

连杆滚轮式水力自动翻板闸门的结构优化

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.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了进一步增强水力自动翻板闸门运行过程中的稳定性,对影响闸门稳定运行的连杆长度、滚轮半径及其后支点位置进行优化设计。结果表明,通过优化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。

关键词:水闸;自动翻板闸门;结构优化;稳定设计

中图分类号:TV663 文献标识码:B 文章编号:1006-7647(2008)S1-0124-03

1 问题的提出

连杆滚轮式水力自动翻板闸门是根据水位涨落,在水压力和闸门自重的作用下利用力矩平衡原理达到闸门自动启闭的目的,见图 1。利用连杆的阻尼作用,连杆滚轮式水力自动翻板闸门大幅度改善了运行的稳定性,但在复杂的水流作用下仍有可能发生水力振动,严重的可能形成“拍打”。“拍打”是翻板闸门在与动水的相互作用下不断撞击底坎和支墩而形成,对工程具有破坏性,甚至导致工程失事,在工程设计中应尽力避免。

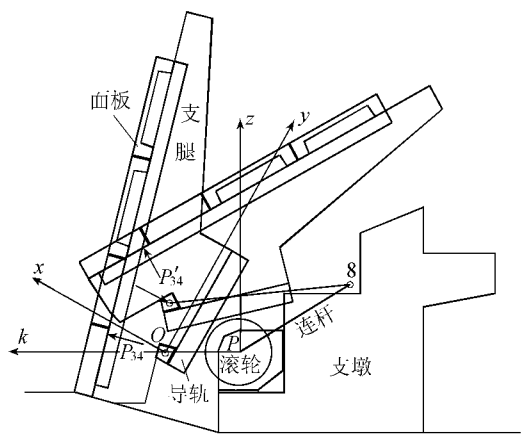


图 1 连杆滚轮式水力自动翻板闸门

从实验中发现:闸门下游面水压力合力 P_{34} 是造成翻板闸门形成“拍打”的主要因素之一。下游水位较低时, P_{34} 形成开门力矩;下游水位特高时, P_{34} 形成关门力矩;当下游水位在某一范围内变化时, P_{34} 在闸门小开门角度时形成关门力矩,而在闸

门大开门角度时形成开门力矩,正是 P_{34} 这种交替作用造成翻板闸门形成“拍打”。将 P_{34} 通过瞬时转动中心(瞬心)的翻板闸门开门角度定义为临界开门角度或临界点,可以说翻板闸门在运行过程中只要出现这样的临界点就有可能形成“拍打”。

对翻板闸门结构本身,可通过合理设置连杆、滚轮的尺寸和位置以及其他结构的几何尺寸等来调整临界点的位置,使翻板闸门运行全过程不出现临界点。闸门瞬心坐标的表达式为

$$k_5 = \frac{1}{\tan\phi} \frac{k_8 + z_8 \tan\phi_T}{c \tan\phi + \tan\phi_T}$$

$$z_5 = \frac{k_8 + z_8 \tan\phi_T}{c \tan\phi + \tan\phi_T}$$

$$\phi_T = \arcsin \frac{r_0 - z_8 \sin\phi - k_8 \cos\phi}{L} + \phi$$

式中: k_5, z_5 为瞬心坐标; k_8, z_8 为连杆后支点坐标; ϕ 为 y 轴与 z 轴的夹角; ϕ_T 为连杆与 z 轴的夹角; r_0 为滚轮圆心到 y 轴的垂直距离; L 为连杆长度。随着 z_8, r_0 值的增大, z_5 也随之增大。因此,当淹没度不大时,可以通过适当加大滚轮半径和提高连杆位置来提高瞬心高度,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,可以适当降低瞬心高度,使闸门下游水压力在运行过程中都形成关门力矩,也可以避免“拍打”。因此,有必要对连杆、滚轮的尺寸和位置进行优化设计,选择连杆阻尼作用大、闸门运行稳定性好、抗“拍打”能力强、启闭水位低的尺寸作为设计值,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。

2 闸门结构优化设计理论

2.1 优化设计数学模型的一般表达式

连杆滚轮式水力自动翻板闸门本身由面板、支腿、导轨三部分组成,连杆滚轮是它的运动机构(图1)。优化设计时以翻板闸门及其运动结构的尺寸为设计变量。翻板闸门系统涉及很多变量,如果对每一个变量进行优化设计工作量太大且意义不大。这是因为水力自动翻板闸门规模相对较小,工程量不大,其关键是相关尺寸的改变对闸门运行的影响,由前面的分析可知,滚轮半径、连杆长度及连杆后支点的位置对闸门运行影响很大,故在闸室规模给定的情况下,面板、支腿、导轨可先行给定,将连杆、滚轮的尺寸大小和位置等作为基本优化变量。

由于翻板闸门结构比较简单,造价低廉,因此不以闸门造价为目标函数,而是以闸门运行最大开门角度较大、稳定性较好作为优化的目的,因此以设计全开角度与闸门最大开门角度之差最小为闸门优化设计问题的目标函数。因此,闸门优化设计问题可表示为

设计变量

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$$

目标函数

$$W(X) \rightarrow \min$$

约束条件

$$\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$$

$$x_1 \geq 0 \ x_2 \geq 0 \ \dots \ x_n \geq 0$$

式中: θ_1 为设计初始开门角度; θ_2 为设计全开角度; θ 为闸门的开门角度。

2.2 优化设计数学模型的建立

结构优化设计结合某闸进行,该闸的闸门为连杆滚轮式水力自动翻板闸门,门高2.0 m,门宽6 m,挡水深度1.932 m,门底坎高程0.00 m,闸门顶高程1.932 m(均以相对高程表示)。

a. 设计变量的选取。根据前面的分析,连杆滚轮式水力自动翻板闸门的优化设计取4个设计变量,即 x_1 为连杆长度 L ; x_2, x_3 分别为连杆后支点的横坐标 k_8 和纵坐标 z_8 ; x_4 为滚轮半径 r_2 。

b. 目标函数。目标函数是设计变量的函数,它代表所设计结构的某个最重要特征或指标。优化设计就是以目标函数为标准,找出这个函数的极值(极小值或极大值),从而选出最优设计方案^[1]。对于水力自动翻板闸门,在一定的约束条件下,其稳定性可以用设计全开角度 θ_2 与闸门最大开门角度 θ_m 之差最小来反映,即使目标函数 $W = \theta_2 - \theta_m$ 取最小值。

c. 约束条件。为了使翻板闸门易于开启,并减轻闸门的配重,闸门全关时有一定的倾斜角,即闸门面板与铅直方向有一夹角 θ_1 (设计初始开门角度),

θ_1 一般取 $10^\circ \sim 20^\circ$ ^[2]。本文取 $\theta_1 = 15^\circ$ 。由于泄洪的需要,闸门的最大开门角度应尽可能大,但考虑到回关的灵活性,翻板闸门从启动到全开一般转动 60° 左右,即 θ_2 一般为 $70^\circ \sim 80^\circ$ 。本文取 $\theta_2 = 78^\circ$ 。因此,闸门的开门角度 θ 的范围为 $15^\circ \leq \theta \leq 78^\circ$,且 $L > 0, r_2 > 0$ 。

考虑到上游水位涨幅过大会造成上游农田的淹没,拟定上游启门水位 ΔH_1 和上游全开水位 ΔH_2 满足 $H_0 < \Delta H_1 \leq H_0 + 5.0 \text{ cm}$, $\Delta H_1 \leq \Delta H_2 \leq 1.2 H_0$,其中 H_0 为闸门挡水深度。

为了更好地分析各个变量对闸门运行的影响,分析某一变量时保持其他变量不变,仅改变该变量的值,分析其变化对闸门运行的影响,以启动水位低、最大开门角度大、稳定性好作为优化的目标,得到相应的最优值。以下分别对连杆长度、连杆后支点位置和滚轮半径这几个变量进行分析。

3 自动翻板闸门的结构优化

在闸室规模给定的情况下,面板、支腿、导轨可先行给定,将连杆、滚轮的尺寸大小和位置作为基本优化变量,以闸门运行最大开门角度较大、稳定性较好、启动水位较低作为优化的目的。根据水力自动翻板闸门的静力平衡原理和平衡方程,编制相应的闸门结构优化程序OPTI.FOR。经程序运算,得到自动翻板闸门设计变量的优化设计成果,即连杆长度 L 为1.100 m,滚轮半径 r_2 为0.215 m,后支点坐标 k_8 和 z_8 分别为-0.561 m和0.464 m,目标函数 W 为 0.01° 。开门曲线(上游水位 H 与闸门开门角度 θ 的关系曲线)如图2所示,可见开门曲线较平稳光滑,闸门最大开门角度也较大,闸门运行较稳定,且全开水位较低,上游水位涨幅较小。

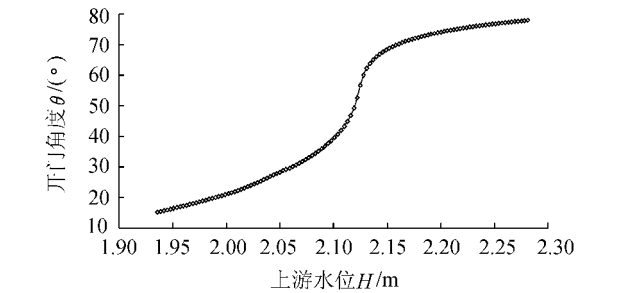


图2 闸门结构优化后的开门曲线

以下以连杆长度 L 为例介绍闸门的结构优化过程。为了便于分析,本文设计了5种典型方案,即保持翻板闸门的滚轮半径和连杆后支点高度不变,滚轮半径 $r_2 = 0.215 \text{ m}$,连杆后支点纵坐标 $z_8 = 0.464 \text{ m}$,后支点向上下游水平移动,各方案间的后支点水平距离间隔为10 cm,方案①: $L = 1.227 \text{ m}$;方案②: $L = 1.134 \text{ m}$;方案③: $L = 1.041 \text{ m}$;方案④: $L = 0.951 \text{ m}$;

方案⑤ : $L = 0.862\text{ m}$ 。通过计算 ,可以得到各方案的开门曲线见图 3。

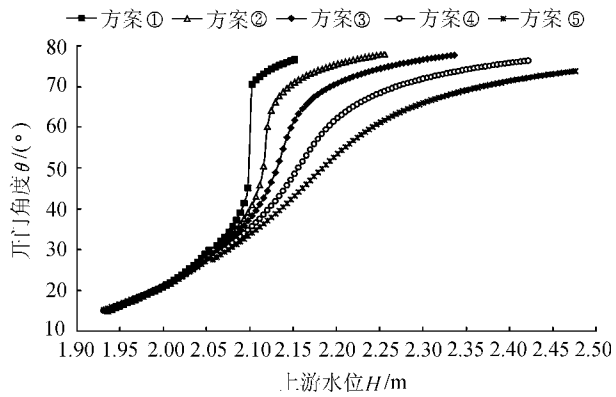


图 3 不同连杆长度的开门曲线

图 3 反映了连杆长度的变化对闸门开门曲线的影响 ,从图 3 可以看出 ,连杆长度过长 ,翻板闸门启动后迅速达到全开位置 ,翻板闸门运行不稳定 ,如方案① ,连杆长度过短 ,闸门的开门曲线过于平缓 ,闸门最大开门角度较小 ,影响泄洪排涝 ,且全开水位较大 ,上游水位涨幅过大 ,会造成上游农田的淹没 ,如方案⑤ ,连杆长度设计得当 ,开门曲线较平稳光滑 ,闸门最大开门角度也较大 ,闸门运行较稳定 ,且全开水位较低 ,上游水位涨幅较小。连杆长度对优化指标的影响如表 1 所示。

表 1 连杆长度对优化指标的影响

方案	连杆长度 L/m	最大开门角度 $\theta_m/(\text{°})$	上游启动水位 $\Delta H_1/\text{m}$	上游全开水位 $\Delta H_2/\text{m}$	上游水位涨幅 m
①	1.227	76.52	1.941	2.152	0.220
②	1.134	77.92	1.936	2.256	0.324
③	1.041	77.69	1.933	2.337	0.405
④	0.951	76.25	1.933	2.422	0.490
⑤	0.862	73.75	1.933	2.476	0.544

不同的连杆长度 ,翻板闸门运行时所能达到的最大开门角度 θ_m 不同 ,其变化规律如图 4 所示。图 4 中曲线有唯一的极值点 (1.10 , 77.98) ,即 θ_m 最大值为 77.98° ,对应的 $L = 1.10\text{ m}$ 。因此 , $L = 1.10\text{ m}$ 为连杆的优化长度。

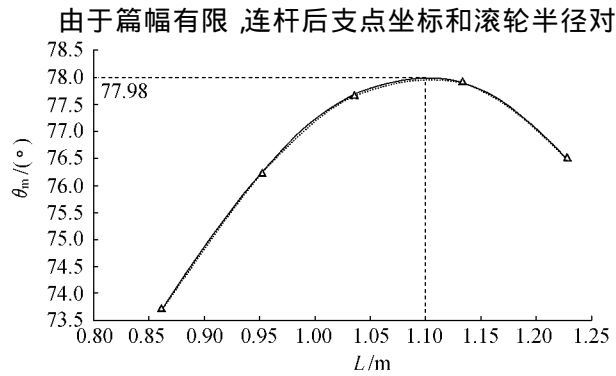


图 4 连杆长度与闸门最大开门角度的关系曲线

优化指标的影响将在结论中简单叙述 ,在此不作详细分析。

4 结 论

针对连杆滚轮式水力自动翻板闸门下游水位较低的情况 ,对闸门的连杆长度、连杆后支点位置以及滚轮半径进行优化设计 ,并对优化结果进行分析 ,得出以下结论 :

a. 若连杆长度过长 ,翻板闸门启动到某一开门角度后迅速达到全开位置 ,闸门运行会出现不稳定的现象。随着连杆长度的缩短 ,闸门全开水位抬高 ,开门曲线趋于平缓 ,对翻板闸门的稳定运行是有利的。但若连杆长度过短 ,全开水位过高 ,上游水位涨幅过大 ,要控制上游水位的涨幅必须减小闸门开门角度 ,相应地降低了闸门的泄流能力。

b. 若后支点位置太低 ,闸门开门角度大幅度减小 ,无法达到全开位置。随着后支点位置的提高 ,闸门开门角度逐渐增大 ,且开门曲线趋于平缓 ,对翻板闸门的稳定运行是有利的 ,闸门的启动水位也相应减小。但若后支点位置过高 ,全开水位也将大幅上升 ,导致上游水位涨幅过大。

c. 若滚轮半径太小 ,闸门开门角度大幅度减小 ,无法达到全开位置 ,甚至达到某一个开门角度后在附近来回摆动或迅速回关 ,对闸门稳定运行很不利。随着滚轮半径的加大 ,闸门开门角度逐渐增大 ,且开门曲线趋于平缓 ,对翻板闸门的稳定运行是有利的。但若滚轮半径过大 ,全开水位也将大幅上升 ,导致上游水位涨幅过大 ,且滚轮半径过大会增加施工安装的难度 ,同时也会影响水流下泄。

参考文献 :

[1] 朱伯芳 ,黎展眉 ,张璧城 . 结构优化设计原理与应用 [M] . 北京 :水利电力出版社 ,1984 .
[2] 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 .

(收稿日期 2007-04-05 编辑 骆超)

