



中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 7551—2019

用槽道式流量计测量天然气流量

Measurement of natural gas flow by spindle flowmeters

2019 — 11 — 04 发布

2020 — 05 — 01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和符号	1
3.1 术语和定义	1
3.2 符号	2
4 测量原理	3
4.1 流量计结构	3
4.2 测量原理	3
5 计量性能	3
5.1 概述	3
5.2 流量计的准确度	4
5.3 重复性	4
5.4 温度	4
5.5 标准参比条件	4
5.6 压力损失	4
5.7 量程比	4
6 流量计要求	5
6.1 概述	5
6.2 流量计表体	5
6.3 纺锤体阻流件	6
6.4 粗糙度	7
6.5 出厂检验	7
7 流量计的选型、安装和维护	7
7.1 选型	7
7.2 安装	8
7.3 维护	8
8 流量计算方法	8
8.1 流量计算	8
8.2 流量计参数计算	9
8.3 取值方法和数据修约	10

9 流量测量的不确定度估算	11
9.1 质量流量测量不确定度估算	11
9.2 操作条件下的天然气密度测量不正确度估算	12
9.3 温度测量不确定度估算	12
9.4 压力和差压测量不确定度估算	13
9.5 标准参比条件下的体积流量测量不确定度估算	13
9.6 标准参比条件下的能量测量不确定度估算	13
附录 A (规范性附录) 校准方法	14
附录 B (规范性附录) 流出系数和可膨胀系数的确定	19
附录 C (资料性附录) 流量计算和差压量程计算示例	22
附录 D (资料性附录) 流量计算常用表	27
附录 E (资料性附录) 流量计算机基本技术要求	29
参考文献	32

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由油气计量及分析方法专业标准化技术委员会提出并归口。

本标准起草单位：中国石油天然气股份有限公司计量测试研究所、中国石油天然气股份有限公司北京天然气管道有限公司、中国计量科学研究院、中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司、北京史宾德科技发展有限公司。

本标准主要起草人：房福生、李国海、李春辉、施斌、孙学军、肖迪、高军、赵成海。

用槽道式流量计测量天然气流量

1 范围

本标准规定了槽道式流量计（以下简称“流量计”）的测量原理、计量性能、技术、选型、安装和维护要求，并给出了气体质量流量和标准参比条件下的体积流量，以及能量流量的计算方法和不确定度估算方法。

本标准适用于管道输送的天然气流量测量。其他类似气体也可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2624.1—2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第1部分：一般原理和要求

GB 3836.1 爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 11062 天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法

GB/T 17747 （所有部分）天然气压缩因子的计算

GB 17820 天然气

GB/T 18603—2014 天然气计量系统技术要求

GB/T 21446—2008 用标准孔板流量计测量天然气流量

SY/T 0599 天然气地面设施抗硫化物应力开裂和抗应力腐蚀开裂金属材料技术规范

ASME PTC 19.3 温度计插孔测试规范

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

GB/T 2624.1—2006 和 GB/T 21446—2008 界定的，以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

纺锤体 spindle segment

一种头部为钝体、中部为等直径的圆柱体、尾部逐渐收缩为锥体的阻流元件。

3.1.2

环形槽道 annular channel

流量计表体和纺锤体等直段之间形成的环形段。

3.1.3

槽道式流量计 spindle flowmeters

利用纺锤体，使流经流量计的流体调整为环形槽道流动，获得对应稳定的差压来测量流体流量

的流量计。

3.1.4

等效直径比 **equivalent diameter ratio**

环形槽道面积换算为等效圆面积直径与表体内径之比。

3.2 符号

见表 1。

表 1 符号

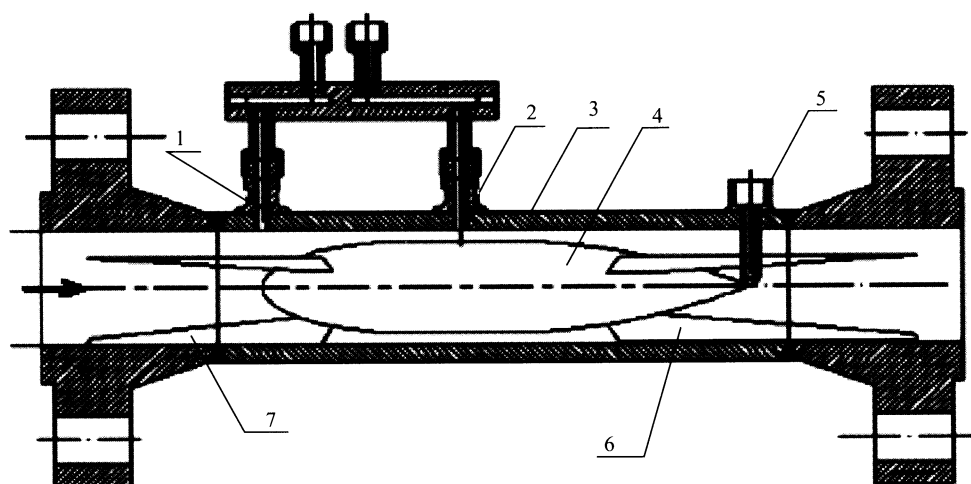
符号	名称	量纲	单位
C	流出系数	1	1
D	操作条件表体内径	L	m
d	操作条件纺锤体等直段直径	L	m
β	等效直径比	1	1
P	静压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
q_m	质量流量	MT^{-1}	kg/s
q_v	体积流量	L^3T^{-1}	m ³ /s
q_E	能量流量	ML^2T^{-3}	J/s
$\hat{H}_s$	标准参比条件质量发热量	L^2T^{-2}	J/kg
Re_D	管径雷诺数	1	1
T	气流热力学温度	Θ	K
t	气流摄氏温度	Θ	℃
Z	压缩因子	1	1
Δp	差压	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
ΔP	压力损失	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
ε	可膨胀性系数	1	1
μ	气体动力黏度	$ML^{-1}T^{-1}$	Pa·s
κ	等熵指数	1	1
M	摩尔质量	MN^{-1}	kg/mol
R	摩尔气体常数	$ML^2T^{-2}\Theta^{-1}N^{-1}$	J/(mol·K)
Ma	马赫数	1	1
ρ	气体密度	ML^{-3}	kg/m ³
ζ	仪表准确度等级或最大允许误差	1	1

注 1：在“量纲”栏中，长度、质量、时间、热力学温度和物质的量的量纲，分别用 L、M、T、 Θ 和 N 表示。
 注 2：下标 f 代表在操作条件下的参数，下标 n 代表在标准参比条件下的参数。

4 测量原理

4.1 流量计结构

流量计主要由表体、纺锤体、固定支撑片、引压管和温度安装附件构成。流量计还应配备压力测量仪表、差压测量仪表、温度测量仪表和流量计算机来完成流量测量及积算。流量计的结构示意图如图 1 所示。



说明：

- 1——取压孔（高压）；
- 2——取压孔（低压）；
- 3——表体；
- 4——纺锤体；
- 5——测温口；
- 6——后支撑片；
- 7——前支撑片。

图 1 槽道式流量计结构示意图

4.2 测量原理

在流量计表体内置入一段直径小于流量计内径的、与轴线同轴的、形状为纺锤体的阻流件，迫使流体通过阻流件与管道内壁之间形成的环状槽道时，流体两侧边界层重新开始，而中间部分的流体流动状态接近于均匀速度分布，同时流速加快、压力降低，在阻流件的前部和中部形成压力差，依据压力差与流量之间的函数关系确定流体流量。

基本原理计算方法见公式（1）：

$$q_m = f(Re, \beta, Ma^2) \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \sqrt{2\rho_f \Delta p} \quad \dots\dots\dots (1)$$

5 计量性能

5.1 概述

在进行校准系数调整之前，流量计就应满足最大允许误差、重复性和工作温度等测量性能的要求。以保证不因进行校准系数调整而掩盖了流量计自身的问题和缺陷。

用户应根据第 6 章和附录 A 的规定，要求对流量计进行出厂检验和校准，以保证在满足最低性能要求基础上提高流量计的测量准确度。

5.2 流量计的准确度

流量计的准确度等级和对应等级配套仪表准确度的要求见表 2。

表 2 流量计准确度等级和配套仪表准确度要求

准确度等级	0.5 级	1.0 级	2.0 级	3.0 级
最大允许误差	± 0.5%	± 1.0%	± 2.0%	± 3.0%
温度	0.2℃	0.5℃	0.5℃	1.0℃
压力	0.1%	0.2%	0.5%	1.0%
差压	0.1%	0.2%	0.5%	1.0%
密度	0.2%	0.40%	0.5%	1.0%
压缩因子	0.1%	0.3%	0.3%	0.5%
质量流量	0.4%	0.8%	1.2%	1.8%
计量结果	0.5%	1.0%	2.0%	3.0%

5.3 重复性

操作条件下流量计各流量点的重复性应不超过流量计最大允许误差绝对值的 1/3。

5.4 温度

环境温度范围为 -40℃ ~ 85℃，同时介质温度应保持在烃类露点以上。

5.5 标准参比条件

本标准规定天然气体积流量计量的标准参比条件和发热量测量的燃烧标准参比条件均为绝对压力 P_n 等于 101.325kPa 和摄氏温度 t_n 等于 20℃。也可采用合同压力和合同温度作为参比条件。

5.6 压力损失

流体流经流量计会产生压力损失。压力损失的大小取决于纺锤体的尺寸和几何形状、质量流量（流速）及过程流体的动力黏度。操作条件下流量计的压力损失按公式（2）计算：

$$\Delta P = \frac{2}{\rho_f} (1 - \beta^4) \left[\frac{q_m}{C \varepsilon \pi (D^2 - d^2)} \right] \dots\dots\dots (2)$$

5.7 量程比

流量计的推荐量程比为 100：1，最大量程比为 400：1。

6 流量计要求

6.1 概述

流量计表体和其他所有部件，应选用几何尺寸稳定的材料制造。若用户有特殊要求，则应符合适用于用户所指定的每一特定安装条件的相应标准规范或规定。

在流量计出厂前，制造厂应对其进行出厂检验，并向用户提供出厂检验报告。

6.2 流量计表体

6.2.1 最大工作压力

流量计的最大设计工作压力应是下列部件的最大工作压力中的最小者：流量计表体、法兰、纺锤体及其安装连接件。

6.2.2 抗腐蚀要求

流量计所有与介质接触的部件应使用适用于天然气的材料制造。用于含 H_2S 、 CO_2 等腐蚀性介质的流量计材料应符合 SY/T 0599 的规定。

流量计的所有外部零件应用抗腐蚀材料制造或者用适合在天然气工业典型大气环境中使用的抗腐蚀涂层进行保护，应用于海上或沿海地区流量计的外部零件和抗腐蚀涂层还应考虑高盐雾环境的影响。

6.2.3 长度和内径

制造厂应给出各个压力等级和口径下的流量计表体的标准长度，也可根据用户需要指定不同的长度和内径。

流量计内径尺寸偏差应为 $\pm 0.1\text{mm}$ 。

6.2.4 压力测量

流量计表体上应至少有 2 个取压孔用以测量静压和差压。高压端取压孔位于纺锤体头部前端对应表体管壁处，低压端取压孔位于环形槽道中间对应表体管壁处。

取压孔应设在流量计表体顶部并在同一水平线上，且取压孔轴线应垂直于表体轴线。在取压孔的穿透管壁处应为圆形，其边缘应与管壁内表面平齐，并尽可能锐利。

6.2.5 温度测量

流量计自带测温套管，测温口位于流量计纺锤体尾部对应表体管壁处，双向流流量计测温口位于一侧纺锤体头部对应表体管壁处。测温套管的选型应通过 ASME PTC 19.3 的应力计算。

6.2.6 流量计标记

铭牌应固定在流量计壳体上，至少包含下列信息：

- a) 制造厂名称。
- b) 流量计名称、型号。
- c) 流量计编号。
- d) 制造日期。
- e) 压力等级。

- f) 工作温度范围。
 - g) 流量范围。
- 流量计表体应有气体流动方向的永久性标记。

6.2.7 外观要求

- 外观要求如下：
- a) 流量计的外表应整洁，表面应有良好的处理，不得有毛刺、刻痕、裂纹、锈蚀、霉斑和涂层剥落现象。
 - b) 所有文字和符号应鲜明、清晰。
 - c) 密封面应光滑，不得有损伤。

6.2.8 其他要求

流量计应设计有吊孔和吊索放置的空间，当将其放在坡度达 10% 的斜面上时不滚动。

6.3 纺锤体阻流件

6.3.1 阻流件的形状

流量计阻流件的头部为钝体，中部为等直径圆柱体，尾部为逐渐收缩的锥体，整个外形类似纺锤体。阻流件轴线平面的截面图如图 2 所示。

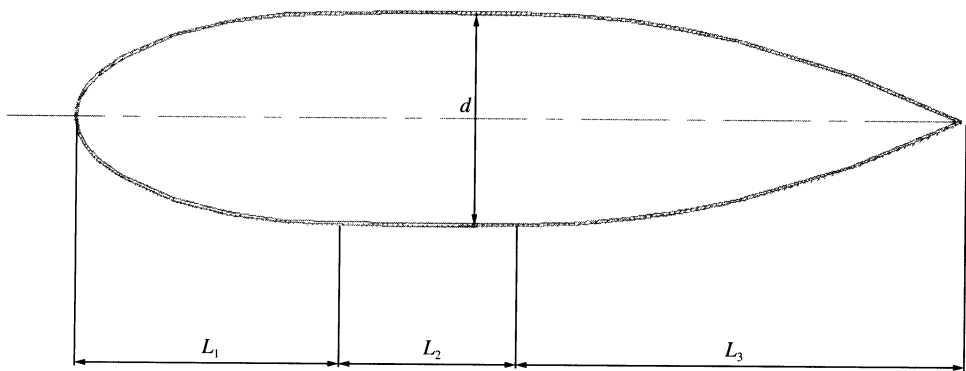


图 2 纺锤体阻流件

双向计量的流量计阻流件的尾部与头部形状一致，均为钝体，中部为等直径圆柱体，阻流件轴线平面的截面图如图 3 所示。

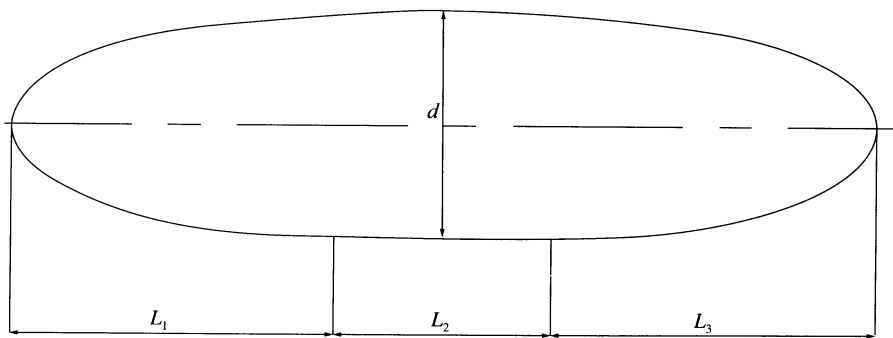


图 3 双向计量的纺锤体阻流件

6.3.2 阻流件的尺寸

一般阻流件头部钝体长度为 $L_1=1.5d$ ，中间等直段长度为 $L_2=d$ ，尾部锥体长度为 $L_3=2.5d$ ，双向计量的流量计阻流件的头部长度 (L_1) 和尾部长度 (L_3) 均为 $1.5d$ ，中间等直段长度为 $L_2=d$ 。其中 d 为中间等直段圆柱体的直径，根据流量计内径和预计加工达到的等效直径比确定。也可根据用户情况加工特定尺寸的阻流件。

6.4 粗糙度

流量计内壁和纺锤体阻流件的表面粗糙度小于 $3.2\mu\text{m}$ ，外表面抛光处理。

6.5 出厂检验

6.5.1 外观与结构检查

用目视和测量的方法，检查外观、法兰、内径、粗糙度等是否满足要求。

6.5.2 性能测试

流量计出厂前应进行整体准确度和重复性等性能检验，并给出流出系数和可压缩系数计算常数，流量范围应能覆盖使用流量，流量计检验结果应满足第 5 章的要求。性能测试方法见附录 B。

6.5.3 耐压强度

流量计在出厂前都应进行耐压强度试验，试验压力通常为最大工作压力的 1.5 倍，试验介质为水，并至少保持 5min，经检查无泄漏和损坏。

6.5.4 气密性

对流量计应进行气密性试验，试验介质为干空气或氮气，试验压力通常为最大工作压力的 1.1 倍，并至少保持 5min，经检查无泄漏。

7 流量计的选型、安装和维护

7.1 选型

7.1.1 总则

宜根据所需的现场参数范围和计量准确度选择流量计。在选型时要考虑以下几点：

- a) 天然气在标准参比条件下的体积流量或质量流量或能量流量和流速。
- b) 设计压力和工作压力。
- c) 设计温度和工作温度。
- d) 允许压损。
- e) 天然气组分。
- f) 要求的测量最大允许误差。

7.1.2 准确度

应按 5.2，根据流量测量的准确度要求选择对应的流量计和配套仪表。

7.1.3 口径

根据操作条件下的流量范围,选择合适的流量计口径和数量,单路计量管路内流速应不大于 20m/s。

7.1.4 工作压力

流量计的最大工作压力应不小于设计压力,流量计的连接法兰应符合用户提供的安装现场适用标准和其他要求。

7.1.5 差压变送器

根据流量计工作流量范围确定差压变送器量程,方法参见附录 C。

7.2 安装

流量计一般为水平安装,也可采用垂直安装方式。

对准确度等级不低于 1.0 级的流量计,上游直管段长度至少应为 $5D$,下游直管段长度至少应为 $2D$,双向计量时,上下游直管段长度均为 $5D$;准确度等级低于 1.0 级的流量计,无上下游直管段要求。

流量计水平安装时应确保表体外壁取压口及测温口垂直向上。

7.3 维护

定期检查纺锤体阻流件,清除杂质。发现阻流件轻微变形应及时校准。

8 流量计算方法

8.1 流量计算

8.1.1 质量流量计算

流量计质量流量用公式 (3) 计算:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \sqrt{2\Delta p \rho_f} \dots\dots\dots (3)$$

8.1.2 体积流量计算

流量计在操作条件下的体积流量 q_{vf} 用公式 (4) 计算:

$$q_{vf} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \sqrt{2\Delta p \rho_f} / \rho_f \dots\dots\dots (4)$$

流量计在标准参比条件下的体积流量 q_{vn} 用公式 (5) 计算:

$$q_{vn} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \sqrt{2\Delta p \rho_f} / \rho_n \dots\dots\dots (5)$$

8.1.3 能量流量计算公式

流量计在标准参比条件下的能量流量用公式 (6) 计算：

$$q_E = q_m \hat{H}_s \quad \dots\dots\dots (6)$$

8.2 流量计参数计算

8.2.1 流出系数

流出系数 C 通过用液体对流量计校准得到，用公式 (7) 计算：

$$C = \frac{4q_m \sqrt{1 - \beta^4}}{\pi(D^2 - d^2) \sqrt{2\Delta p \rho_f}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

流出系数也可用公式计算和查表得到，计算方法和常用流出系数表见 B.1。

流出系数还可用于气体对流量计校准得到，计算方法见 B.2。

8.2.2 可膨胀系数

可膨胀系数 ε 是利用气体对流量计进行校准时由公式 (8) 所确定的一个系数，公式 (8) 中流出系数 C 为相同管径雷诺数下用液体直接校准而确定的数值。

$$\varepsilon = \frac{4q_m \sqrt{1 - \beta^4}}{C \pi(D^2 - d^2) \sqrt{2\Delta p \rho_f}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

可膨胀系数也可通过 B.1 规定的方法计算。

8.2.3 纺锤体等直段直径和表体内径

操作条件纺锤体等直段直径 d 按公式 (9) 计算：

$$d = [1 + A(t_f - 20)] d_{20} \quad \dots\dots\dots (9)$$

操作条件表体内径 D 按公式 (10) 计算：

$$D = [1 + A(t_f - 20)] D_{20} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

d_{20} ——纺锤体等直段在 20℃ 条件下的直径，单位为米 (m)；

D_{20} ——表体在 20℃ 条件下的内径，单位为米 (m)；

A ——流量计材料的线膨胀系数，单位为米每米摄氏度 [m/(m·℃)]，由表 D.1 查得。

8.2.4 等效直径比

等效直径比 β 按公式 (11) 计算：

$$\beta = \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{D} \dots\dots\dots (11)$$

8.2.5 等熵指数

在本标准中可以将比热容比代替等熵指数，按公式（12）计算：

$$\kappa = c_p / c_v \dots\dots\dots (12)$$

式中：

c_p ——质量定压热容，单位为千焦每千克摄氏度 [kJ/(kg·℃)]，由表 D.3 的数据插值计算；

c_v ——质量定容热容，单位为千焦每千克摄氏度 [kJ/(kg·℃)]，由表 D.3 的数据插值计算。

8.2.6 管径雷诺数

管径雷诺数 Re_D 按公式（13）计算：

$$Re_D = \frac{4q_m}{\pi \mu_f D} \dots\dots\dots (13)$$

天然气动力黏度可用甲烷动力黏度代替，由表 D.3 的数据插值计算。

8.2.7 操作条件下天然气密度

操作条件下天然气密度按公式（14）计算：

$$\rho_f = \frac{MP_f}{RZ_f T_f} \dots\dots\dots (14)$$

8.2.8 操作条件下的天然气压缩因子

操作条件下的天然气的压缩因子按照 GB/T 17747 规定的方法计算。

8.2.9 标准参比条件下的天然气物性参数

在流量计算中，使用的标准参比条件下的天然气物性参数有摩尔质量 (M)、密度 (ρ_n)、压缩因子 (Z_n) 和高位发热量 ($\hat{H}_s$)，这些参数应按 GB/T 11062 规定的方法计算。

8.2.10 计算示例

流量计算和差压量程计算示例参见附录 C。

8.3 取值方法和数据修约

8.3.1 取值方法

8.3.1.1 仪表上记录或指示的测量值，应保留一位可疑数。

8.3.1.2 流量计算参数最少有效数字位数应按表 3 取值。

表 3 系数参数最少有效数字位数取值表

序号	参数	有效数值位数或小数
1	纺锤体等直段直径 d	4
2	表体内径 D	4
3	等效孔径比 β	4
4	流动温度 t_f	2 位小数
5	差压 Δp	4
6	静压 P_f	4
7	流出系数 C	4
8	流量计材料线膨胀系数 λ	4
9	天然气密度	4
10	可膨胀性系数 ε	4
11	压缩因子 Z	5
12	$\sqrt{P_f}$	4
13	$\sqrt{\Delta p}$	4

8.3.2 数据修约

当有效数字位数确定后，计算数据按 GB/T 8170 规定进行修约。

9 流量测量的不确定度估算

9.1 质量流量测量不确定度估算

质量流量测量相对标准不确定度按公式 (15) 估算：

$$u_r(q_m) = \sqrt{u_r(C)^2 + u_r(\varepsilon)^2 + \left(\frac{2\beta^4 + 2}{1 - \beta^4}\right)^2 u_r(D)^2 - \left(\frac{2}{1 - \beta^4}\right)^2 u_r(d)^2 + \frac{1}{4} u_r(\rho_f)^2 + \frac{1}{4} u_r(\Delta p)^2} \quad \dots (15)$$

质量流量测量相对扩展不确定度按公式 (16) 估算：

$$U_r(q_m) = 2u_r(q_m) \text{ (包含概率 95\%)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中：

$u_r(C)$ ——流出系数相对标准不确定度；

$u_r(\varepsilon)$ ——可膨胀性系数相对标准不确定度；

$u_r(D)$ ——表体内径测量相对标准不确定度；

$u_r(d)$ ——纺锤体等直段直径测量相对标准不确定度；

$u_r(\Delta p)$ ——差压测量相对标准不确定度，按 9.4 确定；

$u_r(\rho_f)$ ——操作条件下天然气密度测量相对标准不确定度，按 9.2 确定。

9.2 操作条件下的天然气密度测量不确定度估算

天然气密度可以用天然气密度计在线实测,也可以根据组分、压力、温度等物性参数进行计算。目前国内普遍采用后一种方法,天然气密度测量相对标准不确定度 $u(\rho_f)$ 按公式(17)估算:

$$u_r(\rho_f) = \sqrt{u_r(M)^2 + u_r(Z_f)^2 + u_r(T_f)^2 + u_r(P_f)^2} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

$u_r(M)$ ——天然气摩尔质量测量相对标准不确定度;

$u_r(Z_f)$ ——天然气压缩因子测量相对标准不确定度;

$u_r(T_f)$ ——天然气在操作条件下的气流热力学温度测量相对标准不确定度;

$u_r(P_f)$ ——天然气在操作条件下的气体绝对静压力测量相对标准不确定度。

9.3 温度测量不确定度估算

流量计配套的温度测量仪表一般为智能型一体化温度变送器,从校准证书中获取不确定度和包含因子数据,用公式(18)估算温度测量相对标准不确定度:

$$u_r(T_f) = u_c(t_f) / T_f \times 100\% \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中:

$u_c(t_f)$ ——温度测量标准不确定度,单位为摄氏度(℃);

当温度测量使用分体式智能变送器,铂电阻检定合格,变送器经校准时,用公式(21)估算电阻扩展不确定度,用公式(20)估算变送器扩展不确定度。用公式(19)估算合成标准不确定度后,用公式(18)计算相对标准不确定度。

$$u_c(t_f) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{U^2(t_a) + U^2(t_b)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$U(t_a) = E(t_a) \Delta t \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$U(t_b) = E(t_b) + \lambda T_f \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中:

$U(t_a)$ ——温度变送器测量扩展不确定度,单位为摄氏度(℃);

$U(t_b)$ ——电阻准确度等级对应的扩展不确定度,单位为摄氏度(℃);

$E(t_a)$ ——温度变送器准确度等级或误差;

Δt ——温度测量量程,单位为摄氏度(℃);

$E(t_b)$ ——电阻允许误差等级;

λ ——铂电阻允许误差等级对应的系数。

当使用引用误差表示测量准确度时,用公式(22)计算相对标准不确定度:

$$u_r(T_f) = \frac{1}{\sqrt{3}} \xi_T \frac{T_K}{T_f} \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\xi_T = \xi_t t_K / T_K$$

式中：

ξ_T ——温度仪表准确度等级；

T_K ——温度仪表量程值，单位为开尔文（K）。

9.4 压力和差压测量不确定度估算

流量计配套的的压力和差压测量仪表一般为智能型变送器，压力和差压测量相对标准不确定度用公式（23）估算。

$$u_r(P) = \frac{1}{\sqrt{3}} \xi_p \dots\dots\dots (23)$$

当使用引用误差表示测量准确度时，压力和差压测量相对标准不确定度用公式（24）估算：

$$u_r(P) = \frac{1}{\sqrt{3}} \xi_p \frac{P_K}{P_f} \dots\dots\dots (24)$$

式中：

ξ_p ——压力或差压仪表准确度等级；

P_K ——压力或差压仪表上限值，单位为帕斯卡（Pa）。

9.5 标准参比条件下的体积流量测量不确定度估算

在标准参比条件下体积流量测量相对标准不确定度按公式（25）估算：

$$u_r(q_{vm}) = \sqrt{u_r(q_m)^2 + u_r(\rho_n)^2} \dots\dots\dots (25)$$

式中：

$u_r(\rho_n)$ ——在标准参比条件下密度测量相对标准不确定度。

在标准参比条件下体积流量测量相对扩展不确定度按公式（26）估算：

$$U_r(q_{vm}) = 2u_r(q_{vm}) \text{（包含概率 95\%）} \dots\dots\dots (26)$$

9.6 标准参比条件下的能量测量不确定度估算

以质量发热量方式测量时，能量计量相对标准不确定度按公式（27）估算：

$$u_r(q_E) = \sqrt{u_r(q_m)^2 + u_r(\hat{H}_s)^2} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

$u_r(q_m)$ ——天然气质量流量测量相对标准不确定度；

$u_r(\hat{H}_s)$ ——天然气在燃烧标准参比条件下质量发热量测量的相对标准不确定度。

在标准参比条件下能量计量测量相对扩展不确定度按公式（28）估算：

$$U_r(q_E) = 2u_r(q_E) \text{（包含概率 95\%）} \dots\dots\dots (28)$$

附 录 A
(规范性附录)
校准方法

A.1 概述

流量计在出厂使用前、维修后应进行校准，通过校准来判断流量计的测量性能是否满足第 5 章的要求，并给出流量计的流出系数。

本方法适用于测量管径雷诺数 $Re_D \geq 10^5$ 的流量计校准。现场条件不满足的流量计的校准参照本标准和附录 B 的计算方法执行。

A.2 校准条件

A.2.1 标准装置的要求

A.2.1.1 标准器及配套仪表都应具有有效的检定或校准证书。

A.2.1.2 标准装置流量测量的不确定度 $U \leq 0.33\%$ ($k=2$)。

A.2.2 介质

A.2.2.1 测量介质为天然气或其他气体，其组分应基本稳定，天然气气质应符合 GB 17820 二类气要求，其物性参数值按 8.2 的规定计算。

A.2.2.2 单次测试过程中，介质温度变化应不大于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，压力波动应不大于 $\pm 0.5\%$ ，流量波动应不大于 $\pm 5\%$ 。

A.2.3 环境

校准的环境：大气温度一般为 $5^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$ ，相对湿度一般为 $35\% \sim 95\%$ ，大气压力一般为 $86\text{kPa} \sim 106\text{kPa}$ 。

A.2.4 安装要求

校准时的安装应符合 7.2 的要求。

A.3 校准项目和校准方法

A.3.1 随机文件和外观检查

校准前应对流量计的随机文件和外观进行检查。

流量计应附有说明书、出厂证书（或上一周期检定或校准证书）、测量误差或测量不确定度和其他有关技术指标文件。流量计表体上应有符合 6.2.6 要求的铭牌，流量计外观质量应符合 6.2.7 的规定。

A.3.2 校准

A.3.2.1 测试内容

测试内容应包括重复性、示值误差，并给出对应流出系数，必要时还应对差压范围做出说明。

双向计量流量计两侧均需进行校准测试。

A.3.2.2 流量点

校准时，在管径雷诺数 $Re_D=10^5$ 的流量至流量计最大流量之间均匀地选择 4 个测试流量点，也可以增加其他流量点进行附加校准试验。对于大口径流量计的校准可能达不到上限流量值，可指定低于 $q_{\max}$ 的校准流量范围，一般宜为 $0.7q_{\max}$ 。在校准过程中，每个流量点与设置流量偏差应不大于 $\pm 5\%$ 。

A.3.2.3 测试次数

每个流量点连续测试 3 次，对于准确度为 0.5 级流量计，每个流量点连续测试 6 次。

A.3.2.4 测试时间

每次数据采集时间不小于 100s。

A.3.2.5 预运行

应预运行至少 5min，待温度、压力、流量稳定并满足 A.2.2.2 的要求后，进行校准。

A.3.2.6 校准程序

校准程序如下：

- 把流量调到规定的流量值，稳定后，同时启动标准器（或标准器的记录功能）和被检流量计（或被检流量计的输出功能），并记录标准器和被检流量计的初始示值。
- 按装置操作要求运行一段时间后，同时停止标准器（或标准器的记录功能）和被检流量计（或被检流量计的输出功能），记录标准器和被检流量计的最终示值。
- 比较流量计和标准器的累积流量或平均瞬时流量值，计算示值误差和流出系数。
- 重复上述测试，计算流量计的重复性。

A.3.3 测试数据处理

A.3.3.1 示值误差计算

流量计的单次测量示值误差按公式（A.1）计算：

$$E_{ij} = \frac{q_{ij} - (q_s)_{ij}}{(q_s)_{ij}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

E_{ij} ——第 i 校准点第 j 次校准被检流量计的相对示值误差；

q_{ij} ——第 i 校准点第 j 次被检流量计的流量值；

$(q_s)_{ij}$ ——第 i 校准点第 j 次标准器的流量值。

流量计各流量点的相对示值误差按公式（A.2）计算：

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

E_i ——流量计第 i 校准点的相对示值误差；

n ——第 i 校准点的测试次数。

流量计的示值误差按公式（A.3）计算：

$$E = \pm |E_i|_{\max} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

$|E_i|_{\max}$ ——流量计各校准点相对示值误差中的最大值。

A3.3.2 重复性计算

流量计各流量点的重复性按公式 (A.4) 计算：

$$(E_r)_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (E_{ij} - E_i)^2} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

$(E_r)_i$ ——第 i 校准点的重复性。

流量计的重复性按公式 (A.5) 计算：

$$E_r = [(E_r)_i]_{\max} \dots\dots\dots (A.5)$$

A3.3.3 流出系数计算

流量计单次校准的流出系数按公式 (A.6) 或公式 (A.7) 计算：

$$C_{ij} = \frac{4(q_{ms})_{ij} \sqrt{(1-\beta^4)}}{\pi \varepsilon_{ij} (D^2 - d^2) \sqrt{2\rho_{ij} \Delta p_{ij}}} \dots\dots\dots (A.6)$$

$$C_{ij} = \frac{4(q_{nvs})_{ij} \rho_n \sqrt{(1-\beta^4)}}{\pi \varepsilon_{ij} (D^2 - d^2) \sqrt{2\rho_{ij} \Delta p_{ij}}} \dots\dots\dots (A.7)$$

式中：

$(q_{ms})_{ij}$ ——第 i 校准点第 j 次标准器的质量流量值；

$(q_{nvs})_{ij}$ ——第 i 校准点第 j 次标准器在标准参比条件的体积流量值。

流量计各校准点的流出系数按公式 (A.8) 计算：

$$C_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n C_{ij} \dots\dots\dots (A.8)$$

流量计的流出系数 C 取各校准点流出系数的算术平均值。

A3.3.4 管径雷诺数计算

管径雷诺数按公式 (A.9) 计算：

$$(Re_D)_{ij} = \frac{4(q_s)_{ij}}{\pi \mu_f D} \dots\dots\dots (A.9)$$

平均管径雷诺数按公式 (A.10) 计算：

$$(Re_D)_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Re_D)_{ij} \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

A3.4 流量计修正

将按 A.3.3.3 计算得到的流量计流出系数置入配套流量计算机中。

A.4 配套仪表检定 / 校准

流量计配套仪表的检定 / 校准周期按相应检定规程 / 校准规范要求执行。

A.5 校准证书

对每项测试结果，应以书面报告形式记录下来，并形成校准证书，由校准部门提供给用户。证书应至少包括下列内容：

- a) 制造厂名称。
- b) 校准机构、校准装置名称及地址。
- c) 流量计型号和系列号。
- d) 校准日期。
- e) 校准方法。
- f) 测试人和检验人签名。
- g) 校准结果数据，包括重复性、流量计相对示值误差、压力、温度、气体组分、校准装置的流量测量不确定度、校准系数等参数。
- h) 不确定度评定结果。

A.6 校准后的流量测量相对标准不确定度估算

A.6.1 校准后的质量流量测量相对标准不确定度

经过实流校准的流量计，其质量流量测量的不确定度 $u(q_m)$ 按公式 (A.11) 估算：

$$u_r(q_m) = \sqrt{u_r(q_{mf})^2 + \frac{1}{4}u_r(\Delta p)^2 + \frac{1}{4}u_r(\rho_1)^2} \quad \dots\dots\dots (A.11)$$

式中：

- $u_r(q_{mf})$ ——流量计校准后在校准条件下的流量测量不确定度，由公式 (A.12) 估算给出；
- $u_r(\Delta p)$ ——差压测量的不确定度，按 9.4 确定；
- $u_r(\rho_1)$ ——天然气密度测量的不确定度，按 9.2 确定。

A.6.2 校准条件下质量流量测量的不确定度

在校准条件下流量测量的不确定度按公式 (A.12) 估算给出：

$$u_r(q_{mf}) = \sqrt{u(s)^2 + u(E_r)^2} \quad \dots\dots\dots (A.12)$$

式中：

- $u(s)$ ——校准用标准装置的流量测量不确定度；
- $u(E_r)$ ——校准数据重复性引入的 A 类不确定度。

A.6.3 校准后质量流量测量的相对扩展不确定度

经过实流校准的流量计，其质量流量测量的相对扩展不确定度按公式（A.13）估算：

$$U_r(q_m) = 2u_r(q_m) \text{ (包含概率 95\%)} \quad \cdots \cdots \cdots \text{(A.13)}$$

附 录 B
(规范性附录)
流出系数和可膨胀系数的确定

B.1 流出系数计算公式和可膨胀系数计算公式**B.1.1 流出系数计算公式**

在管径雷诺数 $Re_D \geq 10^5$ 时, 流量计的流出系数可按公式 (B.1) 计算:

$$C = 0.32652 \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{0.047751\beta^4 + 0.10661531}} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

B.1.2 常用流出系数表

表 B.1 给出在管径雷诺数 $Re_D \geq 10^5$ 时流量计的常用流出系数值。

表 B.1 常用流出系数表

β	C
0.50	0.9550
0.55	0.9340
0.60	0.9070
0.65	0.8720
0.70	0.8280

B.1.3 可膨胀系数计算公式

可膨胀系数 ε 按公式 (B.2) 计算:

$$\varepsilon = 1 - A \frac{\Delta P}{\kappa P} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

A ——可膨胀系数计算参数, 按 B.2.3.7 的方法计算。

应用公式 (B.1) 和表 B.1 计算时, 可膨胀系数按公式 (B.2) 计算, A 取 0.90。

B.1.4 不确定度

用附录 A 的方法校准得到流出系数的相对标准不确定度按公式 (B.3) 计算:

$$u_r(C) = \sqrt{u(s)^2 + u(E_r)^2} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

$u(s)$ ——校准用标准装置的流量测量不确定度;

$u(E_r)$ ——校准数据重复性引入的 A 类不确定度。

用公式 (B.1) 计算或查表 B.1 得到的流出系数 C 值的相对扩展不确定度 $U_r(C) = 0.5\%$ ($k=2$)。可膨胀系数的相对标准不确定度按公式 (B.4) 计算。

$$u_r(\varepsilon) = \frac{\Delta p}{P_K} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

当 A 取定值 0.90 时, 可膨胀系数的相对扩展不确定度 $U_r(\varepsilon) = 0.5\%$ ($k=2$)。

B.2 性能测试

在流量计出厂前, 制造厂必须对每一台流量计进行性能测试, 并给出流出系数和可压缩系数计算常数, 以保证不因加工精度原因影响流量计计量性能。

测试方法为以空气为介质对流量计进行校准。

B.2.1 测试设备

B.2.1.1 对流量计进行测试的气体流量校准装置的扩展不确定度 $U \leq 0.33\%$ ($k=2$)。

B.2.1.2 准确度等级为 0.05 级的具有相应量程的差压测量装置一套。

B.2.1.3 准确度等级为 0.05 级的具有相应量程的压力测量装置一套。

B.2.1.4 分度值为 0.1°C 的精密温度计一支。

B.2.2 测试程序

B.2.2.1 流量计流量范围根据传感器的设计量程确定, 最大流量也可根据校准装置的能力而定。

B.2.2.2 在上述确定的流量范围内均匀地选择 10 个流量点 (包括最大流量和最小流量), 每点连续测试次数一般不少于 6 次, 各个流量点的实际流量偏差不得超过规定值的 $\pm 5\%$ 。

B.2.2.3 让流体在管路系统中循环预热一定时间, 使每个流量点的测试温度变化不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

B.2.2.4 每次测试, 应测量空气温度、室内温度各一次。

B.2.3 数据计算

B.2.3.1 每次检验中所测得的流量值和差压值均按狄克逊等准则剔除其中的粗大误差。

B.2.3.2 用校准装置给出的标准质量流量按公式 (B.5) 计算出流量装置第 i 个点的第 j 次流出系数 C_{ij} 与可膨胀系数 ε_{ij} 的乘积:

$$C_{ij}\varepsilon_{ij} = \frac{4(q_{ms})_{ij}\sqrt{(1-\beta^4)}}{\pi(D^2-d^2)\sqrt{2\rho_{ij}\Delta p_{ij}}} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

当以空气为介质对流量计进行校准时, 可按公式 (B.6) 计算出流量装置第 i 个点的第 j 次流出系数 C_{ij} 与可膨胀系数 ε_{ij} 的乘积:

$$C_{ij}\varepsilon_{ij} = \frac{4(q_{ms})_{ij}\sqrt{(1-\beta^4)}}{\pi(D^2-d^2)\sqrt{2\rho_n\frac{T_nP_{ij}}{P_nT_{ij}}\Delta p_{ij}}} \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

式中:

$(q_{ms})_{ij}$ ——第 i 个流量点第 j 次的标准质量流量, 单位为千克每小时 (kg/h);

ρ_n ——标准参比条件的介质密度, 单位为千克每立方米 (kg/m^3), 空气标况密度为 $\rho_n = 1.2041 \text{ kg/m}^3$;

T_n ——第 i 个流量点第 j 次的介质工况下温度, 单位为开尔文 (K);

Δp_{ij} ——第 i 个流量点第 j 次的流量计前后取压孔的差压, 单位为帕斯卡 (Pa);

P_{ij} ——第 i 个流量点第 j 次的流量计上游压力, 单位为帕斯卡 (Pa);

T_{ij} ——第 i 个流量点第 j 次的流量计下游温度, 单位为开尔文 (K)。

B.2.3.3 按公式 (B.7) 计算出第 i 个检定点实测流出系数与膨胀因子乘积的平均值 $C_i \varepsilon_i$ 。

$$C_i \varepsilon_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} \varepsilon_{ij} / n \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

式中:

n ——检定次数。

B.2.3.4 根据可膨胀系数 ε 的经验公式 [见公式 (B.2)] 可以推导出 $C\varepsilon$ 按公式 (B.8) 计算得到:

$$C_i \varepsilon_i = C_i - C_i A \frac{\Delta p_i}{\kappa P_i} \quad \dots\dots\dots (B.8)$$

B.2.3.5 按公式 (B.9) 计算出第 i 个检定点差压的平均值 Δp_i :

$$\Delta p_i = \sum_{j=1}^n \Delta p_{ij} / n \quad \dots\dots\dots (B.9)$$

B.2.3.6 按公式 (B.10) 计算出第 i 个检定点的压力的平均值 P_i :

$$P_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} / n \quad \dots\dots\dots (B.10)$$

B.2.3.7 管径雷诺数 $Re_D \geq 10^5$, 流出系数计算。

在管径雷诺数 $Re_D \geq 10^5$ 时, C 近似为定值, 可知 $C\varepsilon$ 与 $\frac{\Delta p}{\kappa P}$ 成线性关系, 用最小二乘法线性拟合, $\overline{C_1 \varepsilon_1}$, $\overline{C_2 \varepsilon_2}$, $\dots$, $\overline{C_i \varepsilon_i}$ 和 $\frac{\Delta p_1}{\kappa P_1}$, $\frac{\Delta p_2}{\kappa P_2}$, $\dots$, $\frac{\Delta p_i}{\kappa P_i}$; 拟合出的常数项即为 C , 一次项系数即为 CA , 可以计算出 A 。

B.2.3.8 管径雷诺数 $Re_D < 10^5$, 流出系数计算。

将计算得到的 A 代入公式 (B.2) 计算出每个检定点的可膨胀系数 ε_i , 再按公式 (B.11), 可以求出管径雷诺数 $Re_D < 10^5$ 时各个流量点 (不少于 3 个) 的流出系数 C_i 。

$$C_i = \frac{\overline{C_i \varepsilon_i}}{\varepsilon_i} \quad \dots\dots\dots (B.11)$$

当低管径雷诺数的时候, 可以发现槽道式流量计的流出系数 C_i 与常数 C 有偏差, 这时就需要重新拟合流出系数。通过大量实验发低管径雷诺数时, 流出系数 C 和管径雷诺数 Re_D 存在公式 (B.12) 对数曲线关系:

$$C = a \ln(Re_D) + b \quad \dots\dots\dots (B.12)$$

C 和 $\ln(Re_D)$ 成线性关系, 其中 a 和 b 近似为定值。

在公式 (B.11) 中代入 C_i 和 Re_D , 计算得到参数 a 和 b , 用迭代法计算出低管径雷诺数拟合后的各个点的流出系数 C_i 。

附 录 C
(资料性附录)
流量计算和差压量程计算示例

C.1 天然气流量计算示例

C.1.1 已知条件

已知条件如下：

- a) 流量计内径： $D_{20}=100.33\text{mm}$ (20 号钢的新无缝钢管)。
- b) 纺锤体环形槽道处直径： $d_{20}=80.264\text{mm}$ (20 号钢)。
- c) 气流常用温度： $t_f=15^\circ\text{C}$ ，温度测量 A 级铂电阻，经法定计量检定机构检定合格，测量范围为 $-10^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 。
- d) 气流常用差压： $\Delta p=12500\text{Pa}$ ，差压测量采用 0.05 级智能差压变送器，经法定计量检定机构检定合格，测量范围为 $0\text{Pa} \sim 25000\text{Pa}$ 。
- e) 气流常用表静压： $P_f=1.48\text{MPa}$ ，压力测量采用 0.05 级智能压力变送器，经法定计量检定机构检定合格，测量范围为 $0\text{MPa} \sim 2.5\text{MPa}$ 。
- f) 当地常用大气压： $P_a=0.0981\text{MPa}$ 。
- g) 流量计符合第 6 章有关技术规定，并按照 7.2 要求进行安装。
- h) 根据出厂校准结果，当管径雷诺数 $Re_D \geq 10^5$ 时，流量计流出系数 $C=0.8712$ ，可膨胀系数计算常数 $A=0.70196$ 。
- i) 天然气组分见表 C.1。

表 C.1 天然气的组分

组分	甲烷	乙烷	丙烷	正丁烷	异丁烷	正戊烷	异戊烷	己烷	氢气	氦气	氮气	二氧化碳
摩尔分数	0.8682	0.0625	0.0238	0.0072	0.0064	0.0025	0.0034	0.0027	0.0004	0.0004	0.0068	0.0157

C.1.2 辅助计算

C.1.2.1 流量计内径、纺锤体等直段直径、等效直径比、操作条件下绝对静压和热力学温度计算：

- a) 流量计表体材料为 20 号钢的新无缝钢管，查表 D.1 并用公式 (10) 计算操作条件管道内径，结果： $D=100.33 \times [1+1.116 \times 10^{-5} \times (15-20)]=100.32 \text{ (mm)}$ 。
- b) 纺锤体为 20 号钢的新无缝钢管，查表 D.1 并用公式 (9) 计算纺锤体等直段直径，结果为：

$$d=80.264 \times [1+1.116 \times 10^{-5} \times (15-20)]=80.26 \text{ (mm)}$$
- c) 用公式 (11) 计算等效直径比，结果为： $\beta=0.60$ 。
- d) 操作条件下天然气绝对静压： $P_f=1.48+0.0981=1.5781 \text{ (MPa)}$ 。
- e) 操作条件下天然气热力学温度： $T_f=15+273.15=288.15 \text{ (K)}$ 。

C.1.2.2 天然气的等熵指数计算：

- a) 通过查表 D.3 按插值计算得到 $P_f=1.5781\text{MPa}$ 和 $t_f=15^\circ\text{C}$ 对应的质量定压热容 c_p 和质量定容热容 c_v 值，结果为：

$$c_p=2.3241\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}),$$

$$c_v=1.7132\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})。$$

b) 按公式 (12) 计算等熵指数, 结果为: $\kappa=1.3565$ 。

C.1.2.3 天然气可膨胀系数计算: 按公式 (8) 计算可膨胀系数, 结果为: $\varepsilon=0.9959$ 。

C.1.2.4 天然气的动力黏度计算: 由表 D.2 查取, 按插值法计算得到 $P_f=1.5781\text{MPa}$ 和 $t_f=15^{\circ}\text{C}$ 下天然气动力黏度, 结果为: $\mu_f=0.01096\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

C.1.2.5 天然气标准参比条件下的物性参数计算: 按 GB/T 11062 规定的方法计算天然气的摩尔质量, 以及标准参比条件下的压缩因子、密度和质量高位发热量, 结果为:

$$M=19.19\text{kg}/\text{kmol}$$

$$Z_n=0.99733$$

$$\rho_n=0.79989\text{kg}/\text{m}^3$$

$$\hat{H}_s=51.87\text{MJ}/\text{kg}$$

C.1.2.6 天然气操作条件下的物性参数计算:

a) 按 GB/T 17747 规定的方法计算天然气操作条件下的压缩因子, 结果为: $Z_f=0.95558$ 。

b) 用公式 (14) 的方法计算天然气操作条件下的密度, 结果为: $\rho_f=13.228\text{kg}/\text{m}^3$ 。

C.1.3 质量流量计算

C.1.3.1 质量流量计算用上述已知和计算的数据进行迭代计算。

C.1.3.2 C 取 1, 用公式 (3) 计算流量计的理论质量流量, 结果为: $q_{mD}=1.746965\text{kg}/\text{s}$ 。

C.1.3.3 用公式 (13) 计算流量计上游管径雷诺数, 结果为: $Re_D=2017854$ 。

C.1.3.4 利用管径雷诺数插值计算流出系数, 结果为: $C_0=0.8712$ 。

C.1.3.5 第一次迭代:

a) 用公式 (3) 中的理论质量流量计算质量流量, 结果为: $q_{m1}=0.8712\times 1.746965/1=1.521956$ (kg/s)。

b) 用公式 (13) 计算流量计上游管径雷诺数, 结果为: $Re_D=1757954$ 。

c) 利用管径雷诺数插值计算流出系数, 结果为: $C_1=0.8712$ 。

d) 比较前后 2 次流出系数, 结果为:

$$\left| \frac{C_0 - C_1}{C_1} \right| = 0 < 1 \times 10^{-5}$$

C.1.3.6 前后 2 次流出系数相差小于 1×10^{-5} , 迭代计算结束, 质量流量为: $q_m=1.5219\text{kg}/\text{s}$ 。

C.1.3.7 天然气体积流量计算:

a) 用公式 (5) 计算流量计标准参比条件下的体积流量, 结果为: $q_{vn}=6849.5\text{m}^3/\text{h}$ 。

b) 用公式 (4) 计算流量计操作条件下的体积流量, 结果为: $q_{vf}=414.18\text{m}^3/\text{h}$ 。

C.1.3.8 天然气能量流量计算:

用公式 (6) 计算天然气用质量流量计量时在标准参比条件下的能量流量, 结果为:

$$q_E=1.5219 \times 51.87 \times 3600=284187 \text{ (MJ/h)}$$

C.1.4 不确定度评估

C.1.4.1 质量流量测量的不确定度评估

C.1.4.1.1 修正系数 (流出系数 C 和可膨胀系数计算常数 A) 的相对标准不确定度:

a) 由校准装置的相对扩展不确定度计算相对标准不确定度, 结果为:

$$u_r(s) = U_r(s) / 2 = 0.33\% / 2 = 0.165\%$$

b) 由校准结果重复性给出的不确定度, 结果为: $u(E_r) = 0.059\%$ 。

C.1.4.1.2 由已知的压力、差压和等熵指数数据, 计算可膨胀性系数相对标准不确定度, 结果为:

$$u_r(\varepsilon) = 12500 / (1.5781 \times 10^6) / 1.3565\% = 0.0058\%$$

C.1.4.1.3 流量计经过校准, 表体内径和纺锤体等直段直径测量不确定度已经纳入校准系数不确定度中, 可以忽略, 即: $u_r(D) = 0$, $u_r(d) = 0$ 。

C.1.4.1.4 差压测量采用 0.05 级智能压力变送器, 检定合格, 用公式 (23) 计算其相对标准不确定度, 结果为: $u_r(\Delta p) = 0.05\% / \sqrt{3} = 0.029\%$ 。

C.1.4.1.5 操作条件下天然气密度的相对标准不确定度:

a) 天然气摩尔质量的相对标准不确定度取: $u_r(M) = 0.15\%$ 。

b) 操作条件下天然气压缩因子的相对标准扩展不确定度取: $u_r(Z_f) = 0.1\%$ 。

c) 温度测量采用为 A 级铂电阻, 检定合格, 按公式 (18) 计算其相对标准不确定度, 结果为:

$$u_r(T_f) = (0.15 + 0.002 \times 15) / \sqrt{3} / 288.15 \times 323.15 / 288.15 = 0.040\%$$

d) 压力测量采用 0.05 级智能压力变送器, 检定合格, 用公式 (23) 的计算其相对标准不确定度, 结果为: $u_r(P_f) = 0.05\% / \sqrt{3} = 0.029\%$ 。

e) 把上述相应数据代入公式 (17), 计算操作条件下天然气密度相对标准不确定度, 结果为: $u_r(\rho_1) = 0.188\%$ 。

C.1.4.1.6 把上述相应数据代入公式 (15), 计算天然气质量流量相对标准不确定度, 结果为:

$$u_r(q_m) = \sqrt{(0.165^2 + 0.059^2 + 0.0058^2 + 0.029^2 / 4 + 0.188^2 / 4)} = 0.199\%$$

C.1.4.1.7 天然气质量流量相对扩展不确定度, 结果为:

$$U_r(q_m) = 2 \times 0.199\% = 0.398\% = 0.40\% \text{ (包含概率 95\%)}$$

C.1.4.2 标准参比条件下体积流量测量的不确定度评估

C.1.4.2.1 标准参比条件下的天然气密度相对标准不确定度取: $u_r(\rho_n) = 0.15\%$ 。

C.1.4.2.2 把上述相应数据代入公式 (25) 和公式 (26), 计算标准参比条件下体积流量的相对扩展不确定度, 结果为: $U_r(q_{vn}) = 0.50\%$ (包含概率 95%)。

C.1.4.3 标准参比条件下能量流量测量的不确定度评估

C.1.4.3.1 天然气标准参比条件下高位发热量相对标准不确定度取: $u_r(\hat{H}_s) = 0.025\%$ 。

C.1.4.3.2 把上述相应数据代入公式 (27) 和公式 (28), 计算标准参比条件下能量流量计量的相对扩展不确定度, 结果为: $U_r(q_{vn}) = 0.40\%$ (包含概率 95%)。

C.2 差压量程设计计算实例

C.2.1 已知条件

已知条件如下:

a) 气流最大流量: $q_{vn, \max} = 8268 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

b) 气流最小流量: $q_{vn, \min} = 827 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

c) 其他条件同 C.1.1。

C.2.2 辅助计算

C.2.2.1 求质量流量

使用公式 (4) 把最大和最小标准参比条件下体积流量反换算成对应的质量流量, 结果为:

a) 气流最大流量: $q_{m,\max}=1.8372\text{kg/s}$ 。

b) 气流最小流量: $q_{m,\min}=0.18372\text{kg/s}$ 。

C.2.2.2 求管径雷诺数

使用公式 (13) 计算最大及最小质量流量对应的管径雷诺数, 结果为:

a) 气流最大流量: $Re_{D,\max}=2134303$ 。

b) 气流最小流量: $Re_{D,\min}=213430$ 。

C.2.2.3 气体物性参数计算

同 C.1.2。

C.2.3 迭代计算

C.2.3.1 最大流量差压计算

C.2.3.1.1 把最大质量流量计算对应的管径雷诺数代入出厂校准数据中插值计算出流出系数, 结果为: $C=0.8712$ 。

C.2.3.1.2 设可膨胀系数初值为: $\varepsilon=0.9960$ 。

C.2.3.1.3 把最大质量流量和上述计算数据代入公式 (3) 反向计算最大差压初值, 结果为: $\Delta p=18221.00\text{Pa}$ 。

C.2.3.1.4 第一次迭代:

a) 用公式 (B.2) 计算可膨胀系数, 结果为: $\varepsilon=0.994025$ 。

b) 再次计算最大差压, 结果为: $\Delta p=18293.48\text{Pa}$ 。

c) 比较前后 2 次最大差压, 结果为:

$$\left| \frac{\Delta p_0 - \Delta p_1}{\Delta p_1} \right| = 0.004 > 1 \times 10^{-3}$$

C.2.3.1.5 前后两次最大差压大于 10^{-3} , 进行第二次迭代:

a) 用公式 (B.2) 计算可膨胀系数, 结果为: $\varepsilon=0.994001$ 。

b) 再次计算最大差压, 结果为: $\Delta p=18294.36\text{Pa}$ 。

c) 比较前后 2 次最大差压, 结果为:

$$\left| \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\Delta p_2} \right| = 0.00005 < 1 \times 10^{-3}$$

C.2.3.1.6 前后 2 次最大差压相差小于 10^{-3} , 迭代结束, 最大差压为: $\Delta p_{\max}=18294.36\text{Pa}$ 。

C.2.3.2 最小流量差压计算

C.2.3.2.1 把最小质量流量计算对应的管径雷诺数代入出厂校准数据中插值计算出流出系数,

结果为： $C=0.8712$ 。

C.2.3.2.2 设可膨胀系数初值为： $\varepsilon=0.9960$ 。

C.2.3.2.3 把最小质量流量和上述计算数据代入公式（3）反向计算最小差压初值，结果为： $\Delta p=182.2100\text{Pa}$ 。

C.2.3.2.4 第一次迭代：

a) 用公式（B.2）计算可膨胀系数，结果为： $\varepsilon=0.999940$ 。

b) 再次计算最小差压，结果为： $\Delta p=180.7769\text{Pa}$ 。

c) 比较前后 2 次最小差压，结果为：

$$\left| \frac{\Delta p_0 - \Delta p_1}{\Delta p_1} \right| = 0.008 > 1 \times 10^{-3}$$

C.2.3.2.5 前后两次最小差压大于 1×10^{-3} ，进行第二次迭代：

a) 用公式（B.2）计算可膨胀系数，结果为： $\varepsilon=0.999941$ 。

b) 再次计算最小差压，结果为： $\Delta p=180.7766\text{Pa}$ 。

c) 比较前后 2 次最小差压，结果为：

$$\left| \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\Delta p_2} \right| = 0.000002 < 1 \times 10^{-3}$$

C.2.3.2.6 前后 2 次最小差压相差小于 1×10^{-3} ，迭代结束，最小差压为： $\Delta p_{\max}=180.78\text{Pa}$ 。

C.2.4 差压量程设计计算

差压量程设计计算如下：

a) 最大流量对应的差压为： $\Delta p_{\max}=18294.36\text{Pa}$ 。

b) 取整为： $\Delta p_{\max}=20000\text{Pa}$ 。

c) 差压仪表量程为： $0\text{Pa} \sim 20000\text{Pa}$ 。

附录 D
(资料性附录)
流量计算常用表

D.1 金属材料的线膨胀系数 λ 值表

表 D.1 用于计算在操作条件下的纺锤体等直段直径 d 和表体内径 D 。

表 D.1 金属材料 (20℃ ~ 100℃) 的线膨胀系数值表

材质	$\lambda, 10^{-6}\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	材质	$\lambda, 10^{-6}\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
A3 号钢、15 号钢	11.75	Cr6SiMo	11.50
10 号钢	11.60	2Cr12Ni1MoWV	10.80
20 号钢	11.16	1Cr18Ni9Ti	16.60
45 号钢	11.59	普通碳钢	10.60 ~ 12.20
1Cr13, 2Cr13	10.50	工业用铜	16.00 ~ 17.10
1Cr17	10.00	黄铜	17.80
12Cr1MoV	9.8 ~ 10.63	红铜	17.20

D.2 不同压力和温度下甲烷动力黏度 μ 值表

由于天然气中以含甲烷为主，甲烷的黏度基本表征了天然气的黏度，用它来计算管径雷诺数可以满足准确度要求，因此本标准推荐采用。不同压力 and 不同温度下甲烷的动力黏度值示于表 D.2，用于计算在操作条件下的天然气动力黏度 μ_f 。一般情况下允许采用 μ_f 等于 0.000011 Pa·s。必要时也可以运用有关资料实算相应操作条件下的动力黏度值。

表 D.2 不同压力和温度下甲烷动力黏度 μ 值表

P (绝压), MPa	$t, ^\circ\text{C}$							
	-15	0	15	30	45	60	75	90
	$\mu, 10^{-8}\text{Pa} \cdot \text{s}$							
0.10	976	1027	1071	1123	1167	1213	1260	1303
1.00	991	1040	1082	1135	1178	1224	1270	1312
2.00	1014	1063	1106	1153	1196	1239	1281	1323
3.00	1044	1091	1127	1174	1216	1257	1297	1338
4.00	1073	1118	1149	1195	1236	1275	1313	1352
5.00	1114	1151	1180	1224	1261	1297	1333	1372
6.00	1156	1185	1211	1253	1287	1320	1352	1391
7.00	1207	1230	1250	1289	1318	1346	1374	1412
8.00	1261	1276	1289	1324	1350	1373	1396	1432
9.00	1331	1331	1335	1366	1385	1403	1424	1456
10.00	1405	1389	1383	1409	1421	1435	1451	1482

D.3 不同压力和温度下甲烷 c_p 及 c_v 值表

在天然气流量计量中,天然气以含甲烷为主,甲烷的比热容基本表征了天然气的比热容,用甲烷的比热容比来代替天然气的等熵指数可以满足准确度要求。不同压力 and 不同温度下甲烷的比热容值示于表 D.3,根据在节流装置处天然气的操作条件查出相应条件的甲烷比热容值,使用公式(12)即可算出甲烷在该条件下的比热容比,用以作为天然气在该操作条件下的等熵指数。一般情况下允许采用 $\kappa=1.30$,必要时也可以运用有关资料实算天然气在操作条件下的等熵指数。

表 D.3 不同压力和温度下甲烷 c_p 及 c_v 值表

P (绝压), MPa		$t, ^\circ\text{C}$							
		-20	-10	0	10	20	30	40	50
		$c, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$							
0.10	c_p	2.064	2.011	2.152	2.194	2.231	2.273	2.315	2.357
	c_v	1.537	1.583	1.624	1.666	1.704	1.746	1.788	1.825
1.00	c_p	2.147	2.184	2.222	2.260	2.298	2.335	2.369	2.403
	c_v	1.549	1.595	1.641	1.683	1.725	1.771	1.804	1.842
2.00	c_p	2.242	2.267	2.305	2.338	2.376	2.406	2.435	2.460
	c_v	1.549	1.595	1.649	1.695	1.745	1.787	1.825	1.859
3.00	c_p	2.357	2.366	2.391	2.421	2.455	2.480	2.501	2.518
	c_v	1.549	1.599	1.662	1.712	1.766	1.808	1.842	1.871
4.00	c_p	2.492	2.481	2.486	2.507	2.533	2.550	2.563	2.576
	c_v	1.581	1.623	1.662	1.716	1.775	1.817	1.854	1.887
5.00	c_p	2.664	2.604	2.593	2.606	2.615	2.624	2.629	2.638
	c_v	1.614	1.632	1.678	1.732	1.783	1.821	1.859	1.892
6.00	c_p	2.868	2.728	2.696	2.696	2.696	2.695	2.694	2.692
	c_v	1.666	1.644	1.687	1.753	1.803	1.841	1.871	1.900
7.00	c_p	3.311	3.001	2.906	2.872	2.849	2.834	2.814	2.803
	c_v	1.769	1.645	1.672	1.735	1.785	1.831	1.864	1.901
8.00	c_p	3.485	3.128	3.005	2.956	2.924	2.900	2.875	2.859
	c_v	1.746	1.619	1.648	1.722	1.784	1.833	1.871	1.905
9.00	c_p	3.633	3.236	3.092	3.034	2.994	2.954	2.932	2.904
	c_v	1.708	1.594	1.627	1.710	1.780	1.834	1.875	1.912
10.00	c_p	3.778	3.347	3.179	3.109	3.060	3.018	2.986	2.953
	c_v	1.671	1.566	1.603	1.697	1.779	1.837	1.883	1.917

附 录 E
(资料性附录)
流量计算机基本技术要求

E.1 流量计算机运用的一般原则

- E.1.1** 当采用流量计算机计算天然气流量时,其数学模型应符合第8章规定计算瞬时流量和累积流量,数据有效位数由计算机本身确定,但不低于表3的规定。流量计算机应能可靠、连续地运行。
- E.1.2** 在正常供气情况下清洗、检修流量计或调校仪表时,流量计算机应具有流量自动累积功能。
- E.1.3** 流量计算机系统应具有所有计量参数和历史事件的记录功能。
- E.1.4** 流量计算机系统应具有参数设置、数据记录的安全保护功能。
- E.1.5** 流量计算机系统应具备通信功能。

E.2 流量计算机构成

- E.2.1** 流量计算机由信号转换和采集单元、流量计算和处理单元及输出单元构成。
- E.2.2** 流量计算机应能自动实时采集检测数据、自动实时处理数据、按本标准规定自动实时计算天然气流量并对流量数据自动进行累计归档。同时对装置设置的基本参数、检测数据、事件进行历史储存和管理。

E.3 流量计算机基本技术要求**E.3.1 处理器 / 存储器 :**

- a) 微处理器不低于16bit,建议选用32bit。
- b) 程序存储器容量应满足程序需求。
- c) 存储器容量满足数据保存需求。
- d) 支持浮点数或双浮点数运算。
- e) 内置电池至少满足1个月的数据保存需求。

E.3.2 时钟 :

- a) 内置可调整石英时钟。
- b) 可显示出年/月/日/时/分/秒。
- c) 时钟精度不低于0.1s/24h。
- d) 允许用户设定日流量时间界限。

E.3.3 自诊断 :

- a) 提供硬件自诊断,包括对处理器、存储器、电源、输入/输出接口、通信接口的诊断测试。
- b) 提供软件自诊断,包括对流量计算程序、设定参数、输入/输出参数的诊断测试。

E.3.4 供电 :支持24V(DC)或220V(AC)通过UPS供电。**E.3.5 系统安全性 :**

- a) 流量计算程序应采用工厂固化或加密保护,不允许用户修改。
- b) 所有输入/输出通道接口、通信接口与外部设备间及各通道间和通道与内部总线间均需采用有效的隔离防护措施。
- c) 流量计算机需设有操作权限限制,可通过密匙、分级密码进行保护,必要时需采用封印进行保护。

d) 当流量计算机安装在危险场所,应符合 GB 3836.1 的要求。

E.3.6 操作、显示:

- a) 流量计算机面板应设有操作键盘,但使用该键盘不能修改程序。
- b) 流量计算机面板设有 LCD 或 LED 显示窗口,可以显示流量计算机系统基础参数设置、测量过程参数、系统诊断报警信息及有关提示信息等。

E.3.7 输入/输出信号:

- a) 支持 4mA ~ 20mA、1V ~ 5V 模拟信号输入, Hart 信号输入, RTD 信号输入; A/D 转换分辨率不低于 16bit。
- b) 支持数字信号输入和输出,包括但不限于 RS-485、RS-232、以太网等。
- c) 支持 4mA ~ 20mA 模拟信号输出, D/A 转换分辨率不低于 12bit。
- d) 支持开关量输出。
- e) 自动或手动输入天然气气质和物性数据、标准参比条件、压缩因子计算方法选择、表体内径、环形槽道等效面积圆孔直径(其计算公式为 $\sqrt{D^2 - d^2}$)、仪表量程、报警限设置、时钟数据及通信参数等。
- f) 显示和输出实时和历史测量数据、流量计算和累计数据、当前和历史基础参数、事件记录、报警信息及必要的中间计算数据等。

E.3.8 通信接口:至少提供 4 个通信接口,分别用于组态、数据传输、打印,以及与在线色谱仪通信。

E.3.9 平均无故障时间 (MTBF):应不小于 100000h。

E.3.10 电磁干扰:电磁性能应符合 GB/T 18603—2014 相关要求。

E.3.11 环境条件:

- a) 温度: 0℃ ~ 40℃ (贮存温度 -20℃ ~ 50℃)。
- b) 湿度: 5% ~ 85%。

E.3.12 数据采集、处理周期:

- a) 数据采集周期应不超过 1s。
- b) 数据处理、流量计算周期不超过 5s。

E.3.13 流量计算功能:

- a) 体积流量:支持在操作条件下的瞬时体积流量计算和在标准参比条件下的瞬时体积流量计算及各自体流量的累计计算。
- b) 质量流量:支持瞬时质量流量计算及质量流量累计计算。
- c) 能量流量:支持在标准参比条件下的瞬时能量流量计算及能量流量累计计算。
- d) 支持小信号切除功能。必要时,通过设定最小差压值,达到切除干扰的目的。
- e) 支持迭代计算参数功能。

E.3.14 流量数据存储:

- a) 支持体积流量、质量流量、能量流量和各自累计量的数据存储。
- b) 至少分别提供上述 3 种流量的小时、日流量累计值存储。
- c) 至少存储前一小时每分钟、前一天每小时、前 35 天每天的测量数据。
- d) 若有必要可要求提供存储 7 ~ 35 天的小时、日归档测量参数值。

E.3.15 报警:

- a) 至少提供流量计算机系统故障报警、输入信号故障报警、测量及内部参数超限报警。
- b) 流量计算机报警时,需提供声音和光警示信号。
- c) 流量计算机内部需对产生的报警按照时间顺序自动进行记录存储,记录应包括报警状态、产

生的时间、确认的时间、报警描述等信息。

E.3.16 事件：

- a) 按照时间顺序自动记录各种报警和任何一次参数修改等事件。
- b) 记录应包括事件产生的时间、事件描述等信息。
- c) 所有记录均不可修改、删除，存储器满后自动溢出。

E.3.17 通道校准：

- a) 所有模拟输入通道均支持校准功能。
- b) 校准及相关设置应有权限限制。

参 考 文 献

- [1] GB/T 2624.2—2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第2部分：孔板
- [2] GB/T 4208 外壳防护等级（IP 代码）
- [3] GB/T 28848—2012 智能气体流量计
- [4] GB/T 34166—2017 用标准喷嘴流量计测量天然气流量
- [5] JJF 1004 流量计量名词术语及定义
- [6] JJG 640 差压式流量计检定规程
- [7] ASME PTC 19.3 TW : 2016 (2010) 温度计插孔测试规范
-

中华人民共和国
石油天然气行业标准
用槽道式流量计测量天然气流量
SY/T 7551—2019

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京中石油彩色印刷有限责任公司排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

880×1230 毫米 16 开本 2.5 印张 70 千字 印 1—300
2019 年 11 月北京第 1 版 2019 年 11 月北京第 1 次印刷
书号：155021·8005 定价：48.00 元
版权专有 不得翻印