

多主体梯级电站补偿效益分摊的改进Raiffa法

秦 朗¹, 任 黎^{1*}, 蒋谋智², 杜兴强²

¹河海大学水文与水资源学院, 江苏 南京

²长江水利委员会水文局荆江水文水资源勘测局, 湖北 荆州

收稿日期: 2025年9月17日; 录用日期: 2025年10月3日; 发布日期: 2025年10月30日

摘 要

针对传统效益分摊方法在多主体梯级水电站联合调度效益分摊时的局限性, 提出改进Raiffa法效益分摊方法, 对乌江流域六座梯级水库联合优化调度的补偿效益分摊问题进行求解, 并与单指标法、信息熵法、熵权法等分配方法进行对比, 最后采用分配策略倾向分析对分摊结果进行评定。乌江梯级实例结果表明, 改进Raiffa法计算效率高、分摊结果好, 梯级多业主情形下可以得到公平、合理且稳定的效益分配结果。该方法能够为解决多主体梯级水电站联合调度效益分配问题提供新的思路和方法, 调动梯级电站联合运行的积极性, 提高水资源利用率。

关键词

效益分摊, 多业主梯级水电站, 联合调度, 改进Raiffa法

Improved Raiffa Method for Compensation Benefit Allocation of Multi-Agent Cascade Power Stations

Lang Qin¹, Li Ren^{1*}, Mouzhi Jiang², Xingqiang Du²

¹College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing Jiangsu

²Jingjiang Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Jingzhou Hubei

Received: September 17, 2025; accepted: October 3, 2025; published: October 30, 2025

Abstract

Addressing the limitations of traditional benefit allocation methods in distributing the joint operation

作者简介: 秦朗(2004-), 男, 主要研究方向水文与水资源工程。Email: 2418597827@qq.com

*通讯作者 Email: renli@hhu.edu.cn

文章引用: 秦朗, 任黎, 蒋谋智, 杜兴强. 多主体梯级电站补偿效益分摊的改进 Raiffa 法[J]. 水资源研究, 2025, 14(5): 515-523.
DOI: 10.12677/jwrr.2025.145056

benefits among multiple stakeholders in cascade hydropower stations, this study proposes an improved Raiffa method for benefit allocation. The method is applied to solve the compensation benefit allocation problem arising from the joint optimal operation of six cascade reservoirs in the Wujiang River basin. The allocation results are compared with those obtained using single-indicator methods, the information entropy method, and the entropy weight method. Finally, an allocation strategy tendency analysis is employed to evaluate the allocation outcomes. The case study of the Wujiang cascade demonstrates that the improved Raiffa method offers high computational efficiency and produces superior allocation results. Under multi-owner cascade scenarios, it yields fair, appropriate, and stable benefit distribution outcomes. This method provides a new approach for solving the benefit allocation problem in the joint operation of multi-stakeholder cascade hydropower stations. It can mobilize the enthusiasm for cascade joint operation and improve water resource utilization efficiency.

Keywords

Benefit Distribution, Multi-Owner Cascade Hydropower Station, Joint Operation, Improve Raiffa Method

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国水电资源的规模不断增加以及相关政策的不断完善,梯级水电站联合调度是优化资源配置的必然趋势[1][2]。然而梯级水电可能分属不同业主,难以实现全流域水电资源联合优化。隶属于不同业主的梯级水电站群需要建立完善的梯级利益分摊和效益补偿机制推进梯级水电联合运行调度[3][4]。

国内外许多学者针对该问题做了许多研究,如:单指标法[5]、综合分析法(离差平方法[6]、逼近理想解法[7])以及合作博弈的 Shapley 值法[8]与客观权重组合法(变异系数-Shapley 值法[9])、信息熵法[10]等,其中:单指标法虽然比较简单,但结果较为片面;综合分析法主观性强,难以体现公平性;Shapley 值法及其组合方法较为公平,但是存在当主体数量增加计算量呈指数级增长且没有考虑电站主体间地位差异的缺点;信息熵法求解较为简单,但其结果存在一定随机性。针对传统效益分摊方法的局限性,提出多主体梯级水电站增益分摊的改进 Raiffa 法。该方法在利用 CRITIC 法对电站进行综合评价后,结合 Raiffa 法对梯级联合调度效益进行分摊,并采用分配策略倾向分析(MDP)的方法对分摊结果进行评定。实例结果表明,本文方法能够为解决多主体梯级水电站联合调度效益分配问题提供新的思路和方法。

2. 基于改进 Raiffa 法的效益分摊模型

Raiffa 法是求解合作博弈问题的重要方法,广泛应用于快递企业共同配送利益分配问题[11]、存货资金质押融资分配问题[12]等多个方面,其最显著特点是克服了目前公认比较公平但计算量随主体数量增多呈指数增加的 Shapley 值法缺点。Raiffa 法基本原理是计算联盟中各主体的效益分配上下限,得到各主体对联盟效益贡献大小,将其作为效益分摊的依据。然而,Raiffa 法同样存在缺陷:假设各成员在联盟中地位相等,没有考虑联盟中各成员重要程度。对于梯级水电合作博弈问题,由于各水电站的核心能力和特征参数各不相同,在联盟中发挥的作用和地位也不同,需要对各电站地位进行综合评价才能使效益分摊结果更加公平合理,所以需要对传统的 Raiffa 法进行改进。

2.1. 改进 Raiffa 法基本思路

本文采用组合法对 Raiffa 法进行改进,即首先对电站地位进行综合评价,然后再采用矩估计理论将电站综

合评价指数与 Raiffa 法结合。

CRITIC 法在赋权时比较客观, 它根据电站参数的对比强度和参数之间的冲突性来综合衡量参数的客观权重, 考虑参数变异性大小的同时兼顾参数之间的相关性, 完全利用电站自身的特征参数进行科学评价, 因此本文将 CRITIC 法与 Raiffa 法结合, 具体步骤如下:

1) 计算电站综合评价指数: 假设 N 个电站, J 类参数参与综合评价计算, 第 i 座电站第 j 个参数表示为 x_{ij} 。

CRITIC 法进行电站综合评价步骤:

① 选取电站特征参数: 选择电站具有代表性的参数以保证电站综合评价可靠性。

② 对电站参数进行赋权。通过计算 j 个参数相关性值和变异性值后, 将变异性值与相关性值做乘积, 得到第 j 类参数的信息量; 然后对参数信息量归一化处理, 得到第 j 类电站参数权重。

$$R_j = \sum_{i=1}^N (1 - r_{kj}) \quad (1)$$

$$\theta_j = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / (j-1)} \quad (2)$$

$$C_j = R_j \cdot \theta_j \quad (3)$$

$$\omega_j = C_j / \sum_{j=1}^N C_j \quad (4)$$

式中: R_j 表示参数相关性值; θ_j 表示参数变异性值; r_{kj} 表示参数相关系数; $\bar{x}_j$ 表示第 j 类参数最大值; C_j 表示第 j 类参数的信息量; ω_j 第 j 类电站参数权重。

③ 对电站进行综合评价:

$$E_i = \sum_{j=1}^N [x_{ij} \cdot \omega_j] / \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [x_{ij} \cdot \omega_j] \quad (5)$$

式中: E_i 表示第 i 座电站综合评价值。

2) Raiffa 法进行效益分摊求解步骤下:

以 N 座电站联合调度电站效益分配求解为例:

① 计算 N 座电站联合调度效益 B_N 、任意除去 i 电站的 $(N-1)$ 座电站子联盟的效益 $B_{(N \setminus i)}$ 以及第 i 座电站单独调度效益 B_i 。

② 对各电站效益分配上下限求解:

$$\underline{S}_i = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (B_{(N \setminus i)}) - B_{(N \setminus i)} \quad (6)$$

式中: $\bar{S}_i$ 表示第 i 座电站效益分配上限; $\underline{S}_i$ 表示第 i 座电站效益分配下限。

③ 对效益进行初次分配: 分配时 i 电站保留分配自身上限的一半, 剩余一半 $(N-1)$ 座电站均分, 对联盟各电站进行初次效益分配遍历。

④ 对效益进行再次分配, 对电站遍历得效益求和平均得到 Raiffa 法各电站分配效益:

$$S_i = \frac{(N-1)\underline{S}_i}{N} + \frac{1}{N} \left[\frac{\bar{S}_i}{2} + \frac{1}{2(N-1)} \sum_{j \neq i} \bar{S}_j \right] \quad (7)$$

式中: S_i 表示第 i 座电站分配效益。

将 $\bar{S}_i$ 、 $\underline{S}_i$ 代入效益再次分配公式后化简得到:

$$S_i = \frac{B_N}{N} + \frac{2N-3}{2(N-1)} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [B_{(N \setminus i)}] - B_{(N \setminus i)} \right] \quad (8)$$

则 Raiffa 法计算第 i 座电站补偿效益分摊比例为:

$$D_i = \frac{S_i - B_i}{B_N - \sum_{i=1}^N B_i} \quad (9)$$

式中: B_i 表示第 i 座电站单独调度效益。

3) 采用组合法对 Raiffa 法进行改进: 设 Raiffa 法与综合评价指数的相对重要程度分别为 ε 和 λ , 结合统计学中矩估计理论[13]的思想, 指标重要系数 ε_i 和 λ_i 计算方法为:

$$\begin{cases} \varepsilon_i = D_i / (D_i + E_i) \\ \lambda_i = E_i / (D_i + E_i) \end{cases} \quad (10)$$

式中: ε_i 表示第 i 座电站 Raiffa 法比例系数, λ_i 表示第 i 座电站综合评价指数比例系数。

改进 Raiffa 法第 i 座电站分摊比例为:

$$P_i = \frac{\varepsilon_i \cdot D_i - \lambda_i E_i}{\sum_{i=1}^N [\varepsilon_i \cdot D_i - \lambda_i E_i]} \quad (11)$$

式中: P_i 表示第 i 座电站补偿效益分摊比例。

2.2. 分配策略倾向评价法

按 2.1 节方法对梯级水电站进行补偿效益分摊后, 需对分摊结果进行评价以验证分摊方法的公平性与合理性。本文采用基于 PTD 改进后 MDP 评价方法。MDP 是对 PTD 进行修正后的指标[14], MDP 能明确给出主体联盟与否的门槛值, 意义更为直观。公式如下:

$$\phi_i = \frac{1}{N-1} \frac{\sum_{j=(N \setminus i)}^N [B_{(N)} \cdot P_j] - B_{(N \setminus i)}}{B_{(N)} \cdot P_i - B_{(i)}} \quad (12)$$

式中: $\sum_{j=(N \setminus i)}^N B_{(N)} \cdot P_j$ 表示电站 i 参与联合调度时其他电站获得的总收益; P_i 表示第 i 座电站补偿效益分摊比例;

ϕ_i 代表的电站对合作博弈分配策略的倾向, 当 ϕ_i 在 0~1 之间时, 电站倾向接受分配结果。

3. 实例分析

3.1. 工程背景及案例设计

选取乌江干流电站中的洪家渡、东风、索风营、乌江渡、构皮滩、思林六座电站作为研究对象, 电站分布情况见图 1, 该六座电站均参与贵州电网, 实际中六座电站业主都为华电集团, 为了验证本研究分配模型的有效性, 假定电站分属于不同业主, 可随机进行电站联合调度, 构建固定电价模式下的发电效益最大模型, 模型求解算法采用 POA-DDDP [15]。目标函数如下式:

$$F_N = \max \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^N [N_i^t \Delta t p_i^t] \right] \quad (13)$$

式中: F_N 表示效益目标值; N 表示联盟电站数量; t 表示时段序号; T 表示时段总数; N_i^t 为第 i 个电站在 t 时段

的平均出力, MW; Δt 为 t 时段小时数, h ; p_i^t 表示第 i 座电站联盟时第 t 时段上网电价, 元/(kW·h)。函数约束如下:

1) 水量平衡约束

$$V_i^{t+1} = V_i^t + (Q_{i,input}^t - Q_{i,output}^t) \Delta t \times 3600 \quad (14)$$

式中: V_i^t 、 V_i^{t+1} 表示电站 i 在第 t 时段始末库容, m^3 ; $Q_{i,input}^t$ 和 $Q_{i,output}^t$ 为电站 i 第 t 时段的入库流量和出库流量, m^3/s 。

2) 库容约束

$$V_i^{t,min} \leq V_i^t \leq V_i^{t,max} \quad (15)$$

式中: $V_i^{t,max}$ 、 $V_i^{t,min}$ 表示第 i 个电站在第 t 时段库容上下限, m^3 。

3) 出力约束

$$N_i^{t,min} \leq N_i^t \leq N_i^{t,max} \quad (16)$$

式中: $N_i^{t,max}$ 、 $N_i^{t,min}$ 表示第 i 个电站在第 t 时段出力上下限, MW。

4) 出库流量约束

$$Q_{i,output}^{t,min} \leq Q_{i,output}^t \leq Q_{i,output}^{t,max} \quad (17)$$

式中: $Q_{i,output}^{t,max}$ 、 $Q_{i,output}^{t,min}$ 表示第 i 个电站 t 时段出库流量上下限, m^3/s 。

	电站	装机容量 (MW)	额定水头 (m)	保证出力 (MW)	调节库容 (亿 m^3)	多年平均 发电量 (亿kW·h)	调节能力
	洪家渡	600.0	135.0	159.0	33.6	15.9	多年调节
	东风	695.0	117.0	236.0	4.9	24.2	不完全年
	索风营	600.0	69.0	166.9	0.7	20.1	日调节
	乌江渡	1250.0	134.2	399.0	13.5	40.6	不完全年
	构皮滩	3000.0	175.5	746.4	29.0	96.8	多年调节
	思林	1050.0	64.0	303.6	3.2	40.6	日调节

图 1. 乌江梯级电站拓扑图

3.2. 梯级六库效益分摊

梯级电站组合形成不同子联盟情形调度结果如表 1 所示: 表中洪-东索乌构思表示洪家渡电站单独调度, 其余电站联合调度。

表 1. 各电站不同联盟情形下调度结果

电站/联盟	洪家渡	东风	索风营	乌江渡	构皮滩	思林	总计/亿元
单独调度	4.3	5.2	4.8	9.7	23.9	9.4	57.4
洪 - 东索乌构思	4.3	6.1	5.6	10.7	28.4	12.5	67.6
东 - 洪索乌构思	4.4	5.2	5.9	11.3	28.1	12.5	67.4
索 - 洪东乌构思	4.0	7.2	4.8	11.3	28.7	12.5	68.6
乌 - 洪东索构思	4.0	7.2	5.9	9.7	28.3	12.5	67.6
构 - 洪东索乌思	4.0	7.2	5.9	11.2	23.9	12.2	64.4
思 - 洪东索乌构	3.6	7.0	5.7	10.8	24.9	9.4	61.4
完全联合调度	4.0	7.2	5.9	11.3	28.3	12.5	69.2

从表 1 中可以看出，梯级电站完全联合调度相较于单独调度龙头电站效益减少 0.3 亿元，梯级效益增加 11.8 亿元；在各电站单独调度情形下，各电站完全从自身效益出发，未充分利用梯级水资源，发电水头不运行于梯级最优状态，导致六座电站整体效益较差；而电站联合调度时，上游电站可以调节自身出库流量使得下游电站处于梯级最优发电效益策略；当“思 - 洪东索乌构”联盟情形时，因思林电站为日调节电站，装机容量较大但是没有调节库容所以单独调度效益较差，而洪家渡电站为保障下游调节能力较大的电站的发电流量，进一步牺牲自身效益，导致该联盟方式在联盟情形下效益最低。龙头电站牺牲自身效益从而增加梯级整体收益；因此要维持多主体梯级电站补偿调度的长期稳定存在，需对补偿效益进行各主体间的再分配，对龙头电站进行效益补偿。对补偿效益分别采用改进 Raiffa 法、信息熵法、单指标法等多方法进行分配。各分配方法计算后效益分配比例计算结果如表 2 所示：从表中可以看出，各方法对于调节能力弱的电站效益分配比例是比较趋于一致的，主要的分歧在于洪家渡、乌江渡、构皮滩三座电站。各方法分配结果与 MDP 评价结果分布如图 2~图 5 所示。

表 2. 各方法效益分配比例

电站	改进 Raiffa 法	信息熵法	装机容量	兴利库容	熵权法
洪家渡	0.10	0.11	0.08	0.08	0.09
东风	0.11	0.11	0.10	0.12	0.10
索风营	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08
乌江渡	0.17	0.16	0.17	0.20	0.18
构皮滩	0.39	0.37	0.42	0.37	0.40
思林	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14

1) 如图 3(b)改进 Raiffa 法进行效益分配时，六座电站中龙头电站效益增长 1.1 亿元，其他电站增长幅度都比较接近，且图 2 中可以看出各个电站 MDP 值均小于 1，集中在 0.1 左右，其中洪家渡与构皮滩 MDP 值分别为 0.09 和 0.18，说明两电站分配结果的公平性和合理性较高，改进 Raiffa 法对调节能力较强贡献度较大的电站进行了额外补偿，肯定了调节能力强的电站在梯级调度中的作用；同时其他调节能力较差的电站 MDP 值最大小于 0.5，说明弱势电站主体对分配结果也比较满意，倾向于留在联盟内，分配结果较为合理。

2) 如图 4(a)信息熵法效益分摊时从各电站效益增长比例及分摊比例来看，龙头电站与中游调节能力强的电站都分得较高的补偿效益，同时也没有忽略其他电站的贡献，结果较为合理；但是图 2 箱中各电站 MDP 值分布较为均匀但是分别集中在 0.7 与 0.1 左右，分为两个集中点说明信息熵法分摊各电站之间较差异较大，仅部分电站认为结果比较公平。

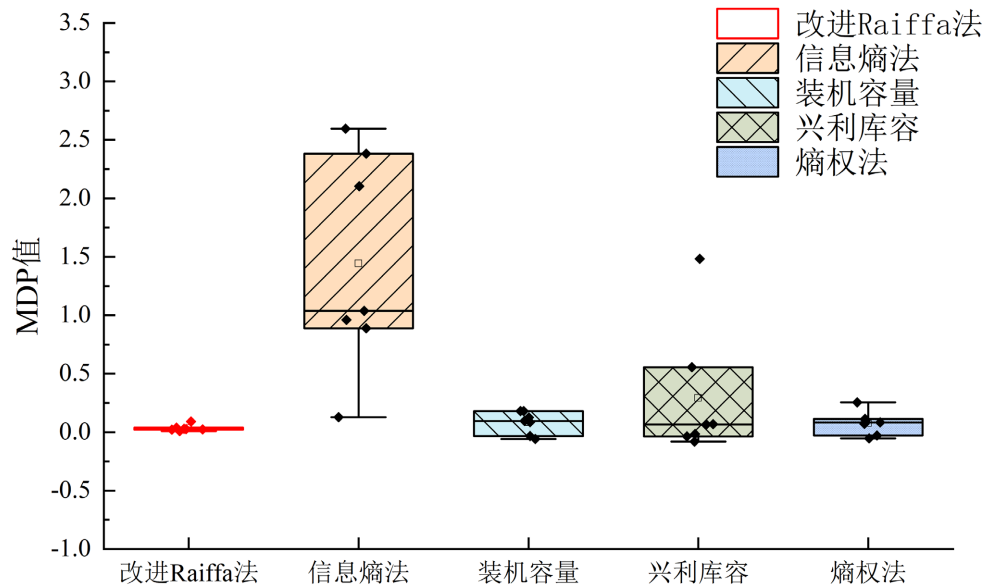


图2. 各水库不同增益分配结果的MDP值分布图

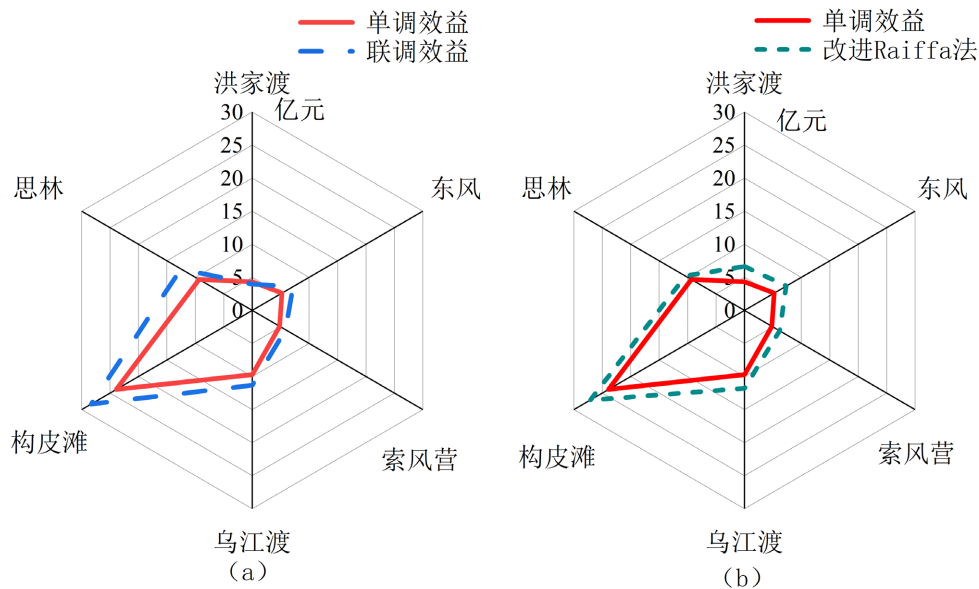


图3. 改进 Raiffa 法分摊结果

3) 以单指标法分配如图4(b)、图5(a)，若以兴利库容指标进行效益分配，则洪家渡分得最高补偿效益，索风营与电站因调节库容较小，分配效益仅为0.05亿元，图2中MDP最大值为3.0，倾向于离开联盟，其他电站MDP值并不集中的分布在从0~3之间，联盟趋于破裂；以装机容量进行分配时，由于下游电站装机容量较大，导致分配结果更偏向下游电站，虽各电站MDP值较小且较为集中，但是龙头电站分得补偿效益最少，对于龙头电站的梯级补偿调节作用未能较好体现，分配结果较为不公平。

4) 如图5(b)熵权法综合考虑以装机容量、保证出力等特征参数为代表的单指标分摊因素，相对单指标法更为合理，但是不能体现电站之间复杂效益贡献关系，而且忽略了指标本身重要程度。从六电站分摊结果来看：龙头电站与构皮滩占补偿效益的71.8%，东风和思林电站效益分配额过低，虽然其他五座电站MDP值比较接近且分布在0~0.5之间，但是思林电站效益增长仅为0.1亿元，其MDP值大于1倾向于离开联盟。

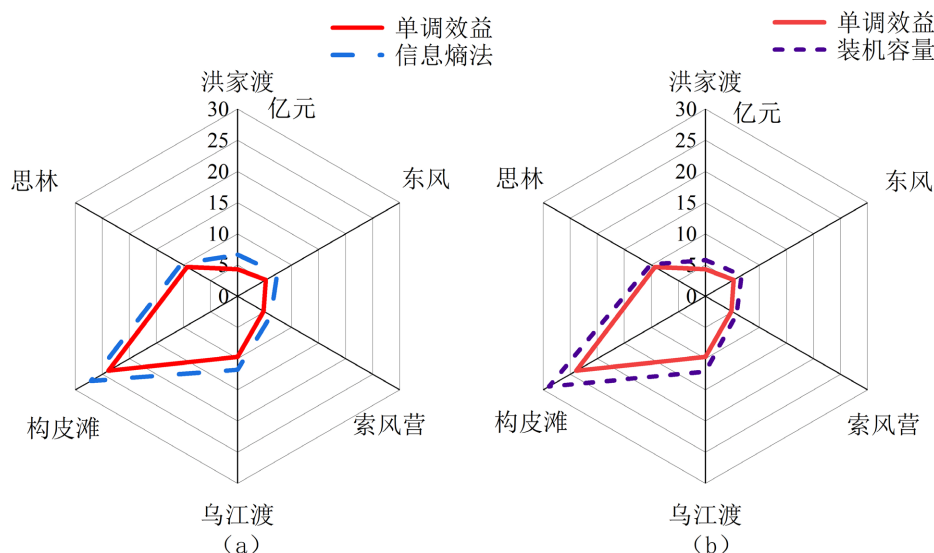


图 4. 信息熵法及装机容量法分摊结果

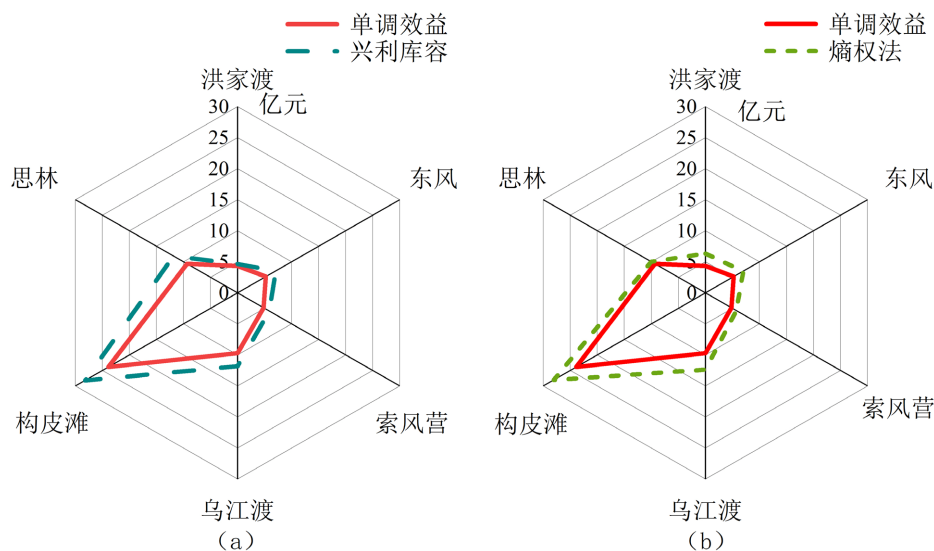


图 5. 兴利库容法及熵权法分摊结果

从各方法分配结果来看：考虑效益贡献率的角度出发的信息熵法分配结果相较于单指标法与熵权法更为合理，但是仅从梯级效益增长出发，并没有考虑到梯级电站基于自身能力对效益分配的诉求；而单指标法与熵权法则是单纯从电站自身效益角度出发，并未考虑各个电站对于补偿效益的贡献。从各分配方法中各电站分配比例及 MDP 值来看，在解决固定电价模式下六座电站联合调度效益分配问题时，改进 Raiffa 法相较于其他方法，可以用较少的计算量更为公平合理的完成任务。

4. 结论

本文得出的主要结论如下：

1) 梯级水电联合调度能显著增加梯级效益，改进 Raiffa 法针对 n 个电站仅需 $n+1$ 条信息，远小于 Shapley 值法的 $2n-1$ 条，相对于传统效益分摊方法，该方法在保留 Shapley 值法公平合理的优点同时降低计算量，保护弱势主体权益，计算简便高效，能有效解决多主体梯级电站补偿效益分摊问题，可以促进多主题梯级水电站

联合调度, 增加水资源利用效率。

2) 目前梯级电站效益分摊计算, 对社会贡献及生态贡献方面考虑较少, 梯级水库不仅承担防洪和发点任务, 还承担航运和生态流量保障的任务, 如何量化梯级电站的社会贡献及生态贡献, 需要进一步研究。

参考文献

- [1] 杨忠伟, 牟时宇, 陈在妮, 等. 大渡河流域梯级水电站智慧调度建设实践[J]. 水利水电快报, 2025, 46(3): 90-95+115.
- [2] 张睿, 刘备, 李纪辉. 梯级水库群洪水资源利用及汛期运行水位控制技术[J]. 水利水电快报, 2024, 45(7): 6-7.
- [3] 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(8): 7-14.
- [4] 杨春花, 杜康华. 基于 Shapley-Value 的梯级水库联合调度效益分配方法探讨[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(12): 53-57.
- [5] AMIT, R. K., SASIDHARAN, S. Measuring affordability of access to clean water: A coping cost approach. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 141: 410-417. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.003>
- [6] LEHTORANTA, V., SEPPALA, E. and KOSENIUS, A. K. Willingness to pay for water level regulation in Lake Pielinen Finland. Journal of Environmental Economics and Policy, 2013, 2(2): 148-163. <https://doi.org/10.1080/21606544.2013.764615>
- [7] 颜山凯, 黄显峰, 方国华, 等. 基于熵权 TOPSIS 法的梯级水电站补偿效益分摊模型研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(9): 76-80+28.
- [8] LIU, L., SUN, L. X. Benefit compensation of construction diversion in upstream flood discharge control based on improved shapley method. In 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013: 2202-2206. <https://doi.org/10.1109/smc.2013.377>
- [9] LI, W., YINGHAI, L. and YONGQIANG, W. Compensation benefits allocation and stability evaluation of cascade hydropower stations based on variation coefficient-shapley value method. Journal of Hydrology, 2021, 599: 126277.
- [10] 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.
- [11] 阮平南, 史文雷, 魏云凤. 基于修正 Raiffa 值的三阶段网络租金分配方法[J]. 软科学, 2019, 33(3): 111-114.
- [12] 魏子茹, 卢延辉, 王鹏宇, 等. 基于 CRITIC 法的灰色关联理论在无人驾驶车辆测试评价中的应用[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 99-108.
- [13] 潘旭, 王金丽, 赵晓龙, 等. 智能配电网多维数据质量评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1375-1384.
- [14] 王莹莹, 梅生伟, 刘锋. 混合电力系统合作博弈规划的分配策略研究[J]. 系统科学与数学, 2012, 32(4): 418-428.
- [15] 武新宇, 宋宇航, 曾博宇, 等. 水风光资源互补与调度互补评价方法研究[J]. 人民珠江, 2025, 46(10): 45-53.