

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.03.13

取压口位置对文丘里管脉动流量测量的影响

张永胜, 张毅治, 王鹏

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为研究通过文丘里管测量周期脉动流量时取压口位置造成的影响, 利用 FLUENT 软件对正弦脉动流下文丘里管内流场进行仿真计算, 获得文丘里管在不同脉动频率和幅度下单周期内流量与四组取压口间的差压, 并利用四组差压分别计算脉动流量, 对计算流量的误差进行比对分析。研究结果表明, 文丘里管取压口轴线位置不同, 将导致横截面倒数在取压口之间的积分值不同, 进而将影响脉动流量测量误差。

关键词: 脉动流量; 文丘里管; 取压口; 测量误差

中图分类号: TB937

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)03-0069-04

Influence of Pressure Tapping Position on the Measurement of Pulsating Flow Through Venturi Tube

ZHANG Yongsheng, ZHANG Yizhi, WANG Peng

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to study the influence of the position of the pressure intake on the measurement of periodic fluctuating flow through Venturi tube, the flow field of sinusoidal fluctuating flow in the lower Venturi tube is simulated by FLUENT software. The differential pressure between the flow rate and four groups of pressure intake in a single cycle under different fluctuating frequencies and amplitudes is obtained. The four groups of differential pressure are used to calculate the fluctuating flow rate separately, which is a mistake in the calculation of flow rate. The differences were compared and analyzed. The results show that the different axis positions of Venturi tube pressure intake will lead to different integral values of reciprocal cross-sectional area between pressure intake, which will affect the measurement error of pulsating flow.

Key words: pulsating flow; Venturi tube; pressure tap; measurement error

0 引言

实际实验中, 管道定常流只在层流中出现, 大多数工业管道流动均有较高的雷诺数, 处于紊流状态。紊流状态下流体通常在速度、压力和温度上出现连续的、无规则的、随机的波动^[1]。产生脉动流波动的原因很多, 如: 可能由旋转或往复式发动机、压缩机和鼓风机等旋转机械运行造成; 也可能由工作管道的振动, 特别是共振造成。脉动流动形成后, 会在管道系统中传播, 对流量测量的准确性带来较大影响, 甚至使流量计不能正常工作。差压式流量计就是对脉动流影响最为敏感的一种流量计^[2-3], 极易受脉动流干扰。

经典文丘里管是一种标准节流件^[4-6], 由于其具有结构简单、无可动部件等特点而广泛应用于封闭管道中单相稳定流量的测量, 可用于测量气体(空气、天然气)或液体(水、油品)的流量。文丘里管测量稳定管道流时, 以伯努利方程和质量守恒定律为基础建立数学模型, 以稳态流量数学模型计算

脉动流量, 会因遗漏流量导数项而产生较大的误差^[7]。导数项的系数与横截面倒数在取压口间沿轴线的积分结果相关, 取压口轴线位置不同会导致积分结果不同, 进而影响脉动流量测量的误差。本文利用 FLUENT 软件, 对文丘里管在正弦脉动流下的流场进行仿真计算, 并对不同取压口位置的脉动流量测量误差进行了分析研究。

1 文丘里管建模

1.1 几何模型

文丘里管几何模型如图 1 所示。文丘里管进出口内径 $D = 30$ mm, 喉径 $d = 19.5$ mm, 直径比 $\beta = 0.65$, 以文丘里管进口中心为坐标原点, 截面 I、截面 II、截面 III 和截面 IV 四截面轴线坐标 x 分别为 25, 46, 78 mm 和 90 mm。研究中分别提取四截面处静压, 进而计算得到截面 I 和 IV、截面 II 和 III、截面 I 和 III 及截面 II 和 IV 之间的四组差压, 分别表示为 Δp_{25-90} , Δp_{46-78} , Δp_{25-78} 和 Δp_{46-90} 。

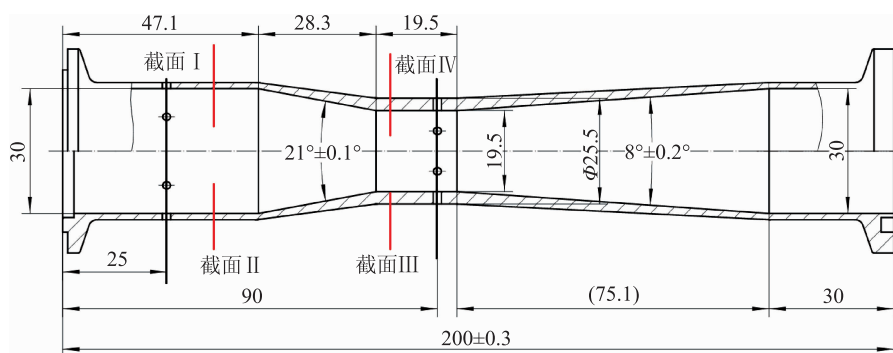


图1 文丘里管几何模型

1.2 流体仿真模型

利用 ICEM 软件进行几何建模, 忽略重力因素影响, 文丘里管内流场是轴对称的, 建立二维轴对称几何模型进行网格划分。文丘里管上游设置 10 倍长直管段, 下游设置 5 倍直管段。仿真模型壁面设置 5 层边界层网格, 中心区域为三角非结构化网格。

仿真中选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 使用液体水作为流体介质。设置下游直管段出口为自由出流条件, 直管段及文丘里管壁为静止壁面; 上游直管段入口为速度入口, 通过 UDF 函数定义, 速度入口流速通过式(1)和式(2)计算。

$$q_m = q_0 + Aq_0 \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

$$V_t = \frac{q_m}{\rho A_{in}} \quad (2)$$

式中: q_m 为瞬时质量流量, kg/s; q_0 为质量流量平均值, kg/s, $q_0 = 2$ kg/s; A 为脉动幅度; f 为脉动频率, Hz; t 为运行时间, s; V_t 为瞬时入口速度平均值, m/s; ρ 为流体密度, kg/m³; A_{in} 为上游直管段入口截面积, m²。

1.3 脉动流理论模型

在脉动流状态下, 假设流体流过文丘里管时为一维流动, 根据动量方程和连续性方程, 文丘里管内的流动可由式(3)表示^[8]。

$$k_1 \frac{dq_m}{dt} + k_2 q_m^2 = \Delta p \quad (3)$$

式中导数项系数 k_1 和平方项系数 k_2 可分别由式(4)和式(5)计算。

$$k_1 = \int_{Pos_u}^{Pos_d} \frac{1}{A_x} dx \quad (4)$$

$$k_2 = \frac{1}{2\rho C^2} \left(\frac{1}{A_d^2} - \frac{1}{A_u^2} \right) \quad (5)$$

式中: Pos_u , Pos_d 分别为上游取压口和下游取压口轴线位置, m; A_x 为某轴线位置文丘里管横截面积,

m²; A_u , A_d 分别为上下游取压口所在截面的截面积, m²; C 为稳态流动下流出系数, 通过文丘里管内稳态流动下流场计算; Δp 为上下游截面之间压差, Pa。

1.4 脉动流量测量误差

稳态流动下, 质量流量 q_{mc} 的计算公式

$$q_{mc} = \sqrt{\frac{\Delta p}{k_2}} \quad (6)$$

正弦脉动流情况下, 瞬时质量流量引入的导数项误差通过式(7)计算, 4 种情况误差可分别表示为 E_{25-90} , E_{46-78} , E_{25-78} 和 E_{46-90} 。

$$E = \frac{q_{mc} - q_m}{q_m} \quad (7)$$

2 流体仿真结果

2.1 理论模型系数计算

通过设定入口质量流量 $q_0 = 2$ kg/s, 获得文丘里管内稳态流量场, 以此稳态流场作为脉动流场计算初始条件, 并以稳态流场进行理论模型中各系数的计算, 表 1 是不同位置的取压口对应理论模型系数计算结果, 对于 k_1 而言, 四种不同位置取压口的关系为 $k_{1(25-90)} > k_{1(46-90)} > k_{1(25-78)} > k_{1(46-78)}$ 。

表1 理论模型系数

Pos_u /mm	Pos_d /mm	流出系数 C	k_1	k_2
25	90	0.98153	141.75	4788.8
46	78	1.0070	71.856	4549.7
25	78	1.0013	101.57	4601.6
46	90	0.97717	112.04	4831.7

2.2 脉动流量测量误差

仿真计算中选择 $f = 5$ Hz & $A = 0.05$, $f = 10$ Hz & $A = 0.10$, $f = 15$ Hz & $A = 0.10$, $f = 20$ Hz & $A = 0.15$, f

= 30 Hz & A = 0.20, $f = 40$ Hz & A = 0.25 和 $f = 50$ Hz & A = 0.30 这 7 个工况进行比较分析。图 2 是 $f = 5$ Hz & A = 0.05 和 $f = 50$ Hz & A = 0.30 两工况下不同位置取压口脉动流量误差随时间变化的曲线图。各工况不同位置取压口脉动流量测量误差极值如表 2 所示。

在脉动频率和脉动幅度较低时, 4 个不同位置脉动流量计算误差区别较小。 $f = 5$ Hz & A = 0.05 工况的 4 种取压位置中, E_{25-90} 的误差上限最大, 为 1.14%; E_{46-90} 的误差下限最小, 为 -1.65%。

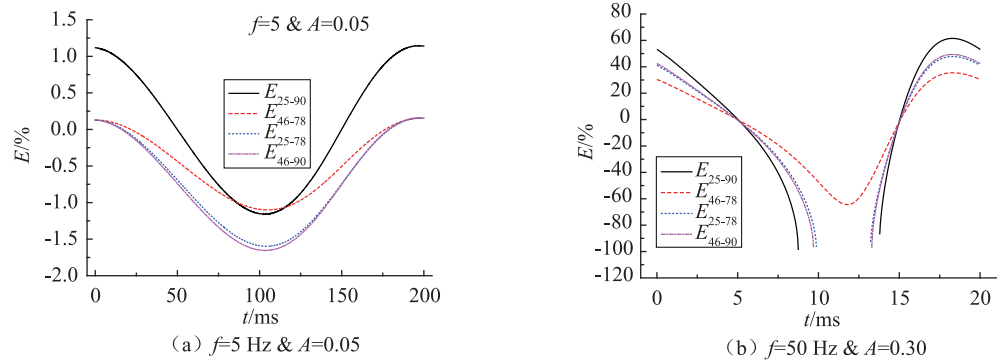


图 2 不同位置取压口脉动流量误差曲线图

表 2 不同位置取压口脉动流量误差上下限 %

工况	E_{25-90}		E_{46-78}		E_{25-78}		E_{46-90}	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
$f = 5$ Hz & A = 0.05	-1.16	1.14	-1.10	0.16	-1.60	0.16	-1.65	0.16
$f = 10$ Hz & A = 0.10	-4.76	4.52	-3.02	1.97	-4.31	2.72	-4.46	2.82
$f = 15$ Hz & A = 0.10	-7.19	6.68	-4.27	3.13	-6.12	4.36	-6.34	4.51
$f = 20$ Hz & A = 0.15	-15.38	13.23	-8.41	6.74	-12.13	9.38	-12.57	9.72
$f = 30$ Hz & A = 0.20	-35.76	25.82	-17.68	13.90	-26.22	19.21	-27.29	19.88
$f = 40$ Hz & A = 0.25	—	41.97	-33.24	23.46	-53.47	32.04	-56.48	33.13
$f = 50$ Hz & A = 0.30	—	61.52	-64.46	35.49	—	47.85	—	49.42

定义误差上限与误差下限的代数差为误差带宽度 δ , 利用 Δp_{25-90} , Δp_{46-78} , Δp_{25-78} 和 Δp_{46-90} 计算脉动流量获得误差带宽度 δ 分布表示为 δ_{25-90} , δ_{46-78} , δ_{25-78} 和 δ_{46-90} , 各工况误差带分布如图 3 所示。4 种情况的误差带宽度关系都为 $\delta_{25-90} > \delta_{46-90} > \delta_{25-78} > \delta_{46-78}$, 与 k_1 值排序相同。

3 总结

利用 FLUENT 软件对文丘里流量计在正弦脉动流下的流场进行了流体仿真, 对不同取压口位置的脉动

随着脉动频率和脉动幅度增大, 脉动流量误差上限迅速抬升, 误差下限则迅速降低。 $f = 50$ Hz & A = 0.30 工况, 4 个不同取压位置流量误差上下限差异很大, E_{25-90} , E_{25-78} 和 E_{46-90} 三者的误差曲线在某时间段内存在中断, 是由于对应的 Δp_{25-90} , Δp_{25-78} 和 Δp_{46-90} 在该时间段内为负值, 无法进行开方运算造成的。 E_{25-90} , E_{25-78} 和 E_{46-90} 三者的误差下限可达 -100%。 E_{25-90} 误差上限最大, 为 61.52%; E_{46-78} 误差上限最小, 为 35.49%。

- 流量测量误差进行了分析研究, 结论如下:
- 1) 在脉动频率和脉动幅度较低时, 各位置脉动流量计算误差区别较小, 且每个取压孔位置流量误差带宽度都较窄;
 - 2) 在脉动频率和脉动幅度较大时, 各位置脉动流量误差上限迅速抬升, 误差下限则迅速降低, 误差带宽度迅速增大;
 - 3) 误差带宽度随理论模型系数 k_1 增大而变宽, 高脉动频率和大幅度工况, 可导致某些取压口之间差压为负值, 脉动流量误差下限可达 -100%。

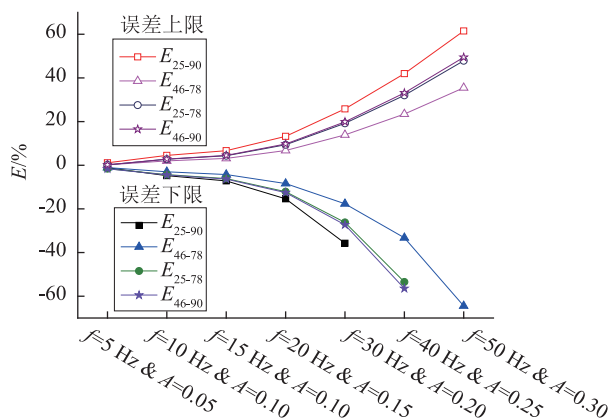


图3 脉动流量误差带分布图

参考文献

- [1] 李文,应启夏. 脉动气体流对涡轮流量计测量误差的影响[J]. 自动化仪表, 2002, 24(2): 20-22.
- [2] 朱云. 脉动流对差压式流量计测量误差影响的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(8): 894-897.
- [3] 董峰,徐冬安. 煤气输送管道中脉动流对孔板流量计的影响[J]. 自动化仪表, 1998, 20(5): 3-7.

- [4] 苏彦勋,杨有涛. 流量检测技术[M]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
- [5] 王池,王自和. 流量测量技术全书[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [6] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 2624.4-2006 用安装在圆形截面管道中差压装置测量满管流体流量第4部分: 文丘里管[S]. 2006.
- [7] 何军山,赵玲. 差压流量计测量脉动流综述[C]//全国反应堆热工流体力学会议. 2007: 226~230.
- [8] ISO/TR 3313-2018 Measurement of fluid flow in closed conduits. Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement[S]. 2018.

收稿日期: 2019-01-14

作者简介

张永胜(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事流量校准及标准装置研发工作。



《化学分析计量》2019 年第 3 期目次

标准物质

pH 值标定用混合碳酸盐溶液标准物质的研制

分析测试

高效液相色谱-串联质谱法测定保健食品中 20 种雌性激素

离子色谱法测定酱腌菜中的二氧化硫

电感耦合等离子体原子发射光谱法同时测定土壤中的铜、锌、镍、铬

近红外光谱法测定红烟硝酸中的水

顶空气相色谱-质谱法快速测定废水中的 α -甲基萘

熔融制样-X 射线荧光光谱法同时测定石煤钒矿中 12 种主次成分

电感耦合等离子体原子发射光谱法同时测定锌冶炼酸浸渣中 12 种元素

固相萃取-气相色谱-串联质谱法测定甘蓝类蔬菜中氟啶虫酰胺和啉菌环胺

基于多分类器融合的近红外光谱技术鉴别蜂蜜品种

5 种甲氧基多溴联苯醚与羟基自由基的二级反应速率常数的测定及反应活性分析

溶解沉淀-气相色谱-质谱法测定食品接触用聚苯乙烯塑料中 10 种有机物

电感耦合等离子体发射光谱法测定三氧化二锑中的铅

高效液相色谱法测定化妆品中的双(羟甲基)咪唑烷基脲

四氯乙烯吸收-红外分光光度法测定压缩空气中的油含量

紫外可见分光光度法测定放线菌 BOS-011 产红色素的稳定性

超高效液相色谱-串联质谱法测定香菇中 29 种农药残留

微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定鲤鱼、河蚌样品中的铜、镉、铅、铬

顶空气相色谱内标法测定香水中的乙醇

石墨炉原子吸收光谱法测定土壤中的银

石墨炉消解-EDTA 滴定法测定铅矿石及铅精矿中的铅

高效液相色谱法测定芝麻油中的叔丁基羟基茴香醚、2,6-二叔丁基对甲酚、特丁基对苯二酚

X 射线荧光光谱法快速测定铅铋合金中的铅、铋、金、银、铜、砷、锑、锡和碲

四酸溶解-电感耦合等离子体发射光谱法测定镍精矿中 12 种主次元素

固相萃取-气相色谱-质谱法测定地表水中的莠去津、灭草松和吡喃丹

高效液相色谱法测定黄蜀葵花总黄酮胶囊中的金丝桃苷和槲皮素-3'-葡萄糖苷

计量技术

紫外可见分光光度计线性范围的校准

仪器设备

全自动红外测油仪的研制

综述

毛细管电色谱应用研究进展

镍基高温合金元素分析方法研究进展