

文章编号: 1001-0920(2007) 11-1280-04

应用自适应遗传算法解决集装箱装载问题

许光泞, 肖志勇, 俞金寿

(华东理工大学 信息科学与工程学院, 上海 200237)

摘要: 集装箱配载是一个复杂的组合优化问题, 其约束条件多, 属于 NP 完全问题, 并且求解难度大. 在满足一定的约束条件下, 提出一种 3 维集装箱装载的自适应遗传算法. 算法中考虑了货物放置方向和装载容积等约束条件, 给出了有效的解码算法. 实例仿真结果表明了该算法的有效性和实用性.

关键词: 集装箱装载; 自适应遗传算法; 空间分割; 优化

中图分类号: TP391

文献标识码: A

Adaptive genetic algorithm for three-dimension container loading problem

XU Guang-ning, XIAO Zhi-yong, YU Jin-shou

(College of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China. Correspondent: XU Guang-ning, E-mail: niatxgn@126.com)

Abstract: Container loading problem with multi-constraints is a complicated combinatorial optimization problem. It's a NP-hard problem and difficult to obtain optimal solution. Considering many constraints in practical applications, an adaptive genetic algorithm for the three-dimension container loading problem is presented. In the algorithm, the direction in which goods are placed and the loading capacity are taken into account, and an effective decoding algorithm is proposed. Simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Container loading; Adaptive genetic algorithm; Space dividing; Optimization

1 引言

在运输中如何进行货物的有效装载, 或在存储中如何提高仓库的利用率, 常被视为集装箱装载问题. 集装箱数量有限, 而被装载的货箱数量很大, 其中 3 维类型较多. 如何使装入的货物总体积达到最大, 即集装箱空间利用率最大, 这是实际作业中常遇到的问题. 装箱问题是一个具有复杂约束条件的组合优化问题, 在理论上属于 NP-hard^[1] 问题, 直接利用数学中的优化方法比较困难, 通常实用的求解方法都是近似算法. 目前, 在装箱问题的算法研究中, 对于 2 维的装箱问题研究较多^[2-4], 3 维装箱问题由于其复杂性和难度大, 研究相应较少. 集装箱装入排放软件采用较多的是启发式方法, 利用空间分解和组合的策略, 如按层、块、三叉树空间分割等方法组合放置物体^[1, 5-9].

遗传算法作为一种基于生物遗传和进化机制的自适应概率优化技术, 与传统的优化算法相比, 具有

运算简单、搜索过程灵活、搜索效率高以及隐含并行性等特点, 是一类可用于复杂系统优化计算的算法, 特别适合求出问题的近似最优解. 本文在考虑一些实际应用中的约束条件下, 提出一种基于计算机的 3 维装箱问题的自适应遗传算法. 实例仿真结果表明了该算法的有效性和实用性.

2 问题描述

2.1 目标函数

装箱达到的要求为满足一定约束条件下最大体积装载率或重量装载率, 以提高集装箱的利用率, 获得最佳效益. 装箱的目标可描述为

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^n l_i w_i h_i / \sum_{j=1}^k L_j W_j H_j \right\}, \quad (1)$$

或
$$\max \left\{ \sum_{i=1}^n l_i w_i h_i g_i / \sum_{j=1}^k M_j \right\}. \quad (2)$$

其中: n 为货物数; k 为集装箱数; l_i, w_i, h_i, g_i 分别表示货物的长、宽、高和质量; L_j, W_j, H_j, M_j 分别表示

收稿日期: 2006-06-21; 修回日期: 2006-09-01.

作者简介: 许光泞 (1975 —), 男, 江西吉安人, 博士生, 讲师, 从事智能控制、优化算法等研究; 俞金寿 (1939 —), 男, 浙江海宁人, 教授, 博士生导师, 从事过程模型化及优化控制、先进控制等研究.

集装箱的长、宽、高和最大装载质量. 货物装载时必须要求: 货物平行于集装箱的边放置; 货物不能完全悬空, 放置在上层的货物必须与下层货物有接触.

2.2 装载策略

待装货物为长方体, 在集装箱中平行于集装箱各边放置. 定义集装箱门所在端为前端, 集装箱在坐标系中的位置关系及 3 空间分割如图 1 所示.

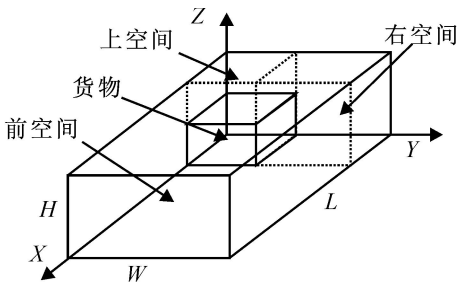


图 1 集装箱 3 空间分割示意图

1) 货物装载顺序原则

在集装箱中装载货物遵循以下原则: 依次沿左侧至右侧方向(即 Y 轴方向)、从下到上(即 Z 轴方向) 放置每一层; 然后沿后端到前端方向(即 X 轴方向) 逐层放置.

2) 空间分割与合并

当一个货物放入一个集装箱后, 该集装箱被分割成前、右、上 3 个空间(除自己占用的空间), 如图 1 所示. 同理每个子空间在装填货物过程中, 在放入货物后同样被继续分割为 3 个空间, 而原空间则相应地从空间队列中去掉. 被分割后的空间采用空间队列进行存储, 按照上空间、前空间、右空间的顺序分别被存储到相应的空间队列中. 对于不能装下一个货物的空间, 则采用间隙队列进行贮存. 装填过程则正好相反, 按右空间、前空间、上空间的顺序进行装填. 在装填每 1 层时, 以装入每层的第 1 个货物的厚度(X 轴方向) 作为层的厚度. 如果 X 轴方向的剩余空间(剩余层的厚度) 小于所有待装货物的最小尺寸, 则当前层的空间与 X 轴方向的剩余空间合并, 作为当前层的厚度. 每次取出空间队列中的一个元素作为当前填充空间, 如果当前填充空间满足以下条件, 则当前空间与间隙进行合并, 形成一个新的空间. 空间合并包括 3 种情况: ①间隙与当前空间前后相邻、在同一水平面上、间隙 Y 坐标小于等于空间 Y 坐标, 则空间与该间隙合并; ②当前空间与间隙左右相邻、在同一水平面上、间隙 X 坐标小于等于空间 X 坐标, 则空间与该间隙合并; ③同一层中多个间隙相邻, 则这些间隙合并, 组成长条形空间.

3 改进的自适应遗传算法

在经典遗传算法中, 交叉和变异操作采用固定

概率, 不能反映种群的进化进程. Srinivas 等提出的自适应遗传算法被认为是标准的自适应遗传算法, 能使交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 随群体的适应度自动改变. 当种群个体的适应度趋于一致或局部最优时, 应使 P_c 和 P_m 增加, 以跳出局部最优; 而当群体适应度较分散时, 应使 P_c 和 P_m 减少, 以利于优良个体的生存. 同时, 对于适应度高于群体平均适应值的个体, 选择较小的 P_c 和 P_m , 使该优良解得以保护; 而对于低于平均适应值的个体, 则选择较大的 P_c 和 P_m 值, 以增加新个体产生的速度. 这种调节方法能保护优良个体的有效模型, 而且, 当全局最优点在局部极值点附近时, 该方法的搜索效率也较高. 但该方法仅考虑了种群中一般个体与最优个体之间的关系, 而正是这种对于优良个体的保护, 使得算法在搜索空间中很可能陷入局部最优. 这是由于优良个体之间的交叉概率很小, 导致进化速度缓慢, 一些适应度较大的个体很可能在进化过程中根本不产生变化或变化很小, 从而使整个算法出现“早熟”现象.

为避免出现“早熟”现象, 本文采用的交叉和变异概率的自适应算式^[10] 为

$$p_c = \begin{cases} p_{c1}, & f' < f_{avg}; \\ p_{c1} - (p_{c1} - p_{c2}) * (f' - f_{avg}) / (f_{max} - f_{avg}), & f' \geq f_{avg}; \end{cases} \quad (3)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1}, & f < f_{avg}; \\ p_{m1} - (p_{m1} - p_{m2}) * (f_{max} - f) / (f_{max} - f_{avg}), & f \geq f_{avg}. \end{cases} \quad (4)$$

其中: f_{avg} 表示每代群体的平均适应度值, f_{max} 表示群体中最大的适应度值, f' 表示要交叉的 2 个体中较大的适应度值, f 表示要变异个体的适应度值, $p_{c1} = 0.95, p_{c2} = 0.6, p_{m1} = 0.15, p_{m2} = 0.01$.

3.1 个体编码及解码

编码是将一个问题的可行解从其解空间转换到遗传算法所能处理的搜索空间的操作, 它是遗传算法应用成功与否的关键. 编码时应考虑货物放置方向及装载顺序约束, 每种装载方案对应一个编码长度为 $2n$ (n 为待装货物的个数) 的符号串个体 $S = (S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n, S_{n+1}, \dots, S_{n+i}, \dots, S_{2n})$. 基因 $S_1 \sim S_n$ 表示货物的编号, 由 $[1, n]$ 间随机产生的一系列非重复整数排列组成, 并且基因 $S_1 \sim S_n$ 所在位置序列号 $(1, 2, \dots, n)$ 表示货物的装载顺序. 基因 $S_{n+1} \sim S_{2n}$ 表示货物的放置方向, 由 $[1, 6]$ 间随机产生的一系列可重复整数排列组成. 放置方向编号为: 若货物的放置方向为 $l_j // L_j, w_j // W_j, h_j // H_j$, 则编号为 1; 若货物的放置方向为 $w_j // L_j, l_j // W_j, h_j // H_j$, 则编号为 2; 若货物的放置方向为 $h_j // L_j, l_j // W_j, w_j // H_j$, 则编号为 3; 若货物的放置方向为 $l_j // L_j,$

$h_j // W_j, w_j // H_j$, 则编号为 4; 若货物的放置方向为 $w_j // L_j, h_j // W_j, l_j // H_j$, 则编号为 5; 若货物的放置方向为 $h_j // L_j, w_j // W_j, l_j // H_j$, 则编号为 6.

个体解码方法为: 基因 s_i 和 s_{n+i} 之间具有一一对应的关系, 即第 i 个装入的货物是基因 s_i 表示的货物, 按照基因 s_{n+i} 表示的放置方向将其放置到集装箱中; 货物的装载遵循货物装载顺序原则.

3.2 适应度函数

遗传算法在进行搜索过程中基本不利用外部信息, 仅以适应度函数为依据, 利用种群中每个个体的适应度值进行搜索. 因此适应度函数的选取至关重要, 将直接影响到遗传算法的收敛速度以及能否找到最优解. 解的好坏是用适宜度函数值的大小来评价的, 适宜度函数值越大, 解的质量越好. 在集装箱装载过程中不仅要求容器空间利用率达到最高, 同时还要考虑多种约束. 本文中作为一种实验研究, 仅以空间利用率作为目标函数, 因此适应度函数为

$$f = \sum_i^n l_i w_i h_i / \sum_j^k L_j W_j H_j. \tag{5}$$

3.3 遗传操作过程

在算法中, 对个体实行的遗传操作过程包括选择操作、交叉操作和变异操作.

1) 选择操作. 在选择过程中采用轮盘赌法和最优个体保存法. 轮盘赌选择法的基本思想是: 首先计算个体的相对适应度值 $p_i = f_i / \sum f_i$; 然后根据选择概率选择个体. 实现方法是生成一个随机数 $\lambda \in [0, 1], p_0 + p_1 + \cdots + p_{i-1} < \lambda \leq p_0 + p_1 + \cdots + p_i$, 则第 i 个个体被选择到下一代. 可见, 个体的适应度值越大, 被选择到下一代的机会也越多.

最优个体保存法基本思想是: 父代种群中最优的个体直接替换子代中最差的个体. 利用这一策略, 能保证遗传算法以 1 的概率收敛.

2) 交叉操作. 交叉是指对 2 个相互配对的染色体以某种方式相互交换部分基因, 从而形成 2 个新的个体. 交叉过程中, 在 $[1, 2n]$ 间按均匀分布随机产生两个整数 a_1 和 $a_2 (a_1 < a_2)$ 作为父代 2 个体 S_1 和 S_2 的交叉位. 若 $a_1 > n$, 则交叉仅在 s_{n+1} 到 s_{2n} 段间进行, 直接交换交叉位间对应位置的基因, 而其余基因保持不变; 若 $a_2 \leq n$, 则交叉仅在 s_1 到 s_n 段间进行, 采取序交叉方法^[10]; 若 $a_1 \leq n$ 且 $a_2 > n$, 则交叉在两段间分别进行, 段采取序交叉方法对 $a_1 \sim n$ 位间的基因进行重组, s_{n+1} 到 s_{2n} 段间直接对应交换 $n + 1 \sim a_2$ 位间的基因.

3) 变异操作. 为了在遗传操作过程中保持群体多样性, 避免算法早熟收敛甚至无法寻到全局最优解, 对个体采取变异操作过程. 变异运算是指将个体

染色体编码串中的某些基因座上的基因值用其他的等位基因来替换, 从而形成 1 个新的个体. 本文采取的变异操作为: 在 $[n + 1, 2n]$ 间按均匀分布随机产生一个整数 b 作为基因 $s_{n+1} \sim s_{2n}$ 间的变异位, 并将该位基因值替换为 $[1, 6]$ 间随机产生的 1 个整数.

4 集装箱装载实例计算

30 件货物的尺寸数据如表 1 所示. 待装集装箱为一个 20 英尺国际标准的集装箱, 尺寸为 2 352 mm $\times$ 2 388 mm $\times$ 5 899 mm. 应用文中提出的自适

表 1 待装货物的尺寸 mm

编号	宽	深	高	编号	宽	深	高
1	900	600	370	16	1 100	1 200	2 100
2	1 440	460	660	17	1 900	1 200	1 100
3	660	950	600	18	2 000	1 630	1 200
4	1 320	660	960	19	2 220	1 800	1 000
5	960	330	300	20	700	1 200	600
6	1 220	1 030	970	21	1 730	360	690
7	680	680	680	22	1 500	1 000	1 400
8	1 680	680	980	23	840	620	780
9	540	700	1 300	24	780	620	500
10	1 200	1 110	2 200	25	750	600	400
11	2 200	1 110	1 200	26	1 300	500	960
12	2 200	1 200	2 220	27	980	500	480
13	600	400	500	28	720	1 100	680
14	700	540	640	29	400	600	800
15	1 200	600	800	30	860	460	340

表 2 装载结果 —— 方向任意 mm

编号	X 轴	Y 轴	Z 轴	BD	BW	BH
12	0	0	0	1 200	2 220	2 200
11	1 200	0	0	1 200	1 110	2 200
10	1 200	1 110	0	1 200	1 110	2 200
19	2 400	0	0	1 000	2 220	1 800
26	2 400	0	1 800	960	1 300	500
27	2 400	1 300	1 800	980	480	500
29	2 400	1 780	1 800	800	600	400
16	3 400	0	0	1 200	2 100	1 100
17	3 400	0	1 100	1 200	1 900	1 100
5	3 400	1 900	1 100	960	330	300
13	3 400	1 900	1 400	600	400	500
25	4 000	1 900	1 400	600	400	750
18	4 600	0	0	1 200	2 000	1 630
30	4 600	2 000	0	860	340	460
20	4 600	0	1 630	1 200	600	700
15	4 600	600	1 630	1 200	800	600
3	4 600	1 400	1 630	950	600	660
21	4 600	2 000	460	690	360	1 730
1	5 200	2 000	460	600	370	900

表 3 装载结果 ——方向向上						
编号	X 轴	Y 轴	Z 轴	BD	BW	BH
12	0	0	0	2 200	1 200	2 220
11	0	1 200	0	2 200	1 110	1 200
6	0	1 200	1 200	1 220	1 030	970
27	1 220	1 200	1 200	980	500	480
3	1 220	1 700	1 200	950	660	600
30	1 220	1 200	1 680	860	460	340
24	1 220	1 700	1 800	780	620	500
10	2 200	0	0	1 200	1 110	2 200
16	2 200	1 110	0	1 200	1 100	2 100
19	3 400	0	0	1 800	2 220	1 000
18	3 400	0	1 000	1 630	2 000	1 200
21	3 400	2 000	1 000	1 730	360	690
5	3 400	2 000	1 690	960	330	300
8	5 200	0	0	680	1 680	980
7	5 200	1 680	0	680	680	680
4	5 200	0	980	660	1 320	960
14	5 200	1 680	680	540	700	640
1	5 200	0	1 940	600	900	370
25	5 200	900	1 940	600	750	400
29	5 200	1 680	1 320	400	600	800

应遗传算法计算,群体规模 $N = 80$,最大进化代数 为 300.表 2 和图 2 是考虑货物可任意旋转装载的 结果,集装箱的空间利用率为 86.25%;表 3 和图 3 是 考虑货物只能沿高度方向装载的结果,集装箱的空

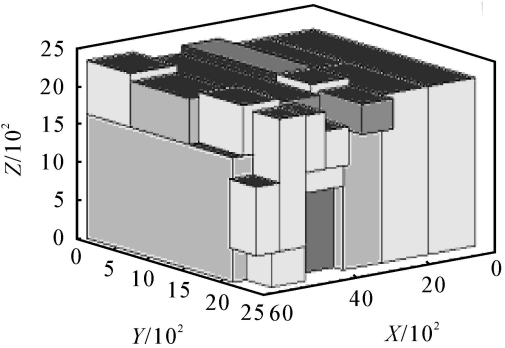


图 2 货物可任意旋转装载

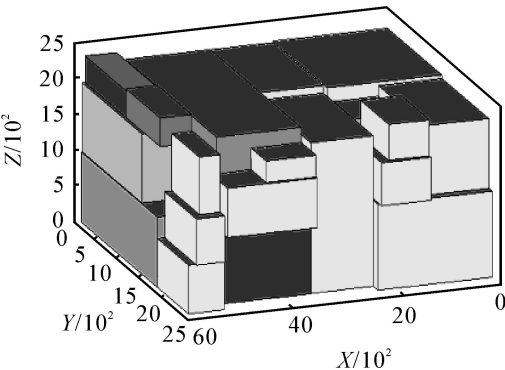


图 3 货物只能沿高度方向装载

间利用率为 85.17 %.其中 :BH 表示在 Z 轴方向物 品的尺寸 ,BW 表示在 Y 轴方向物品的尺寸 ,BD 表 示在 X 轴方向物品的尺寸 .同样的数据采用启发式 算法,文献[5] 和[6] 得到的集装箱的空间利用率分 别为 85.04 %(方向任意) 和 78.34 %(方向向上) .

5 结 论

本文针对集装箱货物装载问题提出一种自适应 遗传算法,解决了简化模型下集装箱货物装载的求 解问题.此算法考虑了货物放置方向的约束条件,采 用 3 空间分割和空间合并等策略.实例计算结果表 明,利用改进的自适应遗传算法解决装箱问题是行 之有效的方法.采用该方法求解,在提高集装箱利用 率的同时可简化操作人员的工作,提高工作效率,从 而规范作业程序,降低运营成本,提高企业竞争力.

参考文献(References)

[1] Pisinger D. Heuristics for the container loading problem [J]. European J of Operational Research, 2002, 141 (2) : 382-392.

[2] Mukhacheva E A, Mukhacheva A S. The rectangular packing problem: Local optimum search methods based on block structures [J]. Automation and Remote Control, 2004, 65(2) : 248-257.

[3] Lipnitskii A A. Use of genetic algorithms for solution of the rectangle packing problem [J]. Cybernetics and Systems Analysis, 2002, 38(6) : 943-946.

[4] Imahori S, Yagiura M, Ibaraki T. Local search algorithms for the rectangle packing problem with general spatial costs [J]. Mathematical Programming, 2003, 97(3) : 543-569.

[5] 何大勇, 鄂明成, 查建中, 等. 基于空间分解的集装箱 布局启发式算法及布局空间利用率规律[J]. 计算机辅 助设计与图形学学报, 2000, 12(5) : 367-370.

(He Da-yong, E Ming-cheng, Cha Jian-zhong, et al. A heuristic approach to container loading problem based on space decomposition and a rule for usage rate of packing space[J]. J of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2000, 12(5) : 367-370.)

[6] 刘嘉敏, 马广昆, 黄有群. 基于组合的三维集装箱装入 启发式算法的研究[J]. 工程图学学报, 2005, 26(1) : 22-25.

(Liu Jia-min, Ma Guang-kun, Huang You-qun. Research of a heuristic algorithm for 3D container loading based on combination [J]. J of Engineering Graphics, 2005, 26(1) : 22-25.)

[7] Eley M. Solving container loading problem by block arrangement[J]. European J of Operational Research, 2002, 141(2) : 393-409.

(下转第 1288 页)

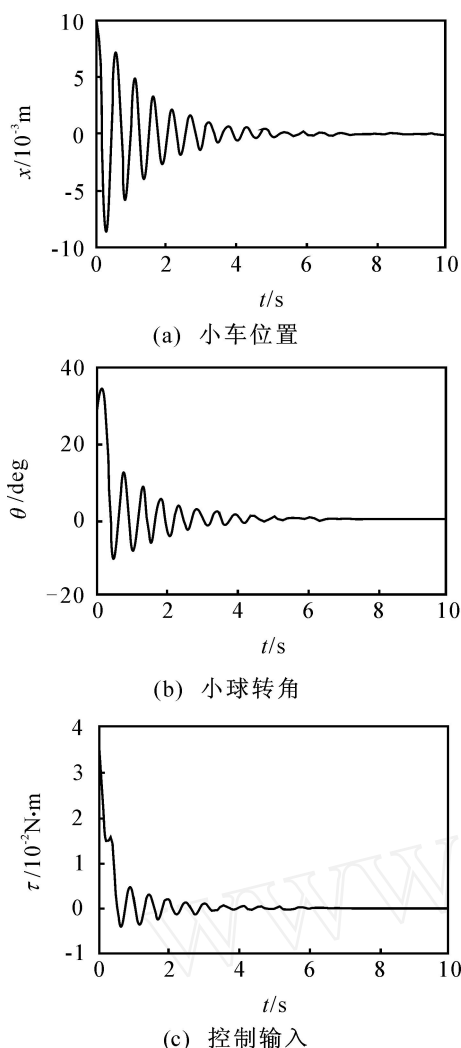


图3 加入控制的系统仿真结果

$[0.01, 0, 0.5, 1]^T$ 稳定到原点 $[0, 0, 0, 0]^T$. 同时仿真结果还表明, 小车的位置不大于 0.025 m , 持续输入转矩不大于 $0.1\text{ N}\cdot\text{m}$, 满足文献[1]中的设计要求.

5 结 论

本文针对旋转小球在垂直平面内运动的 TORA 系统进行了稳定控制的研究. 基于拉格朗日方程建立了该系统的动力学模型, 与旋转小球在水平面内运动的 TORA 系统的动力学相比, 小球在转动过程中自身的重力将影响其运动特征. 结合部分

反馈线性化和一个全局坐标变换, 将系统的动力学转换成严格反馈的级联规范型, 从而将控制设计的任务归约成对级联系统中的非线性子系统部分的设计. 在给出更一般的实现非线性子系统全局渐近稳定的状态反馈算法后, 采用积分 Backstepping 设计了整个系统的全状态反馈控制器. 最后对文中给出的控制方案进行了数值仿真, 实验结果证明了该方案的有效性.

参考文献(References)

- [1] Robert T B, Dennis S B, Vincent T C. A benchmark problem for nonlinear control design[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 1998, 8(4): 307-310.
- [2] Wan C J, Dennis S B, Vincent T C. Global stabilization of the oscillating eccentric rotor[C]. Proc of the 33rd IEEE Control Decision and Control. New York, 1994: 4024-4029.
- [3] Jiang Z P, Kanellakopoulos I. Global output feedback tracking for a benchmark nonlinear system[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(5): 1023-1027.
- [4] Robert T B, Dennis S B, Vincent T Coppola. Experimental implementation of integrator Backstepping and passive nonlinear controllers on the RTAC testbed[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 1998, 8(5): 435-457.
- [5] Ilya K, McClamroch N H. Hybrid feedback stabilization of rotational-translational actuator (RTAC) system[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 1998, 8(5): 367-370.
- [6] Curtis P M, James R C. Control designs for the nonlinear benchmark problem via the state-dependent Riccati equation method[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 1998, 8(5): 401-433.
- [7] Reza O S. Nonlinear control of underactuated mechanical systems with application to robotics and aerospace vehicles[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [8] Hassan K K. Nonlinear systems[M]. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2002.

(上接第 1283 页)

- [8] Fuh Hwa, Liu F, Hsiao C J. A three-dimensional pallet loading method for single-size boxes[J]. J of the Operational Research Society, 1997, 48: 726-735.
- [9] Karabulut K, İnceoğlu M M. A hybrid genetic algorithm for packing in 3D with deepest bottom left with fill method[C]. Proc of the 3th Int Conf on Advances in Information Systems. Turkey: Tatyana

Yakhno, 2004: 441-450.

- [10] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
(Wang Xiao-ping, Cao Li-ming. Genetic algorithm: Principles and applications and its software realization [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.)