

上游水电站控泄条件下的施工导流风险补偿研究

刘 激¹, 胡志根¹, 崔金铁², 王福运²

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130021)

摘要:在水电站梯级建设条件下,上游电站控制洪水下泄流量可减少下游施工导流风险、降低工程投资,但同时增加了上游电站的防洪风险和控泄成本。为有效地均衡上下游风险,合理分配二者利益,本文从梯级系统总体角度出发,通过对控泄参与双方控泄成本和效益的货币化,分析风险承担方和收益方在达成风险补偿共识过程中的博弈行为,建立基于激励与参与约束下的风险补偿模型,选择最优控泄流量并预计该流量下的补偿结果,实现上游控泄条件下施工导流风险补偿决策的优化。最后通过算例分析,验证该风险补偿模型是可行的、有效的。

关键词:施工导流; 风险补偿; 博弈; 上游控泄

中图分类号: TV122

文献标识码: A

1 研究背景

在水电梯级开发过程中,可利用上游电站控制下泄流量削减下游在建工程的施工导流流量^[1],从而降低工程投资,缩短建设工期。然而上游电站在控泄同时,增大了自身的防洪风险,改变了最经济的发电运行方式。因此,为有效协调上游已建电站与下游导流系统的风险,均衡二者间的经济利益,应建立合理有效的施工导流风险补偿机制。

目前国内外学者对风险补偿及施工导流风险分配进行了一系列研究。范锡峨等^[2]用期望效用损失来衡量导流系统风险合理配置的均衡关系,建立基于协商对策平台的导流系统风险分配机制。胡志根等^[2-3]在此基础上引入效用风险熵评价指标,对导流风险分配机制进一步完善。陈志鼎^[4]建立了基于导流工程保险损失的聚合风险模型,提出工程保险费用厘定方法,通过保险形式进行导流风险的转移。何宏谋^[5]等在分析黄河流域水权转换费用及价格计算的基础上,研究了农业风险补偿费用及生态与环境补偿费用。倪冠群等^[6]针对关键活动发生不确定性延误的项目进度—费用优化问题,从占线策略和竞争角度,设计了具有不同风险偏好的风险补偿策略。上述研究大多讨论了施工导流过程中单个风险损失主体的决策行为,针对梯级建设条件下,风险承担方和收益方在达成风险补偿共识过程中的决策行为讨论较少,一旦利益双方发生冲突,将难以保障风险分配机制的实施和补偿结果的执行。

本文分别从上游控泄电站和下游导流系统两个利益主体出发,在耦合控泄流量等变量的基础上计量双方的控泄成本和控泄效益,通过探讨各利益主体之间的博弈过程^[7],建立基于激励与参与约束下的风险补偿模型,实现水电站梯级开发条件下施工导流风险的合理配置和决策的系统优化。

收稿日期: 2012-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079115; 10902078)

作者简介: 刘激(1986-),女,湖北宜昌人,博士生,主要从事水利水电施工优化与决策研究。E-mail: amelielau@whu.edu.cn

2 上游控泄成本

控泄对上游电站效益的主要影响可归结为以下两方面：(1)改变了原有的水库调度规则，上游电站水库除保证自身防洪安全外还要负担下游导流系统的安全度汛的任务，增大上游水库防洪风险；(2)上游水电站控泄改变了上游水电站原有的经济运行方式，增加了下泄流量约束，导致调度规则达不到调度期内的全局优化，影响上游电站经济效益^[8]。将这两个影响因素转化为控泄成本并货币化，可作为确定补偿资金和建立补偿机制的重要依据。

2.1 控泄风险成本计量 当发生大于导流设计频率洪水时，上游电站采取减小下泄流量来减小施工导流风险。假设在 Δt 时间内控泄流量为 $q_k(H, t)$ ， H 为坝前水位， q_k 随着水库中水量变化引起的挡水建筑物前水位变化而变化，且与时间相关； q_s 为下游导流施工的设计流量， $q_k(H, t)$ 最大值加上区间洪水 q_h 叠加后的流量不能超过 q_s ，若当上游来水流量大于水库泄流能力且坝前水位 H 超过坝顶高度 Z ，便会引起漫坝风险。

上游洪水与水库下泄流量过程线对比图(图1)中，阴影部分表示控泄时电站的净入库流量与非控泄时的净入库流量之差，在 t_0 到 t_2 同一时段内，控泄流量越小，阴影面积越大，水库水位越高，风险越大。上游水位与下泄流量关系对比图(图2)表示此时间段内，控泄时上游水位上升的速度大于非控泄时的水位，表明控泄条件下漫坝风险较非控泄时更大。

若控泄时的风险率为： $R = P(H > Z)$ ，下游拟建电站导流施工年限 n 年内遭遇超库容的综合动态风险率为：

$$R(n) = 1 - (1 - R)^n \quad (1)$$

在非控泄情况下，坝前水位 $H' < H$ ，此时的风险率为： $R' = P(H' > Z) < R$ ，综合动态风险率 $R'(n) = 1 - (1 - R')^n < R(n)$ 。

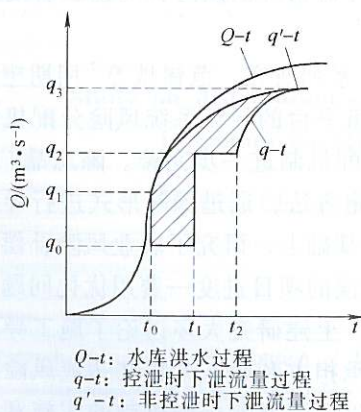


图1 上游洪水与水库下泄流量过程线对比

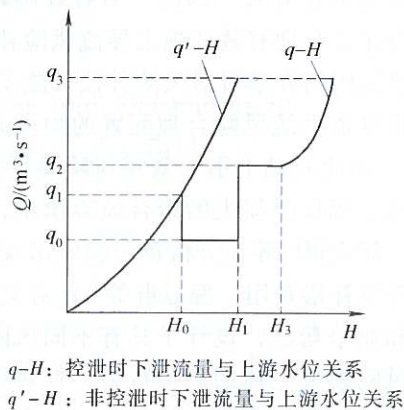


图2 上游水位与下泄流量关系对比

控泄风险成本包括溃坝直接经济损失和间接经济损失。考虑到河道具有一定的滞洪能力和汛期下游会采取一定的预防溃坝的措施，风险成本中不考虑下游的淹没的损失，只计算库区内的直接经济损失，包括实物型损失 $C_1(n)$ 和收益型损失 $C_2(n)$ 。

实物型损失是指溃坝后导致全部或部分机器，建筑物，构筑物等固定和流动资产的实体价值减少或修复重置的费用。收益型损失是指是指由于溃坝引起的除实物型损失以外的因生产经营性经济活动中断造成的收益损失，如发电损失，库区运输、供水供电等部门经济活动中断而引起的损失。

从下游电站施工到竣工， n 年内遭遇超库容风险成本函数为：

$$C_p = \sum_{m=0}^n [C_1(m) + C_2(m)] (1+i)^{-m} [R(m) - R'(m)] \quad (2)$$

式中: n 为下游拟建电站施工导流年限; i 为风险损失折算成投资概算基准年的折现率。

2.2 控泄发电成本计量 由于上游水库控泄改变了洪水的时空分布, 使电站的发电量和保证出力等发生改变, 从而改变了其发电效益。在洪水汛期施工时, 为降低下游在建工程施工洪水, 在坝高一定的情况下, 最常用的途径是降低汛期水位, 预留调洪库容。这一方式必然会降低上游水电站发电效益, 产生发电损失。而在枯水期施工时, 上游保证下游施工安全前提下, 增大出库流量增加发电量。从整体运行方式来看, 引入了下游施工导流约束, 最终发电效益有所减小。

设在 t 时刻, 非控泄情况下泄流量为 $q'_k(H, t)$, 上下水位之差为 $Z'_k(t)$ 。控泄情况下, 经过时间 Δt , 水头差变为 $Z_k(t)$, 其中控泄流量为 $q_k(H, t)$ 。根据水能出力公式, 控泄产生的发电成本函数为:

$$C_f = \int_{\Delta t} \int_{\Delta H} e k p \eta [Z'_k(t) q'_k(H, t) - Z_k(t) q_k(H, t)] dH dt \quad (3)$$

式中: C_f 为发电损失; p 为上网电价; η 为水轮机功率; k 为出力系数; e 为施工期内控泄次数。

3 下游控泄效益

对于下游在建导流工程来说, 上游水库控泄首先降低施工导流标准和设计流量, 减小了施工导流建筑物规模, 节约了临时工程的投资; 其次缩短了主体工程工期, 减小资金的时间成本, 使下游电站获得提前发电的收益。因此, 下游导流系统因控泄带来的效益主要可分为投资效益和进度效益。

3.1 投资效益计量 影响导流工程投资因素众多, 其中导流标准是重要因素之一。上游控泄来调节施工汛期的导流流量, 根据上游控泄的流量, 选定下游的导流标准和导流设计流量, 从而确定导流建筑物和工程量。导流标准的不同, 影响导流建筑物逐年的投资, 进而影响工程总投资。非控泄时工程投资函数如下:

$$C_{qm}(\tilde{q}) = C_{1m} + C_{2m} + C_{3m} \quad (4)$$

式中: $(\tilde{q})$ 为非控泄时导流设计流量; C_{1m} 为第 m 年工程静态投资; C_{2m} 为第 m 年价差预备费; C_{3m} 为第 m 年建设期贷款利息。

已知 i_c 为投资年利率, $C_{qm}(q_k)$ 为控泄流量为 q_k 时第 m 年下游工程投资, 则控泄带来的投资效益:

$$B_q = \sum_{m=0}^n [C_{qm}(\tilde{q}) - C_{qm}(q_k)] (1 + i_c)^{-m} \quad (5)$$

3.2 进度效益计量 控泄减小导流施工难度, 加快大坝整体施工进度, 使水电枢纽早日投产运行。因此下游的进度效益主要是指工期提前产生的发电效益。如果工期缩短为 $N_1 - N_2$ 年, 年有效发电时间为 h , 发电机组装机容量 W 。则由于工期提前而产生的发电效益函数为:

$$B_q = p h W (N_1 - N_2) \quad (6)$$

此外, 进度提前还节省了贷款利息支出, 增加了资金的投资机会的正效益。由于该效益已涵盖在投资效益计算中, 在此不再列入进度效益, 以免重复计量。

4 风险补偿模型及均衡

4.1 风险补偿模型建立 控泄对上游电站和下游导流系统带来了利益冲突, 为保证上游电站参与控泄, 可采取下游导流系统对上游控泄电站在旁支付^[9]的风险补偿形式。参与双方依据个体理性在相应制度约束下, 应追求自身利益最大化^[10-11]。 U_s 、 U_x 分别为补偿支付后上游控泄电站和下游导流系统的效益函数:

$$\max U_s = P - C_p - C_f \quad (7)$$

$$\max U_x = B_q + B_p - P \quad (8)$$

从式(7)、式(8)中可知,无论补偿金额为多少,个人理性决策都无法满足同时双方共同利益最大化。因此,个人理性决策存在局限性。由于下游导流系统为补偿主体,可看成设计补偿机制的委托人,而上游水库即代理人实际上无法根据补偿机制最大化自己的效用,因而会由于服从整体利益而出现某种程度的非理性行为。

因此,下游导流系统在设计补偿机制时,面临两个约束:(1)使上游得到的预期收益必须不小于不接受这个机制时能得到的最大预期收益,才有兴趣参与控泄行为,即满足控泄行为的参与约束或称个人理性约束(Individual Rationality Constraint, IR),显然,当补偿额度 P 大于或等于控泄成本时,上游有参与控泄的动力,因为参与得到的收益至少比不参与差;(2)下游导流系统在参与约束条件下要保证自身利益最大化,以激发下游参与积极性,否则拒绝支付风险补偿,即满足激励相容约束(Incentive Compatibility Constraint, IC)^[12]。上游控泄的梯级导流风险补偿均衡模型可表述为委托—代理模型^[13]:

$$\begin{cases} \max_{q_k} U = B_p + B_q - P & (IC) \\ \text{s.t. } P \geq C_p + C_f & (IR) \end{cases} \quad (9)$$

(1)泄流量约束:

$$q_{\min} \leq q_k(H, t) \leq \min(Q_{\max}, q_s - q_h) \quad (10)$$

(2)导流工程投资约束:

$$C_{qn}(q_s) \leq C_{qn}(\tilde{q}) \leq C_{q\max} \quad (11)$$

(3)上游控泄成本约束:

$$C_p \leq C_{p\max}, C_f \leq C_{f\max} \quad (12)$$

(4)导流工期约束:

$$N_1 \leq N_2 \leq N_{\max}, i_0 \leq i_c \quad (13)$$

式中: P 为补偿金; $q_{\min}$ 为上游电站的最小下泄流量; $Q_{\max}$ 为上游电站最大泄流能力; $C_{f\max}$ 为上游电站允许的最大发电损失; $C_{p\max}$ 为溃坝后的实物和收益最大损失之和 $\sum_{m=0}^n [C_1(m) + C_2(m)](1+i)^{-m}$; $C_{q\max}$ 为导流工程投资上限; $N_{\max}$ 为导流工程工期上限; i_0 为导流工程投资项目基准折现率。

4.2 均衡模型求解 为保证动态控制水位和下泄流量,要求上游水电站在服从一定的控泄规则下,进行均衡模型的求解。显然,当补偿额等于上游电站控泄损失,即 $P = C_p + C_f$ 时,是模型的均衡状态。既能保持上游水电站参与控泄,又能保证下游利益最大化,使双方达成控泄补偿共识。将参与约束的边界值代入目标函数得到关于 q_k 的函数:

$$\max_{q_k} U = B_p + B_q - C_p - C_f \quad (14)$$

为了让函数 U 可导, C_p 中的风险率 R 的分布需要通过系统模拟的方法得出。由水文随机参数和分布抽样得到一个随机洪水过程 F_{in} ; 由水力随机参数额分布抽样得到对应的泄流建筑的泄流量 q_k 。通过随机抽样和一系列调洪演算,可得坝前水位概率分布 $P=f(H)$; 而设计水位的风险率实际上是这个密度函数的一个分位点的值,即: $R = P(H < Z) = \int_{-\infty}^Z f(H) dH = F(H)$ 。由于 $q_k = q_k(H, t)$, $H = q_k^{-1}(q_k)$, 所以 $R = F(q_k^{-1}(q_k))$, 因此风险度可简化为关于控泄流量 q_k 的函数即: $R = \bar{F}(q_k)$, 表示控泄流量下的风险率; $R' = \bar{F}'(q_k)$ 表示非控泄时下泄流量下的风险率。对 U 求一阶导数得:

$$dU/dq_k = d \left\{ \sum_{m=0}^n a(m) (1 - \bar{F}(q_k))^m + \beta q_1 - \sum_{m=0}^n \chi(m) C_{mq}(q_k) \right\} / dq_k = 0 \quad (15)$$

其中: $a(m) = [C_1(m) + C_2(m)](1+i)^{-m}$; $\beta = kp\eta e \int_{\Delta t} Z_k(t) dt$; $\chi(m) = (1+i)^{-m}$ 。

微分方程求解,可找到最优平均控泄流量 q^* ,使得目标函数 U 达到最大。此时,可得出补偿金

额 P :

$$P = \sum_{m=0}^n a(m) \left[\left(1 - \overline{F}(q'_k) \right)^m - \left(1 - \overline{F}(q^*) \right)^m \right] + kp\eta e \iint (Z'_k q'_k - Z_k q^*) dH dt \quad (16)$$

5 实例分析及其计算结果

5.1 工程背景 某流域有已建水电站 A, 多年平均流量 $235 \text{ m}^3/\text{s}$, 水库蓄水位 413 m , 总装机容量为 150 kW , 多年平均年发电量为 $20.37 \text{ 亿 kW} \cdot \text{h}$ 。设计洪水标准为 500 年一遇, 相应流量为 $19\,100 \text{ m}^3/\text{s}$, 库水位为 418.3 m 。校核洪水标准为 $5\,000$ 年一遇, 相应流量为 $26\,200 \text{ m}^3/\text{s}$, 坝顶高程为 423.5 m 。电站 A 下游 250 km 处有水电站 B 老化严重, 存在安全隐患, 需要重建。采用原大坝作为上游围堰, 采用河床一次断流的导流方式。初拟导流设计标准为 10 年一遇和 20 年一遇, 施工总工期为 7 a 。为保障下游导流防汛安全, 拟采用调蓄能力较强的电站 A 进行控泄。洪水控泄规则如表 1 所示。

表 1 水电站 A 洪水控泄规则

条件 1	判定条件	条件 3	下泄流量
	条件 2		
	$H_B \leq 264.1 \text{ m}$	$Q_A < 4000 \text{ m}^3/\text{s}$	$q < 1500 \text{ m}^3/\text{s}$
$413.0 \text{ m} \leq H_A < 416.5 \text{ m}$	且未出现 $Q_B > 25900 \text{ m}^3/\text{s}$	$4000 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_A < 7220 \text{ m}^3/\text{s}$	$q < 2500 \text{ m}^3/\text{s}$
		$Q_A \geq 7220 \text{ m}^3/\text{s}$	$q < 5900 \text{ m}^3/\text{s}$
	$H_B > 264.1 \text{ m}$ 或 $Q_B > 25900 \text{ m}^3/\text{s}$		$q < 1500 \text{ m}^3/\text{s}$
	$Q_A < 10000 \text{ m}^3/\text{s}$ 且 $Q_B > 25900 \text{ m}^3/\text{s}$		$q < 1500 \text{ m}^3/\text{s}$
	或 $H_B > 264.6 \text{ m}$		
$416.5 \text{ m} \leq H_A < 418.3 \text{ m}$	除前栏其他情况	$H_A < 417.5 \text{ m}$	$q < 7800 \text{ m}^3/\text{s}$
		$H_A \geq 417.5 \text{ m}$	开启全部泄流设施
$H_A \geq 418.3 \text{ m}$			开启全部泄流设施

注: H_A 为 A 上时段末水位, H_B 为 B 上时段末水位; Q_A 为 A 上时段天然状态下平均入库流量; Q_B 为 B 上时段入库流量; q 为 A 该时段下泄流量。

5.2 控泄风险及效益计算 根据电站 A 从 1937—2010 年 73 年历史洪水资料, 确定典型洪水过程线作为调洪演算的设计过程线; 用不对称三角形分布描述电站泄水建筑物泄流的不确定性, 用蒙特卡洛法分别测度电站 A 控泄和非控泄的风险。以控泄规则为参考, 对判定条件赋予时间权重, 得出 3 种不同平均下泄流量下的控泄方案。计算备选方案风险度、发电损失及风险成本与其在非控泄下的比较, 结果如表 2 所示。

表 2 各控泄方案下的上游控泄成本对比

条件	控泄方案 1	控泄方案 2	控泄方案 3	非控泄
平均下泄流量/(m^3/s)	2 500	2 000	1 500	7 800
上游发电损失/万元	81.72	108.96	127.7	0
上游水电站风险度 R	0.006 9	0.007 5	0.009	0.001 3
上游风险成本/万元	1 470.10	1 597.83	1 917.40	276.96

考虑到本工程导流建筑物保护对象特性和上游来水以及区间洪水情况, 初期施工导流标准定为: 控泄方案 1、2、3 采用 10 年一遇洪水标准, 非控泄方案采用 20 年一遇洪水标准。不同控泄方案下的各导流标准的投资估算对比如表 3 所示; 由于 3 种控泄方案均对施工工期影响较小, 工期提前产生发电效益的差异可忽略不计, 如表 4 所示。

5.3 补偿结果 根据式 (16) 可得出 3 种控泄方案下对应的总效用 U 和补偿额 P , 如表 5 所示, 效用函数值 U 随着控泄流量 q_k 呈先增大后减小的趋势, 补偿额度随着控泄流量减小而增大。结合风险补偿

表3 各导流标准下的投资估算对比

(单位: 万元)

建设工期	10年一遇标准				20年一遇标准			
	控泄方案1				非控泄			
	静态投资	价差 预备费	建设期贷款 利息	动态投资	静态投资	价差 预备费	建设期贷款 利息	动态投资
$i_c=8\%$								
筹建期	19 281	0	443	19 724	19 281	0	443	19 724
第一年	56 359	1 127	2 234	59 720	56 359	1 127	2 234	59 720
第二年	59 514	2 404	5 111	67 029	59 514	2 404	5 111	67 029
第三年	83 784	5 128	8 880	97 792	92 157	5 128	9 210	106 495
第四年	70 148	5 782	13 196	89 126	76 283	5 782	15 950	98 015
第五年	88 378	9 198	17 968	115 544	98 331	9 198	18 900	126 429
第六年	215 994	27 250	26 868	270 112	222 759	27 250	31 030	281 039
第七年	120 665	17 941	27 929	166 535	121 265	17 941	32 215	171 421
	控泄方案1		控泄方案2		控泄方案3		非控泄	
总工程投资	885 582		876 726		875 071		929 872	
投资效益	30 588.83		30 984.12		31 023.70		0	

表4 各导流标准下施工进度效益对比

导流标准	方案	总工期/月	主体工程施工工期/月	首台机发电工期/月	提前发电效益/万元
10年一遇标准	1、2、3	76	43	61	1 060
20年一遇标准	非控泄	78	45	63	0

表5 各控泄方案下的补偿结果对比

(单位: 万元)

参数值	B_p	B_q	C_p	C_q	U	P	$q_d/(m^3/s)$
方案1	30 588.83	1 060	1 193.14	81.72	3 0374.11	1 274.72	2 500
方案2	30 984.12	1 060	1 320.87	108.96	3 0614.16	1 429.96	2 000
方案3	31 023.70	1 060	1 640.44	147.70	3 0315.56	1 768.14	1 500

均衡模型可知, 必然有一点 $q_k=q^*$, 即最优控泄流量, 使效用函数 U 达到最大值, 既保证下游电站的参与控泄又使下游导流系统达到最大效益而意愿支付补偿。

如前所述, 风险度可化为关于控泄流量 q_k 的解析式: $R = \bar{F}(q_k)$, 本文采用曲线估计对控泄流量的实测数据和风险度进行拟合。选取线性、对数、幂、指数函数进行拟合度比较, 表6所示风险度与控泄流量对应表, 图3所示风险度与控泄流量拟合函数比较图, 最终选择拟合度最高并且 F 统计量的显著值远远小于0.01的对数函数, 在满足下泄流量、投资、工期等约束条件下的函数解析式可表述为: $R = 0.0436 - 0.00473 \ln q_k$ 。

表6 不同控泄流量下风险度计算结果

控泄流量 $/(m^3/s)$	2 500	2 000	1 500	4 000	4 200	5 900	7 700	7 800
上游水电站风险度 R	0.006 9	0.007 5	0.009	0.004 4	0.004 1	0.002 8	0.001 54	0.001 5

同理, 控泄下的导流工程投资 C_q 与泄流量 q_k 的关系可表示为: $C_q = 9.301q_k + 857534$ 。代入式(11)求出最优控泄流量 $q^* = 2267.14 m^3/s$, 使目标函数达到最大。此时, 该控泄流量下的上游风险成本 $C_p = 1207.53$ 万元, 下游支付上游的补偿额 $P = 1289.76$ 万元。

6 结论

本文以水电站梯级开发建设为背景, 讨论了上游电站控泄情况下对自身以及下游施工导流的影