|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分类号 | | TV512 |  | | | 密 级 | | 公开 |
| U D C | |  |  | | | 编 号 | | 10486 |
|  | | | | | | | | |
| 武汉大学logo  **硕 士 学 位 论 文** | | | | | | | | |
|  | | | | | | | | |
| 梯级同步建设下施工导流风险控制效益分配及决策研究 | | | | | | | | |
|  | 研 究 生 姓 名 | | | ： | 聂 鹏 | |  | |
| 学 号 | | | ： | 2018202060093 | |
| 指导教师姓名、职称 | | | ： | 胡志根 教授 | |
| 专 业 名 称 | | | ： | 水工结构工程 | |
| 研 究 方 向 | | | ： | 施工组织管理与系统仿真 | |
|  | | |  |  | |
|  | | | | | | | | |
| 二〇二一年五月 | | | | | | | | |

Benefit Distribution and Decision Making of Diversion Risk Control Under Synchronal Construction of Cascade Hydropower Stations

By Nie Peng

：Prof. Hu Zhigen

May, 2021

论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。



学位论文作者（签名）：

2021年 5 月 30 日

摘 要

随着水电梯级开发程度不断提高，上游水电站与下游水电站同时处于建设状态的情况屡见不鲜，使得施工导流期间导流风险因素变得更为复杂。考虑到施工导流是水利水电工程的控制性环节，其失事后果严重，必须对施工导流风险加以控制。在单一主体开发环境下，开发主体往往通过上游已建电站控制下泄洪水，缓解下游导流系统的度汛压力，从而达到控制施工导流风险的目的。然而在上游电站参与控泄的过程中，各梯级电站的不同利益主体之间存在着矛盾及冲突，给梯级建设环境下施工导流系统的效益分配及导流方案决策带来了新的难题。本文针对梯级水电站同步建设下的施工导流系统，围绕导流风险率估计、风险控制及效益分配、导流方案决策等科学问题开展研究工作，运用工程水文学、模拟仿真技术、工程经济学、合作博弈理论、多属性群决策等理论及方法，建立同步建设下的施工导流系统效益分配及群决策模型，为梯级水电站施工导流风险控制提供参考。本文研究的主要内容概述如下：

（1）根据导流风险的定义及特性，将同步建设条件下施工导流系统的施工洪水组成及特性分析作为切入点，考虑导流系统本身及外在的不确定性，分析不同建设状态下的上游电站对施工导流系统的影响机制，利用数值模拟法和水文、水力学计算方法对导流风险率进行合理的估计。通过实例分析验证了风险分析及估计方法的合理性和有效性，为量化分析梯级施工导流风险提供科学有效的方法。

（2）以上游已建电站参与导流风险控制为研究前提，从成本和收益角度分析上游电站的风险控制行为对电站本身及下游的施工导流系统效益的影响，在计算风险控制的综合效益基础上，将电站对合作联盟的贡献作为分配依据建立基于Shapley值的效益分配模型，为解决施工导流阶段风险控制下的效益冲突问题提供参考。

（3）针对上游已建电站参与下的施工导流方案决策问题，考虑梯级电站决策主体的多元性，以群体偏好的一致性为决策目标，构建了基于TOPSIS法的梯级同步建设下施工导流方案多属性群决策模型。通过工程实例验证了群决策模型的科学有效性，为单一主体开发条件下多决策者、多属性的导流方案优化决策提供参考。

**关键词：**梯级水电站；同步建设；导流风险分析；效益分配；多属性群决策

**ABSRTACT**

With the continuous improvement of the level of hydropower cascade development, it is not uncommon for upstream hydropower stations and downstream hydropower stations to be under construction at the same time, which makes diversion risk factors become more complicated during construction diversion. Considering that construction diversion is the controlling link of water conservancy and hydropower project and the consequences of the accident are serious, so it is necessary to control the risk of construction diversion.In a single-subject development environment, the developer often controls the discharge of floodwater through the upstream hydropower station to relieve the flood pressure of the downstream diversion system, so as to achieve the purpose of controlling the risk of construction diversion.However, in the process of controlling the discharge of the upstream hydropower station, there are some contradictions and conflicts between the different stakeholders of each hydropower station, which brings new problems to the benefit distribution of the construction diversion system and the decision of the diversion scheme under cascade construction environment. Aiming at the construction diversion system of cascade hydropower station under simultaneous construction, this paper focuses on the scientific problems of diversion risk rate estimation, risk control and benefit distribution, diversion scheme decision and so on. Then use engineering hydrology, simulation technology, engineering economics, cooperative game theory, multi-attribute group decision-making and other theories and methods to establish a construction diversion system benefit distribution and group decision-making model under synchronal construction, which provides reference for the risk control of the construction diversion of the cascade hydropower station. The main contents of this paper are summarized as follows:

(1) According to the definition and characteristics of diversion risk, the analysis of the construction flood composition and characteristics of the construction diversion system under synchronal construction conditions is taken as the starting point. Considering the internal and external uncertainties of the diversion system, analyze the influence mechanism of the upstream hydropower station under different construction conditions on the construction diversion system, and use numerical simulation and hydrological and hydraulic calculation methods to achieve a reasonable estimation of the diversion risk rate. The case analysis verifies the rationality and effectiveness of the risk analysis and estimation methods, and provides a scientific and effective method for analyzing the risk of cascade construction diversion.

(2) Based on the research premise of the upstream hydropower station participating in the diversion risk control, this paper analyzes the impact of the risk control behavior of the upstream hydropower station on the benefit of the hydropower station itself and the downstream construction diversion system from the perspective of cost and benefit. And the basis of calculating the comprehensive benefits of risk control, a benefit distribution model based on Shapley value is established with the contribution of power station to the cooperative alliance as the basis of benefit distribution, which provides a reference for solving the problem of benefit conflict under risk control in the construction diversion stage.

(3) Aiming at the decision-making problem of construction diversion schemes with the participation of upstream built hydropower stations, considering the diversity of decision-making bodies of cascade hydropower stations, take the consistency of group preference as the decision-making goal, a multi-attribute group decision-making model for construction diversion schemes under cascade construction based on TOPSIS method is constructed. The scientific effectiveness of the group decision making model is verified by an engineering example, which provides a reference for the optimal decision-making of multi-decision-makers and multi-attribute diversion schemes under the condition of single-subject development.

**Keywords:** cascade hydropower station; synchronal construction; diversion risk analysis; benefit distribution; multi-attribute group decision-making

目 录

[摘 要 I](#_Toc74605485)

[ABSRTACT II](#_Toc74605486)

[第1章 绪论 1](#_Toc74605487)

[1.1 研究背景及意义 1](#_Toc74605488)

[1.2 国内外研究现状 3](#_Toc74605489)

[1.2.1 施工导流风险估计 3](#_Toc74605490)

[1.2.2 导流风险控制及效益分配 5](#_Toc74605491)

[1.2.3 施工导流方案决策 6](#_Toc74605492)

[1.3 本文研究内容及思路 7](#_Toc74605493)

[1.3.1 研究内容 7](#_Toc74605494)

[1.3.2 研究思路 8](#_Toc74605495)

[第2章 同步建设下梯级施工导流系统风险分析 10](#_Toc74605496)

[2.1 引言 10](#_Toc74605497)

[2.2 施工导流系统风险定义 10](#_Toc74605498)

[2.3 同步建设条件下施工洪水分析 10](#_Toc74605499)

[2.3.1 上游电站的下泄洪水分析 12](#_Toc74605500)

[2.3.2 区间洪水的计算与叠加 15](#_Toc74605501)

[2.3.3 河道洪水演进 17](#_Toc74605502)

[2.4 梯级导流风险不确定性分析 18](#_Toc74605503)

[2.4.1 施工洪水的不确定性 18](#_Toc74605504)

[2.4.2 泄流能力的不确定性 20](#_Toc74605505)

[2.5 同步建设条件下导流风险率计算 20](#_Toc74605506)

[2.5.1 导流风险估计方法 20](#_Toc74605507)

[2.5.2 梯级施工导流系统风险识别 23](#_Toc74605508)

[2.5.3 基于Monte-Carlo法的导流风险率计算模型 23](#_Toc74605509)

[2.6 本章小结 25](#_Toc74605510)

[第3章 同步建设下导流风险控制效益分配及决策 26](#_Toc74605511)

[3.1 引言 26](#_Toc74605512)

[3.2 控泄综合效益分析 26](#_Toc74605513)

[3.2.1 上游电站控泄概况 27](#_Toc74605514)

[3.2.2 上游电站经济效益计量 27](#_Toc74605515)

[3.2.3 导流系统经济效益计量 28](#_Toc74605516)

[3.2.4 控泄综合效益的确定 30](#_Toc74605517)

[3.3 效益分配理论 30](#_Toc74605518)

[3.3.1 分配原则 31](#_Toc74605519)

[3.3.2 效益分配方法 31](#_Toc74605520)

[3.4 基于博弈论的效益分配模型 33](#_Toc74605521)

[3.4.1 博弈论概念 33](#_Toc74605522)

[3.4.2 合作博弈 34](#_Toc74605523)

[3.4.3 基于Shapley值的效益分配计算 36](#_Toc74605524)

[3.5 同步建设下导流方案多属性群决策 39](#_Toc74605525)

[3.5.1 多属性群决策概述 39](#_Toc74605526)

[3.5.2 决策基本要素 41](#_Toc74605527)

[3.5.3 导流方案多属性群决策模型 45](#_Toc74605528)

[3.6 本章小结 48](#_Toc74605529)

[第4章 工程案例分析 49](#_Toc74605530)

[4.1 工程概况 49](#_Toc74605531)

[4.2 导流备选方案 49](#_Toc74605532)

[4.3 施工导流风险率计算 50](#_Toc74605533)

[4.3.1 计算参数 50](#_Toc74605534)

[4.3.2 导流风险率计算成果 52](#_Toc74605535)

[4.4 基于合作博弈的效益分配 54](#_Toc74605536)

[4.4.1 控泄综合效益计量 54](#_Toc74605537)

[4.4.2 基于Shapley值的效益分配 56](#_Toc74605538)

[4.5 施工导流方案群决策 57](#_Toc74605539)

[4.5.1 决策指标信息 57](#_Toc74605540)

[4.5.2 导流方案多属性群决策 57](#_Toc74605541)

[4.6 本章小结 60](#_Toc74605542)

[第5章 结论与展望 61](#_Toc74605543)

[5.1 研究结论 61](#_Toc74605544)

[5.2 展望 62](#_Toc74605545)

[参考文献 63](#_Toc74605546)

[攻读硕士学位期间发表的科研成果 68](#_Toc74605547)

[致谢 69](#_Toc74605548)

# 绪论

## 研究背景及意义

稳定安全、可持续的能源供应是一个国家高速发展的前提与保障。随着我国经济的发展步入新常态，对能源的需求不断提高，而传统化石能源增产空间有限，并且在全球地缘政治及国际形势的影响下，能源供应难以满足社会生产消费需求[1]。与此同时，化石能源带来的环境污染问题日益显著，无法适应新时代下环境保护和气候治理的要求，能源结构的调整迫在眉睫[2]。在能源低碳和清洁化发展成为主基调的世界能源格局下，以可再生能源为主的能源体系是保障我国能源安全和可持续发展的必然选择[3]。相较于其他可再生能源，水能资源作为一种清洁能源，其运行成本低廉，开发技术成熟，在保障我国防洪安全、供水需求、电力供应和节能减排等方面发挥了重要作用[4]。我国疆域辽阔，河网密布，且得益于自西向东呈三级阶梯分布的独特地势，国内众多河流落差巨大，蕴藏着巨大的水能。据统计，我国水能资源的技术可开发量高达7.87亿KW，年发电量达到3万亿KW·h，居全球水能资源之最；截至2018年底，我国水能开发量为3.22亿KW，装机总量达到了3.56亿KW，年发电量为1.3万亿KW·h，开发程度仅为46.9%，远低于发达国家的70~80%，由此可以看出我国水电开发潜力巨大。从能源结构角度分析，水能资源相对稳定，对其他可再生能源具有支撑性作用，水电的充分开发在很大程度上为风电、太阳能等能源的发展提供了助力，是构建水风光互补的综合能源体系的前提[5]。综上可知，在未来很长的一段时间内保证水能资源的开发，加快水利水电工程的建设将会是我国优化能源结构的主要途径。

施工导流是贯穿水利水电工程建设始终的重要环节，其主要通过挡、泄水建筑物实现对水流的控制，保证主体工程在施工过程中不受水流的影响，为工程建设创造良好的干地施工条件。在设计指标确定的条件下，导流标准的高低决定了导流建筑物的规模，较高导流标准下导流工程施工期的洪水抵御能力较强，但工程投资较大[6]。导流工程属于临时性工程，通常会在施工期结束后对其进行拆除，若单从控制成本角度去考虑，应尽量选取较低的导流标准；而在施工导流过程中，由于导流工程建设周期短，其风险抵抗能力与主体工程相比较弱，一旦发生导流风险，即挡水建筑物发生漫顶事件，不仅会影响工程的施工进度，还会给下游带来巨大的经济损失甚至人员伤亡。由上述分析可知，在导流工程的规划过程中，应从风险指标和经济指标两个角度对导流标准的合理性进行分析，在保证导流工程安全的同时，尽可能降低导流费用。

在水电建设过程中，为加快水能资源的开发、优化流域水资源配置，我国在大江大河上采用梯级电站滚动开发的建设模式，并逐渐形成了以十三大水电基地为主的流域梯级开发格局，如长江上游水电基地、雅砻江水电基地、大渡河水电基地等[7]。在实际的水电开发过程中，根据同流域内的开发主体数量，可以将水电梯级开发模式分为单一主体开发和多主体开发两种。从流域梯级整体来看，相较于多主体开发模式，单一主体开发模式下各梯级电站之间更具有合作基础，能以更低的成本实现信息互通、风险分摊、利益共享，其管理效率显著提升，有利于实现流域整体性规划及资源最优分配。目前，我国各水电基地多采用单一主体开发模式，如表1.1所示。在单一主体的开发模式下，各梯级电站的规划建设时间存在差异，且水电工程建设周期较长。随着流域开发程度的不断提高，流域内两相邻电站同时处于在建状态的现象屡见不鲜，如乌东德水电站和白鹤滩水电站，叶巴滩水电站和拉哇水电站等。当处于规划设计阶段的梯级电站同属于一个开发主体时，为调控施工风险及控制工程费用，通常会选取上、下游电站同步建设的开发模式。

表1.1 我国水电基地及其开发主体信息

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 水电基地名称 | 典型工程 | 总装机容量  (万KW) | 开发主体 |
| 大渡河下游7级 | 瀑布沟水电站、深溪沟水电站、枕头坝水电站等 | 797.2 | 国电大渡河流域水电开发有限公司 |
| 澜沧江干流15级 | 黄登水电站、小湾水电站、糯扎水电站等 | 2581.5 | 华能澜沧江水电有限公司 |
| 长江上游5级 | 三峡水电站、葛洲坝水电站等 | 3034.0 | 三峡总公司 |
| 雅砻江干流21级 | 两河口水电站、锦屏一级水电站、二滩水电站等 | 2631.8 | 二滩水电开发有限责任公司 |
| 怒江干流13级 | 松塔水电站、马吉水电站等 | 2072.0 | 云南华电怒江水电开发有限公司 |
| 金沙江下游4级 | 乌东德水电站、白鹤滩水电站、溪洛渡水电站等 | 4036.0 | 三峡总公司 |

采用同步建设的模式进行梯级水电开发能有效降低电站的管理成本，有利于实现资源最优配置、加快梯级开发进度，符合梯级开发遵循流域开发的基本原则。然而在梯级同步建设环境下，相邻电站在空间上相互连通，各电站的水文与水力参数联系紧密，使得两电站的导流风险因素相互交织，其施工导流风险存在一定的传播效应；再加上施工期导流系统风险抵御能力较差，一旦发生导流风险，容易引发连溃事件，造成的损失呈几何倍数增加[8]。为调控同步建设下的导流风险，流域开发者通常利用上游已建电站控制下泄流量，达到调控施工导流系统风险与建设投资的目的。此时，上游控泄电站无法处于最优出力工况，自身存在一定的经济损失的同时，却给下游施工导流系统带来了风险收益。也就是说，上游电站控泄是用个体利益换取整体利益。这一情况下应当建立合理的效益分配机制对其进行补偿，从而促进流域梯级协调有序开发。此外，同步建设条件下施工导流标准的决策更为复杂，决策过程中涉及到的利益主体较多，决策指标相互影响，亟需建立科学有效的决策体系。

因此，本文以梯级同步建设环境下的施工导流系统为研究对象，针对梯级电站在施工期所面临的关键问题，探索上游电站影响下的施工洪水特性及风险因素，建立施工导流风险分析模型，研究优化施工导流风险结构的方法，并在提出基于合作博弈的效益分配机制的前提下，构建多主体、多属性的导流方案群决策模型，为梯级导流风险控制和流域整体规划提供理论基础与技术支撑。

## 国内外研究现状

在水电梯级开发的大背景下，对于同步建设的上、下游电站而言，其施工导流相关参数相互影响，风险因素耦合机理复杂，导流标准的决策存在较大的不确定性。在这一前提下，分析如何利用流域梯级的优势调控施工导流风险，对流域协同开发具有重要的意义。本文通过分析不同建设环境下的施工导流风险率，建立风险调控及效益分配机制，研究风险调控措施对施工导流系统的影响，构建导流方案风险决策体系，优选科学合理的施工导流方案。下面从梯级施工导流风险分析，梯级电站效益分配、导流标准决策等方面分别阐述其研究现状。

* + 1. 施工导流风险估计

施工导流风险的内涵十分广泛，通常我们认为施工导流系统风险是指“某些不确定的因素导致施工导流系统失效的可能性，这种可能性一般用概率来描述”。施工风险估计是导流风险分析的核心内容，其目的在于根据导流风险的定义，对风险进行科学、客观的量化，为导流风险调控与导流标准决策提供理论依据[9]。常用风险估计方法大致可以分为三类，即直接积分法、结构可靠性分析法及抽样分析法[10]。由于研究导流风险对电站施工期的安全运行具有重大意义，水利水电研究工作者针对施工导流风险估计做了大量的研究，下面对几类典型风险估计模型进行介绍：

(1)基于施工洪水的风险估计模型

施工洪水对导流系统有直接影响，是系统中最主要的风险因素之一。Yen[11]假设遇超标洪水概率符合古典概率理论，并在此基础上推求工程在其建设使用期内的发生风险事件的概率。肖焕雄[12]、李旭东[13]等以超标洪水的间隔事件为随机变量，分析其概率分布并建立施工导流风险率模型。石明华[14]通过对日径流随机模拟得到导流工程服务年限内的日径流过程，统计发生超标洪水次数，从而计算导流风险率。Luu[15]采用层次分析法结合GIS制图法，根据流域的历史洪水数据绘制洪水风险评估图，并以此为依据度量洪水风险。

上述文献从多个角度分析了施工洪水对导流系统的影响，通过统计超标洪水频率估计导流风险率。仅考虑了导流系统外部影响，却忽略了对导流系统自身蓄泄水能力的分析，与工程实际不符。

(2)基于可靠性的风险估计模型

与结构可靠性定义类似，Lee[16]、Afshar[17]、王栋[18]等从施工导流系统的“荷载”和“抗力”出发，认为当系统的外部荷载大于抗力时，导流系统失效，则导流风险可以用下式表示。



式中，—导流系统对系统外部荷载的抗力；

—外部对导流系统的荷载效益。

随着导流系统可靠度研究的不断深入，Yanmaz[19]基于阻力加载法和随机独立加载法，建立遵循泊松分布的施工导流动态可靠性模型。钟登华[20]考虑围堰的结构可靠性，建立导流风险隶属度函数。张光飞[21]基于BP神经网络确立导流风险评价体系，将定量与定性相结合，估算导流系统施工来流大于泄流能力的概率。王卓甫[22]、陈风兰[23]等考虑施工导流过程中的不确定因素，以出库洪峰流量为系统荷载，泄流建筑物的泄流能力和围堰所围成水库的调蓄能力为系统抗力，用下式计算导流风险*R*：



式中，—从水库蓄泄洪水开始，直到库水位达到最高的持续时间；

—导流系统遭遇的施工洪水流量，为时间的函数；

—导流系统下泄流量，为水库水位的函数；

—围堰挡水后形成的水库的滞洪库容，为围堰高度的函数。

上述文献综合考虑水文及水力因素，运用各类风险分析方法，从导流系统的可靠性角度估计导流风险，风险计算结果贴近实际工程，较为科学合理。然而，施工导流系统建设环境复杂多变，准确描述系统的外部荷载及内部抗力存在一定的困难，上述风险估计方法的适用范围有一定的局限性。

(3)基于堰前水位的风险估计模型

随着水电站梯级开发的不断进行，施工导流系统的复杂程度与日俱增，为简化导流风险的计算，水利工作者们开始以施工导流系统中某关键指标作为风险判断依据，建立导流风险分析模型[24]。在各类风险指标中，上游围堰堰前水位作为导流过程中最易观测的关键指标，得到了相关研究学者们的普遍关注。

Hsu[25]、Kwon[26]、陈肇和[27]等全面考虑洪水、风浪荷载等施工过程中的主要影响因素，构建调洪演算随机微分方程求取库水位分布，进而求解洪水风险。然而，在多约束、多荷载的复杂条件下求解微分方程较为困难，部分专家学者尝试采用数值方法求解堰前水位[28]。胡志根[29]、范锡峨[30]运用Monte-Calro法模拟施工洪水过程，确定堰前水位的变化过程，建立风险率计算模型。张超[31]使用最小信息熵法判别最高堰前水位分布，提出堰前年最高水位随机模拟计算方法。Chen[32]根据实时防洪决策中不确定因素，基于随机过程组合理论，利用解析方法提出了下游防洪段完整洪水过程的综合风险的定义和计算公式。李传奇[33]采用拉丁超立方抽样代替Monte-Calro法的抽样过程，根据水库防洪调度规则评估了洪水作用下的漫坝风险。薛进平[34]以同步建设的电站为研究对象，基于Copula函数描述施工洪水特征量之间的关系估算施工导流风险。王兆强[35]引入Matlab自动化生成数量充足的洪水样本，提高Monte-Calro法的计算效率及准确性。

以上研究分析了水电站梯级施工导流过程中的各种不确定性因素，从施工洪水、结构可靠性、堰前水位等多个角度对导流风险加以讨论，得出了较为成熟的风险分析体系。但目前相关研究中上、下游梯级的建设环境较为固定，且研究对象的较为固定，对处于不同建设环境下多个梯级电站下的导流风险分析较少，相关理论尚有待进一步研究。

* + 1. 导流风险控制及效益分配
       1. 导流风险控制

为实现导流风险控制，部分专家学者基于风险控制理论，结合工程特点对施工过程中的风险控制进行研究[36-38]。胡志根[39]基于风险分析理论及效用理论，在保持期望效益损失均衡的条件下，实现了导流系统的综合风险的科学分配。李本强[40]研究了施工导流风险控制中的问题，结合风险控制理论提出风险控制模型。Zhang[41]、王俊[42]研究了在不同洪水预报误差范围内，利用水库防洪限水位动态控制风险，并论证该方法的可行性。

在梯级水电开发环境下，利用同流域内的上、下游电站对施工导流系统进行风险控制是降低度汛风险、保证工程安全的有效手段[43]。西霞院水库在小浪底枢纽的控泄作用下，降低了导流标准，使导流工程的围堰高度及工程量得到减小[44]。谢小平[45]分析上游电站对下游施工导流系统风险的影响，得出上游电站能通过改变汛限水位降低下游导流风险的结论。任金明[46]通过工程实例分析下游电站回水对施工导截流的影响，总结上游电站的施工洪水控制规律。Chen[47]综合考虑入库不确定性及防洪运行风险的影响，建立多目标风险管理模型，优化汛期并行水库系统的实时防洪调度。谭乔凤[48]针对梯级建设环境下的水库调度，基于水库库容补偿原理提出了一种汛限水位动态控制方法。刘招[49]利用上游已建电站根据临时调度规则控制下泄流量，降低下游施工导流风险。

在上述风险控制方法中，通过调蓄能力较强的上游电站调控施工洪水，所达到的风险调控效果最为显著，且相关技术及理论研究较为成熟，已成为目前导流风险控制的主流方法，并广泛应用于水利水电工程建设的各个阶段。

* + - 1. 风险控制下的效益分配

施工导流风险控制会改变各梯级电站原有的运行方式，在这一过程中，必然会存在控制成本与风险收益，导致相关利益主体的效益发生变化[50]。为促进梯级流域开发的有序进行，充分发挥梯级电站综合开发的作用，一些学者对风险控制所带来的经济效益进行了分析。陶凤玲[51]在分析电量损失的原因及计算方法的基础上，讨论了电站处在非常规调度下的发电量损失。蔡建章[52]以理论电量为基准，分析并计算了水电机组处于非额定出力状态下的发电损失。周婷[53]、陈述[54]等分析上游控泄电站对导流系统的影响，在此基础上计算上游控泄的综合效益和成本，并从经济角度对控泄可行性进行评价。

确定风险控制收益及成本后，还需将其分配给各参与者以保证公平[55]。李英海[56]分析了多主体开发下的梯级水电站联合调度，总结各类水电站效益补偿方法。肖鹏[57]基于上游电站汛期错峰调度，对弃水风险和蓄水量进行识别，建立梯级电站效益分摊补偿模型。张乐辰[58]基于TOPSIS法建立施益、受益电站间的效益分配机制，并通过实际案例进行验证。为优化流域梯级整体开发，合作博弈被广泛应用于梯级电站效益分配中。陈志鼎[59]考虑决策者的风险态度，分析梯级电站的成本和收益，建立非对称三阶段博弈模型。Hu[60]用直观公理取代集体平衡贡献公理，通过联盟价值为Shapley值赋权，建立可转移效用的加权Shapley值博弈模型。曲家峰[61]结合熵权法和Shapley法，探索梯级水电站效益补偿机制，为梯级电站优化调度提供参考。刘潋[62, 63]建立基于合作博弈的效益分摊模型，在满足个体和集体理性条件下，对上下游电站合作带来的施工导流风险效益进行分配。张剑亭[64]为解决多主体梯级电站效益分配问题，针对Shapley法所存在的局限性，基于信息熵提出增益分配法计算效益分配值。

上述研究针对梯级电站风险控制下的效益分配问题，从多个角度分析了风险控制的经济效益，采用TOPSIS法、Shapley值等方法对效益进行分配，计算结果考虑了各电站风险及收益之间的公平性，分配结果较为合理。但关于单一主体开发环境下的多个梯级电站研究较少，且未考虑到同步建设环境下的风险控制及效益分配问题。

* + 1. 施工导流方案决策

施工导流方案决策是施工组织设计中的重要步骤，对导流工程的规模、投资、建设工期起决定性的作用，直接关系到导流工程的安全及效益，国内外许多研究学者对其开展了研究探讨[65]。Song[66]基于互检验理论对不同决策方法的决策结果进行一致化，提出了一种导流方案多属性决策框架。张春生[67]针对有多个备选方案的施工导流系统，以设计规则为依据将备选方案分组，建立两层决策模型优选导流方案。罗舒[68]基于三区间数理论，计算各方案的相对贴近度，从而对导流方案的优劣进行评价。

上述研究主要围绕单决策者参与条件下的方案决策，但对于导流工程这一复杂系统而言，其实际决策过程中涉及的利益主体繁多，单一主体的决策结果很难满足决策要求，部分学者开始对群决策展开研究[69, 70]。Liu[71]针对水利工程多主体、多属性的特点，结合谈判集合和Monte-Calro模拟，构建了施工导流多属性群决策模型优选导流方案。雷丽彩[72]基于有限理性理论，通过观点动力学模拟复杂大群体的决策过程，结果显示个体意见最终会收敛于一个观点簇。薛进平[73]基于交互决策对具有差异性的决策信息进行修正，并根据群决策理论及修正信息对导流方案进行排序。

随着水电事业的繁荣发展，梯级水库群联合运行的模式已然建立，在进行施工导流方案决策时需考虑其影响。对于同步建设的施工导流系统而言，其决策指标相互影响，上下游相邻电站的导流方案决策也应同步进行，给已有的导流方案决策模型带来了新的变化。

## 本文研究内容及思路

* + 1. 研究内容

本文以同步建设的施工导流系统为研究对象，结合洪水及导流系统的不确定性，通过Monte-Calro法将调洪演算、溃堰洪水、洪水演进及洪水遭遇等理论进行有机结合，在现有的研究基础上分析施工导流系统的风险。运用系统工程学、施工仿真技术、工程经济学、合作博弈等理论方法对梯级联合开发下的控泄综合效益进行合理分配，并基于多属性群决策理论对导流方案决策问题进行研究。本文主要从以下五个章节对研究内容展开论述：

第1章—绪论。阐述在梯级建设条件下进行施工导流风险分析及方案决策的研究背景及意义，从导流风险估计、导流风险控制与效益分配及施工导流方案决策等三个角度总结国内外研究现状，进而确定本文研究内容及思路。

第2章—同步建设下梯级施工导流系统风险分析。针对同步建设下的梯级施工导流系统，分析在不同建设环境下施工洪水组成及特性，结合施工导流过程中的不确定性因素讨论上游电站对施工导流系统的影响，并通过Monte-Calro法模拟洪水过程对施工导流系统风险进行分析。

第3章—同步建设下导流风险控制效益分配及决策。从成本和效益两个角度出发，计算在上游电站参与风险控制的前提下的控泄综合效益，并基于效益分配原则，使用Shapley值法判断各电站对合作联盟的贡献，并以此为依据对综合效益进行合理分配。在效益分配的基础上针对同步建设的施工导流系统导流方案决策问题，以多个相关利益主体为决策问题的决策者，通过主客观赋权法确定各指标权重，并基于TOPSIS法对导流方案进行决策。

第4章—工程案例分析。以实际工程为研究背景，运用前两章中所建立的风险率计算模型、效益分配模型及多属性群决策模型，以同步建设的梯级电站为研究对象，对拟定的导流备选方案进行分析计算，从而验证计算模型的合理性与适用性。

第5章—结论与展望。根据前文的研究思路与计算结果，对全文的研究成果进行了系统的总结及分析，并针对论文的不足之处，对下一步的研究工作进行展望。

* + 1. 研究思路

根据上述研究内容，可以得出本文的研究技术路线如图1.1所示。



图1.1 论文技术路线

# 同步建设下梯级施工导流系统风险分析

## 引言

施工导流是贯穿水利水电工程建设始终的控制性环节，主要作用是为主体工程的建设提供干地环境，且导流系统能否正常运行对工程建设的工期、投资等关键因素有较大影响。由于施工期河道来水天然具有随机性，加上施工导流系统泄流能力的不确定性，导流系统的运行必然伴随着风险。因此，对施工导流系统风险进行分析具有重要的现实意义。随着我国梯级滚动开发战略的逐步实施，上下游梯级电站同步规划建设的案例逐渐增加。在梯级电站同步建设环境下，施工导流系统的施工洪水受上游电站下泄洪水及区间洪水的影响，导流系统的风险因素增加。

对于梯级开发流域中同步建设的相邻电站而言，上游导流系统会在很大程度上改变下游施工洪水特性，使得上、下游电站间水文及水力的联系更为紧密，导流风险因素耦合机理变得更为复杂。基于此，本章系统分析同步建设条件下施工导流系统的洪水特性，研究导流风险成因及风险因素的耦合机理，在综合考虑洪水演进和溃堰洪水等因素的条件下，基于调洪演算得出合理的风险度量方法，并建立梯级施工导流系统风险分析模型，为施工期梯级电站风险评价与决策提供理论基础。

## 施工导流系统风险定义

施工导流是一项具有风险性的工程，在进行风险分析前首先要对施工导流系统风险进行定义。由前文可知，施工导流系统风险是指“某些不确定的因素导致施工导流系统失效的可能性”，且这种可能性通常用概率来描述。

本文采用基于围堰可靠度的风险定义，即通过观测堰前水位与堰顶高程的相对关系判断导流系统是否失效。因此，本文关于导流风险的定义为：在确定的导流时段内，堰前水位超过堰顶高程的概率。导流风险可以用下式表示：



式中，—施工导流过程中上游围堰堰前最高水位；

—挡水期上游围堰设计高程。

## 同步建设条件下施工洪水分析

施工洪水是指导流系统设计断面在汛期所遭遇的洪水，是导致导流系统发生风险事件的最直接、且最根本的因素，因此分析施工洪水是导流风险估计的前提。按照洪水演进过程，同步建设下施工导流系统典型模型如图2.1所示。



图2.1 同步建设下施工导流系统概化图

由图2.1可知，同步建设条件下，上游施工导流系统下泄洪水与电站区间洪水叠加后经河道洪水演进，形成下游施工导流系统的施工洪水。根据导流工程的性质可知，上游施工导流系统本身为风险系统，存在发生导流风险的可能性。对下游施工导流系统的施工洪水进行分析时，需同时考虑上游导流系统未发生风险及发生风险后的下泄洪水过程，建立合理的洪水分析模型。

由于施工导流风险与上游电站的下泄洪水联系紧密，在进行导流风险分析时需考虑上游电站的影响。对于上游施工导流系统而言，其上游电站可能为在建电站或已建电站。当上游电站为在建电站时，则串联分布的三个电站同时处于建设状态，此时最下游电站的施工洪水变得较为复杂，且风险分析模型的研究对象无法明确。因此，为全面且清晰地描述同步建设条件下的施工洪水，本文假设上游施工导流系统的上游为已建电站，以三个梯级电站串联分布作为典型模型的拓扑结构，对同步建设施工导流风险及上游已建电站对施工导流系统的影响进行分析。根据洪水下泄过程，可以得到同步建设环境下的拓扑结构如图2.2所示。



图2.2 同步建设下施工导流系统拓扑图

图中G、A、B分别代表上游已建电站、上游在建电站和下游在建电站；、分别为上游已建电站的天然洪水过程与下泄洪水过程；、分别为上游在建电站的施工洪水过程与下泄洪水过程；*、*分为下游在建电站的入库洪水过程与下泄洪水过程；*、*则分别表示电站G和电站A、电站A和电站B的区间洪水过程。根据施工洪水的形成过程，本文从上游电站的下泄洪水，区间洪水叠加，河道洪水演进三个方面对施工洪水的形成机理及洪水特性进行分析。

* + 1. 上游电站的下泄洪水分析

以图2.2中的拓扑模型为研究对象分析施工导流系统的施工洪水，对于同步建设的两个梯级电站而言，其施工导流系统的上游电站建设状态不同，处于上游的施工导流系统的上游为已建电站，而处于下游的施工导流系统的上游却是在建电站。不同建设环境下施工洪水特性有所不同，需分别进行讨论。

* + - 1. 已建电站的下泄洪水

上游电站投产运行后，为了实现对水流的控制，一般会根据电站的运行要求，通过挡水建筑物将部分洪水拦蓄于水库中，其他部分则通过泄水建筑物宣泄到下游河道中。对于已建电站而言，其泄流方式可以分为自由泄流和控制泄流。其中，若采取自由泄流的泄流方式，则电站对下泄洪水不施加约束，使洪水按照泄流建筑物的最大泄流能力直接流向下游；而在控制泄流的情况下，需要通过控制闸门或闸孔等启闭设备实现对下泄洪水进行控制，进而满足发电、供水、通航、生态用水或其他的要求。若电站防洪标准较高，且调蓄洪水的能力较强时，可以在满足其发电等需求的前提下，根据具体情况控制下泄洪水，进而削减洪水洪量及洪峰。然而，无论上游已建电站采用何种泄流方式，上游电站的存在必然改变了洪水原有的下泄通道，再加上水库的拦蓄作用以及泄流建筑物的调控作用，使得下泄洪水过程发生改变。

调洪演算的任务是在确定了水工建筑物的防洪标准的前提下，根据已知的入库洪水过程、泄洪建筑物的泄流能力及水位库容关系等基本资料，模拟洪水入库到出库的全过程，推算出水库水位变化过程、水库最高洪水位，下泄洪水过程和最大下泄流量[74, 75]。调洪演算的核心为求解水量平衡方程，方程的原理为：水库库容的变化等于入库洪水与出库洪水的差值，在计算时段内有：



式中，、—分别为时段初始入库流量和末段入库流量；

、—分别为时段初始出库流量和末段出库流量；

、—分别为时段初始水库库容和末段水库库容。

其中，、为已知，、为计算的初始条件，、为未知。

目前求解水量平衡方程主要有数值解法、牛顿迭代法、直接试算法、双斜率法及其他电算法，其中数值解法因其简单、易理解在工程上运用较为广泛。本文采用常微分方程数值解法中的单步法求解水量平衡方程，假设洪水过程总历时为，即。为保证算法的稳定性，将总历时离散为个时段：



将水量平衡方程转化为关于时间的微分方程为：



式中，—入库洪水流量，为时间的函数；

—下泄洪水流量，为上游水位和时间的函数；

—水库库容，为库水位的函数(其中，库水位为时间的函数)。

微分方程的初始条件为：



由于调洪演算的对象为工程实际模型，泄流能力曲线和水位库容曲线均为单调函数，可确定与的函数关系，即。于是，可以采用二分法求解水量平衡方程中的未知参数，进而推求水库下泄过程线，得到水库水位变化过程、水库最高洪水位和最大下泄流量。

* + - 1. 在建电站的下泄洪水

对于上游在建电站，由于施工期导流系统的挡水建筑物围堰高度较低，其堰前水库的调蓄能力弱，且泄流建筑物的泄流能力较差，其安全系数较低。因此，当遭遇超导流标准的洪水时，堰前水位可能高于堰顶高程，围堰存在溃决的风险。根据在建电站是否发生风险可以将其下泄洪水分为两种：正常下泄洪水、发生风险后下泄洪水。导流建筑物失效后下泄洪水过程线将发生极大的变形，调洪演算将不再适用，需重新推求溃堰洪水过程及溃堰洪水洪峰流量。

不同类型围堰的溃堰机理及溃堰过程相差较大，在推求溃堰洪水之前需要对围堰类型进行划分。目前围堰技术主要有土石围堰、混凝土围堰、钢板桩围堰及草土围堰等，其中土石围堰因其建设成本低，适应能力强而被广泛使用；而根据是否过水，又可将土石围堰分为过水土石围堰和不过水土石围堰。由于本文篇幅有限，选取工程上应用最为广泛的不过水土石围堰作为研究对象。根据调查资料及工程经验，不过水土石围堰遇超标洪水漫顶后的溃堰形式通常为逐渐溃。因此，本文采用《溃坝水力学》[76]中溃口流量计算公式求取溃堰洪水过程线。

(1)溃堰洪峰流量推求

土石围堰的溃决过程是水流与砂石相互作用的复杂过程，其溃决机理目前还未形成统一的研究结论，难以准确描述其发展过程，故现阶段主要以求取其近似解的方法进行溃堰计算。逐渐溃堰是一个逐步发展的过程，围堰在漫顶水流的冲蚀下形成溃口，随着冲刷的不断进行，溃口上游和两侧发展，可以认为溃口处出流类型为堰流。







式中，—溃堰洪水过程中的洪峰流量；

—溃口最大宽度，其中为库容水量，冲刷系数(一般取围堰材料系数)，为堰前水深，为过流断面围堰横断面积；

—流量系数，其中为断面形状指数，一般取1.5。

其中堰高比(为堰顶距离河床底部的高度)；沉溺系数则根据的值查沉溺系数表求得(为坝址处洪峰流量时最大水深)；系数及由出门口比查表得出(，其中为堰顶长度，为最大堰高)。

(2)溃堰洪水过程线推求

①溃堰前洪水过程线

在发生溃堰事件之前，导流系统的泄流类型可以认为属于自由泄流。此时，根据泄流建筑物最大泄流能力结合施工洪水过程及库容水位关系，经调洪演算即可得出溃堰前洪水过程线。

②溃堰发生时洪水过程线

溃堰发生时的洪水过程计算，实际上是计算溃堰洪水处于在不恒定急变流下进行水流的输砂能力，一般采用基于大量工程实际资料的经验公式。

1. 峰前流量过程线

假定从围堰开始出现溃口到下泄流量达到洪峰流量经过的时间为，则下泄洪水过程的经验公式为：







式中，—导流系统下泄流量，是时间的函数；

—最大水深比；

—导流系统围堰所围出的上游水库总库容；

—平均含砂量，由经验公式取得。

1. 峰后流量过程线

峰后流量过程主要与溃堰洪峰流量，库容指数以及水库放空时间有关。





式中，*—*水库放空时间，其中；

*—*库容指数*，*一般水库在1.5~3.0之间，多为2~2.5，当资料缺乏时，可以取。

根据库容指数查询相关表格可以得到曲线，分别乘以和即可得到峰后流量过程线。

③溃堰后洪水过程线

当导流系统发生溃堰后，其挡水建筑物和泄水建筑物可以认为已经失效，不具备拦蓄洪水的能力。因此，可以认为溃堰后洪水过程线与导流系统施工洪水峰后洪水过程线一致。

* + 1. 区间洪水的计算与叠加
       1. 区间洪水计算

区间洪水是指从上游控制断面到下游设计断面之间区域所产生的洪水，是下游施工洪水的重要组成部分；对于相距较远的大中型水电站来说，区间洪水对下游断面施工洪水影响较大，因此要对断面间区间洪水进行分析。由于上、下游电站区间集水区域的支流汇入、降水等产流过程较难直接测量，缺乏实测洪水资料，故通常采用间接资料或间接方法计算区间洪水。根据掌握的洪水实测资料以及区间洪水特性，可以通过以下几种方法计算区间洪水[77, 78]：

（1）当区间洪水比重较大，且各断面实测洪水资料齐全时，可直接在下游断面洪水过程中减去上游断面洪水过程，从而得到区间洪水过程线。

（2）当区间的部分流域上有建有水文站时，可根据水文站中所测量水文资料结合其控制流域的水文特性，选取一定区间的洪水过程，通过计算模拟得到整体区间的洪水过程。

（3）当区间降水的占比较大时，可以根据已知的暴雨资料来推求区间洪水。

（4）当缺少相关水文资料时，可以使用所在地区的暴雨等值线图及暴雨径流查相关图表计算区间洪水，或直接根据相似流域的经验公式推求区间洪水。

* + - 1. 洪水叠加计算

洪水叠加计算是指上游控制断面下泄洪水过程在下游河道与区间洪水过程相加，是洪水计算的重要内容之一。上游下泄洪水与区间洪水遭遇后叠加形成下游电站设计断面的施工洪水，考虑到下泄洪水过程线与区间洪水过程线相差较大，在进行洪水叠加计算前需先对洪水遭遇情况进行分析。根据洪水遭遇情况的不同，可以将下游设计断面的施工洪水分为三种情况：仅上游下泄洪水、仅区间洪水、两洪水叠加。不同的洪水组成方式使施工洪水表现出不同的特征，目前洪水遭遇的主要分析方法有以下三种：典型年组合法、最不利组合法、最可能组合法。

在洪水叠加计算阶段，出于设计安全角度考虑，一般选用最不利组合法，即在两洪水叠加的最不利工况下进行施工洪水计算。梯级导流系统的洪水组成十分复杂，且区间洪水过程一般通过间接方法得出，无法直接与下泄洪水过程逐年计算施工洪水过程。因此，在推求施工洪水过程时一般采用近似计算方法，主要包括：地区组成法[79]、频率组合法、随机模拟法等[80]。

（1）地区组成法

地区组成法不考虑水库调洪对下游设计断面洪水概率分布的影响，其计算步骤为：当设计断面遭遇设计标准下的洪水时，通过分析上游水库及其区间的洪水地区组成情况，计算下游设计断面的洪水频率曲线。

（2）频率组合法

频率组合法将上游控制断面及区间洪水的频率曲线作为基础，研究各分区洪水的所有可能的组合情况，分析在不同组合情况下上游电站的调蓄对设计断面洪水的影响，推求出设计断面的洪水频率曲线。

（3）随机模拟法

随机模拟法利用随机生成技术对下游设计断面及其上游控制断面与区间洪水过程进行模拟，得到足够长的洪水资料系列，然后根据调洪计算求得设计断面受上游电站调蓄影响后的洪水过程线，从中统计出年最大流量或时段洪量的频率曲线。

* + 1. 河道洪水演进

在梯级施工环境下，洪水演进是指上游电站的下泄洪水沿河道与区间洪水叠加后演进至下游设计断面的过程。在实际工程中，由于洪水状况及天然河道的复杂性，洪水演进过程中受到许多其他因素的干扰，河道洪水演进计算变得十分复杂。目前关于洪水演进计算大体可以分为两种：水文学方法、水力学方法。水力学方法计算复杂，对河道地形资料等数据依赖性较大，因此目前工程上运用更为广泛的是的是基于圣维南方程的水文学方法。

由于直接求解圣维南方程的微分方程十分困难，逐渐发展出了一些更为简单易用的洪水演算方法。其中，马斯京根法根据水文学理论对圣维南方程进行简化：将河段划分为多个河段，用水平衡方程体替代连续方程，用槽蓄方程取代动量方程[81]。该方法由G.T.麦克锡(G-T-McGarthy)于1938年首次应用于美国马斯京根河流域而得名，其方程表达式为：



式中，—河段总槽蓄量，为时间的函数；

—河段上断面入流量；

—河段下断面出流量；

—示储流量；

—流量比重因子，反映水面曲线形状及河段调蓄能力；

—稳定洪水波在河段的传播时间，即槽蓄系数。

联立求解方程组，可以得到马斯京根流量演算公式，在时间段内：



式中，—分别为时段开始、结束的河道断面下游断面出流量；

—分别为时段开始、结束的河道断面上游断面入流量；

—均为演算系数，有。

其中，



常用确定马斯京根参数、值的方法为试算法，计算流程为：针对河段内的某一次洪水，先人为假定一组、值，计算示储流量，作出关系曲线，取使二者关系为单一直线的值，该直线的斜率即为所求的值。随后取多组洪水重复计算得到多组、值，则、平均值即为该河段的、值。

## 梯级导流风险不确定性分析

由导流风险定义可知，导流风险为“某些不确定的因素”导致“导流系统失效”的可能性，不确定性与风险相伴而生，系统的不确定性因素正是施工导流存在风险的原因。而在梯级建设环境下，导流系统风险的不确定性因素众多，且关系错综复杂，很难对所有不确定性进行描述，本文主要针对导流系统的施工洪水及泄流能力这两个关键风险因素进行不确定性分析。

* + 1. 施工洪水的不确定性

由于导流系统的施工洪水是上游下泄洪水与区间洪水叠加而形成的，根据产流过程，施工洪水的不确定性主要包括上游电站下泄洪水的不确定性、区间洪水的不确定性以及洪水遭遇的不确定性，下文将对这几类不确定性进行分析。

* + - 1. 上游电站下泄洪水的不确定性

目前，表征洪水不确定性的水文随机因素主要有：洪峰不确定性，洪量不确定性以及洪水历时不确定性。上游电站的下泄洪水与电站的上游来水及泄流方式有关，在电站自由泄流情况下，可以通过数值积分法求得下泄洪水的分布函数。但在控泄条件下，其下泄洪水十分复杂，较难对其不确定性进行分析。

考虑到上游电站下泄洪水的不确定性主要是由电站来水的不确定性所引起的，为简化计算，本文假定无论在何种泄流条件下，下泄洪水的洪峰和洪量不确定性与天然洪水保持一致。根据我国长期的洪水序列分析以及工程实践，一般认为我国流域内天然洪水序列的洪峰和洪量服从型分布[82]，其密度函数为：



式中，—型分布的形状、刻度和位置参数；

—关于的伽玛参数。

在上述参数中，



式中，—型分布的均值；

—型分布的离势系数；

—型分布的离差系数。

* + - 1. 区间洪水的不确定性

根据区间洪水的组成特性可知，挡水建筑物上游集水区域内降水量的不确定性、汇流的不确定性及汇水时间的不确定性导致了区间洪水的不确定性。区间洪水与天然洪水的性质类似，一般认为其洪峰和洪量的不确定性也符合型分布。

* + - 1. 洪水遭遇的不确定性

虽然可以认为上游水电站下泄洪水与区间洪水的洪峰和洪量都符合型分布，但在上游蓄泄影响下，下泄洪水的洪水历时与洪水发生时间发生了较大的改变，且考虑到洪水传播时间是不确定的，两洪水到达下游设计断面的初始时间差同样具有不确定性。假定服从均匀分布，其概率密度函数为：



式中，—上游电站下泄洪水过程历时；

—区间洪水过程历时。

此外，在下游河道区间内下泄洪水与区间洪水的叠加也具有不确定性，在进行洪水叠加计算前需先进行独立性检验[83]。假定上游电站下泄洪水过程和区间洪水过程分别为变量，从历年洪水资料总体中抽取一个样本容量为的样本值。假设变量与相互独立，当假设成立时，检验统计量为：



式中，—样本容量；

—与的相关系数

由假设检验原理可知，当给定显著性水平时，查分布表可以确认其置信区间，根据是否处于置信区间便可以判断假设是否成立，进而判断变量与是否独立。若与不独立，可以分别以上游电站下泄洪水过程和区间洪水过程为自变量和因变量构造回归方程，进而求解两部分洪水叠加后的洪水过程；若与独立，为简化计算，在仅考虑洪水历时的不确定性的情况下将两部分洪水过程叠加，再经河道演算后形成施工洪水过程。

* + 1. 泄流能力的不确定性

经过大量的工程观测与模型试验可以得出，水电站泄流能力与泄流建筑物的过水面积、糙率、湿周及底坡相关，一般用不对称三角形分布来描述其泄流能力的不确定性，其分布函数为：



式中，—泄洪能力的下限值；

—泄洪能力的平均值；

—泄洪能力的上限值。

其中均通过模拟泄流建筑物施工及其运行的统计资料来确定。

## 同步建设条件下导流风险率计算

* + 1. 导流风险估计方法

本文基于挡水建筑物的可靠性对导流风险进行定义，即认为在确定的导流时段内，堰前水位超过堰顶高程的概率为导流风险率。由于影响建筑物可靠性的因素复杂多变，目前尚未完全掌握其影响规律，需要针对具体工程采用适合的估计方法。目前。常见的导流风险估计方法有一次二阶矩法、JC法和Monte-Carlo法[84]。

* + - 1. 一次二阶矩法

一次二阶矩法(FOSM)是以随机变量的一次函数作为基础，结合变量的一阶矩和二阶矩概率统计参数，进而计算可靠指标的方法。而根据一次二阶矩法的状态函数线性化点的不同，可以将分为均值一次二阶矩法和改进一次二阶矩法。

(1)均值一次二阶矩法

其基本原理是将极限功能函数在一阶矩处用泰勒级数展开，并使之线性化后以功能函数的一阶矩和二阶矩之比作为可靠指标[85]。假设功能函数受个随机变量影响，将功能函数在均值处用泰勒级数展开，则有：









式中，—功能函数的一阶矩，即均值；

—功能函数的二阶矩，即标准差；

—可靠指标。

(2)改进一次二阶矩法

改进一次二阶矩法的原理与均值一次二阶矩法原理相似，区别在将功能函数在失效临界点上展开成泰勒级数，则有：



由于失效临界点位于极限状态曲面上，故有：



根据可靠度的定义，通常用迭代的方法计算得到可靠度：





式中，—为灵敏系数，表示第个随机变量对整体标准差的相对影响。

均值一次二阶矩法的计算较为简单，只是粗糙得选取其一阶矩和二阶矩，且功能函数线性化后与原函数相差较大，存在一定的计算误差，且计算精度较低，不适用于复杂系统的可靠性计算。而改进一次二阶矩法在均值一次二阶矩法的基础上进行改进，提高了可靠度计算的精度，但依然不能考虑随机变量的实际分布类型。

* + - 1. JC法

JC法也叫当量正态法，因被国际安全度联合委员会(JCSS)所采用而得名，是一种将非正态分布的随机变量转化为对应的正态分布从而间接求解可靠性的方法，通常适用于求解随机变量任意分布且相互独立的情况。

使用JC法需要满足转化前后随机变量的分布函数和概率密度保持不变，设非正态变量的分布函数为，概率密度函数为，的等效正态分布为，在转换后变量处有：





从上式与式可求得转换后变量的均值和标准差：





将转换后变量的均值和标准差代入改进一次二阶矩法即可求得JC法的可靠度。该方法物理意义明确，可适用于复杂系统，弥补了均值一次二阶矩法和改进一次二阶矩法的缺点，提高了计算精度。

* + - 1. Monte-Carlo法

蒙特卡洛法(Monte-Carlo)因乌拉姆和诺伊曼以赌城蒙特卡洛为秘密工作代号而得名，它以概率论和数理统计为理论基础，由于具有随机性的特征，又称随机模拟法。该方法的基本原理为：对统计数据进行随机抽样，然后用数值计算方法模拟一个完整的确定性或随机性过程，随后统计模拟结果得到可靠性指标的估计值[86]。假定功能函数，密度函数为，其中随机变量相互独立，运用Monte-Carlo求解可靠度主要为以下三步：

(1)从随机变量中按照密度函数进行随机抽样，获得每个变量的样本值；

(2)将获得的样本值输入功能函数，计算得到相应的，若，则认为该次模拟中结构失效；

(3)若共进行次模拟，其中结构失效出现了次，则根据大数定理可知，结构失效概率的估计值为：



根据Monte-Carlo法的求解过程可知，其计算精确度取决于模拟过程的次数，为得到更加接近于实际情况的模拟结果，其运算量很大，计算耗时较长，由人工完成计算存在较大的困难。然而随着电子计算机技术的不断发展，该问题得到了很大的改善，使Monte-Carlo法开始广泛运用于工程实践。因此，本文基于Monte-Carlo法进行导流风险率的计算。

* + 1. 梯级施工导流系统风险识别

在同步建设条件下，导流系统的施工洪水受到上游电站的下泄洪水及区间洪水影响，而施工期导流系统的抗洪能力较弱，不确定性风险因素较多，导流系统存在风险。根据前文的分析可知，导流系统的主要风险因素为：上游电站下泄洪水、区间洪水、区间洪水遭遇、河道洪水演进及自身泄洪能力。

在导流系统上游为在建电站条件下，根据电站是否发生风险，可以将其下泄洪水分为正常下泄洪水和溃堰洪水，此时下游导流系统的风险会受到上游电站溃堰风险的间接影响[87]。因此，导流系统的上游为在建电站或已建电站时的导流风险存在差异，需要分别构建风险计算模型。

* + 1. 基于Monte-Carlo法的导流风险率计算模型
       1. 上游为已建电站的导流风险率计算

根据前文对Monte-Carlo法的描述，可以得到上游为已建电站时导流风险率计算模型的基本原理为：综合考虑下泄洪水过程、泄流过程等不确定性因素，根据分布抽样模拟施工洪水从产生到入库，再到出库的完整洪水过程。通过调洪演算得到堰前水位分布，进而判断堰前最高水位是否超过堰顶高程；重复上述步骤次，通过统计方法处理不同方案组合下的成百上千次结果，得到漫顶次数，则导流风险。由前文分析可知，导流风险估计的具体计算步骤如下：

Step1：输入计算相关水文和水力参数，确定Monte-Carlo法的总模拟次数；并根据不同风险因素所服从的分布，通过计算得到各因素所对应的随机数；

Step2：基于假设检验，对上游电站下泄洪水与河道区间洪水进行独立性检验，若两洪水相关，则构造回归方程确定关系；若两洪水独立便作为独立变量进行叠加处理；

Step3：根据历史实测资料随机抽取已建电站的天然洪水过程，考虑电站控泄规则进行调洪演算，得到上游电站下泄洪水过程；

Step4：从洪水资料中随机抽取一组区间洪水过程，用分布随机数拟合上游电站下泄洪水过程及河道区间洪水过程，再以初始时间随机数拟合两部分洪水叠加得到下游导流系统施工洪水过程；

Step5：以三角随机数拟合下游导流建筑物泄流能力曲线，结合施工洪水过程对导流系统进行调洪演算，得到堰前最高水位分布及下泄洪水过程；

Step6：重复Step2~Step5的过程次，统计堰前最高水位超过堰顶高程次数，则上游为已建电站的导流系统漫顶风险率为。

* + - 1. 上游为在建电站的导流风险率计算

上游为在建电站条件下的导流风险率计算原理与上游为已建电站的基本相同，但因上游导流系统存在溃堰风险，在分析下游导流系统风险时不仅要考虑导流系统本身蓄泄洪水能力，还要需结合上游导流系统是否发生风险综合考虑。根据2.3.1.2中的分析，在上游导流建筑物规模确定的情况下，其洪水下泄有两种情况：

(1)上游电站导流系统未失效，洪水经导流建筑物正常下泄；

(2)上游电站导流系统失效，下泄洪水转变为溃堰洪水。

假定事件为上游导流系统失效，事件为下游导流系统失效，根据贝叶斯公式，则有：



式中，—上游导流系统失效的概率；

—下游导流系统失效的概率；

—上游导流系统未失效时，下游导流系统失效的概率；

—上游导流系统失效时，下游导流系统失效的概率，即连溃风险。

根据上述理论，假设上游导流系统A与下游导流系统B同步建设，具体风险率计算步骤如下：

Step1：确定Monte-Carlo法的总模拟次数；输入计算相关水文和水力参数，根据各参数计算不同风险因素分布所对应的随机数；

Step2：假定上游在建电站同样使用Monte-Carlo法计算导流风险，其总模拟次数也为，发生风险次数为，风险率为；

Step3：以上游在建电站是否发生风险为标准，将其下泄洪水过程分为两组：发生风险组则按照溃堰洪水计算下泄洪水过程，未发生风险组按照调洪演算计算下泄洪水过程；并从洪水资料中随机抽取一组区间洪水过程；

Step4：从发生风险组中随机抽取一组下泄洪水过程，用分布随机数拟合后，再以初始时间随机数拟合两部分洪水叠加得到两组下游导流系统施工洪水过程；以三角随机数拟合导流建筑物泄流能力曲线，对导流系统进行调洪演算，得到堰前最高水位分布；

Step5：从未发生风险组中随机抽取一组下泄洪水过程，其他步骤与Step4中一致，得到堰前最高水位分布；

Step6：分别重复Step4、Step5中的过程次，统计堰前最高水位超过堰顶高程次数分别为、；则上游为已建电站的导流系统漫顶风险率为。

## 本章小结

本章围绕梯级同步建设条件下导流风险这一核心问题，首先对导流风险进行定义，确定了基于围堰可靠度的导流风险。在考虑导流系统上游可能为已建或在建电站的前提下，从上游电站洪水下泄、区间洪水及洪水遭遇、河道洪水演进三个角度对导流系统施工洪水进行了分析，明确了各种条件下的施工洪水从形成到发展的全过程。基于施工洪水不确定性和泄流能力的不确定性，对影响施工导流不确定性的风险因素进行分析，并对挡水建筑物的可靠性进行了分析，分别构建了上游为已建电站和上游为在建电站的基于Monte-Carlo法的导流风险率计算模型。

# 同步建设下导流风险控制效益分配及决策

## 引言

在我国梯级电站开发格局下，梯级电站的建设改变了河道洪水时序分布，下游电站受上游下泄洪水及区间洪水共同影响。随着同一流域中电站数量逐渐增多，各电站之间的联系也逐渐加强。同步建设条件下，相邻的两个在建电站所组成的梯级施工导流系统，在流域上相互连通，其导流系统之间存在风险传递效应：上游电站的导流风险会通过洪水传导到下游，使下游导流风险增大。因此，若不建立风险控制机制对梯级导流系统风险进行控制，不仅影响导流系统本身的安全，也会威胁整个流域梯级的安全。

导流工程属于临时性工程，采用提高导流建筑物防洪标准的方法来降低导流风险增加了经济成本，需寻求更为经济可行的风险控制方法。在单一主体开发的流域内，由于各梯级水电站天然具有协同合作的基础，且考虑到上游下泄洪水对下游导流系统影响较大，当施工导流系统的上游建有调蓄能力较强的电站，通常利用上游电站调控其下泄洪水，进而控制导流风险。因此，本文以上游电站参与导流风险控制为例，分析导流风险控制对施工导流系统的影响。根据控泄原理可知，上游电站的控泄行为对电站本身及其下游的施工导流系统造成了一定的影响。其中，上游电站通过改变原有的洪水调度规则来控制下泄洪水，其发电机组无法处于最优的经济运行方式，可能存在风险成本及发电损失。另一方面，下游导流系统的施工洪水受上游影响，施工导流设计洪水降低，其导流风险和导流标准可能发生变化，存在风险效益、投资及进度效益。而上游电站控泄行为对电站自身及其下游施工导流系统的经济效益之和被称为控泄综合效益，可以认为控泄综合效益即为导流风险控制效益。

控泄综合效益是由上游控泄电站及下游导流系统合作所产生的，应合理分配给各梯级电站。不同的效益分配值对应的导流工程投资也有差异，从而对导流方案决策造成了一定的影响。因此，本章通过分析上游电站控泄成本与收益，建立梯级同步建设下的梯级电站效益分配模型，寻求合理的综合控泄效益分配比例；随后考虑分配结果对导流方案进行决策，选出最优导流标准组合方案，为控制同步建设下的施工导流风险提供了一条切实可行的思路。

## 控泄综合效益分析

在上游电站控泄下，控泄综合效益是评价导流风险控制方法可行性的重要指标，在进行效益分配前需对其数值大小进行分析。

* + 1. 上游电站控泄概况

在梯级开发过程中，已建电站需根据长系列洪水资料，在满足发电、供水、防洪、灌溉及航运等设计任务的同时，动态控制水库水位，按一定的洪水调度规则调蓄洪水。利用上游电站控泄来调控导流系统风险，实质是上游电站在满足自身运行约束的同时，额外增加了保障下游导流系统安全的约束。在双重约束下，上游电站需承担更重的防洪任务，为不降低电站的防洪能力，工程上一般通过降低汛限水位，增加防洪库容的方法控制下泄洪水。根据汛限水位调整依据的不同，该方法可以分为常规控制法和预报控制法两种。

在常规控制法下，上游电站考虑其设计任务及下游导流系统安全，根据流域历年洪水资料调整汛限水位，让电站在汛期保持设计汛限水位以下运行。而预报控制法则根据一定预见期内流域的水文气象预报信息动态调整汛限水位，在超标洪水出现前将库水位调整至汛限水位以下，利用增加的防洪库容拦蓄超标洪水。由于预报控制法对预报精度要求较高，预报信息所具有的不确定也带来了新的风险因素，在实际操作时很难按照理想状态进行洪水控制。因此，常规控制法在工程上应用较为广泛，本文所采用的控泄方法均为常规控制法。

* + 1. 上游电站经济效益计量

在工程实际中运用常规调度法时，要先根据所在流域的多年洪水资料与水库具体信息确定汛限水位，在汛期来临前以水库入流量和库水位为依据，判断是否需要增大下泄流量，保证在汛期使用腾出的库容拦蓄洪水，从而能确保下游施工导流系统防洪安全。当上游电站采用常规控制法进行控泄时，水库的兴利库容减少，控泄规则也发生改变，电站无法处于相对最优的洪水调度状态，可能给自身的防洪、发电等带来一定的影响。

上游电站经济效益是指上游电站因参与控泄而对自身所产生的经济效益，根据电站控泄原理可以分为三个部分：一是增大了电站本身防洪风险，二是产生了发电损失，三是电站调度管理费用。在控泄过程中上游电站虽然需额外承担一部分防洪任务，但一般认为降低汛限水位不会增加电站洪水防洪风险，且电站洪水调度规则是以自身防洪安全为前提所制订的，故认为控泄对电站防洪安全的影响可以忽略不计。而电站调度管理费用是指上游电站改变调度方式所支付的人工费、管理费等，由于这部分费用所需的计算资料较难获得，且调度管理费与其他费用相比较小，本文不予考虑。综上所述，在不考虑控泄对供水、通航等其他任务的条件下，本文认为上游电站控泄对自身的经济效益主要为发电损失。

* + - 1. 发电损失

在确定的时段内，上游电站控泄的发电损失为电站参与控泄和不参与控泄两种情况的发电量之差与上网电价的乘积。水电站的发电量主要与装机容量、发电流量、发电水头及发电时长有关，通过降低汛限水位进行控泄主要影响电站的发电流量和发电水头，可采用水头损失或单位电能耗水率的方法确定两种情况下发电量之差。

假设在时刻电站上游来流量为，若电站不参与控泄，经过时间后，其下泄流量为，发电水头为；而在控泄情况下，电站下泄流量为，发电水头为。由水能出力公式，可得到上游水电站第年控泄的发电量之差计算函数：



式中，—第年流域内单个汛期总时长；

—水轮机功率。

当缺乏洪水资料时，也可以根据电站长期运行所总结出的单位电能耗水率计算第年上游电站发电量之差：



式中，—单位电能耗水；

—第年上游电站预泄减少的库容。

假设施工期为年，则施工期内上游电站控泄所带来的发电损失为：



式中，—上网电价。

* + 1. 导流系统经济效益计量

在梯级施工导流系统建设过程中，导流系统经济效益指因上游控泄而使下游导流系统获得的效益。相较于无控泄条件，上游控泄在很大程度上削减了下游导流系统的施工洪水洪峰流量，使洪水在时间尺度上更加均匀，缓解了施工导流系统的防洪压力，降低了导流风险。

由于导流建筑物属于临时性建筑，从经济环保的角度去考虑，上游电站控泄使得导流难度得以减低，那么在保证导流系统安全的前提下，决策者可以适当降低导流标准。因此，可以从两个部分对施工导流系统经济效益进行讨论：一是降低了施工导流风险，存在导流风险收益；二是下游采用更低导流标准，减少了导流工程量，主体工程工期缩短，从而带来了导流标准收益，这两部分效益之和为施工导流系统经济效益。

* + - 1. 导流风险收益

导流风险收益是由上游电站通过控泄，降低下游导流系统风险所获得的。为评估上游控泄对导流风险的影响，可以通过期望值对导流风险损失进行量化。洪水期望损失是指施工期导流系统发生风险损失的期望平均值，其反映了导流风险发生的可能性及其所带来的后果。假设施工期的第年导流工程的导流标准所对应的重现期为，则导流风险收益为：



式中，—上游电站控泄年数；

—非控泄情况下第年下游导流风险；

—控泄情况下第年下游导流风险；

—导流系统在第年发生风险后的损失，为重现期的函数；

其中，发生风险后损失主要为基坑淹没后所造成的淹没损失：



式中，—基坑抽排水、清淤及施工条件恢复费用；

—围堰重修费用；

—基坑施工设备转移与恢复费用；

—因工期延误所导致的发电、贷款利率等费用。

* + - 1. 导流标准收益

导流标准的确定是导流工程建设中的重要环节之一，不同的导流标准下导流建筑物的尺寸与布置不同，直接影响导流工程投资与工程工期。导流标准收益是指在上游电站控泄情况下，下游导流系统采用不同的导流标准而产生的经济效益，主要由导流投资收益和导流进度收益组成。



式中，—导流投资收益；

—导流进度收益。

(1)导流投资收益

对导流工程而言，其工程总投资是由建设投资、流动资金及建设期利息这三部分所组成。在枢纽布置及导流方式等确定的情况下，第年导流工程投资可以通过公式计算：



式中，—导流工程投资，为重现期的函数；

—第年的建设投资；

—第年的流动资金；

—第年的导流建设期利息。

上游电站充分利用其调蓄作用控制下泄流量，改变了导流系统的施工洪水，假设非控泄条件下洪水重现期为，控泄条件下的洪水重现期为，则可以得到上游电站控泄的导流投资收益：



(2)导流进度收益

若上游电站降低导流标准，其导流建筑物的工程量与施工难度会相应降低，从而加快了主体工程施工进度，可能使下游电站提前投产运行。因此，在不考虑建设期利息变化的情况下，导流进度收益主要为提前投产所带来的发电效益。以发电机组为研究对象，用公式计算下游导流进度收益：



式中，—发电机组的个数；

—上网电价；

—第台发电机组的装机容量；

—第台发电机组年均发电时间；

—第台发电机组提前发电的年数。

* + 1. 控泄综合效益的确定

上游电站控泄综合效益为上游电站经济效益与导流系统经济效益之和，其实质上是从经济角度量化上游控泄行为对其影响范围内各电站的影响程度。上游电站经济效益主要为发电损失，导流系统经济效益包括导流风险收益和导流标准收益。由于水电工程建设周期较长，需考虑资金的时间价值，将电站控泄综合效益折算为基准年费用，则有：



式中，—折现率。

## 效益分配理论

效益分配是指各合作参与人对合作所产生的效益进行再分配的一个过程，一般以各参与人在合作中的角色、贡献度和承担风险量等为分配依据。以同步建设下上游电站控泄为例，上游电站通过预泄控制下泄流量影响了其发电效益，却给下游的施工导流系统带来了巨大的风险和投资收益，而这部分效益是由上下游电站通过合作所获得的，理应根据分配依据以一定的原则和方法进行效益分配，使上、下游电站都获得其应有的收益。

* + 1. 分配原则

合理的效益分配机制是开展合作的前提，而上下游电站合作不仅能降低下游导流系统风险，还能够实现对流域水资源的有效配置，提高梯级系统的整体效益，促进二者达成更为牢固的合作关系。若没有合理的效益分配机制，则上游电站参与合作的意愿较低，很难实现各梯级整体效益最优，由此可见遵循合理的效益分配机制的重要性。对于梯级电站而言，效益的合理分配要坚持以下三大原则：

(1)群体理性与个体理性原则

在进行效益分配前，首先需要确保合作的整体效益最大化，即整体梯级系统通过合作能获得的效益要大于各自独立运行的效益之和，满足群体理性的合作才能成立；同时，在效益分配后各水电站所获得的利益要比单独运行时更大，符合参与者在合作时的个体理性。

(2)客观公正原则

客观与公正是在效益分配时必须保证的原则。客观性是参与者对方案认同且接受的前提，要求选定分配方案需以科学理论为基础，不能仅凭主观意见。为保证公正性，要坚持“谁受益，谁补偿”，在确定各电站的效益分配比例时，不仅要考虑其资源投入情况及贡献，也要充分考虑电站承担的风险变化。

(3)最优分配方案唯一原则

从效益分配的结果来看，效益分配的最优方案存在且唯一，符合各利益群体的偏好。最优分配方案具有唯一性是指，当参与者对分配方案不满意，则会对该方案进行协商改进，直至得到各方都满意的分配结果。

* + 1. 效益分配方法

效益分配方法有很多，在合作前需要选用一种效益分配方法制订出各方利益相关者都认可的利益分配方案，不同的效益分配方法体现了方案制定者遵循的价值观的不同。常见的效益分配方法有：按比例分配法、单指标法、综合指标法和博弈论法。以下主要介绍按比例分配法、单指标法和综合指标法。

* + - 1. 按比例分配法

按比例分配法是指各梯级电站通过协商将控泄综合效益按照一定的比例进行分配。按照从施益电站和受益电站的分配比例不同，可以将按比例分配法分为7:3分配法和5:5分配法。该方法出现时间较早，因其简单易行在国内外均得到了一定的应用，但其分配比例是由人为协商规定的，很难协商出令各方满意的分配比例，在执行过程中往往存在诸多争执。

* + - 1. 单指标法

单指标法是指用某单个指标作为分配依据进行效益分配，通常会选用调节库容、装机容量等具有较高代表性的指标。假设有个电站参与合作，以调节库容为例计算各电站的效益分配比例，其计算公式如下：



式中，—第个电的调节库容；

—第个电站的效益分配比例。

由单指标法的计算原理不难看出，该方法计算简单且便于理解，但具有较大的局限性，不同的指标选取会导致效益分配结果差别很大。在实际工程中，影响梯级电站效益分配参数很多，不存在一个绝对的指标能代表各电站所有参数，故该方法不适用于复杂系统的效益分配。

* + - 1. 综合指标法

综合指标法是指进行效益分配时，选取多个具有代表性的指标，分别计算各水电站在不同指标下的分配比例，然后运用主观赋权法或客观赋权法从多个角度对各指标分别赋权，最后将指标权重与对应的分配比例进行加权平均，得到最终的分配比例。

根据指标赋权方法的不同，综合指标法可以分为多目标综合分析法、离差平方法、模糊综合评判法、TOPSIS法和熵权法。以TOPSIS法为例，在计算指标权重时，需先以各指标下分配比例为评价对象，以各评价对象的接近程度建立相对满意函数，然后用相对满意度计算指标权重。假设有个电站参与效益分配，则第个电站在综合指标法中的分配比例计算公式为：



式中，—第个指标的权重；

—在第个指标下的第个电站的分配比例；

—选取的指标个数。

可以认为综合指标方法是单指标法的加权综合，该方法在弥补了单指标法的最大缺陷的同时，还通过权重的取值引入了主客观意见，较单指标法更为合理；但由于该方法在指标选取环节具有较大的主观性，依赖于在不同指标下的效益分配值，具有人为因素干扰；且在计算分配比例时，没有考虑到各电站的贡献值及其风险，无法有效调动参与者的积极性，不利于合作长期有效的进行。

## 基于博弈论的效益分配模型

上述效益分配方法从各个角度分析了各梯级电站自身的重要指标对其分配比例的影响，却忽视了在工程实际中各电站之间存在的合作竞争关系对分配过程的影响，使得很难在保证客观公正的前提下将效益以各方满意的方式进行合理分配。因此，本文以在解决利益冲突方面表现突出的博弈论为基础，建立公平有效的效益分配模型，使各电站达成稳固的合作关系，进而确保导流系统的安全及水资源的充分利用。

* + 1. 博弈论概念

博弈论(Game Theroy)内涵十分丰富，其最早是一种关于游戏的理论，现多用来解决理性的决策个体或群体之间发生冲突与合作时的决策与均衡问题。在博弈论中，参与合作与竞争的各方为达成各自的目标和利益，必须考虑其他参与者的各种行为，从而选取对自己最为有利的行为方案。相较于其他理论，博弈论最大特点是理性个体行动间相互牵连，每个决策行为取决于其他理性个体的行动。

* + - 1. 博弈基本要素

一个完整的博弈过程一般会包含五个基本要素，分别为局中人、策略集、收益、信息和次序[88]。

(1)局中人

局中人是指在博弈过程中能独立进行决策，独立承担后果，并能最终获得相应收益的参与者。局中人可以是单独个体，也可以是一个集体，每个局中人在博弈中的地位是平等的。

(2)策略集

策略又称为战略，是指一个局中人在博弈中某个阶段做出的行为，而全体局中人所选择的全部策略的集合称为策略集。依据策略数量可以将博弈可以分为有限策略博弈和无限策略博弈。

(3)收益

在一场博弈结束后，各局中人从博弈中的所得或所失，称为该局中人的收益，它是所有局中人选定的策略所构成的策略集的函数。收益是各局中人在博弈中最重视的东西，它可能是正值，也可能是负值。

(4)信息

博弈信息是指局中人在选择策略过程中所掌握的有帮助的知识。若每个局中人都对行动前所发生的情况很清楚，则称博弈为完美信息博弈，否则为不完美信息博弈。从局中人之间对博弈各方面的相互了解程度又可以将博弈分为完备信息博弈和不完备信息博弈。

(5)次序

次序即局中人做出策略的先后顺序。在博弈中次序十分重要，即使是同样的局中人和相同的策略集，行动次序不同，其博弈结果也可能大相径庭。

* + - 1. 博弈类型的确定

按照博弈中的参与者之间能否达成具有一定约束力的协议，博弈论可以被分为合作博弈和非合作博弈两大类[89]。其中，非合作博弈认为每个决策个体都是理性的，会做出最大化自身的利益的决策，最终达成纳什均衡，其博弈结果的有效性是不确定的。而合作博弈则强调团体理性、效率与公平，局中人在考虑本身利益的同时，还需要考虑合作所结成的整体利益。合作博弈在经济、政治、国际关系等公众领域得到了广泛应用。

在梯级建设环境下，各梯级电站在空间上连通，水文水力联系密切，且都有优化水资源配置的共同目标，各电站在进行决策时会相互影响，故选用合作博弈理论对控泄效益进行分配是合理的。然而对于不同开发主体的水电站而言，各主体都想获得最大利益，想达成一个具有约束力的协议十分困难，且各主体间的博弈关系十分复杂。因此，本文假设所讨论的电站都属于同一开发主体，并基于合作博弈理论，对控泄综合效益进行分配。

* + 1. 合作博弈

合作博弈中假定各局中人之间存在一个具有完全约束力且能实施的协议，在这一条件下，各局中人因共同目标而结成一致行动的团体被称为联盟。与非合作博弈不同，合作博弈的分析对象是联盟，主要研究局中人之间会形成什么样的联盟，又是如何通过博弈分配合作所产生的收益。因此，本文从联盟和博弈的解两个方面对合作博弈进行介绍。

* + - 1. 联盟

假设为合作博弈中所有局中人的集合，为的子集，对于，称为一个联盟，则博弈中联盟总个数为。其中对于为的情况，此时所有局中人都不参与联盟；对应所有局中人都参与联盟的情况，也叫全联盟。

* + - 1. 合作博弈的解

当合作博弈中的局中人决定进行结成联盟时，其最关注的问题就是如何对联盟所产生的利益进行分配，即求取合作博弈的解。目前合作博弈中最常见的两种解概念为：核心和Shapley值。

(1)核心

核心是合作博弈中的一个解，在人合作博弈中，核心为分配集的一个子集。其中，函数为合作博弈的特征函数，满足且对于任意联盟，表示该联盟中各局中人相互合作所能获得的收益。若，假设局中人的收益为，且，则称向量为博弈的一个分配，所有可能的分配的集合称为分配集。其分配向量满足以下两个条件：

条件1：；

条件2：，有。

其中，条件1表示联盟中每位局中人所分的利益的总和与联盟的总利益相等，即已经将所有收益完全分配，满足联盟的集体理性；条件2则意味着核心中每个局中人所得都大于或等于其在任意一个联盟的所得，满足局中人的个体理性。核心能同时满足集体理性和个体理性，且为所有联盟中的最优分配，比较符合客观认知。但核心求解过程中存在一个致命缺陷，即可能找不到一种可以被所有联盟都接受的分配向量，核心为空集。

(2)Shapley值

在实际应用中，我们总是需要一个确定的效益分配方案来确保合作的顺利进行。随着合作博弈论的研究发展，国内外学者通过用期望效用来表示博弈中局中人的所面临的所有选择，进而分析其参与博弈的“价值”，提出了许多具有唯一性的解概念，其中应用最为广泛的就是Shapley值。

Shapley值的概念是由诺贝尔经济学奖获得者劳埃德·S·夏普利（Lloyd S. Shapley）于1953年提出的，它是通过局中人在联盟中的边际贡献的期望效用为标准进行效益分配[90-92]。其定义如下：假设在一个合作博弈中所有局中人都参与联盟，其中分配向量为。对于，将联盟的成员加入联盟和未加入联盟的收益之差视为成员对该联盟的边际贡献。因此，各局中人所分配的利益为：



该分配向量与局中人编号顺序相关，合作博弈中的个局中人可以通过随机排序得到种编号顺序，对应个不同的分配向量，其中各种编号顺序出现概率均为。联盟成员的Shapley值等于该成员对其所有可能的联盟的边际贡献平均值，即







式中，—联盟中成员的Shapley值，其中；

—成员对联盟的边际贡献；

—联盟的权重，描述了任意一个局中人加入联盟的概率。

由上述公式可知，在合作博弈中各局中人都存在唯一的Shapley值，且能全面考虑局中人对所有可能的联盟带来的边际贡献，并以此为依据进行效益分配，兼顾了集体理性和个体理性，能有效促进联盟的稳定。

* + 1. 基于Shapley值的效益分配计算
       1. 梯级水电站的联盟分析

在合作博弈中联盟占有十分重要的地位，在求解合作博弈之前需分析各水电站之间会形成怎样的联盟。以图2.1同流域中串联的三个水电站作为研究对象，由于上游控泄电站与下游两个同步建设的电站同属于一个开发主体，共同承担优化水资源配置的开发任务，各电站的决策会倾向于开发主体整体收益的最大化。根据参与博弈的人数，其博弈类型可以分为双人博弈，三人博弈等。因篇幅原因，本文以三个梯级电站均参与博弈为例，将开发主体的整体效益作为联盟收益，对三方参与者效益分配分析。

假设所有电站均参与合作博弈，即参与成员集合为，其中1代表上游控泄电站，2、3分别代表同步建设的两个在建电站。根据合作博弈中对联盟的定义，将上游控泄电站采取控泄措施、下游在建电站降低导流标准视为参与联盟，三个电站可能组成的联盟共有个，分别为、、、、、、、。应当明确的是，上游电站控泄是下游在建电站降低导流标准的前提，不存在下游在建电站单独参与联盟的情况。故可以认为上游控泄电站的行动次序在下游电站之前，联盟、、收益为零。在上游控泄方式确定的条件下，联盟中上游电站发电损失为，下游两电站的导流标准效益分别为、，导流风险收益分别为、。该合作博弈的特征函数可以写为：



* + - 1. Shapley值计算

通过对合作博弈的特征函数的分析，运用式可以得到上游控泄电站1，下游在建电站2及下游在建电站3的Shapley值，具体求解过程如下表所示：

表3.1 上游控泄电站1效益分配值计算过程表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  | | | |

表3.2 下游在建电站2效益分配值计算过程表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  | | | |

表3.3 下游在建电站3效益分配值计算过程表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  | | | |

根据表3.1、表3.2、表3.3即可求得三个电站的Shapley值。由各电站的Shapley值可以看出，梯级电站所组成合作联盟含有一定的工程特征，即各级电站在空间上相互连通，一旦上游电站参与合作，下游电站的洪水参数必然发生改变。从开发主体的整体利益来看，无论上下游的三个梯级电站是否参与联盟，都会对效益分配造成影响。各电站的效益分配比例可以由Shapley值计算得出：



假设联盟控泄收益，为同时满足集体理性与个体理性，需满足公式。



以上内容为是对三人博弈模型的介绍，若仅有两个电站参与联盟，可根据前文所描述的合作博弈理论建立双人博弈模型，对合作产生的效益进行分配，本文则不再进行赘述。

## 同步建设下导流方案多属性群决策

在导流工程建设中，人们总是希望能在导流风险率允许的条件下，在最短的工期内，用最少的费用将导流工程建设完成，给主体工程创造良好的建设环境。而在梯级同步建设环境下，各梯级电站之间相互影响，导流方案的决策有了新的变化。由前文的分析可知，下游施工导流系统受到上游控泄电站或在建电站的影响，其导流风险有所改变；在上游控泄情况下，对产生的综合控泄效益进行分配后，下游在建电站的工程投资也同样发生了改变。此时，对流域梯级电站的开发主体而言，在上游已建电站的影响下，下游同步建设的两电站采用何种导流方案组合能取得最优的工程技术经济效益，成为了一个亟待解决的问题。

* + 1. 多属性群决策概述

多属性决策(Multiple Attribute Decision Making,MAMD)也被称为有限方案多目标决策，一般指决策者以多个属性为决策依据，从有限的方案中选择最佳方案的决策问题，目前已经广泛应用于工程、社会、经济等多个领域。随着社会的发展，决策问题的复杂程度的日益增加，单个决策主体受限于自身的经验与决策能力，难以对决策问题进行全面的评价。为满足决策要求，让多个决策主体参与决策的各个阶段，这类决策被称为多属性群决策。

多属性群决策研究一个群体如何共同进行一项决策活动，其关键在于对决策者偏好的集结。在群决策过程中，不同决策者的专业背景、个人偏好及评判水平存在差异，各决策者会先对备选方案给出自己的偏好信息，然后决策群体通过某种决策规则将个体偏好信息集结形成群体偏好信息，最后使用群体偏好信息对方案的水平进行评价得到最终决策结果[93]。根据决策要素的定义，多属性群决策体系可以分为决策层、指标层和方案层，其层次结构如图3.1所示。



图3.1 多属性群决策体系的层次结构图

施工导流方案涉及的利益主体众多，其决策过程需多个相关单位共同参与。其中，业主、设计和施工单位作为工程的主要负责单位，在决策过程中起主导作用，为该导流方案决策问题的决策主体。本文假定各决策者均为理性主体，他们在决策过程中仅受自身的经验及决策指标信息的影响，且是公平合理的。因此，本文以多个相关利益主体为决策者，对导流方案的各个属性进行评价，讨论在同步建设环境下导流方案的决策问题，多属性群决策的流程如图3.2所示。



图3.2 多属性群决策流程图

* + 1. 决策基本要素
       1. 决策指标的确定

由于不同的导流方案下导流建筑物的规模有所不同，对应的导流风险、工程投资及建设工期也不同。因此，在导流方案的决策中，一般选取确定性费用，不确定性费用和施工强度作为决策指标。

(1)确定性费用

确定性费用指施工导流系统的建设成本，主要包括施工准备费用、挡水建筑物及泄水建筑物的建设费用等，属于成本型指标。除此之外，在梯级同步建设环境下，还包含合作博弈的效益分配费用。在导流方案确定的情况下，确定性费用可由下式估算：



式中，—施工准备费用；

—挡水建筑物建设费用，包括上、下游围堰；

—泄水建筑物的建设费用；

—导流系统控泄效益分配费用。

(2)不确定性费用

从经济指标的角度对工程建设和使用中的不确定性因素进行量化后的费用为不确定性费用，属于成本型指标，是导流方案决策的重要评价指标之一。在导流工程中，施工洪水是导流系统中最主要的不确定性因素，一般用围堰发生风险的概率与发生风险后的风险损失估算不确定性费用。由于在梯级建设环境下导流风险发生后，溃堰洪水会继续向下游传播，此时根据导流系统的下游是否采取一定的防护措施，风险损失可以分为直接损失和间接损失。在围堰运行的第年，施工洪水所导致的不确定性费用为：



式中，—不确定性费用；

—围堰运行年限；

—第年发生风险后基坑还原、围堰重建等直接工程费用；

—第年发生风险后工期延误导致的直接发电损失；

—第年发生风险后给下游带来的间接损失；

—第年发生风险的概率；

—折算成到基准年的折现率。

(3)最大平均施工强度

为保证主体工程的正常施工，导流工程一般需在确定的时间段内完工。在比较各导流方案的施工难度时，通常选取最大平均施工强度作为决策指标，该指标属于成本型指标。在考虑截流历时及基坑抽排水时间的情况下，最大平均施工强度为：



式中，—施工期内的第个月的施工强度；

—导流工程施工总月数。

* + - 1. 指标规范化

为方便计算，将各方案的决策指标值表示在一个矩阵中。假设在某个决策问题中，有个备选方案和个决策指标，可以构造决策矩阵，



式中，—第个方案的第个评价指标值。

在多属性决策中，各决策指标之间因量纲、类型的不同而存在不可公度性，即没有统一的衡量标准。因此，需对决策矩阵进行规范化，使各决策方案在指标值上具有可比性。常见的规范化方法有向量归一法、极差变化法和比重变化法等，针对不同类型的指标计算公式有所不同，规范化方法的选用一般根据指标数值及决策要求确定。由于在导流方案的决策指标中成本型指标较多，故下列计算主要介绍成本型指标的规范化。假设第个方案的第个评价指标规范后的值为，则可以得到隶属度矩阵，



其中可以用式、式或式进行计算，分别对应向量归一法、极差变化法和比重变化法中关于成本型指标的部分。







* + - 1. 指标权重的确定

确定指标权重是多属性决策过程中重要的步骤之一。目前确定指标权重的方法大致有两类：一类是基于决策者偏好的主观赋权法，另一类是基于隶属度矩阵的客观赋权法。这两类赋权方法均有其优缺点，其中主观赋权法虽能在最大程度上反映决策者的主观意见，但具有较大的主观随意性；而客观赋权法体现了决策方案在指标上的特征，但却受数据波动影响较太大。因此，本文将主观权重和客观权重耦合得到的综合权重作为决策的指标权重。

(1)主观权重

主观权重是决策系统中反映决策者主观能动性的重要因素。在梯级同步建设环境下，即使两个在建电站同属一个开发主体，其设计和施工单位也可能并不相同。因此，在这个多属性群决策模型中，不同决策者对相同指标所给出的主观权重有所不同。

本文采用最优-最劣法(BMW)确定指标的主观权重。该方法要求决策者先选取最优和最劣的两个决策指标作为评价标准，并采用1-9分制分别确定其他指标相对于最优指标的重要性及相对于最劣指标的最不重要性，通过多轮比较后得到两组比较向量，最后根据数学规划原理，计算决策者对各决策指标的主观权重[94]。对每位决策者重复上述过程，得到每个决策者对决策问题中所有指标的权重集合。假设有一个由名决策者组成的决策群体，对个指标进行赋权，用表示决策者对指标的权重的评价值，则主观权重集合可以表示为：



(2)客观权重

本文采用熵权法确定客观权重，该方法的原理是根据决策指标的差异程度确定指标的信息熵。在多属性决策问题中，一个指标的变化程度越大则熵值越小，而信息熵越小则表示该指标信息的在方案评价中的作用越大，则赋予更高的权重。以隶属度矩阵中的值为计算对象，则第个决策指标的客观权重表示为：







式中，—第个决策指标在第个方案中的评价值；

—第个决策指标的熵。

(3)综合权重

在实际的决策过程中，为得到满足主观意向与客观特征的综合权重，一般采用集成方法将主观权重和客观权重进行耦合。目前常见的集成方法有加法集成法、离差极小化法、极差最大化法及基于客观修正主观法等[95]。本文采用离差极小化法求解综合权重。该方法的主要思想是不同权重之间寻求妥协或一致，使综合权重与主、客观权重的偏差最小化，从而得到一个相对均衡的权重值。

假设共有个决策指标，决策者集合为，决策者的主观权重向量为，由熵权法计算得到的指标客观权重为，构建综合权重向量的线性组合，



式中，—分别为主观权重和客观权重所对应的权重系数。

根据离差极小化法的原理，以和、的离差最小为目标，对权重进行最优化组合处理，目标函数的最优化一阶导数条件的线性方程组表达式为：



通过求解可以求得权重系数，将其归一化后得到，，则决策者的最终的综合权重向量为：



得到综合指标权重后，将隶属度矩阵与指标权重向量相乘能得到决策者的加权决策矩阵，代表了决策者对各方案中所有指标的评价值。



其中，代表决策者对第个方案的第个指标的加权决策指标值。同理，其他决策者的加权决策矩阵可以用相同的方法得出，可以得到与决策者的数量相同的加权决策矩阵。

* + 1. 导流方案多属性群决策模型

群决策是决策群体对决策问题通过讨论，协商等方式对决策方案进行的集体决策。由前文可知，各决策者根据各自的主观判断结合客观条件得到加权决策矩阵，反映了决策者对各决策指标评价信息。在决策过程中，由于不同的决策者的技术背景、评价标准和个人偏好存在差异，其给出的决策矩阵也可能存在较大的差异。因此，多属性群决策理论的研究重点在于对决策群体信息的集成，及寻求群体决策与个体意见最为一致的决策方案[96, 97]。目前关于多属性群决策方法有很多，如熵权法、基于模糊偏好法、TOPSIS法、基于粗糙集法以及加权集成算子方法等。本节提出一种基于TOPSIS法多属性群决策模型，该模型在加权决策矩阵的基础上，采用基于矩阵相似度计算决策者权重，并利用TOPSIS法得到各方案的综合评价值，进而对方案进行排序。

* + - 1. 基于矩阵相似度的决策者权重

决策者权重取决于决策者评价信息的可靠性和一致性，本文通过比较决策者的加权决策矩阵来对其信息质量进行判断。矩阵相似度法是一种基于偏差元素的矩阵对比方法，其基本原理为：若矩阵和矩阵在相同位置的元素值相等，则在矩阵点除矩阵而获得的商矩阵对应的位置出的值为1[98]。已知代表决策者的加权决策矩阵，记，，，则基于矩阵相似度的决策者权重计算过程如下：

为度量决策者与决策者之间的一致性，根据矩阵相似度法的定义可得，加权决策矩阵与的相似度为：



由此可得决策者之间的相似矩阵为，



该矩阵包含了所有加权决策矩阵相互比较的相似度，其中，当时，。用群体相似度表示决策者与其他决策者的相似度之和，则有，



群体相似度越大，代表该决策者的决策矩阵越符合群体一致性，即决策者信息的一致性越高，应赋予更大的权重，反之则权重更低。决策者的决策者权重为，



* + - 1. 基于TOPSIS的决策方法

将决策者权重分别与其所对应的加权决策矩阵相乘，再相加集结得到群体加权决策矩阵，



得到群体加权决策矩阵后，决策群体需使用决策方法对矩阵中的信息进行处理分析，得到该决策者对各决策方案的评价值，进而获得方案排序。根据决策群体是否提供偏好信息及偏好信息特征的不同，决策方法的类型也有所不同。具体分类见表3.4。

表3.4 常见决策方法表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 偏好信息 | 偏好信息特征 | 常用方法 |
| 无偏好信息 | 无 | 优势法、maximin法。 |
| 有偏好信息 | 基准水平 | 连接法、分离法。 |
| 排序 | 字典序法、排列法、蒙特卡洛法、DEA模拟法。 |
| 基数 | 线性分配法、简单加性加权法、层次分析法、TOPSIS法、ELECTRE法、PROMETHEE法。 |

决策方法的选择是决策群体对信息的处理方式的体现，目前最为常用的是基于属性基数偏好信息的决策方法。逼近理想解法的排序法(简称TOPSIS法)是一种距离综合排序法，它提出了理想解和负理想解的概念，其中理想解是指决策指标都为最优的方案，代表所有决策者的共同期望，是决策群体的一致性的体现。该方法以各方案评价值与理想化目标的相对接近度作为依据对备选方案进行评价，认为与理想解距离最近且离负理想解最远的方案即为最优方案[99]。基于加权决策矩阵，TOPSIS法的决策过程如下：

本文选取的决策指标均做过标准化处理，故理想解和负理想解由下式计算可得，



式中，—第个方案的第个指标的加权决策指标值；

—在加权决策矩阵第列中的数值最小值，即最优值；

—在加权决策矩阵第列中的数值最大值，即最劣值。

得到理想解和负理想解后，计算每个方案到理想解和负理想解的欧式距离：



式中，—第个方案到理想解的距离；

—第个方案到负理想解的距离。

仅根据两个欧式距离对备选方案进行排序，会出现方案之间难以对比的情况，故TOPSIS法用相对贴近度去判断方案的优劣，计算公式为：



式中，—备选方案的相对贴近度。

其中，，越接近于1表示方案越接近理想解，即方案越优；越接近于0表示方案越接近负理想解，方案则越差，通过大小可以得出方案的优先次序。

* + - 1. 多属性群决策过程

综上所述，梯级同步建设环境下，导流方案多属性群决策模型的决策过程如下所示：

Step1：由导流方案特征及专家意见挑选出确定性费用、不确定性费用、施工强度、综合控泄效益四个决策指标，确定最初的决策矩阵；

Step2：根据决策要求，利用式、式或式对决策矩阵进行规范化，得到隶属度矩阵；

Step3：采用最优-最劣法计算得到决策者对决策指标的主观权重，利用式、式、式计算各决策指标基于熵值的客观权重；

Step4：为使指标权重同时满足主观意向和客观特征，使用离差极小化法求解综合权重，并将综合权重与隶属度矩阵相乘得到决策者的加权决策矩阵；

Step5：重复Step3和Step4，直到得到所有决策者的加权决策矩阵集合；

Step6：通过比较各决策者的加权决策矩阵，判断决策者评价信息的质量，并基于相似矩阵解决策者权重；

Step7：将决策者的权重和加权决策矩阵等决策群体信息结合，得到最终的加权决策矩阵；最后采用基于TOPSIS的决策方法，以各导流方案的相对接近度作为评价标准，对备选方案进行排序。

## 本章小结

本章针对串联水电站同步建设环境下导流风险调控问题，探讨了在上游已建电站参与控泄时对导流系统经济及方案决策层面的影响。首先对上游电站控泄的成本与效益进行计量，讨论了上游电站参与控泄的可能性；并在此基础上建立基于合作博弈理论的Shapley值效益分配模型，研究梯级水电站之间的形成的联盟类型，探索合理的效益分配方式，进而解决益分配不均的矛盾。考虑效益分配及风险变化，建立以业主、设计、施工单位为决策群体的导流方案多属性决策模型，以同步建设的两个导流系统为决策对象，运用主客观综合赋权法确定指标权重，利用矩阵相似度法确定决策者权重，并基于TOPSIS法对评价值进行集结，从而获得控泄条件下的导流方案排序。

# 工程案例分析

## 工程概况

某流域拟规划建设水电站A和水电站B，按照可行性研究报告中拟定的工程规划，两个水电站将采用同步建设的开发模式进行开发建设。其中水电站A为混凝土重力坝，多年平均流量1360m3/s，正常蓄水位为592m，对应库容0.112亿m3，坝顶高程595.00m，最大坝高54m，电站装机容量330MW，开发任务以发电为主、兼顾下游生态用水；水电站B坝址位于水电站A坝址处下游9.0km，为混凝土重力坝，多年平均流量1370m3/s，正常蓄水位为577.0m，对应库容0.186亿m3，坝顶高程581m，最大坝高63.0m，电站装机容量为360MW，开发任务以发电为主。两电站均为二等大(2)型工程，其主要建筑物为2级建筑物。根据可行性报告可知，受地形地质条件限制，两个工程的围堰型式为土石围堰，且施工导流均采用分期拦断河床、围堰全年挡水的导流方式，其中一期束窄河床泄流，二期泄洪闸泄流。

在水电站A和水电站B的上游有一个已建电站G，三个电站串联分布(如图2.2所示)，且同属一个开发主体。电站G的装机容量为3600MW，多年平均发电量147.9亿kW·h，是一座以发电为主，兼有防洪、拦沙等综合效益的大(1)型工程。水库坝址以上控制流域面积68512km2，正常蓄水位为850.00m，死水位790.00m，汛限水位841.0m，总库容53.90亿m3，其中调洪库容10.56亿m3，调节库容38.82亿m3，为季调节电站。从提高梯级系统安全和降低导流成本考虑，拟通过电站G协助电站A、B的施工导流。

## 导流备选方案

根据《水电工程施工组织设计规范》（DL/T5397-2007），水电站A和水电站B的次要建筑物级别为4级，土石围堰的设计洪水标准为20～10年一遇。水电站G作为流域中调节能力较强的电站，可对其流域下游的洪水进行统一调蓄及调度，能在较大程度上影响下游导流系统的施工洪水。

电站G的原始汛限水位为841.0m，计划通过减低汛限水位的方法控制下泄洪水。为分析上游控泄对导流系统的影响，决策出同步建设条件下最优的导流标准组合方案，本文以电站G的两个汛限水位(838.4m、836.2m)与电站A、B的两个导流标准(10a、20a)分别进行组合得出八个导流方案，再加上当电站G不参与控泄时(汛限水位841.0m)，电站A、B均采用20a的导流标准的对比方案，初步拟定以下九套备选方案，如表4.1所示。

表4.1 备选方案表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 备选方案 | 电站G | 电站A | | 电站B | |
| 汛限水位(m) | 导流标准 | 设计流量  (m³/s) | 导流标准 | 设计流量  (m³/s) |
| 方案1 | 838.4 | 10年一遇 | 6080 | 10年一遇 | 6375 |
| 方案2 | 10年一遇 | 6080 | 20年一遇 | 6920 |
| 方案3 | 20年一遇 | 6600 | 10年一遇 | 6375 |
| 方案4 | 20年一遇 | 6600 | 20年一遇 | 6920 |
| 方案5 | 836.2 | 10年一遇 | 6080 | 10年一遇 | 6375 |
| 方案6 | 10年一遇 | 6080 | 20年一遇 | 6920 |
| 方案7 | 20年一遇 | 6600 | 10年一遇 | 6375 |
| 方案8 | 20年一遇 | 6600 | 20年一遇 | 6920 |
| 方案9 | 841.0 | 20年一遇 | 6600 | 20年一遇 | 6920 |

## 施工导流风险率计算

* + 1. 计算参数
       1. 水文参数

以电站G两个典型年洪水为典型，按照同一放大倍比计算得到的各频率设计洪水过程线，其中G~A区间洪水采用最近的水文站设计洪水成果按面积放大而得。由于洪水过程具有不确定性，参考历年洪水和实测洪水资料，认为水电站G及G~A区间的洪峰流量及各时间段内最大洪量均符合P-Ⅲ型分布，采用矩法进行参数粗估，再通过适线确定洪水均值、离势系数、离差系数等统计参数。各区域洪水的水文设计及统计参数如表4.2、表4.3所示。

表4.2 电站G坝址处洪水水文参数

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 单位 | 设计值 | | | | 统计值 | | |
| P=0.1% | P=0.2% | P=1% | P=2% | 均值 | Cv | Cs/Cv |
| *Q*m | m3/s | 9950 | 9460 | 8230 | 7690 | 4900 | 0.22 | 5 |
| *W*24h | 亿m3 | 8.36 | 7.95 | 6.92 | 6.47 | 4.12 | 0.22 | 5 |
| *W*3d | 亿m3 | 20.9 | 19.9 | 17.7 | 16.7 | 11.3 | 0.19 | 5 |
| *W*7d | 亿m3 | 41.2 | 39.6 | 35.6 | 33.7 | 23.7 | 0.17 | 5 |

表4.3 G~A区间洪水水文参数

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 单位 | 设计值 | | | | 统计值 | | |
| P=0.1% | P=0.2% | P=1% | P=2% | 均值 | Cv | Cs/Cv |
| *Q*m | m3/s | 4600 | 4270 | 3450 | 3090 | 1030 | 0.40 | 4 |
| *W*24h | 亿m3 | 2.41 | 2.24 | 1.86 | 1.69 | 0.61 | 0.35 | 4 |
| *W*3d | 亿m3 | 4.84 | 4.54 | 3.83 | 3.50 | 1.36 | 0.31 | 4 |
| *W*7d | 亿m3 | 8.09 | 7.62 | 6.51 | 6.03 | 2.46 | 0.28 | 4 |

根据洪峰流量序列对电站G及G~A区间的洪水进行分布假设检验，取置信水平=0.05%，计算结果显示不在置信区间内，故可以认为两部分洪水是互相独立的变量。

* + - 1. 控泄规则

在满足电站防洪及发电任务要求的前提下，综合考虑流域综合效益及下游防洪风险，制定上游水电站G的控泄规则(以汛限水位为841.00m为例)。涨水期的具体控泄规则如下：

(1)当库水位超过841.00m但低于848.41m时，且入库流量大于3000m3/s时，超出部分拦蓄一半泄一半；

(2)当库水位超过848.41m时，且入库流量<8230m3/s(重现期100年一遇洪峰)和水库水位小于850m时，水库按不大于5810m3/s控泄；

(3)当库水位超过848.41时，且入库流量>8230m3/s(重现期100年一遇洪峰)时，水库敞泄；

(4)当水库水位大于850m时，水库按敞泄方式运行，确保工程安全。

在退水段情况下，对于入库流量<6960m3/s(重现期20年一遇洪峰)，下泄流量按最大不超过4980m3/s控制；当水位达到841m时，水库保持在汛期限制水位841m，不再降低水位。根据上述控泄规则，则在一个汛期内电站G的典型洪水过程及泄流洪水过程如图4.1所示。

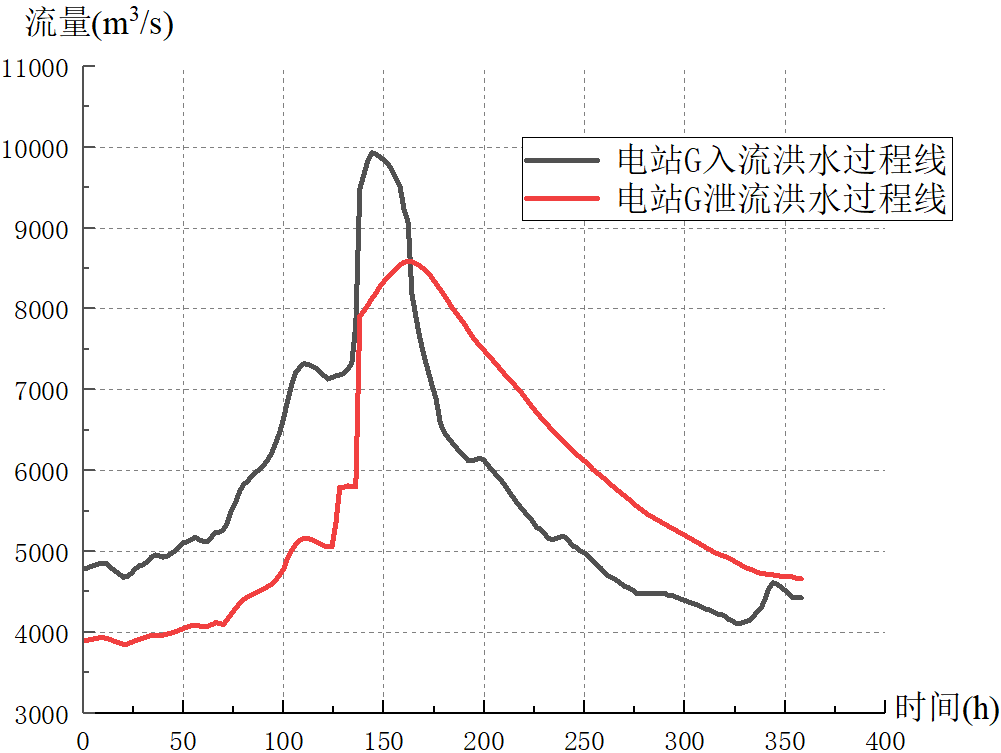


图4.1 控泄条件下的洪水过程线

* + - 1. 洪水演进参数

根据各水文站的实测洪水资料，电站G~A区间河段长度为37.3km，河道平均纵比降为3.8‰，坡底糙率取0.059；河道洪水平均历时为3h，区间洪水平均历时为1h。结合上述参数通过马斯京根法计算电站G的调蓄后的下泄洪水过程线，再加上区间同频率区间洪水过程线，即可推求该频率条件下电站A相应施工洪水过程。

电站A与电站B坝址处相距仅9.0km，且两岸岸坡陡峻，河谷呈“V”字形，洪水演进速度快，加上A~B区间内无支流汇入，故在计算电站B的施工洪水时，可忽略A~B区间洪水影响，不考虑该河段的洪水调蓄作用。

* + - 1. 泄流水力参数

通过大量的原型观察及模型试验资料分析，采用不对称三角形分布描述泄流能力的不确定性，各电站泄流能力分布参数取值见表4.4。

表4.4 各电站泄流水力参数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 电站 | 泄流能力下限 | 平均泄流能力 | 泄流能力上限 |
| 电站G | 0.97 | 1.00 | 1.04 |
| 电站A | 0.98 | 1.00 | 1.01 |
| 电站B | 0.99 | 1.00 | 1.02 |

* + - 1. 溃堰洪水计算参数

在进行电站A溃堰洪水计算时，以A~B区间河道为计算断面，考虑在不同导流标准下的挡水围堰遇超标洪水的溃堰洪水过程。电站A采用的是土石围堰，根据大量历史实测数据可知，其堰体溃决形式一般为漫顶渐溃。通过式计算溃堰洪峰流量，各计算参数见表4.5。

表4.5 溃堰洪水计算参数表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 工况名称 | | 堰前水位  (m) | 围堰高度  (m) | 围堰宽度  (m) | 库容  (×108m³) | 溃堰洪峰流量  (m³/s) |
| 一期导流 | 10年一遇 | 587.3 | 20.0 | 74.0 | 0.0648 | 12526.6 |
| 20年一遇 | 588.2 | 21.0 | 77.9 | 0.0765 | 14529.6 |
| 二期导流 | 10年一遇 | 591.3 | 23.0 | 88.5 | 0.1283 | 23613.9 |
| 20年一遇 | 592.4 | 24.1 | 93.4 | 0.1470 | 24128.4 |

* + 1. 导流风险率计算成果

本文的风险率计算均采用实验室自用的基于Dephi编程的风险计算程序。根据2.5.3中所建立的Monte-Carlo风险率计算模型，基于上述风险计算参数，以典型年洪水作为水电站G的上游来水，选取不同的起调水位通过调洪演算及随机抽样确定下泄洪水，再与区间洪水过程叠加即可推算出受电站G影响的导流系统施工洪水过程线。在考虑水电站A溃堰风险的前提下，由施工洪水过程及溃堰洪水计算参数，根据2.3.1.2中的计算步骤，推求溃堰洪水过程线。

假设在电站A发生溃堰的前提下，电站B发生溃堰的风险称为连溃风险，通过Monte-Carlo法耦合随机变量，抽取电站A的溃堰洪水过程，对电站B进行调洪演算得到连溃风险。连溃风险计算成果见表4.6。

表4.6 连溃风险计算成果

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 导流时段 | 电站A | | 电站B | | 模拟次数 | 发生风险次数 | 连溃风险(%) |
| 导流标准 | 围堰高程(m) | 导流标准 | 围堰高程(m) |
| 一期导流 | 10a | 588.5 | 10a | 574.0 | 20000 | 14462 | 72.31 |
| 20a | 575.2 | 13521 | 67.60 |
| 20a | 589.5 | 10a | 574.0 | 14924 | 74.62 |
| 20a | 575.2 | 13968 | 69.84 |
| 二期导流 | 10a | 593.0 | 10a | 579.0 | 16334 | 81.67 |
| 20a | 580.2 | 15238 | 76.19 |
| 20a | 594.1 | 10a | 579.0 | 16648 | 83.24 |
| 20a | 580.2 | 15634 | 78.17 |

电站A在第2年2月到第3年10月为导流一期，而在第3年11月到第5年11月为导流二期；电站B在第1年10月至第2年12月为导流一期，而在第3年1月至第5年1月为导流二期，两工程计划同时开工。根据导流进度安排，电站A的导流工程经历四个汛期，而电站B经历三个汛期。在考虑连溃风险的前提下，设定Monte-Carlo模拟次数为20000次。先根据式计算水电站A的导流风险率，通过调洪演算计算未发生风险下的洪水过程线，再通过表4.5中的溃堰洪峰流量模拟生成电站A发生风险后的溃堰洪水过程线，然后基于贝叶斯原理，根据式计算水电站B在不同导流标准下的导流风险率。以前文拟定的9个备选方案为例，在各导流时段内电站风险率计算成果如表4.7所示。

表4.7 逐年各备选方案导流风险率（单位：%）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 备选方案 | 电站G  汛限水位(m) | 电站A导流风险率 | | | | 电站B导流风险率 | | | | | |
| 不考虑连溃 | | | 考虑连溃 | | |
| Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ |
| 方案1 | 838.4 | 5.34 | 5.34 | 3.18 | 3.18 | 5.88 | 4.11 | 4.11 | 9.43 | 8.26 | 6.58 |
| 方案2 | 5.34 | 5.34 | 3.18 | 3.18 | 5.43 | 3.78 | 3.78 | 8.75 | 7.65 | 6.08 |
| 方案3 | 4.91 | 4.91 | 2.77 | 2.77 | 5.88 | 4.11 | 4.11 | 9.25 | 7.99 | 6.30 |
| 方案4 | 4.91 | 4.91 | 2.77 | 2.77 | 5.43 | 3.78 | 3.78 | 8.59 | 7.43 | 5.84 |
| 方案5 | 836.2 | 5.16 | 5.16 | 2.70 | 2.70 | 5.62 | 3.92 | 3.92 | 9.06 | 7.93 | 6.02 |
| 方案6 | 5.16 | 5.16 | 2.70 | 2.70 | 5.16 | 3.53 | 3.53 | 8.39 | 7.28 | 5.49 |
| 方案7 | 4.80 | 4.80 | 2.55 | 2.55 | 5.62 | 3.92 | 3.92 | 8.93 | 7.72 | 5.94 |
| 方案8 | 4.80 | 4.80 | 2.55 | 2.55 | 5.16 | 3.53 | 3.53 | 8.27 | 7.11 | 5.43 |
| 方案9 | 841.0 | 5.11 | 5.11 | 2.96 | 2.96 | 5.65 | 3.95 | 3.95 | 8.93 | 7.74 | 6.15 |
| 注：表中Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ分别代表工程开工后的第2年、第3年、第4年、第5年。 | | | | | | | | | | | |

由表4.6、表4.7可知，在同步建设环境下连溃风险较大，均超过70%；与自由泄流相比，在电站G采用控制泄流的情况下，电站A和电站B的导流风险有所降低，且随着汛限水位的降低，风险调控效果更为显著；由于连溃风险较大，提高电站A的导流标准能更有效降低两个水电站的施工导流风险。上述计算结果与工程实际及客观认知相符合，证明了该风险计算模型的科学可靠性。

## 基于合作博弈的效益分配

* + 1. 控泄综合效益计量
       1. 上游电站经济效益

为调控下游施工导流风险，上游电站G需在汛期来临前将库水位消落到更低的汛限水位以下，以预留更多防洪库容拦蓄洪水。由于采取降低汛限水位的方法进行控泄，对水库的度汛风险影响不大，不考虑控泄风险成本。然而，电站G防洪库容的增加必然会导致发电水量的减少，且库水位的降低也会使发电机组无法处于最优出力工况，进而会产生发电损失。

本文通过对比不同汛限水位下的下泄流量曲线计算发电水量损失。根据电网给定的电站出力方案，得出水电站G汛期平均耗水率为3.34m³/(kW·h)，同期批复的上网电价为0.346元/(kW·h)，则当电站G选取汛限水位为838.4m、836.2m时，其发电损失分别为454.4万元、664.6万元。

* + - 1. 导流系统经济效益

(1)导流风险效益

导流风险效益是指因上游控泄导流系统风险发生改变而产生的费用。由于各电站导流风险不具有可比性，可以通过洪水期望损失耦合导流风险率及发生风险的损失来描述导流风险的变化。

在施工导流过程中，电站发生风险后的损失主要由三部分组成：围堰重修费用，施工条件恢复费用，以及因工期延误所导致的推迟发电费用。其中围堰重修费用以10年一遇的导流标准为例，根据围堰工程量及设计概算中的工程量单价，计算可得电站A重建一期围堰所需费用为21921万元，重建二期围堰所需费用为23134万元；电站B重建一期围堰所需费用为16331万元，重建二期围堰所需费用为18231万元。而基坑抽排水、清淤等施工条件恢复费用一般取围堰重建费的20%。对于推迟发电费用，电站A电站装机容量为330MW，预计多年平均发电量15.20亿kW·h，电站B装机容量为360MW，预计多年平均发电量为16.30亿kW·h。

各时段导流风险率的具体数值见表4.7，根据式可以计算各控泄方案导流风险收益。对比无控泄情况下的方案9，其他备选方案的导流风险有增有减，导致导流风险收益有正有负，其中导流风险收益为负则表明为风险损失。风险收益逐年计算成果见表4.8。

表4.8 各电站逐年导流风险收益（单位：万元）

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 备选方案 | 电站A | | | | 电站B | | |
| Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ |
| 方案1 | -269.79 | -370.55 | -431.45 | -522.96 | -560.38 | -821.17 | -873.13 |
| 方案2 | -269.79 | -370.55 | -431.45 | -522.96 | 204.21 | 144.24 | 137.03 |
| 方案3 | 228.33 | 311.00 | 400.53 | 483.63 | -364.22 | -405.89 | -304.58 |
| 方案4 | 228.33 | 311.00 | 400.53 | 483.63 | 388.07 | 498.42 | 646.25 |
| 方案5 | -64.77 | -88.96 | 516.75 | 626.35 | -151.36 | -310.05 | 261.27 |
| 方案6 | -64.77 | -88.96 | 516.75 | 626.35 | 614.70 | 742.15 | 1358.23 |
| 方案7 | 358.47 | 488.27 | 836.55 | 1010.11 | -3.02 | 22.78 | 420.82 |
| 方案8 | 358.47 | 488.27 | 836.55 | 1010.11 | 752.84 | 1019.25 | 1482.46 |
| 注：表中Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ分别代表该工程开工后的第2年、第3年、第4年、第5年。 | | | | | | | |

(2)导流标准效益

由工程进度安排可知，水电站A、B在10年一遇和20年一遇的导流标准下的施工工期相同，导流进度收益为零，故导流标准收益仅由导流标准发生变化而导致的导流投资收益所组成，各导流标准下的导流投资见表4.9，再根据式计算可得导流经济效益。

表4.9 不同导流标准下导流投资（单位：万元）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 导流时段 | 导流标准 | 电站A | 电站B |
| 一期导流 | 10年一遇 | 21921.98 | 16206.11 |
| 20年一遇 | 24654.20 | 18362.10 |
| 二期导流 | 10年一遇 | 23134.37 | 18231.18 |
| 20年一遇 | 26543.10 | 20564.30 |

* + - 1. 控泄综合效益

上游水电站G的控泄综合效益为上游电站经济效益与导流系统经济效益之和，针对水电站G控泄条件下的各备选方案，可以根据式计算控泄综合效益，最终的计算成果见表4.10。

表4.10 综合控泄效益计算（单位：万元）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 效益类型 | 方案1 | 方案2 | 方案3 | 方案4 | 方案5 | 方案6 | 方案7 | 方案8 |
| 控泄成本 | -454.4 | -454.4 | -454.4 | -454.4 | -664.6 | -664.6 | -664.6 | -664.6 |
| 导流风险效益R | -3849.4 | -1109.2 | 348.8 | 2956.2 | 789.2 | 3704.4 | 3133.9 | 5947.9 |
| 导流经济效益C | 10630.1 | 6141 | 4489.1 | 0 | 10630.1 | 6141 | 4489.1 | 0 |
| 综合效益 | 6326.3 | 4577.4 | 4383.5 | 2501.8 | 10754.7 | 9180.8 | 6958.4 | 5283.3 |

* + 1. 基于Shapley值的效益分配

控泄综合效益是由各电站相互合作而获得的，理应将其合理分配。若流域内串联分布的三个水电站参与合作联盟，则合作博弈的集合为，其中1，2，3分别代表上游电站G、在建电站A、在建电站B。

* + - 1. 博弈类型确定

以梯级整体效益和非控泄条件下的各电站行为作为衡量基准，将电站G降低汛限水位，电站A与电站B降低导流标准的行为定义为参与联盟。因此，根据上述定义及合作博弈的分类，在对各方案的控泄综合效益进行分配时，方案1和方案5属于三人博弈，方案2、方案3、方案6、方案7属于双人博弈，而方案4及方案8则不属于博弈内容。因此，以下计算内容不涉及方案4和方案8的内容。

* + - 1. Shapley值计算及效益分配

双人博弈模型的集合，其中=2，3，=2；该合作博弈可能组成的联盟M为、、、。假设电站G和电站均参与合作时，获得的效益为，则有，，，；=1/2，根据式即可计算得到电站M和电站的Shapley值。

对于三人博弈类型，参照表3.1、表3.2、表3.3中的计算过程求取各方案中参与联盟电站的Shapley值，最终计算成果见表4.11。

表4.11 备选方案中各电站Shapley值

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 计算对象 | 方案1 | 方案2 | 方案3 | 方案5 | 方案6 | 方案7 |
| 电站G | 4436.1 | 2530.4 | 2019.2 | 8035.9 | 4247.3 | 3427.5 |
| 电站A | 993.5 | 1561.4 | 0 | 1915.0 | 2218.5 | 0 |
| 电站B | 896.6 | 0 | 940.8 | 803.8 | 0 | 837.6 |

得到各电站的Shapley值后，根据式计算效益分配比例，各方案的综合效益分配结果见表4.12。

表4.12 各电站综合效益分配值（单位：万元）

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 效益类型 | | 方案1 | 方案2 | 方案3 | 方案5 | 方案6 | 方案7 |
| 综合效益值 | | 6326.3 | 4577.4 | 4383.5 | 10754.7 | 9180.8 | 6958.4 |
| 效益  分配值 | 电站G | 4673.6 | 3148.2 | 3317.5 | 8035.9 | 6030.8 | 5591.9 |
| 电站A | 868.7 | 1429.2 | 0 | 1915 | 3150.0 | 0 |
| 电站B | 784.0 | 0 | 1066.0 | 803.8 | 0 | 1366.5 |

## 施工导流方案群决策

* + 1. 决策指标信息

选取电站A的和电站B的确定性费用、不确定性费用、施工强度作为决策指标。根据式、式、式分别计算各备选方案的指标值，计算成果见表4.13。

表4.13 各方案决策指标值

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 备选方案 | 确定性费用  (万元) | | 不确定性费用  (万元) | | 最大平均施工强度  (万m3/月) | |
| 电站A | 电站B | 电站A | 电站B | 电站A | 电站B |
| 方案1 | 44187.6 | 33653.3 | 28244.9 | 37055.1 | 47.2 | 40.6 |
| 方案2 | 43627.1 | 38926.4 | 28244.9 | 34986.4 | 47.2 | 42.7 |
| 方案3 | 51197.3 | 33371.3 | 25851.9 | 35875.1 | 49.7 | 40.6 |
| 方案4 | 51197.3 | 38926.4 | 25851.9 | 33939.1 | 49.7 | 42.7 |
| 方案5 | 43141.3 | 33633.5 | 25660.8 | 35000.6 | 47.2 | 40.6 |
| 方案6 | 41906.3 | 38926.4 | 25660.8 | 32756.8 | 47.2 | 42.7 |
| 方案7 | 51197.3 | 33070.8 | 24582 | 34359.8 | 49.7 | 40.6 |
| 方案8 | 51197.3 | 38926.4 | 24582 | 32217.3 | 49.7 | 42.7 |
| 方案9 | 51197.3 | 38926.4 | 27275.4 | 35471.9 | 49.7 | 42.7 |

以上述决策指标值为对象，通过3.5.2.1中的规范化方法对不同量纲的所有决策指标值进行规范化，根据式及式计算得到隶属度矩阵。



* + 1. 导流方案多属性群决策
       1. 指标权重的确定

邀请业主单位、电站A和电站B的设计及施工单位作为该决策问题的决策者。本文选用最优-最劣法计算主观权重，通过向决策者们分发调查问卷的形式确定决策者倾向。决策者采用1~9分制对各指标的相对重要性及相对不重要性进行评价，计算得到决策者对各决策指标的主观权重，各指标的主观权重计算结果见表4.14。

表4.14 决策指标主观权重值

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 决策者 | | 确定性费用 | | 不确定性费用 | | 最大平均施工强度 | |
| 电站A | 电站B | 电站A | 电站B | 电站A | 电站B |
| 业主单位 | | 0.261 | 0.261 | 0.174 | 0.148 | 0.078 | 0.078 |
| 电站A | 设计单位 | 0.256 | 0.222 | 0.179 | 0.154 | 0.103 | 0.085 |
| 施工单位 | 0.250 | 0.217 | 0.133 | 0.117 | 0.150 | 0.133 |
| 电站B | 设计单位 | 0.236 | 0.205 | 0.197 | 0.189 | 0.079 | 0.094 |
| 施工单位 | 0.214 | 0.186 | 0.171 | 0.179 | 0.121 | 0.129 |

以隶属度矩阵为计算对象，通过式、式、式计算各指标的熵值及客观权重，计算结果见表4.15。

表4.15 决策指标客观权重值

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 权重 | 确定性费用 | | 不确定性费用 | | 最大平均施工强度 | |
| 电站A | 电站B | 电站A | 电站B | 电站A | 电站B |
| 客观权重 | 0.216 | 0.205 | 0.152 | 0.148 | 0.139 | 0.139 |

基于离差极小化原理，根据式和式求解指标的综合权重，其中主观权重系数和客观权重系数计算结果见表4.16，综合权重值如表4.17所示。

表4.16 主、客观权重系数表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 权重系数 | 业主单位 | 电站A | | 电站B | |
| 设计单位 | 施工单位 | 设计单位 | 施工单位 |
|  | 0.3404 | 0.3020 | 0.3462 | 0.1829 | 0.4249 |
|  | 0.6596 | 0.6980 | 0.6538 | 0.8171 | 0.5751 |

表4.17 决策指标综合权重值

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 决策者 | | 确定性费用 | | 不确定性费用 | | 最大平均施工强度 | |
| 电站A | 电站B | 电站A | 电站B | 电站A | 电站B |
| 业主单位 | | 0.231 | 0.223 | 0.151 | 0.142 | 0.127 | 0.126 |
| 电站A | 设计单位 | 0.228 | 0.210 | 0.160 | 0.150 | 0.128 | 0.122 |
| 施工单位 | 0.228 | 0.209 | 0.146 | 0.138 | 0.143 | 0.137 |
| 电站B | 设计单位 | 0.220 | 0.205 | 0.161 | 0.156 | 0.128 | 0.130 |
| 施工单位 | 0.215 | 0.197 | 0.160 | 0.161 | 0.132 | 0.135 |

* + - 1. 决策者权重

将决策指标与隶属度矩阵相乘得到各决策者的加权决策矩阵。为计算决策者权重，以群体一致性为目标，根据式计算各加权决策矩阵之间的相似度，得到相似度矩阵，即：



结合相似度矩阵，根据式和式计算可得决策者权重，结果如表4.18所示。

表4.18 各决策者权重值

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 权重值 | 业主单位 | 电站A | | 电站B | |
| 设计单位 | 施工单位 | 设计单位 | 施工单位 |
|  | 0.183 | 0.231 | 0.182 | 0.225 | 0.179 |

* + - 1. 基于TOPSIS的方案评价

将决策者权重与加权决策矩阵相乘，便得到群体加权决策矩阵。以群体加权决策矩阵为计算对象，基于TOPSIS原理对方案进行优选。根据式计算各方案到到理想解的距离及到负理想解的距离，计算结果见表4.19。

表4.19 各方案与正、负理想方案的距离值

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 距离值 | 方案1 | 方案2 | 方案3 | 方案4 | 方案5 | 方案6 | 方案7 | 方案8 | 方案9 |
|  | 0.331 | 0.444 | 0.503 | 0.597 | 0.168 | 0.361 | 0.479 | 0.586 | 0.626 |
|  | 0.461 | 0.378 | 0.361 | 0.186 | 0.533 | 0.523 | 0.428 | 0.301 | 0.081 |

根据式计算各备选方案与负理想解的相对贴近度，其计算结果及方案排序如表4.20所示。

表4.20 各备选方案评价结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项目 | 方案1 | 方案2 | 方案3 | 方案4 | 方案5 | 方案6 | 方案7 | 方案8 | 方案9 |
| 相对贴近度 | 0.582 | 0.460 | 0.418 | 0.237 | 0.761 | 0.592 | 0.472 | 0.339 | 0.114 |
| 方案排序 | 3 | 5 | 6 | 8 | 1 | 2 | 4 | 7 | 9 |

由表4.20可知，备选方案5的相对贴近度最大，表示该方案与负理想解相对距离最远，可以认为方案5是最优方案。本文以确定性费用、不确定性费用及最大平均施工强度作为决策指标，考虑指标权重及决策者权重的前提下，决策群体认为方案5整体最优。因此，推荐在上游电站G调整控泄水位为836.2m的情况下，电站A和电站B均采用10年一遇的导流标准。

## 本章小结

本章以上游控泄电站及下游两个同步建设的梯级电站为例，根据在不同控泄条件下的导流系统的不同导流标准组合，构建施工导流备选方案集合，采用Monte-Carlo法对各方案的导流风险率进行计算，分析上游控泄对施工导流系统风险的影响。在风险分析的基础上计算各备选方案的控泄综合效益，并基于Shapley值的效益分配模型对效益进行分配，根据分配结果对方案决策指标进行修正，从而优选最佳方案。计算结果与实际情况相符，表明前文所建立的计算模型是科学合理的，研究内容为同步建设的施工导流系统建设提供理论支撑。

# 结论与展望

## 研究结论

随着对水电梯级开发效率的要求愈发严格，对于单一主体开发的流域内同处于建设阶段的上下游水电站而言，开发者往往倾向于采用同步建设的开发模式，这使得电站施工导流环境变得更为复杂。由于洪水及导流系统具有不确定性，串联分布的两个相邻电站同时进行施工导流时，施工导流风险存在向下游传递的可能，威胁下游流域的安全。为了尽可能降低导流风险和控制工程成本，需采取合理的风险调控方式及优选施工导流方案。因此，本文以相邻梯级水电站同步建设的施工导流系统风险分析为研究基础，利用数值模拟方法将工程水文学、风险分析理论、施工水力学进行有机结合，建立导流风险分析模型，依托工程经济学、合作博弈理论及群决策方法，构建了考虑风险调控效益分配的导流方案多属性群决策模型，并通过工程案例对模型进行分析验证。本文主要研究成果总结如下：

（1）针对同步建设下施工导流系统的风险率估计问题，在分析导流系统溃堰洪水过程特征的基础上，基于洪水叠加理论及河道洪水演进计算，对汛期施工导流系统的施工洪水求解过程进行完善。考虑施工洪水及泄流能力的不确定性，并通过Monte-Carlo随机模拟法结合调洪演算，建立了导流风险率计算模型。案例计算结果显示，在考虑导流系统连溃的条件下，上游施工导流系统的导流风险会通过下泄洪水向下游传递，导致下游施工导流系统风险增大，导流风险存在叠加效应。

（2）假定同步建设的相邻施工导流系统的上游电站为已建电站，分析上游电站对施工导流系统的影响，讨论通过上游电站控泄调控导流风险的可行性，并对其风险调控效果进行对比分析。案例计算结果显示，当上游已建电站具有一定的洪水调蓄能力时，该电站能通过调整汛限水位达到控制下泄流量的效果，从而实现对导流系统风险的控制，风险调控效果较大，其中风险控制效果对下游施工导流系统更为显著，表明风险控制同样存在着叠加效应。

（3）在上游已建电站参与风险控制前提下，从成本和效益的角度讨论上游电站控泄对自身的发电出力及施工导流系统的导流风险、工程投资及进度的影响，引入工程经济学确定控泄综合效益。为合理分配控泄综合效益，通过对不同效益分配方法进行讨论，最终确定采用基于合作博弈理论的效益分配法，并在此基础上根据各电站对合作联盟的贡献，建立基于Shapley值的效益分配模型。案例计算结果显示，相较于无上游控泄的建设环境，上游电站参与控泄所带来的收益均要大于其控泄成本，控泄综合效益均为正值；从效益分配来看，由于上游控泄电站对合作联盟的贡献最大，其效益分配比例也最大，而同步建设的相邻电站中上游电站效益分配比例要大于下游电站。

（4）在效益分配的基础上，针对同步建设下施工导流方案决策问题所具有的多属性及多利益主体的特征，以确定性费用、不确定性费用、最大评价施工强度为该决策问题的决策指标。利用主客观赋权法确定指标权重，运用矩阵相似度确定业主、设计及施工单位等决策者的权重，并通过TOPSIS法对导流方案进行排序，建立了施工导流方案多属性群决策模型。通过计算对各备选方案进行比对，结果显示，同步建设的相邻电站中的上游导流系统采取较高导流标准的方案，要优于下游导流系统采取较高导流标准的方案；上游控泄电站选用最低的汛限水位，下游两个在建电站均采用规范允许的最低导流标准的方案最优。

## 展望

梯级水电站同步建设下的施工导流系统风险分析、调控及决策是一个复杂系统问题，其影响因素众多且相互交叉，很难直接对该问题进行清晰而具体的描述。本文以施工导流风险为切入点，系统分析了上游在建电站对施工导流系统的影响，在建立电站控泄综合效益分配机制的前提下，对梯级水电站导流方案多属性群决策问题进行了初步探索。但受限于作者的科研能力、专业认知水平及研究精力，在开展部分研究工作时深度有所欠缺，有待进一步地完善与研究：

（1）在考虑上游电站下泄洪水的不确定性时，本文以我国长期的洪水序列分析为依据，认为下泄洪水过程的洪峰和洪量服从型分布。然而不论上游为已建电站或是在建电站，对电站的下泄洪水而言，即使上游来水为服从型分布的天然洪水，由于挡蓄水设施对洪水的调蓄作用，其下泄洪水的频率分布不一定服从型分布。因此，接下来的研究需对不同建设条件下的电站下泄洪水的特性进行分析，并根据大量下泄洪水过程及典型洪水过程的实测数据，对下泄洪水的频率分布进行科学描述。

（2）本文在使用基于Shapley值的效益分配法求解分配比例时，虽然充分考虑了各电站对联盟的贡献，达成了一种所谓的总效益公平分配，但在进行效益分配时将参与者对联盟的贡献作为唯一分配依据，忽略了在效益分配中需要考虑的个体特征因素，不符合客观实际。在梯级电站合作联盟中，由于不同水电站的建设状态、发电规模、建设成本及地理位置等有所不同，导致各电站在参与联盟时的资源投入、风险承担等因素的存在差异。若某电站参与联盟所投入资源过多或承担风险过大，而在效益分配时没有对其进行倾斜，很容易导致联盟的破裂。因此，下一步研究应综合考虑这些因素对效益分配的影响，对所建立的效益分配模型进行修正。

参考文献

[1] 黄维和, 韩景宽, 王玉生, 等. 我国能源安全战略与对策探讨[J]. 中国工程科学, 2021,23(01):112-117.

[2] 杨宇, 于宏源, 鲁刚, 等. 世界能源百年变局与国家能源安全[J]. 自然资源学报, 2020,35(11):2803-2820.

[3] Zhang X, Wang R, Huo M, et al. A study of the role played by renewable energies in China's sustainable energy supply[J]. ENERGY, 2010,35(11SI):4392-4399.

[4] Jia-kun L. Research on Prospect and Problem for Hydropower Development of China[J]. Procedia Engineering, 2012,28:677-682.

[5] 王亦楠. 《长江保护法》不应与水电建设相对立[J]. 能源, 2021(01):28-32.

[6] 肖焕雄. 论施工导流标准[J]. 水力发电学报, 1987(03):90-98.

[7] 崔磊. 长江水电开发与生态环境保护[J]. 水力发电, 2017,43(07):10-12.

[8] 关志伟. 上游溃坝引发库区土石坝梯级连溃的模拟研究[J]. 陕西水利, 2019(02):24-26.

[9] 张超, 胡志根, 李家亮, 等. 上游水电站初期导流条件下下游水电站施工导流风险分析[J]. 水电能源科学, 2014,32(06):120-123.

[10] 刘章君, 许新发, 成静清, 等. 基于Copula函数的大坝洪水漫顶风险率计算[J]. 水力发电学报, 2019,38(03):75-82.

[11] Yen B C. Risks in hydrologic design of engineering projects[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1970,4(96):959-966.

[12] 肖焕雄, 韩采燕. 施工导流系统超标洪水风险率模型研究[J]. 水利学报, 1993(11):76-83.

[13] 李旭东, 郭红民. 施工导流超标洪水风险率计算的最大熵法[J]. 人民长江, 2010,41(03):75-77.

[14] 石明华, 钟登华. 施工导流超标洪水风险率估计的水文模拟方法[J]. 水利学报, 1998(3):30.

[15] Luu C, von Meding J. A Flood Risk Assessment of Quang Nam, Vietnam Using Spatial Multicriteria Decision Analysis[J]. WATER, 2018,10(4614).

[16] Lee H, Mays L W. Improved risk and reliability model for hydraulic structures[J]. Water Resources Research, 1983,19(6):1415-1422.

[17] Afshar A, Barkhordary A, Mariño M A. Optimizing River Diversion under Hydraulic and Hydrologic Uncertainties[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1994,120(1):36-47.

[18] 王栋, 朱元甡. 防洪系统风险分析的研究评述[J]. 水文, 2003(02):15-20.

[19] Yanmaz A M. Overtopping risk assessment in river diversion facility design[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000,27(2):319-326.

[20] 钟登华, 刘东海. 基于遗传算法的施工导流建筑物优化[J]. 系统工程理论与实践, 2000,20(10):126-133.

[21] 张光飞, 赵建华, 肖玲, 等. 基于BP神经网络的施工导流风险评价[J]. 水电能源科学, 2010,28(10):105-106.

[22] 王卓甫. 考虑洪水过程不确定的施工导流风险计算[J]. 水利学报, 1998(04):34-38.

[23] 陈凤兰, 王长新. 施工导流风险分析与计算[J]. 水科学进展, 1996(04):82-87.

[24] 刘全, 胡志根, 齐志坚, 等. 大坝原址重建施工导流风险特性研究[J]. 工程科学与技术, 2017,49(5):35-41.

[25] Hsu Y, Tung Y, Kuo J. Evaluation of dam overtopping probability induced by flood and wind[J]. Stochastic Environmental Research And Risk Assessment, 2011,25(1):35-49.

[26] Kwon H H, Moon Y I. Improvement of overtopping risk evaluations using probabilistic concepts for existing dams[J]. Stochastic Environmental Research And Risk Assessment, 2006,20(4):223-237.

[27] 陈肇和, 李其军. 漫坝风险分析在水库防洪中的应用[J]. 中国水利, 2000(09):73-75.

[28] 王常红. 施工导流系统不确定性问题的分析与应用研究[D]. 武汉大学, 2013:

[29] 胡志根, 刘全, 贺昌海, 等. 基于Monte-Carlo方法的土石围堰挡水导流风险分析[J]. 水科学进展, 2002(05):634-638.

[30] 范锡峨, 胡志根, 靳鹏. 基于Monte-Carlo方法的施工导流系统综合风险分析[J]. 水科学进展, 2007(04):604-608.

[31] 张超, 胡志根, 刘全. 基于实测洪水系列和最小熵方法的施工导流风险[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012,45(03):296-300.

[32] Chen J, Zhong P, Zhao Y, et al. Risk analysis for the downstream control section in the real-time flood control operation of a reservoir[J]. Stochastic environmental research and risk assessment, 2015,29(5):1303-1315.

[33] 李传奇, 王帅, 王薇, 等. LHS-MC方法在漫坝风险分析中的应用[J]. 水力发电学报, 2012,31(01):5-9.

[34] 薛进平, 胡志根, 刘全. 梯级水电站建设施工导流风险分析[J]. 四川大学学报（工程科学版）, 2014,46(1):75-80.

[35] 王兆强, 陈新, 魏成勇, 等. 基于Matlab的施工导流风险度计算程序编译及应用[J]. 水电能源科学, 2020,38(04):130-133.

[36] Wang T, Gao S, Li X, et al. A meta-network-based risk evaluation and control method for industrialized building construction projects[J]. Journal of cleaner production, 2018,205:552-564.

[37] Lingard H, Saunders L, Pirzadeh P, et al. The relationship between pre-construction decision-making and the effectiveness of risk control: Testing the time-safety influence curve[J]. Engineering, construction, and architectural management, 2015,22(1):108-124.

[38] Li M, Yu H, Jin H, et al. Methodologies of safety risk control for China’s metro construction based on BIM[J]. Safety science, 2018,110:418-426.

[39] 胡志根, 范锡峨, 刘全, 等. 施工导流系统综合风险分配机制的设计研究[J]. 水利学报, 2006,37(10):1270-1277.

[40] 李本强, 潘华. 施工导流系统风险控制[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2002,16(4):25-28.

[41] Zhang Y, Wang G, Peng Y, et al. Risk analysis of dynamic control of reservoir limited water level by considering flood forecast error[J]. Science China-Technological Sciences, 2011,54(7):1888-1893.

[42] 王俊, 郭生练. 三峡水库汛期控制水位及运用条件[J]. 水科学进展, 2020,31(04):473-480.

[43] 陈述, 胡志根, 刘全. 基于上游水电站控泄的施工导流风险分配研究[J]. 水力发电学报, 2014,33(02):193-200.

[44] 蔡仲银, 李惠安, 张有山. 西霞院反调节水库工程施工导截流设计[J]. 水利建设与管理, 2006,26(6):27-30.

[45] 谢小平, 黄强, 徐晨光, 等. 公伯峡水电站施工度汛方案风险分析[J]. 水力发电学报, 2005(06):6-8.

[46] 任金明, 蔡建国, 胡志根, 等. 下游水库对上游梯级电站施工导截流的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011,44(03):331-334.

[47] Chen J, Zhong P, Liu W, et al. A multi-objective risk management model for real-time flood control optimal operation of a parallel reservoir system[J]. Journal of Hydrology, 2020,590:125264.

[48] 谭乔凤, 雷晓辉, 王浩, 等. 考虑梯级水库库容补偿和设计洪水不确定性的汛限水位动态控制域研究[J]. 工程科学与技术, 2017,49(01):60-69.

[49] 刘招, 黄强, 王义民, 等. 基于安康控泄的蜀河水电站施工导流洪水风险控制[J]. 水力发电学报, 2008(02):29-34.

[50] Huang X, Lin J, Qu X, et al. Research on Water Level Control Scheme of Reservoir Flood Resources Utilization Considering Dam Safety and Risk Benefit: ACSR-Advances in Comptuer Science Research, 2015[C].

[51] 陶凤玲, 井刚, 孔珂, 等. 非正常调水造成龙羊峡水电站发电量损失的初步分析[J]. 西北水力发电, 2004(04):5-8.

[52] 蔡建章, 蔡华祥, 吴东平. 水电站弃水电量计算探讨[J]. 电力系统自动化, 2000(10):64-65.

[53] 周婷. 水电站水库群调度优化及其效益评价方法研究[D]. 华北电力大学, 2014:

[54] 陈述, 胡志根. 上游水电站控泄条件下的施工导流效益评价[J]. 水力发电学报, 2015,34(02):181-188.

[55] Dong S, Cao R H, Zhao H Y. Risk and sensitivity analysis of economic evaluation for flood prevention construction: Progress in Safety Science And Technology Series, 2002[C].

[56] 李英海, 汪利, 李清清, 等. 梯级水电站补偿效益分摊方式研究综述[J]. 人民珠江, 2020,41(08):7-14.

[57] 肖鹏, 醋院科. 梯级水电站汛期错峰调度效益的补偿方法[J]. 黑龙江水利科技, 2019,47(07):51-53.

[58] 张乐辰, 李文斌, 何勇, 等. 梯级水电站群补偿效益求解及分配机制研究[J]. 水力发电学报, 2020,39(12):37-46.

[59] 陈志鼎, 王明姣. 上游水电站控泄条件下的施工导流风险效益分配模型及应用[J]. 水电能源科学, 2016,34(2):145-148.

[60] Hu X. The weighted Shapley-egalitarian value for cooperative games with a coalition structure[J]. TOP, 2019,28(1):193-212.

[61] 曲家峰. Shapley值熵权法在梯级水电站效益补偿分摊中的应用[J]. 水利规划与设计, 2016(09):39-42.

[62] 刘潋, 胡志根. 上游水电站调蓄下施工导流风险效益分摊模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014,42(06):559-564.

[63] 刘潋, 胡安娜, 宋玲. 梯级水电站施工导流风险效益补偿机制研究[J]. 人民长江, 2017,48(08):55-59.

[64] 张剑亭, 郭生练, 陈柯兵, 等. 基于信息熵的梯级水库联合优化调度增益分配法[J]. 水力发电学报, 2020,39(2):94-102.

[65] Rasekh A, Afshar A, Afshar M H. Risk-Cost Optimization of Hydraulic Structures: Methodology and Case Study[J]. Water resources management, 2010,24(11):2833-2851.

[66] Song Z, Liu Q, Hu Z. Decision-Making Framework, Enhanced by Mutual Inspection for First-Stage Dam Construction Diversion Scheme Selection[J]. Water resources management, 2020,34(2):563-577.

[67] 张春生, 杨道坡, 宋子达, 等. 基于两层决策模型的东庄水库导流方案优选[J]. 人民黄河, 2017,39(12):105-108.

[68] 罗舒, 刘潋. 考虑提前蓄水下的高堆石坝施工后期导流方案决策模型[J]. 水电能源科学, 2018,36(04):65-68.

[69] Jukrin M, Dongoo L, Taesik L, et al. Group Decision Procedure to Model the Dependency Structure of Complex Systems: Framework and Case Study for Critical Infrastructures[J]. Systems Engineering, 2015,18(4):323-338.

[70] Guo C, Shi R, Jin M, et al. Group decision opinion evolution and simulation based on community and individual influence power[J]. Journal of intelligent & fuzzy systems, 2017,33(5):2667-2676.

[71] Liu D, Hu Z, Guo W. Multi-Attribute Group-Decision on a Construction Diversion Scheme for Hydropower Projects Based on Perception Utility[J]. Energies (Basel), 2018,11(11):3027.

[72] 雷丽彩, 高尚, 曾恩钰. 考虑有限理性行为的大型工程复杂大群体动态决策仿真[J]. 系统工程, 2018,36(08):123-131.

[73] 薛进平, 胡志根, 刘全. 施工导流方案动态交互协商决策[J]. 系统工程理论与实践, 2014,34(11):2995-3000.

[74] Jing Z, An W, Zhang S, et al. Flood control ability of river-type reservoirs using stochastic flood simulation and dynamic capacity flood regulation[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,257:120809.

[75] 聂鹏, 胡志根, 刘全, 等. 考虑上游同步建设条件下沙坪一级水电站初期导流风险分析[J]. 水力发电, 2020,46(11):65-68, 86.

[76] 谢任之. 溃坝水力学[M].山东科学技术出版社, 1993.

[77] 水利部长江水利委员会水文局, 水利部南京水文水资源研究所. 水利水电工程设计洪水计算手册[M].北京：中国水利水电出版社, 2001.

[78] 刘潋. 梯级水电站施工导流风险效益分摊及补偿机制研究[D]. 武汉大学, 2014:

[79] Yixin H, Zhongmin L, Yiming H, et al. Theoretical derivation for the exceedance probability of corresponding flood volume of the equivalent frequency regional composition method in hydrology[J]. Hydrology Research, 2020,51(6):1274-1292.

[80] 邵利萍. 无资料小流域洪水叠加计算方法初探[D]. 浙江大学, 2009:

[81] Perumal M, Tayfur G, Rao C M, et al. Evaluation of a physically based quasi-linear and a conceptually based nonlinear Muskingum methods[J]. Journal of Hydrology, 2017,546:437-449.

[82] 雷冠军, 王文川, 殷峻暹, 等. P-Ⅲ型曲线参数估计方法研究综述[J]. 人民黄河, 2017,39(10):1-7.

[83] 薛进平. 上游电站蓄控影响下的施工导流风险评估方法研究[D]. 武汉大学, 2015:

[84] Ma J, Yang J, Li S, et al. Application of fuzzy analytic hierarchy process in the risk assessment of dangerous small-sized reservoirs[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2018,9(1):113-123.

[85] 赵国藩, 曹居易, 张宽权. 工程结构可靠度[M].北京：科学出版社, 2011.

[86] Peng Y, Chen K, Yan H, et al. Improving Flood-Risk Analysis for Confluence Flooding Control Downstream Using Copula Monte Carlo Method[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2017,22(8):4017018.

[87] 张超, 胡志根. 高拱坝施工初-中期导流风险模型及应用[J]. 水科学进展, 2019,30(01):102-111.

[88] 董保民, 王运通, 郭桂霞. 合作博弈论[M].中国市场出版社, 2008.

[89] 刘斌, 陈来军, 汪雨辰, 等. 应对风电出力不确定性的备用成本分摊:联盟博弈方法[J]. 控制理论与应用, 2016,33(04):437-445.

[90] Dabbagh S R, Sheikh-El-Eslami M K. Risk-based profit allocation to DERs integrated with a virtual power plant using cooperative Game theory[J]. Electric Power Systems Research, 2015,121:368-378.

[91] Zhang L, Xie J, Chen X, et al. Cooperative Game-Based Synergistic Gains Allocation Methods for Wind-Solar-Hydro Hybrid Generation System with Cascade Hydropower[J]. ENERGIES, 2020,13(15):3890.

[92] 周彬彬, 申建建, 程春田. 基于联盟博弈的多控制性水库梯级电站补偿效益分摊方法[J]. 水电能源科学, 2016,34(11):58-62.

[93] 刘炳胜, 王安民, 申映华. 复杂模糊多属性大群体决策模型与算法研究[M].天津：天津大学出版社, 2017.

[94] 艾欣, 秦珺晗, 胡寰宇, 等. 基于最优最劣法-熵权-逼近理想解排序法的电网安全与效益综合评价[J]. 现代电力, 2021,38(01):60-68.

[95] 李刚, 李建平, 孙晓蕾, 等. 主客观权重的组合方式及其合理性研究[J]. 管理评论, 2017,29(12):17-26.

[96] Chen X, Zhao L, Liang H. A novel multi-attribute group decision-making method based on the MULTIMOORA with linguistic evaluations[J]. Soft Computing, 2018,22(16):5347-5361.

[97] Mao X, Wu M, Dong J, et al. A new method for probabilistic linguistic multi-attribute group decision making: Application to the selection of financial technologies[J]. Applied Soft Computing Journal, 2019,77:155-175.

[98] 冯源, 曹月静. 属性和专家客观权重未知的多值中智数群决策方法[J]. 数学的实践与认识, 2021,51(02):68-77.

[99] Gupta P, Mehlawat M K, Grover N, et al. Multi-attribute group decision making based on extended TOPSIS method under interval-valued intuitionistic fuzzy environment[J]. Applied Soft Computing, 2018,69:554-567.

# 攻读硕士学位期间发表的科研成果

**发表论文：**

[1] 聂鹏,胡志根,刘全,王哲鑫,田建海.考虑上游同步建设条件下沙坪一级水电站初期导流风险分析[J].水力发电,2020,46(11):65-68+86.

**授权专利：**

1. 胡志根,聂鹏,杨子宇,刘全,廖若川,王哲鑫,周元,黄维. 一种土石坝坝面螺旋式碾压施工方法[P]. 湖北省：CN110409382B,2020-07-24.

**参与项目：**

[1] 国家自然科学基金项目（NO.51779195）：基于非对称合作博弈的梯级水电站施工导流风险传导机制与控制，参与人。

[2] 横向科研项目：大渡河沙坪一级水电站导截流模型试验，主要参与人。

# 致谢

行文至此，我的这篇论文已经接近尾声，似乎三年的珞珈求学生涯就要在这一刻画上一个句号，感叹时光流逝的同时，心中不禁有些怅然若失。回忆起在武汉大学的读研时光，有过许多欢笑与汗水，许多难忘与不舍，但更多的是感激与感恩。在此，我要向所有给予我帮助的人致以诚挚的谢意，正是有了你们的支持与鼓励，我才能顺利完成学业，去往更大的舞台上追逐自己的梦想。

首先我要感谢我的恩师胡志根教授。本文是在胡老师悉心的指导下完成的，从论文的选题到撰写均得到了胡老师耐心的指导与帮助。胡老师治学态度严谨，学识渊博，富有创见，对学生的培养认真仔细。每当我的科研进展不顺利时，胡老师总会不厌其烦地为我点明方向，鼓励我多思考，多琢磨。此外，胡老师还常教导我们要有一双善于发现的眼睛，要学会从现象中发现本质。这对我之后的学术研究起到了促进作用，极大的提高了我的独立思考能力。在生活中，胡老师和蔼可亲，处处与人为善，其豁达开朗的人生态度是我永远的追求目标。每当我在生活中遇到困难时，胡老师总能在百忙之中抽出时间，用幽默轻松的口吻和我谈心，给我带来很多的帮助与启发。每念及此，都为能成为胡老师的学生而感到无比幸运。同时，还要感谢师母宋凤莲老师，每次见面都感受到宋老师如慈母般的关怀与爱护，让我常怀感激。在此，祝胡老师和宋老师一家身体安康，幸福美满。

感谢师门中亦师亦友的刘全副教授。刘老师渊博的专业知识，精益求精的科研态度，与时俱进的科研精神让我钦佩不已。刘老师在技术上涉猎广泛，计算机能力极强，对行业的发展有自己独到的理解，还时常给我们分享行业先进技术，且不忘对弟子们基础能力的训练。还记得初进师门时，刘老师便有计划的训练我们办公软件的运用能力，对我后来的科研及生活帮助很大。在生活中，刘老师始终充满热情，朝气蓬勃，爽朗大方，始终待人以诚，在研究生期间给了我很多帮助，每当我有所懈怠时，他便会及时提醒。再次感谢刘老师在科研及生活上给我提供的帮助，在今后的工作中我会以您为作为榜样，积极努力。

感谢6408师门的师兄弟们，正是有了你们的陪伴与照顾，我的研究生生涯才会如此多彩。感谢给我们带咖啡的阮兴元博士师兄、创业有成的刘大炜博士师兄、开朗风趣且遇大事有静气的邵波博士师兄、给我论文提供极大帮助的陈云博士师兄、幽默风趣，能言善道的宋子达博士师兄、低调认真的张路硕士师兄、乐于助人的田正师兄，是你们带我融入这个充满爱的大家庭。感谢与我一同进师门的小伙伴，与我“同甘共苦”的杨子宇、聪明爱笑的蒋侠宇、沉默内敛但热心善良的柳智龙、帅气认真的冯琛、我们一起打球、一起聚餐、一起喝酒，有你们在的日子充满欢笑，让我永远铭记于心。感谢新进师门的李飞羽、王浩、游川、高乔裕、张宏阳、赵越良师弟们，你们给实验室增添了许多新鲜活力。

感谢中国电建华东勘测设计研究院有限公司的邱亚峰高级工程师、王哲鑫高级工程师、陆高明工程师，给我提供实习实践机会的同时，还为我的毕业论文提供了宝贵的许多工程资料，感谢实习期间对我的照顾，让我有机会提高自己的专业实践能力。

感谢武汉大学水利水电学院的老师们，感谢张声瑾老师这三年以来对我的照顾，感谢王放老师、陈欢老师、施昉老师、吴琳老师，我在生活中得到了你们许多的帮助，是你们给我带来了如家般的温暖。

感谢我的父母和家人，这么多年以来一直守护与陪伴在我身旁，你们无私且无微不至的爱是埋藏在我心底最深的柔软。感谢父母的养育之恩，你们是我人生道路的指明灯，是我前进的基石，正因有了你们，我才会绽放生命的光彩！感谢姐姐对我的关怀，是你让我明白作为一个弟弟的幸福。感谢彭逸萱女士这五年的陪伴，感谢一路走来我们相互宽容与理解，感谢有你。

最后，感谢参与我论文评阅与答辩的专家们，感谢您在百忙之中抽出时间对本文进行审阅，衷心感谢各位老师们对论文提出的宝贵意见。

三年的硕士时光，不长不短，还没来得及仔细欣赏樱花大道的樱花，还没来得及走遍校园的每个角落，在未来里的日子里我将常怀感念。再次对所有关心我的老师、朋友和亲人致以最诚挚的感谢！

此致

敬礼

聂 鹏

2021年4月15日

于武汉大学工学部六教6408