

文章编号: 1000-4882(2006)S-0160-05

# 水平弯管内气液流动对管道振动影响的实验研究

钟兴福, 李志彪, 李东晖, 吴应湘  
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

## 摘要

通过水平弯管内气液两相流的实验研究, 分析了管道内流体流动参数对管道振动的影响, 给出了在实验参数范围内影响管道振动的一些认识。初步实验结果表明, 当液相流量固定不变时, 气相流量的逐渐增加, 管道振动逐渐减弱。而当气相流量固定不变时, 随着液相流量的增加, 管道振动逐渐加剧, 而且振动幅值出现极大值, 随后管道振幅减小, 但振动频率增大。

**关键词:** 水平管; 两相流; 振动; 检测

## 1 引言

石油天然气、化工管路经常因为产生的不稳定流动, 以及流体流向改变、管线变径等情况而引起管路振动, 如果处理不好, 将严重影响管路的安全运行, 因此管线振动问题越来越引起人们重视, 但目前人们对这个问题的研究还主要集中于由机械振源引起的管线振动问题。而工程实际中有一类管线, 管线内的介质是气、液两相流, 管线两端既无泵, 也无压缩机, 却发生了剧烈的振动。引起这类管线振动的原因很多, 不易分析, 以前曾用理论分析的方法分析过管线内的流体振源<sup>[1]</sup>, 但由于分析中采用某些简化及假设, 其结果只能作为参考。为了全面分析这类管线振动的机理, 以便采取合理措施减轻管线振动, 本文通过实验手段, 对一段气液两相流管线的流体流动激发的振动进行了实验研究分析。通过改变气液相的配比流量和含率, 在管线中观察到不同的流型, 流动稳定后采用激光测距方法, 测量管线在不同气液配比流量和流型下的位移, 分析了流体流动参数对管线系振动的影响, 计算出了流体流动激发的管线位移、幅值等。从计算结果看出, 流体流动对管系的动态响应有着重要的影响, 在管道设计时必须加以考虑, 管流的压力、速度、密度等参数随时间周期性的变化是引起管道振动及其附属设备振动的主要原因之一。

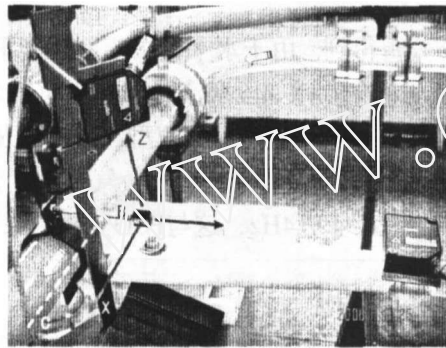
## 2 试验系统及方法

实验是在中国科学院力学研究所的多相流动环路装置上完成的, 装置中管道由全透明的有机玻璃制成。整个流程管线内径为50mm, 长度28m, 试验介质为空气、水、油。气水分别由压缩机和水箱供应, 经过各自的流量计后通过T型管汇合, 流经实验段后被分离, 水流回水箱以备循环使用, 空气排入大气。透明有机玻璃管有助于更好的观察气水两相流动的流动状态。实验装置运行时, 气相表观流速可达0~5m/s, 液相(油/水)表观流速在0.6m~1.2m/s范围内可调。

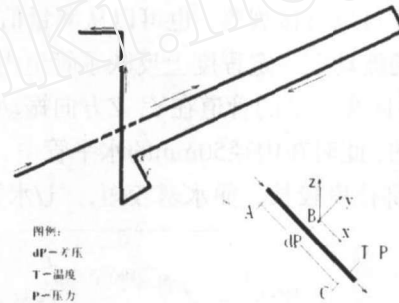
图1为实验装置实验段部分示意图, 图1a为实验段AC实物照片, 图1b为实验段AC放大的示意图。气液两相流水平弯管段的上游A和下游C相距1m, A面距流体入口约22m, 下游C面距出口约5m。在AC两个采集面上分别安装了压力传感器, 以获得采集面上压力波动信号。同时, 在两个采集面之间安装了引压管, 通过引压管分别接入到差压传感器, 以测出气液两相流动时管道底部的差压波动信号, 差压传感器型号为霍尼韦尔24PC。

B点为振动测量点, 是从AC的中间点引出的支点, B点同管道AC刚性连接, 当两相流体从A端流向C端时管道发生振动, 通过测量B点在X、Y、Z方向的振动位移, 就得到管道在三个方向上的振动情况。振动位移采用optoNCDT 1401激光器测量, 激光测距分辨率为 $20\mu\text{m}$ , 测量精度为 $0.01\% \text{ FSO}$ 。

实验时, 通过改变气液相的配比流量和含率, 在管线中会观察到不同的流型, 等某一种流动稳定后, 观察记录流型, 同时测量管线在不同气液配比流量下的压力、差压、振动位移的信号, 所有测量传感器信号统一由 DAQP-12H 数据采集系统进行数据采集, 采样频率为  $50\text{Hz}$ 。实验过程是: 分别保持液相流量 (4, 6, 10, 20, 40, 60, 70, 单位:  $\%25\text{m}^3/\text{h}$ ) 不变, 再逐渐改变气相流量 (10, 50, 100, 200, 300, 400, 单位:  $\%25\text{ l}/\text{min}$ ), 等流动稳定后, 进行数据采集和记录。本文中直接采用计量仪表给出的计量单位, 若无特别说明, 液相流量  $w$  单位为:  $\%25\text{m}^3/\text{h}$ , 气相流量及单位为  $\%25\text{ l}/\text{min}$ 。



a、实验装置及实验段 AC 实物照片



b、实验段 AC 放大的示意图

图 1 实验流程示意图

### 3 管道中的流型分析

在两相流动过程中, 由于管道内流体中各相和组分流体的相速度、密度、粘度及表面张力等的差异, 使得两相流在流动过程中出现不同的流型, 这不但影响到两相流系统的流动特性、传热传质性能、振动特性, 而且影响系统运行的可靠性、安全性和运行效率。众所周知, 当管流的压力、速度、密度等参数随时间周期性变化时, 出现流体脉动, 段塞流型就是一种典型的流体脉动, 它是引起管道振动及其附属设备振动的主要原因之一。

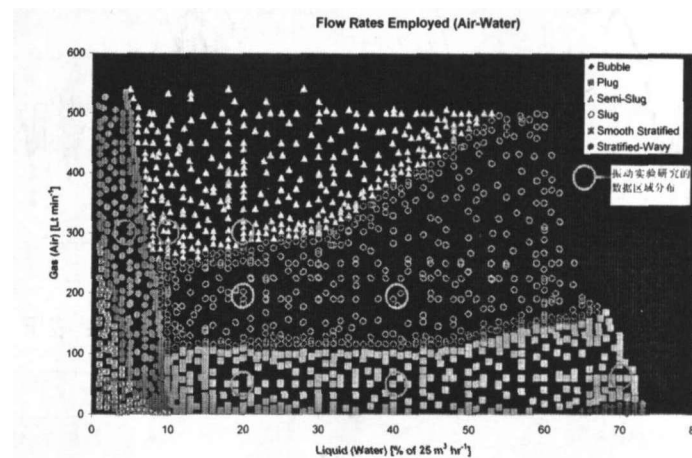


图 2 实验参数范围内的流型图

为了对由于管线流体因素引起的振动进行实验研究, 我们先对实验管中的流型做了详细的观察和记录, 图2给出了实验参数范围内的流型图, 横轴为液相水的流量, 纵轴为气相空气的流量, 实验中观察到的流型由泡状流、弹状流、段塞流、层状流、波状流, 根据流型图, 便可判断并配比出所需要

流体的流型。由于重力的作用,气相比较多地分布在管道上部,液相则较多地分布在管道底部,按通常对气液两相水平流动定义了如下五种流型:

(1) 泡状流:气相以分离的气泡散布在连续的液相内,气泡趋于沿管道顶部流动。这种流型在含气率低时出现。

(2) 弹状流:在波状流中,当波增长到与管道顶部表面接触,将位于管道上部的气相分割成气弹时,就形成了弹状流。

(3) 层状流:在气液流量均较小时,液相在下部气相在上部分开流动,两相间有较光滑的界面。

(4) 波状流:当气相流量较大时,气液分层面上沿流动方向呈现波浪形。

(5) 塞状流:小气泡结合成大气泡,如栓塞状,分布于连续的液相内。大气泡也倾向于沿管道顶部流动。

流型不仅可以直接观察,也可以从测量信号中简介分析得到。由于水平管中不同流型下压降波动不同,压力的波动在一定程度上反映了管道内流体的流动状况。比如段塞流时压力波动较大,图3为 $w=4$ 、 $g=50$ 时同步测量的管道在Y、Z方向振动位移及流动压力波动响应,而流型、压力以及管道振动是相互对应的,此时在内径50mm的水平管中,呈现塞状(液塞和气塞)流动过程,气塞长度大约9-13m左右,气塞尾部拖曳较长,而水塞较短,气/水塞出现的频率大约0.14Hz,这与PSD分析结果相符(如

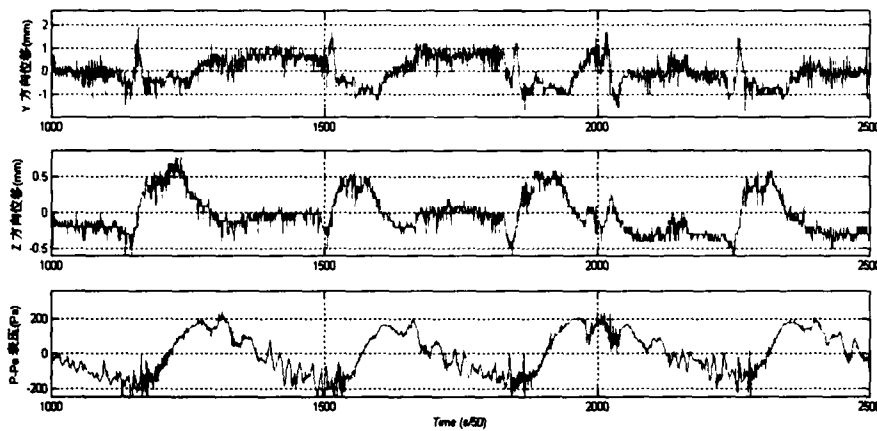


图3a  $w=4$ ,  $g=50$  时, Y, Z 方向振动位移及压力波动 横轴: 时间 (1/50 s), 纵轴: 振动位移 (mm)

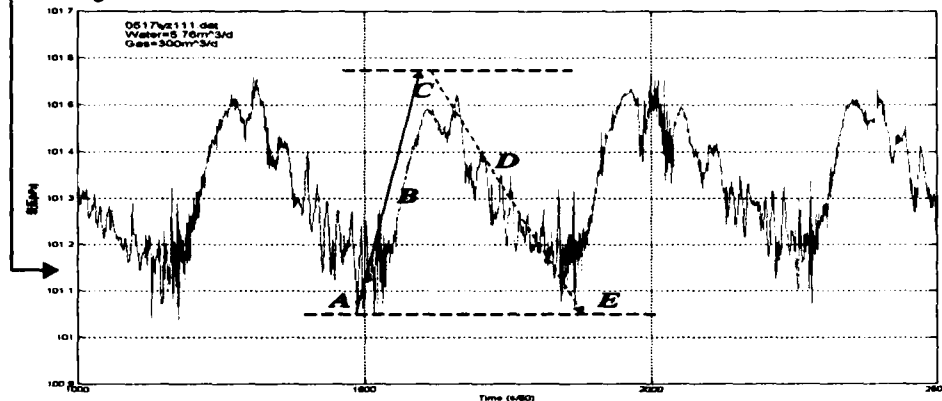


图3b 典型压力波动 ( $w=4$ ,  $g=50$ ) 横轴: 时间 (1/50 s), 纵轴: 表压 (kPa)

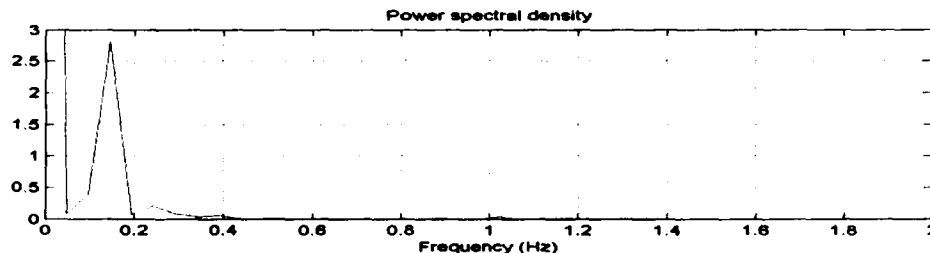


图3c 压力波动曲线的PSD分析结果  $f=0.14\text{Hz}$  ( $w=4$ ,  $g=50$ ) 横轴: 频率 (Hz), 纵轴: 能量  
图3 段塞流时的压力波动及管道在 Y, Z 方向的振动响应

图3c), 水塞长度大约3m~4m, 水塞中伴有小气弹, 水为连续, 在没有气塞或液塞时, 水位大约在2/5管的位置, 一个大的水塞经过以后, 有一部分水回流。从图3b中可以看出, 液塞段AC和气塞段CE构成了一个完整的段塞流过程。这里首先分析液塞段AC, 然后分析气塞段CE。

在AC段, A点是液塞前端, C点是液塞的后端。当液塞到达传感器取压点时, 压力从低值点A急剧增加到一个高值点C, 由于管道中液塞前后两端不同形状、不同压力, 所以从A点到C点的过程中, 液塞前端由于含气量的不同而造成压力从A点到B点的波动, 从B点到C点的过程是纯液塞的流动过程, 压力波动很小, 并急剧上升。当液塞AC离开管线时, 压力才开始降低, 并进入到气塞阶段。

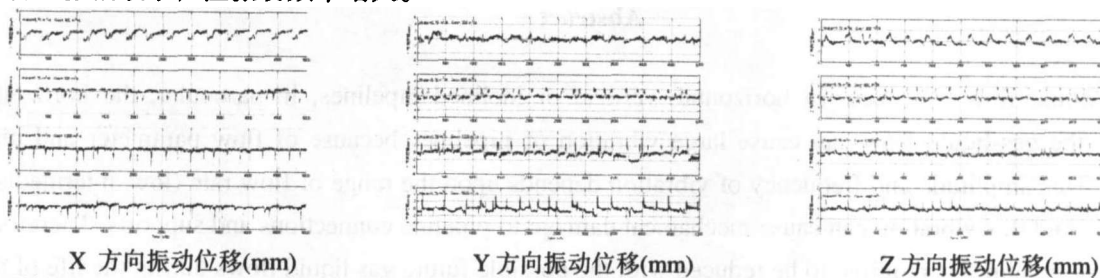
在CE段, C点是气塞前端, 也是液塞的后端, E点是气塞的后端, 也是液塞的前端。当气塞到达传感器取压点时, 压力从高值点C逐渐降低到一个低值点E, 由于管道中一个气塞中不同位置的含液量不同, 因此从C点到E点的过程中, 气塞压力波动比液塞大, 在整个气塞的流动过程CE中, 压力波动一直很大, 下降比较缓慢。当气塞CE离开管线时, 压力才又开始上升, 并进入到液塞阶段。

#### 4 两相流动引起水平弯管的振动分析

管道系统的振动一般是由机械振动、流体振动、管系自身的振动或地震等引起, 流体振动又包括流体脉动、气液二相流振动、高速流振动、振动瞬变冲击、管外流体振动等<sup>[2]</sup>。本文研究过程中, 引起管道振动的主要原因有流体脉动、气液两相流动、高速流动。

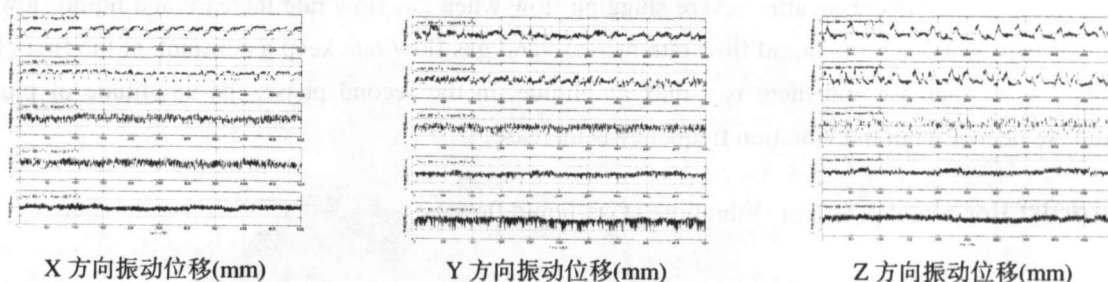
图3a分别给出了管道中段塞流动时压力波动响应以及管道在Y, Z方向的振动响应。从图中可以看出, 为当液塞到达时测量点时(图3b中液塞段AC), 管道振动位移达到最大值, 而气塞对管道振动的贡献不是很大, 液塞过后, 振动逐渐减小。

图4给出了保持液相流量 $w=4$ 不变的情况下, 逐渐增大气相流量 $g=50, 100, 200, 300$ , 测量的X, Y, Z方向的振动位移响应。可以看出当气相流量逐渐增加时, 管道振动逐渐减弱。图5给出了保持气相流量 $g=50$ 不变的情况下, 逐渐增大液相流量 $w=4, 6, 20, 40, 70$ , 测量的X, Y, Z方向的振动位移响应。从中可以看出, 随着液相流量的增加, 管道振动逐渐加剧, 而且振动振幅出现极大值, 随后管道振幅减小, 但振动频率增大。



保持液相流量  $w=4$  不变的情况下, 逐渐增大气相流量  $g=50, 100, 200, 300$ , 测量的 X, Y, Z 方向的振动位移;  
横轴: 时间 (1/50 s), 纵轴: 振动位移 (mm)

图4 液相流量不变, 逐渐增大气相流量时管道在各方向的振动响应



保持气相流量  $g=50$  不变的情况下, 逐渐增大液相流量  $w=4, 6, 20, 40, 70$ , 测量的 X, Y, Z 方向的振动位移;  
横轴: 时间 (1/50 s), 纵轴: 振动位移 (mm)

图5 气相流量不变, 逐渐增大液相流量时管道在各方向的振动响应

## 5 结论

气液两相流在管道中的混合流动是石油化工装置中常见的流动过程,在气液流动过程中,由于流动参数、管道结构以及布置方式的改变,使得部分管道产生较严重的振动。微弱的管道振动不会对设备带来损害,但较强烈的振动可能对管道结构以及上下游设备造成损伤,甚至停运。本文通过水平弯管内气液两相流的实验研究,只给出了一些简单的实验结果,对于管道内流体流动参数对管道振动影响的机理还没做进一步的分析。

初步实验结果表明,当液相流量固定不变时,气相流量的逐渐增加,管道振动逐渐减弱;而当气相流量固定不变时,随着液相流量的增加,管道振动逐渐加剧,而且振动振幅出现极大值,随后管道振幅减小,但振动频率增大。从测量结果看,流型、压力等流动参数同管道振动有着一致响应的关系,其内在的关系有待于进一步的研究。

**致谢:** 本文的流型实验以及分析过程中得到了 Simon Philip (School of Chemical Engineering and Analytical Science, The University of Manchester Manchester M60 1QD, United Kingdom) 的帮助,在此深表感谢。

### 参考文献

- 1 谭平,付行军等,电厂输水管系振动分析,汽轮机技术,Vo1.46, No.2,2004.
- 2 张都清,张广成等,电厂中汽水管道的振动原因及对策,山东电力技术,Vo1.47, No.1,2006.

## The vibration of the horizontal syphon pipeline in gas-liquid flow

Zhong Xingfu Wu Yingxiang Lidonghui Li Zhibiao  
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

### Abstract

Gas-liquid flow can occur in horizontal, vertical or inclined pipelines. In particular, the horizontal pipelines, the gas-liquid flow can cause large vibration of pipelines because of flow parameter and pipe structure. This amplitude and frequency of vibration depends upon the range of flow rate (low, intermediate and high). And this vibration can cause mechanical damage to pipeline connections and supports. Therefore, vibration of pipelines is required to be reduced with the possible future gas liquid flows during the life of the pipe. In this paper, the vibration characteristics of the pipeline in gas liquid flow are investigated. The pipeline vibration responses from flow pressure, 3D laser measurement were analyzed. It is show that the pipeline vibrations are decrease after severe slugging flow when gas flow rate increase and liquid flow rate keep a constant. But when the liquid flow rate increase and gas flow rate keep a constant, at the first phase, the vibration are increase and there is a max amplitude, in the second phase, the amplitude of pipeline vibration are decrease but the vibration frequency is increase.

**Key words:** Horizontal pipeline; Vibration; Gas-liquid flow

### 作者简介

钟兴福 男, 1967年生, 副研究员, 主要从事测井方法及应用、多相流测量理论和应用研究。