

文章编号 : 1672-989X(2005)01-0026-05

多相流量计测单元阻力模型实验研究

林 军 董守平 黄 辉

(石油大学(北京)机电工程学院 北京 102249)

摘要 建立了全新的用于多相流量计测的单元阻力模型,并在此基础上开发出多相流量计测系统实验样机和配套计测软件。通过自建多相流测试环道上大量的模拟现场工况实验研究,对计测模型进行了评价。实验数据表明,该计测模型可以适用于多相流中不同粘度的液相流量计量;可适用于较宽的气、液相流量变化范围;模型计测误差稳定在可接受的水平,适当延长计测周期可以明显改善计测误差。

关键词 多相流 流量计量 单元阻力模型

中图分类号 :TH814 **文献标识码** :A

Experimental study on differential-resistance model in multiphase flow metering

LIN Jun , DONG Shou-ping , Huang Hui

(Mechanical and Electronic Engineering Institute , Petroleum University , Beijing 102249 , China)

Abstract A new multiphase flow metering model named differential-resistance model was presented. The corresponding metering system(software included) was developed and tested in our multiphase flow test loop. The results showed that errors of the model were reasonably accepted despite the variations of viscosity of liquid in a wide gas and liquid flowrates range , further more , the errors could be obviously improved by expanding the data collection periods.

Key words multiphase flow ; flowrate metering , differential-resistance model

0 引 言

近 30 年来,油气田的开发主体从陆上转向自然条件相对恶劣的海洋和沙漠,从大型集中分布的油气田转向小型边际以及卫星油气田。油井中开采出来的原油、天然气和水的多相混合物的长距离可靠输送和分离、计量等一系列多相流问题逐渐成为研究的热点^[1]。

多相计量技术的实现,可以使油井产出液的分离过程完全汇集到远离油井的集中处理站进行,而不必在油井附近设置由测试分离器、监控设备及仪表等组成的巨大而笨重的传统测量系统。这对于海洋油田、沙漠油田以及边际油田的开发尤其具有重要意义,因

此多相流计量技术近年来被列为影响石油工业未来发展的关键技术之一^[2,3]。

近 10 年来,石油大学流体测试实验室在多相流体力学和多相流测量方面做了大量的基础理论研究和实验研究,在此基础上提出了全新的基于有限单元阻力模型的分层流和段塞流两种不同流型下的气液两相计测模型,并利用自建的多相流测试环道和自主开发的多相流量计测系统样机及其配套软件对模型的效果进行实验研究。

1 计测样机

多相流量计测系统原理样机如图 1 所示。计测装置的主体由一水平测试管段和分别连接其两端的

* 收稿日期:2004-03-01,修订日期:2004-07-12

作者简介:林 军(1972-),男,山东滨州人,博士研究生,研究方向:多相流计量研究。

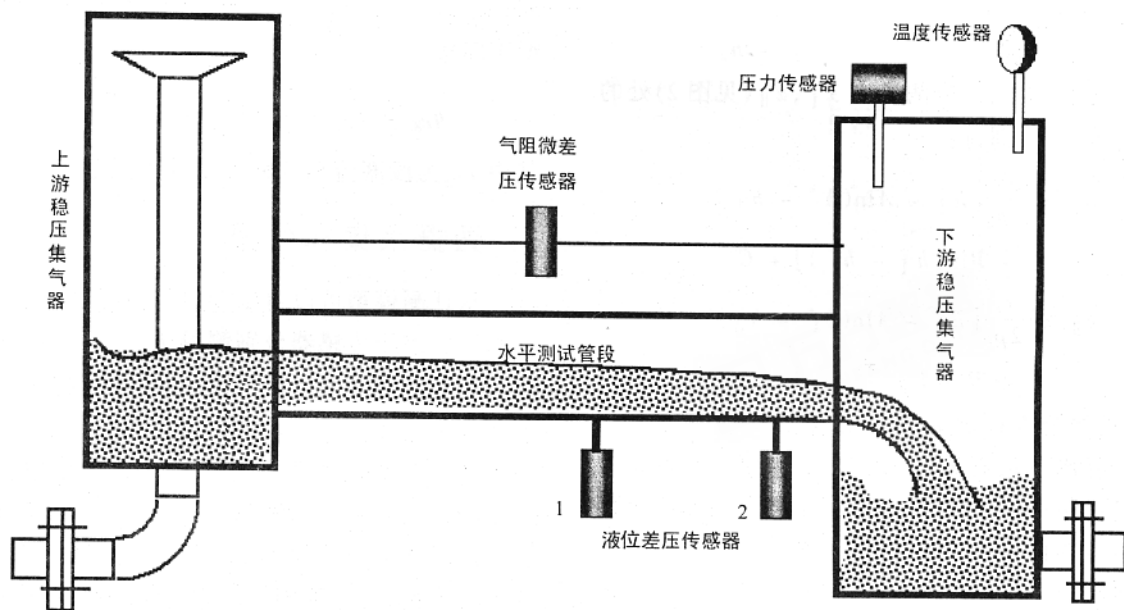


图 1 多相流量计测系统原理样机示意图

Fig.1 Sketch of multiphase flow metering system

上下游稳压集气器组成。上游和下游两个稳压集气器具有两个主要功能 (1) 在两个稳压集气器和水平测试管段内形成净气空间, 为稳定的分层和段塞流型创造生成条件 (2) 净气空间为气流阻力微差压传感器提供了稳定可靠的测试环境, 同时也为液位差压传感器提供了稳定可靠的压力基准。

水平测试段为水平安装的直管段, 内衬矩形截面直管, 由于两端稳压集气器的集气稳压作用, 在计测实验段上可以得到具有较为明确气液界面的分层流型和段塞流型, 这就为流量计测过程中的流型识别提供了较为可靠的信息来源, 同时也为液位传感器的液位监测提供了可靠的测试环境。

2 计测模型

由于两端稳压集气器的集气稳压作用, 在水平测试段上的流型可控制为分层流型 (Layered flow) 和段塞流型 (Plug flow)。作者针对不同流型分别提出了基于单元阻力模型的液相和气相计测模型。

2.1 分层流型液相计测模型

如图 2 所示的矩形通道二维流动中, ox 表示水平渠底, 考虑相距 dx 的两流通截面间的单元液流上的力平衡, 得到单元阻力模型基本关系式:

$$k \frac{d\omega}{dx} dx = b h \frac{p_0}{l} dx - \frac{1}{2} \gamma b h d h \quad (1)$$

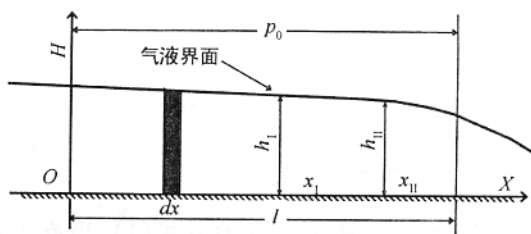


图 2 单元阻力模型示意图

Fig.2 Sketch of differential-resistance model

其中: k 为线性阻力系数, \bar{u} 为液流单元的平均速度, h 为气液界面高度, b 为液流槽宽, p_0 为两个稳压集气器间的压力差, l 为测试管段的全长, γ 为液流介质的重度。由 (1) 式易得:

$$dx = \frac{l\gamma}{2p_0} \frac{h^2}{\left(h^2 - \frac{2l\omega h}{p_0 b^2} - \frac{l\omega}{p_0 b}\right)} dh \quad (2)$$

其中定义:

$$\omega = kq = k\bar{u} \cdot b \cdot h \quad (3)$$

积分 (2) 得:

$$x = \frac{l\gamma}{2p_0} \left[h - A \ln(h_1^* - h) + B \ln(h - h_2^*) \right] + C \quad (4)$$

其中:

$$h_{1,2}^* = \frac{l\omega}{p_0 b^2} \pm 2 \sqrt{\frac{l\omega}{p_0 b} \left(\frac{l\omega}{p_0 b^3} + 1 \right)},$$

$$A = -\frac{h_1^{*2}}{h_1^* - h_2^*}, B = -\frac{h_2^{*2}}{h_1^* - h_2^*}$$

C 为积分常数,因此只要测出点 x_I, x_{II} (见图2) 处的液位高度 h_I, h_{II} 则有:

$$\begin{aligned} x_I &= \frac{l\gamma}{2p_0} [h_I - A \ln(h_1^* - h_I) + B \ln(h_I - h_2^*)] + C \\ x_{II} &= \frac{l\gamma}{2p_0} [h_{II} - A \ln(h_1^* - h_{II}) + B \ln(h_{II} - h_2^*)] + C \end{aligned} \quad (5)$$

应用(5)式两个方程对 ω 和 C 求解,再利用(3)式便可直接计算出液相流量 q 来。为了避免求解超越方程(5),可以假定:作用在单元液体上的阻力压降及位势压降具有线性叠加性而分别求解。根据线性叠加性假设可得:

$$\omega = \omega_h + \omega_{p_0}$$

其中: ω_h 和 ω_{p_0} 分别表示阻力压降为零时和位势压降为零时的 ω 值。相应地,考虑到关系(3),分层流型的液相计测模型可写成:

$$q_{LI} = c_{LI} \cdot (\omega_h + \omega_{p_0}) \quad (6)$$

其中: c_{LI} 为分层流型液相计测系数。

2.2 段塞流型液相计测模型

对于单元阻力模型基本关系式(1),当流动发生段塞时,液位有: $h = H$ 而润湿周边为: $2(H + b)$, 并且: $dh = 0$, 于是(1)式化简为:

$$k u 2(H + b) dx = bH \frac{p_0}{l} dx \quad (7)$$

(7)式积分并考虑(3)式得:

$$\omega_{\text{plug}} = \frac{b^2 H^2 p_0}{2(H + b)l} + C \quad (8)$$

因此,段塞流型的液相计测模型可写成:

$$q_{pl} = \alpha_{pl} \cdot \frac{b^2 H^2}{2(H + b)} \cdot \frac{p_0}{l} + \beta_{pl} \quad (9)$$

其中: α_{pl}, β_{pl} 为段塞流型液相计测系数。

2.3 分层流型气相计测模型

$$q_{lg} = c_{lg} \cdot \sqrt{p_0} \cdot (H - \frac{h_I + h_{II}}{2}) b \quad (10)$$

其中: c_{lg} 为分层流型气相流量计测系数。

2.4 段塞流型气相计测模型

假设发生段塞流型时气相和液相平均速度相等

即: $\bar{u}_g = \bar{u}_l = q_{pl}/bH$ 因此,段塞流型的气相计测模型可写成:

$$q_{pg} = c_{pg} \cdot q_{pl} \cdot (H - \frac{h_I + h_{II}}{2})/H \quad (11)$$

其中: c_{pg} 为段塞流型气相流量计测系数。

3 数据采集和处理

从计测模型可以看出,只要通过气阻微差压传感器和液位差压传感器分别测得 h_I, h_{II}, p_0 , 再设法确定各个计测模型的计测系数,即可得到当前温度和压力下的气相和液相流量。

计测系统软件中的流型分类器实现对水平测试管段的流型进行实时跟踪和识别,从而可以对不同流型采用不同的计测模型。利用气、液单相流量计测得的各相流量,通过计测系统软件中的神经网络的分析处理,确定各个计测模型的计测系数,同时建立计测系数与相应特征参量的函数关系。

4 实验结果及讨论

在自建的多相流测试环道上对多相流量计测系统样机进行了大量的模拟现场工况试验,以验证计测模型的有效性和计测精度。

液相最大流量: $200\text{m}^3/\text{d}$; 气相最大流量: $2000\text{m}^3/\text{d}$ 。液相实验介质包括:自来水、机油和含水70%的油水混合液;气相实验介质为空气。

实验数据处理结果如下:图3分别为纯油、纯水和含水70%的油水混合液在不同流量下的计测误差;图4为空气在不同流量下的计测误差,其液相介质分别为纯油、纯水和含水70%的油水混合液。其中:

$$\text{计测误差} = \frac{\text{系统计测流量} - \text{流量计流量}}{\text{流量计流量}} \times 100\%$$

4.1 实验结果

由图3可见,液相计测误差全部位于 $\pm 10\%$ 以内,且正、负误差总体上存在明显的对称性,即计测值不存在系统误差。利用原始数据进行统计,不同误差范围内计测点所占百分比见表1。

由表1可以看出,80%的液相流量计测结果的误差位于 $\pm 5\%$ 的范围之内,96%的计测结果的误差位于 $\pm 8\%$ 的范围之内。

由图4可见,气相计测误差全部位于 $\pm 25\%$ 以内,且正、负误差总体上也存在明显的对称性,即计测

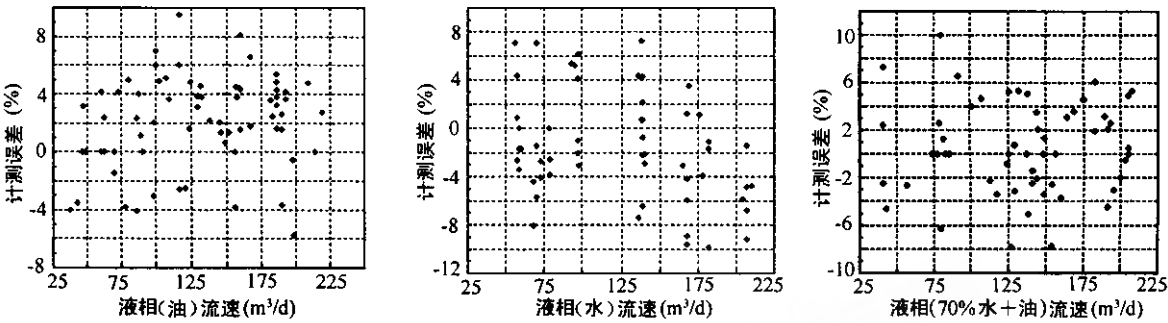


图 3 液相流量计测误差

Fig.3 Measurement errors of liquid phase

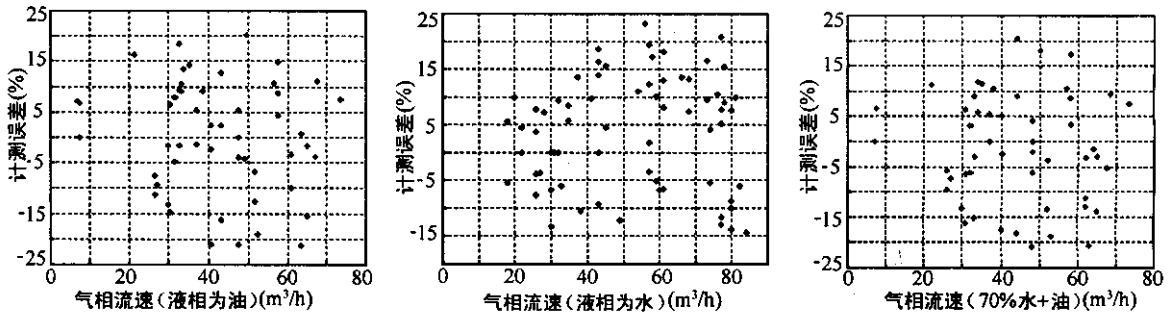


图 4 气相计测误差

Fig.4 Measurement errors of gas phase

值不存在系统误差。利用原始数据进行统计 ,不同误差范围内计测点所占百分比见表 2。

由表 2 可以看出 :83% 的计测结果误差位于 $\pm 15\%$ 的范围之内 ,95% 的计测结果的误差位于 $\pm 20\%$ 的范围之内 ,而计测结果误差位于 $\pm 5\%$ 以内的计测点不足 30%。

表 1 液相计测误差分布统计表

Table 1 Statistics of liquid flowrate errors				
Fig.3	$\pm 5\%$	$\pm 6\%$	$\pm 7\%$	$\pm 8\%$
(a)	85.7	92.9	97.6	97.6
(b)	74.3	81.4	87.1	92.9
(c)	79.3	87.9	93.1	98.3
Ave.	79.8	87.4	92.6	96.3

表 2 气相计测误差分布统计表

Table 2 Statistics of gas flowrate errors				
Fig.4	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$
(a)	34.5	63.6	83.6	92.7
(b)	21.1	62.0	85.9	97.2
(c)	26.0	60.0	80.0	94.0
Ave.	27.2	61.9	83.2	94.6

万方数据

4.2 讨 论

由以上实验结果可见 ,作者构造的单元阻力线性叠加模型可以用于气液两相流量的计测 ,其计测结果不存在明显的系统误差。液相计测误差($< \pm 10\%$)可以满足油田开采管理对多相流量计的精度要求^[2] ;气相计测误差($< \pm 25\%$)偏大。

需要指出的是 :实验计测数据结算周期是 3 分钟 ,考虑到计测正、负误差表现出的对称性 ,以及误差的正态分布属性 ,若适当延长计测周期(如 10 分钟) ,则计测误差可以显著改善。以液相介质为含水 70% 的油水混合液为例 ,其液相计测误差分布直方图如图 5 所示 ,误差位于 $\pm 1\%$ 范围内的计测结果个数占总计测次数的 24% ;其气相计测误差分布直方图如图 6 所示 ,误差位于 $\pm 5\%$ 范围内的计测结果个数占总计测次数的 28%。图 5 和 6 直观地反映了计测误差分布呈现以真值为中心的正态属性。

作者构造的计测模型考虑了液体粘度的影响 ,理论上可适用于不同粘度的流体。实验采用的三种液相流体具有明显不同的粘度 :30℃ 时 :油 78cp、水 1cp、含水 70% 的油 40cp ,计测误差大小及分布并不存

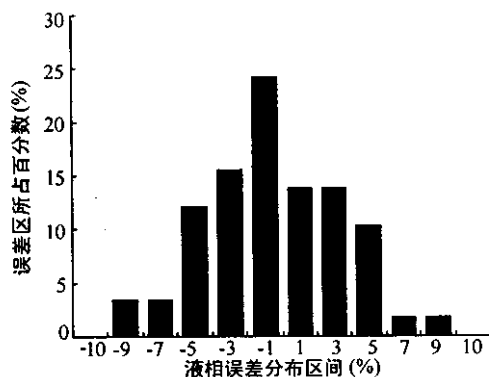


图5 液相误差分布直方图

Fig.5 Bar graph of liquid flowrate errors

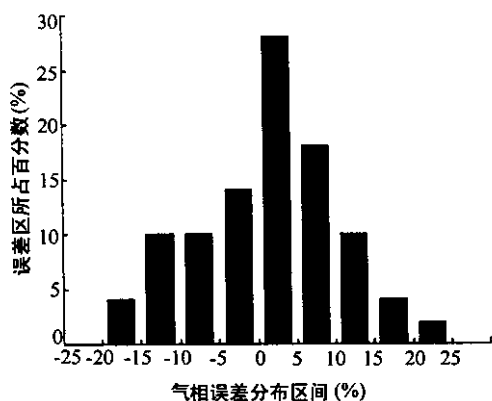


图6 气相误差分布直方图

Fig.6 Bar graph of gas flowrate errors

在明显的差别。这充分验证了计测模型对流体粘度的适应性。

实验工况中,液相最小流量与最大流量的比值约1:6,气相最小流量与最大流量的比值约1:10;而最大气液比约40:1。从实验计测误差大小及分布情况看,计测模型适用于该范围的气、液相流量变化。当

然,气、液相流量变化范围主要由实验环道和计测系统样机的性能参数确定,计测模型的流量适用范围的拓宽需要进一步的实验验证。

5 结论

在水平测试段上的流型可以分为分层流型和段塞流型的基础上,笔者针对不同流型分别提出了基于单元阻力线性叠加模型的液相和气相计测模型。在此基础上研制出了计测系统实验样机和配套计测软件。

通过大量的模拟现场工况实验研究,对计测模型的效果进行评价。实验研究表明:该计测模型充分考虑了流体粘度因素,可以适用于不同粘度的油、水及其混合液的流量计量;计测模型的气、液相流量变化范围得到初步测定,在实验条件下的全范围内,计测误差表现出明显的正、负对称性和正态分布特性,模型计测误差稳定在可接受的范围,适当延长计测周期可以明显改善计测误差。

参考文献:

- [1] 林宗虎. 变幻流动的科学-多相流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [2] OUBA GE. A new look at measurement uncertainty of multiphase flow meters [C]. ASME energy sources tech. Conf. (Houston, 2/2-4/98) Proc. 1998 (PAP NO ETCE98-4661).
- [3] FALCONE G. HEWITT G F. Multiphase flow metering: current trends and future developments [C]. 2001 SPE Annual Tech. Conf. New Orleans, Louisiana, SPE71474.