

基于磁流体的流量传感理论及实验研究

郝瑞参, 李德才

北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044

E-mail: haoruican@163.com

2010-06-07 收稿, 2010-10-22 接受

国家自然科学基金(60471004)和北京市自然科学基金(4062028)资助项目

摘要 磁流体流量传感器是磁流体的一个很重要的应用方向. 通过计算在层流和紊流状态下被测液体流量值与 U 型管两端输入压强差之间的关系, 得出在层流时被测液体流量与压差成正比, 而在紊流时流量与压差不成线性关系. 对 U 型管两端线圈电感、线圈两端电势差的计算, 最终得出输出电势差与流量成正比关系, 与线圈长度的平方成反比关系, 同时通过实验进一步验证了在层流状态下磁流体流量传感器设计研究的可行性.

关键词

磁流体
流量
传感器
电感

将磁流体技术应用于传感和检测是个新的研究思路^[1]. 基于磁流体的流量传感器, 是利用磁流体不同于其他流体的特性实现对管道中水压力的测量, 从而得出介质水的流动参数的一种新的流量传感器.

磁流体即铁磁性流体, 是由粒径约为 10 nm 的强磁性粒子, 通过表面吸附表面活性剂分子而稳定分散于合适基液中形成的一种胶态体系^[2,3]. 图 1 为磁流体的构成模型图. 这种胶状液体既有固体磁性材料的强磁性, 又有液体的流动性. 由于具有交叉特性,

所以有较高的饱和磁化强度, 在使用温度下有较长期的稳定性, 在重力和电磁力的作用下不沉淀, 有很好的流动性和超顺磁性.

磁流体的应用现已扩展到机械、电子、船舶、航天、遥测、仪表、印刷、医疗等诸多领域, 是唯一具有工业实用价值的液体磁性智能化功能材料. 传感技术和检测设备是磁流体最具发展潜力和最具多样性的应用之一^[4-9].

磁流体的传感应用研究是一个崭新的思路. 国际上对磁流体及其传感应用研究比较深入的国家有英国、罗马尼亚、美国、法国等. 英国 Berkovsky 等人^[10]的著作中介绍了磁流体应用于各种检测装置, 如加速度传感器、倾角传感器、压差传感器等. Popa 等人^[11-14]研究了磁流体传感器灵敏度与磁流体各参数以及结构尺寸参数之间的关系, 并研究了流量传感在航空装置中的应用. Cotae 等人^[6]在理论和实验方面研究了磁流体的电磁学特性对电量和非电量识别传感器的性能影响. 罗马尼亚学者 Piso^[15]研究了磁流体用于惯性传感器测量的情况, 提供了磁流体用于运动测量的装置.

目前, 国内流量传感的研究当中^[16-20], 以磁流体为核心的电磁感应传感器在国内刚进入初步研究

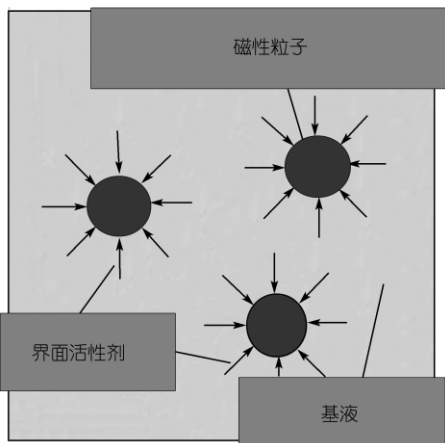


图 1 磁流体的构成

阶段, 相关报道文献很少, 有待进一步深入研究.

本文作者利用磁流体作为磁芯来实现对介质水流动参数的模拟测量, 研究了被输送介质在不同流动状态下由磁流体体积变化而引起的线圈自感变化. 从而得出基于磁流体流量传感器的输入输出特性.

1 磁流体流量传感器的测量原理

如图 2 所示, 与 U 型管相连的为输送介质(如水)的圆管型管道. 由 Darcy-Weisbach 公式^[21], 对于任何流动状态其压差为

$$\Delta p = \frac{\lambda \rho l v^2}{2d}, \quad (1)$$

式中, l 为被测段管道长度, ρ 为被测流体的密度, v 为管道流速, d 为管道的内径, λ 为 Darcy-Weisbach 摩擦因子.

1.1 层流的流量计算

对于圆管泊肃叶流动, 雷诺数为

$$Re = \frac{\rho d v}{\mu}, \quad (2)$$

则

$$\lambda_1 = \frac{64}{Re} = \frac{64\mu}{\rho d v}, \quad (3)$$

式中, μ 是被测流体的黏度系数($N \cdot s/m^2$).

此时有

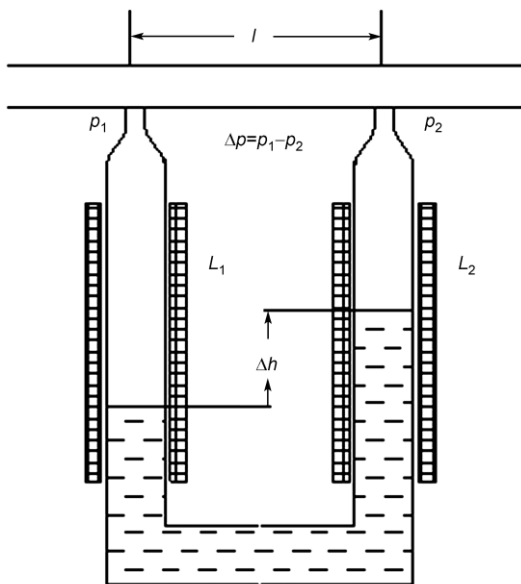


图 2 基于磁流体流量传感器的原理图

$$\Delta p = \frac{\lambda_1 \rho l v^2}{2d} = \frac{32\mu l v}{d^2}, \quad (4)$$

所以流速为

$$v = \frac{\Delta p \cdot d^2}{32\mu l}, \quad (5)$$

流量为

$$q_1 = Av = \frac{\Delta p \cdot \pi d^4}{128\mu l}. \quad (6)$$

若令

$$K_1 = \frac{\pi d^4}{128\mu l},$$

则

$$q_1 = K_1 \Delta p, \quad (7)$$

图 3 为模拟实验中得到的层流管道中相距为 1 m 的两点间水的流量与所测两点间压力差之间的关系. 其中, 管径 $d=40$ mm, 输入压差为 Δp , 运输介质为水. 由模拟结果可知, 在误差允许范围内流量与压力差成线性关系.

1.2 紊流的流量计算

对于紊流状态, 雷诺数为

$$Re = \frac{\rho d \bar{v}}{\mu}, \quad (8)$$

式中, \bar{v} 为平均速度.

设 f 为圆管的相对粗糙度, 则摩擦因子^[21]

$$\lambda_2 = 0.25[\lg(f/3.7) + (5.74/Re^{0.9})]^{-2}. \quad (9)$$

此时流量

$$q_2 = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2d \cdot \Delta p}{\lambda_2 \rho l}}. \quad (10)$$

若令

$$K_2 = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2d}{\lambda_2 \rho l}},$$

则

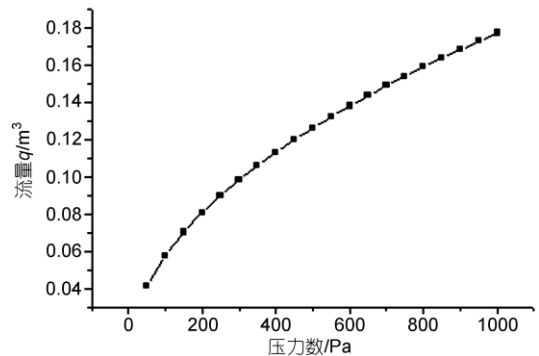


图 3 层流状态下流量随压差的变化

$$q_2 = K_2 \sqrt{\Delta p}. \quad (11)$$

由式(7)和(11)可知, 流量的大小只与两个参数有关, 即管道内径 d 和管道中被测两点的压力差 Δp .

图4为模拟实验中得到的湍流管道中相距为1m的两点间水的流量与所测两点间压力差之间的关系. 其中, $d=40\text{ mm}$.

通过模拟结果可见, 在层流状态下流量与所测压力差之间的关系可做线性处理.

2 磁流体流量传感器的理论计算

假设图2中的初始状态, 磁流体的液面高度差为 $\Delta h=0$, 压差 $\Delta p=p_1-p_2=0$ 时, U型管两臂上的线圈电感相等, 即 $L_1=L_2$; 当压差 $\Delta p \neq 0$ 时, $\Delta h \neq 0$, 此时通过线圈的磁通量^[22,23]为

$$\varphi(x) = \frac{2N^2 IS}{l^2} [\mu_0(l-x) + \mu_m x], \quad (12)$$

式中, μ_0 和 μ_m 分别为空气和磁流体的磁导率; x 为液面到线圈底部的距离; N 为线圈的匝数; S 为液柱的横截面积; l 为线圈的长度; I 为线圈所通电流, $I = I_0 \sin \omega t$.

通过计算可得线圈的电感值为

$$L(x) = \frac{2N^2 S}{l^2} [\mu_0(l-x) + \mu_m x]. \quad (13)$$

初始状态时, 假设 $x=x_0=l/2$, 则

$$L_1 = L_2 = \frac{NS}{l} (\mu_m + \mu_0). \quad (14)$$

当液面高度变化 Δx 时, 假设左边降低 Δx , 右边升高 Δx , 电感将变为

$$L(x) = \frac{2N^2 S}{l^2} [\mu_0[l-(x-\Delta x)] + \mu_m(x+\Delta x)]. \quad (15)$$

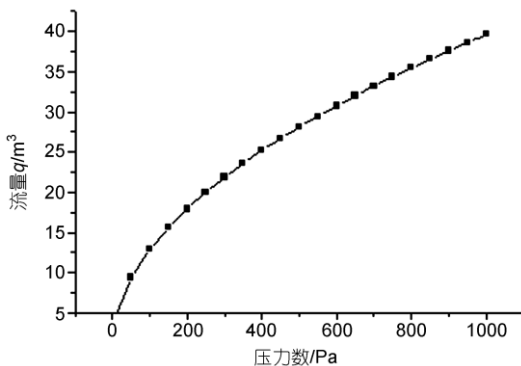


图4 湍流状态下流量随压差的变化关系

此时, 线圈产生的电感差

$$\Delta L = \frac{2N^2 S}{l^2} (\mu_0 + \mu_m) \Delta h, \quad (16)$$

式中, $\Delta h = 2\Delta x$ 为磁流体液面高度差. 从而使线圈两端产生的感应电动势差为

$$\Delta U = \frac{2N^2 S I_0 \omega \cos \omega t}{l^2} (\mu_0 + \mu_m) \Delta h, \quad (17)$$

式中, I_0 和 ω 分别为输入的电流幅值和角频率.

由 U 型管两臂的液面高度差与所代表的压差之间的关系得

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{(\rho_m - \rho_0)g}, \quad (18)$$

式中, ρ_m 和 ρ_0 分别为磁流体和被测介质的密度; g 为重力加速度.

代入式(16)得

$$\Delta U = \frac{2N^2 S I_0 \omega \cos \omega t (\mu_0 + \mu_m) \Delta p}{l^2 (\rho_m - \rho_0)g}, \quad (19)$$

$$\Delta p = \frac{\Delta U (\rho_m - \rho_0) g l^2}{2N^2 S I_0 \omega \cos \omega t (\mu_0 + \mu_m)}. \quad (20)$$

层流状态下, 将式(20)代入式(7)并化简得

$$\Delta U = \frac{2N^2 S I_0 \omega \cos \omega t (\mu_0 + \mu_m) q}{K (\rho_m - \rho_0) g l^2}. \quad (21)$$

可见, 经分析在电源、线圈和磁流体的各参数确定的情况下, 输出电势差与输入的流量成正比.

3 磁流体流量传感实验

通过前述模拟实验及测量实验, 得出流量传感器的输入输出特性. 实验结果如图5所示.

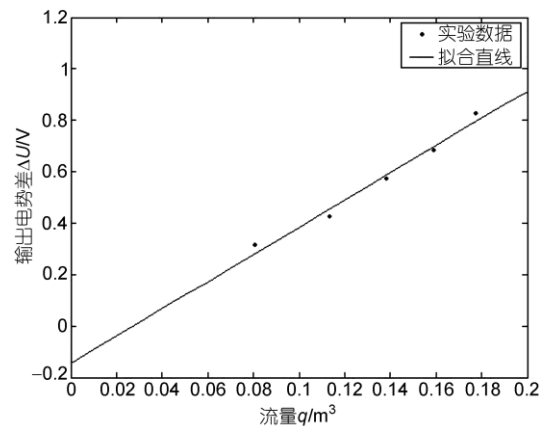


图5 输入输出特性

可见,在误差允许的范围内,磁流体流量传感的输入输出呈线性关系。

4 结论

(1) 被测液体为层流状态时,其流量大小与 U 形管两臂测得的压差成正比;被测液体为紊流状态时,其流量大小与 U 形管两臂端测得的压差平方根成正比。但当被测液体的流动状态不同时,流量值与压差的比例系数不同。

(2) 线圈两端的输出电势差与管两臂磁流体液柱的高度差成正比。

(3) 所用磁液磁导率越高,输出与输入的比值越大,即测量效果越明显。

(4) 层流状态下,外部测量输出的电势差与管道中输入的流量成线性关系。

通过计算可见磁流体流量传感器输入与输出之间在一定条件下呈线性,符合流量传感器测量和设计的条件,可以进行工程等各方面的测量。

参考文献

- 1 刘桂雄,曹东,程韬波.基于磁流体独有特性的各种潜在传感器.功能材料,2006,37:756—759
- 2 李德才.磁性液体理论及应用.北京:科学出版社,2003.302—308
- 3 Rosensweig R E. Ferrohydrodynamics. London: Cambridge University Press, 1985
- 4 Crainic M S, Schlett Z. A flow transducer for cold water using ferrofluids. J Magn Magn Mater, 2004, 268: 8—19
- 5 Popa N C, Sabata I D, Anton I, et al. Magnetic fluids in aerodynamic measuring devices. J Magn Magn Mater, 1999, 201: 385—390
- 6 Cotae C, Baltag O, Olaru R, et al. The study of magnetic fluid-based sensor. J Magn Magn Mater, 1999, 201: 394—397
- 7 Popa N C, Potencz I, Brostean L, et al. Some applications of inductive transducers with magnetic liquids. Sensor Actuat, 1997, A(59): 197—200
- 8 杨文荣,杨庆新,樊长在,等.磁流体加速度传感器的特征参量分析.仪器仪表学报,2006,27:1228—1231
- 9 Stanci A, Iusan V, Buioca C D. Magnetofluidic sensor for volume measurement. Sensor Actuat, 2000, 84: 246—249
- 10 Berkovsky B M, Medvedev V F, Krakov M S. Magnetic Fluids Engineering Applications. Oxford, New York, Tokyo: Oxford University Press, 1993
- 11 Popa N C, Siblini A, Jorat L. Influence of the magnetic permeability of materials used for the construction of inductive transducers with magnetic fluid. J Magn Magn Mater, 1999, 201: 398—400
- 12 Popa N C, Siblini A, Jorat L. Aspects concerning the dimensioning of the inductive transducers with magnetic fluids. J Magn Magn Mater, 2002, 242-245: 1240—1242
- 13 Popa N C, Sabata I D. Numerical simulation for electrical coils of inductive transducers with magnetic liquids. Sensor Actuat A, 1997, 59: 272—276
- 14 Popa N C, Potencz I, Anton I, et al. Magnetic liquid sensor for very low gas flow rate with magnetic flow adjusting possibility. Sensor Actuat A, 1997, 59: 307—310
- 15 Piso M I. Applications of magnetic fluids for inertial sensors. J Magn Magn Mater, 1999, 201: 380—384
- 16 陈智军,韩韬,吉小军,等.用于非粘性液体检测的 Lamb 波传感器阵列.中国科学 G 辑:物理学 力学 天文学,2006,36:403—414
- 17 徐多,谷建华,吴松.柔性基底瞬态热流率测量传感器的研制及其应用.科学通报,2009,54:414—419
- 18 吕浩宇,李椿萱,董海涛.三维超声速磁流体发生器的流动特性.中国科学 G 辑:物理学 力学 天文学,2009,39:435—445
- 19 吕浩宇,李椿萱. Hall 效应对磁流体压缩管道电磁流动特性的影响.科学通报,2010,55:1182—1188
- 20 曹东,刘桂雄,邱东勇,等.磁流体传感器特殊多介质组合电容建模与优化.华南理工大学学报(自然科学版),2007,35:38—41
- 21 周光炯,严宗毅,许世雄,等.流体力学.北京:高等教育出版社,2003
- 22 张三慧.电磁学.北京:清华大学出版社,2002
- 23 朱蕴璞,孔德仁,王芳.传感器原理及应用.北京:国防工业出版社,2005