

水库群调度规则相关研究进展

方洪斌¹, 王 梁¹, 李新杰²

(1.黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003; 2.黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要:从表现形式和研究方法两个层面对水库群调度规则的相关研究进展进行了文献回顾和总结分类;归纳了“总—分”模式的调度规则表现形式,划分了“优化—拟合—修正”和“预定义规则+(模拟)优化模型”的两大类调度规则研究方法;在此基础上分析相关层面研究所存在的一些问题,并指出未来需要进一步加强研究的方向。

关键词:水库群调度规则;研究进展;表现形式;研究方法

中图分类号:TV697 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2017)01-0014-05

1 引言

事实证明,水库群优化调度能有效改善水资源短缺状况^[1-2]、防治洪涝灾害^[3-4]、增加电力产能^[5-6],达到水资源合理配置的效果^[7-8]。

调度规则作为指导库群系统调度的重要工具,一般是以当前时段的水文状况(如各库的蓄水状态、水位、面临时段入流等)为依据,对当前时段水库的下泄水量、出力负荷等做出合理决策,以期获得长期运行的理想效果。有别于已知长时序所有来水情况下运用数学方法获得的库群系统最优决策过程及最优效益值(以动态规划方法为代表),调度规则仅需对未来较近时段下(如下一时段)的径流进行准确预测而后做出实时的调度决策,这在当前水文预报技术条件下是可以实现的;运用调度规则指导库群运行的效益一般劣于最优效益值,但是天然径流的不确定性使得已知长时序来水下所得的最优运行过程并不能够具体地指导实际调度,合理的调度规则对于库群操作以取得长时序稳定的较大效益具有更为实际的指导意义。

虽然水库优化调度问题研究广泛,但对于优化方法的研究占多数,对于规划阶段或指导实际调度的合理调度规则的相关研究并没有太多的有益补充,不少学者的研究综述也多围绕优化方法展开^[9-10],缺乏对调度规则这一重要手段多层次的系统认识。基于此,本文从表现形式和研究方法两个层面,对水库群调度规则

的相关研究进行分类和评述,以加强人们对水库群调度规则的重视,促进水库群联合调度研究的发展。

2 水库群调度规则的表现形式

目前对水库群调度规则研究的主流表现形式可归纳为“总—分”模式:总——即系统对下游需水区的总供水量或总负荷的决策,分——即是当系统总供水量或总负荷已知前提下各单库的供水量或负荷值的决策。一般情况下,调度图和调度函数多用来作为解决“总”决策问题的调度规则表现形式,而对于“分”决策问题,针对不同的库群特征和调度目标,其分配规则的表现形式需分类归纳。

2.1 调度图和调度函数

调度图应用于库群系统的研究分为两类:(1)聚合水库调度图的研究,如适用于多用水户的多目标限制供水调度图^[11]、决策发电库群系统总负荷(出力)值的蓄能调度图。(2)各单库调度图有机结合,共同确定库群系统的总供水或总出力^[12]。(3)另有一些调度图研究的有益补充,如二维调度图应用于供水系统取得不错效果^[13],然而拓展于多库系统时多维调度图结构的复杂性制约了其发展。调度函数具有代表性的如标准运行规则(Standard Operation Policy)和限制供水规则(Hedging Rule)^[14]。目前的研究前沿主要集中于限制供水规则最优性条件的确定上,如 Shiao^[15]推导了基于目标蓄水量的效益函数下的最优限制供水规则的

收稿日期:2016-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51569025);黄河设计公司自主研发开发项目(2011-ky05,2015-ky01)

作者简介:方洪斌(1987-),男,河南新乡人,博士,研究方向为水资源规划与水库调度。E-mail:newfhh@163.com

解析表达。

实际上调度图或调度函数可以是相同调度规则的不同表现形式,在一定条件下具有互通性。如供水系统依据当前时段蓄水状态决策供水量的大小常运用的是离散型限制供水规则,即供水调度图实际上是限制供水规则(调度函数)的图形表示。

2.2 库群系统分配规则

在利用前述调度图或调度函数决策系统时段的总供水量或负荷后,如何将任务分配至各单库,是库群系统分配规则所要解决的关键问题。以常见的并联供水库群和梯级发电库群为代表,本节仅针对此两种类型分配规则的研究进展作总结与评述。

2.2.1 并联供水库群分配规则

以供水为主要目标的并联水库群系统,所建立规则其主旨目标不外乎是为了将未来可能的缺水量降至最小,以防止严重缺水状况的发生;并通过合理的蓄水量分布(或供水任务的分配)降低系统的被迫弃水,避免当某些水库满库并溢流时,却有其他水库处于空库的状态发生。

纽约市规则(New York City Rule)和空间规则(Space Rule)^[16]是早期具有代表性的分配规则,共通点是在蓄水期调度中尽量减少系统中当有些水库溢流时而其他水库却尚未库满的情况,在许多情况下可以得到最优或近似最优解。但是目前尚未有较明确的蓄、供水期的划分标准,且难以直接指导调度操作,对于多目标多约束的复杂系统,其应用也存在局限性。补偿调节规则是我国实际水库调度中常用的一种分配规则,是以成员水库调节能力或库容大小作为蓄放水次序的判别标准,通过分配水量来实现调度;但什么是补偿水库、什么是被补偿水库存在划分标准不明确的问题。参数式规则(Parametric Rule)^[17]通过建立库群系统蓄水量与单库目标蓄水量之间的线性方程来间接实现供水任务在水库间的分配;但缺乏对分段线性特征与模型参数的理论分析。还有这样一类研究——通过探求库群系统蓄水量与各库蓄水量的关系来分配供水任务,即蓄水量的空间分布规律,曲线表达称为平衡曲线^[18],其物理意义清晰,表达直观。笔者认为,前述典型调度规则可用平衡曲线的不同形式表达,然而曲线特征与模型参数的理论分析是拓展蓄水量空间分布指导调度的症结所在,需要进一步加强蓄水量空间分布特性与规律的研究。

2.2.2 梯级发电库群分配规则

库群联合发电调度多见于流域梯级水库群系统,

在已知各时段总负荷下各单水库如何分配的重点在于厘定放水发电的优先序,相关研究围绕蓄放水次序的判别标准展开。

蓄供水判别式法以蓄、供水期增发电能尽可能大或损失电能尽可能小为原则,通过判断时段内各水库放水发电(或蓄水储能)的不蓄电能损失(或增量)值,即判别式值,确定水库时段内的蓄放水次序,是最为常用的时段内出力分配的方法。通常系统中判别式值大的水库在蓄水期优先蓄水,判别式小的水库在供水期优先放水。但蓄供水判别式存在着增大系统弃水、缺乏对水量分配的考虑和时段内操作缺乏对后续时段影响的考虑等问题^[19],相关学者对此做过改进。库容效率指数法^[20]是以各库的发电效率指标为标准决策蓄放水,在清江梯级水电站的联合调度中有应用。库容效率指数法与判别式法在其实质上相同,只不过其能量损失的计算标准不同。还有一些以水量和蓄能相关原则指导分配的研究,如弃水最小原则、耗水量最小原则、蓄能最大准则、全箱库能增益原则、上游水库调度期末蓄能最大准则等;也还存在深入研究的空间,如最小弃水模型注重于高水头发电而忽略了库群系统间水量分布的影响。

3 水库群调度规则的研究方法

水库群调度规则的研究方法与数学建模密切相关,基于调度规则的库群系统数学建模的研究重点经历了从早期模拟模型,到后期优化模型,至近些年来模拟-优化模型配套使用的演变。

(1)模拟模型主要是以计算机语言为工具,分析所研究的系统,将其物理特性与行为重新加以诠释,以符合实际的调度操作情况,是一种模仿实际系统行为的演算程序。优点在于对解决具有多变量、多约束等非线性特征的水库群调度问题尤为适用,但其缺点在于只能测试和评价既定调度规则的有效性,而无法直接求得系统操作的最优解或合理的调度规则。Rani et al.^[21]曾对模拟模型在水库群调度中的应用做过回顾和总结。(2)优化模型是以系统化的数学分析方法,求得目标函数的最优解及系统的决策过程。与模拟模型所不同,优化模型可以直接求解当前目标函数下最优或接近最优的调度规则表现形式,也可以求解调度库群系统的最优运行过程。优化模型寻优能力强,但是对复杂系统的数学建模相当困难,且求解长系列调度时易陷入“维数灾”。(3)模拟与优化模型的优缺点具有较好的互补性,近些年来,基于模拟-优化模型的库群联合调

度得到了发展。

水库群调度规则的研究方法多种多样,尤其是智能优化方法的兴起,使得复杂水库群系统的联合调度规则得到了更深入的探讨,相关研究方法可分为两类:一是“优化-拟合-修正”的研究方法(见图1),二是“预定义规则+(模拟)优化模型”(见图2)的研究方法。

第一类方法通过优化模型直接仿真和优化具有长系列径流资料的水库群调度过程,得到长系列最优的蓄、放水量的决策序列;以此为样本,通过回归分析、数据挖掘等方法,形成特定的调度规则表达形式;而后对获得的调度规则通过模拟调度进行检验,并进行适当的调整与修正。该研究方法原理相对简单,但缺点在于对最优样本的分析可能失效,无法获得可行的调度规则形式,且随着水库数目的增加优化模型易陷入“维数灾”。相关此方法的研究重点可分为两方面,一类是调度规则提取方法,如采用神经网络、回归分析等从最优策略中提取调度函数并对参数加以修正。另一类则是采用优化方法,如动态规划的改进方法,求解长系列最优的运行策略,为训练样本的有效性提供保障,如黄草和王忠静^[22]研究了扩展型逐步优化算法求解长江上游水库群非线性优化模型。

第二类方法首先基于已有的调度经验,预先拟定含待定参数的水库群优化调度规则型式,给定初始参数,按照此预定义的调度规则模拟长系列的调度过程。而后一方面可以通过模拟调度的结果对预定义调度规则的参数做经验修正,迭代往返至满意为止(图2中虚线所示),这是早期模拟模型对预定义调度规则研究的贡献,但是仅能对有限的调度规则效果进行评价和经验性修正,不能保证预定义调度规则参数取值的最优性;另一方面可以将模拟调度结果传递给优化模型,通过优化方法求解得到预定义参数的最优决策集,且往往需要多次在模拟模型和优化模型间的传递,此法结合了模拟模型能较好的描述复杂库群系统特征和优化模型寻优能力强的优点,称为基于模拟-优化模型的库群联合调度规则求解方法。第二类方法规避了第一类方法所遭遇的“维数灾”问题,但潜在的风险则是对复杂库群系统的认识不够全面,预定义的调度规则型式的合理性受到质疑。

目前常用预定义调度规则型式的待优化参数包括调度线位置、调度函数系数、特定规则参数、以及它们之间的组合等。另有一类预定义调度规则是基于边际效益方程的理论研究,这对于预定义调度规则型式的合理性是较好的诠释。如 Zhao 等^[23]讨论了来水不确定性以及约束条件对两阶段模型最优性条件与调度规则的影响,然而如何将基于边际效益的两阶段模型得到的调度规则型式应用于水库调度多阶段决策依然存在一些问题。

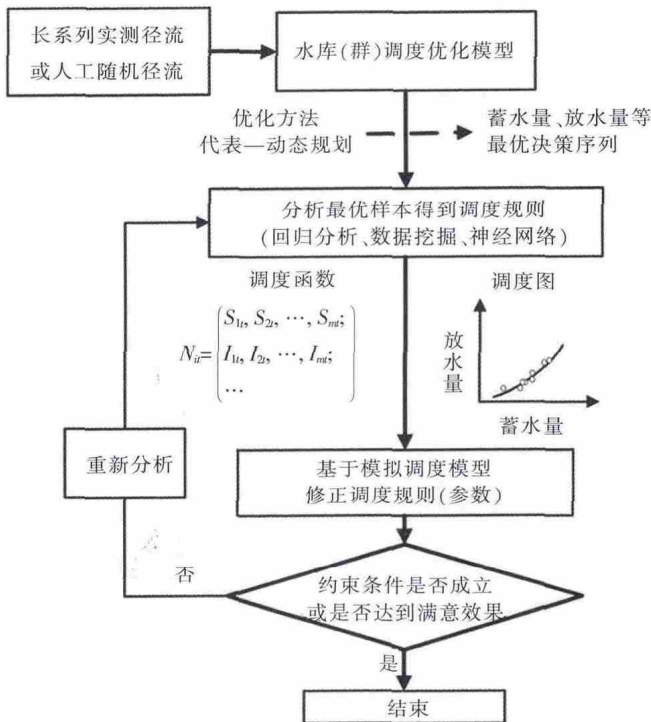


图1 水库群优化调度规则研究方法 I

Fig.1 The research method I on multi-reservoir optimal operation rule

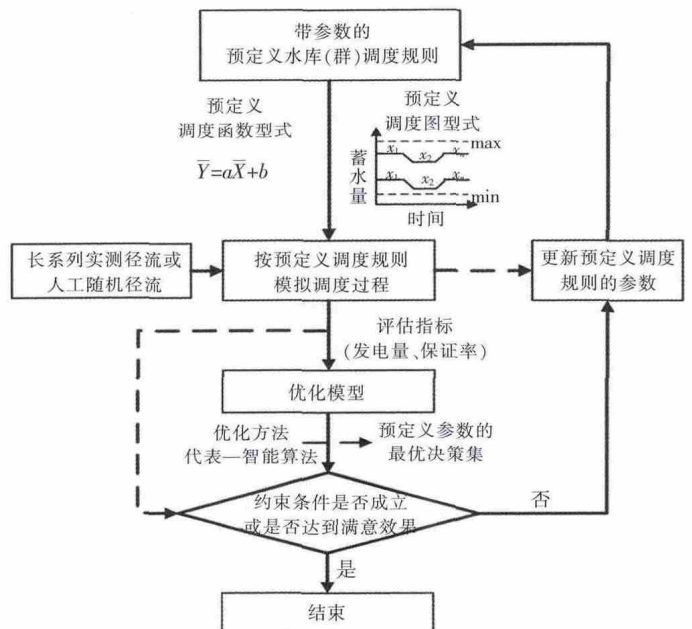


图2 水库群优化调度规则研究方法

Fig.2 The research method II on multi-reservoir optimal operation rule

以上划分的调度规则两大类研究方法均依托于最优化理论,如图1和图2中分别以动态规划和智能算法为代表。优化方法种类繁多且各具优势^[24-29],不同优化方法同样可以达到相同的优化目标,总结归纳于图3。近年来,优化算法的发展呈现相互融合的趋势,优势补充可增强解决实际问题的寻优能力,如林剑艺等^[30]结合单纯形法、随机搜索、基因算法等方法的优点,提出了解决非线性约束最优化问题的复合进化算法。

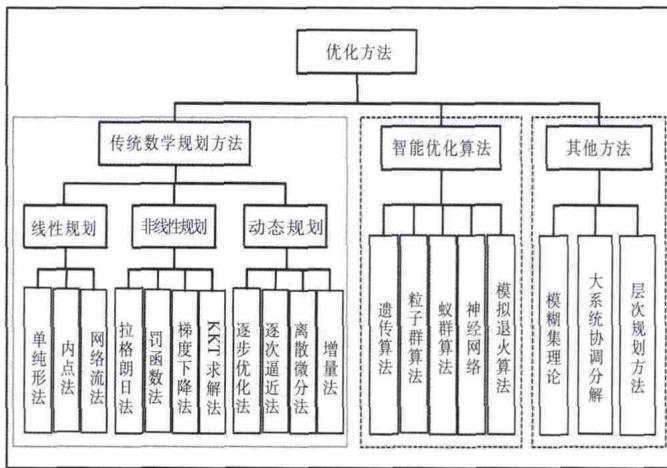


图3 水库调度规则优化方法的总结归纳

Fig.3 The optimization algorithms of reservoir operation

4 结论

论文分两个层面系统回顾了水库群调度规则的研究历程,并指出各层面存在问题和研究趋势。在表现形式上,目前对于规划阶段或指导实际调度的合理调度规则形式研究还不够丰富,具有通用性而非仅适用于个别实例的水库联合调度规则的研究创新更是寥寥,此一方面可以从蓄水量的空间分布着手,加强对不同特征库群系统的蓄水量空间分布特性及内在机理的研究。在研究方法上,应加强模拟-优化模型的构建,通过算法间的融合互补,在规避“维数灾”问题的同时,深入认识复杂库群系统的内在规律。

参考文献:

[1] 周惠成,刘莎,程爱民,等.跨流域引水期间受水水库引水与供水联合调度研究[J].水利学报,2013,44(8):883-891. (ZHOU Huicheng, LIU Sha, CHENG Aimin, et al. Joint operation of water transfer-supply for the reservoir in intake area during inter-basin water transfer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(8):883-891. (in Chinese))
 [2] 胡铁松,曾祥,郭旭宁,等.并联供水水库解析调度规则研究 I: 两阶段模型[J].水利学报,2014,45(8):883-891. (HU Tiesong, ZENG Xiang,

GUO Xuning, et al. Analytical operating rule for parallel multi-reservoir system I: two period model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014,45(8):883-891. (in Chinese))
 [3] 郭生练,陈炯宏,刘攀,等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展, 2010,21(4):496-503. (GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LIU Pan, et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems [J]. Advances in Water Science, 2010,21(4): 496-503. (in Chinese))
 [4] 李安强,张建业,仲志余,等. 长江流域上游控制性水库群联合防洪调度研究[J]. 水利学报, 2013,44(7):59-66. (LI Anqiang, ZHANG Jianyun, ZHONG Zhiyu, et al. Study on joint flood control operation for leading reservoirs in the upper Changjiang River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(7):59-66. (in Chinese))
 [5] 原文林, 吴泽宁. 电力市场环境梯级水库中长期发电优化调度研究 [J]. 水电能源科学, 2011,(1):40-42+53. (YUAN Wenlin, WU Zening. Medium-long term optimal generation operation of Cascaded reservoirs in power market[J]. Water Resources and Power, 2011,(1): 40-42+53. (in Chinese))
 [6] 黄强,高凡,张永永,等. 乌江梯级水库群优化调度规律研究[J]. 水力发电学报, 2011,(4):42-48. (HUANG Qiang, GAO Fan, ZHANG Yongyong, et al. Study on the optimal operation rules of cascade reservoirs in Wujiang Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011,(4):42-48. (in Chinese))
 [7] 王浩,王建华,秦大庸,等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法 [J]. 水利学报, 2006,37(12):1496-1502. (WANG Hao, WANG Jianhua, Qin Dayong, et al. Theory and methodology of water resources assessment based on dualistic water cycle model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(12):1496-1502. (in Chinese))
 [8] Oliveira R, Loucks D P. Operating rules for multireservoir systems[J]. Water Resources Research, 1997,33(4):839-852.
 [9] Labadie J W. Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004,130(2):93-111.
 [10] 郭旭宁,胡铁松,方洪斌,等. 水库群联合供水调度规则形式研究进展[J]. 水力发电学报, 2014,34(1):23-28. (GUO Xuning, HU Tiesong, FANG Hongbin, et al. Advances in research using joint operating rule for multi-reservoirs water supply [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,34(1):23-28. (in Chinese))
 [11] Guo X, Hu T, Wu C, et al. Multi-objective optimization of the proposed multi-reservoir operating policy using improved NSPSO[J]. Water Resources Management, 2013,27(7):2137-2153.
 [12] Chang L-C, Chang F-J. Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system [J]. Journal of Hydrology, 2009,377(1-2):12-20.
 [13] 郭旭宁,胡铁松,曾祥,等. 基于二维调度图的双库联合供水调度规则研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011,39(10):121-124. (GUO Xuning, HU Tiesong, ZENG Xiang, et al. Two-dimensional scheduling chart for jointly water-supply operation of dual-reservoir systems [J]. Journal of Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2011,39(10):121-124. (in Chinese))

- [14] 方红远,马瑞辰,甘升伟,等. 干旱期供水水库运行策略优化分析[J]. 系统工程理论方法应用, 2006,15(1):71-75. (FANG Hongyuan, MA Ruichen, GAN Shengwei, et al. Analysis on reservoir operation policy optimization during drought [J]. Systems Engineering Theory Methodology Applications, 2006,15(1):71-75. (in Chinese))
- [15] Shiau J T. Analytical optimal hedging with explicit incorporation of reservoir release and carryover storage targets [J]. Water Resources Research, 2011,47(1):W01515.
- [16] Sand G. M. An Analytical Investigation of Operating Policies for Water-supply Reservoirs in Parallel [D]. Cornell University, Ithaca, N.Y., 1984.
- [17] Nalbantis I, Koutsoyiannis D. A parametric rule for planning and management of multiple reservoir systems [J]. Water Resources Research, 1997,33(9):2165-2177.
- [18] 方洪斌,胡铁松,曾祥,等. 基于平衡曲线的并联水库分配规则[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014,(7):44-49. (FANG Hongbin, HU Tiesong, ZENG Xiang, et al. Derived allocation rules for reservoirs in parallel based on balancing curves [J]. Journal of Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2014,(7):44-49. (in Chinese))
- [19] 纪昌明,蒋志强,孙平,等. 李仙江流域梯级总出力调度图优化[J]. 水利学报, 2014,(2):197-204. (JI Changming, JIANG Zhiqiang, SUN Ping, et al. Optimization of cascade total output dispatching figure in Lixianjiang basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014,(2):197-204. (in Chinese))
- [20] 李玮,郭生练,朱凤霞,等. 清江梯级水电站联合调度图的研究与应用[J]. 水力发电学报, 2008,27(5):10-15. (LI Wei, GUO Shenglian, ZHU Fengxia, et al. Combined reservoirs operation of Qingjiang cascade hydropower stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008,27(5):10-15. (in Chinese))
- [21] Rani D, Moreira M M. Simulation - optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation [J]. Water Resources Management, 2010,24(6):1107-1138.
- [22] 黄草,王忠静,李书飞,等. 长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究 I: 模型原理及求解[J]. 水利学报, 2014,45(9):1009-1018. (HUANG Cao, WANG Zhongjing, LI Shufei, et al. A multi-reservoir operation optimization model and application in the upper Yangtze River basin I: principle and solution of the model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,45(9):1009-1018. (in Chinese))
- [23] Zhao J, Cai X, Wang Z. Optimality conditions for a two-stage reservoir operation problem [J]. Water Resources Research, 2011,47(8):W08503.
- [24] Bellman R. Dynamic programming and "difficult crossing" puzzles [J]. Mathematics Magazine, 1962:27-29.
- [25] Jiang Y, Hu T, Huang C, et al. An improved particle swarm optimization algorithm [J]. Applied Mathematics and Computation, 2007,193(1):231-239.
- [26] 崔东文. 多隐层 BP 神经网络模型在径流预测中的应用 [J]. 水文, 2013,33(1):68-73. (CUI Dongwen. Application of hidden multilayer BP neural network model in runoff prediction [J]. Journal of China Hydrology, 2013,33(1):68-73. (in Chinese))
- [27] 陈守煜,袁晶瑄,郭瑜. 可变模糊决策理论及其在水库防洪调度决策中应用 [J]. 大连理工大学学报, 2008,48(2):259-262. (CHEN Shouyu, YUAN Jingxuan, GUO Yu, et al. Variable fuzzy decision-making theory and its application to decision-making supporting system for reservoir flood control operation [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008,48(2):259-262. (in Chinese))
- [28] 吴昊,纪昌明,蒋志强,等. 梯级水库群发电优化调度的大系统分解协调模型 [J]. 水力发电学报, 2015,34(11):41-50. (WU Hao, JI Changming, JIANG Zhiqiang, et al. Large system decomposition-coordination model for optimal power-generation scheduling of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015,34(11):41-50. (in Chinese))
- [29] Guo X, Hu T, Zhang T, et al. Bilevel model for multi-reservoir operating policy in inter-basin water transfer-supply project [J]. Journal of Hydrology, 2012,424:252-263.
- [30] 林剑艺,程春田,顾妍平,等. 水库优化调度的 Pareto 强度值 SCE-UA 算法 [J]. 中国工程科学, 2007,9(10):80-82. (LIN Jianyi, CHENG Chuntian, GU Yanping, et al. A Pareto strength SCE-UA algorithm for reservoir optimization operation [J]. Engineering Sciences, 2007,9(10):80-82. (in Chinese))

Progress of Research on Multi-reservoir Operation Rule

FANG Hongbin¹, WANG Liang¹, LI Xinjie²

(1. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd, Zhengzhou 450003, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: A summary and review were made in two aspects of multi-reservoir operation rule research method and research from. The "total-distributed" mode of operation rule form was summarized. Two kinds of research methods applied for operation rule were classified and reviewed, including "optimization-fitting-correction" model and "predefined-(simulation) optimization" model. Based on this, some directions of further study to improve multi-reservoir operation were suggested.

Key words: multi-reservoir operation rule; research progress; operation rule form; research method