

文章编号 1004-924X(2014)02-0390-07

# 气浮式测力传感器静特性的影响因素

黄斌<sup>1</sup>, 陈世静<sup>1\*</sup>, 张文伟<sup>2</sup>, 陶佳月<sup>1</sup>, 易嘉靖<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 国家蒸汽流量计量烟台检定站, 山东 烟台 264000)

**摘要:**采用理论、仿真及实验相结合的方法研究了气膜厚度、供气压力变化以及测压孔的设置对气浮测力传感器静特性的影响。叙述了喷嘴浮板机构的工作原理,建立了静特性方程。在不同气膜层厚度、不同供气压力和有无测压孔条件下,运用Fluent软件仿真出流场的气膜层速度和压力分布曲线,根据曲线分析了它们各自对气膜流场静特性的影响。最后,在气浮喷嘴实验平台上进行了实验验证。实验结果表明:气膜层厚度为5~100  $\mu\text{m}$ ,供气压力分别为303、505、707 kPa,软件仿真和实验所得到的线性度曲线、灵敏度曲线走向一致;有无测压孔对气膜层的承载力、速度没有太大影响。结果表明气膜厚度、供气压力的变化会影响气浮测力传感器静特性,而测压孔的设置对测力传感器的静特性无影响。

**关键词:**测力传感器;喷嘴浮板机构;静特性;气膜厚度;进气压力;测压孔

**中图分类号:**TP212.12;TH823 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142202.0390

## Influence factors on static characteristics of flotation force transducers

HUANG Bin<sup>1</sup>, CHEN Shi-jing<sup>1\*</sup>, ZHANG Wen-wei<sup>2</sup>, TAO Jia-yue<sup>1</sup>, YI Jia-jing<sup>1</sup>

(1. School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering,  
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. National Steam Flowmeter Yan Tai Inspection Station, Yantai 264000, China)

\* Corresponding author, E-mail: 792295655@qq.com

**Abstract:** The effects of gas film thicknesses, gas pressures and pressure holes on the static characteristics of a floating force transducer were explored by combing theory, simulation and an experiment. The working principles of nozzle floating plate mechanism were introduced and a static characteristic equation was established. With a pressure hole or not, the Fluent software was used to simulate the gas blanket level speed and a pressure distribution curve under different gas film thicknesses and different air supply pressures. According to the curve, their influences on the static characteristics of gas membrane flow field were analyzed. Finally, an experiment was performed on a air nozzle experimental platform to verify the obtained results. It shows when the gas film thicknesses range 50  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$  and gas supply pressures are 303, 505, 707 kPa, the linearity curve and sensitivity curve obtained by software simulation are in agreement with that of experimental results. It has no much impact on

收稿日期:2013-08-10;修订日期:2013-10-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61072032);安徽省自然科学基金资助项目(No. 1208085ME76);中国高校基本科研业务费专项基金资助(No. 2013HGBZ0167)

the capacity and speeds of the gas film whether there is the pressure hole or not. It concludes that the gaps of gas film thickness and inlet pressures will effect on the flow field characteristics of nozzle floating plate mechanism seriously, while setting the pressure hole has not affect on it.

**Key words:** force sensor; spray nozzle floating plate mechanism; static characteristics; gas film thickness; inlet pressure; pressure hole

## 1 引 言

气浮式测力传感器静特性是评价传感器性能的重要指标,主要包括线性度、灵敏度、稳定性、准确性等。气浮式测力传感器是新型的六维力传感器,六维力传感器在机器人操作手、火箭发动机推力测试、医学治疗装备以及体育运动中人体足力信息的测试等场合有重要的应用<sup>[1-4]</sup>。至今,国内外六维力传感器主要有梁式结构、筒形结构、十字结构和 Stewart 结构等形式<sup>[5-10]</sup>,这些类型的传感器存在维间耦合现象,测量精度难以突破 1%FS。气浮式六维力传感器能有效避免维间耦合现象,大幅提高六维力测量精度<sup>[11-12]</sup>。但目前对气浮式测力传感器静特性的研究很少。喷嘴浮板机构是构成气浮式六维力传感器的基本单元,本文将基于简化的二维模型分析研究气浮式测力传感器的静特性。

从传感器设计的完整性角度看,气浮式测力传感器静特性与喷嘴结构及各部位(包括承压腔、节流孔、测压孔)的尺寸、供气压力大小等因素有关,本课题前期研究过喷嘴半径、承压腔及节流孔的尺寸对静特性的影响。为了研究气膜厚度、供气压力变化以及测压孔的设置对气浮测力传感器静特性的影响,本文采用理论、仿真及实验相结合的方法。首先根据诺维-斯托克斯方程建立喷嘴浮板机构静特性方程,再通过 Fluent 软件仿真及实验研究喷嘴浮板之间气膜流场特性(包括线性度、灵敏度、承载力等)及其变化规律,揭示静特性与喷嘴结构参数、供气压力及测压孔之间的内在联系。其中,在仿真和实验分析过程中,由于 Fluent 软件的特点,它不能直接得到输入为承压腔压力,输出为承载的曲线,本文取气膜厚度为中间变量描述仿真和实验结果,因为当喷嘴结构及各部位的尺寸、供气压力大小等参数一定时,承载与气膜厚度及承压腔压力一一对应,所以取气膜厚度不会影响静特性的分析。本文为气浮测力传

感器气膜流场特性及其变化规律研究提供了科学依据,为气浮式六维力传感器的进一步研制提供了理论依据,对气浮式六维力传感器的研究具有重要意义。

## 2 喷嘴浮板机构静特性方程

### 2.1 工作原理

气浮测力传感器的基本工作单元是喷嘴和浮板组成的喷嘴浮板机构,其二维模型如图 1 所示。上面为浮板,下面为喷嘴,其中喷嘴承压腔半径为  $a$ ,喷嘴半径为  $b$ ,气膜层厚度为  $h$ ,供气压力为  $p_0$ ,承压腔内气体压力为  $p_d$ ,大气压力为  $p_a$ , $u$  为气膜层内任一点的速度。以平行喷嘴半径方向为  $x$  轴,垂直喷嘴半径方向为  $y$  轴建立直角坐标系,并设定  $y$  轴方向上气膜层厚度为  $h$  时的承载力为  $W$ ,则根据诺维斯托克斯方程可以建立承载力  $W$  与承压腔内压力  $p_d$  之间的函数关系。气浮测力传感器工作时通过测量承压腔内的压力即可计算出喷嘴的承载力。

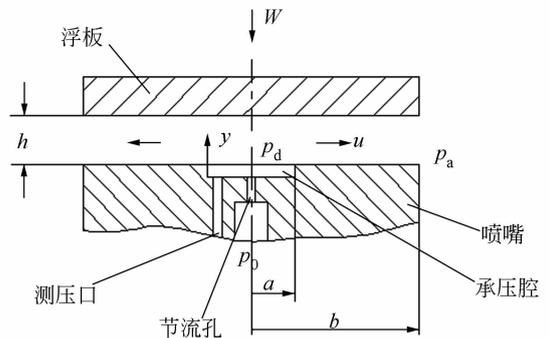


图 1 气浮测力传感器二维模型

Fig. 1 Two-dimensional model of flotation force sensor

### 2.2 静特性方程

诺维-斯托克斯 (Navier Stokes) 方程非常复杂,需要根据喷嘴浮板机构特点对其合理简化,以

便建立简洁使用的喷嘴浮板机构静特性方程。由于喷嘴与浮板是用高导热的金属材料,喷嘴与浮板之间的气膜层工作时产生的热量绝大部分可由金属传出去或随气体排出,气膜厚度远远小于喷嘴直径,因此可以作以下假设:(1)整个气膜工作区为等温流动且惯性力的影响可以忽略;(2)间隙内的流动是附面层完全发展的层流;(3)垂直于气流的截面上的压力、速度都是恒定的;(4)气体与浮板和喷嘴端面之间的接触面上不存在滑动。则气膜层内的压力分布函数可以表示为:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (1)$$

其中: $u$  为气膜层内任一点的速度, $p$  为该点气体的压力, $\mu$  为动力黏度, $r$  为该点到喷嘴中心线的距离。运用诺维-斯托克斯方程,流出间隙的气体流量为:

$$\omega_{\text{out}} = \frac{\pi \rho_a h^3}{12 \mu p_a \ln(b/a)} (p_d^2 - p_a^2), \quad (2)$$

式中: $\rho_a$  为大气密度。

另一方面,可由通过喷嘴的绝热喷流式给出流入间隙的气体流量为:

$$\omega_{\text{in}} = \psi * c_0 * A \frac{p_0}{\sqrt{PT}}, \quad (3)$$

式中: $\psi$  为喷嘴流出速度系数, $c_0$  为喷嘴的流量系数, $A$  为供气孔面积, $R$  为气体常量, $T$  为绝对温度。 $\omega_{\text{out}} = \omega_{\text{in}}$ ,令式(2)等于式(3),则承压腔压力  $p_d$  为:

$$p_d^2 - p_a^2 = \frac{12 \mu p_a \ln(b/a) \psi c_0 A p_0}{\pi h^3 \rho_a \sqrt{RT}}, \quad (4)$$

同理,承压腔压力  $p_d$  为:

$$p_d^2 - p^2 = \frac{12 \mu p \ln(r/a) \psi c_0 A p_0}{\pi h^3 \rho \sqrt{PT}}, \quad (5)$$

式中: $\rho$  为半  $r$  径截面处的密度。

式(4)同式(5)相除,因为为等温过程,  $\frac{p_a}{\rho_a} =$

$\frac{p}{\rho} = RT$ ,变量分离得,消去公因子  $\frac{12 \mu \psi c_0 A p_0}{\pi h^3 \sqrt{RT}}$ ,求出  $p$  为:

$$p = p_d * \left[ 1 - \left\{ 1 - \left( \frac{p_a}{p_d} \right)^2 \right\} \frac{\ln(r/a)}{\ln(b/a)} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

代入承载力计算公式:

$$W = \pi a^2 p_d + \int_{r_0}^{r_1} 2\pi r p dr - \pi b^2 p_a, \quad (7)$$

为了简化,假设气流为不可压缩流,进行积

分,得到比实际值偏低一点的近似结果:

$$W = (p_d - p_a) \frac{\pi(b^2 - a^2)}{2 \ln(b/a)}. \quad (8)$$

式(8)即为气浮测力传感器工作原理的理论依据,表明当喷嘴直径和承压腔直径确定时喷嘴承载力  $W$  与承压腔压力  $p_d$  之间呈函数关系,测出承压腔内的压力即可推算出喷嘴的承载力。

### 3 喷嘴浮板机构气膜流场仿真

#### 3.1 边界条件

初始结构参数设定为:节流孔直径 0.4 mm,节流孔深度 1 mm,承压腔直径 6 mm,承压腔深 0.15 mm,喷嘴外径 20 mm。

计算采用  $k-\epsilon$  双方程湍流模型,介质为理想气体,环境压力为 1 个大气压,环境温度为 300 K,压力入口,压力出口,壁面采用固壁无滑移,求解器采用双精度分离隐式求解器,Space 选择轴对称,压强速度耦合方程为 Simplec 算法。

#### 3.2 气膜层厚

喷嘴浮板机构测力操作是一个动态过程,当供气压力确定后气膜层厚度与浮板上的作用力大小、承压腔压力一一对应,研究喷嘴浮板机构工作特性就可以对不同气膜层厚度下的静态特性进行仿真分析。根据喷嘴浮板机构常用的量程范围,分别取下述气膜层厚度进行仿真:5、10、20、30、40、50、60、80 和 100  $\mu\text{m}$ ;供气压力分别取 303、505 和 707 kPa。先求出各气膜厚度对应的承压腔压力,再代入公式(8)得到承载力,绘出对应承载力分布如图 2 所示。用 Fluent 仿真出节流孔出口处水平方向的速度分布如图 3 所示。

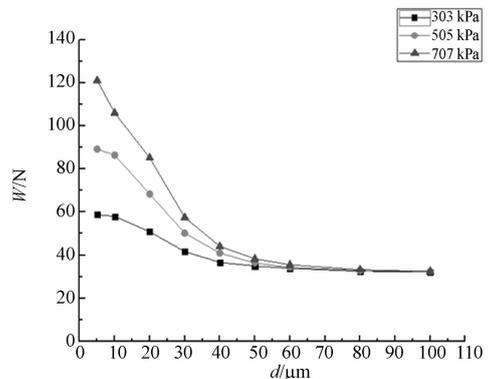


图 2 不同气膜层厚度下的承载力分布曲线

Fig. 2 Bearing capacity distribution curves under different gas layer thicknesses

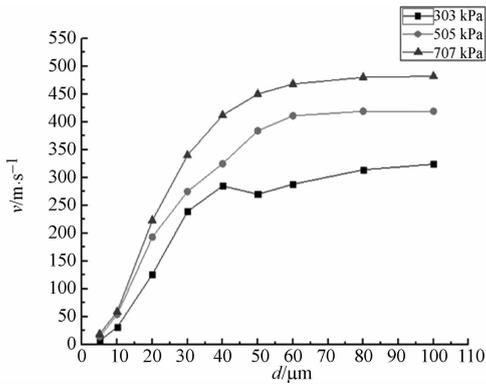


图3 不同气膜层厚度下的速度分布曲线

Fig. 3 Velocity distribution curves of different gas layer thicknesses

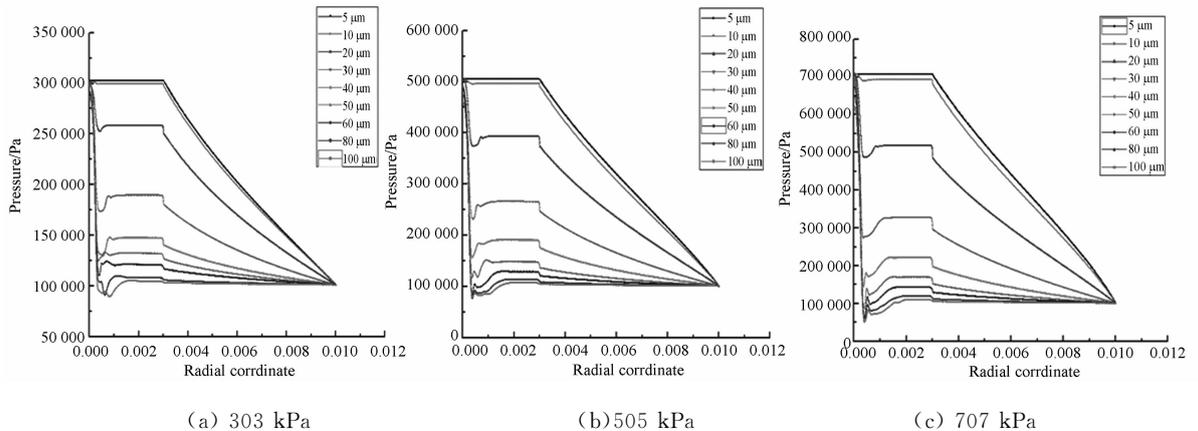


图4 不同供气压力时各个气膜层厚度的压强分布曲线

Fig. 4 Pressure distribution curves of each thickness of gas layer under different supply pressures

从图4的变化可以看出,随着气膜层厚度的增大,气体在节流孔出口附近压力陡降,气膜层厚度越大压力陡降值越大,直至出现负压,在压强降至最低点后又出现压力回升现象,而且随着气膜层厚度的增大,压力回升幅度也逐渐减小,在承压腔边沿由于气膜截面的突然缩小而产生了局部的压力损失,当供气压力增大时,上述情况加剧。因此随着气膜层厚度的增加,压力损失增大,不仅导致承载能力有所减弱而且承载效率也随之降低。

### 3.4 测压孔

由式(8)可知气浮测力传感器工作时只需测量出喷嘴承压腔内的压力即可计算出喷嘴的承载力。所以必须在承压腔内设置测压孔来实时测量承压腔内气膜层的压力,为了探究在承压腔内设

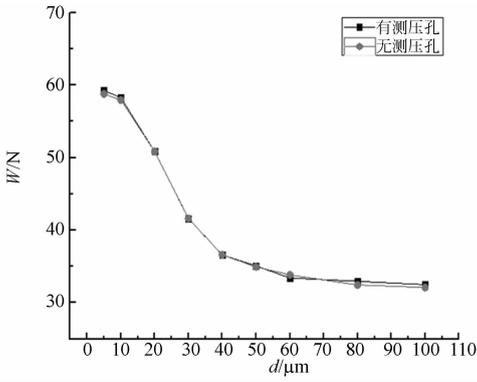
从图2和图3可以看出,在同一供气压力下,随着气膜层厚度的增加(对应的是喷嘴的承载力逐渐减小),气膜层内速度逐渐变大,甚至出现超音速流,使得流动状态逐渐趋于紊乱,这将引起喷嘴浮板机构失稳而无法工作;当供气压力增加时,出现超音速的气膜层厚度值减小,但承载力逐步增大,这说明若依靠增加供气压力的方式获得较大的承载力必须牺牲喷嘴浮板机构的稳定工作区域。

### 3.3 供气压力

供气压力是影响喷嘴浮板机构特性的关键因素,不同的供气压力承载力不同,且供气压力大小还会影响机构的稳定性。通过Fluent仿真3、5和7 atm供气压力时的气膜水平方向的压强分布如图4所示。

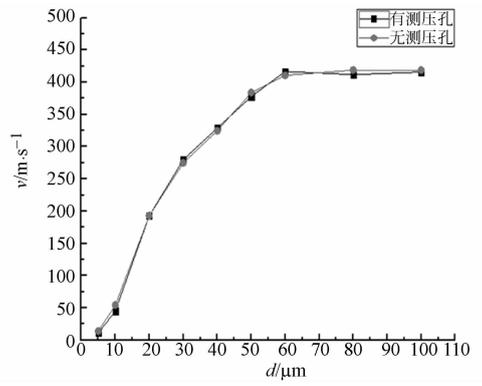
置测压孔是否会对承压腔内气膜层乃至整个喷嘴浮板机构气膜层的流场静特性产生不稳定影响,在离节流孔4 mm处设置0.4 mm的测压孔,对气膜层厚度为5、10、20、30、40、50、60、80和100 μm;供气压力分别为303和505 kPa时的工况进行了仿真实验,并与无测压孔时的流场静特性进行对比,得到如图5、图6所示的流场参数分布曲线。

通过图5、图6所示可知,在常规供气压力下(小于505 kPa),不同气膜层厚度的承载力和速度分布曲线几乎一致,只有一小段部分存在很小的偏差,可以认为在承压腔内加上测压孔后对喷嘴浮板机构气膜层内的流场特性几乎没有影响,表明测压孔的设置对喷嘴浮板机构特性影响不大,即不会造成测量误差,在承压腔内加测压孔测



(a)不同气膜层厚度的承载力分布曲线

(a) Bearing capacity distribution curves under different gas layer thicknesses

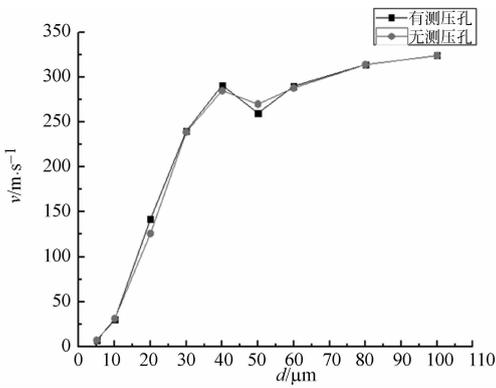


(b)不同气膜层厚度的速度分布曲线

(b) Velocity distribution curves of different gas layer thicknesses

图 6 505 kPa 时的流场参数分布

Fig. 6 Distributions of flow parameters at 505 kPa

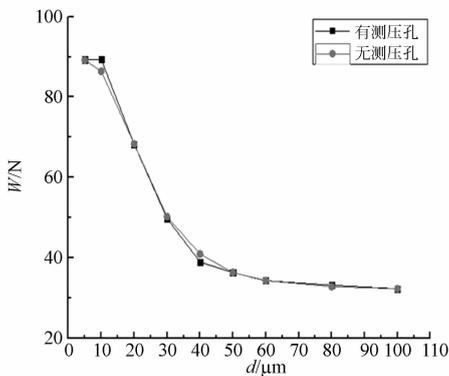


(b)不同气膜层厚度的速度分布曲线

(b) Velocity distribution curves of different gas layer thicknesses

图 5 303 kPa 时的流场参数分布

Fig. 5 Distributions of flow parameters at 303 kPa



(a)不同气膜层厚度的承载力分布曲线

(a) Bearing capacity distribution curves under different gas layer thicknesses

量喷嘴浮板机构气膜层压力的方案可行。其中图 5(b)曲线有一段不单调,这是仿真时收敛变慢导致仿真结果出现波动引起的,但两条曲线的分布基本一致,说明测压孔的设置不会对气浮测力传感器性能产生明显影响。

### 4 实验验证

设计加工节流孔直径 0.4 mm,节流孔深度 1 mm,承压腔直径 6 mm,承压腔深 0.15 mm,喷嘴外径 20 mm,在离节流孔 4 mm 处设置 0.4 mm 的测压孔的喷嘴,并在如图 7 所示的静特性实验装置上进行实验。

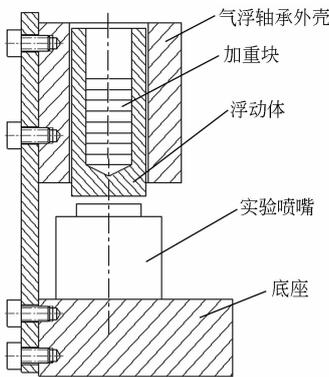
以线性度及灵敏度形式与仿真结果进行对比验证。线性度是指从标定和数据处理得易操作角度出发,输入值和输出值之间呈现一种线性的关系,输入为承压腔压力,输出为承载。由于 Fluent 无法直接得到输入为承压腔压力,输出为承载的曲线,而气膜厚度及承压腔压力一一对应,可以取气膜厚度作为输入来分析静特性,定义灵敏度  $\Delta = (W_1 - W_2) / (h_1 - h_2)$ ,即将承载力对气膜层厚度求导。

实验在供气压力分别为 303、505 和 707 kPa 条件下,通过调节加重块使气膜层厚度分别为 5、10、20、30、40、50、60、80 和 100  $\mu\text{m}$ ,测得相应的承载力,并用测压表测得相应的承压腔压力。绘出线性度及灵敏度曲线,与仿真结果进行对比,得到如图 8 所示承载力与承压腔压力关系曲线及图 9 所示的灵敏度分布曲线。



(a)实物图

(a)Physical map



(b)原理图

(b)Principle map

图 7 喷嘴浮板机构静特性实验装置

Fig. 7 Static characteristic experiment device for spray nozzle floating plate mechanism

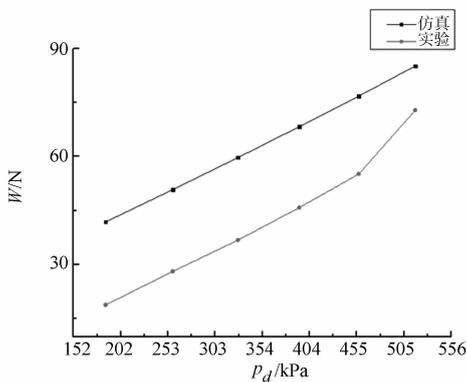


图 8 承载力与承压腔压力关系曲线

Fig. 8 Curve of carrying capacity vs confined cavity pressure

从图 8 可以观察到实验与软件仿真建立的承载力与承压腔压力之间的关系曲线近似平行,由于测量及模型简化过程中存在系统及随机误差,

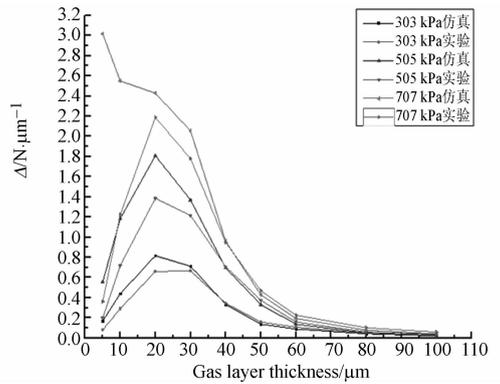


图 9 不同供气压力下的灵敏度分布曲线

Fig. 9 Sensitivity distribution parameters at different supply pressures

所以两条曲线存在误差(误差可补偿),但走向一致且都呈现一种近似的线性关系(即线性度基本一致),验证了仿真得到曲线的可靠性。由图 9 可以观察到除了供气压力为 707 kPa 外,在同一供气压力时实验和 Fluent 软件仿真所得到的灵敏度曲线走向一致,而且灵敏度较大的气膜层段均在 10~50 μm 之间。供气压力为 707 kPa 时,仿真和实验曲线趋势不一致是由于供气压力偏大,喷嘴浮板机构发生了“气锤”不稳定现象,所以设计和实验时尽量避免大的供气压力。

还可以看出同一供气压力时仿真结果比实验结果稍微偏大,随着供气压力的提高两者之间的差值随之增大,也就是说同一气膜层厚度时实验得到的喷嘴承载力值比软件仿真值小,形成这种现象主要有以下几方面原因:(1)软件仿真忽略了扩散效应引起的压力损失。由于承压腔内气体压力与节流孔供气压力存在压差,所以在节流孔出口处存在扩散效应,会导致实验所得的喷嘴承载力减小。(2)实验时喷嘴与浮板之间的气流周向运动也会导致实验得到的喷嘴承载力变小。(3)节流孔和测压孔管道内的沿程压力损失引起实验得到的喷嘴承载力减小。综上所述,上述实验验证了仿真的正确性,仿真结果可信。

## 5 结 论

本文通过理论分析、软件仿真与实验验证研究了喷嘴浮板机构中气膜层厚度分别为 5、10、20、30、40、50、60、80 和 100 μm,供气压力分别为 303、505 和 707 kPa 时气膜流场压力分布特性和

速度分布特性,以及有无测压孔时对气膜流场静特性的影响,结果表明:(1)同一供气压力时,随着气膜层厚度的增加(即浮板上的作用力减小),气膜层内气流速度逐渐变大,压力分布走势不变,但是承压腔内的稳定气垫压力值逐渐减小时,喷嘴浮板机构工作稳定性趋弱;(2)随着供气压力的增

大,气膜层内气流速度增大,承载力也增大,但是出现超音速的气膜层厚度值减小;(3)承压腔内加测压孔对喷嘴浮板机构流场速度和压力分布特性没有明显影响。本文的结果为气浮式六维力传感器的进一步研制提供了理论依据,对气浮式六维力传感器的研究具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 袁树峥,张自强,高文秀,等. 康复外骨骼人机约束处六维力传感器设计[J]. 机械设计与制造, 2013, 1(1): 23-25.  
YUAN SH ZH, ZHANG Z Q, GAO W X, *et al.*. Design of six-axis force torque sensor for the connection between the rehabilitation exoskeleton and human body[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2013, 1(1): 23-25. (in Chinese)
- [2] CHEN W M, LEE, PETER V S, *et al.*. A novel gait platform to measure isolated plantar metatarsal forces during walking [J]. *Journal of Biomechanics*, 2010, 43(10): 2017-2021.
- [3] 侯雨雷,曾达幸,姚建涛,等. 超静定并联式六维力传感器动力学[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(7): 1594-1560.  
HOU Y L, ZENG D X, YAO J T, *et al.*. Dynamics of hyperstatic parallel six component force sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1594-1560. (in Chinese)
- [4] WATSON P C, DRAKE S H. Pedestal wrist force sensors for industrial assembly [C]. *Proc. of the 5th Int. Syrup. on Industrial Robots, Chicago*, 1975: 501-511.
- [5] FELIX B, SIMON M, BRADLY J N. A six-axis MEMS force - torque sensor with micro-Newton and nano-Newtonmeter resolution [J]. *Journal of Microelectro Mechanical Systems*, 2009, 18(2) 433-441.
- [6] YOSHIKAWA T, MIYAZAKI T. A six-axis force sensor with three-dimensional cross-shape structure [C]. *Proc. O, IEEE Conf. on Robotics and Automation*, 1989(1): 249-255.
- [7] 赵磊,刘巍,巩岩. 预紧式 Stewart 结构六维力/力矩传感器[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(12): 2955-

2958.  
ZHAO L, LIU W, GONG Y. Pre-stressed six-axis force/torque sensor based on Stewart platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2955-2958. (in Chinese)
- [8] RANGANATH R, NAIR P S, MRUTHYUNJAYA T S. A force-torque sensor based on a Stewart platform in a near-singular configuration [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2004, 39(9): 971-998.
- [9] 高理富,宋宁,葛运建,等. 航天机器人用六维腕力传感器动态特性研究[J]. 机器人, 2002, 24(4): 319-323.  
GAO L F, SONG N, GE Y J, *et al.*. Research on Dynamic Characteristics of Six-axis Force Sensor for Aeronautic Robot [J]. *Robot*, 2002, 24(4): 319-323. (in Chinese)
- [10] 刘俊,秦岚,李敏,等. 平板式压电六维力/力矩传感器的研制[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(7): 1570-1572.  
LIU J, QIN L, LI M, *et al.*. Development of parallel piezoelectric six-axis force/torque sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1570-1572. (in Chinese)
- [11] 黄斌,余晓芬,黄英. 气浮式六维力测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4): 16-18.  
HUANG B, YU X F, HUANG Y. Study on Air Noating Six-axis Force Measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(4): 16-18. (in Chinese)
- [12] 黄斌,余晓芬,黄英,等. 压力式气浮测力传感器静特性研究[J]. 计量学报, 2012, 33(1): 31-34.  
HUANG B, YU X F, HUANG Y, *et al.*. Study on the static characteristics of force floating measurement sensor based on pressure measurement [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2012, 33(1): 31-34. (in Chinese)

## 作者简介:



黄 斌(1963—),男,安徽庐江人,博士,副教授,硕士生导师,1983年、2003年、2012年于合肥工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事精密仪器及机械、测控技术与仪器等领域的研究。E-mail: ahbb7310168@163.com



陈世静(1988—),男,江西瑞昌人,硕士研究生,2011年于江西理工大学获得学士学位,主要从事精密仪器及机械方面的研究。E-mail: 792295655@qq.com