

引文: 常宏岗, 周代兵, 黄敏, 等. 中国天然气管网特征与计量要求[J]. 天然气工业, 2025, 45(3): 36-45.

CHANG Honggang, ZHOU Daibing, HUANG Min, et al. Characteristics and metering requirements of natural gas pipeline network in China[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(3): 36-45.

# 中国天然气管网特征与计量要求

常宏岗<sup>1,2</sup> 周代兵<sup>1,2,3</sup> 黄敏<sup>1,2,3</sup> 邵璟<sup>1,2</sup>

1. 中国石油西南油气田公司天然气研究院 2. 国家市场监督管理总局重点实验室(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:** 在推进中国双碳目标实施进程中, 天然气发挥着越来越重要的作用。天然气管网中的天然气计量是多参数耦合的连续动态气体计量, 其计量的复杂性增加了实现准确计量的难度。为此, 从中国天然气计量界面、计量保障和计量结果准确度等维度系统分析了天然气计量特点与计量管理要求, 提出了天然气计量的发展方向。研究结果表明: ①“全国一张网”的天然气管网大格局下, 不同交接界面应对不同准确度等级的计量系统; ②中国配套建立了以体积计量为基础的天然气计量技术体系, 天然气流量计、在线气相色谱分析仪、流量计算机是天然气计量系统的关键计量器具; ③天然气计量系统等级越高, 对应的计量系统设计、建设、计量器具配置、投资、运行、管理要求越高, 完整的天然气计量结果应有不确定度评定说明, 以表示结果的可信程度。结论认为: ①天然气计量是天然气工业重要的基础性工作, 准确、可靠的天然气计量结果是天然气工业高质量发展的重要保障, 应加快天然气计量向能量计量转变; ②进一步加强计量溯源性与量值传递能力建设, 能量计量是天然气计量发展的主要方向。

**关键词:** 天然气; 计量系统; 计量器具; 界面; 准确度; 不确定度评定; 能量计量

中图分类号: TE648 文献标识码: A DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2025.03.003

## Characteristics and metering requirements of natural gas pipeline network in China

CHANG Honggang<sup>1,2</sup>, ZHOU Daibing<sup>1,2,3</sup>, HUANG Min<sup>1,2,3</sup>, SHAO Jing<sup>1,2</sup>

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

Natural Gas Industry, Vol.45, No.3, p.36-45, 3/25/2025. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** Natural gas plays an increasingly important role in the process of promoting the implementation of dual-carbon goal in China. Natural gas metering in natural gas pipeline network is a multi-parameter coupled continuous dynamic gas metering, with a complexity challenging the accurate measurement. In this paper, the characteristics and management requirements of natural gas metering are analyzed from the dimensions of natural gas metering interface, metering guarantee and metering result accuracy. Besides, the development direction of natural gas metering is pointed out. The following results are obtained. First, under the big natural gas pipeline network pattern of "one national network", different transfer interfaces shall correspond to the metering systems with different accuracy classes. Second, in China, a set of natural gas metering technology system based on volume metering has been established, and natural gas flow meter, on-line gas chromatography analyzer and flow computer are the key measuring instruments of natural gas metering system. Third, the higher the accuracy class of natural gas metering system, the more strict the requirements on the design, construction, metering instrument allocation, investment, operation and management of the corresponding metering system. Complete natural gas results should have an uncertainty assessment to indicate their credibility. In conclusion, natural gas metering is an important basic work in natural gas industry, accurate and reliable natural gas metering results are an important guarantee for the high-quality development of natural gas industry. Therefore, it is necessary to speed up the transformation of natural gas metering to energy metering in China. What's more, the state will further strengthen the construction of metering traceability and measurement transfer capacity, and energy metering is the main development direction of natural gas metering.

**Keywords:** Natural gas; Metering system; Metering instrument; Interface; Accuracy; Uncertainty evaluation; Energy metering

**基金项目:** 国家市场监督管理总局科研项目“天然气能量计量关键参数溯源技术和现场应用研究”(编号: 2023MK107)、中国石油天然气集团有限公司科技项目“公司发展战略与科技基础工作决策支持研究”(编号: 2023DQ0108-21)。

**作者简介:** 常宏岗, 1965年生, 正高级工程师, 本刊编委; 现任中国石油天然气集团有限公司高级技术专家, 主要从事天然气开发、集输与净化、分析测试、计量及标准化等领域研究工作。地址: (610213) 四川省成都市天府新区天研路 218 号。ORCID: 0000-0003-2263-1535。E-mail: changhg@petrochina.com.cn

## 0 引言

能源是世界文明进步的动力，是支撑经济社会发展和国计民生的重要保障，向绿色低碳转型是世界共同追寻的能源发展模式。天然气作为清洁、安全、环保、高效、低碳的优质能源，在全球一次能源的消费占比逐年增加。2023年，中国天然气产量为 $2\,324 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，消费量为 $4\,017 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。但一次能源消费结构中天然气占比仅为8.5%，与世界23%的平均水平相比差距明显。在推进中国“双碳”目标实施进程中，天然气发挥着越来越重要的作用，可以预见在今后很长时间内，中国的天然气工业仍将高速发展<sup>[1-4]</sup>。

计量是国家经济社会活动的重要组成，是工农业生产、国防建设、科学研究、国内外贸易顺利进行的重要保证。计量技术是国家科技创新的基础技术，是国家技术能力和竞争力的重要体现。准确可靠的计量是提高经济社会发展水平和质量，维护国家、人民利益的重要保障。统一性、准确性、溯源性和法制性是计量工作的显著特点。计量、标准和合格评定是国家质量基础的三大支柱。天然气计量是天然气工业发展的基础，既是保障国家能源安全的重要抓手，又事关民生福祉。

天然气计量是按照计量相关法律法规、计量标准、计量技术规范等，通过相关技术手段和必要的工作程序获得天然气准确量值的过程。准确可靠的天然气计量是天然气工业高质量发展的前提条件。天然气计量通过按照相关标准规范建设、运行和管理的天然气计量系统来实现。天然气属于易燃、易爆危险化学品，也是唯一主要以气体状态进行贸易交接的大宗商品。计量工作涉及天然气产供储销全产业链每个环节。天然气贸易计量对象是经过处理且达到天然气产品质量标准的，可用于工业、商业和民用的商品天然气。气体计量的属性使得天然气计量具有量大、流动、介质可压缩的特点，是连续、动态的复杂过程，需要通过准确测定工作条件下天然气流量、压力、温度、体积、组成等多个参数值，才能导出标准参比条件下的计量结果。通常情况下，液体和固体计量不需要考虑温度、压力等参数的影响，因此，天然气计量的要求和复杂性明显高于液体和固体计量。天然气计量过程往往和天然气使用同时进行，计量结果无法复现，计量的复杂性增加了准确实现天然气计量量值传递、溯源以及获得准确计量结果的难度<sup>[5-6]</sup>。

## 1 中国的天然气管网与交接界面

### 1.1 “全国一张网”的天然气管网格局

伴随经济的高速发展和国家对油气行业体制改革的不断深化，中国天然气工业进入发展黄金时期，天然气产量和消费量呈现快速增长的同时，天然气产供储销全产业链也快速协调发展。中国构建了供应立足国内、进口来源多元、管网布局完善、储气调峰配套的天然气工业体系。形成了天然气的上游资源多主体多渠道供应、中间统一管网高效集输、下游销售市场充分竞争的“X+1+X”天然气市场体系。

中国油气能源生产和消费呈现逆向分布特征，中东部是主要消费地区，而天然气生产主要集中在四川盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地等西部地区，陆上进口资源也远离下游市场，天然气的流通与交接必须依托天然气管网。天然气管网是天然气产业链重要的基础设施。中国天然气管网架构特点是西气东输、北气南下、海气登陆，建设并运行好天然气管网设施对于保障国家能源安全和国民经济高质量发展意义重大。中国天然气管网发展经历了从局部、封闭到干线管道互连互通，从“管道时代”迈进了“管网时代”。国家管网拥有覆盖西气东输管道、陕京管道、俄气管道、缅气管道、“川气东送”管道等跨区域管道系统，基本构建起西北、西南、东北和海上四大战略通道。干线管道实现了互联互通，各管道灵活调控能力显著提升，实现了天然气管网流向优化，网络化调气和系统间互保功能逐步完善，天然气调运更加智能灵活。进入国家管网的天然气所有权并不发生变化，国家管网收取经计量确认的进入国家管网管道的天然气输送费用（管输费）。中国石油、中国石化、中国海油三大石油公司为主的支线管道，主要分布在川渝、南疆、山东等地，并在部分省份占据主导地位。各个省份成立的地区管网公司拥有地方支线管道，分布在全国各地。中国形成了以国家管网集团的干线管道为骨架，以三大石油公司支线和地方支线为延伸的有多个运营主体和多个交接界面的以“全国一张网”为特点的天然气管网架构。图1是中国近年来天然气长输管道总里程变化情况，从2016年的 $7 \times 10^4 \text{ km}$ 快速增长到2023年的 $12.4 \times 10^4 \text{ km}$ 。

中国天然气对外依存度超过40%，已是全球最大的天然气进口国，需要开展大量管道天然气和液化天然气的国际贸易交接。西北、西南、东北和海

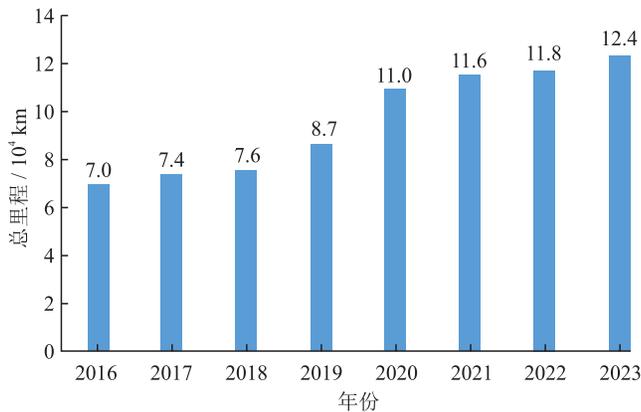


图 1 中国 2016—2023 年天然气长输管道总里程图

上进口四大天然气战略通道全面建成，主体多元供应体系不断完善，形成了国产与进口并重、管道气与 LNG 互补的供应格局（表 1）。

表 1 中国主要进口天然气管道及其技术指标统计表

序号	天然气管道名称	设计输送能力 / 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	设计压力 / MPa	管径 / mm	状态
1	中亚	150	10	1 067	运行
2	中亚 B 线	150	10	1 067	运行
3	中亚 C 线	250	10	1 219	运行
4	中亚 D 线	300	12	1 219	建设
5	中缅	120	10	1 016	运行
6	中俄东线	380	12	1 422	运行

“全国一张网”规模庞大、结构复杂，包含海量设备和管道，状态组合数量巨大，存在多输入多输出结构，不但包括大量不同压力等级、不同管径、不同输气规模的天然气输送管道及天然气增压站等配套设施，还包括储气库、液化天然气接收站等基础设施，覆盖天然气生产、流通、消费三大领域，是连通海外、覆盖全国的国家天然气工业大动脉。“全国一张网”

格局的形成，可以实现管道资源共享，避免重复投资和重复建设带来的资源浪费<sup>[7-9]</sup>。

### 1.2 交接界面对应不同计量系统

交接界面是在天然气管网系统中，气体的所有权发生变化或者发生自然交接的地方。交接界面（以下简称界面）通常需要进行计量确认作为交接依据。天然气生产商到终端用户可能的计量交接界面如图 2。界面 1 是气体生产商（石油公司）或气体进口商与气体储存商（储气库）之间的界面、气体储存商与气体输送商（国家管网公司）之间的界面、气体输送商和气体储存商之间的界面；界面 2 是气体储存商和区域分销商（地区管网公司）之间的界面；界面 3 是区域分销商与本地分销商（燃气公司）之间的界面；界面 4 是本地分销商与居民用户之间的界面；界面 5 是本地分销商与工业用户之间的界面；界面 6 是本地分销商与商业用户之间的界面<sup>[10]</sup>。

依托天然气管网，天然气生产商或进口商到终端用户之间可能经过不同运营主体、多个层级的计量交接界面。可能涉及气体储存商、气体输送商、区域分销商、本地分销商等运营主体之间的多个天然气贸易交接界面。在中国，气体储存商一般不是独立运营，可能依托于天然气生产商或输送商。从气体生产商到终端用户之间并不是必须经过图 2 的所有交接界面，可能只经过部分交接界面，根据天然气生产输送消费实际情况，气体储存商、气体输送商、区域分销商和本地分销商等一个或多个中间计量交接界面可能不存在。天然气管网系统干线、支线、城市燃气、终端用户不同交接界面之间的流量、管径和压力等指标存在明显差异，管输规模差别很大，对计量系统建设运行管理要求不一样。不同等级天然气交接界面对应不同的计量系统配置和准确度要求。

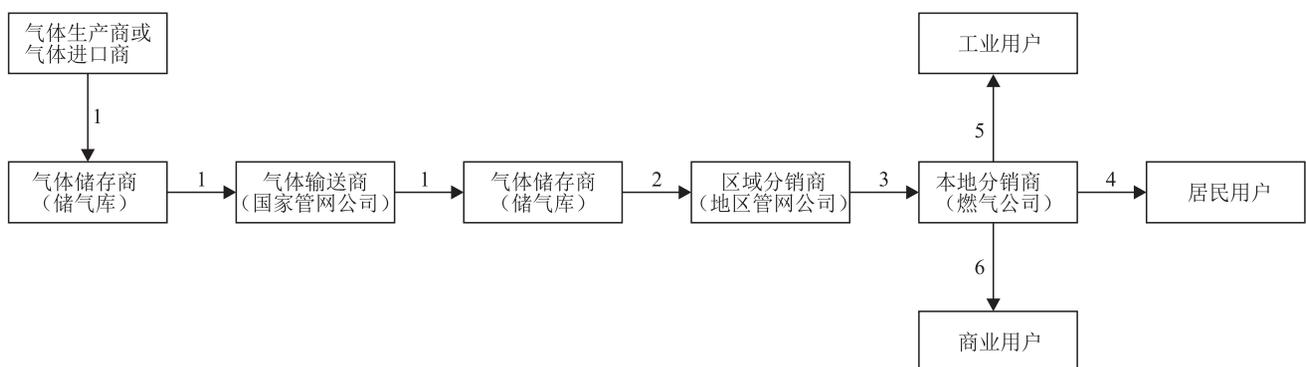


图 2 气体生产商到用户可能的计量交接界面图

注：1～6 表示天然气计量不同交接界面。

## 2 天然气计量要求

### 2.1 天然气计量过程

天然气计量实现了交接天然气计量结果的单位统一和量值准确可靠。中国天然气计量以体积计量为主，以立方米为结算单位。气体的体积量值与状态紧密相关，同样质量的天然气在不同压力、温度条件下，体积量不一样，体积计量结果就不一样。各个国家规定了一定的温度和压力作为贸易交接计量标准参比条件，以保证计量结果统一。中国的标准参比条件为：温度 20 °C (293.15 K)，压力 101.325 kPa，标准参比条件下的量值作为贸易计量交接值。

天然气计量具有连续性特点，通过计量站内的天然气计量系统完成。天然气计量系统是一个多参数输入、输出的复杂系统。天然气流量计量系统测量原理如图 3，流量计算机通过采集流量计工作条件下的天然气流量数据，温度变送器、压力变送器等仪表的温度、压力数据，气相色谱仪（在线或离线）的天然气组成数据，应用相关流体力学模型计算得到标准参比条件下瞬时天然气体积流量、质量流量或能量流量。流量计、在线气相色谱分析仪、流量计算机是天然气计量系统的关键计量器具。天然气计量交接量值不是瞬时流量值，而是通过对计量周期内标准参比条件下瞬时天然气体积流量值对时间积分得到的体积总量。

天然气计量站内还包括分析检测水露点、硫化氢、总硫等天然气质量指标的仪器设备<sup>[11-16]</sup>。

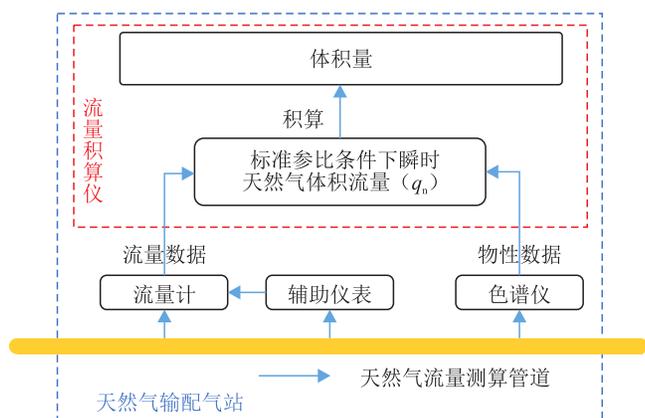


图3 天然气流量计量系统的测量原理示意图

天然气计量结果是通过流量、温度、压力、组成等直接测量参数值计算得到的导出量值。天然气温度、压力、组成参数在计量条件下相对稳定，测量技术较成熟，量值准确度较高。通过流量计获取

的工作条件下天然气的流量值是影响计量结果准确度的最重要因素，大型计量站往往具有多套计量系统，多台流量计同时并联工作。流量计产业技术水平往往能体现一个国家的天然气计量能力。常见的天然气流量计类型包括：速度式流量计、差压式流量计、容积式流量计和质量流量计。速度式流量计以其准确度高、量程比宽、压力损失小等特点在长输、干线天然气管道计量中使用越来越普遍，其测量原理是基于与管道内天然气流速有关的声速变化等物理现象，通过测量管道内流体速度来测量流体流量。典型的速度式流量计包括超声流量计和涡轮流量计，超声流量计具有非接触和没有动部件的特点，在干线管道天然气计量中占主导地位。传统的孔板流量计是差压式流量计，通过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计算流量，差压式流量计价格相对较低。在有足够压力的短距离输送支线管道天然气计量中，孔板流量计使用较多<sup>[17]</sup>。

20世纪80年代以前世界上天然气贸易计量都采用体积计量，目前仍然采用体积计量的国家主要有中国、俄罗斯及部分中亚国家。能量计量兼顾了天然气的组成和体积，更能公平合理体现天然气的能源属性。欧美日韩等工业发达国家天然气计量主要采用能量计量。1978年美国通过的《天然气政策法》规定将天然气贸易结算方式由体积计量改变为能量计量，欧洲国家在20世纪90年代中后期开始由体积计量改变为能量计量<sup>[16-20]</sup>。中国在LNG国际贸易和个别管道天然气贸易交接中也采用了能量计量<sup>[18-22]</sup>。

### 2.2 天然气计量保障体系

科学、先进、实用的计量保障体系对推进中国天然气技术进步和天然气利用，提升天然气生产能力，促进天然气消费升级，提高经济社会发展水平，维护国家和人民的利益具有重要意义。天然气计量科学技术水平是国家科技实力与能力的重要体现。近年来，随着天然气工业跨越式发展，中国天然气计量科学技术水平持续提升，围绕测量原理、方法、设备等方面不断创新，基本形成配套的天然气计量技术体系。结合天然气工业的实际情况，中国配套建立了以体积计量为基础的天然气计量技术和管理体系，主要包括计量法、计量行政法规和计量规章等法律法规；计量技术规范、计量检定规程、计量技术标准、计量管理等技术和管理文件；计量量值传递与溯源体系；计量监督；计量标准和计量器具管理与应用、计量数据与资料管理、计量人员资质和授权等。

天然气计量器具应符合相应计量检定规程或校规范的技术要求, 具有有效的检定或校准证书。中国已具备常用天然气计量器具自主生产能力, 但对国际贸易等关键计量系统, 流量计、在线气相色谱仪等主要计量器具依赖进口。在计量量值传递与溯源方面, 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有 3 套原级标准装置, 并分别将原级标准量值传递至广州分站、乌鲁木齐分站、北京采育检定点等国家授权检定点, 共同构成完整的低、中和高压体积流量量值传递和溯源链。

中国的天然气计量技术体系支撑了天然气的生产和贸易需求, 助推了天然气工业的快速发展。随着新形势下国家对天然气工业提出高质量发展要求以及科学技术的不断进步, 中国天然气计量技术和法律保障体系在不断建设、优化、完善和发展<sup>[23]</sup>。

### 2.3 计量结果的获取

天然气计量结果是通过符合天然气计量系统技术要求的计量器具, 测量工作条件下的天然气温度、压力及体积流量, 结合组成分析系统, 得到天然气组成数据并计算工作条件下和标准参比条件下的天然气压缩因子, 按式 (1) 计算得到标准参比条件下的天然气瞬时体积流量值。

$$q_n = q_f \frac{p_f T_n Z_n}{p_n T_f Z_f} \quad (1)$$

式中  $q_n$  表示标准参比条件下的天然气瞬时体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $q_f$  表示工作条件下的天然气体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $p_f$  表示工作条件下的天然气压力,  $\text{MPa}$ ;  $T_f$  表示工作条件下的天然气温度,  $\text{K}$ ;  $Z_f$  表示工作条件下的天然气压缩因子;  $p_n$  表示标准参比条件下的天然气压力,  $\text{MPa}$ ;  $T_n$  表示标准参比条件下的天然气温度,  $\text{K}$ ;  $Z_n$  表示标准参比条件下的天然气压缩因子。

上述参数中, 工作条件下的流量参数值  $q_f$  由流量计获取, 流量信号采样时间响应不大于  $2\text{ s}$ ; 工作条件下的  $p_f$  和  $T_f$  两个测量参数值由计量系统压力、温度变送器获取, 压力、温度采样时间应不大于  $5\text{ s}$ ;  $Z_f$  和  $Z_n$  两个计算参数值一般通过各自条件下的压力和温度值, 结合在线或离线气相色谱仪得到的组成分析数据, 按相关天然气压缩因子计算的国家标准计算获得, 在线气相色谱仪组成分析响应时间一般不超过  $15\text{ min}$ ; 标准参比条件下的  $p_n$  和  $T_n$  分别为  $0.101\ 3\text{ MPa}$  和  $293.15\text{ K}$ <sup>[24-26]</sup>。

天然气进行贸易交接计量时, 按式 (2) 通过计量周期内标准参比条件下的瞬时体积流量值对时间

积分计算得到的天然气累积体积量进行结算。

$$Q_n = \int_{t_0}^t q_n dt \quad (2)$$

式中  $Q_n$  表示标准参比条件下在  $t_0 \sim t$  时间内的天然气累积体积量,  $\text{m}^3$ ;  $t_0$  表示进行累积流量积分的起始时间,  $\text{s}$ ;  $t$  表示进行累积流量积分的结束时间,  $\text{s}$ 。

## 3 计量准确度保障

### 3.1 天然气计量系统技术要求

中国天然气市场巨大且保持快速增长, 天然气贸易交接计量量值和金额巨大, 管网系统中不同运营主体间必须进行计量交接。计量结果的准确可靠是天然气计量的基本要求。天然气计量准确度是天然气计量测得值与真实值间的一致程度, 计量系统准确度水平是天然气工业科学技术水平的重要体现。

《天然气计量系统技术要求: GB/T 18603—2023》<sup>[27]</sup> 规定了天然气计量站贸易计量系统的设计、建设、投产运行、准确度、验收维护等方面的技术要求。标准适用范围是标准参比条件下设计通过能力大于  $100\text{ m}^3/\text{h}$ 、工作压力大于  $0.1\text{ MPa}$  (表压) 的天然气计量系统, 主要包括图 2 中界面 1、界面 2、界面 3 和部分界面 5 和界面 6 的天然气贸易计量。GB/T 18603 将天然气计量系统分为 4 个不同设计通过能力的交接界面, 不同计量界面对应相应的计量系统准确度等级。计量系统准确度等级分为 A、B、C 3 个级别。不同等级的天然气计量系统计量器具配置要求见表 2。准确度等级不一样, 要求配置的测量参数项目也不一样。

对于界面 4、部分界面 5 和界面 6 等小流量低压燃气用户, 具有数量多、交接天然气量少、交易金额较小等特点, 计量准确度要求相对较低。一般用结构简单、成本较低的一体化膜式燃气表或超声波燃气表即可满足计量要求, 不需要气相色谱仪、流量计算机等设备, 本文不涉及燃气表计量技术要求。

### 3.2 计量系统准确度要求

天然气计量系统通过测量单元获取相关参数值, 按一定数学关系计算得到计量结果, 天然气计量系统的计量特性通过计量系统准确度要求来保证。中国的天然气计量标准规范通过规定天然气计量系统流量、温度、压力、压缩因子等参数最大允许测量误差 (以下简称最大允许误差) 来保证计量结果符合准确度要求。最大允许误差是对给定的测量、测量仪器或测量系统, 由规范或规程所允许的相对于已知参考量值的测量正负最大误差的极限值。最大允许误差

表2 不同等级计量系统计量器具配置要求统计表

设计能力	$100 \text{ m}^3/\text{h} < q_n \leq 1000 \text{ m}^3/\text{h}$	$1000 \text{ m}^3/\text{h} < q_n \leq 10000 \text{ m}^3/\text{h}$	$10000 \text{ m}^3/\text{h} < q_n \leq 100000 \text{ m}^3/\text{h}$	$q_n > 100000 \text{ m}^3/\text{h}$
流量计曲线误差校正		√		√
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%)	A (1%) 或 B (2%)	A (1%)

直观明确地表示了计量系统特性。最大允许误差与测量仪器准确度等级有特定的对应关系。准确度等级是测量仪器最具概括性的特性，经常用于表征测量仪器的测量特性。

GB/T 18603—2023 规定的不同等级的计量系统流量、温度、压力等关键参数测量值的最大允许误差值见表3。由于天然气温度在常温范围内变化相对较小，温度的最大允许误差类别用绝对误差表示，其余参数最大允许误差都用相对误差表示。从表3可见，不同等级的计量系统配置的计量器具需要满足的准确度要求不一样。计量系统等级越高，最大允许误差值越低，对计量器具准确度要求越高。A级计量站的设计、建设、投资、运行、管理、计量器具配置等方面要求高于B级计量站和C级计量站。

表3 计量系统相关参数最大允许测量误差统计表

测量参数	最大允许误差 ( $M_{PE}$ )		
	A级	B级	C级
温度/ $^{\circ}\text{C}$	0.5	0.5	1.0
压力	0.2%	0.5%	1.0%
密度	0.35%	0.70%	1.00%
压缩因子	0.3%	0.3%	0.5%
在线发热量	0.5%	1.0%	1.0%
离线或赋值发热量	0.6%	1.25%	2.0%
工作条件下体积流量	0.7%	1.2%	1.5%
计量结果	1.0%	2.0%	3.0%

### 3.3 不确定度评定

测量不确定度（以下简称不确定度）是以被测

量为研究对象，根据所用到的信息，表征被测量值分散性的非负参数。不确定度已经取代测量误差用来表示测量结果的可信程度。标准不确定度是以标准偏差表示的不确定度，是国际通用的不确定度表征方式。完整的测量结果应包括被测量的测得值及其不确定度。不确定度评定是天然气计量系统性能评价和天然气计量科学研究的重要内容。天然气计量结果及天然气流量量值传递溯源体系各级标准和计量器具应包括不确定度评定结果及有关信息<sup>[28-29]</sup>。

天然气计量结果的不确定度评定是通过工作条件下的天然气流量、压力等分量来评定标准参比条件下的体积流量不确定度。天然气贸易交接量值是计量周期内的累积体积量，是计量周期内标准参比条件下天然气体积流量对时间的积分运算结果，标准参比条件下的体积流量不确定度与累积体积量不确定度是一致的。天然气体积流量变化范围较大，用相对不确定度评定结果较为合理。由于天然气计量的不可复现性，测量不确定度的B类评定结果可以作为天然气计量的不确定度。

标准参比条件下的天然气体积流量不确定度由式(1)中工作条件下的天然气流量、压力、温度、压缩因子和标准参比条件下的压缩因子这5个不相关分量的不确定度合成，标准参比条件下的压力和温度值是常数，不作为不确定度评定分量。不确定度可以通过不同的方式获取，按照《测量不确定度评定与表示：JJF 1059.1—2012》<sup>[30]</sup>，可以采用通过计量部门检定合格的测量仪器的最大允许误差作为被测量可能值区间的半宽度，通过最大允许误差计算对应被测量的相对标准不确定度见式(3)~(7)。

$$u_r(q_f) = \frac{1}{k} M_{PE}(q_f) \quad (3)$$

$$u_r(p_f) = \frac{1}{k} M_{PE}(p_f) \quad (4)$$

$$u_r(T_f) = \frac{M_{PE}(T_f)}{kT_f} \quad (5)$$

$$u_r(Z_n) = \frac{1}{k} M_{PE}(Z_n) \quad (6)$$

$$u_r(Z_f) = \frac{1}{k} M_{PE}(Z_f) \quad (7)$$

式中  $u_r(q_f)$  表示工作条件下的体积流量测量相对标准不确定度； $u_r(p_f)$  表示工作条件下的绝对静压测量相对标准不确定度； $u_r(T_f)$  表示工作条件下的热力学温度测量相对标准不确定度； $u_r(Z_n)$  表示标准参比条件下压缩因子的相对标准不确定度； $u_r(Z_f)$  表示工作条件下压缩因子的相对标准不确定度； $M_{PE}(q_f)$  表示工作条件下体积流量的相对最大允许误差； $M_{PE}(p_f)$  表示工作条件下绝对静压的相对最大允许误差； $M_{PE}(T_f)$  表示工作条件下热力学温度的相对最大允许误差，K； $M_{PE}(Z_n)$  表示标准参比条件下压缩因子的相对最大允许误差； $M_{PE}(Z_f)$  表示工作条件下压缩因子的相对最大允许误差。 $k$  表示置信因子，按均匀分布为  $\sqrt{3}$ ； $T_f$  表示工作条件下的温度，按 293.15 K (20 °C) 计算。

各个分量按照表 3 最大允许误差评定得到的相对标准不确定度结果见表 4，工作条件和标准参比条件下压缩因子最大允许误差值均按照表 3 压缩因子最大允许误差值选取，其中工作条件下天然气流量不确定度分量值最大。

表 4 各分量的相对标准不确定度评定结果统计表

计量系统 项目	A 级		B 级		C 级	
	$M_{PE}$	不 确 定 度	$M_{PE}$	不 确 定 度	$M_{PE}$	不 确 定 度
工作条件 温度	0.5 °C	0.10%	0.5 °C	0.10%	0.5 °C	0.20%
工作条件 压力	0.2%	0.12%	0.5%	0.29%	1.0%	0.58%
工作条件 压缩因子	0.3%	0.18%	0.3%	0.18%	0.5%	0.29%
参比条件 压缩因子	0.3%	0.18%	0.3%	0.18%	0.5%	0.29%
工作条件 体积流量	0.7%	0.41%	1.2%	0.70%	1.5%	0.87%

标准参比条件下天然气体流量的相对标准不确定度按式 (8) 合成。

$$u_r(q_n) = \sqrt{u_r^2(q_f) + u_r^2(p_f) + u_r^2(Z_n) + u_r^2(T_f) + u_r^2(Z_f)} \quad (8)$$

式中  $u_r(q_n)$  表示标准参比条件下天然气瞬时体流量的相对标准不确定度。

标准参比条件下的天然气体流量的相对扩展不确定度按式 (9) 计算，不同等级计量系统天然气体流量的相对标准不确定度和相对扩展不确定度评定结果见表 5。

$$U_r(q_n) = k u_r(q_n) \quad (9)$$

式中  $U_r(q_n)$  表示标准参比条件下天然气瞬时体流量的相对扩展不确定度； $k$  表示包含因子，取  $k=2$ 。

表 5 不同等级计量系统标准参比条件下天然气体流量的不确定度表

项目	A 级	B 级	C 级
$u_r(q_n)$	0.51%	0.81%	1.20%
$U_r(q_n)$	1.1%	1.7%	2.4%

### 3.4 A 级站不确定度评定示例

上文依据 GB/T 18603 规定的相关参数，用最大允许测量误差值评定了不同等级计量系统在标准参比条件下天然气体流量的不确定度。除了用最大允许误差值评定外，天然气体流量的不确定度还可以通过计量器具的检定证书、校准证书、产品技术说明书等信息评定得到。实际运行的计量站配置的计量器具性能指标通常情况下会优于 GB/T 18603 的规定值。《天然气计量系统性能评价：GB/T 35186—2017》<sup>[3]</sup> 给出了天然气计量系统的不确定度评定方法。A 级站计量系统由于交接的天然气量大、涉及金额高，对计量系统准确度要求最高。本文以西南地区某一在运 A 级计量站具体配置的计量器具为例，按照 GB/T 35186 评定其不确定度。

该 A 级站流量计采用不确定度为 0.21% ( $k=2$ ) 的计量标准装置校准，流量计重复性为 0.2%。采用智能绝压变送器测量压力，准确度等级为 0.1 级，量程为 10 MPa，运行压力为 6 MPa。采用一体化智能温度变送器测量温度，不确定度为 0.2 K，运行温度为 20 °C (293.15 K)，并安装在线气相色谱仪。经检定合格，天然气组成分析使用二级标准气体，分析的重复性符合 GB/T 13610 要求。考虑流量计校准重复性影响，工作条件下的体积流量相对标准不确定度按式 (10) 计算，工作条件下的压力、温度测量相对标准不确定度分别按式 (11) 和式 (12) 计算，评定未考虑设备周期偏移引入的不确定度。

$$u_r(q_f) = \sqrt{u_r^2(q_s) + E_r^2} \approx 0.24\% \quad (10)$$

$$u_r(p_f) = \frac{1}{k} \xi_p \frac{p_k}{p_f} \approx 0.10\% \quad (11)$$

$$u_r(T_f) = \frac{u_c(T_f)}{T_f} \times 100\% \approx 0.04\% \quad (12)$$

式中  $u_r(q_s)$  表示检定时所使用的标准装置相对标准不确定度； $E_r$  表示流量计重复性； $\xi_p$  表示智能绝压变送器准确度等级； $p_k$  表示智能绝压变送器满量程值，MPa； $p_f$  表示运行压力测量值，MPa； $u_c(T_f)$  表示温度测量合成标准不确定度，K； $T_f$  表示温度测量值，K。

按实际情况评定的 A 级站相对标准不确定度和相对扩展不确定度见表 6。

表 6 某 A 级计量站不确定度评定示例表

不确定度分量	$u_r(q_f)$	$u_r(p_f)$	$u_r(T_f)$	$u_r(Z_n)$	$u_r(Z_r)$	$u_r(q_n)$	$U_r(q_n)$ $k=2$
评定结果	0.24%	0.10%	0.04%	0.03%	0.05%	0.27%	0.54%

取  $u_r(Z_n)=0.03\%$  (GB/T 35186 附录 B.9.2)、 $u_r(Z_r)=0.05\%$  (GB/T 35186 附录 B.8.2.1)，按式 (8) 和式 (9) 分别计算得到： $u_r(q_n)=0.27\%$ 、 $U_r(q_n)=0.54\%$ 。

## 4 天然气计量发展方向

### 4.1 进一步提升量值传递与计量溯源性能力建设

提高量值传递与计量溯源性能力和技术水平，满足中国天然气工业的快速发展需要。加强国际国内天然气计量标准装置的量值比对，在进一步提高天然气量值传递与计量溯源性技术水平的同时，加快计量技术国际接轨。加快建设具有完全自主知识产权的高压天然气原级标准装置，更加合理布局中国天然气计量检定机构，满足不断增长的流量计检定需求。在量值传递体系中以检定为主，适当增加校准方式。流量计溯源从检定为主转变为检定、校准、比对、使用中检验、现场检定等多种方式并存，提高流量计溯源效率。

### 4.2 进一步加强计量技术创新能力

氢能是战略新兴产业，掺氢天然气输送和利用是天然气工业新的发展方向，开展天然气制氢、掺氢对天然气管网材质、终端设备、流体物性参数和计量系统的影响研究，确保管网和计量系统满足掺氢天然气输送和计量需求，并制定相应的标准规范。开展通过超声流量计结合压力、温度等非天然气组

成参数获取天然气发热量的新技术研究。深化激光多普勒、粒子成像等光学原理计量技术研究，拓展天然气计量检定新方法。加快推进高准确度超声流量计、气相色谱仪等关键计量仪器设备国产化进程，进一步提升计量技术创新深度和维度。

### 4.3 加快计量数字化智能化转型步伐

天然气计量系统和管网的调度运行需要多参数准确测量、复杂运算和海量数据传输，通过机器学习和数据分析实现智能化决策，推进天然气管网和计量技术数字化智能化转型升级；加强天然气计量技术规范标准的数字化转型，制定可扩展标记语言等格式的数字化规范标准，便于计量仪器设备直接使用；规范统一天然气计量数据格式，提升计量数据共享利用率。加强现代信息技术与现代计量技术深度融合，加强计量结果的智能判断，实现计量管理智能化，对提高中国天然气管网运行效率和计量技术水平具有重要意义。

### 4.4 体积计量向能量计量转变是天然气计量发展方向

体积计量虽然实施较为简便，但不能科学公正地表征天然气的能源商品特性。能量计量更能体现优质优价原则，是目前国际天然气计量的主要方式。国家积极推进天然气计量方式转变为能量计量，先后出台《关于加快建设全国统一大市场的意见》、《油气管网设施公平开放监管办法》等一系列重要文件，明确提出“稳妥推进天然气市场化改革，加快建立统一的天然气能量计量计价体系”。中国基本建成实施天然气能量计量的技术、标准、规范等保障体系。国家市场监督管理总局（天然气质量控制和能量计量）重点实验室建成并投入运行，政府企业协作并积极开展天然气能量计量试点示范，上述举措必将加快中国天然气体积计量向能量计量转变，推进计量方式与国际接轨<sup>[32-40]</sup>。

## 5 结论

1) 天然气工业的体制机制改革和国家管网公司的成立宣告中国天然气管网“全国一张网”格局的形成，实现了管道资源共享，避免重复投资和重复建设带来的资源浪费。不同运营主体的天然气交界面都需要进行计量确认，不同等级天然气计量站的计量系统要求不同。

2) 中国建立了以体积计量为基础的天然气计量技术体系，主要包括计量相关的法律法规及管理制

度、技术标准、规范、检定规程、计量器具管理与应用、计量监督、计量溯源与量值传递体系等。

3) 不确定度评定是天然气计量系统性能评价和天然气计量科学研究的重要内容。完整的天然气计量结果应由不确定度评定说明表示结果的可信程度。天然气计量系统的不确定度评定结果表明, 中国的天然气计量系统能够满足天然气计量需求。

4) 天然气计量发展方向主要有 4 个方面: ①加强计量量值传递与溯源能力建设; ②流量计溯源从以检定为主发展为检定、校准、使用中检验、现场检定等多种方式并存; ③加快计量数字化智能化转型步伐; ④加快推进中国天然气计量方式从体积计量向能量计量转变, 实现计量方式与国际接轨。

#### 参 考 文 献

- [1] 中国天然气发展报告(2024)编委会. 中国天然气发展报告(2024)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2024.  
Editorial Board of China Natural Gas Development Report (2024). China natural gas development report (2024)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2024.
- [2] 电力规划设计总院. 中国能源发展报告——2024[M]. 北京: 人民日报出版社, 2024.  
Electric Power Planning and Design General Institute. Report on China energy development 2024[M]. Beijing: People's Daily Publishing House, 2024.
- [3] International Energy Agency. World energy outlook 2024[R]. Paris: IEA, 2024.
- [4] The Energy Institute. Statistical Review of World Energy 2024[R]. London: EI, 2024.
- [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.  
CHANG Honggang, DUAN Jiqin. Natural gas measurement technology system and its prospect in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(1): 110-118.
- [6] 陆渭林. 计量技术与管理工作指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.  
LU Weilin. Work guide for metrology technology and management[M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [7] 黄维和, 宫敬. 天然气管道与管网多能融合技术展望[J]. 油气储运, 2023, 42(12): 1321-1328.  
HUANG Weihe, GONG Jing. Prospect for the development of natural gas network and the multi-energy integration technology in pipeline networks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(12): 1321-1328.
- [8] 王亮, 蔡林, 焦中良, 等. 基于“全国一张网”的天然气基础设施经营模式创新探索——中国天然气管网运营机制研究之三[J]. 国际石油经济, 2022, 30(1): 67-76.  
WANG Liang, CAI Lin, JIAO Zhongliang, et al. Innovation and exploration of natural gas infrastructure business model based on "one network in whole country": Research on the operation mechanism of natural gas pipeline network in China III[J]. International Petroleum Economics, 2022, 30(1): 67-76.
- [9] 李秋扬, 赵明华, 任学军, 等. 中国油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(增刊1): 14-17.  
LI Qiuyang, ZHAO Minghua, REN Xuejun, et al. Construction status and development trend of Chinese oil & gas pipeline[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2019, 38(S1): 14-17.
- [10] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 天然气能量的测定: GB/T 22723—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Natural gas—Energy determination: GB/T 22723-2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [11] 曾文平, 常宏岗, 罗勤, 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.  
ZENG Wenping, CHANG Honggang, LUO Qin, 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.
- [12] 常宏岗, 周理, 罗勤, 等. 中国天然气国际化发展思考[J]. 天然气工业, 2022, 42(10): 1-10.  
CHANG Honggang, ZHOU Li, LUO Qin, et al. Progress and development of international standardization of natural gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(10): 1-10.
- [13] FOLKESTAD T, FLØLO D, TUNHEIM H, et al. Operating experience with two ultrasonic gas meters in series[C]//21<sup>th</sup> North Sea Flow Measurement Workshop 2003. Tonsberg: Energy Institute, 2003: 1-26.
- [14] MICKANIR. 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.
- [15] MICKANIR. 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.
- [16] Transmission Measurement Committee. Natural gas energy measurement: AGA Report No.5[R]. Washington, D.C.: American Gas Association, 2009.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气体流量计: GB/T 32201—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: .  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Gas meters: GB/T 32201-2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [18] OIML. Measuring systems for gaseous fuel: OIML R 140: 2007[S]. Paris: Organisation Internationale de Metrologie Legale, 2007.
- [19] BSI. Gas meters. Conversion devices energy conversion: BS EN 12405-2: 2012[S]. London: British Standards Institution, 2012.
- [20] Transmission Measurement Committee. Natural gas energy measurement: AGA Report No.5[R]. Washington, D.C.: American Gas Association, 2009.
- [21] International Organization for Standardization. Natural gas—

- Energy determination: ISO 15112: 2018[S]. Geneva: ISO, 2018.
- [22] BSI. Gas infrastructure. Gas measuring systems. Functional requirements: BS EN 1776: 2015[S]. London: British Standards Institution, 2015.
- [23] 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.  
PAN Piwu, ZHANG Ming. Technical basis of natural gas measurement[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 流量积算仪: JJG 1003—2016[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Flow integration meters: JJG 1003-2016[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2012.
- [25] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 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—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
State Administration for Market Regulation & Standardization Administration of the People's Republic of China. Natural gas—Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition: GB/T 11062-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 天然气压缩因子的计算 第1部分: 导论和指南: GB/T 17747.1—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Natural gas—Calculation of compression factor—Part 1: Introduction and guidelines: GB/T 17747.1-2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 天然气计量系统技术要求: GB/T 18603—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements of measuring systems for natural gas: GB/T 18603-2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [28] 刘春浩. 测量不确定度评定方法与实践 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.  
LIU Chunhao. Evaluation method and practice of measurement uncertainty[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [29] 倪育才. 实用测量不确定度评定 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2020.  
NI Yucai. Evaluation of practical measurement uncertainty[M]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and expression of uncertainty in measurement: JJF 1059.1-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 天然气计量系统性能评价: GB/T 35186—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Performance evaluation of measuring system for natural gas: GB/T 35186-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [32] 常宏岗. 天然气制氢技术及经济性分析 [J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(4): 53-57.  
CHANG Honggang. Technical and economic analysis of hydrogen production from natural gas[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2021, 50(4): 53-57.
- [33] 张锴, 周理, 张佩颖, 等. 天然气管道掺氢对天然气分析计量的影响 [J]. 天然气工业, 2023, 43(8): 135-145.  
ZHANG Pu, ZHOU Li, ZHANG Peiyang, et al. Influence of hydrogen blending in natural gas pipeline on natural gas analysis and measurement[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(8): 135-145.
- [34] 常宏岗. 高标准引领高质量发展 [J]. 国企管理, 2021(22): 54-55.  
CHANG Honggang. High standards lead to high-quality development[J]. China State-Owned Enterprise Management, 2021(22): 54-55.
- [35] 黄维和, 段继芹, 常宏岗, 等. 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.  
HUANG Weihe, DUAN Jiqin, CHANG Honggang, et al. Construction of natural gas energy-metering system in China: A discussion[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 186-193.
- [36] 成伟, 杨添波, 李长武, 等. 多气源格局下天然气计量体系国内外进展 [J]. 计量科学与技术, 2024, 68(1): 3-9.  
CHENG Wei, YANG Tianbo, LI Changwu, et al. Advancements in the natural gas measurement system under a multi-source scenario: A domestic and international perspective[J]. Metrology Science and Technology, 2024, 68(1): 3-9.
- [37] 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.  
REN Jia, DUAN Jiqin, HE Min. Classification and uncertainty assessment of natural gas energy measurement system[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(10): 115-122.
- [38] 刘博韬, 沈超. 天然气计量系统性能现场测试评价方法探讨 [J]. 石油与天然气化工, 2019, 48(4): 99-105.  
LIU Botao, SHEN Chao. Performance evaluation of natural gas metering system based on field test[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2019, 48(4): 99-105.
- [39] 陈庚良. 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 and Gas, 2017, 46(1): 83-90.
- [40] 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 天然气能量计量技术规范: JJF 1993—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.  
State Administration for Market Regulation. Metrological specification for the energy measurement of natural gas: JJF 1993-2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

(修改回稿日期 2025-02-01 编辑 张晓雪)



本文互动