

水力自动翻板闸门的瞬心轨迹及其对稳定性的影响

侯石华¹, 沈长松²

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 河海大学 水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 分析了连杆滚轮式水力自动翻板闸门的运动轨迹, 并由此得出闸门动、静坐标系间的转换关系. 结合翻板闸门的运转机理, 探讨了闸门在运行过程中的瞬心轨迹线及其对闸门稳定性的影响. 结果表明, 通过优化闸门结构可调整“瞬心”的位置, 保证闸门运转的稳定性.

关 键 词: 翻板闸门; 瞬心轨迹线; 运转机理; 优化设计; 稳定性

中图分类号: TV663.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2007)03-0066-04

Path of instantaneous center of hydro-automatic flap gate and its influences on gate's stability

HOU Shi-hua¹, SHEN Chang-song²

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The path of the instantaneous center of a hydro-automatic flap gate with connecting levers and rolling wheels is analyzed, and the conversion relationship between the moving and fixed coordinates is obtained. The path of the instantaneous center during operation and its influences on the gate's stability are discussed considering the operational principle of the flap gate. Results show that the location of the instantaneous center can be adjusted by optimizing the gate's structure to ensure stability of the gate.

Key words: flap gate; path of instantaneous center; operational principle; optimum design; stability

水力自动翻板闸门利用力矩平衡原理进行工作, 其工作状态可分为静态和动态两种. 翻板闸门处于静态时, 上、下游水位稳定不变, 闸下出流量为常量. 当水位变化时, 翻板闸门的开度也随之改变, 随水位变化从某一开度过渡到另一开度, 这个过程称之为动态过程. 处于动态过程的翻板闸门, 作用在门上的各个力是变化的. 根据翻板闸门在运动过程中所受的力和力的变化, 来分析翻板闸门在运动过程中的工作状态, 称之为动态工作原理. 性能良好的水力自动翻板闸门, 不但要求静态时门上作用力互相平衡, 而且在动态中也要保证翻板闸门能平稳地从一个静止状态过渡到另一个静止状态^[1].

1 运动轨迹与坐标转换

连杆滚轮式水力自动翻板闸门由面板、支腿和导轨三部分组成, 连杆的滚轮为运动机构(见图1). 若把

收稿日期: 2006-12-18

作者简介: 侯石华(1974-), 女, 广东封开人, 工程师, 硕士, 主要从事水利工程设计及研究工作. E-mail: housh@126.com

翻板闸门简化成平面问题,取静坐标系 $K-Z$,结构体系的位置用8个特征点表示,其中点7为静坐标原点, $X-Y$ 为动坐标系,点4为动坐标原点,动坐标系与翻板闸门同时转动, Y 轴与导轨平行.连杆绕固定的后支点(即点8)转动,翻板闸门绕连杆前支点(即点4)转动,同时,翻板闸门上的导轨与滚轮相切而移动.

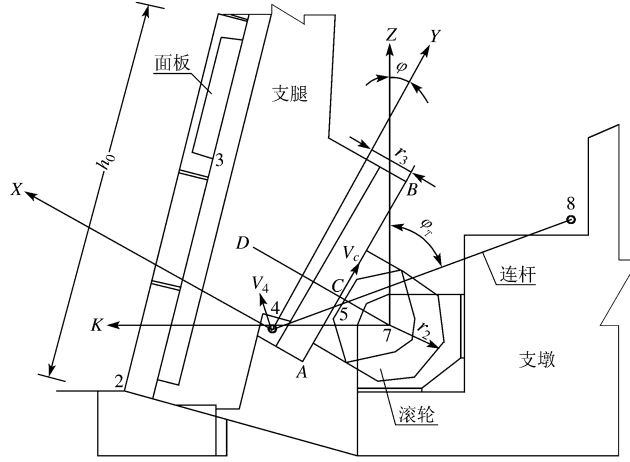


图1 翻板闸门的运动平面图

Fig. 1 Moving plan of the flap gate

翻板闸门高为 h_0 ;滚轮半径为 r_2 ;连杆长为 L ;滚轮与导轨相切,连杆前支点到滚轮与导轨的切线的垂直距离为 r_3 ;滚轮圆心点7至 Y 轴的垂直距离为 r_0 , $r_0 = r_2 + r_3$.

翻板闸门结构在运行过程中产生的复合运动,一是翻板闸门绕连杆前支点转动,二是连杆前支点本身又绕连杆后支点转动.在这种复杂的运动中,点的运动位置不易确定,但连杆前支点的运动轨迹却容易确定,它绕点8转动,并始终在 Y 轴上.因此点4(X_4, Y_4)同时满足两个条件,第一个方程是圆^[2],即

$$(K_4 - K_8)^2 + (Z_4 - Z_8)^2 = L^2 \quad (1)$$

第二个方程可根据导轨与滚轮相切的条件导出.翻板闸门的初始状态为关闭状态.启动后,闸门向下游转动,闸门开度用闸门面板的倾斜角(即面板与 Z 轴的夹角) θ 表示, $\theta = \varphi - \varphi_A$,其中, φ 为动坐标轴 Y 与静坐标轴 Z 的夹角, φ_A 为面板与 Y 轴的夹角, φ_T 为连杆与 Z 轴夹角.在静坐标系 $K-Z$ 中,由几何关系得

$$r_0 - Z_4 \sin \varphi = K_4 \cos \varphi \quad (2)$$

$$K_4 = K_8 + L \sin \varphi_T \quad (3)$$

$$Z_4 = Z_8 - L \cos \varphi_T \quad (4)$$

联立(2)、(3)、(4)式求得:

$$\varphi_T = \arcsin \frac{r_0 - Z_8 \sin \varphi - K_8 \cos \varphi}{L} + \varphi \quad (5)$$

由(3)、(4)式可以求得 K_4, Z_4 的值.确定了动坐标原点的运动位置后,可由几何关系得到动、静坐标系的换算关系:

$$K = X \cos \varphi - Y \sin \varphi + K_4 \quad (6)$$

$$Z = X \sin \varphi + Y \cos \varphi + Z_4 \quad (7)$$

2 瞬心及其轨迹线的推求

连杆滚轮式水力自动翻板闸门的运转过程中,每一瞬时速度等于零的点为瞬心.连杆滚轮式水力自动翻板闸门在启闭过程中,门叶完全由连杆和滚轮支承,因此,连杆、滚轮的尺寸和位置对闸门的运转稳定性影响较大.当上游水位升高,水压力增大且重力与水压力的合力作用线高于瞬心时,产生转动动力矩使门叶向开启方向转动.随着瞬心上移,水压力产生的转动动力矩减小.对于某一水位,当门叶转动到某一特定位置,门叶转动的摩阻力矩与相应位置的转动动力矩平衡时,门叶将稳定于此特定位置或开度.同样,在关闭过程中,随着上

游水位下降,重力与水压力的合力作用线低于瞬心,形成使门叶向关闭方向转动的转动力矩,当门叶转动到某一特定位置,门叶转动的摩阻力矩与相应位置的转动力矩平衡时,门叶将稳定于此特定位置或开度.实际的水位涨落都将经历一定的时程,因而门叶的开度能平稳地随着水位的变化而变化.

在翻板闸门的转动过程中,速度瞬心既可以在平面图形内,也可以在平面图形以外,且速度瞬心的位置也不是固定不变的,而是随着时间变化的.以下推求连杆滚轮式水力自动翻板闸门的瞬心轨迹.

把翻板闸门的运动问题简化成平面问题(见图1).已知 $K_7=0, Z_7=0$, 以及 K_8 和 Z_8 的数值, 并且有 $\varphi_T = \arcsin \frac{r_0 - Z_8 \sin \varphi - K_8 \cos \varphi}{L} + \varphi$.

从翻板闸门的运动规律可知,点4的速度矢量 V_4 垂直于连杆所在的直线 L_{48} , 点C的速度矢量 V_C 平行于导轨所在直线 L_{AB} , 直线 L_{48} 与 L_{AB} 互不平行. 由于门体上任一点的速度方向必须垂直于该点与速度瞬心的连线, 因此, 通过4、C两点分别作速度 V_4, V_C 的垂线, 即 L_{48}, L_{CD} , 这两条垂线的交点5即为门体在此瞬时的速度瞬心.

在静坐标系 $K-Z$ 中, L_{48} 的方程为 $K = -\tan \varphi_T Z + (K_8 + Z_8 \tan \varphi_T)$ (8)

L_{CD} 的方程为: $K = \frac{Z}{\tan \varphi}$ (9)

联立(8)、(9)式,可求得交点5的坐标:

$$\left. \begin{aligned} K_5 &= \frac{1}{\tan \varphi} \frac{K_8 + Z_8 \cot \varphi_T}{\cot \varphi + \tan \varphi_T} \\ Z_5 &= \frac{K_8 + Z_8 \tan \varphi_T}{\cot \varphi + \tan \varphi_T} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

以某工程的闸门为算例, 闸门门型为连杆滚轮式水力自动翻板闸门, 门高 2.6 m, 门宽 6.0 m, 闸门关闭时的倾斜角度为 15° , 全开时倾斜角度为 78° , 滚轮的半径 $r_2 = 0.265$ m, $r_0 = 0.474$ m, 连杆的长度 $L = 1.487$ m, 连杆后支点坐标 $(K_8, Z_8) = (-0.846 \text{ m}, 0.492 \text{ m})$.

翻板闸门开启过程中, φ 从 30° 变化到 93° . 经计算得闸门在运转过程中对应每一瞬时的瞬心(即点5)的坐标 (K_5, Z_5) , 从而绘出 $K_5 \sim Z_5, K_5 \sim \varphi, Z_5 \sim \varphi$ 的关系曲线(见图2和图3). 可见, 开门过程中, 瞬心随门叶向开启方向转动, 向门顶方向移动, 关门过程中, 瞬心随门叶向关闭方向转动, 向门底方向移动.

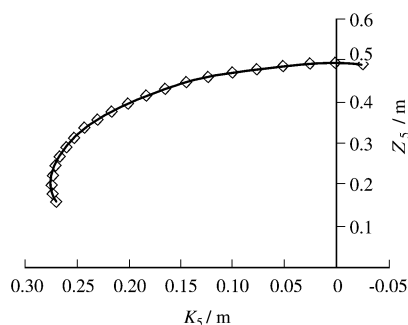


图2 $K_5 \sim Z_5$ 的关系曲线

Fig. 2 Relation curve of $K_5 \sim Z_5$

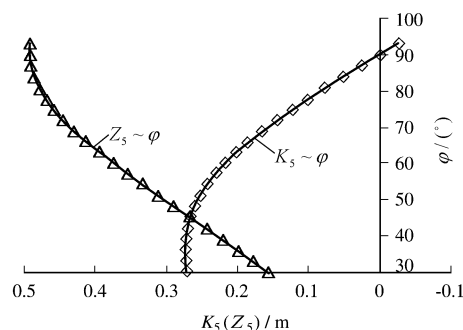


图3 $K_5 \sim \varphi, Z_5 \sim \varphi$ 的关系曲线

Fig. 3 Relation curves of $K_5 \sim \varphi, Z_5 \sim \varphi$

3 闸门运动稳定性的改善

翻板闸门在运行中所受的作用力有: 门重 W , 门叶上游面、下游面、底缘、顶缘所承受的水压力合力 P_{12} 、 P_{34} 、 P_5 、 P_6 , 门下空腔负压的下拉力 P_9 , 以及滚轮的支承力 N 及连杆的内力 T .

实验^[3]发现, 水压力的作用是造成翻板闸门拍打的主要因素. P_{12} 和 P_5 在翻板闸门运动过程中都形成开门力矩, P_6 则形成关门力矩. 在下游水位较低时(Ⅰ区), P_{34} 形成开门力矩; 在下游水位特高时(Ⅲ区), P_{34} 则形成关门力矩; 当下游水位在某一范围变化时(Ⅱ区), P_{34} 在闸门小开度时形成关门力矩, 而在闸门大开度时

形成开门力矩,正是 P_{34} 这种交替作用造成翻板闸门在 II 区形成拍打(见图4). P_{34} 通过瞬心的翻板闸门开度,定义为“临界开度”或“临界点”.

当翻板闸门处于“临界点”时,受到一个扰动使开度加大,偏离“临界点”.由于 P_{34} 开门力矩的作用,开度继续增大,加上负压下拉力 P_9 的作用,翻板闸门可能迅速开到最大,泄流量也达到最大,上游水位迅速下降,下拉力 P_9 消失或减小.在重力等因素的作用下, P_{34} 开门力矩的作用也减小,翻板闸门向关门方向运动.由于转动惯量的影响,翻板闸门关到“临界点”以下, P_{34} 迅速形成关门力矩,使翻板闸门迅速关闭并激烈撞击底坎.这时翻板闸门门下过流量为零,下游水流以波浪的形式往回冲,增加开门的力矩,上游水位急速升高,开门力矩迅速增大.当翻板闸门下游水位出现波谷时,翻板闸门迅速开启,在 P_{34} 交变作用下,翻板闸门迅速达到最大开度并撞击支墩.如此往复上下撞击底坎和支墩就形成具有破坏性的“拍打”.

上述分析表明,翻板闸门在运行过程中,只要出现“临界点”就有可能形成拍打.因此,可通过合理设置连杆、滚轮的尺寸和位置及其他几何尺寸来调整“临界点”的位置,使翻板闸门运行的全过程不出现“临界点”.从闸门瞬心坐标的表达式(5)和(6)式可以看出,增大 Z_8 、 r_0 的值, Z_5 的值也随之增大.因此,当淹没度不大时,通过适当加大滚轮半径和提高连杆的位置,来提高“瞬心”位置,使闸门下游水压力在运行过程中形成开门力矩,以避免拍打现象的发生;反之,当淹没度较大时,可以适当降低“瞬心”位置,使闸门下游水压力在运行过程中始终形成关门力矩,也可以避免“拍打”.这样,可以从结构上保持翻板闸门自身的阻尼作用,保证其运转的稳定性.

如前面的实例,当下游水位较低时,通过对连杆、滚轮的尺寸和位置的优化设计,得到闸门启门水位低、最大开度大、稳定性好的优化设计成果,即连杆长度 $L = 1.477$ m,后支点坐标值 $K_8 = -0.836$ m, $Z_8 = 0.493$ m,滚轮半径 $r_2 = 0.266$ m.优化后的开门曲线如图5所示.开门曲线较平稳光滑,闸门最大开度也较大,表明闸门运行比较稳定.

4 结 语

(1)通过对翻板闸门运行过程的分析,推求了翻板闸门的运动轨迹和瞬心轨迹线.分析了翻板闸门运行过程中产生拍打现象的原因.

(2)针对不同的水位情况,可通过优化设计连杆、滚轮的尺寸和位置来调整“瞬心”的位置,从结构上保持翻板闸门自身的阻尼作用,保证其运转的稳定性.

参 考 文 献:

- [1] 李宗健,江仪贞,王长德.水力自动闸门[M].北京:水利电力出版社,1987:8.
- [2] 陈杰,曾干臣.滚轮连杆式自翻闸门的重心和轨迹[J].江汉大学学报,1997,(3):48.
- [3] 李一平,练继建.水力自控翻板门的振动和水流压力脉动测试及分析[R].广州:广东水利水电科研所,1992.

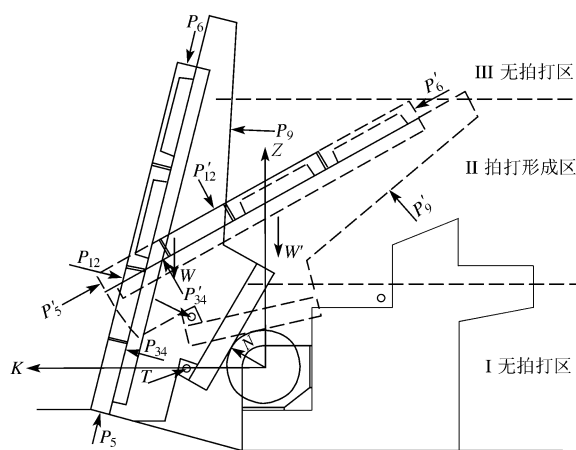


图4 翻板闸门拍打形成区

Fig. 4 Area of the flap occurring of the flap gate

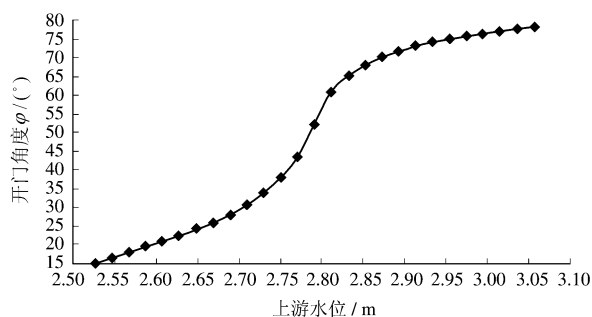


图5 优化后的开门曲线

Fig. 5 Open-door curve after optimization