

基于单亲遗传算法的动态设备布局仿真研究

李波,邱枫

(天津大学 管理学院,天津 300072)

摘要:针对柔性生产环境下的设备布局问题,提出了一种基于单亲遗传算法原理的启发式算法.发展了一种新颖的适用于动态设备布局的遗传换位操作算子,并提出在单期布局编码子串上应用换位概率的策略,增加了种群的多样性. Matlab 编程实现算法,通过大量仿真模拟并与其他算法进行比较分析,证实了所提出方法的有效性.提出的算法在问题规模不大时可以迅速而准确的获得优化解,在问题规模较大时也能在较短时间(与其他算法相比)获得满意解,因此具有较好的综合性能.

关键词:动态设备布局问题;启发式算法;单亲遗传算法

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2007)01-0074-06

Simulation of the dynamic plant layout problem based on partheno genetic algorithm

LI Bo, QIU Feng

(School of Management, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A heuristic algorithm based on PGA was proposed to solve the plant layout problem in flexible manufacturing systems. A new position-switch genetic operator for DPLP was developed. Position-switch probability strategy on single-period layout was used to increase individuals' diversity. The effectiveness of proposed method is demonstrated by simulation examples and comparison with other approaches. Proposed algorithm produces optimal solutions speedily and accurately and provides acceptable solution in a reasonable time. Its performance is very good while considering both solution quality and computational time.

Keywords: DPLP; heuristic approach; PGA

在当今以市场为驱动的经济环境下,制造企业力求适应市场的变化而在竞争中立于不败之地,柔性生产系统(FMS)应运而生.生产车间的设备布局问题是柔性生产系统(或柔性生产单元)在设计初期必须考虑的重要问题之一.柔性即是指灵活应对市场,在拉动式生产方式下,企业面临的是最终用户不断变化的需求,静态设备布局问题(static plant layout problem, SPLP)假设物料流不变,不适用于动态变化的环境,动态设备布局问题(dynamic plant layout problem, DPLP)在 SPLP 的基础上,从多时期的角度出发,每个时期设备间的物料流量各不相同,并考虑设备的移动成本,在总的规划时间内对设

备布局问题进行优化求解.

1 动态设备布局问题

动态设备布局问题,包括为每一期选择一个静态设备布局方案和决定是否在下一期改变这个布局.图1是一个单期6台(2×3)设备布局的例子,用236145(数字代表设备编号)来表示.

对实际问题进行简化,进行以下假设:

1)设备占地面积相同;2)设备数小于等于位置数(小于时可通过增加虚拟设备来解决);3)设备间的单位物流运输成本相同(在此为了简化可设为1);4)设备的移动成本与布局方式无关(是某个常量);5)设备间运输距离,同行或同列的设备间运距为其中心的间距、非同行或非同列的设备间运距为设备中心之间的折线距离(例如图1中设备2到设

备 4 的运距为 2,设备 1 到 6 的运距为 3)。

2	3	6
1	4	5

图 1 6 台设备单期布局图例

Fig. 1 6 plant single period layout example

根据以上假设,结合 Koopmans 和 Beckman 的二次分配模型^[1]给出 DPLP 的数学模型:

$$\min Z = \sum_{t=1}^P \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{ik} d_{jl} X_{ij} X_{kl} + \sum_{t=2}^P \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n A_{ijl} Y_{ijl}, \quad (1)$$

$$\text{S. T. } X_{ij} = 1, j = 1, \dots, n, t = 1, \dots, P, \quad (2)$$

$$X_{ij} = 1, i = 1, \dots, n, t = 1, \dots, P, \quad (3)$$

$$Y_{ijl} = X_{(t-1)ij} X_{iil}, \quad i, j, l = 1, \dots, n, t = 2, \dots, P. \quad (4)$$

式中: P 是总的时期数; n 是设备台数; i, k 代表布置中的设备; j, l 代表位置; f_{ik} 代表在第 t 期设备 i 到 k 物流运输成本(由于假设单位物流成本为 1, f_{ik} 也就是设备间的物流量); d_{jl} 是位置 j 到 l 间的运输距离; X_{ij} 是 0, 1 变量, 代表在第 t 期将设备 i 定位于 j 位置; Y_{ijl} 是 0, 1 变量, 代表在第 t 期初将设备 i 从位置 j 移动到位置 l ; A_{ijl} 代表在第 t 期将设备 i 从位置 j 移动到位置 l 的移动成本。

模型是在规划的总时间内, 最小化每期物流成本与设备移动成本之和。式(1)是最小化目标函数; 约束(2)、(3)表示在每期中每台设备都要定位于一个位置, 每个位置都有一台设备; 约束(4)表示只有在连续的 2 期中设备的位置发生改变时, 0, 1 变量 Y_{ijl} 才能取到 1。

在 n 设备、 t 时期问题中, 要计算 $(n!)^t$ 个布局方案的总成本才能得出最佳的解决方法。即使 6 设备 5 期的问题也有多于 1.9×10^{14} 种布置方案。对于这种大规模问题, 最优化方法是不适用的, 需要使用启发式算法来得到优化解决方案。

Rosenblatt (1986) 用动态规划 (dynamic programming, DP) 方法来解决 DPLP 问题^[2]。他把每一期视为 DP 中的阶段 (stage), 一个具体的单期布局方案 (SPLP 方案) 则为 DP 中的状态变量 (state)。由于 DP 方法不适用于大规模的问题, 所以他又提出了启发式 DP 方法, 但也不是十分有效。选择一些物流成本较低的单期布局方案来构成 DP 可能会有更好的效果, 但是, 由于要考虑移动成本, 对于固定

物流量而言最优的单期静态布局方案从多期的角度来说很可能不是最优的。其他的一些方法比 Rosenblatt 提出的 DP 启发式方法更好一些。如 Urban 提出的一种最速下降成对交换 (steepest-descent pairwise exchange) 启发式算法, 这种方法类似于 CRAFT (Armour 和 Buffa) 算法。Kusiak 和 Heragu^[3] 对不同的数学规划方法进行了研究。Conway 和 Venkataramanan^[4], Balakrishnan 和 Cheng^[5] 用遗传算法解决 DPLP 问题, Kaku 和 Mazzola 使用了禁忌搜索法 (tabu search)^[6]。Baykasoglu 和 Gindy^[7] 针对 DPLP 问题提出一种模拟退火算法, 利用 Balakrishnan 等的试验问题, 他们证明这种算法比 Conway 和 Venkataramanan、Balakrishnan 和 Cheng 的 GA 算法要好。SA 算法中的参数设置涉及到确定初始温度 (initial temperature) (可能在邻域搜索 neighborhood search 中, 会接受一个较差的解决方案), 温度下降速度 (一个较差方案的接受概率下降), 以及反复次数 (the number of iterations)。Balakrishnan 等^[8] 提出了一种混合遗传算法对 DPLP 进行优化计算。

文中基于单亲遗传算法 (partheno-genetic algorithm, PGA) 的机理提出一种针对 DPLP 优化算法, 该算法采用在一条染色体进行遗传操作的进化方法。并使用前人曾用的算例对算法进行测算, 同时与已有算法进行比较分析。

2 基于单亲遗传算法的 DPLP 方法

单亲遗传算法 (PGA) 是李茂军、童调生等^[9] 提出的一种序号编码遗传算法 (GA)。PGA 不同于传统遗传算法的是取消了传统遗传算法 (TGA) 序号编码的交叉算子, 代之以仅在一条染色体上操作的基因重组等遗传算子, 简化了遗传操作, 提高了计算效率, 并且不要求初始群体的多样性, 也不存在“早熟收敛”问题, 并且李茂军等对 PGA 的全局收敛性进行了研究; 文献证明 PGA 在列车占线问题、模式聚类问题、车辆路径问题和物流配送问题等组合优化问题的求解中明显优于传统遗传算法 (TGA)。

2.1 编码方案

单亲遗传算法采用序号编码方式, 对于 n 台设备 t 时期的动态设备布局问题 (DPLP), 先把单期的多行静态布局按照设备从上到下从左到右的顺序进行编码, 然后再按时期数将各期的静态布局编码顺序串接起来。以 6 台 (2 × 3) 设备 P 期为例, $v = [2\ 3\ 6\ 1\ 4\ 5\ | 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ | \dots [4\ 6\ 1\ 5\ 3\ 2]]$ 代表一个动态设备布局的染色体串, 图 2 描述了其编码方法 (以第 P 期为例)。

第 P 期

4	6	1
5	3	2

4	6	1	5	3	2
---	---	---	---	---	---

图2 编码方法

Fig. 2 Code

2.2 评价函数

由于 DPLP 求的是目标函数的极小值,而 GA 选择操作是保留适应度最大的个体,因而目标函数不能直接作评价函数.因此,评价函数 $f_N(v_k)$,如式(5)定义:

$$f_N(v_k) = \frac{1}{1 + F(v_k)}. \quad (5)$$

v_k 是一个染色体,代表某一种设备布置方案, $F(v_k)$ 代表布置 v_k 的总成本(包括每期的物流成本和设备移动成本).

2.3 初始种群的产生

本算法初始种群随机产生,具体过程如下:

- 1) 构造一维自然数数组 $a_{1 \times n} = [1 \ 2 \ 3 \ \dots \ n]$, (1, 2, ..., n 代表设备编号);
- 2) 随机选择 a 中一个元素存入 $v_{1 \times n}$ 的 1 位置;
- 3) 删除 $a_{1 \times n}$ 中被选中的元素及其存储空间,即变为 $a_{1 \times (n-1)} = [1 \ 3 \ 4 \ \dots \ n]$ (例如上一步选中元素 2).

重复执行,直到 a 为空,得到一个合法单期设备布局子串 v ,然后把 P (时期数)个单期布局子串按顺序串接起来即得到 DPLP 的一个初始布局染色体.

2.4 单期布局子串的基因换位操作

PGA 的遗传操作包括基因换位、基因倒位、基因移位等.单点基因换位是一次在一个个体上随机选择 2 个位置的基因进行交换;多点基因换位是指,对预先给定的正整数 u_c ,取随机数 $i(1 \leq i \leq u_c)$ 一次交换 i 对基因.该算法采用多点基因换位算子, u_c 取 $\text{int}(\text{设备台数}/3)$ (经验值).

1) 基于 PGA 的单期布局子串基因换位

由于动态设备布局问题(DPLP)的特殊性,基于 PGA 基因换位的原理,算法提出了一种适用于 DPLP 的染色体单期布局子串的基因换位操作算子.这种基因换位操作是先把一个 DPLP 的染色体(父代个体)分解为单期的子串,然后在每个单期子串上进行基因换位操作,换位完成后再把单期子串

按顺序串接起来,得到子代个体(见图3).这种遗传操作的优点是,换位完成后,子代个体仍然是合法个体,因为基因换位只是在每个单期布局子串上进行(而每个单期布局子串都是一个合法的静态设备布局方案),而且实现起来十分便捷.

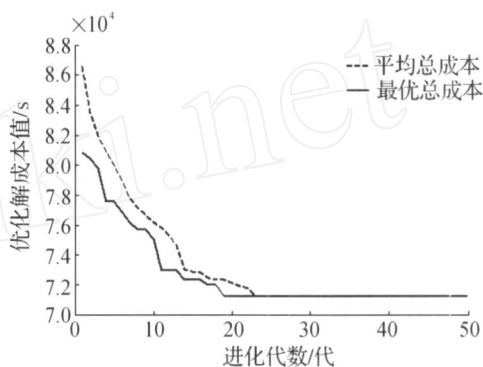


图3 6台设备5期问题的收敛过程

Fig. 3 Convergence of 6 plant 5 period problem

这里提出的基因换位遗传操作与 CVGA 及 NLGA 的交叉遗传操作完全不同. CVGA 对 2 个个体用单点交叉(single point crossover)^[4]. 首先,从父代染色体中随机选择 2 个,然后随机选择一个点进行交叉. 尽管这种交叉操作很简单而且容易执行,但可能会生成不可行的个体,必须改成可行的. 例如:对于 2 个个体 123456 和 125643,如果在第 6 个位置交叉,就会产生 2 个新个体 123453 和 125646. 第 1 个个体中设备 3 出现 2 次,第 2 个个体中设备 6 出现 2 次,还要进行进一步的交换使它们可行,这无疑增加了算法的复杂度. NLGA 使用点对点交叉(point-to-point crossover)^[5], 2 个串中每个位置上的相应设备交换,生成许多子代设备布局(child layout),这样的结果是有些子代非法,但能保证部分子代可行,同样需要进行可行性检验(而且检验的运算量很大). HGA 采用 DP 方法进行交叉^[6],虽然保证了子代的可行性,当问题规模较大时,同样会遇到 Rosenblatt 提出的 DP 启发式算法遇到的问题,也就是将所有可行的单期静态布局全部纳入考虑范围会很困难;不但操作较复杂,而且当选出的父代个数为 $S=10$ 时,一次 DP 交叉就要比较 900 个结果,交叉 1 000 次的计算量可想而知,虽然这样交叉产生的子代质量更好,但耗费的时间成本较高.

2) 单期布局子串基因换位概率的选择

这里说的换位概率与传统 GA 中的交叉概率有所不同,甚至与一般的 PGA 中的基因换位概率也不尽相同. 因为 DPLP 问题的特殊性,为了保证子代的可行性,在父代个体的每个单期子串上进行基

因换位操作,在此,基因换位概率是针对每个单期布局子串的,而不是针对一个父代个体.试验证明单期布局子串换位概率 P_c 取在 $[0.2, 0.4]$ 时较好,而且在此区间变化时,算法效果差异不大.

P_c 取 0.2 并不是意味着父代种群中只有大约 20% 个体进行上面所说的基因换位操作,而是所有单期布局子串中约有 20% 要进行基因换位,例如对 5 期的问题,种群大小为 100, $P_c = 0.2$,并不是只有 20 个左右的个体进行基因换位,而是有 $100 \times 5 \times 0.2 = 100$ 个单期布局子串上要进行基因换位,而约 100 个单期布局子串,随机出现在 100 个个体的共 500 个单期布局子串上.

2.5 选择操作

本算法选择操作包括 2 个部分:

1) 从上一代群体中的 N 个个体和本次遗传操作产生的 N 个新个体共 $2N$ 个体中选择适应性较强的 N 个个体,类似于截断选择法;

2) 把 1) 中选出的 N 个个体按其适应度值排序,最好的个体直接进入下一代(精华策略),其余 $N-1$ 个个体通过轮盘赌进行选择,适应度值高的个体有更大的机率被选择进入下一代种群.

这种选择方法虽然在一定程度上损失了种群的多样化,但可以提高算法的搜索效率.

2.6 变异操作

变异操作是随机产生新的染色体个体,以概率 P_m (小于 0.1) 替换种群中较差的个体,然后进入下一代.

2.7 各种启发式方法在搜索操作策略方面的异同

1) CV GA

遗传操作采用单点交叉; 精华选择策略; 抑制性可行性判断.

2) NL GA

基于内外嵌套循环,内层实现 GA 操作,外层随机产生新个体来替换内层遗传操作后的差的个体; GA 操作采用点对点交叉; 交叉后采用抑制性方法检查可行性; 辅助小概率变异.

3) HGA

采用联赛选择方法; 采用乐观交叉方法; 考虑交叉操作范围; 双亲唯一替代法; 启发式 CRAFT 变异方法.

4) SA

采用交换方法生成相邻布局方案; 采用冷却进度表来控制寻优过程,选择合适的初始温度和冷却率; 2 层循环,外层确定参数,内层进行相邻布局方案的实现; Metropolis 准则的替代方法.

5) PGA

精华选择策略; 提出染色体单期布局子串基因换位操作算子,可避免不可行解; 设置单期子串基因换位概率,增加种群多样性; 变异功能类似于 NL GA 外层循环的功能.

3 仿真试验

仿真试验分 3 个部分,包括试验 1: Rosenblatt^[2] 中的算例,一个 6 台设备 (2 × 3) 5 期的动态布局问题; 试验 2: Conway 和 Venkataramanan^[4] 中的算例,一个 9 台设备 (3 × 3) 5 期的布局问题; 以及试验 3: 对从 Dr. Jaydeep Balakrishnan 处取得的数据集进行仿真试验. 测算时用 Matlab 编程,在 PM-1.5 600 MHz 的机器上运行.

3.1 试验 1

此问题已知最优解的总成本为 71187,文中提出的基于 PGA 的算法(种群大小 400,进化代数 50)可以成功搜索到该解(见图 3),图 4 是 PGA 随机运行 20 次得到的结果,其中 7 次得到 71187 而且得到了更多的最优布置方案. CV GA 从随机初始种群无法得到 71187 的解. Rosenblatt 的 DP 方法得到的最优解为 71984.

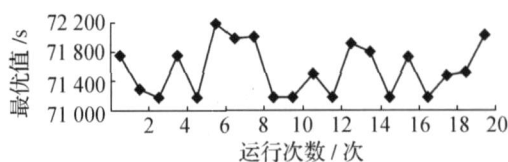


图 4 6 台设备 5 期问题 PGA 20 次运行结果

Fig. 4 Result of PGA to 6 plant 5 period problem

由图 3 的一次收敛过程看到,PGA 算法在迭代 25 代前收敛,图 4 中 7 次收敛于 71187 的平均收敛代数小于 35 代,说明了算法的效率. 对于此问题 CV GA 在文献中没有给出其最优解对应的布局方案,SA 得到的最优布局染色体为: $p = 135246 \ 135246 \ 153246 \ 153246 \ 653214$,PGA 算法得到了更多的最优布局方案,除了 p 还有: $p_1 = 642531 \ 642531 \ 642351 \ 642351 \ 412356$, $p_2 = 642531 \ 642531 \ 642351 \ 462351 \ 412356$ 等.

3.2 试验 2

此问题最优解未知,CV GA 得到的最优总成本为 608904(选择较好的个体组成初始种群),文中提出的算法在初始种群随机产生的情况下可以得到总成本为 608619 的布局方案(取种群大小 400,进化代数 100),收敛过程见图 5. 对此问题 PGA 运行 20 次,得到结果见图 6.

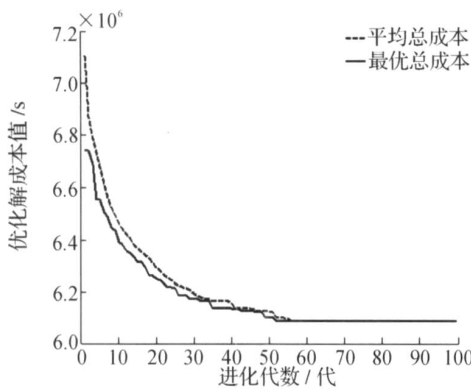


图5 9台设备5期问题的收敛过程
Fig. 5 Convergence of 9 plant 5 period problem

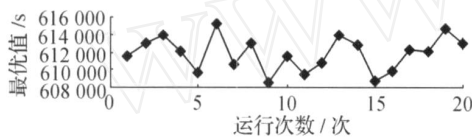


图6 9台设备5期问题 PGA20次运行结果
Fig. 6 Result of PGA to 9 plant 5 period problem

对于问题2,PGA得到的最优布局方案为: $p=894321756\ 698531427\ 693541827\ 629531748\ 728631945$.SA虽然得到成本值为607421的方案,但是代入检验发现并不正确.

3.3 试验3

Dr. Jaydeep Balakrishnan的数据集包括6台设备5期10期;15台设备5期10期;30台设备5期10期各8个问题(共48个问题)的物流量和移动成本数据.这里主要从问题规模对算法收敛精度影响和相关时间复杂度2方面用实验来分析比较了它们的性能.

首先是比较了PGA与其他算法在问题规模方面对收敛精度性能的影响.比较见图7~12(HGA使用初始种群随机产生得出的结果^[8],SA采用更正后的结果^[10]).

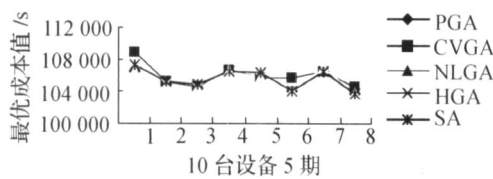


图7 6台设备5期问题结果比较
Fig. 7 Comparison of 6 plant 5 period problem

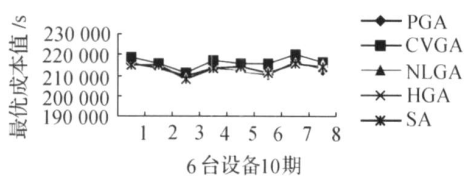


图8 6台设备10期问题结果比较
Fig. 8 Comparison of 6 plant 10 period problem

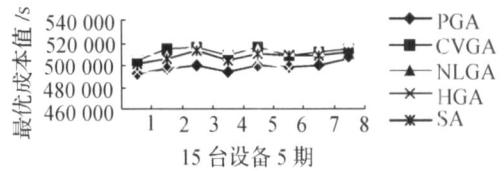


图9 15台设备5期问题结果比较
Fig. 9 Comparison of 15 plant 5 period problem

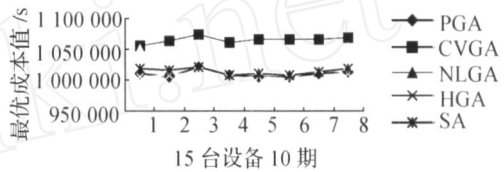


图10 15台设备10期问题结果比较
Fig. 10 Comparison of 15 plant 10 period problem

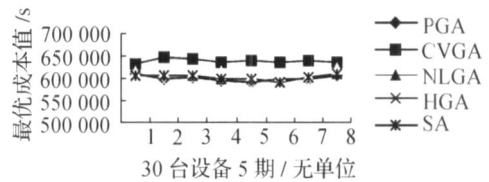


图11 30台设备5期问题结果比较
Fig. 11 Comparison of 30 plant 5 period problem

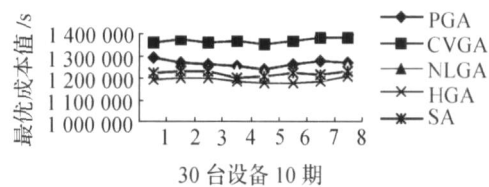


图12 30台设备10期问题结果比较
Fig. 12 Comparison of 30 plant 10 period problem

通过实验可以看出,对于小规模问题,PGA可以得到最优解;但随着问题规模增大,PGA性能处于5种方法的中部.CVGA和预期的相同,性能最差;而NLGA次之.对15台5期问题,HGA性能和PGA类似,随着问题规模增大,性能略好于PGA.由以上比较可以看出,PGA在大部分情况下可以得到较优的结果,只有在30台设备10期情况下略差于HGA和SA.

进一步,实验中衡量的指标是各种问题规模下的时间复杂度.通过前面的原理分析,显然同等问题规模下,HGA和NLGA时间复杂度远高于PGA,但收敛性能PGA和HGA相差不大.这里我们主要比较了PGA和SA的时间复杂度性能(因为只有SA给出了运行时间).PGA与SA运行平均时间的比较见图13.

定义PGA得到的最优成本较SA的相对增长率(相对成本增长率)为

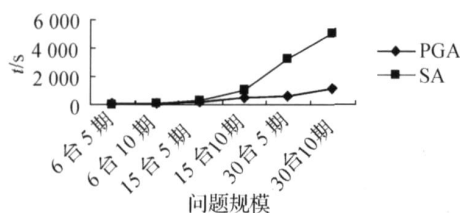


图 13 PGA、SA 运行时间比较

Fig. 13 Time comparison of PGA and SA

$$= (C_{PGA} - c_{SA}) / c_{PGA} \quad (6)$$

式中： c_{PGA} 和 c_{SA} 分别代表 PGA 和 SA 得到的最优成本。在相同规模问题时的平均值如图 14 所示。

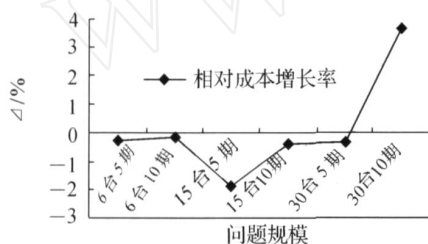


图 14 相同规模问题的相对成本增长率

Fig. 14 Relative cost growth rate

从图 13、14 可以看到 PGA 运行时间随问题规模增大而增加的程度远小于 SA。在大多数情况下 PGA 能在可以接受的时间内得到更好的优化解。虽然 PGA 在大规模设备布置问题中的优化解质量不如 SA，但 PGA 的时间成本随着问题规模的增加，时间增长率远远小于 SA，在 30 台 5 期的 8 个问题中，PGA 花费的平均时间仅仅是 SA 的 19.66%；而在 30 台 10 期的 8 个问题中也只有 22.87%，得到的最优成本只增加了不到 4%。因此，在解决具体问题时，还要综合考虑时间成本和优化结果的质量，来对算法进行选择。

4 结束语

通过 PGA 算法对算例问题的实验运行，可以看出 PGA 用于顺序编码的组合优化问题比较一般 GA 还是有一定优势的，其时间增加程度一般小于其他算法。但在实验中发现，PGA 随着编码长度的增加（问题规模的扩大）性能下降，所以对大规模设备布局问题的布置计算，从种群多样性和时间代价方面来看，应该进一步考虑降低时间复杂度并且增大搜索空间的算法，这将是下一步研究的目标。

参考文献：

[1] KOOPMANS T C, BECKMAN M. Assignment prob-

lems and the location of economic activities [J]. *Econometrica*, 1957(25): 53 - 76.

[2] ROSENBLATT M J. The dynamics of plant layout [J]. *Management Science*, 1986(37): 272 - 286.

[3] KUSIA K A, HERAGU S S. The facility layout problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 1987(29): 229 - 251.

[4] CONWAY D G, VENKATARAMANAN M A. Genetic search and the dynamic facility layout problem [J]. *Computers and Operations Research*, 1994, 21(8): 955 - 960.

[5] BALAKRISHNAN J, CHENG C H. Genetic search and the dynamic layout problem: an improved algorithm [J]. *Computers and Operations Research*, 2000(27): 587 - 593.

[6] KAKU B, MAZZOLA J B. A tabu-search heuristic for the plant layout problem [J]. *INFORMS Journal on Computing*, 1997, 9(4): 374 - 384.

[7] BAYKASOGLU A, NABIL N Z, GINDY. A simulated annealing algorithm for the dynamic layout problem [J]. *Computers and Operations Research*, 2001(28): 1403 - 1426.

[8] BALAKRISHNAN J, CHENG, C H. A hybrid genetic algorithm for the dynamic plant layout problem [J]. *International Journal of Production Economics*, 2003(86): 107 - 120.

[9] 李茂军, 童调生. 单亲遗传算法及其应用研究 [J]. *湖南大学学报*, 1998, 25(6): 56 - 59.

LI Maojun, TONG Tiaosheng. Partheno-genetic algorithm and its application [J]. *Journal of Hunan University*, 1998, 25(6): 56 - 59.

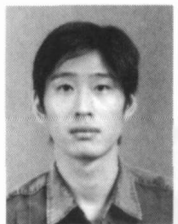
[10] BAYKASOGLU A, NABIL N Z, GINDY. Erratum to A simulated annealing algorithm for dynamic layout problem [J]. *Computers & Operation Research*, 2004, (31): 313 - 315.

作者简介：



李 波,女,1967 年生,教授,主要研究方向为物流系统规划、物流系统调度、智能计算与建模。发表学术论文 30 多篇, EI 检索论文 9 篇,参与编写教材 3 部。

E-mail: libo0410@yahoo.com.cn.



邱 枫,男,1979 年生,硕士研究生,主要研究方向为物流与供应链管理、物流系统规划。

E-mail: qf_ll@126.com.