

实验三：动量定理的验证

姓名: 组别: 第 1 组 时间: 2021.10.28 13: 30-14: 00

摘要: 动量方程在解流体力学模型中有重要作用, 本实验通过巧妙设计 (把不容易测量的流体冲击力转化为测压管水头高度, 用带活塞和翼片的抗冲平板使射流冲击后水平速度为零且有效减小阻力效应) 计算射流动量修正系数, 进而验证恒定总流动量方程。加深对动量方程的理解同时学会巧妙设计实验。

实验目的:

- (1) 测定水的射流对平板的冲击力, 计算射流动量修正系数;
- (2) 进而验证恒定总流动量方程;
- (3) 学会使用质量时间法测流量;
- (4) 了解活塞式动量方程实验装置结构和原理, 启发创新思维。

实验原理:

1) 恒定总流动量方程:

对于不可压缩流体恒定总流动, 取射流转向前的断面 1-1 和射流完全转向后的断面 2-2 之间的水流区域为控制体, 如图 1 所示。运用动量守恒原理, 我们有动量方程分量形式

$$\sum F_x = \rho q_v (\beta_2 v_{2x} - \beta_1 v_{1x}), \quad (1)$$

$$\sum F_y = \rho q_v (\beta_2 v_{2y} - \beta_1 v_{1y}), \quad (2)$$

$$\sum F_z = \rho q_v (\beta_2 v_{2z} - \beta_1 v_{1z}), \quad (3)$$

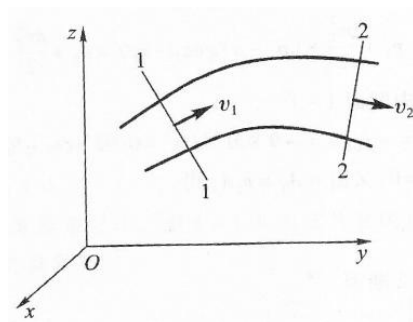


图 1: 控制体

其中 ρ 为流体密度, q_v 是流体流量, v 为流体速度, β 是动量修正系数, F 为作用力。公式 (1) 表明作用于控制体内流体上的外力矢量和, 等于控制体在单位时间内沿外力方向净流出的动量 (流出与流入的动量之差)。

2) 活塞式动量定律实验仪原理:

开启水泵, 水流经供水管供给恒压水箱, 溢流水经水管流回蓄水箱。流经管嘴的水流形成射流, 冲击带活塞和翼片的抗冲平板, 冲击后水流与入射角呈

90° 的方向从四周离开抗冲平板。抗冲平板在射流冲击力和带活塞套的测压管中水压力作用下处于平衡状态。活塞形心处的水深 h 可由带活塞套的测压管测得，其中测量测压管的玻璃尺的零点已经固定在活塞形心处，因此只要读出玻璃尺示数即为作用在活塞形心处的水头，从而可求得射流的冲力。

图 2 是带活塞和翼片的抗冲平板的活塞退出活塞套的示意图。由图中可以看出,活塞中心设有一细导水管 a ,进口段位于平板中心,出口方向与轴向垂直。在平板上设有翼片 b ,活塞套上设有窄槽 c 。当水流从管嘴射出时,在射流冲击力作用下,水流经导水管向测压管内加水。

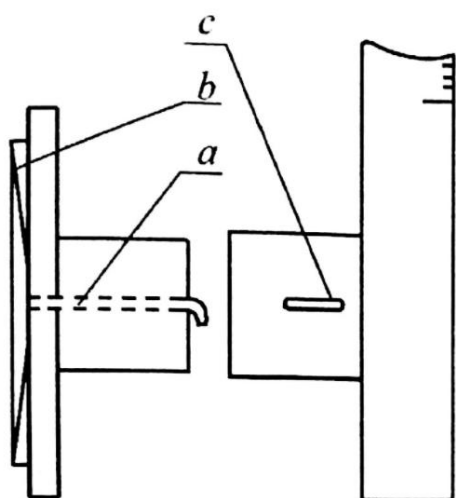


图 2：带活塞和翼片的抗冲平板结构图

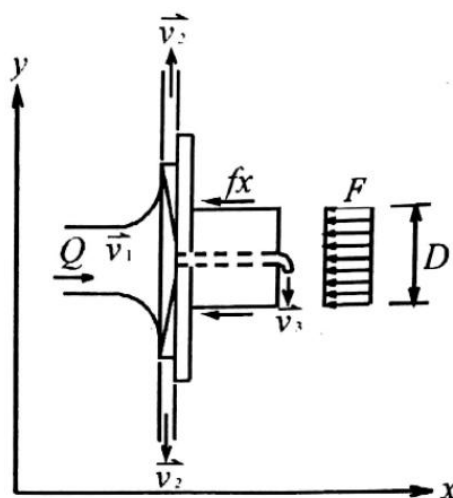


图 3：带活塞和翼片抗冲平板受力图

为了自动调节测压管内的水位,以使活塞的平板受力平衡并减小摩擦阻力对活塞的影响,本实验装置应用了自动控制的反馈原理和动摩擦减阻技术(受力情况如图 3)。当射流冲击力大于测压管内水柱对活塞的压力时,活塞内移,窄槽关小,水流外溢减小,使测压管内水位升高,水压力增大。反之,活塞外移,窄槽开大,水流外溢增多,测管内水位降低,水压力减小。在恒定射流冲击下,经短时段自动调整,即可达到射流冲击力和水压力的平衡状态。这时活塞处在半进半出,窄槽部分开起的位置上,由导水管流进测压管的水量和由窄槽外溢的水量相等。由于平板上设有翼片,在水流冲击下,平板带动活塞旋转,因而克服了活塞在沿轴向滑动时的静摩擦力。

3) 动量修正系数计算:

射流与平板对冲后水平方向速度为零,忽略水流水平方向滑动阻力, x 方向动量方程可化为

$$F_x = -\rho g h \frac{\pi}{4} D^2 = \rho q_v (0 - \beta_1 v_{1x}), \quad (4)$$

即

$$\beta_1 Q v_{1x} - \frac{\pi}{4} g h D^2 = 0, \quad (5)$$

其中 g 为重力加速度，取 $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ 。所以

$$\beta_1 = \frac{\frac{\pi}{4} g h D^2}{q_v v_{1x}}, \quad (6)$$

其中，

$$v_{1x} = \frac{q_v}{a}, \quad (7)$$

其中 $a = \frac{\pi}{4} d^2$, D, d 已知，在平衡状态下，只要测得流量 Q 和活塞形心水深 h 即可得到动量修正系数 β_1 。

4) 流量 q_v 测量:

实验中我们通过电子天平和秒表测得一定时间 t 内水流量 m ，并通过温度计测得水温 T ，通过查水密度与温度关系对照表可以得到水的密度 ρ ，所以

$$q_v = \frac{m}{\rho t}, \quad (8)$$

单位 ml/s 。

实验装置:

1) 活塞式动量定律试验仪 (图 4):

- (1) 自循环供水器;
- (2) 实验台;
- (3) 电源开关;
- (4) 水位调节阀;
- (5) 恒压水箱;
- (6) 喇叭形进口管嘴;
- (7) 集水箱;
- (8) 带活塞套的测压管;
- (9) 带活塞和翼片的抗冲平板;
- (10) 上回水管。

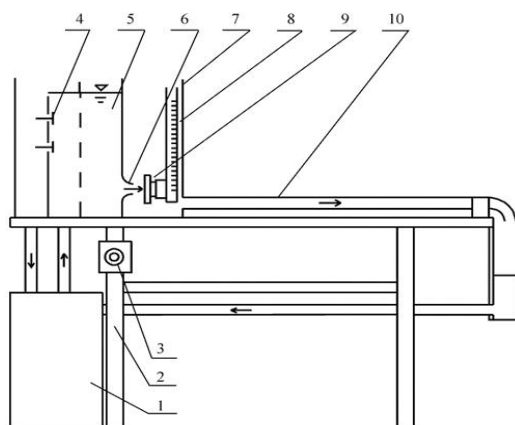


图 4: 动量定律实验仪

2) 流体流量测定装置:

电子天平、秒表、盛水盆、漏斗、温度计等。

实验步骤:

- (1) 正确放置电子天平, 给试验仪和电子天平通电;
- (2) 将水位调节阀完全打开并打开电源开关向水箱供水;
- (3) 待水流到达水位调节阀下部, 恒压水箱液面稳定后准备测量流量;
- (4) 将成水盆和漏斗放在电子天平上, 示数稳定后按下归零按钮;
- (5) 实验人员 A 手持漏斗和秒表, 实验人员 B 用盛水盆在出水口准备接水;
- (6) A 按下秒表同时用漏斗从出水口接水到成水盆中, 取适量水后按停秒表同时拿开漏斗;
- (7) 测量盛水质量并记录, 记录秒表时间;
- (8) 重复步骤 (4) 到 (8) 两次, 得到三组 t - m 数据;
- (9) 待活塞套的测压管稳定后读出示数 h_1 ;
- (10) 将水位调节阀完全关闭, 重复实验步骤 (3) - (10), 得到另外三组 t - m 数据和 h_2 ;
- (11) 关闭电源开关, 取下带活塞和翼片的抗冲平板, 再次打开电源;
- (12) 恒压水箱液面基本稳定后观察射流冲击现象并记录带活塞套测压管示数 h' ;
- (13) 关闭电源, 重新装上带抗冲平板;
- (14) 用温度计测出流体密度并读数;
- (15) 整理实验仪器, 分析实验数据。

实验数据记录:

已知数据管嘴内径 $d=1.200\text{ cm}$; 活塞直径 $D=2.000\text{ cm}$, 实验测量数据记录如下表:

表 1: 实验数据记录表

组别	$m(\text{g})$	$t(\text{s})$	$h(\text{cm})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$h'(\text{cm})$
第一组	5513.9	27.93			
	4918.8	24.84	11.70		——
	5510.2	28.00		22.6	
第二组	5322.2	21.19			
	5099.5	20.16	18.80		27.95
	4793.6	19.00			

数据处理:

首先查看水的密度与温度关系表, 水温 $T=22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 水的密度 $\rho = 0.997685\text{ g/cm}^3$, 从而可根据表 1 中质量时间数据求得各个流量 q_v , 为减小测量误差, 再对其取平均值, 结果如下表所示:

表 2:流量表

组别	m(g)	t(s)	$q_v(\text{ml/s})$	$\overline{q_v}(\text{ml/s})$
第一组	5513.9	27.93	197.877	197.868
	4918.8	24.84	198.479	
	5510.2	28.00	197.249	
	5322.2	21.19	251.748	
第二组	5099.5	20.16	253.538	252.722
	4793.6	19.00	252.880	

然后通过流量和 d , 计算出射流水平流过喷嘴的速度 v_{1x} , 如下表所示:

表 3:喷嘴流速计算表

组别	$\overline{q_v}(\text{ml/s})$	d(cm)	$a(\text{cm}^2)$	$v_{1x}(\text{cm/s})$
第一组	197.868	1.20	1.13	175.04
第二组	252.722			223.57

最后根据表 1、表 2、表 3 和 D 求得实际 F_x , β_1 :

表 4:动量修正系数计算

组别	$\overline{q_v}(\text{ml/s})$	D(cm)	$A(\text{cm}^2)$	$v_{1x}(\text{cm/s})$	h(cm)	$F_x(\text{N})$	β_1
第一组	197.868	2.00	3.14	175.04	11.70	0.359	1.040
第二组	252.722			223.57	18.80	0.579	1.024

实验现象与结论:

1) 通过两组测量数据测量出的动量修正系数 β 略大于 1, 都在公认值 $\beta = (1.02 \sim 1.05)$ 之内, 验证了不可压缩恒定总流动量守恒定律, 同时也表明射流与实验装置之间仍存在不可消除的阻力。

2) 通过实验步骤 (11)、(12) 观测到取下抗冲平板后射流冲击到活塞套上之后会向反方向呈喇叭状散开, 测压管示数较之前高且不稳定。射流直接冲击到活塞套上之后的速度在 x 方向有分量, 对射流撞击后速度 x 方向为零的假设不成立, 所以测压管示数偏高, 且射流不经过抗冲平板导管缓冲直接进入测压管导致测压管液面不稳定。

思考与讨论:

1) 带翼片的平板在射流作用下获得力矩。这对分析射流冲击无翼片的平板沿 x 方向的动量方程有无影响?为什么?

答: 无影响。因为带翼片的平板垂直于 x 轴, 作用在轴心上的力矩 T , 是由射流冲击平板时沿 yz 平面通过翼片造成动量矩的差所致。即

$$T = \rho q_v (v_{yz2} \cos \alpha_2 r_2 - v_{yz1} \cos \alpha_1 r_1) = \beta q_v v_{yz2} \cos \alpha_2 r_2, \quad (9)$$

式中 v_{yz1} 入流速度在 yz 平面上的分速, v_{yz2} 出流速度在 yz 平面上的分速, α_1 入流速度与圆周切线方向的夹角, 接近 90° , α_2 出流速度与圆周切线方向的夹角; r_1, r_2 分别为内、外圆半径。该式表明力矩 T 恒与 x 方向垂直, 动量矩仅与 yz 平面上的流速分量有关。也就是说平板上附加翼片后, 尽管在射流作用下可获得力矩, 但并不会产生 x 方向的附加力, 也不会影响 x 方向的流速分量。所以 x 方向的动量方程与平板上设不设翼片无关。

2) 滑动摩擦力 f , 为什么可以忽略不计?试设计实验分析检验。

答: 因假设实验中滑动摩擦力 $f < 0.5\%F$, 故可略而不计。

实验设计: 在恒定流受压平衡的状态下, 若向测压管内注入 1mm 左右深的水时, 活塞所受的静压力增大。假如活动摩擦力大于此值, 则活塞不会作轴向移动; 反之, 若活塞很敏感地作左右移动, 则自动调整测压管水位直至恢复为止。