

水电站群多目标优化调度建模及求解

技术发展动态

中水科技自动化 胡宇丰、梁犁丽、李匡、于茜

1 学科方向

水电站运行调度是研究一段时期内水库的最优运行调度方式及其实施的有关问题,大致可分为常规调度和优化调度。常规调度以水库调度图作为水电站水库控制运用的工具,该方式简单直观,带有一定的经验性,但所利用的调度信息有限,难以达到全局最优,更难以处理多目标、多维变量等复杂问题;优化调度是根据入库流量过程,遵照一定的调度准则和约束条件建立数学模型,运用优化求解技术寻求最优的水库调度方案,使发电、防洪、灌溉、供水等各方面在整个分析期内的总效益最大。

水电站调度从时间上划分,一般可分为中长期(年、月、旬)调度、短期(周、日、时)调度和实时调度;从径流描述上划分,可分为确定型和随机型调度两种;从采用的方法上划分,可分为常规调度、优化调度和模糊调度、模拟调度等;从分布状况上可分为单库、梯级、并联和混联形式的水电站群联合调度;从调度目标上可分为单目标调度和多目标调度。本报告主要关注的内容为水电站多目标优化调度模型及其优化求解算法,重点调研水电站群多目标优化算法。本报告所调研的多目标侧重单站的防洪、发电、供水、灌溉等目标,水电站群的联合防洪、发电目标,对生态调度暂不予考虑,可借鉴其他调研报告成果。

2 调研背景概述

从 20 世纪 90 年代后期至今,我国水电能源开发经历了快速的发展,形成了复杂、大规模流域梯级水库群及水电系统,对其调度与管理提出了更高的要求。同时水电开发已进入由建设到运行管理的关键转型期,研究规模与范围也转向更为复杂的跨流域、跨区域的水电调度或水火电协同调度。流域梯级水电站群联合优化调度是在满足市场、电网负荷需求及水电系统约束和上下游防洪安全的前提下,协调各级水电站之间的水头、流量和出力关系,提高流域梯级水电站群运行管理效益的主要手段,不需要增加额外投资便可获得更大效益。随着流域梯级水电站数目的增多,

上、下游水电站间的水力、电力联系及其时空特性更加复杂，能量传输后效率及不确定性更加明显，使得流域梯级水库群联合优化调度问题的高维性、非线性、耦合性及不确定性等特征更加突出，约束条件更加难以处理。

水电站优化调度技术与方法经历了单库优化、梯级多库优化、水电站群联合优化以及电力系统水火电联合优化等多个阶段。传统的水电站调度模式通常着重考虑单个调度目标，其余目标或暂不考虑、或转化为约束，这种处理方式难以充分发挥流域梯级水电站群的综合效益，且传统的优化理论与计算方法存在约束条件处理困难、计算实时性不高、易产生“维数灾”等问题。目前，流域梯级水电站群联合优化调度问题正朝着多时空尺度、多层次、多目标的方向发展。随着多目标建模理论不断完善和多目标优化算法的发展，流域梯级水电站群以及整个水火电力系统多目标联合优化调度逐步成为流域能源系统调度研究的热点和重点。

本报告以跟踪调研水电站群多目标联合优化调度模型准则为主，重点调研几种传统和启发式智能多目标优化、高效求解算法的发展及应用情况，评述了各种优化算法的优缺点、适用性及未来发展方向。鉴于我国在水库群调度方面具有较先进的水平，本报告在阅读国外文献的基础上，在国内主要跟踪调研了华中科技大学张勇传、周建中课题组，大连理工大学程春田课题组，西安理工大学黄强课题组，四川大学水利水电学院马光文课题组，武汉大学水利水电学院郭生练课题组，以及大连理工大学陈守煜课题组的系列研究成果及主要进展。调研的主要目的是：（1）跟踪水电站群多目标建模准则（目标），调研多目标优化求解技术在水电站群优化调度中的应用、最新进展及发展趋势；（2）比较分析目前应用较多的优化算法的优缺点、适用性，为相关专业的科研人员提供一定的技术参考。

3 当前学科发展新动向和值得关注点

本调研报告重点关注的是变化环境下水电站群多目标联合优化调度建模及其优化求解技术发展动态，具体为：（1）水电站群多目标模型构建准则；（2）几种常规和启发式智能多目标优化求解方法；（3）各算法的应用情况及优缺点比较等。侧重于具有防洪和发电功能要求的水电站群，调度目标考虑单个水电站以及水电站群防洪、发电、供水目标联合优化调度问题。

3.1 水电站群优化调度目标与调度模型

水电站调度目标（或调度准则）对最佳运行策略的获得至关重要，长期以来受到研究者的高度重视，水电站调度模型则是调度目标或准则的函数表达。近年来，国内外学者围绕梯级水电站

群多目标联合优化调度问题开展了一系列研究，构建了多种同时考虑不同运行目标的优化模型。

黄强等^[1]认为水电站调度目标可以分为两大类：一类是可用货币指标表示的经济目标，如水库综合利用净效益或总收益最大，运行费用最小等；另一类是可用某一物理量表示的非经济目标，如年发电量最大，出力保证率最大，水库弃水量最小，水电站调峰容量最大等等。公认为理想的目标是经济目标，但其在实际中往往难于用货币合理度量；目前常用的是非经济目标，虽然这种目标不尽合理，但概念明确，计算简便、使用方便。

总体来说，调度目标根据水电站群的不同利益主体、不同调度时期、决策者的调度目的等来确定。如考虑不同利益主体时：在以发电为主的水电站系统中，常以调度期末发电量最大、总出力最大或发电效益最大等为目标；在以防洪为主的水电站群系统中，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^[2]；在有火电机组的电力系统中，以剩余负荷序列的均方差来描述水电调峰的目标^[3]；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，考虑生态调度的水库群多目标调度已经成为研究热点，因此，在水电站群优化调度中越来越多地考虑了生态环境目标^[4,5]，通过协调水库兴利要求和生态环境要求，实现水库调度经济社会目标和生态目标的均衡，即实现生态友好型水库调度^[6]。考虑不同调度时期时：在水电站群短期优化调度中，最常用的调度目标为调度期末调峰电量最大、发电量最大、发电效益最大等；在中长期优化调度中，常用调度期末发电量最大、蓄能最大、梯级水电站弃水量最小等目标。

水电站群优化调度最常用的一类模型是给定各电站入库流量、期末水位或平均发电流量等控制条件，以发电量最大、耗能量最少、总蓄能最大、综合利用效益最大等作为优化目标，在调度期内调节水量时空分布。针对不同的调度模型函数，不少学者比较了其调度结果，认为：以发电量最大为目标函数求得的运行结果往往发电不均匀，汛期和非汛期最大、最小时段的发电量相差很大，且以牺牲其他目标的利益为代价，达不到梯级水电站综合效益的最大化。在电力系统中，以总耗能量最小的优化调度模型，既能满足整个电力系统的经济运行要求，又能节约水力资源，但该模型会造成水头最高的水电站耗能量最大，造成水库低水位运行的现象。梯级水电站总蓄能最大的优化调度模型，在实际应用中取得了较好的经济效益，但对于某些特殊运行条件，由于不同约束条件之间的矛盾，存在无解的情况，容易出现放空末级水库的现象，导致下个调度时段无水可调。电力市场下，由发电效益最大的长期优化调度模型求解得出的运行结果比较均匀，在调峰时既有充足的电量用于填谷，又可在高峰期有回旋余地，既能降低出力又能避免弃水，具有很好的经济效益。

3.2 水电站群优化调度方法

水电站（群）调度研究大致经历了常规调度和优化调度两个阶段。优化调度研究始于 20 世纪 40 年代，其标志性成果是 Little 于 1955 年建立的水库群优化调度离散随机动态规划调度模型^[7]。国内代表性成果始于张勇传等^[8]于 1981 年的湖南、凤滩并联水电系统的联合优化研究，该研究以大系统分解协调思想为求解框架，引入偏优损失变量，最后通过协调各水库最优调度策略实现了系统的整体优化。之后，国内学者针对我国各大流域水电站（群）调度运行需求开展了大量富有成效的研究，在调度理论、调度模型求解算法等方面取得了大量成果。

水电站群优化调度通常采用建立效益函数的方式构建最优数学模型，并确定模型应满足的约束条件，最后采用现代优化方法求解由效益函数及约束条件组成的方程组，以寻找解空间中的最优调度方案。相比常规调度方法，它是一个多目标、具有大量约束条件的动态、复杂非线性系统的最优控制问题，是目前水电站（群）调度研究领域的热点。

3.2.1 调度方法

目前用于水电站群多目标优化调度的方法可大致分为以下几种：

（1）基于规则的调度方法

水电站群调度是实践性、实时性很强的决策过程，基于规则提取的调度模型主要是利用模糊系统、神经网络、遗传算法、数据挖掘等技术方法对大量确定和非确定性数据进行聚类分析、非线性映射关系分析以及逻辑关联分析，从大量的历史信息中提取专家的知识 and 经验，抽象概化成具有实际意义的调度规则作为指导^[9]，更好地为决策服务。如黄强等^[10]将模拟技术与差分演化算法相结合，提出了基于模拟差分演化算法制定梯级水库优化调度图的方法，将模拟技术嵌套在优化计算中，实现了模拟与优化的结合，不仅大大降低了优化问题的复杂程度，还可以更逼真地描述系统的运行策略。刘心愿等^[11]基于大系统聚合分解理论，建立了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，分别采用多目标遗传算法和离散微分动态规划进行优化，得到了梯级水电站优化调度规则，大大降低了计算的复杂度。舒卫民等^[12]根据人工神经网络的非线性决策的特点，用逐步优化算法对长系列资料进行优化计算，并将优化计算所得结果作为 BP 神经网络的训练样本，建立了水电站群最优调度规则的调度函数模型。郭旭宁等^[13]提出基于模拟-优化模式的混联供水水库群联合优化调度规则求解框架，首先通过构建虚拟聚合水库，编制联合调度图，以做出水库群对各用水户的供水方案，然后通过优化成员水库供水任务分配因子，并结合供水水库群常规调度规则，实现共同供水任务在水库间的优化分配。许银

山等^[14]以能量的形式将混联水库群聚合成一个等效水库，在隐随机优化调度的基础上，建立了等效水库调度函数模型，并采用逐步回归分析提取调度规则。

(2) 基于优化的调度方法

基于优化的调度方法是目前最常用的调度方法，本报告主要关注此方法，这类调度方法可分为模糊优化调度方法、常规优化调度方法、启发式优化调度方法等。1984年，张勇传^[15]等把模糊等价聚类、模糊映射和模糊决策等引入水库优化调度的研究；随后，陈守煜^[16]提出多目标、多阶段模糊优选模型的基本原理和解法，把动态规划和模糊优选有机结合起来，又提出了系统层次分析模糊优选模型^[17]，为水库模糊优化调度的研究奠定了理论基础；谢新民等^[18]用大系统理论和模糊数学规划方法，分析并建立了水电站水库群模糊优化调度模型，提出一种目标协调-模糊规划（IB-FP）法。模糊优化调度方法在水电站群多目标调度中的应用较少，本报告仅简略提及，将对常规优化调度方法和启发式优化调度方法做较详细的调研。

(3) 其他调度方法

其他调度方法多结合调度规则和优化求解算法获取或评价调度函数，并求解调度模型，这方面的应用成果不多，较常见的是回归分析法，如舒卫民等^[19]根据门限回归具有非线性决策的特点，建立了梯级水电站群最优调度规则的门限回归调度函数。近年来，也有学者将优化和模拟方法相结合来获得调度函数，如刘攀等^[20,21]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：首先建立梯级水库群优化调度模型，通过改进的动态规划方法得到最优样本；然后对最优样本进行回归分析得到联合调度函数，并基于模拟调度结果采用非线性规划法直接修正调度函数，最后通过水文随机模拟技术生成径流系列，进一步检验、评价所得调度函数的效率。

基于规则的调度方法首先需要足够的调度样本来建立调度规则，样本采用长系列资料或采用随机模型获取。基于优化的调度方法主要在于确定调度目标函数与求解算法，调度结果与模型求解算法关系较大。

3.2.2 对调度时段的考虑

水电站群调度时段长短不同，考虑的调度目标函数和约束条件相应会有所差别。在调度期为日、时的短期调度中，调度目标主要考虑调峰发电问题，约束条件中要考虑不同水电站间区间和下泄径流的传播历时、较为准确的来水预报、机组出力特性、震动区等；在调度期为旬、月、年的中长期调度中，约束条件中对机组运行特性的考虑较粗略，可不考虑电站间区间入流和下泄流

量的传播历时,较多地考虑了入库径流,即来水情况。由于入流的不确定性,中长期优化调度多用于制定发电计划。

3.2.3 对来水情况的考虑

按来水情况的不同可将中长期优化调度分为确定性优化调度和随机优化调度:(1)确定性优化调度,即隐随机优化调度,仅利用实际径流序列确定性地描述入库径流,然后基于确定性优化结果寻求各运行要素间的规律性,进而生成最优决策规则(调度函数)来指导水库运行。(2)随机优化调度假定未来入库径流是一个具有一定周期的平稳随机过程,以径流的随机分布函数来描述未来径流序列。经过一定时限后,这个过程会收敛到一个稳定状态,因此根据优化结果可直接得到水库调度规则。但该方法由于需要径流资料较多和计算上的“维数灾”问题,使其应用受到一定的限制^[14]。

随机优化又包括显随机优化和隐随机优化,显随机优化用随机分布函数描述径流,确定水库最优决策与蓄水量、入库径流的函数关系来指导实际运行;而隐随机则通过对大量确定性径流过程进行优化调度计算,然后以统计分析和回归计算为手段,寻求出水库最优决策和状态变量之间的相关关系,并以优化调度函数来反映。由于隐随机调度既反映了径流的随机性特点,又能以确定性优化模型为基础进行计算,而且可以考虑面临时段的预报入流,所以较显随机更适用于实际调度,但仍然存在满足大部分样本的调度函数在遭遇个别径流时结果不合理而不能使用的情况。所以隐随机优化中特别需要注意基函数的选取以及特殊样本的排除^[22]。但两种优化对未来较长时段的来水预报都不可能十分精确。

3.3 梯级水电站群多目标优化调度模型求解算法

目前,水电站群多目标优化调度研究依据处理多个调度目标的方式可以分为两类:一类通过目标函数拟合、约束法、权重法等将多目标问题转化为单目标问题进行求解,另一类则运用以 Pareto 理论为基础的多目标进化算法对问题进行并行求解。已有的水电站群优化调度算法可大致分为两种,一种是常规的优化求解算法,如线性规划法、非线性规划法、网络流规划法、动态规划法、大系统分解协调法等,通常这些算法在一定程度上存在“维数灾”问题。随着计算机技术的进步和人工智能理论的发展,模拟生物进化、迁移和觅食行为,具有启发式特点的现代智能优化算法逐渐受到国内外学者的广泛关注,如遗传算法(GA)^[23]、模拟退火法(SA)^[24]、粒子群优化算法(PSO)^[25]、混沌优化算法^[26]、差分进化法^[27]、蚁群算法(ACO)^[28]、人工神经网络(ANN)、混沌优化算法(COA)、禁忌搜索算法(TS)、人工鱼群算法等。这些智能优化方法多基于生物

物种演变过程中的进化机制，具有内在的并行搜索能力，可以避免大部分数学规划方法所面临的“维数灾”难题，求解效率较高。用于求解流域梯级水电站群优化调度问题时，启发式智能优化算法对问题目标函数与约束条件的形式（如是否连续、可导等）没有特殊要求，且计算时空代价随梯级规模的增大呈线性增长，较常规优化求解方法适应性强，故近年来，多种智能优化算法已成功地应用于求解水电站（群）的优化调度问题。

3.3.1 基于单目标的求解方法

这种求解方法以传统单目标优化方法为基础，以约束法、权重法及模糊拟合等技术手段，借助调度决策者的经验和偏好信息，将多目标问题简化为单目标问题，然后采用数学规划或智能优化方法对模型进行迭代求解生成多目标调度方案集，其本质仍然是单目标优化问题。如唐幼林等^[29]以模拟集理论为基础，采用不同模糊子集描述水库多个调度目标，以各模糊子集加权隶属度之和最大为水库优化调度的最优原则，构建水库综合调度模糊非线性规划模型；林翔岳^[30]依据五个电站水库的运行特点和用户需求，构建了水库群多目标分层序列优化调度模型；陈洋波等^[31]以发电量最大和保证出力最大为目标，使用约束法求解两目标优化模型的不劣解集，利用交互式决策偏好的多目标优化从不劣解集中寻找最优解。Nagesh Kumar 等^[32]综合考虑防洪风险、灌溉供水保证率和发电效益等调度目标，通过联立效益函数的方式构建了水库群优化调度模型，并提出一种基于约束转化策略的模型求解方法；胡国强等^[33]提出了一种兼顾发电效益和梯级运行成本的水库多目标优化调度模型，并通过设置一组模糊隶属度将多目标优化问题进行降维处理；高仕春等^[34]根据黄柏河流域水库群供水、发电以及灌溉等综合利用的工程需求，在分析三个用水目标优先权的基础上，通过将次优先级的目标转化为约束的方式构建了水库综合利用多目标优化调度模型；吴杰康等^[35]以模糊理论为基础，采用模糊隶属将梯级电站多个调度目标函数进行了拟合，并采用非线性规划法求解拟合后的单目标优化问题，得到了可均衡考虑各目标的综合调度方案；徐国宾等^[36]建立了考虑水质改善的三峡水库枯水期多目标优化调度模型，通过设置一组权重向量进行降维处理，并应用遗传算法求解简化后的模型，获得了可兼顾发电效益和改善流域水质需求的综合调度方案。

这种多目标处理方法实现相对简单，对于约束法，其不足在于需要根据先验知识确定主、次目标，并将其他目标转化为约束条件；对于权重法和模糊函数法，需不断调整决策偏好系数以获得多目标调度的非劣解集，且人工设定的权重向量或模糊隶属度难以反映各调度目标间的制约与竞争关系，当问题多目标前沿非凸、非连续时，这些方法解出的非劣调度方案集无法反映真实目

标前沿的特性。同时,这种降维处理方法采用的寻优机制无法满足多目标优化所需的“矢量对比”,给予决策者的调度信息十分有限,且单次求解只能得到一个调度方案,若需获得多种调度方案集则需要进行多次迭代,计算效率偏低。

3.3.2 多目标进化算法

水电站群多个调度目标的效益函数间存在竞争和制约的关系,均衡考虑这些目标的联合优化调度是一类多目标优化问题 (Multi-objective optimization problems, MOP), 其最终目的是获得一组非劣的调度方案集, 为调度人员提供完备的决策信息。20 世纪 80 年代中期开始, 基于群体智能的多目标进化算法 (Multi-objective Evolutionary Algorithm, MOEA) 开始被应用于多目标优化领域, Schaffer 等^[37]于 1984 年提出向量评估遗传算法 (VEGA), 并将其应用于解决机器学习问题, 为多目标优化问题的求解提供了一条崭新的途径。近年来, 几类具有代表性的多目标优化算法, 如非支配排序遗传算法 NSGA^[38]、带精英策略的非支配排序遗传算法 (NSGA-II)^[39]、强度 Pareto 进化算法 (SPEA)^[40]、改进的强度 Pareto 进化算法 (SPEA2)^[41]等先后提出, 这些进化算法仍以进化计算为问题求解的基本框架, 直接继承了进化算法较强的问题寻优特性, 同时引入了 Pareto 优化的相关理论与技术手段, 将进化计算的优化机制推广至多目标优化领域, 使其具有处理多个目标的能力, 并行优化个体直至最终获得一组多目标非劣解集。与传统的多目标处理方法相比, 求解效率有较大提升, 其内在的搜索机制对非劣前沿不规则的多目标进化问题具有适用性。近年来, 多目标进化算法的相关研究引起了国内外学者的广泛关注, 并逐步被引入到梯级水电站群联合多目标调度研究领域。

Janga Reddy^[42,43]通过综合考虑灌溉、发电等调度目标, 构建了梯级水库群多目标优化调度模型, 同时为遗传算法及粒子群算法 (PSO) 的框架设计了模型多目标并行优化解法; 杨俊杰等^[44]针对三峡梯级多目标调度问题, 以发电效益最大和保证出力最大为主要考虑目标, 提出了改进粒子信息密度、Pareto 最优解搜索机制和 Archive 集修剪技术的多目标粒子群算法 (MOPSO) 求解相应的多目标优化调度模型; 丁胜祥等^[45]提出利用强度 Pareto 算法 (SPEA) 求解水库群多目标优化调度问题; 陈小兰等^[46]通过在遗传算法计算框架中引入宏观进化算法 (MA) 中的种群关联矩阵, 提出一种宏观进化多目标遗传算法 (MMGA), 并将其应用于求解清江梯级水电站群多目标发电优化调度模型, 得到了关于发电量最大和保证出力最大的多目标非劣调度方案集; 覃晖等^[47,48]通过分析梯级多目标发电、防洪调度中各目标之间的制约竞争关系, 构建了梯级水库多目标发电、防洪优化调度模型, 并针对不同问题的特点探讨了相应模型的差分进化求解算法和复

杂约束处理方式。

基于进化算法框架的多目标进化算法在应用于求解实际工程问题时，需要克服算法的“早熟收敛”和陷于局部非劣前沿等共性问题，特别是应用其求解梯级水电站群多目标优化调度这一类含复杂耦合约束的实际工程优化问题时，由于水库群调度问题规模庞大，仍存在难以处理高度非线性且复杂多重约束条件、计算耗时较长、非劣解分布散乱等问题，需进一步完善和改进。

3.4 常规优化算法发展动态

3.4.1 动态规划法及其改进

动态规划法是水电站单库优化调度算法中最成熟的方法，是解决多阶段决策过程最优化的一种数学方法，其特点是把多阶段决策问题变换为一系列互相联系的单阶段决策问题，从而把高维问题分解为一系列低维递推子问题，然后逐个加以解决。其缺点是需要离散状态变量、占用内存多、计算工作量大、耗费机时多、易导致“维数灾”。应用时状态变量的选取必须慎重，一般来说，时段初水库蓄水量或水位是首选的状态变量。

为适应多核计算技术的发展趋势，万新宇等^[49]在分析传统串行动态规划算法计算特点的基础上，建立了基于主从模式的并行动态规划模型；自 Young 于 1967 年提出随机概念并应用于单一水库的最优化调度以来，随机动态规划（SDP）方法在水库优化调度研究中得到了广泛的应用，但该方法与动态规划法一样易导致“维数灾”问题；针对多库优化中的“维数灾”问题，众多学者提出了许多降维方法，如离散微分动态规划法（discrete differential dynamic programming, DDDP）、逐次逼近法动态规划法（Successive Approximation Methods of Dynamic Programming, DPSA）、增量动态规划法等^[50]，以上几种优化算法在水库调度研究中均有应用^[51,52,53]。

（1）离散微分动态规划法

离散微分动态规划法具体的步骤如下：1）假设一条符合约束条件及期初、期末起始条件的可行调度线，选取常规调度图结果作为初始轨迹线；2）选择增量 Δz ，并在除起点、终点以外的每个时段的初始点上下各取若干个点，形成廊道；3）在廊道范围内利用动态规划法进行寻优计算，得出一条发电量最大相应的新轨迹线；4）重复 2）、3）步，直到新轨迹线与前一条轨迹线重合，减小增量 Δz ；5）重复 2）、3）、4）步，直到 $\Delta z <$ 最小增量，或者前后两条轨迹线计算出电量相差很小时，停止计算。DDDP 的优化速度较快，但容易陷入局部最优，解的质量与其初始解有很大的关系，为此，艾学山等^[54]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。

(2) 逐次逼近动态规划法

逐次逼近动态规划法由 Meji M. M 等最早引入到水电站优化调度中，其基本思路是把带有若干个决策变量的问题分解成仅带有一个决策变量的若干子问题，使这些子问题的优化序列收敛于原问题的解，因而其计算工作量只是随维数 n 呈线性增长而不是呈指数增长，从而减少计算工作量，便于计算机求解。在解决工程实际问题时常将该方法与其他单库优化算法相结合，首先用 DPSA 将 n 维问题分解成只有一维的 n 个子问题，然后用优化算法实现每个子问题的最优化。

联合逐步优化算法 (Progressive Optimality Algorithm, POA) 法求解有 n 个水库的梯级水电站群发电量最大优化模型的步骤如下：1) 用 POA 求解的单库最优作为各库的初始策略和状态序列；2) 固定第一个水库的 V_{t-1}^k 、 V_{t+1}^k ，得到两时段的 N_{t-1} 、 N_t ，保持其它 $n-1$ 个水库的运行策略和状态变量序列暂时不变，对第一个电站进行优化计算，通过调节 N_{t-1} 和 N_t ，使两阶段梯级总的发电量最大，保存第一个水库在该时段的最优 V_t^{k+1} ，同理，逐时段计算出第一个水库的运行策略；3) 再对第二个水库进行优化，除第一个水库保持新的运行策略外，其余 $n-2$ 个水库仍保持初始策略，同 2)，用 POA 算法逐时段求解第二个水库的最优运行策略；4) 用同样的方法对剩下的水库分别进行优化，得到各个水库的新的运行策略；5) 再从第一个水库开始，重复上述步骤，进行第二轮、第三轮……迭代计算，直到目标函数不再有改善或前后两轮迭代目标函数值满足收敛要求为止。

(3) 随机动态规划的改进

对随机动态规划引起的维数灾和“模拟灾”（需要显示模型来描述每个系统的过渡过程和相关的代价），不少学者在实际操作中对其进行了简化和近似处理，但可能造成与实际情况不符的现象，Castelletti, A 等^[55]提出了 Q-迭代强化学习方法，它结合了一个利用经验来学习和设计调度规则的过程来实现基于树-回归的值连续函数的逼近，采用粗网格离散来减少维数灾，利用基于历史数据和模拟数据的经验学习来减少“模拟灾”；Kumar Jha, D 等^[56]结合罚函数，提出了在水库调度中减少下泄量的水库调度随机动态规划法，以求解下泄量最小情况下的年发电量最大水库优化调度模型。

3.4.2 逐步优化算法

逐步优化算法是 1975 年由加拿大学者 H.R. Howson 和 N.G.F. Sancho 提出的，是一个典型的将多阶段问题转化为两阶段问题的算法，它不需要离散状态变量，避免了“维数灾”问题。该算

法根据贝尔曼最优化思想，提出了逐步最优化的原理，即最优路线具有这样的性质：每对决策集合相对于它的初始值和终止值来说是最优的。该算法在水库调度研究中应用较多，是一个较成熟的优化算法，具有占内存少，计算速度快，可获得较精确解的优点，算法求解的关键在于选择一个既合理又可行的两阶段寻优计算方法。

设调度期为 n 个时段，调度期内水库初始时刻水位和终止时刻水位为定值，选取库容 V_t 作为状态变量，出力 N_t 作为决策变量，POA 算法步骤如下：1) 确定初始调度线。根据入库径流资料，在满足水库各项约束条件下，用常规调度算法拟定一条初始调度线 $V_t^k (t = 1, 2, \dots, n-1, n)$ ， $k = 0, 1, 2, \dots, m$ ， k 为逐次寻优次数；2) 固定 V_{t-1}^k 、 V_{t+1}^k ，用一个两阶段寻优法（如 0.618 法）调整 V_t^k ，选取 $\max(N_{t-1} + N_t)$ ，得到新的 V_t^{k+1} 代替 V_t^k ；再固定 V_t^{k+1} 和 V_{t+2}^k 两点，得到新的 V_{t+1}^{k+1} 代替 V_{t+1}^k ，依次固定两点，使 $t = 1, 2, \dots, n-1, n$ ，完成一轮计算；3) 利用步骤 2) 求出的新轨迹代替初始轨迹，并重复步骤 2)，然后比较两轮轨迹，若不满足 $|V_t^{k+2} - V_t^{k+1}| \leq \varepsilon, (t = 1, 2, \dots, n-1, n)$ ，则用第 $k+2$ 次轨迹重复步骤 3)；若满足则转下一步；4) 第 $k+2$ 或 $k+1$ 次轨迹为最优轨迹，输出相应各时段最优水位、出力等。

离散微分动态规划法对初始值不太敏感，但计算精度不高；逐次逼近动态规划法虽对初始值较敏感，但计算精度较高；逐步优化算法在求解两阶段优化问题时，可与多种算法相结合进行计算，以提高算法精度和便于算法的实现。

3.4.3 大系统协调分解法

大系统分解协调方法以拉格朗日乘子法为数学基础，采用先“分解”整体，后“协调”的方法，通过建立子系统的拉格朗日函数，将原问题转换为无约束非线性规划问题，从而减少计算所需内存，缩短求解时间，并避免了维数灾，是解决库群系统优化问题的有效方法。马光文^[57]应用大系统随机控制理论，提出了水库群长期优化运行的随机递阶控制方法，它不仅可同时考虑多库间径流序列的时间、空间随机相关，而且由于采用大系统递阶控制原理和方法，克服了由于多库所带来的“维数灾”问题；李玮等^[58]结合贝尔曼的逐步逼近思想提出一种改进的大系统分解协调方法，并建立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分解协调模型（Successive Approximate Decomposition Coordination Mode, SADCM），针对系统中的不同约束条件，通过选择适宜的协调变量和协调方法进行模型的求解，推求水库汛期防洪库容补偿控制方

案。大系统分解协调算法只能求得近似的最优解，且计算复杂，收敛缓慢^[59]。

3.5 启发式优化算法评述

启发式算法 (Heuristic Algorithm) 是根据经验或者某些规则来解决问题，与动态规划算法不同之处是：它不一定能保证所得解的可行性和最优性，甚至在多数情况下无法阐述所得解同最优解的近似程度。进入 20 世纪 90 年代后，现代计算机技术与人工智能技术得到了长足的发展，诞生了基于不同原理的各种新型智能与群集 (swarm intelligence) 算法，为解决水电调度问题提供了新的思路与方向^[60]。这种现代智能算法多是模拟自然界中某种现象或具体事物的物理规律而形成的一种启发式优化智能算法，普遍具有自组织、自适应、自学习等优点，可以在合理的计算资源条件下给出较高质量的解。

3.5.1 粒子群算法及其改进

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的一种具有仿生物理机制的启发式优化算法，它通过模拟鸟类在迁徙过程中的觅食行为实现问题求解，具有收敛速度快、占用资源少、鲁棒性强的特点，能够避免类似进化算法的复杂遗传操作，简单易实现。近年来，PSO 在水电站 (群) 联合优化调度研究领域获得了较为广泛的应用。杨道辉等^[61]运用粒子群优化算法求解水电站中长期优化调度模型，并依据算法的特点设计了模型约束的处理策略，与动态规划相比，提高了年发电收入 148 万元的情况下，计算速度提高 4 倍；武新宇等^[62]在考虑电站最小出力约束的前提下以经济效益最优为目标建立了水电站群优化调度模型，并提出一种两阶段粒子群算法对模型进行求解。

粒子群优化算法受其进化机制和实现方式所限，存在“早熟”、后期收敛慢且易陷入局部最优解的问题。目前，针对粒子群算法的改进研究很多，如针对使算法陷入局部最优解的惯性权值的调整研究。陈贵敏等^[63]、黄强等^[64]、董新亮等^[65]分别使用了惯性权值递减策略和自适应随机惯性权值；张双虎等^[66]通过将惯性权值表示为粒子平均移动速率和目标函数平均适应度的函数，提出了一种改进自适应粒子群算法，与动态规划 (80 离散点) 相比，发电量相差不大，计算时间仅是动态规划的 1/5；张俊等^[67]提出了一种新的惯性权重系数更新策略—自适应指数惯性权重系数 (SEIWC) 代替线性递减惯性权重系数 (LDIWC)，并将遗传算法中的染色体交叉变异思想引入粒子的更新策略，提高粒子的多样性，使用 Rosenbrock 函数和 Schaffer 函数验证了改进粒子群优化算法的有效性，与 PSO 算法相比，年发电量可增加 5.78 亿 kwh；陈立华等^[68]提出了自适应多策略粒子群算法，并将该算法与基本 PSO、改进型 PSO、杂交 PSO 和收敛因子 PSO 分别在雅砻江

梯级水库群优化调度中应用,通过对其优化结果的比较,验证了改进算法在加快收敛速度和提高算法精度方面的有效性;张景瑞等^[69]提出一种动态自适应惯性权重调整策略克服标准粒子群算法迭代后期个体之间趋同化严重的弊端;Nagesh Kuma等^[70]提出了一种精英变异算子,并将其嵌入粒子群进化的算法框架;马玉新等^[71]将PSO种群分为多个集群,并通过设计竞争、协作算子实现了集群之间的信息交互,提升了算法的收敛精度和计算效率。

此外,不少研究者将多种全局寻优算法与粒子群算法相结合,提出新的混合粒子群算法,如混沌粒子群算法、免疫粒子群算法、文化粒子群算法等。混沌粒子群算法利用了粒子群优化算法收敛速度快和混沌运动遍历性、随机性等特点,对传统粒子群算法进行改进,摆脱粒子群算法后期易陷入局部极值点的缺点,同时又保持了前期搜索的快速性^[72],提高混沌粒子群算法的全局优化能力。混沌映射可选择 logistic 映射、切比雪夫映射等。相比 logistic 映射,切比雪夫映射([-1,1]区间)可在负值区间进行搜索。针对粒子群优化过程中容易陷入局部最优和混沌算法重复搜索部分分解的问题,汪超等^[73]在配电网无功补偿优化配置模型中设计了基于黄金分割的混沌粒子群优化算法,该算法通过黄金分割评判准则,按照适应度的高低,将粒子群分成标准粒子和混沌粒子两部分,以提高 PSO 算法的搜索能力。为使各适应度层次的粒子维持一定的浓度,保证种群的多样性,利用免疫原理的免疫记忆与自我调节机制,免疫算法被融入到粒子群算法中^[74],引入的疫苗接种等操作可对算法进化过程进行有目的、有选择地指导,提高算法的搜索性能。谢维等^[75]在粒子群算法的进化机制中引入文化算法(CA),建立了文化粒子群算法(PSO-CA),该算法一方面利用信仰空间中的形势知识对群体陷入局部最优的状态进行监视,并通过杂交变异的方式使得群体跳出局部最优;另一方面通过信仰空间的规范化知识对粒子加以限定,对算法的寻优过程进行指导,加快了收敛速度。原文林等^[76]提出了协进化粒子群优化算法(Co-evolutionary Particle Swarm Optimization, CPSO),其基本思路是在算法中包含了两类种群,一类用于进化决策解,另一类用于进化第一类种群子种群中的罚函数因子,并针对约束违反量、目标函数与约束违反量的尺度问题,以及种群中的个体代替问题提出了改进技术。

这些改进算法可以在一定程度上抑制粒子的“早熟”现象,增强算法的全局搜索能力,但都只对单个粒子的行为进行修正,没有利用群体经验指导种群进化,在具体应用中仍存在以下问题:

(1) 利用动态调整惯性权重来协调全局和局部搜索能力的方法只有在算法能够搜索到全局最优解附近的领域时才有效,否则更会使算法陷入局部极值点^[74]; (2) 引入“灾变”原理或者“杂交”思想来试图跳出局部极值点的方法,其进化过程具有随机性,会影响算法的稳定性,并且在进化后期收敛速度明显变慢。因此,还需要进一步探索PSO算法与其他优化算法的组合算法,如

周建中等^[77]以求解三峡梯级电站的中长期多目标发电问题为目标, 提出多目标混合粒子群算法 (MOSP SO), 该算法采用混合蛙跳算法的分组-混合循环优化框架以增强算法的全局搜索能力, 在族群内通过粒子群算法的飞行调整策略指导个体进化, 同时, 建立了基于自适应小生境的外部精英集维护策略, 提高了算法的收敛性和所求调度方案非劣解集的多样性。申建建等^[78]通过模拟退火的降温过程来提高算法后期的进化速度和精度, 并改进粒子群算法的惯性权重, 与PSO相比, 平均每年可增加发电量约150万kwh, 与传统动态规划法相比, 年均发电量可增加约280万kwh; 王永强等^[79]在求解水电站机组组合问题时提出了基于改进二进制粒子群与动态微增率逐次逼近法混合优化算法, 改进了粒子概率变换和位置更新方程, 使其具有更强的全局寻优能力和更快的收敛速度, 与动态规划法相比, 计算时间却只占其计算时间的1/364。PSO算法是启发式算法中较为成熟的方法之一, 应用前景较好, 而这些组合优化算法的探索和应用也为其继续发展提供了有效途径。

3.5.2 遗传算法及其改进

遗传算法 (GA) 是美国 John H Holland 提出的、基于自然选择和基因遗传学原理的随机并行优化搜索算法, 其基本思想是通过模拟生物在自然界中的选择和遗传进化机理和过程来求解一些复杂优化问题。它不要求目标函数必须可导, 只要将需要优化问题的专业计算模块与遗传算法模块连接即可进行计算, 具有简单通用、鲁棒性强、搜索速度快等优点, 在不同领域的多目标优化问题中得到了应用。但对于大型非线性复杂系统的优化求解问题, 标准的 GA 算法仍存在许多缺陷, 如局部寻优能力差, 进化过程过早收敛等。对此, 国内外研究者在该算法的编码、基因、适应度函数、遗传算子、控制参数、与其他算法的结合等方面进行了改进。

(1) 编码

标准遗传算法采用二进制编码, 为避免采用二进制编码时存在的编码冗余问题, 马光文等^[80]提出了一种浮点表示的遗传算法 (A Genetic Algorithm with floating point representation, FP), 该算法不需将状态和控制变量离散化, 可大大减少计算机内存; 畅建霞等^[81]提出了一种基于十进制整数编码的改进遗传算法; 陈立华等^[82]提出了采用超立方体浮点数编码自适应遗传算法 (AGA) 和超立方体浮点数编码遗传模拟退火算法 (SA-GA); chen, L 等^[83]提出了实数超立方遗传算法 (HDGA)。

(2) 适应度函数

在遗传算法中, 用适应度函数评价染色体的优劣, 并在此基础上进行各种遗传操作, 它是进

化过程中个体选择的重要依据，直接影响遗传算法的收敛性和解的质量。通常遗传算法要求目标函数的优化方向对应适应度函数的增大方向，同时为了保持遗传算法的良好性能，需对所选择的适应度函数进行某些数学变换，如线性变换、幂变换等，但所用的适应度函数通常是固定的，不少研究者根据不同约束条件的重要性的特点，设计不同权重的罚函数因子替代单一的罚函数，提高了 GA 的学习性和适应功能。如徐琦等^[84]提出了一种改进自适应遗传算法 (IAGA)，自适应调整遗传算法的交叉概率和变异概率，同时依据当前最优个体解码所对应调度方案对约束条件的违反量，动态调整相应的惩罚系数，使调度方案获得期望的约束程度；朱记伟等^[85]提出退火罚函数法和混沌变异因子法，在继承遗传算法群体智能寻求全局最优的基础上，实现连续域上寻优，并解决其早熟收敛和约束处理问题。

(3) 遗传算子

遗传算法的三个基本算子是选择、交叉、变异，选择算子从旧群体中选出适应性强的某些染色体作为选择算子，为通过染色体交叉和变异产生新种群做准备，选择方法可以采用适应度比例法、期望值法、顺序法、保存优秀法等；交叉算子通过两个染色体的交叉组合，来产生新的优良品种；变异算子用来模拟生物在自然遗传环境中，由于各种偶然因素引起的基因突变，通过变异操作，可确保群体中遗传基因类型的多样性，以使搜索能在尽可能大的空间中进行，避免丢失在搜索中有用的遗传信息而陷入局部解^[81]。游进军等^[86]根据遗传算法每代均产生大量可行解和隐含的并行性这一特点，设计了一种基于排序的表现矩阵测度可行解对所有目标总体表现好坏的向量比较方法，并通过在个体适应度定标中引入该方法，控制优解替换和保持种群多样性，采用自适应变化的方式确定交叉和变异概率，设计了多目标遗传算法 (Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA)；万星等^[87]通过引入对称调和个体和动态调整选择率、交叉率和变异率，改变了产生子代新种群过程的父代种群来源，提出了自适应对称调和遗传算法，使问题尽快收敛；钟平安等^[88]引入了基于均匀设计的初始种群生成方式，保障了初始种群空间分布的均匀性，在交叉、变异操作中建立了个体可行性判断与处理方法，保障了个体进化过程中的可行性。

(4) 运行控制参数

王少波等^[89]引入自适应调整函数，使遗传控制参数随个体适应度大小和群体的分散程度自动调整；张忠波等^[90]第一层采用广度变异和外部存档的方式改善种群的多样性，第二层嵌套广度变异模块，改善了 GA 算法的全局搜索能力。并行遗传算法 (Parallel Genetic Algorithm, PGA) 除具有 GA 的优势外，还能充分利用并行计算机的计算能力、有效地提高求解质量和求解速度，并能够维持群体多样性，抑止早熟现象^[91]，在解决巨型水库群优化调度问题方面具有广阔的应

用前景。如李想等^[92]采用 PGA 粗粒度模型 (CGGA), 并引入迁移算子, 以三峡-葛洲坝梯级水库为例, 将基于双向环迁移拓扑的 CGGA 应用于水库调度模型求解, 收敛性和并行性均较好。

(5) 结合其他优化算法

由于遗传算法的简单通用性及鲁棒性强等特点, 与其他优化算法的结合也是近几年来研究的热点问题之一。如利用模拟退火较强的跳出局部最优解的能力, 将模拟退火和标准遗传算法相结合构建的退火遗传算法^[93,94]、利用多层次的改进遗传算法构建的模拟退火优化算法 (IGA-SA)^[95]来解决水电站优化调度问题。类似的研究还有结合动态规划法与混合编码的多目标遗传算法的动态规划-遗传算法^[96]; 采用逐次逼近算法与遗传算法相结合^[97], 使搜索空间不限于可行解, 而采用罚函数来淘汰不可行解, 并通过逐次循环, 使搜索空间不断缩小, 逐步找到全局最优解; 应用协同进化思想, 通过表征决策解和罚因子的两类种群之间的协同竞争来改善遗传算法的全局收敛性^[98], 提高遗传算法在解决复杂的优化问题时的效率; 以及基于机会约束规划的随机多目标决策模型, 针对模型中的多目标和复杂机会约束问题, 耦合不确定模拟技术、妥协算法及遗传算法的混合智能算法^[99]等。

3.5.3 蚁群算法

蚁群算法 (Ant Colony Optimization Algorithm, ACO) 是意大利学者 M. Dorigo, A. Colomni 等^[100,101,102]受自然界蚁群觅食行为的启发于 1992 年提出并发展起来的。它主要通过蚂蚁群体之间的信息传递和相互协作而达到寻优目的, 具有分布式并行全局搜索能力以及多样性、正反馈、后期收敛速度快的特点。其基本原理是: 自然界中每只蚂蚁在觅食过程中会释放信息素来记忆觅食的轨迹, 即发现食物的道路轨迹上的信息素的量越多, 后来蚂蚁选择该路径的概率也相对越大, 最终整个蚁群会找到最优路径。蚁群算法虽然具有分布式并行全局搜索能力, 但它通过信息素的积累和更新收敛于最优路径, 在解决大型优化问题时, 存在搜索空间和时间性能上的矛盾、易过早收敛于非全局最优解等弱点, 且由于初期信息素匮乏, 求解速度慢。

20 世纪 90 年代初, 蚁群算法首先成功应用于求解旅行商问题 (Traveling Saleman Problem, TSP, 是最基本的路线问题, 该问题是在寻求单一旅行者由起点出发, 通过所有给定的需求点之后, 最后再回到原点的最小路径成本), 引起了许多学者的关注, 并不断提出新的改进算法, 使蚁群算法得到了广泛应用; 进入 21 世纪, ACO 才逐步应用于水库 (群) 优化调度研究中。算法的改进主要是从局部搜索策略、蚂蚁内部状态、信息素更新策略及选择策略四个方面进行。如自适应蚁群算法、基于信息素扩散的蚁群算法、多态蚁群算法、基于信息熵的改进蚁群算法、基于

网格划分策略的连续域蚁群算法、基于交叉变异操作的连续域蚁群算法等。如陈峻等^[103]提出一种基于分布均匀度的自适应蚁群算法,算法自适应地调整路径选择概率的确定策略和信息素更新策略;黄国锐等^[104]提出通过建立信息素扩散模型,加大近距离的蚂蚁个体间的协作,在该算法中,蚂蚁个体可以改变多条路径上的信息素浓度以提高蚂蚁群体之间的合作效果^[105];侯云鹤等^[106]提出一种通用优化算法用于求解一般形式的非凸、非线性约束优化问题,称之为广义蚁群算法 (Generalized Ant Colony Optimization GACO),彭勇等^[107]将其应用到水库群优化调度中,并采用逐步优化算法改进了邻域搜索方法,计算结果与离散点为 200 的动态规划相近,但无维数灾问题;杨文娟等^[108]将蚁群系统中的蚁密、蚁量系统的局部更新和蚁周系统的全局更新有机结合,提出了一种求解梯级水库优化调度模型的蚁群系统 (ACS) 算法,应用于乌江流域时比动态搜索算法略大,但提高了模型求解的搜索效率。

此外,蚁群算法还能与其他优化算法相融合,相互取长补短,改善算法的性能。目前这方面的研究有蚁群算法与遗传算法、人工神经网络、粒子群算法及人工免疫算法等算法之间的融合。如刘卫林等^[109]将遗传算法中的进化思想和蚁群算法中的群体智能技术有效地耦合,提出了一种基于两者的混合智能算法,该算法利用蚁群算法的并行性、正反馈性以及良好的全局寻优能力,避免搜索陷入局部最优,同时借鉴遗传算法的进化思想,利用杂交变异算子来进行局部寻优,使其能快速搜索到全局最优点,在种群随机搜索过程中嵌入确定性的模式搜索,使得算法同时具有随机性和确定性特点;Li 等^[110]、原文林等^[111]和万芳等^[112]提出了基于免疫进化的蚁群算法,该混合算法充分利用了免疫进化算法的全局快速收敛性和蚁群算法的正反馈性,同时在蚁群算法中增加扰动策略,克服了蚁群算法在求解过程中出现初期信息素匮乏、易陷入局部最优解的问题,提高了求解效率;陈立华等^[113]针对蚁群算法在优化过程中出现搜索时间较长和早熟停滞现象,提出了具有变异特征混合局部优化算法的蚁群系统 (MSA-ACS),该改进策略融合了蚁群算法的全局搜索能力和模拟退火算法的局部搜索能力,提高了算法的搜索效率,改善了算法的收敛性。

这些融合算法在解决某些特定问题时,表现出了比较优异的性能,因此,设计新的融合策略结合其他优化算法进一步改善蚁群算法的性能是非常有意义的研究方向。蚁群算法的参数设置对算法的性能也有重要的影响,如 Solno 提出了在蚁群算法运行前加入一个预处理阶段,这个阶段先不使用信息素找到一定数量的路径,再从中选择部分路径在算法开始前初始化信息素,获得了较好的效果。然而对这方面的研究相对较少,因此参数的设置原则也值得深入的研究^[114]。

3.5.4 禁忌搜索算法

禁忌搜索 (Tabu Search, TS) 是一种软计算智能亚启发式搜索算法, 由 Fred Glover 在 1986 年首次提出, 进而形成一套完整的算法^[115]。它是在局部邻域搜索基础上模仿人类具有智能特征的寻优过程形成的一种全局优化算法, 通过禁忌表记忆最近搜索过程中的历史信息, 然后根据记忆的信息, 禁忌某些解, 避免走回头路, 达到跳出局部最优的目的, 它的特点是采用了禁忌技术, 可记录已得到的局部最优解, 并在后续迭代中避开这些局部最优解继续搜索。该算法采用一定的藐视准则使搜索过程跳出局部最优解, 从而提高获得全局最优解的可能性^[116], 充分体现了集中和扩散两个策略。集中策略体现在局部搜索, 扩散策略通过禁忌表来实现, 避免了出现局部最优解。但该算法对初始解依赖性强、后期迭代效率低。为此, 乔西现等^[117]提出了动态规划-禁忌搜索算法, 应用动态规划进行初始解的寻求, 应用关键路径进行当前解的邻域构造, 禁忌长度采用了动态设置, 在清江梯级水库群优化调度中的应用表明, DP-TS 与 POA 相比, 发电量相差不大, 计算时间提高了 50%, 与 TS 相比, 发电量提高了 2.4%, 计算时间提高了 2.6%; 朱颢东^[118]提出了一个基于双禁忌对象的禁忌搜索算法, 在此算法的基础上, 利用并行化分散搜索策略来提高算法的求解精度, 其基本思路为: 先以解向量的分量作为禁忌对象进行禁忌搜索, 当这个搜索过程完成后, 再以当前求的最优解为初始解进行禁忌搜索, 直到算法满足结束条件。该算法在水电站多目标优化调度中单独应用的实例尚不多见, 多用于和其他优化算法相结合, 改善其他算法的求解效率。

3.5.5 差分进化算法

差分进化算法 (differential evolution, DE) 是一种采用实数矢量编码的并行搜索算法^[119,120], 具有群体搜索和协同搜索能力, 其原理简单, 受控参数少, 易于编码实现, 同时它对初始值无要求, 收敛速度快, 对各种非线性函数适应性强, 尤其适应于多变量复杂问题的寻优, 在众多优化问题中取得了良好效果。但在实际优化过程中, 针对某些复杂优化问题, 仍存在容易早熟收敛, 无法搜索到全局最优解等缺陷^[121]。吴亮红等^[122]指出, DE 产生早熟收敛的根本原因在于贪婪选择策略带来的趋同现象, 为提高差分进化算法的性能, 提出了一种自适应二次变异差分进化算法, 有效地避免早熟, 提高了算法的全局收敛能力, 并采用了一种串行结构实现了差分进化算法的并行计算, 提高了算法的收敛速率和全局搜索能力^[123]; 覃晖等^[124]为求解水库多目标防洪优化调度问题提出一种基于自适应柯西变异的多目标差分进化算法 (multi-objective differential evolution with adaptive cauchy mutation, MODE-ACM), 维持种群多样性, 克服了早熟收敛问题, 提高了收敛精度, 同时根据多目标优化的特点, 对差分算子进行修正, 引入外部档案集更新策略提高了

算法的收敛速度; 随后又提出一种强度Pareto差分进化算法(Strength Pareto Differential Evolution, SPDE), 采用SPEA2的适应度评价方法, 并根据多目标优化的特点对DE的进化算子进行修正^[125]; 卢有麟等^[121]提出一种混沌差分文化算法(CDECA), 该算法模型将DE嵌入文化算法的框架作为主群体空间的进化过程, 同时引入具有较强局部搜索性能的混沌搜索来进行信念空间的进化, 并通过设计一组联系操作实现文化算法模型中两个空间的互相影响互相促进, 在某水库的应用中, 与3000 离散点的DP 的计算结果精度一致, 而所需的平均计算时间仅为DP的约1/20; 原文林等^[126]针对差分进化算法在进化过程中适应度的进化模式未考虑进化的外部环境与进化成分之间的内在联系问题, 借鉴生态学对个体生存环境与种群竞争的关系, 提出了协同差分演化算法在梯级水库中长期发电优化调度中的应用。

3.5.6 其他启发式算法

(1) 文化算法

Robert G. Reynolds^[127]从模拟人类社会的进化过程出发, 于1994年提出了文化算法(Cultural Algorithm, CA), 其主要思路是从进化的群体中获得解决问题的知识, 并利用这些知识指导种群的进化, 从而提高搜索效率。将文化看作人类社会中信息的载体, 可以被社会所有成员全面接受, 并指导每个社会成员的各种行为, 从而促使人类的进步和发展。CA中个体积累自身的知识, 并相互交流形成群体经验, 而群体经验也将反过来指导整个种群的进化。不同于其他进化算法, 文化算法包含两个进化空间: (1) 微观层面上由具体个体组成的种群空间(Population Space); (2) 宏观层面上由进化过程中获取的知识和经验组成的信仰空间(Belief Space)。这两个空间通过影响函数和接受函数进行信息交流。在种群空间, 通过目标函数评价个体适应值; 个体在进化过程中形成的个体经验通过接受函数传递给信仰空间, 信仰空间将收到的个体经验按一定的规则形成群体经验, 并通过特定的规则不断更新现有的信仰空间; 信仰空间用更新后的群体经验, 通过影响函数修改种群空间中个体的行为规则, 从而高效指引种群空间的进化^[75]。为提高算法的收敛速度和搜索效率, 覃晖等^[128]将克隆选择算法(CSA)嵌入文化算法框架中, 提出文化克隆选择算法(CCSA), 并根据克隆选择算法的特点, 重新定义了文化算法信念空间的4种知识结构, 进而利用这些知识结构指导克隆选择算法的演化过程, 避免了高频变异对收敛速度的不利影响, 在一个梯级水电站联合优化调度中的应用表明, 1981-2000年, CSSA 求得各年份调度方案的总发电量均高于DDDP, 多年平均增发电量0.1596 亿kW·h。

（2）混沌优化算法

混沌性规律的特征有：解对初始值的高度敏感性、相空间的遍历性、系统的内在随机性。混沌迭代的不重复性和遍历性确定了其快速寻优的可能性，近期针对混沌优化的研究成果主要有：王文川等^[129]利用混沌运动的特点，提出了一种求解水电站水库优化调度问题的基于浮点数编码的混沌遗传（CGA）算法，该算法的思想是采用混沌优化进行改善初始种群质量和利用混沌退化变异算子代替常规算法中的变异算子，避免搜索过程陷入局部极值，在云南省柴石滩水库长期优化调度的应用中表明，CGA 比 DP 算法的多年平均发电量提高 7.7%，计算时间仅为 DP 算法的 1/17.5；贾仁甫等^[130]以混联水电站群总电能最大为目标函数，根据混沌运动的随机性，由 Logistic 模型产生的混沌变量进行优化搜索，求解了混联水电站群长期优化调度模型，年发电量比 POA 算法提高 0.61%；刘起方等^[131]结合了分形分割逼近算法的高遍历性、普适性和混沌优化算法的随机性、规律性、遍历性等特性，提出了基于分形与混沌理论的嵌套搜索算法。

（3）模拟退火算法

模拟退火算法（Simulated Annealing Algorithm, SAA）思想最早是由 Metropolis 在 1953 年提出的，而该算法在 1983 年才出现，源于对固体退火过程的模拟，用一组称为冷却进度的参数控制算法的进程，使算法在控制参数 T 徐徐“降温”并趋于零时，最终求得优化问题的全局或准全局最优解。它使用基于概率的双向随机搜索技术，是一个全局最优算法，理论上讲，它能以 100% 的概率收敛于全局最优解，具有并行性、质量高、初值鲁棒性强、简单通用、易实现等优点，但由于要求较高的初始温度、较慢的降温速率、较低的终止温度以及足够多的抽样，故优化过程慢。该方法的改进方式有：增加升温或重升温过程以避免陷入局部最小、增加记忆功能、增加补充搜索过程、每一状态多次搜索以及结合其他搜索算法等。

（4）人工鱼群算法

人工鱼群算法（artificial fish swarm algorithm, AFSA）是一种基于模拟鱼群行为的随机搜索智能启发式算法，主要利用了鱼的觅食、聚群和追尾行为算子，构造单个人工鱼个体的底层行为，通过鱼群中个体的局部寻优达到全局最优值在群体中突现出来的目的^[132]。该算法具有良好的克服局部极值取得全局极值的能力，并且具有快速收敛、对初值和参数选择不敏感、鲁棒性强、简单易实现等特点。但它保持探索与开发平衡能力较差，搜索盲目性较大，寻优结果精度低^[133]，当问题规模过大时全局搜索能力下降，且后期求解速度慢。对该算法改进的研究有：改进人工鱼视野、步长及局部更新策略^[134]，在算法中增加鱼群的协调行为，与其他智能算法相融合等。

（5）混合蛙跳算法

混合蛙跳算法（Shuffled Frog Leaping Algorithm, SFLA）是 2000 年由 Eusuff 和 Lansey 提出（2006 年发表）的一种基于群体智能的后启发式计算技术^[135,136]，可以理解为沼泽中的青蛙群体通过分散成多个子群独立寻找食物，并周期性地重新聚集起来交换食物源信息的过程；也可以将其理解为人类社会中特定行业或文化群体自发地形成多个小组，并定期聚集起来交换经验和信息，以促进技术或文化发展的过程^[137]。在 SFLA 算法中，群体（解集）由一群具有相同结构的青蛙（解）组成，整个群体被分为多个族群（memePlex），不同的族群被认为是带有不同类信息的青蛙的集合。各族群中的个体按照一定策略执行解空间中的局部深度搜索，在已定义的局部搜索迭代次数结束之后，信息在混合过程中进行交换。局部搜索和混合过程一直持续到定义的收敛条件结束为止。

SFLA 作为一种全新的生物进化算法，结合了混合进化算法（shuffled complex evolution, SCE）全局信息交换和粒子群算法局部深度搜索的优点，具有算法参数少（比 PSO 少），全局寻优能力强等特点^[138,139]，局部深度搜索使得个体可以沿着不同的方向搜索，而混合机制使得个体间信息得到充分交换，避免了算法陷入局部最优，成为混合蛙跳算法最主要的特点^[140]。但由于算法出现的时间不长，在水库多目标调度方面的研究应用成果相对较少。

（6）其他算法

模拟植物生长算法（Plant Growth Simulation Algorithm, PGSA）是李彤等^[141]受植物生长形态和分枝模型的启发，根据植物生长向光性特点提出的一种最初针对整数规划全局优化问题的新型仿生算法。该算法将整数规划的可行域作为植物的生长环境，根据各可行解目标函数的变化情况确定植物的生长信息（形态素浓度），进而模拟出向光源（全局最优解）迅速生长，直到人工植物在优化问题可行域中从初始状态生长到大树长成的终态（即不再有新的树枝生长）的植物生长动力学模型。PGSA 由形态素浓度决定其方向性和随机性搜索机制，具有较强的全局搜索能力，且对参数的确定极为简单和宽松，该方法一经提出就得到了广大学者的关注。目前对 PGSA 的研究还处于初步理论建模和应用探索阶段，研究者通过改进算法的生长点集的生成、规模及步长的选取和调整机制，提高了其全局寻优性能，并逐渐将其应用于电力系统、电网重构、作业车间调度、水库群优化调度^[142]等领域。

人工蜂群算法（ABC）是由 Karaboga 于 2005 年提出的，并成功应用于函数优化问题^[143]，该算法具有控制参数少、计算简洁、易实现等优点，同样，ABC 算法也具有后期搜索速度慢、局部搜索能力差等缺点。有研究者进而提出精英人工蜂群算法（Elitist ABC）、interactive ABC 等，

银建霞等^[144]结合差分进化算法中的变异思想,提出一种改进的人工蜂群算法,其基本思路是在标准人工蜂群算法中观察蜂更新蜜源的阶段,使用差分进化算子对蜜源进行更新,在差分变异算子中引入混沌序列,以提高观察蜂在此阶段的局部搜索能力,最终获得最优蜜源;成鹏飞等^[145]在水电站优化调度中设计了一种以反向学习策略搜寻初始解、以自适应比例选择策略代替轮盘赌法、以基于指数分布突变策略更新蜜源位置,改进了人工蜂群算法,在新安江水电站的中长期优化调度应用中表明,年总发电量比 POS 算法提高 0.44%,且收敛速度更快。

人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS)是一种全局随机概率搜索方法,通过用抗体代表问题的可行解,抗原代表问题的约束条件和目标函数,采用能体现抗体促进和抑制的期望繁殖率来选择父个体,从而达到快速收敛到全局最优解的目的^[146],具有多样性、耐受性、免疫记忆、分布式并行处理、自组织、自学习、自适应和鲁棒性等特点。

Shah-Hosseini^[147]在 2007 年提出了智能水滴算法(Intelligent Water Drops Algorithm, IWD)来解决组合问题,继而算法被应用于旅行问题、多维背包问题、机器人路径规划问题、车辆路径问题、作业车间调度问题及灌溉系统、无功优化调度问题等,其结构与 ACO 算法非常相似。A. B. Dariane^[148]将其应用于水库优化调度问题,并比较了其 with ACO 算法的结果,表明水滴算法比 ACO 算法大大节省时间。

此外,近几年还出现了果蝇算法^[149]、蝙蝠算法、布谷鸟算法、萤火虫算法等仿生算法,这些算法在多种优化问题中的适用情况还需进一步检验。

3.5.7 启发式优化算法评述

上述启发式算法,既是仿生算法,又是群体智能算法,这些算法之间最大的不同在于算法更新规则上,如 PSO, AFSA 与 SFLA 等算法是基于模拟群居生物运动步长更新,ACO 算法则根据觅食机理设定更新规则,但它们有以下突出的共有特点:

(1) 鲁棒性强。算法不依赖问题本身的严格数学性质,对目标函数和约束函数的要求较宽松,在不同的优化问题求解环境下适用性好,且群集算法中的个体是分布式的,无集中控制,即使个别个体出现故障,也不会影响群体对问题的求解。

(2) 具有潜在的并行性和分布式特点。算法同时对群体中的各个个体进行搜索寻优,各个个体通过直接或间接的通信协同工作,寻优过程实际上是种群的进化过程,具有本质上的并行性。

(3) 算法理论基础较差,多注重求解速度和效率。启发式算法多是根据经验提出,没有坚实的理论基础,故算法不以达到精确最优解为目标,且由于非线性,算法易陷入局部最优。

(4) 自组织性强。算法的基本思想均来自对某种自然规律的模仿，种群能够通过自组织和自学习提高其适应性，具有人工智能的特点。

(5) 优化流程的结构框架相似，扩展性好。虽然各种启发式算法在优化机制方面存在一定的差异，但其优化流程却相似，均是一种“邻域搜索”框架。算法从一个（一组）初始解出发，在算法参数的控制下，通过邻域函数，产生若干邻域解，按接受准则（确定性、概率性或混沌方式等）更新当前状态，然后按参数修改准则调节控制参数，如此重复搜索过程直至终止准则满足，最终得到问题的全局最优解。搜索方式、邻域函数、状态更新方式、算法收敛准则是这些算法的核心^[150]。

4 结论与建议

本报告主要关注流域梯级水电站群多目标优化调度问题，在调研目前水电站群多目标模型构建及其求解算法发展动态的基础上，得到的初步结论和建议如下。

4.1 水电站群多目标优化调度发展方向

(1) 模型系统求解稳定性和求解效率的平衡问题

近年来，随着电网精细化要求的提高，电网对水电调峰、出力、出库与水位控制的要求也更为精细。大规模水电站群优化调度问题具有高维、非线性、多阶段、强约束等特点，求解过程十分困难，而不断扩大的水电系统使电站间、梯级间存在着更为复杂的水力和电力联系，增加了问题的约束条件数目。如何保证系统求解和运行效率是大规模系统面临的关键问题^[151]，需要进一步引进新理论、新方法，开展多种理论方法的耦合研究，探索适应于高维、复杂、时变、多目标调度中实际需求的高效、稳定的求解技术。

(2) 考虑生态环境的多目标优化调度模式研究

随着生态调度理念的形成，仅简单地将流域生态环境流量作为约束条件在梯级水电站群多目标优化调度模型中考虑已不能满足某些特定时期调度的需求，构建基于流域生态健康、环境安全、符合流域可持续发展的水电站（库）群优化调度新模式的研究势在必行。

(3) 水电站群优化调度模型描述方法

除动态规划外，启发式算法等水库优化调度模型方法对水库调度过程中的动态描述都不能很好地体现，而动态规划方法从理论上也不能对其入库流量、水位及放水的变化过程等全部信息进行连续性描述，不能精确地对连续动态变化过程的特性进行描述^[152]。在目前大规模复杂系统的

优化调度中,是否需要另寻能精确描述各变量状态变化过程的动态最优化模型描述方法?是利用最优控制理论还是采用模糊控制理论?仍值得探讨。

(4) 优化模型输入和输出的不确定性问题

不确定性是水电站(库)优化调度技术中的三大难题之一。优化模型的输入为水库的入库流量,它很大程度上依赖于流域径流预报精度和预见期,其不确定性分析对水库电站群的多目标调度决策方案确定具有重要意义。在现有技术条件下,最长的预见期基本为一周,而水库以上流域来流具有随机性,如何在这种具有高度输入不确定性的情况下制定调度决策方法是需要研究的问题之一,建立响应曲面来表达水库入库流量、库水位以及最优下泄流量三者之间的关系^[153]也许是一个较好的方法。利用启发式算法等得到的模型输出是优化调度方案集,即最优解集,而这些最优解可能存在“异轨同效”现象^[154],如何减少这种不确定性,或是找出最优调度轨迹的区间并应用于实际调度,尚需深入研究。

(5) 机组高水头多振动区运行问题

在水电站群短期优化调度中,高水头多振动区是我国干流巨型梯级水电站群面临的突出运行问题之一^[155],程春田等以机组组合为基础,分别利用动态规划技术与组合数学理论生成各组合机组的发电特性曲线与振动区,并将振动区避开策略引入逐步优化算法来进行模型求解,较好地解决了高水头多振动区调峰问题,是该问题的有益探索。

4.2 智能优化算法发展方向

从20世纪40、50年代开始,经过几十年的发展,启发式算法虽经历遗传算法时期、群集智能算法等超启发式算法(Hyper-Heuristic Algorithm)时期,但启发式算法还有其不足和发展的空间。

(1) 智能算法数学理论基础研究

除遗传算法外,大多数启发式智能算法虽然原理清晰,但缺乏成熟、严格的数据基础,仍停留于试验和检验阶段,在应用于高维、多目标、多约束的水电站群优化调度模型中,其鲁棒性分析、收敛性和收敛速度证明十分困难。此外,模型全局最优解与算法局部最优解、多峰值解之间的关系,算法初始种群数目选择与计算速度之间的关系等研究较少,寻求新的数学工具和分析方法,将数学理论研究和计算机应用研究有机结合起来,进行算法鲁棒性、收敛性的分析,更加客观地比较各种算法的性能,建立算法的性能评估机制,将是其发展方向之一。

(2) 参数对算法结果的影响分析

启发式算法中的参数对算法的性能和效果影响较大,如何有效选择和设置这些参数仍没有定论,目前仅根据实际问题,依靠经验反复多次试算,使得参数对实际问题的依赖性较强。因此,需要进一步在理论上研究控制参数与算法收敛性、解空间的搜索效率、解的质量之间的影响与制约关系,为最优参数的选取提供理论指导和规律性结论。

(3) 各种优化算法的改进与融合研究

各种启发式算法各有其优缺点,今后一段时间内,各种算法的改进和融合仍将是热点研究内容之一。一方面,改进算法自身搜索机制、优化操作等,提高其计算性能;另一方面,不同优化算法间相似的优化流程与框架结构使得它们可以相互借鉴、补充,取长补短,在统一的框架下发展更高效、强大的具有良好收敛性、求解速度和求解质量的混合智能算法。

(4) 求解算法的并行计算和云计算技术研究

并行计算、云计算、海量数据存取技术的快速发展,为复杂大规模水电站群优化调度模型求解算法的架构与工作分解、提高分布式计算能力、缩短程序执行时间、海量数据的快速调用等方面提供了强大的工具,如何在并行计算和云计算技术的支持下,更有效地利用计算机资源,提高优化算法的执行速度也将是水电群优化调度的研究方向之一。

参考文献

- [1] 黄强,沈晋. 水库联合调度的多目标多模型及分解协调算法[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 1:75-82
- [2] 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
- [3] Howson H R, Sancho N G F. New algorithm for the solution of multi-state dynamic programming problems [J]. Mathematical Programming, 1975, 8(1): 104-116
- [4] 王宗志,王银堂,陈艺伟,等. 基于仿真规则与智能优化的水库多目标调控模型及其应用[J]. 水利学报, 2012, 43(5): 564-570, 579
- [5] 胡和平,刘登峰,田富强,等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 325-332
- [6] SUEN J P, EHEART J W. Reservoir management to balance ecosystem and human needs:

- Incorporating the paradigm of the ecological flow regime[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(3): 1-9
- [7] Little JDC. The use of storage water in a hydroelectric system [J]. *Journal of the Operations Research Society of America*, 1955, 3(2): 187-197
- [8] 张勇传, 李福生, 柱裕福. 水电站水库调度最优化[J]. *华中工学院院报*, 1981, 9(6): 49-56
- [9] 赵鸣雁, 程春田, 李刚. 水库群系统优化调度新进展[J]. *水文*, 2005, 25(6): 18-23, 61
- [10] 黄强, 张洪波, 原文林, 等. 基于模拟差分演化算法的梯级水库优化调度图研究[J]. *水力发电学报*, 2007, 27(6): 13-17, 26
- [11] 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, 51
- [12] 舒卫民, 马光文, 黄炜斌, 等. 基于人工神经网络的梯级水电站群调度规则研究[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(2): 11-14, 25
- [13] 郭旭宁, 胡铁松, 黄兵, 等. 基于模拟-优化模式的供水水库群联合调度规则研究[J]. *水利学报*, 2011, 42(6): 705-712
- [14] 许银山, 梅亚东, 钟壬琳, 等. 大规模混联水库群调度规则研究[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(2): 20-25
- [15] 张勇传, 邴凤山, 熊斯毅. 模糊集理论与水库优化问题[J]. *水电能源科学*, 1984, 27-37
- [16] 陈守煜. 多阶段多目标决策系统模糊优选理论及其应用[J]. *水利学报*, 1990, (1): 1-10
- [17] 陈守煜, 赵瑛琪. 系统层次分析模糊优选模型[J]. *水利学报*, 1988, (10): 1-10
- [18] 谢新民, 陈守煜, 王本德, 等. 水电站水库群模糊优化调度模型与目标协调—模糊规划法[J]. *水科学进展*, 1995, 6(3): 189-197
- [19] 舒卫民, 马光文, 黄炜斌, 等. 基于门限回归的梯级水电站群调度规则研究[J]. *水电能源科学*, 2010, 28(5): 40-42
- [20] 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
- [21] 周研来, 梅亚东, 杨立峰, 等. 大渡河梯级水库群联合优化调度函数研究[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(4): 78-82

- [22] 赵立远, 陈智梁, 陈洪波. 水电站中长期发电调度理论研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(6): 80-83
- [23] Holland J. Adaptation in natural and artificial systems [M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975
- [24] Kirkpatrick S, Gelatt Jr CD, Vecchi MP. Optimization by simulated annealing [J]. Science, 1983, 220:671-680
- [25] Eberhart R. C., Kennedy, J. A new optimizer using particle swarm theory [C]. Proc. 6th Symp. On Micro Machine and Human Science, IEEE Service Center, Piscataway, N.J., 1995, 3943
- [26] 曹磊. 混沌、分形及其应用[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1995
- [27] Storn R, Price K. Differential Evolution: A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces [R]. University of California 'Berkeley : ICSI, 1995
- [28] Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. The Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1996, 26(1): 29-41
- [29] 唐幼林, 曾佑澄. 模糊非线性规划数学模型在多目标综合利用水库规划中的应用[J]. 水电能源科学, 1991, 9(1): 43-49
- [30] 林翔岳, 许丹萍, 潘敏贞. 综合利用水库群多目标优化调度[J]. 水科学进展, 1992, 3(2): 112-119
- [31] 陈洋波, 王先甲, 冯尚友. 考虑发电量与保证出力的水库调度多目标优化方法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 4:95-101
- [32] Nagesh Kumar D., Janga Reddy M. Ant Colony Optimization for Multi-Purpose Reservoir Operation [J]. Water Resources Management, 2006, 20: 879-898
- [33] 胡国强, 贺仁睦. 梯级水电站长期多目标模糊优化调度新模型[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 23-26
- [34] 高仕春, 滕燕, 陈泽美. 黄柏河流域水库水电站群多目标短期优化调度[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(2): 15-17
- [35] 吴杰康, 祝宇楠, 韦善革. 采用改进隶度函数的梯级水电站多目标优化调度模型[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 48-52

- [36] 徐国宾, 王健, 马超. 耦合水质目标的三峡水库非汛期多目标优化调度模型[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 78-84
- [37] Schaffer J D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms [C]. Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, 1985: 93-100
- [38] Srinivas N., Deb K. Multi-objective Optimization Using Non-dominated Sorting in Genetic Algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248
- [39] Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, et.al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002, 6(2): 182-197
- [40] Zitzler E., Thiele L. Multi-objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 57-271
- [41] Zitzler E, Laumanns M, Thiele L. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm [C], Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial Problems, Athens, Greece, 2002: 95-100
- [42] Janga Reddy M., Nagesh Kumar D. Optimal reservoir operation using multi-objective evolutionary algorithm [J]. Water Resource Management, 2006, 20(6): 861-878
- [43] Janga Reddy M., Nagesh Kuma D. Multi-objective particle swarm optimization for generating optimal trade-offs in reservoir operation [J]. hydrology Process, 2007, 21(21): 2897-2909
- [44] 杨俊杰, 周建中, 方仍存, 等. MOPSO 算法及其在水库优化调度中的应用[J]. 计算机工程, 2007, 33(18): 249-250, 264
- [45] 丁胜祥, 董增川, 王德智, 等. 基于 Pareto 强度进化算法的供水库群多目标优化调度[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 679-684
- [46] 陈小兰, 熊立华, 万民, 等. 宏观进化多目标遗传算法在梯级水库调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2009, 28(3): 5-9
- [47] 覃晖, 周建中, 王光谦, 等. 基于多目标差分进化算法的水库多目标防洪调度研究[J]. 水利学报, 2009, 40(5): 513-519

- [48] 覃晖, 周建中, 肖舸, 等. 梯级水电站多目标发电优化调度[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 377-384
- [49] 万新宇, 王光谦. 基于并行动态规划的水库发电优化[J]. 水力发电学报, 2011, 30 (6): 166-170, 182
- [50] 畅建霞, 黄强, 王义民. 水电站水库优化调度几种方法的探讨[J]. 水电能源科学, 2000, 18 (3): 19-22
- [51] 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
- [52] 刘新, 纪昌明, 杨子俊, 等. 基于逐步优化算法的梯级水电站中长期优化调度[J]. 人民长江, 2010, 41 (21): 32-34
- [53] 黄炜斌, 马光文, 王和康, 等. 雅砻江下游梯级电站群中长期优化调度模型及其算法研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28 (1): 1-4
- [54] 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
- [55] Castelletti, A., S. Galelli, M. Restelli, and R. Soncini-Sessa. Tree-based reinforcement learning for optimal water reservoir operation [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46, W09507, doi:10.1029/2009WR008898
- [56] Kumar Jha, D., Yorino, N., Zoka, Y., Sasaki, Y., Hayashi, Y., Iwata, K. and Oe, R. Incorporating Penalty Function to Reduce Spill in Stochastic Dynamic Programming Based Reservoir Operation of Hydropower Plants[J]. *IEEJ Trans Elec Electron Eng*, 2010, 5: 531–538. doi: 10.1002/tee.20569
- [57] 马光文. 大系统随机控制理论在水库群优化调度中的应用[J]. 系统工程学报, 1991, 6 (2): 46-58
- [58] 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
- [59] 李亮, 黄强, 肖燕, 等. DPSA 和大系统分解协调在梯级水电站短期优化调度中的应用研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(10): 125-128
- [60] 申建建. 大规模水电站群短期联合优化调度研究与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2011: 16

- [61] 杨道辉, 马光文, 过夏明, 等. 粒子群算法在水电站优化调度中的应用[J].水力发电学报, 2006, 25(5): 5-7.
- [62] 武新宇, 程春田, 廖胜利, 等. 两阶段粒子群算法在水电站群优化调度中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 25-28
- [63] 陈贵敏, 贾建援, 韩琪. 粒子群优化算法的惯性权值递减策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40 (1): 53-56
- [64] 黄强, 陈晓楠, 张洪波, 等. 基于自适应随机惯性权的粒子群优化算法[J]. 西安理工大学学报, 2008, 4 (1): 27-31
- [65] 董新亮, 马光文, 陈尧, 等. SAPSO 算法在梯级水电站日优化调度中的应用[J]. 水力发电, 2009, 35 (6): 55-57
- [66] 张双虎, 黄强, 吴洪寿, 等. 水电站水库优化调度的改进粒子群算法[J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 1-5
- [67] 张俊, 程春田, 廖胜利, 等. 改进粒子群优化算法在水电站群优化调度中的应用研究[J]. 水利学报, 2009, 40 (4): 435-441
- [68] 陈立华, 梅亚东, 杨娜. 自适应多策略粒子群算法在水库群优化调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2010, 29 (2): 139-144
- [69] 张景瑞, 向泽江, 龙健, 等. 流域梯级水电站群优化调度的多向导粒子群算法[J].水力发电学报, 2011, 30(4): 36-41
- [70] Nagesh Kumar D., Janga Reddy M. Multipurpose Reservoir Operation Using Particle Swarm Optimization [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2007, 133(3): 192-201
- [71] 马玉新, 解建仓, 罗军刚. 基于组织进化粒子群算法的水电站水库优化调度研究[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(3): 256-262
- [72] 黄炜斌, 马光文, 王和康, 等. 混沌粒子群算法在水库中长期优化调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2010, 29 (1): 102-105
- [73] 汪超, 王昕, 姚钢, 等. 基于黄金分割的混沌粒子群优化算法在配电网无功规划中的应用[J]. 电力保护与控制, 2012, 40 (7): 31-36
- [74] 李安强, 王丽萍, 藺伟民, 等. 免疫粒子群算法在梯级电站短期优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39 (4): 426-432

- [75] 谢维, 纪昌明, 吴月秋, 等. 基于文化粒子群算法的水库防洪优化调度[J]. 水利学报, 2010, 41 (4): 452-457, 463
- [76] 原文林, 吴泽宁, 黄强. 电力市场环境下水库发电优化调度的协进化粒子群算法应用研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3):65-70
- [77] 周建中, 李英海, 肖舸, 等. 基于混合粒子群算法的梯级水电站多目标优化调度[J]. 水利学报, 2010, 41 (10): 1212-1219
- [78] 申建建, 程春田, 廖胜利. 基于模拟退火的粒子群算法在水电站水库优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2009, 28 (3): 10-15
- [79] 王永强, 周建中, 覃晖, 等. 基于改进二进制粒子群与动态微增率逐次逼近法混合优化算法的水电站机组组合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (10): 64-69
- [80] 马光文, 王黎, G·A·Walters. 水电站优化调度的 FP 遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 1996, 11: 77-81, 112
- [81] 畅建霞, 黄强, 王义民. 基于改进遗传算法的水电站水库优化调度[J]. 水力发电学报, 2001, (3) : 85-90
- [82] 陈立华, 梅亚东, 董雅洁, 等. 改进遗传算法及其在水库群优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39 (5): 550-556
- [83] Chen, L., Chang, F. J. Applying a real-coded multi-population genetic algorithm to multi-reservoir operation [J]. Hydrol. Process, 2007, 21: 688-698. doi: 10.1002/hyp.6259
- [84] 徐琦, 张勇传, 孔力, 等. 改进遗传算法在梯级电站日优化运行中的应用[J]. 水电能源科学, 2002, 20 (4): 51-53
- [85] 朱记伟, 张洪波, 辛琛, 等. 水库调度 PSO 优化模型及求解方法[J]. 系统工程, 2010, 28 (1): 105-112
- [86] 游进军, 纪昌明, 付湘. 基于遗传算法的多目标问题求解方法[J]. 水利学报, 2003, 64-69
- [87] 万星, 周建中. 自适应对称调和遗传算法在水库中长期发电调度中的应用[J]. 水科学进展, 2007, 1 (4): 598-603
- [88] 钟平安, 徐斌, 张金花. 水电站发电优化调度遗传算法的改进[J]. 水力发电学报, 2011, 30 (5): 55-60

- [89] 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
- [90] 张忠波, 张双虎, 蒋云钟, 等. 改进的遗传算法在水库调度中的应用[J]. 人民黄河, 2012, 34 (8): 54-57
- [91] 陈立华, 梅亚东, 麻荣永. 并行遗传算法在雅砻江梯级水库群优化调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2010, 29 (6): 66-70
- [92] 李想, 魏加华, 傅旭东. 粗粒度并行遗传算法在水库调度问题中的应用[J]. 水力发电学报, 2012, 31 (4): 28-33
- [93] 陶春华, 马光文, 涂扬举, 等. 实码退火遗传算法在厂内经济运行中的应用[J]. 四川大学学报, 2005, 37(6) : 38-41
- [94] 晋健, 马光文, 陶春华. 基于退火遗传算法的水电站短期优化调度[J]. 水力发电学报, 2008, 27 (6): 18-21
- [95] 李勋贵, 魏霞, 黄强, 等. 改进的多层次优化算法在水库群优化调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2007, 26 (6): 1-6, 11
- [96] 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
- [97] 邹进. 基于逐次逼近遗传算法的梯级水库优化调度[J]. 水利水电工程学报, 2012, 1:19-25
- [98] 万芳, 黄强, 原文林, 等. 基于协同进化遗传算法的水库群供水优化调度研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27 (2): 139-144
- [99] 纪昌明, 李克飞, 张验科, 等. 基于机会约束的水库调度随机多目标决策模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (19): 36-40
- [100] Dorigo M. Optimization, learning and natural algorithms. PhD thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy, 1992
- [101] Colomi A, Dorigo M, Maniezzo V. Ant colony system for job-shop scheduling[J]. Belgian J of Operations Research Statistics and Computer Science, 1994, 34(1): 39-53
- [102] Dorigo M, Gambardela L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computing, 1997, 1(1): 53-66

- [103] 陈峻, 沈洁, 秦玲, 等. 基于分布均匀度的自适应蚁群算法[J]. 软件学报, 2003, 14(8) : 1379-1387
- [104] 黄国锐, 曹先彬, 王煦法. 基于信息素扩散的蚁群算法[J]. 电子学报, 2004, 32(5) : 865-868
- [105] 牛新征, 余堃, 路纲, 等. 蚁群算法研究的新进展和展望[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(4): 12-15, 25
- [106] 侯云鹤, 熊信良, 吴耀武, 等. 基于广义蚁群算法的电力系统经济负荷分配[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3) : 59-64
- [107] 彭勇, 薛志春. 基于广义蚁群算法的梯级水库群优化调度[J]. 水电能源科学, 2011, 29(4): 48-50
- [108] 杨文娟, 刘任远. 梯级水库优化调度模型的蚁群系统 (ACS) 算法求解研究[J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2013, 41 (8): 228-234
- [109] 刘卫林, 董增川, 王德智. 混合智能算法及其在供水水库群优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2007, 38 (12): 1437-1443
- [110] LI Meiyi, CAI Zixing. Immune evolutionary algorithms with domain knowledge for simultaneous localization and mapping [J]. J. CENT. South Unit Technology, 2006, 13(5): 529- 535
- [111] 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
- [112] 万芳, 邱林, 黄强. 水库群供水优化调度的免疫蚁群算法应用研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30 (5): 234-239
- [113] 陈立华, 梅亚东, 杨娜, 等. 混合蚁群算法在水库群优化调度中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42 (5): 661-664, 668
- [114] 张祖琼. 蚁群算法的研究及应用进展[J]. 电脑知识与技术, 2009, 5 (9): 2396-2397
- [115] Glover F.Future paths for integer programming and links to artificial intelligence[J].Computers and Operations Research, 1986, 13: 533-549
- [116] Boyer V, Elkihel M, Baz D E.Heuristics for the 0-1 multidimensional knapsack problem[J].European Journal of Operational Research, 2009, 199 (3): 658-664.

- [117] 乔西现, 原文林, 黄强, 等. 改进的禁忌搜索算法在梯级水库联合优化调度中的应用研究[J]. 西安理工大学学报, 2008, 24 (1): 75-79
- [118] 朱颢东, 李红婵. 基于双禁忌对象的并行禁忌搜索算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47 (29): 31-33
- [119] Storn R and Price K. Differential evolution-a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[R]. Technical Report TR_95_012, ICSI, 1995
- [120] Storn R and Price K. Minimizing the real functions of the IECCE'96 contested by differential evolution. Proceeding of IEEE International Conference on Evolution computation, 1996: 842-844
- [121] 卢有麟, 周建中, 李英海, 等. 混沌差分文化算法及其仿真应用研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21 (16): 5107-5111
- [122] 吴亮红, 王耀南, 袁小芳, 等. 自适应二次变异差分进化算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(8): 117-120
- [123] 吴亮红, 王耀南, 周少武, 等. 双群体伪并行差分进化算法研究及应用[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 453-458
- [124] 覃晖, 周建中, 王光谦, 等. 基于多目标差分进化算法的水库多目标防洪调度研究[J]. 水利学报, 2009, 40 (5): 513-519
- [125] 覃晖, 周建中, 肖舸, 等. 梯级水电站多目标发电优化调度[J]. 水科学进展, 2010, 21 (3) :377-384
- [126] 原文林, 吴泽宁. 协同差分演化算法在梯级水库中长期发电优化调度中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31 (3): 39-43
- [127] Robert G Reynolds. An introduction to cultural algorithms[C]. Proceeding of the Third Annual Conference on Evolutionary Programming[A]. New Jersey: World Scientific Publishing, 1994: 131-139
- [128] 覃晖, 周建中, 李英海, 等. 基于文化克隆选择算法的梯级水电站联合优化调度[J]. 系统仿真学报, 2010, 22 (10): 2342-2346, 2362
- [129] 王文川, 程春田, 徐冬梅. 基于混沌遗传算法的水电站优化调度模型及应用[J]. 水力发电学报, 2007, 26 (6): 7-11

- [130] 贾仁甫, 陈守伦, 梁伟. 基于混沌优化算法的混联水电站群长期优化调度[J]. 水利学报, 2008, 39 (9): 1131-1135
- [131] 刘起方, 马光文, 刘群英. 梯级水电站优化调度的分形与混沌嵌套搜索算法[J]. 水科学进展, 2009, 20 (2): 197-203
- [132] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22 (11): 32-38
- [133] 王联国, 洪毅, 赵付清. 一种改进的人工鱼群算法[J]. 计算机工程, 2008, 34 (19): 192-194
- [134] 彭勇, 唐国磊, 薛志春. 基于改进人工鱼群算法的梯级水库群优化调度[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 21 (6): 1118-1125
- [135] Eusuff M M and Lansey K E. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2003, 129(3): 210-225
- [136] Muzaffar Eusuff, Kevin Lansey, Fayzul Pasha. Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic meta-heuristic for discrete optimization, *Engineering Optimization*, 2006, 38(2): 129-154
- [137] 李英海. 梯级水电站群联合优化调度及其决策方法[D]. 华中科技大学博士学位论文, 2009
- [138] 李英海, 周建中, 杨俊杰, 等. 一种基于阈值选择策略的改进混合蛙跳算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(35): 19-21
- [139] Alireza R V, Ali H M. Solving a bi-criteria Permutation flow-shop Problem using shuffled frog-leaping algorithm[J]. *Soft Computer*, 2008, (12):435-452
- [140] ElbehairyH, ElbeltagiE, HegazyT, et al. Comparison of Two Evolutionary Algorithms for Optimization of Bridge Deck RePairs. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2006, (21): 561-572
- [141] 李彤, 王春峰, 王文波, 等. 求解整数规划的一种仿生类全局优化算法——模拟植物生长算法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 1 (1): 76- 85
- [142] 白涛, 黄强. 仿生算法在水库(群) 优化调度中的应用综述[J]. 中国农村水利水电, 2009, 9: 154-157

- [143] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, Technical Report-TR06[R].Computer Engineering Department, Engineering Faculty, Erciyes University, 2005
- [144] 银建霞, 孟红云. 具有混沌差分进化搜索的人工蜂群算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47 (29): 27-30
- [145] 成鹏飞, 方国华, 黄显峰. 基于改进人工蜂群算法的水电站水库优化调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2013, (4): 109-112
- [146] 左幸, 马光文, 徐刚, 等. 人工免疫系统在梯级水库群短期优化调度中的应用[J]. 水科学进展, 2007, 18 (2): 277-281
- [147] Shah-Hosseini H. Problem solving by intelligent water drops. IEEE Congress on Evolutionary Computation. Swissotel, The Stamford, 2007
- [148] A. B. Dariane, S. Sarani. Application of Intelligent Water Drops Algorithm in Reservoir Operation[J]. Water Resour Manage, 2013, 27:4827-4843
- [149] 赖豪杰, 李晓英, 张磊, 等. 基于改进果蝇算法的水库群调度应用研究[J]. 2013, 31 (8): 74-76
- [150] 张高峰. 梯级水电系统短期优化调度与自动发电控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004
- [151] 程春田, 武新宇, 申建建, 等. 大规模水电站群短期优化调度方法 I: 总体概述[J]. 水利学报, 2011, 42 (9): 1017-1024
- [152] 吴建兴, 王先甲, 杨志琼. 水库调度最优控制路径的多目标数学模型探究[J]. 人民珠江, 2013, (1): 35-38
- [153] 李芳芳, 曹广晶, 王光谦. 考虑径流不确定性的水库优化调度响应曲面方法[J]. 水力发电学报, 2012, 31 (6): 49-54
- [154] 刘攀, 赵静飞, 李立平, 等. 水库优化调度中的异轨同效问题[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33 (2): 5-8, 82
- [155] 申建建, 武新宇, 程春田, 等. 大规模水电站群短期优化调度方法 II: 高水头多振动区问题[J]. 水利学报, 2011, 42 (10): 1168-1177