

单孔堵塞对均速管流量计测量精度的影响

张东飞,苏中地,何馨雨

(中国计量学院 计量测试工程学院,杭州 310018)

摘 要: 对均速管流量计单孔堵塞后的内部流动进行数值模拟,得到压差,然后算出流量系数并与正常结果相比较,最后分析孔堵塞时对测量精度的影响。计算中引用 $k-\epsilon$ 湍流模型,应用有限体积法对控制方程离散和求解,在前处理软件 GAMBIT 中将计算区域划分为 236 多万个计算单元。

关键词: 均速管流量计;压差;流量系数;测量误差

中图分类号: TH814;O357.5

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2007)04-0265-04

Effect of Annubar Flowmeter's Measure Precision on a Blocked Hole

ZHANG Dong-fei, SU Zhong-di, HE Xin-yu

(College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Flow inside blocked Annubar flowmeter is numerically simulated to get pressure differential. Then the flow coefficient can be calculated out and compared with the normal data. At last the analysis process of the measure errors is given. A $k-\epsilon$ based model of turbulence is applied to solve the turbulent problem. Variational form of the numerical system is discretized with the finite volume method. The flow fields is divided to more than 2.36 million computing elements by GAMBIT.

Key words: annubar flowmeter; pressure differential; flow coefficient; measure error

均速管流量计(国外称 Annubar、Verabar、Probar、Averaging Pitot tube 等)是基于皮托管测速原理,以插入形式测量管道中截面直径上几点流速来推算流量的^[1]。均速管流量计具有结构简单、价格低廉、节约能源、安装维护简便、测量精度高等优点,在大于 300 mm 内径的管道中其优势更为突出。在我国西气东输工程中直径为 1 m 的主管道上选用了 50 台均速管流量计,占总干线流量计的 52%;此外,在冶金、化工、能源、市政工程等行业中应用较多。

目前,均速管流量计使用最广泛的是 Verabar,其结构的特殊性决定其取压孔不容易堵塞,大多数使用者认为其防堵效果特别好,在实际应用中流量计一经安装一般不再校验。然而,如果所测气体中含有灰尘、油烟等杂物,其检测孔难免会有不同程度的堵塞,甚至有的孔被完全堵住;另外,当均速管不工作时,附着在其表面的分子的布朗运动也有增加堵塞的可能。均速管流量计的工作原理是取流场中某个截面上多个点流动的平均值,孔的堵塞会使输

收稿日期: 2007-07-13

作者简介: 张东飞(1981—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要研究方向为均速管流量计内部的流动特性。

出差压发生明显变化,从而带来很大的测量误差。

研究均速管某个孔堵塞后差压的输出变化,可以为实际应用中判断流量计工作状态和进行流量修正提供非常重要的技术指导,所以有必要研究孔堵塞时对测量结果的影响。本文主要通过数值模拟,比较某个孔堵塞前后输出压差和流量系数的变化,分析每个孔的堵塞对测量结果的影响。

1 控制方程

可采用文献[2]的控制方程,基本方程为:

连续方程

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式(1)中, U_i 是流体平均速度分量。

动量方程

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_0 \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

式(2)中, P 是流体压力; ρ 是流体密度; ν_0 是流体的运动黏性系数。

$$\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式(3)中, δ_{ij} 是克罗内克数; ν_t 是流体的湍流运动黏性系数。

k - ϵ 方程:

$$\frac{\partial k}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = G - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu_0 + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} G - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu_0 + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$\text{式中, 湍动能} \quad k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (6)$$

$$\text{耗散比} \quad \epsilon = \nu_0 \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)^2} \quad (7)$$

$$\text{流体的湍流运动黏性系数} \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^3}{\epsilon} \quad (8)$$

$$\text{湍流生成项} \quad G = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (9)$$

方程(4)、(5)、(8)中的各系数的取值分别为: $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_\mu = 0.09$ 。

2 计算模型与方法

选用检测杆有效长度为 300 mm 的子弹头型 Verabar 作为计算模型,如图 1 所示,(a) 是流量计布局,(b) 是孔的标记,其中静压孔分布在检测杆后部的两侧。模拟的大口径管道直径 $D = 300$ mm,使均速管检测杆充满管道;取压孔是按照切比雪夫法分布,此法已为 ISO TC30 所确认^[3];流量计前后直管段长度分别为 $L_1 = 30D$, $L_2 = 5D$,达到 ISO 5167 新标准^[4],使均速管处的流动是充分发展湍流。

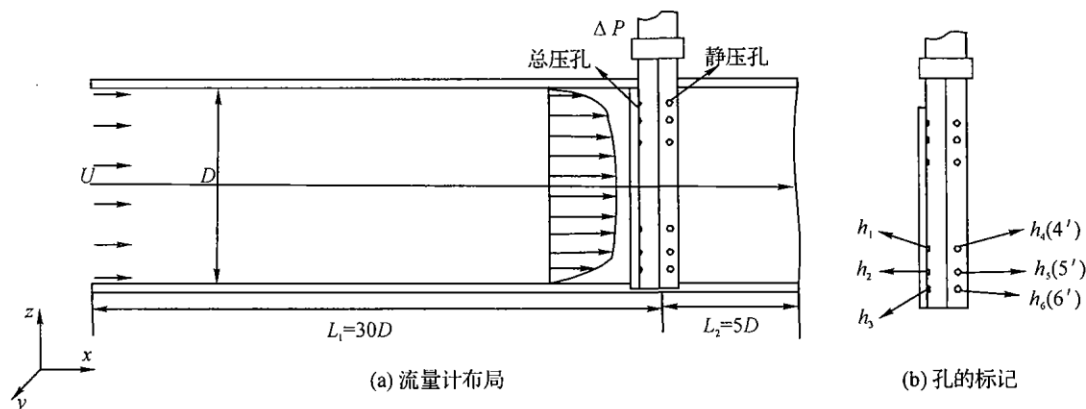


图 1 计算模型

各边界条件为^[5]:

入口处: 给一常水平速度 U , 其他两个方向速度 $U_y = U_z = 0$;

出口处: $\frac{\partial U_x}{\partial x} = \frac{\partial U_y}{\partial x} = \frac{\partial U_z}{\partial x} = 0$;

管壁处: 采用无滑移边界条件, 即 $U_x = U_y = U_z = 0$ 。

当管道达到充分发展湍流后, 水平方向的速度剖面分布为: $U_x = U_{\max} \left(\frac{z}{R} \right)^{\frac{1}{n}}$; z 方向: $U_z = 0$, $\frac{\partial U_x}{\partial z} =$

$\frac{\partial U_y}{\partial z} = 0$; y 方向: $U_y = 0$, $\frac{\partial U_x}{\partial y} = \frac{\partial U_z}{\partial y} = 0$ 。

其中, U_{\max} 为管道中心处速度; z 为管道内离管壁的距离; R 为管道半径; 指数 n 与雷诺数 Re 有关^[6]。

通过流体力学数值模拟研究均速管某个取压孔堵塞时对测量精度的影响。采用有限体积法对各控制方程进行离散,由于管道内是高雷诺数的充分发展湍流,计算时选用 FLUENT 流体力学软件^[7],模型选用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型,近壁区内采用壁面函数法。波兰人 Dobrowolski^[8]等成功地对均速管内部流动进行了数值模拟,提供了可行性依据。在前处理软件 GAMBIT 中将计算区域划分为 236 多万个计算单元,其中均速管流量计内部计算域采用较密集的网格,保证了数值模拟有较高的精确度。

由于充分发展湍流的对称性,这里取均速管的下半部分,分别研究取压孔 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 、 h_5 、 h_6 完全堵塞的情况下差压的输出变化。雷诺数范围选择 $1.21 \times 10^5 \leq Re \leq 6.05 \times 10^5$,由雷诺数公式 $Re =$

UD/ν ,在常温下对应的速度范围为 $6 \sim 30$ m/s,其中 U 是流动的特征速度、 D 是管道直径、 ν 是流体运动黏性系数。

3 计算结果与分析

笔者已在文献[5]中成功地模拟出均速管流量计内部的速度和压力分布,获得压差,并拟合出不同雷诺数下流量系数的变化曲线,这里直接引用此变化曲线:

$$K_L = 0.752\,03(1 + 1.861\,55 \times 10^{-8} Re) \quad (10)$$

式(10)中,雷诺数范围为 $1.21 \times 10^5 \leq Re \leq 6.05 \times 10^5$ 。本文主要比较某个孔堵塞前后输出压差的变化,并算出堵塞后的流量系数 K 相对 K_L 的误差。

图2给出速度为 18 m/s 时,孔 h_1 堵塞前后的总

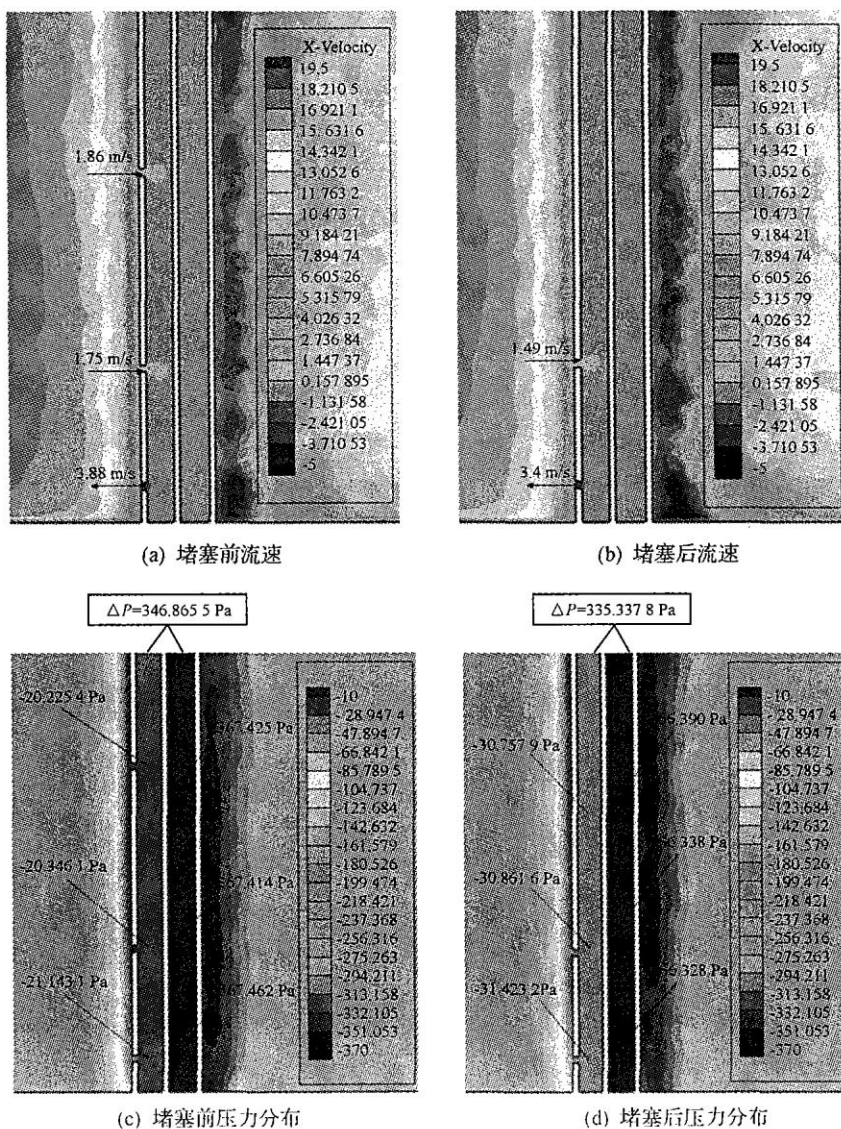


图2 $v = 18$ m/s 时, h_1 堵塞前后总压孔水平流速和管内压力分布

压孔水平流动速度和管内的压力分布。由图 2 可知, 由于均速管流量计的工作原理是取流场中某个截面上多个点流动的平均值, 孔 h_1 堵塞会改变此平均值, 使总压腔内压力明显变小, 而静压腔内压力变化不大, 所以压差 $\Delta p = p_{\text{总}} - p_{\text{静}}$ 会变小, 数值模拟计算中参考压力取 101 325 Pa。

表 1 是通过数值模拟得到的各种堵塞对压差大

小的影响, 其中 Δp 是堵塞前的压差。从表 1 中可看出, h_3 堵塞后所得压差比 Δp 大, 这是因为该孔堵塞前其水平流速是由总压腔内流向腔外, 堵塞后总压腔内压力会变大, 故压差变大; 图 2 虽然不能判断出静压孔的流动情况, 但由于 h_6 堵塞后压差比 Δp 稍微变大, 所以可知该孔堵塞前流动方向也是从内到外的; 其他取压孔堵塞后所得压差均变小。

表 1 各种堵塞对压差的影响

$Re(\times 10^{-5})$	$U/(m \cdot s^{-1})$	Δp	Δp_{h_1}	Δp_{h_2}	Δp_{h_3}	Δp_{h_4}	Δp_{h_5}	Δp_{h_6}
1.21	6	38.734 9	37.818 4	38.753 6	40.070 5	38.623 3	38.606 1	38.865 0
3.63	18	346.865 5	335.337 8	342.947 8	355.503 8	341.583 7	343.282 7	347.130 5
6.05	30	955.805 4	929.019 4	938.300 6	978.188 7	947.981 0	938.142 6	957.292 7

均速管流量计测得的压差能正确地反映充分发展管道内的平均流速, 又由于管道内流量处处相等, 所以流量系数为:

$$K = U \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p}} \quad (11)$$

式(11)中, K 为流量系数; U 为管道内平均流速 (m/s); 差压 $\Delta p = p_{\text{总}} - p_{\text{静}}$ (Pa); ρ 为空气密度, 这里取标准状态下的 1.205 kg/m^3 。

由式(11)可知, 堵塞后压差的变化幅度与流量计的测量误差密切相关, 流量系数 K 相对于公式(10)的 K_L 误差为:

$$\delta = \frac{K - K_L}{K} \times 100\% \quad (12)$$

将其算出并绘成图 3, 由图 3 可知: 由于 h_3 和 h_6 堵塞后均速管管内压差变大, 所以算出的流量系数变小, 其余孔堵塞后均速管流量系数变大; 总压孔 h_1 和 h_3 堵塞后对测量结果影响比较大, 误差最大接近 2%, 3 个静压孔的堵塞对测量结果影响都保持在 1% 以内, 其中 h_6 堵塞时的变化最小; 在精度要求较高时, 孔的堵塞会使流量系数误差超过允许的范围 $\pm 0.5\%$, 所以要采取措施减小误差。

由表 1 可知, h_1 和 h_3 堵塞产生的压差变化有着相反的效应。如果同时堵住 h_1 和 h_3 , 模拟得到其压差在以上 3 个 Re 下分别为 39.339 4 Pa, 348.254 3 Pa, 957.767 5 Pa, 比堵塞前的压差 Δp 稍微变大。代入公式(11)和(12)可以得到, h_1 和 h_3 同时堵塞时的测量误差最大为 -0.77% , 也超过了允许的 $\pm 0.5\%$ 。

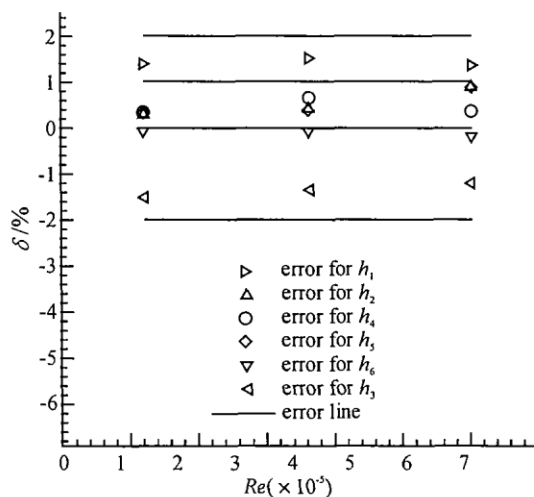


图 3 某个孔堵塞后的流量误差

4 结 语

本文对单孔堵塞的均速管流量计内部流动进行了数值模拟, 并对输出压差与堵塞前进行比较, 分别算出流量系数并与堵塞前的数据比较, 得到测量误差。

1) 均速管流量计的工作原理是取流场中某个截面上多个点的流速平均值, 某个孔的堵塞会改变此平均值, 使输出差压发生明显变化, 从而带来很大的测量误差。

2) 均速管流量计输出差压的变化会使流量系数发生改变, 特别是总压孔的堵塞对测量结果的影响比较大, 所以在实际现场要对均速管流量计进行定期校验。

(下转第 284 页)

(上接 268 页)

参考文献:

- [1] 毛新业. 什么是影响均速管流量计精确度的主要因素[J]. 世界仪表与自动化, 2004, 8(7): 42-44.
- [2] 刘 宇, 苏中地. 不同雷诺数下方柱绕流的数值模拟[J]. 中国计量学院学报, 2006, 17(1): 40-43.
- [3] 毛新业. 均速管流量计一种简便、价廉、节能的流量仪表[J]. 工业自动化控制, 2005, 5: 13-15.
- [4] 毛新业. 大管道气体流量检测仪表与校验[J]. 过程控制专刊, 2006(6): 42-45.
- [5] 张东飞, 苏中地, 史晓妍, 等. 不同雷诺数下均速管流量计流量系数的确定[J]. 中国计量学院学报, 2007, 18(1): 18-21.
- [6] 梁国伟, 蔡武昌. 流量测量技术及仪表[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 26.
- [7] 韩占忠. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京理工大学出版社, 2004: 201-228.
- [8] DOBROWOLSKI B, KABACINSKI M, POSPOLITA J. A mathematical model of the self-averaging Pitot tube-A mathematical model of a flow sensor[J]. Flow Measurement Instrumentation, 2005, 16: 251-265.