

超声波流量计整流器优化设计

李 季,章吉刚,汪志远,魏佳敏

(浙江威星智能仪表股份有限公司,浙江 杭州 310013)

摘要: 气体超声波流量计的测量精度由飞行时间的测量精度和流量计自身的流场适应性决定,流量计的流场适应性又由流量计的声道布置和整流器的性能决定。文章设计了一种内嵌于流量计的整流器,详细阐述了该整流器的结构、各模块的功能。介绍了整流器性能优化的理论依据、过程以及整流器性能优劣的判别准则。该整流器性能优化主要取决于起旋器的优化,文章给出了装有 8 片起旋器和装有 10 片起旋器的整流器在直管、单弯管下的性能参数对比,试验结果显示装有 10 片起旋器的整流器有着更好的流场适应性;重复性满足国标要求,直管示值误差与弯管示值误差的差值 $< 0.3\%$ 。文章的创新点在于给出气体超声波流量计整流器设计和优化的理论依据和一整套流程,对于设计气体超声波流量计整流器的科研人员有借鉴意义。

关键词: 整流器;测量误差;流态畸变;气体超声波流量计;弯管;数值仿真

中图分类号: TH814

文章编号: 1000-0682(2024)01-0038-04

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.01.009

Optimal design of rectifier for ultrasonic flow meters

LI Ji,ZHANG Jigang,WANG Zhiyuan,WEI Jiamin

(Zhejiang Viewshine High-Tech Co., Ltd., Zhejiang Hangzhou 310013, China)

Abstract: The measurement accuracy of gas ultrasonic flow meters is determined by the measurement accuracy of flight time and the adaptability of the flow field of the flow meter itself, the flow field adaptability of the flow meter is determined by the sound channel arrangement of the flow meter and the performance of the rectifier. The article designs a rectifier embedded in a flow meter, the structure of the rectifier, the functions of each module. This article introduces the theoretical basis, process, and criteria for evaluating the performance of rectifiers. The performance optimization of the rectifier mainly depends on the optimization of the spinner, the article provides a comparison of performance parameters between rectifiers equipped with 8 gyrators and rectifiers equipped with 10 gyrators under straight and single bend conditions, the experimental results show that rectifiers equipped with 10 spinners have better flow field adaptability; repeatability meets national standard requirements, the difference between the indication error of straight pipes and the indication error of bent pipes is less than 0.3% . The innovation of the article lies in providing the theoretical basis and a complete process for the design and optimization of a gas ultrasonic flow meter rectifier, it can help the researchers who design the ultrasonic flow meter rectifiers.

Keywords: rectifier; measurement error; flow distortion; gas ultrasonic flow meter; elbow; numerical simulation

0 引言

时差法气体超声波流量计的测量精度受流场畸

变的影响^[1]。现实中气体超声波流量计的安装环境由于受到空间限制等原因不可避免引入单弯管、双弯管等扰流件,扰流件会引起流场畸变^[2]。因此需要在流量计前加装整流器来减少因扰流件引起的涡流、二次流,使得流过整流器的流体流速变得均匀,从而满足流量计计量精度的要求^[3]。文章设计的整流器内嵌在流量计中,既改善了流场,又有效缩

收稿日期:2023-05-23

第一作者:章吉刚(1983—),男,硕士,中级工程师,浙江嵊州人,主要从事超声测流技术研究。E-mail:zhang-593@163.com

短了流量计的整体长度,克服了分离式整流器占用空间大和安装复杂的问题,满足《JJG1030-2007 超声流量计检定规程》中超声流量计的安装要求(在安装整流器的前提下,流量计上游直管段长度至少 5D、流量计下游直管段长度至少 3D)。此整流器由起旋器、直管混合腔、蜂窝整直器三部分组成,可以通过优化起旋器的设计来改善整流器的性能^[4]。数值仿真初步验证整流器方案的可行性,直管和弯管下的实流实验最终验证优化后整流器的实际性能^[5]。实验证明装有 10 片起旋器的整流器性能:重复性满足国标要求(分界流量点 q_l 以上重复性 $<0.2\%$,分界流量点 q_l 以下重复性 $<0.4\%$),直管示值误差与弯管示值误差的差值 $<0.3\%$ 。实验结果证明此整流器有良好的流场适应性^[6]。

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^[7],时差法测量原理如图 1。

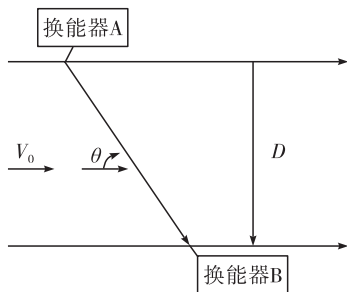


图 1 时差法测量原理图

超声脉冲的顺流飞行时间 t_{down} 如公式(1)计算得到:

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

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; θ 为声道角; V_0 为气体流速。

超声脉冲的逆流飞行时间 t_{up} 如公式(2)计算得到:

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

由公式(1)和(2)得到公式(3)即气体流速 V_0 的计算公式。

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

流量 Q 由公式(4)计算得到:

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

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

2 气体超声波流量计整流器结构设计

2.1 整流器的结构及各模块功能

文章设计的超声波流量计整流器由起旋器、直管混合腔、蜂窝整直器三部分组成。整流器具体结构示意图如图 2 所示。起旋器起到减少涡流和二次流的作用,直管混合腔起到让气流充分发展一段距离,蜂窝整直器起到理顺气流,使得流体流速变得均匀^[8]。

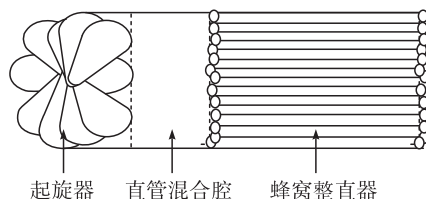


图 2 超声流量计整流器结构示意图

2.2 整流器的实物图



图 3 整流器正视图



图 4 整流器背视图

3 数值仿真结果

首先分别对装有整流器的流量计在前面直管和前面单弯管安装条件下换能器中心面的流速分布进行仿真,研究直管和弯管安装环境下换能器中心面的流速分布差异情况,由仿真结果初步验证此整流器的性能。数值仿真用来初步筛选整流器^[9-10]。

图 5 是流量计上游是 5D 直管时换能器中心面的流速分布仿真结果,图 6 是流量计上游 5D 处安装单弯管时换能器中心面的流速分布仿真结果。仿真时共取了 0.4 m/s、2.5 m/s、6.25 m/s、10 m/s、17.5 m/s、25 m/s 六个流量点,仿真结果显示的是

各流量点下换能器中心面处的流速分布图和仿真得到的面平均速度与理论设置的进口速度(均匀分布)的误差,即 $E = \frac{(V_{\text{仿真}} - V_{\text{进口}})}{V_{\text{进口}}} * 100\%$ 。

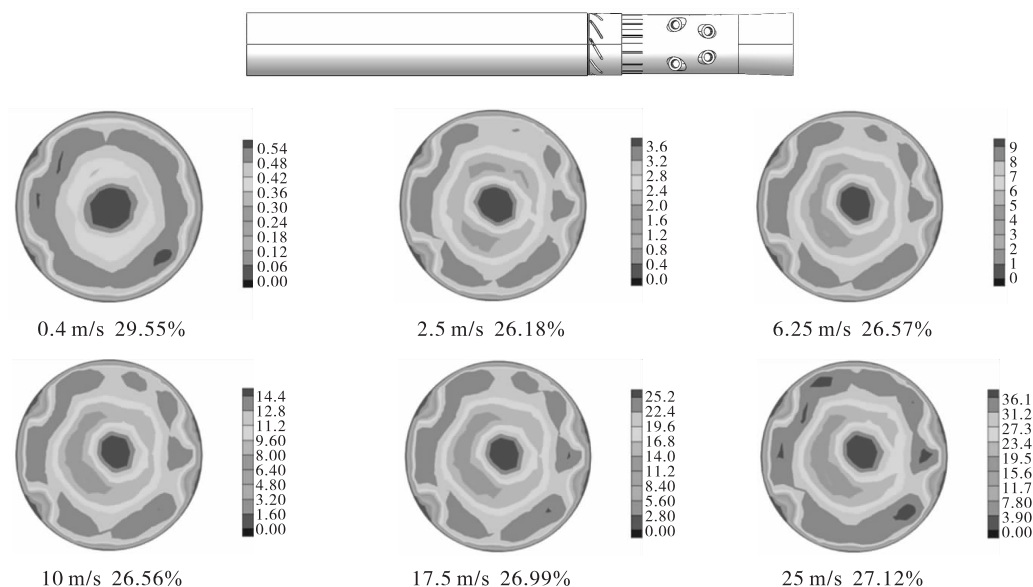


图 5 流量计上游 5D 为直管时换能器中心面仿真结果

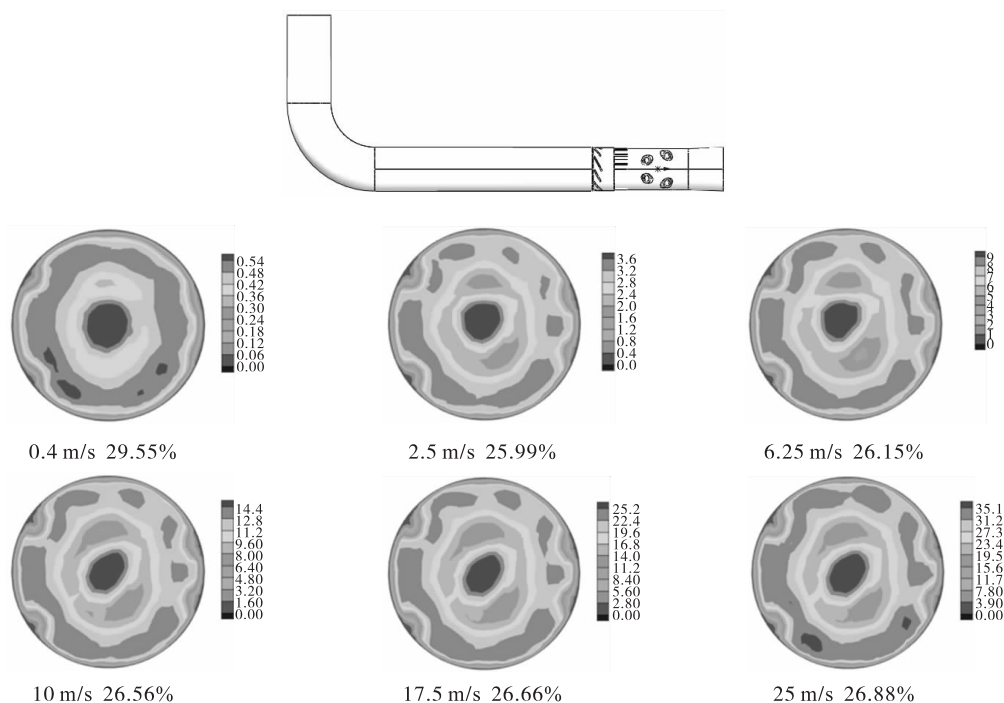


图 6 流量计上游 5D 为弯管时换能器中心面仿真结果

从图 5、图 6 这两个图对比可以看出,上游 5D 是直管和上游 5D 处是弯管时,换能器中心面的流场情况和均匀度十分相似。由此初步判断此整流器方案是可行的。

4 整流器的优化

4.1 整流器性能优劣的判别准则

整流器性能优劣的评价准则有两条^[11]:①流量计前面是直管和弯管的条件下各流量点重复性均

好,满足国标要求(分界流量点 q_t 以上重复性 $<0.2\%$,分界流量点 q_t 以下重复性 $<0.4\%$);②流量计前面是直管和弯管的条件下同一流量点示值误差差值 $<0.5\%$,即 $|E_{\text{直管}} - E_{\text{弯管}}| < 0.5\%$ 。这两点均说明设计的整流器流场适应性好,即整流器适用于气体超声波流量计的常见的安装环境。

4.2 整流器的优化过程

文章设计的整流器由起旋器、直管混合腔、蜂窝整流器组成,由于该整流器内嵌于流量计,流量计长度有限,因此整流器的长度受限,故直管混合腔和蜂窝整流器的长度受限。整流器性能的优化空间在于蜂窝整流器的正六边形蜂窝的边长、起旋器叶片的角度和数量。起旋器的角度越大、叶片的数量越多,起旋器破坏漩涡流和二次流的能力越强。但是起旋器角度越大、叶片数量越多也存在缺点。缺点一:会导致流量计压损变大^[12];缺点二:起旋器加工难度变大,加工成本变高。整流器性能优化是先数值仿真初步验证设计方案可行,然后做出具体整流器,最后在实流试验中实测性能,若性能不满足要求,改进起旋器,再试验测试性能,这样不断迭代优化,直至整流器性能满足要求。

4.3 试验方案(直管和弯管下对比测试^[13])

步骤1:将设计好的整流器组合后内嵌入流量计(被测流量计口径为 DN50,即直径长度为 50 mm),流量计前安装长度为 5D 的直管,记录 q_{\min} 、 $0.3q_{\min}$ 、 q_t 、 $0.4q_{\max}$ 、 $0.7q_{\max}$ 、 q_{\max} 流量点下流量计的重复性和示值误差,每个流量点测试 6 次,每次测试时长 60 s,稳定时间 60 s;

步骤2:流量计前安装长度为 5D 的直管,直管前再安装单弯管,记录 q_{\min} 、 $0.3q_{\min}$ 、 q_t 、 $0.4q_{\max}$ 、 $0.7q_{\max}$ 、 q_{\max} 流量点下流量计的重复性和示值误差,每个流量点测试 6 次,每次测试时长 60 s,稳定时间 60 s;

步骤3:计算各流量点下直管和弯管示值误差差值。

4.4 试验结果

如表 1 和表 2 所示的试验结果是装 8 片起旋器的整流器和装 10 起旋器的整流器的试验结果(被测流量计口径为 DN50,最大流量为 160 m³/h、最小流量 1.6 m³/h,分界流量为 16 m³/h,所测得的示值误差为原始误差,即被测流量计事先没有经过校表)。

从表 1 数据看装有 8 片起旋器的整流器在弯管 160 m³/h 流量点重复性超标、在流量点 1.6 m³/h 和 4.8 m³/h 处,直管和单弯管的示值误差差值较大,

分别为 1.99%、1.75%,不满足测量精度的要求,同时说明此整流器流场适应性较差。从表 2 数据看装有 10 片起旋器的整流器不仅直管、弯管下重复性远远满足国标要求,而且所有流量点下直管和弯管的示值误差差值 $<0.3\%$,证明此整流器流场适应性较好(上游直管和弯管对流量计测量管段所形成的流场不同)。需要说明的是装有 8 片起旋器的整流器是试验优化过程中其中一个,装有 10 片起旋器的整流器是最终优化后得到的性能优良的整流器。

表 1 装有 8 片起旋的整流器直管、弯管测试结果

流量点/ (m ³ /h)	直管重 复性/%	弯管重 复性/%	直管示 值误差/%	弯管示 值误差/%	示值误差 差值/%
1.6	0.230	0.152	-0.11	-2.1	-1.99
4.8	0.156	0.089	-5.77	-7.52	-1.75
16	0.073	0.029	-10.005	-9.77	0.24
64	0.052	0.096	-9.12	-9.15	-0.03
112	0.017	0.131	-8.8	-9.03	-0.23
160	0.066	0.229	-4.57	-4.92	-0.35

表 2 装有 10 片起旋的整流器直管、弯管测试结果

流量点/ (m ³ /h)	直管重 复性/%	弯管重 复性/%	直管示 值误差/%	弯管示 值误差/%	示值误差 差值/%
1.6	0.157	0.173	7.03	7.15	0.12
4.8	0.138	0.167	-0.55	-0.26	0.29
16	0.016	0.052	-8.55	-8.72	-0.17
64	0.097	0.024	-9.86	-9.96	-0.10
112	0.073	0.019	-10.13	-10.08	0.05
160	0.036	0.026	-10.60	-10.53	0.07

4.5 实验平台现场

图 7 是测试整流器实际性能的实验平台的现场照片。



图 7 实验平台现场

5 结论

该文介绍了所设计的超声波流量计整流器的作用、结构以及组成此整流器各部分的功能。详细描述了整流器的设计和优化流程:先数值仿真初步验证整流器性能,然后做出整流器实物安装在流量计

(下转第 56 页)

- 2023, 45(06):1814-1820.
- [9] 李萍. 基于 BP 和多项式拟合模型在电力系统短期负荷的研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2018(05): 135-138.
- [10] 徐晴, 周超, 赵双双, 等. 基于机器学习的短期电力负荷预测方法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 70-75.
- [11] 李大中, 李颖宇. 基于深度学习与误差修正的超短期风电功率预测[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12): 200-205.
- [12] 查雯婷, 杨帆, 陈波, 等. 基于 CNN 的区域风功率预测方法[J]. 计算机仿真, 2021, 38(05): 318-323.
- [13] 冯裕祺, 李辉, 李利娟, 等. 基于 CNN-GRU 的光伏电站电压轨迹预测[J]. 中国电力, 2022, 55(07): 163-171.
- [14] 曾囿钧, 肖先勇, 徐方维. 基于小波变换与 BiGRU-NN 模型的短期负荷预测方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(06): 103-109.
- [15] HU Y, ZHANG Q. A hybrid CNN-LSTM machine learning model for rock mechanical parameters evaluation[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023: 225.
- [16] WANG Delu, GAN Jun, MAO Jinqi, et al. Forecasting power demand in China with a CNN-LSTM model including multimodal information[J]. Energy, 2023, 263(PE).
- [17] 范士雄, 刘幸蔚, 於益军, 等. 基于多源数据和模型融合的超短期母线负荷预测方法[J]. 电网技术, 2021, 45(01): 243-250.
- [18] HOU Jingwei, WANG Yanjuan, ZHOU Ji, et al. Prediction of hourly air temperature based on CNN-LSTM[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2022, 13(1).
- [19] 乔石, 王磊, 张鹏超, 等. 基于时间模式注意力机制的 GRU 短期负荷预测[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-9[2023-06-05].
- [20] 董雪, 赵宏伟, 赵生校, 等. 基于二次分解和多目标优化的超短期海上风电功率预测[J]. 高电压技术, 2022, 48(08): 3260-3270.
- [21] 朱凌建, 荀子涵, 王裕鑫, 等. 基于 CNN-BiLSTM 的短期电力负荷预测[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4532-4539.
- [22] 梁宏涛, 王莹, 刘红菊, 等. 基于注意力机制的 CNN-BiGRU 短期光伏发电功率预测[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(06): 259-265.
- [23] 刘倩倩, 刘钰山, 温烨婷, 等. 基于 PCC-LSTM 模型的短期负荷预测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(12): 2529-2536.

(上接第 41 页)

上,最后分别测试上游安装直管和安装弯管时流量计的性能(主要关注重复性和示值误差差值这两个技术指标)。试验结果表明装有 10 片起旋器的整流器性能优于装有 8 片起旋器的整流器,缩短了上游直管段长度,减少了单弯管引起的误差偏差值。该文的意义在于给出了整流器设计的理论依据、整流器性能的优化过程,对于设计气体超声波流量计整流器的从业人员有一定的帮助。

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] 陈炜刚. 气体超声波流量计非理想流场分析与补偿方法[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [3] 田顺佳. 不同整流器对超声波流量计计量的影响[J]. 油气储运, 2021, 40(7): 780-790.
- [4] 章圣意. 气体超声波流量计整流装置设计与仿真分析[J]. 自动化仪表, 2021, 42(3): 8-11.

- [5] 万勇. CFD 流动调整器性能评价方法研究[J]. 中国测试, 2016, 42(6): 33-36.
- [6] 陈红. 超声波流量计整流器设计及验证[J]. 自动化仪表, 2018, 39(7): 91-94.
- [7] 用气体超声流量计测量天然气流量: GB/T 18604-2014[S]. 2014.
- [8] 熊光德. 流动调整器对气体流量计量的影响[J]. 天然气与石油, 2009, 27(4): 34-37.
- [9] 杨运旅. 基于 CFD 的流动调整器性能评价方法研究与安装优化[D]. 广州:华南理工大学, 2017.
- [10] 陈国宇. 超声流量计声道设计与调整器流场优化方法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
- [11] 厉胜男. 气体超声波流量计流场分析及整流器设计[D]. 成都:电子科技大学, 2021.
- [12] 朱国俊. 典型扰流流场对超声流量计计量性能的影响研究[D]. 北京:北京化工大学, 2022.
- [13] 姚平. 复杂流场下气体超声波流量计测量精度提升方法[D]. 杭州:浙江大学, 2018.