



船闸人字闸门浮箱的设置方法

邢述炳¹, 黄 珑¹, 朱召泉²

(1. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210014; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 大型船闸人字闸门通常设置浮箱以改善顶底枢运转件的受力状态, 降低门头下垂量。在同等浮力下, 先对比矩形、U型、⊥型、L型、J型、T型、Π型等7种不同形式的浮箱, 分析顶底枢支反力、门头下垂量、固有频率、通气路径等特性, 给出相对合理的浮箱结构形式; 在此基础上, 再对比1层、1层半、2层、3层、4层等5种不同浮力大小的浮箱, 分析并给出相对合理的浮箱浮力控制范围。

关键词: 船闸; 人字闸门; 浮箱; 结构形式; 浮力; 有限元分析

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0112-07

Methods of setting buoyancy tank for the miter gate of ship lock

XING Shu-bing¹, HUANG Long¹, ZHU Zhao-quan²

(1. Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Ltd., Co., Nanjing 210014, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: At the miter gate of large-scale ship lock, buoyancy tank is usually set to improve the stress state of operating parts of the top and bottom pivot, and to reduce the drooping volume of gate head. First of all, seven kinds of different buoyancy tanks of the rectangle, U type, ⊥ type, L type, J type, T type and Π type were compared under the same buoyancy to analyze the features of bearing reaction of top and bottom pivot, drooping volume of gate head, natural frequency and ventilation path, and give a relative reasonable structural form of buoyancy tank. On this basis, five kinds of buoyancy tanks of one layer, one and a half layer, two layers, three layers, and four layers with different buoyancy forces were compared to analyze and give a relatively reasonable control range for the buoyancy force of buoyancy tank.

Keywords: ship lock; miter gate; buoyancy tank; structural form; buoyancy force; finite element analysis

浮箱在船闸闸门上的应用常见于横拉闸门、三角闸门和人字闸门。横拉闸门浮箱设置后, 可减轻运行期横拉闸门的门体自重, 改善底台车的受力状态; 三角闸门设置浮箱后, 可调整顶底枢受力状态, 降低门头下垂量。因为浮箱结构的复杂性, 人字闸门“是否设置浮箱”、“如何选择浮箱形式”及“如何确定浮力大小”一直是工程界争论的话题。

20世纪90年代初, 京杭运河淮安二线船闸人字闸门大修时, 为降低底枢蘑菇头的磨损量, 首次尝试浮箱结构。在京杭运河泗阳二线船闸大修期间, 相关学者对人字闸门浮箱增设前后进行跟踪研究, 研究表明浮箱对人字闸门底枢蘑菇头摩擦副的磨损具有较大的改善作用^[1-2]。之后, 浮箱在京杭运河三线船闸及江苏省内其他Ⅲ级以上船闸的人字闸门设计中得到推广运用^[3-4]。

收稿日期: 2016-03-10

作者简介: 邢述炳(1984—), 男, 硕士, 工程师, 从事钢结构及机械设计。

1 浮箱形式的选择

1.1 浮箱的布置形式

人字闸门浮箱布置形式多样, 可能的形式有: 矩形、U 型、⊥型、L 型、J 型、T 型、Π 型等, 其中矩形和 U 型结构较为常见。以某 III 级船闸下闸首人字闸门为例, 其门体尺寸为 14.26 m × 13.584 m × 1.5 m (高 × 宽 × 厚), 最大水位差 9.43 m, 最小淹没水深 3.98 m, 采用矩形浮箱 (图 1)。通过 ANSYS 建立空间模型进行分析, x 轴为压力轴线方向, y 轴为门体厚度方向, z 轴为门体高度方向, 有限元模型见图 2。为排除浮力大小对浮箱布置形式分析结果的影响, 对同为 8 个区隔 (浮力相等) 不同排列组合形成的浮箱进行分析。浮箱结构的布置形式见图 3。

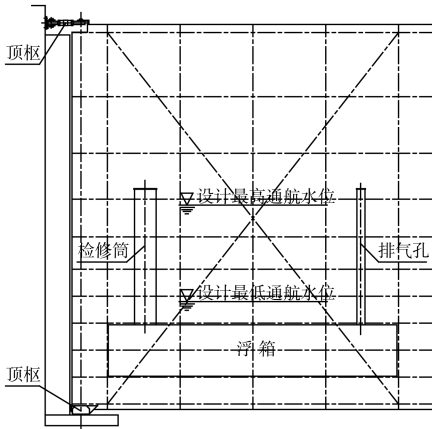


图 1 设置浮箱的人字闸门结构

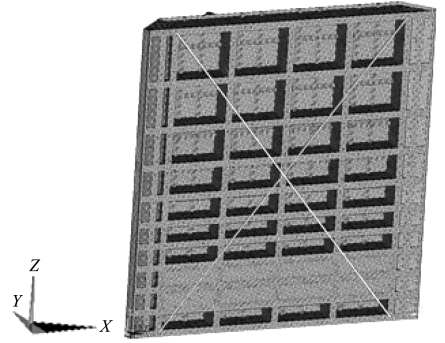


图 2 设置浮箱的人字闸门有限元单元模型

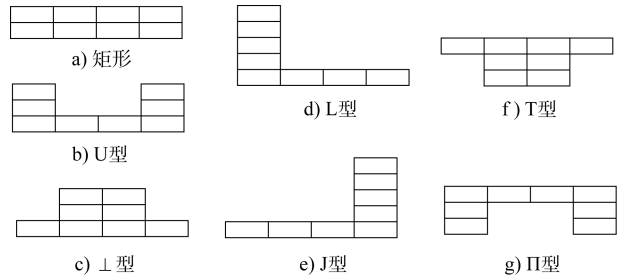


图 3 浮箱区隔布置形式 (8 区隔)

1.2 浮箱形式对顶底枢及启闭力的影响

人字闸门为空间受力体系, 作用在门体上的荷载主要有: 门体自重、壅水荷载、风荷载、浮箱浮力、背拉杆预应力等。同时, 门体还受到顶枢 U_x 、 U_y 约束、底枢 U_x 、 U_y 、 U_z 约束及启闭支座的推拉 (U_x 、 U_y)。在有水状态的关门工况下, 不同浮箱布置形式的人字闸门顶底枢支反力及启闭力计算结果见表 1。

表 1 有水关门工况不同浮箱布置形式的人字闸门支反力及启闭力

浮箱布置形式	顶枢支反力/kN		底枢支反力/kN			启闭力/kN	
	D_x	D_y	R_x	R_y	R_z	T_x	T_y
无	-609.51	229.95	378.92	-124.70	378.92	231.33	-341.46
矩形	-486.74	232.88	243.83	-134.24	543.28	243.34	-334.15
U 型	-484.68	233.90	243.86	-134.26	543.34	241.25	-335.18
⊥ 型	-487.91	232.36	243.85	-134.25	543.31	244.49	-333.63
L 型	-513.13	242.07	286.68	-134.52	543.31	226.86	-343.81
J 型	-456.55	227.36	201.01	-134.61	543.31	255.97	-328.86
T 型	-482.73	235.46	243.85	-134.43	543.32	239.31	-336.96
Π 型	-484.62	233.92	243.86	-134.26	543.34	241.18	-335.20

由表1可知: 1) 相对无浮箱门体, 人字闸门设置浮箱后, 顶底枢支反力均显著降低, 启闭力略有降低, 不同浮箱布置形式对顶底枢及启闭力的影响程度不同。2) 矩形、U型、⊥型、T型、Π型等5种对称结构浮箱, 对顶底枢支反力及启闭力影响值基本一致; 非对称浮箱中, J型浮箱对顶底枢支反力的改善作用好于对称结构浮箱, 而L型浮箱对顶底枢支反力的改善作用比对称结构浮箱的差。3) 人字闸门增设浮箱后, 启闭力有所降低, 但表中数据并不明显。一方面由于启闭力主要取决于壅水阻力, 而壅水阻力为定值; 另一方面因为有限元未模拟浮箱变化带来的顶底枢摩阻力矩的降低, 而顶底枢摩阻力是启闭总阻力矩的重要组成部分。

1.3 浮箱形式对闸门门体结构的影响

1.3.1 浮箱形式对门头下垂量和固有频率的影响

浮箱结构形式不同, 人字闸门的刚度也不同, 这将影响闸门的门头下垂量和固有频率。通过有限元静力分析和模态分析可知, 增设浮箱后, 门体产生不同程度的上浮, 各阶固有频率均有所增加。人字闸门的前5阶阵型分别如下: 1阶为斜接柱底部向上游扭曲变形, 2阶为斜接柱顶部向上游扭曲变形, 3阶为门轴柱中部向下游外鼓变形, 4阶为斜接柱底部向上游、顶部向下游扭曲变形, 5阶为斜接柱中部向上游外鼓变形^[4]。不同浮箱布置形式的人字闸门的门头下垂量及1~5阶固有频率见表2。

表2 不同浮箱布置形式的人字闸门门头下垂量及固有频率

浮箱 布置形式	门头下垂量 C/mm			固有频率 f/Hz				
	无水态	有水态	变幅	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶
无	3.38	3.38	0	2.05	8.72	14.34	17.07	26.90
矩形	2.50	1.54	0.96	2.21	9.54	15.86	17.63	28.47
U型	2.40	1.48	0.92	2.24	9.63	15.81	17.67	28.47
⊥型	2.44	1.51	0.93	2.24	9.69	15.87	17.58	28.20
L型	2.22	1.64	0.58	2.33	9.63	15.82	17.77	28.56
J型	2.56	1.24	1.32	2.19	9.70	15.25	17.58	28.04
T型	2.45	1.50	0.95	2.26	9.76	15.37	17.55	27.45
Π型	2.38	1.47	0.91	2.24	9.66	15.67	17.63	28.40

从表2中可以看出: 1) 无论是无水状态还是有水状态, 人字闸门设置浮箱后, 其门头下垂量均显著降低, 有水状态下门头下垂量最小。说明浮箱对人字闸门整体刚度有增强作用, 且刚度增强的影响因素大于其质量增加的影响因素。2) 对比无水状态和有水状态, 门头下垂量的变动幅度与浮箱的浮力中心距门轴线的远近有关: L型浮箱浮心较近, 门头下垂量最稳定, 变幅最小; 矩形、U型、⊥型、T型、Π型等5种对称结构浮箱, 变幅居中; 而J型浮箱浮心较远, 变幅最大, 门头跳动量不易达到规范要求。3) 从各种门体的1~5阶固有频率中发现, 浮箱对门体各阶固有频率均有所增加, 但增幅及差异并不明显, 说明浮箱结构形式的变化不是改变人字闸门固有频率的

有效途径。1阶固有频率普遍较低, 且远小于其他阶, 说明斜接柱底部向上游侧扭曲变形较容易发生。

1.3.2 浮箱布置对面板梁系的影响

面板是人字闸门的主要挡水构件, 浮箱布置形式对面板区隔的影响主要体现在有水工况下。经有限元对比分析发现: 1) 浮箱设置后, 人字闸门面板应力在挡水工况和运行工况有所不同, 且应力随浮箱布置形式的变化而变化。在关门挡水工况下, 面板最大 Von Mises 应力由 108 MPa 增加到 112 MPa, 应力分布形状基本一致; 最高通航水位运行工况下, 浮箱区面板应力几乎由 0 突变至 22 MPa, 非浮箱区应力仍为 0。2) 浮箱对面板区隔的影响是局部的, 浮箱设置后, 浮箱区面板应

力明显上升, 变化区域随着浮箱布置的变化而变化, 而非浮箱区面板应力基本未变。

主梁和横隔板是人字闸门主要受力构件, 人字闸门设置浮箱后, 浮箱背板相当于主梁和横隔板的加强后翼缘, 提高了门体刚度; 而作为浮箱围板的主梁腹板及横隔板腹板, 其受力状况则由双向压力变为单向压力趋于不利, 需要加强。关门挡水工况下, 人字闸门主梁和横隔板的有限元计算应力云图见图 4。

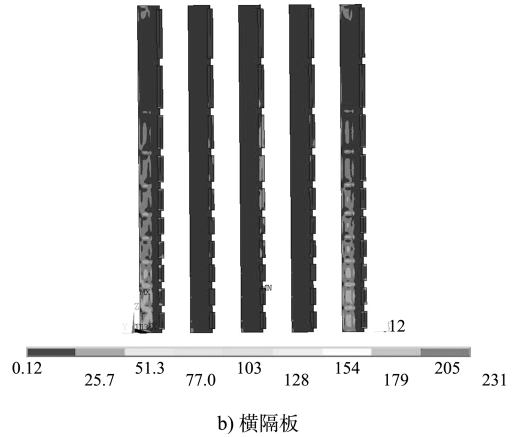
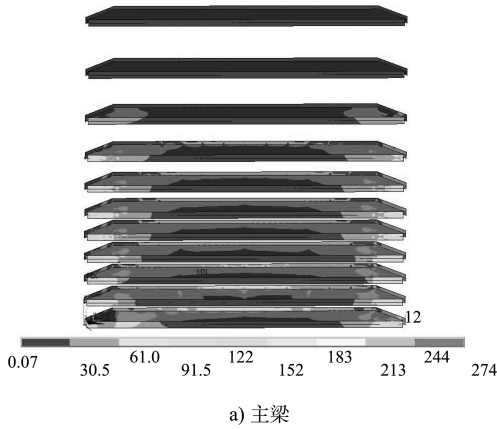


图 4 设置浮箱的人字闸门应力云图 (单位: MPa)

对比各种浮箱设置前后主梁和横隔板的应力云图, 发现浮箱设置前后主梁和横隔板的应力形状基本不变, 仅在浮箱围板的主梁腹板及横隔板腹板处有所增大, 其余部分均有所降低。为进一步量化分析不同结构形式浮箱对主梁和横隔板的影响, 从有限元分析结果中, 提取出主梁(底梁至顶梁编号依次为 A~K)跨中应力及挠度, 见表 3、4。

表 3 关门挡水工况下不同浮箱形式的主梁跨中应力

浮箱布置形式	主梁跨中应力 σ_m /MPa										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
无	89.3	70.4	65.3	60.7	56.3	49.4	41.1	31.4	21.1	8.4	14.9
矩形	74.3	65.1	59.0	54.2	51.3	46.5	40.8	33.4	23.4	10.4	13.3
U 型	73.9	64.6	58.9	55.8	51.2	45.9	40.6	33.5	23.6	10.6	13.2
⊥ 型	74.6	65.2	57.7	54.8	52.0	46.4	40.7	33.3	23.2	10.3	13.4
L 型	73.6	64.2	58.2	55.2	52.8	47.0	39.5	33.0	23.6	10.9	12.9
J 型	75.3	65.2	57.8	55.1	52.8	47.0	39.9	32.5	22.9	10.2	13.4
T 型	74.6	63.4	58.9	57.1	52.2	45.7	40.4	33.3	23.3	10.3	13.3
Π 型	75.2	62.5	59.0	56.9	50.8	45.3	40.4	33.5	23.5	10.6	13.2

表 4 关门挡水工况下不同浮箱形式的主梁跨中挠度

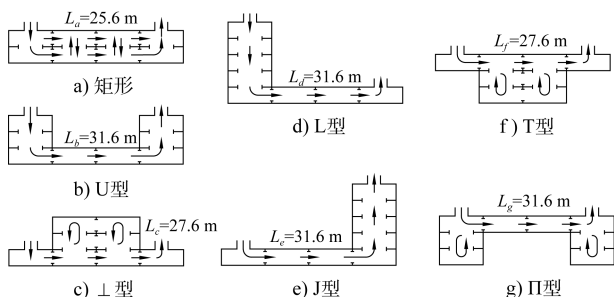
浮箱布置形式	主梁跨中挠度 ω_m /mm										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
无	8.29	7.74	7.17	6.59	6.01	5.46	4.83	4.05	2.93	1.24	0.92
矩形	6.86	6.56	6.28	6.02	5.73	5.40	4.92	4.21	3.12	1.41	0.78
U 型	6.79	6.50	6.25	6.00	5.72	5.41	4.94	4.24	3.14	1.43	0.76
⊥ 型	6.93	6.58	6.28	5.97	5.67	5.36	4.89	4.19	3.10	1.41	0.77
L 型	6.77	6.48	6.23	5.96	5.67	5.38	4.94	4.26	3.17	1.46	0.73
J 型	6.92	6.59	6.31	6.01	5.68	5.34	4.88	4.19	3.10	1.40	0.77
T 型	6.97	6.61	6.28	5.96	5.66	5.36	4.90	4.20	3.11	1.41	0.76
Π 型	6.81	6.52	6.24	5.95	5.69	5.39	4.93	4.23	3.14	1.43	0.75

从表3、4中可以看出:1)浮箱设置后,顶底梁、浮箱区主梁的跨中应力和挠度得以降低,说明浮箱可增强浮箱区主梁的强度及刚度。2)浮箱设置后,浮箱附近主梁的跨中应力和挠度也随之降低,离浮箱越远降低幅度越小,甚至在离浮箱更远的顶部几道主梁处出现应力和挠度增加的现象。3)浮箱设置后,门体的变形协调得到改善,浮箱具有消峰均化作用,主梁间的应力及挠度均趋于平稳。

水平次梁和竖直次梁是改善面板区隔的重要构件,常用于主梁和横隔板围起的面板区隔刚度不足时,浮箱设置后,在面板区隔不变的情况下,水平次梁和竖直次梁应力的变化集中显示在浮箱区,与面板一致:1)浮箱设置后,浮箱围板由双侧受压变为单侧受压,压力提高,而次梁主要作用为强化围板区隔,故浮箱区水平次梁和竖直次梁应力及变形均有所增大。2)浮箱设置后,浮箱对其围板局部的强度和刚度带来不利影响,应予以加强,浮箱围板水压周长越大,意味着需要次梁加强的区域越广,使用材料的工程量也越多。

1.4 浮箱形式的安全性比较

设置浮箱的人字闸门在检修时,需向浮箱中持续通入新鲜空气,以利于浮箱内废气的排出,保障检修人员的人身安全。而浮箱的结构形式决定了气流的通畅程度和检修路径的复杂程度,直接影响检修人员的安全。此外,水压周长决定浮箱制造的难易程度,影响浮箱可靠性。不同结构形式浮箱的通气情况、检修路径及水压周长的比较见图5。



注: L_a 、 L_b 、 L_c 、 L_d 、 L_e 、 L_f 、 L_g 分别为矩形、U型、T型、L型、J型、T型和Π型浮箱的水压周长。

图5 各种浮箱的通气路径及水压周长

从图5中可以看出:1)矩形、U型、L型和J型浮箱结构通气较顺畅,而T型和Π型浮箱通气过程中存在涡流,气体交换欠佳。2)检修路径是否方便与气流通道是否顺畅基本一致,矩形、U型、L型和J型浮箱检修相对方便,而T型和Π型浮箱存折返区,不易检修。3)从水压周长来说,矩形浮箱最小最优,T型和Π型浮箱大小居中,U型、L型和J型和Π型水压周长最大。

1.5 浮箱结构形式小结

通过以上对各种浮箱的分析可知,浮箱对降低人字闸门顶底枢支反力、提高门体的强度和刚度等作用较大。综合对比7种形式浮箱,其特点可归纳如下:1)矩形。结构简单,检修路径短且空间大,气流通道顺畅,水压区围板周长最短,能有效降低顶底枢支反力,对门体及主梁变形改善较好。2)U型与T型。底部均基于矩形的对称结构,对顶底枢支反力改善均一般;U型相对T型门体整体刚度大,T型相对U型主梁跨中挠度改善好;U型相对T型气流通道及检修路径更好。3)L型与J型。顶部均单一侧设置,虽通气顺畅,但淹没水深不易满足,给门体分段制造、运输、安装及检修带来不便;L型对顶底枢水平向支反力的改善不明显,J型门头下垂量变幅较大,不易控制。4)T型和Π型。淹没水深不易满足,检修路径较为复杂,空气补给不畅,检修风险较大。

2 浮箱大小的确定

2.1 浮箱大小的比较方案

根据人字闸门浮箱布置形式的对比分析结果得知,人字闸门浮箱相对合理的布置形式为矩形和U型两种。基于此,仍以该船闸人字闸门为研究对象,兼顾制作成本及检修可行性,将浮箱按浮力大小分为5种。浮箱结构从4区隔起开始布置,1层为单排4区隔矩形结构,1层半为6区隔U型结构,2层为双排8区隔矩形结构,3层为3排12区隔矩形结构,4层为4排16区隔矩

形结构。各种浮箱布置简图、门重、浮力、浮重比、浮箱使用率等参数见表 5。

表 5 浮力不等各种浮箱的主要影响参数对比

浮箱大小	浮箱简图	门重 G/kN	最大浮力 F/kN	浮重比 I/%	浮箱使用率/%
无	无	935	0.0	0.0	0.0
1 层		964	159.0	16.5	100
1 层半		970	238.5	24.6	100
2 层		976	318.0	32.6	100
3 层		982	477.0	48.6	93
4 层		988	636.0	64.4	70

由表 5 可知: 随着浮箱区隔及层数的增加, 浮力不断上升, 门重也相应增加; 相对浮力的增加速度, 门体重力增速较慢。当浮箱设置到一定高度时, 本工程浮箱顶面已经超出最低通航水位, 若继续增设浮箱, 浮箱使用率则不足 100%, 如 3 层 93%、4 层 70%。此外, 6 种方案中浮重比从 0 到 64.4%, 基本覆盖所有浮箱大小问题, 据此展开浮箱大小的分析相对全面。

2.2 浮箱大小对顶底枢及启闭力的影响

顶底枢支反力及启闭力均在运行工况下最大, 因浮箱结构的特殊性, 即无水状态下增加门体重力、有水状态下产生浮力抵消部分门重, 故需分别在无水和有水工况下分析闸门顶底枢支反力和启闭力。相关参数的计算结果见表 6。

表 6 不同浮箱大小的人字闸门支反力和启闭力

工况	浮箱大小	顶枢支反力/kN		底枢支反力/kN			启闭力/kN	
		D_x	D_y	R_x	R_y	R_z	T_x	T_y
无水关门	无	-327.44	-3.91	378.69	29.14	835.07	-51.25	-25.23
	1 层	-329.74	-1.70	384.69	28.76	847.99	-54.95	-27.05
	1 层半	-330.47	-0.39	387.68	28.56	854.45	-57.22	-28.17
	2 层	-332.84	0.10	390.68	28.38	860.92	-57.84	-28.48
	3 层	-336.60	1.56	396.67	28.01	873.84	-60.07	-29.57
	4 层	-340.73	2.84	402.65	27.65	886.76	-61.93	-30.49
有水关门	无	-609.51	229.95	378.92	-124.70	834.66	231.33	-341.46
	1 层	-543.91	233.74	331.38	-129.58	688.98	233.31	-340.18
	1 层半	-511.13	235.67	277.62	-132.02	616.18	234.00	-339.62
	2 层	-486.74	232.88	243.83	-134.24	543.28	243.34	-334.15
	3 层	-421.27	237.21	176.29	-139.22	397.55	245.32	-333.86
	4 层	-361.95	237.92	108.75	-143.99	251.79	253.48	-329.77

从表 6 可以看出: 在无水状态下, 随着浮箱层数的增加, 顶底枢的支反力不断增大, 启闭力也随之稍有增大。在高水位运行状态下, 随着浮箱层数的增加, 顶底枢的支反力快速减小、启闭力也随之稍有降低。据此, 浮箱的增设对改善顶底枢受力作用巨大, 浮箱越大效果越显著。

然而, 在关门挡水工况下, 闸门底梁还承受约 600 kN 的浮托力; 因此, 当浮箱层数增加到 3 层及以上时, 闸门顶枢 A、B 杆实际上受压, 底枢竖

向支反力已为 0, 对闸门运转十分不利。综合考虑, 该船闸人字闸门设置 2 层浮箱最为合理, 此时的浮重比为 32.6%, 浮箱浮力约占闸门总重的 1/3。

2.3 浮箱大小对门体结构的影响

2.3.1 浮箱大小对门头下垂量和固有频率的影响

浮箱大小不同, 门体重力也不同, 门头下垂量及固有频率随之有所差异。通过有限元分析, 不同浮箱大小的人字闸门门头下垂量及门体 1~5 阶固有频率见表 7。

表7 不同浮箱大小的人字闸门门头下垂量及固有频率

浮箱大小	门头下垂量/mm			固有频率/Hz				
	无水态	有水态	变幅	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶
无	3.38	3.38	0	2.05	8.72	14.34	17.07	26.90
1层	2.87	2.31	0.56	2.11	9.04	15.08	17.67	27.83
1层半	2.60	1.84	0.76	2.18	9.35	15.55	17.68	28.28
2层	2.50	1.54	0.96	2.21	9.54	15.86	17.63	28.47
3层	2.25	0.98	1.27	2.29	9.99	16.41	17.58	28.75
4层	2.07	0.55	1.52	2.35	10.45	16.74	17.51	28.79

从表7中可以看出:1)随着浮箱的增大,在无水状态下,门头下垂量不断减小;在有水状态下,门头下垂量加速减小。说明浮箱对提高门体总体刚度、降低门头下垂量有利。门头下垂量的变幅随着浮箱的增大而减小。2)固有频率随着浮箱的增大,各阶表现不一,第1、2、3、5阶

均表现为递增趋势,而第4阶表现为先增后降趋势。

2.3.2 浮箱大小对面板梁系的影响

闸门面板梁系在关门挡水状态下受力比下游最高通航水位条件下运行更为不利,关门挡水工况下不同浮箱大小的面板和梁系应力及挠度见表8。

表8 关门挡水工况下不同浮箱大小人字闸门面板及梁系计算结果

浮箱大小	最大应力/MPa				最大挠度/mm			
	面板	主梁跨中	端隔板	次梁	面板	主梁跨中	端隔板	次梁
无	113	78.19	127	74.8	7.72	7.08	7.20	7.49
1层	113	75.79	128	74.6	7.57	6.93	7.04	7.34
1层半	112	74.70	129	74.2	7.49	6.84	6.97	7.26
2层	112	74.27	129	74.2	7.47	6.84	6.95	7.25
3层	111	73.25	128	73.8	7.41	6.79	6.90	7.19
4层	111	72.56	128	73.5	7.37	6.76	6.87	7.15

从表8可以看出:随着浮箱的增大,门体面板、主梁、横隔板和次梁的挠度均有所降低,主梁应力降低明显,而面板、横隔板和次梁应力基本一致。主要因为增设浮箱对主梁相当于加强后翼缘,进而改善门体整体变形协调;而面板和次梁对局部荷载较敏感,增设浮箱对面板区隔局部刚度没有改进。

3 结语

1)人字闸门增设浮箱后,顶底枢支反力显著降低,减小运转件的磨损量,降低有水态和无水态的门头下垂量,增强门体的强度与刚度,均化主梁的应力及挠度,提升门体的固有频率。

2)人字闸门浮箱结构布置形式宜以“最低通航水位以下、最简单结构形式、最简短检修路径、最顺畅气流通道、最小水压周长”为原则,首先采用矩形结构,其次选择U型结构,在无其他功

能限制及特殊要求的情况下,⊥型、L型、J型、T型和Π型等结构不推荐使用。

3)人字闸门浮箱大小设置要求任何情况下底枢不可上浮、顶枢拉杆不能受压,可在浮重比20%~40%区间内取值,以门重1/3为宜;浮力不应超过门重的50%,否则底止水走线较难布置。

参考文献:

- [1] 常苏华.船闸人字闸门增设浮箱的观测与研究[J].水运工程,1995(10):36-39.
- [2] 林江.关于船闸人字浮箱问题的思考[C]//中国航海学会船闸专业委员会二届二次年会论文集.北京:中国航海学会,2005:32-36.
- [3] 邢述炳.浮箱结构船闸人字闸门预应力背拉杆设计[J].水运工程,2013(8):147-151.
- [4] 邢述炳.人字闸门浮箱与预应力背拉杆组合应用研究[D].南京:河海大学,2015.