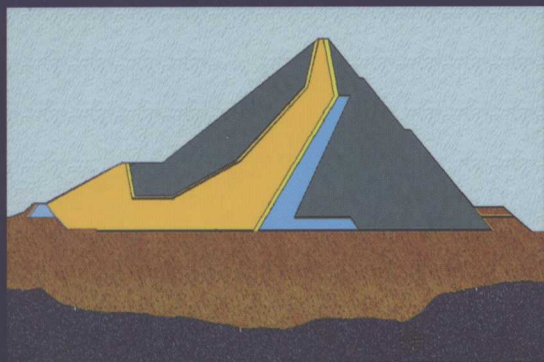


黄河小浪底水利枢纽规划设计丛书

林秀山 总主编



大坝设计

高广淳 主编

中国水利水电出版社
黄河水利出版社

黄河小浪底水利枢纽规划设计丛书

大坝设计

林秀山 总主编

高广淳 主 编

中国水利水电出版社
黄河水利出版社

内 容 提 要

本书为“黄河小浪底水利枢纽规划设计丛书”的大坝设计卷,由直接参与工程设计的人员撰写。本书全面、系统地论述了小浪底水利枢纽工程大坝的设计特点,内容涉及坝址及坝型选择、筑坝材料设计、坝体结构设计、坝基处理设计、动力分析与抗震设计、大坝计算分析、大坝观测设计、大坝初期挡水运用及大坝安全性评价等,并对工程设计优化与创新、设计中的经验与体会作了介绍。

本书内容丰富,实用性强,可供从事水利水电工程设计、施工、运行管理人员以及大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

大坝设计/高广淳主编. —郑州:黄河水利出版社,
2008. 12

(黄河小浪底水利枢纽规划设计丛书/林秀山总主编)

ISBN 978 - 7 - 80734 - 506 - 0

I. 大… II. 高… III. 黄河 - 水利枢纽 - 大坝 - 设计
IV. TV632. 613 TV649

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 188917 号

出 版 社:中国水利水电出版社

地址:北京市西城区三里河路 6 号

邮政编码:100044

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

传真:0371 - 66022620

E-mail:hhslcbs@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—2 000

版次:2008 年 12 月第 1 版

印次:2008 年 12 月第 1 次印刷

定价:96.00 元

总 序 一

黄河小浪底水利枢纽是“以防洪（包括防凌）、减淤为主，兼顾供水、灌溉、发电，蓄清排浑，除害兴利，综合利用”为开发目标的大型水利工程，是国家“八五”重点建设项目，也是当时我国利用世界银行贷款最大的工程项目。小浪底主体工程于1994年9月开工，2001年底按期完工。工程采用国际招标方式选择了世界上一流的承包商，从施工管理、工程设计、移民搬迁到环境影响评价全面和国际接轨，为我国水利水电建设积累了宝贵经验。工程建成运行5年来，在黄河下游防洪、防凌、减淤冲沙、城市供水、发电、灌溉方面发挥了不可替代的作用。截至2004年底，累计发电约150亿kWh。在黄河连续枯水的情况下为确保黄河不断流提供了物质基础。显著的社会效益和经济效益使小浪底水利枢纽成为治黄的里程碑工程。

本着建设我国一流工程的目标，我有幸参与了小浪底工程的建设管理。一流的工程首先要以一流的设计为龙头。小浪底工程由于其独特的水文泥沙条件、复杂的工程地质条件和严格的水库运用要求，给工程设计提出了一系列挑战性的课题，被国内外专家公认为是世界上最具挑战性的工程之一。黄河勘测规划设计有限公司^①的工程技术人员，经过近30年的规划论证和10多年的方案比选，以敢于创新和科学求实的精神，在国内科研院所和高等院校的配合下，较满意地解决了一个个技术难题，诸如深式进水口防泥沙淤堵、施工导流洞改建为孔板消能泄洪洞的重复利用、排沙洞后张预应力混凝土衬砌、洞室群围岩稳定、大坝深覆盖层基础处理、进出口高边坡加固、20万移民的生产性安置等，提出了以集中布置为鲜明特点的枢纽建筑物总体布置方案，同时也创造了许多国内国际领先水平的设计。小浪底工程于1999年10月蓄水运行以来，已安全正常地运行了5年，并经历了2003年高水位的运用考验，实践证明，小浪底工程的设计是成功的。

小浪底工程成功的设计，为小浪底工程的建设提供了可靠的技术保障。

① 编者注：黄河勘测规划设计有限公司为原水利部黄河水利委员会勘测规划设计研究院。

黄河勘测规划设计有限公司的同志们认真总结小浪底工程的设计经验，编写出版了这套技术丛书。这套丛书的出版，无疑将丰富和促进我国水利水电建设事业的发展，也希望通过这套丛书使小浪底水利枢纽的成功经验得到更好的推广和应用。

张 星 志

二〇〇三年三月一日

总序二

小浪底水利枢纽是黄河治理开发的关键工程。如今这座举世瞩目的工程已全面竣工，几代黄河人的小浪底之梦终成现实。宏伟的小浪底工程犹如一座巍峨的丰碑，记载着人民治黄的丰功伟绩，同时又是一座黄河治理开发的里程碑工程。它的建成运用，使治黄工作进入了一个能够对黄河下游水沙进行调控的新阶段。

黄河是世界上最复杂、最难治的河流。大量的泥沙淤积在下游河道内，使下游河道滩面高于大堤背河地面，成为举世闻名的地上悬河。如何把黄河的事情办好，一代又一代黄河人进行着孜孜不倦的探索和实践。

位于黄河中游最后一个峡谷出口处的小浪底，是三门峡水利枢纽以下唯一能够取得较大库容的坝址，处于承上启下控制黄河水沙的关键部位。修建小浪底水库对于黄河下游防洪、防凌、减淤等具有非常重要的作用，其战略地位是其他治黄工程无法替代的。

小浪底工程规模宏大，地质条件复杂，水沙条件特殊，运用要求严格，被公认为世界坝工史上最具挑战性的工程之一。面对这些难题，设计人员总结国内外的工程实践经验，克服重重困难，以勇于开拓创新又实事求是的科学精神，攻克了一个个技术难关，创造了多项国内外领先的设计成果。目前，工程已经开始发挥巨大的综合效益，特别是在调水调沙及塑造黄河下游协调水沙关系方面更是发挥了突出作用。

小浪底工程的勘测、规划和设计实践体现了“团结、务实、开拓、拼搏、奉献”的黄河精神，凝聚了广大治黄人员的智慧，同时也为今后的工作积累了丰富的经验。现在黄河勘测规划设计有限公司的同志总结小浪底工程的设计经验，编撰了这套规划设计丛书，非常必要、及时。丛书注重工程特点，论述设计思路和方法，突出创新成果，体现时代特征，系统全面反映了工程设计情况，对于今后的治黄工作乃至我国水利水电工程建设都将具有很好的借鉴作用。

小浪底工程建成后，黄河治理开发的任务依然非常繁重。小浪底水库本身的运用方式仍然需要深入研究，以保证其最大限度地发挥综合效益。同时，必须抓住小浪底水库投入运用的大好机会，抓紧开展黄河下游治理工作，并加快黄河干流骨干工程和南水北调西线工程建设、中游水土保持以及小北干流放淤等工作，构建完善的黄河水沙调控体系，使治黄工作朝着“维持黄河健康生命”的终极目标迈进。

李国英
2005年9月22日

总 前 言

小浪底水利枢纽位于黄河中游三门峡以下约 130km 黄河最后一个峡谷的出口处。从三门峡到小浪底，河床比降 0.1%，南岸是秦岭山系邙山，北岸是中条山、王屋山，河谷宽 500 ~ 1 000m，洪水水面宽 200 ~ 300m，每遇洪水，黄河波浪滔天、咆哮而下。黄河出小浪底峡谷之后，河道突然展宽，大浪没有了，小浪也到底了，进入了由黄河泥沙堆积而成的黄淮海平原。郑州花园口以下约 800km 的下游河道高悬于两岸地面，在约 1 400km 堤防的约束下流入渤海。居住在峡谷出口右岸黄河岸边一个小山村的先人们，观黄河流态的变化，以“小浪底”命名了自己的小山村。年年岁岁，世世代代，先人们并不知道今天小浪底竟成了家喻户晓的一个巨大的水利枢纽的名字。这个名字牵系着国内外许多专家、学者，牵系着曾为之奋斗的上万名中外建设者，牵系着上至中央领导、下至黎民百姓。

小浪底水利枢纽控制黄河流域面积 69.4 万 km²，占黄河流域总面积（不包括内陆区）的 92.3%，控制黄河天然年径流总量的 87% 及近 100% 的黄河泥沙。小浪底工程处在承上启下控制黄河水沙的关键部位，与龙羊峡、刘家峡、大柳树、碛口、古贤、三门峡一起成为开发治理黄河的七大骨干工程，在治黄中具有十分重要的战略地位。

小浪底工程建在因含沙量高而闻名于世的黄河上。黄河不仅水少沙多，而且水沙在时间上分布不均，黄河下游为地上悬河，河道上宽下窄，比降上陡下缓，排洪能力上大下小，凌汛也威胁着黄河两岸人民的安全。我国近代治河的先驱者，总结我国的治河经验，引进西方科技，提出了“全面开发，综合利用”的水利规划思想。新中国成立以后，开始了人民治黄的历程。历经 50 多年，治黄取得了举世瞩目的成就。在黄河流域整体规划的基础上，小浪底工程的开发论证经过了近半个世纪漫长的历程。根据黄河的特点及小浪底工程在黄河流域规划中所处的位置，对小浪底工程的开发目标进行了多次分析论证，一致认为小浪底水库处在控制黄河下游水沙的关键部位，是黄河干流三门峡以下唯一能取得最大库容的重大控制工程，在治黄中具有重要的战略地位。国家计委于 1986 年 5 月明确小浪底水利枢纽的开发目标为“以防洪（包括防凌）、减淤为主，兼顾供水、灌溉和发电，蓄清排浑，除害兴利，综合利用”。要求达到的目标是：提高下游防洪标准；基本消除下游凌汛威胁，在一定时段内遏制黄河下游河床淤积的趋势；调节径流提高下游灌溉供水保证率；水电站在系统中担任调峰。

小浪底水利枢纽由于其独特的水文泥沙条件，复杂的工程地质条件，适应多目标开发的严格的运用要求，以及巨大的工程规模和治理黄河中重要的战略地位，被国内外专家公认为是世界坝工史上最具挑战性的工程之一。多年来，参与工程规划设计和研究的人员如履薄冰，认真总结借鉴前人的经验，以求实创新的精神开展工作，攻克了工程规划设计中的许多技术难关，保证了工程的规划设计达到先进水平。设计人员既尊重科学，又敢于突破常规，开拓创新，先后进行了 400 余项科学试验和专题论证分析，融汇

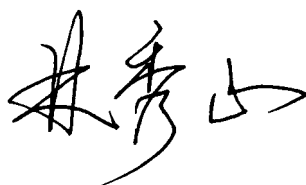
了国内外许多专家的心血和智慧，解决了一个又一个难题。在建造深 82m 的混凝土防渗墙、将 3 条直径 14.5m 的导流洞改建为永久的多级孔板消能泄洪洞、在地质条件极为复杂的左岸单薄山体内建造了规模宏大和数量众多的地下洞室群、在高水头大直径排沙洞设计中采用了双圈缠绕的后张无黏结预应力混凝土衬砌结构、在国内大规模采用了双层保护的预应力锚索和钢纤维喷混凝土技术等多方面取得突破，在国内外处于领先地位。如今，小浪底水利枢纽以其独具鲜明特色的总体布置和建筑物设计展现在世人面前。小浪底工程为黄河治理开创了崭新的局面。

小浪底工程的规划设计、研究和论证，以及工程建设一直得到中央领导、水利部和国家有关部委的关注，并得到国内外许多专家的支持和帮助，融汇了他们的心血和智慧。

小浪底工程的成功设计，为小浪底工程的建设做出了巨大的贡献。为总结小浪底工程规划设计方面的经验和教训，我们组织了直接参与小浪底工程规划设计的人员从工程规划、设计的各个方面，认真总结小浪底工程的设计经验，并出版黄河小浪底水利枢纽规划设计丛书，以期和同行进行技术交流，丰富和促进我国水利水电建设事业，使小浪底工程的成功经验得到更好的推广和应用。黄河勘测规划设计有限公司对丛书的出版给予了大力支持，国务院南水北调建设委员会办公室主任张基尧和水利部黄河水利委员会主任李国英亲自为丛书作序，在此表示衷心的感谢。

由于水平所限，谬误之处在所难免，敬请指正。

黄河小浪底水利枢纽设计总工程师



2005年9月

黄河小浪底水利枢纽规划设计丛书

编辑委员会

主 任：李文学

副主任：林秀山 许 人 宗志坚 景来红

委 员：（按姓氏笔画排列）

王庆明 刘继祥 刘豪杰 张汉青

张会言 李惠安 罗义生 杨法玉

高广淳 路新景 潘家铨

总主编：林秀山

黄河小浪底水利枢纽规划设计丛书书目

- | | | |
|---------------|-----|----|
| ◆ 枢纽规划设计 | 林秀山 | 主编 |
| ◆ 工程规划 | 李景宗 | 主编 |
| ◆ 水库移民 | 翟贵德 | 主编 |
| ◆ 环境保护研究与实践 | 张宏安 | 主编 |
| ◆ 水库运用方式研究与实践 | 刘继祥 | 主编 |
| ◆ 大坝设计 | 高广淳 | 主编 |
| ◆ 泄洪排沙建筑物设计 | 潘家铨 | 主编 |
| ◆ 引水发电建筑物设计 | 杨法玉 | 主编 |
| ◆ 机电与金属结构设计 | 王庆明 | 主编 |
| ◆ 工程安全监测设计 | 宗志坚 | 主编 |

前 言

小浪底水库大坝是迄今我国最大的壤土斜心墙大坝,坝高 160m,坝顶长 1 667m,坝顶宽 15m,坝体填筑总量 5 073 万 m^3 。坝基采用厚 1.2m、最大造孔深度 82m、混凝土抗压强度 35MPa 的国内最深厚的混凝土防渗墙,以截断坝基覆盖层基础,并对坝基及作为大坝延伸的左岸单薄山体进行了帷幕灌浆,形成了坝基垂直防渗体系。大坝斜心墙通过内铺盖、上游拦洪围堰斜墙与坝前淤积泥沙形成的天然铺盖连接起来,构成坝基的水平辅助防渗线。大坝设计充分利用黄河多泥沙的特点,简化坝基渗控措施,采用 17 种材料进行坝的分区设计,将截流戗堤、枯水围堰、拦洪围堰和主坝有机地结合成一个整体。

小浪底坝址区自然条件复杂,如坝基最深达 70 余 m 的砂砾石覆盖层,基岩内泥化夹层发育,坝轴线处河床深槽右侧有一高约 45m 的基岩陡坎,断距达 220m 的 F_1 顺河向大断层及多条小断层,左岸相对单薄的山体,右坝肩及坝上游体积达 1 100 万 m^3 的滑坡体和倾倒变形体,较高的地震设防烈度以及河床覆盖层的振动液化和渗透稳定等。

鉴于坝址附近有储量丰富、质量良好的土料、石料和砂砾石料及坝基工程地质条件,选择了壤土斜心墙堆石坝坝型。根据其自然条件和坝址附近丰富的筑坝材料,形成了小浪底大坝以下主要设计特点:

(1) 采用斜心墙坝型,以避免坝轴线上河床深槽右侧的基岩陡坎,并便于内铺盖的布置。

(2) 充分利用黄河多泥沙的特点,通过设置内铺盖将主坝防渗体、拦洪围堰斜墙和坝前泥沙淤积形成的天然铺盖连接起来,构成了坝基以垂直防渗为主、水平防渗为辅的双重防渗体系。

(3) 枯水围堰、上游拦洪围堰为大坝的一部分,并将左岸单薄山体作为大坝的延伸进行设计。

1993 年 2 月 15 日大坝自右岸混凝土防渗墙开始施工,1994 年 12 月中旬国外承包商开始坝基开挖,1999 年 10 月 25 日水库下闸蓄水,2000 年 11 月 30 日大坝竣工。历时 8 年,中外建设者采用了诸多先进技术、先进工艺、先进设备以及国际化的管理模式,创造了日最高填筑强度 6.7 万 m^3 、月最高填筑强度 158 万 m^3 和年最高填筑量 1 636.1 万 m^3 的国内最高记录,谱写了中外建设者合作治理开发黄河的新篇章。

大坝施工过程中,除采用了大量先进设备外,还采用了多项先进的施工方法和施工工艺,诸如:

(1) 主坝防渗墙施工时,在横向塑性混凝土槽孔墙保护下,用液压铣槽机(双轮铣)切削的平板式接头技术,解决了高标号混凝土防渗墙接头孔施工困难的问题,不但工效高,而且接头质量好。

(2) 主河槽段拦洪围堰基础采用高压旋喷灌浆成墙技术,设备先进,工效高,仅用 1 台钻机 and 1 台旋喷钻机在 98 d 内完成灌浆进尺 11 562.4m、成墙面积 9 897.2 m^2 。

(3)坝基帷幕灌浆广泛采用稳定性浆液,使灌浆工艺大为简化。

(4)利用高压旋喷灌浆加固心墙基础坡、洪积覆盖层,不但减少了坝基开挖量、基础处理工程量和填筑量,还为抢填大坝的拦洪高程赢得了宝贵的工期。

(5)GIN(灌浆强度值)法灌浆技术的引进和成功应用,并取得了有益的经验。

(6)关键的原型观测仪器通过数据采集、控制单元 MCU 和计算机联网,进行观测数据的自动传输和处理分析,对大坝的工作性态进行实时监控。

小浪底水库蓄水运用近9年来,已发挥了显著的社会、经济效益:大旱之年,通过科学调度,实现了黄河下游不断流;2003年“华西秋雨”期间,按照黄河防总的统一调度并与有关水库联合运用,减少了下游洪灾损失约110亿元;小浪底水库投入运用后,有效地解除了黄河下游凌汛灾害;截至2008年4月底,水库共拦蓄泥沙23.23亿 m^3 ,并连续5年进行了调水调沙运用,有效地减少了下游河道的淤积抬升,提高了下游河槽的过水能力;为下游供水、灌溉提供了可靠的水源;截至2008年,累计发电350亿kWh,2004~2007年连续4年年发电量超过50亿kWh,提前达到了设计水平;通过水库的合理调度,保障了黄河下游及入海口的生态需求流量,大大改善了黄河下游的生态环境。小浪底水库的运用,对于黄河下游起到了其他工程措施无法替代的作用。

小浪底大坝的成功建设凝聚了中外坝工专家,特别是我国坝工专家的智慧以及大坝设计工程师创造性的工作和中外建设者的创造性劳动,小浪底大坝是集体智慧的结晶。

在小浪底大坝的论证和整个设计过程中,甘宪章、杜士斌、李弘、彭新祺、李运涛、倪新贤等均为大坝的设计倾注了自己的心血,在此谨向他(她)们表示崇高的敬意。

为总结小浪底高土石坝的设计经验,兹编写本书,以期与同行进行技术交流,为共同促进我国高土石坝设计水平的提高尽我们的微薄之力。书中难免存在错误和不足之处,敬请批评、指正。

高广淳
2008年8月

《大坝设计》编写人员名单

主 编 高广淳

章 名	编写人员
第一章 概述	高广淳 甘宪章
第二章 工程设计条件	甘宪章 韩秋茸
第三章 坝线、坝型比较与选择	孙胜利 姜苏阳
第四章 筑坝材料设计与研究	孙胜利 王新奇 田华祥
第五章 坝体分区和结构设计	李治明 韩秋茸 杨永叶
第六章 基础处理设计	段世超 代巧枝
第七章 动力分析	韩秋茸 李治明
第八章 大坝监测设计	王 跃 李海河
第九章 施工中出现问题及处理	段世超 杨永叶 曹国利
第十章 大坝工程施工	高广淳 李治明 段世超
第十一章 大坝初期挡水运用情况及 大坝安全性评价	高广淳 赵洪岭 韩秋茸

目 录

总序一	张基尧
总序二	李国英
总前言	林秀山
前 言	高广淳
第一章 概 述	(1)
第一节 工程概况	(1)
第二节 河段开发规划及坝址选择	(2)
第三节 枢纽总体布置	(5)
第二章 工程设计条件	(8)
第一节 基本数据	(8)
第二节 工程地质与水文地质条件	(10)
第三节 主要工程地质问题	(14)
第三章 坝线、坝型比较与选择	(23)
第一节 坝址比较与选择	(23)
第二节 坝型比选	(26)
第四章 筑坝材料设计与研究	(31)
第一节 坝料选择的原则和研究思路	(31)
第二节 防渗土料	(33)
第三节 反滤料	(51)
第四节 堆石料	(60)
第五节 开挖料的利用	(65)
第五章 坝体分区和结构设计	(70)
第一节 坝顶高程和坝坡	(70)
第二节 坝体分区和结构设计	(91)
第三节 左岸山体加固处理设计	(98)
第四节 三维渗流计算	(104)
第五节 静力应力和变形计算	(115)
第六章 基础处理设计	(125)
第一节 坝基开挖设计	(125)
第二节 深厚覆盖层防渗处理	(134)
第三节 灌浆和排水系统设计	(156)
第四节 F_1 断层处理设计	(187)
第五节 固结灌浆及岩面处理	(189)

第七章 动力分析	(191)
第一节 概 述	(191)
第二节 地震动工程参数的确定	(192)
第三节 河床覆盖层组成及工程性质	(193)
第四节 坝基、坝体材料动力特性试验研究	(198)
第五节 抗震稳定分析研究	(211)
第六节 抗震工程措施	(227)
第七节 结束语	(232)
第八章 大坝监测设计	(233)
第一节 监测项目及监测断面选择	(233)
第二节 变形监测设计	(233)
第三节 渗流监测设计	(242)
第四节 应力应变监测设计	(247)
第九章 施工过程中出现问题及处理	(249)
第一节 主坝混凝土防渗墙一期工程施工缺陷处理	(249)
第二节 东坡“倾倒变形体”滑坡处理	(259)
第三节 F ₁ 断层带混凝土盖板抬动处理	(264)
第四节 左岸“老虎嘴”处理	(266)
第五节 3 区过渡料级配不良问题	(274)
第十章 大坝工程施工	(277)
第一节 工程概述	(277)
第二节 大坝工程施工布置	(279)
第三节 筑坝材料的开采与加工	(281)
第四节 坝基和岸坡开挖	(288)
第五节 防渗墙及高压旋喷灌浆防渗墙施工	(293)
第六节 坝体填筑施工	(301)
第七节 主要施工经验总结	(311)
第十一章 大坝初期挡水运用情况及大坝安全性评价	(315)
第一节 蓄水运用情况	(315)
第二节 两岸坝肩、坝基渗漏处理及效果	(319)
第三节 大坝变形分析	(330)
第四节 大坝的安全性评价	(346)

第一章 概 述

第一节 工程概况

小浪底水利枢纽位于河南省洛阳市以北 40km 的黄河干流上,上距三门峡水库 130km,下距郑州京广铁路桥 115km。坝址位于黄河中游最后一个峡谷段的出口,控制流域面积占花园口以上流域面积的 91.5%,是黄河干流三门峡以下唯一能够取得较大库容的控制性工程,处在承上启下控制黄河水沙的关键部位,在治黄中具有重要的战略地位。

工程开发目标是以防洪(包括防凌)、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电,蓄清排浑,除害兴利,综合利用。

整个枢纽由三部分组成:一是拦河大坝,坝型为带内铺盖的壤土斜心墙堆石坝,最大坝高 160m,总库容 126.5 亿 m^3 ,坝体方量 5 073 万 m^3 ;二是泄洪排沙建筑物,包括 10 座进水塔、3 条孔板泄洪洞、3 条排沙洞、3 条明流泄洪洞、1 条灌溉洞、1 座正常溢洪道、1 个综合消能水垫塘;三是引水发电建筑物,包括与排沙洞共用的 3 座综合进水塔、6 条直径为 7.8m 的高压引水隧洞、地下厂房、尾水洞、尾水渠和防淤闸等。

小浪底枢纽工程受地形地质条件限制和运行要求,16 条引水和泄水隧洞、溢洪道、地下厂房洞群均集中布置在左岸山体内,且呈空间立体交叉,地下洞室之多、程度之复杂为国内外所罕见。黄河小浪底水利枢纽工程位置见图 1-1-1。

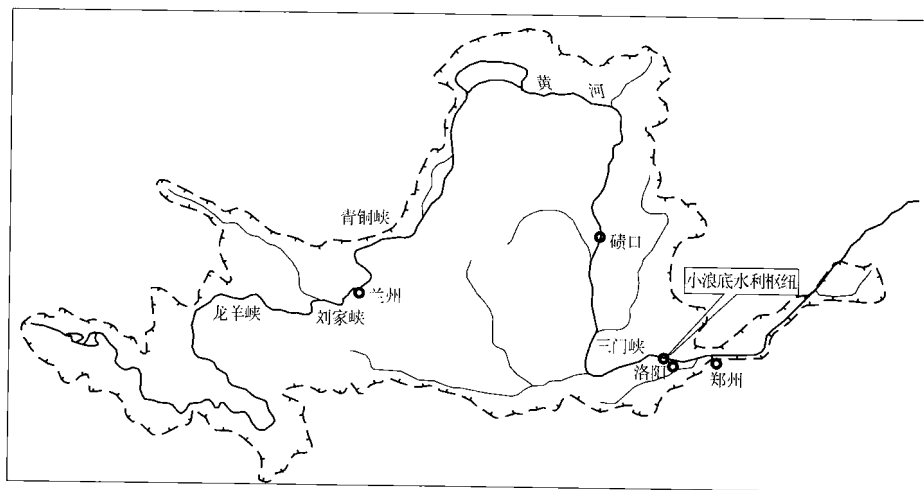


图 1-1-1 黄河小浪底水利枢纽工程位置