

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.01.03

利用流体仿真研究文丘里流量计瞬变流动模型

张永胜, 张毅治, 王鹏

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为研究文丘里流量计在瞬变流动流下的数学模型, 利用 FLUENT 软件对文丘里流量计在阶跃流动下的流场进行仿真计算, 获得不同阶跃流动状态下流量与差压的离散值, 利用平面拟合方法获得微分方程各项系数, 进而确定流量计在瞬变流动下的数学模型。

关键词: 阶跃流量; 文丘里流量计; 数学模型

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)01-0010-04

Exploration of Model of Venturi Flowmeter under Transient Flow by Fluid Simulation

ZHANG Yongsheng, ZHANG Yizhi, WANG Peng

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to study the mathematical model of Venturi flowmeter under transient flow, the flow field of Venturi flowmeter under step flow was simulated by FLUENT software. The discrete values of flow and differential pressure under different step flow conditions were obtained. The coefficients of differential equation were obtained by plane fitting method, and then the mathematical model of Venturi flowmeter under transient flow was determined.

Key words: step flow; Venturi flowmeter; mathematical model

0 引言

工业生产中动力系统在正常运行时^[1-3], 其流动属定常工况。动力系统一般包括动力装置(泵、风机、压缩机等)、管道系统、容器装置(凝汽器、储罐等)、阀门和计量测试仪器仪表等。动力系统的实际工作过程始终处于动态调节变化中。各类工况调节、管路切换、系统的启动和停止等, 都会导致非定常流动; 由于系统的复杂性和控制技术的不完善, 也会出现非主动调节的非定常流动, 若非定常流动在极短时间内完成则形成瞬变流动。

文丘里流量计是以文丘里管为节流件的差压式流量计^[4-5], 由于其具有结构简单、无可动部件等特点而广泛应用于测量封闭管道中单相稳定流体的流量(常

用于测量空气、天然气、煤气、水等流体的流量)。文丘里流量计测量管路中稳定流动状态下, 以伯努利方程和质量守恒为基础建立数学模型; 而在瞬变流动状态下, 稳态流动时的数学模型并不适用, 流量测量会产生很大的误差。研究中以经典文丘里管为研究对象, 通过 FLUENT 软件方法^[5], 对研究对象在阶跃流量状态下进行流体仿真, 通过离散数据拟合方法对瞬变流动状态下的数学模型进行研究。

1 文丘里管建模

1.1 几何模型

图 1 是文丘里管几何尺寸图。测量截面 I 和截面 II 两处之间压差进行流量计算。

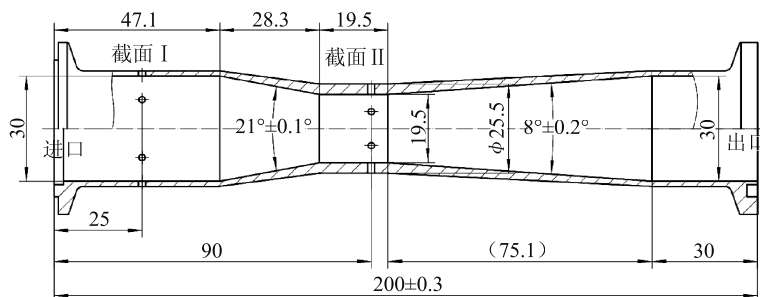


图 1 文丘里管几何模型

文丘里管进出口内径 $D = 30 \text{ mm}$ ，喉径 $d = 19.5 \text{ mm}$ ，直径比 $\beta = 0.65$ ，截面 I 与进口距离 $L_I = 25 \text{ mm}$ ，截面 II 与进口距离： $L_{II} = 90 \text{ mm}$ 。

1.2 流体仿真模型

利用 ICEM 软件进行几何建模，忽略重力因素影响，文丘里管内流场是轴对称的，建立二维轴对称几何模型进行网格划分。文丘里管上游设置 10 倍长直管段，下游设置 5 倍直管段。仿真模型壁面设置 5 层边界层网格，中心区域为三角非结构化网格。

仿真中选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型，选用液体水 (water-liquid) 作为流体介质。设置下游直管段出口为自由出流 (outflow) 条件，直管段及文丘里管壁为静止壁面 (wall)；上游直管段入口为速度入口 (velocity-inlet)，通过 UDF 函数定义，速度入口流速通过式 (1) 和式 (2) 计算。

$$q_m = \begin{cases} q_{m_0} & t \in (0 \sim 0.05] \\ q_{m_0}(1 - \Delta q) & t \in (0.05 \sim 0.10] \cup (0.55 \sim 0.60] \\ q_{m_0}(1 - 2\Delta q) & t \in (0.10 \sim 0.15] \cup (0.50 \sim 0.55] \\ q_{m_0}(1 - 3\Delta q) & t \in (0.15 \sim 0.20] \cup (0.45 \sim 0.50] \\ q_{m_0}(1 - 4\Delta q) & t \in (0.20 \sim 0.25] \cup (0.40 \sim 0.45] \\ q_{m_0}(1 - 5\Delta q) & t \in (0.25 \sim 0.30] \cup (0.35 \sim 0.40] \\ q_{m_0}(1 - 6\Delta q) & t \in (0.30 \sim 0.35] \end{cases} \quad (1)$$

$$V_t = \frac{q_m}{\rho A_{in}} \quad (2)$$

式中： q_m 为瞬时质量流量， kg/s ； q_{m_0} 为初始质量流量， kg/s ； Δq 为阶跃幅值， $\Delta q = 5\%$ ； t 为运行时间， s ； V_t 为瞬时入口速度平均值， m/s ； ρ 为流体密度， kg/m^3 ； A_{in} 为上游直管段入口截面积， m^2 。

2 脉动流理论模型

在非定常流动状态下，假设流体流过文丘里管为一维流动^[6-7]，文丘里管内流动运动方程可由式 (3) 表示。

$$\frac{du}{dt} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = C(t) \quad (3)$$

由于质量流量可由式 (4) 表示，则式 (3) 可进一步表示为式 (5)。

$$\begin{aligned} q_m &= \rho A_x u \quad (4) \\ \frac{dq_m}{A_x dt} + q_m \frac{\partial q_m}{\rho C^2 A_x^2 \partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} &= C(t) \quad (5) \end{aligned}$$

在截面 I 和截面 II 之间沿流派对式 (5) 进行积分，可获得式 (6)。

$$\int_{Pos_I}^{Pos_{II}} \frac{1}{A_x} dx \cdot \frac{dq_m}{dt} + \frac{1}{2\rho C^2} \left(\frac{1}{A_{II}^2} - \frac{1}{A_I^2} \right) q_m^2 = \Delta p \quad (6)$$

式中： Pos_I ， Pos_{II} 分别为轴线上截面 I 和截面 II 的位置， $Pos_I = 0.025 \text{ m}$ ， $Pos_{II} = 0.090 \text{ m}$ ； A_x 为某轴线位置文丘里管横截面面积， m^2 ； A_I ， A_{II} 分别为截面 I 和截面 II 的截面积， $A_I = m^2$ ； C 为稳态流动下流出系数； Δp 为截面 I 和截面 II 之间压差， Pa 。

设 $k_1 = \int_{Pos_I}^{Pos_{II}} \frac{1}{A_x} dx$ 和 $k_2 = \frac{1}{2\rho C^2} \left(\frac{1}{A_{II}^2} - \frac{1}{A_I^2} \right)$ ，则可将式 (6) 简化为脉动流理论模型，即

$$k_1 \frac{dq_m}{dt} + k_2 q_m^2 = \Delta p \quad (7)$$

3 瞬变流量理论模型仿真修正

3.1 流体仿真结果

仿真计算中调整初始质量流量 ($q_{m_0} = 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 \text{ kg/s}$) 参数设置，获得 7 个不同工况下的流场，式 (7) 中 q_m ， $\frac{dq_m}{dt}$ ， Δp 可通过利用流体仿真数据中入口流速、截面 I 和截面 II 静压计算得到。

图 2 和图 3 分别是 $q_{m_0} = 0.5 \text{ kg/s}$ 和 $q_{m_0} = 3.0 \text{ kg/s}$ 两工况下， $\frac{dq_m}{dt}$ ， q_m^2 ， Δp 随时间变化的曲线图。在流量阶跃时刻存在差压突变尖峰；且在流量负阶跃时刻，差压为负值。在稳定流量范围内，流量导数项为零；在流量阶跃时刻，利用阶跃前后流量之差与时间步长之商作为流量导数，显然负阶跃导致 $\frac{dq_m}{dt} < 0$ ，而正阶跃导致 $\frac{dq_m}{dt} > 0$ 。在平稳流量范围内，导数项对差压贡献为零；而在流量阶跃时刻，导数项对差压贡献远大于平方项，所以差压尖峰是由于流量导数项变化引起的。

3.2 理论模型修正及确定

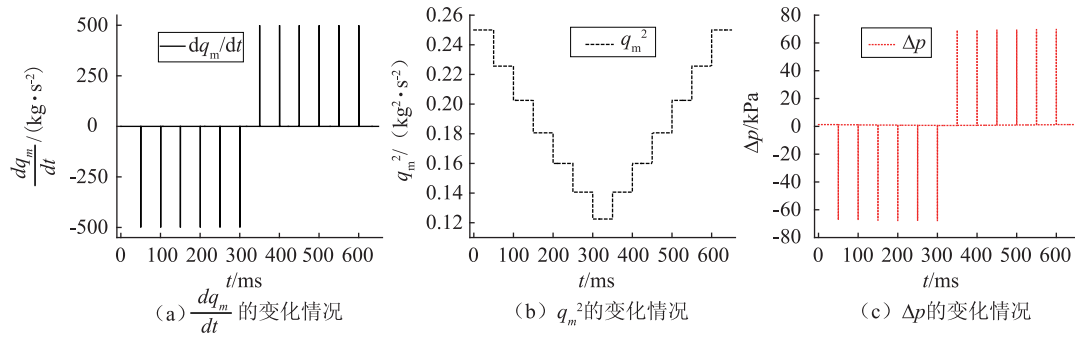
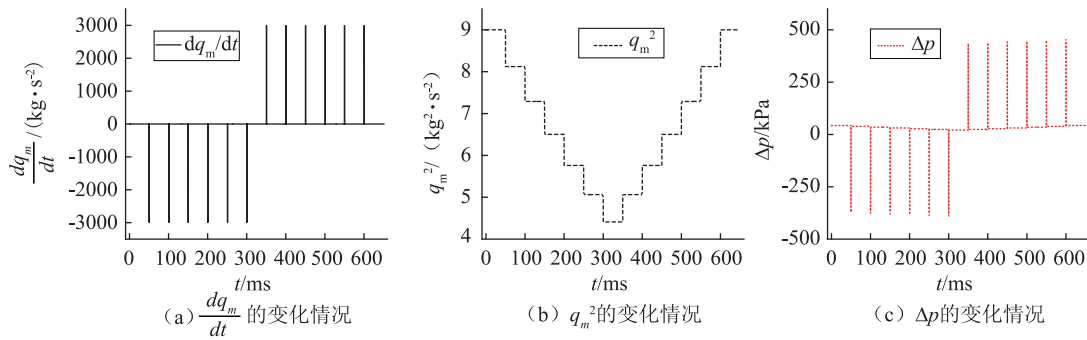
对式 (7) 进一步增加水介质在管道流中的粘性耗散项 k_0 ，可得到式 (8)。

$$k_0 + k_1 \frac{dq_m}{dt} + k_2 q_m^2 = \Delta p \quad (8)$$

分别设 $x = \frac{dq_m}{dt}$ ， $y = q_m^2$ ，则式 (8) 可表示为

$$\Delta p = k_0 + k_1 x + k_2 y \quad (9)$$

利用 Origin 软件对 q_m^2 ， $\frac{dq_m}{dt}$ ， Δp 三者进行分析，

图2 $q_{m0} = 0.5 \text{ kg/s}$ 工况下各参数随时间变化的曲线图图3 $q_{m0} = 3.0 \text{ kg/s}$ 工况下各参数随时间变化的曲线图

通过平面拟合 (PlaneFit) 获得 k_0 , k_1 和 k_2 三个系数。图 4 是 $q_{m0} = 0.5 \text{ kg/s}$ 和 $q_{m0} = 3.0 \text{ kg/s}$ 两工况压差

与流量平面拟合图形, 包括 12 处阶跃流量时刻的所有数据点均处于同一平面内。

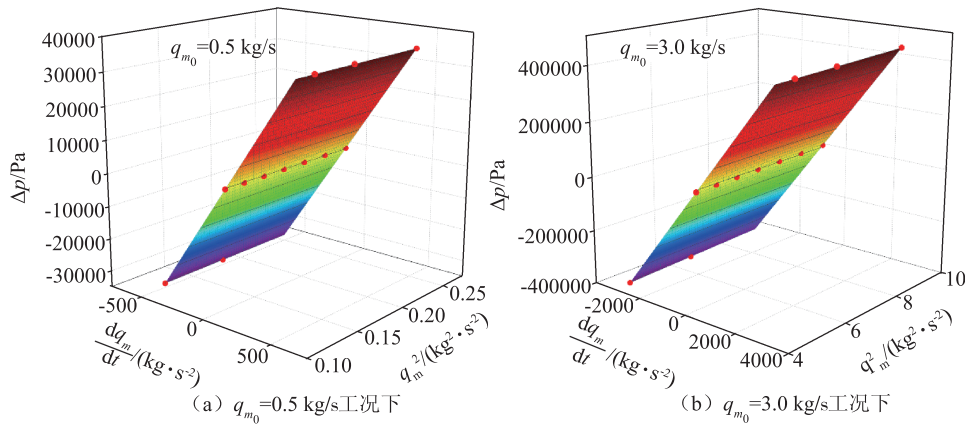


图4 压差与流量平面拟合图形

表 1 是阶跃流量下平面拟合系数表。 k_0 在低流量稳定流动范围内 ($q_{m0} = 0.5 \text{ kg/s}$ 和 0.8 kg/s) 对差压的贡献较大, 但不超过 2%; 在高流量稳定流动范围 ($1 \sim 3 \text{ kg/s}$) 和阶跃流量时刻 k_0 的贡献可以忽略, 而一般差压式流量计量程比为 1:3, 在此量程范围内 k_0 基本可以忽略。 k_1 在各工况数值

为常数, 算例中 $k_1 = 137.01$ 。 k_2 处于 4765.5 ~ 4928.6 范围内, 变化范围小于 2%; 而在 1:3 的量程比范围内, 变化范围小于 0.2%。 k_2 的变化是由于不同流量下文丘里管流出系数不同造成, 图 5 是流出系数平方倒数 C^{-2} 与 k_2 随稳定流量变化曲线, 可见 C^{-2} 与 k_2 具有相同变化趋势。

表 1 流体仿真拟合系数表

$q_{m0}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	k_0	k_1	k_2
0.5	22.620	137.01	4928.6
0.8	49.803	137.01	4816.4
1.0	69.184	137.01	4778.4
1.5	71.032	137.01	4765.5
2.0	36.875	137.01	4780.4
2.5	44.248	137.01	4777.4
3.0	55.475	137.01	4774.7

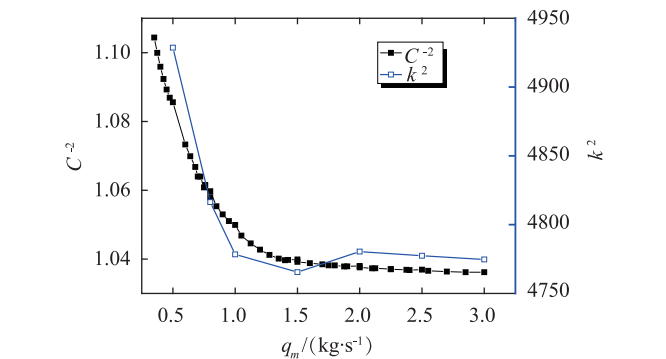


图 5 k_2 随流量的变化曲线

4 总结

研究中利用 FLUENT 软件对文丘里流量计在阶跃流动下的流场进行了流体仿真，获得了各瞬变流量工况下的流场，并求取了各工况内 q_m^2 ， $\frac{dq_m}{dt}$ 和 Δp 的离散数值。以理想模型为基础，通过 Origin 软件对流体仿

真的离散数据进行拟合计算，获得各工况下理论模型的各项系数。粘性耗散项 k_0 在文丘里流量计正常使用范围内可以忽略；导数项系数 k_1 与文丘流管两测压截面间几何结构相关，基本为常数；平方项系数 k_2 与文丘里管流出系数相关，而在文丘里管正常使用范围内约为常数。

参 考 文 献

[1] 刘恩斌, 李长俊, 贾文龙, 等. 液体输送管道瞬变流动分析[J]. 油气储运, 2010, 29(4): 263-265.

[2] 丁延鹏. 天然气管输系统快瞬变流动特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.

[3] 徐晓菊. 动力系统中瞬变流动的特性研究[J]. 机械管理开发, 2010, 25(5): 50-52.

[4] 苏彦勋. 流量检测技术[M]. 北京: 计量质检出版社, 2012.

[5] 王池, 王自和. 流量测量技术全书[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

[6] 朱云. 脉动流对差压式流量计测量误差影响的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(8): 894-897.

[7] 何军山, 赵玲. 差压流量计测量脉动流综述[C]//第十届全国反应堆热工流体力学会议, 2007: 226-230.

收稿日期: 2018-12-16

作 者 简 介



张永胜(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事流量校准及标准装置研发工作。