

文章编号: 1673-5196(2018)04-0045-07

# 圆柱齿轮流量计的误差特性

杨国来<sup>1,2</sup>, 赵君<sup>1</sup>, 颜志超<sup>1</sup>, 王淦泽<sup>1</sup>, 李文祺<sup>3</sup>

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 温州泵阀工程研究院, 浙江 温州 325105; 3. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 在对 VC 0.2 型圆柱齿轮流量计结构设计的基础上, 综合考虑流量计泄漏、测量介质特性和流量计使用条件等影响流量计误差特性的因素, 通过理论计算和仿真分析, 得到了被测油液运动黏度、压力损失等因素以及不同使用条件对齿轮流量计精确度的影响。将理论计算、模型仿真结果与流量计出厂试验结果对比发现: 利用理论计算的方法对流量计测量误差进行估计有一定局限性, 只适用于高黏度油液测量; 而模型仿真结果与流量计试验结果较符合, 其相对误差在 0.5% 上下浮动。利用仿真模拟试验的方法得到了 VC 0.2 型圆柱齿轮流量计测量不同黏度油液时相对误差的具体数值。

**关键词:** 圆柱齿轮流量计; 径向间隙泄漏; 测量精度; 数值模拟

**中图分类号:** TH137 **文献标志码:** A

## Analysis of error characteristics of cylindrical gear flowmeter

YANG Guo-lai<sup>1,2</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>, YAN Zhi-chao<sup>1</sup>, WANG Hao-ze<sup>1</sup>, LI Wen-qi<sup>3</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Wenzhou Engineering Institute of Pump and Valve, Lanzhou Univ. of Tech., Wenzhou 325105, China; 3. Lanzhou Ls Energy Equipment Engineering Institute Co. Ltd., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Based on the structural design of VC 0.2-type cylindrical gear flowmeter and taking comprehensively the factors of influence of flowmeter leakage, measurement medium characteristics, and flowmeter application condition on the error characteristics of the flowmeter, into consideration, the influence of kinematic viscosity of oil to be tested, pressure loss, and various application conditions on the accuracy of the gear flowmeter was obtained by means of theoretical calculation and simulation analysis. It was found by comparing the results of the theoretical calculation and model simulation with the result of product-test of flow meter that the estimate of measurement error of flowmeter with theoretical calculation method would have certain limitation and it would be suitable only for the oil with high viscosity while the result of model simulation would be more consistent with product-test result of flowmeter, its relative error being 0.5% more or less. The concrete data of relative errors of oil with different viscosity tested with the VC 0.2-type cylindrical gear flowmeter were obtained by using simulation test method.

**Key words:** cylindrical gear flowmeter; radial clearance leakage; measurement accuracy; numerical simulation

在现代液压设备、液压系统中流量信号作为最主要的参数之一, 往往是工程技术人员和研究人员所关心的, 而且流量特性直接地表征着液压元件以及系统的性能优劣, 因而在液压领域中对流量的测量尤为重要<sup>[1]</sup>。流量信号分为动态流量信号和稳态

流量信号, 其中稳态流量信号的测量可以利用安装在回路上的低压流量计来解决, 而动态流量的测量, 尤其是系统高压侧的动态流量的测量, 一直是液压测试领域的重难点之一<sup>[2]</sup>。VC 系列圆柱齿轮流量计的出现解决了这一问题, 但考虑到流量测量过程往往会受到外部使用条件以及被测流体特性的影响, 从而影响到流量计的误差特性, 因此对影响流量计误差特性的因素进行研究显得尤为重要。

收稿日期: 2016-08-31

基金项目: 温州市科技特派员专项项目(2014F002)

作者简介: 杨国来(1963-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博导。

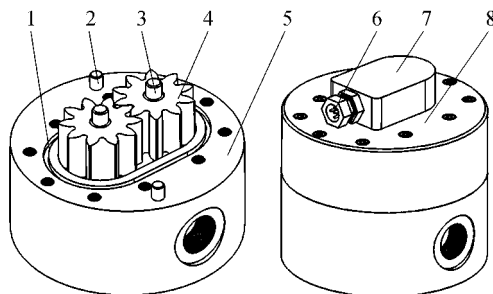
国内对圆柱齿轮流量计的研究主要集中在其流量脉动以及试验方面,安徽理工大学的张军等设计了行星齿轮流量计以及一种由两对错位的外啮合齿轮相叠加的新型齿轮流量计,并对其流量脉动进行了分析<sup>[3-5]</sup>.而国外则主要致力于对新型的科里奥利流量计以及超声流量计的研究<sup>[6-7]</sup>.综合国内外对圆柱齿轮流量计所作的研究发现,针对单个流量计内部流场仿真模拟以及测量精度数值模拟的研究比较少,本文通过数值模拟和流场仿真相结合的方法对圆柱齿轮流量计内部流场以及误差特性进行了分析研究.

### 1 圆柱齿轮流量计基本原理

容积式流量计也称定排量流量计,简称 P.D.F 流量计,是一种有悠久历史的流量仪表,且具有对上游流速分布不敏感,测量精度高,可用于高黏度流体测量等特点,广泛应用于各种液体和气体的测量.圆柱齿轮流量计是容积式流量计中的一类,适用于油、脂、溶剂、液压油和其他一些无颗粒的润滑性液体的测量,广泛应用于航空、航天、化工等多种军用和民用领域的流量测量<sup>[8]</sup>.

#### 1.1 圆柱齿轮流量计结构组成

圆柱齿轮流量计主要由机械部分也就是齿轮、轴承、轴、壳体和电子部分即电磁传感器、放大器等部件组成.图 1 为其结构原理图,其结构与齿轮泵及齿轮马达相类似,不同之处在于其齿轮转子与轴是分开设计的,并在中间加入了轴承,目的是为了减少流量计测量时的压力损失.



1. 密封槽;2. 定位销;3. 轴;4. 齿轮;5. 壳体;6. 插座;7. 放大器;8. 壳体上盖

图 1 圆柱齿轮流量计的结构原理图

Fig.1 Principle diagram of Structure of cylindrical gear flowmeter

#### 1.2 圆柱齿轮流量计计量原理

圆柱齿轮流量计的工作原理是利用一对互相啮合的齿轮将流过管路的流量分割为具有一定容积的“计量空间”,通过流量计内部的霍尔传感器来检测

并计数,累计后根据该“计量空间”的体积以及连续测量的累计次数计算得出体积流量.通过圆柱齿轮流量计的理论流量为

$$q_v = 2NV$$

式中: $q_v$  为通过流量计的流量; $N$  为流量计发出的脉冲次数; $V$  为齿容量.

#### 1.3 圆柱齿轮流量计模型建立

参照德国 KRACHT 公司设计生产的 VC 系列圆柱齿轮流量计,利用三维造型软件 SolidWorks 对固定型号为 VC 0.2 的圆柱齿轮流量计机械结构进行建模,采用插件 GearTrax 对关键部件齿轮转子进行设计,齿轮转子的部分参数如图 2 所示.

节距数据		小齿轮		大齿轮	
齿轮标准:	大节距渐开线20°	齿数:	10	齿数:	10
径节:	10.1600	齿轮类型:	外齿轮	齿轮类型:	外齿轮
法向径节:	10.1600	螺旋方向:	右	螺旋方向:	左
模数:	2.5000	节径:	25.000mm	节径:	25.000mm
法向模数:	2.5000	大径:	32.250mm	大径:	32.250mm
周节:	7.85398mm	小径:	21.000mm	小径:	21.000mm
压力角:	20.000deg	齿顶高:	3.625mm	齿顶高:	3.625mm
法向压力角:	20.000deg	齿根高:	2.000mm	齿根高:	2.000mm
螺旋角:	0.0000deg	径向变位系数:	0.450	径向变位系数:	0.450
齿顶高系数:	1.00000	径向变位量:	1.125mm	径向变位量:	1.125mm
顶隙系数:	0.25000	基圆直径:	23.492mm	基圆直径:	23.492mm
圆角系数:	0.30000	全齿高:	5.625mm	全齿高:	5.625mm
单位:	公制	齿根圆角半径:	0.750mm	齿根圆角半径:	0.750mm
装配		侧隙:	0.050mm	侧隙:	0.050mm
齿轮速比:	1:1.000	齿厚:	4.6959mm	齿厚:	4.6959mm
中心距:	26.836mm	齿宽:	10.000mm	齿宽:	10.000mm
		毛坯外径:	n/a	毛坯外径:	n/a

图 2 齿轮转子设计参数

Fig.2 Design parameters of gear rotor

在完成对齿轮转子建模的基础上,对圆柱齿轮流量计整体进行模型的建立,图 3 为完成后的圆柱齿轮流量计三维模型.

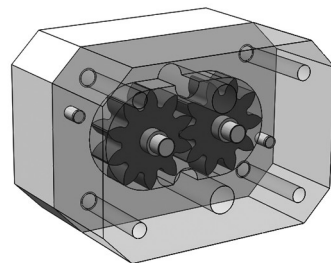


图 3 圆柱齿轮流量计三维模型

Fig.3 Three-dimensional model of cylindrical gear flowmeter

## 2 内泄漏理论模型与分析

圆柱齿轮流量计的齿轮转子与壳体之间是动态配合,考虑齿轮转动和齿轮啮合对润滑的需求,要求

齿轮与壳体在轴向以及径向方向存在微小间隙,通常间隙高度小于 0.1 mm;由于机械摩擦以及流体黏性阻力使得流量计进出口存在一定的压差,间隙以及压差必然造成缝隙流动,即泄漏<sup>[9]</sup>.正是由于泄漏的存在使圆柱齿轮流量计的实测流量小于理论计算流量并造成计量误差.

### 2.1 流量计内泄漏模型的建立

在齿轮泵以及齿轮马达液压元件中内泄漏总是存在的,内泄漏途径主要有三个:齿轮两侧面与盖板和壳体端面之间的端面间隙(轴向间隙)泄漏,齿顶圆和壳体内孔间的径向间隙泄漏以及啮合线处的泄漏.由于圆柱齿轮流量计结构和工况与齿轮泵和齿轮马达有很大区别,并考虑到啮合线处泄漏只占到总泄漏的 5%左右,于是在对其结构参数确定的基础上主要对前两种内泄漏分别进行模型建立和数值计算分析.

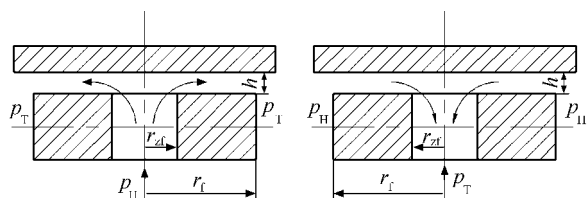
#### 2.1.1 端面间隙泄漏

端面间隙泄漏即轴向泄漏,是齿轮泵和马达泄漏的主体,占总泄漏量的 75%~80%.根据平面缝隙二维流理论可求出端面泄漏量,但求解过程过于繁琐复杂,工程价值有限.于是利用平行圆盘放射流理论对齿槽内油液经过齿轮端面与轴承之间的间隙泄漏进行讨论<sup>[10-11]</sup>.

如图 4 所示,在相同条件下按汇流和放射流可以得出相同的结论.当周边(360°)放射或汇流时,泄漏量为

$$q_v = \frac{\pi h^3 \Delta p}{6\mu \ln(r_f/r_{zf})} \quad (1)$$

式中: $r_f$  为齿根圆半径; $r_{zf}$  为齿轮轴半径; $\mu$  为被测油液的动力黏度.



(a) 放射流 (b) 汇流

图 4 平行圆盘放射流和汇流

Fig.4 Radial and confluent flow between parallel disks

考虑到圆柱齿轮流量计端面间隙并非周边情况,根据高压区的区间角  $\theta$  通常为  $\pi/4$  的情况,另外将上半部其他高压压力引起端面间隙泄漏也考虑进去,最后得到折算高压区间角  $\varphi = \pi/2$ .由于齿轮流量计有两个齿轮,每一齿轮正反面各有一个高压区,最终得到其端面间隙泄漏流量为

$$q_{v,a} = \frac{4\varphi h^3 \Delta p}{6\mu \ln(r_f/r_{zf})} \quad (2)$$

#### 2.1.2 径向间隙泄漏

圆柱齿轮流量计径向间隙中的泄漏占总泄漏量的 15%~20%,可以将其近似看作是平行平板间的缝隙流动,而缝隙流动产生的原因有二:一种是由于在缝隙两端存在压差而导致的,这种流动称为压差流,也称哈根-泊肃叶流;另一种是由于构成缝隙的壁面具有相对运动从而产生的剪切流,也称为库埃特流;两者叠加称为压差-剪切流<sup>[12]</sup>.

应用纳维斯托克斯方程(Navier-Stokes equations)对平行平板间缝隙流动方程进行推导,假设平行平板长为  $l$ ,宽为  $b$ ,缝隙高度为  $h$ ;层流时流体运动速度  $v_y = v_y(z)$ ,  $v_x = v_z = 0$ ,再考虑到定常、连续、不可压缩并忽略质量力,则最终推导得到

$$v_y = \frac{\Delta p}{2\mu l} (zh - z^2) + \frac{v_0}{h} z \quad (3)$$

在图 5 上取微元面积  $b dz$ ,则微元流量为  $v_y b dz$ ,对其从  $z=0$  到  $h$  进行积分,则得到径向间隙泄漏流量为

$$q_{v,r} = \int_0^h v_y b dz = b \int_0^h \left[ \frac{\Delta p}{2\mu l} (zh - z^2) + \frac{v_0}{h} z \right] dz = \frac{bh^3 \Delta p}{12\mu l} + \frac{bhv_0}{2} \quad (4)$$

式中: $l$ 、 $b$ 、 $h$  为径向间隙的长、宽和高; $v_0$  为齿轮转子齿顶线的速度; $\Delta p$  为径向间隙两端的压差.

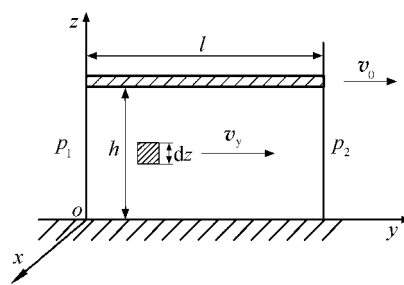


图 5 平行平板间的流动

Fig.5 Flow between parallel plates

### 2.2 油液运动黏度对流量计内泄漏的影响

由以上对间隙泄漏方程的推导,得到了圆柱齿轮流量计的轴向和径向间隙泄漏都受到间隙高度  $h$ 、间隙两端压差  $\Delta p$  以及油液运动黏度  $\nu$  的影响.利用 Matlab 软件对流量计内泄漏进行量化计算分析.

根据轴向以及径向间隙泄漏方程可得流量计泄漏流量近似与油液运动黏度  $\nu$  成反比,测量不同油液黏度时流量计内部泄漏的情况决定了固定型号的流量计能否适用于一定运动黏度油液的流量计量.

1) 不同间隙高度间隙两端压差一定情况下油液运动黏度对端面间隙泄漏的影响

由流量计样本中给出的流量-压力降特性曲线确定出合适的压力降,设置圆柱齿轮流量计高低压腔压差为 200 kPa;取圆柱齿轮流量计端面间隙高度  $h$  为 0.04~0.16 mm,并对测量不同黏度油液时的端面间隙泄漏流量进行计算,其结果如图 6 所示.

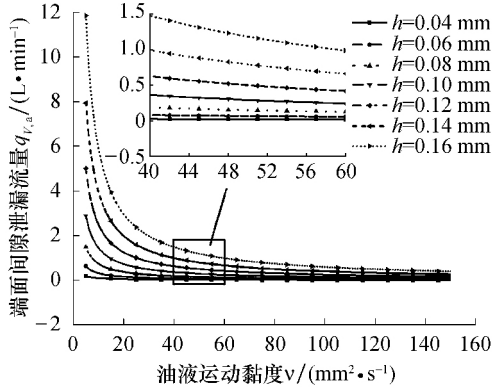


图 6 运动黏度-端面间隙泄漏曲线

Fig.6 Curve of axial clearance leakage vs kinematic viscosity

工程实际中由于机械加工技术的不断提高和装配工艺的改良,可以保证圆柱齿轮流量计端面间隙高度保持在相对较小的数值.于是选取其端面间隙高度为较小的 0.08 mm,通过计算得到在测量运动黏度分为 32 mm<sup>2</sup>/s 和 100 mm<sup>2</sup>/s 的油液时流量计由于端面间隙泄漏所造成的测量误差分别为 2.475 8%和 0.788 9%.

2) 间隙两端压差一定不同间隙高度情况下油液运动黏度对径向间隙泄漏的影响

在固定压差的情况下,选取径向间隙高度为 0.04~0.16 mm,计算测量不同黏度油液时的泄漏,结果如图 7 所示.通常圆柱齿轮流量计径向间隙高度小于 0.10 mm,于是在取径向间隙高度为 0.08 mm 的情况下计算得到流量计在测量 46 号液压油时的

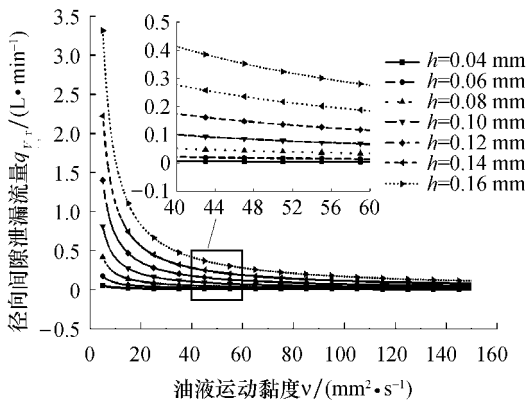


图 7 运动黏度-径向间隙泄漏曲线

Fig.7 Curve of radial clearance leakage vs kinematic viscosity

径向间隙泄漏量为 0.045 07 L/min,由此造成的测量相对误差为 0.48%.

综合考虑圆柱齿轮流量计内部端面间隙泄漏以及径向间隙泄漏并对啮合线处的泄漏再加以补偿,通过理论计算得到测量不同黏度油液时流量计内泄漏流量的大小以及测量误差,结果见表 1.

表 1 圆柱齿轮流量计内泄漏和测量误差

Tab.1 Internal leakage and measurement error of cylindrical gear flowmeter

油液运动黏度/ (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	流量计内泄漏 /(L·min <sup>-1</sup> )	理论计算 测量误差/%
15	0.663 7	7.176 7
22	0.452 5	4.865 7
32	0.311 1	3.326 9
46	0.216 4	2.310 2
68	0.146 4	1.564 7
100	0.099 5	1.062 5
150	0.066 4	0.706 9

参考流量计样本中给出的 VC 0.2 圆柱齿轮流量计在测量运动黏度大于 50 mm<sup>2</sup>/s 的油液时的测量精度为 ±0.5%.由此可见理论计算的方法在针对高黏度流体测量时更加接近实际情况,而在估计低黏度流体测量时误差较大.

### 3 流量计内泄漏仿真分析

目前圆柱齿轮流量计的测量精度主要通过试验的方法来确定,同时流量计内部泄漏流量的大小也可以通过试验得到.但由于材料、加工等各方面的限制,无法对流量计内部油液的具体流动情况进行观察及分析.计算流体动力学的出现解决了这一问题,下面在对流量计内部泄漏理论计算的基础上利用 CFD 软件对齿轮流量计内部流场进行动态仿真,对其内部油液流动以及间隙泄漏进行可视化分析.

#### 3.1 流量计流体模型的建立及网格划分

在利用三维 CAD 软件完成了对圆柱齿轮流量计的机械结构的设计后,考虑到齿轮啮合传动对润滑的要求以及不增加流量计内泄漏,在此基础上设定齿轮间齿侧间隙为 0.05 mm,流量计径向间隙高度为 0.1 mm,建立其内部流道模型,图 8 为 VC 0.2 型圆柱齿轮流量计内部流道模型.

对流量计流道进行网格划分,为捕捉到间隙中流体流动状态的相关参数,在间隙处划分网格层数为 10 层,如图 9 所示.

#### 3.2 边界条件加载及监测设置

为了将仿真结果与理论计算结果及出厂校验结果进行比较分析,将流量计样本中给出的使用条件

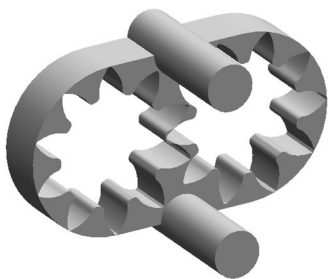


图 8 流量计内部流道模型

Fig.8 Inner flow channel model of flowmeter

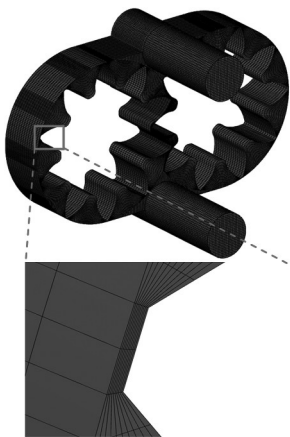


图 9 流量计流场网格

Fig.9 Flow field grid of flowmeter

加载到流场仿真中:设置流量计入口压力为 30.101 3 MPa,通过样本中给出的圆柱齿轮流量计流量-压差特性曲线得到流量计进出口压差,将出口压力设置为 29.901 3 MPa;油液运动黏度为 46 mm<sup>2</sup>/s,密度为 870 kg/m<sup>3</sup>;流量计转速为 2 000 r/min;仿真时长为 0.03 s,使流量计齿轮转子能够完整回转一周。

图 10 为在圆柱齿轮流量计内部设置监测点的具体分布情况,为了得到其内部间隙泄漏的具体流动参数以及流量脉动情况,分别在流量计间隙处不同位置以及进出口分别设置固定和随网格运动的监测点。

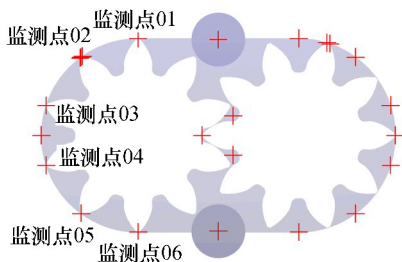


图 10 监测点设置

Fig.10 Setting of monitoring points

### 3.3 流量计流场仿真及结果分析

#### 3.3.1 流量计内部压力分布

首先在齿轮转子部分流道处建立对称面以便观察流量计内部压力分布及变化,初始时刻截面上的压力分布如图 11 所示.间隙两端压差是影响间隙泄漏的因素之一,由图 11 可以看出,流量内部流体压力沿齿轮周向随着通过径向间隙数量的增加是线性下降的,流量计进出口压力损失将均匀地分布在每一间隙上,这与前面进行理论计算时所假设的压力损失分布规律相符合;并且可以发现在齿轮互相啮合处由于闭死容积即将增大和减小,从而在闭死容积处也出现了局部的高压和低压。

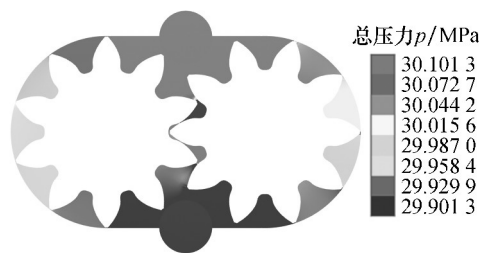


图 11 初始时刻流量计内部压力分布

Fig.11 Initial pressure distribution in flowmeter

图 12 为 0.003 s 时刻的流量计内部压力分布,半透明阴影部分为初始时刻齿轮转子位置.与初始时刻相比齿轮转子发生了一定转动,并且在闭死容积部分已经出现了局部高压和低压,最高压力达到 32.910 5 MPa,低压降低至 29.328 6 MPa。

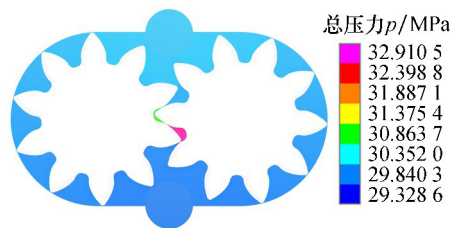


图 12 0.03 s 时流量计内部压力分布

Fig.12 Pressure distribution in flowmeter at 0.03 s

利用仿真模拟试验的方法对圆柱齿轮流量计内部间隙中流动的具体参数来进行监测和观察.先前设置的初始时刻分布在驱动齿轮齿顶与壳体内壁之间的监测点,由逆时针方向分别将其命名为监测点 01 至监测点 06,提取它们在各个时刻的压力,结果如图 13 所示。

由图 13 可以看到间隙中的各个点上压力也出现了明显的周期性脉动,并且六个监测点之间也存在着几乎等值的压力降,与流量计内部压力云图相符合.从数值上体现出流量计总的压力损失均匀地

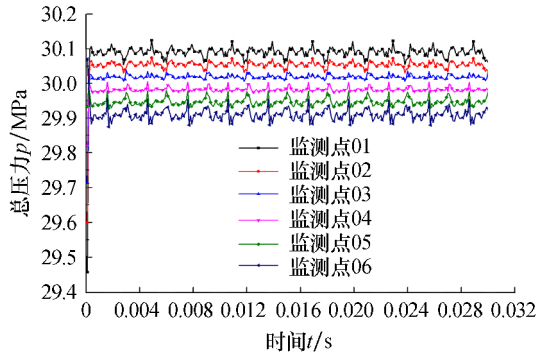


图 13 监测点压力脉动

Fig.13 Pressure pulsation at monitoring points

分布在每一间隙上,从而影响着圆柱齿轮流量计间隙泄漏的大小以及其测量精确度.

### 3.3.2 流量计内部泄漏

为了直观地观察与圆柱齿轮流量计内部间隙泄漏的具体流动情况,截取流量计在 0.024 s 时刻内部流线分布图,显示变量为速度在 z 轴方向的分量  $v_z$ ,如图 14 所示.

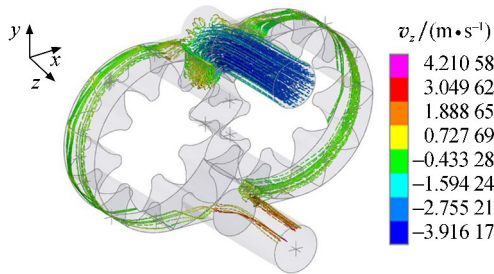


图 14 流量计内部泄漏流线图

Fig.14 Streamline of inner leakage flow of flowmeter

大量流线从流量计入口进入,大部分流量将会随着齿轮转动由齿轮齿腔带到出口处,而泄漏则沿着齿轮流量计周向流动到出口,只有很少的泄漏流线到达出口,说明流量计内泄漏是确实存在的.

圆柱齿轮流量计模型仿真结果显示,流量计进出口流量在计量过程中出现了比较明显的脉动现象,通过对入口和出口流量的叠加,得到了流量计瞬时的内部泄漏,图 15 为流量计瞬时流量及内泄漏曲线.对泄漏以及实际通过流量计的流量进行平均处理并计算其相对误差,得到 VC 0.2 圆柱齿轮流量计在工作压力 30 MPa 情况下测量运动黏度为 46 mm<sup>2</sup>/s 油液时的相对误差为 0.4914%;这与 KRACHT 齿轮流量计样本中给出的当测试介质黏度大于等于 50 mm<sup>2</sup>/s 时的测量精度为 ±0.5% 较为符合.

### 3.3.3 泄漏对测量精度的影响

利用以上方法,对 VC 0.2 圆柱齿轮流量计在

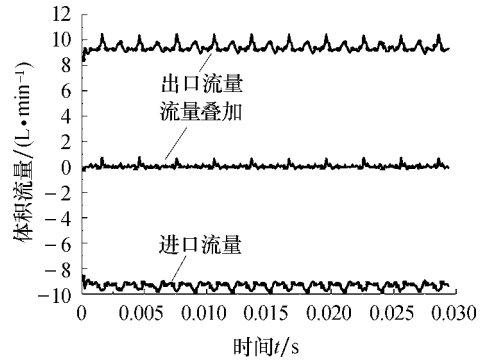


图 15 流量计瞬时流量曲线

Fig.15 Transient flow curve of flowmeter

测量油液黏度分别为 15、22、32、46、68、100、150 mm<sup>2</sup>/s 油液时由于内泄漏造成的误差进行仿真计算,并与理论计算结果相比较,结果见表 2.表 2 为使用两种不同方法计算得到的流量计测量误差.

表 2 流量计测量误差

Tab.2 Measurement error of flowmeter

油液运动黏度/ (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	理论计算 误差/%	模型仿真 误差/%
15	7.176 7	0.519 9
22	4.865 7	0.515 1
32	3.326 9	0.507 0
46	2.310 2	0.491 4
68	1.564 7	0.463 0
100	1.062 5	0.419 9
150	0.706 9	0.353 7

将其绘制成曲线如图 16 所示,由流量计测量误差曲线可以看出:对于 VC 0.2 型圆柱齿轮流量计,随着被测油液运动黏度的增大的同时压力损失也有所增大,流量计内部泄漏整体上呈减小的趋势,测量精度也随油液运动黏度增大而变得越高;与圆柱齿轮流量计样本中试验得到的测量精度相对比,发现模型仿真结果要比理论计算结果更加切合实际,并且得到了被测油液运动黏度变化时圆柱齿轮流量计测量精度产生的微小变化.

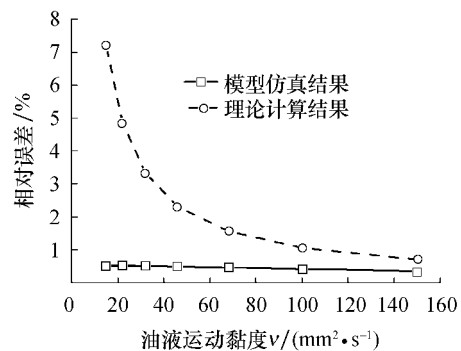


图 16 测量误差曲线

Fig.16 Measurement error curve

尽管油液黏度在小范围内变化时流量计测量精度变化不是特别明显,但是随着对流量测量精度更高的追求,在对流量计电子计量部分加入修正时,根据流量计测量精度的变化所加的修正量也需要随之改变。

## 4 结论

1) 利用平行圆盘放射流理论和平行平板间隙流动理论对流量计端面间隙泄漏以及径向间隙泄漏的数学模型分别进行了建立,通过 Matlab 编程计算分析了在固定压力损失和间隙高度不同的情况下被测油液运动黏度变化对圆柱齿轮流量计端面和径向间隙泄漏的影响。

2) 通过计算机辅助设计软件对 VC 0.2 型圆柱齿轮流量计机械部分进行了建模,并对流量测量过程中流量计内部流场进行了仿真分析,能够实现在不同测量介质和不同使用条件下对圆柱齿轮流量计内部的可视化分析。

3) 将理论计算结果、模型仿真结果以及圆柱齿轮流量计样本中给出的试验结果相对比发现:对圆柱齿轮流量计进行模型仿真不仅可以节约对其进行试验的成本和时间,并且可以更加精确地得到测量不同黏度的油液时测量误差的具体数值,从而通过在流量计电子部分加入不同的修正量以达到更高的测量精度。

## 参考文献:

- [1] 张 斌,徐 兵,马吉恩.液压领域中的高精度流量计——容积式流量计 [J].液压与气动,2005(3):53-57.
- [2] 付春保.动态齿轮流量计的实验研究 [D].淮南:安徽理工大学,2015.
- [3] 张 军,刘 军,王永生.新型内齿轮流量计的设计与研究 [J].机床与液压,2009,37(4):62-63.
- [4] 王 伟.齿轮流量计的动态流量测量研究 [D].淮南:安徽理工大学,2015.
- [5] 李 义.齿轮式动态流量计的理论研究 [D].淮南:安徽理工大学,2015.
- [6] KOLAH I K, SCHRODER T, ROCK H. Model based density measurement with Coriolis flowmeter [J]. Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(4): 1258-1262.
- [7] KIM J, KANG T, KAUIH S K. Transient air/fuel ratio control of a multi-point injection engine with an integration-type ultrasonic flowmeter [J]. Engineering Index, 2001, 215(3): 385-391.
- [8] 苏彦勋,梁国伟,盛 健.流量计量与测试 [M].北京:中国计量出版社,2007.
- [9] 信彦峰,桑培勇.圆柱齿轮流量计初探 [J].中国计量,2008(5):67-69.
- [10] 许贤良,赵连春,王传礼.复合齿轮泵 [M].北京:机械工业出版社,2006.
- [11] 赵万勇,刘天宝,梁 森.多级泵三间隙平衡盘间隙流动的理论分析 [J].兰州理工大学学报,2006,32(6):62-64.
- [12] 张也影.流体力学 [M].2 版.北京:高等教育出版社,1986.