



葛洲坝船闸人字闸门底止水装置改造

曾 维

(长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 葛洲坝船闸多次因人字闸门底止水装置损坏造成船闸停航抢修, 停航时间长, 给长江航运带来巨大损失。分析底止水损坏原因, 提出将止水装置活动段改成固定段, 并增加人字闸门全关时底止水与门槛的间隙, 将底枢段止水固定螺栓由沉孔螺栓改为通孔螺栓, 并提高所有止水固定螺栓强度, 安装 2 个螺母防松, 改善底止水装置使用工况, 提高其可靠性。通过计算给出人字闸门全关时底止水与门槛的间隙值, 保证人字闸门合拢时底止水刚好与门槛接触。结果表明, 葛洲坝 3 座船闸下游人字闸门底止水经过改造, 运行效果良好。

关键词: 人字闸门; 底止水; 活动段; 固定段; 间隙

中图分类号: U643

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0118-06

Reconstruction of bottom water seal device of miter gate for Gezhouba ship lock

ZENG Wei

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

Abstract: The Gezhouba ship lock has been suspended for repairs due to multiple damages to the bottom water seal device of the miter gate, resulting in a long suspension time and causing huge losses to the Yangtze River shipping. The reason for the damage to the bottom water seal is analyzed. It is proposed to change the active segment of the sealing device into a fixed segment. The gap between the bottom water seal and the threshold is increased when the miter gate is fully closed. The sealing bolts of the bottom pivot segment are changed from counterbore bolts to through-hole bolts. The strength of all sealing fixing bolts is increased. Two anti-loosening nuts are installed to improve the sealing device's working conditions and reliability. The gap value between the bottom water seal and the threshold is obtained by calculating when the miter gate is fully closed. It is ensured that the bottom water seal is just in contact with the threshold when the miter gate is closed. The results show that the water seal devices of miter gates for the three Gezhouba ship locks are reconstructed, which have good operation effect.

Keywords: miter gate; bottom water seal; active segment; fixed segment; gap

葛洲坝水利枢纽有 3 座通航建筑物, 分别为布置在大江的 1[#]船闸、布置在三江的 2[#]和 3[#]船闸。3 座船闸的工作闸门均为人字闸门(简称“人字门”)。底止水与门体两侧的支、枕垫块形成人字门的密封面, 进行封水。葛洲坝船闸人字门为垂直面贴合式止水, 止水装置设置有一个活动段,

在建筑物与闸门结构发生意外变形时能够进行调整^[1-2]。葛洲坝船闸多次因底止水装置损坏造成船闸停航抢修, 停航时间 15~20 d, 给长江航运带来巨大损失。因此有必要对底止水装置进行改造, 延长其使用寿命。改造时考虑人字门从全关位到全水头挡水, 位置变化对底止水位置的影响, 以

收稿日期: 2023-04-09

作者简介: 曾维 (1968—), 男, 正高级工程师, 从事船闸及升船机机械设备检修、改造及技术研究。

保证底止水使用工况良好，提高底止水装置的可靠性。本文根据人字门从全关位到全水头挡水位置变化，确定底止水与门槛的间隙，止水固定螺栓采用高强度穿孔螺栓改造方案，对类似人字门底止水装置的设计和改造具有借鉴意义。

1 底止水装置结构

1#、2#船闸人字门底止水装置结构，见图 1，

由固定段和活动段两部分组成，固定段从底枢开始，长约 6 m，其余为活动段，长约 16 m。固定段止水座为门体结构，活动段止水座由螺栓固定在门体上，位置可调。止水材料为橡胶，型号为 P65 mm×220 mm×25 mm(直径×长×厚)。

3#船闸底止水装置结构与 1#、2#船闸相同，固定段长约 4 m，活动段长约 8 m，止水材料为橡胶，型号为 P65 mm×200 mm×25 mm。

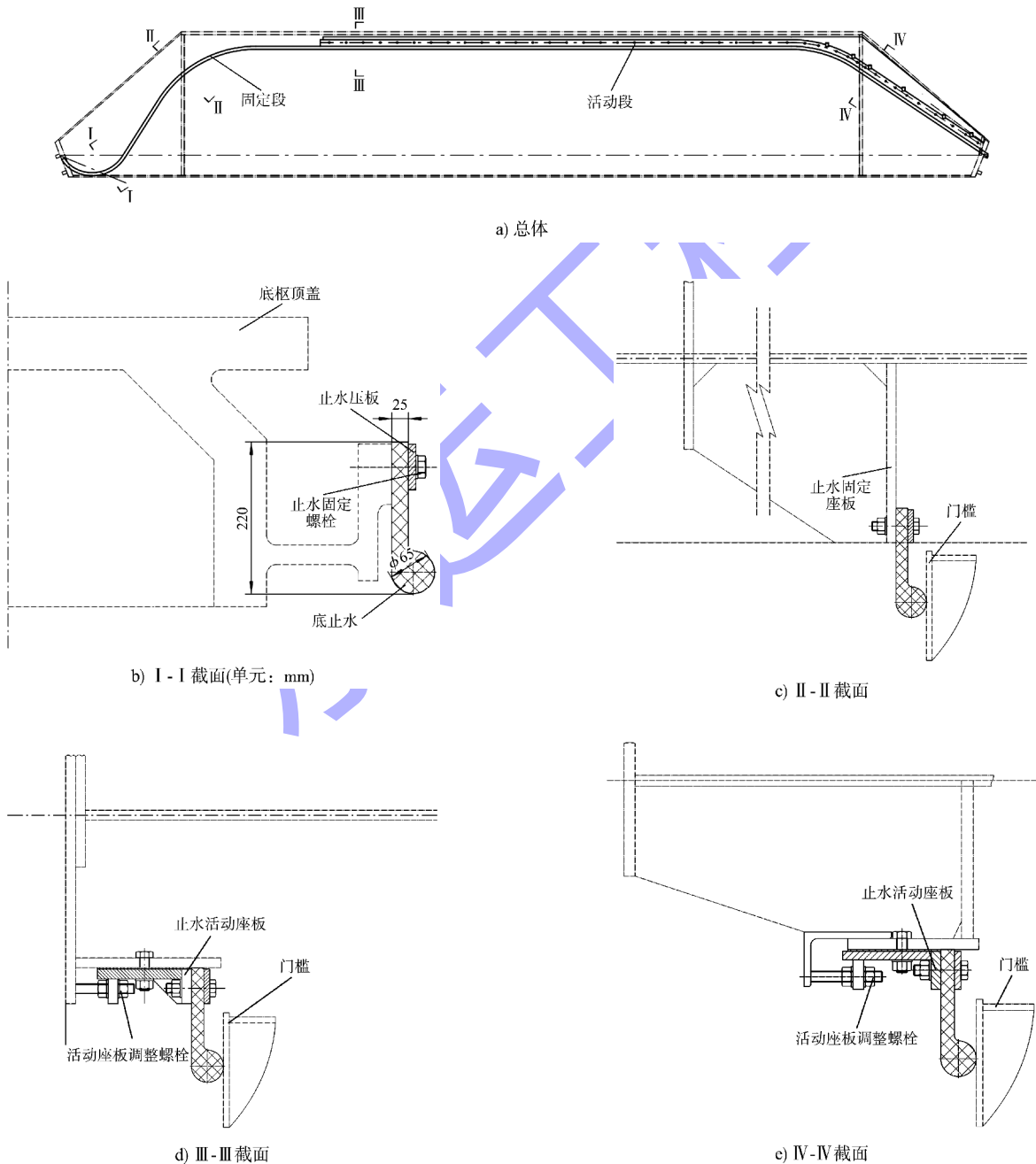


图 1 人字门底止水装置布置

2 底止水装置损坏表现及原因分析

2.1 损坏表现

- 1) 止水装置活动座板移位, 造成止水失效。
- 2) 止水平板面被人字门门槛包钢损伤, 出现裂纹, 长期反复作用造成止水撕裂。
- 3) 底枢段止水固定螺栓松脱, 止水不能有效固定, 造成止水失效。

2.2 原因分析

1) 汛期江水中的泥沙沉积在闸室, 船舶过闸时掉落一些轮胎和靠把等异物, 人字门门库中淤积物堆积在门龛处, 经过一段时间, 淤积物的局部位置高于底止水, 人字门开门接近全开位时, 底止水刮蹭淤积物, 止水座承受较大的力, 造成活动段止水座移位, 改变止水装置使用状态, 造成止水失效。

2) 止水与门槛间隙太小, 人字门挡水时, 止水平板面在水压作用下压在门槛包钢直角部位, 见图 2。包钢直角切入平板面, 形成较深的凹槽, 产生裂纹, 长期反复作用, 造成止水撕裂。

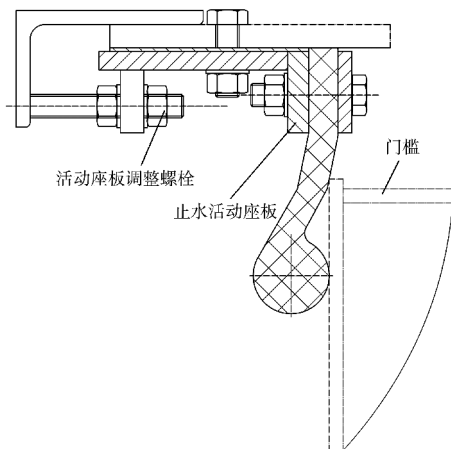


图 2 底止水平板面压在门槛处

3) 底枢段止水为圆弧形, 止水固定螺栓为沉头螺栓, 无防松措施, 止水压板与底枢顶盖止水座圆弧吻合精度不高, 止水固定螺栓受力不均, 长期运行螺纹存在牙型局部损坏、螺栓松动情况, 止水不能有效固定, 造成止水失效。

3 改造方案

3.1 止水装置活动段改成固定式

经一段时间运行, 人字门及水工建筑物处于稳定状态。人字门尺寸无变化, 门槛位置无变化, 人字门运行环境温度多年重复不变。因此, 人字门挡水状态下, 底止水相对门槛位置是固定不变的。底止水装置采用活动段结构, 在运行初期安装调整底止水装置时起作用, 底止水装置安装调整后, 后期只需要保持不变即可, 继续保留活动段结构形式的意义不大。活动段止水座用螺栓固定在门体上, 利用止水座与门体间的摩擦力抵抗外力防止移位, 在人字门门库淤高、止水刮蹭淤积物的情况下, 抵抗力偏小, 易在外力作用下移位。

改造时, 在调整好止水座板位置后, 用角焊缝将活动段止水座焊接在门体上, 活动段改为固定式, 整个底止水装置全部为固定式。

3.2 增加止水与门槛间隙

设计安装要求为: 固定段内止水均压缩 2 mm, 活动段从起点开始, 压缩量逐渐递减, 直至斜接柱段圆弧起点, 压缩量为 0 mm, 然后逐渐增加与门槛间隙, 至斜接柱支、枕垫处, 间隙为 2 mm。

人字门关门挡水过程为: 人字门启闭机推动人字门运行到全关位停止, 全关位两人字门间留有中缝, 闸室充水, 在较小的水压力下消除中缝, 人字门合拢, 形成三铰拱挡水。

3.2.1 人字门从全关位到设计水头挡水位的止水前行量

1) 从全关位到合拢位的止水前行量。对于 1#、2# 船闸, 按照要求, 人字门全关时, 下游门中缝宽为 18~20 mm^[3-4]。以 20 mm 为例, 人字门从全关位到合拢位的位置变化见图 3。

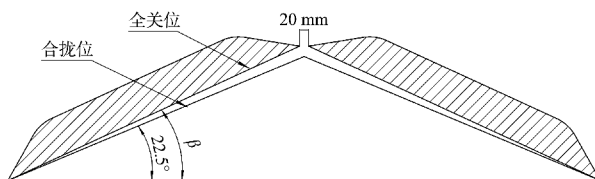


图 3 人字门从全关位到合拢位的位置变化

人字门合拢时门轴线与闸室横轴线夹角 $\alpha = 22.5^\circ$, 门体宽度 $L = 19\,700\text{ mm}$ 。人字门全关位门轴线与闸室横轴线夹角的计算公式为:

$$\beta = \arccos \frac{L \cos \alpha - k/2}{L} \quad (1)$$

式中: k 为人字门全关位门中缝值, mm, 取 20 mm 。经计算得出 $\beta = 22.5759^\circ$ 。则从全关位到合拢位斜接柱处止水前行量 W_1 的计算公式为:

$$W_1 = L \cdot \frac{\beta - \alpha}{180} \pi \quad (2)$$

经计算得出 $W_1 = 26\text{ mm}$ 。

同理, 3[#]船闸下游人字门中缝宽取 16 mm 时, 前行量 $W_1 = 21\text{ mm}$ 。

2) 从合拢位到设计水头挡水位的止水前行量。以 1[#]、2[#]船闸为例进行计算, 在 27 m 设计水头, 下游人字门主横梁单位宽度受力值^[5]见表 1。

表 1 1[#]、2[#]船闸下游人字门主横梁单位宽度受力值

主横梁	受力值/(kN·m ⁻¹)	主横梁	受力值/(kN·m ⁻¹)
L ₁	231.57	L ₁₂	260.97
L ₂	260.68	L ₁₃	253.82
L ₃	264.60	L ₁₄	254.60
L ₄	264.60	L ₁₅	249.80
L ₅	264.60	L ₁₆	232.65
L ₆	261.66	L ₁₇	211.68
L ₇	263.23	L ₁₈	206.88
L ₈	263.23	L ₁₉	183.46
L ₉	251.57	L ₂₀	127.01
L ₁₀	260.29	L ₂₁	70.56
L ₁₁	265.68	L ₂₂	15.88

①计算底主梁挠度。底主梁结构见图 4。计算得底主梁的惯性矩 $J = 8.079 \times 10^{10} \text{ mm}^4$ 。

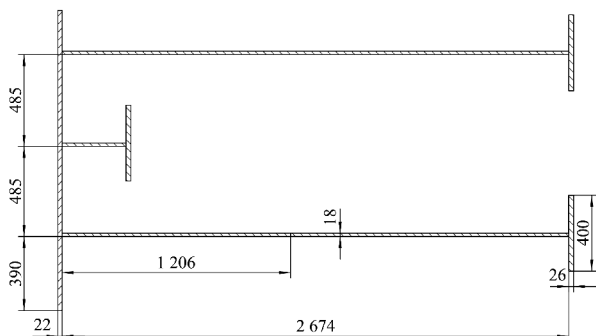


图 4 人字门底主梁结构 (单位: mm)

在均布水压作用下底主梁的跨中挠度 f_1 的计算公式为^[6]:

$$f_1 = \frac{5qL_1^4}{384EJ} \quad (3)$$

式中: q 为底主梁单位长度水压力值, N/mm, 取 231.57 N/mm ; L_1 为底主梁长度, mm, 取 $19\,700\text{ mm}$; E 为 Q355 钢弹性模量, N/mm², 取 $2.05 \times 10^5\text{ N/mm}^2$; J 为底主梁计算截面的惯性矩, mm⁴, 取 $8.079 \times 10^{10} \text{ mm}^4$ 。经计算底主梁的跨中挠度 $f_1 = 27.4\text{ mm}$ 。

计算梁受端部弯矩作用时在底主梁跨中产生的挠度。底主梁计算简图见图 5。

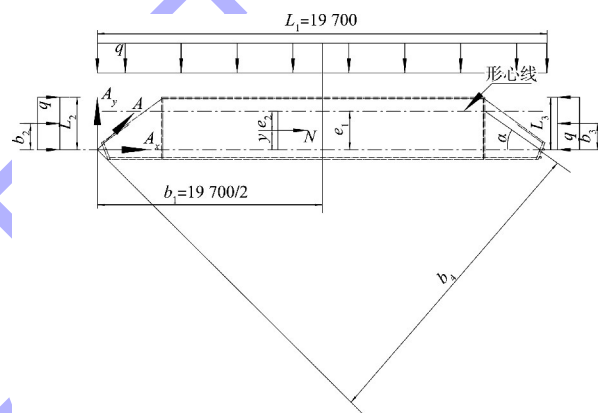


图 5 底主梁计算简图 (单位: mm)

底主梁门轴柱支承力轴向分力 A_x 计算公式为:

$$A_x = \frac{q(L_1 b_1 + L_2 b_2 - L_3 b_3)}{b_4} \cos \alpha - qL_2 + qL_3 \quad (4)$$

当 $L_2 = L_3$ 时, 有:

$$A_x = \frac{qL_1 b_1}{b_4} \cos \alpha \quad (5)$$

式中: A_x 为底主梁门轴柱支承力轴向分力, kN; b_1 为底主梁一半长度, m; L_2 为门轴柱上游面宽度, m, 取 2.516 m ; b_2 为门轴柱上游面一半宽度, m; L_3 为斜接柱上游面宽度, m, 取 2.516 m ; b_3 为斜接柱上游面一半宽度, m; α 为人字门合拢时门轴线与闸室横轴线的夹角, 取 22.5° ; b_4 为斜接柱支承力对门轴柱支承点的力臂, 其值为 $L_1 \sin \alpha$ 。经计算得出 $A_x = 5\,506\text{ kN}$ 。

作用在底主梁上的轴向压力 N 的计算公式为:

$$N = A_x + qL_2 \quad (6)$$

由 x 轴到力 N 间距 y 的计算公式为:

$$y = \frac{qL_2 b_2}{N} \quad (7)$$

截面形心到面板距离 x 的计算公式为:

$$x = \frac{\sum S_{\text{静}}}{F} \quad (8)$$

x 轴到截面形心距 e_1 的计算公式为:

$$e_1 = D - x - Z \quad (9)$$

力 N 至截面形心距 e_2 的计算公式为:

$$e_2 = e_1 - y \quad (10)$$

则梁受端部弯矩作用时在底主梁跨中产生的挠度 f_2 的计算公式为:

$$f_2 = \frac{3ML_1^2}{6EJ}\xi(1-\xi) = \frac{3Ne_2L_1^2}{6EJ}\xi(1-\xi) \quad (11)$$

式中: $\sum S_{\text{静}}$ 为底主梁截面到面板的静矩, mm^3 , 取 $91\,396\,738\,\text{mm}^3$; F 为底主梁截面积, mm^2 , 取 $77\,782\,\text{mm}^2$; D 为人字门门体厚度, mm , 取 $2\,722\,\text{mm}$; Z 为人字门体下翼缘到 x 轴距离, mm , 取 $184\,\text{mm}$; ξ 为底主梁计算点距支撑点距离与底主梁长度比值, 取 0.5 ; M 为轴向力对截面形心线的力矩, $\text{N}\cdot\text{mm}$ 。经计算得出 $N=6\,089\,\text{kN}$ 、 $y=120\,\text{mm}$ 、 $x=1\,206\,\text{mm}$ 、 $e_1=1\,332\,\text{mm}$ 、 $e_2=1\,212\,\text{mm}$ 、 $f_2=21.6\,\text{mm}$ 。

底主梁跨中挠度 f 的计算公式为:

$$f = \frac{f_1 - f_2}{1 - k\varepsilon^2} \quad (12)$$

$$\varepsilon^2 = \frac{NL_1^2}{\pi EJ} \quad (13)$$

式中: k 为与杆件端部的连接方式有关的系数, 两端铰接时 $k=1$ 。经计算得出 $f=6.1\,\text{mm}$ 。

计算底主梁各位置挠度值, 见表 2 (底主梁位置 1~6 分别为距门轴柱 $10L_1/20$ 、 $11L_1/20$ 、 $12L_1/20$ 、 $14L_1/20$ 、 $16L_1/20$ 、 $18L_1/20$ 处)。可以看出, 1#、2#船闸下游人字门底主梁最大挠度在中部, 最大挠度值为 $6.1\,\text{mm}$ 。

表 2 1#、2#船闸下游人字门底主梁各位置挠度值

底主梁各位置	1	2	3	4	5	6
挠度值/mm	6.1	6.0	5.7	4.4	2.5	0.8

同理计算 3#船闸下游人字门底主梁各位置挠度值, 见表 3。可以看出, 3#船闸下游人字门底主

梁最大挠度在中部, 最大挠度值为 $-0.1\,\text{mm}$ 。

表 3 3#船闸下游人字门底主梁各位置挠度值

底主梁各位置	1	2	3	4	5	6
挠度值/mm	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.5	-0.5

②计算底主梁压缩量。其压缩量 $\Delta L_{\text{压}}$ 的计算公式为:

$$\Delta L_{\text{压}} = \frac{NL_1}{EF} \quad (14)$$

经计算得出 $\Delta L_{\text{压}}=7.52\,\text{mm}$ 。

③计算由温度变化引起的底主梁长度变化。葛洲坝船闸止水检修一般在 3 月份, 此时温度与冬季低温相差约 $20\,^{\circ}\text{C}$ 。在 $20\,^{\circ}\text{C}$ 温差下底主梁长度变化 $\Delta L_{\text{温}}$ 的计算公式为:

$$\Delta L_{\text{温}} = \alpha' L \Delta T \quad (15)$$

式中: α' 为 Q355 钢的线膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$, 取 $1.2 \times 10^{-5}\,^{\circ}\text{C}^{-1}$; ΔT 为温差, $^{\circ}\text{C}$, 取 $20\,^{\circ}\text{C}$ 。经计算得出 $\Delta L_{\text{温}}=4.73\,\text{mm}$ 。

④由于底主梁压缩和温差长度的变化, 计算此时止水前行量。底主梁长度减少量 $\Delta L_{\text{总}}$ 的计算公式为:

$$\Delta L_{\text{总}} = \Delta L_{\text{压}} + \Delta L_{\text{温}} \quad (16)$$

经计算得出 $\Delta L_{\text{总}}=12.3\,\text{mm}$ 。

人字门从合拢位到设计水头挡水位的位置变化见图 6。

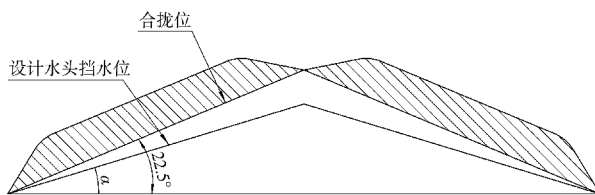


图 6 人字门从合拢位到设计水头挡水位位置变化

人字门设计水头挡水位时门轴线与闸室横轴线夹角 θ 的计算公式为:

$$\theta = \arccos \frac{L \cos \alpha}{L - \Delta L_{\text{总}}} \quad (17)$$

人字门从合拢位到设计水头挡水位, 斜接柱止水前行量 W_2 的计算公式为:

$$W_2 = (L - \Delta L_{\text{总}}) \frac{\alpha - \theta}{180} \pi \quad (18)$$

经计算得出 $\theta = 22.4136^\circ$ 、 $W_2 = 30 \text{ mm}$ 。

同理计算得到 3# 船闸的 $W_2 = 16 \text{ mm}$ 。

3) 计算全关位到设计水头挡水位的止水前行量。1#、2# 船闸斜接柱处止水前行量 $W = W_1 + W_2 = 56 \text{ mm}$ 。同样计算得到 3# 船闸的 $W = 37 \text{ mm}$ 。

3.2.2 止水与门槛间隙量分析

1#、2# 船闸底止水型号为 $P65 \text{ mm} \times 220 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ ，止水 P 形圆头高点比平板面高 40 mm，按照原要求安装后，止水平板面与门槛距离为 42 mm。在冬季低温时，1#、2# 船闸下游人字门斜接柱处止水前行量均为 56 mm，大于平板面与门槛距离，人字门在设计挡水状态下，平板面压入门槛包钢直角部位。

3# 船闸底止水型号为 $P65 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ ，止水平板面与门槛距离为 42 mm，斜接柱处止水前行量为 37 mm，虽小于平板面与门槛距离，但余量不大。

3.2.3 增加止水与门槛间隙方案

增加止水与门槛间隙，方案为：从原活动段起点开始，逐渐增加与门槛的间隙，至斜接柱支、枕垫块处，1#、2# 船闸均为 26 mm，3# 船闸为 21 mm。

增加间隙后，人字门在启闭机作用下运行到全关位停止，然后在较小水压下短时间内合拢，止水刚好与门槛接触，闸室充水到上游水位，底主梁弯曲变形和压缩变形造成止水前行，前行量小于止水平板面与门槛间隙，避免了平板面压入门槛包钢直角部位损坏。

3.3 提高止水固定螺栓可靠性

1) 将底枢段止水固定螺栓孔由螺纹孔改为通孔，穿螺栓带螺母方式固定止水，避免螺纹孔损坏造成螺栓松脱。

2) 所有止水固定螺栓采用 8.8 级螺栓，提高螺栓强度。

3) 所有止水固定螺栓安装 2 个螺母防松。

4 改造效果

在 2002 年 2# 船闸下游人字门止水损坏抢修中，对下游 2 扇人字门底止水装置进行了改造。

在 2004 年 3# 船闸计划性大修和 2005 年 1# 船闸计划性大修中，分别对其下游人字门底止水装置进行了改造，止水装置全部为固定式，止水固定螺栓采用 8.8 级螺栓，所有止水固定螺栓安装 2 个螺母防松。在后期的船闸大修中，将底枢段止水固定螺栓孔由螺纹孔改为通孔，采用穿孔螺栓固定止水。

在每年汛期前的 4—5 月和汛期后的 9 月份，安排潜水员对下游人字门底止水装置和门库淤积情况进行检查，并及时清理门库内较大的异物，防止损伤止水。

改造至今，使用情况良好。

5 结语

1) 针对底止水刮蹭门库淤积物造成活动段止水座移位问题，将活动段改成固定式，在调整好止水座板位置后，用角焊缝将活动段止水座焊接在门体上。

2) 针对止水与门槛间隙太小、人字门挡水时，止水平板面压在门槛包钢直角部位造成止水损伤撕裂的问题，通过计算人字门从全关位到设计水头挡水位的止水前行量，安装时增加止水与门槛间隙，人字门合拢时，止水刚好与门槛接触。

3) 针对止水螺栓松动造成止水失效问题，将底枢段止水螺栓改为穿孔螺栓，所有止水固定螺栓采用 8.8 级螺栓，并安装 2 个螺母防松。

参考文献：

- [1] 王既民. 闸门与启闭机[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [2] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [3] 葛洲坝船闸管理局. 葛洲坝船闸检修规程[R]. 宜昌: 葛洲坝船闸管理局, 1997.
- [4] 中国电力企业联合会标准化部. 电力工业标准汇编·水电卷·金属结构[G]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [5] 《水电站机电设计手册》编写组. 水电站机电设计手册金属结构(一)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [6] 《机械设计手册》联合编写组. 机械设计手册[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 1987.

(本文编辑 王璁)