

## 用于测量气固两相流质量流量的梯度相关方法<sup>①</sup>

王一鸣<sup>②</sup> 于海波 何建宇 郭永红 刘禾

(中国农业大学电子电力工程学院)

张宝芬 彭黎辉

(清华大学)

**摘要** 借助一种新的阵列式电容传感器、信号测量组合电路和梯度相关信号处理方法,直接测量了气固两相流中分离相的质量流量和平均流速。在气固两相流试验装置上的试验结果表明,在较低浓度情况下用梯度相关方法能够直接测量气固两相流的质量流量与平均流速。

**关键词** 梯度相关法; 气固两相流; 质量流量; 测量

**中图分类号** TM938.82

## Correlation Gradient Method for Measuring the Mass Flow in Two Phase Flow Cases

Wang Yiming Yu Haibo He Jianyu Guo Yonghong Liu He

(College of Electronic and Electric Power Engineering, CAU)

Zhang Baofen Peng Lihui

(Tsinghua University)

**Abstract** By using a new array capacitance sensor, a measuring circuit and a complex circuit, the rate of flow and average velocity of the mass flowing in two phase flow can be measured directly. A theoretical model is developed. The results obtained from the test have been shown that there is a good agreement between the theory and practice.

**Key words** correlation gradient method; gas-solid two phase flow; mass flow; measurement

在电力、冶金、化工、食品、农业等工农业生产过程中,大量存在气固两相流流动。气固两相流质量流量测量对于节能和控制具有重要意义。从60年代至今,渡越时间相关测量技术经历了较长的发展过程,在测量理论与实际应用等方面都取得了重大进展。由于相关测量技术具有非接触测量的特点,有很宽的测量范围和较高的测量精度,尤其适用于一些所谓“难测”流体速度与流量的测量,因此,它不仅在各个科研领域,而且在工业界受到重视并得到推广应用。

然而,大量的研究表明,渡越时间相关方法的测量结果存在着某些不确定性,表现在利用该方法测出的流速一般都高于平均流速,尤其是在层流段,二者之间的误差可高达40%。在层流与紊流段,二者呈线性关系,可以利用标定的方法引入修正系数求出流体的平均流速和流

收稿日期:1996-09-25

①国家自然科学基金资助项目

②王一鸣,北京清华东路17号中国农业大学(东校区)63信箱,100083

量,但在层流与紊流之间的过渡段,曲线呈现多值性,不能利用标定的方法消除测量的系统误差。本文介绍的梯度相关方法为解决这个问题提供了一条新的途径,该方法以多个粒子的位置概率分布为基础直接测量气固两相流中分离相的平均流速和质量流量。

## 1 梯度相关法的原理

气固两相流体测量装置中,信号接收装置将固体颗粒流经传感器时引起的电磁场扰动转换为电信号。假定单个颗粒在位置  $r_i$  时的作用函数  $T(r_i)$  表示,如果颗粒浓度较低,传感器获得的信号  $S(t)$  则可用单个颗粒作用的线性叠加表示,即

$$S(t) = \sum_{i=1}^N T(r_i)$$

式中  $N$  为传感器敏感体积  $\Omega$  内的固体颗粒总数。信号  $S_1(t)$  与  $S_2(t)$  的互相关函数为

$$\Phi_{12}(\tau) = E \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N T_1(r_i) T_2(r'_k) \right\}$$

$$C_{12}(\tau) = \Phi_{12}(\tau) - \bar{S}_1 \bar{S}_2 = \varphi E_u \{ \Phi_{T_{12}}(u) \} + \frac{N(N-1)}{|\Omega|^2} \bar{T}_1 \bar{T}_2 - \bar{S}_1 \bar{S}_2$$

其中  $u = r'_k - r_i$ , 为颗粒在时间  $\tau$  内移动的距离。有

$$\Phi_{T_{12}}(u) = \int T_1(r) T_2(r+u) dr$$

易见  $N \rightarrow \infty$  时,有  $N(N-1) \bar{T}_1 \bar{T}_2 / |\Omega|^2 = \bar{S}_1 \bar{S}_2$ , 即  $\varphi = (\bar{S}_1 \bar{S}_2 / \bar{T}_1 \bar{T}_2)^{1/2}$ 。采用几何平均值时,有

$$Q = [C_{11}(0) C_{22}(0)]^{1/2} = \varphi [\Phi_{T_{11}}(0) \Phi_{T_{22}}(0)]^{1/2} \quad (1)$$

假定在时间  $\tau$  内所有颗粒以平均速度  $\bar{v}$  移动了距离  $u$  时,对协方差函数作梯度运算,则有  $\dot{C}_{12}(\tau) = \varphi E_v \{ v \text{grad} \Phi_{T_{12}}(v\tau) \}$ ; 当  $\tau=0$  时,有  $\dot{C}_{12}(0) = \varphi \text{grad} \Phi_{T_{12}}(0) E_v(v)$ 。对于直管系统只需要其一维形式,即

$$\dot{C}_{12}(0) = \varphi \text{grad} \Phi_{T_{12}}(0) \cdot \bar{v} \quad (2)$$

式(2)说明,两信号互协方差函数在  $\tau=0$  处的梯度  $\dot{C}_{12}(0)$  与固体颗粒平均流速  $\bar{v}$  成正比,还与固体颗粒平均体积分数  $\bar{\varphi}$  成正比。易见  $\dot{C}_{12}(0)$  就是物料的流率,只须再乘管道面积和固体密度,就得到物料的质量流量。

## 2 试验结果与分析

4 组阵列式电容传感器<sup>[1]</sup>安装在装置中垂直管段的直径为 30 mm 的外壁上,其间距为 12 mm。电容测量电路输出 4 路时间相关信号,空间相关信号是时间信号经过组合电路<sup>[2]</sup>得到的,代替结构上难以作到的传感器的交叠。装置输送的是稀相塑料粒子。

试验中得到不同速度的协方差函数曲线  $C_{12}(\tau)$ , 如图 1(a) 所示。不同流动速度  $v_1, v_2$  和  $v_3$  的过程,其协方差函数在  $\tau=0$  附近的斜率  $k_1, k_2$  和  $k_3$  不同:流动速度大的过程,斜率大;流动速度小的过程,斜率小。 $v_1 > v_2 > v_3$  时,  $k_1 > k_2 > k_3$ 。

图 1(b) 示出体积分数  $\varphi$  不同时的协方差函数曲线  $C_{12}(\tau)$ 。 $\varphi$  不同,其协方差函数在  $\tau=0$  附近的斜率  $k'_1, k'_2$  和  $k'_3$  不同: $\varphi$  值大的过程,斜率大; $\varphi$  值小的过程,斜率小。当  $\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3$  时,  $k'_1 >$

$k'_2 > k'_3$ 。

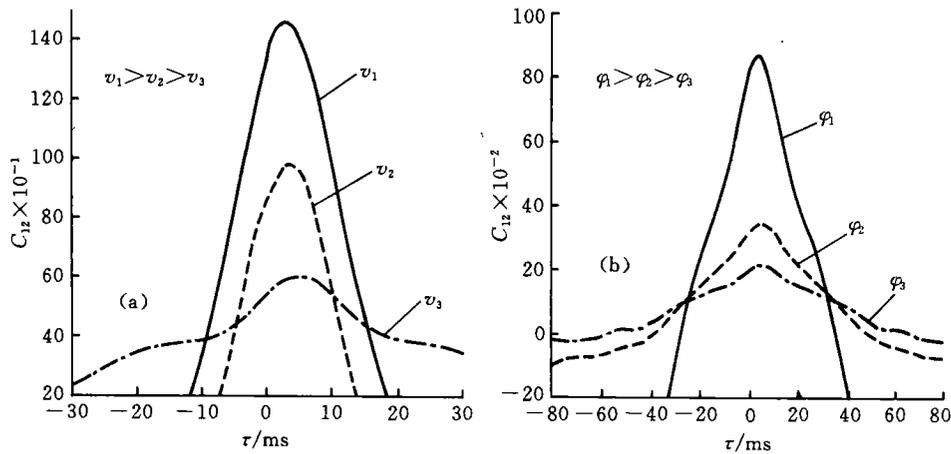


图 1 不同速度(a)和不同体积分数(b)时的协方差函数曲线

图 2 表示空间相关函数曲线,不同流动速度过程,其空间相关函数  $\Phi_{T_{12}}(z)$  在  $z=0$  时有一个确定值 ( $z$  为固体颗粒在时间  $\tau$  内移动的距离),这满足了梯度相关方法的要求。在式(2)中  $\Phi_{T_{12}}(0)$  作为一个系数出现,它是与传感器结构有关的常数。式(1)左端是 2 个信号通道的平均功率的一种表达式,与体积分数  $\varphi$  成正比。将式(1)代入(2)有  $v=K\dot{C}_{12}(0)/Q$ , 其中:

$$K = [\Phi_{T_{11}}(0)\Phi_{T_{22}}(0)]^{1/2} / \Phi_{T_{12}}(0)$$

$$Q = [C_{11}(0)C_{22}(0)]^{1/2}$$

$K$  是只与传感器设计本身有关的常数。为使  $\Phi_{T_{12}}(0)$  不等于零且  $K$  为某个常数,就要使空间信号在相当于传感器完全交叠的条件下获得。

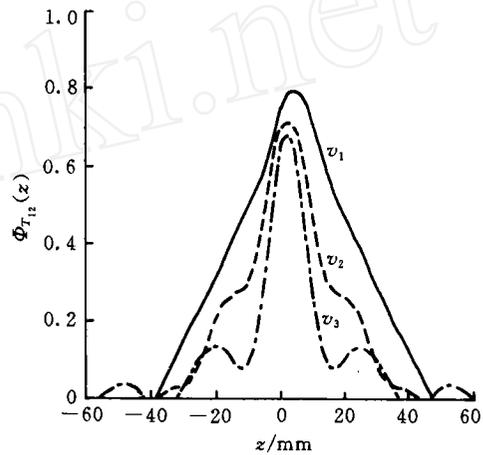


图 2 流动速度不同时的空间相关函数曲线

从 上

述理论推导可见,空间信号的质量从根本上决定了系统能否正确地对该理论作实践上的检验,因为平均速度和体积分数的得到直接依赖  $K$  值的稳定性。

空间信号是时间信号经过组合电路得到的,代替了结构上难以作到的传感器的交叠,所以空间信号与时间信号在均值上应一致。对本实验的  $K$  值作统计,波动范围不超过 5%。

由实验结果发现,直接采用渡越时间法,比梯度法计算出的平均速度高出 40%,而梯度法的平均速度与实验装置的频带宽度在经验上能很好地符合。

本试验的两相流装置输送的固体物料为硅胶颗粒,属于稀相环流。图 3 中 A 是连续流动时采样后的

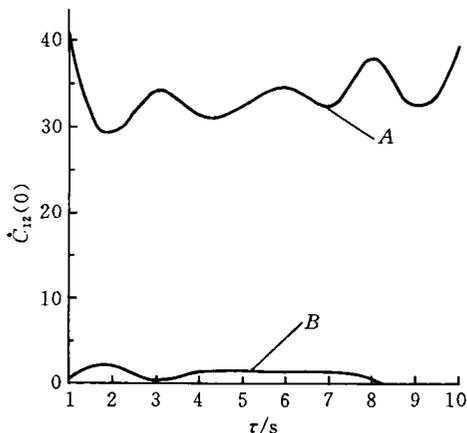


图 3 连续流动时采样后的流率曲线

流率( $C_{12}(0)$ )曲线,流率波动在15%左右,除系统的测量误差外,原因在于本装置对物料来讲是一个封闭系统,靠重力来分离和回收物料,物料与回收箱壁之间的摩擦和滞留现象,造成两相流的体积分数和速度同时波动。B是空管流率曲线,说明测试系统使用梯度法能成功地标定零流量。另外,试验中发现体积分数较大时,梯度法得到的流率却很低,说明梯度法的前提线性假设,只适于单位流量较低(小于 $150 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )的情况。

图4示出用梯度相关方法测得的体积分数 $\varphi$ 与用时间信号的均方值得到的体积分数 $\varphi$ 之间的关系,经过拟合是一条直线。

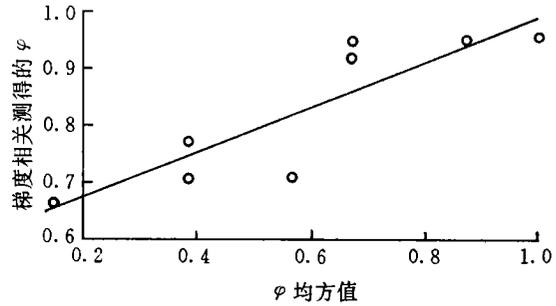


图4 梯度相关测得的 $\varphi$ 值与 $\varphi$ 均方值的关系。

### 3 结 论

梯度相关测量方法是相关测量理论的新发展,它为了解决渡越时间相关测量结果的不确定性,测量真正的平均流速和质量流量提供了可能性。本文通过对气固两相流流量测量的试验研究和理论分析,证明了利用梯度相关方法可以测量稀相气固两相流的速度与质量流量。

### 参 考 文 献

- 1 王一鸣,于海波,刘 禾. 用于气固两相流流量测量的阵列式电容传感器和互相关测量系统. 多相流测试技术学术会议,浙江杭州,1996-10
- 2 王一鸣,张宝芬. 两相流流量测量中的梯度相关方法研究. 计量学报,1996,17(2):149~153
- 3 Füg M. Korrelative Durchfluß-Messung an Zweiphasen-Strömungen mit optischen und kapazitiven sensoren. [Dissertation]. Karlsruhe; Universität (TH) Karlsruhe, 1990