

◇ 研究报告 ◇

杆中导波声弹性效应分析与数值模拟*

鲁珊珊¹ 吴英思² 刘 飞^{2†}

(1 内蒙古机电职业技术学院 呼和浩特 010070)

(2 内蒙古农业大学机电工程学院 呼和浩特 010018)

摘要 大型钢结构在役应力检测意义重大, 基于超声导波声弹性效应进行应力检测具有潜在的优势。该文基于等效弹性常数法研究了杆中超声导波的声弹性效应。通过计算 Q235 钢结构构件钢杆的频散曲线, 确定了检测频率范围, 并对不同工作应力状态下 L(0,1)、F(1,1) 与 T(0,1) 模态的群速度值进行了理论分析与数值模拟。结果表明: L(0,1) 模态较适合于钢杆轴力检测, F(1,1)、T(0,1) 模态声弹性效应较弱, 不适合于应力检测; L(0,1) 模态的声弹性效应随着频率的增加而减弱; 通过理论分析与有限元计算对声弹性效应的验证都与波结构轴向位移对声弹性效应的判断得到了较好的吻合。

关键词 等效弹性常数, 柱面导波, 声弹性效应, 应力检测, 频散

中图法分类号: TU378, TB132 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2018)04-0469-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.04.004

Numerical simulation and sensitivity analysis of acoustoelastic effect for guided wave in bar

LU Shanshan¹ WU Yingsi² LIU Fei²

(1 Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics, Hohhot 010070, China)

(2 College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract A new significant method of online stress monitoring based on acoustoelastic theory for cylindrical guided wave was proposed aim at the deficiency of steel structure online stress monitoring. The disperse curves of $\phi 20$ Q235 steel bar were calculated, the frequency ranges fit for acoustoelastic detection of cylindrical guided wave were optimized. According to acoustoelasticity motion equation and Pochhammer frequency equation, the group velocities of longitudinal L(0,1) mode, flexural F(1,1) mode and torsional T(0,1) mode in different stress level were calculated and simulated by theoretical equation and finite element software, and the acoustoelastic coefficients were obtained. The results show that longitudinal L(0,1) mode guided wave is fit for acoustoelastic axis stress monitoring, flexural F(1,1) mode and torsional T(0,1) mode are weak in acoustoelastic effect. Acoustoelastic effect of longitudinal L(0,1) mode is decreasing with the increasing of frequency. The results of theoretical and finite element simulation are consistent well with axial displacement of mode shapes for acoustoelastic effect.

Key words Effective elastic constant, Cylindrical guided wave, Acoustoelastic effect, Stress monitoring, Dispersion

2017-11-30 收稿; 2018-03-24 定稿

*国家自然科学基金项目 (11662013)

作者简介: 鲁珊珊 (1981-), 女, 山东潍坊人, 硕士, 讲师, 研究方向: 农业电气自动化技术、检测技术等。

† 通讯作者 E-mail: afei2208@imau.edu.cn.

1 引言

杆管类构件被广泛用于工程类结构中,如斜拉桥索、钢结构建筑、矿用支柱等。由于此类结构一般都具有缺陷敏感结构的特征,在服役期内要受到不可控外力及环境等多种因素的影响,导致出现局部损伤,影响整个结构的安全使用,甚至威胁到人类的生命及财产安全。造成此类结构事故的主要原因是失稳与结构的局部应力集中,上述原因又都与结构中局部构件的受力超载相关,因此,对此类结构的受力状态进行在役检测,具有广泛的应用前景与现实意义。

对于杆管类构件,传统的应力检测方法主要有电阻与光纤应变计测量法,该类检测方法原理简单,且测试精度较高,但它们仅能测量到布置应变片后的应力增量,并不能直接获取杆件的绝对应力值。模态分析技术是一种全新的应力监测方法,它能获取杆件的绝对应力,但这种方法要求钢杆相对封闭独立,且该方法对于杆件的局部应力获取也是较困难的。基于超声波的声弹特性已被广泛用于检测金属结构的焊接残余应力与螺栓紧固力^[1]。由于杆管类构件几何结构特点与超声导波技术本身的优势,因此,在此类结构中研究导波的声弹性效应对于杆管类构件的应力水平检测就显得更为重要。

Chen等^[2]基于导波声弹性效应检测预应力杆的应力水平,发现L(0,1)模态在低频范围内群速度随着应力的增大而降低。Scalea等^[3]及Rizzo等^[4]进一步研究了纵向模态导波在预应力钢绞线中的传播特性,基于Gabor小波变换方法对试验采集到的信号数据进行分析,发现在低应力水平声速变化与应力关联度较差,在高应力水平二者线性度较好。

Loveday等^[5-6]对无缝钢轨(CWR)中的导波传播特性进行了研究,基于半解析有限元方法分析了载荷对导波传播速度的影响,在理论上丰富了复杂波导结构导波声弹性效应的分析。Pei等^[7]利用数值建模与试验的方法研究了Lamb波在垂直于传播方向应力作用下的波的传播特性,发现高阶Lamb波声弹性效应较为明显,更有利于应力检测。何文等^[8]基于导波声弹性效应,采用F模态和L模态相结合的方法评估在役螺柱的轴向应力,得到了较好的结果。刘增华等^[9]基于导波声弹性效应,采用磁致伸缩传感器试验研究了7芯预应力钢绞线中应力水平与群速度的关系,发现L(0,1)模态群速度随着应力的增大而线性降低。刘飞等^[10]利用声弹性运动方程和Rayleigh-Lamb频率方程,分析了不同激励频率下各模态群速度的相对变化率,并采用有限元数值模拟进行了验证。

本文在借鉴前人研究的基础上,主要对常见的三种柱面超声导波,即纵向L(0,1)模态导波、弯曲F(1,1)模态导波和扭转T(0,1)模态导波在频散较小频点的声弹性效应进行理论分析与数值模拟,以期获得基于导波声弹性效应检测杆管类构件工作应力的最佳模态与所对应的频率。

2 声弹性理论

弹性波在具有初始应力的固体材料中的传播速度不仅与材料的二阶弹性常数和密度相关,还与高阶弹性常数和应力有关。上述这种应力与声速之间的关系称为声弹性效应^[11]。当钢杆受到单轴应力作用时,沿应力方向传播的纵波波速和横波波速及钢杆的密度与应力大小的关系式为

$$\begin{cases} V_L^\sigma = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0} + \frac{\sigma}{3\rho_0 K_0} \left[\frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu + 4m) + \lambda + 2l \right]} = \sqrt{\frac{\lambda' + 2\mu'}{\rho'}}, \\ V_T^\sigma = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_0} + \frac{\sigma}{3\rho_0 K_0} \left[\frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\mu + m \right]} = \sqrt{\frac{\mu'}{\rho'}}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho' = \rho_0 (1 + 2\theta_1 + 4\theta_2 + 8\theta_3)^{-1/2}, \quad (2)$$

式(1)和式(2)全部为零应力状态下的弹性常数,其中: K_0 为体积模量且 $K_0 = \lambda + \frac{2}{3}\mu$, ρ_0 为密度, σ 为轴向应力, λ 和 μ 是拉梅常数, l 、 m 和 n 为Murnaghan三阶弹性常数, λ' 、 μ' 和 ρ' 分别对应不同应力条件

下等效的拉梅常数和密度, θ_1 、 θ_2 和 θ_3 分别为第一、第二和第三应变不变量, $\theta_1 = (1 - 2\nu)\varepsilon$, $\theta_2 = \nu\varepsilon^2(\nu - 2)$, $\theta_3 = \nu^2\varepsilon^3$, ν 为泊松比, ε 为轴向应变。

Q235钢的材料参数为 $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 115.9 \text{ GPa}$, $\mu = 79.9 \text{ GPa}$, $l = -248 \text{ GPa}$, $m = -623 \text{ GPa}$, $n = -714 \text{ GPa}$,屈服极限 250 MPa 。由

表1 不同应力条件下体波速度与等效二阶弹性常数

Table 1 Bulk wave velocities and equivalent second order elastic constants for different stress levels

应力 σ /MPa	V_L /(m·s ⁻¹)	V_T /(m·s ⁻¹)	λ' /GPa	μ' /GPa	E' /GPa	ν'	ρ' /(kg·m ⁻³)
0	5945.263	3200.561	115.9	79.9	207.0953	0.295965	7800
50	5941.945	3200.521	115.5852	79.89027	207.0199	0.295651	7799.247
100	5938.623	3200.480	115.2704	79.88055	206.9444	0.295336	7798.495
150	5935.299	3200.439	114.9556	79.87082	206.8687	0.295021	7797.744
200	5931.972	3200.398	114.6407	79.86109	206.7929	0.294703	7796.995
250	5928.642	3200.357	114.3259	79.85137	206.7169	0.294385	7796.246

式(1)与式(2)可计算出不同应力条件下的等效二阶拉梅常数。表1给出了0~250 MPa 应力范围内,不同应力状态下的纵横波速度与等效二阶弹性常数。

3 柱面导波

沿杆管类结构轴向传播的柱面导波存在三种不同的模式:纵向模式 $L(0,m)$ 、弯曲模式 $F(n,m)$ 和扭转模式 $T(0,m)$ ^[12]。其中L模式和T模式为轴对称模式,F模式为非轴对称模式。

3.1 柱面导波的纵向模式

在进行柱面超声导波的纵向模式实验与有限元仿真时,可以利用轴向对称加载得到。理论计算时,假定沿钢杆轴向传播的纵波是轴对称的,通过对Navier波动控制方程进行求解推导可得到纵向

模式的Pochhammer频散方程为^[13]

$$\begin{aligned} & \frac{2\alpha}{r}(\beta^2 + k^2)J_1(\alpha r)J_1(\beta r) \\ & - (\beta^2 - k^2)^2 J_0(\alpha r)J_1(\beta r) \\ & - 4k^2\alpha\beta J_1(\alpha r)J_0(\beta r) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中: r 是钢杆半径且 $r = 10$ mm, $\alpha = \sqrt{\omega^2/V_L^2 - k^2}$, $\beta = \sqrt{\omega^2/V_T^2 - k^2}$, $\omega = 2\pi f$ 是角频率, k 是波数, J_0 和 J_1 分别是零阶和一阶Bessel函数。

3.2 柱面导波的弯曲模式

在进行柱面超声导波的弯曲模式实验与有限元仿真时,可以利用径向非对称加载得到。理论计算时,假定沿钢杆轴向传播的是横波,确定偏振方向所在平面,通过对Navier波动方程进行求解可得到弯曲模式的频散方程为^[13]

$$\begin{cases} J_1(\bar{\alpha})J_1^2(\bar{\beta})(y_1\xi_\alpha^2 + y_2\xi_\alpha\xi_\beta + y_3\xi_\beta + y_4\xi_\alpha + y_5) = 0, \\ y_1 = 2(\bar{\beta}^2 - \bar{k}^2)^2, \quad y_2 = 2\bar{\beta}^2(5\bar{k}^2 + \bar{\beta}^2), \\ y_3 = \bar{\beta}^6 - 10\bar{\beta}^4 - 2\bar{\beta}^4\bar{k}^2 + 2\bar{\beta}^2\bar{k}^2 + \bar{\beta}^2\bar{k}^4 - 4\bar{k}^4, \\ y_4 = 2\bar{\beta}^2(2\bar{\beta}^2\bar{k}^2 - \bar{\beta}^2 - 9\bar{k}^2), \\ y_5 = \bar{\beta}^2(-\bar{\beta}^4 + 8\bar{\beta}^2 - 2\bar{\beta}^2\bar{k}^2 + 8\bar{k}^2 - \bar{k}^4), \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: $\bar{\alpha} = r\alpha$, $\bar{\beta} = r\beta$, $\bar{k} = rk$, $\xi_x = xJ_0(x)/J_1(x)$ 。

3.3 柱面导波的扭转模式

在进行柱面超声导波的扭转模式实验与有限元仿真时,可以利用周向反对称加载得到。理论计算时,假定沿钢杆径向与轴向的位移分量为零,通过对Navier波动控制方程进行求解推导可得到扭转模式的Pochhammer频散方程为^[13]

$$(\beta r)J_0(\beta r) - 2J_1(\beta r) = 0. \quad (5)$$

图1为纵向模式、弯曲模式与扭转模式的模式振型与加载示意图。柱面超声导波的频散方程都只能通过数值方法进行求解,图2为基于Pochhammer频散方程计算得到的相速度频散曲线和群速度频散曲线。图3为根据频散方程绘制的不同频率点的波结构图。

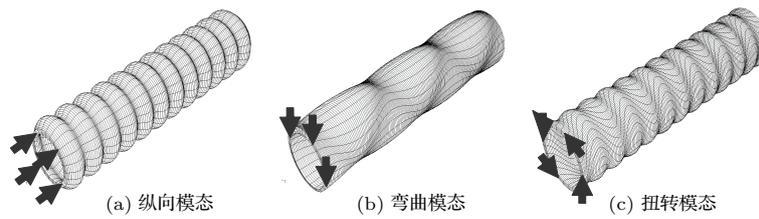


图1 柱面导波振型与激励方式示意图

Fig. 1 Load mode and modal shapes for cylindrical guided waves

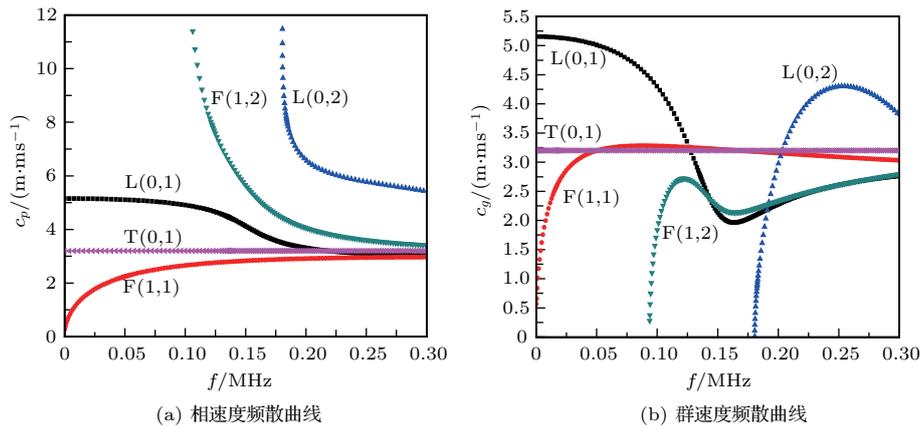


图2 phi20 Q235 钢杆的频散曲线

Fig. 2 Dispersion curves of phi20 Q235 steel bar

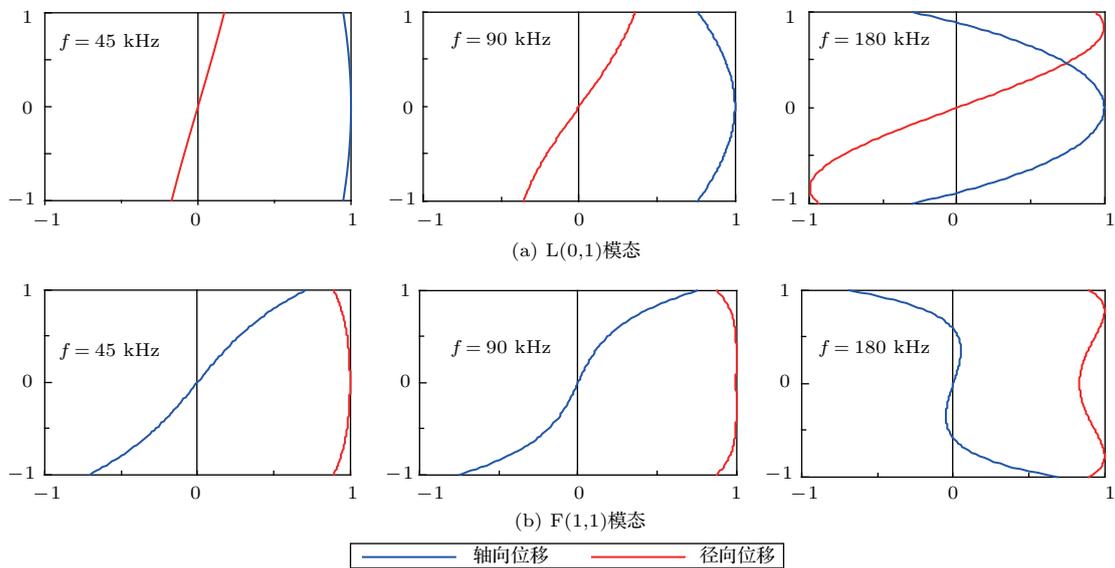


图3 L(0,1) 模式与 F(1,1) 模式不同频率点波结构图

Fig. 3 Displacement mode shapes of different frequency for L(0,1) mode and F(1,1) mode

4 柱面导波的声弹性效应

根据频散曲线可知, L(0,1) 模式在频率 $f \leq 75$ kHz 时几乎无频散, 适合用于声弹性应力测量; F(1,1) 模式当频率 $f > 30$ kHz 时频散较小, 较为适合于声弹性应力测量; T(0,1) 模式无频散现象, 故在

声弹性应力测量时无需考虑频率的影响。从波结构图可发现, L(0,1) 模式轴向位移较大, 而径向位移较小, 且轴向位移随着频率的增大而逐渐降低。相关研究表明轴向位移对应力检测敏感性显著^[14-15], 因而 L(0,1) 模式在低频处的声弹性效应较强。而 F(1,1) 模式主要表现为径向位移, 轴向位移较弱, 且

各个频率点的轴向位移所占比例较为接近,故从波结构定性分析认为F(1,1)模态声弹性效应较弱,且声弹性效应受频率影响较小。T(0,1)模态无轴向位移,即其声弹性效应几乎没有。

综上分析,当激励频率 f 在 30~75 kHz 时,纵向 L(0,1) 模态和弯曲 F(1,1) 模态频散性较低,故选取 30 kHz、45 kHz、60 kHz 和 75 kHz 四个频率点作为 $\phi 20$ Q235 钢杆声弹应力检测的激励频率。理论计算是基于等效弹性常数法分析在不同应力水平下的体波速度和密度,再将之代入 Pochhammer 频散方程求解各个模态的群速度值。有限元模拟同样基于等效弹性常数法,根据表 1 不同应力所对应的等效二阶弹性常数和密度作为有限元模拟钢杆的物理参数。利用 ABAQUS 有限元分析软件,通过不同的加载方式模拟激励单一的导波模态,群速度值根据时域波形图计算得到。以自由状态各模态的群速度值作为基础值,群速度相对变化量作为应力的函数能直观地反映声弹性效应的强弱,图 4 和图 5 分别为理论计算与有限元模拟得到的群速度相对变化量与应力的关系。

理论计算结果与有限元模拟吻合较好,个别频率点存在一定的误差主要是由于在这些频率点频

散相对较大,有限元模拟时从时域波形图读取的时间差存在一定的误差。L(0,1) 模态虽然较 F(1,1) 模态群速度绝对变化值大很多,但由于二者的基础群速度值相差很大(L(0,1) 模态群速度约是 F(1,1) 模态群速度的两倍),反映在群速度相对变化量决定的声弹性效应上二者的差别不是很大,这也表明弯曲 F(1,1) 模态也是适合声弹性轴力检测的。T(0,1) 模态的群速度相对变化值较 L(0,1) 模态与 F(1,1) 模态要小很多,从而证实 T(0,1) 模态的声弹性效应很弱,是不适合用于声弹性轴力检测的。

声弹性系数是声弹性轴力检测的基本参量,因此在实际工程应用中,声弹性系数应在实验中要有准确的标定。根据群速度基本参考值与标定的声弹性系数,即可通过实测的群速度值来计算轴力的大小。式(6)为声弹性系数的计算公式^[15]:

$$K = (c_g^\sigma - c_g^0) / \sigma, \quad (6)$$

式(6)中: K 为声弹性系数, c_g^σ 是应力为 σ 的群速度值, c_g^0 为无应力时的群速度值。根据式(6)计算理论结果与有限元模拟结果各个频率点的声弹性系数。图 6 是各个频率点理论计算与有限元模拟得到的声弹性系数。

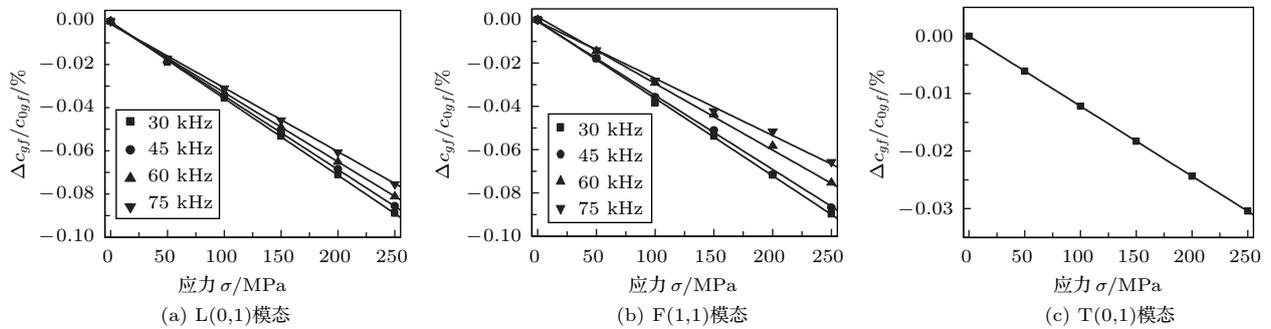


图4 应力大小与群速度变化量关系的理论计算结果

Fig. 4 Relative group velocity change of theoretical calculation as a function of stress

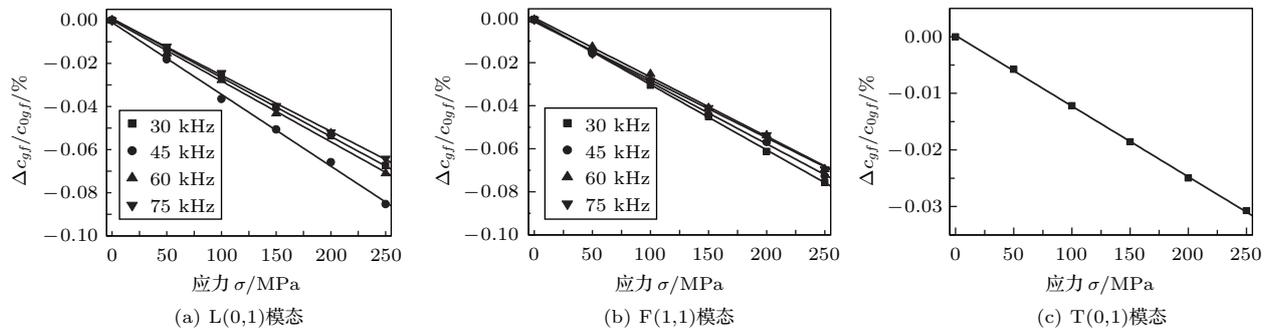


图5 应力大小与群速度变化量关系的仿真模拟计算结果

Fig. 5 Relation of group velocity variation and stress level for numerical simulation

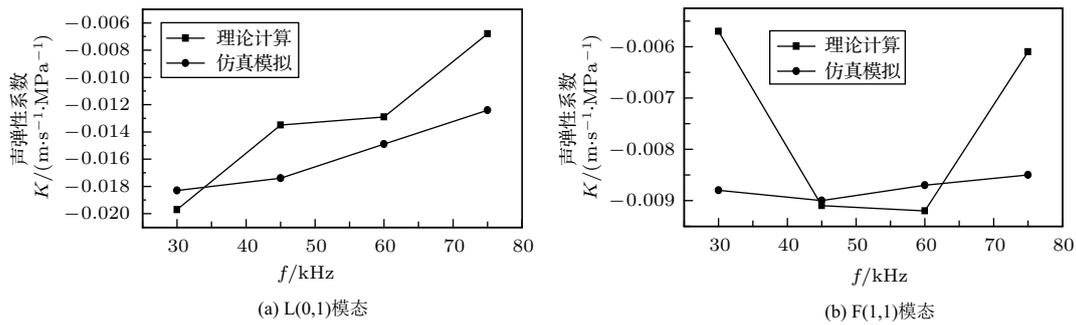


图6 理论计算与有限元模拟的声弹性系数

Fig. 6 Acoustoelastic coefficients of theoretical calculation and numerical simulation

图6结果表明: L(0,1) 模态声弹性效应随着频率的增大而降低,且在激励频率为30 kHz时声弹性效应明显优于其他频率点; F(1,1) 模态的声弹性效应最优激励频率位于45~60 kHz间,但总体声弹性效应较L(0,1) 模态弱,考虑到实际工程应用中激发较难控制,其不适合用于轴力检测。

5 结论

本文利用体波声弹性理论与Pochhammer频散方程相结合的方式,得到了柱面导波纵向模态L(0,1)、弯曲模态F(1,1)和扭转模态T(0,1)的声弹性系数理论解,并用有限元模拟软件ABAQUS进行了仿真计算,二者吻合较好,得到如下主要结论:

- (1) L(0,1) 模态声弹性效应较好,可用于声弹性轴力检测,且其群速度随着应力的增大而单调递减;
- (2) L(0,1) 模态用于 $\phi 20$ Q235钢杆轴力检测的最佳激励频率为30 kHz,每50 MPa应力所对应的理论值和有限元模拟值时间差均在30 ns以上,表明在工程实际应用中可以利用该方法检测应力;
- (3) 波结构轴向位移可以定性分析声弹性系数的大小,预估声弹性效应的强弱,能为声弹性轴力检测频率范围的选取提供一定的参考价值。

参考文献

- [1] Crecraft D I. Ultrasonic measurement of stress[J]. Ultrasonics, 1968(2): 117.
- [2] Chen H L, He Y, Gangarao H V. Measurement of prestress force in the rods of stressed timber bridges using stress waves[J]. Materials Evaluation, 1998, 56(8): 977-981.
- [3] Scalea F L D, Rizzo P, Frieder S. Stress measurement and defect detection in steel strands by guided stress waves[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(3): 219-227.
- [4] Rizzo P, Scalea F L D. Ultrasonic inspection of multi-wire steel strands with the aid of the wavelet transform[J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14(4): 685-695.
- [5] Loveday P W. Semi-analytical finite element analysis of elastic waveguides subjected to axial loads[J]. Ultrasonics, 2009, 49(3): 298-300.
- [6] Loveday P W, Wilcox P D. Guided wave propagation as a measure of axial loads in rails[C]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2010, 7650(23): 1-8.
- [7] Pei N, Bond L J. Higher order acoustoelastic Lamb wave propagation in stressed plates[J]. Journal of Acoustical Society of America, 2016, 140(5): 3834-3843.
- [8] 何文, 王成. 基于导波技术的螺柱轴力无损检测[J]. 计算力学学报, 2009, 26(4): 604-607.
- [9] 刘增华, 刘溯, 吴斌, 等. 预应力钢绞线中超声导波声弹性效应的试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 22-27.
- [10] 刘飞, 吴斌, 何存富, 等. 弹性板中低阶导波模态声弹性效应分析[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(6): 823-827.
- [11] 贺玲凤, 刘军. 声弹性技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 93-99.
- [12] Cantrell J H, Salama K. Acoustoelastic characterisation of materials[J]. International Materials Reviews, 1991, 36(1): 125-145.
- [13] Doyle J F. 结构中波的传播[M]. 吴斌, 何存富, 焦敬品, 等译. 北京: 科学出版社, 2013.
- [14] Rizzo P, Scalea F L D. Effect of frequency on the acoustoelastic response of steel bars[J]. Experimental Techniques, 2003, 27(6): 40-43.
- [15] Chaki S, Bourse G. Guided ultrasonic waves for non-destructive monitoring of the stress levels in prestressed steel strands[J]. Ultrasonics, 2009, 49(2): 162-171.