

基于 MATLAB 天然气流量计检定工艺计算

赵孟卿¹ 黄 坤² 王劲松³ 于 振¹ 杨 涵¹ 巨 龙⁴ 李灿荣¹

(1. 中国石油集团东南亚管道有限公司 2. 西南石油大学石油工程学院)

(3. 西气东输南京计量测试中心 4. 中国石油天然气股份有限公司浙江油田分公司)

摘 要 随着我国中缅管道、西气东输二、三线 and 液化天然气上岸等新一轮输气管道工程的建设,用于计量天然气流量的流量计日益增多。只有对这些流量计实施准确检定才能确保流量计精确工作,从而使得我国天然气交接贸易更加公平。以天然气流量计检定站三级检定为基础,考虑输气管道沿线动能的增加对流量的影响,建立天然气在检定管路中的流动压损模型,利用 MATLAB 软件计算不同口径天然气流量计在检定中的参数变化,求解检定过程的压差,并对检定过程中的不确定度进行计算,符合我国天然气调度的要求。

关键词 MATLAB 流量计检定 不确定度

中图分类号:TE863.1 文献标志码:A DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2013.04.019

Process calculation of natural gas flow meter verification based on MATLAB

Zhao Mengqing¹, Huang Kun², Wang Jinsong³, Yu Zhen¹, Yang Han¹, Ju Long⁴, Li Canrong¹

(1. Southeast Asia Pipeline Company, Beijing 100028, China; 2. Petroleum Engineering College, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China; 3. West to East Gas Pipeline Company, Nanjing Measurement Test Center, Nanjing 210000, Jiangsu, China; 4. PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: With a new round of gas pipeline project construction such as “Burma-China pipeline”, “the second and third line of West-East natural gas transmission project” and “liquefied natural gas ashore”, the flow meters for measuring gas flow are increasing. The only way to ensure these meters work accurately is to calibrate these meters precisely, which will make it more equitable for the transfer of natural gas trade. In this paper, basing on three levels of gas flow meter verification station, considering the influence of the increase of kinetic energy along the pipeline's on flow, the pressure loss model is established when natural gas flows in the verified pipe, and the parameters variation in different caliber meters calibration by MATLAB software are calculated, then the pressure difference is solved and the uncertainty in certification process is calculated, which conforms to the natural gas dispatching request.

Key words: MATLAB, verification of flow meter, uncertainty

天然气是一种高效、优质、洁净的化工能源原料,在能源结构中的比例不断上升,在世界各国的消耗量也在不断增加。以我国为例,近年来每年约消

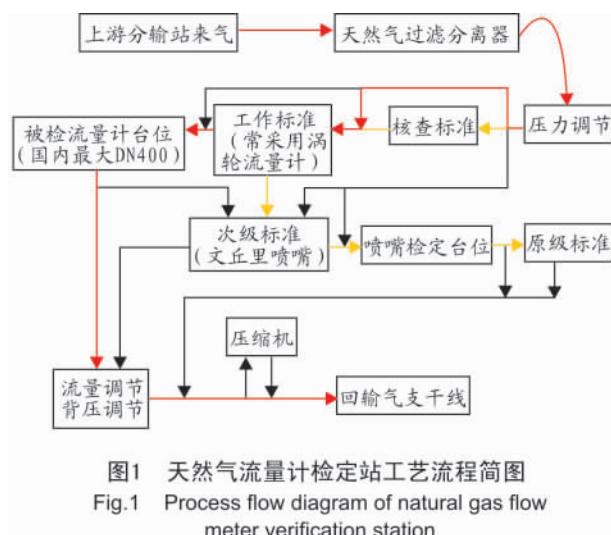
耗 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 天然气,如果天然气计量的误差为 0.15%,那么每年由于计量误差损失的金额可达 4 000 万欧元。而天然气流量计的计量特性和测

作者简介:赵孟卿(1987—),男,硕士,2011年毕业于西南石油大学油气储运工程专业,现在中国石油东南亚管道公司工作。地址:(100028)北京市朝阳区太阳宫金星园8号A座。E-mail:zhaomengqing@126.com

量不确定度要通过在天然气流量计检定站内进行实流测试和校准才能确定。伴随着大小型天然气流量计检定站的相继建立,天然气贸易交接计量工作的增加,天然气流量计计量的准确性愈加成为关注的焦点,由此针对检定、校准气体流量计的检定站检定工艺研究工作也愈发显得重要。

1 天然气流量计检定工艺

随着科学技术的迅速发展,世界上很多发达国家都相继建成了具有较高准确度水平的天然气流量计检定站,并设立了与之相匹配的天然气流量值传递和溯源体系。天然气流量计检定站设有工作标准、次级标准,对于有的大型流量计检定站还设有原级标准和核查标准。通过设立三级标准装置可以实现流量范围的逐级扩大,达到量值溯源和传递的需要。原级标准的所有基本物理量都应溯源到相对的国家基准,天然气流量值从原级标准传递到次级标准,再由次级标准传递到工作标准,最后再由工作标准实现对被检流量计的检定。



原级标准装置较多地采用了质量时间法流量标准装置和高压活塞式气体流量标准装置,其不确定度能达到 0.064%~0.1%,最佳不确定度能达到 0.05%。次级标准装置则广泛采用临界流喷嘴,也可采用涡轮流量计或容积式流量计,测量的不确定度可达到 0.15%~0.25%。工作标准装置则大多选用涡轮流量计,其不确定度可达到 0.15%~0.40%。然而,在加拿大 TCC 检定站和南京计量

测试中心等一系列新建的高压大流量的天然气流量计检定站中,相继都新增了超声流量计作为核查的标准,用来监测工作标准的测量能力和计量性能,大大提高了站内天然气流量检测的可靠性^[1-3],其检定工艺流程如图 1 所示。

2 流动模型的建立

天然气在检定站场管道中的流动可以视为一元流动,由于气体的流动满足质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。根据流体力学可建立天然气流动相应的连续性方程、运动方程和能量方程,以描述天然气的流速、压力、温度、密度和高程等量之间的相互关系^[4],见式(1)~式(3)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D}{Dt} \iiint_{\tau_0} \rho v d\tau_0 = \iiint_{\tau_0} \rho f d\tau_0 + \iint_{A_0} p_n dA_0 \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \frac{dT}{dx} + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T \frac{dp}{dx} + v \frac{dv}{dx} + g \frac{dz}{dx} = -\frac{dQ}{dx} \quad (3)$$

为了方便建立模型,作以下假设^[5]:①天然气在检定站内管道中作稳定流动,即在天然气管道任意一截面上,天然气的质量流量为一常数,它不随时间的变化而改变, $\rho v A = N = \text{常数}$;②天然气在检定站内管道中作等温流动,采用检定温度 T ,就可以不考虑能量方程的影响;③检定站内管道为水平管道,即 $dz/dx = 0$ 。

由于在实际工作中常常采用标准状况下的体积流量,为使用方便,所以把质量流量 M 换算成标准状况下的体积流量。考虑局部阻力系数,将气体状态方程 $\rho = \frac{p}{ZRT}$ 代入上面方程组,则方程组可简化为式(4):

$$Q \frac{p_0 \Delta}{R_a T_0} = \sqrt{\frac{(p_Q^2 - p_Z^2) D^4}{Z R_a T \left[\lambda \frac{(L + L_f)}{D} + 2 \ln \frac{p_Q}{p_Z} \right]}} \quad (4)$$

式中: R_a 为空气的气体常数, $\text{m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$; Q 为天然气在标准状况下体积流量, m^3/s ; Δ 为天然气的相对密度,无因次; p_Q 、 p_Z 为管道计算段起点和终点压力, MPa ; D 为管道内径, m ; λ 为水力摩擦系数,无因次; Z 为天然气压缩因子,无因次; T 为天然气的平均温度, K ; L 为管道计算段的长度, m ;

L_j 为局部损失当量长度, m。

由于检定站内管线距离短, 局部损失大, 所以在模型建立过程中考虑了输气管道沿线动能的增加对流量的影响, 即 $2 \ln \frac{p_Q}{p_Z}$ 。由于计算公式很复杂, 很难实现人工求解进出站压差与检定流速、检定温度以及被检管径的关系, 因此采用编程计算。

3 MATLAB 编程

在进行检定工艺计算程序设计时, 采用给定的天然气密度参数, 对检定站内管道进行适当地简化, 模拟检定时站内天然气流动, 以被检流量计的口径、检定温度、检定流速和进站压力为条件参数得到检定天然气流量计时压力损失随条件参数的变化^[6-7]。

计算程序分为 4 个部分。第一部分是针对不同管径和不同流速下的水力摩阻系数确定; 第二部分是对公式(4)中所涉及的参数程序化, 建立质量流量等参数的求解关系; 第三部分是输入相关参数实现对公式(4)中出口压力的求解; 第四部分是对检定工艺计算的程序界面设计。以常温条件下进站天然气压力为 7 MPa, DN400 超声流量计允许检定的最大流速 30 m/s 为例, 其程序运行界面如图 2 所示。

进站天然气压力 (Pa)	7000000
检定流速 (m/s)	30
输入 被检流量计口径 (m)	0.4
检定温度 (K)	293
出站压力 (Pa)	6.30835e+006
开始计算	

图2 程序运行界面图
Fig.2 Chart of program operation interface

通过对国内天然气输气干线调研得知, 为不影响检定站下游地区正常供气, 对于天然气流量计的实流在线检定, 天然气通过检定站压损不超过 0.8 MPa。通过计算 DN400 口径流量计在最大流量点进行检测时, 检定站内的压损大约为 0.69 MPa, 满足输气干线调度需求。

4 检定过程中的不确定度估算

对于工作标准采用涡轮流量计的流量计检定站, 根据 JJG 198—1994《速度式流量计检定规程》, 涡轮流量计的不确定度计算如式(5):

$$u_{kw} = \sqrt{u_{vw}^2 + u_{rw}^2 + u_{nw}^2} \quad (5)$$

式中: u_{kw} 为涡轮流量计的不确定度; u_{vw} 为体积流量的标准不确定度; u_{rw} 为重复性系数; u_{nw} 为脉冲输出的标准不确定度。

u_{vw} 的计算如式(6):

$$u_{vw} = \sqrt{u_{qm}^2 + u_{\rho}^2} \quad (6)$$

式中: u_{qm} 为单台喷嘴流量计的标准不确定度, 可由原级溯源而得, $u_{qm} = 0.102\%$; u_{ρ} 为天然气密度的标准不确定度, 其计算如式(7):

$$u_{\rho} = \sqrt{u_m^2 + u_p^2 + u_Z^2 + u_T^2 + u_R^2} \quad (7)$$

式中: u_m 、 u_p 、 u_T 、 u_Z 和 u_R 分别代表天然气摩尔质量的标准不确定度、压力流量的标准不确定度、温度测量的标准不确定度、天然气压缩因子的标准不确定度和气体常数的标准不确定度。

u_m 的分析, 根据 GB 50251—2003《输气管道工程设计规范》的要求, 管输天然气为二类天然气, 其组分摩尔含量的不确定度为 2%, 其中甲烷为主要成分, 根据 GB/T 11062—1998《天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法》, 可以计算得 u_m 为 0.088%。 u_T 的分析, 温度传感器最大示值误差为 0.1 K, 测量温度为 293.15 K, 误差均匀分布, 计算可得: $u_T = 0.1/293.15/\sqrt{3} = 0.0197$ 。 u_p 的分析, 压力传感器最大示值误差小于测量值的 0.05%, 误差按均匀分布, 可以计算得: $u_p = 0.05/\sqrt{3} = 0.0289$ (传感器响应时间滞后期间压力变化很小, 几乎不影响压力传感器的不确定度分析, 可以忽略。) u_Z 的分析, 工作条件下的压缩因子不确定度不超过 0.1%, 分布为正态分布, 包含因子取 2, 可以计算得: $u_Z = 0.1\%/2 = 0.05\%$ 。 u_R 的分析, R 为气体常数, 其误差来源于选取的有效数位, 其不确定度远小于基本不确定度的 1/10, 可以忽略。由以上可计算得:

$$u_{\rho} = \sqrt{0.088^2 + 0.0289^2 + 0.05^2 + 0.0197^2} \% = 0.107\%$$

$$u_{vw} = \sqrt{0.102^2 + 0.107^2} \% = 0.146\%$$

式中: u_{rw} 为脉冲输出的标准不确定度, 涡轮流量计的脉冲输出为高频脉冲, 其标准不确定度相当小, 可忽略。 u_{rw} 为重复性系数, 涡轮流量计的重复性系数为 0.1%。

由此得出, 一台涡轮流量计的标准不确定度 $u_{kw} = \sqrt{0.146^2 + 0.1^2} \% = 0.177\%$, 置信概率为 95%, 自由度为 5, 包含因子 $k = 2$ 。其扩展不确定度: $U_{kw} = k u_{kw} = 2 \times 0.177\% = 0.354\%$ 。

装置的不确定度应根据参与检测的标准流量计而定, 根据 JJG 643—2003《标准表法流量标准装置》公式求得^[8], 见式(8)。

$$U_{kw} = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (q_n u_n)^2 \right]^{1/2}}{\sum_{i=1}^n q_n} \quad (8)$$

式中: u_n 为第 n 台标准流量计的不确定度; q_n 为第 n 台标准流量计 u_n 对应的流量, m^3/h 。对于单台涡轮流量计而言, 其标准不确定度为 $u_{kw} = 0.177\%$, 扩展不确定度为 $U_{kw} = 0.354\%$ 。

5 结论与建议

经实践证明, 采用以涡轮流量计作为工作标准, 文丘里喷嘴作为次级标准, 质量时间法流量标准装置作为原级标准的三级检定工艺, 技术上是可行的。若增设超声流量计作为核查标准, 其技术性能更优。本文利用 MATLAB 举例, 对 DN400 口径天然气流

量计检定时压力、温度、粘度等工艺参数进行计算, 得出在大检定流速下的压力损失为 0.69 MPa, 符合我国天然气输气调度的压损要求, 经估算, 得到不确定度为 0.354%。

在以后对 DN400 以上流量计进行检定时, 为实现在最大流量点下的检定, 标定站应有充足的气源保障, 在考虑建设检定站位置区域时, 应优先考虑位于气田附近的地区, 例如荷兰 Westerberg 检定站就位于 Slochteren 气田^[9]。

参考文献

- [1] Stephen D. Baldwin, Unocal, Kenneth E. Starling. Economic Impact of Different Gas Flow Measurement Standards[J]. Society of Petroleum Engineers, 1997.
- [2] 何敏, 任佳, 肖云萍, 等. 气体超声流量计国际标准制/修订进展和发展趋势[J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 109-112.
- [3] 李高峰, 王宏伟, 朱梅松, 等. 旋进旋涡流量计取压方式对检定结果的影响及改进措施[J]. 天然气工业, 2011, 31(11): 100-102.
- [4] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986, 10.
- [5] 冯叔初, 郭揆常. 油气集输与矿场加工[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006, 5: 157-167.
- [6] 黄忠霖. 控制系统 MATLAB 计算及仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001, 11: 15-28.
- [7] 周品, 何正风. MATLAB 数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009, 1: 176-182.
- [8] 全国流量容量计量技术委员会. JJG 643—2003 标准表法流量标准装置[S]. 中国计量出版社, 2004—04—19.
- [9] 陈福庆. 国外高压大容量气体流量仪表检定站[J]. 国外油田工程, 2002, 18(8): 42-43.

收稿日期: 2012-01-13; 修回日期: 2013-03-14; 编辑: 钟国利

全国首届天然气质量与计量学术论坛

2013 年 6 月 18 日至 6 月 20 日, 中国石油西南油气田举办了全国首届天然气质量与计量学术论坛。此次论坛旨在探讨我国天然气质量与计量技术、标准化以及未来天然气计量技术进步发展概况, 展望中国天然气工业的蓬勃发展前景。会上, 来自全国各地专家学者围绕“天然气上游领域分析和测量技术”、“天然气能量计量技术”、“天然气质量控制技术及标准化”、“天然气计量技术及标准化”4 个专业领域进行了学术交流。

西南油气田高度重视天然气质量与计量技术研究, 在天然气物质测定、组分分析和取样技术、体积与能量计量研究等方面, 均达到了国内领先水平, 具备了跨地域承担气质检测和质量计量参与国际验证活动的的能力, 为国内天然气达标管输和国际天然气贸易交接计量提供了强有力的技术支撑; 同时, 负责起草了 52 项国家和行业标准, 参与了 2 项天然气领域国际标准的召集和起草。西南油气田通过举办此次学术论坛, 建立起了推进全国天然气质量与技术交流和科技进步的平台, 对促进我国天然气计量方式由体积计量到能量计量转变, 以及西南油气田自身推进建设天然气质量控制与能量计量集团公司重点实验室, 并力争使之成为国家级工程研究中心将起到积极的推动作用。

(天然气研究院 傅红 报道)