

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221767

# 基于能值分析的漫湾水库生态服务价值优化调度

付江凤, 张代青, 张 惠, 马 森, 陈艺菁

(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 为保障河流水库生态系统健康发展的同时实现其服务价值的可持续利用, 将能值分析技术应用于水库生态调度探讨水库生态服务价值的能值优化调度问题, 以澜沧江中游河段漫湾水库生态系统服务功能的能值为优化目标, 以其生态需水和社会经济用水等为约束条件, 建立水库生态系统服务能值优化调度模型, 并采用蚁群算法进行求解。结果表明, 漫湾水库丰、平、枯水年服务总能值分别为  $2.10 \times 10^{22}$ 、 $1.79 \times 10^{22}$ 、 $1.58 \times 10^{22}$  sej, 总能值大小排序与水库来水流量一致; 漫湾水库生态服务价值主要体现在生态调节、淡水供给、生态支持三方面, 物质生产次之, 文化娱乐最小。研究结果可对维持澜沧江流域尤其是漫湾库区生态系统健康发展具有实际价值和重要意义。

**关键词:** 河流水库; 生态系统; 服务价值; 优化调度; 漫湾水库

**中图分类号:** TV697.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)07-0094-04

## 1 概况

漫湾水库是澜沧江中下游河段两库八级水电规划的第三级, 坝址以上流域面积  $11.45 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 多年平均流量  $1230 \text{ m}^3/\text{s}$ , 死水位 982 m, 防洪限制水位 985 m, 正常蓄水位 994 m, 总库容  $9.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 调节库容  $2.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 电站装机容量  $150 \times 10^4 \text{ kW}$ , 出力系数 8.4。漫湾库区多陡坡、断层发育、地表破碎、雨量集中, 且生态环境较为脆弱、易退化, 严重制约了区域经济发展。传统水库调节方式以追求经济效益为主, 忽视了生态系统健康, 引发了许多影响河流生态系统健康的问题<sup>[1,2]</sup>。现行的水库生态调度将生态因子增加到水库调度中, 统筹水库调度的各项要求, 降低水库调度对生态造成的负面影响, 如考虑鱼类产卵<sup>[3]</sup>、生态需水量<sup>[4]</sup>、生态保护<sup>[5]</sup>等的水库生态调度方式, 但存在生态调度目标单一、负面影响补偿不全面的缺点<sup>[6]</sup>。因此, 亟需深入研究漫湾水库生态调度问题, 补偿现行水库生态调度对河流水库生态系统健康带来的负面影响, 解决一系列河流水库生态系统健康问题。为此, 本文结合新兴的能值分析理论方法, 探讨河流水库生态系统服

务功能的能值优化调度问题; 以漫湾水库生态系统服务功能的能值为优化目标, 以其生态环境需水和社会经济用水为约束条件, 建立水库生态系统服务功能的能值优化调度模型, 并采用蚁群算法求解水库生态系统服务价值优化调度模型, 旨在综合解决河流水库生态环境需水、生态系统健康和水电资源开发等问题, 以维持河流水库生态系统健康发展、确保河流水能资源可持续利用。

## 2 水库生态服务价值的能值调度

### 2.1 基本概念

能值分析<sup>[7]</sup>能够统一标准, 实现生态系统内各种资源综合分析, 弥补能量分析存在的缺点, 成为联通生态系统与经济系统的桥梁<sup>[8]</sup>。水库生态服务价值调度以系统服务价值最大为目标, 以水位、生态流量、社会经济用水等为约束条件, 通过调度使水库所能提供的服务价值最优。基于能值分析的水库生态服务价值优化调度就是以水库生态系统服务功能的能值价值最大为调度目标, 建立目标函数, 以生态环境需水和社会经济用水等为约束条件, 通过水库调度使系统总服务能值达到最优。能值调度不仅从能值角度强调河流水库

收稿日期: 2022-08-26, 修回日期: 2022-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469009)

作者简介: 付江凤(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源, E-mail: 2583560833@qq.com

通讯作者: 张代青(1974-), 男, 博士、讲师, 研究方向为水资源系统规划与管理, E-mail: dqzhang10@126.com

生态服务功能的经济价值,还保障了河流水库生态系统服务功能的综合生态效益,保证了河流水库生态系统对社会经济发展用水的可持续提供。

## 2.2 调度模型

### 2.2.1 目标函数

水库生态系统服务价值的能值调度模型目标函数为:

$$E_{ES} = \max \sum_{i=1}^N E_i \quad (1)$$

式中,  $E_{ES}$  为水库的总服务能值;  $E_i$  为第  $i$  项服务功能的能值。

### 2.2.2 约束条件

(1) 水位  $Z$  约束。其公式为:

$$Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max} \quad (2)$$

式中,  $Z_{\min}$ 、 $Z_{\max}$  分别为允许的最低、最高水位。

(2) 流量  $Q$  约束。其公式为:

$$Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max} \quad (3)$$

式中,  $Q_{\min}$ 、 $Q_{\max}$  分别为最小、最大发电流量。

(3) 出力  $N$  约束。其公式为:

$$N_{\min} \leq N \leq N_{\max} \quad (4)$$

式中,  $N_{\min}$ 、 $N_{\max}$  分别为最小、最大出力。

(4) 下泄流量  $q$  约束。其公式为:

$$q_{\min} \leq q \leq q_{\max} \quad (5)$$

式中,  $q_{\min}$ 、 $q_{\max}$  分别为最小、最大下泄流量。

(5) 社会经济供水  $Q_{SE}$  约束。其公式为:

$$Q_{SE \min} \leq Q_{SE} \leq Q_{SE \max} \quad (6)$$

式中,  $Q_{SE \min}$ 、 $Q_{SE \max}$  分别为最小、最大社会经济供水流量。

(6) 水量  $V_{i+1}$  平衡方程。其公式为:

$$V_{i+1} = V_i + I_i - Q_i \Delta t - q_i \quad (7)$$

式中,  $V_{i+1}$ 、 $V_i$  分别为水库第  $i+1$ 、 $i$  时段的水库库容;  $I_i$  为第  $i$  时段的水库入库水量;  $Q_i$  为第  $i$  时段的水库发电流量;  $\Delta t$  为计算时段;  $q_i$  为第  $i$  时段的弃水量。

(7) 生态流量  $Q$  约束。其公式为:

$$Q_{E \min} \leq Q \leq Q_{E \max} \quad (8)$$

式中,  $Q_{E \min}$ 、 $Q_{E \max}$  为最小、最大生态流量。

(8) 非负约束: 式(1)~(8)中所有变量非负。

## 3 水库生态服务能值优化模型及求解

### 3.1 河流水库生态系统服务功能

河流水库生态系统具有多项服务功能,对人类的生存、生活及社会经济发展提供了多种产品。参照已有研究成果,结合河流水库生态系统的特征及属性,将河流水库生态系统服务功能划分为

5 大类、16 小类<sup>[6,9]</sup>。

(1) 淡水供给功能。包含社会经济、水力发电、河道航运和生态环境供水 4 项。河流水资源不仅能为人们提供生活、农业和工业用水,同时也为流域生态环境提供必要水源;另外,水能转换为电能可带来巨大经济效益,河流水库的航运功能对货物运输也发挥了一定作用。

(2) 物质生产功能。包含渔业水产品及其他产品 2 项。河流水库生态系统中,水产品种类丰富,以鱼、虾类资源为主;此外,河流水库也为其他的产品如库区农作物等的生长提供了保障。

(3) 生态支持功能。包含储水、吸收循环营养物质、提供生境及维持生物多样性 4 项。河流水库不仅能储存水资源、调节径流,同时其丰富的物质资源能为系统内动植物的生长提供条件,在系统中,生物、植被、动物种类多样,维持了生物多样性的稳定发展。

(4) 生态调节功能。包含调洪、水质净化、空气净化和输沙造陆 4 项。河流水库能调节径流,缓解水资源时空分布不均,减少洪涝灾害;河水的流动性对输沙起到了重要作用。河流水库水资源具有一定的自净能力,能减缓污染物的危害,同时,水力发电较火力发电可减少二氧化硫等气体的排放,系统内植被固碳释氧也对空气的净化起到了不可忽视的作用。

(5) 文化娱乐功能。包含文化科研和休闲娱乐 2 项。河流水库生态系统不仅为科学研究提供基础资料,同时,系统内各种生态自然景观、休闲娱乐活动也吸引了大量游客,具有一定休闲娱乐价值。

河流水库服务功能划分见图 1。

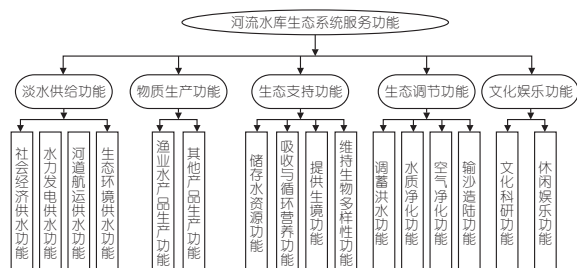


图 1 河流水库生态系统服务功能分类

Fig. 1 Classification of river-reservoir ecosystem services function

### 3.2 河流水库生态系统服务功能的能值评价模型

根据服务功能的类型划分,应用能值评价方法建立其服务功能的能值评价模型见表 1。

### 3.3 水库生态服务能值优化模型求解

蚁群算法求解水库优化调度问题时,有利于

表 1 能值评估模型  
Tab. 1 Energy evaluation models

Table with 3 columns: 服务功能 (Service Function), 能值评估模型 (Energy Evaluation Model), 模型字母含义 (Model Letter Meaning). Rows include 社会经济供水, 水力发电供水, 河道航运供水, 生态环境供水, 渔业水产品, 其它物质生产, 储存水资源, 吸收循环营养, 维持生物多样性, 提供生境, 调蓄洪水, 水质净化, 空气净化, 输沙造陆, 文化科研, 休闲娱乐.

注: E<sub>i</sub> 为各项能值, sej; T 为对应能值转换率, sej/g/J。

提高效率、优化质量<sup>[10]</sup>, 且收敛快、求解精度高<sup>[11]</sup>。蚁群算法求解步骤如下。

步骤 1 初始化种群, 设置参数。

步骤 2 随机将蚂蚁放于不同出发点, 通过概率计算每一只蚂蚁下一次访问的地点, 直到所有地点被访问完。

步骤 3 计算蚂蚁行走的路径长度并进行记录, 对信息素浓度进行更新。

步骤 4 若满足停止条件, 对结果进行输出, 否则返回步骤 2。

### 4 实例应用

有关数据资料来源于《中国统计信息网》、《云南统计公报》(2016~2020 年), 能值转换率来源于文献[7]。不同来水情况下, 水库的服务能值差异较大, 因此本文主要对丰、平、枯水典型年进行优化调度, 通过优化出库流量, 应用能值评估模型计算水库服务能值, 对各水平年的服务能值求解。表 2 为能值调度结果, 表 3 为各项服务功能的能值价值, 图 2 为生态功能能值及经济功能能值。

由表 2 可看出, 5 项服务功能的能值所占比例的大小排序为生态调节>淡水供给>生态支持>物质生产>文化娱乐; 漫湾水库生态调节、生态支持、淡水供给 3 项服务功能能值较大, 在维持漫湾水库生态系统健康发展贡献度最大; 文化娱乐的能值最小, 其能值所占比例仅为 0.1% 左右, 开发潜力较大。

表 2 能值调度结果  
Tab. 2 Energy scheduling results

Table with 7 columns: 项目 (Item), 丰水年 (Wet Year), 平水年 (Normal Year), 枯水年 (Dry Year). Each year has sub-columns for 能值/sej (Energy/sej) and 比例/% (Ratio/%).

表 3 各项服务功能的能值—货币价值  
Tab. 3 Energy value of each service function 10<sup>8</sup> 元

Table with 7 columns: 典型年 (Typical Year), 淡水供给 (Freshwater Supply), 物质生产 (Material Production), 生态支持 (Ecological Support), 生态调节 (Ecological Regulation), 文化娱乐 (Cultural Entertainment), 合计 (Total).

注: 能值—货币价值=能值/(能值/货币比率)<sup>[7]</sup>。

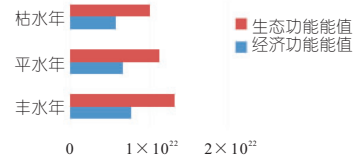


图 2 生态功能能值及经济功能能值

Fig. 2 Ecological function energy and economic function energy

由表 3 可看出, 3 个典型年的服务总能值大小为丰水年>平水年>枯水年。丰水年、平水年、枯水年服务能值货币分别为 133×10<sup>8</sup>、114×10<sup>8</sup>、100×10<sup>8</sup> 元; 除文化娱乐服务功能外, 其余功能的服务价值均表现为丰水年>平水年>枯水年, 说明径流是该流域生态服务价值的重要影响因素, 对河流水库的服务价值具有重要影响。文化娱乐价值是漫湾库区的科研价值及旅游价值, 由于资料的缺乏, 不再进行区分, 导致其计算结果相同。

由图 2 可看出, 经济价值包含淡水供给、物质生产和文化娱乐等 3 项, 生态价值包含生态调节和生态支持 2 项。漫湾库区丰、平、枯水年的经济服务能值分别为 7.78×10<sup>21</sup>、6.67×10<sup>21</sup>、5.76×10<sup>21</sup> sej; 生态服务能值分别为 1.32×10<sup>22</sup>、1.13×10<sup>22</sup>、1.00×10<sup>22</sup> sej。漫湾库区三种水平年均表现为生态功能的服务总能值大于经济功能。

### 5 结论

a. 基于能值分析理论, 以漫湾生态系统服务能值最大为优化目标, 各供水量、水量平衡等为约束条件, 建立漫湾水库生态系统服务功能的能值优化调度模型, 探讨了水库生态系统服务功能的能值优化调度问题。

b. 漫湾水库丰水年、平水年、枯水年的生态系统服务能值分别为 2.10×10<sup>22</sup>、1.79×10<sup>22</sup>、1.58×10<sup>22</sup> sej, 相应的能值货币分别为 133×10<sup>8</sup>、

114×10<sup>8</sup>、100×10<sup>8</sup> 元。

c. 漫湾水库生态服务功能主要体现在生态调节、物质生产、生态支持三个方面,三项服务功能的服务价值贡献度最高。

d. 水库生态服务价值的能值优化调度将生态—社会—经济联系起来,从能值角度兼顾考虑经济效益和生态系统健康,是生态调度的新发展阶段,对维持河流水库生态系统健康发展具有重要意义,可推广至其他河流水库生态系统。

参考文献:

[1] 范继辉. 梯级水库群调度模拟及其对河流生态环境的影响[D]. 成都:中国科学院研究生院(水利部成都山地灾害与环境研究所), 2007.

[2] 毛文永. 流域开发规划环境影响评价的战略意义——以岷江上游紫坪铺水库工程与都江堰保护问题为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2001(3): 91-94.

[3] 戴凌全, 戴会超, 李玮, 等. 兼顾四大家鱼产卵需求的梯级水电站生态调度[J]. 水力发电学报, 2022,

41(5): 21-30.

[4] 王霞, 郑雄伟, 陈志刚. 基于河流生态需水的水库生态调度模型及应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 59-61.

[5] 方国华, 丁紫玉, 黄显峰, 等. 考虑河流生态保护的水电站水库优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(7): 1-9.

[6] 张代青, 沈春颖, 于国荣, 等. 基于河道流量生态服务效应的水库生态价值优化调度[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(2): 101-109, 116.

[7] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.

[8] 刘维丽, 程锦添, 杭桂兰, 等. 能值分析方法的应用与展望[J]. 福建师大福清分校学报, 2021, 39(2): 112-117, 126.

[9] 杨婷. 基于蚁群算法的水库群生态服务价值联合调度[D]. 昆明:昆明理工大学, 2021.

[10] 刘玘玘, 汪妮, 解建仓, 等. 水库群供水优化调度的改进蚁群算法应用研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(2): 31-36.

[11] 徐刚, 马光文. 基于蚁群算法的梯级水电站群优化调度[J]. 水力发电学报, 2005(5): 7-10.

### Optimal Dispatching of Manwan Reservoir Ecological Service Value Based on Energy Value Analysis

FU Jiang-feng, ZHANG Dai-qing, ZHANG Hui, MA Sen, CHEN Yi-jing

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In order to realize the sustainable utilization and maintain the healthy development of river and reservoir ecosystem, this paper applied energy value analysis to reservoir ecological operation for discussing the energy optimal operation of reservoir ecological service value. With the objective of maximizing the service energy of Manwan Reservoir and the constraints of ecological water demand and social economic water consumption, an optimal operation model of reservoir ecosystem service energy was established, and the ant colony algorithm was used to solve the model. The results show that the total service energy of Manwan Reservoir is 2.10×10<sup>22</sup> sej in high flow year, 1.79×10<sup>22</sup> sej in normal year, 1.58×10<sup>22</sup> sej in dry year. Main service values are ecological regulation, water supply and ecological support, material production followed, cultural entertainment is the minimum. The results have practical value and important significance for maintaining the healthy development of the Lancang River basin, especially for the ecosystem of the Manwan Reservoir Region.

**Key words:** river and reservoir; ecosystem; service value; optimal scheduling; Manwan Reservoir



(上接第 208 页)

### Influence of Rotating Speed on Oil Film Characteristics of Thrust Bearing of Hydro-generator Unit

ZHANG Jian, DING Qiang, MA Hai-bo, WANG Tong, WANG Hao-yu

(China Energy Dadu River Repair & Installation CO., LTD., Leshan 614000, China)

**Abstract:** The performance of thrust bearing is very important to the energy conversion efficiency and stable operation of hydro-generator unit. Therefore, the thrust bearing of a hydropower station was taken as the research object. The characteristics of thrust bearing oil film under different rotating speed conditions were studied. The pressure, speed and temperature distribution inside the oil film were analyzed. The influence law of rotating speed on the performance of thrust bearing was clarified. The results show that the rotational speed cannot change the pressure distribution on the thrust pad surface, but with the increase of rotational speed, the relationship between the maximum pressure and rotational speed is almost linear; The high temperature zone on the thrust pad surface moves away from the main shaft towards the oil outlet side with the increase of the rotating speed, and the average temperature difference and the maximum temperature difference show an upward trend. At runaway speed, the thrust bearing needs to bear much higher pressure than the rated speed, and also needs to bear local high temperature. The maximum temperature difference at runaway speed is more than 40 K, which is easy to cause bearing bush burning. The research results provide theoretical support for the operation and optimal design of thrust bearings in hydropower stations.

**Key words:** thrust bearing; oil film characteristics; numerical simulation; runaway speed