

高水头平面事故闸门 动水闭门的水动力实验 和数值模拟研究

章晋雄 著

国外借



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高水头平面事故闸门 动水闭门的水动力实验 和数值模拟研究

章晋雄 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

泄水建筑物的平面事故闸门动水闭门的可靠性直接影响着工程的泄水安全。闸门动水闭门水流属于非恒定的高速水气两相湍流,水动力特性复杂。本书介绍了平面闸门水动力学研究进展、高水头平面闸门动水闭门的水动力实验及数值模拟的方法和成果,内容主要涉及3个方面:采用闸门动态实验方法,深入研究了典型闸门动水关闭水流及水动力荷载特征;基于物理模型试验及原型观测结果论证,提出了适合高水头平面闸门动水关闭的水动力数值模拟方法;采用数值模拟方法系统研究了闸门底缘体型及水力参数对闸门水动力特性的影响,揭示了闸门上托力及上托力系数随上游底缘倾角和厚度参数组合变化的关系,揭示了下游底缘倾角及上、下游水头对闸门下吸力的影响规律,提出了下吸力系数和淹没水头系数的拟合计算公式。

本书可供从事闸门水力学、高速水力学等相关研究的科研人员、设计人员、高校教师与研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高水头平面事故闸门动水闭门的水动力实验和数值模拟研究 / 章晋雄著. -- 北京:中国水利水电出版社, 2016.12

ISBN 978-7-5170-5080-3

I. ①高… II. ①章… III. ①高水头—平面闸门—水动力学—实验—研究②高水头—平面闸门—水动力学—数值模拟—研究 IV. ①TV663

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第322813号

书 名	高水头平面事故闸门动水闭门的水动力实验和数值模拟研究 GAOSHUITOU PINGMIAN SHIGU ZHAMEN DONGSHUI BIMEN DE SHUIDONGLI SHIYAN HE SHUZHIMONI YANJIU
作 者	章晋雄 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、68545874 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	虎彩印艺股份有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 6印张 114千字
版 次	2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷
定 价	30.00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

前 言

我国水利水电高坝工程的泄水闸门具有水头高、流量大的特点。泄水建筑物的平面事故闸门担负着紧急情况下动水下闸、防止事故扩大的重任，闸门动水关闭的可靠性直接影响着工程的泄水安全。高水头及高流速下闸门的水动力特性十分复杂，闸门水动力荷载受闸门体型、作用水头及流速、启闭速度及通气等诸多因素的影响，闸门体型设计不良、荷载计算产生偏差时容易导致闸门不能正常关闭等安全问题。系统研究高水头平面闸门复杂的水动力特性，提出有利于闸门动水关闭可靠性的措施及方法，对于高水头闸门的设计和安全运行具有重要意义。

平面事故闸门动水下门属于非恒定的水气两相湍流运动，闸门区水流为复杂的绕流及射流现象，闸门水动力特性不仅与闸门体型及水力条件相关，还受闸门的重力、水体的附加质量以及惯性力等综合作用影响，问题十分复杂，目前尚无一套成熟的理论及计算方法可供参考，也缺乏系统和深入地研究。本书针对高水头平面闸门动水关闭的水动力特性问题，结合典型平面事故闸门的模型试验分析了闸门动水关闭水流及水动力荷载的变化特征；在物理模型试验及原型观测结果验证数值模拟方法的基础上，系统深入地研究了闸门底缘体型、水头及启闭速度等参数和闸门水动力特性的影响关系，揭示了闸门上托力及上托力系数随上游底缘倾角和厚度参数组合变化的关系，给出了下吸力系数和淹没水头系数的定量关系计算公式，并提出了闸门体型设计的相关建议。研究成果不仅可为高水头闸门的设计、应用及安全评估提供科技支撑，对于提高现代闸门水动力学研究水平也具有重要意义。

本书共分为6章。第1章绪论，总结了国内外平面闸门动水关闭的水动力实验、原型观测及数值模拟的相关研究成果和进展，分析了高水头平面闸门动水闭门水动力特性研究拟解决的关键技术问题，介绍了本书涉及的主要研究工作。第2章高水头平面闸门动水

闭门的水动力实验研究,介绍了闸门水动力作用原理、闸门静态及动态实验方法,结合两个典型闸门阐述了模型相似准则和模型设计原则,介绍了闸门动态实验的启闭控制系统与测量仪器设备,详细研究了闸门动水关闭的水流流态及门体压力荷载变化特性,基于实验分析了影响闸门水动力荷载特性的关键体型及水力因素。第3章平面闸门动水关闭的水动力数值模拟方法,针对影响闸门动水关闭的水动力数值模拟的难点,介绍了本书采用的能较好描述闸门区复杂流动特性的数学模型、合理的动网格适应技术及计算格式,针对典型事故闸门的动水关闭水流进行了数值模拟分析,通过模型试验及原型观测结果论证了数值模拟结果的可靠性与精度,提出了适合平面闸门动水关闭的水动力数值模拟方法。第4章闸门上托力特性的数值模拟研究,采用数值模拟方法系统地研究了闸门上托力随底缘体型及水力参数的变化规律,阐释了闸门上托力和上托力系数受底缘倾角及厚度参数的双重影响,给出了闸门最小上托力系数随底缘倾角和厚度参数组合变化的关系。第5章闸门下吸力特性的数值模拟研究,采用数值模拟方法系统地研究了下游底缘倾角及上、下游水头参数对闸门下吸力的影响,提出了典型下游底缘体型闸门下吸力强度随闸门水头的变化关系曲线,并揭示了闸门下吸力及下吸力系数随淹没水头的变化规律。第6章为全书的总结与展望,归纳总结了本书研究的成果和创新点,并对需进一步深入研究的问题进行了展望。

本书大量素材来源于作者在中国水利水电科学研究院完成的博士学位论文,相关研究工作得到了导师吴一红教授、张东教授和曹以南教授的精心指导。本书还得到了潘水波教授、陈文学教授以及张文远、张宏伟、张蕊等高级工程师的帮助和支持,在此一并表示衷心的感谢。

本书的出版得到了国家“十三五”重点研发计划课题“梯级高坝大库水温结构变化的生态影响和分层取水技术”(2016YFC0502202)、“低环境影响度的泄洪消能技术研究”(2016YFC0401706)以及国家自然科学基金项目(51279216)的资助,在此一并致谢。

由于作者水平有限,本书难免存在不妥和疏漏之处,敬请读者批评指正。

作者

2016年9月

目 录

前 言

第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景和意义	1
1.2	研究进展	3
1.3	本书的研究内容及主要工作	6
第 2 章	高水头平面闸门动水闭门的水动力实验研究	8
2.1	平面闸门的水动力作用原理	8
2.2	平面闸门水动力实验方法	10
2.3	实验对象、相似准则和模型设计	11
2.4	实验系统	17
2.5	非稳态水流动水压力的实验数据处理方法	20
2.6	闸门动水闭门的水动力实验成果分析	22
2.7	小结	36
第 3 章	平面闸门动水关闭的水动力数值模拟方法	38
3.1	控制方程	38
3.2	自由表面 VOF 模型	39
3.3	计算域、网格、初始条件、边界条件及数值算法	41
3.4	数值模拟结果及模型的验证	45
3.5	小结	53
第 4 章	闸门上托力特性的数值模拟研究	54
4.1	平面闸门上游底缘的上托力及上托力系数	54
4.2	计算工况参数的选取	55
4.3	上游底缘倾角对闸门上托力的影响	55
4.4	上游底缘厚度对闸门上托力特性的影响	62
4.5	高水头下闸门上游底缘头部的压力分布特性	68
4.6	闸门启闭速度对闸门上托力的影响	70
4.7	小结	71

第 5 章	闸门下吸力特性的数值模拟研究	72
5.1	闸门（下游倾角底缘）的下吸力及下吸力强度	72
5.2	计算工况参数的选取	73
5.3	下游底缘倾角及高水头对闸门下吸力的影响	73
5.4	尾水淹没条件对闸门底缘下吸力的影响	78
5.5	小结	81
第 6 章	总结与展望	83
6.1	主要结论	83
6.2	创新点	84
6.3	工作不足及展望	85
参考文献		86

第 1 章 绪 论

泄水闸门是水利水电工程泄水建筑物的控制“咽喉”，泄水建筑物中通常设有工作闸门、事故闸门和检修闸门。事故闸门是指泄水建筑物或相关设备发生事故时使用的闸门，一般要求在动水条件下关闭而截断水流。事故闸门担负着紧急情况下动水下闸、防止事故扩大的重任，直接关系着泄水建筑物运行的技术可行性和安全可靠性能。

1.1 研究背景和意义

进入 21 世纪以来，我国实施“西电东送”等战略工程，在西南地区高库大坝不断涌现，在建和拟建包括溪洛渡、锦屏、小湾、白鹤滩、糯扎渡、乌东德等一大批巨型水利水电工程，这些工程坝高已达 300m 量级，泄水建筑物及闸门具有水头高、流量大的特点，其事故闸门的设计水头已大大超过 100m（表 1.1），如小湾电站底孔中事故链轮平面闸门的设计承压水头高达 160m，闸门动水关闭的操作水头达 106m，闸门孔口尺寸为 5m×12m（宽×高），总水压力超过 100MN，其设计和应用水平已达到世界前列。在国外，高水头闸门的应用也比较广泛，典型的如法国谢尔邦松的深孔平板门，其设计水头达 126m，总水压力达 84.3MN；在加拿大 Mica 大坝中，电站进水口平板事故闸门的孔口尺寸为 5.258m×6.706m（宽×高），最高水头为 71.5m。从国内外平面事故闸门的发展趋势来看，随着高库大坝的建设，闸门的应用水头越来越高，在高水头及高流速的运行条件下，闸门动水关闭的水动力学问题非常突出，闸门的体型及水动力性能是否良好，高水头条件下闸门能否正常动水关闭，都是高水头闸门设计及应用所关注的焦点问题。

表 1.1 国内外投入运行和正在建造的部分高水头平面事故闸门

工程名称	闸门应用类型	孔口尺寸 (宽×高) /(m×m)	设计水头 /m	总水压力 /MN	支承形式
龙羊峡	底孔事故门	5×9.5	120	65.4	链轮
东江	底孔事故门	6.8×9	115	81	链轮

续表

工程名称	闸门应用类型	孔口尺寸 (宽×高) /(m×m)	设计水头 /m	总水压力 /MN	支承形式
漫湾	冲沙底孔事故门	5×6	98	31.8	链轮
天生桥一级	放空洞事故门	6.8×9	120	73.5	链轮
二滩	中孔事故门	5.2×11.8	90	57.1	链轮
三峡	深孔事故门	9×11	85	65	定轮
锦屏一级	放空底孔事故门	5×12.42	133	83	定轮
小湾	底孔事故门	5×12	160	100	链轮
溪洛渡	深孔事故门	5.2×14.14	110	81	定轮
Mica (加拿大)	进水口平板事故闸门	5.26×6.7	71.5	25	定轮
谢尔邦松 (法国)	电站深孔平板门	7×9.7	126	84.3	履带式
伊泰普 (巴西)	深孔平板闸门	10×14	140	199.8	定轮

平面（板）闸门的优点是在顺水流方向所占有的空间尺寸较小，闸门启闭装备的构造也相对简单，闸门门叶可移出孔口而有利于检修和维护，泄水孔的孔数较多时还能做到一门多用，因此在水利水电工程泄水建筑物（泄水孔、泄洪洞及引水发电流道等）中得到广泛应用。平面闸门底缘一般可分为上游倾角底缘、下游倾角底缘和上、下游组合倾角底缘 3 种型式，见图 1.1。对于在动水中操作的平面事故闸门，一般要求闸门上游底缘受到正压力作用，避免底缘水流发生强分离时引起闸底产生过大负压和强压力波动，因此，我国《水利水电工程钢闸门设计规范》（SL 74—2013）规定：“对于部分利用水柱的平面闸门，其上游底缘倾角应不小于 45°；平面闸门下游底缘倾角应不小于 30°，当不能满足要求时应采取适当补气措施”。

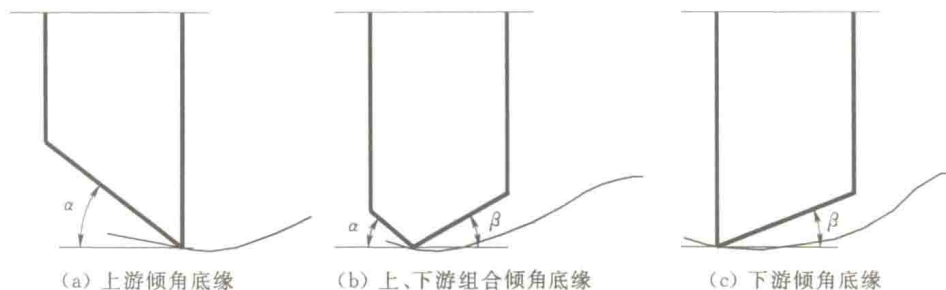


图 1.1 平面闸门的底缘型式

当前平面事故闸门的应用水头越来越高，高速水流下闸门水动力特性对体型边界非常敏感，闸门布置或体型设计稍有不当，极易造成事故情况下不能紧

急关闭,不仅威胁工程的泄水安全,甚至会给下游带来严重的生命财产损失。我国天桥水电站泄洪洞平板闸门在 1977 年投入运行后,多次出现高水位下闸门落不到底、启门力超载及拉杆钢丝绳断裂等问题。水口水电站溢洪道的事故闸门在 1997 年动水关闭原型试验中,也发生了门机超负荷破坏的严重事故。上述两个工程的事故闸门运行水头仅 30m 左右,尚由于闸门水动力特性不良而发生事故,对于当前高达和超过 100m 水头的平面闸门,闸门动水关闭水流呈高速水气两相过渡流,闸门底缘处容易发生脱流和水流分离,在强剪切流作用下门体压力产生大梯度变化,闸门的水动力荷载呈复杂的时空变化特征,高速水流影响下闸门的水动力荷载系数可能还会发生变化,因此参考低水头闸门研究成果或经验就会产生较大的偏差。另外,高水头下平面事故闸门底缘水流容易发生严重脱流和水流分离,闸底产生过大负压和压力波动,不仅影响闸门启闭力,严重时可能还会导致门叶发生振动,甚至导致闸门发生空蚀破坏。

综上所述,对于高水头平面事故闸门,研究闸门动水关闭的复杂水流及水力荷载演变规律,研究高水头下闸门的水动力特性,揭示闸门体型及水力参数对闸门水动力性能的影响,提出有利于闸门动水关闭可靠性的措施及方法,是当前高水头闸门亟待解决的一个重要科学难题,其研究成果不仅对高水头闸门的研究、设计和运行能发挥重要的科技支撑作用,对于提高现代闸门水动力学研究水平也具有重要意义。

1.2 研究进展

平面闸门动水关闭中的水动力特性问题非常复杂,是闸门设计及研究中的一个重点和难点。在针对闸门水动力特性的研究中,主要有物理模型试验、数值计算及原型观测 3 种方法。

1.2.1 平面闸门动水关闭的水动力学实验

在闸门动水下门快速截断水流的过程中,闸门本身是一个与水流作用的运动边界,同时闸下水流又是一个复杂的绕流及射流现象,其所构成的非稳态水流形态复杂,需要考虑闸门的重力、水体的附加质量以及运动加速度的惯性力等综合作用影响,目前尚无一套成熟的理论及计算方法可供参考,因此目前借助闸门水动力模型试验进行研究的居多。

国内外学者围绕闸门动水关闭水流、水动力荷载及启闭力等问题进行了大量模型试验研究及理论分析工作。Naudascher 在 1964 年对 3 种上游倾角底缘闸门的上托力进行了试验研究,提出了闸门上托力和底缘倾角及水力参数的无

量纲理论公式。Smith 和 Murray 通过试验也研究分析了电站闸门底缘及门井体型对上托力荷载的影响。Sagar 从减轻闸门的振动、空化以及降低闸门启闭力角度探讨了底缘上游倾角的选取方法。谢省宗等通过实验研究了电站进水口快速闸门动水下门的明满流过渡的临界开度,导出了闸门水力学与水轮机水力学的关联方程。哈唤文、刘维平等进一步研究了电站进水口闸门快速下降的持住力等水力学问题。陈怀先等通过试验研究了不同上游底缘型式和下游底缘型式闸门的压力变化以及上托力系数,提出了将底缘压力从正压变为负压所对应的闸门开度定义为零压力开度的概念。金泰来、潘水波等通过模型试验研究了三峡深孔事故闸门门体压力分布、水力荷载及启闭力特性。从 20 世纪平面闸门水力学研究成果来看,一般还基于势流理论对闸水流及水力荷载进行分析,试验研究对象主要针对水头低于 60m 的闸门,还未能考虑高水头及高速水流对平面闸门水动力特性的影响。

随着高水头平面闸门的逐渐应用,Ahmed 于 1999 年通过 14 种闸门上游底缘型式,进一步研究了底缘压力系数随底缘体型的变化规律,并分析了门顶压力系数与门楣间隙的影响。肖兴斌、王才欢等结合三峡工程,通过试验研究了闸门铅垂方向的动水压力载荷并提出了避免闸门底缘负压的布置型式。周通结合积石峡泄洪洞事故闸门通过调整闸门体型对闸门启闭力进行了优化研究。吴一红、章晋雄、张文远等针对小湾底孔、溪洛渡泄洪洞及锦屏一级电站进水口等工程的事故闸门,通过模型试验较为系统地研究了闸门的压力荷载分布及闭门力、闸门区水流脉动及流激振动等水动力学问题。王伟等结合小浪底孔板洞事故闸门动水下门实验,研究了长有压泄洪洞进水口事故闸门及流道的明满流流态及压力特性。物理模型试验通过对闸门水流及水力荷载的测试分析,解决了我国许多高水头闸门的水力设计和工程问题,但模型试验的研究对象一般为特定工程的事故闸门,因成果的系统性不强而不便于广泛地推广应用。

1.2.2 平面闸门动水关闭的原型观测

由于物理模型在缩尺效应等方面的局限性,相关研究及设计工作者对通过原型试验研究闸门的动水关闭问题也十分关注,其中我国在 20 世纪 80 年代曾对天桥水电站泄洪洞工作闸门进行原型观测,通过测试闸门启闭力和门后压力随闸门启闭的变化过程,对该闸门曾多次出现的启门力严重超载、拉杆和钢丝绳断裂、闸门落不到位等问题进行了研究。加拿大的 B. C. Hydro 于 2008 年针对 Mica 电站进水口事故闸门开展了原型试验,对闸门动水关闭的启闭力进行了测试研究。张黎明、夏毓常曾对拓溪电站事故闸门、葛洲坝船闸输水道反弧门的原型观测成果和模型进行对比,分析了模型和原型之间的缩尺影响并提出

了修正方法。总体来说,由于工程现场条件的限制,在闸门水力学原型观测方面的研究工作还较少,对于闸门水流结构及水力荷载分布也很难进行深入研究。

1.2.3 平面闸门的水动力数值模拟

由于闸门动水关闭水流属于典型的非定常两相流流动,直接求解描述闸门水流的 $N-S$ 方程十分困难,两相流的数学模型也非常复杂,因此以往只是在大量简化和假定条件下进行了一些计算研究工作。何小新等曾根据势流理论,采用边界元法计算了闸门上的水平作用力和上托力。Sagar、夏毓常均在假定底缘水流不分离的条件下,推导了闸门底缘上托力系数的计算公式。以上理论分析或计算模式均建立在简单水流方程或假定的条件下,模型简化及假定条件多,对于高水头平面闸门的高速水流及复杂的水动力荷载问题,这些方法还不能满足工程设计的需要。

近些年来,随着湍流及多相流数值模拟技术和计算机水平的迅速发展,使得数值求解水力学运动方程成为可能。数值模拟不仅可以解决简单的流动问题,而且可对复杂的实际流动进行模拟与预测。张瑞凯等针对三峡船闸反弧事故闸门,采用流动标点法跟踪自由水面位置建立了二维数值模型,研究了阀门区水流时空特性及阀门承受的水动力荷载。沙海飞等结合非结构化动网格,对简单的平底闸门动水开启的二维非恒定流过程进行了 CFD 模拟分析。Andrade 和 Amorim、Zlatko 采用二维 $k-\epsilon$ 紊流模型模拟了电站工程平板闸门区水流流场,分析了门体上的水力荷载。李利荣等曾针对水力自动滚筒闸门,采用 RNG $k-\epsilon$ 模型和水-气两相 VOF 模型,模拟分析了闸门表面的动水压力、流速分布等水动力特性。上述在闸门紊流数值模拟方面的工作,为闸门动水关闭水流的数值模拟提供了一些基础和经验,也表明数值模拟已成为闸门水动力学研究的一个重要手段。

综上所述,物理模型还存在成果系统性较差及缩尺效应等局限性,原型观测也有现场条件限制、费用较高和难以深入研究的问题,而闸门动水关闭水流的数值模拟能弥补物理测试手段的不足,可以详细分析闸区的流场,得到全面的水力荷载分布和变化特征,且数值模拟的研究周期短,费用较低,体型和参数修改方便,也没有缩尺效应问题,因此采用数值模拟方法进行闸门动水关闭水力学研究是一个重要的发展方向。从闸门水流数值模拟研究概况来看,目前采用二维单相流模型的居多,还难以考虑门槽影响下闸门区的三维水气两相流特性。另外,由于高水头闸门动水关闭的非恒定多相流十分复杂,数值模拟结果是否有足够的精度,是否能满足工程设计的要 求,也还需要做大量的研究工作。

1.3 本书的研究内容及主要工作

1.3.1 关键技术问题

从前述闸门水动力特性研究进展来看,高水头平面闸门动水闭门的水动力实验及数值模拟研究的关键技术问题有以下几个方面。

(1) 平面闸门的动水闭门性能不仅与闸门体型相关,也受水力运行参数的影响。平面闸门底缘体型布置多样,不同的上、下游底缘布置方式及倾角等体型参数对闸门水动力特性影响很大;闸门的水头、流量及关闭速度等水力参数复杂、变化范围较大,也显著影响闸门门体的水动力荷载特性。为研究闸门水动力特性的基本规律,需要把握影响闸门水动力特性的关键体型及水力因素,合理选取典型的闸门布置型式进行水动力实验及数值模拟研究。

(2) 适合平面闸门非恒定高速水气两相湍流的数值模拟方法以及数值模拟精度需要达到满足工程要求的问题。高水头闸门动水闭门的水流为复杂的非恒定高速水气两相湍流,闸门区水流流场存在强弯曲、大压力梯度变化的特点,闸门闭门过程中发生满流向明流过渡演变,因此湍流模型不仅要较好地模拟闸门区绕流的弯曲和大压力梯度特性,还要很好地处理闸后水气两相流的自由界面问题,需要选取合适的湍流模型及两相流模型。另外,闸门区水流流场及闸门水动力荷载随闸门门体的运动而变化,由于闸门门体的几何结构较为复杂,网格特征尺寸小,其动水闭门水流存在复杂的内部动边界处理问题,常规的动边界网格处理方法容易产生网格畸变或更新困难的问题,也需要采用合适的网格适应技术,使闸门区动边界网格高效更新,同时又能保证网格质量和计算精度。

(3) 高水头下平面闸门的上托力系数、下吸力强度等荷载系数计算公式或系列图表的研究提炼。高流速、强射流作用下闸门底缘上托力或下吸力变化规律及范围相比低水头时可能存在较大差异,闸门体型及参数组合多样,如何研究提炼出具有工程意义的上托力系数、下吸力强度等荷载系数的计算公式或图表,是一个需要解决的重点技术问题和难点。

(4) 高水头、高流速对闸门水动力特性的影响问题。高水头作用下闸孔为高速绕流及射流,闸门门体特别是底缘容易发生水流分离,闸门门体的压力分布变化特性复杂,如何研究其对闸门水动力荷载的影响,进一步识别其可能造成的闸门空化及振动危害,也是闸门设计和研究关注的一个重要技术问题。

1.3.2 主要研究工作

本书针对高水头平面事故闸门的水动力学问题,结合典型平面事故闸门水动力实验研究了闸门动水关闭水流及水动力荷载的变化特征;在物理模型试验及原型观测结果验证数值模拟方法的基础上,系统深入地研究了不同闸门体型及水力参数对平面闸门水动力荷载特性的影响。

(1) 针对工程中两种典型上、下游倾角底缘型式的平面事故闸门,采用物理模型试验的方法进行了闸门动水关闭的水动力实验,研究了闸后明满流转换演变规律及过渡形态,分析了闸门门体压力分布、闸门门顶水柱压力、上托力及下吸力荷载随闸门开度的变化规律,探讨了闸门水头、流量及底缘体型对闸后流态及门体水动力特性的影响。

(2) 根据闸门动水关闭过程中的水流特性,建立了平面闸门动水闭门的水动力数值模型。数值模型采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和 VOF 两相流模型,结合域动网格和动态分层的网格适应技术,提出了适合高水头闸门动水关闭非恒定两相流的数值模拟方法,模拟计算了典型平面事故闸门动水关闭过程及门体的水动力荷载,数值模拟结果与模型试验及原型观测结果的吻合程度良好,数值模拟的精度能够满足工程设计的需要,论证了数值模拟方法的可行性。

(3) 针对上游底缘型式的平面事故闸门,模拟分析了闸门动水关闭的水动力特性,研究揭示了闸门上托力随上游底缘体型及水力运行参数的变化规律。研究了底缘倾角及厚度对闸门上托力特性的综合影响,提出了闸门最小上托力系数随底缘倾角和厚度参数组合变化的关系,针对高水头运行条件提出了闸门体型参数的取值建议。

(4) 针对下游底缘型式的平面事故闸门,模拟分析了不同底缘体型及水头条件下闸门的水动力特性,研究了下游底缘倾角及上、下游水头参数对闸门下吸力强度的影响规律,并提出了典型下游底缘体型闸门下吸力强度随闸门水头的变化关系。模拟研究了不同尾水淹没条件下闸门下吸力的演变特性,研究了上、下游水头差对闸门下吸力性质及动水关闭性能的影响。

第2章 高水头平面闸门动水闭门的水动力实验研究

本章基于闸门水动力作用原理分析,介绍了闸门水动力实验方法。结合两个典型上游和下游倾角底缘体型的事故闸门,通过物理模型试验研究了闸门动水关闭的水流流态及门体压力荷载变化特性,分析了影响闸门水动力特性的关键体型及水力因素。

2.1 平面闸门的水动力作用原理

研究闸门水动力荷载的主要目的是为了闸门启闭力的设计计算。从影响平面闸门启闭力的因素来看,主要有闸门自重、动水作用力、摩擦力及因启闭加

速度引起的惯性力等。在闸门设计中,一般将启闭力进行力系分解为门体重力、门顶水柱压力、底缘上托力及下吸力、水平推力及摩擦力,在分析各项分力的特性和内在联系的基础上,根据力系平衡原理计算分析闸门的启闭力。

由于平面事故闸门一般匀速关闭,惯性力可以忽略,因此在闸门的动水关闭过程,闸门的闭门持住力与门顶水柱压力、底缘上托力(或下吸力)、摩擦力及门体重力等构成一个平衡力系,其作用原理及力系构成见图2.1,闸门动水关闭时的闭门持住力可表示为

$$F = (G_g + G_w) \cos \theta - \Delta P_v - T \quad (2.1)$$

图2.1和式(2.1)中各参数的代表意义如下。

(1) 闸门门顶水柱压力 W_s 。当闸门采用下游面板止水型式时,闸门关闭过程中就在门顶形成水柱压力,从而增大闸门

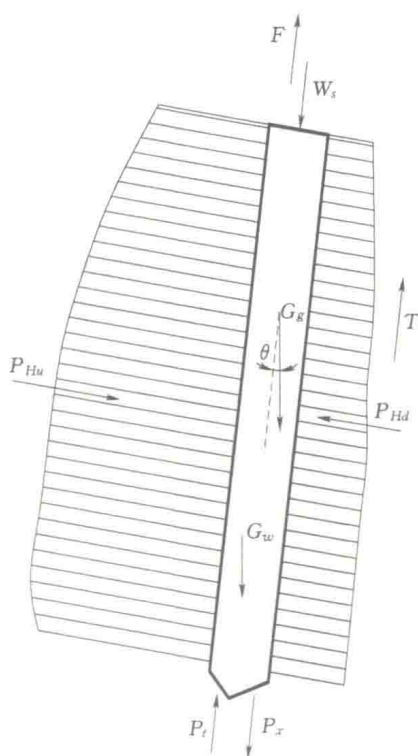


图2.1 闸门上的作用力系示意图

的闭门力；对于上游止水型式的闸门，当闸门处于大开度且门后为满流流态时，门井水位的存在同样在门顶产生一定的水柱压力。

(2) 闸门底缘上托力 P_t 或下吸力 P_x 。闸门底缘上托力或下吸力与底缘型式及门后水流转换过程相关。

1) 对于仅有上游底缘倾角的闸门 [图 1.1 (a)]，闸门启闭过程中底缘一般呈上托力荷载。

2) 对于仅有下游底缘倾角的闸门 [图 1.1 (c)]，闸门启闭过程中水流作用在底缘的水力荷载形式与门后流态转换相关，当门后为满流时呈上托力；当门后为明满流或明流时，由于底缘处水流分离、射流扰动及吸气影响，在闸门底缘上会转换形成下吸力作用，且下吸力大小与底缘脱流形态和补气是否充足相关。

3) 当底缘设计为前后均为锐角组合型式时 [图 1.1 (b)]，底缘上的上托力和下吸力需分开计算。

(3) 闸门上、下游面板上的压力 P_{Hu} 、 P_{Hd} 及水平推力 ΔP_H 。闸门上、下游面板上的压力 P_{Hu} 与 P_{Hd} 的差值为作用在闸门上的水平推力 ΔP_H ，是计算闸门运行摩擦力的水力荷载，表达式为

$$\Delta P_H = P_{Hu} - P_{Hd} \quad (2.2)$$

(4) 摩擦力 T 。闸门摩擦力主要指支撑行走系统（滚轮、链轮等）和止水水封摩擦两部分，在闸门水平推力荷载作用下，摩擦力的表达式为

$$T = [\Delta P_H + (G_g + G_w) \sin \theta] f \quad (2.3)$$

式中： f 为综合摩擦系数； θ 为闸门门井与铅垂线夹角，闸门门槽铅直型式时 $\theta = 0^\circ$ 。

(5) 闸门重力 G_g 。闸门结构自身的重力，有时会加以配重 G_j ，采用拉杆形式时还应计入拉杆重力。

(6) 闸门门体内积水重力 G_w 。对于闸门空腹面板设计为开孔形式，在计算闸门闭门力时应考虑门体内积水重力。

(7) 闸门竖向水压力 ΔP_v 。为表征作用在闸门门体的竖向水力荷载，令闸门底缘上托力（下吸力）与门顶水柱压力的差值为沿门体的竖向水压力 ΔP_v ，即

$$\Delta P_v = P_t - P_x - W_s \quad (2.4)$$

(8) 闸门闭门持住力 F 。根据作用在闸门上的力系平衡式 (2.1)，闸门动水关闭过程中的闭门持住力可表示为

$$F = (G_g + G_w) \cos \theta - \Delta P_v - [\Delta P_H + (G_g + G_w) \sin \theta] f \quad (2.5)$$

从闸门闭门持住力的构成来看，闸门重力一般情况下为已知，摩擦力主要是由闸门的材料特性和面板上的水平推力所决定的，因此作用在闸门上的各项

水动力荷载是确定闸门启闭力的关键因素。

2.2 平面闸门水动力实验方法

平面闸门水动力实验有静态试验和动态试验两种方法,静态试验对于控制流量的泄水工作闸门研究是一个行之有效而又简单的试验方法,而对于泄洪建筑物或电站进水口的事故闸门,只有动态试验才能真正模拟闸门动水关闭的非恒定流过程,准确测试闸门区水流特性及作用在闸门上的水动力荷载。

2.2.1 闸门固定开度(静态)试验法

闸门的静态试验是指模拟闸门在固定开度下泄流的试验方法,只能测试获取闸门在不同开度下恒定泄流的水力参数,因此一般仅适用于研究诸如平面工作闸门控泄等恒定流问题。静态试验不需要模拟闸门启闭的试验设备,其试验设备和方法相对简单,费用较低,在早期的闸门水力学试验中有所应用。静态试验由于不能反映闸门连续开启或关闭过程中水流惯性的影响,因此对于研究平面事故闸门动水关闭问题不太适用。

2.2.2 闸门动水关闭(动态)试验法

闸门的动态试验是指模拟闸门在动水条件下的连续闭门过程,通过测试该非恒定流过程中闸门的水动力参数及启闭力,以探明闸门事故工况下动水下门、截断水流的真实工作情况。动态试验需要配备控制闸门运动的启闭仪器,另外,闸门门体压力等水力参数属于随时间(闸门开度)变化的非平稳随机过程,因此相对静态试验而言,动态试验无论在测试手段和试验数据处理上都要复杂得多。动态试验能够较真实地反映闸门连续动水关闭过程中水流惯性的作用,适用于诸如平面事故闸门动水关闭等问题的研究,是研究该类问题的主要试验方法,在我国众多水电工程的高水头闸门试验研究中得到了应用。

由于原型和模型闸门摩擦力一般很难相似,目前闸门水动力实验主要根据2.1节中所述的闸门水动力作用荷载的计算原理,采用试验测试闸门水力荷载后再计算闸门启闭力的方法,研究闸门的水动力荷载及启闭力特性。试验中通过测量闸门门体的动水压力分布,计算作用在闸门上的各项水力载荷,再结合闸门摩擦系数计算运行摩擦力,最后计算得到闸门动水关闭的持住力。闸门水力荷载及闭门持住力的计算公式参见式(2.1)~式(2.5)。

对于闸门门体的竖向水压力 ΔP_v ,除了按闸门门体压力分布及式(2.4)计算以外,还可以利用闸门启闭过程中摩擦力反向的特点,采用试验分解、计算合成的方法进行试验测试分析。闸门开启和关闭时闸门启闭力可分别表示为