

梯级水库多目标优化调度多属性决策研究

官云飞, 郑芙蓉

(浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002)

摘要: 为客观全面评价梯级水库多目标优化调度方案的合理性, 需对多目标优化调度非劣方案集进行多属性决策, 以便获得最佳均衡方案。文章首先构建了梯级水库多目标优化调度多属性决策指标集, 并采用基于权重的投影寻踪模型对非劣方案集进行多属性决策, 以此应用于汀江流域棉花滩-青溪梯级水库。实例研究表明该决策模型合理可行, 决策结果能够充分发挥流域水资源综合效益, 促进流域梯级水资源更合理健康地利用。

关键词: 梯级水库; 多目标优化调度; 非劣方案集; 多属性决策; 投影寻踪; 棉花滩-青溪

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-2469(2019)11-0094-05

多属性决策在社会生活中普遍存在, 决策者根据已有决策信息、社会经济发展实际需要和结合自己偏好进行带有一定风险和机会的决策。流域梯级水库调度时不仅需要考虑社会经济目标, 也必须重视生态环境目标, 然而这些目标之间既有相互联系, 也存在不同程度的矛盾。对于梯级水库多目标优化调度非劣方案集, 决策者为协调目标间的矛盾从而得到相对最佳均衡的水库调度方案, 就需要进行多属性决策。

1 多属性决策模型构建

为客观全面评价梯级水库多目标优化调度方案的合理性, 首先需要构建多属性决策指标集, 通过多目标优化调度模型得到非劣方案集, 在此基础上进行多属性决策, 一般包含三个过程, 即属性值规范化、属性权重确定以及方案综合排序^[1], 以获得权衡之下最优的水库调度方案。

1.1 多属性决策指标集

梯级水库多目标优化调度多属性决策指标集应该包含社会、经济与生态目标。社会目标主要是防洪安全目标和供水安全目标。对于以防洪调度为主的梯级水库调度模型, 一般以最高库水位、最大下泄流量、后汛期调度期末水位作为评价指标。对于有供水目标的水库, 则以调度期内平均缺水率作为评价指标。同时为提高水资源利用率, 梯级水库调度时总弃水量越小越好, 将梯级总弃水量也纳入社会目标评价指标集。经济目标主要包括发电、供水、航运、灌溉等目标, 对于以发电为主的水电站

水库, 一般选取梯级总发电量和梯级最小时段出力作为评价指标。目前国内外对水库生态调度还没有一个获得公认的目标, 本次梯级水库多目标生态调度仍以梯级总发电量和梯级最小时段出力作为评价指标, 并提出了以适宜生态流量距离这个指标来考量水库生态调度的实现程度, 其目标函数为:

$$\max E = \min \sqrt{\sum_{t=1}^T (q_{it} - q_{it, \text{epro}})^2} \quad (1)$$

式中, E —生态环境效益, 以最接近适宜生态流量作为目标函数, 以欧几里得范数作为距离测度; q_{it} —第 i 个水库 t 时段内的下泄流量, 包括发电流量, m^3/s ; $q_{it, \text{epro}}$ —第 i 个水库 t 时段内的适宜生态流量, m^3/s 。

梯级水库多目标优化调度多属性决策指标集如图 1 所示。

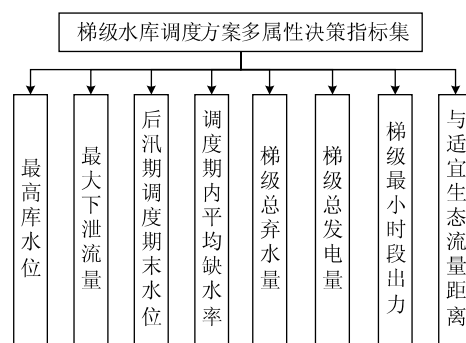


图 1 梯级水库多目标优化调度多属性决策指标集

收稿日期: 2019-08-13

作者简介: 官云飞(1988 年—), 男, 工程师。

E-mail: 457349499@qq.com

1.2 多目标优化调度模型

梯级水库多目标优化调度模型以调度期内产生的社会经济、生态环境综合效益最大为目标。为确保更好地实现河流生态目标,本文将社会效益最大和最接近适宜生态流量作为非约束性目标,将其他目标转化为约束条件,并通过多目标免疫遗传算法得到多目标优化调度非劣方案集^[2-3]。

1.3 属性值规范化

由于不同决策指标属性表示方法之间量纲具有很大差异,因此在进行多属性决策前有必要对各属性值进行规范化处理。常用属性规范化方法有向量规范化、比例变换法、非比例变换法等。非比例变换方法根据决策指标属性值之差,按照不固定比例关系进行指标属性值规范化处理。对于效益型指标,可用以下公式计算:

$$q_j^+(i) = \frac{q_j(i) - q_{j\min}(i)}{q_{j\max}(i) - q_{j\min}(i)} \quad (2)$$

对于成本型指标,可用以下公式计算:

$$q_j^-(i) = \frac{q_{j\max}(i) - q_j(i)}{q_{j\max}(i) - q_{j\min}(i)} \quad (3)$$

非比例变化方法得到的 $q_j^+(i)$ 不是按照固定比例放大或缩小,而是一个相对的概念,且 $q_j^+(i) \in [0, 1]$ 。

1.4 属性权重确定

多属性决策方法有无权重方法和基于权重的方法。无权重方法将所有指标看作同等重要,在实际决策过程中可能导致一些原本不是特别重要的因素影响决策结果。基于权重的决策方法,可以更好地反映实际决策过程。属性权重确定是多属性决策的重要内容,主要包括主观赋权法、客观赋权法、组合赋权法、交互式赋权法等四类^[4-5]。常见主观赋权法有德尔菲法^[6]、层次分析法^[7]等,但是主观赋权法需要决策者具有深厚的工作经验积累,否则可能偏离客观自然规律,同时主观赋权法的透明公正性也受到一些质疑。客观赋权法主要有主成分分析法^[8]、两阶段法^[9]等,这些方法评价过程比较透明,再现性强,但是它们一般计算过程较为复杂。为了能够克服各自方法的缺陷,将主观赋权法和客观赋权法相结合得到组合赋权法,已成为研究发展的趋势,包括组合最小二乘法^[10]、交互式组合法^[11]等。但是上述方法在确定属性权重时只含有一次决策过程,在实际操作过程中总是会或多或少包含决策者的主观信息,不断调整和修正属性权重值,形成交互式的属性确定方法。层次分析法基

于客观事实判断各种因素之间的相对重要性,通过两两比较形成判断矩阵,根据判断矩阵的最大特征值及其特征向量,计算同层次某一因素的相对重要性权重。该法能将复杂系统的各个因素划分得非常具有层次性,能够较好地获得决策者的偏好信息,是确定权重常用的系统性分析方法。

1.5 方案综合排序

确定各属性的权重之后,可以对各方案进行优选排序,获得相对最优方案。多属性决策一般可分为传统决策方法和现代决策方法。传统决策方法如简单加权法^[12]、ELECTRE^[13]、TOPSIS^[14]等。20世纪90年代以来,随着计算机科学计算以及人工智能优化技术的发展,越来越多的研究者将智能优化方法与多属性决策相结合,用以分析大批量统计数据获得属性的低维特征,形成现代的多属性决策方法,主要包括遗传算法(GA)^[15]、粗糙集分类法(RSC)^[16]、投影寻踪聚类模型(PP)^[17]等,决策愈趋科学化和复杂化。由于梯级水库调度方案优选追求的是综合效益最大,指标一般不设定评价标准,因此可选择没有分类标准的多属性决策方法。

PP的基本思想是将高维的指标数值通过一定的转换关系投影到低维的子空间里,通过对某个投影指标函数进行寻优,找到可以显示高维样本数据自身特征的投影值,以便在低维空间对原始样本数据进行分析。本文采用PP模型,并通过GA加速投影函数优化过程,提高模型计算效率,并对水库多目标优化调度方案集进行优选评价。GA-PP的基本流程如图2所示。

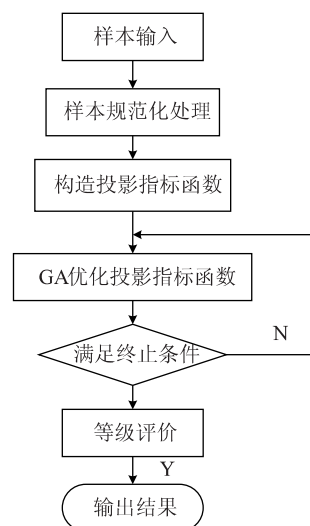


图2 GA-PP基本流程图

2 实例研究

2.1 概况

汀江位于闽粤边界。棉花滩水库为其干流第一级，工程设计以发电为主，兼顾防洪、航运等综合效益，下游距青溪水库 13km。青溪水电站位于广东省大埔县青溪镇境内，是一座以发电为主，不承担下游防洪任务的河床径流式电站。通过梯级水库多目标优化调度模型求解得到非劣方案集^[2]，在此基础上采用基于权重的 GA-PP 模型对其进行多属性决策，并采用 TOPSIS 寻优模型进行对比分析验证其合理性。

2.2 水库多目标优化调度多属性决策

(1) 非劣方案集

棉花滩-青溪梯级水库多目标优化调度模型以

发电为主，同时兼顾生态环境效益，选取梯级总发电量、梯级最小时段出力、梯级总弃水量、后汛期末调度水位、与适宜生态流量距离五个指标作为多属性决策依据，非劣方案集见表 1。

(2) 多属性决策

采用层次分析法确定各个决策指标的权重，判断矩阵见表 2，从而确定各决策指标的权重为 $W = [0.4030, 0.1367, 0.1367, 0.0791, 0.2444]$ 。

分别采用基于权重的 GA-PP 和 TOPSIS 对棉花滩-青溪梯级水库多目标优化调度非劣方案集进行多属性决策，决策结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出，有权重决策时 GA-PP 和 TOPSIS 结果都比较接近，丰水、平水、枯水年最优方案选择基本一致。以基于权重的 GA-PP 得到的最优调度方案见表 3。

表 1 棉花滩-青溪梯级水库多目标优化调度非劣方案集

代表年	方案	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
丰水年	梯级总发电量/(亿 kW·h)	23.8	23.9	24.0	24.1	24.2	24.3	24.4	24.5	24.6	24.7
	梯级最小时段出力/MW	5.04	5.04	5.56	5.43	10.38	11.23	9.80	8.91	4.58	4.26
	梯级总弃水量/亿 m ³	0	0.30	0	0.77	0.19	0.69	0.72	0.48	1.13	1.35
	后汛期末调度水位/m	172.62	172.83	172.5	172.58	172.98	172.71	172.10	173.00	172.49	172.86
	与适宜生态流量距离	485	492	500	508	523	532	544	558	567	578
平水年	梯级总发电量/(亿 kW·h)	20.2	20.3	20.4	20.5	20.6	20.7	20.8	20.9	21.0	21.1
	梯级最小时段出力/MW	4.46	4.29	4.51	3.94	4.06	3.96	4.56	4.54	3.80	3.93
	梯级总弃水量/亿 m ³	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	后汛期末调度水位/m	172.38	172.5	173	172.9	172.96	172.77	172.4	173	173	173
	与适宜生态流量距离	274	280	285	292	301	307	318	327	338	361
枯水年	梯级总发电量/(亿 kW·h)	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9	17	17.1	17.2	17.3	17.4
	梯级最小时段出力/MW	4.17	4.13	4.29	4.46	4.57	5.09	5.13	5.05	5.53	5.14
	梯级总弃水量/亿 m ³	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	后汛期末调度水位/m	148.43	148.40	150.60	154.28	160.68	163.00	165.20	165.00	166.84	167.73
	与适宜生态流量距离	126	133	140	150	165	182	198	219	241	261

表 2 棉花滩-青溪梯级水库多目标优化调度决策指标判断矩阵表

决策指标	梯级总发电量	梯级最小时段出力	梯级总弃水量	后汛期末调度水位	与适宜生态流量距离	权重
梯级总发电量	1	3	3	4	2	0.403 0
梯级最小时段出力	1/3	1	1	2	1/2	0.136 7
梯级总弃水量	1/3	1	1	2	1/2	0.136 7
后汛期末调度水位	1/4	1/2	1/2	1	1/3	0.079 1
与适宜生态流量距离	1/2	2	2	3	1	0.244 4
一致性检验	$\lambda_{\max} = 5.0331, CR = 0.0074 < 0.10$ ，满足一致性检验					

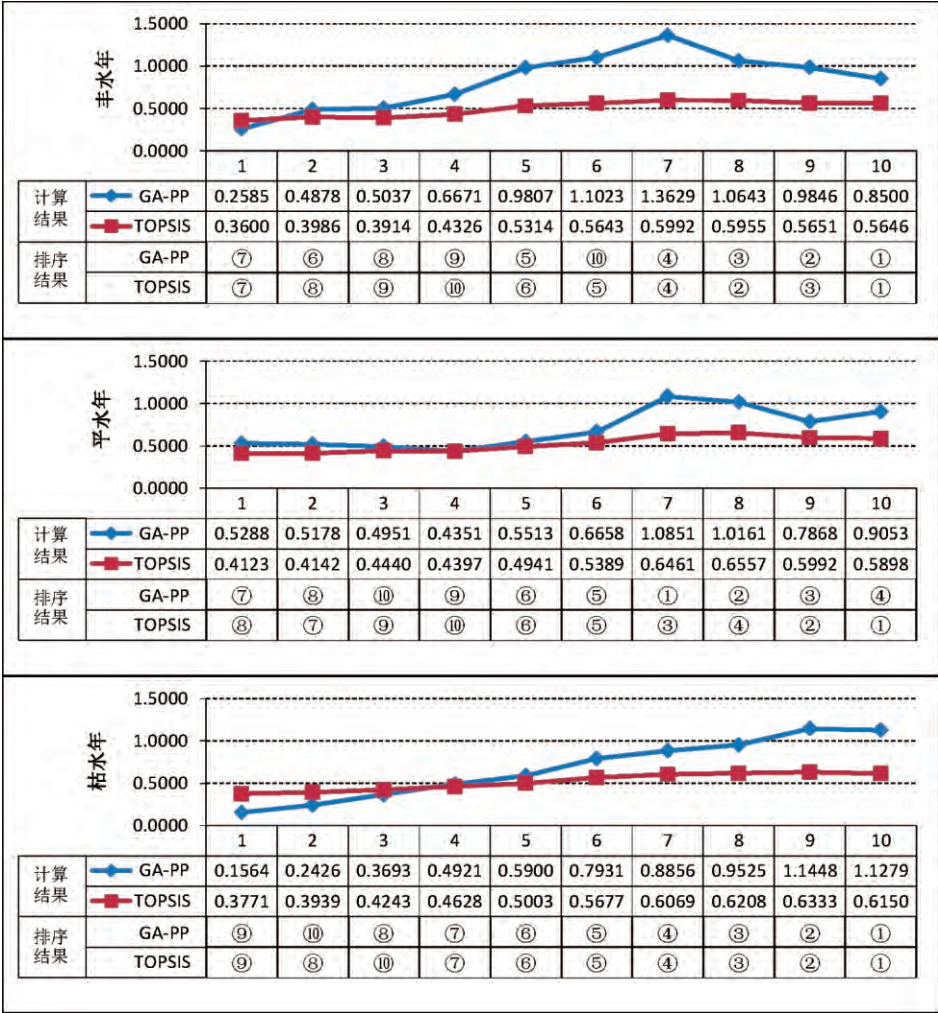


图 3 棉花滩-青溪梯级水库多目标优化调度方案多属性决策结果图

表 3 棉花滩-青溪梯级水库多目标优化调度最优方案表

代表年	最优方案	梯级总发电量 /(亿 kW·h)	梯级最小时段出力 /MW	梯级总弃水量 /亿 m ³	后汛期末调度水位 /m	与适宜生态流量距离
丰水年	⑦	24.40	9.80	0.72	172.10	544
平水年	⑦	20.80	4.56	0.00	172.41	318
枯水年	⑨	17.30	5.53	0.00	166.84	241

(3) 结果合理性分析

通过分析各代表年棉花滩-青溪梯级水库发电量、逐月初水位及青溪水库下泄流量来分析所获得最优调度方案的合理性。多目标优化调度后棉花滩-青溪梯级水库平均发电量与纯发电优化调度相比均有所减小,梯级总发电量平均减小了 1.38%,棉花滩发电量平均减小了 1.48%,青溪发电量平

均减小了 0.30%,但是与现状调度相比仍然增加,依然能产生较可观的经济效益。同时可减小水库调度对河流下泄流量产生的影响,使下泄流量更加接近河流自然水文情势,不仅满足青溪水库下游河道最小生态流量需求,也大于下游河道适宜生态流量需求,避免青溪水库下泄流量均一化,更贴近下游河道适宜生态流量变化趋势,如图 4 所示。因此该最优调度方案在梯级总发电量比现状调度仍然有所提高的情况下,不仅能发挥棉花滩龙头水库调节作用,还能够尽可能地保证下游河流生态用水需求,促进流域梯级水资源更合理健康地利用。

3 结论

流域梯级水库在我国能源结构调整和实施可持续发展、构建生态文明社会战略中占据着重要

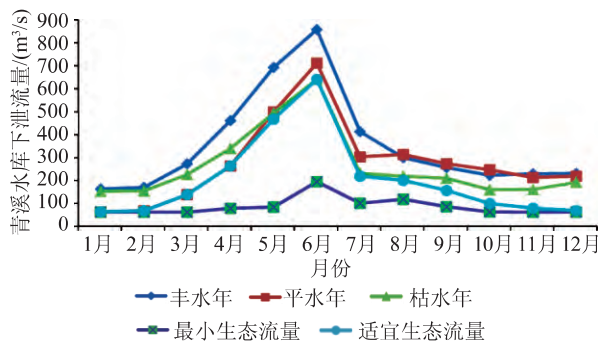


图4 青溪水库下泄流量与生态流量对比图

位置,并具有规模集成化、目标多元化、联系复杂化等发展趋势。梯级水库调度时需全面考虑社会经济与生态环境目标,以获得最大的综合利用效益,但是这些目标之间往往存在不同程度的矛盾,因此需要进行多属性决策研究。流域梯级水库多目标优化调度方案多属性决策涉及因素较多,具有较大的不确定性和复杂性。多属性决策指标的选择和权重的确定将在很大程度上影响决策的结果,决策者在决策时如何根据实际情况合理确定决策指标集以及权重值得进一步研究和探索。

参考文献

- [1] 周亚. 多属性决策中的 TOPSIS 法研究[D]. 武汉理工大学, 2009.
- [2] 官云飞. 基于多目标免疫遗传算法的梯级水库优化调度研究[D]. 河海大学, 2014.
- [3] 孙梦娴. 改进免疫遗传算法在函数优化中的应用研究[D]. 苏州大学, 2010.
- [4] 李小红. 嘉陵江亭子口水库多目标生态调度研究[D]. 河海大学, 2007.
- [5] 储萍. 多属性决策若干方法研究[D]. 浙江工商大学, 2007.
- [6] Linstone H A, Turoff M. The Delphi method: techniques and applications [M]. Boston: Addison-Wesley Educational Publishers Inc, 1975.
- [7] Saaty T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [8] 王磊. 水资源管理多属性决策与风险分析理论方法及应用探析[J]. 水利技术监督, 2013(1): 23-25.
- [9] 刘家学, 刘耀武. 带有方案偏好信息的多指标决策法[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(1): 4-7.
- [10] Ma J, Fan Z P, Huang L H. A subjective and objective integrated approach to determine attribute weights [J]. European journal of operational research, 1999, 112: 397-404.
- [11] Chen K. Interactive group decision-making modeling and application [J]. Socio-economic planning sciences, 1998, 32(2): 113-121.
- [12] Churchman C W, Ackoff R L, Amoff E L. Introduction to operation research [J]. New York: John Wiley and sons, 1957: 102-110.
- [13] Roy B. Problems and methods with multiple objectives functions [J]. Mathematical programming, 1971, 1: 239-266.
- [14] 曹丹. 改进 TOPSIS 法在河道整治方案优选评估中的应用[J]. 水利规划与设计, 2016(10): 148-151.
- [15] Fonseca C M, Fleming P J. Genetic algorithms for multi-objective optimization: formulation, discussion and generation [C]. Proc. of 5th ICGA, 1993: 416-423.
- [16] Greco S, Matarazzo B, Slowinski R. Rough sets methodology for sorting problems in presence of multiple attributes and criteria [J]. European journal of operational research, 2002, 138: 247-259.
- [17] 刘忠民. 投影寻踪聚类法在农村水利现代化评估中的应用[J]. 水利规划与设计, 2017(10): 83-86.
- [18] 李永业, 孙西欢, 阎庆斌. 局部起旋器内部旋流特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2011(2): 72-77.
- [19] 延耀兴, 孙西欢, 阎庆斌. 阶梯螺旋孔口式孔板消能降压装置性能[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 71-75.
- [20] 郭晓宇, 段喜明. 农业供水工程中在线式孔板消能装置探讨[J]. 山西农业科学, 2010(12): 57-60.
- [21] 郭晓宇. 多级孔板螺旋流消能装置试验研究[D]. 太原理工大学, 2008.
- [22] 饶永超, 常凯, 王树立, 等. 水平管内螺旋流特性数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2016(4): 503-509.
- [23] 宫崎薰. Solid transportation in spiral flow pipeline for underground digging system [D]. 福井大学, 2000.
- [24] Benjamin, T. B. Significance of the vortex breakdown phenomenon ASME [J]. Journal Basic Eng, 1965, 87(2): 518-524.
- [25] Weske, D. R. and Sturov, G. Y. The dynamics of a swirling flow in a pipe and transition to axisymmetric vortex breakdown [J]. Journal Fluid Mech, 1974(340): 177-223.
- [26] Kitoh, O. Experimental study of turbulent swirling flow in a straight pipe [J]. Journal Fluid Mech, 1991(225): 445-479.
- [27] Chang F, Dhir, V. K. Turbulent flow field in tangentially injected swirl flows in tubes [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1994, 15(5): 346-356.
- [28] 熊鳌魁, 魏庆鼎. 轴对称螺旋流解析解的探讨[J]. 力学与实验. 1999(5): 15-16.

(上接第 86 页)

Symp. On Flow, 1974(1): 301-312.

- [28] Benjamin, T. B. Significance of the vortex breakdown phenomenon ASME [J]. Journal Basic Eng, 1965, 87(2): 518-524.
- [29] Weske, D. R. and Sturov, G. Y. The dynamics of a swirling flow in a pipe and transition to axisymmetric vortex breakdown [J]. Journal Fluid Mech, 1974(340): 177-223.
- [30] Kitoh, O. Experimental study of turbulent swirling flow in a straight pipe [J]. Journal Fluid Mech, 1991(225): 445-479.
- [31] Chang F, Dhir, V. K. Turbulent flow field in tangentially injected swirl flows in tubes [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1994, 15(5): 346-356.
- [32] 熊鳌魁, 魏庆鼎. 轴对称螺旋流解析解的探讨[J]. 力学与实验. 1999(5): 15-16.

践. 1999(5): 15-16.

- [33] 宫崎薰. Solid transportation in spiral flow pipeline for underground digging system [D]. 福井大学, 2000.
- [34] 李永业, 孙西欢, 阎庆斌. 局部起旋器内部旋流特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2011(2): 72-77.
- [35] 延耀兴, 孙西欢, 阎庆斌. 阶梯螺旋孔口式孔板消能降压装置性能[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 71-75.
- [36] 郭晓宇, 段喜明. 农业供水工程中在线式孔板消能装置探讨[J]. 山西农业科学, 2010(12): 57-60.
- [37] 郭晓宇. 多级孔板螺旋流消能装置试验研究[D]. 太原理工大学, 2008.
- [38] 饶永超, 常凯, 王树立, 等. 水平管内螺旋流特性数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2016(4): 503-509.