

飞机燃油管道中的润湿阻力及其光学测量

苗 扬,王少萍

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院,北京 100191)

摘 要:文中建立一种激光测量燃油管道润湿阻力的方法及实验装置。得到了小流管条件下润湿阻力大小的解析表达式,即液体表面斜率与反射亮场及入射光通光半径之间的解析关系。根据弯曲液体表面光反射原理及光电自动检测原理,建立了润湿阻力的激光测量实验装置。依据激光反射图样光斑大小可以测出液面的斜率和液面与管壁的接触角。再根据润湿阻力的解析式,得到了润湿阻力大小。实验上,观察到特殊的弯曲液体表面激光反射图样,该图样为圆形光斑,具有明显的干涉圆环。圆形光斑的大小不仅与入射光通光半径有关,而且与表面的弯曲度有关。理论上润湿阻力的大小与液体的表面张力成正比,与接触角的余弦值成正比。本装置具有无损和自动化特点。

关键词:润湿阻力; 燃油管道; 表面张力; 反射光斑

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0284-04

Wet resistance force in aircraft fuel pipe and its optical measurement

Miao Yang, Wang Shaoping

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A kind of method by means of laser was suggested and experimental set-up was constructed to study wet resistance in fuel pipe and its measurement. The wet resistance force would be acted on the fluid by the surface of the pip because of the wet effect between the liquid and the pip surface. The expression of wet resistance force was derived under small pip condition based on the liquid principle. A laser measurement set-up was constructed based on the light reflected from curved liquid surface and automatic electron-optics detection. The diameter of the special optics pattern depended on both the aperture diameter and curved degree of liquid surface. The analytic expression of light pattern diameter related with the slope of curved liquid surface and aperture diameter was arrived theoretically. The force depended linearly on the liquid surface tension and cosine of contact angle. A special pattern reflected from curved liquid surface was observed which was circle with clear interference fringes. The slop of liquid surface and contact angle was detected by means of the pattern scale and the experimental value of wet resistance force was archived. It has no-touch, no-damage and automatic properties.

Key words: wet resistance force; fuel pipe; surface tension; circle

收稿日期:2013-05-05; 修订日期:2013-06-11

基金项目:十二五民机预研项目

作者简介:苗扬(1985-),男,博士生,主要从事飞机燃油系统方面的研究。Email:miaoyang1985@126.com

导师简介:王少萍(1966-),女,教授,主要从事飞机液压、燃油系统健康管理科研方面的研究。Email:shaopingwang@vip.sina.com

0 引 言

当液体在流管中流动时(如飞机中的输油管),由于液体与管壁的润湿效应,管壁对液体的流动形成一种阻力。这种阻力的大小,直接影响液体在管中的流动情况。因此搞清这种阻力的大小及其有效的测量方法是非常必要的。随着激光技术的不断发展与完善,利用激光探测液体表面特性已取得了不少成果。PADDAY 等人借助计算机,用数值法求解出该方程,并给出了液体重量随液面上升高度的关系图 [1-2]。K. Ishida 等人提出利用激光在平板上液体润湿形成的弯曲液面上反射的方法制作了表面张力计 [3]。YONG-LAPLACE 提出了研究弯曲液面的基本方程,即杨-拉普拉斯方程式(Yong-Laplace Equation),被人们广泛地应用 [4-5]。随着光电技术的发展,很多研究者利用其非接触、无损的特性测量液体性质 [6]。娄岩等利用接收的光斑面积计算大气湍流 [7]。苗润才等提出激光弯曲液面光学可视化方法,发现了弯曲液面的光学临界反射,并对表面张力和细棒的润湿参数进行了测量 [8-11]。D.J.Barter 和 Y.Lee 利用透射成像技术研究液体表面形变,测量了表面的形变高度 [12]。虽然流体力学中对液体的润湿描述较多,但系统研究由于液体润湿造成流管对液体流动时形成的阻力相对较少,特别是通过激光测量液面的形变,进而测量阻力还未见报道。文中将系统地分析润湿效应所引起的管壁对液体形成的阻力,给出阻力与液体润湿特性参数的解析表达式。建立一种激光测量润湿阻力大小的实验装置,并对阻力进行测量。这种方法是一种非接触式测量,对于特殊的液体材料具有极高的安全性。

1 润湿阻力

当液体在流管中流动时,液体与流管管壁的润湿效应对液体的流动产生阻力。为了描述这种阻力,建立如图 1 所示的模型。当底端封闭的半径为 r 的管子竖直放置,管中盛有一定量的液体,由于液体对管壁的润湿效应,导致液体的表面为弯曲页面。

根据流体力学知,液体的表面内外之间形成压强差 ΔP , ΔP 的大小为 [13]:

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \tag{1}$$

式中: γ 为液体的表面张力; R_1 和 R_2 分别为相互垂

直方向上液面的曲率半径,且 $\frac{1}{R_1} = \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}}$, $\frac{1}{R_2} = \frac{1}{x(1+y'^2)^{1/2}}$ 。 x, y 分别代表水平方向和竖直方向的坐标, y' 和 y'' 代表 y 对 x 的一阶和二阶导数, y' 亦为表面的斜率。

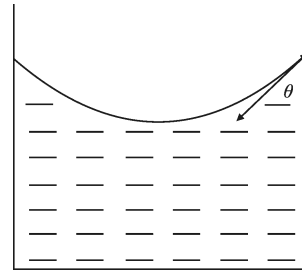


图 1 润湿效应引起的液体表面形变

Fig.1 Liquid surface deformation by wetting effect

当流管的半径较小时,公式(1)可近似为:

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \tag{2}$$

液体表面之所以形成压强差,是由于液体表面发生了形变,液体表面的形变是由于液体对管壁的润湿效应,类似于管壁对液体作用了力。力的大小 F 为:

$$F = \pi r^2 \cdot \Delta P = 2\pi \gamma r \cos \theta \tag{3}$$

上式表示的力,是整个管壁对液体作用的合力,如果按管壁上单位长度力 f 来表示,则 f 为:

$$f = \gamma \cos \theta \tag{4}$$

由上式可见,液体与管壁的润湿效应使得管壁对液体作用了力,力的大小为与液体的表面张力和液体与固体的润湿角有关。

2 反射光学图样形成的原理分析

由于液体与管壁的润湿效应,在圆柱形的管中,液体的表面呈现凹形弯曲液面,如图 2 所示。

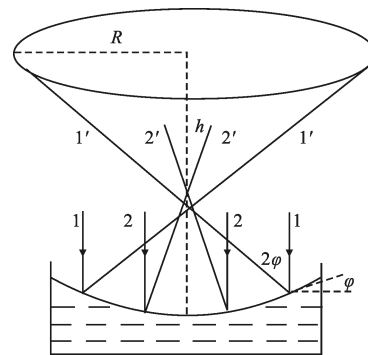


图 2 弯曲液面反射光学图样形成原理

Fig.2 Principle of curved liquid surface reflection optical pattern

当半径为 a 的平行激光束垂直入射到弯曲液面上, 光线 1 为入射光束的边界光线, 光线 2 为入射光束中的任意光线。光线 1 与光线 2 分别对应的反射光线为光线 1' 与光线 2'。由几何光学可知: 由于对称性, 反射光线 1' 的轨迹在观察屏上形成一个圆环。反射光线 2' 一定在该圆环内, 这也就是说, 该环内为反射光形成了亮场, 环外为暗场。由于观察屏距弯曲液面的距离远大于液面的弯曲高度, 根据几何光学有:

$$\tan 2\varphi = (R+a)/h \quad (5)$$

式中: φ 为光线 1 的入射角; R 为观察屏上亮场的半径, a 为入射光的光束半径; h 为弯曲液面到观察屏的距离; $\tan\varphi$ 为弯曲液面对应点上的斜率。由上式可以看出, 入射光束的边界光线的入射角与观察屏上亮场的半径有关, 与入射光束通光孔径的大小有关, 与观察屏到液体表面的距离有关。或者说实验上测定出 R , a 和 h 值时, 根据上式就可以计算出对应入射点上的入射角的大小。当改变入射光束的通光半径, 则可以计算出不同点上的入射角, 进而给出表面的弯曲形状, 最后得到接触角的大小。

3 实验装置

实验装置如图 3 所示, He-Ne 激光束经扩束镜 L_1 和准直镜 L_2 后, 照射可调节通光光阑 MA, 经光阑后的光束再经半透半反镜 B 照射到凹形弯曲液面 S 上。弯曲液面上的反射光经半透镜后, 再经平面反

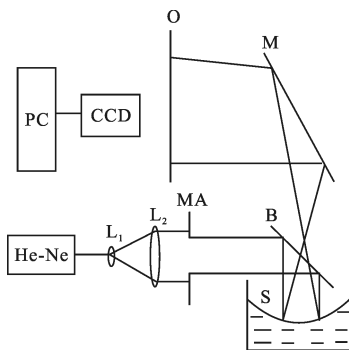


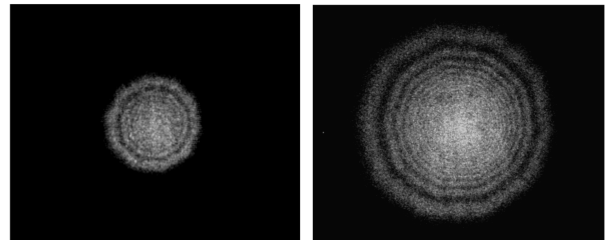
图 3 激光润湿阻力检测实验装置

Fig.3 Wet resistance force detection equipment

射镜 M 照射在观察屏 O 上。用 CCD 检测观察光屏上所形成的光学图样, 并将数据直接输入计算机, 计算机可以显示、存储和处理光学图样。实验中激光器采用 He-Ne 激光, CCD 的大小为 $7.95\text{ mm} \times 6.45\text{ mm}$,

信噪比超过了 48 dB。液面距观察屏的距离为 54 cm, 圆柱形管为玻璃管, 半径为 12.0 mm。

实验时液体选用航空煤油 RP-3。通过调节通光光阑的通光半径, 观察并记录相应半径所对应的光学图样。通光直径的调节区间 2~11.6 mm, 每次调节间隔为 0.4 mm。图 4 为两幅不同通光直径下观察屏上的光学图样。



(a) 通光直径 4 mm

(b) 通光直径 8 mm

(a) Diameter 4 mm

(b) Diameter 8 mm

图 4 两种不同通光直径时的光学图样

Fig.4 Two images of different diameter shutter

由图可以看出: 凹形液体表面反射光所形成的光学图样中间为亮场, 周围为暗场, 具有中心对称性; 反射图样中, 亮场的直径的大小与入射光的通光孔径大小有关, 同时与液体表面的弯曲程度有关, 入射光通光直径越大, 亮斑的直径也越大; 反射光亮场具有明显的干涉图样, 干涉图样呈现圆环状。

4 实验结果

对应不同大小的入射光通光半径 a , 通过 CCD 检测对应的亮场半径 R , 并根据公式(5)计算出对应的液体表面斜率 $\tan\varphi$ 。以通光半径 a 为横轴, 斜率 $\tan\varphi$ 为纵轴, 图 5 为弯曲液面斜率随位置变化的实验结果。

图中小圆点为实验数据。用最小二乘法, 并且以多项式对实验数据拟合, 并得到拟合多项式方程。图中的实线为拟合曲线。根据拟合方程, 代入实验中液体管的半径 r 值, 则可以得到对应半径处液体表面斜率。实验中管的半径为 12 mm, 计算得到对应点上的斜率为 1.257。由此得到航空煤油 RP-3 润湿玻璃管壁的接触角为 38.5° 。航空煤油 RP-3 的表面张力 g 取 24.12 mN/m 。将接触角及表面张力值代入公式(4), 则可以得到文中实验条件下, 管壁单位长度上作用力的大小为 18.87 mN/m 。如果要求得管壁对液体总的润湿阻力, 则可乘以管壁的周长即可。

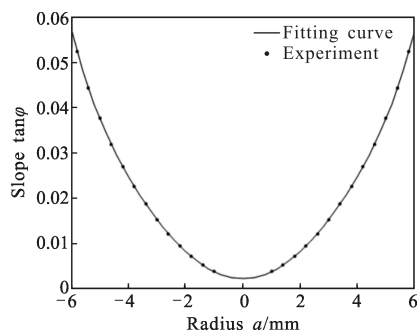


图5 弯曲液面的斜率随距离的变化关系

Fig.5 Slope of curved liquid surface vs distance

5 结 论

(1) 由于液体与管壁的润湿效应,液体在管内流动时受到润湿阻力作用。根据流体静力学原理,分析得到了小流管条件下润湿阻力大小的解析表达式为 $f=\gamma\cos\theta$, 这说明润湿阻力的大小与液体的表面张力成正比,与接触角的余弦值成正比。

(2) 实验上观察到了弯曲液体表面反射所形成的光学图样,该图样为圆形光斑,中心为亮场,周围为暗场,亮场中具有明显的干涉圆环。圆形光斑的大小不仅与入射光通光半径有关,而且与表面的弯曲度有关。

(3) 理论上推导出了液体表面斜率与反射亮场及入射光通光半径之间的解析关系。并进一步可知液体与管壁之间的接触角的表达式。

(4) 在上述基础上,提出了一种激光测量润湿阻力的方法并建立了实验装置。根据反射图样光斑大小测出液面的斜率和液面与管壁的接触角。得到了润湿阻力大小的实验值。

(5) 该测量方法属非接触测量,对特殊的液体具有非常高的安全性。

参考文献:

- [1] Padday J. Tables of the profiles of axisymmetric menisci[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 1972, 37(1): 313-316.
- [2] Padday J, Pitt A. Axisymmetric meniscus profiles[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1972, 38(2): 323-334.
- [3] Ishida K, Kinoshita S, Mori Y H. Surface tensiometer utilizing laser-beam reflection at cylindrical liquid menisci[J]. *Review of scientific instruments*, 1993, 64(5): 1324-1329.
- [4] Rejmer K, Napiórkowski M. Curvature contributions to the capillary-wave Hamiltonian for a pinned interface [J]. *Physical Review E*, 1996, 53(1): 881.
- [5] Chen P, Susnar S, Pasandideh-Fard M, et al. The generalized Laplace equation of capillarity II. Hydrostatic and thermodynamic derivations of the Laplace equation for high curvatures [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1996, 63: 179-193.
- [6] Chen Haixiu, Zhang Guoxiong, Tang Huiqiang. Application of photoelectric test technique in liquid detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 227-232. (in Chinese) 陈海秀, 张国雄, 唐慧强. 光电测试技术在液体检测中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(1): 227-232.
- [7] Lou Yan, Jiang Huilin, Chen Chunyi, et al. Analysis of experimental data of the scintillation fluctuation and spot area in atmosphere laser communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 515-519. (in Chinese) 娄岩, 姜会林, 陈纯毅, 等. 激光大气湍流传输光强起伏及光斑面积实验分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3): 515-519.
- [8] Miao Runcai, Yang Zhongli. The critical light reflection from curved surface and its applications [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(4): 327-329. (in Chinese) 苗润才, 杨宗立. 弯曲液体表面上的光学临界反射现象及其应用[J]. *光子学报*, 2000, 29(4): 327-329.
- [9] Miao R, Yang Z, Zhu J. Critical light reflection from curved liquid surface [J]. *Optics communications*, 2003, 218 (4): 199-203.
- [10] Dong J, Miao R, Qi J. Visualization of the curved liquid surface by means of the optical method [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(12): 124914-124914-5.
- [11] Qi Jianxia, Miao Runcai, Dong Jun. Theoretical and experimental study on curved liquid surface by means of optical method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37 (7): 1468-1472. (in Chinese) 祁建霞, 苗润才, 董军. 光学方法对润湿效应形成弯曲液面的理论及实验研究, 2008, 37(7): 1468-1472.
- [12] Barter J D, Lee P. Imaging surface-wave analyzer for liquid surfaces[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(12): 2630-2635.
- [13] McCormack P D, Crane L. *Physical Fluid Dynamics* [M]. New York: Academy Press Inc, 1973: 133-134.