

求解带时间窗车辆路径问题的混沌遗传算法*

王永锋¹, 杨育¹, 顾永明², 吴彩明³

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆长安铃木汽车有限公司技术中心, 重庆 401321; 3. 重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065)

摘要: 针对遗传算法随机性大、未成熟收敛等缺点, 提出了将混沌搜索技术和遗传算法相耦合的混沌遗传算法来求解带时间窗的物流配送车辆路径问题(VRPTW)。该算法将混沌变量映射到优化变量的取值范围中, 把得到的混沌变量进行编码生成初始种群, 然后在遗传操作进行之后对优秀个体增加混沌扰动, 促进种群的进化收敛速度, 得到最优解。实例计算结果与其他算法比较表明, 该算法在求解 VRPTW 问题时, 搜索效率高, 能以较快的速度收敛于全局最优解, 为求解 VRPTW 问题提供了一种新方法。

关键词: 混沌搜索技术; 混沌遗传算法; 带时间窗的车辆路径问题

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)07-2422-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.005

Chaotic genetic algorithm for solving vehicle routing problems with time windows

WANG Yong-feng¹, YANG Yu¹, GU Yong-ming², WU Cai-ming³

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Technical Centre of Chang'an Suzuki Automobile Company Limited, Chongqing Chang'an, Chongqing 401321, China; 3. School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Aiming at the disadvantage of big randomness and premature convergence in genetic algorithm, the paper put forward the chaotic genetic algorithms which was a combination of chaotic search technology and genetic algorithms to solve the vehicle routing problem with time windows (VRPTW) during the logistics and distribution. The algorithm mapped chaotic variables to the range of optimization variables and coded the getting variables to generate the initial population. Then, after the genetic operations, it increased chaotic disturbance to the excellent individuals, and promoted the convergence rate of populations' evolution and get the optional solution. Compared the calculation results with other algorithms show that when the algorithm solves the VRPTW problem, the search efficiency is high and it can converge in the optional solution in a fast speed and offers a new method to the VRPTW solving.

Key words: chaos search technology; chaos genetic algorithm (CGA); vehicles routing problems with time windows (VRPTW)

0 引言

随着生产和贸易全球化的不断深入,世界价值创造体系在全球出现了前所未有的垂直分离和再构。面对这一国际分工转换的背景,发展中国家有了融入到全球价值链的机会,在未来的几年至十几年中,我国企业将面临着尤为激烈的竞争环境。物流产业作为促进经济发展的加速器,近年来受到国内外各行业极大的重视,并得到了较大的发展。许多规模较大的生产企业、商业企业纷纷建立起配送中心,向商品流通的效率发起挑战^[1]。物流配送是现代化物流管理中的一个重要环节,它是按用户的订货要求,在配送中心进行分货、配货,并将配好的货物及时送交收货人的活动。车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)最早在1959年由Dantzig和Ramser提出,它是物流配送研究领域内的一个非常重要的问题^[2]。带时间窗的

车辆路径问题(vehicle routing problem with time windows, VRPTW)其本质是在VRP上增加了时间窗约束条件的一种变化形式,一直是车辆路径问题的研究热点。它主要研究物流配送中心在客户要求访问的时间窗口内,如何对车辆行驶路径进行合理的安排,从而使配送总成本最小。VRP已经被证明是一个NP-hard问题,Savelsbergh于1985年证明了当车辆数固定时,一个带(硬)时间窗的车辆路径问题(VRPTW)的可行解也是一个NP-hard问题^[3]。于是,众多学者把研究的重点转移到各种启发式算法上,如蚁群算法(ant colony algorithm, ACA)^[4]、遗传算法(genetic algorithm, GA)^[5]、模拟退火算法(simulated annealing algorithm, SAA)^[6]、禁忌搜索算法(tabu search algorithm, TSA)^[7]以及神经网络法(neural network algorithm, NNA)^[8]。应用这些算法对带时间窗物流配送路径进行优化,取得了一定成果,基本上能够满足现代物流配送系统的要求。但是由于带时间窗物流配送调度的复杂性,以及启发式

收稿日期: 2011-11-30; **修回日期:** 2012-01-06 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(71071173); 国家教育部高校博士点科研基金资助项目(20090191110004); 重庆市科技攻关重点资助项目(2011GCG351)

作者简介: 王永锋(1978-), 女, 山西人, 博士, 主要研究方向为生产调度与仿真、人工智能研究等(wyf734@cqu.edu.cn); 杨育(1971-), 男, 四川成都人, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为客户协同创新及网络化制造; 顾永明(1980-), 男, 内蒙古人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为生产调度仿真; 吴彩明(1987-), 男, 山西人, 硕士研究生, 主要研究方向为图像传感与处理。

算法存在的各种不足,至今尚未形成系统的理论与方法。如何寻求更加有效的物流配送方案,一直是人工智能领域的研究难点及热点^[9]。

目前很多学者对混沌遗传算法作了较多的相关研究。例如,刘立衡等人^[10]通过混沌遗传算法对经济负荷分配问题进行了研究,认为该方法可求得高质量的可行解;罗贤海等人^[11]将混沌遗传算法应用在机构创新设计中,实现了机构型创新设计的自动化,缩短了创新设计周期。王敏等人^[12]将混沌遗传算法应用在船舶电力系统供电恢复中,通过一个船舶电力系统典型的故障恢复算例,证明该算法可避免遗传算法不成熟的收敛,较好地实现了船舶电力系统多目标故障恢复。本文针对带时间窗的物流配送路径问题的特点,将混沌遗传算法创新性地应用到带时间窗的物流配送路径优化问题的求解中。

1 混沌遗传算法

遗传算法(GA)是一种启发式蒙特卡洛反演方法^[13],它以自然选择和遗传理论为基础,通过模拟自然界中的生命进化过程,有指导而不是盲目地进行随机搜索,具有简单、快速、鲁棒性好等特点,广泛应用于函数优化、自动控制、组合优化、图像处理等领域。研究证明,遗传算法具有大范围快速的搜索能力,能从概率意义上以随机的方式寻求到问题的最优解。但在实际应用中,遗传算法会出现一些不尽人意的现象,最主要是容易产生早熟、收敛速度缓慢、局部寻优能力较差等现象。

混沌是自然界中一种较为普遍的现象,它看似混乱,却有着精致的内在结构^[14],具有计算精度高、遍历性好和对初始条件敏感性强等特点。是在一定范围内能按其自身的规律不重复地遍历所有状态。在实际应用中,常用 Logistic 迭代方程: $z_{i+1} = uz_i(1 - z_i)$ (u 为控制参量,通常 $0 < u \leq 4$) 来模拟混沌现象,当 $u = 4, 0 \leq z_0 \leq 1$ 时,Logistic 完全处于混沌状态。混沌搜索是通过类似载波的方式将混沌引入优化变量使其呈现混沌状态,然后通过附加小幅度的扰动(混沌变量或者是基于高斯分布等的随机变量)进一步进行局部区域内的细搜索,直到满足终止规则^[15]。

本文利用混沌搜索的遍历性和遗传算法优化的反演性,提出了混沌遗传算法(CGA),其基本思想是将混沌搜索技术作为遗传算法的附加成分引入到优化变量中:利用混沌搜索的遍历性,将混沌运动的范围放大到优化变量的取值范围;然后把得到的混沌变量进行编码表示为染色体,并将其置于问题环境中,根据适者生存的原则,对其进行选择、杂交、变异;接着对各个混沌变量进行小扰动,引导种群进行新一轮的进化;通过一代代不断地进化,最后收敛到一个最适合环境的个体上,求得问题的最优解。

本文所提出的混沌遗传算法相对于一般遗传算法,在时间复杂度上相同,但在计算频次上较一般遗传算法低,即混沌遗传算法收敛得到全局最优解的代数明显多于一般遗传算法,进化代数也比一般遗传算法短。

2 带时间窗的物流配送车辆路径问题的描述与数学模型

2.1 问题描述

带时间窗的物流配送车辆路径问题可以描述为:某一物流

配送中心用多辆汽车向多个客户需求点配送货物,每个客户的位置和需求量为已知,每辆汽车的载重量已知,车辆运输时间范围已知,求一合理的汽车行驶路线安排方案,使得总运距最短,运费最小,运时最短,同时满足以下条件:

- 物流配送中心的位置已知且唯一;
- 每条配送路径上各客户需求量之和不超过配送汽车的载重量;
- 每条配送路径的长度不超过配送汽车一次配送的最大行驶距离;
- 每个客户的需求必须满足,且只能由一辆汽车送货;
- 车辆从配送中心出发,完成配送任务后必须返回中心。

2.2 数学模型

设配送中心 A 有 n 辆汽车,车辆集为 $V = \{i\} (i = 1, 2, \dots, n)$,第 i 辆汽车的载重量为 $Q_i (i = 1, 2, \dots, n)$,向 m 个客户提供服务,客户点集为 $C = \{j\} (j = 1, 2, \dots, m)$,第 j 个客户点的货运量为 $q_j (j = 1, 2, \dots, m)$, $\max q_j \leq \max Q_i$,客户点 j 允许服务的时间范围为 $[ST_j, ET_j]$,其中 ST_j 表示为客户点 j 服务的开始时间, ET_j 表示为客户点 j 服务的结束时间。定义变量如下:

$$y_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{客户点 } j \text{ 的需求由车辆 } i \text{ 完成} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$x_{jki} = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } i \text{ 由客户点 } j \text{ 行驶到客户点 } k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

模型参数定义: c_{jk} 表示车辆从客户点 j 到客户点 k 的运输成本; t_j 表示车辆到达客户点 j 所需要的时间; c_1 表示车辆在客户点处等待的单位时间成本,若车辆在 ST_j 之前到达客户点 j ,则会产生等待成本为 $c_1(ST_j - t_j)$; c_2 表示车辆在客户要求时间之后到达所处以的单位惩罚值,若车辆在 ET_j 之后到达客户点 J ,则处以罚款 $c_2(t_j - ET_j)$ 。则可得到 VRPTW 数学模型如下:

$$\min Z = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^m \sum_{i=1}^n c_{jk} x_{jki} + c_1 \sum_{j=1}^m \max(ST_j - t_j, 0) + c_2 \sum_{j=1}^m \max(t_j - ET_j, 0) \quad (3)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_j q_j y_{ij} \leq q_i \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_i y_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$\sum_j x_{jki} = y_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_k x_{jki} = y_{ij} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad \forall i \quad (7)$$

$$ST_j \leq t_j \leq ET_j \quad (8)$$

模型中,式(3)表示目标函数;式(4)确保每辆车每次的配送量不能超过其相应的载重量;式(5)保证每个客户点只能被一辆车服务一次;式(6)(7)表示每辆车从配送中心出发,送完货后回到配送中心;式(8)是对时间窗的约束。

3 带时间窗的物流配送车辆路问题的混沌遗传算法

3.1 混沌遗传算法的两个关键步骤

混沌遗传算法与标准遗传算法的区别主要体现在以下两个关键步骤。

3.1.1 初始种群的混沌化

由于标准遗传算法在实际应用中存在许多缺陷,如容易产生早熟现象、局部寻优能力较差等。为了克服这些缺陷,本文

利用混沌搜索技术的计算精度高、遍历性好的特点来进行细粒度局部搜索,以此来改善初始种群的个体质量和计算效率。

a) 用混沌理论研究中常用的混沌模型——Logistic 映射对初始种群进行混沌化。Logistic 映射的数学模型为

$$z_{i+1} = uz_i(1 - z_i) \quad i = 0, 1, 2, \dots, k \quad (9)$$

其中: u 为控制参量,通常 $0 < u \leq 4$, u 值的不同, Logistic 映射呈现出不同的状态,如图 1、2 所示。图 1 中,当 $z_0 = 0.1$ 、 $u = 4$ 时, Logistic 呈现出完全混沌状态;图 2 中,当 $z_0 = 0.1$ 、 $u = 1$ 时,混沌映射是一条直线,混沌状态不明显。

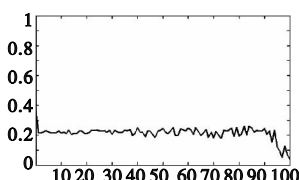


图1 $z_0=0.1$ 、 $u=4$ 时,混沌映射呈现的混沌状态

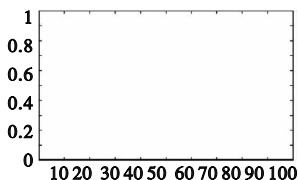


图2 $z_0=0.1$ 、 $u=1$ 时,混沌映射呈现的混沌状态

若 u 值确定,给 z_0 ($z_0 \in [0, 1]$) 赋不同的初始值,则会产生 i 个不同轨迹的混沌变量,如图 3、4 所示。

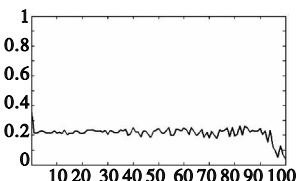


图3 $u=4$ 、 $z_0=0.1$ 时,混沌映射呈现的混沌状态

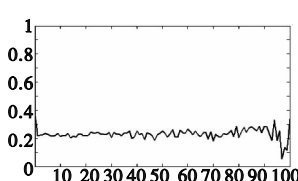


图4 $u=4$ 、 $z_0=0.9$ 时,混沌映射呈现的混沌状态

b) 将 i 个混沌变量按式(10)分别映射到优化变量的取值范围 $[a_i, b_i]$,使其变成混沌变量 z'_i :

$$z'_i = a_i + (b_i - a_i)z_i \quad (10)$$

其中: z'_i 代表 $[z'_1, z'_2, \dots, z'_k]$ 的一个可行解; a_i 、 b_i 代表优化变量的取值范围,计算每一个可行解的适应度,选择种群中适应度较高的个体组成初始种群。为了保证混沌变量搜索的全局性,混沌序列的迭代次数一般取 300 次左右。

3.1.2 优秀个体的混沌优化

在进行遗传操作之后,选取 10% 左右适应度较高的个体对这些优秀个体进行小扰动,以此进一步优化优秀染色体的质量,引导种群快速进化,从而提高最优解的精度。

令 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 为某种群中一个优秀个体,对其每一变量按式(11)进行混沌扰动:

$$x'_k = (1 - \alpha)x^* + \alpha x_k \quad (11)$$

其中: x^* 为优秀个体映射到 $[0, 1]$ 后形成的向量; x'_i 为优秀个体 $(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 被扰动后对应的混沌向量; x_k 为迭代 k 次后的混沌向量; $0 \leq \alpha \leq 1$, α 与 k 之间的关系为

$$\alpha = 1 - \left[\frac{k-1}{k} \right]^m \quad (12)$$

对优秀个体进行再次优化,属于细粒度局部搜索,故选用较小的 α ,迭代次数 k 一般取 50 次, m 为一整数,根据优化目标而定。

3.2 混沌遗传算法的步骤

混沌遗传算法的流程如图 5 所示,具体步骤如下:

a) 编码及基因范围的设定。遗传算法常用的编码方法有二进制编码、浮点数编码和符号编码^[16]。本文采用自然数编码方法(属于符号编码方法),如对 n 辆汽车给 m 个客户点配

送货物的问题,一个解的染色体的形式就是一个长度为 $m + n - 1$ 的字符串,每个基因的取值范围为 $[1, m + n - 1]$ 。用 0 表示配送中心,每条配送线路都始于配送中心,也终于配送中心。为了在编码中反映车辆配送的路径,采用增加虚拟配送中心的方法,分别用 $m + 1, m + 2, \dots, m + n - 1$ 表示各个配送中心。若配送中心有 n 辆汽车,则存在 n 条配送路线。例如,用三辆汽车对 7 个配送点进行货物配送,首先随机生成 m 个客户点的排序,然后对车辆按客户代号进行任务安排,且一辆车的各客户点需求量之和不超过该车的载重量,如一个个体的随机排列是 478956231,客户 4789 的需求量之和大于车辆的最大载重量,而 478 的客户点需求量之和小于车辆的最大载重量,则 0-4-7-8-0 为一条路径。同理,客户点 9562 和客户点 31 的需求量之和正好小于车辆的载重量时,0-9-5-6-2-0、0-3-1-0 分别为另外两条路径。所以整个染色体的编码为:4-7-8-10-9-5-6-2-11-3-1。

b) 参数设定。确定变量的个数 L 、算法中种群的规模 M 、交叉概率 p_c 、变异概率 p_m 及混沌遗传算法的终止迭代次数 N 等参数。 p_c 要选择一个较大的值,一般 $p_c \in [0.5, 1]$; p_m 则需要取一个较小的值,一般 $p_m \in [0.001, 0.05]$ 。

c) 初始种群的混沌化。通过式(9)产生一组与优化变量相同数目的混沌变量,同时利用式(10)把混沌搜索的遍历范围放大到优化变量的取值范围内,在产生大量初始群体的基础上,从中择优选出初始种群。

d) 选择、交叉和变异。采用赌轮^[17]的方式选择遗传算子,其目的是从当前群体中选出优良的个体,使它们有机会作为父代为下一代繁殖子孙,个体的适应度越高,其被选择的机会就越大。交叉首先对群体中的个体进行随机配对,其次在配对的个体中,随机设定个体的交叉处,使配对个体彼此交换部分信息。变异是随机选择种群中的个体,按一定的概率改变群体中个体的基因链,挖掘群体中个体的多样性,从而克服遗传操作可能限于局部解的弊端。

e) 适应度评估。适应度函数是评价个体优劣的指标,能够较为准确地反映个体的优劣性。本文研究的带时间窗的车辆配送路径优化问题的目标是 minimized 配送成本,因此选取的适应度函数为

$$F_i = \frac{1}{Z_i + GM_i}$$

其中: F_i 为个体 i 的适应度; Z_i 为个体 i 的目标函数值; M_i 为个体 i 对应配送路径方案的不可行路径数; G 为对每条不可行路径的惩罚系数。

计算出各个体的适应度值后,将适应度值从大到小进行排序,选取若干个适应度较高的染色体直接带入下一代种群,对剩下的适应度较差的种群再次进行选择、交叉和变异运算,计算出新的适应度值,将上一代若干个适应度值较高的染色体替换第二代中适应度最差的同时数量染色体,得到新的种群。

f) 优秀个体的混沌优化。选取新种群中 10% 左右适应度较高的个体,对这些优秀个体进行混沌化,即在近似最优解的邻域内进行细搜索,以便快速找到问题的满意解。

g) 输出最优解。计算出优秀个体混沌后种群的最大适应度值与平均适应度值,求出最大适应度值与平均适应度值的差值。若差值小于设定的允许误差值,或计算时的迭代次数达到

设定的最大值,则输出最优解,否则转入步骤 e),重复步骤 e)~g),直至达到终止条件。

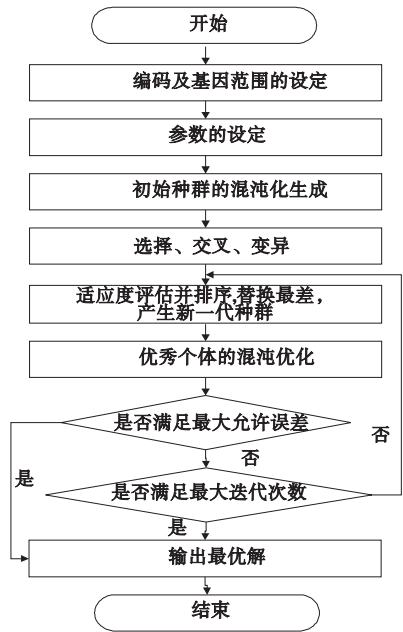


图5 混沌遗传算法流程

4 实验计算及分析

根据上述混沌遗传算法用 MATLAB 编程语言在 MATLAB 7.0 环境下运行,并对文献[16]列出的三辆汽车为 8 个客户点进行货物配送的路径优化问题实例进行了实验计算。实验中客户的配送要求及各客户点之间的距离如表 1、2 所示。

表 1 客户点特征及配送要求

客户点 <i>j</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
货运量 <i>q</i>	2.5	2	5	3.5	2	4.5	3	3.5
配送时间 <i>t</i>	2	3	2	4	3	3.5	4	1.6
配送时间范围 [<i>ST_j</i> , <i>ET_j</i>]	[1,5]	[4,7]	[1,3]	[4,8]	[3,6.5]	[2,6]	[5,9]	[1.5,4]

表 2 客户点间的距离

<i>i</i>	<i>j</i>								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	50	70	85	100	210	110	170	90
1	50	0	75	50	110	60	85	120	110
2	70	75	0	85	110	110	85	85	85
3	85	50	85	0	110	0	100	100	160
4	100	110	110	110	0	110	85	85	110
5	210	60	110	60	110	0	80	100	85
6	110	85	85	100	85	80	0	80	110
7	170	120	85	100	85	100	80	0	110
8	90	110	85	160	110	85	110	110	0

根据文献[16]实例的特点,在实验计算中采用了以下参数:群体规模 $N=90$,交叉概率 $p_c=0.9$,变异概率 $p_m=0.05$,运行代数 $S=300$,变异时基因换位次数取 6,对不可行路径的处罚权系数 $G=100$ (单位/h),单位时间等待成本 $c_1=150$ (单位/h),单位时间惩罚成本 $c_2=200$ (单位/h),利用计算机随机求解 20 次,得到的计算结果如表 3 所示,求得最优解 12 次,最小配送费用为 910,最优解的路径总长为 850 km,与此相对应的车辆路径分别为 0-6-4-0、0-3-1-2-0、0-8-5-7-0。

表 3 混沌遗传算法运行结果

次数	运行时间	结果	次数	运行时间	结果
1	11	850	11	12	915
2	12	850	12	13	850
3	11	890	13	14	850
4	12	850	14	11	860
5	10	875	15	11	885
6	13	860	16	12	850
7	14	850	17	11	850
8	11	850	18	11	850
9	12	850	19	13	850
10	11	850	20	12	850

本文将混沌遗传算法与混合遗传算法、并行遗传算法及标准遗传算法分别对本算例运行 10 次(其他算法的种群取 100),将所得结果进行比较发现,混沌遗传算法求得最优解 7 次,其他算法求得最优解次数不超过 5 次,但混沌遗传算法的求解时间大于并行遗传算法和混合遗传算法(表 4)。因此在种群规模大致相当的情况下,本文提出的混沌遗传算法的解明显优于并行遗传算法和混合遗传算法。

表 4 四种算法运行结果比较

算法	运行结果平均值	运行时间	最优解收敛次数
混沌遗传算法	858	11.7	7
并行遗传算法	858.5	11.2	5
混合遗传算法	862.5	11.5	3
标准遗传算法	871	12.5	2

5 结束语

本文以带时间窗的物流配送车辆路径优化问题为背景,提出了解决 VRP 的一种新的方法——混沌遗传算法(CGA)。该算法把混沌搜索技术与传统遗传算法相结合,利用混沌搜索技术的遍历性,将 Logistic 映射产生的混沌序列放大到优化变量的取值范围,把得到的混沌变量进行编码生成初始种群,以提高初始种群的个体质量;在进行遗传操作之后,对得到的优秀个体再次进行混沌扰动,实施细粒度局部搜索,以加快种群的进化速度,从而得到问题的最优解。实例计算结果表明,该算法比传统的遗传算法具有更好的性能,能很好地解决带时间窗的车辆路径优化问题,为求解 VRP 提供了一种新的思路。当然,该算法还有需要改进的地方,如优化变量的取值范围太大,容易造成搜索时间长,结果偏差大。

参考文献:

[1] 邵国金,沈云琴.基于免疫计算的物流配送车辆路径优化[J].计算机测量与控制,2010,18(7):35-39.
[2] 阎庆,鲍远律.新型遗传模拟退火算法求解物流配送路径问题[J].计算机应用,2004,24(S1):261-263.
[3] 黄凯伟. SVG 开发实践[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.
[4] BELL J E, MCMULLEN P R. Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem[J]. Advanced Engineering Informatics, 2004,18(1):41-48.
[5] PISINGER D, ROPKE S. A general heuristic for vehicle routing problems[J]. Computers & Operations Research, 2007,34(8): 2403-2435.
(下转第 2456 页)

(上接第 2425 页)

- [6] GENG Xiu-tang, CHEN Zhi-hua, YANG Wei, *et al.* Solving the traveling salesman problem based on an adaptive simulated annealing algorithm with greedy search[J]. *Applied Soft Computing*, 2011, 11(4): 3680-3689.
- [7] BRANDO J. A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 157(3): 552-564.
- [8] EFFATI S, JAFARZADEH M. Nonlinear neural networks for solving the shortest path problem[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 189(1): 567-574.
- [9] PAN Quan-ke, FATIH T M, SUGANTHAN P N, *et al.* A discrete artificial bee colony algorithm for the lot-streaming flow shop scheduling problem[J]. *Information Sciences*, 2011, 181(12): 2455-2468.
- [10] 刘立衡, 韩璞, 王东风. 混沌遗传算法研究及其在经济负荷分配问题中的应用[J]. *华北电力大学学报*, 2010, 27(3): 94-96.
- [11] 罗贤海, 许红, 张仁宏, 等. 混沌遗传算法及其在机构创新设计中的应用[J]. *机械设计与研究*, 2007, 23(1): 28-33.
- [12] 王敏, 刘维亭. 混沌遗传算法在船舶电力系统供电恢复中的应用研究[J]. *江苏科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 22(5): 6-10.
- [13] 姚姚. 蒙特卡洛非线性反演方法及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
- [14] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. *控制理论与应用*, 1997, 14(4): 613-615.
- [15] 李鹏, 车阿大. 基于混沌遗传算法的自动化生产单元调度方法[J]. *系统工程*, 2008, 26(11): 75-77.
- [16] 宾松, 符卓. 求解带软时间窗的车辆路径问题的改进遗传算法[J]. *系统工程*, 2003, 21(6): 12-14.
- [17] Z·米凯利维茨. 演化程序——遗传算法和数据编码的结合[M]. 北京: 科学出版社, 1999.