

李跃忠 著

# 多声道超声波 气体流量测量技术研究

Duoshengdao

Qiti

Chaoshengbo

Liuliang Celiang Jishu

YANJIU

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

# 多声道超声波气体流量测量 技术研究

李跃忠 著

 哈尔滨工程大学出版社

## 内 容 简 介

本书从理论与技术研究的角度系统地论述了多声道超声波气体流量测量方法与流量计的设计技术,论述了系统的理论依据、工作原理、数学模型、电路与软件设计、测量精度的不确定度分析。本书共分6章,主要内容包括:第1章,绪论;第2章,超声波气体流量测量方法研究;第3章,多声道超声波气体流量测量机理建模与仿真研究;第4章,超声信号的产生、接收与识别技术研究;第5章,多声道超声波气体流量测量数据处理技术研究;第6章,研究展望。

本书适合作为高等院校相关专业本科生及研究生的教材,也可供从事相关工作的科研和工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

多声道超声波气体流量测量技术研究/李跃忠著.

—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2014.12

ISBN 978-7-5661-0973-6

I. ①多… II. ①李… III. ①多声道-超声波-  
气体流量计量 IV. ①TB937

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 016453 号

---

|      |                    |
|------|--------------------|
| 出版发行 | 哈尔滨工程大学出版社         |
| 社 址  | 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号  |
| 邮政编码 | 150001             |
| 发行电话 | 0451-82519328      |
| 传 真  | 0451-82519699      |
| 经 销  | 新华书店               |
| 印 刷  | 哈尔滨市石桥印务有限公司       |
| 开 本  | 787mm×960mm 1/16   |
| 印 张  | 6.75               |
| 字 数  | 131 千字             |
| 版 次  | 2014 年 12 月第 1 版   |
| 印 次  | 2014 年 12 月第 1 次印刷 |
| 定 价  | 29.00 元            |

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

---

# 前 言

作为非接触式测量方式的超声波流量计在气体、液体和蒸汽的体积流量测量方面具有独特的优势,其在工业界的应用已有 30 多年的历史。在油气、天然气、煤气等气体输送和分配过程中,其流量测量和计量精度直接影响输送和分配企业的经济效益。然而在超声波气体流量测量与计量中还存在较突出的问题,尤其在大口径、大流量超声波气体流量测量中。多声道超声波流量测量计是解决大口径、大流量气体流量测量的一种很好的方法。在多声道超声波流量计的设计中,制造者尝试对流量计进行优化以降低它们对流动干扰的敏感程度。如果流量计可以对所有的流动干扰做修正补偿的话,那么在管道分布中就可以省掉整流器的作用。因此在解决大口径、大流量测量中,研究多声道超声波气体流量测量的关键技术是极其重要的。

据此,本书是在科研项目研究的基础上,以中大管径气体流量测量为背景,着重于多声道超声波气体流量测量原理研究、数学模型的建立、流场分布与流速分布系数的计算、一次仪表流量测量管段的超声波换能器安装位置与结构设计,研制了超声波发射与接收电路、二次仪表人机接口电路,完成了系统程序的设计、流量测量不确定度分析等多声道超声波气体流量测量的关键技术研究内容,为多声道超声波气体流量计研制提供了理论基础与技术支持。

本书的出版得到了华中科技大学李昌禧老师生前的悉心指导,同时也得到了“电子科学与技术”江西省重点学科基金、国家自然科学基金项目(项目编号:61064013)、中国博士后基金项目(项目编号:2012M512005)、江西省自然科学基金项目(项目编号:2008GZS0043)和江西省科技厅科技支撑计划项目(项目编号:2010BGB01600)的资助。

同时,作者在撰写本书的过程中参考或引用了国内外一些专家学者的论文、论著,在此一并表示感谢。

由于水平所限、时间仓促,书中疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

2014 年 11 月 28 日

于东华理工大学机械与电子工程学院

# 目 录

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                          | 1  |
| 1.1 发展现状与背景 .....                       | 1  |
| 1.2 研究目的和意义 .....                       | 6  |
| 1.3 研究的方法和内容 .....                      | 8  |
| 1.4 国内外发展现状 .....                       | 8  |
| 第 2 章 超声波气体流量测量方法研究 .....               | 15 |
| 2.1 时差法超声波气体流量测量工作原理分析 .....            | 15 |
| 2.2 超声波气体流量测量的影响因素分析 .....              | 18 |
| 2.3 高精度超声波气体流量计的仿真研究 .....              | 26 |
| 2.4 本章小结 .....                          | 31 |
| 第 3 章 多声道超声波气体流量测量机理建模与仿真研究 .....       | 32 |
| 3.1 多声道超声波气体流量计流量测量机理建模 .....           | 32 |
| 3.2 基于 Gauss 数值积分方法的换能器位置确定和权系数计算 ..... | 38 |
| 3.3 模型分析与仿真研究 .....                     | 43 |
| 3.4 基于神经网络方法的多声道超声波气体流量计仿真研究 .....      | 48 |
| 3.5 本章小结 .....                          | 51 |
| 第 4 章 超声波信号的产生、接收与识别技术研究 .....          | 52 |
| 4.1 超声波信号的产生与接收电路研究 .....               | 52 |
| 4.2 数字极性相关超声波信号识别技术研究 .....             | 61 |
| 4.3 实验研究 .....                          | 68 |
| 4.4 本章小结 .....                          | 74 |
| 第 5 章 多声道超声波气体流量测量数据处理技术研究 .....        | 75 |
| 5.1 多声道超声波气体流量测量系统研究 .....              | 75 |
| 5.2 流量测量数据融合算法研究 .....                  | 76 |

---

---

|       |                           |    |
|-------|---------------------------|----|
| 5.3   | 基于管道内温度、压力参数的流量补偿算法 ..... | 79 |
| 5.4   | 超声波气体流量测量不确定度分析 .....     | 84 |
| 5.5   | 本章小结 .....                | 88 |
| 第 6 章 | 研究展望 .....                | 89 |
| 6.1   | 研究小结 .....                | 89 |
| 6.2   | 创新之处 .....                | 90 |
| 6.3   | 研究展望 .....                | 91 |
| 参考文献  | .....                     | 92 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 发展现状与背景

在工业界,超声波流量计用于气体、液体和蒸汽的体积流量测量已有 30 多年的历史,无接触式的测量方式决定了其在气体流量测量中的优势。德国、美国、荷兰、英国等国家已经研究成功了相应的产品,并推广应用在天然气输送等方面,且制定了相应的计量标准。近些年韩、日两国在超声波流量计产品化方面也较成功。

我国自从开展“西气东输”项目以来,在城市使用蒸汽供热和制冷方面的项目日益增多,随着城市煤气、天然气管道化项目的建设,以及油田输送民用和工业用天然气的商品化项目有关政策的不断完善,人们越来越重视气体流量测量技术和计量水平的提高。然而气体流量在计量中还存在较突出的问题,尤其在大口径、大流量气体流量测量中<sup>[1,2]</sup>。多声道超声波流量计是解决大口径、大流量气体流量测量的一种很好的方式。在多声道超声波流量计的设计中,制造者尝试对流量计进行优化以降低它们对流动干扰的敏感程度。如果流量计可以对所有的流动干扰作修正补偿的话,那么在管道分布中就可以省掉整流器的作用。因此在解决大口径、大流量气体流量测量中,急需研究多声道超声波气体流量测量的一些关键技术,并解决一些关键问题。

国内在 2001 年制定了“用气体超声流量计测量天然气流量”的国家标准(GB/T1 8604—2001),在 2004 年孙延祚教授的“2020 流量仪表科技发展规划的建议”中提到,积极按照目前制定的气体超声国际标准 ISO 17089 的要求,提高我国中小口径各种工业用流量计的水平,组织多种行业学科的协作攻关,研制大口径超声流量计,以达到 ISO 国际标准的要求,满足国内油气贸易计量的需要。

### 1.1.1 气体流体的特性

以天然气、蒸汽、油气、煤气等作为常用的工业用气体介质,其流体特性如下。

#### (1) 可压缩性

实际流体都具有压缩性和热胀性,气体的压缩性较大,在压力和温度较高时,其密度变化较大,这时的气体可看作可压缩流体;当压力和温度较小时,其密度可看作常数,此时的气体可看作不可压缩流体。液体的压缩性和热胀性较小,可忽略

不计,因此工程上将液体看作不可压缩流体<sup>[3]</sup>。

## (2) 黏滞性

由于气体分子间的间隙较大,其内聚力很小,气体的黏性主要由于气体流层分子之间的动量交换而产生。温度上升时,由于分子间动量交换加剧而使黏度上升。

## (3) 变组分

工业现场常有气体大多是混合气体,混合气体的组分会发生一定的变化,呈现出时变特征。比如煤气,它包含多种组分,包括  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$  等,原料成分的差别或生产工艺的改变,会使煤气的组分产生较大变化<sup>[4,5]</sup>。

## (4) 流量变化范围大

天然气、煤气等气体都有很大的流量变化范围,用气高峰与用气低谷时的气体流量之比为 20:1。

### 1.1.2 气体流量测量方法比较

目前用来测量气体流量的流量计有:差压流量计、转子流量计、涡轮流量计、气体腰轮流量计、热式气体流量计、涡街流量计和超声波流量计<sup>[6]</sup>。每种流量计在测量气体流量方面各有优缺点,在解决大口径、大流量气体流量测量方面,超声波流量计测量最具优越性<sup>[7~9]</sup>。

#### 1. 差压式流量计

差压式流量计是在管道中安装节流元件,使其产生差压,再根据流体的条件、节流件以及管道的几何尺寸,通过计算得到流体流量。差压式流量计已广泛应用于气体流量的测量中,它是天然气、煤气流量计量主要使用的流量计<sup>[2,10]</sup>。根据节流件不同,可以将差压式流量计分为孔板流量计、均速管流量计和文丘里管流量计等。根据国际市场调查估计,标准孔板约占天然气流量测量仪表的 60%,在国内约占 90%<sup>[11]</sup>。标准型差压流量计是一种不需要实流标定就可投入使用的流量计。普通差压式流量计由节流件和二次仪表组成,节流件是差压式流量计的通用元件,已得到国际标准组织的认可。二次仪表主要包括差压转换和流量显示仪表。

差压流量计也存在着测量的重复性、精确度水平不高等不足之处,且提高难度较大,并且量程比(测量范围)较小(在 3:1 ~ 4:1 之间),不适宜大流量测量场合<sup>[12]</sup>,因此就有了如何扩大量程比的有关文献<sup>[13,14]</sup>。差压流量计还存在现场安装条件要求较高,引压管易产生泄漏、堵塞、冻结及信号失真等问题;孔板、喷嘴差压流量计还存在压力损失较大的问题。

在煤气、天然气等较脏的气体流量的测量方面,差压式流量计存在着局限性的

主要原因有:

①由于差压流量计的量程比不高,不适宜用于煤气、天然气用气高峰和低谷带来的流量变化非常大的场合。为了扩大差压流量计的量程比,实际生产中采用在总管上并接分管的方法,同时带来了计量系统的复杂化和投资费用较高等问题。

②在煤气、天然气中存在较脏的杂质,引压管堵塞、节流元件特性改变是常遇到的问题,导致不能保证仪表的正常工作 and 计量精度需要。目前通过开发方便清洗的可清洗孔板,并定期或不定期地进行清洗来解决上述问题,但还不能彻底解决脏污带来的问题<sup>[10]</sup>。

③由于压力损失问题,难以适应在长距离的气体管道输送中运用。

## 2. 转子流量计

转子流量计又称为浮子流量计<sup>[3]</sup>,它是一种变面积式流量计。其市场的占有率仅次于差压式流量计。由于转子流量计结构简单,在微小流量测量方面存在较大的优势。但其缺点是只适用于小管径流量测量,其安装受到一定的限制。在气体流量测量方面,转子流量计测量精度不高,只能使用在一些要求不高的场合。而由于煤气、天然气等气体流量测量和计量涉及贸易结算,测量精度是一个必须保证的指标,同时由于气体组分的变化也会影响流量测量得到的信号,因此转子流量计不太适用于煤气、天然气的流量测量。

## 3. 涡轮流量计

目前涡轮流量计广泛应用在液化气、天然气、煤气、低温流体、石油、有机液体和无机液体等气体流量测量中。在国外的原油转运集输站和输送管线的首末站的贸易结算中大量应用涡轮流量计。在欧美国家,涡轮流量计在天然气流量测量中的使用量仅次于孔板流量计。涡轮流量计由涡轮传感器和转换显示仪表两部分组成,传感器是多叶片的转子,通过它感受流体的平均流速,根据公式推导得到流量值。转子转速的检测可采用光电检测和磁感应方法。

涡轮流量计具有测量精度高(可达0.5%~0.2%)、测量量程比大(在6:1~10:1之间)、压力损失小、重复性好、信号输出易数字化、安装和维修方便等优点。

其不足之处是需要定期标定,不能长期保持校准特性;流体密度、黏度等物性指标对流量测量影响大,一般不适合高黏度介质的流量测量,对被测介质清洁度要求高;流速分布和畸变对流量测量的影响较大。

尽管涡轮流量计具有精度高、量程比大的显著优点,但它同时存在容易受到污损与磨损问题,并且在大管径流量测量中其制造成本较高。所以涡轮流量计难以胜任煤气、天然气等气体流量测量,它较适用于中、小管径气体流量测量领域。

#### 4. 气体腰轮流量计

气体腰轮流量计是一种容积式流量计<sup>[3,6]</sup>,它的优点包括:测量精度高、可靠性好、安装时对前后直管段无要求、测量量程比大(可达 10:1)。缺点包括:安装要求严格,其壳体需要避免承受管线的各种应力;由于腰轮转动部分容易受脏污物卡住,因此腰轮流量计不适合于较脏的煤气、天然气等气体流量测量;由于腰轮流量计体积比较大,显得很笨重,难以在大管径管道上使用。

#### 5. 热式气体流量计

热式气体质量流量计是利用换热原理来检测气体流量的测量仪表,即利用流动气体与热源之间的热能交换来测量流量<sup>[6]</sup>。热源是安装在管内气体中的加热体或管外加热体。

热式气体流量计的优点包括<sup>[15,16]</sup>:①可靠性高,无可动部件;②能测量极低流速的微小流量;③可直接测量质量流量,无需压力和温度修正;④压力损失非常小,几乎可以忽略;⑤量程比极高(高达 1 000:1);⑥输出值较大,直接输出电信号;⑦重复性好;⑧安装方便。

热式质量流量计也开始用于空气、天然气、煤气、火炬气等各种工业领域的气体流量测量,还应用于气象、汽车工业(测量汽车尾气流量)、能源工业(燃烧配风)、公共事业(测量氯气、臭氧等气体流量)、医疗卫生事业(测量氧气和麻醉剂流量)、采暖通风等场合。但热式流量计属于介入式测量方法,其传感器受流体介质的物理、化学特性的影响较大,在不同流速下,其测量的稳定性受影响,热式流量传感器的使用寿命也受影响。

#### 6. 涡街流量计

涡街流量计于 20 世纪 70 年代开始研发,作为一种新型流量计,目前已广泛用于液体、气体和蒸汽流量的测量。且已跻身于世界通用流量计之列,被测信号检出方法的改进与信号处理技术<sup>[17~20]</sup>的提高是涡街流量计迅速发展的关键所在。

涡街流量计的优点有:压力损失小、测量精度较高(1%~2%)、量程比大(可达 10:1~20:1)、适用流体种类多(如液体、气体、蒸汽都可以测量)、安装方便等;在雷诺数允许范围内,涡街流量计的输出信号不受流体密度、黏度等物性和组分的影响,只需在一种典型的介质中标定即可适用于各种介质。仪表系数仅与旋涡发生体及管道的形状和尺寸有关。

涡街流量计也存在缺点:①要求雷诺数  $Re \geq 4\,000$ ;②由于发生流体旋涡分离的稳定性与流速分布畸变及旋转流都有关,因而根据需要在上游使用不同形式的阻力件,以及配置规定长度要求的直管;③由于涡街流量计采用的是力敏检测法检测原理,因此对管道机械振动较为敏感,也就不利于强振动场合下的流量测量;

④分辨率低、仪表系数较低;⑤在实际应用中,难以测量大于  $6 \text{ m/s}$  煤气和天然气的气体流速,流速较高时涡街流量计会发生漏计涡街信号现象。

### 7. 超声波流量计

超声波流量计是近年来发展最为迅速的流量计之一,它是根据检测流体流动时对超声波束的作用,通过测量超声波传播时间差值,来获得流体流速以及体积流量的仪表<sup>[3, 21, 22]</sup>。超声波流量计在大管径流量测量方面有突出的优势。按照测量原理,在封闭管道中使用的超声波流量测量法包括<sup>[23]</sup>:传播时间法、波束偏移法、相关法、多普勒效应法和噪声法。

20 世纪 90 年代,超声波流量计开始应用于气体流量的测量,由于它的非接触式测量、计量稳定可靠、量程比大、无压损、安装方便等一些突出优点,超声波气体流量计深受广大用户欢迎,且常被应用到煤气、天然气、油气等气体的流量测量中。相对于其他流量计而言,它具有下列主要特点:

①解决了大管径、大流量及各类明渠、暗渠流量测量困难的问题。因为一般流量计随着管径的增大会带来制造和运输上的困难,有不少流量计只适用于圆形管道,而且造价很高,能耗大,安装不方便。这些问题在超声波流量计上均可避免,流量测量仪表的性能价格比得到了提高。

②对介质要求不严格。超声波流量计不仅可以测量液体、气体,也可以测量双相介质(主要是应用多普勒法)流体流量;由于利用超声波测量原理可制成非接触式测量仪表,它不会破坏流体流场,没有压力损失,并且可以测量强腐蚀性、非导电性、放射性的流体流量,这是其他类型流量计难以做到的。

③超声波流量计受被测流体的温度、压力、密度、黏度等参数的影响小,测量准确度高,多声道超声波气体流量计测量精度可达  $0.15\%$ 。

④超声波流量计的测量量程比大,一般可达  $20:1$ 。

迄今为止,包括美国、荷兰、英国等 12 个国家在内的政府机构已批准将超声波流量计作为贸易结算的法定计量器具,并广泛应用于大管径流体流量测量和计量。目前国内只有少数用户使用进口超声波流量计进行流量计量<sup>[25~27]</sup>,但在西气东输项目中,引进了不少超声波流量计。

### 1.1.3 多声道超声波气体流量测量方法分析

在气体超声波流量计中,有单声道和多声道之分,其测量原理都是利用超声波传播时间来测量气体流量的<sup>[3, 21, 22]</sup>。大于两个声道的超声波流量计称为多声道超声波流量计,常有双声道、3 声道、4 声道、5 声道、6 声道超声波流量计,目前国内研制的超声波流量计声道数最多为 3 声道,国外研究的声道数最多为 6 声道。多

声道超声波流量计主要能够解决单声道超声波流量计速度分布修正系数的不确定度大的问题<sup>[28]</sup>。由荷兰 Instrumet 公司研发的多声道超声波流量计的测量数据处理中,通过使用积分技术来提高速度修正系数的精确度<sup>[29]</sup>。单声道超声波流量计的测量精度为 1.0%,3 声道超声波流量计的测量精度为  $\pm 0.4\%$ ,5 声道超声波流量计的测量精度为  $\pm 0.3\%$ 。目前韩国昌民公司在北京合资生产多声道超声波流量计,并逐步在国内推广应用。多声道超声波流量计主要特点如下<sup>[30]</sup>:

①测量精度高。该流量计是通过对流速分布和面积积分的二重积分计算出流量,因此不受雷诺数影响,可获得高准确度、高重复性的数据。

②低流速性好。该流量计可在较复杂的流态下得到较高的准确度,解决了低流速区不能精确计量的问题。

③压力损失小。无驱动部件,无突出部分,压力损失小,生产维护成本低。

④不断流在线安装。解决了不能停产施工或因断流停产带来的损失问题,无需设旁路管,降低了施工及维修成本。

⑤适用范围广。可达 DN25 ~ DN15 000 mm,明渠测量宽度可达 30 m,河川测量宽度可达 150 m。

⑥测量范围大。流速范围可达 0.03 ~ 30 m/s。

⑦最小的上下游直管段(通常要求为上游 5D,下游 2D)。对安装环境无特殊要求,最大限度地降低了施工成本和满足现场要求。

⑧双向计量。该流量计能实现双向流量测量。

⑨干式标定(间接标定)技术。解决了大管径流量计不能实流标定的问题,也降低了标定成本。

## 1.2 研究目的和意义

### 1.2.1 问题的提出

如前所述,尽管国外已经研制出多声道超声波气体流量计,但国内目前只有韩国昌民驻北京的合资公司生产,且该流量计在工程应用中还存在诸多问题。由多声道超声波气体流量计的测量原理可知,影响超声波气体流量计测量精度的因素很多,仍然有待于研究,流速分布系数的修正是提高测量精度的主要因素;多声道超声波气体流量计的声道分布方式,决定了对流速分布系数修正的效果,其正交积分方式也同样决定适合测量什么样的流场分布的流体流量;免在线标定系数的测量方法研究,可解决工程应用上的在线标定流量计,也可解决在线仪器检修的功

能;多声道超声波信号的发射和接收处理性能的进一步提高是保证仪器测量稳定性的关键;压缩性气体受压力和温度变化影响极大,声速本身受温度变化也较大,因此多声道超声波流量测量数据的温、压补偿和数据融合处理,是流量测量值修正不可缺少的环节。因此根据国内外研究情况,在国内进行多声道超声波气体流量测量方法及其关键技术的研究是很有必要的。

大多数国内生产单声道超声波气体流量计的公司目前只研制硬件电路,程序基本上来源于国外合作公司,原因是系数修正方法研究得不够。文献资料上有经验公式,但用仪器微处理器如何完成系数修正过程,还是急需解决的问题;国内唯一一家研制多声道(气体)超声波流量计的韩国昌民驻北京公司,也只完成了测量管段(一次仪表)和二次仪表的研制,流量计算机仍然需要订购韩国昌民韩国公司的产品。因此多声道(气体)超声波测量方法的研究是急需解决的,不同测量方法适合不同流体介质的流量测量和不同流态流体的流量测量。声道分布位置、超声波信号的发射与接收处理、流量测量值的数据处理等问题是研制多声道超声波(气体)流量计的关键问题,也有待于研究完善,才能够研制出高精度的多声道超声波(气体)流量计。

### 1.2.2 课题研究的目的和意义

超声波流量计具有非介入式测量气体流量的特点,是气体流量测量中最合适的一种流量计量手段,尤其是在天然气、油气和煤气等易燃易爆气体流量的测量中具有独到的优势。但在实际应用中也存在以上提到的问题。为了发挥超声波气体流量计的优势,研究多声道超声波流量测量方法,使其适合大管径气体流速、流量的测量,通过对各个声道超声波流速测量值的数值积分,加权求和得到多声道超声波流量测量值,从而克服流速分布引起的系数修正问题,提高流量测量精度。国外几个公司(例如美国 Instromet、荷兰 Daniel、韩国昌民等公司)已经拥有多声道超声波气体流量测量方法方面的专利技术,但这些算法属于核心保密技术。在国内,这方面的研究基本还是空白。从查阅的文献上看,国内外期刊都没有介绍多声道超声波流量测量方法和流量计的完整数学模型。研究多声道超声波气体流量测量方法及关键技术的意义在于:解决研制多声道超声波气体流量计的核心技术,促进国内多声道超声波气体流量计的引进速度,推广多声道超声波气体流量计的应用,早日实现有中国知识产权的多声道超声波气体流量计产品。

### 1.3 研究的方法和内容

超声波气体流量计的研究涉及流体力学、声学(超声学)、热力学、电子学、计算数学等多个领域,本书采用 Prandtl 的流速分布经验公式、光滑管的 Prandtl 方程和粗糙管的 Colebrook 方程相结合的方法来研究高精度超声波流量测量数学模型;分别用 Gauss - Legendre 和 Gauss - Jacobi 数值积分方法、线性神经网络方法完成多声道超声波气体流量计的数学建模;采用超声换能器的机械振动方程研究超声波换能器的等效电路,并研究接收超声波信号的发射与接收电路,通过实验方法研究数字极性相关超声波信号处理算法;研究温压流量修正算法、单声道时间域数据融合算法和多声道温、压补偿数据融合算法。

多声道超声波流量测量管段是由多组超声波换能器对布置在封闭测量管段的,每对超声波换能器构成一个弦向声道,通过测量在流体流速的作用下不同弦向声道中超声波的传播时间,从而求得弦向声道沿轴线方向的线平均流速值。在多声道超声波气体流量计中,采用不同的数字积分方法,解决流速分布不均匀所带来的系数修正问题。因为流速分布系数的计算目前只有靠经验公式,因此本书采用理论分析与数字仿真研究相结合的方法,完成流速分布系数的理论计算,利用高斯积分方法完成流量测量管段结构分析与多声道超声波气体流量测量数学建模,提高多声道超声波气体流量测量的理论水平,为多声道超声波流量计的研制打下基础。

为了解决多声道超声波气体流量计的免在线标定系数问题,采用神经网络自学习的方法,产生系数表格存储在仪器内。测量时采用自适应系数修正方法,完成数字积分。同样通过理论分析和数字仿真的方法,分析基于神经网络算法的多声道超声波气体流量计的可行性。

被测气体的温度和压力变化将导致流体密度变化,引起流量计体积流量测量值的改变。本书将采用温、压补偿的方法来修正体积流量测量值,通过理论分析和测量不确定分析补偿算法的实际意义。

### 1.4 国内外发展现状

#### 1.4.1 国内外发展概况

超声波流量计研究已有 80 多年的历史。1931 年 Rutten 发表的“关于利用声

波测量管道流体流量”是关于超声检测的最早记述资料。1957 年左右 Grosso 作了关于超声波流量计发展的一些评述。1930 年左右传播时间法中的相位差超声波流量计首先被研制出来,但并没有商品化生产<sup>[31]</sup>;20 世纪 50 年代频差法 MAXSON 流量计研制成功,其主要用于测量航空燃料,意味着超声流量计从此由研究阶段进入了应用阶段。Z. M. Shafranovskaia 于 1956 年研制出前苏联第一台超声波流量计, N. LBrazhikov 和 GLBirger 在 1957—1959 年间也做了这方面的研究工作<sup>[32]</sup>。20 世纪 60 年代末出现了多普勒效应的超声波流量计,有关超声波流量计的大量专利也相继问世。随着电子技术的不断发展,20 世纪 70 年代超声波流量计的性能逐步提高,其应用也得到了推广,理论研究也逐渐增多<sup>[33,34]</sup>。目前开展超声波气体流量计研究的国家有美国、加拿大、荷兰、德国、韩国、日本等,各国具有代表性的研究机构有德国的 Elster 和 Kerhne 公司、荷兰的 Instromet 公司、美国的西南研究所和 Danniell 公司等<sup>[35]</sup>。

但在 20 世纪 70 年代超声波流量计并未占据流量计领域的多大市场,因为当时的流量测量行业尚没有制定任何标准和规范,所以各流量计生产厂家都为自己的产品制定了一个应用标准。到了 20 世纪 90 年代,随着气体超声波流量计的迅速发展,为了解决缺乏统一标准所带来的各种问题,国际标准化组织 ISO 于 1998 年发布了《用时间传播法超声流量计测量封闭管道内的流体流量》(ISO/TR12765)标准,这个标准主要偏向于液体的流量测量。同年美国气体工业联合会(American Gas Association, A. G. A.)也颁布了第 9 号报告《用多声道超声波流量计测量天然气流量》(A. G. A. Reort NO.9),报告总结了在天然气流量测量领域相关的超声波流量计应用的阶段性研究成果<sup>[36,37]</sup>,制定了超声波气体流量计在天然气流量测量中的应用规范。中国在 2001 年参照上述两个报告制定了《用气体超声流量计测量天然气流量》<sup>[38]</sup>(GB/T 18604—2001)的国家标准。

随着多年的研究成果的积累,气体超声波流量计开始逐渐进入多个重要的应用领域。例如加拿大输气校验公司研究和成功建设了天然气实流校验装置(TCC 装置),装置测量精度可达 0.15%(公认是 0.2%)。该装置把输送管道中的天然气引入实流校验装置中,在输气管道中安装了一个旁路支管进行校流试验,试验后再把天然气送回到输气干线中去。由 6 台 DN400 mm 和 2 台 DN200 mm 气体超声波流量计、6 台 DN400 mm 和 2 台 DN200 mm 气体涡轮流量计作为标准表构成整个 TCC 装置<sup>[38]</sup>。中国在西气东输项目上选用了 40 台 Daniel 公司的超声波气体流量计作为标准校验用表<sup>[7]</sup>。继气体涡轮流量计之后,目前被气体工业界接受的最重要的流量计量器具是多声道超声波气体流量计<sup>[35,39]</sup>。国际上包括英国、荷兰、美国等已有 12 个国家政府机构批准多声道超声波气体流量计作为贸易结算的法定计量器具,成为继孔板、涡轮后的第三类高精度气体流量计。

我国自行研发超声波流量计比较晚。20 世纪 90 年代由同济大学声学研究室、上海光华仪表厂、唐山仪表厂等单位开始研制超声波流量计,并逐步应用到煤气流量计量中。目前国内有华中科技大学、天津大学、浙江大学、清华大学深圳研究生院、哈尔滨工业大学、西安交通大学、东南大学、大连理工大学、燕山大学等高等院校都在进行超声波流量计的研究,取得了一定的研究成果,并且国内生产超声波流量计的公司已经有几十家。但与国外的超声波流量计研究相比还有差距,尤其在多声道超声波流量计研究中,国内文献中只见华中科技大学、天津大学在从事多声道超声波流量测量方法的研究,与国外的研究水平差距较大。目前,国内天然气、油气和煤气等工业应用多声道超声波流量计却越来越多,因此进行多声道超声波气体流量测量方法及其关键技术研究具有重大意义。

### 1.4.2 国内外文献综述

#### 1. 多声道超声波气体流量测量方法研究简介

超声波流量测量方法有时差法、多普勒法、相关法、波束偏移法等方法,各种测量方法各有利弊。要求测量精度高的流量测量多采用时差法和多普勒法,多普勒法要求流体介质中含有反射物质,多应用于液体流量测量中。根据气体介质的特性,经过 30 年的实际应用,气体流量测量多采用时差法<sup>[3]</sup>。

在大管径气体流量测量中大多采用多声道超声波流量计,多声道超声波气体流量计的超声波换能器有多种布置方式,各个声道之间常按弦向声道布置<sup>[31]</sup>。在多声道超声波气体流量测量中,流速的计算公式为  $V = \sum_{i=1}^N K_i V_{zi}$ ,  $V_{zi}$  为各个声道沿管道轴线方向平均流速,  $K_i$  为各声道平均流速的加权系数。

多声道超声波气体流量计的关键技术在于流量测量完整的机理建模、超声波信号的处理和安装效应,由于多声道超声波气体流量测量数学建模方面的资料不多,因此将其作为本课题的重要研究内容。以下分别对超声波声信号处理和安装效应进行综述。

#### 2. 声道分布位置研究

单声道超声波流量计测量精度难以提高,主要是因为非理想流体流态下流速分布的影响。单声道超声波流量计声道布置单调,不足以克服非理想流体流态下流速分布的影响。因此多声道的布置方式开始作为解决这个问题的主要途径,研究工作也越来越受重视。不同的声道布置方式克服因流速波动对流量测量的效果不同,因此新型的超声波气体流量计具有多种声道布置方式,来解决速度分布畸变及旋转流等不正常流动特性的影响。至今已有若干种较特殊的声道布置方案申请