

集装箱码头堆场的数学模型分析

林熙辉, 黄晓鹏

甘肃农业大学管理学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2023年2月3日; 录用日期: 2023年2月28日; 发布日期: 2023年3月7日

摘要

本文对集装箱码头的特点、功能、基本布局、集装箱码头堆场的特点及功能等基础信息进行了介绍, 围绕集装箱码头堆存过程、集装箱码头堆场的“翻箱”问题及产生原因、集装箱码头空间资源优化数学模型的综合建构(包括相关问题的假设描述、数学模型的建立、分支定界法的运用)展开分析, 供参考。

关键词

集装箱码头, 堆场, 数学模型, 分支定界法, “翻箱”作业

Mathematical Model Analysis of Container Terminal Yard

Xihui Lin, Xiaopeng Huang

College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu

Received: Feb. 3rd, 2023; accepted: Feb. 28th, 2023; published: Mar. 7th, 2023

Abstract

This paper introduces the characteristics, functions, basic layout, characteristics and functions of container terminal yard and other basic information. This paper focuses on the storage process of container terminals, the “turning over” problem of container yards and its causes, the comprehensive construction of the mathematical model of spatial resource optimization of container terminals (including the hypothesis description of related problems, the establishment of mathematical models, and the application of branch and bound method) for reference.

Keywords

Container Terminal, Storage Yard, Mathematical Model, Branch and Bound Method, "Turn over the Box" Operation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

集装箱码头堆场是指在集装箱码头专门设置, 专用于办理集装箱交接、堆存、保管的场所。在集装箱运输系统中, 码头堆场主要承担区分运输责任、计算运输及作业费用节点的任务, 包括出港箱的接收、堆存、装船, 进港箱的卸船、堆存、交付, 空箱的交接、保管、维护等均需在集装箱码头堆场完成。集装箱码头在日常运行过程中, 可能受各种因素影响而出现“翻箱”问题, 可通过构建数学模型的方式加以优化。

2. 集装箱码头内涵简析

2.1. 集装箱码头的特点和功能

2.1.1. 集装箱码头的构成

在经济全球化的浪潮下, 跨国贸易的规模不断扩大, 国与国之间的商品进出口数量、成交总额均呈现不断增加的趋势。在诸多商品交通运输方式中, 海运成本低、一次性运输量大, 故已经成为国际贸易中应用范围最广泛的交通运输方式。采用海运方式输送商品时, 一般将商品放置于集装箱之中。由此催生了集装箱码头——专用于集装箱船舶停靠并装卸集装箱。作为集装箱运输过程中的水路及陆路运输的连接点, 集装箱码头时至今日已经成为集装箱“多式联运”的枢纽。一般来说, 集装箱码头会设有泊位、集装箱堆场、控制室、闸口、仓库、集装箱装卸专用机械设备[1]。

2.1.2. 集装箱码头的功能

集装箱码头的核心职能集中在三个方面: 其一, 作为整个集装箱运输系统的“集散中心”; 其二, 为船舶卸下的集装箱提供专用堆存场所, 为转换集装箱的运输方式提供缓冲区域; 其三, 如上文所述, 作为水路集装箱运输及陆路集装箱运输的衔接点及枢纽。除了上述三项基础职能之外, 在现代物流发展的过程中, 集装箱码头的功能正在不断增加, 可在其中设置分拨中心、配送中心、流通加工中心, 进而使集装箱码头集仓储、装卸、包装、运输、加工、配送、信息处理等物流相关增值服务于一体, 满足各方的需求[2]。

2.2. 集装箱码头的基本布局

当前, 集装箱码头的基本布局如下: 其一, 选择岸壁线达到一定长度的岸边区域修建泊位, 供船舶停靠并方便装卸集装箱。现阶段, 全球范围内的集装箱码头泊位的长度通常设置在 300 m 以上。其二, 将从码头岸壁线到码头堆场前方的区域设置为“码头前沿”。该区域一般设置吊装集装箱的设备(如装卸桥等), 也是集装箱船舶装卸作业不可或缺的区域。比如将集装箱向船舶运输时, 需使用拖车, 将集装箱从堆场或者闸口运输到码头前沿, 之后使用集装箱装卸桥, 将之转移到船舶上。此外, 码头前沿还有可

能大批量堆放集装箱船舶盖。因此, 码头前沿必须具有足够的宽度。若场地较为狭窄, 大概率会影响集装箱装卸作业效率。

其三, 集装箱堆场作为集装箱码头的核心区域, 主要用于临时堆放集装箱。将在下文作重点论述。

2.3. 集装箱码头堆场的特点和功能

2.3.1. 集装箱码头堆场的构成和布局

从集装箱船舶卸下的集装箱, 或是即将装船的集装箱都会暂时存放在集装箱码头堆场中[3]。因此, 堆场的主要功能是, 与码头前沿、码头闸口围绕集装箱展开“互动”。具体的布局为: 其一, 全球范围内, 集装箱的尺寸相对统一, 故为了提高码头堆场堆放集装箱的容量, 避免出现混乱, 通常会按照集装箱的尺寸, 在堆场画出多个足以放置集装箱的“长方形格子”, 这便是“堆场位”且均具有独立编号(堆场位号)。其二, 为了方便查找集装箱、指引集装箱装卸及运输人员迅速赶赴对应位置, 堆场位号的设置存在一定的科学性——一般是6位数字, 从左到右两两数字分别代表堆场位的列号、行号、层号。其三, 一个堆场往往被分割成多个“箱区”, 每一个“箱区”内均设有多个“贝位”, 每一个“贝位”中均含有多个“箱位”, 可通过“重叠”的方式, 堆放多层集装箱, 从而提高单位堆场土地的利用率。

2.3.2. 集装箱码头堆场的主要功能及分区

集装箱码头堆场的主要功能包括交接集装箱、检验及维修集装箱、临时堆存集装箱、保管集装箱等[4]。为有效支撑并满足上述功能, 需在堆场建设完善的货运保障机制。堆场具体的布局如下: 堆场一般需要设置在码头主干道两侧且尽量靠近码头前沿。这样设置的考量是: 其一, 尽量提高交通运输的便捷性; 其二, 能够对干道两侧的排水、电照通讯等硬件设施进行充分利用。在此基础上, 集装箱码头的闸门一般同时作为堆场的大门, 应设置在靠近道路的一侧。为提高堆场进出的便捷性, 确保在发生火灾等险情时, 消防车辆可畅通无阻, 需以闸口作为起始点, 之后在堆场内设置多条作业通道, 首尾相连形成环形通道, 可解决诸多需要。

现代集装箱码头堆场的分区应该包含重箱堆存区、空箱堆存区、冷藏箱及特种箱区、拆装箱区、查验区、维修保养区、停车区等。

3. 集装箱码头堆场运行过程的数学模型建构综合分析

3.1. 集装箱码头堆存过程

围绕集装箱码头堆场建构数学模型的目的是, 优化堆场的结构布局, 以提升堆场的综合运行效率。基于此, 应首先对集装箱码头堆场的基础构成原理、堆存过程, 即堆场的日常运转流程进行梳理。如上文所述, 集装箱码头堆场一般会按照集装箱的尺寸(以长度为主), 被划分成多个小型长方形场地, 并被标注成“块”、“街”、“箱区(以下统一以‘箱区’表示)”。每一个箱区的长边(即长方形地块的“长”)的TEU长度被称为“贝”; 箱区短边的TEU宽度通常以“排”或“行”表示。每个“贝”中的“一排”构成一个“栈”或一个“垛”。一个“栈”或“垛”的垂直方向上可以堆放多层集装箱, 每一个“栈”或“垛”中的一层空间便是一个“箱位”。集装箱存放在堆场或从堆场取出时, 需要按照指挥中心工作人员的指引, 首先根据编号前往集装箱所在区域, 之后将集装箱吊装进或吊出箱位, 如此便可完成常规作业。

3.2. 集装箱码头堆场的“翻箱”问题及产生原因

3.2.1. “翻箱”问题

在集装箱码头堆场规模、作业量较小的情况下, 堆场出现“翻箱”问题的概率较低。但近年来, 由

于国际贸易总量增加, 进出口商品量随之增大, 集装箱码头的整体吞吐量也在不断提升。全球多地的集装箱码头堆场数据显示, 一个“贝”中容纳的集装箱数量越多, 整体进出调度复杂程度便会越大, 出现“翻箱”事故或被迫进行翻箱应对作业的概率也会越大。

3.2.2. 引发问题的主要原因

理清引发“翻箱”事故的主要原因, 将相关信息用于建构集装箱码头堆场优化模型具有重要指导意义。具体而言: 其一, 不同类型船舶、航次的集装箱混合进场。其二, 某些船运公司临时改变了集装箱的航次或即将进出的目标港口, 导致码头必须对装卸船计划进行修改, 因准备不足而引发事故。其三, 不同重量级的集装箱被混合堆放。总体来看, 集装箱码头堆场的“翻箱”存在主动行为和被动行为, 无论是哪一种类型, 发生概率都应尽量降低。为实现这一目标, 需对集装箱码头堆场空间的设置情况、空间资源的利用进行优化, 这是建构模型的核心原因。

3.3. 集装箱码头堆场空间资源优化模型的综合建构分析

3.3.1. 模型建构的假设描述

结合国内外集装箱码头堆场运转期间的现实问题, 在建构优化数学模型的初期, 应首先确定基础假设条件, 否则建构的模型不具有实际意义, 得出的结论也没有较高的参考性。具体的假设描述主要集中在以下六个方面: 其一, 设定翻箱作业只能在同一个“贝”中开展。相关考量是, 确保堆场机械设备运转时具有充足的便利性且能够保证操作安全。其二, 在开始提箱作业时, 相关“贝”内的初始堆码状态应该是已知的, 即需要提起的集装箱具体堆放在哪一个具体位置的信息必须处于已知状态。其三, 提箱作业开始前, 相关“贝”内涉及的集装箱的提起作业顺序、船舶的配载计划同样应该是已知的。其四, 在提箱作业过程中应遵循一个原则——对应“贝”不应接纳新的集装箱, 即只允许原“贝”内集装箱外提, 拒绝入内堆放。其五, 每一个“贝”内堆放的集装箱种类应该是同一种, 不得混淆。其六, 同一个“贝”内的集装箱只能来源于同一条船舶, 这是避免混淆的另一个重要前提条件。

在提箱作业的顺序已经得到确定之后, 为确保后续模型建构时具有较强的直观性, 需将“贝”内原本堆放的集装箱赋予特定的“顺序号”。赋予原则是: 集装箱提走的顺序越靠前, 其对应的顺序号便越小。此外, 每一个“贝”内的集装箱顺序号都具有唯一性, 不得重复赋予。如此一来, 每一个集装箱都有特定的标识, 基于模型进行优化分析时, 直观性会更强。比如在一个“贝”内, 对应的地面标识区域共画出了 4 个长方形, 设定每一个长方形竖向上空间内, 最多可以堆放 4 层集装箱。因此, 该“贝”的集装箱最大容纳数量为 $4 \times 4 = 16$ 个。如果“贝”内的某个位置现存集装箱, 则该位置便可以集装箱将要移出的顺序赋予顺序号, 没有放置集装箱的位置统一赋予“0”编号。如一个“贝”内, 第一列现有两个集装箱, 最下方的集装箱需要在第 4 顺位移走, 次上方的集装箱需要在第 2 顺位移走, 则该列集装箱的总体编号便是 $s_1 = (4, 2, 0, 0)$ 。第二列现有三个集装箱, 按照整体移出顺序, 自下而上分别赋予顺序号 1、8、6, 则第二列集装箱总体编号便是 $s_4 = (1, 8, 6, 0)$ 。可见, 若要按照编号顺序移出集装箱, 则第二列最下方的集装箱需要在第一顺位移走, 故需对该列上方编号为 6 和 8 的两个集装箱首先进行“翻箱”作业。需要考虑的重点内容是: 在按照顺序移出集装箱的过程中, “翻箱”作业量越少越好。因此, 在移动集装箱时, 需提高“非当前移动顺位集装箱的放置科学性”, 以达到降低“翻箱”作业量的目的。

3.3.2. 数学模型的建立

明确优化数学模型的建构核心原理之后, 需设定多个条件, 从而逐渐推导出集装箱移动最佳方案。模型中必须具备的指标项如下: 其一, 以 N 表示目标“贝”在初始状态下, 现有的集装箱的数量。其二, 以 r 表示一个“贝”内总计“栈或垛”的数量。其三, 以 s_i^k 表示“贝”内 i 栈(垛)编号为“ k ”的集装箱

被提走后, i 栈当前的集装箱存量状态。其四, 以 s^k 表示集装箱 k 被提走后, 整个“贝”当前剩余集装箱的状态。其五, 以 a^k 表示将序号为 k 的集装箱移走时采取的行动。其六, 以 $h(a^k/s^{k-1})$ 表示在“贝”的状态可以用 s^{k-1} 表示的情况下, 采取 a^k 行动时必须执行的翻箱作业数量。其六, 以 $F(s^k)$ 表示在“贝”处于 s^k 的状态下, 取走“贝”内剩余 $N-k$ 个集装箱时, 所需的最小翻箱作业量。

明确上述六个重要指标以及相互之间的对应关系后, 模型的整体架构便宣告搭建完成——希望通过建构模型而解决的集装箱码头堆场集装箱优化移出问题可以经由以下公式完成描述:

$$F(s^0) = \min_a [h(a^1/s^0) + F(s^1)] \quad (1)$$

公式(1)表示, “贝”原本的状态如果是 s^0 , 那么经过动作 a^1 之后, “贝”当前的状态会转化为 s^1 。按此规律, 该数学模型可基于分支定界法进行深度解释。

3.3.3. 分支定界法的应用

在数学建模领域和计算机编程领域, 分支定界法可被形容为“在问题的解空间树上搜索问题”[5]。这种方法与回溯分析法的区别在于, 可基于“广度优先”或是“最小耗费优先”的原理, 完成对解空间树的搜索。在此基础上, 分析过程中涉及的每一个“活结点”有且只有一次机会可以被转换为扩展节点[5]。将此种方法运用于集装箱码头堆场“翻箱”作业优化模型分析的主要作用是: 可以对从当前堆存状态进入下一堆存状态中的优先级进行定义。比如一个“贝”当前集装箱的状态可以表示为[(1, 3, 0, 0), (2, 0, 0, 0)], 那么经过梳理后, 预期出现的下一阶段的集装箱状态为[(0, 0, 0, 0), (2, 3, 0, 0)], 或是[(0, 0, 0, 0), (2, 0, 0, 0)]。可以看到, 第二种预期的效果优于第一种, “翻箱”作业量更少, 故应该选择第二种方案。

3.3.4. 集装箱码头堆场空间资源模型的深度优化

上文对集装箱码头堆场空间资源优化模型的建构过程、在尽量降低“翻箱作业量”的情况下将目标集装箱从堆场特定区域内取出的过程进行了介绍。没有涉及的内容是: 集装箱码头堆场空间大, 同一个“贝”中的一个或多个“垛”中可能堆放多个集装箱且当前需要提取的集装箱被“包裹”在其他多个集装箱之中。如果按照上述算法原理提取集装箱时, 作业量依然较大。因此, 需要进一步对模型进行优化, 从而找到在更加复杂环境下顺利取出集装箱的方法。

如图1所示。所有3行×4列的方格均为集装箱码头堆场内的同一个“贝”。最上方的“贝”的集装箱堆放状态是, 该“贝”按照自下向上、自左向右的顺序, 最下面、最左面的“垛”现堆放3号集装箱, 最下面中间的“垛”现堆放7号集装箱, 最下面、最右面的“垛”现堆放2号集装箱; 次下方最左面、中间、最右面三个“垛”现堆放的集装箱数量标号为1号、5号、4号; 次上方、最左面的“垛”现堆放6号集装箱。相关要求是, 集装箱的标号顺序代表提取优先级, 标号越小表明提取与优先级越高。无论提取集装箱的控制方法先进到何种程度, 一个核心原理永远无法改变——如果目标集装箱上方存在其他集装箱, 则必须首先将这些“压在上方的其他集装箱”全部移走, 之后方可提取目标集装箱。于是按照图1中同一个“贝”内的集装箱初始状态堆放格局, 若要将标号为“1”的集装箱提走, 则必须将标号为“6”的集装箱移走。此时还应遵循另一个原则——“让道”的集装箱不能随意放置, 而是应该放在其他“垛”内。于是将6号集装箱提起后, 应该放在图1中 N_{11} 、 N_{12} 表格所显示的位置, 表明6号集装箱提起之后, 可暂时存放的位置有两个。针对这两个位置应该如何选择, 取决于1号集装箱提取之后, 下一个需要提取的集装箱的位置。根据集装箱初始标号位置可知, 如果按照 N_{12} 的方法, 将6号集装箱放置于次上方、最右面的“垛”, 那么将会在2号集装箱上方已有4号集装箱的情况下, 进一步增加一个集装箱, 在提取2号集装箱时必定会增大工作量。因此, 需按照 N_{11} 呈现出的效果安置6号集装箱。以此类推, 按照这种思路, 可有效降低“重复提取某个集装箱”行为的发生率, 最终使集装箱提取作业

得到简化。

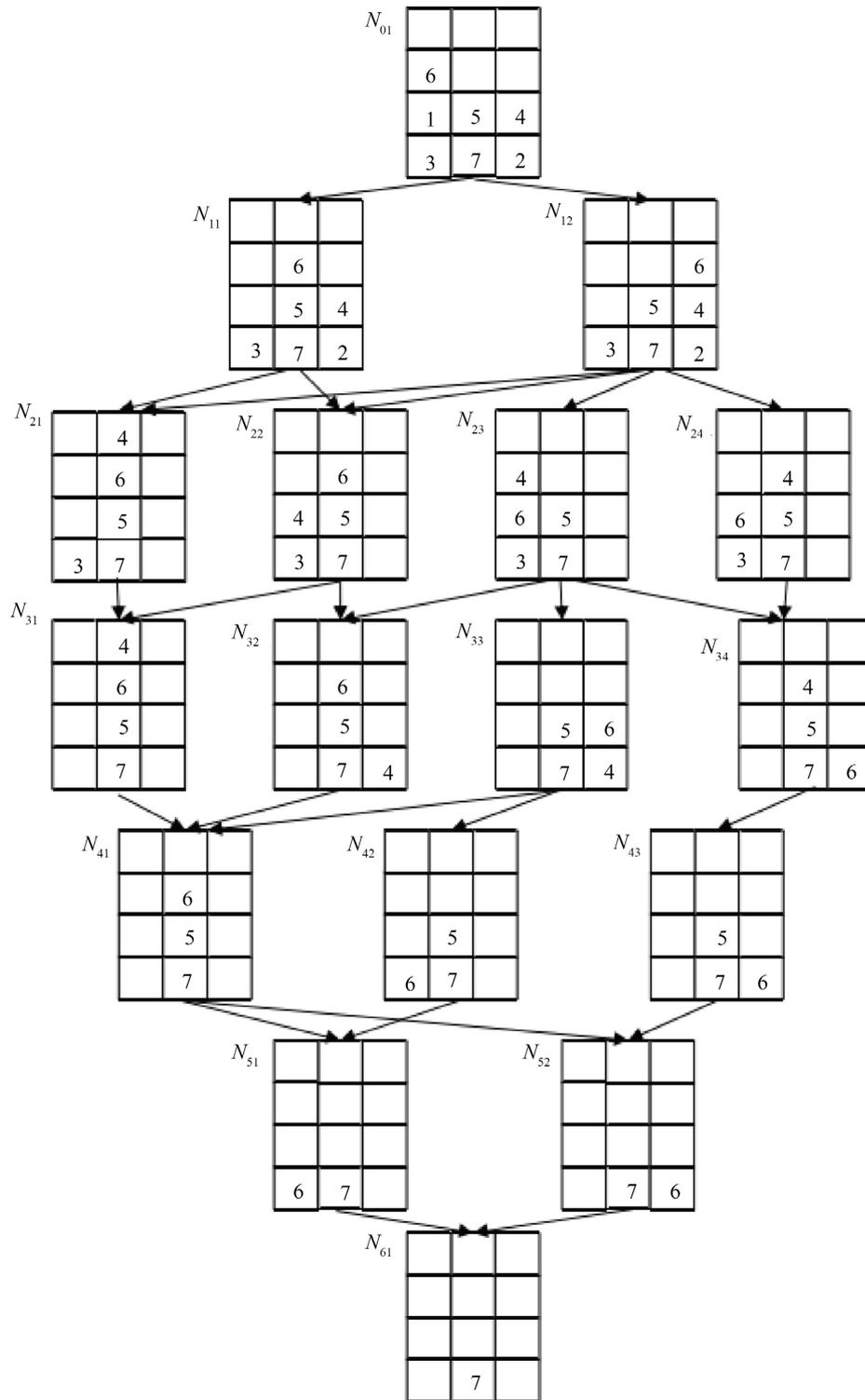


Figure 1. Extraction sequence model of target containers with a large number of containers in the same “shell”

图 1. 同一“贝”内集装箱数量较多时的目标集装箱提取顺序模型

总体而言, 针对集装箱码头堆场开展集装箱提取作业之前, 需以“贝”作为单位, 围绕“贝”内集装箱的提取顺序构建行列模型。在根据不同集装箱的转移、临时放置位置、作业量完成模拟之后, 可找出“最优解”, 从而降低作业量, 达到提高工作效率的目的。

4. 结语

综上所述, 在建构集装箱码头堆场数学优化模型之前, 需要对集装箱码头堆场的功能、运行特点、日常运转期间常见的问题以及引发原因等进行全方位、系统性地了解。在此基础上, 分析出各要素之间的关系, 围绕相关问题提出“假设性描述”, 即“XX问题的本质可被视作XX”, 之后对分支定界法进行综合应用, 便可完成集装箱码头堆场数学模型的建构, 有助于切实解决问题, 提高集装箱码头堆场的运转效率。

参考文献

- [1] 舒帆, 肖攀, 叶军. 集装箱码头堆场全自动轨道式起重机调度控制系统[J]. 集装箱化, 2022, 33(6): 12-15+25.
- [2] 彭云, 陈磊, 李相达, 等. 自动化集装箱码头堆场箱区布置及交换区车道配置仿真[J]. 上海海事大学学报, 2021, 42(3): 1-7+90.
- [3] 唐波, 高仕博, 张聪, 等. 智能感知技术在集装箱码头堆场智能装卸中的应用[J]. 港口科技, 2021(8): 1-6+12.
- [4] 李想. 集装箱码头海铁共堆场下的“堆场-铁路”作业调度优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [5] 曾庆成, 吕明蔚. 集装箱码头堆场与港前铁路中心站协同调度模型[J]. 中国航海, 2020, 43(4): 129-134.