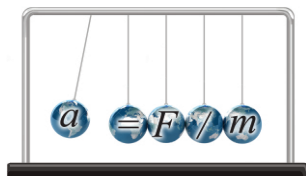


文章编号:1005-4642(2022)01-0020-04



普通物理实验

基于伯努利定理的流水法测量水流速度

宋连鹏, 孙 瑜, 周 丽

(海军大连舰艇学院 基础部, 辽宁 大连 116018)

摘 要: 对于侧壁有孔的敞口瓶, 瓶中水流出的时间与出水口处的压强存在定量关系, 根据伯努利定理, 水管中的水流速度与压强也存在定量关系. 结合上述定量关系, 提出了通过测量敞口瓶中水流出的时间来测量水管中水流速度的方法——流水法. 制作测试瓶, 运用加氧泵搭建测试系统测量了水流速度, 推导出敞口瓶中水流出时间与水管中水流速度的定量关系.

关键词: 伯努利定理; 水流速度; 压强; 流水法

中图分类号: O351.2

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.01.004

水流速度是常用物理量, 在生产生活中发挥着重要作用, 如在防洪抗灾和洋流的研究中都离不开水流速度的测量. 对于重力场中不可压缩的均质流体, 满足伯努利方程^[1]

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = C, \quad (1)$$

其中, p 为流体压强, ρ 为流体密度, g 为重力加速度, h 为流体高度(从某参考点计), v 为流体速度. 在沿流线运动过程中, 流体的能量总和保持不变, 即总能量守恒. 由式(1)可知, 流速大处压强低, 流速小处压强高^[2], 因此可以通过水流压强的相关测量来测量水流的速度.

1 流水法测量水流速度的设计

1.1 测量装置

测量装置如图 1 所示, 在矿泉水瓶底部的侧面打一小孔, 插入细导管, 并用热熔胶密封, 在与细导管等高处用记号笔做标记 1, 再向上方 10 cm 处, 做标记 2, 细导管的自由端口与待测流速的水流连通.

1.2 测量原理

文献[3]通过实验得到空气中小孔的水流速度, 文献[4]利用流体运动的连续性方程进一步论证了上述结果. 现将图 1 所示的测试装置置入待测水流中, 使细导管指向与待测水流方向垂直, 形

成如图 2 所示的测量系统. 在细导管自由端口两水流交汇的界面处, 待测水流方向与界面平行, 产生的冲量不会影响界面的压强. 因此, 在忽略黏性阻力时, 界面受到向左的压强即为待测水流在此处产生的压强 p , 满足

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = C, \quad (2)$$

其中, v 为待测水流速度.

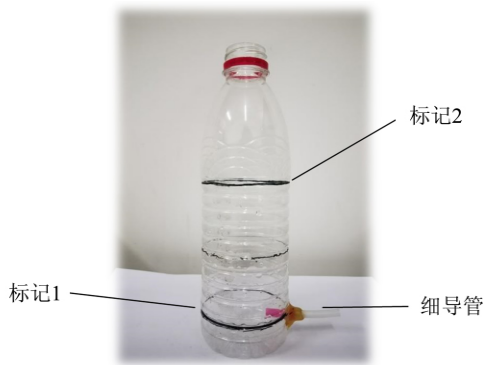


图 1 测量装置

在测量装置内水流出的过程中, 根据伯努利定理可得

$$p_0 + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p + 0 + \frac{1}{2} \rho v_2^2, \quad (3)$$

其中, p_0 为大气压强, h 为测试瓶内液面高度, v_1 为液面处水流速度, v_2 为细导管中的水流速度.

收稿日期: 2021-04-06; 修改日期: 2021-11-20

作者简介: 宋连鹏(1977—), 男, 辽宁大连人, 海军大连舰艇学院基础部高级实验师, 硕士, 主要从事大学物理实验教学. E-mail: 58174671@qq.com

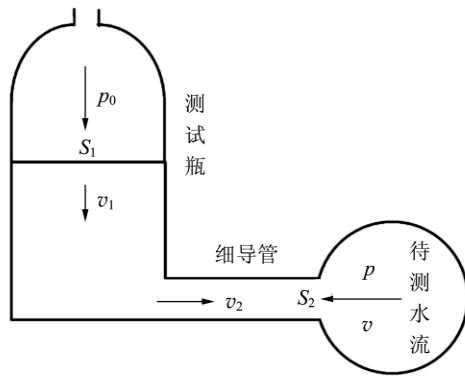


图 2 测量水流速度的系统示意图

将式(2)代入式(3)得

$$\frac{p_0 - C}{\rho} + gh + \frac{1}{2}v^2 = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2). \quad (4)$$

由于测试瓶中水减少的体积与细导管口处水流出的体积相同,因此

$$v_1 = \frac{S_2}{S_1}v_2, \quad (5)$$

其中, S_1 和 S_2 分别为测试瓶和出水口的横截面积,令

$$\frac{2(p_0 - C)}{\rho} = D, \quad (6)$$

其中 D 为常量^[4],将式(6)代入式(4),联立式(5),可解得

$$v_2 = \sqrt{\frac{D + v^2 + 2gh}{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}}}, \quad (7)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{D + v^2 + 2gh}{\frac{S_1^2}{S_2^2} - 1}}. \quad (8)$$

因此测试瓶中水下降的时间为

$$dt = \frac{dh}{v_1} = dh \sqrt{\frac{\frac{S_1^2}{S_2^2} - 1}{D + v^2 + 2gh}}, \quad (9)$$

则液面下降高度为 H 的水流出的总时间为

$$t = \sqrt{\frac{S_1^2}{S_2^2} - 1} \cdot \frac{\sqrt{v^2 + D + 2gH} - \sqrt{v^2 + D}}{g}. \quad (10)$$

因此,根据式(10),测量出瓶中水流出的时间 t 即可得到待测水流速度 v .

2 实验测量与分析

2.1 测量方法及数据处理

图 3 为测量水流速度的实物装置图,在连结加氧泵(出水量为 1 000 L/h)的出水口处,接入调

流阀,将测试装置中细导管的自由端接入加氧泵的进气口。由于加氧泵进气口与出水口是呈“⊥”形的三通结构,因此 2 个水流方向垂直,通过测量测试瓶中水流出的时间,即可得出加氧泵出水管中的水流速度。

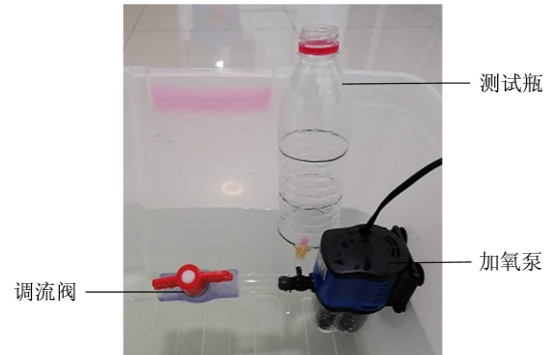


图 3 流水法测量水流速度的实物装置图

打开加氧泵,调节调流阀,用电子称称量单位时间内水管中流出水的质量,利用密度公式计算对应的体积,再除以出水口的横截面积得到水的流速即为实际水流速度——称重法。由于加氧泵的总功率保持不变,从而可以提供稳定的水流。在待测加氧泵出水管中的水流速度较小时,根据伯努利定理可知水流会产生较大压强,当该压强大于测试瓶内水所产生的压强时,会出现加氧泵出水管中的水倒向流入测试瓶中的现象。随着测试瓶内水压不断增加,最终会达到压强相等,形成平衡态。

使测试瓶中液面保持不变,通过测试发现当加氧泵出水管中水流速度为 1.56 m/s 时,测试瓶中的液面恰好稳定在与细导管等高的标记 1 处,可知此时加氧泵水管中的水流压强 p 等于大气压强 p_0 。将式(2)代入式(6),得到 $D = -2.43 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

另外,测量出测试瓶的直径 $d_1 = 60.0 \text{ mm}$,细导管出口的内径 $d_2 = 2.5 \text{ mm}$,测试瓶中水下降的高度 $H = 100.0 \text{ mm}$ 。将测量结果代入式(10),其中 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,得

$$t = 576 \times \frac{\sqrt{v^2 - 2.43 + 1.96} - \sqrt{v^2 - 2.43}}{9.8}. \quad (11)$$

当加氧泵出水管中水流速度增大时,测试瓶中水流出的速度也加快,分别测量不同水流速度下测试瓶中水流出的时间,如表 1 所示。每个数据都是 5 次测量取平均值的结果。

表 1 不同水流速度下的水流出时间(称重法)

$v/(m \cdot s^{-1})$	t/s
1.63	59.57
1.66	53.43
1.72	47.70
1.74	46.14
1.81	40.66
1.90	31.15
2.00	26.34

借助 Matlab 软件,利用式(11)得到水流速度,如表 2 所示.

表 2 不同流出时间下的水流速度(流水法)

t/s	$v/(m \cdot s^{-1})$
59.57	1.63
53.43	1.68
47.70	1.75
46.14	1.78
40.66	1.89
31.15	2.22
26.34	2.51

2.2 数据分析

以测试瓶中水流出的时间 t 为横坐标,以水流速度 v 为纵坐标,将流水法的测量结果(表 2)和称重法(表 1)的测量结果描点进行比较,如图 4 所示.

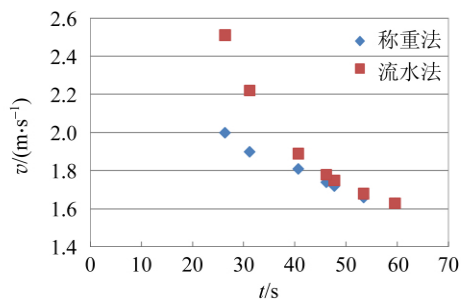


图 4 流水法和称重法测量值比较

从图 4 中可见,流水法与称重法在低流速区吻合得非常好,说明流水法测量水流速度的理论完全正确,测量方法切实可行.但在流速大时流

水法偏差较大,流水法测量结果明显比称重法测量结果大,分析形成这种结果的原因如下:

1) 流水法测水流速度时,采用的加氧泵是固定的三通结构,2 个水流的截面面积差别不够大,所以当瓶中水以较大流速汇入待测水流时,形成了由于射流冲击横流产生的螺旋涡^[6],导致待测水流的流线发生畸变,从而破坏了模型中理想情况的假设.螺旋涡加速了瓶中水流出的速度,使水流速度的测量结果产生了正偏差.

2) 称重法测量水流速度时,由于引流管太细太长导致黏性阻力较大,且流速越大,黏性阻力影响越大,造成称重法水流速度的测量结果偏小,形成负偏差.

综合以上原因,在水流速度大时,2 种测量方法的测量结果都产生了较大的相对偏差.通过改进、优化三通汇流处的结构,减小水流的相互冲击,可以提升流水法在水流速度较大时的测量精度.另外,采用增加引流水管的直径并减小其长度的方法可改善引流条件.

3 结束语

本文利用伯努利方程将对水流速度的测量转换为对水流压强的测量,再利用测试瓶将对水流压强的测量转换为对测试瓶中水流出时间的测量.该方法所用仪器结构简单、操作简便,实验结果表明该测量方法稳定可靠、有效可行.

参考文献:

- [1] 漆安慎,杜蝉英.力学[M].北京:高等教育出版社,1997:489-497.
- [2] 王小怀.利用光杠杆测量流体压强及流速的微小变化[J].物理实验,2018,38(10):21-24.
- [3] 蔡一坤,张建恒.测小孔流速实验[J].物理实验,1986,6(6):244-246.
- [4] 金进生,周祖利.小孔流速和流量率分析[J].杭州大学学报,1995,22(S1):90-92.
- [5] 张志昌,赵莹.矩形明渠水跃段沿程和局部水头损失的计算[J].水利发电学报,2015,34(11):88-94.
- [6] 李琪琪,梁彬烽,郭泳盈,等.基于射流冲击横流原理产生涡旋及其测量[J].物理实验,2020,40(7):46-52.

Measuring flow velocity by flow method based on Bernoulli's principle

SONG Lian-peng, SUN Yu, ZHOU Li

(Basic Science Department, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: For an open bottle with holes in the side wall, the time for water to flow out has a quantitative relationship with the pressure at the water outlet. Based on Bernoulli's principle, there is also a quantitative relationship between the water flow velocity and the pressure. Therefore, a method of measuring the water flow velocity in the water pipe by measuring the time to flow out was proposed. A test bottle and an oxygen pump were used to build a test system to measure the water flow velocity, and the quantitative relationship between the water outflow time and the water flow velocity was deduced.

Key words: Bernoulli's principle; flow velocity; flow pressure; flow method

[责任编辑:郭 伟]

(上接 19 页)

Correction of dispersion relation of Faraday waves in xanthan gum solution

GAO Yun-hao^a, WANG Wei^b, ZHOU Lu-qun^b

(a. Yuanpei College; b. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Stable standing wave patterns, termed Faraday waves, will appear on the free fluid surface subjected to a vertical harmonic oscillation under certain conditions. For xanthan gum solution, Landau's classical dispersion relation of surface gravity-tension wave is applicable only for the low frequency region. In order to obtain the dispersion relation over a larger frequency range, a theoretical correction should be made considering viscous effect and shear thinning effect. The analysis showed that the viscous effect introduced a fourth power of frequency dependence to the dispersion relation. And the shear thinning effect, quantitatively described by power law equation, weakened the viscous effect at high frequencies. The dispersion relation over a wide frequency range was measured for the xanthan gum solution in a cylindrical container, and the rationality of the theoretical correction was verified quantitatively.

Key words: Faraday waves; dispersion relation; xanthan gum solution; viscous effect; shear thinning effect

[责任编辑:任德香]