

西霞院反调节水库 水力学及泥沙问题 试验研究

李远发 武彩萍 高 航 曹国利 张绍民 著
宋莉萱 郭慧敏 勾兆莉 秦云香 王亚春



黄河水利出版社

西霞院反调节水库水力学及 泥沙问题试验研究

李远发 武彩萍 高 航 曹国利 张绍民 著
宋莉莹 郭慧敏 勾兆莉 秦云香 王亚春

黄河水利出版社

内 容 提 要

西霞院反调节水库是黄河小浪底水利枢纽配套工程。本书主要依据作者在西霞院反调节水库不同设计阶段进行的大量物理模型试验研究成果,对西霞院工程总体布置的合理性,各泄流排沙建筑物体型的优劣、泄流排沙能力、消能与防冲效果,左右岸滩地方案与主河槽方案对水库上游进流影响和对下游河势影响,贯流式机组方案和轴流式机组方案优劣的比较等进行了分析总结。该研究成果为西霞院反调节水库的设计、施工提供了大量科学的参考依据。本书可供水利、水电及相关专业的科技工作者和高等院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

西霞院反调节水库水力学及泥沙问题试验研究 /
李远发等著. —郑州:黄河水利出版社, 2007.12
ISBN 978-7-80734-311-0

I.西… II.李… III.①水库-水力学-试验-研究-
洛阳市②水库泥沙-试验-研究-洛阳市 IV.TV632.613

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 171064 号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail: wlp@yrp.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail: hhsicbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1 / 16

印张:23

字数:530 千字

印数:1—1 000

版次:2007 年 12 月第 1 版

印次:2007 年 12 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-80734-311-0 / TV · 530

定价:60.00 元

前言

根据黄河干流工程布局修订规划,小浪底水利枢纽建成后,拟在小浪底枢纽下游 16 km 处修建西霞院低水头水利工程。随着小浪底工程建设的进展,1998 年正式明确:西霞院水利枢纽作为小浪底水利枢纽配套工程——西霞院反调节水库尽快实施。该工程开发任务以反调节为主,结合发电,兼顾供水、灌溉等综合利用。

在西霞院水库可行性研究阶段,黄河水利科学研究院配合设计工作进行了多方案的系统试验研究:论证水库总体布置的合理性;检验泄流排沙建筑的泄流能力和排沙效果;论证电站排沙建筑物合理布置形式;观测研究水库建筑物的消能与防冲;观测水库回水对小浪底电站尾水的影响;论证左、右岸滩地方案与主河槽方案对水库上游进流影响和对下游河势影响变化等。1995 年开始在水库整体模型上对电站坝段贯流式机组方案和轴流式机组方案进行比较论证。两种机组方案试验结果表明:水库上、下游流态没有明显差异;轴流机组方案机组进口高程 120.00 m,每台机组下方左侧设一排沙底孔,贯流式机组方案机组进口高程 103.00 m,每台机组右侧设一排沙底孔,电站坝段左右两侧和底部设置 3 个方位的泄流排沙建筑物。总体布置形式,对多沙的黄河而言,通过合理调度运用,可以明显地减少过机泥沙,并可避免关闭机组的进口泥沙淤堵;电站坝段和泄洪坝段之间,下游设置导墙,对改善下游流态及消能防冲有较好的效果。贯流式机组造价较低。在电站采用贯流式机组情况下,1997 年 10 月又对水库坝轴线直角布置方案和直线布置方案电站防沙效果在水库整体动床模型上进行了试验研究。电站坝段与泄流排沙坝段直角布置方案,电站坝段不设排沙底孔,在电站进口前设一 48 m 宽的排沙槽,排沙槽上游高程 102.00 m,比 1[#]机组进口高程低 4 m,排沙槽下游高程 99.00 m,与 5 孔排沙洞进口高程齐平,通过排沙洞将排沙槽淤积粗泥沙排向枢纽下游,以减少过机泥沙。试验结果表明:排沙洞前的冲刷漏斗范围较小,远离排沙洞进口的 1[#]~4[#]机组前排沙槽内淤沙高程高出电站进口高程,排沙洞拉沙效果不理想。枢纽坝轴线直线布置方案,电站坝段右侧和左侧安装间下设排沙洞,电站进口底部设排沙底孔,电站进口与排沙底孔进口上下对应重叠布置,该方案排沙底孔体型比较复杂,运用操作不便,但排沙底孔排沙效果比较明显。在进行水库总体布置方案试验的同时,对库区泥沙淤积形态及下游河道河势变化进行了研究,试验结果表明:在选定水库坝址情况下,水库淤积库容较小,很快能达到淤积平衡,汛限水位 131.00 m,非汛期最高蓄水位 134.00 m 运用情况下,水库回水对小浪底电站尾水无明显影响。左、右岸滩地布置方案改变了坝址处主河槽位置,对下游河势产生一定影响,但通过修建河道整治工程,仍可以使遂村以下河道工程靠溜,与枢纽修建前河势相比无明显变化。通过可行性阶段水工模型和泥沙模型多方案试验研究,为初步设计工作的深入和优化提供了可靠的试验依据。

1997 年水利部水电规划设计总院对西霞院工程可行性研究报告的审查意见明确指出:初设阶段应结合模型试验,分析复核库区泥沙淤积,论证水库防沙设施布置的合理

性以及工程布置对下游河势的影响。1998 年配合设计工作的深入在大比尺枢纽河段河道泥沙模型上, 针对库区淤积对小浪底电站尾水及对下游河势的影响进行了试验研究。试验结果表明: 库区在淤积造床过程中, 随时可能出现顺坝流过程, 应注意观测土坝坝坡的冲刷及采取相应的防护措施。左右岸滩地布置方案, 水库下游采取相应的河道整治工程措施对下游河势影响一般不超过铁谢以下的河段。最高蓄水位 134.00 m 情况下, 小浪底枢纽下泄流量超过 $700 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 库区回水对小浪底电站尾水无明显影响。2002 年 5 月对水库总体布置初设优化方案和推荐方案在水库整体模型上进行试验研究, 鉴于黄河汛期含水量较大, 贯流式机组进口高程较低, 电站防沙缺乏实际运用管理经验, 初设阶段电站选定 4 台轴流式机组。初设优化方案和推荐方案差别不大, 主要区别是: 优化方案 21 孔泄洪闸全部采用开敞式低堰形式, 每孔净宽 12 m; 推荐方案 1[#]~7[#]泄洪闸改为胸墙式, 堰顶高程由 126.40 m 降低为 121.00 m, 每孔净宽减小为 9 m。两方案试验结果差别不大, 这表明, 在各种调度运用情况下, 泄流建筑物泄流能力均满足设计要求。泄流建筑物消能和防冲均能满足工程安全要求。局部散抛石防护部位, 散抛石冲失较多, 建议在这些易冲刷部位增大抛石粒度或采用铅丝笼块石防护。电站坝段在左右两侧和底部设置排沙洞和排沙底孔, 对电站防沙和防淤堵效果比较明显。王庄引水闸和下游灌溉引水闸在引水期间, 均能形成一定稳定流路, 也能保证正常引水。在水库整体模型上, 库区淤积造床过程中, 同样也出现顺坝流现象, 应注意土坝坝坡的冲刷和防护。在水库不同调度运用情况下, 泥沙冲淤迅速无常, 可能出现不利的流态和冲刷, 应加强平时观测, 并通过泄流排沙建筑物调度措施及时消除。

根据初设审查意见, 2003 年又对泄洪闸、排沙闸(洞)和上游左导墙等建筑物体型进行了单体终结布置方案的试验研究, 按单体建筑物的最终体型, 又在水库整体模型上进行验证试验。结果表明, 与初设总体布置推荐方案试验结果差别不大, 水库泄流能力和消能冲刷都满足设计要求。西霞院低水头水库运用成败主要取决于对泥沙的处理, 不断总结水库调度运用经验, 完全可以实现反调节为主, 结合发电, 兼顾供水灌溉的目标。

自西霞院反调节水库可行性研究立项以来, 配合不同设计阶段工作, 共提出试验研究报告 15 份(篇)。本书是按时间顺序进行编排的, 清晰显现了设计思路的演进过程; 试验研究成果又为设计方案的深入和优化提供了科学依据。试验研究历时 10 年, 先后参加人员很多, 主要参加人员有: 黄河水利科学研究院李远发、武彩萍、姚文艺、刘海凌、张红武、张俊华、高航、吕文堂、王德昌、王国栋、董年虎、勾兆莉、宋莉萱、郭慧敏、陈俊杰、夏传星、田治宗、王卫红、许雨新、梁跃平、姚振华等, 黄河勘测规划设计研究院刘宗仁、张国兰、曹治平、秦云香、王亚春、李振连、曹国利、张绍民、张厚军、史仁杰等。

作 者

2007 年 6 月

目 录

前 言

第一篇 可行性研究阶段试验研究

第一章 西霞院反调节水库河段河道特征及工程开发任务和设计特征指标	(1)
第一节 工程地理位置及开发任务	(1)
第二节 工程河段河道特征	(2)
第三节 工程设计特征指标	(2)
第二章 西霞院反调节水库轴流式和贯流式机组布置模型试验研究	(3)
第一节 模型设计及模型沙选择	(3)
第二节 西霞院反调节水库轴流式机组布置试验	(7)
第三节 西霞院反调节水库贯流式机组布置试验	(34)
第四节 贯流式和轴流式机组总体布置方案试验结果比较	(48)
第三章 西霞院反调节水库坝轴线直角和直线布置模型试验研究	(50)
第一节 试验研究内容及水库总体布置方案概况	(50)
第二节 水库坝轴线直角总体布置方案试验	(56)
第三节 坝轴线直角总体布置方案下游左岸导墙冲刷试验	(71)
第四节 水库坝轴线直线总体布置方案试验	(75)
第五节 水库坝轴线直线总体布置修改方案试验结果	(87)
第六节 水库坝轴线直角和直线总体布置方案试验结语和讨论	(100)
第七节 西霞院水库泄洪闸水工断面模型试验	(102)
第八节 西霞院水库排沙洞单体水工模型试验	(110)
第九节 有压淹没泄水洞增大泄流能力的试验研究	(121)
第四章 西霞院水库总体布置方案河道泥沙模型试验研究	(127)
第一节 水库河段及水库总体布置方案概况	(127)
第二节 模型设计及试验水沙条件	(130)
第三节 模型验证试验	(134)
第四节 西霞院水库回水对小浪底电站尾水位的影响试验	(136)
第五节 不同水库整体布置方案水库上下游河床演变试验	(137)
第六节 右岸滩地方案上下游河道整治工程试验	(143)
第七节 试验结论	(145)

第二篇 初设阶段试验研究

第五章 西霞院工程总体布置优化方案整体模型试验研究	(147)
第一节 工程总体布置优化方案工程概况	(147)
第二节 枢纽整体模型设计及枢纽下游水位验证	(153)
第三节 枢纽建筑物泄流能力及消能冲刷	(158)

第四节	上游导墙、下游锥坡和护岸及防冲槽后冲刷和堆积	(163)
第五节	枢纽上下游造床过程河床演变	(164)
第六节	设计洪水和校核洪水枢纽流场及冲淤形态	(168)
第七节	汛期调度运用枢纽流场及冲淤形态	(169)
第八节	电站排沙底孔防淤堵及拉沙调度运用坝前漏斗形态	(178)
第九节	王庄引水闸及下游灌溉引水闸引水引沙观测	(183)
第十节	枢纽总体布置优化方案试验小结	(183)
第六章	西霞院工程初设阶段河道泥沙模型试验研究	(185)
第一节	工程概况及枢纽河段河道特征	(185)
第二节	模型设计和验证	(187)
第三节	枢纽修建后对下游河势影响试验	(190)
第四节	枢纽不同布置方案库区淤积形态试验	(203)
第五节	施工导流试验	(223)
第六节	结 语	(224)
第七章	西霞院工程总体布置推荐方案整体模型试验	(226)
第一节	总体布置推荐方案工程概况及试验简况	(226)
第二节	建筑物泄流能力及消能冲刷	(229)
第三节	库区堆渣体对库区流态影响和上游导墙、下游锥坡及护岸冲刷情况	(234)
第四节	枢纽上下游造床过程演变	(237)
第五节	汛期调度运用时枢纽上下游流场及冲淤形态	(238)
第六节	排沙底孔防淤堵及拉沙调度运用	(246)
第七节	设计洪水、校核洪水上下游流场及冲淤形态	(250)
第八节	王庄引水闸及下游灌溉引水闸引水引沙观测	(252)
第九节	枢纽总体布置推荐方案试验小结和讨论	(252)

第三篇 技施阶段试验研究

第八章	建筑物终结布置单体模型试验研究	(254)
第一节	开敞式泄洪闸终结布置试验	(254)
第二节	胸墙式泄洪闸终结布置试验	(263)
第三节	排沙闸修改布置试验	(285)
第四节	排沙洞终结布置试验	(300)
第五节	王庄引水闸单体模型试验	(316)
第六节	枢纽上游左导墙冲刷与防护试验	(329)
第九章	西霞院工程总体布置终结方案整体模型验证试验	(340)
第一节	工程总体布置终结方案概况	(340)
第二节	枢纽泄流排沙建筑物泄流能力	(344)
第三节	汛期特征洪水位流态及消能冲刷	(347)
第四节	汛限水位不同调度运用下游流态及消能冲刷	(353)
第五节	试验小结	(360)
参考文献		(362)

第一篇 可行性研究阶段试验研究

第一章 西霞院反调节水库河段河道特征及工程开发任务和设计特征指标

第一节 工程地理位置及开发任务

黄河小浪底水利枢纽配套工程——西霞院反调节水库位于黄河干流中游河南境内，坝址左右岸分别为洛阳市吉利区和孟津县，上距小浪底 16 km，下距花园口 145 km。1998 年明确西霞院枢纽为小浪底水利枢纽配套工程，与小浪底枢纽组成一组工程，其开发任务以反调节为主，结合发电，兼顾供水和灌溉等综合开发，工程位置见图 1-1。

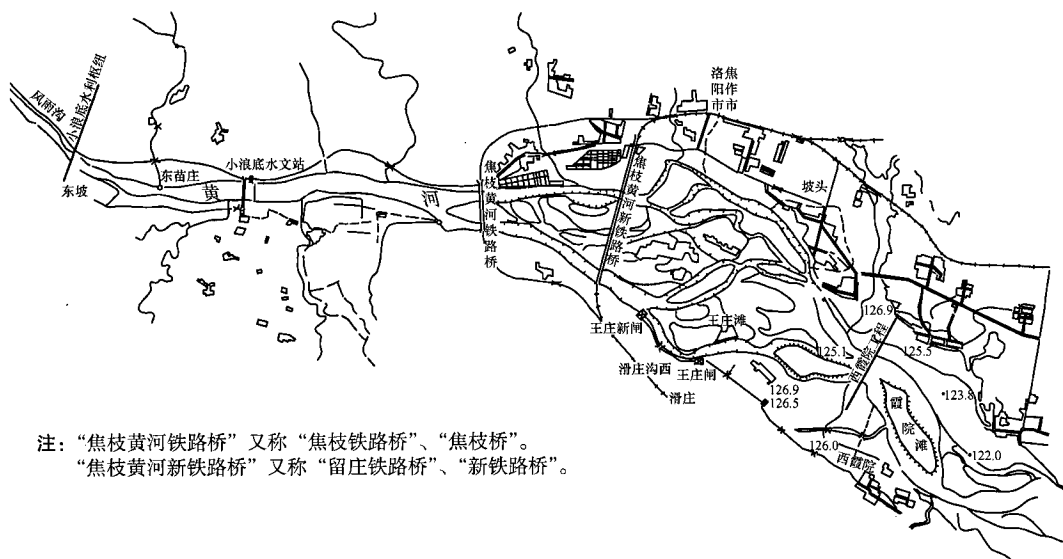


图 1-1 西霞院反调节水库的工程位置

小浪底枢纽建成后，水电站将承担河南省电网的调峰任务，水电站在参与调峰运用时，下泄流量为不稳定流，日均断流 7 小时左右。断流期间，黄河断流河段长达 30~50 km，对下游河道水质和生态环境、工农业用水以及河道整治工程带来不利影响。西霞院反调节水库的兴建，将明显提高小浪底电站调峰发电效益，并可解决断流期间上述不利影响，

进一步开发水能资源,发展周边地区灌溉,也为华北地区供水提供条件。

第二节 工程河段河道特征

小浪底枢纽工程位于黄河中游最后一个峡谷的出口,是控制黄河下游水沙的关键工程。它是在三门峡以下唯一能取得较大库容的坝址。小浪底坝址下游 16 km 在建的西霞院枢纽库区河段属于峡谷型河道向平原游荡型河道的过渡河段,焦枝铁路桥以上 8 km 河段为峡谷型河段,河谷宽仅 500~800 m,两岸有几处山嘴和礅石滩控制着河道河势。焦枝桥至西霞院坝址 8 km 的河段为冲积扇型河段,黄河出焦枝桥后,两岸突然放宽到 4 km,黄河分为多股汉河,除连地滩、西滩和王庄滩 3 个大滩外,还有众多的江心州。主河槽在右岸,沿山坡流至王庄滩后,又分为多股汉河,在西霞院坝址附近,汉河又汇集在左岸,小浪底至西霞院河段河势变化不大,3 个大滩基本稳定,边滩略有变化。西霞院枢纽选择在右岸滩地。

小浪底至西霞院河段全部为砂卵石河床,砂卵石覆盖层 10~40 m,河床及滩地覆盖层全为洪积物,沿程级配变化不大,非汛期局部段受礅石滩影响,有局部淤沙层,在急流陡坡段也有直径 1 m 左右的大块石,砂卵石覆盖层中基本不含悬沙粒径,在卵石骨架中充满小砾石和砂,干容重达 2.33 t/m^3 左右。流量 $1\,000 \sim 10\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,河段平均比降 $5.6\text{‰} \sim 9.0\text{‰}$,局部河段比降有陡有缓。小流量时局部河段比降仅 1‰ ,而冲积扇汉河段比降可达 50‰ ,呈急流状态。

西霞院坝址以下至铁谢河段,河道比降逐渐变缓,河床也由砂卵石逐渐过渡到砂质河床,从长期来看,河床冲淤相对变化不大,河势基本稳定。铁谢以下至逯村河段属砂质河床,冲淤变化相对较大。逯村至大玉兰河段左岸滩区为小浪底枢纽移民安置区,自小浪底工程修建起开始对该河段进行河道整治,整治后该河段河势比较稳定。

第三节 工程设计特征指标

黄河小浪底枢纽配套工程——西霞院反调节水库主要开发任务以反调节为主,结合发电,兼顾供水灌溉等综合利用。西霞院枢纽正常蓄水位 134.00 m,汛限制水位 131.00 m,正常蓄水位 134.00 m 时库容为 1.62 亿 m^3 ,淤积平衡后库容为 0.452 亿 m^3 ,电站装机容量 140 MW,灌溉引水流量 $53.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

枢纽坝址选定南陈坝址,枢纽建筑物由挡水大坝、电站、排沙洞、泄洪洞和灌溉引水闸等组成。工程总体布置选用混凝土建筑物集中布置在右岸滩地。电站采用 4 台轴流式机组;挡水大坝为砂砾石坝壳壤土斜墙坝;泄洪闸采用低堰开敞式和带胸墙式闸型;电站右侧和安装间下各设三孔排沙洞;每台机组之间设一排沙底孔。泄流排沙建筑物均采用底流式消能工。

100 年一遇设计洪水流量 $9\,870 \text{ m}^3/\text{s}$,设计洪水位 132.56 m,相应下游水位 125.30 m。

5 000 年一遇校核洪水流量 $13\,940 \text{ m}^3/\text{s}$,设计洪水位 134.75 m,相应下游水位 126.23 m。

正常蓄水位 134.00 m;汛限制水位 131.00 m。

第二章 西霞院反调节水库轴流式和贯流式机组布置模型试验研究

第一节 模型设计及模型沙选择

一、试验研究内容

根据黄河干流工程布局修改规划,西霞院反调节水库被列为小浪底工程建成后拟建的一项低水头水利工程。西霞院反调节水库的可行性研究阶段设计提出,需要通过模型试验全面论证设计方案的合理性。水库局部动床水工模型试验的研究内容有:比较工程总体布置方案,论证工程总体布置的合理性;检验工程各泄流建筑物的泄流、排沙能力,论证泄流排沙规模的合理性;观测研究水库上下游冲淤平衡后的流态及流速分布,针对存在的问题提出改善措施;观测研究泄流建筑物在各种调度运用下下游的消能和冲刷,论证砂卵石覆盖层冲刷堆积和悬移质淤积对电站尾水的影响;研究工程开发任务,实施合理的调度运用方式,如汛期工程防淤排沙调度运用、非汛期防止电站进口淤堵和减少过机泥沙调度运用方式,提出泄流排沙建筑物闸门操作运用方式等。

二、模型设计相似准则

在动床模型试验时,其模型的设计应满足几何形态相似、水流运动相似和泥沙运动相似的相似条件。根据西霞院反调节水库局部动床水工模型试验的研究任务和可行性研究阶段的设计要求,模型按正态设计,在保证模型与原型几何相似的条件下,模型设计还应遵循以下相似准则。

(一)水流运动相似准则

由水流重力相似条件得流速比尺关系

$$\lambda_v = \lambda_H^{1/2} = \lambda_L^{1/2} \quad (2-1)$$

由水流阻力相似条件得阻力系数比尺关系

$$\lambda_n = \lambda_H^{2/3} \lambda_J^{1/2} / \lambda_v = \lambda_L^{1/6} \quad (2-2)$$

由水流连续性相似条件得水流运动时间比尺关系

$$\lambda_{t_1} = \lambda_L / \lambda_v = \lambda_H^{1/2} \quad (2-3)$$

流量的比尺关系为

$$\lambda_Q = \lambda_v \lambda_H^2 = \lambda_H^{5/2} \quad (2-4)$$

(二)砂卵石运动相似准则

西霞院反调节水库下游没有砂卵石补给,属于局部冲刷问题,要求模型设计满足起

动相似和河床变形相似。起动相似(以起动流速的形式来表示)要求

$$\lambda_{V_0} = \lambda_v = \lambda_H^{1/2} \quad (2-5)$$

非黏性颗粒起动流速公式的一般形式为

$$V_0 = K \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} g D \left(\frac{H}{D} \right)^{1/6} \quad (2-6)$$

式中 V_0 ——起动流速;

H 、 D ——水深和砂卵石粒径;

γ_s 、 γ ——泥沙和水的容重;

K ——系数。

由式(2-5)和(2-6)得砂卵石粒径比尺关系

$$\lambda_D = \lambda_H / \lambda_v^{3/2} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \quad (2-7)$$

根据冲淤变形方程式可求得冲淤时间比尺

$$\lambda_{T_2} = \frac{\lambda_{\gamma_s} \lambda_L \lambda_H}{\lambda_{g_s}} \quad (2-8)$$

由成都勘测设计研究院的推移质输沙率公式

$$g_s = K \gamma_s D (V - V_0) \left(\frac{V}{V_0} \right)^3 \left(\frac{D}{H} \right)^{1/4} \quad (2-9)$$

可得单宽输沙率比尺关系为

$$\lambda_{g_s} = \lambda_{\gamma_s} \lambda_D^{5/4} \lambda_H^{1/4} \quad (2-10)$$

(三)悬移质泥沙运动相似准则

1. 悬移相似

在正态模型中, 泥沙悬移相似要求沉速 ω 和流速之间的比尺关系为

$$\lambda_\omega = \lambda_v \quad (2-11)$$

在原型和模型泥沙粒径均较细的情况下, 根据滞流区泥沙的沉降公式可求得悬移质粒径比尺

$$\lambda_d = \left[\frac{\lambda_v \lambda_\omega}{\lambda_v \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)} \right]^{1/2} \quad (2-12)$$

2. 输沙相似

对冲积性河流要求模型与原型的输沙能力相似和挟沙力相似, 悬移质的输沙能力相似要求含沙量比尺与挟沙力的比尺关系为

$$\lambda_s = \lambda_{s_s} \quad (2-13)$$

对于含沙量或挟沙力比尺,一种方法是由挟沙力公式确定,另一种方法是借助预备试验确定。

3. 河床冲淤变形相似

根据河床变形方程可得冲淤时间比尺关系

$$\lambda_{t_3} = \lambda_{\gamma_0} \lambda_{t_1} / \lambda_s \tag{2-14}$$

床沙质起动相似

$$\lambda_{\gamma_0} = \lambda_{\gamma} \tag{2-15}$$

三、模型比尺的确定与模型沙的选择

西霞院反调节水库局部动床模型主要研究工程附近的河流再造床过程,即上游库区的淤积和下游的冲刷,西霞院来流中的悬移质泥沙组成是由小浪底枢纽下泄浑水决定的。图 2-1 为 1961~1988 年小浪底实测悬移质泥沙级配曲线,由图中可见非汛期悬沙粒径相对较粗,而汛期相对较细。考虑到在造床过程中,悬移质泥沙起造床作用的是床沙质部分,冲泻质不参加造床,因此模型设计中要求悬沙相似仅限于床沙质。根据张红武的床沙质和冲泻质分界粒径经验公式,求得小浪底分界粒径为 0.028 mm,在汛期含沙量中床沙质所占比例约为 44%,非汛期含沙量中床沙质所占比例约为 57%。由图 2-1 和分界粒径得到 1961~1988 年小浪底悬沙河床沙质级配曲线,如图 2-2 所示。床沙质年平均中

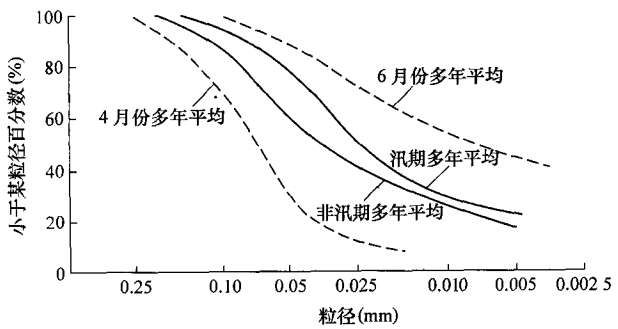


图 2-1 1961~1988 年小浪底实测悬沙级配曲线图

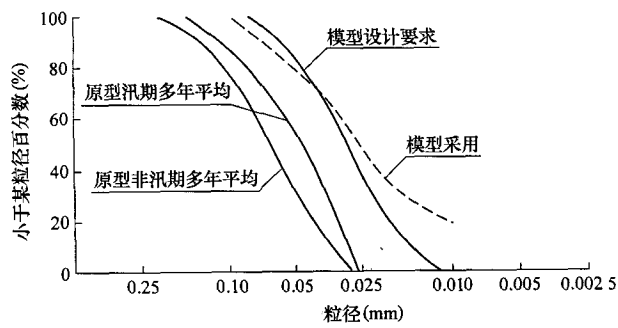


图 2-2 1961~1988 年小浪底悬沙中床沙质级配曲线和模型沙级配曲线

值粒径为 0.075 mm。对于下游主河槽的砂卵石河床，其原型表层砂卵石中值粒径约为 35 mm。

根据西霞院模型试验的研究内容和要求，模型为正态，其几何比尺取 1 : 100，图 2-3 为模型总体布置图。模型上观测水位的测针布设位置是：在水库上、下游河槽左、右岸各设一测针，以观测水库上、下游的水位。在模型入口前设置一矩形量水堰控制流量。

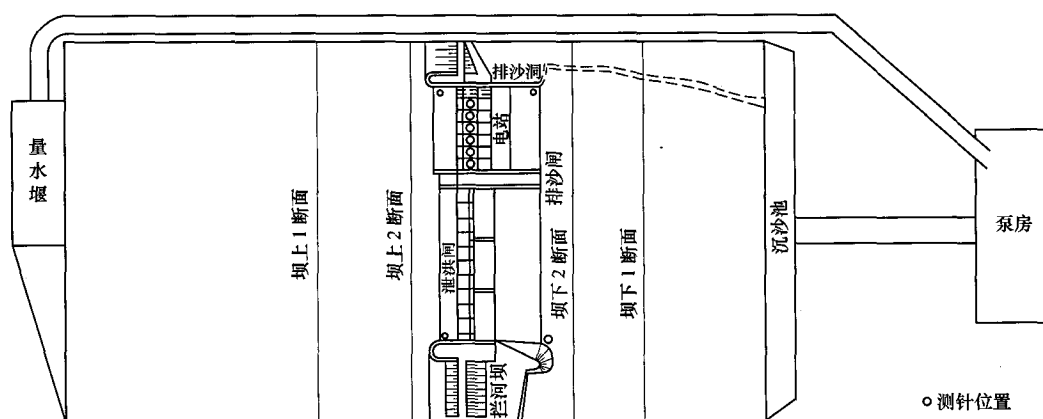


图 2-3 局部模型枢纽总体布置图

模型中的悬沙选用郑州热电厂的煤灰，其容重为 2.1 t/m^3 ，砂卵石在模型中用轻质煤屑模拟，其容重为 1.51 t/m^3 。对悬移质泥沙，容重比尺 $\lambda_{\gamma_s} = 2.7/2.1 = 1.29$ ，相应的相对容重比尺 $\lambda_{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)} = 1.55$ ，关于黏性比尺关系中的水流运动黏性比尺，考虑到黄河上西霞院河段水温变化在 $6 \sim 29 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间，而试验室水温变化在 $10 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间，按原型水温 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、试验室水温 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 计，则 $\lambda_\nu = 0.00898/0.0115 = 0.78$ ，由式(2-12)得悬沙粒径比尺 $\lambda_d = 2.25$ 。由此得到所要求的模型悬沙床沙质级配(年平均)曲线和分选后试验中使用的模型沙级配曲线。

含沙量比尺的确定，一种方法是用挟沙力公式计算，但由于公式的经验性，其系数的比尺不易确定，用不同的公式分析的结果相差较大，另外在泄流建筑物前的淤积过程中，含沙量处于过饱和状态，不满足输沙平衡条件；另一种方法是借助预备试验，经调试验证后确定，黄河模型含沙量比尺范围一般为 $1 \sim 5$ ，参照与本试验模型比尺相同的小浪底库区悬沙模型验证试验，含沙量比尺取 $\lambda_s = 4.0$ 。对于干容重比尺取 $\lambda_{\gamma_0} = 1.3/0.8 = 1.625$ 。

对于砂卵石模拟，其容重比尺为 $\lambda_{\gamma_s} = 2.7/1.51 = 1.79$ ，相应的相对容重比尺为 3.33，模型上的砂粒粒径比尺为 16.43，干容重比尺为 2.24，其他各项比尺列于表 2-1。

表 2-1 模型比尺

相似条件	比尺名称	设计依据	选取值
几何相似	水平比尺 λ_L	任务和要求	100
	垂直比尺 λ_H		100
水流运动相似	流速比尺 λ_V	$\lambda_V = \lambda_H^{1/2} = \lambda_L^{1/2}$	10
	流量比尺 λ_Q	$\lambda_Q = \lambda_V \lambda_L \lambda_H$	100 000
	水流运动时间比尺 λ_{t_1}	$\lambda_{t_1} = \lambda_L / \lambda_V = \lambda_L^{1/2}$	10
	糙率比尺 λ_n	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$	2.15
砂卵石河床质运动相似	容重比尺 λ_{γ_s}	$\lambda_{\gamma_s} = (\gamma_s)_p / (\gamma_s)_m$	1.79
	相对容重比尺 $\lambda_{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)}$	$\lambda_{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)} = \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)_p / \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)_m$	3.33
	粒径比尺 λ_D	$\lambda_D = \lambda_H / \lambda_{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)}^{3/2}$	16.43
	冲淤时间比尺 λ_{t_2}	$\lambda_{t_2} = \lambda_{\gamma_s} \lambda_L \lambda_H / \lambda_{g_s}$	119.6
悬移质运动相似	容重比尺 λ_{γ_s}	$\lambda_{\gamma_s} = (\gamma_s)_p / (\gamma_s)_m$	1.29
	相对容重比尺 $\lambda_{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)}$	$\lambda_{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)} = \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)_p / \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)_m$	1.55
	沉速比尺 λ_ω	$\lambda_\omega = \lambda_V$	10
	粒径比尺 λ_d	$\lambda_d = \left[\lambda_V \lambda_\omega / \lambda_{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)} \right]^{1/2}$	2.25
	含沙量比尺 λ_s	验证试验	4.0
	冲淤时间比尺 λ_{t_3}	$\lambda_{t_3} = \lambda_{\gamma_0} \lambda_{t_1} / \lambda_s$	4.1
	起动流速比尺 λ_{V_0}	$\lambda_{V_0} = \lambda_V$	10

第二节 西霞院反调节水库轴流式机组布置试验

一、原设计方案试验

(一) 单项建筑物的过流能力与工程的泄流规模

1. 泄洪闸的水位~流量关系

经模型试验, 得泄洪闸的水位 H 与流量 Q 的关系如图 2-4 所示。

图 2-4 中曲线是经最小二乘法曲线拟合定出的。由于泄洪闸设在主河槽的右岸, 在单项建筑物泄流时, 右岸为主流, 流速较大, 而左岸为一弱回流区, 右岸水面低于左岸。图 2-4 中两条曲线分别表示左、右岸水位与流量关系, 其计算公式为(闸门全开):

$$Q = m' nb \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (2-16)$$

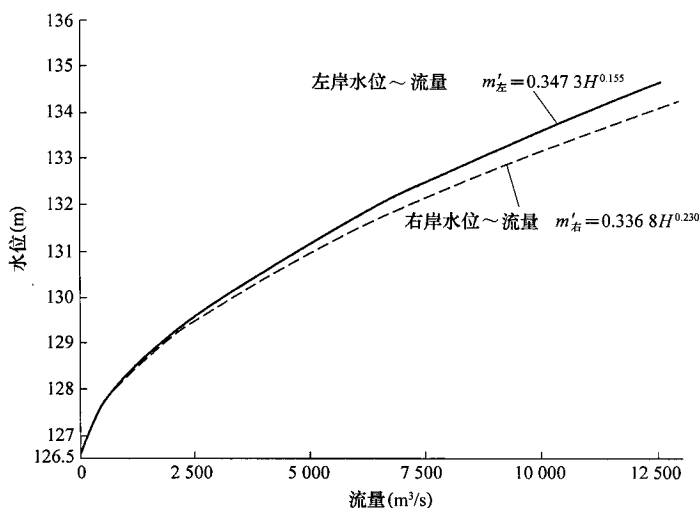


图 2-4 泄洪闸水位~流量关系

式中 Q ——流量, m^3/s ;

n ——闸孔数;

b ——每孔闸的净宽, m ;

H ——堰顶水头, m ;

m' ——流量系数, 对应图中的两条曲线的流量系数分别为:

$$m'_{\text{左}} = 0.3473H^{0.155}$$

$$m'_{\text{右}} = 0.3368H^{0.230}$$

在以下使用中均采用右岸的水位及相应的流量系数。

2. 排沙闸的水位~流量关系

排沙闸为带胸墙的闸孔出流, 在闸门全开时胸墙起挡水作用。泄流公式为:

$$Q = \omega \mu \sqrt{2gH} \quad (2-17)$$

式中 ω ——闸孔的过水面积;

H ——闸孔孔口中心处作用水头, m ;

μ ——流量系数;

根据试验结果, 排沙闸流量系数的经验公式为:

$$\mu = 0.6142\Delta H^{0.0983}$$

试验得到的水位与流量关系曲线见图 2-5。

3. 排沙洞的水位~流量关系

电站左侧安装间下的三孔排沙洞为淹没出流, 试验结果反映了泄流量与上、下游水位差之间的关系良好, 如图 2-6 所示。

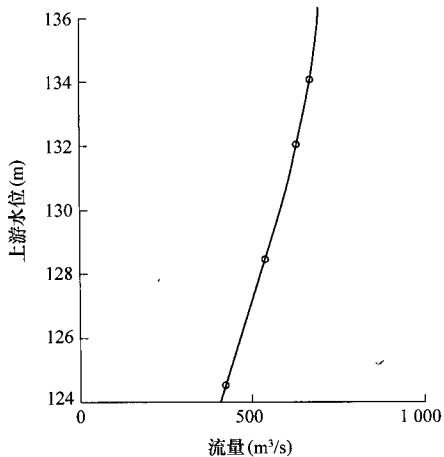


图 2-5 排沙闸水位~流量关系

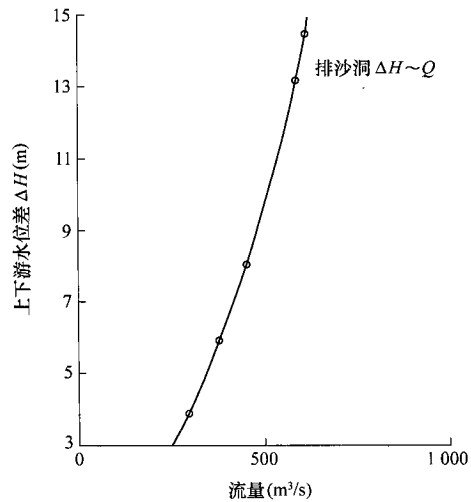


图 2-6 排沙洞水位~流量关系

计算公式为：

$$Q = \omega \mu \sqrt{2g\Delta H} \quad (2-18)$$

式中 ΔH ——上、下游水位差，其他符号的意义同前。

流量系数的经验关系为：

$$\mu = 0.7219\Delta H^{0.0495}$$

4. 排沙底孔的过流能力

电站下的六孔排沙底孔为淹没出流，在上游水位为 134.04 m，下游水位为 120.21 m 时，过流量为 935.6 m³/s，相应的流量系数为 0.775。

5. 水库泄流规模

根据各单项泄流建筑物的过流情况，在不同运用条件下其组合的水库泄流规模见表 2-2。根据表 2-2 可知，当在汛期限制水位、设计洪水位和校核洪水位下，排水闸、排沙

表 2-2 不同运用条件下枢纽过流建筑物的泄流规模

运用条件	上游水位 (m)	下游水位 (m)	流量 Q (m³/s)			
			排沙洞	排水闸	泄洪闸	总泄量
非汛期正常蓄水位	134	120*	613	678		1 291
	134	120.15	610			610
	134	120.24		678		678
	134	120.8	594	678		1 272
汛期限制水位	131	122.8	457	605	5 069	6 131
设计洪水位	132.94	123.45	495	654	9 425	10 574
校核洪水位	134.69	124.05	527	694	14 285	15 506

洞和泄洪闸敞泄运用时其泄流规模都能满足设计要求。表中也列出了电站在正常蓄水位时,排沙洞和排水闸的组合泄流情况。

(二)泄流建筑物下游消能与流态

1. 泄洪闸下游消能水流衔接与流态

泄洪闸下游原设计采用底流消能,设一级消力池,海漫高程 116.0 m,护坦高程 113.0 m,池深 3 m,在池中每 7 孔设一导墙隔开。试验表明,在设计洪水及其以下水位,泄洪闸敞泄时消力池中均能产生淹没式水跃;而在校核洪水水位运用时,闸后消力池中产生远驱式水跃,说明消力池深度偏小;但在校核洪水流量时尚出现准临界水跃,见图 2-7。泄洪闸上、下游组合安全水位见图 2-8。

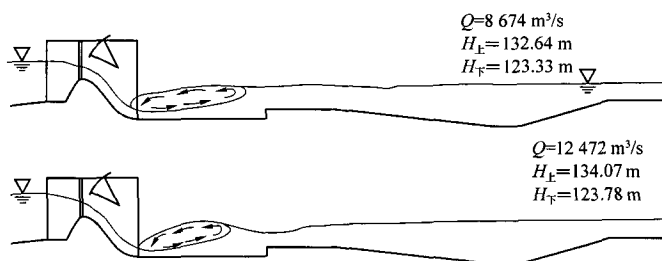


图 2-7 泄洪闸下游消能水面衔接图(原方案)

泄洪闸下游消力池中的导墙长度设至池的末端,试验中观察到海漫上水流比较均匀;在电站、排沙洞和排沙闸关闭的情况下,电站后产生一极弱回流区;右岸滩边扭曲面护岸工程处水流扩散也较为均匀、充分,初步认为导墙长度和右岸护岸的扩散角较为合适。

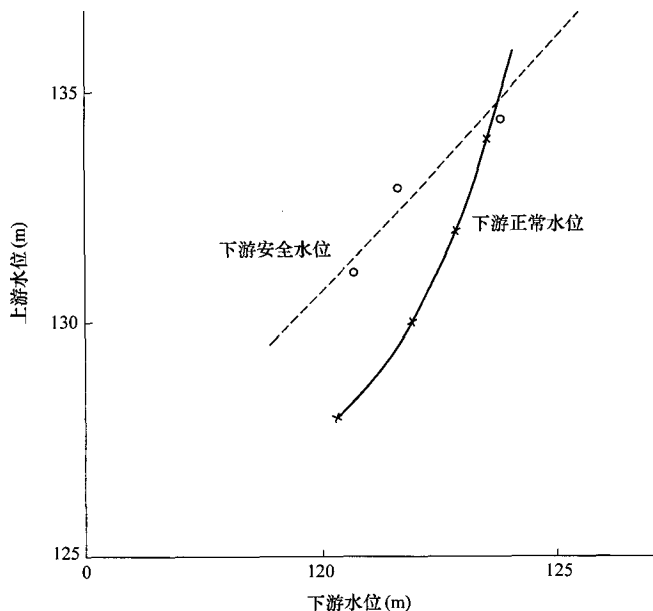


图 2-8 泄洪闸上、下游组合安全水位