

基于改进粒子群算法的海洋钻机系统布局优化

王逢德¹, 肖文生^{1,2}, 刘健¹, 徐葱葱¹, 杨旭¹, 耿玉豪¹

(1. 中国石油大学机电工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:为提高海洋钻机的工作效率和平台的空间利用率,应用改进的粒子群算法对海洋钻机系统进行布局优化研究。针对多目标、多约束的钻机系统布局优化问题,建立钻机系统布局优化数学模型,应用多目标粒子群算法直接求解,得出相应的最优解集。利用线性加权法将多目标转变为单目标进行求解分析,针对单目标粒子群算法的缺点,基于约束条件、惯性权重以及遗传算法的选择和杂交对粒子群算法进行改进,完成不同改进算法的测试实验。结果表明,在应用粒子群算法求解布局问题时将约束条件作为目标函数、单独引入遗传算法的杂交思想求解速度和精度更好。提出的基于杂交的动态惯性权重粒子群算法的布局优化问题求解性能更优,得到的优化方案符合海洋钻井作业要求且占用甲板面积较小。

关键词:海洋钻机; 布局优化; 粒子群算法; 多目标优化算法; 单目标优化算法

中图分类号:TE 52; TP 336

文献标志码:A

引用格式:王逢德,肖文生,刘健,等. 基于改进粒子群算法的海洋钻机系统布局优化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(2):123-128.

WANG Fengde, XIAO Wensheng, LIU Jian, et al. Research on layout optimization of drilling rig system of semi-submersible platform based on modified particle swarm optimization[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(2): 123-128.

Research on layout optimization of drilling rig system of semi-submersible platform based on modified particle swarm optimization

WANG Fengde¹, XIAO Wensheng^{1,2}, LIU Jian¹, XU Congcong¹, YANG Xu¹, GENG Yuhao¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to enhance the efficiency of offshore drilling rig and the space utilization of offshore platform, a modified particle swarm optimization (PSO) was applied to the layout optimization of offshore drilling rig system. A mathematical model was established for the layout optimization of offshore drilling rig system, and the mathematical model was directly solved by multi-objective particle swarm optimization (MOPSO). Then the problem of multi-objective optimization was converted into a mono-objective one by linear weighting method. Aiming at the defects of the mono-objective particle swarm optimization, several improvement measures based on interference constraints, inertia weight, the selection and crossover operator of genetic algorithm (GA) were carried out in this paper. Then testing experiments for the above-mentioned improved algorithms were conducted. The test results show that a better solving speed and accuracy can be obtained by taking the constraint condition as the objective function and adopting the hybrid thought of GA in the layout design. A modified PSO with dynamic inertia weight and crossover operator was proposed in this paper, which has a better solving performance. The obtained layout scheme satisfies the requirements of the marine drilling operation and takes up the less deck area.

Keywords: offshore drilling rig; layout optimization; particle swarm optimization; multi-objective optimization algorithm; mono-objective optimization algorithm

钻机系统布局设计的优劣直接影响平台的使用性能及稳定性^[1],目前国内主要采用设计人员与CAD交互的方式进行海洋钻机系统布局,须对设计方案进行反复验证,效率低且难以量化设计因素。工程实际中的布局优化问题多为高维、多约束的复杂非线性优化问题^[2],已有多名学者进行了海洋钻井设备布局优化研究,其中潘斌^[3]、刘海霞^[4]研究了海洋平台的总布局原则,杨轶普^[5]提出分层次布局方法,鲁桂荣^[6]把遗传算法应用于平台布局优化设计领域,岳吉祥^[7]采用分解-协调理论对平台进行了布局优化研究。粒子群算法在求解多约束多目标问题方面具有良好的求解性能和鲁棒性^[8],为提高粒子群算法的求解性能,很多学者提出了改进方法,其中 Clerc 等^[9]设置压缩因子用来改进学习因子对算法的影响,Lovbjerg 等^[10]将遗传算法的群体概念运用到粒子群算法,并提出子种群概念,Frans 等^[11]提出协同粒子群优化算法,刘卓倩等^[12]提出三群协同粒子群算法,Liu 等^[13]提出混沌粒子群算法。笔者基于约束条件、惯性权重以及遗传算法的选择和杂交思想对粒子群算法进行改进,研究不同改进粒子群算法在钻机系统布局优化中的求解性能,提出一种基于杂交的动态惯性权重粒子群算法,并完成实例求解。

1 钻机系统布局优化数学模型

1.1 双井架钻机

1.1.1 目标函数

以井口中心为坐标原点,矩形*i*的形心和质心坐标为 (x_i, y_i) ,整个布局用向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 表示。设矩形的横竖状态 e_i 为0或1,若 $e_i = 0$, $p_{1i} = L_i$, $p_{2i} = W_i$;否则, $p_{1i} = W_i$, $p_{2i} = L_i$ 。系统目标函数如下:

(1) 占用甲板周长。

$$\min S = (|\min(x_i - p_{1i})| + \max(x_i + p_{1i}) + |\min(y_i - p_{2i})| + \max(y_i + p_{2i})) \quad (1)$$

(2) 偏移量。

$$\min Q = |x_o - x_c| + |y_o - y_c| \quad (2)$$

式中, (x_o, y_o) 为质心坐标; (x_c, y_c) 为形心坐标; Q 为质心与形心间距。

(3) 管材运移距离。

$$\min D = \sum_{i=t}^{k-1} (\varphi_i \sqrt{(x_i - x_{fm})^2 + (y_i - y_{fm})^2}) + \varphi_k \sqrt{(x_m - x_g)^2 + (y_m - y_g)^2} \quad (3)$$

式中, φ_i 为权重系数; (x_m, y_m) 为猫道形心坐标; $(x_{fm},$

$y_{fm})$ 为辅动力猫道形心坐标。

1.1.2 约束条件

(1) 干涉约束。

水平方向干涉量:

$$u_{ij1} = \max\left(0, \frac{p_{1i} + p_{1j}}{2} - |x_i - x_j|\right) \quad (4)$$

竖直方向干涉量:

$$u_{ij2} = \max\left(0, \frac{p_{2i} + p_{2j}}{2} - |y_i - y_j|\right) \quad (5)$$

任意两矩形块间的干涉量:

$$\begin{cases} u_{ij} = 0, & u_{ij1} u_{ij2} = 0; \\ u_{ij} = u_{ij1} + u_{ij2}, & u_{ij1} \neq 0, u_{ij2} \neq 0. \end{cases} \quad (6)$$

系统总干涉量:

$$U = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n u_{ij} \quad (7)$$

系统布局问题要求寻找一个布局 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$,满足 $U = 0$ 。

(2) 其他约束。

在实际工况中,钻机系统的子系统之间存在必要联系,设定坐标原点在主井口中心,钻台形心位置 (x_z, y_z) 。

① 辅井口约束:通常将辅井口布置于平台左舷,设辅井口的坐标为 (x_f, y_f) ,主、辅井口之间的距离为 t ,则

$$\begin{cases} x_f = 0, \\ y_f = t. \end{cases} \quad (8)$$

② 辅动力猫道布局约束:

$$\begin{cases} x_f - x_{fm} = (L_z + L_{fm})/2, \\ y_{fm} = y_f. \end{cases} \quad (9)$$

式中, L_{fm} 为辅动力猫道的长度。

③ 立放隔水管模块布局约束:

$$\begin{cases} x_g - x_z = (L_g + L_z)/2, \\ y_g = 0. \end{cases} \quad (10)$$

式中, (x_g, y_g) 为立放隔水管模块的形心坐标; L_g 、 L_z 分别为立放模块及钻台长度。

④ 主猫道机布局约束:

$$\begin{cases} x_z - x_m = (L_m + L_z)/2, \\ y_m = 0. \end{cases} \quad (11)$$

式中, (x_m, y_m) 为猫道的形心坐标; L_m 、 L_z 分别为猫道及钻台长度。

⑤ BOP 台车布局约束:

$$\begin{cases} y_b - y_z = (W_b + W_z)/2, \\ x_b = 0. \end{cases} \quad (12)$$

式中, (x_b, y_b) 为 BOP 台车的形心坐标; W_b 、 W_z 分别为台车及钻台宽度。

⑥ BOP 吊车及 BOP 布局约束:

$$\begin{cases} y_B - y_z - W_b = (W_B + W_z)/2, \\ x_B = 0. \end{cases} \quad (13)$$

式中, (x_B, y_B) 为 BOP 及吊车的形心坐标; W_B 为 BOP 和吊车的宽度。

⑦ 采油树台车布局约束:

$$\begin{cases} y_z - y_c = (W_c + W_z)/2, \\ x_c = 0. \end{cases} \quad (14)$$

式中, (x_c, y_c) 为采油树台车的形心坐标; W_c 为采油树台车宽度。

⑧ 采油树及吊车布局约束:

$$\begin{cases} y_z - y_c = (W_z + W_c)/2, \\ x_c - x_c = (L_c + L_c)/2. \end{cases} \quad (15)$$

式中, (x_c, y_c) 为采油树及吊机形心坐标; W_c 为采油树及吊机宽度; L_c 、 L_c 分别为采油树及吊机、台车的长度。

1.2 钻机系统布局优化智能求解方案分析

针对钻机系统布局问题提出两种求解方案: 方案一, 直接应用多目标算法求解, 得到非劣解集, 从非劣解集中选择较优方案。方案二, 利用线性加权将多目标问题转为单目标问题, 通过单目标算法进行求解。

2 粒子群算法测试实验及改进

2.1 多目标粒子群算法测试实验

基于 Coello 提出的 MOPSO 算法^[14]提出基于约束和支配的 MOPSO。通过拥挤距离对非劣解集进行修剪, 随机选取非劣解集中的粒子作为全局最优, 以文献[6]中的数据为布局实例, 利用该算法对钻机系统布局优化问题直接求解。参数设置: 种群规模 100, 进化 1 000 代, 学习因子 $c_1 = c_2 = 2$, $w = 0.4$, 得到的解集如图 1 和表 1。

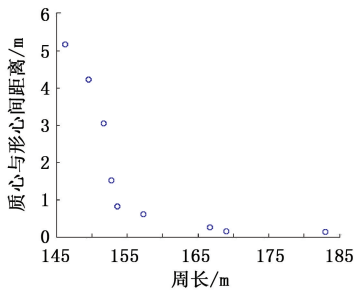


图 1 多目标粒子群算法的非劣解分布

Fig. 1 Distribution of non-inferior solutions of MOPSO

表 1 MOPSO 求解的数据

Table 1 Data of MOPSO

序号	布局周长/m	偏移量/m	干涉量/m
1	146.26	5.16	0
2	149.56	4.22	0
3	151.66	3.05	0
4	152.79	1.51	0
5	153.66	0.81	0
6	157.29	0.61	0
7	166.75	0.26	0
8	169.03	0.14	0
9	183.06	0.13	0

2.2 单目标粒子群算法改进

在单目标求解实际问题中, 基本粒子群优化算法容易陷入早熟, 当求解问题的变量个数增加时, 其求解速度较慢。针对这两种缺点, 对 PSO 算法做改进。

2.2.1 基于干涉约束的改进

(1) 干涉约束转为目标函数。
在粒子群算法中, 适应度值用在全局最优粒子和个体最优粒子选取过程中, 以全局最优粒子选取过程为例, 将干涉约束转为目标函数, 系统的总体目标函数为

$$Y = \varphi_1 S + \varphi_2 Q + \varphi_3 D + \varphi_4 U. \quad (16)$$

(2) 干涉条件作为求解约束。
干涉作为求解约束, 可限制粒子群算法对全局最优粒子和个体最优粒子的选取。此时, 系统总目标函数为

$$Y = \varphi_1 S + \varphi_2 Q + \varphi_3 D. \quad (17)$$

2.2.2 惯性权重改进

为兼顾粒子群算法求解问题的速度和精度, 在求解初期选用较大的 w 值, 在后期选用较小的 w 值。选取几种典型的 w 动态变化公式, 主要区别在于 w 在局部迭代过程中的下降速度。

$$w(k) = w_{\max} - k(w_{\max} - w_{\min})/T_{\max}, \quad (18)$$

$$w(k) = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \left(\frac{k}{T_{\max}} \right)^2, \quad (19)$$

$$w(k) = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) \left[\frac{2k}{T_{\max}} - \left(\frac{k}{T_{\max}} \right)^2 \right], \quad (20)$$

$$w(k) = w_{\min} \left(\frac{w_{\max}}{w_{\min}} \right)^{1/(1+ck/T_{\max})}. \quad (21)$$

式中, $w_{\max}$ 为初始惯性权重; $w_{\min}$ 为迭代终止时的惯性权重; k 为当前迭代代数; $T_{\max}$ 为最大迭代代数; c 为一常量。

2.2.3 与遗传算法相结合的改进

方案一: 将遗传算法中的选择思想应用到粒子

群算法中。

方案二:将遗传算法中的杂交思想应用到粒子群算法中。

方案三:同时将遗传算法的选择和杂交思想应用到粒子群算法中,依次对位置和速度更新后的粒子进行选择 and 杂交操作。

2.3 单目标粒子群改进算法测试实验

2.3.1 基于干涉约束改进算法测试

分析基于干涉约束的两种改进方式对算法求解性能的影响,实验设置运行 20 次, $N=200, M=500$,加权系数都为 1,适应度值的收敛曲线见图 2,实验数据见表 2。

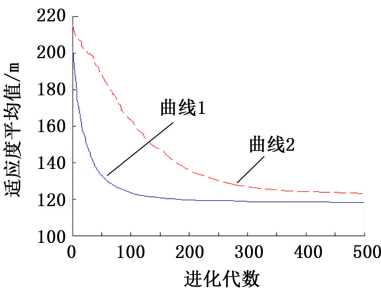


图 2 基于干涉约束的收敛曲线

Fig.2 Convergent curves based on interference constraint

表 2 基于干涉约束的实验数据

Table 2 Experimental data based on interference constraint

处理方式	适应度平均值/m	布局周长/m	偏移量/m	干涉量/m	线型
作为目标	118.23	114.97	3.26	0	曲线 1
作为约束	123	118.18	4.82	0	曲线 2

2.3.2 基于惯性权重 w 改进算法测试

分析 w 不同变化路径对算法性能的影响,采用不同 w 取值公式(19)~(21)进行求解实验,每个实验设置运行 20 次, $N=50, M=500, c_1=c_2=2$ 。 w 的算法进化曲线如图 3 所示,实验数据见表 3。

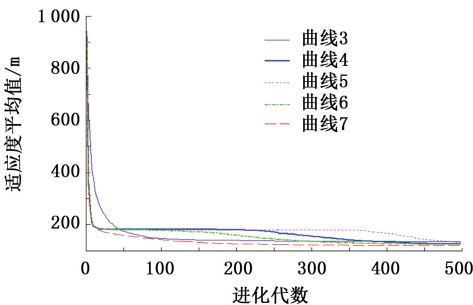


图 3 不同惯性权重收敛曲线

Fig.3 Convergent curves with different weight

表 3 不同惯性权重实验数据

Table 3 Experimental data with different weight

w	适应度平均值/m	布局周长/m	偏移量/m	干涉量/m	线型
0.4	134.4	128.38	6.02	0	曲线 3
公式(18)	124.93	120.2	4.73	0	曲线 4
公式(19)	130.58	124.52	5.06	0	曲线 5
公式(20)	123.52	120.23	3.29	0	曲线 6
公式(21)	118.83	115.43	3.4	0	曲线 7

2.3.3 引入遗传算法改进测试

参数设置为: $M=300, N=50, w=0.4$,杂交概率 $P_x=0.9$,杂交的粒子个数所占种群比例为 0.2。设置运行 20 次。算法进化曲线如图 4 所示,实验数据见表 4。

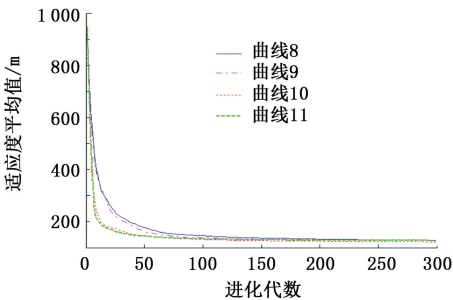


图 4 引入遗传算法的收敛曲线

Fig.4 Convergent curves based on genetic algorithm (GA)

表 4 引入遗传算法的实验数据

Table 4 Experimental data based on GA

算法	适应度平均值/m	布局周长/m	偏移量/m	干涉量/m	线型
基本粒子群	128.87	124.6	4.27	0	曲线 8
选择算子	129.63	125.15	4.48	0	曲线 9
交叉算子	122.77	118.54	4.23	0	曲线 10
选择+交叉算子	127.01	122.29	4.73	0	曲线 11

2.4 实验分析及其讨论

由图 2 和表 2 可以看出:干涉作为目标函数时的求解性能更好。将干涉作为求解约束时,将一部分不可行解排除,导致其寻优能力较差;而将干涉作为目标函数时,其干涉量会随着适应度值的降低而减小,不可行解也能参与运算。由图 3 和表 3 可以看出:惯性权重按公式(21)变化时,求解性能较好。进化过程中,改进算法的 w 值较大,全局寻优能力较强,有利于求解跳出局部最优,收敛速度快;后期 w 值较小,有利于局部寻优,收敛到最优解,故综合性能优于基本粒子群算法。由图 4 和表 4 可以看出:选择思想的引入,由于减少了粒子多样性,不利于提高布局求解速度和精度,故不采用。由于杂交生成的子代粒子替代父代粒子,杂交思想的引入,增加了粒子多样性,全局寻优能

力较强,收敛速度快;并且粒子的杂交变异有利于跳出局部最优,故求解精度高。综合以上实验结论,采用单目标粒子群算法求解钻机系统布局优化问题,提出一种基于杂交的动态惯性权重粒子群算法。

3 基于杂交的动态惯性权重粒子群算法测试及实例求解

3.1 算法测试

参数设置为: $N=50,M=300,c_1=c_2=2$,实验运行 20 次。测试流程如图 5 所示,测试结果见图 6 和表 5。

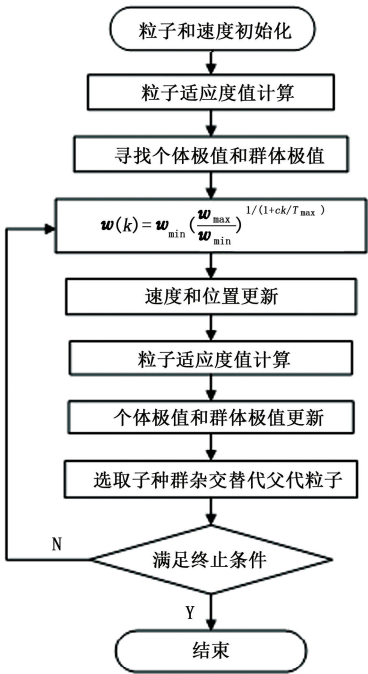


图 5 基于杂交的动态权重粒子群算法流程图

Fig. 5 Flow chart of PSO with crossover operator and dynamic weight

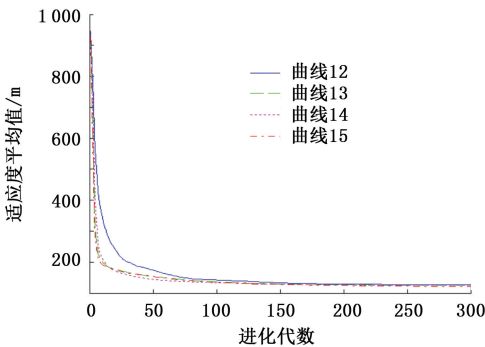


图 6 基于杂交和动态权重的收敛曲线

Fig. 6 Convergent curves based on crossover operator and dynamic weight

表 5 基于杂交和动态权重的数据

Table 5 Experimental data based on crossover operator and dynamic weight

算法	适应度平 均值/m	布局周 长/m	偏移 量/m	干涉 量/m	线型
基本粒子群	127.28	122.78	4.5	0	曲线 12
动态权重	125.27	120.29	4.98	0	曲线 13
交叉算子	124.76	120.53	4.23	0	曲线 14
动态权重+交叉算子	120.82	116.62	4.2	0	曲线 15

3.2 实例求解

钻机系统模块参数见表 6,采用基于杂交的动态粒子群算法进行求解,求解方案如图 7 所示。

表 6 模块尺寸及质量

Table 6 Size and weight of modules

编号	布局模块	长/m	宽/m	质量/t
1	钻台	23.43	26.52	2860
2	猫道	24.43	4.5	27.8
3	辅猫道	16	1.7	10.5
4	BOP 台车	8.5	7.68	30
5	采油树台车	8.9	6	30
6	立放隔水管	11	31.6	2100
7	BOP	17.5	6.8	310
8	采油树	8.8	10.3	70
9	泥浆模块	16.7	9.3	40
10	固井模块	12.7	6.5	80
11	横放隔水管	23	14.5	670
12	导管 1	12.5	3.2	73
13	表层套管 2	12.5	3.7	119
14	套管 3	10.66	5.3	396
15	钻杆 4	10.35	5.4	210
16	钻铤 5	9.45	1.5	61
17	套管 6	12.5	9.6	202
18	套管 7	12.3	7	435
19	钻杆 8	9.5	4	128
20	散料区	5.2	33	400
21	生活区	11	40	342

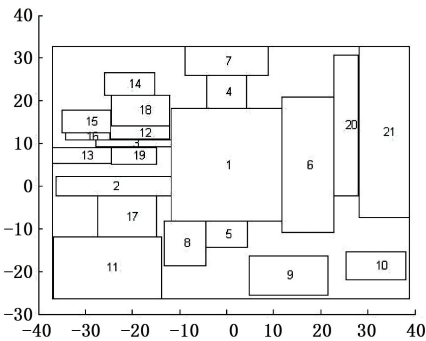


图 7 双井架钻机优化布局

Fig. 7 Optimized layout of double dual derrick rig

平台中心坐标为(1.06,3.17),主井口坐标为(0,0),辅井口坐标为(0,10),主、辅井口基本位于

平台横向中心上,有利于平衡。在纵向上,主、辅井口到平台中心的距离为 $3.17:6.83$,接近于 $1:2$,优化的布局方案介于主井口运动性能最优和有利于均衡主辅大钩载荷对平台的影响之间,因此主辅井口位置合理。

4 结 论

(1)单目标算法求解性能更优。

(2)在应用粒子群算法求解布局问题时将约束条件作为目标函数,单独引入遗传算法的杂交思想求解速度和精度更好。

(3)基于干涉约束、惯性权重改进、引入遗传算法的杂交思想,提出的基于杂交的动态惯性权重粒子群算法,其布局优化问题求解性能更优,可用于钻机系统布局优化求解。

参考文献:

- [1] 廖谟圣. 2000—2005 年国外深水和超深水钻井采油平台简况与思考[J]. 中国海洋平台, 2006, 21(3): 1-8.
LIAO Mosheng. Briefing and reflect on the deepwater or ultradeepwater drilling and production platform activity in 2000—2005[J]. China Offshore Platform, 2006, 21(3): 1-8.
- [2] 周驰, 高亮, 高海兵. 基于粒子群优化算法的约束布局优化[J]. 控制与决策, 2005, 20(1): 36-40.
ZHOU Chi, GAO Liang, GAO Haibing. Particle swarm optimization based algorithm for constrained layout optimization[J]. Control and Decision, 2005, 20(1): 36-40.
- [3] 潘斌. 移动式平台设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1995: 125-128.
- [4] 刘海霞. 深海半潜式钻井平台的总布置[J]. 中国海洋平台, 2007, 22(3): 7-11.
LIU Haixia. General arrangement of deepwater semi-submersible drilling unit[J]. China Offshore Platform, 2006, 22(3): 7-11.
- [5] 杨铁普. 半潜式平台钻井系统布置技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009.
YANG Yipu. Technology research on layout design of semi-submersible platform drilling system[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009.
- [6] 鲁桂荣. 半潜式平台钻井系统布置关键技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2008.
LU Guirong. Key technology research on layout design of semi-submersible platform drilling system[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008.
- [7] 岳吉祥. 深水半潜式钻井平台钻机系统选型与布局优化研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009.
YUE Jixiang. Research on the drilling rigs system mode option and layout optimization for deepwater semi-submersible drilling unit[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009.
- [8] 吴玫. 粒子群算法及其应用[D]. 南京: 南京工业大学, 2008: 6-8.
WU Mei. Particle swarm optimization algorithm and its application [D]. Nanjing: Nanjing Technology University of Petroleum, 2008: 6-8.
- [9] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space[J]. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2002, 6(1): 58-73.
- [10] LOVBJERG M, RASMUSSEN T K, KRINK T. Hybrid particle swarm optimizer with breeding and subpopulations: proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, 2001 [C]. USA: San Francisco, c2001: 469-476.
- [11] FRANS Van D B, ENGELBRECHT A P. Training product unit networks using cooperative particle swarm optimizers[J]. IEEE, 2001, 1: 126-131.
- [12] 刘卓倩, 顾幸生, 陈国初. 三群协同粒子群优化算法[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2006, 32(6): 754-757.
LIU Zhouqian, GU Xingsheng, CHEN Guochu. Three swarms cooperative particle swarm optimization [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2006, 32(6): 754-757.
- [13] LIU Bo, WANG Ling, JIN Yihui, et al. Improved particle swarm optimization combined with chaos[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005, 25(5): 1261-1271.
- [14] COELLO C A C, van VELDHUIZEN D A, LAMONT G B. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems[M]. New York: Kluwer Academic, 2002.

(编辑 沈玉英)