

# 分布估计算法求解集装箱装载问题

左先亮 郭莉莉 高 尚

(江苏科技大学 计算机科学与工程学院 江苏 镇江 212003)

**摘 要:** 集装箱装载是一个空间优化分解的布局问题,其约束条件多,属于典型的 NP 完全问题,求解难度大。在考虑实际应用中的约束条件下,使用三空间分割的布局方法对剩余空间进行分解,并采用空间合并原则将闲置空间与可用空间进行合并达到充分利用,并结合分布估计算法(EDA)求解多约束装箱问题。分布估计算法采用统计学习的方法建立一个描述解分布的概率模型,再对概率模型进行随机采样产生新的种群,如此反复进行,实现种群的进化,最终获取最优解。实验仿真结果表明该算法应用于实际空间规划设计中具有重要的实际意义。

**关键词:** 集装箱装载; 空间分割; 分布估计算法; 统计学习; 概率模型

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2014)08-0183-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2014.08.043

## Solving of Container Loading Problem by Estimation of Distribution Algorithm

ZUO Xian-liang, GUO Li-li, GAO Shang

(School of Computer Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology,  
Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** Container loading is a layout problem with space optimization and decomposition. With multiple constraints it's a typical NP-complete problem and difficult to obtain an optimal solution. Considering some constraints in practical applications, adopt the measures of three-space-dividing to decompose the residual space, use the spatial merge principle to combine the free space with the usable space in order to achieve the full use of container, and combined with the Estimation of Distribution Algorithm (EDA), solve the multi-constrained packing problem. The EDA establishes a probability model by statistical learning to describe the distribution of solutions. New populations are gotten by sampling the probability model randomly. The algorithm is iterated to realize the evolution and finally to get the best individuals. The simulation results show that the algorithm is of great significance in the practical planning and design of space.

**Key words:** container loading; space dividing; Estimation of Distribution Algorithm (EDA); statistical learning; probability model

### 0 引 言

集装箱装载问题是指将不同尺寸的货物按照一定的约束条件装入具有一定容量的集装箱中,使其空间利用率和重量利用率达到最高。该问题是货物运输过程中的重要环节,如何给出一种合理的布局及装载方案,将提高集装箱的利用率以获得某种最佳效益,是集装箱装载问题的主要目标。

随着对集装箱装载问题研究的不断深入,目前大部分是研究二维或三维矩形物体在矩形容器中的布局。由于三维布局在数学上属于 NP<sup>[1]</sup> 完全问题,在短时间内找不到最优解。对于这样的问题,需要解决两

个关键性的问题:

(1) 物体装入容器的空间的分解方法,即布局问题;

(2) 如何确定物体的装载顺序。

目前常用的研究方法有数学规划法、图论法、启发式方法<sup>[2-3]</sup>、蚁群算法<sup>[4-5]</sup>、模拟退火算法<sup>[6]</sup>、禁忌搜索算法<sup>[7]</sup>、遗传算法<sup>[8-10]</sup>等。

文中将分布估计算法应用于三维装箱问题的求解,这对于将分布估计算法应用于实际空间规划设计中具有重要的实际意义。

收稿日期: 2013-10-12

修回日期: 2014-01-16

网络出版时间: 2014-05-21

基金项目: 人工智能四川省重点实验室开放基金(2012RYJ04); 江苏省“青蓝工程”资助项目(苏教师[2010]27号)

作者简介: 左先亮(1989-),男,硕士生,研究方向为智能计算;高尚,博士,教授,研究方向为模式识别与人工智能。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140524.2149.014.html>

## 1 装箱问题描述

### 1.1 适应度函数及约束条件

给定一个长方体的集装箱容器  $R$  和一批待装的矩形货物集合  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。集装箱长、宽、高分别  $L, W, H$ ，体积  $V = L \times W \times H$ 。待装物体  $C_i$  对应长宽高分别为  $l_i, w_i, h_i$ ，体积  $v_i = l_i \times w_i \times h_i$ 。装箱要求为：在满足一定的约束条件下最大化体积装载率，以提高集装箱的利用率。其目标函数为：

$$f() = \left( \sum_{i=1}^n v_i / V \right) \times 100\% \quad (1)$$

在集装箱装载货物过程中，其约束条件有：集装箱承载质量和承载容积、货物摆放方向、集装箱稳定性、货物本身承载力、货物装载顺序等。

### 1.2 装载策略

文中采用的是三空间分割的方法，将待装货物放入集装箱后，该集装箱被分成除货物本身占用外的三个子空间，分别为前空间  $L$ 、右空间  $R$  和上空间  $M$ 。定义集装箱门所在端为前端，集装箱所在坐标系中的位置及三空间分割如图 1 所示。每个子空间在填充过程中，该空间被摆放入货物后，同样被继续分割成三个子空间，而原空间消失，直至没有待布局物体满足要求或集装箱无可利用空间位置。

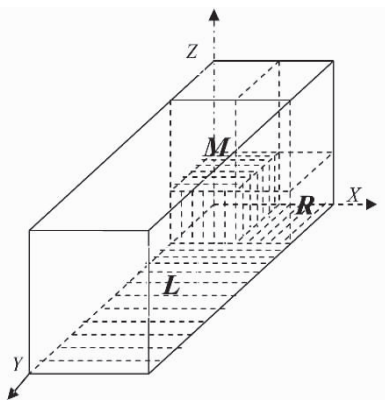


图 1 集装箱三空间分割示意图

#### (1) 货物装载原则。

空间分割的思想就是最大限度地填满每个子空间，首先考虑的是对子空间利用率最大的物体，所以采用按待装物体体积递减的方式装入货物。先将体积大的装入，随着分解的进行，空间越来越琐碎，体积小的物体恰好能填充这些琐碎的空间。

在装载货物时，采用从左到右（即图 1 中  $X$  轴方向），从下到上（即图 1 中  $Z$  轴方向），从后到前（即图 1 中  $Y$  轴方向）的顺序逐层摆放。这样做不仅考虑了工人实际操作过程，还能保证沿集装箱深度方向空隙的填充。

#### (2) 空间分割。

在空间分割的过程中，未被填充的成为剩余空间，

空间分解的过程其实就是剩余空间的搜索过程。在初始阶段剩余空间就只有一个，即整个集装箱。此时剩余空间的坐标为  $(0, 0, 0)$ ，长、宽、高分别  $L, W, H$ 。随着物体的装入过程会出现很多新的剩余空间，每装入一个物体都会在物体的前方、右方和上方产生三个剩余空间。将剩余空间相关数据信息存储在数据栈中。由于堆栈的后进先出机制所以在搜索剩余空间时，应先搜索当前摆放物体的前方剩余空间，再搜索其上方的剩余空间，最后搜索右方的剩余空间。

定义 3 个长度为 6 的一维数组：Lspace [6]、Rspace [6] 和 Mspace [6] 分别存储前空间、右空间和上空间的左后下角坐标  $(x, y, z)$  以及长宽高的尺寸大小。以前空间 Lspace [6] 为例：

Lspace [0] =  $x$ , Lspace [1] =  $y$ , Lspace [2] =  $z$ ,

Lspace [3] =  $l$ , Lspace [4] =  $w$ , Lspace [5] =  $h$

其中  $l, w, h$  表示前空间在长度、宽度和高度上的尺寸，右空间与上空间存储顺序与前空间相同。

搜索剩余空间的算法如图 2 所示。

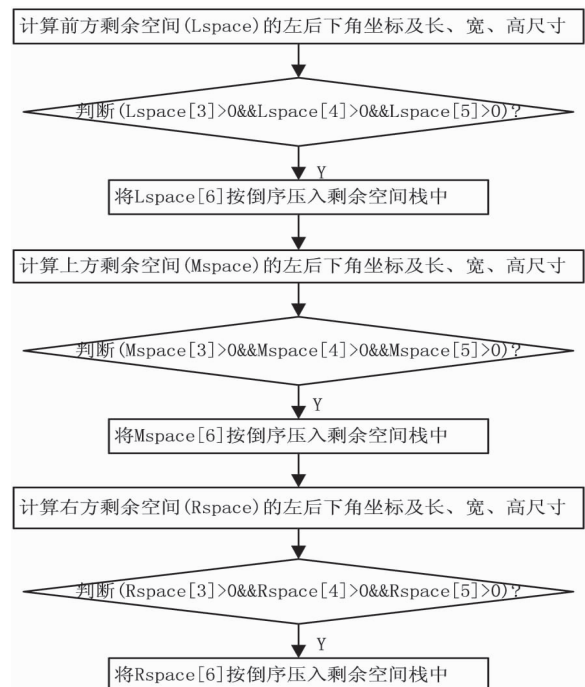


图 2 搜索剩余空间流程

#### (3) 空间合并。

当剩余空间无法容纳任何一个未被装载的货物时，则该空间叫做闲置空间。如何合理地减少闲置空间，将会大大改善算法的寻优性能。文中定义了一个多维数组 freespace 来保存在摆放物体过程中产生的闲置空间数据，包括闲置空间的长、宽、高尺寸以及左后下角坐标。一旦当前待填充空间与某一闲置空间符合合并条件，便可以进行合并再利用，使集装箱空间达到充分利用。此时存放在数组 freespace 中的数据会被清空，相当于该闲置空间被删除。

由前文可知空间分割过程中产生的剩余空间按照前空间到上空间再到右空间的顺序被存储在堆栈中, 取栈顶元素为当前待填充空间, 其相应的数据(长、宽、高尺寸以及左后下角坐标)存入一维数组  $currentspace[6]$  中。如果闲置空间  $freespace$  不为空, 判断当前空间是否能与闲置空间进行合并。空间合并包括当前空间与闲置空间的合并, 以及闲置空间之间的合并。并且每一种情况又包括同一高度空间的左右合并(如图3所示)和前后合并(如图4所示), 以及不同高度之间的上下合并(如图5所示)。

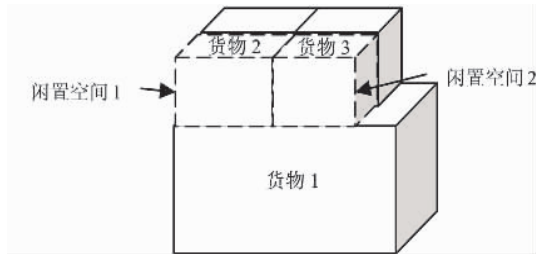


图3 左右合并

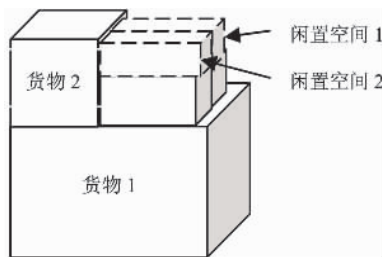


图4 前后合并

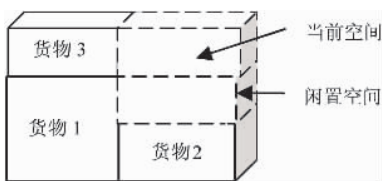


图5 上下合并

## 2 分布估计算法解决集装箱装载问题

### 2.1 分布估计算法概况

分布估计算法的概念最初在1996年被提出<sup>[11]</sup>, 分布估计算法提出了一种全新的进化模式<sup>[12]</sup>, 目前已经成功应用于多个领域<sup>[13-15]</sup>。在该算法中不存在杂交和变异等遗传操作, 取而代之的是从一个概率模型中进行个体采样从而形成新的种群。分布估计算法通过一个概率模型描述候选解在空间的分布, 采用统计学习手段从群体宏观的角度建立一个描述解分布的概率模型, 然后对概率模型随机采样产生新的种群, 如此反复进行, 实现种群的进化, 直到终止条件。

根据概率模型的复杂程度以及不同的采样方法, 分布估计算法发展了很多不同的具体实现方法, 但是都可以归纳为以下两个主要步骤。

(1) 构建描述解空间的概率模型。首先对种群进行评估, 选择优秀的个体集合, 再采用统计学习等手段构造一个描述当前解集的概率模型。

(2) 由概率模型随机采样产生新的种群。一般采用蒙特卡罗方法, 对概率模型采样得到新的种群。

### 2.2 编码与解码

将  $n$  个待装的物体按照装载顺序对其进行编码, 每种方案对应一个编码序列, 其编码形式为  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。将用来表示货物装载顺序的十进制数  $a_i$  用  $k$  位 ( $2^{k-1} \leq n < 2^k$ ) 的二进制码  $X_i = [h_{ik}, h_{i(k-1)}, \dots, h_{i1}] \in \{0, 1\}^k$  表示, 将  $n$  个类似于  $X_i$  的二进制编码片段连接在一起就组成了所有待装物体的编码  $X = [h_{1k}, h_{1(k-1)}, \dots, h_{11}, h_{2k}, h_{2(k-1)}, \dots, h_{21}]$ 。

已知第  $i$  个物体的顺序  $a_i$  用二进制编码  $X_i = [h_{ik}, h_{i(k-1)}, \dots, h_{i1}] \in \{0, 1\}^k$  表示, 则其解码公式为:

$$a_i = \sum_{j=1}^k 2^{j-1} h_{ij} \quad (2)$$

### 2.3 评价适应度函数

在集装箱装载过程中不仅要求容器的空间利用率达到最高, 同时要考虑多种约束, 其适应度函数为公式(1)。通过下面建立的概率模型以及随机采样操作方法不断地搜索适应值  $f$  较大的解。

### 2.4 建立概率模型

在建立概率模型时假设变量相互独立, 采用 UM-DA 方法进行更新。在更新的概率模型中, 用一个概率向量  $P(X) = [p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_q)]$  表示解空间的概率模型,  $q$  表示基因链的长度,  $p(x_i) \in [0, 1]$  表示基因位置  $i$  取1的概率,  $1 - p(x_i)$  表示基因位置  $i$  取0的概率。假设种群进化到第  $l$  代, 那么第  $l+1$  代的更新概率为:

$$P_{l+1}(x_i) = p_l(x_i | D_l^S) \quad (3)$$

其中,  $D_l^S$  为第  $l$  代种群中的优势群体。

### 2.5 算法步骤

步骤1: 按照概率  $P_l(X) = [0.5, 0.5, \dots, 0.5]$  随机产生  $M$  个个体作为初始群体  $D_l$ ,  $l = 0$ ;

步骤2: 计算  $M$  个个体的适应值, 保留最好解;

步骤3: 若算法符合终止条件则结束, 否则继续执行;

步骤4: 进行选择操作, 选择  $N$  个个体 ( $N < M$ ) 作为优势群体  $D_l^S$ , 由优势群体  $D_l^S$  构建概率模型  $P_{l+1}(X)$ , 其计算公式参照公式(3);

步骤5: 从概率向量  $P_{l+1}(X)$  中采样  $M$  次, 得到新一代的群体, 返回步骤2。

## 3 算法测试与结果对比

文中采用文献[16]的布局空间和测试数据, 布局

空间为国际标准的 20 英尺的集装箱,尺寸为 2.352 m × 2.388 m × 5.899 m,随机产生 30 件货物,每件货物的长、宽、高如表 1 所示。适应度函数暂时只考虑空间约束,文中算法得出的空间利用率为 80.14%,结果如表 2 所示。

表 1 待装货物尺寸 m

No	长	宽	高	No	长	宽	高
1	0.6	0.9	0.37	16	1.2	1.1	2.1
2	0.46	1.44	0.66	17	1.2	1.9	1.1
3	0.95	0.66	0.6	18	1.63	2.0	1.2
4	0.66	1.32	0.96	19	1.8	2.22	1.0
5	0.33	0.96	0.3	20	1.2	0.7	0.6
6	1.03	1.22	0.97	21	0.36	1.73	0.69
7	0.68	0.68	0.68	22	1.0	1.5	1.4
8	0.68	1.68	0.98	23	0.62	0.84	0.78
9	0.7	0.54	1.3	24	0.62	0.78	0.5
10	1.11	1.2	2.2	25	0.6	0.75	0.4
11	1.11	2.2	1.2	26	0.5	1.3	0.96
12	1.2	2.2	2.22	27	0.5	0.98	0.48
13	0.4	0.6	0.5	28	1.1	0.72	0.68
14	0.54	0.7	0.64	29	0.6	0.4	0.8
15	0.6	1.2	0.8	30	0.46	0.86	0.34

表 2 实验结果 m

No	X	Y	Z	长	宽	高
18	0	0	0	1.63	2.0	1.2
12	0	1.63	0	1.2	2.2	2.22
11	0	2.83	0	1.11	2.2	1.2
17	0	0	1.2	1.2	1.9	1.1
10	0	3.94	0	1.11	1.2	2.2
16	1.2	3.94	0	1.2	1.1	2.1
6	0	2.83	1.2	1.03	1.22	0.97
8	0	5.14	0	0.68	1.68	0.98
28	1.22	2.83	1.2	1.1	0.72	0.68
15	0	5.14	0.98	0.6	1.2	0.8
21	0	1.2	1.2	0.36	1.73	0.69
1	1.22	2.83	1.88	0.9	0.6	0.37
27	0	5.14	1.78	0.5	0.98	0.48
25	1.68	5.14	0	0.75	0.6	0.4
14	1.68	5.14	0.4	0.7	0.54	0.64
9	1.68	5.14	1.04	0.7	0.54	1.3
5	2.0	0	0	0.96	0.33	0.3
29	1.2	5.14	0.98	0.6	0.4	0.8
13	1.2	5.14	1.78	0.6	0.4	0.5

使用相同的实验数据,不同算法的实验结果对比如表 3 所示。文献[16]采用启发式算法得到的空间利用率为 78.34%,说明分布估计算法的性能优于启发式算法。而文献[9]采用的遗传算法得到的空间利用率为 85.17%,性能明显优于文中的分布估计算法,

但实际操作时分布估计算法明显比遗传算法更为简便。因为分布估计算法对整个群体进行操作,不同于遗传算法对个体进行操作,通过学习和采样取代遗传算法的交叉、变异等操作,从而降低了算法的复杂度。同时也要看到不足的地方,文中将分布估计算法直接应用于实际问题,得到的效果不够令人满意。如何对该算法进行优化,提高其在实际应用中的效率,是在后续的学习研究过程中需要解决的问题。

表 3 实验结果对比

使用算法	空间利用率/%
启发式算法	78.34
遗传算法	85.17
分布估计算法	80.14

## 4 结束语

文中将分布计算方法应用于具有一定约束条件的三维装箱问题中,为类似的空间布局优化问题提供了一种新的思路。分布计算方法的研究处于初期,仍有许多问题值得去研究,但从当前的应用效果来看,分布估计算法在实际环境中的应用具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] Pisinger D. Heuristics for the container loading problem[J]. European Journal of Operational Research 2002, 141(2): 382-392.
- [2] Lim A, Rodrigues B, Yang Y. 3-D container packing heuristics[J]. Applied Intelligence 2005, 22(2): 125-134.
- [3] 阎威武,邵惠鹤,田雅杰. 集装箱装载的一种启发式算法[J]. 信息与控制 2002, 31(4): 353-356.
- [4] 杜立宁,张德珍,陈世峰. 蚁群算法求解复杂集装箱装载问题[J]. 计算机应用 2011, 31(8): 2275-2278.
- [5] 庄凤庭,张磊,张春鲜,等. 基于蚁群算法的集装箱装载问题[J]. 江南大学学报(自然科学版) 2007, 6(6): 795-799.
- [6] 江娜,丁香乾,刘同义,等. 集装箱装载问题的模拟退火遗传算法[J]. 电子技术应用 2005, 31(10): 14-16.
- [7] 刘嘉敏,董宗然,马广焜. 基于禁忌搜索算法求解集装箱装载问题[J]. 沈阳工业大学学报 2009, 31(2): 212-216.
- [8] 何大勇,查建中,姜义东. 遗传算法求解复杂集装箱装载问题方法研究[J]. 软件学报 2001, 12(9): 1380-1385.
- [9] 许光宁,肖志勇,俞金寿. 应用自适应遗传算法解决集装箱装载问题[J]. 控制与决策 2007, 22(11): 1280-1283.
- [10] 庄凤庭,宋淑娜,高尚. 基于空间优化的三维装箱布局混合遗传算法[J]. 科学技术与工程 2009, 9(3): 709-712.
- [11] Muhliebe H, Paass G. Form recombination of genes to the estimation of distributions I: binary parameter[J]. Lecture Notes in Computer Science 1996, 1141: 178-187.

(下转第 190 页)

表 2 三种模式程序运行时的输入/输出比较

模式	输入	输出
单机模式	标准输入	标准输出
在线模式	动态文件	动态文件
OJ 系统	静态文件	动态数据

在单机模式中,程序运行在命令行窗口。少量的数据输入通过标准输入设备键盘录入,结果通过标准输出设备屏幕显示。对于数据量比较大的输入,可预先录入文件,运行时采用输入重定向到文件获取数据。同样,需要保存输出结果时,使用输出重定向到文件的方法即可实现。

在线模式中,程序运行在远程服务器端,输入数据需要从客户端(如 Web Form)提交,并存储在服务器端文件中,该文件是中间组件运行时动态生成的。程序运行时使用重定向输入方法获取数据,标准输出也重定向到一个文本文件,该文本文件的 URL 返回到客户端,即是在 Web 客户端看到的是程序运行的结果。

OJ 系统中,处理每个问题的程序如果编译通过,运行时的数据来自系统设计时预置的数据文件,通常有  $1-N$  组,它们是预先设计好的,不可更改,所以称之为静态文件。它们通过输入重定向传给程序,同时分别将输出结果重定向到  $1-N$  个文本文件。最终的输出结果由判定程序比对预置的  $1-N$  组标准输出与运行时产生的  $1-N$  个文本文件内容,从而给出评判结果。这种反馈的结果不是程序运行结果,而是有限个可能出现的结果标志,它们由系统设计者制定。

#### 4 结束语

在线编译环境实现了软件的网络化和服务化。网络化特性为用户提供了即上网即使用的方便性,实现了多用户共享使用,提高了软件的利用率。服务化特性体现在使用模式上,它是一种 SaaS( Software as a Service) 模式的云计算实现方式,用户可以按需使用,按时付费,不需要安装和维护。

#### 参考文献:

- [1] Wilz Sr D M, Knowles C H. Web - based system and method for enabling a viewer to access and display HTML - encoded

(上接第 186 页)

- [12] 周树德,孙增圻. 分布估计算法综述[J]. 自动化学报, 2007, 33(2): 113 - 121.  
 [13] 樊玮,苏秋波. 基于分布估计算法的多航段座位分配模型[J]. 信息与控制, 2012, 41(6): 774 - 778.  
 [14] 高 尚. 武器 - 目标分配问题的分布估计算法及参数设计[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(S1): 178 -

documents located on the World Wide Web ( WWW ) by reading URL - encoded bar code symbols printed on a web - based information resource guide: U. S. 6 076 733 [P]. 2000 - 06 - 20.

- [2] Murugesan S. Web application development: challenges and the role of web engineering [M] // Web engineering: modelling and implementing web applications. Berlin: Springer, 2008: 7 - 32.  
 [3] Han M C, Li D Y, Liu C Y, et al. Networked characteristics in software and its contribution to software quality [J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(20): 29 - 31.  
 [4] He Keqing, Wang Jian, Liang Peng. Semantic interoperability aggregation in service requirements refinement [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2010, 25(6): 1103 - 1117.  
 [5] He Keqing, Peng Rong, Liu Jing, et al. Design methodology of networked software evolution growth based on software patterns [J]. Journal of System Science and Complexity, 2006, 19(2): 157 - 181.  
 [6] 潘峰,席泓,张儒良. 一种分布式编译平台的设计与实现[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2010, 35(4): 141 - 144.  
 [7] 王 腾,姚丹霖. Online Judge 系统的设计开发[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(12): 129 - 130.  
 [8] 喻擎苍,翁秀娟,赵 匀,等. 交互式开放结构计算机视觉平台 Ch OpenCV [J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(23): 78 - 81.  
 [9] 赵剑冬,林 健. MATLAB 在基于 Web 的决策支持系统中的应用研究[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(12): 260 - 262.  
 [10] 陈文鑫,项剑波,陈军敢. 基于 Web 的 MATLAB 远程命令窗口的设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(2): 138 - 141.  
 [11] 潘峰. 绘图脚本自动生成器的设计及其应用[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(10): 74 - 77.  
 [12] 郭秀娟. 基于 B/S 模式的地下水资源管理系统设计[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(12): 198 - 200.  
 [13] 李养群. 基于 Web 的 EPON 业务配置管理系统设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(4): 153 - 156.  
 [14] SoftIntegration Inc. Ch CGI user's guide [EB/OL]. 2009. http://www.softintegration.com/.

181.

- [15] Pelikan M, Goldberg D E, Cantu - Paz E. Linkage problem, distribution estimation, and Bayesian networks [J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(3): 311 - 340.  
 [16] 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.