

基于 ANSYS Workbench 完井管柱流固耦合振动固有频率分析

曹银萍¹, 黄宇曦¹, 于凯强², 窦益华¹

1. 西安石油大学机械工程学院 陕西西安 710065

2. 中航富士达科技股份有限公司 陕西西安 710000

通讯作者:E-mail:caoyinping029@163.com

项目支持:国家科技重大专项“极端工况油套管柱强度分析及优化设计”(2016ZX05051)

引用:曹银萍, 黄宇曦, 于凯强, 等. 基于 ANSYS Workbench 完井管柱流固耦合振动固有频率分析[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 1-7.

Cite: CAO Yingping, HUANG Yuxi, YU Kaiqiang *et al.* Natural frequency analysis for fluid-solid coupling vibration of completion string based on ANSYS Workbench [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 1-7.

摘要 试油完井工况下,处于高温高压环境中的管柱易受到压力、轴向力、温度以及流固耦合作用的影响而引发振动。以完井管柱为研究对象,在 ANSYS Workbench 中建立完井管柱的有限元模型,用六面体八节点单元进行了网格划分,并对流体和固体设置流固耦合交界面,分析了内压、轴向力以及流固耦合作用对完井管柱固有频率的影响。研究表明,完井管柱的固有频率随着管柱内压的增加而减小;完井管柱固有频率随着轴向力的增加而增加;流固耦合作用会降低管柱的固有频率。当管柱内流体为天然气时,管柱的固有频率减小 1.4%;当管柱内流体为水时,管柱的固有频率减少 18%,液体与管柱流固耦合作用对管柱固有频率的影响大于气体。该分析为试油完井管柱安全性评估和结构优化提供了理论支持。

关键词 试油;完井管柱;固有频率;流固耦合;模态分析;ANSYS Workbench;有限元分析**中图分类号**:TE925 **文献标识码**:A **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.01.001

Natural frequency analysis for fluid-solid coupling vibration of completion string based on ANSYS workbench

CAO Yinping¹, HUANG Yuxi¹, YU Kaiqiang², DOU Yihua¹

1. College of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

2. Avic Forstar Company, Xi'an, Shaanxi 710000, China

Abstract: Under the high-temperature and high-pressure conditions, the production test and completion string may vibrate due to pressure, axial force, temperature and fluid-solid coupling effect. In this paper, a finite element model of the completion string has been established in ANSYS Workbench and meshed with the hexahedron eight-node element. Meanwhile, the fluid-solid coupling interface is set up in order to analyze the influence of internal pressure, axial force and fluid-solid coupling effect on natural frequency of the completion string. The results show that the natural frequency of the completion string decreases with the increase of the internal pressure, increases with the increase of axial force, and reduces due to the fluid-solid coupling effect. When the fluid in the string is natural gas, the natural frequency can decrease by 1.4%. When the fluid in the string is water, the natural frequency can decrease by 18%. The fluid-solid coupling effect between liquid and string has a greater effect on the natural frequency than the gas. This study provides theoretical basis for safety evaluation and structure optimization of well testing string.

Keywords: well testing; completion string; natural frequency; fluid-solid coupling effect; modal analysis; ANSYS Workbench; finite element analysis

完井管柱是连接地层与地面的重要通道,主要由油管、安全阀、伸缩节、滑套、封隔器等组成。在完井工况下,管柱除受到压力、温度等变化引起的伸缩运动外,同时还伴随着各种振动^[1]。当外部激振力

的变化频率与油管柱某一阶振动频率接近时,管柱将发生共振,从而加剧管柱的振动破坏^[2]。

张立翔等^[3]应用 Hamilton 变分原理和流体运动的 N-S 方程,推导了具有轴向位移、横向位移、流

速和压力等变量的管道流固耦合 4—方程模型。吴泽兵等^[4]利用牛顿法得到钻柱的振动方程,并利用 Houbolt 数字解法模型求解了振动微分方程,根据上述模型编制了用于分析钻柱纵向振动的计算机仿真软件,并进行了大量实验分析。李子丰^[5]对内外压力对油管柱等效轴向力及稳定性的影响进行分析。樊洪海等^[6-7]以管道流固耦合振动模型为基础给出了气井完井管柱流固耦合振动数学模型,分析了阀门开启过程中管柱流固耦合振动的瞬态响应,预测了天然气不稳定流动引起的流体压力、管柱应力、管柱振动速度的耦合响应过程。窦益华等^[8]运用有限元软件建立了三维有限元管柱模型,求得了管柱振型图、固有频率,并对模型施加加速度得到了其在危险时刻的应力分布情况。杨莹等^[9]利用 ANSYS 有限元软件对航空发动机管路的流固耦合振动进行研究,考察了管内流体质量、压力等参数对管路固有频率的影响。张杰等^[10]建立了水下多弯管路的有限元模型,分别考虑管内流体、管外流体和管道之间的耦合,研究了管道壁厚和流体波动速度对管道振动的影响规律。梁建术等^[11]利用 ANSYS 分析了流固耦合作用对波纹管固有频率的影响,比较了有流固耦合作用管道和无流固耦合作用管道两种情况下的模态。姜峰等^[12]运用 ANSYS Workbench 中的 Acoustic Extension 分析模块对海洋立管进行湿模态分析,描述了湿模态建模的方法与技巧,并据此进行了结构优化设计。李林涛等^[13]采用 Abaqus 有限元软件建立了特殊螺纹油管接头三维有限元模型,分析了温度对接头密封面、扭矩台肩及螺纹段 Mises 应力和接触压力分布规律的影响。张林等^[14]利用 ANSYS Workbench 软件,建立弯管和流体有限元模型,进行流体激励下弯管流固耦合振动特性分析,考察流体波动频率对弯管流固耦合振动幅值的影响。许杰等^[15]选取绥中 36-1 油田某井的完井管柱为研究对象,建立了完井管柱下入不同井深力学模型,利用有限元法将管柱离散成梁单元进行模拟仿真计算,分析了完井管柱与井眼曲率适应性。张智等^[16]针对多封隔器的完井管柱结构特点,建立了考虑端面效应、热胀冷缩效应、形变效应、螺旋和正弦屈曲效应影响的管柱变形和受力计算模型,研究发现封隔器在井筒中的位置以及井筒温度压力对整个管柱的受力和变形影响较大。樊恒等^[17]针对气井点蚀管柱,利用有限元软件建立了椭圆、扫略和实际等 3 种不同形式的点蚀简化模型,并分别对这 3 种简化

模型进行数值模拟,研究不同点蚀简化方法对管柱剩余强度的影响。朱明等^[18]结合地热井井身结构特点,建立井筒温度计算模型,通过现场测试数据对模型进行验证,针对地热井热损失严重的井段,提出新的完井管柱结构。

从以上研究者的研究对象和研究方法可以看出,流体力学与固体振动力学相互结合产生的学科交叉的流固耦合振动问题增加了油气井管柱力学分析问题的复杂性,目前大多研究还是采用有限元方法。为了深入研究各种载荷对完井管柱振动的影响,本文以单根管柱为例,利用 ANSYS Workbench 有限元软件建立完井管柱的有限元模型,采用计算模态法分析完井管柱的固有频率,考察内压、轴向力与流固耦合作用对完井管柱固有频率的影响。

1 完井管柱振动模型建立

对质量系统进行受力分析,得到质量系统的运动微分方程为:

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = [F] \quad (1)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 及 $[K]$ 为系统本身的质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵; \ddot{x} 、 \dot{x} 、 x 分别为系统的加速度列阵、速度列阵和位移列阵; $[F]$ 为外激励列阵。

令式(1)中的 $[C]=0$, $[F]=0$, 就可以得到无阻尼质量系统的自由振动方程:

$$[M]\ddot{x} + [K]x = 0 \quad (2)$$

假设系统的运动方式为:

$$[x] = [a]f(t) \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为与时间有关的运动函数; $[a]$ 为常数向量。

将 $f(t)$ 、 $[a]$ 代入(2)式,且对等式的两边同时乘以 $[a]^T$ 可得:

$$[a]^T[M][a]\ddot{f}(t) + [a]^T[K][a]f(t) = 0 \quad (4)$$

分离变量可得:

$$-\frac{f(t)}{\ddot{f}(t)} = \frac{[a]^T[M][a]}{[a]^T[K][a]} \quad (5)$$

令上式两边等于一个常数 λ , 因为在正定系统和半正定系统中, $[M]$ 正定, $[K]$ 正定或半正定, 所以 λ 为是非负数, λ 称为方程的特征根, 令

$$\lambda = 1/\omega^2 \quad (6)$$

式中: ω 为系统的固有频率。

因为 λ 为非负数, 所以 $\omega \geq 0$ 。

令 $f(t) = \sin(\omega t + \beta)$

则 $[x] = [a]\sin(\omega t + \beta)$

代入式(2)得:

$$([K] - \omega^2[M])[a] = [0] \quad (7)$$

要令式(7)存在非零解,则矩阵 $[a]$ 的系数行列式必须为零,可得:

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (8)$$

式(8)称为振动系统的特征方程,通过对上式求解可以得到系统 n 个不同的固有频率:

$$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \cdots < \omega_n \quad (9)$$

由式(8)可以看出,系统本身的刚度矩阵和质量矩阵决定了系统的固有频率。式(9)中 ω_1 是结构振动的最小的固有频率,也称为结构的基频,一般的研究和工程问题比较关心系统的这个频率,但也有比较关心高频振动的固有频率,例如研究固体振动对裂缝的影响。

满足式(7)的非零向量 $[a]$ 称为特征向量, $[a]$ 的取值由系统的质量矩阵和刚度矩阵决定。在研究振动问题的过程中, $[a_i]$ 被称为系统第 i 阶固有频率对应的主振型。系统有多少个自由度就会对应的有多少阶主振型,一般的振动过程中,系统各阶固有频率都会表现出来,所以系统的振动是各阶固有频率下的主振型的叠加:

$$\begin{aligned} [x(t)] &= [a_1]\sin(\omega_1 t + \theta_1) + [a_2]\sin(\omega_2 t + \theta_2) \\ &\quad + \cdots + [a_n]\sin(\omega_n t + \theta_n) \\ &= \sum_{i=1}^n a_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \end{aligned} \quad (10)$$

由上式可以看出,系统的振动不是一般的简谐运动,而是各阶简谐运动的叠加。

1.1 完井管柱纵向振动模态分析

完井管柱可简化为等直径直杆模型,它的纵向振动属于典型的一维波动问题,所以管柱的纵向自由振动方程^[19]为:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (11)$$

其中 $a = \sqrt{E/q}$

式中: a 为常数; E 为管柱的弹性模量; q 为管柱单位长度质量。

两种边界条件下,完井管柱纵向振动的固有频率和主振型如下:

(1)两端固定,管柱纵向振动的固有频率为:

$$\omega_i = \frac{i\pi a}{l} \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (12)$$

则相应的主振型为:

$$U_i(x) = A_i \sin \frac{i\pi x}{l} \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (13)$$

(2)一端固定,一端自由,管柱纵向振动的固有频率为:

$$\omega_i = \frac{(2i-1)\pi a}{2l} \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (14)$$

则相应的主振型为:

$$U_i(x) = A_i \cos \frac{(2i-1)\pi x}{2l} \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (15)$$

1.2 完井管柱横向振动模态分析

完井管柱的横向振动可简化为梁模型的横向振动,典型的伯努利-欧拉梁横向振动微分方程^[19]为:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (16)$$

式中: E 为管柱的弹性模量; I 为管柱的截面惯性矩。

两种边界条件下完井管柱横向振动的固有频率和主振型如下:

(1)两端固定,管柱横向振动的固有频率为:

$$\omega_i = \left(i + \frac{1}{2} \right)^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho A l^4}} \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (17)$$

则相应的主振型为:

$$U_i(x) = B_i \sin \frac{i\pi x}{l} \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (18)$$

(2)一端固定,一端自由,管柱横向振动的固有频率为:

$$\omega_i = (\beta_i l)^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho A l^4}} \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (19)$$

则相应的主振型为:

$$U_i(x) = \cosh \lambda x - \cosh x + \gamma (\sinh \lambda x - \sin \lambda x) \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (20)$$

1.3 完井管柱流固耦合模态分析

完井管柱的流固耦合模态分析中,流体的波动方程^[19]为:

$$[M_f]\{\ddot{p}\} + [C_f]\{\dot{p}\} + [K_f]\{p\} = \{F_f\} \quad (21)$$

式中: $\{p\}$ 为流体的压力列向量; $[M_f]$ 为流体的质量矩阵; $[C_f]$ 为流体的阻尼矩阵; $[K_f]$ 为流体的刚度矩阵; $\{F_f\}$ 为管柱对流体的载荷项。

固体的振动方程为:

$$[M_p]\{\ddot{x}\} + [C_f]\{\dot{x}\} + [K_p]\{x\} = \{F_p\} + \{F\} \quad (22)$$

式中: $\{x\}$ 为管柱的位移列向量; $[M_p]$ 为管柱的质量矩阵; $[C_p]$ 为管柱的阻尼矩阵; $[K_p]$ 为管柱的刚度矩阵; $[F_p]$ 为流体对管柱的载荷项; $[F]$ 为管柱的外载荷。

流固耦合作用体现在式(21)中固体对流体的载荷项 $\{F_f\}$ 和式(22)中流体对固体的载荷项 $[F_p]^{[20]}$, 其中:

$$\{F_f\} = -\rho_f [R_{fp}] \{\ddot{x}\} \quad (23)$$

$$\{F_p\} = [R_{fp}]^T \{\ddot{p}\} \quad (24)$$

式中: ρ_f 为流体密度; $[R_{fp}]$ 为流固交界面上的耦合矩阵。

忽略阻尼和结构外载荷的影响,联立式(21)至式(24)可得:

$$\begin{cases} [M_f] \{\ddot{p}\} + [K_f] \{p\} + \rho_f [R_{fp}] \{\ddot{x}\} = 0 \\ [M_p] \{\ddot{x}\} + [K_p] \{x\} - [R_{fp}]^T \{\ddot{p}\} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

写成标准的矩阵形式:

$$[M] \{\ddot{\varphi}\} + [K] \{\varphi\} = 0 \quad (26)$$

式中: $[M]$ 为管柱与流体的质量耦合矩阵; $[K]$ 为管柱与流体的刚度耦合矩阵; $\{\varphi\}$ 为参数列向量。

$$[M] = \begin{bmatrix} M_f & \rho_f R_{fp} \\ 0 & M_p \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_f & 0 \\ -R_{fp} & K_p \end{bmatrix}$$

$$\{\varphi\} = \begin{Bmatrix} p \\ x \end{Bmatrix}$$

对方程(26)进行解耦求解,即可对管柱进行流固耦合模态分析。

2 完井管柱振动边界条件设置

由于井下完井管柱长达几千米,在 ANSYS Workbench 中建立管柱的全尺寸模型后计算量较大,故取单根管柱作为分析对象,各参数如下:材料是 P110 钢,管柱长 9.8 m、外径 88.9 mm、壁厚 7.34 mm,弹性模量 206 GPa,泊松比 0.3,密度 7 850 kg/m³。

高产气井的完井管柱处于高温高压的复杂环境^[21],管柱在不同的井深处会受到不同的内压和轴向力。以某一井深为 5 600 m 的高产气井为例,分析内压和轴向力的变化对完井管柱固有频率的影响。假设此高产气井完井管柱产量为 110 × 10⁴ m³/d,井口流体压力为 40 MPa,估算井底流体压力达到 70 MPa 左右,管柱最大轴向力为 400 kN。

在 ANSYS Workbench 中先建立完井管柱的有限元模型,用六面体八节点单元对所建立的管柱模型进行网格划分,划分后管柱的网格模型如图 1 所示。因为在流固耦合模态分析过程中,需要对流体和固体分别设置流固耦合交界面来实现流体与固体之间的数据传递,若采用四面体网格可能导致计算结果不收敛,故采用六面体八节点单元对所建立流体模型进行网格划分,得到图 2 所示流体有限元模型。

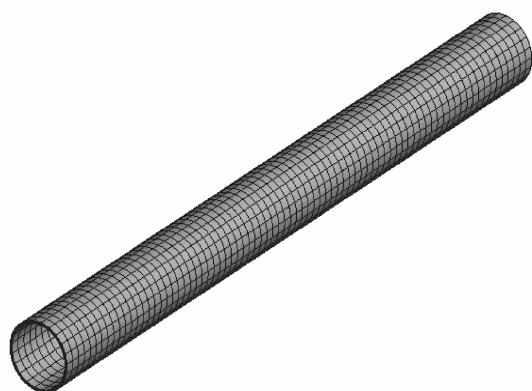


图 1 单根管柱有限元模型

Fig.1 Single string finite element model

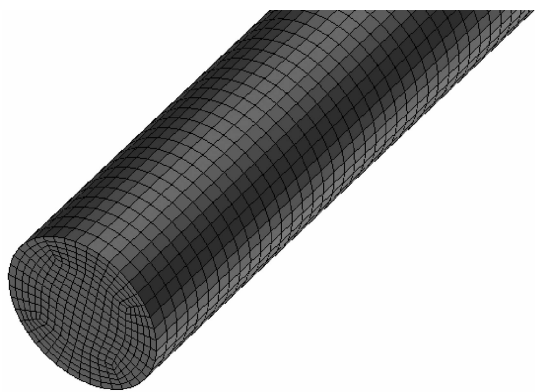


图 2 流体有限元模型

Fig.2 Fluid finite element model

管柱与流体的三维有限元模型已建立完毕,在 ANSYS Workbench 中使用 Design-modeler 模块的 Fill 命令对管柱内进行流体的填充,就可得到图 3 所示充满流体的完井管柱几何模型。其中,灰色部分为固体,黄色部分为流体。在 ANSYS Workbench 模态分析模块中,将流体表面与固体内表面均设置为流固耦合面,流体与固体的计算数据在流固耦合面上相互传递;完井管柱边界条件为两端固定约束。流体介质分别为水和天然气,水的密度为 998.2 kg/m³,动力黏度为 0.001 Pa·s,天然气的密度为 0.8 kg/m³,动力黏度为 0.015 Pa·s。

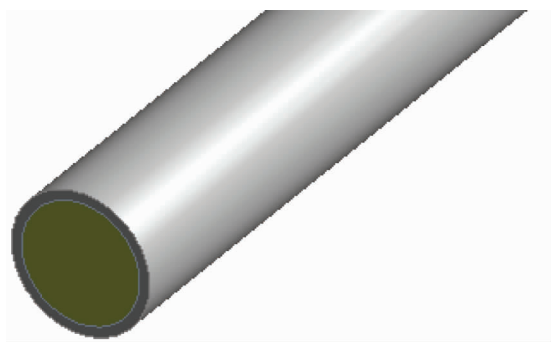


图 3 完井管柱与流体的几何模型
Fig.3 Geometric model of completion string and fluid

由于建立流体与固体数据相互交换的流固耦合交界面比较困难,且流体与固体之间的相互作用机理比较复杂,故以往对完井管柱振动固有频率进行分析的方法没有考虑流体的影响。因此,本文考虑流体和管柱的相互作用,对流固耦合作用下完井管柱振动的固有频率进行分析。

3 完井管柱振动计算结果讨论

在 ANSYS Workbench 中建立完井管柱有限元模型,分别考察内压、轴向力和流固耦合作用对管柱固有频率的影响。

3.1 内压对完井管柱固有频率的影响

在 ANSYS Workbench 中建立完井管柱有限元模型,考察内压分别为 0、20 MPa、40 MPa、60 MPa 和 80 MPa 时完井管柱的固有频率。提取前十阶固有频率,绘制管柱固有频率随内压变化的曲线图如图 4 所示。

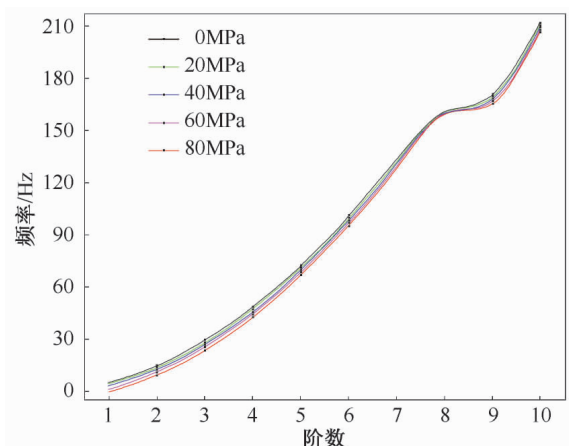


图 4 管柱固有频率随内压变化曲线
Fig.4 Change of natural frequency with internal pressure

从图 4 中可以看出,完井管柱的固有频率随内

压的增加而减小。随着模态阶数的增加,完井管柱的振动形式发生变化:前七阶完井管柱发生横向振动;从第八阶开始,完井管柱的振动变为扭转振动。故原本光滑的完井管柱固有频率曲线在第八阶频率出现拐点。

3.2 轴向力对完井管柱固有频率的影响

在 ANSYS Workbench 中建立完井管柱有限元模型,考察轴向力分别为 -100 kN、0 kN、100 kN、200 kN、300 kN 和 400 kN 的轴向力时完井管柱的固有频率。提取前十阶固有频率,绘制的管柱固有频率随轴向力变化的曲线如图 5 所示。

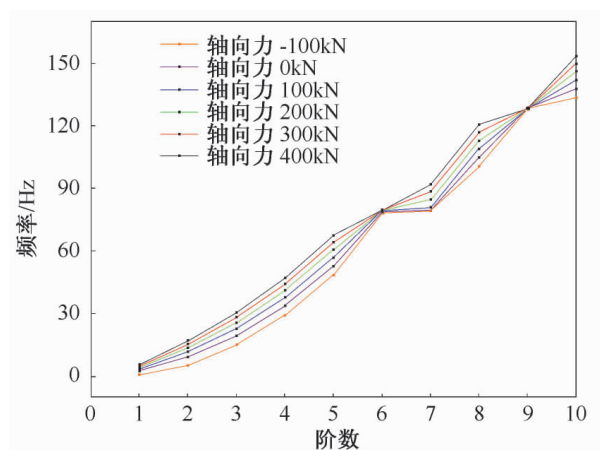


图 5 管柱固有频率随轴向力变化曲线
Fig.5 Change of natural frequency with axial force

从图 5 中可以看出,完井管柱的固有频率随着轴向力的增加而增加,轴向力对管柱固有频率的高频区影响比低频区影响大。随着模态阶数的增加,完井管柱的振动形式发生变化:前五阶完井管柱发生横向振动;第六阶到第八阶完井管柱发生扭转振动;从第九阶开始,完井管柱的振动变为轴向振动,所以在第六阶和第九阶处固有频率曲线出现拐点。

3.3 流固耦合作用对完井管柱固有频率的影响

考察无流体作用、气固耦合与液固耦合等三种情况,分别提取无耦合和流固耦合作用下完井管柱的前 6 阶固有频率,结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,当管柱内流体为天然气时,管柱的固有频率减小 1.4%;当管柱内流体为水时,管柱的固有频率减少 18%。流体与固体的耦合作用会降低完井管柱的固有频率^[22],液体与管柱耦合作用对管柱固有频率的影响明显大于气体。

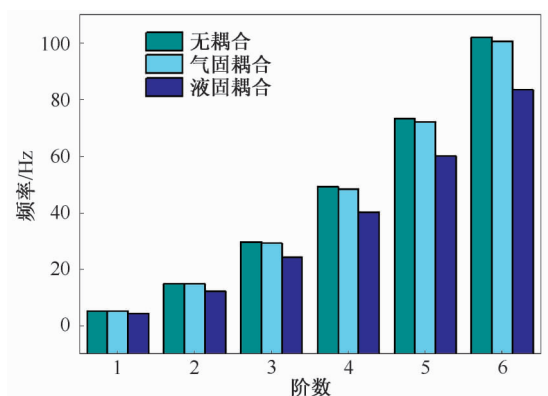


图6 三种情况下管柱耦合固有频率对比柱状图

Fig.6 Comparison of natural frequency in present of and absence of coupling effect

因而,分析完井管柱固有频率时,为得到准确的结果,需考虑流体与完井管柱之间的流固耦合作用。

4 结论

(1) 完井管柱的固有频率随内压的增加而减小。随着模态阶数的增加,完井管柱的振动形式发生变化:前七阶完井管柱发生横向振动;从第八阶开始,完井管柱的振动变为扭转振动。故原本光滑的完井管柱固有频率曲线在第八阶频率出现拐点。

(2) 完井管柱的固有频率随着轴向力的增加而增加,轴向力对管柱固有频率的高频区影响比低频区影响大。随着模态阶数的增加,完井管柱的振动形式发生变化:前五阶完井管柱发生横向振动;第六阶到第八阶完井管柱发生扭转振动;从第九阶开始,完井管柱的振动变为轴向振动。

(3) 流体与固体的耦合作用会降低完井管柱的固有频率,液体与管柱耦合作用对管柱固有频率的影响明显大于气体。当管柱内流体为天然气时,管柱的固有频率减小 1.4%;当管柱内流体为水时,管柱的固有频率减少 18%。所以不考虑流体作用的模态分析法不能真实反映完井管柱的振动特性。

致谢:感谢西安石油大学机械工程学院同意发表该成果;感谢国家科技重大专项的资助。

参 考 文 献

[1] 梁政,邓雄,余孝林. 高温高压深井测试管柱横向振动分析[J]. 油气井测试,1999,8(4):5-10.
LIANG Zheng, DENG Xiong, YU Xiaolin. An analysis of lateral vibration of test string in high temperature and high pressure deep well. [J]. Well Testing, 1999,8(4):5-10.
[2] 黄楨. 油管柱振动机理研究与动力响应分析[D]. 成都:西南石油学院,2005.

HUANG Zhen. The research of vibration mechanism and analysis of dynamic response for tubing string. [D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2005.

[3] 张立翔,黄文虎. 输流管道非线性流固耦合振动的数学建模[J]. 水动力学研究与进展,2000,15(1):116-128.

ZHANG Lixiang, HUANG Wenhui. Nonlinear dynamical modeling of fluid-structure interaction of fluid-conveying pipes [J]. Journal of Hydrodynamics, 2000, 15(1): 116-128.

[4] 吴泽兵,马德坤,况雨春. 钻柱纵向振动仿真分析[J]. 石油学报,2000,21(3):73-76.

WU Zebing, MA Dekun, KUANG Yuchun. Simulation of drill string's longitudinal vibration [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000,21(3):73-76.

[5] 李子丰. 内外压力对油井管柱等效轴向力及稳定性的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(1):65-67.

LI Zifeng. Influence of internal and external pressure on equivalent axisforce and stability of pipe string in oil wells [J]. Journal of China University of Petroleum (Science & Technology Edition), 2011,35(1):65-67.

[6] 樊洪海,王宇,张丽萍,等. 高压气井完井管柱的流固耦合振动模型及其应用[J]. 石油学报,2011,32(3):547-550.

FAN Honghai, WANG Yu, ZHANG Liping *et al.* A fluid-solid coupled oscillation model for completion string and its application in high pressure gas well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(3):547-550.

[7] 樊洪海,杨行,王宇,等. 高压气井生产管柱横向振动特性分析[J]. 石油机械,2015,43(3):88-91.

FAN Honghai, YANG Hang, WANG Yu *et al.* Analysis on lateral vibration features of production string in high pressure gas wells [J]. China Petroleum Machinery, 2015,43(3):88-91.

[8] 窦益华,王蕾琦,刘金川. 开关井工况下完井管柱振动安全性分析[J]. 石油矿场机械,2015,44(10):11-15.

DOU Yihua, WANG Leiqi, LIU Jinchuan. Safety analysis of completion tubing considering the vibration during well startup or shutdown [J]. Oil Field Equipment, 2015,44(10):11-15.

[9] 杨莹,陈志英. 航空发动机管路流固耦合固有频率计算与分析[J]. 燃气涡轮试验与研究,2010,23(1):42-46.

YANG Ying, CHEN Zhiying. Calculation and analysis on natural frequency of fluid structure interaction in aero-engine pipelines [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2010,23(1):42-46.

[10] 张杰,梁政,韩传军. 基于流固耦合的多弯管路系统动

- 力学分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(8): 5-10.
- ZHANG Jie, LIANG Zheng, HAN Chuanjun. Dynamics analysis of more curved pipe system based on fluid-structure coupling [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(8): 5-10.
- [11] 梁建术, 苏强, 李欣业. 基于ANSYS/Workbench 流固耦合输液波纹管的模态分析[J]. 机械设计与制造, 2013, (2): 91-93.
- LIANG Jianshu, SU Qiang, LI Xinye. Modal analysis of fluid-structure interaction bellows based on ANSYS/Workbench [J]. Machinery Design and Manufacture, 2013, (2): 91-93.
- [12] 姜峰, 郑运虎, 梁瑞, 等. 海洋立管湿模态振动分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(5): 159-166.
- JIANG Feng, ZHENG Yunhu, LIANG Rui *et al.* An analysis of the wet modal vibration of marine riser [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37(5): 159-166.
- [13] 李林涛, 魏晓冬, 窦益华, 等. 考虑温度影响的特殊螺纹油管接头有限元分析[J]. 石油机械, 2017, 45(11): 105-110.
- LI Lintao, WEI Xiaodong, DOU Yihua *et al.* Three-dimensional finite element analysis of premium connection tubing joint considering temperature effect [J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(11): 105-110.
- [14] 张林, 窦益华, 于凯强, 等. 流体激励下弯管流固耦合振动特性分析[J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 10-14.
- ZHANG Lin, DOU Yihua, YU Kaiqiang *et al.* Finite element analysis of fluid-structure interaction vibration for curved pipe of the surface manifold in oil testing [J]. Well Testing, 2017, 26(3): 10-14.
- [15] 许杰, 韩耀图, 张强, 等. 完井管柱与井眼曲率适应性有限元分析[J]. 石油机械, 2017, 45(3): 6-10.
- XU Jie, HAN Yaotu, ZHANG Qiang *et al.* Finite element analysis of adaptability of completion string and wellbore curvature [J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(3): 6-10.
- [16] 张智, 王波, 李中, 等. 高压气井多封隔器完井管柱力学研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(6): 172-178.
- ZHANG Zhi, WANG Bo, LI Zhong *et al.* Mechanical study of completion string with multi-packer for high pressure gas wells [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(6): 172-178.
- [17] 樊恒, 骆佳楠, 李鹏宇, 等. 腐蚀形貌简化对完井管柱剩余强度的影响分析[J]. 石油机械, 2016, 44(8): 65-70.
- FAN Heng, LUO Jianan, LI Pengyu *et al.* Corrosion morphology simplification effect on residual strength of completion string [J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(8): 65-70.
- [18] 朱明, 段友智, 姚凯, 等. 基于温度场模型的地热井完井管柱结构优化[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(22): 29-32.
- ZHU Ming, DUAN Youzhi, YAO Kai *et al.* Completion string structure optimization for geothermal well based on temperature field model [J]. Science Technology & Engineering, 2015, 15(22): 29-32.
- [19] 倪振华. 振动力学[M]. 西安交通大学出版社, 1986: 342-388.
- NI Zhenhua. Vibration Mechanics [M]. Xi'an Jiaotong University Press, 1986: 342-388.
- [20] 罗伯特·D·库克. 有限元分析的概念与应用[M]. 西安交通大学出版社, 2007: 156-177.
- ROBERT D C. Concepts and applications of finite element analysis [M]. Xi'an Jiaotong University Press, 2007: 156-177.
- [21] 何同, 岳慧, 何祖清. 塔河超深水平井分段压裂管柱力学分析方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(32): 101-106.
- HE Tong, YUE Hui, HE Zuqing. Mechanical analysis method of the staged fracturing string for ultradeep horizontal well in tahe oilfield [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(32): 101-106.
- [22] 于凯强. 高产气井完井管柱流固耦合振动分析及安全性评价[D]. 西安: 西安石油大学, 2017.
- YU Kaiqiang. The analysis fluid-solid coupling vibration and safety evaluate of completion string of high gas well [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.

编辑 刘述忍

第一作者简介:曹银萍,女,1982年出生,博士,副教授,2010年毕业于西北工业大学兵器科学与技术专业,现主要从事石油机械与管柱强度安全性研究工作。电话:029-88382617, 13636815042; Email: caoyinping029@163.com。地址:陕西省西安市雁塔区电子二路18号,邮政编码:710065。