

文章编号:1007-2284(2022)01-0200-06

基于生态流量过程等级的水库调度研究

顾国玉¹,方国华¹,黄显峰¹,颜敏¹,戴灵辉^{1,2}

(1. 河海大学水利水电学院,南京 210098; 2. 湖南省农村水电及电气化发展局,长沙 410007)

摘要:为修复大坝下游生态退化的减脱水河段,基于ME-Tennant法定义了生态流量过程等级,构建了以生态流量过程等级最大和发电量最大为调度目标的生态调度模型,采用改进的NSGA-II算法进行求解。将该模型运用于湖南省筷子篓-水口梯级电站,结果表明:生态流量与发电流量为竞争关系,随着生态流量过程等级增加,发电量也会减少;选取的丰平枯年调度方案发电量分别为11 487、8 444和6 139万kWh,生态流量过程等级均处于“很好”等级,保证发电量的同时满足生态退化的河流恢复至健康状态的高层次生态用水需求,可为有生态退化问题的水库生态调度提供借鉴。

关键词:减脱水河段;ME-Tennant法;生态流量过程等级;生态调度

中图分类号:TV76 **文献标识码:**A

顾国玉,方国华,黄显峰,等. 基于生态流量过程等级的水库调度研究[J]. 中国农村水利水电,2022(1):200-205.

GU G Y, FANG G H, HUANG X F, et al. Research on reservoir operation based on the ecological flow process level[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(1):200-205.

Research on Reservoir Operation Based on the Ecological Flow Process Level

GU Guo-yu¹, FANG Guo-hua¹, HUANG Xian-feng¹, YAN Min¹, DAI Ling-hui^{1,2}

(1. College of Water Resources and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hunan Provincial Development Bureau of Rural Hydropower and Electrification, Changsha 410007, China)

Abstract: Based on the ME-Tennant method, this paper defines the ecological flow process level, and constructs an ecological operation model with the highest ecological flow process level and maximum power generation as the operation goal. The improved NSGA-II algorithm is used to solve this model, which is used to repair the dewatering reaches of the downstream ecological degradation of the dam. The model is applied to the Kuaizilou-Shuikou Cascade Hydropower Station in Hunan Province, and the results show that the ecological flow and the power generation flow are in a competitive relationship. As the level of the ecological flow process increases, the power generation will also decrease. The power output of the selected reservoir scheduling schemes for the wet year, the normal year, and the dry year are 114.87, 84.44, and 61.39 million kWh respectively, the ecological flow process levels are all at the “very good” level, ensuring the power generation and meeting the high-level ecological water demand for the restoration of ecologically degraded rivers to a healthy state. The research results can provide reference for the ecological operation of reservoirs with ecological degradation problems.

Key words: dehydrated river reaches; ME-Tennant method; ecological flow process level; ecological operation

收稿日期:2021-03-22

基金项目:湖南省水利科技重点项目(湘水科计[2016]194-21);湖南省水利科技项目([2015]245-13)。

作者简介:顾国玉(1997-),女,硕士研究生,主要从事水利水电系统规划与优化调度研究。E-mail:ggylhu@hhu.edu.cn。

通讯作者:方国华(1964-),女,教授,博士生导师,主要从事水利水电系统规划与优化调度研究。E-mail:hhufgh@163.com。

0 引言

水库通过截蓄天然流量进行拦洪和调节流量,由于水库的调蓄作用,改变了原河道的天然流量分配,河流的水文情势被改变,河流的连通性遭到破坏,甚至在下游形成了减脱水河段,导致水质恶化、生态退化和河流生态系统失衡等问题^[1]。河流生态环境要实现可持续发展,就要保证河流生态流量,使河流生态系统恢复至有自我调节能力,2016年水利部印发了《农村

水电增效扩容改造河流生态修复指导意见》,提出要合理确定河流的生态修复目标,保障生态流量优先。可见保障河流生态流量^[2],对被破坏的河流生态进行修复势在必行。

对减脱水河段进行生态修复可采取生态调度^[2]的措施,保证河流的生态流量,满足水生生物对水力、水文因子的需求,使河流具有自我修复能力。国内学者对生态调度的研究主要是针对多目标综合利用,将生态效益作为调度目标之一。传统的生态调度将生态缺水最小或生态缺水率最低作为生态目标,这种方式有可能造成加大生态流量泄放去追求最小值,从而牺牲发电效益。同时,天然河流具有丰枯不均的特性,各月流量对河流生态保护的重要性不同,用生态缺水总量或缺水率评价生态效益缺乏标准,不能体现年内变化。为了提高生态流量过程的稳定性,使调度后偏离适宜生态需水区间的水量能在一定范围内,有学者定义了生态溢缺水量^[4]、生态保护程度^[5]和生态流量贴近度^[6]等指标衡量生态效益,但是常常需要定义适宜生态流量阈值,该阈值的确定一般通过某一种生态流量计算方法来确定,由于选取方法主观性较大,计算结果可能存在差异。

为此,本文基于ME-Tennant法^[7]定义了生态流量过程等级,构建以生态流量过程等级最大为生态目标的水电站生态调度模型,可以避免在选取生态流量计算方法时主观性较大的问题,同时根据生态流量过程等级可以直观体现生态流量过程在调度期内的优劣性,用于指导水库进行生态调度,模型采用改进的NSGA-II进行求解,并应用于湖南洣水流域的筷子篓-水口梯级电站。

1 生态流量过程等级

河流生态流量可以分为最小生态流量、适宜生态流量和最大生态流量^[8]。河道流量一般不会超过最大生态流量,遇枯水季可能将来水全部用于发电,低于最小生态流量时对河流无修复效果,在一定的适宜生态流量范围内,河流生态的保护程度与流量呈正相关。

黄显峰等提出了Tennant法和物元分析法耦合的ME-Tennant河流生态流量过程评价模型^[7](以下简称ME-Tennant模型),该模型通过对多种生态流量计算方法进行评价,根据评价结果综合确定生态流量过程,由于采用了合理明确的评价标准,避免了在选择生态流量计算方法时存在的主观因素大的问题,可以进行客观综合的评价。以往有关生态调度的研究在定义生态目标时,对生态流量过程缺乏明确的评价标准,无法体现在调度期内生态流量过程的综合评价效果,ME-Tennant模型可以直观地体现河流生态流量过程的优劣性。本文采用ME-Tennant模型对生态流量过程进行评级,用评价等级及其综合关联度定义生态流量过程等级,并将其作为生态目标用以评价水库调度的生态效益,评价等级越高、综合关联度值越大则生态流量过程等级越好。

1.1 ME-Tennant模型

ME-Tennant模型以12个月的生态流量状况作为评价指标构建物元 R ;首先根据Tennant法评价等级标准构建经典域物元 R_j 及节域物元 R_p ,然后确定各评价等级的关联函数并计算其关

联度,接着根据各月生态流量满足度的重要性,采用模糊层次分析法确定各评价指标的权重,并计算综合关联度,见式(1),最后根据综合关联度值对河流生态流量过程进行等级评定,综合关联度值最大所处的等级为综合评价等级,综合评价等级评定见式(2)。

$$K_j(P_0) = \sum_{i=1}^n w_i K_j(x_i) \quad (1)$$

式中: $K_j(P_0)$ 为第 j 个评价等级的综合关联度; w_i 为第 i 个指标的权重; $K_j(x_i)$ 为第 j 个评价等级下第 i 个指标的关联度。

$$K_{j^*} = \max \{K_j(P_0)\} (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中: K_{j^*} 表示生态流量过程属于综合关联度值最大对应的第 j 个评价等级;当 $0 \leq K_j(P_0) \leq 1$ 时,表示所求生态流量过程符合该标准等级的要求;当 $-1 < K_j(P_0) < 0$ 时,表示该过程不符合该标准等级的要求,但是具备转化为该等级的条件,且转化时值越小越容易;当 $K_j(P_0) \leq -1$ 时,表示不符合该标准等级的要求,而且也无法转化为该等级;当 $K_j(P_0) > 1$ 时,表示超出了标准等级上限。

1.2 生态流量过程等级计算

ME-Tennant模型根据研究区域季节特点将全年分为丰平枯3个时期,并根据各时期来水特点及河流生态系统用水需求,将河流生态流量过程评价标准等级分为“差”~“最大”共七个等级,根据ME-Tennant模型计算出的综合关联度值应在 $(-1, 1]$ 范围内,超出该范围则认为不符合河流的生态流量的需要,在构建生态调度模型时不予考虑。基于ME-Tennant模型定义了如下的生态流量过程等级。

生态流量过程等级定义为:调度期内的各月生态流量为生态流量过程,依据Tennant法评价标准对各月生态流量划分评价等级^[9],用物元分析法计算各评价等级的综合关联度,确定生态流量过程的综合评价等级,由于综合关联度值在 $(-1, 1]$ 范围内越大,则越符合该标准等级的要求。为体现等级内的优劣性,考虑综合关联度对生态流量过程的影响最终确定生态流量过程等级。

生态流量过程等级由综合评价等级和综合关联度两部分构成。其中综合评价等级分“差”~“最大”7个等级,各综合评价等级赋值1~7,例如“差”对应1,“一般”对应2,以此类推“最大”对应7;对综合关联度值进行归一化处理,其值经规范化处理后处于 $[0, 1]$ 区间。

当生态流量过程处于“差”综合评价等级时,该等级下的河流流量已低于最低生态流量阈值,认为不具备生态保护效果,因此定义生态流量过程等级为0;在“一般”~“最佳”综合评价等级时,生态流量过程等级由综合评价等级值和规范化后的综合关联度值综合确定,综合评价等级越高、同一评价等级下综合关联度值越大,则生态流量过程等级值越大;当河流生态流量过程达到“最大”综合评价等级时,河流长时间处于高流量状态下,亦不利于河流稳定,但保持了河流的水量,本文定义其生态流量过程等级为5。生态流量过程等级计算如下:

$$F_t = \begin{cases} 0 & K_{j_0} = 1 \\ K_{j_0} + N_j & 1 < K_{j_0} \leq 6 \\ 5 & K_{j_0} = 7 \end{cases} \quad (3)$$

$$N_j = \frac{K_j(P_0) + 1}{2} \quad (4)$$

式中: F_t 为生态流量过程等级; P_0 为生态流量过程; N_j 为综合关联度的归一化数值; $K_j(P_0)$ 为生态流量过程 P_0 的综合关联度值; K_{j_0} 为综合评价等级。

生态流量过程等级值区间见表1。

表1 生态流量过程等级区间

Tab.1 Ecological flow process level interval

生态流量 过程等级	差	一般	较好	好	很好	最佳	最大
区间	0	(2,3]	(3,4]	(4,5]	(5,6]	(6,7]	5

2 生态调度模型

对于已出现生态退化的减脱水河流,要改善河流生态环境,必须明确生态效益的重要地位,在运行调度时要优先保障河流生态流量,本文构建了以生态流量过程等级最大和发电量最大为目标的水库生态调度模型。

2.1 目标函数

(1)生态流量过程等级最大:

$$W_F = \max F_t \quad (5)$$

式中: W_F 为调度期内电站减脱水段生态流量过程等级。

(2)发电量最大:

$$W_E = \max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T A_i q_{i,t} H_{i,t} \Delta t \quad (6)$$

式中: W_E 为调度期内 N 个水电站的总发电量, kWh; A_i 为第 i 个水电站的出力系数; $q_{i,t}$ 为第 i 个水电站 t 时段内的发电引水流量, m^3/s ; $H_{i,t}$ 为第 i 个水电站 t 时段内的净发电水头, m; T 为总调度时段; Δt 为计算时段区间。

2.2 约束条件

生态调度模型各约束条件表达式如下:

(1)水量平衡约束。

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (Q_{i,t} - q_{i,t}) \Delta t \quad (7)$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为 t 时段初、末的第 i 水库蓄水量, m^3 ; $Q_{i,t}$ 为 t 时段第 i 水库入库流量, m^3/s ; $q_{i,t}$ 为 t 时段第 i 水库出库流量, m^3/s ; Δt 为计算时段长, h。

(2)水库库容约束。

$$Z_{i,\min} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,\max} \quad (8)$$

式中: $Z_{i,\min}$ 为第 i 个水库死水位, m; $Z_{i,\max}$ 为第 i 个水库正常蓄水位, m; $Z_{i,t}$ 为第 i 个水库 t 时段运行水位, m。

(3)机组出力约束。

$$N_{i,\min} \leq A_i q_{i,t} H_{i,t} \leq N_{i,\max} \quad (9)$$

式中: $N_{i,\min}$ 、 $N_{i,\max}$ 为第 i 水库被允许的最小和最大出力, kW。

(4)机组过流能力约束。

$$Q_{i,\min} \leq q_{i,t} \leq Q_{i,\max} \quad (10)$$

式中: $Q_{i,\min}$ 、 $Q_{i,\max}$ 分别为第 i 个水库机组允许的最小和最大流量, m^3/s 。

(5)上下游水力联系。

$$Q_{i+1,t} = q_{i,t} - qe_{i,t} + Qr_{i+1,t} \quad (11)$$

式中: $qe_{i,t}$ 为 t 时段内第 i 个电站从电站尾水引水至减脱水河段的生态流量, m^3/s ; $Qr_{i+1,t}$ 为第 i 个水库至第 $i+1$ 个水库在 t 时段内的区间来水流量, m^3/s 。

(6)非负约束。

2.3 生态调度模型求解

NSGA-II 算法^[10]在求解过程中,通常采用各调度时段的水位为决策变量,以随机的方式生成初始种群,导致产生的部分初始解不在约束范围内,又加之部分遗传操作也造成解偏离约束,从而优化效率和最优解的质量被影响,改进的 NSGA-II 算法^[11]引入了个体约束和群体约束机制来提高优化效率和最优解的质量。本文选用改进 NSGA-II 算法对生态调度模型进行求解,流程图见图1。

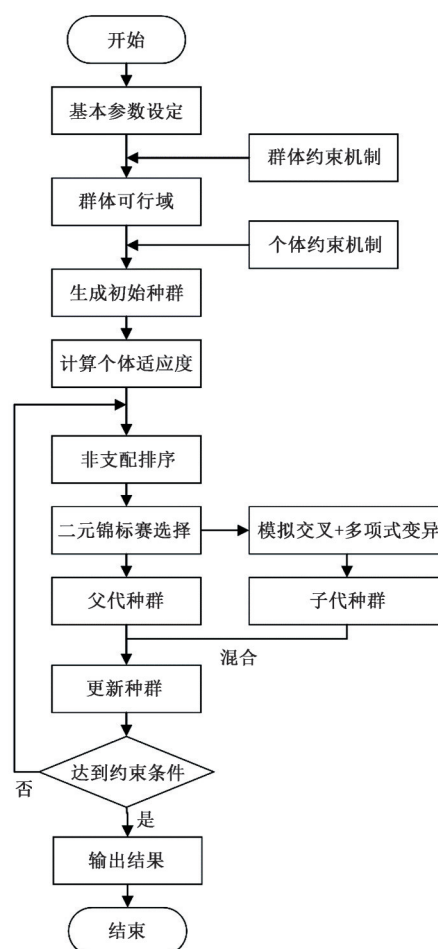


图1 改进 NSGA-II 算法流程图

Fig.1 Improved NSGA-II algorithm flow chart

3 实例研究

3.1 筷子篓-水口梯级电站概况

湖南省筷子篓-水口梯级电站位于炎陵县。筷子篓水电站属湘江水系洙水支流河漠水上游下村河,是炎陵县唯一一个集防洪、县网调峰作用于一体的水电站,也是一座以发电为主,兼顾防洪的小(一)型水库。筷子篓水库大坝坝高 60.2 m,水库最

高水位 748.2 m,死水位 713 m,总库容 850 万 m³,死库容 120 万 m³,兴利库容 730 万 m³,约为年来水的 5%,可实现季调节。筷子篓电站为引水式电站,于 1998 年 8 月投产,总装机容量为 3 000 kW,2014 年进行更新改造后总装机容量为 3 750 kW。

水口电站位于水口镇自源村,位于河漠水上游。于 1973 年 11 月动工兴建,1977 年 4 月投产发电。电站从上游筷子篓水库电站尾水(筷子篓水库弃水不进入引水渠)和大横溪河坝引水,为引水式电站,现装机 5 台,总装机容量 16.35 MW。

由于筷子篓电站建成年代较早,未考虑生态保护的要求,早年拦水坝未设置生态流量下泄设施,导致拦水坝下游出现了长 7.2 km 的减脱水河段,部分区域出现了水环境恶化、生态退化的问题。筷子篓电站水库大坝下游 190 m 设有二道坝,坝下设有引水渠道,为修复减脱水河段生态环境,拟将二道坝下渠道疏通将电站尾水通过渠道引至坝下满足生态流量需求,本文通过生态调度模型确定引至坝下的生态流量和用于下游水口电站的发电流量。

3.2 筷子篓-水口梯级电站生态流量过程等级计算

根据筷子篓-水口梯级电站的区域季节特点将全年分为丰平枯 3 个时期,参照 Tennant 法确定了如表 2 所示的评价标准,Tennant 法认为年平均流量的 200% 是最大的生物栖息地标准,

为河流生态系统能承受的流量上限,故本文将河流生态流量过程评价标准中“最大”等级区间上限设为 200%;根据典型年每个月的生态流量作为评价指标,构建物元;然后根据表 2 的评价标准构建经典域与节域;计算关联函数和关联度;用模糊层次分析法计算各月生态流量指标的权重,各月生态流量指标权重见表 3;根据式(1)计算综合关联度,用式(2)计算年生态流量过程的综合评价等级;最后根据式(3)和式(4)计算生态流量过程等级。

表2 河流生态流量过程评价标准
Tab.2 Evaluation criteria of river ecological flow process

等级	生态流量占多年平均流量的百分比/%		
	枯水期(11-次年1月)	平水期(2-5月,8-10月)	丰水期(6-7月)
最大	[100,200]	[100,200]	[100,200]
最佳	[60,100)	[70,100)	[80,100)
很好	[40,60)	[50,70)	[60,80)
好	[30,40)	[40,50)	[50,60)
较好	[20,30)	[30,40)	[40,50)
一般	[10,20)	[20,30)	[30,40)
差	[0,10)	[0,20)	[0,30)

表3 各月生态流量指标权重
Tab.3 The weight of each month's ecological flow index

w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9	w_{10}	w_{11}	w_{12}
0.123	0.114	0.081	0.078	0.052	0.049	0.051	0.056	0.076	0.086	0.115	0.119

3.3 筷子篓-水口梯级电站生态调度结果分析

依据炎陵水文站 1959-2015 年的水文资料,坝址多年平均流量为 4.43 m³/s,对各坝址年平均流量进行排频计算,用皮尔逊Ⅲ型曲线对坝址年平均流量进行适线,选取 $P = 25\%$ 为丰水年, $P = 50\%$ 为平水年, $P = 75\%$ 为枯水年。每个典型年以月为调度时段输入生态调度模型,运用改进的 NSGA-II 算法进行求解,算法参数为:群体数为 400,全局迭代次数为 500。根据调度模型生成的各典型年非劣解集,每个典型年均匀选取 20 个方案,调度方案集见表 4。

方案的优选采取熵权法^[12]和灰色关联度法^[13]结合进行综合评价的方法进行确定。熵权法为客观赋权法,可以客观评价各指标相对重要性,选用熵权法确定各目标的权重;灰色关联度分析可根据序列曲线与理想方案曲线之间的相似程度判断联系是否紧密,灰色关联度值越大则越接近,联系越紧密。通过计算理想方案与各方案之间的灰色关联度可确定各典型年的调度方案。计算过程需确定理想方案和比较方案,对不同量纲的数据进行规范化处理,计算关联系数,根据各指标权重及灰色关联系数计算出灰色关联度值,最终根据关联度值越大越好的原则选择最优调度方案。

3.3.1 熵权法确定各指标权重

根据熵权法计算梯级年发电量和生态流量过程等级指标在各典型年的权重见表 5。

3.3.2 灰色关联度分析

发电量和生态流量过程等级都是效益型指标,指标值越大

表4 典型年调度方案集

Tab.4 Typical year operation schemes

编号	丰水年		平水年		枯水年	
	梯级年	生态流	梯级年	生态流	梯级年	生态流
	发电量/ 万 kWh	量过程 等级	发电量/ 万 kWh	量过程 等级	发电量/ 万 kWh	量过程 等级
1	12 516	2.557	9 684	2.571	7 395	2.527
2	12 416	2.587	9 581	2.613	7 306	2.575
3	12 345	2.620	9 474	2.656	7 194	2.621
4	12 195	2.647	9 289	3.506	7 097	3.520
5	12 096	3.498	9 188	3.529	6 838	3.560
6	11 980	3.552	8 893	4.444	6 710	3.581
7	11 875	4.467	8 779	4.478	6 582	4.481
8	11 775	4.502	8 651	4.501	6 475	4.507
9	11 651	4.528	8 545	4.518	6 309	4.545
10	11 566	5.473	8 444	5.443	6 139	5.464
11	11 487	5.492	8 316	5.463	6 030	5.479
12	11 404	5.503	8 208	5.481	5 918	5.491
13	11 309	5.516	8 044	5.496	5 787	5.510
14	11 236	5.525	7 909	5.506	5 681	5.521
15	11 124	5.542	7 773	5.525	5 558	5.530
16	11 036	5.559	7 666	5.546	5 464	5.546
17	10 954	5.573	7 550	5.560	5 359	5.556
18	10 853	5.593	7 373	5.575	5 250	5.564
19	10 752	5.611	7 244	5.584	5 144	5.571
20	10 647	5.623	7 054	5.598	5 022	5.586

表5 指标权重值
Tab.5 Index weight value

典型年	梯级年发电量	生态流量过程等级
丰水年	0.530	0.470
平水年	0.512	0.488
枯水年	0.463	0.537

则方案越优,根据调度方案集确定各典型年理想方案指标集,见表6。

表6 典型年理想方案指标集
Tab.6 Typical year ideal operation scheme index set

典型年	梯级年发电量/万 kWh	生态流量过程等级
丰水年	12 516	5.623
平水年	9 684	5.598
枯水年	7 395	5.586

根据灰色关联度值越大越优的原则,丰平枯年最优调度方案分别选取方案11、方案10和方案10,最优调度方案和未建水库下天然河流的生态流量过程等级见表7。由表7可知天然河道在丰水年达到了“最佳”等级,在该等级下河流生态系统健康,水生生物及河岸带植物正常地生长繁育;平水年处于“很好”等级,虽然平水年来水没有丰水年丰富,但是在年内生态流量过程仍处于一个较高等级,这是因为考虑了河流丰枯特性及不同时期生态流量重要性不同,该等级下河流能保持生态系统的健康稳定发展;枯水年也处于“好”的等级,该等级下河流流量处于30%~60%多年平均流量范围,该范围下河流已经能够维持河流系统不发生退化,并能保证一定的水深、流量等水力参数。最优调度方案里,丰平枯年生态流量过程等级值分别为5.492、5.443和5.464,均处于“很好”等级,在该等级下河道湿润底质增加,河宽、水深和流速等水力参数也能较好满足水生生物生长繁育的需要,有利于让河流恢复至能够自我修复的状态。根据以上的结果可知生态流量过程等级能符合天然河道的一般特征,以此用于生态调度目标是合理的。

表7 典型年建库前后生态流量过程等级
Tab.7 Ecological flow process level before and after the construction of the database in the typical year

典型年	未建库天然河道	最优调度方案
丰水年	6.496	5.492
平水年	5.365	5.443
枯水年	4.427	5.464

根据最优调度方案绘制的筷子篓水库水位及生态流量过程见图2、3和图4,由于筷子篓电站未考虑生态流量泄放措施,坝址下游减脱水段多年缺乏必要的生态流量,造成生态退化等问题,若仅仅满足基础的河道生态流量需求,河流生态系统就不能恢复至健康状态。丰平枯年调度方案下年平均生态流量分别为1.51、1.49和1.48 m³/s,均处于相对较高的流量,由图2、3可知丰水年和平水年在调度期大多数时间内可以保持高水位

运行,有利于保证发电效益。由图4可知枯水年枯水期在较低水位运行,是因为枯水期天然来水量较少,筷子篓电站生态用水是引至电站尾水,为了保持生态泄流量仍保持高流量下泄,导致的低水位运行,虽然发电效益有所损耗,但是从长期来看,能够保证河流生态系统恢复至健康状态的高层次用水需求,有利于河流的生态修复。

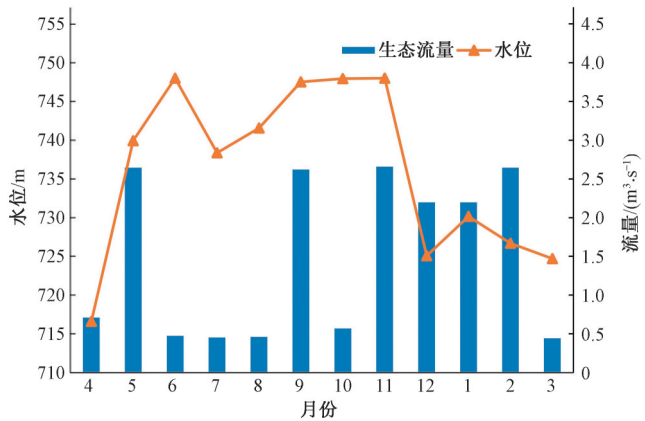


图2 丰水年调度方案
Fig.2 Wet year scheduling scheme

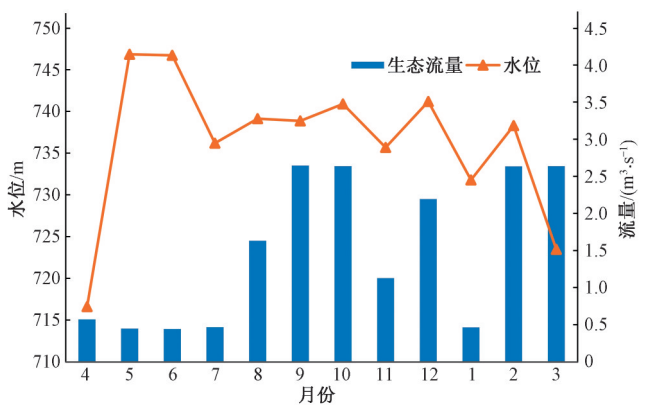


图3 平水年调度方案
Fig.3 Normal year scheduling scheme

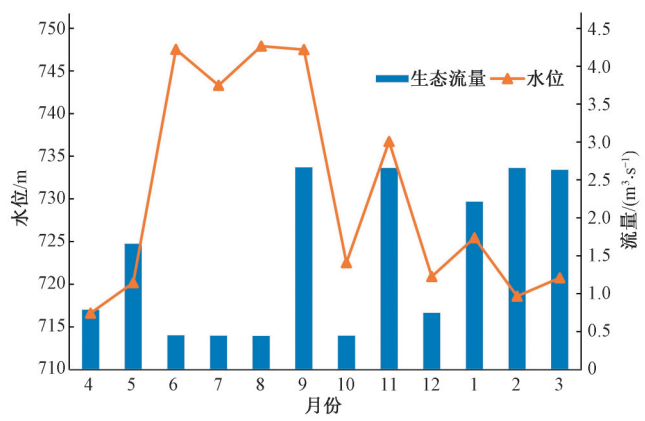


图4 枯水年调度方案
Fig.4 Dry year scheduling scheme

表8是筷子篓-水口梯级电站典型年运行现状和最优调度方案的对比,丰水年和平水年经生态调度后发电效益分别增加了601和830万kWh,说明实际调度尚有优化的空间,还能兼顾

表8 典型年运行现状与最优调度方案对比 万kWh
Tab.8 Comparison of operating status and optimal scheduling plan in the typical year

典型年发电量	运行现状	最优调度方案
丰水年	10 886	11 487
平水年	7 614	8 444
枯水年	6 518	6 139

生态效益,虽然枯水年最优调度方案发电效益与运行现状相比减少了379万kWh,但是鉴于筷子篓-水口电站在此之前没有生态流量泄放的保护措施,并且减脱水河段生态已经初显退化,所以牺牲部分发电效益保证生态优先是很有必要和可行的。

4 结 论

(1)本文定义了生态流量过程等级,对生态流量过程确立了明确的评判标准,根据评价等级及对应的综合关联度值来确定生态流量过程等级,生态流量过程等级可以直观地体现生态流量过程在调度期内的优劣情况。

(2)本文构建的基于ME-Tennant模型的生态调度模型,在对调度结果进行评价分析时,可以直观地体现发电效益大小及生态流量过程在调度期内的优劣性,在进行方案的优选的时候采取了熵权法与灰色关联度结合的综合评价方法,有利于保证调度方案的客观性和合理性。

参考文献:

[1] 汪恕诚.论大坝建设与生态环保的关系[J].中国三峡,2004,11
(上接第199页)
[8] 邱训平,杨丽莉.地表水水量和水质的联合实时控制[J].水利水电快报,2012,33(11):1-5.
[9] XU M. Real-time Control of Combined Water Quantity & Quality in Open Channels[D]. Delft: Delft University of Technology, 2013.
[10] 孔令仲,王浩,雷晓辉,等.基于线性预测控制算法的明渠实时控制研究[J].水利学报,2020,51(3):326-334.
[11] 杨迁,孔令仲,宋培兵,等.耦合前馈控制策略的明渠线性最优控制方法[J].水力发电学报,2020,39(5):64-71.
[12] 崔巍,王长德.调水工程运行最优控制研究[J].南水北调与水利科技,2007(2):6-8,24.
[13] 王长德,张礼卫.下游常水位水力自动控制渠道运行动态过程及数学模型的研究[J].水利学报,1997(11):12-20,71.
[14] ZHIMING L, GAO F, ZHANG H, et al. Research on the impact of upstream reservoirs regulation on the operation of Xiluodu Reservoir [C]. MATEC Web of Conferences, 2018, 246.
[15] 熊玺,周林勇.混凝土缺陷水下修复技术在枕头坝一级水电站的应用[J].水电与新能源,2018,32(4):56-58.
[16] 涂承义,黄维,吴宏荣,等.沙坪二级水电站预应力闸墩设计与三维有限元分析[J].人民长江,2019,50(增刊2):108-113,134.
[17] 麦赫默德,叶夫耶维奇.明渠不恒定流[M].北京:水利电力出

(6):4-5.
[2] 欧传奇.水电站生态流量核定要求与若干特例的探讨[J].中国农村水利水电,2020(12):189-192.
[3] 陈端,陈求稳,陈进.考虑生态流量的水库优化调度模型研究进展[J].水力发电学报,2011,30(5):248-256.
[4] 王学敏,周建中,欧阳硕,等.三峡梯级生态友好型多目标发电优化调度模型及其求解算法[J].水利学报,2013,44(2):154-163.
[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] 杨哲,杨侃,夏怡,等.考虑不同生态流量要求梯级水库群生态调度及其算法[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2018,51(12):1266-1277.
[7] 黄显峰,钟婧玮,方国华,等.基于ME-Tennant法的河道生态流量过程评价模型研究[J].长江科学院院报,2019,36(2):20-26.
[8] 高宇.漳河下游的径流趋势分析及生态调度研究[J].南水北调与水利科技,2014,12(3):186-190.
[9] 陈敏建,丰华丽,王立群,等.生态标准河流和调度管理研究[J].水科学进展,2006,17(5):631-636.
[10] 陈小庆,侯中喜,郭良民,等.基于NSGA-II的改进多目标遗传算法[J].计算机应用,2006(10):2453-2456.
[11] 王学斌,畅建霞,孟雪姣,等.基于改进NSGA-II的黄河下游水库多目标调度研究[J].水利学报,2017,48(2):135-145,156.
[12] 郭金维,蒲绪强,高祥,等.一种改进的多目标决策指标权重计算方法[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2014(6):118-125.
[13] 李英海,周建中,张勇传,等.水库防洪优化调度风险决策模型及应用[J].水力发电,2009,35(4):19-21,37.
出版社,1987.
[18] NEWTON. Mathematical principles of natural philosophy and his system of the world[M]. University of California Press, 1962.
[19] MU J, ZHANG X. Real-time flood forecasting with 1-D unsteady flow model[J]. Journal of hydrodynamics, 2007, 19(2): 150-154.
[20] WANG C, YANG J, NILSSON H. Simulation of Water Level Fluctuations in a Hydraulic System Using a Coupled Liquid-Gas Model [J]. WATER, 2015, 7(8): 4446-4476.
[21] 王船海,李光炽,向小华,等.实用河网水流计算[M].河海大学出版社,2015.
[22] 刘瑞江,张业旺,闻崇伟,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55.
[23] 李凡琦,牧振伟,孙德旭,等.基于正交设计的糙条消能工评价方法[J].排灌机械工程学报,2020,38(5):481-487.
[24] 方开泰,马长兴.正交与均匀试验设计[M].北京:科学出版社,2001.
[25] 张旭辉,龚晓南,徐日庆.边坡稳定影响因素敏感性的正交法计算分析[J].中国公路学报,2003(1):37-40.
[26] 何晓群.现代统计分析方法与应用[M].北京:中国人民大学出版社,1998.
[27] 梅长林.数据分析方法[M].北京:高等教育出版社,2006.