

水利水电规划设计总院 主管
水电水利规划设计总院

泄水工程 与高速水流

水利水电泄水工程与高速水流信息网 编
中水东北勘测设计研究有限责任公司科学研究院

2010

XIESHUIGONGCHENG
YU GAOSUSHULIU

吉林人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

泄水工程与高速水流 / 水利水电泄水工程与高速水流信息网, 中水东北勘测设计研究有限责任公司科学研究院编. — 长春: 吉林人民出版社, 2010.9

ISBN 978-7-206-07046-4

I. ①泄… II. ①水… ②中… III. ①泄水建筑物—文集 ②水利工程—文集… IV. ①TV65-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 177638 号

泄水工程与高速水流

编者: 水利水电泄水工程与高速水流信息网,

中水东北勘测设计研究有限责任公司科学研究院

责任编辑: 隋军

封面设计: 王贤宇

咨询电话: 0431-85378017

吉林人民出版社出版(长春市人民大街 7548 号 邮政编码: 130022)

印刷: 长春工程学院印刷厂

开本: 787mm×1092mm 1/16

印张: 32.25

字数: 700 千字

标准书号: ISBN 978-7-206-07046-4

版次: 2010 年 9 月第 1 版

印次: 2010 年 9 月第 1 次印刷

定价: 68.00 元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与印刷厂联系调换。

内 容 提 要

本论文集内容广泛,有技术总结、创新研究成果、基础理论研究探讨等,可供从事水利水电工程设计、施工、科研、管理的科技工作者及大专院校相关专业的师生参考。

吉林出版集团有限责任公司

前 言

今年水利水电泄水工程与高速水流信息网学术研讨会,定于10月在西安召开,由水利水电泄水工程与高速水流信息网与中国水电顾问集团西北勘测设计研究院联合举办。

一直以来,在水利水电规划设计总院与水电水利规划设计总院的领导下,在各同仁的坚定努力奉献下,在参与者的热情支持下,水利水电泄水工程与高速水流信息网及所属刊物《泄水工程与高速水流》在风风雨雨中,得以豪迈地走过了30多年。它的生存和发展与我国的水利水电建设息息相关。可以非常自豪的说,本网在成长的过程中已为我国的水利水电建设作出了应有的贡献。

但是,任何事物都有产生、发展和结束的历程规律,如今国家经济形势已发生巨大的变化,水利水电建设也进入了新的历史历程。如何实现科技自主创新是摆在我们面前新的重要使命。

目前,本网及所属刊物《泄水工程与高速水流》仍然是没有名利纷扰的一块净土,仅仅是为实现自主创新提供一个科技成果交流的平台;互相学习进步的平台;创造灵感闪现的平台,在如今的历史条件下显得非常难能可贵。从某种意义上讲是在整合全网的科技力量,增强团队意识,联合攻关产生出应有的效应。

本次出版的论文集为会议交流材料,内容涉及宝贵的技术总结、创新的研究成果、基础理论研究探讨等,如果对读者有所裨益,将会为我们今后的工作提供更大的动力。

本论文集由水利水电泄水工程与高速水流信息网与中水东北勘测设计研究有限责任公司科学研究院组编。受条件限制,错漏之处请予批评指正。

编 者

2010年9月

目 录

一、专题总结

1. 旋流泄洪洞的研究进展与水力设计 (1)
2. 护岸裙台的体型设计和冲淤验证 (17)
3. 洋塘鱼道的布置与监测 (23)
4. 锥形阀在巴贡水电站放水孔上的应用 (27)
5. 小湾水电站反拱型水垫塘水力特性试验研究 (31)
6. 引水工程应急调度与风险分析 (39)
7. Y型窄缝挑坎在斯木塔斯水电站中的应用 (47)
8. 向家坝水电站右岸地下厂房岩锚梁锚杆施工工艺 (51)
9. 构建人水和谐的生态水利 (56)
10. 溢流坝下消能工综合特性图的总结与设计 (60)
11. 东北地区城区段中小河流治理及生态修复研究 (69)
12. 高水头闸门闭门过程的动态模拟 (78)
13. 溢流坝下消能措施使用概述 (83)
14. 拱坝挠度观测方法及其应用 (90)
15. 条形沉沙池的设计及应用 (95)
16. 博登湖生态模拟研究 (100)
17. 多波束测深系统在葛洲坝导沙底坎清淤中的应用 (104)
18. CS - Script 动态编译引擎在大坝监测数据管理系统中的应用 (112)
19. 漳河灌区用水现状及水资源供需平衡分析 (116)

二、研究探讨

1. 双向旋转竖井式消能工的试验研究 (122)
2. 对规范上有关 ΔP 的讨论 (130)
3. 水流空化的模拟研究 (133)
4. 空化水流模型中绝对压强的缩尺效应 (139)

| | |
|----------------------------------|-------|
| 5. 空化水流相似模拟及空蚀预防的解决途径 | (148) |
| 6. 锥形阀及消能室在巴贡水电站放水孔的泄洪消能运用 | (157) |
| 7. 相对运动的相似性原理与流体特别定律的探讨 | (163) |
| 8. 台阶式溢洪道消能率的研究 | (180) |
| 9. 人类活动对河流沿岸植被分布影响研究 | (185) |
| 10. 土的冻胀与换填防冻 | (192) |
| 11. 锦凌水库初期运用水沙数学模型计算分析 | (196) |
| 12. 北方多沙河流水库冲淤计算代表系列的研究 | (202) |
| 13. 浙江省溢洪道除险加固工程几个水力学问题 | (210) |
| 14. 有效利用水资源发展稻田养鱼初探 | (219) |
| 15. 台阶式溢洪道滑掠流水面线计算 | (222) |
| 16. 圆弧边墙收缩窄缝消能工水面线简化计算 | (227) |
| 17. 扩散折坡消力池水力计算 | (232) |
| 18. 基于工程部位示意图上的分布过程线绘制 | (238) |
| 19. 跌坎式底流消能二维数值模拟研究 | (241) |
| 20. 放空洞底流式消能池三维水流数值模拟研究 | (247) |
| 21. 钱塘江某船闸输水系统水力学计算研究 | (253) |
| 22. 小型水库除险加固问题探讨 | (258) |
| 23. 水电站进水口水流流场数值模拟 | (261) |

三、试验研究

| | |
|------------------------------------|-------|
| 1. 跌坎式消力池底板稳定性试验研究 | (267) |
| 2. 小湾水电站中后期导流试验研究 | (273) |
| 3. 内加强月牙肋岔管水力特性研究 | (278) |
| 4. 绥满高速公路齐甘段主线嫩江大桥动床河工模型试验研究 | (286) |
| 5. 南水北调工程淖沱河模型试验模型沙设计 | (294) |
| 6. 温泉电站深孔、表孔体型优化及泄洪消能问题的试验研究 | (300) |
| 7. 叶河中游渠首涵洞出口与总干渠衔接段试验研究 | (306) |
| 8. 新疆北岸干渠鱼道试验研究 | (312) |
| 9. 峡江水利枢纽水工、泥沙整体模型试验研究 | (318) |
| 10. 白莲崖水库主要水力学问题的试验研究 | (323) |
| 11. 苏家河口水电站溢洪道试验研究 | (329) |
| 12. 红岩水电站扩建工程引水系统优化设计与试验研究 | (334) |

| | |
|----------------------------------|-------|
| 13. 水库放空洞水流特性试验研究 | (338) |
| 14. 亭子口水利枢纽底孔消力池边墙空化特性试验研究 | (342) |
| 15. 向家坝水电站导流底孔体型空化特性研究 | (349) |
| 16. 溢洪道泄槽弯道段水力学优化试验研究 | (354) |
| 17. 丙乳砂浆性能试验研究 | (359) |

四、设计施工

| | |
|---------------------------------------|-------|
| 1. 高速水流条件下的泄洪洞无压段底板混凝土施工技术 | (363) |
| 2. 浅谈 PE 管在给水管道工程中的应用 | (369) |
| 3. 超大型弧形闸门支铰座板的安装施工 | (372) |
| 4. 除险加固工程中侧槽式溢洪道水力设计 | (376) |
| 5. 曹娥江朱山坝段标准堤坝滑坡的成因与处理 | (381) |
| 6. 浅谈南水北调中线工程左岸排水倒虹吸建筑物渗控设计 | (385) |
| 7. 解放水库放水涵管除险加固采用 PE 管处理技术方案 | (389) |
| 8. 水工钢筋混凝土结构设计中应注意的一些不规范问题 | (394) |
| 9. 水工闸门止水橡皮布置的常见问题 | (399) |
| 10. 蒲石河抽水蓄能电站坝顶门机安装 | (403) |
| 11. 浅谈高压喷射灌浆技术在高城子水库除险加固中的应用 | (408) |
| 12. 钻孔灌注桩设计中需注意的一些技术问题 | (411) |
| 13. 提高大坝混凝土施工质量的控制方法浅析 | (415) |
| 14. 水工隧洞施工中的围岩塌落问题 | (423) |
| 15. 论 TBM 洞内组装洞室设计参数的确定 | (426) |
| 16. 哈达山集水井地基渗水处理浅析 | (431) |
| 17. 浅谈土坝基础处理 | (434) |
| 18. 浅谈提高混凝土外观质量的控制措施 | (437) |
| 19. 蒲石河抽水蓄能电站弧形闸门安装 | (443) |
| 20. 冬季(冬期)桥涵、路堤施工方案 | (448) |
| 21. 金家坝水电站枢纽大坝原型观测设计 | (454) |
| 22. 浅谈水利工程的桥灌注桩施工技术 | (460) |
| 23. 现浇混凝土衬砌渠道施工技术 | (463) |
| 24. 响水水库除险加固工程安全监测设计 | (466) |
| 25. 松花江大顶子山航电枢纽工程安全监测设计 | (469) |
| 26. 枕头坝一级电站 2010 年施工中的重大技术问题及对策 | (472) |

旋流泄洪洞的研究进展与水力设计

卫 勇

(西北勘测设计研究院工程科研实验分院,西安 710043)

【摘要】 本文总结了旋流泄洪洞的研究进展,并通过前人关于旋流消能成果的总结及公伯峡、溪古水电站旋流消能成果的分析,提出了一套水力设计方法,可供设计者及研究人员参考使用。

【关键词】 竖井旋流泄洪洞、水平旋流泄洪洞、涡室、溢流堰、竖井掺气坎、起旋器、消力塘、研究进展、水力设计。

1 国内外研究现状

旋流泄洪洞是由导流洞改建成永久泄洪洞的一种消能工形式。旋流泄洪洞视其旋转水流发生的位置,可分为竖井旋流消能和水平旋流消能,其原理均利用旋转水流的离心力,形成空腔,增大洞壁压力和水力摩阻,延长流程,达到防止空蚀和消能的目的。

从国内外目前的研究进展看^{[1]-[4]},在导流洞改建为永久式泄洪建筑物过程中,旋流式内消能工具有结构简单、布置灵活、消能率高的特点,它能适应复杂的地形、地质条件,利用反转井钻机施工也较简单。它利用旋流的离心力作用,在壁面上形成正压力,不易发生空化现象,而且由于水流的旋转作用,形成较稳定的空腔,有利于空气掺混,减轻了空蚀作用,同时还因为水流的旋转,加大了水流流程与紊动,提高了消能率。导流洞作为永久泄洪洞时,衬砌工程简化,降低了工程造价,加快了施工进度,并减轻了隧洞出口的冲刷和雾化现象。因此旋流式内消能工是一种适于深山峡谷中高水头、大流量的新型消能措施,是高坝施工导流洞改建为泄洪洞的可行方案。

关于旋流式内消能工的研究与工程应用在国外开始于20世纪50~60年代,在国内开始于90年代前后,并逐渐成为研究与工程方案论证的热点。国内多家研究机构也先后不同程度地开展了旋流式内消能工的研究。中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、河海大学和大连理工大学等结合沙牌、小湾等水电站工程,着重开展了竖井旋流式内消能工的研究,国家电力公司西北勘测设计研究院和西安理工大学等结合拉西瓦与公伯峡的导流洞改建着重开展了水平旋流式内消能工的研究,其方法各有特色。

夏维洪^[3,5]在20世纪90年代初介绍了苏联的旋转水流消能设施,还用模型试验的方法研究竖井进流水平旋转内消能工的环向、纵向流速和断面能量的沿程变化规律,论证了此种消能工消能率高的特性,以及空化数较高、空化特性优良的特点^[3]。崔隲天等^[6]早在1993年就对涡流式内消能工的水力特性进行过初探,钱莺莺等^[7]、马萍章等^[8]结合工程方案的论证,也早在1994年就研究过同轴反向与单向涡旋内消能工。其后,董兴林等^[9-12]对导流洞改建为旋涡式竖井溢洪道进行了综合研究,并系统地研究了其设计方法和水力学特性,提出

超临界流的涡室优化体型,给出确定涡室和竖井等尺寸的经验公式。董兴林等^[13]结合公伯峡水电站导流洞改建水平旋流式泄洪洞试验研究,采用收缩墩形成水垫塘的技术,大大缩短旋流洞的长度,同时增加了消能率。史力生等^[14]研究了混合型竖井泄水道。孙双科等^[15-16]结合小湾水电站导流洞改建为泄洪洞的工程方案,对下游高水位条件下导流洞改建为旋流式竖井泄洪洞后,泄洪洞内出现的水跃、不稳定气囊等不利流态提出竖向压板和多孔平板的工程措施。郭炎和倪汉根^[17-19]通过旋流式竖井溢洪道的模型试验研究和理论分析,推出有锥形渐缩管的竖井溢洪道的流量系数和涡室内环向流速的计算方法。从1995年至今,牛争鸣对竖井进流水平旋转内消能泄洪洞的基本水力特性进行了较深入系统的研究^[20-30]。2001年至今,笔者结合公伯峡、溪古水电站对竖井旋流洞和水平旋流洞进行了体型优化与工程应用的试验研究^{[21-3]、[31-33]}。

在国内,沙牌、拉西瓦、小湾、公伯峡、洪家渡、大梁、吉灵台、冶勒等水电站工程都进行了导流洞改建为旋流式内消能泄洪洞的设计方案比选和试验研究工作,但仅在沙牌水电站和公伯峡水电站得到实际应用。沙牌水电站的竖井旋流式泄洪洞最大泄流量只有 $242\text{m}^3/\text{s}$,水头总落差 88m 。公伯峡水电站右岸泄洪洞是国内第一个泄流量达 $1060\text{m}^3/\text{s}$ 、水头超过 100m 、由导流洞改建并建成的水平旋流式内消能泄洪洞,在我国旋流式内消能泄洪洞设计、研究与工程应用中具有里程碑的意义,将会有力地推动这一新的消能形式在工程上的应用,从而为解决高坝建设中泄水建筑物的高速水流问题与导流洞改建中的技术与经济问题提供工程实例。

2 竖井旋流洞与水平旋流洞的特点

旋流消能的主要原因一方面是旋流洞边壁压力增大,相应的摩擦力增大,消能率提高;另一方面是水流路径加长;加之掺气后使水汽混合物内部损失加大(即流速梯度加大)。竖井旋流与水平旋流消能相比有如下特点:

(1)从旋流洞(井)流态分析,竖井旋流洞水流在竖井内不能充分旋转,其理由不仅仅是因为竖井进口流速小的原因,我们知道,水流进入竖井后,由于边壁摩擦力的作用,沿边壁切向的流速会越来越小;而沿竖井轴线方向的法向流速,则由于重力的作用,其越来越大,使水流的旋转圈数更少。对水平旋流洞来说,则水流旋转在水平洞内,一方面,进洞流速较大,有利于水流旋转;另一方面,进洞后水流沿洞壁切向流速仅受边壁摩擦力的影响,而不受重力的作用而减小,衰减较慢。

(2)从振动方面分析,竖井旋流洞来流不对称,竖井的振动较大;水平旋流洞则振动小些,因此,竖井旋流洞要求竖井表面到底部的地质条件都要好,水平旋流洞则仅要求竖井底部地质条件好。

(3)从运用水头来看,对竖井旋流洞而言,在过流范围内,竖井涡流都具有稳定的流态,其运用水头范围较宽;对水平旋流洞来说,在低水位时,进口段为自由堰流,竖井内水位较

①卫勇,黄河公伯峡水电站发包设计阶段旋流消能泄洪洞常压水工模型试验报告,国家电力公司西北勘测设计研究院工程科研实验院,2002.3。

②卫勇,公伯峡水电站水平旋流泄洪洞优化试验研究报告,国家电力公司西北勘测设计研究院工程科研实验院,2003.12。

③卫勇,溪古水电站首部枢纽施工图设计阶段整体水工模型试验报告,中国水电顾问集团西北勘测设计研究院工程科研实验分院,2008.8。

低,水流对竖井底板的冲击力较大,高水位时,竖井内为有压流,水流对竖井底板的冲击力较小,因此,高水位运行较为有利。

(4)从空化空蚀方面分析,竖井旋流洞在竖井内形成的环流空腔,使竖井边壁始终为正压,从而改善了竖井水流的空化条件,且由于流速相对较小,不易发生空蚀破坏;水平旋流洞则在起旋器与旋流洞连接段,由于水流方向的急剧变化,导致局部出现负压,并由于流速较高,易发生空蚀破坏。但采用竖井和起旋器上游侧2处通气措施后,可使水平旋流洞免于空蚀。

(5)从消能率分析,竖井旋流洞通常在工程运行水头范围内,主要由于竖井下部消力井的存在,消能率较高,达70%~90%;对水平旋流洞消能来说,一方面是起旋器内水流的剧烈变化消耗了一部分能量(30%左右的总能量),另一方面是旋流洞与消力塘消耗了大部分能量(55%),消能率与竖井消能接近。

(6)从掺气方面来说,竖井旋流洞在各级流量下,竖井中部均存在上下连通的空腔,无需专门的通气设施就能达到良好的自然掺气的目的;对水平旋流洞来说,竖井及起旋器上游侧的掺气必须有专门的通气井,且高度及尺寸均较大。

(7)从竖井直径大小分析,竖井旋流洞因进井流速较低,且竖井中心为空腔,所需直径较大;而水平旋流洞竖井段为有压流,全断面过水,所需直径仅为竖井旋流洞直径的70%左右。

3 竖井旋流洞的水力设计

3.1 竖井旋流洞的体型布置

竖井旋流洞是一种具有内部消能作用的新型泄洪洞形式,它具有消能效果好,结构布置灵活,抗空化能力强,工程造价低等优点,但由于竖井震动较大,因此工程应用中要求竖井段的地质条件要好。其由以下三段组成(见图1)。

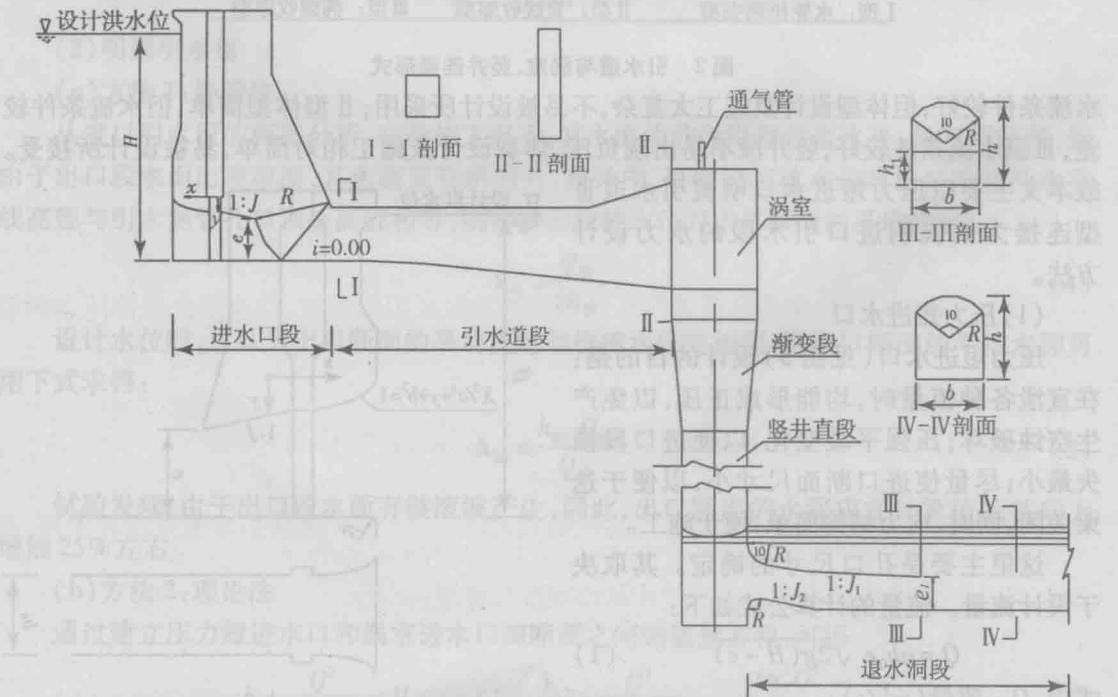


图1 竖井旋流洞的体型布置图

(1) 进口引水段:包括短压力进水口及后面的明渠引水道段。

(2) 竖井消能段:包括涡室段、竖井收缩段、竖井直段以及下部淹没消力井室及消力井。消力井也作为退水洞的压力进口段。

(3) 退水洞段:即利用施工导流隧洞的泄洪洞。

在该种体型下,利用在竖井中形成的高速涡旋水流运动及消力井中水垫消能作用达到水流内部消能的目的。

3.2 竖井旋流洞的水力设计

竖井旋流消能泄洪洞的水力设计主要包括三部分内容,即进口引水段的设计、竖井消能段的设计及退水洞段的设计。

3.2.1 进口引水段的水力设计

进口引水段包括进水口、引水道两部分。进水口主要有三种进水形式,即堰流引水道、压力短进水口明流引水道和有压引水道同涡室竖井连接。引水道与涡室的连接形式有三种, I 型:水轮机涡壳型、II 型:直线收缩型、III 型:椭圆收缩型,见图 2。三种连接形式, I 型

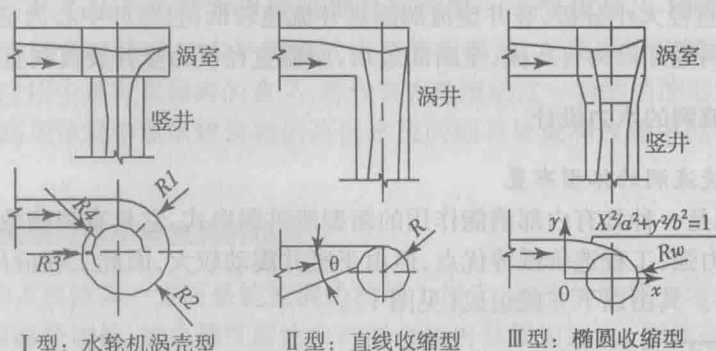


图 2 引水道与涡室、竖井连接形式

水流条件较好,但体型设计及施工太复杂,不易被设计所采用; II 型体型简单,但水流条件较差; III 型水流条件较好,竖井段不易出现负压,体型设计及施工相对简单,易被设计所接受。故本文主要以压力短进水口明流引水道 III 型连接为例说明进口引水段的水力设计方法。

(1) 压力短进水口

压力短进水口(见图 3)设计的目的是:在宣泄各种流量时,均能形成正压,以免产生空蚀破坏;压强平缓变化,以使进口段损失最小;尽量使进口断面尺寸小,以便于迭梁关闭,同时,应力结构简单,便于施工。

这里主要是孔口尺寸的确定。其取决于设计流量。流量的计算公式如下:

$$Q = \mu b_0 e \sqrt{2g(H-e)} \quad (1)$$

式中: Q —流量(m^3/s);

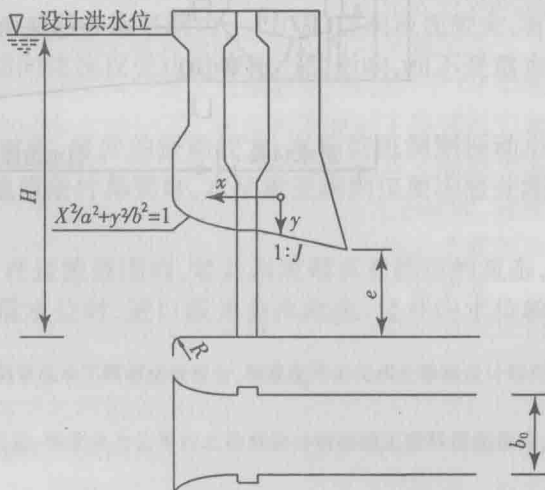


图 3 压力短进水口体型

μ —流量系数;

H —闸孔底板以上水头(m);

e —闸孔开度(m);

b_0 —闸孔宽度(m);

g —重力加速度,取 $g=9.8\text{m/s}^2$ 。

另外,由文献[34]知:泄洪洞压力短进水口的流量系数亦可表示为:

$$Q = \mu_1 b_0 e \sqrt{2g(H - e\varepsilon)} \quad (2)$$

$$\text{即: } \mu_1 = \frac{Q}{b_0 e \sqrt{2g(H - e\varepsilon)}}$$

由(1)、(2)式可得:

$$\mu_1 = \frac{\mu \sqrt{H - e}}{\sqrt{H - e\varepsilon}} \quad (3)$$

式中: ε —水流垂向收缩系数;

μ_1 —流量系数;其余符号的意义同前。

对有压短进口,其流量系数 μ_1 与水流垂向收缩系数 ε 的大小均取决于压力短进水口的出口顶板压坡坡度 J (见表1)。

表1、坡度 J 与 μ_1 、 ε 的关系

| J | μ_1 | ε |
|-----|---------|---------------|
| 1/4 | 0.876 | 0.895 |
| 1/5 | 0.893 | 0.914 |
| 1/6 | 0.904 | 0.915 |

(2) 明渠引水道

(a) 方法1:经验法

从进口引水段的流态分析,在校核工况下,其水面线前段沿程近似水平,虽有所降低,但由于出口段水面出现滚波,其水面又有所回升,设计中,可假设校核水位时出口断面的水面线高程与引水涵管孔口顶板高程相等,则可求出校核水位时出口断面的平均流速:

$$V_{\text{校}} = \frac{Q_{\text{校}}}{bh_{\text{校}}} \quad (4)$$

设计水位时,可认为出口断面的平均流速与校核水位时相同,则出口断面的平均水深可用下式求得:

$$h_{\text{设}} = \frac{h_{\text{校}} Q_{\text{设}}}{Q_{\text{校}}} \quad (5)$$

试验发现:由于出口段水面有漩滚波产生,因此,出口断面的水深应在计算值的基础上增加25%左右。

(b) 方法2:理论法

通过建立压力短进水口和涡室进水口两断面之间的能量方程,可得

$$h + \frac{Q^2}{2gb^2h^2} = H + z + \left(1 - \frac{1}{\phi^2}\right) \frac{Q^2}{2g(b_0e\varepsilon)^2} - \frac{Ln^2Q^2}{R^{4/3}(Bh)^2} \quad (6)$$

式中: H —短进水口坎上水头(m);

b_0 —短进水口宽度(m);

z —短进水口底坎同涡室进水口底板的高程差(m);

b, h —分别为涡室进口宽度和垂直于渠底的水深;

\bar{B}, L 和 n 分别为引水道平均宽度、长度和糙率;

e —为短进水口压板末端高度(即弧门高度)(m);

ε, ϕ —分别为压板出口水流收缩系数和流速系数;

\bar{h} 和 \bar{R} 分别为从压板出口收缩水深到涡室进口前平均水深和平均水力半径。即:

$$\bar{B} = (b_0 + b)/2; \bar{h} = (\varepsilon e + h)/2; \bar{R} = \frac{\bar{B}\bar{h}}{\bar{B} + 2\bar{h}} \quad (7)$$

h 值可由(6)、(7)式试算求得, 求出涡室前的水深 h 后, 该断面的平均流速为:

$$v = \frac{Q}{bh} \quad (8)$$

3.2.2 引水道与涡室连接段的水力设计

根据奚落度、公伯峡、溪古等水电站模型试验的经验, 椭圆收缩型连接形式的设计程序如下:

(1) 取工作闸门尺寸高宽比 $H/B > 1.3$, 引水道宽度缩小, 有利于同涡室连接, 可降低佛氏数, 改善涡室流态;

(2) 涡室半径 $R_w \approx 1.2R$ (R —竖井半径, 其计算将在下节中说明);

(3) 取椭圆曲线短轴 $b = (1.5 \sim 2.0)B$ (B —工作门宽度或引水道宽度);

(4) 取 $k > b$, k —椭圆中心至涡室圆心距(见图2中Ⅲ型), 按下式求椭圆长轴 a :

$$a = \sqrt{\frac{b^2(k^2 + b^2 - R_w^2)}{b^2 - R_w^2}} \quad (9)$$

(5) 椭圆曲线与涡室圆弧的切点 (x, y) : $x = \frac{ka^2}{a^2 - b^2}, y = b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}$ (10)

若计算的 $x > a$, 则取 $x = a, y = 0$, 或重新设 k 值。

3.2.3 竖井段的水力设计

竖井段的水力设计主要包括竖井直径与顶部涡室直径的设计, 以及竖井底部压力的计算等。

(1) 竖井直径的设计

根据前人的研究经验, 竖井的直径可按式估算: $D = k \left(\frac{Q^2}{g} \right)^{0.2}$ (11)

式中: $k = F_r^{0.05}$ (F_r —引水道行进流佛氏数), $F_r = \frac{Q}{\sqrt{gb^2h^3}}$ (B, h 为引水道宽度和水深, 可

近似采用压力短进水口工作闸门宽度和高度;

D —竖井的直径(m);

Q —最大设计流量(m^3/s);

g —重力加速度(m/s^2), 取 $g = 9.8 m/s^2$;

(2) 涡室直径的设计 为验证工水隧洞泄洪洞设计参数, 曾对几个工程的试验研究表明: 涡室半径 R_w 约为竖井半径 R 的 1.2 ~ 1.4 倍, 当引水道与涡室的连结形式采用椭圆收缩型时, 可使涡室直径减小 15% ~ 20%, 且在涡室内形成稳定的螺旋流态, 故采用椭圆收缩型时可取: $R_w = 1.2R$ (12)

(3) 涡室与竖井连接渐变段高度的设计 涡室与竖井连接渐变段的高度, 对渐变段后竖井周壁的压力影响较大, 理论上, 渐变段越高, 渐变段后竖井周壁的最小压力越大。对矩形或梯形水平明渠, 渐变段的长度常用下面的经验公式^[35] 计算:

$$L_i = \eta(B_{\max} - B_{\min}) \quad (13)$$

式中: L_i —渐变段的长度;

B_{\max} —渐变段进口及出口断面中较大的一个水面宽度;

B_{\min} —渐变段进口及出口断面中较小的一个水面宽度;

η —系数, 对进口收缩渐变段, $\eta = 1.5 \sim 2.5$, 对出口收缩渐变段, $\eta = 2.5 \sim 3.0$ 。

同理, 我们可将上式修改为: $L_i = \eta(R_w - R)$ (14)

式中: L_i —涡室与竖井连接渐变段的高度 (见图 4);

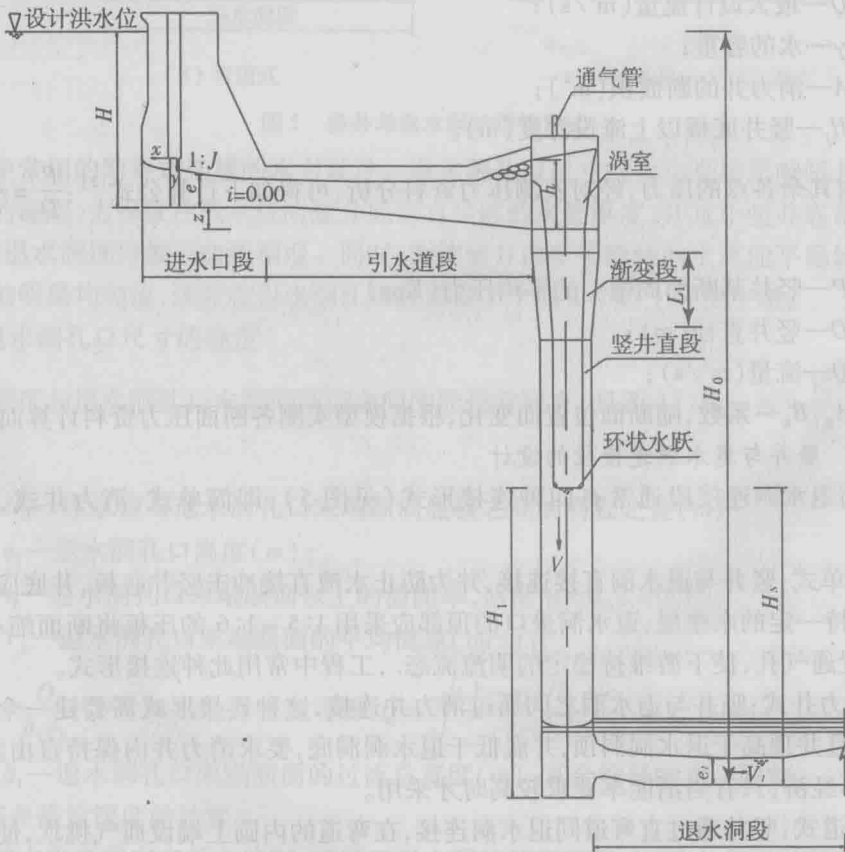


图 4 竖井旋流洞计算简图

由于竖井旋流涡室出流方向为垂直降落, 其流速较高, 相应的渐变段的长度应较流速较

低的水平明渠长,经过公伯峡水电站竖井旋流泄洪洞水工模型试验,取 $\eta = 5.0 \sim 6.0$ 较适宜;若 $\eta < 4.0$,则渐变段后竖井周壁易出现负压;反之,若 $\eta > 6.0$,渐变段后竖井周壁的最小压力越大。

(4) 涡室顶部通气孔尺寸的确定

在引水道为高佛氏数的情况下,涡室进口将被水跃封堵,必须在涡室顶部设通气孔,向旋流空腔通气,以维持空腔压力为大气压力,否则,竖井壁面会产生负压。通气孔的通气量与引水道的佛氏数和水跃的补气量有关。目前尚未给出通用的计算公式,但佛氏数是主要的影响因素,可按下式估算最大通气量 Q_a (通气量一般为流量的 20% 左右,通气孔的风速以不超过 60m/s 为宜): $Q_a = 0.1Q(F_r - 1)^{0.2}$ (15)

式中: Q —最大设计流量。

(5) 竖井段边壁压力的计算

消力井最大压力发生在井底周边处。最大压力主要由井内水深、水流的冲击力和离心力合成。沿井深的压力不再遵循静水压力分布规律。由于井底的离心力基本消失,故,井底最大压力可近似的按静水压力加冲击压力计算。即 $P_{max} = \gamma H_j + \frac{\gamma Q^2}{gA^2}$ (16)

式中: Q —最大设计流量 (m^3/s);

γ —水的容重;

A —消力井的断面积 (m^2);

H_j —竖井底板以上淹没深度 (m)。

竖井内其余各点的压力,经对实测压力资料分析,可得如下计算公式^[2]: $\frac{P}{D} = A \left(\frac{Q}{Q^{2.5}} \right)^B$ (17)

式中: P —竖井某断面周壁上的平均压力 (Kpa);

D —竖井直径 (m);

Q —流量 (m^3/s);

A_h 、 B_h —系数,随断面位置而变化,根据模型实测各断面压力资料计算而得。

3.2.4 竖井与退水洞连接段的设计

竖井与退水洞连接段通常有四种连接形式(见图 5),即简单式、消力井式、弯道式及 L 形。

(a) 简单式:竖井与退水洞直接连接,并防止水流直接冲击竖井底板,井底应低于退水洞洞底,保持一定的水垫层,退水洞进口的顶部应采用 1:5 ~ 1:6 的压板将断面缩小,并在压板末端设置通气孔,使下游维持稳定的明流流态,工程中常用此种连接形式。

(b) 消力井式:竖井与退水洞之间通过消力井连接,这种连接形式需要建一个直径较大的消力井,且井顶高于退水洞洞顶,井底低于退水洞洞底,要求消力井内保持自由水面,此种连接形式不经济,只有当消能率要求较高时才采用。

(c) 弯道式:竖井通过直弯道同退水洞连接,在弯道的内圆上端设通气挑坎,使水流脱离洞顶,形成明流。

(d) L 形:竖井同退水洞成 L 形连接,这是法国人 1996 年提出的一种简单形式。

退水洞段的水力设计主要是竖井内淹没水深的计算、退水洞孔口尺寸的确定。这里仅