

水库群联合优化调度研究进展与展望

郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 李雨

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 系统阐述了线性规划、非线性规划、网络流、大系统、动态规划、启发式算法等主要的水库群联合优化调度方法, 对近年来国内外水库群优化调度理论及应用进展进行综述; 重点分析了库群联合调度的基本原则、目标函数、优化算法及在防洪调度、兴利调度和多目标调度中的应用; 展望了水库群联合优化调度的多目标技术, 决策支持系统和效益分配等研究的方向。

关键词: 水库群; 联合调度; 优化算法; 防洪兴利; 水资源管理; 研究; 评述

中图分类号: TV213.9; O221; G353.11 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2010)04-0496-08

20世纪60年代以来, 国内外诸多学者对水库优化调度理论和方法进行了研究, 但主要是针对单个水库或单个目标开展工作。进入21世纪以来, 随着大批水库电站的建成和投入使用, 中国已形成了一批巨型水库群, 如黄河上游、长江上游、第二松花江、三峡梯级和清江梯级水库群等, 中国水电工程已经进入了由建设到管理运行的关键转型期, 国家能源发展战略规划对中国的水电发展提出了新的要求, 因此开展水库群联合调度是顺应“节能发电”与“洪水资源化”的时代需求, 具有重大的理论价值和现实意义。近年来, 随着水文气象预报精度的提高、系统决策科学理论的日益完善和计算机软硬件技术的快速发展, 为水库群联合优化调度创造了条件。

由于入库径流的随机性, 决策过程的动态性、实时性和数学模型、优化技术的局限性, 使得水库调度决策问题呈现出非结构化的特点, 水库群联合调度决策是一个非常复杂的过程。从不同的角度分类, 水库调度决策可分为很多不同类型。按水库的功能目标可分为防洪调度、兴利调度和综合利用调度; 按水库数量可分为单库调度、梯级水库调度和水库群联合调度; 按调度周期可分为短期调度和中长期调度; 按调度方式可分为常规调度和优化调度。本文重点综述近年来国内外库群联合优化调度方法研究应用进展, 并探讨今后库群联合调度的发展趋势。

1 水库群联合调度原则和目标函数

1.1 联合调度的基本原则

对以防洪为主的水库群, 应采用补偿方式调度, 一般以梯级水库的上游水库或距防洪保护区较远的并联水库先行补偿, 使控制洪水比重较大、对洪水的调节能力较高、距下游防洪保护区较近的水库最后控制泄量; 对以灌溉及供水为主的水库群, 以总弃水量最小拟定各个水库的蓄放水次序, 梯级水库上游水库应先蓄水后供水, 库群中如有调节能力高、汛期结束较早的水库应先蓄水, 在供水期按总供水要求进行补偿调节; 对于以发电为主的水库群, 在满足系统正常供电要求的前提下, 以总发电量最大拟定各个水库的蓄放水次序, 梯级水库上游水库一般应先蓄水后供水; 对并联水库则需采用一些方法(如判别式法、库容效率指数

收稿日期: 2009-08-20

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2008BAB29B09; 2009BAC56B02)

作者简介: 郭生练(1957-), 男, 福建龙岩人, 教授, 博士, 主要从事水文学及水资源开发利用方面的研究。

E-mail: slguo@whu.edu.cn

法),根据各库具体情况判别来确定最佳的蓄放水次序。西方发达国家在水库群调度领域有许多应用成功的实例,如美国加利福尼亚中心流域工程优化调度系统(CVP)、田纳西流域机构的水资源优化调度系统(HYDROSIM)、美国陆军工程兵团开发的防洪兴利调度系统(HEC-5)等^[1-2]。

1.2 目标函数及约束条件

水库群联合优化目标必须尽可能满足国民经济和社会发展的各项具体要求或目的,如防洪、发电、灌溉、供水和生态等能以定量指标表示的具体目标。在以发电为主的水库群系统中,常以发电量最大、总出力最大或发电效益最大等为目标函数;在以防洪为主的水库群系统中,常以最大削峰准则、最大防洪安全保证准则和最短洪灾历时准则等作为目标函数。在不同类型水库的调度中,发电、灌溉及供水一般主要是兴利调度对象,防洪是各水库在汛期的主要调度对象,灌溉、供水、航运、泥沙、防凌和生态调度等主要是在兴利调度中通过给定限制条件来实现的。近年来随着水资源可持续发展观念的日益加强,综合考虑水资源经济、环境、生态和社会的和谐发展,水库群联合调度已经成为多目标调度问题,是近年来国内外研究的一大热点^[3-4]。

处在同一流域的梯级水电站不仅有水量水头的联系,也有电力方面的联系。由不同调节性能和不同入库径流特性的水库组成的水电站群,约束条件常用上下游水位、水头、水电站出力、额定用水、下泄流量等指标组成等式或不等式表示。对于具有防洪、发电、灌溉、航运及生态等任务的水库群系统,如果各目标效益可以公度则其运行调度可采用单一经济目标的优化模型;若不能公度则需转化为多目标问题来处理。

2 水库群联合调度优化算法

水库群联合优化调度模型的求解一般采用优化算法,它是通过确定决策变量的取值,使目标函数在特定约束条件下搜寻到最优解的方法。目前优化调度最优决策方法主要有线性规划、非线性规划、网络流法、动态规划法、大系统方法和启发式算法等。

2.1 线性规划

线性规划(Linear Programming, LP)是一种最简单、应用最广泛的计算方法,决策变量、约束条件、目标函数是线性规划的3个要素,满足线性约束条件的解为可行解。线性规划是最早应用于水库调度的方法之一,由于不需要初始决策,且计算结果能得到全局最优解,因此在处理一定规模优化问题时应用非常广泛,由于防洪目标多以线性形式表达,所以以处理水库群防洪问题居多。目前线性规划方法的求解技术成熟、易于求解。但由于线性规划模型与水库群系统之间存在一定的差异,对于模型中含有发电等兴利目标时,单纯的线性规划模型不一定能很好的反映库群联合调度的基本规律^[5-6]。

2.2 非线性规划

目标函数或约束条件中包含非线性函数称为非线性规划(Nonlinear Programming, NLP)。一般说来,解非线性规划要比解线性规划问题困难得多,而且也不像线性规划有单纯形法这一通用方法,非线性规划目前还没有适于各种问题的一般算法,各个方法都有自己特定的适用范围,对于一些特定的非线性规划,也常常进行线性化处理使之变为线性规划问题来解。对于一般的非线性规划问题,局部解不一定是整体解,只有是凸规划问题的局部解才是全局最优解。水库群发电调度问题不一定能当成线性规划问题来处理,非线性规划在处理此类问题时有更强的适用性^[7-9]。

2.3 网络流

网络流(Network Flow Optimization)是图论中的一种理论方法,是研究网络上的一类最优化问题。针对水库群优化调度具有目标函数为非线性,约束条件一般为线性集合的特点,若把整个库群的时空关系展开为一张网络图,就成了库群调度的非线性网络模型,可由线性网络技术及图论知识进行求解。网络上的流就是由起点流向终点的可行流,它是定义在网络上的非负函数,一方面受到容量的限制,另一方面除去起点和终点以外,在所有中途点要求保持流入量和流出量是平衡的^[10]。水库群优化调度的特殊结构使得此类问题也可

用网络流模型来表示,该方法具有存储量小、计算速度快、对初始值要求不高的特点^[11]。

2.4 大系统方法

大系统(Large-Scale System)分解协调技术的原理是将大系统分解成相对独立的若干子系统,每个子系统视为下层决策单元,并在其上层设置协调器,形成递阶结构形式。整个大系统的求解过程是首先应用现有的优化方法实现各子系统的局部优化;然后根据大系统的总目标,使各个子系统相互协调,即通过上层协调器与下层子系统之间不断地进行信息交换,来达到整个系统的决策优化。因此大系统分解协调原理具有两个显著的特点:①目标函数(或总体指标函数)和耦合条件是可分的;②各子系统的寻优次序是任意的。库群联合优化调度模型可分解为两层谱系结构模型,第1层为子系统模型,第2层为总体协调模型。先进行各水库优化计算,然后对水库群系统的目标进行整体协调求出全局最优解,它克服了一般动态规划中“维数灾”问题,具有明显的优越性^[12]。

2.5 动态规划

动态规划方法(Dynamic Programming)把复杂问题化成了一系列结构相似的最优子问题,而每个子问题的变量个数比原问题少得多,约束集合也相对简单,特别是一类指标、状态转移和允许决策不能用解析形式表示的最优化问题,用解析方法无法求出最优解,而动态规划法很容易。动态规划对于连续的或离散的、线性或非线性的、确定性的或随机性的问题,只要是能构成多阶段决策过程,便可用来求解。但随着决策阶段数的增加会出现“维数灾”问题,使其应用受到很大的限制,为此人们提出了一些改进算法,主要有离散微分动态规划(DDDP)、逐次渐进动态规划(DPSA)和逐次优化方法(POA)等。

DDDP法是由一个满足约束条件和边界条件的初始试验轨迹开始,并在这个试验轨迹的某一定邻域内将状态离散化,然后使用动态规划递推方程,在各离散状态间寻找一条改善轨迹,重复进行直到寻找最优轨迹为止。由于每次迭代时每一阶段的离散点数较少,从而大大减少了存储量和计算时间,为求解水库群联合调度的高维问题提供了方便。其主要的优点在于用逐次逼近的方法寻优,每次寻优只在某一个状态系列的小范围内进行,这样大大的减少了参加计算的状态点和可能决策数,可以节省大量的时间。但是由于动态规划问题中的函数不一定是凸函数,只从一个初始轨迹出发求得的最优解不一定是全局最优解,由于受初始轨迹的影响、有时可能难以得到全局最优解。因此,一般应通过设置多种初始试验轨迹,重复上述计算步骤求得与其相应的最优解。

DPSA法的基本思想是把包含若干决策变量的问题,变为仅仅包含一个决策变量的若干子问题,每个子问题的状态变量比原问题的状态变量少,因而可大大降低问题的维数,也可减少所需的存储空间。当状态变量数等于决策变量数时,每个子问题只有一个状态变量。对于决策向量维数不等于状态向量维数的问题,同样可以通过DPSA方法进行寻优:一般按照决策向量维数将问题划分为若干子问题(个数等于决策向量维数),对每个子问题采用动态规划方法求解。该方法可大大节省计算机存储量和计算时间,但也不能确保收敛到全局最优解。为了提高算法寻求全局最优解的可能性,可从不同初始轨迹开始寻优,选取最好的作为最终计算结果。

POA方法是一种求解多阶段决策问题的数值计算方法,该方法能使计算收敛于全局最优解,且是唯一最优解。其优化的最优路线具有这样的特征:每对决策集合相对于它的初始值和终止值来说都是最优的,运用此原理可把一个复杂的序列决策问题化为一系列的二阶段极值问题,使原问题得到简化,但该方法对初始轨迹的依赖性较强。

2.6 启发式算法

随着现代计算机技术的进步,一类基于生物学、物理学和人工智能的具有全局优化性能、稳健性强、通用性强且适于并行处理的现代启发式算法(Heuristic Programming)得到了发展。它比较接近于人类的思维方式,易于理解,用这类算法求解组合优化问题在得到最优解的同时也可以得到一些次优解,便于规划人员研究比较。在水库优化调度领域,近年来关于启发式算法的研究主要包括遗传算法(GA)、人工神经网络(ANN)、微粒子群算法(PSO)和蚁群算法(ACO)等。

GA 算法是一种基于模拟自然基因和自然选择机制的寻优方法,该方法按照“择优汰劣”的法则,将适者生存与自然界基因变异、繁衍等规律相结合,采用随机搜索,以种群为单位,根据个体的适应度进行选择、交叉及变异等操作,最终可收敛于全局最优解。在求解梯级水库群联合优化调度问题时显示出明显的优势,与传统的动态规划方法相比,GA 算法采用概率的变迁规则来指导搜索方向,而不采用确定性搜索规则,搜索过程不直接作用于变量上,状态变量和控制变量无需离散化,所需内存小、稳定性强,在确定性优化调度方面得到了较为广泛的应用^[13-45]。

ANN 算法是一种由大量简单非线性单元广泛连接而成的具有并行处理能力的系统。该方法具有快速收敛于状态空间中一稳定平衡点的优点,对于诸如动态规划等方法在目前串行计算机上模拟求解时存在着不同程度的“维数灾”问题,此方法提供了一条新途径^[16],在水文预报、水库优化调度等^[17-49]方面得到了广泛应用。

PSO 算法采用“群体”与“进化”的概念,模拟鸟群飞行觅食的行为,通过个体之间的集体协作和竞争来实现全局搜索。PSO 算法是通过粒子记忆、追随当前最优粒子,并不断更新自己的位置和速度来寻找问题的最优解,所以存在早熟收敛、难以处理问题约束条件,易陷入局部最优解等缺点。近年来一些改进的 PSO 算法能以较快的速度收敛到全局最优解^[20-22]。

ACO 算法是一种用来在图中寻找优化路径的机率型算法,该方法来源于蚂蚁在寻找食物过程中发现路径的行为,该算法具有正反馈、分布式计算和富于建设性的贪婪启发式搜索的特点,可求解组合最优化问题。模拟蚂蚁群体觅食路径的搜索过程来寻找梯级水电站中长期最优调度计划,把问题解抽象为蚂蚁路径,利用状态转移、信息素更新和邻域搜索以获取最优解,将复杂的问题变为一种非线性全局寻优问题,有效的避免了“维数灾”问题,为解决梯级水库中长期优化调度问题提供了一种有效的方法^[23-25]。

2.7 算法比较和建议

改进的动态规划算法(POA 和 DSPA)可以求解数量不多的水库群系统,但对于复杂的水库群联合优化调度模型,动态规划改进算法在处理多水库多目标任务时还会出现的“维数灾”问题。启发式进化算法(GA 和 ANN)不依赖于目标函数的梯度信息,尤其适于处理传统搜索方法解决不了的复杂问题和非线性问题,具有较快的收敛速度和较高的求解精度。因此建议采用改进的动态规划算法和启发式进化算法及其混合算法,求解复杂的水库群联合优化调度问题。

3 水库群联合优化调度的应用研究

水库群联合调度不仅是实现流域水资源可持续利用的基础,也是实现流域内水文补偿、库容补偿、电力补偿及综合利用效益的必要条件,在防洪、发电、灌溉、供水、生态和多目标调度等方面得到了广泛的应用。

3.1 在防洪调度中的应用

在以防洪为主要目标的水库群调度中,在早期简单防洪工程上传统的线性规划和 DP 方法的应用十分广泛,且卓有成效。然而随着研究对象的复杂化,面对由水库群、蓄滞洪区、湖泊等防洪工程组成的复杂防洪系统,传统的方法已凸现其局限性。刘群明等^[26]引入粒子群算法与死亡罚函数相结合的混合算法,求解流域梯级水库防洪优化调度数学模型,通过惩罚项将定义域内的非可行域变成凸化,将求解约束优化问题转换为求解一个无约束问题。李玮等^[27]针对清江梯级水库群,提出了基于预报及库容补偿的水库群防洪补偿联合调度逐次渐进协调模型,运用大系统分解协调理论及 Bellman 的逐步逼近思想,通过建立三层递阶结构推求水库汛期防洪库容动态控制方案,在不降低水库及梯级原有的防洪标准前提下,有效地利用了上游水布垭水库的防洪库容分担隔河岩水库部分防洪任务,显著地提高了梯级水库发电量。Ampitiyawatta 等^[28]应用 HEC-ResSim 模型对清江梯级水库进行了模拟调度,提出了适用于清江流域梯级特性的调度规则。

3.2 在兴利调度中的应用

在以兴利为主要目标的水库群调度中,张铭等^[29]应用 K 判别式法求解乌江干流大规模梯级水电站群发电优化调度问题,为解决方程组求解带来的困难,采用坐标轮换法,将多个水库同时供、蓄水决策转化为单

个水库逐次轮换决策,并结合水库常规调度图规则,对判别式法进行修正,使求解结果更为合理。张双虎等^[30]将遗传算法与系统模拟相结合,提出了基于模拟遗传混合算法制定梯级水库优化调度图的理论及方法,并以乌江上游梯级水库为研究对象进行实例分析。Suiadee等^[31]应用混合模拟遗传算法来计算并联水库的调度规则。刘攀等^[32]构建了制定梯级水库群联合优化调度函数的“优化-拟合-再优化-随机仿真”框架。刘攀等^[33]根据最优调度结果确定了调度图的型式,引入了可能出力的概念,对水库群进行聚合,建立梯级总出力与梯级可能出力之间的关系,根据总出力是否为保证出力进行决策分解,由此采用一连串的二维水库调度图来描述水库群的联合调度规则。李玮等^[34]针对清江梯级水电站应用库群补偿调度的库容效率指数法(SEI),建立了基于PSO算法的联合调度图研制模型。

对以三峡梯级和清江梯级组成的巨型混联水电站群,高仕春等^[35]建立了系统联合调度数学模型,采用大系统分解协调法求解系统联合调度,分析计算三峡和清江两梯级水库群联合调度的补偿效益,取得了较好的效果;刘宁^[36]应用DPSA算法寻求最佳组合的调度方式,计算联合调度总出力过程;陈炯宏等^[37]建立了以梯级发电量最大为目标的三峡梯级和清江梯级水电站群联合调度模型,采用改进的POA方法计算两个梯级单独运行和梯级联合调度时电量补偿效益。

3.3 在多目标调度中的应用

由于多目标决策问题更能体现生态环境、社会、经济和人文等多种因素对水库群的影响,因此在当前复杂的水库群联合优化调度问题研究中日趋重视。艾学山等^[38]提出了可行搜索-离散微分动态规划(FS-DDDP)方法,利用正向搜索和逆向搜索相结合的方式寻找水库优化调度过程的大量可行轨迹,在满足黄河上游梯级水库群综合利用要求下,求得水库群优化调度的解。刘攀等^[39]基于Bellman最优化原理将清江梯级水库的调度问题按阶段划分为若干多目标决策子问题,各子问题采用混合编码的多目标遗传算法求解,提出了一种求解水库优化调度问题的动态规划-遗传算法。Reddy等^[40]提出了EM-MOPSO方法,用来解决水库群多目标优化调度问题,其优点是从数据信息中优先选择效率高的变异因子,使收敛速度更快。Chen等^[41]提出一种大进化多目标遗传算法(MMGA),用来求解水库群的发电与供水多目标问题,丰富了GA算法在处理多目标问题时的多样性。与NSGA-II相比,MMGA的优化结果更接近于全局最优解。刘心愿等^[42]基于大系统聚合分解理论,建立了清江梯级水电站总出力调度图(聚合)与出力分配模型(分解)相结合的双层优化模型,分别采用NSGA-II多目标遗传算法和离散微分动态规划(DDDP)进行优化,大大降低了计算的复杂度,有效地增加了梯级电站的发电量。

4 结 语

水库群联合调度是一个涉及面广、极其复杂的管理和决策问题。随着水文气象预报和计算机应用技术的不断进步,必将产生一些适用于水库群联合调度的新理论和新技术,具有广阔的发展应用前景,主要可概括为以下几个方面:

(1) 水库群多目标优化调度。现代水库调度决策必须综合考虑发电、防洪、航运、生态等多种目标,既要考虑经济效益又要兼顾社会和环境效益,同时还要考虑决策者的偏好要求。因此传统的单目标优化决策方法已经不能适应新时期水库调度的要求,必须寻求多目标之间协调、统一的调度模式。目前研究大多集中采用主观权重法对多个目标进行加权,转化为单目标优化问题求解。因此采用客观权重法或主客观权重相结合的方法,是水库群多目标联合优化调度研究的重点。

(2) 水库群联合调度效益分配问题研究。随着中国电力市场改革的稳步推进,水电作为一种高效清洁能源参与电力市场竞争,电力市场对梯级水库优化调度提出了新的要求,研究电力市场条件下的水库群联合优化调度和经济运行,协调梯级水库群整体利益与局部利益之间的关系,公平有效的分配梯级联合调度盈余效益问题,将会是水库群联合调度和管理的研究方向。

(3) 基于规则的优化调度方法研究。对大量确定的和非确定性数据利用模糊系统、数据挖掘等方法进行聚类分析、非线性映射关系分析以及逻辑关联分析等来提取调度规则。从大量的历史信息中提取专家的知

识和经验,抽象概化成具有实际意义的指导规则,实现水库群调度决策智能化。

(4) 水库群调度决策支持系统。利用先进的可视化计算机编程语言,开发直观易读的水库调度软件,引进人工智能技术,开发具有强交互功能的水库群调度智能决策支持系统。

参考文献:

- [1] LUND J R, GUZMAN J. Derived operating rules for reservoirs in series or in parallel [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1999, 125(3): 143-153.
- [2] JOHN W L. Optimal operation of multi-reservoir systems: State-of-the-art review [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2004, 130(2): 93-111.
- [3] 郭文献,夏自强,王远坤,等. 三峡水库生态调度目标研究[J]. *水科学进展* 2009, 20(4): 554-559. (GUO Wen-xian, XIA Zi-qiang, WANG Yuan-kun, et al. Ecological operation goals for Three Gorges Reservoir [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(4): 554-559. (in Chinese))
- [4] 梅亚东,杨娜,翟丽妮,等. 雅砻江下游梯级水库生态友好型优化调度[J]. *水科学进展* 2009, 20(5): 721-725. (MEI Ya-dong, YANG Na, ZHAI Li-ni, et al. Optimal ecological sound operation of cascade reservoirs in the lower Yalongjiang River [J]. *2009 20(5): 721-725. (in Chinese))*
- [5] NEEDHAM J, WATKINS D, LUND J, et al. Linear programming for flood control in the Iowa and Des Moines rivers [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2000, 126(3): 118-127.
- [6] SHIM K C, FONTANE D, LABADIE J. Spatial decision support system for integrated river basin flood control [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2002, 128(3): 190-211.
- [7] BARROS M, TSAI F, YANG S L, et al. Optimization of large-scale hydropower system operations [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2003, 129(3): 178-188.
- [8] PENG C S, Buras N. Practical estimation of inflows into multi-reservoir system [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2000, 126(5): 331-334.
- [9] 吴杰康,郭壮志,秦砺寒,等. 基于连续线性规划的梯级水电站优化调度[J]. *电网技术*, 2009, 33(8): 24-29. (WU Jie-kang, GUO Zhuang-zhi, QIN Li-han, et al. Successive linear programming based optimal scheduling of cascade hydropower station [J]. *Power System Technology*, 2009, 33(8): 24-29. (in Chinese))
- [10] FREDERICKS J, LABADIE J, ALTENHOFEN J. Decision support system for conjunctive stream-aquifer management [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1998, 124(2): 69-78.
- [11] HSU N S, CHENG K W. Network flow optimization model for basin-scale water supply planning [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2002, 128(2): 102-112.
- [12] 田峰巍,解建仓. 用大系统分析方法解决梯级水电站群调度问题的新途径[J]. *系统工程理论与实践*, 1998, 18(5): 112-117. (TIAN Feng-wei, XIE Jian-cang. A new way to solve cascade hydropower reservoirs operation with large scale system analysis [J]. *System Engineering Theory & Practice*, 1998, 18(5): 112-117. (in Chinese))
- [13] 王少波,解建仓,孔珂. 自适应遗传算法在水库优化调度中的应用[J]. *水利学报*, 2006, 37(4): 480-485. (WANG Shao-bo, XIE Jian-cang, KONG Ke. Application of adaptive genetic algorithm in optimization of reservoir operation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(4): 480-485. (in Chinese))
- [14] 刘攀,郭生练,李玮,等. 遗传算法在水库调度中的应用综述[J]. *水利水电科技进展*, 2006, 26(4): 78-83. (LIU Pan, GUO Sheng-lian, LI Wei, et al. A review of application of genetic algorithm to reservoir operation [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2006, 26(4): 78-83. (in Chinese))
- [15] LI Xun-gui, WEI Xia. An improved genetic algorithm-simulated annealing hybrid algorithm for the optimization of multiple reservoirs [J]. *Water Resources Management*, 2008, 22(8): 1031-1049.
- [16] 胡铁松,万永华,冯尚友. 水库群优化调度函数的人工神经网络方法研究[J]. *水科学进展*, 1995, 6(1): 53-60. (HU Tie-song, WAN Yong-hua, FENG Shang-you. Research on the artificial neural network methodology for multi-reservoir operating rules [J]. *Advances in Water Science*, 1995, 6(1): 53-60. (in Chinese))
- [17] CHANG L C, CHANG F J. Intelligent control for modeling of real-time reservoir operation [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(9): 1621-1634.

- [18] CHANDRAMOULI V ,RAMAN H. Multi-reservoir modeling with dynamic programming and neural networks [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management* ,2001 ,127(2) : 89-98.
- [19] LIU P ,GUO S L ,XIONG L H ,et al. Deriving reservoir refill operating rules by using the proposed DPNS model [J]. *Water Resources Management* ,2006 ,20(3) :337-357.
- [20] 袁鹏,常江,朱兵,等. 粒子群算法的惯性权重模型在水库防洪调度中的应用[J]. *四川大学学报: 工程科学版*,2006 ,38(5) : 54-57. (YUAN Peng ,CHANG Jiang ,ZHU Bing ,et al. Applying the inertia weight model of particle swarm optimization in reservoir flood control operation [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition* ,2006 ,38(5) : 54-57. (in Chinese))
- [21] ALEXANDRE M B ,DARRELL G F. Use of multi-objective particle swarm optimization in water resources management [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management* ,2008 ,134(3) : 257-265.
- [22] 王少波,解建仓,汪妮. 基于改进粒子群算法的水电站水库优化调度研究[J]. *水力发电学报*,2008 ,27(3) : 12-15. (WANG Shao-bo ,XIE Jian-cang ,WANG Ni. Modified particle swarm optimization algorithm and its application in optimal operation of hydropower station reservoir [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering* ,2008 ,27(3) :12-15. (in Chinese))
- [23] 徐刚,马光文,梁武湖,等. 蚁群算法在水库优化调度中的应用[J]. *水科学进展* 2005 ,16(3) : 397-400. (XU Gang ,MA Guang-wen ,LIANG Wu-hu ,et al. Application of ant colony algorithm to reservoir optimal operation [J]. *Advances in Water Science* ,2005 ,16(3) :397-400. (in Chinese))
- [24] 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 ,24(5) : 7-10. (XU Gang ,MA Guang-wen. Optimal operation of cascade hydropower stations based on ant colony algorithm [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering* ,2005 ,24(5) :7-10. (in Chinese))
- [25] 原文林,黄强,万芳. 基于免疫进化的蚁群算法在梯级水库优化调度中的应用研究[J]. *西安理工大学学报*,2008 ,24(4) : 395-400. (YUAN Wen-lin ,HUANG Qiang ,WAN Fang. Application of ant colony optimization based on immune evolutionary algorithm for cascade reservoirs optimal operation [J]. *Journal of Xi'an University of Technology* ,2008 ,24(4) : 395-400. (in Chinese))
- [26] 刘群明,陈守伦,刘德有. 流域梯级水库防洪优化调度数学模型及 PSODP 解法[J]. *水电能源科学*,2007 ,25(1) : 34-37. (LIU Qun-ming ,CHEN Sou-lun ,LIU De-you. Mathematical model and PSODP solution method for optimal flood control dispatching of cascaded reservoirs [J]. *Water Resources and Power* ,2007 ,25(1) :34-37. (in Chinese))
- [27] 李玮,郭生练,郭富强,等. 水电站水库群防洪补偿联合调度模型研究及应用[J]. *水利学报*,2007 ,38(7) : 826-831. (LI Wei ,GUO Sheng-lian ,GUO Fu-qiang ,et al. Real time dynamic compensated storage control model for cascade reservoirs [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* ,2007 ,38(7) : 826-831. (in Chinese))
- [28] AMPITIYAWATTA A D 郭生练,李玮. 清江梯级水库 HEC-ResSim 模型调度规则研究[J]. *水力发电*,2008 ,34(1) : 15-17. (AMPITIYAWATTA A D ,GUO Sheng-lian ,LI Wei. Study on regulation rules of HEC-ResSim model in Qingjiang cascade reservoirs system [J]. *Water Power* ,2008 ,34(1) :15-17. (in Chinese))
- [29] 张铭,丁毅,袁晓辉,等. 梯级水电站水库群联合发电优化调度[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*,2006 ,34(6) : 90-92. (ZHANG Ming ,DING Yi ,YUAN Xiao-hui ,et al. Study of optimal generation scheduling in cascaded hydroelectric stations [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science* ,2006 ,34(6) :90-92. (in Chinese))
- [30] 张双虎,黄强,黄文政,等. 基于模拟遗传混合算法的梯级水库优化调度图制定[J]. *西安理工大学学报*,2006 ,22(3) : 229-233. (ZHANG Shuang-hu ,HUANG Qiang ,HUANG Wen-zheng ,et al. Linking simulation with genetic algorithm to establish optimal operation chart of cascade reservoirs [J]. *Journal of Xi'an University of Technology* ,2006 ,22(3) : 229-233. (in Chinese))
- [31] SUIADEE W ,TINGSANCHALI T. A combined simulation-genetic algorithm optimization model for optimal rule curves of a reservoir: A case study of the Nam Oon irrigation project-Thailand [J]. *Hydrological Processes* ,2007 ,21(23) :3211-3225.
- [32] 刘攀,郭生练,张文选,等. 梯级水库群联合优化调度函数研究[J]. *水科学进展*,2007 ,18(6) : 816-822. (LIU Pan ,GUO Sheng-lian ,ZHANG Wen-xuan ,et al. Derivation of optimal operating rules for cascade reservoirs [J]. *Advances in Water Science* ,2007 ,18(6) :816-822. (in Chinese))
- [33] 刘攀,郭生练,郭富强,等. 清江梯级水库群联合优化调度图研究[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*,2008 ,36(7) : 63-66. (LIU Pan ,GUO Sheng-lian ,GUO Fu-qiang ,et al. Derivation of the optimal operating curve rules for Qingjiang cascade

- reservoirs [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science, 2008, 36(7): 63-66. (in Chinese)
- [34] 李玮, 郭生练, 朱凤霞, 等. 清江梯级水电站联合调度图的研究应用 [J]. 水力发电学报, 2008, 27(5): 10-15. (LI Wei, GUO Sheng-lian, ZHU Feng-xia, et al. Combined reservoirs operation of Qingjiang cascade hydropower stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(5): 10-15. (in Chinese))
- [35] 高仕春, 万飏, 梅亚东, 等. 三峡梯级和清江梯级水电站群联合调度研究 [J]. 水利学报, 2006, 37(4): 504-510. (GAO Shi-chun, WAN Biao, MEI Ya-dong, et al. Cooperating dispatch of hydropower station groups of Three Gorges cascade and Qingjiang cascade [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4): 504-510. (in Chinese))
- [36] 刘宁. 三峡-清江梯级电站联合优化调度研究 [J]. 水利学报, 2008, 38(3): 264-271. (LIU Ning. Unified optimal operation of Three Gorges and Qingjiang cascade hydropower system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 38(3): 264-271. (in Chinese))
- [37] 陈炯宏, 郭生练, 刘攀, 等. 三峡梯级-清江梯级五库联合优化调度效益分析. 水力发电, 2009, 35(1): 92-95. (CHEN Jiong-hong, GUO Sheng-lian, LIU Pan, et al. Joint operation benefit analysis of the five reservoirs of Three Gorges and Qingjiang cascade reservoirs [J]. Water Power, 2009, 35(1): 92-95. (in Chinese))
- [38] 艾学山, 冉本银. FS-DDDP 方法及其在水库群优化调度中的应用 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2007, 31(1): 13-16. (AI Xue-shan, RAN Ben-yin. FS-DDDP method and its application to optimal operation of groups of reservoirs [J]. Hydropower Automation & Dam Monitoring, 2007, 31(1): 13-16. (in Chinese))
- [39] 刘攀, 郭生练, 雒征, 等. 求解水库优化调度问题的动态规划-遗传算法 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2007, 40(5): 1-6. (LIU Pan, GUO Sheng-lian, LUO Zheng, et al. Optimization of reservoir operation by using dynamic programming-genetic algorithm [J]. Journal of Wuhan University: Engineering Edition, 2007, 40(5): 1-6. (in Chinese))
- [40] REDDY M J, KUMAR D N. Multi-objective particle swarm optimization for generating optimal trade-offs in reservoir operation [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(21): 2897-2909.
- [41] CHEN L, MCPHEE J, YE H W W G. A diversified multi-objective GA for optimizing reservoir rule curves [J]. Advances in Water Resources, 2007, 30(5): 1082-1093.
- [42] 刘心愿, 郭生练, 刘攀, 等. 基于总出力调度图与出力分配模型的梯级水电站优化调度规则研究 [J]. 水力发电学报, 2009, 28(3): 26-31. (LIU Xin-yuan, GUO Sheng-lian, LIU Pan, et al. Based on the total output and the distribution of model output to optimize scheduling of cascade hydropower stations rules [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(3): 26-31. (in Chinese))

State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems*

GUO Sheng-lian, CHEN Jiong-hong, LIU Pan, LI Yu

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The state-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems in recent years is given. The basic operation rules, objective functions, optimization algorithms and applications of multi-reservoir systems are discussed and analyzed in detail. The future research on the multi-objective optimization technology, decision support system, optimal rules and allocation of benefits for joint operation of multi-reservoir systems are suggested.

Key words: multi-reservoir systems; joint operation; optimization algorithms; flood control and water conservancy; water resources management; research; review

* The study is financially supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the 11th Five-year Plan Period (No. 2008BAB29B09; No. 2009BAC56B02).