

非充分生态约束条件下水库生态调度模型研究

徐淑琴¹ 苏鑫¹ 邢贞相¹ 王莉莉² 路豪杰¹

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省松花江工程建设管理处, 哈尔滨 150030)

摘要: 在不影响水库原有防洪及供水目标前提下, 为了降低水库对河流生态系统的影响, 针对部分调度模型存在调度结果满足最小生态流量约束而不满足适宜生态流量约束的情况, 提出了以最小生态流量约束调度结果为基础, 逐步向适宜生态流量约束靠近的非充分生态约束流量求解方法, 并引入松弛变量, 建立了生态保证程度与发电量的关系, 通过对比 K_{\min} 法和 $K_{\max-1}$ 法的 Tennant 评价结果确定水库生态调度的最佳平衡点, 以此作为非充分生态约束条件下的尼尔基水库生态调度模型。结果表明, 生态流量约束值还有很大的提升空间, 不宜直接选取最小生态流量约束的调度结果作为调度方案; 新的调度模型可以有效解决此类生态调度问题, 给决策者提供更合理的调度方式, 6种生态约束条件下的生态保证程度分别可提高 60%、80%、40%、60%、70%、70%, 电量损失率仅为 2.01%、1.13%、1.28%、1.47%、2.16%、2.08%。

关键词: 环境水利; 水库生态调度; 生态流量; 生态保证程度; 电量损失率

中图分类号: TV697.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0190-08

Reservoir Ecological Operation Model under Condition of Non-sufficient Ecological Constraints

XU Shuqin¹ SU Xin¹ XING Zhenxiang¹ WANG Lili² LU Haojie¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Songhua River Project Construction Management Office of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China)

Abstract: Under the premise that targets of the reservoir's original flood control and water supply were unaffected, in order to reduce the influence of reservoirs on river ecosystems, in allusion to the situation that the scheduling results satisfied the constraint of minimum ecological flux rather than the appropriate ecological flux, a model to solve ecological scheduling of Nierji reservoir under the condition of incomplete ecological constraints was proposed. The model was based on the scheduling results of constraints of the minimum ecological flux, the solving method of non-sufficient ecologically constrained flux approached the constraint of appropriate ecological flux step by step, and by introducing relaxation variables, the firefly algorithm (FA) was used to optimize the scheduling process which led to the establishment of the relation curve between the degree of the ecological assurance and the generated energy and the confirmation of the optimal equilibrium point under the restriction of the non-sufficient ecological flux by the Tennant evaluation through comparing the K_{\min} with $K_{\max-1}$ methods. The results showed that according to the non-sufficient ecological constraint flux inquired by the used model, the ecological water consumption and the minimum ecological constraints could be increased by 4.415 billion m^3 , 3.655 billion m^3 , 5.596 billion m^3 , 4.626 billion m^3 , 3.790 billion m^3 and 5.481 billion m^3 , respectively, in the six cases when compared with low flow years and normal years. It was indicated that there was still much room for ecological flow restriction, therefore, when the scheduling results satisfied the constraint of the minimum ecological flux rather than the appropriate ecological flux, it was inappropriate to select result of the constraint of the minimum ecological flux as the scheduling scheme; according to the established relation curve and $K_{\max-1}$ method, the degree of ecological guarantee of optimal scheduling scheme under six constraints were 60%, 80%, 40%, 60%, 70% and 70%, respectively and their generated energy were corresponded to 0.606 57 billion $kW \cdot h$, 0.603 12 billion $kW \cdot h$,

收稿日期: 2016-07-26 修回日期: 2016-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109036)、黑龙江省教育厅科研项目(11551044)和东北农业大学农业水土工程创新团队项目
作者简介: 徐淑琴(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事水资源优化利用与管理及水库调度研究,E-mail: 1210569246@qq.com

0.685 13 billion kW·h, 0.667 96 billion kW·h, 0.596 82 billion kW·h and 0.678 59 billion kW·h. In conclusion, the new scheduling model could effectively solve the problem of ecological scheduling under this kind of circumstance, improve the degree of ecological assurance, ensure certain economic benefits and provide a more reasonable scheduling approach for decision-makers and new ideas for these issues.

Key words: environmental hydraulics; reservoir ecological operation; ecological flow; ecological level of assurance; power loss ratio

引言

水库作为重要的水利工程使水资源得以更加有效的利用,大规模的水库建设促进了社会经济的发展,为人类带来了巨大的经济和社会效益。但在以往的水库运行中,以经济效益最大化为目标的水库调度在改变河道天然径流时空分配的同时,破坏了河流的连续性,改变了河流原有的水文环境,导致下游河道缺水干涸、河床淤沙、生态环境恶化等一系列生态问题^[1]。因此,探究新形势下的水库调度方式显得尤为重要,生态调度也逐渐成为新的研究方向。

国外的生态调度实践始于20世纪40年代,而国内的生态调度研究工作起步较晚,进入21世纪,随着人们对河流生态的逐步重视,生态调度研究工作才蓬勃开展^[2]。1982年,SALE等^[3]将鱼类最佳栖息地面积对应的生态流量作为适宜生态流量并建立了优化调度模型;2008年,CASTELLETTI等^[4]为实现对河流的生态保护,将最小生态流量约束条件方程加入到优化调度模型中;2010年,SHAFROTH等^[5]通过模拟春季洪水脉冲,减缓洪水退水过程,来修复本地岸边植被;康玲等^[6]计算了四大家鱼产卵所需的洪水脉冲,以及河道的最小和适宜生态流量,建立了丹江口水库调度模型;尹正杰等^[7]计算了4种最小生态流量并作为约束条件,进行了梯级水库的优化调度研究;徐淑琴等^[8]考虑水文变异对生态流量的影响,建立了水文变异条件下的生态调度模型。

但对于这些研究而言,大多是以最小生态流量^[9]或适宜生态流量^[10]为约束条件的兴利调度。但在运行过程中会存在这样的问题,如文献^[6,8]所示,当水库进行生态调度时,在来水不足的年份,由于入库水量及库容的限制,其调度结果可以满足最小生态流量的要求,但无法满足适宜生态流量的要求,若此时仅以最小生态流量进行调度,虽然经济效益较为乐观,但会造成生态用水的浪费;而以适宜生态流量为约束进行调度,生态保证程度较高,但会损失较大的经济效益,同时也无法制定确切的调度方案。因此,本文提出非充分生态约束条件下水库生态调度模型,以最小生态流量约束下的调度结果为基础,求解得到非充分生态约束流量,并建立生态

保证程度与发电量的关系,通过对比 K_{\min} 法和 $K_{\max-1}$ 法的Tennant评价结果确定水库生态调度的最佳平衡点,制定更易被决策者接受的水库调度方式,以期作为水库生态调度提供新的思路。

1 水库生态调度模型

目前,生态调度方法包括:河流生态需水量调度、模拟生态洪水调度、防治水污染调度、控制泥沙调度、生态因子调度、水系连通性调度等^[11-13]。而考虑生态需水量的水库优化调度模型主要为生态流量约束型模型、生态流量目标型模型以及生态价值目标型模型^[14]。本文选择生态流量约束型模型对尼尔基水库的生态调度进行求解。

1.1 生态调度模型

为探究非充分生态约束条件下水库生态调度模型的效果,本文以文献^[8]的研究成果为基础,选择以最大发电量为调度目标,目标函数为

$$E = \max \sum_{t=1}^T N_t \Delta t \quad (1)$$

式中 E ——调度期总的发电量

T ——计算时段总数

N_t ——时段出力 Δt ——计算时段

约束条件:

水量平衡约束

$$(I_t - Q_t - S_t - Q_{\text{loss},t}) \Delta t = V_{t+1} - V_t \quad (2)$$

水位约束

$$Z_{\min} \leq Z_t \leq Z_{\max} \quad (3)$$

水轮机最大过机流量约束

$$Q_t \leq Q_{\max} \quad (4)$$

水电站出力约束

$$N_{\min} \leq N_t \leq N_{\max} \quad (5)$$

水电站出力特性

$$P_t = f_t(H, Q) \quad (6)$$

生态约束

$$Q_{\min,t} \text{ (或 } Q_{\text{eff},t}) \leq (Q_t + S_t) \leq Q_{\max,t} \quad (7)$$

非负约束:上述各变量非负。

式中 V_{t+1} 、 V_t —— t 时段末、时段初的库容

I_t ——入库流量

Q_t 、 S_t ——发电流量、弃水流量

$Q_{\text{loss},t}$ ——水库各时段蒸发和渗漏损失之和

Z_{\min} 、 Z_{\max} ——水库死水位、正常蓄水位(或汛限水位)

Q_{\max} ——水电站水轮机组的最大过机流量

N_{\min} 、 N_{\max} ——水电站的保证出力、额定出力

$Q_{\min,t}$ 、 $Q_{\text{fit},t}$ 、 $Q_{\max,t}$ ——最小生态流量、适宜生态流量、最大生态流量

1.2 非充分生态约束条件求解模型

当存在水库生态调度结果可以满足最小生态流量约束,而不满足适宜生态流量约束时,采用以下步骤进行非充分生态约束流量的求解:①以最小生态流量为约束条件,以最大发电量为目标,对水库进行生态调度,并记录达到最优目标值时的逐时段下泄流量,记为 Q_{bestmin} 。②将 Q_{bestmin} 与适宜生态流量约束流量 Q_{fit} 进行比较,若任一时段的适宜生态流量大于 Q_{bestmin} ,则用该时段的 Q_{bestmin} 代替 Q_{fit} ,否则,仍保留原值,由此会产生一组个别时段流量值小于适宜生态流量的新的生态流量,记为 Q_{fit1} 。③将新产生的生态流量作为约束条件,进行该条件下的水库生态调度,记录下达到最优目标值时的逐时段下泄流量,记为 Q_{fit2} 。④将任一时段的 Q_{fit2} 与 Q_{fit1} 进行比较,若 Q_{fit2} 大于 Q_{fit1} 且小于 Q_{fit} ,则将该时段的 Q_{fit2} 赋值给 Q_{fit1} ,若该时段的 Q_{fit2} 大于 Q_{fit} ,则将该时段的 Q_{fit} 赋值给 Q_{fit1} ,否则, Q_{fit1} 仍保留原值,由此会产生一组新的生态流量值,记为 Q_{fit3} 。⑤重复③、④,不断更新小于适宜生态流量的流量约束,直到所有小于适宜生态流量的约束值与生态调度后的流量值相等,即为所求得的最小生态流量与适宜生态流量之间的非充分生态约束流量。

1.3 引入松弛变量的生态调度模型

生态调度往往存在经济效益与生态效益之间的矛盾问题,在水量充足的年份,矛盾可以得到有效缓解,可非充分条件下的水库生态调度多发生于来水不足的年份,若一味的追求生态效益,固然可以满足生态调度的理念,但会损失较大的经济效益,故如何提供更容易被决策者接受的调度方式显得尤为重要。

陈端等^[14]建立了不同生态流量满足程度与工程效益损失之间的关系,据此寻找最小生态流量与适宜生态流量的最佳平衡点;徐刚等^[15]研究了不同生态基流对水利枢纽发电效益影响,探索进一步加大生态基流的可能性。根据文献[14-15]的思路,本文通过引入松弛变量 λ ,拟定不同生态保证程度的生态基流,据此进行生态调度,建立不同生态保证程度与发电量之间的关系曲线,同时,计算各生态基流的斜率绝对值 k ,以分析比较不同生态基流下的发电收益损失程度,建立非充分条件下水库生态调度模型,从而寻找该调度方式下最佳平衡点。

具体实现过程计算式为

$$Q_{ECA,t} = Q_{\min,t} + \lambda(Q_{nsec,t} - Q_{\min,t}) \quad (8)$$

$$k_{\lambda} = \begin{cases} \left| \frac{E_{\lambda} - E_{\min}}{10\%} \right| & (\lambda = 0, 10\%) \\ \left| \frac{E_{\lambda} - E_{\lambda-10\%}}{10\%} \right| & (\lambda = 20\%, 30\%, \dots, 100\%) \end{cases} \quad (9)$$

式中 $Q_{ECA,t}$ ——不同生态保证程度下的生态基流
 $Q_{nsec,t}$ ——非充分条件下的生态约束流量
 E_{λ} ——生态保证程度为 λ 时的发电量,其中
 $E_0 = E_{\min}$
 E_{\min} ——最小生态流量约束下的发电量
 k_{λ} ——斜率,即不同生态保证程度下的发电量变化程度

1.4 模型求解

1.4.1 模型求解方法

萤火虫算法的思想是模拟自然界中萤火虫的发光行为,即通过萤火虫总是朝向更亮的区域飞去实现进化^[16]。目前,该算法分为 GSO 和 FA 两种。这两者的仿生原理相同,但在具体实现方面有一定的差异^[8]。其中, GSO 算法由 KRISHNANAND 等^[17]提出, FA 算法在 2009 年,由 YANG^[18]提出。本文选择 FA 算法对模型进行优化求解。

1.4.2 FA 算法在水库生态调度模型中的应用

FA 算法已被证实在求解约束优化类问题方面的优越性,曾冰等^[19]针对装配序列规划问题的特点,提出了一种改进的萤火虫算法,并与遗传算法进行比较,证明其优越性;付强等^[20]针对土壤水分特征曲线参数优化的非线性拟合问题,将 FA 算法与 PSO 算法、GA 算法进行对比,证明其具有模拟结果精度高、曲线吻合性好的特点。

寻优过程为:①以死水位为下限,汛限水位或正常蓄水位为上限,在这范围内生成一系列的初始种群。②将初始种群通过水量平衡方程等约束条件进行约束,推求满足约束条件下的逐时段水位值及下泄流量。③判断下泄流量是否大于水轮机最大过机流量,若大于水轮机最大过机流量,则发电流量取水轮机最大过机流量,多余流量为弃水流量;若小于水轮机最大过机流量,则为发电流量。④根据下泄流量,在尾水位流量关系表中查得对应的下游水位。⑤根据出力及发电量公式,求得相应的出力和发电量,并寻找最大发电量在种群中的位置,以便获取各时段初库容及对应的水位。

在寻优过程中,初始种群的选择较为重要,若每次均可生成满足约束的初始解,则会大大减少寻优过程,本文通过约束条件来实现这一过程。根据水

量平衡方程

$$V_{t+1} = V_t + (I_t - Q_{x,t} - Q_{loss,t}) \Delta t \quad (10)$$

$$(V_{\min,t} \leq V_t \leq V_{\max,t})$$

式中 $Q_{x,t}$ ——下泄流量,包括发电流量和弃水流量
确定每一调度时段的上下限数值。

对于典型年调度的水库来说,初始库容为已知,同时根据文献[8]求得的最小、适宜生态流量或非充分适宜生态流量及最大生态流量,可确定下一时段下泄流量的上下限,故下一时段的上、下限库容约束计算式为

$$V_{\max,t+1} = V_t + (I_t - \min(Q_{x,t}) - Q_{loss,t}) \Delta t \quad (11)$$

$$V_{\min,t+1} = V_t + (I_t - \max(Q_{x,t}) - Q_{loss,t}) \Delta t \quad (12)$$

求解下一时段的上下限约束之后,还应遵循以下原则:若本时段库容下限值小于死库容,上限值大于死库容,则本时段库容下限值取为死库容;若本时段库容下限值大于正常蓄水位(或汛限水位)所对应的库容 V_z/V_x ,则本时段库容上限值和下限值均取 V_z/V_x ;若本时段库容上限值小于死库容,则本时段的上限值和下限值均为死库容;若本时段的上限值大于 V_z/V_x ,下限值小于 V_z/V_x ,则本时段库容上限值取为 V_z/V_x 。若生成的初始库容值在本时段的上下限约束内,则保持不变,若不在该范围内,则计算本时段的库容

$$V_{t+1} = V_{\min,t+1} + \text{rand}(V_{\max,t+1} - V_{\min,t+1}) \quad (13)$$

式中 $\text{rand}()$ ——0~1之间的随机数

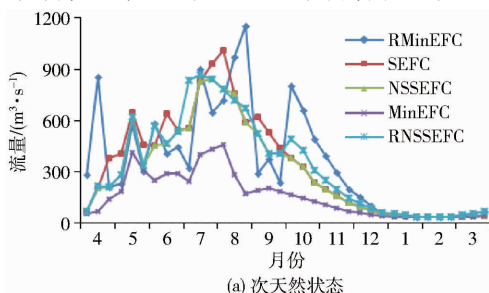
在库容上下限及每时段的库容确定后,记录下每时段对应的库容上下限值,由水库库容曲线查得相应的水位,作为各时段水位约束的上下限值,根据该数值进行算法的进化与变异,以此减少无关解的影响。

本文虽以文献[8]的研究成果为基础,但所用算法及其实现过程略有不同,故调度结果有所差异,考虑本文研究目的,具体差异分析不做过多赘述。

2 应用实例

2.1 尼尔基水库概况

尼尔基水利枢纽位于嫩江干流中游,为多年调



节水库,其正常蓄水位 216 m,死水位 195 m,主汛期(6月21日—8月25日)汛限水位为 213.37 m,前汛期(6月1日—20日)及后汛期(9月6日—30日)汛限水位为正常蓄水位,水库总库容 86.10 亿 m^3 ,其中防洪库容 23.68 亿 m^3 ,兴利库容 59.68 亿 m^3 ,死库容 4.88 亿 m^3 ,装机容量 250 MW。

2.2 尼尔基水库生态调度结果

2.2.1 非充分生态约束条件下生态调度结果

区间水补给会在一定程度上影响河段的流量,对研究造成干扰,所以为了消除区间水补给的影响,选择尼尔基水库坝下至第一个入水口——讷谟尔河长度为 10 km 的河段为控制断面,并考虑尼尔基水库原有的供水、防洪、发电、航运任务兼顾生态需水目标进行水库的生态调度。

根据推求的非充分生态约束流量,依据文献[8]所述方法进行水文变异条件下的生态调度,将最小生态流量约束下的调度曲线记为 RMinEFC、适宜生态流量过程线记为 SEFC、非充分条件下的适宜生态流量过程线记为 NSSEFC、最小生态流量过程线记为 MinEFC、非充分适宜生态流量约束下的调度曲线记为 RNSSEFC,较枯水年和平水年调度结果分别见图 1、图 2 及表 1、表 2。

由图 1、图 2 可以看出,最小生态流量约束下的调度结果均不能满足适宜生态流量的要求,且不能满足的年份多发生在 5—10 月份之间,而该时期也恰好为作物生育期,说明农业用水与生态用水之间存在矛盾;经过本文模型确定出的非充分条件下的适宜生态流量,其调度结果与最小生态流量约束下的调度结果相比,可以看出,当调度结果不能满足适宜生态流量时,约束值可在两者之间得到有效的提升,而其他时段,调度结果均能满足适宜生态流量的要求,说明该模型可以有效的提高生态的保证程度;由图 1b、图 2c 可知,在现状条件下确定的非充分适宜生态流量与原适宜生态流量相比,较为接近,说明现状下的生态需水量较低、较易满足,不宜按最小生态流量进调度,不能满足的时段多发生在调度初期,若在调度开始时可以多存蓄些水量则可更好地解决

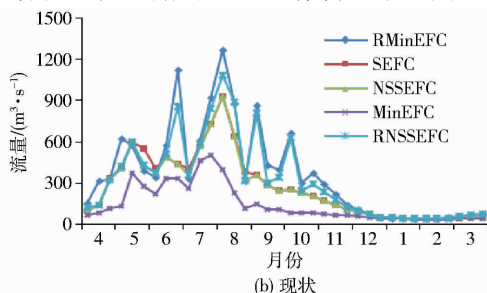


图 1 较枯水年的生态流量约束及优化调度结果

Fig. 1 Ecological flow constraints and optimal scheduling results for relatively dry years

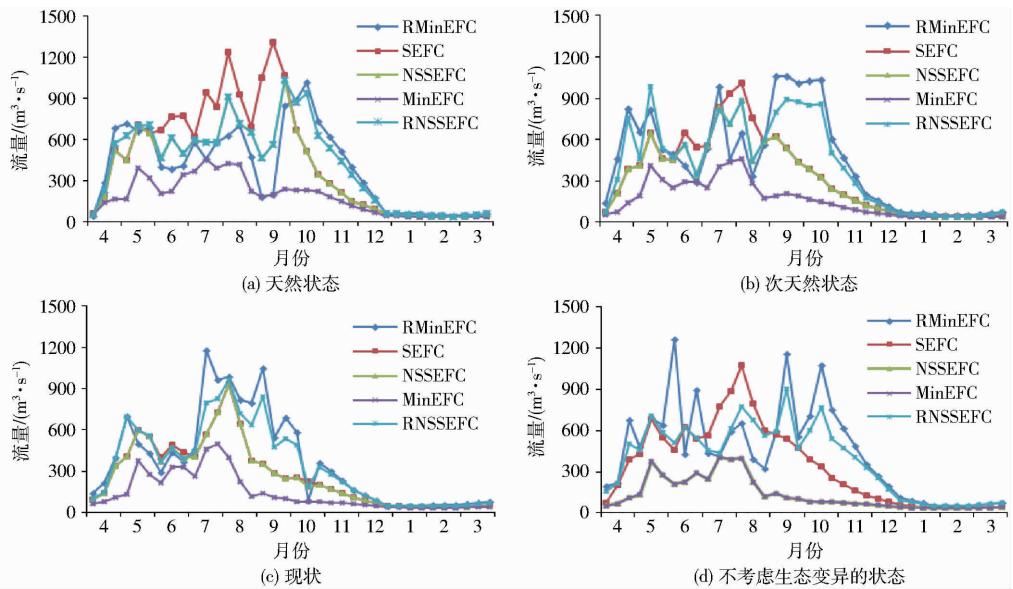


图 2 平水年的生态流量约束及优化调度结果

Fig. 2 Ecological flow constraints and optimal scheduling results for normal years

表 1 较枯水年的生态调度发电量及约束用水量

Tab.1 Ecological scheduling power generation and water consumption of constraints for relatively dry years

约束条件	效益指标	最小生态流量	适宜生态流量	非充分条件下的适宜生态流量约束
		约束	约束	约束
次天然	发电量/(亿 kW·h)	6.19	5.48	5.86
	生态约束用水量/亿 m ³	50.50	105.12	94.65
现状	发电量/(亿 kW·h)	6.10	5.75	5.93
	生态约束用水量/亿 m ³	45.14	84.22	81.69

表 2 平水年的生态调度发电量及约束用水量

Tab.2 Ecological scheduling power generation and water consumption of constraints for normal years

约束条件	效益指标	最小生态流量	适宜生态流量	非充分条件下的适宜生态流量约束
		约束	约束	约束
天然	发电量/(亿 kW·h)	6.94	6.30	6.56
	生态约束用水量/亿 m ³	57.23	141.55	113.19
次天然	发电量/(亿 kW·h)	6.78	6.40	6.53
	生态约束用水量/亿 m ³	50.50	105.12	96.76
现状	发电量/(亿 kW·h)	6.10	5.83	5.86
	生态约束用水量/亿 m ³	45.14	84.22	83.04
不考虑变异	发电量/(亿 kW·h)	6.93	6.50	6.63
	生态约束用水量/亿 m ³	42.01	107.21	96.82

此类问题。

由表 1、表 2 可以看出,适宜生态流量约束下的调度结果较最小生态流量约束下的调度结果相差较大,发电量分别减少了 11.47%、5.74%、9.22%、5.60%、4.42%、6.20%,而且此约束下的下泄流量又无法满足约束值,自然不能被决策者所接受,可若是仅以最小生态流量来调度,虽然经济效益显著,但

会损失生态用水,不能更好地体现生态调度的目标。

非充分条件下的生态调度与适宜生态流量约束的调度结果相比,其发电量在枯水年的次天然及现状条件下分别提高了 6.93%、3.14%,在平水年的天然、次天然、现状及不考虑变异的条件下分别提高了 4.20%、2.02%、0.52%、1.96%;与最小生态流量约束的调度结果相比,在枯水年的次天然及现状条件下其生态约束用水量分别提高了 87.43%、42.76%,发电量分别减少了 5.34%、2.78%,在平水年的天然、次天然、现状及不考虑变异的条件下其生态约束用水量分别提高了 97.77%、91.61%、83.97%、130.48%,发电量分别减少了 5.41%、3.69%、4.93%、4.37%。

由此可以看出,非充分生态约束条件下的生态调度可以有效地增加生态用水量,提高生态保证程度,同时对进行生态调度的水库来说发电量的减少程度在可接受的范围内。

2.2.2 引入松弛变量的生态调度结果

当以非充分生态约束进行调度时,发电量较最小生态流量约束的调度结果最多可减少 5.41%,为制定更加合理的调度方案,通过引入松弛变量来实现该过程。经计算发现,当松弛变量的梯度值选取较小时,相邻梯度的调度结果相差较小,经多次比对,选择 10% 为梯度,故松弛变量的取值为 0、10%、20%、...、80%、90%、100% 共 11 个值。将非充分天然生态约束、非充分次天然生态约束、非充分现状生态约束、非充分不考虑生态变异的生态约束分别记为 NSNA、NSSNA、NSN、NSNV,计算结果见图 3、图 4。

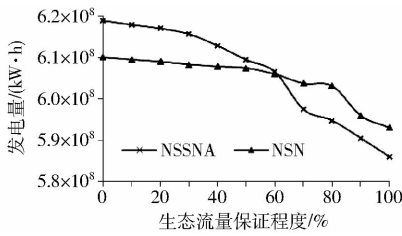


图 3 较枯水年的生态流量保证程度及其发电量

Fig. 3 Degree of ecological flow and amount of electricity generation for relatively dry years

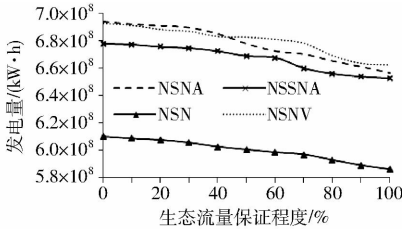


图 4 平水年的生态流量保证程度及其发电量

Fig. 4 Degree of ecological flow and amount of electricity generation for normal years

根据得到的 6 种生态流量保证程度与发电量关系曲线,计算非充分生态约束条件下的最佳平衡点,本文采用 2 种方法并结合 Tennant 评价法来实现该过程,选取最佳平衡点时,文献[15]提出了生态发电收益损失比值 k ,比较不同生态基流下的 k 值,选择最小值为最佳平衡点,结合该思路,本文第 1 种方

法为以生态流量保证程度与发电量关系曲线斜率绝对值 k 的最小值确定最佳平衡点,称为最小斜率法 (K_{\min} 法);根据文献[14]的思路,确定第 2 种方法为选择斜率绝对值最大值(即发电量改变程度最大)的前一梯度生态流量保证程度及发电量为最佳平衡点,称为最大斜率法 ($K_{\max-1}$ 法)。将两次结果用 Tennant 法评价,选择较优者作为最优的非充分生态流量约束,相应的其调度结果也为非充分生态约束条件下的最佳平衡点,将非充分天然生态约束流量、非充分次天然生态约束流量、非充分现状生态约束流量、非充分不考虑生态变异的生态约束流量分别记为 QNSNA、QNSSNA、QNSN、QNSNV,计算结果见表 3、图 5、图 6 及表 4。

根据表 3、表 4 可以看出, K_{\min} 法的生态调度发电量优于 $K_{\max-1}$ 法,较最小生态流量的调度发电量相比损失率不足 1.5%,可生态保证程度较低, $K_{\max-1}$ 法确定的生态约束流量评价结果优于 K_{\min} 法确定的生态约束流量,而且发电损失率可控制在 2.5% 以下,考虑生态调度的理念,故选择 $K_{\max-1}$ 法确定的生态保证程度及发电量作为非充分生态约束的最优值。同时,对于决策者来说,若个别年份的生态保证程度要求不高,或发生用电紧张的情况时,可采用 K_{\min} 法制定调度计划来获得最大的发电效益。

表 3 K_{\min} 法和 $K_{\max-1}$ 法的求解结果与比较

Tab. 3 Results and comparison of K_{\min} method and $K_{\max-1}$ method

典型水文年	约束条件	方法	斜率	生态保证程度/%	发电量/(亿 kW·h)	电量损失率/%
较枯水年	非充分次天然生态约束	K_{\min}	0.09	20	6.171 2	-0.30
		$K_{\max-1}$	0.29	60	6.065 7	-2.01
	非充分现状生态约束	K_{\min}	0.04	50	6.074 5	-0.42
		$K_{\max-1}$	0.06	80	6.031 2	-1.13
平水年	非充分天然生态约束	K_{\min}	0.11	20	6.897 7	-0.41
		$K_{\max-1}$	0.46	40	6.851 3	-1.28
	非充分次天然生态约束	K_{\min}	0.05	10	6.774 4	-0.46
		$K_{\max-1}$	0.11	60	6.679 6	-1.47
	非充分现状生态约束	K_{\min}	0.11	20	6.074 2	-0.42
		$K_{\max-1}$	0.16	70	5.968 2	-2.16
	非充分不考虑变异生态约束	K_{\min}	0.05	50	6.831 2	-1.43
		$K_{\max-1}$	0.28	70	6.785 9	-2.08

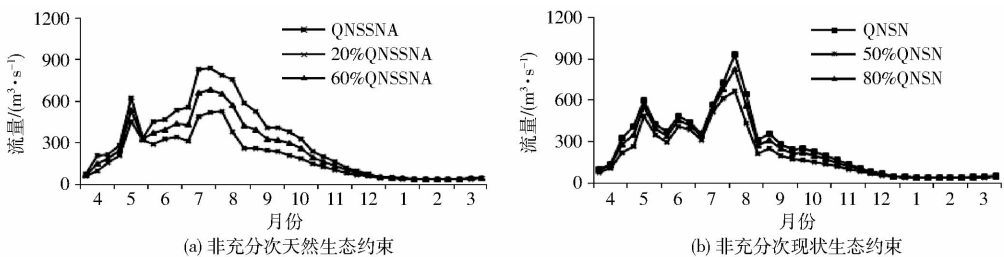


图 5 K_{\min} 法和 $K_{\max-1}$ 法的较枯水年非充分生态约束流量

Fig. 5 K_{\min} and $K_{\max-1}$ methods of non-sufficient ecological constraint flow for relatively dry years

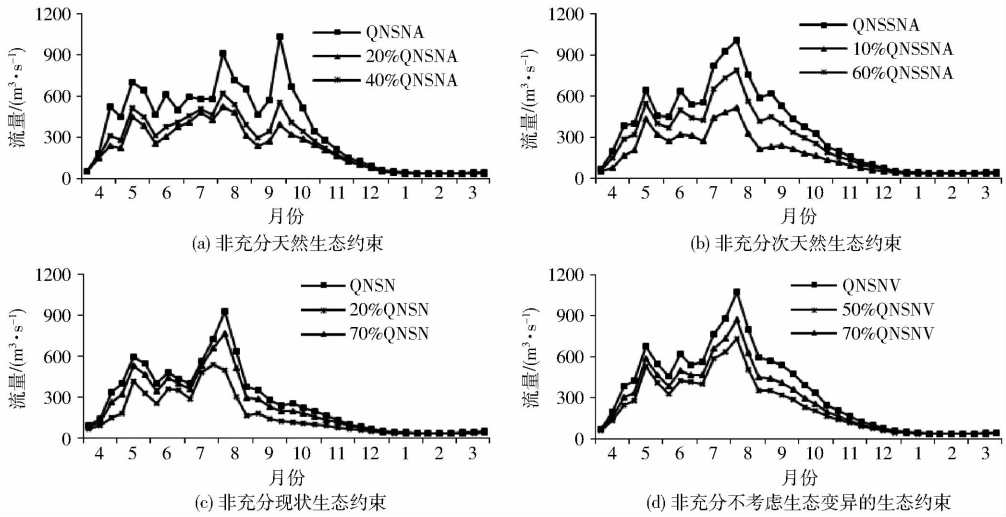


图6 K_{min} 法和 K_{max-1} 法的的平水年非充分生态约束流量

Fig.6 K_{min} and K_{max-1} methods of non-sufficient ecological constraint flow for normal years

表4 Tennant 法评价结果

Tab.4 Evaluation result of Tennant method

典型水文年	径流条件	占年均流量的比重/%		Tennant 法评价结果	
		10月一次	4—9	10月一次	4—9
		年3月份	月份	年3月份	月份
较枯水年	QNSSNA	17.75	138.44	一般	极限
	20% QNSSNA	14.33	84.52	较差	最佳
	60% QNSSNA	16.04	111.48	一般	极限
	QNSN	17.09	118.23	一般	极限
	50% QNSN	13.65	74.02	较差	最佳
	80% QNSN	15.37	96.13	一般	最佳
平水年	QNSNA	20.58	166.01	较好	极限
	20% QNSNA	17.79	105.50	一般	极限
	40% QNSNA	18.19	114.15	一般	极限
	QNSSNA	17.75	155.13	一般	极限
	10% QNSSNA	13.90	79.45	较差	最佳
	60% QNSSNA	16.04	121.49	一般	极限
	QNSN	17.15	122.23	一般	极限
	20% QNSN	13.66	74.82	较差	最佳
	70% QNSN	15.84	104.45	一般	极限
	QNSNV	18.32	158.07	一般	极限
	50% QNSNV	13.29	68.02	较差	最佳
	70% QNSNV	16.64	128.06	一般	极限

注:选取尼尔基水库 1951—2010 年的径流资料推求多年平均径流量为 339.09 m³/s。

3 结论

(1)非充分生态流量约束的生态用水量与最小

生态约束在较枯水年及平水年的 6 种情况相比,可分别提高 44.15 亿 m³、36.55 亿 m³、55.96 亿 m³、46.26 亿 m³、37.90 亿 m³、54.81 亿 m³,故当发生调度结果满足最小生态流量约束而不满足适宜生态流量约束的情况时,不宜直接选择最小生态流量约束的调度结果作为调度方案。

(2)通过引入松弛变量进行非充分生态约束条件下的生态调度,建立了生态保证程度及其发电量的关系并将 K_{max-1} 法的调度结果作为最佳平衡点,确定了 6 种约束条件下最优调度方案的生态保证程度分别为 60%、80%、40%、60%、70%、70%,发电量分别为 6.065 7 亿 kW·h、6.031 2 亿 kW·h、6.851 3 亿 kW·h、6.679 6 亿 kW·h、5.968 2 亿 kW·h、6.785 9 亿 kW·h,说明新的调度模型可以有效地解决该种情况下的生态调度问题,提高生态保证程度并保证一定的经济效益,符合生态调度的理念。

(3) K_{min} 法的生态调度侧重于经济效益而 K_{max-1} 法的生态调度侧重于生态效益,决策者可以结合二者的优越性来制定更为合理的调度方案,即在生态需水量高的月份(4—9 月份),采用 K_{max-1} 法制定调度计划,在生态需水较少的月份(10 月一次年 3 月份),选择 K_{min} 法制定调度计划。

参 考 文 献

- 王加全,马细霞,李艳. 基于水文指标变化范围法的水库生态调度方案评价[J]. 水力发电学报,2013,32(1):107-112. WANG Jiaquan, MA Xixia, LI Yan. Evaluation of reservoir ecological operation schedule by range of variability approach[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1):107-112. (in Chinese)
- 吴旭,魏传江,申晓晶,等. 水库生态调度研究实践及展望[J]. 人民黄河,2016,38(6):87-90,107. WU Xu, WEI Chuanjiang, SHEN Xiaojing, et al. Reservoir ecological operation research, practice and prospect[J]. Yellow River, 2016, 38(6):87-90,107. (in Chinese)
- SALE M J, BRILL E D, HERRICKS E E. An approach to optimizing reservoir operation for downstream aquatic resources[J].

- Water Resources Research, 1982, 18(4):705-712.
- 4 CASTELLETTI A, PIANOSI F, SONCINI-SESSA R. Water reservoir control under economic, social and environmental constraints [J]. Automatic, 2008, 44(6): 1595-1607.
 - 5 SHAFROTH P B, WILCOX A C, LYTLE D A, et al. Ecosystem effects of environmental flows: modelling and experimental floods in a dryland river[J]. Freshwater Biology, 2010, 55(1): 68-85.
 - 6 康玲, 黄云燕, 杨正祥, 等. 水库生态调度模型及其应用[J]. 水利学报, 2010, 41(2): 134-141.
KANG Ling, HUANG Yunyan, YANG Zhengxiang, et al. Reservoir ecological operation model and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2): 134-141. (in Chinese)
 - 7 尹正杰, 杨春花, 许继军. 考虑不同生态流量约束的梯级水库生态调度初步研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3):66-70,81.
YIN Zhengjie, YANG Chunhua, XU Jijun. Ecological regulation of cascade dams in the lower Jinsha river under different ecological flow constraints[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(3):66-70,81. (in Chinese)
 - 8 徐淑琴, 苏鑫, 王莉莉, 等. 水文变异条件下水库生态调度研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 146-154,381.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160420&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.020.
XU Shuqin, SU Xin, WANG Lili, et al. Reservoir ecological operation under condition of hydrological variability [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 146-154,381. (in Chinese)
 - 9 张涛, 李光吉, 冉令贺. 基于频率法的河道最小生态流量计算[J]. 人民黄河, 2014, 36(3): 32-34.
ZHANG Tao, LI Guangji, RAN Linghe. Minimum ecological flow calculation of river channel based on frequency Method[J]. Yellow River, 2014, 36(3): 32-34. (in Chinese)
 - 10 陈敏建, 丰华丽, 王立群, 等. 适宜生态流量计算方法研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 745-750.
CHEN Minjian, FENG Huali, WANG Liqun, et al. Calculation methods for appropriate ecological flow[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(5): 745-750. (in Chinese)
 - 11 王宗志, 程亮, 王银堂, 等. 基于库容分区运用的水库群生态调度模型[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 435-443.
WANG Zongzhi, CHENG Liang, WANG Yintang, et al. A multi-reservoir ecological operation model based on subdivision application of reservoir storage capacities[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 435-443. (in Chinese)
 - 12 KONDILI E, KALDELLIS J K, PAPAPOSTOULOU C. A novel systemic approach to water resources optimisation in areas with limited water resources [J]. Desalination, 2010, 250(1): 297-301.
 - 13 HU S Y, WANG Z Z, WANG Y T, et al. Total control-based unified allocation model for allowable basin water withdrawal and sewage discharge[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(5): 1387-1397.
 - 14 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.
CHEN Duan, CHEN Qiuwen, CHEN Jin. Review on optimization models of reservoir operation with consideration of ecological flow[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(5): 248-256. (in Chinese)
 - 15 徐刚, 黄迪, 咎雄风, 等. 不同生态基流量对拉洛水利枢纽发电损益影响分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(11):51-58.
XU Gang, HUANG Di, ZAN Xiong Feng, et al. Impact of ecological base flow on power revenues and losses of Laluo hydro-junction[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(11):51-58. (in Chinese)
 - 16 龙文, 蔡绍洪, 焦建军, 等. 求解约束优化问题的萤火虫算法及其工程应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(4): 1260-1267.
LONG Wen, CAI Shaohong, JIAO Jianjun, et al. Firefly algorithm for solving constrained optimization problems and engineering applications[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(4): 1260-1267. (in Chinese)
 - 17 KRISHNANAND K N, GHOSE D. Detection of multiple source locations using a glowworm metaphor with applications to collective robotics[C]//Proceedings of IEEE Swarm Intelligence Symposium, 2005: 84-91.
 - 18 YANG Xinshe. Nature-inspired metaheuristic algorithms[M]. London:Luniver Press, 2008: 83-96.
 - 19 曾冰, 李明富, 张翼. 基于改进萤火虫算法的装配序列规划方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(4): 799-806.
ZENG Bing, LI Mingfu, ZHANG Yi. Assembly sequence planning based on improved firefly algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(4): 799-806. (in Chinese)
 - 20 付强, 蒋睿奇, 王子龙, 等. 基于改进萤火虫算法的土壤水分特征曲线参数优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 117-122.
FU Qiang, JIANG Ruiqi, WANG Zilong, et al. Optimization of soil water characteristic curves parameters by modified firefly algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 117-122. (in Chinese)