

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.02.011

基于 Workbench 的输流弯管流固耦合分析

湛冉曦¹, 韩天宇¹, 郭长青^{2*}, 刘颖¹

(1. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 数理学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:运用 ANSYS Workbench 软件建立不同弯曲半径的弯管模型, 分析了弯曲半径对所受流体压力以及内部流速分布的影响, 得到了弯曲半径和管道入口压强对固有频率和整体变形的关系。结果表明: 弯曲半径对流速分布影响显著, 弯头处内侧流速大, 外侧流速小; 弯曲半径对弯头后段内壁压力影响显著; 弯头处内侧受压小, 外侧受压大; 弯曲半径对整体变形的影响较小, 而管道入口压强对整体变形的影响大; 管道 2、3 阶固有频率随着弯曲半径的增大有所下降趋势, 随着弯曲半径的增大 4 阶固有频率增大明显。

关键词:ANSYS Workbench; 流固耦合; 弯管

中图分类号: O353.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-0062(2020)02-0069-06

Fluid-solid Coupling Analysis of Fluid-conveying Pipe Based on Workbench

CHEN Ranxi¹, HAN Tianyu¹, GUO Changqing^{2*}, LIU Ying¹

(1. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. School of Mathematics and Physics, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Use ANSYS Workbench to establish bend pipe model with different bending radii, the study analyzes and discusses the influence of the bending radius on the fluid pressure and the internal flow velocity distribution. It reached the inherent relationship of the bending radius and the inlet pressure of the pipe effects of frequency and overall deformation. The results show that the bending radius has a significant effect on the velocity distribution. The inside velocity at the elbow is large, while the outside velocity is small. The bending radius has a significant impact on the inner wall pressure at the rear of the elbow. The effect of the overall deformation is small, and the pressure at the inlet of the pipeline has a large effect on the overall deformation. The natural frequencies of the 2nd and 3rd order of the pipeline decrease with the increase of the bending radius, and the natural fre-

收稿日期: 2019-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678286)

作者简介: 湛冉曦(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事流固耦合力学方面的研究。E-mail: 1842469165@qq.com。

* 通信作者: 郭长青(1965-), 男, 教授, 主要从事流固耦合力学方面的研究。E-mail: GuoCQ@hotmail.com

quencies of the 4th order increase significantly with the increase of the bending radius.

key words: ANSYS Workbench; fluid-structure interaction; curved infusion pipeline

0 引言

随着输流管道系统广泛的运用在生物医学、石油化工、船舶海洋等多个领域,管道系统的安全性与稳定性的保障变得越发重要。流固耦合力学主要研究由于结构场和流场的变形导致的流体与结构之间的相互作用,即流体的非定常流动导致结构变形,而结构变形反过来又会影响到流体的流动状态。这种两相介质之间的相互作用现象常出现在各种工程领域,拥有广阔的应用背景^[1]。

自 1950 年, H. Ashley 等^[2]首次提出流固耦合力学后,国内外的众多学者在此方面进行了深入的研究,郭长青等^[3]研究了输流管道系统的振动和稳定性问题。刘凤友^[4]运用传递矩阵法研究了流体流经圆弧曲管的振动稳定性问题。李艳华^[5]参考 Tenteralli 的建模思想,对弯管进行整体建模及求解。喻萌等^[6]运用 ANSYS 软件对不同约束条件下的管道系统进行了模态分析并提供了管道优化设计和管道维护指导。

输流弯管与直管道相比,弯管的情况更为复杂。首先,由于弯管流道强制流体改变运动方向,因而弯管处的流体压力波会在弯管壁上作用不平衡的轴向和横向压力;其次,结构的轴向和横向运动也不再互相独立,而是耦合在一起,并产生结合部耦合^[7]。赵宁^[8]运用 ANSYS 软件建立弯管流固耦合有限元模型,研究了压力、流速和管径三参数对管道系统振动频率的影响。俞树荣^[9]以流固耦合理论为基础,运用 ANSYS 对比分析了单向流固耦合受力和双向流固耦合受力。A. S. Tijsseling^[10]在文章中提到管道系统流固耦合的主要形式为摩擦耦合、泊松耦合、结合部耦合、Bourdon 耦合、波流耦合和波波耦合。

本文运用 ANSYS Workbench 软件中联合 ANSYS-CFX 软件求解 FSI (fluid solid interaction) 的建模方法。在一般情况下,根据物理场耦合程度的不同将耦合场分为弱耦合场、强耦合场、超强耦合场。为了满足在不同耦合场中计算要求,在 ANSYS Workbench 中提供了三种建模方法^[11]。1) 单向耦合,先求解两个场其中之一,然后将所求结果作为另一个场的边界条件或以外荷载的形式加载上去。2) 双向耦合,将流场方程与结构方程依次独立求解,然后将每个时间步长所求的结

果以荷载的形式加到对方的场中。3) 完全耦合,将流场方程与结构方程放入同一个巨大的矩阵中求解,求解过程非常困难,同时也不适用与 ANSYS-CFX Coupling,本文不考虑完全耦合的情况。

运用 ANSYS Workbench 软件对管道建模,进行仿真模拟计算,研究了弯曲半径对所受流体压力、变形以及内部流速分布的影响,并通过模态分析讨论弯曲半径和管道入口压强对管道固有频率的影响^[12]。

1 有限元模型建立

如图 1 所示,为单向耦合的建模求解流程图^[13],在 Geometry 模块中创建几何模型,使用 Mesh 模块划分网格,两个物理场之间的载荷在耦合见界面上可实现自动传递而并不需要拥有匹配的单元节点,但节点的不匹配会直接影响到求解精度。因此建议在 ICEM (the integrated computer engineering and manufacturing code) 中同时创建管道和流场的单元,分别将划分好的单元格导入各自的软件,然后进入 Fluid Flow (CFX) 模块定义流体属性,并求解计算,最后将计算结果以荷载的形式添加到 Static Structural 模块中,并在其中设置约束等外界条件,最后进行求解,得到管道在耦合状态下的应力变形图及流体的流速迹线图。而双向耦合是将流体域和固体域的计算结果按照一定长的时间步相互传递,然后继续进行运算,得出结论。

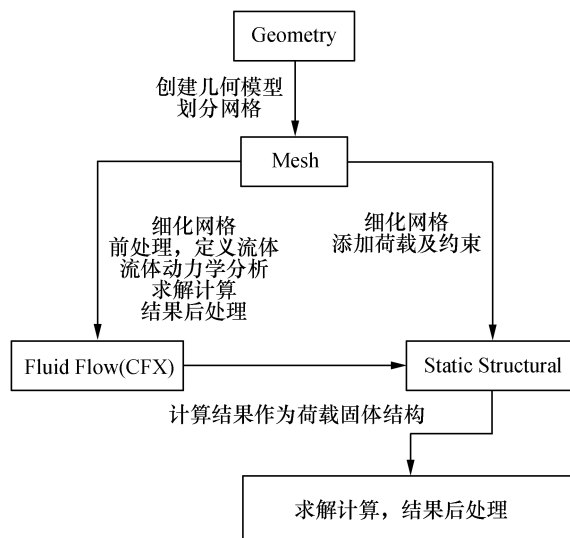


图 1 求解流程图

Fig.1 Solving flow chart

下文将以弯曲半径为 32 mm 的弯管单向耦合为例详细说明仿真步骤。

1) 采用 ANSYS-Geometry 模块建模,如图 2 所示,设某输流弯管直径 $d=64$ mm,壁厚 $h=2$ mm,几何尺寸 $L_1=L_2=500$ mm。管道材料为结构钢,其密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 200 GPa ,泊松比为 0.3 ,管道内的流体介质为水,其温度为 $22\text{ }^\circ\text{C}$,密度为 998.2 kg/m^3 ,流体黏度 γ 为 $0.001\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

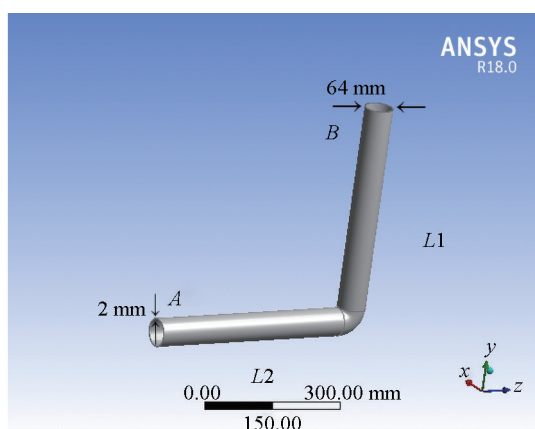


图2 弯管模型

Fig.2 Curved pipeline

2) 采用 ANSYS-Mesh 进行网格划分,如图 3 所示,分别划分流体域和固体域网格,并在流固交界面设置加密的网格膨胀层,综合考虑计算时间和精度后,尽量使用六面体单元,并设置单位网格尺寸为 3 mm 。

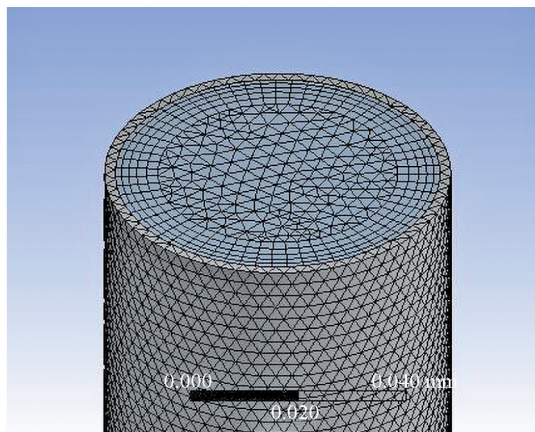


图3 管道单元格划分

Fig.3 The finite element model of the pipe

3) 划分网格后分别在流体域和固体域模块中进行前处理。在流体前处理中首先定义流体的区域并将流体材料设置为水,不考虑热能传递和

湍流的影响,然后添加荷载,将入口总压设置为 $3\times 101.325\text{ kPa}$, $5\times 101.325\text{ kPa}$, $8\times 101.325\text{ kPa}$, $12\times 101.325\text{ kPa}$,出口设置为 $1\times 101.325\text{ kPa}$ 。固体结构前处理时,将管道材料设置为结构钢,两端设置为固定约束并定义流固接触面。

4) 在 Fluid Flow (CFX) 模块中进行流体域运算,得到流体流速迹线图和流体压力场分布云图,并将运算结果以荷载的形式通过流固接触面传递到管道结构上。

在 Static Structural 模块中进行固体域运算,得到管道整体变形、最大主应变和最大主应力。

2 静态耦合分析

本文建立弯曲半径分别为 32 mm 、 96 mm 、 160 mm 、 224 mm 、 288 mm 、 352 mm 的弯管模型,分别对设置入口总压为 $3\times 101.325\text{ kPa}$, $5\times 101.325\text{ kPa}$, $8\times 101.325\text{ kPa}$, $12\times 101.325\text{ kPa}$,耦合计算得到流体流速迹线图、管道压力云图和管道变形数据,分析了管道弯曲半径和管道入口压强对这些量的影响。

1) 流体流速迹线图

图 4 为入口总压设置为 $12\times 101.325\text{ kPa}$ 时各管道流体流速迹线图,管道上端为入口,下端为出口。随着迹线的颜色由蓝色逐渐转变为红色,表示流体流速的增加。

由图 4 可见,随着管道弯曲半径的增大,管道内流体流速显著增加;管道弯头处内侧流速最大,外侧流速最小;流体流经弯头前后的迹线比较发现弯头后的流速略大于弯头前,但是弯头后的迹线不如弯头前稳定。

2) 管道压力云图

图 5 为入口总压设置为 $12\times 101.325\text{ kPa}$ 时各管道压力云图,管道上端为入口,下端为出口。随着管道颜色由蓝色逐渐转变为红色,表示管道内壁受到压力增加。

由图 5 可见,随着管道弯曲半径的增大,管道内壁整体受压不断减小,而弯头后段管道内壁受压减小显著;管道弯头处内侧受压最小,外侧受压最大。

对比管道压力云图和流速迹线图发现随着流速的增加,流体对管道内壁的压力减小,管道弯曲半径对控制管道内流体流速和管道内壁压力有显著的作用。

3) 管道变形图

绘制弯曲半径为 32 mm 、 96 mm 、 160 mm 、 224 mm 、 288 mm 、 352 mm 的弯管在入口压力为 $3\times$

101.325 kPa, 5×101.325 kPa, 8×101.325 kPa, 12×101.325 kPa 下的整体变形图、主应变图、主应力图。

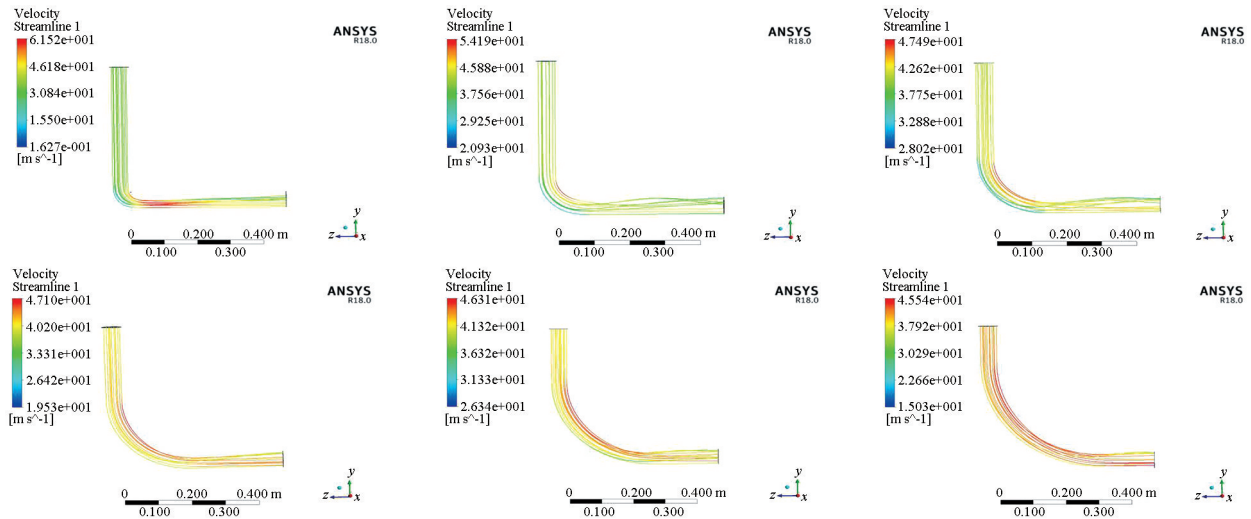


图 4 不同弯曲半径管道迹线图

Fig. 4 Pipeline traces with different bending radii

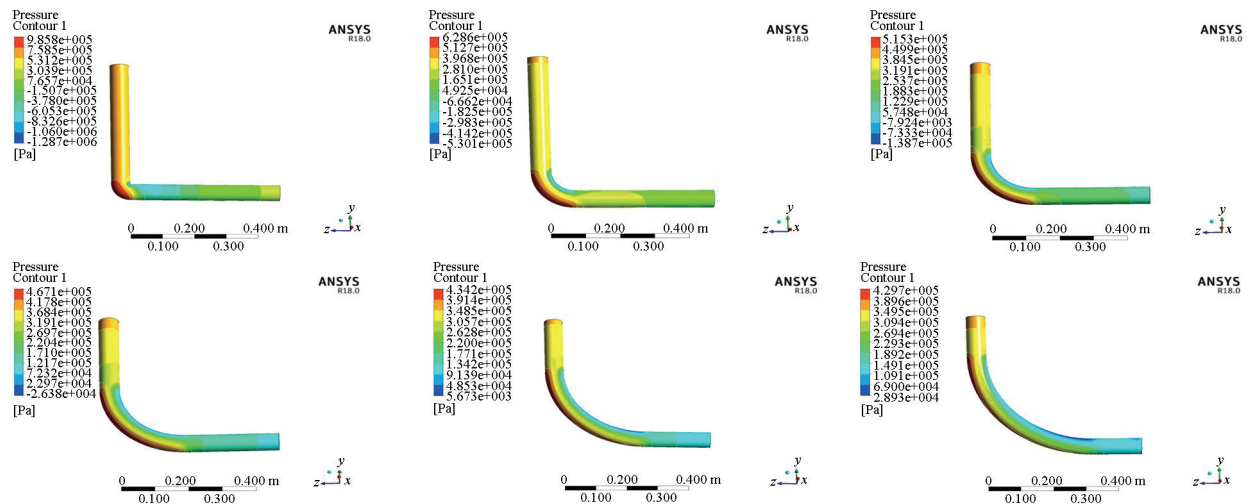


图 5 不同弯曲半径管道压力云图

Fig. 5 Pressure curve of pipelines with different bending radii

整体变形 U_{total} 是一个标量, 变形结果仅和移动自由度有关, U_x 、 U_y 、 U_z 表示管道在 x 、 y 、 z 方向上的变形量, 它由下式决定

$$U_{\text{total}} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$$

主应变是指应变椭球体主轴方向的应变。主应力为物体任一点剪应力为零的截面上的正应力。

由图 6 可见, 管道弯曲半径的变化对整体变形的影响较小, 而压强对总变形的影响显著。

由图 7 可见, 压强越大管道最大主应变越大; 最大主应变随着管道弯曲半径的增加呈现先降后增的趋势; 但当管道弯曲半径较小或较大时, 最大

主应变受弯曲半径的影响较大, 而弯曲半径适中时最大主应变几乎不受弯曲半径的影响。

由图 8 可见, 随着压强增大管道最大主应力增大; 而随着管道弯曲半径的增大, 管道最大主应力的变化并不明显。

3 耦合振动特性分析

弯管弯头处为耦合振动中最敏感的部位^[14], 为进一步研究不同弯曲半径管道的振动性能差异, 分别对弯曲半径为 32 mm、96 mm、160 mm、224 mm、288 mm、352 mm 的弯管进行模态分析, 得到如图 9 所示的前 6 阶的固有频率变化曲线。

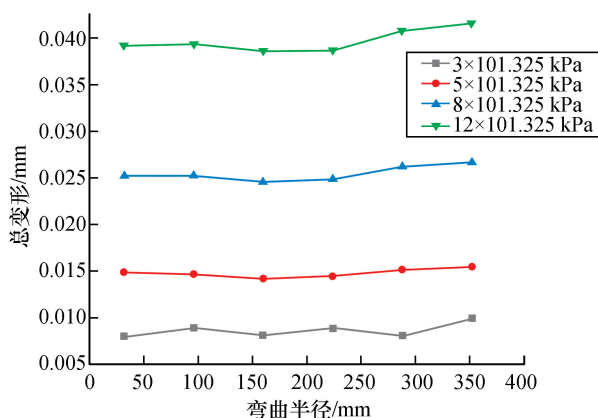


图6 整体变形图

Fig. Total deformation

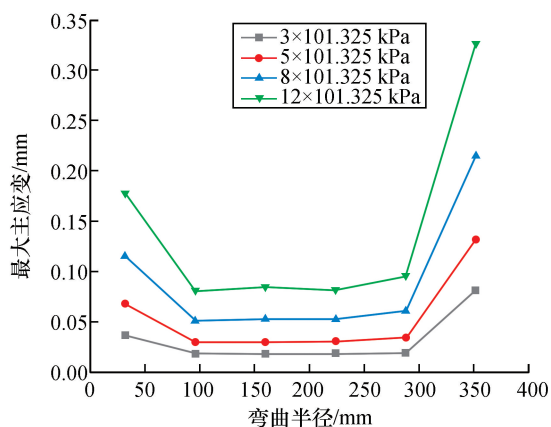


图7 最大主应变图

Fig.7 Maximum principal strain

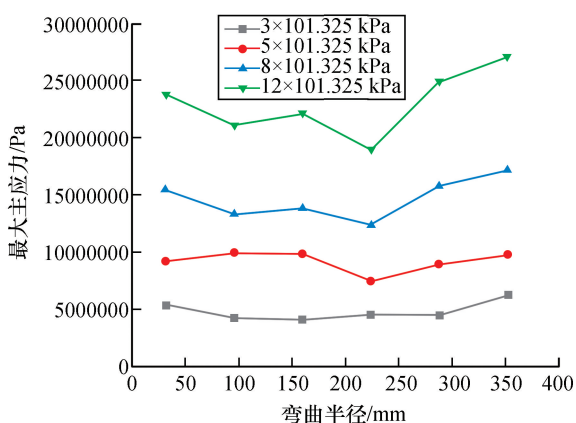


图8 最大主应力图

Fig.8 Maximum principal stress

由图9可见,随着管道弯曲半径的增加,管道1、5、6阶固有频率稳步增大,而2、3阶管道固有频率随着弯曲半径的增大呈现先降后升的趋势;4阶管道固有频率在弯曲半径较小时较2、3阶固有频率差别不大,但随着弯曲半径的增大固有频率

增大明显,在弯曲半径较大时趋于稳定。

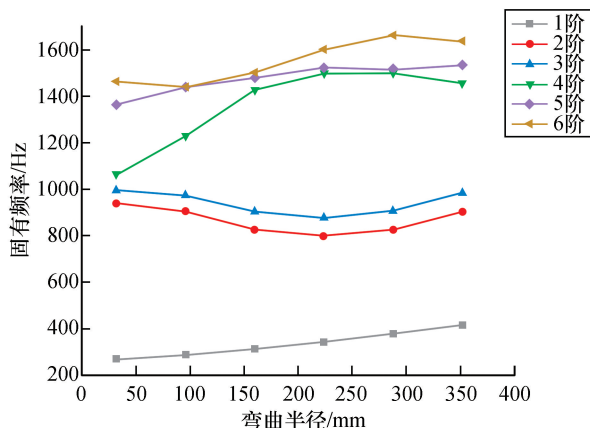


图9 不同弯曲半径管道固有频率

Fig.9 Natural frequency of different bending radius pipes

故为了避免共振对管道结构的影响^[15],对于低频振动的情况,应使用弯曲半径较大的弯管,对于高频振动的情况,应使用弯曲半径较小的弯管。

4 结 论

1)随着管道弯曲半径的增大,管道内流体流速显著增加;管道弯头处内侧流速最大,外侧流速最小;弯头后的流速略大于弯头前,但是弯头后的迹线不如弯头前稳定。

2)随着弯曲半径的增大,管道内壁整体受压不断减小,而弯头后段管道内壁受压减小显著;管道弯头处内侧受压最小,外侧受压最大。

3)管道弯曲半径的变化对整体变形的影响很小,而压强对总变形的影响显著。压强越大管道最大主应变越大;最大主应变随着管道弯曲半径的增加呈现先降后增的趋势。压强越大管道最大主应力越大;管道最大主应力随着管道弯曲半径的增大变化并不明显。

4)随着管道弯曲半径的增大,管道1、5、6阶固有频率稳步增大;2、3阶管道固有频率随着弯曲半径的增大呈现先降后升的趋势;4阶管道固有频率随着弯曲半径的增大固有频率增大明显。

在工程运用中,弯管弯头处为耦合振动中最敏感的部位,管道在满足实际用途的条件下选择合适的弯曲半径,对工程有重要的参考价值。

(下转第81页)

建立一类 Michaelis-Menten 型时滞比率依赖的食物链模型等等,这是未来研究的方向。

参考文献:

- [1] MAITIL A, JANA M, SAMANT G P. Deterministic and stochastic analysis of a ratio-dependent predator-prey system with delay[J]. Nonlinear analysis:Modelling and control,2007,12(3):383-398.
- [2] HSU S B, HWANG T W, KUANG Y. Global analysis of the Michaelis-Menten-type ratio-dependent predator-prey system[J]. Mathematical biology,2001,42(6):489-506.
- [3] XIAO D, RUAN S. Global dynamics of a ratio-dependent predator-prey system[J]. Mathematical biology,2001,43(3):268-290.
- [4] XING Z, PENG J. Boundedness persistence and extinction of a stochastic non-autonomous logistic system with time delays[J]. Applied mathematical modelling,2012,36(8):3379-3386.
- [5] LIU M, WANG K. A note on delay Lotka-Volterra competitive system with random perturbations[J]. Applied mathematics letters,2013,26(6):589-594.
- [6] JIANG D, JI C, LI X, et al. Analysis of autonomous Lotka-Volterra competition systems with random perturbation[J]. Journal of mathematical analysis and applications,2012,390(2):582-595.
- [7] LIU M, QIU H, WANG K. A remark on a stochastic predator-prey system with time delays[J]. Applied mathematics letters,2013,26(3):318-323.
- [8] LI X, JIANG D, MAO X. Population dynamical behavior of Lotka-Volterra system under regime switching[J]. Journal of computational and applied mathematics,2009,232(2):427-448.
- [9] QIU H, LIU M, WANG K, et al. Dynamics of a stochastic predator-prey system with Beddington-DeAngelis functional response[J]. Applied mathematics and computation,2012,219(4):2303-2312.
- [10] MAO X. Stochastic differential equations and application[M]. Chichester:Horwood Publishing,1997.
- [11] Higham D J. An algorithmic introduction to numerical simulation of stochastic differential equations[J]. SIAM Review,2001,43(3):525-546.
- [12] SUN Z R, LV J L. Dynamical analysis on two stochastic single-species models[J]. Applied mathematics letters,2020,99:37-45.
- [13] WANG Y S, WU H, WAN S K. Persistence of pollination mutualisms under pesticides[J]. Applied mathematical modelling,2020(77):861-880.

(责任编辑:周泉)

(上接第73页)

参考文献:

- [1] 王涛. 基于 ANSYS Workbench 的输液管道振动特性分析和振动控制的研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2011.
- [2] ASHLEY H, HAVILAND G. Bending vibrations of a pipe line containing flowing fluid[J]. Journal of applied mechanics,1950,72:229-232.
- [3] 郭长青. 输流管道与轴向流中板状结构的流致振动与稳定性[D]. 北京:清华大学,2010.
- [4] 刘凤友. 输流曲管的振动稳定性分析[J]. 强度与环境,1991(1):9-17.
- [5] 李艳华. 考虑流固耦合的管路系统振动噪声及特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [6] 喻萌. Analysis on Characteristics of Fluid-structure Interaction for Fluid Conveying Pipes by ANSYS[J]. Chinese Journal of Ship Research,2007.
- [7] 李帅军. 管路系统流固耦合动力学计算及特性分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.
- [8] 赵宁. 基于 Workbench 的流固耦合作用下弯管的振动分析[J]. 辽宁化工,2017,46(8):795-796;799.
- [9] 俞树荣,马璐,余龙. 弯曲输流管道流固耦合动力特性分析[J]. 噪声与振动控制,2015,35(4):43-47.
- [10] TIJSSELING A S. Fluid-structure interaction in liquid-filled pipe systems: a review[J]. Journal of fluids & structures,1996,10(2):109-146.
- [11] 窦益华,于凯强,杨向同,等. 输流弯管流固耦合振动有限元分析[J]. 机械设计与制造工程,2017,46(2):18-21.
- [12] CHEN S S. Vibration and stability of a uniformly curved tube conveying fluid[J]. The journal of the acoustical society of America,1972,51(1B):223-232.
- [11] 于瀛. 基于 ANSYS Workbench 的管道系统流固耦合振动特性分析[D]. 沈阳:东北大学,2017.
- [14] 叶红玲. 输流弯管的流固耦合模态分析及参数影响研究[C]//中国力学学会计算力学专业委员会. 中国计算力学大会 2014 暨第三届钱令希计算力学奖颁奖大会论文集. 中国力学学会计算力学专业委员会:中国力学学会,2014:579-583.
- [15] 夏永胜,张成龙. 基于 ANSYS Workbench 的液压管道流固耦合振动分析[J]. 流体传动与控制,2017(3):38-41;57.

(责任编辑:扶文静)