

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

段继芹^{1,2,3,4} 李长俊² 周芳^{1,3,4}

1. 中国石油西南油气田公司天然气研究院 2. 西南石油大学
3. 中国石油天然气集团有限公司天然气气质控制和能量计量重点实验室 4. 国家石油天然气大流量计量站成都分站

摘 要 气体超声流量计具有测量准确度高、适应性强和自诊断能力强等优点而被广泛用于天然气生产、输送及销售计量中, 中国与俄罗斯天然气贸易交接计量就使用了超声流量计。为了提高天然气贸易交接计量的准确度、维护贸易双方合法的经济利益, 分析比较了气体超声流量计国际标准 ISO 17089-1—2010、俄罗斯标准 ГОСТ 8.611—2013 和中国国家标准 GB/T 18604—2014 等 3 个标准的适用范围、测量气质条件、超声流量计技术指标、安装要求和现场测量性能保障措施等方面的异同点, 并进行了 2 台超声流量计串联安装计量试验, 开展了试验数据的重复性、安装位置对计量性能的影响和流量差值控制限分析, 在此基础上提出了对 GB/T 18604—2014 的修订建议。研究表明: ①中国标准同国际标准的主要技术内容是基本一致的, 但前者在超声流量计使用过程中质量控制方面还有待加强; ②建议 GB/T 18604—2014 增加 ISO 17089-1—2010 中超声流量计两次校准误差限、测量误差处理方法以及串联安装超声流量计对比方法等方面的内容。

关键词 中俄天然气贸易 交接计量 超声流量计 ISO 17089-1—2010 ГОСТ 8.611—2013 GB/T 18604—2014 差异性 测量误差

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.01.014

Recommended revision of the *Measurement of Natural Gas Flow by Ultrasonic Gas Flow Meters (GB/T 18604-2014)*

Duan Jiqin^{1,2,3,4}, Li Changjun² & Zhou Fang^{1,3,4}

(1. Natural Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu, Sichuan 610213, China; 2. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. CNPC Key Laboratory of Natural Gas Quality Control and Energy Measurement, Chengdu, Sichuan 610213, China; 4. Chengdu Verification Branch, National Oil and Gas Large Flowrate Measurement Station, Chengdu, Sichuan 610213, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 38, ISSUE 1, pp.109-115, 1/25/2018. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Ultrasonic gas flow meters are widely applied to the metering of natural gas in production, transmission and marketing sectors owing to their advantages of high accuracy, high adaptability and high self-diagnostic capacity. They are used for the custody transfer metering during the China–Russia natural gas trade. To improve the custody transfer metering accuracy in natural gas trade and protect the legal economic benefits of both trading parties, three standards on ultrasonic gas flow meters (i.e., the international standard ISO 17089-1-2010, Russia's standard ГОСТ 8.611-2013 and China's standard GB/T 18604-2014) were comparatively analyzed from the aspects of application, gas quality condition, technical indicators, installation requirements and field measurement securities. Then, a metering test was conducted on two ultrasonic gas flow meters that were installed in series, and the reproducibility of test data, the effect of installation sites on metering performance and the control limit of flow rate difference were analyzed. Accordingly, the recommendations were proposed on the revision of GB/T 18604-2014. It is indicated that GB/T 18604-2014 is basically consistent with the international standard in terms of main technical contents, but the former shall be strengthened in terms of quality control during the operation of ultrasonic gas flow meters. It is recommended to add GB/T 18604-2014 with an error limit of two calibrations of ultrasonic gas flow meters, the measurement error treatment method and the comparison method of ultrasonic gas flow meters installed in series that are included in ISO 17089-1-2010.

Keywords: China–Russia natural gas trade; Custody transfer metering; Ultrasonic gas flow meter; ISO 17089-1-2010; ГОСТ 8.611-2013; GB/T 18604-2014; Diversity; Measurement error

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司项目“中俄天然气贸易谈判相关质量和计量标准对比及技术方案研究”(编号: 2015D-4711-0501)。

作者简介: 段继芹, 女, 1969 年生, 高级工程师; 主要从事天然气流量值溯源、天然气流量检测、湿天然气流量计量等方面的研究工作。地址: (610213) 四川省成都市华阳镇天研路 218 号。电话: (028) 85605479, 13981890605。ORCID: 0000-0003-4320-9827。E-mail: duanjq@petrochina.com.cn

0 引言

近年来,中国自产天然气、进口天然气和液化天然气数量快速增加,至2016年底,我国天然气的消费量已超过 $2\ 100\times 10^8\text{ m}^3$,进口天然气量超过 $700\times 10^8\text{ m}^3$,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 $1\ 200\times 10^8\text{ m}^3$ ^[1]。如何提高天然气贸易交接计量准确度以及如何客观公正地维护贸易双方合法经济利益是大家关注的焦点。气体超声流量计具有无机械可动部件、无压损、量程比大、测量准确性较高、适应性强和具有自诊断能力等优点,近年来被广泛应用于天然气计量。中俄天然气贸易交接用流量计也为超声流量计,据了解,俄罗斯气体超声流量计标准主要参考了国际标准。因此,需弄清国际标准、俄罗斯标准和中国标准3个标准间的差异性。同时天然气贸易常采用两台不同原理或相同原理不同厂家的流量计串联安装,通过两台流量计的差值不能超过供销双方商定的差值控制限的控制来保证流量计准确可靠运行。而中国气体超声流量计国家标准 GB/T 18604—2014^[2]未对两台超声流量计的差值控制限提出具体要求,气体超声流量计国际标准 ISO 17089-

1—2010 附录 C^[3]则提出了相关要求,但有待进一步试验验证。为此,对国际标准、俄罗斯标准和中国标准的差异性进行了对比分析,同时通过试验确定了两台超声流量计的差值控制限。

1 标准对比分析

ISO 17089-1—2010、ГОСТ 8.611—2013^[4]和 GB/T 18604—2014 这3个标准对超声流量计的技术要求、安装要求、经实验室校准或检定合格的超声流量计在现场使用的计量性能保证和测量不确定度估算等做出了相关要求,3个标准的技术内容、要求及指标稍有不同。

1.1 标准适用范围及主要章节内容

由于中国标准主要根据美国煤气协会 AGA NO.9—2007^[5]、近年研究成果、现场使用经验及国际标准主要技术要求而制(修)订。因此国际标准、俄罗斯标准和中国标准在标准适用范围和主要章节内容稍有不同(表1)。

从表1可知:俄罗斯标准 ГОСТ 8.611—2013 缺少 ISO 17089-1—2010 中两次校准误差限及误测量处理方法介绍、超声流量计测量误差及修正方法、串联

表1 3个标准适用范围及主要章节内容比较表

项目	标准编号			备注
	ISO 17089-1—2010	ГОСТ 8.611—2013	GB/T 18604—2014	
适用范围	贸易交接和分配计量	贸易交接和分配计量	贸易交接和分配计量	相同
适用气体	单相均质气体	单相均质多组分气体和单组分气体	单相均质天然气	相同
主要章节内容	超声流量计的原理、影响因素及流量计算方法 结构及性能要求 测试及校准 跟踪检查及运行监控 调压计量站阀门特性及噪音控制 两次校准误差限及误测量处理方法 超声流量计测量误差、修正方法以及测量不确定度估算 串联安装超声流量计比对方法 文件要求 几何相关的温度和压力校正的详细计算 干扰测试及要求	超声流量计的准确度等级及流量计分类性能要求 原理及流量计算方法 操作人员的技能要求和安全要求 计量设施环境及工况条件要求 计量系统及仪表性能及安装要求 投产前准备工作 天然气流量计算处理方法 现场检查及诊断方法 测量结果的不确定度评定方法	超声流量计的基本原理、影响因素及流量计算方法 工作及环境条件 测量性能要求 流量计要求 安装要求及维护 现场验证测试要求 流量计算方法及测量不确定度估算 流量计组件的实流校准 出厂测试要求 具备的文件 声学噪声的产生及防治措施 流量计和流动调整器的性能验证测试 流量计现场测量性能的检验和保证	有差异

安装超声流量计比对方法、几何相关温度和压力校正的详细计算、干扰测试及要求章节的内容。中国标准 GB/T 18604—2014 缺少 ISO 17089-1—2010 中两次校准误差限及误测量处理方法介绍、串联安装超声流量计比对方法、几何相关温度和压力校正的详细计算内容。

1.2 测量气质条件

由于欧盟、俄罗斯和中国对天然气管输气质的要求不同，因此 ISO 17089-1—2010、ГОСТ 8.611—2013 和 GB/T 18604—2014 标准有关测量气质条件也有一定差异（表 2），但 GB 17820—2012《天然气》^[6] 中我国贸易交接用 II 类天然气气质要求 CO₂ 含量小于等于 3%（体积分数），总 S 含量小于等于 200 mg/m³。因此超声流量计适用的技术指标要求一致。

1.3 超声流量计技术指标

ГОСТ 8.611—2013 与 ISO 17089-1—2010 相比只给出了最大允许误差要求，但列出了超声流量计测量准确度等级有 A（0.5）级、B（0.75）级、C（1.5）级、D（2.5）级和 E（5.0）级 5 个级别，其中对于贸易交接用气体超声流量计等级为 A（0.5）级和 B（0.75）级，其工况流量测量扩展不确定度分别为 0.3% 和 0.5%，标况流量测量扩展不确定度分别为 0.4% 和 0.55%，比 ISO 17089-1—2010 和中国标准要求严格。GB/T 18604—2014 对贸易计量用气体超声流量计计量性能的要求与 ISO 17089-1—2010 相似，ISO 17089-1—2010 还增加了对气体超声流量计复现性的要求。各标准对计量性能要求比较如表 3 所示。

表 2 3 个标准有关气体超声流量计测量气质条件比较表

技术指标	标准编号			备注
	ISO 17089-1—2010	ГОСТ 8.611—2013	GB/T 18604—2014	
测量介质	天然气或其他气体	天然气或其他气体	天然气	有差异
介质流态	单相均质	单相均质	单相均质	相同
CO ₂ 体积分数	≤ 3%	≤ 3%	≤ 10%	有差异
总 S 含量上限值 / (mg · m ⁻³)	≤ 320	≤ 320	≤ 460	有差异

表 3 3 个标准测量性能要求比较表

测量性能要求	ISO 17089-1—2010		ГОСТ 8.611—2013	GB/T 18604—2014	
	贸易计量	分配计量			
重复性	0.2% (q_t 及以上)	0.25% ($q \geq q_t$)	无	0.2% (q_t 及以上)	
	0.4% (q_t 以下)	0.5% ($q < q_t$)		0.4% (q_t 以下)	
复现性	0.3% (q_t 及以上)	0.6% ($q \geq q_t$)	无	无	
	0.6% (q_t 以下)	1.2% ($q < q_t$)			
分辨率 / (m · s ⁻¹)	0.001	0.002	无	0.001	
分界流量 / (m · s ⁻¹)	管道公称直径 ≥ 300 mm	1.5	无	≤ 0.1 q_{max}	
	管道公称直径 < 300mm	3.0			3.0
零流量读数 / (m · s ⁻¹)	管道公称直径 ≥ 300 mm	< 0.006	< 0.006	< 0.006	
	管道公称直径 < 300 mm	< 0.012	< 0.024	< 0.012	
最大允许误差	管道公称直径 ≥ 300 mm	±0.7% ($q \geq q_t$)	±1.0% ($q \geq q_t$)	0.5% ($q \geq q_t$)	±0.7% ($q \geq q_t$)
		±1.4% ($q < q_t$)	±2.0% ($q < q_t$)	0.75% ($q < q_t$)	±1.4% ($q < q_t$)
	管道公称直径 < 300 mm	±1.0% ($q \geq q_t$)	±1.5% ($q \geq q_t$)	≤ 0.7% ($q \geq q_t$)	±1.0% ($q \geq q_t$)
		±1.4% ($q < q_t$)	±2.0% ($q < q_t$)	≤ 1.5% ($q < q_t$)	±1.4% ($q < q_t$)
最大峰间误差	管道公称直径 ≥ 300 mm	< 0.7% ($q \geq q_t$)	1.0% ($q \geq q_t$)	0.5% ($q \geq q_t$)	0.7% ($q \geq q_t$)
				0.75% ($q < q_t$)	1.4% ($q < q_t$)
	管道公称直径 < 300 mm	< 1.0% ($q \geq q_t$)	1.4% ($q \geq q_t$)	≤ 0.7% ($q \geq q_t$)	1.0% ($q \geq q_t$)
				≤ 1.5% ($q < q_t$)	1.4% ($q < q_t$)

注：q 表示瞬时流量；q_t 表示分界流量；q_{max} 表示设计流量计的最大流量

1.4 安装要求

1.4.1 声学噪声防治

ISO 17089-1—2010 和 GB/T 18604—2014 都给出了可能存在的噪声源及对流量计的影响, 并就如何减少噪声对超声流量计的影响提出了实用性的建议, 如将调压阀和其他产生噪声的设备安装在流量计的下游, 使噪声源远离流量计, 安装盲三通和过滤器等管件, 增强信号处理功能等, 而 GOCT 8.611—2013 标准未提及。

1.4.2 上下游直管段长度要求

GB/T 18604—2014 在超声流量计计量管路安装设计方面的技术要求主要参考了 ISO 17089-1—2010 标准中的相关内容。不同的阻流件条件、不同厂家的超声流量计和不同的流动调整器组合对于上游直管段的要求不同, 因此, 最小上游直管段长度应由生产厂家通过型式试验给出。当没有型式试验数据时, 应由用户来确定最小上游直管段长度。按流量计是否配流动调整器, 最小上游直管段长度可以是 $(30 \sim 50)D$ (D 表示管径, 下同)。而下游直管段最小长度为 $3D$, 取温孔等位置为 $(3 \sim 5)D$ 。还指出, 当没有足够的安装空间和上游管路条件恶劣时, 需要配流动调整器。3 个标准有关上下游直管段长度及温度计安装位置要求比较结果如表 4 所示。

1.5 实流校准要求

ISO 17089-1—2010、GOCT 8.611—2013 和 GB/T 18604—2014 均提出作为贸易计量的气体超声流量计需要进行实流校准。各标准的校准技术要求比较如表 5 所示。

1.6 现场测量性能保障措施

GB/T 18604—2014 相应条款内容主要参照 ISO 17089-1—2010 中的相关内容, 非常详细地说明了如何利用超声流量计自诊断历史数据的分析来判断流量计的现场计量性能。3 个标准现场测量性能保障措施比较结果如表 6 所示。

2 两台超声流量计串联安装实验

选取国际上主要使用的两个生产厂家的超声流量计作为实验对象, 两台超声流量计的原始参数如表 7 所示。

2.1 两台超声流量计串联实验方案

在国家石油天然气大流量计量站成都分站进行两种安装工况下性能测试实验。工况一: 上游直管段内径为 309 mm, 管长为 $30D$, 后接内径为 303 mm、管长为 $10D$ 的超声流量计 B 上游直管段, 安装流量计 B, 再安装内径为 303 mm、管长为 $5D$ 的超声流

表 4 3 个标准有关上下游直管段长度及温度计安装位置要求比较表

技术要求	标准编号		
	ISO 17089-1—2010	GOCT 8.611—2013	GB/T 18604—2014
上游最短直管段	由相关厂家提出 不带整流器 $50D$ 带整流器 $30D$	由相关厂家提出 不带整流器 $50D$ 带整流器 $30D$	由相关厂家提出 不带整流器 $50D$ 带整流器 $30D$
下游最短直管段	$3D$	$5D$	$5D$
温度计安装位置	单向测量 $(2 \sim 5)D$ 插入深度 $(1/10 \sim 1/3)D$	单向测量 $(2 \sim 5)D$ 双向测量 $(3 \sim 5)D$ 插入深度 $(0.1 \sim 0.7)D$	单向测量 $(2 \sim 5)D$ 双向测量 $(3 \sim 5)D$ 插入深度宜 $1/3D$, 直径大于 300 mm 的不超过 125 mm

表 5 3 个标准实流校准要求比较表

校准要求	ISO 17089-1—2010	GOCT 8.611—2013	GB/T 18604—2014
推荐流量点	q_{\min} 、 $0.05q_{\max}$ 、 $0.10q_{\max}$ 、 $0.25q_{\max}$ 、 $0.40q_{\max}$ 、 $0.70q_{\max}$ 、 q_{\max}	无	q_{\min} 、 $0.05q_{\max}$ 、 $0.10q_{\max}$ 、 $0.25q_{\max}$ 、 $0.40q_{\max}$ 、 $0.70q_{\max}$ 、 q_{\max}
最大校准流量	标准装置能力不足时, $\geq 0.40q_{\max}$		无
每次采数时间 /s	≥ 100		≥ 100

注: q_{\min} 表示设计流量计的最小流量

表 6 3 个标准现场测量性能保障措施比较表

现场检查方法	ISO 17089-1—2010	ГОСТ 8.611—2013	GB/T 18604—2014
声速监测	有	有	有
流速监测	有	有	有
流态分布系数监测	有	有	有
核查流量计	有	无	无
现场零流量检查	有	有	有
目测检查	有	有	有
单声道测量分析	有	无	无
内部检查	有	有	有

3 个标准都指出声速是超声流量计现场计量性能最为重要的监测参数；GB/T 18604—2014 与 ISO 17089-1—2010 技术内容一致，ISO 17089-1—2010 还强调使用核查流量计

流量计 B 下游直管段，再安装内径为 286 mm、管长为 10D 的超声流量计 A 上游直管段，接着安装流量计 A，再安装内径为 286 mm、管长为 5D 的超声流量计 A 下游直管段。工况二：上游直管段内径为 309 mm，管长为 30D，后接内径为 286 mm、管长为 10D 的超声流量计 A 上游直管段，接着安装流量计 A，再安装内径为 286 mm、管长为 5D 的超声流量计 A 下游直管段，再安装内径为 303 mm、管长为 10D 的超声流量计 B 上游直管段，安装流量计 B，再安装内径 303 mm 长 5D 超声流量计 B 下游直管段。两台流量计安装位置如图 1 所示。

两台流量计串联安装，实验流量分布见表 8。

2.2 两台超声流量计试验数据分析

将两台超声流量计分别按工况一、工况二串联安装，按表 8 实验流量进行测试，流量计的重复性、安装位置对计量性能的影响和两台流量计的流量差值控制限如下。

表 7 两台超声流量计的原始参数表

实验对象	流量计规格	流量计内径/mm	流量测量范围 / (m ³ · h ⁻¹)	压力等级	仪表系数 (k) / m ⁻³
流量计 A	DN300 mm	289	65 ~ 7 800	CLASS 600	920
流量计 B	DN300 mm	303	80 ~ 10 000	CLASS 600	720

注：温度铂电阻准确度为 A 级，温度变送器准确度为 0.025 级，量程为 0 ~ 40 ℃；压力变送器准确度为 0.025 级，量程为 0 ~ 5.5 MPa

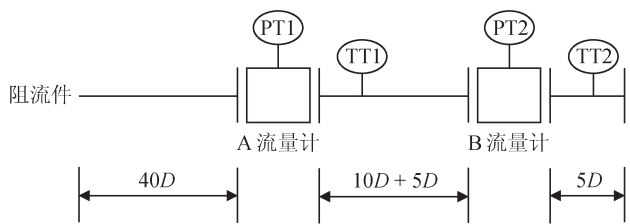


图 1 两台流量计安装示意图

注：PT 表示压力变送器；TT 表示温度变送器

表 8 实验流量分布表

项目	结果
压力/MPa	2.8
流量布点 / (m ³ · h ⁻¹)	160、800、1 600、3 200、5 600 (每个流量点 6 次)
采数时间 /s	100

注：每个实验流量点重复测试 6 次

2.2.1 重复性

将流量计 A 和 B 分别安装在上游或下游的重复性数据绘于图 2，由图 2 可知，流量计 B 的重复性偏大，

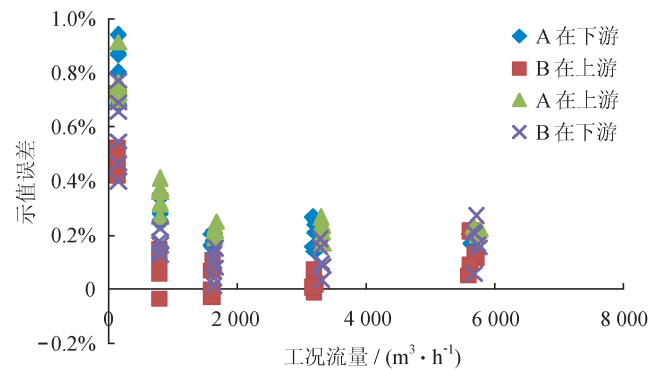


图 2 两台超声流量计的重复性数据图

流量计 A 的重复性相对较小，相对于流量计 B 较稳定，但流量计分界流量 q_t 以上重复性小于 0.10%， q_t 以下重复性小于 0.15%，两者较稳定。

2.2.2 流量计安装位置对计量性能的影响

流量计安装位置对计量性能的影响如图 3 所示。从图 3 可知，在流量计分界流量 q_t 以上，流量计 A 安装在上、下游的影响不超过 0.3%，计量性能相对较稳定。

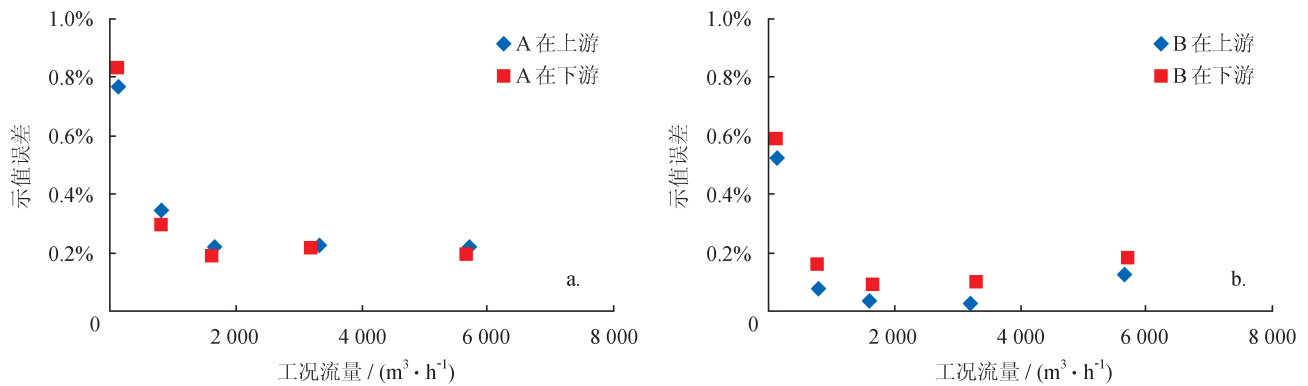


图 3 流量计 A、B 安装在上、下游的影响图

2.2.3 两台串联超声流量计的差值控制限

两台串联超声流量计的差值控制限如表 9 所示。由表 9 初步可知，两台流量计流量 $q \geq 0.25q_{max}$ ，平

均小时流量偏差的差值控制限均小于 0.3%，在满足上游大于 $40D$ 和两台流量计间距大于 $15D$ 时，流量计安装在上游或下游带来的影响可忽略^[7]。

表 9 两台串联超声流量计的差值控制限表

流量	流量计 A 标准状态下流量 / ($m^3 \cdot h^{-1}$)	流量计 B 标准状态下流量 / ($m^3 \cdot h^{-1}$)	流量偏差	备注
$0.70q_{max}$	166 241.2	166 125.9	-0.07%	流量计 A 安装在下游， 流量计 B 安装在上游
$0.40q_{max}$	95 992.49	95 811.34	-0.19%	
$0.20q_{max}$	47 603.70	47 532.78	-0.15%	
$0.10q_{max}$	24 523.56	24 469.74	-0.22%	
$0.02q_{max}$	4 798.489	4 781.248	-0.36%	
$0.70q_{max}$	172 098.7	172 024.6	-0.04%	流量计 A 安装在上游， 流量计 B 安装在下游
$0.40q_{max}$	97 953.50	97 826.94	-0.13%	
$0.20q_{max}$	48 509.58	48 444.77	-0.13%	
$0.10q_{max}$	23 765.38	23 714.67	-0.21%	
$0.02q_{max}$	4 876.032	4 869.133	-0.14%	

3 GB/T 18604—2014 修订建议

综上所述比较分析和实验验证，建议 GB/T 18604—2014 下次修订时主要增加以下两方面的内容：

1) 增加 ISO 17089-1—2010 中超声流量计两次校准误差限及测量误差处理方法。国际标准 ISO 17089-1—2010 资料性附录 A 提供了两次校准误差限及测量误差处理方法。图 4 为一台超声流量计首次校准和后续校准的数据比较图。首次校准“偏移量”已输入流量计的电子模块。从图 4 可看出后续校准产生了超出误差范围的结果，因此可能带来误测量问题。误测量的时间段将取决于许多因素，首要的是以前工作的状况。当偏移发生时如能从日志文件或比较检查中发现，则它就可以作为任何误测量开

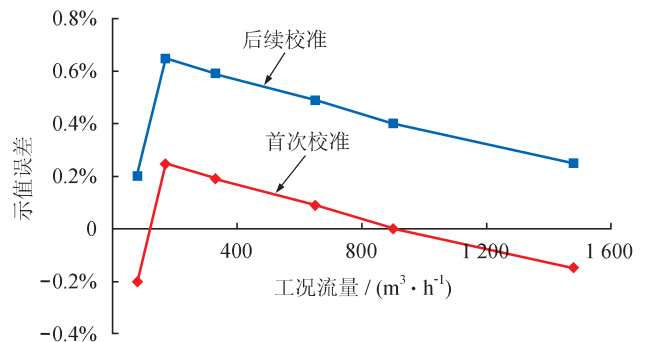


图 4 一台超声流量计首次校准和后续校准的数据比较图

始的日期。否则，起始日期应在现有数据或合同协议的基础上双方达成一致，这需要对记录的实际流量的工作时段进行测量检查。

2) 增加串联安装超声流量计比对方法。国际标

准 ISO 17089-1—2010 资料性附录 C 提供了两台超声流量计串联的参比计量方法。该方法用于在计量现场两台串联超声流量计其中一台进行修理后重建可溯性, 同时也是两台串联超声流量计正常运行时性能评估控制并提供证明符合贸易交接要求的最有效的办法^[3] (图 5)。图 5 给出了 4 种性能评估控制限, 如果评估流量计性能时当 $\Delta q_{V, HDF}/q_{V, HDF}$ 值超出了性能评估范围, 应首先排除故障以确定哪台流量计发生了偏移, 待排除故障后并作为核查流量计放回使用, 另外的气体超声流量计就是贸易交接主流量计。欧洲国家国际贸易也采用不同生产厂家的两台超声流量计串联或涡轮与超声流量计串联的参比计量方法^[8], 其两台流量计差值控制限在正常运行时控制在 0.2%, 超过 0.3% 控制系统显示预警, 需引起注意并排查问题, 超过 0.5% 不能接受。该方法也符合前述第二部分的实验结果。

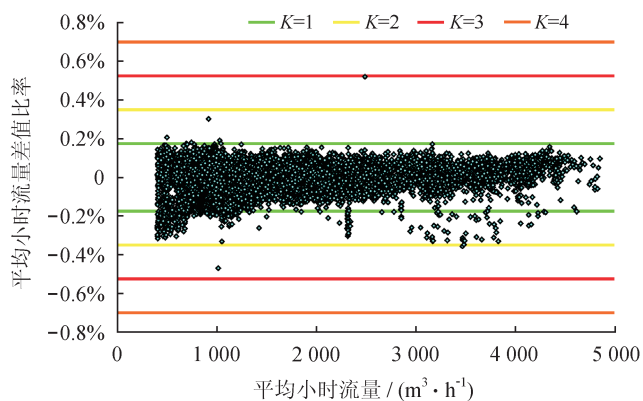


图 5 串联安装超声流量计对比方法图

4 结束语

通过超声流量计测量天然气流量的国际标准 (ISO 17089-1—2010)、俄罗斯 (ГОСТ 8.611—2013) 及中国标准 (GB/T 18604—2014) 的对比分析, 中国标准同国际标准的主要技术内容是基本一致的, 在超声流量计使用过程中质量控制方面有待加强, 建议 GB/T 18604—2014 增加超声流量计两次校准误差限及测量误差处理方法和串联安装超声流量计对比方法等方面的内容。

参 考 文 献

- [1] 赵文智. 中国天然气工业发展形势与展望 [R]. 杭州: 2017 年全国天然气学术年会, 2017.
Zhao Wenzhi. Natural gas development situation and prospect in China[R]. Hangzhou: 2017 International Conference on Natural Gas, 2017.
- [2] 段继芹, 何敏, 文代龙, 任佳, 黄和, 刘勇明, 等. 用气体超声流量计测量天然气流量: GB/T 18604—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
Duan Jiqin, He Min, Wen Dailong, Ren Jia, Huang He, Liu Yongming, et al. Measurement of natural gas flow by ultrasonic gas flow meters: GB/T 18604-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [3] ISO. Measurement of fluid flow in closed conduits—Ultrasonic meters for gas—Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement: ISO 17089-1: 2010E[S]. Geneva: ISO, 2010. <https://www.iso.org/standard/41235.html>.
- [4] Расход и количество природного газа методика(метод) измерений с помощью ультразвуковых преобразователей Расхода: Гост 8.611-2013[S]. Москва: Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии, 2013. <https://www.gostinfo.ru/.html>.
- [5] Bowen J, Bowles E & Bronner J. Measurement of gas by multipath ultrasonic meters: AGA Report No. 9: 2007[S]. Washington DC: American Gas Association, 2007.
- [6] 黄维和, 唐蒙, 黄黎明, 陈彰兵, 石兴春, 邱健勇, 等. 天然气: GB/T 17820—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Huang Wehe, Tang Meng, Huang Liming, Chen Zhangbing, Shi Xingchun, Qiu Jianyong, et al. Natural gas: GB/T 17820-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [7] 罗勤, 李晓红, 段继芹, 曾文平, 李万俊, 王晓琴, 等. 中俄天然气贸易谈判相关质量和计量标准对比及技术方案研究 [R]. 成都: 中国石油西南油气田公司天然气研究院, 2017.
Luo Qin, Li Xiaohong, Duan Jiqin, Zeng Wenping, Li Wanjun, Wang Xiaoqin, et al. The research on quality and number measurement standards and operational technical solution about natural gas trade negotiations between China and Russia[R]. Chengdu: Natural Gas Research Institute of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, 2017.
- [8] Folkestad T, Flolo D, Tunheim H & Nesse O. Operating experience with two ultrasonic gas meters in series[R]. Oslo: North Sea Flow Measurement Workshop, 2003.

(修改回稿日期 2017-11-02 编辑 何明)