

# 漂移流模型在水平间歇流动中的应用

李志彪<sup>1</sup>, 许晶禹<sup>2</sup>, 吴应湘<sup>2</sup>

(1. 中国石油天然气股份有限公司规划总院, 北京 100083; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

## 摘 要

研究了漂移流模型在水平间歇流动中的应用。间歇流动是水平气液两相流中最常见的一种流态, 含气率是两相流的基本参数之一。利用射线系统在长 30m、直径为 50mm 的水平管内测量了以空气-水为介质的间歇流动的含气率。根据漂移流模型的原理提出了一种模型参数的确定方法, 并利用实验数据对该方法得到的参数进行了验证, 结果表明该方法得到的参数能更准确地描述水平间歇流动。

**关 键 词:** 漂移流模型; 间歇流动; 含气率

## 0 引言

间歇流动是气液两相流中最常见的一种流动形态。含气率代表着两相流动中的相分布情况, 是决定两相流内部结构的基本参数之一。在含气率计算中, 应用最广泛的是 Zuber-Findlay<sup>[1]</sup> 漂移流模型。该模型同时考虑了截面上的速度分布、相含率分布以及两相间的相对速度。

漂移流模型在垂直两相流动中应用非常广泛<sup>[2,3,4]</sup>, 但在水平两相流动中的应用却较少。在油田现场中的水平油气混输管道大部分都处于间歇流动状态, 本文用漂移流模型研究水平气液两相间歇流动及模型参数的确定方法。

在漂移流模型中, 须由实验确定的参数分别是分布参数  $C_0$  和漂移速度  $V_d$ 。目前, 主要是通过通过对实验数据进行线性拟合来确定漂移流模型的参数, 本文在理论分析的基础上提出了一种模型参数确定的方法。实验结果证明, 本文提出的方法确定的模型参数能更准确地描述水平间歇流动。

## 1 漂移流模型

漂移流模型是 Zuber 与 Findlay(1965)提出的, 该模型是在热力学平衡的假设下, 建立在两相平均速度场基础上的一种模型。漂移流模型提出了漂移速度的概念, 当两相流以某一混合速度流动时, 气相相对于这个混合速度有一个漂移速度, 液相则有一个反向的漂移速度以保持流动的连续性。在守恒方程中将相间相对速度以漂移速度来考虑, 通过附加的气相连续方程来描述气液相流动。

对任一参数  $F$  采用下述两种平均值定义:

$$\text{按截面平均} \quad \langle F \rangle = \frac{1}{A} \int_A F dA \quad (1)$$

式中,  $A$  为流通截面积,  $m^2$ ; 符号“ $\langle \rangle$ ”表示按截面积取平均, 下同。

$$\text{按含气率权重平均} \quad \bar{F} = \frac{\langle \alpha F \rangle}{\langle \alpha \rangle} \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为含气率; 符号“-”表示按含气率取平均, 下同。

由漂移速度定义  $V_G = V_m + V_d$ , 可得出:

$$\langle V_G \rangle = \langle V_m \rangle + \langle V_d \rangle \quad (3)$$

式中,  $V_G$  为气相速度,  $m/s$ ;  $V_m$  为气液相混合速度,  $m/s$ ;  $V_d$  为漂移速度,  $m/s$ 。

$$\langle V_{SG} \rangle = \langle \alpha V_G \rangle = \langle \alpha V_m \rangle + \langle \alpha V_d \rangle \quad (4)$$

式中,  $V_{SG}$  为气相表观速度, m/s.

$$\bar{V}_G = \frac{\langle \alpha V_G \rangle}{\langle \alpha \rangle} = \frac{\langle V_{SG} \rangle}{\langle \alpha \rangle} = \frac{\langle \alpha V_m \rangle}{\langle \alpha \rangle} + \frac{\langle \alpha V_d \rangle}{\langle \alpha \rangle} = \frac{\langle \alpha V_m \rangle}{\langle \alpha \rangle \langle V_m \rangle} \langle V_m \rangle + \bar{V}_d \quad (5)$$

分布参数  $C_0$  为

$$C_0 = \frac{\langle \alpha V_m \rangle}{\langle \alpha \rangle \langle V_m \rangle} \quad (6)$$

因此

$$\bar{V}_G = C_0 \langle V_m \rangle + \bar{V}_d \quad (7)$$

由此可得:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\langle V_{SG} \rangle}{\bar{V}_G} = \frac{\langle V_{SG} \rangle}{C_0 \langle V_m \rangle + \bar{V}_d} \quad (8)$$

上式即为Zuber-Findlay漂移流模型含气率计算式。在上面的计算中  $V_m$  及  $V_{SG}$  本身就是截面平均值, 所以均可以去掉“ $\langle \rangle$ ”符号。于是有

$$V_G = \frac{V_{SG}}{\alpha} = C_0 V_m + V_d \quad (9)$$

或

$$\alpha = \frac{V_{SG}}{C_0 V_m + V_d} \quad (10)$$

式(10)即为Zuber-Findlay漂移流模型计算式。这里  $V_m$  是混合速度,  $C_0$  是分布参数, 它考虑了速度和含气率空间分布不均匀的影响。如果两相混合均匀,  $C_0$  的值约等于 1。  $V_d$  是气相漂移速度, 它考虑了相间局部相对速度的影响。如果两参数和表观速度已知的话, 可以计算出含气率。含气率的预测精度与所选取的参数值有关。

如果漂移流模型中的参数  $C_0$  和  $V_d$  已知, 就可以通过(10)式来计算含气率。根据公式(9)可以建立如下目标函数:

$$E_{V_G} = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{V_{SG_i}}{\alpha} \right) - (C_0 V_{m_i} + V_d) \right]^2 \quad (11)$$

式(11)取最小值时可以确定漂移流模型参数  $C_0$  和  $V_d$ , 式中  $n$  是总的实验点数。利用漂移流模型的目的是预测含气率, 理论上确定模型参数的更好的方法是利用测量含气率和预测含气率之间的误差最小这一原则来确定:

$$E_\alpha = \sum_{i=1}^n \left[ \alpha_i - \left( \frac{V_{SG_i}}{C_0 V_{m_i} + V_d} \right) \right]^2 \quad (12)$$

公式(11)的实质是寻找  $\frac{V_{SG}}{\alpha}$  与  $(C_0 V_m + V_d)$  之间的关系, 可以通过线性拟合得到  $C_0$  和  $V_d$ 。公式(12)

的实质是寻找  $\alpha$  与  $\left( \frac{V_{SG_i}}{C_0 V_{m_i} + V_d} \right)$  之间的关系。衡量系数是否合理的指标是:  $E = \sum_{i=1}^n [\alpha_{M_i} - \alpha_{P_i}]^2$  越小越好,

式中,  $\alpha_M$  是含气率测量值,  $\alpha_P$  是含气率预测值。

## 2 实验系统

本文的实验工作是在中国科学院力学研究所应用流体力学实验室的多相流实验平台上进行的。实验管段长约 30m, 直径 50mm。该平台可以进行空气-水、油-水两相流动或油-气-水三相流动特性研究。

本文的实验介质是空气和水。含气率是采用自制的射线系统测量的<sup>[5]</sup>。射线源为放射性同位素镅( $^{241}\text{Am}$ ), 活度为 3.7GBp, 发射出的  $\gamma$ -射线光子能量为 59.2keV。放射性同位素置于一个厚铅罐内防止射线造成危害。在铅罐底部开有直径 20mm 的准直孔,  $\gamma$ -射线从准直孔中输出。同时在铅罐上装有机械开关可以打开或关闭射线输出以保证操作安全。

NaI 晶体是最常用的闪烁体探测器, 它有很高的探测效率。实验中用到的探测器 NaI 晶体是直径为 40mm、厚 40mm 的圆柱体, 与光电倍增管组合在一起制成一个闪烁体探测器。该组合探测器外径 55mm, 总长度为 220mm。在探测器顶部安置了一个长 50mm、宽 30mm、高 150mm 的准直孔。

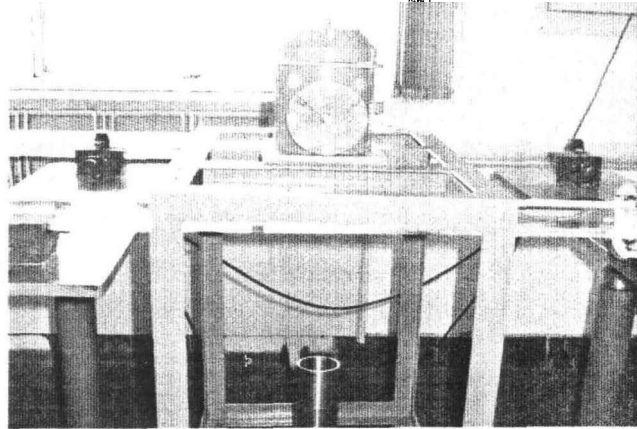


图1 射线系统示意图

射线系统中的测量电路是多通道系统, 系统以光子脉冲计数方式工作。它主要有射线源、高压电源、前置放大器、脉冲成型放大器、可编程脉冲计数器采集板等部件组成。

### 3 模型参数确定方法

模型参数依赖于流型, 但在实际应用中并不能提前知道具体的流动形态, 同时塞状流和弹状流之间的界限很难确定, 于是, 寻找一种适用整个间歇流动的模型参数的确定方法是非常必要的。

随着体积含气率的增大, 在相同的混合速度下, 流型逐渐发生变化, 也就是说体积含气率包含有流型的相关信息。

要想确定参数 $C_0$ , 必须知道相分布, 但是, 一般情况下不知道相的分布情况。然而, 在分析理想水平流动的基础上可以估算 $C_0$ 的值。间歇流动是分层流和泡状流(如果液塞中含有气泡的话)的结合, 假设液塞中不含气泡, 则间歇流动是分层流和单相流动的结合, 如图2所示。

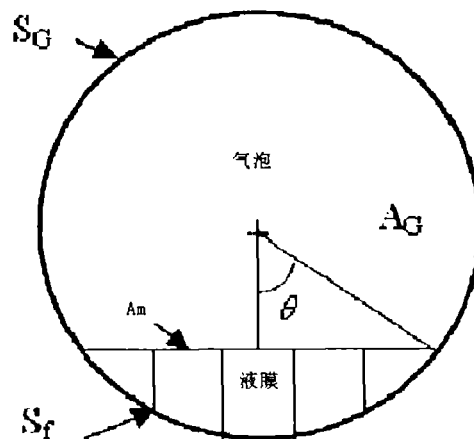


图2 分层流动结构示意图

由 $C_0$ 的定义可以得到

$$C_0 = \frac{1}{A(\alpha)/V_m} \left( \int_{A_L} \alpha V_m dA + \int_{A_m} \alpha V_m dA + \int_{A_G} \alpha V_m dA \right) \quad (13)$$

式中的下标  $G$ ,  $L$ ,  $m$  分别表示全气相区, 全液相区和混合区,  $A$  是管道横截面积,  $m^2$ 。

如果在液相区没有气泡, 则在液相区的积分为0。如果假设混合区面积与管道横截面积相比非常小 ( $A_m/A \ll 1$ ), 即在分层流的情况下, 上式可以简化为

$$C_0 \cong \frac{V_G}{V_m} \quad (14)$$

因为  $V_G = V_{SG}/\alpha$ , 所以有

$$C_0 = \frac{V_{SG}/\alpha}{V_m} \quad (15)$$

也就是说, 在分离流动中,  $C_0 = \frac{V_G}{V_m} = \frac{V_{SG}}{\alpha} \frac{1}{V_m} = \frac{1}{\alpha} \beta$ , 假设模型参数是体积含气率  $\beta$  的函数,

$$C_0 = a_1 \beta + a_2 \quad V_d = a_3 \beta + a_4 \quad (16)$$

式中  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  是待定系数, 把式(16)代入式(12)可得新的目标函数:

$$E_\alpha = \sum_{i=1}^m \left[ \alpha_i - \left( \frac{V_{SGi}}{(a_1 \beta + a_2) V_{mi} + (a_3 \beta + a_4)} \right) \right]^2 \quad (17)$$

这样就可以通过该目标函数得到模型参数与体积含气率之间的关系。

图3中横坐标是含气率测量值, 纵坐标是含气率预测值。图3(a)是利用公式(11)所述方法取得模型参数, 然后对预测值和实验值进行比较。图3(b)是利用本文提出的方法确定模型参数, 然后对预测值和实验值进行比较。对比图(a)和图(b)可以看出, 本文提出的方法得到的模型参数预测值比公式(11)所述方法得到的模型参数预测值更接近于测量值。

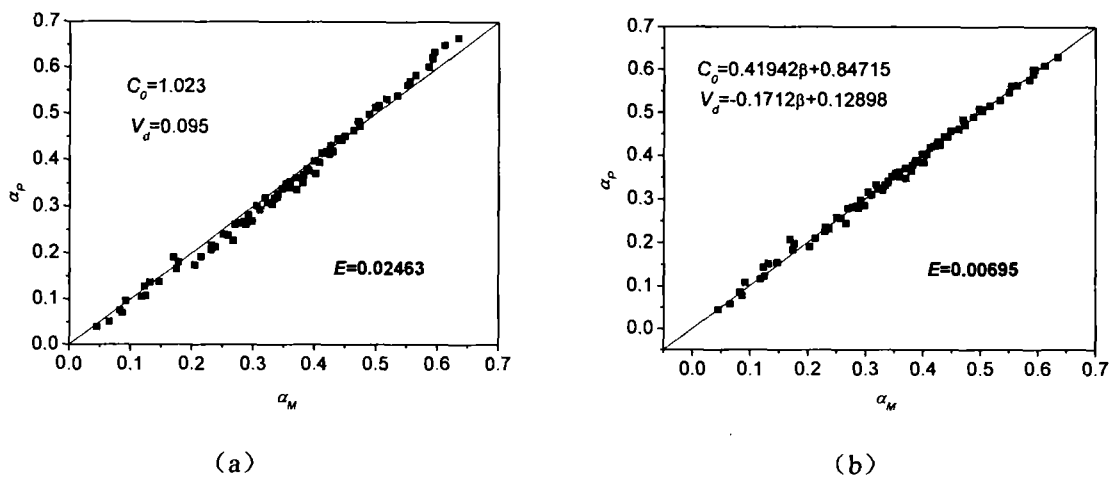


图3 公式(11)所述方法与本文提出方法比较

## 4 结论

① 对漂移流模型在水平气液两相间歇流动中的应用进行了研究, 结果表明漂移流模型可以很好地描述水平间歇流动。

② 根据漂移流模型原理提出了一种由实验数据确定模型参数的方法。并把该方法得到的模型参数与其他方法得到的模型参数进行了实验验证, 结果表明该方法能更好地描述水平间歇流动。

**参考文献:**

- [1] ZUBER N, FINDLAY J A. Average volumetric concentration in two-phase flow system [J]. J. Heat. Trans. Transactions of the ASME 1965(87):453-468.
- [2] GODA H, HIBIKI T. Drift-flux model for downward two-phase flow [J]. Int. J. Heat and Mass Transfer 2003(46): 4835-4844.
- [3] GUET S, OOMS G. Bubble size effect on low liquid input drift-flux parameters [J]. Chemical Engineering Science 2004(59): 3315-3329.
- [4] 孙奇, 赵华, 等. 垂直上升两相流漂移流模型研究 [J]. 核动力工程, 2006(27):40-44.
- [5] 李志彪, 吴应湘. 射线衰减法在水平气液两相流动流型识别中的应用 [J]. 中国造船, 2007, 48 增刊:398-404.

## Application of Drift-Flux Model in Horizontal Gas-Liquid Two-Phase Intermittent Flow

LI Zhi-biao<sup>1</sup>, XU Jing-yu<sup>2</sup>, WU Ying-xiang<sup>2</sup>

(1. PetroChina Planning&Engineering Institute, Beijing 100083, China;

2. Institute of mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

### Abstract

This article studies the application of drift-flux model in horizontal gas-liquid two-phase intermittent flow. Intermittent flow is a most common flow pattern in horizontal gas-liquid two-phase flow and void fraction is one of the essential parameters. Experiments are carried out in horizontal pipes of 50mm i.d and 30m long with air and water. A method of determination model parameters is developed on basis of drift-flux model and the test result shows that this method is more exact for horizontal intermittent flow.

**Key words:** drift-flux model; intermittent flow; void fraction

### 作者简介

李志彪 男, 1979 年生, 工程师。现从事海洋工程及多相流动方面的研究工作。

许晶禹 男, 1975 年生, 博士。现从事海洋工程及多相流动方面的研究工作。

吴应湘 男, 1956 年生, 博士, 博士生导师, 研究员。主要从事流体力学、海洋工程力学、水动力学及多相流体力学研究。