

# 涡街流量计漩涡发生体位置仿真研究

黄绍锋 陈洁 宋佳忆 曹毅杰 陈茨茨

(西上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072)

**摘要:** 目前对于涡街流量计漩涡发生体的位置研究仅局限于二维的仿真研究,但实际流体撞击漩涡发生体是流体三维模型。鉴于二维仿真并不能完全对实际流体撞击漩涡发生体的流场进行验证,本文采用数值仿真软件平台 Ansys+Workbench+FLUENT,根据实际涡街发生体的机械尺寸建立相应的三维仿真模型。并对仿真模型进行网格细分,再通过 N-S 方程进行求解计算,通过仿真与在线实验对比验证表明通过 FLUENT 软件对实际涡街流场进行仿真的可行性。最终利用 FLUENT 软件,对不同流速,通过调整发生体平移的位置最终确定发生体位置对涡街信号的影响,从而确定发生体允许最大的平移位置  $\delta$ 。

**关键词:** 涡街流量计; FLUENT; 发生体; 基准轴

**中图分类号:** TP391.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

## Numerical simulation on Vortex generating body position of vortex flowmeter

Huang Shaofeng Chen Jie Song Jiayi Cao Yijie Chen Qianqian

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The research of flow field on Vortex generating body position of vortex flowmeter is focused on two-dimensional at present, but the actual flow field is three-dimensional model. In view of the fact that the two-dimensional simulation can not fully verify the flow field generated by the actual fluid impinging the Vortex generating body. The 3D simulation model was built according to the actual mechanical dimensions of vortex generating body using the numerical simulation software platform Ansys Workbench FLUENT in this dissertation. Then make the mesh subdivision on the simulation model, and calculate it by N-S equation. The comparison between the simulation and the real experiment shows that the actual vortex flow field can be simulated by the FLUENT software. Finally with the help of FLUENT software, the influence of generating body position can be determined by adjusting the the translation of generating body in the condition of different Current Speed but the same probe position, So that the maximum allowed translation position  $\delta$  of generating body can be accessed.

**Keywords:** vortex flowmeter; FLUENT; generating body; reference axis

## 1 引言

随着涡街流量计在国内各行各业的使用量逐渐增大,各高校、研究所和流量计生产厂商的学者和研究人员也对此展开了各方面的研究,涡街流场的数值仿真的研究和实现也是其中一个重点<sup>[1]</sup>。

其中贾云飞等人利用 FLUENT 对二维涡街流场中的压力场进行数值仿真研究,找出三角柱发生体的最佳取压位置,通过仿真数据验证了涡街信号强度随检测位置变化而变化,同时实验对比三角柱发生体与 T 形发生体的信号特点,得到了 T 型发生体产生的涡街信号优于三角柱发生体<sup>[2]</sup>。郑丹丹通过对圆柱发生体流场进行数值仿真实验,

得出二维涡街流场与三维涡街流场的差异性,并通过对比圆柱发生体与三角柱发生体的流场差异,揭示了影响探头位置的各种因素以及发生体下游尾迹区域对涡形成以及脱落的影响<sup>[3]</sup>。各种研究出发点、仿真方法和仿真结论均给予我们以启示<sup>[4,11]</sup>。

基于涡街流量计的测量原理涡街发生体的设计要求就尤为重要,而在实际设计生产当中不能保证发生体的中心位置在管道的中轴线上,发生体与管道中轴线偏离多少会对最终的测量产生影响需要重复更换发生体,操作起来费时费力。鉴于以上原因本文对进行对涡街发生体移动位置进行仿真研究,通过仿真结果来指导物理实验,并根据物理实验结果进一步完善传感器结构。

## 2 涡街流量计原理

涡街流量计利用流体振动原理进行流量测量,在特定的流动条件下,流体一部分动能转化为振动,其振动频率与流速(流量)有确定的比例关系。1878 年斯特劳哈尔(Strouhal)发表了关于流体振动频率与流速关系的文章<sup>[5]</sup>。

涡街流量计的基本原理是:在与被测介质流向垂直的方向放置一个非流线型旋涡发生体,当流体流过该旋涡发生体时,在发生体后方两侧交替地分离释放出两列规则的交错排列的旋涡,称为冯·卡尔曼涡街<sup>[6]</sup>,如图 1 所示。当旋涡发生体右(或左)下方产生一个旋涡后,在旋涡发生体上产生一个升力。在旋涡发生体的后方安装应力式压电传感器,可以将作用在旋涡发生体上的升力转换为电荷信号。该电荷信号的变化频率与旋涡的脱离频率一致。通过检测电荷信号的变化频率,就可以得到旋涡的分离频率<sup>[7]</sup>。

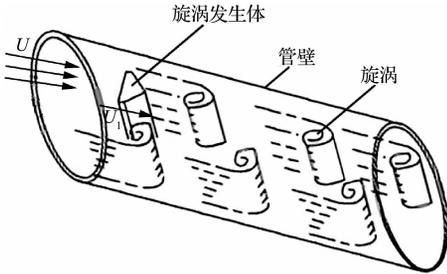


图 1 卡尔曼涡街

## 3 涡街流场模型分析

雷诺时均方程的方法求解出来的是流动变量的针对时间的平均值,无法给出流场结构的详细信息,体现不出湍流流动的瞬时性特点。大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)是近代湍流研究中,用计算机直接求解 N-S 方程的一种方法<sup>[8]</sup>,它从空间的角度对大涡进行直接模拟,对小涡进行模型化处理,从而使得网格要求比 DNS 低。其基本思想是:将流动的区域分为两个部分:一部分是可通过求解定常三维 N-S 方程获得的大尺度涡旋流动部分,另一部分是不需要直接计算可采用通用模型获得的小尺度部分。

LES 的控制方程是对 N-S 方程在波数空间或物理空间进行过滤得到的。过滤的过程是去掉比过滤宽度或者给定物理宽度小的旋涡,从而得到大旋涡的控制方程。对于均匀湍流,常用卷积滤波定义变量的大尺度成分:

$$\bar{\phi}(x) = \int_{\Omega} \phi(x') G(x, x') dx' \quad (1)$$

式中:  $\bar{\phi}(x)$  为被过滤变量。过滤函数  $G$  是:

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V, x' \in V \\ 0, x' \notin V \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $V$  是被求解的控制单元体积,或网格平均尺度,或滤波宽度。过滤不可压的 N-S 方程后,可以得到 LES 控制方程<sup>[9]</sup>:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nabla \cdot (\mu \bar{u}_{ij}) - \nabla \tau_{ij} \quad (4)$$

式中:  $i, j$  取  $x, y$  和  $z$ ;  $\tau_{ij}$  为亚网格应力,定义亚网格应力:

$$\tau_{ij} = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (5)$$

为了直观得到涡街信号真实的流动曲线及流场分布,本课题采用 LES 湍流模型来模拟涡街流场。在 CFD-Post 中,选用二阶迎风差格式及 SIMPLE 算法<sup>[10]</sup>进行仿真。如图 2 为流体流经三角柱发生体时的流线图,可以从图中清晰地看到旋涡的产生、脱落,以及涡街流量计的工作流场。

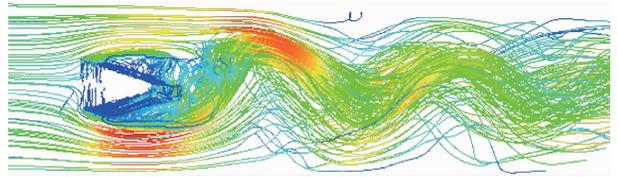


图 2 涡街流场中三角柱发生体绕流的流线图

## 4 三维涡街流场仿真

本文通过 FLUENT 软件对实际管道中的流场进行仿真,其中在使用 FLUENT 设置相关参数时是根据实际管道中发生体的尺寸进行配置,图 3 为实际管道中发生体在管道中平移后的三视图。

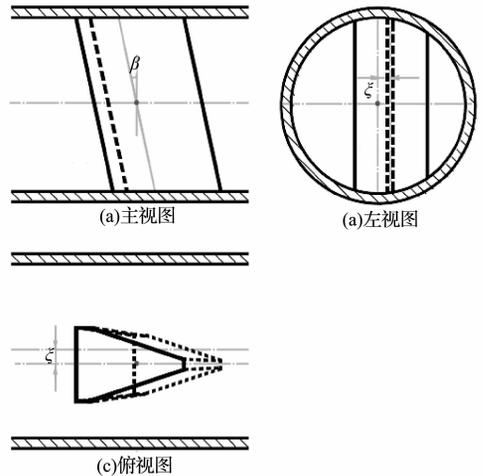


图 3 管道中发生体平移后的三视图

发生体中心线平行于基准轴线。这种情况下,会产生位置偏差,平移距离记作  $\delta$ 。如图 4 所示。

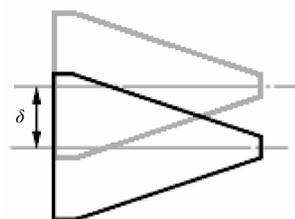


图 4 中心线平移

在 Geometry 中建立发生体中心线平行于基准轴线的三维几何模型。如图 5 所示。



图 5 中心线平移几何模型

在 Mesh 中进行网格划分,如图 6 所示。

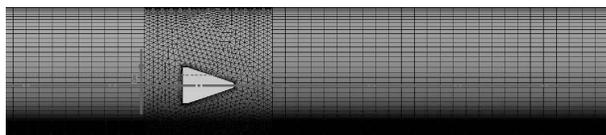


图 6 中心线平移网格划分

图 7 为  $\delta=0.5d$  时涡街流场中漩涡的产生-脱落图。

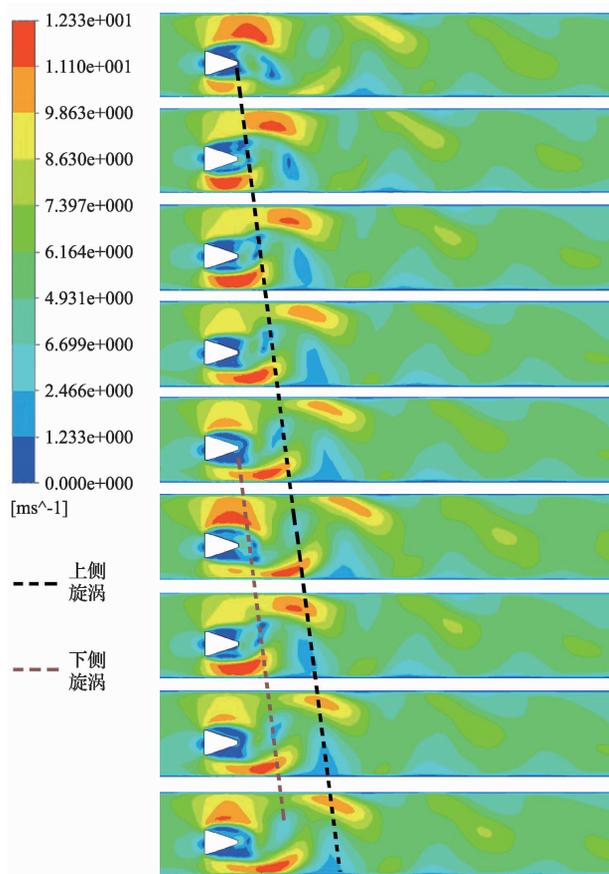


图 7 发生体中心线平移时漩涡的产生-脱落图

可以从图 7 中看出即使发生体位置与理想位置存在偏差,仍然会出现漩涡脱落现象。并且当发生体上侧的漩涡从产生到脱落时,发生体下侧在为漩涡的产生做准备,而不会产生漩涡。同时当上侧漩涡离开发生体一段距离以后,下侧才开始出现漩涡。

发生体在理想位置时产生的漩涡是交替排列的,而发生体在中心线发生平移的情况下,会根据  $\delta$  的不同使得漩涡脱落后朝中心线相对基准轴线平移的方向碰撞到管壁。针对此现象对低速(4 m/s)、中速(40 m/s)和高速(70 m/s)

流速下进行仿真研究,并将数据记录到表 1 中。

表 1 不同流速下不同平移距离的信号强度

$\delta/\text{mm}$	流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		
	4	40	70
0.1d	1.61	155.81	462.94
0.2d	1.50	150.57	445.75
0.3d	1.34	142.77	422.41
0.4d	1.08	130.65	387.20
0.5d	0.64	112.75	307.73

表 2 不同流速下不同平移距离的偏移程度

$\delta/\text{mm}$	流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		
	4	40	70
0.1d	8.00%	4.08%	6.79%
0.2d	14.29%	7.31%	10.25%
0.3d	23.43%	12.11%	14.95%
0.4d	38.29%	19.57%	22.04%
0.5d	63.43%	30.59%	38.06%

为了更为直观地反映出图 8 中不同流速下的漩涡信号强度随平移位置的变化规律,现将表 1 中的漩涡信号强度用表 2 的偏移程度来表示。

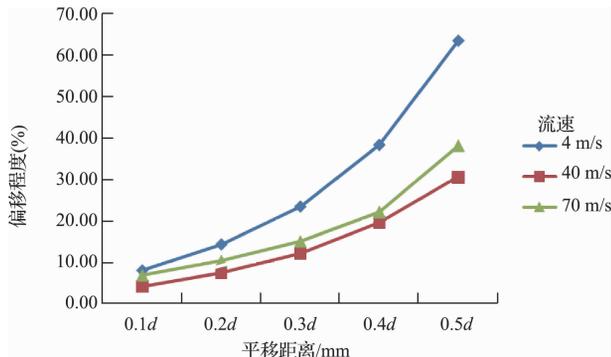


图 8 不同流速不同平移距离的偏移程度图

将表 2 中的数据绘制成图 8。从图中可以看出信号强度随着偏移距离,流速的不同而不同。并且得出以下结论:

无论是低速(4 m/s)、中速(40 m/s)、还是高速(70 m/s)流速下,随着平移距离的增加,信号强度减弱,偏移程度增加。平移距离越小,偏移程度越小,随着平移距离的增加,平移距离与偏移程度近似于平方关系。

通过观察低速(4 m/s)、中速(40 m/s)和高速(70 m/s)流速下涡街流场中漩涡的产生-脱落图,可以发现,当平移距离较小时,会在发生体尾部生成两列规则排列的漩涡。继续增加偏移距离,会出现漩涡发生体尾部产生交替排列的漩涡向发生体尾部产生的漩涡碰撞到管壁的过渡点。流速为 4 m/s 时,过渡点在 0.3d 处;流速为 40 m/s 和 70 m/s 时,过渡点在 0.4d 处。也就是说,当流速为 4 m/s,平移距离为 0.3d、0.4d 和 0.5d 时,发生体产生的漩涡会碰撞到

管壁;当流速为 40 m/s 或 70 m/s,偏移距离为 0.4d 和 0.5d 时,发生体产生的旋涡会碰撞到管壁。

### 5 仿真与实际流速对比

实验室使用 50 mm 口径液体流场进行实验其中实验装置如图 9 所示,由于实验装置限制本实验主要针对低流速下进行实验仿真对比。

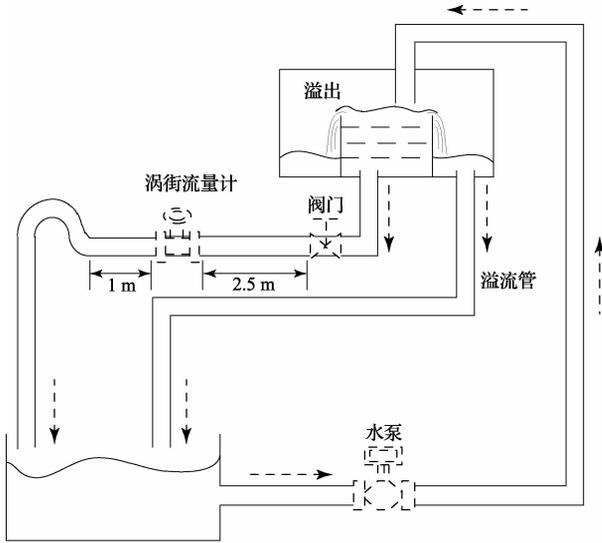


图 9 涡街流量计测流速实验装置

涡街流量计安装在阀门的下游,由于阀门上游连接的水箱在水泵不断送水的状态下一直呈溢出状态,因此可认为上游水箱的液位是稳定的。实验中通过调节阀门的开度达到控制回路中流量大小,同时与仿真中的流速进行对比,其中  $\delta$  为发生体平移距离。

表 3  $\delta=0$  时仿真与实际测量结果

流速/ $m \cdot s^{-1}$	1	2	3	4	5
仿真结果/Hz	5.01	9.98	14.99	20.04	24.99
实验结果/Hz	5.02	10.01	14.98	20.01	25.01
误差(%)	0.20	0.30	0.07	0.15	0.08

表 4  $\delta=0.05 d$  时仿真与实际测量结果

流速/ $m \cdot s^{-1}$	1	2	3	4	5
仿真结果/Hz	5.03	10.02	15.01	19.99	25.03
实验结果/Hz	5.02	10.01	14.98	20.01	25.01
误差(%)	0.20	0.10	0.20	0.10	0.08

表 5  $\delta=0.1 d$  时仿真与实际测量结果

流速/ $m \cdot s^{-1}$	1	2	3	4	5
仿真结果/Hz	4.95	10.88	13.76	20.05	24.67
实验结果/Hz	5.02	10.01	14.98	20.01	25.01
误差(%)	1.39	8.61	8.14	0.20	1.36

### 6 结 论

流场仿真在涡街流量计传感器设计以及优化传感器设计变得越来越重要,它通过理论支持指导仿真的可实施性,并将仿真结论用于实验中,大大缩短了设计周期。

本文通过模拟三维涡街流场以及涡街流量计的漩涡发生体,通过改变发生体与管道基准轴的距离从而得到不同的漩涡信号,通过仿真与实际管道流体的实验对比可以看出,在发生体中心线相对于基准轴线发生平移的情况下,涡街流场的旋涡信号强度是流体流速和偏移距离的共同作用结果,同时在发生体偏离中心轴在 0.05d 以内则不影响涡街流量计的最终测量精度,这为实际设计发生体做出理论指导。

### 参考文献

- [1] 王慧,黄咏梅.不同形状涡街发生体流场仿真及特性研究[J].中国计量学院学报,2013(3):237-242.
- [2] 胡岳,张涛.涡街流量计梯形旋涡发生体的研究[J].化工自动化及仪表,2012,(5):580-584.
- [3] 郑丹丹.涡街流量传感器小流量测量性能研究[D].天津:天津大学,2009:85-90.
- [4] 宋佳忆,李斌,陈洁,等.基于 CFD 的涡街流量计取压位置仿真研究[J].电子测量技术,2015,38(3):1-2.
- [5] 钟立源.高性能涡街流量计信号处理方法的研究[D].上海大学,2013:2-3.
- [6] 郑德智,王帅,樊尚春.涡街流量传感器信号处理方法研究[J].感技术学报,2009,22(1):80-84.
- [7] 孙宏军,徐冠群.基于相角判据的 Rife 算法的涡街信号处理方法[J].仪器仪表学报,2013,34(12):2860-2866.
- [8] 刘华蓉,龙文光.瞬态 N-S 方程的二阶全离散稳定化两重网格有限元方法[J].四川大学学报,2013,50(2):231-233.
- [9] 汪怡平,谷正气,邓亚东.基于准  $k-\epsilon-v \sim 2/LES$  模型的汽车外流场数值模拟[J].机械工程学报,2012,48(14):97-103.
- [10] 崔曦文.SIMPLE 算法非稳态时间离散格式比较[D].华东理工大学,2013:5-6.
- [11] LIU K Y, YANG Q, CHEN F, et al. Inductance calculation for 3D microsolenoids with single-layer coils[J]. Instrumentation, 2014, 1(2):13-22.

### 作者简介

黄绍锋,工学硕士,学生,主要研究方向为涡街信号处理。

陈洁,工学博士,硕士研究生导师,主要研究方向为涡街流量计信号处理方法研究。

E-mail:hsf0793@163.com