

## 求解两级定位一路径问题的粒子群算法

陈久梅<sup>1,2\*</sup>, 龚 英<sup>1,2</sup>

(1. 重庆工商大学 商务策划学院, 重庆 400067; 2. 电子商务及供应链系统重庆市重点实验室(重庆工商大学), 重庆 400067)

(\* 通信作者电子邮箱 1104053770@qq.com)

**摘 要:**为求解配送网络中的两级定位—路径问题,提出一种在粒子更新过程中融入路径重连启发式搜索策略的粒子群算法。其中,根据两级定位—路径问题中解的属性,提出以中转站、路径、边为对象的三个路径重连搜索模块;同时基于搜索模块的不同组合,提出四种路径重连策略。应用不同规模算例测试结果表明,该粒子群算法能有效求解两级定位—路径问题,且路径重连策略一的求解效率较高,策略二求解的稳定性较好,策略三求解时各方面均无突出表现,策略四求解时解的质量较高。

**关键词:**两级定位—路径问题;粒子群算法;路径重连;配送

**中图分类号:** TP18 **文献标志码:** A

### Particle swarm optimization for two-echelon location-routing problem

CHEN Jiumei<sup>1,2\*</sup>, GONG Ying<sup>1,2</sup>

(1. School of Business Planning, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Electronic Commerce & Supply Chain System (Chongqing Technology and Business University), Chongqing 400067, China)

**Abstract:** In order to solve two-echelon location-routing problem of distribution network, particle swarm optimization with path relinking integrated into particle update process was proposed. Three path relinking search modules with regarding transfer station, path and edge as the object were put forward according to the attributes of the solution of two-echelon location-routing problem. At the same time, on the basis of the different combinations of these search modules, four kinds of path relinking strategy were put forward. The test results on different scale examples show that the particle swarm optimization can solve two-echelon location-routing problem effectively, the first path relinking strategy has higher efficiency. The second one has higher stability, the third one has no obvious performance in every aspect, and the fourth one has higher quality solution.

**Key words:** Two-Echelon Location-Routing Problem (2E-LRP); Particle Swarm Optimization (PSO); path relinking; distribution

## 0 引言

“最后一公里”作为配送的最后一个环节,是工作人员直接与客户面对面的时机,它不仅可以实现“门到门”的服务,而且在企业品牌传播和售后服务等工作中占有重要地位。为确保在“最后一公里”的良好表现,越来越多的企业在城市周边设立中转站,用于进城物品的分拣、拼装和转运,这使得企业的配送活动从以往的“配送中心—顾客”转向“配送中心—中转站—顾客”,配送网络的结构也随之改变,即由一级配送网络转向两级配送网络。两级配送网络中同时考虑定位配给、车辆调度与路径安排的问题即为学术界所研究的两级定位—路径问题(Two-Echelon Location-Routing Problem, 2E-LRP)<sup>[1]</sup>。该问题即考虑两级配送网络中,设施点如何选址,下级设施点与上级设施点以及顾客与二级设施点之间的归属,以及针对每个设施点车辆行驶路径如何安排的问题。

两级定位—路径问题包含三个 NP-Hard 子问题:两级设施定位问题(Two-Echelon Facility Location Problem, 2E-FLP)、两级车辆路径问题(Two-Echelon Vehicle Routing Problem, 2E-VRP)和有容量限制的定位路径问题(Capacitated Location-Routing Problem, CLRP),其求解非常困难。因此,目前的研究主要集中在启发式算法求解方面,如模拟退火算法<sup>[2]</sup>、大规

模邻域搜索算法<sup>[3-4]</sup>、禁忌搜索算法<sup>[5-7]</sup>、遗传算法<sup>[8]</sup>、基于两阶段分解思想的“三角”启发式算法<sup>[9]</sup>和贪婪随机启发式算法<sup>[10-11]</sup>。

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是 Kennedy 和 Eberhart 受鸟群觅食启发,于 1995 年提出的一种模拟鸟集群飞行觅食的行为,通过鸟的集体协作使群体达到最优目的的群集智能优化算法<sup>[12]</sup>。该算法具有较好的并行性,且收敛速度快,近年来在旅行商问题、车辆路径问题及设施定位等 NP-Hard 问题的求解方面应用广泛<sup>[13]</sup>。在此,针对两级定位—路径问题,引入一种高效启发式搜索策略——路径重连(Path Relinking, PR)<sup>[14]</sup>的思想,设计相应的粒子群算法进行求解。

## 1 问题描述

两级定位—路径问题可描述如下:在两级配送网络中,从配送中心运送出来的货物需要经过中转站,然后再从中转站运送到顾客。因此,在由大量潜在配送中心、潜在中转站和顾客构成的两级配送网络中,需要确定开放哪些配送中心和中转站,以及各顾客分别分配给哪个开放的中转站、每个开放的中转站分配给哪个开放的配送中心,并设计相应的车辆行驶路径,使设施开放成本、车辆固定使用成本和车辆行驶成本之

收稿日期:2013-02-24;修回日期:2013-05-02。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(71101159)。

作者简介:陈久梅(1976-),女,重庆人,副教授,博士,主要研究方向:物流系统优化、智能算法; 龚英(1968-),女,重庆人,教授,主要研究方向:逆向物流。

和最小,如图1所示。

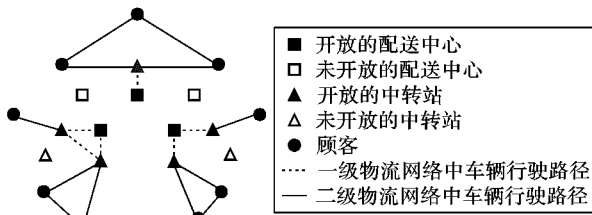


图1 两级定位一路径问题示意图

该问题的假设条件如下:

- 1) 每个顾客被访问且仅被访问一次,每个开放的中转站被访问且仅被访问一次;
- 2) 每个顾客分配且仅分配给一个开放的中转站,每个开放的中转站分配且仅分配给一个开放的配送中心;
- 3) 车的装载量不能超过其容量,设施点的货物量不能超过其容量;
- 4) 每个中转站的货物量等于分配给其的所有顾客需求量之和;
- 5) 任意两个中转站之间无二级路径相连,任意两个配送中心之间无一级路径相连;
- 6) 一条路径需要使用一辆车,车辆行驶成本与其行驶距离成正比。

## 2 求解2E-LRP的粒子群算法

### 2.1 粒子群算法

粒子群算法采用速度一位移模型,将群体中的个体看成多维空间一个没有质量和体积的粒子。每个粒子代表一个可行解,具有速度和位置两个属性。粒子根据自身和同伴的飞行经验进行动态调整,即每个粒子通过跟踪自身最优和群体最优来不断更新自己的位置和速度。更新公式如下:

$$V_{i+1} = \omega V_i + c_1 \text{rand}() (X_{pbest} - X_i) + c_2 \text{rand}() (X_{gbest} - X_i) \quad (1)$$

$$X_{i+1} = X_i + V_{i+1} \quad (2)$$

其中: $\omega$ 为惯性权重; $c_1$ 、 $c_2$ 为加速度常数; $\text{rand}()$ 为(0,1)的随机数; $V_i$ 为粒子当前速度,也称作惯性行为; $X_i$ 为粒子当前位置; $X_{pbest}$ 为粒子个体历史最优, $X_{pbest} - X_i$ 称作个体认知行为; $X_{gbest}$ 为种群历史最优, $X_{gbest} - X_i$ 称作社会学习行为。

粒子群初始位置和速度随机产生,然后按式(1)、(2)进行迭代,直至找到满意的解。据问题描述可知,若采用传统粒子群算法求解两级定位一路径问题,其解空间非常复杂。受到该算法中粒子每次更新都会受到惯性行为、个体认知行为和社会学习行为三个方面影响的启发,引入路径重连策略思想,分别将上述三方面的影响转化为粒子当前位置的邻域搜索、与个体历史最优之间的路径重连、与种群历史最优之间的路径重连,从而形成求解两级定位一路径问题的粒子群算法。

### 2.2 求解2E-LRP的粒子群算法

对于两级定位一路径问题,粒子群算法中的每个粒子就是一个可行解。求解两级定位路径问题的粒子群算法如下:

- 1) 算法初始化阶段:初始化种群规模  $SN$  和算法最大迭代次数  $T_{max}$ 。
- 2) 生成初始解阶段:生成  $SN$  个初始解,记为  $x_i$ ,其个体历史最优  $x_{ibest} = x_i$ ,种群历史最优  $g_{best} = \min\{x_i\}$ 。
- 3) 迭代改进阶段:

For 算法迭代次数  $= 1 \sim T_{max}$

当前解状态设置为未处理;

While 系统中存在未处理的当前解

随机选择系统中未处理的当前解  $x_i$ ;

当前解状态修改为已处理;

调用邻域搜索策略,生成当前解的邻域解  $x_i'$ ;

调用路径重连策略实现  $x_i'$  向  $x_{ibest}$  靠近并生成中间解  $x_i''$ ;

调用路径重连策略实现  $x_i''$  向  $g_{best}$  靠近并生成中间解  $x_i'''$ ;

搜索过程结束时包括当前解在内的最优解  $x_i^* = \min\{x_i, x_i', x_i'', x_i'''\}$

If  $x_i^*$  比  $x_i$  更优

用  $x_i^*$  替换  $x_i$ ;

End

If  $x_i^*$  比  $x_{ibest}$  更优

用  $x_i^*$  替换  $x_{ibest}$ ;

End

End

If  $\min\{x_i^*\}$  比  $g_{best}$  更优

用  $\min\{x_i^*\}$  替换  $g_{best}$ ;

End

算法迭代次数加1。

End

4) 输出结果:输出种群最优解  $g_{best}$ 。

#### 2.2.1 初始解的生成

生成两级定位一路径问题初始解的方法如下:首先,随机选择未开放的中转站将其开放,从距离该中转站最近的  $r$  个未归入任意中转站的顾客中随机选择一个顾客将其归入,重复选择顾客直到该中转站容量超限;重复未开放中转站及应归入该中转站顾客的选择,直到所有顾客均归入相应的中转站。随后,采用经典的 C-W (Clarke-Wright) 节约算法,在满足车辆容量限制的条件下,生成从各开放的中转站到顾客的车辆行驶路径,从而完成二级配送网络中中转站的选择及从中转站到顾客之间的车辆行驶路径。最后,计算归属各开放中转站的顾客需求量之和作为对应中转站在一级配送网络中的货物量,按类似的方法,可确定一级配送网络中配送中心的选择及从配送中心到中转站的车辆行驶路径。如此便可完成初始解的生成。

#### 2.2.2 邻域解的产生

两级定位一路径问题,其产生邻域解的考虑对象有顾客、中转站及路径三类。以顾客为对象的邻域解采用单个顾客位置的移动及两个顾客之间的交换两种方式产生;以中转站为对象的邻域解采用单个中转站开放与否的状态改变及两个状态不同中转站状态对换两种方式产生;以路径为对象的邻域解采用常用的 2-opt 方式产生。每次产生邻域解时,依次采用上述五种方式生成不同的邻域解,从中选择一个最优的作为当前解的邻域解。

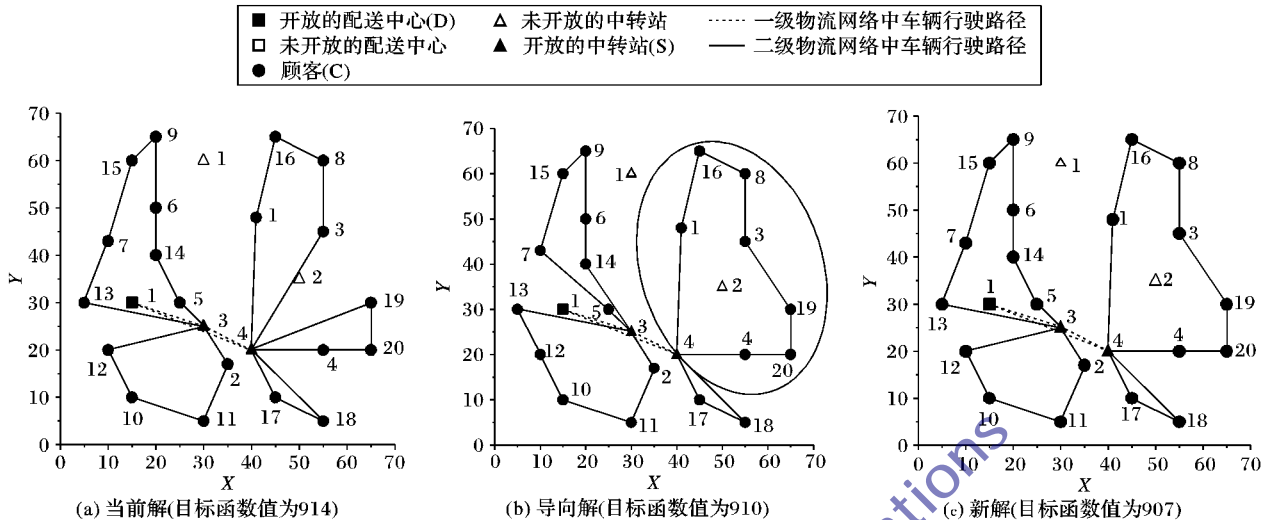
#### 2.2.3 路径重连策略

路径重连策略是通过建立当前解与导向解之间的连接路径,以快速获得新解的一种高效启发式搜索策略。该策略的主要思想是:选择一个较优解作为导向解,通过包含在导向解中的属性去引导当前解沿着相应路径一步一步向导向解靠近,靠近过程中产生新解。

根据两级定位一路径问题中解的属性,提出三个路径重连搜索模块,即以“中转站”为对象的路径重连模块(简称“中转站靠近”)、以“路径”为对象的路径重连模块(简称“路径靠近”)及以“边”为对象的路径重连模块(简称“边靠近”)。

在此以第 3 章中编号为“1-4-20”的算例为例,说明以“路径”为对象的路径重连模块的实施过程,如图 2 所示。图 2 展示的是当前解(其目标函数值为 914)向导向解(其目标函数值为 910),以向导解中路径  $S4 \rightarrow C4 \rightarrow C20 \rightarrow C19 \rightarrow C3 \rightarrow C8 \rightarrow C16 \rightarrow C1 \rightarrow S4$  引导当前解沿着相应路径向导向解靠近,即在

满足设施点容量及车载容量条件下,将该路径直接移置到当前解中,得到新解(其目标函数值为 907)。以“中转站”为对象的路径重连模块及以“边”为对象的路径重连模块的实施过程与以“路径”为对象的路径重连模块类似,在此不再赘述。



在此,基于路径重连模块的不同组合,提出以下四种路径重连策略:

P1:顺序执行各路径重连搜索模块,直到结束。

P2:顺序执行各路径重连搜索模块,若出现比当前解更优的中间解,则用该中间解替换当前解,回到第一个模块继续执行;否则,执行下一步,直到结束。

P3:顺序执行各路径重连搜索模块,若出现比当前解更优的中间解,则用该中间解替换当前解,继续用该模块进行搜索,直到更差的中间解出现;否则,继续执行下一步,直到结束。

P4:顺序执行各路径重连搜索模块,若出现比当前解更优的中间解,则用该中间解替换当前解,并结束,否则,继续执行下一步,直到结束。

在此,以“路径靠近”为例,展示四种路径重连策略,如图 3 所示,其中 P1 为图 3 中去掉虚线框所示判断比较部分。

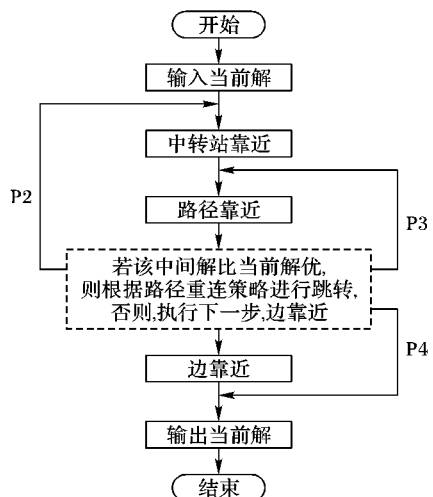


图 3 路径重连策略

### 3 算例分析

为了分析所设计的粒子群算法求解两级定位—路径问题

的效果以及不同路径重连策略对算法求解的影响,利用相应的算例进行求解。由于该问题目前缺乏公认的国际算例,本文在文献[15]一级定位—路径问题算例规模分别为 25 点、50 点及 75 点的基础上,选择前面部分设施点作为两级定位—路径问题的潜在配送中心(依次记为  $D1, D2 \dots$ ),剩余设施点作为潜在在中转站(依次记为  $S1, S2 \dots$ ),顾客点不变(依次记为  $C1, C2 \dots$ )产生两级定位—路径问题的算例。算例中需补充和调整的参数如表 1 所示,其余参数详见文献[15]。

表 1 补充、调整的参数

算例 规模	配送中心		中转站		大货车		小货车	
	容量	费用	容量	费用	容量	费用	容量	费用
25 点	300	150	150	75	240	80	60	20
50 点	1000	500	200	100	480	160	120	40
75 点	1500	750	300	150	720	240	120	40

使用 C#编程实现不同路径重连策略下的粒子群算法,在 Windows XP 系统, Pentium Dual-Core CPU E5700@3 GHz, 2 GB 内存的计算环境下,对上述算例进行求解。种群规模  $SN = 25$ , 算法最大迭代次数  $T_{max} = 400$ , 初始解生成过程中所用参数  $r = 4$ 。车辆行驶成本与其行驶距离比例系数取 1, 随机运行 50 次的求解结果如表 2 所示。表 2 中的算例采用“e-f-g”形式表达,其中“e”代表潜在配送中心数量、“f”代表潜在中转站数量、“g”代表顾客数量、“e+f+g”为算例规模;加粗项为该算例该项指标的最优值。

由表 2 可知,随机运行 50 次,路径重连策略 P1 求解得到的最好解质量较好;路径重连策略 P4 求解得到的最差解质量较好;从平均解的角度来看,四种路径重连策略的求解效果相当;路径重连策略 P2 求解得到解的标准差相对较小;路径重连策略 P1 在计算时间方面占有绝对优势。因此,若从计算时间和最好解的角度来看,路径重连策略 P1 较优;若从最差解的角度来看,路径重连策略 P4 较优;若从解的稳定性来看,路径重连策略 P2 较优。

图 4 给出了采用四种路径重连策略的粒子群算法求解两



级定位一路径问题算例“3-7-65”时,种群最优解随迭代次数变化趋势曲线。

从图4可知,求解两级定位一路径问题时,采用路径重连策略P3的粒子群算法最先出现早熟;相对来说,采用路径重连策略P1的粒子群算法能较好避免早熟,且其收敛性较好。

表2 采用四种路径重连策略随机运行50次的求解结果

算例 (e-f-g)	路径重 连策略	最好解	最差解	平均解	标准差 系数%	平均计算 时间/s
1-4-20	P1	914	973	946	1.60	<b>668</b>
	P2	910	<b>965</b>	944	<b>1.31</b>	848
	P3	<b>907</b>	971	942	1.55	785
	P4	<b>907</b>	<b>965</b>	<b>940</b>	1.70	787
2-3-20	P1	<b>907</b>	982	942	1.91	711
	P2	910	988	<b>941</b>	2.07	835
	P3	913	<b>974</b>	<b>941</b>	<b>1.76</b>	772
	P4	<b>907</b>	993	945	2.20	777
2-6-42	P1	2013	2178	2084	1.90	<b>1190</b>
	P2	<b>2002</b>	2160	2088	2.16	1380
	P3	2012	2161	2089	1.87	1297
	P4	2006	<b>2159</b>	<b>2082</b>	<b>1.66</b>	1296
3-5-42	P1	<b>1929</b>	2077	1999	2.07	<b>1098</b>
	P2	1935	<b>2057</b>	<b>1996</b>	<b>1.91</b>	1258
	P3	1930	2058	<b>1996</b>	1.97	1189
	P4	<b>1929</b>	2060	2000	1.96	1182
3-7-65	P1	<b>3195</b>	3550	3326	2.75	<b>1337</b>
	P2	3222	3511	<b>3306</b>	<b>2.21</b>	1587
	P3	3227	3513	3326	2.48	1523
	P4	3206	<b>3501</b>	3330	2.35	1535
4-6-65	P1	<b>3183</b>	3530	<b>3343</b>	2.95	<b>1359</b>
	P2	3185	3566	3346	3.21	1481
	P3	3203	3563	3352	3.17	1439
	P4	3203	<b>3518</b>	3351	<b>2.58</b>	1439

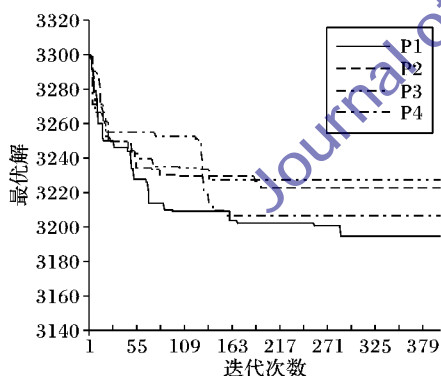


图4 种群最优解随迭代次数的变化趋势

在此,给出算例“3-7-65”最好解(3195)对应的网络及路径明细,如表3所示。

从表3可知,算例“3-7-65”最好解(3195)中开放了配送中心D1及中转站S2、S3、S6、S7,一级物流网络中共有2条车辆行驶路径,二级物流网络中共有12条车辆行驶路径,两级网络中车辆行驶路径长度为885。因此,代入表1所示参数,计算目标函数=配送中心开放成本 $750 \times 1$ +中转站开放成本 $150 \times 4$ +一级物流网络大货车的使用成本为 $240 \times 2$ +二级物流网络中小货车的使用成本 $40 \times 12$ +两级网络中车辆行驶成本 $885 \times 1 = 3195$ 。

进一步分析,由文献[15]知,算例“3-7-65”的顾客需求总量为1168。根据表1所示参数得知,最好解“3195”开放了

最少的配送中心及中转站,而且使用了最少的大货车。

表3 算例“3-7-65”最好解网络及路径明细

网络	路径 序号	需求量	路径 长度	路径明细
二级 网络	1	110	78	S2→C24→C49→C13→C33→ C18→C60→C61→C4→S2
	2	80	40	S2→C26→C40→C19→C41→S2
	3	96	72	S2→C32→C59→C52→C25→ C64→C27→S2
	4	83	36	S3→C9→C57→C56→S3
	5	104	68	S3→C12→C51→C17→C11→ C6→C31→S3
	6	109	73	S3→C37→C8→C28→C34→ C62→C50→S3
	7	71	51	S6→C36→C55→C21→C48→S6
	8	117	101	S6→C42→C43→C7→C23→ C46→C16→C22→S6
	9	106	68	S6→C54→C14→C63→C2→ C53→C20→C1→S6
	10	110	79	S7→C5→C39→C45→C30→ C58→S7
	11	93	54	S7→C10→C3→C65→C15→ C44→S7
	12	89	42	S7→C35→C29→C38→C47→S7
一级 网络	1	582	76	D1→S3→S2→D1
	2	586	47	D1→S7→S6→D1

注:路径长度按欧几里得距离计算求和后取整得出。

## 4 结语

针对配送系统“最后一公里”中出现的两级定位一路径问题,提出求解的粒子群算法。考虑到采用传统粒子群算法求解两级定位一路径问题的解空间非常复杂,在粒子更新过程中引入一种高效的启发式搜索策略——路径重连策略,并详细给出了路径重连模块,以及基于模块不同组合的重连策略。采用由一级定位一路径问题算例调整形成的两级定位一路径问题算例进行测试,结果表明,本文算法能有效求解两级定位一路径问题,且不同路径重连策略在求解效率、解的质量及稳定性方面各有优劣。因此,在应用粒子群算法求解两级定位一路径问题时,可根据实际需要并结合决策者的风险偏好选用相应的路径重连策略进行求解。下一步的研究集中在两级定位一路径问题的建模,以及求解该问题的其他启发式算法设计方面。

## 参考文献:

- [1] NAGY G, SALHI S. Location-routing: Issues, models and methods [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177(2): 649-672.
- [2] LIN C K Y, CHOW C K, CHEN A. A location routing-loading problem for bill delivery services [J]. Computers & Industrial Engineering, 2002, 5(25): 43.
- [3] AMBROSINO A D, SCIAMACHENA A, SCUTELLAB M G. A heuristic based on multi-exchange techniques for a regional fleet assignment location-routing problem [J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(2): 442-460.
- [4] CONTARDO C, HEMMELMAYR V, CRAINIC T G. Lower and upper bounds for the two-echelon capacitated location-routing problem [R]. Montreal: CIRRELT, 2011.

(下转第2268页)

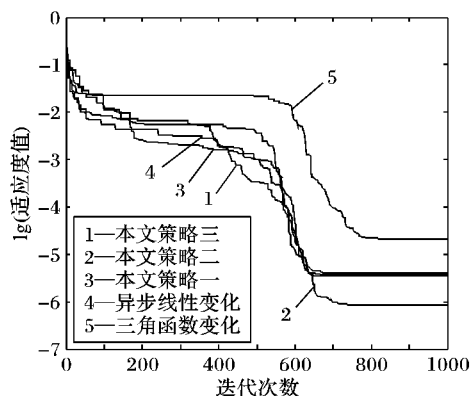


图5 Griewank 函数的适应度曲线

从表1和表2可以看出,利用本文学习因子取值策略的 PSO 算法求解出的各函数最优值总体上优于其他学习因子法,并且取值策略二效果最佳,策略三次之,策略一最差,而这正是参数非线性变化和 PSO 算法智能特性的有效利用。同时还可发现,采用指数递减权重与学习因子融合的效果总体上优于线性递减权重与学习因子的融合。实验结果表明,采用非线性惯性权重和学习因子相互作用的 PSO 算法能够有效改善算法的全局和局部搜索能力,并求解出更优解。

观察图2至图5可以发现,采用本文提出的学习因子取值策略的 PSO 在收敛速度上的效果并不明显,但是能够有效改善算法的优化精度。在粒子飞行过程中,本文提出的算法增加了粒子之间的相互作用,从而增强了搜索最优解的能力。此外,从图中还可发现,策略二在4个函数中均表现了良好的优化性能,其适用范围较广;策略三在单峰函数中的优化性能较好,而在多峰函数中却与其他学习因子法相差无几;策略一性能一般,并且在 Rosenbrock 函数中的效果较异步线性变化学习因子法差,其适用性较弱。

#### 4 结语

学习因子的多种改进策略一定程度上能够改善 PSO 算法的搜索性能,但是它和惯性权重的变化相互脱离,削弱了 PSO 进化过程的统一性而不利于粒子进行全局搜索,故本文在分析 PSO 算法学习因子各种取值策略的基础上提出了一种新的学习因子调整策略,即认知学习因子随惯性权重逐渐减小,社会学习因子随惯性权重逐渐增大。针对不同的优化

问题采用了三种函数对应关系,从对测试函数和多种相关 PSO 的比较分析不仅验证了该算法是一种有效的新型全局 PSO 算法,也为通过控制惯性权重和学习因子之间的相互关系来改善算法性能提供了一种新的研究思路。

#### 参考文献:

- [1] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE, 1995, 4: 1942-1948.
- [2] 纪震,廖惠连. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] KENNEDY J. Stereotyping: improving particle swarm performance with cluster analysis [C]// Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE, 2000, 2: 1507-1512.
- [4] LIU B, WANG L, JIN Y-H, *et al.* Improved particle swarm optimization combined with chaos [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005, 25(5): 1261-1267.
- [5] SHI Y, EBERHART R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization [C]// Proceedings of the 2001 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE, 2001: 101-106.
- [6] SHI Y, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer [C]// IEEE World Congress on Computational Intelligence: The 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. Piscataway: IEEE, 1998: 69-73.
- [7] CHATTERJEE A, SIARRY P. Nonlinear inertia variation for dynamic adaption in particle swarm optimization [J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(3): 859-971.
- [8] 田东平, 赵天绪. 基于 Sigmoid 惯性权重的自适应粒子群优化算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(12): 3058-3061.
- [9] SUGANTHAN P N. Particle swarm optimiser with neighbourhood operator [C]// CEC 99: Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE, 1999, 3: 1958-1962.
- [10] RATNAWEERA A, HALGAMUGE S. Self-organization hierarchical particle swarm optimizer with varying acceleration coefficients [J]. Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 240-255.
- [11] 毛开富, 包广清. 基于非对称学习因子调节的粒子群优化算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(19): 182-184.
- [12] 谢晓峰, 张文俊. 微粒群算法综述[J]. 控制与决策, 2003, 18(2): 130-134.
- [13] 徐生兵. 一个改进学习因子的粒子群算法[J]. 信息安全与技术, 2012, 7(19): 17-19.
- [14] 李宁, 孙德宝. 基于差分方程的 PSO 算法粒子运动轨迹分析[J]. 计算机学报, 2006, 29(11): 2052-2061.
- [15] Research, 2012, 216(1): 113-126.
- [11] NGUYEN V P, PRINS C, PRODHON C. A multi-start iterated local search with tabu list and path relinking for the two-echelon location-routing problem [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(1): 56-71.
- [12] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of 1995 International Conference on Neural Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1995: 1942-1948.
- [13] KHARE A, RANGNEKAR S. A review of particle swarm optimization and its applications in Solar Photovoltaic system [J]. Applied Soft Computing, 2012, 13(5): 2997-3006.
- [14] RESENDE M G C, RIBEIRO C C, GLOVER F, *et al.* Scatter search and path-relinking: fundamentals, advances, and applications [M]// Handbook of Metaheuristics: International Series in Operations Research & Management Science Volume 146. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 87-107.
- [15] 胡大伟. 设施定位和车辆路线问题模型及其启发式算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008: 129-133.

(上接第2264页)

- [5] STERLE C. Location-routing models and methods for freight distribution and infomobility in city logistics [D]. Napoli: Università degli Studi di Napoli "Federico II", 2009.
- [6] BOCCIA M, CRAINIC T G, SFORZA A, *et al.* A metaheuristic for a two echelon location-routing problem [J]. Experimental Algorithms, 2010, 6049: 288-301.
- [7] CRAINIC T G, SFORZA A, STERLE C. Tabu search heuristic for a two-echelon location-routing problem [R]. Montreal: CIRRELT, 2011.
- [8] JIN L, ZHU Y L, SHEN H, *et al.* A hybrid genetic algorithm for two-layer location-routing problem [C]// Proceedings of 2010 4th International Conference on New Trends in Information Science and Service Science. Piscataway: IEEE, 2010: 642-645.
- [9] 王绍仁, 马祖军. 震害紧急响应阶段应急物流系统中的 LRP[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(8): 1497-1507.
- [10] NGUYEN V P, PRINS C, PRODHON C. Solving the two-echelon location routing problem by a GRASP reinforced by a learning process and path relinking [J]. European Journal of Operational