

基于光闪烁法的烟气流速及流量的测量

杨 阳,董凤忠*,倪志波,庞 涛,吴 边,张志荣

(中国科学院安徽光学精密机械研究所,安徽 合肥 230031)

摘要:提出了一种利用光闪烁技术监测工业管道烟气排放的方法,在实际应用中具有适应范围广、结构灵活和测量准确等特点。利用开源流体模拟软件 OpenFOAM 对圆直管道内的流体进行了数值分析,构造网格数为 52 624 0,基于图形处理器(GPU)的高性能计算平台对流体的数值仿真进行了并行加速,取得了 3.493 倍的加速比。描述了光闪烁法测量烟气流速、流量的步骤,对实验室的模拟烟道内的烟气流速和流量进行了测量,并与皮托管所测得的数据进行对比,得到了较为一致的结果。

关键词:光闪烁;流速;流量;数值模拟

中图分类号:X851 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2014)01-0128-07

Detection of smoke flow velocity and flow rate by optical scintillation

YANG Yang, DONG Feng-zhong*, NI Zhi-bo, PANG Tao, WU Bian, ZHANG Zhi-rong

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The stack gas emitted by the industrial production is main source of particulate matter and pollution in the atmosphere. In this paper, a new optical method using the optical scintillation caused by the random fluctuation of particulate matter concentration is introduced to monitor the industrial emission. The principle of measuring stack gas flow velocity and flow rate by optical scintillation is explained, and on this basis, a parallel double-transceiver technique is introduced, which has many advantages, such as wide suitability, flexible structure, accurate measurement. The practical meaning of the fluid numerical emulation for the measurement is discussed. An open source software OpenFOAM is used to analyze the fluid in the exhaust pipe with the calculation grid number of 52 624 0. The numerical simulation of the fluid is accelerated by using the high performance computing platform which is based on GPU, and the speed up ratio of 3.493 times is obtained. The steps of the measurement of stack gas flow velocity and flow rate by optical scintillation are described. The stack gas flow velocity and flow rate of the simulation pipe are measured, the results are compared with those measured by the pitot tube, and they have good agreement.

Key words: optical scintillation; flow velocity; flowrate; numerical simulation

1 引言

大型燃煤发电厂、水泥厂、金属冶炼厂和玻璃制造厂等排放的烟气是大气中颗粒物和污染气体的主要来源。要控制、治理污染,必须对污染物排放实行在线连续监测,因此对于烟尘排放速度、颗粒物浓度和流量等进行准确测量具有重要的社会

意义和经济价值。

目前常用的流速计包括皮托-静压管流速计、热线风速计、激光流速计和光栅流速计等^[1~4],常用的气体流量计有压差式流量计、容积式流量计、超声波流量计、热式流量计和光纤干涉流量计等^[5~7]。这些测量气体流速和流量的装置在测量精度、安装维护和运行环境等方面都存在一些不

* E-mail: fzdong@aiofm.ac.cn

收稿日期:2013-06-03 修订日期:2013-08-07

基金项目:国家自然科学基金(11204320)和国家“863”计划(2007AA06Z420)资助项目

足,例如应用范围最为广泛的压差式流速、流量计,存在测量精度普遍偏低、现场安装条件要求较高、引压管线容易堵塞、压损大和维护成本高等缺点。

利用光闪烁法对管道中的烟气流进行监测具有非介入性,可在易爆、高温等极端条件下使用,可同时测量烟气流速、颗粒物浓度和流量等特点。同时,光学遥测减小了维护成本,增加了仪器寿命,且测量结果与温度、湿度和压力等环境因素无关,结果准确可靠。本文介绍了一种以烟气流中颗粒物浓度的起伏所引起的光强闪烁信号为基础,利用互相关技术测量烟气流速和流量的方法。在分析测量原理的基础上,结合管道中气流的数值模拟,对模拟烟道中的烟气流进行测量,与皮托管所测量的数据进行对比,取得了较为一致的结果。

2 原理与方法

2.1 光闪烁成因

一束光通过工业管道烟气流产生闪烁的原因有很多。例如,当光束通过烟气流时,颗粒物随机地进入或移出视场引起光强的起伏^[8~10]。这种由粒子统计起伏造成的闪烁,仅在视场很小、光程很短、粒子直径较大和浓度较低的情况下才能够被观测到。在大型烟道使用较大直径的发射、接收透镜测量光闪烁时,由于粒子数很多,因此闪烁强度很低,一般接收不到颗粒物空间分布统计起伏造成的闪烁信号。在高温烟气流中,因为湍流,很容易造成折射率空间时间的起伏,当光束通过时会产生闪烁。折射率湍流造成的闪烁的频率集中在高频部分,可达到 $几 \times 10^2 \sim 10^3$ Hz。可以利用光闪烁的高频部分进行烟气流速测量^[11,12],但当烟气流中温度分布均匀、折射率起伏很弱的情况下,这种方法就很难测得流速。颗粒物浓度场的起伏同样会造成光闪烁,且烟气流造成的光闪烁的低频部分和颗粒物浓度场的随机起伏有关。利用光闪烁的低频部分进行流速测量适合工业烟道环境,即使在温度分布均匀、折射率起伏很弱的情况下同样有效。且在烟气流光闪烁的低频部分,光强起伏的标准差和颗粒物浓度有很好的线性关系,可用于颗粒物浓度的测量^[13,14]。工业管道环境复杂,造成光闪烁的原因也不限于以上所述。

2.2 光闪烁法测量烟气流速

利用光闪烁法测量烟气流速的示意图如图1所示。双光源放置在 $x=0$ 处,发射的光束为发散的球面波,沿方向横穿烟气流,分别被 $x=L$ 处的两个光电探测器接收。烟气流沿 y 方向流动,速度为 v ,两

光源和两探测器彼此间的距离均为 l 。

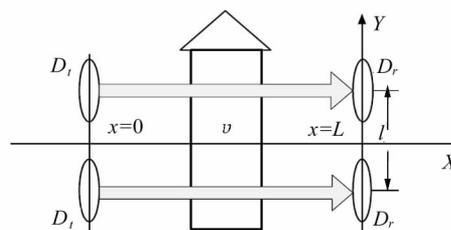


图1 测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring system

受到湍流的影响,光路上的颗粒物浓度 m 产生起伏,有

$$m = m_0 + m' \quad (1)$$

式中: m_0 为颗粒物平均浓度; m' 为浓度的起伏量。设烟气流的消光系数为 α ,则消光系数与颗粒物浓度有

$$\alpha = K_m m \quad (2)$$

式中, K_m 为比消光系数,与粒子的尺度分布、折射指数有关。则在 t 时刻,位置 r 处,消光系数可表示为

$$\alpha(r, t) = \langle \alpha(r, t) \rangle + \alpha'(r, t) \quad (3)$$

其中: $\langle \cdot \rangle$ 表示系综平均; α' 为消光起伏的起伏量。在只考虑点光源、点接收的情况下,由Beer-Lambert定律可得探测器接收到的对数光强 $\ln I(t)$ 为

$$\ln I(t) = \ln \langle I \rangle - \int_0^L \alpha'(r, t) dx \quad (4)$$

对于均匀各向同性、时间平稳的湍流,对数光强闪烁的相关函数可表示为

$$C_{\ln I}(l, \tau) = \int_0^L \int_0^L R_\alpha(|r_1 - r_2|, \tau) dx_1 dx_2 \quad (5)$$

其中: τ 为时间延迟; r_1, r_2 分别为两条光路上的任意一点; $R_\alpha(|r_1 - r_2|, \tau)$ 为消光系数的相关函数。假设烟气流满足湍流冻结假设,根据图1所示的几何关系可得

$$R_\alpha(|r_1 - r_2|, \tau) = R_\alpha(x_1 - x_2, l - v\tau, 0) \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),并根据关于任意偶函数 $f(x)$ 存在的恒等式

$$\int_0^L \int_0^L f(x_1 - x_2) dx_1 dx_2 = 2 \int_0^L (L - x) f(x) dx \quad (7)$$

得到

$$C_{\ln I}(l, \tau) = 2 \int_0^L (L - x) R_\alpha(r) dx \quad (8)$$

其中, $r = \sqrt{x^2 + (l - v\tau)^2}$ 。

根据互相关函数可以有多种方法进行流速的反

演^[11]。其中,最大互相关法是应用最为广泛的一种方法,具有抗干扰能力强、算法简单和准确率高等特点。使用最大互相关技术,可以通过互相关曲线最大值对应的时间延迟 τ 获得流速,即有

$$\bar{v} = \frac{l}{\tau} \quad (9)$$

其中: \bar{v} 表示光路上烟气流体的平均流速; l 为两探测器间的距离。

2.3 光闪烁法测量烟气流量

对于烟气流速的测量,为计算流量提供了基础。假设烟气流充分发展,在测量区域内满足冻结假设,气体流速呈中心对称分布,则理论上对于流量的计算可表示为

$$Q_T = v_c \times s \quad (10)$$

其中: Q_T 为理论流量; v_c 为使用光闪烁互相关法得到的烟气流速; s 为烟道的横截面积。实际工业管道中一般很难满足以上假设条件。为提高实际烟气流量测量的准确性,扩展应用范围,需对流量的计算结果进行标定。引进标定系数 ω 则实际流量 Q 的计算公式为

$$Q = \omega \times v_c \times s \quad (11)$$

这里,采用应用最为广泛的皮托管进行标定。在测量截面选取若干特征点^[15],同时测量各特征点上的烟气流速,利用速度-面积法计算流量 Q_p ,则标定系数 ω 为

$$\omega = \frac{Q_p}{Q_T} \quad (12)$$

3 实验与结果

3.1 管道中烟流体的数值模拟

首先,使用光学测量方法对于管道中的检测区域有一定的要求,例如测量区域应满足湍流冻结假设,颗粒物浓度或水汽浓度在一定范围内,流速分布较稳定等条件,由于工业管道形式多样,对于复杂管

道不可能凭经验或者使用破坏性的方法进行测量来寻找适合的测量区域,数值模拟提供了一个有效的方法来确定测量区域,即仪器在管道上的安装位置;其次,在对流量进行标定时,需选取若干特征点,数值模拟为特征点的选取提供了一个依据;第三,数值模拟提供了一个直观的管道内流体流动、浓度分布和温度分布等情况,为进一步的烟气流分析提供了参考。因此,对于管道流体的数值模拟是利用光闪烁法测量烟气流速和流量的一个必要的步骤。

OpenFOAM(open field operation and manipulation)是一个 Linux 平台下使用 C++ 语言开发的用于连续流场模拟的计算流体力学(CFD)软件工具库。用户可以灵活根据自己的需求在其程序框架上开发自定义解算器和前后处理函数,从而实现针对具体 CFD 问题的求解。

最常见的工业管道为圆形直管道。对圆直烟道进行数值模拟,管道直管段长为 5.5 m,横截面直径为 0.32 m,进风口流速为 6 m/s。使用 Gambit 作为计算网格生成工具,生成三维的圆管道几何模型,网格数为 52 624 0。采用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)算法求解,湍流模型选用标准 $\kappa\epsilon$ 两方程模型^[16]。控制方程组——Navier-Stokes 方程组中各方程的求解参数见表 1。

使用 OpenFOAM 提供的不可压缩稳态求解器 simpleFoam 对管道区域进行求解,得到纵截面和不同位置处的横截面流速等值线图如图 2 所示。

由图 2 可知,管道内烟气流沿轴向不断发展,横截面上的速度分布在持续变化后趋于稳定,在 $x = 4.8$ 和 $x = 5.2$ 处,速度分布基本相同,可以作为光闪烁法测量烟气流速和流量的区域。同时,管道横截面上速度等值线的分布为方便有效地判断特征点选择的合适与否提供了依据。实际上,特征点也可选择在等值线包围的区域之内,特征点上的流速作为此区域的平均速度。对于圆直管道,横截面上速

表 1 Navier-Stokes 方程组求解参数

Tab. 1 Parameters for solving Navier-Stokes equations

Equation	Preprocess	Solution	Relaxation factor	Residual
Pressure equation	DIC	PCG	0.3	1e-05
Momentum equation	DILU	PBiCG	0.7	1e-05
κ -equation	DILU	PBiCG	0.7	1e-05
ϵ -equation	DILU	PBiCG	0.7	1e-05

Note: PCG; preconditioned conjugate gradient method
 BiCG; preconditioned biconjugate gradient method
 DIC; incomplete cholesky factorization
 DILU; incomplete LU decomposition.

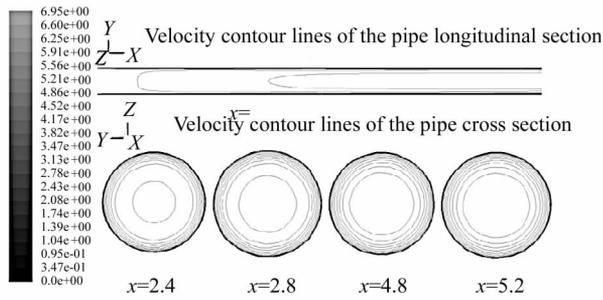


图 2 直管道纵、横截面速度等值线图

Fig. 2 Velocity contours of straight pipe for longitudinal section and cross section

度等值线分布为简单的同心圆环。对于工业现场复杂的管道形状,实际速度等值线分布会变得不规则。数值模拟所产生的等值线,对于特征点选取更具实用价值。

工业现场的排气管道形式多样、几何尺寸较大,为了提高模拟精度,就需要建立大规模的计算网格来模拟大尺寸的管道,计算网格数可以达到 10^9 以上。OpenFOAM 提供的串行计算能力已经不能满足如此大规模的计算量,从而导致开发周期漫长、优化困难等问题。图形处理器(GPU)作为一种低成本、低能耗和高计算密度的并行高性能芯片,为搭建 CFD 计算平台提供了一个很好的选择。采用 CPU/GPU 异构计算平台,编程模型使用 NVIDIA 公司推出的统一计算设备架构(CUDA)对数值模拟进行加

速计算。

对于 simpleFoam 求解器,其计算热点在于大规模稀疏方程组的求解,因此基于 GPU 实现预处理共轭梯度法(PCG)和预处理双共轭梯度法(PBiCG)的并行计算是加速数值模拟的关键。在 OpenFOAM 的软件框架下,新建 PCG 和 PBiCG 的 GPU 版本。图 3 所示为 OpenFOAMGPU 解算器的扩展结构。

图 3 中,lduMatrix::solver 是 OpenFOAM 中所有求解方程组算法的基类;在 GPU 插件模块中新建两个类 PCG_accel 和 PBiCG_accel,实现 PCG 算法和 PBiCG 算法的并行化;ldu2csr() 函数实现系数矩阵存储格式的转化;在 GPU_accel.H 中,利用通用并行算法库 Thrust 和稀疏矩阵库 CUSP 实现具体的并行计算函数。图 4 所示为不同网格数条件下利用 GPU 插件模块加速数值模拟的效果。使用的 CPU 型号为 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E7500/2.93 GHz/内存 2G;GPU 型号:NVIDIA GeForce GTX 570 /CUDA 核心数 480/显存 GDDR5 1280M。

从图 4 可以看出,随着网格数的增加,相对于普通计算平台,GPU 高性能平台对于大规模数值模拟的加速效果更加明显,从而有效解决了实际工业管道中烟气流模拟时间过长的问题,缩短了仪器安装前相关数据计算的时间。

3.2 实验分析

实验装置及结构如图 5 所示。燃烧室产生的烟气通过风机、整流器沿管道轴向流动,通过安装在管

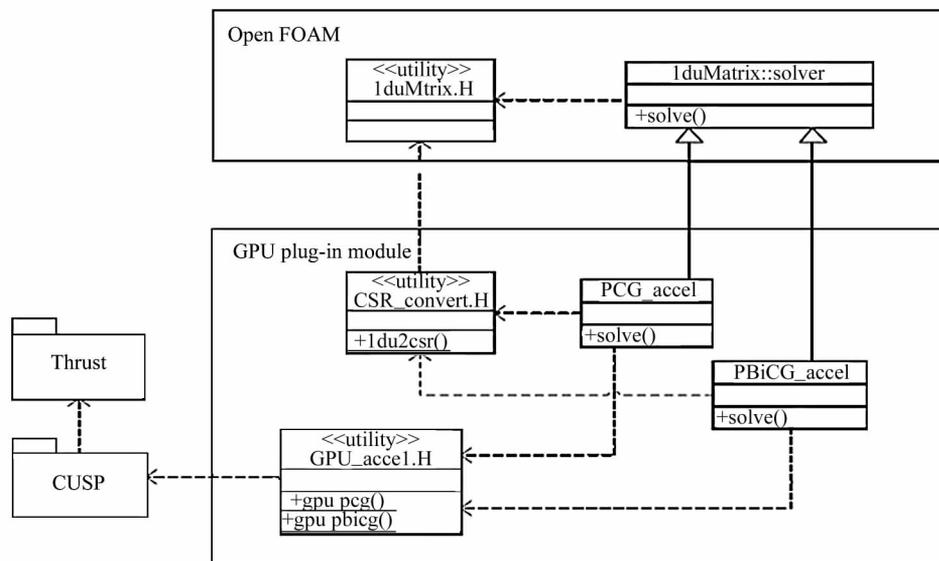


图 3 OpenFOAM GPU 解算器的扩展结构

Fig. 3 Extended structure of OpenFOAM GPU solver

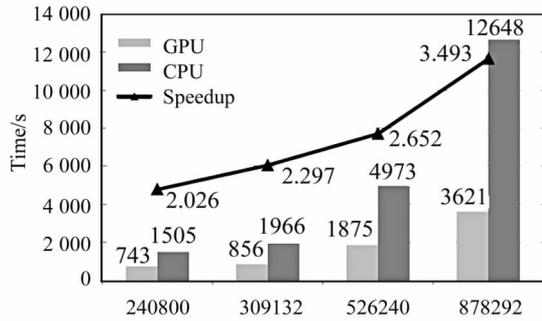


图4 数值模拟在CPU平台和CPU/GPU平台上运行的时间及加速比

Fig. 4 Running time and speed up ratio of numerical simulation on CPU and CPU/GPU platforms

道两侧的测量仪器,根据数值模拟的结果仪器安装的位置距离风机应大于4.8 m。圆直管道横截面直径为0.32 m,长为5.5 m,两探测器距离为0.35 m。光源模块发出高频调制光,经过烟气流到达接收单元,光电探测器产生光电信号,经电路放大、自适应滤波后,由高性能数据采集卡对两路模拟信号进行数据采集,由系统软件对光闪烁信号进行相关计算。

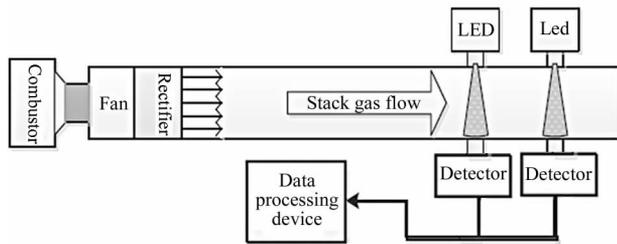


图5 实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

在燃烧室中,利用纸屑的燃烧产生烟气。在燃烧稳定时,使用空气动力学粒度仪(AE3321)测得的粒子浓度谱分布如图6所示。

在此条件下,利用光闪烁法可以连续测得烟气流速。图7所示为两探测器分别接收到的一组光闪烁信号数据及其互相关曲线,采样时间为10 s。

从图7可以看出,两路信号形状相似,具有一定的时间延迟。互相关曲线最大峰值对应的时间即为两路信号的时间延迟 τ ,从而由 l/τ 得到流速。通过调节风机变频器的频率,可以改变管道的入口风速。

图8所示为调节风机变频器在不同频率下光闪烁法测得的流速与皮托管测得数据的对比,两者的测量结果基本一致。

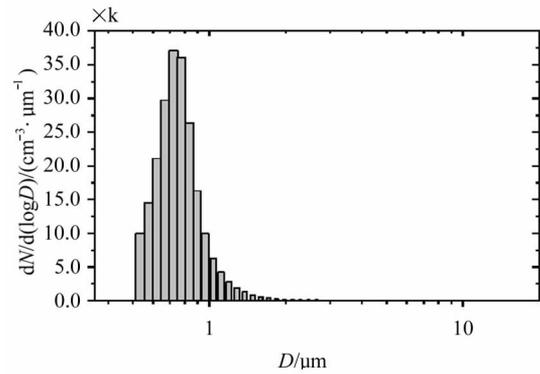
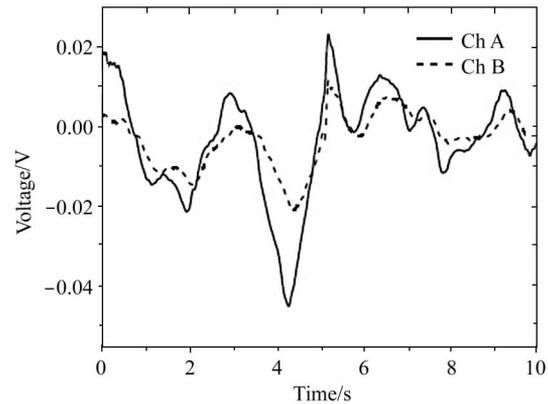
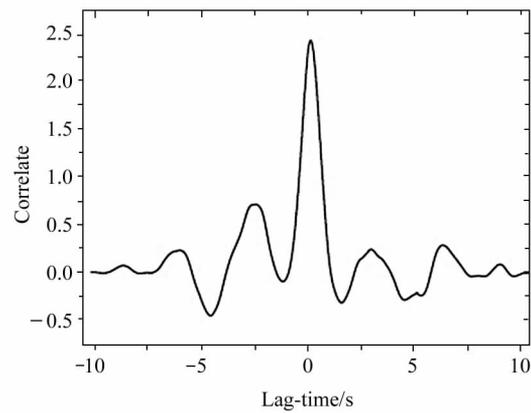


图6 管道内粒子浓度谱分布

Fig. 6 Particle concentration distribution in the pipe



(a) Signals of optical scintillation



(b) Curve of cross-correlation

图7 两路光闪烁信号及其互相关曲线

Fig. 7 Signals and cross-correlation curves of two paths of optical scintillations

对于烟气流量的测量,首先要计算标定系数 ω 。选择适当测速特征点,根据速度-面积法计算流量 Q_P 。特征点的选择可参考表2^[17]。

由于实验烟道直径为0.32 m,且由数值模拟可知测量区域内横截面流速呈中心对称分布,所以选择等面积环数为2,测量直径为1,特征点数为4。分

别距离管道内壁 $0.067D$ 、 $0.25D$ 、 $0.75D$ 和 $0.933D$, 其中 D 为管道横截面直径长度。在距离风机 5.0 m 处的横截面上, 选择 9 个测量点, 其中包括 4 个特征点, 距管道中心距离分别为 -15.500 、 -13.856 、 -12.000 、 -8.000 、 0.000 、 8.000 、 12.000 、 13.856 和 15.500 cm 。使用皮托管连续测量各测点流速, 得到各点的平均流速, 如图 9 所示。其中, 4 个特征点上平均流速分别为 4.27 、 5.12 、 4.95 和 4.11 m/s 。

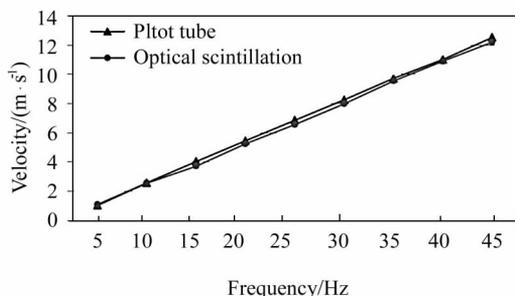


图 8 不同频率下皮托管与光学方法测得的烟气流速
Fig. 8 Gas velocities measured by Pitot tube and optical method under different frequencies

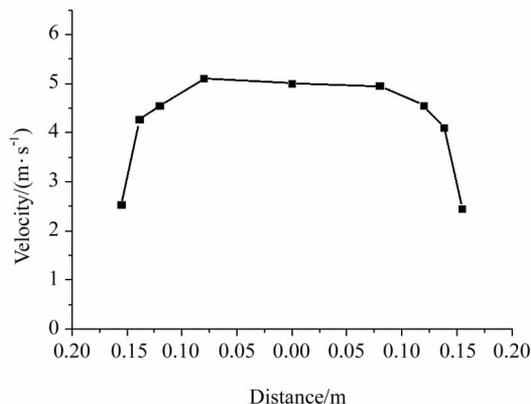


图 9 管道直径上流速的分布
Fig. 9 Velocity distribution along the pipe diameter

表 2 圆形管道的测点分布

Tab. 2 Distribution of measuring points in the pipe

Pipe diameter	Cylinder number	Measuring diameter number	Measuring point number
<0.3			1
$0.3\sim0.6$	1~2	1~2	2~8
$0.6\sim1.0$	2~3	1~2	4~12
$1.0\sim2.0$	3~4	1~2	6~16
$2.0\sim4.0$	4~5	1~2	8~20
>4.0	5	1~2	10~20

与此同时, 利用光闪烁法对管道烟气流速进行连续测量, 测量结果如图 10 所示。测量时间内的平均流速为 4.315 m/s 。

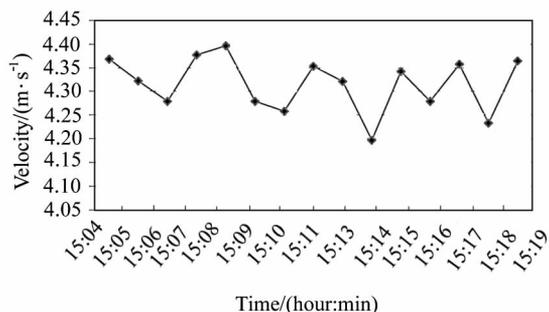


图 10 利用光学方法测得的烟气流速
Fig. 10 Velocities continuously measured by using optical method

根据各特征点流速, 利用速度-面积法计算流量 Q_P 为

$$Q_P = \frac{1}{2}(4.27 + 4.11) \times \frac{1}{2}s + \frac{1}{2}(5.12 + 4.95) \times \frac{1}{2}s = 4.613s \quad (13)$$

利用光闪烁法测得的流速计算理论流量 Q_T 为

$$Q_T = 4.315s \quad (14)$$

则标定系数为

$$\omega = \frac{Q_P}{Q_T} = \frac{4.613}{4.315} = 1.0689 \quad (15)$$

光闪烁测得的流量表达式为

$$Q = 1.0689 \times v_c \times s \quad (16)$$

利用式(16), 可以实时测得管道烟气流量。图 11 所示为光闪烁法测得的一段连续时间内的实时流量与利用皮托管在此段时间内测量的流量平均值的对比。

从图 11 可以看出, 光闪烁法测得的实时流量围绕皮托管测得的平均流量在小范围内上下波动, 其平均值与皮托管测得的结果基本一致。

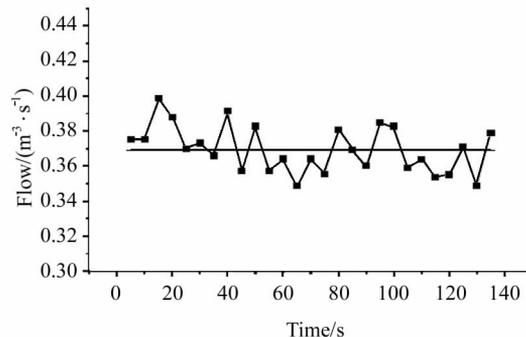


图 11 实时流量测量数据
Fig. 11 Measured flow rates in real time

4 讨论

利用烟气流中颗粒物浓度起伏引起的光闪烁低频信号测量烟气流速和流量。首先利用数值模拟得到管道内烟气流的基本流动信息,为测量提供必要的参考;然后实际测量,并计算流量的标定系数;最后进行流速和流量的实时测量。在数值模拟中利用GPU加速计算,缩短仪器安装的准备时间。在实际应用中,把标定系数作为定值处理并不都能符合客观情况,很多原因导致了标定系数的非线性。例如,工业管道内的流速分布随着雷诺数的改变会发生变化;由于工业控制和工业现场的复杂环境也会导致流速的分布发生不可预期的畸变,从而改变标定系数;光源和传感器等设备的非线性也会导致标定系数的非线性。为了满足标定系数的非线性,可以把标定系数表示为非线性函数,实际上可以利用神经网络对非线性函数的无限逼近能力,把标定系数用神经网络代替,这将是下一步工作的重点。对于管道类型复杂、横截面流速分布不规则的测量环境,可以在横截面的两条直径上分别安装两套设备进行测量,从而提高测量的准确性。

参考文献:

- [1] Klopfenstein Jr R. Air velocity and flow measurement using a Pitot tube[J]. ISA Transactions, 1998, **37**(4): 257-263.
- [2] SHENG Sen-zhi, ZHUANG Yong-ji, LIU Zong-yan. A new type of hot-wire/film anemometer [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, **23**(1): 89-93.
盛森芝,庄永基,刘宗彦.一种新型热线热膜流速计[J].实验流体力学,2009, **23**(1): 89-93.
- [3] Satoru kato, Hivoshi Ito, Tadashi Ichikawa, et al. Laser doppler velocimeter: united states [P]. US: 5, 587, 785, 1996-12-24.
- [4] WANG Zheng-fang, WANG Jing, SUI Qing-mei, et al. A target-type fiber Bragg grating flow velocity sensor[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2012, **23**(1): 1-8.
王正方,王静,隋青美,等.靶式光纤 Bragg 光栅流速传感器的研制[J].光电子·激光,2012, **23**(1): 1-8.
- [5] Miyaji N, Kadoguchi A, Yoshino A. Coriolis flow meter [P]. EP: 2386838, 2011-11-16.
- [6] Brody W R, Meindl J D. Theoretical analysis of the CW doppler ultrasonic flowmeter[J]. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, 1974(3): 183-192.
- [7] WANG Chang. Design for a new type of flowmeter based on fiber optic interferometer for oil well logging[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2012, **23**(6): 1072-1076.
王昌.应用于石油测井的新型光纤干涉流量计的研究[J].光电子·激光,2012, **23**(6): 1072-1076.
- [8] CHEN Jun, SHEN Jian-qi. Transmission fluctuation spectrometry in time domain[J]. J. University of Shanghai for Science and Technology, 2004, **26**(6): 503-508.
陈俊,沈建琪.时间域内的消光起伏光谱法[J].上海理工大学学报,2004, **26**(6): 503-508.
- [9] CHEN Jun, SHEN Jian-qi. Transmission fluctuation spectrometry in time domain[J]. J. University of Shanghai for Science and Technology, 2004, **26**(6): 503-508.
陈俊,沈建琪.时间域内的消光起伏光谱法[J].上海理工大学学报,2004, **26**(6): 503-508.
- [10] Lacaze B. Spectral properties of scattered light fluctuations[J]. Optics Communications, 2004, **232**: 83-90.
- [11] Wang T I, Ochs G R, Lawrence R S. Wind measurements by the temporal cross-correlation of the optical scintillations[J]. Appl. Opt., 1981, **20**(23): 4073-4081.
- [12] Wang T I. Optical flow sensor using a fast correlation algorithm [P]. U. S. P 6, 611, 319, 2003-8-26.
- [13] CHEN An-shi, HAO Ji-ming, ZHOU Zhong-ping, et al. Theoretical solutions for particulate scintillation monitors[J]. Optics Communications, 1999, **166**: 15-20.
- [14] CHEN An-shi, HAO Ji-ming, ZHOU Zhong-ping, et al. Measuring particulate concentration by means of scattered light scintillation [A]. Proc. of SPIE [C]. 2000, **4222**: 71-75.
- [15] ZHOU Ning-ning, LIANG Guo-wei. The comparison of selection of different characteristic points with Area velocity method [J]. Journal of China Institute of Metrology, 2003, **14**(2): 104-108.
周宁宁,梁国伟.速度面积法中不同特征点位置选择法之比较[J].中国计量学院学报,2003, **14**(2): 104-108.
- [16] ZHANG Zhao-shun, CUI Gui-xiang, XU Chun-xiao. Theory and modeling of turbulence [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005, 209-215.
张兆顺,崔桂香,许春晓.湍流理论与模拟 [M].北京:清华大学出版社,2005, 209-215.
- [17] State Environmental Protection Administration. Air and exhaust gas monitoring analysis method [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2003, 339-342.
国家环境保护总局.空气与废气监测分析方法 [M].北京:中国环境科学出版社,2003, 339-342.

作者简介:

杨阳 (1985—),男,江苏徐州人,博士研究生,主要从事光电技术用于环境监测的研究。