

SHUIGONG ZHAMEN
JIEG

水工闸门结构分析

杜培文 著



 黄河水利出版社

水工闸门结构分析

杜培文 著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书系统介绍了双拱曲面钢闸门,强地震区弧形钢闸门,大跨度、大宽高比平面钢闸门和拦污栅结构设计关键技术,包括闸门门型、结构布置、荷载效应分析和应用工程等,重点介绍了利用空间有限元方法分析三种闸门类型的整体受力和变形特点,以及拦污栅结构的三维数值模拟计算与水工模型试验。

本书可作为水工金属结构及相关专业设计和科研人员的参考资料,也可供高等院校相应专业本科生和研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工闸门结构分析/杜培文著. —郑州:黄河水利出版社,2018.3

ISBN 978-7-5509-2003-3

I. ①水… II. ①杜… III. ①水闸-闸门-结构分析 IV. ①TV66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 047114 号

组稿编辑:贾会珍 电话:0371-66028027 E-mail:110885539@qq.com

出版社:黄河水利出版社

网址:www.yrcp.com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南瑞之光印刷股份有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:17.25

字数:420 千字

印数:1—2 000

版次:2018 年 3 月第 1 版

印次:2018 年 3 月第 1 次印刷

定价:68.00 元

前 言

本书共分为4篇23章,主要阐述双拱曲面钢闸门,强地震区弧形钢闸门,大跨度、大宽高比平面钢闸门和拦污栅结构设计中涉及的关键技术,成果源自山东省水利勘测设计院设计完成、作者担任主要技术负责人(设计总负责人、项目负责人或核定人)的“威海市南海新区香水河挡潮闸工程”、国家治淮骨干工程——“沂沭泗河洪水东调南下续建工程刘家道口枢纽工程”、“山东省寿光市弥河寒桥拦河闸工程”、“南水北调东线(山东段)工程”和“山东省胶东地区引黄调水工程”等大型水利工程项目。“第1篇 双拱曲面钢闸门”属于原创性新型闸门结构,是水利部技术示范项目(项目编号:SF-201728);“第2篇 强地震区弧形钢闸门”对地震9度高烈度区大型表孔弧形闸门进行了不同地震烈度多工况下整体受力及变形和启闭机总体布置优化技术研究;“第3篇 大跨度、大宽高比平面钢闸门”分析了该门型整体受力和变形特点;“第4篇 拦污栅”系统描述了栅体结构的三维数值模拟计算与水工模型试验,分析拦污栅的水力特性,是国家“十一五”科技支撑课题“大型渠道设计与施工新技术研究”之“大型渠道清污技术及设备研制”专题(编号:2006BAB04A02-07)成果的主要内容。

书中收纳了作者课题组十多年来的研究成果,包括水工机械设计室许志刚、刘天政、朱琳等同志担任金属结构专业负责人的设计工作,也参考了同行的研究成果与论著,在此对他们以及设计项目组成员表示感谢!武汉大学曾又林教授、江苏大学李彦军博士、水利部水工金属结构质量检验检测中心孟庆奎、胡木生教高以及我院王金华、李孟、李鹏飞等同志对项目研究和本书的撰写给予了帮助,在此一并致谢!

本书出版得到水利部技术示范项目(项目编号:SF-201728)的资助。在本书出版之际,对水利部国际合作与科技司、水利部科技推广中心以及山东省水利厅科技与对外合作处等单位领导的支持表示衷心的感谢!

山东省水利勘测设计院党委书记刘绍清同志对本书的出版给予了大力支持和热情帮助,在此表示深切的谢意!

由于作者水平有限,书中缺点和错误之处,诚恳欢迎读者批评指正。

作 者
2017年12月

目 录

前 言

第 1 篇 双拱曲面钢闸门

第 1 章 拱形闸门	(3)
1.1 引 言	(3)
1.2 三铰拱护镜式钢闸门	(3)
1.3 双拱平面钢闸门	(4)
1.4 双拱曲面钢闸门	(5)
第 2 章 双拱曲面钢闸门结构设计	(7)
2.1 双拱曲面钢闸门结构的提出	(7)
2.2 双拱曲面钢闸门结构及受力特点	(8)
2.3 双拱管桁曲面钢闸门结构设计	(9)
2.4 预应力双拱管桁曲面钢闸门结构设计	(9)
2.5 双拱板桁曲面钢闸门结构设计	(10)
第 3 章 双拱管桁曲面钢闸门有限元分析	(11)
3.1 有限元计算模型	(11)
3.2 工况 1 计算结果	(13)
3.3 工况 2 计算结果	(20)
3.4 工况 3 计算结果	(27)
3.5 工况 4 计算结果	(35)
3.6 结 论	(43)
第 4 章 双拱板桁曲面钢闸门有限元分析	(44)
4.1 有限元计算模型	(44)
4.2 工况 1 计算结果	(45)
4.3 工况 2 计算结果	(55)
4.4 工况 3 计算结果	(64)
4.5 工况 4 计算结果	(73)
4.6 结 论	(82)

第 2 篇 强地震区弧形钢闸门

第 5 章 门型概述	(85)
5.1 引 言	(85)

5.2	工程应用	(85)
第6章	强地震区水闸金属结构总体布置	(89)
6.1	引 言	(89)
6.2	单孔净宽方案的选定	(89)
6.3	弧形闸门启闭方案研究	(90)
6.4	表孔弧形闸门液压式启闭机总体布置优化技术	(94)
第7章	弧形闸门结构布置与设计	(100)
7.1	设计技术参数	(100)
7.2	闸门结构布置	(100)
第8章	弧形闸门三维有限元分析	(103)
8.1	引 言	(103)
8.2	弧形闸门三维有限元分析	(104)
8.3	工况1 有限元静力计算结果	(108)
8.4	工况2 有限元静力计算结果	(113)
8.5	工况4 有限元静力计算结果	(117)
8.6	工况5 有限元静力计算结果	(122)
8.7	工况6 有限元静力计算结果	(127)
8.8	工况7 有限元静力计算结果	(133)
8.9	工况8 有限元静力计算结果	(140)
8.10	自由振动计算结果	(145)
8.11	工字形支臂弧门工况7 静力计算结果	(147)
8.12	工字形截面支臂弧门自由振动计算结果	(152)
8.13	计算结果分析	(154)
第9章	弧形闸门支铰钢梁有限元分析	(157)
9.1	钢梁有限元模型	(157)
9.2	钢梁有限元静力计算	(160)
9.3	钢梁自由振动计算	(170)
第10章	闸门原型试验应力测试与声发射监控	(172)
10.1	试验目的	(172)
10.2	试验依据	(172)
10.3	实施方案	(172)
10.4	测试仪器及应变片	(173)
10.5	充水加压过程	(175)
10.6	应力测试	(177)
10.7	声发射监控	(183)
10.8	结 论	(188)
10.9	附 图	(188)

第3篇 大跨度、大宽高比平面钢闸门

第11章 门型概述	(193)
11.1 引言	(193)
11.2 工程应用	(193)
第12章 闸门结构设计	(195)
12.1 设计技术参数	(195)
12.2 闸门启闭机总体布置	(195)
12.3 闸门结构设计	(198)
第13章 闸门三维有限元分析	(208)
13.1 计算基本资料	(208)
13.2 计算模型	(209)
13.3 计算方法	(214)
13.4 静力计算结果	(215)
13.5 自由振动计算结果	(222)
13.6 闸门优化设计	(224)
13.7 有限元分析结论	(225)
第14章 闸门静应力检测	(226)
14.1 检测荷载设计	(226)
14.2 测试方法与仪器设备	(226)
14.3 主横梁静应力实测成果	(227)
14.4 闸门静应力检测结论	(228)
14.5 闸门静应力检测与有限元计算结果对比	(228)
第15章 平面与空间体系闸门应力及位移计算对比	(230)
15.1 设计静水头下平面闸门主梁应力及位移计算	(230)
15.2 平面体系与空间体系计算结果比较	(231)
15.3 主梁应力及位移校核计算	(232)
第16章 闸门有限元计算应力及位移图	(234)
16.1 工况1 闸门应力及位移图	(234)
16.2 工况2 闸门应力及位移图	(240)

第4篇 拦污栅

第17章 拦污栅概述	(249)
第18章 拦污栅结构分析方案	(250)
第19章 拦污栅三维数值计算	(253)
19.1 三维数值计算物理模型构建	(253)
19.2 数值模拟的数学模型	(253)

第 20 章 内部流态分析 (255)

第 21 章 水力特性分析 (259)

第 22 章 水工模型试验 (260)

 22.1 模型设计 (260)

 22.2 试验结果及分析 (260)

第 23 章 栅体结构分析结论 (264)

参考文献 (267)

第 1 篇 双拱曲面钢闸门

第 1 章 拱形闸门

1.1 引 言

拱是一种古老的结构形式,它以改直为曲的方法把直梁的受弯状态改变为受压状态,提高了材料的承载效率。建于隋代的赵州桥,跨度达 37 m,就是拱结构创纪录的杰出范例,被誉为国际土木工程里程碑。随着我国经济建设的迅速发展,钢产量不断提高,钢材性能与质量不断提高,大跨径拱形钢结构已经广泛应用于建筑结构与桥梁工程中。

目前,应用于大型水闸的闸门形式多为平面闸门和弧形闸门,且一般采用实腹式梁格结构,拱形结构闸门较为少见。随着我国水利水电建设事业的不断发展,各种水工建筑物不断兴建,尤其是低水头闸门跨度日益加大,使得利用拱结构受力条件好、承载力大、用料省、跨越空间的能力和刚度强等优点解决大跨度闸门结构设计问题成为可能,这有利于该类水闸工程在确保运行安全的前提下更趋科学与合理。

1.2 三铰拱护镜式钢闸门

国内首例三铰拱护镜式钢闸门由上海勘测设计研究院有限公司设计,应用于江苏南京秦淮河三汊河河口闸(见图 1-1)。闸址位于秦淮河东支流三汊河口入长江处,新三汊河大桥下游约 200 m 处,水闸的规模为蓄水期河道过水流量 $30 \text{ m}^3/\text{s}$,非汛期河道行洪流量 $80 \text{ m}^3/\text{s}$,汛期河道行洪流量 $600 \text{ m}^3/\text{s}$,是一座集非汛期时蓄水、冲淤、换水、调节秦淮河水位,汛期向长江行洪,兼顾旅游和景观等多功能于一体的综合性水闸。该闸为双孔,总净宽 80 m,闸门为半圆形三铰拱结构,单孔闸门净宽 40 m,高 6.50 m(水位在 5.50 ~ 6.65 m 可调),弧长 74 m,闸门中另设 6 扇活动小闸门(门宽 7.1 m,高 1.15 m)。闸门在水平状态时挡水并在闸门门顶过流形成瀑布景观,闸门上的活动门叶根据秦淮河上游来水,灵活升降调节秦淮河的水位。需要开启闸门时,卷扬式启闭机通过钢丝绳牵引闸门,使闸门以铰轴为圆心向上转动,到达 60° 时闸门达到全开位置,启闭机停止并锁锭,河道行洪过流。

护镜门的三铰拱结构,即把闸门的跨中部位设计成铰接结构,使闸门跨中处的弯矩为零,与闸门的两个铰接支承一起使闸门整体在水平面上形成三铰拱结构。该结构大大减小了闸门门体的断面尺寸,不仅减小了闸门的自重和闸门的启闭力,而且减少了闸门制造和安装误差,以及温度变化等对门体产生的影响,在水头不高、孔口较大的场合具有较大的优势。

南京秦淮河三汊河河口闸建成于 2005 年 9 月,为国家第十届运动会增添了一道靓丽的水上风景线。



图 1-1 南京秦淮河三汊河河口闸

1.3 双拱平面钢闸门

浙江省曹娥江大坝位于钱塘江下游右岸主要支流曹娥江河口,是一座具有防潮(洪)、治涝,水资源开发、航运等多目标综合利用的大(1)型水利枢纽工程,由浙江省水利水电勘测设计院设计。全闸共 28 孔,每孔设一扇工作闸门,闸门孔口尺寸为 $20.0\text{ m} \times 5.0\text{ m} \sim 9.0\text{ m}$ (宽 $\times$ 高一水头),采用液压启闭机启闭,启闭机容量为 $2 \times 1\,600\text{ kN}$ 。工作闸门采用双拱管桁式大跨度平面滑动钢闸门,闸门梁系采用双拱空间网架结构,闸门双向受力,主、反向支承装置采用自润滑线接触滑块,侧向支承装置为悬臂挡块,侧止水、顶止水材料为橡塑复合水封,底止水为高分子材料,埋件使用 STNi2Cr 合金铸铁轨道。

曹娥江大坝工作闸门双拱空间网架结构由正拱、反拱、腹杆、弦杆、面板等构建组成,4 榀双拱管桁架结构等间距布置,且每榀构造相同,双拱桁架被腹杆分为 8 格。正拱为全贯通的弯管,反拱在与正拱交叉点处断开,并和全贯通的正拱焊接为一体,在两个拱之间焊接腹杆,连接双拱使之共同作用;弦杆为矩形管,用于连接面板和双拱。弦杆直接与闸门面板焊接,通过腹杆与双拱连接。面板和弦杆对与之相连的拱有约束作用,承担了拱的水平推力,改善了双拱钢管桁架结构的力学性能。双拱管桁式平面闸门结构简图见图 1-2,门叶结构图见图 1-3。

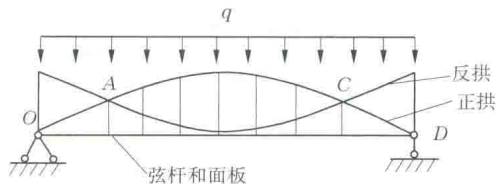


图 1-2 双拱管桁式平面闸门结构简图

曹娥江河口挡潮泄洪为双拱平面滑动闸门,面板厚度 14 mm ;面板区格肋梁 $25\text{ mm} \times 200\text{ mm}$;正拱 $\phi 530\text{ mm} \times 18\text{ mm}$,反拱 $\phi 402\text{ mm} \times 14\text{ mm}$,腹杆 $\phi 299\text{ mm} \times 14\text{ mm}$,连系杆 $\phi 180\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 。大坝 2008 年 12 月运行至今(见图 1-4),经受了钱塘江大潮与强台风的考验,闸门工作正常,达到防潮泄洪的预期目的,为当地经济、社会发展发挥了巨大作用。

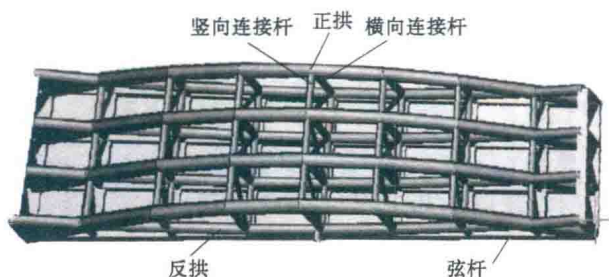


图 1-3 双拱管桁式平面闸门门叶结构图



图 1-4 双拱管桁式平面闸门投入运用

1.4 双拱曲面钢闸门

威海市南海新区香水河(母猪河)挡潮闸位于香水河支流金花河入香水河河口下游,是一座具有防潮(洪)、水资源开发利用、改善水环境等综合效益的大(2)型水利工程,设计等别为Ⅱ等,由山东省水利勘测设计院设计。全闸共 14 孔,挡潮闸总宽 463 m,总净宽 364 m,单孔净宽 26 m。设计最大过闸流量 $4\,961\text{ m}^3/\text{s}$,洪水设计标准为 50 年一遇,校核标准为 100 年一遇,设计潮水标准为 50 年一遇,挡潮高度 3.97 m,减少海水河道内的上溯长度约 13.4 km,设计蓄水深 2.6 m,河段蓄水量 7.9 万 m^3 。挡潮闸工作闸门采用露顶式双拱曲面钢闸门,孔口尺寸 $26.0\text{ m} \times 4.5\text{ m} \sim 3.97\text{ m}/2.6\text{ m}$ (宽 $\times$ 高一水头),双向挡水。闸门门体材质采用 Q345B,工程塑料合金自润滑滑道支承,止水为双 P 型橡塑复合水封,埋件使用耐腐蚀合金铸铁轨道。

威海市南海新区香水河挡潮闸双拱曲面钢闸门是由上弦拱、下弦拱、腹杆、弦杆、面板、拱脚等组成的型钢拱桁架结构(中国专利:201510408799.2)。闸门面板为圆弧拱曲面,弦杆兼作水平次梁,闸门面板与弦杆焊接为一体组成上弦拱,承担临海面荷载;下拱为两道圆弧拱。下弦拱、弦杆和腹杆均为 H 型钢,端柱为箱形的拱脚结构。该结构使得闸门整体结构受力合理,各构件焊接方便,易于保证加工制作质量,特别适合于大型水闸、大跨度闸门的

应用。“露顶式大跨度双曲拱闸门新技术推广应用”为水利部技术示范项目(项目编号:SF-201728)。本书双拱曲面钢闸门结构分析是依托威海市南海新区香水河挡潮闸工程(见图 1-5 ~ 图 1-7)进行的。



图 1-5 威海市香水河挡潮闸远景



图 1-6 双拱曲面钢闸门门叶结构组装图



图 1-7 双拱曲面钢闸门挡水控制运行

第 2 章 双拱曲面钢闸门结构设计

2.1 双拱曲面钢闸门结构的提出

随着我国经济社会的高速发展,水资源、水环境、水生态、水景观等建筑物的不断兴建,低水头闸门跨度日益加大。大量的工作闸门既要满足各种运行工况的控制要求,又要适应各自不同的工作和自然环境,同时对闸门的安全运行及科学合理性提出了更高的要求。

双拱曲面钢闸门是桁架结构在水工闸门中的新应用。一些学者对桁架结构断面形状的优化进行了研究,Wang 和 Zhang 对承受均布荷载简支桁架进行截面和节点位置的两级优化,在下弦节点位置不变的条件下,只改变上弦节点的竖向坐标。从优化结果可以看出,上弦节点优化移动后变成了图 2-1 (a) 所示的拱形。L. Gil 和 A. Andreu 对图 2-1 (b)、图 2-1 (c) 所示下弦节点受均布荷载作用的桁架结构进行了截面和节点位置的两级优化分析,在优化过程中桁架上、下弦节点的竖向坐标都可以移动,优化结构都形成了拱形。借鉴以上桁架结构优化结果可以看出,对于两端支承受均布荷载的桁架来说,在下弦节点位置不变时,拱形是一个较好的构形;上、下弦节点的竖向坐标都可以改变时,上、下弦杆都是拱形的双拱结构是较好的构形。

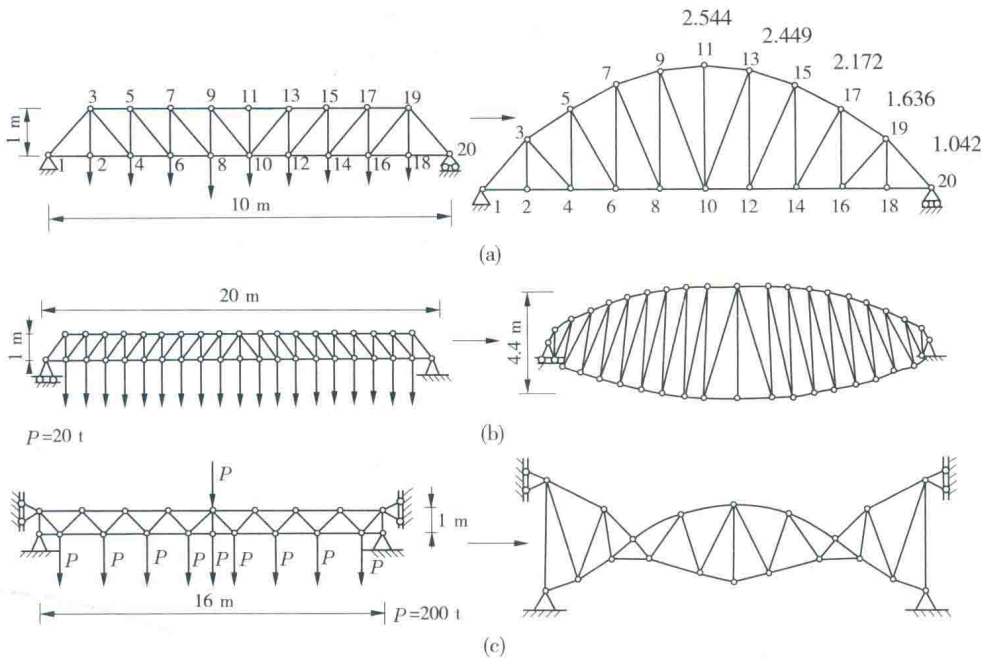


图 2-1 桁架优化形状

在水工钢闸门平面体系计算方法中,闸门主梁的力学模型简化为受均布荷载的简支梁,其约束条件和受力与图 2-1 (b) 最为相似。简支梁承受均布荷载时,其主应力迹线如图 2-2

所示(图中实、虚线分别表示拉、压主应力),拉、压主应力迹线的形状是双拱形,与双拱桁架结构拱轴的布置相似,上、下弦拱正好处于主应力迹线的发展方向。这表明简支约束的双拱桁架结构能较好地承受均布荷载,与水利闸门主梁的力学模型相符合,借助于拱桁架结构刚度大的技术特点,为大跨度拱形闸门的设计提供了有利的应用条件。对于双向挡水闸门,双拱桁架构形截面则显得更有优势。

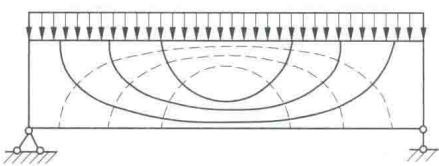


图 2-2 均布荷载简支梁主应力迹线

2.2 双拱曲面钢闸门结构及受力特点

闸门门叶的双拱桁架结构的截面形状与拱轴线形状、节点构造和拱脚结构,需要满足闸门的功能要求、荷载条件、跨度大小、制造、安装和运行条件。理想的闸门拱桁结构应具有适合承受均布荷载、传力明确、整体刚度好、安全可靠、结构形式简洁、节省材料、制造安装和维护方便等特点。

根据水压力的分布特点和闸门拱桁结构形式简洁的要求,作者发明了双拱曲面钢闸门结构(见图 2-3)。其结构特征是:门体包括上弦拱、下弦拱、弦杆、拱脚和腹杆,双拱轴线均采用圆弧形。上弦拱是由圆弧形的面板及设置在面板内弧侧的水平弦杆和竖向系杆组合而成的板桁组合拱。弦杆兼作闸门水平次梁,沿闸门高度由下至上设置多道,与竖杆把面板划分为若干区格。下弦拱为单独圆弧拱,根据闸门高度和水压力大小确定下弦拱数量。在闸门左、右两侧布置上下弦拱的拱脚,沿高度方向组成闸门箱形结构端柱,端柱上游翼板与闸门面板平缓过渡焊接。这样拱形方向相反的上弦拱、下弦拱和左右端柱在平面上形成橄榄状的双拱结构。上弦拱、下弦拱通过多道水平和斜向腹杆相连接。双拱曲面钢闸门结构主要受力构件为上弦拱、下弦拱(含弦杆)、腹杆和拱脚端柱,上弦拱、下弦拱和端柱组成了一个自平衡体系。

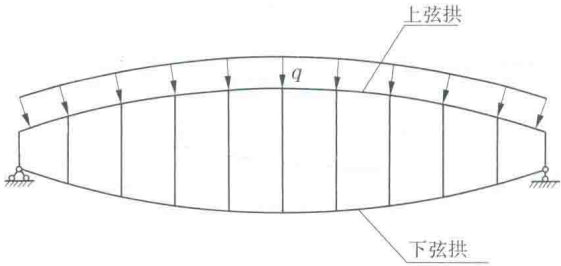


图 2-3 双拱曲面钢闸门结构简图

闸门上游板桁组合拱是闸门面板与钢桁架结合共同受力的一种新型结构,增强了结构的抗弯刚度、抗扭刚度。这样,双拱曲面钢闸门门叶形成拱形方向相反的双拱结构,使闸门受力条件好,结构稳定,可以大大提高闸门整体刚度,便于实现大跨度设计,同时在满足大跨度设计条件下大大减轻闸门的自重,减小闸门启闭力,从而能够节省工程投资。

另外,为满足闸门拦蓄和启闭的需要,在端柱的上游面侧安装有反向支承滑块、侧止水,其下游侧设有正向支承滑块、侧向滑块,在面板底部设有闸门底止水。埋件包括安装在闸门

槽内的主支承轨道和反向支承轨道,以及闸底板处埋设的底轨。

2.3 双拱管桁曲面钢闸门结构设计

钢管桁架结构是近年来在大跨度空间结构中广泛应用的一种结构,为此,威海市南海新区香水河挡潮闸对双拱曲面钢闸门进行了钢管桁架结构的设计(见图2-4)。上弦拱由闸门面板和上弦杆、竖杆组成,上弦杆、竖杆均采用矩形钢管,下弦拱、腹杆和系杆均采用圆管截面;双拱轴线均采用圆弧形;拱脚端柱为“日”字形钢板焊接结构,是双拱空间钢管桁架闸门的重要节点。

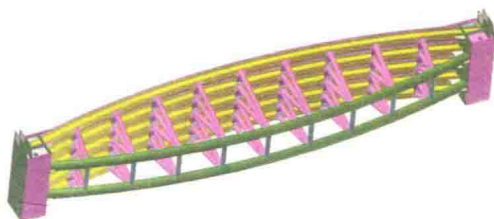


图2-4 双拱管桁曲面钢闸门

管桁结构闸门的优点和局限性如下:

- (1) 闸门梁系结构造型简洁、流畅。
- (2) 刚度大、几何特性好,抗弯性能和抗扭性能好。
- (3) 利于防腐蚀和运管维护,管构件在全长和端部封闭后,其内部不易生锈。
- (4) 圆管截面的管桁架结构流体动力特性好。

局限性是:由于节点采用相贯焊接,相贯节点的加工和放样复杂,切割坡口难度和工作量大,焊接量大,加工设备和质量要求较高;大直径钢管尚有货源供应困难。

2.4 预应力双拱管桁曲面钢闸门结构设计

预应力双拱管桁曲面钢闸门结构由面板、次梁、桁架梁系、箱形端柱、预应力拉杆、底止水 and 侧止水、正反向支承滑块和侧向滑块等组成(见图2-5)。桁架梁系由上弦拱管、下弦拱管、腹杆和系杆组成,双拱轴线均采用圆弧形。上弦拱管与拱型面板平行,其上、下游分别与水平次梁和桁架腹杆焊接,下弦拱管的方向与上弦拱相反,上、下弦拱管在闸门左、右两侧分别与端柱相连接,中间由多道腹杆桁架相连接,闸门在平面图上形成外观似“橄榄”状的结构;预应力钢拉杆布置在上、下弦拱之间,两端与端柱连接板连接(见图2-6),拉杆数量与下弦拱数量相同。

预应力双拱管桁曲面钢闸门主要优缺点:

- (1) 提高闸门结构承载能力。
- (2) 改善结构受力状态,降低弯矩峰值,减小构件截面。
- (3) 提高结构刚度及稳定性,预应力产生的结构变形与荷载下变形反向,因而结构刚度得以提高。
- (4) 进一步降低用钢量,节约工程投资。

闸门施加预应力的缺点是:反拱度不易控制;施工质量要求高,需要技术较熟练的专业队伍;对自身具有一定刚度的闸门施加预应力,会对端柱产生较大的附加应力。