

# 哈尔滨工业大学（深圳）

## 工程流体力学实验报告

实验题目： 动量实验

院 系： 机电工程与自动化学院

班 级： 机械二班

姓 名： 杨敬轩

学 号： SZ160310217

指导教师： 曹勇

实验日期： 2018年12月24日



哈爾濱工業大學(深圳)

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SHENZHEN

# 动量实验报告

## 一、实验目的和要求

1. 通过定性分析实验，加深动量与流速、流量、出射角度、动量矩等因素间相关关系的了解；
2. 通过定量测量实验，进一步掌握流体动力学的动量守恒定理，验证不可压缩流体恒定总流的动量方程，测定管嘴射流的动量修正因数；
3. 了解活塞式动量定律实验仪原理、构造，启发创新思维。

## 二、实验装置

本实验的仪器装置简图如图 1。

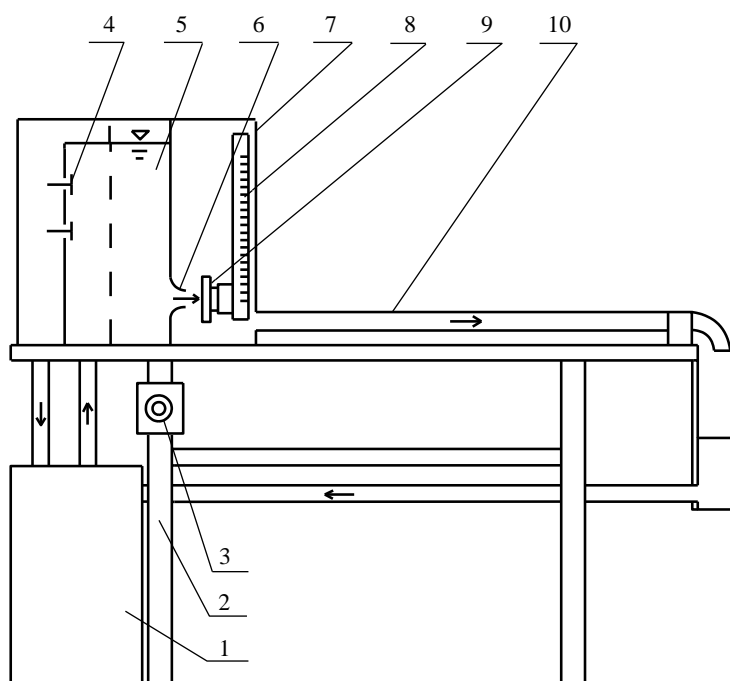


图 1 动量定律实验装置图

- |                |          |             |            |
|----------------|----------|-------------|------------|
| 1. 自循环供水器      | 2. 实验台   | 3. 可控硅无级调速器 | 4. 水位调节阀   |
| 5. 恒压水箱        | 6. 管嘴    | 7. 集水箱      | 8. 带活塞的测压管 |
| 9. 带活塞和翼片的抗冲平板 | 10. 上回水管 |             |            |

自循环供水装置 1 由离心式水泵和蓄水箱组合而成。水泵的开启、流量大小的调节均由调速器 3 控制。水流经供水管供给恒压水箱 5，溢流水经回水管流回蓄水箱。流经管嘴 6 的水流形成射流，冲击带活塞和翼片的抗冲平板 9，以与入射角成  $90^\circ$  的方向离开抗冲平板。抗冲平板在射流冲力和测压管 8 中的水压力作用下处于平衡状态。活塞形心处水深  $h_c$  可由测压管 8 测得，由此可求得射流的冲力，即动量力  $F$ 。冲击后的弃水经集水箱 7 汇集后，再经上回水管 10 流出，最后经漏斗和下回水管流回蓄水箱。

为了自动调节测压管内的水位，以使带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，其构造及受力情况如图 2、图 3。

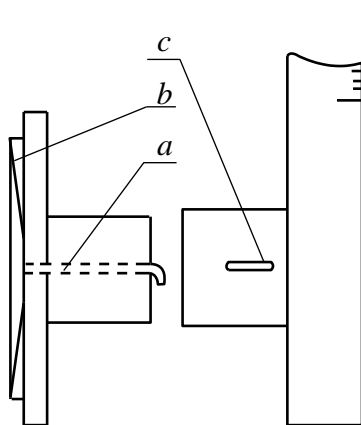


图 2

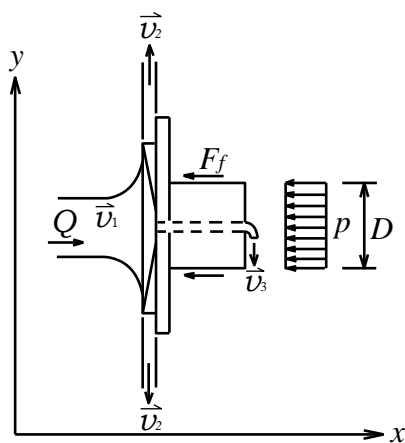


图 3

图 1 中，带活塞和翼片的抗冲平板 9 和带活塞套的测压管 8，(如图 2 所示)，该图是活塞退出活塞套时的分部件示意图。活塞中心设有一细导水管  $a$ ，进口端位于平板中心，出口端伸出活塞头部，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  $c$ 。

为了精确测量动量修正因数  $\beta$ ，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。工作时，活塞置于活塞套内，沿轴向可以自由滑动。在射流冲击力作用下，水流经导水管  $a$  向测压管 8 加水。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  $c$  关小，水流外溢减少，使测压管 8 水位升

高，活塞所受的水压力增大。反之，活塞外移，窄槽开大，水流外溢增多，测压管 8 水位降低，水压力减小。在恒定射流冲击下，经短时段的自动调整后，活塞处在半进半出、窄槽部分开启的位置上，过  $a$  流进测压管的水量和过  $c$  外溢的水量相等，测压管中的液位达到稳定。此时，射流对平板的冲击力和测压管中水柱对活塞的压力处于平衡状态，如图 3 所示。活塞形心处水深  $h_c$  可由测压管 8 的标尺测得，由此可求得活塞的水压力，此力即为射流冲击平板的动量力  $F$ 。

由于在平衡过程中，活塞需要做轴向移动，为此平板上设有翼片  $b$ 。翼片在水流冲击下带动活塞旋转，因而克服了活塞在沿轴向滑移时的静摩擦力，提高了测力机构的灵敏度。本装置还采用了双平板狭缝出流方式，精确地引导射流的出流方向垂直于来流方向，以确保  $v_{2x}=0$ 。

### 三、实验原理

恒定总流动量方程为

$$\vec{F} = \rho q_v (\beta_2 \vec{v}_2 - \beta_1 \vec{v}_1)$$

取控制体如图 2(b)，因滑动摩擦阻力水平分力  $F_f < 0.5\%F_x$ ，可忽略不计，故  $x$  方向的动量方程可化为

$$F_x = -p_c A = -\rho g h_c \frac{\pi}{4} D^2 = \rho q_v (0 - \beta_1 v_{1x})$$

即

$$\beta_1 \rho q_v v_{1x} - \frac{\pi}{4} \rho g h_c D^2 = 0$$

式中： $h_c$ ——作用在活塞形心处的水深；

$D$ ——活塞的直径；

$q_v$ ——射流的流量；

$v_{1x}$ ——射流的速度；

$\beta_1$ ——动量修正因数。

实验中，在平衡状态下，只要测得流量  $q_v$  和活塞形心水深  $h_c$ ，由给定的管嘴直径  $d$  和活塞直径  $D$ ，代入上式，便可验证动量方程，并测定射流的动量修

正因数  $\beta_1$  值。

#### 四、实验内容与方法

##### 1. 基本操作方法

(1) 测压管定位。待恒压水箱满顶溢流后，松开测压管固定螺丝，调整方位，要求测压管垂直、螺丝对准十字中心，使活塞转动松快。然后旋转螺丝固定好。

(2) 恒压水箱水位调节。旋转水位调节阀 4，可打开不同高度上的溢水孔盖，调节恒压水箱 5 水位，管嘴的作用水头改变。调节调速器，使溢流量适中，待水头稳定后，即可进行实验。

(3) 活塞形心处水深  $h_c$  测量。标尺的零点已固定在活塞圆心的高程上。当测压管内液面稳定后，记下测压管内液面的标尺读数，即为作用在活塞形心处的水深  $h_c$  值。

(4) 管嘴作用水头测量。管嘴作用水头是指水箱液面至管嘴中心的垂直深度。在水箱的侧面上刻有管嘴中心线，用直尺测读水箱液面及中心线的值，其差值即为管嘴作用水头值。

(5) 测量流量。用重量法体积法测量流量。

##### 2. 定性分析实验（选做）

验证  $v_{2x} \neq 0$  对  $F_x$  的影响。

取下平板活塞 9，使水流冲击到活塞套内，便可呈现出回流与  $x$  方向的夹角  $\alpha > 90^\circ$ （即  $v_{2x} \neq 0$ ）的水力现象[见图四(a)]。调整好位置，使反射水流的回射角度一致。以某动量实验台为例，某次实验测得作用于活塞套圆心处的水深  $h'_c = 292\text{mm}$ ，管嘴作用水头  $H_0 = 293.5\text{ mm}$ ，而相应水流条件下，在取下带翼轮的活塞前， $v_{2x} = 0$ ， $h_c = 196\text{mm}$ 。表明  $v_{2x}$  若不为零，对动量力影响甚大。因为  $v_{2x}$  不为零，则动量方程变为[见图四(b)]

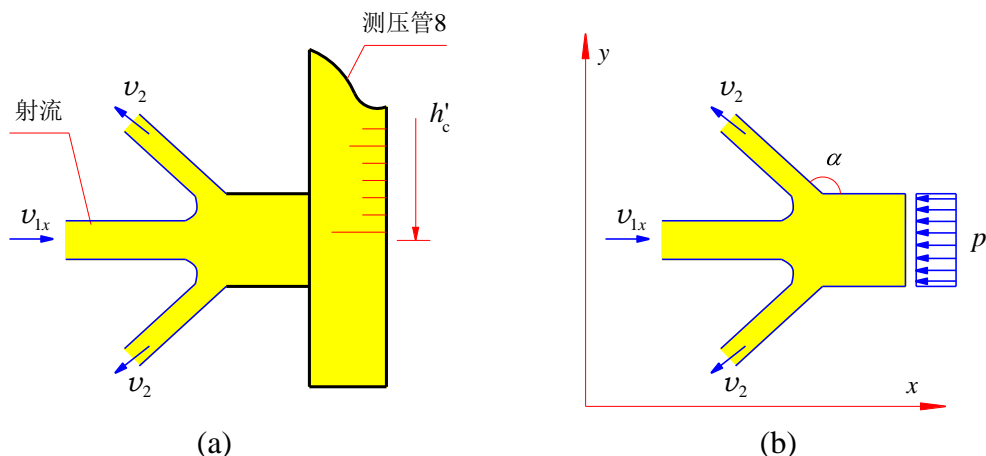


图4 射流对活塞套的冲击与受力分析

$$-\rho g h'_c \frac{\pi}{4} D^2 = \rho q_V (\beta_2 v_{2x} - \beta_1 v_{1x}) = -\rho q_V [\beta_1 v_{1x} + \beta_2 v_2 \cos(180^\circ - \alpha)]$$

就是说  $h'_c$  随  $v_2$  及  $\alpha$  递增。故实验中  $h'_c > h_c$ 。

## 2. 定量分析实验——恒定总流动量方程验证与射流动量修正因数测定实验

实验方法与步骤：参照基本操作方法，分别测量高、中、低三个恒定水位下的流量、活塞作用水头等有关实验参数，实验数据处理与分析参考第五部分内容。

## 五、数据处理及成果要求

### 1. 记录有关信息及实验常数

实验设备： 动量定律综合试验仪

实验台号： 8

实 验 者： 杨敬轩

实验日期： 2018 年 12 月 24 日

管嘴内径  $d =$  1.19  $\times 10^{-2}$  m

活塞直径  $D =$  1.995  $\times 10^{-2}$  m

## 2. 实验数据记录及计算结果

表 1 测量记录及计算表

| 测量<br>次数 | 管嘴作用水头<br>$H_0 / 10^{-2} \text{ m}$ | 活塞作用水头<br>$h_c / 10^{-2} \text{ m}$ | 流量 $q_v$<br>$/(10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})$ | 流速 $v$<br>$/(10^{-2} \text{ m/s})$ | 动量力 $F$<br>$/ 10^{-5} \text{ N}$ | 动量修正因数<br>$\beta$ |
|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|------------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 1        | 28.43                               | 19.36                               | 254.6   | 228.92                             | 59307.16                         | 1.0176            |
| 2        | 22.64                               | 15.46                               | 226.5   | 203.65                             | 47359.95                         | 1.0267            |
| 3        | 17.41                               | 11.86                               | 197.1   | 177.22                             | 36331.76                         | 1.0402            |

## 3. 成果要求

(1)测定管嘴射流的动量修正因数 $\beta$ ，如表 1 所示。

(2)取某一流速，绘出控制体图，阐明分析计算的过程。

答：取第一组数据，控制体图如图 5 所示。

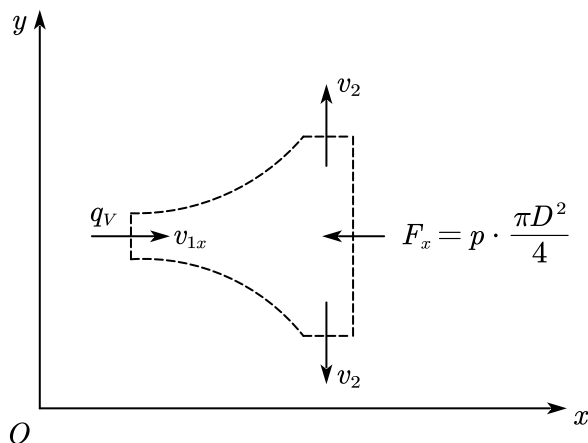


图 5 控制体图

流速为：

$$\begin{aligned}
 v_{1x} &= \frac{q_v}{A} = \frac{q_v}{\frac{\pi d^2}{4}} \\
 &= \frac{4 \times 254.6 \times 10^{-6}}{\pi \times (1.19 \times 10^{-2})^2} \\
 &= 2.28915 \text{ m/s} = 228.92 \times 10^{-2} \text{ m/s}
 \end{aligned} \tag{1}$$

动量力为：

$$\begin{aligned}
 F_x &= p \cdot \frac{\pi D^2}{4} = \rho g h_c \cdot \frac{\pi D^2}{4} \\
 &= 1000 \times 9.8 \times 19.36 \times 10^{-2} \times \frac{\pi \times (1.995 \times 10^{-2})^2}{4} \\
 &= 0.5930716 \text{ N} \\
 &= 59307.16 \times 10^{-5} \text{ N}
 \end{aligned} \tag{2}$$

沿  $x$  方向的动量方程为：

$$F_x = -p_c A = -\rho g h_c \cdot \frac{\pi D^2}{4} = \rho q_v (0 - \beta_1 v_{1x}) \tag{3}$$

则动量修正系数为：

$$\begin{aligned}
 \beta_1 &= -\frac{F_x}{\rho q_v v_{1x}} \\
 &= -\frac{-0.5930716}{1000 \times 254.6 \times 10^{-6} \times 228.92 \times 10^{-2}} \\
 &= 1.0176
 \end{aligned} \tag{4}$$

## 六、分析思考题

1. 实测 $\beta$ 与公认值（ $\beta=1.02\sim1.05$ ）符合与否？如不符合，试分析原因。

答：平均值为  $\bar{\beta} = \frac{1}{3}(1.0176 + 1.0267 + 1.0402) = 1.0282$ ，与公认值符合良好。

分析三组实验值，只有第一组数据与公认值略有一点误差，其余两组均完全符合公认值，综上，实测 $\beta$ 与公认值符合良好。

2. 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  $T$  是由射流冲击平板沿  $yz$  平面通过翼片造成动量矩的差所致。即

$$T = \rho Q v_{yz2} \cos \alpha_2 \cdot r_2 - \rho Q v_{yz1} \cos \alpha_1 \cdot r_1 \tag{5}$$

式中： $Q$ ——射流的流量；



$v_{yz1}$ ——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；

$\alpha_1$ ——入流速度与圆周切线方向的夹角，接近  $90^\circ$ ；

$\alpha_2$ ——出流速度与圆周切线方向的夹角；

$r_1, r_2$ ——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翼片与否无关。

### 3. 如图 2，通过细导水管 $a$ 的分流，其出流角度为什么需使之垂直于 $v_{1x}$ ？

答：因为如果细导水管  $a$  的分流出流角度垂直于  $v_{1x}$ ，则该分流速度对以上受力分析无影响。

当计及该分流影响时，动量方程为

$$-\rho g h_c \frac{\pi D^2}{4} = \rho Q_2 \beta_2 v_{2x} + \rho Q_3 \beta_3 v_{3x} - \rho Q_1 \beta_1 v_{1x} \quad (6)$$

又  $v_{2x} = v_{3x} = 0$ ，则

$$-\rho g h_c \frac{\pi D^2}{4} = -\rho Q_1 \beta_1 v_{1x} \quad (7)$$

即

$$\rho Q_1 \beta_1 v_{1x} - \rho g h_c \frac{\pi D^2}{4} = 0 \quad (8)$$

该式表明只要细导水管  $a$  的分流出流角度与  $v_{1x}$  垂直，则  $x$  方向的动量方程与设置细导水管与否无关。