

# 气体超声流量测量中的补偿算法及实现

李 季, 章吉刚

(浙江威星智能仪表股份有限公司, 浙江 杭州 310015)

**摘要:**多声道超声流量计相比单声道超声流量计有更好的流场适应性、更高的测量精度和更优的测量可靠性。单声道气体超声流量计出现故障时, 流量计不能正常工作, 计量功能失效; 而多声道超声流量计有冗余性, 当其中 1 个声道失效时仍能保持较高的计量精度, 为维修人员争取一定的抢修时间。目前国内很多流量计产品在某些声道损坏的情况下并不能保证计量准确性。该文针对出现故障声道设计了 1 种基于正常声道数据和各声道独立校表的补偿算法, 保证多声道气体超声流量计出现 1 路故障声道时仍能准确计量。对比测试了不同型号 4 声道气体超声流量计无故障声道、出现 1 路故障声道时带补偿算法和不带补偿算法时的示值误差和重复性, 以验证补偿算法的有效性。该研究对于设计多声道气体超声流量计的工程人员有一定的指导意义。

**关键词:**多声道气体超声流量计; 补偿算法; 可靠性; 对称声道; 故障声道

中图分类号: TH814

文章编号: 1000-0682(2024)04-0110-04

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.04.021

## The compensation in the measurement of gas ultrasonic flow

LI Ji, ZHANG Jigang

(Zhejiang Viewshine High-Tech Co., Ltd., Zhejiang Hangzhou 310015, China)

**Abstract:** Compared with mono channel ultrasonic flowmeter, multi-channel ultrasonic flowmeter has better flow field adaptability, higher measurement accuracy and better measurement reliability. When the mono gas ultrasonic flowmeter fails, the flowmeter cannot work normally and the metering function fails. The multi-channel ultrasonic flowmeter has redundancy, when one of the channels fails, it can still maintain a high measurement accuracy, and strive for a certain rush repair time for maintenance personnel. At present, many domestic flowmeter products cannot guarantee the measurement accuracy when some sound channels are damaged. In this paper, a compensation algorithm based on normal channel data and independent calibration of each channel is designed to ensure that the multi-channel gas ultrasonic flowmeter can still measure accurately when there is one faulty channel. In order to verify the effectiveness of the compensation algorithm, the error and repeatability of different models of 4-channel gas ultrasonic flowmeters with no fault channel, with and without compensation algorithm are compared and tested. The research has a certain guiding significance for the engineers who design multi-channel gas ultrasonic flowmeter.

**Keywords:** multi-channel gas ultrasonic flow-meter; compensation algorithm; reliability; symmetrical channel; faulty channel

## 0 引言

时差法多声道气体超声波流量计由于多声道的结构设计, 可以获得更多的流场信息, 拥有更高的测量精度和更好的流场适应性<sup>[1-2]</sup>。同时多声道的冗余设计可以保证流量计出现故障声道时仍能保持较高的计量准确性<sup>[3]</sup>。针对气体超声流量测量中出

收稿日期: 2023-12-08

第一作者: 李季(1984—), 男, 汉族, 硕士, 从事超声计量方面技术研究及产品化工作。

通信作者: 章吉刚(1983—), 男, 浙江嵊州人, 硕士, 中级工程师, 主要从事超声测流技术研究。E-mail: zhang-593@163.com

现故障声道情况,该文设计了一种基于正常声道数据和各声道独立校表的补偿算法,并将该算法应用于浙江威星智能仪表股份有限公司研发的 DN100 型 4 声道气体超声波流量计中,并在音速喷嘴气体流量标准装置上进行了流量实验,实验结果证明了该补偿算法的有效性,出现 1 路故障声道带补偿算法时各测试流量点下示值误差和重复性均满足国标要求。同时对比测试了国内某品牌 4 声道气体超声波流量计出现 1 路故障声道时的示值误差和重复性,各测试流量点下重复性满足国标,但部分测试流量点下的示值误差超标。对比实验证明了补偿算法的优越性。

## 1 时差法气体超声波流量计测量原理

时差法气体超声波流量计是速度式流量计,通过测量气体的流速来测量流过的气体体积。气体的流速可以通过测量超声波脉冲信号的顺逆流飞行时间差得到<sup>[4]</sup>,时差法测量原理如图 1 所示。

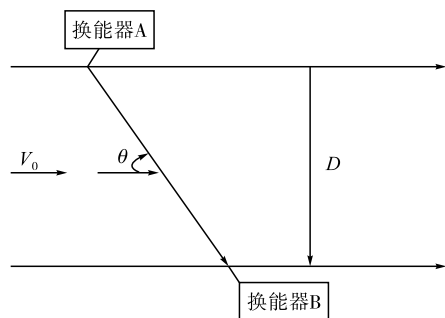


图 1 时差法测量原理图

气体流量计算的推导过程如下:

按式(1)计算超声脉冲的顺流飞行时间  $t_{\text{down}}$ :

$$t_{\text{down}} = L / (C + V_0 \cos \theta) \quad (1)$$

式中: $L$  是声道长度,即换能器 A 端面中心到换能器 B 端面中心之间的距离; $C$  为声速; $\theta$  为声道角; $V_0$  为气体流速。

按式(2)计算超声脉冲的逆流飞行时间  $t_{\text{up}}$ :

$$t_{\text{up}} = L / (C - V_0 \cos \theta) \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得到式(3):

$$V_0 = \frac{L}{2 \cos \theta} \left( \frac{1}{t_{\text{up}}} - \frac{1}{t_{\text{down}}} \right) \quad (3)$$

由式(4)计算得到流量  $Q$ :

$$Q = k \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \times V_0 \quad (4)$$

式中: $k$  为雷诺数修正系数; $D$  为流量计直径; $V_0$  为测得的气体流速。

## 2 多声道气体超声波流量计出现故障声道时的补偿算法

### 2.1 平行交叉的对射式 4 声道超声流量计声道布置

DN100 型 4 声道气体超声波流量计采用平行交叉的对射式 4 声道布置<sup>[5]</sup>,图 2 所示为声道布置结构图。 $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1$  和  $D_2$  为安装在管道内壁处的换能器, $A_1$  和  $A_2$  为声道 1, $B_1$  和  $B_2$  为声道 2, $C_1$  和  $C_2$  为声道 3, $D_1$  和  $D_2$  为声道 4。声道 1 和声道 4 为靠近管壁的对称声道,声道 2 和声道 3 为靠近轴线的对称声道。流道内气体流态稳定时,声道 1 和声道 4 测得的流速一致,声道 2 和声道 3 测得的流速一致<sup>[6-7]</sup>。因此流态稳定时某路声道出现故障时可以利用其对称声道的流量数据。

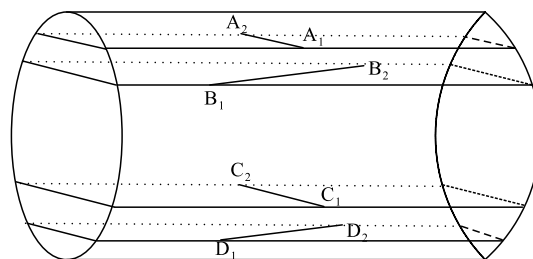


图 2 平行交叉的对射式声道布置结构图

### 2.2 基于正常声道数据及各声道独立校表的补偿算法

补偿算法需要保证任意 1 路声道故障时气体流量测量的准确性<sup>[8-9]</sup>。假定声道 4 出现故障,流量计判断出此声道为故障声道,丢弃故障声道的流量数据。此时声道 1、声道 2 和声道 3 测得的流量分别是  $Q_1, Q_2$  和  $Q_3$  且  $Q_1, Q_2$  和  $Q_3$  测量是准确的。若流量计测得的流量  $Q$  可以准确地用  $Q_1, Q_2$  和  $Q_3$  表示,则证明该补偿算法有效。

通过每个声道独立校表来保证各声道正常工作时所测得的流量是准确的。出现 1 路故障声道时可以采用以下算法来计算此时的流量。

丢弃故障声道的流量数据,用另外 3 路正常声道的流量数据的平均值作为最终的流量计测试结果  $Q$ ,即  $Q = (Q_i + Q_j + Q_k) / 3$ ,式中  $Q_i, Q_j$  和  $Q_k$  分别为正常的 3 个声道所测得的流量。

由于各路声道是独立校表的,因此每路声道可以独立代表整个流量计计量<sup>[10]</sup>。

如果 4 路声道均是正常的,则每路声道测得的测量声速是比较接近的<sup>[11]</sup>。测量声速的计算式为<sup>[4]</sup>:

$$C_{\text{测}} = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{t_{\text{down}}} + \frac{1}{t_{\text{up}}} \right)$$

式中:  $C_{\text{测}}$  为测量声速;  $L$  为声道长度;  $t_{\text{down}}$  为顺流飞行时间;  $t_{\text{up}}$  为逆流飞行时间。

因此, 流量计很容易通过测量声速判断出故障声道。比较 4 路声道的测量声速  $C_1, C_2, C_3$  和  $C_4$ , 如果其中 1 路声道的测量声速与另外 3 路声道的测量声速偏差超过限值则判断该声道为故障声道<sup>[12-13]</sup>, 丢弃该故障声道的流量数据。图 3 是出现 1 路故障声道时补偿算法的流程图。

### 2.3 实现该补偿算法的前提条件

实现该补偿算法的前提条件是所设计的多声道气体超声流量计各声道具有良好的重复性和线性度, 同时校表设备支持流量计各声道独立校表。

表 1 所示为 DN100 型 4 声道气体超声流量计各声道的重复性, 图 4 所示为 DN100 型 4 声道气体超声流量计各声道线性度, 可以看出其满足流量计各声道独立校表的要求。

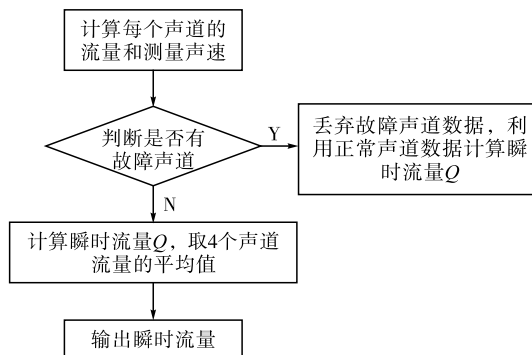


图 3 补偿算法流程图

表 1 DN100 型 4 声道气体超声流量计及各声道重复性

流量点	流量/(m <sup>3</sup> /h)	声道 1 重复性/%	声道 2 重复性/%	声道 3 重复性/%	声道 4 重复性/%
$Q_{\text{max}}$	650	0.05	0.06	0.09	0.10
$0.7Q_{\text{max}}$	455	0.09	0.08	0.07	0.06
$0.4Q_{\text{max}}$	260	0.08	0.09	0.08	0.05
$0.1Q_{\text{max}}$	65	0.06	0.06	0.09	0.08
$Q_{\text{min}}$	4	0.09	0.10	0.12	0.15

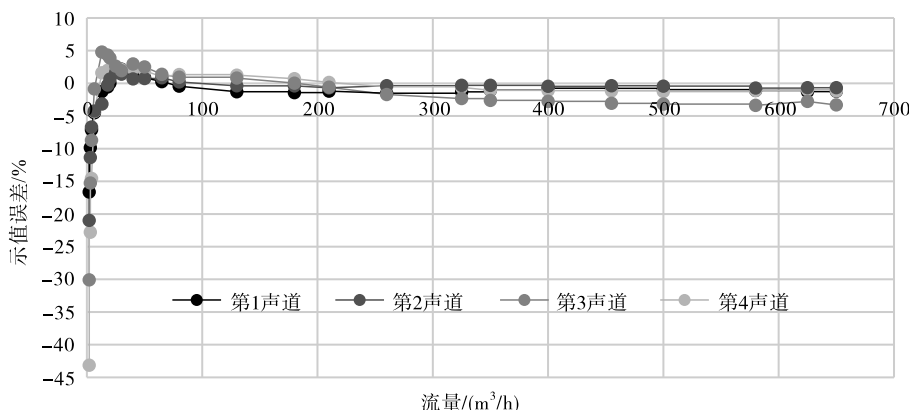


图 4 DN100 型 4 声道气体超声流量计各声道线性度

## 3 不同型号 4 声道气体超声流量计 1 路声道故障时的试验

### 3.1 DN100 型 4 声道气体超声流量计补偿算法试验方案

步骤 1: 对 DN100 型 4 声道气体超声流量计各声道进行单独校表, 校表后每个声道具有各自单独的  $K$  值和  $B$  值;

步骤 2: 只插上其中 3 路声道的换能器组, 拔掉其中 1 路声道的换能器, 此步骤模拟流量计出现 1 路故障声道;

步骤 3: 记录出现 1 路故障声道时带补偿算法的试验数据(记录该状态下每个测试流量点下的示值误差和重复性, 每个流量点测 3 次, 每次测 60 s, 稳定时间 60 s);

步骤 4: 记录出现 1 路故障声道时不带补偿算法的试验数据(记录该状态下每个测试流量点下的示值误差和重复性, 每个流量点测 3 次, 每次测 60 s, 稳定时间 60 s);

步骤 5: 记录流量计正常工作时每个测试流量点下的示值误差和重复性, 每个流量点测 3 次, 每次测 60 s, 稳定时间 60 s。

3.2 DN100 型 4 声道气体超声流量计对比试验结果

表 1 对比试验结果显示, DN100 型 4 声道气体超声流量计正常状态和 1 路声道故障带补偿算法时

示值误差和重复性均满足国标, 1 路声道故障无补偿算法时重复性满足国标、但示值误差超标。试验证明了该补偿算法的有效性。

表 2 DN100 型 4 声道气体超声流量计对比试验结果

流量点	流量/(m <sup>3</sup> /h)	正常状态		出现 1 路故障声道(无补偿算法)		出现 1 路故障声道(有补偿算法)	
		检定示值误差/%	重复性/%	检定示值误差/%	重复性/%	检定示值误差/%	重复性/%
$Q_{\max}$	650	-0.12	0.05	1.32	0.09	-0.22	0.06
$0.7Q_{\max}$	455	0.32	0.07	1.51	0.06	0.35	0.08
$0.4Q_{\max}$	260	0.08	0.04	2.12	0.05	0.12	0.09
$0.1Q_{\max}$	65	0.25	0.06	1.55	0.06	0.32	0.08
$Q_{\min}$	4	0.44	0.11	1.32	0.11	0.55	0.12

3.3 DN100 型 4 声道气体超声流量计试验平台

图 4 所示为浙江威星智能仪表股份有限公司研制生产的 DN100 型 4 声道气体超声流量计试验平台现场。



图 5 试验平台现场

3.4 国内某品牌 4 声道气体超声流量计试验方案(出现 1 路故障声道和正常状态对比试验)

- 步骤 1: 拔掉某品牌 4 声道气体超声波流量计中的其中任意 1 路声道换能器(模拟出现 1 路故障声道);
- 步骤 2: 测量并记录该状态下(出现 1 路故障声道)的示值误差和重复性;
- 步骤 3: 测量并记录流量计正常工作状态下的示值误差和重复性。

3.5 国内某品牌 4 声道气体超声波流量计试验结果

测量了国内某品牌 4 声道气体超声流量计出现 1 路故障声道时的示值误差和重复性, 表 3 试验结果显示其部分测试流量点下重复性满足国标, 但示值误差超标。

表 3 国内某流量计厂商 4 声道气体超声波流量计对比试验

流量点	流量/(m <sup>3</sup> /h)	正常状态(4 声道正常工作)		出现 1 路故障声道	
		检定示值误差/%	重复性/%	检定示值误差/%	重复性/%
$Q_{\max}$	650	0.51	0.03	4.39	0.05
$0.7Q_{\max}$	455	0.36	0.05	3.66	0.06
$0.4Q_{\max}$	260	0.49	0.06	2.81	0.08
$0.1Q_{\max}$	65	-0.35	0.08	1.04	0.09
$Q_{\min}$	4	0.82	0.08	0.65	0.12

4 结论

该文介绍了针对多声道气体超声波流量计出现 1 路故障声道的流量补偿算法, 该补偿算法基于正常声道数据和各声道独立校表。详细介绍了该算法的原理和实现过程, 并做了流量计无故障声道、出现 1 路故障声道时带补偿算法和不带补偿算法下的对比试验, 试验结果证实了该算法的有效性。同时测量了国内某品牌 4 声道气体超声流量计正常状态和出现 1 路故障声道时的示值误差和重复性, 试验结果表明出现 1 路故障声道时重复性符合国标要求但示值误差

超标。对比试验证明了带有该补偿算法的气体超声流量计出现 1 路故障声道时的性能优于其他同类产品。当多声道气体超声波流量计某个声道出现故障时, 该文提出的补偿算法在故障解决前仍能提供较高的计量精度, 降低因声道故障引起的流量计量的偏差。

参考文献:

[1] 鲍敏. 影响气体超声波流量计计量精度的主要因素研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

[2] 李跃忠. 多声道超声气体流量计的建模与仿真[J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(4): 39-42.

(下转第 119 页)

与输出之间的映射关系,减少测量误差,提高数据的准确性。针对煤矿井下的特殊环境,该研究提出一种基于遗传算法优化的神经网络方法进行传感器非线性校正。这种方法利用神经网络的自学习特性和非线性映射能力,有效处理复杂的非线性因素和特征提取,以应对井下恶劣的工作环境。同时,结合遗传算法对校正模型的权值和阈值参数进行优化调整,进一步增强校正的准确性和模型的性能。实验结果表明,经过该方法校正后的瓦斯浓度值与标准瓦斯浓度值更加接近,误差明显减小。这充分证实了该方法在实际应用中的有效性和可靠性,对于提高煤矿生产的安全性和效率具有重要意义。

## 参考文献:

- 与输出之间的映射关系,减少测量误差,提高数据的准确性。针对煤矿井下的特殊环境,该研究提出一种基于遗传算法优化的神经网络方法进行传感器非线性校正。这种方法利用神经网络的自学习特性和非线性映射能力,有效处理复杂的非线性因素和特征提取,以应对井下恶劣的工作环境。同时,结合遗传算法对校正模型的权值和阈值参数进行优化调整,进一步增强校正的准确性和模型的性能。实验结果表明,经过该方法校正后的瓦斯浓度值与标准瓦斯浓度值更加接近,误差明显减小。这充分证实了该方法在实际应用中的有效性和可靠性,对于提高煤矿生产的安全性和效率具有重要意义。
- 参考文献:**
- [1] 王璐,程勇,尹伟,等. 基于 Sage - Husa 预测算法的直流无刷电机 Hall 传感器位置信息校正[J]. 仪器仪表学报,2023,44(10):90-99.
  - [2] GAO Z, ZHOU B, HOU B, et al. Self - calibration of nonlinear signal model for angular position sensors by model - based automatic search algorithm[J]. Sensors, 2019,19(12):2760-2760.
  - [3] LI Y, LI C H, SONG Z, et al. Correction method of three - axis magnetic sensor based on DA - LM[J]. Metals,2022,12(3):428-428.
  - [4] 杨秋菊,王彤. 扩散硅压阻式压力传感器非线性误差纠正方法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2023,44(03):466-472.
  - [5] 王玉芬,周国华,吴轲娜,等. 基于动态学习策略多群体粒子群的消磁站水下磁传感器位置校正方法[J]. 兵工学报,2023,44(02):526-533.
  - [6] 蒲明辉,罗祺,张金皓,等. 差动平行极板变极距电容式传感器的误差校正方法[J]. 仪表技术与传感器,2022(03):33-39.
  - [7] 娄敏,彭雪峰,叶大伟,等. 高精密多极磁感应角位移传感器校正方法的技术研究[J]. 传感技术学报,2023,36(09):1452-1458.
  - [8] 李景富,李福荣. 基于误差反馈的光纤传感器测距畸变校正方法[J]. 激光杂志,2023,44(08):231-235.
  - [9] 刘万里,张学亮,徐健斌,等. 多传感器融合的时空关系在线自动校正方法研究[J]. 中国科学:技术科学,2023,53(11):1975-1989.
  - [10] 申永鹏,王前程,王延峰,等. 直流母线单电流传感器零点漂移误差自校正策略[J]. 电机与控制学报,2023,27(07):133-142.
  - [11] 于博文,俞若愚,尹飞飞,等. 一种 CMOS 温度传感器输出误差的数字校正方法[J]. 半导体技术,2023,48(01):43-47+53.
  - [12] 肖舜仁,胡青春,李妮妮,等. 基于 Levenberg - Marquardt 算法的无人机多传感器校正方法研究[J]. 机床与液压,2022,50(10):12-18.
  - [13] 廖金湘,陈木荣,张敏,等. 基于纹理特征的环状肌电传感器位置偏移校正方法[J]. 国外电子测量技术,2022,41(04):29-36.
  - [14] 丁军,古榆川,黄霞,等. 基于改进遗传算法优化人工神经网络的 304 不锈钢流变应力预测准确性研究[J]. 机械工程学报,2022,58(10):78-86.
  - [15] 胡志新,王涛. 改进遗传算法优化 BP 神经网络的双目相机标定[J]. 电光与控制,2022,29(01):75-79.
  - [16] 谢琳琳,朱武,崔昊杨. 改进遗传优化神经网络的光伏阵列故障诊断[J]. 电源技术,2022,46(07):802-806.
  - [17] 于洋,张骏,王磊,等. 基于改进遗传算法的多源数据继电保护定值优化策略[J]. 电子设计工程,2024,32(6):81-85.

(上接第 113 页)

- (上接第 113 页)

  - [3] 刘畅. 气体超声流量计在声道故障状态下的应用技术研究[J]. 化工自动化及仪表, 2020, 47(4): 303-307.
  - [4] 全国石油天然气标准化技术委员会. 用气体超声流量计测量天然气流量: GB/T 18604—2014[S]. 2014.
  - [5] 祝飘霞. DN804 声道气体超声波流量计设计与适应性研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2020.
  - [6] 郑丹丹. 速度分布对气体超声流量计声传播规律的影响[J]. 天津大学学报, 2017, 50(11): 1169-1175.
  - [7] 郭燕军. Z 型多声道超声波流量计常见故障分析[J]. 工业计量, 2022, 32(1): 78-80.
  - [8] 李玉军. 气体超声波流量计现场应用技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
  - [9] 陈鹏. 超声波流量计诊断及故障处理[J]. 石化技术, 2016(3): 127-128.
  - [10] 裴全斌. 天然气超声流量计的应用与故障处理[J]. 石油工业技术监督, 2012, 28(3): 47-48.
  - [11] 全恺. 超声流量计现场故障诊断及处理方法[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(3): 33-34.
  - [12] 刘丹丹. 多声道超声波气体流量测量若干问题的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
  - [13] 王清伟. 一种提高超声波流量计测量精度的补偿算法[J]. 声学及电子工程, 2009(3): 34-36.

安:西安石油大学,2016.