

U型振动管流体密度计的设计与实现

李琼^{1,2},孔令周³,秦实宏¹

(1. 武汉工程大学电气信息学院,湖北 武汉,430074;

2. 武汉大学电子信息学院,湖北 武汉,430079;

3. 武汉大学印刷与包装系,湖北 武汉,430079)

摘要:从力学角度对欧拉-伯努利梁的简谐振动进行分析,推导出梁的横向振动方程;在考虑边界条件的情况下推导出两端固定梁的频率方程和主振型函数;建立主振型频率与相应密度的关系解析式,求解得到目标流体密度.以此为基础,提出了一种基于振荡管的新型流体密度测量方法(系统).实验表明,相对于目前外业常用流体密度计,该流体密度计具有误差小于0.2%的高测量精度,且具有较好的抗恶劣环境的性能.

关键词:流体密度;梁振动模型;振动方程

中图分类号:TP23

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2012.1.012

0 引言

实际生产场合所使用的流体密度检测仪器主要为压差式密度计^[1]、浮子式密度计^[2]等,它们的精度在1%~5%左右,对于越来越高精度的流体密度测量与分析而言,它们都存在一定的测量精度的局限性.为了满足诸如浆氢、浆氮等特定场合高精度测量的需求,电容式流体密度计的设计^[3-4]以及低振动雷诺数下横纹管内脉冲流流动^[5]等也有研究.但电容式流体密度计对温度及湿度非常敏感,难以适应野外现场的恶劣环境.

在前期研究工作的基础上,利用振动管的振动频率与被测介质密度有确定函数关系的原理,设计了一种新型的基于振动测量的流体密度计.样机实验表明,该新型流体密度计的测量精度远高于压差式密度计、浮子式密度计等传统测量手段,与电容式流体密度计相比较,测量精度稍低但具有非常优越的抗恶劣环境性能.

1 梁及梁的横向振动方程

1989年,英国的Sultan和Hemp发表了U形管科氏质量流量计建模的论文^[6].在下述4点假定的基础上,将其振动理论应用于流体质量流量的测量:

①测量管处于近似无阻尼振动状态;②测量管

转动惯量及剪切变形可忽略不计;③振动激励发生器质量及测量传感器质量可忽略不计;④流体压力可忽略等.

上述理论也可用于测量流体密度,基于振动测量的流体密度计的精度很大程度上取决于振动模型(即振动方程)的建立.

物理上,如果一直杆在通过杆的轴线的一个纵向平面内受到力偶,或垂直于轴线的外力作用,杆的轴线就变成一条曲线,杆的这种变形称为弯曲变形.凡在外力作用下产生弯曲变形的,或者以弯曲变形为主的杆件,在结构力学上都称为梁.不失一般性,几何上梁的横截面存在一根或几根对称轴.由横截面的对称轴和梁的轴线组成纵向对称面.在外力作用下,梁的纵向对称面内出现平面弯曲^[7].

如图1所示的欧拉-伯努利梁,具有纵向对称面的横向微振动.在假设只有弯矩引起挠度 $V(x, t)$,考察梁上 x 处的微分 dx .

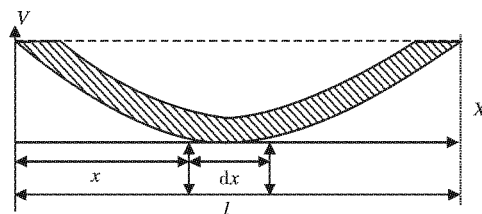


图1 梁的模型

Fig. 1 Model of the beam

如图2所示,设 dx 微分段上梁的质量为 M ,若在瞬时 t 梁上 x 处单位体积的质量为 $\rho(x)$,截面积为 $A(x)$,这时 $x+dx$ 截面上中点的力矩平衡方程为

$$M + \frac{\partial M}{\partial x} dx - M + Q dx - q dx \frac{dx}{2} = 0 \quad (1)$$

若略去上式的高阶项 d^2x 后,得到:

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial x} = -Q(x,t) \quad (2)$$

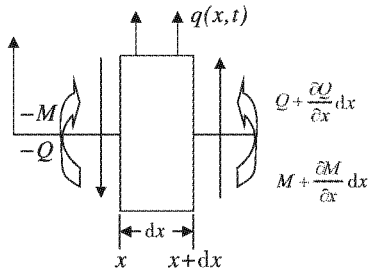


图2 具有纵向对称面的梁的横向振动
Fig.2 Beam's horizontal vibration with the vertical symmetric plane

定义 E 为梁的弹性模量, I 为梁横截面惯性矩. 由材料力学知,弯矩与由之产生的位移的关系可表示为

$$EI(x) \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = M(x,t) \quad (3)$$

所以,微分段 dx 沿 V 方向的运动方程为

$$\rho A(x) \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI(x)) \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = q(x,t) \quad (4)$$

设梁是均质、等截面的,则有

$$\rho A \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} = q(x,t) \quad (5)$$

对等截面梁,两端固定的情况下边界条件为

$$\begin{cases} Y|_{x=0} = Y|_{x=l} = 0 \\ \frac{dY}{dx}|_{x=0} = \frac{dY}{dx}|_{x=l} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

这样,便可以得到主振型函数为

$$Y_i(x) =$$

$$ch\beta_i x - \cos\beta_i x - \frac{\cos\beta_i l - ch\beta_i l}{\sin\beta_i l - sh\beta_i l} sh\beta_i x - \sin\beta_i x \quad (7)$$

2 振动管中流体密度的求解

在瞬时 t ,流体与其容器管在物理上可以视为具有不同密度的两端固定的梁^[8];在外置激励补偿的前提下,对该梁的无阻尼自由振动进行分析,计算其谐振频率与内盛流体密度之间的关系,有:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

式(8)中所有变量记号的物理含义同上.

按式(8)求解不同阶的谐振频率为:

$$\begin{cases} f^k = (2\pi)^{-1} (P^k/l)^2 (EI/M)^{1/2} \\ = C^k (1 + k^k \rho)^{-1/2} \\ C^k = (2\pi)^{-1} (P^k/l)^2 [E(D^2 + d^2)/\rho^s]^{1/2} \\ K^k = [d^2/(D^2 - d^2)\rho^2] \quad k=1,2,3,\dots \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, d 与 D 分别为振动管的内外径; ρ^s 为振动管材料的密度; C^k 、 K^k 为与振动管材料及尺寸相关的常数, P^k 为常数; f^k 为 k 阶谐振频率, ρ 为管内流体的密度.

式(9)的求解参照文献[10].

当 U 型管传感器制成后, D 、 d 、 ρ^s 、 P^k 、 l 、 E 便确定了,所以 C^k 、 K^k 为常数,由上式得

$$f^k \propto \frac{1}{\rho^{1/2}} \quad (10)$$

在科氏力流体密度计初出现时,测量原理都是在基于以上模型的,并开发出了高精度的小型的密度计产品;在进一步研究中发现,该模型有进一步完善之处,将输送流体的管道的自由振动的运动方程修正为,

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + 2\rho A v \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} + M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (11)$$

其中 $M = m + \rho v$, 是管的单位长度质量与单位长度中的流体质量之和^[9].

3 实验与分析

实验选用谐振频率在 10 ~ 100 Hz 之间的双 U 型振动管(与直型管相较,弯管型起振容易,激励功率较小,精度较高),外形如图3所示,采用经钝化的厚管壁以增强其抗腐蚀、耐酸碱能力. 另外,采用双管式振动管以期具有很好的自动平衡及补偿功能.

硬件系统设计功能模块包括单片机控制下的激励、稳幅反馈控制、放大整形、滤波、计数、温度补偿等.

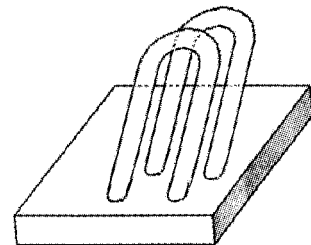


图3 双U型管外形图

Fig.3 Double U type structure

在振动管的振动试验、传感器承压试验、传感器的温度试验、电路模拟试验基础上,进行样机标定和误差分析^[10]. 实验结果如表1所示.

表 1 密度误差分析数据表
Table1 Measuring density relative error

标准液	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	t/ms	ρ^*	$\varepsilon(\rho)$
空气	11.100	9.259	1.098	-0.002
柴油	820.000	10.672	820.005	0.005
水	998.000	10.955	988.005	0.005
	1 052.000	11.040	1 051.997	-0.003
	1102.000	11.117	1 102.009	0.009
盐水	1 154.000	11.197	1 153.994	-0.006
	1 202.000	11.271	1 202.001	0.001

注: $\varepsilon(\rho)$ 为拟合密度与真密度之差.

表 1 中, ρ 为标定的密度(视为真密度), ρ^* 为最小二乘法拟合出的密度值, $\varepsilon(\rho)$ 为拟合密度与真密度之差.由表 1 可知其所测得密度的最大相对误差为 0.171 %.可见该流体密度计的系统误差已优于 0.2 %,其精度远远高于压差式密度计、浮子式密度计.

另外,该流体密度计具有较广的适用范围和极高的稳定性.

4 结 语

流体密度测量是现代石油、化工等规模生产诸多工艺环节中进行相关流体监测和控制的主要手段之一,但由于其测量机理和抗恶劣环境等因素的制约,目前在上述领域的野外作业中所使用的测量系统规范存在精度不足现象.鉴于此,在梁振动模型分析的基础上,建立振动频率与被测介质密度的函数关系;进一步设计并开发出基于振动管的流体密度计.

样机实验表明,其最大测量相对误差为 0.171 %,精度高出当前野外常用流体密度计一个数量级.

参考文献:

- [1] 陈亚平,郑德毅.压差式密度计[P].中国专利:89201018,1990.
- [2] 李川,牛生辉,万舟.浮子式光纤光栅液体密度计[P].中国专利:094844,2009.
- [3] Ohira K, Nakamichi K. Development of a high - accuracy capacitance type densimeter for slush hydrogen[J]. JSME International Journal (B), 2000, 43 (2) :162 - 170 .
- [4] Jiang Yuye, Zhang Peng. Study on the capacitance - type densimeter and liquid levelmeter for slush nitrogen [J]. Cryogenics, 2010, 38 (5) :19 - 23.
- [5] 林伟,喻九阳,吴艳阳,等.横纹管脉冲流流动与换热数值分析[J].武汉工程大学学报,2011,33(5):89 - 93.
- [6] Sultan G, Hemp J. Modelling of coriolis mass flowmeter [J]. Journal of sound and vibration, 1989, 32 (3) : 473 - 489.
- [7] 欧珠光.工程振动[M].武汉:武汉大学出版社,2010.
- [8] 赵知礼,刘慧颖.DDM-1 便携式振动管液体密度计的研究[J].石油仪器,2001,15(4):16 - 19.
- [9] 张阿舟,姚起航.振动控制工程[M].北京:航空工业出版社,1989.
- [10] 李琼.CQ-1 型振动管流体密度计的设计研究[D].武汉:武汉大学,2001.

Fluid densimeter design and implimentation based on U-type tube vibration modet

LI Qiong^{1,2}, KONG Ling-wang³, QIN Shi-hong¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Electrical Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Harmonic oscillation of Bernoulli-Euler beam was analyzed in sense of mechanics to deduce its horizontal vibration function. The frequency function was developed with the principle vibrating function when its 2 terminals were fixed and the boundary condition was concerned. The target fluid density was ultimately solved from the density function of principle vibrating frequency. By means of the method mentioned above, a novel fluid densimeter was designed. The experiments showed that, compared with the currently applied outdoor devices, it had a higher measuring accuracy with the lower 0.2% relative error, as well it had well performance of bad-environment resistance.

Key words: fluid density; beam vibrating model; oscillation function

本文编辑:陈小平