



船闸桁架式检修闸门的适用性分析

刘晓光¹, 吕敏², 魏玲², 黄勇³

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 枣庄市港航和机场建设发展中心, 山东 枣庄 277899; 3. 济宁市港航事业发展中心, 山东 济宁 272100)

摘要: 船闸检修闸门为工作闸门和闸室检修时使用, 考虑总平面布置、启闭设备能力以及降低土建工程费用, 检修闸门门重成为船闸金属结构设计的关键因素。桁架式检修闸门利用型钢代替实腹式检修闸门腹板, 门重较同尺度实腹式检修闸门大为降低, 在信江、赣江以及京杭运河多座船闸已有应用。对于山区河流高水头船闸, 桁架式与实腹式检修闸门应用存在一定重叠。利用有限元软件, 分析不同水头作用下桁架式检修闸门的应力和变形情况, 验证特定尺度下桁架式检修闸门所能承受的极限载荷, 给出桁架式检修闸门的推荐水头范围。

关键词: 船闸; 桁架式检修闸门; 有限元

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0291-04

Application analysis of ship lock truss type bulkhead gate

LIU Xiao-guang¹, LYU Min², WEI Ling², HUANG Yong³

(1.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2.Zaozhuang Port, Waterway and Airport Construction and Development Center, Zaozhuang 277899, China;

3.Jining City Port and Shipping Development Center, Jining 272100, China)

Abstract: The ship lock bulkhead gate is used for the maintenance of the working gate and lock chamber. Considering the general layout, the capacity of hoist and the reduction of civil engineering costs, weight of bulkhead gate becomes a key factor in the design of the ship lock metal structure. Due to the use of section steel, the weight of the truss-type bulkhead gate is much lower than that of the solid-web bulkhead gate of the same size. Truss-type bulkhead gates have been used in many ship locks of the Xinjiang River, the Ganjiang River and the Beijing-Hangzhou Grand Canal. For high-head ship locks in mountainous rivers, there is an overlap in the application of truss-type and solid-web bulkhead gates. The finite element software is used to calculate the stress and deformation of the truss-type bulkhead gate under different water heads. Thus, the ultimate load that the truss-type bulkhead gate can withstand under a certain scale is verified, and the recommended water head range for the truss-type bulkhead gate is given.

Keywords: ship lock; truss-type bulkhead gate; finite element

1 实腹式和桁架式叠梁门应用对比

1.1 实腹式叠梁门

船闸检修闸门是船闸金属结构的重要组成部分, 船闸工作闸门和闸室检修时使用, 根据结构

形式, 可划分为整体浮式检修闸门和叠梁式检修闸门。其中, 叠梁式检修闸门有实腹式和桁架式 2 种, 实腹式叠梁门在 23 m 和 34 m 口门大型船闸均有应用, 通过不同高度和厚度的门型组合, 使

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 刘晓光(1988—), 男, 工程师, 从事港口装卸工艺和船闸金属结构设计。

其适用水头范围较广。

实腹式叠梁门的单节门质量较大，其中 23 m 口门船闸实腹式叠梁门单节门质量一般为 45 ~ 70 t，34 m 口门船闸实腹式叠梁门单节门质量为 55 ~ 130 t。实腹式叠梁门对启闭设备的要求较高：多采用台车式启闭机、A 型门机及 L 型门机启闭，不仅启闭设备投资较高，而且对船闸总平面布置也有很大影响。特别是山区河流船闸，总平面布置相对紧凑，采用台车式启闭机需要开山布置门库；采用 A 型或 L 型门机需要增加闸首和闸室宽度，而且下闸首及闸室顶高程均需要抬高至与上闸首顶高程相同。2 种方案均会使开挖量和水工结构工程量大幅增加，增加土建工程费用。

1.2 桁架式叠梁门

桁架式叠梁门利用节点板和型钢代替实腹式检修闸门腹板，在满足应力和变形要求的情况下，使单节门重大幅降低，在信江、赣江和京杭运河多座船闸已有应用。23 m 口门船闸桁架式叠梁门单节门质量约 25 t，为同尺度实腹式检修闸门单节门质量的 36% ~ 56%。23 m 口门船闸实腹式叠梁门和桁架式叠梁门参数见表 1。桁架式叠梁门对启闭设备的要求低，可不设置固定启闭设备，采用临时启闭设备即可满足要求，如京杭运河船闸多用浮吊进行启闭，对于部分山区河流，浮吊租用不便，可使用汽车起重机启闭，从而降低总平面布置难度，减少开挖量和水工结构工程量，降低土建工程费用。

表 1 23 m 口门船闸实腹式叠梁门和桁架式叠梁门参数

门型	项目名称	设计水头/m	长度/m	高度/m	厚度/m	单节门质量/t
实腹式叠梁门	利泽	6.125	23.90	3.20	2.5	66.72
	谪皮岭	12.41	23.90	2.00	2.5	46.16
			23.90	1.50	2.5	43.57
	万安二线	19.50	23.90	2.00	3.0	63.44
	蜀山	12.30	23.90	1.90	2.4	43.43
	派河口	6.50	23.90	1.90	2.0	36.46
桁架式叠梁门	峡江	9.66	23.96	11.00	2.8	25.00
	石虎塘	9.34	23.96	10.01	2.8	25.00
	新干	9.68	23.96	10.74	2.8	25.00
	界牌	10.51	23.96	11.50	2.8	25.00
	长沟	7.00	23.96	7.86	2.8	25.00

考虑减小单节桁架式叠梁门的水压力，桁架式叠梁门单节门高较实腹式叠梁门小。底节桁架式叠梁门门高在 1 m 左右，随着水头减小，门高逐渐增加，顶节门高约 1.5 m。同口门宽度和水头条件下，实腹式叠梁门单节门高在 1.5 ~ 3.2 m；同等组合门高情况下，桁架式叠梁门数量约为实腹式叠梁门的 2 倍。从吊装时间来看，虽然桁架式叠梁门所需吊装时间更长，但考虑检修闸门的使用频次低，对吊装时间并不敏感，因此不影响其适用性。

对于 23 m 口门船闸，在一定水头范围内，实腹式叠梁门和桁架式叠梁门均有应用案例，二者适用水头范围存在一定重叠。根据 260 t 汽车起重

机起重性能表，工作幅度考虑 20 m，最大起重力约 300 kN。在此基础上，扣除残余水位差引起的摩阻力，桁架式叠梁门单节门质量最大为 26 t。在单节门重约束条件下，利用三维有限元软件系统分析不同水头条件下，不同杆径型号 23 m 口门船闸底节桁架式叠梁门的应力和变形情况，研究其所能承受的极限水头，得出桁架式叠梁门推荐的水头范围。

2 桁架式叠梁门分析计算

传统桁架式叠梁门多采用手工计算方法，基于理论力学、材料力学、结构力学等理论基础，按照既有理论体系对结构、零部件进行强度、刚

度、稳定性计算^[1]。手工计算程序繁琐,特别是对结构较为复杂的空间结构和零部件,较难精确计算,进一步探究特定结构的极限载荷也很困难。因此,笔者采用有限元软件进行计算。

三维有限元软件主要包括前处理模块、分析计算模块和后处理模块^[2]:前处理模块提供了强大的实体建模和网格划分工具,完成桁架式叠梁门建模和网格划分;分析计算模块对模型施加约束和载荷,模拟不同计算工况,进行结构分析;后处理模块可将计算结果以不同方式进行展示。利用上述 3 个模块可完成不同工况下桁架式叠梁门应力和变形分析,便于极限载荷的模拟。

2.1 计算模型

2.1.1 依托工程

以界牌枢纽船闸改建工程为例,进行桁架式叠梁门的建模计算。界牌航电枢纽位于江西省鹰潭市余江县中童镇徐杨村与贵溪市鸿塘镇交界处的信江干流,为信江航运工程的第 1 个梯级,是以航运为主、兼有发电和灌溉等功能的水利枢纽^[3]。改建界牌船闸为Ⅲ级船闸,设计船型为 1 000 吨级单船,建设规模为 180 m×23 m×4.5 m (长×宽×门槛水深),通航净高 10 m。船闸检修闸门采用桁架式叠梁门,上、下闸首各布置 1 扇:上闸首检修闸门检修水深 5.2 m,门扇高度 6.5 m;下闸首检修闸门检修水深 10.51 m,门扇高度 11.5 m。检修闸门参数见表 2。

表 2 界牌枢纽船闸改建工程检修闸门参数					
位置	检修水位/m	底槛高程/m	门顶高程/m	检修水深/m	门高/m
上游	24.00	18.8	25.3	5.20	6.5
下游	23.51	13.0	24.5	10.51	11.5

桁架式叠梁门共 3 种规格,顶节高 1.5 m,中节高 1.2 m,底节高 1.1 m。检修时,根据不同水深进行叠梁组合。

2.1.2 模型的建立

因底节门所受水头最大,故以底节 1.1 m 高叠梁门为例建模计算。

桁架式叠梁门由门体结构、主滑块、反滑块和止水系统组成,其中门体结构包括面板、上弦杆、

下弦杆、竖杆、斜杆和连接板。考虑对模型进行简化,只针对门体结构建模,忽略滑块和止水系统对门体结构的影响。除面板和节点板外,其余杆件均为型钢,如角钢、槽钢和钢管等。为了更准确地模拟桁架式叠梁门的受力状态,各种型钢均采用壳单元建模,根据型钢型号赋予壳单元不同板厚。桁架式叠梁门门体结构所用材料及性能见表 3。

表 3 门体结构所用材料及性能			
材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(t·m ⁻³)
Q235B	210	0.3	7.8
Q355B	210	0.3	7.8

建模完成后,进行单元属性定义和网格划分。模型见图 1。

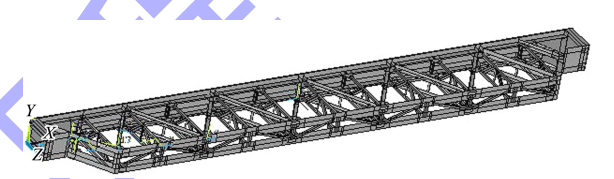


图 1 底节桁架式叠梁门模型

2.2 结构计算

2.2.1 载荷组合及应力、变形许用值

根据 JTJ 308—2003《船闸闸阀门设计规范》^[4],检修闸门应计算迎水面为检修期最高水位、门后为无水的情况。因此,检修闸门考虑水压力和门体自重组合,进行静力学分析。

根据检修闸门所受载荷组合及试算结果,上弦杆所受压应力最接近许用应力,因此,在单节门重约束条件下,调整上弦杆所用型钢型号,进行多方案有限元计算。根据门体结构所选用材料、板厚以及《船闸闸阀门设计规范》的规定,桁架式叠梁门门体结构各部分许用应力为:面板、连接板为 218.5 MPa,上、下弦杆为 142.5 MPa,竖杆、斜杆为 152 MPa。

根据检修闸门计算跨度 l,检修闸门主梁最大挠度取 1/500,即 47.28 mm。

2.2.2 加载与求解

通过施加竖直方向惯性荷载模拟桁架式叠梁门自重,并在边柱及底止水分别施加约束。同时,为模拟不同水头作用下桁架式叠梁门应力和变形

情况，面板处分别施加不同水头下的梯形荷载。
模型加载和约束见图 2。

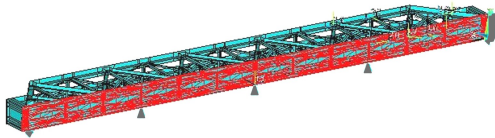
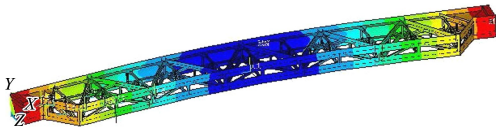


图 2 底节桁架式叠梁门荷载及约束

在以上约束条件下，分别对上弦杆 L200 mm×200 mm×14 mm、L200 mm×200 mm×16 mm 和 L200 mm×200 mm×18 mm 3 种规格桁架式叠梁门进行不同水头作用下的模拟。不同水头作用下，各桁架式叠梁门应力及变形云图见图 3。



a) 应力



b) 变形

图 3 桁架式叠梁门应力及变形云图

各水头作用下，分别对 3 种规格上弦杆叠梁门上下弦杆、面板、连接板、竖杆、斜杆应力和主梁挠度结果进行统计，结果见表 4。

表 4 叠梁门计算结果

叠梁门规格	水头/m	应力/MPa					挠度/mm
		上弦杆	下弦杆	面板	连接板	竖杆、斜杆	
上弦杆 L200 mm×200 mm×14 mm	9.5	136.69	78.66	101.97	144.68	105.62	15.99
	9.7	139.75	80.39	104.08	147.88	107.95	16.34
	9.8	141.27	81.26	105.13	149.47	109.12	16.52
	9.9	142.80	82.13	106.18	151.07	110.28	16.70
上弦杆 L200 mm×200 mm×16 mm	10.5	131.47	81.85	97.78	147.47	118.37	16.51
	11.0	137.94	85.82	102.24	153.63	127.22	17.32
	11.3	141.90	88.26	104.99	159.02	130.83	17.82
	11.4	143.22	89.07	105.91	160.48	132.03	17.99
上弦杆 L200 mm×200 mm×18 mm	10.5	117.68	88.61	111.04	160.46	117.16	15.49
	11.5	138.97	97.31	121.31	176.23	128.68	17.03
	11.7	141.50	99.07	123.38	179.41	131.01	17.34
	11.8	142.77	99.95	124.42	181.10	132.17	17.50
许用值		142.50	142.50	218.50	218.50	152.00	47.28

3 结论

- 1)各水头情况下，上弦杆应力值最接近许用值，上弦杆所用型钢规格是影响桁架式叠梁门极限载荷的关键因素；
- 2)在门重约束条件下，该规格桁架式叠梁门的极限水头约为 11.7 m；
- 3)影响桁架式叠梁门极限水头的关键结构为上弦杆，通过增大上弦杆规格可显著提高叠梁门极限水头；在门重 26 t 约束条件下，桁架式叠梁门推荐水头范围为 0~11.7 m。

参考文献：

[1] 陶书东,张珊,李树海.基于模块化理念的船闸金属结构设计[J].水运工程,2011(9):189-192.

[2] 曾攀.基于 ANSYS 平台有限元分析手册:结构的建模与分析[M].北京:机械工业出版社 2010.

[3] 罗少桢,韩巍巍,赵凯,等.界牌枢纽船闸改建工程初步设计报告[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2018.

[4] 四川省交通厅内河勘察规划设计院.船闸闸阀门设计规范:JTJ 308—2003[S].北京:人民交通出版社,2003.

(本文编辑 郭雪珍)