

# 新型自由侧翻式拍门研究

陈 坚<sup>1</sup> 李 娟<sup>1</sup> 周龙才<sup>1</sup> 周卫东<sup>2</sup> 张 意<sup>2</sup>

( 1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室 湖北 武汉 430072 ; 2. 湖南力威液压设备有限公司 湖南 湘潭 411228 )

**摘要** 结合传统拍门的研究方法 , 从理论上分析和研究了一种新型拍门即自由侧翻式拍门的运动规律和撞击力。主要内容包括 拍门的结构和工作原理、无水空翻时拍门的运动规律和撞击力、停泵闭门过程中拍门的运动规律和撞击力、拍门撞击力的求解方法、拍门的流态和水力损失分析等 , 得出一般拍门的运动方程和撞击力近似表达式 , 并结合百里洲泵站更新改造工程拍门改造实例进行计算。结果表明该新型拍门克服了传统拍门的缺陷 , 运行时阻力小、开启角度大、水流流态好 , 无需配套设备 , 造价低廉 , 安装与检修方便。

**关键词** 自由侧翻式拍门 运动规律 撞击力 水力损失

中图分类号 S277.9 文献标识码 A 文章编号 1006-7647(2008)01-0066-04

**Study on new type of laissez-aller side-turn-over flap gate**//CHEN Jian<sup>1</sup>, LI Juan<sup>1</sup>, ZHOU Long-cai<sup>1</sup>, ZHOU Wei-dong<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>( 1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Liwei Hydraulic Equipment Co., Ltd. of Hunan Province, Xiangtan 411228, China )

**Abstract** : Based on the research method for conventional flap gates, a new type of flap gate, the laissez-aller side-turn-over flap gate, was studied. Theoretical analysis was carried out on the structure and working principle of the flap gate, the motion law and impact force of the flap gate under different conditions, the method to solve the impact force, the flow pattern and hydraulic loss, etc.. The motion equation for the common flap gate and an approximate formula for the impact force were obtained. Case study on the flap gate reform in rebuilding of Bailizhou Pumping Station shows that the new type of flap gate overcomes the defects of conventional ones, and it is characterized by small resistance, large open angle, good flow pattern, no requirement for auxiliary facility, low cost, and convenience in installation and repairing.

**Key words** : laissez-aller side-turn-over flap gate; motion law; impact force; hydraulic loss

## 1 自由侧翻式拍门的结构和工作原理

自由侧翻式拍门的结构与普通拍门类似 , 即由阀板 ( 门板 )、门铰、门座和密封件组成 , 门板通过门铰安装在门座上 , 且靠橡胶密封止水。

其工作原理是 : 拍门铰轴倾斜 , 使门板倾斜 , 因此当门板离开管口位置时 , 门重的分力促使拍门关闭。正如停在坡上的汽车 , 当推开车门时门会自动关闭一样。这种拍门的关键是将门轴倾斜 , 它利用了门重的部分分力作闭门的动力。

图 1 为流道出口拍门的布置图。假定门铰的轴心线 ( 门轴 ) 与水平面不垂直 , 设门轴与垂直水平面的竖直轴夹角 ( 门轴倾角 ) 为  $\delta$  , 拍门关闭时过门轴的门板所在平面 ( 管口所在平面 ) 与竖直平面的夹角 ( 垂角 ) 为  $\gamma$ 。

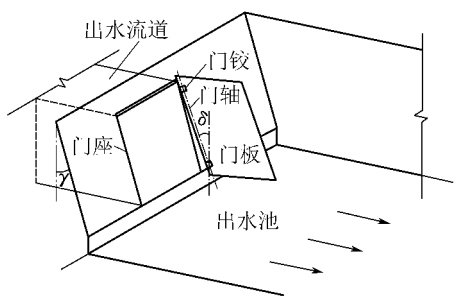


图 1 流道出口拍门布置

## 2 无水空翻时拍门的运动方程和撞击力

无水空翻时 , 拍门运动类似于物理摆 , 重力在其运动方向上的分力 ( 对于拍门而言为重力垂直于门板的分力 ) 引起物体运动的变化。在开启角为  $\alpha$  时 ( $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ) , 一般情况下即拍门门轴倾角  $\delta$ 、垂角  $\gamma$  都存在时 , 门轴与竖直线夹角为  $\beta$  , 门轴所在竖直

面与管道出口断面所成二面角为  $\theta$  ,则它们与  $\delta, \gamma$  有如下关系 :

$$\cos\beta = \cos\gamma\cos\delta$$

$$\sin\theta = \frac{\sin\gamma}{\sqrt{\sin^2\gamma\cos^2\delta + \sin^2\delta}}$$

此时 ,垂直于门板的重力分力为

$$f = mg\sin\beta\sin\theta\cos\alpha + mg\sin\beta\cos\theta\sin\alpha$$

对于圆形拍门 ,当  $\delta, \gamma$  都存在 ,且在时间为  $T$ 、开启角为  $\alpha$  时 ,由动量矩定理得

$$J_o \frac{d\omega}{dt} = (mg\sin\beta\sin\theta\cos\alpha + mg\sin\beta\cos\theta\sin\alpha)R \quad (1)$$

式中 : $J_o$  为拍门对门轴的转动惯量 ; $R$  为圆形拍门的半径。

经过变形和积分 ,式(1)可变成

$$-\frac{1}{2}J_o\omega^2 = (mg\sin\beta\sin\theta\sin\alpha - mg\sin\beta\cos\theta\cos\alpha)R + C \quad (2)$$

当  $\alpha = \alpha_0$  时 , $\omega = \omega_0$  为初始开启角 ,对于侧翻式拍门取  $90^\circ$  ;当  $\alpha = 0$  时 , $\omega = \omega_q$  (碰撞前角速度)。

可知  $C = mg\sin\beta\cos\theta\cos\alpha_0 - \sin\theta\sin\alpha_0)R$

$$\omega_q = \sqrt{\frac{2mg\sin\beta\cos\theta - \cos\theta\cos\alpha_0 + \sin\theta\sin\alpha_0)R}{J_o}} \quad (3)$$

任意  $\alpha$  角时角速度为

$$\omega = \sqrt{\frac{2mgR\sin\beta[\cos(\theta + \alpha) - \cos(\theta + \alpha_0)]}{J_o}} \quad (4)$$

对于方形拍门 ,上述所有表达式均成立 ,计算时只需将公式中的  $R$  换成方形门板重心至门轴的距离即可。

门体撞击门座的瞬间 ,拍门的运动状态发生了有限的变化 ,速度产生突变 ,会出现很大的碰撞力 ,其过程很复杂。在一定的简化条件下可运用动量矩、动量等定理分析碰撞问题 ,推导出撞击力的近似计算公式。

假设碰撞时间为  $t$  ,则门座对门体的碰撞力为

$$F = \frac{-4\mu(1+K)J_o\omega_q R}{(5R^2 + r_0^2)t} - \frac{4mg\sin\beta\sin\theta R^2}{5R^2 + r_0^2} \quad (5)$$

式中 : $\mu$  为冲击系数 ,可由实验确定 ; $K$  为恢复系数 ,是物体碰撞后与碰撞前速度大小的比值<sup>[1-2]</sup> ; $r_0$  为管道内径。

### 3 停泵闭门期间拍门的运动方程和撞击力

停泵拍门运动实际经历了两个完全不同的阶段 :短时间内 ,泵为正转正流 ,这时拍门受到来自泵的水流冲击力作用 ,且冲击力逐渐减小 ;一段时间后 ,水

体开始逆流 ,拍门受到反向水压力的作用<sup>[3]</sup>。

正流阶段 ,拍门受到水体、自身及门铰、门轴作用的力 ,其中门铰、门轴作用的力不产生绕轴的力矩 ;自身作用的力有重力和浮力 ,综合作用表现为拍门的浮重  $G$ 。对于整体圆形拍门而言 ,其作用点距门轴的距离为门的半径  $R$  ;水体作用的力主要有水流冲击力和运动阻力。由于水流通过自由侧翻式拍门产生了侧向收缩 ,垂直扩大 ,因此在拍门的上下及左右面都会产生漩涡。根据经验 ,该漩涡作用的力可近似地看成是成对出现的 ,故可相互抵消 ,但实际作用如何需通过实验确定。

逆流阶段 ,拍门受到动水压力、运动阻力、附加阻力(惯性力)、浮重力等作用 ,后3种力对门轴的力矩与前面相同。

由泵站设计规范<sup>[4]</sup>可知停泵后正转正流时间  $T_B$  和正转逆流时间  $T_{BC}$ 。假定  $T_B$  时段内流量随时间呈直线变化 ,则停泵后  $t$  时的流量、流速可用式(6)表示 :

$$Q_t = Q\left(1 - \frac{t}{T_B}\right) \quad v_t = v\left(1 - \frac{t}{T_B}\right) \quad (6)$$

本文对圆形拍门各力进行如下分析。

#### 3.1 水流冲击力

当拍门处于较宽敞的出水池中时 ,水流冲击力可看作射流冲向平板的力 ,开启角为  $\alpha$  ,射流速度为  $v_s$  ,管道中流量为  $Q$  时 ,对于自由侧翻式拍门 ,停泵后  $t$  时刻水流冲击力对门轴的力矩为

$$M_1 = \varphi\rho Qv_s t R \cos^2\alpha \quad (7)$$

式中 : $\varphi$  为修正系数 ,根据实测 ,典型的平板射流情况  $\varphi = 0.92 \sim 0.96$ <sup>[11]</sup> ; $\rho$  为水的密度。

将式(6)代入式(7) ,可得

$$M_1 = \varphi\rho Qv_s R\left(1 - \frac{t}{T_B}\right)^2 \cos^2\alpha = M_c\left(1 - \frac{t}{T_B}\right)^2 \cos^2\alpha \quad (8)$$

#### 3.2 运动阻力

根据流体力学原理 ,平板在流体中沿板面法线方向运动时 ,其阻力为

$$R = k\rho v_p^2 S$$

式中 : $v_p$  为平板运动速度 ; $k$  为阻力系数 ,可通过实验确定。

拍门关闭运动为绕铰轴旋转运动。近似计算运动阻力时 ,设门体转动角速度为  $\omega$  ,则水流阻力所造成的力矩  $M_R$  为

$$M_R = \frac{7\pi}{4}k\rho\omega^2 R^5 \quad (9)$$

#### 3.3 附加阻力

根据流体力学原理 ,物体在水中作加速(或减速)运动时 ,尚有与加速度方向相反的附加阻力(惯性阻力)产生。设附加阻力为  $D$  ,则

$$D = C_m m' \frac{dv_w}{dt} \quad (10)$$

式中:  $C_m$  为附加阻力系数;  $v_w$  为物体运动速度, m/s;  $m'$  为“附加质量”, 数值上等于物体排开的水的质量, kg。

对照水流运动阻力的分析, 附加阻力对门轴的力矩为

$$M_D = C_m J_s \frac{d\omega}{dt} \quad (11)$$

式中:  $J_s$  为附加质量对门轴的转动惯量, kg·m<sup>2</sup>。

### 3.4 浮重

同无水空翻时, 浮重( $G = mg - F_{\text{浮}}$ )对门轴的力矩为

$$M_2 = G \sin \beta R \sin(\theta + \alpha) \quad (12)$$

令  $M_C = G \sin \beta R$ , 则

$$M_2 = M_C \sin(\theta + \alpha) \quad (13)$$

若拍门无外施拉力, 则拍门开启角度  $\alpha_0$  可根据平衡式(14)计算:

$$M_c \cos^2 \alpha_0 - M_C \sin(\theta + \alpha_0) = 0 \quad (14)$$

式中  $M_c = \varphi \rho Q v R_0$ 。

### 3.5 动水压力

关于动水压力<sup>[3]</sup>, 对于自由悬浮式拍门在下落过程中开启角为  $\alpha$  时, 其门上的作用水头(拍门的损失水头)为定值, 设其为  $H$ , 则水压力  $P_Y = \rho g H S$ ; 设  $P_Y$  的作用点距门铰距离为  $L_Y$ , 则  $P_Y$  对门铰所造成的力矩为  $M_Y = \rho g H S L_Y$ 。对照自由侧翻式和悬挂式两种拍门在运动过程中的受力状况可知, 自由侧翻式拍门的受力状况相同, 上述分析公式适用。

逆流开始时拍门的作用水头为零, 闭门时作用水头最大, 其间拍门作用水头由零增至最大可能的数值随时间呈直线变化, 任意时刻拍门作用水头为

$$H_t = H \frac{t}{T_{BC}} \quad (15)$$

则拍门水压力及水压力对门轴所造成的力矩分别为

$$P_t = \varepsilon P_Y \frac{t}{T_{BC}} \quad M_t = \varepsilon M_Y \frac{t}{T_{BC}} \quad (16)$$

式中:  $\varepsilon$  为动水压力修正系数, 其值小于 1, 可近似地取为 1。具体数值应通过实验确定。

同无水空翻时, 根据动量矩定理, 可列出正流阶段拍门的运动方程为

$$J_o \frac{d\omega}{dt} = -M_1 - M_R - M_D + M_2 \quad (17)$$

即  $J_o \frac{d\omega}{dt} + C_m m' \frac{d\omega}{dt} + M_C \left(1 - \frac{t}{T_B}\right)^2 \cos^2 \alpha +$

$$M_R - M_C \sin(\theta + \alpha) = 0 \quad (18)$$

同理逆流阶段拍门的运动方程为

$$J_o \frac{d\omega}{dt} + C_m m' \frac{d\omega}{dt} - \varepsilon M_Y \frac{t}{T_{BC}} +$$

$$M_R - M_C \sin(\theta + \alpha) = 0 \quad (19)$$

上述两个方程均可转变为关于  $\alpha$  的二阶微分方程, 解这两个方程可求得角速度的表达式。当  $\alpha = 0$  时即为拍门撞前角速度, 参考无水空翻时拍门及门铰撞击力的求解方法亦可求得拍门实际运行时撞击力的近似表达式。

以上公式是针对普通拍门, 因此公式具有普遍意义, 改变倾角( $\delta$  或  $\gamma$ )可以获得不同的拍门形式的公式。

## 4 计算实例

为进一步了解自由侧翻式拍门的使用效果, 结合百里洲泵站内径为 2 m、外径为 2.2 m、质量为 800 kg、体积为 0.13 m<sup>3</sup> 的拍门, 根据上面所推导的公式, 分别进行几种拍门无水空翻时关闭时间及撞前角速度和实际运行时开启角的计算。无水空翻时计算结果见表 1。

表 1 拍门无水空翻时关闭前角速度及关闭历时计算结果

| 拍门放置角度/(°) |          | $\sin \beta$ | $\sin \theta$ | $\cos \theta$ | $\frac{\omega_q}{(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})}$ | $t/s$ |
|------------|----------|--------------|---------------|---------------|-----------------------------------------------------|-------|
| $\delta$   | $\gamma$ |              |               |               |                                                     |       |
| 0          | 10       | 0.17         | 1             | 0             | 1.57                                                | 2.00  |
|            | 15       | 0.26         | 1             | 0             | 1.92                                                | 1.64  |
|            | 0        | 0.09         | 0             | 1             | 1.11                                                | 2.82  |
| 5          | 10       | 0.19         | 0.90          | 0.44          | 1.92                                                | 1.63  |
|            | 15       | 0.27         | 0.95          | 0.31          | 2.21                                                | 1.42  |
|            | 0        | 0.17         | 0             | 1             | 1.57                                                | 2.00  |
| 10         | 10       | 0.24         | 0.71          | 0.70          | 2.22                                                | 1.42  |
|            | 15       | 0.31         | 0.84          | 0.54          | 2.47                                                | 1.27  |
|            | 0        | 1.00         | 0             | 1             | 3.78                                                | 0.83  |
| 90         | 10       | 1.00         | 0.17          | 0.98          | 4.06                                                | 0.77  |
|            | 15       | 1.00         | 0.26          | 0.97          | 4.18                                                | 0.75  |

注: 拍门重力矩  $M_G = 800 \times 9.8 \times 1.1 = 8624 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ , 绕轴转动惯量  $J_o = 1210 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 计算时取拍门初始开启角  $\alpha_0 = 90^\circ$ 。

分析表 1 可知, 闭门角速度随  $\delta, \gamma$  增大而增大, 闭门时间随  $\delta, \gamma$  增大而减小。倾角  $\delta$  和垂角  $\gamma$  对闭门角速度及关闭时间影响的敏感度基本相同, 因此可根据需要灵活调整  $\delta$  和  $\gamma$ , 使拍门处于最佳运行状态。当  $\delta = 90^\circ, \gamma = 10^\circ$  即传统的自由悬浮式拍门时, 其闭门前角速度为 4.06 rad/s, 是同等情况下自由侧翻式拍门( $\delta = 5^\circ$ )的 2 倍多。因此, 在空气中自由侧翻式拍门的撞击力比自由悬浮式拍门的撞击力小。

在设计情况下, 百里洲泵站单泵流量为 7.95 m<sup>3</sup>/s, 流道出口断面流速为 2.53 m/s。可由式(14)计算开启角, 计算结果见表 2。

由表 2 可知, 拍门初始开启角  $\alpha_0$  随门轴倾角  $\delta$  增大而减小, 因而采用较小的倾角  $\delta$  可获得较大的开启角  $\alpha_0$ 。自由悬浮式拍门( $\delta = 90^\circ$ )的开启角要比自由侧翻式拍门( $\delta = 5^\circ$ )的开启角小 22°, 这是因为

拍门开启时 对于自由悬浮式拍门 水流要克服全部的重力做功。而对于自由侧翻式拍门 水流仅需克服部分的重力。开启角度大 能大大改善拍门的过流条件 减小拍门的水流阻力 可显著节约电能。

表 2 不同类型拍门开启角  $\alpha_0$  的计算结果

| 拍门放置角度 $(^\circ)$ |          | $\sin\beta$ | $\theta(^\circ)$ | $M_G/$<br>$(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$ | $\alpha_0(^\circ)$ |
|-------------------|----------|-------------|------------------|----------------------------------------------------------|--------------------|
| $\delta$          | $\gamma$ |             |                  |                                                          |                    |
| 90                | 0        | 1           | 0                | 7222.60                                                  | 58.0               |
|                   | 10       | 1           | 10               | 7222.60                                                  | 57.0               |
| 10                | 0        | 0.174       | 0                | 1253.56                                                  | 76.0               |
|                   | 10       | 0.244       | 45               | 1759.40                                                  | 75.0               |
| 5                 | 0        | 0.087       | 0                | 629.17                                                   | 80.4               |
|                   | 10       | 0.194       | 64               | 1398.34                                                  | 79.0               |

注： $\delta=90^\circ$ 时为自由悬浮式拍门； $\delta=5^\circ$ 时为自由侧翻式拍门。

5 拍门流态及水力损失

图 2 为自由侧翻式拍门和自由悬浮式拍门的流型图。由图 2 可以看出：自由悬浮式拍门立面图显示 水流因受拍门挤压 拍门背面至池面出现大尺度的横轴漩涡 主流偏向池壁两侧。但改用双节拍门后 流态有所改善。该种流型会一直存在。自由侧翻式拍门立面图显示 主流流出管口后可直接攀升至池中水面。但平面图显示 水流因受拍门挤压 将在拍门背面、池壁附近产生尺度较大的柱状漩涡（竖轴）。如采用单侧翻式拍门 柱状漩涡将出现在门背一侧 且漩涡强度较大 主流偏向池壁一侧；如采用双侧翻式拍门 则柱状漩涡在池壁两侧对称显现 但漩涡强度减弱 1/2 主流位于池中心。该种流型仅在拍门闭门或开门过程中才出现。

故对于自由侧翻式拍门 因机组正常运行时拍门基本全开 拍门几乎无能耗 池中的水流也不会存在额外的水力损失。自由侧翻式拍门的水力损失与倾角  $\delta$  或垂角  $\gamma$  有关  $\delta$  或  $\gamma$  大 损失也大 不同  $\delta$

或  $\gamma$  时的损失最好通过试验来确定。但是 可以预见 在倾角  $\delta$  或  $\gamma$  很小的情况下（如  $\delta=5^\circ$  或  $\gamma=10^\circ$ ）其损失与其他过流部件（如池中漩涡损失）比几乎可以忽略。因此 比照经验 理论上的分析有充分理由认为 自由侧翻式拍门在机组正常运行时的阻力系数  $\zeta_p<0.1$  一般情况下可认为  $\zeta_p=0.1$ 。它比自由悬浮式拍门的阻力系数  $\zeta_p$ （ $\zeta_p=0.4\sim0.5$ ）小 75% ~ 80% 倍。

6 结 语

自由侧翻式拍门的工作原理介于无自闭能力的自由侧翻式和自由悬浮式两种拍门之间 其技术的关键是将门轴倾斜（存在  $\delta$  或  $\gamma$  角）使门板倾斜 因而当拍门离开管口位置时 门重的分力会促使拍门关闭。这种拍门利用了门体自重的部分分力作为闭门的动力（当  $\delta=5^\circ$  时利用的重力仅占自由悬挂式拍门全部重力的 10% 左右）克服了无自闭能力的自由侧翻式拍门和自由悬浮式拍门的缺点。因重力利用仅为自由悬浮式拍门全部重量作用的一小部分 因而与普通的拍门相比 拍门的过流阻力要小很多（不是一个数量级）水流过门流型也较好 不会带来额外的漩涡损失 可提高泵站的运行效率。

本文仅对自由侧翻式这种新型拍门的运动及撞击力进行了初步的研究 其中为利于推导 对一些问题进行了近似处理 如近似以静水压力替代动水压力 假设拍门在下落过程中 流量随拍门位置（开启角  $\alpha$ ）呈直线变化等 这些难免会带来误差 在以后的研究中可进行模拟试验和现场检测 对这些误差予以评估。另外 对于自由侧翻式拍门在运行过程中的水头损失和停泵闭门撞击力 本文仅做了理论上的分析 今后可通过现场试验做进一步分析研究 如利用数值计算拟合出水头损失随拍门开启角度变化而变化的连续曲线以及停泵闭门过程中能量衰减的过程等 这些工作在今后的研究中加以分析总结后 将对进一步研究拍门的工作特性以及评定这种新型拍门的使用效果等方面起到重要作用。在自由侧翻式拍门结构方面 本文没有做很多的研究 今后亦可进行这方面的研究 为设计可靠高效的自由侧翻式拍门提供理论指导。

参考文献：

[1] 刘毅. 泵站拍门断流的力学特性研究[D]. 扬州: 扬州大学 2005.  
[2] 夏海峰. 低扬程泵站充气浮箱拍门的技术研究[D]. 扬州: 扬州大学 2003.  
[3] 严登丰. 泵站过流设施与截流闭锁装置[M]. 北京: 中国水利水电出版社 2000 :118-133.  
[4] GB/T50265—97 泵站设计规范[S].

（收稿日期 2007-03-26 编辑 方宇彤）

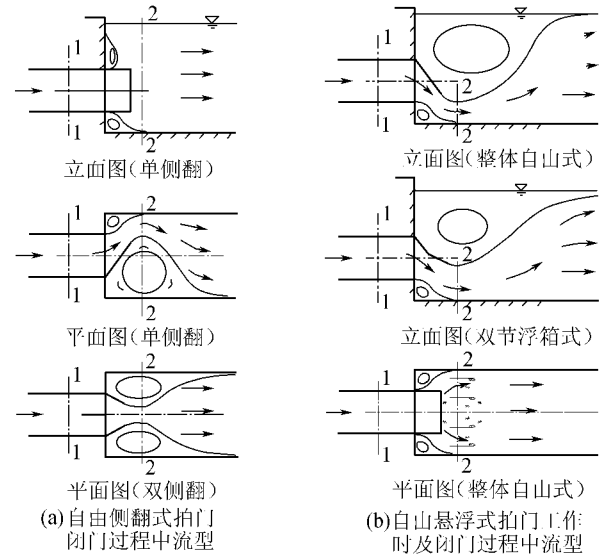


图 2 两种拍门的过门流型