

# 复合式质量流量计的研究

Research of the Compound Mass Flow Meter

高永锋 李昌禧

(华中科技大学控制科学与工程系,湖北 武汉 430074)

**摘要:** 针对纸浆液固两相流质量流量和浓度测量过程中存在的问题,研究开发了一种复合式质量流量计。该流量计一方面采用 DSP 和频域相关算法实时、高精度地获取体积流量信号;另一方面采用静刀式浓度变送器获取浓度信号,并通过 C8051F005 单片机间接得到纸浆质量流量。试验表明,该流量计能够同时输出体积流量、浓度和质量流量信号,在纸浆两相流测量领域具有良好的应用前景。

**关键词:** 纸浆 液固两相流 DSP 频域相关 质量流量

中图分类号: TP216+.1 文献标志码: A

**Abstract:** Aiming at the problems of the mass flow and concentration of pulp liquid-solid two-phase flow measuring, a compound mass flow meter is researched and developed. One side, DSP and correlation algorithm of frequency domain are adopted to obtain the volumetric flow signals accurately in real time; on the other hand, the static blade consistency transmitter is used to get the concentration signals, and pulp mass flow is calculated indirectly by C8051F005 MCU. The experimental results show that this flow meter is powerful in functions of outputting volumetric flow, concentration, and mass flow signals simultaneously and features good prospect in the field of measurement for pulp two-phase flow.

**Keywords:** Pulp Liquid-solid two-phase flow DSP Frequency domain correlation Mass flow

## 0 引言

随着自动化技术的不断发展和对工业产品要求的提高,人们对质量流量的关注度越来越高。科里奥利质量流量计是近年来发展较快的一种直接式质量流量计,它在液相流体质量流量测量方面以其高准确度、高重复性和高稳定性得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>,但在多相流测量中还存在测量不稳定、精度容易受多相流浓度的影响等诸多问题。多相流体中各分相的质量流量是多相流测量的关键参数。以纸浆液固两相流为例,在造纸工业中,纸浆浓度和固相纸纤维质量流量实时精确的测量对制作高质量的纸张具有十分重要的意义<sup>[3]</sup>。针对上述工业需求,开发了一种复合式质量流量计。该流量计由纸浆体积流量测量、浓度测量和质量流量运算这三大模块构成,属于间接式质量流量计,但三大模块集中在一个仪表中,安装使用方便,且测量精度可靠。

## 1 质量流量测量原理

纸浆体积流量的测量基于相关测量原理<sup>[4]</sup>,在管道上相距  $L$  处安装两路结构完全相同的光纤传感器,

用来采集管道中与被测流体相关的随机流动噪声信号,并通过信号调理得到  $x(t)$  和  $y(t)$  两路信号。根据相关理论,将这两路信号作互相关运算,得到互相关函数  $R_{xy}(\tau)$  的图形,其计算公式如式(1)所示:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t)x(t-\tau) dt \quad (1)$$

式中: $y(t)$  和  $x(t-\tau)$  为传感器采集到的两路信号; $\tau$  为不同的延时值,s; $T$  为积分时间,s。

在理想流动状态下,假设流体为“凝固”流动模型。对两相流而言,即假设流体在流动中离散相的尺寸分布和空间分布状况保持不变,该图形的峰值所对应的时间位移  $\tau_0$  可看作是流体流过距离为  $L$  的上下游传感器所用的时间,因此被测流体的平均流速可表示为:

$$v_{cp} = L/\tau_0 \quad (2)$$

式中: $v_{cp}$  为流体平均流速,m/s; $L$  为上下游传感器之间的距离,m; $\tau_0$  为互相关函数峰值时间,s。

因此,被测流体的体积流量  $Q_v$  可表示为:

$$Q_v = kv_{cp}A \quad (3)$$

式中: $A$  为管道横截面积,m<sup>2</sup>; $k$  为相关流量计的仪表系数,它与传感器的几何尺寸、流体速度分布廓形等因素有关,一般需要通过试验进行标定。

一般来说,“凝固”流动模型的假设在实际流动系统中是不可能满足的,在相关流量测量系统中,如果上

修改稿收到日期:2011-09-29。

第一作者高永锋(1986-),男,现为华中科技大学检测技术与自动化装置专业在读硕士研究生;主要从事检测技术与智能仪表方面的研究。

下游传感器之间的距离足够小,被测流体从上游传感器所在的横截面处流动到下游传感器所在的横截面处,即流体流动模型的变化相对来说比较小时,即可近似地认为该流动系统满足“凝固”流动模型假设<sup>[5]</sup>。本系统中,在光纤传感器探头上开有两个直径为 2 mm 的圆形透光孔,两孔中心距离  $L = 10$  mm。试验表明,从上下游传感器获得的随机信号相关性良好,近似满足相关流量系统的“凝固”流动模型。

纸浆浓度测量基于剪应力测量原理,采用静刀式浓度变送器<sup>[6]</sup>,通过测量作用在刀形敏感元件上的剪应力,得到纸浆浓度值。由于静刀式浓度测量属于被动测量,流体流速对测量结果有较大影响。因此,通过相关流量计所测得的流速也将用于浓度信号的流速补偿,即可得到更精确的浓度和质量流量信号。在本系统中,将流速值存入共享存储器中,浓度测量模块一方面从共享存储器中取出流速值进行补偿;另一方面将补偿后的浓度值存入共享存储器中,以用于质量流量的计算。

复合式质量流量计利用纸浆体积流量  $Q_v$  与固相纸纤维的浓度  $c$  进行计算处理,从而实现测量<sup>[7]</sup>,其瞬时质量流量  $q_m$  为:

$$q_m = K_1 K_2 c Q_v \quad (4)$$

式中: $Q_v$  为体积流量,  $m^3/h$ ;  $c$  为纸浆浓度, %;  $K_1$  为纸浆密度、打浆度等特征修正参数;  $K_2$  为质量流量计系统的误差特征修正系数。其中的  $K_1$  和  $K_2$  两个修正参数根据试验进行标定。通过多次试验,在单片机中存入不同工况条件下的数值表,现场应用时根据不同的输入信号值可以进行高精度运算。

而累计质量流量  $Q_m$  为:

$$Q_m = \int_0^t q_m dt = \sum_{i=1}^N q_i \Delta t \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中: $q_i$  为第  $i$  秒采样的瞬时流量均值,  $kg/s$ ;  $\Delta t$  为累计时间间隔,  $s$ 。

## 2 系统结构设计

复合式质量流量计由两台传感器、两台变送器、一台共享存储器和一台质量流量运算计组成。

上下游传感器均采用光纤传感器,若要能够从管道中获取微弱的两路随机噪声信号,发光器件要具有较高的光发射功率,同时,对光源波长的选择不仅要考虑光传输器件的损耗和与光接收器件灵敏度的光谱特性的匹配,还要考虑纸浆介质对多种波长光的吸收特性。光接收器件用于接收纸浆调制的微弱光信号并转化为电信号,因此要具有较高的信噪比和光电转换灵敏度,同时要与发射器件波长匹配。本系统采用波长

为 940 nm 的红外发光二极管和光敏二极管组成的对管,在管道中对随机信号进行采集,能实现光谱特性的最佳匹配,不易受杂散光的干扰,器件一致性好<sup>[8-9]</sup>;同时,试验调整发光二极管的电流,使其有适当的光发射功率,光传输器件采用光纤传输,传光效率高。

系统结构如图 1 所示。

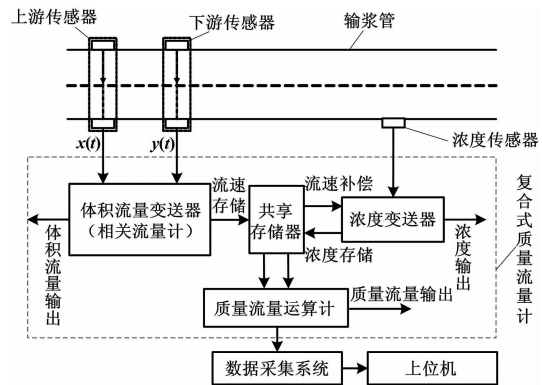


图 1 系统结构图

Fig. 1 Structure of the system

将光纤传感器得到的两路随机信号传输到体积流量变送器,以进行纸浆体流量的实时计算,并将结果按照一定规则存入共享存储器中。由单片机构成的质量流量运算计从共享存储器中取出体积流量和浓度值,根据式(4)计算出纸浆的质量流量,整个系统既可以现场显示,也可以通过上位机完成数据处理管理。

## 3 相关流量计的实现

体积流量测量系统基于相关流量测量原理<sup>[10-12]</sup>,以 TMS320VC5402 芯片的 DSP 和 EPM240T10015 芯片的 CPLD 为核心,采用 DSP 内部的库函数完成快速傅里叶变换,能够实时、高精度地计算出相关流速和体积流量。

测量系统原理框图如图 2 所示。

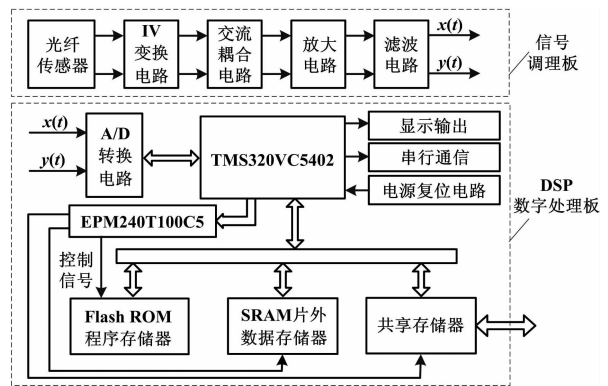


图 2 测量系统原理图

Fig. 2 Principle of measurement system

整个体积流量测量系统以 DSP 为核心,通过红外光纤传感器采集管道中的两路随机信号,经过 I/V 变换、交流耦合、放大和滤波,电路完成信号调理,使得输入到 A/D 转换器中的信号幅值在 0~2.5 V 之间。两路随机信号的采集和调理电路必须完全相同,才能保证以足够的精度进入 DSP 完成数字相关运算。因此,在调理板上的元件布局布线、器件一致性的选择都至关重要。

根据相关理论,时域的数字相关算法可表示为:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n)x(n-\tau) \quad (6)$$

式中: $x(n-\tau)$ 、 $y(n)$ 分别为上下游传感器获得的流动噪声信号抽样函数; $n=i\Delta$ ,其中, $\Delta = \frac{T}{N}$ 为抽样时间间隔, $N$ 为抽样点数。

由式(6)可知,在不同的延时值 $\tau$ 下,互相关函数有唯一的值,而当互相关函数达到峰值时,所对应的延时值 $\tau_0$ 是系统测量需要的关键参数,函数的幅值大小并不具有实际的意义。因此,为了在 DSP 中进行快速的计算,将式(6)中的比例因子 $1/N$ 去掉。为了加以区别,将去掉比例因子的互相关函数用 $r_{xy}(\tau)$ 表示,即:

$$r_{xy}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n)x(n-\tau) \quad (7)$$

该系统中的抽样时间间隔采用 DSP 的定时器  $T_0$  溢出中断控制,通过向  $T_0$  相关寄存器中写入不同的值可改变采样速率。A/D 转换采用 MAX1295 芯片和 12 位并行转换器,最高采样频率可达 256 kHz。

由式(7)可知,数字相关器在时域计算  $N$  点要进行  $N^2$  次乘法和  $N(N-1)$  次加法,计算量很大。根据数字信号相关理论,将这两路信号分别进行周期化延拓,并进行离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT),可以得到  $X(k)$  和  $Y(k)$ ,若:

$$\begin{cases} X(k) = \text{DFT}[x(n)] \\ Y(k) = \text{DFT}[y(n)] \\ R_{xy}(k) = \text{DFT}[r_{xy}(\tau)] \end{cases} \quad (8)$$

则可以证明:

$$R_{xy}(k) = X(k) \times \overline{Y(k)} \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (9)$$

式中: $\overline{Y(k)}$ 为  $Y(k)$  的共轭复数。

采用频域数字相关法计算相关函数的步骤归纳如下。

- ① 将采样得到的两路随机信号进行周期化延拓,即在其后面补零,避免信号混叠;
- ② 对周期化延拓后的两路信号分别进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)变换;
- ③ 用式(9)计算  $R_{xy}(k)$ ;
- ④ 对  $R_{xy}(k)$  进行快速傅里叶逆变换(inverse fast Fourier transform, IFFT),得到的前  $N$  个点即为相关函

数在  $\tau > 0$  时的函数值。

本系统采用 DSP 作相关运算,运用 TI 公司内部的库函数作 FFT 和 IFFT,可达到算法的最优、高效。同时,将得到的流速存入共享存储器中,以备浓度补偿和质量流量的计算,其软件流程图如图 3 所示。

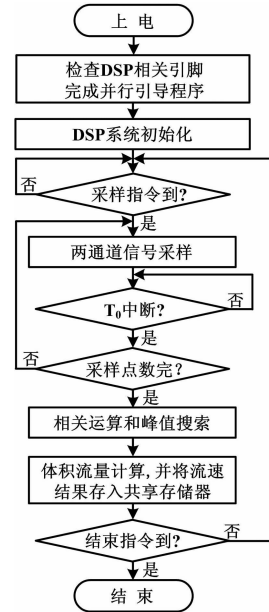


图 3 相关流量计流程图

Fig. 3 Flowchart of correlation flow meter

#### 4 质量流量运算模块设计

质量流量运算是整个系统进行质量流量数据计算的中心。其软件程序流程图如图 4 所示。

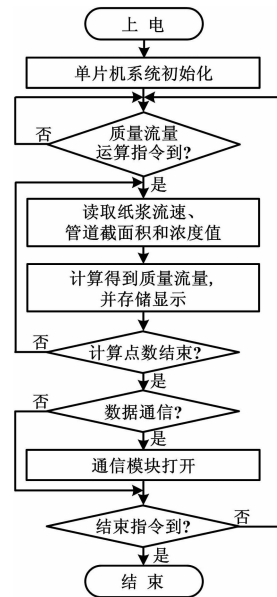


图 4 主程序流程图

Fig. 4 Flowchart of the main program

本系统采用 C8051F005 单片机为核心,根据共享存储器中取得的流速信号  $v_{cp}$ 、管道截面积  $A$ ,由式(3)计算得到体积流量  $Q_v$ 、浓度信号  $c$ ;再根据式(4)计算得到纸浆质量流量。式(4)中的两个系数根据试验进行标定得到不同条件下的系数表,将此表存入单片机中可用于高精度的计算。同时,采用 AD421 完成 4 ~ 20 mA 电流环电路,并配有 RS-485 数据通信功能,可实现模拟和数字信号的远传,系统的键盘显示功能可进行现场操作显示控制。

### 5 试验结果及分析

试验条件为:管径取 DN60、上下游传感器中心距离  $L = 10$  mm、采样频率为 10 kHz、采样点数为 512 个点、流速为 2 m/s。相关函数试验曲线如图 5 所示。

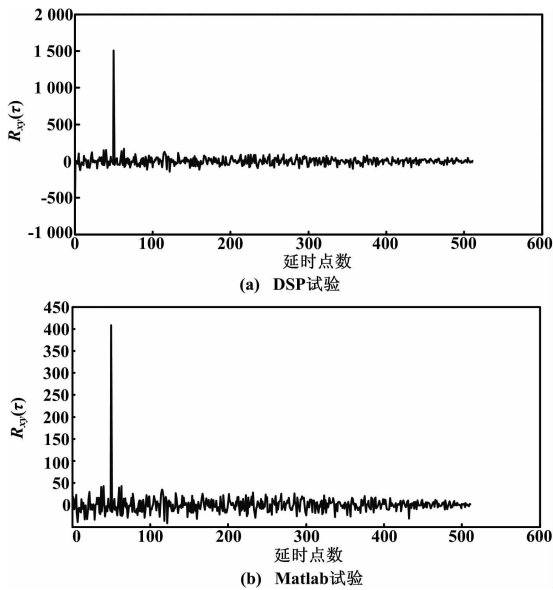


图 5 相关函数试验曲线图  
Fig. 5 Experimental curves of correlation function

由图 5 可以看出,采用频域相关算法计算得到的互相关函数值在延时  $\tau > 0$  时,曲线与时域的互相关运算曲线完全吻合,最大峰值在同一点达到(这里在第 50 个点达到),只是在幅值上差一个倍数。由于相关流量计只关心延时  $\tau > 0$  时最大峰值点对应的延时  $\tau_0$ ,因此,可采用频域相关算法进行纸浆体积流量的快速计算。

由 Matlab 模拟的在不同纸浆浓度下的质量流量和流速变化曲线与不同流速下(即体积流量)的质量流量与浓度变化曲线如图 6 所示。其中,纸浆浓度在 2% ~ 6% 之间、流速在 0.2 ~ 3 m/s 之间、采样频率设定为 10 kHz。

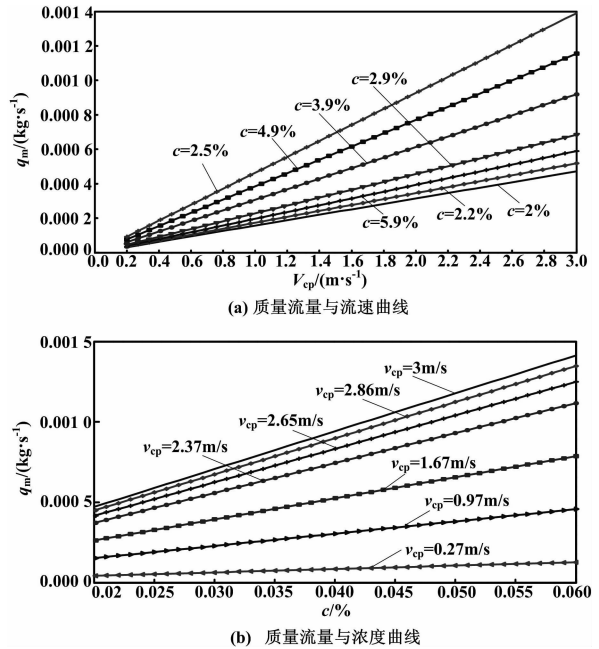


图 6 质量流量仿真曲线图  
Fig. 6 Simulation curves of mass flow

由图 6 可以看出,曲线的斜率都随着浓度和流速的增大而增大。该斜率反映了两个修正系数的值。在实际应用中,可根据试验数值进行标定,得到实际的浓度、流速与修正系数的曲线图,以便在现场应用中进行高精度计算。

### 6 结束语

本研究的复合式质量流量计有效地实现了对纸浆液固两相流的浓度、体积流量和质量流量的同时测量。整个系统以 DSP 和单片机 C8051F005 为核心,采用高速 A/D 采样和频域相关算法,保证了信号的实时获取和高精度处理,能够满足工业现场的实时性和精度要求。此外,还配备丰富的显示、RS-485 数字和 4 ~ 20 mA 模拟通信功能,在液固两相流测量中将有很好的应用前景。

#### 参考文献

- [1] Wang L J, Hua L, Zhu Z C, et al. Analytical calculation of sensitivity for Coriolis mass flowmeter[J]. Measurement, 2011(44): 1117 - 1127.
- [2] 李叶. 科里奥利质量流量计数字信号处理算法的研究与实现[D]. 合肥:合肥工业大学, 2007.
- [3] 梁国伟, 蔡武昌. 流量测量技术及仪表[M]. 北京:机械工业出版社, 2002: 334 - 376.
- [4] 李昌禧. 智能仪表原理与设计[M]. 北京:化学工业出版社, 2005: 108 - 144.
- [5] 徐苓安. 相关流量测量技术[M]. 天津:天津大学出版社, 1988: 81 - 84.

(下转第 82 页)