

文章编号:1672-3031(2022)03-0237-07

改进风驱动优化算法在水库调度中的应用

顾起豪¹, 张双虎¹, 刘 吟¹, 王 丹^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 水资源所, 北京 100038; 2. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

摘要: 风驱动算法是一种新兴的基于群体迭代启发式的全局优化算法, 与遗传算法、布谷鸟算法等相比, 具有明确的物理背景, 但该算法避免不了易陷入早熟和收敛效率慢的问题。针对早熟, 本文提出了扰动策略, 对当前最优适应度值对应的任一元素进行扰动, 且随着迭代次数的增加, 扰动量逐渐减少。针对收敛效率不高, 提出了空间压缩策略, 采用奇偶相间的方式, 通过计算约束更新解的上下限以保证该解是可行解。将改进的风驱动优化算法运用到某水库的优化调度中, 并与粒子群算法和标准风驱动算法进行比较。结果表明改进的风驱动优化算法更为可靠、高效, 能以较快速度收敛于最优解, 且最优解值更大, 为水库优化调度模型求解提出新的解决方案。

关键词: 水库; 风驱动; 扰动; 空间压缩; 优化调度

中图分类号: TV697.1*1

文献标志码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20210066

1 研究背景

水库优化调度特别是发电优化调度是一个多阶段、强约束、非线性的组合优化问题^[1], 水库优化调度模型求解方法始终是水库优化调度研究的热点。目前, 求解水库调度模型的方法有两种: 一种是以线性规划(LP)、动态规划^[2-4](DP)为代表的传统优化方法。该类方法的缺点是效率和精度难以兼顾, 容易陷入“维数灾”。因此, 专家学者提出了很多降维方法, 例如: 耦合 KL 理论与调度特征的降维方法^[5]、逐步优化算法(POA)^[6]、离散梯度逐步优化算法(DGPOA)^[7]、三层并行逐步优化算法^[8]、双层动态规划算法(BDSP)^[9]等。另一种是基于生物学、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^[10], 如改进粒子群算法^[11-13]、混沌优化算法^[14]、狼群算法^[15]、群居蜘蛛优化算法^[16]、改进遗传算法^[17]等。现代启发式算法鲁棒性强, 在一定程度上克服了传统算法的求解效率低的缺点。但这些算法以模拟自然界的生物进化或动物运动为主, 无明确的物理背景。

风驱动优化算法(Wind Driven Optimization, WDO)是由 Zikri Bayraktar 等^[18]在 2010 年提出的模拟空气运动的一种优化算法。空气中的任何一微小部分可以视为点, 简称为“空气质点”。空气质点在外力的作用下, 相互影响相互作用, 朝着同一方向运行, 当气压达到平衡时不再运动, 该位置可以理解为最优解。空气运动过程中, 每个空气质点位置组合可以认为一个是候选解, 空气质点的运动轨迹就是寻优的过程。WDO 算法的核心是研究空气质点在大气中的受力运动情况, 并结合牛顿第二定律及理想气体状态方程, 推导出空气质点在每次迭代中的速度和位置更新方程^[19]。算法中的每一项都具有明确完整的物理意义, 在实际运用中更加简便、容易理解。近几年, 风驱动优化算法已经被广泛应用到电磁优化^[20-22]、医学^[23]、人工智能^[24]、遥感^[25]等领域, 但尚未在水库优化调度领域中得到运用。

本文对 WDO 在水库优化调度模型求解中的应用进行了详细的阐述, 并提出通过加入扰动策略解

收稿日期: 2021-03-10; 网络首发时间: 2021-06-18

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210618.1022.001.html>

基金项目: 中国工程院重大咨询项目(2019-XY-59)

作者简介: 顾起豪(1995-), 硕士生, 主要从事大型水利工程的咨询和运行调度研究。E-mail: 769030624@qq.com

通讯作者: 张双虎(1976-), 教授级高级工程师, 主要从事大型水利工程的咨询和运行调度研究。

E-mail: zhangshh@iwhr.com

决 WDO 后期收敛速度慢、容易陷入局部最优解的缺陷，通过引入空间压缩机制提高模型求解效率，并将该算法应用到某水库发电优化调度模型求解中。

2 风驱动优化算法

根据牛顿第二运动定律，作用在空气质点上的合力与运动加速度关系如式(1)所示，且加速度和合力的方向始终保持一致。

$$\rho \vec{\alpha} = \sum_i \vec{F}_i \quad (1)$$

式中： ρ 为空气密度； $\vec{\alpha}$ 为加速度； \vec{F}_i 为施加在空气质点 i 方向上的力。

作用于大气的力包括真实力和视示力。真实力又包括气压梯度力、万有引力和摩擦力；视示力主要是科氏力。科氏力不做功，只改变空气质点运动方向，是地球自转效应的反映。

(1) 气压梯度力是空气运动的最基本力，气压梯度力合力可以表示为：

$$F_p = -\frac{m}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = -\delta V \frac{\partial P}{\partial x} = -\delta V \nabla p \quad (2)$$

式中： m 为空气质点质量； ρ 为气体密度； δV 为空气质点体积； ∇p 为气压梯度；“-”表示从高压指向低压运动。

(2) 空气质点之间的摩擦力非常复杂，简化如下：

$$F_f = -\kappa \rho u \quad (3)$$

式中： κ 为摩擦系数； u 为速度矢量；“-”表示摩擦力与运动方向相反。

(3) 空气质点的重力是垂直与地球表面方向的力，可以表示为：

$$F_g = \rho g \delta V \quad (4)$$

(4) 科里奥氏力是指由于地球自转而使空气质点运行发生偏转的力。科氏力不做功，只改变运动方向，可以表示为：

$$F_c = -2\Omega u \quad (5)$$

式中 Ω 为地球自转的角速度。

根据理想气体状态方程 $p = \rho RT$ ，有

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (6)$$

式中： p 为气体压强； R 为干空气比气体常数； T 为理想气体的热力学温度。

令 $\Delta t = 1$ ， $\delta V = 1$ ， $\vec{\alpha} = \frac{\Delta u}{\Delta t}$ ，并把式(2)一式(6)带入式(1)，等式两边同时除以 ρ ，则有：

$$\Delta u = \left(-\nabla p \frac{RT}{p} \right) - \kappa u + g + \left(\frac{-2\Omega u RT}{p} \right) \quad (7)$$

设 u_t 、 u_{t+1} 分别为空气质点在 t 、 $t+1$ 时刻的速度，则 $\Delta u = u_{t+1} - u_t$ 。根据牛顿第二运动定律的“瞬时性”特点，即加速度和力同时产生、同时变化、同时消失，则式(7)可转化为：

$$u_{t+1} = (1 - \kappa) u_t + \left(-\nabla p \frac{RT}{p_t} \right) + g + \left(\frac{-2\Omega u_t RT}{p_t} \right) \quad (8)$$

气压梯度力的方向从高压指向低压。定义目前为止空气质点最小压强为 p_{opt} ，即群体当前最优解，与之对应的空气质点位置为 x_{opt} 。根据气压梯度公式定义，空气质点当前位置与最优位置的气压梯度关系如下：

$$-\nabla p = \frac{|p_{opt} - p_t|}{x_{opt} - x_t} \quad (9)$$

根据文献[21],

$$g = |g| (0 - x_t) \quad (10)$$

把式(9)和式(10)带入式(8), 则有:

$$u_{t+1} = (1 - \kappa)u_t + \left| \frac{p_{opt}}{p_t} - 1 \right| RT / (x_{opt} - x_t) - |g| x_t + \left(\frac{-2\Omega u_t RT}{p_t} \right) \quad (11)$$

为避免气体压力过大, 影响模型稳定性, 用压强大小排序来代替实际压力值, p_{opt} 为1, p_t 为 j ; 设 $RT = \alpha$, $-2\Omega RT = \beta$; 科氏力是一种惯性力, 为刻画空气质点当前速度受其它维度速度的影响, 用 $u_t^{otherdim}$ 近似代替 u_t , 则式(11)可改写为下式:

$$u_{t+1} = (1 - \kappa)u_t + \alpha \left| \frac{1}{j} - 1 \right| / (x_{opt} - x_t) - |g| x_t + \beta \frac{u_t^{otherdim}}{j} \quad (12)$$

式(12)是空气质点运动速度更新公式。位置更新公式如下:

$$x_{t+1} = x_t + u_{t+1} \Delta t \quad (13)$$

3 水库优化调度数学模型

本文建立了兼顾保证出力的发电量最大为目标的水库优化调度模型。即在调度期内根据历史来水过程或预报来水过程, 考虑各约束条件, 在保证各时段出力不小于电站保证出力的前提下, 寻找水库运行调度过程, 以达到年发电量最大的目标。具体目标函数如下:

$$\begin{aligned} \text{obj: Max } E &= \sum_{t=1}^T N_t \Delta t = \sum_{t=1}^T k Q_t H_t \Delta t \\ \text{st: } N_t &\geq N_{Firm} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: N_t 为水电站出力; k 为出力系数; Q_t 为 t 时段发电流量; H_t 为 t 时段发电水头; T 为调度期内时段数; Δt 为每个计算时段内的小时数。

主要约束条件包括:

水量平衡约束:

$$V_t = V_{t-1} + (Q_t^{in} - Q_t^{out}) \times \Psi \quad (15)$$

蓄水位约束:

$$Z_t^{\min} \leq Z_t \leq Z_t^{\max} \quad (16)$$

电站出力约束:

$$N_t \leq \varphi(H_t) \quad (17)$$

式中: V_t 、 Q_t^{in} 、 Q_t^{out} 、 Z_t^{\min} 、 Z_t^{\max} 分别为 t 时段末库容、 t 时段出入库流量和出库流量、 t 时段允许最低蓄水位和最高蓄水位; Ψ 为流量水量换算单位; $\varphi(\cdot)$ 为预想出力曲线函数。

4 应用于水库优化调度 WDO 算法的改进

4.1 算法设计 WDO 算法可以描述为一个由 M 个空气质点组成的群体在 D 维空间内运行。速度矩阵 U 、位置矩阵 Z 如下:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11}^i & u_{12}^i & \cdots & u_{1D}^i \\ \vdots & u_{md}^i & \vdots & \\ u_{M1}^i & u_{M2}^i & \cdots & u_{MD}^i \end{bmatrix}; \quad Z = \begin{bmatrix} z_{11}^i & z_{12}^i & \cdots & z_{1D}^i \\ \vdots & z_{md}^i & \vdots & \\ z_{M1}^i & z_{M2}^i & \cdots & z_{MD}^i \end{bmatrix}$$

u_{md}^i 、 z_{md}^i 分别为第 m 个空气质点、在 d 维方向上 i 步(或迭代次数)的速度和位置。

WDO 在水库优化调度模型求解时, 空气质点数可以用来描述初始解的个数, 空气质点运动空间

维数可以用来描述水库优化调度求解时段，速度矩阵 U 可以用来描述迭代求解过程中水位或库容的变化，位置矩阵 Z 可以用来描述迭代求解过程中某一状态下的水位或库容。按照一定的随机方法可以生成 M 个库容变化向量和初始库容向量， $U_m^0 = (u_{m,1}^0, u_{m,2}^0 \cdots u_{m,T}^0)$ ， $V_m^0 = (v_{m,1}^0, v_{m,2}^0 \cdots v_{m,T}^0)$ 。

WDO 算法速度更新公式共有 4 项，其中前 3 项决定速度更新大小和方向，根据科氏力定义，第 4 项只改变速度方向、不改变速度大小。WDO 算法在求解水库优化调度时，先根据式 (12) 计算前 3 项计算速度即时段末的库容变化量 $u_{m,t}^{i+1}$ ，再根据这一库容变化后相邻前后时段是否有弃水，动态调整 λ 。库容变化更新公式如式 (18) 所示，时段末水位更新公式如式 (19) 所示， λ 计算公式如式 (20) 所示：

$$u_{m,t}^{i+1} = \lambda \left[(1 - \kappa) u_t + \alpha \left| \frac{1}{j} - 1 \right| \left| (x_{opt} - x_t) - |g| |x_t| \right| \right] \quad (18)$$

$$v_{m,t}^{i+1} = v_{m,t}^i + u_{m,t}^{i+1} \quad (19)$$

$$\lambda = \begin{cases} 1, & f(v_{m,t-1}^{i+1}, v_{m,t}^{i+1}) = 0, f(v_{m,t}^{i+1}, v_{m,t+1}^i) = 0 \\ 0, & f(v_{m,t-1}^{i+1}, v_{m,t}^{i+1}) > 0, f(v_{m,t}^{i+1}, v_{m,t+1}^i) > 0 \\ 1, & u_{m,t}^{i+1} > 0, f(v_{m,t-1}^{i+1}, v_{m,t}^{i+1}) > 0 \\ -1, & u_{m,t}^{i+1} < 0, f(v_{m,t-1}^{i+1}, v_{m,t}^{i+1}) > 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中 $f(\cdot)$ 为根据时段初、时段末库容计算发电弃水函数。

4.2 算法改进 针对风驱动算法求解优化问题存在的易于陷入早熟和搜索效率不高的缺点，本文主要从以下两个方面进行改进。

(1) 空间压缩。水库优化调度求解是一个强约束、序贯决策过程，当前的决策不仅影响到当前时段效益，还影响到下一时段效益。在用智能优化算法求解水库优化调度模型时，经常会生成大量的不可行解，导致模型求解效率不高。为此，引入空间压缩策略来提高模型求解效率。空间压缩方法的核心思想是：在求解过程中，根据 $v_{m,t-1}^i$ 和 $v_{m,t+1}^i$ ，考虑各种约束，计算满足约束条件 $v_{m,t}^{i+1}$ 的上下限 $\text{Max } v_{m,t}^{i+1}$ 、 $\text{Min } v_{m,t}^{i+1}$ ，并根据下式计算约束更新后的库容：

$$v_{m,t}^{i+1} = \begin{cases} \text{Min } v_{m,t}^{i+1}, & (v_{m,t}^i + u_{m,t}^{i+1}) < \text{Min } v_{m,t}^{i+1} \\ \text{Max } v_{m,t}^{i+1}, & (v_{m,t}^i + u_{m,t}^{i+1}) > \text{Max } v_{m,t}^{i+1} \end{cases} \quad (21)$$

在进行空间压缩时，采用奇偶相间的方式来更新库容向量，即进行第 $i+1$ 代库容序列更新时，只对奇数时段末的库容进行更新；进行第 $i+2$ 代库容序列更新时，只对偶数时段末的库容进行更新，依次来更新提高模型求解效率。水库优化调度求解空间压缩示意图如图 1 所示。

(2) 扰动。在室内放一个气球，气球在经历一系列运动后会飘在空中静止，此时气球达到平衡状态，处于当前最佳位置。若在气球任一方向上稍微加一点力，气球即会重新开始运动，直到达到新的平衡状态，处于新的最佳位置，这就是扰动的原理。

WDO 在求解水库优化调度模型时，若连续多代适应度值变化不大，则可以认为是陷入早熟。对当前最优适应度值对应的库容向量中的任一个时段蓄水状态进行扰动，且随着迭代次数的增加，扰动量要逐渐减少。为此构建以下扰动量计算函数：

$$\varepsilon = (2\gamma - 1) \times \frac{1}{\theta \sqrt{i}} \quad (22)$$

式中： ε 为扰动量； γ 为 $(0, 1)$ 的随机数； θ 为常量，经大量试算， $\theta = 4$ 求解效率最高。通过扰动，更新早熟的最优解，使其跳出早熟，继续寻优。

4.3 求解步骤

(1) 确定进化代数和群体规模，设置相应参数。

(2) 生成初始库容序列(初始解)和速度更新序列。为提高模型求解速度，要保证初始库容序列中

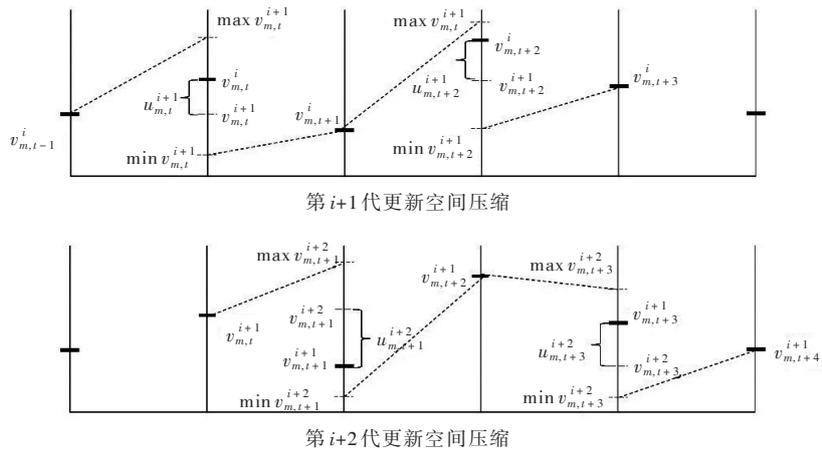


图1 水库优化调度模型求解空间压缩示意图

有一定比例满足约束条件的解。

(3)开始迭代。按照式(18)一式(21)进行库容变化序列和库容序列的迭代更新，并计算相应的适应度值。

(4)扰动。判断是否陷入早熟，若早熟，对当前最优解进行扰动，进行下一代迭代。

(5)模型终止判断。判断是否满足模型终止条件，满足条件、模型终止；不满足条件，返回第(3)步再次进行迭代。

5 实例计算

为充分验证改进WDO算法的有效性并比较该算法与标准WDO算法及PSO算法的性能差异^[26]，以某水库优化调度模型求解为实例进行验证。该水库是以发电为主，兼有防洪任务的年调节水库。水库的正常蓄水位630 m，相应库容为55.63亿 m^3 ；死水位590 m，相应库容为26.62 m^3 ；6—7月份汛限水位为626.24 m，8月份汛限水位为628.12 m；电站装机容量为3000 MW，电站保证出力600 MW；水电站综合出力系数8.5。为了避免或尽可能减少社会用水挤占河道生态用水产生的不利影响^[27]，该水库中最小生态下泄流量设置为300 m^3/s 。为兼顾保证出力的发电量最大为目标进行优化调度计算，计算时段为月。

5.1 合理性分析 表1为引入改进策略的风驱动算法(IWDO)求解水库优化调度模型计算结果。由表1可知：6、7月份水位不高于汛限水位626.24 m，8月份水位不高于汛限水位628.12 m，其余月份水位均高于死水位590 m，低于正常蓄水位630 m；各月平均下泄流量均大于最小生态下泄流量300 m^3/s ；电站出力均大于保证出力600 MW。计算结果表明，IWDO求解水库发电优化调度模型是可行的。

5.2 改进策略效率分析 为了分析本文提出的空间压缩和扰动策略在模型求解的作用，进行了三种情景对比。一是标准风驱动算法WDO；二是增加了空间压缩策略的风驱动算法；三是增加了空间压缩和扰动策略的风驱动算法IWDO。三种算法求解水库优化调度，适应度值随迭代次数的变化过程如图2所示。从图2可以看出，标准风驱动在第62代开始就陷入了早熟，此后迭代几十次内适应度值变化很

表1 IWDO运算结果

	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月
水位/m	626.2	626.2	628.1	630	630	630	627.8	623.9	618.3	612.1	610.7	620
流量/ (m^3/s)	1505	1670	1063	772	678	428	358	364	374	386	396	587
出力/MW	2364.9	2653.1	1724.4	1275.1	1129	719.1	600	600.6	601.8	600.4	603.8	907.7
电量/(亿 $kW \cdot h$)	17.03	19.1	12.42	9.18	8.13	5.18	4.32	4.32	4.33	4.35	4.35	6.54

小, 适应度值为 97.93 亿 kW·h; 加入空间压缩策略后在第 29 代达到最大适应度值 98.53 亿 kW·h; 再加入扰动策略, 从第 29 代之后, 适应度在持续缓慢的增加, 到 100 代时适应度值达到 98.88 亿 kW·h, 到 200 代时适应度时达到 99.01 亿 kW·h, 到 500 代结束迭代时, 适应度值达到最大 99.25 亿 kW·h。上述分析结果表明, 在标准风驱动中加入空间压缩策略可以明显提高迭代效率; 加入扰动策略后, 能持续缓慢地提高适应度值。

5.3 IWDO 算法搜索性能分析 为了进一步分析 IWDO 算法在求解水库优化调度模型时的性能, 本文又应用了粒子群算法(PSO)进行优化求解, 目标函数与约束条件均不变。两种算法适应度值对比如图 3 所示。从图 3 可以看出, IWDO 和 PSO 两种方法求解水库优化调度, 最终适应度值相差不大, 但是 IWDO 效率更高。IWDO 第 30 代适应度值就与 PSO 第 195 代适应度值相当。上述分析结果表明, IWDO 求解水库优化调度, 效率更高。

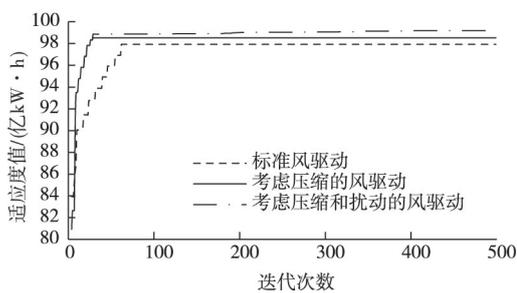


图 2 改进策略效率分析

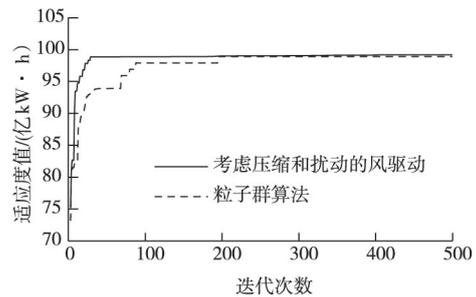


图 3 IWDO 搜索性能分析

6 结论

本文以风驱动算法为基础, 提出了改进的风驱动算法 IWDO, 并将其应用到水库优化调度模型求解中, 通过实例研究可得:

(1) 标准风驱动算法仍然存在着早熟和收敛速度慢的问题。经过实例计算, 标准风驱动优化算法在第 62 代陷入早熟, 且最终适应度值为 97.93 亿 kW·h。在对其改进的过程中, 当仅加入空间压缩策略时, 在第 29 代就达到最大适应度值, 为 98.53 亿 kW·h; 若再加入扰动策略, 适应度值随着迭代次数的增加, 不断上升, 最终达到 99.25 亿 kW·h。由此可见, 本次研究提出的空间压缩策略可明显提高风驱动算法求解水库优化调度的效率, 提出的扰动策略能有效避免算法“早熟”, 两种策略同时具有显著提高风驱动算法求解水库优化调度的性能。

(2) 改进的风驱动算法在迭代 30 次得到的适应度值与粒子群算法迭代 195 次得到的适应度值相当; 优化后的风驱动算法迭代 200 次适应度值为 99.02 亿 kW·h, 比 PSO 算法迭代相同代数适应度值增加 0.1 亿 kW·h; 优化后的风驱动算法最终求解适应度值为 99.25 亿 kW·h, 比 PSO 算法增加 0.33 亿 kW·h。

(3) 空间压缩策略还可以应用到其它智能算法中, 提高算法求解效率。

因此, 改进的风驱动优化算法(IWDO)为解决水库优化调度模型的有效算法。

参 考 文 献:

- [1] FENG Zhongkai, NIU Wenjing, LIU Shuai, et al . Multiple hydropower reservoirs operation optimization by adaptive mutation sine cosine algorithm based on neighborhood search and simplex search strategies[J] . Journal of Hydrology, 2020, 590: 125523 .
- [2] 朱小瑞 . 基于 DP 算法的水库动态调度规划[J] . 陕西水利, 2019(4): 83-84, 87 .
- [3] EUM H, KIM Y, PALMER R N . Optimal drought management using sampling stochastic dynamic programming with a hedging rule[J] . Journal of Water Resources Planning and Management, 2010, 137(1): 113-122 .
- [4] 王徐洋 . 三门峡-小浪底水库联合防洪优化调度研究[D] . 郑州: 华北水利水电大学, 2020 .

- [5] 申建建,张博,程春田,等.耦合KL理论与调度特征的大规模水电站群优化调度降维方法[J].水利学报,2021,52(2):169-181.
- [6] 汪菲娜,谈飞.梯级水电站群联合优化调度研究与应用[J].中国水利水电科学研究院学报,2015,13(2):150-156.
- [7] 赵志鹏,廖胜利,程春田,等.梯级水电站群中长期优化调度的离散梯度逐步优化算法[J].水利学报,2018,49(10):1243-1253.
- [8] 朱迪,梅亚东,许新发,等.复杂防洪系统调度的三层并行逐步优化算法[J].水利学报,2020,51(10):1199-1211.
- [9] 姚华明,张勇传,钟琦,等.双状态动态规划算法(BSDP)及其在水库群补偿调节中的应用[J].人民长江,1988(10):11-16.
- [10] 王浩,王旭,雷晓辉,等.梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J].水利学报,2019,50(1):25-37.
- [11] 李海英,肖舸,张勇传,等.粒基于混合子群算法的梯级水电站优化调度[J].水利学报,2010,41(10):1212-1219.
- [12] 纪昌明,马皓宇,彭杨.面向梯级水库多目标优化调度的进化算法研究[J].水利学报,2020,51(12):1441-1452.
- [13] 张忠波,何晓燕,耿思敏,等.改进的粒子群算法在水库优化调度中应用[J].中国水利水电科学研究院学报,2017,15(5):338-345.
- [14] 贾仁辅,陈守伦,梁伟,等.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.
- [15] 王建群,贾洋洋,肖庆元.狼群算法在水电站水库优化调度中的应用[J].水利水电科技进展,2015,35(3):1-4,65.
- [16] 王文川,雷冠军,邱林,等.群居蜘蛛优化算法在水电站优化调度中的应用及其效能分析[J].水力发电学报,2015,34(10):80-7.
- [17] 梅亚东,董雅洁,杨娜,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.
- [18] 明波,黄强,王义民,等.梯级水库发电优化调度搜索空间缩减法及其应用[J].水力发电学报,2015,34(10):51-59.
- [19] ZIKRI Bayraktar, MUGE Komurcu. Adaptive wind driven optimization[J]. EAI Endorsed Transactions on Serious Games, 2016(8): 124-127.
- [20] 任作琳,田雨波,孙菲艳.具有强开发能力的风驱动优化算法[J].计算机科学,2016,43(1):275-81,305.
- [21] MUGE Komurcu, JEREMY A Bossard, et al. The wind driven optimization and its application in electromagnetics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(5): 2745-2757.
- [22] NARI Yoon, MARY Ann Piette, JUNG Min Han, et al. Optimization of window positions for wind-driven natural ventilation performance[J]. Energies, 2020, 13(10): 2464.
- [23] WANG Kun, PU Yuanyuan, ZHANG Yufeng, et al. Fully automatic measurement of intima-media thickness in ultrasound images of the common carotid artery based on improved otsu's method and adaptive wind driven optimization[J]. Ultrasonic Imaging, 2020, 42(6): 245-260.
- [24] 张鑫,舒志兵,李俊.基于量子风驱动优化算法的机器人路径规划[J].机床与液压,2019,47(17):67-70.
- [25] SHRUTIKA S Sawant, PRABUKUMAR Manoharan. New framework for hyperspectral band selection using modified wind-driven optimization algorithm[J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(20): 67-70.
- [26] 赵臣啸,薛惠锋,王磊,等.基于孤立森林算法的取用水量异常数据检测方法[J].中国水利水电科学研究院学报,2020,18(1):31-39.
- [27] 游进军,刘鼎,梁团豪,等.基于供水统一核算的水利工程生态调度补偿方法及应用[J].中国水利水电科学研究院学报,2020,18(2):86-94.

(下转第250页)

- [13] 中华人民共和国水利部 . 水工混凝土试验规程 : SL 352-2006[S] . 北京 : 中国水利水电出版社 , 2006 .
[14] 中华人民共和国水利部 . 水利水电工程岩石试验规程 : SL 264-2001[S] . 北京 : 中国水利水电出版社 , 2001 .

Experimental study of in-situ shear of cemented sand and gravel rocks layers

JIA Baozhen, JIA Jinsheng, ZHENG Cuiying, LI Shuguang, DING Lianying

(*China Institute of Water Resources and Hydropower Research,*

State Key Laboratory of Simulation and Regulation Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to make full use of engineering slag, both weak weathering material and strong weathering materials are used as dam-building materials In the construction of Xijiang Cemented Material Dam. Interlinear shear behavior of cemented strongly weathered materials is related to the stability of dam against sliding. The in-situ interlinear shear test was carried out to obtain the shear parameters and verify the anti-sliding stability of the dam. In this paper, in-situ shear tests of these two groups of cemented sand and gravel specimens were carried out according to the current code. According to the interlinear shear parameters of the test, the dam is stable after verification and calculation. The results also show that, the shear failure surface of cemented gravel with strong weathering material is mostly mixed shear surface, and the weak weathering material is mostly plane shear. The internal friction angle f' of the strong weathered material cemented sand and gravel is large, and the shear cohesion c' is small. Shear deformation of cemented sand and gravel specimen belongs to brittle material characteristics. The results of this test can be used for reference in the area of thousand-shaped sericite slate and palimpsest tuff.

Keywords: sand and gravel rocks; in-situ shear test; strongly weathered dam materials; thousand-shaped sericite slate; palimpsest tuff

(责任编辑: 祁 伟)

(上接第 243 页)

Application of an improved wind driven optimization algorithm in reservoir operation

GU Qihao¹, ZHANG Shuanghu¹, LIU yin¹, WANG dan^{1, 2}

(1. *Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*

2. *Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

Abstract: Wind-driven algorithm is an emerging global optimization algorithm based on group iterative heuristics. Compared with genetic algorithm and cuckoo algorithm, it has a clear physical background, but the algorithm still cannot avoid the problems of prematurity and slow convergence efficiency. Aiming at prematurity, this paper proposes a perturbation strategy to perturb any element corresponding to the current optimal fitness value, and as the number of iterations increases, the amount of perturbation should gradually decrease. Aiming at the low convergence efficiency, a space compression strategy is proposed, which adopts the method of odd and even phases, and constrains the upper and lower limits of the solution through calculation to ensure that the solution is feasible. The improved wind-driven optimization algorithm is applied to the optimal scheduling of a certain reservoir and compared with the particle swarm optimization algorithm, as well as the standard wind-driven algorithm. The results show that the improved wind-driven optimization algorithm is more reliable and efficient. It can converge to the optimal solution faster and has a larger optimal solution value. It proposes a new solution for the optimization of the reservoir operation model.

Keywords: reservoir; wind driven; disturbance; space compression; optimal operation

(责任编辑: 王学风)