

液体离心式喷嘴脉动流量测量方法^{*}

杨立军, 王向东, 富庆飞

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 为了对离心喷嘴动态特性进行实验研究, 根据离心喷嘴内部流动的特点, 以多孔钛材料为电极并结合锁相放大电路研制了一种离心喷嘴内部脉动流量的测量装置, 并对敞口型模型离心喷嘴进行了实验测量。初步实验结果表明此方法及测量传感器可用于离心喷嘴内部脉动流量测量, 对离心喷嘴动态特性的实验研究具有重要意义。

关键词: 离心喷嘴; 动态特性; 脉动流量; 电导测量; 传感器

中图分类号: V434 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2008) 06-0721-05

Conductance measurement method of pulsing flow in liquid swirl injector

YANG Li-jun, WANG Xiang-dong, FU Qing-fei

(School of Astronautics, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract In order to investigate dynamic characteristic of swirl injector experimentally, an inner pulsing flow measurement method has been developed according to the characteristics of the liquid flow in swirl injector. Experimental measurement of open-end swirl injector was conducted with this sensor. The experimental results show that the method and sensor can meet the requirement of pulsing flow measurement in the swirl injector. It has remarkable significance for the experimental investigation of swirl injector dynamic characteristic and LRE unstable combustion.

Key words Swirl injector; Dynamic characteristic; Pulsing flow; Conductance measurement; Sensor

1 引 言

离心喷嘴是液体火箭发动机广泛采用的喷注单元型式, 脉动流量测量是离心喷嘴动力学实验研究的技术关键之一。从目前液体流量测量技术现状看, 电磁流量计是唯一能够测量导电液体脉动流量的传感器, 但是只适用于测量较低频率 (几十赫兹以下) 脉动流量^[1], 无法满足中、高频脉动流量的测量要求, 并且电磁流量计结构尺寸较大, 无法在喷嘴内安装。因此必须探索可行的脉动流量测量方法以满足离心喷嘴动力学的实验研究需要。Bazarov^[2]介绍了使用两个环形电极来对离心喷嘴内的液膜厚度进行测量, 但并未有详细资料公开。除文献 [2] 外国内外未见有针对脉动环状液膜的测量研究, 但已经有多种 (如探针法、平板电极法等) 利用电极测量各种液体电导的方法。Asali^[3]等人利用环状电极对垂直气/液环

状管流的液膜厚度和相界面阻力进行了研究。随后 Andreussi 等^[4]和 Tsochatzidis 等^[5]通过对 Coney^[6]的平板电极测量理论的扩展对环形电极进行了研究。刘兴斌利用类似于 Tsochatzidis 给出的环形电极测量原理实现了对轴向环形四电极局部持水率计优化设计及两相流相关性流量测量^[7]。尽管采用电导法测量液体及两相流量的资料很多, 但是这些资料几乎都是针对稳态流量测量。本文研究并实现了一种使用电导法测量出液膜厚度扰动值从而得到流量扰动量的方法, 初步实验表明可用于离心喷嘴内脉动流量测量, 对离心喷嘴动态特性实验研究具有重要意义。

2 测量原理

离心式喷嘴结构及各流动参数如图 1 所示。液体由切向通道进入旋流腔后将形成旋流, 旋流腔及喷嘴口处的中心位置出现空气涡。液体在喷嘴内部的

* 收稿日期: 2007-10-25 修订日期: 2008-05-19。

基金项目: 国家自然科学基金 (50406007)。

作者简介: 杨立军 (1970—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为液体火箭发动机。Email: yanglijun@buaa.edu.cn

流动状态是一旋转的环形液膜。

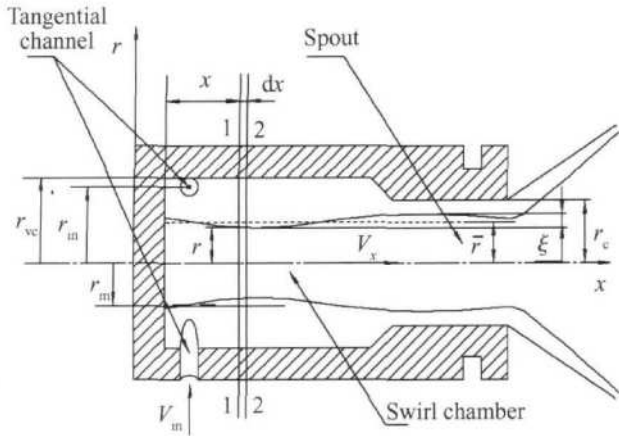


Fig 1 Schematic of swirl injector

在喷嘴轴向 x_0 位置处取 1-1 和 2-2 截面之间 dx 段液膜进行分析, 假设液膜表面径向坐标值仅随时间和轴向坐标变化, 即 $r(t, x)$ 。旋流室液膜厚度为 $h = r_{vc} - r(t, x)$, 喷口液膜厚度为 $h = r_c - r(t, x)$ 。

在某一个时刻 t_0 , x_0 处的液膜表面波径向坐标值为 $r(t_0, x_0)$, $x_0 + dx$ 处的液膜表面波径向坐标值为

$$r(t_0, x_0 + dx) \approx r(t_0, x_0) + \frac{\partial r(t, x)}{\partial x} dx \quad (1)$$

两处径向坐标差为

$$\Delta = \frac{\partial r(t, x)}{\partial x} dx \quad (2)$$

由式 (2) 可以看出, 当 $\partial r(t, x) / \partial x$ 和 dx 较小时, $\Delta \approx 0$ 。根据经验, 液膜厚度与喷口内液膜表面波的波长会相差两个数量级^[2]。因此 $\partial r(t, x) / \partial x$ 较小, 当 1-1 和 2-2 截面之间距离 dx 较小时, 可认为 $\Delta \approx 0$ 即 1-1 和 2-2 截面之间液膜表面波的径向坐标值不随轴向坐标变化。

当采用导电液体时, 离心喷嘴内 1-1 截面和 2-2 截面之间环形液膜的电阻计算公式为

$$R_w = \rho_w \frac{dx}{\pi r(t, x)^2} \quad (3)$$

式中 R_w 为环形液柱电阻; ρ_w 为被测流体电阻率。

由式 (3) 可得

$$r(t, x) = \sqrt{\rho_w \frac{dx}{\pi R_w}} \quad (4)$$

设喷口内液膜平均半径为 r , 液膜振幅为 $\xi(t, x)$, 因此有

$$r(t, x) = r + \xi(t, x) \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (4) 可以得到

$$\xi(t, x) = \sqrt{\rho_w \frac{dx}{\pi R_w(t, x)}} + r \quad (6)$$

在间距 dx 确定的条件下, 式 (6) 表示了液膜振幅和 1-1 和 2-2 截面之间环形液膜电阻的变化关系, 通过测量 $R_w(t, x)$ 就可以得知液膜厚度的振幅 $\xi(t, x)$ 。

液膜厚度的振幅与瞬时流量之间的关系推导过程如下, 在离心喷嘴内部, 液体具有自由内表面的旋流, 液膜表面波的传播情况可用下列类型的波动方程来描述^[2]

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{1}{r_m^4} V_{in}^2 r_{in}^2 \left(\frac{r^2 - r_m^2}{2} \right) \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (7)$$

式中 V_{in} 为液体由切向通道进入旋流腔时速度; r_{in} 为喷嘴内液体旋流半径; r_m 为喷嘴内空气涡的半径。

表面波的传播速度为

$$C = \frac{V_{in} r_{in}}{r_m^2} \sqrt{\frac{r^2 - r_m^2}{2}} \quad (8)$$

式 (7) 可与浅水波传播方程相类比, 对于刚性壁面限制的半无穷空间, 式 (7) 的解为

$$\xi = \xi_{max} e^{i(\omega(t-x/C))} \quad (9)$$

式中 ξ_{max} 为液体表面波的最大振幅。

对于具有自由内表面的轴对称旋转流动, 将运动方程线性化为液体表面波动与轴向速度的关系式

$$\frac{\partial V'_x}{\partial t} = \frac{V_{in}^2 r_{in}^2}{r_m^3} \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (10)$$

对式 (10) 两边 t 进行积分得

$$V'_x = \frac{V_{in}^2 r_{in}^2}{C r_m^3} \xi = \frac{V_{in}^2 r_{in}^2}{C r_m^3} \xi_{max} e^{i(\omega(t-x/C))} \quad (11)$$

轴向速度的最大振幅为

$$|V'_{xmax}| = \xi_{max} V_{in}^2 r_{in}^2 / (C r_m^3) \quad (12)$$

从式 (11) 可以看出, 喷嘴内液体轴向流速振荡与液膜表面振荡同相位, 且相对振幅相等。由流量的公式可得

$$q_v = q_v + q'_v = 2\pi \int_{r_m - \xi}^{r_k} (V_x + V'_x) r dr \quad (13)$$

式中 r_k 为喷嘴旋流腔半径; q_v 为喷嘴瞬时体积流量; q_v 为喷嘴稳态体积流量; q'_v 为喷嘴体积流量振荡量。

对式 (13) 积分并略掉高阶无穷小量, 然后将式 (11) 代入可得到如下公式

$$q_v = 2\pi V_x (r_k^2 - r_m^2) + 2\pi V_x r_m \xi + \pi \frac{V_{in}^2 r_{in}^2}{C r_m^3} \xi (r_k^2 - r_m^2) \quad (14)$$

联立式 (6) 和式 (14) 可得

$$q_v = 2\pi V_x (r_k^2 - r_m^2) + 2\pi V_x r_m \left| \sqrt{\rho_w \frac{dx}{\pi R_w}} + r \right| +$$

$$\pi \frac{V_{in}^2 r_{in}^2}{C r_m^3} \sqrt{\rho_w \frac{dx}{\pi R_w}} + \left| (r_k^2 - r_m^2) \right| \quad (15)$$

右式中第一项为稳态流量,第二项为液体有效截面积变化引起的流量振荡,第三项为液体轴向流速变化引起的流量振荡。由于喷嘴内液体轴向流速振荡与液膜表面振荡同相位,液流轴向稳态速度为

$$V_x = \frac{q_v}{\pi (r_k^2 - r_m^2)} \quad (16)$$

由式(15)可以看出流量的瞬时值可以用环形液膜电阻瞬时值来表征。由于液膜厚度测量的标定精度为 0.005 mm,而喷嘴内液膜厚度的量级为 0.1 mm,所以测量结果是可信的。

3 传感器设计

根据上述测量原理可知,在喷嘴内 1-1 和 2-2 截面处各安装一个环形电极,测出两电极间液体电阻,就可以通过式(15)计算出瞬时流量。由于离心喷嘴内液膜厚度变化量很小,因此测量电极和液体的接触电阻对测量信号质量有着较大的影响。为了减少导电液体和电极间的接触电阻,需要设法增大其接触面积,最终确定电极材料选用多孔钛,钛金属导电性好,耐腐蚀,金属颗粒间的孔隙能增大被测液体与电极有效接触面积。电极间间距的确定按照在大于喷嘴内的液膜厚度的条件下尽量小的原则选取,电极内孔与所测喷嘴的内壁面齐平,几乎对喷嘴内液体流动无影响。图 2 为安装的传感器实物照片。考虑到液体电阻的测量过程是一个电化学过程,在传感器电路设计时为了避免电极的极化现象,采用交流激励,交流激励的频率定为 20 kHz,传感器信号处理采用锁相放大电路^[8]。

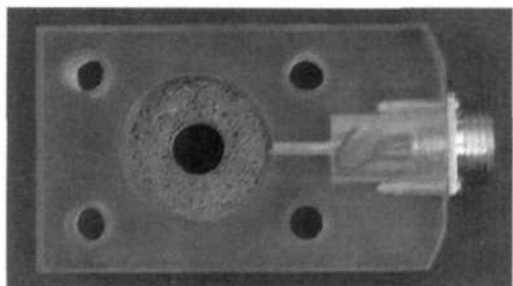


Fig. 2 Schematic of sensing device

传感器标定通过测量标准液膜厚度电阻的方法来完成,标准液膜厚度采用自制的圆环标定装置来实现,标定装置如图 3 所示,不同有机玻璃棒对应不同液膜厚度,液膜厚度精度为 0.005 mm。用输出电压

代表电阻值,标定曲线见图 4。

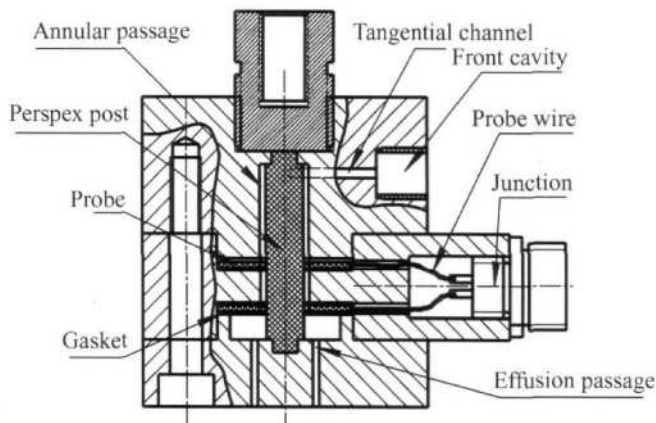


Fig. 3 Schematic of calibration device

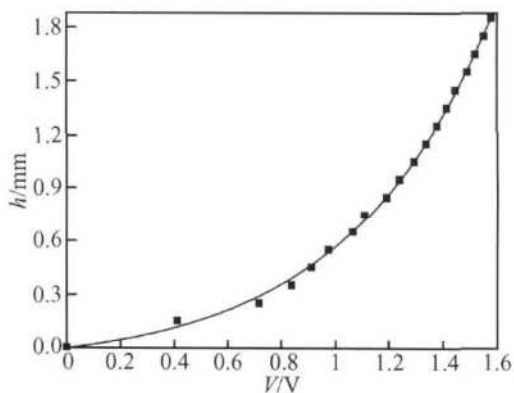


Fig. 4 Calibration curve

4 实验装置与实验件

实验装置如图 5 所示,来流在进入喷嘴之前,经过流量振荡器分流后产生流量脉动。喷嘴进口处动态压力采用昆山双桥传感器厂出产的 CYG1101FT 高频动态压力传感器进行测量。响应频率 0~100 kHz,量程为 0~1.5 MPa,精度达到了 0.15%。

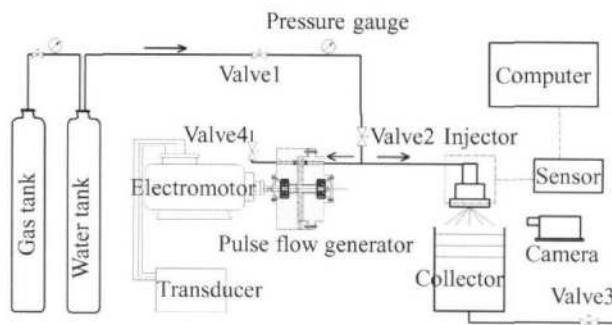


Fig. 5 Injector dynamics experimental system

流量振荡器是产生压力脉动信号的装置,本实验系统采用轮盘式流量振荡器,由电动机驱动轮盘,周期性地截断液流的通道,从而得到频率范围在 0~

1 000 H 的压力脉动信号,图 6为脉动流发生器输出的典型压强波形。

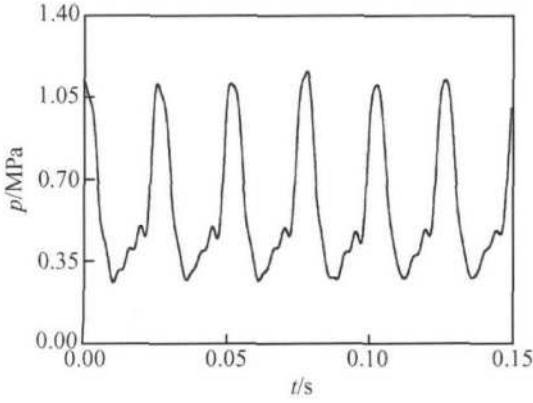


Fig. 6 Pressure signal generated by flow pulse generator

喷嘴实验件结构形式为单切向通道敞口型离心喷嘴,由有机玻璃材料制成,结构及相关参数见图 7。

5 实验结果与讨论

利用实验台和实验件对所研制传感器的性能进

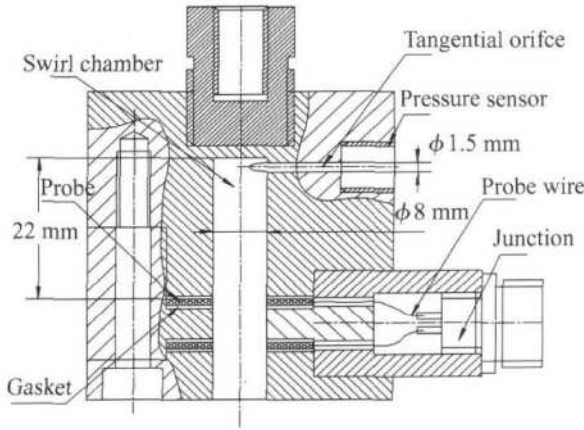


Fig. 7 Schematic of model injector

行初步检验,在进行实验之前,采用内径与喷嘴内径相同的标定装置对液膜厚度标定。采用水作为工质,喷嘴前压力为 0.8 MPa 反压为 1 个大气压。实验过程如下:喷嘴稳态工作一段时间,记录稳态压力和流量,然后开启流量振荡器,记录动态压力和流量。每次实验通过电机转速来控制来流脉动频率,脉动频率从 60~ 500 H z 间隔进行变化,实验结果见图 8。

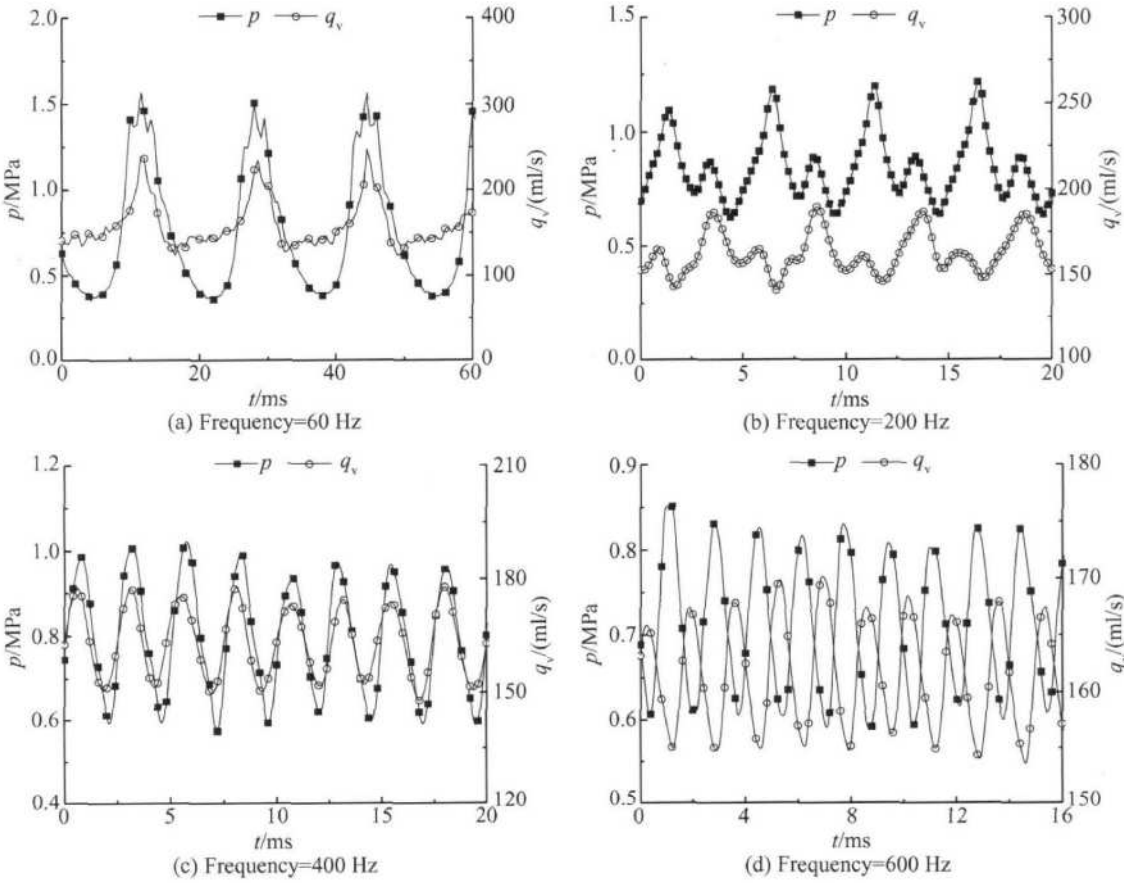


Fig. 8 Pressure and flow fluctuation under different frequency

由图 8 看出, 在来流压力信号有脉动的情况下, 传感器所测量的流量变化信号与来流压力信号的频率相同, 证明了脉动流量传感器在脉动频率方面测量的准确性。从图中可以看出, 不同脉动频率下压力与流量脉动的振幅都不同, 而且流量脉动与压力脉动之间的相位差也随脉动频率不同而变化。

将不同频率下实验测量出的压力信号与脉动流量信号进行处理, 处理方法见文献 [8], 可以得到该实验件喷嘴的幅频和相频特性, 见图 9 图 10。从图中可以看出, 喷嘴的幅频特性曲线随频率的增加呈现出先上升后下降的趋势, 而流量振荡与压力振荡之间的相位差随振荡频率的增加而近乎线性增加。

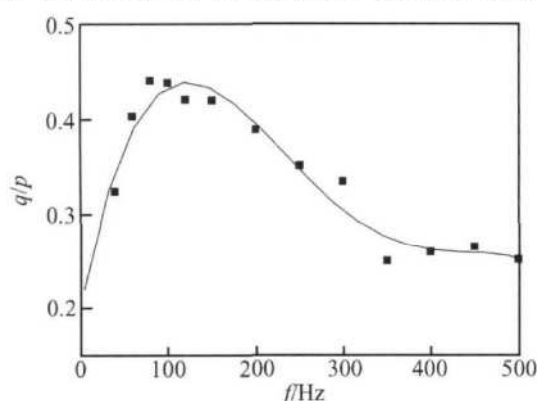


Fig. 9 Amplitude-frequency characteristics of injector

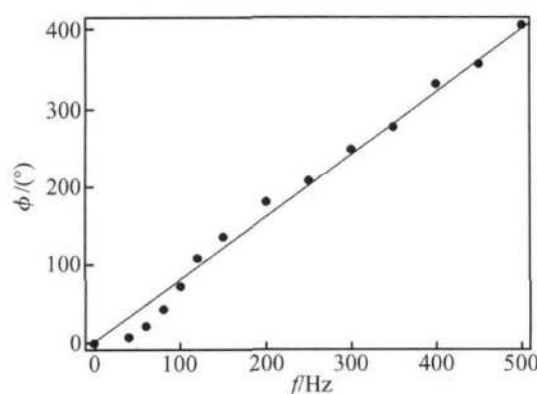


Fig. 10 Phase-frequency characteristics of injector

6 结 论

本文根据离心喷嘴内部液体流动特点, 探索并实现了一种新的脉动流量测量方法。初步的实验结果表

明, 该测量方法能够满足液体离心式喷嘴动力学特性的研究需要, 测量结果基本可信, 传感器结构简单, 成本较低。该方法不但能实现对离心喷嘴脉动流量的测量, 还可以用于离心喷嘴内部动态和稳态液膜厚度的测量, 对认识离心喷嘴的内部流动机理具有一定的意义。所研制的传感器仅完成了频率最大达到 600 Hz 的脉动流量测量实验, 但在来流频率高于 600 Hz 的情况下, 现有传感器电路对微弱信号处理出现困难。由于脉动频率越高, 离心喷嘴内液膜脉动振幅越小, 对传感器电路微弱信号处理能力的要求就越高, 因此研制新型微弱信号处理电路是下一步的工作重点。

参考文献:

- [1] 蔡武昌, 马中元, 瞿国芳. 电磁流量计 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2004
- [2] 巴扎罗夫 V G. 著, 液体喷嘴动力学 [M]. 任汉芬, 孙纪国译. 北京: 航天工业总公司第 11 研究所, 1997
- [3] Asali J C, Hanratty T J. Interfacial drag and film height for vertical annular flow [J]. *AIChE Journal*, 1985, 31 (6): 895~902
- [4] Andreussi P, Donfrancesco A D, Messina M. An impedance method for the measurement of liquid hold-up in two phase flow [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1988, 14 (66): 777~785
- [5] Tsochatzidis N A, Karapantsios T D, Kostoglou M V, et al. A conductance probe for measuring liquid fraction in pipes and packed beds [J]. *Int. J. Multiphase Flow*, 1992, 18(5): 653~667
- [6] Coney M W E. The theory and application of conductance probes for the measurement of liquid film thickness in two-phase flow [J]. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1973, 6 (1): 903~910
- [7] 刘兴斌. 井下油/水两相流测量 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1996
- [8] 王向东. 离心喷嘴脉动流量电导式测量方法研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007

(编辑: 梅 瑛)