

引文: 李睿, 石新娜, 刘浩天, 等. 基于变质心调谐原理的管道内检测机器人减振方法[J]. 油气储运, 2024, 43(9): 1012-1021.

LI Rui, SHI Xinna, LIU Haotian, et al. Research on vibration reduction technique for in-line inspection robot based on variable-centroid TMD principle[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(9): 1012-1021.

基于变质心调谐原理的管道内检测机器人减振方法

李睿¹ 石新娜² 刘浩天² 富宽¹ 马江涛¹ 张行²

1. 国家管网集团科学技术研究总院分公司;

2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院·高端油气装备智能设计与制造研究中心

摘要:【目的】管道内检测机器人作为油气管道内检测的重要装备,管道弯头、变形、焊缝等多种管内激励引发的瞬时剧烈振动会影响其内置传感器的检测精度及装备结构可靠性,其中管道弯头引起的振动尤为剧烈。【方法】针对管道内检测机器人过弯头时的运动特点,结合调谐质量阻尼器与变质心减振控制原理,提出了一种阻尼-质量球缓冲吸能变质心减振思路,并设计了单自由度与两自由度两种管道内检测机器人变质心调谐质量阻尼器减振结构;使用 ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems)软件与 Matlab 软件联合模拟方法,研究了管道内检测机器人过弯头时的振动响应情况,并对含减振结构的管道内检测机器人过弯头时的冲击碰撞工况进行了双向流固耦合动力学分析。【结果】通过对比分析减振前、后管道内检测机器人过弯头时的加速度时程曲线与能量幅值,明确了两种自由度减振结构的减振效果:与无减振结构相比,含单自由度减振结构的管道内检测机器人在入弯初期存在加速度突变现象,最大可达 $3.47g$ ($1g=9.8\text{ m/s}^2$);含两自由度减振结构的管道内检测机器人过弯头过程中,轴向、水平摇摆方向加速度极值的下降幅度最高分别达 48%、39%,振动能量下降极为明显。【结论】新设计的管道内检测机器人变质心调谐质量阻尼器减振结构具有较好的减振效果,可为管道内检测机器人的平稳作业提供理论参考。(图 13,表 1,参 25)

关键词: 油气管道; 内检测机器人; 变质心控制技术; 调谐质量阻尼器; 减振

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)09-1012-10

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.09.006

Research on vibration reduction technique for in-line inspection robot based on variable-centroid TMD principle

LI Rui¹, SHI Xinna², LIU Haotian², FU Kuan¹, MA Jiangtao¹, ZHANG Hang²

1. PipeChina Institute of Science and Technology; 2. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing)/Center of Advanced Oil and Gas Equipment

Abstract: 【Objective】 In-line inspection robots are essential tools for conducting in-line inspections of oil and gas pipelines. Nevertheless, the transient and intense vibrations caused by different excitation factors within pipelines, like pipeline elbows, deformations, and welds, undermine the detection accuracy of their built-in sensors and structural reliability. This issue is particularly evident in cases of vibration stemming from pipeline elbows. 【Methods】 This study proposed a vibration reduction philosophy focusing on the movement characteristics of in-line inspection robots maneuvering through pipeline elbows. The approach integrates damping-mass sphere buffer energy absorption and a variable centroid, drawing from the control principles of tuned mass dampers (TMD) and variable centroid for vibration reduction. Two vibration reduction structures were then developed, each embodying the variable-centroid TMD principle with single-degree-of-freedom (SDOF) and two-degree-of-freedom (2DOF), respectively. Subsequently, simulations were conducted to analyze the vibration responses of in-line inspection robots navigating pipeline elbows, supported by Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems (ADAMS) and Matlab. Furthermore, a bidirectional fluid-structure interaction dynamic analysis was performed to investigate the impact and collision conditions of robots equipped with the designed vibration reduction structures passing through pipeline elbows. 【Results】 By comparing and analyzing the time-history curves of accelerations and energy amplitudes of in-line inspection robots passing through pipeline elbows

before and after the application of vibration reduction structures, the effects of vibration reduction were revealed for structures with different degrees of freedom. Compared to scenarios without vibration reduction structures, the robot within an SDOF vibration reduction structure experienced sudden acceleration changes when approaching elbows, with its maximum acceleration reaching $3.47 g$ ($1 g = 9.8 \text{ m/s}^2$). Meanwhile, the robot equipped with a 2DOF vibration reduction structure experienced reductions in acceleration maximums along the axial and horizontal swing directions by up to 48% and 39% respectively. This decrease led to a significant reduction in vibration energy. **[Conclusion]** The novel design of variable-centroid TMD structures for in-line inspection robots makes significant contributions to vibration reduction. The study outcomes could potentially be utilized as a theoretical reference for ensuring the stable operation of in-line inspection robots. (13 Figures, 1 Table, 25 References)

Key words: oil and gas pipeline, in-line inspection robot, variable-centroid control technique, tuned mass damper (TMD), vibration reduction

加强巡检维护是保障油气管道安全运行的重要条件,压差式管道内检测机器人(简称管道机器人)具备缺陷内检测、里程计数、清管等多种功能,正逐步成为管道全面检测及完整性评估的重要装备。管道机器人一般采用双联万向节串联若干短节的结构,在管道内部周向受限工况下运行时,聚氨酯密封盘与管壁的摩擦、管内高压流体的流致振动等均会导致管道机器人出现振动叠加等复杂的非线性动力行为。同时,管道路由的激励会引起管道机器人动力学行为的极大变化,加剧管道机器人的振动,严重时可能使管道机器人主要结构受到过大冲击,导致检测探头断裂、万向节失效,甚至发生检测器卡堵等严重事故,威胁管道的安全运行^[1-6]。

近年来,管道机器人在作业过程中的动力学问题逐渐得到关注,大量学者对各类振动现象及机理进行了深入研究^[7-10],但对于管道机器人的减振研究相对较少。目前,管道机器人使用的主要减振方式是对传感器所在的探头机构进行结构减振设计,常用检测探头主要有一体式探头、铰链式探头、柔性聚氨酯封装探头,还有安装了永磁体、传感器、防撞轮等部件的复杂结构探头^[11-12]。尽管结构减振设计可在一定程度上降低探头所受的振动影响,但在实际应用中探头仍面临着复杂的振动环境及更高的减振需求。为了进一步提升管道机器人的减振效果,探讨更加多元的减振手段势在必行。调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)作为一种广泛应用于建筑、交通运输、大型机械设备等领域的被动减振装置,具有较好的实践经验及参考价值^[13-16]。孔凡等^[17]考虑风浪的共同作用,将TMD应用于海上风涡轮机的减振设计。吕洋等^[18]研制了适用于管道流致振动的可变刚度TMD。Zhang等^[19]探讨了移动荷载作用下,调谐质量惯性系统在多跨梁模型振动控制中的应用与优化。变质心减振控

制是指通过改变质心位置达到减振效果的新概念控制手段,目前主要应用于高速飞行器领域^[20-21]。陈百辉等^[22]通过对变质心飞行器进行动力学特性、气动特性仿真分析及样机试验发现,与传统副翼相比,固定翼飞行器变质心操纵能够有效降低传统舵面偏转引起的气动阻力。可见,TMD与变质心减振控制在工程实际上具有较好的减振效果。

当管道机器人在油气管道内周向受限空间中运行时,存在复杂流体激励、特征管段与管内障碍激励产生的自身颤振等多维、宽频、耦合的复杂非线性振动。为解决这一问题,提出了一种变质心TMD减振方式,在管道机器人多体动力学模型基础上建立变质心TMD减振机构,通过双向流固耦合的方式对其施加流体激励力,探讨管道机器人在过弯头工况下单自由度与两自由度减振方案的减振效果,以期管道机器人在复杂工况下的减振提供一种高效、可靠的解决方案。

1 减振方式

传统清管器主要用于清除管道内的污垢、沉积物,结构相对简单,功能也较为单一。与清管器相比,管道机器人不仅可以执行清管任务,还能对管道内部状况进行全面检测。利用管道机器人可以获得管道的腐蚀程度、裂缝位置、变形情况等详细数据,从而为管道维护、修复提供科学依据。管道机器人(图1)主要由圆柱形筒体、密封盘、支撑皮碗、里程轮、检测设备 etc 构成。

1.1 TMD 减振控制

TMD是一种经典的被动振动控制装置,通过调谐振动,将本体振动的能量转移至TMD,从而减弱结构振动。TMD系统主要由弹簧、阻尼器及质量球组

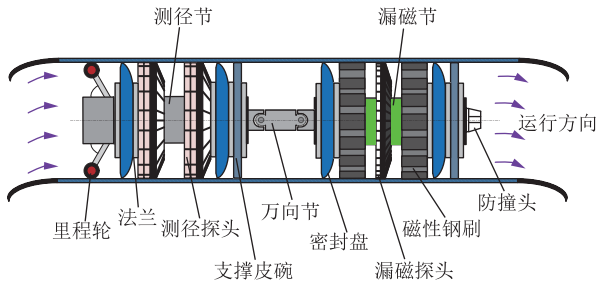


图1 管道机器人组成示意图
Fig. 1 Composition of in-line inspection robot

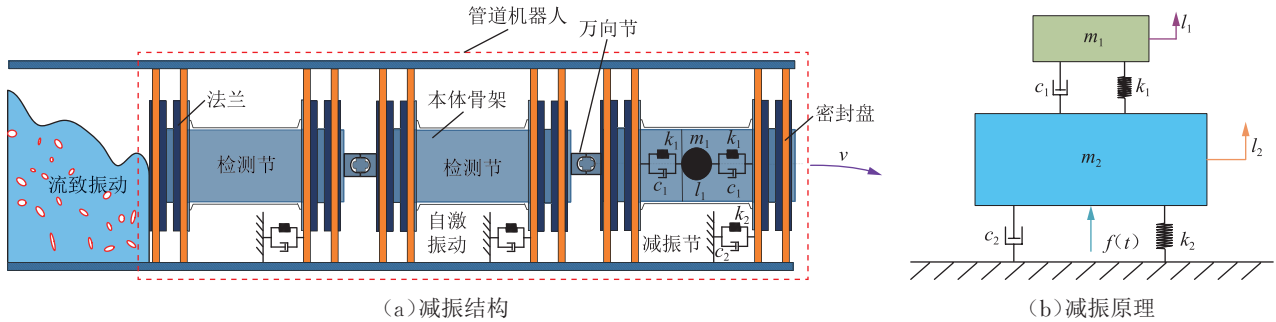


图2 管道机器人减振方式及原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram for vibration reduction of in-line inspection robot

在外部激励力 $f(t)$ 的作用下,加入 TMD 减振后的管道机器人运动方程为:

$$\begin{cases} m_2 \ddot{j}_2 + c_2 \dot{j}_2 + k_2 l_2 = f(t) + c_1 \dot{l}_1 + k_1 l_1 \\ m_1 \ddot{l}_1 + c_1 \dot{l}_1 + k_1 l_1 = -m_1 \ddot{j}_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: j_1, j_2 分别为 TMD 相对于管道机器人本体结构位移、管道机器人本体结构相对于地面位移的导数(速度), m/s; \ddot{j}_1, \ddot{j}_2 分别为 TMD 相对于管道机器人本体结构位移、管道机器人本体结构相对于地面位移的二阶导数(加速度), m/s^2 。

管道机器人本体结构主要受到外部激励力与惯性力的共同作用产生运动突变,此时 TMD 的质量结构部分产生一个反向惯性力,抵消外部激励力作用,进而减小本体结构的振动。由此可以通过调整弹簧阻尼系数,使 TMD 自振频率与主结构的自振频率相近,凭借反向惯性力抑制激振频率相近载荷引发的本体结构振动。

管道机器人受到的外部激励综合表现为一个快速施加的单向力,且管道机器人自身振动也表现为往复振荡形式,但整体上其运行速度并不会产生反向变化。因此, TMD 减振结构并不完全适用于管道机器人在特征管道下的减振,但在管道机器人碰撞初期, TMD 可以产生相反作用力并利用自身的弹簧阻尼进行吸能,因此也具有部分吸振功能。

1.2 变质心减振控制

变质心减振控制是指通过主动改变被控体的质

心位置,通过 TMD 质量球运动变化产生的惯性力减弱控制主体的运动变化,进而达到减振的目的^[18,23-24](图2,其中 m_1, m_2 分别为 TMD、管道机器人本体结构的质量; k_1, k_2 分别为 TMD、管道机器人本体结构的刚度; c_1, c_2 分别为 TMD、管道机器人本体结构的阻尼系数; $f(t)$ 为外部激励力; t 为激励时间; l_1, l_2 分别为 TMD 相对于管道机器人本体结构、管道机器人本体结构相对于地面的位移; v 为管道机器人在管道内的运行速度)。

心位置,达到控制减振的预期效果,其主要是通过移动机体部分结构或部件实现质心变换。依据可动部件的选取方式,变质心的实现方式主要分为两类:①可动部件位于被控体外部,变质心同时影响外部气动布局。②可动部件位于被控体内部,外部气动外形无变化,仅改变被控体内部布局。依据不同的变质心控制原理,可实现附加惯量消旋模式、质量矩姿态控制模式及操稳性能调控模式共3种变质心控制模式^[20,25]。当管道机器人在周向受限管内空间运动时,在外部障碍激励下姿态运动具有明显的非线性、强耦合性等特性。该特性造成的振动以及在管内高压、受限空间下单程长距离作业,是设计变质心减振机构时需考虑的核心问题。

为模拟变质心机构,在管道机器人内部设置质量球,以原质心位置为原点,在水平径向、重力垂向等方向进行偏移,研究在水平径向、重力垂向下质心变化时管道机器人通过管道弯头的振动情况(图3,其中, x, y, z 分别为轴向、水平径向、垂向)。

安装了变质心机构的管道机器人本质上是一个复杂多刚体耦合系统。将管道机器人分为管道机器人本体、质量球、质量球移动机构(简称移动机构)3部分,其中移动机构围绕管道机器人对称分布,且连接于本体内壁。为便于进行动力学分析,做以下假设:①假设管道机器人本体整体成轴对称,质心与体心位于同一位置。②变质心移动机构中的弹簧阻尼移动时,质

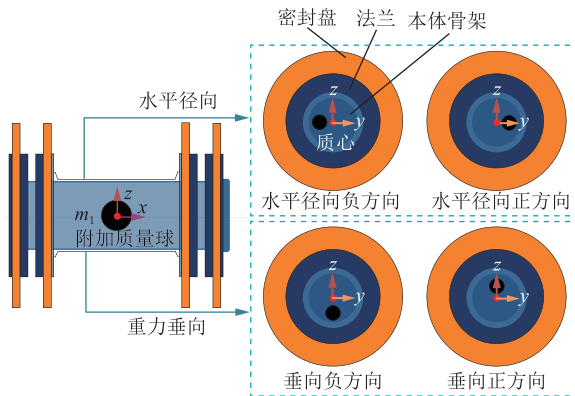


图3 管道机器人变质心原理示意图
Fig. 3 Schematic diagram for variable centroid of in-line inspection robot

心位置、转动惯量均不变。③质量球在移动过程中仅平移,不出现转动。则管道机器人整个系统的总质量 m_{total} 为:

$$m_{total} = m_3 + m_4 + m_5 \quad (2)$$

式中: m_3 、 m_4 、 m_5 分别为管道机器人本体、移动机构、质量球的质量,kg。

管道机器人各部分相对于系统总质量的质量比为:

$$\begin{cases} \varepsilon_3 = \frac{m_3}{m_{total}} \\ \varepsilon_4 = \frac{m_4}{m_{total}} \\ \varepsilon_5 = \frac{m_5}{m_{total}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ε_3 、 ε_4 、 ε_5 分别为管道机器人本体、移动机构、质量球相对于系统总质量的质量比。

加入变质心机构后,随着质量球和移动机构位置的改变,运行过程中的管道机器人(包含管道机器人本体、移动机构及质量球)的质心不再与管道机器人本体的质心重合。根据点的速度合成定理以及质心运动定理,管道机器人动系相对于管道定系进行牵连运动,变质心机构相对于管道机器人动系进行相对运动,由此可得管道机器人质心处速度 v_1 :

$$v_1 = v_0 + \varepsilon_3 \omega l_3 + \varepsilon_4 \omega l_4 + \varepsilon_5 \omega l_5 + \varepsilon_5 \dot{l}_5 \quad (4)$$

式中: v_0 为管道机器人动系相对于管道定系的速度, m/s; ω 为管道机器人转动的角速度, rad/s; l_3 、 l_4 、 l_5 分别为管道机器人本体质心、移动机构质心、质量球的质心至管道机器人质心处的位移, m; \dot{l}_5 为质量球的质心至管道机器人质心处位移的导数(速度), m/s。

将管道机器人在管内的运动简化为直线运动,不存在转动,依据牛顿第二定律,外力对管道机器人的作用力 F 可表示为:

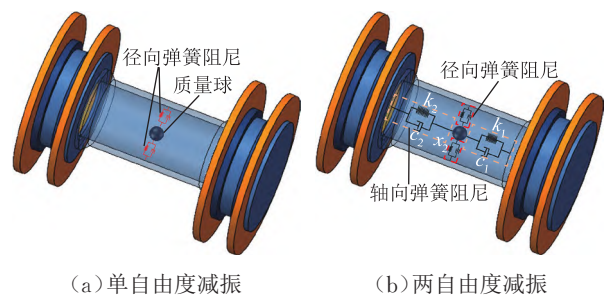
$$F = m_{total} \frac{dv_1}{dt} = F_1 + F_2 + G + F_3 \quad (5)$$

式中: F_1 为管道机器人冲击管道弯头内壁时产生的作用力, N; F_2 为流体推动力, N; G 为管道机器人自身重力, N; F_3 为密封盘与管壁之间的动态摩擦力, N。

将速度矢量分别在轴向、水平径向、垂向进行分解,并将 F 在本体坐标系分为 $F = [x, y, z]^T$ 后,针对上述 3 个方向,利用式(4)、式(5)即可求解质心变化后带来的动力学变化。

1.3 变质心 TMD 减振控制

TMD 减振多用于往复激励荷载,主体结构往复运动越大,减振效果越明显。管道机器人在管内时多为单向运动,减振效果相对较弱。使用变质心减振控制方式后,水平径向与重力垂向减振效果较为明显,但其轴向减振效果较差,且长距离作业时,质心位置的偏移易造成密封盘偏磨严重,可能引发管道机器人皮碗外翻、密封失效甚至卡堵等严重事故。结合 TMD 减振与变质心减振原理,提出一种阻尼-质量球缓冲吸能变质心减振思路:在管道机器人内部设置质量球,限制质量球移动方向,使质量球吸收冲击能量;通过调整弹簧刚度,使管道机器人在直管段运行时,质量球位于质心处,不会造成过大的质心变化,减小密封盘偏磨情况。针对管道机器人过弯头特殊管段,提出单自由度水平径向、两自由度水平径向与轴向两种减振思路。单自由度减振原理(图 4a)为:将质量球限制为仅在水平径向移动,并在质量球与管壁之间设置一对弹簧阻尼吸能,通过弯头时质量球在径向移动,吸收冲击传递的能量。两自由度减振原理(图 4b)为:限制质量球的垂向位移及旋转,通过设置平面副实现质量球在水平方向上的任意移动。与单自由度相比,两自由度减振在轴向上增加了一对弹簧阻尼系统,使得质量球缓冲吸能移动的距离显著增加。



(a) 单自由度减振 (b) 两自由度减振
图4 管道机器人单自由度与两自由度减振原理示意图
Fig. 4 Schematic diagram for vibration reduction of in-line inspection robots with SDOF and 2DOF

2 数值模拟

2.1 模型建立

管道机器人的圆柱形筒体骨架由高强度合金钢制成,通常视为刚体不可变形材料,而密封盘则采用标准线性固体模型进行等效模拟,因此选用 ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) 软件对管道机器人建模(图5)。密封盘主要由质量块、摆杆及弹簧阻尼进行等效替代,并通过标准线性固体模型的建模方法对密封盘进行建模。筒体与质量块之间通过弹簧连接,质量块与质量块之间通过弹簧阻尼进行连接,摆杆之间也通过弹簧阻尼进行连接。在管道机器人内部质心位置增加质量球、轴向及水平径向的弹簧阻尼系统,通过对质量球与筒体之间设置平面副来限制质量球在重力方向的位移。

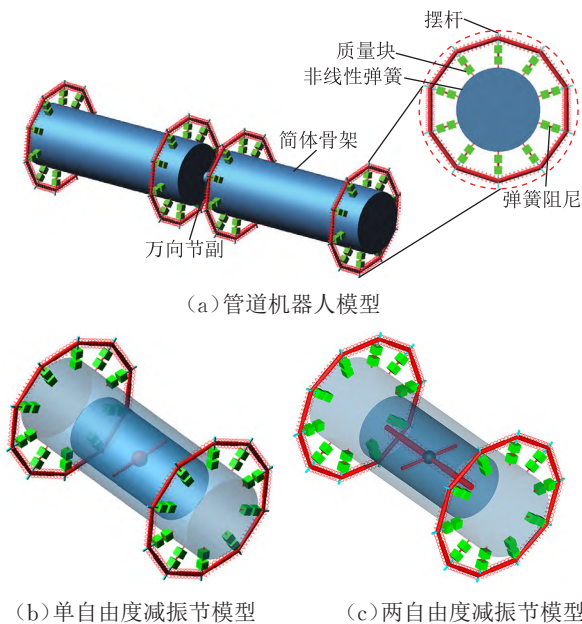


图5 管道机器人及不同自由度减振节模型图

Fig. 5 Model diagram of in-line inspection robot and damping joints with different degrees of freedom

依据 GB 50253—2003《输油管道工程设计规范》中规定的管材与壁厚之间的关系,选取常用的壁厚为 21 mm 的 X70 管线钢,利用 ADAMS 软件建立管体模型(图6)。根据管道的实际使用环境及工程要求,管道的弯头曲率半径各不相同,因此分别针对曲率半径为 $3D$ 、 $4D$ 、 $5D$ (D 为管道内径) 的弯头进行建模。管道机器人摆杆与管道模型之间接触类型设置为实体对实体,二者采用碰撞进行接触,根据 ADAMS 软件中钢铁与橡胶碰撞的常用数值,设置刚度为 2 855、力指数为 1.1。

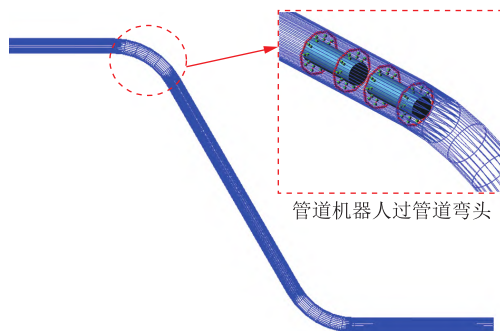


图6 某 X70 管道管体及弯头模型图
Fig. 6 Model diagram of a X70 pipeline with elbows

2.2 管道机器人过弯头时的振动响应

管内流体产生的时变驱动力是管道机器人振动的主要来源之一,当管道机器人在弯头处发生碰撞时,其速度大小及方向发生剧烈变化,进而对流体产生影响,加剧管道机器人的流致振动。通过模拟获得管道机器人在弯头处的运行速度,将运行速度输入 Matlab 中的流体求解方程进行求解,通过 Simulink 流体计算并更新管道机器人前后压力,进而求解弯头处前后压差驱动力。

管道机器人自直管进入弯头、出弯头再进入直管,其经历了 S1~S4 共 4 种不同状态:S1 为前密封盘接触弯头、S2 为管道机器人完全进入弯头、S3 为前密封盘接触直管、S4 为管道机器人完全脱离弯头(图7)。

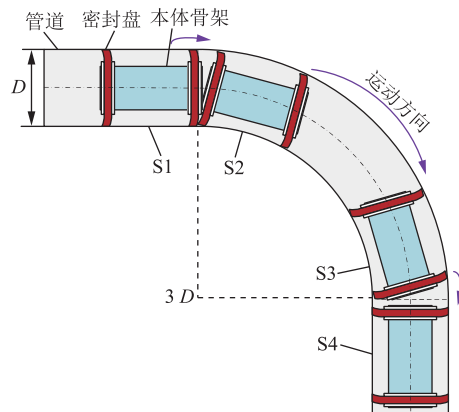


图7 管道机器人过曲率半径为 $3D$ 弯头时不同时刻的状态变化模型图

Fig. 7 Model diagram of time-varying states of in-line inspection robot negotiating an elbow with curvature radius of $3D$

以管道机器人运行速度 4 m/s 为例,基于其通过管道弯头过程中轴向、垂向及水平摇摆方向的加速度,分析不同曲率半径工况下其振动响应情况。根据管道机器人通过不同曲率半径的弯头时质心轴向加速度时程曲线(图8,其中 I、II、III 分别为入弯阶段、弯头运行阶段、出弯阶段, $1g=9.8\text{ m/s}^2$) 及幅频曲线(图9)可知,当运动速度相同时,管道机器人进入弯头后,平均振荡幅值随着管道曲率半径的增大而减小,且振荡时间随曲

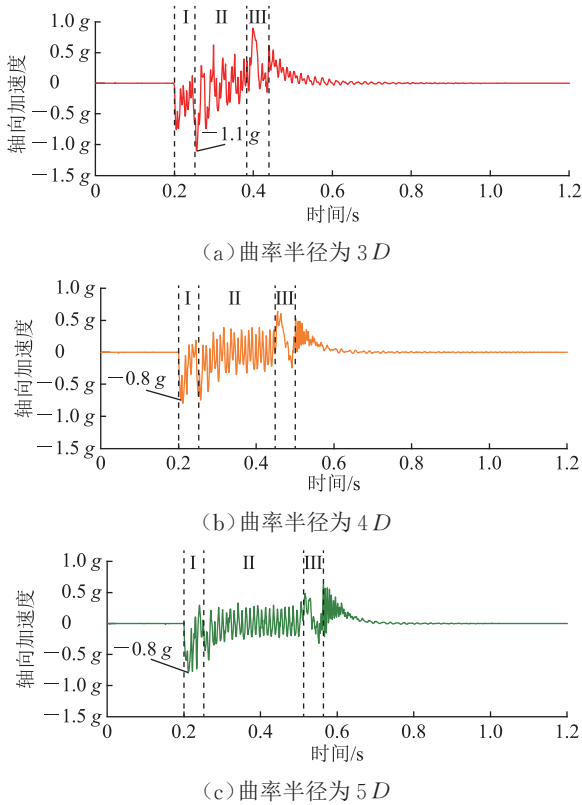


图8 管道机器人过不同曲率半径的弯头时质心轴向加速度时程曲线
 Fig. 8 Time-history curves of axial accelerations at centroid of in-line inspection robot negotiating elbows with different curvature radii

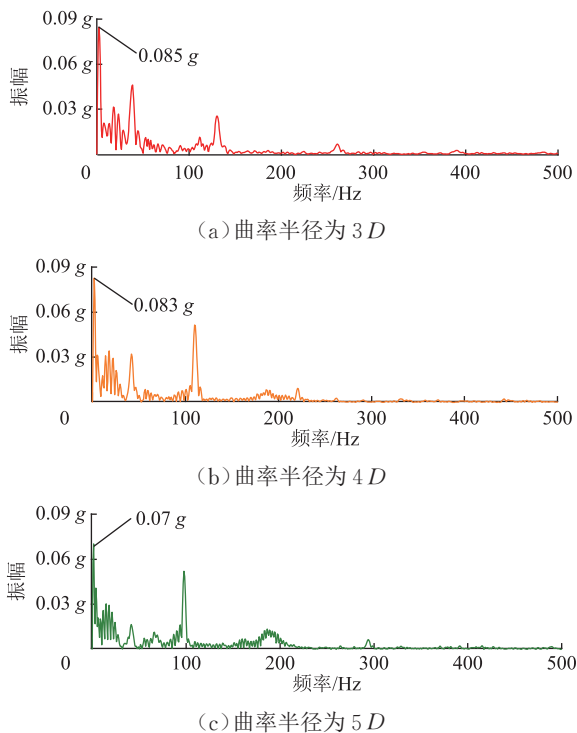


图9 管道机器人过不同曲率半径的弯头时质心轴向加速度幅频曲线
 Fig. 9 Amplitude-frequency curves of axial accelerations at centroid of in-line inspection robot negotiating elbows with different radii of curvature

率半径的增大而增加。振荡频率主要集中于0~150 Hz的低频段,最大峰值位于2 Hz位置且随着曲率半径的增大而减小。

3 模拟结果及分析

在ADAMS中,设置管道机器人的整体质量为1 000 kg、质量球为100 kg,质量球与筒体内部的接触设定为碰撞。以管道机器人运动速度3 m/s、管道弯头曲率半径5 D为例,基于管道机器人在通过管道弯头过程中的轴向、垂向及水平摇摆的加速度,对单自由度与两自由度两种结构的减振效果进行分析。

3.1 单自由度减振结构

针对单自由度减振结构模型,将弹簧阻尼系数设定为固定值0.01 (N·s)/mm,通过改变不同的弹簧刚度进行模拟,得到管道机器人水平摇摆加速度时程曲线(图10)。可见,由于管道内空间位置限制,水平径向空间有限,当管内弹簧刚度较大时,质量球位移较小,且吸能水平较差,对于弯头处的碰撞反应较小,减振效果不明显,振幅变化较小;当弹簧刚度较小时,质量球易碰撞管壁,造成冲击;当弹簧刚度为 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-4}$ N/mm时,质量球在内部出现移动,且在弯头后期往复振荡阶段减振效果明显。但在入弯初期,由于弹簧刚度提供的力与径向移动距离较小,质量球冲击管壁造成管道机器人的加速度突变,最大可达3.47 g,远大于无减振时的加速度极值。

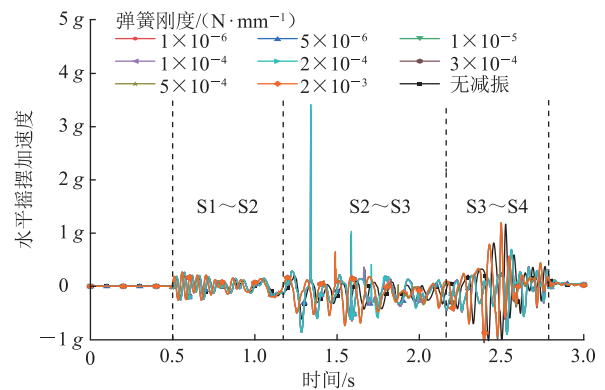


图10 不同弹簧刚度下安装单自由度减振结构的管道机器人水平摇摆加速度时程曲线
 Fig. 10 Time-history curves of horizontal swaying accelerations of in-line inspection robot with SDOF vibration reduction structure under different spring rigidities

3.2 两自由度减振结构

根据两自由度减振结构的质量球在管道机器人内部的位移变化(图11)可见,在管道机器人通过弯头的

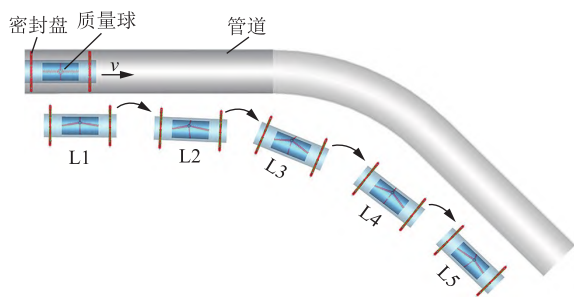


图 11 管道机器人过弯头时两自由度减振结构质量球位移变化示意图

Fig. 11 Schematic diagram of mass sphere displacement changes of 2DOF vibration reduction structure for in-line inspection robot passing through an elbow

整个过程中,质量球并未出现较强的往复振荡运动,但在位置L1~L5处质量球出现了明显的偏置位移现象,起到缓冲吸能的作用;在过弯及出弯位置(即L3、L4),质量球的偏置位移现象最为明显。

对于安装有两自由度减振结构的管道机器人,需对水平径向与轴向两个方向上的弹簧刚度、阻尼系数进行选择。与水平径向不同,轴向上的弹簧及阻尼需应对更大的冲击力。考虑轴向可移动距离及冲击力,计算初步的弹簧刚度范围。选取不同弹簧刚度及阻尼系数共13种工况(表1)进行模拟,发现其中部分工况模拟出现减振效果不明显、质量球触壁等情况。对比分析不同方向的振动响应曲线,发现在选取工况9的参数时,管道机器人在3个方向上的减振效果最好,最终确定工况9为参数最优。

表 1 13 种工况下两自由度减振结构的弹簧刚度及阻尼系数表
Table 1 Spring rigidities and damping coefficients of 2DOF vibration reduction structure under 13 conditions

工况编号	弹簧刚度/(N·mm ⁻¹)		阻尼系数/(N·s·mm ⁻¹)	
	轴向	径向	轴向	径向
1	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻²
2	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹
3	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁷	1.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻²
4	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁷	1.0×10 ⁻²	1.0×10 ⁻²
5	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹
6	1.1×10 ⁻³	1.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹
7	1.1×10 ⁻³	5.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹
8	1.2×10 ⁻³	5.0×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹
9	1.2×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹
10	1.2×10 ⁻³	1.5×10 ⁻³	1.0×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹
11	1.5×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹
12	1.5×10 ⁻³	1.5×10 ⁻³	1.0×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹
13	2.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	1.0×10 ⁻¹	1.0×10 ⁻¹

根据工况9下管道机器人减振前后轴向、垂向及水平摇摆的加速度变化时程曲线(图12)可见:①对于轴向加速度,质量球的移动使轴向加速度的变化幅度在前期略微增大;在通过弯头的后期与出弯阶段,轴向

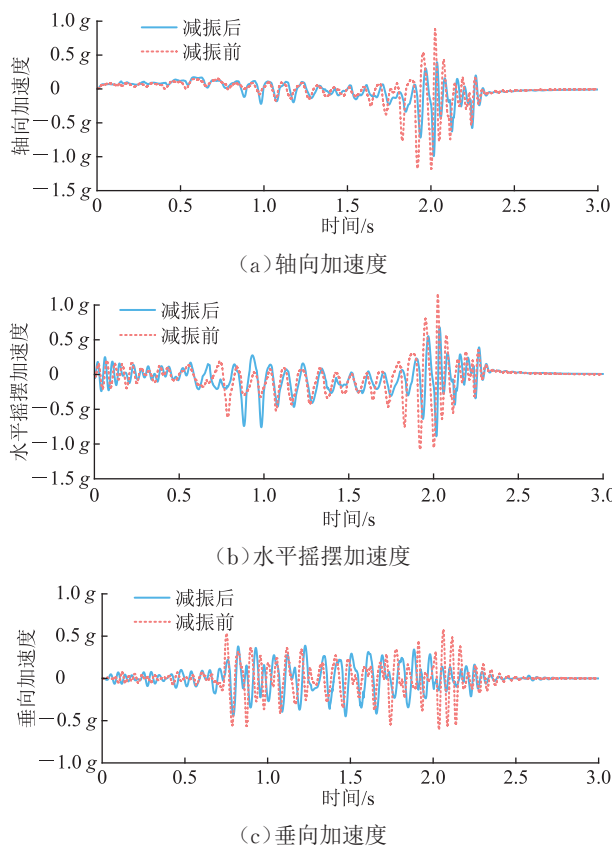


图 12 管道机器人减振前、后 3 个不同方向加速度时程曲线
Fig. 12 Time-history curves of acceleration in three directions of in-line inspection robot before and after vibration reduction

加速度减振效果明显,加速度极值具有明显的下降趋势,分别提取减振前、后管道机器人运行到相同位置时加速度曲线波峰处的加速度极值进行对比,发现部分极值点处减振效果可达40%左右,最高减振效果达48%;管道机器人由振荡状态恢复至稳定状态的时间与无减振结构基本一致,质量球在恢复到原位置时产生的振动响应有极小增加。②对于水平摇摆加速度,在进入弯头与通过弯头初期,质量球移动带来的振动响应使得加速度极值由-0.29g增至-0.74g,此时增幅较为明显。根据通过弯头的整个过程可见,加速度极值下降相对明显,最高减振效果可达39%,避免了加速度增大带来的冲撞损伤。③对于垂向加速度,在进入弯头初期与出弯阶段的减振效果均较为明显。

选取分析机械振动冲击信号时常用的Morlet小波,对图12中的加速度时程信号进行频率切片小波变换(Frequency Slice Wavelet Transform, FSWT)分析,得到管道机器人通过弯头减振前后轴向、水平摇摆及垂向3个方向上的振动能量分布(图13)。

从整体上看,安装减振装置后,管道机器人3个不同方向上的能量在时域上的分布更加平均,降低了短

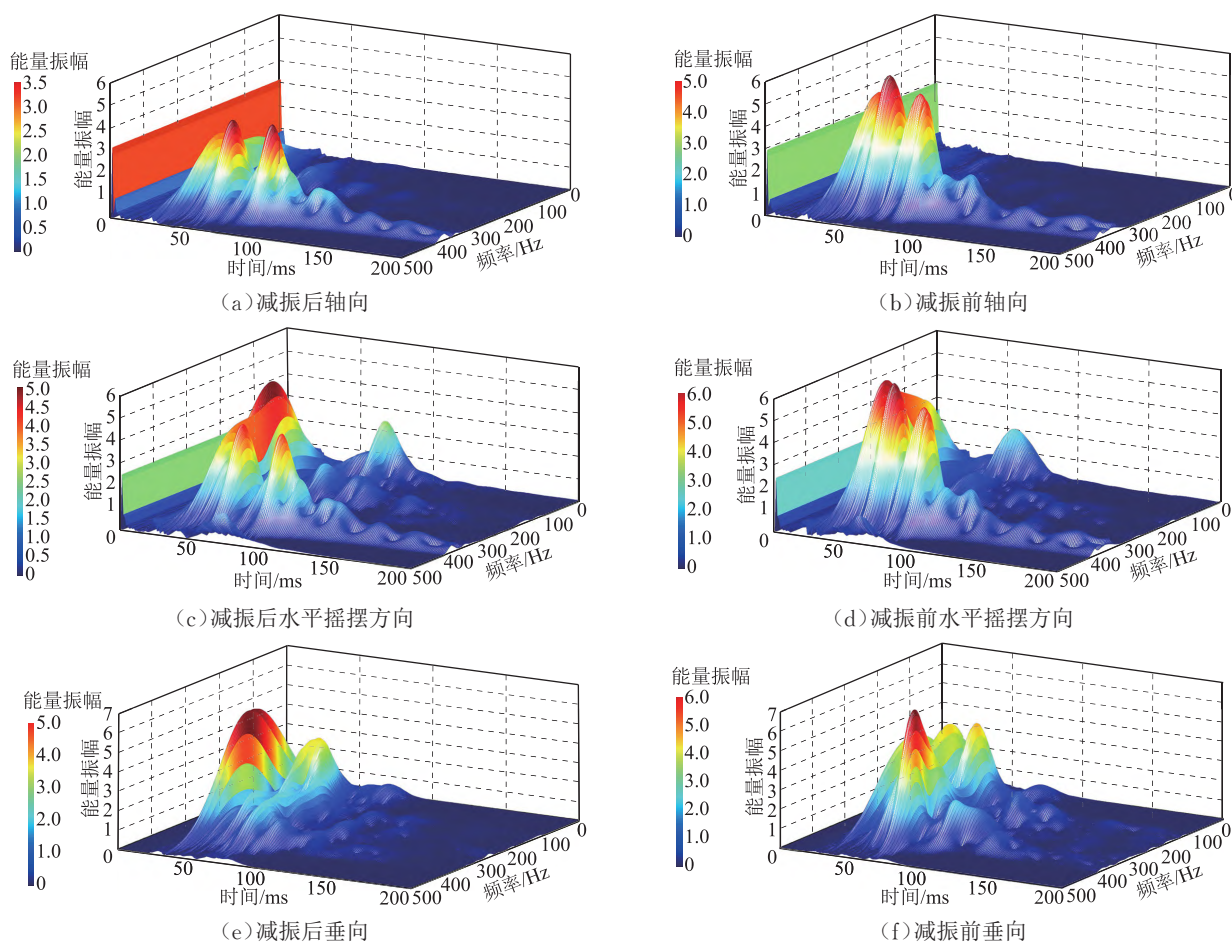


图 13 管道机器人通过管道弯头减振前后 3 个不同方向时频能量幅值谱图

Fig. 13 Time-frequency energy amplitude spectrograms in three directions of the in-line inspection robot passing elbows before and after vibration reduction

时间内大冲击的影响。根据图 13a、图 13b 可知,轴向振动能量明显减小,能量幅值的极值也下降明显,尽管因质量球受惯性移动,在入弯处能量有所增加,但在整体时频上轴向振动能量均减小,且在幅频上的分布无明显变化。根据图 13c、图 13d 可知,水平摇摆方向加速度的振动能量峰值变化不大,减振前能量大多处于高频段,但减振后部分能量极值下降明显,且减振后能量极值处于低频段,通过减振明显降低了通过弯头及出弯阶段的振动能量。根据图 13e、图 13f 可知,垂向加速度的振动能量峰值有微小下降,振动能量在 100~300 Hz 出现集中的情况,高频处的振动能量明显向低频处转移。

4 结论

针对管道机器人运行特点及通过管道弯头的特殊工况,分析了 TMD 减振控制结构与变质心减振控制结构的应用效果,结合两种减振控制原理的优点,设计

了单自由度与两自由度两种管道内检测机器人变质心调谐质量阻尼器减振结构,并通过数值模拟对其减振效果进行了分析,得到以下结论:

1) TMD 减振控制结构并不完全适用于管道机器人在特征管道下的减振,变质心减振控制结构在水平径向、重力垂向两个方向的减振效果较为明显,但其轴向减振效果较差。

2) 对于安装单自由度减振结构的管道机器人,在通过管道弯头初期易出现加速度突变现象,减振效果较差,但在管道弯头后期往复振荡阶段减振效果明显;对于安装两自由度减振结构的管道机器人,其内部质量球在管道内并未出现较强的往复振荡运动,质量球与弹簧阻尼缓冲吸能表征明显。

3) 以上所设计的两种减振结构均具有较好的减振效果,其中两自由度减振结构的减振效果优于单自由度减振结构,但其结构相对较为复杂;今后有待进一步优化单自由度减振结构以降低管道机器人在入弯初期的加速度突变。

参考文献:

- [1] 董绍华,袁士义,张来斌,胡瑾秋,陈怡玥.长输油气管道安全与完整性管理技术发展策略研究[J].石油科学通报,2022,7(3):435-446. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.038.
DONG S H, YUAN S Y, ZHANG L B, HU J Q, CHEN Y Y. Research on integrity development strategy for long-distance oil and gas pipeline[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(3): 435-446.
- [2] 王晓磊,尹博文,李晓丹.多节式管道机器人转弯过程的稳定性分析与仿真[J].机械传动,2023,47(6):94-99. DOI: 10.16578/j.issn.1004.2539.2023.06.014.
WANG X L, YIN B W, LI X D. Stability analysis and simulation of multi-section pipeline robots in the turning process[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(6): 94-99.
- [3] 李亚平,彭云超,淦邦.油气管道漏磁内检测器的变径结构设计[J].油气储运,2022,41(11):1285-1290. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.11.006.
LI Y P, PENG Y C, GAN B. Variable-diameter structure design of MFL inline detector for oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(11): 1285-1290.
- [4] ZHANG Z, HU L H, LI X H, HU X Y. Motion analysis of screw drive in-pipe cleaning robot[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(10): 5605-5617. DOI: 10.1177/09544062211061238.
- [5] LI J, HUANG F, TU C L, TIAN M Q, WANG X S. Elastic obstacle-surmounting pipeline-climbing robot with composite wheels[J]. Machines, 2022, 10(10): 874. DOI: 10.3390/machines10100874.
- [6] 梁守才,孙皓,孙超,马焱,刘万强.小曲率半径低压输气管道内检测器研制与应用[J].油气储运,2023,42(11):1261-1266. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.11.006.
LIANG S C, SUN H, SUN C, MA Y, LIU W Q. Development and application of inline inspectors in low-pressure gas pipelines with small curvature radii[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(11): 1261-1266.
- [7] ZHANG H, ZHANG S M, LIU S H, ZHU X X, TANG B. Chatter vibration phenomenon of pipeline inspection gauges (PIGs) in natural gas pipeline[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27(Part 2): 1129-1140. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.09.054.
- [8] 张行,崔灿,廖宁生,张仕民.考虑流固耦合的管道机器人冲击环焊缝过程动力学建模与分析[J].机械工程学报,2020,56(23):129-140. DOI: 10.3901/JME.2020.23.129.
ZHANG H, CUI C, LIAO N S, ZHANG S M. Dynamic modeling and analysis of pipeline inspection gauge passing girth welds considering fluid-solid coupling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(23): 129-140.
- [9] YU Z T, ZHANG L, KIM J. The performance analysis of PSO-ResNet for the fault diagnosis of vibration signals based on the pipeline robot[J]. Sensors, 2023, 23(9): 4289. DOI: 10.3390/S23094289.
- [10] ZHANG H, GAO M Q, LI Z L, WU Q B. Vibration analysis of an in-pipe inspection robot considering fluid-structure coupling[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2022, 22(5): 2250055. DOI: 10.1142/S0219455422500559.
- [11] 臧延旭,赵云利,梁雪婷,陈峰,王倩.油气管道漏磁检测器探头结构设计[J].化工设备与管道,2022,59(6):96-100. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3281.2022.06.017.
ZANG Y X, ZHAO Y L, LIANG X T, CHEN F, WANG Q. Structure design for probe of magnetic flux leakage inspection gauge for oil & gas pipeline[J]. Process Equipment & Piping, 2022, 59(6): 96-100.
- [12] 李振北,常连庚,张学鹏,刘高菲,李彦春.Φ1016 mm管道超高清漏磁复合检测器研制[J].石油机械,2023,51(7):138-145. DOI: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2023.07.018.
LI Z B, CHANG L G, ZHANG X P, LIU G F, LI Y C. Development of ultra-high definition magnetic flux leakage composite pipeline detector for Φ1016 mm pipelines[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(7): 138-145.
- [13] 苏宁,彭士涛,洪宁宁.基于极点配置的调谐黏滞质量阻尼器脉冲型振动响应控制[J].建筑结构学报,2023,44(9):115-123. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0340.
SU N, PENG S T, HONG N N. Impulsive vibration response control of tuned viscous mass damper based on pole assignment approach[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(9): 115-123.
- [14] 杜永峰,李炜枫,李虎.摇摆双调谐质量阻尼器参数优化及动力性能研究[J].振动与冲击,2023,42(9):275-283. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.09.032.
DU Y F, LI W F, LI H. Parametric optimization and dynamic performance of rocking double-tuned mass damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(9): 275-283.
- [15] MANZONI S, BERARDENGO M, BOCCUTO F,

- VANALI M. Piezoelectric-shunt-based approach for multi-mode adaptive tuned mass dampers[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 200: 110537. DOI: 10.1016/J.YMSSP.2023.110537.
- [16] ZHANG J J, XIE F G, MA Z J, LIU X J, ZHAO H C. Design of parallel multiple tuned mass dampers for the vibration suppression of a parallel machining robot[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 200: 110506. DOI: 10.1016/J.YMSSP.2023.110506.
- [17] 孔凡, 夏红兵, 孙超, 李书进. 风浪联合作用下海上风力涡轮机的碰撞阻尼减振控制[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(3): 19-27. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.03.003.
- KONG F, XIA H B, SUN C, LI S J. Pounding tuned mass damper for vibration control of offshore wind turbine subjected to combined wind and wave excitations[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(3): 19-27.
- [18] 吕洋, 张力, 洪流. 基于可变刚度调谐质量阻尼器的管道减振研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2021, 43(12): 93-99. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2021.12.015.
- LYU Y, ZHANG L, HONG L. Research on pipeline vibration reduction based on a novel variable stiffness tuned mass damper[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2021, 43(12): 93-99.
- [19] ZHANG L Q, CHEN Q J, ZHANG R F, LEI T. Vibration control of beams under moving loads using tuned mass inerter systems[J]. *Engineering Structures*, 2023, 275(Part A): 115265. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2022.115265.
- [20] 周敏, 周凤岐, 周军, 郭建国. 高速飞行器变质心控制技术综述[J]. *宇航学报*, 2022, 43(3): 271-281. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2022.03.002.
- ZHOU M, ZHOU F Q, ZHOU J, GUO J G. A review of moving mass control for high-speed vehicles[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(3): 271-281.
- [21] SUN J H, JING W X, GAO C S, WU T. Attitude dynamics and control of high-mass-ratio fixed-trim moving mass reentry vehicle[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 123: 107456. DOI: 10.1016/j.ast.2022.107456.
- [22] 陈百辉, 韩路路, 王晓明, 冯晓港. 基于翼内双滑块的变质心飞行器设计、分析与飞行试验[J]. *飞行力学*, 2022, 40(3): 81-87. DOI: 10.13645/j.cnki.f.d.20220411.007.
- CHEN B H, HAN L L, WANG X M, FENG X G. Design, analysis and flight test of mass-actuated aircraft based on two moving masses within wings[J]. *Flight Dynamics*, 2022, 40(3): 81-87.
- [23] SHEN L, DING X H, HU T N, XIONG M, ZHANG H. Simultaneous optimization of structure together with attached tuned mass dampers considering dynamic performance[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(2): 128-140. DOI: 10.1016/j.cja.2020.11.021.
- [24] LI C X, PAN H, CAO L Y. Tuned tandem mass dampers-inerters for suppressing vortex-induced vibration of super-tall buildings[J]. *Engineering Structures*, 2022, 270: 114831. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2022.114831.
- [25] 吉思臣, 王司令, 阎坤, 任海鹏, 周洋. 变质心共轴双旋翼无人机建模与反步滑模控制[J]. *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(6): 1056-1064. DOI: 10.16356/j.1005-2615.2022.06.007.
- JI S C, WANG S L, YAN K, REN H P, ZHOU Y. Modeling and backstepping sliding mode control of moving mass-actuated coaxial dual-rotor UAVs[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(6): 1056-1064.

(编辑: 李在蓉)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“考虑复杂激励与管土耦合的气液两相驱动多节串联管道机器人动力学特性研究”, 52275141; 国家自然科学基金资助项目“环焊缝连续激励下管道机器人流固耦合系统非线性动力学特性研究”, 51805542; 国家重点研发计划“中俄管道重大风险防控与安全保障关键技术”, 2022YFC3070100; 国家管网集团科研项目“高钢级管道检测评价技术研究”, WZXGL202104; 中国石油大学(北京)科研基金项目“复杂服役环境下管道内检测装备服役可靠性基础问题与性能提升方法研究”, 2462023QNXZ012。

作者简介: 李睿, 男, 1983年生, 高级工程师, 2018年博士毕业于北京航空航天大学机械电子工程专业, 现主要从事管道完整性及检测技术的研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳区金光道51号, 065000。电话: 0316-2073114。Email: 9632920@qq.com

通信作者: 张行, 男, 1988年生, 教授, 博士生导师, 2016年博士毕业于中国石油大学(北京)机械工程专业, 现主要从事高端油气智能装备设计理论及服役可靠性等方向的教学及研究工作。地址: 北京市昌平区府学路18号, 102249。电话: 010-89737562。Email: zhanghang@cup.edu.cn

• Received: 2023-09-23

• Revised: 2023-11-02

• Online: 2024-06-13

