

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104846

多相流互相关测速算法综述*

万倪¹ 钱相臣¹ 闫勇²

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院 北京 102206; 2. 肯特大学工程学院 肯特 CT2 7NT)

摘要:多相流广泛存在于现代工业生产中,其流速测量是保障生产过程安全及改善生产工艺质量和效率的关键。互相关技术是多相流流速测量的主要手段之一,但由于工业多相流流动状态的复杂性,经典的互相关算法难以满足测量的实时性和准确性的需求,在应用时有一定的局限性。本文综述了近年来运用互相关算法测量多相流流速的研究进展,并从提升算法精度和计算速度两方面对已有的改进方法进行了阐述和对比分析。评估结果表明,自适应互相关方法和频域相关方法均能在计算量较低的情况下获得准确度较高的结果,其中频域方法能够得到最稳定的速度测量结果。基于互相关算法的研究进展,本文还对可能的研究方向进行了讨论,为多相流互相关测速技术的发展提供借鉴。

关键词:互相关算法;多相流;流速测量;算法优化

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Review of cross-correlation velocimetry algorithms for multiphase flow measurement

Wan Ni¹ Qian Xiangchen¹ Yan Yong²

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. School of Engineering, University of Kent, Canterbury, CT2 7NT, UK)

Abstract: Multiphase flows widely exist in modern industries. The velocity measurement of multiphase flow is the key to ensure safety as well as improve the quality and efficiency of the production processes. Cross-correlation velocimetry is one of the main methods for the velocity measurement of multiphase flows. However, the classical cross-correlation algorithm is difficult to meet the demand of real-time and accuracy due to the complexity of industrial multiphase flows and thus has some limitations in application. In this paper, recent progress of the method is reviewed and the improvements that have been made to the method are elaborated and analyzed in terms of calculation efficiency and accuracy. Evaluation results show that both the adaptive cross-correlation method and the frequency domain method can obtain accurate results with less computational effort. Besides, the frequency domain method can also obtain the most stable measurement results. Based on the state-of-the-art cross-correlation velocimetry, possible future research is discussed for further development of the method.

Keywords: cross-correlation; multiphase flow; velocimetry; algorithm optimization

0 引言

多相流广泛存在于能源、化工、医药等各个领域的生产与科研过程,且随着工业4.0时代的到来,对其动态参数进行在线检测非常重要。多相流中的分相流速能够表

征流体的动态特性,流速的准确、快速测量对工业过程的精准在线控制 and 生产效率的提升具有重大意义。与单相流相比,多相流的成分复杂,且流动过程具有时变性、非线性等特点,导致难以建立准确的物理模型,增加了在线检测的难度。一直以来,多相流中分相流速的精确测量都是检测学科中亟待解决的问题^[1]。

在多相流测量领域,目前被广泛研究的测速方法主要包括位移法、多普勒法和互相关法等。其中位移法主要应用于粒子图像测速技术,通过分析曝光时间较短的多帧粒子图像,利用荧光标记、亮度分辨等方法匹配同一粒子的位移,计算粒子的移动速度。该方法已应用于气固、气液两相流输运过程的流速测量^[2]。多普勒法则是通过将流体暴露在超声或激光信号中,由于流体中产生的回波信号的多普勒频移与其流速变化存在相关关系,可从中计算得到流速值^[3]。这两种方法均需要利用相机或探头获得被测相的流动参数,设备较为复杂,容易受到环境干扰,且无法测量浑浊液体。互相关是一种广泛应用于信号检测和速度测量等领域的分析方法,尤其在具有诸多工程“挑战”问题的多相流速度测量领域,已经成为主要测速手段之一^[4-6]。与传统测速方法相比,互相关测速具有许多优势:传统方法需要分离各相组分分别测速,互相关方法仅需要在流动上下游安装传感器以及数据采集电路,简化了设备和操作;利用上下游信号的相关性进行计算,避免了不相关噪声的影响;计算得到的互相关系数可以作为衡量流动稳定性的指标^[7]。

互相关测速算法计算量较大,在高性能信号处理器出现之前,难以满足工业现场对测量实时性的要求。为了简化计算,一般将信号转换为0~1序列后再进行互相关计算,尽管该方法提升了计算效率,使其能够应用于现场仪表开发,但同时降低了计算精度。其后又发展出隔点计算法和频域计算法等优化方法。这些方法仅对计算过程进行优化,而未对外部噪声等干扰因素进行处理,具有一定局限性^[8]。近年来,随着信号采样装置以及信号处理芯片性能的提升,使得对多相流流动参数进行更加准确的实时测量成为可能。互相关算法可以与多种类型的传感器配合使用,而且对设备环境要求较低,已在多相流测量领域开始广泛应用。对于气液两相流,已有研究证明了将电容耦合式非接触电导测量与互相关技术相结合,应用于气液两相流气泡速度测量的可行性^[9]。对于流动状态更为复杂的气固两相流,有学者研制基于静电传感器的互相关测速仪表,应用于煤电厂一次风管道中煤粉的流动速度的测量,其可靠性和成本效益均优于其他测速技术^[10-13]。由于多相流本身复杂的流动特性,难以通过直接测量的方法从测量信号中直接计算出准确的分相流速,而目前少有人提出针对多相流信号的特征进行计算的互相关算法。随着多传感器系统的发展以及测量精度要求的提高,对互相关算法在计算精度和速度方面的优化已经成为多相流流速测量领域的重点问题,因此有必要进行深入研究。

本文综述了互相关算法近年来在多相流流速测量领域的研究进展和应用,从计算精度和计算量(计算速度)两方面对比和梳理已有互相关优化算法的特点,并利用

实验数据进行验证和比较。最后对算法未来的研究方向进行讨论和展望。

1 互相关测速算法及优化策略

1.1 互相关测速原理

互相关的基本方法是在测量路径间隔一定距离的位置安装两个相同的传感器,将其输出信号代入互相关函数进行计算。图1为一对布置于管道上、下游的静电传感器测得的流体流动信号以及计算得到的互相关函数,其峰值对应的时间延迟为渡越时间 τ ,即被测流体流经上、下游传感器的时间。利用渡越时间和传感器之间的距离可以求出流体流速^[14]。对于传感器测得的上下游信号 $x(t)$ 和 $y(t)$,在时域离散化后进行互相关计算的公式如下:

$$R_{xy}(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k)y(k+m) \quad (1)$$

其中, $x(k)$ 、 $y(k)$ 为信号的离散形式, N 为信号总采样点数, m 为信号流经上下游传感器的时间延迟对应的采样点数。将不同 m 值代入计算得到函数 R_{xy} ,函数峰值对应的时刻为渡越时间 τ_m 。流速 v_m 如式(2)所示。

$$v_m = \frac{L}{\tau_m} \quad (2)$$

式中: L 为两个传感器之间的距离。

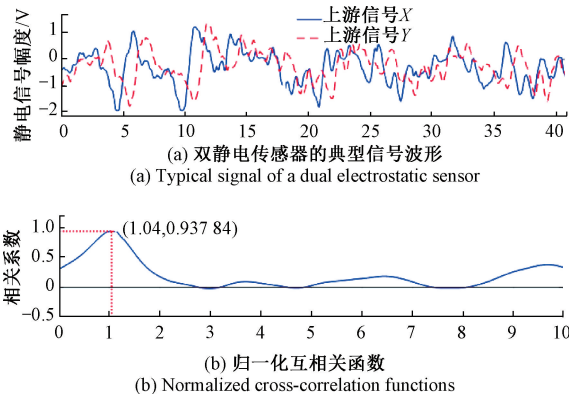


图1 双静电传感器的典型信号及相应的归一化互相关函数

Fig. 1 Typical signals of double electrostatic sensors and the corresponding normalized cross-correlation function

由式(1)可知,对应每一个不同的 m ,共需要进行 N 次乘法和 N 次加法运算,在测量信号的采样频率较高而采样时间固定的情况下,低性能计算机和微处理器无法实时求解方程。同时,由于计算中信号为离散采样点形式,互相关函数的最大值可能出现在两个采样点之间,从而产生测量误差。此外,硬件设备的性能、硬件参数的设置等外部因素也会对计算精度产生影响。综上所述,在实际应用过程中,经典互相关测速算法存在的问题主要

集中在测量精度和快速性两方面,因此算法的优化方法可归纳为两大类:1)在遵循经典互相关算法流程的基础上,对原始信号或计算后得到的互相关曲线进行插值、滤波等处理,或是通过对测量参数进行优化,以提升测量精度;2)从互相关算法的原理入手对算法本身进行改进,以提升计算速度。

1.2 提高计算精度的优化策略

1) 信号预处理

在多相流流动信号的测量过程中,若环境存在较明显的背景噪声,此时使用经典互相关算法得到的函数曲线存在噪声干扰,难以确定峰值所在的位置。因此,在计算前需要降低信号中的噪声水平。近年来,小波变换作为一种有效的降噪措施被广泛研究与应用。汪剑鸣等^[15]提出了一种基于提升小波的时延估计算法对原始信号进行去噪。李帅永等^[16]在进行管道泄漏定位的研究中,利用改进的经验小波变换法对泄漏声信号进行处理,提取泄漏相关分量进行互相关计算,发现该方法能够有效减少时延估计误差。在测量管道内气固两相流流速的过程中,有学者利用小波分解技术实现测量信号分离,从中选取相关性较高的分量进行信号重构和互相关计算,达到提升速度测量精度的目的^[17-18]。

对信号进行插值或滤波是提高渡越时间测量精度的主要方法。插值方法通过增加参与计算的采样点数来提高计算精度,其效果等价于提升采样频率^[19-20]。关于滤波技术,已有学者证明利用滤波后的原始信号进行互相关计算能够减少函数波形的干扰震荡^[21-22]。Zych等^[23-25]在测量气液两相流的离散相平均速度时,采用小波变换和Nadaraya-Watson核估计方法对原始信号进行滤波处理,并通过实验证明所得的互相关函数曲线与传统算法得到的相比更加平滑,有助于渡越时间的确定。与传统算法相比,插值滤波法的计算量较大,在互相关计算中,一般应用于在相关函数峰值附近进行小范围精确计算。

2) 测量参数改进

多相流速度测量的精度和速度与传感器的布置方式、采样频率、传感器间距等参数的设置有关。其中采样频率的选取需要考虑信号的特征频率,并满足香农采样定理。提高采样频率,则参与计算的数据点数增加,互相关函数峰值的定位准确度也相应增加。根据检测电路模数转换器件的性能要求,信号的采样周期需要小于模拟信号转换为数字信号的时间,在满足该条件的情况下,采用较高的采样频率可以提高测量精度^[26-27]。但由于提高采样频率会导致互相关计算量增加,需要根据实际精度和计算速度需求选择采样频率。

上下游传感器间的间距也是运用互相关测速时需要考虑的关键因素之一。多相流在流经传感器检测区域

时,随着传感器间距的增加,流型会发生较大变化,导致测量信号相关性降低。因此需要在安装环境允许的条件下选择合适的安装间距^[28]。传感器的几何参数对测量也会造成影响,特别是几何参数与感应区域面积有关的传感器。有研究表明,感应区域面积较小的传感器具有良好的动态响应,而面积较大的电极的测量信号能够反映传感器敏感场的平均特性,需要根据系统对动态响应以及测量精度的要求进行选取^[29]。

3) 多传感器速度融合

多相流流动状态的复杂性和时变性使得其流动状态不稳定,使测量信号有较大波动,进而导致计算得到的速度值波动较为剧烈,在实际应用中难以准确确定流体的平均流速^[30-31]。对此,有学者提出了多传感器速度融合的思想,该方法利用传感器阵列对多相流进行检测,从中提取更多流动信息,并融合可用信息以产生准确度更高的计算结果^[32-33]。Qian等^[34]在气固两相流的研究中,将静电传感器阵列和数据融合算法相结合,先计算阵列中每个传感器对的测量数据对应的速度值,并将对应的相关系数作为每个速度值的权重,通过数据融合产生更可靠的相关速度,其公式为:

$$\bar{v}_c(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^{n+1} R_{ij}(t) v_{ij}(t)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^{n+1} R_{ij}(t)} \quad (3)$$

其中, n 为阵列中传感器的个数, $R_{ij}(t)$ 和 $v_{ij}(t)$ 是由传感器阵列中的第 i 和第 j 个传感器对确定的信号相关系数和相应的相关速度。如果阵列中某个传感器得到的速度与其他传感器的速度相差过大,或出现速度对应的互相关系数很低等情况,则舍弃该速度值。多传感器之间的速度值互相验证,最大程度地减少“虚假峰值”现象。结果证明,使用数据融合后,速度曲线得到较大程度的平滑,同时与原始速度曲线保持一致的变化趋势,提升了速度测量的鲁棒性。该研究已经应用于发电厂实际工况下煤粉速度的测量^[12]。

4) 参数估计法

为克服多相流流态的时变性对测量精度的影响,有研究提出构建流体流经传感器时流动参数变化的数学模型,并提出了参数估计法,原理图如图2所示^[35]。

将上、下游两个传感器的信号传输过程视作脉冲响应函数为 h 的线性系统。上游信号 $x(k)$ 为模型输入信号,与 h 对应相乘得到输出信号 $Y(k)$,再与下游传感器信号 $y(k)$ 作差,得到误差信号 $e(k)$ 为:

$$e(k) = y(k) - Y(k) = y(k) - x^T(k)h(k) \quad (4)$$

每隔一个采样周期,对 h 进行如下更新:

$$h(k+1) = h(k) + \mu \cdot e(k)x(k) \quad (5)$$

式中; μ 为反馈系数,其值对算法的收敛速度和稳定性有

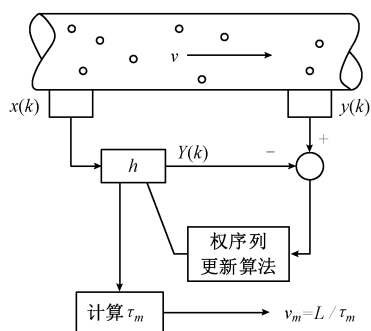


图2 参数估计法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of parameter estimation method

较大影响。调整模型参数使得 $e(k)$ 达到极小值,此时 h 的峰值对应的时间位移即为渡越时间。有研究在测量电极、传感器间距等硬件条件相同的条件下,对比参数估计法与经典互相关算法计算多相流速得到的函数曲线,发现二者的互相关系数峰值位置基本相同,而前者的曲线峰值更加尖锐、清晰^[36]。该方法的缺点是计算量较大,难以满足现场测量仪表的实时性要求。

1.3 提高计算速度的优化策略

在20年前,由于计算芯片的算力不足,互相关测速法在实际情况下的应用受到较大限制,因此众多学者提出了简化计算的方法。近年来具有强大数据处理功能的集成电路芯片已使互相关测速的在线应用成为了可能,但芯片成本较高且工业检测装置及配套设备的更新换代的周期较长,所以尚未在工业现场得到广泛应用。因此,

$$\begin{cases} R_{xy}(0) = \frac{1}{N} [x(0)y(0) + x(1)y(1) + \cdots + x(N-1)y(N-1)] \\ R_{xy}(1) = \frac{1}{N} [x(0)y(1) + x(1)y(2) + \cdots + x(N-1)y(N)] \\ \vdots \\ R_{xy}(m-1) = \frac{1}{N} [x(0)y(m-1) + x(1)y(m) + \cdots + x(N-1)y(N+m-2)] \end{cases}$$

此时,输入新数据 $x(N)$ 和 $y(N+m-1)$,使用式(6)进行计算,与 $x(N-1)$ 和 $y(N+m-2)$ 相比,区别仅为每个方程的首项和末项不同。逐点计算法正是利用该特点,用前一次的计算结果减去首项并加上新增的末项,得到新一次计算的结果。实验结果证明该方法通过免去复杂的乘法计算,有效加快了计算速度^[38-39]。

2) 极性互相关算法

20世纪80年代前,为了减少互相关的计算量以适应信号处理芯片低下的性能,有学者提出通过极性相关的方法“粗略”地实现互相关计算。极性互相关通过对上下游信号进行数字量化,舍去信号幅度信息而只取正负号的方式简化了算法,其计算公式如下^[40]:

仍需要进行深入研究提升互相关计算速度的方法,下文将针对重点技术进行简要介绍。

1) 隔点峰值搜索与逐点计算法

隔点峰值搜索能够有效减少计算数据量^[37],该方法首先采用较大的采样周期对原始信号进行稀疏化处理,并计算互相关函数的峰值位置,再选用较小的采样周期,对峰值数据点附近的原始信号进行精确计算,如此重复直至采样周期减小到原始采样周期,其流程如图3所示。

由于参与计算的数据点的大幅度减少,提升了计算速度。但由于对数据进行稀疏化,造成原始信号中部分信息丢失,可能会出现“虚假峰值”现象,进而产生较大计算误差并降低测量可靠性。

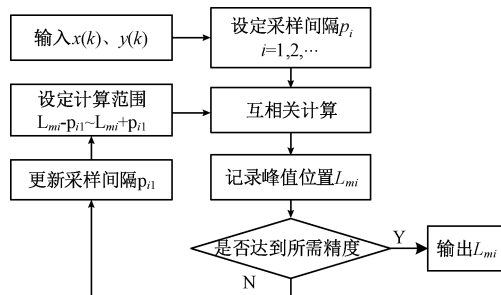


图3 隔点峰值搜索流程

Fig. 3 Schematic diagram of the peak interval search method

另一种更实用的优化方法是逐点计算法,它在利用式(1)计算时,输入两组离散信号并将其展开,可得:

$$\varphi(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=0}^N X(t)Y(t+\tau) \quad (7)$$

式中: $X(\cdot)$ 和 $Y(\cdot)$ 分别对应 $x(t)$ 和 $y(t+\tau)$ 的极性化样本点。有研究表明, $x(t)$ 与 $y(t)$ 在极性化后,其互相关函数与经典互相关函数仍能在同一时刻到达峰值点。极性相关利用简单的逻辑操作代替多位数乘法,可以仅通过模拟电路实现,显著缩短计算时间,多用来作为数字相关器的核心程序^[41]。然而,极性相关法大大降低了信号分辨率,造成信息丢失,进而导致计算精度降低。极性相关算法可以与多种流体信号测量传感器相结合,在对测量精度要求不高的条件下,实现管道多相流分相流速的测量或管道泄漏定位等功能^[42]。

3) 自适应互相关算法

自适应算法的计算公式与经典互相关算法相同,但在计算前会根据经验速度值 v_p 预估渡越时间 τ_p ,并令下游信号采集的起始时刻相对于上游信号的起始时刻后移 τ_p 。计算得到“剩余”渡越时间 τ_r ,其与 τ_p 之和为最终所求的渡越时间 τ_m 。其计算流程如图4所示。

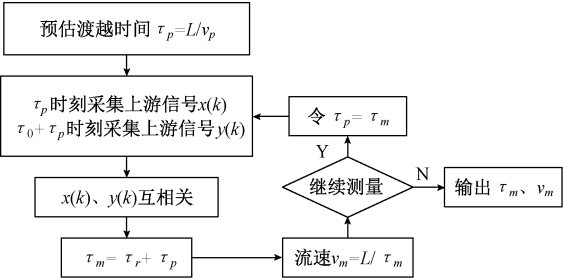


图4 自适应互相关算法流程

Fig. 4 Schematic diagram of the adaptive cross-correlation algorithm

该算法能更快找到两路信号中相似度较高的信号段,在被测流体速度变化不剧烈且系统有连续测量的需求时具有优势。研究在采样频率位 20 kHz,该方法与经典方法相比,能得到更大的相关系数,且计算误差减小了 2% 左右^[43]。

4) 基于傅里叶变换的频域计算法

除了在时域的计算方法,在频域中计算互相关函数也被广泛应用。由 Wiener-Khinchin 定理可知,随机信号的自相关函数和功率谱密度函数服从一对傅里叶变换的关系。由此可以推知,时域信号互相关函数的傅里叶变换,在频域中可表示为函数的互谱密度^[44]。利用该定理,可以在频域中使用互相关方法求取渡越时间。首先将离散后的上下游信号 $x(k)$ 、 $y(k)$ 进行傅里叶变换,转换到频域后在频域进行互相关计算,可得^[45]:

$$R_{xy}(j\omega) = X^*(j\omega)Y(j\omega) \tag{8}$$

其中, $X^*(j\omega)$ 为 $x(k)$ 做傅里叶变换后的共轭, $Y(j\omega)$ 为 $y(k)$ 的傅里叶变换,在频域进行 N 次乘法计算后利用傅里叶反变换转换回时域,可求得渡越时间。有研究利用该方法测量油-汽-水三相流的流速,证明该方法能够有效提高采样频率,并有效提升计算速度和计算精度^[46]。

2 优化算法对比与展望

2.1 优化算法的对比

实验中计算并对比了在使用相同原始信号的情况下不同互相关算法的计算量与计算精度。采用文献[32]所述的气力输送煤粉/生物质的静电信号进行计算,颗粒

体积浓度约为 0.03%,输送风速约 15 m/s,信号的采样频率为 50 kHz,每次取 1 000 个采样点进行计算。

本研究中采用的计算量评估方式的公式如下:

$$C = 4a + b \tag{9}$$

式中: C 为所求的计算量, a 为算法中乘法的计算次数, b 为加法的计算次数。在单片机中乘法占 4 个指令周期,加法占 1 个指令周期,通过与计算次数进行乘算后求和,能够估算出每种算法的计算量。令经典互相关算法的计算量为 100%,其他优化算法的计算量与其值之比为优化算法的计算量,并令经典互相关计算出的渡越时间为参考渡越时间,结果如表 1 所示。

表 1 互相关算法计算量与相关系数比较

Table 1 Comparison of computational effort and correlation coefficients of cross-correlation algorithms

算法	计算量/%	互相关系数	渡越时间/ms
经典互相关法	100.0	0.864	1.24
自适应互相关法	23.01	0.864	1.24
逐点计算法	19.63	0.864	1.24
频域计算法	26.66	0.828	1.30
隔点计算法	10.73	0.802	1.40
参数估计法	67.36	0.712	1.04
极性相关法	11.68	0.581	1.84

表 1 中第 2 列为计算量,第 3 列为每种算法计算同一组原始信号所得的互相关系数,第 4 列为计算得到的渡越时间。部分互相关函数图像如图 5 所示。由图 5 可知,经典算法和逐点计算法由于原理公式相同,仅是进行了计算量的优化,因此互相关函数曲线相同。自适应相关算法得到的函数图像与二者算相比,得到的函数图像更加平滑;隔点计算法由于对信号进行稀疏化,损失部分信息,因此得到的结果偏差较大;频域计算法与经典算法结果有一定偏差的原因可能是多相流信号含有较多高频噪声以及干扰信号,直接进行频域相关计算会造成误差;参数估计法和极性相关法相对来说具有较大的计算偏差,其可能的原因是多相流的信号形式复杂,难以建立流动模型,将信号进行极性化或加减处理会损失大量数据信息,从而降低计算精度,甚至出现虚假峰值现象。

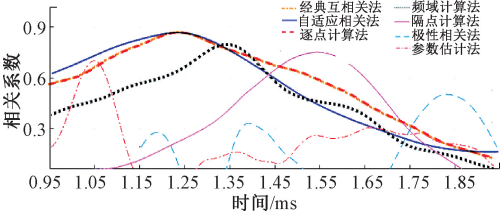


图5 各互相关算法的函数图像

Fig. 5 Function graphs obtained by cross-correlation algorithms

表 2 对本章介绍的算法的优化原理以及优缺点进行小结。为了直观地展示各个互相关优化方法的特点,图 6 总结了上文阐述的互相关优化算法在计算流程中的应用。图中虚线框内为互相关算法的计算流程,纯色底纹代表在计算过程中可选的提升计算精度的步骤,加斜纹的底纹代表减少计算量的步骤,根据不同的计算要求,

可以采取不同措施优化计算过程。由以上信息可知,隔点计算法计算量最小,说明实际应用中,在满足一定精度的条件下,对原始信号进行稀疏化处理,可以大幅度降低计算时间;采用自适应互相关法或逐点计算的方式对算法进行优化,能够在不影响精度的情况下加快计算速度。

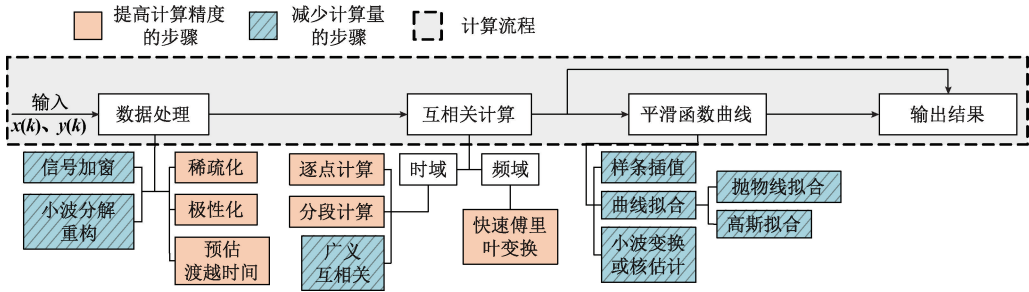


图 6 互相关算法优化策略流程

Fig. 6 Schematic diagram of the optimization strategy for cross-correlation method

表 2 各种互相关算法的特点

Table 2 Features of different cross-correlation algorithms

算法	优化原理	优势	不足
参数估计法 ^[35-36]	将流体在上下游传感器之间的传输过程视作一个线性系统,通过输入上游信号更新系统模型序列,在序列最大值处计算渡越时间。	计算结果峰值的分辨率和相关系数更高。	计算量较大。
隔点计算法 ^[37]	采用由大至小的采样周期计算,每次均计算峰值位置并在峰值附近进行下一次计算,直至采样周期减小到原始采样周期。	计算量大大减少。	改变信号的采样频率,导致测量误差增大。
逐点计算法 ^[38]	计算互相关函数时用前一次的计算结果减去首项并加上新增的末项,得到下一次的计算结果。	计算量大大减少。	对经典相关算法没有精度的改进。
极性相关算法 ^[40-42]	对原始信号进行 0~1 量化处理,舍去信号幅度信息进行互相关计算。	利用简单的逻辑操作代替多位乘法,硬件电路结构简单,计算速度快。	舍去原始信号幅度信息造成信号失真,计算精度低。
自适应互相关算法 ^[43]	根据预估渡越时间改变采集下游信号的起始时刻,计算得到的“剩余”渡越时间与预估渡越时间之和为所求结果。	测量结果可作为下一轮测量的预估值,适用于连续测量的场合。	算法的精度没有明显提高。
频域计算法 ^[44-46]	将上下游信号进行傅里叶变换,转换到频域后在频域进行互相关计算。	计算速度有较大提升,便于进行硬件实现。	该算法对逻辑存储资源的使用量较大,与时域方法相比优势并不明显。

为了评估各优化算法在计算多相流流速时的性能,取一连续时间段内计算的速度绘制曲线图,并将经典互相关法、自适应互相关法和频域计算法的结果进行比较,如图 7 所示。其中图 7(a) 的测量工况 1 与 2.1 节所述相同,图 7(b) 的测量工况 2 与图 7(a) 的区别是颗粒体积浓度提升到 0.06%。图中带圆圈标记的曲线为自适应算法所得结果,实线曲线为经典互相关算法所得结果,长虚线为频域计算法所得结果,点虚线为所得速度数据的 5

点滑动平均值。互相关曲线中每点的速度值与对应的滑动平均值之间的均方误差可以作为计算结果稳定性的评价指标。

表 3 列出了每种工况下的均方误差值,由以上结果分析可知,频域算法与经典算法得到的速度分布十分相似,其均方误差值均小于自适应算法。频域方法相较之下有最小的均方误差值,说明该方法与其他方法相比能够得到更稳定的速度曲线,且其计算结果与文献^[32]中所

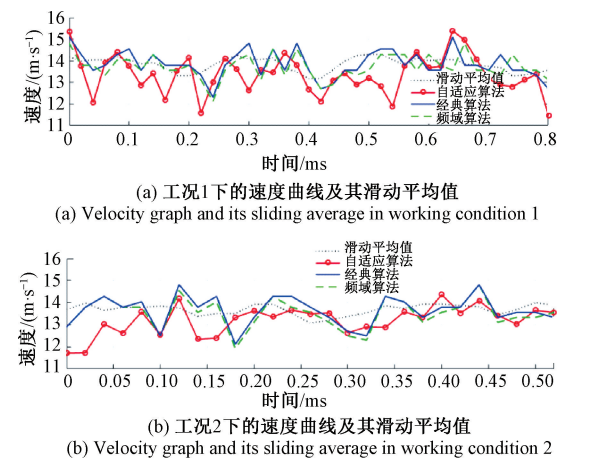


图 7 两种工况下连续时间段内的速度曲线

Fig. 7 Calculated velocity in a continuous period of time under two working conditions

得数据相比具有较好的一致性,说明频域方法能够得到较为准确的结果。

表 3 测量速度的均方误差

Table 3 Mean square error of measured velocity		
颗粒体积浓度/%	互相关计算方法	均方误差 ($\times 10^{-1}$)
0.03	经典方法	7.77
	自适应方法	9.47
	频域方法	1.53
0.06	经典方法	3.06
	自适应方法	4.55
	频域方法	0.647

2.2 算法优化的展望

已有的互相关测速算法改进研究大多以优化计算过程为目标,而很少有结合流体动态特征和信号特点进行优化的方案,在计算中仍可能产生较大误差。多相流信号的特征一般由被测流体的动态特性决定,有模拟研究表明,多相流流动状态信号具有一定规律:在含液相的多相流中,各相组分的速度分布具有中心区域速度较平坦,靠近管壁处速度迅速下降的特点;若含有气相,则气相组分的速度值和变化趋势明显高于其他组分^[47,49];气固两相流又有不同的流动规律,这些特点在实际多相流测量信号的频谱中有所体现。例如,气固两相流静电信号的频谱呈现单峰的特点,且随着固相颗粒速度的增加,信号带宽相应增加,并向更高的频率移动^[50]。若能针对多相流信号的特征进行互相关计算,能够进一步提升计算效率。

一种结合信号特征的互相关测速算法优化策略的流程如图 8 所示。首先提取原始信号主频部分对应的时域分量,将其划分为数个信号段,并对不同信号段进行互相

关计算,再将得到的结果进行平均作为最后的渡越时间计算结果,同时在计算中采用自适应互相关与逐点计算法相结合的思路提升计算效率。初步计算结果显示,该方法与滑动平均值曲线间的均方误差为经典方法的 0.55%~1.5% 左右,计算量为经典互相关方法的 33.37%,说明该方法在多相流流速测量中有更好的适用性。

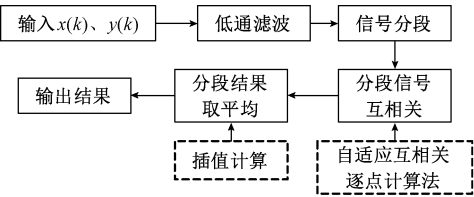


图 8 优化算法的流程

Fig. 8 Flow chart of optimization algorithm

此外,对于多相流体,普遍采用间接测量方式,即测量结果并不能直接作为流体速度、浓度或质量流量等参数的度量。由于在传感器的作用范围内,多相流的流态分布十分复杂,同时传感器的灵敏度分布及敏感区域内各相分布等因素也会对检测信号产生影响,导致很难从检测信号中提取出多相流的真实流动状态,互相关测速结果并不等于流体真实的流速。因此,深入研究多相流流动状态与传感器测量信号之间的关系,建立更精确的测量模型,能够从根本上提升参数测量的准确性,是需要不断探索的重要研究方向。

3 结 论

本文综述了多相流互相关测速算法的发展现状,从提升计算精度以及计算量两方面介绍了现有的互相关优化方法,并提出了一种结合多相流流动信号特征的互相关优化方法,主要结论如下:

- 1) 提升互相关测速技术的计算精度,可以对原始信号或互相关函数曲线进行插值、滤波降噪等处理,其中滤波方法是通过提升原始信号的信噪比来增加计算精度^[15-18],插值方法则是通过增加计算点数(即提高采样频率)来提高计算精度^[19-25];或改进测量参数,其中采样频率、传感器距离等参数对测量精度都有较大影响,在实际应用场合中应根据测量要求进行参数设置^[26-29];或利用优化后的互相关算法提升计算精度,例如多传感器数据融合方法^[30-34]、参数估计法^[35-36]等。

- 2) 提升计算速度,最简单的方式是通过信号稀疏化,减少参与计算的数据点数来实现。也可以通过应用逐点计算法^[38]、极性相关法^[40-42]、自适应互相关算法^[43]、频域计算法^[44-46]等优化方法实现。由于提升计算

速度往往导致计算精度降低,二者难以同时满足,因此在算法的实际应用时,需根据工程要求选择合适的优化策略。

3) 应考虑结合多相流体流动特性及测量信的变化特征,有针对性地进行互相关测速算法优化策略的研究。由于多相流流动状态的复杂性,其流速时变性较强。而目前的互相关测速算法对于流速和流型变化的灵敏度不高,在非稳定流型下得到的测速结果准确性相对较低,因此发展一种能够准确、快速的跟踪多相流流速变化的互相关算法对实时测量动态特性变化剧烈的多相流具有重要的意义。也可考虑采用不同加权系数融合多种测速算法计算,通过设定特征值判断流体的流动状态,当流型稳定时,增大互相关算法的加权系数,流型变动较大时则采用其他测速算法。

4) 此外,实际流体流动速度与测量信号之间的物理耦合关系少有研究。由于不同传感器的灵敏度特性变化较为复杂,使测量速度值与实际速度值之间存在一定偏差。因此更为准确地建立实际流动参数与传感器测量信号之间的模型能够从根本上提升参数测量的准确性。

参考文献

- [1] 王智慧,王磊. 互相关流量测量的原理及算法研究[J]. 西北工业大学学报, 1999, 17(B12): 186-189.
WANG ZH H, WANG L. Research on the principle of cross-correlation flow measurement [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1999, 17(B12): 186-189.
- [2] KOYAMA M, WATAMURA T, SUGIYAMA K. Simultaneous photobleaching molecular tagging velocimetry for density-stratified flows of suspensions[J]. Experiments in Fluids, 2019, 60(9): 1-22.
- [3] FAN L, MCGRATH D, CHONG C T, et al. Laser-induced incandescence particle image velocimetry (LII-PIV) for two-phase flow velocity measurement [J]. Experiments in Fluids, 2018, 59(10): 1-14.
- [4] WANG L J, QIAN X C, YAN Y, et al. Rotational speed measurement through electrostatic sensing and correlation signal processing [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63 (5): 1190-1199.
- [5] YAN C, ZHAI L S, ZHANG H X, et al. Cross-correlation analysis of interfacial wave and droplet entrainment in horizontal liquid-liquid two-phase flows[J]. The Chemical Engineering Journal, 2017, 320: 416-426.
- [6] TAN C, CAO, Y, DONG F. Cross correlation based dispersed phase velocity profile measurement of two-phase pipe flow[C]. 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2012:1-6.
- [7] 赵鑫,金宁德,王化祥. 相关流量测量技术发展[J]. 化工自动化及仪表, 2005, 32(1): 1-6.
ZHAO X, JIN N D, WANG H X. Development of cross-correlation flow measurement technique[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2005, 32(1): 1-6.
- [8] 谭超,董峰. 多相流过程参数检测技术综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1923-1932.
TAN CH, DONG F. Parameters measurement for multiphase flow process[J]. ATCA Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1923-1932.
- [9] 周颖,黄志尧,王保良,等. 基于C4D技术的气泡速度测量[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(5): 892-895.
ZHOU Y, HUANG ZH Y, WANG B L, et al. Measurement of bubble velocity based on C4D technique[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(5): 892-895.
- [10] QIAN X C, YAN Y. Flow measurement of biomass and blended biomass fuels in pneumatic conveying pipelines using electrostatic sensor-arrays [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61 (5): 1343-1352.
- [11] 贾志海,范学良,李俊峰,等. 锅炉煤粉气力输送状态在线监测系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(8): 1651-1655.
JIA ZH H, FAN X L, LI J F, et al. On-line monitoring for pulverized coal pneumatic conveyance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30 (8): 1651-1655.
- [12] QIAN X C, HUANG X B, HU Y H, et al. Pulverized coal flow metering on a full-scale power plant using electrostatic sensor arrays [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014 (40): 185-191.
- [13] YAN Y, HU Y, WANG L, et al. Electrostatic sensors-their principles and applications [J]. Measurement, 2021, 169: 108506.
- [14] BECK M S. Correlation in instruments: Cross correlation flowmeters [J]. Journal of Physics E Scientific Instruments, 1981 (14): 7-19.
- [15] 汪剑鸣,李博,王琦,等. 基于提升小波时延估计的气液两相流流速测量[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 653-663.
WANG J M, LI B, WANG Q, et al. Measurement of gas/liquid two-phase flow velocity based on lifting wavelet time delay estimation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 653-663.
- [16] 李帅永,程振华,毛维培,等. 基于改进经验小波变换及互谱相位差谱的供水管道泄漏声振动定位方法[J]. 仪

- 器仪表学报, 2019, 40(12): 80-91.
- LI SH Y, CHENG ZH H, MAO W P, et al. Leak location based on the improved EWT and cross-power phase difference spectrum of vibro-acoustic[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 80-91.
- [17] WANG C, ZHANG J Y, ZHANG Y S, et al. Representation of induced and transferred charge in the measurement signal from electrostatic sensors[C]. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2014, 1306-1309.
- [18] WANG C, ZHAN N, ZHANG J Y. Induced and transferred charge signals decoupling based on discrete wavelet transform for dilute gas-solid two-phase flow measurement [C]. 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2017: 1-6.
- [19] MUHAMMAD W M, BUSHRA A K. Cross correlation velocity measurement of multiphase flow [J]. International Journal of Science and Research, 2015, 4(2): 802-807.
- [20] 刘佳鑫, 唐佳能, 郎业兴. 基于插值互相关函数的 GIS 局部放电特高频时差定位方法[J]. 高压电器, 2018, 54(2): 62-67.
- LIU J X, TANG J N, LANG Y X. Approach for time delay location of UHF signals of GIS partial discharge based on interpolating cross-correlation function [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 62-67.
- [21] 袁镇福, 周洁, 浦兴国, 等. 信号滤波和传感器特性对相关测速影响的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2001(1): 78-80.
- YUAN ZH F, ZHOU J, PU X G, et al. Study of effects of digital filtering and sensor characteristics on velocity measurement by correlation method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001 (1): 78-80.
- [22] REDA K, YAN Y. An improved method for the processing of signals contaminated with strong common-mode periodic noise in correlation velocity measurement [J]. IEEE Sensors Letters, 2019, 3(7): 1-4.
- [23] ZYCH M, HANUS R, PETRYKA L, et al. Application of gamma densitometry and statistical signal analysis to gas phase velocity measurements in pipeline hydrotransport. [J]. EPJ Web of Conferences, 2015, 92:1-6.
- [24] ZYCH M, HANUS R, VLASAK P, et al. Radiometric methods in the measurement of particle-laden flows[J]. Powder Technology, 2017, 318: 491-500.
- [25] ZYCH M, HANUS R, WILK B, et al. Comparison of noise reduction methods in radiometric correlation measurements of two-phase liquid-gas flows [J]. Measurement, 2018, 129: 288-295.
- [26] ZHANG W B, WANG C, WANG Y L. Parameter selection in cross-correlation-based velocimetry using circular electrostatic sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59 (5): 1268-1275.
- [27] CUI Z Q, WANG H X, YIN W L, et al. Flow velocity measurement by cross-correlation with tailored modulation[C]. 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2015:1906-1909.
- [28] GAJEWSKI J B. Accuracy of cross correlation velocity measurements in two-phase gas-solid flows [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2013, 30: 133-137.
- [29] ZHANG W B, WANG C, WANG H X. Hilbert-Huang transform-based electrostatic signal analysis of ring-shape electrodes with different widths[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61 (5): 1209-1217.
- [30] WANG S N, LI J, XU C L, et al. Local particle mean velocity measurement in pneumatic conveying pipelines using electrostatic sensor arrays[J]. Particulate Science and Technology, 2015(33) 81-90.
- [31] FOKER S, KINGMAN S, LOWNDES I, et al. Characterization of the cross sectional particle concentration distribution in horizontal dilute flow conveying—A review [J]. Chemical Engineering and Processing Process Intensification, 2004, 43 (6): 677-691.
- [32] WANG C, ZHANG J Y, GAO W B, et al. Cross-correlation focus method with an electrostatic sensor array for local particle velocity measurement in dilute gas-solid two-phase flow [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26: 1-10.
- [33] QIAN X C, YAN Y, WU S T, et al. Measurement of velocity and concentration profiles of pneumatically conveyed particles in a square-shaped pipe using electrostatic sensor arrays [J]. Powder Technology, 2021, 377(2):693-708.
- [34] QIAN X C, YAN Y, WANG L J, et al. An integrated multi-channel electrostatic sensing and digital imaging system for the on-line measurement of biomass-coal particles in fuel injection pipelines [J]. Fuel, 2015 (151): 2-10.
- [35] 高晋占. 用于两相流流速测量的极性导向式自适应算法[J]. 工业仪表与自动化装置, 2006(3): 8-10,26.
- GAO J ZH. The polarity pilot adaptive algorithm for two-

- phase flow velocity measurement [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2006(3): 8-10, 26.
- [36] 李文涛, 叶俊, 李忠虎, 等. 气/固两相流固体颗粒流速测量方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015(3): 88-91.
- LI W T, YE J, LI ZH H, et al. Research on particle velocity measurement of gas/solid two-phase flow [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(3): 88-91.
- [37] 徐灵佳, 吴祥坤, 章梦彪, 等. 基于实时互相关算法的双相流流量测量的研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2017, 35(2): 139-145.
- XU L J, WU X K, ZHANG M B, et al. Research on two-phase flow measurement over real-time cross-correlation algorithm [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2017, 35(2): 139-145.
- [38] 张鸣, 张宏建. 一种逐点连续计算相关函数的方法[J]. 仪器仪表学报, 1997, 18(3): 278-282.
- ZHANG M, ZHANG H J. A method to continuously calculate correlation function point by point [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1997, 18(3): 278-282.
- [39] 赵正敏, 李洪海. 超声波 TOF 的递推相关估计[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(12): 2689-2694.
- ZHAO ZH M, LI H H. Recursive cross-correlation estimation of ultrasound TOF [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(12): 2689-2694.
- [40] 包文运, 崔依冬, 王启昌, 等. 基于互相关原理的流速测量技术及算法研究 [J]. 科学技术创新, 2020(2): 193-194.
- BAO W Y, CUI Y D, WANG Q CH, et al. Research on velocity measurement technology and algorithm based on cross correlation algorithm. [J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(2): 193-194.
- [41] 郑莹娜, 刘强, 陈长缨, 等. 固体表面速度软测量系统分析[J]. 仪器仪表学报, 2000(6): 574-577.
- ZHENG Y N, LIU Q, CHEN CH Y, et al. Analysis of soft-measurement system for measuring solid surface velocity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000(6): 574-577.
- [42] 王清琳, 程珩, 靳宝全. 管网泄漏极性相关法定位研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015(7): 94-97.
- WANG Q L, CHENG H, JIN B Q. Research of leakage detection for pipelines based on polarity correlation algorithm [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(7): 94-97.
- [43] LIU Y J, ZHANG Y M, CAO Z, et al. An adaptive algorithm for cross-correlation velocity measurement [C]. Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT), 2012: 96-100.
- [44] ZHAO X J, SHANG P J, LIN A J, et al. Multifractal Fourier detrended cross-correlation analysis of traffic signals [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2011(390): 3670-3678.
- [45] 江南, 黄建国, 黄清. 基于互相关函数的频域实现时延估计器[J]. 仪器仪表学报, 2004(S1): 777-779.
- JIANG N, HUANG J G, HUANG Q. Cross correlation function based time delay estimators implemented in frequency domain [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004(S1): 777-779.
- [46] WANG D Y, JIN N D, ZHAI L S, et al. Measurement of oil-gas-water mixture velocity using a conductance cross-correlation flowmeter with center body in small pipe [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(12): 4471-4479.
- [47] WELAHETTIGE P, ARIYARATNE W, MELAAEN M C. Euler-granular approach for modelling of dilute phase pneumatic conveying in a vertical pipe [C]. The 58th SIMS Conference on Simulation and Modelling, Linköping Electronic Conference Proceedings, 2017: 227-233.
- [48] KUANG S B, ZHOU M M, YU A B. CFD-DEM modelling and simulation of pneumatic conveying: A review [J]. Powder Technology, 2020(365): 186-207.
- [49] 陶中兰, 邢世录, 李春丽, 等. SMBR 内气液两相流三维 CFD 模拟 [J]. 环境工程学报, 2014, 8(6): 2251-2256.
- TAO ZH L, XING SH L, LI CH L, et al. Three-dimensional CFD simulation of gas-liquid two phase flow in SMBR [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(6): 2251-2256.
- [50] WANG C, ZHANG J Y, ZHENG W, et al. Signal decoupling and analysis from inner flush-mounted electrostatic sensor for detecting pneumatic conveying particles [J]. Powder Technology, 2017 (305): 197-205.

作者简介



万倪, 2019 年于华北电力大学获得学士学位, 现为华北电力大学控制与计算机工程学院硕士研究生, 主要研究方向为多相流参数检测以及火焰燃烧参数检测。

E-mail: wn_201509@163.com

Wan Ni received her B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2019 and currently a M. Sc. student at the School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University. Her main research interests include multiphase flow parameters detection and combustion parameters detection.



钱相臣 (通信作者), 2004 年于天津理工大学获得学士学位, 2007 年于天津大学获得硕士学位, 2013 年于英国肯特大学获得博士学位, 现为华北电力大学控制与计算机工程学院副教授, 主要研究方向包括气固两相流测量与装置、工业过程参数监测、先进检测技术与仪器等。

E-mail: xqian@ncepu.edu.cn

Qian Xiangchen (Corresponding author) received the B. Sc. degree from the Tianjin University of Technology in 2004, the M. Sc. degree from Tianjin University in 2007, and the Ph.D. degree from the University of Kent, Canterbury, U. K., in 2013. Now he is an associate professor with the School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University. His main research interests include gas-solid two-phase flow measurement and instrumentation, condition monitoring of industrial processes, advanced measurement and instrumentation techniques.



闫勇, 1985 年于清华大学大学获得学士学位, 1988 年于清华大学获得硕士学位, 1992 年于英国提赛德大学获得博士学位, 现为英国肯特大学教授, 英国皇家工程院院士和国际电气电子工程师学会会士。主要研究方向包括多相流测量与装置、火焰检测

传感器与装置、工业系统和过程状态监测、可回收材料质量评估等。

E-mail: y.y@kent.ac.uk

Yan Yong received the B. Sc. and M. Sc. degrees from Tsinghua University in 1985 and 1988, respectively, and the Ph.D. degree from the University of Teesside, Middlesbrough, U. K., in 1992. Now he is a professor with the University of Kent, the Fellow of the Royal Academy of Engineering and the Fellow of IEEE. His main research interests include flow measurement and instrumentation, combustion sensors and instrumentation, condition monitoring of industrial systems and processes and quality assessment of recycled materials.