

# 长距离下倾管-立管系统严重段塞流数值模拟研究

刘 昶 (北京中航油工程建设有限公司, 北京 100012)

**摘要:** 针对长距离下倾管-立管系统, 建立了2维数值模型, 对下倾管立管系统中比较容易发生的严重段塞流现象进行了模拟, 将长距离的下倾管路简化为气箱, 大幅度缩短了数值模拟所需时间, 建立了室内实验装置对数值结果进行了验证, 数值结果与实验结果吻合较好。利用该数值模型, 对立管顶部及底部的流体速度及质量流量进行了模拟, 并分析了流体对立管的冲击作用。

**关键词:** 下倾管-立管; 严重段塞流; 试验研究; 数值模拟

## 0 引言

海洋立管是海洋石油开采中所需的关键设备, 负责连接海底井口或海底集输管道与海上平台, 同时也是海上石油开采系统中的最薄弱环节。外部承受洋流、波浪的冲刷载荷, 内部输送高压气液。在如此复杂的外力作用下, 考察立管的动态响应保证立管的安全运行显得尤为重要。

以往的研究中, 学者们对立管进行了大量的管外涡激导致的振动研究, 内流的影响通常被忽略。随着研究的深入, 内流对立管动力特性的影响引起了学者们的关注<sup>[1]</sup>, Chucheepsakul et al. 分析了内部流动流体和静位移对立管动力特性的影响, 结果表明立管频率随着内流流速的增加和静位移的增加而降低<sup>[2]</sup>。王法利通过实验的方法同样得出了内流的存在会降低海洋立管的振动频率的结论<sup>[3]</sup>, 但是, 以上结论的得出都是以管内为单相流动为前提。而当管内为两相流动时, 压力波动比单相流动强烈得多, 并且在特定的流型下, 压力波动具有明显的周期性, 这种情况下, 内流更应被视作激励, 而不是仅仅考虑对立管模态的影响。

对于立管内的流动, 国内外学者通过实验做了大量的研究<sup>[4-6]</sup>, 重点集中在对强烈段塞流的研究, 王鑫<sup>[7]</sup>在下倾管立管系统中观测到了强烈段塞流和稳定流动两种流型。

本文建立了简化的2维数值模型, 对立管内的强烈段塞流进行了数值模拟, 通过与室内下倾管立管实验装置中的测量结果进行比对, 验证了2维数值模型对立管内强烈段塞流模拟的准确性。同时通过分析模拟结果, 对立管的受力情况进行了分析。

## 1 数值模型的建立

### 1.1 几何模型

用于数值模拟的几何模型如图1所示, 立管高度为3.5m, 立管直径51.4mm, 以1.225×1.225m的方形气箱模拟长距离管道的气体压缩空间, 气箱顶部为气体入口, 气箱底部为液体入口。这样的几何模型处理方式, 对于数值计算有两点优势:

①将下倾段管道长度缩短, 便于大长径比管道模拟结果的展示;

②减小气液接触面的面积, 减少网格数量, 对于应

用VOF方法计算的情形, 能够有效减少迭代步数, 从而减少总的计算时间。

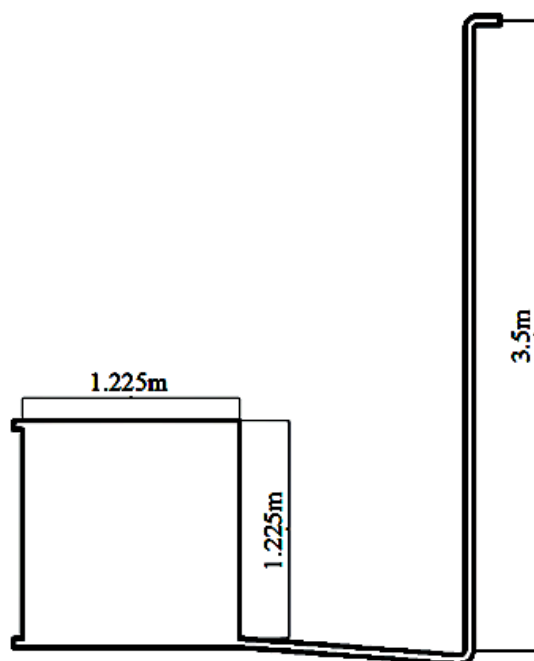


图1 2维管道几何模型

### 1.2 数学模型

湍流运动中任何物理量都随时间和空间不断的变化, 要想用N-S方程求解这种运动的瞬时速度是非常困难的。研究表明, 虽然湍流运动十分复杂, 但是它仍然遵循连续介质运动的特征和一般力学规律, 因此, 雷诺(Reynolds)提出用时均值概念来研究湍流运动的方法, 导出了以时间平均速度场为基础的雷诺时均N-S方程。式(1)、(2)、(3)分别是张量形式的时均化流体运动连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right) + F_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{T})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{T} \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \rho \bar{T} \bar{u}_j' \right) + \bar{S}_T \quad (3)$$

式中:  $\rho$  代表单元内混合密度, 由式  $\rho = \alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g$  确定;  $\mu$  代表流体动力粘性系数, 由式确定;  $\alpha_l$  和  $\alpha_g$

分别是单元中液相体积分数和气相体积分数，由VOF模型计算得出。 $\bar{\phi}_i$ 、 $\phi_i'$  ( $i=1,2,3$ ) 分别代表广义变量  $\phi$  在3个空间坐标上的时均值和脉动值， $\phi$  可以是速度  $u_i$ ，压力  $P$ ，温度  $T$  和热源相  $S_T$ ； $k$  代表流体导热系数。

### 1.3 多相流模型

VOF模型通过求解体积分数方程来追踪气液界面，

(4) 为体积分数连续性方程：

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

$$\alpha_1 + \alpha_g = 1 \quad (5)$$

式中： $u_i$  为雷诺时均速度

时均流动方程中多出与  $-\rho u_i' u_j'$  有关的项，该项被定义为雷诺应力，根据 Boussinesq 假设：

$$-\rho u_i' u_j' = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \sigma_{ij} \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

式中， $\mu_t$  为涡粘性系数， $k$  为湍流动能， $\varepsilon$  为湍流耗散率， $\sigma_{ij}$  为 Kronecker 函数， $C_\mu=0.09$ 。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (9)$$

式中，方程中  $G_k$  表示由平均速度梯度而产生的湍流动能， $G_b$  是由浮力影响产生的湍流动能， $Y_M$  表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响， $C_{1\varepsilon}=1.44$ ， $C_{2\varepsilon}=1.92$ ，湍流动能的普朗特数  $\sigma_k=1.0$ ，湍流耗散率的普朗特数  $\sigma_\varepsilon=1.3$ ， $C_{3\varepsilon}$  在浮力剪切层与重力矢量垂直时值为0，在浮力剪切层与重力矢量平行时值为1。

整个区域中采用结构网格进行划分，沿管道走向的网格距离为5mm，沿管道径向划分25层网格，并局部进行加密处理。

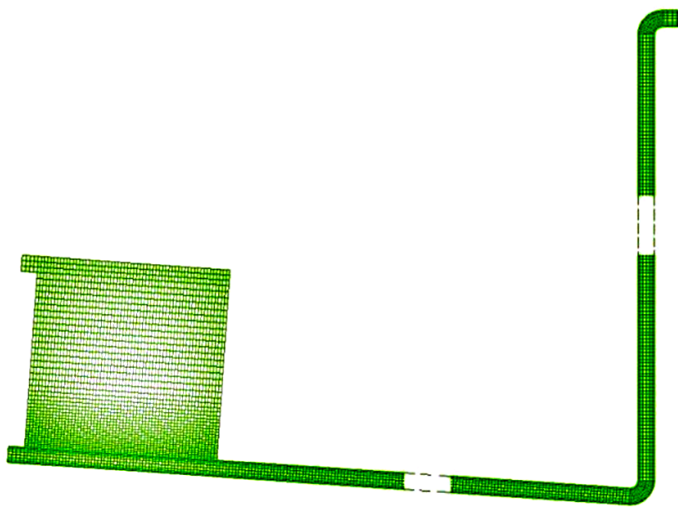


图2 带气体压缩空间的立管系统网格

### 1.4 边界条件

严重段塞流的发展过程中存在气体在下倾管中的压

缩过程，此时系统中气体密度发生变化，为了使气液入口流量保持恒定，选用质量入口条件。立管出口为压力出口。气箱及管道壁面均为无滑移壁面。近壁面采用标准壁面函数处理。气液表面张力模型采用CSF模型，表面张力系数为常数。

对于以上模型采用分离式求解器 (Pressure based Solver)，应用压力的隐式算子分割算法 (PISO) 进行求解，该算法在求解瞬态问题时有明显的优势。

## 2 数值结果的实验验证

实验装置垂直段高度为3.5m，发展段与下倾段长度和为  $L=30.5m$ ，下倾角度为  $\alpha=4^\circ$ ，管道内径  $d$  为51.4mm，外径  $D$  为63mm，弯头处的曲率半径  $r=100mm$ ，材质为PPR。压力变送器测量范围为0~0.5MPa，产品精度0.1级，设置在立管底部；空气经压缩机压缩，经缓冲罐过滤掉气体压力脉动进入气液混合器与水泵来水混合后进入下倾管立管系统。

### 2.1 压力波动特性对比

利用上述模型对实验中观测到的典型严重段塞流进行模拟，得到的立管底部压力曲线与实验结果的对比如图3。

可以发现，对于典型严重段塞流，数值结果的压力最大值与周期时长与实验结果吻合良好，数值结果的压力最小值比实验结果稍小。

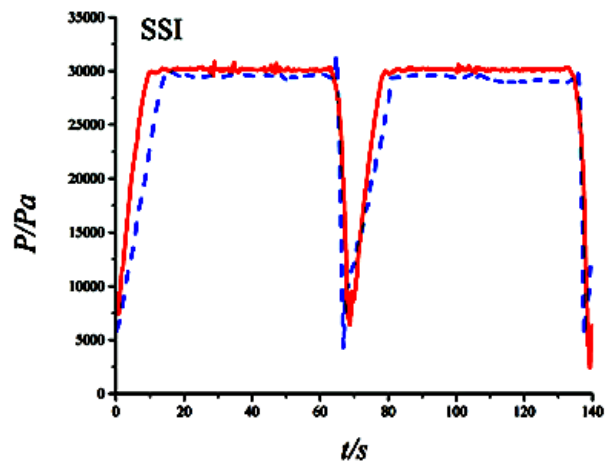
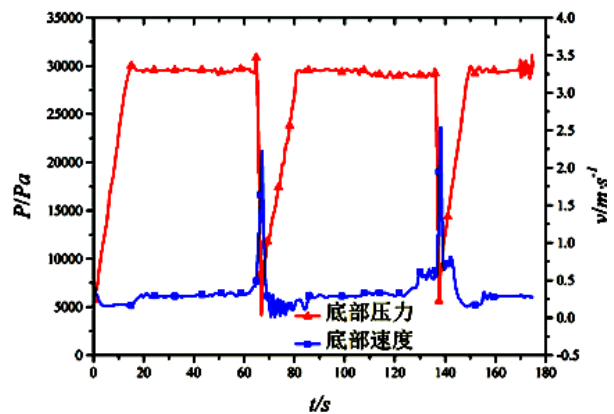


图3 立管底部压力的数值结果与实验结果对比

### 2.2 立管弯头处速度和流量的变化特性



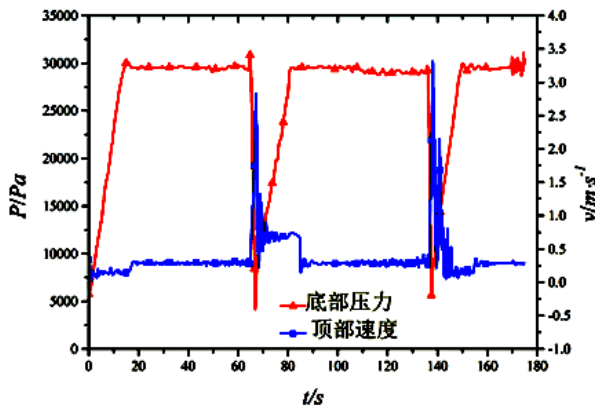


图4 立管弯头平均速度变化特性

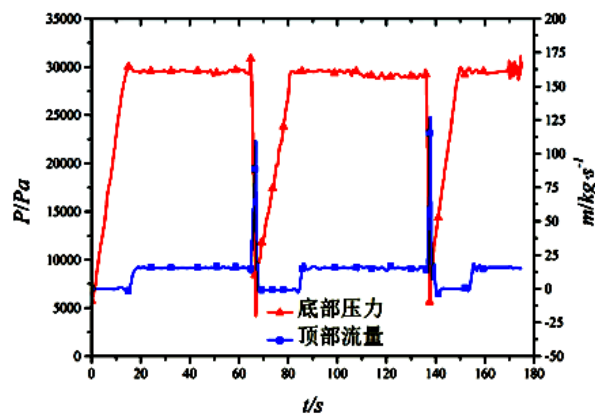
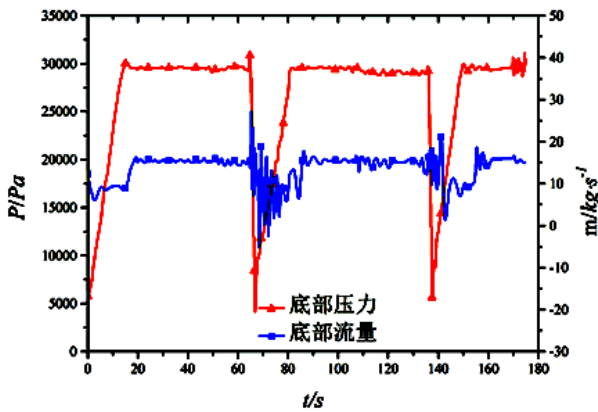


图5 立管弯头质量流量变化特性

作为一种事故流型,严重段塞流对立管的冲击作用不能忽略,并且这种冲击力主要作用于立管弯头处,流体动量在速度及方向上的剧烈变化,使得立管弯头处长期处于波动的受力之下。由适用于流体的动量定理可知:对液塞对弯头的冲击力进行定量描述,需要知道液体在弯头处的速度与质量流量。图4、5分别为弯头处的速度与质量流量,与立管底部的压力曲线绘制在同一张图中,用于识别严重段塞流中的各个流态阶段。

液体稳定出流阶段,立管底部的液体速度约为0.3m/s,基本等于液体入口折算速度,此时立管底部压力约等于30000Pa保持不变;随着管内流态向气液喷发阶段的过渡,下倾段中的加速气体膨胀推动液塞,液体速度逐步升高到0.5m/s附近,立管底部压力有轻微下降;气液喷发阶段开始后,底部弯头处速度持续增大,但是有

很大上下波动,这是因为底部弯头处气液交替进入立管,纯液时速度在下倾段气体的推动下升高,气体进入弯头处后,致使一部分液体回流,因此弯头处平均速度有较大幅度的下降,这个阶段立管底部的压力由30000Pa降低到20000Pa左右。随着气体压力释放结束,流动进入液塞生成阶段,底部弯头处速度降低到0.3m/s,立管底部压力逐渐升高至30000Pa。

结合立管顶部及底部的质量流量及流速,可以发现,立管顶部流体的动量变化强于立管底部,气液喷发时,立管中气体膨胀对液体的加速作用显著。立管顶部的受力工况更为复杂且剧烈。

### 3 结论

本文介绍了二维立管系统的网格划分方法、湍流模型及多相流模型的选择方法,通过对比数值结果与实验结果,证明建立的数值模型对立管系统内的严重段塞流的数值模拟结果与试验结果很接近。可以通过该模型,对严重段塞流的流动参数及液流对弯头的冲击特性进行分析。结果显示,立管底部的受力主要来自管内流体的静压,流动冲击力与静压力相比可以忽略;立管顶部,流动冲击力与静压力数量级相当,需要对立管顶部受力情况给与足够的关注。

### 参考文献:

- [1]Guo Hai-yan, Wang shu-qing. Dynamic characteristics of marine risers conveying fluid[J]. China Ocean Engineering, 2000, (14):153-160.
- [2]Chuchepsakul S, Huang T, monprapussom T. Influence of transported fluid on behavior of an extensible flexible riser/pipe, Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference. Brest, France, 1999, 2:286-293.
- [3]王法利.考虑内流的海洋立管动力特性和动力响应的实验研究[J].海洋湖沼通报,2007(Z):47-51.
- [4]Bóe A. Severe Slugging Characteristics; Part 1: Flow Regime for Severe Slugging; Part 2: Pointmodel Simulation Study[A], presented at Selected Topics in Two-Phase Flow, Trondheim, Norway, march 1981.
- [5]Schmidt Z. Experimental study of two-phase slug flow in a pipeline-riser pipe system [D] Ph.D. Dissertation, Tulsa: University of Tulsa, 1977.
- [6]马华伟.组合立管系统中强烈段塞流特性及其消除方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2008.
- [7]王鑫,郭烈锦,张西民(等).集输-上升管路系统强烈段塞流实验研究[J].工程热物理学报,2005,26(5):799-801.

### 作者简介:

刘昶(1988-),男,民族:汉,籍贯:河北省唐山人,学历:研究生,现有职称:中级工程师,研究方向:机场供油。