

# 航材包装单元多隔层集装箱装载优化研究

倪彬, 崔崇立, 徐常凯, 侯胜利, 李乐喜  
(空军勤务学院 航材四站系, 江苏 徐州 221000)

**摘要:** **目的** 通过对装载模型开展研究, 提高航材包装单元在组合式多隔层集装箱中的装载率, 为部队进行集装箱装载工作提供技术方法。**方法** 依据待装载航材包装单元和集装箱尺寸, 分析集装箱内部的分割方案, 考虑装载容积、载质量、底面积和装载重心等约束条件, 综合空间利用率和载质量为目标函数, 建立数学模型, 并利用遗传算法对每种分割方案进行优化计算, 确定最佳的分割与装载方案。**结果** 以26个航材包装单元待装入B9型组合式集装箱为例, 最优的装载方案是将集装箱内部分割成3层, 16个航材包装单元被装入, 空间利用率达到86.25%, 装载后集装箱的稳定性良好。**结论** 该模型能有效优化航材包装单元的装载方案, 提升组合式集装箱的装载效率, 对加快军用物资的输送具有重要意义。

**关键词:** 航材包装单元; 多隔层集装箱; 遗传算法

中图分类号: TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)17-0267-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.17.038

## Optimization of Multi-compartment Container Loading for Air Material Packaging Unit

NI Bin, CUI Chong-li, XU Chang-kai, HOU Sheng-li, LI Le-xi

(Air Force Material and Four-Stations Department, Air Force Logistics College, Xuzhou 221000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the loading model, to improve the loading rate of air material packaging unit in combined multi-compartment container, thus providing a technical method for container loading work of the army. According to the size of air material packaging units to be loaded and container, the segmentation scheme of container interior was analyzed. Considering the constraints of loading volume, loading weight, floor area and center-of-gravity position, a mathematical model was established with comprehensive space utilization and loading capacity as the objective function, and genetic algorithms were used to perform optimization calculations for each segmentation scheme, to determine the best segmentation and loading scheme. Taking 26 air material packaging units to be loaded into B9 type combined container as an example, the optimal loading scheme was to divide the interior of container into three layers to load 16 air material packaging units, thus the space utilization of container reached 86.25% and the stability of the loaded container was good. This algorithm model can effectively optimize the loading scheme for the air material packaging units, improve the loading efficiency of the combined containers, and have important significance for accelerating the transportation of military materials.

**KEY WORDS:** air material packaging unit; multi-compartment container; genetic algorithm

装载运输是航材保障的重要环节, 经常需要利用集装箱进行联合运输。对于在飞机上配套使用的航

材, 通常要放在同一包装箱或者航材标准箱中, 作为运输的一个航材包装单元, 装入集装箱内。为提高航

收稿日期: 2020-02-27

作者简介: 倪彬(1985—), 男, 空军勤务学院讲师, 主要研究方向为装备管理。

材的运输效率,需要充分利用集装箱的有效容积,合理制定航材包装单元的装载方案。集装箱装载约束条件多,属于多项式复杂程度的非确定性完全问题,求解难度大。从20世纪70年代开始,引起了很多学者的关注,最初的研究主要解决一维和二维的装载问题<sup>[1-3]</sup>,80年代以后,对于三维装载问题的研究才逐步展开<sup>[4-7]</sup>。其中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、搜索效率高以及隐含并行性等特点<sup>[8-9]</sup>,是解决集装箱内部三维装载问题的常用算法。在装载优化的研究中,通常设定集装箱或者其他装载设备内部的层高固定不变<sup>[10-15]</sup>,而当前部队配发的集装箱为多用途组合式结构,箱体内部的隔层数量和位置可以根据所运输物资的不同,进行灵活的组配,有利于进一步提升集装箱的利用率。文中针对航材包装单元在这种集装箱中的装载问题,提出一种改进遗传算法,并将优化的装载方案可视化输出。

## 1 多隔层集装箱装载问题描述

为便于建模及装载优化,设定待装航材包装单元全部为规则长方体,大小、重量不一,放置方向无限制,航材包装单元的重心在其几何中心位置。航材的精密程度和价值普遍较高,为保证运输的安全性,集装箱的每个隔层上只能装载一层航材包装单元。

### 1.1 目标函数及约束条件

组合式多隔层集装箱装载优化的目标函数表达式为:

$$z = \theta \left( \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i m_i}{G} \right) + (1-\theta) \left( \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i I_i w_i h_i}{V} \right) \quad (1)$$

式中: $z$ 为目标函数; $n$ 为待装载航材包装单元的数量; $I_i$ , $w_i$ , $h_i$ , $m_i$ 分别为第*i*件航材包装单元的长、宽、高和质量; $V$ 和 $G$ 分别为集装箱的内部体积和最大装载质量; $\theta$ 为目标函数的比例参数,取值在0到1之间, $\theta=0$ 时,表示目标为集装箱的容积利用率最大; $\theta=1$ 时,表示目标为集装箱的载质量最大; $\beta_i$ 为第*i*件航材包装单元的是否装入集装箱,当第*i*件航材包装单元装入时, $\beta_i=1$ ;反之, $\beta_i=0$ 。

约束条件如下所述。

1) 载质量约束。装载完成后,航材包装单元的总质量不得超过集装箱的载质量,即:

$$\sum_{i=1}^n \beta_i m_i \leq G \quad (2)$$

2) 容积约束。装载完成后,航材包装单元的总容积不得超过集装箱的内部容积,即:

$$\sum_{i=1}^n \beta_i I_i w_i h_i \leq V \quad (3)$$

3) 底面积约束。每个隔层装载的航材包装单元

底面积总和不得超过集装箱的底面面积,即:

$$\sum_{i=1}^n \beta_i s_i \leq S \quad (4)$$

式中: $s_i$ 为航材包装单元放置的底面面积; $S$ 为集装箱的底面积。

4) 重心约束。装载完毕后所有航材包装单元的整体重心必须保持在一定安全范围内,即:

$$\frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i \beta_i / \sum_{i=1}^n m_i - x_0}{x_0} \leq M_1 \quad (5)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i \beta_i / \sum_{i=1}^n m_i - y_0}{y_0} \leq M_2 \quad (6)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i \beta_i / \sum_{i=1}^n m_i - z_0}{z_0} \leq M_3 \quad (7)$$

式中: $(x_i, y_i, z_i)$ 为第*i*件航材包装单元在装载后的重心位置坐标; $(x_0, y_0, z_0)$ 为集装箱的内箱体的几何中心坐标; $M_1, M_2, M_3$ 为装载后集装箱内重心在*x*轴,*y*轴和*z*轴上的安全浮动范围。

### 1.2 集装箱装载策略

待装航材包装单元都为长方体,与集装箱的边柜平行放置,集装箱内部的长、宽、高分别为 $L, W, H$ 。

1) 集装箱内部分割原则。组合式集装箱的隔板主要用于分割高度空间,每隔一定的高度,可放置一块隔板。隔层高度的确定原则:最小高度的隔层能够放入最小尺度的待装航材,即保证有待装航材能够放入该层;最大高度的隔层刚刚大于所有待装航材的最短边长,即保证所有的待装航材都能放入该层。最大隔层的数目通过集装箱高度值除以最小高度后向下取整得到,最小隔层的数目通过集装箱高度值除以最大高度后再向上取整得出。集装箱中的隔层高度,由最大值和最小值之间所有可能值的排列组合确定。为保证装载后的稳定性,最大高度的隔层在集装箱的最底部,向上的隔层高度依次减小。对于尺寸分布分散的待装载航材,会产生较多种集装箱内部分割方案,较多的隔层数通常对应容积利用率较小的装载方案,因此为了提高计算的效率,可以根据实际情况将隔层的最小高度值适当提高。

2) 航材包装单元放置原则。放置原则主要包括顺序和方向2个方面。放置在哪一隔层由放置顺序决定,航材包装单元按顺序依次装入集装箱,先放置在集装箱的底层,底层放满后再依次向集装箱的上一隔层放置。首先,通过随机方式确定航材包装单元的最初放置顺序,然后通过算法迭代生成新的放置顺序。方向的确定原则参考单车货物积载问题中的放置方式<sup>[11]</sup>,航材包装单元中短于且又最接近集装箱层高的边,放置方向与层高*H*方向一致;航材包装单元的

其余边中，较短边的长度如果不超过集装箱内  $W$  方向的剩余长度，则短边的放置方向与  $W$  边一致；剩余的长边长度如果没有超过集装箱内  $L$  方向的剩余长度，则该航材包装单元能够放入集装箱的这个隔层中。如果其中任何一个不能满足，则该航材包装单元不能放入这个隔层。通过这种方式，可以确定每个装入集装箱的航材包装单元的重心维度坐标  $(x_i, y_i, z_i)$  及其放置方向和隔层。

## 2 遗传算法计算

### 2.1 编码与解码

在多隔层集装箱的装载问题中，对航材包装单元的编码需要考虑航材包装单元的装载顺序、放置方向和放置隔层，装载方案对应一个包含  $3n+1$  个基因的染色体。

$$S_r^{\text{gen}} = (s_1, s_2, \dots, s_n, s_{n+1}, \dots, s_{2n}, s_{2n+1}, \dots, s_{3n}, s_{3n+1}) \quad (8)$$

式中： $r=1, 2, \dots, N$ ， $N$  为染色体群体中个体的数量。染色体中前  $n$  个基因，即  $s_1$  到  $s_n$  代表每个航材包装单元装载顺序，由小于等于  $n$  且不重复的正整数组成；后面的  $n$  个基因， $s_{n+1}$  到  $s_{2n}$  代表航材包装单元的放置方向编号，由 1 到 6 之间可重复的整数数列排列而成，编号方式见表 1；再后面  $n$  个基因， $s_{2n+1}$  到  $s_{3n}$  表示对应航材包装单元放置的隔层编号，若  $s_{2n+i}=0$ ，则表示第  $i$  件航材包装单元不能被装入集装箱；最后一个基因， $s_{3n+1}$  代表了该染色体对应装载方案的适应度值。

表 1 航材包装单元放置方向编号  
Tab.1 Placement direction number of air material packaging unit

编号	放置方向
1	$I_i // L, w_i // W, h_i // H$
2	$w_i // L, I_i // W, h_i // H$
3	$h_i // L, I_i // W, w_i // H$
4	$I_i // L, h_i // W, w_i // H$
5	$w_i // L, h_i // W, I_i // H$
6	$h_i // L, w_i // W, I_i // H$

### 2.2 适应度计算

在集装箱装载问题中，放置原则保证了航材包装单元能够正确地放入集装箱；编程过程中对装载的航材包装单元设定了维度坐标，在优化计算中航材包装单元的总容积和每层的底面积已经受到了集装箱总容积和平面面积的约束，但载质量约束和重心约束不能通过算法得到保证。为保证迭代计算过程中装载方案不偏离约束条件，在计算装载方案的适应度值时，对于违反约束条件的装载方案要给予惩罚，因此适应度函数为：

$$f_{\text{gen}}(r) = z(r) - \lambda_1 \max[0, h_1(r)] - \lambda_2 \max[0, h_2(r), h_3(r), h_4(r)] \quad (9)$$

其中：

$$h_1(r) = \sum_{i=1}^n \beta_i m_i - G \quad (10)$$

$$h_2(r) = \left| \sum_{i=1}^n m_i x_i \beta_i / \sum_{i=1}^n m_i - x_0 \right| - M_1 x_0 \quad (11)$$

$$h_3(r) = \left| \sum_{i=1}^n m_i y_i \beta_i / \sum_{i=1}^n m_i - y_0 \right| - M_2 y_0 \quad (12)$$

$$h_4(r) = \left| \sum_{i=1}^n m_i z_i \beta_i / \sum_{i=1}^n m_i - z_0 \right| - M_3 z_0 \quad (13)$$

式中： $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为惩罚因子，根据约束条件的严格程度，给与相应的权重值。

### 2.3 遗传算法操作过程

遗传算法的主要操作步骤为选择、交叉和变异。首先进行选择操作，计算群体中每个个体的相对适应度  $p_i = f_i / \sum f_i$ ，选取相对适应度高的个体，去除相对适应度低的。为保持染色体的群体规模不变，在被淘汰的个体位置上，按随机原则生成新的个体。交叉和变异操作仅在前  $n$  个基因中进行，因为  $s_1$  到  $s_n$  是随机生成的，表示放置顺序，后面表示放置方向和隔层的基因需要根据放置顺序来确定。应用双切点方式进行交叉操作，在种群中的个体进行两两交叉产生新的个体，新个体中如果表示放置顺序的基因有重复，则对未交叉部分的重复基因进行置换，对交叉操作后的种群再次进行选择操作。设置特定的概率，对种群中的个体进行变异操作，用 1 到  $n$  之间任意的整数代替随机产生的要变异的基因，再将变异后重复的基因进行置换，确保染色体基因对算法有效。再次进行选择操作，完成一次迭代计算。算法根据设定的迭代次数循环进行计算，得到适应度最高的装载方案。

## 3 计算实例

根据部队航材保障的实际情况，待装载的航材包装单元是 6 类 26 个航材标准箱，每类航材标准箱内的航材种类数量相同。航材包装单元具体的尺寸和质量见表 2。

表 2 待装载航材包装单元尺寸和质量  
Tab.2 Size and weight of air material packaging units to be loaded

类型	$l_i/\text{mm}$	$w_i/\text{mm}$	$h_i/\text{mm}$	$m_i/\text{kg}$	数量
A5	600	600	600	30	5
B5	600	600	400	25	3
B6	800	800	600	40	3
C6	800	600	400	35	6
C7	1200	800	600	55	6
D7	1200	800	400	50	3

待装的集装箱是 B9 型航材集装箱，总承质量为 2500 kg，内部尺寸为 2060 mm×1450 mm×1700 mm。隔板的最小调整距离为 100 mm，隔板厚度约为 10 mm，不到集装箱高度的 1%。综合考虑集装箱内隔板所占的高度和航材包装单元在装载过程中需要的间隙，为方便建模且不影响优化结果的实际应用，将集装箱的内部尺寸适当缩小，设定为 2000 mm×1400 mm×1600 mm。与集装箱中隔板的最大载质量相比，航材包装单元的质量很轻，因此文中假设隔板无载质量的限制。根据待装航材包装单元的尺寸和集装箱内部分割原则，确定集装箱内隔层最小为 400 mm，最大为 600 mm，集装箱内部可分割成 3 层或 4 层，共计 3 种分割方案。对于每一种分割方案应用遗传算法进行计算，各项参数的取值为：群体中个体的数量  $N=30$ ，变异概率 0.01，计算的迭代次数为 10 000，因为待装载航材包装单元的质量轻、体积大，令目标权重  $\theta=1$ ，即以装载容积率最大为目标，重心约束的安全范围中  $M_1=M_2=0.5$ ， $M_3=0$ ，载质量惩罚因子  $\lambda_1$  设定为 0.000 09，重心约束惩罚因子  $\lambda_2$  设定为 0.000 07。每种分割方案的具体层高和最优适用度见表 3。

结果表明，最优的装载方式出现在第 1 种分割方案中，具体的装载方案见表 4。

表 3 集装箱分割方案

Tab.3 Container segmentation schemes

序号	分割层数	具体层高/mm	最优适应度
1	3	400, 600, 600	0.8625
2	3	500, 500, 600	0.7783
3	4	400, 400, 400, 400	0.4561

表 4 分割方案 1 的装载方案

Tab.4 Loading scheme of segmentation scheme 1

层级	装载顺序	装载方向
顶层	C6,D7,C6,C6	1,1,1,1
中间层	C6,A5,C6,A5,A5,B5,B5,A5	5,4,5,3,6,6,4,6
底层	C6,C7,B6,A5	5,2,1,2

装载航材包装单元的总体积是 3.864 m<sup>3</sup>，容积利用率为 86.25%。装载总质量为 555 kg，装载后全部航材包装单元的重心位置在 (640,960,730)，满足载质量和重心约束要求。通过 Matlab 编程语言设计实现了“航材包装单元装载优化系统”，输出的装载方案效果见图 1。

为增加系统的实用性，使装载方案更加的直观，系统还输出优化装载方案的每层截面图，计算实例优化装载方案的 3 个截面装载见图 2—4。图 2—4 中每个包含字符串的矩形代表装载的航材包装单元，字符串中横杠前字母和数字代表航材包装单元的类型，横杠后的数字代表装载的方向。

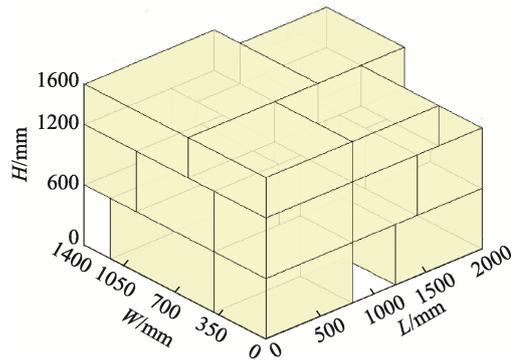


图 1 优化装载方案  
Fig.1 Optimized loading scheme

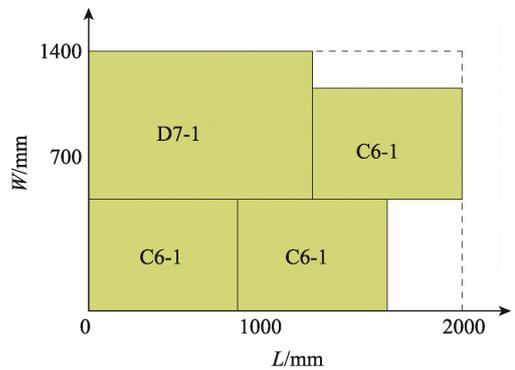


图 2 集装箱顶层装载方案截面  
Fig.2 Sectional view of loading scheme for container top layer

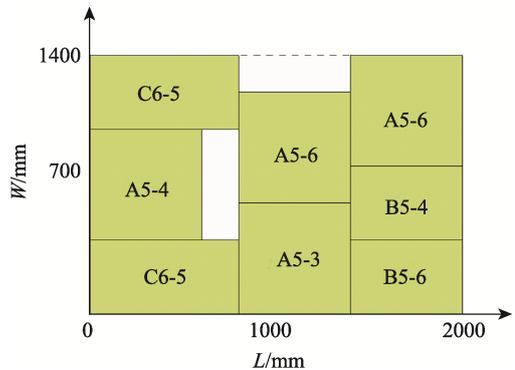


图 3 集装箱中间层装载方案的截面  
Fig.3 Sectional view of loading scheme for container middle layer

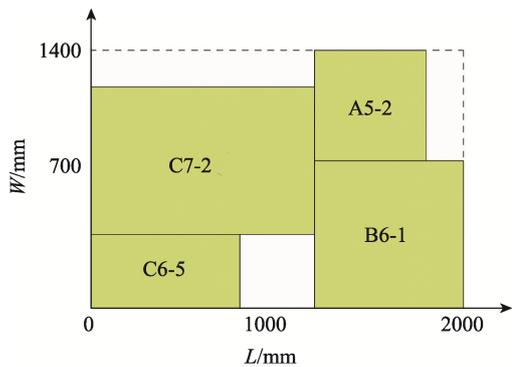


图 4 集装箱底层优化装载方案的截面  
Fig.4 Sectional view of optimized loading scheme for container bottom layer

## 4 结语

针对内部隔层数量、位置可更改的集装箱,提出了基于遗传算法的优化装载模型。通过实例计算表明,该模型能根据待装载航材包装单元的实际情况,设定装载的约束条件和优化目标,计算出满足条件的优化装载方案,较好地解决了航材集装箱的装载问题。对于提高航材集装箱的装载利用率,加快军用物资的输送具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] SIMTH A, DECANI P. An Algorithm to the Layout of Boxes in Pallets[J]. *Journal of Operational Research Society*, 1980, 31(7): 573—578.
- [2] 徐丽丽. 集装箱单箱三维装载优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2008: 4—8.  
XU Li-li. Optimization on Three-dimensional Loading in a Single Container[D]. Jinan: Shangdong University, 2008: 4—8.
- [3] 江娜. 混合遗传算法在装箱问题中的应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006: 4—10.  
JIANG Na. Hybrid Genetic Algorithm for Bin Packing[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006: 4—10.
- [4] TANSEL D, AHMET C. Optimization of One-dimensional Bin Packing Problem with Island Parallel Grouping Genetic Algorithms[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014(75): 176—186.
- [5] JAYA T, NARENDRA S C. Design of Efficient Packing System Using Genetic Algorithm Based on Hyper Heuristic Approach[J]. *Advances in Engineering Software*, 2014(73): 45—52.
- [6] 于金, 金乐, 杜海璐. 基于改进遗传算法的集装箱装载优化问题研究[J]. *船海工程*, 2008, 37(5): 140—143.  
YU Jin, JIN Le, DU Hai-lu. On the Optimized Container Loading Problem Based on Improved Genetic Algorithm[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2008, 37(5): 140—143.
- [7] 卜雷, 袁新江, 蒲云, 等. 基于遗传算法的集装箱单箱三维装载优化问题[J]. *中国铁道科学*, 2001, 25(4): 108—111.  
BU Lei, YUAN Xin-jiang, PU Yun, et al. Optimization Based on Genetic Algorithm for Three-dimensional Packing in a Single Container[J]. *China Railway Science*, 2001, 25(4): 108—111.
- [8] 许光宁, 俞金寿. 改进遗传算法求解三维集装箱装载问题[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 33(3): 425—444.  
XU Guang-ning, YU Jin-shou. An Improved Genetic Algorithm for Three-dimension Container Loading Problem[J]. *Journal of East China University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2007, 33(3): 425—444.
- [9] 许光宁, 陈国初, 俞金寿. 三维集装箱装载的改进遗传算法研究[J]. *上海电机学院学报*, 2008, 11(1): 32—36.  
XU Guang-ning, CHEN Guo-chu, YU Jin-shou. Research on Improved Genetic Algorithm for Three-dimension Container Loading Problem[J]. *Journal of Shanghai Dianji University*, 2008, 11(1): 32—36.
- [10] 程文明, 赵道致. 基于遗传算法的集装箱配载问题研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2005(9): 107—109.  
CHENG Wen-ming, ZHAO Dao-zhi. Study on Container Loading Problem Based on Genetic Algorithm[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2005(9): 107—109.
- [11] 明立立. 基于遗传算法的单车三维货物积载问题优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 19—23.  
MING Li-li. A Study on Genetic Algorithm for the One-vehicle Three-dimension Freight Loading Problem[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 19—23.
- [12] 崔会芬, 许佳瑜, 朱鸿国, 等. 基于改进遗传算法的三维单箱装载问题研究[J]. *工业工程与管理*, 2018, 23(1): 86—89.  
CUI Hui-fen, XU Jia-yu, ZHU Hong-guo, et al. Study on Three Dimensional Single Box Packing Based on Improved Genetic Algorithm[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2018, 23(1): 86—89.
- [13] 魏大帅, 张春和, 张大鹏, 等. 车辆战术储备器材包装单元装载优化研究[J]. *包装工程*, 2017, 38(23): 7—11.  
WEI Da-shuai, ZHANG Chun-he, ZHANG Da-peng, et al. Loading Optimization of Packing Unit of Vehicle Tactical Reserve Equipment[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(23): 7—11.
- [14] 朱莹, 向先波, 杨运桃, 等. 集装箱船装载问题的混合遗传智能优化研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(10): 448—451.  
ZHU Ying, XIANG Xian-bo, YANG Yun-tao, et al. Intelligent Hybrid Genetic Algorithm for Container Ship Loading[J]. *Journal of East China University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2015, 43(10): 448—451.
- [15] 孙洪礼, 王周敬. 同类货物集装箱装载问题的启发式算法[J]. *计算机应用与软件*, 2011, 28(4): 193—196.  
SUN Hong-li, WANG Zhou-jing. Heuristic Algorithm for Containers Loading Homogenous Goods[J]. *Computer Applications and Software*, 2011, 28(4): 193—196.