

西部山区水电工程施工 导截流工程设计创新与实践

何兴勇 蒲建平 王小波 程保根 等 著



非外借



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

西部山区水电工程施工 导截流工程设计创新与实践

何兴勇 蒲建平 王小波 程保根 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是以中国电建集团成都勘测设计院有限公司 30 多年来在西部山区建设的大中型水电站施工导截流工程设计创新与实践为背景,依托二滩、溪洛渡、锦屏一级、大岗山、铜街子、官地、瀑布沟、长河坝、猴子岩、两河口、双江口、桐子林、东西关、草街等工程,围绕高山峡谷、大江大河、大流量、复杂地质条件下的水利水电工程的施工导流规划、大型地下洞室群结构设计、超高陡边坡的支护设计、深厚覆盖层上导流泄水建筑物出口消能防冲设计、深厚覆盖层河道高落差截流设计、深厚覆盖层基础上高围堰堰体防渗与基础处理设计、深厚覆盖层上大泄量过水挡渣堰堰面保护设计等,系统地介绍了施工导截流工程设计与建设中创新技术研究及其应用实例。本书内容完整、资料翔实、实例丰富,涉及的问题均是国内外水电工程施工导截流工程设计中的技术难题,具有创新性和实用性。

本书可供从事水利水电工程的技术人员参考阅读,也可作为相关领域大专院校师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

西部山区水电工程施工导截流工程设计创新与实践 /
何兴勇等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2021. 12
ISBN 978-7-5226-0358-2

I. ①西… II. ①何… III. ①山区—水利水电工程—
工程施工—导流—研究—中国②山区—水利水电工程—工
程施工—截流—研究—中国 IV. ①TV551

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第000018号

书 名	西部山区水电工程施工导截流工程设计创新与实践 XIBU SHANQU SHUIDIAN GONGCHENG SHIGONG DAOJIELIU GONGCHENG SHEJI CHUANGXIN YU SHIJIAN
作 者	何兴勇 蒲建平 王小波 程保根 等著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@mwr.gov.cn 电话: (010) 68545888 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售有限公司 电话: (010) 68545874、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	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.5印张 377千字
版 次	2021年12月第1版 2021年12月第1次印刷
定 价	98.00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

前 言

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司（以下简称“中国电建成都院”）在西部山区进行水电工程设计 60 余载，在窄河床、大流量、陡坡降、深厚覆盖层河道上建设超高拱坝、超高堆石坝的河道水流控制技术方面积累了丰富的工程经验，培养了大批优秀的技术人才，形成了国际领先的技术优势。通过 200 多个工程的勘测设计及“六五”“七五”“八五”“九五”科技攻关，建造了一大批代表着我国乃至世界水电勘测设计最高水平的标志性工程——二滩、溪洛渡、锦屏一级、两河口、双江口、沙牌、铜街子水电站等。在西南山区复杂的地质条件、恶劣的施工条件下，为主体工程施工服务的施工期水流控制设计技术面临巨大的挑战，也屡屡通过技术创新，不断突破当时的施工技术水平、施工手段和设计能力。

20 世纪六七十年代，映秀湾水电站在导流工程中开创了纵向围堰塑料薄膜防渗、明渠出口采用沉井防冲两项新技术，映秀湾水电站导流明渠出口防冲沉井专题总结获得四川省科技成果四等奖（1979 年）。龚嘴水电站在国内首次采用堰体木板心墙防渗获得成功，导流明渠宽为 35m、设计泄流量为 $9560\text{m}^3/\text{s}$ ，为当时国内最大的明渠工程。

20 世纪 80 年代，二滩、铜街子两个大型电站的施工导流设计，在工程规模和技术难度均跨上新的台阶。铜街子导流明渠宽为 60m，设计泄流量为 $9200\text{m}^3/\text{s}$ ，采用大型沉井群（沉井最大平面尺寸为 $16\text{m}\times 30\text{m}$ ，最大深度为 31m，顺水流向总长达 394m）作为左岸岸坡抗滑结构和明渠边墙的一部分，采用大吨位（单位吨位 336t）预应力锚索处理右岸导墙基础的玄武岩层间、层内错动和缓倾角裂隙带，在二期纵向围堰、上游围堰的深层抗滑稳定、明渠出口消能防冲、固化灰浆防渗墙等单项设计均有创新或突破，大型沉井群的设计和施工获四川省科技进步三等奖，导流工程技施设计获得第五届（1992 年）全国优秀工程设计银质奖。二滩电站在应力区开挖两条断面尺寸为 $20\text{m}\times 25\text{m}$ 、长约 1km 的导流隧洞，工程获得全国第七届（1999 年）优秀工程设计奖银质奖。包含施工设计在内的“铜街子水电站设计”获得全国第六届优秀工程设计金奖（1994 年），“二滩水电站设计”获得全国第十届优秀工程设计金奖（2003 年）。

20 世纪 90 年代，太平驿和东西关电站在导流设计上，具有典型的代表

性。建设的太平驿电站导流隧洞设计流量为 $2080\text{m}^3/\text{s}$ ，断面尺寸为 $15\text{m}\times 19\text{m}$ 的城门洞形，在当时为国内建成的最大断面导流洞。东西关电站导流设计最大流量为 $22100\text{m}^3/\text{s}$ ，为中国电建成都院在大江大河上第一个采用束窄河床枯水期分期导流的工程，第一次解决施工期通航和采用过水围堰的工程，第一次采用高压喷射灌浆作为堰基防渗墙的工程。包含施工设计在内的太平驿水电站获得全国第九届优秀工程设计银奖（2001年）。

2000年后，以溪洛渡、锦屏一级、瀑布沟、官地、长河坝、猴子岩、桐子林、草街水电站等为代表的大型工程相继开工建设，在导流工程设计的规模、难度、复杂性又有快速的突破。溪洛渡水电站导流设计流量为 $32000\text{m}^3/\text{s}$ ，导流洞最大净断面 $18\text{m}\times 20\text{m}$ ，数量最多达6条，碎石土斜心墙上游围堰高78m；锦屏一级导流洞进出口采用垂直开挖、强支护技术处理的边坡最高约为130m，堰体复合土工膜斜墙防渗高度最高为44m，并成功采用特大减载空腔处理左岸导流洞长达120m、高约40m的连续塌方段，坝身无钢衬导流底孔简化布置、加快施工进度，高地应力、极低围岩强度应力比围岩中建造了设计挡水水头250m级的导流洞封堵堵头；长河坝采用隧洞导流，堰基防渗墙最大深度为82.5m，超陡一坡到底式中期导流洞进出口落差为55m；草街水电站分期导流混凝土导墙高达48m，最大导流设计流量为 $41100\text{m}^3/\text{s}$ ，过水围堰采用混凝土楔形板保护，过堰水流最大单宽流量为 $113.16\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ，过堰水流最大流速为 $13\text{m}/\text{s}$ ，过堰水流最大落差为8.87m，并在实际洪枯比超过150的河流上探索了施工期通航的解决方案；桐子林水电站最大导流设计流量为 $14400\text{m}^3/\text{s}$ ，采用明渠道导流方式，混凝土纵向围堰基础采用40m深框格式地下连续墙，下游右岸岸坡采用锚拉混凝土旋挖桩进行防冲防淘，三期导流明渠截流采用混凝土旋挖桩防止龙口抛投料流失。这些工程相继完工，并成功接受洪水考验，表明在大型地下洞室支护设计、高边坡支护设计、高围堰设计、防渗土工膜大规模工程应用、深厚覆盖层围堰基础处理上，技术水平不断提高，并逐步成熟、可靠。

2010年后，在雪域高原开工建设两河口、双江口等为代表的工程，建成了西藏某水电站窄深式大单宽高流速导流明渠，明渠道导墙最大高度为40m，单宽流量 $253.43\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ，出口最大流速为 $17.79\text{m}/\text{s}$ ；采用折线式戗堤实现龙口最大流速 $7\text{m}/\text{s}$ 、最大落差4.5m的单戗堤立堵截流。建设中的两河口、双江口两座300m级特高土石坝，采用三层导流洞接力过流的导流方式，两河口水电站3号导流洞进出口落差达115m；采用导流洞侧竖井式旁通洞改造利用施工通道满足了导流洞下闸后下游供水需求；过水堰堰脚最大平均流速达 $16\text{m}/\text{s}$ ，与基坑内水位差约16m，较好满足了前期施工的需求。

成都院在 30 多年的工程实践中，在高山峡谷、大江大河、大流量、复杂地质条件下的水利水电工程的施工导流规划、大型地下洞室群结构设计、高陡边坡的支护设计、深厚覆盖层河道截流、高围堰与深厚覆盖层基础上堰体防渗设计、大泄量过水围堰设计及其保护、沟水与泥石流沟治理等多方面，取得了十分丰富的成果和经验。

这书依托锦屏一级、溪洛渡、瀑布沟、二滩、长河坝、两河口、双江口、猴子岩、铜街子、桐子林、官地、东西关、草街等水电站的施工导截流工程设计，系统总结中国电建成都院 40 年来在西南山区高山峡谷、大江大河、大流量、复杂地质条件下的水电工程的施工导流规划设计、高落差陡河床覆盖层河道与导流明渠截流设计、特高坝施工期水流控制全过程风险分析、大型地下洞室塌方段治理设计、高陡边坡的支护设计、深厚覆盖层上导流建筑物基础处理设计、深厚覆盖层基础上高围堰防渗设计、深厚覆盖层上大泄量过水挡渣堰设计及其保护、导流明渠出口消能防冲保护设计等方面的成果，反映了以 300m 级特高坝施工导流设计成套技术、框格式地下连续墙承载及防冲技术、折线形截流戗堤技术、过水（分流）围堰的堰面保护技术、复杂地质条件下大型地下洞室塌方治理设计技术、导流明渠高流速低弗劳德数水流的出口消能技术等为代表的创新技术与实践。这些在不断探索中创新技术与实践的总结与提炼，具有重要的学术价值和显著的工程实际意义。

全书共 9 章，参与本书编写的主要人员有何兴勇、蒲建平、王小波、程保根、陈世全、张有山、张超、冯菊等。在本书的编写过程中，也得到了穆建志正高、雷运华正高、付峥正高给予的大力指导和帮助，在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不足和欠妥之处，恳请读者批评指正。

作 者

2021 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 狭窄河谷超高坝、特高坝施工导流规划技术	1
1.1 狭窄河谷超高坝、特高坝施工导流规划技术的发展	1
1.2 狭窄河谷超高坝、特高坝施工导流规划关键技术特点	11
1.3 工程案例	14
1.3.1 二滩水电站施工导流规划（混凝土双曲拱坝坝高 240m）	14
1.3.2 溪洛渡水电站施工导流规划（混凝土双曲拱坝坝高 285.5m）	15
1.3.3 锦屏一级水电站施工导流规划（混凝土双曲拱坝坝高 305m）	20
1.3.4 两河口水电站施工导流规划（砾石土心墙堆石坝坝高 295m）	20
1.3.5 双江口水电站施工导流规划（砾石土心墙堆石坝坝高 315m）	23
1.3.6 长河坝水电站施工导流规划（砾石土心墙堆石坝坝高 240m）	27
1.3.7 大岗山水电站施工导流规划（混凝土双曲拱坝坝高 210m）	32
1.3.8 猴子岩水电站施工导流规划（混凝土面板堆石坝坝高 223.5m）	34
第 2 章 高落差陡河床覆盖层河道与导流明渠截流技术	38
2.1 截流工程技术进展	38
2.1.1 截流方式	38
2.1.2 截流技术发展	38
2.2 工程案例	40
2.2.1 溪洛渡水电站（单戽立堵截流）	40
2.2.2 长河坝水电站（双戽立堵截流）	42
2.2.3 桐子林水电站（明渠单戽立堵截流）	44
2.2.4 西藏某水电站（明渠单戽立堵截流）	47
第 3 章 特高坝施工期水流控制全过程风险分析与控制技术	50
3.1 施工导流标准风险分析发展历程	50
3.2 特高坝施工期水流控制全过程风险分析	53
3.3 施工期水流控制标准风险分析决策方法	53
3.3.1 单目标风险分析损失期望值决策法	53
3.3.2 基于 Monte - Carlo 法的施工期水流全过程控制动态风险计算方法	54
3.3.3 初期导流标准多目标风险决策方法	57
3.3.4 基于 Monte - Carlo 法的河道截流设计标准风险分析	60
3.4 工程案例——锦屏一级水电站施工期水流控制全过程风险研究与风险决策	61

3.4.1	基于 Monte - Carlo 法的河道截流时段与标准风险分析研究	62
3.4.2	初期导流标准的单目标风险分析研究	64
3.4.3	基于 Monte - Carlo 法的初期导流标准的动态风险分析	65
3.4.4	初期导流时段与标准的多目标风险分析与决策	68
3.4.5	基于 Monte - Carlo 法的坝体临时断面挡水度汛与初期蓄水期风险分析研究	72
3.4.6	基于 Monte - Carlo 法的导流建筑物封堵风险分析研究	76
第 4 章	高陡狭窄深切河谷卸荷松弛岩体工程边坡治理技术	80
4.1	岩质高陡工程边坡稳定分析方法综述	80
4.1.1	Bishop 法	80
4.1.2	Sarma 法	80
4.1.3	刚体极限平衡法	81
4.1.4	连续力学数值分析方法	81
4.1.5	非连续数值分析方法	82
4.1.6	边坡爆破振动动力稳定性计算方法	84
4.2	基于多源知识综合集成的高陡狭窄深切河谷卸荷松弛岩体工程边坡治理技术	85
4.3	工程案例	88
4.3.1	锦屏一级水电站左岸导流洞出口直立边坡的开挖与支护设计	89
4.3.2	基于多源知识集合的垂直开挖直立边坡稳定分析	93
4.3.3	基于多源知识集合的出口工程边坡加固措施效果研究	114
4.3.4	施工期爆破振动对左岸导流洞出口边坡稳定性影响分析	123
4.3.5	基于多源知识集合的边坡开挖与支护设计综合评判	128
第 5 章	深厚覆盖层上导流建筑物基础处理技术	130
5.1	深厚覆盖层上导流建筑物基础处理技术	130
5.1.1	深厚覆盖层特点	130
5.1.2	深厚覆盖层工程地质问题	131
5.1.3	深厚覆盖层地基处理技术	132
5.2	工程案例	135
5.2.1	锦屏一级水电站围堰基础塑性混凝土防渗墙设计	135
5.2.2	桐子林水电站右岸堰肩深厚覆盖层帷幕灌浆技术	136
5.2.3	铜街子水电站导流明渠边墙基础沉井设计	138
5.2.4	桐子林水电站导流明渠基础框格式地下连续墙设计	140
5.2.5	桐子林水电站下游河道右岸岸坡连续旋挖桩设计	142
5.2.6	西藏某水电站导流明渠出口框格式地下连续墙设计	144
第 6 章	高土石围堰综合防渗体系技术	146
6.1	土石围堰的发展	146
6.2	高土石围堰堰基防渗处理技术	146
6.2.1	混凝土防渗墙防渗处理技术	149

6.2.2	高喷防渗墙防渗处理技术	150
6.3	高土石围堰堰体防渗处理技术	151
6.3.1	土质防渗体防渗处理技术	151
6.3.2	复合土工膜防渗体处理技术	151
6.3.3	防渗体连接技术	153
6.4	工程案例	153
6.4.1	溪洛渡水电站上游围堰防渗体系设计	153
6.4.2	两河口水电站上游围堰防渗体系设计	155
6.4.3	长河坝水电站上游围堰防渗体系设计	156
6.4.4	猴子岩水电站上游围堰防渗体系设计	158
6.4.5	瀑布沟水电站上游围堰防渗体系设计	159
第7章 深厚覆盖层上分流挡渣堰过流保护技术		161
7.1	分流挡渣堰技术发展综述	161
7.2	工程案例	162
7.2.1	猴子岩分流挡渣堰	162
7.2.2	两河口分流挡渣堰	166
第8章 复杂地质条件下的大型或巨型导流建筑物结构设计技术		172
8.1	复杂地质条件下的大型或巨型导流建筑物结构设计技术发展	172
8.2	工程案例——锦屏一级水电站左岸导流洞塌方段空腔实施方案数值分析计算	180
8.2.1	工程概况	180
8.2.2	工程地质条件	183
8.2.3	模拟研究的基本参数	185
8.2.4	导流洞塌方段开挖期间洞周围岩稳定性模拟分析研究	187
8.2.5	导流洞塌方段加固治理完建后衬砌结构和洞周围岩稳定性模拟分析研究	193
8.2.6	运行期塌方段衬砌结构及洞周围岩稳定性模拟分析研究	199
8.2.7	封堵期塌方段衬砌结构及洞周围岩稳定性模拟分析研究	209
8.2.8	导流洞塌方段虚碴固结灌浆处理效果的研究	213
8.2.9	基于反演参数的导流洞塌方段结构特性研究	221
8.2.10	结论	227
第9章 深厚覆盖层河道导流明渠出口水流消能设计技术		228
9.1	明渠导流设计概况	228
9.1.1	明渠导流概述	228
9.1.2	明渠导流设计进展	228
9.2	导流明渠出口水流消能	229
9.2.1	泄水建筑物出口下游消能概述	229
9.2.2	导流明渠出口水流消能设计进展	230
9.2.3	深厚覆盖层导流明渠出口水流消能型式选择	231

9.3 工程案例	232
9.3.1 铜街子水电站导流明渠出口水流消能设计	232
9.3.2 西藏某水电站导流明渠出口水流消能设计	233
参考文献	237

第 1 章 狭窄河谷超高坝、特高坝施工 导流规划技术

1.1 狭窄河谷超高坝、特高坝施工导流规划技术的发展

我国西部山区河流丰富的水能资源，狭窄河谷的地形地质条件，形成了水电工程高坝（ $100\text{m} \leq \text{坝高} < 200\text{m}$ ）、超高坝（ $200\text{m} \leq \text{坝高} < 300\text{m}$ ）、特高坝（ $\text{坝高} \geq 300\text{m}$ ）独特的建设条件。中国电建成都院以 20 世纪 80 年代二滩大坝建设为标志的 200m 级超高坝建设起步，陆续在西部山区勘测设计了一批超高坝、特高坝，其中已建超高坝 5 座：二滩混凝土双曲拱坝（坝高 240m）、溪洛渡混凝土双曲拱坝（坝高 285.5m）、大岗山混凝土双曲拱坝（坝高 210m）、猴子岩混凝土面板堆石坝（坝高 223.5m）、长河坝砾石土心墙堆石坝（坝高 240m），已建特高坝 1 座：锦屏一级世界第一高混凝土双曲拱坝（坝高 305m）；正在建设超高坝 2 座：两河口砾石土心墙堆石坝（坝高 295m），叶巴滩混凝土双曲拱坝（坝高 217m）；正在建设特高坝 1 座：双江口世界第一高砾石土心墙堆石坝（坝高 315m）；拟建设超高坝 1 座：孟底沟混凝土双曲拱坝（坝高 240m）。积累了混凝土双曲拱坝型、心墙堆石坝型和混凝土面板堆石坝型超高坝、特高坝的施工导流规划设计经验，迎接挑战促使了施工导流技术取得许多重大突破。

在面对复杂地质条件和特殊自然环境下设计和建设具有更多难度和挑战的超高坝、特高坝时，首先要紧密围绕施工进度形象面貌，制定涵盖从工程开工至主体工程完建投入运行前的全过程的施工导流规划，妥善协调解决施工期水流控制、施工期防洪度汛、主体工程快速施工、施工期环境保护和生态流量供给等问题。超高坝、特高坝的建设工程长、施工难度巨大、施工程序复杂、施工工期可控性较差、关键节点施工面貌偏差大、影响因素多变等问题，加上复杂地质条件下的施工期导流建筑物布置设计难度、施工期环境保护和生态流量供给已成为影响施工导流规划的重要因素，给施工导流规划带来的困难均超过以往的工程。在此之前，世界上仅在 1980 年建成一座坝高 300m 的苏联（塔吉克斯坦）努列克土心墙堆石坝，坝高 315m 的伊朗巴哈提亚瑞混凝土拱坝尚处于拟建中，300m 级特高坝施工导流规划设计可借鉴的资料几乎一片空白，使得特高坝的施工导流规划技术则是难上加难。锦屏一级 305m 特高坝施工导流规划技术的成功实施，标志着我国施工导流规划技术首次跨入 300m 级特高坝领域，为后续特高坝工程实施提供了宝贵的经验。

施工导流规划的核心是以施工期度汛安全为目标，明确导流方式，确定设计标准、导流建筑物布置与导流程序，导流程序含河道截流、拦洪度汛、导流建筑物封堵与初期蓄水等过程。

二滩水电站的施工导流规划设计，是我国首座超高混凝土双曲拱坝施工导流规划设



计。按施工期挡水、泄水建筑物的不同,二滩水电站施工导流分为初期导流、中期导流和后期导流三个阶段,所具有的狭窄河谷、深厚河床覆盖层的施工导流条件,限制了初期导流采用断流围堰挡水、隧道过流是唯一可行的导流方式,后期导流采用坝身导流底孔过流是最经济合理的导流方式。施工期水流控制最大设计流量为 $13500\sim 16000\text{m}^3/\text{s}$,除设置初期导流洞和导流底孔泄流外,还利用永久泄水建筑物中的放空底孔、中孔和泄洪洞参与施工期泄流,由5个高程、18条孔洞组成施工期泄水建筑物分层布置方案,分层布置的施工期导流泄水建筑物进水口总高差为178.5m、相邻最大高差为67.5m。其中左右岸各一条初期导流洞为城门洞型,过水断面尺寸为 $17.5\text{m}\times 23\text{m}$ (宽 \times 高),过水断面面积达 362.5m^2 ,初期导流设计流量为 $13500\text{m}^3/\text{s}$,为当今世界断面最大的导流隧洞,具有施工期泄流和施工期漂送木材至下游河道的功能;初期导流洞封堵闸门为平面滑动闸门,尺寸为 $16\text{m}\times 21\text{m}-20.5\text{m}$ (宽 \times 高-挡水水头),其过流流量、孔口尺寸为当时全国最大;导流底孔封堵闸门尺寸为 $4\text{m}\times 8\text{m}-190\text{m}$ (宽 \times 高-挡水水头),其封堵设计挡水水头为当时最高。上述施工期导流建筑物规模,显示了超高坝施工导流建筑物设计难度大的特点。

由于施工期水流控制的流量大、费用高、对工程建设影响大,为科学选择初期导流设计洪水标准,二滩水电站首次尝试和使用风险分析和风险决策方法。

二滩水电站施工导流规划中,施工期漂木方案、漂木流量大小和漂木流态的优劣,是影响导流方案选择的因素之一,也影响到施工期导流泄水建筑物布置与结构设计。施工期漂木采用初期由导流洞漂送木材至下游河道、后期由原木纵向过木机过坝的运输方式。为满足漂送木材至下游河道的要求,初期导流洞进出口高程、底坡、进口闸室宽度、水流流态等,适应设计漂木流量为 $7060\sim 7500\text{m}^3/\text{s}$,该流量大于重现期2年洪水流量,若发生超标流量时,木材暂蓄库内,待洪水退后再行流放;考虑到单侧过流面宽度应大于河道中漂送的木材最大长度9m的要求,初期导流洞进口闸室无中墩,封堵平板闸门尺寸为 $16\text{m}\times 21\text{m}-20.5\text{m}$ (宽 \times 高-挡水水头),其过流流量、孔口尺寸为当时全国最大;为满足坝址下游不间断供水要求,在坝体上接近原河床高程1012.50m处设置导流底孔,用于宣泄枯水期间初期导流洞封堵施工时段的来水流量;导流底孔按封堵期设计过流量 $1500\text{m}^3/\text{s}$ 时,导流底孔闸前上游水位不超过1030.50m、出口单宽流量不大于 $80\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 选择泄流断面尺寸,控制当时全国最大尺寸的导流洞封堵平面滑动闸门设计挡水水头不超过20.5m,使得封堵平面滑动闸门设计制造增加的难度尚可克服,也同时降低了受外水控制的世界上最大过流断面的初期导流洞上游库区段结构的衬砌强度与施工难度。

二滩水电站初期蓄水安排在汛前进行,拟定的水库水位蓄至发电死水位1155m、汛后适当再升高方案,由于坝体尚未完建,溢流表孔闸门尚未安装,坝身中孔、底孔事故闸门因启闭设备不具备安装条件而不能投入运行,制定蓄水规划时除研究下游3万居民供水要求外,还需同时研究蓄水期间工程度汛安全问题。初期蓄水至死水位高程1155.00m过程分成4个阶段控制,其中:蓄水至高程1027.00~1080.00m,无控制手段,不限制库水位上升速度;蓄水至高程1080.00~1130.00m,每天打开1孔底孔向下游供水,控制蓄水水位上升速度不大于4m/d;蓄水至高程1130.00m,停蓄7d,全天开启底孔或中孔向下游供水,并保持该水位,进行坝体变形观测与评估;蓄水至高程1130.00~1155.00m,每天打开1孔底孔或中孔向下游供水,控制蓄水水位上升速度不大于3m/d。



初期蓄水断流期间,安排进行大坝下游围堰拆除开挖、尾水渠末端石埂开挖和盐边县新县城水厂取水口开挖,根据进度计划,这些工程的施工期要需6d,因此,初期蓄水期间断流时间不低于6d。

坝址下游雅砻江河口河段长33km,其中在13km处有安宁河汇入,坝下游居民用水各水泵站基本上均位于安宁河汇入口之下,断流期间均可使用安宁河水,且安宁河来水流量远超过下游各泵站的需要,但由于河水位降低,各泵站的取水口已不能直接从江中取水,对三个用水大户采取增加一级泵站的措施来满足供水的需要,对于小泵站,给予一定经济补偿,自行采取措施解决供水问题,避免了初期蓄水断流期间带来的对当地居民的生产生活的影响。

二滩水电站上游围堰坐落在15~30m厚的块卵石层和紧密粉质黏土层上,下游围堰基础河床覆盖层厚20~40m,层次结构与上游围堰类同,唯粉质黏土层厚度比上游围堰大。河道截流戗堤和龙口均处于深厚河床覆盖层上,河道截流流量为 $1090\text{m}^3/\text{s}$,河道截流最大落差为4.94m,采用的2.5号戗堤、平立堵进占综合截流方案,在当时国内乃至国际上都属于高难度的截流工程,戗堤进占壅水、泄水建筑物分流降低水位、戗堤进占再次壅水、泄水建筑物分流降低水位、戗堤进占合拢的方式,较好地适应了河道截流流量大、落差大、深厚覆盖层的特点。

溪洛渡水电站的施工导流规划设计,是一座装机容量超千万千瓦巨型电站的超高混凝土双曲拱坝施工导流设计。按施工期挡水、泄水建筑物的不同,溪洛渡水电站施工导流分为初期导流、中期导流和后期导流三个阶段。初期导流采用断流围堰一次拦断河床、土石围堰挡水、左右岸六条初期导流隧洞过流、基坑全年施工的导流方式;中期导流采用坝体临时断面挡水、左右岸六条初期导流隧洞过流、基坑全年施工的导流方式;后期导流采用坝体临时断面挡水、导流底孔和利用枢纽永久泄水建筑物单独或联合过流的导流方式。施工期水流控制最大设计流量为 $32000\sim 37600\text{m}^3/\text{s}$,除设置初期导流洞和导流底孔泄流外,还利用永久泄水建筑物中的深孔和泄洪洞以及提前发电机组参与施工期泄流,由7个高程、30条(个、台)临时和永久泄水建筑物组成施工期泄水建筑物分层布置方案,分层布置的施工期导流泄水建筑物进水口总高差为177m、相邻最大高差约为50m,施工期水流控制分层调用的泄水建筑物群规模与数量目前居国内外超高拱坝工程首位。其中初期导流洞采用左右岸各布置三条共6条的格局,城门洞型断面尺寸为 $18\text{m}\times 20\text{m}$ (宽 \times 高)、断面积达 335.55m^2 ,单洞长度为 $1258.85\sim 1937.70\text{m}$,导流洞总长 9394.12m ,导流洞群规模目前最大,单洞跨度居世界首位。坝身上布置的10个导流底孔,包括断面尺寸为 $5\text{m}\times 10\text{m}$ (宽 \times 高)数量为6孔和断面尺寸为 $3.5\text{m}\times 8\text{m}$ (宽 \times 高)数量为4孔,总过流面积达 412m^2 ,导流底孔数量和过流面积均为世界高拱坝首位。

溪洛渡水电站工程坝址区狭窄,枢纽工程规模大,地下建筑物数量多,洞室群庞大,空间布置难度大,施工导流泄水建筑物与枢纽泄水建筑物结合布置的方式灵活多样,导流洞的封堵次序、改建施工通道布置、施工干扰大小,利用永久泄水建筑物参与施工期泄流时间等,使得施工期泄水建筑物可进行多种运行方式组合,增加了施工导流规划的复杂性,影响到施工导流规划布置,影响到工程投资费用。

溪洛渡水电站施工导流规划中,1号、6号尾水洞单独布置,不与导流洞结合,工程



完建不受导流洞下闸封堵改建工程的影响,为施工期提前发电创造条件;左右岸1号、2号、5号、6号导流洞共4条导流洞与厂房尾水洞结合布置,3号导流洞后期改建为5号竖井泄洪洞;6条初期导流洞分两期进行下闸断流、封堵施工与改建工程,第一个枯水期先下闸断流封堵1号、6号导流洞,第二个枯水期下闸断流封堵2号、3号、4号、5号导流洞,除考虑到施工通道布置、施工与封堵占用直线工期、施工干扰因素外,还结合坝体施工形象面貌,考虑一期封堵后的次年满足坝体安全度汛要求的施工期泄水建筑物安排、结构设计难度、水力学条件等因素,导流底孔分两个高程布置,分两期下闸断流封堵,满足施工期度汛泄流要求,降低导流洞和导流底孔封堵闸门的设计挡水水头,将封堵闸门设计制造难度控制在可行范围内,其中高高程导流底孔汛前下闸断流后、枯期再进行封堵,满足利用汛前洪水进行初期蓄水,减少高坝大库蓄水时间长、对下游居民生产生活影响大的问题,实现了已建工程效益最大化的目的。

溪洛渡水电站河道截流设计流量为 $5160\text{m}^3/\text{s}$ 、水深为 23.6m ,属于超大截流设计流量的深水截流。初期导流洞采用5低1高方案,兼顾到河道截流设计指标、度汛安全需求的设计泄流能力与导流洞下闸封堵设计与施工的难度,截流龙口水流最大平均流速为 $5.25\text{m}/\text{s}$ 、最大单宽功率为 $49.08\text{t}\cdot\text{m}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 、最大落差为 1.4m ,龙口进占过程中戗堤坍塌频率较低、范围较小且抛投材料流失量较小,以良好的分流条件,实现了深厚覆盖层河床、超大截流设计流量、龙口不护底的深水截流。

溪洛渡水电站施工期导流建筑物布置困难,参与利用的永久建筑物数量多、规模大、程序复杂性等,深厚覆盖层河床进行超大截流设计流量的深水截流,均充分反映了西部山区超高坝施工导流规划的特点。

针对溪洛渡超高坝施工导流规划的建筑物规模大、施工周期长、导流工程投资费用多、影响风险控制因素多且环节复杂的特点,初步尝试引入风险分析方式,研究施工期各个阶段中的风险,用风险决策方法,优化施工导流规划中的设计标准和方案。

溪洛渡水电站施工期导流规划设计时,进行了施工期风险因素的识别,建立了基于Monte-Carlo法进行施工期导流设计标准风险分析的基本模型与计算方法,建立了基于Monte-Carlo法的初期导流标准多目标风险分析与决策模型与评价准则,建立了基于实测流量系列的截流设计标准风险基本模型与计算方法。

采用实测资料法,研究河道截流系统的风险率。以河道截流时段的天然实际来水旬平均流量系列为基础,以截流过程中龙口最大流速或最大落差为风险模型变量,研究得出初期导流洞布置采用4低洞方案、5低1高洞方案、6低洞方案时河道截流系统的风险率相差不大,仅4低洞方案时龙口最大平均流速相对较大、深水河道截流的困难较大,需结合其他研究成果进行决策。

建立基于Monte-Carlo法模拟施工导流调洪演算与堰前水位分布的风险率模型,以实际统计水文参数为基础,基于Monte-Carlo法模拟天然最大洪水流量和施工期导流泄水建筑物的泄流能力,以典型设计洪水过程按照峰值放大、按量调整的原则,拟合设计洪水过程线进行施工期调洪演算,以调洪后堰前上游水位超过设计洪水位为致险指标,建立风险模型,分析两个备选布置方案(6低洞方案和5低洞1高洞方案)在备选设计频率(重现期30年、50年,第一年重现期30年,以后重现期50年)下的风险率,分析成



果显示各备选方案上游水位超过设计洪水位的风险率低于设计标准, 初期导流建筑物布置方案和导流标准选择需结合其他研究成果进行决策。

对于初期导流 5 低洞 1 高洞布置方案, 拟选设计洪水标准为重现期 30 年、50 年和第一年重现期 30 年、以后为 50 年, 建立基于 Monte - Carlo 法的初期导流标准多目标风险分析与决策模型。利用 Monte - Carlo 法模拟施工期洪水洪峰流量和导流泄水建筑物泄流能力, 通过拟合设计洪水过程线进行施工洪水调洪演算, 用统计分析模型确定上游围堰堰前水位分布, 以堰前水位统计分析确定不同导流标准条件下围堰运行的动态风险率。将初期导流工程的确定性投资 (建筑物费用和基坑抽排水费用之和)、不确定性投资 (考虑动态风险率的超标洪水风险损失费用)、施工强度共同作为决策择优目标, 引入了“1~9”比率标度法来确定目标之间的权重, 采用效用决策方法将不同类型指标转化为等效费用和工期, 将构造所有备选方案多目标决策特征矩阵转化为隶属度矩阵, 采用最小二乘法优选准则, 以正隶属度极大原则择优选择初期导流标准与施工导流方案, 通过目标权重敏感分析研究优选结果的稳定性。对于三个拟选初期导流设计洪水标准, 进行多目标风险分析与决策结果为重现期 50 年方案。

按照基于 Monte - Carlo 法进行初期导流设计标准风险分析相同的原理, 以上游水位超过设计上游水位为致险指标, 构建后期导流标准风险分析模型, 研究第 9 年 2~5 号导流洞与 1~6 号导流底孔联合泄流、坝体临时断面挡水度汛设计洪水标准为重现期 100 年时, 施工期水流控制系统的风险率, 研究第 10 年 7~10 号导流底孔与深孔、泄洪洞和提前发电机组联合泄流、坝体临时断面挡水度汛设计洪水标准为重现期 200 年时, 施工期水流控制系统的风险率, 研究成果的综合风险值均低于设计风险值, 能满足施工期度汛安全。

锦屏一级的施工导流规划设计, 是一座坝高 305m 的特高混凝土双曲拱坝施工导流设计。按施工期挡水、泄水建筑物的不同, 施工导流规划分为初期导流、中期导流和后期导流三个阶段, 共 7 年。初期导流采用断流围堰一次拦断河床、土石围堰挡水、隧洞过流、基坑全年施工的导流方式; 中期导流采用坝体临时断面挡水, 左右岸两条初期导流隧洞联合泄流, 大坝全年施工的导流方式; 后期导流采用坝体临时断面或完建坝体挡水, 利用导流底孔、放空底孔、深孔、溢流表孔和提前发电机组单独或联合宣泄河道来水, 大坝全年施工的导流方式。施工期水流控制最大设计流量为 $9370\sim 12800\text{m}^3/\text{s}$, 除设置初期导流洞和导流底孔泄流外, 还利用永久泄水建筑物中的放空底孔和深孔以及提前发电机组参与施工期泄流, 由 7 个高程、20~23 条 (个、台) 临时和永久泄水建筑物组成施工期泄水建筑物分层布置方案, 分层布置的施工期导流泄水建筑物进水口总高差 229.5m、相邻最大高差约 78m, 施工期水流控制分层调用的泄水建筑物群规模与数量居目前国内外特高拱坝工程首位。其中初期导流洞采用左右岸各布置一条共 2 条的格局, 城门洞形断面尺寸为 $15\text{m}\times 19\text{m}$ (宽 \times 高)、过水断面积达 266.19m^2 , 单洞洞身段长度分别为 1214.36m、1185.41m, 导流洞洞身段总长 2399.77m, 导流洞单洞最大设计泄流流量 $4696\sim 5463\text{m}^3/\text{s}$, 最大设计平均流速 $17.5\sim 20.44\text{m}/\text{s}$; 坝身上布置的 5 个导流底孔, 断面尺寸为 $5\text{m}\times 9\text{m}$ (宽 \times 高), 总过流面积达 225m^2 , 设计总泄流流量 $8907\text{m}^3/\text{s}$, 单孔最大泄流流量 $1781.4\text{m}^3/\text{s}$, 最大单宽设计泄流流量 $356.28\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$, 出口工作弧门处最大平均流速 $39.6\text{m}/\text{s}$, 出口挑流水流消能功率 $14.93\times 10^6\text{kW}$, 单宽消能功率 $5.97\times 10^5\text{kW}/\text{m}$ 。坝体



施工期临时度汛期间,为减少导流临时泄水建筑物数量、规模,节省导流工程投资费用,在一个汛期内最多同时利用永久泄水建筑物 11 个孔洞和提前发电机组 3~4 台参与施工期泄流,其最大设计泄流流量 $12800\text{m}^3/\text{s}$,无论是利用永久泄水建筑物参与施工期泄流的数量还是泄流流量,都是特高坝施工导流规划设计中的首位,中后期导流期间精细调度施工期泄水建筑物运行方式的复杂程度也是首位,充分显示特高坝施工导流规划难、大、杂的特点。

锦屏一级水电站是建造在狭窄河谷的高技术难度的世界第一高坝,也是我国已建的第一座特高坝,施工导流工程布置区域的地形地质特点表现为“三高二深二窄”,即高山峡谷、高边坡、高地应力、深部卸荷、深厚覆盖层、窄河谷、窄施工场地;施工导流工程建设难点表现为“二大一密一长一难”,即风险大、流量大、建筑物密集、历时长、场地布置困难。针对上述特点,为更好妥善解决 300m 级特高坝枢纽工程施工全过程中的挡水、泄水、蓄水等施工导流规划问题,引入风险分析技术和风险管理理念,进行施工全过程的风险研究、风险决策,通过控制施工期全过程的风险,优化施工导流规划中的设计标准和方案。

采用随机模拟法,研究不同截流时段、截流设计标准和截流方案的河道截流系统风险率。基于 Monte - Carlo 法,以河道截流时段的实测水文统计频率参数、按 P - III 型分布随机抽样过程,随机模拟河道截流时段的来流量,以河道截流时分流建筑物的设计泄流能力、按三角分布变量抽样公式,随机模拟分流建筑物的分流能力。以反映截流龙口综合性变量的龙口最大平均流速为风险变量,建立单戽堤立堵截流和双戽堤立堵截流方案(上戽承担 $2/3$ 落差,上戽承担 $1/2$ 落差)的风险模型,统计大于设计标准频率下龙口最大平均流速的数量,得到相应风险模型下的河道截流系统风险率。对比单戽立堵截流和双戽立堵截流方案的风险分析成果,综合推荐 11 月上旬、截流设计标准重现期 10 年、双戽堤立堵、上下戽堤均分落差的截流方案。

对拟选的初期导流设计标准和拟选的初期导流洞洞径,组合成备选的典型初期导流方案,进行技术经济比较。以备选典型方案导流工程预期总费用为决策目标,用风险概率树按照折现值方法进行单目标风险分析决策,首选导流洞洞径 $15\times 19\text{m}$ 、重现期 30 年方案。

初期导流设计拟选标准重现期 20 年、30 年、50 年,拟选的导流洞洞径 $14\text{m}\times 18\text{m}$ 、 $15\text{m}\times 18\text{m}$ 、 $15\text{m}\times 19\text{m}$ 、 $16\text{m}\times 19\text{m}$ 和 $16\text{m}\times 20\text{m}$,组合成初期导流期间水流控制的备选方案,基于 Monte - Carlo 抽样方法模拟施工期洪水过程和施工期的泄流能力,利用施工洪水调洪演算分析上游水位,用统计分析模型确定施工期上游水位分布,以备选方案在设计频率与相应的设计洪水流量下的上游水位、设计堰顶高程为致险因素,研究水文随机因素和水文与水力随机因素时的施工期系统风险率,以风险率最小方案为最优。

坝体临时断面挡水期间,不同施工阶段分别由初期导流洞、永久放空深孔、泄洪洞、大坝溢流表孔和提前发电机组单独或联合泄流。基于 Monte - Carlo 抽样方法模拟施工期洪水过程和施工期的泄流能力,利用施工洪水调洪演算分析上游水位,用统计分析模型确定施工期上游水位分布,以不同施工阶段在设计频率与相应的设计洪水流量下的上游水位、坝体浇筑最低高程和最低接缝灌浆高程为致险因素,研究水文随机因素和水文与水力随机因素时的施工期系统风险率,各施工阶段拟选设计标准所对应的度汛水位和风险度均能满足要求。按施工进度计划,第 8 年 6—7 月初期蓄水期间,坝体接缝灌浆顶高程为



1800.00m 略低于设计标准所对应的度汛水位，坝体悬臂挡水（最大高度 6.04m）所对应的风险为 1.161%。第 9 年 6—8 月，坝体完建期间，坝体接缝灌浆顶高程为 1870.00m 低于拟选设计标准所对应的度汛水位，推荐选择坝体临时断面挡水度汛设计标准为重现期 200 年，坝体悬臂挡水（高度为 2.1~1.48m）所对应的风险为 0.188%~0.136%。

介于导流底孔下闸断流封堵期间，可通过调度施工期泄水建筑物运行方式调控上游水位，导流底孔下闸设计水位和封堵闸门设计挡水水位不受天然来水和泄水建筑物泄流能力的随机性变化影响，基于 Monte - Carlo 抽样方法模拟初期导流洞封堵期的洪水流量和泄流能力，用统计分析模型确定封堵期上游水位分布，研究水文随机因素和水文与水力随机因素，以设计频率下相应的设计水位为致险因素，对拟选封堵期挡水设计标准为重现期 10 年、20 年方案，其设计水位对应的风险率均在可接受范围内，考虑到综合风险率变化因素，推荐初期导流洞封堵期进出口设计挡水标准选择重现期 20 年更为妥当。

对于初期导流设计拟选标准重现期 20 年、30 年、50 年，拟选的导流洞洞径 14m×18m、15m×18m、15m×19m、16m×19m 和 16m×20m，组合成初期导流期间水流控制的备选方案，将各备选方案的风险率、费用、工期作为风险分析目标，依据决策人确定的费用与工期权重，采用效用决策方法将不同风险度下的费用和工期转化为等效费用和工期，进行最终决策，以其正隶属度极大原则为优，进行初期导流标准多目标风险分析与决策。分析时，分别以各备选方案设计频率下的设计挡水水位或设计堰顶高程为致险因素，进行综合风险率计算，多目标决策计算分析时采用按备选方案的洞径分别决策、按备选方案的设计频率分别决策和所有备选方案统一决策三种方式，并研究目标权重敏感性对多目标分析结果的影响。研究结果表明，优选结果稳定性良好，不受目标权重浮动变化的影响；综合三种决策方式的决策结果，导流洞尺寸为 16m×20m 和 16m×19m，导流标准为重现期 30 年的导流方案是较优方案。

锦屏一级水电站 300m 特高坝施工导流规划时，以满足施工期度汛安全为总体目标，引入风险分析技术和风险管理理念实施施工期风险全过程控制，基于 Monte - Carlo 法和实际统计水文参数成果为基础，研究河道截流、初期导流、坝体临时断面挡水度汛、下闸封堵、蓄水过程中的施工期风险因素、风险概率、失事后果评价结论，进行风险判断、风险决策，结合初期导流设计标准单目标分析成果，形成设计规范取值、工程类比与风险分析技术综合决策施工期水流控制设计标准的新方式，使施工期的工程安全以及工程建设期的公共安全、社会安全和环境安全均处于可接受风险之内。建立了所有拟选初期导流设计标准和施工导流设计方案的工程投资、工期、风险为多目标进行风险分析与风险决策的大数据统一分析平台，分析方案的全面性、合理性与分析成果的实用性，标志导流标准多目标风险分析与风险决策技术从理论方法研究、初步尝试到走向成熟。

锦屏一级水电站位于深山峡谷地区，两岸地形陡峭，施工道路布置及施工难度极大，大坝工程高陡边坡开挖高度达 540m，出渣道路布置困难，按常规出渣方式，大规模出渣道路施工的开挖石渣易因掉渣而淤堵河道，施工干扰大，进度缓慢，且施工期环境保护与水土保持措施难以实施。针对上述问题，采用导流洞工程施工提前实施，大坝工程高陡边坡大规模开挖安排在河道截流以后进行，在上下游围堰保护下，坝肩开挖直接翻渣至河床基坑、再从基坑出渣方案，简化出渣道路布置，实现大坝工程快速开挖，利用时空关系拓