

Study on Flow Field Adaptability of New Inserted Electromagnetic Flowmeter

Zhilei Ma¹, Xiaojing Li²

¹School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin

²Engineering Teaching Practice Training Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin

Email: zhileime@163.com

Received: Jul. 30th, 2017; accepted: Aug. 13th, 2017; published: Aug. 18th, 2017

Abstract

The working principle of the inserted electromagnetic flowmeter is based on Faraday's law of electromagnetic induction, when the gas or liquid medium passes through the sensor probe, the magnetic induction line is cut and the magnetic induction electromotive force is generated. Therefore, the distribution of the flow field around the probe will have a great influence on the measurement results of the flowmeter. In this paper, fluent fluid simulation software is used to simulate and analyze various geometric models of electromagnetic flowmeter sensors. The high-speed flow around the sensor and the boundary layer are observed, and the influence of the flow field around the sensor on the electrode is studied. The physical structure of the sensor is optimized; the probe position is designed and installed on both sides of the sensor, and the physical structure model of the cylinder is changed into elliptical and elliptic water drop type. Through further modeling and simulation, it is found that the signal intensity and stability of elliptic water drop sensor are higher.

Keywords

Insertion Electromagnetic Flow Sensor, Flow Field Analysis, Flow Field around a Cylinder, Ellipse Model, Elliptic Water Drop Model

新型插入式电磁流量计流场适应性研究

马志垒¹, 李小京²

¹天津工业大学, 电气工程与自动化学院, 天津

²天津工业大学, 工程教学实习训练中心, 天津

Email: zhileime@163.com

收稿日期: 2017年7月30日; 录用日期: 2017年8月13日; 发布日期: 2017年8月18日

摘要

插入式电磁流量计工作原理是基于法拉第电磁感应定律, 管道中气体、液体介质流经传感器探头时切割磁感线, 引起磁感应电动势, 因此探头周边流场的分布情况对流量计的测量结果会产生比较大的影响。文中采用Fluent流体仿真软件对电磁流量计传感器的多种几何模型进行仿真分析, 观察传感器在流场中形成的高速绕流区域和边界层, 研究传感器周边流场变化给电极带来的影响。提出将传感器的物理结构进行优化, 将传感器的探头位置设计安装于传感器两边, 并将圆柱体的物理结构模型改成椭圆型和椭圆水滴型。通过进一步建模仿真发现, 椭圆水滴型传感器测量的信号强度更强、稳定性也较高。

关键词

插入式电磁流量计, 流场分析, 圆柱绕流, 椭圆模型, 椭圆水滴模型

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

插入式电磁流量计通常包含传感器和变送器两部分。传感器主要是用来测量介质流动切割磁感线产生的感应电动势, 并将其传输到变送器; 变送器将此感应电动势信号进行放大, 并将放大后的信号转换成可以直观检测到的标准输出信号[1]。

通常情况下, 插入式电磁流量计探头普遍安装于底侧区域, 但是这样设计的弊端是检测到的信号会比较微弱而不宜被检测到。文中提出将探头安装于传感器两侧, 利用传感器两侧的绕流引起的高速流场信号来提高信噪比。普通插入式流量计传感器的外部形状是圆柱体, 周围的绕流作用会使外部流场带来比较大的波动。本文先从优化传统插入式电磁流量计物理结构的角度出发, 先进行理论推导分析, 进一步提出了椭圆水滴型的物理外形。

2. 插入式流量计流场分析

2.1. 插入式流量计结构分析

传感器插入管道时, 介质在流过探头时将产生绕流现象, 传感器周围会有比较大的流场波动, 电极测量到的信号稳定性差, 波动大[2]。文中采用 CFD 技术对传感器的物理结构建模, 分析传感器还有电极周边的流场分布情况, 进而为选择最佳的传感器模型提供设计方案和依据。

通常, 插入式流量计结构有以下两种设计模型, 传感器外形都是圆柱体, 主要区别在于电极的安置位置, 一种是安置于传感器的两侧(以下简称结构 I), 一种是安置于传感器的底端(以下简称结构 II) [3], 模型 I、模型 II 分别如图 1 所示。

2.2. 插入式电磁流量计流场分析

文中采用 Fluent 流体仿真软件对传感器周边流场进行建模仿真, 雷诺数 $Re = \rho v d / \mu$, 参数 d 、 μ 和 v 分别代表特征直径、运动粘度和流速, 雷诺数如表 1 所示。

三维模型仿真结果不便于观测, 并且要对模型内部的层面的计算结果进行观察, 因此要创建一些内部面。利用 Gambit 构建仿真模型, 重点观测电极所处区域周边流场[4]。

2.3. 模型 I 传感器流场分析

文中主要研究电极周围的流场分布情况, 因为有圆柱绕流的影响, 所以我们观测电极所在平面两侧流场的变化情况。进口流速设定 1 m/s, 文中采用速度等值图来观测电极所处位置的流场的变化情况, 传感器速度等值图如下图 2 所示。

Table 1. Inlet velocity

表 1. 进口流速

Re	特征直径 d (m)	运动粘度 μ (Pa.s)	流速 v (m/s)
2×10^4			1
6×10^4	0.02	10^{-3}	3
10^5			5

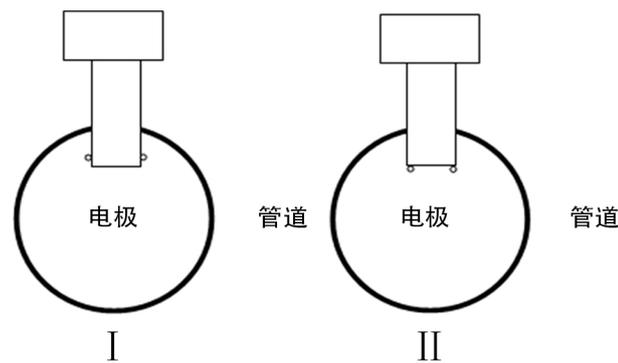


Figure 1. Inserted electromagnetic flowmeter structure I (II)

图 1. 插入式流量计模型 I (II)

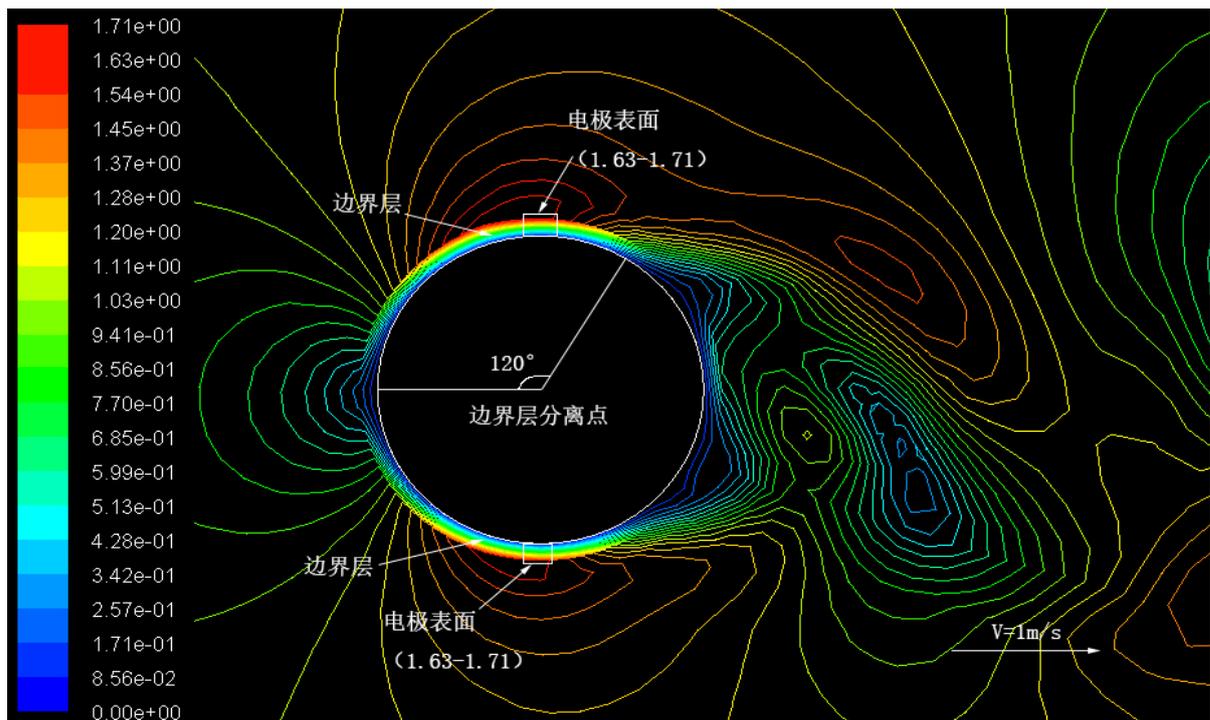


Figure 2. $z = 0.06$ m sensor speed contours

图 2. $z = 0.06$ m 流量计速度等值图

从图 2 可以发现, 传感器周边产生圆柱绕流, 雷诺数 $Re = 2 \times 10^4$, 此时处于亚临界, 传感器尾流变化成湍流态, 边界层状态仍是层流态[5], 尾部有涡街现象产生。

由图 2 可以发现, 水流流经流量计的时候, 流量计周围的流场会受到圆柱绕流影响, 两侧部分产生了高速流场, 水流无法很好地贴合流量计后半段壁面流动, 致使流速减小, 在 120° 时, 边界层开始产生分离现象, 产生“尾涡区”, 这在一定程度上破坏了周围流场的稳定性, 这时信号测量稳定性较差。

2.4. 模型 II 传感器流场分析

进口设定流速 1 m/s , 速度矢量云图如图 3 所示。

图 3 是圆管 x 轴方向平面图, 从图 5 发现, 水流受到传感器的阻挡, 其流速方向改向传感器右下区域, 右下侧部区域流速较高, 而此时底面的流速较小, 由图中可以明显发现在传感器背侧有较大涡流区域。将电极所处部分区域放大, 速度等值图如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 虽然电极位置安装于底面, 削弱了绕流作用的影响, 但此时测量到的流场信号强度不强, 引起传感器信噪比较低。

2.5. 模型 I 与模型 II 传感器对比分析

对比模型 I 与模型 II 仿真结果我们知道, 这两种模型传感器各有优点和缺点。

模型 I 传感器的优点: 由于绕流作用, 探头此时检测到的信号强度较强; 缺点: 在距离探头较近的区域, 传感器的边界层发生分离, 电极周边流场产生了较大波动, 探头检测到的信号稳定性较差、波动较大。

模型 II 传感器的优点: 由于我们将探头安装于底侧, 由于远离“尾涡区”, 探头周围流场相对稳定

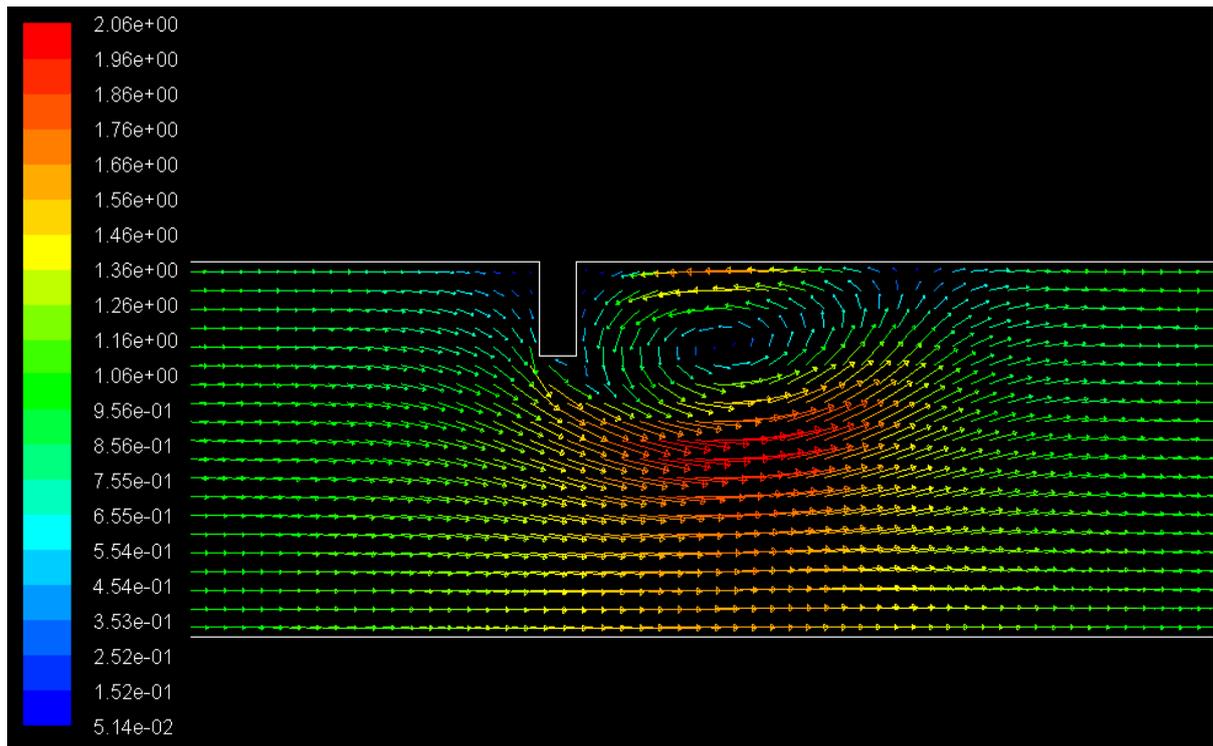


Figure 3. $x = 0.02 \text{ m}$ plane vector cloud image

图 3. $x = 0.02 \text{ m}$ 平面矢量云图

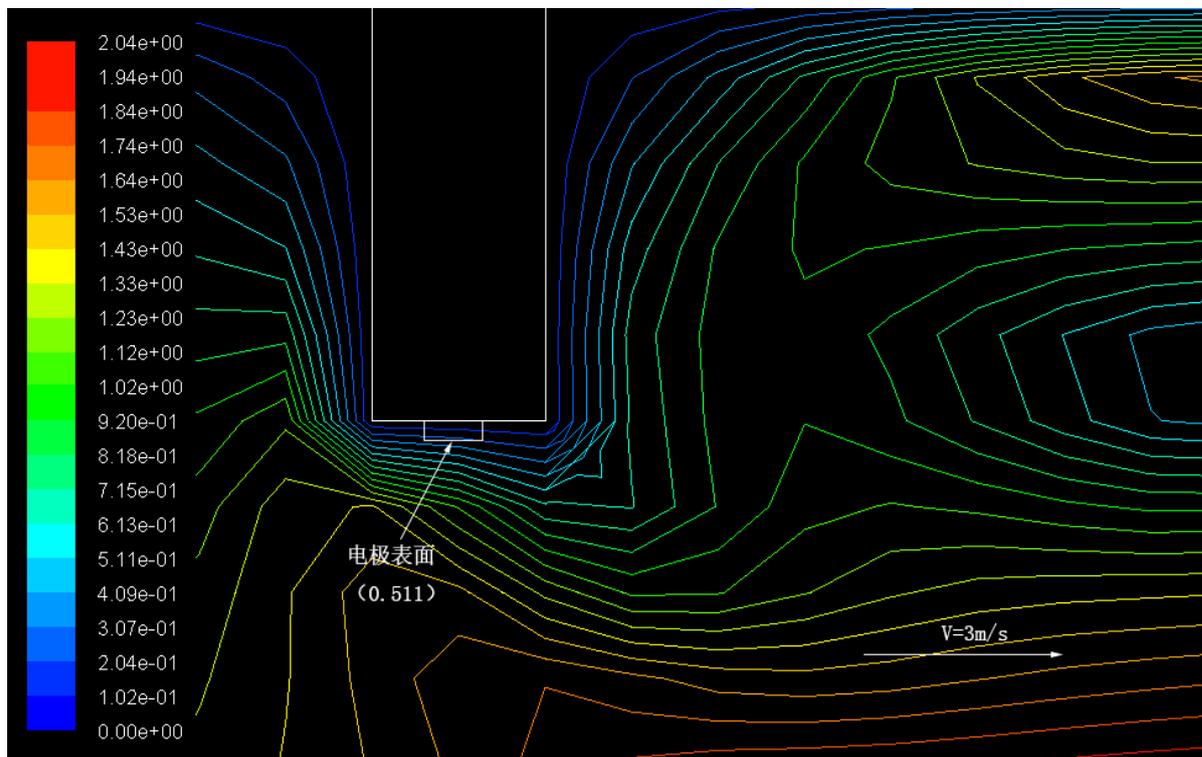


Figure 4. $x = 0.02$ m plane velocity equivalence partial enlargement

图 4. $x = 0.02$ m 平面速度等值放大图

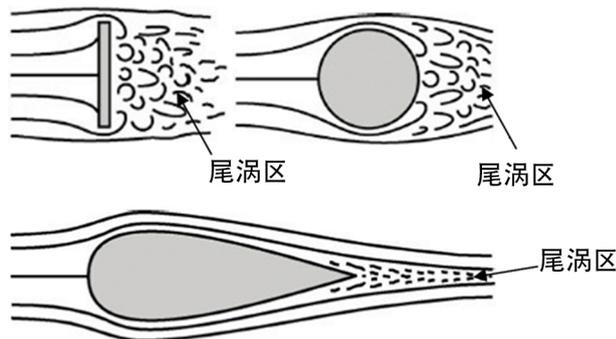


Figure 5. Flow field of each shape object

图 5. 不同物体形状流场

些；缺点：从图 3 和图 4 我们可以发现，虽然传感器右下侧流场较高，但是在接近底面的区域流场速度不高，探头由于处在此流场，因此测量到的信号强度不如模型 I 强。

因此，上述模型的流量计不能够满足稳定性和信号强度的双重要求。目前常见传感器大都采用模型 II 设计，但当介质流速较低时，探头检测到的信号强度极其微弱，传感器信噪比将会受到较大影响。

文中计划采用模型 I，即将探头安装于传感器两侧，利用圆柱绕流带来的高速流场，提高探头探测能力。但由于此时边界层有分离脱落现象，探头周边流场信号波动变化较大，稳定性不高。

3. 新型插入式流量计流场分析

模型 I 传感器探测信号不稳定，是因为探头的安装位置距离边界层分离点处较近所引起的，因为受到“尾涡区”的影响，探头周边流场波动较大，探头检测信号稳定性也不高。

较为有效的方法就是使传感器压差阻力减小, 进而使边界层的分离点尽量向后推迟。绕流物体的形状对压差阻力有较大影响因素, 为此文中从改变物体外形着手, 来进一步研究怎样使压差阻力减小。

由伯努力(Bernoulli)方程可知, 水流动能变化量的大小能够影响物体表面压强变化量, 他们之间成正相关:

$$\frac{1}{2}\rho V^2 + P_i = C \quad (1)$$

等式左边 P_i 表示单位流体介质体积上压力的势能, $\frac{1}{2}\rho V^2$ 表示单位流体介质体积上动能, 等式右边为常数 C 。

由于粘性力影响, 介质流经物体表面时, 物体表面介质速度会减小。流体在流到物体后半部分时, 边界层会发生分离, 进而产生涡流。而伯努力原理告诉我们, 流体的动能与势能的和是一个定量, 二者是反比关系, 所以“尾涡区”的压力势能势必会降低, 从而形成低压区。根据压差阻力公式(1), 物体压差阻力的决定性因素是物体与水流相互作用的最大横截面积, 而压差阻力又被物体前后的压强差所直接影响, 这个压强差也叫做压强梯度[6]。

为尽量降低压差的阻力, 降低因物体后半部流动减速过快引起的流动分离, 设计外形的时候, 尽量让物体的后部流动速度缓慢降低, 为此引出使物体得形状由圆柱变为前面圆后面尖的流线体, 比如外形椭圆水滴状物体, 水流能够较好地经过流线型物体的表面, 而几乎没有涡流现象[7]。

流体的运动中, 流线型的物体所受阻力很小, 压差得阻力也很小, 摩擦阻力主要控制绕流的阻力。

3.1. 椭圆水滴型电磁流量计流场分析

流线型主要有三类, 卡克斯流线型、双半椭圆型与抛物线 + 半椭圆型。

分别对上面不同流线型用 Fluent 流体仿真软件进行仿真, 流速不相同, 雷诺数也不相同, 不同的流线型的摩擦阻力和压差阻力关系图 6 如下所示。

综上分析知道, 以上三种流线型当中, 双半椭圆型与抛物线 + 半椭圆型流线体的压差阻力相对较小, 所以分别选择双半椭圆型与抛物线 + 半椭圆型流线体来设计传感器的外形[8]。

(1) 由第一节结论可知, 相比模型 II 的传感器来说, 模型 I 传感器信号的探测强度更强, 因此笔者计划将探头安装于传感器两边;

(2) 通常情况下, 传感器外部形状多为圆柱状, 由于绕流作用的产生, 探头后面将有涡街现象, 进而引起探头周围的流场波动较大, 探测信号也不稳定, 所以笔者选用传感器外形的横截面是双半椭圆型的椭圆型柱体和抛物线 + 半椭圆型的椭圆水滴型柱体, 尽量使传感器得边界层分离点往后边推迟, 将探头处于稳定的流场中。与普通圆柱型比较, 这两种流量计和流场流动贴合度较好。

由于传统圆柱型的插入式电磁流量计由于自身形状不可避免的会对所测流场产生一定干扰, 电极检测到的信号不够理想, 本文计划分析设计出一种信号探测强度较强, 探测信号稳定的传感器, 为此我们还要对双半椭圆型的椭圆型柱体和抛物线 + 半椭圆型的椭圆水滴型柱体模型进一步分析。

3.2. 椭圆水滴型电磁流量计建模仿真

用 Fluent 流体仿真软件模拟流场仿真, 设定水流流速为 3 m/s, 对管道中流场的情况进行分析, 由于探头安装在传感器两边, 本文需要分析探头周边流场分布情形, 所以我们选择 z 平面视图来观测传感器的两边流场分布。

由前面分析知道, 模型 I 流量计: 流量计的探头安装于传感器的两边, 外部结构是圆柱形, 为了更加方便的将模型 I 流量计, 椭圆型流量计, 椭圆水滴型流量计流场进行直观对比, 三种流量计 Fluent 仿真图如图 7, 图 8 和图 9 所示。

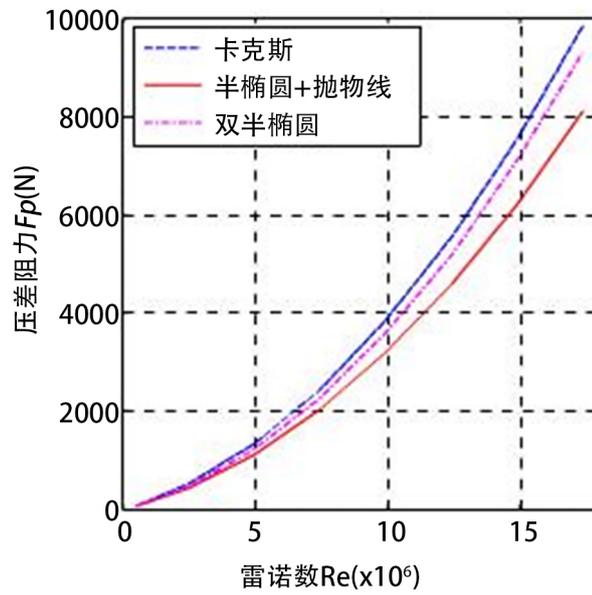


Figure 6. Simulation results of turbulent pressure differential resistance
图 6. 湍流下压差阻力仿真

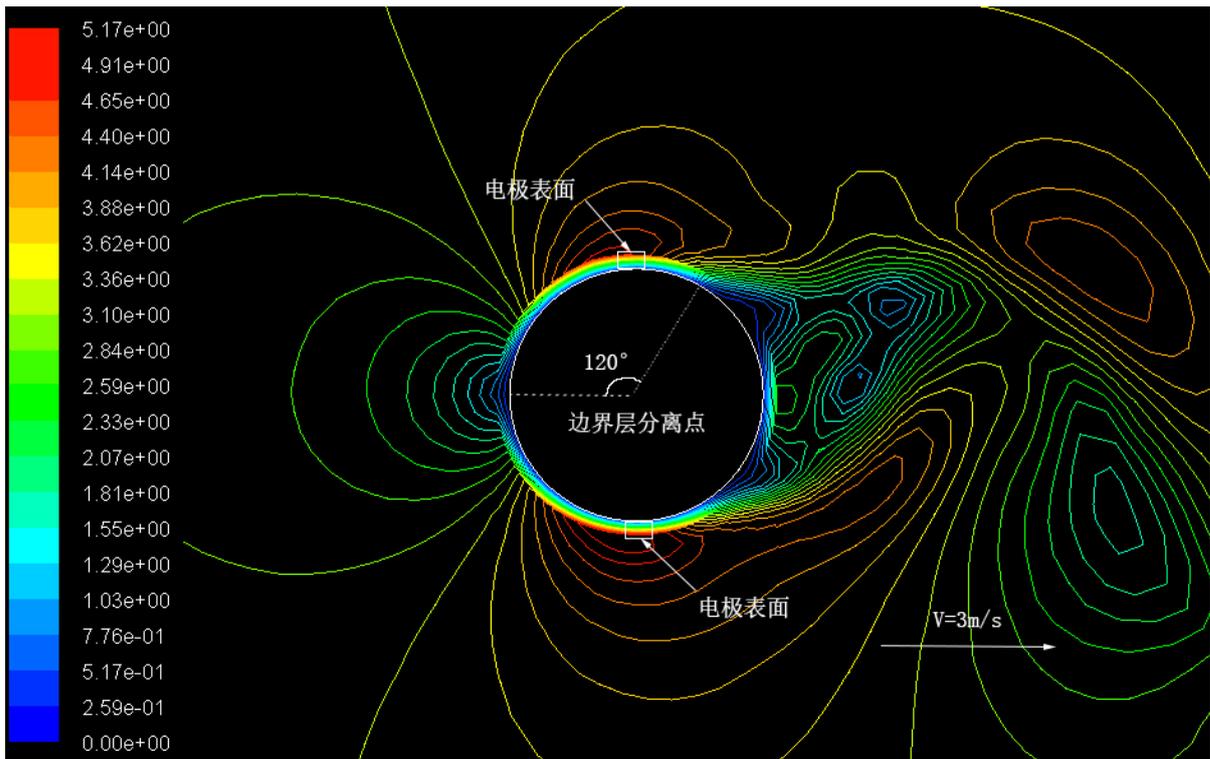


Figure 7. Speed contours of structure a sensor
图 7. 模型 I 流量计速度的等值图

模型 I 流量计：从图 7 可知，流量计两边引起高速流场，流速最大为 5.17 m/s，边界层在 120°时产生分离，离探头后边不远处有“尾涡区”，“尾涡区”将引起不稳定的流场，此时探头位于高速、波动流场中。

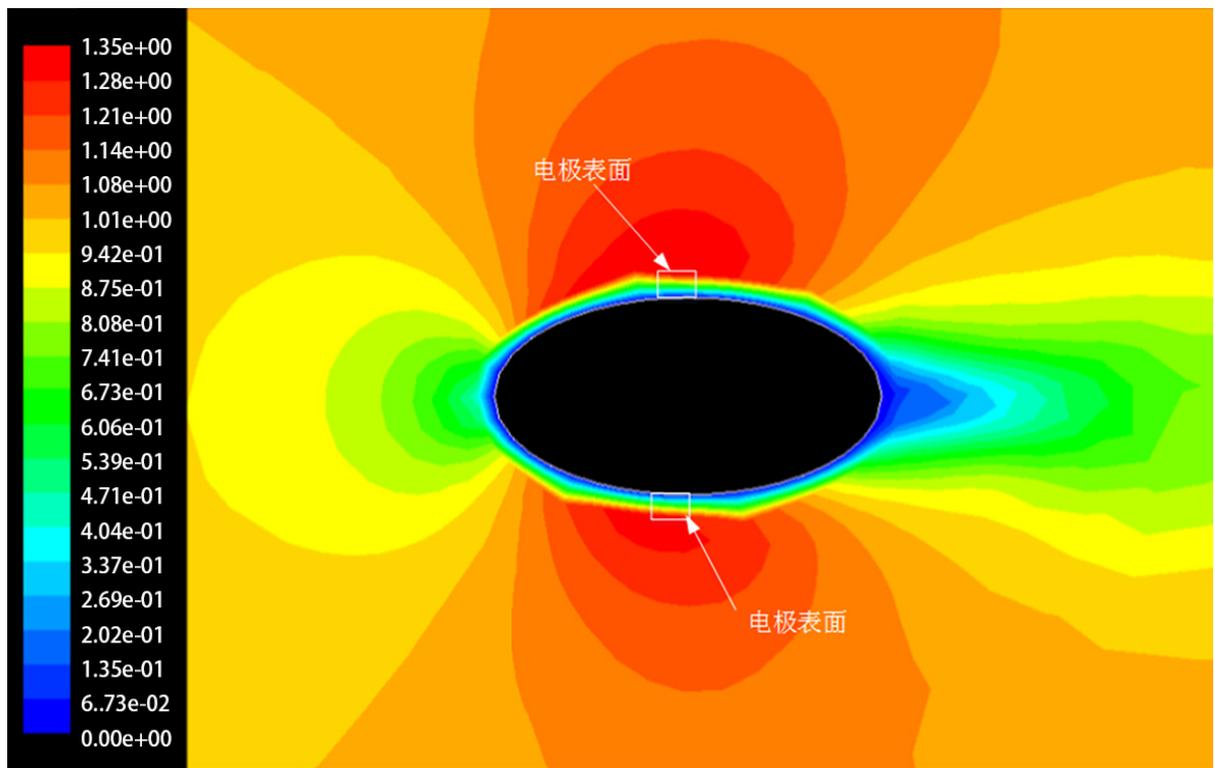


Figure 8. Velocity profile of elliptic flowmeter
图 8. 椭圆型流量计速度云图

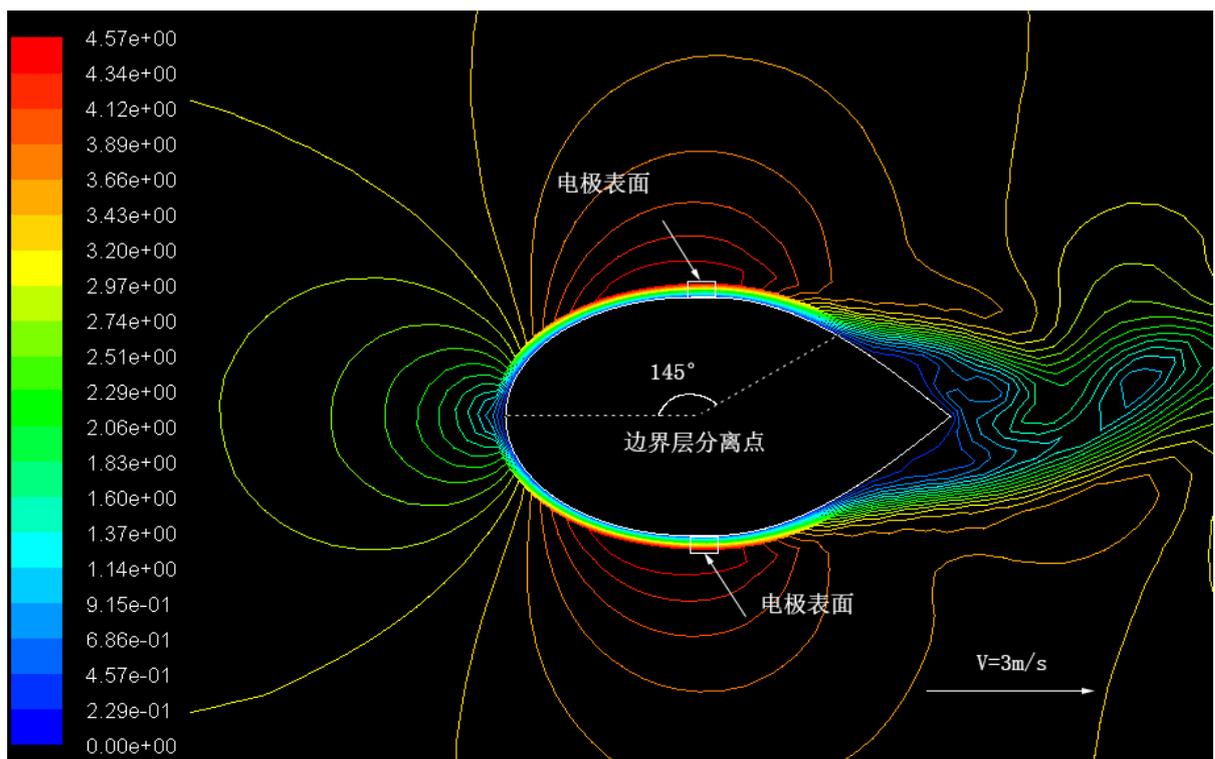


Figure 9. Speed contour of water drop type sensor
图 9. 椭圆水滴型流量计速度等值图

椭圆型流量计: 从图 8 可以发现, 根据选取电极所在平面放大后的速度云图进行观察, 可以看出, 水流流经椭圆型流量计的时候, 水流可以较好的贴合椭圆型流量计流动, “尾涡区”得到了很好的抑制, 流量计前后部分的压差阻力较圆柱型流量计要减小很多, 这就相对稳定了流量计周围的流场, 所以将流量计模型制作成椭圆型能使其在流场中的稳定性更强。

椭圆水滴型流量计: 从图 9 可以发现, 流量计两边有高速的流场, 流速最大值为 4.57 m/s, 边界层在 145°时产生分离, “尾涡区”尾迹逐渐变小。所以说, 流量计外部形状变化使边界层的分离产生了推迟, 探头也离“尾涡区”远了, 此时探头处在高速且较稳定流场中。

将探头所处区域局部放大, 观察模型 I 流量计和椭圆水滴型流量计的探头流场分布情况如图 10, 图 11 所示。

椭圆水滴流线型和流场流动贴合度较高, 由图 10 与图 11 对比发现, 椭圆水滴型边界层厚度相比较圆柱体边界层厚度而言, 明显变得较薄, 并且最大的流速范围也变宽了[9]。

模型 I 流量计: 由图 10 发现, 探头所处区域内的流场不太稳定, 探头处在速度等值线是(4.90~5.16) m/s 的范围, 探头测量到的信号会有波动。

椭圆水滴型流量计: 由图 11 发现, 速度等值线位 4.56 m/s 处范围变大, 将整个探头表面覆盖了, 此时探头所测量到的信号稳定相对较好。

经过对比发现, 相比普通圆柱型探头, 椭圆水滴型流量计的探头测量的流场的信号强度变化不大, 测量到的信号稳定变高, 信号波动变小, 信噪比得到了较大提升。

4. 结论

文中采用 Fluent 流体软件仿真分析了新型椭圆型和椭圆水滴型流量计的流场分布情况, 并且分别将其流场分布情况与普通圆柱型流量计进行比较, 主要进行了下面几点分析:

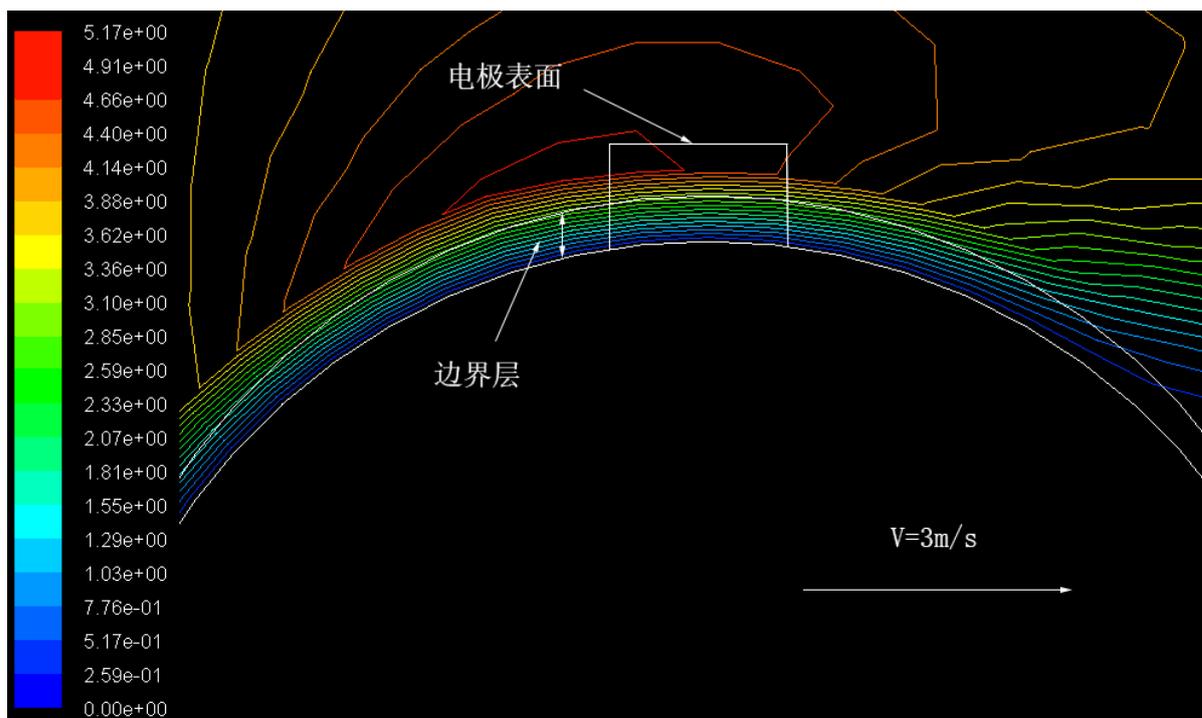


Figure 10. Enlarged drawing of electrode of structure a sensor

图 10. 模型 I 流量计探头局部图

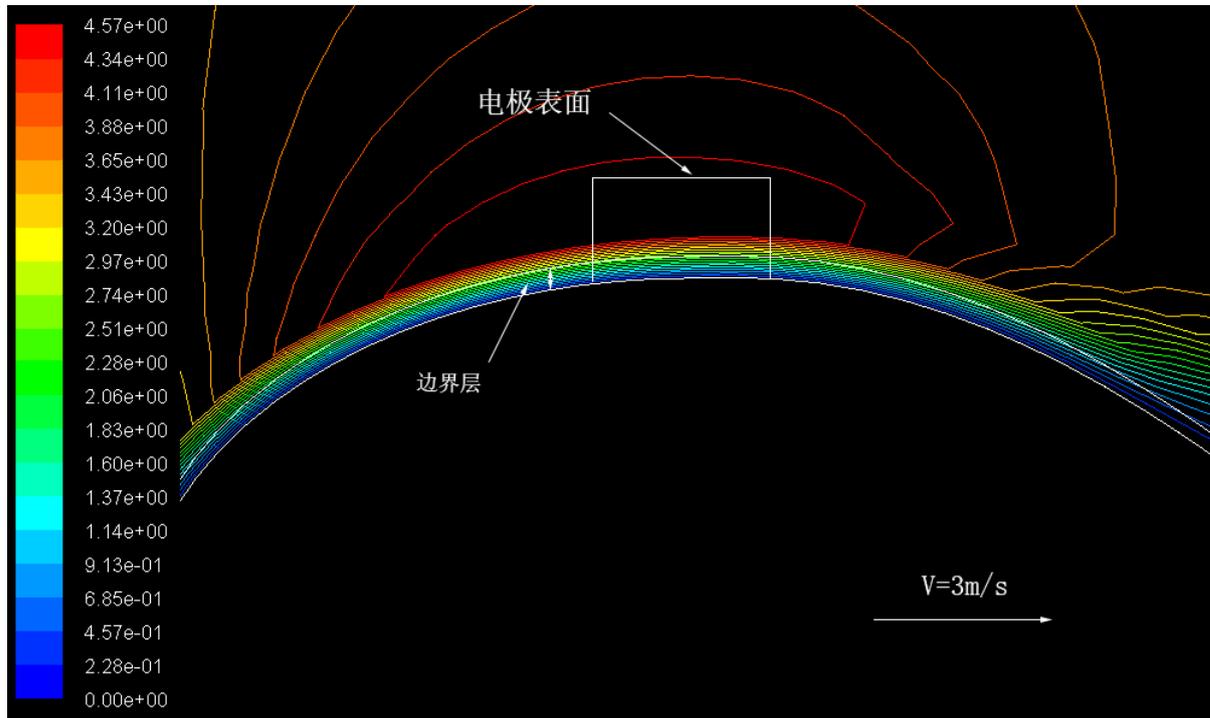


Figure 11. Large drawing of electrode of water drop sensor

图 11. 椭圆水滴型流量计探头局部图

(1) 采用 Fluent 流体软件对插入式电磁流量计的外部流场进行仿真分析, 通过仿真可以直观地观察到流体速度的分布状况, 通过对探头安装于流量计两侧以及底面不同的流场分布情况, 分析比较了探头安装不同位置的优缺点。最终确定将探头安置于有较强流场信号的位置: 即流量计的两边, 使探头的检测信号强度有较大提高。

(2) 将圆柱型流量计探头伸入圆管后, 流量计探头周围会产生圆柱绕流现象, 促使探头检测信号引起较大波动。所以文中提出将流量计外部机构由圆柱改为椭圆型和椭圆水滴流线型, 使压差阻力减小, 边界层分离点尽量的后延, 从而使探头处于较稳定的高速流场之中, 进一步使探头检测到的信号稳定性提高。

分别将模型 I 流量计与椭圆型流量计和椭圆水滴型流量计流场分布的分析仿真图进行对比, 我们发现椭圆水滴型流量计比模型 I 和椭圆型流量计测量信号的稳定性都要好, 较好的分析了椭圆水滴型流量计设计的可行性。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(61372011); 国家高技术研究发展(863)计划(2014AA093403)。

参考文献 (References)

- [1] 张学庆. 流量测量的意义及流量传感器的现状[J]. 石油化工自动化, 2005(5): 99-101.
- [2] 陈坚祯. 一种新型多电极插入式电磁流量传感器及其基础研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海大学, 2009.
- [3] 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表选用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 20-25.
- [4] 唐淼. 智能电磁流量计系统的设计与优化[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [5] 房元灿. 基于 CFD 技术的液压管道过滤系统研究及过滤结构优化设计[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳理工大

学, 2012.

- [6] Wang, H.F., Li, L. and Wu, Z.X. (2013) Research on the Straight Pipe Length of A + K Flowmeter When Single Elbow Is Installed in the Upstream. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, **39**, 477-481.
- [7] 李燕玲. 高雷诺数下圆柱绕流的三维数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 中国计量学院, 2014.
- [8] 沈丹平. 多电极插入式电磁流量计的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2009.
- [9] 全卫国, 李国光, 金秀章, 等. 用圆管中最大流速测量流量的实验研究[J]. 华北电力大学学报, 2001, 28(4): 39-42.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jsta@hanspub.org