

4种常用流量计性能的对比试验研究与分析

沙毅¹,李强¹,李金磊²,曹森龙¹

(1.浙江科技学院机械与汽车工程学院,杭州310023;2.江苏南通金通灵风机股份有限公司,江苏南通226001)

摘要:利用 π 定理推导出孔板、文丘里、电磁及涡轮流量计水力特性。将4种流量计串联组成测试装置进行试验研究,利用软件采集各流量计测试数据,与称重法测量数据进行对比。用Origin软件绘出流量曲线,分析在不同流量条件下各种流量计的准确度和误差率,以期为流量计的选型和应用提供有价值的参考依据。

关键词:孔板流量计;文丘里流量计;电磁流量计;涡轮流量计;试验性能

中图分类号:TH71 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-8798(2009)02-0092-04

Contrast testing study on performance of four commonly used flowmeters

SHA Yi¹, LI Qiang¹, LI Jin-lei², CAO Miao-long¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Jiangsu Jintongling Fan CO., Ltd, Jiangsu Nantong 226001, China)

Abstract: The hydraulic characteristics of orifice flowmeter, venturi flowmeter, electromagnetic flowmeter and turbine flowmeter are derived by π -principle. The testing device is designed by four flowmeters connected in series. We contrast the flow of four commonly and use software to get datum of flowmeters, which are compared to datum by weighing method. We analyze the accuracy and error rate of the four commonly used flowmeters in detail by flow curves, using origin software under the different flow conditions. The conclusion could be used as a valuable reference for selection and application on the four commonly used flowmeters.

Key words: orifice flowmeter; venturi flowmeter; electromagnetic flowmeter; turbine flowmeter; test performance

在泵的运行与调节中,对泵流量的测量是泵性能检测的重要指标,实际中要用到大量的流量计,流量计性能将直接反映出泵的流量准确度^[1-2],因此,有必要对流量计的性能有所了解 and 掌握。本文对常用的4种流量计进行试验对比,得出了相关结论,以

期为实际应用及选型提供依据。

1 常用的4种流量计

1.1 孔板、文丘里流量计

孔板^[3]、文丘里流量计是基于伯努利方程原理

收稿日期:2009-05-10

基金项目:浙江省教育厅科研计划项目(20070782)

作者简介:沙毅(1961—),男,山西介休人,研究员,主要从事流体机械理论及流体力学现代测试技术研究。

制造的流量仪表,如图 1 和图 2 所示。它利用流体流经节流装置所产生的压差来测量流量,因此叫作差压流量计,是目前应用最广泛的一类流量测量仪表。其特点是:所测介质为单相、均质的牛顿流体,在通过节流装置时不发生相变和析出杂质,在节流装置中不得有物质黏附或聚集。适用于圆管和上下游有较长间距的直管段。流动应连续、稳定,流线与管轴线平行。节流装置结构简单,使用寿命长,适应性比较广,能够测量各种工况下的流体,精确度可达 $\pm 1\%$;但其压力损失较大,刻度呈非线性。

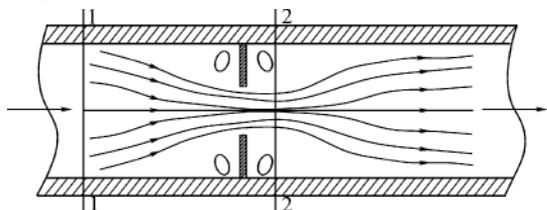


图 1 孔板流量计原理图

Fig.1 Schematic diagram of orifice flowmeter

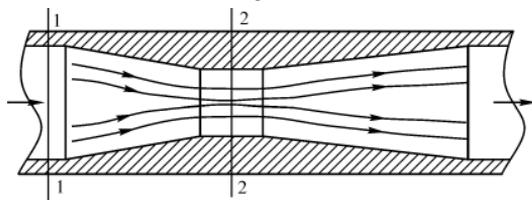


图 2 文丘里流量计原理图

Fig.2 Schematic diagram of venturi flowmeter

1.2 电磁流量计

电磁流量计^[4]是基于法拉第电磁感应定律制成的测量导电性液体的仪表,如图 3 所示。即利用电磁感应原理来测量导管中导电液体的平均流速。

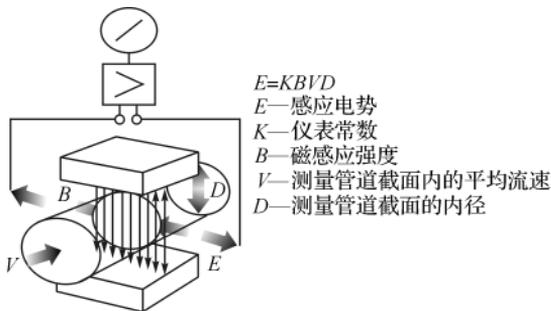


图 3 电磁流量计原理图

Fig.3 Schematic diagram of electromagnetic flowmeter

其特点是:测量通道为光滑直管,不会阻塞,适用于测量含固体颗粒的液固二相流体(如纸浆、泥浆、污水等),没有压力损失,所测体积流量不受流体密度、黏度、温度、压力和电导率($> 10^{-5} \Omega/\text{cm}$)的影响,测量范围大(流速为 $0.3 \sim 10 \text{ m/s}$),口径范围

宽(3 mm 至 3 m),测量精度比较高(基本误差值的 $\pm 0.2\% \sim \pm 0.5\%$),输出与被测介质平均流速成正比,与流动状态无关,可测量瞬时脉动流量。但是它不能测量电导率很低的液体(如石油制品),不能测量气体、蒸汽和含有较大气泡的液体,不能用于测量较高温度的介质(易受外界电磁干扰)。

1.3 涡轮流量计

涡轮流量计^[5]是基于动量矩守恒原理制造的速度式流量仪表,即利用置于流体中叶轮的旋转角速度与流体流速成比例的关系,通过测量叶轮的转速来反映通过管道的体积流量,是目前流量仪表中比较成熟的高精度仪表,工作原理如 4 所示。

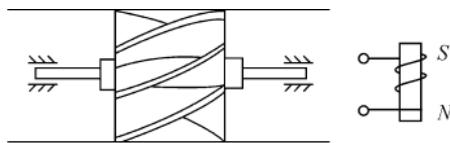


图 4 涡轮流量计原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of turbine flowmeter

其特点是:结构简单、加工零部件少、重量轻、维修方便、流通能力大(同样口径可通过的流量大),易实现脉冲远距离传送,可适应高参数(高温、高压和低温)的测量需要,测量精确度较高,测量范围较宽,动态响应好,压力损失较小;但是被测流体的部分物性对测量精确度有一定的影响,不能长期保持校准特性,对被测介质清洁度要求较高,流体的温度、黏度、密度对仪表指示值有较大影响,由于有转动部件会带来磨损,仪表的使用年限受影响。适宜测量比较洁净的低黏度液体。

2 π 定理推导水力特性

2.1 孔板、文丘里流量计水力特性

对于孔板、文丘里流量计,流速 v 的影响因素有:进口管径 d_1 、孔径(喉径) d_2 、流体的密度 ρ 、动力黏度系数 μ 及断面间压强差 Δp 。据 π 定理:

$$f(v, d_1, d_2, \rho, \mu, \Delta p) = 0 \quad (1)$$

其量纲 $[v] = [L T^{-1}]$; $[d_1] = [L]$; $[d_2] = [L]$; $[\rho] = [L^{-3} M]$; $[\mu] = [L^{-1} M T^{-1}]$; $[\Delta p] = [L^{-1} M T^{-2}]$, 选 ρ, v, d_1 为循环量, $\Delta p, \mu, d_2$ 为无量纲数 π_1, π_2, π_3 。

$\pi_1 = \Delta p \rho^a v^b d_1^c$; $\pi_2 = \mu \rho^a v^b d_1^c$; $\pi_3 = d_2 \rho^a v^b d_1^c$
代入各量纲整理得:

$$\pi_1 = \frac{\Delta p}{v^2 \rho}; \pi_2 = \frac{\mu}{d_1 v \rho}; \pi_3 = \frac{d_2}{d_1}$$

因此 $v = \sqrt{\Delta p / \rho f\left(\frac{d_2}{d_1}, \frac{\mu}{d_1 v \rho}\right)}$, $\frac{\mu}{d_1 v \rho}$ 为雷诺数

Re , 考虑损失, 引入流量系数 μ_0 , 得流量表达式:

$$Q = \mu_0 d_1^2 \sqrt{\Delta p / \rho f_1} \left(\frac{d_2}{d_1}, Re \right) \quad (2)$$

由(2)式可知, 流量 Q 与流量系数 μ_0 、管道雷诺数 Re 及管径与孔径比 d_2/d_1 有关。

2.2 电磁流量计水力特性

当流体的电导率大于 $10^{-5} \Omega/\text{cm}$ 时, 电磁流量计流速与流体的物性无关, 流速 v 的影响因素有: 电磁感应强度 e 、磁场强度 B 、管道直径 D 。据 π 定理:

$$f(v, D, e, B) = 0 \quad (3)$$

其量纲 $[v] = [\text{LT}^{-1}]$; $[D] = [\text{L}]$; $[e] = [\text{L}^2 \text{MT}^{-3} \text{I}^{-1}]$; $[B] = [\text{MT}^{-2} \text{I}^{-1}]$, 选 v, D, B 为循环量, e 为无量纲数 π_0 , $\pi_0 = ev^a D^b B^c$ 。

代入各量纲整理得:

$$\pi_0 = \frac{e}{BvD}; \text{即 } v = \frac{e}{\pi_0 BD};$$

则流量表达式:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{e}{\pi_0 BD} = \frac{\pi e D}{4\pi_0 B} \quad (4)$$

由(4)式可知, 当磁场强度 B 、管道直径 D 为常数时, 流量 Q 仅与电磁感应强度 e 相关且成正比。

2.3 涡轮流量计水力特性

当涡轮结构一定时, 涡轮流量计流速 v 与叶轮的转速相关, 故影响因素有: 叶轮的旋转角速度 ω 、流体密度 ρ 、动力黏度系数 μ 、管径 D 、叶轮转动的阻力矩 M (包括摩擦阻力矩和磁阻尼力矩等)。据 π 定理:

$$f(\omega, v, D, \rho, \mu, M) = 0 \quad (5)$$

其量纲 $[\omega] = [\text{T}^{-1}]$; $[v] = [\text{LT}^{-1}]$; $[D] = [\text{L}]$; $[\rho] = [\text{L}^{-3} \text{M}]$; $[\mu] = [\text{L}^{-1} \text{MT}^{-1}]$; $[M] = [\text{L}^2 \text{MT}^{-2}]$; 选 ρ, v, D 为循环量, 余下 ω, μ, M 组成无量纲数 π_1, π_2, π_3 。

$$\pi_1 = \omega \rho^a v^b D^c; \pi_2 = \mu \rho^a v^b D^c; \pi_3 = M \rho^a v^b D^c$$

代入各量纲整理得:

$$\pi_1 = \frac{\omega D}{v};$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{Dv\rho};$$

$$\pi_3 = \frac{M}{D^3 v^2 \rho}$$

因此 $v = \omega D f\left(\frac{\mu}{Dv\rho}, \frac{M}{D^3 v^2 \rho}\right)$, $\frac{\mu}{Dv\rho}$ 为雷诺数 Re , 由角速度 $\omega = \frac{2n\pi}{60}$, 设 F 为流体的惯性力, 由惯性力定义: $F = \rho^2 D^2$; $M = f \cdot r$, f 为涡轮旋转的阻力, r 为叶轮的半径, 则流量表达式:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{2n\pi}{60} \cdot D f\left(\frac{\mu}{Dv\rho}, \frac{M}{D^3 v^2 \rho}\right) \\ = nD^3 f_1\left(R_e, \frac{f}{F} \cdot \frac{r}{D}\right) \quad (6)$$

由(6)式可知, 当管径 D 一定, 流量 Q 与涡轮转速 n 成一定的比例关系, 和雷诺数 Re 、涡轮旋转阻力与流体惯性力之比及涡轮平均半径与管径之比相关。

3 试验装置及方法

试验测试装置由电磁、涡轮、文丘里和孔板 4 个同口径 ($\Phi 25 \text{ mm}$) 的流量计, 组成串联管路、自动切换控制仪、计算机测控系统、自循环供水系统及辅助补水机构, 如图 5 所示。

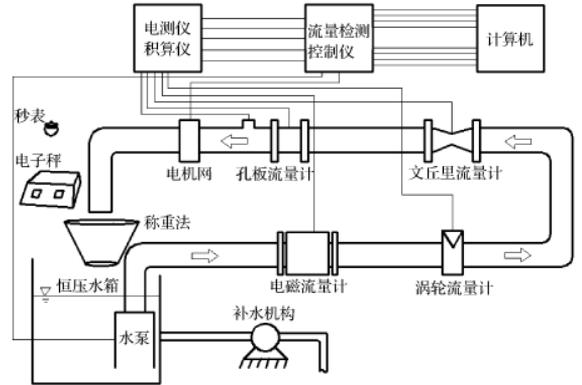


图 5 试验装置图

Fig. 5 Diagram of the test device

孔板流量计采用标准孔板角接取压, $\beta=0.450$; 文丘里流量计采用圆锥形文丘里管, $\beta=0.628$; 电磁流量计传感器型号 LDG-25S, 精确度 1 级; 涡轮流量计传感器型号 LWGY-25A, 精确度 0.5 级。辅助补水机构的作用是当用称重法测量时, 对水箱进行补水以保持水箱水位不变, 形成管道内恒速定常运动。系统管径 $\Phi 25 \text{ mm}$, 流量范围 $0 \sim 3 \text{ m}^3/\text{h}$ 。各流量计数据由计算机瞬时采集。称重法由秒表记录时间, 电子秤测试重量, 采用同一流量测 3 次, 取平均值为测定流量。同一流量 4 个流量计和称重法同时测量, 测定流量值各不相同, 以称重法为真值基准, 通过分析对比, 揭示各自的性能特点。

4 试验数据及分析

本试验测得流量计及称重法 5 组实验数据, 按试验顺序计算汇总如表 1 和表 2 所示。为了便于研究, 将称重法测量数据为 X 轴, 各流量计数据与称重法数据之差为 Y 轴, 以及相对误差为 Y 轴, 利用 Origin 软件绘流量曲线如图 6、图 7 所示。

表 1 流量计及称重法试验数据

Table 1 Test data of four flowmeters and weighing method

序号	电磁	涡轮	文丘里	孔板	称重法
1	0.642	0.403	0.452	0.745	0.451
2	0.731	0.684	0.697	0.794	0.745
3	1.013	0.956	0.952	0.974	1.031
4	1.276	1.232	1.285	1.209	1.317
5	1.594	1.527	1.526	1.538	1.629
6	1.798	1.828	1.838	1.881	1.899
7	2.098	2.124	2.126	2.157	2.250
8	2.493	2.459	2.511	2.487	2.579
9	2.699	2.696	2.726	2.693	2.784
10	2.919	2.873	2.952	2.873	2.963

表 2 流量计流量偏差

Table 2 Error rate of four flowmeters

序号	电磁	涡轮	文丘里	孔板
1	42.4	11.3	0.2	65.2
2	1.9	8.7	6.4	6.6
3	1.7	7.9	7.7	5.5
4	3.1	6.6	2.4	8.2
5	2.1	6.7	6.3	5.6
6	5.3	4.2	3.2	1.0
7	6.8	5.8	5.5	4.1
8	3.3	5.0	2.6	3.6
9	3.1	3.4	2.1	3.3
10	1.5	3.1	0.4	3.0

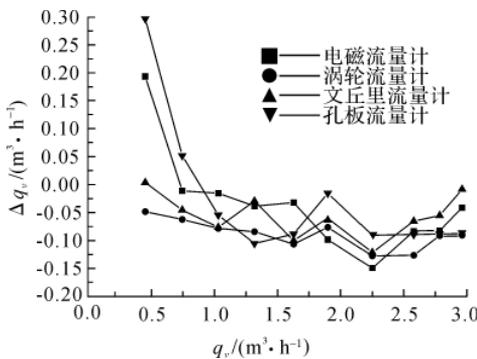


图 6 4 种流量计流量变化趋势

Fig. 6 Tendency of discharge change of four flowmeters

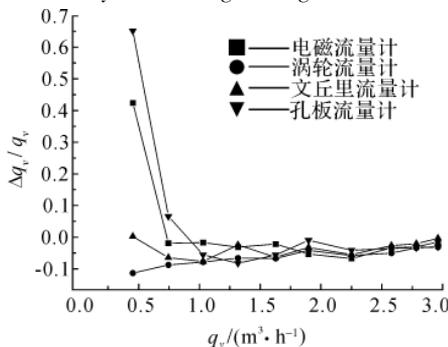


图 7 4 种流量计流量误差百分率曲线

Fig. 7 Flow error rate curves of four flowmeters

分析图 6 和图 7,当流量 $0.451\text{m}^3/\text{h}$ 时,管中流速为 0.255m/s ,雷诺数 $Re=6\ 336$,处于紊流状态。

对于电磁流量计,测量精度主要受传感器性能的影响,流速较低时积聚在电极上的电荷较少,受纵向速度影响明显,因此出现较大的偏差;在流量逐渐增加的过程中,纵向速度的影响逐渐减小,误差减小,精度、可靠性增加,说明电磁流量计在小流量时精确度较低。对于涡轮流量计,流量与涡轮转速成比例,与仪表常数有关,小流量时出现偏差,测量值偏小,这是因为此时叶轮的机械摩擦阻力及磁阻尼力矩相对旋转力矩较大,因此所测的流量值偏小;随着流量的增加,旋转力矩增大,误差逐渐减小,精度、可靠性增加。对于文丘里流量计,属于平缓节流,所测过程中受旋涡影响较小,且没有旋转部件,精度取决于试验标定,因此精度、可靠性较高,说明文丘里流量计适应性较广。对于孔板流量计,小流量时所测数据偏大,这是因为此时压差 Δp 较小,易受流体扰动的影响,孔板前后区域存在旋涡,因而测量偏差较大;随着流量的增加,旋涡的影响减小,精度、可靠性增加,说明孔板流量计不适于测量较小流量。流量从 $0.745\text{m}^3/\text{h}$ 增加 $1.899\text{m}^3/\text{h}$ 的过程中,电磁流量计的精确度要略高于涡轮、文丘里和孔板流量计,精度都能达到 1 级。流量从 $1.899\text{m}^3/\text{h}$ 增加 $2.963\text{m}^3/\text{h}$ 的过程中,各流量计精度都较高,表现在图 7 中的曲线趋于一点。

以上分析可知,电磁、涡轮、孔板流量计均不适于较小的流量,而文丘里流量计因为压损小,对旋涡不敏感,较接近真值。大流量时各流量计都有一定的波动,但测值接近真值,说明它们的性能是可靠的。

5 结 语

通过本次试验可知,在小流量时,孔板与电磁流量计的数据偏大、相对误差也较大,涡轮流量计数据偏小、相对误差也较小,文丘里流量计则接近真值;大流量时各流量计读数都有一定偏差,但所测值接近真值,说明性能都较可靠。

参考文献:

- [1] 杨根生,林辉渝.流量测量仪表[M].北京:机械工业出版社,1986.
- [2] 沙毅,闻建龙.泵与风机[M].合肥:中国科技大学出版社,2005.
- [3] 贾云飞,张涛,张清鹏.涡街流量计与孔板流量计压力损失的比较研究[J].计量学报,2008,29(2):134-137.
- [4] 袁加维,董连鹏.电磁流量计的分类和选型[J].农业与技术,2009,29(1):152-154.
- [5] 冯振伟,云康.智能涡轮流量计的设计[J].华北水利水电学院学报,2009,30(1):56-58.