

基于量子粒子群优化的油水井措施方案优选

孙 昊,李盼池

(东北石油大学 计算机与信息技术学院,黑龙江 大庆 163318)

摘 要:油水井措施方案优选是油田中后期开发面临的重要问题之一,目前主要依靠相关技术人员根据经验手工试算,不仅工作效率低而且往往不能得到最优结果。为解决这一问题,提出一种基于量子行为粒子群优化的解决方案。在深入研究现有的量子行为粒子群优化模型的基础上,利用量子力学原理考察了粒子在方势阱中的动态行为,进而提出一种新的量子行为粒子群优化算法。根据油田具体施工情况对油水井采取 0-1 编码,并综合考虑目标函数及各种措施组合必须满足的约束条件,合理构造适应度函数。在优化过程中,引入变异策略增加种群多样性。实验结果表明,该方法获得了令人满意的优化结果。

关键词:油水井施工方案;措施方案优选;量子粒子群优化;算法设计

中图分类号:TP183

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)09-0078-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.09.018

Measures Optimization for Oil and Water Well Based on Quantum Particle Swarm Optimization

SUN Hao, LI Pan-chi

(School of Computer and Information Technology, Northeast Petroleum University,
Daqing 163318, China)

Abstract: Measures optimization for oil and water well is one of the important problems in the development of oil field. Currently this issue relies mainly on manual calculation of the technical personnel by their experiences, which has low efficiency and often can not get the best results. To address this issue, a method based on quantum particle swarm optimization is proposed. On the basis of the thorough study of the existing quantum behaved particle swarm optimization model, the dynamic behavior of a particle in a square potential well is investigated with help of the principle of quantum mechanics, and a novel quantum particle swarm optimization is presented. And then, all oil and water wells are taken 0-1 coding according to their construction situation. By comprehensive considering of the objective function and the constraint conditions of all kinds of measures combination, the fitness function is reasonably designed. In the optimization process, the introduction of mutation strategy increases the population diversity. The experimental results show that the optimizations of this method are satisfactory.

Key words: oil and water well construction plan; measures optimization; quantum particle swarm optimization; algorithm design

1 概 述

运用优化方法研究油田开发决策问题可追溯到 1958 年 Aronofsky 和 Lee 在 JPT 杂志上发表的题为《A Linear Programming Model for Scheduling Crude Oil Production》的文章。文章中运用线性规划方法研究了以生产效益最大为目标的有限多个均质油藏的生产规划问题。之后,又有几篇文章发表在 MS/OR 与 JPT 等刊物上,但在 1985 年以前,这些文章都属于探索性的,优化方法在油田开发决策中的应用还没有得到足

够重视,因此在油田生产领域的成功应用仍然很少。1985 年以后,由于油田开发的实际迫切需要和优化方法、计算机技术的迅速发展,情况有了很大变化。美国、前苏联和中国等主要产油国的一些科研单位、大专院校及石油公司都积极地使用优化技术研究各种各样的油田开发问题,在建模、求解和应用等方面都进行了较好的研究工作。

然而传统的优化技术均不同程度地存在缺陷,如单纯形法只适用于线性优化,神经网络法易于陷入局

收稿日期:2015-12-13

修回日期:2016-04-14

网络出版时间:2016-08-23

基金项目:黑龙江省自然科学基金项目(F2015021)

作者简介:孙 昊(1992-),男,硕士研究生,研究方向为智能优化算法;李盼池,博士,教授,研究方向为量子智能优化算法。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160823.1359.054.html>

部极小值^[1],解析法需要建立精确的数学模型,等等。因此,应用智能优化算法解决油田工程问题正日益成为新兴的研究方向^[2]。

已有理论证明,粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种全局优化算法,具有种群规模小、收敛速度快、全局搜索能力强等优点^[3-5]。任何实际问题,不论工程背景如何复杂,只要最终能够归结为求最小值和最大值问题,都可用 PSO 获得满意的解决方案^[6]。PSO 适用于一切优化问题,而与具体问题的工程背景无关,因而自 1995 年提出之后^[7],在各个工程领域很快获得了广泛的应用^[8-11]。

油水井措施方案优化是指在综合考虑国家计划、资源条件、资金情况、措施种类、措施潜力、措施效果以及队伍、装备、矿场施工能力等因素的前提下,寻求一种为完成开发规划指令性任务,各项措施必须遵循的最优分配比例。措施方案优化是原油开发规划的核心之一,旨在统筹安排各种增产增注措施作业量,以最小的投入、最少的措施井次完成给定的油水井措施增产任务。油水井措施方案优选就是实现吨增油措施投入最低的非线性规划的极值问题,即根据油井和水井的各种措施单价,同时考虑总体方案的增油、增液、增注指标约束,以及各种措施施工井数的约束,合理安排一年中各个月份的措施施工井数,以使当年产出比和累计产出比最大。这实质上是一个带约束条件的最大值优化问题,即在满足增油、增液、增注等指标约束前提下,寻找一种施工方案,使施工效益最大化。抛开工程背景,该问题实质上就是一个连续优化问题,即一个多元函数求极值问题,解决该类问题,恰是粒子群优化的长处。

鉴于此,文中提出一种基于量子粒子群优化(Quantum Particle Swarm Optimization, QPSO)^[12]的油水井措施方案优选方法,旨在为此问题的解决提供一种新途径。

2 PSO 模型

2.1 基本 PSO 模型

设在 n 维空间中的 M 个粒子组成一个种群。其中,第 i 个粒子位置 X_i 、速度 V_i 、自身搜索到的最优位置 P_i^L 、整个种群搜索到的最优位置 P_g 分别记为: $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$, $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$, $P_i^L = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$, $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})$ 。将 X_i 代入目标函数可计算其适应值。粒子更新策略为

$$V_i(t+1) = wV_i(t) + c_1r_1(P_i^L - X_i(t)) + c_2r_2(P_g - X_i(t)) \quad (1)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (2)$$

其中, w 为惯性因子; c_1 为自身因

子; c_2 为全局因子; r_1, r_2 是 $(0, 1)$ 之间的随机数。

对种群中每个粒子应用式(1)和式(2)循环迭代,可使整个种群逐步逼近全局最优解。

为便于叙述,将式(1)重写为如下形式^[13]:

$$V_i(t+1) = wV_i(t) + [\Phi](P_i - X_i(t)) \quad (3)$$

其中

$$P_i = \text{diag}\left(\frac{c_1r_1^1}{c_1r_1^1 + c_2r_1^2}, \dots, \frac{c_1r_n^1}{c_1r_n^1 + c_2r_n^2}\right)P_i^L + \text{diag}\left(\frac{c_2r_1^2}{c_1r_1^1 + c_2r_1^2}, \dots, \frac{c_2r_n^2}{c_1r_n^1 + c_2r_n^2}\right)P_g \quad (4)$$

$$[\Phi] = \text{diag}(c_1r_1^1 + c_2r_1^2, \dots, c_1r_n^1 + c_2r_n^2) \quad (5)$$

文献[14]指出,为使 PSO 收敛,所有粒子必须逼近式(4)定义的 P_i 。

2.2 量子 PSO 模型

在量子力学里,粒子动态行为一般用如下薛定谔方程描述。

$$\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(r, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right) \Psi(r, t) \quad (6)$$

其中, \hbar 为普朗克常数; m 为粒子质量; $V(r)$ 为势场能量分布函数。

在薛定谔方程中,未知量是波函数 $\Psi(r, t)$, 根据波函数统计诠释,该函数幅度的平方表示粒子 t 时刻在势场 r 处出现的概率密度。

QPSO 的设计思想为,首先选择某种不显含时间 t 的势阱 $V(r)$, 然后通过求解式(6)的薛定谔方程得到变量分离形式的波函数 $\Psi(r)$, 进而得到粒子在势阱中出现的概率密度函数 $|\Psi(r)|^2$, 最后通过将势阱中心设置为式(4)定义的最优解,并合理设计势阱参数,可使粒子以大概率逼近式(4)定义的位置。下面以方势阱为例说明 QPSO 的构造过程。

方势阱的势能分布可表示为:

$$V(r) = \begin{cases} 0, & |r| \leq W/2 \\ V_0, & |r| > W/2 \end{cases} \quad (7)$$

其中, W 为势阱宽度; V_0 为势阱高度。

粒子在 r 处出现的概率密度函数为^[7]:

$$Q(r) = \begin{cases} \frac{a}{W} \cos^2\left(\frac{\xi}{W}r\right), & |r| \leq \frac{W}{2} \\ \frac{b}{W} e^{-\frac{\eta}{W}r}, & r > \frac{W}{2} \\ \frac{b}{W} e^{\frac{\eta}{W}r}, & r < -\frac{W}{2} \end{cases} \quad (8)$$

其中, a, b, ξ, η 为待定常数。

式(8)含有多个束缚态,构造 QPSO 时只需考虑能量最小的束缚态(基态),根据量子力学理论,此时 $\xi < \pi$, 为简便取 $\xi = 1$ 。根据波函数及其导数在 $r = \pm W/2$ 处的连续性,式(8)可重写为:

$$Q(r)=\begin{cases}\frac{a}{W}\cos^2(\frac{1}{W}r),|r|\leqslant\frac{W}{2}\\\frac{a}{W}\cos^2(\frac{1}{2})e^{\tan(\frac{1}{2})-\frac{2}{W}\tan(\frac{1}{2})r},r>\frac{W}{2}\\\frac{a}{W}\cos^2(\frac{1}{2})e^{\tan(\frac{1}{2})+\frac{2}{W}\tan(\frac{1}{2})r},r<-\frac{W}{2}\end{cases}\quad(9)$$

由 $\int_{-\infty}^{\infty}Q(r)\mathrm{d}r=1$ 得, $a=0.429\ 1$ 。

为使当前在 r 处的粒子下次移动时以较大概率向势阱中心靠近,式(9)需满足如下条件:

$$\int_{-|r|}^{|r|}Q(r)\mathrm{d}r>0.5\quad(10)$$

由式(9)和式(10)可得势阱宽度 W 必须满足:

$$W=1.482\ 9\left|r\right|/g\quad(11)$$

其中, $g>1$ 。

在势阱中的粒子动态行为服从薛定谔方程,在任一确定时刻,其位置是不确定的;而普通 PSO 中的粒子服从牛顿力学,在任一确定时刻,必须具有确定的位置。这个矛盾可借助波函数的坍缩得以圆满解决。具体可用蒙特卡洛方法。首先在(0,1)内取随机数 u ,令 $u=\cos^2(r/W)$,最后解出:

$$\left|r\right|=\text{Warccos}(\sqrt{u})\quad(12)$$

由式(11)、(12)可得:

$$\left|r_{k+1}\right|=1.482\ 9\cos^{-1}(\sqrt{u})\left|r_k\right|/g\quad(13)$$

表 1 常用措施类型、单价及年度工作量上限

分类	措施工作量									调整工作量		
	油井措施				水井措施					测调	细分	周期
单价	36.0	13.0	5.0	5.0	36.0	13.0	6.0	50.0	5.8	0.3	5.0	0.3
年度上限	100	150	80	50	40	60	300	20	300	500	300	200

表 2 措施方案优选原始数据

序号	措施类型	日增液	日增油	日控液	日降油	日增注	日控注	有效期/天
1	油井压裂	0.1	0.7	0	0	0	0	238
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
61	油井压裂	20	0	0	0	0	0	238
62	油井补孔	0.1	1.2	0	0	0	0	467
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
222	油井补孔	38	0	0	0	0	0	467
223	油井堵水	0	0	-17	0.9	0	0	498
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
269	油井堵水	0	0	-17.5	0	0	0	498
270	油井换泵	0.1	0.3	0	0	0	0	312
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
378	油井换泵	15.7	0	0	0	0	0	312
379	水井压裂	1	0.2	0	0	3	0	246
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

万方数据

令 $r_k=x_k-P_k$ 得:
$$x_{k+1}=P_{k+1}\pm1.482\ 9\cos^{-1}(\sqrt{u})\left|x_k-P_k\right|/g\quad(14)$$

为使 QPSO 收敛,令

$$g=\lambda E[1.482\ 9\cos^{-1}(\sqrt{u})]\quad(15)$$

其中, $\lambda>1$ 。

此时满足式(11)中 $g>1$ 的条件。代入式(14)可得:

$$x_{k+1}=P_{k+1}\pm\frac{\cos^{-1}(\sqrt{u})}{\lambda E[\cos^{-1}(\sqrt{u})]}\left|x_k-P_k\right|\quad(16)$$

其中

$$P_k=\frac{1}{M}(\sum_{i=1}^Mp_{i1}^L,\sum_{i=1}^Mp_{i2}^L,\cdots,\sum_{i=1}^Mp_{in}^L)\quad(17)$$

$$P_{k+1,i}=rP_i^L+(1-r)P_g\quad(18)$$

式(16)即为 QPSO 的迭代方程。该方程只含一个可调参数 λ ,从而有利于优化过程的调整。

3 基于 QPSO 的油水井措施优选

3.1 矿场数据资料

油水井常用措施共 12 种,每种措施涉及的单价及该措施施工井数的年度上限指标如表 1 所示。原始数据如表 2 所示。

续表 2

序号	措施类型	日增液	日增油	日控液	日降油	日增注	日控注	有效期/天
428	水井压裂	2.7	0.4	0	0	8	0	246
429	水井补孔	8	1.4	0	0	24	0	349
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
515	水井补孔	26.7	5.3	0	0	40	0	349
516	水井酸化	3.7	0.4	0	0	11	0	155
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1 220	水井酸化	6	0.6	0	0	18	0	155
1 221	水井细分	13.7	1.5	0	0	41	0	327
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1 513	水井细分	0	0	-14	-0.3	0	-28	327
1 514	水井测调	50	10	0	0	75	0	248
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2 416	水井测调	0	0	-87.5	-1.8	0	-105	248
2 417	水井浅调	8	0.9	-14	-0.3	24	-28	224
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2 850	水井浅调	1.8	0.2	-7.3	-0.1	5.5	-14.5	224
2 851	水井深调	8.3	0.9	-16.7	-0.5	25	-30	478
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2 889	水井深调	8	0.9	-16	-0.5	24	-24	478
2890	水井周期	0	0	-15.5	-1.1	0	-31	128
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3 219	水井周期	0	0	-8.3	-0.2	0	-10	180

3.2 适应度函数设计

(1) 目标函数。

当年产出比 = max[(A₁ + B₁)/C] (19)

累计产出比 = max[(A₂ + B₂)/C] (20)

其中

A₁ = ∑_{i ∈ 施工油井} ((210 1 - 759.39) × a_i × (2 - d_i/d̄_i)/2 - 5.88 × b_i - 5.36 × c_i) × d_i

B₁ = ∑_{i ∈ 施工水井} (2 101 - 759.39) × a_i × (2 - d_i/d̄_i)/2 × (d_i - 50) - (5.88 × b_i + 5.36 × c_i) × d_i

A₂ = ∑_{i ∈ 施工油井} (2 101 - 759.39) × a_i/2 × d̄ - (5.88 × b_i + 5.36 × c_i) × d̄_i

B₂ = ∑_{i ∈ 施工水井} (2 101 - 759.39) × a_i/2 × (d_i - 50) - (5.88 × b_i + 5.36 × c_i) × d̄_i

C = 10⁴ × ∑_{i ∈ 施工井} p_i

其中, a_i 为日增油; b_i 为日增液; c_i 为日增注; d_i

为措施天数, d̄_i 为有效期; p_i 为单井措施价格。

(2) 约束条件。

① ∑_{i ∈ 施工油井} a_i × (2 - d_i/d̄_i)/2 × d_i/10⁴ ≤ 7.1

② ∑_{i ∈ 施工水井} a_i × (2 - d_i/d̄_i)/2 × (d_i - 50)/10⁴ ≥ 7.5

③ ∑_{i ∈ 施工油井} a_i × (2 - d_i/d̄_i)/2 × d_i/10⁴ + ∑_{i ∈ 施工水井} a_i × (2 - d_i/d̄_i)/2 × (d_i - 50)/10⁴ = 14.6

④ ∑_{i ∈ 施工井} b_i × d_i/10⁴ = 18

⑤ ∑_{i ∈ 施工井} c_i × d_i/10⁴ = 30

⑥ ∑_{i ∈ 油井压裂} X_i ≤ 100, ∑_{i ∈ 油井补孔} X_i ≤ 150, ∑_{i ∈ 油井堵水} X_i ≤ 50, ∑_{i ∈ 油井换泵} X_i ≤ 80, ∑_{i ∈ 水井压裂} X_i ≤ 40, ∑_{i ∈ 水井补孔} X_i ≤ 60, ∑_{i ∈ 水井酸化} X_i ≤ 300, ∑_{i ∈ 水井细分} X_i ≤ 300, ∑_{i ∈ 水井测调} X_i ≤ 500, ∑_{i ∈ 水井浅调} X_i ≤ 300, ∑_{i ∈ 水井深调} X_i ≤ 20, ∑_{i ∈ 水井周期} X_i ≤ 200

(3) 适应度函数设计。

针对该问题, 采取了将约束条件和目标函数融合

的设计方法,即当所有约束都满足时适应度函数值最大,否则适应度下降。考虑到约束条件③~⑤为等式约束,因此适应度函数按式(21)设计。

fit = fit₁ + fit₂ + fit₃ + fit₄ + fit₅ +
(A₁ + B₁)/C + (A₂ + B₂)/C

(21)

其中

fit₁ = exp(-| $\sum_{i \in \text{施工油井}} a_i \times (2 - d_i/\bar{d}_i)/2 \times d_i/10^4 - 7.1$ |)

(22)

fit₂ = exp(-| $\sum_{i \in \text{施工水井}} a_i \times (2 - d_i/\bar{d}_i)/2 \times (d_i - 50)/10^4 - 7.5$ |)

(23)

fit₃ = exp(-| $\sum_{i \in \text{施工水井}} a_i \times (2 - d_i/\bar{d}_i)/2 \times d_i/10^4 + \sum_{i \in \text{施工水井}} a_i \times (2 - d_i/\bar{d}_i)/2 \times (d_i - 50)/10^4 - 14.6$ |)

(24)

fit₄ = exp(-| $\sum_{i \in \text{施工井}} b_i \times d_i/10^4 - 18$ |)

(25)

fit₅ = exp(-| $\sum_{i \in \text{施工井}} c_i \times d_i/10^4 - 30$ |)

(26)

3.3 优化过程设计

(1)参数初始化。

设油井和水井总数为 N ,每一口井需要优化两个变量,即是否选中(0:否,1:是)和措施天数。因此优化空间为 $2N$ 维。种群规模取 100,限定步数取 1 000,变异概率取 0.05。

表 3 基于 QPSO 的措施方案优选问题三次优化结果

序号	各月安排井数											总井数	目标值 1	目标值 2
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
1	492	136	124	122	318	329	103	67	25	74	37	1 827	1.594 2	0.969 9
2	470	181	110	122	325	328	133	103	31	37	9	1 849	1.566 0	0.955 0
3	437	169	131	130	309	335	110	89	64	38	7	1 819	1.582 1	0.975 3

4 结束语

文中提出一种用于油水井措施方案优选的量子粒子群优化算法。该算法采用量子力学理论建立搜索机制,具有强大的全局搜索能力。对于油水井措施方案优选问题具有一定潜力。

数值实验证实,该方法操作简单,灵活易用,且有较快的收敛速度。

该预测方法可为油田开发规划的编制和计划安排提供较为合理的依据。

参考文献:

[1] 赵国忠,孟曙光,姜祥成. 聚合物驱含水率的神经网络预测方法[J]. 石油学报,2004,25(1):70-73.

[2] 关晓晶,魏立新,杨建军. 基于混合遗传算法的油田注水系统运行方案优化模型[J]. 石油学报,2005,26(3):114-

(2)粒子初始化。
为增强粒子的多样性,对每个粒子的前 N 维随机在 $[-0.25, 0.25]$ 中取值(代表 0),或随机在 $[0.75, 1.25]$ 中取值(代表 1);后 N 维描述该井施工的措施天数,在不超过施工限制天数(有效期)下随机赋值。
(3)变异策略设计。

影响粒子寻优性能的一个障碍就是早熟收敛,即种群粒子趋于一致,从而迫使寻优终止。引入变异策略可有效增强种群多样性,避免早熟收敛。在智能优化算法中,通常的变异策略是针对个体上某一维的,考虑到措施方案优选问题的高维复杂性,采取将变异策略改进为针对个体上所有维,即若满足变异概率,则随机选取一个粒子并将其初始化为新粒子。实验结果表明,这样可有效增强种群多样性。

3.4 优化结果

该问题属于高维空间的多变量、多约束、非线性、强耦合连续优化问题,复杂度较高。采用 QPSO 按上述策略实施优化,三次典型的优化结果如表 3 所示。

由表 3 可知,三次优化的结果比较接近,油水井各种措施方案的施工主要集中在上半年,这与实际采油厂的施工安排是一致的,且能获得更为理想的经济效益。采用 QPSO 实施措施方案优选的优点在于,不仅可以避免极为繁琐的手工计算,提高工作效率,而且也能获得更为理想的措施优选方案。

117.

[3] Cai X J, Cui Z H, Zeng J C, et al. Dispersed particle swarm optimization [J]. Information Processing Letters, 2008, 105 (6):231-235.

[4] Lin S W, Ying K C, Chen S C, et al. Particle swarm optimization for parameter determination and feature selection of support vector machines [J]. Expert Systems with Applications, 2008,35(4):1817-1824.

[5] 张英杰,邵岁锋,Niyongabo Julius. 一种基于云模型的云变异粒子群算法[J]. 模式识别与人工智能,2011,24(1):90-96.

[6] 朱海梅,吴永萍. 一种高速收敛粒子群优化算法[J]. 控制与决策,2010,25(1):20-24.

[7] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarms optimization [C]// Proceedings of IEEE international conference on neural networks. USA:IEEE,1995:1942-1948.



图 5 运行测试结果

4 结束语

文中从产品展示的角度讨论了增强现实技术的原理及其在产品互动展示中的应用,进行了移动增强现实关键技术的探讨,利用立体物作为识别对象实现了产品互动展示系统,给用户带来身临其境的沉浸式体验,使产品展示更加生动化,更具趣味性。将增强现实技术与实际相结合有利于增强现实技术的普及,也有利于这一技术今后的发展,具有一定的现实意义。增强现实技术正在改变着人类传统的生活方式,结合增强现实场景、三维数据与现实世界创建的增强现实应用将会给用户带来前所未有的体验。

基于增强现实技术的应用也存在瓶颈,比如实景融合方面的瑕疵,虽然是实时渲染,但是在灯光的渲染上需要消耗过多机器性能;还有识别上的不够精确;在云识别方面,由于网络速度限制,可能会对识别造成影响等。但是随着科技的发展,这些问题最终都会得到解决。

参考文献:

- [1] 邹优嘉. 移动设备增强现实技术与书本交互的应用[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(8): 227-229.
- [2] 赖蕤华. 基于移动增强现实技术的灾害和事故救援系统设计[J]. 软件工程师, 2014, 17(10): 57-58.
- [3] 郭昌达. 增强现实三维配准技术方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013.
- [4] 程志, 金义富. 基于手机的增强现实及其移动学习应用[J]. 电化教育研究, 2013, 34(2): 66-70.
- [5] 司占军, 李文霞, 顾翀. 增强现实在印刷品中的应用研究[J]. 包装工程, 2014, 35(19): 125-129.
- [6] Ceravolo P, Anisetti M, Damiani E. Augmented reality technologies systems and applications[J]. Multimedia Tools and Applications, 2011, 51: 341-370.
- [7] 冉洋, 朱飞, 陈康. 虚拟现实及增强现实技术在工业设计中的应用[J]. 激光杂志, 2010, 31(1): 4-6.
- [8] 常勇, 薛立明, 姜淑芳. 智能手机增强现实关键技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(15): 69-71.
- [9] Wikipedia. Augmented reality[EB/OL]. 2012. http://en.wikipedia.org/wiki/Augmented_reality.
- [10] 孙源, 陈靖. 智能手机的移动增强现实技术研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(6A): 493-498.
- [11] 李然, 隋毅, 孙仁诚, 等. 手持设备增强现实开发平台研究及应用[J]. 计算机仿真, 2010, 27(1): 253-256.
- [12] Billingham M, Hakkarainen M, Woodward C. Augmented assembly using a mobile phone[C]//Proc of IEEE international symposium on mixed and augmented reality. Cambridge, UK: IEEE, 2008: 167-168.
- [13] Chen W C, Xiong Y G, Gao J, et al. Efficient extraction of robust image features on mobile devices[C]//Proc of IEEE/ACM international symposium on mixed and augmented reality. [s. l.]: IEEE, 2007.
- [14] 李东旭, 江澄, 刘海峰. 体感技术驱动下的图书馆应用平台架构创新与体验革命[J]. 大学图书馆学报, 2012(5): 12-17.

(上接第 82 页)

- [8] Li L L, Wang L, Liu L H. An effective hybrid PSOSA strategy for optimization and its application to parameter estimation[J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 179(1): 135-146.
- [9] 赵新超, 刘国莅, 刘虎球, 等. 基于非均匀变异和多阶段扰动的粒子群优化算法[J]. 计算机学报, 2014, 37(9): 2058-2070.
- [10] 钱玉良, 张浩, 彭道刚, 等. 基于 EMD 调制和粒子群模型的发电机组轴心轨迹提纯[J]. 信息与控制, 2013, 42(2): 243-251.
- [11] 白国振, 荆鹏翔. 基于改进粒子群算法的并联机械手运动

学参数辨识[J]. 信息与控制, 2015, 44(5): 545-551.

- [12] 方伟, 孙俊, 谢振平, 等. 量子粒子群优化算法的收敛性分析及控制参数研究[J]. 物理学报, 2010, 59(6): 3686-3694.
- [13] Said M M, Ahmed A K. Quantum particle swarm optimization for electromagnetic[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(10): 2765-2775.
- [14] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm: explosion, stability, and convergence in a multi-dimensional complex space[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.