

基于流固耦合的立轴旋转钢闸门的应力应变分析

袁 尧¹, 李忠斌², 许旭东¹, 沈强儒³, 杨 帆²

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 2. 扬州大学, 江苏 扬州 225127;
3. 南通大学, 江苏 南通 226019)

摘要:立轴旋转钢闸门广泛应用于中小型水利工程中,为明确立轴旋转钢闸门的工作受力特征,采用流固耦合方法对立轴旋转钢闸门不同工况时应力应变进行计算分析,获得不同工况下立轴旋转钢闸门的应力应变变化规律。结果表明:在立轴旋转钢闸门全闭时,相对集中应力区发生在下支撑处和联轴器端面,最大应力为 20.06 MPa,为材料允许应力的 8.7%,此时立轴旋转钢闸门中间区域变形最大,最大变形量为 0.076 mm;在立轴旋转钢闸门全开时,相对集中应力区发生在联轴器端面,最大应力为 11.4 MPa,为材料允许应力的 4.9%,立轴旋转钢闸门两侧变形较大,最大变形量为 0.0172 mm。

关键词:立轴旋转钢闸门;流固耦合;应力;应变;数值模拟

中图分类号:TV663 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2021)07-0005-05

Stress – strain analysis of vertical axis rotary steel gate based on fluid – solid coupling

YUAN Yao¹, LI Zhongbin², XU Xudong¹, SHEN Qiangru³, YANG Fan²

(1. Jiangsu Institute of Water Resources and Hydropower Research, Nanjing 210017, China;
2. Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;
3. Nantong University, Nantong 226109, China)

Abstract: Vertical axis rotary steel gate is widely used in small and medium – sized hydraulic engineering. In order to clarify the working force characteristics of vertical axis rotary steel gate, fluid – solid coupling method was used to calculate and analyze the stress and strain of vertical axis rotary steel gate under different working conditions, and the stress – strain variation rule of vertical axis rotary steel gate under different working conditions was obtained. The results showed that when the vertical axis rotary steel gate was fully closed, the relative concentrated stress zone occurred at the lower support and the end face of the coupling, and the maximum stress was 20.06 MPa, which was 8.7% of the allowable stress of the material. At this time, the deformation of the middle area of the vertical axis rotary steel gate was the maximum, and the maximum deformation was 0.076 mm. When the vertical axis rotary steel gate was fully open, the relative concentrated stress zone occurred at the end face of the coupling, with the maxi-

收稿日期:2020-11-03

基金项目:江苏省高校自然科学研究重大项目(20KJA570001)、江苏省水利科技项目(2020029)、扬州市校科技合作资金项目(YZU201901)、江苏省创新能力建设计划项目(BM2018028)

作者简介:袁尧(1985—),男,高级工程师,博士,主要从事泵站性能安全检测及评估分析工作。E-mail:yyuan@126.com

作者简介:杨帆(1985—),男,副教授,硕士生导师,主要从事泵站工程的科研、教学及工程实践工作。E-mail:fanyang@yzu.edu.cn

imum stress of 11.4 MPa, which was 4.9% of the allowable stress of the material. The deformation on both sides of the vertical axis rotary steel gate was large, with the maximum deformation of 0.0172 mm.

Key words: vertical axis rotary steel gate; fluid – solid coupling; stress; strain; numerical simulation

立轴旋转钢闸门起开启和关闭孔口,调节上下游水位和流量的作用。立轴旋转钢闸门多用于中小型排水、防汛、灌溉等水利水电工程中,相较于传统钢闸门有着独特的优势,具有造价比较低、无上部土建设施、安装非常方便、后期检修维护便利等特点。立轴旋转钢闸门的闸板对称于轴心,所以开关时无需担心水的阻力,通过开展立轴旋转钢闸门各工况下的应力应变的数值及分布影响的计算分析,可进一步减小立轴旋转钢闸门的材料用量,节省工程投资。万宇飞等^[1]基于 ANSYS Workbench 平台的 Fluent 流体分析模块及 Static Structural 固体结构分析模块,针对露顶式平面钢闸门自由出流水动力特性及闸门动态响应进行研究。陈扬^[2]通过理论分析与有限元数值模拟的方法,对比分析闸门不同开度下的振动特性。黄勇等^[3]研究了闸下淹没出流、考虑水体与弧门耦合作用时,弧形闸门的开度对流场的瞬态流速、近壁水体动压力的变化规律。本文采用单向流固耦合方法,计算和分析了不同工况时立轴旋转钢闸门的应力应变特征,可为立轴旋转钢闸门的实际运用提供参考。

1 流场计算模型

1.1 固体模型和网格划分

立轴旋转钢闸门的长宽比为 1:1,厚度是宽度的 1/10。利用三维建模软件对立轴旋转钢闸门进行三维建模,立轴旋转钢闸门的三维模型如图 1,对立轴旋转钢闸门的固体计算对象进行非结构化网格划分,立轴旋转钢闸门的网格单元数为 66 468 个,立轴旋转钢闸门的结构网格如图 2。

1.2 流体域和网格划分

利用三维建模软件对流体域进行三维造型,流场三维模型如图 3(a),采用混合网格划分的方式对流场进行网格划分,网格单元数为 3 714 349 个,流场的网格划分结果如图 3(b),立轴旋转钢闸门的壁面处边界层网格如图 3(c)^[4-10]。

1.3 边界条件

对立轴旋转钢闸门的流场进行三维定常的流场数值模拟,选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭流动控制方程。考虑到渠道内流动的实际情况,流场上自

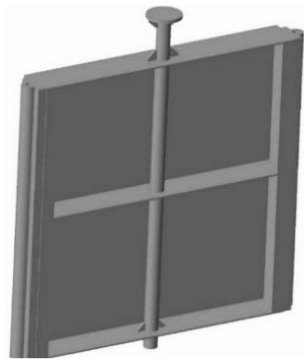
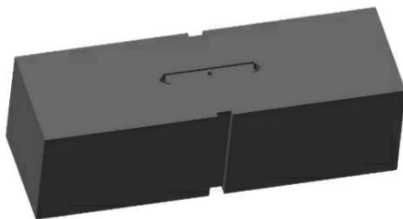


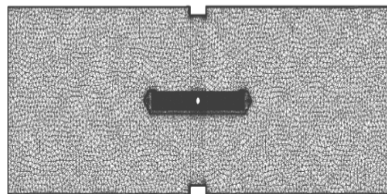
图 1 立轴旋转钢闸门三维模型



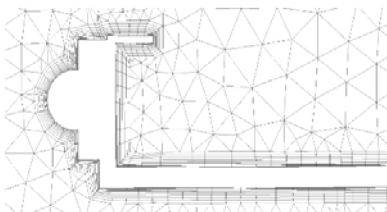
图 2 立轴旋转钢闸门的结构网格



(a) 流场计算模型



(b) 流场模型整体网格



(c) 流场模型的边界层网格

图 3 立轴旋转钢闸门流场计算模型及网格
由液面设置为对称边界条件;进水断面设置为进口

边界条件, 给定入口流量为 660 L/s; 出水断面设置为自由出流边界条件, 设置相对压力为 1 atm; 其余面都设置为壁面条件, 收敛残差设置为 10^{-4} 。

钢闸门材料 Q235 钢, 其材料参数为: 弹性模量 $E=206\text{ GPa}$, 泊松比 $\mu=0.25$, 密度 $\rho=7\,850\text{ kg/m}^3$ 。立轴旋转钢闸门固体边界条件分为载荷和约束, 其中载荷有自身重力带来重力加速度引起的惯性荷载、流体的压力作用于闸门结构的流固耦合面上产生的结构荷载^[11-13]; 约束包括下支承座 (只约束径向和切向, 允许轴向上的移动) 与联轴器端面 (约束该面上的所有移动)。

根据工程实际运行情况, 选取 3 种工况对立轴旋转钢闸门进行流固耦合数值模拟, 工况参数如表 1 所示。

表 1 各个模拟工况参数

工况	闸门状态	上游水位/ m	下游水位/ m	流量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	全闭	1.0	0	
2	全闭	1.0	0.6	
3	全开			660

2 计算结果与分析

2.1 立轴旋转钢闸门的应力分布

不同工况时立轴旋转钢闸门的应力云图如图 4 所示。3 个工况时立轴旋转钢闸门表面应力分布相对均匀, 相对集中应力发生在下支撑处和联轴器端面附近, 最大应力均发生在联轴器端面; 工况 1 时, 立轴旋转钢闸门的最大应力为 20.06 MPa, 工况 2 时, 立轴旋转钢闸门的最大应力为 16.6 MPa, 工况 3 时, 立轴旋转钢闸门的最大应力为 11.4 MPa。工况 2 时, 立轴旋转钢闸门上下游均有水, 立轴旋转钢闸门的两面承受的静水压力互相抵消了部分, 则应力比工况 1 时小; 工况 3 为立轴旋转钢闸门全开时, 立轴旋转钢闸门表面主要受到水流荷载冲击, 因此应力比工况 2 时小, 工况 1 为应力分布最不利的工况。

2.2 立轴旋转钢闸门的应变分布

图 5 为不同工况时立轴旋转钢闸门的应变云图。工况 1 和工况 2 时, 立轴旋转钢闸门处于关闭状态, 应变分布规律一致, 静水压力对闸门的影响为主要因素, 立轴旋转钢闸门的最大变形发生在闸

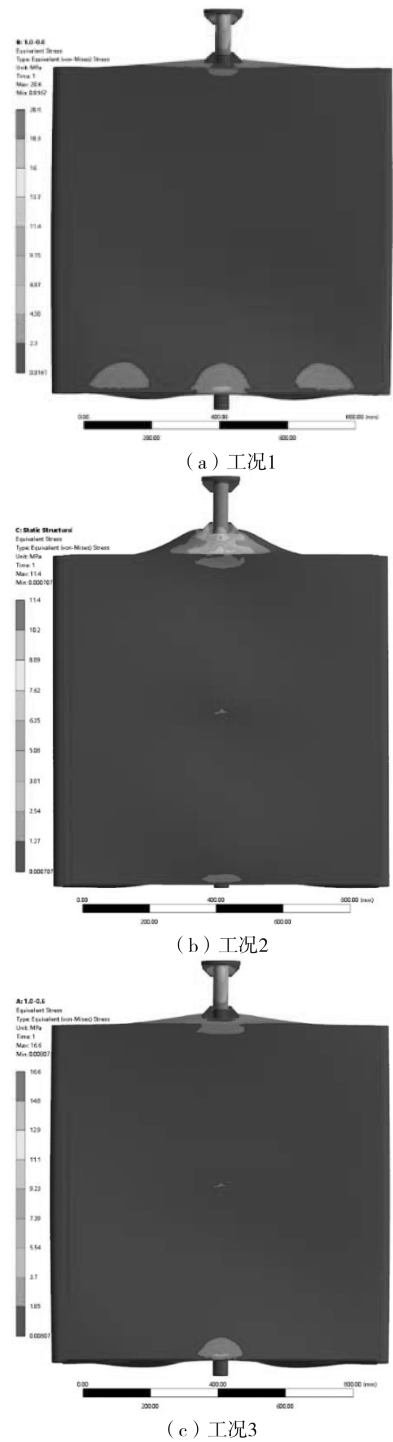


图 4 不同工况下立轴旋转钢闸门的应力云图

门中间位置, 变形量由中间向四周逐渐减小。立轴旋转钢闸门在工况 1 时, 最大变形量为 0.076 mm, 在工况 2 时最大变形量为 0.0549 mm; 在工况 3 时, 立轴旋转钢闸门的自重和水流动的冲击荷载占主要影响, 立轴旋转钢闸门的最大变形发生在闸门的两侧, 最大变形量为 0.0172 mm。工况 1 为立轴旋转钢闸门运行时应变分布最不利的工况。

图 6 为不同工况时立轴旋转钢闸门的最大应

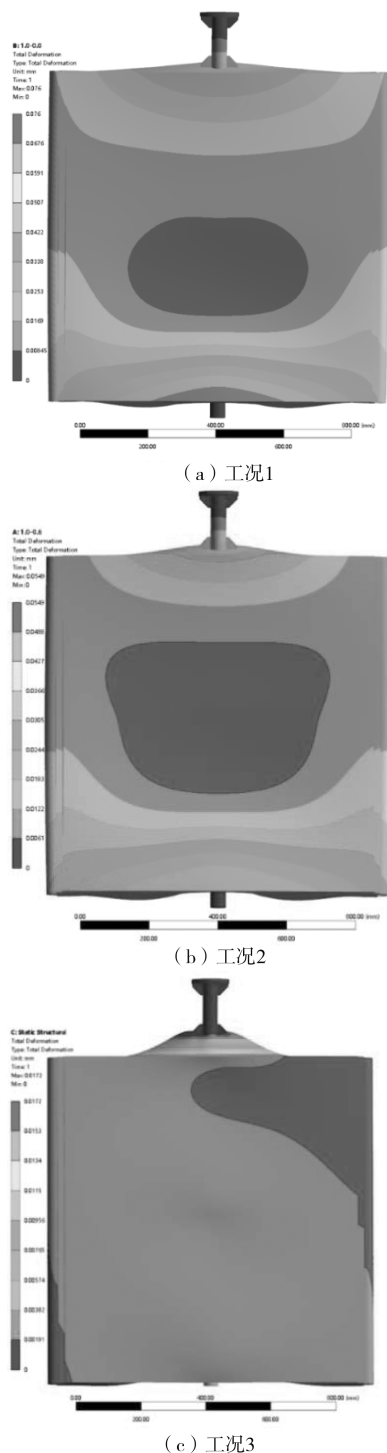


图 5 不同工况下立轴旋转钢闸门的应变云图

力和最大应变曲线,工况 1 时立轴旋转钢闸门产生了较大的应力集中与应变,最大应力值为工况 3 时立轴旋转钢闸门最大应力值的 1.75 倍,且工况 1 时最大变形量为工况 3 时立轴旋转钢闸门的 4.4 倍。各工况时较大的应力集中区均发生在立轴旋转钢闸门的下支撑处和联轴器端面,最大应力值均小于材料的屈服强度,从节省工程投资的角度,可选用强度略低的材质。

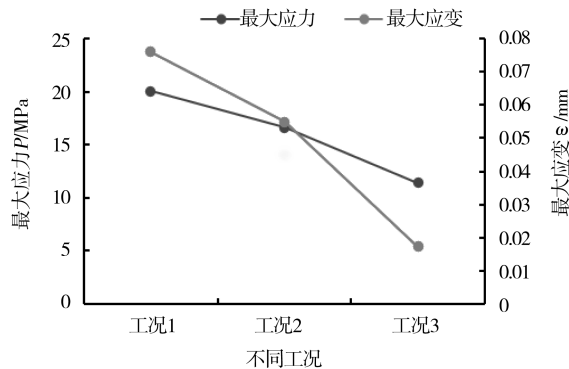


图 6 各工况时立轴旋转钢闸门的应力应变变化曲线

3 结 论

(1)在各计算工况下,立轴旋转钢闸门表面应力分布相对均匀,应力集中在闸门下支撑处和联轴器端面;在上游水深 1.0 m,下游无水时,相对集中应力最大。

(2)在立轴旋转钢闸门关闭时,最大变形发生在立轴旋转钢闸门中间区域,且从立轴旋转钢闸门中间区域向闸门边缘处变形量逐渐减小;在立轴旋转钢闸门开启时,立轴旋转钢闸门两侧受到水流的冲击而产生最大变形。

(3)通过对立轴旋转钢闸门的多工况流固耦合分析,不同工况时立轴旋转钢闸门的变形量、应力值的分布情况均不同,但相对较小,立轴旋转钢闸门的最大等效应力都低于材料的屈服强度,立轴旋转钢闸门结构设计满足强度要求,在满足规范和强度要求的条件下,可选用强度更低的材料,以节省闸门造价。

参考文献:

- [1] 万宇飞,杨光明,郭军良. 平面钢闸门自由出流流固耦合数值模拟[J]. 人民黄河, 2020, 42(4):112-115, 134.
- [2] 陈扬. 平面钢闸门流固耦合振动特性及稳定性研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2019.
- [3] 赵勇,郑圣义,蔡卫江,等. 基于流固耦合的闸下淹没出流流场瞬态分析[J]. 水力发电, 2019, 45(5): 86-90, 117.
- [4] 屈磊飞. 闸站枢纽进水流动计算与研究[D]. 扬州:扬州大学, 2006.
- [5] 李明. 弧形闸门动力特性及流激振动数值模拟[D]. 长沙:长沙理工大学, 2013.
- [6] 王旭声. 不同开度时弧形闸门流固耦合数值模拟[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2018.

- [7] HU Youan, WANG Meng, WANG Miaomiao, et al. Hydraulic calculation and dynamic analysis of columnar reversing gate[J]. Water Science and Engineering, 2011, 4(3):294-304.
- [8] 王福军. 流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2):1-14.
- [9] 李昊, 张园, 文恒. 水力自动滚筒闸门振动特性的数值模拟及试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(11):1360-1370.
- [10] SINGH D K, PAL P, DUGGAL S K. Dynamic pressure on lock gate structure coupled with fluid[J]. Vibroengineering Procedia, 2019(29):165-170.
- [11] 王嘉宝. 考虑流激振动的水工弧形钢闸门数值模型研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2017.
- [12] ZHOU Minzhe, LI Tongchun, DING Yuan, et al. Fluid-structure interaction analysis of layered water intake structure considering load changes[J]. Advances Materials Research, 2015, 3696:569-574.
- [13] 关淑萍. 基于 ANSYS 的水闸动力特性及内力分析方法研究[D]. 南京:河海大学, 2006.

(上接第4页)

的问题,从征地范围、开挖及弃土量等方面分析研究减少征地措施;依据弃土综合利用必须坚持的原则,经综合分析研究出4种弃土优化利用的可行途径:土地整治利用、基础设施建设利用、生态环境建设利用以及乡村振兴村庄整治利用。研究成果对解决工程弃土难题具有重大指导作用,对保障入海水道二期工程建设和运行,保障移民安置和谐实施,以及促进地方社会经济、环境协调发展具有重大意义。

参考文献:

- [1] 赵海蛟. 线型水利工程建设征地实施阶段移民问题探讨[J]. 水利规划与设计, 2015(11):120-122.
- [2] 姜言亮, 张超, 王俊杰. 南水北调东线一期两湖段工程弃土区设计[J]. 山东水利, 2011(9):19-20.
- [3] 郭蕊. 工程弃土综合利用政策及技术浅析[J]. 河南建材, 2017(4):184-185.
- [4] 王岳明. 深圳市盐田区政府投资项目弃土资源化利用研究报告[J]. 科技经济导刊, 2018, 26(19):130.
- [5] 李维东, 王建宝. 浅谈南水北调工程中弃土场的选择[J]. 河南水利与南水北调, 2008(6):3-4.
- [6] 洪月菊, 杜遂. 城市弃土资源化途径探索及管理实践——以武汉市为例[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(3):85-88.