

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108167

基于 C⁴D 技术的非满管液体流速测量方法研究*

高鹤明, 宋晓文, 周弘林, 庠帅超, 赵恒

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

摘要:为满足目前小型化设备中液体流速测量的需求,通过将空间滤波测速与电容耦合非接触电导测量(C⁴D)技术相结合,提出了一种适用于非满管液体流速测量的新方法。设计了一种轴向两电极结构的C⁴D传感器,采用COMSOL仿真软件建立了传感器的三维仿真模型,并对其空间灵敏度分布特性进行了分析,然后基于该传感器的空间滤波效应对液体流速测量原理进行了理论推导,并采用等效峰值频率的方法得到了速度测量的数学表达式;在此基础上,设计了一套可适用于空间滤波的C⁴D液体流速测量系统,并通过该测量系统验证了C⁴D传感器具有良好的空间滤波效应,且实验结果表明,该测量方法具有良好的可行性,在1.39~2.35 m/s的速度范围内,测量速度的绝对误差均在5%以内。

关键词:电容耦合非接触电导测量;空间滤波;等效峰值频率;液体流速;非满管流

中图分类号: TB934 TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Research on measurement method of non-full tube liquid flow rate based on C⁴D technique

Gao Heming, Song Xiaowen, Zhou Honglin, Ku Shuaichao, Zhao Heng

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to meet the current demand for liquid flow velocity measurement in miniaturized equipment, a new method suitable for measuring fluid velocity in non-full tube is proposed by combining spatial filtering velocity measurement with capacitively coupled contactless conductivity detection (C⁴D) technology. A C⁴D sensor with an axial two-electrode structure is designed. The three-dimensional simulation model of the sensor is established using COMSOL simulation software, and the spatial sensitivity distribution characteristics of the sensor is analyzed. The principle of liquid velocity measurement is theoretically deduced based on the spatial filtering effect of the sensor, and the mathematical expression of velocity measurement is obtained using the method of equivalent peak frequency. On this basis, a set of C⁴D liquid flow velocity measurement system that is suitable for spatial filtering was designed, and the good spatial filtering effect of C⁴D sensor was verified with this measurement system. The experiment results show that the measurement method has good feasibility. In the velocity range of 1.39~2.35 m/s, the absolute error of measured velocity is within 5%.

Keywords: capacitively coupled contactless conductivity detection; spatial filtering; equivalent peak frequency; liquid flow velocity; non-full tube flow

0 引言

液体流速的测量在日常生活和工业控制中广泛存在,如自来水厂流速与流量的控制,石油井下注水系统对注水量和流速的精确测量等。近年来,小型化工业设备中液体流动参数的测量备受关注。由于小型化设备中管

道内径的变小,水的表面张力作用会变的更为突出,因此在常规管径下得到的一些理论将不再适用于小通道内流体的检测。目前在小通道液体流速测量领域常用的检测手段主要有超声法、高速摄影法和电导测量法等^[1-4]。其中前两种方法相比于电导测量法而言,不仅对检测环境有特殊要求,而且成本较高,在实际工业中的应用较为困难。电导测量法装置简单且成本低,在液体流速测量领

收稿日期:2021-06-28 Received Date: 2021-06-28

* 基金项目:国家自然科学基金(51775429)项目资助

域中的应用较为常见。然而传统的电导测量方法多为接触式电导检测,电极与被测溶液直接接触,容易造成电极极化和电化学腐蚀等问题^[5-7]。

电容耦合非接触电导检测 (capacitively coupled contactless conductivity detection, C⁴D) 方法是一种新型非接触式测量技术,由于其检测电极不与被测液体直接接触,可以有效克服传统接触式电导检测中存在的问题^[8-11]。然而作为一种新兴的检测手段,C⁴D 技术目前大多用于分析化学领域中毛细管尺寸下离子浓度的检测,在毫米级以上管径的流体参数测量中的应用较为稀少^[12-17]。此外,在现有的文献报道中将该技术应用于流速测量的研究也仅局限于采用互相关的方法实现,这不仅对传感器的结构有特殊要求,而且就互相关方法本身而言,要求上下游信号具有一致性,从而使该方法对液体流动状态的稳定性有较高要求。而对于非满管流,液体在流动过程中形态不断发生改变,输出的电信号也随之变动,难以保证上下游输出信号的一致性,液体流速的测量就难以实现。因此,需要寻求一种新的方法使得 C⁴D 技术可普遍适用于液体流速的测量。

空间滤波的概念最早起源于光学测量领域,由于其算法简单,测量结构稳定等特点,在电学领域中也得到了很好地应用。目前电学领域中空间滤波法多用于静电传感器和电容传感器中,其测量原理可简单概述为:通过分析输出电信号的频谱特性得到与速度相关的频率信息,即可求得流体的速度。本文通过将空间滤波测速原理与 C⁴D 传感器相结合,提出一种小通道液体流速测量的新方法。设计了一种轴向两电极结构的 C⁴D 传感器,并通过 COMSOL 有限元分析工具对 C⁴D 传感器的空间滤波效应进行分析及理论推导,在此基础上设计了一套可用于空间滤波的 C⁴D 液体流速测量系统;最后通过该测量系统对 C⁴D 传感器的空间滤波效应进行验证,并对液体流动速度进行实验测量和分析。

1 C⁴D 技术测量原理

传统 C⁴D 传感器的结构如图 1(a) 所示,激励电极与检测电极间隔一定距离贴在绝缘管道上组成传感器,另有 1 个提供激励的 AC 源和 1 个电流检测电路。该传感器的等效电路如图 1(b) 所示,其中 C_1 和 C_2 分别为两电极通过管壁与被测液体形成的耦合电容, C_{d1} 和 C_{d2} 是与 C_1 和 C_2 串联的双电层电容、 C_p 是两电极间的杂散电容、 C_x 是与液体等效电阻 R_x 并联的等效电容。根据文献^[18-20]可知:1) 当施加交流激励电压时,由于 C_x 的值非常小,且与 R_x 并联,则 C_x 产生的容抗可以忽略不计;2) 电路中 C_{d1} 和 C_{d2} 的值很小,且与 C_1 和 C_2 串联,也

可忽略不计,电路可以进一步简化为图 1(c);3) 通过仿真可以发现杂散电容的值相比耦合电容的值要小两个数量级,对输出信号的影响较小,也可以忽略,因此电路可以进一步简化为图 1(d)。

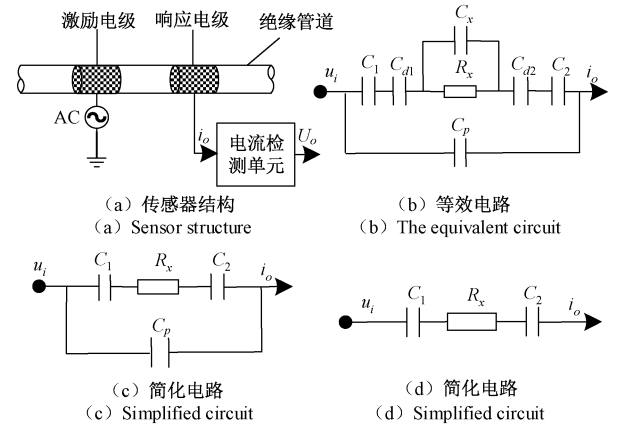


图 1 传感器原理

Fig. 1 Sensor principle

由图 1(d) 可以看出,C⁴D 传感器的等效电路最终可以简化成耦合电容与等效电阻的串联。当给激励电极施加交流电压时,传感器内部会形成一条交流通路,检测电极上则会输出含有溶液电导信息的交流电信号,通过对交流电信号的处理即可得到溶液的电导率。

2 传感器设计

2.1 传感器结构参数

图 2 为本研究中所用 C⁴D 传感器的结构示意图,其中图 2(a) 和 (b) 分别为传感器的三维视图和管道截面图。该传感器由绝缘管道、激励电极、响应电极和金属屏蔽罩构成。电极采用轴向圆环设计紧密贴在绝缘管道壁上,响应电极被金属屏蔽罩完全覆盖,用以消除与激励电极之间的杂散电容,提高传感器的灵敏度。

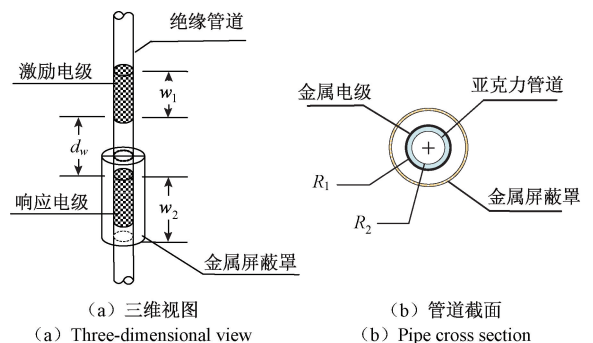


图 2 传感器结构

Fig. 2 Sensor structure

从图 2 中可以看出传感器的几何参数主要包括如下几部分: 激励电极宽度 w_1 , 响应电极宽度 w_2 , 两电极之间的距离 d_w , 管道外径 R_1 和管道内径 R_2 。实验中, 为满足测量要求, 各部分的参数选取如下(其中 ε_p 和 ε_s 分别为管道和屏蔽罩的介电常数):

$$w_1 = w_2 = d_w = 20 \text{ mm}, R_1 = 16 \text{ mm}, R_2 = 14 \text{ mm}, \varepsilon_p = 4, \varepsilon_s = 1.$$

2.2 C⁴D 传感器测量原理

耦合电容作为一个背景信号与被测溶液的等效电阻串联, 它的存在会降低传感器的灵敏度。当传感器的管径增大时, 等效电阻 R_x 产生的信号会被耦合电容产生的信号所淹没, 对测量产生不利影响, 所以在实验中需要对其进行去除。传感器的测量原理如图 3 所示, 其中图 3(a) 为传感器的测量结构, 包含 1 个交流激励源、1 个绝缘管道、两圆环形电极、1 组色环电感、1 个金属接地屏蔽罩和 1 个信号处理单元。其中信号处理单元由两部分组成: 电流-电压转换电路和整流滤波电路。

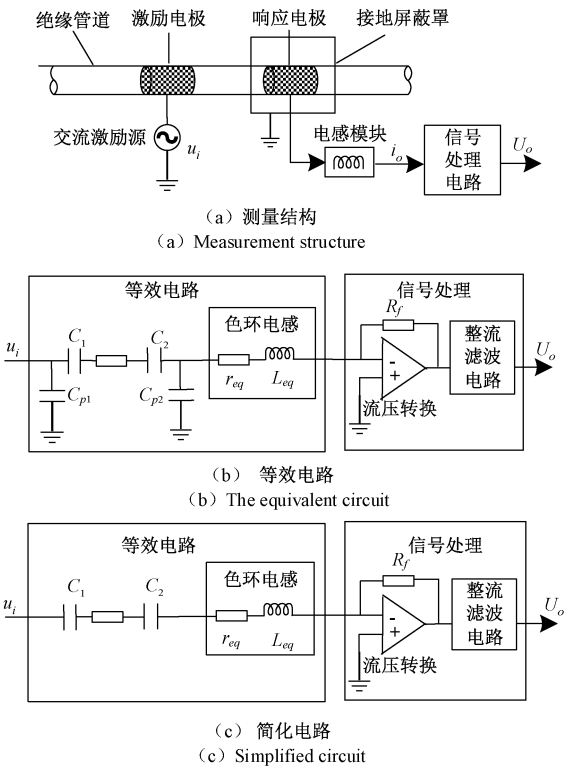


图 3 C⁴D 传感器的测量原理

Fig. 3 Measurement principle of the C⁴D sensor

传感器的等效电路如图 3(b) 所示, 图中 C_{p1} 和 C_{p2} 分别为两电极与金属屏蔽罩之间产生的杂散电容。由于两电容与信号地相接, 且数值很小, 其对电路的影响可以忽略^[18-20]。图 3(b) 可进一步简化为图 3(c), 由图可知

电路的总阻抗为:

$$Z = R_x + r_{eq} + j \left(2\pi f L_{eq} - \frac{C_1 + C_2}{2\pi f C_1 C_2} \right) \quad (1)$$

式中: f 为激励频率; R_x 为溶液的等效电阻值; L_{eq} 为色环电感值; r_{eq} 为电感内阻。根据串联谐振原理, 在谐振频率 f_0 处, 电感的感抗和耦合电容的容抗相互抵消, 此时谐振频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_{eq} C_1 C_2}} \quad (2)$$

因此, 电路发生谐振时, 电路的总阻抗 Z_R 为:

$$Z_R = R_x + r_{eq} \quad (3)$$

3 速度测量

3.1 传感器灵敏度分布特性

为更好地评估被测液体在流动过程中空间位置改变对 C⁴D 传感器输出电信号的影响, 将该传感器的空间灵敏度定义为:

$$S(z) = \frac{I(z) - I_{el}}{I_{eh} - I_{el}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $S(z)$ 表示传感器的轴向灵敏度; $I(z)$ 为液体流经传感器在某一位置处发生变化所对应的输出电流值; I_{eh} 和 I_{el} 分别为管内充满液体和充满空气对应的电流值。

当液体在管道内沿轴向流动时, 会引起传感器输出电信号的变化, 该值可由传感器的轴向灵敏度表示。图 4 为液体空间位置分布, 为简化分析, 本文选取管道内 a, b, c, d 4 个位置来模拟液体在管道内的波动情况, 并以此表征传感器的轴向灵敏度特性。通过 COMSOL 软件仿真计算可以获取不同径向位置上沿轴向运动的灵敏度分布函数, 如图 5 所示。

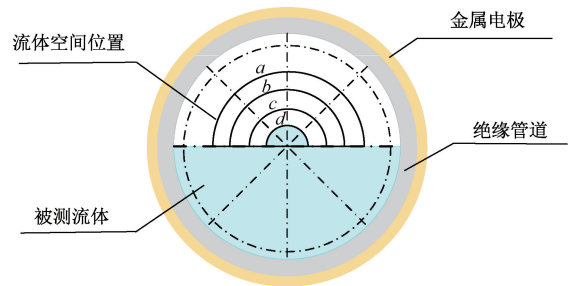


图 4 流体空间位置分布

Fig. 4 Fluid spatial location distribution

从灵敏度分布曲线可以看出, 当液体流经传感器发生波动时, 传感器的轴向灵敏度分布近似于高斯脉冲函数分布, 在传感器中心位置处达到峰值。此外, 当液体流经传感器时, 波动幅度变大, 灵敏度会增加。这是由于液体波动幅度增大, 传感器回路中的等效电阻值减小, 检测电极输出电流值增大, 从而导致灵敏度的增加。

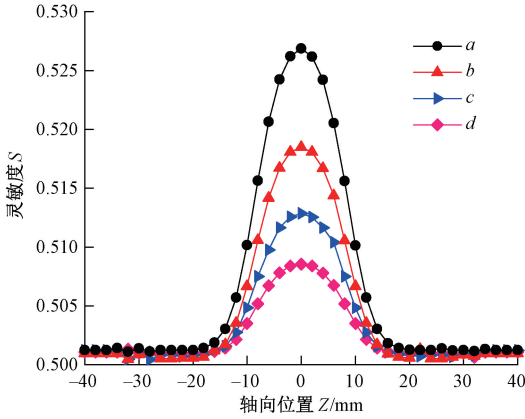


图5 不同位置轴向灵敏度分布曲线

Fig. 5 Axial sensitivity distribution curve at different positions

3.2 空间滤波测量原理

由图5可知,C⁴D传感器的轴向灵敏度分布近似于高斯曲线分布。通过拟合,任意轴向位置上灵敏度的分布都可以采用如下公式表示:

$$S(z) = a \exp(-b(z-c)^2) \quad (5)$$

轴向灵敏度 $S(z)$ 的傅里叶变换表示出传感器的轴向空间滤波特性,对式(5)进行傅里叶变换可得:

$$S(f_z) = \int S(z) \cdot \exp(-j2\pi f_z z) \cdot dz =$$

$$\frac{a\sqrt{\pi}}{\sqrt{b}} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 f_z^2}{b}\right) \cdot \exp(-j2\pi f_z c) \quad (6)$$

式中: $S(f_z)$ 为 C⁴D 传感器空间滤波特性的传递函数; f_z 是空间频率; a, b, c 为高斯函数的拟合系数,与流体的空间位置分布有关。

当导电液体以一定速度流经传感器作轴向运动时,其液相介质分布不均引起的灵敏度变化可以看作是由单位冲击信号 $\delta(z-vt)$ 产生的,则传感器轴向灵敏度的单位冲击响应 $h(t)$ 可以近似表示为:

$$h(t) = \int \delta(z-vt) \cdot S(z) \cdot dz =$$

$$\int S(f_z) \cdot \exp(-j2\pi f_z vt) \cdot df_z \quad (7)$$

因为单位冲击响应 $h(t)$ 的 Fourier 变换 $H(f)$ 可以用空间频率响应表示,所以时间频率响应特性传递函数幅频特性 $|H(f)|$ 可以表示为:

$$|H(f)| = \int h(t) \cdot \exp(-j2\pi ft) \cdot dt =$$

$$\frac{a\sqrt{\pi}}{v\sqrt{b}} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 f^2}{bv^2}\right) \quad (8)$$

由式(8)可知,该轴向二电极 C⁴D 传感器在时间频域上具有低通滤波的频谱特性。这是因为当导电液体流

动引起输出电压变化时,传感器会在一定的空间权函数下对这种“流动噪声”进行平均,这种噪声并不能完全被传感器捕捉^[21-24],因此可以通过输出电压信号的频谱特性来获取速度信息。当幅频特性衰减为0时,即式(8)导数为0时,存在:

$$\frac{a}{\sqrt{b}} \exp\left(-\frac{\pi^2 f^2}{bv^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{2(\pi f)^2}{bv^2}\right) = 0 \quad (9)$$

如果在径向位置 r 处引入结构特征常数 g_s ,上述方程的解可表示为:

$$v/f_m = g_s \quad (10)$$

式中: v 代表所要求取的速度; g_s 为传感器的结构常数; f_m 为输出电压信号频谱上的峰值频率。由于频谱中容易出现峰值频率集中,难以准确提取的问题,本文采用等效峰值频率的方法来获取速度的信息,公式如下:

$$f_e = \frac{\sum_{i=1}^n h_i f_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (11)$$

式中: f_e 为等效峰值频率; f_i 为输出电压信号频谱中的频率; h_i 为频率 f_i 所对应的幅值。此外,由于在实际测量过程中液体流动状态不稳定的影响,引入一无量纲比例系数 k 进行修正,速度 v 与等效峰值频率 f_e 之间的关系可以改为:

$$v = k f_e \quad (12)$$

3.3 实验系统

基于 C⁴D 技术的液体流速测量系统如图6所示,该系统主要由信号发生器、C⁴D 传感器、电感模块、信号处理电路、数据采集卡、高速摄像机和计算机组成。被测液体由量杯倒入漏斗,使液体充满软管后,流入传感器。当信号发生器给激励电极施加交流激励电压时,液体经软管流入传感器,响应电极输出含有溶液电导信息的交流电流信

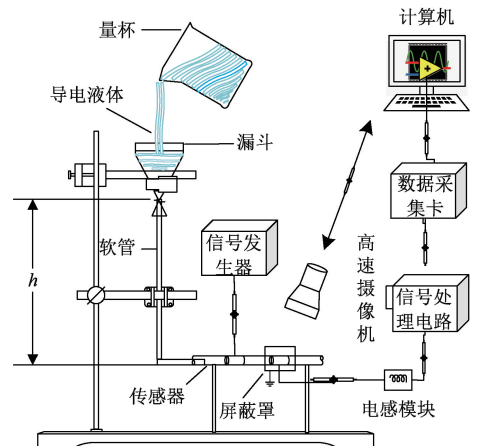


图6 实验装置

Fig. 6 Experiment apparatus

号, 经过信号处理电路后, 输出直流电压信号, 然后由数据采集卡采集数据传送至计算机进行数据处理。

在液体下落的同时, 启动高速摄像机, 进行实时拍摄, 根据所拍摄的图像获得流体的参考速度, 参考速度 v_s 可由式 (13) 求出:

$$v_s = \frac{L \cdot f_c}{n} \quad (13)$$

式中: L 为液体移动的距离; n 为液体移动距离所对应的拍摄图片张数; f_c 为拍摄频率。表 1 记录了垂直安装软管时液体的高度以及对应的参考速度, 在实验中, 为保证传感器管道不被液体充满, 选择内径 7 mm, 外径 9 mm 的软管。液体采用实验室自来水, 电导率为 0.5×10^{-2} S/m。

表 1 软管垂直安装的高度及参考速度

Table 1 The vertical installation height of the hose and the corresponding reference velocity

下落高度 h/m	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1
参考速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	1.39	1.63	1.80	1.97	2.19	2.35

4 实验结果与讨论

4.1 输出信号及频谱分析

实验中通过改变软管的高度来改变液体的流动速度, 当液体通过软管流入传感器时, 液体无规则的波动, 会导致溶液的等效电阻 R_x 也随之发生改变, 此时检测电极输出反应溶液流动过程中波动的电流信号。在实验过程中, 采集到的信号会包含有一些环境的干扰信号, 使得数据偏离基线产生趋势项。如果信号中有明显的趋势项没有被消除时, 进行一些相关性分析或功率谱密度分析时就会产生畸变, 造成低频成分上翘甚至淹没主频成分, 从而严重影响实验测量精度^[25]。所以需要先对原始数据进行去除趋势项处理, 再进行快速傅里叶变换。图 7 所示为液体分别从 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、1.1 m 高度处流入传感器, 数据采集卡采集到的原始电压信号去除趋势项后的电压信号。

从不同高度下输出的电压信号可以看出, 检测电极输出的电压信号在时域上呈现不规则的脉冲, 这主要是由于液体在管道内流动, 溶液电阻值发生改变造成的。当液体稳定流经传感器, 不发生波动时, 传感器中溶液的等效电阻 R_x 为定值, 不发生改变, 此时检测电极输出稳定的直流电压信号; 但是液体在实际流动过程中会产生波动, 当液体发生波动时, 流经传感器的溶液的等效电阻 R_x 会随之改变, 此时检测电极输出对应的电压信号。由于波动是随机的, 所以各脉冲及其间隔会呈现出不规则分布, 通过分析输出电压信号的频谱特性得到与速度相

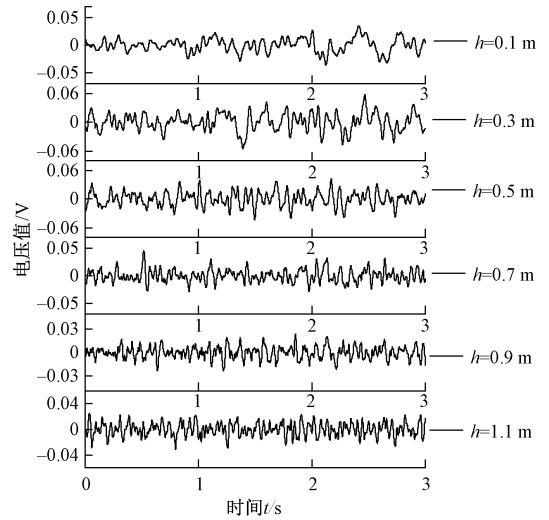


图 7 不同高度下输出的电压信号 U

Fig. 7 Output voltage signal U at different heights

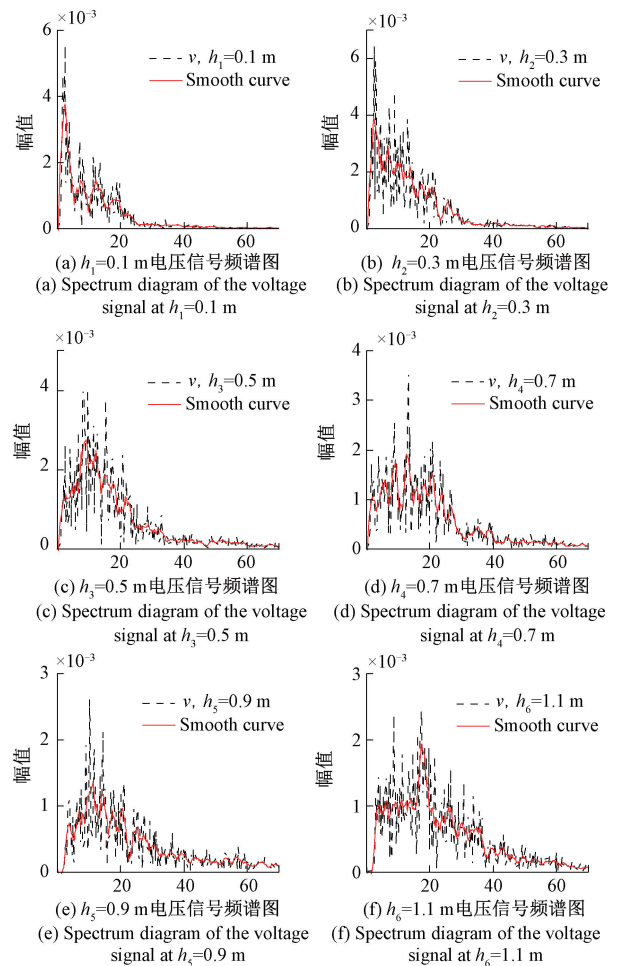


图 8 输出电压信号的频谱

Fig. 8 The spectrums of output voltage signal

关的频率信息,即可求得流体的速度。图8为输出电压信号的频谱图,由于电磁干扰、测量电路内部热噪声等因素,导致输出信号中含有大量噪声,为了有效克服上述因素的影响,准确验证C⁴D传感器的空间滤波效应,本文通过对信号频谱进行平滑处理并提取其趋势项,可以减小频域特征参数提取带来的测量误差,也有助于观察不同速度下的频谱特性。

液体分别从0.3、0.5、0.7、0.9 m高度处流入传感器的输出电压信号频谱的平滑曲线如图9所示。从图9中可以看出,液体流动速度增大,输出电压信号的频谱宽度明显增加,主要峰值频率向右偏移,且幅值下降,这与式(8)的推导结果相吻合。

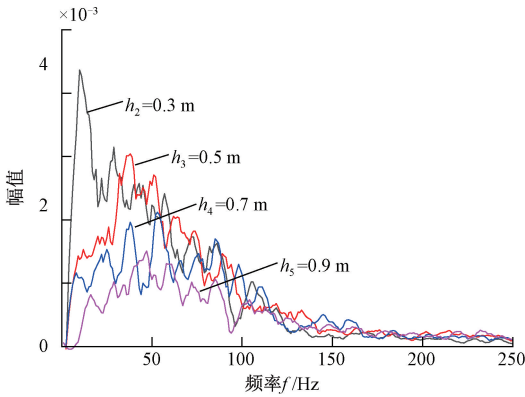


图9 4组频谱的平滑曲线

Fig. 9 The smooth curves of the four groups of spectrums

实验中,为准确得到速度和等效峰值频率之间的关系,减小测量误差,采用4组不同高度下落的液体(0.3, 0.5, 0.7, 0.9 m),分别进行5次重复性测量,取5次测量的等效峰值频率的均值与参考速度进行线性拟合,如图10所示。从图10中可以看出参考速度和等效峰值频率呈现良好的线性关系,该实验结果与理论部分获取的

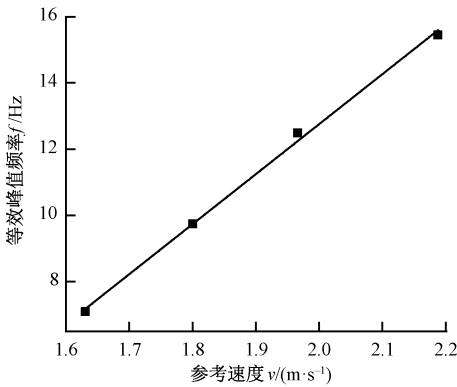


图10 等效峰值频率与参考速度之间的关系

Fig. 10 The relationship between the equivalent peak frequency and reference velocity

速度计算式(12)相吻合,以此可以证明理论分析的正确性,且利用该线性关系通过求取等效峰值频率即可计算得到被测液体的流动速度。

4.2 测量准确性分析

图11和表2分别为6组不同高度下液体流经传感器的测量速度 v_z 与参考速度 v_s 之间的直接对比结果以及对应的绝对误差。从图11中可以看出,测量速度在给定的参考速度附近上下波动,且随着液体下落高度的不断增加,测量速度也呈线性递增趋势。该实验结果进一步证实了前面理论分析的正确性,即C⁴D传感器输出电压信号的等效峰值频率和液体速度之间具有良好的线性关系。

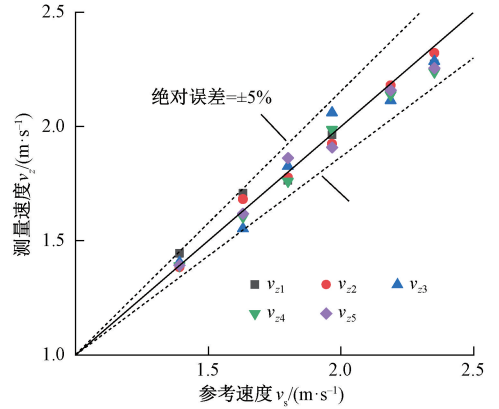


图11 测量速度和参考速度之间的比较

Fig. 11 Comparison between the measurement velocity and reference velocity

表2 测量速度与参考速度之间的误差

Table 2 The error between the measurement velocity and reference velocity

下落高度 h/m	参考速度 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	最小误差/%	最大误差/%
0.1	1.39	0.006	3.73
0.3	1.63	-0.75	4.67
0.5	1.80	1.35	3.36
0.7	1.97	-0.16	4.73
0.9	2.19	-0.96	-3.41
1.1	2.35	-1.32	-4.86

表2中绝对误差 ε 的定义为 $\varepsilon = (v_s - v_z) / v_s$,在实验中液体下落高度从0.1 m增加到1.1 m,速度从1.39 m/s增加到了2.35 m/s。从30组测量结果中可以看出,同一高度下落的液体的测量速度均在小范围内波动,且相对于参考速度的最大绝对误差为-4.86%,最小绝对误差为0.006%,接近参考速度。以此可以看出,采用等效峰值频率的方法对频谱进行分析是有效的,且通过等效峰值频率与参考速度的关系式求取的测量速度的最大误差不

超过5%。通过该实验结果可以证明本文提出的测量方法是可行的,且测量精度能够满足实际测量的要求。

5 结 论

本文将空间滤波测速与电容耦合非接触电导检测技术相结合,提出了一种小通道液体流速测量的新方法。设计了一种轴向两电极结构的C⁴D传感器,通过COMSOL仿真软件对C⁴D传感器的空间滤波效应进行了分析及理论推导;为避免频谱中容易出现峰值频率集中,难以准确提取的问题,本文采用等效峰值频率的方法得到了速度测量的数学表达式,并在此基础上设计了一套可应用于空间滤波的C⁴D液体流速测量系统;最后通过该测量系统对C⁴D传感器的空间滤波效应进行验证,并对液体流动速度进行实验测量和分析。实验结果表明,本文所设计的C⁴D传感器具有良好的空间滤波效应,且在1.39~2.35 m/s的速度范围内,测量结果的最大绝对误差不超过5%。该研究初步证明了将空间滤波测速与电容耦合非

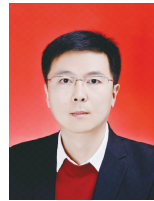
接触电导检测技术相结合的可行性,并为非满管流的流体流速测量提供了新的途径。

参考文献

- [1] SAISORN S, WONGWISES S. Flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air-water flow in a horizontal circular micro-channel [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2008, 32(3) : 748-760.
- [2] 李海青. 两相流参数检测及应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991.
LI H Q. Two-phase flow parameter measurement and applications [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1991.
- [3] REVELLIN R, AGOSTINI B, URSENBACHER T, et al. Experimental investigation of velocity and length of elongated bubbles for flow of R-134a in a 0.5 mm microchannel [J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2008, 32(3) : 870-881.
- [4] THORODDSEN S T, ETOH T G, TAKEHARA K. High-speed imaging of drops and bubbles [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, 40(1) : 257-285.
- [5] JIN H, WANG M, WILLIAMS R A. Analysis of bubble behaviors in bubble columns using electrical resistance tomography [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, 130(2-3) : 179-185.
- [6] GAS B, DEMJANENKO M, VACÍK J. High-frequency contactless conductivity detection in isotachopheresis [J]. *Journal of Chromatography A*, 1980, 192 (2) : 253-257.
- [7] 胡友强, 戴欣. 基于电容耦合的非接触电能传输系统模型研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31 (9) : 2133-2139.
HU Y Q, DAI X. Study on modeling of capacitively coupled contactless power transfer system using generalized state space averaging method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31 (9) : 2133-2139.
- [8] ZEMANN A J, SCHNELL E, VOLGGER D, et al. Contactless conductivity detection for capillary electrophoresis [J]. *Analytical Chemistry*, 1998, 70(3) : 563-567.
- [9] FRACASSI D, LAGO C D. An oscillometric detector for capillary electrophoresis [J]. *Analytical Chemistry*, 1998, 70(20) : 4339-4343.
- [10] HUANG Z Y, JIANG W W, ZHOU X, et al. A new method of capacitively coupled contactless conductivity detection based on series resonance [J]. *Sensors and Actuators B Chemical*, 2009, 143(1) : 239-245.
- [11] KUBAN P, HAUSER P C. A review of the recent achievements in capacitively coupled contactless conductivity detection [J]. *Anal Chim Acta*, 2008, 607(1) : 15-29.
- [12] KUBAN P, HAUSER P C. Contactless conductivity detection for analytical techniques: Developments from 2010 to 2012 [J]. *Electrophoresis*, 2013, 34(1) : 55-69.
- [13] KUBAN P, HAUSER P C. Contactless conductivity detection for analytical techniques-developments from 2012 to 2014 [J]. *Electrophoresis*, 2015, 36 (1) : 195-211.
- [14] CAHILL B P, LAND R, NACKE T, et al. Contactless sensing of the conductivity of aqueous droplets in segmented flow [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2011, 159(1) : 286-293.
- [15] PUMERA M. Contactless conductivity detection for microfluidics: Designs and applications [J]. *Talanta*, 2008, 74(3) : 358-364.
- [16] 王保良, 徐升继, 冀海峰, 等. 非接触式地表水电导率检测系统 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33 (7) : 1620-1625.
WANG B L, XU SH J, JI H F, et al. Non-contact surface water conductivity measurement system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33 (7) : 1620-1625.
- [17] LYU Y, JI H, YANG S, et al. New (CD)-D-4 sensor with a simulated inductor [J]. *Sensors*, 2016, 16(2), DOI:10.3390/s16020165
- [18] HUANG Z, LONG J, XU W, et al. Design of

- capacitively coupled contactless conductivity detection sensor [J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2012, 27: 67-70.
- [19] WANG L, HUANG Z, WANG B, et al. Flow pattern identification of gas-liquid two-phase flow based on capacitively coupled contactless conductivity detection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(5): 1466-1475.
- [20] 徐升继. 电容耦合非接触电导检测技术在流体检测中的应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
XU SH J. Study on the applications of capacitively coupled contactless conductivity detection technique in fluid detection [J]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [21] GAO H, DENG H, WANG B, et al. Local particles velocity measurement using differential linear capacitance matrix [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(9), DOI:10.1088/1361-6501/aac5b.
- [22] 高鹤明, 周弘林, 宋晓文, 等. 金属颗粒的电容式速度测量方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 60-67.
GAO H M, ZHOU H L, SONG X W, et al. Research on the capacitive velocity measurement method of metal particles [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 60-67.
- [23] 王睿怀, 高鹤明. 平面阵列电容式固体颗粒速度测量方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 133-139.
WANG R H, GAO H M. Solid particle velocity measurement method based on planar array capacitive sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 133-139.
- [24] 史皓天, 张洪朋, 王文琪, 等. 一种液压油磨粒检测新方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 44-51.
SHI H T, ZHANG H P, WANG W Q, et al. Research on a novel method for detection of wear debris in hydraulic oil [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9): 44-51.
- [25] 朱学锋, 韩宁. 基于经验模态分解的非平稳信号趋势项消除 [J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(1): 65-70.
ZHU X F, HAN N. Removal of non-stationary signal trend items by empirical mode decomposition [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2012, 31(1): 65-70.

作者简介



高鹤明 (通信作者), 2012 年于东南大学获得博士学位, 现为西安理工大学副教授, 主要研究方向为过程层析成像与多相流测试。

E-mail: gaoheming@126.com

Gao Heming (Corresponding author) received Ph. D. from Southeast University in 2012. Currently, he is an associate professor in Xi'an University of Technology. His research interest includes process tomography and multiphase flow measurement.



宋晓文, 2019 年于淮海工学院获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向为多相流测试技术。

E-mail: 915733445@qq.com

Song Xiaowen received his B. Sc. degree from Huaihai Institute of Technology in 2019. Now, he is an M. Sc. student in Xi'an University of Technology. His main research interest is multiphase flow measurement.