

康赫然, 张天闻, 邢敬舒, 等. 基于粒子群算法的发电机启停调度快速优化方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 436-440.

KANG Heran, ZHANG Tianwen, XING Jingshu, et al. Generator start-stop scheduling optimization method based on particle swarm algorithm[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 436-440.

基于粒子群算法的发电机启停调度快速优化方法

康赫然¹, 张天闻¹, 邢敬舒¹, 霍启迪², 胡文波¹, 王青², 高雯曼²

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司经济技术研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 针对目前发电机启停调度难以适应新能源和负荷快速变化的问题, 在常用的调度方案基础上, 提出了一种以经济效益为目标, 以系统安全稳定为约束的发电机启停优化调度模型, 并引入粒子群算法, 通过对模型进行线性化处理以减少求解所需时间, 提高了求解效率。通过 IEEE-30 节点算例对提出的方法进行仿真验证, 提出的发电机启停调度优化方法准确度和效率高。相比于目前发电机启停调度方法, 该方法误差在 5% 以内, 计算时间能够节省 50% 以上。

关键词: 粒子群算法; 发电机启停顺序; 潮流优化调度; 直流法潮流计算; 运行成本

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S1.067

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S1-0436-05

Generator start-stop scheduling optimization method based on particle swarm algorithm

KANG Heran¹, ZHANG Tianwen¹, XING Jingshu¹, HUO Qidi², HU Wenbo¹, WANG Qing², GAO Wenman²

(1. State Grid East Inner Mongolia Economic Research Institute, Huhhot 010020, Inner Mongolia, China;

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: In order to solve the problem of difficulty in adapting to renewable energy and rapid load changes in generator start-stop scheduling, a generator start-stop optimization scheduling model with economic benefits as the goal and system safety and stability as the constraint is proposed on the basis of commonly used scheduling schemes. Besides, the particle swarm algorithm is introduced to linearize the model to reduce the required solving time and improve the solving efficiency. The proposed method was simulated and verified by IEEE-30 node system under the condition that the system hot standby ratio was 60%, respectively. The proposed generator start-stop scheduling optimization method has high accuracy and efficiency. Compared with the current generator start-stop scheduling method, the method proposed has an error of less than 5% and can save more than 50% of calculation time.

Keywords: particle swarm arithmetic; generator start-stop sequence; tide optimization scheduling; dc power flow calculation; operating costs

收稿日期: 2024-08-01

基金项目: 国网内蒙古东部电力有限公司科技研发项目(526606230005); 国家自然科学基金项目(U22B20109)

作者简介: 康赫然(1989—), 男, 工程师, 博士, 主要从事电力系统规划研究。E-mail: 617938593@qq.com

通信作者: 霍启迪(1991—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统分析与控制研究。E-mail: huoqidi91@163.com

0 引言

随着我国电力市场的快速发展和电网技术的进步,截至2023年,中国的总装机电力容量已达到约29亿kW,电力系统结构变得日益复杂且规模庞大^[1]。在此基础上,新兴的可再生能源如风电和光伏的大规模接入进一步增加了系统的复杂性。这种快速变化的能源结构对新型电力系统的调度提出了新的挑战,尤其是在发电机的启停调度优化方面。发电机启停调度不仅需要考虑经济效益,还要确保系统的安全和稳定,这对提高电网的运行效率和响应市场需求具有至关重要的作用。因此,设计高效且可靠的发电机启停调度优化方法,成为了当前电力系统研究的重点之一。

杨硕等^[2]利用海鸥算法模拟海鸥的迁徙行为,对综合能源系统进行规划,优化不同能源的耦合和配置,增强系统的经济性和环保性。田程等^[3-4]基于机组的最小平均煤耗成本,构建了一个动态经济调度模型,通过混合整数线性规划解决机组的最优调度问题。李健等^[5]提出了一个电热综合能源系统优化调度模型,考虑蓄热罐备用效益,以适应风电波动性并提高新能源消纳。赵海颐等^[6]采用分支界定法研究发电机启停机分配问题,提高了发电机使用效率,降低成本。章良利等^[7]分析了燃煤机组深度调峰下的低负荷和启停两班制调峰运行方式的经济性,为燃煤机组调峰运行提供经济优化。

对于机组组合的解决算法可归为启发类、数学优化类和智能优化类。启发类主要根据优先级先后顺序对机组进行启停,其优点是节省计算资源,但不一定能够得到最优解和可行解。数学规划类求解可能出现维数灾问题,速度慢,计算资源需求大。相比于启发类和数学优化类算法,智能优化类算法利用各种人工智能技术进行求解,具有随机全局优化性能。特别是粒子群算法具有收敛速度快、参数少、算法简单易实现的优点,对高维度优化问题比遗传算法更快收敛于最优解^[8]。

目前发电机启停调度方法存在计算周期长,难以适应新能源和负荷快速变化的问题,限制了它们在实际调度中的应用。本文在常用的调度方案基础上,以经济效益为目标,以系统安全稳定为约束建立了发电机启停优化调度模型,并引入粒子群算法,通过对模型进行线性化处理以减少求解所需时间,提高求解效率。通过IEEE-30节点系统的仿真对本文所提方法的有效性进行了验证。

1 发电机启停调度优化模型

1.1 优先级目标函数

为确保模型的严谨性,在对发电机进行启停调度优化时,考虑各机组的煤耗成本、启动成本、关停成本,则目标函数即为最小化成本 Φ 为

$$\Phi = \min \sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^T C_i^f(P_{i,t}) + C_i^U + C_i^D \right) \quad (1)$$

式中, $P_{i,t}$ 为机组*i*在时段*t*的出力; C_i^f 为单位*i*的煤炭消耗量,是单元输出功率的函数; C_i^U 为单位*i*的启动费用; C_i^D 为单元*i*停运费用; N 为网络所含发电机(组)数。

机组的煤耗成本采用机组出力的二次函数模型为

$$c_i(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (2)$$

式中, a_i 、 b_i 、 c_i 分别为机组*i*的二次煤耗系数、线性煤耗系数、恒定煤耗系数。

1.2 等式约束条件

等式约束最优模式下,受系统电源均衡限制,即电力系统在任何时刻产出的有功功率一等于该时刻总消耗的有功功率,计算公式如下

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} = \sum_{d=1}^{N_L} P_{d,t} \quad (3)$$

式中, $P_{d,t}$ 为节点*d*早时段*t*时的负荷需求; N_L 为网络节点数。

1.3 不等式约束条件

(1)热备用约束。根据电力系统安全运行规范,通常情况下系统发电机组在确保负荷供电的同时,应预留出不小于15~20%的热备用功率,即

$$\sum_{i=1}^N (u_{i,t} P_{i,\max} - P_{i,t}) \geq \rho \sum_{d=1}^{N_L} P_{d,t} \quad (4)$$

式中, $u_{i,t}$ 为单位*i*在周期*t*时的起止状态,1标志启动,0标志关停; $P_{i,\max}$ 为单元*i*的最大输出功率极限; ρ 为温储备因子。

(2)机组出力约束。由于任何一台发电机所能发出的功率都是有限的,且由于结构限制以及经济因素的考虑,发电机通常存在一个出力下限,正常运行的发电机要运行在出力下限以上和出力上限以下,即

$$u_{i,t} P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq u_{i,t} P_{i,\max} \quad (5)$$

式中, $P_{i,\min}$ 为机组*i*的最小出力限制。

(3)机组爬坡速率约束。当机组爬坡率绝对值较大时,机组的带载/甩载速度会更快,对机组的功率分配具有更大的潜力,然而,由于设备的设计和机械结构等因素,其爬坡率很难超出某一区间^[9],即

$$-R_d \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq R_u \quad (6)$$

式中, R_d 为机组的下爬坡率; R_u 为机组的上爬坡率。

(4) 机组启停时间约束。各发电机组受机械惯性及机械强度限制, 无论启动或停止都需要一定时间, 其最小关停时间与最小开机时间的约束为

$$\sum_{k=t}^{t+TS-1} (1 - u_{i,k}) \geq TS(u_{i,t-1} - u_{i,t}) \quad (7)$$

$$\sum_{k=t}^{t+TO-1} u_{i,k} \geq TO(u_{i,t} - u_{i,t-1}) \quad (8)$$

式中, TS 为单元最短关闭时间; TO 为单元最短启动时间。

(5) 启停费用约束。由于机组在切换输出状态时, 需要附加的能源支持, 从而导致启动和停止成本增加, 其约束为

$$\begin{cases} C_{i,t}^U \geq H_i (u_{i,t} - u_{i,t-1}) \\ C_{i,t}^U \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} C_{i,t}^D \geq J_i (u_{i,t-1} - u_{i,t}) \\ C_{i,t}^D \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $C_{i,t}^U$ 为 t 时间段内单元 i 的启动费用; $C_{i,t}^D$ 为机组 i 在时段 t 的关停成本; H_i 为机组 i 的启动成本; J_i 为机组 i 的关停成本。

(6) 潮流安全约束。线路的潮流越限可能会引起频率失稳及电压崩溃事故, 为保证在发电机组启停优化调度中系统能够安全稳定的运行, 对线路的潮流约束为

$$P_{l,\min} \leq P_{l,t} \leq P_{l,\max} \quad (11)$$

式中, $P_{l,\min}$ 、 $P_{l,\max}$ 分别为线路 l 的最小、最大潮流约束, 改约束是双向潮流约束。

当机组启动最小出力 P_{\min} 大于爬坡速率 R , 约束(6)将使得所有关停的机组都无法启动, 因此改写为

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq u_{i,t-1}(R_u - S_{i,u}) + S_{i,u} \quad (12)$$

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq u_{i,t}(R_d - S_{i,d}) + S_{i,d} \quad (13)$$

式中, $S_{i,u}$ 为机组 i 的启动最大升出力; $S_{i,d}$ 为机组 i 的启动最大降出力。

为了简化, 可以将启动最大升力和关停最大下降功率都取为

$$S_{i,u} = S_{i,d} = \frac{1}{2}(P_{i,\min} + P_{i,\max}) \quad (14)$$

计算潮流的转移分布因子, 将公式(11)改写为

$$P_{l,\min} \leq \sum_{i=1}^N G_{l-i} P_{i,t} - \sum_{j=1}^{N_l} G_{l-j} P_{d,t} \leq P_{l,\max} \quad (15)$$

其中 G_{l-i} 描述节点 i 的注入功率对于线路 l 产生的影响。则简化模型的变量为机组 i 在时段 t 分段化部分的第 s 段出力 $p_{i,t,s}$ 和 $u_{i,t}$, 在满足公式(3)—(5), (7)—(15)的约束下, 最小化目标函数(1)。

1.4 模型简化

上节构建的机组组合优化模型, 煤耗成本采用二次函数, 经试验得出, 当系统规模较大时(如节点数超过 1 000), 求解起来将消耗大量时间, 因此可以对原模型进行线性化处理。将煤耗函数分段线性化, 分为 m 段, 将原模型的公式(2)替换, 得到

$$c_i(p_{i,t,s}, u_{i,t}) = \sum_{s=1}^m K_{i,s} p_{i,t,s} + u_{i,t} C_{0,i} \quad (16)$$

式中, $K_{i,s}$ 为在分段线性化后煤用量的每一段的斜率。

$C_{0,i}$ 指示单元开始工作, 在最小输出功率下 $P_{i,\min}$ 开启所需用的煤耗, $p_{i,t,s}$ 为机组分段的出力, 满足以下公式

$$\begin{cases} C_{0,i} = a_i P_{i,\min}^2 + b_i P_{i,\min} + c_i \\ 0 \leq p_{i,t,s} \leq \frac{P_{i,\max} - P_{i,\min}}{m} \\ P_{i,t} = \sum_{s=1}^m p_{i,t,s} + P_{i,\min} \end{cases} \quad (17)$$

2 粒子群寻优算法

2.1 粒子群模型

粒子群算法是从研究鸟类的觅食行为出发, 鸟群通过集体的信息共享使群体找到最优的目的地。粒子群算法中每个质点的位置表示该问题的一个备选方案。每个微粒在空间中的定位质量取决于它在这个问题中的位置的适应度。每个粒子在下一代中的位置取决于它自己的速度向量, 其速度决定了每一次粒子运动的方向与距离。在飞行时, 这颗微粒将记录下曾经到达过的最佳位置 P , 同时, 族群也将更新所抵达的最佳位置 G 。微粒的运动速率是由微粒当前所处的位置、粒子最佳位置、群体最佳位置和速度决定的, 粒子群算法的核心原理描述如下^[9]

$$v_i^d = w v_i^{d-1} + c_1 r_1 (pBest_i^d - x_i^d) + c_2 r_2 (gBest^d - x_i^d) \quad (18)$$

$$x_i^{d+1} = x_i^d + v_i^d \quad (19)$$

式中, i 为粒子编号; d 为循环次数; v_i^d 为第 d 次迭循环时; 第 i 个粒子的速度; x_i^d 为第 d 次迭循环时, 第 i 个粒子的位置; c_1 为粒子的个体学习因子; c_2 为粒子的社会学习因子; w 为速度的惯性权重; $pBest_i^d$ 为到第 d 次迭代为止, 第 i 个粒子经过的最好的位置; $gBest^d$ 为到第 d 次迭代为止, 所以粒子经过的最好的位置。

利用粒子群优化算法, 把各发电机在各时段的启停状态 $u_{i,t}$ 与在各时段的出力 $P_{i,t}$ 看作搜索空间的粒子, 每个粒子都有一个位置属性 x_i 和速度属性 v_i ,

并由适应度函数 $f(t)$ 来追寻最优解, 粒子群优化算法的流程如图 1 所示。

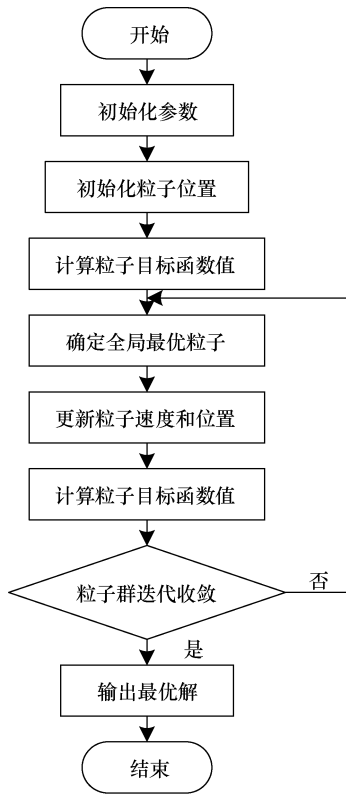


图 1 粒子群优化算法流程

2.2 适应度函数

粒子群算法最核心的部分就是根据适应度函数的最优值不断更新粒子的速度和位置, 为确保发电机启停调度方案具有最佳的经济性, 因此选择电力系统的综合最小化成本为粒子群算法寻优的适应度函数, 即

$$f(P_{i,t}) = \Phi = \min \sum_{i=1}^N \left(\sum_{t=1}^T C_i^f(P_{i,t}) + C_i^u + C_i^d \right) \quad (20)$$

3 案例仿真与数据分析

本文进行仿真分析的案例为 IEEE 的 30 节点标准测试系统。该系统包括 30 个节点、6 组发电机以及 41 个分支, 在模拟试验中, 需要以最小的发电费用(发电费用+起停费用)为目标, 来确定最优的机组

组合。为了提高计算效率, 减少计算量, 在模拟过程中引入了直流法, 所有系统参数均归算为标么值, 无量纲, 各煤耗成本基准值为 100 元/t。仿真得出的结果包括机组组合结果, 即机组各时段启停计划、机组各时段最优出力。

为了验证模拟的有效性, 把粒子群算法的优化效果和 yalmip+ cplex 的优化效果作了比较。机组的经济参数与出力限制如表 1 所列, 仿真采用 24 h 动态负荷, 负荷曲线如图 2 所示。

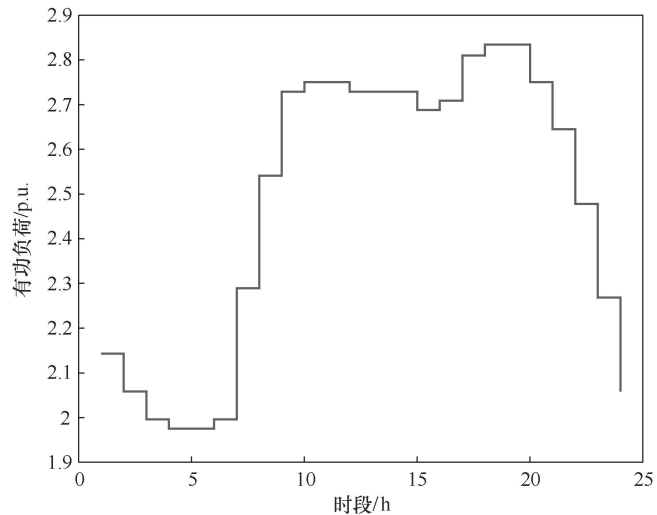
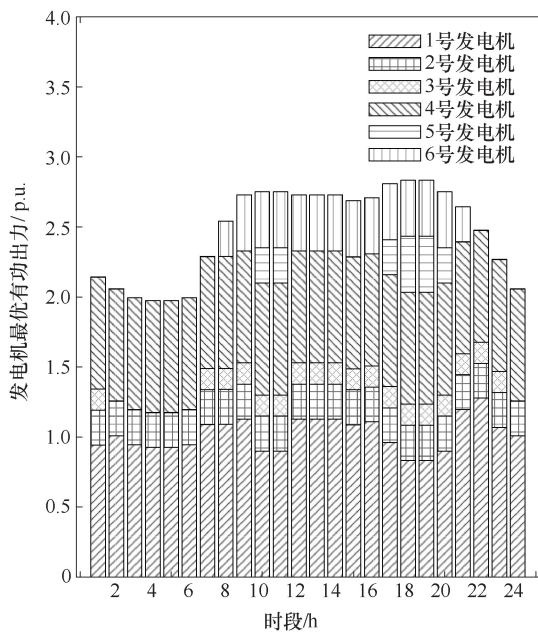


图 2 IEEE-30 节点系统日负荷曲线

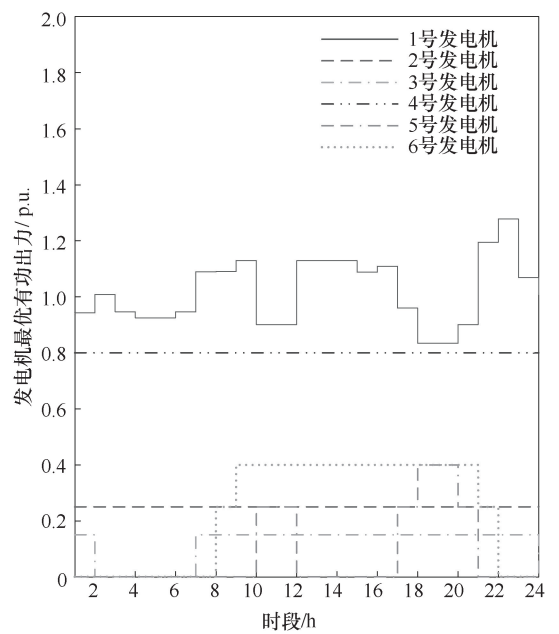
考虑 60% 热备用容量, 模拟在负荷非高峰期及电网在通常情况下的稳定运行状态, 仿真得出的机组启停顺序与出力分布情况如图 3 所示。由图 3 可知, 6 台发电机全部参与了负荷调度。1 号发电机在时段 1~24 h 中不间断出力, 共工作 24 h; 2 号发电机在时段 1~24 h 中不间断出力, 共工作 24 h; 3 号发电机在时段 1 h 时启动, 在时段 2 h 时关停, 在时段 7 h 时再次启动, 在时段 24 h 时再次关停, 共工作 18 h; 4 号发电机在时段 1 h 时启动, 并持续工作, 共工作 24 h; 5 号发电机在时段 10 h 时启动, 在时段 12 h 时关停, 在时段 17 h 时再次启动, 在时段 21 h 时再次关停, 共工作 6 h; 6 号发电机在时段 8 h 时启动, 在时段 22 h 时关停, 共工作 14 h。

表 1 发电机经济参数与出力限制

机组编号	节点号	P_{\max} /p. u.	P_{\min} /p. u.	a /t · (p. u.) ⁻¹	b /t · (p. u.) ⁻¹	c /t · (p. u.) ⁻¹	R_u/R_d /(p. u.) · h ⁻¹	TS/TD /h	H_i /元 · 次 ⁻¹	J_i /元 · 次 ⁻¹
1	1	1.574 9	0.50	0.152 4	38.539 7	786.798 8	0.375	2	39 372.5	19 686.25
2	2	1.000 0	0.25	0.105 8	46.159 1	945.633 2	0.300	2	25 000.0	12 500.00
3	5	0.600 0	0.15	0.028 0	40.396 5	1 049.998	0.150	2	15 000.0	7 500.00
4	8	0.800 0	0.20	0.035 4	38.305 5	1 243.531	0.20	2	20 000.0	10 000.00
5	11	0.400 0	0.10	0.021 1	36.327 8	1 658.57	0.150	2	10 000.0	5 000.00
6	13	0.400 0	0.10	0.017 9	38.270 4	1 356.659	0.150	2	10 000.0	5 000.00



(a) 60%热备用情况下机组启停顺序



(b) 60%热备用情况下的出力分布

图3 60%热备用情况下的机组启停顺序与出力分布

通过对该方案的优化结果进行了分析,得到总费用的最优调度方案,即要尽可能地保持各台机组的高负荷率运转,并尽可能地减少机组的启动和关闭的次数,减少启动和关闭的损耗。在机组的配置次序上,优先考虑综合成本较小、爬坡率较高的机组,这与运行原理是一致的。通过与 Yalmip+ cplex 优化模块的模拟结果进行比较,二者的发电机启停顺序相同,发电机承担负荷相近,相对误差不大于 4.1%,采用 tic、toc 计时,得出二者的计算时间如表 2 所列。由表 2 可知,相较于传统的寻优模型,基于粒子群算法的发电机启停调度优化模型具有更好的运算效率,算法实时性更强。

表2 仿真计算耗时对比

寻优方法	粒子群算法	yalmip+cplex
计算耗时/s	1.29	5.37

4 结论

本文提出了一种基于粒子群算法,以二次综合成本模型为适应度函数,结合电力系统安全稳定运行约束的发电机启停调度优化算法,采用 IEEE-30 节点系统进行了仿真验证。

参考文献:

- [1] 谭辉,孔祥福,曾凡涛. 新能源发电技术研究综述[J]. 山东工业技术, 2014(23): 173-174.
- [2] 杨硕,叶鹏,刘俐利,等. 基于海鸥算法的综合能源系统优化规划研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2022, 18(4): 62-69.
- [3] 田程,张飞,任晓颖,等. 考虑机组最优排序的电力系统动态经济调度[J]. 电工技术, 2022(16): 136-139.
- [4] 刘文礼,马金虎,徐彬,等. 基于煤质与供电煤耗的火电厂配煤优化模型研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(11): 158-163.
- [5] 李健,李雪峰,张娜,等. 计及储热备用效益的电热综合能源系统优化调度模型[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3851-3859.
- [6] 赵海颐,彭泽峰,李丛昫,等. 基于分支界定法的发电机开停机分配问题的研究[J]. 科技与创新, 2019(13): 19-20.
- [7] 章良利,李敏,周晓蒙,等. 深度调峰下燃煤机组运行方式对能耗的影响[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 85-89.
- [8] 于怡然. 基于混合智能算法的电网机组组合优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [9] WANG Zijia, ZHAN Zhihui, YU Weijie, et al. Dynamic group learning distributed particle swarm optimization for large-scale optimization and its application in cloud workflow scheduling [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(6): 2715-2729.

(责任编辑 王璐)