

一体化闸门泵结构设计优化及抗振效果分析

张晓芳,余代广,刘红坤,陈 照

(南京市水利规划设计院股份有限公司,江苏 南京 212000)

摘要:为解决内河排水动力不足、建设用地困难等问题,结构紧凑、占地面积小的一体化闸门泵受到广泛关注,其中较大口径的一体化泵闸在国内应用时间较短、实例较少。以盐河泵闸工程为背景,采用三维参数化计算模型,进行门叶厚度、板厚度等参数设计优化分析,以及穿墙管、腹板薄弱处的加固分析;同时针对闸门泵振动、防腐等关键问题进行了分析论证。研究得出,门叶厚度不宜增加过大,应同时对区隔较大的面板、腹板结构进行适当加固,以控制共振频域;当闸门宽高比小于0.6且泵外径与闸门宽之比接近0.5时,宜采用12~16 mm范围内的板厚组合;穿墙管加固应横、纵、斜肋同时考虑;通过动态模拟分析,盐河泵闸设计能够避免一体化泵闸发生共振,且有一定的安全余量。

关键词:一体化闸门泵;优化设计;穿墙管;抗振效果;防腐

中图分类号:TV675

文献标识码:A

DOI:10.12396/znsd.222296

张晓芳,余代广,刘红坤,等.一体化闸门泵结构设计优化及抗振效果分析[J].中国农村水利水电,2023(10):161-165+180. DOI:10.12396/znsd.222296.

ZHANG X F, YU D G, LIU H K, et al. Structural design optimization and anti-vibration effect analysis of integrated gate pump[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(10):161-165+180. DOI:10.12396/znsd.222296.

Structural Design Optimization and Anti-vibration Effect Analysis of Integrated Gate Pump

ZHANG Xiao-fang, YU Dai-guang, LIU Hong-kun, CHEN Zhao

(Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 212000, Jiangsu Province, China)

Abstract: By solving the problems such as the shortage of drainage power in inland rivers and the difficulty of construction land, the integrated gate pump with compact structure and small floor area has received much attention. Among them, the integrated gate pump with larger diameter has a short application time and few examples in China. This paper takes the Salt River Pump Gate Project as the background, uses the three-dimensional parametric calculation model, carries on the design optimization analysis of the door blade thickness, the plate thickness and other parameters, and the reinforcement analysis of the weak parts of the wall pipe and web. At the same time, the key problems such as vibration and anticorrosion of the gate pump are analyzed and demonstrated. The results show that the thickness of the door blade should not increase too much, and the panel and web structure with large separation should be properly strengthened at the same time to control the resonance frequency domain. When the ratio of gate width to height is less than 0.6 and the ratio of the pump outer diameter to gate width is close to 0.5, the plate thickness combination in the range of 12~16 mm should be used. Transverse, longitudinal and diagonal ribs should be considered at the same time for wall pipe reinforcement. Through a dynamic simulation analysis, the design of Salt River Pump Gate can avoid the resonance of the integrated pump gate, and has a certain safety margin.

Key words: integrated gate pump; optimal design; wear wall tube; anti-vibration effect; corrosion protection

收稿日期:2022-11-11

接受日期:2023-02-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600704);水工结构服役安全与性能提升创新团队项目(Y417015)。

作者简介:张晓芳(1973-),男,高级工程师,主要从事水利工程设计、数值计算等方面研究。E-mail:1262219777@qq.com。

一体化泵闸是将泵站和水闸一体式布置的泵闸,由钢闸门、闸门泵、拍门和控制结构等组成。该类闸门泵可大大提高土地利用效率,缩短建设周期,同时具有安装维护简单、便于自动化运行管理等特点^[1,2]。一体化泵闸在欧洲使用已有20多年历史,最大一体化泵闸位于荷兰,单泵流量达到13.33 m³/s。在小口径一体化泵闸的应用研究中,有地区^[3]已总结提出一套当地的适用技术标准。但较大口径一体化泵闸在国内的应用实例及研究成果较少^[4]。目前研究成果多为闸门自激振动和测控方面。鉴于自激振动主要由水流脉动频率及水泵自身振频接近时产生。有学者^[5]进行了多个原型和模型试验,得出约93%的闸门水流脉动主频率在1~20 Hz范围内变化,超过20 Hz的极少。水泵自身振动主要是由机组转子的不平衡转动产生的振动和水流通过泵体引起的振动。有学者^[6]在圩区整治工程中应用一套小流量低水头的一体化泵闸系统,重点研究了闸门门叶高度及型式的优化选取。有学者^[7,8]针对引水工况,进行相关调度方案对闸门泵影响程度分析,提出水泵与水流耦合振频宜不大于30 Hz。为避免泵的振动频率与闸门振动频率接近导致的共振破坏,一体化闸门泵的设计优化是十分必要的。目前对于小口径的闸门泵设计中,有研究^[9,10]闸体门叶中心线偏差需控制在1.5 mm内,且对接焊缝加强高度不宜大于3 mm;也有改进叶轮结构,增加叶片至7片以减小转动噪声及振动^[11];有学者^[12]在门叶设计中提出其高度应为淹没深度、挡水超高、安装高度之和。鉴于大口径闸门泵应用尚少,在板厚及减振加固方面研究仍有不足。

本文基于盐河泵闸工程中较大口径一体化泵闸设计,进行三维参数化数值分析,提出从参数调整(门叶厚度、板结构厚度)和结构调整(穿墙管、板结构)两方面,进行设计参数敏感性分析。通过结构变形破坏位置、程度、类型等综合分析相应参数推荐取值范围,为结构设计优化提供依据。同时针对闸门泵振动、防腐等关键问题进行了分析论证。确保工程能够切实发挥应有的功能,保障工程顺利实施运行,为类似工程提供参考依据。

1 一体化泵闸设计及模型

1.1 盐河泵闸工程概况

盐仓盐河大塘配套加固工程拟在现有盐河主闸的基础上配套排涝泵站,项目区地处盐仓大河入海口处,盐河大塘中部,整体位于军区范围内。经防洪排涝计算分析,需在现有盐河主闸6孔×3 m、总净宽18 m规模的基础上配套27 m³/s的排涝能力,才能符合规划要求,即满足盐仓片区1年一遇最大1小时暴雨设计,并满足20年一遇24小时最大暴雨不受淹的标准。综合考虑用地及功能需求,工程拟选用一体化泵闸型式,实现在满足防洪规划要求的基础上,最大化利用原有基建以降低工程投资。考虑大直径闸门泵具有系统谐振不稳定、重量过大、底板过深而引起的易发生振动破坏、地基处理难度大、易淤积等不利因素。盐河泵闸拟采用小直径、多台数、嵌入式安装的整体布置方案。方案采用1 200 mm口径水泵配合适当厚度的钢闸门,利用原有桩基,可节省工期、施工难度相对较小。同时为

提高水泵数量与现有闸门宽度的适应度,解决结构受力不均衡、淤积等问题,推荐采用6孔×3.0 m闸门泵,闸门泵选型为1200QGLN-125,共安装6台水泵。额定转速为365 r/min,换算成强迫振动频率约为6 Hz。同时考虑水流脉动主频率一般不超过20 Hz,提出本次分析强迫振动频率范围约为1~20 Hz。

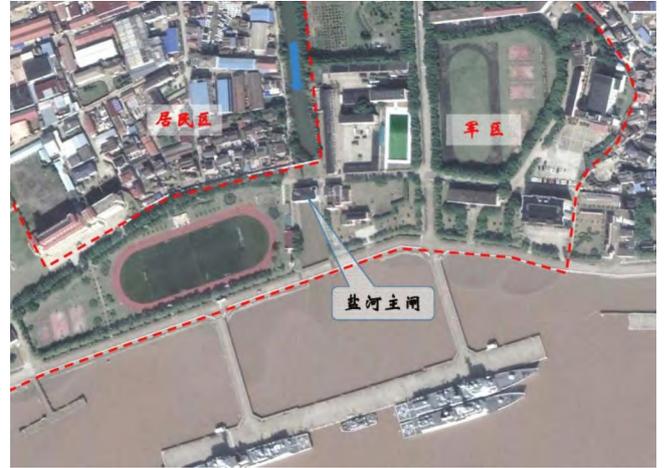


图1 盐河闸位置及周边环境示意图

Fig.1 Map of Salt River lock location and surrounding environment

1.2 计算模型

一体化泵闸闸门主要包括门叶结构、泵体、主滑块、反向滑块、侧向限位、侧滚轮、底部支撑、闸门止水。为便于计算和网格划分对闸门结构进行概化,模型构建不考虑锁定槽口、漏水孔、尺寸小于20 mm的倒角、倒圆角,螺栓孔等特征,采用inventor对一体化泵闸进行参数化建模,并导入Midas进行网络划分。其中门体结构、泵体结构、泵支撑结构、边梁腹板加强结构拆分为独立模型导入,各结构单元之间采用接触模式连接。主滑块、底部支撑采用质地较硬的FGB材料,可视为刚体,主滑块采用顺水流方向位移约束,底部支撑采用重力方向位移约束;侧止水采用SF6574材料及反向止水采用聚四氟乙烯材料均为弹性质地,可视为弹性约束;闸门为固定约束。模型网格共划分为约19.8万个单元体和39.5万个节点。对于一体化泵闸的数值模拟计算,边界条件主要施加叶轮传导到闸门上的力及上下游水位对闸门的正应力。相关门体及泵体材料参数详见表1,法向及切向刚度比例因子默认值均为1,主段延伸率取默认值0.005。一体化泵闸三维模型网格剖分详见图2。

表1 一体化泵闸模型材料参数列表

Tab.1 Material parameter list of integrated pump brake model

部位	弹性模量/ (N·m ⁻²)	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	抗拉强度/ MPa
门体	0.207	7 850	0.288	255
泵体	0.206	1 010	0.300	/

2 设计参数敏感性分析

2.1 门叶厚度影响分析

在门厚对一体化泵闸的影响分析中,分析范围为350~800 mm,以50 mm为递增尺寸。根据前10阶模态频率(图3)及相应模态特征,1~3阶时主要为穿墙管位置振动,门厚的变化对其影

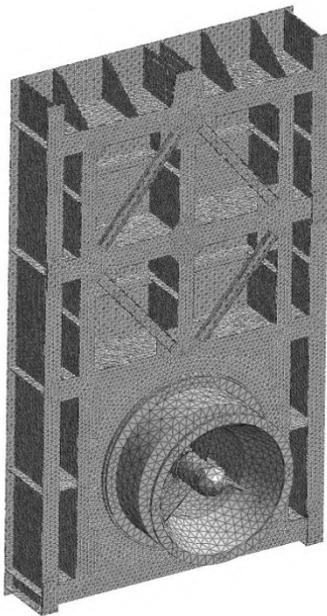


图2 一体化泵闸模型网格划分示意图

Fig.2 Grid partition diagram of integrated pump gate model

响较小;4阶时闸门振型主要为上部整体弯曲,振频随门厚增加而增加,振幅随门厚增加而减小。5阶时闸门振型主要为门顶两端翘曲,翘曲程度随门厚增加而减小,当门厚大于750 mm时振型趋于平稳。6~10阶闸门振型主要为板结构振动,振频随门厚增加而减小。故建议设计中适当增加门叶厚度以提高闸门整体刚度,同时对区隔较大的面板、腹板结构进行适当加固,以控制共振频域。

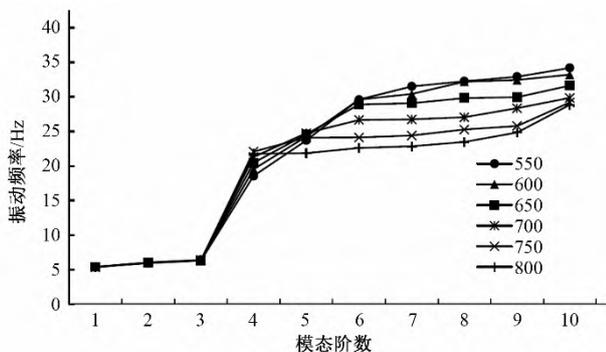


图3 不同门厚规格对应振动频率与模态变化规律曲线图

Fig.3 Curve of vibration frequency and modal variation law corresponding to different door thickness specifications

2.2 板结构厚度影响分析

闸门设计中门叶板件厚度直接影响闸门的门重、结构强度及抗振能力。鉴于平面钢闸门多为焊接结构,设计过程中为便于生产加工,板件型号规格多为两种尺寸的组合。其中面板、腹板板厚一般较薄,翼缘一般较厚,常用板厚设计范围为10~24 mm。例如10 mm的面板及腹板,通常搭配12 mm翼缘板,记作板厚T10-12。在板厚对闸门振动的影响分析中,选取T10-12, T12-14, T14-16, T16-18, T18-20, T20-22, T22-24七种不同的板厚组合。根据振动频率曲线分析,板厚对于6~10阶的高阶振频影响较大,对于1~5阶的低阶振频影响可忽略。可见,高阶

振频对应的振型影响以面板、腹板为主,鉴于闸门自身振动安全频域为1~20 Hz,仅有T10-12共振频率小于20 Hz,不满足闸门自身振动安全频域要求,其他组合均满足要求。且考虑经济性及加工要求,板件厚度不宜过厚。故可得当闸门宽高比小于0.6且泵外径与闸门宽之比接近0.5时,建议采用T12-14或T14-16板厚组合。

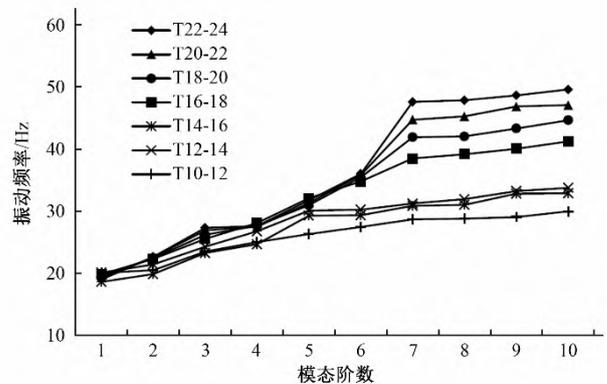


图4 不同板厚组合对应振动频率与模态变化规律曲线图

Fig.4 Curve of vibration frequency and modal change law corresponding to different plate thickness combinations

2.3 穿墙管加固分析

较常规平面钢闸门,一体化闸门泵是在其基础上增设穿墙管,而穿墙管与闸门连接处的设计直接影响闸门的整体稳定及其抗振能力。本次进行横肋、纵肋、斜肋及背板的七种组合方案(图5)的穿墙管稳定效果分析。由图6可知,方案一对应的1~3阶时穿墙管与面板连接区域发生振动,导致周边面板发生局部变形,4阶时闸门出现上部竖向弯曲振型[图7(a)],可见4阶为该方案振型变化的转折点。方案二及方案三的转折点为3阶,方案四及方案六的转折点为1阶,方案五及方案七的转折点为2阶。综合分析,单独的纵、横肋加固可以提高穿墙管与面板连接区域的刚度,但存在将穿墙管周边面板局部变形发展为闸门上部扭曲变形[图7(b)]的可能。横+纵组合及背板加固方案可以减少上述局部变形,但仍有发展为闸门整体双向弯曲[图7(c)]及翼缘波型弯曲的可能。故横+纵+斜肋的方案加固效果最为显著,斜肋方案其次。

2.4 腹板结构加固分析

2.4.1 边梁腹板结构加固

若穿墙管所在区格较大,需同时对边梁腹板进行加固。选取边梁与纵梁间的无肋板、单肋板、双肋板3种设计方案进行分析。由图8和表2可见,无肋板方案边梁腹板共振现象多出现在5~6~7阶,单肋板及双肋板方案均可提高边梁刚度,降低振幅最大约70.8%。综合考虑简化结构加工工艺及降低材料成本,建议一体化泵闸边梁腹板采用单肋板加固方案较好。

2.4.2 主梁腹板结构加固

主梁部分的加固,选取单侧角加劲肋、单侧通长肋、双侧角加劲肋、双侧通长肋四种设计方案(图9)进行分析。由表3可知:主梁腹板振动变形通常发生在10~11阶;单侧角肋和双侧角肋加强方案对降低振幅作用较小;单侧通长肋与双侧通长肋方案均可有效提高主梁腹板刚度,加固效果较为接近。综合考虑

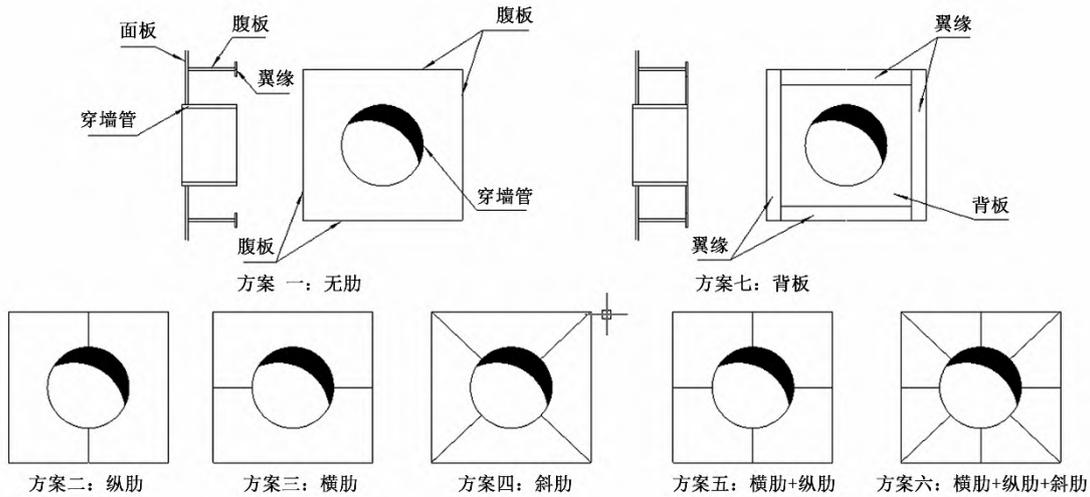


图5 穿墙管加固方案示意图

Fig.5 Schematic diagram of the wall pipe reinforcement scheme

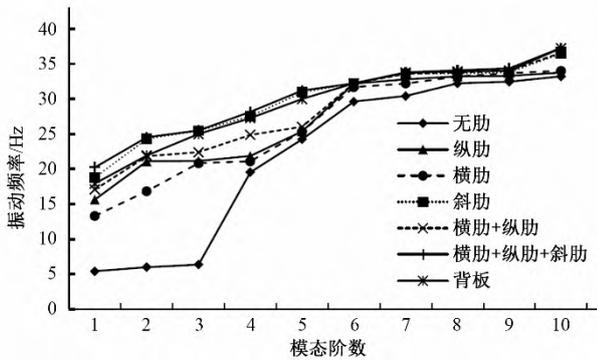


图6 不同穿墙管加固方案对应振动频率与模态变化规律曲线图

Fig.6 Curve of vibration frequency and modal change law corresponding to different wall pipe reinforcement schemes

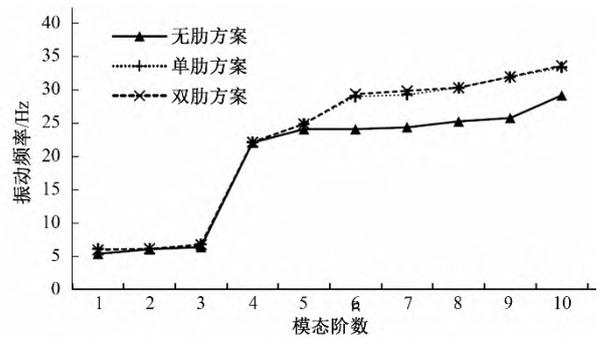


图8 不同边梁腹板加固方案对应振动频率与模态变化规律曲线图

Fig.8 Curve of vibration frequency and modal variation law corresponding to different side beam web reinforcement schemes

表2 不同边梁腹板加固方案产生共振时对应最大振幅列表

Tab.2 List of the maximum amplitudes corresponding to the resonance generated by different side beam web reinforcement schemes

方案	最大振幅/mm		
	5阶模态	6阶模态	7阶模态
无肋	0.823	1.745	0.691
单肋	0.686	0.510	0.153
双肋	0.067	0.145	0.245

水泵运行扬程变幅较大。在水泵运行时段内流量不是固定的，流量变化范围多为1~10 m³/s。根据《水利水电工程钢闸门设计规范》和《水电站厂房设计规范》，关于钢闸门和动力支承结构的共振验算要求如下：自振频率与强迫振动频率及机组转频之差均应大于20%。根据动态模拟分析计算结果(表4)，各种条件下自振频率与强迫振动频率之差和自振频率之比均大于20%，尤其是运行过程中较常发生的振频前三阶，均超规范要求约3~8倍。故认为动态模拟分析验算结果能够避免一体化泵闸发生共振，且有一定的安全余量。

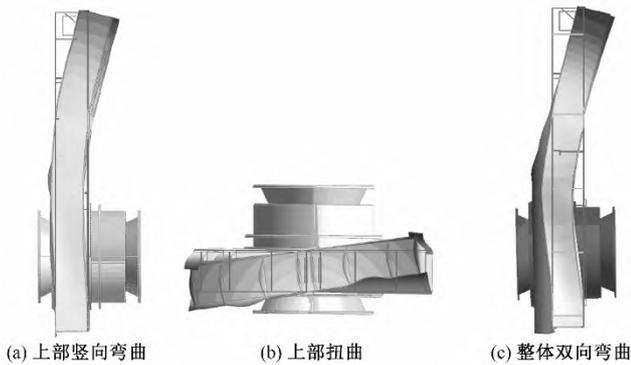


图7 带有穿墙管的闸门振型发展示意图

Fig.7 Schematic diagram of vibration pattern development of gate with wall pipe

结构受力均衡及美观,故建议一体化泵闸主梁腹板采用对称型式的双侧通长肋板加固较好。

3 一体化泵闸抗振效果分析

泵站进口侧盐仓大河为平原河道,水位随流域内降雨量变化而变化,泵站出口侧为东海,属于非正规半日浅海潮,因此水泵扬程随外海潮位涨落和内河水位的变化较为频繁,排涝期间

4 一体化泵闸防腐性能分析

对于水质较差或腐蚀性较强的海水等环境,区别于一般闸门,一体化闸门泵的防腐要求需更高。为保证主泵的使用寿命

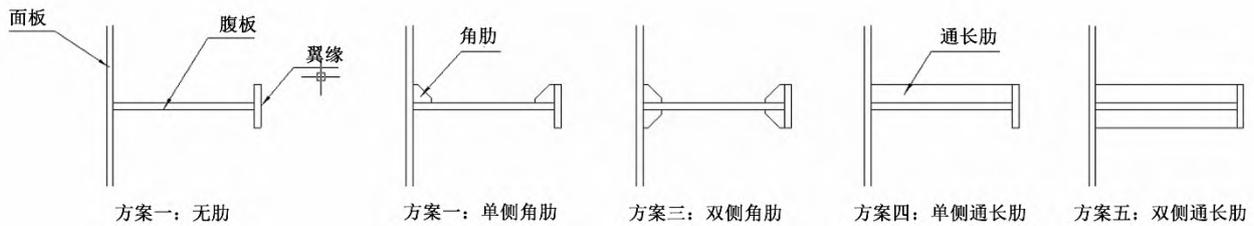


图9 主梁腹板加固方案示意图

Fig.9 Schematic diagram of main girder web reinforcement scheme

表3 不同主梁腹板加固方案产生共振时对应最大振幅列表

Tab.3 List of the maximum amplitudes corresponding to the resonance generated by different main beam web reinforcement schemes

方案	最大振幅/mm	
	10阶模态	11阶模态
无肋	0.471	0.999
单侧角肋	0.431	1.014
双侧角肋	0.401	0.983
单侧通长肋	0.132	0.165
双侧通长肋	0.128	0.165

表4 一体化泵闸特征频率模态成果对比表

Tab.4 Comparison table of characteristic frequency modal results of integrated pump gate

特征频率模态	振型频率/Hz					
	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
闸门泵自振频率	4.31	13.99	16.63	62.91	122.12	137.38
闸门泵运行时(固液耦合)——强迫振动频率	11.65	24.38	43.2	90.98	95.17	103.58
绝对误差	7.34	10.39	26.57	28.07	26.95	30.80
相对误差/%	170.3	74.3	159.8	44.6	22.1	24.6

表面喷漆防腐及产品总装完成后外表面装饰漆层的喷涂防护处理工艺,按SL105-2007、《SIPZC 涂敷工艺守则》和《全贯流潜水泵及安装系统表面涂敷工艺守则》进行处理。

4.2 钢闸门及埋件防腐措施

闸门泵配套安装露顶滑动平面直立式钢闸门,闸门主材Q345B,主滑块及侧滚轮为工程塑料合金,反向滑块为四氟乙烯,其他支承块、水封橡皮材质均为SF6574,螺栓连接件均为2205不锈钢。门叶前、后面板处与水泵连接的焊接法兰面、滑块安装面要求机械精加工;所有螺栓孔均要求配钻。水泵闸门埋件全部要求二期方式预埋。闸门外露非不锈钢表面防腐采用喷锌铝合金+涂料封闭方式,表面处理到Sa2.5级别,热喷锌铝合金2层,总厚度200 μm;再喷涂油漆层,底漆为环氧富锌漆,厚60 μm;中间漆为环氧云铁,厚80 μm;面漆采用改性耐磨环氧涂料,厚100 μm;涂层厚度均指干膜厚度。

5 结语

(1)通过三维模型计算分析与真机试验,对于较大口径的一体化闸门泵结构进行了振频与振型的系统研究,发现门叶结构厚度(梁高)对闸门整体刚度影响较大,是初步设计中主要确定的参数之一。一体化泵闸由于其闸门开孔的特殊形式,门厚的确定一般在同规格普通平板闸门的基础上适当加厚。门叶板件厚度建议取值范围为12~16 mm。

命,经真机防腐试验,不同位置的构件所采用的较为有效的措施总结如下。

4.1 主泵防腐蚀措施

水泵叶片、导叶片、安装螺栓和螺母等采用双相不锈钢2205,整铸、数控加工,并做无损探伤试验;水泵外壳和内腔体采用CCSA船用钢。水泵设备安装件和管路连接件均采用2205双相不锈钢。主泵电机采用真空浸漆冲片压装工艺防腐。冲片之间,在压装以后,用真空抽气把冲片之间的微小间隙之间的空气抽出,然后用压力将防锈漆注入,充满冲片间的所有间隙,达到硅钢片层间的有效防腐。金属零部件加工完成后配合

(2)穿墙管与闸门连接处的设计,是提升一体化闸门泵抗振性能的关键。对于穿墙管周边区格板范围内采用对称的米字型肋条加固效果最佳。主梁及边梁腹板以通长肋加固效果最佳。经动态模拟分析,在3.0 m宽闸门上开2.0 m洞,该口径闸门泵在穿墙管周边区格及腹板优化加固后,能够避免泵闸共振。

(3)一体化闸门泵占地小、施工简易等特点明显,且易实现智能化、信息化管理,建议在大中型泵闸工程中推广应用及研究。总结提炼出成体系的主要设计参数和指标,形成系统的标准规范,为后续应用推广提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 徐振东,杜丽惠,才君眉.平面闸门流固耦合自振特性研究[J].水力发电,2001(4):39-43+67.
XU Z D, DU L H, CAI J M. Study on natural vibration characteristics of fluid-structure coupling of plane gate [J]. Hydroelectric Power, 2001(4): 39-43+67.
[2] 姚磊.浅谈智能一体化闸门在大型灌区中的应用[J].农业开发与装备,2022(7):114-115.
YAO L. Application of intelligent integrated gate in large-scale irrigation area [J]. Agricultural Development and Equipment, 2022(7): 114-115.

(下转第180页)

- 94+100.
- [16] 常鹏程,杨帆,孙丹丹,等.多机组泵站侧向进水前池流态及整流措施分析[J].中国农村水利水电,2021(12):229-234.
CHANG P C, YANG F, SUN D D, et al. An analysis of flow pattern and rectification measures of lateral inflow forebay of multi-unit pumping station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021 (12):229-234.
- [17] 高传昌,李晓超,董旭敏,等.簸箕形进水流道喉部高度对水力性能的影响[J].中国农村水利水电,2022(6):222-226+232.
GAO C C, LI X C, DONG X M, et al. The influence of height of throat section of dustpan-shaped inlet conduit on hydraulic performance [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022 (6) : 222-226+232.
- [18] 李颜雁,郭鹏程,孙龙刚,等.立柱对大型泵站前池和进水池流态影响的数值分析[J].排灌机械工程学报,2021,39(9):929-936.
LI Y Y, GUO P C, SUN L G, et al. Numerical analysis on influence of vertical column on flow pattern in forebay and intake of large pumping station [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2021,39(9):929-936.
- [19] 周曼,周春峰,周艳霞,等.圆形立柱对侧向进水泵站前池流态的影响及其整流机理[J].扬州大学学报(自然科学版),2020,23(1):73-78.
ZHOU M, ZHOU C F, ZHOU Y X, et al. Influence of circular columns on flow pattern in side-intake forebay of pumping station and rectification mechanism [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2020,23(1):73-78.
- [20] 资丹,王本宏,王福军,等.开机组合对泵站进水系统泥沙浓度分布的影响[J].农业工程学报,2022,38(7):59-68.
ZI D, WANG B H, WANG F J, et al. Influence of start-up pump units on the sediment concentration for the intake system of a pumping station [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022,38(7):59-68.
- (上接第165页)
- [3] 武慧芳,陆立国,鲍子云,等.宁夏测控一体化闸门应用技术标准研究[J].人民黄河,2022,44(1):116-119+123.
WU H F, LU L G, BAO Z Y, et al. Research on application technical standard of integrated gate of Measurement and control in Ningxia [J]. Yellow River, 2022,44(1):116-119+123.
- [4] 戴林军,郝晓伟,陈胜.一体化泵闸技术在杭嘉湖圩区中的应用研究[J].浙江水利科技,2022,50(4):94-96+102.
- [5] 钟兴,夏雪莲.双向一体化闸门泵的设计与应用[J].陕西水利,2022(1):152-155.
ZHONG X, XIA X L. Design and application of bidirectional integrated gate pump [J]. Shaanxi Water Resources, 2022(1):152-155.
- [6] 陈伟.一体化泵闸水力优化数值模拟研究[D].江苏扬州:扬州大学,2021.
CHEN W. Numerical simulation study on hydraulic optimization of integrated pump gate [D]. Jiangsu Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [7] 李明玉.一体化泵闸的设计及技术要点分析[J].机电信息,2020(29):126-127.
- LI M Y. Design and technical key analysis of integrated pump gate [J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(29):126-127.
- [8] 侍贤瑞,严根华,董家,等.立式一体化泵闸安全性研究及结构优化[J].振动·测试与诊断,2021,41(1):176-181+207.
SHI X R, YAN G H, DONG J, et al. Safety research and structure optimization of vertical integrated pump gate [J]. Vibration. Journal of Test & Diagnosis, 2021,41(1):176-181+207.
- [9] 宋建大.一体化泵闸在福州内河水系治理中的应用[J].福建建筑,2018(7):140-142.
- [10] 温汉昌.模型试验对水利工程泵闸结构的影响与改进优化[J].内蒙古水利,2021(10):41-42.
- [11] 付本国,张颖军.船舶消防疏水一体化泵组设计及试验研究[J].机电工程技术,2020,49(12):111-113+137.
FU B G, ZANG Y J. Design and experimental study of integrated pump group for marine fire protection [J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2020,49(12):111-113+137.
- [12] 陆宇杰.城市泵闸建设管理与河道水环境改善分析[J].工程建设与设计,2021(22):89-91.
- (上接第173页)
- [4] ZHANG J, ZHUB Y, ZHANG X, et al. Developing a long short-term memory (LSTM) based model for predicting water table depth in agricultural areas [J]. Journal of Hydrology, 2018,561:918-929.
- [5] 张勇,郭纯青,朱彦光,等.云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析[J].环境科学,2019,40(6):2686-2695.
- [6] XIA J, ZHAO X, CHEN Y, et al. Responses of water and salt parameters to groundwater levels for soil columns planted with tamarix chinensis [J]. Plos One, 2016,11(1):e0145828.
- [7] ALEXANDER VANDENBOHEDE PAULINE N. Mollema Nicolas Greggio Marco Antonellini. Seasonal dynamic of a shallow freshwater lens due to irrigation in the coastal plain of Ravenna, Italy [J]. Hydrogeology Journal. 2014(22):893-909.
- [8] 史文娟,沈冰,汪志荣,等.蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究[J].农业工程学报,2005,21(9):23-26.
- [9] 李亮,史海滨,贾锦凤,等.内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J].农业工程学报,2010,26(1):31-35.
- [10] 陈丽娟,冯起,王昱,等.微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J].农业工程学报,2012,28(8):44-51.
- [11] 余世鹏,杨劲松,刘广明.易盐渍区黏土夹层对土壤水盐运动的影响特征[J].水科学进展,2011,22(4):495-500.
- [12] 刘广明,杨劲松.地下水作用条件下土壤积盐规律研究[J].土壤学报,2003,40(1):65-69.
- [13] 魏光辉,马亮,杨鹏年.地下水位与灌溉定额对棉花土壤水分的动态影响模拟[J].排灌机械工程学报,2016,34(1):73-80.
- [14] 郝远远,徐旭,黄权中,等.土壤水盐与玉米产量对地下水埋深及灌溉响应模拟[J].农业工程学报,2014,30(20):128-136.
- [15] 史海滨,郭珈玮,周慧,等.灌水量和地下水调控对干旱地区土壤水盐分布的影响[J].农业机械学报,2020,51(4):268-278.
- [16] 史海滨,吴迪,闫建文,等.盐渍化灌区节水改造后土壤盐分时空变化规律研究[J].农业机械学报,2020,51(2):318-331.
- [17] 姚荣江,杨劲松.黄河三角洲地区浅层地下水与耕层土壤积盐空间分异规律定量分析[J].农业工程学报,2007,23(8):45-51.
- [18] 李彬,史海滨,闫建文,等.节水改造后盐渍化灌区区域地下水埋深与土壤水盐的关系[J].水土保持学报,2014,28(1):117-122.
- [19] 常春龙.河套灌区农田生态地下水埋深及不同种植模式作物最适灌水量研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.