发强度条件下,S0模式的能量透射系数(T_{S2S} 和 T_{S2A})均高于A0模式(T_{A2A} 和 T_{A2S})。这说明使用S0模式导波进行螺栓预紧力测试时,能量透射强度更高,更利于检测。从透射强度变化周期来看,激发单一A0模式比激发单一S0模式下导波透射强度变化周期小,

其中,透射系数 T_{A2A} 随接触长度 L 变化周期约为4 mm,透射系数 T_{S2S} 随接触长度 L 变化周期约为30 mm。这说明相比于S0模式,A0模式随螺栓接触长度的变化更加敏感,例如,当透射系数 T_{A2A} 和 T_{S2S} 均发生0.11大小的变化时, T_{A2A} 对应接触长度 L 发生了约1 mm的变化,而 T_{S2S} 对应接触长度 L 发生了约4 mm的变化。这说明A0模式更利于对螺栓的早期松动进行检测。

当螺栓发生较大松动时,螺栓接触面积会发生较大变化,例如,从图8(a)的a点变化至b点,对应透射系数 T_{A2A} 的变化非常小,而对应图8(b)的a点变化至b点,透射系数 T_{S2S} 的变化则比较大,这说明S0模式更利于对螺栓的较大松动进行检测。

3 结 论

有限元仿真结果表明,使用宽7 mm、厚1 mm的压电晶片(PZT-5A)激发3 mm厚铝板的导波时,A0模式在255 kHz、S0模式在345 kHz处激发效率最高。在导波与螺栓连接板的相互作用中,单一模式导波与接触面作用后发生模式转换,接收区域的能量传输系数随接触长度呈周期性变化。A0模式能量传输系数对接触长度变化更敏感,适用于早期松动检测;S0模式周期更长,适合螺栓从拧紧到完全松动的全过程检测。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] LI C, QIAO R, TANG Q, et al. Investigation on the vibration and interface state of a thin-walled cylindrical shell with bolted joints considering its bilinear stiffness [J]. Applied Acoustics, 2021, 172: 107580.
- [2] ZHU L, HONG J, JIANG X. On controlling preload and estimating anti-loosening performance in threaded fasteners based on accurate contact modeling [J]. Tribology International, 2016, 95: 181-191.
- [3] LIU Y, ZHI J, LIU E, et al. Influence of different ultrasonic transducers on the precision of fastening force measurement [J]. Applied Acoustics, 2022, 185: 108357.
- [4] 牛牧, 陈则王, 张淞源, 等. 基于超声传感和高斯过程回归的锂离子电池SOC估计研究[J]. 测试技术学

- 报, 2023, 37(1): 18-24.
- NIU Mu, CHEN Zewang, ZHANG Songyuan, et al. Research on SOC estimation of lithium-ion batteries based on ultrasonic sensing and gaussian process regression[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2023, 37(1): 18-24. (in Chinese)
- [5] MEI H, JAMES R, HAIDER M F, et al. Multimode guided wave detection for various composite damage types[J]. Applied Sciences, 2020, 10(2): 484.
- [6] TREMBLAY N, GAUTHIER B, BELANGER P. Feasibility of structural health monitoring in a composite plate using omnidirectional SH0 transduction[C]// AIP Conference Proceedings, 2019, 2102(1): 050019.
- [7] MEI H, JAMES R, GIURGIUTIU V. Damage detection in laminated composites using pure SH guided wave excited by angle beam transducer[C]// Health Monitoring of Structural and Biological Systems XI, 2020: 65-76.
- [8] NIKRAVESH S M Y, GOUDARZI M. A review paper on looseness detection methods in bolted structures[J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2017, 14(12): 2153-2176.
- [9] SUN Q, YUAN B, MU X, et al. Bolt preload measurement based on the acoustoelastic effect using smart piezoelectric bolt[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(5): 055005.
- [10] ZHAO N, HUO L, SONG G. Vibration acoustic modulation for bolt looseness monitoring based on frequency-swept excitation and bispectrum[J]. Smart Materials and Structures, 2023, 32(3): 034004.
- [11] ZHANG M, TANG Z, YUN C B, et al. Bolt looseness detection using SH guided wave and wave energy transmission[J]. Smart Materials and Structures, 2021, 30(10): 105015.
- [12] SU Z, YANG C, PAN N, et al. Assessment of delamination in composite beams using shear horizontal (SH) wave mode[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(2): 244-251.
- [13] WANG T, SONG G, WANG Z, et al. Proof-of-concept study of monitoring bolt connection status using a piezoelectric based active sensing method[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(8): 087001.
- [14] AMERINI F, MEO M. Structural health monitoring of bolted joints using linear and nonlinear acoustic/ultrasound methods[J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10(6): 659-672.
- [15] MONTOYA A, DOYLE D, MAJI A, et al. Ultrasonic evaluation of bolted connections in satellites[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2014, 25(1): 44-62.
- [16] JIANG T, WU Q, WANG L, et al. Monitoring of bolt looseness-induced damage in steel truss arch structure using piezoceramic transducers[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(16): 6677-6685.
- [17] YANG B, XUAN F Z, XIANG Y, et al. Lamb wave-based structural health monitoring on composite bolted joints under tensile load[J]. Materials, 2017, 10(6): 652.
- [18] YANG J, CHANG F K. Detection of bolt loosening in C-C composite thermal protection panels: I. Diagnostic principle[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(2): 581-590.