

引文: 谢云韵, 苏焱, 李鹏涛, 等. 中国天然气计量技术与计价方式探究[J]. 油气储运, 2025, 44(7): 721-734.

XIE Yunyun, SU Yao, LI Pengtao, et al. Study on natural gas metering technology and pricing methods in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(7): 721-734.

中国天然气计量技术与计价方式探究

谢云韵¹ 苏焱² 李鹏涛² 张帆² 刘文耀² 郭建文²

1. 西安交通大学能源与动力工程学院·热流科学与工程教育部重点实验室; 2. 陕西省计量科学研究院

摘要:【目的】在当前中国天然气市场需求持续增长与资源供应多元化的背景下, 先进的计量技术与合理的计价方式直接影响着国家、企业及消费者的利益, 推动天然气计量与计价方式的革新迫在眉睫。【方法】首先从天然气的计量标准体系、计量设备应用技术、量值溯源体系及贸易交接计量方式 4 个方面对国内外天然气计量技术进行对比分析。其次, 对不同计量与计价方式在天然气贸易中的差异进行定量分析, 揭示其在实际应用中的影响。最后, 对中国天然气计量技术的发展进行总结与展望。【结果】中国已构建了较为全面的天然气计量技术体系, 具体包括计量相关的法律法规、技术标准规范、计量设备选型与应用、量值溯源技术等多个方面。该体系基本能够满足中国天然气产业快速扩张的需求, 同时在保障国家利益与公众权益方面发挥了重要作用。天然气能量计量能够更准确地反映天然气的经济价值, 特别是在不同气源与成分的天然气贸易中, 能量计量有助于消除气体成分差异带来的误差。随着中国天然气工业的高速与高质量发展, 天然气计量标准体系将不断完善, 计量设备国产化进程将逐步加快, 天然气能量计量的溯源技术水平将不断提高, 贸易计量方式也将从传统的体积计量逐步向能量计量过渡。【结论】推动天然气计量与计价方式的革新不仅有助于提高资源的利用效率, 还能确保市场的公平性与透明度。尽管中国现有的天然气计量技术体系已基本满足中国天然气产业的需求, 但仍需进一步提升与完善, 以应对未来更加复杂的国际天然气市场竞争。(图 1, 表 3, 参 30)

关键词: 天然气; 能量计量; 计量标准; 计量设备; 量值溯源; 能量计价

中图分类号: TE9

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)07-0721-14

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.07.001

Study on natural gas metering technology and pricing methods in China

XIE Yunyun¹, SU Yao², LI Pengtao², ZHANG Fan², LIU Wenyao², GUO Jianwen²

1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University//MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering;

2. Shaanxi Institute of Metrology Science

Abstract: [Objective] Amid the ongoing growth in demand within China's natural gas market and the increasing diversification of supply sources, the adoption of advanced metering technology and reasonable pricing methods is closely tied to the interests of the government, enterprises, and consumers. Therefore, there is an urgent need to promote reforms in natural gas metering and pricing methods. [Methods] This paper begins with a comparative analysis of natural gas metering technologies between China and other countries, focusing on four aspects: natural gas metering standard systems, metering equipment applications, metrological traceability systems, and custody transfer metering modes. The subsequent quantitative analysis examines the differences between different metering and pricing modes in natural gas trade, revealing their effects in practical applications. Finally, the paper presents a summary and provides a future outlook on the development of natural gas metering technology in China. [Results] China has established a relatively comprehensive natural gas metering technology framework, which includes laws, regulations, and technical standards related to metering, the selection and application procedures of metering equipment, and metrological traceability technology. This framework provides a fundamental guarantee to meet the needs of China's rapidly expanding natural gas industry, while also playing a crucial role in safeguarding national interests and public welfare. Energy-based metering more accurately reflects the economic value of natural gas, particularly in the trade of gas from different sources and with varying compositions, as it helps eliminate errors caused by differences in gas composition. With the rapid and high-quality

development of China's natural gas industry, the natural gas metering standard system is expected to undergo continuous improvement, the localization of metering equipment is anticipated to accelerate, and the metrological traceability technology is expected to be continuously upgraded for energy-based natural gas metering. Additionally, there will be a gradual transition from traditional volumetric metering to energy-based metering in custody transfer. **[Conclusion]** Promoting reforms in natural gas metering and pricing methods not only enhances resource utilization efficiency but also ensures market fairness and transparency. While China's current natural gas metering technology framework largely meets the needs of the domestic natural gas industry, further enhancements and refinements are necessary to address the increasingly complex competition in the international natural gas market in the future. (1 Figure, 3 Tables, 30 References)

Key words: natural gas, energy metering, metering standard, metering equipment, metrological traceability, energy pricing

根据国际能源署、中国石油天然气集团公司的数据显示^[1-3], 2024年中国天然气消费量高达 $4\,260.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占全球天然气总消费量的10%以上, 排名仅次于美国、俄罗斯, 位居世界第三。随着能源结构优化与环保需求的增加, 天然气在中国能源消费中的占比持续上升, 预计未来仍将保持稳步增长态势。而中国天然气的供需矛盾愈发突出, 其对外依存度也在不断攀升, 天然气能源安全问题已然成为中国关注的重点^[4]。目前, 中国已打破单一气源的天然气使用模式, “西气东输、北气南下、海气登陆、就近外供”的多元化供气格局已经形成, 干线管网的互联互通工作也在全面推进中^[5]。天然气是一种主要由甲烷构成的多组分混合气体, 因来源与产地的不同, 气体成分存在显著差异, 其单位体积的发热量也有较大不同, 各类天然气的组分变化直接影响其能量输出效率与应用效果。因此, 不论是单独还是混合输送与销售的情况下, 仅依靠体积计量难以全面体现天然气的实际能量属性与市场价值。目前中国天然气计量方式主要是体积计量, 为体现优质优价、公平交易的原则, 计量改革势在必行, 天然气贸易交接中推行能量计量已成为必然趋势^[6-7]。为此, 从天然气的计量标准体系、计量设备应用技术、量值溯源体系及贸易交接计量方式4个方面对比国内外天然气计量技术发展现状, 而后定量分析不同计量计价方式带来的直观差异, 并对未来中国天然气计量技术的发展进行展望, 以期为进一步推动天然气能量计量技术的进步提供参考和借鉴。

1 国内外天然气计量技术现状

1.1 天然气计量标准体系

完善且实用的计量技术标准体系是天然气行业发展的重要基础。采用先进的天然气计量标准对于推动天然气技术创新、促进天然气产业的生产与消费升级、

扩大天然气的高效利用、提升经济与社会发展水平及保障国家与公众利益具有重要意义^[5]。目前, 中国已经制定了与天然气计量相关的标准共80项。其中, 全国石油天然气标准化技术委员会负责管理25项流量计量标准, 全国天然气标准化技术委员会负责33项发热量测量标准, 全国流量计量技术委员会与全国物理化学计量技术委员会负责22项检定、校准规程标准^[8]。

在严格遵循上述与计量相关法律法规、管理制度的前提下, 借鉴国际先进的天然气计量技术标准, 并结合具体国情, 中国已建立了适合自身天然气工业的计量技术标准体系, 有效保障了天然气的生产与贸易需求。总体而言, 中国天然气体积流量计量标准与国际标准接轨, 部分标准已达到国际领先水平^[5]。将与天然气测量相关的主要中国标准、ISO标准、美国标准、欧盟标准(表1)进行对比^[9]可见, 中国在计量方面的主要标准还存在以下5点问题^[10]: ①标准转化不足。部分国际标准, 如ISO 14111-1997、ISO/TR 24094-2006、ISO 15970-2008等相关标准, 尚未在中国天然气计量标准中得到转化, 导致天然气分析用的气体标准物质在全国范围内缺乏统一的规范使用、管理及溯源。此外, 部分中国标准虽然参考或采用了国际先进标准, 但仍存在滞后问题, 如GB/T 21446—2008未能及时进行同步修订, 导致相关标准在技术更新、与国际接轨方面存在一定的差距, 影响了标准的前瞻性与应用的有效性。同时, 在修订GB/T 21446—2008时, 应引入ISO 5167.1~4-2022最新修订内容, 细化天然气复杂组分条件下的适用性限制, 构建量化的不确定度评定方法, 并明确计量系统的分类适用边界, 以增强标准的科学性与工程指导性。②缺少相关标准。中国在能量计量领域尚未制定关于流量积算仪、天然气在线色谱校准、能量计量实施、发热量测量校准及标准物质溯源等方面的相关标准。此外, 能量

表 1 与天然气测量相关的主要中国标准、ISO 标准、美国标准、欧盟标准列表
Table 1 Major Chinese, ISO, American, and EU standards related to natural gas metering

项目类别	中国标准	ISO 标准	美国标准	欧盟标准
天然气计量系统技术要求	GB/T 18603—2023 《天然气计量系统技术要求》		—	EN 1776-2015 《燃气基础设施燃气计量系统功能要求》
超声流量计	GB/T 18604—2023 《用气体超声流量计测量天然气流量》	ISO 17089.1-2019 《燃气超声波流量计第 1 部分》	AGA Report NO.9-2022 《多声道超声波流量计的燃气测量》	—
孔板流量计	GB/T 21446—2008 《用标准孔板流量计测量天然气流量》	ISO 5167.1~4-2022 《通过插入满管圆形截面管道的差压装置测量流体流量第 1~4 部分》	AGA Report NO.3-2016 《用于天然气及其他相关碳氢流体的节流孔板计量》	—
涡轮流量计	GB/T 21391—2022 《用气体涡轮流量计测量天然气流量》	ISO 9951-1993 《涡轮流量计》	AGA Report NO.7-2006 《用涡轮流量计测量天然气》	EN 12261-2024 《涡轮燃气表》
质量流量计	SY/T 6659—2016 《用科里奥利质量流量计测量天然气流量》	ISO 10790-2015 《科里奥利流量计的选择、安装和使用指南(质量流量、密度和体积流量测量)》	AGA Report NO.11-2013 《科里奥利流量计测量天然气》	—
旋进旋涡流量计	SY/T 6658—2021 《用旋进旋涡流量计测量天然气流量》	ISO 12764-2017 《通过插入满管圆形截面管道的涡街流量计进行流量测量》	API MPMS Ch14.12-2017 《使用涡街流量计测量天然气》	—
旋转容积式流量计	SY/T 6660—2021 《用旋转容积式气体流量计测量天然气流量》		ANSI B109.3-2019 《旋转式气体置换计量器》	EN 12480-2018 《旋转式气体置换计量器》
天然气能量的测定	GB/T 22723—2024 《天然气能量的测定》	ISO 15112-2018 《天然气能量测定》	AGA Report NO.5-2009 《天然气能量测定》	—
天然气取样导则	GB/T 13609—2017 《天然气取样导则》	ISO 10715-2022 《天然气气体采样》	API MPMS Ch14.1-2022 《天然气样品的采集和处理》	—
气相色谱法	GB/T 13610—2020 《天然气的组成分析气相色谱法》 GB/T 27894.1~3—2023 《天然气用气相色谱法测定组成和计算相关不确定度第 1~3 部分》	ISO 6974.1~3-2018 《天然气通过气相色谱法测定组成及相关不确定度第 1~3 部分》	ASTM D1945—2014 《通过气相色谱法分析天然气的标准测试方法》	—
直接发热量测定-连续燃烧法	GB/T 35211—2017 《天然气发热量的测量连续燃烧法》	ISO 15971-2008 《天然气性质测量热值和沃比指数》	ASTM D1826-2017 《使用连续记录量热计测定天然气范围内气体的热值的标准测试方法》	—
发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算	GB/T 11062—2020 《天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法》	ISO 6976-2016 《天然气根据组成计算热值、密度、相对密度和沃比指数》	ASTM D3588-2024 《气态燃料发热值、压缩因子和相对密度计算标准操作规程》	—
压缩因子计算	GB/T 17747—2011 《天然气压缩因子的计算》	ISO 12213.1~3-2006 《天然气压缩因子的计算第 1~3 部分》	AGA Report NO.8-2003 《天然气及相关碳氢气体压缩因子》	—
流量积算仪	JJG 1003—2016 《流量积算仪检定规程》	ISO 15970-2008 《天然气性质测量体积性质：密度、压力、温度和压缩因子》	API MPMS Ch21.1-2013 《使用电子计量系统进行流量测量第 1 部分：电子气体测量》	EN 12405.3-2015 《燃气表转换装置第 3 部分：流量计算机》

表 1 (续)

项目类别	中国标准	ISO 标准	美国标准	欧盟标准
天然气分析用气体标准物质的验收及核查		ISO/TR 24094-2006 《天然气分析气体标准物质的验证方法》	—	DS/CEN ISO/TR 24094-2008 《天然气分析气体标准物质的验证方法》
天然气分析系统性能评价	GB/T 28766—2018 《天然气分析系统性能评价》	ISO 10723-2012 《天然气分析系统性能评估》	—	—
天然气分析溯源指南		ISO 14111-1997 《天然气分析中可追溯性的指南》	—	BS EN ISO 14111-1999 《天然气分析中可追溯性的指南》

计量系统的不确定度评价方法也缺乏统一的标准,导致在实际应用中存在规范不足的问题。③检定规程与校准规范不足。现有的天然气计量器具检定与校准规范多为通用类型,缺乏专门针对天然气流量计的独立检定或校准规程,使得现行的规范在实际使用中实用性与操作性不足,难以完全满足天然气计量的特定需求。④计量设备精度不高、技术应用不完善。欧美国家的计量设备标准化程度较高,设备精度也相对更高。相比之下,中国虽然引进部分高精度的计量设备,但其在实际应用中的覆盖范围有限,维护与操作规范也尚未健全,导致设备在实际操作中的精确度与一致性仍有待提升。⑤缺乏国际参与。中国在天然气能量计量领域尚未积极参与国际标准的制定与相关研究工作,因此在这一领域缺少影响力和话语权,不利于国际标准的对接与国内标准的提升。

1.2 天然气计量设备应用

1.2.1 流量计量设备

流量计在天然气计量中至关重要,直接影响生产、输送、贸易结算及用户成本,其精确测量能力保障了市场公平交易与资源高效利用,是天然气产业稳定运行的关键技术支撑。根据工作原理的不同,流量计可分为容积式、速度式、差压式、质量流量计 4 大类^[5]。容积式流量计是将流体分割成多个已知体积的测量室,通过记录腔室充满与排空的次数来测量总流量,其适用于低流速、高黏度流体的计量,常见设备包括腰轮流量计、皮膜表。其中,腰轮流量计主要用于小型工业与民用天然气计量,皮膜表则主要用于居民生活用气与商业用气的流量计量。速度式流量计利用与流体流速相关的物理现象来测量管道中的流速,进而计算流量,其通常用于高流速、低黏度流体的计量,代表设备

包括涡轮流量计、超声波流量计及旋进旋涡流量计。其中,涡轮流量计主要用于天然气小流量计量场景,如城市燃气分输管网、燃气锅炉燃料供应及工业用气过程控制等;超声波流量计广泛应用于天然气贸易结算、长输管道计量、LNG 接收站计量及大型燃气分配站等高精度、大流量计量场景,是目前天然气大宗计量的重要手段之一;旋进旋涡流量计则主要应用于天然气输配系统中的支线管网、工业燃料气计量及中小型用气企业的过程监控,特别适用于具有一定脉动流的天然气计量环境。差压式流量计基于流量检测元件产生的差压与管道几何尺寸的关系来计算流量,其广泛应用于高压、高流速的工况条件,典型设备有孔板流量计、文丘里流量计。其中,孔板流量计常用于高压输气管道、天然气管网主干道及长输管道的流量监测与计量,且在贸易交接计量中也具有广泛应用;文丘里流量计则常用于天然气长输管道计量、高压输配系统流量监控及天然气储运系统中的大流量计量环节,尤其适用于含有水分、杂质或非理想气态介质的复杂工况。质量流量计是基于流体质量流量与特定物理效应之间关系进行测量的仪表,与传统体积流量计不同,其不受温度、压力及密度变化的影响,因此广泛应用于高精度流量计量及流体成分变化较大的工况,代表设备有科里奥利质量流量计、热式质量流量计。其中,科里奥利质量流量计常用于贸易交接计量、生产井流量监测、CNG/LNG 计量、小口径与脏污管道计量、燃驱压气站自耗气计量等高精度计量场合^[11];热式质量流量计常用于低流速、小流量及洁净气体的天然气计量场景,如分户计量、工业用气的过程控制、锅炉燃气供应监测以及天然气泄漏检测与低流量报警系统等。

选择一款既经济实用又符合实际需求的仪表, 需综合考虑准确性、可靠性、成本及流体特性等多种因素。在测量目标方面, 需要明确流量测量的具体要求, 如测量的准确度要求、测量体积流量还是质量流量、关注瞬时流量还是累积流量、是否有必要监测流量的变化情况, 以及流量测量结果的显示方式与经济性等。在选型过程中, 应确保被测流量值在流量计量程的 20%~80%, 以尽量减小误差。流量计的用途也需结合实际需求, 既可以用于计量, 也可用于控制与指示。由于流量计的结构不同, 其价格与所产生的压力损失也各异, 进而直接影响仪表的经济性。其中, 价格属于一次性投资, 而长期运行中的压力损失如果过大, 将导致流体动能的严重浪费, 因此在考虑经济性时, 需全面衡量购买成本与长期运行成本, 包括安装、操作、维护、校验及操作员培训等费用。此外, 流量计的安装环境也是重要的考量因素, 在选择前应充分评估安装现场的具体条件, 如管道断面形状、管径、直管段长度、环境温度、湿度、电气连接、电气干扰、附件安装、振动等因素, 其都可能对流量计的性能产生影响。

国内外在流量计选型的倾向反映了各自的技术水平、应用需求及经济条件的差异。在欧美发达国家, 流量计选型普遍偏向高精度、低维护的设备。欧洲国家(荷兰、德国等)逐渐淘汰了传统的孔板节流装置, 更多地采用涡轮流量计与腰轮流量计, 尤其是在中低压大流量场合, 这些流量计以其高精度、低维护需求备受青睐。此外, 超声波流量计由于非接触测量、低压力损失及高精度的特点, 在大流量与高精度需求的场合也得到广泛应用。在北美, 特别是加拿大, 涡轮流量计占据市场主导地位, 而美国则仍以孔板流量计为主, 虽然孔板流量计的精度与长期维护成本不及其他新型流量计, 但其在高压高流速场合中具有一定优势^[12]。相比之下, 中国的流量计选型正在从传统设备向现代化、高精度仪表转型。早期主要采用孔板流量计, 但随着技术进步, 涡轮流量计、罗茨流量计、超声波流量计等逐渐在各级计量系统中广泛应用, 尤其是超声波流量计在大流量、高精度需求领域逐渐成为主流。同时, 中国在流量计选型中更加注重经济性与实用性, 在中低压、小流量场合, 智能涡轮与旋进旋涡流量计因其性价比优势被广泛使用。随着技术标准逐渐完善, 越来越多的先进流量计进入市场, 推动了中国计

量系统的现代化升级。总体而言, 欧美国家更加倾向于选择高精度、低维护的流量计, 注重长期性能与精确度; 而中国则在追求技术进步的同时, 更加注重设备的经济性与适应性, 正逐步向高精度、现代化方向过渡。

在天然气贸易计量中, 欧美发达国家对流量计的设置与使用要求更为严格且技术先进, 尤其是在标准工况流量大于 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 的计量站, 通常采用不同原理或同一原理不同厂家的流量计在同一管路上进行一对一核查。这意味着在同一计量管路上设置了主流流量计与核查流量计, 通过对比两台流量计的工况体积流量差异来保证数据的准确性, 供销双方根据合同约定差值限, 通常差值控制在 0.3% 以内, 超过 0.3% 时会触发预警以查找原因, 若差值超过 0.5% 则停止交接, 采用两台流量计的平均值作为结算依据^[13]。这种精细化的流量计配置大大提高了贸易结算中数据的可靠性与准确性。相比之下, 中国在同一管路上同时安装两台流量计进行一对一核查的做法较为少见。通常采用供销双方各自建站, 通过总量核查的方式进行贸易结算, 这种方法虽然符合规定的误差限, 但相对误差范围较大, 计量精度与数据的一致性较欧美标准稍显不足。

1.2.2 发热量测定设备

天然气发热量的测定方式分为直接测定法与间接测定法(表 2)。直接测定法通过燃烧天然气样品来测量其发热量, 通常使用量热仪记录燃烧时释放的热量。这种方法能够准确反映天然气的真实发热值, 具有较高的精度, 因此常用于实验室条件下的校准与验证^[14]。虽然直接测定法能够提供非常可靠的结果, 但其操作过程复杂、耗时较长, 并且对设备与操作环境有较高要求, 因此, 直接测定法在日常大规模应用中相对较少, 更多用于需要高精度的场合。间接测定法则通过分析天然气的组分, 结合每种组分的已知发热值, 推算天然气的总发热量。这一过程通常借助气相色谱仪来分析天然气的化学成分(如甲烷、乙烷、丙烷等), 再根据各组分的占比计算得出总发热量。间接测定法具有速度快、操作简便、成本低等优点, 尤其适合在线连续测量与大规模应用场景, 其能在天然气贸易结算中快速提供发热量数据, 是天然气能量计量中测量发热量的主流方法, 但其精度依赖于组分分析的准确性与测量条件的稳定性。

表2 天然气发热量的测定方法及其适用范围表
Table 2 Methods for determining the calorific capacity of natural gas and their applicable scopes

类型	方法	适用范围
间接测定法	在线气相色谱法	天然气长输管道、城市燃气门站及贸易结算计量场合, 中到超大流量(1 000~500 000 m ³ /h)条件下的实时热值监测及组分分析
	离线气相色谱法	实验室周期性检测、质量监督、标准分析, 低至中等流量(1~50 000 m ³ /h)系统中的天然气样品分析
	赋值气相色谱法	标准气体的浓度赋值及在线色谱仪校准, 广泛应用于高精度标准制备实验室及国家计量院标准实验室
	声光发热量测定仪	适用于测量甲烷为主要成分的链烷烃气体和氢气热值, 其中氮气、氧气、二氧化碳、一氧化碳等其他杂质气体体积含量之和不超过20%
直接测定法	氧弹热量计	实验室条件下高碳烷烃组分与标准样品的高精度热值测定
	Rossini 型热量计	国家级计量机构、科研实验室中天然气发热量的最高精度溯源测量
	气流吸热式热量计	工业现场中小流量(0.5~20.0 m ³ /h)天然气的快速在线热值测量
	水流吸热式热量计	实验室与工业中的中等流量(1~50 m ³ /h)天然气高精度连续热值测量
	金属膨胀型热量计	燃气调压站、输配站等现场条件下小流量(0.2~5.0 m ³ /h)便携式天然气热值趋势监测

在天然气分析测试技术方面, 欧美国家的国际贸易计量站或重要计量站通常采用2种方式: ①配备2台在线色谱仪, 以2台设备的分析结果平均值来计算发热量; ②采用1台在线色谱仪与1台累积取样器相结合的方式, 通过在线色谱仪的实时分析数据与离线取样的气质分析结果相互验证。发热量的差值通常控制在0.3%以内, 超过0.3%需查找原因, 且不能超过0.5%, 由供销双方通过协议明确数据差异的容忍度, 从而保障气质分析的准确性^[15]。中国在气质分析方面多依赖引进的色谱设备, 且多采用取点样分析方式, 较少有计量站同时配备2台在线色谱仪, 且色谱仪性能核查的频次也较低, 导致设备在出现问题时难以及时发现并处理, 从而影响贸易计量的准确性与可靠性。

尽管气相色谱法广泛应用于天然气能量计量中, 但其局限性在于操作复杂、成本较高、分析有一定延迟且对环境条件较为敏感, 从而影响其在部分场合的应用。除了气相色谱法, 近年来声-光联用法、激光法等新技术也逐渐应用于天然气发热量的测定^[16]。声-光联用法通过结合声波传播速度与气体密度、组分的关系, 以及光谱分析气体成分的特性, 实现对天然气发热量的精确测定。声波的传播特性能够反映气体的物理参数, 而光谱分析则能提供更精确的化学组分信息, 两者结合后可快速计算出天然气的发热量, 适用于实时在线监测, 但设备成本较高且应用范围有限。激光法则利用激光通过气体的吸收光谱来分析气体中的各组分分子, 推算发热量。由于激光法是非接触测量, 能

够在高精度条件下进行快速实时监测, 且不受温度、压力的影响, 因此特别适合于恶劣环境与高精度需求场合, 但其设备昂贵且维护要求高, 现阶段应用相对较少。上述天然气能量计量方法精度高、响应快, 但在商业贸易中的普及仍受限于成本与技术成熟度, 未来随着技术进步, 这些新型方法有望得到更广泛的应用。

1.2.3 流量积算仪及其他配套仪表

在天然气计量系统中, 流量计虽然是核心设备, 但仅依赖流量计本身无法满足高精度的计量需求, 尤其是在贸易结算与实时监控场景中。为了确保计量数据的准确性与系统运行的可靠性, 流量积算仪及其他配套仪表(压力传感器、温度传感器、气质分析仪等)的配合使用至关重要。流量积算仪的主要作用是根据流量计测得的工况流量, 通过实时采集的温度、压力等参数进行补偿与转换, 计算出标准状态下的流量, 以满足贸易结算的需求。此外, 流量积算仪具备累积计算、数据存储、自诊断及故障报警等功能, 能够实现天然气流量的长期稳定计量与实时监控。从天然气计量的角度来看, 流量积算方法主要有站控计算机、专业流量积算仪两种^[17]。站控计算机通用性强, 适用于多种流量计类型, 能够根据需求扩展功能模块, 且经济性较好, 但在功能性、安全性及权威性上稍显不足。相比之下, 专业流量积算仪具备更强的流量积算、压力与温度补偿等功能, 适合复杂贸易场景, 并且符合国际贸易标准, 安全性较高, 但扩展能力有限, 成本较高。因此, 在天然气贸易结算中, 建议优先采用专业流

量积算仪进行累积计算,同时借鉴天然气交接站的做法,配置热备流量积算仪,以确保多流路计量的安全性与系统可靠性。

压力传感器、温度传感器分别负责实时监测管道内的气体压力、温度,确保流量积算仪能够根据实际工况进行精准的流量校正。不同等级的计量系统中,相应工况下的温度、压力、密度及压缩因子等测量参数应满足 GB/T 18603—2023 标准的准确度要求,系统规模越大,对准确度的要求也越高。气质分析仪则用于分析天然气的组分,提供准确的热值参数以确保贸易结算的公正性与精确性。目前中国已制定并发布了天然气产品与分析测试技术国家标准 29 项、行业标准 6 项,天然气标准化工作取得显著进展,基本满足行业发展需求^[18]。整个系统通过流量计、流量积算仪及配套仪表的综合集成,实现了高精度、高可靠性的计量,确保天然气贸易与输送过程中的数据准确性、可追溯性及系统安全性。因此,天然气计量不仅依赖单一设备,还依托于各类仪表的协同作用,以满足现代天然气贸易与管网运行的高要求。

1.3 天然气量值溯源体系

天然气量值溯源的目的是通过建立科学、规范的计量基准体系,确保天然气计量结果具有准确性、一致性及可追溯性,从而为贸易结算、能量评估、生产监控及调度管理提供可靠的技术依据。其核心目的是使计量设备、测量结果与国家及国际标准接轨,确保不同测量环节中设备的量值能够统一、协调并可追溯到权威基准,以保证数据的可信度与一致性。

1.3.1 流量量值溯源技术

在“十三·五”期间,通过自主研发与技术引进,中国流量量值溯源技术水平相比国际先进水平已取得显著进步,特别是在高压、大流量天然气计量领域,逐渐接近国际标准,甚至达到国际领先水平。中国的原级、次级及工作级标准装置已经在天然气流量量值溯源体系中形成完整的层级结构。天然气流量原级标准是天然气流量计量的最高标准,原级标准装置主要由中国计量科学研究院负责建设与维护,测量不确定度可以达到 0.05%~0.07%,能够满足大规模贸易(天然气、LNG 等的高精度计量)需求。目前,中国已建有 3 套天然气流量原级标准,分别为成都分站的中低压原级标准、南京分站的高压原级标准以及武汉分站的高压原级标准。其中,南京分站隶属于国家管网集团西气

东输公司南京计量研究中心,其实现了质量-时间法测量不确定度从 0.1% 提升至 0.05% 的飞跃,提高了天然气流量计量的精准度,并确立了中国在国际天然气计量行业中的领先地位,使中国高压大口径天然气流量计的检定不再依赖国外机构。次级标准装置由区域性与行业级计量站负责,以临界喷嘴为主,主要用于向工作级装置传递量值,测量不确定度可达 0.16%~0.20%,满足区域性天然气贸易与管道输送的计量需求。在主要天然气产区(四川、陕西等地)已经建成多个次级标准装置,为管道流量计校准提供了技术支持。为了提高次级装置的覆盖范围,中国还持续加大投资,推动区域级天然气计量实验室的建设。工作级标准装置则主要用于日常的天然气贸易交接、管网监测及消费端计量,以涡轮流量计为主,其测量不确定度可达 0.16%~0.33%^[19],广泛应用于天然气主干管道与城市燃气网络。如中石化华北油气分公司配备大量超声波流量计,确保天然气输送的实时性与计量准确性。另外,成都分站于 2021 年 3 月建成的环道标准表法气体流量标准装置顺利通过国家市场监督管理总局组织的专家评审,标志着中国首套环道式天然气流量工作标准装置正式建立。相较于传统直排工艺的天然气流量工作标准装置,该装置减少了对上游气源及排气通道压力、流量的依赖,并具备 0.4~6.0 MPa 压力范围内的灵活调节能力,实现天然气压力、流量的快速稳定,其测量不确定度为 0.22%~0.24%,在计量过程中具有不受上下游气源条件影响、天然气组分稳定以及温度与压力调节灵活等优势,为中国天然气流量计量体系的发展提供了重要支撑。尽管中国在原级标准装置方面与国际水平接轨,但工作级、次级标准装置的整体能力仍有待提高,特别是在复杂工况与智能化计量技术方面,国外如欧美国家在高流量、超高压及智能化流量计量方面的应用较为广泛,而中国仍需在这些领域进一步加大研发投入与技术引进。总体而言,中国在流量量值溯源的高端计量能力方面已具备国际竞争力,但在工作级设备的普及与精准度上,特别是面对复杂的气体成分、工况条件下的计量,仍需进一步提升。

1.3.2 发热量量值溯源技术

在体积流量测量方面,中国已建立一系列较完善的标准,能量计量的流量溯源不存在较大问题,难点主要集中在气相色谱法与热量计法测定天然气发热量的溯源问题。天然气发热量的测定方法主要分为间接

测定法与直接测定法。20世纪90年代之前,现场测量多采用直接测定法,但之后逐渐被间接测定法取代。直接测定法虽然不需要测量天然气的组成,但仪器结构复杂,对实验条件要求高。间接测定法溯源至标准气混合物,虽然简便,但无法溯源至国际单位制,因此在计量溯源性方面存在不足。为解决这一问题,美国提出以燃烧实际释放能量作为基准原则,故直接测定法仍是法定的基准方法。虽然直接测定法技术复杂,但根据ISO 15971-2008标准,0级热量计可通过直接测定法溯源至国际制单位(焦耳),因而从计量学角度,直接测定法仍是发热量测定的基准标准^[20]。

在发热量的直接测定方面,美国自20世纪30年代起基于Rossini原理,建立了符合ISO 15971-2008规定的 uncertainty 为0级水平的发热量测试装置,形成完善的发热量直接测量溯源体系。另外,欧洲气体研究组织在德国联邦物理技术研究院新建一套等环境式参比热量计,用于测定纯甲烷高位发热量时的扩展 uncertainty 可以达到优于0.05%^[21]。相比之下,中国计量科学研究院于20世纪90年代建立了水流式发热量测定装置,测量 uncertainty 为1.0%,并自主开发了Rossini热量计,其测量甲烷发热量的 uncertainty 约为0.2%。此外,中国石油西南油气田分公司于2006年开发了基于Cutler-Hammer技术的发热量直接测定装置,测量 uncertainty 为0.17%,达到ISO 15971-2008规定的1级水平,能够满足目前中国现场发热量核查与争议仲裁的需求。然而,中国的直接测定技术(现有装置的 uncertainty 为0.17%)尚未达到ISO 15971-2008标准中的0级水平,与国际标准还存在一定差距。在发热量的间接测定方面,德国、美国等发达国家生产的基准气体标准物质的 uncertainty 通常优于0.1%。自20世纪90年代以来,中国逐步开展气体标准物质研究,建立了质量比较仪、烃类多组分标准气制备、动静态配气及高压气体标准物质制备等关键系统,形成完善的标准物质制造体系,已获得5种国家一级标准物质、13种国家二级标准物质的认证。其中,国家一级气体标准物质GBW06340的发热量测量 uncertainty 优于0.5%^[16],这些标准物质可确保天然气发热量测量过程中在线、离线分析系统的稳定性与准确性,保障天然气计量的可靠性与数据溯源性,有效支撑了天然气多气源、多品种的精确定量需求。但在中俄东线天然气贸易交接计量实例上,通过对俄罗斯气体标准物质与

中国一级气体标准物质的组成分析结果计算发热量的相对扩展 uncertainty 进行比较,发现中国标准气体在技术水平上与国外高准确度标准气体存在明显差距^[22-23]。建议进一步加强中国高准确度有证气体标准物质的研制,以缩小与国际先进水平的差距,为天然气能量计量提供更可靠的技术支撑。此外,中国生产的二级气体标准物质的甲烷含量 uncertainty 尚未明确,且采用称量法制备的气体标准物质计算发热量的 uncertainty 为0.21%~0.46%,与欧洲国家存在较大差距,标准物质的制备速度、覆盖范围均无法完全满足市场需求。因此,中国在天然气发热量测定方面仍有较大提升空间,特别是在天然气高精度直接测定、气体标准物质的完善两方面。

1.4 天然气贸易交接计量方式

天然气贸易交接计量主要分为体积计量、质量计量及能量计量3种计量方式。体积计量是通过流量计测量天然气在管道中的流速、压力及温度,并结合气体的压缩因子、摩尔质量、比热容等物理参数,计算出标准状态下的天然气体积。该技术在全球范围内的应用已经较为成熟,适合大量日常的天然气贸易交接,尤其是在本地贸易或消费中应用广泛。质量计量是基于科里奥利力或热传导原理,将质量流量与流体的物理特性相结合,直接测量天然气流量,其测量结果通常不受压力、温度波动的影响,适用于高精度计量。由于天然气的组分复杂多变,体积计量或质量计量只能反映天然气的数量,而无法充分体现其质量属性。另外,天然气的主要组分(甲烷、乙烷、丙烷等)具有不同的能量输出,仅凭体积或质量计量无法表征天然气的热值或燃烧性能,即使体积或质量相同的天然气,在发热量与经济价值上亦可能大不相同。因此,将天然气发热量与体积或质量相结合的能量计量应运而生,其优势在于符合国际贸易标准,能够有效消除不同气体成分对计量结果的影响,确保天然气交易的公平性与准确性,因此能量计量在国际天然气贸易中被广泛采用。

目前,能量计量交接方式已逐渐成为主流,除俄罗斯、部分东欧及中亚国家外,北美、南美、西欧、中东及亚洲的大多数国家的天然气交易合同均采用该方式。能量计量已广泛应用于天然气产业的各个环节,涵盖从上游勘探开发、中游运输储存到下游销售利用的全过程,并且在天然气国际贸易领域,无论是液化

天然气还是管道天然气, 都已成为主流的计价依据。中国天然气贸易计量与计价体系随着天然气市场的快速发展而逐步完善, 但仍面临一些挑战。当前, 主要采用体积计量与质量计量相结合的方式, 其中大型贸易交接中通常采用高精度的超声波流量计与质量流量计, 并以体积流量值进行结算。在目前中国天然气管网多气源供应的格局下, 能量计量交接方式能够更精准且公平地核算不同气源天然气的品质, 是一种更为有效的计量方式。特别指出, 中国在部分天然气贸易中已逐步引入能量计量与能量值结算方式, 如广东福建液化天然气接收站、中海油气电集团公司与上海石油天然气交易中心贸易项目、部分天然气进出口国际贸易等。这不仅标志着中国天然气市场计量方式的革新, 更为未来全面推行能量计量提供了重要示范, 也推动了中国计量与国际接轨的进程。

2 不同天然气计量方式经济效益研究

2.1 能量计量天然气售价

为了更准确地反映天然气的热值与经济价值, 将天然气计价方式从体积计价转换为能量计价, 并需在技术、定价及利益协调方面同步推进。在技术层面, 需要建立完善的能量计量体系, 要求在各分输站、计量点安装高精度的气质分析仪与能量计量设备, 以确保天然气发热量的准确测定, 将计量单位从“元/m³”转换为“元/GJ”。在定价体系与利益协调方面, 天然气发热量单价的制定应不改变原有的价格结构与水平, 建议以现行的体积价格为基础, 通过“体积价格/单位体积发热量”初步得出每单位能量的价格^[24], 从而平稳过渡到能量计价, 保障企业与用户的利益平衡。此外, 价格转换涉及生产企业、输配商及用户的切身利益, 因此需广泛征求相关方的意见, 确保定价转换的公平合理。天然气能量价格的计算表达式为:

$$P_e = \frac{U_c P_v}{H_g} \quad (1)$$

式中: P_e 为天然气能量价格, 元/GJ 或元/(kW·h); P_v 为天然气体积价格, 元/m³; H_g 为天然气发热量, GJ/m³ 或 kW·h/m³; U_c 为能量单位换算系数, 当 H_g 与 P_e 的单位一致时, $U_c=1$, 反之, U_c 用于单位换算, GJ/kW·h 或 kW·h/GJ。

2011 年 12 月, 国家发展和改革委员会发布了《关

于在广东省、广西壮族自治区开展天然气价格形成机制改革试点的通知》^[25], 提出天然气市场中心门站价格的定价原则从原先以成本加成为主更改为按“市场净回值”方法, 并建立中心市场门站价格与可替代能源(燃料油和液化石油气)价格挂钩机制, 且制定了具体的天然气市场中心门站价格计算公式, 其中用到的天然气热值为 8 000 kcal/m³(约 33.36 MJ/m³), 表明定价所使用的是天然气低位发热量^[26], 但实际应用中通常采用天然气高位发热量, 所以在将天然气体积价格转换为能量价格时, 高位发热量应按区域(省、市、直辖市、区、自治区)前一年的平均值选取, 以确保转换后的价格水平保持相对稳定, 且符合国家发展和改革委员会所使用的核定数据标准。通过将某区域天然气高位发热量与现行基准门站的体积计量价格代入式(1), 即可计算出其相应天然气的基准门站能量计量价格。以 2022 年陕西省为例, 其当年天然气平均高位发热量为 37.585 9 MJ/m³, 天然气基准门站价格为 1.22 元/m³, 利用式(1)计算即可以得到相对应的能量计量价格为 32.459 元/GJ。

2.2 体积计量与能量计量对比

天然气定价非常复杂, 涉及很多因素。简单来看, 对于同一气源, 门站价格扣除高压管输费(包含适当利润)即为出厂价, 门站价格加上配气费即为终端用户价, 因此, 测算不同计量方式(体积计量、能量计量)对天然气生产公司、输气公司、地方燃气公司(门站)及终端用户的经济成本影响, 本质上算法均一样。

选取陕西省某压气分输站 2023 年天然气贸易交接数据, 对能量计量与体积计量的经济效果进行对比分析。结合其体积计量价格与换算后的能量计量价格, 根据 2023 年 1 月该压气分输站每天的体积分输量与平均高位发热量, 可计算得到该站每天以体积计量、能量计量方式的收益(表 3)^[24]。可见, 与体积计量相比, 2023 年 1 月该压气分输站若使用能量计量将少收益 62.18×10^4 元, 同比下降 0.35%。

采用上述方法计算得到该压气分输站 2023 年 1 月至 12 月采用 2 种计量方式每月的总收益情况(图 1)。可见, 该站场 1 月至 4 月、6 月、8 月收益增幅为负, 剩余月收益增幅为正, 即供方收益有负有正, 符合公平公正原则。综合一整年能量计量与体积计量收益金额可知, 能量计量方式收益大于体积计量方式累计达到 $1 221.9 \times 10^4$ 元, 平均收益增幅 1.17%。其原因是: 能量

表3 陕西省某压气分输站2023年1月采用2种计量方式的日收益列表
Table 3 Comparison of daily revenues for a compressed gas distributing station in Shaanxi based on two metering modes during January 2023

日期	体积分输量/ (10 ⁵ m ³)	平均高位 发热量/(MJ·m ⁻³)	日累能量/ (10 ⁶ MJ)	体积单价/ (元·m ⁻³)	能量单价/ (元·GJ ⁻¹)	收益/(10 ⁴ 元)			收益 增幅
						体积计量	能量计量	差值	
2023-01-01	65.51	37.56	246.08	1.22	32.459	799.22	798.76	-0.47	-0.058%
2023-01-02	51.49	37.59	193.56	1.22	32.459	628.19	628.27	0.08	0.014%
2023-01-03	41.92	37.55	157.38	1.22	32.459	511.37	510.83	-0.54	-0.106%
2023-01-04	45.97	37.54	172.54	1.22	32.459	560.82	560.06	-0.76	-0.136%
2023-01-05	45.49	37.56	170.84	1.22	32.459	554.93	554.52	-0.41	-0.074%
2023-01-06	47.47	37.56	178.33	1.22	32.459	579.19	578.83	-0.37	-0.064%
2023-01-07	42.96	37.52	161.17	1.22	32.459	524.09	523.14	-0.95	-0.181%
2023-01-08	41.64	37.51	156.19	1.22	32.459	508.03	506.99	-1.04	-0.205%
2023-01-09	33.64	37.52	126.21	1.22	32.459	410.40	409.66	-0.74	-0.181%
2023-01-10	30.64	37.50	114.88	1.22	32.459	373.76	372.89	-0.87	-0.234%
2023-01-11	32.05	37.50	120.18	1.22	32.459	391.04	390.10	-0.94	-0.239%
2023-01-12	31.89	37.45	119.42	1.22	32.459	389.07	387.63	-1.44	-0.370%
2023-01-13	31.90	37.44	119.41	1.22	32.459	389.13	387.60	-1.53	-0.394%
2023-01-14	46.42	37.41	173.63	1.22	32.459	566.30	563.60	-2.70	-0.476%
2023-01-15	55.96	37.38	209.18	1.22	32.459	682.66	678.97	-3.69	-0.540%
2023-01-16	63.46	37.31	236.78	1.22	32.459	774.19	768.55	-5.64	-0.729%
2023-01-17	58.91	37.39	220.29	1.22	32.459	718.71	715.02	-3.69	-0.513%
2023-01-18	57.47	37.36	214.67	1.22	32.459	701.08	696.79	-4.29	-0.612%
2023-01-19	59.19	37.25	220.46	1.22	32.459	722.06	715.61	-6.45	-0.894%
2023-01-20	54.08	37.24	201.39	1.22	32.459	659.82	653.69	-6.13	-0.928%
2023-01-21	46.46	37.20	172.82	1.22	32.459	566.83	560.96	-5.87	-1.035%
2023-01-22	39.91	37.19	148.43	1.22	32.459	486.95	481.80	-5.14	-1.056%
2023-01-23	45.12	37.22	167.91	1.22	32.459	550.42	545.03	-5.39	-0.979%
2023-01-24	50.52	37.27	188.30	1.22	32.459	616.32	611.20	-5.12	-0.830%
2023-01-25	42.84	37.36	160.05	1.22	32.459	522.61	519.52	-3.09	-0.591%
2023-01-26	42.09	37.51	157.87	1.22	32.459	513.51	512.42	-1.09	-0.213%
2023-01-27	40.45	37.62	152.17	1.22	32.459	493.44	493.94	0.50	0.101%
2023-01-28	44.74	37.66	168.49	1.22	32.459	545.83	546.90	1.08	0.197%
2023-01-29	49.12	37.77	185.49	1.22	32.459	599.22	602.09	2.87	0.479%
2023-01-30	54.99	37.65	207.06	1.22	32.459	670.89	672.11	1.21	0.181%
2023-01-31	47.54	37.61	178.82	1.22	32.459	580.02	580.43	0.40	0.069%

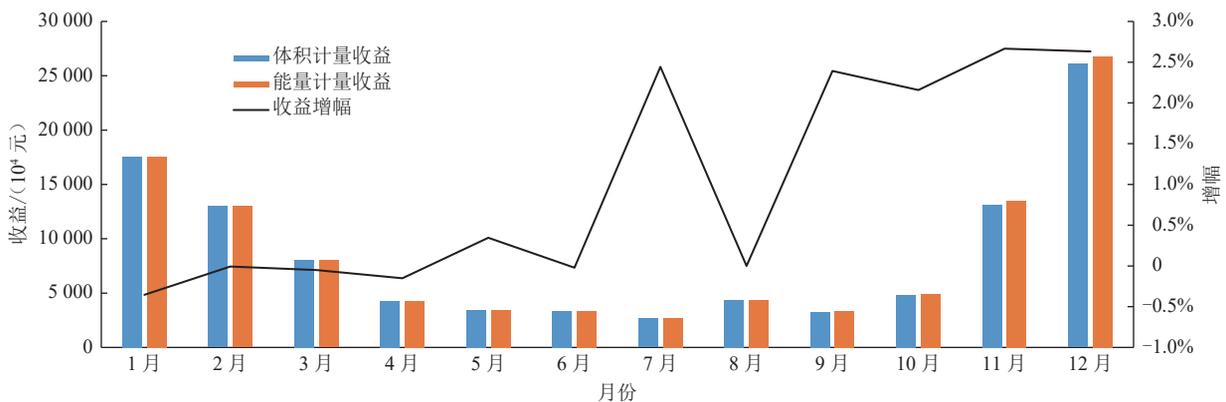


图1 陕西省某压气分输站2023年各月采用2种计量方式的收益图
Fig. 1 Monthly revenue chart for a compressed gas distributing station in Shaanxi based on two metering modes in 2023

计量直接反映了天然气的热值，能够真实体现天然气品质。在定价中考虑不同批次天然气的能量差异，有助于

促使天然气贸易更加公平合理，激励供应商提升天然气质量，进一步推动天然气市场的规范化与透明化。

2.3 计量方式对中国—中亚天然气贸易的影响

中亚是中国实现“一带一路”倡议的关键地区之一, 能源合作是中国与中亚国家进行区域经济合作的重点领域与主要抓手。随着中哈原油管道、中国—中亚天然气管道的相继建成并投入使用, 中国与中亚国家的能源合作逐渐驶入发展快车道。通过分析不同天然气计量方式对中国—中亚天然气贸易的影响, 可为中国—中亚天然气管道 A/B/C/D 线贸易交接方式的选择提供重要参考。

根据中国海关总署在线查询平台的统计数据可知, 2021 年中亚向中国共输送了约 $3\ 190 \times 10^4$ t 天然气, 按体积计量方式累计交易金额约 563.2×10^8 元。如果按能量计量方式(天然气的热值存在 5% 的差异)^[27]折算, 将导致在价格上的计量误差高达 28.2×10^8 元。对于天然气生产企业而言, 以体积为基础的结算方式对生产高热值天然气的企业不利。如果高热值与低热值的天然气均按相同的体积计价, 显然在经济上缺乏公平性。这种体积计价模式会导致生产高热值天然气的企业遭受经济损失, 削弱其生产高热值天然气的积极性, 不符合资源合理利用与市场激励机制的要求。根据 GB 17820—2018《天然气》规定, 一类气、二类气的高位发热量应分别不低于 $34\ \text{MJ}/\text{m}^3$ 、 $31.4\ \text{MJ}/\text{m}^3$, 二者相差约 $2.6\ \text{MJ}/\text{m}^3$, 进一步表明不同热值的天然气在经济收益上应有所区分。根据《BP 世界能源统计年鉴 2022》显示, 以 2021 年中亚气田年产量 $1\ 622 \times 10^8\ \text{m}^3$ 测算, 这两类天然气的热值差距可达 $4\ 217 \times 10^8\ \text{MJ}$, 其对应的经济价值超过 143×10^8 元。这一差距凸显了不同热值天然气在经济效益上的显著影响, 进一步表明在计量与定价上应充分考虑热值差异, 以确保贸易的公平性与资源的合理利用。目前, 中亚天然气进口仍然沿用体积计量方式, 为巩固“一带一路”合作成果, 推行能量计量计价势在必行。

3 中国天然气计量技术展望

通过上述研究可知, 中国的天然气计量技术可以从以下几个方面进一步提高完善。

1) 完善中国标准体系, 特别是加快能量计量标准的更新与制定。修订 GB/T 21446—2008 等相关标准, 同时补充制定能量计量实施细则、色谱仪校准、标准物质溯源及流量积算仪性能评价等标准。推动编写多语

种版本的国家标准, 以适应国际市场的需求。此外, 加强国际标准的主导作用, 提升自主研发与创新能力。积极参与国际标准化组织的管理与研究工作, 进一步推动国际标准的制定, 如在天然气流量计选型、计量性能评价及槽道式流量计应用等领域中发挥主导作用, 以增强中国在全球天然气计量标准中的影响力与话语权。

2) 加大对国产计量设备的研发力度。当前, 除孔板流量计外, 精度要求较高的超声流量计、在线气相色谱仪等设备仍依赖进口。为打破国外技术垄断, 必须大力推动这类仪表的国产化, 提升其稳定性与精度, 以满足中国天然气工业快速发展的需求。同时, 天然气计量设备正向高精度、智能化及自动化方向发展。未来, 智能流量计、在线气质分析仪、物联网系统等新型设备将广泛应用于天然气计量中, 这些设备不仅能够提高计量精度, 还能实现远程数据监控与实时数据传输, 极大提升了管网的监测与管理能力^[28]。此外, 超声-可见光联用法、激光吸收法等天然气发热量测量技术, 因响应速度快、操作简便、耗材少等优势而具有广阔应用前景。初步实验表明, 这些方法产生的发热量与相对密度的测量误差均符合 GB/T 18603—2023 标准中的要求, 进一步的试验验证有望将此类技术纳入天然气能量计量体系, 作为现有技术的有效补充^[29]。

3) 增加中国天然气实流检定站点, 构建更加完备的溯源链, 以满足快速增长的天然气市场需求。当前, 中国已有 3 套原级标准装置溯源链, 并在成都、南京、武汉等地设立了多个专业计量站点, 年检定流量计能力超过 3 000 台。

4) 为建立高水平的天然气能量计量体系, 全面支撑中国天然气市场计量的精确性与国际竞争力, 还需突破多项关键技术: 建设不确定度优于 0.05% 的高精度原级标准装置; 攻关更高精度的高压环道标准装置; 开发不确定度优于 0.10% 的 0 级发热量直接测量装置; 建立适应管输天然气需求的气体标准物质体系。

5) 积极推动国内外天然气计量标准装置的量值比对, 以实现国际间计量量值的统一与数据互认。中国计量科学研究院牵头启动了成都、南京、武汉等国家石油天然气大流量计量站的原级标准量值比对活动, 未来还将继续开展工作级标准的比对工作, 以期为中国天然气流量量值的统一、参与国际关键比对奠定坚实基础, 进一步推动国际实验室间的数据互认。

6) 针对大型天然气计量系统, 应着重强化流量、

压温变送器、在线色谱分析仪及标准气体物质的实时核查或周期核查工作,进一步完善流量计的型式评价技术要求与管理机制。依据市场监管总局出台的相关标准物质标准,加强气体标准物质定值的可靠性评估,严格监管气体标准物质生产商。

7)推动体积计量逐步转变为能量计量。试点工作应从局部到整体,分阶段推进天然气产供储销各环节的能量计量,规范产业链计量与计价体系^[30]。天然气产业链环节众多,推行能量计量方式将对当前采用体积计量的行业各方产生影响,建议在具有“多气源供应、全省一张网”统购统销模式的浙江省、陕西省开展区域试点。这些省份管网公司话语权大、购销环节少,便于协调各方开展能量计量试点。同时,这些省份管网对上下游议价能力强,省内天然气价格市场化难度大,试点较易取得成效,利于全国推广。

4 结论

通过对比国内外天然气计量技术现状,定量分析天然气贸易采取不同计量方式带来的差异,得出以下结论:

1)天然气作为重要的基础燃料与化工原料,已在国民经济的多个领域得到广泛应用,包括城市燃气、工业燃料、天然气发电及天然气化工等。计量是国家、社会及经济发展的基础,天然气计量结果在确保贸易公平、提高资源利用效率、推动市场规范化及支撑政策制定等方面具有重要意义。中国在借鉴国际先进技术的基础上,结合本国天然气工业的实际需求,逐步建立了完善的天然气计量技术体系。该体系涵盖计量法律法规、技术标准与规范、计量器具的选型与应用、量值溯源技术等方面,基本满足中国天然气产业快速发展的需要,有效维护了国家利益与公众利益,为天然气行业的规范化与高效运作提供了重要支撑。

2)天然气能量计量与计价的实施应立足于中国的天然气能量计量标准体系,同时结合产业链的实际情况,选择适合的能量计量界面与计量方法,以确保其可行性与有效性。同时,按照国家发改委规定的天然气热值,将天然气体积价格转换为能量价格,以确保计量、计价的科学性与公平性。通过定量计算发现,小到某天然气站场输气量分析,大到中国—中亚国家间的天然气贸易分析,在不同的天然气计量方式下,体

积计量与能量计量带来的经济差异显著。总体而言,现行的天然气体积计量与计价方式存在诸多弊端,忽略了天然气热值的差异,无法准确反映不同气源的实际能量,导致资源价值被低估或高估,进而损害了市场公平性,影响高热值天然气供应商的积极性。此外,体积计价还与国际主流的能量计价方式不一致,制约了中国天然气的国际贸易合作。因此,需要加速推进能量计量与计价改革,以更科学、公正的方式体现天然气的经济价值,推动市场规范化,提升国际竞争力。

参考文献:

- [1] 央视新闻. 国际能源署:2024年全球天然气消费量创新高[EB/OL]. (2025-01-22)[2025-04-08]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1821932413447951413&wfr=spider&for=pc>.
CCTV News. IEA: global gas consumption to reach record high by 2024[EB/OL]. (2025-01-22)[2025-04-08]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1821932413447951413&wfr=spider&for=pc>.
- [2] 一带一路能源合作网. 2024年全球天然气消费量再创新高[EB/OL]. (2025-02-06)[2025-04-08]. <https://obor.nea.gov.cn/detail/21695.html>.
Belt and Road Energy Cooperation. Global gas consumption reaches new high in 2024[EB/OL]. (2025-02-06)[2025-04-08]. <https://obor.nea.gov.cn/detail/21695.html>.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2024年12月份全国天然气运行快报[EB/OL]. (2025-01-23)[2025-04-08]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/jjyxtj/202501/t20250123_1395858.html.
National Development and Reform Commission. National natural gas operational snapshot for December 2024[EB/OL]. (2025-01-23)[2025-04-08]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/jjyxtj/202501/t20250123_1395858.html.
- [4] 李云鹤,肖建忠,黎明. 中国天然气能源安全评价研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(2): 313-323, 332. DOI: 10.19603/j.cnki.1000-1190.2020.02.021.
LI Y H, XIAO J Z, LI M. Evaluation on natural gas energy security in China[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2020, 54(2): 313-323, 332.
- [5] 常宏岗,段继芹. 中国天然气计量技术及展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 110-118. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.01.015.
CHANG H G, DUAN J Q. Natural gas measurement technology system and its prospect in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(1): 110-118.

- [6] 武睿. 中国天然气能量计量探讨[J]. 石化技术, 2023, 30(8): 59–61. DOI: [10.3969/j.issn.1006-0235.2023.08.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-0235.2023.08.020).
- WU R. Discussion on energy measurement of natural gas in China[J]. Petrochemical Industry Technology, 2023, 30(8): 59–61.
- [7] 回吉. 我国的天然气流量计量技术现状及发展趋势探析[J]. 大众标准化, 2022(12): 193–195. DOI: [10.3969/j.issn.1007-1350.2022.12.065](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-1350.2022.12.065).
- HUI J. Exploration of the current situation and development trend of natural gas flow measurement technology in China[J]. Popular Standardization, 2022(12): 193–195.
- [8] 段继芹, 罗勤, 涂振权, 任佳, 高乐. 中国天然气能量计量标准体系优化[J]. 天然气工业, 2022, 42(增刊 1): 157–165.
- DUAN J Q, LUO Q, TU Z Q, REN J, GAO L. Optimization of natural gas energy metering standard system in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(S1): 157–165.
- [9] 高军. 中国天然气计量标准体系现状简析[J]. 石油工业技术监督, 2020, 36(4): 12–15. DOI: [10.3969/j.issn.1004-1346.2020.04.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1346.2020.04.005).
- GAO J. Analysis on current situation of China's natural gas measurement standard system[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2020, 36(4): 12–15.
- [10] 黄维和, 段继芹, 常宏岗, 罗勤, 周理, 孙齐. 中国天然气能量计量体系建设探讨[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 186–193. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.017](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.017).
- HUANG W H, DUAN J Q, CHANG H G, LUO Q, ZHOU L, SUN Q. Construction of natural gas energy-metering system in China: a discussion[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 186–193.
- [11] 卫杰, 李宁. 天然气的计量方法与发展[J]. 煤炭与化工, 2020, 43(4): 143–147, 150. DOI: [10.19286/j.cnki.cci.2020.04.045](https://doi.org/10.19286/j.cnki.cci.2020.04.045).
- WEI J, LI N. Measurement methods and development of natural gas[J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43(4): 143–147, 150.
- [12] 党磊. 西北地区天然气贸易计量技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2017.
- DANG L. A study on natural gas trade measurement technology in the northwest[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.
- [13] 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. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2018.01.014](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2018.01.014).
- DUAN J Q, LI C J, ZHOU F. 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.
- [14] 常季成. 国内外天然气计量技术现状及发展趋势[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2019(2): 36–38. DOI: [10.3969/j.issn.1672-5611.2019.02.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-5611.2019.02.017).
- CHANG J C. Status and development trend on domestic and abroad natural gas flow metering technology[J]. Instrument Standardization and Metrology, 2019(2): 36–38.
- [15] FOLKESTAD T, FLØLO D, TUNHEIM H, NESSE Ø, HYDRO N. Operating experience with two ultrasonic gas meters in series[C]. Tonsberg: 21th North Sea Flow Measurement Workshop 2003, 2003: 1–26.
- [16] 周理, 陈辰, 张镞. 天然气能量计量技术现状及展望[J]. 工业计量, 2023, 33(3): 84–88. DOI: [10.13228/j.boyuan.issn1002-1183.2023.0072](https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1002-1183.2023.0072).
- ZHOU L, CHEN C, ZHANG P. Natural gas energy metering technology status and outlook[J]. Industrial Metrology, 2023, 33(3): 84–88.
- [17] 贾晓林, 黄杨挺, 吴凯骐, 徐刚. 天然气能量计量设计关键技术研究[J]. 天然气与石油, 2021, 39(2): 11–17. DOI: [10.3969/j.issn.1006-5539.2021.02.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-5539.2021.02.003).
- JIA X L, HUANG Y T, WU K Q, XU G. Research on the key technology for natural gas energy metering design[J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39(2): 11–17.
- [18] 潘丕武, 张明. 天然气计量技术基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 160–164.
- PAN P W, ZHANG M. The measurement technology foundation of natural gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013: 160–164.
- [19] 任佳, 段继芹, 何敏. 天然气能量计量系统分级与不确定度评定[J]. 天然气工业, 2022, 42(10): 115–122. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2022.10.011](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2022.10.011).
- REN J, DUAN J Q, HE M. Classification and uncertainty assessment of natural gas energy measurement system[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(10): 115–122.
- [20] 陈贻良. 0 级热量计的技术进展[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(2): 128–132. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3426.2023.02.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3426.2023.02.021).
- CHEN G L. Technical progress of the 0 class calorimeter[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2023, 52(2): 128–132.
- [21] SCHLEY P, BECK M, UHRIG M, SARGE S M, RAUCH J, HALOUA F, et al. Measurements of the calorific value of methane with the new GERG reference calorimeter[J]. International Journal of Thermophysics, 2010, 31(4): 665–679. DOI: [10.1007/s10765-010-0714-z](https://doi.org/10.1007/s10765-010-0714-z).

- [22] 曾文平, 常宏岗, 罗勤, 王志学, 李万俊, 王伟杰, 等. 中俄东线天然气管道天然气质量分析与计量技术[J]. 天然气工业, 2020, 40(10): 111–119. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2020.10.013](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2020.10.013).
ZENG W P, CHANG H G, LUO Q, WANG Z X, LI W J, WANG W J, et al. Quality analysis and flow measurement technologies for natural gas of the China–Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(10): 111–119.
- [23] 高乐, 丁雨. 中俄东线天然气管道跨国计量站配置及运行现状[J]. 油气储运, 2020, 39(4): 446–452. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2020.04.013](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2020.04.013).
GAO L, DING Y. Configuration and operation status of cross-border metering stations in China–Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(4): 446–452.
- [24] 钱筱婕. 天然气长输管道能量计量赋值方法及应用研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
QIAN X J. Research on energy metering assignment method and application for long-distance natural gas pipeline[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [25] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于在广东省、广西壮族自治区开展天然气价格形成机制改革试点的通知(发改价格〔2011〕3033号)[EB/OL]. (2011-12-27)[2025-04-08]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201112/t20111227_964356.html.
National Development and Reform Commission. Notice on pilot reform of natural gas price formation mechanism in Guangdong Province and Guangxi autonomous region (NDRC price〔2011〕No. 3033)[EB/OL]. (2011-12-27)[2025-04-08]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201112/t20111227_964356.html.
- [26] 王富平, 周娟, 段小浪, 于智博, 陈加民, 胡奥林. 我国如何实行天然气能量计量和计价[J]. 天然气工业, 2018, 38(10): 128–134. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2018.10.018](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2018.10.018).
WANG F P, ZHOU J, DUAN X L, YU Z B, CHEN J M, HU A L. How to practice energy metering and pricing of natural gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 128–134.
- [27] 吴谋远, 殷冬青, 何春蕾, 余岭, 谢薇, 刘畅. 我国需加快推行天然气热值计量计价改革[J]. 国际石油经济, 2018, 26(4): 38–41, 59. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7298.2018.04.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7298.2018.04.006).
WU M Y, YIN D Q, HE C L, YU L, XIE W, LIU C. Accelerating the reform of the measurement and pricing of natural gas calorific value in China[J]. International Petroleum Economics, 2018, 26(4): 38–41, 59.
- [28] 程靖云. 油气管网体制改革后天然气计量技术的发展分析[J]. 油气田地面工程, 2021, 40(3): 14–17. DOI: [10.3969/j.issn.1006-6896.2021.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6896.2021.03.003).
CHENG J Y. Analysis on the development of natural gas metering technology after the reform of oil and gas pipeline network system[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2021, 40(3): 14–17.
- [29] 张镞, 周理, 陶建, 常宏岗, 罗勤, 孙晓艳. 物性值法计算天然气压缩因子适应性分析[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(2): 48–54, 64. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3426.2023.02.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3426.2023.02.008).
ZHANG P, ZHOU L, TAO J, CHANG H G, LUO Q, SUN X Y. Applicability analysis on calculating natural gas compression factor by physical property method[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2023, 52(2): 48–54, 64.
- [30] 贺超. 天然气热值计量发展趋势及展望[J]. 天然气与石油, 2021, 39(1): 140–144. DOI: [10.3969/j.issn.1006-5539.2021.01.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-5539.2021.01.022).
HE C. Development trend and prospect of natural gas calorific value measurement[J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39(1): 140–144.

(编辑: 张雪琴)

基金项目: 陕西省计量科学研究院科技创新基金资助项目“计量对‘一带一路’建设的支撑作用机理研究”, No. 2020JJ02。

作者简介: 谢云韵, 女, 2000年生, 在读硕士生, 2023年毕业于江苏大学能源与动力工程专业, 现主要从事能源计量方向的研究工作。地址: 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号, 710049。电话: 19850938369。Email: yyxie@stu.xjtu.edu.cn

通信作者: 苏焱, 男, 1988年生, 工程师, 2010年毕业于长安大学车辆工程专业, 现主要从事计量方向的研究工作。地址: 陕西省西安市航天基地神舟六路南段580号, 710100。电话: 13572500101。Email: 271660632@qq.com

- Received: 2025-02-19

- Revised: 2025-04-01

- Online: 2025-05-09

