

# 五连杆浮体闸的水力学试验及研究

刘子榕 姜也英 刘国昌

(水力学教研室)

## 提 要

本文简单介绍了我们十年来研究五连杆浮体闸的主要成果。首先从分析工作状态着手分析闸的运动特点,建立了五连杆浮体闸起、落及平衡的计算公式。接着讨论了模型试验,提出了动态相似的模型律。根据大量的实验资料,得出溢流水压力矩的实用图,可供设计人计算时查用。最后简单讨论了浮体闸的几个重要问题,即起动问题、自锁及自浮问题,不同步及与之有紧密联系的快降及失控问题,提出了我们对不同步产生原因及改善途径的基本观点。

## 一、五连杆浮体闸简介

浮体闸是一种不用启闭机械的自动闸坝,由主闸板、上付闸板、下付闸板和中铰连片组成单元,单元宽3—5米,一座闸由数个或几十个单元组成,它借助一套可用人工操作的进、泄水管道系统调节闸室水压,灵活地操纵浮体闸的升降或停留在某一位置,示意图如图1

从力学观点看,是主闸板、上付闸板、下付闸板、中铰连片和基础这五根连杆在内外水压力作用下平衡、上升或下降,故称五连杆浮体闸。取消中铰连片就成为最简单的四连杆浮体闸。它是设计与分析的基础。

浮体闸省掉了启闭设备,运用灵活,比较经济,1970年以来在河南先后修建了大小20座。由于它是一个可变机构,在内外水压力作用下维持稳定或作升降运动,加上是多单元联合同步运动,因而结构较复杂,施工要求较高,性能的研究也就比较复杂,我们进行了将近十年的试验研究,做了13项型模试验,三项

六次原型观测。在各单位的协作下,解决了一些关键问题,对浮体闸性能有了比较深入的了解,而有些问题还需作进一步的研究。本文是十年研究的简单概括。

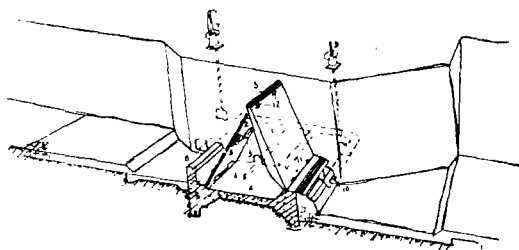


图1 浮体闸

1—主闸板; 2—上付闸板; 3—下付闸板; 4—闸底板; 5—闸墙; 6—进水口; 7—进水闸门; 8—闸墙进、出水口; 9—放水闸门; 10—放水口; 11—后铰; 12—顶铰; 13—中铰; 14—底铰。

## 二、五连杆浮体闸的工作状态和计算公式

### (一) 五连杆浮体闸的工作状态

浮体闸常遇的两种工作状态，其分析计算方法不同，分述如下：

#### 1、正常挡水状态：

闸顶高于库水位并随库水位涨落而升降，这是最多的一种工作状态，相当于非溢流挡水坝。该状态的基本特点是由于此时库水位与闸室水位齐平，闸室内外水压力平衡，付闸板基本上不起作用，仅按主闸板受水压力及重力维持平衡计算。

#### 2、溢流工作状态：

闸顶低于库水位，水从闸顶下泄，相当于活动的溢流坝。调节闸室水压可使闸顶升降或稳定在某要求位置控制下泄流量。该状态的特点是闸室水压低于库水位，主闸板承受内外水压，付闸板也处在受力状态，闸室被水封闭与大气隔绝，室内分有气和无气，如假定闸从最高水位溢流降落，室内空气已被压出，水封使大气不能进入，此系实际情况，故今后计算按闸室无气（充满水）考虑。

### (二) 五连杆浮体闸工作状态的计算

浮体闸是在外力作用下的平衡机构，有上升、降落或稳定平衡三种工作状态，见图2，图中符号：

$H_0$ ——水头（自后铰心至库水位）；

$\varphi_0$ ——主闸板最大水平张角；

$\alpha_0$ ——主闸板最大张角；

$x_0 = \frac{H_0}{\sin \varphi_0}$ ——主闸板长度；

$\Delta x$ ——悬臂长度；

$x$ ——主闸板铰心间长度 =  $x_0 - \Delta x$ ；

$y$ ——下付闸板长度；

$z$ ——上付闸板长度；

$t$ ——中铰连板长度；

$L$ ——底铰铰心间长度，即AD连线；

$m_0 = y + t + z = \sqrt{L^2 + x^2 + 2Lx \sin \alpha_0}$ ；

$H = x \sin \varphi$ （ $\varphi$ ——闸门运用角度）；

$\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ——主付闸板之间夹角；

$\beta_2$ ——上付闸板水平夹角；

$\beta_3$ ——中铰连杆水平夹角；

$\beta_4$ ——下付闸板水平夹角；

$G$ ——主闸板单宽重量；

$G'$ ——主闸板单宽浮重；

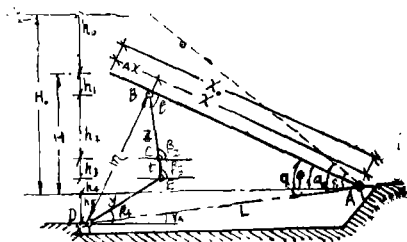


图2 浮体闸工作状态

$G_2$ ——上付闸板单宽重量;

$G'_2$ ——上付闸板单宽浮重;

$G_3$ ——下付闸板单宽重量;

$G'_3$ ——下付闸板单宽浮重;

将闸在上付闸板处切开用 $P_1$ 及 $S_2$ 代替付闸板的作用,见图3,对A点取力矩: 则

$$\Sigma M_A = 0 \quad \text{闸平衡}$$

$$\Sigma M_A > 0 \quad \text{闸上升}$$

$$\Sigma M_A < 0 \quad \text{闸降落}$$

由上知浮体闸升降或平衡关键是 $\Sigma M_A$ 的计算。详细写出 $\Sigma M_A$ 的数学式如下:

$$\Sigma M_A = M_{P_0} + M_{P_1} + M_L - M_S - M_{G'} - M_r \quad (1)$$

各分项力矩表达式:

$$M_{P_0} = P_0 L_0 = (h_0 + \frac{1}{2} h_1) \Delta x (x_0 - \frac{1}{2} \Delta x) \quad (a)$$

$$P_1 = \frac{1}{2} \Delta h z, \quad \Delta h = H_0 - \mu H_0 = (1 - \mu) H_0$$

$\mu H_0$ ——闸室水压

$$L_1 = x \cos \beta$$

$$M_{P_1} = \frac{1}{2} (1 - \mu) H_0 z x \cos \beta \quad (b)$$

$M_L$ ——闸室内水压力作用于主闸板的力矩,溢流降闸时按闸室无气无自由水面考虑,将具有折线轮廓的主闸板简化成只有浮重的单线图如图(4)

$$M_L = M_{L1} - M_{L2}$$

$$= \frac{1}{6} \frac{(\mu H_0)^3}{\sin^2 \varphi} - \frac{1}{2} (x - \frac{\mu H_0}{\sin \varphi}) (x \sin \varphi - \mu H_0) (\frac{2}{3} x + \frac{1}{3} \frac{\mu H_0}{\sin \varphi}) = x^2 (\frac{1}{2} \mu H_0 - \frac{1}{3} x \sin \varphi) \quad (c)$$

实验证明闸室不通大气无自由水面的假定是符合实际的,因此 $M_L$ 的计算是精确的。

$$M_{G'} = G' L_g \quad (d)$$

$M_{G'}$ 是主闸板按浮重计算的降闸力矩,关键是要根据闸的形状算出其重心至后铰的距离 $L_g$ 。

$M_r$ ——主闸板面板上的溢流水压力矩。溢流面板水压力为专门研究的问题,下节专述。

$M_s$ ——付闸板在各种力综合作用下对主闸板的力矩、假定各铰为理想铰,则上付闸板力的方向即铰轴心线方向。

$$M_s = S_2 x \sin \beta \quad (e)$$

上式中 $S_2$ 及 $\beta$ 须另立铰点平衡方程式求得。

图5为所取铰点的脱离体,作用于付闸板及中铰连板上的水压力(内外水压差)按等效原理换算成集中荷载作用于铰点,见图(5)

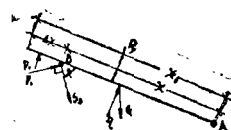


图3 主闸板脱离体

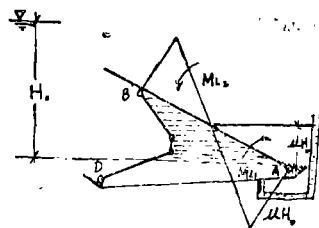


图4 内水压力计算图

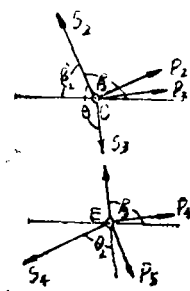


图5 中铰分析图

上之 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ 及 $P_6$ ，用力的平衡关系得：

$$S_2 = \frac{P_3}{\sin(\beta_3 + \beta'_2)} - P_2 \operatorname{ctg}(\beta_3 + \beta'_2) + G'_2 \sin \beta_2 \quad (2)$$

$$\frac{P_2}{\sin(\beta_3 + \beta'_2)} - P_3 \operatorname{ctg}(\beta_3 + \beta'_2) = P_4 \operatorname{ctg}(\beta_3 - \beta_4) + \frac{P_5}{\sin(\beta_3 - \beta_4)} \quad (3)$$

由图(1)得几何方程

$$y \sin \beta_4 + t \sin \beta_3 + z \sin \beta_2 = x \sin \varphi + L \sin \gamma_A \quad (4)$$

$$y \cos \beta_4 + t \cos \beta_3 + z \cos \beta_2 = \sqrt{m^2 - (H + \sin \gamma_A)^2} \quad (5)$$

$$m = \sqrt{L^2 + x^2 - 2Lx \cos \alpha} \quad (6)$$

联解(2)(3)(4)(5)(6)式可得 $S_2$ 及 $\beta_1$ 角，则(e)式为：

$$M_s = \left[ \frac{P_3}{\sin \theta_1} - P_2 \operatorname{ctg} \theta_1 \right] x \sin(\beta_2 + \varphi) \quad (7)$$

从推导上述公式可知，计算浮体闸性能的关键是准确计算主闸板上溢流水压力，即是水力学问题的研究，截止目前溢流水压力尚未精确掌握，因而浮体闸性能研究尚离不开模型试验。

### 三、浮体闸模型试验

浮体闸模型试验分两大类：一类系纯水力学试验，即测量过流能力及主付闸板的静(动)水压强；二类是在模型上直接重现浮体闸的起落及不同步现象。这种水力学试验还少见，浮体闸由我们作首次尝试，十年来作了13座断面及整体模型试验，对模型律及模拟技术作如下讨论。

#### 1. 重力相似的正态模型

第一类纯水力学模型试验通用重力相似，毋容赘述。对闸起落试验经分析首先也须满足重力相似。根据(1)式

$$\Sigma M_A = M_{PO} + M_{P1} + M_L - M_S - M_{G'} - M_Y \pm M_t$$

有四种类型的力和力矩：(1)水压力作用产生的 $M_{PO}$ 、 $M_{P1}$ 、 $M_L$ 、 $M_Y$ ；(2)闸门自重产生的 $M_{G'}$ ；(3)水压力和闸门机构混合产生的 $M_S$ ；(3)铰和边止水摩擦产生的 $M_t$ 。要使模原型相似，各类力及力矩应是同一比例，即

$$\lambda_{MPO} = \lambda_{MP1} = \lambda_{ML} = \lambda_{MS} = \lambda_{MG'} = \lambda_{MY} = \lambda_{Mt} \quad (8)$$

按重力相似做成正态模型，(1)(2)(3)项均可自动满足： $\lambda_L = \lambda_H = \lambda_B$

$$\lambda_A = \lambda_L^2, \lambda_V = \lambda_L^3$$

$$\text{压强: } \lambda_P = \lambda_\gamma \cdot \lambda_H = \lambda_H = \lambda_L \quad (9)$$

$$\text{总压力: } \lambda_P = \lambda_P \cdot \lambda_A = \lambda_L^3 \quad (10)$$

$$\text{闸门重量: } \lambda_G = \lambda_\gamma \lambda_V = \lambda_\gamma \cdot \lambda_L \cdot \lambda_B \cdot \lambda_H$$

同一模型各种力比例应相同

$$\lambda_G = \lambda_P$$

$$\text{故 } \lambda_G = \lambda_P = \lambda_L^3 \quad (11)$$

所有尺寸按正态模拟，模原型采用同一介质及闸门材料 $\lambda_\gamma = 1$ 。闸板内各梁格不按几何

相似, 只要保持外形几何正态相似 ( $\lambda_L = \lambda_H = \lambda_B$ ) 闸门总重量相似 ( $\lambda_G = \lambda_L^3$ ) 及闸门重心相似, 在无加速情况下, 仍有相同效用之  $M_G$ , 即  $\lambda_{MG} = \lambda_G \cdot \lambda_{Lg}$ ,  $\lambda_{Lg} = \lambda_L$ 。  $\lambda_{Lg}$  为重力位置至后铰之距离比例。

按  $M_i = P_i L_i$

$\lambda_M = \lambda_P \cdot \lambda_L = \lambda_G \cdot \lambda_{Lg} = \lambda_L^4$  (当  $\lambda_{Lg} = \lambda_L$  时)

由上可知按重力相似之正态模型, 对  $P$ 、 $G$  两种主要力能同时满足要求。

## 2、摩擦相似

摩擦主要有两部分, 一是止水橡皮与边墙的滑动摩擦, 另一是各活动铰间之转动摩擦。边止水的摩擦力包括安装时橡皮与边墙压紧程度而产生的予加摩擦, 以及水压使橡皮与边墙间的摩擦力。采用圆管橡皮止水基本上没有予压摩擦, 模型律如下:

$$P_f = \mu P = \mu \gamma PDL = \gamma \mu HDL$$

$$\lambda_{P_f} = \lambda_\gamma \cdot \lambda_\mu \cdot \lambda_H \cdot \lambda_D \cdot \lambda_L$$

$$\text{而 } \lambda_{P_f} = \lambda_P = \lambda_L^3$$

$$\lambda_\mu = \frac{\lambda_L^3}{\lambda_\gamma \cdot \lambda_H \cdot \lambda_D \cdot \lambda_L}$$

$$\text{当 } \lambda_\gamma = 1, \lambda_H = \lambda_L, \lambda_D \neq \lambda_L$$

$$\text{则 } \lambda_\mu = \frac{\lambda_L}{\lambda_D}$$

(12)

$$\text{若 } \lambda_D = \lambda_L \quad \text{则 } \lambda_\mu = 1$$

采用正态模型, 用  $\mu_m = \mu_H$ , 即可满足摩擦力相似。当用平板橡皮或  $P$  形橡皮还要考虑予压摩擦力, 该力难以掌握, 不仅与边墙平整度有关, 还与边闸板与边墙间是否平行有关, 这些因素难以模拟, 只能分别情况予以简化。

(1) 对断面模型试验。多单元浮体闸仅两侧边与边墙有摩擦力, 做此项试验时只模拟中间单元, 使其与边墙间不接触, 用圆管橡皮止水。

(2) 对整体模型试验。尽量按原型做边止水, 做予备试验时校正边止水摩擦影响。根据原型观察, 边止水摩擦影响闸顶高程均在10公分范围内, 以此调整模型的摩擦力, 虽难以完全相似, 但比不考虑不校正有进步。

(3) 对铰的摩擦, 首先是做到几何相似, 摩擦系数相近, 其次是不让其生锈, 基本上可以达到相似。因后铰摩擦力力臂很小力矩值不大, 对升降闸影响不大, 因而铰摩擦不相似对力矩影响更小。付闸板各铰的摩擦只影响  $S_2$  的大小和方向, 对降闸力矩属低阶微量, 故可认为基本相似。

## 3、动态相似

在运动状态时  $\Sigma M \neq 0$ , 而是  $\Sigma M = F_i L_i$ , 式中  $F_i = \Sigma m_i \frac{d^2 S}{dt^2}$ ;  $L_i$ ——是各微元力臂,  $S = f(t)$  是降闸曲线。

由此可见动态相似要求降闸曲线和闸体各微元质量相似, 即严格的几何及质量相似。

## 4、浮体闸同步试验的相似律

实验发现郾城闸原型有不同步, 而在1:15的整体模型中却未出现不同步, 可见不同步

试验模型除水力学相似外还须同时考虑闸体结构力学性能的相似。

原型观测表明,不同步所以能发生是与浮体闸并非一刚体有关。在不均匀外力作用下,各单元闸顶将有不同的闸顶高程,使闸板在横向的挠曲扭曲或单元间错动而可能发生不同步。因此闸的刚度相似成了模拟不同步的必要条件。

闸体刚度的模拟是从结构力学的一般公式出发推导出闸体结构的模型律如下:

(1) 对于挠曲变形:不论是纵向还是横向在水压力荷载作用下的一般公式是:

$$\delta = \alpha \frac{qL^4}{EI}$$

式中:  $\delta$ —挠度值

$q$ —单元闸板单位长度的荷载

$L$ —计算跨长

$E$ —材料的弹性模量

$I$ —截面惯性矩

$$\text{则 } \lambda_\delta = \lambda_\alpha \frac{\lambda_q \cdot \lambda_L^4}{\lambda_E \lambda_I}$$

式中:  $\lambda_\alpha = 1$ ,  $\lambda_\delta = \lambda_L$ ,  $\lambda_q = \lambda_L^2$

$$\text{得: } \lambda_I = \frac{\lambda_L^5}{\lambda_E} \quad (13)$$

(2) 对于横向扭曲变形,也从材料力学的一般公式出发  $\theta = \frac{M_P \cdot L}{GJ_P}$

式中:  $\theta$ —扭转角,

$M_P$ —扭曲力矩,

$L$ —计算长度,

$G$ —材料的剪切弹性模量,

$J_P$ —极惯性矩。

$$\lambda_\theta = \frac{\lambda_{M_P} \lambda_L}{\lambda_G \lambda_{J_P}}$$

式中:  $\lambda_{M_P} = \lambda_L^4$ ;  $\lambda_\theta = 1$ ; 由于  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ ,

$$\text{所以 } \lambda_G = \lambda_E, \text{ 得 } \lambda_{J_P} = \frac{\lambda_L^5}{\lambda_E} \quad (14)$$

比较(13)及(14)式,  $\lambda_I$ 与 $\lambda_{J_P}$ 为同一比值形式,对各种形式的梁板, $I$ 可写成 $I = \beta b h^3$ ,  $J_P$ 可写成  $J_P = \gamma b h^3$  ( $b$ 是梁或板宽,  $h$ 是高)

因而  $\lambda_I = \lambda_{J_P} = \lambda_\beta \lambda_b \lambda_h^3 = \lambda_\gamma \lambda_b \lambda_h^3$

一般可认为  $\lambda_\beta = \lambda_\gamma$ ,  $\lambda_b = \lambda_L$ , 代入(13)或(14)式,

$$\lambda_h = \left( \frac{\lambda_L^4}{\lambda_E} \right)^{1/3} \quad (15)$$

若为开口组合梁,则 $J_P$ 的近似计算可写成

$$J_P = \gamma \sum_{i=1}^n b_i h_i^3 \quad \text{式中 } \gamma \text{ 一般用 } \frac{1}{3}, \text{ 现只要假定是常数, } b_i \text{ 是分成几块窄而高的小块的宽}$$

边即高,  $h$  是窄边,  $b \gg h$ 。对梁板结构

$$J_P = \gamma \left[ \sum_1^n b_i \delta_i^3 + \sum_1^m h_i b_i^3 \right] \quad \text{假定 } \delta_i, h_i, b_i \text{ 相等}$$

$$= \gamma \left[ \delta^3 \sum_1^n b_i + m h b^3 \right] = \gamma (B \delta^3 + m h t^3)$$

式中  $B$  为板全宽,  $\delta$  为板厚,  $h$  为梁高,  $t$  为梁厚,  $m$  为梁根数, 在这种情况下要分别模拟。

对面板  $\lambda_{JP} = \lambda_r \lambda_B \lambda_b^3$  代入 (14) 式得 (15)

$$\lambda_b = \left( \frac{\lambda_L^4}{\lambda_E} \right)^{\frac{1}{3}}$$

对梁部分  $\lambda_{JP} = \lambda_b \lambda_t^3 \cdot \lambda_r$  代入 (14) 式

$$\lambda_t = \left( \frac{\lambda_L^5}{\lambda_r \lambda_E \lambda_b} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad \text{若决定 } \lambda_b = \lambda_L$$

$$\lambda_t = \left( \frac{\lambda_L^4}{\lambda_E} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ 仍为 (15) 式形式。}$$

对封口的梁板, 为一空间的复连通薄壁结构, 抗扭刚度计算经分析 仍可 按 (15) 式模拟。

由以上推导的结果证明, 按抗弯或抗扭刚度来模拟闸板的变形, 采取一定的措施二者可同时满足, 按 (15) 式设计闸板模型, 在安阳白壁浮体闸整体模型试验中, 第一次在模型中重现了不同步, 所测各项数据与原型实测资料基本相符。

#### 四、浮体闸内外水压力的试验研究

浮体闸水压主要有闸室内水压、付闸板外水压和主闸板溢流水压, 分别进行了研究。

(一) 闸室内水压强: 闸起落过程中的水压变化复杂, 且影响闸的性能。原型观测到降闸时泄水一侧先降, 升闸时另一侧先升, 这只能从闸室水压变化予以解释。闸在挡水和溢流稳定工作状态时的闸室水压是不相同的, 这里主要研究闸处于溢流稳定时闸室水压的计算, 根据实验分析, 按闸室满水无气计算既合理又简单, 所谓合理是符合实际降闸情况, 又有利于降闸。此时付闸板水压力为矩形分布, 其值  $\Delta h = (H_0 - \mu H_0) = (1 - \mu) H_0$ , 计算大为简化。上式中  $\mu H_0$  是以后较为基准的闸室水压见图 4。主闸板内水总压力, 当闸板为直线变化时为

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{(\mu H_0)^2}{\sin \varphi} - \frac{1}{2} (x - \frac{\mu H_0}{\sin \varphi}) (x \sin \varphi - \mu H_0) \quad (16)$$

其对后铰力矩:

$$M_L = x^2 \left( \frac{1}{2} \mu H_0 - \frac{1}{3} x \sin \varphi \right) \quad (17)$$

其他情况根据实际形状取计算图形。

#### (二) 溢流时付闸板外水压强规律

当闸位高溢流量小时, 付闸板上动水压强与混凝土溢流坝上游面压强相似, 一般可按符

合静水压强分布规律计算。当闸位较低过闸单宽流量大时,近似于低堰前坎的压强分布,比较复杂,为此专门作了付闸板外水压强分布实验。在上下付闸板沿中线从上到下设置了八个等距离的测压孔,实验资料见参考资料(1)中(表五—8)。试验证明各测压管水面为同一水平面,即  $z + \frac{p}{\gamma} = \text{常数}$  在曲折的付闸板上也相当吻合。在多数情况下:  $z + \frac{p}{\gamma} = H_0$ 。

(18)

闸前有前坎闸顶又处于低位,其压强随过闸水头增加而减小即  $z + \frac{p}{\gamma} = \alpha H_0$ ,  $\alpha < 1$   $\alpha$  值难以计算,还须依赖试验,这也是浮体闸目前离不开试验的原因之一。

### (三) 溢流时主闸板上的水压力

#### 1、流态分析

主闸板上的流态可分为三个区域,即闸首脱流区、急变流过渡区及渐变流区。

闸首脱流区:对直板型闸首,因流速向量的惯性影响,流线与闸首脱离,脱流边界流线呈向上凸起的弧形,因离心力而使压强降低。试验发现如下规律:(1)脱流区内测压管水面水平,即在脱流区内符合  $z + \frac{p}{\gamma} = \text{常数}$  的规律,该值须通过试验确定;(2)脱流区大小与主闸板开度  $\varphi$  及溢流水头  $h_0$  成正比,其值须试验确定。

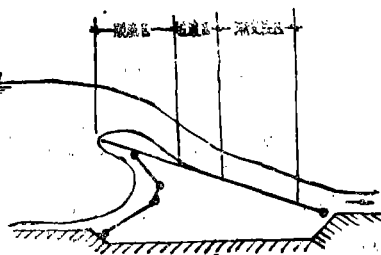


图6 面板水流形态

急变流过渡区:指脱流区末到渐变流的一段,其特点是流线从凸转向凹面板水压力急剧增加,甚至超过静水压强,然后逐渐减小趋近于静水压强规律。过渡区长度较难判定,故也可将渐变流区延长到与脱流区相接,最大压力按离心力计算一附加值。

渐变流区:水压强符合静水压强分布。先计算出水面线,然后按垂直于闸板的过水断面计算压强,从实验资料大致可认为  $x > 2h_0$  以下,才进入渐变流区。当闸顶降到  $\frac{h_0}{H_0} \geq \frac{1}{2\sin\varphi_0}$  面板上无渐变流区。

尾部转向区:闸上泄水到河底后要水平转向,对后铰附近有附加的离心力,附加力对后铰取力矩力臂很短对力矩影响小,所以不专门研究。

分析流态划分流区是便于分区进行研究,当用实验方法求水压力分布就不用分区了。

2、影响主闸板水压力因素的讨论

#### 影响水压力的因素较多,只有找出主要因素才便于总结规律。

(1) 闸顶形状的影响

闸顶分直线和曲线两大类。直板型有脱流问题,曲线型须设计成无负压,所以直线型主要研究水压分布而曲线型是确定无负压的设计水头。

#### (2) 直板型闸板的影响因素

一般讲  $\frac{p}{\gamma} = f(H_0, h_0, \varphi, x, C, \delta, t, m)$

式中:  $H_0$ ——闸前水深(从后铰算起),



$h_0$ ——闸上溢流水头,  
 $\varphi$ ——主闸板角度,  
 $x$ ——测点位置,  
 $C$ ——前槛高度,  
 $\delta$ ——闸顶厚度,  
 $t$ ——下游水深,  
 $m$ ——流量系数。

此外还有是否进气或掺气的影响等,要研究主闸板水压力,即使在最简单情况下也相当复杂,有必要加以实验研究。分别对闸顶厚度,前槛高度及侧向收缩作了比较试验,见参考资料(1)表(5—3)(5—4)(5—5)。实验结论是 $\delta$ 及 $C$ 对面板压强不明显,侧收缩在低位时影响大,如 $B=b$ 时 $\Sigma My = 0.243 T^3 M$ ,其他条件相同 $B=3b$ 时 $\Sigma My = 0.23 T^3 M$ ,误差达5.4%,实际工程 $\frac{B}{b} = 1 \sim 1.1$ ,收缩影响将更小些。因此将影响直板水压力主要因素简化成

$$\frac{P}{r} = f(H, h_0, x, \varphi)$$

$$\text{或 } \frac{P}{r} / H = f\left(\frac{h_0}{H}, \frac{H}{x}, \varphi\right)$$

根据上述分析,对六个模型作了专门的溢流水压力测量。设计浮体闸需要的是溢流水压力对后铰的下降力矩,因此由实测压力分布图算出总力矩,并将六个模型试验资料统一换算成单位水头( $H=1$ 米)的资料绘制成图(7),对于有下游水位影响时另绘成图(8),作初步设计时可用此资料作起落平衡计算。 $My = M_1 \lambda^3 H$ ,  $M_1$ 从表中查得。

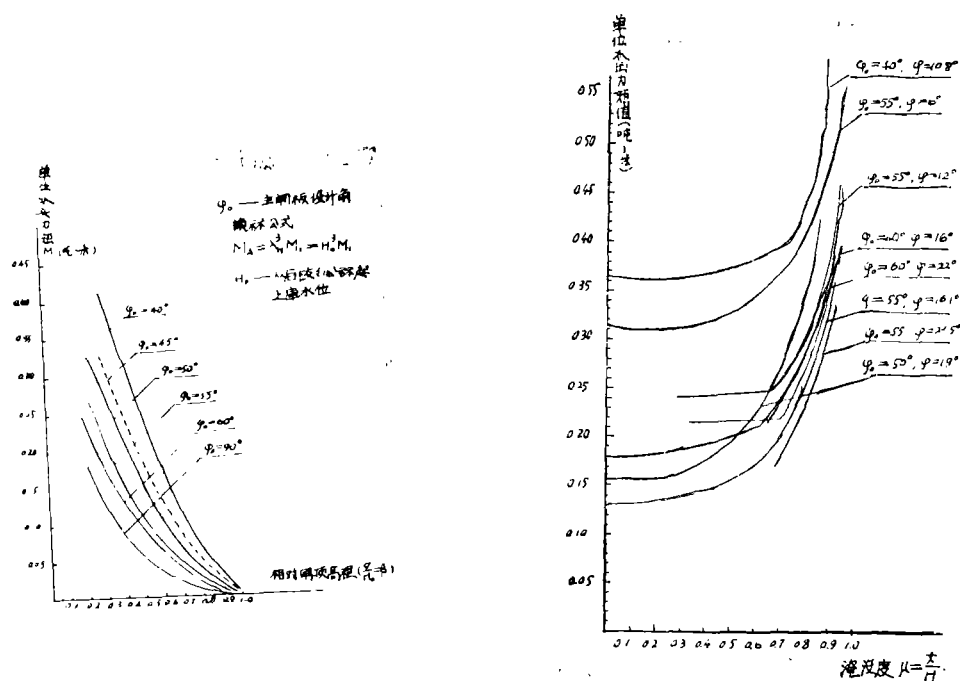


图7 自由溢流对面板单位水压力矩图

### 3、流线型闸首设计

浮体闸曲线型闸首有与实用剖面堰相同处也有不同处,不同处在于闸的角度随溢流水头增大而变小,若按最大设计水头因闸很平反而得不出曲线闸顶,加以曲线闸顶的设计原则不是要获得最大流量系数而是要获得最大压强,以便于克服自锁,故不能简单地应用实用堰的设计曲线和设计水头。对几个模型实测资料统计,直线型闸顶  $\varphi_0 = 50^\circ - 60^\circ$  最高库水位闸首最大负压发生在  $\varphi = 30^\circ - 35^\circ$ , 闸门角度再大或再小些闸顶处压强均变大,因此建议按  $\varphi = 30^\circ - 35^\circ$ ;  $h_0 = (0.3 \sim 0.35) H$  设计非真空实用剖面,如条件允许可再变剖面以增大正压。

## 五、五连杆浮体闸几个重大的水力学性能问题

### (一) 五连杆浮体闸的起动

浮体闸一般用钢筋混凝土材料制成(个别为钢材)。当上游来水闸门能否升起挡水,是关系该闸成败的关键之一。

1、自动起动:不依靠外力,只须在上游来水后关闭泄水阀打开进水阀,闸门在闸顶未溢流前开始上升,称为自动起动。若闸门比重小于1,肯定可自动起动,若闸门比重大于1,则须将闸斜置使闸栏高一定水头,靠水的上浮力矩将闸升起,闸门启动时一般是闸前水位=闸室水压=闸顶高程,此时从后铰算起的闸室水头称为起动水头。起动计算的最简单情况是忽略付闸板的作用,按单板在静水压力作用下使  $\Sigma M_A \geq 0$  而得。进一步精确计算分四连杆和五连杆,五连杆视设计而分为:(1)上下付闸板同时动;(2)上付闸板与主闸板同时动称第一起动,到一定高程后再带下付闸板称第二起动,设计以第一起动水位控制,因此起动水头就有各种计算公式。

对四连杆按  $\Sigma M_A = 0$  得

$$h = 6 \frac{G' L g + \frac{1}{2} G'_2 (1 + \eta) + G'_3 \eta}{x_0^2} + R_4 \quad (19)$$

$$\text{式中} \quad \eta = \frac{y - L \sqrt{\frac{1}{2} (1 - \cos \alpha_0)}}{L - x}$$

$R_4$ ——后铰心至面板垂距

(19)式为比较精确的计算公式,进一步的简化公式从略。

对五连杆第一起动水头公式推导是:将付闸板对主闸板的作用力相当于去掉付闸板而在顶铰处加  $-\frac{1}{2} G'_2$  的铅垂力,最后得:

$$h = \frac{3}{x_0^2} (G' X_0 + G'_2 X) \cos \varphi \quad (20)$$

第二起动水头,近似值可用(19)式计算,此时  $z' = z + t$ ,  $y = m_0 - z'$ 。通常都是第一起动水头控制。

### 2、充水起动

将进出水阀都关死,用水泵从竖井往闸室充水使闸门升起。此是平原河道闸门平卧时不得已而采用的落后方法,最大缺点是闸室向上游的漏水量大,充水起动水头高,要求水泵充水量大;其次是起动上升快,容易发生付闸板外翻的倒闸事故,已建立北京曹碾闸和河南堰

城闸均发生过这种事故。建议用挡水起动代替充水起动,挡水起动是在浮体闸前修建活动小坝(小翻板或橡皮坝)壅高上游水位。

### 3、溢流起动

水位高于闸顶一定程度闸才起动,称溢流起动。要求闸顶较低,如上游不来大流量闸可能长期溢流,不能升起挡水,此法不可取。

### 4、深水起动

平原河道遇洪水时卧闸溢流,上下游水位差不大,汛后要求升闸挡水,称此为深水起动。如设计不周,闸可能起不来,经理论分析和试验证明如能满足下式,闸可深水起动。

$$H_0 - t \geq h \quad (21)$$

式中:  $H_0 = H + \frac{\alpha v^2}{2g}$   $t$ ——下游水深,

$h$ ——起动水头,以后铰心为基准,

## (二)浮体闸的水力自锁

河南省的浮体闸都是五连杆不稳定机构,但在内外水压作用下可维持平衡。在极端情况下闸室水位降到后铰,闸门降不到底呈半溢流状态,继续降低闸室水位已无助于降闸,此时闸已处于水力平衡状态,称之水力自锁,此系七十年代初对自锁的定义。这种自锁在建闸初期多次发生,如安阳白壁闸原型观测到自锁,郑州老鸦陈闸模型试验发现闸室排空也不能降闸,此种自锁只要将主闸板悬臂端减短可解决。实践发现不是所有闸之闸室水位均可泄空,对平原河道有尾水的影响,闸室水压只能降至与下游水位齐平,此时若闸也降不到底亦称为自锁,因此自锁的定义是:闸室最高水位与可能的最低水位之差称为调节水压,在调节水压,用尽闸门仍降不到底,称之为有自锁。

自锁可分溢流自锁和非溢流自锁,非溢流自锁国外早已有人进行过研究〔3〕,而溢流自锁是我们开始研究。工程上主要是溢流自锁,影响泄洪能力。在我国溢流自锁和非溢流自锁均在原型上观测到。

不同类型的工程对自锁有不同的标准;

(1)上游库水位保持设计水位,闸从最高位置降落到底。

(2)只要求降闸到水下一定深度,保持闸顶泄一定流量,闸顶随库水位降落而降落,直至到底。

前一标准较完善,对水库应按此设计。后者在特定条件的河道勉强可行,近十年运用证明既不安全又不方便,不宜采用。因此讨论降闸采用第一项作标准。

自锁点及自锁计算:十多项模原型实测资料表明:降闸所需最低闸室水压不在最低闸位而在  $\frac{2}{3}H$  附近,过此处闸室水压反而升高如图(9)。对应于最低闸室水压的点称为自锁点,克服自锁的计算只要在自锁点附近作平衡计算就可。计算方法见(二)。从理论计算与实测比较可以看出:闸顶在高位时比较吻合,低位时误差大,关键是主付闸板外水压力精度不够,今后仍须从理论和实验两方面研究水压力规律,并编制外水压力计算程序。

改善自锁途径简述:从方程式

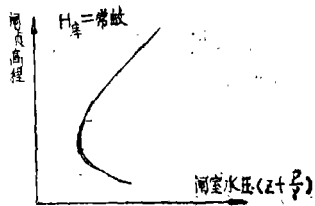


图9 溢流稳定平衡

$\Sigma M_A = M_{P_0} + M_{P_1} + M_L - M_Y - M_{G'} - M_{S_2} \leq 0$  看出: 改善自锁应加大  $M_Y$ 、 $M_{S_2}$  而减小  $M_{P_0}$ 、 $M_{P_1}$ 、 $M_L$ 。要减小  $M_{P_0}$  须尽力缩短悬臂长度; 要减小  $M_{P_1}$  则须缩短上付闸板而加长下付闸板, 上下付长板合适的比例是  $K = z/y = 0.65-0.8$ ; 要减小  $M_L$  要求闸室充满水不通大气从而利用负压; 增大  $M_Y$  应使主闸板角度小些;  $M_{G'}$  一项影响不大, 不能用增加  $M_{G'}$  获得降闸力矩, 因其弊多利少, 闸门重量还是轻些为好。  $M_{S_2}$  这项比较复杂,  $M_{S_2} = S_2 \sin \beta$ , 从公式看增大  $S_2$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  均可增大  $M_{S_2}$ , 当  $\alpha$  为定值时,  $S_2$  和  $\beta$  又相互联系, 如何增大  $M_{S_2}$  特别对五连杆闸的中铰连杆长度的影响, 研究人员认识有分歧, 一种认为当中铰杆性能是改善浮体闸性能的关键, 另一种人认为中铰杆有用, 设计时应加以利用, 但不是解决浮体闸存在问题的唯一手段。对中铰杆性能分析研究另有专文。

### (三) 浮体闸的快降、失控和不同步

由模型实验及原型观测绘出闸室水压与闸顶高程关系曲线如图(10)。可分成三个区:

#### (1) 稳定区:

在此区域闸顶高程随闸室水压的变化比较平缓,  $\frac{dH}{dh} \rightarrow$  常数, 闸门可以长期稳定在需要位置, 闸室内横向水压不均, 也不会引起闸顶发生显著高差。

#### (2) 快降区又称不稳定区:

在此区间, 闸室水压的微小变化将使闸顶高程变化巨大, 即曲线很陡, 极限处  $\frac{dH}{dh} \rightarrow \infty$ 。这就产生了两个问题: 一是闸门在此区间很难稳定, 故亦称不稳定区。二是不同步明显, 同样的横向内水压力差, 在稳定区可能只在两端看出微小不同步, 而在快降区不同步就要大得多。

(3) 失控区: 当闸顶过了自锁点,  $\frac{dH}{dh} = (-)$  曲线反弯, 闸室要增加水压才能维持平衡, 而实际工程无法迅速增加水压, 故闸过自锁点后, 由于力矩不平衡而加速直落到底, 故称之为失控。失控区是严重不同步的主要范围。

总之, 从图上看, 曲线呈双曲线型, 有反弯,  $\frac{dH}{dh}$  从正经过无穷大变负, 使闸门具有快降和失控的特性, 这就是发生不同步的水力学基础。

#### 1. 不同步问题简介

在我国第一批修建的浮体闸, 有的发生过严重的不同步。如郾城县的颍河闸, 闸高5米, 总宽63米, 分21个单元, 而不同步竟使南北两端高差达2.1米, 严重撕坏止水橡皮, 致使该闸无法运用。

原型观测到的不同步现象是发生在闸顶溢流下降到  $2/3H$  高程左右。靠泄水孔口一侧突然加速下降, 而另一端则停顿不下降甚至反而回升; 而当闸门作深水起动时, 远离进水口一侧先升起很高, 然后另一端才起。一般讲深水起升的不同步差值更大些。

#### 2. 不同步产生的分析

从结构方面讲, 发生不同步表现为结构横向有变形。浮体闸本身和各单元间的联结都是

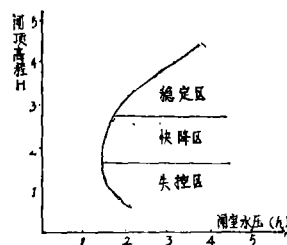


图10 闸体性能曲线

柔性的,在承受弯矩或扭矩时可以变形,设想闸板抗弯和抗扭的刚度都很大,各单元之间也是刚性联结,则不会有可以觉察的不同步。相反如果闸板是完全柔性,则闸顶高程从横向看是一条随着闸室水压而变化的曲线,一般实际工程均介于二者之间,既不是全完的刚性,也不是完全的柔性,是否会发生严重的不同步,就要与性能及水力条件结合起来考虑。

从水力学方面讲,止水不严,从付闸板及主闸板向闸室漏水,为了要降低闸室水压,必须加大廊道泄水量,因此就在闸室内产生了横向压力坡降,这个压力坡降是发生不同步的水力学基础,如果外水压力也不均匀,也会引起不同步。

从闸的起落性能讲,存在快降和失控区,是浮体闸发生严重不同步重要条件,如前面所述,对不同步发生的过程,可作如下描述:

闸在上部稳定区,由于泄水而闸室水压不平,会产生闸顶稍有不齐,但差别不大。若闸门性能曲线有快降区,当闸顶进入快降区,闸室水压在横向的微小差值,闸顶高程的平衡位置相差显著,如果闸板本身及相互联结是可以变形的,就将出现显著的不同步,形成一侧闸顶高而另一侧低的局面,为进一步加剧不同步提供了条件。如果闸性能有失控区,则闸顶低的一端先进入失控区,由于不平衡力矩越来越大而加速下降,而另一端的闸顶由于还在拐点以上,将由于闸室水压略有升高而不降甚至反而上升,使得不同步加剧,在短时间出现一端到底而另一端在拐点以上的巨大不同步。

综上所述,浮体闸由于(1)内水压力不均;(2)闸门本身性能上存在快降与失控;(3)浮体闸各单元及单元之间的联结在弯扭作用下有变形,这三方面综合作用,在各闸上出现各种不同程度的不同步,有的闸由于性能较好,失控区小,刚度大因而不同步不显,如洛阳金水闸;有的闸性能不好,快降失控区大,单元联结刚度小,就会发生破坏性不同步,郾城闸是典型实例。

### 3.不同步的改善与防止

既然不同步是三大因素综合造成,改善或防止不同步也可以三方面着手。

一是改善闸的性能,最好能消除快降区,缩小失控区,这已有一些简单可行的办法,如将闸门斜卧,提高闸顶到底高程,自然就减小了失控区。

二是加强闸门的刚度。首先是单元闸的刚度,主要是抗扭刚度。闸板之间的联结以抗剪板为好,郾城闸及白壁闸的联结板,主要是抗弯,变形较大。

三是改进止水,使闸室密封,这样放出少许水量就会引起闸室水压均匀变化,闸室内流速为零。没有横向压差即使在快降或失控区,也不会导致不同步。进一步分析,如果闸室密封,则闸的升降完全受调节闸室内水量的控制,没有失控及不同步问题。

总之三项措施任何一项只要能做到符合要求,都可以改善或防止不同步,三项措施综合考虑,可以更好地提高闸的质量。

## 六、几点结论

1、五连杆浮体闸是可动机构,依靠水力升降平衡,因而水力学因素是关键。浮体闸性能的研究也必然是水力学、理论力学和机械原理等学科综合研究的成果。

2、我们从工程实际需要出发进行实验研究和总结分析,深入不够还满足不了计算失控的需要,尚须更精确研究。

3、浮体闸的模型试验由我们开始，十年来对深入认识浮体闸的性能起了较大的作用。升降及平衡的模型试验经原型实测证实是符合的。不同步的模型实验曾失败过，总结失败经验，按照我们推导的模型律做了安阳白壁闸整体模型，模原型试验对照已取得初步成果，为进一步研究不同步提供了条件。

#### 参考文献

- 〔1〕 浮体闸专题研究报告 1975年印
- 〔2〕 浮体闸专辑—第一辑 河南省水利厅设计院
- 〔3〕 The control of water Parker 1916
- 〔4〕 安阳闸原型观测纪要及实测资料
- 〔5〕 郾城闸不同步事故的报告
- 〔6〕 洛阳闸模型试验及原型观测
- 〔7〕 安阳闸不同步模型试验研究报告