Pure Mathematics 理论数学, 2024, 14(8), 187-195
Published Online August 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/pm
https://doi.org/10.12677/pm.2024.148317

Hans汉斯

天然气计量流量补偿系数研究

赵伟东[1]，方丽萍[1]，周　雄[1]，高春元[2]

[1]北部湾大学石油与化工学院，广西 钦州
[2]重庆科技大学石油与天然气工程学院，重庆

收稿日期：2024年7月25日；录用日期：2024年8月16日；发布日期：2024年8月23日

摘　要

随着天然气工业的不断发展，天然气的计量变得尤为重要，影响天然气计量的因素也复杂多样，其中孔板装卸对气体计量补偿的问题一直存在。实验结果表明天然气在管输过程中，由于设备的老化，管线的腐蚀以及管道内的杂质，都会污染孔板的表面，这使得孔板计量偏低，需要对孔板进行清洗，但卸下孔板时，不能停止供气，这一段时间流量无法计量，这将引起用户和企业的经济纠纷。因此本文通过理论分析、数字模拟和实验验证，详细探讨了在不同工况下的补偿系数计算方法及其应用效果。研究过程中不仅研究了温度、压力对流量计量的直接影响，还拟合出流量补偿系数ξ的计算公式，并在现场实验中验证。研究结果表明，通过合理的补偿系数计算和应用，可以显著提高天然气流量计的测量精度。这对于企业自身利益发展是具有重要指导意义。

关键词

天然气计量，数值模拟，补偿系数

Research on Compensation Coefficient for Natural Gas Measurement Flow

Weidong Zhao[1], Liping Fang[1], Xiong Zhou[1], Chunyuan Gao[2]

[1]College of Petroleum and Chemical Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou Guangxi
[2]College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jul. 25th, 2024; accepted: Aug. 16th, 2024; published: Aug. 23rd, 2024

Abstract

With the continuous development of the natural gas industry, the measurement of natural gas has

文章引用: 赵伟东, 方丽萍, 周雄, 高春元. 天然气计量流量补偿系数研究[J]. 理论数学, 2024, 14(8): 187-195.
DOI: 10.12677/pm.2024.148317

become particularly important, and the factors affecting natural gas measurement are complex and diverse. Among them, the problem of gas measurement compensation caused by orifice plate loading and unloading has always existed. The experimental results show that during the pipeline transportation of natural gas, equipment aging, pipeline corrosion, and impurities inside the pipeline can contaminate the surface of the orifice plate, resulting in low orifice plate measurement. It is necessary to clean the orifice plate, but the gas supply cannot be stopped when the orifice plate is removed. During this period, the flow rate cannot be measured, which will cause economic disputes between users and enterprises. Therefore, this article explores in detail the calculation methods and application effects of compensation coefficients under different working conditions through theoretical analysis, digital simulation, and experimental verification. During the research process, not only were the direct effects of temperature and pressure on flow measurement studied, but also a calculation formula for the flow compensation coefficient Zeta was fitted and verified in field experiments. The research results indicate that by calculating and applying reasonable compensation coefficients, the measurement accuracy of natural gas flow meters can be significantly improved. This has important guiding significance for the development of the company's own interests.

Keywords

Natural Gas Metering, Numerical Simulation, Compensation Coefficient

1. 引言

天然气在目前世界范围内能源市场占比不断快速攀升，根据统计 2020 年 2 月我国燃气产量首次达到 300 亿立方米，相较于 2019 年 296.7 亿立方米产量增加 3.3 亿立方米，增速大约为 1.11% [1] [2]，天然气已经发展成为目前我国重要能源之一。早在 70 年代[3]，欧美发达国家已经开始使用孔板流量计，到了 90 年代超声波流量计开始兴起，据统计，美国当时孔板流量计的使用率已经达到 80%以上。孔板流量计主要特征是结构简单，安装方便，使用期限长，价格低廉。但孔板流量计也存在的一些问题，主要包括压损大，现场安装条件要求高，孔板装卸时流量无法补偿等不足。

在孔板流量计正常工况下，天然气经过节流元件时，气体会在节流处形成一个局部气流收缩，促使气体流速增大，并在两个孔板前后之间产生较大压差，气流随节流速度的变化增大，孔板前后压差也随之变大，从而通过前后压差变化测量天然气[3]-[7]，但对于管道中没有安装节流器的元件就会产生较大压差，无法正常测量到的天然气。根据现场调研现场计量回路没有备用计量回路，因此需要对工作管道在清洗孔板期间引用一个数值大于 1 的气压系数，即孔板补偿系数，乘以平均瞬时天然气流量和平均时间来计算作为最终的平均气量补偿值，换言之，就是对孔板流量计在孔板清洗期间的未被计量的流量进行修正。然而，补偿系数具体取多大，一直以来备受学界争议[8]。补偿系数对流量影响不可忽视，这关系到天然气公司的利益和企业形象，因此，对补偿系数进行研究试验，确定其合理值是非常必要的。

2. 孔板流量计测量理论分析

流体经过孔板，产生节流效益，通过能量守恒和连续性方程为基础，根据输气管道气体流动基本方程式按 GB 50251-2015《输气管线工程设计》规范，公式如下：

$$q_v = 0.03848\left[\frac{\left(p_1^2 - p_2^2\right)D^5}{\lambda zdTL}\right]^{0.5} \tag{1}$$

或者

$$q_v = 0.03848\left\{\frac{\left[p_1^2 - p_2^2\left(1+\alpha\Delta h\right)\right]D^5}{\lambda zdTL\left[1+\frac{\alpha}{2L}\sum_{i=1}^{n}\left(h_i + h_{i-1}\right)L_i\right]}\right\}^{0.5} \tag{2}$$

以及

$$q_m = \frac{\pi}{4}\left[\frac{d\left(p_1^2 - p_2^2\right)D^5}{\lambda zTLR_a}\right]^{0.5} \tag{3}$$

或者

$$q_m = \frac{\pi}{4}\left\{\frac{d\left[p_1^2 - p_2^2\left(1+\alpha\Delta h\right)\right]D^5}{\lambda zdTR_a\left[1+\frac{\alpha}{2L}\sum_{i=1}^{n}\left(h_i + h_{i-1}\right)L_i\right]}\right\}^{0.5} \tag{4}$$

式中：q_v——输气管道体积流量，m^3/s；q_m——质量流量，kg/s；p_1——输气管道计算段的起点压力，Pa；p_2——输气管道计算的终点压力，Pa；D——管内径，m；λ——摩擦阻力系数；z——天然气的压缩因子；K_e——当量粗糙度，mm；d——天然气的相对密度；T——输气管道的平均温度，K；L——输气管道的计算长度，m；n——输气管道沿线的分段数；Δh——输气管道分段的终点与起点的高程，m；h_i——各分段终点的标高，m；h_{i-1}——各分段起点的标高，m；L_i——各分段的长度，m；R_a——空气气体常数；a——系数，l/m。

对于绝大多数管道流动气体，雷诺数在进入湍流区时，输气管线的雷诺数达到了 10^6~10^7。一般的干线的雷诺数在阻力平方区，不满负荷时在混合摩擦区，城市居民输气管道大多在水力光滑区。

2.1. 系数分析

1、流出系数 C

流出系数 C 用 Reader-Harris/Gallagher (1998)公式计算[9]：

$$\begin{aligned} C = {} & 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.261\beta^8 + 0.000521\left(\frac{10^5\beta}{Re_D}\right)^{0.7} + \left(0.0188 + 0.0063A\right)\beta^{3.5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.3} \\ & + \left(0.043 + 0.080e^{-10L_1} - 0.123e^{-7L_1}\right)\left(1 - 0.11A\right)\frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0.031\left(M_2' - 0.8M_2'^{1.1}\right)\beta^{1.3} \end{aligned} \tag{3}$$

式中：β——d/D，直径比；Re_D——雷诺数；L_1 ($=l_1/D$)——孔板上游端面到上游取压口的距离除以管道直径得出的商。

$$M_2' = \frac{2L_2'}{1-\beta} \tag{4}$$

$$A = \left(\frac{19000\beta}{Re_D}\right)^{0.8} \tag{5}$$

$L_1\ (=l_2'/D)$——孔板下游端面到下游取压口的距离除以管道直径得出的商。

流出系数 C 与 Re 成反比，Re 变大时 C 变小，反之亦然，因此流出系数不是一个定值。对于法兰取压和角接取压时，Re 分别取 10^6 和 10^5 以上。

2、可膨胀性(膨胀)系数 ε

对于实际取压口方式，计算膨胀系数的经验公式如下所示：

$$\varepsilon = 1-\left(0.351+0.256\beta^4+0.93\beta^8\right)\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/\kappa}\right] \tag{6}$$

ε 通过孔板密度的变化而改变，当天然气流量低于设计流量时，工作时的 ε 低于设计 ε，测量结果也随之变小，因此压力是对流量计量产生重要影响。

上式看出，上下游压差是测量的关键。压差越大，测量精度越高。但是流动压差影响整个管道的流量。即孔板安装和拆下后，流量有所变化，这也是需要补偿的原因。

2.2. 流体流动阻力与流量关系分析

孔板流量计可以视为节流元件，通过限制流量和降低压力的目的[10]。随着孔板越小，压差越大，对流动的影响也越大。

安装孔板流量计的整个管道单位重量流体能量损失

$$h_w = \sum h_f + \sum h_j \tag{7}$$

h_w——水头损失，量纲为长度；

$\sum h_f$ ——沿程阻力的总和；

$\sum h_j$ ——局部阻力的总和。

在整个流动过程中，天然气处于湍流状态，将孔板的局部阻力全部折算到沿程阻力上中，

$$h_f = \lambda \frac{L}{d}\frac{v^2}{2g} \tag{8}$$

管道内上下游压差即是流动阻力。即局部阻力加沿程阻力等于上下游压差。当孔板取消后，局部阻力消失。所有的上下游压差都提供为流动阻力。根据(7)式，流动阻力和流速(流量)平方成正比。由此可见，当孔板取下后，整个管道的流量有较大变化。

在湍流区计算摩阻系数中 Colebrok-White 摩擦阻力公式[11]可作为优选公式，该公式可用于整个湍流区，是目前应用精度最高的公式。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{K_e}{3.7D}+\frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}}\right) \tag{9}$$

当然，流量的变化会影响到流态和雷诺数 Re，反过来影响到流动阻力的变化，情况很复杂，具体还需要分析。湍流状态下，流量与流动阻力关系 1.5~1.7 次方关系。因此，取消孔板后，流量将增大。

3. 数值模拟结果分析

本文模拟计算选用最广泛使用的 k-ε模型[12]。该模型适用性广，具有较高的精度，是工程流场中最常用的模型。通过 FLUENT 建立模型，管径 DN100，运行天然气压力 1 MPa，由于模拟的限制，初步建立管长 50 m，在管子入口处 0.5 m 处插入孔板。选择孔板厚为 10 mm，开孔为 34 mm。如图 1、图 2 所示：

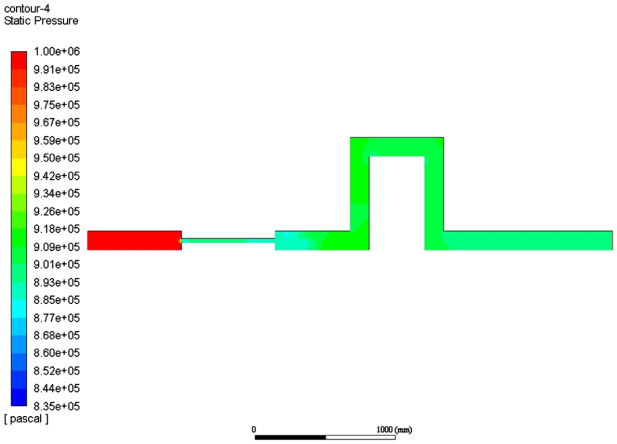

Figure 1. Pressure distribution diagram of non perforated plate
图 1. 无孔板压力分布图

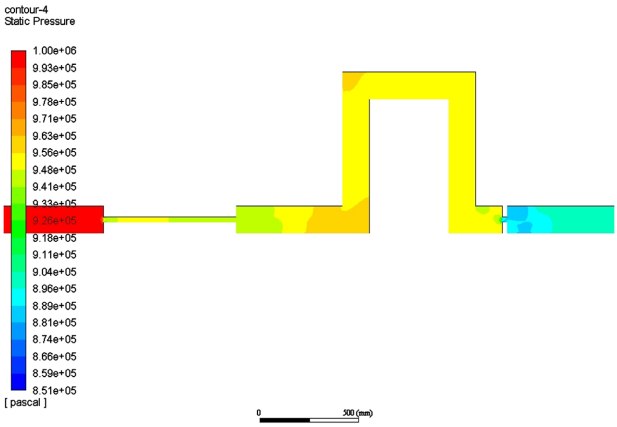

Figure 2. Pressure distribution diagram of perforated plate
图 2. 有孔板压力分布图

通过模拟可以看出，通过有孔板的时候，压力为 1.025 MPa，无孔时压力为 0.999 MPa，符合孔板流量计节流过程，并且与现场压力变化规律类似。

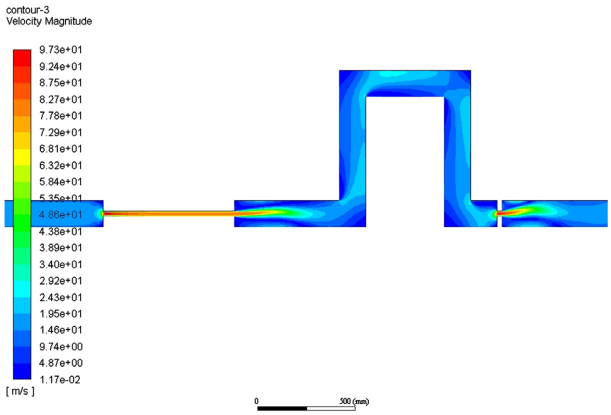

Figure 3. Velocity cloud map at perforated plate location
图 3. 有孔板处速度云图

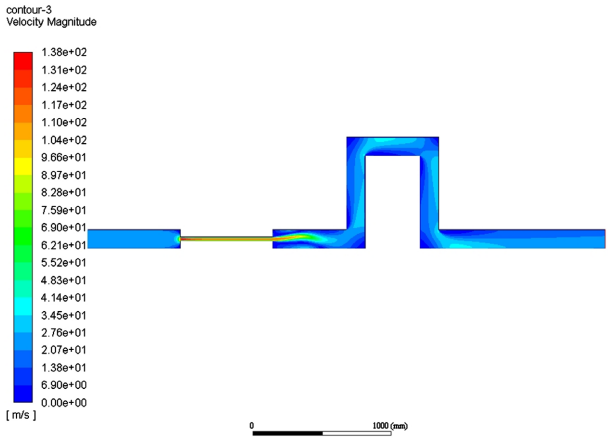

Figure 4. Velocity cloud map at non perforated plate location
图 4. 无孔板处速度云图

如图 3、图 4 所示，有孔板是管道流速为 97.258 m/s，无孔板时候，管内流速到达 138.015 m/s。模拟计算也清楚的显示，当孔板的存在与否，会对管道内流动有影响。

使用上述模拟计算结果，首先对流量修正系数 ζ 的计算公式进行拟合，并在现场实验中验证。通过模拟发现：ζ 是开孔直径比 β、孔板前后上下游压差变化ΔP 参量的函数。在上述模拟计算过程中，通过改变不同的雷诺数，得到孔板取下前后流量与流阻变化关系，并回归为下列计算公式：

$$\varsigma = \frac{0.4 - 0.017\beta^2 + 0.1536\beta^4}{0.4 - 0.017\beta'^2 + 0.1536\beta'^4}\sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta p'}} \tag{10}$$

式中 β——孔板清洗前，输气管道孔板流量计孔板开孔直径比；

β'——取下孔板，输气管道孔板流量计孔板开孔直径比(流量计阀座最小通孔直径与管道内径之比)；

ΔP——孔板清洗前，输气管道孔板流量计孔板前到管道出口(实际管道为用户入口)后压差，Pa；

$\Delta P'$——取下孔板，输气管道孔板流量计原来孔板前测量点到管道出口(实际管道为用户入口)后压差，Pa。

4. 补偿系数分析

4.1. 现场计量比对

为验证数学模型的准确性，选择下游超声流量计，对整个清洗过程中的气流瞬量进行实时测量，从而验证补偿数学模型的准确性。选择现场运行平稳，且处于上、下游紧邻安装的流量计做比对。上游为高级孔板阀，下游为超声波流量计比对计量装置，两台装置相邻不足 25 米，瞬量在 508,000 m^3/d 左右，通过计量比对，下游计量气量偏低稳定在 1.6%左右。通过观察上游孔板装置清洗过程中，下游用超声波装置瞬量的测量数据，来推算清洗补偿系数的取值范围(表 1)。

Table 1. Comparison of flow rates between orifice flowmeter and ultrasonic flowmeter
表 1. 孔板流量计与超声流量计流量对比

时间	09:30	09:35	09:38	09:41	09:44	09:47	09:50	平均值	实际系数
清洗前孔板瞬时流量	597347	595979	597557	592991	595285	609280	608709	599374	1.022
清洗后超声瞬时流量 × 1.016	615607	617303	608363	608299	608863	618275	610133	612166	

流量单位：m^3/d。

4.2. 更换不同孔径的孔板进行试验

通过分别更换上游三种尺寸孔板进行试验。三种孔板尺寸如表 2：

Table 2. Three types of orifice plate sizes
表 2. 三种孔板尺寸

孔板编号	1	2	3
计量管内径/mm	92.050	92.021	92.021
孔板内径/mm	60.010	34.001	25.011
管壁粗糙度/mm	0.2	0.2	0.2
孔板年限/年	1	1	1
孔板清洗修正系数	1.6	1.6	1.6
当地大气压/Pa	97460	97460	97460
测量管线膨胀系数数/10^{-6}	11.16	11.16	11.16
孔板线膨胀系数数/10^{-6}	16.6	16.6	16.6

更换 d20 = 60.010 mm 孔板，孔板清洗前后流量变化(表 3)：

Table 3. Flow rate before and after orifice plate cleaning
表 3. 孔板清洗前后流量

孔板状态	孔板内径 mm	压力 MPa	温度 ℃	操作前流量 m^3/d	操作后流量 m^3/d	实际补偿系数
提取孔板第一次	60.010	1.466	27.43	49544	52266	1.04
提取孔板第二次	60.010	1.466	27.43	49844	51286	1.03
提取孔板第三次	60.010	1.466	27.10	49672	51045	1.03

更换 d20 = 34.001 mm 孔板，孔板清洗前后流量(表 4)：

Table 4. Flow rate before and after orifice plate cleaning
表 4. 孔板清洗前后流量

孔板状态	孔板内径 mm	压力 MPa	温度 ℃	操作前流量 m^3/d	操作后流量 m^3/d	实际补偿系数
孔板拆除第一次	34.001	1.484	27.43	49,544	52,266	1.06
孔板拆除第二次	34.001	1.486	27.43	49,552	52,269	1.05
孔板拆除第三次	34.001	1.491	27.43	49,585	52,271	1.06

更换 d20 = 25.011 mm 孔板，孔板清洗前后流量变化(表 5)：

通过更换不同孔板试验可以看出，与正常计量状态下的流量(参考流量)相比，孔板提取后的流量补偿系数在 1.04~1.09 左右。其中流量补偿系数与 β 值有一定的关系，孔板内径越小，孔板拆除、安装前后，测量影响越大，趋势图见图 5 所示。

Table 5. Flow rate before and after orifice plate cleaning
表 5. 孔板清洗前后流量

孔板状态	孔板内径 mm	压力 MPa	温度 ℃	操作前流量 m^3/d	操作后流量 m^3/d	实际补偿系数
孔板拆除第一次	25.011	1.494	27.10	49,672	54,045	1.09
孔板拆除第二次	25.011	1.496	27.43	49,652	54,269	1.09
孔板拆除第三次	25.011	1.491	27.43	49,685	54,271	1.09

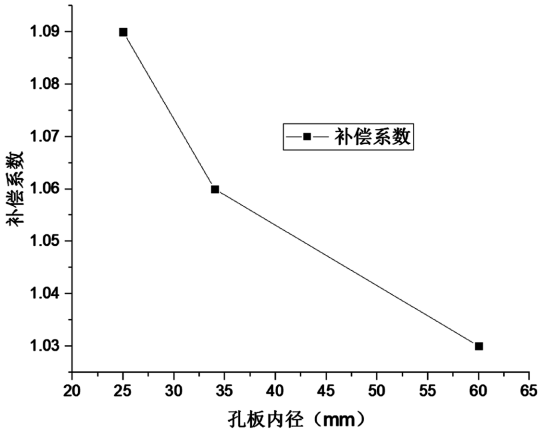

Figure 5. Relationship between the inner diameter of the orifice plate and the actual compensation coefficient
图 5. 孔板内径与实际补偿系数的关系

4.3. 现场实际系数与理论系数对比

由于管径越小，测量影响越大，故选取孔板内径为 34.001 mm 进行实验，现场多次实验选择下游超声流量计，对整个清洗过程中的气流瞬量进行实时测量，根据不同流量点来验证修正后的补偿数学模型是否准确，试验结果与计算结果对比见表 6 所示。

Table 6. Comparison of experimental and computational results
表 6. 试验结果与计算结果对比

标准器工况流量(m^3/h)	标准表压力 P (kPa)	被测表压力 P (kPa)	压缩因子 Z_f	雷诺数 Re_d	粘度 μ	密度 (kg/m^3)	操作前标况流量 Q_n (m^3/h)	操作后标况流量 Q_n (m^3/h)	实际补偿系数	理论补偿系数	比对结果
	2012.48	2011.75	0.9585	2.05E+05	1.10E−05	14.78	920.72	1032.13	1.121	1.140	0.019
43.22	2015.30	2014.57	0.9584	2.05E+05	1.10E−05	14.75	921.48	1036.67	1.125	1.138	0.013
	2017.78	2017.02	0.9584	2.06E+05	1.10E−05	14.79	923.42	1036.08	1.122	1.135	0.013
	1968.86	1967.66	0.9593	3.10E+05	1.10E−05	14.43	1380.95	1551.66	1.124	1.137	0.013
66.32	1968.18	1967.02	0.9593	3.10E+05	1.10E−05	14.42	1382.48	1556.67	1.126	1.132	0.006
	1967.62	1966.49	0.9593	3.10E+05	1.10E−05	14.42	1380.05	1551.18	1.124	1.130	0.006
	2007.17	2005.98	0.9585	4.18E+05	1.10E−05	14.73	2007.17	2248.03	1.120	1.131	0.011
87.81	2008.12	2006.86	0.9585	4.18E+05	1.10E−05	14.73	2008.12	2265.16	1.131	1.138	0.007
	2008.33	2007.04	0.9585	4.19E+05	1.10E−05	14.73	2008.33	2265.40	1.128	1.132	0.004

续表

	2056.21	2054.07	0.9576	6.31E+05	1.10E−05	15.08	2826.95	3143.57	1.112	1.117	0.005
129.78	2057.18	2055.09	0.9576	6.31E+05	1.10E−05	15.09	2827.39	3152.54	1.115	1.119	0.004
	2058.25	2056.13	0.9575	6.31E+05	1.10E−05	15.10	2828.23	3144.99	1.112	1.116	0.004
	2032.38	2029.59	0.9581	9.72E+03	1.10E−05	14.90	2884.72	3202.03	1.110	1.127	0.017
134.18	2027.23	2024.75	0.9582	9.61E+03	1.10E−05	14.86	2876.97	3202/03	1.113	1.116	0.003
	2025.25	2022.91	0.9583	9.58E+03	1.10E−05	14.84	2876.57	3210.25	1.116	1.122	0.006

数学模型在现场和实验室均进行了验证试验：在现场试验，通过下游超声波流量计在孔板清洗前后的流量对比结果与计算结果对比；在实验室试验，通过在不同流量下对孔板进行提取试验，读取提取孔板前后标准表读数。

现场和实验室两处试验结果表明：孔板提取后的实际流量补偿系数和修正后的数学模型计算结果比对结果最大差 0.013 (1.14%)，说明补偿数学模型是比较符合的。

5. 结论

(1) 孔板流量计在孔板提出后无法计量，但由于流体的流速增大、流量增加，会造成一部分气体无法计量，因此在孔板清洗期间的流量是需要补偿的。

(2) 利用数值计算模拟和拟合分析可以快速的找到紊流状态下影响流量的主要因素，并在紊流下建立流量补偿系数的数学模型的效果较好。为方便现场技术人员使用，编译了孔板流量计补偿系数计算软件流量，补偿软件的鲁棒性仍需现场技术人员进一步验证及反馈。

(3) 通过更换不同孔板试验可以看出，流量补偿系数与 β 值有一定的关系，孔板内径越小，孔板拆除、安装前后，对补偿系数的影响越大。总体看来，如果在井场，孔板流量计拆装影响较小，特别是安装在管网上的孔板流量计，孔板拆装影响会更大。

(4) 流量补偿系数数学模型可以给孔板流量计清洗孔板期间流量补偿系数的确定提供了理论支持，可减少天然气公司的经济损失，减少企业与用户间的经济纠纷。

参考文献

[1] 蔡英华, 吕寒英. 天然气流量计量仪表选型与应用探讨[J]. 石油化工自动化, 2023, 59(z1): 90-91.

[2] 天工. 2019 年上半年中国天然气市场回顾和展望[J]. 天然气工业, 2019, 39(9): 122.

[3] 马云峰. 孔板流量计取压方式的研究[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(6): 113-115.

[4] 孟鑫, 姜苏, 何欢欢. 提高差压式孔板流量计准确度的措施[J]. 氯碱工业, 2023, 59(12): 38-39.

[5] 王慧鹏, 刘欣荣, 张鑫, 等. 多孔孔板流量计结构参数的数值研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 75-84.

[6] 戴建刚, 沈创谦, 纪波峰, 等. 宽量程比差压流量计的研究[J]. 石油化工自动化, 2023, 59(5): 96-100.

[7] 张雯琴, 李长俊, 贾文龙, 等. 混氢天然气对流量计安装条件的适应性分析[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(6): 98-103, 109.

[8] 建生. 孔板流量计测量原理及流量计算存在问题分析[J]. 煤矿安全, 2014, 45(10): 218-221.

[9] 何运奇. 浅谈影响标准孔板流量计测量天然气流量准确度的因素及应对措施[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(6): 73-75.

[10] 朱江. 影响天然气孔板流量装置计量准确性的因素[J]. 石油与天然气化工, 2009, 38(4): 352-353, 269-270.

[11] 张福坤, 吴长春, 左丽丽. 输气管道水力摩阻因数计算[J]. 油气储运, 2010, 29(3): 181-186.

[12] 佘振苏, 陈曦, 未波波, 邹鸿岳, 毕卫涛. 应用结构系综理论发展壁湍流工程湍流模型[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45(12): 26-43.