

水力学与水利信息学 进展 2017

ADVANCE IN HYDRAULICS AND
HYDROINFORMATICS IN CHINA 2017



主编 ● 陈云华 刘之平 章晋雄



河南大学出版社

水力学与水利信息学进展

ADVANCE IN HYDRAULICS AND HYDROINFORMATICS IN CHINA 2017

主编 陈云华 刘之平 章晋雄

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

水力学与水利信息学进展. 2017 / 陈云华, 刘之平,
章晋雄主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.8
ISBN 978-7-5643-5695-8

I. ①水… II. ①陈… ②刘… ③章… III. ①水力学
—文集②水利工程—管理信息系统—文集 IV. ①TV-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 208298 号

水力学与水利信息学进展 2017

主 编 / 陈云华 刘之平 章晋雄

责任编辑 / 陈 斌

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 四川煤田地地质制图印刷厂

成品尺寸 210 mm × 285 mm

印张 30 字数 895 千

版次 2017 年 8 月第 1 版 印次 2017 年 8 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-5695-8

定价 180.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

第八届全国水力学与水利信息学学术大会

2017年8月23—25日 西昌

主办单位：中国水力发电工程学会水工水力学专委会
中国水利学会水力学专委会
国际水利与环境工程学会中国分会

承办单位：雅砻江流域水电开发有限公司
四川大学
西南科技大学

会议议题

A. 工程水力学

- 水工水力学与工程安全
- 江河湖库水力学
- 输水工程水力学
- 冰工程水力学
- 火核电工程水力学（冷却水与冷却塔）
- 河口海岸水动力学
- 防洪工程与洪水管理
- 水工模型与仪器

B. 水利信息学

- 数值模拟与仿真技术
- 复合模型（原观、物模、数模）技术研究
- 智能算法及其应用
- 信息技术在水利工程中的应用

C. 环境水力学

- 水利水电工程建设与水环境
- 洪涝与干旱灾害预测、管理和控制
- 山洪灾害与防灾减灾
- 海岸保护与修复
- 雨洪、污水、苦咸水资源化
- 极端事件与灾害应对中的水力学问题

D. 生态水力学

- 气候变化对水环境/鱼类/资源/能源的影响及对策
- 河湖水环境及其生态修复
- 鱼道及其他过鱼设施水力学问题
- 城市水生态与水景观

组织委员会

主 任：刘之平 吴世勇

副主任：许唯临 陈永灿

委 员：肖白云 练继建 李 云 苏祥林 高盈孟
江春波 孙双科 余 挺 谌 书 程晓陶
陈 端 董志勇 程 文 高学平 许士国
槐文信 郭红民

技术委员会

主 任：彭静 吴一红

副主任：周孝德 唐洪武 刘德富

委 员：刘树坤 高季章 郭 军 陈求稳 黄真理
张永良 李克锋 黄国兵 刘士和 吴时强
王海军 李志军

秘书处

秘 书 长：章晋雄

副秘书长：余 挺 谌 书 张建立 陈文学

秘 书：杨 帆

前 言

“全国水力学与水利信息学大会”是由中国水利学会水力学专业委员会、中国水力发电工程学会水工水力学专业委员会、国际水利与环境工程学会（IAHR）中国分会共同发起，每两年举办一次，至今已经成功举办了七届。第八届大会将于2017年8月在西昌召开。该系列会议已经成为国内水力学界的一件盛事，对促进我国水力学和水利信息学的学科发展与学术繁荣起到了积极的推动作用。

本次会议得到了全国水利水电领域科技人员和高校广大师生的热烈响应和广泛支持。大会收到投稿论文137篇、摘要34篇。经专家评审，共有64篇论文和34篇摘要收录到此论文集中，另有数十篇论文被推荐到《水利学报》《水利水电技术》《中国水利水电科学研究院学报》《南水北调与水利科技》《中国防汛抗旱》等学术刊物上。这些成果体现了近两年来水力学与水利信息学领域的新成果和新进展，从多方面、多角度体现了我国水力学学科的发展水平。

本次会议包括四个议题：工程水力学、水利信息学、环境水力学、生态水力学。这四个议题都涉及我国水利水电工程建设中的热点和难点问题，这些问题的解决对促进学科的发展、工程技术的完善、确保工程的安全和节省投资等方面具有重要的学术和实用价值。

我们诚挚地希望本次会议能够为同行们提供一个交流成果、切磋体会、共商发展的平台，进一步推动我国水力学与水利信息学的研究工作，使之更加生气勃勃、发达兴旺。

在本次会议论文的组稿、审定、编辑和出版过程中，刘树坤等68位专家在百忙之中对论文进行了审定；秘书处章晋雄、唐奇志、余挺、湛书、杨帆等同志做了大量的工作，付出了辛勤劳动，在此一并表示感谢！

最后，感谢雅砻江流域水电开发有限公司、四川大学和西南科技大学对本次大会的大力支持；感谢中国水力发电工程学会和中国水利学会长期以来给予专业委员会的支持；特别要感谢参加本次会议的来自全国的代表以及所有工作人员。

中国水力发电工程学会
水工水力学专业委员会

主任：刘之平

中国水利学会
水力学专业委员会

主任：黄一仁

国际水利与环境工程学会
中国分会

主任：刘之平

2017年7月

目 录

第一篇 工程水力学

河床基岩冲刷模拟敏感性分析与探讨	刘 东	韩松林	王 奔	3			
复杂水道系统水力-机械一体化过渡过程仿真软件开发及其应用	李高会	刘子乔		10			
跌坎型底流消能工水流结构区水流特性与水气结构研究	欧阳晨	张功育	刘志建	马文韬	费 扬	16	
窄河谷大流量河道行进流速对闸坝泄流能力计算的影响	汪 振	陆 欣	黄成家	吴森华	陈重喜	24	
石岛湾核电厂排水口消能匀流试验研究	刘赞强	纪 平	刘 彦			28	
KARUMA 水电站岔管体型优化的数值模拟	纪昌知	倪绍虎				33	
涡流式旋流竖井水力特性数值模拟研究	杨青远	翟静静	姜治兵	韩继斌		37	
基于水力学特性的库区超高边坡开挖体型优化设计	周晓明	倪绍虎				43	
收缩墩与跌坎消力池体型研究	唐秋明	牛争鸣	李一川	蒋雁森		48	
水平旋流泄洪洞通气孔的通气机理研究	蒋雁森	牛争鸣	唐秋明	李一川		54	
Coca Codo Sinclair 水电站引水防沙试验研究	武彩萍	赵连军	朱 超			60	
跌坎水流水翅抬升驱动因子及定量影响	陈 端	沈晓莹	黄国兵	薛宗璞		67	
水垫塘附壁射流区掺气浓度变化规律试验研究	马文韬	谢 菱	吴建森			75	
三峡水运新通道分散三级船闸方案输水系统布置及水力计算分析	吴英卓	江耀祖	范 敏	蒋筱民		82	
竖井式抽水蓄能电站进出水口体型优化的水力学数值模拟	熊保锋	房敦敏	侯 博			89	
特型水闸研究与应用展望	陈发展	严根华				95	
射流消能井底板冲击压力试验研究	翟静静	杨青远	王海波	沈立群	陈晓松	101	
水工隧洞的摩阻系数取值研究	郭永鑫	李云龙	王 珏	黄 伟	郭新蕾	105	
电站进水口体形和分层取水试验研究方法 & 规律性探索	薛阿强	侯冬梅				112	
引江济淮枞阳枢纽船闸引航道口门区水流特性研究	范 敏	陈 辉	江耀祖			118	
基于 PIV 技术的近床面流场试验研究	洪安宇	王竞革	王正中			124	
水头对事故闸门门体水力荷载影响研究	张文远	董 波	王 磊	强 杰	姚 尧	章晋雄	132
白鹤滩水电站尾水调压室水力设计	孟江波	吕 慷	陈益民	杨 飞	倪绍虎		138
滨海火、核电厂水工消泡措施研究综述	康占山	赵懿珺	秦 晓				145

以礼河四级水电站复建工程尾水系统水工模型试验研究

.....陈为博 王恒乐 潘益斌 李高会 黄 可 倪绍虎	151
某排水深隧折板消能竖井水力特性试验.....陈思禹 张法星 殷 亮 王庆丰	160
复杂侧向进水前池三维流场模拟与优化.....郭永鑫 李甲振 郭新蕾 付 辉 王 涛	166
洪水作用下车辆稳定性及安全标准研究进展.....马梦蝶 李传奇 肖 学 王德振	173

第二篇 水利信息学

沐西片防洪保护区水动力数学模型研制及应用.....贵 鹏 虞邦义	183
基于 Flow-3D 的纺锤体结构在充流管道中下落过程的数值模拟汪 楠 李国栋 赵 鑫 左娟莉 胡文军	190
基于 CFD 的金属多孔介质气固分离器流场数值模拟李星南 李国栋 方细波 刘宇星 张巧玲	197
基于 Sentinel-2A 卫星数据的洪水前后城市生物量变化特征分析杨 斌 王 磊 李 丹 陈 财	204
高效高精度全水动力模型在洪水演进中的应用研究李桂伊 侯精明 李国栋 王 润 韩 浩	211
金属多孔介质气固分离器结构优化的数值模拟刘宇星 李国栋 方细波 李星南 杨振东	218
Analysis for stream flow depletion induced by a well pumping from rivers in some specific conditionsLibingdong Zhangxinhua	224
Numerical Simulation for Hydraulic Characteristics of Tunnel Spillway on Jingping-I Hydropower ProjectZhang Hua Rajesh Shilpakar Birodh Manandhar He Gui cheng Qu Xiao feng	233
Computational fluid dynamics modelling of tunnel spillwayZhang Hua Birodh Manandhar Rajesh Shilpakar He Guicheng Qu Xiaofeng	241
多相浮射流的大涡模拟方法研究.....杨博文 牛小静	249
电厂虹吸井排水消泡数值模拟方法研究.....李明达 纪 平	255
小浪底水库模型水沙测控及三维重构平台建设.....李昆鹏 马怀宝	261
长距离调水工程中闸门控制精度优化研究.....靳宏昌 李庆涛 范 磊	267
大坝浇筑过程中坝址区防风措施的数值模拟研究.....邓雅冰 李国栋 李莹慧 李珊珊	273
水工结构流激振动特征信息提取方法研究进展.....张建伟 侯 鸽 赵 瑜 马晓君 王立彬	279
半封闭性海湾水文特性的数值模拟研究.....秦 晓 纪 平 赵懿珺 梁洪华 康占山	287
滑坡涌浪形成与传播过程数值模拟研究.....姜治兵 任坤杰 程子兵	294
EMD 算法在径流序列趋势提取中的应用.....宿 策 荣钦彪	299
基于种植结构调整的农业灌溉用水优化配置模型.....孙秋慧 徐国宾 马 超	306

第三篇 环境水力学

我国农村小水电开发的生态环境影响研究进展	汤显强	潘婵娟	黎 睿	315				
南盘江上游地区水环境时空分布特征及演变趋势研究	蔚 辉			325				
国内典型水电工程砂石骨料废水处理工艺存在问题分析	陈云鹏	黎 睿	汤显强	331				
黄河山坪电站库区泥石流堆积物特征研究	向贵府	任光明		338				
酸性废水排放的 pH 紊流数学模型研究	李纪龙	李 然	晁立强	344				
方形孔口多孔板水力空化杀灭原水中病原微生物的试验研究	董志勇	赵文倩	张 凯	居文杰	李杨如	351		
水库蓄水过程重金属浓度变化的数值模拟	武柯宏	韩继斌	韩松林			358		
多点概化水环境容量计算方法研究	杨 杰	韩延成	唐 伟	初萍萍	梁梦媛	365		
恒定流作用下内陆核电厂温排水三维数值模拟	刘 彦	陈小莉	刘赞强			371		
红海湾某核电厂排放污染物输移扩散数值模拟	梁洪华	康占山	赵懿珺			378		
火（核）电厂温排水水气交界面水力热力特性试验研究	王 勇	王 华	纪 伟	沙海飞	周 杰	刘圣凡	童中山	384
泸灞生态区湖泊水动力及水质数值模拟	陈 军	王 颖						392
雁栖湖流域水质时空分布规律研究	班静雅	马 巍	兰瑞君					398

第四篇 生态水力学

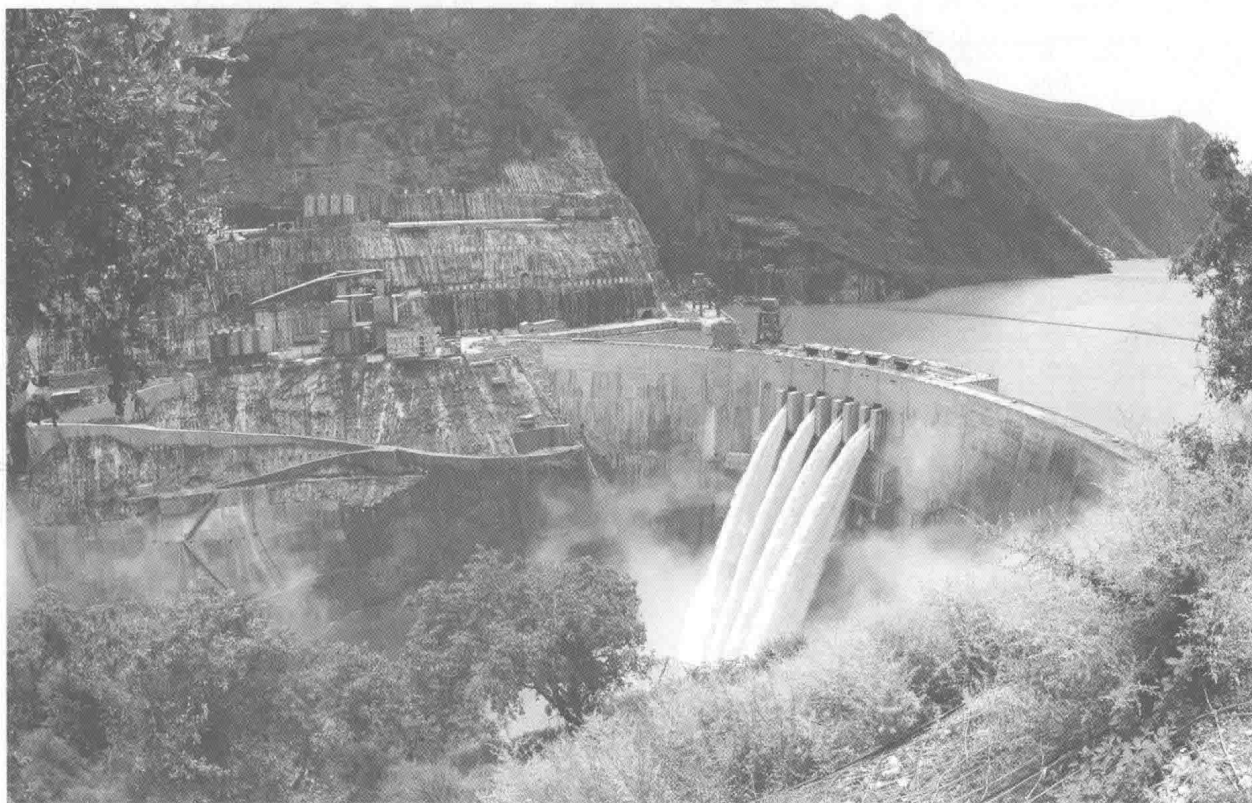
人工湿地生态系统服务功能与价值评估	马 杰	李传奇	刘 凯	409		
水利枢纽附属鱼道建设分析	黄钰铃	骆辉煌	杨青瑞	414		
基于生态通道模型模拟长江口水域生态系统结构与能量流动	韩 瑞	王 丽	陈求稳	419		
水库下泄水温生态环境影响综述	张 迪	王东胜	彭期冬	林俊强	陈冬红	427

第五篇 摘 要

N-S 方程特征线算子分裂有限元法及应用	王大国	水庆象	437				
打帮河溶解氧分布特征及影响因素分析	谭 宏	王从锋	莫伟均	王 瑶	冯三杰	438	
岷江上游叠系地区的河湖软沉积构造与动力研究	崔 杰	王兰生	439				
基于 GIS 的地震重灾区滑坡易损性评价	吴彩燕	440					
洪水分析软件 IFMS/IFMS Urban 理论方法及应用	马建明	喻海军	张大伟	张洪斌	吴滨滨	穆 杰	441
高坝泄洪洞智能机器人巡检系统	张 华	王皓冉	汪 双	任万春	442		
黑河流域上游水沙特征变化及原因分析	王 昱	连运涛	卢世国	时文强	443		
后河梓潼溪电站下游河段塌岸特征及影响因素分析	向贵府	444					

英罗湾溺谷型潮汐水道演变及其稳定性分析	黄广灵	黄本胜	黄锦林	刘 达	445
基于 SWE-SPH 的溃坝波与障碍物作用模拟	任立群	郑仙佩	王 星	顾声龙	446
阶梯式泄水道竖井性能研究	吴建华	任炜辰	马 飞		447
考虑支流水华防控生态约束的三峡水库优化调度	刘晋高	诸葛亦斯	余 晓	刘德富	448
突发水环境事件重金属污染水生态损害量化方法研究	裴倩楠	马 巍	胡彩虹		449
大水体范围三维激光诱导荧光测量标定和校正系统研究	王鲁海	任家盈	彭海欣	黄真理	450
南水北调中线总干渠冬季输水冰情分析与安全调度研究	段文刚	黄国兵	杨金波	刘孟凯	451
生存或灭亡: 中华鲟与长江水坝的关系	黄真理	王鲁海	李海英		452
台特玛湖湖泊面积变化特征及保护对策研究	余 晓	诸葛亦斯	李国强	杜 强	453
提高大坝泄洪能力新的解决方案——琴键堰的研究与进展	李国栋	李珊珊	荆海晓	祁媛媛	454
基于径流-潮位关联特性的河口盐水入侵及淡水保证率研究	贺 蔚	练继建	马 超	徐 奎	455
有限时段源一维水质模型的求解及其简化条件				武周虎	456
新型抛物线形渠道及水力最优断面	韩延成	唐 伟	梁梦媛	初婷婷	457
旋流消能工内空腔旋流的流速特性	南军虎	牛争鸣	张 东		458
沿海城市暴雨潮位致灾作用度量化及排涝措施适应性评估	许红师	练继建	徐 奎	马 超	459
应用 IV 技术对高 Re 数下台阶后水流流动特性的实验研究	樊新建	吴时强	雷显阳	周 辉	460
鄱阳湖星子站水位时间序列相似度研究	葛金金	彭文启	黄 伟	吴文强	461
无水功能区划小流域水环境容量计算方法探究	黄 伟	吴问丹	马 巍		462
基于 RVA 和 Copula 方法的黄河头道拐站水沙变化分析			崔冉昕	马 超	463
水库月均径流滚动预报及其不确定性研究			崔喜艳	马 超	464
一种明渠水流自由水面追踪的隐式算法			陈 啸	刘昭伟	465
An implicit method for capturing free surface of open channel flows					
.....	Xiao Chen	Zhaowei Liu			465
基于物质流分析的小流域山洪灾害易损性评估	杨伟超	练继建	马 超	徐 奎	466
水环境损害鉴定评估技术难点问题探讨	霍 静	诸葛亦斯	杜 强		467
梯级泵站事故停泵水力过渡过程分析及防护研究	肖 学	李传奇	杨幸子	韩典乘	468
密云水库水生态安全调控参数及其阈值初探	马 巍	班静雅	廖文根	陈哲灏	469
南水北调中线突发水污染监测调控与处置关键技术	雷晓辉	王 浩	权 锦	郑和震	470

第一篇 工程水力学



河床基岩冲刷模拟敏感性分析与探讨

刘东, 韩松林, 王奔

(长江水利委员会长江科学院)

【摘要】 本文主要对挑流消能工下游河床冲刷模拟进行研究, 针对模拟不同的基岩抗冲流速、动床砂铺砂高程、原型冲刷演化等进行敏感性分析, 探讨影响河床基岩冲刷深度及范围模拟的关键因素。成果表明: 河床基岩冲刷坑的深度主要取决于河床基岩的抗冲能力, 模型试验中应注重动床砂中值粒径及铺砂高程的选择, 同时需充分考虑基岩断层及破碎带特性, 对冲刷深度及位置的演变提出合理推测。

【关键词】 冲刷模拟; 抗冲流速; 铺砂高程; 敏感性

1 前言

挑流消能的工程结构简单, 经济合理, 当下游河床地质条件较好时, 中、高水头水利枢纽大多采用挑流消能, 如图 1 所示。一般情况下, 河床冲刷坑的深度取决于水舌跌入下游水体后的冲刷能力和河床的抗冲能力, 它与单宽流量、上下游水位差、下游河床的地质条件、下游水深、鼻坎型式、坝面和空中的水流能量损失及掺气程度等因素有关。过高的河床基岩冲深将严重危害枢纽建筑物的安全, 因此河床冲刷坑最大深度的估算及试验模拟研究极为重要。

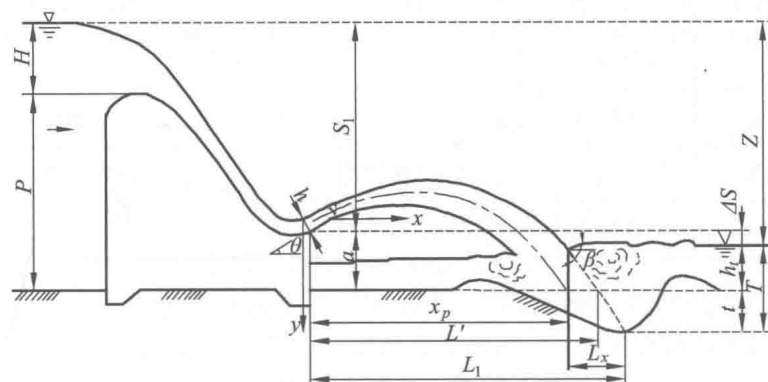


图 1 挑流消能

对基岩河床冲刷坑深度 t 的计算, 我国目前较普遍采用计算公式为^[1]

$$t = Kq^{0.5}Z^{0.25} - h_t$$

式中 t ——冲刷坑深度, m;
 q ——单宽流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$;
 Z ——上下游水位差, m;

h_t ——下游水深, m;

K ——抗冲系数, 主要与河床地质条件有关。坚硬完整的基岩, $K = 0.9 \sim 1.2$; 坚硬但完整性较差的基岩, $K = 1.2 \sim 1.5$; 软弱破碎、裂隙发育的基岩, $K = 1.5 \sim 2.0$ 。

在枢纽体型、布置及优化方案中, 下游河床进行冲刷模拟是必须且关键的试验研究内容。试验一般根据设计提供原型河床基岩抗冲流速选择适宜动床砂及铺砂高程, 在不同泄洪工况下模拟基岩冲刷, 量测河床冲刷范围、冲刷高程及冲深后坡比等参数, 为设计提供参考。

2 不同抗冲流速敏感性分析

在冲刷模拟试验中, 一般根据设计提供基岩抗冲流速, 按下式选取模型砂中值粒径:

$$v = k \sqrt{\frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} 2gD_{50}} \quad (1)$$

式中 γ ——砂容重, 一般取 26.9 kN/m^3 ;

γ_w ——水容重, 取 9.81 kN/m^3 ;

v ——抗冲流速, 单位为 m/s ;

g ——重力加速度, 取为 9.81 m/s^2 ;

k ——系数, 试验取为 1.2。

某水利枢纽下游抗冲流速分别按 5 m/s 、 8 m/s 、 10 m/s 分别进行冲刷试验, $P = 0.02\%$ ($Q = 28\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_{\text{上}} = 986.17 \text{ m}$, $H_{\text{下}} = 852.04 \text{ m}$)、 $P = 0.1\%$ ($Q = 24\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_{\text{上}} = 979.38 \text{ m}$, $H_{\text{下}} = 849.73 \text{ m}$) 工况下, 下游河床冲刷见表 1。

表 1 不同抗冲流速河床冲刷特性表

基岩抗冲流速	频率	冲刷最低点高程 (m)	位置 (m)	冲深 (m)	范围 (m)	
5 m/s	$P = 0.02\%$	707.9	0 + 230	24.1	0 + 155 ~ 0 + 290	135
	$P = 0.1\%$	723.3	0 + 225	8.7	0 + 185 ~ 0 + 255	70
8 m/s	$P = 0.02\%$	710.1	0 + 230	21.9	0 + 160 ~ 0 + 285	125
	$P = 0.1\%$	725.9	0 + 225	6.1	0 + 190 ~ 0 + 250	60
10 m/s	$P = 0.02\%$	717.1	0 + 230	14.9	0 + 165 ~ 0 + 280	115
	$P = 0.1\%$	728.5	0 + 230	3.5	0 + 190 ~ 0 + 250	60

从表中可以看出, $P = 0.02\%$ 及 $P = 0.1\%$ 工况下冲刷最深点位置均在桩号 0 + 230 m 附近, 冲刷范围随着基岩抗冲流速的增加略有降低, 冲刷最低点高程变化明显。 $P = 0.02\%$ 工况下冲深分别为 24.1 m、21.9 m、14.9 m; $P = 0.1\%$ 工况下冲深明显降低, 但不同抗冲流速冲深仍为 8.7 m、6.1 m 及 3.5 m。可见根据不同抗冲流速选择模拟动床砂, 相同泄水工况下游河床冲刷深度及范围变化较大, 因此需根据河床实际基岩特性, 选择适宜的基岩抗冲流速进行冲刷模拟, 为泄洪建筑物的安全提供依据。

3 不同铺砂高程敏感性分析

在泄洪建筑物体型及泄洪工况一致的情况下, 河床基岩冲刷坑的深度主要取决于河床的抗冲能力,

但模型试验研究发现，河床动床砂铺砂高程的变化与抗冲流速强度对河床基岩模拟冲刷深度的影响同等重要。

(1) 某水利枢纽采用岸边泄洪洞及溢洪道泄流，由于河道狭窄，河床覆盖层表层砂卵石层较薄，下覆含泥粉细砂，抗冲流速极低，试验动床模拟不考虑覆盖层和强风化层，仅模拟弱风化层基岩，抗冲流速取 6 m/s，模型按 275 m、270 m、265 m 及 260 m 高程分别铺设动床砂， $P = 0.1\%$ 泄洪工况下 ($Q = 6\,180\text{ m}^3/\text{s}$, $H_{\text{上}} = 471.90\text{ m}$, $H_{\text{下}} = 306.06\text{ m}$) 河床冲刷成果见表 2、图 2。

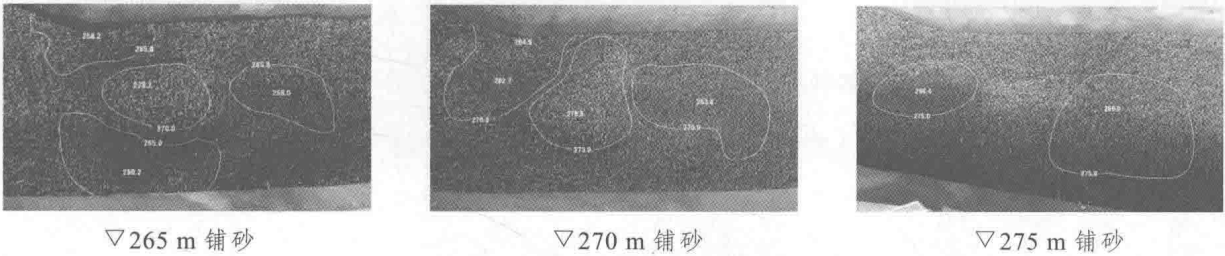


图 2 不同铺砂高程河床冲刷成果图

表 2 不同铺砂高程河床冲刷特性表

铺砂高程 (m)	1#冲坑			2#冲坑		
	冲坑高程 (m)	位置	冲深 (m)	冲坑高程 (m)	位置	冲深 (m)
275	266.4	0 + 670	8.6	269.0	0 + 760	6.0
270	262.7	0 + 670	7.3	263.6	0 + 760	5.4
265	260.2	0 + 670	4.8	259.0	0 + 755	5.0
260	257.1	0 + 670	2.9	256.3	0 + 755	3.7

从图表中可以看出，该河床中部 1#、2#冲刷坑最深点均位于桩号 0 + 670 m 及 0 + 760 m 附近，冲刷深度及最低点高程均随铺砂高程的降低而降低。1#冲坑在河床铺砂 275 m 高程时，最低点冲刷高程为 266.4 m，铺砂高程降低至 265 m 时，该位置冲刷高程 260.2 m，冲刷深度 4.8 m；再次降低铺砂高程至 260 m，该位置仍继续冲刷，最深点高程 257.1 m，冲深降低为 2.9 m。2#冲刷坑冲刷形态与 1#基本一致。

图 3 为该枢纽不同铺砂高程冲刷最深点高程曲线图，从图中可以看出，随着铺砂高程的降低，河床冲刷最深点高程随之减小，该工况下，河床冲刷最深点高程与铺砂高程存在一个极限最小值，1#、2#冲刷坑最深点与铺砂高程均可拟合为二次曲线关系，为设计提供参考。

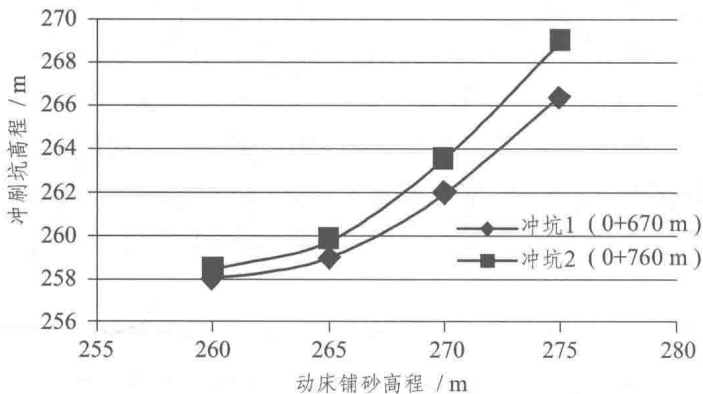


图 3 不同铺砂高程河床冲刷坑高程图

(2) 某枢纽为双曲拱坝, 坝身通过表、中孔泄流, 河床基岩设计抗冲流速 8 m/s, 模型按 750 m、737 m、732 m 及 725 m 高程分别铺设动床砂, $P = 0.1\%$ 工况 ($Q = 24\,000\text{ m}^3/\text{s}$, $H_{\text{上}} = 979.38\text{ m}$, $H_{\text{下}} = 849.73\text{ m}$) 及 $P = 5\%$ 工况 ($Q = 18\,000\text{ m}^3/\text{s}$, $H_{\text{上}} = 975.00\text{ m}$, $H_{\text{下}} = 842.46\text{ m}$) 坝后水垫塘冲刷成果见图 4、表 3。

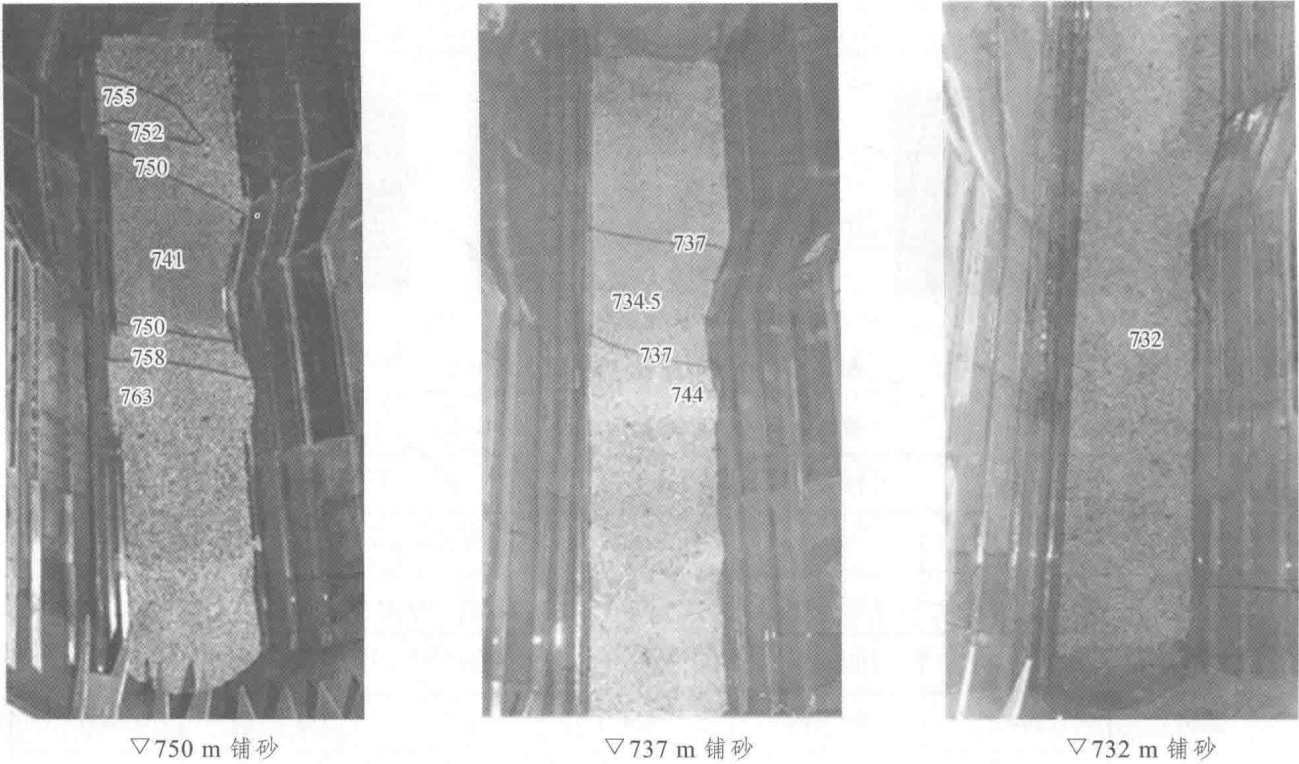


图 4 $P = 5\%$ 工况各铺砂高程冲刷成果图

表 3 不同铺砂高程水垫塘冲刷特性表

铺砂高程 (m)	$P = 0.1\%$			$P = 5\%$ 表孔单泄		
	冲坑高程 (m)	位置	冲深 (m)	冲坑高程 (m)	位置	冲深 (m)
750	735.0	0+220	15.0	741.0	0+220	9
737	728.0	0+220	9.0	734.5	0+220	2.5
732	725.9	0+225	6.1	732.0	0+225	0
725	723.5	0+225	1.5	725.0	0+225	0

各工况下水垫塘冲刷坑最深点均位于桩号 0+220 m 附近, 冲刷深度及最低点高程均随铺砂高程的降低而降低。 $P = 0.1\%$ 工况, 水垫塘铺砂 750 m 高程时, 最低点冲刷高程为 735.0 m, 铺砂高程降低至 732 m 时, 该位置冲刷高程 725.9 m, 冲刷深度 6.1 m, 再次降低铺砂高程至 725 m, 该位置仍存在冲刷, 最深点高程 723.5 m, 冲深降低为 1.5 m。 $P = 5\%$ 表孔单泄工况冲刷坑冲刷形态与 $P = 0.1\%$ 工况基本一致。

从图 5 中可以看出, 随着铺砂高程的降低, 水垫塘冲刷最深点高程随之减小, $P = 5\%$ 工况下, 河床冲刷最深点高程已存在一最小值 732.0 m, $P = 0.1\%$ 工况冲刷坑最深点与铺砂高程仍可拟合为一曲线关系, 计算出冲深极限最小值。

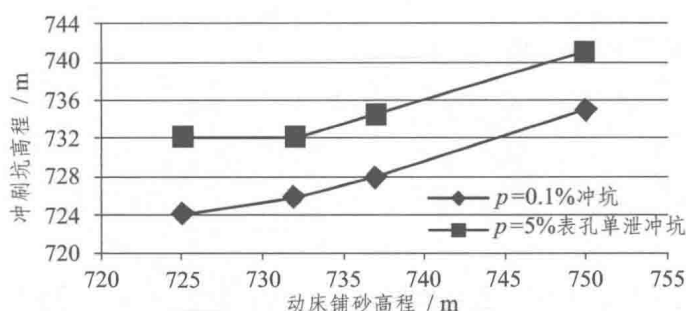


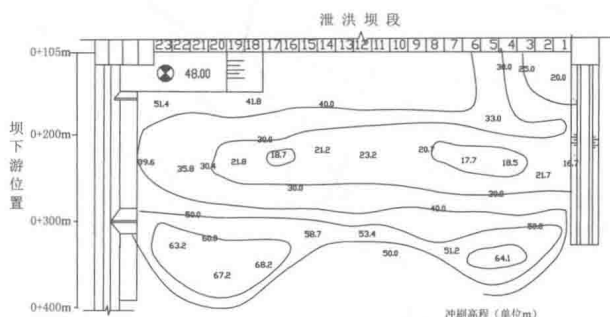
图 5 不同铺砂高程水垫塘冲刷坑高程图

可见河床冲刷模拟试验中, 动床铺砂高程的选择对冲刷坑最深点高程的影响极其重要, 模型试验除选择适宜中值粒径的动床砂外, 还需充分考虑该枢纽河床动床铺砂高程, 为设计及试验成果提供科学依据。

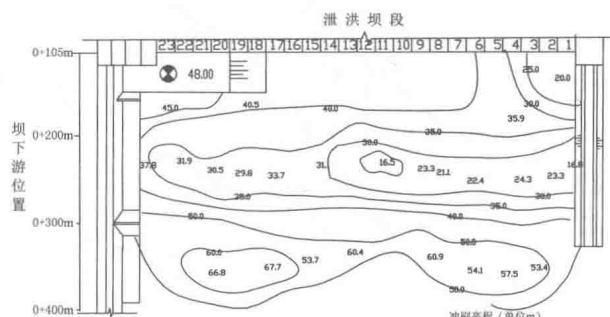
4 冲刷演化敏感性分析

图 6、图 7 分别为某水利枢纽 2004—2008 年历次泄洪后模型试验冲刷地形及原型实测水下地形图。试验研究表明^[2]: 工况 1 (2004 年模型试验工况, $Q = 45\,000\text{ m}^3/\text{s}$, $H_{\text{上}} = 135.00\text{ m}$) 泄洪坝段下游动床冲刷地形从下纵围堰左侧防冲墙至左导墙呈长条形完整冲坑形态, 冲坑底部位于坝轴线下 230 ~ 250 m, 冲刷最低点高程 17.7 ~ 23.2 m; 工况 2 (2008 年模型试验工况, $Q = 45\,700\text{ m}^3/\text{s}$, $H_{\text{上}} = 145.00\text{ m}$) 冲刷形态与工况 1 基本一致, 冲刷最低点高程 16.9 ~ 19.9 m。

枢纽从 2003 年至 2008 年汛前, 运行经历 5 个汛期后, 泄洪坝段下游整体冲刷形态与 2004 年实测地形相近 (见图 7)。泄洪坝段下游水下地形整体为形状不规则的冲坑形态, 冲坑底部平面位置弯折、底面凹凸不平。左侧 6# ~ 13# 坝段下游有与水流方向约 60° 交角的狭长冲坑, 坑中形成 2 个局部深坑, 最低点高程分别为 22.5 m、26.7 m, 泄洪坝段中部冲刷最低点高程分别为 21.6 m、28.5 m, 较模型试验冲刷位置及高程均有一定差异, 工况 2 不同坝段下游冲刷最深点高程比实测最低点高程均低, 模型试验成果较实测地形冲刷具有 1 ~ 9 m 高程的安全富余 (见图 8), 且河床冲刷地形逐步稳定。随着枢纽泄洪建筑物的运行, 库水位上升, 泄洪流量增加, 水流对下游冲刷能力加大, 同时泄洪坝段下游河床地质条件也不断弱化, 基岩岩块逐渐破碎分解, 基岩抗冲刷能力减弱, 泄洪坝段下游河床地形不断受冲刷发展, 冲刷最低点也向下游缓慢移动。



2004 年前泄洪下游动床冲刷形态图



2008 年前泄洪下游动床冲刷形态图

图 6 枢纽历次最大洪水泄洪模型试验冲刷成果