

硕 士 学 位 论 文

集装箱码头协同装船优化模拟退火算法

**Simulated Annealing Based Algorithm for Cooperative Loading
ships in Container Terminal**

作 者 姓 名: 尚 尔 进

学 科、 专 业: 港口、海岸及近海工程

学 号: 21406211

指 导 教 师: 周鹏飞 副教授

完 成 日 期: 2017 年 6 月

大连理工大学

Dalian University of Technology

大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目：_____

作者签名：_____ 日期：_____年____月____日

摘 要

在世界经济一体化进程的持续推动下，全球贸易迅猛发展，港口吞吐量持续增长。在改革开放以来，中国的集装箱运输行业也迅速崛起，已成为全球最大的集装箱运输国。随着港口集装箱吞吐量增长和船舶大型化的发展，船公司对码头作业效率和能力的要求越来越高，迫切需要寻求合理的方法优化船舶的装载调度，以提高码头作业效率，增强港口的竞争力。

本文首先对集装箱码头装船作业优化问题涉及到的舱位预配图、集装箱在堆场分布和协同装船作业的具体过程等相关知识作出了全面的分析介绍，阐明本文研究以预配为基础，关注于装船作业阶段。在此基础上，通过对约束条件的详细分析，作出了合理的简化假设，清晰地界定了本文的研究内容，并明确了本文以最小化集装箱码头装船作业的总时间等效成本为优化目标。

基于问题的简化假设，结合约束条件，并根据所研究问题的特点，设计了相应的启发式规则处理装船顺序与具体舱位分配的同时优化及多场桥和岸桥的协同作业两个关键问题，并通过编码设计使优化问题与模拟退火算法相结合，又考虑了堆场的翻箱过程、目标函数的具体设定等问题，设计了初始解和新解的生成规则，从而全面设计了集装箱码头多场桥和岸桥协同装船作业优化模拟退火算法，对装船作业优化问题的研究给出了一种创新的思路和方法。

最后，通过理论和实验分析，验证了本文算法的可行性、收敛性和有效性。对算法的收敛性、精度及 CPU 时间进行了分析，结果表明：1) 当总循环 18 万次时，总成本趋于稳定，算法收敛；2) 收敛时，总成本降低了约 36.8%；3) CPU 时间和总循环次数成正比；4) 收敛时，CPU 时间消耗为 1437.568s (约 24min)。接着对算法中相关参数的影响作出了详细分析，结果表明：1) 内循环次数 L 根据温度 T_k 来计算比内循环次数 L 固定不变时，算法收敛速度更快；2) 内循环次数 L 对于算法精度并无影响；3) 温度衰减率 r 较小时，算法收敛速度更快；4) 温度衰减率 r 较大时，算法精度更高；5) 初始温度 T_0 较小时，算法收敛速度更快；6) 初始温度 T_0 较大时，算法精度更高；7) 终止温度 T_f 较大时，算法收敛速度更快；8) 终止温度 T_f 较小时，算法精度更高。

关键词：集装箱运输；装船作业优化；协同作业；启发式规则；模拟退火算法

Simulated Annealing Based Algorithm for Cooperative Loading ships in Container Terminal

Abstract

Continuously driven by the process of the world economic integration, international trade has been developing rapidly, and container throughput of ports has continued to grow. Since China's reform and opening up, container transportation has also risen rapidly, and the container throughput of ports has become the first in the world. With the growth of the container throughput of ports and the large-scale trend for containership, the demand of shipping companies of containerships' operation efficiency and ability in ports is higher and higher. To seek a reasonable method to optimize loading schedule of vessels is in urgent need, in order to improve the operation efficiency of terminals, and enhance the competitiveness of ports.

First, this paper makes a comprehensive introduce and analysis of related knowledge about the prestowage of slots, the containers' distribution in the yard and the specific process of loading operation under collaboration, which involved in the optimization problem of container terminal loading operation. It is clarified that this paper based on the prestowage, focus on the loading stage. On this basis, through detailed analysis of the constraint conditions of the problem, it makes reasonable simplifying assumptions, which defines clearly the content of research in this paper. And it regards minimizing the total equivalent time cost of the container terminal loading operation as the optimization goal.

Based on the premise, the constraint conditions, and the characteristics of the problem, it designs corresponding heuristic rules to deal with optimizing the loading sequence and space arrangement at the same time, and collaboration of several yard cranes and quay cranes, which are two key problems of this paper. And through the designing of the codes, it combines the optimization problem with simulated annealing algorithm. Considering the shift of containers in the yard as well as the setting of the specific target function, it designs the heuristic rules to generate the initial solution and new solutions. It designs the simulated annealing algorithm to optimize the container terminal loading operation under collaboration of several yard cranes and quay cranes, which provides an innovative method and idea to the study of the problem of container terminal loading operation.

Finally, the feasibility, convergence and validity of this algorithm are verified through theoretical and experimental analysis. First of all, the convergence, precision, and CPU time of

the algorithm are analyzed. Results show that: 1) When the total cycle times reach 180000, total cost tends to be stable, and the algorithm converges. 2) After converging, the total cost is reduced by about 36.8%. 3) The CPU time is proportional to the total cycle number. 4) When converging, the consumption of CPU time is 1437.568s (about 24min). Then the influence of related parameters of the algorithm is detailed analyzed. Results show that: 1) The algorithm can get a faster convergence speed with the inner cycle number L calculated according to temperature T_k then it fixed. 2) The inner cycle number L makes no difference to the accuracy of the algorithm. 3) The algorithm can get a faster convergence speed with a faster temperature decrement r . 4) The algorithm can get a higher accuracy with a slower temperature decrement r . 5) The algorithm can get a faster convergence speed with a lower initial temperature T_0 . 6) The algorithm can get a higher accuracy with a higher initial temperature T_0 . 7) The algorithm can get a faster convergence speed with a higher temperature T_f . 8) The algorithm can get a higher accuracy with a lower temperature T_f .

Key Words: Container Transportation; Optimization of Loading Operation;
Collaborative Operation; Heuristic Rules; Simulated Annealing Algorithm

目 录

摘 要.....	I
Abstract	II
1 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 预配的相关研究	3
1.2.2 装船的相关研究	4
1.2.3 存在的问题.....	6
1.3 研究内容	7
1.4 论文结构	8
2 装船优化问题分析.....	10
2.1 舱位预配图与集装箱在堆场分布	10
2.1.1 舱位预配图.....	10
2.1.2 集装箱在堆场分布	11
2.2 协同装船作业.....	12
2.2.1 集装箱码头机械设备.....	12
2.2.2 装船作业过程	14
2.3 简化假设和优化目标	15
2.3.1 问题简化假设.....	15
2.3.2 问题优化目标	16
2.4 本章小结	17
3 协同装船优化模拟退火算法	18
3.1 模拟退火原理.....	18
3.2 编码设计	20
3.3 生成初始解.....	21
3.4 生成新解	24
3.5 状态接受函数、退火策略及结束策略	26
3.6 本章小结	26

4	算法分析	27
4.1	理论分析	27
4.1.1	问题简化假设	27
4.1.2	编码设计	27
4.1.3	生成初始解	27
4.1.4	生成新解	28
4.1.5	总体评价	28
4.2	实验设计	28
4.3	算法性能分析	28
4.4	参数影响分析	31
4.4.1	内循环次数 L	31
4.4.2	温度衰减率 r	32
4.4.3	初始温度 T_0	34
4.4.4	终止温度 T_f	35
4.5	本章小结	36
5	结论与展望	38
5.1	结论	38
5.2	展望	39
	参 考 文 献	40
	攻读硕士学位期间发表学术论文情况	43
	致 谢	44
	大连理工大学学位论文版权使用授权书	45

1 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

集装箱海上运输兴起于二十世纪六十年代，因其具有标准化、便捷性、高效性、安全性、经济性等诸多优点，在国际航运中逐渐占据了重要的地位，“集装箱化”是对传统的件杂货运输的一次伟大变革。在世界经济一体化进程的不断推动下，国际贸易迅猛发展，也使得集装箱运输在近几十年中得到了飞速的发展，港口集装箱吞吐量持续增长。目前，世界贸易 90% 以上的货物由海运承担，其中约 80% 为集装箱运输。在我国，改革开放以来，集装箱运输行业也迅速崛起，集装箱港口数量逐年增多，港口集装箱吞吐量也已跃居世界第一位。2016 年，我国沿海港口集装箱吞吐量合计完成 19442 万 TEU，同比增幅 3.4%；并据世界航运公会统计，全球集装箱吞吐量排名前 10 的港口中，有 7 个属于中国，我国已成为全球最大的集装箱运输国。

表 1.1 2016 年全球港口集装箱吞吐量排名
Tab. 1.1 The ranking of container throughput globally

排名	港口名称	2016 年	
		吞吐量（万 TEU）	同比增速
1	上海港	3713	1.71%
2	新加坡港	3090	-0.06%
3	深圳港	2411	-0.37%
4	宁波—舟山港	2157	4.54%
5	香港港	1963	-2.40%
6	釜山港	1943	-0.09%
7	广州港	1858	9.50%
8	青岛港	1801	2.88%
9	迪拜港	1480	-5.07%
10	天津港	1450	2.76%

港口作为国际集装箱运输的重要节点和核心作业区，已经成为推动区域经济快速发展的重要力量。而随着集装箱运输的增长，港口间的竞争也变得更加激烈。现代港口之间的竞争，实质上是码头作业效率的竞争，而集装箱装船作业作为集装箱码头的一项核心业务，直接影响着码头的作业效率。随着集装箱船舶的大型化，装船作业量和复杂度

也日趋增加，集装箱码头面临很大的挑战，迫切需要寻求合理的方法优化装船作业调度，以提高码头作业效率，增强港口的竞争力。

1.1.2 研究意义

随着港口集装箱吞吐量增长和船舶大型化的发展，船公司对码头作业效率和能力的要求越来越高。船舶在港作业包括卸船和装船，其中装船作业计划需考虑船舶稳定、集装箱在堆场的分布和目的港、码头装卸设备分配等影响因素。集装箱码头在船舶到港前通常要求集装箱提前 1-5 天集港到码头堆场等待装船。船方在船舶到港靠泊前会将船舶舱位分布和舱位上的装载箱要求计划图（简称船舶预配图）发送给码头。船方制定预配图时主要考虑船舶舱位结构、订舱集装箱箱型、箱重和目的港等因素。预配图从船方角度制定装船舱位的集装箱目的港、箱型和箱重量等要求，主要考虑船舶的重心、稳性、适航性等船舶运输的安全因素，以及在目标卸货港的倒箱问题。码头根据预配图和集装箱在码头堆场的分布，在预配图装载要求条件下制定船舶实际装载计划，包括舱位上的具体集装箱分配和集装箱的装船顺序。本文集装箱码头装船作业优化问题研究在已知集装箱堆场分布和船舶预配图条件下，对集装箱的装船作业进行优化研究，确定舱位的具体集装箱分配和集装箱的装船顺序。

一个好的集装箱装船作业方案不仅有利于满足船方的集装箱配积载要求，而且有利于减少堆场翻箱量，减少场桥的小车和大车移动距离，减少集卡的运输距离，并降低各装卸设备的冲突等待，从而提高装船作业效率，缩短装船作业时间，并大大减少集装箱船舶的靠港停泊时间，可以间接提高其运输效率，减少海上运输费用，有效降低船公司的运营成本。另外，装船作业的效率直接影响着码头的通过能力和服务水平，装船作业的高效可以提高码头方的核心竞争力，为港口企业吸引更多的客户，从而提高港口企业的经济效益。

本文旨在设计一种有效的集装箱码头装船作业优化算法，优化船舶舱位的具体集装箱分配和集装箱的装船顺序，从而得出更好的集装箱装船作业方案，对集装箱装船作业效率的提高和集装箱码头核心竞争力的提升具有着重要的应用价值和实践意义。

1.2 国内外研究现状

国内外学者对集装箱码头装船作业优化问题做出了多方研究，大体上可分为预配和装船两个方面。

1.2.1 预配的相关研究

对于集装箱码头装船作业优化问题，大多数的研究都仅针对于预配阶段，主要考虑船舶的重心、稳性、适航性等船舶运输的安全因素，以及在目标卸货港的倒箱问题，较少考虑堆场和设备相关的影响因素，国内外具有代表性的研究如下。

(1) 国外研究现状

Scott 和 Chen^[1]针对单一港口的配载，建立了满足最小压载最大装箱量的整数规划模型，并在动态规划的基础上采用分支定界法完成了集装箱的配载。

Aslidis^[2]为简化问题，假设船舶在各个港口只装箱而不卸箱（或只卸箱而不装箱），以卸货港倒箱量最少为目标，用启发式算法求解了 0/1 规划模型。

Shields^[3]提出并设计了 CAPS 系统，作为最具代表性的随机模拟方法，该系统可以模拟配载人员的思维，并给出大量的配载方案，通过仿真技术评估，可得出最优的配载方案。

Botter 和 Brinati^[4]提出了一个完整的配载模型，模型中考虑了多达 12 项约束条件，在求解过程中会产生过多的决策变量和约束条件，使得问题在多项式时间内无法求解。

Avriel 和 Penn 等^[5-7]针对单贝位配载问题，以最小化各个港口的倒箱次数为目标，建立了一个 0/1 线性规划模型，在模型中假设全船仅包含一个大的贝位，并设计了悬挂式启发式算法、基于环形图着色问题的启发式算法等对模型进行了求解。在其研究中证明了集装箱船舶配载问题属于 NP 问题，为简化问题，其只考虑了卸货港的倒箱约束，忽略了集装箱船的稳性、强度等其他因素。

Todd 和 Sen^[8]以卸货港倒箱量最小为目标，考虑了船舶的稳性、横倾力矩、纵倾力矩等相关标准，设计了多准则完全编码遗传算法。它的解矢量由不同目的港的集装箱位置信息表示，缺点是编码过长，搜索空间过大。

Haghani 和 Kaisar^[9]建立了混合整数规划模型来研究集装箱船舶的配载，应用遗传算法进行了求解，并对船舶纵倾、纵向力矩等因素进行了检验。

Dubrovsky 和 Levitin 等^[10]考虑了船舶的稳定性，以最小卸货港倒箱量为目标函数，采用遗传算法求解了集装箱船舶的配载问题。并对完全编码的方法加以改进，显著地缩小了搜索空间，提高了算法效率。

Ambrosino 和 Sciomache 等^[11]提出了主贝位计划问题，以总的配载作业时间最小化为目标，同时考虑了集装箱的尺寸、重量、船舶的稳性、强度、浮态等多种约束，建立了一个 0/1 线性规划模型。在其研究中，将相同目的港的箱子分配在同一个贝位内，忽略了卸货港倒箱作业的问题。

（2）国内研究现状

段成华和郭旭^[12]使用数学规划方法建立了单贝多港的配载模型，关注于船舶稳性和卸货港倒箱量之间的平衡。

张维英等^[13-15]研究了集装箱船舶全航线混装贝位排箱优化模型。以最小化全航线的倒箱量为目标，采用隐式图启发式搜索策略得出最优的配载方案，但研究中忽略了船舶的安全性因素。另外，还建立了 Hopfield 神经网络模型，来对集装箱船的配载方案进行综合评价研究。

史宗耀^[16]考虑了集装箱船舶卸货港的倒箱量、稳性和舱位利用率等因素，建立了集装箱船舶智能配载的原型。

陈忱^[17]针对集装箱船舶配载问题，建立了整数规划模型，将船舶稳性作为约束条件，以集装箱在卸货港的倒箱量最小化为目标，利用改进的遗传算法进行求解。

1.2.2 装船的相关研究

装船阶段是在预配的基础上，结合集装箱码头堆场的作业调度，确定分配给船舶舱位的具体集装箱的和集装箱的装船顺序，即定序定位问题，重点关注于集装箱码头的作业效率，针对于这一阶段的研究则相对较少。

（1）国外研究现状

Martin 和 Methodology 等^[18]设计了启发式方法，求解了装船优化问题。但其主要考虑堆场的作业，而忽略了集装箱在船上的布置问题。

Wilson 和 Roach 等^[19-21]将问题分为战略和战术两个阶段。战略阶段按照集装箱的尺寸、目的港等特性，将其分组分配到船上，完成总体布置，并用分支定界法进行求解。战术阶段将集装箱分配到具体的舱位中，采用禁忌搜索方法进行求解。该方法具有一定的可行性。

Peter 和 Erhan^[22]以集装箱船在港时间最小为目标建立了集装箱装船模型，利用遗传算法进行了求解，并将该模型的求解结果和布里斯班港的实际装船方案进行了比较。

Ryu 和 Kim 等^[23]人分别采用禁忌搜索算法和蚁群算法对集装箱装船过程进行优化，并比较了两种算法的效率。

Imai 等^[24,25]针对集装箱船舶的装船问题，综合考虑了船舶稳性和装船过程中的翻箱量，在前期和后期的研究中分别建立了多目标的线性和整数规划两种数学模型，并分别求得了估算倒箱量和具体倒箱量。

Bortfeldt 和 Mack^[26]构造了平行禁忌搜索算法，对集装箱建立禁忌表，并通过定点禁忌长度解决了局部最优解的问题，得到了全局最优解。

Winter^[27]在集装箱装船优化问题的研究中,既考虑了和预配有关的卸货港倒箱次数和船舶稳定性,又研究了装船的过程,着重考虑了如何均衡各岸桥的作业量,同时指出集装箱的水平移动系统是装船作业的瓶颈,但其没有考虑装船过程中的堆场翻箱量及船舶稳性等因素。

Akio 和 Kaxuya 等^[28]以装船作业时堆场的翻箱量最小、船舶的初稳高度最优、横倾与纵倾力矩最小为目标函数建立了一个整数规划模型,并利用遗传算法进行了求解。

Monaco 和 Sammarra^[29]以最小化装船时间和堆场翻箱量为目标,建立了相应的数学模型,并设计了两阶段启发式算法,但其未对集装箱的装船顺序进行研究。

(2) 国内研究现状

张新艳^[30]未考虑集装箱在船上的配载位置,仅针对集装箱码头装船作业的运送顺序进行了优化。其使用一种基于混合变异的自然数编码进化策略算法,以集装箱船舶的在泊时间最小化为目标,给出了染色体表达方式和基于混合变异的进化机制。

王晓和陈海燕等^[31]分别讨论了既保证装船速度,又保证准舱率和侧重于保证装船速度,又兼顾准舱率两种装船方式,确定了合理的发箱和装箱顺序。

车鉴^[32]将集装箱装船优化问题分为堆场集装箱组分配和具体舱位分配两个阶段,分别设计了启发式算法和模拟退火算法求解问题。但其研究中未考虑装船顺序和堆场翻箱量的影响。

王莉莉和于红^[33]针对集装箱码头装船的定序定位问题,将船舶稳性、强度、装船过程的可操作性、堆场翻箱量等因素作为评估策略,并划分了优先等级,应用遗传算法进行求解。

朱明华和范秀敏等^[34]结合集装箱码头作业状况深入分析了倒箱产生的原因。并基于给定的堆场集装箱堆存状态和集装箱装船配载图,提出了一种以最少堆场翻箱量为目标求解集装箱装船顺序的启发式算法,并建立了基于规则的改进策略。仿真实例表明,所提出的启发式算法是可行的,改进策略相对于启发式算法具有更好的效果。

靳志宏和兰辉等^[35]基于给定的集装箱堆场的堆存状态和集装箱船配载图,并考虑了海关是否放关这一现实约束,以最小化集装箱装船时的翻箱量为目标,构建集装箱装船顺序优化模型,并开发了启发式算法进行求解,数值实验显示了模型及算法的有效性与实用性。

黎明和翟金刚^[36]采用粒子群算法将船舶稳性和堆场中的翻箱率结合在一起研究集装箱装船的定序定位问题。但其忽略了集卡、吊桥以及翻箱落位等现实约束对集装箱装船的影响。

孙环环^[37]以集装箱翻箱量最小为目标，确定合理的装船顺序的问题。并分别在不同的翻箱原则下设计了遗传算法对问题进行求解。

王秀臣^[38]针对集装箱集中入港的不足，在既定的装船顺序下，以装船过程中堆场翻箱量最小为目标，设计了模拟退火算法求解模型。

李坤和唐立新^[39]考虑总的装载时间以及船舶上贝位的装箱量，构建了多贝位的整数规划模型，并将问题分为两阶段，设计了禁忌搜索算法，并改进了搜索策略，通过实验验证了算法的有效性。

何钢和张耀周等^[40]建立了多目标数学优化模型，并设计了一种改进的混合遗传算法，融入了A*算法的启发式搜索思想。但其仅对单贝位的装船进行研究，忽略了全船装载时，不同贝位间的协调问题。

李俊和张煜等^[41]综合考虑了集装箱装船顺序问题和船舶贝内排箱问题，提出了集装箱船舶装箱排序问题，并提出了SWO-HES两阶段算法进行求解，算例求解结果表明该算法与常见的智能算法及基于实际装船规则的启发式算法相比，性能更优。

周晓峰^[42]仅关注于船舶的稳定性和堆场翻箱率问题，建立了一个整数规划模型，并利用粒子群算法进行了求解，验证了算法的有效性。

1.2.3 存在的问题

本文以预配阶段为基础，关注于装船作业阶段。由上述文献可以看出，目前国内外学者对装船作业阶段的研究主要缺少对以下两方面问题的考虑：

(1) 舱位分配和装船顺序的相互制约

Bortfeldt^[26]，王晓^[31]，朱明华^[34]，靳志宏^[35]，孙环环^[37]等众多学者，为简化问题，仅对集装箱的装船顺序进行了研究。在研究中，他们假设集装箱在堆场的分布和装载到船上的具体舱位已知，仅考虑装船作业过程中堆场的翻箱量最少，优化集装箱的装船顺序。相反，Martin^[18]，车鉴^[32]，王秀臣^[38]等学者，在研究中则将装船顺序作为已知条件，仅对集装箱装载的具体舱位进行优化。

实际作业中，集装箱船舶的装船作业阶段既要确定合理的集装箱装船顺序，又要安排集装箱装载到船舶上的具体舱位，这两方面问题存在相互的制约。在研究中既要保证船舶上的现实约束，又要考虑堆场的提箱翻箱过程，不同的舱位分配，对应不同的最优装船顺序，不同的装船顺序，可得到不同的最优舱位分配。而这些学者仅就单方面问题进行研究，则必然会忽略许多相关的影响因素，缩小问题的优化空间，导致无法得到最优的装船作业方案。

（2）多个场桥和岸桥间的协同作业

Imai^[24,25], Akio^[28], 黎明^[36], 周晓峰^[42]等学者在研究中仅关注于集装箱船舶的稳定性和堆场的翻箱率, 而没有考虑场桥、岸桥等机械设备的影响。而何钢^[40], 李俊^[41]等学者仅对单贝位的装船进行研究, 没有考虑全船装载时, 多个场桥和岸桥在不同贝位的装船中的协同作业。

集装箱船舶的装载过程, 不可能由一个场桥和岸桥单独完成, 必然存在着多个场桥和岸桥的共同作业。因而装船作业的整体效率并不是单贝位效率的简单叠加, 必须保证多个场桥和岸桥间的配合有序, 协调高效, 才能提高集装箱装船作业的整体效率。可见, 对集装箱装船作业的效率而言, 多个场桥和岸桥间的协同作业是一个至关重要的影响因素, 在研究中不能忽略。

1.3 研究内容

本文在前人研究的基础上, 针对现阶段国内外学者对于集装箱船舶装船作业的研究中存在的两方面主要问题, 设计了集装箱码头多场桥和岸桥协同装船作业优化模拟退火算法, 研究在已知船舶预配图和集装箱在堆场分布的条件下, 对集装箱船舶的装船作业阶段进行优化。

针对前人研究中的不足, 一方面将集装箱装船作业优化中的装船顺序问题和舱位分配问题结合在一起进行综合考虑、同时优化, 从而使其满足两个问题之间的相互制约, 更加贴近工程实际; 另一方面以全船的装船优化为研究对象, 考虑多个场桥和岸桥同时装载多个贝位, 及其在装船作业过程中的协同与配合, 从而从整体上提高集装箱码头装船作业的效率。

研究的具体内容主要包括以下几个方面:

（1）装船优化问题分析

通过对装船作业具体流程及相关内容的详细介绍, 明确本文关注基于预配的装船作业优化。结合预配图的限制, 详细分析问题的约束条件, 基于此提出合理的简化假设, 清晰界定所研究问题的相关内容, 并为算法的设计奠定基础, 最后通过对装船效率影响因素的全面分析, 明确问题的优化目标。

（2）模拟退火算法设计

基于问题的简化假设, 结合约束条件, 并根据所研究问题的特点, 重点关注装船顺序与舱位分配的同时优化及多场桥和岸桥的协同作业两个关键问题, 设计合理的编码方式使优化问题与模拟退火算法相结合, 并设计初始解和新解的生成规则、状态接受函数及退火和结束策略, 完善算法的全过程。

(3) 算法的理论实验分析

从理论上分析算法的优势与不足，并以北方某集装箱码头资料为背景，设计实验，利用协同装船优化模拟退火算法对算例进行求解，分析算法的收敛性、求解时间、求解精度，并详细分析算法的相关参数内循环次数 L 、温度衰减率 r ，以及初始温度 T_0 和终止温度 T_f 对算法的收敛速度和精度的影响。

1.4 论文结构

论文主要分为摘要、正文和参考文献 3 个部分。其中，正文部分主要包括绪论、装船优化问题分析、协同装船优化模拟退火算法、算法分析以及结论与展望 5 个部分。论文结构如图 1.1 所示。

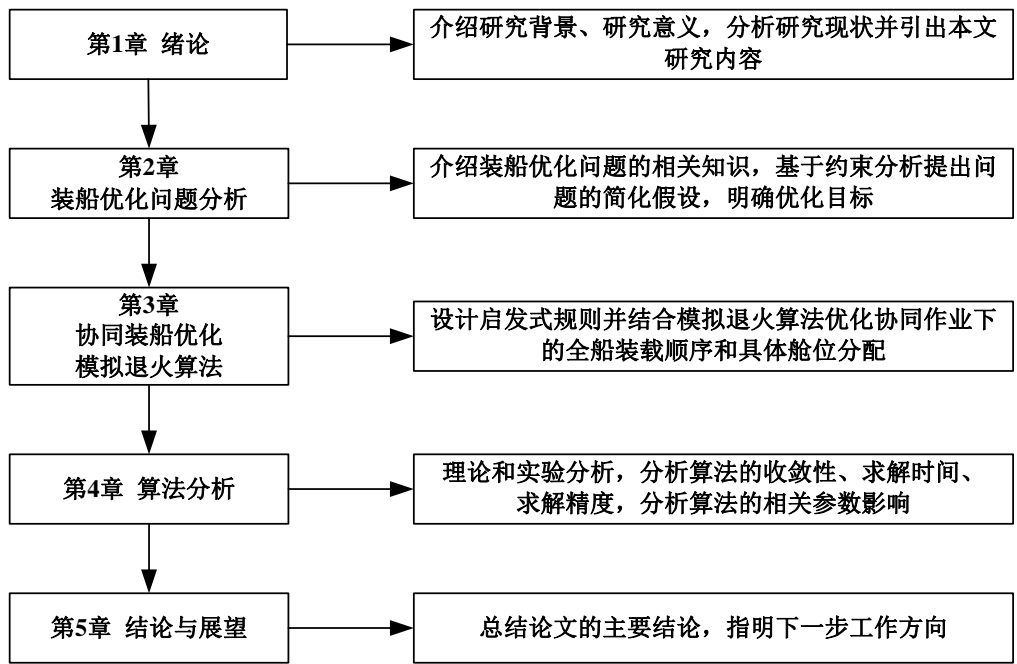


图 1.1 论文结构图

Fig. 1.1 The structure of the essay

第 1 章为绪论，介绍了论文的研究背景和研究意义，总结了国内外学者对于集装箱船舶预配和装船两个阶段的相关研究，分析了存在的主要问题，引出本文的研究内容，最后简要介绍了论文的结构安排。

第2章为问题分析，介绍了集装箱在堆场的分布与舱位预配图的对应关系，以及协同装船作业的相关知识及过程，结合约束分析，提出了本文研究的简化假设，并明确了优化目标。

第3章为算法设计，在对问题详细分析的基础上，通过编码设计使问题结合模拟退火算法，并设计了初始解和新解生成的相应启发式处理规则，对考虑多场桥和岸桥协同作业的全船装载顺序和具体舱位分配问题进行了求解优化。

第4章为算法分析，通过理论分析和算例求解，证明了本文协同装船优化模拟退火算法的可行性、收敛性和有效性，并分析了求解时间和求解精度。最后对算法中相关参数的影响作出了详细分析。

第5章对论文的主要结论进行了全面的总结，并指明了下一步的工作方向。

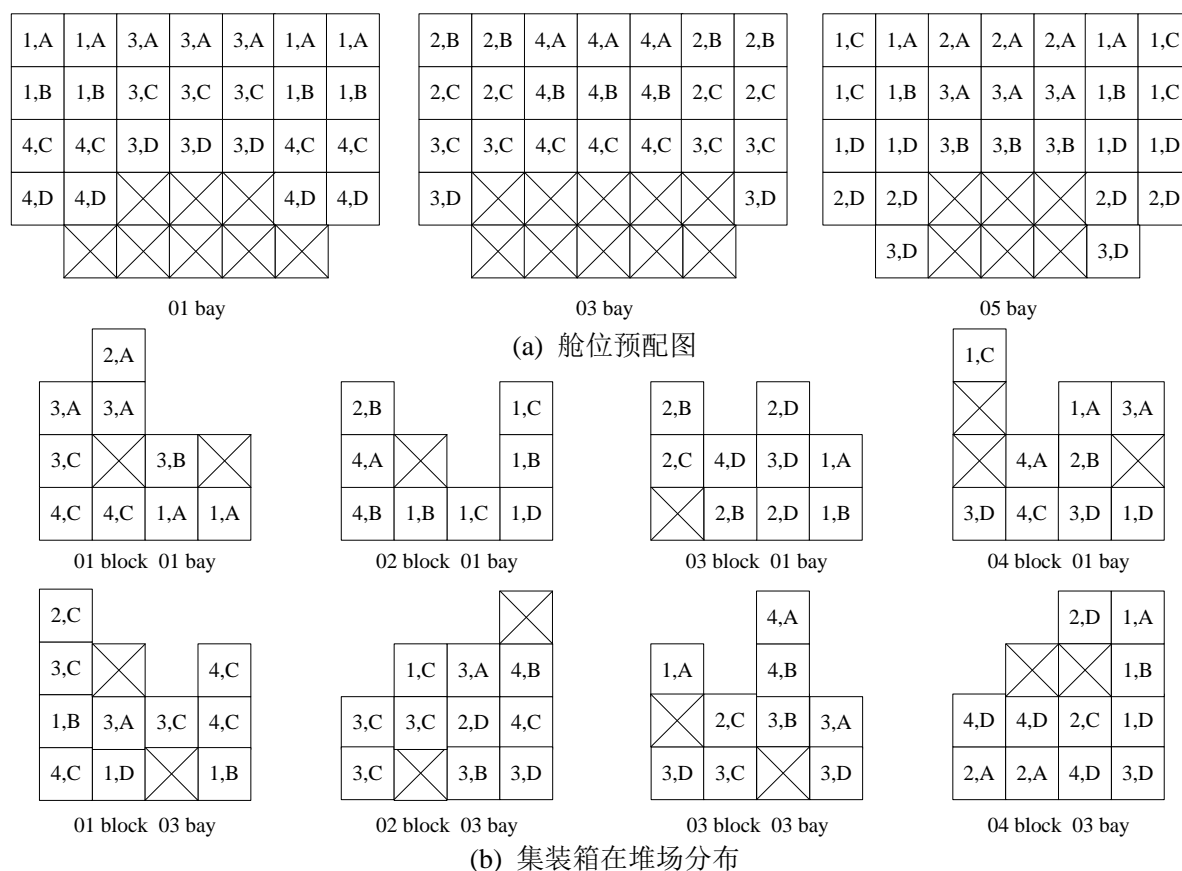
2 装船优化问题分析

2.1 舱位预配图与集装箱在堆场分布

2.1.1 舱位预配图

集装箱船出现于 20 世纪 50 年代中后期，是装运集装箱的专用船舶，是集装箱物流网络中连接各口岸的水路运输载体。其装载货运能力体现于其装载集装箱的数量，以 20ft 标准箱（TEU）的箱数计算。集装箱船通常具有单甲板、宽舱口、尾机型、双层船壳、货舱内无中间甲板等特点。船体横剖面呈“U”字型，采用箱型舱盖，舱内和甲板上均可装载集装箱。舱内采用箱格结构，纵向设置许多横舱板，设有固定的箱格导轨，便于集装箱沿导轨放入、堆码整齐，提高装卸效率；四角有格栅栏制约，防止集装箱在舱内的摇摆移动。同时舱盖和甲板上设有固定集装箱的系紧装置，以保证集装箱在航行过程中的安全。另外，通常船舶本身没有装卸设备，需要依靠码头上的起吊设备进行垂直装卸。ISO/TC104 委员会制定了国际统一的舱位代码编号方法，即 ISO9711-1:1900 标准，来表示每个集装箱在船上的装载位置。其规定对船上的每个舱位按纵向、横向和垂向进行三维定位，分别称为贝、列和层，确定舱位所在的贝、列、层，即可确定一个舱位。

对于集装箱码头装船作业，在船舶到港靠泊前，船方首先会将船舶舱位分布和舱位上的装载箱要求计划图（简称船舶预配图）发送给集装箱码头。船方制定预配图时主要考虑船舶舱位结构、订舱集装箱箱型、箱重和目的港等因素。通常将集装箱按照箱型、尺寸、目的港的不同分成多个箱组，并根据箱重分成多个等级，预配图给出每个舱位需要装载的集装箱箱组与重量等级限制，如图 2.1（a）所示。预配图主要考虑船舶的重心、稳性、适航性等船舶运输的安全因素，以及在目标卸货港的倒箱问题。对舱位箱组的限制，可保证配载结果满足集装箱的后不压前，避免中途卸箱港的倒箱，并满足同目的港箱子的分舱堆放，避免过分集中；对舱位重量等级的限制，可保证配载结果使得集装箱船舶具有良好的稳性、适宜的吃水差，并满足纵向强度约束，不会出现中拱现象，满足局部强度约束，载重不超过允许的堆积负荷，同时可满足集装箱船舶横向的平衡问题，避免“一边倒”配箱。装船作业在预配图的限制约束下进行，上述条件自然满足，可不再考虑。



注：舱位和集装箱上的数字表示箱组，字母表示重量等级，（a）中“×”表示该舱位已堆存集装箱，在本港的装船计划中不予考虑；（b）中“×”表示该集装箱不参与本船装载计划。

图 2.1 舱位预配图与集装箱在堆场分布示例

Fig. 2.1 An example of the prestowage of a ship and the distribution of containers in the yard

2.1.2 集装箱在堆场分布

集装箱堆场是集装箱码头的一个重要组成部分，是集装箱在装船前和卸船后临时堆放的场所，在集装箱运输系统中承担了堆存、交接和保管的作用。堆场通常由若干箱区组成，每个箱区由连续的若干个贝位组成，每个贝位又包括若干堆栈，每个堆栈可堆多层集装箱。确定了集装箱所在的箱区、贝位、堆栈和层，即可确定其在堆场中的具体位置。其中 20ft 箱位的贝位编号用奇数表示，若相邻的两个 20ft 箱位被 40ft 集装箱占用，则该贝位用两个贝位编号之间的偶数表示。某箱区的堆存示意图，如图 2.2 所示。

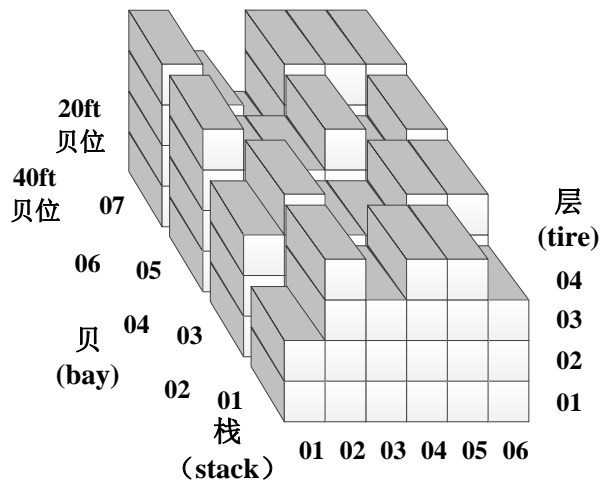


图 2.2 箱区堆存示意图

Fig. 2.2 The diagrammatic sketch of the storage on a block

集装箱码头在船舶到港前通常要求集装箱提前 1-5 天集港到码头堆场等待装船。本文不考虑堆场的堆存及预倒箱规则，对任意随机堆存情况均适用。所考虑堆区内，包含确定的全部订舱集装箱，且箱组和重量等级与预配图对应，并考虑堆区内同时包含不参与装船计划的阻碍箱，如图 2.1（b）所示。

2.2 协同装船作业

实际装船作业前，集装箱码头需要根据预配图和集装箱在码头堆场的分布，在预配图装载要求条件下，结合码头装卸设备的分配与作业，制定船舶实际装载计划，包括舱位上的具体集装箱分配和集装箱的装船顺序。

2.2.1 集装箱码头机械设备

集装箱码头的机械设备在集装箱的装卸作业中起着重要的作用，根据集装箱码头装船作业的过程，可以将码头的机械设备分为三类：岸边装卸机械、堆场作业机械和水平运输机械。

（1）岸边装卸机械

主要指集装箱装卸桥（岸桥），负责集装箱在码头前沿的提取装卸工作。



图 2.3 集装箱装卸桥

Fig. 2.3 Container loading bridges

(2) 堆场作业机械

目前，大多数集装箱码头的堆场作业主要依靠门式起重机（场桥），又称龙门吊。其在集装箱码头的装卸作业中，负责集装箱在堆场中的翻倒和提取，并完成集装箱在堆场与集卡之间的传递。

轮胎式起重机使用柴油机驱动，能耗较大、故障率较高，但购置成本较低。另外，其具有转向装置，便于移动、操作简单、覆盖区域较大。轨道式起重机使用电力驱动，能耗较小、故障率较低，但购置成本较高。另外，其跨距较大、堆垛较高、效率较高，但活动受轨道的限制，机动性不够。



图 2.4 轮胎式和轨道式起重机

Fig. 2.4 A tyre crane and a transporter crane

(3) 水平运输机械

集装箱卡车（集卡）是目前集装箱码头最常用的水平运输机械，负责集装箱在堆场和码头前沿之间的水平运输。集卡具有机动性较强、受限较小的优点，一般一次可装载一个 40ft 集装箱或两个 20ft 集装箱。

跨运车机动性较高，能够承担集装箱堆场的多种工作，是一种专门从事短途水平搬运工作的机械。但其造价较高、故障率较高、对操作者的要求也较高。



图 2.5 集卡和跨运车

Fig. 2.5 A container truck and a container straddle carrier

2.2.2 装船作业过程

装船作业的基本流程为：场桥在堆场中翻倒、提取装船集装箱，将其装载到集卡上，由集卡完成集装箱在堆场和码头前沿之间的水平运输，最后由岸桥提取集装箱，并将其装载到集装箱船上的舱位中，完成装船作业。具体流程如图 2.6 所示。

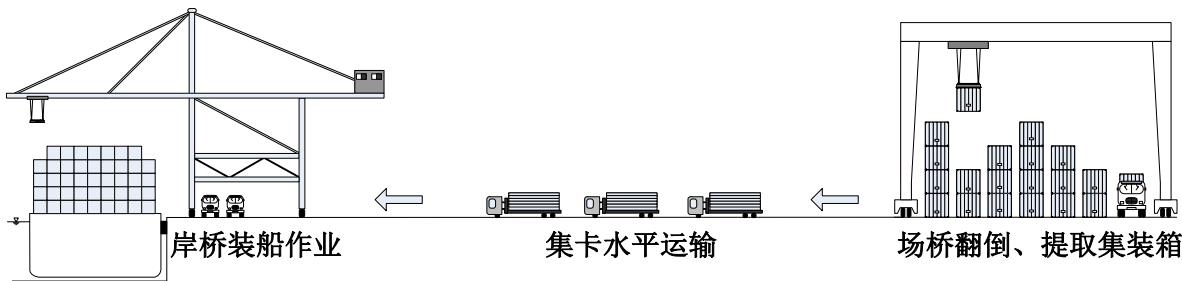


图 2.6 装船作业流程

Fig. 2.6 The process of the container terminal loading

全船的装载作业过程中,存在多个岸桥的并行作业,即多个岸桥同时装载集装箱船的不同贝位。同时,存在多个场桥在堆场的不同区域中翻倒、提取集装箱,并装载到集卡上,输送给岸桥。不同岸桥间,不同场桥间,以及场桥与岸桥间均存在着协同作业,必须保证多个场桥和岸桥间的配合有序,协调高效,才能降低装船作业过程中各设备的冲突等待,提高集装箱装船作业的整体效率。装船作业平面图,如图 2.7 所示。

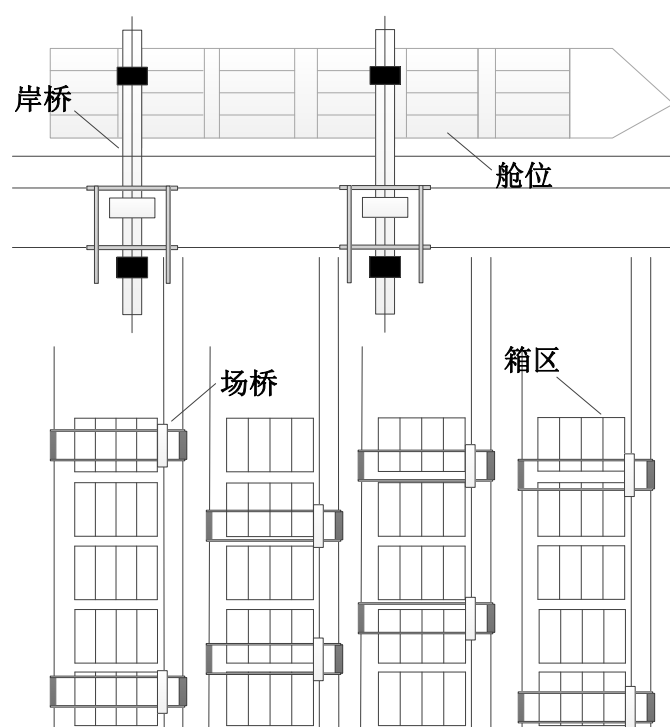


图 2.7 装船作业平面图

Fig. 2.7 The plan sketch of the container terminal loading

2.3 简化假设和优化目标

本文基于船方制定的预配图,考虑集装箱的堆场分布和多场桥与岸桥的协同作业,优化船舶舱位上的具体集装箱分配和集装箱的装船顺序。

2.3.1 问题简化假设

集装箱码头装船作业过程涉及场桥的提箱翻箱、集卡的水平运输和岸桥的提箱装船。确定船舶舱位上的具体集装箱分配要满足预配图对箱组和重量等级的限制;确定合理的装船顺序,要保证装船过程中船舶的左右平衡,避免出现大角度横倾;多场桥和岸桥的协同作业,要保证各场桥和岸桥作业量均衡,并避免相互干扰。

基于上述约束分析，结合码头作业实际，对问题作出如下简化假设：1) 集装箱在堆场分布、预配图、以及场桥和岸桥分配已知，且每个场桥和岸桥操作的集装箱量大致相等；2) 仅考虑单艘船的装船作业优化，单作业仅操作一个集装箱；3) 仅考虑普通箱装船计划，冷藏箱、危险品箱和超高箱等特殊箱型由配载员直接指定；4) 预先设定堆场场桥堆取的堆场贝（称为场桥的作业区域），且翻箱在同堆场贝位内进行；5) 集卡数量充足，不是装船作业效率瓶颈；6) 根据岸桥装箱过程，将问题分成多个阶段，每个阶段每个岸桥装载一个箱；7) 各岸桥间隔若干贝位并行作业，每个岸桥装船的贝位及顺序已知；8) 分层装载，一层舱位全部装载完成再装载上一层舱位，可确定每阶段各岸桥将集装箱装载到哪个贝位的哪一层；9) 每层先装载中间舱位（舱位为单数时，最中间位置的舱位），两侧的舱位根据位置一左一右对称装载，称对称位置上的舱位互为对称舱位，舱位示意图如图 2.8 所示。

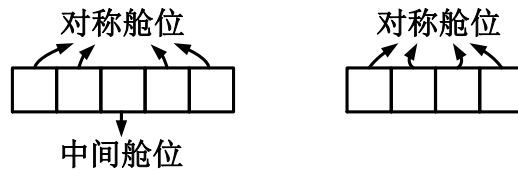


图 2.8 舱位示意图

Fig. 2.8 The diagrammatic sketch of slot on ship

基于上述简化假设，只需确定每阶段各岸桥选择的装载舱位和集装箱，及岸桥间的选择顺序，即可确定多场桥和岸桥协同作业下所有集装箱的装船顺序和装载到船上的具体舱位，得到完整的装船作业方案。

2.3.2 问题优化目标

集装箱码头装船作业的效率具体体现在装船作业的时间消耗上，而装船作业的时间消耗和堆场的翻箱量、场桥的大车移动距离、集卡的运输距离等因素有着密不可分的关系，堆场翻箱量、场桥大车移动距离和集卡运输距离的增大都将使装船作业消耗更多的时间。因而，在本文中将堆场的翻箱量、场桥的大车移动距离和集卡的运输距离，作为集装箱码头装船作业效率的影响因素，将其分别乘以相应的系数并加在一起，可代表单个集装箱装船作业的时间等效成本，即：

$$t = a_1 \times n_{shi} + a_2 \times s_{mov} + a_3 \times s_{tra} \quad (2.1)$$

其中 t 为单个集装箱装船作业的时间等效成本； n_{shi} 、 s_{mov} 和 s_{tra} 分别为该集装箱装船作业过程所产生的堆场翻箱量、场桥大车移动距离和集卡运输距离； a_1 、 a_2 和 a_3 为相应系数。

本文考虑多个场桥和岸桥的协同作业，要提高集装箱码头装船作业的效率，就必须保证所有场桥和岸桥操作的均衡。如果出现一些场桥和岸桥繁忙，而另一些场桥和岸桥空闲的情况，则会导致装船作业过程出现不必要的等待，造成额外的时间消耗，此时单个集装箱装船作业的时间等效成本应调整为：

$$t' = a_1 \times n_{shi} + a_2 \times s_{mov} + a_3 \times s_{tra} + b \times t_{wai} \quad (2.2)$$

其中 t' 为场桥和岸桥作业不均衡时，单个集装箱装船作业的时间等效成本； t_{wai} 为造成的额外时间消耗； b 为相应系数。

另外，本文考虑多个场桥和岸桥同时装载多个贝位，因而总的装船时间并不是装载的所有单个集装箱时间的简单加和，必须考虑从第一个集装箱开始装船到最后一个集装箱完成装船这一过程的总时间等效成本。本文的优化目标即最小化集装箱码头装船作业的总时间等效成本。

2.4 本章小结

本章对装船作业优化问题的相关知识作出了全面的介绍，并详细分析了问题的约束条件、简化假设及优化目标。首先介绍了集装箱船的特点、集装箱船上的舱位表示和舱位预配图的相关知识，详细地分析了预配图给出的限制条件，并介绍了集装箱在堆场的分布，明确了其与舱位预配图的对应关系；之后介绍了集装箱码头机械设备及装船作业的流程，强调了装船过程中的协同作业；最后在约束分析的基础上作出了问题的简化假设，并明确了优化目标应考虑的影响因素，从而清晰地界定了本文的研究内容，并为模拟退火算法的设计奠定了基础。

3 协同装船优化模拟退火算法

集装箱码头装船作业优化问题既要保证集装箱船舶的安全、又要尽量提高装船作业的效率，其过程涉及众多因素，是一个多约束的全局优化过程，属于 NP-hard 组合优化问题。由于问题的复杂性，传统的优化方法不易求出问题的全局最优解，现代优化算法在解决这类复杂的组合优化问题上具有很大的优势。结合本文集装箱码头装船优化问题的特点，设计启发式规则并结合模拟退火算法对问题进行求解。

3.1 模拟退火原理

模拟退火算法基于物理系统退火原理。金属物体被加热到一定温度后，内部粒子在状态空间自由运动，变为无序状，内能增大，随着温度的逐渐下降，粒子运动逐渐趋于有序，最后在常温时以一定的结构排列，达到基态，内能减为最小。这种由高温向低温逐渐降温的过程就称为退火，在退火过程中系统的熵值不断减小，系统能量随温度的降低趋于最小值。退火过程如图 3.1 所示。

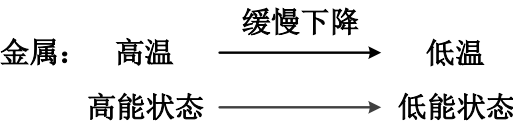


图 3.1 退火过程

Fig. 3.1 The annealing process

表 3.1 模拟退火的相似性

Tab. 3.1 The similarity of simulated annealing

优化问题求解	物理系统退火
解	状态
目标函数	能量函数
最优解	最低能量的状态
设定初始高温	加温过程
基于 Metropolis 准则的搜索	等温过程
温度参数 T 的下降	冷却过程

模拟退火算法以优化问题求解过程与物理系统退火过程之间的相似性为基础：优化问题的解空间相当于物理退火的能量状态空间；优化问题的目标函数相当于物理退火的

能量函数；优化问题的最优解相当于物理退火的最低能量状态；优化问题设定初始高温相当于物理退火的加温过程；优化问题基于 Metropolis 准则的搜索相当于物理退火的等温过程；优化问题温度参数 T 的下降相当于物理退火的冷却过程。模拟退火的相似性如表 3.1 所示。

模拟退火算法的一般流程为：从一给定的初始解开始，在邻域中随机生成一个新解，根据 Metropolis 准则，算法持续进行“生成——判断——接受或舍弃”的迭代，经过大量的解变换后，可以求得控制参数 T_k 时优化问题的相对最优解。然后减小控制参数 T_k 的值，重复执行上述迭代过程，当控制参数逐渐减少并趋于 0 时，目标函数亦趋于全局最优解。由于物理系统退火必须缓慢降温，最终才能趋于最低能量状态，因此，控制参数 T_k 需经缓慢衰减，才能确保模拟退火算法最终得到问题的全局最优解。模拟退火算法的一般流程如图 3.2 所示。

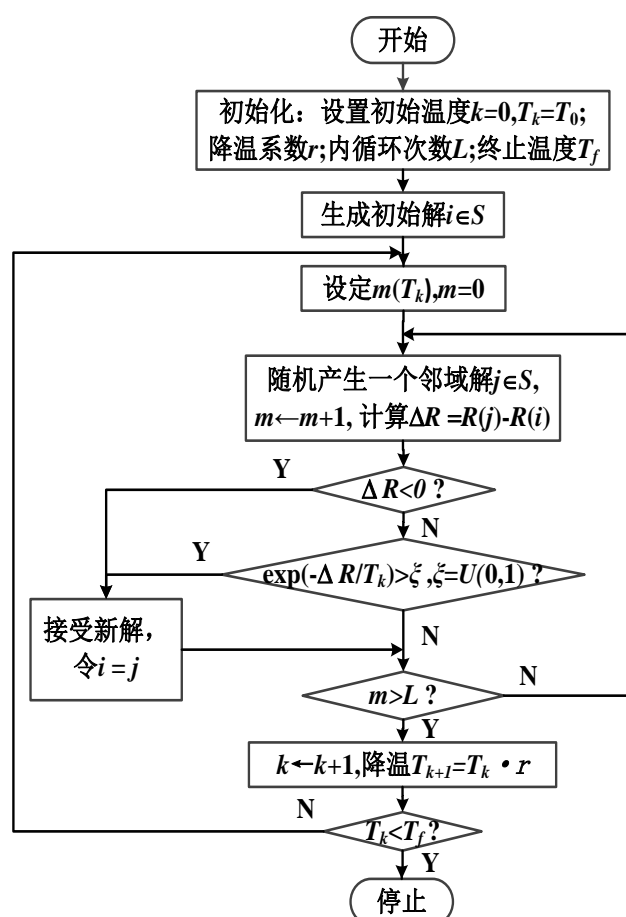


图 3.2 模拟退火算法流程

Fig. 3.2 The process of simulated annealing algorithm

本文集装箱码头协同装船优化模拟退火算法求解思路为：在问题的简化假设基础上，设计模拟退火算法编码，基于步步最优设计初始解生成规则，结合编码设计，全面考虑邻域解情况设计新解生成规则，结合模拟退火算法的状态接受函数、退火策略及结束策略，得出最终解，如图 3.3 所示。算法设计关键在于具体舱位分配与装船顺序的同时优化及多场桥和岸桥的协同作业，具体表现在编码的合理设计、解方案的生成规则以及目标函数的设定等方面。

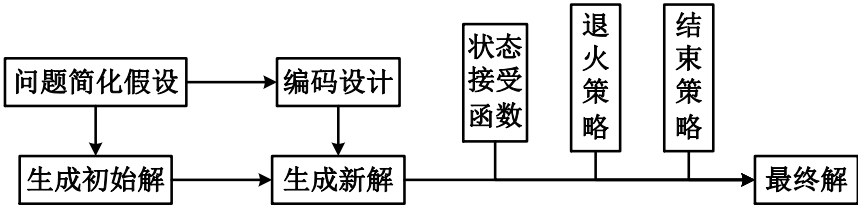


图 3.3 求解思路示意图

Fig.3.3 The diagrammatic sketch of the resolving thought

3.2 编码设计

进行编码设计，结合模拟退火算法来求解集装箱码头装船作业优化问题。设装载 n 个集装箱，将集装箱和船舱位分别从 1 到 n 编号。基于问题的简化假设，集装箱在堆场分布、预配图、以及场桥和岸桥分配均已知，因而集装箱与场桥间和船舱位与岸桥间，均存在确定的对应关系，另外还可确定问题的阶段总数。因而只需在解编码中表示出每阶段各岸桥选择的装载舱位和集装箱，及岸桥间的选择顺序，即可确定多场桥和岸桥协同作业下所有集装箱的装船顺序和装载到船上的具体舱位，得到完整的装船作业方案。根据岸桥间的选择顺序，依次列出每阶段各岸桥选择的集装箱和船舱位号，即可得到一个解编码。编码分前后两部分：前半部分为每阶段依次选择的集装箱号，后半部分为对应的船舱位号。

例如：假设共 2 个岸桥，每个岸桥装载 3 个箱，1 号岸桥负责 1、2、3 号船舱位的装载，2 号岸桥负责 4、5、6 号船舱位的装载，则共分 3 个阶段。当前解方案为：第 1 阶段 1 号岸桥先进行选择，装载 3 号集装箱到 2 号船舱位，2 号岸桥后进行选择，装载 6 号集装箱到 4 号船舱位；第 2 阶段 2 号岸桥先进行选择，装载 2 号集装箱到 6 号船舱位，1 号岸桥后进行选择，装载 5 号集装箱到 1 号船舱位；第 3 阶段 2 号岸桥先进行选择，装载 4 号集装箱到 5 号船舱位，1 号岸桥后进行选择，装载 1 号集装箱到 3 号船舱位。得到解编码如图 3.4 所示。

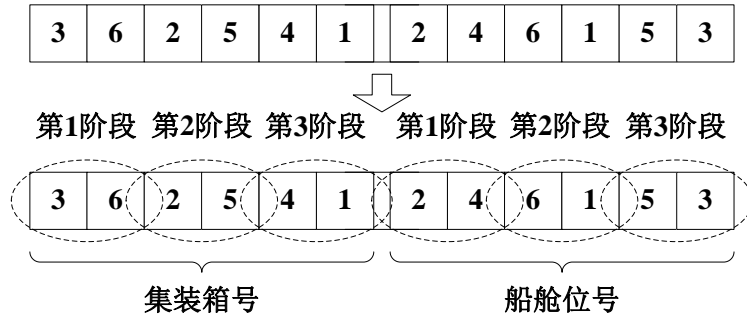


图 3.4 解编码示意图

Fig. 3.4 The diagrammatic sketch of a solution encoding

3.3 生成初始解

基于问题的简化假设，确定每阶段各岸桥选择的装载舱位和集装箱，及岸桥间的选择顺序，生成初始解：

(1) 称任一阶段中，还未选择装载舱位和集装箱的岸桥为未选择岸桥，未选择岸桥在该阶段需要装载的船贝位为当前船贝位，当前船贝位中需要装载的层为当前层，当前层中的所有未装载舱位为当前舱位。当前舱位及其对应的集装箱与岸桥的选择流程如下：

① 若当前舱位中存在中间舱位，则在中间舱位及其对应的集装箱与岸桥中进行选择。

根据舱位限制的箱组和重量等级，在堆场中搜索相应的集装箱。计算每个满足要求的集装箱因被选择而产生的翻箱量、场桥大车移动距离，以及所在的场桥作业区域到当前船贝位的运输距离。将 3 个量值分别乘以相应的系数 a_1 、 a_2 、 a_3 ，并加在一起作为选择该集装箱的时间等效成本。选取成本最小的集装箱及其对应的舱位与岸桥，作为当前阶段的第一个或下一个选择。选择每个集装箱的时间等效成本公式如下：

$$t = a_1 \times n_{shi} + a_2 \times s_{mov} + a_3 \times s_{tra} \quad (3.1)$$

其中 t 为单个集装箱因被选择而产生的时间等效成本； n_{shi} 、 s_{mov} 和 s_{tra} 分别为该集装箱装船作业过程所产生的堆场翻箱量、场桥大车移动距离和集卡运输距离； a_1 、 a_2 和 a_3 为相应系数。

② 若当前舱位中不存在中间舱位，但存在对称舱位已经装载的舱位，则在这几个舱位及其对应的集装箱与岸桥中进行选择，过程同上。

③ 若以上两种情况均不存在，则在所有当前舱位及其对应的集装箱与岸桥中进行选择，过程同上。

综上所述，任一阶段当前舱位及其对应的集装箱与岸桥的选择流程如图 3.5 所示。

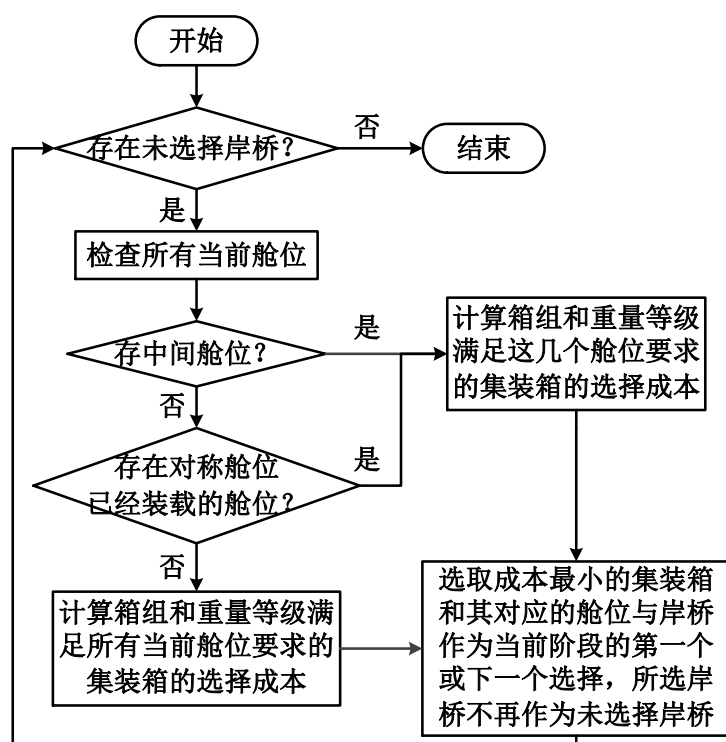


图 3.5 任一阶段岸桥选择流程图

Fig. 3.5 The process of quay crane's choice in any phase

(2) 在每个阶段中，为保证所有场桥作业的均衡，考虑尽可能地在不同的场桥作业区域中提取集装箱。在每个阶段的选择过程中，先不考虑当前阶段已被选择的集装箱所在的场桥作业区域中的其他集装箱，若仍存在满足箱组和重量等级要求的集装箱，则选取选择成本最小的集装箱及其对应的舱位与岸桥，作为当前阶段的下一个选择。若不考虑已被选择的集装箱所在的场桥作业区域中的其他集装箱时，不存在满足箱组和重量等级要求的集装箱，则必须在同一个场桥作业区域中提取多个集装箱。此时，首先需要确定通过翻箱、提箱等操作移走已被选择的集装箱后，该场桥作业区域中其他集装箱的堆存位置，及此时场桥移动到该区域中的哪个贝位。然后计算在此状态下，满足箱组和重量等级要求的集装箱的选择成本，并选取选择成本最小的集装箱及其对应的舱位与岸桥，作为当前阶段的下一个选择。

此时，因为必须在同一个场桥作业区域提取多个集装箱，后提取的集装箱必须等先提取的集装箱提取完成后才能进行提取，所以在计算后提取的集装箱的时间等效成本时，为了体现出因等待而延误的时间，在其因被选择而产生的翻箱量、场桥的大车移动距离，以及集装箱所在的场桥作业区域到对应的船贝位的运输距离的基础上，还要再加上该场桥提取其作业区域中先提取的其他集装箱时所产生的翻箱量（称等待翻箱量）乘以系数 b_1 以及产生的大车移动距离（称等待大车移动距离）乘以系数 b_2 。此时的时间等效成本公式为：

$$t' = a_1 \times n_{shi} + a_2 \times s_{mov} + a_3 \times s_{tra} + b_1 \times n_{wai} + b_2 \times s_{wai} \quad (3.2)$$

其中 t' 为同阶段同场桥作业区域提取多个集装箱时，后提取的集装箱装船作业所产生的时间等效成本； n_{wai} 和 s_{wai} 分别为等待翻箱量和等待大车移动距离； b_1 和 b_2 为相应系数。

（3）另外，考虑翻箱操作仅在同一个堆场贝位内进行，在选择将集装箱翻倒到哪个堆栈时，以尽量避免二次翻箱为原则。可知，堆栈中需要装船的集装箱（称待装箱）越多，产生二次翻箱的可能性越大。对贝位内任一堆栈，将堆栈中的待装箱数乘以系数 c_1 ，再加上堆栈间距离（称栈间距离）乘以系数 c_2 ，将其和作为翻箱等效成本，选取翻箱等效成本最小的堆栈，将集装箱翻倒到该堆栈。

$$c = c_1 \times n_{loa} + c_2 \times s_{sta} \quad (3.3)$$

其中 c 为落箱堆栈的翻箱等效成本； n_{loa} 和 s_{sta} 分别为该堆栈的待装箱数和栈间距离； c_1 和 c_2 为相应系数。

（4）在一个阶段，若某个或某几个岸桥已将其负责装载的集装箱全部装载完成，则在当前阶段中不再考虑这个或这几个岸桥。

按照上述规则，即可确定每阶段各岸桥所选择的集装箱和装载舱位，以及岸桥间的选择顺序，按照设计的编码方式进行编码，即可得到基于步步最优原则的初始解。

另外，对任一阶段，需计算每个岸桥的选择成本，并选取其中的最大值，作为这一阶段的成本。将所有阶段的成本加和，可得到总成本，即为本文问题的目标函数值，如图 3.6 所示。

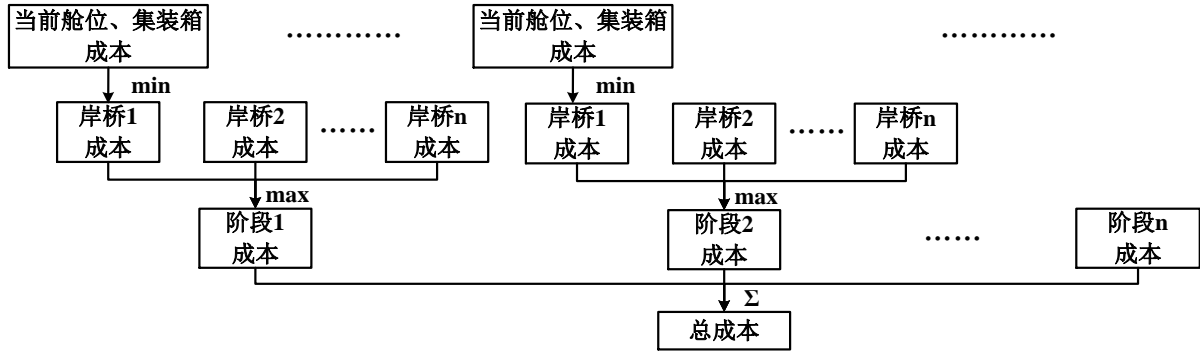


图 3.6 成本逻辑示意图

Fig. 3.6 The diagrammatic sketch of the logic of the cost

3.4 生成新解

基于本文问题的简化假设，可知邻域解共有三种情况：1) 箱组和重量等级相同的两个集装箱互换舱位；2) 同贝位同层的两个舱位互换装载顺序；3) 同阶段同场桥作业区域提取的两个集装箱互换提取顺序。另外，新解的生成还要考虑岸桥、舱位、场桥和集装箱间的对应关系，以及对称装载的简化假设。

假设需要装载 n 个集装箱，当前解方案，共 d 次同一阶段在同一场桥作业区域提取多个集装箱，按顺序从 1 到 d 标号。基于本文的编码设计，为生成新解，首先生成随机数 $x \in [1, 2n+d]$ ，具体规则如下：

(1) 交换集装箱：如果 $x \leq n$ ，则选择交换解编码中两个集装箱号的位置， x 即为选择交换的第一个集装箱号。搜索与 x 号集装箱同箱组、同重量等级的其他集装箱。若不存在满足条件的集装箱，则重新生成一个 $[1, 2n+d]$ 范围内的随机数，重新进行新解的生成；若存在 a 个满足要求的集装箱，按顺序从 1 到 a 标号，生成随机数 $y' \in [1, a]$ ，其对应的原集装箱号为 y ，则 y 即为选择交换的另一个集装箱号。交换解编码中 x 与 y 的位置，生成新解编码，可计算出新解的总成本。

(2) 如果 $n < x \leq 2n$ ，则选择交换解编码中两个舱位号及其所对应的集装箱号的位置， $(x-n)$ 即为选择交换的第一个舱位号。排除中间舱位，搜索与 $(x-n)$ 号舱位在船上同贝位同层的其他舱位。若 $(x-n)$ 号舱位为中间舱位，或者不存在满足条件的其他舱位，则重新生成一个 $[1, 2n+d]$ 范围内的随机数，重新进行新解的生成；若存在 b 个满足要求的舱位，按顺序从 1 到 b 标号，生成随机数 $y' \in [1, b]$ ，其对应的原舱位号为 y ， y 即为选择交换的另一个舱位号。若 $(x-n)$ 与 y 为对称舱位，交换 $(x-n)$ 与 y 及 $(x-n)$ 对应的集装箱号与 y 对应的集装箱号在解编码中的位置，生成新解编码，可计算出新解的总成本；若 $(x-n)$

与 y 不是对称舱位, 则还需同时交换 $(x-n)$ 的对称舱位与 y 的对称舱位及 $(x-n)$ 的对称舱位对应的集装箱号与 y 的对称舱位对应的集装箱号在解编码中的位置, 以保证对称装载的简化假设, 同样可生成新解编码, 并计算其总成本。

(3) 交换选择顺序: 如果 $x > 2n$, 则选择交换编码中同阶段同场桥作业区域提取的两个集装箱号及其对应的船舱位号的位置。设 $(x-2n)$ 对应的原集装箱号为 z , 即为选择交换的第一个集装箱号。搜索与 z 号集装箱同阶段同场桥作业区域提取的其他集装箱。将 c 个满足要求的集装箱, 按顺序从 1 到 c 标号, 生成随机数 $y' \in [1, c]$, 其对应的原集装箱号为 y , 则 y 即为选择交换的另一个集装箱号。交换 z 与 y 及 z 对应的船舱位号与 y 对应的船舱位号在解编码中的位置, 生成新解编码, 可计算出新解的总成本。

综上所述, 新解生成流程如图 3.7 所示。

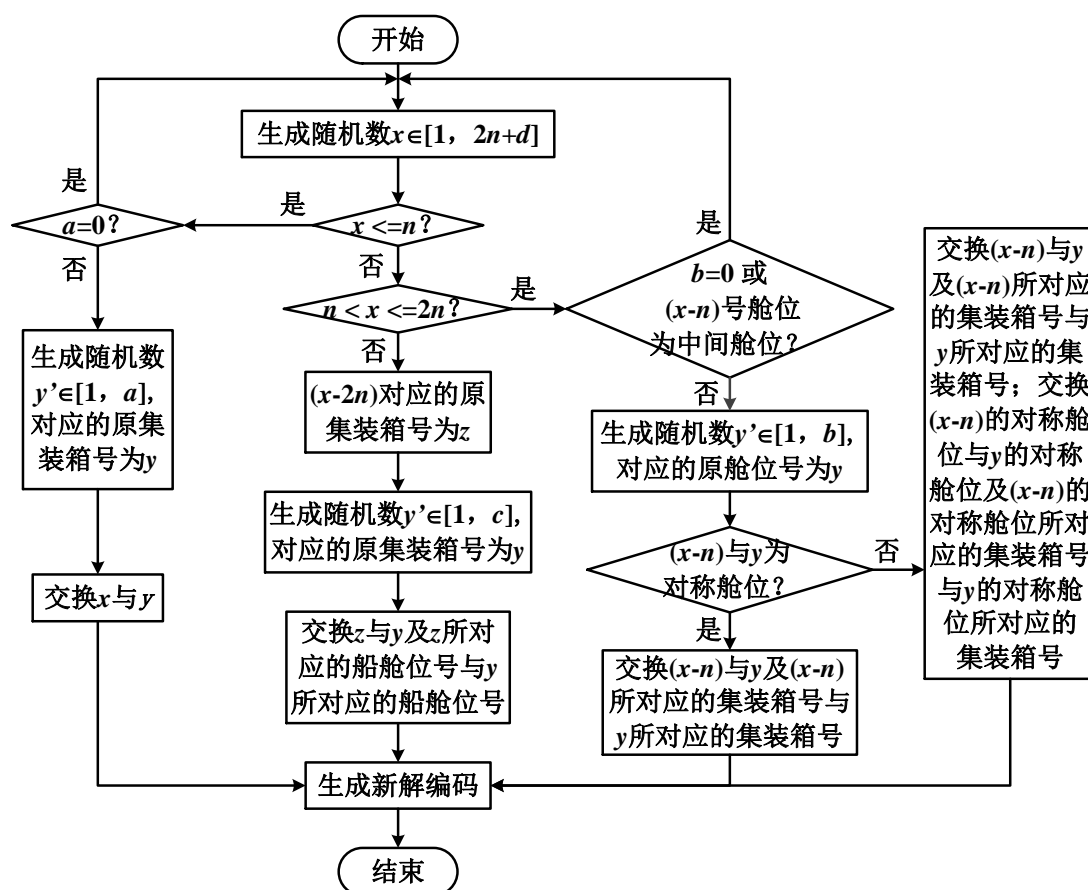


图 3.7 新解生成流程

Fig. 3.7 The process of the generation of a new solution

3.5 状态接受函数、退火策略及结束策略

本文算法的目标函数即为总成本最小，在模拟退火算法中，总成本对应于物理退火过程的当前状态的能量。根据 Metropolis 接受准则设计状态接受函数如下：

$$p_k(i \rightarrow j) = \begin{cases} 1 & R(i) \geq R(j) \\ \exp\left(\frac{R(i) - R(j)}{T_k}\right) & R(i) < R(j) \end{cases} \quad (3.4)$$

式中 $R(i)$ 表示 i 解方案总成本， $R(j)$ 表示当前 j 解方案总成本。当 $R(j) < R(i)$ 时，表示当前解方案总成本变小，则接受当前解；当 $R(j) > R(i)$ 时，表示当前方案总成本增大，随机产生 $\xi = U(0, 1)$ ，若 $\exp\left(\frac{R(i) - R(j)}{T_k}\right) > \xi$ ，则接受当前解。

退火策略的选择表现在降温函数的设置，本文采用指数退火法构造降温函数，即 $T_{k+1} = T_k \cdot r$ ，其中 $r \in (0.95, 0.99)$ 。 T_{k+1} 表示新的温度， T_k 代表上一温度状态。

退火算法的结束策略一般以设置终止温度和最大迭代次数为主，本文设置终止温度结束退火算法。

3.6 本章小结

本章在上一章对装船作业优化问题进行了详细分析的基础上，设计了启发式规则并结合模拟退火算法，对问题进行了优化求解。首先介绍了模拟退火算法的相关原理及本文算法的求解思路及关键所在；然后重点考虑装船顺序与具体舱位分配的同时优化及多场桥和岸桥的协同作业，通过设计的编码方式使优化问题与模拟退火算法相结合；之后又考虑了场桥作业的均衡，堆场的翻箱过程及目标函数的具体设定等问题，设计了初始解的生成规则；又结合编码设计，详细设计了新解的生成规则；最后介绍了本文协同装船优化模拟退火算法的状态接收函数及退火和结束策略。

4 算法分析

4.1 理论分析

4.1.1 问题简化假设

问题简化假设中首先明确了问题的已知条件，包括集装箱在堆场分布、预配图、以及场桥和岸桥分配，并对问题作出界定，仅考虑单船普通箱装载、单箱作业及贝内翻箱，同时忽略集卡数量的影响。另外为保证作业量均衡，指出各场桥和岸桥操作的集装箱量大致相等。并划分场桥作业区域，简化了多场桥的协同作业，可避免相互干扰，但一定程度上限定了场桥的作业范围，缩小了优化空间。岸桥间隔若干贝位并行作业，可避免相互干扰。各岸桥装船的贝位及顺序已知，根据岸桥装箱过程，将问题分成多个阶段，分解了全船作业，简化了多岸桥的协同作业，是算法设计的基础。分层装载简化了装船顺序，可确定每阶段各岸桥装载的贝位和层，便于后续求解，但排除了一些合理方案，缩小了优化空间。对称装载简化了装船顺序，保证了装船过程中船舶的左右平衡，避免出现大角度横倾，但同样排除了一些合理方案，缩小了优化空间。

问题简化假设的设定可有效简化集装箱码头装船作业优化问题，降低问题的复杂度。只需确定每阶段各岸桥选择的装载舱位和集装箱，及岸桥间的选择顺序，即可确定多场桥和岸桥协同作业下所有集装箱的装船顺序和装载到船上的具体舱位，得到完整的装船作业方案。但对问题的简化排除了部分合理方案，一定程度上缩小了优化空间。

4.1.2 编码设计

编码设计使集装箱码头装船作业优化问题与模拟退火算法相结合，编码中可反映出每阶段各岸桥选择的装载舱位和集装箱，及岸桥间的选择顺序，基于问题的简化假设，可确定集装箱与场桥间和船舱位与岸桥间的对应关系，因而确定了解编码，即可确定多场桥和岸桥协同作业下所有集装箱的装船顺序和装载到船上的具体舱位，得到完整的装船作业方案。

4.1.3 生成初始解

在问题简化假设的基础上，根据预配图对舱位箱组和重量等级的限制，结合优化目标的设定，基于步步最优原则，生成了初始解，并设计了相应的启发式处理规则。考虑同阶段尽可能在不同场桥作业区域提取集装箱，必须在同场桥作业区域提取多个集装箱时，考虑了等待翻箱量和大车移动距离，体现了因等待而延误的时间等效成本，从而保证各场桥作业量的均衡。落箱堆栈的选择主要考虑待装箱数，并兼顾栈间距离，从而最

大限度避免二次翻箱。每阶段，选取各岸桥时间等效成本的最大值作为阶段成本，所有阶段成本加和得到总时间等效成本，即为目标函数值。

4.1.4 生成新解

基于编码设计，考虑了三种情况：1) 交换解编码中两个集装箱号的位置；2) 交换解编码中两个舱位号及其对应的集装箱号的位置；3) 交换解编码中同阶段同场桥作业区域提取的两个集装箱号及其对应的船舱位号的位置。2) 中，排除了中间舱位，并考虑了对称舱位的影响，保证了对称装载的简化假设。三种情况的全面考虑，包括了邻域解的所有情形，为求得最优解提供了必要保障。

4.1.5 总体评价

本文对集装箱码头装船作业优化问题的研究，考虑了全船装载时具体舱位分配和集装箱装船顺序的同时优化，扩大了问题的优化空间，并考虑了多场桥和岸桥的协同作业，从而可对装船作业的整体效率进行有效优化，结合模拟退火算法，可得出最优的装船作业方案。但对问题的简化排除了部分合理方案，一定程度上缩小了优化空间。

4.2 实验设计

以北方某集装箱码头资料为背景，假设问题涉及的码头堆场区域共堆存 300 个集装箱，现需将其中的 200 个确定的集装箱装载到一艘集装箱船上的 10 个贝位中，每个集装箱在堆场的具体位置及其箱组和重量等级等信息已知。船贝位的最大堆箱层数为 5 层，每个贝位的每一层需要装载的集装箱数已知。堆场中共有 5 个场桥，每个场桥操作 4 个贝位，每个贝位包含 5 个堆栈，每个堆栈的最大堆箱层数为 5 层，每个场桥作业区域到集装箱船上的每个贝位的运输距离已知。另外，共有 3 个岸桥同时进行装船作业，共有 4 类集装箱箱组，重量等级分为 4 级。系数取值为 $a_1=1$ 、 $a_2=1$ 、 $a_3=1$ 、 $b_1=1$ 、 $b_2=1$ 、 $c_1=10$ 、 $c_2=1$ 。

使用 C++ 编写算法程序，进行算例求解，验证算法有效性。算例的实验环境为：处理器 Pentium(R) Dual-Core CPU, E5200 @2.50GHz, 2.50GHz, 4.00GB 内存，Win7 32 位操作系统。

4.3 算法性能分析

取初始温度 $T_0=10$ ，终止温度 $T_f=0.1$ ，温度衰减率 $r=0.95$ ，通过改变内循环次数 L ，来改变总循环次数，并考虑根据温度 T_k 计算内循环次数（例如： $L=100/T_k$ ），使温度较大时，内循环次数较少，温度减小时，内循环次数增加。

(1) 得到总成本统计表和总成本与总循环次数关系曲线, 即总成本的收敛性曲线, 如表 4.1 和图 4.1 所示。由表 4.1 和图 4.1 可知, 当总循环次数达到 18 万次, 总成本趋于稳定, 算法收敛, 成本优化情况如表 4.2 所示。由表 4.2 可知, 算法收敛时, 翻箱量从初始的 70 下降到 27, 大车移动距离从 75 下降到 41, 运输距离从 151.75 下降到 124.25, 等待成本从 9 下降到 1, 总成本从 305.75 下降到 193.25, 总成本降低了约 36.8%, 验证了算法的可行性、收敛性和有效性。

表 4.1 总成本统计表

Tab. 4.1 Statistics table for total cost

内循环次数	总循环次数	总选择成本	求解时间	内循环次数	总循环次数	总选择成本	求解时间
初始解		305.75	0.004	$400/T_k$	76054	202.75	604.826
$1/T_k$	153	279.25	1.271	$450/T_k$	85571	204.25	700.608
$5/T_k$	908	256.75	7.631	$475/T_k$	90323	201.75	740.735
$10/T_k$	1861	237.25	15.741	$500/T_k$	95079	195.25	781.023
$15/T_k$	2806	247.25	24.141	$550/T_k$	104586	195.75	861.095
$20/T_k$	3766	241.75	31.475	$600/T_k$	114109	198.25	927.442
$25/T_k$	4709	229.25	39.821	$650/T_k$	123615	193.25	991.640
$30/T_k$	5665	230.25	48.194	$700/T_k$	133126	201.25	1065.372
$40/T_k$	7569	227.75	64.426	$750/T_k$	142636	199.75	1141.479
$50/T_k$	9467	227.25	80.005	$800/T_k$	152151	196.25	1217.625
$55/T_k$	10416	223.25	88.648	$850/T_k$	161664	196.25	1290.640
$60/T_k$	11372	211.75	97.177	$900/T_k$	171177	196.25	1361.867
$65/T_k$	12326	221.75	104.758	$950/T_k$	180692	193.25	1437.568
$80/T_k$	15177	222.75	127.941	$1000/T_k$	190204	194.25	1508.000
$100/T_k$	18980	223.25	151.048	$1100/T_k$	209224	195.25	1700.507
$120/T_k$	22789	220.75	188.835	$1200/T_k$	228250	196.25	1826.624
$140/T_k$	26593	210.25	220.292	$1300/T_k$	247269	197.25	2009.725
$150/T_k$	28491	202.75	229.527	$1400/T_k$	266299	195.25	2131.122
$160/T_k$	30392	208.75	248.650	$1500/T_k$	285322	193.75	2269.994
$180/T_k$	34198	207.75	282.800	$1600/T_k$	304348	195.25	2429.754
$200/T_k$	38008	206.25	304.552	$1700/T_k$	323369	196.75	2572.691
$250/T_k$	47515	202.75	386.296	$1800/T_k$	342398	197.25	2714.644
$300/T_k$	57028	202.25	465.061	$1900/T_k$	361425	193.75	2892.391
$350/T_k$	66532	210.75	551.769	$2000/T_k$	380449	194.25	3016.325

表 4.2 成本优化统计表

Tab.4.2 Statistics table for optimization of cost

翻箱量	大车移动距离	运输距离	等待成本	总成本	优化率
70	75	151.75	9	305.75	
27	41	124.25	1	193.25	36.8%

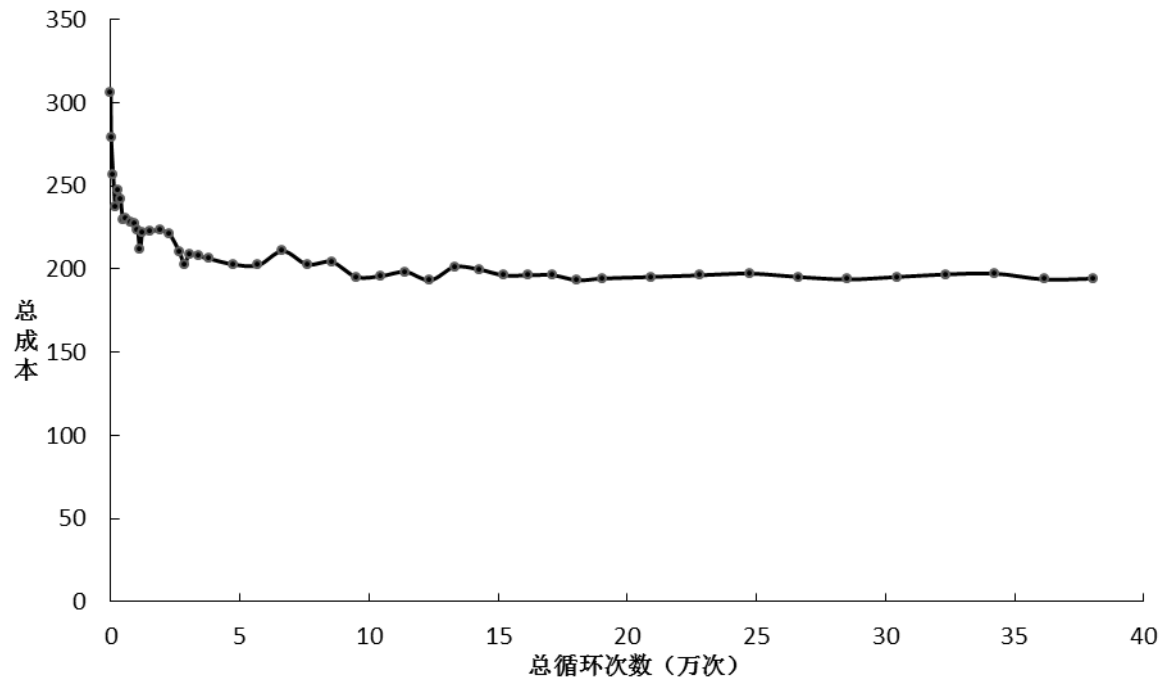


图 4.1 总成本收敛性曲线

Fig. 4.1 Convergence curve of total cost

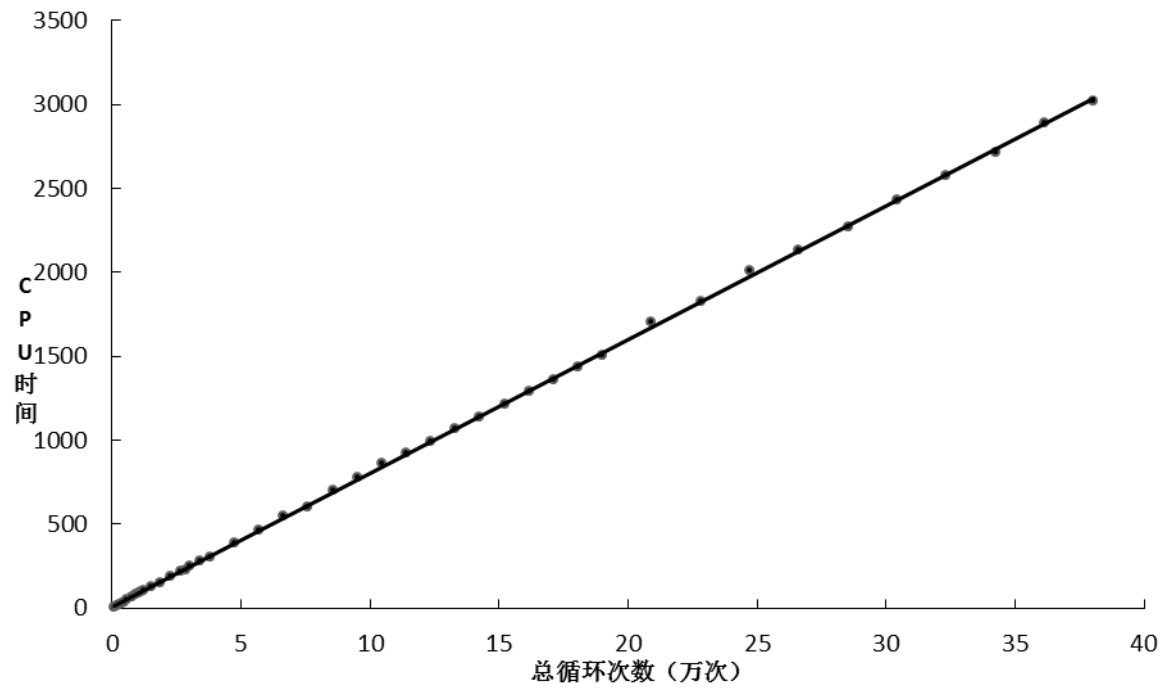


图 4.2 CPU 时间和总循环次数关系曲线

Fig. 4.2 Relation curve of CPU time and total cycle number

(2) 根据上述实验, 还可得到 CPU 时间和总循环次数关系曲线, 如图 4.2 所示。由图 4.2 可知, CPU 时间和总循环次数成正比关系, CPU 时间随总循环次数的增大而增大。当总循环次数达到 18 万次时, 算法收敛, 此时的 CPU 时间消耗为 1437.568s (约 24min)。

4.4 参数影响分析

模拟退火算法的主要参数包括初始温度 T_0 , 终止温度 T_f , 温度衰减率 r , 以及内循环次数 L 。理论上, 为了使模拟退火算法终止于全局最优解, 必须在算法设计过程中同时满足下列条件:

- ① 初始温度 T_0 足够高;
- ② 终止温度 T_f 足够低;
- ③ 温度衰减率 r 足够大 (降温过程足够慢);
- ④ 内循环次数 L 足够大 (热平衡时间足够长)。

但以上条件在实际应用过程中很难同时得到满足。集装箱码头装船作业优化问题, 考虑因素众多, 求解过程复杂, 无法满足理想化的参数条件, 需对参数的影响进行分析。而模拟退火算法会接受性能较差的解, 所以最终解可能比运算过程中遇到的最好解 (称历史最优解) 性能差, 因此在算法运行过程中记录历史最优解, 作为输出解。

4.4.1 内循环次数 L

取初始温度 $T_0=10$, 终止温度 $T_f=0.1$, 温度衰减率 $r=0.95$ 。比较内循环次数 L 固定不变和内循环次数 L 根据温度 T_k 来计算 (例如: $L=100/T_k$) 两种情况下, 算法的收敛速度和精度, 比较结果如表 4.3 和图 4.3 所示。

表 4.3 内循环次数 L 比较表
Tab. 4.3 Comparison table for inner cycle number L

L 固定不变			L 根据 T_k 计算		
内循环次数	总循环次数	总选择成本	内循环次数	总循环次数	总选择成本
10	900	292.75	$5/T_k$	908	256.75
100	9000	238.75	$50/T_k$	9467	227.25
500	45000	210.75	$250/T_k$	47515	202.75
1000	90000	205.75	$475/T_k$	90323	201.75
2000	180000	200.25	$950/T_k$	180692	193.25
3000	270000	192.75	$1500/T_k$	285322	193.75
4000	360000	192.75	$2000/T_k$	380449	194.25

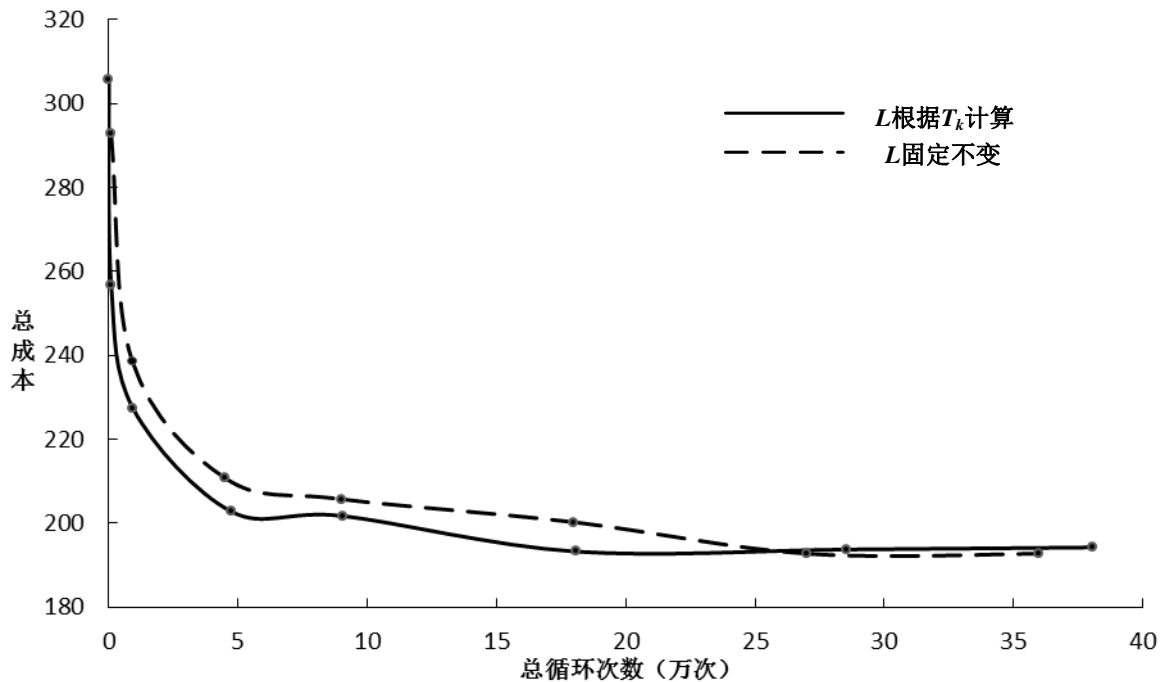


图 4.3 内循环次数 L 比较图

Fig. 4.3 Comparison curve of inner cycle number L

由表 4.3 和图 4.3 可知，在算法收敛之前，当总循环次数相近时，内循环次数 L 根据温度 T_k 来计算时所得到的总成本会比内循环次数 L 固定不变时更小；而若内循环次数 L 根据温度 T_k 来计算，当总循环次数达到 18 万次时，算法已经收敛，若内循环次数 L 固定不变，则当总循环次数达到 27 万次时，算法才会收敛。故内循环次数 L 根据温度 T_k 来计算比内循环次数 L 固定不变时，算法收敛速度更快。算法收敛后，两种情况下总成本基本相同，故内循环次数 L 对于算法精度并无影响。

4.4.2 温度衰减率 r

取初始温度 $T_0=10$ ，终止温度 $T_f=0.1$ ，内循环次数 L 根据温度 T_k 来计算，比较温度衰减率 $r=0.95$ 和 $r=0.99$ 两种情况下，算法的收敛速度和精度，比较结果如表 4.4 和图 4.4 所示。

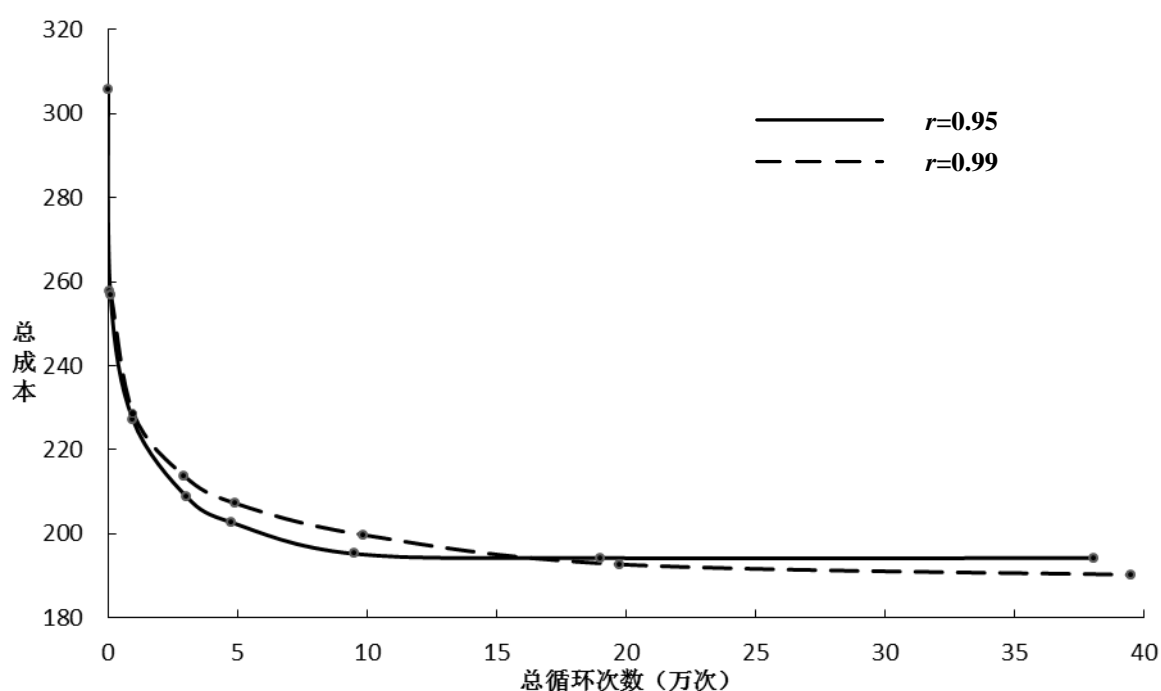
表 4.4 温度衰减率 r 比较表

Tab. 4.4 Comparison table for temperature decrement r

$r=0.95$			$r=0.99$		
内循环次数	总循环次数	总选择成本	内循环次数	总循环次数	总选择成本
$5/T_k$	908	256.75	$1/T_k$	789	257.75

表 4.4 续
Tab. 4.4 Cont

$r=0.95$	$r=0.99$	208.75	$30/T_k$	29422	213.75
内循环次数	总循环次数	总选择成本	内循环次数	总循环次数	总选择成本
$50/T_k$	9467	227.25	$10/T_k$	9658	228.75
$160/T_k$	30392	208.75	$30/T_k$	29422	213.75
$250/T_k$	47515	202.75	$50/T_k$	49168	207.25
$500/T_k$	95079	195.25	$100/T_k$	98561	199.75
$1000/T_k$	190204	194.25	$200/T_k$	197356	192.75
$2000/T_k$	380449	194.25	$400/T_k$	394954	190.25

图 4.4 温度衰减率 r 比较图Fig. 4.4 Comparison curve of temperature decrement r

由表 4.4 和图 4.4 可知, 在算法收敛之前, 当总循环次数相近时, 温度衰减率 $r=0.95$ 时的总选择成本比 $r=0.99$ 时更小; 而若 $r=0.95$, 当总循环次数达到 19 万次时, 算法已经收敛, 若 $r=0.99$, 则当总循环次数达到 39 万次时, 算法还未收敛。故温度衰减率 r 较小时, 算法收敛速度更快。算法收敛后, 若 $r=0.95$, 算法可以收敛到 194.25 附近, 而若 $r=0.99$, 由实验可知, 当总循环次数达到 79 万次时, 算法可以收敛到 187.75 附近。故温度衰减率 r 较大时, 算法精度更高。

4.4.3 初始温度 T_0

取终止温度 $T_f=0.1$ ，温度衰减率 $r=0.95$ ，内循环次数 L 根据温度 T_k 来计算，比较初始温度 $T_0=10$ 和 $T_0=200$ 两种情况下，算法的收敛速度和精度，比较结果如表 4.5 和图 4.5 所示。

表 4.5 初始温度 T_0 比较表
Tab. 4.5 Comparison table for the initial temperature T_0

$T_0=10$			$T_0=200$		
内循环次数	总循环次数	总选择成本	内循环次数	总循环次数	总选择成本
$5/T_k$	908	256.75	$5/T_k$	936	256.75
$50/T_k$	9467	227.25	$50/T_k$	9827	224.75
$160/T_k$	30392	208.75	$160/T_k$	31607	211.75
$300/T_k$	47515	202.75	$300/T_k$	59326	206.25
$500/T_k$	95079	195.25	$500/T_k$	98931	200.25
$1000/T_k$	190204	194.25	$1000/T_k$	197936	197.25
$2000/T_k$	380449	194.25	$2000/T_k$	395956	192.25

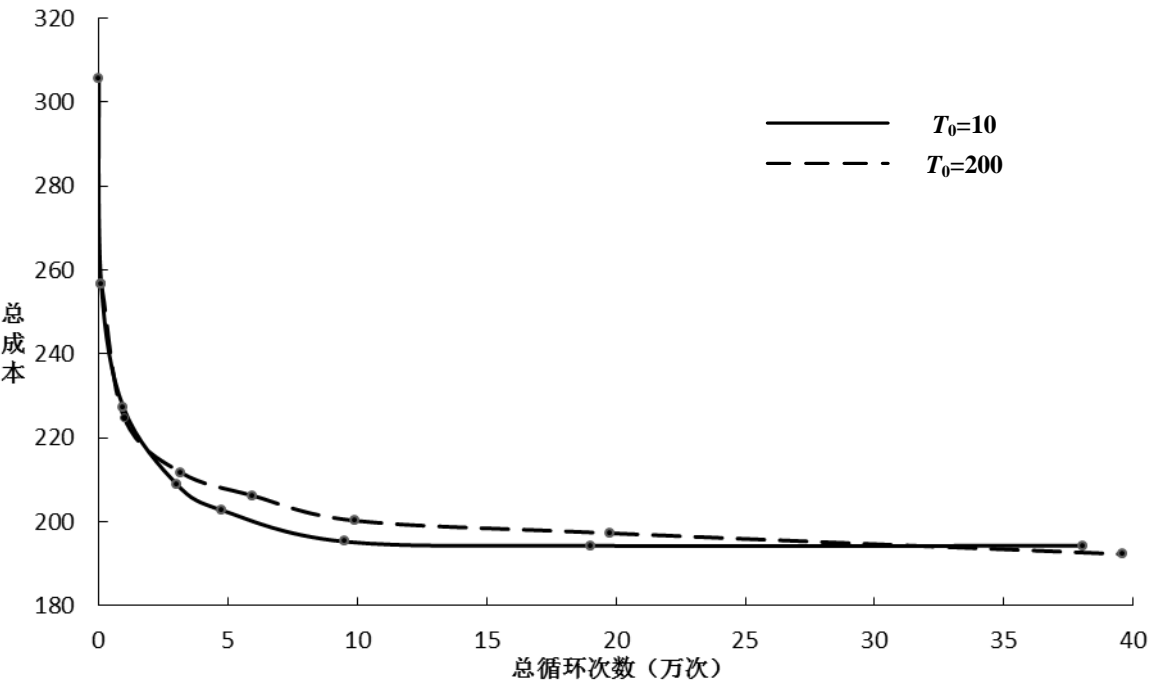


图 4.5 初始温度 T_0 比较图
Fig. 4.5 Comparison curve of the initial temperature T_0

由表 4.5 和图 4.5 可知, 在算法收敛之前, 当总循环次数相近时, 初始温度 $T_0=10$ 时的总选择成本比 $T_0=200$ 时更小; 而若 $T_0=10$, 当总循环次数达到 19 万次时, 算法已经收敛, 若 $T_0=200$, 则当总循环次数达到 39 万次时, 算法还未收敛。故初始温度 T_0 较小时, 算法收敛速度更快。算法收敛后, 若 $T_0=10$, 算法可以收敛到 194.25 附近, 而若 $T_0=200$, 由实验可知, 当总循环次数达到 79 万次时, 算法可以收敛到 190.75 附近。故初始温度 T_0 较大时, 算法精度更高。

4.4.4 终止温度 T_f

取初始温度 $T_0=10$, 温度衰减率 $r=0.95$, 内循环次数 L 根据温度 T_k 来计算, 比较终止温度 $T_f=0.1$ 和 $T_f=0.01$ 两种情况下, 算法的收敛速度和精度, 比较结果如表 4.6 和图 4.6 所示。

表 4.6 终止温度 T_f 比较表

Tab. 4.6 Comparison table for the final temperature T_f

$T_f=0.1$			$T_f=0.01$		
内循环次数	总循环次数	总选择成本	内循环次数	总循环次数	总选择成本
$5/T_k$	908	256.75	$0.5/T_k$	912	252.25
$50/T_k$	9467	227.25	$5/T_k$	9586	231.25
$160/T_k$	30392	208.75	$16/T_k$	30820	213.25
$250/T_k$	47515	202.75	$25/T_k$	48189	207.75
$600/T_k$	114109	198.25	$60/T_k$	115755	202.25
$1000/T_k$	190204	194.25	$100/T_k$	192969	201.25
$2000/T_k$	380449	194.25	$200/T_k$	386013	196.75

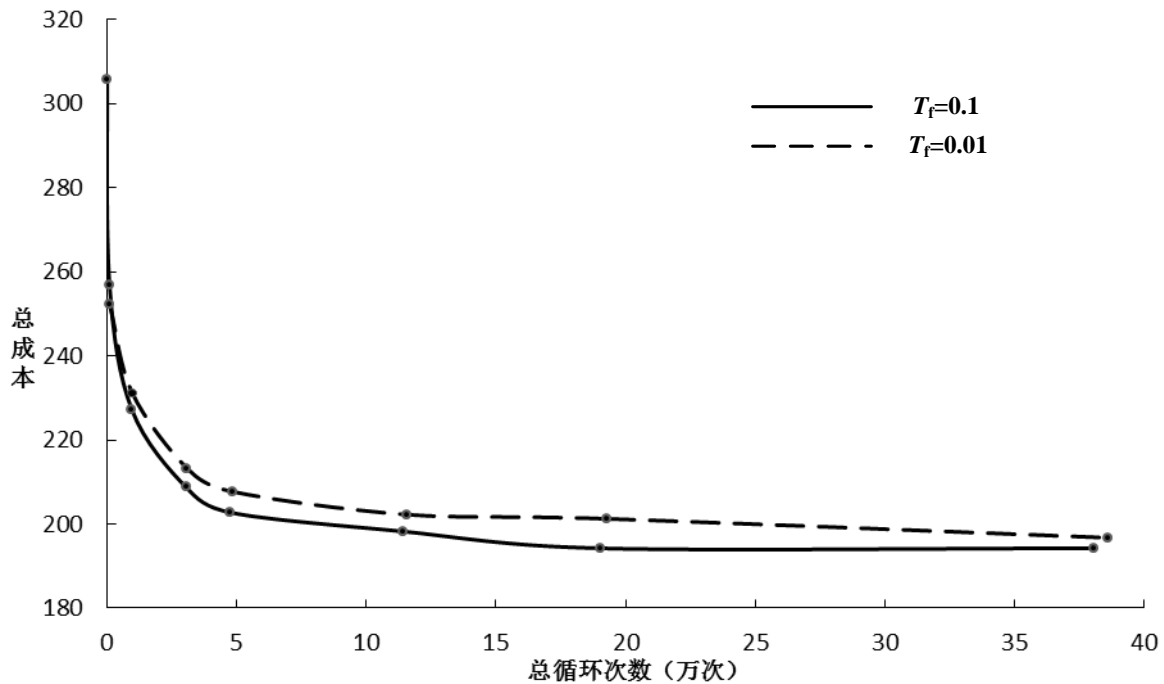


图 4.6 终止温度 T_f 比较图

Fig. 4.6 Comparison curve of the final temperature T_f

由表 4.6 和图 4.6 可知，在算法收敛之前，当总循环次数相近时，终止温度 $T_f=0.1$ 时的总选择成本比 $T_f=0.01$ 时更小；而若 $T_f=0.1$ ，当总循环次数达到 19 万次时，算法已经收敛，若 $T_f=0.01$ ，则当总循环次数达到 38 万次时，算法还未收敛。故终止温度 T_f 较大时，算法收敛速度更快。算法收敛后，若 $T_f=0.1$ ，算法可以收敛到 194.25 附近，而若 $T_f=0.01$ ，由实验可知，当总循环次数达到 96 万次时，算法可以收敛到 189.25 附近。故终止温度 T_f 较小时，算法精度更高。

4.5 本章小结

本章通过理论和实验分析，验证了本文集装箱码头多场桥和岸桥协同装船作业优化模拟退火算法的有效性，并对算法中相关参数的影响作出了详细分析。首先对算法的简化假设、编码设计、初始解和新解的生成规则及算法的总体情况进行了理论分析，从理论上说明了算法的优势与不足；之后进行了实验设计，对算例的已知条件进行了介绍，同时说明了算例的实验环境；然后对算法的收敛性及精度进行了分析，结果显示算法可将总选择成本降低约 36.8%，验证了算法的可行性、收敛性和有效性；同时对 CPU 时间进行了分析，得出了 CPU 时间和总循环次数成正比关系的结论；之后相继对算法中的

内循环次数 L 、温度衰减率 r ，以及初始温度 T_0 和终止温度 T_f 对算法的收敛速度和精度的影响作出了分析，结果表明：内循环次数 L 根据温度 T_k 来计算比内循环次数 L 固定不变时，算法收敛速度更快，内循环次数 L 对于算法精度并无影响；温度衰减率 r 较小时，算法收敛速度更快，温度衰减率 r 较大时，算法精度更高；初始温度 T_0 较小时，算法收敛速度更快，初始温度 T_0 较大时，算法精度更高；终止温度 T_f 较大时，算法收敛速度更快，终止温度 T_f 较小时，算法精度更高。

5 结论与展望

5.1 结论

随着港口集装箱吞吐量增长和船舶大型化的发展,集装箱船舶的在港作业效率和能力要求越来越高。本文针对集装箱码头装船作业优化问题,考虑在给定预配图的基础上,同时优化集装箱的装船顺序与具体舱位分配,并结合全船装载时多个场桥和岸桥的协同作业,设计了相应的启发式规则并与模拟退火算法相结合。通过理论和实验分析,验证了算法的可行性、收敛性和有效性,并对算法的相关参数影响进行了分析。论文主要的研究成果和结论如下:

(1) 对集装箱码头装船作业优化问题涉及到的舱位预配图、集装箱在堆场分布和协同装船作业的具体过程等相关知识作出了全面的分析介绍,阐明本文研究以预配图为基础,关注于集装箱装船作业阶段。在此基础上,通过详细的约束分析,作出了合理的简化假设,明确了问题的优化目标,从而清晰地界定了本文的研究内容并为算法的设计奠定了基础。

(2) 在对集装箱码头装船作业优化问题详细分析的基础上,基于问题的简化假设,结合约束条件,并根据所研究问题的特点,重点考虑装船顺序与具体舱位分配的同时优化及多场桥和岸桥的协同作业,设计了合理的启发式规则,并通过编码设计使优化问题与模拟退火算法相结合,又考虑了堆场的翻箱过程、目标函数的具体设定等问题,设计了初始解和新解的生成规则,从而全面设计了集装箱码头多场桥和岸桥协同装船作业优化模拟退火算法,对装船作业优化问题的研究提供了一种创新的思路和方法。

(3) 通过理论和实验分析,验证了本文集装箱码头多场桥和岸桥协同装船作业优化模拟退火算法的可行性、收敛性和有效性。分析了算法的收敛性、精度及 CPU 时间,结果表明:1) 当总循环次数达到 18 万次时,总成本趋于稳定,算法收敛;2) 收敛时,总成本降低了约 36.8%;3) CPU 时间和总循环次数成正比;4) 收敛时, CPU 时间消耗为 1437.568s (约 24min)。并对算法中相关参数的影响作出了详细分析,结果表明:1) 内循环次数 L 根据温度 T_k 来计算比内循环次数 L 固定不变时,算法收敛速度更快;2) 内循环次数 L 对于算法精度并无影响;3) 温度衰减率 r 较小时,算法收敛速度更快;4) 温度衰减率 r 较大时,算法精度更高;5) 初始温度 T_0 较小时,算法收敛速度更快;6) 初始温度 T_0 较大时,算法精度更高;7) 终止温度 T_f 较大时,算法收敛速度更快;8) 终止温度 T_f 较小时,算法精度更高。

5.2 展望

本文针对基于预配的集装箱码头装船作业优化问题，设计了相应的启发式规则处理装船顺序与具体舱位分配的同时优化及多场桥和岸桥的协同作业两个关键问题，并结合模拟退火算法，对问题进行了求解优化，对装船作业优化问题的研究提供了一种创新的方法和思路。但本文算法也存在着一些不足，还有待进一步完善：

(1) 在问题的简化假设中，仅考虑单箱作业及贝内翻箱，同时忽略了集卡数量的影响，并对问题做出了场桥分区域、作业分阶段、分层装载、对称装载等简化，这样会使得优化结果与实际作业产生一定的偏差。在今后的研究中，可以对相关问题进行更加全面的考虑，使算法更加贴合实际。

(2) 受限于模拟退火算法搜索全局最优解时循环次数过多、求解时间过长的缺点，在本文的实验环境下，对于 200 个集装箱的装船作业优化，实验结果显示，算法收敛时，CPU 的时间消耗约为 24min。而随着问题规模的扩大，CPU 时间消耗也将变得更大，在实际应用中会受到限制。在今后的研究中，应寻找更好的退火策略和搜索方式，加快算法的求解速度。

(3) 本文研究仅针对传统的场桥与岸桥作业，而港口集装箱吞吐量的持续增长和船舶大型化的发展，也使得集装箱码头的装卸设备和作业工艺不断改进和更新，出现了多种先进的高科技自动化装卸设备和作业工艺。在今后的研究中，可以将本文算法与新型的码头装卸设备和作业工艺相结合，以提高算法的实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] Scott D K, Chen D S. A loading model for a container ship [D]. Matson: Navigation Cambridge, 1978.
- [2] Aslidis A H. Optimal container loading [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1984.
- [3] Shields J J. Containership stowage:a comPUter-aided preplanning system [J]. Marine Technology, 1984, 21(4):370-383.
- [4] Botter R C, Brinati M A. Stowage container planning:a model for getting an optimal solution [J]. IFIP Transactions B (Applications in Technology), 1992, B-5:217-229.
- [5] Avriel M, Penn M. Exact and approximate solutions of the containership stowage problem [J]. Computers and Industrial Engineering, 1993, 25(1-4):271-274.
- [6] Avriel M, penn M, Shpirer N. Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts [J]. Annals of Operations Research, 1998, 76(0):55-71.
- [7] Avriel M, Penn M, Shpirer N. Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs [J]. Discrete Applied Mathematics, 2000, 103(1- 3):271-279.
- [8] Todd D, Sen P. A multiple criteria genetic algorithm for containership loading: proceedings of the seventh international conference on genetical gorithm [C]. SanMateo, California, 1997.
- [9] Haghani A, Kaisar E I. A model for designing container loading plans for containerships [C]. Annual Conference for Transportation Research Board, 2001.
- [10] Dubrovsky O, Levitin G, Penn M. A genetical gorithm with acompact solution encoding for the container ship stowage problem [J]. Journal of Heuristics, 2002, 8(6): 585-599.
- [11] Ambrosino D, Sciomachen A, Tanfani E. Stowing a containership: the master bay plan problem [J]. Transportation Research, Part A, 2004, 38(2):81-99.
- [12] 段成华, 郭旭. 基于整数规划的单贝多港(SBMP)配载模型研究[J]. 计算机辅助工程, 2004, 13(03):9-13.
- [13] 张维英, 林焰, 纪卓尚, 等. 集装箱船舶配载方案评价的 Hopfield 神经网络模型[J]. 大连海事大学学报, 2005, 31(3):13-16.
- [14] 张维英. 集装箱船全航线配载智能优化研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
- [15] 张维英, 林焰, 纪卓尚. 集装箱船全航线 Bay 位排箱优化模型[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(2):199-204.
- [16] 史宗耀. 混合遗传算法在集装箱船舶配载中的应用[D]. 长春:长春理工大学, 2010.

- [17] 陈忱. 最优航线调度和集装箱船舶配载计划的决策支持系统[D]. 天津:天津理工大学, 2012.
- [18] Martin G L, Methodology R, Mcdowell E D. Computerised container ship load planning [J]. Computer and Industry Engineer, 1988, 14(4):429-440.
- [19] Wilson I D, Roach P A. Principles of combinatorial optimization applied to containership stowage planning [J]. Journal of Heuristics, 1999, 5(4):403-418.
- [20] Wilson I D, Roach P A. Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions [J]. Journal of the Operational Research Society, 2000, 51(11):1248-1255.
- [21] Wilson I D, Roach P A, Ware J A. Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study [J]. Knowledge-Based Systems, 2001, 14(3-4):137-145.
- [22] Peter P, Erhan K. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals [J]. Computers and Operations Research, 2001, 28:983-995.
- [23] Ryu K R, Kim K H, Lee Y H. Loading sequencing algorithms for container ships by using meta-heuristics [C]. Hongkong: The 16th International conference on Producton Research, 2001: 232-238.
- [24] Imai A, Miki T. A heuristic algorithm with expected utility for an optimal sequence of loading containers into a containerized ship [J]. Journal of Japan Institute of Navigation, 1989, 80:117-124.
- [25] Imai A, Nishimura E, PaPadimitriou S, et al. The containership loading problem [J]. International Journal of Maritime Economics, 2002, 4(2):126-148.
- [26] Bortfeldt A, Mack G H. A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem [J]. Parallel Computing, 2003, 29(5):641-662.
- [27] Winter T. Online and real-time dispatching problems [D]. Braunschweig: Technical University of Braunschweig, 2004.
- [28] Akio I, Kaxuya S, Etsuko N, et al. Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks [J]. European Journal of Operational research, 2005, 171(3):373-389.
- [29] Monaco M F, Sammarra M, Sorrentino G. The terminal-oriented ship stowage planning problems [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 39 (1):256-265.
- [30] 张新艳. 基于进化策略的港口集装箱装船作业优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 03:262-265.
- [31] 王晓, 陈海燕, 王超, 等. 关于合理确定集装箱码头装船顺序的算法[J]. 经济数学, 2005, 03: 284-290.
- [32] 车鉴. 集装箱船舶配载计划优化研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.

- [33] 王莉莉, 于红. 集装箱装船顺序优化模型及遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(15): 234-238.
- [34] 朱明华, 范秀敏, 程免翀, 等. 集装箱装船顺序问题的启发式算法研究[J]. 中国工程机械, 2010, 21(9): 1066-1070.
- [35] 靳志宏, 兰辉, 边展, 等. 基于现实约束的集装箱装船顺序优化[J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(1): 71-74.
- [36] 黎明, 翟金刚. 基于粒子群算法集装箱装船顺序的整数规划模型[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2011, 27(4): 295-300.
- [37] 孙环环. 基于船舶配载图的集装箱装船顺序优化模型与算法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [38] 王秀臣. 出口箱随机入港下的码头堆场与船舶积载协调优化[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [39] 李坤, 唐立新. 集装箱码头装船计划问题建模与优化研究[J]. 控制工程, 2015, 22(4): 683-689.
- [40] 何钢, 张耀周, 梁燕, 等. 自动化码头集装箱船舶倍内配载问题研究[C]. //中国土木工程学会. 水运工程创新技术交流会论文集. 厦门: [出版者不详], 2015.
- [41] 李俊, 张煜, 计三有, 等. 集装箱船舶装箱排序问题的两阶段算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(1): 183-190.
- [42] 周晓峰. 粒子群算法应用于装船顺序整数规划模型[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(1A): 147-149.

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

- 1 集装箱码头协同装船优化模拟退火算法. 尚尔进. 大连理工大学研究生院网络学刊 (已录用, 待发表). 主办单位: 大连理工大学研究生院。(本硕士学位论文第三章、第四章)

致 谢

时光荏苒，2014 年 9 月，我满怀憧憬地选择了在我的母校大连理工大学继续研究生阶段的求学之路。三年的研究生学习生活让我受益匪浅，转眼又到了毕业的季节，即将离开母校的我心中满是留恋与不舍，但更多的还是感激。

感谢我的导师周鹏飞教授。三年来，周老师在学习和生活上都给予了我很多的帮助。周老师有着认真负责的工作态度，每周的课题组讨论，老师都会对我们的科研工作作出耐心细致的指导；每当在科研中遇到困难，老师都会放下手头的工作，在百忙之中和我们一起讨论解决。从论文的选题到最终完成，周老师给予了我很多详细的指导，提出了很多建设性的意见。周老师严谨的科研态度、孜孜不倦的追求精神、精益求精的工作作风对我产生了很大的影响。在此向周老师表示最深的敬意和衷心的感谢。

感谢父母的养育之恩，是他们用辛勤的汗水将我抚养长大，并让我衣食无忧的学习和生活，也是他们一如既往的关怀和支持，才成就了今天的我。他们是最亲近的人，也是我在科研道路上前进的最大动力，感谢他们的一路相伴。

感谢师姐杨云，师兄赵金秋、耿琨在生活上和科研中给予我的启发和帮助；感谢同窗邢小伟，师弟吕梦华、李玉登、石少宝、李孟斌、张震，师妹范璐璐、丘诗惠在每周的课题组讨论中给予我的建议和启发；感谢 523 教研室的史奔骏、李强、刘崇期、刘慧亮、唐玉元、于海鹏、李霆、伍华鑫、邓琦在学习生活中的陪伴和关照。很珍惜三年来的点点滴滴，大家互相帮助、共同进步，营造出教研室和谐的氛围，也让我感受到家的温暖。最后，感谢港工 1401 班的全体同学，感谢三年来有你们的帮助和陪伴。

再一次衷心的感谢我的导师以及在生活和学习工作中曾给予我关心、支持、鼓励和帮助的老师、同学、朋友和家人，谢谢你们！

最后，感谢评审本论文和出席学位论文答辩的各位老师，感谢你们的指导！

大连理工大学学位论文版权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于大连理工大学，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印、或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文题目：_____

作者签名：_____ 日期：_____年____月____日

导师签名：_____ 日期：_____年____月____日