

文章编号: 1000-5013(2012)04-0451-05

文丘里管流动特性的数值模拟

邹星^{1,2}, 李海涛^{1,2}, 宗智^{1,2}

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 运载工程与力学学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 利用 Fluent 软件模拟文丘里管在较大雷诺数范围(200~70 000)内的流动情况,给出实际流量与测压管水头差的关系曲线,并与实验结果进行比较. 研究表明:当雷诺数在 2 000~20 000 之间时,Fluent 的模拟结果与实验结果符合很好. 对于实验未给出的雷诺数范围(200~2 000 和 20 000~70 000)内实际流量和测压管水头差的关系,分别进行计算整理和回归分析,给出其函数关系式. 分析喉管相对真空压强与入口速度的关系,得出文丘里管在大小尺寸不变情况下二者之间的关系曲线,并给出文丘里管内部流场分布情况.

关键词: 文丘里管; Fluent 软件; 流量; 雷诺数; 水头差

中图分类号: TV 134 **文献标志码:** A

文丘里管亦称通用文丘里管、低压损文丘里管,应用于各种行业各种介质的流量测量、控制和调节. 它具有结构简单耐用,性能稳定,不容易被脏污杂志堵塞,压力损失很小,寿命长等特点^[1]. 正是由于具有诸多优点,文丘里管差压式流量计在我国工农业的发展中应用广泛,占流量仪表总数的一半以上^[2]. 李连科等^[3]论述了内文丘里的几何结构和内文丘里流量计良好性能的机理,并认为内文丘里流量计比内锥流量计更有优势. Lee 等^[4],Shaffer 等^[5] 分别对文丘里管在管道煤粉流量测量方面的应用进行了研究,发现空气-煤粉混物流过文丘里管时产生的压差与煤粉流量有对应关系. 近年来,文丘里管在湿气测量领域的应用也越来越广泛,相关的研究也较多. 如 Leeuw^[6]首次建立了文丘里管湿气测量模型; Steven^[7]在英国国家工程实验室(National Engineering Laboratory, NEL)对当时 7 种已有的湿气测量模型进行研究,并提出了一个新的文丘里管湿气测量模型. 本文基于通用 CFD(computational fluid dynamics)模拟软件对文丘里管流动特性进行了数值模拟.

1 数值模拟

图 1 为文丘里管的结构. 其中:喉部管道直径 d 为 1 cm;主管道直径 D 和喉部直径 d 之比 λ 为 2;入口速度 v_{in} 为 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;出口压强 $P_{out}=0\text{ Pa}$. 模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型,控制方程主要是关于 k, ϵ 两个未知量的输运方程^[8],即

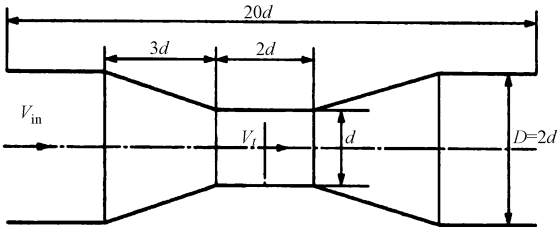


图 1 文丘里管的结构示意图
Fig. 1 Structure of Venturi tube

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k,$$

(1)

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon.$$

(2)

压力速度耦合采用 SIMPLE 算法^[9]. 经 Fluent 模拟后,得出喉部压强 $P_t = -6\,172.64\text{ Pa}$,入

口压强 $P_{in}=1\ 995.83\ \text{Pa}$.

设入口处压强为 P_{in} ,入口流速为 v_{in} ,喉部压强为 P_t ,喉部流速为 P_t ,出口处压强为 P_{out} ,收缩段局部损失系数为 K_1 ,渐扩段局部损失系数为 K_2 ,水头损失用包达定理的形式表示. 由于管路很短,沿程损失相对于局部损失很小,所以忽略不计.

1) 由入口到出口的伯努利方程,有

$$\frac{P_{in}}{\rho g}+\frac{v_{in}^2}{2g}=\frac{P_{out}}{\rho g}+\frac{v_{out}^2}{2g}+K_1\frac{v_t^2}{2g}+K_2\frac{(v_{out}-v_t)^2}{2g}.$$
(3)

2) 由入口到喉部的伯努利方程,有

$$\frac{P_{in}}{\rho g}+\frac{v_{in}^2}{2g}=\frac{P_t}{\rho g}+\frac{v_t^2}{2g}+K_1\frac{v_t^2}{2g}.$$
(4)

3) 由喉部到出口的伯努利方程,有

$$\frac{P_t}{\rho g}+\frac{v_t^2}{2g}=\frac{P_{out}}{\rho g}+\frac{v_{out}^2}{2g}+K_2\frac{(v_{out}-v_t)^2}{2g}.$$
(5)

然后由连续性方程

$$\frac{\pi}{4}D^2v_{in}=\frac{\pi}{4}d^2v_t=\frac{\pi}{4}D^2v_{out}=Q,$$
(6)

可得到

$$v_t=(\frac{D}{d})^2v_{in}=\lambda^2v_{in}=\lambda^2v_{out}.$$
(7)

将式(7)代入式(5),可得到

$$\frac{P_t}{\rho g}+\frac{v_t^2}{2g}=\frac{P_{out}}{\rho g}+[1+(\lambda^2-1)^2K_2]\frac{v_{out}^2}{2g},$$
(8)

再代入式(4),可得到

$$\frac{P_{in}}{\rho g}+\frac{v_{in}^2}{2g}=\frac{P_{out}}{\rho g}+[1+\lambda^4K_1+(\lambda^2-1)^2K_2]\frac{v_{out}^2}{2g},$$
(9)

设 $v_{in}=v_{out}=v$,则有

$$\frac{\Delta P}{\rho g}=\frac{P_{in}-P_{out}}{\rho g}=[\lambda^4K_1+(\lambda^2-1)^2K_2]\frac{v^2}{2g}=\xi\frac{v^2}{2g},$$
(10)

由式(8)可得到

$$\frac{P_{in}}{\rho g}=\frac{P_{out}}{\rho g}+[1+(\lambda^2-1)^2K_2-\lambda^4]\frac{v^2}{2g}=\frac{P_{out}}{\rho g}+\xi_1\frac{v^2}{2g},$$
(11)

由文献[10]可知:对于渐缩管道常取 $K_1=0.04$;对于扩张角 $\theta=18.92^\circ$ 的渐扩段,由 Gibson 的实验曲线^[10] 如图 2 所示,可得出 $K\approx 0.35$. 管道直径与喉部直径之比 $\lambda=2$,代入式(10),(11),可得到

$$\xi=\lambda^4K_1+(\lambda^2-1)^2K_2=3.79,$$
$$\xi_1=1+(\lambda^2-1)^2K_2-\lambda^4=-11.85,$$
$$P_{in}=\frac{1}{2}\xi\rho v^2=1\ 895\ \text{Pa},$$
$$P_t=\frac{1}{2}\xi_1\rho v^2=-5\ 925\ \text{Pa}.$$

将 Fluent 计算结果与模拟结果相比,可知喉部压强误差为 4.18%,入口压强误差为 5.32%. 这都在可接受的范围内,说明数值模拟是准确的,结果也是可信的.

文丘里管各截面压强中,喉部的压强最低,在一定条件下会发生空化现象. 水在常温(293 K)下的饱和蒸汽压是 2 337 Pa^[11],相对压强为 -98 988 Pa,即当 Fluent 计算得到的喉部压强低于该值时,应考虑是否与发生了空化现象. 利用上述标准 $k-\epsilon$ 模型,对入口流速从 $0.1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 到 $3.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 选取了不

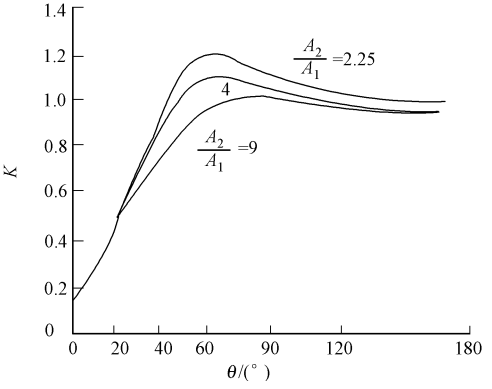


图 2 渐扩管道局部损失曲线
Fig. 2 Local loss curve of diffuser

同速度进行模拟,而对流速低于 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的,采用层流模型进行模拟,对 Bernoulli 方程的动能部分仍考虑用动能修正系数, K_1, K_2 值不变,计算结果如表 1 所示.

表 1 不同速度下的数值模拟结果
Tab. 1 Results of numerical simulation in different velocities

$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3.5	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2
Re	70 000	60 000	56 000	52 000	48 000	44 000
P_{in}/Pa	22 142.30	16 534.60	14 511.40	12 614.60	10 844.80	9 202.79
P_t/Pa	-78 071.10	-57 169.20	-49 724.40	-42 802.50	-36 403.00	-30 525.40
$Q/\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$	1 092.510	936.433	874.005	811.576	749.148	686.718
$\Delta h/\text{cm}$	1 022.480	752.003	655.401	565.423	482.071	405.348

$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.0	1.8	1.4	1.2	1.0	0.7
Re	40 000	36 000	28 000	24 000	20 000	14 000
P_{in}/Pa	7 689.73	6 306.44	3 933.62	2 946.92	1 995.83	1 078.94
P_t/Pa	-25 168.70	-20 332.30	-12 217.60	-8 937.09	-6 172.64	-2 989.55
$Q/\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$	624.289	561.860	437.002	374.573	312.144	218.501
$\Delta h/\text{cm}$	335.256	271.797	164.792	121.253	84.364	41.511

$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.5	0.3	0.2	0.1	0.08	0.07
Re	10 000	6 000	4 000	2 000	1 600	1 400
P_{in}/Pa	580.56	234.44	124.55	44.03	36.85	30.12
P_t/Pa	-1 505.57	-525.15	-219.16	-46.70	-22.95	-16.55
$Q/\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$	156.072	93.643	62.429	31.214	24.972	21.850
$\Delta h/\text{cm}$	21.285	7.750	3.507	0.926	0.610	0.476

$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01
Re	1 200	1 000	800	600	400	200
P_{in}/Pa	23.66	17.82	12.71	7.99	4.15	1.42
P_t/Pa	-11.48	-7.37	-4.13	-2.07	-0.77	-0.06
$Q/\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$	18.729	15.607	12.476	9.364	6.243	3.121
$\Delta h/\text{cm}$	0.358	0.257	0.172	0.103	0.050	0.015

利用李琼等^[12]所给出的测压管水头差 Δh 与实测流量 Q 两者间的经验公式($Q=34.005\Delta h^{0.5155}$),计算出各工况下的误差,并绘制出其与雷诺数的关系曲线,如图 3 所示.从图 3 可看出:在雷诺数为 2 000~20 000 范围内,误差最大不超过 7%,这再次证明了计算方法的准确性;但当雷诺数大于 20 000 或小于 2 000 时,误差就变得很大,说明经验公式在此范围内不适用,需重新给出经验公式.将以上由数值模拟得到的数据整理并进行拟合,结果如图 4 所示.

大雷诺数下,可得 4 种拟合的实际流量 Q 和压差 Δh 公式: 1) 一阶多项式拟合, $Q=0.7925\Delta h+336.3$, $R=0.9765$; 2) 二阶多项式拟合, $Q=-4.122\times10^{-4}\Delta h^2+1.245\Delta h+243.1$, $R=0.9985$; 3) 三阶多项式拟合, $Q=4.610\times10^{-7}\Delta h^3-1.197\times10^{-3}\Delta h^2+1.617\Delta h+198.4$, $R=0.9999$; 4) 乘幂拟合, $Q=36.67\times\Delta h^{0.5021}$, $R=1.000$.

比较上述各拟合公式并结合图 4(a),可知当雷诺数在 20 000~70 000 内,入口和喉部的压差 Δh 和实际流量 Q 按乘幂关系拟合得到的相关系数 R 最大(即最接近 1),拟合相关程度最好.

小雷诺数下,可得 4 种拟合的压差 Δh 和实际流量 Q 的公式: 1) 一阶多项式拟合, $Q=35.38\Delta h+5.018$, $R=0.9643$; 2) 二阶多项式拟合, $Q=-37.92\Delta h^2+58.34\Delta h+3.122$, $R=0.9951$; 3) 三阶多项式拟合, $Q=87.55\Delta h^3-119.5\Delta h^2+77.56\Delta h+2.316$, $R=0.9990$; 4) 乘幂拟合, $Q=32.92\Delta h^{0.5528}$,

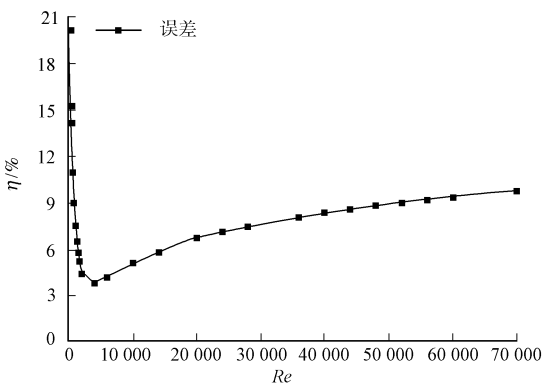


图 3 误差与雷诺数的关系曲线
Fig. 3 Relationship curve of error and Reynolds number

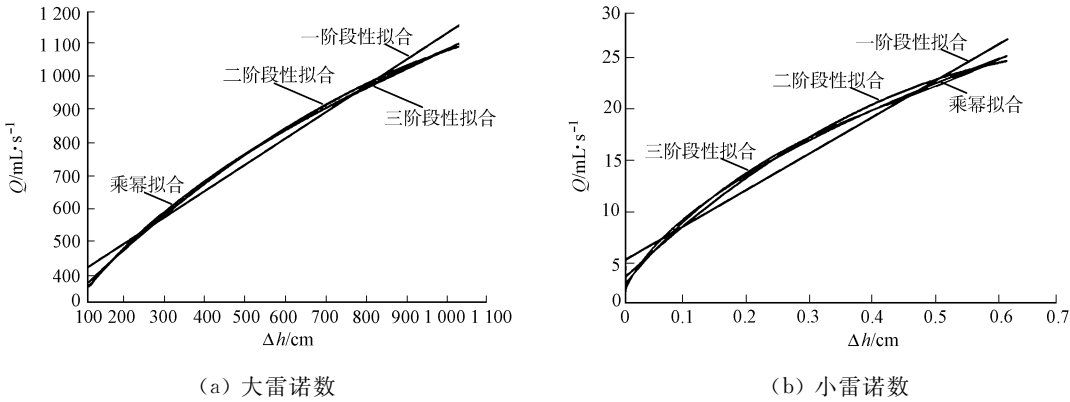


图 4 流量 Q 和压差 Δh 的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve between flow rate Q and pressure difference Δh

$R=0.9999$.

比较上述各拟合公式并结合图 4(b), 可知当雷诺数在 200~2 000 内入口和喉部的压差 Δh 和实际流量 Q 按乘幂关系拟合得到的相关系数 R 最大(即最接近 1), 拟合相关程度最好.

文中计算模型是一个三维对称体, 图 5 给出了 $v=1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时文丘里管内的静压分布, 其右端为入口, 左端为出口. 从图 5 可以看出: 入口压强较大, 在锥面处开始下降, 并在整个喉部圆柱段处于较低范围内; 低压分布在一个较大圆柱段内, 而并不是出现在某一局部, 这对于文丘里管流量计的使用寿命是有益的.

图 6 给出了同一工况下的速度分布. 从图 6 中可以看出: 入口段和出口段速度较小, 锥部及喉管圆柱段速度较大, 同压强的分布正好相反, 这与由伯努利方程得出的结果一致.

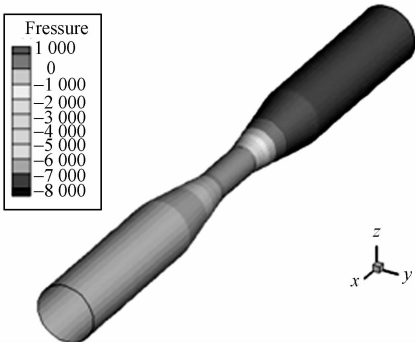


图 5 文丘里管静压分布图

Fig. 5 Distribution of static pressure in venturi tube

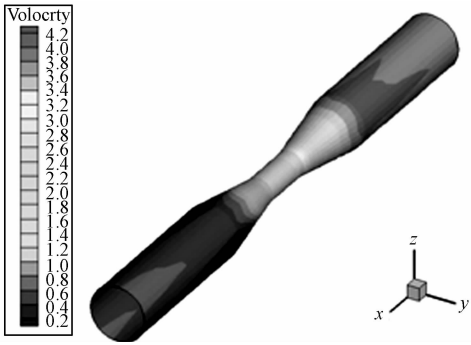


图 6 文丘里管速度分布图

Fig. 6 Distribution of velocity in venturi tube

在不改变文丘里管尺寸大小的情况下, 喉部压强与入口速度关系曲线如图 7 所示. 从图 7 可看出: 当入口速度较小时, 喉部压强也较小, 并随着速度的增加而缓慢下降; 当速度达到某个值($1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)后, 喉部压强迅速降低, 并有可能低于该温度下水的饱和蒸汽压而发生空化现象.

2 结论

基于通用 CFD(computational fluid dynamics)模拟软件对文丘里管流动特性进行了数值模拟, 同理论计算结果比较发现误差在可接受的范围内, 表明了数值模拟的准确性和可靠性. 然后, 在一个较大范围雷诺数(200~70 000)内模拟得出了实际流量与测压管水头差的关系曲线, 同实验给出的经验公式^[12]在其适用范围(雷诺数为 2 000~20 000)内的计算结果符合得很好, 对文丘里管

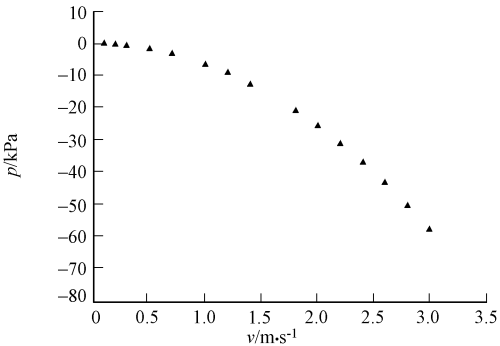


图 7 喉部压强与入口速度关系

Fig. 7 Relationship between throat pressure and inlet velocity

的优化设计有一定指导意义.

但是在高于和低于其范围时,则存在较大误差. 对此,将计算数据进行整理并利用 MATLAB 软件进行回归分析,分别给出了大雷诺数和小雷诺数范围的函数关系式. 同时给出了文丘里管内部流场的分布情况,并在其大小尺寸不变的情况下,研究喉管压强和入口速度大小之间的关系. 这有助于在只知道入口速度的情况下推测管内喉部位置是否已发生空化现象,为文丘里管的使用提供指导.

参考文献:

[1] 谭奇峰,赵雨斌,王家成. 文丘里管流量计在东深工程供水计量中的应用[J]. 中国仪器仪表,2002(增刊):40-42.

[2] 苏彦勋,盛健,梁国伟. 流量计量与测试[M]. 2 版. 北京:中国计量出版社,2007:75-76.

[3] 李连科,王汉卿,庞世强. 内文丘里管流量计[J]. 仪器仪表学报,2001,22(6):556-559.

[4] LEE J,CROWE C T. Scaling law for metering the flow of gas-particle suspensions through venturis[J]. ASME Journal of Fluids Engineering,1982,104(1):88-91.

[5] SHAFFER F D,BAJUZA R A. Analysis of venture performance for gas-particle flows[J]. ASME Journal of Fluids Engineering,1990,112(1):121-127.

[6] De LEEUW R. Liquid correction of Venturi meter readings in wet gas flow[C]// North Sea Flow Measurement Workshop. Netherlands:[s. n.],1997.

[7] STEVEN R N. Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2002,12(5/6):361-372.

[8] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:121-122.

[9] 陈作炳,豆海建,陈思维,等. 文丘里管流场的数值研究[J]. 中国水泥,2005(4):58-60.

[10] 张也影. 流体力学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,1999:287-288.

[11] 韩学孟. 一种实用的水饱和蒸汽压拟合方程[J]. 山西农业大学学报,1996,16(3):278-280.

[12] 李琼,齐鄂荣. 文丘里管流动特性的实验研究[J]. 中国农村水利水电,2007(11):65-67.

Numerical Simulation of Flow Characteristics in Venturi Tube

ZOU Xing^{1,2}, LI Hai-tao^{1,2}, ZONG Zhi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The flow characteristics in Venturi tube for the wide range Reynolds number from 200 to 70 000 were simulated with Fluent software. The relationship curve of flow rate and water level difference (between inlet and throat) was presented, which is in good agreement with the experimental results for 2000~20 000 Reynolds number. For 200~2 000 and 20 000~70 000 Reynolds number without experimental results, the numerical results of the relationship of flow rate and water level difference were regressed, and a formula was established for each range of Reynolds number to calculated the relationship between relative vacuum pressure in throat and inlet velocity, and their relationship curve is obtained for the constant size of Venturi tube. The distribution of inner flow field, such as velocity and static pressure, is discussed.

Keywords: Venturi tube; fluent software; flow rate; reynolds number; water level difference

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)