



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

上游管道结构对超声波流量计测量精度影响分析

**Analysis of Influence of Upstream Pipeline Structure on
Measurement Accuracy of Ultrasonic Flowmeter**

姓 名 杨增静

学 院 智能制造学院

专 业 自动化

指导教师 邵欣

职 称 副教授

完成时间 2021.06.04



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

上游管道结构对超声波流量计测量精度影响分析

姓 名 杨增静

学 院 智能制造学院

专 业 自动化

指导教师 邵欣

职 称 副教授

完成时间 2021.06.04

天津中德应用技术大学
本科生毕业论文（设计）的声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

本人声明：该学位论文是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过论文的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

学位论文指导教师签名：

年 月 日

摘 要

本文针对超声波流量计的国内外应用现状,总结出工业及生活环境中超声波流量计的特点和影响超声波流量计测量精度上的误差因素。本文主要从了解超声波流量计的原理入手,系统地分析出换能器的安装效应、超声波传播时间的测量方法等关键因素所能引起的检测误差,以及掌握时差法流量计流体流速的计算方法的基础上研究上游管道结构、弯管角度、收缩管收敛角及圆弧半径、管壁粗糙程度、流体粘度对其检测精度的影响。此次研究中本人将采用 CFD-FLUENT 建立仿真系统及模型,结合多种安装效应及多种管道模型的超声波流量计,设计实验,分析影响因素并提出相应解决方案。其中实验通过考察管道入口速度、上游缓冲管道长度及结构等条件对于管道截面处流体速度分布的变化,研究弯管角度、收缩管收敛角及圆弧半径和管道内壁粗糙程度、被测流体的粘度等因素对超声波流量计测量精度的影响。

关键词: 超声波流量计; FLUENT; 上下游缓冲管道; 管道结构; 粗糙度; 粘度

ABSTRACT

Based on the application of ultrasonic flowmeter in recent years, the characteristics and influencing factors of ultrasonic flowmeter in the process of industrial and domestic use are summarized. This paper starts with the understanding of the principle of ultrasonic flowmeter, systematically analyzes the detection error caused by the installation effect of transducer, the measurement method of ultrasonic propagation time and other key factors, and studies the upstream pipeline structure, elbow angle, contraction tube convergence angle and arc radius, pipe wall roughness on the basis of mastering the calculation method of fluid velocity of time difference flowmeter. The influence of fluid viscosity on its detection accuracy. In this study, I will use CFD FLUENT to establish the simulation system and model, combined with a variety of installation effects and a variety of pipe models of ultrasonic flowmeter, design experiments, analyze the influencing factors and put forward the corresponding solutions. The experiment is based on the effect of import flow rate, upstream buffer pipe length and structure on the distribution of fluid velocity, so as to study the influence of natural conditions such as elbow angle, shrink tube convergence angle, shrink tube arc radius, roughness of pipe wall, viscosity of measuring fluid, etc. on ultrasonic flow meter.

Key words: ultrasonic flowmeter; FLUENT; upstream and downstream buffer pipe; pipe structure; roughness; viscosity

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 超声波流量计的研究背景及意义.....	1
1.2 超声波流量计的发展历史及国内外应用现状.....	1
1.2.1 超声波流量计的发展历史.....	1
1.2.2 超声波流量计的国内外应用状况.....	3
1.3 超声波流量计的特点.....	4
1.4 论文所研究的主要内容.....	5
第二章 超声波流量计的测量原理及仿真模型的建立.....	6
2.1 时差法测量原理.....	6
2.2 提高流量计测量精度的方法.....	8
2.3 FLUENT 介绍.....	9
2.4 仿真建模流程介绍.....	9
2.5 本章小结.....	11
第三章 上游管道结构对测量结果的影响.....	12
3.1 上下游缓冲管道与超声波流量计的仿真分析.....	12
3.1.1 上下游缓冲管道的直管段长度对测量精度的影响.....	12
3.1.2 FLUENT 仿真结果与分析.....	13
3.2 弯管与超声波流量计的仿真分析.....	14
3.2.1 弯管的弯度对测量精度的影响.....	14
3.2.2 FLUENT 仿真结果与分析.....	16
3.3 收缩管与超声波流量计的仿真分析.....	18
3.3.1 收缩管的过渡段、直管段长度对测量精度的影响.....	19
3.3.2 FLUENT 仿真结果与分析.....	20
3.4 本章小结.....	22
第四章 管壁粗糙程度对测量结果的影响.....	23
4.1 粗糙度对测量精度的影响.....	23
4.2 FLUENT 仿真结果与分析.....	24
4.3 本章小结.....	26
第五章 流体的粘度对测量的影响分析.....	27

5.1 流体粘度对测量精度的影响.....	27
5.2 FLUENT 仿真结果与分析.....	28
5.3 本章小结.....	31
第六章 超声波流量计性能实际测试.....	32
6.1 基本误差实验测试.....	33
6.2 稳定性实验测试.....	34
6.3 重复性实验测试.....	35
6.4 实际工况现场测试.....	35
6.5 本章小结.....	37
第七章 结论.....	38
参考文献.....	40
致谢.....	43

第一章 绪论

1.1 超声波流量计的研究背景及意义

超声波流量计投入市场将近 20 年左右，是近些年发展最为迅速的流量仪表之一。它不仅在工业、农业、物业的发展需求上提供着很大的帮助，而且在医疗、食品、海洋观察和河川测量等领域也被广泛的使用^[1]。

随着人们生活的快节奏和对生活的高要求，以及工业上的高精度水准，都摆出了能源、环境、技术等问题，这就使得在自动化流量检测领域内增添了很多复杂课题。现如今，原有的仪表在一些特殊、复杂的测量环境或者对象中难以得到想要的精准^[2]。再紧接着石油和天然气的工业应用范围快速遍及，人们和各种商家、工厂看到了流量检测仪表的市场需求和其仪表所必要的精度和广泛的应用范围等，所以对流量计的各项功能和性价比有了很高的要求。因此开展高性能的流量检测仪表的研究，并给予开发和使其产业化，是对我国流量检测仪表工业发展的促进及增强了我国国内产品国际竞争力^[3-5]。

目前研制出可以进行非接触测量，且同其他流量计相较下有着可在大口径管道和被测流体是非电导质、粘度强、小流量或者强放射性、腐蚀性等环境中测量，这些较为突出的性能特点的超声波流量计^[6-9]。使得其应用范围也同时日趋扩大，突显出了它一系列的优势，迅速展开市场。当今，我国用于实用测量仪表的超声波流量计已在外国市场上显而易见^[10]。

然而就算是很不错的节能型且拥有超大的发展前途和广泛应用空间的超声波流量计，仍然有待改进的地方。就拿传统时差法来说，就极不适合用来测量小流量的管道，因为在测量过程中很难精准计算出声速，从而导致测量误差^[11-13]。现如今国外的超声波流量计价格昂贵，很难大规模的购买应用，而我国出产的大多数超声波流量计价格虽然相比较便宜，但其精度、性能等使用方面上达不到想要的预期。所以国内应加强对超声流量计的研究，使其在测量精度上有所改进，让国内生产的超声波流量计可以广泛应用，并在外国冲出一定的市场，这也正是本课题的研究意义^[14-16]。

1.2 超声波流量计的发展历史及国内外应用现状

1.2.1 超声波流量计的发展历史

现如今在工业生产中流量计的使用场合很多，但有些环境中需要非接触式测量、测量精度高并且对流体介质无要求、应用范围广的流量计。超声波流量计是

被大众公认的最适合大管径的流量计，它不仅符合以上要求，且超声波流量计还拥有着安装及检修方便、操作简单等优势^[17-20]。

19 世纪后到 20 世纪前，世界便出现了很多以节流理论的多种多样的流量计的原型。

1931 年，德国科学家 O. Rutten 发表了一种当时根本无法达到的技术，其中内容讲到要采用两个信号的时差来测量管道的流量，这也是关于通过声来测量流量的最早的参考文献。继第二次世界大战后，美国又进行了新的技术改革，补救了 1931 年无法实现的时差法，其方法为鸣环法，是利用声反复传播信号，扩大时差后再进行测量，提高了精准度。到 1955 年对应鸣环法的声循环法“马克松流量计”（Maxson Flowmeter）的出产后，便在航空方面有所应用，立下了工业阶段的里程碑。此后，超声波流量计的研制技术飞快进步，研究开发了射速偏转法以及多普勒等一系列的超声流量计^[21]。

在 20 世纪的 70 年代后，集成电路技术的飞速进步，使得对高速信号采样的精度达到了想要的水平。还因锁相技术的出现和应用，大大提升了超声波流量计的性能与稳定性，为超声波流量计在今后的工业应用上取代其他流量计提供了可能。90 年代以后，更因为新型材料技术、传感器技术以及智能信号处理技术的发展，超声波流量计的性能等方面都得到了大幅提高。这时虽然没有研制出适合小流量的流量计，但已经生产出受温度影响较小的频差法超声波流量计，其测量范围、灵敏度都比之前的流量计优秀，且大大提高了声速测量的精确度^[22-24]。

据查找的资料显示我国在 60 年代到 70 年代期间才开始对超声波流量计进行研究，最早是由北京大学及上海一家自动化研究所进行研制。80 年代中，开封和本溪工厂分别从美国、日本陆续引进相关关键技术，生产出一批能够代表 80 年代国际先进水平的超声波流量检测仪表，但其市场仍旧被国外产品所控制。当时在 90 年代初，国内的年产量估计到达 800~1000 台。紧接着标志着我国在超声波流量计发展道路正式开启的 JJG198-94 速度式流量计的检定规程于 1994 年 12 月正式出版并施行^[25-28]。

产品品类日益完善，超声波流量计的相关技术水平同时也有了很有效的提高，甚至已有一些规模化的超声波流量计企业，如汇中股份、迪纳声、海峰仪器等。而且根据我国超声波流量计应用范围的逐渐扩大，我们的市场需求也跟着不断增加。2019 年我国的超声波流量计市场规模已将近 10 亿元^[29]。

中国超声波流量计市场需求的不断增长吸引了很多外国厂家，有些外国厂家通过合资、独资以及经销代理等形式进入了中国市场，利用他们领先的技术等优势迅速抢占了国内超声波流量计的市场。然而，我们国内的企业通过多年的技术和市场积累，产生的市场竞争力越来越强，借助低价以及多年合作的渠道等方式

与国外厂家开展竞争。但中国流量检测技术起步较晚，从目前来看，与国外企业相比，国外对流量测量技术和流量测量仪表的研究相对较早，对很多方面都十分成熟^[30]。欧、美、日等工业发达国家的超声波流量计生产厂家的规模和研发水平都处于国际上的领先地位。当然，我国也努力加大对研发的投入，增强技术的创新能力，号召国内同行齐头并进，让中国自主研发、生产的流量仪表走向更高的台阶，未来可期。

1.2.2 超声波流量计的国内外应用状况

目前我国的总流量检测技术的发展趋势明显变快，多种多样的优秀流量仪表早已运用到工业化生产之中，可是每种流量仪表的性能指标都具有一定的差异，所应用得领域也大有不同，超声波流量计则能普遍地运用在各种场所，并且适用于农牧业、废水处理等多个领域。解决了工业上明暗渠、大流量等测量问题而带来运输上的困难。

近几年迅速开发的集成电路技术使研究人员研制出一种在实际安装场合中不用安装其测量元件的非接触式流量计。所以可在不易接触和观察的管道中测量，同时不会扰动流动状态，故不会造成附加的阻力。而且超声波流量计不仅可以测量液体、气体、甚至是对双向介质的流体的流量测量也不在话下，解决了强腐蚀性、非电导性、放射性等其他流量计不可避免的问题。作为节能型的流量计，在实际应用过程中，尤其是下水道等排脏污流的测量管道中，其检修及安装都要做到不影响生产管线的正常运行。便携式超声波流量计可在 2m 宽的明暗渠到 500m 宽的河流中测量，且利用在发电厂中的水轮机、汽轮机等大流量环境中的效率明显高于以前的皮脱管流速计^[31]。

以前超声波流量计虽然在我国燃气计量领域中有所发展，但居民家中燃气管道的管径小、安装环境尤为复杂，很难使超声波流量计精确测量流体的状态，致使超声波流量计在燃气表的应用前景下未得到很好的普及。如今由于天然气在我国使用范围逐渐扩大，计量天然气就成为各地区的思考问题，从而在问题中得到了较大程度的改善。在天然气管道安装过程中发现居民家中的管道呈分散分布，这就会导致需要很多的计量表装配在所有的零散处，这时就需要超声波流量计，其准确度高、影响因素小等特点在此处显现的尤为突出^[32]。

在可从应用领域划分为，适用于高压气体流量、适用于生产过程气体流量、适用于火炬气体流量，以及适用于贸易计量的 Q 型超声波流量计。总之超声波流量计的通用能力有着其它仪表无法与之相比的优势，进而超声波流量计渐渐成为人们的首选方式。

然而，中国对超声波流量计的生产及研究还是相对滞后的。近年来，国外的大型超声波流量计企业的大部分产品已经进入了国内市场，同时也推动了我国超

声波流量测量仪器的研发，使我国的生产厂家也渐渐增多，如南京的亚楠，唐山的汇中，武汉的泰隆，大连的先超等，但结合国际先进水平，我国的技术还存在一定差距。例如当今我国国内市场中的高档高精度的超声波流量计依旧是国外品牌产品，例如中国内高质量、高精度的产品始终是从国外进口的品牌产品，这样就产生了国内超声波流量计产品过剩，高档产品仍然由国外进口的市景问题。

1.3 超声波流量计的特点

超声波流量计是一种非接触式流量测量仪表，与传统流量计相比主要有如下特点^[34-36]：

1) 超声波流量计更适用于管径为矩形、大型圆形等大流量的管道的高精度测量。超声波流量计不受管壁厚度、管径、管道材料的限制，有很好的通用性，其制造成本无需考虑管径，任其测量管径可最大达到 1600mm。且在流量和管径越大的场合中，超声波流量计的精度越高。

2) 超声波流量计的结构更简单，在维护、使用和安装方面都很方便。再加上它在工业流量仪表中很突出的特点，即其换能器可安装在管道外侧，非接触测量的特性，不会对流体产生阻碍作用，这就减轻了临时检查管内的流量时的麻烦而且不会产生额外的压力损失。

3) 测量范围也就是量程比相比较很宽。就大多数被测流体而言，大到几米的大管径，小到小于 1cm 的小管径，每秒十几米的流速都可在超声波流量计的测量范围内，而且其可在很大的气压下甚至是真空下工作，允许的工作温度最高可达到上千度，响应时间可高达 24h。

4) 超声波流量计是在管道外侧进行测量，因此可实现不破坏流场、不受湿气和沉淀物的影响、无压力损失，部件不受磨损和流体腐蚀的要求。超声波流量计不仅可以对石油、天然气、水等常见流体进行测量，而且在高粘度、有腐蚀性、高温高压等复杂问题下也可轻松、准确地进行测量。

5) 拥有模拟及数字的方式可直接输出流体的累积、瞬时流量。除可用于测量流速和流量外，将其与微机联合起来一起使用，使其整体智能化后，使其附加自动测量流体速度、浓度、成分等参数的功能。

除了以上所概括的超声波流量计的特点，还有很多细小方面比以往的机械式、涡街及电磁式流量仪表做得优秀，如可双向计量；高重复性；上游直管段仅需 10D，下游直管段仅需 3D 即可；脉动流的精确测量；不随涡流和流速剖面的变化而变化；可测量质量流量；不受压力、温度、相对分子质量变化的影响；允许清管球自由的通过；有自我检测的特殊功能，能进行自检；能够忍受较长时间的超量程运行。

现如今有很多类型的超声波流量计被研究出来，应用在各种适宜的场合。

1.4 论文所研究的主要内容

从以上的介绍中可以了解到超声波流量计如今在燃气和农业等多个行业中广泛使用，尤其是近年天然气的范围突然扩大，超声波流量计因超强的适应能力和优势随着天然气的贸易输送等迅速展开市场。我国超声波流量计检测技术与其他工业大国相比起步较晚，发展较慢，很多技术水平的核心还不太成熟。

本文围绕利用 FLUENT 软件进行模拟搭建弯管、收缩管、上下游管道模型，进行仿真和计算，考察管道入口速度、上游缓冲管道长度及结构等条件对于管道截面处流体速度分布的变化，以此来研究弯管角度及管道内壁粗糙程度、测量流体的粘度等本身因素对超声波流量计的影响。有关本文章节内容分述如下：

第一章讲解本课题的相关研究背景及历史，表明论文主要研究的意义，给出文中的研究内容和研究发现，并讲述当下在各个领域中所适宜的超声波流量计的特点。

第二章熟悉掌握超声波流量计的检测技术，并讲述时差法超声波流量计的测量原理，同时根据测量原理进行相应的计算，计算出瞬时体积流率，以及列出提高流量计测量精度的几种方法并分析。最后简述 FLUENT 的应用及建模，此章节为下一步的任务做好了铺垫。

第三章利用 FLUENT 软件建立上下游缓冲管道、弯管、收缩管与超声波流量计模拟模型打下基础，并研究与流量计搭建后其干扰因素对测量精度的影响，并逐一分析其仿真结果。

第四章建立不同粗糙程度的流量计模型，研究管壁自身的粗糙程度对超声波流量计测量精度的影响，并利用 FLUENT 仿真结果进行分析。

第五章设计不同粘度的被测流体的管道模型，研究流体自身的粘度对超声波流量计测量精度的影响，并利用 FLUENT 仿真结果进行分析。

第六章基于前几章的仿真结果改进超声波流量计声道位置及补偿算法，并进行实际实验测试，并得出流量计是否符合实际测量中的要求。

第七章总结全文并对此次论文研究影响因素进行综合分析，以及讲述对此次课题所研究对象的发展展望。

第二章 超声波流量计的测量原理及仿真模型的建立

2.1 时差法测量原理

超声波流量计较以往的电磁式和机械式流量仪表而言，在测量气体、液体的流速方面上有许多优势，如超声波的适应能力性强、测量精度高，而且还有方便实际使用、非接触测量、数字化管理等特点。超声波流量计的测量一般有三种方式：信号数字化处理技术、多脉冲以及纠错技术，这三种测量方式各有偏重，而且效果非常明显。但是基于这三种测量方式之上，超声波流量计“时差法”则是一种新型测量方式。

我们了解到超声波流量计在进行流体计量的过程中，首先会从探头发射信号，信号穿过管壁、介质和另一侧管壁，然后被另一个探头接收，在这同时间里两个探头会同时发射及接受信号，但因介质流速的影响，此刻会有时间误差，可

以根据公式 $v = \frac{c^2}{2L} \Delta t$ (流速 v 、声速 C 、间距 L 、时间差 Δt) 来正确精准的计算出想要的数值。简而言之，传播速度差法求取流速的原理是计算传播速度之差与被测流体流速的比值，进一步得到流量。按照不同参数可分为时差法、频差法和相位差法。在这里我们主要讲述这种目前为止最受人们欢迎的时差法超声波流量计原理。

在研究时差法测量原理之前我们首先来熟悉一下流量的概念。流量又称为瞬时流量，其中流量分为两种表示方法，一是体积流量 Q ，指的是在单位时间内流体流过封闭管道中某处的流体的体积，单位 m^3/s ；二是质量流量 G ，指的是其流过管道的流体质量，单位 kg/s 。

体积流量 Q 计算式为：

$$Q = \bar{v}A \quad (2-1)$$

式中， A 为与流速 v 相垂直的通道横截面面积，单位为 m^2 ； \bar{v} 为沿通道横截面上的流体平均速度，单位为 m/s 。

质量流量 G 计算式为：

$$G = \rho Q = \rho v s \quad (2-2)$$

式中， ρ 为流体密度，单位为 kg/m^3 。

其次再来了解一下超声波流量计中最重要的元件——超声换能器，即超声传感器。换能器也就是在超声波发射和接收的过程中转换电能和声能的装置。超声波换能器一般都为电声换能器，是电与声能相互交替收发装置。当超声在发射状态的过程中，将电能转化成机械能，再由机械能转换成声能；则当超声在接收状态时，将声能转化成机械能，再由机械能转换成电能。

图 2-1 是超声波换能器的原理图，图中可以看出一旦压电晶体被加上振荡器产生的超声频电压，进而产生电场，其组件便作纵运动，因此超声波换能器也可被看作为超声频电子振荡器。超声波是在 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 振荡振幅， $10\sim 10^3\text{g}$ 加速度条件下，给予脉冲，当电磁振荡能量转换成机械振动的能量时，压电晶片产生共振，并在同一方向上一同带动周围介质振动而产生的。超声波接收器则是在共振板接收反射信号时，而且其换能器的两电极间的电压在不施加的条件下，因逆压电效应压迫两压电晶片振动，进而使超声波转换成电信号，从而达到接收信号的功能。

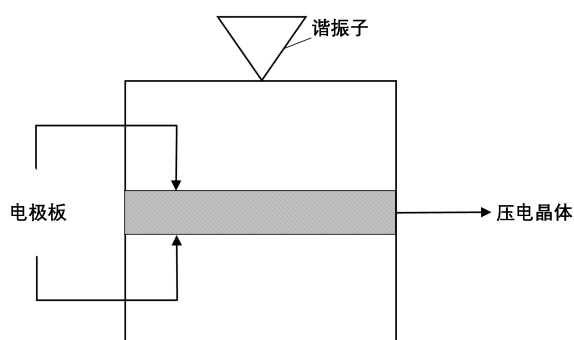


图 2-1 超声波换能器结构原理图

时差法超声波流量计测得流体流量的方法，是通过计算出的流体的流速进一步得到的，流速则是利用声波在同一管道中顺流、逆流所测得的时间差得到。

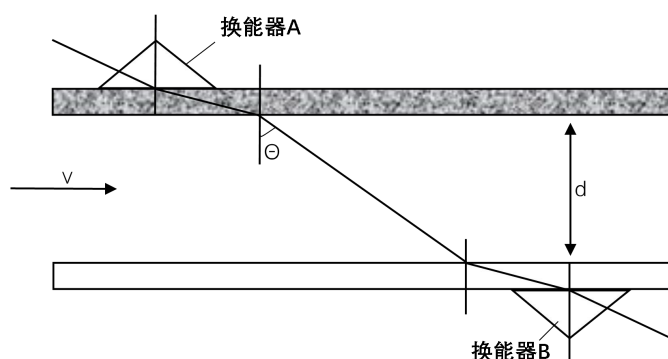


图 2-2 时差法工作原理图

图 2-2 为时差法超声流量计的工作原理图。其中，轮替负责放射和接收超声波工作的为换能器 A、B， d 为管道的内直径， v 为液体流速， θ 为流速和传播方向的夹角。换能器 A、B 可称为顺流换能器和逆流换能器，其安装位置要在流体介质的两侧并要有一定的距离。若 θ 是锐角，称流体在顺流；逆流则是 θ 为钝角。设在介质中超声波信号的速度为 C ，从 A 到 B 为顺流，所用时间为 t_1 ，逆流为 B 到 A，时间为 t_2 。则利用几何关系可得：

$$t_1 = \frac{d / \cos \theta}{C + v \sin \theta} \quad (2-3)$$

$$t_2 = \frac{d / \cos \theta}{C - v \sin \theta} \quad (2-4)$$

又由于 $C^2 \gg v^2 \sin^2 \theta$ ，则时差为：

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_2 - t_1 \\ &= \frac{2dv \tan \theta}{C^2 - v^2 \sin^2 \theta} \\ &\approx \frac{2dv \tan \theta}{C^2} \end{aligned} \quad (2-5)$$

流体的流速为：

$$V = \frac{C^2}{2d \tan \theta} \Delta t \quad (2-6)$$

时差式超声波流量计的测量原理是基于介质流速与时差的线性关系。如果得到正、逆流的时间，则可以根据流速与时间的线性关系计算瞬时流速和瞬时流量。

不过时差法有一个缺点，即由于时间差 Δt 的数量很小（约为 $10^{-8} \sim 10^{-9} \text{s}$ ），因此一般用于明渠及大口径管道等的测量，又由于此方法会因温差而导致时间差的测量不准确，所以应该提高在温差条件下流量计测量的精度。

2.2 提高流量计测量精度的方法

从上节可以了解到若想达到超声波流量计所需的测量精度，就得精准、正确地计算出传播在顺、逆流的时差和传播时间的测量。在盘根错节的实际工厂工作过程中进行接收信号，一定会受到各种外来干扰的阻碍，例如在外界的电磁干扰，被测管道中的气泡、杂质等造成的干扰。提高测量超声波传播时间的精度的方法有很多种，常见的方法有阈值法、设置接收窗口法、PLL 锁相回路法、自动增益控制法、双触发回路法^[33]。

2.3 FLUENT 介绍

CFD（计算流体力学）是通过图像显示、计算机数值计算方法来描述流场分布，从而达到对物理研究的目的，是最近几年中发展最快的流体力学和计算方法，其功能在理论和实践中都对工程流场计算中有所占据，相比之下 CFD 的优势是能够应对各种复杂流动、传热问题，同时避免了经费投入、流场扰动、测量精度等问题在实验过程中出现。这使得 CFD 在航空航天、医疗器械、汽车设计、工业排管等方面都有了很广泛的应用。

FLUENT 是 CFD 软件中目前应用最广泛并且比较实用的计算软件。FLUENT 有着前、后共同处理的功能，为科研或者工厂测量省去了很多不必要的工作，避免了工作者在编程、处理、计算上进行低效率的工作。

FLUENT 是在 CFD 计算机软件群的概念上进行设计的，它不仅可以按照流体的特点制定出相应的数值解法，能够轻松应对测量流体过程中的计算难题，而且在精确度，稳定程度，计算速度上的优势尤为突出。

FLUENT 是由前处理器、求解器、后处理器三个环节组成。FLUENT 计算程序如图 2-3 所示。使用 FLUENT 进行建模、计算，首先进行建模，所利用软件有 Solidworks、Pro/E 等，再对其进行网格划分：将模型导入到前处理器（Gambit）后进行操作，网格划分包括：变形网格、滑动网格、变形网格，非结构化、结构化网格等。其次利用求解器（FLUENT）对其计算结果、进程进行多窗口的检测，再对计算结果进行输出。所以，求解器是流体计算最重要的一步，是计算流体的核心。最后利用后处理器（Tecplot）将数据转化为可视化的多种绘图格式（绘图格式有：2D、3D 体；x-y 曲线图等等）。

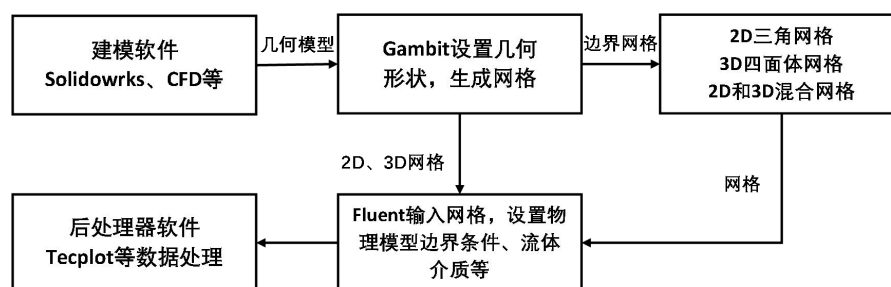


图 2-3 FLUENT 计算程序

2.4 仿真建模流程介绍

管道建模大致步骤流程如下：

1) 管道零件的设计：新建一个文件夹，保存并命名为 Mypipe（注：全称英文，不可有中文），新建一个草图，画两个尺寸相近的同心圆并标注出尺寸，右

键编辑尺寸属性，在尺寸属性对话框中将尺寸名称改为 InnerDiameter（内径）、OuterDiameter（外径），再将草图名称更名为 PipeSketch（管道草图），然后对其拉伸并选择拉伸深度尺寸，这里将拉伸、深度尺寸分别更名为 Extrusion、length，以便后续生成管道实体。在管道一端处再次做出一个过滤器的草图，并将草图、尺寸分别更名为 FilterSketch（过滤器草图）、NominalDiameter（铭牌直径），保存。单击文件后对其弹窗进行编辑，名称命名为 pipeidentifier（管道标识），接着单击添加，添加 Swbompartno（进口编号）等其他零件的不同属性。最后插入零件设计表。

2) 设置管道装配体设计的环境：点击工具中的选项，依次单击系统选项、管道设计，对系统选项属性表进行编程，调出管道零件、管道附件保存的文件夹，设置其默认值。

3) 管道子装配体设计：在确认前面管路点被选上的前提下便可插入连接点或其他管路点路径上的对象，有连接点就可对管道进行管道子装配体设计。新建装配体文件，插入管道设计的物体，调节适当的角度，右键点击开始管路，调出相应文件，只要铭牌直径与过滤器草图中的铭牌直径相等就可以进行连接。

4) 管道装配体零件的工程图分为 FLUENT 仿真设置步骤及 FLUENT 建立仿真计算步骤两方面进行分述。

FLUENT 仿真设置步骤如下：1、确定几何形状，利用 Gambit 生成计算网格；2、输入并检查网格 3、选择 2D 或 3D 求解器 4、选择层流或湍流的求解方程 5、设置流体属性 Water fluid(water-liquid、air)6、利用 Gambit、FLUENT 确定边界的类型、边界条件 7、条件计算的控制参数 Density、Viscosity、Velocity Magnitude、Flow Rate Weighting、Roughness Height8、初始化流场 Solution Initialization9、计算求解 Run Calculation10、绘制流场流速截面图 Graphics11、保存结果。

FLUENT 建立仿真计算，如图 2-4，步骤大致如下：1、启动 FLUENT3D 求解器 2、导入网格文件 case3、网格检查 check4、确认长度 scale5、设置试验参数 6、运行计算 7、绘制流速图 8、保存。

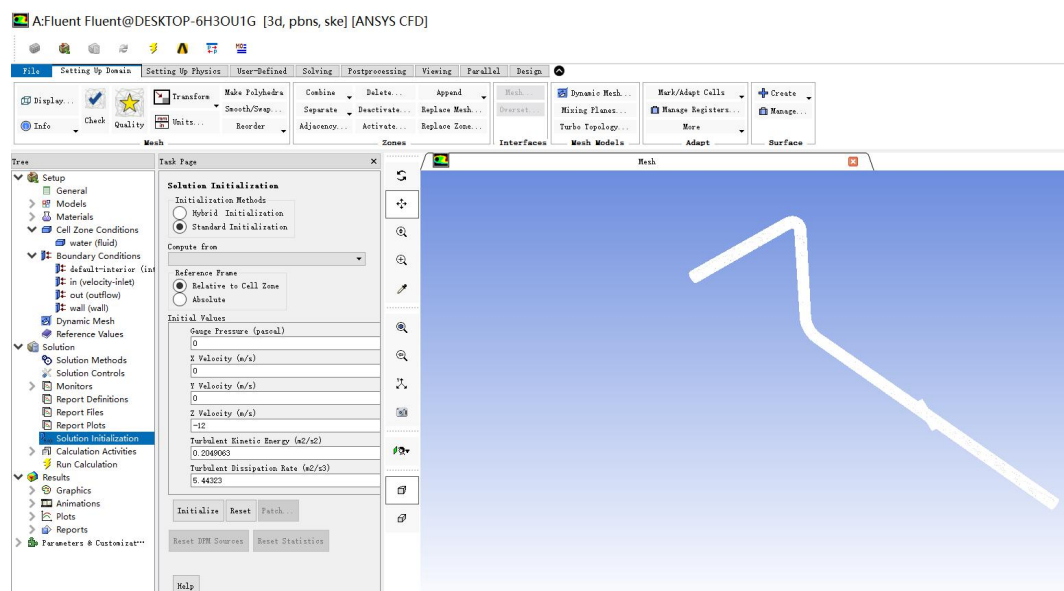


图 2-4 FLUENT 仿真界面

2.5 本章小结

本章主要讲述四个部分，第一部分时差法测量原理，第二部分提高流量计测量精度的方法，第三部分 FLUENT 介绍，第四部分仿真建模流程介绍，通过这四个部分表现出本文的研究方法，以及相关步骤，为下文仿真实验做好铺垫。

第三章 上游管道结构对测量结果的影响

3.1 上下游缓冲管道与超声波流量计的仿真分析

以下内容是利用 FLUENT 软件对上下游管道与超声波流量计的建模进行检测，并设计不同长度的直管段坐标，对其计算流速及绘出坐标对应的管道截面流速图，分析仿真结果，得出上下游缓冲管道的直管段长度对超声波流量计测量精度的影响因素。

3.1.1 上下游缓冲管道的直管段长度对测量精度的影响

时差法计算的标定系数 K ，又称为雷诺数函数，即其会随着雷诺数的变化而发生变化，其定义为所测流体在管道中的平均流速与横截面的平均流速的比值。而且当流体到达紊流时，将会导致流体的流速分布不均， K 系数发生变化，这将大大影响到测量的精准度。

上游管道如果设计安装泵、阀等设备时，超声波流量计的安装位置则要与其相隔一定的距离，除泵、阀外，若还有如震动、热源及噪声源等等的干扰源，都要将超声波流量计与之远离安装。当直管段前后有弯管等部件，这时的流体流动过程中会使流速造成畸变或旋转流，这将不利于超声波流量计的测量。

通过上文可知时差法超声波流量计的算法是根据测量被测管道中流体流速，从而得出流量的，这种计算方法要达到测量所需的精度，管道中的流体必须要处于均匀、稳定的流态，只有当流体通过传感器时已将管流充分发展开来，就可避免流态的突变。所以，保证直管段的长度符合规定要求，是超声波流量计测量时所需精度的重要因素之一。

至此，时差法超声波流量计的产品安装手册上对上下游的直管段长度都制作了相应规定。通常要求换能器安装在上游直管段长度为 10 倍管径，下游的 5 倍管径的位置，即上 10D，下 5D，或要求上 15D，更有甚者则要求上下游直管段的长度高达 40D（型号为 DUF-10，准确度为 0.5 级的 FLUTEC 超声波流量计）。早在 1998 年 9 月美国天然气协会 A.G.A 就对多声道超声波流量计进行研究，对其发表超声波流量计管段的长度要求，在非对称速度分布的流场中，下游从起始处算起至少留有 50 倍的管道直径的管段，在涡流速度分布时更要保持至少 200 倍管道直径的管段。所以在使用超声波流量计的实际测量时，一定要按照安装要求规划，满足换能器在直管段所需要远离的长度。

3.1.2 FLUENT 仿真结果与分析

1) 导入弯管文件进行网格检查后，确认网格文件尺寸，设置流体属性、入口速度等试验参数，对其运行计算，结果如图 3-1 所示。

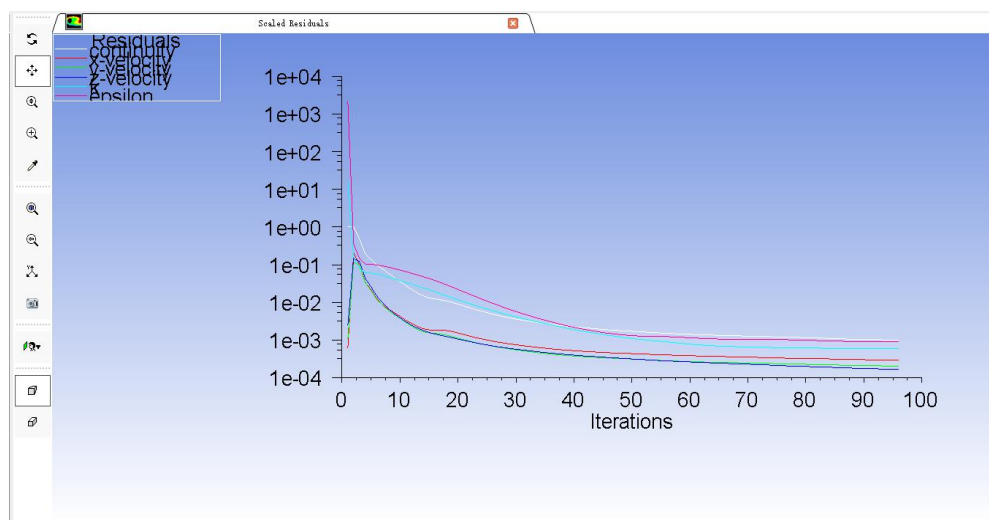


图 3-1 上下游缓冲管道运行计算结果

2) 计算后，如图 3-2 所示，选取双弯管下游管道的不同长度处的直管段速度截面。

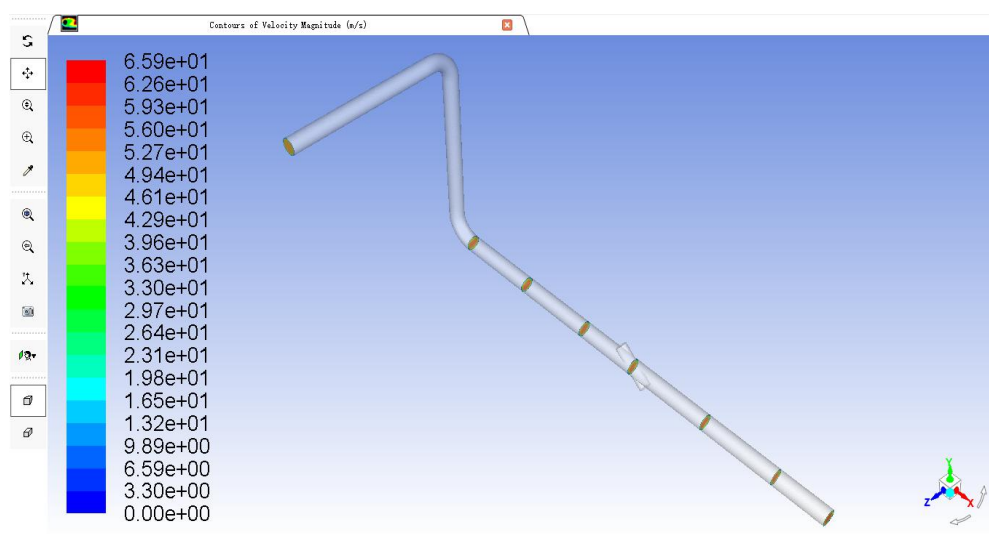


图 3-2 上下游缓冲管道流速截面位置图

3) 各个不同长度的直管段处流速截面依次排列，如图 3-3 所示。

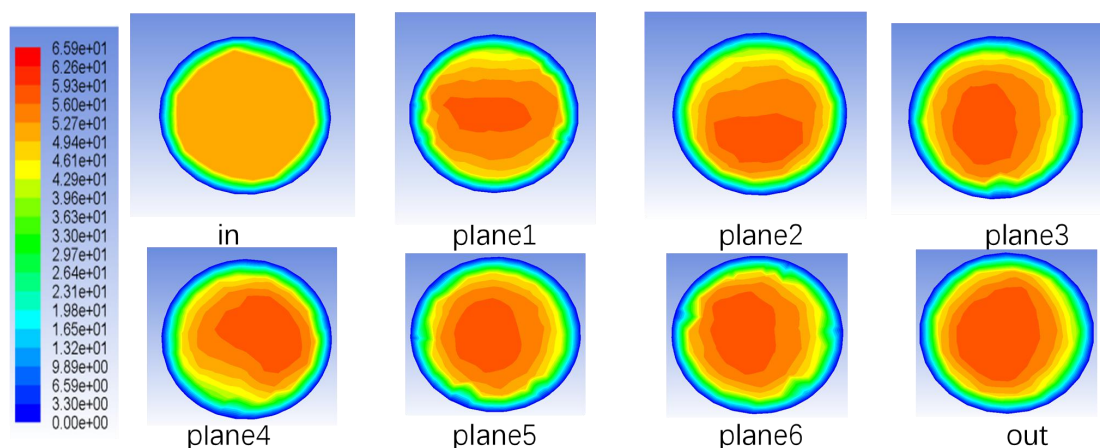


图 3-3 直管段不同长度处流速截面图

4) 仿真结果分析：随着下游管道与所选直管段之间的长度越来越长时，对应的双弯管中速度场的不均匀分布情况有了明显减弱，因此从已上图中可以得出随着下游管道直管段长度越来越长时，下游缓冲管道所能引起的测量误差就越小。

3.2 弯管与超声波流量计的仿真分析

作为天然气消耗大国，随着天然气的发展，天然气的计量设备也随之有了市场。经多年计量设备的使用凸显出气体超声波流量计在天然气应用上有着很大的优势。在工业或日常应用的过程中，大多都会出现安装空间有限进而安装弯管来方便管道的布局，这就会导致流场变得复杂，产生测量误差。因此研究弯管的弯度对超声波流量计测量精度的影响十分重要。

以下内容是利用 FLUENT 软件对弯管与超声波流量计的建模进行检测，并设计不同弯度的管道坐标，对其计算流速及绘出坐标对应的管道截面流速图，分析仿真结果，得出弯管的弯度对其测量精度的影响因素。

3.2.1 弯管的弯度对测量精度的影响

弯管在实际应用中会导致流体产生各种波动，使流场需过渡后才可进入稳定状态。然而时差法的测量原理是根据测量换能器对超声波射线上多点的流体速度值进行求和进而得到被测管道截面上的流体流速的平均值，这就使得被测管道内的流体需为理想流动状态下，才可使测量没有太大的误差。根据以往的实验证明，单声道超声波流量计的测量精度在 0.5%，但若使超声波流量计安装在直管段上安有 90° 弯管的不稳定流场环境中，则会达到大于 4% 的测量误差。

双弯管大多数被用来安装在管道输送得场合，在方向转换、防止热胀冷缩损坏等实际安装问题环境中应用更为广泛，但根据研究计算得知双弯管会在流体流

动的后侧产生二次流动从而形成涡流，局部出现回流，使被测直管段内速度分布不均匀，流场速度分布也就变成非理想状态下进而产生误差。

弯管导致的二次流动问题主要指的是迪恩涡，是超声波流量计进行测量时最常见的扰流问题。在流体力学中，二次流是指在一定条件下，由于侧向压力而平行于边界运动的粘性流体，而且离边界越近，液层速度越慢，偏移得越严重，导致离开主流的二次流产生。简单说就是流体在弯管内流动时，由于流体的不可压缩产生离心力推动流体，使流速分布不稳定形成径向规律运动的涡旋，也就是迪恩涡稳定性问题。

在被测弯管流体流动过程中，产生二次流的强度大小由无量纲常数迪恩数 Dn 表示，由公式 3-1 得知，管道二次流强度与雷诺数 Re 和弯管曲率半径 R 有关，若对弯管模型规格已设计完成，则二次流强度大小只受雷诺数控制。

迪恩数 Dn 表达公式如下：

$$Dn = Re \times \sqrt{\frac{d}{R}} \quad (3-1)$$

式中： d ——管道直径。

由图 3-4 双弯管流动的二次流流函数等值线图及研究发现，在管道模型直径固定时，流速越快，弯管曲率半径越小，管道内部形成的二次流强度就越大。

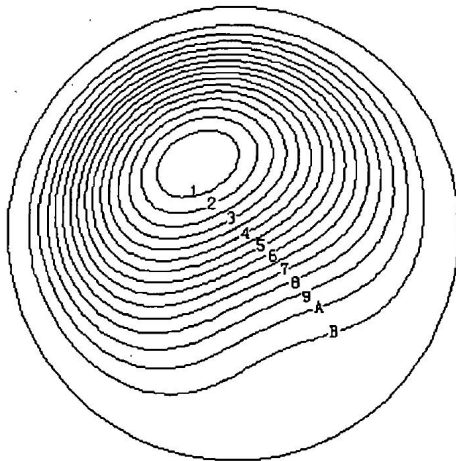


图 3-4 二次流流线图

利用 FLUENT 软件计算并绘出弯管出口与流量计进口之间的直管段长度被测管道不同位置中流场的流速云图，真实分析流速分布情况。

通过搜寻以往实验数据可以证明，对于在相同入口流量时，取不同流量计进口的直管段长度时，长度为直管段的 20、30、40 倍时，即 $20D$ 、 $30D$ 和 $40D$ 时，所测误差相差并不大。然而在弯管与测量直管间长度较小时，弯管中涡流对其测量的精度影响较大，直到长度增加到 $20D$ 后，弯管中涡流对测量精度的影响逐

渐没了变化，但仍会有流量误差，犹如下面图 3-9 中 in 及图 3-11 中 plane6 所示的测量直管段流速截面图。

3.2.2 FLUENT 仿真结果与分析

1) 图 3-5 为空间 90° 双弯管几何模型。进口直管段长度 $D=110\text{mm}$ ，测量段 $D_1=60\text{mm}$ ，双弯管的弯曲半径 $R=1.25D$ ，两弯管间的直管段 $L_1=2D$ 。

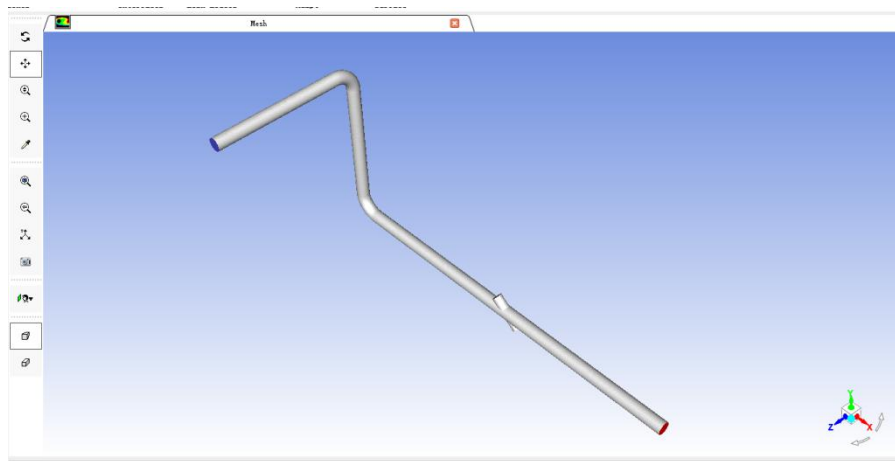


图 3-5 空间 90° 双弯管几何模型

2) 如图 3-6 所示设置试验参数后，经过运行计算，再对弯管直管段长度进行布置。

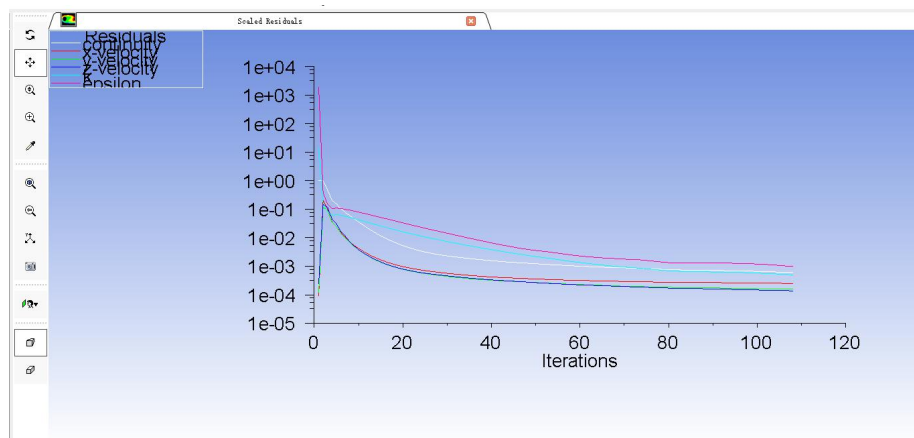


图 3-6 双弯管运行计算结果

3) 图 3-7 为双弯管流速截面位置图，此次试验入口流量均设为 $Q=50\text{m}^3/\text{h}$ 。图 3-8 中取弯管进口和弯管与流量计进口间的直管段长度 L 分别为 $2D$ 、 $6D$ ，图 3-10 中则取弯管处和弯管出口与流量计入口间的直管段长度 L 分别为 $6D$ 、 $8D$ 、 $10D$ 处的流速截面图。

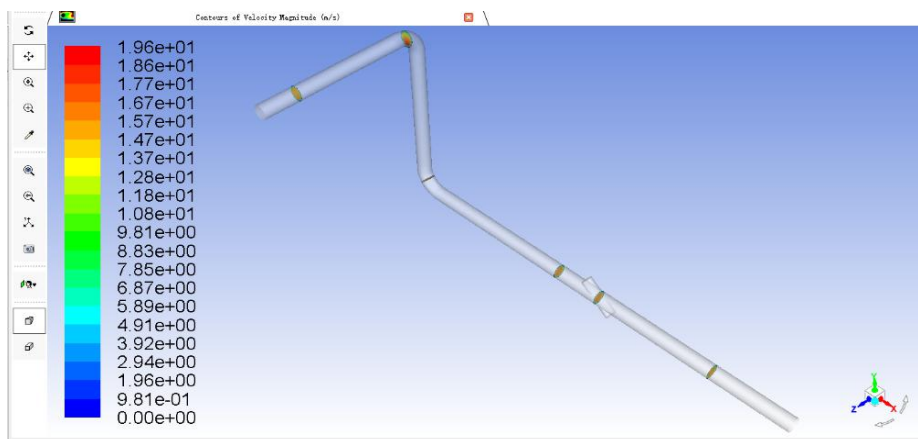


图 3-7 双弯管流速截面位置图

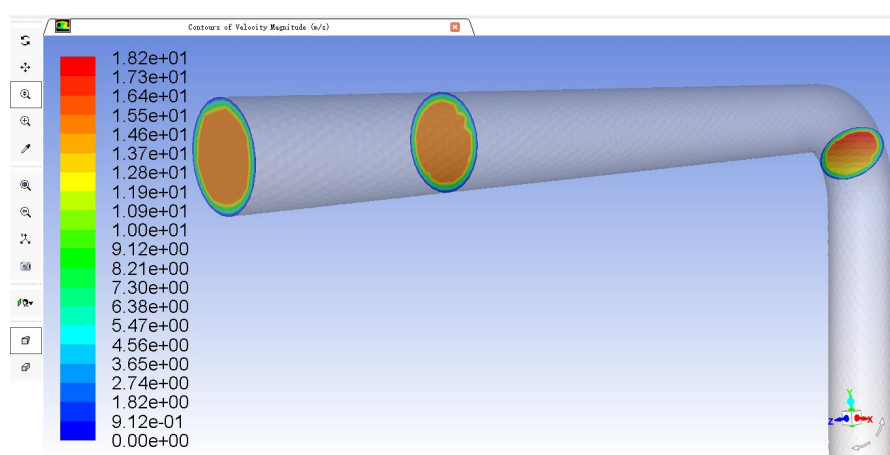


图 3-8 双弯管上游管道流速截面位置图

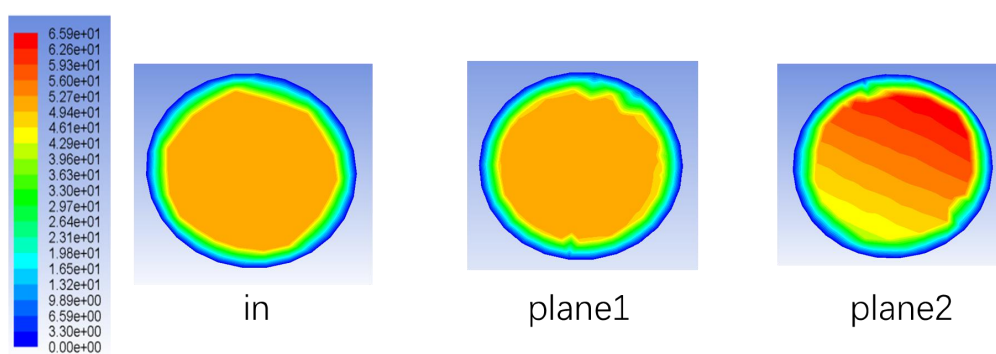


图 3-9 双弯管上游管道不同长度处流速截面图

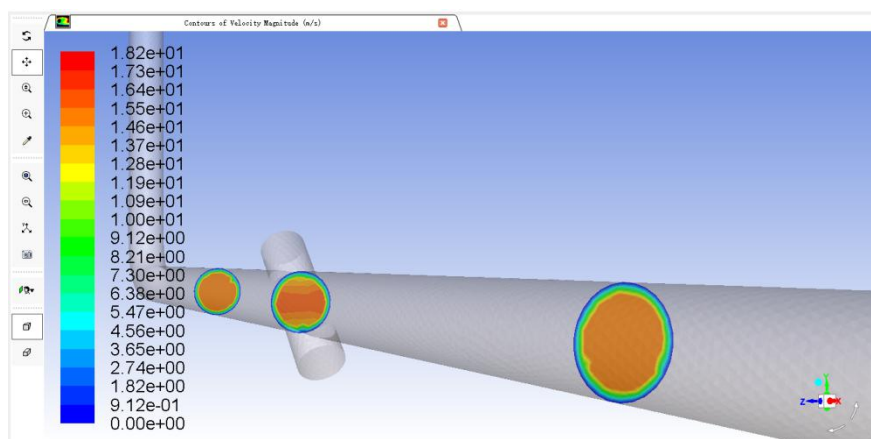


图 3-10 双弯管下游管道流速截面位置图

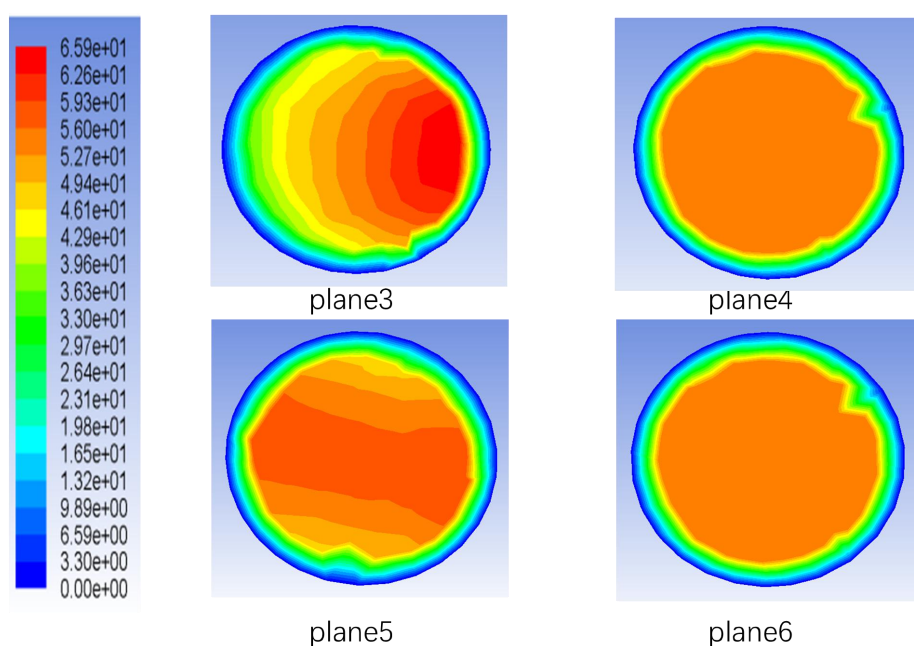


图 3-11 双弯管下游管道转弯处及下游管道不同长度处流速截面图

4) 由以上的流速截面图中可以得出结论：在 L 越小时，弯管中涡流造成的速度的不均匀分布情况就越糟糕，然而随着弯管与测量直管段间的长度变长时，这种情况逐渐缓解。因此从速度分布等值线图中可以得出随着弯管与测量段之间的距离越来越大，弯管所引起的测量误差应该越来越小。

3.3 收缩管与超声波流量计的仿真分析

目前收缩管是目前工业现场中最常见的管道形式之一，在实际应用过程中，由于现场环境的空间限制，使得超声波流量计在安装收缩管前都要精心计算、安排其前后直管段以及收缩角、圆弧半径等因素，不然会使被测流体在流动过程中

无法进行充分的发展，从而产生堆积造成流量计的测量误差。所以研究超声波流量计在收缩管中的测量影响因素是确定现场超声流量计安装位置的重要因素。

利用 FLUENT 软件对收缩管与超声波流量计的建模进行检测，并设计不同长度的直管段坐标，对其计算流速及绘出坐标对应的管道截面流速图，分析仿真结果，得出收缩管的收敛角、圆弧半径对超声波流量计测量精度影响因素。

3.3.1 收缩管的过渡段、直管段长度对测量精度的影响

收缩管是通过流体流量的大小来体现其性能的，然而影响流过收缩管流量的主要因素是其过渡段的设计，也就是收缩管的圆弧半径及收敛角。本文下面分别分析收缩管的收敛角与流量及圆弧半径与流量之间的关系，进而来优化收缩管的设计，提高收缩管的流动效率和流量计测量精度。

1) 收缩管的收敛角与流量之间的关系：

在收缩管入口直径和出口直径都保持不变的情况下，且设计圆弧半径与出口半径比 $R/r=2$ ，这时取不同收敛角进行测量计算。经过实验证明，在收敛角为 90° 以下时，收缩管的流量会随着收敛角的增大而减小，而在收敛角大于 90° 之时，收缩管的流量则几乎保持不变。得出结论，要想减少流量损失，提高流动效率及提高流量计测量精度，最好设计收缩管的收敛角在 90° 以下。

2) 收缩管圆弧半径与流量之间的关系：

在收缩管入口直径和出口直径及其他参数都保持不变的情况下，且设计收敛角为 90° ，这时取不同的圆弧半径进行测量计算。经过实验证明，收缩管的流量会随着圆弧半径的增大而增大。当圆弧半径与出口半径比 $R/r < 2$ 时，收缩管的圆弧半径对流体流过的流量有明显的影响，而当圆弧半径与出口半径比 $R/r > 2$ 时，收缩管的圆弧半径则对流量的影响较小。得出结论，要想减少流量损失，提高流动效率及提高流量计测量精度，最好设计收缩管的圆弧半径与出口半径的比值 $R/r > 2$ 。

收缩管直管段的长度要求与弯管直管段长度的要求相似，都是因流体在收缩管流动时突遇管道变化而受到管壁的压力，对流体流动产生阻碍作用，所以在安有收缩管的管路中需要有足够长的直管段，使其被测流体在流动过程中进行充分的发展，才可使流体流过流量计的流速与进口流速近似相等。

收缩管属于阻流件，且其管道流动方向速度承梯度增大，但收缩管管道是对称的几何形状，所以管道中的流体流动时不会发生扭曲和畸变。而且经过实验证明，收缩管的阻碍作用会随着管道长度的增加而逐渐减小，从而使管道流速几乎恢复正常。

图 3-15 为流体流经收缩管时，收缩管前后各个速度分布云图。由速度云图可知，气体流过管道扩大处时，因有惯性，所以气体在管壁附近的流速不会迅速

增大而是慢慢降低，直到达到平稳状态。观察轴向速度和横向速度分布云图，收缩管下游的轴向速度和横向速度分布呈垂直对称，当直管段达到 15D-18D 时的速度分布云图基本相同，流速也就基本达到了均匀分布，横向流动也随着下游直管段的长度增加而逐渐减弱，这时的收缩管下游的轴向流速分布和充分发展流场接近，也就达到了超声波流量计测量精度的标准。

DN150 变 DN100 收缩管模型如图 3-12，其网格划分如下：

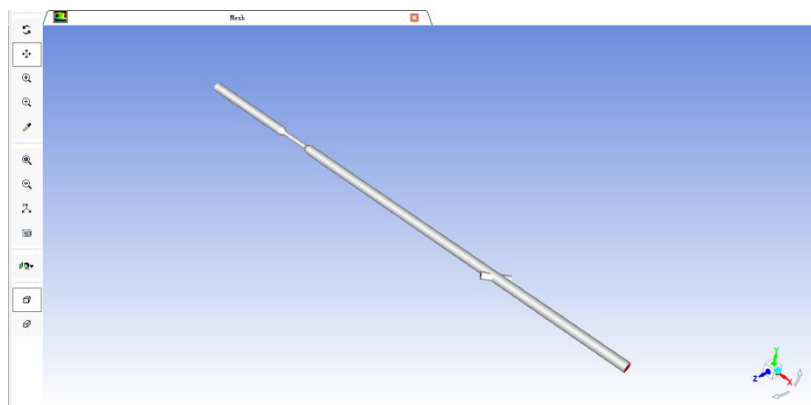


图 3-12 DN150 变 DN100 收缩管几何模型

1) 直管段前后：形状规则，圆柱体，六面体网格。

2) 测量段：因此管段有探头，所以该部分模型结构较为复杂，则选用四面体网格并利用增长函数来控制网格的密度。选用远离探头的网格逐渐变稀，靠近探头附近部分的网格最疏，起始网格尺寸(start size)、尺寸增长因子(growth rate)、最大网格尺寸(sizelimit)分别为 1、1.05、3 的这种网密，从而保持网格的光滑，网格的数量，且节省计算时间。

3) DN150 变 DN100 收缩管：长度为 100mm，渐缩角 14° ，入口直径为 150 mm，出口直径为 100 mm，网格间距(interval size)为 3。完成收缩管的建模和网格划分后，将此网格文件导入 FLUENT 软件中进行仿真计算，设置流动介质为常温常压下的空气，管道壁面为光滑。

经过 FLUENT 计算及绘图后得知，超声波流量计安装在在 DN150 变 DN100 的收缩管下游 16D 处时测量误差缩小到 $\pm 0.1\%$ 以内。要想确保测量误差在 $\pm 0.5\%$ 以内，且超声流量计后直管段为 10 D 时，通过 FLUENT 数值仿真得到，上游 DN150 变 DN100 的收缩管安装条件下，前直管段应大于 4D。

3.3.2 FLUENT 仿真结果与分析

1) 如图 3-13 所示设置试验参数后，经过运行计算，再对收缩管长度进行布置。

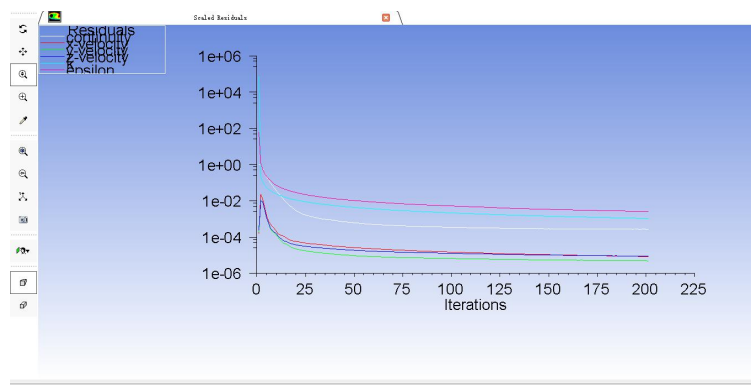


图 3-13 收缩管运行计算结果

2) 运行计算后，选取收缩管的不同长度的管段，具体流速截面位置如下图 3-14 所示。

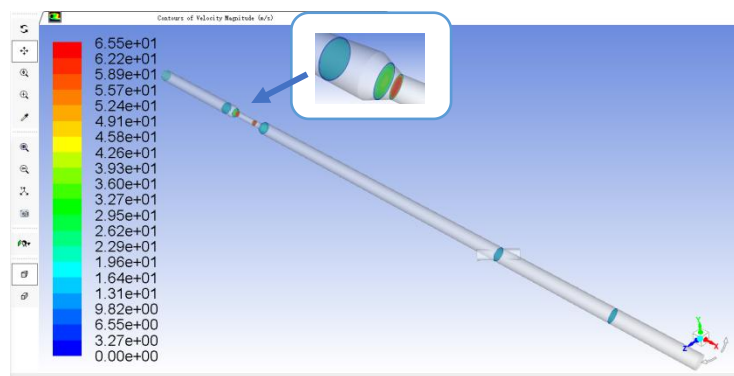


图 3-14 收缩管流速截面位置图

3) 图 3-15 为收缩管各个流速截面图。

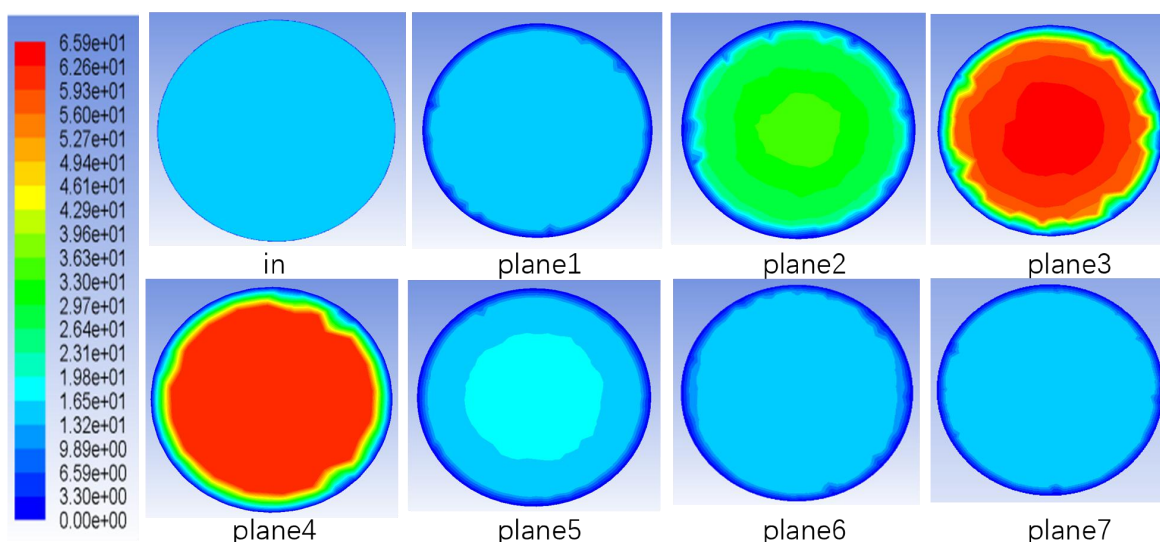


图 3-15 收缩管不同长度流速截面图

4) 仿真结果分析：当选取收缩管的 plane6、plane7 流速截面处时，通过图 3-15 可以看出这两个的速度分布云图基本相同，即流速基本达到均匀分布。因此

得出结论，经过收缩管后的下游直管段达到一定长度（如 15D-18D）时，横向流动逐渐缓解，且这时的轴向流速分布与充分发展的流场十分相似，这就达到了超声波流量计测量精度的标准。

3.4 本章小结

本章通过 FLUENT 仿真软件，进行了运行、计算，分析上下游缓冲管道、弯管、收缩管与超声波流量计搭建之后的仿真结果，并根据相应的管道流速截面图探索出对超声波流量计测量精度的影响因素。

第四章 管壁粗糙程度对测量结果的影响

4.1 粗糙度对测量精度的影响

美国天然气协会 A.G.A 曾经提出过，超声波流量计的内壁应保持干净，圆滑，不能出现凝析液以及轧屑、脏物、沙子、粉尘混在一起的油质等沉积物。然而在实际应用中管道长期使用后会出现磨损、腐蚀、生锈，会将管道沉积物堆积，就会影响传播时间，还使流过流量计的流通截面积减少，而且当管道内壁的粗糙度不断增大，进而使近壁处的气体流动的摩擦力增加，对整个管道内流场分布产生影响，这都致使超声波流量计在测量精度产生正的测量误差。

在管道流体流动过程中有一层紧贴在管壁上很薄的层流层叫做黏性底层，下面公式 4-1 为黏性底层厚度公式。

$$\delta_0 \approx \frac{32.8d}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \quad (4-1)$$

式中： δ_0 为黏性底层的厚度，单位为 mm；

d 为管道直径，单位为 mm；

Re 为雷诺数，无量纲；

λ 为沿程阻力系数或摩擦系数，无量纲。

管道从厂家制作、加工到现场安装过程中，其管壁是做不到绝对平整光滑，都会有一定的不规整，这些不规整的粗糙的平均尺寸被称为管壁的绝对粗糙度，本文用 ε 表示。若 $\delta_0 > \varepsilon$ 时，管壁的不规整将被在黏性底层掩盖，此时流体犹如在光滑管道中流动，管壁的粗糙度几乎对其没有影响，这种现象称为水力光滑管。如若 $\delta_0 < \varepsilon$ ，管壁的不规整将露出黏性底层外，流动的流体将与凸起的管壁发生碰撞，进而形成旋涡，能量将有更大的损失，这时的粗糙度对流态有了直接影响，这种现象被称为水力粗糙管。由公式 4-1 也可得知同一管道不仅能为粗糙管，也可以成为光滑管，这主要取决于黏性底层的厚度或雷诺数。

在超声波流量计仿真、检定时管道的内壁的粗糙度与现场实际安装管道的内壁粗糙度几乎都会不一致，这将会导致超声波流量计在实际测量中与其真实数据存在差别，影响测量结果。所以要提前在应用安装时确保管道的粗糙度在超声波流量计适应范围内。

本文将利用 FLUENT 软件对管道与超声波流量计的建模进行检测，并设计不同粗糙度，对其计算流速及绘出坐标对应的管道截面流速图，分析仿真结果，得出管道的粗糙度对超声波流量计的适应范围。

4.2 FLUENT 仿真结果与分析

1) 设置流体属性为 air、粘度为 $1.7894e^{-5}$ (kg/m•s)、入口流速为 50 (m/s)、粗糙度高度为 0 (m)。

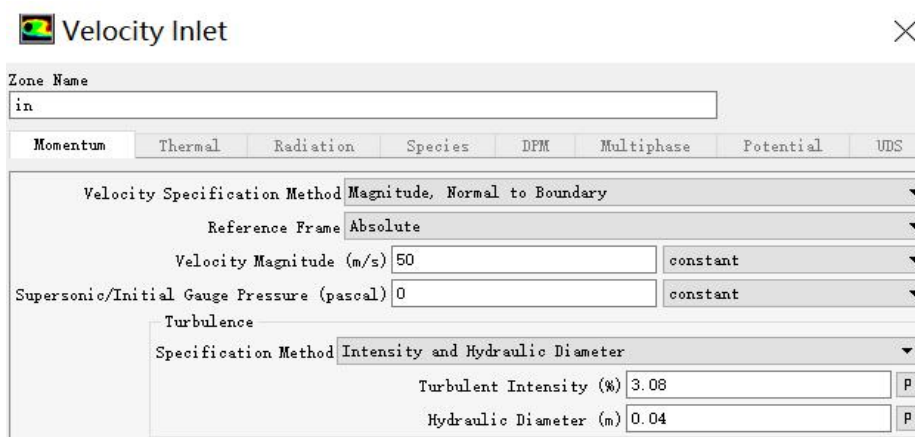


图 4-1 入口流速

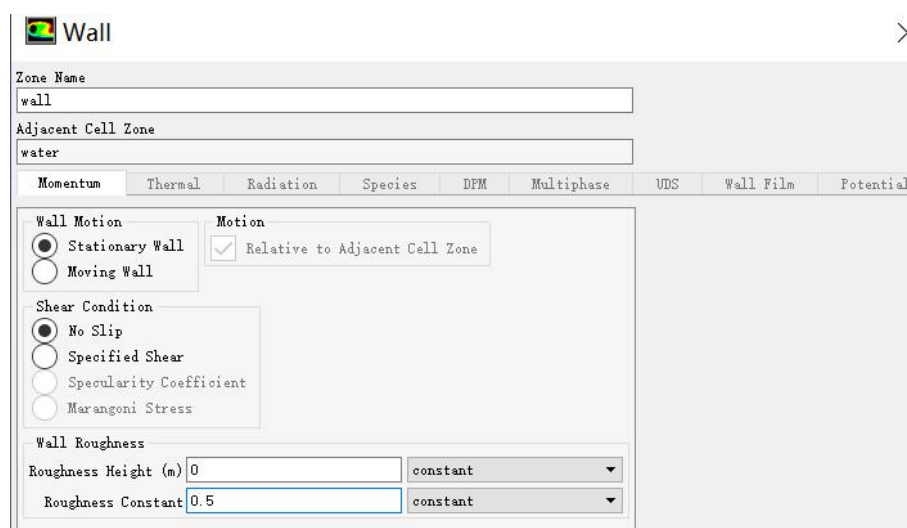


图 4-2 粗糙度高度为 0(m)

2) 设置试验参数后，粗糙度高度为 0 (m) 时运行计算结果如图 4-3 所示。

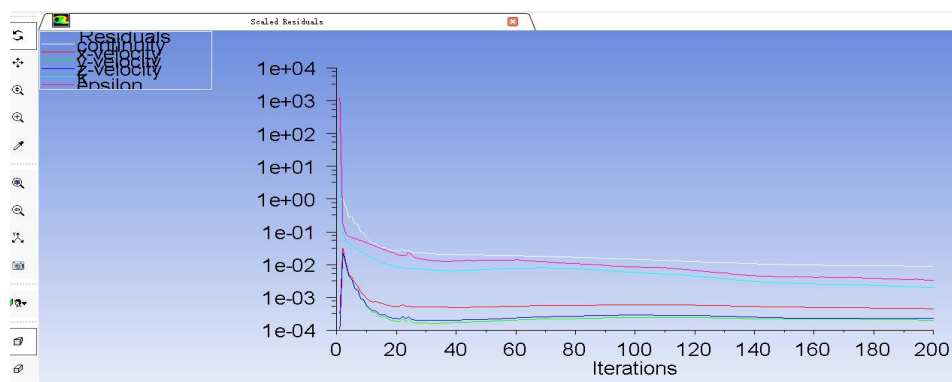


图 4-3 粗糙度高度为 0(m)时计算结果

3) 粗糙度高度为 0(m)时管道流速截面图如下:

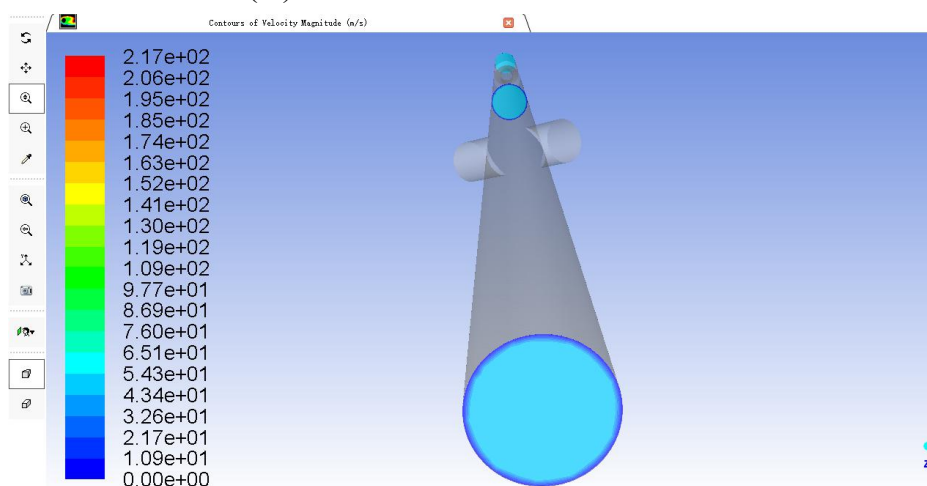


图 4-4 粗糙度高度为 0(m)时流速截面图

4) 设置粗糙度高度为 15 (m)，并运行计算得出结果。

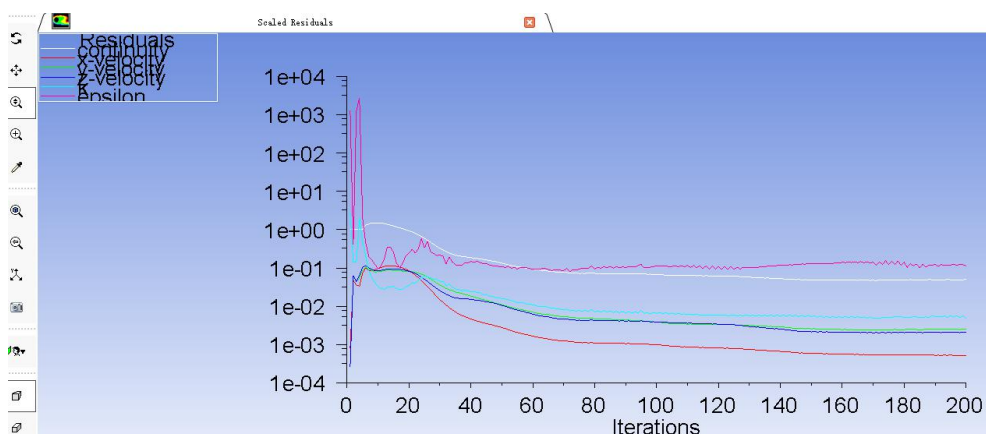


图 4-5 粗糙度高度为 15 (m) 时计算结果

5) 粗糙度高度为 15 (m) 时，管道流速截面图如下:

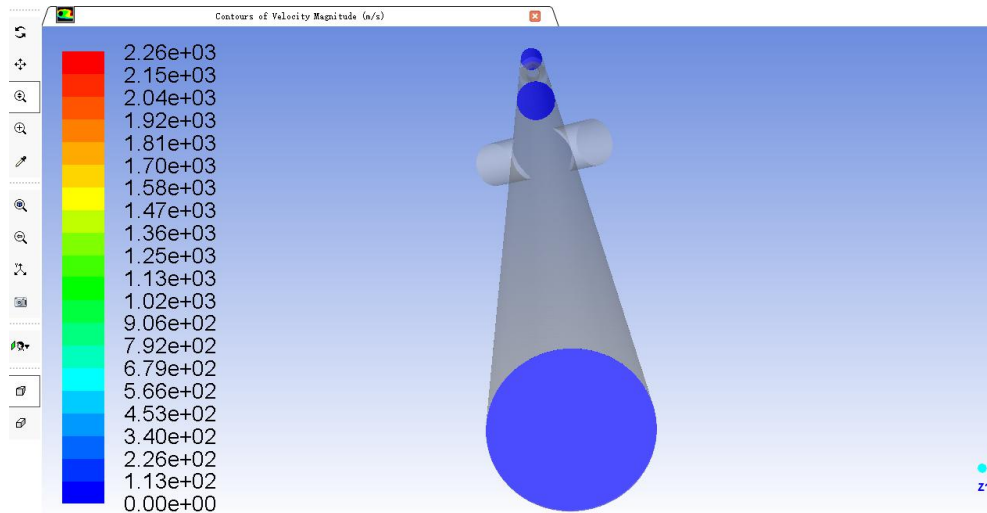


图 4-6 粗糙度高度为 15（m）时流速截面图

6) 仿真结果分析：经过以上仿真计算，可以看出粗糙度高度越大时，测量出的相对误差越大。所以在实际安装场合中要提前测量管道的粗糙度高度 ε 及相应的流体黏性底层厚度 δ_0 ，最好达到 $\delta_0 > \varepsilon$ 水力光滑管。

4.3 本章小结

本章通过 FLUENT 仿真软件，进行了运行、计算，分析不同粗糙程度的管道与超声波流量计搭建之后的仿真结果，并根据相应的管道流速截面图探索出对超声波流量计测量精度的影响因素。

第五章 流体的粘度对测量的影响分析

5.1 流体粘度对测量精度的影响

热力学将自然界中的所有常见物质分为三种状态：固态、液态、气态。其中液体、气体都具有流动性，我们将这种物体统称为流体，如空气、血液、酒精。

流体按照是否具有粘性区分为理想流体和粘性流体。理想流体一般指在管道相邻两层之间不存在粘性作用力，无需考虑粘性、质量扩散、热传导的流体，是不可压缩的流体。所谓的理想流体和完全气体有所差别，理想流体主要讲述没有粘性的流体，完全气体则是可压缩。理想流体是一种理想化、假想性的流体，实际中不会存在，是客观现实中的近似模型，真实流体都有粘性。

流体微团在流动时会对管道中相邻的两层流体作相对运动，这时会出现动量交换使流体内部产生内摩擦力，来抵抗变形和阻碍滑动的速度，这种内摩擦力称为粘性力，在理论力学中提到的“与物体速度一次方成正比的阻力”，指的就是黏性力，而粘度就是表示这种摩擦力阻力的大小，即粘性大小的物理量。

通过往年的实验研究证明粘性应力与粘性和运动的相对速度成正比关系，所以当流体的粘度很小即流体滑动的速度也不大时，相比较下产生的粘性应力比其他作用力小得多，从而可忽略不计，近似为无粘性的流体，也就可以把这种流体看作为理想流体。虽然现实中没有理想流体，其也不存在热传导和扩散效应，但在实验仿真中理想流体有着很重要的利用价值，它会给分析、研究带来很多便利，会使流动问题简化。

在液体中随着温度的变化，液体的热膨胀和冷收缩现象明显，分子间距离和分子间重力急剧变化，液体的粘度随着温度的升高而降低。

因为流体有粘度的性质，必然会使流体在流动时将用一部分的机械能来抵抗，就会造成机械能的损失，所以当流体运动时才会显示出粘性的大小（有些流体的粘性很小，如水、空气，有些很大，如甘油、油漆、蜂蜜），粘度越大，流体流动损失越大，流体的流动性越差，从而推理得到，当速度相等时内摩擦力越大，即粘度越大时，流体的阻力越大，流体的损失越大，所以要在测量流体之前，选择适合其粘度的流量计。

5.2 FLUENT 仿真结果与分析

1) 设置入口流速为 50 (m/s)、粗糙度高度为 0 (m)、粘度为 1.7894×10^{-5} (kg/m \cdot s)。

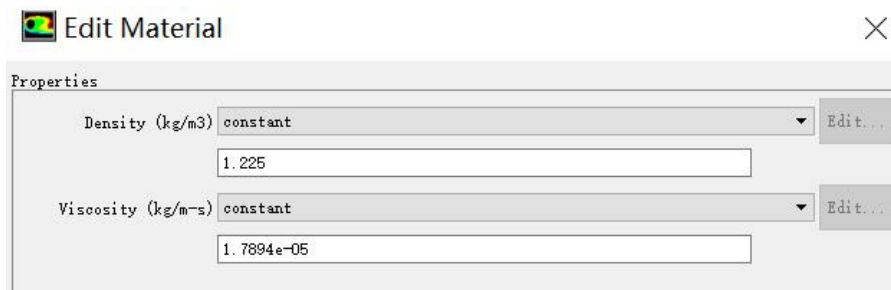


图 5-1 粘度为 1.7894×10^{-5} (kg/m \cdot s)

2) 设置试验参数后，粘度为 1.7894×10^{-5} (kg/m \cdot s) 时运行计算结果如图 5-2 所示。

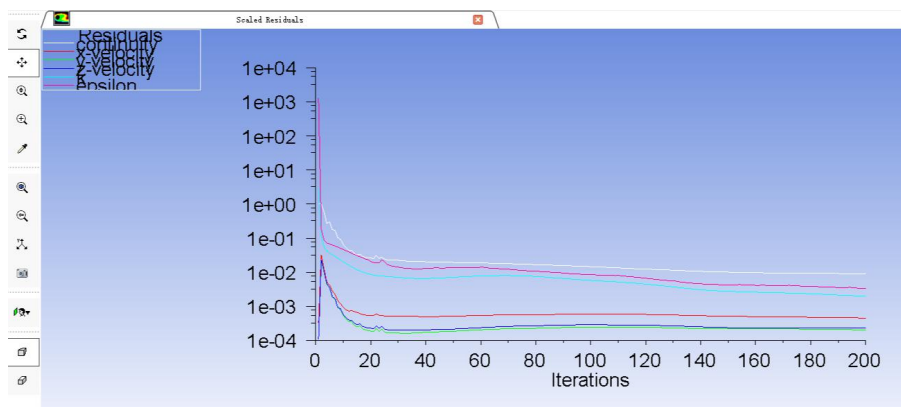


图 5-2 粘度为 1.7894×10^{-5} (kg/m \cdot s) 时计算结果

3) 流体粘度为 1.7894×10^{-5} (kg/m \cdot s) 时流速截面图如下：

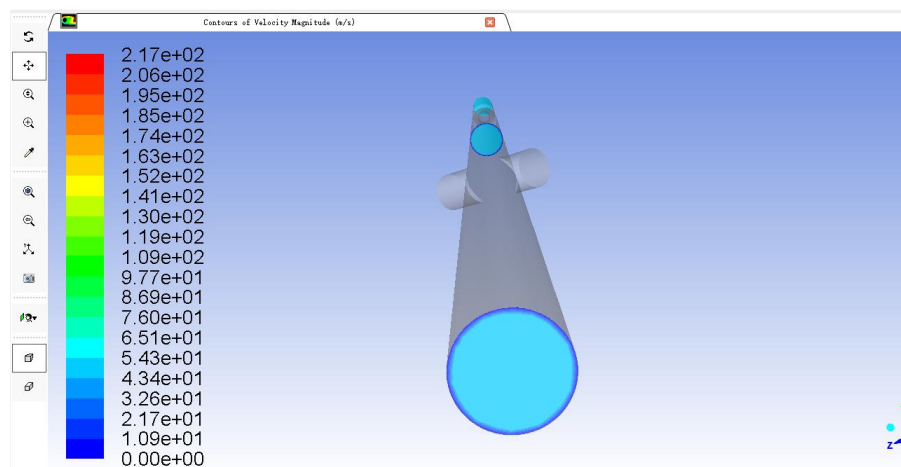


图 5-3 粘度为 1.7894×10^{-5} (kg/m \cdot s) 时流速截面图

4) 设置流体粘度为 0.0004 (kg/m \cdot s) 并运行计算，结果如下。

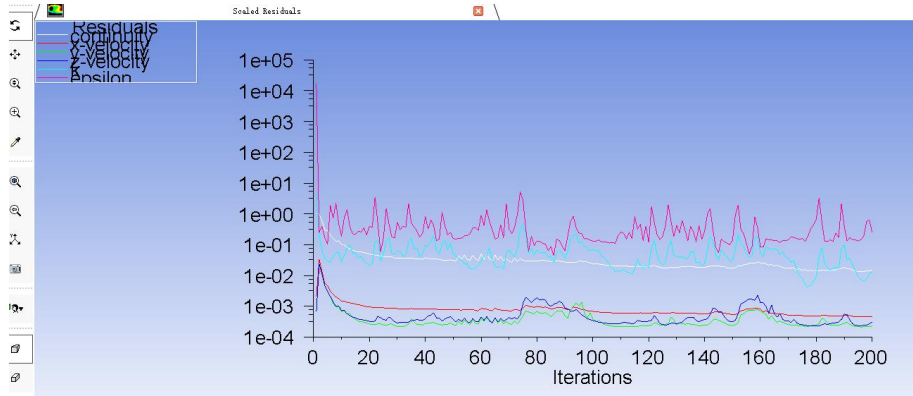


图 5-4 粘度为 0.0004 (kg/m·s) 时计算结果

5) 流体粘度为 0.0004 (kg/m·s) 时流速截面图如下:

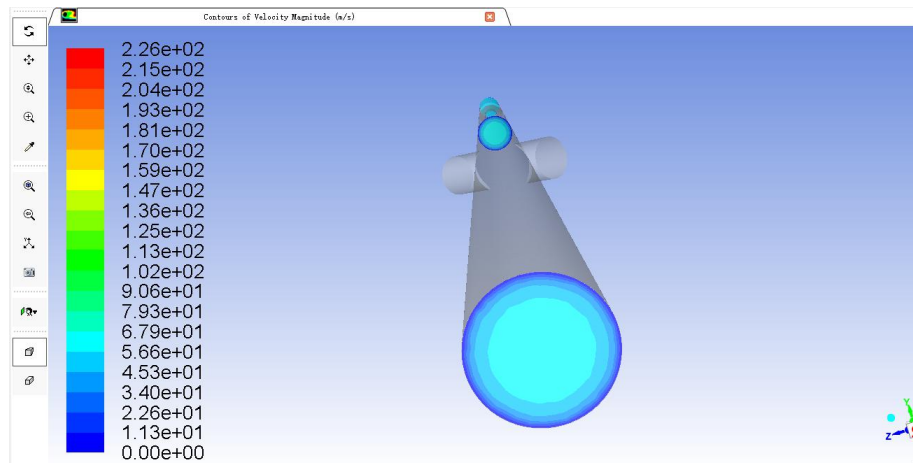


图 5-5 粘度为 0.0004 (kg/m·s) 时流速截面图

6) 设置流体粘度为 0.001 (kg/m·s) 并运行计算, 结果如下。

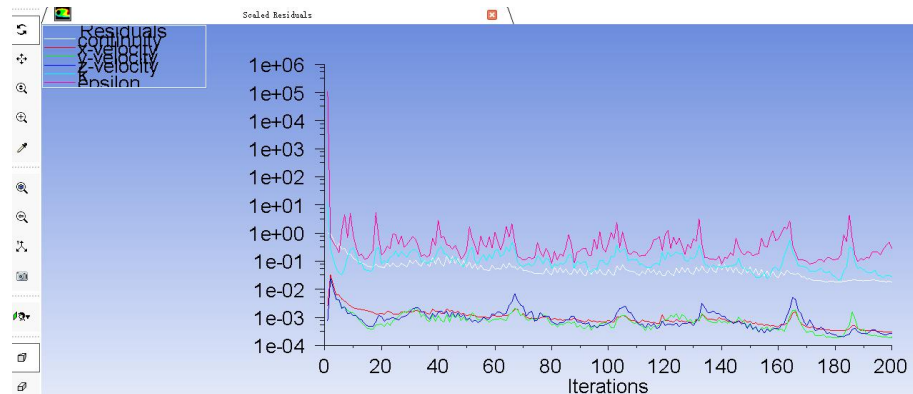


图 5-6 粘度为 0.001 (kg/m·s) 时计算结果

7) 流体粘度为 0.001 (kg/m·s) 时流速截面图如下:

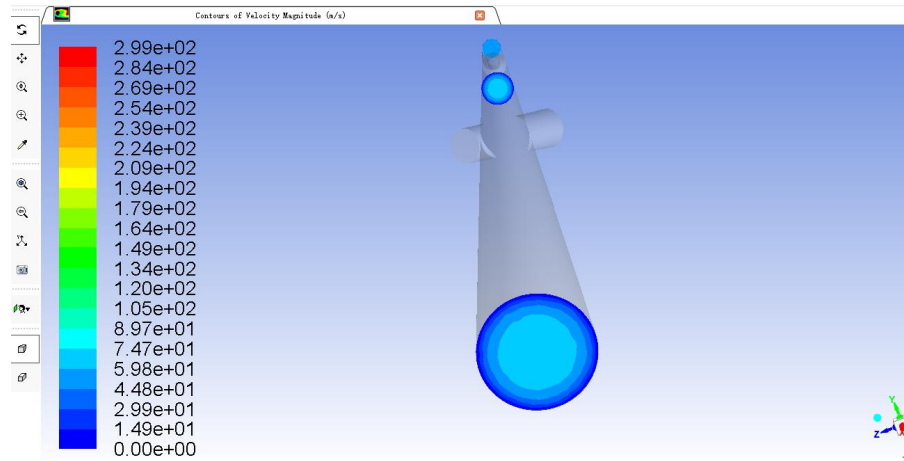


图 5-7 粘度为 0.001 (kg/m·s) 时流速截面图

8) 设置流体粘度为 0.0017 (kg/m·s) 并运行计算，结果如下。

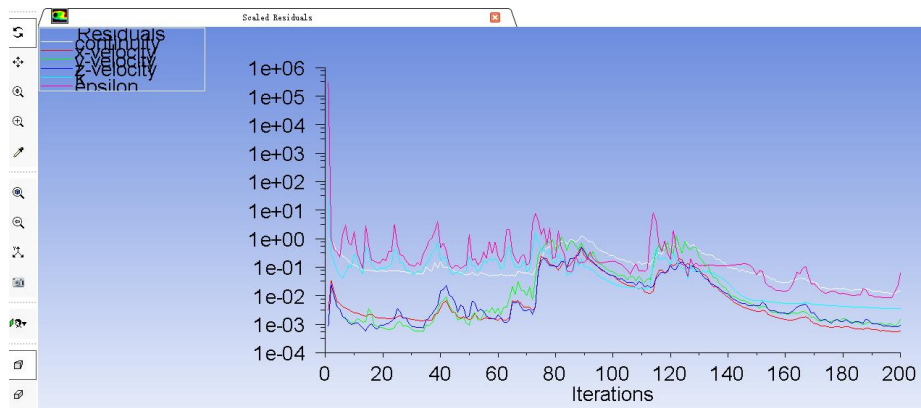


图 5-8 粘度为 0.0017 (kg/m·s) 时计算结果

9) 流体粘度为 0.0017 (kg/m·s) 时流速截面图如下：

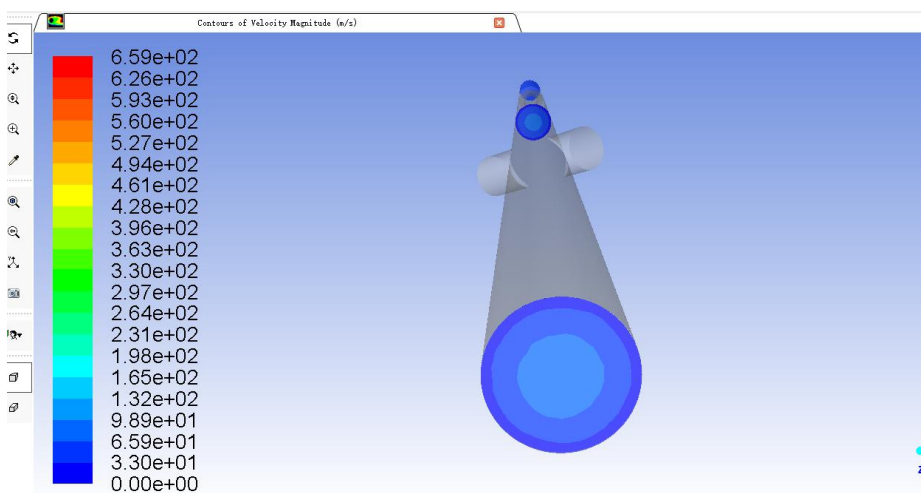


图 5-9 粘度为 0.0017 (kg/m·s) 时流速截面图

10) 仿真结果分析: 经过以上仿真计算可以得出, 流体粘度越大, 对流量计测出的相对误差越明显。虽然实际生活中没有理想的无粘度流体, 但当粘性应力比其他作用力小得多, 从而可忽略不计时, 就可看似为无粘性流体。

5.3 本章小结

本章通过 FLUENT 仿真软件, 进行了运行、计算, 分析不同流体粘度的管道与超声波流量计搭建之后的仿真结果, 并根据相应的管道流速截面图探索出对超声波流量计测量精度的影响因素。

第六章 超声波流量计性能实际测试

经过以上第三、四、五章节的介绍，我们已经知晓超声波流量计测量管道中的上下游缓冲管道、弯管、收缩管以及被测流体中的粗糙度、粘度等对其测量精度的影响因素，并利用 FLUENT 软件对其进行计算及绘画出相应的流速截面图，让我们仿真出管道中流速的变化，从而看出流量的相对误差的变化，助于我们分析出如何提高精度的解决方法。此章内容是在图 6-1 的测试环境下，基于以上章节总结的工况和测量误差的变化规律，对超声波流量计的声道位置及补偿算法进行优化，并测试其性能。



图 6-1 测试环境

流量计标定测试系统由管路、离心泵、液位计、支架、压力表、温度计、流量计、法兰连接件、上下游阻流件以及 PLC 控制系统等软硬件设备组成，本次实际测试所用的流量计为 MSSP-1210 超声波流量计，其技术参数为双声道，口径为 DN40，精度等级为 $\pm 1.0\%$ ，防护等级为 IP68（传感器），安装方式为一体式，线缆长度为 5m，3 按键参数配置。其实物图如图 6-2 所示。

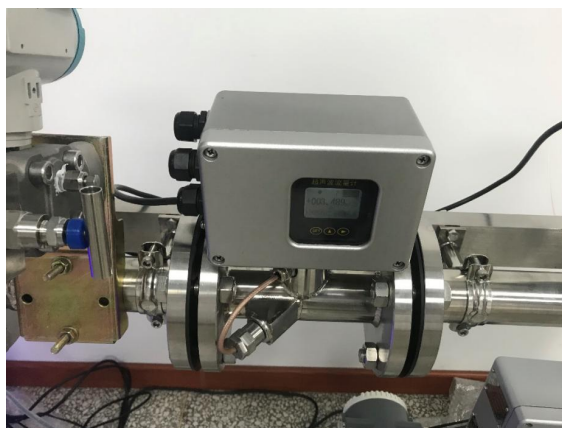


图 6-2 超声波流量计实物图

为了使超声波流量计能够稳定可靠地运行，在标定测试前要注意流量计安装位置远离变频器设备，防止变设备影响超声波流量计的回波信号而造成流量测量不稳定；此外在流量传感器之后安装 $5D$ 长度的直管段，将尾流效应降到最低；测试时保证流量计换能器处于液体充满状态，杂质含量要低于 5%；流量计安装位置尽量在低处，这样可以避免管道内聚集气泡影响声波传输。

6.1 基本误差实验测试

此次试验所需要的设备有：标准流量实验装置一套。

首先将流量计安装在被测管道上，采用容积法进行标定试验装置，其次对其逐个流量点进行测试，其中有 4 个流量点，分别为 0.3m/s、0.5m/s、3m/s、5m/s，对所有的测试点进行 3 次的测试，并记录在表 6-1。

表 6-1 基本误差实验数据表

流量测试点 (m/s)	脉冲总数 N	时间 (s)	流量 (L/h 或 m ³ /h)	流速 (m/s)	三次流速平 均值	误差 %	重复性 %
0.3	11078	291.255	1.3724	0.231	0.232	-0.23	0.1
	11078	291.776	1.3684	0.264		-0.12	
	11078	292.611	1.3675	0.201		-0.33	
0.5	11082	181.771	2.1949	0.495	0.51	-0.01	0.12
	11082	181.707	2.1921	0.575		0.15	
	11082	182.429	2.1887	0.46		-0.08	
3	11129	31.315	12.809	2.64	2.62	-0.12	0.03
	11130	31.351	12.8019	2.49		-0.17	
	11130	31.311	12.8083	2.73		-0.09	
	46205	57.743	28.8941	3.5		-0.3	

5	46203	58.011	28.7661	3.4	3.483333	-0.32	0.02
	46202	58.143	28.6906	3.55		-0.29	

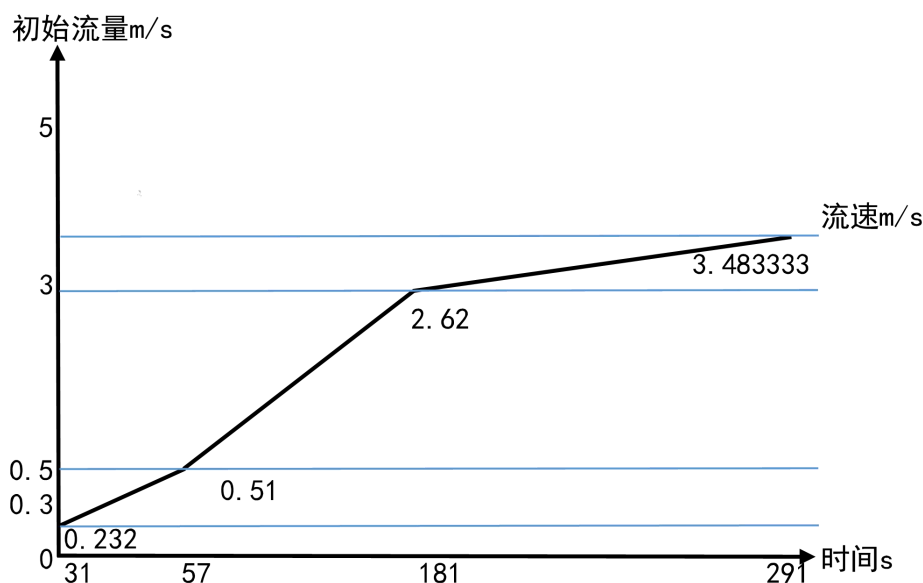


图 6-3 流速折线图

折线图 6-3 为四个测试点的 3 次测试中测得的流速平均值，从中对比可以看出改变了流量，故而从 $1.3\text{m}^3/\text{h}$ 、 $2.1\text{m}^3/\text{h}$ 、 $12.8\text{m}^3/\text{h}$ 增到 $28.7\text{m}^3/\text{h}$ ，流速则会随之从 0.23m/s 、 0.51m/s 、 2.62m/s 再到 3.48m/s 。分析此种情况则可得到三次测量中的误差均小于 0.5% ，所以改进后超声波流量计符合实际企业测量使用要求。

6.2 稳定性实验测试

此次试验所需要的设备有：电磁传感器、水槽、密封垫、电流表等。

首先将密封垫放到水槽中，其次将传感器垂直放在密封垫上，并将传感器的内部注满水，等待其静止后，再将转换器和传感器相连接，然后将转换器的 I^+ 和 I^- 端子串入到电流表，并上电对其进行预热，15 分钟后调整零点，最后切断电源，等等待 24h 后再次上电，记录电流值在表 6-2，再经过 24h 后再次记录零点输出的电流值。

表 6-2 稳定性试验数据表

样机	零点输出电流值	24h 后零点输出电流值	零点输出漂移
	mA	mA	%
1 号	3.994	4.002	0.2
2 号	3.9904	4.0004	0.35
3 号	3.986	3.998	0.3

通过表 6-2 数据可得到此超声波流量计的稳定性是可经受连续 48h 运行，而且零点漂移不超过 0.5%，零点输出电流漂移也低于 0.5%，所以此超声波流量计的稳定性是符合我们实际测量中所需要的要求。

6.3 重复性实验测试

测试流量计 5 个流量点（0.3m/s、0.5m/s、1m/s、3m/s、5m/s）重复性误差，1m/s 以上重复性误差不能大于 0.1%，1m/s 以下重复性误差不应大于 2.0%。测试结果如表 6-3 所示，不同流量点下改进后的超声波流量计均符合重复性测试要求。

表 6-3 现场重复性数据表

流量测试点 (m/s)	脉冲数 (N)	时间 (s)	流量 (m ³ /h)	流速 (m/s)	误差 (%)	重复性 (%)
0.3	11141	310.913	1.2930	0.372	0.24	0.19
	11141	312.832	1.2818	0.294	-0.02	
	11142	314.479	1.2736	0.258	-0.14	
0.5	11146	182.317	2.1981	0.44	-0.12	0.12
	11145	183.129	2.1924	0.535	0.07	
	11146	183.637	2.1872	0.55	0.10	
1	11156	90.13	4.4587	1.06	0.06	0.04
	11155	90.375	4.4499	1.14	0.14	
	11155	90.57	4.4388	1.11	0.11	
3	47420	121.512	14.0544	3.12	0.04	0
	47420	121.285	14.0806	3.12	0.04	
	47420	121.171	14.0922	3.09	0.03	
5	46175	75.11	22.0384	7.1	0.42	0.03
	46175	75.118	22.0480	6.7	0.34	
	46173	75.021	22.0646	7.1	0.42	

6.4 实际工况现场测试

经实验测试平台标定验证后的超声波流量计进一步应用于实际工况现场，考察非理想流场下流量计的稳定性和重复性。图 6-4 所示为天津武清区某工业园区污水处理企业的应用现场。检测介质为含有少量杂志的工业废水，粘度略高于自来水，管道由于长期化学物质腐蚀存在不同程度沉积物。本项目以常规补偿算法

设置的超声波流量计和依据仿真结果优化后的仪表系数设置的超声波流量计作为对比，两种超声波流量计均经过实验室标定，理想流场状态下精度达到 1.0 级。



图 6-4 流量计实际工况现场测试图

两个样机不同流量工况下的相对误差如图 6-5 所示，总体上看两种流量计精度均优于 1.0 级，其中在高湍流情况下，改进后的超声波流量计相对误差为 0.5%，略低于对照样机（0.6%），这是由于流速较高时流体充满管道，不同管道截面处流速分布比较对称，因此线速度误差较小；而低流速时大多情况流体不能充满管道，且由于实际工业管道不同位置处出现沉积物会导致管径突变，造成流场严重畸变，此时根据前文仿真得到的数据来改进补偿系数能够明显提高流量计的测量精度， $4\text{m}^3/\text{h}$ 流量工况下改进后的超声波流量计使相对误差由 0.87% 下降至 0.54%，说明本文研究成果适用于实际工业应用。

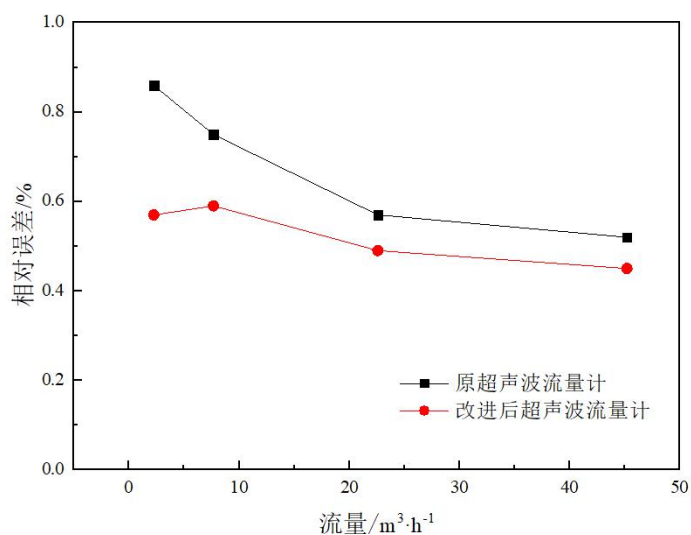


图 6-5 流量计实际工况现场测试图

6.5 本章小结

本章基于前几章的研究内容，对超声波流量计性能进行实际的测量，并得出相应的试验结果，是否符合我们在现实场所中，保持正常的和低误差的测量状态。

第七章 结论

目前国内超声波流量计的应用范围日益扩大,不仅广泛应用于石油、天然气、城镇供水供电、医疗器械、水利工程、飞机、冶金等流量的测量上,同时在下水道、环保排污测量等方面也有相当的应用前景。所以今后的超声波流量计行业在国内具有雄厚的市场前景。我国在 2019 年时,超声波流量计的市场规模已经接近 10 亿元。而且新思界产业研究员还表示,新型流量计——超声波流量计,在众多流量计中凭借着安装方便、维护省时省力、测量精度高、适用范围广等特点得到广大场所认可。随着国内的科技飞速进步,我国超声波流量计的技术也有所提高,产品功能日益完善、品类逐渐增多。其进步与市场需求一同呈现出不断上升的趋势,不论在技术上还是经济上看,超声波流量计的发展速度不亚于流量计行业整体的发展速度。所以解决目前超声波流量计的测量问题,是进一步提高我国产出的超声波流量计在国际上市场的台阶。

就这个想法研究且编写下此文,本文利用 FLUENT 数值仿真技术研究了气体超声波流量计受上下游缓冲管道的直管段长度、弯管的弯度、收缩管的过渡段及直管段长度等安装效应对测量精度的影响,以及单独描述了粗糙度、流体粘度等自身问题对超声波流量计测量精度产生误差的影响因素。经过本文研究要点工作后得到如下成果:

1) 上下游缓冲管道的直管段长度对测量精度的影响:在使用超声波流量计的实际测量之前,一定要按照时差法超声波流量计的产品安装手册上对上下游缓冲管道的直管段长度进行设计及安装。产品安装手册上通常要求其换能器安装要安装在上游直管段长度为 10 倍管径,下游的 5 倍管径的位置,即上 10D,下 5D,或要求上 15D,即必须满足换能器在直管段所需要远离的长度。

2) 弯管的弯度对测量精度的影响:双弯管应用场合主要在方向转换等管道输送这种实际安装问题场合,但根据研究确定双弯管会在流体流动的后侧产生二次流动从而形成涡流,局部出现回流的情况,使得流速的测量就会出现偏差。经过计算后得知在管道模型直径固定时,流速越快,弯管曲率半径越小,管道内部形成的二次流强度就越大,即产生的误差大。

3) 收缩管的过渡段、直管段长度对测量精度的影响:要想减少流量损失,提高流动效率及提高流量计测量精度,最好设计收缩管的收敛角在 90° 以下。要想减少流量损失,提高流动效率及提高流量计测量精度,最好设计收缩管的圆

弧半径与出口半径的比值 $R/r > 2$ 。且经过 FLUENT 数值仿真后得知,当 DN150 变 DN100 的收缩管下游 $16D$ 处安装超声流量计时,所测得的误差在 $\pm 0.1\%$ 以内。若直管段为 $10D$ 时,且前直管段大于 $4D$,测量误差则在 $\pm 0.5\%$ 以内。

4) 粗糙度对测量精度的影响: 经过推理得知,如若 $\delta_0 < \varepsilon$, 管道为水力粗糙管。由公式 4-1 得知同一管道为粗糙管还是为光滑管,主要取决于黏性底层的厚度或雷诺数,所以要提前在应用安装时确保管道的粗糙度在超声波流量计适应范围内。

5) 流体粘度对测量精度的影响: 粘性的影响因素主要依赖于环境中压强、温度。因为粘度的性质,这就会使流体在流动时有机械能的损失,粘度越大,流体流动损失越大,流体的流动性越差,因此当速度相等时内摩擦力越大,即粘度越大时,流体的阻力越大,流体的损失越大,所以要在测量流体之前,选择适合其粘度的流量计。

参考文献

- [1] 蔡浩晖. 管壁粗糙度影响超声流量计测量性能的研究[J]. 石油工业技术监督,2020,36(05):41-47.
- [2] 韩思奇,邵欣,檀盼龙,张灵旺,杨彬. 基于 FLUENT 下双声道超声波流量计最优声道研究[J]. 中国测试,2018,44(08):140-146.
- [3] 姚平. 复杂流场下气体超声波流量计测量精度提升方法[D].浙江大学,2018.
- [4] 路好,朱红丽,张登攀,李成伟,张安超. 基于 FLUENT 模拟的超声波流量计安装位置研究[J]. 能源研究与管理,2017,(03):18-22.
- [5] 朱丽,王小辉. 基于 FLUENT 的超声波流量计流场应用研究[J]. 中国科技信息,2017,(17):26-27.
- [6] 梁玉玉,李少波. 时差法超声波流量计的研究[J]. 信息与电脑(理论版),2016,(03):72-73.
- [7] 刘鹿,解明杰. “速度差法”超声波流量计在电厂中的应用[J]. 河北电力技术,2015,34(S1):6-7+31.
- [8] 唐晓宇. 多声道超声波气体流量检测技术仿真与实验研究[D].浙江大学,2016.
- [9] 黎裕熙. 基于结构与流场分析的超声波流量计结构设计[D].浙江大学,2015.
- [10] 陈红. 上游弯管对超声波流量计测量误差的影响[D].中国计量学院,2014.
- [11] 徐天室. 阻流件下游超声流量计安装位置影响研究[D].天津大学,2012.
- [12] 梅海舟. 基于 TDC-GP21 型超声波流量计的开发与研究[D].华南理工大学,2012.
- [13] 赵文明,邵仙鹤,王玲,佟少强. 超声波流量测量影响因素的研究[J]. 自动化仪表,2012,33(09):80-82.
- [14] 郭小丽,郑丹丹,张涛,杨芳,吴朝晖,胡鹤鸣. 渐缩管和直管流场中超声流量计的适应性研究[J]. 传感器与微系统,2012,31(05):68-72.
- [15] 王雪峰. 基于时差法气体超声波流量计的关键技术研究[D].大连理工大学,2011.
- [16] 沈美华,石斌. 高温超声波流量计测量可靠性研究[J]. 化学工程与装备,2011,(05):160-164.
- [17] 王雪峰,唐祯安. 超声波气体流量计的管道模型仿真和误差分析[J]. 仪器仪表学报,2009,30(12):2612-2618.
- [18] 张朋勇,郑丹丹,徐天室,张力新,胡鹤鸣. 超声流量计探头对流场及其测量性能影响研究[J]. 实验流体力学,2011,25(03):60-65.
- [19] 方坤. 计算流体力学的几种常用软件[J]. 煤炭技术,2006,(12):124-125.
- [20] 岳洪伟. 基于双层阵列式传感器的气固两相流速度场重建[D].广东工业大学,2006.

- [21]刘贵根,栾振辉. 渐缩管过渡段型面对其流量影响的有限元分析[J]. 煤矿机械,2005,(11):69-71.
- [22]鲍敏. 影响气体超声波流量计计量精度的主要因素研究[D].浙江大学,2004.
- [23]梁立新,麦伟明. 直管段长度对超声波流量计测量误差的影响[J]. 计量与测试技术,2001,(04):12.
- [24]李勇,刘志友,安亦然. 介绍计算流体力学通用软件——FLUENT[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2001,(02):254-258.
- [25]小管径超声波流量计的仿真与设计[D]. 赵伟国,赵雪松,黄朝川. 2012(11)
- [26]变径对超声波流量计的影响探讨[J]. 流量计的博客.2015(07)
- [27]超声波流量计的设计与研究[D].百度. 本科毕业论文. 2019(04)
- [28]时差法超声波流量计的研究[R]. 兰纯纯. 重庆大学. 2006(04)
- [29]Chen Jianfeng,Zhang Kai,Wang Leiyang,Yang Mingyue. Design of a High Precision Ultrasonic Gas Flowmeter.[J]. Sensors (Basel, Switzerland),2020,20(17).
- [30]Anonymous. ULTRASONIC FLOWMETER[J]. National Provisioner,2020,234(5).
- [31]Xing Hong Zhang,Hui Zhang,Xi Hou Chen,Xian Quan Wang, Ji Qin Feng. Design of the A/D Conversion Circuit Based on ARM for the Time-Difference Method Ultrasonic Flowmeter[J]. Advanced Materials Research,2012,1518.
- [32]Lavelle, Kevin. Portable ultrasonic flowmeters[J]. InTech,2010,57(4).
- [33]Marco Dell'Isola, Mauro Cannizzo, Matteo Diritti. Measurement of high-pressure natural gas flow using ultrasonic flowmeters[J]. Measurement,1997,20(2).
- [34]Dandan Zheng, Sheng-Hong Lv, Yang Mao. Effect mechanism of non-ideal flow field on acoustic field in gas ultrasonic flowmeter[J]. IET Science, Measurement & Technology,2019,13(4).
- [35]Seyed Foad Mousavi, Seyed Hassan Hashemabadi, Hossein Azizi Moghaddam. Design, simulation, fabrication and testing of ultrasonic gas flowmeter transducer (sensor)[J]. Sensor Review,2019,39(2).
- [36]Woong Kang, Saeng-Hee Lee, Seung-Jun Lee, Young-Cheol Ha, Sung-Soo Jung. Effect of ultrasonic noise generated by pressure control valves on ultrasonic gas flowmeters[J]. Flow Measurement and Instrumentation,2018,60.

致谢

回望这大学四年，仿佛转瞬间就过去了，自己还不肯接受要离开母校去工作，面对新征程的现实。经过这段时间的奋斗琢磨、研究，使我在最后学习路上又获得了很大的收获，在此论文编写、研究上曾遇到了很多问题，自己也有一段时间颓废，致使论文进度落后，这时就要感谢我的导师——邵欣老师。在他的操心、催促下我才重新给自己规划好时间安排，让自己的时间充分利用起来，使每天自己的知识及操作都充实起来，使此论文完满完成。

而且在这里我也非常感谢学校给予我自然科学基金项目（项目批准号 62073240）强大背景的机会，让我根据项目的研究进程进行思考、研究、撰写。

至此，我也感谢我的同学在我研究本次论文要点过程中给了我很多快乐，在学习的枯燥下，同学的聊天、嬉闹都是放松最好的方法，使脑子更加轻松，在撰写论文及研究中不会焦急、烦心，让我在清醒的状态下想出更好的词句和研究点。

最后，也要感谢家人的理解与支持，在放假期间，家中书桌上总是规规矩矩，家中小孩也减少了打闹。家人不会在我写论文时打搅，使我的脑子在清静的环境下更易浮现所需的知识点，更加专心地完成我在学校的最后任务，成功完成论文。

谢谢。