优化多品种零散货物配装问题的混合遗传算法*

王晓博, 任春玉
(黑龙江大学 信息管理学院, 哈尔滨 150080)

摘　要: 针对多品种、具有优先等级货物配装问题的特点,建立了能充分均衡利用装载工具的载重和容积的多品种货物配装模型,并从全局、整体最优上设计混合遗传算法求解。首先,采用基于容重比平衡法构建初始解,提高解的可行性,用基于排序选择与最佳保留相结合的策略保证群体的多样性,构造合理动态容重均衡适应度函数以保证收敛到全局最优解;其次,利用模拟退火算法的 Boltzmann 机制,控制遗传算法的交叉、变异操作,加强局部搜索能力和效率。实验结果表明了上述模型和算法的有效性,并为大规模解决实际问题提供了思路。

关键词: 多品种货物配装; 容重比平衡法; 动态容重均衡; Boltzmann 机制; 混合遗传算法
中图分类号: TP301.6　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1001-3695(2012)09-3240-04
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.09.010

Study on hybrid genetic algorithm for optimal loading problem of multi-category goods

WANG Xiao-bo, REN Chun-yu
(*School of Information Management, Heilongjiang University, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: According to the characteristics of multi-variety and freight loading problems with priority, this paper established target function fully utilizing capacity and cubage of loading tools. And it solved this type of problems utilizing hybrid genetic algorithm from the overall situation. Firstly, on the basis of cubage-weight balance algorithm, the method constructed initial solution to improve the feasibility. Through adopting strategy combining with sorting options and best reserved, the method ensured the diversity of population. And it constructed reasonable dynamic density fitness function to ensure to be convergence to the global optimal solution. Secondly, through utilizing Boltzmann mechanism of simulated annealing algorithm, the method controlled crossover and mutation operation of hybrid genetic algorithm, so as to improve the solution quality of algorithm. Finally, the example shows that the above model and algorithm is effective and they can provide for large-scale ideas to solve practical problems.

Key words: loading problem of multi-category goods; cubage-weight balance; dynamic density fitness; Boltzmann mechanism; hybrid genetic algorithm

0　引言

配送首先要求对货物进行合理配装。合理配装可以提高配送业务的自动化水平和货物装载率,进而降低成本、节约费用、提高配送业务的工作效率。货物配装问题是一个具有复杂约束条件的组合优化问题,属于 NP-hard 问题,其研究方法主要有精确算法、启发式算法和智能优化算法。

精确算法在可以求解的情况下要优于人工智能算法,但此类算法只能有效求解中小规模问题。Chen 等人[1]针对集装箱一般装载问题(用一定数量的集装箱装载给定的货物)给出了 0-1 整数线性规划模型。Francois 等人[2]采用了新的精确算法求解的二维配装问题,运算时间是可以接受的。

启发式方法只能给出问题的局部最优解,缺乏全局寻优能力,尤其是在求大规模问题时效率不高[3]。Pisinger[4]通过把整个集装箱分解成若干层、条,并转换为二维背包问题来处理,构造基于分支定界法的启发式算法,该算法的集装箱利用率较高,但货物稳定性差。Berghammer 等人[5]对装载问题采用线性逐渐逼近的方法进行优化,不过该方法较难确定逼近的收敛条件。Carlo[6]设计了近似算法来求解重量固定、货物数量不定的一维装箱问题。Terno 等人[7]设计基于分支定界概念和启发式方法相结合的算法求解多 pallet 货物配装问题。

在求解大规模、多约束复杂问题时,智能算法应用更广泛。Bortfeldt 等人[8]采用基于同质块思想进行局部填充的禁忌搜索算法求解单个集装箱弱差异货物装载问题。Loh 等人[9]通过改进解的领域结构及降温策略构建新的模拟退火算法,求解同规格和不同规格货物配装问题。曹宏美等人[10]设计了求解多品种货物配装问题的蚂蚁算法,求解结果实现了集装箱的装载重量和装载容积的同时优化。卜雷等人[11]设计了求解多品种货物配装问题的遗传算法。

鉴于多品种、具有优先等级货物配装问题的特殊性,传统的求解算法将装载重量利用率和容积利用率设定在此消彼长的对立面上,从而造成装载资源的浪费,增加了运输成本。

为了能够充分均衡利用装载工具的载重和容积,本文设计

收稿日期: 2012-02-13; **修回日期**: 2012-03-25　**基金项目**: 国家社会科学基金资助项目(10CGL076);国家教育部人文社会科学研究资助项目(12YJC630160)

作者简介: 王晓博(1973-),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,硕导,博士,主要研究方向为物流系统仿真(wangxb2010@163.com);任春玉(1974-),女(朝鲜族),黑龙江哈尔滨人,副教授,硕士,主要研究方向为信息管理与信息系统、电子商务.

了混合遗传算法求解该类问题。

1　配装优化数学模型

$$\max Z = \sum_{i\in N}\sum_{j\in K}\lambda g_i x_{ij} + \sum_{i\in N}\sum_{j\in K}(1-\lambda) v_i x_{ij} \tag{1}$$

约束条件:

$$\lambda G_{\min_j} \leqslant \sum_{i\in N} g_i x_{ij} \leqslant \eta_1 G_j \quad j\in K \tag{2}$$

$$(1-\lambda) V_{\min_j} \leqslant \sum_{i\in N} v_i x_{ij} \leqslant \eta_2 V_j \quad j\in K \tag{3}$$

$$\sum_{j\in K} x_{ij} \leqslant 1 \quad i\in N - D_0 \tag{4}$$

$$\sum_{j\in K} x_{ij} = 1 \quad i\in D_0 \tag{5}$$

$$x_{ij} + \frac{1}{|D_i|}\sum_{l\in D_i} x_{lj} \leqslant 1 \quad i\in N, j\in K \tag{6}$$

$$x_{ij} = 0,1 \quad i\in N, j\in K \tag{7}$$

其中:$N(i=1,2,\cdots,n)$为配装货物的集合;$K(j=1,2,\cdots,m)$为装载工具的集合;装载工具 j 最大装载重量为 G_j、最大装载容积为 V_j;第 $i(i\in N)$ 种货物的重量为 g_i、体积为 v_i;$G_{\min_j}$为装载工具 j 的最小待装货物重量;$V_{\min_j}$为装载工具 j 的最小待装货物容积;$\eta_1(0\leqslant\eta_1\leqslant1)$为载重量弹性系数;$\eta_2(0\leqslant\eta_2\leqslant1)$为装载容积弹性系数;$D_i(D_i\subset N)$为不能与货物 $i(i\in N)$ 混装的货物集合;$D_0(D_0\subset N)$为指令性优先配装货物集合;$x_{ij}(i\in N, j\in K)$为货物配装决策变量。

上述模型中参数 λ 取值为$0\leqslant\lambda\leqslant1$,当只求载重量最大时 λ 取 1;当只求容积利用率最大时 λ 取 0;当同时求载重量和容积利用率的最大值时 λ 取 1/2。式(1)中,目标函数为求载重量和容积利用率的最大值;约束条件(2)为配装货物的总重量约束;约束条件(3)为配装货物的总容积约束;约束条件(4)为同一种货物只能装在同一辆车上;约束条件(5)为指令性优先配装约束;约束条件(6)为不能同时配装约束。

2　混合遗传算法中各算子确定

2.1　混合编码

由于单一车辆配装是将不同收货人的货物混装在同一车辆内,编码时不必考虑车辆选取,因此,采用常规二进制编码,即 0、1 字符串。以货物 i 配装状态作为染色体中的第 i 位遗传基因,每条染色体上有 n 个遗传基因。具体编码形式为$(x_1,x_2,\cdots,x_i,\cdots,x_n)$,每个基因的取值为 $x_i=1$ 或 $x_i=0(i=1,2,\cdots,n)$。$x_i=1$ 表示货物 i 处于配装状态,否则 $x_i=0$。以 10 件货物编码(1,1,0,0,0,1,0,1,0,0)为例,该编码表示一种配装方案为:货物(1,2,6,8)此次配装,货物(3,4,5,7,9,10)此次不配装。

2.2　初始解的形成

令 $N(i=1,2,\cdots,n)$为配装货物的集合;$K(j=1,2,\cdots,m)$为装载工具的集合;装载工具 j 最大装载重量为 G_j、最大装载容积为 V_j;第 $i(i\in N)$ 种货物的重量为 g_i、体积为 v_i。若将所有货物都配装,则所需车辆为 $n_k=\max(n_g,n_v)$。其中:$n_g=\left|\sum_{i=1}^{N} g_i/\min(G_1,G_2,\cdots,G_m)\right|$,$n_v=\left|\sum_{i=1}^{n} v_i/\min(V_1,V_2,\cdots,V_m)\right|$。如果 $n_g>n_v$,则令 $\omega_i=\frac{g_i}{v_i}(i\in N)$,否则 $\omega_i=\frac{v_i}{g_i}(i\in N)$。以 $n_g>n_v$为例,步骤如下:

a)初始数据,令 $n_k=0, V^1_{\text{sum}}=0, G^1_{\text{sum}}=0, S^0=\varnothing; K=m$。

b)计算 $\omega_i=\frac{g_i}{v_i}(i\in N)$,并按非递增次序排序,记目前集合为 p^1。

c)令 $p=p^1$,遍历集合 p,依次考察首尾,其顺序为 $p[1]$, $p[N]$, $P[2]$, $P[N-1]$, $\cdots$。

d)如果 $G^1_{\text{sum}}+g_{p[1]}\leqslant G_j(j\in m)$且 $V^1_{\text{sum}}+v_{p[1]}\leqslant V_j(j\in m)$,则 $G^1_{\text{sum}}=G^1_{\text{sum}}+1, V^1_{\text{sum}}=V^1_{\text{sum}}+1$。

e)如果 $G^1_{\text{sum}}+g_{p[N]}\leqslant G_j(j\in m)$且 $V^1_{\text{sum}}+v_{p[n]}\leqslant V_j(j\in m)$,则 $G^1_{\text{sum}}=G^1_{\text{sum}}+1, V^1_{\text{sum}}=V^1_{\text{sum}}+1$;否则,转到 g)。

f)重复 d)e)直到 $G^1_{\text{sum}}>G_j(j\in m)$或 $V^1_{\text{sum}}>V_j(j\in m)$。

g)记录当前状态 $G^1_{\text{sum}}, V^1_{\text{sum}}, S^1, n_k=n_k+1, K=K-1, S^2=S^1\cup S^0$。

h)令 $p^1=p-S^2$。

i)重复 c)~h),直到 $K=0$,转到 j)。

j)输出配装货物集合$\{S^1,S^2,\cdots,S^{nk}\}$、配装货物的总重量 G_{sum}、配装货物的总体积 V_{sum}。

2.3　适应度函数

适应度函数可用来评价解的质量优劣。货物配装问题中,评价解的优劣主要指标是装载重量和装载容积利用程度。

装载重量利用程度 $f_1(X)$ 为

$$f_1(X)=\begin{cases}(\sum_{i=1}^{N} g_i x_{ij})/(\sum_{j=1}^{m} G_j) & \sum_{i=1}^{N} g_i x_{ij}\leqslant\sum_{j=1}^{m} G_j\\ -M_1 & \sum_{i=1}^{N} g_i x_{ij}>\sum_{j=1}^{m} G_j\end{cases}$$

装载容积利用程度 $f_2(X)$ 为

$$f_2(X)=\begin{cases}(\sum_{i=1}^{N} v_i x_{ij})/(\sum_{j=1}^{m} V_j) & \sum_{i=1}^{N} v_i x_{ij}\leqslant\sum_{j=1}^{m} V_j\\ -M_2 & \sum_{i=1}^{N} v_i x_{ij}>\sum_{j=1}^{m} V_j\end{cases}$$

其中,M_1 和 M_2 为足够大的正数。

综合上述两个因素,引入加权系数 α、$\beta(\alpha,\beta>0)$构造货物配装的适应度函数为

$$f_t(X)=\alpha f_{t1}(X)+\beta f_{t2}(X) \tag{8}$$

其中:$f_t(X)$为第 t 个染色体的适应度值;α、β 由经验确定,本文取 $\alpha=\beta=0.5$。

2.4　选择算子

为了能够保持全局搜索能力,避免出现早熟现象,本文提出了一种将最佳个体保留与基于排序的选择策略相结合的最佳保留选择法。

设 a、b 是常数,满足关系 $b=2(a-1)$, $1\leqslant a\leqslant2$,本文取 $a=1.5, b=1$。构造线性函数 $p_i=(a-b\frac{i}{N+1})/N$,其中 $i=1,2,\cdots,N$。具体步骤如下:

a)计算种群中每个个体的适应度值 f_i,并按非递增次序排序;

b)找出当前群体中适应度值最高的个体,令其为 f_{best};

c)依据线性函数 $p_i=(a-b\frac{i}{N+1})/N$,计算并分配相对适应度值;

d)随机生成一个$[0,1]$间的数 δ,如果 $p_1+\cdots+p_{i-1}<\delta<p_1+\cdots+p_{i-1}+p_i$,选择个体 i 进入到下一代种群中,重复选择 N 次,生成下一代种群的 N 个个体;

e)找出新种群中适应度值最高的个体 f'_{now1} 和适应度值最

低的个体 f'_{now2}；

f) 如果 $f'_{now1} > f_{best}$，则 $f_{best} = f'_{now1}$；否则，用最好个体 f_{now1} 替换目前群体中的最差个体 f_{now2}。

2.5 交叉算子

顺序交叉能保留并融合不同排列的有序结构单元。但是，当染色体交叉点不全为0时，优良基因片断在顺序交叉时被破坏，不能保证算法能够收敛到全局最优。因此，本文对顺序交叉操作进行了改进，其操作过程如下：

a) 在两个父代染色体上随机各选取一段作为交叉段；

b) 如果染色体交叉点处的两个基因全都为0，则直接进行顺序交叉操作；

c) 如果染色体交叉点处的基因不全都为0，则将交叉点左移(右移)，直到左右两个交叉点处的基因都为0，再进行顺序交叉操作。

同标准的顺序交叉算子相比较，改进后的交叉算子能够使子代染色体更多地继承父代的基因信息，避免优良基因片断在顺序交叉时被破坏，保证算法能够收敛到全局最优。

2.6 变异算子

本文的变异策略采取2-交换变异策略，即以一定的变异概率随机选取发生变异的个体染色体，然后在该染色体上随机选取两个基因位，把这两个位置上的基因互换，形成新的基因串。若基因串中连续出现0代码的情况，则将其中一个0代码与任意一个位置上的非零代码互换，多次执行该步骤，直到新基因串成为合法的子代个体。

经过验证，2-交换变异方式有利于跳出局部最优解，可以明显地改善整个算法的效率。

2.7 模拟退火操作

为了避免陷入区域优化过程，利用模拟退火算法的 Boltzmann 机制控制遗传算法的交叉、变异操作。这种混合算法可以使最优解的收敛从局部最优跳出，从而进一步提高优化质量和搜索效率，以弥补单一优化方法的不足，最终达到全局收敛。

设某代产生个体的适应度值为 f_1，经过遗传算法的选择、交叉和变异，产生新个体的适应度值为 f_2。设定 $\Delta f = f_2 - f_1$，当前温度为 T。

根据个体适应性的变异值 Δf 和概率值 $\exp(-\frac{\Delta f}{T})$ 控制个体，具体步骤如下：

a) 如果 $\Delta f < 0$，适应度值 f_2 个体被保存在下一代里，并且适应度值 f_1 个体被从总体中删除；

b) 如果 $\Delta f > 0$，计算 $\exp(-\frac{\Delta f}{T})$；

c) 当 $\exp(-\frac{\Delta f}{T})$ 大于[0,1]间的随机数，那么适应度值为 f_1 的个体保留在下一代中，适应度值为 f_2 的个体被删除；

d) 当 $\exp(-\frac{\Delta f}{T})$ 小于等于[0,1]间的随机数，那么适应度值为 f_2 的个体保留在下一代中，适应度值为 f_1 的个体被删除。

2.8 混合遗传算法步骤

a) $g_{en} = 0$，采用 n 位实数序列编码，基于容重比平衡法构建初始解，并输入控制参数：交叉算子 p_c、初始变异算子 p_m、群体规模 N、最大运行代数 K。设定模拟退火初始温度 T_0，$T = \delta T_0$，并且 $\delta \in [0.80, 0.95]$。

b) 利用式(8)计算适应度值 f_i，并按非递增次序排序。

c) 找出当前群体中适应度值最高的个体，令其为 f_{best}。

d) 依据线性函数 $p_i = (a - b\frac{i}{N+1})/N$，计算并分配相对适应度值。

e) 随机生成一个[0,1]之间的数 δ，如果 $p_1 + \cdots + p_{i-1} < \delta < p_1 + \cdots + p_{i-1} + p_i$，选择个体 i 进入到下一代种群中，重复选择 N 次，生成下一代种群的 N 个个体。

f) 找出新种群中适应度值最高的个体 f'_{now1} 和适应度值最低的个体 f'_{now2}。

g) 如果 $f'_{now1} > f_{best}$，则 $f_{best} = f'_{now1}$，否则，用最好个体 f_{now1} 替换目前群体中的最差个体 f_{now2}。

h) 若 $g_{en} < K$，$g_{en} = g_{en} + 1$，转步骤 i)；否则停止计算，并输出最优解；

i) 进行交叉和变异。

j) 计算 $\Delta f = f_2 - f_1$，如果 $\Delta f < 0$，适应度值为 f_2 的个体被保存，为 f_1 的个体被删除。

k) 否则，当 $\exp(-\frac{\Delta f}{T})$ 大于[0,1]间的随机数，适应度值为 f_1 的个体被保留，为 f_2 的个体被删除；当 $\exp(-\frac{\Delta f}{T})$ 小于等于[0,1]间的随机数，适应度值为 f_2 的个体被保留，为 f_1 的个体被删除。

l) 重复步骤 b) ~ k)。

3 实验计算与结果分析

本文数据取自文献[10,11]，利用 TBJ10 型集装箱配装 42 张货票的普零货物，各货票的货物重量和外径体积如表 1 所示。TBJ10 型集装箱最大装载重量为 $G = 10$ t、最大装载容积为 $V = 16.81$ m^3。货票 1 的货物必须优先装箱，且各货票中的货物性质与包装不发生相互抵触，确定载重利用率和容积利用率最大的配装方案。

表 1 各货票货物重量及外径体积

货票编号	g_i/t	v_i/m^3	货票编号	g_i/t	v_i/m^3
1	1.221	1.05	22	0.730	4.40
2	1.156	1.98	23	1.030	1.80
3	0.7	2.00	24	2.430	3.80
4	1.243	3.14	25	1.520	4.00
5	1.600	2.86	26	1.890	5.46
6	1.612	2.17	27	1.320	3.54
7	2.300	4.80	28	1.150	1.60
8	1.930	5.20	29	1.102	2.46
9	1.850	2.30	30	2.041	2.20
10	1.900	3.80	31	1.900	2.80
11	1.120	2.00	32	2.400	3.20
12	1.431	4.02	33	1.029	3.00
13	0.600	2.78	34	3.000	1.20
14	0.306	3.22	35	1.840	1.20
15	1.040	2.60	36	1.796	3.89
16	0.805	1.23	37	2.650	1.01
17	1.220	0.65	38	1.975	1.23
18	1.000	2.40	39	0.800	1.00
19	1.782	0.87	40	1.100	3.20
20	1.100	1.54	41	1.200	0.80
21	1.030	5.60	42	2.000	1.10

3.1 混合遗传算法求解

用 C 语言编制配装问题混合遗传算法程序，在 1.8 GHz

CPU、1 GB 内存的计算机上进行实验计算。

经反复实验,采用以下参数:$\lambda = 0.5$,设群体规模 $NN = 60$,最大迭代次数 $t_{\max} = 300$,交叉算子 $p_c = 0.85$,变异算子 $p_m = 0.02$,初始温度 $T_0 = 250$,降温系数 $\delta = 0.89$,随机求解 10 次,结果如表 2 所示。

表 2　混合遗传算法求解配装问题结果

计算次序	混合遗传算法求解		
	采用货票编号	载重利用率/%	容积利用率/%
1	1,16,26,29,30,35,40	99.99	99.94
2	1,9,12,13,26,34	99.92	100
3	1,4,11,16,17,27,30,33	99.99	100
4	1,8,9,20,26,42	99.91	99.05
5	1,2,9,13,14,16,17,18,35	99.98	100
6	1,9,12,13,26,34	99.92	100
7	1,12,14,15,17,23,29,37	100	100
8	1,10,14,20,23,30,32	99.98	100
9	1,7,10,18,19,36	99.99	100
10	1,12,14,15,17,23,29,37	100	100
平均值	–	99.97	99.90
标准差	–	0.036	0.300

从表 2 中可以看出,用本文设计的混合遗传算法对实例的 10 次求解中,都得到了质量较高的解,载重利用率的平均值为 99.9%,容积利用率的平均值为 99.90%。算法的计算结果相当稳定,载重利用率的标准差仅为 0.036,容积利用率的标准差为 0.300。从计算效率上看,10 次求解中有 2 次达到了最优解,7 次达到了最好解,可见效率较高。

3.2　遗传算法求解

参考文献[11]采用的遗传算法求解,主要参数取值为:群体规模 $N = 80$,最大迭代次数 $K = 300$,交叉算子 $p_c = 0.95$,变异算子 $p_m = 0.01$,初始温度 $T_0 = 250$,降温系数 $\delta = 0.89$,随机求解 30 次。求得最优装载重量和容积利用率为 83.80% 和 91.13%。具体配装方案如表 3 所示。

3.3　蚁群算法求解

参考文献[10]采用的蚁群算法求解,具体参数取为 $\alpha = 1$, $\beta = 5$, $\rho = 0.9$, $\tau_0 = 0.5$, $\eta_1 = \eta_2 = 1$, $m = 30$, $n_c = 200$,多次随机求解。求得最优装载重量和容积利用率为 81.19% 和 98.75%。具体配装方案如表 4 所示。

表 3　遗传算法求解配装问题最优结果

货票编号	1 9 18 23 28 33 40
载重利用率/%	83.80
容积利用率/%	91.13

表 4　蚁群算法求解配装问题最优结果

货票编号	1 3 7 18 29 36
载重利用率/%	81.19
容积利用率/%	98.75

3.4　三种算法求解分析

本文采用混合遗传法求解,求得最优装载重量和容积利用率均为 100%,具体方案如表 5 所示。

如表 6 所示,与文献[11]采用遗传算法所得解相比较,装载重量利用率提高了 16.2%,容积利用率提高了 8.87%;与文献[10]采用蚁群算法所得解相比较,装载重量利用率提高了 18.81%,容积利用率提高了 1.25%。

表 5　混合遗传算法求解配装问题最优结果

货票编号	1 12 14 15 17 23 29 37
载重利用率/%	100
容积利用率/%	100

表 6　三种算法求解配装问题最优结果分析

指标	遗传算法	蚁群算法	本文算法
载重利用率/%	83.80	81.19	100
容积利用率/%	91.13	98.75	100

对比文献[10]与文献[11]这两种算法所求配装最优方案,前者以装载重量利用率的下降为前提,来换取容积利用率的提高;后者以容积利用率的下降为前提,来换取装载重量利用率的提高。

而本文设计混合遗传算法所求配装最优方案装载重量和容积利用率均有很大提高,比上述文献最优装载重量利用率(遗传算法求得)提高了 16.2%,最优容积利用率(蚁群算法求得)提高了 1.25%。可以看出,本文提出的混合遗传算法具有很强的寻优能力和很高的计算效率,算法的求解质量高。

4　结束语

本文算法并没有将装载重量利用率和容积利用率设定在此消彼长的对立面上,而是从全局、整体最优上设计该类问题,并充分、均衡利用装载工具的载重和容积。因此,更具有实际应用意义和推广价值,降低了企业运营成本,提高了经济效益。

参考文献:

[1] CHEN C S, LEE S M, SHEN Q S. An analytical model for the container loading problem [J]. European Journal of Operational Research, 1995, 80(1): 68-76.

[2] FRANCOIS C, JACQUES C, AZIZ M. A new exact method for the two-dimensional orthogonal packing problem [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 183(3): 1196-1211.

[3] SHACHNAI H, TAMIR T. Polynomial time approximation schemes for class-constrained packing problems [J]. Journal of Scheduling, 2001, 4(6): 312-338.

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

[5] BERGHAMMER R, REUTER F. A linear approximation algorithm for bin packing with absolute approximation factor [J]. Science of Computer Programming, 2003, 48(1): 67-80.

[6] CARLO F. On the bin packing problem with a fixed number of object weights [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 181(8): 117-126.

[7] TERNO J, SCHEITHAUER G, SOMMERWEISS U, *et al*. An efficient approach for the multi-pallet loading problem [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 123(2): 372-381.

[8] BORTFELDT A, GEHRING H, MACK D. A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem [J]. Parallel Computing: Parallel Computing in Logistics, 2003, 29(5): 641-662.

[9] LOH K H, GOLDEN B, WASIL E. Solving the one-dimensional bin packing problem with a weight annealing heuristic [J]. Computers & Operations Research, 2008, 35(7): 2283-2291.

[10] 曹宏美,高利,张天宫. 优化多品种货物配装的蚂蚁算法[J]. 交通与计算机, 2008, 26(2): 11-14.

[11] 卜雷,尹传忠,蒲云. 优化普零货物拼箱配装的遗传算法[J]. 交通运输工程学报, 2004, 34(4): 84-87.