

# 超声波测速仪的计算流体力学 数值模拟研究\*

关 晖<sup>1</sup>, 孙学金<sup>1</sup>, 熊 英<sup>2</sup>, 卫克晶<sup>1</sup>, 杨启东<sup>3</sup>

(1. 解放军理工大学 气象海洋学院, 南京 211101;

2. 工业装备结构分析国家重点实验室(大连理工大学), 辽宁 大连 116024;

3. 上海气象仪器厂有限公司, 上海 201209)

(本刊编委吴锤结推荐)

**摘要:** 超声波测速仪是一种利用超声波发射接收装置,通过发射接收时间来计算来流速度的一种仪器装置.目前国内许多研究都关注在如何消除测速仪的测量误差上,对于模型结构对测量风场的影响研究较少.为了考察测速仪的测量精度,该研究以模型结构对测量区域风速的影响作为关注的重点,采用计算流体力学方法模拟了从低速到高速的不同来流风速下的绕流流场,计算出位于测速仪中心区域的速度分布和不同截面上的平均速度,以判断测速仪模型结构对中心测量区域风速的影响程度.该研究结果表明在测速探头平面内测量到的速度值,无论在低速和高速时均最为准确.采用计算流体力学数值模拟方法可为今后的测速仪模型设计和改造提供准确的依据.

**关键词:** 超声波测速仪; 计算流体力学数值模拟; 有限体积法

**中图分类号:** O35; TH824      **文献标志码:** A

**doi:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.12.008

## 引 言

风速是气象学中的基本要素之一,气象学的实验应用和理论研究都离不开风速的测量,对风速测量的精度要求也更高<sup>[1]</sup>.在测量风速的各种仪器中,超声波测速仪越来越广泛地得到使用.由于它很好地克服了机械式风速风向仪固有的缺陷,因而能全天候地、长久地正常工作,它将是机械式风速仪的强有力替代品<sup>[2]</sup>.超声波测速仪应用便利,测量精确,在很多领域都能灵活运用,广泛应用于城市气象监测、环境监测、风力发电、桥梁隧道、航空机场、航海船舶等行业中.

超声波测速仪是一种利用超声波发射接收装置,通过发射接收时间来计算来流速度的一种仪器装置.这种测速仪测量风速时的主要误差来源于:1) 模型结构对测量区域风场的影响; 2) 探头对路径和时间的测量误差.目前国内许多研究都关注在如何消除测量误差上,如曹可劲等<sup>[3]</sup>从传播时间和声强两个方面描述了超声波风速仪的基本原理,并在不同风速和相对风

\* 收稿日期: 2014-09-25; 修订日期: 2014-10-09

作者简介: 关晖(1970—),女,满族,河南开封人,副教授,博士后(通讯作者. E-mail: guanhui70@163.com).

向的条件下进行了实验,取得了和理论模型一致的结果,为研制超声波风速仪提供了理论基础.黄颖辉<sup>[4]</sup>研究了基于数字信号处理器(DSP)的超声风速测量,通过超声波在3坐标轴来回的传播时间与空气流速间的关系,求算出三维风速与风向.丁向辉等<sup>[5]</sup>研究了基于现场可编程门阵列(FPGA)和DSP的硬件系统架构和基于包络重心法的信号处理算法,研制了体积小、反应速度快、抗干扰能力强和分辨率高的超声波风向风速测量系统.李增志等<sup>[6]</sup>分析了其测量误差的主要来源,进而提出了一种快速的误差检定方法,理论上只需两次测量即可完成对风速温度的误差检定.

目前国内对于模型结构对测量风场的影响研究较少,测量区域内的风速,也就是测速仪测量的速度和来流速度之间的误差是本研究关注的重点.本文采用研制的一种结构较简单而又能可靠地工作的超声波测速仪(如图1),可以测定平面上任意正交方向水平风速的分量.该仪器对模型结构设计要求较高,要求模型结构对来流影响不要太大,以提高测速仪的测量精度.

为了量化描述模型对风场的影响程度,同时也为给模型优化提供一个考核参数,根据测速仪的测速原理,本研究采用计算流体力学方法数值模拟了从低速到高速的不同来流风速下的绕流流场,将超声波传播路径上的速度平均值作为考核参数.计算出位于测速仪中心区域的速度分布和不同截面上的平均速度,以判断测速仪模型结构对中心区域风速的影响程度,并为以后的模型设计改造提供理论依据.

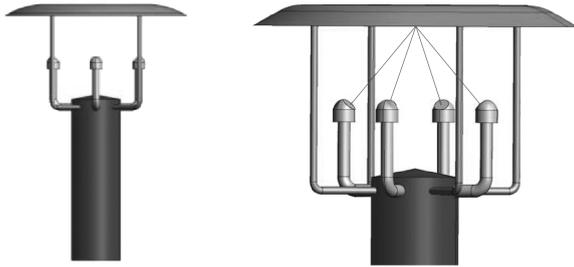


图1 测速仪三维模型

Fig.1 The 3D model of the ultrasonic velocimeter

## 1 软件简介及数值算法

在本研究中,我们在OpenFOAM<sup>[7]</sup>(open field operation and manipulation)开源软件的基础上进行进一步开发,实现了高Reynolds(雷诺)数测速仪绕流的数值模拟,为深入了解测速仪流场并进行模型优化提供数值验证依据.OpenFOAM软件包实现的是张量场的基础操作和运算,其本质是一个主要应用于计算连续介质力学的C++类库<sup>[8]</sup>,采用类似于人们日常习惯的方法在软件中描述偏微分方程的有限体积离散化,包含大量求解器,研究人员也可根据自己需要编写求解器.

### 1.1 流体流动控制方程

为建立数学模型,对流体运动做以下假设:连续性介质;不可压缩的流体;流体内部压力各向同性.

质量守恒方程也称作连续性方程,表达式如下:

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0. \quad (1)$$

不可压缩流体运动的动量守恒方程也称Navier-Stokes方程(N-S方程),表达式如下:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = \rho \mathbf{F}_g - \text{grad } p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}. \quad (2)$$

这里  $\mathbf{u}, \mathbf{F}_g, p, \mu$  分别代表流体的速度矢量、单位质量流体上的质量力矢量、压力和粘性系数。

## 1.2 数值算法

### 1.2.1 方程离散

采用有限体积法和 Crank Nicholson 格式对偏微分方程进行离散<sup>[9-10]</sup>。将计算域离散成单元体之后,所有物理量离散分布在各单元体中心上,方程的离散即是对微分形式的控制方程在各离散单元体上进行时间空间上的积分,以保证质量和动量在单元体上的守恒,然后将单元体上的积分方程转化为用单元体中心上量表示的代数方程,最后求解代数方程即可得到数值解<sup>[9]</sup>。

以非定常对流扩散输运方程为例:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \phi) - \nabla \cdot (\rho \nu_\phi \nabla \phi) = S_\phi(\phi), \quad (3)$$

其中,  $\phi$  为具有输运性质的任意物理量,  $\rho$  为流体密度,  $\mathbf{u}$  为流场流速,  $\nu_\phi$  为扩散系数,  $S_\phi$  为源项。在  $[t, t + \Delta t]$  时间段内,对单元体  $P$  做时间空间积分,将上面的微分方程化为如下的积分方程:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[ \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_p} \rho \phi dV + \int_{V_p} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \phi) dV - \int_{V_p} \nabla \cdot (\rho \nu_\phi \nabla \phi) dV \right] dt = \int_t^{t+\Delta t} \left( \int_{V_p} S_\phi(\phi) dV \right) dt. \quad (4)$$

对于在极小的时间段和单元体上满足的连续量的积分项,要进一步用其离散点值来代数表示,需要假定物理量在离散的时间空间片段上的分布规律。如对任意空间函数  $\phi(\mathbf{x})$  或时间函数  $\phi(t)$ ,假定其在单元体  $P$  上满足:

$$\begin{cases} \phi(\mathbf{x}) = \phi_p + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_p) \cdot (\nabla \phi)_p, \\ \phi(t + \Delta t) = \phi_t + \Delta t \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_t, \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $P$  点是单元体  $V$  的体中心,  $\phi_p$  表示  $\phi(\mathbf{x})$  在  $P$  点处的值,  $\phi_t$  表示  $t$  时刻  $\phi(t)$  的值。根据 Taylor(泰勒)级数展开得到的截断误差是时间空间的二阶,假定物理变量在离散片段上一般都满足上述关系,即物理量在时间空间域上呈局部线性分布,因此将其统称为二阶有限体积离散框架。

### 1.2.2 非线性和速度压力耦合

对于通常含有关于质量和动量守恒的 N-S 方程系统,要求解的速度和压力同时出现在动量方程中,反映了速度和压力的强耦合关系,此外动量方程中的对流项还会引起非线性效应。因此,要想将 N-S 方程体系转化为只含速度场  $\mathbf{u}$  或压力场  $p$  的线性代数方程组,必须进行对流项的线性化和速度压力形式上的解耦。

本文采用 Issa 在 1984 年提出的 PISO (pressure implicit with splitting of operators) 算法。总的原则是求出的速度压力场要同时满足质量和动量方程,因此关键是把原质量和动量方程转化为方便求解的速度方程和压力方程,并通过两方程之间的反复迭代求解来校正速度压力场,以最终得到同时满足质量和动量方程的正确场值。

将连续方程离散成

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{u} dV = \sum_f S_f \cdot \mathbf{u}_f = \mathbf{0}, \quad (6)$$

将动量方程写成如下半离散形式:

$$a_p \mathbf{u}_p = \mathbf{H}(\mathbf{u}) - \nabla p, \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{H}(\mathbf{u}) = \sum_N a_n \mathbf{u}_n + \frac{\mathbf{u}^0}{\Delta t}, \quad (8)$$

下标  $N$  表示单元体  $P$  的邻近单元,  $f$  表示单元体  $P$  的面, 上标  $0$  表示上一时刻, 由式(7)得出面流量, 代入连续方程, 就得到压力方程.

控制方程最后的离散形式可写成:

速度方程

$$a_p \mathbf{u}_p = \mathbf{H}(\mathbf{u}) - \sum_f S(p)_f; \quad (9)$$

压力方程

$$\sum_f S_f \cdot \left[ \left( \frac{1}{a_p} \right)_f (\nabla p)_f \right] = \sum_f S_f \cdot \left( \frac{\mathbf{H}(\mathbf{u})}{a_p} \right)_f, \quad (10)$$

注意, 其中用  $\sum_f S(p)_f$  来表示式(7)中的  $\nabla p$  项的离散形式.

PISO 算法由一次隐式动量预测和若干次的压力、速度修正组成. 在隐式动量预测中, 速度方程中的系数  $a_N, a_p$  由上一时刻速度场得到以使得对流项线性化, 压力场也使用上一时刻的. 由此, 新的速度场可通过求解矩阵方程得到. 在压力、速度修正时, 由动量预测得到的速度场或最新速度场得到压力方程右端项, 从而计算出左端的压力场, 用得到的压力场修正速度场并重新计算流量.

### 1.3 求解流程

整个计算流程为

- 1) 建立初始物理场;
- 2) 计算 Courant 数, 必要的话调整时间步;
- 3) 进入压力速度迭代, 得到当前时间步的速度场和压力场;
- 4) 返回步骤 2) 进入下一时间步计算, 如果已到最后时刻则计算终止.

## 2 物理模型和参数设定

### 2.1 流场耦合和表面网格生成过程

用计算流体力学方法研究三维模型绕流问题时, 尤其对于一些复杂模型的绕流问题, 网格生成是一项复杂而艰巨的任务. 可以直接采用引用外部网格生成软件, 但其前提条件是所产生的测速仪的“.stl”文件足够光滑完整. 用“.stl”文件的好处是无需花很多精力去产生网格.

至此, 就完成了“.stl”文件与流场计算的耦合. 耦合后的流场如图 2 所示, 右边两个图分别为流场的局部放大和切片图, 可以看到对于这样一个几何结构复杂的三维物体, 所生成的网格满足了数值模拟的要求.

计算采用均匀网格, 网格数为:  $N_x \times N_y \times N_z = 200 \times 150 \times 120 = 3\ 600\ 000$ . 为了更好地分

辨模型结构,采用自适应网格在模型的顶盖、细杆和探头处进行局部加密,则最大加密网格数为 1 000 000。

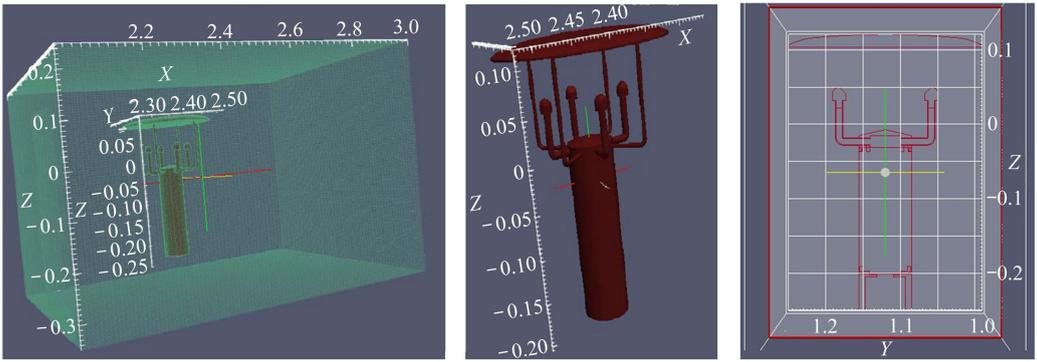


图 2 测速仪模拟流场示意图

Fig.2 The sketch map of the ultrasonic velocimeter

## 2.2 初始条件与边界条件

初始条件:初始流场速度为 0。

边界条件:左边界为入流边界,右边界为连续出流边界,前后和上下边界均为滑移边界,测速仪表面为无滑移边界.入流速度分别为

$$u = 0.5 \text{ m/s}, u = 2 \text{ m/s}, u = 5 \text{ m/s}, u = 10 \text{ m/s}, u = 15 \text{ m/s},$$

$$u = 20 \text{ m/s}, u = 25 \text{ m/s}, u = 30 \text{ m/s}, u = 35 \text{ m/s}, u = 40 \text{ m/s}.$$

表 1 流场参数

Table 1 Parameters of the flow field

	X/m	Y/m	Z/m
computation domain	1	0.75	0.6
model size	0.26	0.26	0.37

## 2.3 参数设定:流场基本参数、湍流模式参数

该流动的流速不同,Reynolds 数也不同,以速度为 15 m/s 的来流速度为例,Reynolds 数为

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{1.5 \times 0.37}{1.8 \times 10^{-5}} \approx 3.1 \times 10^5. \tag{11}$$

不同的来流速度 Reynolds 数也不同,不同风速所对应的 Reynolds 数范围从  $1.1 \times 10^4 \sim 8.22 \times 10^5$ 。

由于 Reynolds 数很大,因此在计算中采用 realizable  $k-\epsilon$  湍流模式,其中采用的模式参数为: $C_\nu = 0.09, A_0 = 4.0, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_{\epsilon ps} = 1.2$ 。

## 2.4 并行计算

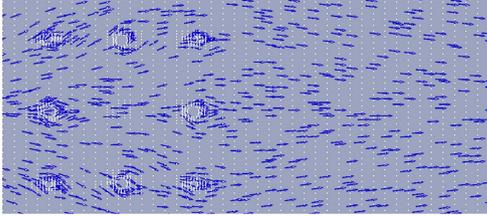
由于该模型结构复杂,模型支撑杆过细,来流速度大,流场的 Reynolds 数极高,因此计算区域要足够大以包含模型并使边界对流场影响尽量小,同时网格又要足够密以分辨出细小的支撑杆.本文在网格划分上采用了局部加密的处理方法,所以该数值模拟的网格数多且计算量非常大;在计算时采用区域分解的并行计算以提高计算效率,减少计算时间.该计算采用 4 个计算节点并行计算,每个算例的计算时间平均在 7 天左右。

### 3 结果分析

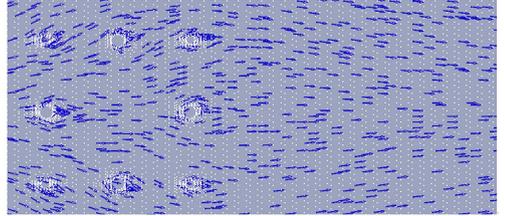
#### 3.1 数值模拟研究算例分布

本文共计算了 10 组不同来流速度的工况,分别为  $u = 0.5 \text{ m/s}$ ,  $u = 2 \text{ m/s}$ ,  $u = 5 \text{ m/s}$ ,  $u = 10 \text{ m/s}$ ,  $u = 15 \text{ m/s}$ ,  $u = 20 \text{ m/s}$ ,  $u = 25 \text{ m/s}$ ,  $u = 30 \text{ m/s}$ ,  $u = 35 \text{ m/s}$ ,  $u = 40 \text{ m/s}$ 。

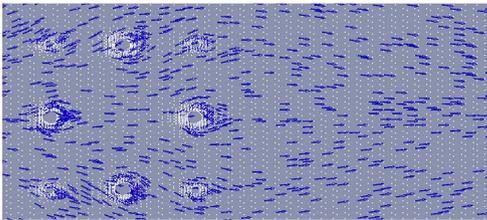
#### 3.2 流场分析:三维速度场、压力场、涡量场



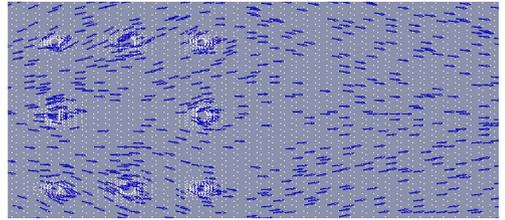
(a)  $Z = 0.003 \text{ m}$



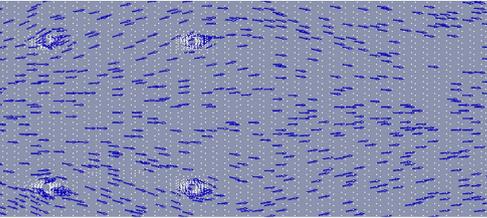
(b)  $Z = 0.014 \text{ m}$



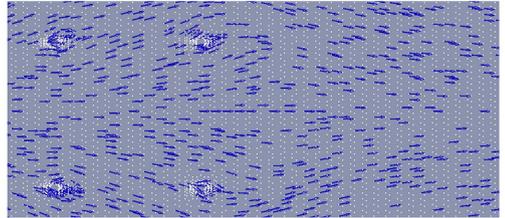
(c)  $Z = 0.031 \text{ m}$



(d)  $Z = 0.048 \text{ m}$



(e)  $Z = 0.065 \text{ m}$



(f)  $Z = 0.082 \text{ m}$

图 3 测速仪模拟截面速度分布

Fig.3 The velocity distribution in different cross sections

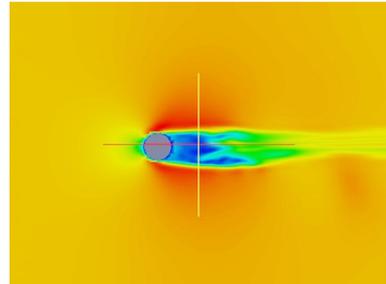
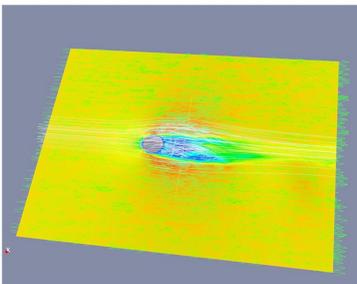


图 4 测速仪模拟截面涡量分布

Fig.4 The vorticity distribution in the cross section

从图 3 和图 4 中可见测速仪支撑细杆和探头对流动有扰动,在其后部下游流场中出现涡

流尾流,但其基本流场结构仍保持较好的二维特征,即在垂直于  $Z$  轴方向的各流面间没有较大的动量交换。

### 3.3 速度面平均分析

在沿顶盖下中心区域  $Z$  轴垂向上从  $0 \sim 0.082$  m 的范围内平均截取 20 个截面,每个截面上选取  $10 \times 10 = 100$  个网格点上的速度做了面平均,画出了垂向上面平均速度的曲线图,图 5 分别为来流速度从  $0.5$  m/s 到  $40$  m/s 的 9 种算例下的  $u_x, u_y, u_z$ , 3 个速度分量和总速度值。

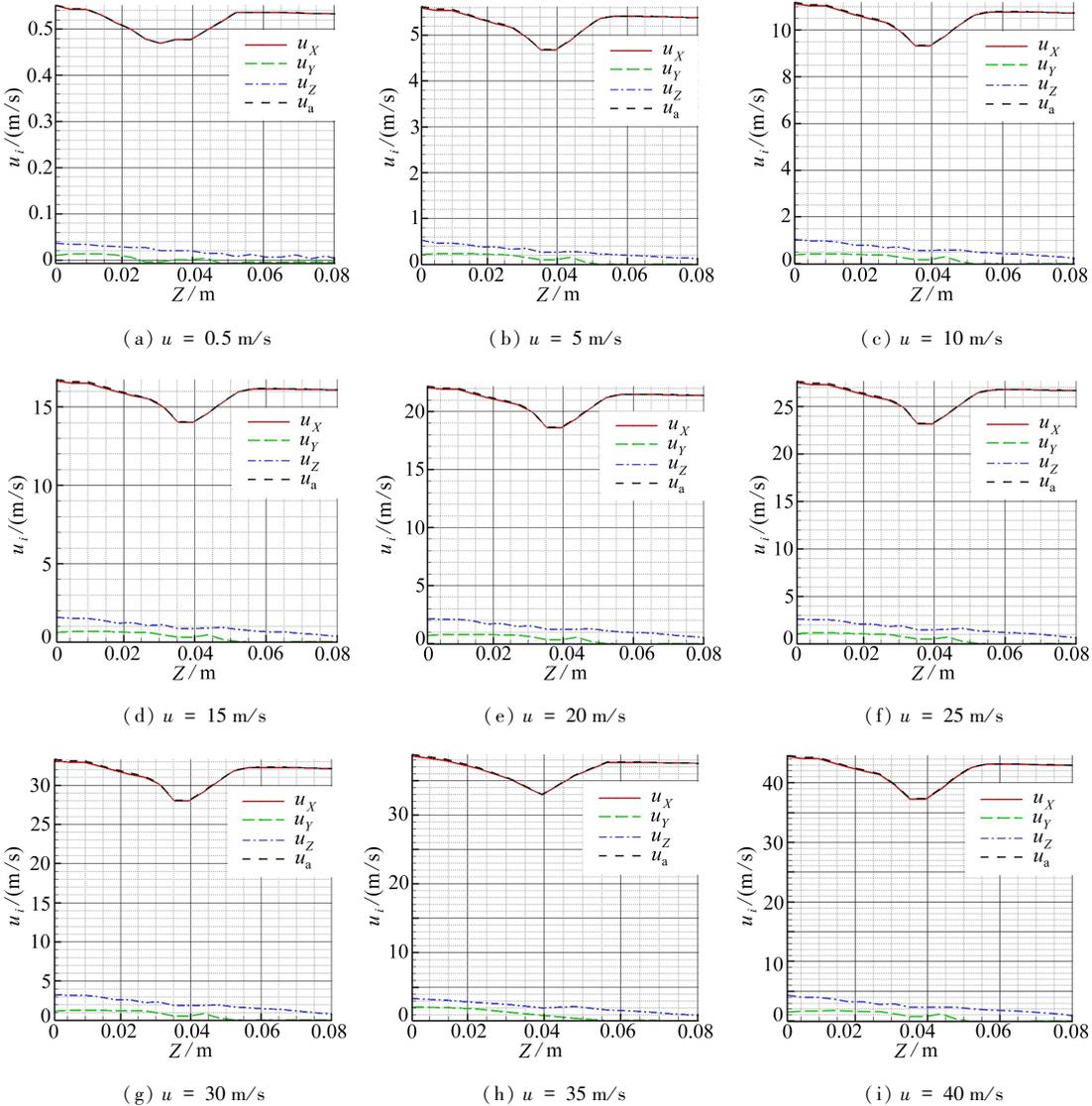


图 5 不同来流速度下  $X$ - $Y$  面上的速度平均值

Fig.5 The average velocity of  $X$ - $Y$  plane at different inflow velocities

由图 5 可以看出,沿  $Z$  轴方向,面平均速度  $u_a$  的值在探头中心线 ( $Z = 0.04$  m) 以左部位达到最低值,而在各种情况下,由于在探头中心线平面内流体受到超声速测速仪支杆等的影响最小,因此此处的速度平均值均与给定来流值最为接近。

### 3.4 研究结果分析

随后,着重分析了小球中心截面,即测速仪发射接收装置的区域截面上的速度变化情况,如图6和图7所示。由表2、3可以看到截面上平均速度与来流速度的误差百分比的空间分布趋势,在速度为20~30 m/s的范围内误差值最小,而在低速(小于5 m/s)和高速(大于40 m/s)的误差相对来说比较大,但误差百分比都没有大于3.5%,这说明该测速仪的设计精度还是比较高的。

表2 探头中心  $Z = 0.048\ 0\ \text{m}$  截面上速度平均误差率

Table 2 The errors of average velocity for  $Z = 0.048\ 0\ \text{m}$

inflow velocity $u / (\text{m/s})$	0.5	5	10	15	20	25	30	35	40
average velocity $u_a / (\text{m/s})$	0.515 8	5.157	10.253 5	15.348 3	20.372 4	25.408 7	30.590 7	35.779 6	41.137 9
error specific value $\delta_a / \%$	3.16	3.14	2.54	2.32	1.86	1.63	1.97	2.23	2.84

表3 测速仪中心区域所有截面上速度平均误差率

Table 3 The errors of average velocity in all cross sections

inflow velocity $u / (\text{m/s})$	0.5	2	5	10	15	20	25	30	35	40
average velocity $u_a / (\text{m/s})$	0.519 0	2.068 4	5.282 3	10.527 1	15.781 6	20.964 6	26.169 7	31.521 8	36.853 7	42.097 1
error specific value $\delta_a / \%$	3.8	3.42	5.65	5.27	5.21	4.82	4.68	5.07	5.3	5.24

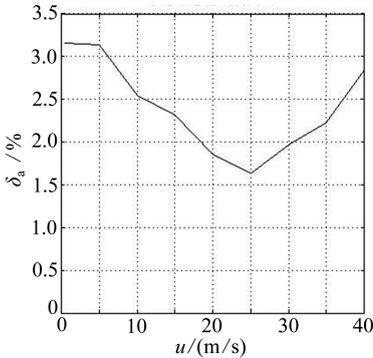


图6 探头中心  $Z = 0.048\ 0\ \text{m}$  截面上速度平均误差率

Fig.6 The errors of average velocity for  $Z = 0.048\ 0\ \text{m}$

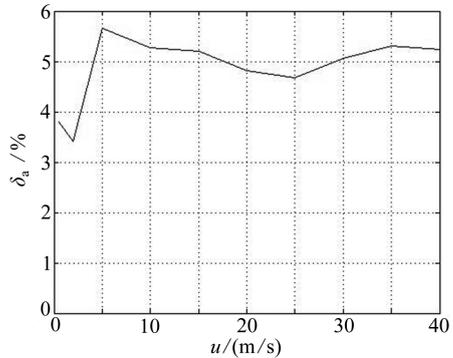


图7 测速仪中心区域所有截面上速度平均误差率

Fig.7 The errors of average velocity in all cross sections

## 4 结 论

根据测速仪的测速原理,本研究采用计算流体力学方法数值模拟了从低速到高速的不同来流风速下的绕流流场,从数值模拟结果可以得到如下结论:

- 1) 测速仪模型内部的平均速度比来流风速要大,理论分析与数值模拟均支持该结论。
- 2) 本测速仪的最佳测速点为4个探头中心点连线处,在由4个探头中心线组成的平面上,流速面平均值最接近来流速度。
- 3) 在低速、中速、高速和层流、湍流状态下利用本测速仪均可得到满足误差要求的速度测

量结果。

总之,采用计算流体力学方法可以量化描述模型对风场的影响程度,可以准确地预测最佳测速点,以判断测速仪模型结构对中心区域风速的影响程度,从而为后续对测速仪模型进行设计和优化提供理论依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 彭艳,张宏升,许飞,王凯,康凌,张霁琛. 风杯风速计测风误差的分析研究与订正方法[J]. 气象水文海洋仪器, 2003, 20(2): 5-15.(PENG Yan, ZHANG Hong-sheng, XU Fei, WANG Kai, KANG Ling, ZHANG Ai-chen. The wind cup anemometer wind error analysis and correction method[J]. *Meteorological Hydrological and Marine Instrument*, 2003, 20(2): 5-15.(in Chinese))
- [2] 黄健,杨金波,夏光滨. 手持式超声波风向风速仪动态比对试验方法研究[J]. 科技信息, 2012(15): 69-70.(HUANG Jian, YANG Jin-bo, XIA Guang-bing. Handheld ultrasonic anemometer wind dynamic comparative test method research[J]. *Science & Technology Information*, 2012(15): 69-70.(in Chinese))
- [3] 曹可劲,崔国恒,朱银兵. 超声波风速仪理论建模与分析[J]. 声学与电子工程, 2010(1): 39-42.(CAO Ke-jin, CUI Guo-heng, ZHU Yin-bing. Ultrasonic anemometer theory modeling and analysis[J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2010(1): 39-42.(in Chinese))
- [4] 黄颖辉. 基于 DSP 的超声风速测量[J]. 信息技术, 2008(11): 107-110.(HUANG Ying-hui. Ultrasonic velocity measurement based on DSP[J]. *Information Technology*, 2008(11): 107-110.(in Chinese))
- [5] 丁向辉,李平. 基于 FPGA 和 DSP 的超声波风向风速测量系统[J]. 应用声学, 2011, 30(1): 48-54. (DING Xiang-hui, LI Ping. The ultrasonic wind speed measurement system based on FPGA and DSP[J]. *Applied Acoustics*, 2011, 30(1): 48-54.(in Chinese))
- [6] 李增志,黄峰,朱福萌,王金刚. 超声风速温度计的误差分析与检定方法研究[J]. 气象研究与应用, 2009, 30(1): 60-64.(LI Zeng-zhi, HUANG Feng, ZHU Fu-meng, WANG Jin-gang. Ultrasonic wind temperature instrument error analysis and detection methods of research[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2009, 30(1): 60-64.(in Chinese))
- [7] Jasak H. OpenFOAM: open source CFD in research and industry[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2009, 1(2): 89-94.
- [8] OpenFOAM UserGuide[K]. version 2.2, 2013.
- [9] 查晶晶. 基于 OpenFOAM 的数值造波与消波模型及其应用[D]. 硕士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2011.(ZHA Jing-jing. Based on OpenFOAM numerical wavemaker and wavebreaker model and applications[D]. Master Thesis. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.(in Chinese))
- [10] 郑巢生. 基于 OpenFOAM 的空泡流数值模拟方法研究[D]. 硕士学位论文. 北京: 中国舰船研究院, 2012.(ZHENG Chao-sheng. Based on OpenFOAM cavity flow numerical simulation research[D]. Master Thesis. Beijing: China Academy of Ships, 2012.(in Chinese))

# Computational Fluid Dynamics Numerical Simulation of an Ultrasonic Velocimeter

GUAN Hui<sup>1</sup>, SUN Xue-jin<sup>1</sup>, XIONG Ying<sup>2</sup>, WEI Ke-jing<sup>1</sup>, YANG Qi-dong<sup>3</sup>

(1. *College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, P.R.China;*

2. *State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment (Dalian University of Technology), Dalian, Liaoning 116024, P.R.China;*

3. *Shanghai Meteorological Instrument Factory Co., Ltd., Shanghai 201209, P.R.China)*

(Recommended by WU Chui-jie, M. AMM Editorial Board)

**Abstract:** An ultrasonic velocimeter is a device with ultrasonic transmitter-receiver to detect the time between transmission and reception of ultrasonic waves and to calculate the velocity of fluid flow. The current domestic studies mainly focus on how to eliminate the measurement errors, but spare little attention to the influence of the model structure on the measuring wind field. In order to investigate the accuracy of a model velocimeter, the impact of the model structure on the wind velocity in the measuring wind field was addressed, the computational fluid dynamics (CFD) method was used to simulate the flow fields of different incoming flows from low speed to high, and to calculate the velocity profiles in the central area of the velocimeter and the average velocities in different cross sections. Consequently, the interference effect of the model velocimeter structure on the velocity in the central area of measurement was evaluated. The research results show that the velocities measured on the plane at the tops of measuring balls are the most accurate in spite of low or high incoming flow velocities. Therefore, the CFD method is proved to be a powerful tool for the model design of high-accuracy velocimeters.

**Key words:** ultrasonic velocimeter; computational fluid dynamics numerical simulation; finite volume method