doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018050012

基于 CFD 的气体超声流量计计量准确性研究

陈利琼[1]， 谢虹雅[1]， 孙靖云[1]， 刘 琦[1]， 陶宏伟[2]
(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500;
2. 中国石油与天然气股份公司西南管道分公司, 四川 成都 610094)

摘 要: 在实际生产中, 由于现场扰流元件的作用, 计量管内会出现不同程度的流速畸变, 使超声流量计的工作性能降低。因此, 采用 CFD 数值模拟方法针对超声流量计(以 DANIEL 3400 超声流量计为例)上游存在不同布置形式的弯头扰流元件时, 保证其计量准确性的最近安装位置进行研究, 获得 DANIEL 3400 型超声流量计的推荐安装位置, 为体积计量的准确实施提供参考。结果表明, 当弯头扰流元件的形式相同且入口流速不变时, 计量管内径越大, 计量误差越小, 即超声流量计对于雷诺数 *Re* 较大的气体具有更好的测量性能; 弯头弯曲角度越大、曲率半径越小, 气流扰动越强。基于模拟结果, 获得不同情况下超声流量计的推荐安装位置, 并提出在弯头后安装板式流动调整器以减少气流扰动, 为体积计量的准确实施提供参考。

关键词: CFD; 超声流量计; 安装位置; 优化
中图分类号: TE977 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674–5124(2019)07–0087–05

Research on the measurement accuracy of gas ultrasonic flowmeter based on CFD

CHEN Liqiong[1], XIE Hongya[1], SUN Jingyun[1], LIU Qi[1], TAO Hongwei[2]
(1. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. Southwest Pipeline Branch of CNPC, Chengdu 610094, China)

Abstract: In actual production, due to the action of the on-site spoiler components, different degrees of flow velocity distortion will occur in the metering tube, which will reduce the performance of the ultrasonic flowmeter. Therefore, using the CFD numerical simulation method for the ultrasonic flowmeter (take the DANIEL 3400 ultrasonic flowmeter as an example), there are different arrangements of the elbow spoiler components upstream, and the nearest installation position to ensure the accuracy of the measurement is studied. The recommended installation position of the DANIEL 3400 ultrasonic flowmeter provides a reference for the accurate implementation of volumetric measurement. The results show that the larger the inner diameter of the metering tube, the metering error is smaller when the shape of the elbow spoiler and the inlet flow rate constant remain the same. It indicates that the ultrasonic flowmeter performs better on gases with Reynolds number. And it is found that the larger the bend angle of the elbow and the smaller the radius of curvature, the perturbation of the gas flow velocity is stronger. According to the simulating results, the installation location of

收稿日期: 2018-05-10; **收到修改稿日期:** 2018-06-20
基金项目: 2016 国家重点研发计划 (2016YFC0802100)
作者简介: 陈利琼 (1976-), 女, 四川成都市人, 教授, 博士, 主要从事油气储运安全技术、油气储运系统优化技术方面的研究。
通信作者: 谢虹雅 (1993-), 女, 浙江湖州市人, 硕士, 主要从事油气储运安全技术、油气储运系统优化技术方面的研究。

the ultrasonic flowmeter is obtained and it is recommended to install a plate flow regulator downstream of the elbow to reduce flow disturbance. This study can provide reference for accurate volumetric measurement.

Keywords: CFD; ultrasonic flowmeter; installation location; optimization

0 引 言

天然气体积计量所用的设备是体积流量计，目前国内大型输气管道沿线的站场多数采用超声流量计[1]。超声流量计属于速度式流量计，通过测定超声波脉冲在管道介质内的传播速度求得介质在管道内的流速，从而获取体积流量，具有准确性高，不受介质物性参数干扰等优点[2]。其工作时对介质的流场分布要求较高[3]，在实际站场中，由于受到站场空间或工艺流程的限制，计量管上游常存在扰流元件[4]，使气体进入流量计时的流动呈现出非理想的流动状态，导致流量计的计量示值误差降低[5]。为此，国内相关标准（如 GB/T 18604-2014、JJG 1030-2007 等）对站场内扰流元件下游超声流量计的安装位置做出了一系列的规定。但对于上游存在弯头扰流元件的多声道超声流量计上、下游所需直管的长度并没有做出较为全面的规定，而且对于弯头的几何形状和布置形式也没有详细说明，在实际应用中，根据经验或生产厂家推荐的上、下直管长度进行安装[6]。因此，本文将利用 CFD 的方法，针对计量管上游存在不同布置形式的弯头扰流元件的情况，以 DANIEL3400 超声流量计为例，对保障其准确性的最近安装位置进行研究，并根据研究结果对体积计量工艺进行优化，从而为体积计量的准确实施打下基础。对于弯头来说，弯曲角度 θ 和曲率半径 R 是最主要的几何参数[7]，因此，本文将以这两个参数为基础展开研究。

1 模型建立

1.1 不同弯曲角度弯头模型

以工程上最常见的 45°、90°和 180°弯头为例。根据 JJG 1030—2007《超声流量计检定规程》中的规定[8]，对于单声道超声流量计，在扰流元件为单个 90°弯头时，其上游直管长度至少为 36D（D 为计量管内径），为了获取充分发展的流体流态，采用 90D 的下游直管长度[9]。另外，根据 Q/SY XQ 21—2013《DANIEL 3400 超声流量计运行维护规程》中所推荐的流量计内径，分别建立 100 mm、200 mm 和 300 mm 3 种内径的计量管模型。几何模型结构及尺寸如图 1 和表 1 所示。

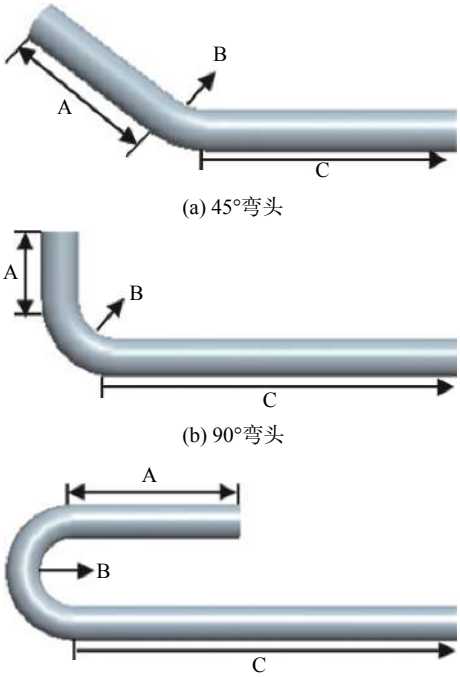


图 1 不同弯曲角度弯头的几何模型

表 1 模型几何尺寸

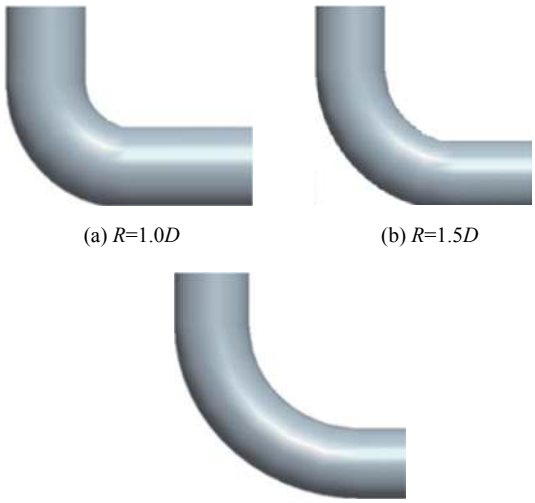
模型结构	内径D/mm	直管长度/mm	弯头曲率半径/mm
A-弯头前直管		3D	–
B-弯头	D=100/200/300	–	1.5D
C-计量直管		90D	–

1.2 不同曲率半径弯头模型

以工程上 3 种较为常见的曲率半径（R=1D、1.5D 和 2D）的 90°弯头为例，分别建立 D 等于 100 mm、200 mm 和 300 mm 这 3 种内径的计量管。研究所采用的局部几何模型如图 2 所示，其余部分的几何尺寸参照表 1。

1.3 边界条件的设定

由于超声流量计对小流量的工作性能较差，因此根据 Q/SY XQ 21-2013 中的规定，以3 m/s 作为气体入口的边界条件，另外，在模拟过程中，弯头采用水平布置。



(a) R=1.0D　(b) R=1.5D

(c) R=2.0D

图 2　不同曲率半径弯头的几何模型

2　结果与分析

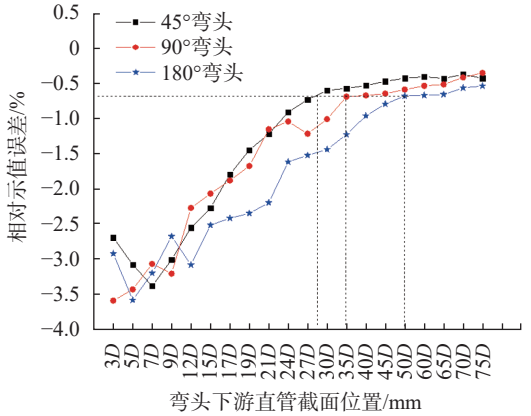
2.1　不同弯曲角度弯头下游不同位置处的仿真流量与检定真实值的比较

根据仿真结果得到不同管径条件下各弯曲角度弯头下游不同位置处的计算流量与检定真实值的相对示值误差随截面位置的变化关系如图 3 所示。

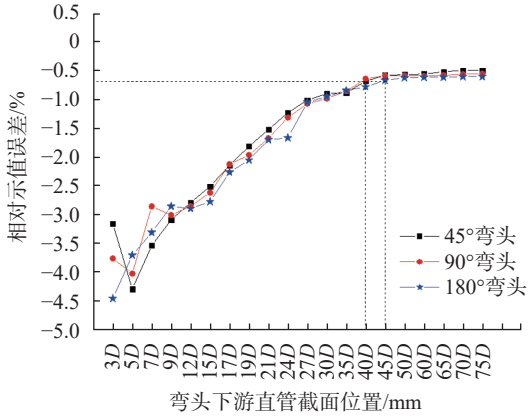
1)当计量管段上游存在弯头扰流元件时, 相对示值误差随截面位置的增加整体呈先缩小后稳定的趋势, 说明随着超声流量计远离弯头, 其工作性能逐渐提高; 2)当管径相同时, 弯头的弯曲角度越大, 计量管各位置处相对示值误差的绝对值就越大, 说明弯头对气体的扰动作用增强; 3)随着管径的增加, 各角度弯头下游直管内相对示值误差的差别减弱, 说明湍流强度的增加对弯头的扰动起到了削弱作用; 4)当相对示值误差进入稳定阶段后, 对于各弯曲角度的弯头, 大管径的相对示值误差较小, 说明超声流量计对于雷诺数 Re 较大的气体具有更好的测量性能; 5)根据本节的研究结果并结合 GB/T 18603—2014《天然气计量系统技术要求》中对计量系统配套仪表准确度的规定[10], 对于计量管段上游存在水平布置的各弯曲角度弯头的 A 级计量系统(±0.7%), 保证 DANIEL 3400 超声流量计计量准确性的推荐安装位置如表 2 所示。

2.2　不同曲率半径弯头下游各位置处仿真流量与检定真实值的比较

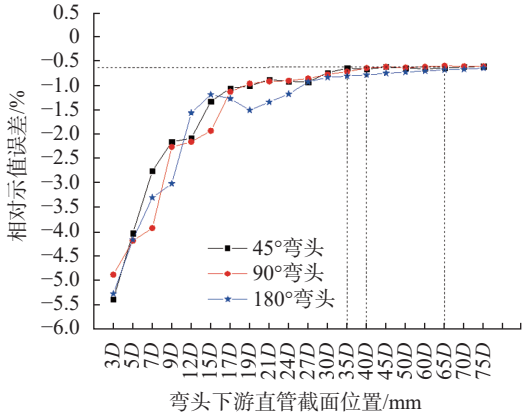
根据仿真结果得到不同检定流量条件下各曲率半径弯头下游不同位置处的计算流量与检定真实值的相对示值误差随截面位置的变化关系见图 4。



(a) D=100 mm



(b) D=200 mm



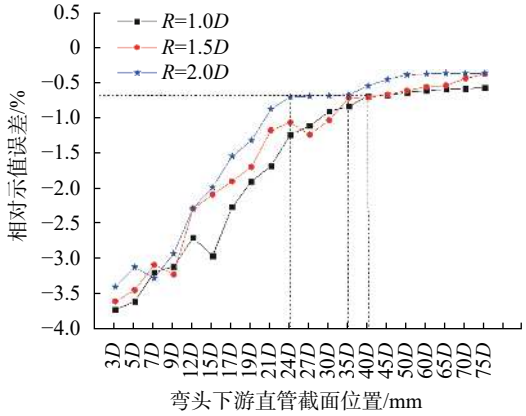
(c) D=300 mm

图 3　不同管径条件下各弯曲角度弯头下游直管内相对示值误差随截面位置的变化关系

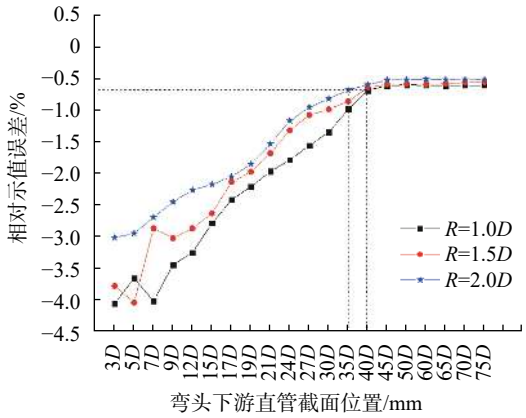
1)当计量管管径相同时, 弯头的曲率半径 R 越小, 计量管各位置处相对示值误差的绝对值就越大, 说明随着弯头曲率半径的降低, 对气体流速的扰动增强; 2)随着管径的增加, 不同曲率半径弯头下游直管内各位置处相对示值误差的差异缩小, 且弯头附近管段内相对示值误差的波动有所增加, 说

表 2 不同弯曲角度单弯头下游超声流量计的推荐安装位置

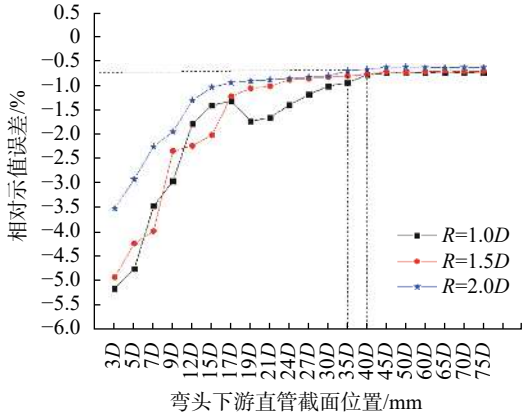
弯头角度	内径		
	D=100mm	D=200mm	D=300mm
45°	≥35D	≥45D	≥40D
90°	≥40D	≥45D	≥45D
180°	≥55D	≥50D	≥65D



(a) D=100 mm



(b) D=200 mm



(c) D=300 mm

图 4 不同管径条件下各曲率半径弯头下游直管内相对示值误差随截面位置的变化关系

明湍流强度对二次流的影响逐渐占据主导地位；3）根据 GB/T 18603—2014 中对计量系统配套仪表准确度的规定，对于计量管段上游存在水平布置的不同曲率半径弯头的 A 级计量系统（±0.7%），保证 DANIEL 3400 超声流量计计量准确性的推荐安装位置如表 3 所示。

表 3 不同弯曲率半径的单弯头下游超声流量计的推荐安装位置

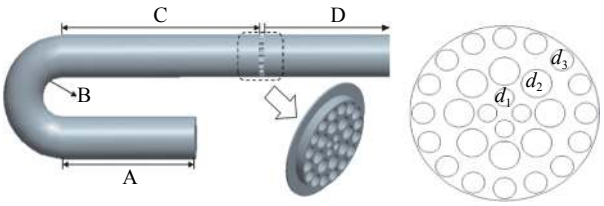
弯头曲率半径	内径		
	D=100mm	D=200mm	D=300mm
R=1.0D	≥45D	≥45D	≥45D
R=1.5D	≥40D	≥45D	≥45D
R=2.0D	≥27D	≥40D	≥40D

3 体积计量优化研究

从研究结果中可以看出，在上游仅存在直管的情况下，保障 DANIEL 3400 超声流量计计量准确性所需的直管长度较长，会受到站场空间的限制[11]。因此，有必要对之前的工艺进行优化。根据 GB/T 18604—2014 中的建议[12]，采用在超声流量计上游加装板式流动调整器的优化方案，从而有效地减小计量单元的占地空间，同时提高计量的准确性。

3.1 优化模型的建立

本文将以对气体流速扰动最强的弯头参数组合进行分析，即弯头水平安放，弯头弯曲角度为 180°，弯头曲率半径为 1D。优化采用板式流动调整器中的一种，即斯皮尔曼流动调整器[13]，它的外形是一块具有 28 个孔洞的钢板[14]。所建立的几何模型结构及尺寸如图 5 和表 4、表 5 所示。



(a) 优化后计量管段几何模型 (b) 孔板结构

图 5 优化后计量管段的几何模型结构

3.2 优化效果分析

根据仿真结果得到流动调整器下游不同位置截面计算流量与检定真实值的相对示值误差随截面位置的变化关系如图 6 所示。

1）相比于优化前的计量管段，相对示值误差的波幅度和波动距离都有所减小，达到平稳状态时所需的直管长度大大缩短，说明超声流量计的工作性

表 4　优化后计量管模型结构

模型结构	内径D/mm	计量直管长度/mm
A-进气直管	D=100/200/300	3D
B-180°弯头		–
C-流动调整器前直管		6D
D-流动调整器后直管		9D

表 5　优化后板式流动调整器模型结构

模型结构	内径
d_1(4孔)	d_1=0.1D, 环的节圆直径0.18D
d_2(8孔)	d_2=0.16D, 环的节圆直径0.48D
d_3(16孔)	d_3=0.12D, 环的节圆直径0.86D

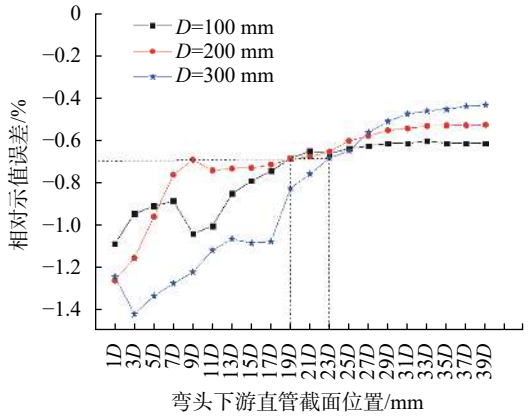


图 6　流动调整器下游计量管内相对示值误差随截面位置的变化关系

能有所提高; 2)此时 DANIEL 3400 超声流量计的推荐安装位置如表 6 所示。

表 6　板式流动调整器下游超声流量计的推荐安装位置

内径D/mm	推荐安装位置
100	≥19D
200	≥19D
300	≥23D

采用混合网格进行处理, 即在孔板附近的管段布置四面体非结构化网格, 其他区域布置六面体结构化网格, 网格模型及网格信息如图 7 所示。

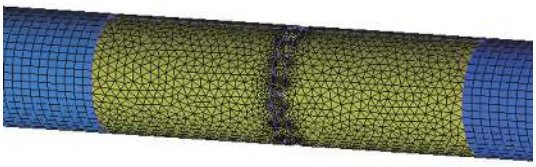


图 7　优化后计量管段的网格模型

4　结束语

本文利用 CFD 仿真的方法, 针对 DANIEL 3400 型超声流量计上游存在不同布置形式弯头扰流元件的情况, 研究了保障该型号流量计计量准确性的最近安装位置并进行了优化, 所得主要结论如下:

1)当弯头扰流元件的形式相同时, 计量管内径 D 越大, 流态稳定时的相对误差就越小, 说明超声流量计对于雷诺数 Re 较大的气体具有更好的测量性能。

2)计量管内径 D 越小, 弯头扰流元件对气体流速的扰动作用就越明显, 且弯头弯曲角度越大、曲率半径越小, 对气体流速的扰动性就越强。

3)在超声流量计上游直管内安装板式流动调整器, 对计量管段上游存在弯头扰流元件的计量管进行优化, 从而减小了体积计量单元的占地空间, 同时提高了计量的准确性。

参考文献

[1] 马立强, 李郝鹏. 浅析天然气能量计量系统的检定现状 [J]. 工业计量, 2009, 19(2): 31-34.
[2] TSUKADA K, TSUZUKI N, KIKURA H. A study of air-coupled ultrasonic flowmeter using beam focusing[J]. Energy Procedia, 2015, 71: 352-359.
[3] 兰纯纯. 时差法超声波流量计的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
[4] 陈红. 上游弯管对超声波流量计测量误差的影响 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.
[5] 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.
[6] 吴焕芬. 天然气能量计量关键技术的研究 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2012.
[7] 林金贤, 林棋, 娄晨, 等. 气固两相流管道流动阻力特性数值模拟 [J]. 油气储运, 2014, 33(1): 32-41.
[8] 超声流量计检定规程: JJG 1030-2007[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
[9] RUPPEL C, PETERS F. Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter[J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2004, 15(3): 167.
[10] 天然气计量系统技术要求: GB/T 18603-2014[S]. 北京: 中国质检出版社, 2014.
[11] 孙延祚. 论流量计的合理选型 [J]. 自动化仪表, 2007, 28(z1): 52-55.
[12] 用气体超声流量计测量天然气流量: GB/T 18604-2014[S]. 北京: 中国质检出版社, 2014.
[13] 孟浩龙, 王菊芬, 薛水发, 等. 流量测量中整流器的研究现状 [J]. 计量技术, 2011(2): 15-18.
[14] 熊光德, 黄和, 杨文川. 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.

(编辑:刘杨)