

河海大学“211工程”三期资助研究生系列教材

水工钢闸门 数值模拟与工程实践

● 胡友安 王孟 著

63
8



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



河海大学“211工程”三期资助研究生系列教材

水工钢闸门 数值模拟与工程实践

胡友安 王孟 著



1541877



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

1197317-20

内 容 提 要

本书主要内容包括：目前水工钢闸门结构形式发展，水工钢闸门数值模拟的现状和意义，有限元基本理论和 ANSYS 软件简介，水工钢闸门结构 ANSYS 静力分析，水工钢闸门动力学分析，水工钢闸门计算流体动力学分析，水工钢闸门运动仿真分析等。本书是作者多年从事水工钢闸门工程实践经验的总结，书中列举了大量的水工钢闸门数值模拟计算实例。本书可供从事水工钢闸门的设计、制造、安装、研究人员和大专院校的师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

水工钢闸门数值模拟与工程实践 / 胡友安, 王孟著

— 北京：中国水利水电出版社，2010.12

河海大学“211工程”三期资助研究生系列教材

ISBN 978-7-5084-8262-0

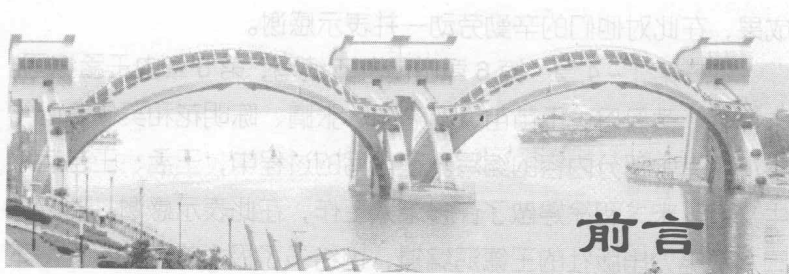
I. ①水… II. ①胡… ②王… III. ①钢闸门—数值模拟—研究生—教材 IV. ①TV663

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第262954号

书 名	河海大学“211工程”三期资助研究生系列教材 水工钢闸门数值模拟与工程实践
作 者	胡友安 王孟 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	140mm×203mm 32开本 6.125印张 165千字
版 次	2010年12月第1版 2010年12月第1次印刷
印 数	0001—1200册
定 价	26.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



目前,工程结构的数值模拟技术已经在各行业中得到了广泛应用。数值模拟方法主要包括有限元法和运动仿真技术等。有限元的静动力学计算结果和运动仿真已经成为各类工程结构设计和性能分析的可靠依据。特别是近年来,水利工程中大量应用有限元技术对钢闸门的结构强度、刚度和稳定性进行分析;对于启闭复杂的钢闸门运动参数进行运动仿真分析,如钢闸门的启闭、检修等运动过程中的速度、加速度、支铰反力和启闭力变化;此外,还对各种特型闸门内外的流体动力学进行分析研究等。在这些应用研究中,成功的工程实例也不少。近年来,作者参加了国内多项大型水利工程钢闸门的设计和计算工作,并指导 10 余名研究生完成这方面的论文工作,对于钢闸门的结构计算和运动仿真,积累了一些经验,一直计划总结、凝练和充实一下,与大家共享。在本书的编写过程中,对每一个工程实例项目都力求做到叙述清楚、层次分明、联系实际、便于读者自学、引导思考。通过与工程实际结合,提高读者在水利工程钢闸门有限元分析和仿真中的实际解决问题的能力。在掌握基本理论的基础上,结合工程实际,培养独立思考,分析问题,多做总结,为解决工程中的实际问题积累丰富的经验。

特别指出的是,本书同时也吸收了部分国内其他专家的研究

成果，在此对他们的辛勤劳动一并表示感谢。

本书第1~4章、第6章由胡友安编写，第5章由王孟编写。朱怀淼、黄丹丹、王苗苗、方治国、张晴、陈明花和吴倩等同学参加了其中部分内容的编写。在编写的过程中，王孟、王苗苗、牛文宣、宋戈和徐婷做了许多录入工作，在此表示感谢。此外中国水利电力出版社的王德鸿编辑，也给予了极大的帮助，使得本书得以按时出版，在此表示感谢。

水工钢闸门数值仿真技术还在不断地发展和应用，鉴于作者水平有限，书中可能有欠妥之处，恳请广大师生和读者批评指正。

该书属河海大学研究生教育创新计划系列教学用书。

作者

2010年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 目前水工钢闸门结构形式发展	1
1.2 水工钢闸门数值模拟的现状和意义	7
1.3 本书主要内容	8
参考文献	10
第 2 章 有限元基本理论和 ANSYS 软件简介	13
2.1 有限元基础	13
2.2 有限元分析软件 ANSYS 简介	21
2.3 水工钢闸门有限元分析的单元特征	24
参考文献	29
第 3 章 水工钢闸门结构 ANSYS 静力分析	31
3.1 水工钢闸门组成结构	31
3.2 水工钢闸门材料及其材料参数	34
3.3 水工钢闸门的荷载及其在 ANSYS 中的施加	35
3.4 水工钢闸门静力学分析的基本步骤	42
3.5 弧形闸门静力学分析实例	44
3.6 升卧式翻板闸门静力学分析实例	52
3.7 船闸三角闸门静力学分析实例	58
3.8 超大型平面弧形双开闸门静力学分析实例	77
参考文献	85
第 4 章 水工钢闸门动力学分析	88
4.1 闸门动力学分析简介	88
4.2 动力学分析的基本方法和步骤	90

4.3	立柱式双向旋转闸门动力学分析实例	94
4.4	护镜闸门自振频率分析实例	99
4.5	大型坞门的船舶撞击分析实例	105
4.6	可升卧式翻板闸门的地震响应分析实例	116
4.7	弧形闸门流固耦合振动模态特性分析实例	129
	参考文献	137
第 5 章	水工钢闸门计算流体动力学分析	140
5.1	概述	140
5.2	基于 ANSYS 的计算流体动力学分析方法	141
5.3	某工程立柱式双向旋转钢闸门计算流体动力学 分析实例	144
	参考文献	151
第 6 章	水工钢闸门运动仿真分析	153
6.1	概述	153
6.2	仿真软件 Pro/ENGINEER 简介	153
6.3	可升卧式翻板闸门运动仿真分析实例	156
	参考文献	188

第 1 章

绪 论

1.1 目前水工钢闸门结构形式发展

水工钢闸门是水工建筑物的重要组成部分之一，它的作用是封闭水工建筑物的孔口，并能够按其工作需要全部或局部地开放这些孔口，可靠地调节上下游水位，以实现防洪、灌溉、引水发电、通航、过木以及排除泥沙、冰块和其他漂浮物等。闸门一般设置于水利枢纽的泄水系统、引水发电系统、水闸与排灌系统以及交通运输系统的咽喉要道，是水工金属结构中采用最多的一种设备。水利枢纽的各个系统，在很大程度上都是通过闸门灵活可靠地启闭来发挥着它们的功能与效益，并维护着整个枢纽的安全。

水利水电工程中闸门的种类繁多，应用比较广泛的有平面钢闸门、弧形钢闸门、船闸人字闸门、三角闸门、横拉门、浮箱式闸门等。近年来，随着设计制造水平的提高，一些大型或超大型的特型闸门也相继出现，如荷兰新水道防洪工程 Maeslant Dam 挡潮闸门，上海市苏州河口液压水下卧式闸门、常州钟楼防洪控制工程的平面弧形双开闸门、合肥塘西河的立柱式双向旋转钢闸门和南京市三汊河口护镜式闸门等。下面是目前国内外一些著名特型闸门介绍。

荷兰新水道防洪工程 Maeslant Dam，挡潮闸共有两扇挡潮闸门（图 1.1），该工程位于流经鹿特丹市的新水道上，于 1997 年 5 月正式通过验收并投入使用。风暴潮来临时，两扇闸门关闭形成宽 360m 的新水道防洪屏障，正常天气情况下，闸门泊在河岸两侧，不影响通航。闸门构件长约 300m，几乎与埃菲尔铁塔的高



度相当，用如此庞大的可移动闸门结构做成的挡潮闸在建闸史上是史无前例的。每扇闸门及其两支支承桁架的平面总体轮廓像个扇形，这个扇形的圆弧部分就是中空起的挡水挡浪作用的挡墙，墙高 22m，弧长达 210m，由钢板焊接而成的板梁箱型结构。挡墙内部被隔成一个个舱间，除一个舱间用于安装电气设备和水力设备，可供技术人员出入操作维修之外，其他舱间用于在挡墙下沉时充水。扇形的两个半径就是两支三维刚架，长为 238m。每支桁架由三根粗大的钢管加上作为联系杆件的大小钢管组成。底部两根最粗的钢管直径达 1.8m，管壁厚度为 6~9cm。桁架被焊接在闸门挡墙上，桁架的另一端连接在重达 680t 的球铰上。闸门由设置在闸门顶部的自动推进器操作。自动推进器有 6 个齿轴，由齿轮传动装置带动。每个自动推进器与岸上 30m 高的导向塔之间通过一伸缩杆连接，自动推进器的相对位置不变，与闸门一起仅作垂直方向运动。闸门采用球铰节点，单个球铰节点重 680t，具有一个与球形钢铸件相贴合的钢制芯板。球铰节点在连接于混凝土地基上的 8 个凹凸型钢铸件内转动。球铰节点直径为 10m，连接精确度为 2mm，这在当今世界上是独一无二的。球铰节点独特地采用了仿人体肩关节的转动原理，可以在三个方向上转动，完全符合闸门运转要求。



图 1.1 荷兰新水道防洪工程 Maeslant Dam 挡潮闸门

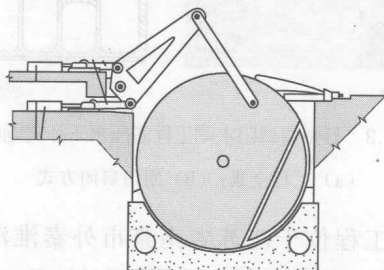


Maeslant Dam 挡潮闸与其他相关防洪设施组成的建设项目是三角洲工程规划的最后一项配套工程。

伦敦泰晤士防洪工程（图 1.2）于 1984 年建成，该工程修建在 523m 宽的泰晤士河上，由 11 座大型防水桥墩把泰晤士河分割成 4 个 61m 宽和 2 个 31.5m 宽的可以通船的河道，其余 4 孔 31.5m 为不能通船的河道，南岸 1 个，北岸 3 个。闸门 4 个主孔及 2 个辅孔采用提升式扇形闸门，其余 4 孔和辅孔采用普通简单式提升闸门。闸门设计非常新颖，采用提升式扇形闸门的闸墩之间底板上设混凝土底槛，开闸时，扇形闸门（圆弧半径为 27m）藏于底槛的凹处。闸门底部是圆形的，如 1/4 月牙形状。通常它们随轴



(a)



(b)

图 1.2 伦敦泰晤士防洪工程

(a) 防洪工程全景；(b) 闸门启闭方式



转动，平躺在河床上，使船只可以从桥墩间通过。如果遇到任何洪水的威胁，18m 高的闸门可通过安装在闸墩两边直径为 1.1m，行程为 3.5m 的液压启闭机进行启闭，以阻拦洪水。

近年来随着我国经济的发展，也相继出现了一些特型闸门。

苏州河河口水闸工程是上海市苏州河环境综合整治中的一项重要工程（图 1.3）。该工程位于苏州河口，是目前国内唯一一座单跨净宽 102m 水闸。闸门门型为液压水下卧式闸门，工程防洪标准为千年一遇重现期，相应防洪水位为 6.26m。工程设计要求水闸具有双向挡水和综合调水的功能，其正向挡水设计挡苏州河水水位差为 3.26m，反向挡潮设计挡黄浦江潮水水位差为 3.46m。闸底板总长 99m，支撑于 3 个闸墩之上，边闸墩下部为预制中空钢质沉箱，上部为钢筋混凝土箱形结构，中闸墩为预制中空钢质沉箱，闸墩基础均采用钢管桩。

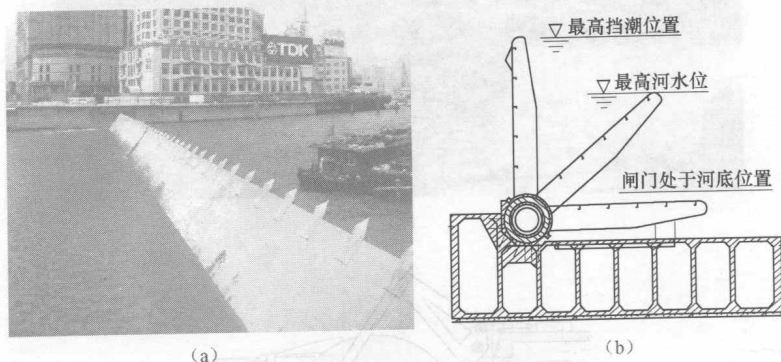


图 1.3 苏州河河口水闸工程液压水下卧式闸门

(a) 工程全景；(b) 闸门启闭方式

三汊河口闸工程位于江苏省南京市外秦淮河入江口处（图 1.4），上游距下关大桥约 300m，下游距长江约 150m。该水闸的主要功能是非汛期关闸蓄水，抬高外秦淮河水位，改善外秦淮河的水景观和水质；汛期闸门开启行洪，该水闸不考虑防洪及航运等功能。



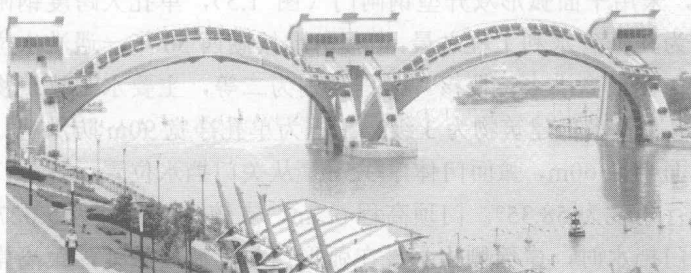


图 1.4 三汊河口闸双孔护镜闸门

该工程按秦淮河流域 50 年一遇降水、长江 20 年一遇潮位、设计行洪流量 $600\text{m}^3/\text{s}$ 的标准设计。非汛期关闸蓄水，河口闸上游正常控制水位 $5.5\sim 6.5\text{m}$ ，最高水位 7.0m ，排涝流量 $80\text{m}^3/\text{s}$ ，正常过闸流量 $30\text{m}^3/\text{s}$ 。工程等级为：闸区两岸堤防和水闸翼墙一等 1 级，水闸闸室二等 2 级，抗震烈度 7 度。该工程闸门设计总宽度 80m ，共设 2 孔。闸室采用钢筋混凝土坞式结构，水闸顺水流方向长 37m ，垂直水流方向宽 96m 。底板面高程 1.0m （吴淞零点），厚 $3.0\sim 1.2\text{m}$ ，中墩厚 7.0m ，边墩厚 4.5m ，闸门两侧拱脚插入闸墩 3.2m ，闸墩顶高程 7.5m 。

闸门形式采用双孔护镜门，单孔闸门净宽 40m ，高约 6.0m （ $5.15\sim 6.65\text{m}$ 可调），采用半圆形的三铰拱结构，圆半径 22.0m ，其半圆形闸门门叶两侧的拱脚用铰链连接后支承在边墩和中墩上。采用盘香式启闭机启闭。闸门在水平状态时挡水或门顶溢流，闸门上的活动门叶可升降以调节水位。

江苏省常州钟楼防洪控制工程是京杭运河常州市区段改线后，在太湖流域武澄锡西控制线上新增的防洪控制性工程。其主要任务是在大洪水期启用，尽量使太湖湖西地区洪水北排入长江，减少湖西高水东泄，减轻常州、无锡、苏州三大城市和武澄锡低洼地区防洪压力。在非大洪水期不碍航，满足京杭运河正常运行。工程建于京杭运河常州市区改线段上，距老武宜运河河口上游 600m ，位于常州市钟楼区西林街道境内。防洪闸设计闸孔净宽



90m, 采用平面弧形双开型钢闸门(图 1.5), 单孔大跨度钢闸门设计为江苏省水利工程之最。工程标准按湖西 50 年一遇洪水位设计, 历史最高洪水位校核。工程等别为二等, 主要水工建筑物为 2 级, 次要水工建筑物为 3 级。工程为单孔净宽 90m 防洪闸。闸门弧面半径 60m, 弧面门体厚 3.5m。从关门挡水位置运行至门库中运行角度为 58.35° 。门顶高程 6.5m, 支铰中心高程为 5.027m。弧形门挡水时, 岸墙侧止水设在弧形门与岸墙接触处, 距离岸墙 0.5m 处, 底止水采用 L 形止水橡皮, 与高程 -1.0m 活动底轨接触, 中间止水采用止水尼龙板。弧形工作门检修时, 门库抽干, 闸门支承于活动底轨上。



图 1.5 平面弧形双开闸门

闸门结构为横向布置上、中、下和底四道实腹式主横梁。底主梁距底板的距离为 0.55m, 上、中主梁间距 2.64m, 中、下主梁间距 2.42m, 下、底主梁间距 1.89m。门体上、底横梁之间设置浮箱。支臂在面板受力段沿总水压力作用线对称布置, 两支臂受力基本相等。支臂结构采用 3 根 $\phi 520 \times 18$ 钢管组成的格构杆。下边两根钢管中心距 3.12m; 上、下钢管中心距为 3.5m, 3 根主钢管之间设有连接弦杆。支铰安装于岸边主沉井上, 中心至岸墙 5m。支铰轴径 600mm, 闸门挡洪时, 支铰最大水平分析径向力 6148kN, 最大垂直方向轴向力约 1430kN。闸门检修和挡水状态时, 支铰轴



线与支臂中心线垂直。弧门支铰采用自润滑 GEW600XFZ5—2RS 球关节轴承,该轴承在垂直平面内可以偏摆 $\pm 2^\circ$,能满足闸门在特殊情况下的沉浮需要。

1.2 水工钢闸门数值模拟的现状和意义

水工钢闸门结构是一个完整的空间结构体系,结构形式复杂多样,作用外力荷载各异。目前对于这些闸门的设计较多的是套用现有的 SL 74—95《水利水电工程钢闸门设计规范》进行的。多数是按平面结构体系设计方法进行设计,采用一般结构力学和容许应力方法进行计算。对闸门各部件进行了一定程度的结构简化,把整个结构体系分割成相互独立的构件,忽略了各个构件的整体协调性,将外载荷按照经验分配给各个构件,然后再对每个构件按平面受力进行分析,其结构计算只限于在主框架平面内进行,而平面外的内力或应力的影响却未考虑。平面体系分析方法将整个闸门的结构计算,均按实际可能产生的最不利载荷组合情况,对各个构件进行强度、刚度及稳定性计算,对于水工钢闸门的低水头、中小型普通钢闸门,如平面闸门、弧形闸门等,该 SL 74—95《水利水电工程钢闸门设计规范》是其主要设计依据。这种方法也是现今普遍采用的设计方法,应用得十分成熟。该方法虽然计算简便、便于应用,但不能准确地反映整个闸门各构件间的相互联系和变形协调关系以及非计算构件在闸门上的作用。特别是对于一些特型闸门如大跨度低水头的闸门,或高水头闸门的设计,该方法明显存在一定的缺陷。鉴于上述因素,必须对于该类型的闸门结构的强度和刚度进行数值分析计算。对于运行操作复杂的闸门还需要进行运动仿真分析。各运动构件间的运动是否会产生干涉,闸门的运动轨迹、运动过程中的速度、加速度、各约束的反力等指标能否满足设计要求,都需要进一步的深入研究,从而为闸门结构的优化设计、支撑布置、启闭机的选择与安装、闸门制造、安装、检修等提供理论指导和参考,这在水工钢闸门的设计中具有重大的应用价值。



2.2.5 水工钢闸门的数值模拟主要包括水工钢闸门的有限单元法和运动仿真分析。

水工钢闸门的有限元法是将闸门作为一个整体的空间结构体系进行分析计算,在荷载的作用下,各个构件相互协调、共同作用。首先将整体结构进行单元划分,对每一个单元建立节点平衡方程,然后将其集成整个结构的平衡方程组。求出每个节点的位移,再根据单元应力和节点位移之间的关系,求解出单元应力,最后经过数据处理,推导出结构内每一个节点处的位移、应力值。运用空间有限元法来计算水工钢闸门,可充分体现出闸门较强的空间效应,并能够准确地计算出各构件的内力、应力及变形。因此,深入分析水工钢闸门的受力特点、变形特点,不仅可以节省材料、减轻闸门自重,实现对闸门结构的整体优化,同时还能提高闸门的整体安全度。再者,为了保证过去按平面体系方法设计的已建水工闸门能够安全可靠地运行,运用空间体系方法对这些闸门计算分析,以便及早发现问题,去除隐患,也是十分有必要的。随着计算机技术的飞速发展和广泛应用,有限单元法在水工钢闸门设计中得到了巨大的发展和应用。应用的计算机软件随之出现了很多,如 ANSYS、Patran、I-DEAS、Marc 等,其中 ANSYS 的应用最为广泛,在各类闸门的设计与分析中,已广泛采用此软件。

对于新型结构的闸门,如果运行启闭复杂,还必须进行运动仿真分析。利用虚拟样机技术对闸门的性能、行为、功能和制作可行性进行预测,从而事先对设计方案进行评估和优化,以达到最优目标。目前该技术在国内外诸多领域都得到了应用,通常用得比较多的仿真软件有 Adams、Pro/ENGINEER(简称 Pro/E)等。将虚拟样机技术应用在闸门分析中有着很大的前景。

1.3 本书主要内容

第1章为绪论,主要叙述了目前水工钢闸门结构形式发展现状,并阐明了水工钢闸门数值模拟的现状和意义。

第2章介绍了水工钢闸门结构数值模拟的基本理论知识和



ANSYS 软件。主要内容包括有限单元法的基本概念,静力分析的有限单元法,动力学分析的有限单元法,流体流动的有限单元法和水工钢闸门数值分析的常用单元特征。如弹性壳单元 Shell63,三维结构实体单元 Solid45,三维梁单元 Beam188,杆单元 Link8,流体动力学单元 Fluid141、Fluid142 等。

第 3 章详细叙述了水工钢闸门结构 ANSYS 静力分析的方法和工程实例。主要为水工钢闸门组成结构、材料及其材料参数、荷载及其在 ANSYS 中的施加,水工钢闸门静力学分析的基本步骤和工程实例。本书中遴选了比较有代表性的一些静力学分析工程实例,它们是弧形闸门,升卧式翻板闸门,船闸三角闸门,超大型平面弧形双开闸门。这些工程实例都是近年来从国内水利工程中涌现出的比较有代表意义的闸门结构。在对这些实例的讲述中,从工程的描述,计算工况和约束,有限元模型和求解,结果的后处理,计算结果的分析等内容都力求详细,便于读者参考和学习。

第 4 章是水工钢闸门动力学分析,主要内容为闸门动力学分析简介,动力学分析的基本方法和步骤。并列举了几个典型的工程实例:立柱式双向旋转闸门动力学,护镜闸门自振频率,大型坞门的船舶撞击分析,可升卧式翻板闸门的地震响应分析和弧形闸门流固耦合振动模态特性分析。这些实例具有广泛的代表性,有自振频率分析,有基于 ANSYS/LS-DYNA 的船舶与闸门撞击力计算,还包括 ANSYS 中的反应谱分析和闸门流固耦合振动模态特性分析等内容。

第 5 章是水工钢闸门计算流体动力学分析,主要介绍了基于 ANSYS 的计算流体动力学分析方法、步骤、参数设置。并以某工程立柱式双向旋转钢闸门计算流体动力学分析为实例进行了阐述。

第 6 章介绍了水工钢闸门运动仿真分析。主要内容是仿真软件 Pro/E 简介,可升卧式翻板闸门运动仿真分析实例。在这个仿真实例中,详细叙述了运动仿真工况,闸门中三维实体零件在 Pro/E 中的建模设计,闸门结构的 Pro/E 模型装配,闸门运动仿真过程,闸门运动仿真结果分析等内容。



参考文献

- [1] 郑克红. 高水头弧形钢闸门三维有限元分析 [D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [2] 张晴. 超大型平面弧形闸门有限元静动力数值分析 [D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [3] 周军. 平面多定轮钢闸门结构分析 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [4] 朱怀淼, 胡友安. 可升卧式翻板闸门的静力数值分析 [J]. 水电能源科学, 2009, 27 (4): 120-122.
- [5] 张振鑫. 荷兰新水道挡潮闸简介 [J]. 江苏水利, 1997, (2).
- [6] 翁义孟, 杨德发. 荷兰梅斯兰特弧门挡潮闸介绍 [J]. 人民珠江, 1992, (1): 46-48.
- [7] 郑仁塘. 世界著名的水利工程—泰晤士河防潮闸 [J]. 世界农业, 1990, (11): 14-21.
- [8] 吴庆洲. 伦敦防洪的泰晤士河挡潮闸 [J]. 人民珠江, 1988, (6): 32-35.
- [9] 陈文伟, 汪云祥, 季永兴, 等. 苏州河河口水闸工程综述 [J]. 水利水电科技进展, 2007, (S1): 1-4.
- [10] 季永兴, 卢永金, 陈文伟, 等. 苏州河河口水闸工程设计特色 [J]. 水利水电科技进展, 2007, (S1): 5-8.
- [11] 南京市三汊河口新型闸门水力与结构静动力特性研究总报告 [R]. 南京: 河海大学, 2006.
- [12] 胡友安. 苏南防洪超大型平面弧形双开闸门设计 [A]. 中国水力发电工程学会金属结构专业委员会. 水工机械技术 [C]. 北京: 中国水利电力出版社, 2008: 101-104.
- [13] SL 74—95 水利水电工程钢闸门设计规范 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [14] SL 226—98 水利水电工程金属结构报废标准 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.

