

中国天然气计量技术及展望

常宏岗^{1,2} 段继芹^{1,2,3}

1. 中国石油西南油气田公司天然气研究院

2. 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 3. 国家石油天然气大流量计量站成都分站

摘要: 天然气计量是国家、社会和经济发展的基础性工作,准确可靠的计量是促进我国天然气工业快速发展的重要保证。为此,分析了天然气计量的重要性及其特点,从计量技术标准体系、计量器具的应用技术、天然气贸易交接计量方式、量值溯源体系和计量管理方面对国内外天然气计量技术进行了对比分析,并对中国天然气流量计量技术的发展进行了总结和展望。研究表明:①天然气计量是量大、动态、可压缩介质的气体计量,计量结果由工况流量、组成、温度、压力等数据导出,每个基础数据都要被准确测量,才能保证计量结果的准确性;②我国已经建立了天然气计量技术体系,主要包括计量法律、法规,计量技术标准与规范,计量量值溯源技术,计量器具的应用技术,计量管理制度等;③随着我国天然气工业的高质量快速发展,我国天然气计量技术体系将持续完善并进一步与国际接轨,计量器具可靠性保证可能从强制检定转变为通过检定或校准均可的方式进行溯源,计量器具国产化进程会加快,天然气贸易计量方式将发生从体积计量转变为能量计量的重大改变。结论认为,我国建立的天然气计量技术体系基本满足了国家天然气大发展的需求,但仍需进一步提升和完善。

关键词: 天然气; 计量; 标准体系; 量值溯源; 主流量计; 核查流量计; 能量计量; 展望

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.01.015

Natural gas measurement technology system and its prospect in China

CHANG Honggang^{1,2}, DUAN Jiqin^{1,2,3}

(1. *Natural Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610213, China*; 2. *CNPC Key Laboratory of Natural Gas Quality Control and Energy Measurement, Chengdu, Sichuan 610213, China*; 3. *Chengdu Verification Branch, National Oil and Gas Large Flowrate measurement Station, Chengdu, Sichuan 610213, China*)

NATUR. GAS IND. VOLUME 40, ISSUE 1, pp.110-118, 1/25/2020. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Natural gas measurement is an important basic job in national, social and economic development, and accurate and reliable measurement is an important guarantee for promoting the rapid development of natural gas industry in China. In this paper, the importance and characteristics of natural gas measurement were analyzed. Then, domestic and foreign natural gas measurement technologies were analyzed and compared from the aspects of measurement technological standard system, measurement instrument application technology, custody transfer metering mode in natural gas trade, measurement value traceability system and measurement management. Finally, the development of domestic natural gas flow metering technologies was summarized and predicted. And the following research results were obtained. First, natural gas measurement is a kind of large-quantity dynamic gas measurement with compressible medium, and the measurement result is derived from the flow rate, composition, temperature, pressure and other data under working conditions. Therefore, the accuracy of the measurement results cannot be guaranteed unless each basic data is measured accurately. Second, a natural gas measurement technology system has been established in China, including measurement laws and regulations, measurement technological standards and specifications, measurement value traceability technology, measurement instrument application technology and measurement management system. Third, with the high-quality rapid development of domestic natural gas industry, China's natural gas measurement technology system will get improved continuously and be in line with international standards further. The guarantee for the reliability of measurement instrument may be transformed from compulsory verification to traceability based on verification or calibration, and the nationalization process of measurement instruments will be sped up. In addition, the metering mode in natural gas trade will be changed greatly from volume measurement to energy measurement. In conclusion, China's natural gas measurement technology system basically guarantees the rapid development of its natural gas industry, but it still needs further improvement and completion.

Keywords: Natural gas; Measurement; Standard system; Measurement value traceability; Master meter; Check meter; Energy measurement; Prospect

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司科研项目“天然气贸易交接计量检验标准研究”(编号:2016D-4704)。

作者简介: 常宏岗, 1965年生, 正高级工程师、中国石油天然气集团有限公司高级技术专家、本刊编委;长期从事油气田开发、地面集输与净化、分析测试和计量及标准化领域的科研及管理工作。地址:(610213)四川省成都市华阳镇天研路218号。ORCID: 0000-0003-2263-1535。E-mail: changhg@petrochina.com.cn

1 天然气计量的重要性及其特点

“量”是客观事物及其运动的表现形式，确定的“量”是一切活动的前提和基础，天然气商品的价值也是通过天然气的“量”来体现的。计量是通过技术与法律手段，实现单位统一、量值准确可靠的活动。计量是国民经济发展重要的基础工作，是适应于生产、贸易、科学技术发展和国民经济建设需要，维护国家、人民的利益的重要保证。

我国天然气工业按照产供储销协调发展的原则，整体推进天然气上、中、下游业务快速发展，构建供应立足国内、进口来源多元、管网布局完善、储气调峰配套、用气结构合理、运行安全可靠的天然气产供储销体系。随着中亚、中缅及进口液化天然气的引入，中俄东线天然气管道的开通，国家天然气骨干管网基本形成，区域性天然气管网逐步完善，“西气东输、北气南下、海气登陆、就近外供”供气格局已经形成，干线互联互通工作正在全面开展^[1]。天然气计量结果直接影响到天然气产供储销企业的生产经营活动。企业计量的科学性和先进性关系到企业的运行效率和经营效益。在天然气生产环节中，计量数据为油气田产量统计和生产调度组织提供基本依据；在天然气输送环节中，计量数据可监控输气管线运行状态，为输差分析提供基础数据；在天然气销售环节中，计量数据的准确性可有效保障企业的合法经济利益，实现天然气公平贸易、公正交接。只有通过准确、可靠的计量结果，我们才能得到我国每年巨大的天然气消费量、生产量、进口量等关键数据。如果没有准确、可靠的计量，天然气企业无法开展正常生产经营活动，社会经济秩序将发生混乱，天然气的生产、输送、贸易活动也不能正常进行。

天然气计量特点和难点如下：

1) 天然气是易燃、易爆气体，天然气管道和计量站都处在压力状态，计量设备、设施、仪器符合安全标准，保证计量全过程安全是天然气计量的首要条件。

2) 天然气计量是量大、流动、可压缩介质的动态气体计量，相较于静态、不可压缩的液体和固体计量，量值不易复现。

3) 由于天然气属于多组分混合气体，组分的变化会引起相对密度、发热量、压缩因子、等熵指数、临界流函数等物性参数的变化，而这些参数直接与天然气流量计算，对计量结果有直接影响。

4) 由于天然气的气体流态特征，流量计的上游

管件和阻力件形式、前后直管段和整流器形式等安装条件和温度、压力、振动、脉动、电磁干扰等操作条件和环境条件均会对计量结果产生直接影响。

5) 天然气流动过程中温度和压力都处于变化中，流量是由时间、组成、长度、温度、压力等数据导出，相比较单参数测量要求更高，每个基础数据都要准确测量，才能保证计量结果的准确。

面对复杂的产供储销体系，天然气计量工作必须适应天然气工业的快速变化，才能够保证我国天然气业务的健康发展。

2 国内外天然气计量技术对比分析

天然气计量是压力状态下的大流量、动态、影响因素多且复杂条件下的不可复现的气体计量，须具备先进的技术体系和高效的管理才能实现准确、可靠的计量。天然气计量方式包括体积计量、质量计量和能量计量3种方式。国际天然气贸易和欧美日韩等工业发达国家广泛采用能量计量；我国按照苏联模式，与俄罗斯、中亚地区国家一样，仍以体积计量为主；天然气质量计量应用相对较少，主要针对压缩天然气计量。随着贸易全球化进程加快，消除国际间贸易技术壁垒，正当维护国家利益，实现多气源格局下天然气国际国内贸易的准确计量，是计量界业内人士的重要责任。

我国天然气主要用户包括居民、商业、工业用户等对象。天然气利用领域分为城市燃气、工业燃料、天然气发电和天然气化工4大类。本文所指的天然气计量是以20℃、101.325 kPa为标准参比条件，流量大于100 m³/h，工作压力大于0.1 MPa（表压）的天然气贸易计量。天然气计量是天然气生产、输送和销售等关键环节的重要工作，为了更好地满足国家天然气大发展需求，结合我国天然气工业的实际情况，我国配套建立了以体积计量为基础的天然气计量技术体系，体系主要包括计量相关的法律、法规与管理制度，计量技术标准与规范，计量器具的应用与量值溯源技术等。随着国家对天然气工业加快发展要求越来越高，我国天然气计量技术体系也在不断建设、优化和发展中。笔者将从计量技术标准体系、计量器具应用技术、贸易交接计量方式、量值溯源技术、管理制度等方面，讨论如何保障天然气计量结果的准确可靠。

2.1 计量技术标准体系

先进、实用的计量技术标准体系是天然气工业

发展的基础,先进标准的使用对推进天然气技术进步,加快中国天然气工业的生产、消费升级和推进天然气利用,提高经济社会发展水平,维护国家和人民的利益意义重大。在符合我国计量相关的法律、法规与管理制度基础上,参考国际先进天然气计量技术标准体系,并结合我国实际情况,建立了基本适合我国天然气工业的天然气计量技术标准体系,保证了天然气的生产和贸易需求,我国天然气体积流量计量标准体系总体与国际接轨,部分达到国际先进水平,近年来我国积极参与并牵头制订天然气计量方面的国际标准,这对提升我国天然气大国地位和获取天然气国际贸易主动权具有重要意义,我国天然气计量主要技术标准及国外相关标准对比如表1所示。

通过国内外标准的总体比较,我国天然气计量标准与国外先进标准基本一致,基本能满足我国天然气体积计量和能量计量的需求。其中GB/T 18603—2014《天然气计量系统技术要求》是标准体系中的基础,标准规定了天然气计量站贸易计量系统的设计、建设、投产运行、维护方面的技术要求,对流量计量

装置和发热量测量系统均提出了技术要求。该标准根据在标准参比条件下,按照设计 $100 \sim 1\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $1\,000 \sim 10\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $10\,000 \sim 100\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 和大于 $100\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 体积流量规模将天然气计量站计量系统分为4档,不同等级计量系统的对应准确度等级要求分别为A级、B级、C级,对应的能量计量结果的最大允许误差为1%、2%和3%^[2],计量站流量规模越大,对计量系统要求越高。表2为我国天然气不同等级的计量系统技术要求,我国的要求与国际法定计量组织OIML R 140: 2007^[3]标准要求相同。中国作为天然气大国,若按照2018年 $2\,766 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的天然气体积消费量,0.5%的计量误差将产生 $14 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的输送差异,A级计量系统1%的允许误差,计量将可能产生 $28 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的差异,涉及金额数十亿,实际上我们还有大量的B级站和C级站,如果再加上天然气生产商到终端用户的若干贸易交接界面,计量差异会更大,对供销双方均有一定的财务风险。因此,如何进一步提高我国的天然气计量技术水平,还任重道远。

表1 国内外天然气计量技术主要标准对比表

| 项 目 | 中国标准 | 国际标准 | 美国标准 | 欧盟标准 |
|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---|---|
| 能量计量 | GB/T 22723—2008 | ISO 15112: 2018 | AGA NO.5: 2009 | EN ISO 15112: 2018 |
| 计量系统技术要求 | GB/T 18603—2014 | OIML R140: 2007 | AGA NO.4A: 2009 | EN 1776: 2015 |
| 超声流量计 | GB/T 18604—2014 GB/T 30500—2014 | ISO 17089.1: 2010 | AGA NO.9: 2017 AGA NO.10: 2002 | ISO 17089: 2010 |
| 孔板流量计 | GB/T 21446—2008 | ISO 5167.1 ~ 4: 2003 | AGA NO.3.1 ~ 4: 2000 AGA NO.3.3: 2016 | EN ISO 5167.1 ~ 4: 2003 |
| 涡轮流量计 | GB/T 21391—2008 | ISO 9951: 1993 | AGA NO.7: 2007 | EN 12261: 2018 |
| 容积式流量计 | SY/T 6660—2006 | — | ANSI B109.3: 2019 | EN 12480: 2018 |
| 质量流量计 | SY/T 6659—2016 GB/T 20727—2006 | ISO 10790: 2015 | AGA NO.11: 2013 | ISO 10790: 2015 |
| 旋涡流量计 | SY/T 6658—2006 | ISO 12764: 2017 | API MPMS Chapter 14.12: 2017 | BS ISO 12764: 2017 |
| 流量计算机及能量 转换装置 | JJG1003—2016 | — | API MPMS 21.1: 2013 | EN 12405-1: 2018, EN 12405-2: 2012 EN 12405-3: 2015 |
| 天然气压缩因子的 计算 | GB/T 17747.1 ~ 3—2011 | ISO 12213: 1 ~ 3: 2009 | AGA No.8: 2017 | EN ISO 12213:1 ~ 3: 2009 |
| 天然气发热量、密 度、相对密度和沃 泊指数的计算方法 | GB/T 11062—2014 | ISO 6976: 2016 | API MPMS 14.5: 2009 | EN ISO 6976: 2016 |
| 天然气的组成分析 气相色谱法 | GB/T 13610—2014 | ISO 6568: 1981 ISO 6975: 1997 | ASTM D1945: 2014 | BS EN ISO 6975: 1997 |

表 2 不同等级的计量系统表

单位：m³/h

| 项 目 | 设计能力 (q_n) ^① | | | |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------|
| | $100 < q_n \leq 1\,000$ | $1\,000 < q_n \leq 10\,000$ | $10\,000 < q_n \leq 100\,000$ | $q_n > 100\,000$ |
| 流量计的曲线误差校正 | | √ | | √ |
| 在线核查(校对)系统 | | | | √ |
| 温度转换 | √ | √ | | √ |
| 压力转换 | √ | √ | | √ |
| 压缩因子转换 | | √ | | √ |
| 在线发热量和气质测量 | | | | √ |
| 离线或赋值发热量值测定 | √ | √ | | |
| 每一时间周期的流量记录 | | | | √ |
| 密度测量 | | | | √ |
| 准确度等级 | C(3%) | B(2%) | B(2%) 或 A(1%) ^② | A(1%) |

注：①标准参比条件下。

②根据计量系统重要性选择属于 A 级或 B 级计量系统。

2.2 计量器具的应用技术

天然气计量需要多台套仪器设备的测量值综合计算导出，使用先进可靠的计量检测设备是获得计量结果准确的保证，流量计是天然气实现准确计量最为关键的设备，根据天然气流量计工作原理，主要包括以下几类：

- 1) 容积式流量计：测量元件把流体连续不断地分割成单个已知体积的测量室，根据测量室逐次重复地充满和排空其腔室流体的次数来测量流体体积总量，如腰轮流量计、皮膜表等。
- 2) 差压式流量计：管道中流量检测元件产生的差压与管道的几何尺寸的相互关系来推算流量的，如孔板流量计、文丘里管等。
- 3) 速度式流量计：基于与流体流速有关的各种物理现象测量管道内流体速度来测量流体流量，如涡轮流量计、超声流量计、旋进旋涡流量计等。
- 4) 质量流量计：管道中流量检测元件产生的相位差或温度差与流体质量流量呈比例关系来测量流

体的质量流量，如科里奥利质量流量计、热式质量流量计等。

国内外目前使用的主要计量器具及特点如表 3 所示。20 世纪 80 年代以孔板流量计为主，随着技术进步，准确度水平越来越高，量程越来越宽，可供选择的流量计种类也越来越多，应用较多的超声流量计、孔板流量计、涡轮流量计。超声流量计以其准确度高、量程比宽、压力损失小等特点在干线管网中使用越来越普遍。在流量计选型时，在应用流量计类型方面国内外相同，主要根据各种流量计的价格、准确度要求、适用流量和管径范围、天然气压力和压力损失要求、温度和流动状态、天然气洁净程度要求、环境条件、检定要求等因素综合考虑选用合适的流量计。高准确度流量计是实现天然气的准确计量重要保障。随着我国制造业技术的不断进步，各类流量计我国都能够自主生产，也得到越来越广泛的应用，但在流量计的准确度和长期稳定性方面与国外先进水平还存在差距，目前，在 A 级计量站的流量计

表 3 国内外常用流量计类型及特点表

| 流量计 | 孔板流量计 | 涡轮流量计 | 腰轮流量计 | 超声流量计 | 旋进旋涡流量计 | 质量流量计 |
|----------------|-------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| 量程比 | 3:1 (单差压) 10:1 (双差压) | 10:1 ~ 50:1 | 5:1 ~ 150:1 | 30:1 ~ 100:1 | 10:1 ~ 15:1 | 10:1 ~ 30:1 |
| 准确度等级 (最优) | 0.5 级 | 0.2 级 | 0.2 级 | 0.5 级 | 1.0 级 | 1.0 级 |
| 压力损失 | 较大 | 中等 | 较大 | 较小 | 中等 | 中等 |
| 适合公称通径 / mm | 50 ~ 1 000 | 15 ~ 750 | 25 ~ 250 | 50 ~ 1 000 | 15 ~ 250 | 25 ~ 300 |

及其配套仪器主要还是进口设备（孔板流量计除外，国产孔板流量计已达到国际同类先进水平），在低级别计量站国产设备使用越来越广泛。

天然气计量结果是由工作条件下的流量、组成、温度、压力等数据导出标准参比条件下（20℃、101.325 kPa）的体积、质量或能量流量，我国天然气计量基本采用体积流量计量方式。因此，除流量计外，温度传感器、压力和差压变送器，以及色谱仪、水露点检测仪、硫化氢检测仪等天然气组成分析仪表也必不可少。工作条件下的体积流量、温度、压力、密度、压缩因子等测量参数在不同等级的计量系统配套仪表需要满足的准确度要求如表 4 所示，计量系统规模等级越大，准确度要求越高。

表 4 计量系统配套仪表准确度表

| 项目 | 最大允许误差 | | |
|-----------|--------|-------|-------|
| | A 级 | B 级 | C 级 |
| 温度 /℃ | 0.50 | 0.50 | 1.00 |
| 压力 | 0.20% | 0.50% | 1.00% |
| 密度 | 0.35% | 0.70% | 1.00% |
| 压缩因子 | 0.30% | 0.30% | 0.50% |
| 在线发热量 | 0.50% | 1.00% | 1.00% |
| 离线或赋值发热量 | 0.60% | 1.25% | 2.00% |
| 工作条件下体积流量 | 0.70% | 1.20% | 1.50% |
| 计量结果 | 1.00% | 2.00% | 3.00% |

另外，对于标况流量超过 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 的计量站，在体积流量测量方面，欧美发达国家常采用不同原理或相同原理不同厂家生产的流量计在同一管路进行一对一核查，即主流量计与核查流量计，两流量计示值的差值限由供销双方通过合同约定，通常情况下两流量计工况体积流量之差控制在 0.2%，超过 0.3% 就预警需查找原因，两流量计之工况流量差不超过 0.5%^[4-6]，贸易交接数据采用两台流量计示值的平均值作为结算依据^[7]。我国在同一计量站同一管路采用两台流量计一对一核查的较少，多为供销双方各自建站进行计量总量核查，误差限不超过表 4 规定误差限，相对来说误差限较大。在气质分析方面，在进出口国际贸易计量站或重要计量站，常设置两台在线色谱仪分析结果的平均值计算发热量，或是 1 台在线色谱仪和 1 台累积取样器结合的方法，用在在线色谱仪的组成分析数据进行贸易计量，累积取样

离线气质分析数据进行确认，两种方法的发热量差值均控制在 0.3% 内，超过 0.3% 查找原因，但不能超过 0.5%，双方在协议中协商确定，保障了色谱分析数据的准确性。我国色谱分析设备均为引进设备，取点样分析的较多，国内同一计量站安装两台在线色谱的很少，且多数在周期检定期间，计量器具性能核查频次少，出现问题不易及时发现。

2.3 天然气贸易交接计量方式

天然气是以甲烷为主的气体混合物，是一种能源商品，天然气的使用价值是提供能量，在商品贸易过程中应该体现其使用价值。天然气的计量方式国内外并不统一，我国天然气计量采用体积计量，通过测量工况条件下的体积流量值换算到标准参比条件下的体积量进行结算，体积计量体现了天然气单位时间内流过管道横截面的体积量的多少，但同样体积的天然气可能由于组成不一样，燃烧后产生的热量就不一样。同样，质量计量只体现了天然气单位时间内流过管道横截面的质量，相同质量的天然气由于组成不一样，燃烧后产生的热量也往往不一样。体积计量方式和质量计量方式均未体现优质优价原则。国外天然气计量交接方式经历了体积计量（或质量计量）和能量计量的不同发展阶段。天然气能量值由天然气的体积量乘以单位体积发热量得到，能量计量兼顾了天然气的组成和体积，虽然需要准确获得天然气的体积量和单位体积发热量两个量值，要求高于体积计量和质量计量，但能量计量更为科学合理地体现了天然气商品属性。因此更加合理。天然气能量流量计算如下：

$$E = V \times H_g$$

式中 E 表示一定时间内的能量流量，MJ； V 表示一定时间内的体积流量或质量流量， m^3/h 或 kg/h ； H_g 表示单位体积或摩尔质量的天然气完全燃烧，其中的水蒸气凝析到标准参比条件下的液态水释放出的发热量， MJ/m^3 或 MJ/kg 。

美国在 20 世纪 70 年代末就开始推行天然气能量计量，以 AGA No.5^[8] 和 AGA No. 4A^[9] 技术报告规范能量计量。欧洲国家在 20 世纪 90 年代中后期开始推行能量计量，目前以 ISO 15112: 2018^[10] 和 OIML R 140: 2007^[3] 以及 EN 1776: 2015^[11] 等标准规范能量计量。天然气能量计量根据合同协议中供用双方气质组分的变化情况和贸易量的多少，确定采用能量计量的积算周期。居民用户采用公告发热量方式，常为季、半年或年为周期，由政府机构或计

量权威机构定期发布。对于标准参比条件下流量超过 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 的国际贸易计量站，国际上通常采用两台不同原理或相同原理不同厂家的流量计串联，以及两台在线色谱同时运行，另安装1台累积取样器，发热量以两台色谱的平均值与两台流量体积分量的平均值乘积进行能量计量结算，两台现行色谱定期（如3个月）与累积取样的分析结果定期比较确定色谱分析数据的准确性^[12]。

目前我国 LNG 液化天然气进口和中缅管线国外段采用能量结算，国内中海油输香港支线和广东深圳 LNG 液化天然气独立管网采用能量结算，其他管线仅部分计量系统具备能量计量功能，但未进行能量结算。中国石油西南油气田公司在 1997 年初开始进行能量计量科研项目研究，2008 年发布 GB/T 22723《天然气能量测定》标准^[13]，国家正在制订具体的能量实施管理办法。

国外天然气能量测定方法可参考表 5，对于配有在线色谱仪的 A、B 级计量站，可根据在线色谱分析的组成计算单位发热量，并与分析周期内的标准状态流量的乘积实时计算并累积。可采用取点样或累积样进行定期核查，确保单位发热量在合同约定的区间范围内。对于未配置在线色谱仪的 B、C 级计量站，可采用 GB/T 22723—2008 的固定或可变赋值技术，也可采用加权平均或算数平均计算发热量^[14]，并与双方约定时间内的标准状态流量的乘积计算能量。

表 5 国外天然气能量测定方法表

| 计量系统 | 体积流量测量 | 发热量测量 | 备注 |
|----------|--------------|---|---------------------------------|
| A 级 | 至少一套体积流量测量装置 | 至少一套在线组分分析仪器 | 安装两套计量系统后，两个系统间的平均值应用于能量测定 |
| B 级 | 一套体积流量测量装置 | 现场连续采样；现场定期采样；远程测定（可变）；根据标准规定赋值固定系数（固定） | 对公告固定气体成分的情况应定期评估与实际成分之间差异并进行校正 |
| C 级和 D 级 | 一套体积流量测量装置 | 计算赋予总热值（GCV） | GCV 应在预定时间段内（每天、每月或每年）求平均值 |

2.4 量值溯源体系

天然气计量结果是通过计量器具测定工况条件下天然气实际流量并结合其他参数值计算得到，计

量器具是指能用以直接或间接测出被测对象量值的装置、仪器仪表、量具和用于统一量值的标准物质。计量器具的准确性必须通过量值溯源进行保证，量值溯源是通过一条具有规定不确定度的不间断的比较链，使测量结果或测量标准的值能够与规定的参考标准（通常是国家计量基准或国际计量基准）联系起来特性。

量值溯源的目的主要是通过检定/校准等方式，以保证被计量对象的量值准确一致。量值溯源和传递具有法制性、强制性和科学性。它是保证仪器仪表量值准确可靠的重要途径，是检验装备是否始终处于良好技术状态的重要手段，也是获取正确的、可信的科研试验数据的重要技术基础。国家石油天然气大流量计量站成都分站、南京分站和武汉分站共同构成完整的低、中和高压体积分流量量值传递和溯源链（图 1），通过这 3 条溯源链分别将原级标准量值传递至广州分站、乌鲁木齐分站、北京采育检定点、塔里木检定点、长庆检定点、武汉检定点。总体说来，天然气流量原级标准装置测量不确定度（ U ）水平达到 $0.05\% \sim 0.07\%$ ^[15]，与国外一流水平相当，工作级标准装置的能力和水平有待于提高（表 6）。

2.5 计量管理

计量管理是对计量站中与操作人员、计量器具、数据和资料管理相关的管理制度。欧美国家对计量器具的管理与我国主要不同的地方在于贸易交接以供销双方合同协议确定流量计的校准周期、运行维护相关事项；而我国目前是强制检定为主，流量计按相关检定规程（表 7）进行检定。

3 中国天然气流量计量技术展望

随着国家加快发展天然气工业，我国正在加快进入天然气时代，为了满足中国天然气消费的强劲需求，我国天然气管网更加复杂，天然气管道输送压力和管径大幅增加，长输管径超过 1 200 mm，管道设计压力最高达到 12 MPa，单台流量计工况流量超过 $10\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ ，加之国家管网公司的呼之欲出，这些会对天然气计量工作的管理和技术提出新的更高要求。作为天然气工业基础的天然气计量技术在“十四五”期间乃至更长时间将得到进一步的发展和提升，预计主要从以下方面：

1) 天然气贸易交接用计量器具将从检定向校准，现场计量注重流量计使用中检验、远程诊断、主流流量计与核查流量计串联应用以及现场计量系统的性

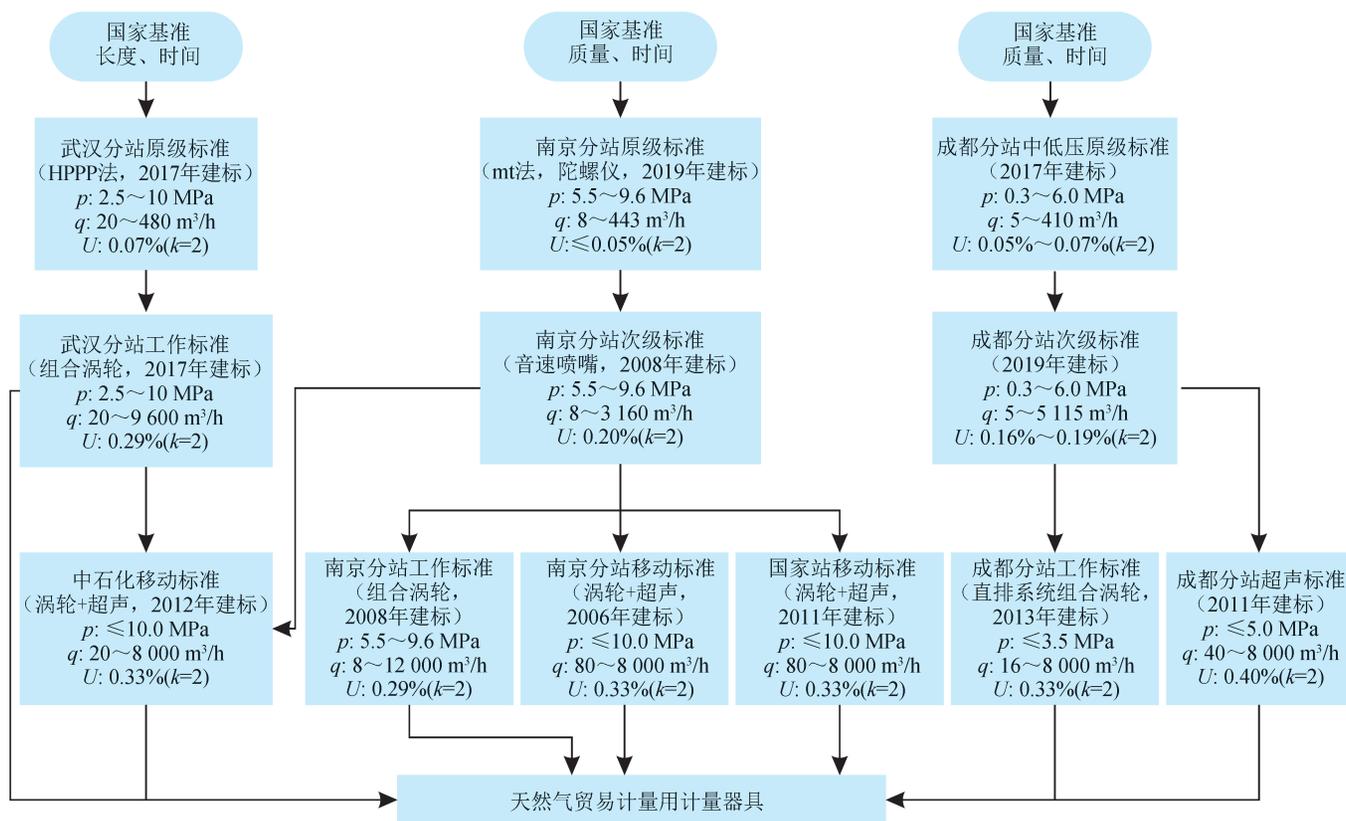


图 1 国内天然气流量量值溯源体系图

注：p 表示压力；q 表示流量；U 表示测量不确定度。

能评价等方向转变。

2) 天然气实流检点站逐步增加，以满足天然气发展的需求。目前已形成 3 套原级标准装置溯源链，天然气专业计量站点有成都分站、南京分站、武汉分站、广州分站、乌鲁木齐分站、北京采育站、长庆榆林站、塔里木站，即将建立沈阳站和云南站，已形成年检定能力达到 3 000 多台流量计能力，以满足天然气发展的需求。

3) 国内外天然气计量标准装置的量值比对活动将会加强。2018 年由中国计量科学院牵头启动了国家石油天然气大流量计量站成都分站、南京分站、武汉分站原级标准的量值比对活动，还将开展工作级标准比对，为国内天然气流量的量值统一及参加国际关键比对，实现国际间实验室数据互认打下了坚实基础。

4) 完善标准体系，积极主导国际标准制修订。积极承担和参与国际标准制修订，提升我国在天然气标准领域的国际影响力。如天然气贸易用流量计的选型指南、天然气计量性能评价研究、槽道式流量计测量天然气流量等国际标准的制订。

5) 加强流量计量仪器、仪表的国产化。我国除

孔板流量计达到国际先进水平外，高准确度超声流量计、气相色谱仪等主要依赖进口。因此，必须大力发展此类仪表的国产化，提高仪器仪表的长期稳定性，达到国际先进水平。

6) 体积计量将会向能量计量转变。2019 年 5 月 24 日，国家发展与改革委员会、国家能源局、住房城乡建设部门和市场监管部门联合发布“关于印发《油气管网设施公平开放监管办法》的通知（发改能源规[2019]916号），第十五条明确提出“以能量作为贸易结算依据，暂不具备热值计量条件的，应于本办法施行之日起 24 个月内实现热值计量”。

能量计量分阶段开展实施。第一阶段：选择代表性计量站点开展能量计量示范，完全模拟天然气的能量计量开展工作，根据示范点实施情况，不断改进完善；第二阶段：推广至进口管道气下游、进口 LNG 下游以及煤层气、煤制气的输送、销售、储存及贸易交接的地区公司。

4 结论

1) 计量是国家、社会和经济发展的基础性工作，

表 6 国内外流量计量标准装置能力及水平一览表

| 计量溯源链类型 | 机构名称 | 流量标准名称 | 压力范围 / MPa | 流量范围 / (m ³ · h ⁻¹) | 扩展不确定度 (k=2) |
|-----------|-------------------------|----------------|------------------|--|------------------------------------|
| 质量流量溯源 | 美国西南研究院气体研究所 (SwRI GRI) | mt 法原级标准 (陀螺仪) | 0.14 ~ 1.40 | 2.65 ~ 1 564.00 | 0.10% |
| | | 临界流喷嘴次级标准 HPL | 1.00 ~ 8.40 | 102.00 ~ 678.80 | 0.05% ~ 0.10% |
| | | 临界流喷嘴工作标准 LPL | 0.14 ~ 1.40 | 2.65 ~ 1 020.00 | 0.20% |
| | | 临界流喷嘴工作标准 LPL | 1.00 ~ 8.40 | 102.00 ~ 2 380.00 | 0.20% |
| | 美国科罗拉多工程试验站 (CEESI) | 涡轮工作标准 | 7.00 | 10.00 ~ 30 000.00 | 0.18% |
| | 成都分站 | mt 法原级标准 (天平) | 2.00 ~ 6.00 | 5.00 ~ 410.00 | 0.05% |
| | | 次级标准 | 0.40 ~ 2.00 | | 0.07% |
| | | 涡轮工作标准 | 0.30 ~ 6.00 | 5.00 ~ 5 115.00 | 0.20% |
| | 南京分站 | 涡轮工作标准 | 1.70 ~ 5.50 | 16.00 ~ 8 000.00 | 0.33% |
| | | mt 法原级标准 (陀螺仪) | 5.00 ~ 9.60 | 8.00 ~ 443.00 | 0.05% |
| 临界流喷嘴次级标准 | | 5.00 ~ 9.60 | 8.00 ~ 3 160.00 | 0.22% | |
| 体积流量溯源 | 德国国家物理研究院 (Pigsar) | 涡轮工作标准 | 5.00 ~ 9.60 | 10.00 ~ 12 000.00 | 0.29% |
| | | HPPP 高压活塞体积管法 | 1.50 ~ 6.00 | 8.00 ~ 480.00 | 0.06% |
| | | 涡轮工作标准 (环道) | 1.50 ~ 6.00 | 8.00 ~ 6 500.00 | 0.16% |
| | 丹麦国家计量院 (FORCE) | 涡轮工作标准 (环道) | 0.80 ~ 6.50 | 40.00 ~ 22 000.00 | 0.18% ~ 0.22% (待建) ^[16] |
| | | 双活塞高压活塞体积管 | ≤ 10.00 | 1.00 ~ 400.00 | 0.05% |
| | | 涡轮工作标准 | 1.00 ~ 6.00 | 1 200.00 | 0.18% |
| | 荷兰国家计量院 (NMI) | 涡轮工作标准 | 1.00 ~ 10.00 | 32 000.00 | 0.18% ~ 0.22% |
| | | 高压动态置换体积管式 | 0.10 ~ 6.00 | 0.10 ~ 120.00 | 0.07% |
| | | Bergum 涡轮工作标准 | 0.10 ~ 6.50 | 50.00 ~ 4 000.00 | 0.17% |
| | | 欧洲环道涡轮工作标准 | 0.10 ~ 6.50 | 50.00 ~ 30 000.00 | 0.17% |
| 武汉分站 | HPPP 高压活塞体积管法 | 2.50 ~ 10.00 | 20.00 ~ 480.00 | 0.07% | |
| | 涡轮标准表法工作标准 | 2.50 ~ 10.00 | 20.00 ~ 1 600.00 | 0.16% | |
| | 涡轮标准表法工作标准 | 2.50 ~ 10.00 | 20.00 ~ 9 600.00 | 0.29% | |

表 7 计量器具及其配套仪表检定和校准执行的规程、规范或标准表

| 计量器具 | 规程、规范或标准 | 计量器具 | 规程、规范或标准 |
|-------------|-------------------------------------|-------------|---|
| 超声流量计 | JJG 1030 (检定) GB/T 30500 (使用中检验) | 科里奥利质量流量计 | JJG 1038—2008 |
| 涡轮流量计 | JJG 1037—2007 | 压力和差压变送器 | JJG 882—2015 |
| 标准孔板标准喷嘴流量计 | JJG 640—2016 | 温度变送器铂电阻 | JJF 1183—2007 JJG 229—2010 |
| 旋进旋涡流量计 | JJG 1121—2015 | 流量积算仪或流量计算机 | JJG 1003—2016 |
| 容积式流量计 | JJG 633—2005 | 气相色谱仪 | JJG 700—2016 (离线) JJG 1055—2009 (在线) |

准确可靠的计量是我国天然气工业快速发展的重要保证。在天然气生产中, 计量数据为油气田产量统计和生产调度组织提供基本依据; 输送中, 计量数据可监控输气管网运行状态, 为输差分析提供基础数据; 销售中, 计量数据的准确性可有效保障企业的合法经济利益。

2) 通过参考国际先进技术, 结合我国天然气工业实际情况, 我国建立了天然气计量技术体系, 主要包括计量法律、法规, 计量技术标准与规范, 计量器具的选择与应用, 计量量值溯源技术, 计量管理制度等。我国建立的天然气计量技术体系基本满足了国家天然气大发展需求, 维护了国家、人民的利益。

3) 大力发展天然气, 推进中国能源生产和消费升级是我国能源战略的重要方向。伴随我国天然气工业的高质量发展和天然气对外依存度越来越高, 我国天然气计量技术和标准体系将进一步完善, 并与国际接轨, 计量器具可靠性保证可能从强制检定转变为通过检定或校准均可的方式进行溯源, 计量器具国产化进程会加快, 天然气贸易计量方式将发生从体积计量转变为能量计量的重大改变。

参 考 文 献

- [1] 孙文宇. 2018 年国内外油气行业发展报告 [R]. 北京: 中国石油集团经济技术研究院, 2019.
SUN Wenyu. The development report of oil and gas in domestic and foreign industry in 2018[R]. Beijing: CNPC Economics & Technology Research Institute, 2019.
- [2] 段继芹, 何敏, 文代龙, 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, et al. Measurement of natural gas flow by ultrasonic gas flow meters: GB/T 18604-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [3] OIML Recommendation. Measuring systems for gaseous fuel: OIML R 140-2007[S]. Paris: OIML, 2007.
- [4] RIEZEBOS H J. The art of gas measurement about performance monitoring by on-line comparison[R]. Groningen: Gasunie Engineering Technology, 2008.
- [5] 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.
- [6] MICKAN I R. Requirements for gas metering systems in transport networks of germany to achieve best balances[R]. Chengdu: Natural Gas Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, 2018.
- [7] BSI Standards Publication. Gas meters—conversion devices—part 2: Energy conversion: BS EN 12405-2:2012[S]. Brussels: BSI Standards Publication, 2012.
- [8] STARLING K, LANASA P, KIZER P, et al. Natural gas energy measurement: AGA report No.5: 2009[S]. Washington DC: American Gas Association, 2009.
- [9] BEN-POORAT, SHAABAN, BENDER, et al. Natural gas contract measurement and quality clauses: AGA report No.4A: 2009[S]. Washington DC: American Gas Association, 2009.
- [10] International Organization for Standardization. Natural gas—energy determination: ISO 15112: 2018[S]. Geneva: ISO, 2018.
- [11] BSI Standards Publication. Gas infrastructure—gasmeasuring systems—functional requirements: BS EN 1776: 2015[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2015.
- [12] FOLKESTAD T, FLOLO D, TUNHEIM H, et al. Operating experience with two ultrasonic gas meters in series[R]. Oslo: North Sea Flow Measurement Workshop, 2003.
- [13] 黄黎明, 张福元, 郭绪明, 等. 天然气能量测定: GB/T 22723—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
HUANG Liming, ZHANG Fuyuan, GUO Xuming, et al. Natural gas—energy determination: GB/T 22723-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [14] 常宏岗, 罗勤, 陈赓良. 天然气气质管理与能量计量 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
CHANG Honggang, LUO Qin, CHEN Gengliang. Gas quality management and energy measurement[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [15] 罗勤, 段继芹, 周理, 等. 天然气流量及发热量溯源技术研究 [R]. 成都: 中国石油西南油气田分公司天然气研究院, 2018.
LUO Qin, DUAN Jiqin, ZHOU Li, et al. Research on the traceability technology of natural gas flow and calorific value[R]. Chengdu: Natural Gas Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, 2018.
- [16] MICKAN I B. Gas measurement infrastructure for high pressure test rigs in Germany—technologies and actual developments[R]. Chengdu: Natural Gas Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, 2018.

(修改回稿日期 2019-11-15 编辑 何明)