

# 多元宇宙算法及其在电力系统环境经济调度的应用

刘世宇<sup>1,3</sup>, 王孜航<sup>2</sup>, 杨德友<sup>3</sup>

(1. 国网四平电力公司, 吉林 四平 136000; 2. 国网大连供电公司, 辽宁 大连 116001; 3. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘 要:** 提出了一种求解电力系统环境经济调度的新方法, 该方法利用宇宙空间在随机创建过程中高膨胀率的物体随虫洞在空间移动物体的规律, 通过对白洞和黑洞间随机传送物体来实现最优搜索。算法具有运算速度快, 收敛性强, 适用于高维计算等特点。以总燃料费用最低和总污染排放最少为多目标建立环境经济调度模型, 通过 PFF 定价原则对多目标规划问题进行转化。最后, 通过发电厂传统 10 机组和 40 机组算例进行仿真。结果表明: 本文所提算法具有经济性和有效性。

**关 键 词:** 多元宇宙算法; 阀点效应; 环境经济调度; 多目标优化; PFF 定价原则

**中图分类号:** TM731

**文献标识码:** A

目前, 化石能源仍然是发电系统最主要的能量来源。然而, 以煤、石油和天然气为主导的化石能源不仅会排放大量含硫、氮化合物等有害气体, 而且会严重影响生态平衡, 危害社会可持续发展<sup>[1]</sup>。

随着全球变暖趋势增加, 人类更有意识去减少化石能源消耗, 逐渐纳入新能源。“十三五”期间, 我国将大力发展环境治理, 加强环保督察, 推动绿色发展, 推动可再生能源发展。电力行业是大型化石能源消耗产业, 在保持新能源替代进程中, 电力系统环境经济调度 (Economic-Environmental Dispatching, EED) 因其仅对现有调度策略进行规划, 而且可以同时兼顾环境保护政策和经济调度效益等特点, 因此受到了广泛关注<sup>[2]</sup>。

传统经济调度模型具有的高维数、非凸、非线性、多约束等特点, EED 问题在保持原有特点下, 增设环境因素, 形成多目标规划问题。目前, 已有许多研究者求解了传统经济调度问题。文献[3]利用对自适应罚函数中惩罚因子和修补策略的设定, 提出了基于反捕食粒子群算法的 EED 模型, 并解决了传统经济调度中一些问题。文献[4]在传统进化算法前提下, 对算法进行改进, 并对传统经济调度问题进行求解。文献[5]提出社会演化算法, 用基于范式学习与更新的进化寻优思想设计算法结构, 并运用该算法解决了电力系统机组组合问题。通过上述分析, 传统和改进算法都有其优势, 但在解决各类问题时, 容易形成局部最优, 影响调度方案获取。

在权衡环境因素时, 文献[6]通过对实时电价并网时各微源的满意度计算, 来对比分析多目标优化值, 并实现了较好的环境效益。文献[7]在考虑维护成本和环境污染前提下, 通过对不同权重系数的线性加权, 建立多目标规划模型, 并进行求解。文献[8]基于风险评估前提下, 建立多目标经济调度模型, 运用多目标差分进化算法进行求解。本文提出了一种多元宇宙算法 (Multi-Verse Optimizer, MVO), 该算

收稿日期: 2017-08-29

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科技项目 (JJKH20170100KJ)

第一作者: 刘世宇 (1991-), 男, 硕士, 主要研究方向: 含新能源电力系统随机调度方法研究

通讯作者: 王孜航 (1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 电力系统及其自动化

电子邮箱: eeliusy@foxmail.com (刘世宇); voyage327@163.com (王孜航); eedyang@hotmail.com (杨德友)

法运算速度快,较适合多维度优化问题.综合阀点效应和环境影响因素,运用 PPF 定价原则协调多目标因素,建立 EED 模型.最后以 10 机组和 40 机组测试系统为例,证实了本文方法的有效性和经济性.

## 1 环境经济调度数学模型

### 1.1 目标函数

EED 问题的目标函数应考虑三方面因素,传统火力机组总燃料成本,发电机阀点效应成本和发电过程中所产生的含硫、氮化合物的污染气体排放量.

(1) 总燃料成本. 常规发电机组发电过程中所产生的燃料成本符合二次方程关系,其煤耗特性公式如下:

$$f_G(P_i) = \sum_{i=1}^N a_i + b_i P_i + c_i P_i^2, \quad (1)$$

式中:  $f_G(P_i)$  为第  $i$  台发电机的燃料成本;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为所对应的煤耗特性系数.

在实际发电系统中,汽轮机进气阀突然开启会产生一种“拔丝现象”,产生与煤耗特性相似的脉动效果,即阀点效应,表示为

$$f_G(P_i) = |d_i \sin(f_i(P_{i\min} - P_i))|. \quad (2)$$

式中:  $f_G(P_i)$  为第  $i$  台发电机的阀点效应成本;  $d_i$ 、 $f_i$  为所对应的阀点费用系数.

综上所述,传统环境经济调度总燃料成本为

$$F = f_G(P_i) + f_G(P_i) = \sum_{i=1}^N a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + |d_i \sin(f_i(P_{i\min} - P_i))|. \quad (3)$$

(2) 总污染排放. 常规发电厂烟囱中滚滚浓烟是化石能源在发电过程中产生的大量含硫、氮化合物,这些物质对环境造成了恶劣影响. 其排放特性曲线公式如下:

$$E = E(P_i) = \sum_{i=1}^N \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 + \eta_i \exp(\delta_i P_i), \quad (4)$$

式中:  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\gamma_i$ 、 $\eta_i$ 、 $\delta_i$  为第  $i$  台发电机排放特性系数.

### 1.2 约束条件

(1) 功率平衡约束. 发电机组需始终满足系统总出力、总网损与负荷的动态平衡. 具体形式可表示为

$$\sum_{i=1}^N P_i - P_d - P_L = 0, \quad (5)$$

式中:  $P_d$  为系统负荷,  $P_L$  为系统总网损,网损可以通过 Kron 公式<sup>[9]</sup> 计算,具体表示为

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^N B_{0i} P_i + B_{00}, \quad (6)$$

式中:  $B_{ij}$ 、 $B_{0i}$ 、 $B_{00}$  为发电系统网损系数.

(2) 出力上、下限约束. 受发电机组自身参数限制,有功出力应满足发电机上下限不平衡约束条件,

表示为

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax}, \quad (7)$$

式中: $P_{imax}$  为火电机组最大出力; $P_{imin}$  为火电机组最小出力.

### 1.3 多目标优化问题

计及阀点效应和污染排放的 EED 问题多目标规划的数学模型可以表示为

$$\min[F, E], \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} g(P) = 0, \\ h(P) \leq 0, \end{cases} \quad (9)$$

式中: $g(P)$  为平衡约束条件; $h(P)$  为不平衡约束条件. 污染气体处理价格罚因子 (Price Penalty Factor, PPF) 通过对煤耗特性曲线和污染气体特性关系, 实现对污染气体的处理定价<sup>[10]</sup>, 具体步骤如下:

Step1: 计算每台发电机 PPF 定价原则系数为

$$h_i = \frac{f_i(P_i^{\max})}{E_i(P_i^{\max})} \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad (10)$$

Step2: 将系数  $h_i$  按照从小到大进行排序;

Step3: 根据 Step2 所求顺序, 依次将各台发电机最大出力进行累加, 直到  $\sum P_i^{\max} \geq P_d$  停止求和;

Step4: 此时, 最后一台发电机所对应的系数  $h_i$  即为发电机组在给定负荷的 PPF 定价.

根据 PPF 定价原则, 求解 EED 问题的多目标优化问题可以表示为

$$\min f(P) = F(P) + h(P) \times E(P), \quad (11)$$

式中: $h(P)$  为 PPF 定价原则系数, 此时多目标规划问题被转化为单目标问题.

## 2 多元宇宙算法

多元宇宙算法是 Seyedali Mirjalili 教授于 2015 年底与其团队共同设计的启发式算法<sup>[11]</sup>. 该算法主要借助宇宙在随机创建过程中高膨胀率物体总是趋于低膨胀率的物体, 这种万有引力作用可以使物体转移, 借助相关宇宙学规则, 可以在搜索空间逐渐趋于最优位置.

遍历过程主要分为探索和开采过程, 虫洞可以作为转移物体的媒介, 通过白洞和黑洞交互作用进行搜索空间探测, 本文算法具体操作如下:

假设搜索空间存在宇宙矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \cdots & x_1^d \\ x_2^1 & x_2^2 & \cdots & x_2^d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \cdots & x_n^d \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: $d$  为变量个数; $n$  为宇宙数量(候选解);

$$x_i^j = \begin{cases} x_k^j & r_1 < NI(U_i). \\ x_i^j & r_1 \geq NI(U_i). \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $x_i^j$  为第  $i$  个宇宙的第  $j$  个变量;  $U_i$  为第  $i$  个宇宙;  $NI(U_i)$  为第  $i$  个宇宙的标准膨胀率;  $r_1$  为介于 0 和 1 的随机数;  $x_k^j$  为根据螺旋机制被选中的第  $i$  个宇宙的第  $j$  个变量。

通过式 (13), 依据标准膨胀率大小, 白洞将以螺旋形式搜索, 膨胀率低的物体更易于通过白洞或黑洞输送物体. 同等情况下, 膨胀率更高的物体具有更强拥有白洞的可能性, 膨胀率更低的物体拥有黑洞的可能性更低. 对于最大化问题,  $-NI$  将被改变为  $NI$ . 根据搜索机制, 在排除扰动影响时, 为了使其始终处于探索过程, 每个宇宙将物体通过虫洞随机传送. 白洞传送物体穿过虫洞, 如图 1 所示.

为了提高宇宙利用虫洞提高物体膨胀率的可能性, 假设虫洞隧道总是建立在宇宙和最优宇宙之间. 这种机制可以公式为:

$$x_i^j = \begin{cases} \begin{cases} X_j + TDR \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j) & r_3 < 0.5, \\ X_j - TDR \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j) & r_3 \geq 0.5, \end{cases} & r_2 \geq WEP, \\ x_i^j & r_2 < WEP, \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $X_j$  为目前最优宇宙的第  $j$  个变量,  $WEP$  和  $TDR$  是两个系数;  $ub_j$  为第  $j$  个变量最高值;  $lb_j$  为第  $j$  个变量最低值;  $x_i^j$  为第  $i$  个宇宙的第  $j$  个变量;  $r_2, r_3, r_4$  均为介于 0 和 1 的随机数.

这种机制主要存在两个系数: 虫洞存在可能性 (Wormhole Existence Probability,  $WEP$ ) 和旅程距离速率 (Travelling Distance Rate,  $TDR$ ),  $TDR$  系数用于定义宇宙空间虫洞存在可能性, 同时表示物体在最优宇宙附近通过虫洞进行转换的距离.

$$WEP = \min + l \times \left( \frac{\max - \min}{L} \right), \quad (15)$$

式中:  $\min$  为  $WEP$  最小值 (本文设置为 0.2);  $\max$  为  $WEP$  最大值 (本文设置为 1);  $l$  为当前迭代次数;  $L$  为最大迭代次数.

$$TDR = 1 - \frac{1}{L^p}, \quad (16)$$

式中:  $p$  定义了随迭代次数改变的探测速度,  $p$  值越高, 局部探测速度越快, 用时越短. 两个参数随时间变化曲线图, 如图 2 所示.

在本文算法中, 优化过程起始状态随机创建一些宇宙. 在每次迭代中, 宇宙内具有较高膨胀率的物体趋于通过白洞发送物体, 具有较低膨胀率的物体趋于通过黑洞接受物体. 同时, 独立宇宙通过虫洞随机传送物体, 这种状态将持续进行直到满足终止条件.

目标函数复杂度依赖于迭代次数、宇宙数量、螺旋搜索机制和宇宙分类机制等. 宇宙分类在每次迭代过程中得以完成, 快速分类算法包含最优复杂度  $O(n \log n)$  和最劣复杂度  $O(n^2)$ . 迭代过程中, 宇宙在

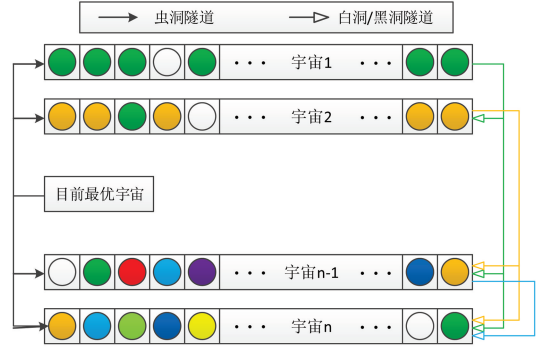


图 1 多元宇宙算法概念模型

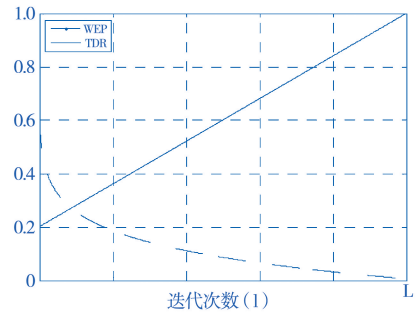


图 2 WEP 和 TDR 参数变化趋势

螺旋选择中得到每个变量. 因此, 计算复杂度过程如下:

$$O(MVO) = O(l(O(Quick\ sort) + n \times d \times (O(roulette\ wheel)))) ,$$

(17)

$$O(MVO) = O(l(n^2 + n \times \log n)) ,$$

(18)

式中: $n$  为宇宙数量; $l$  为当前迭代次数; $d$  为变量个数. 通过上述过程可得全局最优解, 本文算法遍历过程主要分为探索和开采两个阶段, 具体流程如图 3 所示.

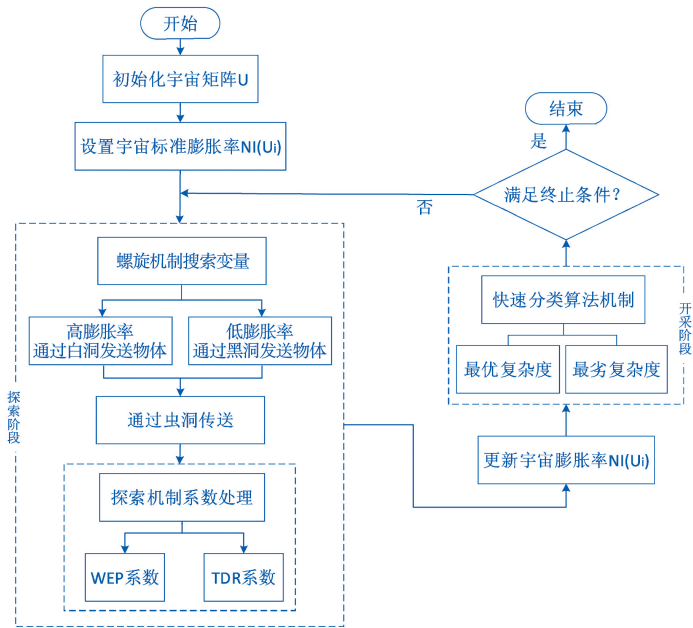


图 3 多元宇宙算法优化流程

### 3 计算机算例结果

为了验证本文算法在求解 EED 问题的有效性, 本文分别以传统 10 机组和 40 机组发电厂为例, 仿真系统测试环境处理器为 Inter(R) Core(TM) i5 CPU, 应用 MATLAB2014b 软件编译.

算例 1: 机组参数见文献[12], 系统总负荷为 2 000 MW. 本文算法粒子数目为 100 个, 迭代次数与文献[12]中方法一致, 均为 200 次. 经计算, PPF 定价为 52.039, 独立运行 100 次, 取最优调度方案及所得总燃料成本和污染排放见表 1.

由表 1 可知, 本文算法求得最优总燃料成本 113 465.207 \$, 低于 MODE、PDE、NSGA-II 和 SPEA2 算法所最优调度方案. 在污染物排放比较中, 本文算法排放 4 110.860lb, 强于 MODE、NSGA-II、SPEA2 和 PDE 算法. 可见本文算法具有较强的搜索能力, 可以实现 EED 问题的调度方案获取.

表 1 不同算法 EED 计算结果( $P_d=2\ 000\ MW$ )

出力/MW	MODE	PDE	NSGA-II	SPEA2	MVO
P1	54.949	54.985	51.952	52.976	53.282
P2	74.582	79.380	67.258	72.813	79.471
P3	79.429	83.984	73.688	78.113	78.943
P4	80.688	86.594	91.355	83.609	86.562
P5	136.855	144.439	134.052	137.243	143.679
P6	172.639	165.776	174.950	172.919	163.083
P7	283.823	283.212	289.435	287.202	292.890
P8	316.341	312.771	314.056	326.402	312.674

(续)表 1

出力/MW	MODE	PDE	NSGA-II	SPEA2	MVO
P9	448.592	440.114	455.698	448.881	431.013
P10	436.429	432.678	431.805	423.903	442.898
网损/MW	84.327	83.933	84.250	84.061	84.495
煤耗/( \$/h)	113 477.616	113 506.503	113 542.839	113 552.726	113 465.207
排放/( 吨/h)	4 124.864	4 111.380	4 150.981	4 126.854	4 110.860

算例 2:以大型火力发电厂为例,用以测试本文算法在求解高维运算的计算能力. 结合实际发电厂投运过程的国家标准,系统总负荷设置为 10 500 MW,40 机组系统机组参数见文献[12],运算粒子设置为 200 个,迭代次数为 300 次,其他算法迭代 300 次,单独运行 100 次,并获取最优出力方案,与文献[12]中其他算法结果对比,如表 2 所示.

经计算,算例 2 中 PPF 定价设置为 0.352. 由表 2 得知,本文算法所得最优调度方案总燃料成本为 125 623.026 \$,强于 MODE、PDE、NSGA-II 和 SPEA2 算法所得方案,在污染排放因素比较中,本文算法明显优于其他算法,可见本文算法的高维运算能力更强.

表 2 不同算法 EED 计算结果( $P_d=10\,500\text{ MW}$ )

出力/MW	MODE	PDE	NSGA-II	SPEA2	MVO
P1	113.530	112.155	113.869	113.969	110.346
P2	114.000	113.943	113.638	114.000	110.980
P3	120.000	120.000	120.000	119.872	119.872
P4	179.802	180.265	180.789	179.928	179.659
P5	96.772	97.000	97.000	97.000	87.890
P6	139.276	140.000	140.000	139.272	140.000
P7	300.000	299.883	300.000	300.000	291.430
P8	298.919	300.000	299.008	298.271	298.600
P9	290.774	289.892	288.889	290.523	288.620
P10	130.903	130.573	131.613	131.483	130.000
P11	244.735	244.100	246.513	244.670	241.453
P12	317.822	318.284	318.875	317.200	318.416
P13	395.385	394.783	395.722	394.736	394.357
P14	394.469	394.219	394.137	394.622	394.342
P15	305.810	305.962	305.578	304.727	394.262
P16	394.823	394.132	394.697	394.729	394.321
P17	487.987	489.304	489.423	487.986	489.254
P18	489.175	489.642	488.270	488.532	490.863
P19	500.527	499.984	500.800	501.168	508.232
P20	457.007	455.416	455.201	456.432	451.470
P21	434.607	435.285	434.664	434.789	480.514
P22	434.531	433.731	434.150	434.394	433.540
P23	444.673	446.250	445.839	445.077	433.077
P24	452.033	451.883	450.751	451.897	433.740
P25	492.783	493.226	491.275	492.395	438.637
P26	436.335	434.749	436.342	436.993	434.678
P27	10.000	11.806	11.246	10.778	10.000
P28	10.390	10.754	10.000	10.296	10.000
P29	12.315	10.305	12.071	13.702	10.000
P30	96.905	97.000	97.000	96.243	97.000
P31	189.773	190.000	189.483	190.000	184.919
P32	174.232	175.307	174.797	174.216	171.990



(续)表2

出力/MW	MODE	PDE	NSGA-II	SPEA2	MVO
P33	190.000	190.000	189.285	190.000	190.000
P34	199.651	200.000	200.000	200.000	200.000
P35	199.866	200.000	199.914	200.000	200.000
P36	200.000	200.000	199.507	200.000	200.000
P37	110.000	109.941	108.306	110.000	96.490
P38	109.945	109.882	110.000	109.691	110.000
P39	108.179	108.969	109.790	108.556	110.000
P40	422.063	421.378	421.561	421.852	421.045
总出力/MW	10 500.000	10 500.000	10 500.000	10 500.000	10 500.00
煤耗/( \$/h)	125 791.610	125 730.390	125 825.020	125 807.740	125 623.026
排放/(吨/h)	211 191.450	211 761.050	210 945.410	211 097.480	207 737.548

不同算法在寻优过程中适应度值函数收敛情况,如图4所示.可见,本文算法在EED问题的求解过程中具有更强的收敛性,可以匹配不同负荷要求,实现EED调度自动化.

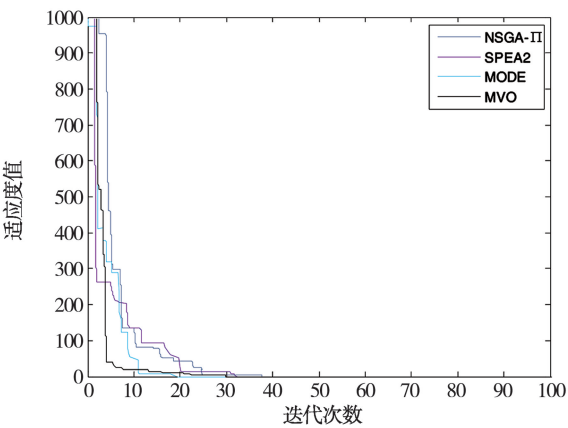


图4 不同算法优化过程收敛性比较

4 结 论

本文提出了一种求解电力系统环境经济调度的新方法,计及阀点效应和污染排放因素,建立多目标规划模型,利用PPF定价原则权衡多重因素.通过仿真分析,得到以下结论:

- (1)计及阀点效应和污染气体排放因素,本文算法所得调度方案与其他算法比较,具有更好的经济性和有效性;
- (2)利用PPF定价原则可以将多目标优化问题转化为单目标规划,该原则具有普遍性,适用于污染气体同总成本因素间无量纲转化;
- (3)多元宇宙算法在求解EED问题时具有计算精度高,收敛速度快等特点,在求解高维度问题表现更佳,适用于其他工程问题研究.

参 考 文 献

[1] 王佳欣,孙震放.基于多目标非线性规划模型计算的电厂负荷分配方案设计[J].东北电力大学学报,2017,37(3):53-59.  
[2] 张杰,刘妮,单连捷,等.基于碳排放量的多目标发电调度优化模型的研究及其应用[J].东北电力大学学报,2013,33(6):5-10.  
[3] 吴杰康,韩军锋,刘蔚,等.基于反捕食粒子群算法的电力系统经济调度方法[J].电网技术,2010,34(6):59-63.  
[4] N. Sinha, R. Chakrabarti, P. K. Chattopadhyay. Evolutionary programming techniques for economic load dispatch[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(1): 83-94.

- [5] 王喆,余贻鑫,张弘鹏. 社会演化算法在机组组合中的应用[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4):12-17.
- [6] 陈洁,杨秀,朱兰,等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):57-66.
- [7] F. A. Mohamed,H. N. Koivo. Online management of microgrid with battery storage using multiobjective optimization[C]. International Conference on Power Engineering,Energy and Electrical Drives,2007. Powering. IEEE,2007;231-236.
- [8] 邱威,张建华,刘念,等. 计及运行风险的多目标发电优化调度[J]. 中国电机工程学报,2012,32(22):64-72.
- [9] 于娜,李铁松. 计及风电不确定性的虚拟电厂优化调度[J]. 东北电力大学学报,2017,37(5):14-18.
- [10] 陈功贵,陈金富. 含风电场电力系统环境经济动态调度建模与算法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):27-35.
- [11] V. Martf,L. M. Robledo. Multi-verse optimizer;a nature inspired algo-rithm for global optimization[J]. Neural Computing and Applications, 2016,27(2):495-513.
- [12] M. Basu. Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution[J]. Applied Soft Computing Journal,2011,11(2):2845-2853.

## Optimal Scheduling of Energy Saving and Emission Reduction in Power System Based on Multi-Verse Optimizer Algorithm

Liu Shiyu<sup>1,3</sup>, Wang Zihang<sup>2</sup>, Yang Deyou<sup>3</sup>

(1. State Grid Siping Electric Power Company, Siping Jilin 136000;2. State Grid Dalian Electric Power Supply Company, Dalian Liaoning 116001;2. Electrical Engineering College, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012)

**Abstract:** The paper proposes a new method for solving the economic-environmental dispatch of power system. In this method, the rule of the object with high expansion rate in the process of random creation of space in the space of a wormhole is moved, and transfer objects randomly between the black hole and white hole, and tend to be optimal. The multi-verse optimizer algorithm has the advantages of fast computation speed, strong convergence and high dimensional computation. In this paper, the economic-environmental dispatch model is established with the lowest total fuel cost and the least total pollutant emission, and the PFF model is used to solve the multi-objective programming. Finally, through the simulation and analysis of the traditional 10 units and 40 units of power plant. The results show that the proposed algorithm is economical and effective.

**Key words:** Multi-verse optimizer; Valve point effect; Economic-environmental Dispatching; Multi-objective optimization; Price penalty factor