



管道内气液两相流流激力研究进展

何兆洋 刘海潇 何利民 王丹 赫松涛

Research progress of fluctuating force caused by internal gas-liquid flow

HE Zhao-yang, LIU Hai-xiao, HE Li-min, WANG Dan, HE Song-tao

引用本文:

何兆洋, 刘海潇, 何利民, 王丹, 赫松涛. 管道内气液两相流流激力研究进展[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(1): 129–136. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.07.14.001

HE Zhao-yang, LIU Hai-xiao, HE Li-min, WANG Dan, HE Song-tao. Research progress of fluctuating force caused by internal gas-liquid flow [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(1): 129–136. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.07.14.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.07.14.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

难溶气体对水润滑轴承特性影响分析

Influence of undissolved gas on the characteristics of high-speed water-lubricated bearings
工程科学学报. 2017, 39(11): 1709 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.11.014>

棒式文丘里除尘器气液两相流阻力特性

Resistance characteristics of gas-liquid two-phase flow in stick venturi scrubbers
工程科学学报. 2017, 39(3): 449 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.03.018>

π 型向心径向流吸附器气固两相模型传热传质特性

Heat and mass transfer characteristics of the gassolid two-phase model in a π -shaped centripetal radial flow adsorber
工程科学学报. 2019, 41(11): 1473 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.03.26.001>

基于同步热跟踪法的微量气液反应热测量

Measurement of gas-liquid reaction heat based on synchronous thermal tracking
工程科学学报. 2019, 41(3): 368 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.03.010>

ND钢连铸坯两相区内的微观偏析模型

A microsegregation model in the two-phase region of an ND steel continuous casting billet
工程科学学报. 2019, 41(4): 461 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.04.006>

3Cr钢在油水两相层流工况下的腐蚀行为

Corrosion behavior for 3Cr steel under oil-water two-phase laminar flow conditions
工程科学学报. 2020, 42(8): 1029 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.07.27.003>

管道内气液两相流流激力研究进展

何兆洋^{1,2,3)}, 刘海潇^{1,2,4)}, 何利民^{1,2)}✉, 王 丹^{1,2)}, 赫松涛^{1,2)}

1) 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 青岛 266580 2) 山东省油气储运安全省级重点实验室, 青岛 266580 3) 中石油管道有限责任公司, 北京 100029 4) 中国石化工程建设有限公司, 北京 100101

✉通信作者, E-mail: upcmpfs@163.com

摘 要 管道内气液两相流广泛存在于核工业、化工以及石油运输等多个领域中,其诱发的流激力会引起管道振动,导致管系的疲劳破坏。本文分别从流激力发生机理、影响因素及计算模型出发,对流激力研究进展进行综述。研究表明:动量通量的改变被认为是引起流激力的最主要原因,管道内压力波动、液塞的脉动冲击、起伏不定的液波等因素同样会对流激力的产生做出贡献,针对不同流型建立完整的流激力发生机理的理论体系,是流激力机理研究方面的重点发展方向。在不同流型下,流激力展现出不同的波动特征,目前研究所针对的管道大多是单独的水平管或立管管道,开展多种集输-立管管道系统中流激力的研究将具有重要的工程意义。关于流激力经验模型和理论模型的建立逐渐完善,计算流体力学(Computational fluid dynamics, 简称 CFD)软件能够同时对流场和流激力大小进行模拟计算,优势明显,是一种重要的计算手段,对 CFD 软件计算结果的准确性进行研究,对比优选有效的 CFD 计算模拟方法,将具有重要科研价值。

关键词 流激力;气液两相流;动量通量;实验研究;模型;计算流体力学

分类号 TE832

Research progress of fluctuating force caused by internal gas-liquid flow

HE Zhao-yang^{1,2,3)}, LIU Hai-xiao^{1,2,4)}, HE Li-min^{1,2)}✉, WANG Dan^{1,2)}, HE Song-tao^{1,2)}

1) College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2) Shandong Provincial Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Safety, Qingdao 266580, China

3) PetroChina Pipeline Company Ltd., Beijing 100029, China

4) SINOPEC Engineering Incorporation, Beijing 100101, China

✉ Corresponding author, E-mail: upcmpfs@163.com

ABSTRACT Two-phase flow (Gas-liquid) in pipelines is widely present in many fields, such as nuclear industry, chemical industry, and petroleum transportation. Compared with single-phase flow, the density, pressure, and momentum flux in two-phase flow change greatly in the flow. When flowing through a valve, elbows, tees, and other components, a pulsating force is induced, which is termed as the “flow-induced force.” Flow-induced force causes pipeline vibration. If the vibration frequency is close to the natural frequency of the pipeline, a resonance phenomenon occurs that can further increase the vibration amplitude of the pipeline and consequently cause fatigue damage to the pipeline system. Therefore, research on flow-induced force is of great significance for the safe design and operation of pipelines. In this paper, the research progress on the mechanism, influencing factors, and calculation models of flow-induced force was reviewed. The results show that the change of momentum flux is the dominant factor in causing flow-induced force. The pressure fluctuations, pulsation of the liquid slug, and the volatile liquid wave also contribute to force fluctuation. This study aims to establish a complete theoretical system of flow-induced force mechanism that shows varying wave characteristics with different flow patterns. Most of the current studies focus on single horizontal pipe or riser pipe. With the development of deep-sea oil and gas, demand

收稿日期: 2020-07-14

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05028-004-003); 中央高校基本科研业务费专项资助项目(15CX05006A)

on gathering and transportation-riser pipeline systems is increased, making it a great engineering significance to study the flow-induced force in a variety of pipeline-riser systems. The empirical and theoretical models are gradually established. The ability of CFD software to simulate flow field and excitation force offers numerous advantages. Therefore, research on the accuracy of CFD software calculation results and the comparison and optimization of effective CFD calculation simulation methods will have important scientific research value for development in the future. This article comprehensively summarized the current research status of gas-liquid two-phase internal flow excitation, which can provide guidance for further related research.

KEY WORDS flow-induced force; gas-liquid flow; momentum flux; experimental study; model; computational fluid dynamics

管道内气液两相流在核工业、化工业以及石油运输等多个领域中广泛存在,与单相流相比,其密度、压力、动量通量在流动中变化较大^[1-3],当流经阀门、弯头、三通等部件时,极易引起脉动力,即“流激力”^[4-6]。“流激力”会引起管道振动,当振动频率与管道固有频率相接近时,会产生“共振”现象^[7-10],使管道振动幅度进一步增大,引起管系的疲劳破坏^[11-13]。据英国安全与健康执行局(HSE)的研究显示,英国2010年海洋工程行业在北海21%的管道损坏是由管道振动引起的疲劳失效引起^[14]。因此研究“流激力”对管道的安全设计和运行具有重要意义。

在过去几十年内,管道外流对管道的影响受到了广泛关注^[15-20],但随着研究的深入,学者们发现管道内流激力的产生机理与管道外流有本质的区别^[21]。本文首先对管道内气液两相流流激力的产生机理方面的研究进展进行了综述,然后总结了流激力的影响因素,最后对其计算模型进行了阐述,旨在全面展示气液两相内流流激力的研究现状,为进一步开展相关研究给出指导。

1 气液两相流流激力发生机理

1968年,学者Yih和Griffith^[22]首次进行了三通结构内气液两相流流激力的实验研究,研究发现:气液两相流流动伴随着强烈的压力、持液率和动量通量波动,正是由于这些不稳定因素导致了管道系统的受力和移动。作者认为动量通量更能从本质上揭示流动的变化规律,因此将动量通量变化看作“源”,三通结构的移动看作“响应”,但限于实验条件不足,实验并未直接测量流体动量通量的变化,而是使用过滤器将管道移动信号转换为动量通量信号。Riverin和Pettigrew^[6]使用光学探针测量了U型管弯管处的气泡大小和频率以及该处管道的受力值,作者认为,不同气泡的经过导致动量通量的不断变化,经过的气泡越大,带来的动量变化越大;通过实验数据做出气泡尺寸-频率图线,发现最大气泡对应的频率值与受力信号

频谱图中主频率值是一致的,由此证明流体轴向动量通量的变化使管道弯管部分产生了脉动力。Cargnelutti等^[23]进一步指出,单相流中弯头部位作用力的产生是由于流体流动方向和压力的改变,而气液两相流中,这两者的变化由于密度、气液界面的急剧变化而大大增加;在直管中,管道作用力的产生机理是液塞经过引起的湍流噪声和压力波动,而在弯头部位,则是由于动量通量在短时间的剧烈改变所造成。

Giraudeau等^[24]在实验中直接对截面含气率信号和U型管弯管部位受力同时进行测量,通过对比两者的频谱图发现,同一组实验下两者的主频率值基本相同。Liu等^[25]指出,基于均匀混合流假设,气液两相流动量通量可以通过持液率进行计算:

$$M = A j^2 [\rho_g \alpha_g^\Delta(t) + \rho_f (1 - \alpha_g^\Delta(t))] \quad (1)$$

其中, M 为动量通量,N; $\alpha_g^\Delta(t)$ 为截面平均含气率; j 为气液混合流速,单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; A 为管道截面积, m^2 ; ρ_g 和 ρ_f 分别为气体和液体的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。基于此,Giraudeau等^[24]认为其实验证明了弯头处的动量通量变化在管道弯头部位激励产生了作用力,并提出在段塞流流型下液塞的频率与弯头受力信号的主频率值近似相等。然而,Liu等^[25]通过实验获得了弯头受力值信号,并通过式(1)计算不同工况下的动量通量值,将两者的均方根(RMS)进行比较发现具有一定的差距,并非严格相等(图1),这表明弯头受力并非完全由动量通量的变化引起。Liu等^[25]以90°弯头为控制体积进行动量分析,得到一阶偏微分动量方程,通过理论推导和傅里叶转换等手段,最终发现,低频段(小于1 Hz)的流激力波动主要由管道内压力波动引起;高频段(大于1 Hz)的波动主要由动量通量波动引起,但由于当地速度、截面含气率突然变化带来了局部冲击作用,在此局部冲击作用的影响下,两者的主频率之间存在一定的差距。Liu等^[26]对段塞流流型下的这一局部冲击作用进行了进一步研究分

析,认为液塞的局部加速对弯头产生了脉动冲击,对流激力的波动同样做出贡献;通过理论推导与傅里叶转换等手段做出图2,分析认为:液塞对弯头的冲击作用主要影响了流激力的大小,动量变化项则与流激力的主频率值一致,而压力项的波动幅度较小,对流激力无明显影响. Miwa等^[27]随后对波浪流型下的冲击作用进行了研究,发现起伏不定的液波对弯头产生了脉动的冲击作用,作者将此称之为“液波冲击力”.

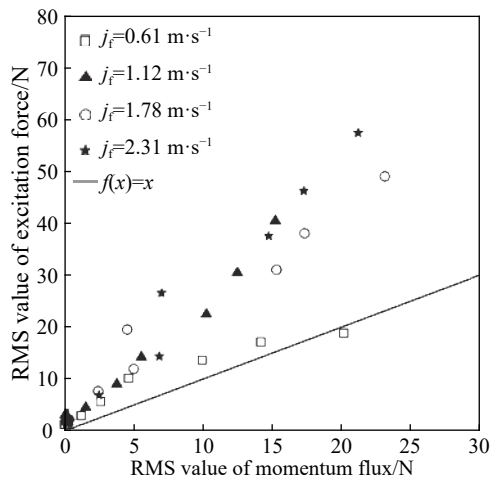


图1 动量通量与受力值的RMS值对比^[25]

Fig.1 Comparison of RMS values of momentum fluxes and forces^[25]

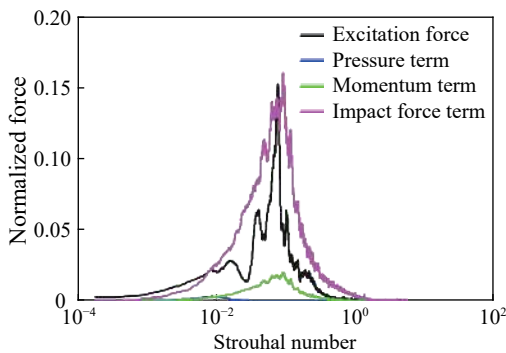


图2 不同作用项之间的比较^[26]

Fig.2 Evaluation of different terms^[26]

在管道内气液两相流激力的发生机理方面,动量通量的改变被认为是引起流激力的最主要原因,动量通量的改变由流体含气率的变化引起,因此针对流体中气泡发生频率,围绕气泡尺寸和分布特性展开研究,并将其与流激力进行关联,将具有重要意义.另外,由于气液两相流动的复杂性,管道内压力波动、液塞的局部加速对弯头产生的脉动冲击、起伏不定的液波等因素同样会对流激力的产生做出贡献,因此以科学全面的气液两相流流型分类为基础,针对不同流型展开流激力发生机理研究,建立完整的流激力发生机理理论体

系,是流激力机理研究的重点发展方向.

2 气液两相流流激力实验研究

目前已有众多学者在不同管道系统内展开了气液两相流流激力的实验研究,从已有的实验研究来看,研究者们大都重点关注两个特征值:流激力信号的均方根值 F^{rms} 和流激力频谱信号的主频率值 f_0 ,这两者分别用来表征流激力的大小量级和波动频率;所研究的影响因素不尽相同,主要包括入口流速、管道结构形式和管径.

2.1 入口流速

气液两相流的实验入口条件常使用气液两相各自流量^[28-30].而在流激力的实验研究中,为了能够方便地反映流动中管截面的气液分布情况,常使用气液混合流速 j 和体积含气率 β 进行入口流速条件的表示:

$$j = \frac{Q_l + Q_g}{A}; \beta = \frac{Q_g}{Q_l + Q_g} \quad (2)$$

其中, Q_l 和 Q_g 分别为液相和气相的当地体积流量, $m^3 \cdot s^{-1}$; A 为管道横截面积, m^2 .

研究者们通过实验研究发现,当 j 和 β 发生变化时, F^{rms} 和 f_0 会发生显著变化.其中,当 β 一定时,随 j 的增大, f_0 近似线性增大^[6];而 F^{rms} 与 j 最适宜的曲线形式为 $y=Cx^\alpha$, α 的实验拟合值介于 1.03 ~ 1.48 之间^[6],式(1)基于气液均匀流假设给出了动量通量与气液混合流速的关系式,可以看出,当平均截面含气率 $\alpha_g^{\wedge}(t)$ 一定时, M 与 j 的二次方成正比关系,由此证明了流激力并非完全由动量通量的变化引起^[25-26].而 Giraudeau等^[24]扩大实验工况后发现, F^{rms} 值随着 j 的增大并非单调变化,而是当 F^{rms} 值增大到一定程度之后逐渐稳定或出现轻微下降,作者认为这是由于流型的转变引起的,即不同的流型下, j 对 F^{rms} 的影响效果不同.可以看出,不同入口气液流速所决定的流型对流激力的影响是十分显著的.

在水平管和竖直管中,气液两相流型分类已十分完善^[31-33],其中段塞流的动量、压力和持液率波动最为剧烈^[34-36],所产生的流激力特点也最为复杂^[7, 37-40].具体来看,环状流和段塞流的 F^{rms} 值大小基本处于同一量级,分层流的 F^{rms} 值较小^[23], F^{rms} 最大值发生在环状流和段塞流转换边界附近^[22],这一现象主要是由液体含量不同造成,液体相较于气体具有更高的密度,因此会在弯头部位引起更高的动量变化^[23].另外,段塞流/环状流流型下的 f_0 值最大,气泡流流型下的 f_0 和 F^{rms} 均较小,接

近于零^[25].

2.2 管道结构形式

对管道结构形式的研究主要包括: 90°弯头^[23]、三通^[22]、U型管^[6]等, 研究发现, 弯头的曲率半径对弯头的受力值几乎没有影响, 而三通结构的受力值则略微小于弯头, 这主要是由于流体在三通结构处产生了分流, 因此产生的力较小^[23]. 对于竖直U型管结构, 不同径曲比的U型管对气液两相分布形态产生了显著的影响, 但未影响其轴向动量变化, 因此U型管的受力并未明显变化; 另外, 由于气液两相流动均能充分发展, 因此U型管的高度对受力也无明显影响^[6]. 而U型管与90°弯头相比, 两者产生的流激力相差不大, 竖直流向的受力值较水平方向稍大一些^[24]. 综合以上来看, 不同的使流体流向转变的管道结构中, 流激力产生机理一致, 受力值相差不大.

而随着油气开采向深海的进行, 海洋立管系统内气液两相流激力的研究逐渐受到青睐^[37, 41-45], 主要包括自由悬链立管^[37, 43]、海底M型跨接管^[7, 46], 以及复杂管系结构^[47], 研究的重点部位则集中在立管底部的弯头^[44]. 但此处可考文献依然较少, 研究仍不完善, 因此对集输-立管管道系统内, 不同气液两相流流型流激力的特征展开相关研究, 仍具有较高的科研价值和工程意义.

2.3 管径

在气液两相流动中, 量纲为一的数 Bo 被用来描述液体表面张力对流动的影响, 其定义如下:

$$Bo = \frac{\rho_L g D^2}{\sigma} \quad (3)$$

其中, ρ_L 为液体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; D 为圆柱腔体内径, m ; σ 为表面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$. Bo 表示液体重力与表面张力对流动的相对影响, 当 Bo 小于 1 时, 液体黏性力占主导, 而当 Bo 非常大时, 则可以忽略液体表面张力的影响.

在大管径管道中, Bo 较大, 随管径减小, 动量通量的波动更强, 因此流激力更大, 这是由于在管径较大的管道中, 气液混合更均匀, 因此流体通过三通时的动量变化更小^[22]; 同时, 随着管径的增大, 流激力信号的主频率 f_0 近似线性减小^[22, 48]. 而在 Cargnelutti 等^[4]的实验中, 管道管径为 6 mm 左右, Bo 的值约为 5, 液体的表面张力影响了管内的气液两相流动, 使得段塞流的发生范围增大, 这使得小管径管道中的 f_0 值更大.

从已有研究可以看出, 在不同流型下, 流激力展现出不同的波动特征. 而流型主要受气液入口

流速和管道系统的影响, 目前研究针对的管道大多是单独的水平管或立管管道, 随着深海油气的开发, 集输-立管管道系统的应用日益增多^[49-53], 因此开展多种立管管道系统中流激力的研究将具有重要工程意义.

3 计算模型

3.1 F^{rms} 和 PSD 曲线

经验模型的建立对工程实际中管道的设计和运行具有重要参考价值, 现有文献中的经验模型主要针对流激力的均方根值 F^{rms} 和 PSD(功率谱密度)曲线.

Yih 和 Griffith^[22] 首先提出了 F^{rms} 的量纲一表达式:

$$\frac{F^{\text{rms}}}{F^{\text{stat}}} We^{0.4} = A(\beta) \quad (4)$$

式中, F^{rms} 是流激力的均方根值, N ; F^{stat} 表示流激力信号中的稳态组分, N . $A(\beta)$ 是含气率 β 的函数表达式^[22]. 量纲为一的数 We 表达式为:

$$We = \frac{\rho_L j^2 D}{\sigma} \quad (5)$$

但式(4)不具备通用性, 并且影响参数的选定并不准确. 实际上, 目前计算常用的 F^{rms} 表达式为^[5, 12]:

$$\overline{F^{\text{rms}}} = \frac{F^{\text{rms}}}{\rho_L j^2 (\pi D^2 / 4)} = C We^{-0.4} \quad (6)$$

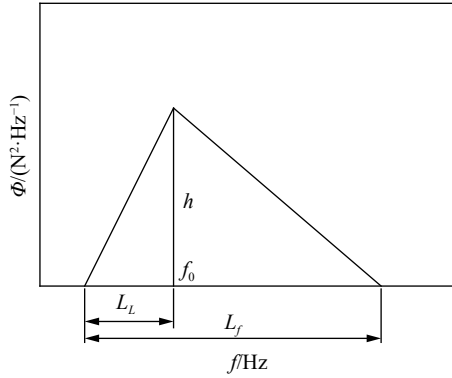
其中, 定义 $\overline{F^{\text{rms}}}$ 为 F^{rms} 的量纲为一的值, 式中忽略了液体黏度、重力和气液体密度的影响. 式(6)定义了两个量纲为一的值之间的关系, 两者在双对数坐标系中呈线性关系, 其中 C 是常数, 其值的确定是经验关联式准确预测 F^{rms} 值的关键.

实际上, 当 β 值不同时, 拟合得出的最佳 C 值是不相同的, 可使用 $C=25$ 来描述 F^{rms} 的极大值^[24, 48]. 一般来讲, 当 C 取 10 时可以对大部分实验数据进行预测^[5, 26], 控制误差在 $\pm 50\%$ 以内; 而当入口体积含气率 β 较大 ($>80\%$) 或者较小 ($<20\%$) 时, 此关联式都会过大地预测 F^{rms} 值, 且随着 We 的增大, 误差会越来越大^[26].

功率谱密度曲线中含有很多随机波动分析的有效信息, 对其准确预测在工程应用上有重要作用. 大多工况下流激力的功率谱密度曲线可以简单表示为三角形状^[22], 如图 3 所示, 图中参量满足

$$0.5hL_f = (F^{\text{rms}})^2 \quad L_f = f_0 + 22 \quad L_L = 0.6f_0 + 3$$

其中, f_0 即为流激力信号的主频率, Hz ; h , L_f , L_L 为表示曲线的几何尺寸, 单位分别为 $\text{N}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ 、 Hz 、

图3 功率谱密度曲线的简单表示^[22]Fig.3 Simple power spectral density curve^[22]

Hz. 通过以上三式, 只要获得 F_{rms} 和 f_0 的值, 就可以求出流激力的功率谱密度曲线 $\Phi-f$.

若对流激力的功率谱密度曲线进行精确定义, 可以使用如下关系式^[5],

$$\frac{\phi}{(\rho_L j^2 D^2)^2} f_0 We^{0.8} = E \left(\frac{f}{f_0} \right) \quad (7)$$

其中, ϕ 为流激力功率谱密度, $N^2 \cdot Hz^{-1}$; f 为频率, Hz. 引入量纲一的功率谱密度和量纲一的频率表达式^[24, 48]:

$$\bar{\phi} = \frac{\phi}{(\rho_L j^2 D^2)^2} \frac{j}{D} We^{0.8} \quad (8)$$

$$\bar{f}_0 = \frac{f_0 D}{j \sqrt{1-\beta}} \quad (9)$$

两者在双对数坐标系中近似为三角形折线关系, 关系式可以表述为:

$$\bar{\phi} = \begin{cases} k_1 \bar{f}^{m_1}, & \bar{f} \leq \bar{f}_0 \\ k_2 \bar{f}^{m_2}, & \bar{f} \geq \bar{f}_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中 k_1 、 k_2 、 m_1 、 m_2 的表达式如下:

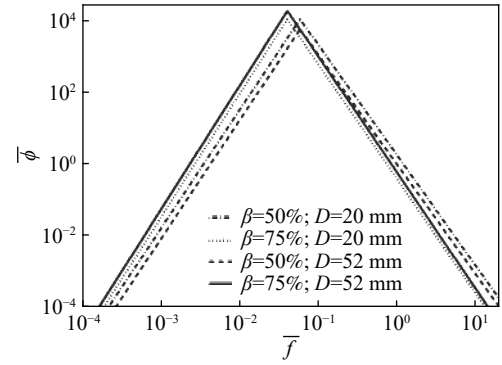
$$ki = \frac{\bar{\phi}(\bar{f}_i)}{\bar{f}_0^{m_i}}, i = [1, 2], m_1 = \frac{\log\left(\frac{\bar{\phi}(\bar{f}_2)}{\bar{\phi}(\bar{f}_1)}\right)}{\log\left(\frac{\bar{f}_2}{\bar{f}_1}\right)}, m_2 = \frac{\log\left(\frac{\bar{\phi}(\bar{f}_2)}{\bar{\phi}(\bar{f}_0)}\right)}{\log\left(\frac{\bar{f}_2}{\bar{f}_0}\right)}$$

其中, f_1 、 f_2 为任意两点的频率值, Hz; $\phi(f_1)$ 、 $\phi(f_2)$ 分别为其对应的功率谱密度, $N^2 \cdot Hz^{-1}$.

其中, \bar{f}_0 为量纲一的主频率值, 将 f_0 代入式 (9) 即可计算. 通过对不同入口体积含气率和管径下的实验数据拟合, 可以得出相应的参数值表格. 通过式 (10) 得到的不同管径和入口体积含气率下的功率谱密度曲线, 如图 4 所示, 可以看出式 (10) 受管径和入口体积含气率的影响很小.

3.2 理论计算模型

在气液两相内流作用下, 当流型为段塞流时,

图4 修正后的功率谱密度曲线^[24]Fig.4 Modified power spectral density curve^[24]

管道受力最为严重, 因此, 流激力计算模型的建立大都针对段塞流流型. 在研究初期, 计算模型的建立多基于准稳态假设, 即液塞区和液膜区交替通过弯头部位. Massey 与 Wardsmith^[54] 给出了基于稳态动量方程的弯头受力估算公式:

$$F_x = \rho_L A u_s^2 (1 - \cos \theta) \quad F_y = \rho_L A u_s^2 \sin \theta \quad (11)$$

其中, F_x 、 F_y 分别为 x 、 y 方向的受力值分量, N; u_s 是液塞速度, $m \cdot s^{-1}$, 可通过式 (12) 进行计算; θ 是上倾管和水平管之间的夹角, $^\circ$; A 为管道横截面截, m^2 .

$$u_s = \frac{j}{H_G} \quad (12)$$

其中, H_G 是段塞流流型下的平均含气率, 使用 Beggs-Brill 关联式^[55] 进行计算.

对于段塞流, 液塞与液膜的交替流动在弯头上产生作用力, 最大流激力出现在液塞经过的时刻; 并且上下游压力对流体流激力产生了影响, 因此可以使用力-动量方程的非定常形式^[56]:

$$F_{surface} + F_{body} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} u_s \rho dV + \int_{SC} u_s \rho u_s dA \quad (13)$$

其中, $F_{surface}$ 与 F_{body} 分别为液塞单元表面力和体积力, N.

但作者忽略了控制体积受力和动量变化, 得到下式:

$$F_x = u_x^2 \rho_L A + (P_x - P_a) A \quad F_y = u_y^2 \rho_L A + (P_y - P_a) A \quad (14)$$

其中, u_x 、 u_y 分别为 x 、 y 方向的液塞速度分量, $m \cdot s^{-1}$; P_x 、 P_y 分别为 x 、 y 方向的压力分量, Pa; P_a 为大气压力, Pa.

对于水平管道忽略控制体积的体积力是可行的, 而对动量变化的忽略会导致模型计算误差变大, 若从两相流瞬态动量方程出发, 针对弯头控制体积, 弯头受力计算式为^[57]:

$$F = \left[\left(\int P dA \right)_{in} - \left(\int P dA \right)_{out} \right] - \left(\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} u_s \rho dV + \int_{SC} u_s \rho u_s dA \right) \quad (15)$$

其中, P 为当地压力, Pa.

实际上, 当地液塞加速引起的冲击力对流激力同样有贡献, 因此在受力方程中可以增加当地加速项 F_{IF} ^[25-26]:

$$F_{IF} = \rho_g a_g A \sqrt{\frac{2P_0 L_g}{\rho_g L_s}} \quad (16)$$

其中, ρ_g 为段塞流液膜区的平均密度, $m^3 \cdot s^{-1}$; a_g 为含气率; L_s 和 L_g 分别为液塞区和液膜的长度, m; P_0 为大气压力, Pa.

3.3 CFD 数值模拟

近年来, CFD 数值模拟软件逐渐受到关注^[11, 58-61], 对于复杂管系, 工程上常用 CFD 模拟软件对气液流动和流激力进行计算^[11, 58-59], 该方法既能够预测管道内气液流动状况, 对流激力进行计算, 同时允许对高气液入口速度的工况进行准确计算^[7]. 在 CFD 计算过程中, 通常对流体流动和固体结构分别计算, 然后通过数据交换, 实现流体流动与管道受力的耦合运算. Xing^[40] 使用 STAR-OLGA 模型对弯头处的流激力进行模拟计算, 即首先使用 OLGA 计算气液两相流流动参数, 而后导入 STAR-CCM+ 软件进行耦合运算. Pontaza 等^[58] 对海底复杂管系展开模拟计算, 指出 CFD 模拟能够有效预测流激力及管道易疲劳损失点, 对生产具有重要意义.

综合以上模型研究可以看出, 关于流激力经验模型和理论模型的建立逐渐完善, CFD 软件能够同时对流场和流激力大小进行模拟计算, 优势明显, 在计算手段方面是未来重要的发展方向. 然而, 学者们多将重点放在对计算结果的展示和分析上, 并未对计算结果的准确性进行研究, 同时也未对比优选有效的 CFD 计算模拟方法, 今后加强此方面的研究将具有重要科研价值.

4 结论与展望

4.1 结论

管道内气液两相流广泛存在于核工业、化工工业以及石油运输等多个领域中, 当流体流经阀门、弯头、三通等部件时, 极易对管道产生流激力, 产生安全威胁, 因此开展对流激力的研究, 对管道的安全设计和运行具有重要意义, 本文共得到以下结论:

(1) 管道内气液两相流流动伴随着强烈的压力、持液率和动量通量波动. 在直管中, 管道作用力的产生原因是液塞经过引起的湍流噪声和压力波动; 而在弯头处, 动量通量的改变被认为是引起流激力的最主要原因, 但由于气液两相流动的复杂性, 管道内压力波动、液塞的局部加速对弯头产生的脉动冲击、起伏不定的液波等因素同样会对流激力的产生做出贡献.

(2) 对流激力的研究重点关注两个特征值: F^{rms} 和 f_0 . 当 β 一定时, 随 j 的增大, f_0 近似线性增大, F^{rms} 与 j 最适宜的曲线形式为 $y=Cx^\alpha$, α 的实验拟合值介于 1.03 ~ 1.48 之间; 在水平管和垂直管中, 段塞流/环状流流型下的 F^{rms} 和 f_0 值最大, 分层流和气泡流流型下的 f_0 和 F^{rms} 均较小, 接近于零; 不同管道结构中, 流激力产生机理一致, 受力值相差不大.

(3) 对流激力计算手段的研究主要包括: 经验模型、理论计算模型和 CFD 数值模型. 关于流激力经验模型和理论模型的建立逐渐完善, CFD 软件能够同时对流场和流激力大小进行模拟计算, 优势明显, 在计算手段方面是未来重要的发展方向.

4.2 展望

(1) 在发生机理方面, 以科学全面的气液两相流流型分类为基础, 针对不同流型展开流激力发生机理研究, 建立完整的流激力发生机理的理论体系, 是该方面的重点研究方向.

(2) 目前研究针对的管道大多是单独的水平管或立管管道, 随着深海油气的开发, 集输-立管管道系统的应用日益增多, 开展多种立管管道系统中流激力的研究将具有重要工程意义.

(3) CFD 计算软件优势明显, 目前研究重点为计算结果的分析, 而对计算结果的准确性及最优计算方法缺乏相关研究, 今后加强此方面研究将具有重要科研价值.

参 考 文 献

- [1] Karim H, Ancian L. Experimental analysis of discontinuities in single phase flow-vibration and pressure fluctuation measurements // SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Jakarta, 2017: SPE-186336-MS
- [2] Ortiz-Vidal L E, Mureithi N W, Rodriguez O M H. Vibration response of a pipe subjected to two-phase flow: analytical formulations and experiments. *Nucl Eng Des*, 2017, 313: 214
- [3] Hara F. Two-phase-flow-induced vibrations in a horizontal pulping system. *Bull JSME*, 1977, 20(142): 419
- [4] Cargnelutti M F, Belfroid S P C, Schiferli W. Two-phase flow-

- induced forces on bends in small scale tubes // *Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference. Volume 4: Fluid-Structure Interaction*. Prague, 2009: 369
- [5] Riverin J L, de Langre E, Pettigrew M J. Fluctuating forces caused by internal two-phase flow on bends and tees. *J Sound Vib*, 2006, 298(4-5): 1088
- [6] Riverin J L, Pettigrew M J. Fluctuating forces in U-tubes subjected to internal two-phase flow // *Proceedings of the ASME 2005 Pressure Vessels and Piping Conference. Volume 4: Fluid Structure Interaction*. Denver, 2005: 547
- [7] Parsi M, Nair A, Kara M, et al. Condition based assessment of subsea rigid jumpers using advanced analytical model // *10th North American Conference on Multiphase Technology*. Banff, 2016: BHR-2016-245
- [8] Smeulders J P M, Diez N G, Slot H. Flow induced vibration in subsea production systems // *SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition*. Moscow, 2012: SPE-160727-MS
- [9] Wang L, Yang Y R, Li Y X, et al. Resonance analyses of a pipeline-riser system conveying gas-liquid two-phase flow with flow-pattern evolution. *Int J Press Vessels Pip*, 2018, 161: 22
- [10] Liu H G, Kong J Y, Li G F, et al. Inquiry into vibration analysis and control of fluid filled pipe system. *J Hubei Univ Technol*, 2005, 20(3): 78
(刘怀广, 孔建益, 李公法, 等. 充液管道系统振动分析与控制的探讨. *湖北工业大学学报*, 2005, 20(3): 78)
- [11] Jia D. Slug flow induced vibration in a pipeline span, a jumper and a riser section // *Offshore Technology Conference*. Houston, 2012: OTC-22935-MS
- [12] Tay B L, Thorpe R B. Statistical analysis of the hydrodynamic forces acting on pipe bends in gas-liquid slug flow and their relation to fatigue. *Chem Eng Res Des*, 2015, 104: 457
- [13] Pettigrew M J, Taylor C E, Fisher N J, et al. Flow-induced vibration: recent findings and open questions. *Nucl Eng Des*, 1998, 185(2-3): 249
- [14] Swindell R. Hidden integrity threat looms in subsea pipework vibrations. *Offshore*, 2011, 71(9): 78
- [15] de Langre E, Villard B. An upper bound on random buffeting forces caused by two-phase flows across tubes. *J Fluids Struct*, 1998, 12(8): 1005
- [16] Sakaguchi T, Ozawa M, Hamaguchi H, et al. Analysis of the impact force by a transient liquid slug flowing out of a horizontal pipe. *Nucl Eng Des*, 1987, 99: 63
- [17] Mulcahy T M, Lawrence W, Wambsganss M W. Dynamic surface-pressure instrumentation for rods in parallel flow. *Exp Mech*, 1982, 22(1): 31
- [18] Chu I C, Chung H J, Lee S. Flow-induced vibration of nuclear steam generator U-tubes in two-phase flow. *Nucl Eng Des*, 2011, 241(5): 1508
- [19] Sasakawa T, Serizawa A, Kawara Z. Fluid-elastic vibration in two-phase cross flow. *Exp Therm Fluid Sci*, 2005, 29(3): 403
- [20] Pettigrew M J, Zhang C, Mureithi N W, et al. Detailed flow and force measurements in a rotated triangular tube bundle subjected to two-phase cross-flow. *J Fluids Struct*, 2005, 20(4): 567
- [21] Miwa S, Mori M, Hibiki T. Two-phase flow induced vibration in piping systems. *Prog Nucl Energy*, 2015, 78: 270
- [22] Yih T S, Griffith P. *Unsteady Momentum Fluxes in Two-phase Flow and The Vibration of Nuclear Reactor Components* [Dissertation]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1968
- [23] Cargnelutti M F, Belfroid S P C, Schiferli W, et al. Multiphase fluid structure interaction in bends and T-joints // *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Division/K-PVP Conference. ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference: Volume 4*. Bellevue, 2010: 75
- [24] Giraudeau M, Mureithi N W, Pettigrew M J. Two-phase flow-induced forces on piping in vertical upward flow: excitation mechanisms and correlation models. *J Pressure Vessel Technol*, 2013, 135(3): 030907
- [25] Liu Y, Miwa S, Hibiki T, et al. Experimental study of internal two-phase flow induced fluctuating force on a 90° elbow. *Chem Eng Sci*, 2012, 76: 173
- [26] Miwa S, Liu Y, Hibiki T, et al. Two-phase flow induced force fluctuations on pipe bend // *Proceedings of the 2014 22nd International Conference on Nuclear Engineering. Volume 2B: Thermal Hydraulics*. Prague, Czech Republic, 2014: V02BT09A007
- [27] Miwa S, Hibiki T, Mori M. Analysis of flow-induced vibration due to stratified wavy two-phase flow. *J Fluids Eng*, 2016, 138(9): 091302
- [28] de Henau V, Raithby G D. A study of terrain-induced slugging in two-phase flow pipelines. *Int J Multiphase Flow*, 1995, 21(3): 365
- [29] Al-Safran E. Investigation and prediction of slug frequency in gas/liquid horizontal pipe flow. *J Petrol Sci Eng*, 2009, 69(1-2): 143
- [30] Peddu A, Chakraborty S, Das P K. Visualization and flow regime identification of downward air-water flow through a 12 mm diameter vertical tube using image analysis. *Int J Multiphase Flow*, 2018, 100: 1
- [31] Barnea D, Shoham O, Taitel Y. Flow pattern characterization in two phase flow by electrical conductance probe. *Int J Multiphase Flow*, 1980, 6(5): 387
- [32] Taitel Y, Lee N, Dukler A E. Transient gas-liquid flow in horizontal pipes: Modeling the flow pattern transitions. *AIChE J*, 1978, 24(5): 920
- [33] Hewitt G F. *Measurement of Two-Phase Flow Parameters*. London and New York: Academic Press, 1978
- [34] Chen Z Y, He L M. Experimental study on measuring characteristics of slug flow in horizontal pipe. *J Univ Petrol China Nat Sci*, 2003, 27(1): 67
(陈振瑜, 何利民. 水平管段塞流特征参数测量方法的试验研究. *石油大学学报: 自然科学版*, 2003, 27(1): 67)

- [35] Barnea D, Brauner N. Holdup of the liquid slug in two phase intermittent flow. *Int J Multiphase Flow*, 1985, 11(1): 43
- [36] Dukler A E, Hubbard M G. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. *Ind Eng Chem Fundamen*, 1975, 14(4): 337
- [37] Zhu H J, Gao Y, Zhao H L. Experimental investigation on the flow-induced vibration of a free-hanging flexible riser by internal unstable hydrodynamic slug flow. *Ocean Eng*, 2018, 164: 488
- [38] Wang L, Yang Y R, Li Y X, et al. Dynamic behaviours of horizontal gas-liquid pipes subjected to hydrodynamic slug flow: modelling and experiments. *Int J Press Vessels Pip*, 2018, 161: 50
- [39] Al-Hashimy Z, Al-Kayiem H, Time R W. Experimental investigation on the vibration induced by slug flow in horizontal pipe. *J Eng Appl Sci*, 2016, 11(20): 12134
- [40] Xing L, Yeung H, Lo S. Investigation of slug flow induced forces on pipe bends applying STAR-OLGA coupling // *15th International Conference on Multiphase Production Technology*. Cannes, 2011: BHR-2011-H2
- [41] Chen B C M. A marine riser with internal flow-induced vibration // *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, 1992: OTC-6893-MS
- [42] Ortega A, Rivera A, Larsen C M. Flexible riser response induced by combined slug flow and wave loads // *Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 4B: Pipeline and Riser Technology*. Nantes, 2013: V04BT04A008
- [43] Swindell R, Belfroid S. Internal flow induced pulsation of flexible risers // *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, 2007: OTC-18895-MS
- [44] Zhou X J, Gong J, Chen J. Analysis on the static/dynamic load at the elbow in riser system of subsea pipeline. *China Offshore Oil Gas*, 2005, 17(4): 268
(周晓军, 宫敬, 陈杰. 海底管道立管系统弯头部位静、动荷载分析. *中国海上油气*, 2005, 17(4): 268)
- [45] Liu C, Li Y X, Wang L, et al. Experimental study on two-phase flow and vibration characteristics of marine riser. *China Petrol Mach*, 2016, 44(4): 46
(刘昶, 李玉星, 王琳, 等. 海洋立管两相流动及管道振动特性试验研究. *石油机械*, 2016, 44(4): 46)
- [46] Lu Y J, Liang C, Manzano-Ruiz J J, et al. FSI analysis of flow-Induced vibration in subsea jumper subject to downstream slug and ocean current // *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 2: CFD and VIV*. San Francisco, 2014: V002T08A062
- [47] Locharla H, Al Awadhi I, Narayana S, et al. Flow induced vibration in multi phase piping systems - successful mitigation // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, 2017: SPE-188386-MS
- [48] Giraudeau M, Pettigrew M J, Mureithi N W. Two-phase flow excitation forces on a vertical U-bend tube // *Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference. Volume 4: Fluid-Structure Interaction*. Baltimore, Maryland, 2011: 103
- [49] Li W S, Guo L J, Xie X D. Effects of a long pipeline on severe slugging in an S-shaped riser. *Chem Eng Sci*, 2017, 171: 379
- [50] Malekzadeh R, Henkes R A W M, Mudde R F. Severe slugging in a long pipeline-riser system: experiments and predictions. *Int J Multiphase Flow*, 2012, 46: 9
- [51] Mokhtab S. Severe slugging in a catenary-shaped riser: Experimental and simulation studies. *Petrol Sci Technol*, 2007, 25(6): 719
- [52] Montgomery J A, Yeung H C. The stability of fluid production from a flexible riser. *J Energy Resour Technol*, 2002, 124(2): 83
- [53] Xie C, Guo L J, Li W S, et al. The influence of backpressure on severe slugging in multiphase flow pipeline-riser systems. *Chem Eng Sci*, 2017, 163: 68
- [54] Massey B S, Wardsmith J. *Mechanics of Fluids*. 9nd Ed. Boca Raton: CRC Press, 2012
- [55] Beggs D H, Brill J P. A study of two-phase flow in inclined pipes. *J Petrol Technol*, 1973, 25(5): 607
- [56] Tay B L, Thorpe R B. Hydrodynamic forces acting on pipe bends in gas-liquid slug flow. *Chem Eng Res Des*, 2014, 92(5): 812
- [57] Tay B L, Thorpe R B. Effects of liquid physical properties on the forces acting on a pipe bend in gas-liquid slug flow. *Chem Eng Res Des*, 2004, 82(3): 344
- [58] Pontaza J P, Abuali B, Brown G W, et al. Flow-induced vibrations of subsea piping: A screening approach based on numerical simulation // *SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition*. Aberdeen, 2013: SPE-166661-MS
- [59] Li F Q, Cao J, Duan M L, et al. Two-phase flow induced vibration of subsea span pipeline // *The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*. Rhodes, 2016: ISOPE-I-16-333
- [60] Tian H J, Xing Y, Song C Y, et al. Numerical simulation of flue gas desulfurization by horizontal spray tower. *Chin J Eng*, 2018, 40(1): 17
(田海军, 邢奕, 宋存义, 等. 卧式喷淋塔烟气脱硫的数值模拟. *工程科学学报*, 2018, 40(1): 17)
- [61] Yuan F, Yang G, Xu A J, et al. Thermal state simulation analysis of molten iron ladle based on different insulation measures. *Chin J Eng*, 2018, 40(1): 31
(袁飞, 杨光, 徐安军, 等. 基于不同保温措施下的铁水包热状态模拟分析. *工程科学学报*, 2018, 40(1): 31)