集装箱装船顺序优化模型及算法研究

摘　要　本论文提出了一个用于集装箱装船顺序优化的动态整数规划模型。模型同时兼顾了集装箱在堆场中和在船上的摆放位置，并把集装箱在不同港口的装卸作业作为一个整体。在实现装船顺序最优化的同时该模型还可保证船只在不同荷载分布下的稳定性。模型的求解是一个离散的 NP-hard 问题，论文给出了用遗传算法解决该问题的算法框架，并通过正交因子试验探讨了算法参数的显著性和交互效应，从而大大缩短了算法在解决该问题时的运算时间。

关键词　集装箱运输，装卸优化，倒箱，遗传算法

Modeling and Algorithm Study for Optimizing Container Loading Planning for Containership

Abstract

In this paper, a mathematical model is proposed for developing plans for loading containers on containerships. The mathematical model is formulated as a dynamic integer programming problem. The model integrates many factors, such as the storage policies, container ship stowage and the transfers at different terminals. As weight is one of the critical factors that the model deals with, the best solution can also satisfy the meta-centric height restriction of the container ship. Since the problem is known to be NP-hard, GA is chosen due to the relatively good results in reasonable time. Unique coding method, evaluation function, genetic crossover and mutation operators are designed aimed at this problem and the significance and interactive effect of different parameters settings used during operation are analyzed. The paper shows that by using orthogonal fractional experimental designs, a good GA structure can be achieved to solve a large, computationally intensive schedule problem.

Key words:　Container Transfers, Loading-unloading Optimization, Setup Arrangement, Genetic Algorithms

1　引言

近年来，全球集装箱的运输量增长迅猛。1990 到 1999 年 10 年间，全球及中国大陆地区的集装箱吞吐量年平均递增率分别为 6.4%和 12.7%。为了获得规模经济的优势，各航运公司也不断采用越来越大的集装箱运输船舶。当前营运中的最大集装箱船舶可载箱 6000~7000TEU，甲板上的载箱列数为 17 列。而设想中的超大型集装箱船舶更达到了载箱 18000TEU，列数超过 20 列的规模。随着船舶装卸集装箱数量的增加，其在港口停留的时间也越来越长，往往一艘船在其运输网络中的一个节点就要装卸上千个集装箱，服务时间长达 5、6 个小时，乃至一天。

根据调查表明，在集装箱装卸的过程中，由于港口的平面布置，设备配备，船舶属性都是固定的，“倒箱”次数的多少将是影响装卸服务时间的决定性因素。为了提高堆场的储存能力，堆场中的集装箱往往要堆 3~7 层高，而船舶上的集装箱往往也分 6、7 层摆放。如果要装卸的集装箱不是放在最上层，倒箱操作就在所难免。虽然倒箱一次的时间相对于整个搬运时间来说很短，但随着规模经济的发展，堆场和船只中集装箱堆放数量将会不断增加，且堆放形式将更为紧凑，这就使得累积的因为倒箱而耗费的时间达到不可忽视的程度。假设每个集装箱倒箱一次需要额外花费 2.5 分钟，现有 500 只集装箱要装船，而其中 30%需要倒箱的话，其额外作业时间就长达 6 个小时，这对于航运公司和港口来说都将是一笔不小的损失。所以本论文的研究目的就在于如何最大限度的减少倒箱次数，从而减少装卸作业的时间。

2　集装箱装船顺序优化模型

2.1 集装箱装船顺序对运输效率的影响

我国集装箱码头工艺布置与国际上传统的轮胎式集装箱龙门起重机方式基本相同。船舶在港口的装卸过程通常由几个子过程构成，其中装船过程尤为复杂，首先由龙门起重机将要装的集装箱运至堆场旁的输送点（这个过程要经过若干次倒箱的操作），然后由集装

箱拖挂车运至码头后用集装箱装卸桥装船(在装船的同时，由于考虑到下一个港口的卸货以及船的配载要求，又要经过若干次的倒箱操作)。其操作流程可见图1：

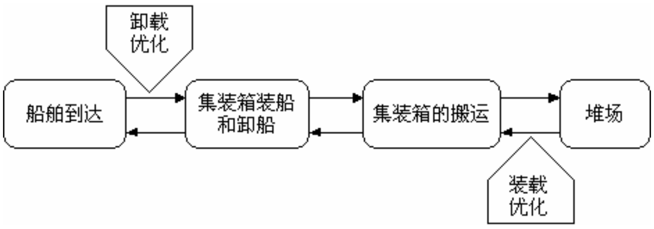

图 1 集装箱船装卸过程

而从集装箱流动的角度来看，假设第 n 个集装箱要从 i 地运往 j 地，它首先要在 i 地的堆场内存放，然后由场内吊车运至输送点，通过集装箱拖挂车运至码头，再由装卸桥装船。经过一段航行后在 j 地的码头卸下运至堆场内。本论文所建的模型就是考虑集装箱在起点港口由堆场运出至目的地港口在码头卸下这一个典型的运输过程。该运输过程所耗费的时间包括堆场作业时间 T_s、堆场至码头的运输时间 T_m、集装箱在 i 地装船的时间 T_l、集装箱船从 i 地至 j 地的旅行时间 T_t，以及集装箱在 j 地的卸船时间 T_u。

$$Travel\ time = T_s + T_m + T_l + T_t + T_u \tag{1}$$

由于在固定的船舶类型，装卸设备和港口工艺布置的情况下 T_m、T_t 都是固定的值，并且在 i 地堆场集装箱搬运顺序一定的情况下，T_l 和 T_u 也是固定的值，所以集装箱在 i 地堆场的搬运顺序将是决定该运输过程所需时间的关键因素。因为不同的搬运顺序决定了不同的装船顺序，同时也导致了在下一个港口卸船顺序的不同。

2.2 倒箱操作的定义

吊车移动集装箱的时间是由两部分组成的，一是将集装箱移动到目的地的时间，记作 T_{move}；一是吊车锁住集装箱以及放开集装箱的时间，这两个时间我们可以假设它们是相等的，记作 T_{lock}。如果再把集装箱的层数记作 z_i（i 代表第 i 只集装箱，z_i 是一个大于或等于 1 的正整数），则第 i 个集装箱的倒箱时间可以用下面的式子表示：

$$\begin{cases} Setup\quad time = 0, \quad if \quad z_i = 1 \\ Setup\quad time = z_i * (4 * T_{lock} + T_{move}) \\ \qquad + 2 * T_{lock} + T_{move}, \quad if \quad z_i > 1 \end{cases} \tag{2}$$

倒箱的次数即为 z_i-1。

2.3 集装箱船配载的方法和稳性要求

集装箱船装载集装箱后，船舶重心提高，受风面积增大会严重影响船舶稳性。因此必须选择适度的稳性和合理的集装箱重量分布。

在本课题的研究中，由于装载的总重量是一定的，则集装箱的装载顺序成为集装箱船重量分布的关键影响因素。往往为了获得一个好的重量分布，需要经过若干次的倒箱操作，为了尽量减少这些操作，可以在装载的顺序上进行预先的安排。由于装载时必须达到集装箱船的初稳性要求，所以在建立模型时必须把初稳性作为不可行约束条件。

合重心位置

$$\begin{cases} X = (\Delta_0 \cdot X_0 + P \cdot X_P + G \cdot X_g + BW \cdot X_f) / \Delta \\ Y = (\Delta_0 \cdot Y_0 + P \cdot Y_P + G \cdot Y_g + BW \cdot Y_f) / \Delta \\ Z = (\Delta_0 \cdot Z_0 + P \cdot Z_P + G \cdot Z_g + BW \cdot Z_f) / \Delta \end{cases} \tag{3}$$

初稳性高度

⑴ 自由液面对初稳性的修正

$$\delta GM_f = \frac{\sum I_{fi}}{\Delta} \tag{4}$$

⑵ 自由液面修正的初稳性高度

$$GM = KM - Z - \delta GM_f \tag{5}$$

对初稳性最低要求的校核

集装箱船的稳性通常利用船舶资料提供的“极限重心高度 KG_C 曲线”或“临界初稳性高度 GM_C 曲线”进行校核。要求经自由液面修正后的 GM 或 KG 符合下列条件之一：

$$\begin{cases} GM \ge GM_C(m) \\ KG \ge KG_C(m) \end{cases} \tag{6}$$

2.4 模型的假设

影响装卸时间的因素很多，如果全部考虑，模型将变得十分复杂，难以体现出问题的本质。所以忽略一些次要因素，做一些假设是有必要的：

⑴ 在本论文考虑的问题中，集装箱船在首发港口是空载，并且只考虑从首发港口装货到下一港口卸货的过程。由于集装箱船在起点装载的集装箱是运往网络中的各个港口，其在下一港口卸载的只是起点装载的一部分。这个子过程的优化是整个运输网络优化的基础；

⑵ 在模型中，目标函数就是倒箱的次数。吊车的移动相对于集装箱倒箱来说所耗费的价值要小得多，可以忽略不计；

⑶ 所有的集装箱尺寸是相等的，并且都为 40 尺的集装箱。这是本模型最主要的假设。但集装箱的重量各不相同；

⑷ 集装箱船在起点所装载的集装箱中，不包含冷藏箱、危险箱和动物箱等特殊箱。因为这些集装箱在船上存放的位置都有特殊的要求，如冷藏箱由于其箱位附近要设置外接电源插座和监控插座，因此一般位于舱面第一层。并且特殊箱需要提前装载；

⑸ 堆场中用于抓取集装箱的吊车只有一台；

⑹ 装船时无集装箱的缓冲区；

2.5 模型的建立

首先定义 0-1 变量 X_{idek}， $X'_{jd'e'k'}$， $X''_{id'e'k'}$：

$$X_{idek}=\begin{cases}1 & \text{需要装载的集装箱}i\text{处于堆场的第}d\text{行e列k层时，}\\ 0 & \text{其它。}\end{cases}$$

$$X'_{jd'e'k'}=\begin{cases}1 & \text{需要卸载的集装箱j被分配至集装箱船的第d'行e'列k'层时，}\\ 0 & \text{其它。}\end{cases}$$

$$X''_{id'e'k'}=\begin{cases}1 & \text{需要装载的集装箱}i\text{被分配至集装箱船的第d'行e'列k'层时，}\\ 0 & \text{其它。}\end{cases}$$

定义 C_{idek} 为装载集装箱 i 时所需的倒箱次数，同理定义 $C'_{jd'e'k'}$ 为卸载集装箱 j 时所需的倒箱次数。

目标函数：

$$Min\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{d=1}^{l}\sum_{e=1}^{p}\sum_{k=1}^{f}C_{idek}X_{idek}+\sum_{j=1}^{m}\sum_{d'=1}^{l'}\sum_{e'=1}^{p'}\sum_{k'=1}^{f'}C'_{jd'e'k'}X'_{jd'e'k'}\right)\quad(m\le n) \tag{7}$$

约束条件：

$$\sum_{d=1}^{l}\sum_{e=1}^{p}\sum_{k=1}^{f}X_{idek}=1\qquad\forall i \tag{8}$$

$$\sum_{d'=1}^{l'}\sum_{e'=1}^{p'}\sum_{k'=1}^{f'}X'_{jd'e'k'}=1\qquad\forall j \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{d=1}^{l}\sum_{e=1}^{p}\sum_{k=1}^{f}W_iX_{idek}\le D\qquad\forall i \tag{10}$$

$$\sum_{i=1}^{n}X''_{id'e'k'}-\sum_{i=1}^{n}X''_{id'e'(k'+1)}\le 0\qquad\forall d',e' \tag{11}$$

$$\sum_{i=1}^{n}X''_{id'e'k'}-\sum_{i=1}^{n}X''_{id'(e'-1)k'}\le 0\qquad\forall d',k' \tag{12}$$

$$\sum_{i=1}^{n}X''_{id'e'k'}-\sum_{i=1}^{n}X''_{i(d'-1)e'k'}\le 0\qquad\forall e',k' \tag{13}$$

$$GM\ge GM_{\min} \tag{14}$$

$$C_{idek}=k-1 \tag{15}$$

$$C'_{jd'e'k'}=k'-1 \tag{16}$$

$$\begin{aligned}&if\quad X_{idek}=X_{i'dez}=1,k>z\ \ and\ \ t_i<t_{i'}\\ &then\ \ C_{idek}=C_{idek}-1\ \ \forall d,e,i\ne i'\end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}&if\quad X'_{jd'e'k'}=X_{j'd'e'z'}=1,k'>z'\ \ and\ \ t_j<t_{j'}\\ &then\ \ C'_{jd'e'k'}=C'_{jd'e'k'}-1,\ \forall d',e',j\ne j'\end{aligned} \tag{18}$$

其中，

i：需要装载的集装箱编号；$i=1,2,\dots\dots\dots n$

j：需要卸载的集装箱编号；$j=1,2,\dots\dots\dots m$

d：堆场集装箱所在行的编号；$d=1,2,\dots\dots\dots l$

e：堆场集装箱所在列的编号；$e=1,2,\dots\dots\dots p$

k：堆场集装箱所在层的编号；$k=1,2,\dots\dots\dots f$

d'：已装载集装箱所在行的编号；$d'=1,2,\dots\dots\dots l'$

e'：已装载集装箱所在列的编号；$e'=1,2,\dots\dots\dots p'$

k'：已装载集装箱所在层的编号；$k'=1,2,\dots\dots\dots f'$

D：集装箱船的排水量；

W_i：集装箱 i 的重量（以吨为单位）；$i = 1,2,\dots\dots\dots n$

C_{idek}：装载集装箱 i 时所需的倒箱次数；

$C'_{jd'e'k'}$：卸载集装箱 j 时所需的倒箱次数；

该模型为一个纯整数的线性规划模型。其最优解可表示为 n 个集装箱装箱顺序的一个全排列。

目标函数（7）是求集装箱在起点港口由堆场运出所需倒箱次数以及目的地港口在码头卸载时倒箱次数之和的最小值。根据前面的分析，这是集装箱运输的一个典型过程，并且该过程的倒箱次数的多少决定了整个过程集装箱处理时间的长短。所以该模型即是要解决集装箱装卸时间的最优化问题。

约束条件（8）保证了堆场中待装载的集装箱的位置编码的唯一性。约束条件（9）保证了已装载的集装箱在船上的位置编码的唯一性。约束条件（10）表示待装载的集装箱重量的总和必须小于集装箱船的排水量，也即装载的重量总和不能超过集装箱船的总容量。

约束条件（11）～（13）给定了集装箱在船上的配载顺序。式（11）表示对于集装箱船的任意行和任意列，其下层的箱位都要比上层的箱位先填满。也就是说，在装箱时，总是先装满一层后再装上一层；同理可得，这三个约束条件限定了集装箱在由装卸桥装载到船上时，是按照装满一列再装下一列，装满一行再装下一行，装满一层再装下一层的顺序摆放的。前面曾经讨论过，这样的摆放顺序有很多优点，比如有助于同一目的地的集装箱分布相对集中，以及在装船的过程中保持较均匀的重量分布等等。

式（14）是一个否定性约束，即集装箱配载完之后的初稳性高度一定要大于极限初稳性高度，否则该配载方案则是无效或者不合法的。

式（15）～（18）描述了某个集装箱在装载和卸载时对其他集装箱摆放位置的影响。集装箱所处的层数在整个装卸过程中并不是固定不变的，并且叠放在它上面的集装箱数量也在不停的变化。所以移动该集装箱所需的倒箱次数是一个动态变化的值。式（15）、（16）设定初始状态每个集装箱所需倒箱次数为其所在层数减一。如，最上层的集装箱所在层数为 1，其所需的倒箱次数为 0；而处于第二层的集装箱在搬运时所需的倒箱次数则为 1，依此类推。当两个集装箱处于同一行同一列的不同层时，如果上面的集装箱先被搬走，则下层的集装箱所需倒箱次数减一。如果一个放在第二层的集装箱，当其上层的集装箱被搬走时，其自身所处的层数自然变为最上层。这是一个很重要的必须考虑的情况。

3　模型的算法研究

实际的集装箱运输过程中，从集装箱船上装卸的集装箱的数量是很大的。本章试图用该模型来解决一个接近真实情况的问题，并讨论遗传算法在解决大规模问题时的性能。

现以 1000TEU 左右的全集装箱船为例，该轮某航次由上海开往日本，在上海港口起始状态船为空载，并且在其下一个目的地日本港口卸载其在上海港口装载的集装箱的一部分。该船甲板上共 9 行，每行可装载 8 个集装箱，并且每行可装载 7 层。则该船共有 9×8×7＝504 个集装箱装载单元。根据模型的前提，假设该轮只装载尺寸相同的 40 尺集装箱。该类型集装箱的配货毛重约 22 吨，空箱重量小于 5 吨，体积 $68m^3$。由于集装箱有时并非装满货物，则可设定每个集装箱的重量在 5～25 吨范围内。

上海港口的集装箱堆场内共有 500 个 40 尺集装箱待装。这 500 个集装箱在装载前处于离码头较近的两个相邻的区内。每个区可堆放 8 列 10 行 5 层的集装箱。集装箱在这两个区内的分布状态为随机产生。遗传算法的初始参数设置如表 1 所示：

表1　遗传算法的初始参数

参数名称	参数值
初始种群大小	50
循环终止条件	30 代
交叉次数	2
变异次数	2
惩罚函数 α 值	0.5

算法中所用到的交叉算子和遗传算子如表 2 所示：

表2　基于顺序问题的交叉和变异算子

交叉算子（crossovers）		遗传算子（mutations）	
首字母缩写	描述	首字母缩写	描述
PMX	部分映射交叉	AM	反转变异
LOX	线性顺序交叉	SFM	插入变异

SPX	单点交叉	2SM	互换变异
OOX	基于顺序的交叉	3SM	三位置互换变异
CX	循环交叉		
UX	均匀交叉		

算法采用的选择机制为“指数排序选择”(Exponential Ranking Methods) 其基本思想为：将染色体从好到坏进行排序，按照它们在顺序中的位置而不是原适值指定选择概率。与通常所用的转轮式选择相比，它的优势是可使染色体之间保持合理的差距，阻止某些超级染色体太快的把持遗传过程，以满足早期限制竞争、晚期鼓励竞争的需要。其选择概率 P_i 按照下式计算：

$$P_i = q'(1-q)^{r-1}; \tag{19}$$

其中，

q＝最好染色体的选择概率；

r＝染色体在排序中的位置，最好染色体的 r 为 1；

$$q' = \frac{q}{1-(1-q)^P} \text{，P 为种群的规模。} \tag{20}$$

在集装箱装卸优化的问题中，船舶的定倾中心高度对目标函数的约束其实是一个否定性约束，即不满足临界初稳性高度的染色体即为不可行染色体。但正如前面讨论的，不可行解有可能离最优解很近，给予过大惩罚不利于从不可行域的方向获得最优解，所以考虑带有自适应项的乘法形式的评估函数：

惩罚函数构成如下：

$$p(x) = 1\Big/\left(1-\left(\frac{\Delta b(x)}{b}\right)^{\alpha}\right) = \frac{b^{\alpha}}{b^{\alpha}-\Delta b(x)^{\alpha}} \tag{21}$$

$$\Delta b(x) = \max\{0,\ g(x)-b\} \tag{22}$$

其中，α 是用来调节惩罚严厉性的参数；$\Delta b(x)$ 为约束的违反量。

在不考虑集装箱船初稳性的情况下，本程序运行了 20 次，每次运行时间 25 分钟，得出的结果如图 2：

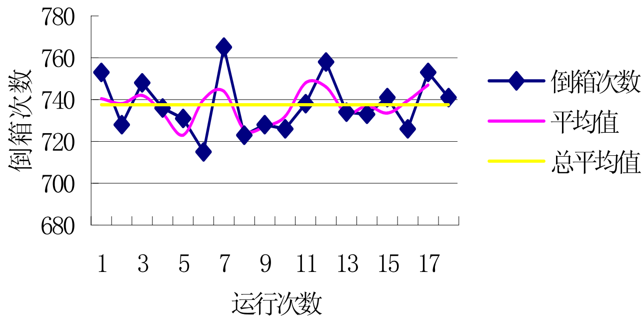

图 2　仿真 1 运行结果

由图可以看出，每次程序运行的结果并不相同，其倒箱次数在 710～770 之间波动。平均最优倒箱次数为 737 次。其中最小值为 715 次，最大值为 765 次，标准差 12.97。因此，在初始种群大小为 50，并运行 30 代的情况下，并不能保证得到最优解，但基本上已经接近最优解。

当改变初始种群数为 100，运行 50 代时，倒箱次数在 679～739 之间波动。平均最优倒箱次数为 707 次，其中最小值为 679 次，标准差 14.75。

在考虑了集装箱船的初稳性的情况下，倒箱次数有所增加，但不是很明显。

三种不同初始种群、运行代数和目标函数设置下的运行结果比较如表 32 和图 3 所示：

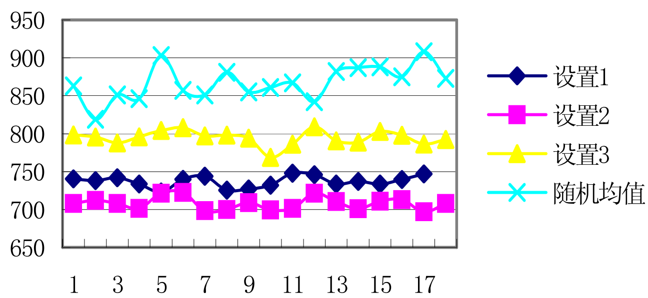

图 3　3 次仿真结果比较

表3 仿真结果对比

仿真号码	种群数/运行代数	是否考虑初稳性	均值	最优解	标准差
1	50/30	否	765	715	12.97
2	100/50	否	707	679	14.75
3	50/30	是	795	766	15.44

由上面的图表可以看出，在处理大规模问题时，遗传算法存在一定的困难，运行的时间较长（对于 500 个集装箱的问题，在第二次仿真时运行时间为 3 个小时左右），而且并不能保证每次都达到最优解。但即使这样，该较好的解 679 与随机搬运时的倒箱次数均值

864 相比还是减少了 20%的倒箱次数，这对于集装箱运输系统的效率将会是很大的提高。

通过对三种不同设置的比较可以得出以下结论：

⑴ 种群数越大，运行的代数越多，遗传算法得到的结果越好。但该效果需要通过牺牲计算时间而获得；

⑵ 在考虑了集装箱船的初稳性高度时，最优解的值明显增大，但和随机搬运时的倒箱次数相比，仍然减少了 12%左右。由于在该算法中采用的是非否定性惩罚函数，最终解受惩罚函数的参数 α 的影响较大。根据多次运算的经验，α 取 0.5 时可以得到较好的结果。

4 算法的优化

遗传算法是一种用来解决需要搜索复杂解空间的问题的启发式算法。它通常包含了一系列的参数。如交叉运算和变异运算的参数，种群的大小以及运行次数等等。不仅如此，还存在着很多不同的交叉和变异的算子。随着这些因素的不同，遗传算法的结构也在发生变化。所以，如何根据实际的优化问题找到相应的遗传算法的最佳结构将是非常重要的研究方向。因为如果在解决大规模问题时算法运行的时间过长，耗费的资源过多，即使可以得到最优解，也将失去其实际应用的意义。

符合表 4 参数设置的遗传算法结构优化问题即为三因子二水平试验问题。为了有足够的自由度来估计参数，而又不致进行太多次的试验，我们可以按 $L_8(2^7)$ 正交表来设计一个正交试验：

表4 试验参数设置

参数	不同水平设置和代码		
	1	2	水平个数
种群大小/运行代数（P/G）	20:60	60:20	2
交叉次数（C）	1	3	2
变异次数（M）	1	3	2

表5 仿真试验结果分析表

试验号	y	P	C	PC	M	PM	CM	误差
1	63.2	1	1	1	1	1	1	1
2	64.4	1	1	1	2	2	2	2
3	61.2	1	2	2	1	1	2	2
4	66.4	1	2	2	2	2	1	1
5	77.0	2	1	2	1	2	1	2
6	70.6	2	1	2	2	1	2	1
7	73.2	2	2	1	1	2	2	1
8	64.8	2	2	1	2	1	1	2
平均值	67.6000	63.800	68.800	66.400	68.650	64.950	67.850	68.350
$\hat{\beta}_j^{(1)}$		-3.8000	1.2000	-1.2000	1.0500	-2.6500	0.2500	0.7500
排序		1(1)	3(2)	3(1)	5(2)	2(1)	6(2)	

表6 试验数据的方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方	F
P	115.52	1	57.76	25.671
C	11.52	1	5.76	2.560
M	8.8	1	4.41	1.960
PC	11.52	1	5.76	2.560
PM	56.18	1	28.09	12.484
CM	0.5	1	0.25	0.111
随机误差	4.5	1	2.25	
和	208.56	7		

根据对表 5 和表 6 的正交因子试验结果的分析，可以得出以下结论：

⑴ 初始种群的规模相对于其它参数来说显得最为重要。尤其是大规模问题，一定要保证初始种群的数量，以便提供足够的采样点。虽然每一代的运行时间变长了，但可以大大节省运行的代数，从而节省整个算法的运算时间；

⑵ 在不破坏高适应值染色体结构的情况下，并且在运算时间允许的范围内，应适当提高交叉和变异运算的频率，从而在全局和局部搜索中都可以迅速的达到或接近最优解；

⑶ 对于小规模的问题，不能将变异运算频率设置得太高，这样会导致算法变成随机性搜索而很难收敛；

⑷ 在大规模问题上，增加变异频率比增加交叉频率显得更为有效，主要表现为收敛得更快，运算结果更好，并且牺牲的代价——运算时间更小。

5 论文主要结论及对今后研究的建议

论文建立了用于集装箱装船顺序优化的多阶段动态整数规划模型。该模型不同于以往将堆场装卸，集装箱船装卸以及集装箱在不同港口装卸的过程分开来研究的做法，而是将这些过程整合到一个模型中进行优化，从而使模型在宏观上更具合理性和优越性。模型还同时兼顾了集装箱船配载后的稳性要求，使得优化后的方案同时具有更好的可行性和实用性。在实例分析中，该模型的运用使倒箱次数平均减少了 12％，这对于集装箱运输系统的效率将会是很大的提高；论文还给出了集装箱装卸优化模型的遗传算法解决。设计了针对该模型的编码策略、选择机制、惩罚策略和交叉、变异算子。该算法在大规模问题的解决上比以往的优化方法计算时间大大缩短了，并且在解决实际问题时取得了较好的效果，从而显示了启发式算法在解决组合优化问题时的巨大潜力；

但该模型假设集装箱在堆场中位置已定，而实际上装卸前都要对堆场内的集装箱位置进行调整。因此可以开发堆场堆放策略的优化模型，两者相结合，模型的输出结果可以互为输入参数，经过若干次的迭代运算达到平衡，从而实现集装箱运输过程的整体最优化；并且本论文的模型仅考虑了两个港口之间的集装箱流动，今后的研究可以考虑 n 个节点之间的集装箱装卸优化问题，将该模型推广至整个物流运输网络。

参 考 文 献

[1] Ali Haghani, Evangelos I. Kaisar. **A model for designing container loading plans for containerships**. Transportation Research Board. Jan.2001

[2] E.Kozan. **Optimising container transfers at multimodal terminals**. Mathematical and Computer Modeling. 2000, 31:235-243

[3] Erhan Kozan, Peter Preston. **Genetic algorithms to schedule container transfers at multimodal terminals**. Intl.Trans. in Op. Res. 1999, 6:311-329

[4] Christopher R. Houck, Jeffery A. Joines, Michael G. Kay. **A genetic algorithm for function optimization: a matlab implementation**. NCSU-IE TR 1995, 1995-09

[5] D.J.Stewardson, C.Hicks, P.Pongcharoen, S.Y.Coleman. **Overcoming complexity via statistical thinking: optimizing genetic algorithms for use in complex scheduling problems via designed experiments**. Proceeding of the meeting at Downing College, Cambridge, UK: Tackling Industrial Complexity: the ideas that make a difference, 9-10 April 2002