

射流流量计的仿真与试验研究*

傅 新 王驰宇 谢海波 杨华勇

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室 杭州 310027)

摘要：以流场仿真为基础，设计射流流量计内部流道结构，研究射流流量计内部流场的速度分布和压力分布，并研究射流附壁诱发流体交替振荡的机理，提出主射流的偏转过程实际上是两个共同作用于主射流的涡流强弱交替的过程。在此基础上，以仿真模型优化射流流量计，通过试验验证射流振荡的效果以及管道流速与流体振动频率之间的特性关系，并设计出计量范围 0.55 ~ 6.50 m/s(气体介质)、精度等级高于 2 级的射流传感器，为射流流量计的结构改进和优化设计提供了有效的途径。

关键词：射流流量计 附壁效应 流体振动 流场仿真
中图分类号：TP69

0 前言*

流量计的种类繁多，按目前比较流行的分类方法，可把流量计分为两大类：一类是容积式流量计，一类是推理式流量计。在推理式流量计中，有一类流量计以一定的内部结构使得通过的流体产生振荡，振荡频率与流量成正比，这种利用测量流体振动频率来测量流量的仪表，就称为流体振动式流量计。

射流流量计和涡街流量计、旋涡进动流量计同属于流体振动式流量计。流体振动式流量计的共同特点是：振动频率与流量成正比；几乎不受流体组成、密度、粘度和压力等因素的影响，可在高温、辐射等恶劣环境下工作；无机械可动部件，有较强的抗干扰能力，稳定性高等，是一种比较理想的流量计^[1]。

射流流量计的核心是一种利用附壁效应(也称柯恩达效应^[2-3])形成的双稳元件，双稳元件附加反馈通道而诱发流体振荡，其振荡频率和被测流体的流量成比例，所以只要测得振荡频率就可以获得流量值。

射流流量计与其他流体振动式流量计相比一个突出的优点是它能在远低于后者要求的雷诺数下稳定起振。例如，对于涡街流量计，当管道雷诺数降至 10 000 左右时便无法运行。对于射流流量计，采取适当的结构可以使其运行下限所对应的流体雷诺数降至 120 甚至 100 以下^[4]。因而，射流流量计除了具有流体振动式流量计共有的性能优点外，在测量高粘度、小流量流体方面更是其他同类或非同类

流量计所无法企及的。

1 原理

射流流量计在壳体内设置两块渐扩的侧壁。流体由射流喷嘴进入形成主射流，由于附壁效应，主射流可随意地依附两个侧壁面中的任何一个，来自侧壁面的流束一部分被转向到反馈腔，从而使反馈通道中的介质扩散，从控制喷嘴射出并作用于主射流。当控制喷嘴的流量由零增至最大值时，是一个完整的循环工作过程，并推动主射流偏向另一个侧壁面，开始了另一个反馈循环。如此循环往复，主射流中就会有一小部分分流在上下两个反馈腔中来回振荡^[5-7](图 1)。

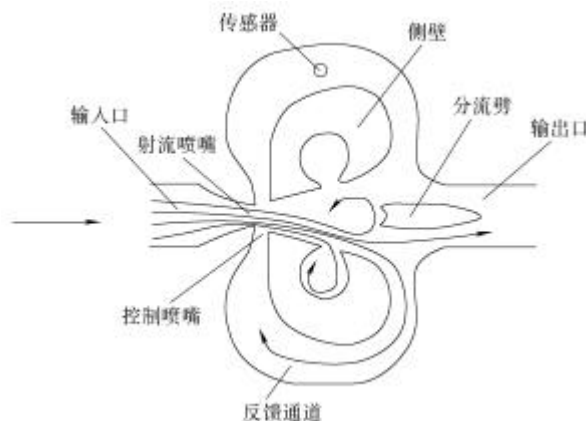


图 1 双稳射流元件

根据 Strouhal 方程有

$$Sr = \left(\frac{d}{v} \right) f \quad (1)$$

式中 Sr ——Strouhal 数

d ——与流体振动振幅有关的尺寸系数

* 国家自然科学基金资助项目(50175097)。20050721 收到初稿，20060118 收到修改稿

v ——射流喷嘴出口流体的流速

f ——流体振荡频率

Strouhal 数又称为斯特劳哈尔准则,该准则是在研究非定常流动时要用到的谐时性准则,该准则反映了流动的非定常性影响,它表示流动参数的局部变化率与迁移变化率的比值^[8]。在较宽的流体流速和密度范围内,Strouhal 数基本恒定,所以射流流量计中流体振荡频率与其体积流量呈线性关系。

在射流流量计的一个反馈回路中安装压力传感器,流体在振荡过程中,反馈流周期性的作用于传感器末端,传感器输出信号的变化频率与流体的振荡频率相同,并与流速或流量大小成正比。

2 数学模型

射流流量计的核心——射流元件是具有一定厚度的平面结构。在射流元件的结构参数中,位差是两侧壁间的最小距离与射流喷嘴宽度的差值,劈距即射流喷嘴到分流劈的距离。假设通过射流流量计的流体为不可压缩粘性流体,对不同纵横尺寸比的流束试验证明,主射流的运动特性可以用两维坐标来描述。根据量纲分析理论,写出一般的函数关系式

$$F(f, \Delta p, d, b_1, l, b_2, D, v, r, m, s, K, g) = 0 \quad (2)$$

式中 f ——流体振动频率

Δp ——流量计两端的压差

d ——劈距

b_1 ——射流喷嘴宽度

l ——反馈通道长度

b_2 ——反馈通道宽度

D ——内腔平均粗糙度

v ——射流喷嘴流速

r ——流体密度

m ——动力粘性系数

s ——表面张力系数

K ——体积模量

g ——重力加速度

选取 d 、 v 、 r 为独立变量,由量纲分析方法可

以得到

$$j \left(\frac{fd}{v}, \frac{? p}{rv^2}, \frac{b_1}{d}, \frac{l}{d}, \frac{b_2}{d}, \frac{D}{d}, \frac{m}{dv r}, \frac{s}{dv^2 r}, \frac{K}{v^2 r}, \frac{dg}{v^2} \right) = 0 \quad (3)$$

或

$$j_1 \left(Sr, Eu, \frac{b_1}{d}, \frac{l}{d}, \frac{b_2}{d}, \frac{D}{d}, Re, We, Ma, Fr \right) = 0 \quad (4)$$

在射流流量计中,不存在自由面,重力不影响流场,马赫数小,因而重力、表面张力以及液体的压缩性等对这类流动现象没有多大影响,粘性阻力、压力、惯性力以及流动的非定常性起重要的支配作用。故式(4)可简化为

$$j_2 \left(Sr, Eu, \frac{b_1}{d}, \frac{l}{d}, \frac{b_2}{d}, \frac{D}{d}, Re \right) = 0 \quad (5)$$

或

$$Sr = j_3 \left(Eu, \frac{b_1}{d}, \frac{l}{d}, \frac{b_2}{d}, \frac{D}{d}, Re \right) \quad (6)$$

由局部阻力引起的压力损失计算公式

$$? p = z \frac{rv^2}{2} \quad (7)$$

又欧拉数

$$Eu = \frac{? p}{rv^2} \quad (8)$$

比较式(7)和(8)可得

$$Eu = \frac{z}{2} \quad (9)$$

式中 z 为局部阻力系数,是一个量纲一数,其数值大小主要由管件的几何形状和尺寸决定,射流流量计在此处相当于引起局部压力损失的管件;同时 z 也受流体流动特性的影响,因此也是管道雷诺数的函数。从而由式(6)和(9)可以看出, Sr 数只与流量计的结构参数、管道雷诺数 Re 有关,对于结构形式及尺寸参数一定的射流流量计,斯特劳哈尔数 Sr 仅仅是管道雷诺数 Re 的函数。

试验证明,当雷诺数较大时,局部阻力系数 z 为常数,并且在较宽的流速范围内 Sr 数也为常数。

3 流场仿真与数值计算

3.1 结构参数

管道管径选为 25 mm。射流元件厚度 8 mm,入口宽度 15 mm,射流喷嘴长 8 mm、宽 4 mm,在射流元件入口到射流喷嘴之间设置 30°收缩段,以减小流阻,位差 1 mm,侧壁张角 15°,劈距 30 mm,反馈通道宽度 12 mm,控制喷嘴宽度 3 mm,射流元件采用双出口结构形式,出口分别位于两侧壁上,直径 15 mm。

3.2 网格划分

试验证明,主射流的运动特性可以用两维坐标来描述,对流场做两维仿真,以增加求解速度;在射流喷嘴、控制喷嘴、两侧壁和凹劈之间的区域等处,由于速度梯度较大,对此部分网格进行加密处理,以获得较好的求解精度。

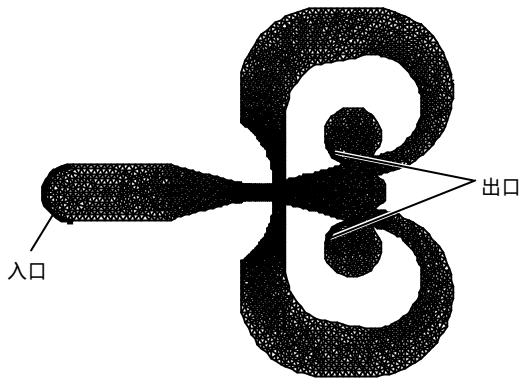


图2 射流元件网格划分示意图

3.3 边界条件

以空气作为流体介质,在射流元件入口处,给定气体的流速,在射流元件出口处,给定背压,以非定常流动作为求解模型,壁面按无滑移条件计算。由于求解时按理想情况运算,不考虑外界干扰,因而主射流在开始时不会随意的附壁,为缩短过渡过程,加快求解速度,可以人为的给其内部流场加上一个扰动。具体做法是,在仿真求解开始前为射流元件的两个出口设置不同的背压,等射流偏向一个侧壁面后,再将两个出口的背压设为相等。现实中这样的扰动总是存在的。

3.4 仿真结果

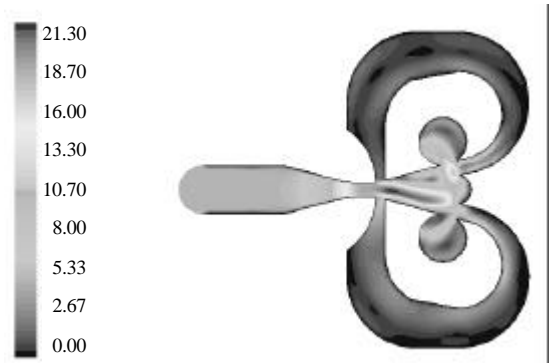
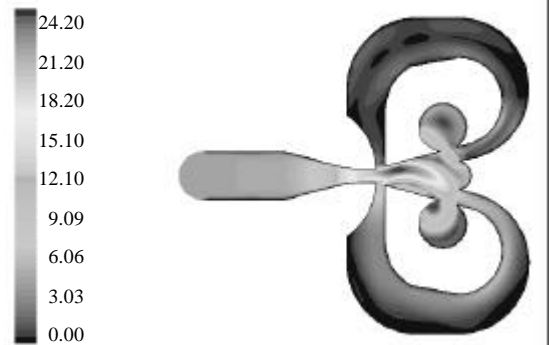
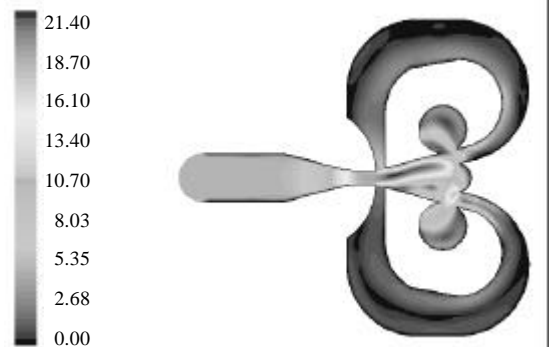
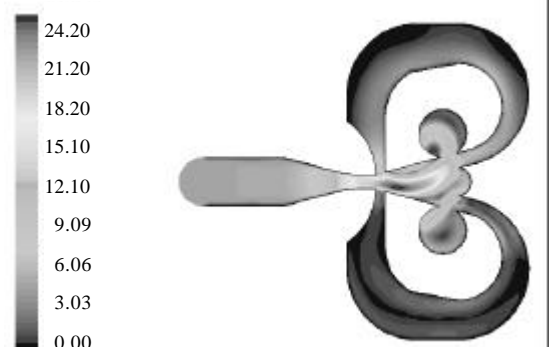
射流元件入口流速设置为 5 m/s,出口背压在产生所需扰动后设置为 0。

(1) 流场的流速分布。当流体振动经过过渡阶段到达稳定阶段之后,在一个振动周期内,流场速度分布随时间变化过程的仿真结果如图 3~6 所示。

图 3 所示的流场的流速分布,显示 $t = 8.44 \times 10^{-2}$ s 时,射流依附于下侧壁面,并引起下反馈通道内介质扩散;射流在下控制喷嘴的作用下逐渐偏向上侧壁,图 4 所示为 $t = 8.92 \times 10^{-2}$ s 时流场的速度分布;随时间推移,当 $t = 9.40 \times 10^{-2}$ s 时,如图 5 所示,射流完全偏向依附于上侧壁,引起上反馈通道内介质扩散;射流在上控制喷嘴的作用下逐渐偏向下侧壁,当 $t = 9.92 \times 10^{-2}$ s 时,到达图 6 所示状态。完成射流附壁诱发流体振荡的一个完整的循环。

在模型以给定时间步长持续求解过程中,流场的流速分布显示,射流会以一定的周期交替依附射流元件的两个侧壁面,流速分布以此周期在图 3~6 之间循环变化。

(2) 流场的压力分布。流体振动频率通过反馈通道内压力变化频率求出。在一个振动周期内,流场压力分布随时间变化过程的仿真结果如图 7~10 所示。

图3 $t = 8.44 \times 10^{-2}$ s 时的流速分布图(m/s)图4 $t = 8.92 \times 10^{-2}$ s 时的流速分布图(m/s)图5 $t = 9.40 \times 10^{-2}$ s 时的流速分布图(m/s)图6 $t = 9.92 \times 10^{-2}$ s 时的流速分布图(m/s)

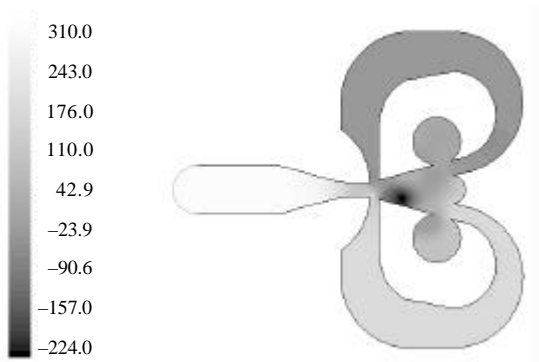


图7 $t=8.80 \times 10^{-2}$ s 时的压力分布图(Pa)

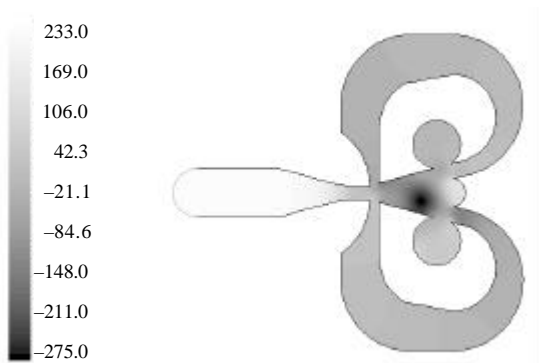


图8 $t=9.26 \times 10^{-2}$ s 时的压力分布图(Pa)

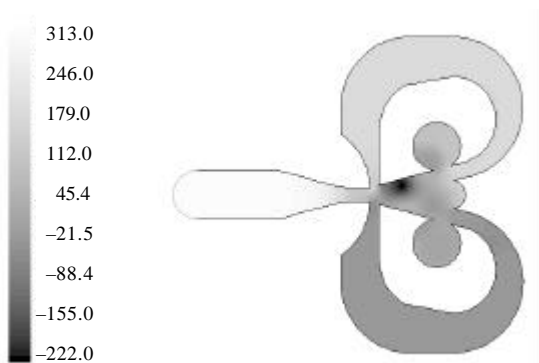


图9 $t=9.78 \times 10^{-2}$ s 时的压力分布图(Pa)

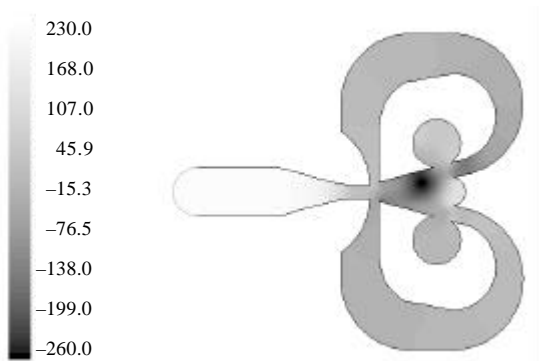


图10 $t=1.03 \times 10^{-1}$ s 时的压力分布图(Pa)

图7所示的流场的压力分布,显示 $t=8.80 \times 10^{-2}$ s 时,上反馈通道压力(以 p_1 表示)处于波谷处,下反馈通道压力(以 p_2 表示)处于波峰处,此时两反

馈通道压差达到最大;在接下来的阶段, p_1 逐渐回升, p_2 逐渐下降,在 $t=9.26 \times 10^{-2}$ s 时,两反馈通道压力基本持平,并接近于0,如图8所示;随着 p_1 继续上升, p_2 继续下降,在 $t=9.78 \times 10^{-2}$ s 时, p_1 处于压力波峰处, p_2 处于压力波谷处,两反馈通道压差再次到达最大,如图9所示;之后, p_1 逐渐下降, p_2 逐渐回升, $t=1.03 \times 10^{-1}$ s 时,两反馈通道压力再次基本持平,如图10所示。完成一个完整的上下反馈腔压力交替变化过程。

在上反馈通道放置压力传感器的地方设置监视点,在数值运算过程中,监视该点的压力,得到压力随时间变化的曲线,见图11。

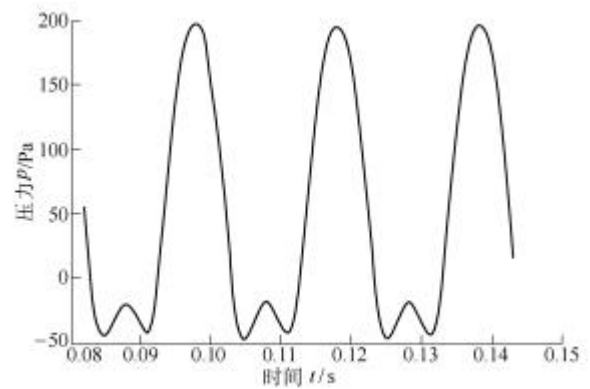


图11 反馈通道压力随时间变化曲线

由图11也可以看出,反馈通道中压力呈周期性变化。

(3) 射流切换机理研究。射流的切换过程总是伴随着一个低压区域沿同侧的侧壁从前向后的移动过程。当反馈通道中的流体由控制喷嘴射出时,会影响主射流,并在与主射流的相互作用下,在侧壁面前端贴近侧壁的地方形成一个旋涡,低压区域就是旋涡的低压中心,此旋涡对射流向另一个侧壁面偏转起着推动的作用。同时,由于凹劈的作用,在凹劈的凹部也会出现涡流,所不同的是,这一涡流会使射流产生诱导速度,导致射流稳定的向侧壁附着,反而抑制了主射流的扩散和偏转。当凹劈凹部的涡流起主要作用时,射流仍可稳定的附着侧壁面而不被切换。随着控制喷嘴流量渐渐变大,侧壁面附近的旋涡逐渐剧烈强大,并向侧壁后端移动,从而增强了对主射流的切换作用;而凹劈凹部的涡流逐渐变弱,此消彼涨下,推动主射流偏转的涡流最终占据主导地位,导致主射流被切换并依附另一个侧壁面。

图12中时刻主射流正处在被来自上方控制喷嘴的流束切换的过程。

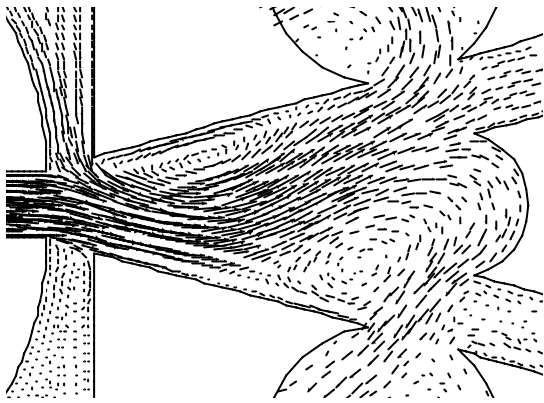


图 12 速度矢量场局部放大图

4 试验研究

基于流场仿真的结果,以仿真模型的结构参数构建射流流量计实体,并对不同的管道流速进行试验研究。

以压电晶体作为传感器的敏感元件,输出信号经电荷放大器、低通滤波器、整形器,最终输出一定频率的方波脉冲,显示了反馈通道中压力呈周期性变化,从而间接验证射流附壁诱发流体交替振荡现象。

流体振荡频率随管道流速变化的试验数据被列入下表中,仪表系数 K 定义为 $K=f/v$,仪表系数 K 的变化反映射流流量计仪表的线性度。

表 输出频率与流速的关系

试验编号	流速 $v/(m \cdot s^{-1})$	频率 f/Hz	仪表系数 K/m^{-1}
1	0.552	28.90	52.36
2	0.685	35.69	52.10
3	0.943	48.53	51.46
4	1.250	63.60	50.88
5	1.557	78.74	50.57
6	2.032	102.64	50.51
7	2.661	134.73	50.63
8	3.422	173.36	50.66
9	4.385	223.46	50.96
10	5.318	279.46	52.55
11	6.240	323.93	51.91
12	7.047	376.70	53.46
13	8.093	424.84	52.49
14	9.152	455.69	49.79
15	10.244	502.13	49.02

以管道流速为横坐标,流体振动频率为纵坐标,绘制出流量传感器的“频率—流速”特性曲线,如图 13 所示。由上表和图 13 可以看出,仪表在一定的流速范围内($1.0 \text{ m/s} < v < 4.5 \text{ m/s}$)具有较好的线性度,在较大流速范围内($0.55 \text{ m/s} < v < 6.50 \text{ m/s}$)线性度不超过 $\pm 2\%$ 。当流速低于 1 m/s 时,仪表线性度

变差,但重复性好,不超过 0.25% ,因而可以用软件方式补偿。

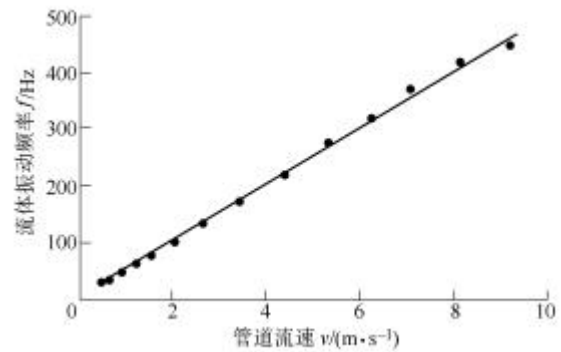


图 13 “频率—流速”特性曲线

5 结论

(1) 针对射流流量计的结构模型,获得较好的仿真效果,可作为射流流量计结构改造和优化设计的试验平台。

(2) 射流附壁诱发交替振荡,振荡过程中反馈腔内压力呈周期性变化;主射流的偏转过程伴随着两个作用于主射流的旋涡强弱交替的过程。

(3) 在较宽流速范围内,管道流速与射流流量计中流体振动频率呈线性关系。射流流量计具有低的测量下限。

参 考 文 献

- [1] 赵汉臣,王喆用,余文晟. 用途广泛的射流流量计[J]. 自动化仪表, 2001, 22(9): 20-23.
- [2] ALAIN T, DANIEL M. Stability analysis of the mechanism of jet attachment to walls[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(13): 2 769-2 775.
- [3] SONG H B, YOON S H, LEE D H. Flow and heat transfer characteristics of a two-dimensional oblique wall attaching offset jet[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(13): 2 395-2 404.
- [4] 周云波,林加瑞. 射流流量计的原理及发展[J]. 中国仪器仪表, 1997(1): 3-5.
- [5] 王力勇,王兴才. 射流流量计的原理与应用[J]. 工业计量, 2002, 12(3): 44-45.
- [6] LUA A C, ZHENG Z. Numerical simulations and experimental studies on a target fluidic flowmeter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2003, 14(1~2): 43-49.
- [7] 于晓洋,王雁,郭华,等. 射流流量传感器原理与设计[J]. 哈尔滨理工大学学报, 1997, 2(4): 34-36.

- [8] 景思睿, 张鸣远. 流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY ON FLUIDIC FLOWMETER

FU Xin WANG Chiyu

XIE Haibo YANG Huayong

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission
and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract : Numerical simulation is applied to design the internal flow passage of a fluidic flowmeter and research on the velocity distribution and pressure distribution of the flow field in the fluidic flowmeter, as well as the mechanism of fluid alternation and oscillation induced by the Coanda effect. The results of the simulation indicate that the deflection of main jet

is always accompanied with strength alternation of two vortexes acting on the main jet together. Subsequently a fluidic flowmeter prototype is optimized based on the simulation model. Experimental study is carried out to verify the effects of fluidic vibration and the characteristic relationship between conduit velocity and vibration frequency. A fluidic flow sensor with a measuring range from 0.55 m/s to 6.5 m/s for gas medium and an accuracy grade higher than grade 2 is finally developed. Hence effective methods of structural improvement and optimum design for fluidic flowmeter are provided.

Key words : Fluidic flowmeter

Coanda effect

Fluid vibration

Flow field simulation

作者简介: 傅新, 男, 1961年出生, 教授, 博士生导师。主要研究方向为流体仿真及流场可视化、流体振动及流体噪声控制、流体检测与计量等。

E-mail: xfu@zju.edu.cn

(上接第 23 页)

OPTIMUM DESIGN SYSTEM OF LOW-SPECIFIC OPEN-IMPELLER HIGH-SPEED CENTRIFUGAL PUMP

ZHANG Jianci¹ CUI Baoling² LI Yi²

ZHU Zuchao² CHEN Ying³

(1. Western College, Zhejiang University of
Technology, Quzhou 324006;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Modern
Textile Machiner, Zhejiang Sci-tech University,
Hangzhou 310018;

3. State Key Laboratory of Fluid Power
Transmission and Control, Zhejiang University,
Hangzhou 310027)

Abstract: The optimum design system based on the N-S equation and S-A turbulent model is carried out on low-specific open-impeller high-speed centrifugal pump, which includes four parts, optimum design of basal parameters, performance

prediction, flow analysis and information feedback. The design example and experimental study are carried out on an open high-speed centrifugal pump. The satisfied performances are obtained, the head-capacity characteristic curve of pump almost is a straight line, the head coefficient reaches above 0.7, the suction performance also satisfies the demand, the relative velocity and pressure distribution in impeller channel are reasonable. This shows that the excellent-performance low-specific open-impeller high-speed centrifugal pump can be gained adopting the increasing-capacity design method. The proposed method is of importance for the design of open-impeller centrifugal pump.

Key word : Open impeller

High-speed centrifugal pump

Design method Numerical simulation

Experimental study

作者简介: 张剑慈, 女, 1964年出生, 副教授。主要研究方向为流体传动与流体机械。

E-mail: zhjci@tom.com