

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306874

基于 CFD 仿真圆柱齿轮流量计性能影响因素分析*

郭素娜^{1,2} 张珊^{1,2} 孙萃鸿^{1,2} 王帆^{1,2} 方立德^{1,2}
(1. 河北大学质量技术监督学院 保定 071002; 2. 零碳能源建筑与计量技术教育部工程研究中心 保定 071002)

摘要:为确定圆柱齿轮流量计结构参数和流体介质物理特性对其性能影响的规律,确定最佳装配间隙,提出了基于 6 自由度运动模型的仿真方法,基于该方法分别研究了不同装配间隙和不同流体粘度对 DN16 圆柱齿轮流量计性能的影响。研究结果表明:随着装配间隙的减小,线性度误差逐渐减小。当齿顶圆间隙为 140 μm、齿轮端面间隙为 100 μm 时,线性度误差达到最优值 0.13%;线性度误差随着流体粘度的增大而减小,当粘度为 42.7 mm²/s 时,线性度误差仅为 0.03%。
关键词:圆柱齿轮流量计;CFD 仿真;齿顶圆间隙;端面间隙;流体粘度
中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Performance influence factors analysis of cylindrical gear flowmeter based on CFD simulation

Guo Suna^{1,2} Zhang Shan^{1,2} Sun Cuihong^{1,2} Wang Fan^{1,2} Fang Lide^{1,2}
(1. College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. Engineering Research Center of Zero-carbon Energy Buildings and Measurement Techniques, Ministry of Education, Baoding 071002, China)

Abstract:To determine the influence of the structural parameters of the cylindrical gear flowmeter and the physical characteristics of the fluid medium on its performance, and to determine the optimal assembly clearance, a simulation method based on the six-degree-of-freedom motion model is proposed. Based on this method, the effects of different assembly clearances and different fluid viscosities on the performance of the DN16 cylindrical gear flowmeter are studied. The results show that the linearity error gradually decreases with the decrease of the assembly clearance. When the tip clearance is 140 μm and the gear end clearance is 100 μm, the linearity error reaches the optimal value of 0.13%. The linearity error decreases with the increase of fluid viscosity. When the viscosity is 42.7 mm²/s, the linearity error is only 0.03%.
Keywords:cylindrical gear flowmeter; CFD simulation; tip circular clearance; end clearance; fluid viscosity

0 引言

圆柱齿轮流量计是一种容积式流量仪表,具有体积小、精度高、稳定性好、量程范围宽等优点,广泛应用于航空、航天、化工等多种领域^[1]。然而圆柱齿轮流量计存在的内部泄漏现象一直是不容忽视的问题。由于机械结构部件装配时留有一定间隙,而装配间隙引起的泄漏会使测量的实际流量小于理论流量,这种测量误差势必会影响圆柱齿轮流量计的测量性能。当装配间隙变化时,漏流的流动状态不同,对圆柱齿轮流量计性能的影响也不

同。因此,研究圆柱齿轮流量计的测量性能随装配间隙变化的规律,降低其受装配间隙的影响,对圆柱齿轮流量计具有重要的理论意义和应用价值。
为拓宽齿轮流量计的应用领域,减小其对环境 and 装配条件变化的敏感度,提高测量准确度,研究人员分别通过理论计算、数值模拟或实流测试等方法开展了大量研究。马彬等^[2]通过实验分析了不同粘度条件下椭圆齿轮流量计性能变化的规律。研究结果表明,随着介质粘度的增加,椭圆齿轮流量计仪表系数有增大的趋势。信彦峰等^[3]对圆柱齿轮流量计在高压工况进行了测试,实验结果显示,仪表性能会随压力变化而变化,针对压力如何

影响圆柱齿轮流量计性能未做出进一步分析。张永胜等^[4]研究了圆柱齿轮流量计仪表系数随温度变化的趋势,并通过函数拟合得到圆柱齿轮流量计仪表系数与温度的函数关系,但未对温度变化引起仪表系数变化的机理进行分析。杨国来等^[5]建立了圆柱齿轮流量计间隙泄漏的数学模型,利用该模型预测了被测油液运动粘度变化对端面间隙泄漏和径向间隙泄漏的影响情况。结果表明,在被测流体粘度较高时,预测结果与实验结果较接近;被测流体粘度较低时,预测结果误差较大。

近年来,计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)仿真技术逐渐成为指导流量计设计和结构优化的主要手段^[6]。Guo 等^[7]对涡轮流量计的内部流场进行了 CFD 仿真,分析了粘度对涡轮流量计性能影响的机理。郭素娜等^[8]采用 CFD 仿真和实验测试相结合的方法,研究了不同叶轮叶片形状参数对涡轮流量计性能的影响。Nasiruddin 等^[9]通过数值模拟和流场分析研究了雷诺数和边界层厚度对 V 锥流量计性能的影响。马馨玥等^[10]通过数值仿真研究了非标准音速喷嘴的流动特性。葛亮等^[11]研究了基于电磁检测机理的井下环空流量测量方法,并通过仿真和实验验证了测量方法的可行性。司欣格等^[12]利用 CFD 技术对不同参数的三角发生体管内流动的速度分布进行数值模拟,分析了漩涡耗散的情况。贾惠芹等^[13]采用 CFD 仿真的方法,分析了放喷管内气液两相流流场的相关特性,得到了不同相比条件下管内的压力、速度分布以及气液两相分布规律。吴杰等^[14]对圆柱齿轮流量计内部流场进行仿真,得到流量计内部速度矢量分布图。从仿真结果可以看出流量计内部存在 3 种间隙泄漏,但是未定量分析由间隙泄漏带来的圆柱齿轮流量计性能的变化。

综上,现有文献中对齿轮流量计的研究主要集中在在使用条件变化对圆柱齿轮流量计测量性能宏观参数的影响,而装配条件对圆柱齿轮流量计性能影响的机理分析却很少。本文提出基于 6 自由度模型的仿真方法,利用该方法对不同装配间隙的 DN16 圆柱齿轮流量计进行 CFD 仿真,得到装配间隙变化对圆柱齿轮流量计测量性能影响的规律,并利用流体力学原理对其机理进行分析。在此基础上探究介质粘度变化对圆柱齿轮流量计测量性能影响的规律,为圆柱齿轮流量计的设计装配和应用提供指导。

1 理论基础

1.1 圆柱齿轮流量计工作原理

圆柱齿轮流量计内部有一对截面为圆形相互啮合的柱形齿轮,流体从入口进入时,在流体进出口压差的作用下齿轮开始转动。轮齿把流动的液体连续不断地分割成

多个独立的体积单元并送至出口,每个体积单元容积为 v , 齿轮旋转一周排出流体的总量为 V :

$$V = 2Nv \quad (1)$$

式中: N 为齿轮的齿数。

漏流的存在使实测流量偏小,是影响容积式流量计测量性能的主要原因。圆柱齿轮流量计内部存在 3 种漏流如图 1 所示。由于齿轮啮合点处的漏流只占总漏流量的 5% 左右,本文主要分析端面漏流和径向漏流。

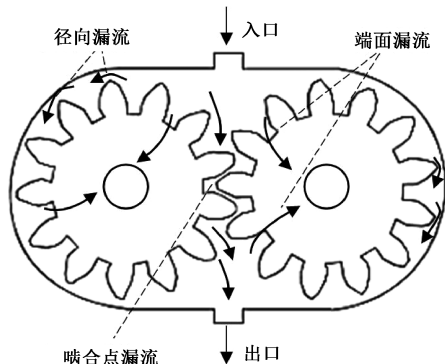


图 1 圆柱齿轮流量计漏流示意图

Fig. 1 Leakage flow in a cylindrical gear flowmeter

1.2 6 自由度模型

正常工作过程中,圆柱齿轮流量计内的齿轮在进出口差压的作用下进行转动,转动过程满足惯性系刚体运动方程,如式(2)所示。

$$L = I \cdot \omega \quad (2)$$

式中: L 为角动量; ω 为刚体在本地系下的角速度; I 是惯性张量,可通过式(3)计算。

$$I = \begin{pmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

根据动量矩定理可知,

$$\frac{dL}{dt} = T \quad (4)$$

则:

$$I \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega \times (I \cdot \omega) = T \quad (5)$$

式中: T 为合力矩,包括驱动力矩和阻力矩。

当受力情况发生变化时,齿轮依据运动方程,自行调整运动状态。齿轮在力矩作用下只绕中心做旋转运动,与其他 5 个方向无关。仿真过程中,可通过编写程序限制圆柱齿轮流量计内齿轮 5 个方向的自由度,并对齿轮旋转方向上的转动惯量赋值。在设定入口流速情况下,齿轮根据受力情况自行实时调整转速,本研究就是基于这一方法对圆柱齿轮流量计齿轮运动状态进行仿真模拟,并预测其计量性能。

2 仿真方法研究

2.1 仿真模型建立

本文研究的对象是 DN16 圆柱齿轮流量计,实验样机如图 2 所示。对实验样机关键尺寸测绘,结果如表 1 所示。参照实验样机利用三维建模软件 SolidWorks 抽取流道,画出该流量计内部流场三维模型。

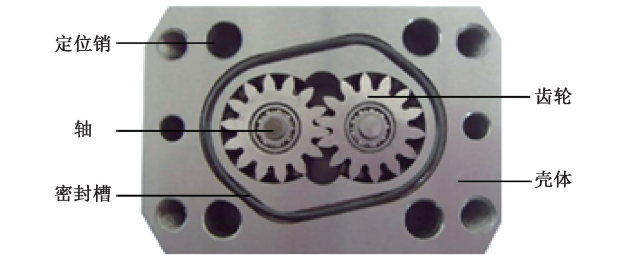


图 2 DN16 圆柱齿轮流量计实验样机
Fig. 2 DN16 cylindrical gear flowmeter experimental prototype

表 1 流场模型关键尺寸表

Table 1 Flow field model key dimensions table			
进出口直管段 长度/mm	齿顶圆间隙 (双边)/μm	齿轮端面间隙 (双边)/μm	两齿轮啮合 间隙/μm
20	180	140	22.36

2.2 网格划分

为便于限制网格总数,但不影响关键部位流场分析,划分网格之前整个流场被分割为入口、上端面间隙、下端
面间隙、齿轮及周边区域以及出口 5 个部分。各流场区
域和壁面都被命名,以便仿真过程中进行边界条件设置
和过程参数监测。将圆柱齿轮流量计三维仿真模型导入
PumpLinx 软件,利用不同网格生成模块分别生成各区域
网格。为保证间隙处求解的精确度,齿轮顶隙以及齿轮
啮合间隙处的网格划分达到了 18 层,各区域网格总数为
66w。圆柱齿轮流量计三维仿真流场网格划分结果如图
3 所示。

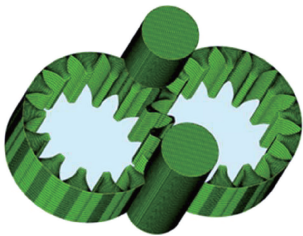


图 3 仿真流场网格划分结果

Fig. 3 The meshing result of the simulation flow field

2.3 仿真流程

在 PumpLinx 中设置仿真初始条件和边界条件,具体
仿真流程如图 4 所示。

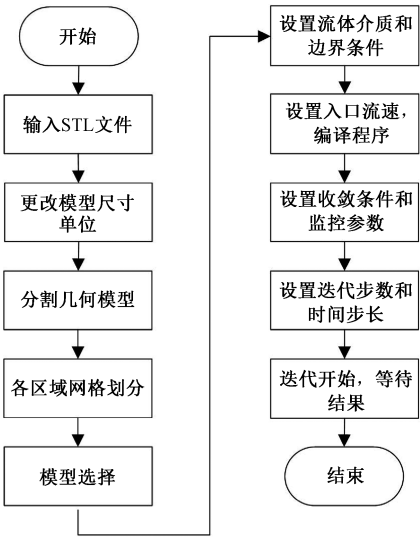


图 4 仿真流程
Fig. 4 Simulation flow chart

2.4 数据处理

在仿真过程中,通过 PumpLinx 自带的编译器编写齿
轮转动的速度表达式,来监测齿轮的实时转速 n_i ,速度
表达式如下:

$$n = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega \tag{6}$$

取一个周期内转速的平均值 $\bar{n}$,作为齿轮在此流量
点下对应的转速值,计算过程如式(7)所示。

$$\bar{n} = \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_m}{m} \tag{7}$$

式中: m 为一个周期内仿真的步数。

利用 $\bar{n}$ 计算出齿轮旋转频率 f ,由齿轮旋转频率 f 和
瞬时流量 q_v 算出圆柱齿轮流量计在该流量点的仿真仪表
系数 K_s ,计算过程如式(8)、(9)所示。

$$f = \frac{\bar{n} \cdot N}{60} \tag{8}$$

$$K_s = \frac{60f}{q_v} \tag{9}$$

2.5 仿真方法可靠性验证

为验证仿真方法的可靠性,在中航工业 304 所的体
积管流量标准装置上进行实流测试,实验装置系统框图
如图 5 所示。该装置的测量范围为 (0.15 ~ 500) L/min,
装置的整体扩展不确定度为 0.05% ($k=2$)^[4]。实验过程
中通过调节伺服电机的转速值以及比例调速阀实现对系
统流量的连续调节,将体积管内的累计流量值作为标准

流量,由信号采集装置采集并记录被测流量计的脉冲信号。

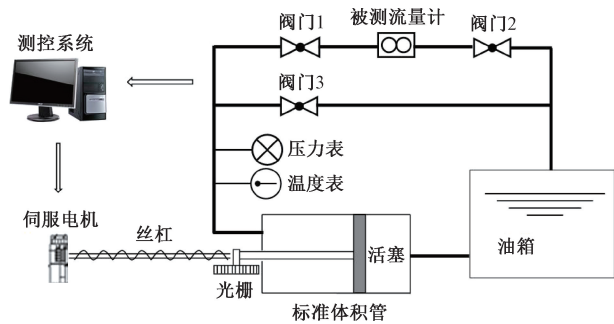


图 5 体积管流量标准装置系统框图
Fig. 5 The pipe prover system diagram

实验样机为仿真测绘的 DN16 圆柱齿轮流量计。依据 JJG 667-2010《液体容积式流量计》检定规程^[15],确定 0.8、20、40、60、80 L/min 5 个流量点,实验在常温条件下进行,测试介质为 YH-15 航空液压油。

实验过程中,每个流量点测量 3 次,分别利用式(10)计算圆柱齿轮流量计的仪表系数,然后通过式(11)计算该流量点下圆柱齿轮流量计的平均仪表系数,依据式(12)和(13)计算圆柱齿轮流量计在整个流量范围内的平均仪表系数 $\bar{K}$ 和线性度误差 E_L 。

$$K_{ij} = \frac{N_{ij}}{(Q_s)_{ij}} (i = 1, 2, 3, 4, 5; j = 1, 2, 3) \tag{10}$$

$$\bar{K}_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 K_{ij} \tag{11}$$

$$\bar{K} = \frac{1}{2} (\bar{K}_{i_{\max}} + \bar{K}_{i_{\min}}) \tag{12}$$

$$E_L = \frac{\bar{K}_{i_{\max}} - \bar{K}_{i_{\min}}}{\bar{K}_{i_{\max}} + \bar{K}_{i_{\min}}} \times 100\% \tag{13}$$

式中: K_{ij} 为单次实验测得的仪表系数; N_{ij} 为单次实验测得的脉冲数; $(Q_s)_{ij}$ 为单次实验标准装置的累积流量值; $\bar{K}_i$ 为第 i 个流量点的平均仪表系数; $\bar{K}_{i_{\max}}$ 为整个流量范围内的最大仪表系数; $\bar{K}_{i_{\min}}$ 为整个流量范围内的最小仪表系数。

实验结果与仿真结果对比如图 6 所示。
由图 6 可知,仿真结果与实验结果有着相同的趋势,当流量较小时,圆柱齿轮流量计仪表系数较小,随着流量增大,仪表系数逐渐增大;为了满足仿真需要,对建模、求解过程做了理想化处理,故仿真结果和实验结果在数据上存在一定偏差,平均仪表系数相差 8.8%,整体偏差在可接受误差范围之内。因此,本文提出的基于 6 自由度模型的仿真方法是可靠的,可用来预测圆柱齿轮流量计的性能。

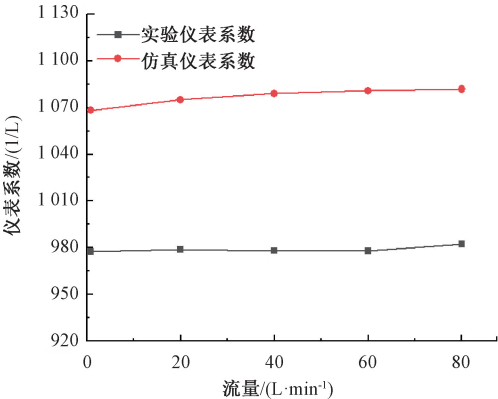


图 6 仿真与实验结果对比
Fig. 6 Comparison of simulation and experimental results

3 装配间隙对圆柱齿轮流量计性能的影响

3.1 装配间隙对圆柱齿轮流量计性能影响的仿真研究

在原模型基础上改变齿顶圆和齿轮端面间隙尺寸,采用前文的仿真方法,对 6 组不同间隙的圆柱齿轮流量计进行仿真分析。各模型间隙尺寸如表 2 所示,由仿真结果计算的平均仪表系数和线性度误差随间隙变化情况如图 7 所示。

表 2 各模型间隙尺寸		
Table 2 Clearance size of each model		
模型	齿顶圆间隙/ μm	齿轮端面间隙/ μm
1	180	140
2	170	130
3	160	120
4	150	110
5	140	100
6	120	80

从图 7 可以看出,随着齿顶圆间隙与齿轮端面间隙的逐渐减小,平均仪表系数和线性度误差均有减小的趋势。平均仪表系数由 $1\,074.95\text{ L}^{-1}$ 减小为 $1\,064.62\text{ L}^{-1}$,线性度误差由 0.63% 减小为 0.18%,变化率分别为 0.96% 和 71.43%。当齿顶圆间隙为 $140\text{ }\mu\text{m}$,齿轮端面间隙为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 时,线性度达到最优值 0.13%,工作间隙再继续减小时,线性度误差有增大的趋势,这种现象需要通过流体力学基本理论来解释。

3.2 装配间隙对圆柱齿轮流量计性能影响机理分析

圆柱齿轮流量计单个计量腔室体积为 $0.000\,460\,5\text{ L}$,每转一圈排出 28 个腔室体积,由式(14)计算出圆柱齿轮流量计的理论流量值 q_t ,入口流量值 q_v 与理论流量值 q_t 相减即可得到漏流量的预估值 Δq 如式(15)所示,各模

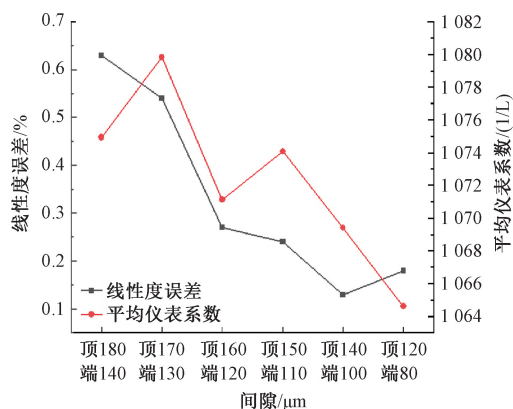


图 7 平均仪表系数和线性度误差随间隙变化情况

Fig. 7 The change of average meter factor and linearity error with clearance

型漏流量随流量变化曲线如图 8 所示。

$$q_t = 2Nv \cdot \bar{n} \quad (14)$$

$$\Delta q = q_v - q_t \quad (15)$$

式中: Δq 为漏流量预估值; q_v 为入口流量值; q_t 为理论流量值; v 为体积单元容积; $\bar{n}$ 为转速平均值。

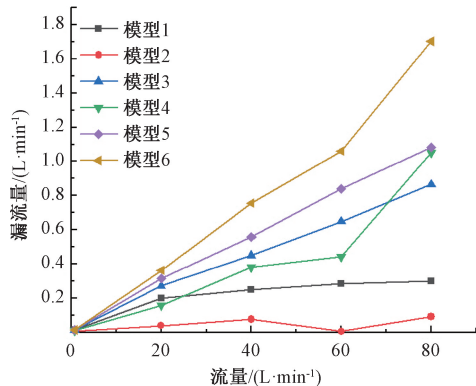


图 8 各模型漏流量随流量变化曲线

Fig. 8 The change of leakage flow rate with the flow rate of each model

由图 8 可知,当圆柱齿轮流量计的间隙在一定范围减小时漏流量随之减小,但随着间隙继续减小,漏流量反而有所增加,其中模型 2 的漏流量最小。进一步估算各模型由泄漏带来的测量误差,测量误差随流量变化曲线如图 9 所示。

由图 9 可知,随着齿轮间隙变化,测量误差也因漏流量变化而变化,模型 2 的测量误差最小,平均绝对百分比误差为 0.32%。为解释装配间隙对圆柱齿轮流量计性能的影响,提取仿真流场中进出口的压力损失,各模型压力损失随流量变化曲线如图 10 所示。

由图 10 可知,压力损失的变化趋势与漏流量的变化趋势基本一致,当圆柱齿轮流量计的间隙在一定范围减

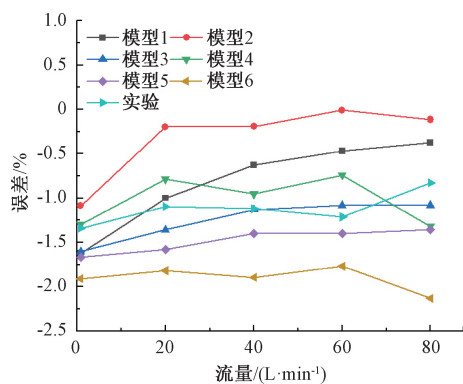


图 9 各模型测量误差随流量变化曲线

Fig. 9 The change of measurement error with flow rate of each model

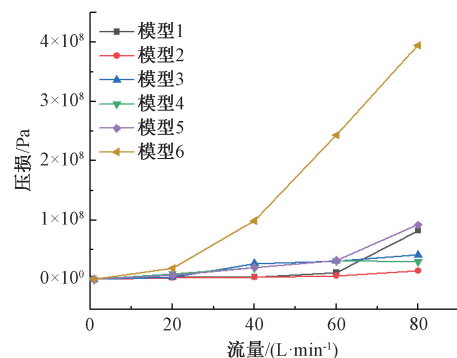


图 10 各模型压力损失随流量变化曲线

Fig. 10 The change of pressure loss with flow rate of each model

小时,压力损失随之减小,使得漏流量减小,即平均仪表系数增大。当间隙继续减小时,流通面积减小,粘性剪切力增大,齿轮转动需要克服较大阻力,造成较大的压力损失,且间隙越小压力损失越大,使得漏流量增大,即平均仪表系数减小。因此可得出流场中压力损失的变化导致了平均仪表系数发生变化。

由于齿顶圆间隙和端面间隙较小,间隙中的流体呈层流动状态。在复杂流场环境下,由于流体具有粘滞力,部分流体附着在齿轮表面,随齿轮一起转动,实际漏流量和理论漏流量存在一定偏差,这种现象使得各个模型的线性度误差发生变化。

4 介质粘度对圆柱齿轮流量计性能的影响

圆柱齿轮流量计实际应用时会不同温度下工作,不同的温度会改变介质的基本属性,而对圆柱齿轮流量计漏流量影响最大的是介质的粘度,YH-15 航空液压油在不同温度条件下所对应的运动粘度如表 3 所示。

表 3 介质在不同温度下的运动粘度

Table 3 Kinematic viscosity at different temperatures			
温度/℃	运动粘度/(mm ² ·s ⁻¹)	温度/℃	运动粘度/(mm ² ·s ⁻¹)
0	42.7	60	9.7
20	22.5	80	7.1
40	13.9	100	5.6

利用上述仿真方法对圆柱齿轮流量计在 42.7, 22.5, 13.9, 9.7, 7.1, 5.6 mm²/s 粘度条件下的工作性能进行仿真, 仿真模型使用测量误差最小的模型 2。由于圆柱齿轮流量计在最小流量点 0.8 L/min 的漏流量较小, 只对比其他 4 个流量点 20, 40, 60, 80 L/min 在不同粘度条件下的仿真结果。根据仿真结果分别计算圆柱齿轮流量计每个流量点对应的仪表系数、平均仪表系数和线性度误差。不同粘度条件下仪表系数随流量变化曲线如图 11 所示, 平均仪表系数和线性度误差随粘度变化情况如图 12 所示。

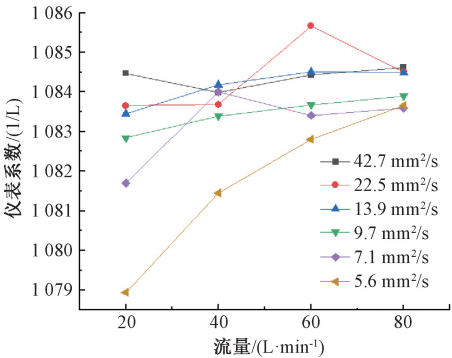


图 11 不同粘度条件下仪表系数随流量变化曲线
Fig. 11 The change of meter factor with flow rate under different viscosity conditions

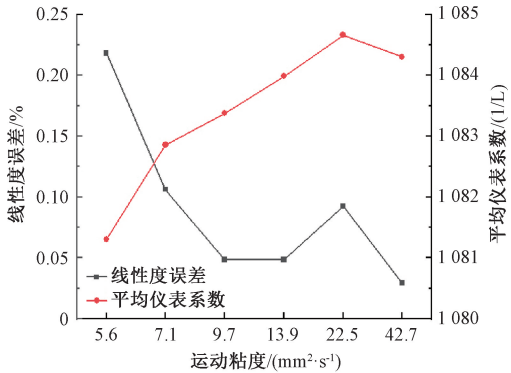


图 12 平均仪表系数和线性度误差随粘度变化情况
Fig. 12 The change of average meter factor and linearity with viscosity

由图 11 可知, 圆柱齿轮流量计的仪表系数随流量的增大而逐渐增大。当粘度为 22.5 和 7.1 mm²/s 时, 仪表

系数先增大后减小, 这是因为流体由小流量逐渐增大时, 存在从层流到湍流的转捩过程, 此时流量计的性能会发生变化。由图 12 可知, 随着流体粘度的逐渐升高, 圆柱齿轮流量计的平均仪表系数呈上升趋势, 线性度误差呈下降趋势。其中粘度为 42.7 mm²/s 时, 圆柱齿轮流量计的线性度误差最小, 说明圆柱齿轮流量计的测量性能受高粘度流体的影响较小。分析圆柱齿轮流量计仪表系数发生变化的原因, 主要是由于流体在不同粘度条件下的流动状态不同, 造成的漏流量不同。对圆柱齿轮流量计在不同粘度条件下的漏流量进行估算, 不同粘度条件下漏流量随流量变化曲线如图 13 所示。

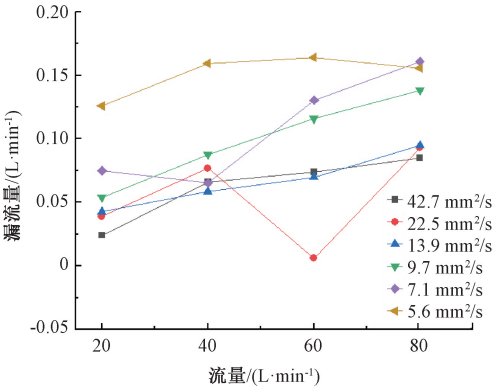


图 13 不同粘度条件下漏流量随流量变化曲线
Fig. 13 The change of leakage flow rate with the flow rate under different viscosity conditions

由图 13 可知, 随着流体粘度的不断增大, 圆柱齿轮流量计的漏流量呈减小的趋势, 而漏流量减小会使仪表系数增大。因此, 流体介质粘度变化导致漏流量改变, 进而导致仪表系数变化, 最终影响圆柱齿轮流量计的测量性能。

5 结 论

为了提升圆柱齿轮流量计的测量准确度, 减小装配间隙对圆柱齿轮流量计性能的影响, 本研究通过 CFD 仿真获得 DN16 圆柱齿轮流量计性能随装配间隙变化的规律, 分析了装配间隙对圆柱齿轮流量计测量性能的影响机理, 在此基础上探究了介质粘度变化对圆柱齿轮流量计性能影响的规律, 得出如下结论:

- 1) 圆柱齿轮流量计仿真仪表系数随流量变化的趋势与实验结果一致, 验证了基于六自由度模型的仿真方法的有效性;
- 2) 不同齿顶圆间隙与齿轮端面间隙的仿真结果表明, 随着间隙的逐渐减小, 圆柱齿轮流量计的平均仪表系数和线性度误差均有减小的趋势。当齿顶圆间隙为 140 μm、齿轮端面间隙为 100 μm 时, 线性度误差达到最

优值 0.13%;

3) 随着装配间隙变化,漏流量逐渐变化,因漏流量引起的测量误差也发生变化。当齿顶圆间隙为 170 μm 、齿轮端面间隙为 130 μm 时,因漏流引起的测量误差最小,优于 0.32%;

4) 圆柱齿轮流量计测量性能受介质粘度变化影响,随着流体粘度的逐渐升高,线性度误差呈下降趋势,粘度为 42.7 mm^2/s 时,线性度误差最小,仅为 0.03%。

参考文献

- [1] 朱宇辉,丁川,阮健. 容积式流量计的研究现状及展望[J]. 液压与气动, 2019 (4): 1-14.
ZHU Y H, DING CH, RUAN J. Research review and prospect of positive displacement flowmeter [J]. Hydraulic and Pneumatic, 2019 (4): 1-14.
- [2] 马彬,刘冬晓. 粘度对椭圆齿轮流量计的性能影响[J]. 计量技术, 2020 (4): 69-72.
MA B, LIU D X. Effect of viscosity on performance of the elliptical gear flowmeter[J]. Metrology Technique, 2020 (4): 69-72.
- [3] 信彦峰,贾正红,桑培勇,等. 圆柱齿轮流量计变压测试研究[J]. 计量技术, 2016 (12): 7-10.
XIN Y F, JIA ZH H, SANG P Y, et al. Research on variable pressure test of cylindrical gear flowmeter[J]. Measurement Technique, 2016 (12): 7-10.
- [4] 张永胜,张毅治. 基于曲面拟合的圆柱齿轮流量计变温修正方法研究[J]. 计量技术, 2019(2): 18-20.
ZHANG Y SH, ZHANG Y ZH. Research on variable temperature correction method of cylindrical gear flowmeter based on surface fitting [J]. Metrology Technique, 2019(2): 18-20.
- [5] 杨国来,赵君,颜志超,等. 圆柱齿轮流量计的误差特性[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(4): 45-51.
YANG G L, ZHAO J, YAN ZH CH, et al. Analysis of error characteristics of cylindrical gear flowmeter [J]. Lanzhou University of Technology Journal, 2018, 44(4): 45-51.
- [6] GUO S N, YANG Z H, WANG F, et al. Optimal design of wide viscosity range turbine flow sensor based on flow field analysis [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 79: 101909.
- [7] GUO S N, SUN L J, ZHANG T, et al. Analysis of viscosity effect on turbine flowmeter performance based on experiments and CFD simulations[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2013, 34: 42-52.
- [8] 郭素娜,张涛,孙立军,等. 采用流场分析提高涡轮流量传感器性能的研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2473-2478.

- GUO S N, ZHANG T, SUN L J, et al. Research on improving the performance of liquid turbine flow sensor with flow field analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2473-2478.
- [9] NASIRUDDIN S, SINGH S N, VEERAVALLI S V, et al. Effect of reynolds number and boundary layer thickness on the performance of V-cone flowmeter using CFD[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 73: 101728.
- [10] 马馨玥,谢代梁,徐志鹏,等. 不同结构微小音速喷嘴的数值模拟与特性对比[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 188-195.
MA X Y, XIE D L, XU ZH P, et al. Numerical simulation and characteristic comparison of micro-sonic nozzles in different structures [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34 (9): 188-195.
- [11] 葛亮,黄凯强,田贵云,等. 基于电磁检测机理的井下环空流量测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 161-174.
GE L, HUANG K Q, TIAN G Y, et al. Research on the measurement method of downhole annular flow based on the electromagnetic detection mechanism [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40 (12): 161-174.
- [12] 司欣格,沈悦,包建东. 基于 CFD 的涡街流量计三角发生体仿真研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(21): 6-9.
SI X G, SHEN Y, BAO J D. Numerical simulation on optimal parameters of vortex flowmeter triangle cylinder based on CFD[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(21): 6-9.
- [13] 贾惠芹,杨晓. 基于 Fluent 的气井放喷时气液两相流场仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(1): 48-51.
JIA H Q, YANG X. Simulation of gas-liquid two-phase flow during gas well discharge based on fluent [J]. Foreign Electronic Measurement Technique, 2019, 38(1): 48-51.
- [14] 吴杰,陆明刚,康少春. 基于 Fluent 的圆柱齿轮流量计的密封性仿真分析[J]. 计量与测试技术, 2017 (1): 24-26.
WU J, LU M G, KANG SH CH. Based on Fluent simulation of sealing of cylindrical gear flowmeter [J]. Metrology and Testing Technology, 2017(1): 24-26.
- [15] 全国流量容量计量技术委员会. 液体容积式流量计检定规程: JJG 667-2010[S]. 2010.
National Technical Committee of flow capacity

measurement. Liquid Positive Displacement Flowmeter; JJG 667-2010[S]. 2010.

作者简介



郭素娜, 2007 年于河北工业大学获得硕士学位, 2016 年于天津大学获得博士学位, 现为河北大学副教授, 主要研究方向为流量检测技术与标准装置、CFD 仿真技术与流场分析。

E-mail: guosunatju@163.com

Guo Suna received her M. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2007, and received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2016. She is currently an associate professor at Hebei University. Her main research

interests include flow detection technology and standard equipment, CFD simulation technology and flow field analysis.



王帆(通信作者), 2017 年于英国伦敦玛丽女王大学获得博士学位, 现为河北大学讲师, 主要研究方向为多相流的高效数值仿真。

E-mail: fwang130494461@126.com

Wang Fan (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Queen Mary University of London in 2017. She is currently a lecturer at Hebei University. Her main research interest includes efficient numerical simulation of multiphase flows.