

大跨度旋转扇形门在吴淞江工程上的应用

管义兵¹, 顾晓峰¹, 李 灿¹, 施巍巍¹, 姜胜先²

(1. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215103; 2. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022)

摘要:以吴淞江整治工程某高等级航道大孔径闸工作门作为研究对象,调查并总结已建大跨度闸门的运转特性及各自特点,提出了一种新型的大跨度扇形旋转门设计方案,从技术上及经济上对各门型进行门型比选,最终选定大跨径扇形旋转门方案。结合工程实际需求及设计工况对大跨径扇形旋转门的设计进行了介绍,为类似工程闸门选型及设计研究提供借鉴。

关键词:旋转扇形门; 大跨径闸门; 门型比选; 有限元分析

中图分类号:TV675

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2022)05-0028-0004

Application of large-span rotating sector gate in Wusongjiang Project

GUAN Yibing¹, GU Xiaofeng¹, LI Can¹, SHI Weiwei¹, JIANG Shengxian²

(1. Jiangsu Taihu Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215103, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213002, China)

Abstract: Taking the working gate of large aperture gate in a high-grade channel of Wusong River Regulation Project as the research object, the operation characteristics and respective characteristics of typical large-aperture gate are investigated and summarized. A new design scheme of large-aperture sector rotating gate is put forward. By comparing and selecting each gate type technically and economically, a large-span sector rotating gate scheme is finally selected. The design of large span sector rotary gate is introduced in combination with actual engineering requirements and design conditions, which provides a reference for gate type selection and design research of similar projects.

Key words: rotating sector gate; large-span gate; comparison and selection of gate type; finite element analysis

吴淞江是江苏省苏南水网中重要的水利和通航河道,是太湖汛期一条重要的行洪通道。吴淞江(江苏段)整治工程位于太湖流域阳澄淀泖区,吴淞江沿途流经经济发达、人口集中、财富密集的苏州市吴江区、吴中区、工业园区及昆山市,沿线支河涉及航道包括京杭运河、苏申外港线、界浦江、青秋浦、昆周线、申张线等,这些高等级航道大孔闸承担着吴淞江行洪期间沿线防洪任务。

水工钢闸门作为水利枢纽中的重要组成部分,其安全运行相当重要^[1]。闸门门型选择主要考虑以下几方面因素:①满足使用功能要求,即满足防洪、引排水等要求;②满足经济合理的要求,即布置简洁、造价较低、运行方便可靠、易于维护保养;③满足与枢纽相邻建筑物的景观协调要求。

青秋浦等高等级航道口门还需兼顾水利与航运利益,具有以下特殊要求:①不设梯级、不阻航、

收稿日期:2021-12-18

基金项目:江苏省水利科技项目(2019021)

作者简介:管义兵(1988—),男,工程师,主要从事水工金属结构设计工作。E-mail:285288055@qq.com

特大洪水断航;②对应等级航道采用不小于60 m或90 m的设计孔径;③能较迅速地进行闸门启闭;④运行管理方便。因此大跨度门型选择是本工程首先要考虑的问题。随着近年来工程施工技术和金属结构制造水平的提高,水工钢闸门朝着大孔径方向发展,这就使得对其运行安全性能的要求也大大提高^[2]。对国内外众多水利工程的调查研究发现,已建成的大跨度闸门种类较多,如常州钟楼闸采用的有轨平开弧门、常州新闻采用的浮箱式闸门、上海苏州河采用的底轴驱动翻板门、南京三汊河口采用的护镜门等。这些超大跨度闸门的成功应用给其他新建的水利工程闸门门型选择提供了参考、借鉴,但其种类繁多、优缺点各异及适用性不同一定程度上增加了闸门的选型难度。

本文以吴淞江整治工程单孔孔径60 m口门为例,对该工程闸门在设计过程中门型比选、设备布置及结构设计进行总结。

1 门型分类

可将上述几种大跨度闸门分为以下几种类型:上翻式、下翻式和平转式等^[3]。上翻或下翻主要是针对闸门开启过程的运动动作而言,如液压互为止水式闸门及护镜闸门等门型在由挡水位置开启至全开位过程中动作均为上翻,因此这两种闸门可归类为上翻转式闸门;同理,底轴驱动式翻板门及气盾形门等门型可归类为上翻式闸门,平面弧形双开门及大跨度浮体闸门等门型可归类为平转式闸门。

上翻式闸门具有便于检修、方便管理等优点,但因其自身结构在上翻至全开位时悬于水面之上,并不能满足通航过船要求;下翻式闸门与上翻转式闸门特性刚好相反,闸门全开时门体结构隐藏于水底,不影响水面船闸通航,当闸门需要挡洪时,关闭至挡水位即可,但下翻转式闸门转动部件大都设置于水下,检修维护难度较大;平转式闸门同时具备上翻转式闸门及下翻转式闸门的优点,闸门在开启及关闭过程中闸门始终位于水平面内运动,全开至门库时不影响船闸通航,但平转式闸门因其自身庞大结构及门库占地导致工程占地面积较大,不经济。

2 旋转扇形闸门方案

通航及占地要求也是本工程需要解决的问题,基于上述3种门型各自的优缺点,提出一种新型大

跨度旋转门设计方案,这种门型既能满足高等级航道的通航要求,又便于检修维护,同时工程占地又很小。该大跨度旋转门门叶结构为扇形形状,其工作示意图如图1所示,开门时闸门卧于水下门库之中,以保证船只正常通航,关门时闸门旋转至挡水位置,以承挡外河侧洪水;当闸门需检修维护时,闸门由全开位开启180°平卧于水面正上方即可具备检修条件。

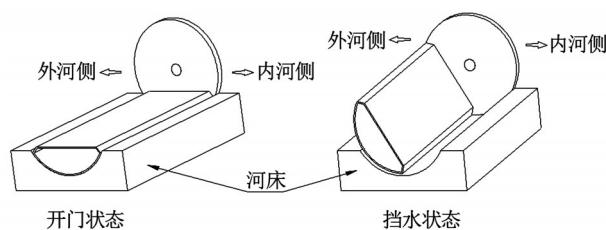


图1 闸门工作示意

在型式上该门型属于下翻式闸门类别,较其他同类门型不同的是:其旋转中心位于中间位置,可以称之为“中轴旋转”。中旋转轴与圆盘固连,在中旋转轴中间部位设置一对关节轴承。在支撑轴端部设置一对星轮驱动系统,以驱动闸门的启闭运行。星轮驱动系统设置一系列行星齿轮,均布在大齿轮周围,当洪水来临时,通过驱动机构驱动行星齿轮,行星齿轮再将力矩传递给大齿轮,以带动闸门整体旋转到挡水位置。

3 门型比选

鉴于设计任务要求为单孔孔口净宽不小于60 m的大孔径闸,因此门型选择上仅考虑大孔径闸门门型。对前面介绍的各类大孔闸门工程运用的特点进行总结,见表1。综合比较不同门型的优缺点,并结合本工程实际需求做出合理选择。

护镜式闸门和液压互为止水式闸门的门型因上部建筑物或自身结构限制不具备通航能力,故不参与方案比选。底轴驱动翻板门的运行维护及检修条件较为苛刻,甚至会出现打坝断航进行检修情况,气动盾形闸门气袋充满介质所需时间较长,闸门控制难度较大,且现有的产品和技术水平都不能满足工程需要,因此这两种门型也不参与比选。

平面弧形双开闸门、浮箱式闸门及中轴旋转扇形门在技术上和经济上都是可行的,3个方案共同优点是:(1)布局上不影响通航,特大洪水时控水挡

表1 各类大孔径门型优缺点及适用范围

闸门类型	启闭原理	优点	缺点	适用范围
护镜式闸门	通过启闭机驱动门叶结构沿闸门两侧铰轴转动	结构新颖、轻巧,管理运行简单,设有小门结构,可局部调节水位;景观性好	结构相对复杂,设计难度大,不具备通航能力,跨度受限	城市景观水利工程
液压互为止水式闸门	液压启闭机驱动闸门沿闸门顶部的固定铰转动	可局部开启,具备挡水、防洪功能;可与建筑物联合布置,对周围景观无影响;运行方式新颖,跨度不受限制	与建筑物联合布置难度较大,不具备通航能力,启闭控制方式要求较高	闸桥等综合性水利工程,跨度不限
底轴驱动式翻板门	过液压启闭机驱动底轴两侧拐臂驱动闸门	门叶采用纵向悬臂梁结构,孔口宽度不限;启闭灵活快捷、开度无极,具有通航功能;无须水上结构布置,景观效果好	造价较高、闸门检修不便、对闸基沉降要求较高;不适用于水位差较大的工程	水头差较小的城市景观水利工程,跨度不限
气动盾形闸门	通过控制气袋的充气、排气使闸门升起或倒伏	可连续无级调速,长度不受限;景观性好,无污染	闸门控制难度较大,易发生不同门体单元开度不同等问题;结构寿命相对较低	水头差较小、跨度较大的水利工程
平面弧形双开门	通过卷扬机驱动门体沿底轨绕支铰转动,实现闸门启闭	结构双向挡水,具备防洪、航运等功能;结构运行安全、平稳,检修方便且造型美观,景观性较好	结构相对巨大,占地面积大;底部轨道受淤泥沉积等影响,对启闭机要求较高	水头差、跨度较大的水利工程
浮箱式闸门	动力舱或绞车钢丝绳牵引将门体移至闸位,再向浮箱内注水,使门体下沉	动水启闭,具有通航、防洪功能;利用浮力作用,启闭时的牵引力相对较小;结构简单,设计难度低	须控制浮箱的浮沉稳定性、动水定位等,难度较大	水头差、跨度较大的中型水利工程
中轴旋转扇形门	通过两侧星轮驱动机构输出扭矩使门叶旋转启闭	可双向挡水,维护方便,水力条件较好;具有通航、防洪功能;布置紧凑,占地小;运行方式新颖	造价较高、启闭系统较为复杂	跨度较大的中型水利工程,城市景观工程

洪,能兼顾水利和航运的需要;(2)均能在一定程度上满足大孔径要求;(3)设计思路合理,技术先进。

3个方案不同优点:浮箱式闸门方案门体结构设计及制造安装技术难度较小;平面弧形双开门启闭能耗小、造型美观;中轴旋转扇形门布置紧凑,占地小,投资省。

3个方案可能存在的问题:浮箱式就位操作难度大,受淤积影响大;平面弧形双开门结构巨大占地大、对启闭要求高;中轴旋转扇形门启闭系统较为复杂,金属结构部分投资略高。

综合以上比选分析,中轴旋转扇形门启闭时间短,常规检修维护方便,工程投资节省,方案略优,因此,采用中轴旋转扇形门方案。

4 闸门布置与结构设计

4.1 闸门布置

水闸工程河道宽度60 m,闸门采用星轮驱动中轴旋转门结构,主要由扇形门叶、联接圆盘和中旋转轴3个部分组成,扇形门叶由平面和弧形面板包

裹而成,并在两面板之间设置隔板,主梁和次梁以支撑其内部结构,弧形面板与圆盘外圈相切;挡水门体连接在两侧的圆盘结构上,圆盘结构围绕支承轴和轴承实现自由的旋转。闸门承受的水压力及闸门的自重通过门体和圆盘结构传递至支承轴上、再通过轴承传递至土建闸墩上。闸门结构可设置浮箱及在圆盘上施加配重,以减小启闭机的容量。闸门采用液压马达输出端的小齿轮驱动圆盘上大齿轮进行旋转,进而带动门叶实现闸门的启、闭和检修。闸门结构布置见图2。

在门叶底部设置U型槽,闸门上设置Ω型止水。当开启闸门时,在启闭机的驱动下闸门平卧于河道底部的门槽中,此时河道敞开,可以泄流和通航;当闸门需要检修时,可以将门体结构旋转平卧至顶部进行检修。

4.2 结构计算分析

对大跨度中轴旋转扇形门的设计主要采用平面设计分析与三维有限元分析相结合的研究方法,通过对扇形门门体进行强度、刚度、振动等计算分

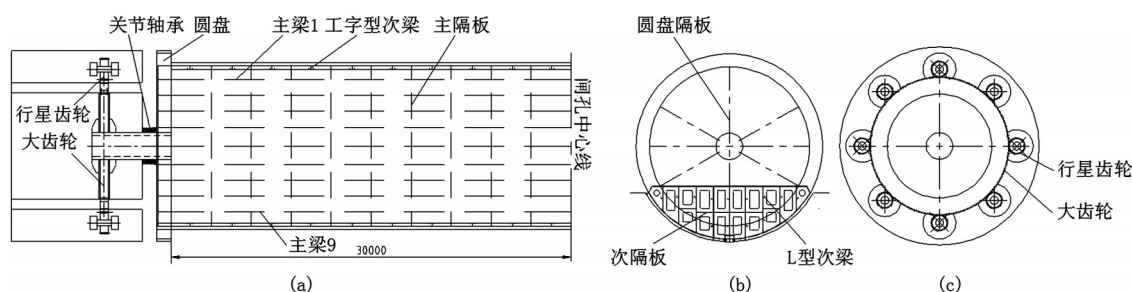


图2 闸门结构布置

析并优化设计。平面设计分析主要依据现行钢闸门设计规范《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—2019)中相关要求^[4]进行,同时通过相关有限元软件对闸门结构进行仿真计算分析。

闸门设计荷载按以下水位组合进行:吴淞江侧水位4.58 m,内河侧水位2.99 m,其中闸门弧形面板布置在吴淞江侧,平面面板布置于内河侧。

主梁是闸门主要的受力构件,且跨度较大,在闸门顶部区域主梁较为薄弱,此处运用平面体系计算方法对闸门主梁进行挠度和应力计算,取闸门顶部第二道主梁,其截面简化成工字型,两边面板兼做翼缘。主梁载荷按简支梁受均布载荷考虑,易知简支梁最大挠度和最大弯矩均在跨中位置^[5],经计算,主梁最大挠度及应力均满足规范要求。

运用有限元分析软件,建立大孔径中轴旋转扇形门的三维有限元模型,如图3所示。其中,X方向为闸门水流方向,Y方向竖直向上,Z方向为闸门轴向。闸门圆盘、门叶、主梁及隔板均采用板单元进行模拟;闸门主梁上设置L型次梁,闸门弧形面板上主梁隔板之间设置T型次梁,且2种次梁均采用梁单元模拟。

闸门关门挡水时,轴承外圈采用固定约束,轴外端外表面节点约束Y向的切向自由度,轴承内外圈之间设置接触对。通过附加外部水作用及自身重力作用荷载,星轮驱动旋转闸门的恒定载荷包括其自身重力及静水压力。

通过计算机模拟分析,闸门有限元模型的应力、挠度在各工况下均满足设计要求。

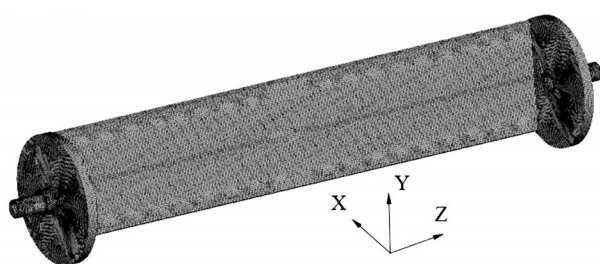


图3 中轴旋转扇形门有限元模型

5 结 语

本文重点对吴淞江整治工程高等级航道口门大孔径闸门在设计过程中结构型式比选、主要设备布置及结构设计进行了介绍,提出了一种大跨度旋转钢闸门设计方案,从技术、经济方面进行方案比选论证,最终选定采用中轴旋转扇形门方案。所研究的星轮驱动闸门结构新颖,技术先进,可为类似闸门设计研究提供借鉴。

参考文献:

- [1] 李佳子. 水工钢闸门的可靠度分析[J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(4): 53-55.
- [2] 王正中, 张雪才, 刘计良. 大型水工钢闸门的研究进展及发展趋势[J]. 水力发电学报, 2017, 36(10): 1-18.
- [3] 丁正忠, 杨光, 姚宏超. 大跨度闸门建设实例及思考[J]. 人民黄河, 2012, 34(9): 145-148.
- [4] SL 74—20019 水利水电工程钢闸门技术设计规范[S].
- [5] 周建方. 材料力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.