

# 输油管道流致振动与地震效应耦合仿真研究

张佳晨, 高健飞, 翁光远

(西安石油大学 机械工程学院, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为揭示输油管道流致振动与地震响应的耦合机理, 以输油管道为研究对象, 构建基于双向流固耦合的三维动力学有限元模型, 并考虑原油从流入、充满到稳定输送全过程中流速、动压及流体分布的时变特性, 分别分析满管稳态流动工况与流体逐渐充满管道工况下的地震响应差异。通过提取入口段、跨中段和出口段典型节点的加速度与动压时程, 揭示流速、空间位置以及流体状态对管道振动的影响规律。结果表明: 流体动力效应显著放大了管道在地震动作用下的响应, 入口段对流速变化最为敏感, 在典型工况下加速度峰值较静止流体工况增幅达30%左右; 流体充满过程引入了额外的瞬态流致效应, 使各测点在初始阶段产生明显的加速度差值和动压峰值, 随后随流场收敛逐渐衰减; 受黏性耗散与壁面摩擦影响, 管内动压沿程呈现由入口向下游方向递减的空间梯度, 中下游段流体对结构地震响应的贡献明显减弱。

**关键词:** 输油管道; 流致-地震耦合; 双向流固耦合; 充液瞬态效应; 动压响应

中图分类号: TE973.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0119-06

## Coupled Simulation of Flow-induced Vibration and Seismic Effects in Oil Pipelines

ZHANG Jiachen, GAO Jianfei, WENG Guangyuan

(Mechanical Engineering College, Xi'an Shiyu University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

**Abstract:** To reveal the coupling mechanism of flow-induced vibration and seismic response in oil pipelines, a three-dimensional dynamic finite element model based on bidirectional fluid-structure interaction (FSI) is developed for the medium-pipeline structure system. The model simultaneously considers the time-varying characteristics of flow velocity, dynamic pressure, and fluid distribution throughout the oil flow process, from entry, filling, to stable transportation. The seismic response differences under steady-state flow conditions and the process of gradual fluid filling are analyzed. By extracting the acceleration and dynamic pressure time histories at typical nodes in the inlet, mid-span, and outlet sections, the impact of flow velocity, spatial location, and fluid state on pipeline vibration is revealed. The results show that the dynamic effect of the fluid significantly amplifies the pipeline's response under seismic excitation. The inlet section is most sensitive to changes in flow velocity, with peak acceleration increases of up to 30% compared to the static fluid condition under typical scenarios. The fluid filling process introduces additional transient flow-induced effects, causing significant acceleration differences and dynamic pressure peaks at the initial stage of each measurement point, which then gradually attenuate as the flow field stabilizes. Due to viscous dissipation and wall friction, dynamic pressure decreases along the pipeline from the inlet to downstream, with the contribution of fluid to the structural seismic response weakening significantly in the middle and downstream sections.

**Keywords:** oil pipeline; flow-seismic coupling; bidirectional fluid-structure interaction; transient filling effect; dynamic pressure response

输油管道是重要的能源输送设施, 在运行过程中, 流体流动引发流致振动, 影响结构稳定性。地震

发生时, 外部激励会进一步加剧管道的动力响应, 与流致振动产生耦合效应, 增加共振和疲劳破坏的风

险<sup>[1-2]</sup>。目前,地震动与管道内流体振动激励相互作用的耦合机理尚缺乏统一的理论基础、模拟计算和试验验证。因此,许多学者针对此问题开展了研究,取得了相应的研究进展。

介质流动诱发管道振动方面,刘诗文等<sup>[3]</sup>研究了输流管网中的流致振动特性,提出了基于流体和管道耦合的数值模拟方法,探索了不同管网拓扑结构、流速及管道布置对振动的影响,尤其关注了流体流动的非线性效应。宋微等<sup>[4]</sup>针对输油悬跨管道的流致振动进行了数值模拟,建立了复杂的管道模型,研究了不同流速、管道跨度与支撑条件对管道振动响应的影响,提出了悬跨管道特有的振动特性与流体相互作用的规律。鲍健等<sup>[5]</sup>分析了细长输流管内外流耦合振动特性,提出了新的流体-结构耦合模型,研究了内外流动对管道振动的联合影响。杨超等<sup>[6]</sup>采用数值模拟方法,研究了输液管道的流固耦合振动,重点分析了流体诱发的非稳态振动特性及其对结构安全性的影响。柳博瀚等<sup>[7]</sup>针对海洋弹性管建立了流固耦合数值模型,通过对比不同流态下的动力学行为,重点阐明了流动不稳定性是诱发管道大幅振动的关键机制。Duan 等<sup>[8]</sup>揭示了非定常摩擦对管径与管长的尺度依赖性,给出无量纲判据以解释瞬态压力沿程衰减与位置敏感性规律。Rakhsha 等<sup>[9]</sup>将多体系统动力学与流体建模结合,用于复杂流固耦合系统的高效仿真。

地震激励引发的结构响应方面,马璐珂<sup>[10]</sup>以国内最大跨度的斜拉-悬索跨越结构开展动力响应分析,并评估了管道体系对结构抗震性能的影响。王晓阳等<sup>[11]</sup>分析了在洪水荷载下桁架梁跨越结构的应力及变形,针对不同级别的地震,分析了桁架跨越结构固有频率及应力分布情况。滕振超等<sup>[12]</sup>通过建立桁架跨越结构模型,输入 EL-Centro 波进行数值模拟分析,研究了地震作用下高度和截面形式对桁架结构的影响。杨海洋等<sup>[13]</sup>通过建立铁路悬索桥动力学模型,分析了纵向非一致地震激励下的结构响应,重点揭示了地震波非一致性对桥梁振动特性的影响。Teng 等<sup>[14]</sup>揭示了管道跨越长度增大使固有频率降低且地震响应增强,且在相同跨越长度下直线型管道虽频率较高但抗震性能最差。

在地震响应与流致振动耦合方面,Yao 等<sup>[15]</sup>开发了双向耦合模型,分析斜拉管桥-原油系统在地震与原油流动共同作用下的动态响应,指出流体密度显著影响管道压力与位移的时变特性。Wang 等<sup>[16]</sup>基于流固耦合理论建立埋地供水管道有限元

模型,发现最大变形出现在管道中部,最大等效应力集中在出口端,并指出管径、埋深与壁厚对抗震性能存在敏感性规律。Mir 等<sup>[17]</sup>分析了地震激励下流体-结构相互作用对液体储存结构的影响,重点探讨了流体动力响应、结构振动特性以及震动传播的机制。

目前的管道流-震耦合分析多基于稳态流动或等效质量近似的简化假设,侧重于分析满管稳定输送状态下的结构响应。然而,这种简化处理忽略了管道在充液及工况切换过程中流体分布的时变特性,未能捕捉介质流入引发的动压剧变及其伴随的瞬态流致效应。因此,构建介质充满管道全过程的流-震耦合模型,系统揭示流体时变动力效应对结构地震响应的非线性调制机理,对准确评估复杂工况下输油管道的抗震安全性至关重要。

鉴于现有研究多侧重于稳态工况,忽视了瞬态流体行为对地震响应的影响,本文以原油管道结构系统为研究对象,核心创新在于,不仅考虑了常规的稳态流-震耦合,更首次系统研究了原油从流入、充填到稳定输送这一全时变过程与地震动的动态耦合机理。通过构建双向 FSI-VOF 模型,揭示输油管道在地震与流体流入管道全过程中耦合作用,为复杂工况下的管道抗震评估提供更精准的理论依据。

## 1 建立有限元模型

### 1.1 建立输油管道-原油的流固耦合模型

以如图 1 所示的输油管道结构为原型结构,将输油管道管内原油介质、管道结构、管道跨越结构组成原油管道结构系统,构造三维有限元模型。管道总长 40 m,采用 X70 管线钢材料,规格为  $\Phi 711 \times 12.7$  mm,最高输油温度 70℃。管道支座、支撑环组成管道支撑系统,选用 Q345 结构钢,每间隔 8 m 布设一组。为充分考虑跨越结构的实际约束特性,模型中对所有支架底部节点施加全约束,限制其六个自由度,在管道与支撑系统的连接关系方面,将管道外壁与支撑环内壁定义为绑定接触,模拟抱箍紧固状态下的无相对滑移工况。该边界设置使管道整体变形主要通过支架自身的弹性弯曲与剪切变形得以协调,更符合工程实际约束特性

根据管道的几何尺寸建立管道固体区域模型,并抽取流体区域,管道内壁/流体外壁为界面耦合面,指定流体入口和出口。对流体流入管道过程采用 VOF 模拟气液混合物和自由表面,在流体的初始条件下,油的体积分数设置为 0.99,空气的体积分数为 0.01。

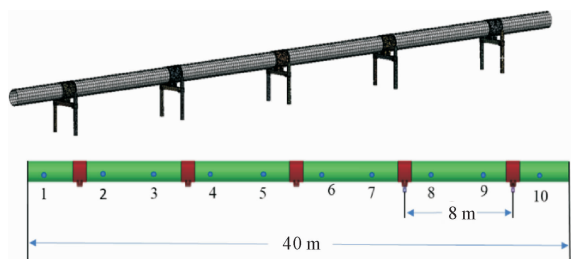


图 1 输油管道有限元模型

在 Transient structural 模块,设置管道跨越系统材料参数,管道的网格划分采用六面体八节点单元。管道网格划分的精细程度会对模型后处理计算结果产生影响,网格划分越精细,计算结果更精确,并施加地震载荷。网格无关性验证曲线如图 2 所示,网格模型网格数量分别为 42 232、78 267、110 635、166 299 和 218 428。

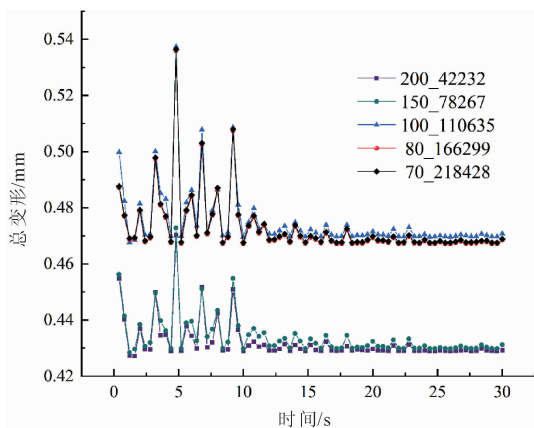


图 2 网格无关性验证图

由图 2 可知,这 5 种网格之间的误差随着网格数量增加逐渐减小,当网格数量大于 166 299 时,监测点处结构的变形差别最小,综合考虑计算成本和模拟精度,最终采用网格数为 166 299 的模型展开后续的研究。

流体湍流采用标准湍流模型,设置原油密度  $900 \text{ kg/m}^3$ ,黏度  $0.8 \text{ cP}$ ,入口流速依据《输油管道工程设计规范》(GB 50253—2014)及工程设计经验分别设置为  $1.2、2 \text{ m/s}$ ,出口为自由流出。Fluent 模块中的流固耦合(FSI)界面采用弹簧模型(Spring model)。推导数学模型时,将 Euler 坐标下的 N-S 方程映射到任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrange-Euler, ALE)坐标系统中来解决动网格问题,即在流体区域中采用 Euler 单元,对固体区域内用 Lagrange 单元,并在统一的 ALE 坐标系下进行求解,使得流体模型中的流固界面总是跟随固体的变形而改变。

在 System Coupling 中对 Transient Structural 与 Fluent 进行分区耦合,连通流体域与结构域的 FSI 界面,实现载荷-位移的双向数据交换,从而联立求解管道位移响应与原油动态压力分布。

介质流经管道时,流体的分布情况发生了较大变化,流体的状态是计算介质经时流固耦合力学行为的基础。为分析地震动作用下原油流动对管道跨越结构系统的振动影响,在有限元计算的结果中,本文提取了介质流经输油管道瞬态以及稳定流动的典型分布图,如图 3 所示。

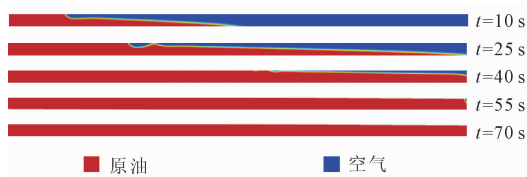


图 3 流体状态分布图

## 1.2 施加地震动作用

原油管道在中国分布范围很广,跨越多个省区,其中有相当一部分区段位于地震多发区或高地震烈度危险区。当地震发生时,管道-跨越结构系统会发生振动,导致管道内的原油发生振荡,且原油的振荡反过来影响系统,并贯穿整个地震波传播过程。为揭示流体-结构-地震三者交互机制,基于工程场地的地震动参数建立分析基准:该输油管道处于 8 度区,II 类场地,特征周期值  $0.40 \text{ s}$ ,结构阻尼比  $0.05$ ,水平地震影响系数  $\alpha_{\max} 0.45$ ,峰值加速度  $0.2g$ ,如图 4 所示。

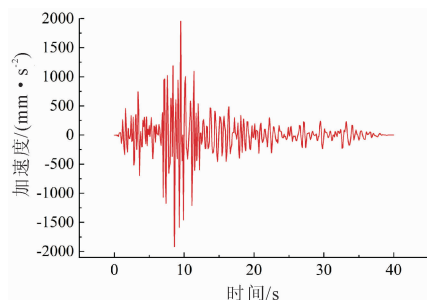


图 4 地震激励加速度时程曲线

将地震加速度时程施加在管道上.设置总作用时间为  $30 \text{ s}$ ,以  $0.1 \text{ s}$  为 1 个时间步长,输入每个时间点所对应的地震波加速度,共输入 300 组数据,对应加速度时程曲线上的每个点,便可以模拟输油管道在地震波作用下的振动情况,地震波的传播方向设置为沿着水平方向进行传播。

## 2 结果与分析

### 2.1 流体满管时流致振动与地震耦合响应分析

液体充分充满管道截面,管内原油流动状态均匀,流体密度、压力及速度场分布稳定,气液混合与压缩效应可以忽略,流固边界条件清晰,耦合关系相对简单,便于分析结构系统在典型运行条件下的振动响应特征。本文选取流体充满管道的瞬时流场作为

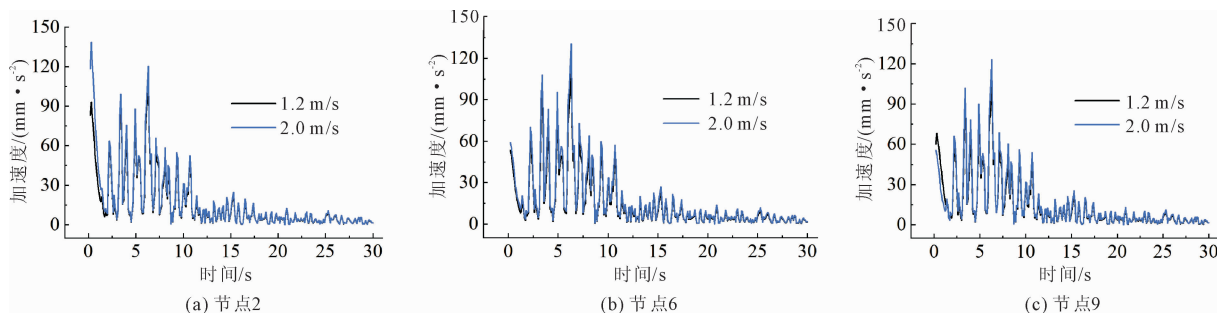


图5 流体充满管道的加速度响应时程曲线

在地震波作用下,流速和位置的变化对管道的加速度响应产生了显著影响。随着流速从 1.2 m/s 增加到 2 m/s,节点 2 的加速度峰值从  $92.8 \text{ mm/s}^2$  增加到  $132.2 \text{ mm/s}^2$ ,表明较高流速增强了流体对管道的激励作用。节点 6 和节点 9 的加速度峰值也随流速的增加呈上升趋势,增幅约为 10%。此外,位置变化对加速度响应也有一定影响,节点 2 的加速度峰值显著高于节点 6 和节点 9,反映出入口段在地震波作用下的振动响应更为强烈。随着管道位置向下游延伸,振动响应逐渐衰减,节点 6 和节点 9 的加速度峰值趋于一致。总的来说,随流速的增加管道的振动响应幅度明显增大,尤其在管道入口段振动响应更加显著。

这种局部响应放大现象本质上由水动力入口段

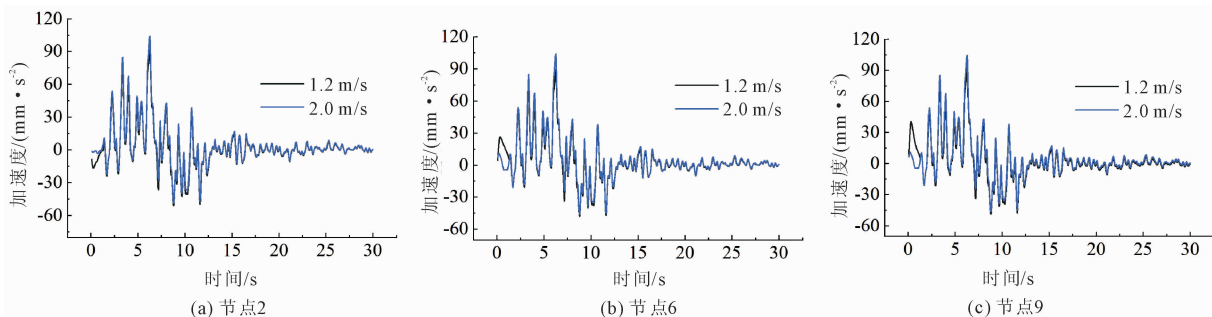


图6 加速度时程差值曲线

在地震波激励下,三个节点的差值曲线形态基本一致,均在初始 0~10 s 以正值差异为主,随后逐渐减小并在 0 附近振荡。随着流速升高,差值幅值

初始条件,开展地震作用下的瞬态流固耦合响应分析,对比结构各测点在不同流速与地震波激励下的加速度响应,开展流固耦合的瞬态响应分析,揭示流体动力效应对跨越结构地震响应的影响。

为分析原油流动对管道跨越结构系统的振动影响,提取近入口节点 2、跨中节点 6、近出口节点 9 的加速度时程曲线,具体如图 5 所示。

效应主导。基于定常动量方程,入口段流体处于边界层急剧发展的流速剖面演变区,对流加速度项达到沿程最大值。该区域流体动量通量的高梯度变化伴随着更高的压力梯度与壁面剪切作用。流体动力载荷的集中效应与地震激励叠加,导致入口段结构振动加剧,使其响应幅度显著高于流动已充分发展的中下游管段。

### 2.2 流体充满管道过程中的地震响应分析

介质以定速流入管道端口时,入口部分的流体分布主要包括原油、液面附近气液混合物和管内空气。取介质开始流入管道的前 30 s 进行地震响应耦合计算,分析考虑流经状态的加速度响应。通过对比流体满管与流入状态的加速度差值揭示流体流动状态的附加效应,具体如图 6 所示。

整体放大,节点 5 处的负向幅度  $55 \text{ mm/s}^2$  高于节点 2、节点 9。在较高流速下,满管状态下流体的激励作用更强,流入过程与满管过程之间的加速度差异

更加明显。

### 2.3 流体动压力对管道结构响应的影响分析

在前两节中,分别探讨了介质流经阶段与稳定流动状态下管道结构在地震动作用下的动力响应特

征。为进一步区分外部激励与内部流动的影响,本节以2、6、9节点为例,揭示流体动力载荷对管道结构的影响特征,管内动压随时间和流速的变化曲线,如图7所示。

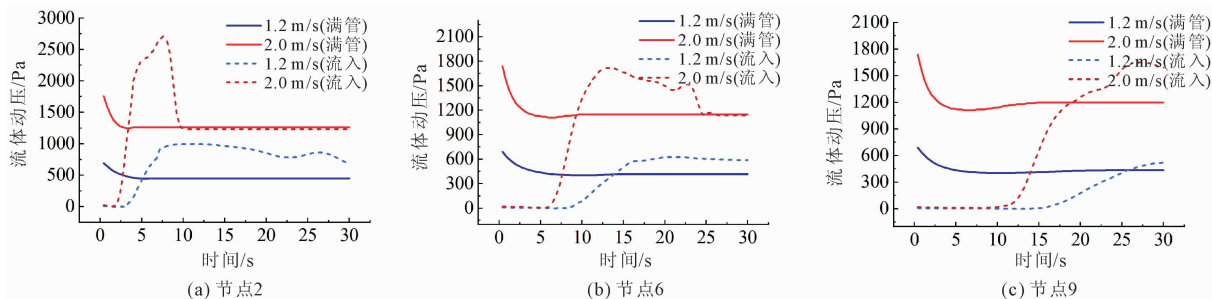


图7 流体流入与充满管道的动压时程曲线

由图7可知,三处测点的稳态动压均随流速升高而增加。在入口区,瞬态动压在0~8 s内表现出显著峰值(如流速2.0 m/s时达2 710 Pa),且收敛速度与流速成正比,说明入口处对流速扰动敏感性较高。节点6位置的满管动压整体水平低于入口,随流速升高同样呈上升趋势,但增长幅度相对减弱;其瞬态动压峰值亦较入口明显降低(如2.0 m/s时为1 730 Pa),并在较短时间内收敛,这表明流体在传输过程中受到黏性阻尼与壁面摩擦作用,使动压脉动逐渐被削弱。节点9处的动压峰值更小,表明脉动沿程进一步衰减。取计算模型管道动压力对应节点所在的区域截面为研究对象,提取了动压力在管道截面的计算结果,绘制了动压力变化云图,如图8所示。

程分布云图(图9(b))。

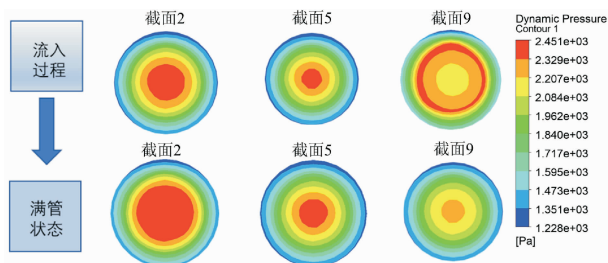


图8 流体不同位置动压云图

通过图8可知,流体动压规律与曲线结果一致。管道内不同位置的动压呈现出由入口向下游逐渐衰减的趋势,且在下游节点的动压变化幅度较小,符合流体在管道内的流动特性和能量耗散过程。

为揭示地震峰值时刻流体动力载荷与管道结构响应之间的瞬态耦合机制,图9同步展示了 $v = 2 \text{ m/s}$ 、 $t = 6.3 \text{ s}$ 介质满管状态下地震波加速度峰值时刻的管道结构变形云图(图9(a))与流体域动压沿

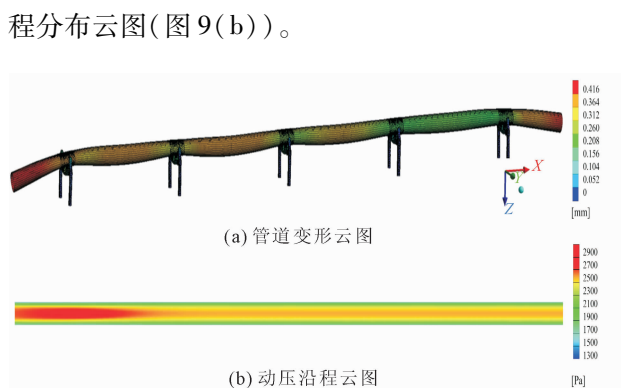


图9 地震作用下管道结构变形与流体动压耦合分析云图

对比图9(a)与图9(b),流体动压的高能区与管道结构的大变形区在空间位置上精确重合,均集中分布于管道入口及其邻近管段。这种高度的空间一致性表明,入口段的高动能流体是加剧结构局部破坏风险的关键载荷源。

图9(b)中动压沿管程的显著衰减趋势,本质上反映了流体能量在管道传输过程中的持续损失。基于修正伯努利方程的能量守恒机理,流体在流动过程中需同时克服管壁黏性摩擦与地震诱发管壁弯曲所产生的联合阻滞作用产生沿程水头损失。这种能量的连续耗散导致流体总能沿流向降低,进而使动压呈现出由入口向出口单调递减的梯度分布特征。

综上,在只考虑流致作用下,管道内动压响应呈现显著的空间梯度特征,入口区对流速扰动敏感且瞬态脉动强烈,中下游区因黏性耗散与壁面摩擦作用,动压脉动沿程衰减。该现象揭示了流体动力参数的空间依赖性。

### 2.4 模型的验证

本文基于经典振动理论,通过计算分析空管和充满原油管道的固有频率验证模型的可靠性,并验

证一阶固有频率比。对于跨越结构支撑的管道结构,往往忽略流体的粘弹性阻尼和刚度效应,主要考虑单位长度等效质量降低对固有频率的影响,通过理论计算和本文模型的有限元模态计算,提取了前 6 阶固有频率,如表 1 所示。

表 1 管道结构干/湿模态固有频率对比

阶数	空管/Hz		充满原油管道/Hz		频率比 偏差/%
	理论计算值	模型计算值	理论计算值	模型计算值	
1	19.76	18.99	13.25	12.85	0.94
2	20.30	20.25	13.61	13.12	3.35
3	21.17	21.58	14.19	14.21	1.77
4	22.34	22.68	14.98	14.98	1.47
5	23.75	24.39	15.92	16.36	0.06
6	25.38	24.75	17.01	17.29	4.21

表 1 计算结果表明,本文建立的有限元计算模型固有频率与理论计算偏差小,能较好反映流体对结构模态的削弱作用,流体动力条件的改变(流速由 1.2 m/s 增至 2.0 m/s)可引发关键测点加速度响应产生约 34% 的显著波动。这一结果与 Weng 等<sup>[18]</sup>研究结论在量级上保持一致,验证了本文有限元模型的计算结果的合理性与可靠性。

### 3 结 论

(1) 流体动力效应显著影响管道的地震响应。入口段的加速度响应对流速变化影响大,尤其在较高流速下,响应差异明显。而管道的中段和出口段响应逐渐平稳,且受边界约束的影响较大,表明流体惯性效应随着管道长度的增加逐渐衰减。

(2) 动压衰减的主要因素是黏性耗散和壁面摩擦。随着流速的增加,动压衰减的速率加快,尤其是在较高流速下,动压沿管道的衰减趋于更为明显。在管道的中段和出口段,随着流速的提高,动压的变化逐渐平稳,表明流速越高,动压收敛得越快。

(3) 相比于稳态简化模型,模拟流体充注的瞬态过程能捕捉到入口段关键的地震放大效应与动压峰值,避免低估局部构件的疲劳风险。双向流固耦合框架支持多工况敏感性分析,为输油管道跨越结构的抗震设计提供了重要指导与数据支撑。

#### 参考文献:

[1] 张亮超,郭恩栋,杨斐,等. 典型架空输油管道地震破坏特征数值模拟分析[J]. 震灾防御技术, 2025, 20(2): 409-416.

[2] 赵可杰,翁光远. 15° 倾斜输油管道内油水两相流流动特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2025, 23(2): 134-138, 161.

[3] 刘诗文,赫荣辉,杨钊,等. 输流管网流致振动特性数值模拟研究[J]. 核动力工程, 2022, 43(1): 187-191.

[4] 宋微,王素玲,姜民政,等. 输油悬跨管道流致振动数值模拟研究[J]. 化工机械, 2020, 47(4): 473-477, 516.

[5] 鲍健,陈正寿. 细长输流管内外流耦合振动特性研究[J]. 海洋工程, 2022, 40(2): 78-87.

[6] 杨超,范士娟. 输液管道流固耦合振动的数值分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(6): 56-59, 194.

[7] 柳博瀚,陈正寿,鲍健,等. 管道内流对海洋弹性管振动影响的数值仿真研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(17): 177-185, 202.

[8] Duan H F, Ghidaoui M S, Lee P J, et al. Relevance of unsteady friction to pipe size and length in pipe fluid transients[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(2): 154-166.

[9] Rakhsha M, Yang L, Hu W, et al. On the use of multi-body dynamics techniques to simulate fluid dynamics and fluid-solid interaction problems[J]. Multibody System Dynamics, 2021, 53(1): 29-57.

[10] 马璐珂. 管道斜拉-悬索跨越结构地震响应分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.

[11] 王晓阳,刘杏塔. 桁架跨越结构的动力学响应[J]. 科技视界, 2020(4): 184-185.

[12] 滕振超,赵添佳,赵佳. 地震作用下桁架结构响应分析[C]//第 26 届全国结构工程学术会议论文集(第 III 册), 2017: 208-212.

[13] 杨海洋,钟毅毅,夏禾. 铁路悬索桥纵向非一致激励地震响应分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(22): 157-163.

[14] Teng Z, Zhao Y, Liu Y, et al. Response analysis of pipeline crossing structure with earthquake[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 580(1): 012086.

[15] Zhai Y, Weng G, Han Z, et al. Dynamic pressure and displacement response of pipelines in cable-stayed bridge under the coupling effect of earthquakes and crude oil flow[J]. Results in Engineering, 2025, 27: 106719.

[16] Wang Lijuan, Zhang Jiaming, Zhang Haixiao, et al. Seismic response analysis of buried water supply pipeline based on fluid-solid interaction[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(3): 271-278.

[17] Mir F U H, Yu C, Whittaker A S. Experimental and numerical studies of seismic fluid-structure interaction in a base-supported cylindrical vessel[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2020, 50(5): 1395-1413.

[18] Weng Guangyuan, Xie Qixuan, Xu Chenxi, et al. Seismic response of cable-stayed spanning pipeline considering medium-pipeline fluid-solid coupling dynamic effect[J]. Processes, 2023, 11(2): 313.