

# 空气和高压天然气实流标定涡轮流量计的差异性

刘夷平<sup>1</sup> 李海洋<sup>1</sup> 吴锦川<sup>1</sup> 沈琼<sup>1</sup> 全晓军<sup>2</sup>

1. 上海市计量测试技术研究院 2. 上海交通大学

**摘要：**随着天然气供求量的高速增长，国家级天然气实流检定站的产能无法满足城市管网和地区输配气干线上中、高压天然气流量计的周期性检定的需求，大量涉及贸易结算的涡轮流量计只能被送至法定计量检定机构在常压空气下标定，对于其检定结论和校准数据是否适用则存在着争议。为此，分别在常压（0.1 MPa）空气流量标准装置和德国国家高压（2.5 MPa 和 5 MPa）天然气流量标准装置上对 32 台涡轮流量计进行了实流标定，引入涡轮流量计扩展校准模型，并基于雷诺数对误差作了对比分析。研究结果表明：①常压和高压下的误差线分别位于两个不同的流动特征区域，不具有可比性；②在分界流量以上区域，涡轮流量计的误差仅随雷诺数而变化；③在各段压力工况中，存在着误差接近的雷诺数重叠区；④工况压力增加，所对应的误差数据可以被认为是对涡轮流量计准确度性能的连续延拓；⑤不同的工作介质对涡轮流量计的性能没有明显的影响。结论认为，常压空气下的标定数据不能用于 0.4 MPa 以上工况流量计的检定和校准，在压力限制条件下使用空气标定高压天然气流量计是一种可行的方案。

**关键词：**天然气；高压气体；涡轮流量计；流量测量；测量误差；计量性能；差异性分析；标定

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.01.016

## Differential flow calibration of turbine flowmeters for air and high pressure natural gas

LIU Yiping<sup>1</sup>, LI Haiyang<sup>1</sup>, WU Jinchuan<sup>1</sup>, SHEN Qiong<sup>1</sup>, QUAN Xiaojun<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China; 2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 40, ISSUE 1, pp.119-124, 1/25/2020. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** With the rapid growth of natural gas supply and demand, the capacity of national natural gas flow measurement stations is incapable of meeting the periodic verification demands of medium- and high-pressure natural gas flowmeters installed in urban pipeline networks and local transmission and distribution lines, and a great number of turbine flowmeters involved in trade settlement have to be sent to statutory metrological verification institutions for calibration in atmospheric air, so the applicability of verification conclusions and calibration data is still controversial. To deal with this situation, this paper carried out actual flow calibration on 32 turbine flowmeters by using the flow calibration facility of atmospheric air (0.1 MPa) and the Germany national flow calibration facility of high-pressure natural gas (2.5 MPa and 5 MPa) respectively. Then, an extended calibration model for turbine flowmeters was introduced, and the errors were comparatively analyzed on the basis of Reynolds number. And the following research results were obtained. First, error lines under atmospheric pressure and high pressure are situated in different flow characteristic regions, so the calibration curves for atmospheric pressure and high pressure are not comparable. Second, the errors of turbine flowmeters in the range above the transition flow rate are only dependant on the Reynolds number. Third, under the working condition of each pressure interval, there are Reynolds number overlapping sections with similar errors. Fourth, with the increase of the working pressure, the corresponding errors can be considered as a continuous extension of turbine flowmeter's accuracy performance. Fifth, the effect of working medium on the performance of turbine flowmeters is not obvious. It is concluded that the calibration data in atmospheric air is not applicable to the verification and calibration of the flow meter for the working pressure above 0.4 MPa. It is feasible to make use of air to calibrate high-pressure natural gas flowmeters under restricted pressure conditions.

**Keywords:** Natural gas; High-pressure gas; Turbine meter; Flow measurement; Measurement error; Measurement performance; Comparative analysis; Calibration

**基金项目：**上海市质量技术监督局科研项目“气体超声波流量计在线检验方法的研究”（编号：2015-35）。

**作者简介：**刘夷平，1974年生，高级工程师，博士；2008年毕业于上海交通大学并获得博士学位；主要从事天然气流量计量方面的研究工作。地址：（201203）上海市张衡路1500号。电话：（021）38839800-36304。ORCID: 0000-0003-3823-2109。E-mail: liuyyp@simt.com.cn

## 0 引言

天然气是优质高效、绿色清洁的低碳能源,随着经济发展、能源消费增长和二氧化碳减排要求日趋严格,有效开发、利用天然气已经成为我国推进能源生产和消费革命的重要路径之一<sup>[1-2]</sup>。预计到 2020 年我国天然气的表观消费量将超过  $3\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,进口天然气量将超过  $1\,200 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[3]</sup>。提高天然气贸易交接计量准确度是客观公正地维护贸易双方合法经济利益的关键<sup>[4-8]</sup>。

涡轮流量计因其准确度高、重复性好、无零点漂移、抗干扰性强、量程范围宽的特点<sup>[9]</sup>,被广泛用于天然气贸易交接,但其缺点之一是流体的物性对流量特性影响较大<sup>[10]</sup>,不同介质、不同工况所导致的气体物性变化对涡轮流量计的准确度有影响<sup>[11]</sup>;另一个缺点是不能长期保持校准特性,伴随着输气系统管道网络的大规模建设,必须定期对用于天然气贸易结算的流量计进行实流标定。

目前国内实流标定流量计主要有两种方式:①以天然气为工作介质的直排方案,利用输气管线上游的自身压力和气量,在正压下标定流量计,之后工作介质进入低压管线或下游低压区;②以空气为工作介质在常压下标定。为了尽可能接近天然气流量计的实际工况,我国建立了 9 个国家石油天然气大流量计量站(截至 2019 年 7 月)用于解决高压天然气流量计的实流标定与量传溯源问题。然而,随着天然气供求的高速增长,上述国家级天然气实流检定站的产能无法满足城市管网和地区输配气干线上中高压天然气流量计的周期性检定需求。大量涉及贸易结算、属强制检定范畴的涡轮流量计的准确性和有效性无法得到保证,只能送至法定计量检定机构在常压空气下标定。因此,涡轮流量计在不同介质、不同工况条件下的准确度差异受到了天然气工业和流量测量学术界的关注<sup>[12-14]</sup>。特别是使用常压空气标定的数据结果或检定结论是否适用于天然气涡轮流量计存在争议。

## 1 实验工况条件

2015—2018 年,某研究院对两家生产商共 32 台进口天然气涡轮流量计实施检定,流量计入关前都在德国国家高压天然气流量标准装置(Pigsar)进行了实流标定,其中制造商 A 提供了 8 台 DN200 mm

流量计(标定压力为 2.1 MPa),制造商 B 提供了 10 台 DN150 mm(标定压力为 5 MPa)和 14 台 DN250 mm 流量计(其中 7 台在 2.4 MPa 压力下标定,另 7 台在 5 MPa 压力下标定)。Pigsar 的主标准器是 9 台涡轮流量计,量程介于  $3 \sim 6\,500 \text{ m}^3/\text{h}$ ,装置的扩展不确定度( $U_{\text{rel}}$ )为 0.12% (包含因子  $k$  为 2),流量标准值是荷兰—法国—德国统一参考值(Harmonized Reference Value)。某研究院使用临界流文丘里喷嘴法气体流量标准装置,工作介质是常压空气,量程介于  $2 \sim 4\,500 \text{ m}^3/\text{h}$ , $U_{\text{rel}}$  为 0.16% (包含因子  $k$  为 2),16 个喷嘴溯源到中国计量科学研究所的 pVTt 法气体流量国家基准。

尽管测量期较长,两个标准装置的工作介质和工况均比较稳定,天然气装置(Pigsar)的温度介于  $17 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,当工作压力介于  $2.3 \sim 2.4 \text{ MPa}$  时,天然气动力黏度( $\mu$ )为  $1.18 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ;当工作压力介于  $4.8 \sim 5.0 \text{ MPa}$  时, $\mu$  为  $1.28 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。常压空气装置的温度介于  $19 \sim 21 \text{ }^\circ\text{C}$ ,实验室压力介于  $0.100\,3 \sim 0.101\,3 \text{ MPa}$  时, $\mu$  为  $1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。鉴于同一制造商相同口径流量计的型号规格相同,筛选出具有代表性的标定数据,绘制成体积流量—误差曲线,如图 1 所示。

同一流量计在高压天然气装置与常压空气装置下的误差曲线存在差异,在分界流量点( $q_l$ )为  $0.2\,q_{\text{max}}$  以下时,常压空气下出现“驼峰区”,导致差异较大,驼峰点处最大的差异达到 0.7%。大口径(DN250 mm)涡轮流量计在空气装置下的驼峰效应减弱,驼峰点处的差异减小。涡轮流量计在高压天然气下的体积流量—误差曲线基本呈现良好的线性趋势,特别是在 5 MPa 时,线性特征显著。然而在常压空气工况下,某一类型的 DN250 mm 流量计在驼峰点以下的误差随流量的减小急剧下降,导致高压天然气与常压空气的误差最大差异出现在最小流量点及其附近的始动流量区,最大相差 1.4%。从图 1 所示的点对点误差对比来看,不同的流量计规格、不同工作压力下展现出来的两条误差曲线差异各不相同,有的差异并不大(0.1 MPa 空气和 2.4 MPa 天然气的 DN250 mm 流量计,差距甚至小于 0.2%),有的差异超过 1%,误差曲线的形状也完全不同,这样的数据对比会导致争议:根据常压空气下的标定结果能否判断流量计是否合格,标定的数据能否用于校准该流量计。因此,引入涡轮流量计扩展校准模型作进一步分析。

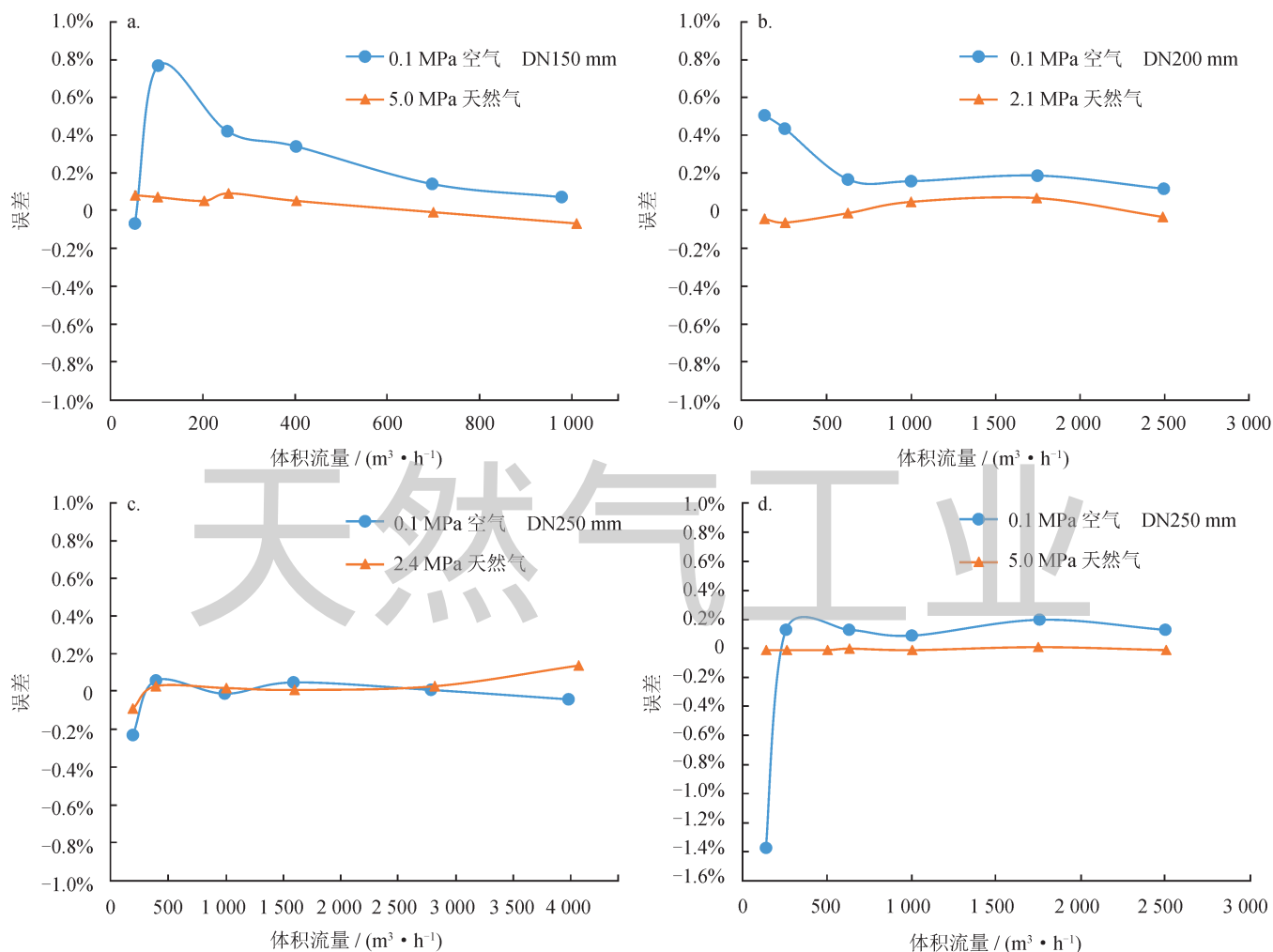


图1 涡轮流量计在空气和天然气工况下的体积流量—误差曲线图

## 2 涡轮流量计扩展校准模型

Lee 等<sup>[15-16]</sup>研究了流体密度、黏度对涡轮流量计性能的影响,在此基础上,美国国家标准与技术研究院的 Pope 等<sup>[17]</sup>和 Wright 等<sup>[18]</sup>扩展了 Lee 模型,研究了低雷诺数下涡轮流量计示值误差随工作介质运动黏度变化所呈现的扇形特征。该模型将基于角频率( $\omega$ , rad/s)的流量计仪表系数( $K_\omega$ , rad/m<sup>3</sup>)表示为对理想流量计仪表系数( $K_i$ , rad/m<sup>3</sup>)<sup>[19]</sup>的修正,如下所示:

$$K_\omega = \frac{\omega}{q} = K_i - C'_D(Re) - \frac{C'_{B0}}{\rho q^2} - \frac{C'_{B1} \nu \omega}{q^2} - \frac{C'_{B2} \omega^2}{\rho q^2} \quad (1)$$

式中  $q$  表示体积流量, m<sup>3</sup>/s;  $\nu$  表示介质的运动黏度, m<sup>2</sup>/s; 雷诺数  $Re=4q/(\pi d \nu)$ ;  $d$  表示流量计口径, m;  $\rho$  表示介质的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C'_D$ 、 $C'_{B0}$ 、 $C'_{B1}$  和  $C'_{B2}$  分别表示 4 个待定系数,在某个流量点下标定出的仪表系数( $K_f$ , 表示单位体积流体通过流量计时,流

量计输出的脉冲数, 1/m<sup>3</sup>)和转子叶片频率( $f$ , s<sup>-1</sup>)的关系为:

$$K_f = \frac{f}{q} = \frac{N\omega}{2\pi q} \quad (2)$$

式中  $N$  表示转子叶片数。

设流量计出厂标称的仪表系数为  $K$  (1/m<sup>3</sup>), 在该流量点下的示值误差为  $e$ , 则有:

$$e = \frac{K_f}{K} - 1 \quad (3)$$

由式(1)~(3)可得:

$$e = \frac{N}{2\pi K} \left[ K_i - C'_D(Re) - \frac{C'_{B0}}{\rho q^2} - \frac{C'_{B1} \nu \omega}{q^2} - \frac{C'_{B2} \omega^2}{\rho q^2} \right] - 1 \quad (4)$$

式(4)中括号所示的修正包括 4 个部分, 从括号内第二项开始依次为: ①仅和雷诺数有关的流体阻力项; ②轴承静态阻力项; ③轴承黏性阻力项; ④由于轴向推力和动态不平衡引起的轴承阻力项。于是修正项分成两部分: 流体阻力项和轴承阻力项,

流体阻力项在分界流量以上的区域起主要作用,且仅与雷诺数有关,在不同的运动黏度(例如改变工作介质)下测得的误差保持不变;轴承阻力项起主要作用的是分界流量以下的区域,因为阻力作用在转子上,转子受运动黏度的影响,所以在驼峰上升区,同一雷诺数下不同运动黏度的介质会导致误差的差异,在雷诺数—误差曲线上呈现扇形特征<sup>[20]</sup>。

涡轮流量计是根据工况体积流量发出脉冲或频率,将雷诺数表达式代入式(4)可知,影响涡轮流量计准确度的相关特性是运动黏度,而不是动力黏度<sup>[21]</sup>。即使工质的动力黏度相近,由于运动黏度的密度依赖性,特别是天然气(2.5 MPa)与空气(0.1 MPa)之间 25 倍的压力差,导致两个工况的雷诺数存在显著差异。所以,应当基于雷诺数,使两个工况下的误差对比符合流动相似准则的要求。

### 3 基于雷诺数的误差对比与分析

图 2 所示是上述涡轮流量计基于雷诺数的误差

对比图,两条误差线分别处于两个不同的流动特征区域,并不具有可比性,而是反映了该流量计的准确度随雷诺数变化的情况。此外,由于流量计的体积流量量程范围一定而工况压力不同,常压雷诺数上限与高压雷诺数的下限存在间隔,且工况压力相差越小,间隔越小。随着间隔差距缩小,误差越来越接近, DN200 mm 和 DN250 mm (2.4 MPa 天然气)流量计的误差随雷诺数呈现几乎连续的变化,符合式(4)表征的物理意义,即:流体阻力项在分界流量以上的区域起主要作用,流量计示值误差仅与雷诺数有关。若上述间隔的雷诺数差距在可接受的范围内,则可以进行常压空气与高压天然气之间点对点的误差比较,但是受当前实验条件所限,图 2 所示的数据并不支持这样的对比。因此,增加了高压空气下的标定实验。一台经过常压空气标定的 DN100 mm 涡轮流量计分别在德国一家企业的高压空气(1.6 MPa、2.6 MPa)环道(2~1 600 m<sup>3</sup>/h,  $U_{rel} = 0.20\%$ ,  $k=2$ )和德国国家高压天然气流量标准装置(Pigsar, 5.1 MPa)进行标定,误差曲线如图 3-a 所示。

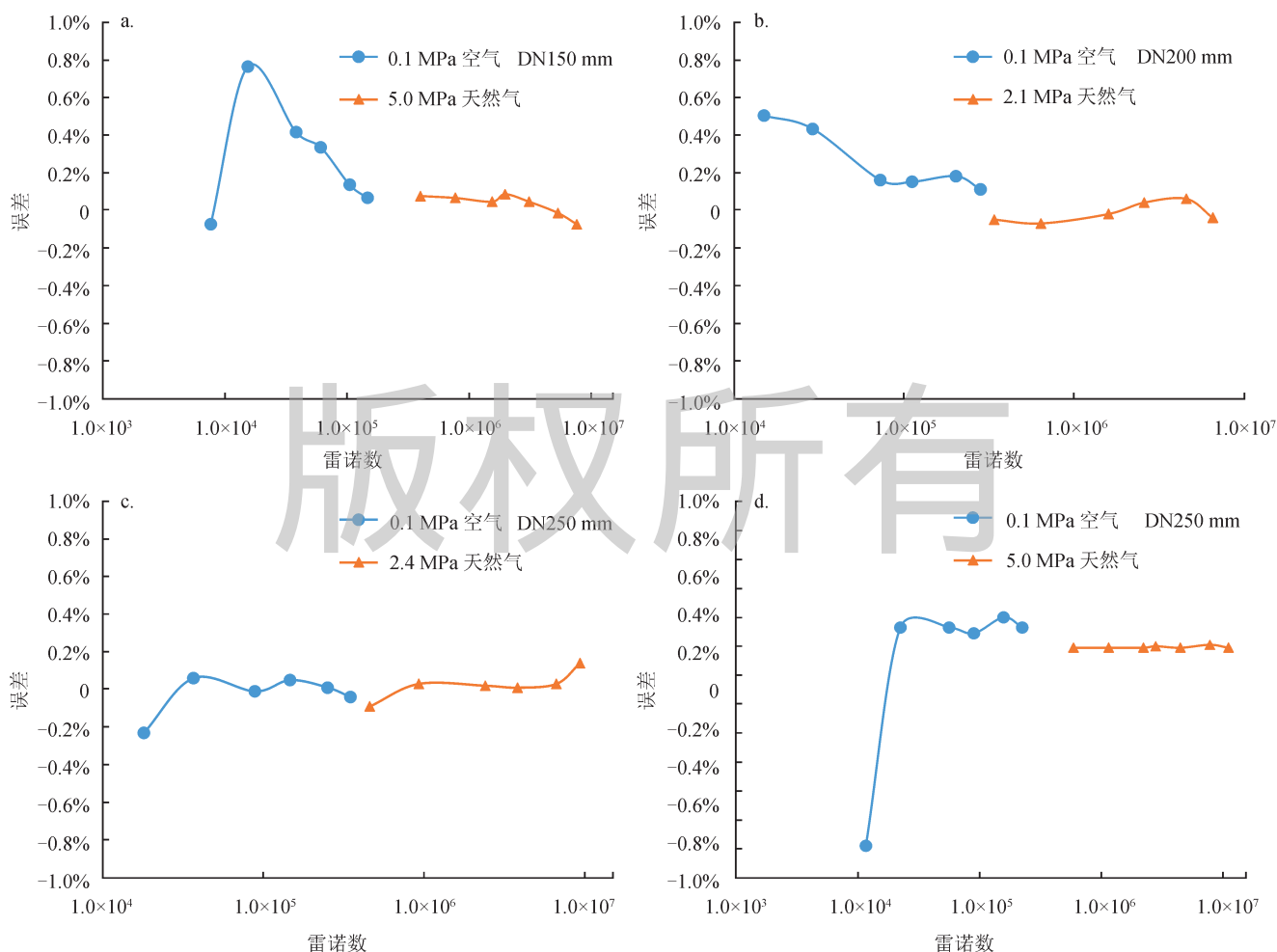


图 2 涡轮流量计在空气和天然气工况下的雷诺数—误差曲线图

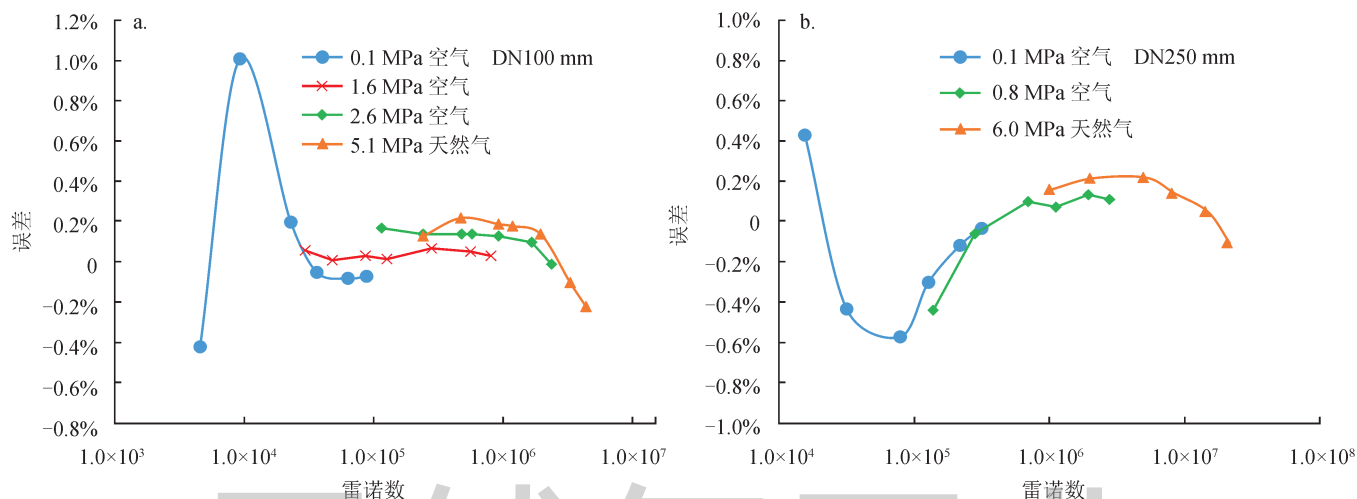


图3 涡轮流量计在常压、高压空气和天然气工况下的误差对比图

0.1 MPa 常压空气的上限和 2.6 MPa 高压空气的下限雷诺数差距为  $2.72 \times 10^4$ , 两者对应的误差相差 0.24%, 小于两套装置的合成扩展不确定度 0.25%。3 个空气 (0.1 MPa、1.6 MPa 和 2.6 MPa) 的测量结果出现两段雷诺数重叠, 重叠区内误差仅有不到 0.2% 的差异。高压空气 (2.6 MPa) 和高压天然气 (5.1 MPa) 的部分误差数据在点对点比较中差异小于 0.1%。图 3-a 中出现的数据段重叠, 可以认为是流量计准确度性能的延拓。图 3-a 还表明, 压力差异对流量计性能的影响显著, 与之相较, 不同工作介质引起的差异很小。

图 3-b 所示的是荷兰国家计量研究院提供的 DN250 mm 涡轮流量计在空气 (0.1 MPa, 0.8 MPa) 和天然气 (6.0 MPa) 下的测试数据, 结果表明, 流量计误差随雷诺数变化特征明显, 误差在雷诺数介于  $2.72 \times 10^4 \sim 3.14 \times 10^5$  (常压空气—中压空气) 和雷诺数介于  $(1.12 \sim 2.77) \times 10^6$  (中压空气—高压天然气) 两段有较好的重叠与衔接, 基于雷诺数重叠可以估计其他相近压力 (或其他工作介质) 的误差曲线, 但是在量程范围以外, 不能外推出误差。鉴于气体涡轮流量计性能受压力影响, GB/T 21391—2008 “用气体涡轮流量计测量天然气流量”<sup>[22]</sup> 和欧洲标准 EN 12261 “涡轮流量计” 特别强调: 对用户规定的工作压力大于 0.4 MPa 的流量计, 需在一个或多个压力下校准。如果用户指定的工作压力范围的上限值小于或等于 4 倍的下限值, 要求选定校准工作压力  $p_1$ , 使  $[0.5p_1, 2.0p_1]$  覆盖用户指定的工作压力的上下限; 当上限值大于下限值的 4 倍, 需要增加一个压力试验点  $p_2$ , 且  $p_1 < p_2$ , 使  $[0.5p_1, 2.0p_2]$  能够覆盖用户

指定的工作压力上下限。根据上述规定, 如果用户指定这台 DN250 mm 的涡轮流量计在 0.8 MPa 和 6.0 MPa 下工作, 可以选定  $p_1=1.6$  MPa 和  $p_2=3.0$  MPa 作为校准工作压力, 根据上述雷诺数重叠区域的误差数据衔接, 可以估计该流量计在 (0.8 ~ 6.0 MPa) 范围内的误差大小和变化趋势。

## 4 结束语

影响涡轮流量计准确度的相关特性是工作介质的运动黏度, 由于运动黏度的密度依赖性, 气体涡轮流量计的性能主要受到工况压力的影响。如果两个工况压力相差大于 4 倍, 那么涡轮流量计在相应工况下的误差数据不具有可比性, 所以常压下的标定结果不能反映该流量计在 0.4 MPa 以上工况的计量性能, 标定的数据也不能用于流量计的校准。

在分界流量以上区域, 涡轮流量计的误差仅随雷诺数变化, 工况压力增加所对应的误差数据可以认为是对流量计准确度性能的连续延拓。因此, 基于雷诺数重叠可以估计其他相近压力 (或其他工作介质) 的误差。

实验结果并没有发现不同的工作介质 (例如天然气和空气) 对涡轮流量计的性能有明显的影响, 所以, 在前述压力限制条件下, 使用空气标定高压天然气流量计是一种可行的方案。目前国家级天然气实流检定站都选址在主干线附近, 需要有稳定的气源和低压天然气用户, 且直排方案投资巨大。而闭环式高压空气流量标准装置具有以下优点: ①不存在测试用气体的排放问题; ②没有防爆问题的困扰; ③流量调节、

压力调节和更换气体等问题迎刃而解；④装置维持成本和能耗都较低，因而计量技术机构已经开始这方面的研发工作<sup>[23]</sup>，大批城市管网和地区输配气干线上中高压天然气流量计的量传溯源有望得到解决。

### 参 考 文 献

- [1] 康建国. 全球天然气市场变化与中国天然气发展策略思考[J]. 天然气工业, 2012, 32(2): 5-10.  
KANG Jianguo. A discussion on global natural gas market change and Chinese natural gas development strategies[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2): 5-10.
- [2] 黄维和, 郑洪龙, 李明菲. 中国油气储运行业发展历程及展望[J]. 油气储运, 2019, 38(1): 1-11.  
HUANG Weihe, ZHENG Honglong, LI Mingfei. Development history and prospect of oil & gas storage and transportation industry in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(1): 1-11.
- [3] 段继芹, 李长俊, 周芳. 对“用气体超声流量计测量天然气流量”国家标准的修改建议[J]. 天然气工业, 2018, 38(1): 109-115.  
DUAN Jiqin, LI Changjun, ZHOU Fang. Recommended revision of the Measurement of Natural Gas Flow by Ultrasonic Gas Flow Meters (GB/T 18604-2014)[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(1): 109-115.
- [4] 徐明, 闫文灿, 陆玉城. 基于 HPPP 法的高压大流量天然气计量检定站系统工艺[J]. 油气储运, 2018, 37(7): 810-815.  
XU Ming, YAN Wencan, LU Yucheng. Technologies based on HPPP method used in high pressure and high flowrate natural gas metrological verification station[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(7): 810-815.
- [5] 陈康良. 天然气能量计量的溯源性与不确定度评定[J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(1): 83-90.  
CHEN Gengliang. Traceability of energy determination for natural gas and estimation of measuring uncertainty[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2017, 46(1): 83-90.
- [6] 刘志鹏, 孟江, 安坤. 新型非插入式流量测量原理的研究[J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(2): 94-98.  
LIU Zhipeng, MENG Jiang, AN Kun. Study on the principle of the new type of non-inserted flow measurement[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2017, 46(2): 94-98.
- [7] 高书香, 周星远, 单秀华, 等. 国内在线不分离式多相流量计技术现状[J]. 油气储运, 2019, 38(6): 667-671.  
GAO Shuxiang, ZHOU Xingyuan, SHAN Xiuhua, et al. The technical status of in-line multiphase flow meter in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(6): 667-671.
- [8] 许晓英, 赵庆凯, 陈丰波, 等. 多相流量计在国内市场的应用及发展趋势[J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(2): 99-104.  
XU Xiaoying, ZHAO Qingkai, CHEN Fengbo, et al. Application and development trend of multiphase flow meter in the domestic market[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2017, 46(2): 99-104.
- [9] 李春辉, 李鹏. 作为标准表非定点使用的涡轮流量计评定方法探析[J]. 计量学报, 2015, 36(6): 610-612.  
LI Chunhui, LI Peng. The investigation on the evaluation for the turbine meter by the use of non-fixed point as master meter[J]. Acta Metrologica Sinica, 2015, 36(6): 610-612.
- [10] 肖迪, 徐军. 检定介质温度、压力对流量计在线检定的影响[J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 113-114.  
XIAO Di, XU Jun. Influences of medium temperature and pressure on online flowrate measurement of flowmeters[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(5): 113-114.
- [11] 穆剑, 段继芹, 何敏, 等. 不同压力和介质下流量计计量性能的差异探究[J]. 中国计量, 2012, (7): 77-79.  
MU Jian, DUAN Jiqin, HE Min, et al. Study on the difference of flowmeter performance under different pressures or different working fluid[J]. China Metrology, 2012, (7): 77-79.
- [12] DOPHEIDE D. CCM. FF-K5. a: Comparison of flow rates for natural gas at high pressure[J]. Metrologia, 2006, 43(1A): 07001.
- [13] DOPHEIDE D. Final report on the CIPM key comparisons for compressed air and nitrogen conducted in November 2004/June 2005: CCM. FF-5b[J]. Metrologia, 2006, 43(1A): 07008.
- [14] MICKAN B, DOPHEIDE D, KRAMER R, et al. Final report on the bilateral CIPM key comparison CCM. FF-K5. a. 1 for natural gas at high pressure[J]. Metrologia, 2007, 44(1A): 07006.
- [15] LEE W F Z, EVANS H J. Density effect and reynolds number effect on gas turbine-type flowmeters[J]. Journal of Basic Engineering, 1965, 87(4): 1043-1051.
- [16] LEE W F Z, KARLBY H. A study of viscosity effect and its compensation on turbine-type flowmeters[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(3): 717-725.
- [17] POPE J G, WRIGHT J D, JOHNSON AN, et al. Extended Lee model for the turbine meter & calibrations with surrogate fluids[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 24: 71-82.
- [18] WRIGHT J D, JOHNSON A N, KLINE G M, et al. A comparison of 12 US liquid hydrocarbon flow standards and the transition to safer calibration liquids[J]. Cal Lab: International Journal of Metrology, 2012, 19(2): 30-38.
- [19] 王菊芬, 孟浩龙, 岳彬, 等. 新型涡轮流量计的理论模型[J]. 力学与实践, 2014, 36(1): 64-75.  
WANG Jufen, MENG Haolong, YUE Bin, et al. The theoretical model of a new-type turbine flowmeter[J]. Mechanics in Engineering, 2014, 36(1): 64-75.
- [20] 孙立军. 降低涡轮流量传感器黏度变化敏感度的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.  
SUN Lijun. Research on reducing turbine flowmeter's sensitivity to viscosity change[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [21] GUO Suna, SUN Lijun, ZHANG Tao, et al. Analysis of viscosity effect on turbine flowmeter performance based on experiments and CFD simulations[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2013, 34: 42-52.
- [22] 何衍, 苏荣跃, 郭绪明, 等. 用气体涡轮流量计测量天然气流量: GB/T 21391—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
HE Yan, SU Rongyue, GUO Xuming, et al. Measurement of natural gas flow by gas turbine flow meters: GB/T 21391-2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [23] 赵普俊, 熊茂涛, 雷励, 等. 高压气体流量计量标准装置研制[J]. 天然气工业, 2010, 30(9): 78-81.  
ZHAO Pujun, XIONG Maotao, LEI Li, et al. A study of standard facilities for high-pressure gas flow measurement[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(9): 78-81.