

多相流体流量测量的采样分流方法

王栋¹, 梁法春², 张炳东¹, 林宗虎¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 中国石油大学
储运与建筑工程学院, 257061, 山东东营)

摘要: 借用数据采集中的采样概念,提出了一种多相流采样分流方法,以获得具有高度代表性的分流体,从而提高多相流体的流量测量精度. 首先,以足够高的频率从被测多相流中采集流量数据(分流体),然后把采集到的分流体分离成单相流体,再分别用单相流量计测量其流量,最后根据采样关系确定被测多相流体的总流量. 由于分流体只占总流量的很少一部分,因此所需分离器的体积可以大幅度缩小,基本接近普通单相流量计的大小. 在油气水三相流实验回路上进行了实验研究,结果表明在实验范围内,采样机构运转平稳、可靠,获得的分流体具有足够高的代表性,测量结果与流型无关,千度偏差小于2%,总流量的测量不确定度小于3.82%.

关键词: 采样;分流;流量测量;多相流

中图分类号: O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)01-0103-05

Multiphase Flow Measurements by Flow Sampling

WANG Dong¹, LIANG Fachun², ZHANG Bingdong¹, LIN Zonghu¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Transport & Storage and Civil Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

Abstract: A flow sampling method and an apparatus for the measurement of multiphase flow rate were proposed. The principle of flow sampling is similar to that of data sampling in data acquisition process. After a sample is extracted from the multiphase flow, it is separated into single phase flows, which are metered with conventional flow meters respectively. The total flow rate of each phase is determined according to the metered values and the sampling relation. Because the sample is only a very small fraction of the total flow, the separator can be reduced greatly in size to as small as a single phase flow meter. Experiments were conducted in an air-water-oil multiphase flow test loop. The inside diameter of the loop was 50 mm, and the superficial gas velocity varied from 4.5 to 22 m · s⁻¹; the liquid superficial velocity was in the range of 0.02-0.32 m · s⁻¹; the oil concentration was in the range of 0.0%-60% by volume. The flow pattern in the experiments included stratified flow, wave flow and annular flow. The experimental results show that the flow sampling method and apparatus could be feasible to measure the multiphase flow rate, and the average uncertainty of flow rate measurements for each phase was less than 3.82%.

Keywords: flow sampling; flow extraction; flow measurement; multiphase flow

在石油、化工、能源动力等工业领域中常需要测量和控制多相流体的流量和组分,例如在石油热采中,注入油井中的蒸汽是一种含有大量水分的蒸汽-水两相流体,为了取得最佳注汽效果,就需要准确测

量和控制这种蒸汽的流量和干度. 另外,从油井流出的产物一般都是油-气-水三相流体,生产上非常需要一种三相流量计来测量其流量和组分,以取代传统的分离测量设备. 经过30多年的研究,多相

流量测量技术有了很大的发展,出现了多种类型的测量方法,如射线法、差压流量计法、质量流量计法、粗分离法,以及各种基于电学、声学 and 光学的测量方法^[1-3]. 这些方法的一个共同特点是,直接将传感器置于或面向多相流体进行测量. 由于多相流动十分复杂,流动过程常伴有强烈的不稳定性 and 随机性,因而导致测量仪表总是处于极度的不稳定状态,其可靠性和稳定性始终难以保证,甚至根本不能工作,严重影响了流量测量精度. 王栋等提出的分流分相法^[4-5],以另一种新的方式实现了对多相流体流量的测量. 该方法的基本思路是,首先成比例地从多相流中分流出一小部分(1%~20%)有代表性的多相混合物(分流体),然后将其分离成单相流体,并用常规流量计测量其各相流量,最后再根据比例关系将测量值换算成总流量. 由于进入分离器的流体只占总流量的很少一部分,因此所需分离器的体积可以大幅度缩小,达到一个普通仪表的大小. 这样既将多相流体的流量测量转化成了单相流体的流量测量,从根本上保证了测量仪表的稳定性、可靠性和测量精度,同时又具有很小的仪表体积. Andreussi 的方法在测量原理上也与此相仿^[10]. 很显然,分流分相法的关键在于分流方式. 无论采用什么方式,分流出的流体都必须具有一定的代表性,代表性愈高,总流量的测量精度也愈高. 目前采用的分流方式主要有,王栋提出的三通型^[6]、取样管型^[7]和转鼓型^[8],梁法春的管壁取样式^[9]以及 Andreussi 的皮特管式^[10]. 这些分流方式在一定范围内都取得了比较好的效果. 为了进一步提高分流效果,扩大测量范围,本文借用数据采集中的采样概念,提出了一种多相流体采样分流方法,以获得具有高度代表性的分流体,从而提高多相流体的流量测量精度. 本文首先讨论了采样分流的基本原理,然后研究了这种分流原理的实现方式,并在油-气-水三相流实验回路上进行了实验研究,证明该方法切实可行.

1 采样分流原理

模仿数据采集中的采样过程,可以相应地组成多相流体的采样分流系统. 图 1a 是采样分流器,其作用相当于一个采样开关. 在采样分流过程中,采样分流器以一定的周期 T 将多相流体整体导入分流回路,每次持续时间为 Δt ,于是在分流回路内就得到了一个离散的流量序列(分流体),如图 1b 所示,这一过程就相当于对多相流进行采样. 图 1b 中的曲线表示任一相流量 Q_j 随时间的变化情况,阴影

部分为所采集的离散流量序列. 由于 Δt 远小于 T ,因此进入分流回路的流体只占总流量的很少一部分. 根据采样定理^[11],只要采样频率高于原连续信号中最高频率的 2 倍,则由离散信号就可以无失真地恢复原信号. 即只要满足采样定理,不管多相流体的流量如何变化或呈何种流型,由采样分流得到的离散流量序列总能代表总流量,通过分流体可以确定总流量. 对于工程实际中的大多数多相流,因其流量变化频率都比较低,采样定理是很容易自动满足的. 这就是采样分流的最大优点.

当由上述采样分流方式获得的离散流量序列进入分流回路后,由于管道和分离器的缓冲作用,很快会变成一股连续的多相流,其流量大小为 q_j ,如图 2 所示. 根据质量守恒关系,可以得出一个采样周期内进入分流回路的多相流体质量(图 1b 和图 2 中的阴影面积)为

$$\Delta m_j = \Delta t Q_j = T q_j \tag{1}$$

由式(1)可以得出总流量与分流体流量的关系

$$Q_j = q_j \frac{T}{\Delta t} \tag{2}$$

定义分时比为

$$\mu = \frac{\Delta t}{T} \tag{3}$$

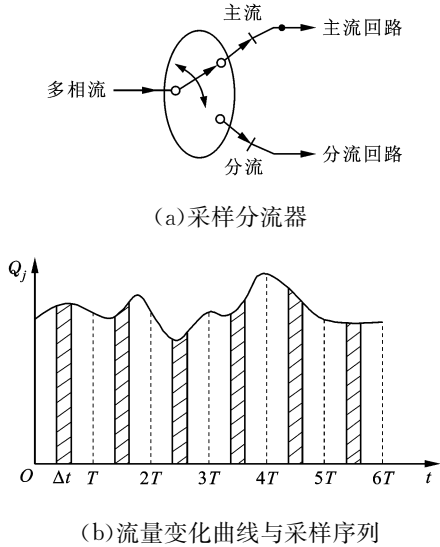


图 1 采样分流原理图

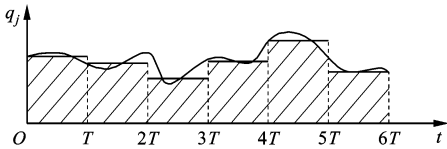


图 2 分流回路中的流量随时间变化曲线

将式(3)代入式(2),可以得到

$$Q_j = \frac{q_j}{\mu} \text{ 或 } \mu = \frac{q_j}{Q_j} = k_j \quad (4)$$

式中: k_j 定义为分流比或分流系数,即分流体流量与总流量的比值. 式(4)表明,分时比与分流比相等,一旦确定了分时比,就可以根据式(4)由分流体流量 q_j 确定总流量 Q_j . 由于分流体只占总流量的很小一部分,因此可以用一个很小的分离器将其分离成单相流体,然后精确测量其流量,从而最终保证多相流体总流量的测量精度. 式(4)虽然表示的是总流量的离散值,但对于工程实际中的大多数多相流,由于其流量变化频率都比较低,而且工程上更关注一段时间内的平均流量,因此如果对式(4)两边求平均值,也可以表示分流体流量与总流量之间平均值的关系. 这就是应用采样分流方法测量多相流体流量的基本原理.

2 采样分流原理的实现方法

由图1可知,采样分流是一种动态分流方法,需要多相流体在两个回路之间不断进行切换,而且这种切换必须以平稳的方式进行,在切换过程中不应多相流施加任何附加作用,不影响流动方式和流量大小. 如何用一种简单的机构实现这一功能,是采样分流法所要解决的关键问题. 图3是本文提出的采样分流器结构示意图,主要由一个转轮和围绕转轮分布的支路通道组成. 多相流体从转轮中心进入内部流道,再由外缘上的出口流向与之相对的支路通道内. 因此,外缘上的出口位置就决定了多相流体的流向,通过转轮的旋转就可以实现多相流在两回路之间周期性地平稳切换. 转轮既可以由电机驱动,也可以由多相流体本身推动. 由图3可以看出,在一个旋转周期内,多相流体流向分流支路通道的时间,也就是采样时间为

$$\Delta t = \frac{L}{R\omega} \quad (5)$$

分流周期为

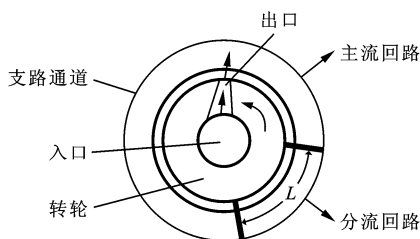


图3 采样分流器结构示意图

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (6)$$

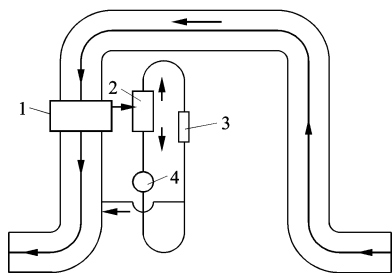
根据式(3),分时比为

$$\mu = \frac{\Delta t}{T} = \frac{L}{R\omega} \frac{\omega}{2\pi} = \frac{L}{2\pi R} \quad (7)$$

式中: L 为分流支路通道的入口宽度(弧长); R 为转轮半径; ω 为转轮的角速度. 从式(7)可以看出,分时比只取决于转轮和支路通道的几何参数,而与转速和流体的物性无关. 当转速变化时,旋转周期和分流时间都会变化,但分时比仍为一恒定值. 根据式(4)的关系,确定了分时比也就确定了分流比. 但是,式(4)是在理想条件下得到的,对于实际分流器,分流系数还应进一步通过实验来确定.

3 实验系统

如图4所示,分流测量装置安装在一个倒U型管的下降侧,倒U型管连接在水平实验回路内,在倒U型管的上游布置了100倍管径长的直管段. 实验转轮的半径为50 mm,分流支路通道的入口宽度 $L=15.71$ mm,根据式(7),分时比(分流比)的理论值等于0.05. 转轮由流体直接驱动,转速近似与混合物的流速成正比. 在实验范围内,采用高速摄像的方法观察到的转速范围为400~2 000 r/min(旋转周期 $T=0.15\sim0.03$ s). 在分流回路内设置了气液分离器,气体从分离器上部流出,经文丘里管流量计测量后返回主流管道;液体从分离器下部流出,直接进入计量泵中进行计量,然后返回主流管中. 当液体中不含油时,其流量应用电磁流量计测量. 实验管道内径等于50 mm,采用透明有机玻璃管制作,以便于观察流型. 实验介质为空气、水和10号机油. 实验回路中的空气总流量采用涡街流量计测量,水流量采用孔板流量计测量,油流量应用椭圆齿轮流量计计量. 空气的折算流速 U_{SG} 范围为4.5~22 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,液相的折算流速 U_{SL} 范围为0.02~



1:分流器;2:分离器;3:气体流量计;4:液体流量计

图4 实验装置

$0.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 液体的含油率(体积分数 φ)变化范围为 $0\% \sim 60\%$. 实验中出现的流型包括分层流、波状分层流和环状流. 在实验范围内, 由于气相的强烈搅动作用, 油水之间始终处于均匀混合状态, 表现为水包油或油包水型态, 未出现油水分层现象.

4 实验结果

实验首先考核了分流器的运转情况, 发现在各种流型下转轮均能平稳运转, 能够克服由于多相流体流动不稳定性所造成的冲击. 在实验范围内, 转速与混合物的流速近似成正比. 在此基础上测试了分流体的代表性, 对比了分流体干度与进口干度的差别. 干度定义为气体的质量流量与多相流总流量的比值. 然后, 测定了分流器的分流系数值, 并与理论值进行了对比, 接着测量了液相含油率对分流系数的影响, 最后用标定的分流系数值进行总流量测量, 并测定了流量测量误差.

4.1 分流体的代表性

图5是分流体的干度 X_3 与进口干度 X_1 的比较曲线. 从图中可以看出, 在实验范围内 X_3/X_1 很接近于1, 两者的最大差值不超过2%. 这说明分流体是被测多相流体的一个很好样品, 具有足够高的代表性.

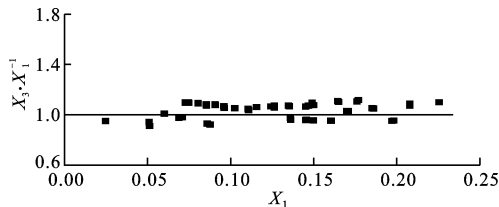


图5 分流回路干度与进口干度的比较

4.2 分流系数值

图6是液相分流系数 K_L 和气相分流系数 K_G 的实验结果, 实验中液相含油率等于0. 从图中可以看出, K_L 和 K_G 都与理论值(0.05)有一定的距离, 随着液相折算流速的增大, 两者逐渐接近并取得稳定值, 总体上都比理论值大. 这一现象可以解释如下, 由于一部分流体在分流过程中通过转轮与壳体之间的间隙(该间隙在本实验中为 1.5 mm)直接旁路到了分流回路, 从而使实际分流体流量超过了理论值. 当液相流量较大时, 旁路比例取得相对稳定值, 分流系数也就取得稳定的值. 显然, 通过提高加工精度, 缩小转轮与壳体之间的间隙, 是有助于减小旁路影响、提高分流系数精度的. 从图中还可以看

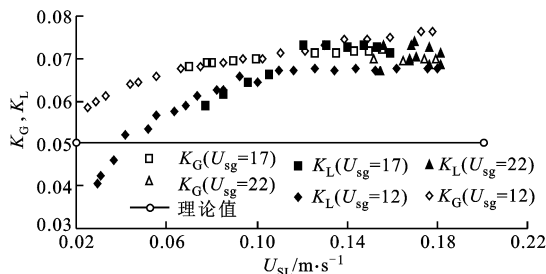


图6 分流系数实验结果

出, 气相流速对分流系数的值没有明显影响.

4.3 含油率对分流系数的影响

图7示出了含油率对气相分流系数的影响情况. 从图中可以看出, 当含油率大于50%时, 将会使 K_G 约下降10%, 而当含油率低于50%时对 K_G 没有明显影响. 图8示出了含油率对液相分流系数的影响. 从图中可以看出, 除含油率为60%的实验点(低7%)外, 其他实验点都落在同一条线上.

由上述实验得出的分流系数可以作为分流器的标定值, 用来确定液相与气相的总流量. 当测定了分流体流量后, 就可以根据式(4)确定总流量. 实验结果证明, 总流量的平均不确定度不超过3.82%.

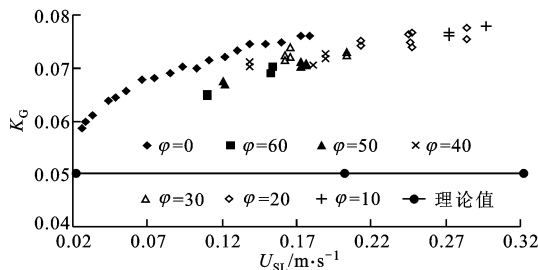


图7 含油率对气相分流系数的影响

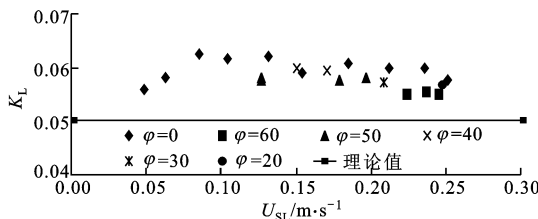


图8 含油率对液相分流系数的影响

5 结论

通过上述理论分析和实验研究, 可以得出如下结论.

采样分流过程相当于一种数据采样过程, 只要满足采样定理, 所获得的分流体就具有高度的代表性, 通过测量分流体流量能够确定被测多相流的总

流量. 由于分流体只占总流量的很少一部分, 因此所需分离器的体积就可以大幅度地缩小, 基本接近普通单相流量计的大小. 本文提出的采样分流器结构简单, 运转平稳可靠, 能够实现采样分流的功能. 分流系数的理论值只取决于结构参数, 与转速和流体的物性无关. 实测分流系数高于理论值, 主要原因是由于转轮与壳体之间的间隙过大, 造成一部分流体旁通到分流回路, 使实际分流体流量高于理论值. 通过提高分流器的加工精度, 有利于减少这种旁路的影响, 从而提高分流系数的精度和流量测量精度. 在实验范围内, 气体流速和液体含油率对分流系数没有明显的影响. 在本文实验范围内, 应用标定的分流系数确定三相流体的总流量时, 其不确定度小于3.82%. 有关结构和其他因素对测量误差的影响, 还有待于今后更深入的研究.

参考文献:

- [1] THORN R, JOHANSEN G A, HAMMER E A. Recent development in three-phase flow measurement [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 8 (7): 691-701.
- [2] CHA J E, AHN Y C, KIM M H. Flow measurement with an electromagnetic flowmeter in two-phase bubbly and slug flow regimes [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2002, 12 (5/6): 329-339.
- [3] GYSLING D L, KERSEY A D, PADUANO J D. Fluid parameters measurement in pipes using acoustic pressures; US, 6354147 [P]. 2002-03-12.
- [4] WANG Dong, LIN Zonghu. Gas-liquid two-phase flow measurement using ESM [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26(6/7): 827-832.
- [5] 王栋, 林宗虎. 气液两相流体流量的分流分相测量法 [J]. *西安交通大学学报*, 2001, 35(5): 441-444.
WANG Dong, LIN Zonghu. Extracting and separating method for gas-liquid two-phase flow measurement [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2001, 35 (5): 441-444.
- [6] 王栋, 林益, 林宗虎. 利用 T 型三通测量气液两相流体的流量和干度 [J]. *热能动力工程*, 2002, 17(4): 336-338.
WANG Dong, LIN Yi, LIN Zonghu. Measurement of flow rate and dryness of a vapor-liquid two-phase fluid by using a T-junction [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2002, 17(4): 336-338.
- [7] 王栋, 林益, 林宗虎. 取样管型分流分相式气液两相流体流量计 [J]. *工程热物理学报*, 2002, 23(2): 235-237.
WANG Dong, LIN Yi, LIN Zonghu. A ESM type gas-liquid two-phase flow meter with sampler tubes as distributor [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2002, 23(2): 235-237.
- [8] 王栋, 林益, 林宗虎. 转鼓分流分相式气液两相流体流量测量技术研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2002, 36 (5): 457-460.
WANG Dong, LIN Yi, LIN Zonghu. Extracting and separating method type gas-liquid two-phase flow meter by using rotational drum as distributor [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2002, 36(5): 457-460.
- [9] 梁法春, 王栋, 林宗虎. 基于管壁取样的气液两相流量测量 [J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(1): 52-55.
LIANG Fachun, WANG Dong, LIN Zonghu. Gas-liquid two-phase flow metering with pipe wall sampler [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42 (1): 52-55.
- [10] ANDREUSSI P. Method for measuring the flow rates of the single phases in a multiphase fluid stream and relevant apparatus; US, 6546809B1 [P]. 2003-04-15.
- [11] 马明建. 数据采集与处理技术 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2005: 10-29.

(编辑 荆树蓉)