

# 流出系数和可膨胀性系数对差压式 流量计计量影响的分析与研究

周文辉,冯 鑫

(河南省计量测试科学研究院 流量计量技术研究所,河南 郑州 450008)

**摘要:**差压式流量计在计量天然气输送管道的流量时,流出系数  $C$  因节流装置磨损、管道内杂质堆积改变流态等原因偏离标准值,影响计量精准性;可膨胀性系数  $\varepsilon$  受输送中压力与温度频繁变化、天然气成分波动等问题,进而使计量结果不准。基于此,该研究分析了这两个系数对差压式流量计计量结果的影响,并探讨了减少计量误差的方法。该研究以标准孔板为节流件的差压式流量计的测量原理及其使用极限条件为基础,以某热力公司差压式流量计计量过热蒸汽的节流装置设计为例,按照 JJG1003—2016 检定规程,在考虑系数随温压改变的情况下获取实验数据。通过实验得出以下结论:当压力浮动 17%、温度浮动 9% 时,流出系数最大变化幅度为 0.07%,可膨胀性系数最大变化幅度为 0.9%。在不同的流量信号和补偿信号下,流出系数改变与不变时,仪表示值会存在不同的误差。

**关键词:**差压式流量计;流出系数;可膨胀性系数;流量积算仪;数学模型

中图分类号:TM614

文章编号:1000-0682(2025)02-0117-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.02.021

## Analysis and study on the effects of outflow coefficient and scalability coefficient on differential pressure flow meter measurement

ZHOU Wenhui, FENG Xin

(Institute Offlow Metering Technology, Henan Institute of Metrology, Henan Zhengzhou 450008, China)

**Abstract:** When measuring the flow rate of natural gas transmission pipelines using differential pressure flow meters, the outflow coefficient  $C$  deviates from the standard value due to wear of throttling devices, accumulation of impurities in the pipeline, and changes in flow state, which affects the accuracy of measurement. The coefficient of expandability  $\varepsilon$  is affected by frequent changes in pressure and temperature during transportation, as well as fluctuations in natural gas composition, which can lead to inaccurate measurement results. Based on this, this study analyzed the impact of these two coefficients on the measurement results of differential pressure flow meters and explored methods to reduce measurement errors. This study is based on the measurement principle and usage limit conditions of a differential pressure flowmeter with a standard orifice plate as the throttling element. Taking the throttling device design of a differential pressure flowmeter for measuring superheated steam in a certain thermal company as an example, experimental data was obtained according to the JJG1003—2016 calibration regulation, considering the coefficient changing with temperature and pressure. The following conclusion was drawn through experiments: when the pressure fluctuates by 17% and the temperature fluctuates by 9%, the maximum change in outflow coefficient is 0.07%, and the maximum change in expansion coefficient is 0.9%. When the outflow coefficient changes and remains constant under different flow signals and compensation signals, there will be different errors in the instrument readings.

**Keywords:** differential pressure flowmeter; outflow coefficient; coefficient of expandability; flow integrator; mathematical model

收稿日期:2024-12-03

第一作者:周文辉(1978—),男,河南郑州人,硕士,高级工程师,主要研究方向为流量计量。

## 0 引言

在众多流体流量监测的工业应用及能源评估场合,压差式流量仪表因设计直观、信赖度高、通用性强而备受推崇。其工作原理依据流体动力学的伯努利定律,具体是通过捕捉流体穿越节流部件前后的压力变动来间接计算出流量数值。但实际流量计量受多种因素影响,准确性面临挑战<sup>[1]</sup>。流出系数反映节流装置几何形状、流体粘性和流动状态等对流量测量的综合影响,是联系实际流量与理论流量的重要纽带,其数值准确性影响计量精确性。各类节流元件,例如孔板、喷嘴、以及文氏管等,均展现出独特的流出效率特性,而这些特性又会依据雷诺数范围的不同以及管道尺寸的多样条件产生相应的变动。压力变化会使密度改变,影响测量结果,流出系数可修正这种偏差,准确确定它对提高气体流量计量准确性很关键<sup>[2-3]</sup>。为此,该文通过研究流出系数和可膨胀性系数对差压式流量计计量的影响,旨在更好地理解和控制这些关键参数对流量测量精度的影响,通过采用更精确的数学模型和校正方法,来适应实际运行工况与设计工况之间的偏差,以此保障流量计计量结果的准确性和可靠性。

## 1 差压式流量计的工作原理与测量准确性分析

### 1.1 差压式流量计的测量原理

差压式流量计是基于能量守恒定理(伯努里方程)和流动连续性方程来测量流量的。流体穿越管道节流元件时,节流区域流速加快,伴随静压降低,形成差压。据此,差压成为衡量流体流量的重要依据。差压流量计由两部分构成:一是初级感应部件(如节流元件),负责产生差压;二是次级转换装置(含差压转换与流量计算仪表),负责将差压信号转换为流量数据。结合流体的已知特性(密度等)和节流元件及管道的几何特性(节流孔径、管道规格等),通过测量节流元件前后的差压,即可精确计算出流体的质量流量。在测量过程中,流出系数  $C$  和可膨胀性系数  $\varepsilon$  是影响测量准确性的关键参数。流出系数  $C$  是表征节流装置流量特性的一个统计量,而可膨胀性系数  $\varepsilon$  则与流体的可压缩性有关。这两个参数与设计工况的偏离会对测量结果产生影响<sup>[4]</sup>。

假设一个未经校准的节流设备与已全面测试并校准的节流设备在几何形态及动力学行为上保持一

致,也就是说,它们均满足 GB2624(或 ISO5167)标准的规定,那么在标准所允许的不确定度范围内,质量流量量( $q_m$ )与差压之间的关联界定,如下方法:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P \times \rho_1} \quad (1)$$

式中: $C$  为流出系数,无量纲; $d$  为节流装置作业时的孔径尺寸; $\beta$  为直径比率( $d/D$ ),无量纲,其中  $D$  管道作业直径; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  为节流前后的流体膨胀系数(无量纲);对不可压缩性流体: $\varepsilon$  值为 1;对可压缩性流体: $\varepsilon$  值小于 1; $\rho_1, \rho_2$  为节流前后流体在工作状态下的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $q_m$  为质量流量,  $\text{kg/s}$ ;  $\Delta P$  为节流前后的压力差异值,  $\text{Pa}$ <sup>[5]</sup>。

在此情况下,  $d, D, \rho, \Delta P$  均为通过实验获得的测量值。只要  $d$  与  $D$  的加工制造及安装流程遵循规范标准,其精确度即可得到保障; $\rho$  通常可以通过温度、压力及成分等参数的运算得出;至于  $\Delta P$ ,选择高精度差压变送器,并确保取压孔及引压管线的制造、安装及使用无误,同样能确保其精确度。然而,膨胀系数  $\varepsilon$  与流出系数  $C$  属于统计量,无法直接测量<sup>[6-7]</sup>。它们与设计工况的偏差,有的可以量化估算,有的则只能进行定性评估。

### 1.2 差压式流量计适用范围

针对采用标准孔板作为节流组件的差压流量计,在不同取压操作下所适用的极限条件,涵盖了诸如开孔直径、管道尺寸、直径比率以及雷诺数等关键参数的界定范围。这些界定条件旨在确保流量计的测量精度及稳定性。如表 1 所示。

表 1 标准孔板使用的极限条件

项目	描述/条件
取压方式	角接取压、法兰取压、 $D - D/2$ 取压
开孔直径( $d$ )	对于所有取压方式, $d \geq 12.5 \text{ mm}$
管道直径( $D$ )	$50 \text{ mm} \leq D \leq 1000 \text{ mm}$
直径比( $\beta, d/D$ )	$0.2 \leq \beta \leq 0.75$
雷诺数( $ReD$ )	当 $ReD \geq 5000$ , 用于 $0.20 \leq \beta \leq 0.45$ $ReD \geq 10\,000$ , 用于 $\beta > 0.45$ $ReD \geq 1260\beta^2 D$

针对孔板的前端管道,其表面的相对粗糙程度所允许的最大值,如表 2 所示。

其中,等效绝对粗糙度的量化指标为  $K$  值,其单位采用长度来衡量。该指标受管壁起伏高度、分布模式、尖锐程度以及管壁的其他粗糙特征等因素影响。为了确定最优的  $K$  值,需在特定管段上执行全量程的压力降测试。

表 2 孔板上游管道的相对粗糙度上限值

$\beta$	$\leq 0.3$	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.45	0.50	0.60	0.75
$10^4 K/D$	25.0	18.1	12.9	10.0	8.3	7.1	5.6	4.9	4.2	4.0

### 1.3 热膨胀系数与流出系数的影响

差压流量计中的标准孔板,其核心要素包括流出率因子与膨胀性因数,这两者的精确估算对于保障流量测量的精确度极为关键。流出率因子受孔板构造、流体的物理特性及流动状况等多种要素的综合作用,而膨胀性因数则主要表征了流体流经节流装置时的压缩性能<sup>[8-9]</sup>。在计算这些系数时,需要充分考虑孔板的取压方式、开孔直径与管道内径的比值以及雷诺数等因素。通过准确计算这些系数,可以进一步提高差压式流量计的测量精度和可靠性<sup>[10]</sup>。

#### 1.3.1 流出系数

流出系数计算,如下方法:

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5}(10^6/R_{ed})^{0.75} + 0.090L_1\beta^4(1-\beta^4)^{-1} - 0.033L'_2(\text{或 } L_2)\beta^3 \quad (2)$$

当  $L_1 \geq \frac{0.0390}{0.0900} (=0.4333)$  时,  $\beta^4(1-\beta^4)^{-1}$  的系数应使用 0.0390。

式中:  $L_1$  为孔板上游边缘至上游压力取点位置,其距离与管道直径之比;  $L_2$  为孔板上游边缘至下游压力取点位置,这段距离与管道直径的商;  $L'_2$  为孔板下游边缘至下游压力取点,这段距离除以管道直径得出的结果。

对于不同取压方式,系数取值如下:

(1) 角接取压方式:  $L_1 = L'_2 = 0$ ;

(2)  $D-D/2$  取压:  $L_1 = 1, L_2 = 0.47$ , 且由于  $L_1$  总大于 0.4333, 因此对  $\beta^4(1-\beta^4)^{-1}$  的系数用 0.0390。

(3) 法兰取压: 对于  $L_1$  与  $L_2$ , 其值均设定为 25.4 mm 除以  $D$  ( $D$  的单位为 mm)。当  $D$  小于等于 58.62 mm 时,  $L_1$  的最小值需达到 0.4333; 在此情况下, 针对  $\beta^4(1-\beta^4)^{-1}$  的系数, 采用 0.0390 进行运算。

#### 1.3.2 可膨胀性系数

针对前述三种孔板取压方式, 流体膨胀系数的计算, 如下方法:

$$\varepsilon_1 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta P}{kP_1} \quad (3)$$

其中:  $\varepsilon_1$  为流体的可膨胀特性系数;  $\beta$  为孔板开孔直径相对于管道内径的比率。

此公式之应用范围仅限于前文所述之极限界限, 且需满足条件  $P_2$  与  $P_1$  之比不小于 0.75。该公式源自空气、水蒸气及天然气之实验数据, 对于已知

熵指数的其他气体及蒸汽, 同样具有参考意义。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验设计

实验采用角接取压标准孔板作为节流装置, 设计了从低到高多个流量点进行测量。同时, 考虑了介质温度、压力的变化对流出系数  $C$  和可膨胀性系数  $\varepsilon$  的影响, 以及这些变化对流量计计量结果的潜在影响。

#### 2.1.1 介质温度压力偏离设计值

节流设备设计计算时, 所考虑的气体流量是在特定温压状况下的流量, 即预设运行条件下的流量。这些特定条件下, 介质的密度维持不变。但在实际运作过程中, 若介质的温度或压力与设计值有所偏差, 其密度将随之改变。从流量的计算公式中可以观察到, 介质密度的变动会直接影响流量数值的大小。此外, 介质压力和温度的变化还会导致其统计量 (如流出系数  $C$  和可膨胀性系数  $\varepsilon$ ) 的改变, 进而增加测量的不确定度。为了降低这种影响, 实际应用中通常会增加温压校正环节, 目前大部分流量积算仪都具备这一功能。

#### 2.1.2 实际运行流量值偏离设计流量值

为了消除流量系数  $C$  发生较大变化带来的影响, 积算仪内部通常会建立相应的数学模型。然而, 一些用于高精度测量场合的仪表可能并不具备这一功能, 会引入不可忽视的计量误差。

以下是根据某热力公司差压式流量计计量过热蒸汽使用的节流装置的设计计算书, 现以此设计为例, 深入解析实际流量偏离设计值时所产生的误差情况, 如表 3 所示。

表 3 设计计算书

节流件名称	角接取压标准孔板
最大流量	8000 kg/h
常用流量	4000 kg/h
最小流量	2000 kg/h
差压上限 ( $\Delta P_{\max}$ )	60 000 Pa
工作压力 (绝压)	1.3 MPa
工况密度 $\rho_1$	4.628 7 kg/m <sup>3</sup>
流体黏度 $\mu_1$	0.022 29 MPa·s
工作温度	350 °C
管道内径 $D20$	125 mm

续表 3

节流件名称	角接取压标准孔板
等熵指数 $\kappa$	1.291
管道线膨胀系数	$13.38 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$
节流件线膨胀系数	$17.5 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$
开孔直径比 $\beta$	0.609 31
流出系数 $C$	0.604 83
可膨胀性系数 $\varepsilon$	0.995 903
最大雷诺数 $ReD_{\max}$	1 011 031
常用雷诺数 $ReD_{\text{com}}$	505 516
最小雷诺数 $ReD_{\min}$	252 758
常用差压 $\Delta P_{\text{com}}$	15 000 Pa
最大压损 $\Delta\omega_{\max}$	36 631 Pa
流量不确定度 $\delta q/q$	0.958%
前直管段长度	2700 mm
后直管段长度	878 mm
20 ℃时节流件开孔直径 $d_{20}$	$76.061 \pm 0.04 \text{ mm}$

2.2 实验结果与分析

按照 JJG1003—2016《流量积算仪》检定规程,考虑流出系数  $C$  和可膨胀性系数  $\varepsilon$  随温度压力改变,如表 4 所示。

针对各流量点(单位:t/h),流出系数变动对仪表显示值造成的误差(误差 1),与流出系数保持恒定时的误差(误差 2),其变化情况已在图 1 中呈现。图表的横轴表示不同流量范围,由低至高;而纵轴则反映了误差百分比,即测量结果与真实数值之间的偏差程度。误差 1 和误差 2 随着流量点变化的趋势,如图 1 所示。

通过对比实验数据中的仪表示值、流出系数改变时的流量标准值和流出系数固定时的流量标准值,能够观察到实际运行流量值与设计流量值之间的偏差所引入的误差。

表 4 实验数据

流量信号 /kPa	补偿信号 1/MPa	补偿信 号 2/℃	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	流出系数	可膨胀 性系数	雷诺数	仪表示值 /(t/h)	流出系数 改变时的 流量标准 值/(t/h)	流出系数 固定时的 流量标准 值/(t/h)	误差 1 /%	误差 2 /%
15				0.604 830	0.995 903	505 517	4.00	4.000	4.000	0.00	0.00
30	1.2	350	4.628 7	0.604 512	0.991 806	711 594	5.68	5.630	5.675	0.62	0.06
45				0.604 363	0.987 709	867 713	6.93	6.866	6.928	0.80	0.02
60				0.604 270	0.983 613	997 639	8.00	7.894	8.000	1.33	0.00
60	1	350	3.901 9	0.604 327	0.980 633	913 294	7.35	7.227	7.345	1.54	0.06
	1.4		5.361 0	0.604 223	0.985 798	1 075 964	8.62	8.514	8.610	1.33	0.12
		320	4.887 3	0.604 253	0.983 613	1 024 404	8.23	8.103	8.220	1.59	0.12
60	1.2	370	4.472 7	0.604 280	0.983 612	981 147	7.87	7.767	7.864	1.29	0.08

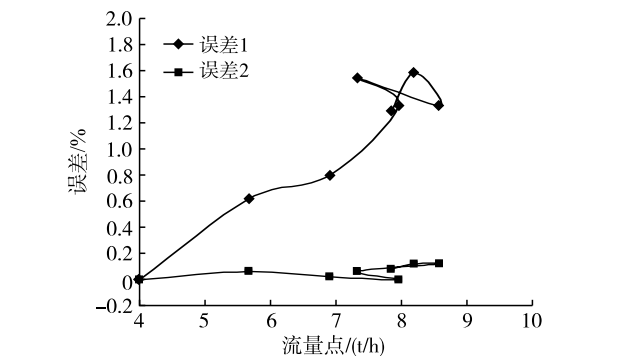


图 1 不同流量点下流出系数变化对仪表示值误差的影响图

(1) 流出系数的影响

随着流量点的增加,误差 1(流出系数改变时相对仪表示值的误差)逐渐增大,并在某个流量点达到峰值后略有下降,但仍保持在较高的水平。这表明流出系数的变化对测量误差产生了显著影响。误

差 2(流出系数不变时相对仪表示值的误差)的变化趋势相对平稳,虽然也随着流量点的增加而略有增大,但整体上增长幅度较小,且始终保持在较低的误差范围内。这说明在流出系数保持恒定时,仪器能够较为准确地反映流量的真实值。

(2) 可膨胀性系数的影响

实验中观察到,当压力浮动 17%,温度浮动 9% 时,可膨胀性系数最大变化为 0.9%。这一数据反映了雷诺数变化对可膨胀性系数的影响,进而影响了流量计的计量精度。

综上所述,该实验通过实际测量数据深入分析了流出系数  $C$  和可膨胀性系数  $\varepsilon$  对差压式流量计计量精度的影响。实验结果表明,这两个参数的变化是导致流量计计量误差的重要原因之一。所以,在流量计的构思设计、型号选择及实际运用阶段,必

须充分考量这两个参数的作用,并采取有效手段来降低误差,从而提升测量的准确性。

### 3 结论

该文从差压式流量计的测量原理及其使用极限条件入手,深入分析了流出系数  $C$  和可膨胀性系数  $\varepsilon$  对差压式流量计计量精度的影响。最后通过雷诺数随流量值变化而引起的流出系数和可膨胀性系数  $\varepsilon$  的变化,对实际测量结果造成的偏差。得出如下结论:

(1) 流出系数的变化对流量测量误差有显著影响,特别是在高流量点。这可能是由于流体在管道中的流动状态随着流量的增加而变得更加复杂,导致流出系数的变化对流量的测量精度产生了更大的影响。

(2) 在流出系数不变的情况下,仪表示值的准确性相对较为稳定,但仍存在一定的测量误差,这可能源于仪器本身的精度限制、环境因素的微小变化以及测量过程中的随机误差等因素。

(3) 对于准确度等级为 0.5 级的流量积算仪,采用简化的数学模型(如公式 4)通常能满足计量要求。但在少数准确度较高的场合,如果仍把流出系数  $C$  和可膨胀性系数  $\varepsilon$  视为常量,由此引入的计量误差及能耗是不能忽略的。因此,在这些场合下,应采用更精确的数学模型(如公式 1)进行计算。

(4) 雷诺数的变化会引起流出系数和可膨胀性系数的变化,这一点在实际应用中应被充分考虑和校正,以确保计量的准确性和可靠性。

(下转第 128 页)

## 2025 年主题征文活动通知

各位作者朋友们:

《工业仪表与自动化装置》期刊开展“2025 年主题征文活动”,积极宣传并报道国内外工业自动化、工业互联网、人工智能、工业物联网、智能制造、智慧能源、分布式能源、仪器仪表等行业的发展方向、新技术和新工艺、应用科研设计、信息与动态,探讨新的工业革命的突破点,搭建企业、高校、行业开展论坛交流平台。

### 一、征文主题

智能传感器/工业自动化系统/智能测控技术/仪器仪表与系统设计应用/人工智能

### 二、征文要求

1. 稿件选题应符合上述 5 项主题,力求新颖、有创新或独特视角,应具学术性、前瞻性、实用性和指导性。
2. 稿件请用 Word 排版。论文模板参考本刊官网提供的投稿模板。
3. 投稿方式:请登陆本刊刊官网 <http://yb-zdh.shaangu-group.com>,在“作者在线投稿”中进行注册并投稿。

### 三、征文展示

1. 稿件经审核,符合要求的论文将发表在本刊。
2. 征文活动结束后,将评选优质论文,获奖论文的作者将被邀请参加本刊相关活动,并进行表彰宣传。

### 四、联系方式

联系地址:陕西省西安市高新区沣惠南路 8 号

邮政编码:710075

联系电话:029-81871277

E-mail:gyybbjb@126.com

《工业仪表与自动化装置》编辑部

仍有其局限性。未来研究应聚焦于提升方法的环境适应性和鲁棒性,特别是在极端工况下的表现,通过持续的技术优化和算法改进,确保校准方法能够在更广泛的矿山环境中稳定、高效地运行,为矿山行业的智能化发展贡献更多力量。

#### 参考文献:

- [1] 王彦勇. 基于无线网络的煤矿通风机远程自动控制系统[J]. 煤炭技术, 2023, 42(09): 248 - 251.
- [2] 樊璐璐, 范鑫, 李安迪, 等. 基于专利大数据分析方法的锻压领域热点技术挖掘[J]. 锻压技术, 2023, 48(07): 7 - 12.
- [3] 周伟, 李刚, 贾敏涛, 等. 矿用局部通风机风量补给及测定组合装置研发及应用[J]. 金属矿山, 2023(07): 153 - 158.
- [4] 单泽彪, 于渤力, 徐再祥, 等. 基于二次相关的超声波风速风向测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(04): 322 - 329.
- [5] Ligeza P, Jamróz P. A hot - wire anemometer with automatically adjusted dynamic properties for wind energy spectrum analysis[J]. Energies, 2022, 15(13): 4618.
- [6] Seidl D T, Granzow B N. Calibration of elastoplastic constitutive model parameters from full - field data with automatic differentiation - based sensitivities[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2022, 123(1): 69 - 100.
- [7] 杨阳阳, 崔永俊, 侯钰龙. 基于时差法的高精度超声波风速风向测量系统[J]. 仪表技术与传感器, 2022(02): 79 - 83.
- [8] 程玉龙. 基于控制安全的东林煤矿主要通风机监控系统改造[J]. 煤矿安全, 2022, 53(11): 109 - 112 + 117.
- [9] 但强. 基于 STM32 的超声波风速低采样检测技术[J]. 仪表技术与传感器, 2023(05): 59 - 63 + 69.
- [10] 边攀, 梁彬, 黄建军, 等. RTDMiner: 基于数据挖掘的引用计数更新缺陷检测方法[J]. 软件学报, 2023, 34(10): 4724 - 4742.
- [11] 李建, 高云. 基于阶跃函数的光纤传感器超差校准方法仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(10): 307 - 311.
- [12] 尹春勇, 陈双双. 结合微聚类和主动学习的流分类方法[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(20): 254 - 265.
- [13] 孙亮, 孙珍平. 矿井大断面巷道风速分布规律及风量监测研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(04): 97 - 100.
- [14] 王斌, 魏成伟, 谢丽蓉, 等. 基于风速误差校正和 ALO - LSSVM 的风电功率预测[J]. 太阳能学报, 2022, 43(01): 58 - 63.
- [15] 郭对明, 李国清, 胡乃联, 等. 基于文本挖掘的矿山安全隐患大数据分析与可视化[J]. 工程科学学报, 2022, 44(03): 328 - 338.

(上接第 121 页)

#### 参考文献:

- [1] 刘扬. 差压式流量计精度范围分析及宽量程计量方法[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(4): 107 - 110.
- [2] 康勇, 李靖, 丁凌, 等. 基于介质可压缩性的涡街流量计仪表系数修正[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(02): 96 - 100 + 106.
- [3] 王国云, 李长俊, 贾文龙. 混氢天然气管道标准孔板流量计适应性研究[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(04): 101 - 106.
- [4] 宋述古, 刘伟光, 张强, 等. 孔口流量计正压测试夹具和可膨胀系数的研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(01): 19 - 27.
- [5] 郭素娜, 李光, 季增祺, 等. 基于 CFD 仿真的差压微小流量计设计[J]. 仪表技术与传感器, 2022(03): 45 - 49 + 56.
- [6] 赵笑寒, 王乃民, 刘东. 一种新式差压流量计的设计与应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2020(02): 52 - 55.
- [7] 郝彩哲, 宋晓明, 王东, 等. 对称多孔孔板差压式流量计计量性能试验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(05): 174 - 180.
- [8] 黄秀娟. 压差式流量计误差自动化修正算法研究[J]. 自动化仪表, 2024, 45(05): 45 - 49.
- [9] 余激滢, 裴祥翔, 李想, 等. U 型科里奥利质量流量计温度影响特性分析[J]. 仪表技术与传感器, 2024(02): 28 - 35.
- [10] 邹斌, 钟浩, 刘明, 等. 基于双锥流量计的气液两相流量测量方法研究[J]. 中国测试, 2023, 49(S2): 32 - 37.