

# 纺锤体流量计流场的数值模拟

## Numerical Simulation of Flow Field in Spindle Flowmeter

明 晓/MING Xiao, 钟 伟/ZHONG Wei

南京航空航天大学空气动力学系,南京 210016

Department of Aerodynamics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

**[摘要]** 介绍了一种新型的节流式差压流量计——纺锤体流量计,推导了差压式流量计的一般理论以及用于纺锤体流量计的具体形式,并对纺锤体流量计的流动特性进行了数值模拟。结果表明,在来流规则和畸变情况下,纺锤体等直径段部分均能很好地形成环形槽道流动,使测量重复性和精确度得到大幅提高成为可能;同时,由于完全避免了流动分离,与孔板流量计相比,压力损失与所得差压之比小得多,在高雷诺数下尤为明显。实验结果验证了数值模拟的可靠性。

**[关键词]** 计量学,纺锤体,流量,差压,压力损失,数值模拟

**[中图分类号]** TP216<sup>+</sup>.1, C819

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1000-7857(2005)11-0040-03

**Abstract :** Spindle flowmeter, a new type of differential pressure flowmeter, is introduced. The general formulation for different pressure flowmeter and the formula for the spindle are derived. The numerical simulation was conducted. The results indicate that an annular channel flow is formed in conditions of regular and aberrant coming stream, which makes it possible to improve the repeatability and precision of measurement. The ratio of non-recovered pressure drop to differential pressure obtained as an output from spindle is much less than orifice plate, especially at higher Reynolds Number. The experiment results validate the reliability of the numerical simulation.

**Key Words :** metrology, spindle, differential pressure, pressure drop, numerical simulation

**CLC Numbers :** TP216<sup>+</sup>.1, C819

**Document Code :** A

**Article ID :** 1000-7857(2005)11-0040-03

### 1 引言

传统的节流式差压流量计一般以标准孔板或喷嘴作为节流件。其节流装置本身不具有调整流动和保持流动稳定的功能,而且使流动产生严重分离,导致其存在以下一系列缺点<sup>[1]</sup>:测量重复性、精确度在流量计中仅属中等水平,且精确度难以提高;范围度窄;现场安装条件要求较高,需较长的直管段;压力损失大。这促使研究人员探索新型节流装置。迄今较成功的有“V”型内锥式流量计<sup>[2]</sup>。它之所以能部分克服以上缺点,主要得益于“V”型内锥的整流作用。但它并未避免流动分离,且仍旧采用在分离区内取低压的传统方式,致使其低压脉动虽较孔板流量计大幅减小但仍然存在,压力损失也未比孔板流量计有明显减少<sup>[3]</sup>。

纺锤体流量计(又名槽道流量计)的外型经过遗传算法优化,具有良好的低阻外型。以此作为节流件,不仅能够很好地调整流动和保持流动稳定,而且完全避免了流动分离,从根本上使得测量重复性和精确度得到进一步提高成为可能,同时显著减少了压力损失。此项技术已经获得了国家专利。

### 2 纺锤体流量计结构与基本原理

#### 2.1 节流装置结构

纺锤体流量计节流装置的主要结构有如图1(a)、(b)所示的两种形式。流线型纺锤体沿测量管轴线安装,其几何形状根据流体力学原理精心设计,中部适当位置有一段足够长的等直径段,与测量管的内壁之间形成均匀的环形通道。被测流体首先经过导流片,紧接着进入该环形通道,形成标准的环形槽道流动(annular

channel flow)。槽道流动的特点是压力顺轴线的降落具有良好的线性度,从而提供了非常稳定的低压(静压)。对于清洁流体,节流装置可采用(b)形式,高压由纺锤体前缘(前驻点)的高(总)压管引出,可以得到最大的差压。(a)形式的节流装置在纺锤体前缘对应的测量管壁处取高压,得到的差压较(b)形式低,但结构简单、适用范围广。本文的数值模拟与实验均采用(a)形式取压。

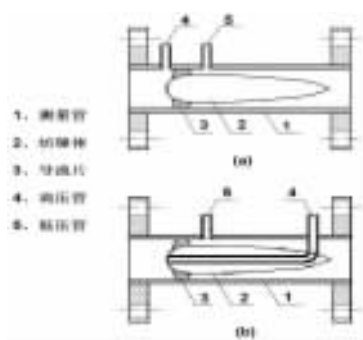


图1 节流装置剖面图

#### 2.2 流量公式

所有的节流式差压流量计都可使用同一形式的流量公式:

$$q_v = \frac{C \cdot \varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_1}} \quad (1)$$

收稿日期: 2005-09-01

作者简介: 明 晓,男,南京市御道街29号南京航空航天大学空气动力学系,教授,主要研究方向为实验流体力学、流动控制及流动测量; E-mail: mingam@nuaa.edu.cn

$$q_m = \frac{C \cdot \varepsilon}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (2)$$

式中:  $q_v$ ——体积流量

$q_m$ ——质量流量

$C$ ——流出系数

$\varepsilon$ ——可膨胀性系数

$d$ ——节流件的孔径或等效孔径

$D$ ——上游管道内径

$\beta$ ——节流比系数,  $\beta=d/D$

$\Delta p$ ——差压

$\rho_1$ ——上游流体密度

以上公式的推导,首先假设流动为无粘的一维管流,运用伯努利方程和连续方程得到初步的流量表达式(对于可压缩流体,代表压缩性影响的项记为 $\varepsilon$ ),然后用流出系数 $C$ 对流体粘性的影响进行修正。但事实上,管道流动中无粘的假设一般是不成立的,特别是孔板等节流件附近的流动更为复杂,用伯努利方程进行推导,理论上显得不严密。因此,下面放弃无粘假设,以纺锤体流量计为例,用量纲分析法<sup>[4]</sup>对节流式差压流量计的流量公式进行重新推导。

差压 $\Delta p$ 与以下物理量有关:上游流体密度 $\rho_1$ ,上游压力 $p_1$ ,上游平均流动速度 $v_1$ ,测量管内径 $D$ ,纺锤体最大直径 $d$ (或等效孔径 $d_s=\sqrt{D^2-d^2}$ ),流体粘性系数 $\mu$ 。用函数关系式可表示为:

$$f_i(\Delta p, \rho_1, p_1, v_1, D, d_s, \mu)=0 \quad (3)$$

选用 $\rho_1$ 、 $v_1$ 和 $D$ 作为基本量,可以得到以下4个无量纲量:

$$\text{差压系数} \quad C_{\Delta p} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho_1 v_1^2}$$

$$\text{截流比系数} \quad \beta = d_s/D$$

$$\text{管道雷诺数} \quad \text{Re} = \frac{\rho_1 v_1 D}{\mu}$$

流体比热比和马赫数的组合参数

$$\frac{1}{\gamma M^2} = \frac{p_1}{\rho_1 v_1^2}$$

用这些无量纲量之间的函数关系来表示式(3)的函数关系:

$$C_{\Delta p} = f_1(\text{Re}, \beta, \gamma M^2) \quad (4)$$

$$\text{即} \quad \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho_1 v_1^2} = f_2(\text{Re}, \beta, \gamma M^2) \quad (5)$$

$$\text{或} \quad v_1 = f(\text{Re}, \beta, \gamma M^2) \sqrt{2\Delta p / \rho_1} \quad (6)$$

$$\text{则} \quad q_v = f(\text{Re}, \beta, \gamma M^2) \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_1}} \quad (7)$$

$$q_m = f(\text{Re}, \beta, \gamma M^2) \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (8)$$

将式(7)、(8)与式(1)、(2)进行比较,可以发现:式(1)、(2)中各参数的影响在式(7)、(8)中均得以体现。例如,流体粘性和压缩性的影响,在式(1)、(2)中分别以系数 $C$ 和 $\varepsilon$ 体现,在式(7)、(8)中则分别以 $\text{Re}$ 和 $\gamma M^2$ 体现。这说明以式(7)、(8)代替式(1)、(2)作为节流式差压流量计的流量公式是可以的。

如果不考虑流体的压缩性,流量公式(7)、(8)可以写为:

$$q_v = K \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_1}} \quad (9)$$

$$q_m = K \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (10)$$

$$\text{其中} \quad K = f(\text{Re}, \beta) \quad (11)$$

称为流量系数。

### 3 流场的数值模拟

#### 3.1 数值模拟方法

纺锤体流量计的流场数值模拟几何模型如图2所示,节流比系数 $\beta=0.6$ 。由于模型的轴对称性,采用圆柱坐标,简化成二维问题求解。

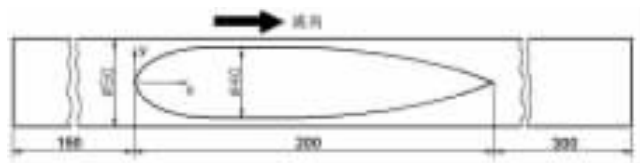


图2 数值模拟几何模型(单位:mm)

使用网格生成软件 GAMBIT 构造三角形非结构网格。使用计算流体力学软件 FLUENT 进行求解。求解方程组为不可压缩二维轴对称流动的基本方程组<sup>[5]</sup>。

所取流体为 20 °C 的水,假设其不可压、等温。湍流模型采用  $k-\varepsilon$  双方程模型。

入口边界为速度入口,速度分布设为充分发展管流的速度分布,采用如下经验公式<sup>[6]</sup>表示:

$$u = u_{\max} \left(1 - \frac{r}{D/2}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

其中  $n = 1.66 \log \text{Re}$

出口边界为压力出口,压力  $P=0$  (参考压力  $P_0=101\,325\text{ Pa}$ )。

为了将纺锤体流量计与孔板流量计进行比较,采用相同的方法对管道内径和节流比系数相同的一个孔板流量计的流场进行了数值模拟。

#### 3.2 数值模拟结果

##### 3.2.1 流线分布

图3(a)为纺锤体附近的流线分布,图3(b)为相同条件下孔板附近的流线分布。可以看出,流体稳定顺滑地流过纺锤体,整个流场内没有出现流动分离;而孔板后方存在很大的分离区。

流动分离会产生大量的漩涡。一方面由于漩涡的粘性耗散会大幅增加流体的压力损失;另一方面分离区内压力会产生脉动,且对来流条件非常敏感。因此,可以初步推断,纺锤体流量计造成的压力损失会比孔板流量计大幅减小,并且测量压力的重复性会明显提高。

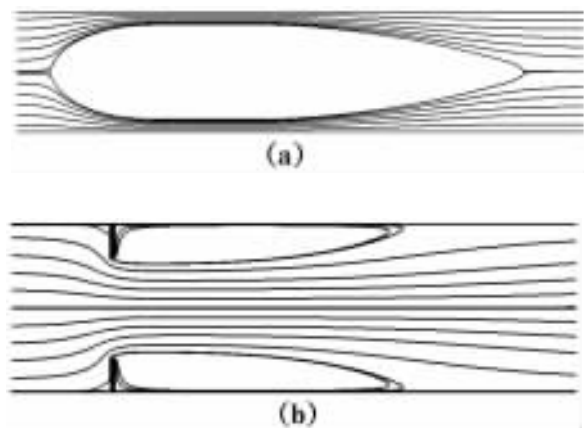


图3 纺锤体与孔板附近的流线分布对比( $\text{Re}=8 \times 10^4$ )

### 3.2.2 压力分布

从图4可以看出,在环形槽道区域,压力等值线沿轴向分布非常均匀。这说明压力沿轴线呈线性下降,压力分布被“标准化”为槽道流动的压力分布。该区域各点的压力应该非常稳定,几乎不存在任何脉动。

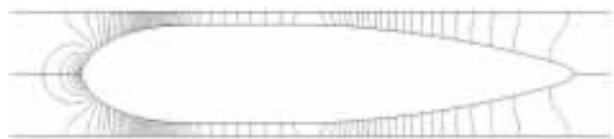


图4 纺锤体附近的压力等值线分布( $Re=8 \times 10^4$ )

### 3.3 来流速度分布畸变情况下的数值模拟结果

设置一个畸变的速度分布代替式(12)表示的管流速度分布作为入口速度分布,观察纺锤体的整流效果。结果如图5所示。可见,畸变的速度分布很快被调整为标准槽道流动的速度分布。

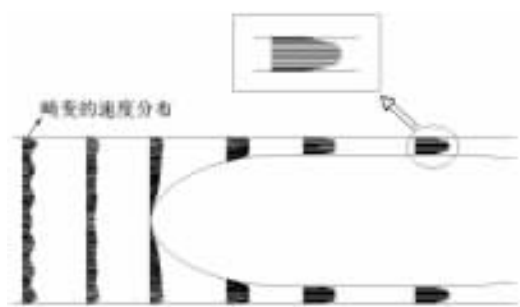


图5 纺锤体的整流效果( $Re=8 \times 10^4$ )

表1列出了由于来流速度分布畸变导致的差压变化。作为比较,孔板(取压)在相同条件下进行数值模拟得到的差压变化也列于表中。

表1 来流速度分布畸变导致的差压变化  
( $Re=8 \times 10^4$ , 压力单位: kPa)

| 节流件 | 来流 | 高压    | 低压    | 差压    | 差压变化 |
|-----|----|-------|-------|-------|------|
| 纺锤体 | 规则 | 4.56  | -7.02 | 11.58 | 0.4% |
|     | 畸变 | 4.63  | -7.00 | 11.63 |      |
| 孔板  | 规则 | 13.65 | -7.54 | 21.19 | 6.8% |
|     | 畸变 | 14.79 | -7.85 | 22.64 |      |

由表1可见,来流速度分布畸变导致的纺锤体流量计的差压变化(误差)远远小于孔板流量计。因此,纺锤体流量计对各种来流具有很强的适应能力,可以大大缩短甚至省略传统差压流量计所必须的上下游较长的直管段。

## 4 实验

为了验证数值模拟的可靠性,对几何尺寸与数值模拟模型一致的一个纺锤体流量计进行了初步实验。

初步实验在南京航空航天大学进行。以溢流水塔作为恒压水源,一个准确度为0.2级的电磁流量计作为标准流量计,使用Sailors V6型差压变送器(精度为0.1%)读取差压。实验得到的差压与流量的关系如图6所示。数值模拟结果与实验数据吻合得比较好,说明数值模拟结果是可靠的。图7是中国计量科学研究院标定的结果,直线段线性度达0.0583%。

## 5 结论

任何测量想要得到好的重复性和高的精确度,被测对象必须

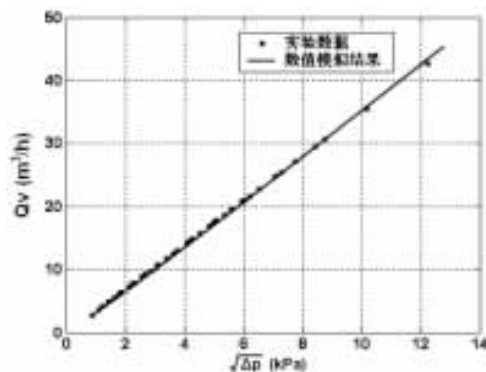


图6 差压与流量的关系

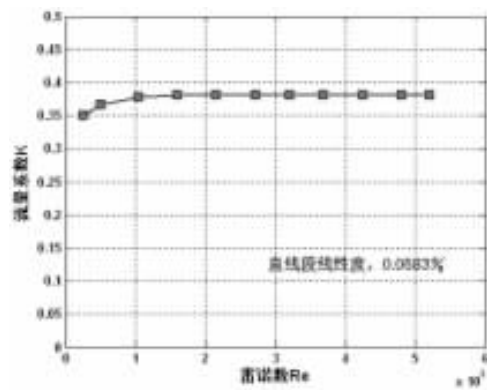


图7 槽道流量计标定结果

处于一个稳定的状态。孔板流量计测量重复性和精确度难以提高的根本原因,在于其流动的不稳定导致测量压力的脉动。从对流场的数值模拟结果可以看出,纺锤体流量计能够把来流很快调整为标准的环形槽道流动,在该稳定的流动区域内取低压,从根本上保证了测量的重复性和精确度有望得到大幅提高。

通过本文的初步研究可以看出,纺锤体流量计具有以下特性。

- 1) 将流动“标准化”为稳定的环形槽道流动,使测量的重复性和精确度得到大幅提高成为可能。
- 2) 能够适应复杂的非规则来流,从而可以大大缩短甚至省略传统差压流量计所必须的上下游较长的直管段。
- 3) 完全避免了流动分离,压力损失较孔板流量计显著减小。
- 4) 对于清洁的流体,采用“总压—静压”的取压方式,同等条件下能获得最高的差压。
- 5) 纺锤体具有良好的流线型,不仅避免脏物的堆积,而且不易磨损,延长检定周期。

## 参考文献 (References)

- [1] 蔡武昌等编著. 流量测量方法和仪表的选用[M]. 北京: 化学工业出版社. 2001. 47
- [2] 孙延祚. “v”型内锥式流量计[J]. 天然气工业, 2004, 24(3): 105~110
- [3] 刘跃. 内锥流量计的探讨[J]. 自动化仪表, 2004, 25(3): 38~42
- [4] 徐有恒等编著. 基础流体实验[M]. 上海: 复旦大学出版社. 1990. 13~18
- [5] 程勇, 等. 低雷诺数的孔板计量数值模拟及其应用 [J]. 计量学报, 2005, 26(1): 57~59
- [6] R.W.米勒[美]编著. 流量测量工程手册[M]. 孙延祚译. 北京: 机械工业出版社. 1990. 160

(责任编辑 肖庆山)