Research on a Reconstruction Method of Conductive Continuous Phase Velocity*

LI Xuejing[1,2*]

(1.*Shanghai Test and Measurement Technology Research Institute*, *Shanghai* 201203, *China*;
2.*Shanghai Key Laboratory of On-line Testing and Control Technology*, *Shanghai* 201203, *China*)

Abstract: As a non-invasive on-line process imaging technology, electromagnetic flowmeter (EMFM) can achieve multi-phase flow measurement under the condition of simplified flow pattern judgment. Conductive continuous phase velocity reconstruction method is one of the key technologies of electromagnetic multiphase flow measurement. Based on Discrete Fourier Transform (DFT), a method for reconstructing the flow rate of a conductive continuous phase is proposed. In this method, the flow rate of the conductive continuous phase is set as the superposition of multiple velocity sub-items. The multi-electrode electromagnetic flowmeter is used to obtain the induced potential distribution at the measurement electrode. The DFT coefficient is used to determine the direction angle of the flow rate component and the conductive continuous phase is reconstructed. Simulation and real-flow experimental results show that the DFT-based method for the reconstruction of the continuous flow velocity of the conductive phase is effective and reliable.

Key words: electromagnetic sensor; velocity reconstruction; fourier theory; multiphase flow
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2020.09.016

一种导电连续相流速重构方法研究*

李雪菁[1,2*]

(1.上海市计量测试技术研究院, 上海 201203; 2.上海市在线检测与控制技术重点实验室, 上海 201203)

摘 要: 作为非侵入式在线过程成像技术, 电磁流量计可以在简化流型判断的情况下很好的实现多相流的测量。导电连续相流速重构方法是电磁式多相流测量的关键技术之一。基于离散傅立叶理论(Discrete Fourier Transform, DFT), 提出一种导电连续相流速重构方法。该方法将导电连续相流速设为多个速度分项的叠加, 通过多电极电磁流量计获得测量电极处感应电势分布, 利用 DFT 的系数确定流速分量的方向角进而对导电连续相进行重构。仿真及实流实验结果表明, 基于 DFT 的导电连续相流速重构方法的有效性及可靠性。

关键词: 电磁式传感器; 流速重构; 傅里叶理论; 多相流
中图分类号: TN973.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2020)09-1327-06

在化工、石油等行业生产场合中涉及到多相流流动工况十分普遍。与单相流相比, 多相流不仅流动特征复杂, 且各相间存在截面效应和相对速度, 相界面在空间和时间上都存在随机性, 导致多相流流量测量的难度很大。随着石油、深海采矿、航空航天业的发展, 以及人类对环境保护的日益重视, 需要在不使用大型测试分离器及放射源的情况下, 对多相流流量测量, 这对多相流测量技术提出了巨大的挑战。

电磁流量计是利用法拉第电磁感应定律测量导电流体体积流量的感应式仪表, 因其自身测量精度高、非侵入性等优点被广泛应用于工业过程控制中。近年来, 传统电磁流量计技术已经得到了很大的扩展, 学者们尝试秉承电磁流量计的优势, 并将其运用到多相流的测量。但是传统电磁流量计测量是基于对称原理的, 而多相流是非对称的, 因此通过增加更多的电极实现非对称流的测量。

项目来源: 上海市市场监督管理局科研项目(2019-20)
收稿日期: 2020-05-27 **修改日期**: 2020-08-27

Horner[1]提出六电极电磁流量计测量平均流速,并且通过实验证明多电极电磁流量计对速度分布不敏感。Bates[2]设计九对电极沿管道轴向平行布置的电磁流量计,并在实际装置的缩比模型中验证其测量性能。导电连续相重构方法是应用电磁流量计测量多相流流速的关键技术之一。但之前的学者们未能给出关于局部流速的分析方法。很多学者将电磁流量计的最重要理论之一权重函数理论运用到多相流分析中。Xu 等[3]改进了一种非轴对称速度剖面重建算法。Honda[4]利用传感器中液位与权重函数关系重建流场。Leeungculsatien 等[5]在现有权重函数理论基础上,发展了一种区域权重函数并实现轴向流速重构。天津大学[6]利用多电极电磁流量计并结合权重函数实现对固-液两相流截面方向水流速度分布。河北科技大学利用对权重函数矩阵求逆的方法对流速进行重构[7]。研究者们基于电磁流量计的权重函数理论构建有效截面的流场,但因为实时性等在实际应用中该方法受到一定的限制。也有学者利用逻辑算法实现流速重构,但是大多针对两相流,例如北京交通大学[8]、西安电子科技大学[9]利用一种改进的粒子群算法研究了两相流中流体流速重构。河南理工大学[10]采用一种改进的极小范数对两相流重构进行研究。北京大学[11]开发了一种改进的滤波反投影方法,并尝试用于非轴对称速度剖面重建算法。赵耀等[12]针对椭圆截面管道的流场分布进行了研究。东北电力大学[13]对二维流场进行仿真,相对于其他学者的三维流速的分析,在分析维度上是一个退步,但是分析了特殊工况下的流速分布进行了分析[14-15]。

尽管目前已有的部分研究结论为本文的研究奠定了基础,但是如何实现快速且高精度的流速分布重构算法仍是多相流研究的热点之一。本文基于离散傅里叶理论(Discrete Fourier Transform,DFT),将速度分解为速度分项的叠加,通过测量多电极电磁流量传感器的电势分布获得速度分布的解析函数,实现导电连续相速度分布重构。该方法的优势在于,不但可以实现在测量管段任何位置处导电连续相的速度,且可以应用于两相流及三相流。

1 背景理论分析

1.1 多电极结构分析

传统电磁流量计对测量截面处的流体速度分布十分敏感。实际工况存在测量管道倾斜、被测流体中含有非导电相等情况,使得测量结果误差较大。

多电极电磁流量传感器可以多角度、多位置的测量弦端感应电动势,获取更详细丰富的电动势信息,得到非轴对称流平均流速,实现流量的精确测量。电极数目越多,获取的感应电压信息越详细,平均流速的测量精度也会随之提高,但从实际加工手段与经济性、可靠性来讲并不可取,而且电极数目增加会降低系统的信噪比、加大信号检测难度,还延长数据采集的时间,降低系统实时性。

为了选择合适的电极数量,针对不同流型下的估计偏差如表 1。根据分析可知,本文选用十六电极的设计较优[16]。

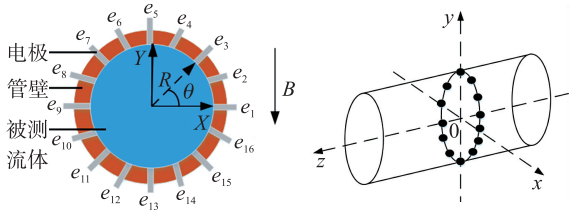
表 1 不同流型下不同电极数目的估计偏差

单位:%

电极数	单峰流	偏峰有回流	层流
4	−0.833	−1.455	−0.272
8	−0.224	−0.188	−0.272
16	−0.228	−0.144	−0.272
32	−0.228	−0.144	−0.272

1.2 极坐标下传感器测量方程

本文所研究的传感器内径为 R,磁场方向为 y 方向,管道的轴线方向为 z 方向,流体流动截面中的轴向速度分布可能不均匀,即流动具有轴向速度分布(结构示意图 1)。



(a) 2D图 (b) 3D图(增加)

图 1 多电极传感器结构示意图(线圈未画出)

在二维空间下,电磁流量计的测量方程为[17]:

$$U(\boldsymbol{x}')=\iint_{\Omega}\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x})[\boldsymbol{B}(\boldsymbol{x})\times\mathrm{grad}G(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}')]\mathrm{d}^2x=\iint_{\Omega}v_z\left(B_x\frac{\partial G}{\partial y}-B_y\frac{\partial G}{\partial x}\right)\mathrm{d}^2x \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{x})$为磁感应强度;$G(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}')$为格林函数;$\boldsymbol{x}'$为电极位置;$\boldsymbol{x}$为积分变量。

假设流速场为 z 方向(如图 1(b)),即

$$\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x})=[0,0,v_z] \tag{2}$$

将电磁流量计的测量方程转换为极坐标下,即有

$$\boldsymbol{x}'=\boldsymbol{R}(\cos\theta,\sin\theta),\boldsymbol{x}=\boldsymbol{r}(\cos\vartheta,\sin\vartheta) \tag{3}$$

引入格林函数:

$$G(r,\vartheta,R,\theta)=-2\ln R+\frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k}\left(\frac{r}{R}\right)^k\cos k(\vartheta-\theta) \tag{4}$$

式中:$0\leqslant\vartheta,\theta<2\pi,0\leqslant r<R$

假设磁场均匀,且为 y 的负方向,即

$$\boldsymbol{B}=B[0,-1] \tag{5}$$

在极坐标下,根据式(3)、(4),图 1 所示的传感器的测量方程式(1)可以表示为:

$$U(\theta)=\frac{B}{\pi}\int_0^R\int_0^{2\pi}v_z\sum_{k=1}^{\infty}\cos[(k-1)\vartheta-k\theta]\mathrm{d}\vartheta\mathrm{d}r \tag{6}$$

2　基于 DFT 的流速重构方法

2.1　感应电势沿管壁周向分布

基于 DFT,电极截面 Z 方向的流速可表达为:

$$v_z(r,\vartheta)=\frac{1}{2}c_0(r)+\sum_{k=1}^{\infty}c_k(r)\cos(k\vartheta)+s_k(r)\mathrm{Sin}(\mathrm{k}\vartheta) \tag{7}$$

其中系数为:

$$c_k(r)=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}v_z(r,\vartheta)\cos(k\vartheta)\mathrm{d}\vartheta,\ k=0,1,2,\cdots \tag{8}$$

$$s_k(r)=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}v_z(r,\vartheta)\mathrm{Sin}(k\vartheta)\mathrm{d}\vartheta,\ k=1,2,\cdots \tag{9}$$

由式(8)~式(10)可知,感应电势式(6)可表达为:

$$U(\theta)=B[M_1(c_0)\cos\theta+\sum_{k=1}^{\infty}M_{k+1}(c_k)\cos(k+1)\theta+M_{k+1}(s_k)\sin(k+1)\theta] \tag{10}$$

式(11)中系数为:

$$M_{k+1}(c_k)=\int_0^R c_k(r)\left(\frac{r}{R}\right)^{k+1}\mathrm{d}r,\ k=0,1,2,\cdots \tag{11}$$

$$M_{k+1}(s_k)=\int_0^R s_k(r)\left(\frac{r}{R}\right)^{k+1}\mathrm{d}r,\ k=1,2,\cdots \tag{12}$$

2.2　基 DFT 的速度分量的确定

如图 2 所示,导电连续相流速 v_n 只与方向角 $\theta_{Q,n}$ 有关:

$$v_n(x;y)=a_n\frac{(x\cos\theta_{Q,n}+y\sin\theta_{Q,n})^n}{R^n} \tag{13}$$

式中:$\theta_{Q,n}$ 为流体与 x 轴的方向角。

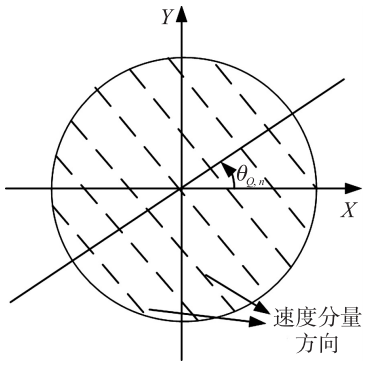


图 2　导电连续相流速方向角示意图

当流速分布均匀,即没有沿 $\theta_{Q,n}$ 的分量时:

$$v_0=a_0 \tag{14}$$

v_n 切割磁力线产生的电势分布:

$$U(\theta)=\frac{1}{(n+1)2^n}a_{n,n}BR\sum_{k=0}^{[n/2]}\binom{n+1}{k}\times\{\cos[(n-2k)\theta_{Q,n}]\cos[(n-2k+1)\theta]+\sin[(n-2k)\theta_{Q,n}]\sin[(n-2k+1)\theta]\} \tag{15}$$

式中:

$$\left[\frac{n}{2}\right]=\begin{cases}n/2 & n\text{ 为偶数}\\(n-1)/2 & n\text{ 为奇数}\end{cases} \tag{16}$$

由式(16)利用 DFT 确定速度分量,见式(18)~(19)。

当 n 为奇数

$$v_n(x;y)=a_{n,n}\frac{(x\cos\theta_{Q,n}+y\sin\theta_{Q,n})^n}{R^n}+a_{n,n-2}\frac{(x\cos\theta_{Q,n}+y\sin\theta_{Q,n})^{n-2}}{R^{n-2}}+\cdots+a_{n,1}\frac{x\cos\theta_{Q,n}+y\sin\theta_{Q,n}}{R} \tag{17}$$

当 n 为偶数

$$v_n(x;y)=a_{n,n}\frac{(x\cos\theta_{Q,n}+y\sin\theta_{Q,n})^n}{R^n}+a_{n,n-2}\frac{(x\cos\theta_{Q,n}+y\sin\theta_{Q,n})^{n-2}}{R^{n-2}}+\cdots+a_{n,0} \tag{18}$$

系数为

$$a_{n,n-2}=-\frac{n-1}{4}a_{n,n} \tag{19}$$

$$a_{n,n-4}=-\frac{n-3}{(n+1)2^4}\binom{n+1}{2}a_{n,n}-\frac{n-3}{2^2}a_{n,n-2} \tag{20}$$

…

$$a_{n.n-2m}=-\frac{(n+1-2m)}{(n+1)2^{2m}}\binom{n+1}{m}a_{n,n}-\frac{(n+1-2m)}{(n-1)2^{2m-2}}\binom{n-1}{m-1}\times a_{n,n-2}-\frac{(n+1-2m)}{(n-3)2^{2m-4}}\binom{n-3}{m-2}a_{n,n-4}-\cdots-\frac{(n+1-2m)}{(n+1-2(m-1))2^2}\binom{n+1-2(m-1)}{1}a_{n,n-2(m-1)} \tag{21}$$

式中:

$$m=\begin{cases}\dfrac{n}{2} & n\text{ 为奇数}\\[2ex]\dfrac{n-1}{2} & n\text{ 为偶数}\end{cases} \tag{22}$$

因此

$$U_n(\theta)=K_n\{\cos(n\theta_{Q,n})\cos[(n+1)\theta]+\sin[(n+1)\theta]\} \tag{23}$$

式中：

$$K_n=\frac{1}{(n+1)2^n}a_{n,n}BR \tag{24}$$

式中：B 为磁通密度，R 为测量管道半径。

流体产生的感应电势测量管壁方向分布记为 $\widetilde{U}U(\theta)$。$\widetilde{U}(\theta)$ 可以通过 n 的各分量 $U(\theta)$ 求和获得，系数为式(25)

$$K_n=\pm 2|X_{n-1}| \tag{25}$$

通过式(26)~(28)，得到 $a_{n,n}$

当 $n=0,1$ 时

$$a_{0,0}=\mathrm{sgn}(\mathrm{Re}X_1)\frac{2}{BR}|X_1| \tag{26}$$

$$a_{1,1}=\frac{8}{BR}|X_2| \tag{27}$$

当 $n=2,>2$ 时

$$a_{n,n}=\pm\frac{(n+1)2^{n+1}}{BR}|X_{n+1}| \tag{28}$$

2.3 基于 DFT 的感应电势在管壁周向分布

基于 DFT，通过 $\widetilde{U}(\theta)$ 计算速度分布。将流体切割磁力线产生的感应电势离散化，得到测量电极位置处的电势 $U_p(p=0,1,\cdots,N-1)$，即电势沿测量管壁周向的分布。

$$X_n=\frac{1}{N}\sum_{p=0}^{N-1}U_p\exp[-(2\pi np/N)j],n=0,1,\cdots,N-1 \tag{29}$$

式中：N 为电极数。

流速的方向角 ψ_n：

$$\psi_n=\arctan\frac{\mathrm{lm}(X_n)}{\mathrm{Re}(X_n)} \tag{30}$$

基于以上分析，流速分布的重构关键在于方向角参数的确定。根据流速分量表达式(17)、式(18)，

①当 n 为奇数，且 $a_n>0$ 或 $a_n<0$ 时，

$$\theta_{Q,n}=-\frac{\psi_{n+1}}{n}+\frac{2k\pi}{n},\theta_{Q,n}\in\left[\frac{(2k-1)\pi}{n},\frac{(2k+1)\pi}{n}\right),\quad k=0,1,\cdots,n-1 \tag{31}$$

②当 n 为偶数，且 $a_n>0$ 时，

$$\theta_{Q,n}=-\frac{\psi_{n+1}}{n}+\frac{2k\pi}{n},\theta_{Q,n}\in\left[\frac{(2k-1)\pi}{n},\frac{(2k+1)\pi}{n}\right),\quad k=0,1,\cdots,n/2-1 \tag{32}$$

③当 n 为偶数，且 $a_n<0$ 时，

$$\theta_{Q,n}=-\frac{\psi_{n+1}}{n}+\frac{(2k+1)\pi}{n},\theta_{Q,n}\in\left[\frac{2k\pi}{n},\frac{2(k+1)\pi}{n}\right),\quad k=0,1,\cdots,n/2-1 \tag{33}$$

3 实验结果及分析

3.1 气-液两相流仿真实验

通过式(31)~式(33)确定流速分量 $v_n(x;y)$ 的 n 的解，因此重构导电连续相流速分布，需要确定最优解。

16 个电极将测量管内部空间分为 30 个微元(如图 3 所示)，电极输出电势信号为传感器内微元产生的感应电势总和，见式(34)。

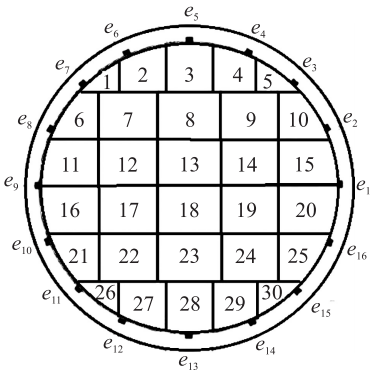


图 3 传感器微元划分示意图

$$\hat{U}_j=\frac{2B_{op}}{\pi R}\sum_{i=1}^{M}V_iW_{ij}A_i,j=1,2,\cdots,N-1 \tag{34}$$

式中：$\hat{U}_j$ 为电极 j 测得的感应电势；V_i 为微元处的流速；W_{ij} 为微元处的平均权重函数值；A_i 为所在微元的面积；R 为传感器内径；B_{op} 为磁感应强度，若非均匀磁场，B_{op} 为图 3 中 e_{13} 处磁感应强度。

可通过式(35)最小值确定最优解，即流速分量 $v_n(x;y)$ 的 n 的解。

$$(S_U)_{\min}=\sum_{i=1}^{n}(\hat{U}_{j,\mathrm{ref}}-\hat{U}_j)^2 \tag{35}$$

式中：$\hat{U}_{j,\mathrm{ref}}$ 为各电极与 e_5 之间的电势差，n 为 15。

根据以上分析，利用 Comsol Multipysics with MATLAB 计算。构建模型如图 4 所示，传感器内径为 80 mm，管壁厚度为 5 mm，传感器长度为 120 mm。16 个电极均匀分布在管壁，每两个间隔

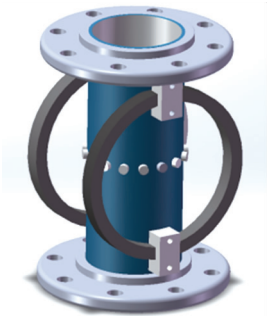
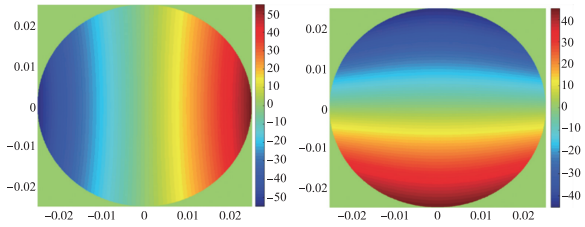


图 4 传感器模型

22.5°。励磁线圈采用 Helmholtz 线圈,线圈内径 204.8 mm,外径 255 mm。

测量管道内的磁感应强度计算结果如图 5 所示,电极 e13 处的感应强度为 0.005 T。



(a) x方向磁场强度　　(b) y方向磁场强度

图 5　磁感应强度计算结果

按照论文的流速重构方法,将流速表示为

$$v(x;y)=v_0(x;y)+v_1(x;y)+v_2(x;y)+v_3(x;y)+v_4(x;y) \tag{36}$$

$$v_0(x;y)=1$$

$$v_1(x;y)=1\left(\frac{x}{R}\cos 90°+\frac{y}{R}\sin 90°\right)$$

$$v_2(x;y)=1\left(\frac{x}{R}\cos 45°+\frac{y}{R}\sin 45°\right)^2-0.25$$

$$v_3(x;y)=1\left(\frac{x}{R}\cos 20°+\frac{y}{R}\sin 20°\right)^3-0.5\left(\frac{x}{R}\cos 20°+\frac{y}{R}\sin 20°\right)$$

$$v_4(x;y)=1\left(\frac{x}{R}\cos 20°+\frac{y}{R}\sin 20°\right)^4-0.75\left(\frac{x}{R}\cos 0°+\frac{y}{R}\sin 0°\right)+0.062\ 5$$

本文以气-液两相流为例进行研究。根据平均气相含率,实验选取了 5 种流动条件,具体见表 2。

表 2　气-液两相流实验条件

流动条件	液相体积流量/(m^3/h)	气相体积流量/(m^3/h)	平均气相含率
f_1	5.42	0.24	0.046
f_2	6.62	0.30	0.041
f_3	6.45	2.05	0.19
f_4	5.41	1.04	0.13
f_5	6.68	1.86	0.17

在不同流动条件下,利用磁共振系统得到的导电连续相流速分布结果可与本文所研究的重构算法结果进行对比。图 6 为导电连续(液)相的流速重构结果,从左到右的流动条件为 f_1~f_5。上层为本文所述的算法计算结果,下层为装置中磁共振的重构结果。

通过图 6 结果可知,采用磁共振方法所得水的流速分布与本文所研究算法的计算结果基本一致,且基于 DFT 的重构算法结果更清晰。

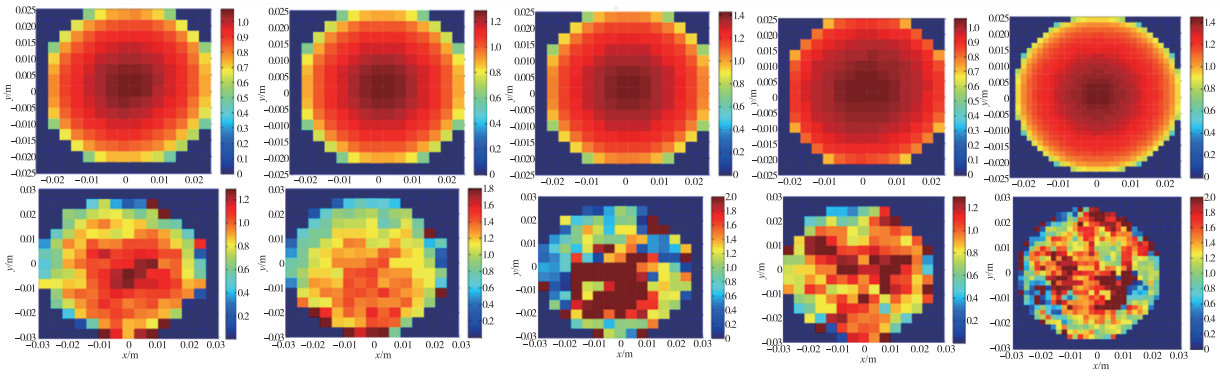


图 6　导电连续(液)相流速分布

3.2　气-液两相流实流实验

利用上海市计量测试技术研究院的实验装置进行气-液两相流的实流实验,进一步验证方法的有效性及可靠性。实验中采用的气-液两相流的特点是,液相中含有气泡,导电连续相为水,实验装置如图 7 所示。16 电极电磁流量传感器测得的感应电势如图 8 所示。

通过图 8 所示的测量结果可知,五种流动条件下得到的感应电势分布是对称的,再次验证了理论研究中指出的多电极的设计克服了非对称流对测量的影响。传感器得到的感应电势受到流型的影响显著,液相体积流量越大,电极处的感应电势越大。

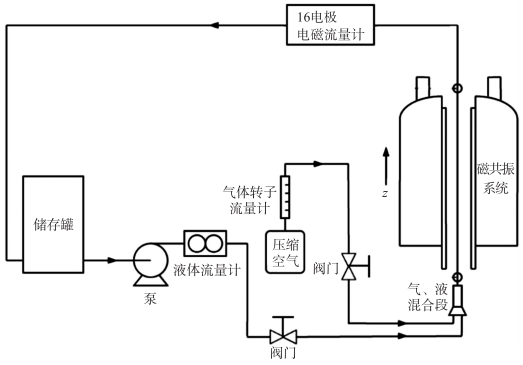


图 7　气-液两相流实验装置示意图

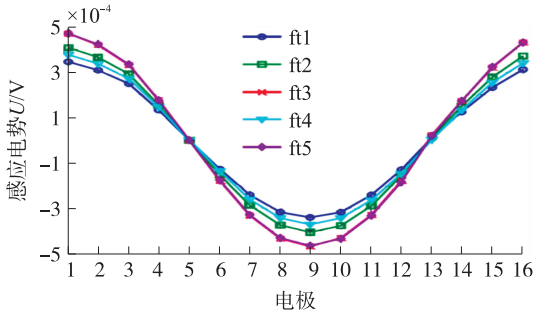


图 8 不同流动条件下测量结果

表 3 不同流动条件下液相流速测量结果 单位:m^3/s

流动条件	水参考流速	水测得流速	误差
f_1	0.82	0.85	0.03
f_2	1.00	1.01	0.01
f_3	1.15	1.16	0.01
f_4	0.89	0.91	0.02
f_5	1.16	1.17	0.01

通过实验室的气-液两相流实流实验测得不同流动状态下的水流速,结果见表 3 所示。在低流速(0.82 m/s)时,误差最大为 0.03 m/s;最小误差为 0.01 m/s。进一步验证了本文的导电连续相流速重构算法的有效性及正确性。

4 结论

本文对一种基于离散傅里叶理论(DFT)的导电连续相速度重构方法进行研究,该方法适用于多电极电磁流量计,是多相流流量测量的关键技术之一。首先将流速表达为多项式形式,其次获得流体流动时产生的感应电势分布,最后通过确定速度分量的系数以及方向角实现导电连续相的流速重构,并利用最小二乘法确定最佳重构速度曲线。本文以 16 电极电磁流量计为例进行了仿真及气-液两相流实流实验。实流实验中得到的流速结果与参考流速最大误差为 0.03 m/s。本文为多相流测量提供了一种有效手段,并拓展了电磁流量计的测量范围。

参考文献:

[1] Horner B, Mesch F, Tr Chtler A. A Multi-Sensor Induction Flowmeter Reducing Errors due to Non-Axisymmetric Flow Profiles [J]. Measurementence & Technology, 1996, 7(3): 354.

[2] Yoon Chi Ho. An Experimental Study on the Flow Characteristics of Solid-Liquid Two-Phase Mixture in a Vertical Tube[C]//The Proceedings of the Third(1999) Isope Ocean Mining Symposium, 1999, 43-48.

[3] Xu L, Wang Y, Dong F. Online Monitoring of Nonaxisymmetric Flow Profile with a Multielectrode Inductance Flowmeter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2003, 53(4): 1321-1326.

[4] Sakuratani Honda. Estimation by Regularized Process Tomography of Partially Filled Flow with Electro-Magnetic Induction[C]//Sice Conference. IEEE, 2011. 2758-2762.

[5] Webilor R O, Lucas G P, Agolom M O. Fast Imaging of the Velocity Profile of the Conducting Continuous Phase in Multiphase Flows Using an Electromagnetic Flowmeter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2018, 64: 180-189.

[6] 赵宇洋,张涛,Lucas G. 多电极电磁流量计用于非轴对称流的测量[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2013,46(6):559-564.

[7] 杨静芬. 多电极电磁血液流速仪建模与成像算法研究[D]. 河北:河北科技大学,2016.

[8] Xiang D, Li G, Zheng W, et al. Theoretical Study of Vertical Slug Flow Measurement by Data Fusion from Electromagnetic Flowmeter and Electrical Resistance Tomography[J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2011, 22(4): 272-278.

[9] 王湃,李阳博,汪梅,等. 一种具有流型识别能力的自适应电阻层析成像传感器[J]. 中南大学学报(英文版),2019(3):612-622.

[10] 刘靖. 一种测量多相流流型的 ECT 图像重建算法[J]. 工程热物理学报,2011,32(4):602-604.

[11] Xu L, Wang Y, Dong F. Online Monitoring of Nonaxisymmetric Flow Profile with a Multielectrode Inductance Flowmeter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2003, 53(4): 1321-1326.

[12] 赵耀,杜洪奎. 电磁流量计椭圆截面管道流场仿真研究[J]. 中国计量大学学报,2018,29(1):20-25.

[13] 马仁婷. 流速分布未知二维流场流量测量方法研究[D]. 沈阳:东北电力大学,2017.

[14] 陈丹. 注聚井电磁流量计流量测量技术的研究与应用[D]. 沈阳:东北石油大学,2018.

[15] 张瑜. 低产液水平井油水两相流流型仿真与传感技术[D]. 沈阳:东北石油大学,2015.

[16] 徐立军,王亚,姜印平,等. 电磁流量计电场动态平衡过程分析[J]. 仪器仪表学报,2004,25(1):39-43.

[17] Shercliff J A. The Theory of Electromagnetic Flow-Measurement [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1962.

李雪菁(1980—),女,上海大学获工学博士学位,并于(2016~2019)年在上海大学进行博士后工作,现工作单位:上海市计量测试技术研究院。主要研究领域为流体计量、仪器仪表,lixj@simt.com.cn。