

文章编号: 1000-4882(2012)S2-0249-06

# 应用涡轮流量计测量油水两相混合流量

丰飞飞, 李东晖, 许晶禹, 吴应湘

(中国科学院力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

## 摘 要

应用涡轮流量计测量油水两相流混合流量, 重点研究油相粘度和入口相含率对测量精度的影响。通过试验给出了测量误差随油相粘度和入口相含率变化的试验曲线图。结果表明: 油相粘度和入口相含率对测量误差有显著的影响, 特别是油相粘度较高时。

**关 键 词:** 油水两相流; 涡轮流量计; 粘度; 相含率

## 0 引 言

随着工业快速发展, 能源需求量越来越大, 而陆上油气资源的日益紧缺, 促使各国转向海洋石油的开发。但陆上油田采用的传统计量技术并不完全适合于海洋平台使用, 这促使工业界和学术界联合开发新型的结构紧凑的多相流量计。目前国内的研究大都集中于气液两相流的测量, 且集中于流动中分散相的测量, 而对油水混合流量的测量研究较少。

涡轮流量计是被工业界普遍采用的用于测量单相流动的速度式流量仪表。由于在高温、高压等比较严酷的环境下, 仍然具有较高精度以及稳定性; 与其他流量计相比, 具有较大的测量范围; 对流动的瞬态变化具有快速反应的特点<sup>[1]</sup>, 因此, 应用涡轮流量计测量两相流有着良好的前景。本次试验主要考察用涡轮流量计测量油水两相流时, 油相粘度对测量精度的影响。

## 1 试验系统

### 1.1 试验装置

本试验在中国科学院力学研究所多相流动实验平台上完成。图 1 为试验装置示意图。油和水分别由油箱和水箱供应, 经过各自的流量计后, 进入试验管线, 混合液流经试验段后被分离再循环使用。试验管线采用内径 50mm 的透明有机玻璃管, 这有利于观察油水两相的流动状态, 管线从入口到分离器长约 35m。

流量计量: 水相采用电磁流量计, 油相采用腰轮流量计, 油相和水相经过试验管线后, 用 LWGY 型涡轮流量计对其混合流进行测量。LWGY 型涡轮流量计的公称通径为 50mm, 测量流量范围在 1~15m<sup>3</sup>/h, 在测量单相流体时, 其精度可达 0.25%。流型识别系采用高速摄像机记录每次试验条件下的流动状态, 慢镜头回放观察流型。为保证试验数据的准确可靠, 对每个测量点, 都在调整流量后的 5~8min, 流动相对稳定后再采集数据和观测流型。

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性基金资助项目(编号: KJXC2-YW-L02); 国家自然科学基金面上项目(编号: 10572143)

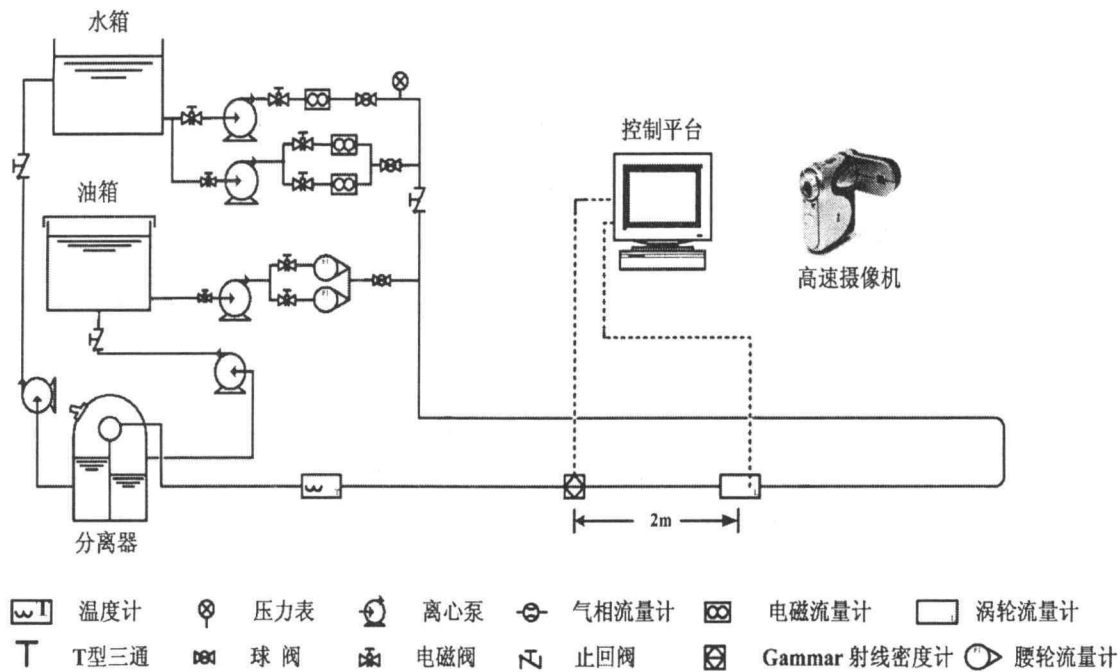


图1 油水两相流涡轮流量计测速试验示意图

## 1.2 试验工质及试验过程

试验水相为自来水, 20℃时的粘度为 1.005mPa·s。油相采用无色、透明的矿物油, 俗称白油, 在常温常压(20℃, 0.101mPa)下, 分别选用粘度为 50、160、225、400、700、1100 和 1450mPa·s 的七种样品。同时, 为便于观察试验流型, 在水中加入高锰酸钾(着色剂)。试验工质温度控制在 19~21℃, 在特定粘度下, 给定油相流量后, 调整水相流量, 通过可视化手段观察试验段的油水两相流型, 记录入口处不同流型的油相和水相表观流量和试验段的混合流量。表 1 给出了不同粘度下的试验数据。

表1 试验方案设计

粘度/(mPa·s)	50	160	225	400	700	1100	1450
水的流量 $Q/(m^3/h)$	0~15	0~15	0~15	0~15	0~15	0~15	0~15
油的流量 $Q/(m^3/h)$	1.7~13.1	2.5~12.1	2.9~12.1	0.8~9.9	0.7~5.7	0.7~1.4	1.4~2.8
数据点数/ $m$	52	41	43	54	40	31	31

## 2 结果与讨论

### 2.1 全油时试验结果

本试验首先在油相粘度分别为 50、160、225、700、1450mPa·s 时, 用涡轮流量计测量完成了全油时单相流量的测量, 结果如图 2 所示。

本文以工程中能接受的±5%相对误差作为其有效工作区间的判断标准(在图中, ±5%的区间用虚线标出), 作为有效工作区域的分界线。从图中可以看出, 当粘度为 50 mPa·s 时, 其测量误差大都在±5%以内, 但当粘度继续增大时, 其测量误差明显偏离了±5%的区间。因此, 用其测量单相高粘油时, 需要对结果进行修正。

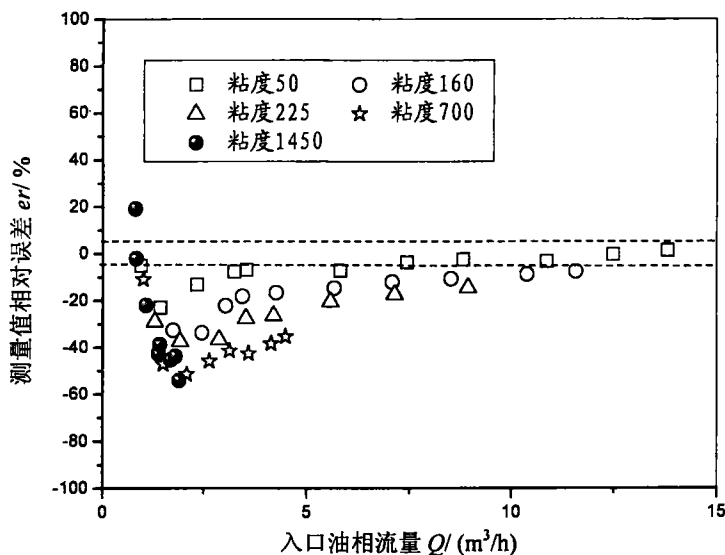


图2 全油时不同粘度下的误差图(粘度单位: mPa·s)

## 2.2 油水两相流时油相粘度和入口含率的影响

测量油水两相流时, 固定油相粘度, 用电磁流量计测量入口处水相流量  $Q_w$ , 腰轮流量计测量入口处油相流量  $Q_o$ , 进而得到入口处油相、水相的体积相含率  $\beta_o$  和  $\beta_w$ 。即:

$$\beta_o = \frac{Q_o}{Q_o + Q_w} = \frac{Q_o}{Q_{M1}} \quad \text{入口油相流量 } Q' \text{ (m}^3\text{/h)} \quad (1)$$

$$\beta_w = \frac{Q_w}{Q_o + Q_w} = \frac{Q_w}{Q_{M1}} = 1 - \beta_o \quad (2)$$

式中  $Q_{M1}$  为管道入口处的混合流量。

同时, 在试验管段用涡轮流量计测量两相混合流量  $Q_{M2}$ , 对比  $Q_{M1}$  和  $Q_{M2}$ , 可得到涡轮流量计的测量误差(相对误差):

$$Er = \frac{Q_{M2} - Q_{M1}}{Q_{M1}} \times 100\% \quad (3)$$

图3给出了七种不同粘度情况下, 测量误差随入口处油相含率变化关系图。以 $\pm 5\%$ 相对误差作为其有效工作区间的判断标准(在图中,  $\pm 5\%$ 的区间用虚线标出), 作为有效工作区域的分界线。由油相粘度为  $50\text{mPa}\cdot\text{s}$  时相对误差随入口处油相含率变化关系图可以看出, 在整个油相含率变化范围内, 误差可以控制在 $\pm 5\%$ 以内, 只有个别的几个点超过  $5\%$ 的范围, 因此可认为油相粘度为  $50\text{mPa}\cdot\text{s}$  时, 涡轮流量计在任何油相含率下均处于有效工作区间。对于油相粘度为  $160\text{mPa}\cdot\text{s}$  的试验研究结果显示, 随着油相含率  $\beta_o$  的增加, 相对误差有逐渐增大的趋势, 同时, 绝对误差值也由  $\beta_o$  较小时的正值, 变为  $\beta_o$  较大时的负值。但在大部分入口油相含率  $\beta_o$  的变化范围内, 相对误差在 $\pm 5\%$ 以内, 这与粘度为  $50\text{mPa}\cdot\text{s}$  时的情况大体一致。

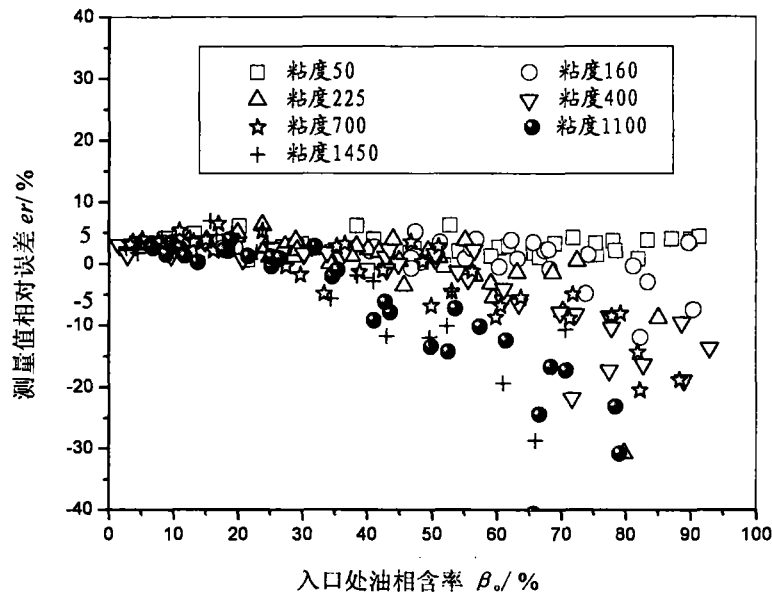


图3 不同粘度下测量误差随入口相含率变化曲线图(粘度单位: mPa·s)

当油相粘度提高至 225mPa·s 时,观察到了与粘度为 160mPa·s 时相似的曲线变化趋势,不同的是:当  $\beta_0$  小于 70% 时,相对误差在 5% 以内,涡轮流量计处于有效工作区间。然而,随着  $\beta_0$  的增加,误差曲线下降的幅度增大,当  $\beta_0$  达到 70% 时,整体误差超过了 5% 的界线,达到 10% 以上,此时,失效区开始出现。

由油相粘度为 400mPa·s 和 700mPa·s 时变化关系,可以看出,当  $\beta_0$  达到 50%~60% 时,测量误差呈大幅度增大的趋势,超过 5% 的界线,涡轮流量计超出了有效工作区,而且,随着  $\beta_0$  的增加,绝对误差也由正值变成负值。

为进一步研究超粘油对于涡轮流量计测量精度的影响,观察油相粘度为 1100 和 1450mPa·s 时的涡轮流量计测量油水两相流量的工作特性。由图 3 可以看出,当  $\beta_0$  仅为 30%~40% 时,误差便开始急剧增大。因此,对于超粘油来说,涡轮流量计仅能在低含油率的情况下工作,有效工作区的范围非常狭窄。

由上述试验结果可知,对于油相粘度较大的油水流动,涡轮流量计的测量误差随着入口处油相含率  $\beta_0$  的增加有逐渐增大的趋势,其有效工作区在逐渐减少。可以看出,流体的粘度对于涡轮流量计的计量精度有着重要的影响,当粘度大于一定值时,计量产生的误差将会很大,即流量计偏离线性区。为了对其说明,笔者计算了粘度 400mPa·s 时的油水有效粘度:将油水两相混合物看作均相的单相流体,应用均相模型压降计算公式,分别对水相连续流动的混合物粘度  $\mu_1$  和油相连续流动的混合物粘度  $\mu_2$  采用下式计算<sup>[2]</sup>:

$$\mu_1 = \frac{\rho_o(1-\beta_w) + \rho_w\beta_w}{\frac{\rho_o(1-\beta_w)}{\mu_o} + \frac{\rho_w\beta_w}{\mu_w}} \quad (4)$$

$$\mu_2 = \frac{\mu_o}{1+\mu_w} \left( 1 + \frac{1.5\mu_w\beta_w}{\mu_o + \mu_w} \right) \quad (5)$$

在使用上述公式计算混合物粘度时, 首先要确定混合流的流型。试验中流动的流型利用可视化观察试验管段得到, 同时采用 Laflin 和 Oglesby 提出的方法定义流型<sup>[3]</sup>。在一定的混合流速和输入油相含率下, 水平试验管段观察到了四种流型, 即: 分层流 (SW), 双连续流 (DC), 油含水 (Dw/o) 以及水含水 (Do/w)。为此, 在油相粘度为 400mPa·s 时, 给出了相对误差随入口相含率变化图 (见图 4), 以及混合流动的流型图 (见图 5)。

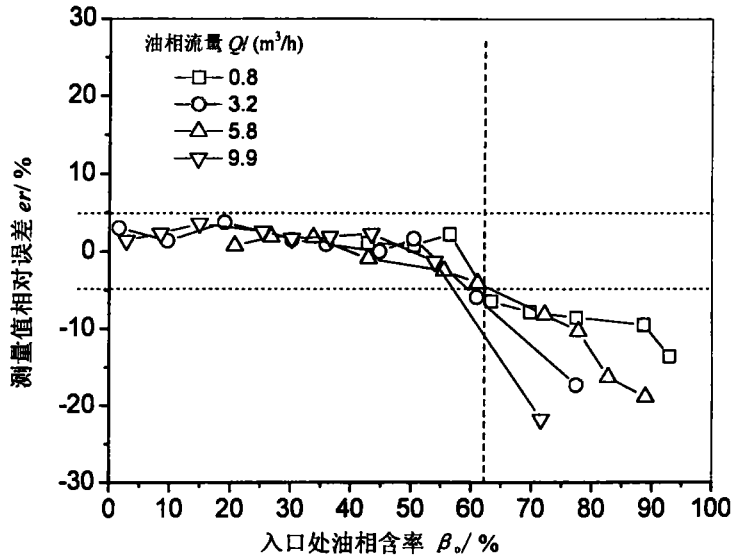


图 4 油相粘度为 400mPa·s 时相对误差  $er$  随入口处油相含率  $\beta_0$  变化图

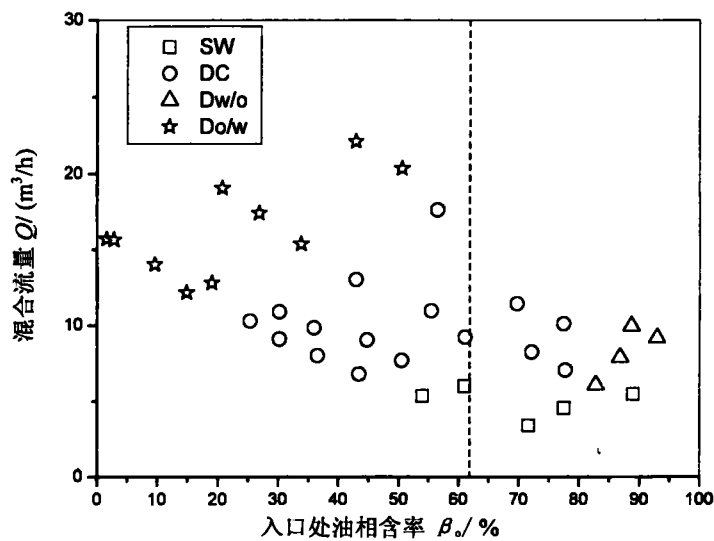


图 5 油相粘度 400mPa·s 时流型图

对比图 4 和图 5 可知, 当水相为连续流动即流型为 Do/w 时, 由式 (4) 计算有效粘度的范围在 1.02~2.35mPa·s 之间, 其测量误差大都在  $\pm 5\%$  之间; 而当油相为连续流动时, 由式 (5) 计算有效粘度的范围在 283~370mPa·s 之间, 其测量误差大都超过 10%, 有的甚至达到了 21%。同时还可看出, 在其有效工作区域, 粘度较低时, 绝对误差大都为正值, 即测量值大于真实值, 而在粘度较大时, 绝对误差大都为负值, 即测量值小于真实值。

### 3 结 论

本文应用涡轮流量计测量了不同油相粘度下的油水两相混合流量,研究了油相粘度和入口相含率对其工作性能的影响,绘制了 50, 160, 225, 400, 700, 1100 和 1450mPa·s 七种粘度情况下,测量误差随入口处油相含率的变化曲线图。通过试验发现,粘度为 50 和 160mPa·s 时,在 0~100%的入口油相含率变化范围内,相对误差大都在±5%以内,可认为涡轮流量计工作在有效工作区。但粘度达到 225mPa·s,随着油相含率的增加,误差有逐渐增大的趋势,并在入口处油相含率达到 70%时,涡轮流量计进入失效区。随着油相粘度的进一步增加,涡轮流量计在更低的油相含率下进入失效区,同时绝对误差逐渐由正值变为负值。

### 参 考 文 献

- [1] LUXHÜ J T. An artificial neural network for nonlinear estimation of the turbine flow-meter coefficient [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1998(11): 723-734.
- [2] 刘文红, 郭烈锦,等. 水平管油水两相流摩擦阻力特性实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2002(23):627-630.
- [3] LAFLIN G C, OGLESBY K D. An experimental study on the effects of flow-rate, water fraction and gas-liquid ratio on air-oil-water flow in horizontal pipes [D]. B.S. thesis, The University of Tulsa, 1976.

## Measurement of the Mixture Flow Rate of Oil-Water Two-Phase Flow Using the Turbine Flow-Meter

FENG Feifei, LI Donghui, XU Jingyu, WU Yingxiang

(Fluid-Solid Coupling System Mechanics Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

### Abstract

In this work, the mixture flow rate of oil-water flows was studied using the turbine flow-meter. The research focuses on the effect of oil viscosity and input oil fraction on the precision of the meter. It is shown that oil viscosity and input oil fraction exert a remarkable effect on measured errors, especially when oil viscosity is high.

**Key words:** oil-water two-phase flow; turbine flow-meter; viscosity; phase fraction

### 作 者 简 介

丰飞飞 男, 研究生。研究方向为油气水多相流测试技术。

李东晖 男, 高级工程师。研究方向为油气水多相流测试技术。

许晶禹 男, 副研究员。研究方向为多相流体力学和分离技术研究。

吴应湘 男, 研究员, 博士生导师。研究方向为流体力学、多相流体力学和分离技术研究。