

代金汕, 葛恒军, 阚永庚, 等. 泵站单机组优化调度组合改进粒子群算法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 978-986, 1040. DAI J S, GE H J, KAN Y G, et al. Combination improved particle swarm optimization algorithm for single unit optimal scheduling of pumping station[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 978-986, 1040. (in Chinese)

泵站单机组优化调度组合改进粒子群算法

代金汕¹, 葛恒军², 阚永庚³, 仇锦先¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225100;
3. 江都水利工程管理处, 江苏 扬州 225200)

摘要: 开展泵站节能降耗优化模型算法研究、实现泵站经济运行具有重要的现实意义。动态规划法在泵站优化调度模型求解中较为常用, 针对动态规划法决策变量离散处理对精度的影响, 引入决策变量在可行域内随机生成并不断更新的粒子群算法, 并提出“Sobol 序列优化初始种群+实时调整惯性权重+正余弦替代学习因子”多策略融合的改进方法, 通过 4 种基准函数性能测试, 验证了改进粒子群算法在搜索能力和计算精度上有显著提升。在此基础上, 将改进粒子群算法应用于某大型调水泵站以耗电费用最小为目标的单机组变速优化模型求解中, 得到不同时段的最优决策方案及相应的目标最优值, 并与动态规划法计算结果进行对比, 2 种方法最优决策过程基本一致, 最优目标值精度相当。结果表明: 粒子群算法组合改进策略是可行的, 计算结果是可靠的, 可以作为泵站优化调度模型求解的一种有效方法。

关键词: 粒子群算法; 组合改进策略; 单机组; 变速优化; 动态规划

中图分类号: TV675 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0097

随着泵站工程应用领域的扩大和运行管理复杂程度的提高, 开展泵站机组优化调度研究、实现泵站经济运行已成为一个重要研究领域。我国诸多学者^[1-6]对泵站优化模型构建与求解方法进行了不断探索与研究, 传统的泵站优化调度方法主要包括非线性规划、动态规划、试验选优和大系统优化方法等。其中, 动态规划法在泵站优化调度中运用较多^[7-8], 仇锦先等^[9]在前期研究所建立的泵站单机组变速优化模型求解时也采用了一维动态规划法。在求解过程中通常对决策变量以一定步长进行离散处理, 而离散步长的大小对模型目标最优解的精度有一定程度的影响^[10]。因此, 有必要寻找决策变量在可行域内随机生成并能不断更新的其他算法, 以进一步分析决策变量不同取值方式对优化结果的影响。

随着计算机技术的发展, 现代智能算法为泵站优化模型求解提供了新的途径, 常见的智能算法主要包括遗传(genetic algorithm, GA)算法、粒子群

(particle swarm optimization, PSO)算法、神经网络(back propagation, BP)算法、禁忌搜索(tabu search, TS)算法等。其中, 粒子群算法具有原理相对简单、参数少、编程易实现等优点, 已被国内外学者广泛采用。Afshar 等^[11]将改进 PSO 算法应用于灌溉提水泵站优化模型的求解, 解决了灌溉提水系统的优化设计与运行管理问题; 陶东等^[12]将 PSO 算法应用于某多级提水泵站优化模型的求解, 最终实现了泵站经济运行; 吴远为等^[13]应用混沌理论对 PSO 算法进行改进, 并成功应用于泵站节能降耗优化模型的求解; Jafari-asl 等^[14]在 PSO 算法改进的基础上开发了供水泵站优化调度程序, 提高了水资源利用效率。

然而 PSO 算法也具有局限性: 当目标函数为复杂多峰函数, 可能会提前陷入局部最优解; 而对于复杂多维问题, 其空间搜索能力、收敛速度和精度又会受到参数设置的影响^[15]。因此, 已有学者针对上述不足之处提出了改进措施。Ali 等^[16]将 PSO

收稿日期: 2024-04-30 修回日期: 2024-08-22 网络出版时间: 2024-09-05

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240904.1709.010>

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAB04A03); 江苏省属高校自然科学基金面上项目(11KJB57002); 扬州大学“新世纪人才工程”资助项目

作者简介: 代金汕(1999—), 男, 江西赣州人, 主要从事水利工程规划与优化研究。E-mail: 2719529505@qq.com

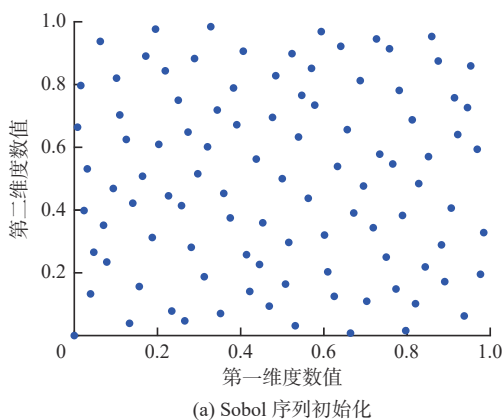
通信作者: 仇锦先(1971—), 男, 江苏盐城人, 副教授, 博士, 主要从事灌排理论与水利规划优化研究。E-mail: qiujx@yzu.edu.cn

与 GA 算法的交叉算子相结合,提出了改进算术交叉的混合粒子群优化算法,并应用于无约束优化模型的求解; Chroua 等^[17]提出了一种非均匀、多种群改进粒子群算法,提高了种群的多样性,具有较高的求解精度;汪涛等^[18]提出了多种群引力 PSO 算法,提高了算法的寻优性能;刘宇等^[19]从初始种群生成和寻优模式等方面对 PSO 算法进行了改进。

为进一步提升基本 PSO 算法的搜索能力与求解精度,避免陷入局部最优解,本文在前人研究的基础上尝试综合考虑粒子群算法中初始种群、惯性权重和学习因子等影响因素,提出多策略融合的一种组合改进方法,并在基准函数测试其有效性的基础上,将其应用于某大型调水泵站单机组变速优化模型求解的计算实例,以进一步验证改进策略的可行性与计算结果的可靠性。

1 粒子群算法组合改进策略与测试

PSO 算法的基本思想是受鸟群群体行为的启发,模拟群体中个体的协同行为,使得整个群体能够在搜索空间中找到最优解。在 PSO 算法中,每一个“个体”被定义为一个“粒子”,所有“粒子”构成了整个“种群”,整个“种群”的行为通过“粒子”之间的信息交流和合作来实现,即速度与位置的更新。PSO 算法的基本公式为



$$v_{li,t+1} = \omega v_{li,t} + c_1 r_1 (p_{best_{li,t}} - x_{li,t}) + c_2 r_2 (g_{best_{li,t}} - x_{li,t}) \quad (1)$$

$$x_{li,t+1} = x_{li,t} + v_{li,t+1} \quad (2)$$

式(1)和(2)中: t 表示迭代次数; $v_{li,t+1}$ 和 $x_{li,t+1}$ 分别表示粒子 l 在迭代 $t+1$ 次后维度 i 上的速度和位置; ω 表示惯性权重; $p_{best_{li,t}}$ 表示粒子 l 在迭代 t 次后维度 i 上的最优位置; $g_{best_{li,t}}$ 表示迭代 t 次后整个种群在维度 i 上的最优位置; c_1 、 c_2 分别表示粒子与种群的学习因子; r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 范围内的随机数。

1.1 粒子群算法组合改进策略

1.1.1 Sobol 序列优化初始种群

基本 PSO 算法通常采用随机方式生成初始种群,但这样得到的初始种群往往分布不均匀,可能出现在某些区域过于稀疏或密集的情况,从而影响算法的全局搜索能力。为了在初始化种群时得到分布更加均匀的种群,采用 Sobol 序列初始化种群, Sobol 序列是一种常见的低差异序列,与传统的伪随机序列相比,它可以产生一系列相互独立且相对均匀分布的点,这些点具有低差异性和高维均匀性^[20]。图 1 为在二维空间中 Sobol 序列初始化和随机方式初始化得到的种群总体分布,2 种方式的种群规模都设置为 100,搜索空间在 $[0,1]$ 区间内。由图 1 可知,通过 Sobol 序列得到的初始种群总体分布相对随机方式更加均匀,对解空间的覆盖范围更加全面,为算法的全局搜索奠定了良好基础^[21]。

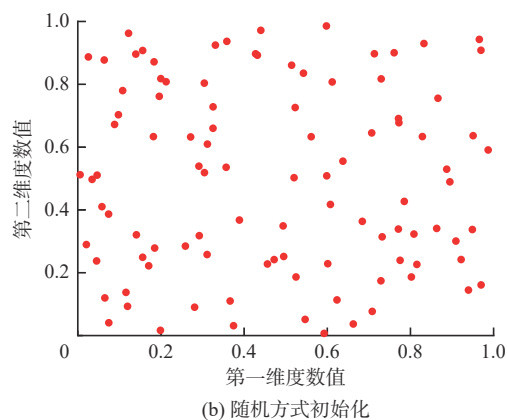


图 1 种群初始化的 2 种方式对比

Fig. 1 Comparison of two ways of population initialization

1.1.2 惯性权重实时非线性递减

惯性权重 ω 是 PSO 算法的重要参数之一,其大小会影响算法在不同阶段的全局探测和局部开发能力。通常希望前期 ω 取值大一些,以便满足全局搜索范围,而后逐渐减小,在后期 ω 取值小一些,从而增强其局部搜索能力。采取一种随迭代次数非线性递减的实时调整惯性权重,前期 ω 较大,而后

逐渐减小,后期较小,可以提升 PSO 算法中粒子前期全局以及后期局部的搜寻能力。 ω 随迭代次数的变化规律如下:

$$\omega = \begin{cases} \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{2} (e^{2t/T-1} - 1) + \frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} & t < T/2 \\ \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{2} (e^{1-2t/T} - 1) + \frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} & t \geq T/2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别表示惯性权重最大、最小取值, 一般情况下 ω_{\max} 可取 0.9, ω_{\min} 可取 0.4^[22]; T 表示程序开始时设置的最大迭代次数; t 表示程序运行中当前的迭代次数。

1.1.3 正余弦因子替代学习因子

学习因子 c_1 、 c_2 也是 PSO 算法的关键参数, 其

$$v_{li,t+1} = \begin{cases} \omega v_{li,t} + r_1 \times \sin r_2 \times (p_{best_{li,t}} - x_{li,t}) + r_1 \times \sin r_2 \times (g_{best_{li,t}} - x_{li,t}) & r_3 < 0.5 \\ \omega v_{li,t} + r_1 \times \cos r_2 \times (p_{best_{li,t}} - x_{li,t}) + r_1 \times \cos r_2 \times (g_{best_{li,t}} - x_{li,t}) & r_3 \geq 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

$$r_1 = 0.4(1 - t/T) \quad (5)$$

式(4)和(5)中: r_1 根据公式(5)确定; r_2 描述了个体移动的方向, $r_2 \in [0, 2\pi]$; r_3 为正弦因子和余弦因子之间变换的概率, $r_3 \in [0, 1]$ 。

引入正余弦因子替代学习因子后, 各粒子可以在个体最佳位置与种群最佳位置之间进行振荡衰减性的搜索移动, 使其可以进行多方位搜索, 增强粒子的搜索能力。同时结合非线性递减惯性权重的实时调整, 实现 PSO 算法在不同阶段搜索能力的

大小影响着算法中粒子 l 在迭代过程向个体最优位置 $p_{best_{li,t}}$ 和种群最优位置 $g_{best_{li,t}}$ 前行的方向与步长。基于上述非线性递减惯性权重的实时调整, 引入 SCA(正弦余弦算法)^[23] 位置更新公式中的正余弦因子来替代学习因子, 此时粒子速度更新公式为

协同提升^[24]。

1.2 改进算法性能测试与分析

为了检验上述组合改进 PSO 算法的性能, 选取 4 个基准函数进行测试(表 1), 运用 Matlab 软件编程, 独立重复运行 30 次; 再根据 30 次计算结果得到相应的最优值、平均值和标准差, 并与基本 PSO 算法进行对比分析。算法性能测试结果见表 2, 各基准函数收敛情况见图 2。

表 1 基准函数

Tab. 1 Benchmarking functions

函数类型	表达式	维度	搜索范围	理论最优值
Sphere函数	$f_1 = \sum_{i=1}^d x_i^2$	30	[-100, 100]	0
Schwefel函数	$f_2 = \sum_{i=1}^d x_i + \prod_{i=1}^d x_i $	30	[-10, 10]	0
Step函数	$f_3 = \sum_{i=1}^d (x_i + 0.5)^2$	30	[-100, 100]	0
Ackley函数	$f_4 = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_i^2} \right) - \exp \left[\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \cos(2\pi x_i) \right] + 20 + e$	30	[-500, 500]	0

表 2 算法性能测试结果

Tab. 2 Algorithm performance test results

函数类型	算法	最优值	平均值	标准差
Sphere函数	基本PSO	21.10	26.20	2.34
	改进PSO	1.85E-09	7.74E-07	2.07E-06
Schwefel函数	基本PSO	19.38	21.82	1.18
	改进PSO	1.19E-05	1.22E-03	2.05E-03
Step函数	基本PSO	20.90	25.60	2.05
	改进PSO	1.10E-09	2.28E-07	3.49E-07
Ackley函数	基本PSO	4.82	5.07	0.11
	改进PSO	1.22E-05	1.08E-03	3.07E-03

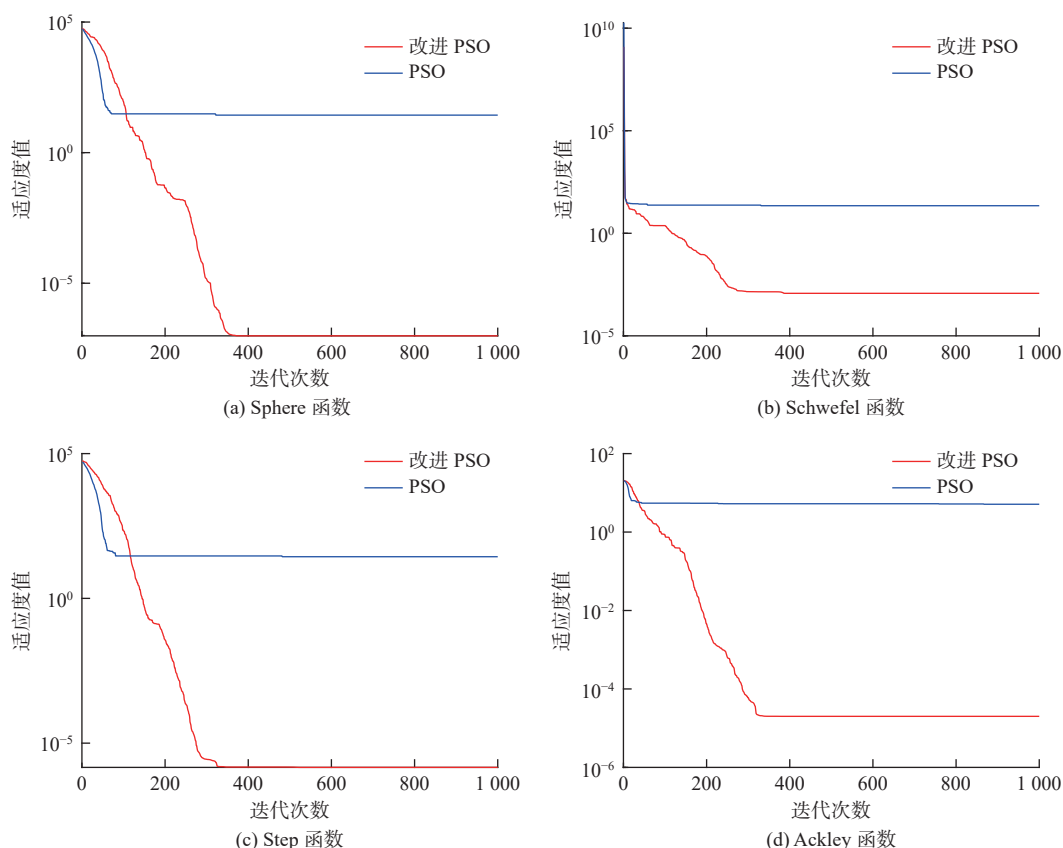


图2 基准函数优化收敛曲线

Fig. 2 Benchmark functions optimization convergence curve

根据算法测试结果与函数收敛情况可知,改进 PSO 算法具有良好的收敛性。在最优值测试中,对于 4 种函数,改进 PSO 算法精度都明显优于基本 PSO 算法;在平均值测试中, Sphere 函数和 Step 函数的寻优精度显著高于基本 PSO 算法, Schwefel 函数和 Ackley 函数的精度也高于基本 PSO 算法;在标准差测试中, Sphere 函数和 Step 函数的精度相比基本 PSO 算法有显著提升, Schwefel 函数和 Ackley 函数的精度也有很大提升。由此可见,对于不同的基准函数,改进 PSO 算法在寻优精度上都有明显提升。

2 实例应用与结果分析

2.1 数学模型构建

以某大型调水水泵站的单机组变速优化调度为例,考虑一天内分时电价及水源水位变化等因素,以泵站单机组变速运行耗电费用最小为目标函数,以提水量、功率等为约束条件,构建多阶段单决策变量非线性优化数学模型^[10]:

目标函数

$$F = \min \sum_{i=1}^{S_N} \frac{\rho g Q_i(n_{i,l}) H_i}{\eta_{z,i}(n_{i,l}) \times \eta_{\text{mot}} \times \eta_{\text{int}} \times \eta_f} \Delta T_i P_i \quad (6)$$

式中: F 表示单机组运行耗电费用,元; i 表示时段, $i=1, 2, \dots, S_N$ (一天内划分的时段总数); $n_{i,l}$ 、 $Q_i(n_{i,l})$ 分别表示第 i 时段第 l 个转速取值(r/min)及相应提水流量(m^3/s); H_i 、 ΔT_i 和 P_i 分别表示第 i 时段的平均扬程(m)、开机时间(h)和分时电价 [元/(kW·h)]; $\eta_{z,i}$ 、 η_{mot} 、 η_{int} 、 η_f 分别表示单机组装置效率、电动机效率、传动效率以及变频装置效率。

约束条件,提水量约束

$$\sum_{i=1}^{S_N} Q_i(n_{i,l}) \Delta T_i \geq W_s \quad (7)$$

式中: W_s 表示单机组运行一天所要求达到的提水总量, m^3 。

功率约束

$$N_i(n_{i,l}) \leq N_e \quad (8)$$

式中: $N_i(n_{i,l})$ 表示单机组第 i 时段实际运行功率, kW; N_e 表示单机组额定功率, kW。

2.2 基本资料说明

水泵型号: 2000ZLQ13.7-7.8。水泵额定转速为 214.3 r/min, 设计叶片角度为 $+2^\circ$ 。

日均扬程及分时电价: 以日均扬程 5.8 m 为例, 各时段扬程及分时电价见表 3。

表 3 各时段平均扬程及分时电价

Tab. 3 Average heads and time-of-use electricity prices of each period

时段划分	17:00—19:00	19:00—21:00	21:00—23:00	23:00—3:00	3:00—7:00	7:00—9:00	9:00—11:00	11:00—14:00	14:00—17:00
时段平均扬程/m	6.06	5.46	5.40	5.82	6.13	5.50	5.36	5.69	6.09
分时电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.978	0.978	0.587	0.276	0.276	0.978	0.978	0.587	0.587

不同转速相应流量与效率: 在叶片安放角度不变的条件下, 根据水泵比例律, 可推算出一定范围内不同转速 n_i 、装置扬程 H_i 时相对应的流量 Q_i 和装置效率 η_{zi} 。

运行负荷界定: 若单机组在日均扬程 5.8 m 情况下定角(+2°)、恒速(214.3 r/min)连续运行 24 h 产生的提水量为 W , 采用变速优化运行 24 h 产生的提水量为 W_d : 当 $W_d \geq W$ 时, 单机组为相应扬程下 100% 负荷(满负荷)运行; 当 $W_d \geq 80\% W$ 时, 单机组为 80% 负荷运行; 当 $W_d \geq 60\% W$ 时, 单机组为 60% 负荷运行。

2.3 模型求解与结果

采用上述改进 PSO 算法, 通过 Matlab 软件编程计算(程序流程见图 3), 得到在日均扬程 5.8 m、不同运行负荷情景下的单机组变速优化运行方案, 同时采用基本 PSO 算法、动态规划法(DP)对模型进行求解, 以便对比分析。限于篇幅, 这里以单机组 80% 运行负荷情景为例, 给出 3 种方法(基本 PSO、改进 PSO 和动态规划法)计算所得到的单机组变速优化决策过程或开机方案, 见表 4。

2.4 结果比较与分析

基本 PSO 与改进 PSO 2 种算法结果比较与分析:

单机组在不同负荷变速优化运行情况下, 2 种算法的提水量、费用及相应的单位提水费用(即耗电费用与提水量之比)见表 5 和图 4。由图 4(a)可知, 单机组 100% 负荷运行时 2 种算法的提水费用相差 57 元(比例为 0.3%), 60% 负荷运行时相差 1 056 元(比例为 11.4%); 由表 5 可知, 100% 负荷运行时两种算法的单位提水费用偏差率为-0.34%, 60% 负荷运行时单位提水费用偏差率达到了-11.93%。

由此可见, 不同运行负荷情况下, 单机组变速优化运行的提水费用、单位提水费用均是改进 PSO 算法优于基本 PSO 算法, 且运行负荷越低, 优化空间越大, 最优目标值偏差也越大, 即 PSO 算法组合改进效果越显著。

改进 PSO 与动态规划法 2 种方法结果比较与分析:

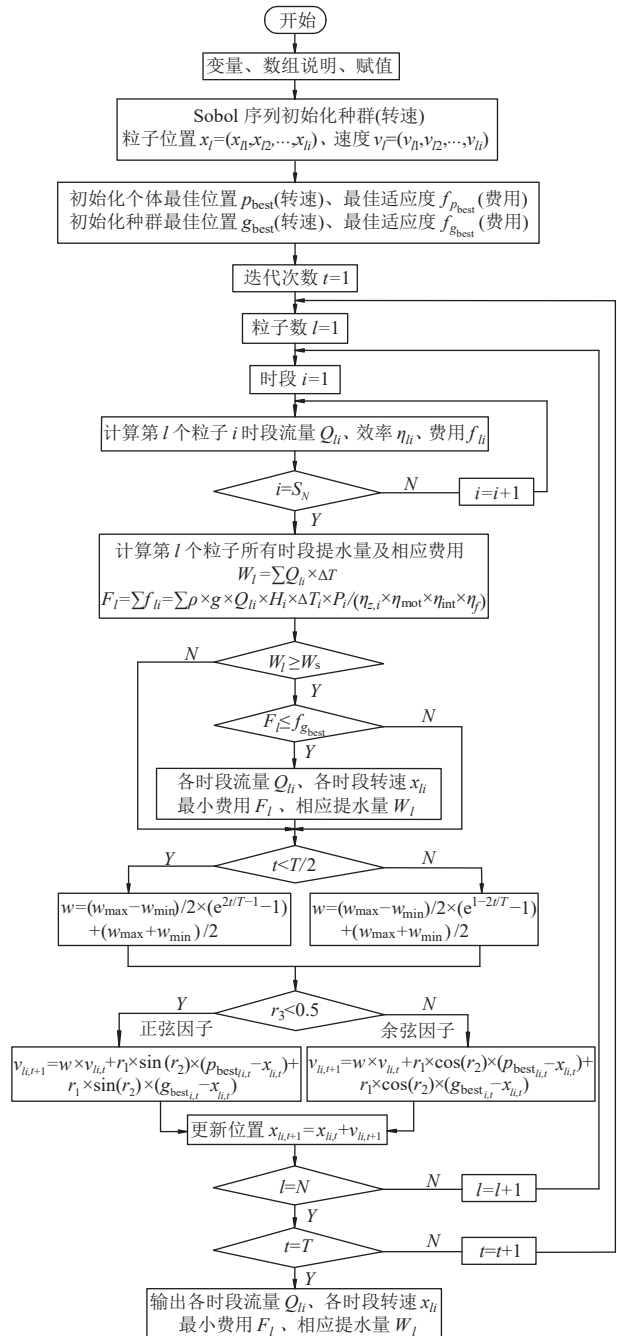


图 3 单机组变速优化改进粒子群算法流程

Fig. 3 Flow diagram of improved PSO algorithm for single unit variable speed optimization

决策过程对比分析。单机组在不同负荷变速优化运行情况下, 2 种方法的决策过程与各时段电价、扬程对应关系见图 5。由图 5(a)可知, 当单机组低负荷运行, 决策过程主要受分时电价影响, 一般高

电价机组不开机;由图 5(b)、(c)可知,当分时电价和扬程均较低时,单机组开机且提水量相对较多,而当电价较低、扬程较高时,一般机组也需开机,但此时提水量相对较少;由图 5(c)还可以看出,当单机组满负荷运行时,为了满足提水量要求,即使电价、扬程较高,一般机组也需开机运行。

表 4 单机组变速优化运行计算结果(3 种方法)

Tab. 4 Calculation results of variable speed optimization operation of single unit (three methods)

方法	时段序号	扬程/m	转速/($r \cdot \min^{-1}$)	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	水量/ $万 m^3$	耗电费用/元
基本PSO	1	6.06	不开机	0	0	0
	2	5.46	180.0	11.86	8.54	1 840.30
	3	5.40	188.7	13.34	9.61	1 209.84
	4	5.82	223.9	17.66	25.43	1 720.25
	5	6.13	224.0	17.39	25.04	1 752.26
	6	5.50	181.4	12.03	8.67	1 876.41
	7	5.36	180.5	12.12	8.73	1 833.94
	8	5.69	194.6	13.83	14.94	1 982.50
	9	6.09	187.6	12.07	13.04	1 900.52
小计					114.00	14 116.02
改进PSO	1	6.06	不开机	0	0	0
	2	5.46	185.9	12.84	9.24	1 965.31
	3	5.40	209.1	16.17	11.64	1 520.43
	4	5.82	223.8	17.65	25.42	1 718.37
	5	6.13	224.0	17.39	25.04	1 751.83
	6	5.50	不开机	0	0	0
	7	5.36	180.0	12.03	8.66	1 823.09
	8	5.69	209.9	15.99	17.27	2 346.46
	9	6.09	210.3	15.61	16.86	2 415.39
小计					114.13	13 540.88
动态规划法	1	6.06	不开机	0	0	0
	2	5.46	185	12.69	9.14	1 944.26
	3	5.40	211	16.42	11.82	1 552.85
	4	5.82	224	17.68	25.46	1 723.01
	5	6.13	224	17.39	25.04	1 753.19
	6	5.50	不开机	0	0	0
	7	5.36	185	12.84	9.24	1 928.66
	8	5.69	205	15.32	16.55	2 222.79
	9	6.09	211	15.70	16.96	2 431.55
小计					114.21	13 556.31

表 5 2 种方法单位提水费用比较分析(基本 PSO 与改进 PSO)

Tab. 5 Comparative analysis of unit water-pumping cost (basic PSO and improved PSO)

运行负荷/%	基本PSO			改进PSO			单位费用 偏差率/%
	水量/ $万 m^3$	费用/万元	单位费用/[$元 \cdot (万 m^3)^{-1}$]	水量/ $万 m^3$	费用/万元	单位费用/[$元 \cdot (万 m^3)^{-1}$]	
100	142.01	1.98	139.43	142.50	1.98	138.95	-0.34
80	114.00	1.41	123.68	114.13	1.35	118.29	-4.36
60	85.00	0.93	109.41	85.10	0.82	96.36	-11.93

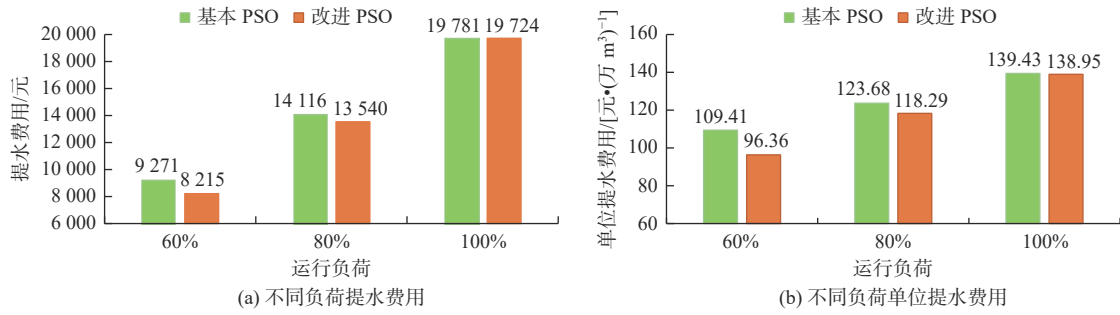


图 4 2 种算法提水费用及单位提水费用对比(基本 PSO 与改进 PSO)

Fig. 4 Comparison of water-pumping cost and unit water-pumping cost between two algorithms (basic PSO and improved PSO)

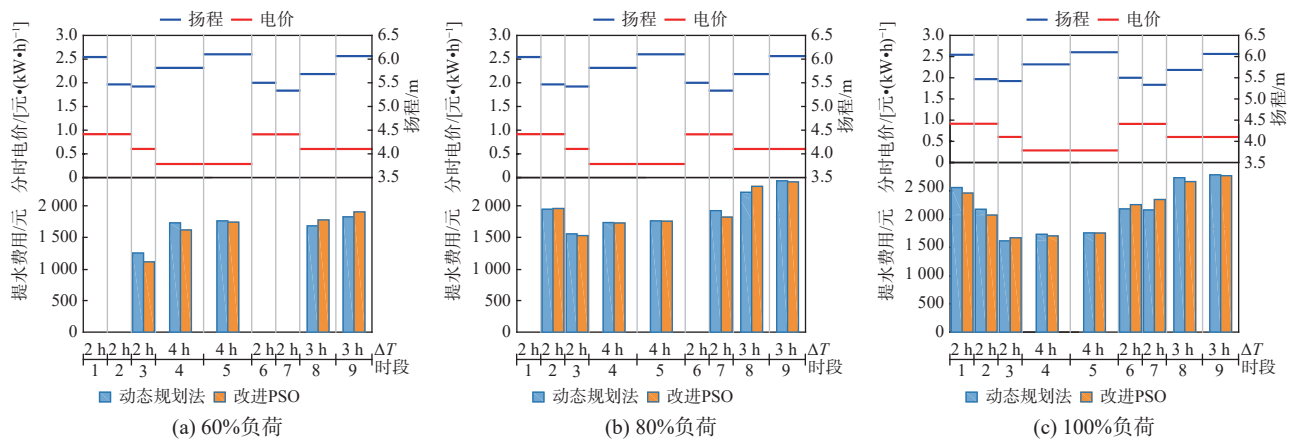


图 5 2 种方法决策过程与各时段电价及扬程对应关系(动态规划法与改进 PSO)

Fig. 5 Corresponding relation between the decision-making process of two methods and the electricity price and head of each period (DP and improved PSO)

因此, 总体来看, 2 种计算方法所得到的优化决策结果基本一致, 即: 单机组在变速优化运行过程中, 一般在电价、扬程相对较高时不开机, 即使开机其转速一般取值较小, 提水量也相对较少; 而在电价、扬程相对较低时开机运行, 且转速一般取较大

值, 提水量也相对较多。从不同运行负荷来看, 单机组变速优化决策过程受分时电价影响较大。

单位提水费用对比分析。由表 6 可知, 单机组在 3 种不同运行负荷情景下, 2 种方法的单位提水费用均非常接近, 偏差率绝对值均不超过 0.07%。

表 6 2 种方法单位提水费用比较分析(动态规划法与改进 PSO)

Tab. 6 Comparative analysis of unit water-pumping cost (DP & improved PSO)

运行负荷/%	动态规划法			改进 PSO			单位费用偏差率/%
	水量/万 m ³	费用/万元	单位费用/[元·(万 m ³) ⁻¹]	水量/万 m ³	费用/万元	单位费用/[元·(万 m ³) ⁻¹]	
100	142.59	1.98	138.86	142.50	1.98	138.95	+0.06
80	114.21	1.35	118.20	114.13	1.35	118.29	+0.07
60	85.12	0.82	96.33	85.10	0.82	96.36	+0.03

3 结论

研究提出了基本 PSO 算法的一种组合改进策略, 即粒子群初始化时引入了 Sobol 序列, 使初始种群总体分布更加均匀, 为全局搜索奠定了基础; 采用了一种随迭代次数可以实时调整的非线性递减惯性权重, 提高了算法在不同阶段的搜索能力; 引入了正余弦因子替代学习因子, 结合非线性递减的

惯性权重, 实现了粒子群算法在不同阶段搜索能力的协同提升, 提高了算法的计算精度。通过 4 种基准函数性能测试, 并与基本 PSO 算法进行比较, 验证了 PSO 算法多策略融合改进的有效性。

以某大型泵站单机组变速优化调度模型为例, 分别运用基本 PSO 算法、改进 PSO 算法和动态规划法对模型求解。结果表明, 相对于基本 PSO 算法,

改进 PSO 算法的多策略融合改进效果显著(60% 负荷运行时提水费用降低了 11.4%, 单位提水费用降低了 11.9%); 改进 PSO 算法和动态规划法所得到的开机方案或决策过程基本一致, 单位提水费用偏差率小于 0.1%。由此可见, 本文提出的粒子群算法多策略融合改进方法是可行与有效的, 求解结果也是可靠的。因此, 多策略融合改进的 PSO 算法可以作为泵站单机组变速优化模型求解的一种行之有效的方法。

参考文献:

- [1] 高玉琴, 杜承霖, 张泽宇, 等. 基于正交试验法的平原圩区排涝泵站优化调度 [J]. *水利水电科技进展*, 2022, 40(6): 45-53. DOI: [10.3880/j.issn.1006-7647.2020.06.009](https://doi.org/10.3880/j.issn.1006-7647.2020.06.009).
- [2] 王辰昊, 高强, 毛梦娜, 等. 并联泵组的多目标控制策略 [J]. *人民长江*, 2019, 50(12): 198-203. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.12.036](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.12.036).
- [3] 朱博文, 龚懿, 陈再扬, 等. 基于 Pareto 最优解的跨流域调水泵站多目标优化运行研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(2): 131-139. DOI: [10.13522/j.cnki.ggps.2021359](https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2021359).
- [4] 何彬浩, 傅志敏, 吴巍, 等. 基于改进遗传算法与动态规划的输水泵站日优化调度 [J]. *水电能源科学*, 2023, 41(2): 128-132. DOI: [10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220581](https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220581).
- [5] 吴怡, 李智, 王京晶, 等. 梯级泵站输水系统旬优化调度及经济运行研究 [J]. *人民黄河*, 2018, 40(5): 144-147. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2018.05.031](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2018.05.031).
- [6] 孙天野, 王忠静, 祝宝山. 盐环定扬黄灌区五泵站运行优化研究 [J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2024, 22(1): 97-107. DOI: [10.13244/j.cnki.ji-whr.20230046](https://doi.org/10.13244/j.cnki.ji-whr.20230046).
- [7] 郑和震, 张召, 吴辉明, 等. 梯级泵站输水系统日优化调度及经济运行研究 [J]. *水利学报*, 2016, 47(12): 1558-1565. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20151350](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20151350).
- [8] 程吉林, 张礼华, 张仁田, 等. 泵站单机组变速运行优化方法研究 [J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3): 72-76. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.015).
- [9] 仇锦先, 程吉林, 罗金耀, 等. 江都站不同型号机组变速优化运行效果分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(4): 32-36. DOI: [10.13522/j.cnki.ggps.2009.04.004](https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2009.04.004).
- [10] 仇锦先, 张仁田, 张礼华. 不同转速离散规则的单机组变速优化影响规律研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(6): 93-97. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbqjk.2014.06.021](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbqjk.2014.06.021).
- [11] AFSHAR M, RAJABPOUR R. Application of local and global particle swarm optimization algorithms to optimal design and operation of irrigation pumping systems [J]. *Irrigation and Drainage*, 2009, 58(3): 321-331. DOI: [10.1002/ird.412](https://doi.org/10.1002/ird.412).
- [12] 陶东, 李娜, 肖若富, 等. 多级提水泵站优化调度研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2020(5): 123-127.
- [13] 吴远为, 梁兴, 刘志勇, 等. 基于改进粒子群算法的排涝泵站优化调度分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2020(1): 185-187.
- [14] JAFARI-ASL J, AZIZYAN G, MONFARED S H, et al. An enhanced binary dragonfly algorithm based on a V-shaped transfer function for optimization of pump scheduling program in water supply systems (case study of Iran) [J]. *Engineer Failure Analysis*, 2021(123): 105323. DOI: [10.1016/J.ENGFAILANA.2021.105323](https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANA.2021.105323).
- [15] 刘玉敏, 高岩松. 一种改进的粒子群优化算法及其算法测试 [J]. *数学的实践与认识*, 2019, 49(9): 237-247.
- [16] ALI A, TAWHID M. Hybrid particle swarm optimization with a modified arithmetical crossover for solving unconstrained optimization problems [J]. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 2015, 53(3): 125-141. DOI: [10.3138/infor.53.3.125](https://doi.org/10.3138/infor.53.3.125).
- [17] CHROUTA J, FETHI F, ZAAFOURI A. A modified multi-swarm particle swarm optimization algorithm using an adaptive factor selection strategy [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 202101423312211029509. DOI: [10.1177/01423312211029509](https://doi.org/10.1177/01423312211029509).
- [18] 汪涛, 徐杨, 刘亚新, 等. 基于多种群引力粒子群算法的金沙江下游: 三峡梯级水库群优化调度 [J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(12): 30-36. DOI: [10.11988/ckyyb.20221439](https://doi.org/10.11988/ckyyb.20221439).
- [19] 刘宇, 许新宇, 李晓澜, 等. 水库发电优化调度改进粒子群算法应用 [J]. *水力发电*, 2024, 50(1): 53-57.
- [20] 刘晓航, 贺金川, 郑山锁, 等. 基于正余弦算法的文本特征选择 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(9): 119-125. DOI: [10.13245/j.hust.200921](https://doi.org/10.13245/j.hust.200921).
- [21] 何庆, 罗仕杭. 混合改进策略的黑猩猩优化算法及其机械应用 [J]. *控制与决策*, 2023, 38(2): 354-364. DOI: [10.13195/j.kzyjc.2021.1108](https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1108).
- [22] 付强, 戴长雷, 王斌, 等. 水资源系统分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

- [23] MIRJALILI S. SCA: A sine cosine algorithm for solving optimization problems[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 96(3): 120-133. DOI: [10.1016/j.knsys.2015.12.022](https://doi.org/10.1016/j.knsys.2015.12.022).
- [24] 徐福强, 邹德旋, 李灿, 等. 引入 Circle 映射和正弦余弦因子的改进粒子群算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(17): 80-90. DOI: [10.3778/j.issn.1002-8331.2211-0290](https://doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.2211-0290).

Combination improved particle swarm optimization algorithm for single unit optimal scheduling of pumping station

DAI Jinshan¹, GE Hengjun², KAN Yonggeng³, QIU Jinxian¹

(1. *College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*; 2. *Yangzhou Survey Design Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225100, China*; 3. *Jiangdu Water Conservancy Project Bureau, Yangzhou 225200, China*)

Abstract: With the continuous increase of the application scale of pumping station engineering and the improvement of the complexity of operation and management, it has become an important research field to carry out the optimal scheduling of pumping station units and realize economic operation. Many scholars in China explore and study the construction and solution methods of pumping station optimization model. The traditional pumping station optimization scheduling methods mainly include nonlinear programming, dynamic programming, experimental optimization and large-scale system optimization methods. Among them, the dynamic programming method is widely used in the optimal scheduling of pumping stations. In the solution process, the decision variables are usually discretized with a certain step size, and the size of the discrete step size has a certain degree of influence on the accuracy of the optimal solution of the model target. Therefore, this paper attempts to find a particle swarm optimization algorithm that decision variables are randomly generated in the feasible region and can be continuously updated to further discuss the influence of different value methods of decision variables on the optimization results.

According to the shortcomings of particle swarm optimization algorithm, which is easy to fall into local optimal solution and low precision, a combined improvement method of multi-strategy fusion of "Sobol sequence optimization initial population & real-time adjustment of inertia weight & sine and cosine substitution learning factor" was proposed. (1) Sobol sequence was applied to initialize the population, which made the initial population distribution more uniform and laid a good foundation for the global search of the algorithm. (2) A real-time nonlinear decreasing adjustment of inertia weight with number of iterations was adopted to improve the search ability of the algorithm at different stages. (3) The sine-cosine factor in the position update formula of SCA (sine-cosine algorithm) was introduced to replace the learning factor. Each particle could search and move between the best position of the individual and the best position of the population, so that it could carry out multi-directional search and enhance its search ability. At the same time, combined with the real-time nonlinear decreasing adjustment of inertia weight, the collaborative improvement of search ability of particle swarm optimization algorithm was realized in different stages.

Through the performance test of four benchmark functions, it was verified that the improved particle swarm optimization algorithm had a significant improvement in search ability and accuracy compared with the basic particle swarm algorithm. On this basis, the improved particle swarm optimization algorithm was applied to the solution of the single unit variable speed optimization model with the minimum power consumption cost as objective function in a large-scale pump station. The optimal decision-making scheme and the corresponding optimal objective value were obtained, then compared with the calculation results of the dynamic programming method and basic PSO algorithm. The results showed that: (1) Compared with the basic PSO algorithm, the multi-strategy fusion improvement effect of the improved PSO algorithm is more significant (the water-pumping cost is reduced by 11.4 % at 60 % load operation, and the unit water-pumping cost is reduced by 11.9 %). (2) The optimal decision-making process of the two methods (improved PSO algorithm and dynamic programming method) was basically consistent, that was, in the process of variable speed operation of single unit, the unit was generally

(下转第 1040 页)