

Hydrodynamics for High Dam

练继建 杨敏 等 著

高坝泄流工程



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

Hydrodynamics for High Dam

高坝泄流工程

练继建 杨敏 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是在总结作者及所在研究团队最近 30 年来在高坝泄流消能方面取得的具有实用价值和创新性研究成果的基础上撰写而成的。

本书共三篇、19 章。第一篇介绍消能防护方面的研究成果, 主要包括平底消力塘、反拱消力塘、护坡不护底消力塘的水动力荷载的特征和控制指标, 防护结构的破坏机理、失稳模式和分析方法, 不同类型消力塘的适用条件, 消力塘防护结构的实时安全监测和预警系统等。第二篇介绍泄流振动方面的研究成果, 主要包括泄流振动类型、泄流振动的全水弹性模型模拟理论和方法、泄流结构振动模态测试和计算、泄流结构动水荷载特性、泄流振动响应及振源正交分析方法、泄流结构振动响应和控制指标、水工闸门的振动稳定性理论、泄流结构动力优化设计理论、泄流结构安全动态检测理论方法等。第三篇介绍泄流雾化方面的研究成果, 主要包括泄流雾化的机理和研究方法, 考虑雾雨转换、碰井、雾滴凝结和蒸发过程的底流泄流雾化影响数学模型, 基于水滴随机喷溅的挑流泄流雾化数学模型, 泄流雾化的神经网络预测方法, 泄流雾化与边坡稳定性进行耦合分析方法等。

本书展示了我国在工程水力学科学研究领域取得的重大进展, 有助于高坝泄流建筑物的设计和安全运行水平的提高。本书可供水利水电工程设计人员、技术人员、管理人员和广大水利工作者查阅、借鉴。

图书在版编目 (CIP) 数据

高坝泄流工程/练继建等著. —北京: 中国水利水电出版社, 2008

ISBN 978 - 7 - 5084 - 5537 - 2

I. 高… II. 练… III. 高坝—排水—水利工程—研究
IV. TV649

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 059907 号

书 名	高坝泄流工程
作 者	练继建 杨敏 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266(总机)、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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 28.25 印张 670 千字
版 次	2008 年 5 月第 1 版 2008 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	79.00 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

序 一

我国水能资源居世界首位,水能资源理论蕴藏量 6.94 亿 kW,经济可开发量 4.02 亿 kW。截至 2006 年底,全国水能资源已开发 1.28 亿 kW,占经济可开发量的 32%。目前,水能资源开发的重点集中在西南的金沙江、澜沧江、雅砻江、大渡河等干支流以及西北的黄河上游。我国西南、西北诸河流具有高水头、狭窄河谷、大流量、地质条件复杂等特点。在该地区修建水电站,其单宽河床的泄洪功率往往达到国外同类工程的几倍甚至十几倍,况且国外没有成功的经验可直接借鉴,高坝泄流是我国水能资源开发和水电站安全运行的技术难题之一。

作者及天津大学高速水流研究室几十年来面向国家水电建设的重大需求,紧密结合工程实际,从水利水电工程复杂的工作条件出发,考虑多相介质、多种因素的联合作用,致力于学科交叉和融合来凝炼科学问题、形成实用的创新技术,注重水力学与结构动力学的结合、物理模型试验与数值模型仿真相结合、模型与原型相互验证,在高坝泄洪振动、消能防护、泄洪雾化、闸门水动力学、泄洪安全监测和预警等方面取得了丰富的研究成果和技术上的突破,并在二滩、三峡等数 10 座大型水利水电工程中得到成功应用,充分体现了学科的交叉性,学术的前沿性、创新性以及工程综合性和实用性。

该书的问世,展示了我国在工程水力学科学研究领域取得的重大进展,有助于高坝泄流建筑物的设计和安全运行水平的提高。该书是一部集科学性、技术性和实用性于一体的佳作,可供水利水电工程技术人员和高校师生学习、参考和使用。是为序。

中国工程院院士

中国长江三峡工程开发总公司总工程师

张超然

2008 年 3 月 13 日

于宜昌

序 二

我国重大水利水电工程的泄洪流量、水头和功率居世界领先水平，高坝泄洪消能安全问题十分突出，是我国水利水电工程建设中需解决的关键技术难题。由于高速水流、水气二相流、水流—结构相互作用的复杂性及巨大破坏作用，国内外已经发生多起泄流结构破坏的工程实例，如前苏联的萨扬水电站和我国的五强溪、安康、鱼塘等水电站的消力塘防护结构的严重破坏，美国德克萨尔卡那坝（Texarkana）、纳佛角坝（Navajo）和我国万安水电站导墙的流激振动破坏，刘家峡、龙羊峡水电站和美国胡佛（Hoover）水电站泄洪洞的空蚀破坏等。高水头大流量高坝泄洪安全问题是水电工程的前沿课题之一。

近 30 年来，作者及所在研究团队在高坝消能防护、泄流振动和雾化等关键性技术方面开展了大量的理论分析、实验研究、原型观测研究，取得了丰硕的研究成果。这些研究成果是国际上很少见的自主创新性的成果，有较高的工程应用价值，是我国高坝水力学研究的重要进展。本人多次参加天津大学在高坝泄流方面的成果鉴定会，曾建议出版一本著作来集中反映所取得的宝贵研究成果。获悉《高坝泄流工程》一书即将出版，我非常高兴，欣然为之作序。

该书在消能防护研究方面，从水流和结构相互作用的综合角度系统阐述了平底板、反拱底板、透水底板、边坡护砌等防护结构的破坏机理和失稳模式；系统论述了消力塘水动力荷载的特性，探讨了上举力、脉动压强、冲击压强之间的量化关系和安全控制指标；提出了可以反映水动力荷载—底板—锚筋—基岩（拱座）的耦合作用和防护结构失稳的动态过程的消力塘防护结构分析方法；将力学分析、专家经验、人工智能技术有机融合，创造性地构建了高坝消力塘防护结构的实时安全监测和分级预警系统。

该书在泄流振动研究方面，系统研究了高薄拱坝、导墙、水工闸门、闸墩、泄洪洞等各类泄流结构的流激振动问题；建立了一整套适用于各类泄流结构的全水弹性试验模拟理论、方法；阐明了泄流结构耦合动力响应的正、反分析方法；发展了水工平面、弧形、翻板闸门

的动力稳定性理论，提出了水工闸门优化设计方法以及导墙水动力—结构的优化设计方法；提出基于泄流激励的泄流结构模态参数识别和损伤评估方法，创建了泄流结构安全动态检测诊断系统。

该书在泄流雾化研究方面，系统地研究了挑流、底流雾化机理、预测方法和影响问题；系统研究了挑流水舌扩散和水舌撞击尾水时水滴随机喷溅特性，创造性地提出了挑流水舌撞击尾水时水滴随机喷溅的数学模型，该模型考虑了挑流坎型（连续坎、窄缝坎和扭曲坎等）和泄洪组合方式的影响；建立了挑流雾化范围预测的 BP 神经网络模型；所建立的水电站底流泄洪雾化的数学模型，考虑了雾雨自动转换过程、碰并过程、雾滴的凝结和蒸发过程综合影响；将挑流泄洪雾化与边坡稳定进行了耦合分析。

我相信，该书的出版仍将有益于高坝泄流建筑物的设计、施工和安全运行水平的提高。该书不仅能为我国广大水利水电工作者提供一部很好的学术专著，而且也是一部值得向国际同行，如国际水利工程与研究协会（International Association of Hydraulic Engineering and Research, IAHR）等推荐的佳作。本人建议将该书译成英文出版，以向国际同行专家展示我国在工程水力学方面所取得的重大进展。

IAHR 中国分会主席

李桂京

2007 年 6 月

于北京

前 言

我国是世界水电的第一大国，在未来的 20 年内将建设的水电站装机容量达 2 亿多 kW。在水电工程的挡水、泄水和发电三大建筑物布置中，泄水建筑物的造价约占工程土建造价的 1/3。在水电站的建设中，确保泄洪安全往往是第一位的。与国外已建成的高坝相比，我国自主设计及在建的高坝中，其坝高和泄量、泄洪功率都已超过目前世界最高水平，居世界领先水平。由于高速水流的复杂性，即水—气或气—水二相流、缝隙流复杂性，以及高速水流与结构相互作用的复杂性，因泄流高速水流引起的泄水建筑物破坏的事例都屡见不鲜。据统计有约 1/3 水电站工程的泄水建筑物出现不同程度的破坏，有的破坏是相当严重。因而，高水头、大流量的泄洪消能设计、安全运行问题一直是近年来水利水电工程界所关心的热点和难点问题。

天津大学早在 1961 年就由杜镇福教授主持成立了高速水流研究组，开始系统地研究高坝泄流的消能问题。特别是 20 世纪 80 年代以来，在崔广涛教授、刘宣烈教授和赵耀南教授的带领下，密切结合国内外大型水电站工程建设和安全运行的需要开展研究，在泄流振动、泄流雾化、消能防护、闸门水力学、泄流结构安全监测预警等方面都取得了重要的进展或突破，并且其成果在国内外 40 座大型水利水电工程中得到应用，取得了显著的社会和经济效益。本书是在总结作者及所在研究团队最近 30 年来在高坝泄流消能方面所取得的具有实用价值和创新性研究成果的基础上撰写而成的。

本书共三篇、19 章。第一篇介绍消能防护方面的研究成果，主要包括平底消力塘、反拱消力塘、护坡不护底消力塘的水动力荷载的特征和控制指标，防护结构的破坏机理、失稳模式和分析方法，不同类型消力塘的适用条件，消力塘防护结构的实时安全监测和预警系统等。第二篇介绍泄流振动方面的研究成果，主要包括泄流振动类型、泄流振动的全水弹性模型模拟理论和方法、泄流结构振动模态测试和计算、泄流结构动水荷载特性、泄流振动响应及振源正反分析方法、泄流结构振动响应和控制指标、水工闸门的振动稳定性理论、泄流结

构动力优化设计理论、泄流结构安全动态检测理论方法等。第三篇介绍泄流雾化方面的研究成果，主要包括泄流雾化的机理和研究方法，考虑雾雨转换、碰并、雾滴凝结和蒸发过程的底流泄流雾化影响数学模型，基于水滴随机喷溅的挑流泄流雾化数学模型，泄流雾化的神经网络预测方法，泄流雾化与边坡稳定性进行耦合分析方法等。

本书由练继建、杨敏、李火坤、马斌、刘昉撰写。为本书付出辛勤劳动的还有彭新民、安刚、杨弘、张建伟、李松辉、张华、王继敏、白俊光、张金良、尹庭伟、徐国宾、辜晋德、黄津明、刘喜珠、杨令强、王春涛、陈为博、符晓、张东明、黄财元、刘鹏、秦艳、雷春江等。我们不会忘记是在恩师崔广涛教授、林继镛教授指导下开始高坝泄流消能问题研究的，谨以此书献给恩师崔广涛教授从教 50 周年；不会忘记曹楚生院士、张勇传院士、张超然院士、林皋院士、李桂芬教授、童显武教授、刘树坤教授、李玉柱教授对我们的鼓励和指导。感谢许唯临教授、沈永明教授、刘之平教授、吴一红教授、李嘉教授、吴建华教授、周建中教授、槐文信教授、戴会超教授、陈永灿教授、江春波教授、张永良教授、陈刚教授、刘韩生教授、刘沛清教授、刘士和教授、吴时强教授等国内同行提供的无私帮助；感谢二滩水电开发有限责任公司，黄河上游水电站开发有限责任公司，中国长江三峡工程开发总公司，中国水电顾问集团西北勘测设计研究院、昆明勘测设计研究院、成都勘测设计研究院、中南勘测设计研究院、华东勘测设计研究院，长江水利委员会长江勘测设计研究院等单位对我们科学研究的支持！

由于作者的学识和水平所限，书中难免存在疏漏、不妥或错误之处，恳请读者与专家指正。

作 者

2008 年 3 月于天津大学

目 录

序一

序二

前言

第一篇 消 能 防 护

第 1 章 高坝泄流消能防护引论	3
1.1 高坝泄流的消能方式	5
1.2 高坝下游的冲刷和防护	13
1.3 消力塘防护结构的破坏实例	17
参考文献	28
第 2 章 消力塘平底板安全	29
2.1 平底板的工作条件和失稳破坏模式	29
2.2 平底消力塘的动水荷载研究	30
2.3 平底板的稳定性分析和控制指标	56
2.4 透水底板的稳定性研究	69
参考文献	72
第 3 章 消力塘反拱底板安全	76
3.1 反拱底板的失稳破坏模式和工作条件	77
3.2 检修工况反拱底板的安全性分析	78
3.3 水垫塘的水动力荷载特性	92
3.4 泄流工况下反拱底板的安全性分析	99
3.5 反拱底板与平底板的安全性综合评价	103
3.6 反拱底板的工程应用实例	104
参考文献	112
第 4 章 护坡不护底消力塘及边坡衬砌安全	114
4.1 护坡不护底消力塘的动床冲刷和边坡衬砌失稳的破坏模式	114
4.2 边坡衬砌的动水荷载研究	116
4.3 边坡衬砌的稳定性分析和控制指标	120
4.4 护坡不护底消力塘的适用条件	120
4.5 护坡不护底消力塘的工程应用实例	121

参考文献	127
第5章 水垫塘防护结构实时安全监测预警系统	128
5.1 水垫塘安全实时监控预警系统的方案设计	128
5.2 水垫塘底板稳定性的动位移响应识别方法	129
5.3 水垫塘底板的安全监控指标体系	133
5.4 水垫塘底板的实时安全监控预警系统集成	139
参考文献	142

第二篇 泄流振动

第6章 泄流振动引论	147
6.1 泄流振动的类型	147
6.2 泄流振动的研究方法和进展	151
6.3 泄流振动导致工程破坏的实例	154
参考文献	165
第7章 泄流振动的全水弹性模型模拟理论和方法	169
7.1 水流脉动压力的相似律	169
7.2 泄流结构体系耦合动力的全水弹性模拟原理	176
7.3 水弹性模型材料的研制	178
7.4 基础模拟范围的影响	178
参考文献	184
第8章 泄流结构振动模态测试和计算	186
8.1 全水弹性模型的结构振动模态测试方法	186
8.2 泄流结构的模态计算方法	188
8.3 高拱坝的模态测试与计算	193
8.4 导墙结构的模态计算	199
8.5 闸门结构的模态测试与计算	200
参考文献	205
第9章 泄流结构动水荷载特性	206
9.1 高拱坝泄流的动水荷载特性	206
9.2 导(隔)墙结构的动水荷载特性	208
9.3 平面闸门的动水荷载特性	214
9.4 弧形闸门的动水荷载特性	220
9.5 翻板闸门的动水荷载特性	223
9.6 管道阀门的动水荷载特性	225
9.7 多级孔板管道壁压的脉动特性	228
参考文献	232

第 10 章 泄流振动响应及振源正反分析方法 234

10.1 水流脉动荷载的相关分析 234

10.2 泄流振动响应的分析方法 242

10.3 泄流振动的振源反分析方法 245

10.4 泄流振动响应的反分析 251

10.5 水弹性模型不相似因素影响的修正 252

参考文献 253

第 11 章 泄流结构振动响应和控制指标 254

11.1 泄洪振动响应的测试方法 254

11.2 高拱坝的泄流振动响应 256

11.3 导墙结构的泄流振动响应 260

11.4 典型闸门结构的泄流振动响应 266

11.5 其他泄流结构的泄洪振动响应 271

11.6 泄流振动响应的控制指标 280

参考文献 283

第 12 章 水工闸门振动稳定性理论 285

12.1 平面闸门的振动稳定性 286

12.2 弧形闸门的振动稳定性 295

12.3 翻板闸门的振动稳定性 299

参考文献 308

第 13 章 泄流结构动力优化设计理论 310

13.1 导墙结构的优化理论 310

13.2 弧形闸门结构的优化理论 315

13.3 拦污栅栅叶的体型优化 320

参考文献 324

第 14 章 泄流结构安全动态检测理论 326

14.1 基于泄流激励的结构模态参数识别方法 326

14.2 典型泄流结构的模态参数识别 336

14.3 泄流结构的损伤评估方法 342

参考文献 348

第三篇 泄 流 雾 化

第 15 章 泄流雾化及研究方法 353

15.1 泄流的雾化现象与危害 353

15.2 泄流雾化的机理 357

15.3 泄流雾化的研究方法 359

参考文献 362

第 16 章 底流泄流雾化研究 364

16.1 底流消能的雾源量 364

16.2 水雾扩散的数学模型 365

16.3 雾滴、雨滴和水汽之间的相互转换过程 366

16.4 某水电站底流泄流雾化原观的反馈分析 367

16.5 底流泄流雾化数学模型的验证计算 371

16.6 泄流雾化对下游环境影响的预测计算 372

参考文献 379

第 17 章 挑流泄流雾化研究 380

17.1 挑流泄流雾化源的分析 380

17.2 挑流水舌随机喷溅的数学模型 381

17.3 挑流泄流雾化的雾流扩散 386

17.4 挑流泄流雾化原观的反馈分析与验证计算 388

17.5 挑流泄流雾化的预测计算 394

参考文献 401

第 18 章 挑流泄流雾化人工神经网络模型 403

18.1 挑流泄流雾化人工神经网络模型的构建 403

18.2 挑流泄流雾化的神经网络预测 407

参考文献 413

第 19 章 泄流雾化影响下岩质边坡稳定性分析 414

19.1 三维饱和一非饱和渗流理论 414

19.2 三维渗流的有限元计算方法 416

19.3 泄流雾化雨作用下裂隙岩体边坡的渗流场计算 421

19.4 雾化雨入渗对岩体边坡稳定性的影响分析 431

参考文献 438

第一篇

消 能 防 护

第 1 章 高坝泄流消能防护引论

我国水能资源丰富,全国水能资源理论蕴藏量 6.94 亿 kW,技术可开发量 5.42 亿 kW,经济可开发量 4.02 亿 kW。截至 2006 年底,全国水能资源已开发 1.28 亿 kW,占经济可开发量的 32%。目前,水能资源开发的重点集中在西北的黄河上游,西南的金沙江、澜沧江、雅砻江、大渡河等干支流。我国西南、西北诸河流山高谷陡、洪水峰高量大、地质条件复杂,坝址选择及枢纽布置面临很多技术难题。水利水电工程枢纽布置是在充分研究水文气象、地质、施工条件基础上,选定坝型,协调好挡水建筑物、泄水建筑物和引水发电建筑物之间的关系,通过技术经济比较,获取综合较优的枢纽布置方案。

水利水电工程挡水、泄水和发电三大建筑物布置中,泄水建筑物布置及泄流消能结构选择尤为重要。因为筑坝壅高水库水位,泄水建筑物泄流时,携带巨大能量,必须在坝下河床较短距离内集中消杀,如果处理不慎,会造成泄水建筑物破坏,从而影响水电工程的安全运行。因此,高水头、大流量泄水建筑物是保障水电工程安全并充分发挥经济效益的关键。另一方面,泄水建筑物和消能建筑费用很高,有的工程甚至占到水工建筑物费用的 1/3。因此,精心布置、精心研究、精心选择泄水建筑物和消能结构尤为重要。

受河流的水文特性和地形、地质条件的影响,我国一般大型工程枢纽的泄流消能建筑物具有以下特点:

(1) 水头高:如二滩工程坝高 240m,锦屏 305m,小湾和溪洛渡工程接近 300m。泄流水头一般为坝高的 0.5~0.8 倍,流速大(一般均超过 30m/s,有的超过 50m/s),高速水流问题十分突出。

(2) 流量大:国外高坝设计泄量超过 $10000\text{m}^3/\text{s}$ 的工程不多,我国高坝多数设计泄量超过 $10000\text{m}^3/\text{s}$,二滩工程已超过 $20000\text{m}^3/\text{s}$,溪洛渡工程超过 $40000\text{m}^3/\text{s}$,三峡工程通过坝身泄水建筑物的泄量接近 $80000\text{m}^3/\text{s}$ 。

(3) 河谷狭窄,导致泄水建筑物单宽流量大,过去一般认为 $100\sim150\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 已属大单宽流量,目前由于消能技术的发展,单宽流量已突破 $200\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$,少数接近 $300\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。

(4) 泄流功率巨大,下泄功率达数千万千瓦至上亿千瓦。如此巨大的能量需要安全泄放和消杀,使泄流消能任务相当繁重,给消能防冲设计带来极大的困难,成为筑坝的关键技术难题之一。

高水头、大流量泄水建筑物消能方式主要有两大类。一类是大流量、较宽河谷泄水工程,或由于地质条件、环境因素限制,主要采用底流消能工。国外,高坝消力池采用底流消能最高坝为印度的特里面板堆石坝,坝高为 260.5m。我国的五强溪、安康、向家坝、官地等水电站都采用了底流消能工。另一类高水头、大流量、窄河谷泄水工程,主要采用

挑(跌)流消能,如东江、龙羊峡、二滩、溪洛渡、锦屏一级、白鹤滩等。国内外采用底流、挑流消能工程的部分高坝见表 1.1。

表 1.1 国内外部分高坝工程统计表

序号	工程名称	国 家	泄洪消能形式	坝高 (m)	消能水头 (m)	枢纽总泄流量 (m ³ /s)	枢纽泄洪总功率 (MW)	消力池单位体积效能率 (kW/m ³)	最大单宽流量 [m ³ /(s·m)]	建成年份
1	特里	印度	底流	260.5	222	5480	11934		174.0	1990
2	萨扬·舒申斯克	前苏联	底流	245	197	13600	26282		140.0	1989
3	巴克拉	印度	底流	226	149.1	8250	9871		104.0	1967
4	德沃歇克	美国	底流	219	81	5430	4315	11.9	145.0	1973
5	奥本	澳大利亚	底流	213		4480			142.0	1968
6	夏斯太	美国	底流	184		5240			62.0	1943
7	官地	中国	底流	168	106	15500	16118	32.1	163	在建
8	向家坝	中国	底流	161	85	49800	41526	17.6	368	在建
9	瓦拉根巴	澳大利亚	底流	137		12700			166.0	1961
10	利贝	美国	底流	136		5800			40.0	1975
11	百色	中国	底流	130	95.0	9944	9267	42.7	137.0	2006
12	阿尔康托拉	西班牙	底流	130		8000			114.0	1969
13	安康	中国	底流	128	73.3	35700	25671	40.0	209.3	1990
14	岩滩	中国	底流	110	35.5	34800	12119	24.2	308	1992
15	大朝山	中国	底流	110	58.2	18200	10391	99.5	113.8	2003
16	五强溪	中国	底流	85.8	35.5	49320	17176	18.2	287	1999
17	锦屏	中国	挑流	305	228.6	13854	33992	13.1	224.7	在建
18	小湾	中国	挑流	292	226.6	23600	45730	12.3	270	在建
19	溪洛渡	中国	挑流	278	192.4	52300	98710	11.5	294	在建
20	拉西瓦	中国	挑流	250	213.0	6000	12537	20.5	189.8	在建
21	二滩	中国	挑流	240	166.3	23900	39000	13.5	285	1999
22	构皮滩	中国	挑流	232.5	147.9	35600	51687	15.3	229.2	在建
23	白鹤滩	中国	挑流	277	193.8	48200	96933	13.5	306.9	规划
24	英古里	格鲁吉亚	挑流	272	230.0	2500	5040	10.4	62.8	1980
25	埃尔卡洪	洪都拉斯	挑流	231	184.0	8590	15500	—	210	1985
26	莫拉丁其	南斯拉夫	挑流	220	175.0	2200	3890	—	52.4	1975
27	摩西罗克	美国	挑流	184	103.6	7800	8100	10.12	150	1968
28	糯扎渡	中国	挑流	260	182.2	33000	58860		261	在建
29	卡齐	南非	挑流	185	143	6252	8762		39.2	1996
30	伯克	土耳其	挑流	201	190	7510	13984		66.7	1996
31	卡里巴	赞比亚	挑流	128	103	8400	8479		176	1976

对于大流量、较宽河谷底泄流消能问题,我国结合安康、五强溪、岩滩等水电工程,研究开发出宽尾墩技术,大大增强了消力池(戽)消能效果。结合向家坝工程,开发了带小跌坎的淹没流射流消能工程,降低消力池临底流速和动水荷载,提高消力池安全度。

对于高水头、大流量、窄河谷泄流工程,我国学者结合东江、龙羊峡等水电工程,研究应用了扭曲鼻坎、窄缝式消能工等。近年来,随着二滩、小湾、溪洛渡、锦屏等高拱坝工程的建设发展,我国开发了高拱坝泄流消能新技术,采用表、深孔和泄流洞分散泄水、分区消能、坝下水垫塘集中防护措施,较好地解决了高拱坝泄流消能技术难题。

毋庸置疑,以往大型水电工程泄流消能研究的重点在于泄流消能建筑物布置和新型消能工开发研究,研究的目的是尽最大可能将高速水流动能消杀于进入下游河道前或分散于下游河道中,或加强消能区水体紊动消能。以此为目的,开发出各种消能工,如鼻坎高低差动布置,上下、左右挑射水舌对冲消能,窄缝消能,宽尾墩消能等。通过改变挑射水舌形状,增强水体与空气的摩阻和水舌入水后混掺,增强消能效果,减轻消能防护结构和下游河床冲刷。

但一些新型消能工的采用,不可避免地带来一些环境影响问题。如泄流时形成的局部暴雨引起山体滑坡,泄流泥雾影响电气设备运行,空气湿度增加可能使特殊产品生产环境恶化等。因此,采用合适的泄流布置方式,选取适应的消能防冲结构,采取分散泄水、分区消能、重点防护成为高坝、大流量泄流工程设计的趋势。基于此,对高坝泄流消能结构安全研究,显得越来越重要。

1.1 高坝泄流的消能方式

水利水电工程的泄流布置与消能方式的选择,取决于诸多因素,如地形、地质、水文和水力学条件、坝型与坝高、交通条件、运行可靠性以及生态要求等。泄流建筑物的布置方式总体上可分为坝身式^[1]、岸边式及坝身与岸边组合式三种。如何对高拱坝进行泄流和消能建筑物的布置,保证泄流建筑物的安全运行,减轻水流对下游河道的冲刷,是高拱坝设计中的关键技术问题之一。尤其对于我国目前高坝、窄河谷、大流量的拱坝枢纽工程,坝身式布置型式及泄量规模是当前泄流设施布置研究的关键。

1.1.1 坝身泄流布置和流量分配

1.1.1.1 泄流设施布置

综合近些年的研究成果,在泄流消能方案的选择和空间布置方面,对于泄量大、水头高、窄河谷的枢纽,应采取“分散泄流、分区消能、按需防护”的原则。尤其对于泄量大、水头高、河道狭窄的枢纽,限制坝身泄流水流的入水宽度和入水单宽流量,消能区尽量沿河床纵向拉开,以利于拱坝坝肩稳定和两岸边坡的稳定。对于坝身泄流(尤其是拱坝),在消能要求上的指导思想可归结为“分层多孔,上下差动,水流撞击”的布置形式。水舌纵向分层拉开,单体横向扩散,总体入水归槽。表孔出口取大差动布置,靠出口挑角不同拉开水舌挑距,中孔进、出口立面分层(不同高程),以尽量增加水舌入水范围,尽可能多地利用水垫塘水体来消能。表孔、中孔联合泄流时采取水