



# 基于仿真建模的煤炭码头堆场的 网格化及优化策略研究

刘园香, 周 强

(武汉理工大学物流工程学院, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 堆场的优化是煤炭码头的重要问题。针对堆场的优化提出了两种新型的堆存策略, 采用系统形式化描述, 将连续空间的堆场进行了网格化逼近, 建立了煤炭码头堆场网格化的数学模型。再根据离散事件系统建模与仿真, 建立了煤炭码头物流系统网格化仿真模型, 并结合实际专业煤炭码头的仿真试验, 研究了各优化策略对码头作业效率影响情况并验证了堆场优化策略的工程适用性。

**关键词:** 码头; 网格化; 仿真建模; 堆场优化

中图分类号: U 653.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0101-05

## Yard stockpiling strategy in yard gridded coal terminal based on modeling and simulation

LIU Yuan-xiang, ZHOU Qiang

(College of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** The optimization of the yard is an important issue of the coal terminal. The paper presents two new stockpiling strategies which can improve the stockpiling efficiency for the yard optimization, with the formal description of the system and gridding the continuous space of the yard, then establishes a mathematical model for the coal terminal of gridded yard. According to the modeling and simulation of discrete event systems, we establish the gridded simulation model of the logistics system of coal terminal. Combining with the emulation test of practical professional coal terminal, we study how the new optimized stockpiling strategy affect the terminal's operation. Meanwhile, we validate the novel optimized stockpiling strategy of engineering applicability.

**Key words:** terminal; gridded; modeling and simulation; yard optimization

随着我国经济的高速发展, 各大煤炭码头的竞争愈演愈烈, 而各大煤炭码头的规模已趋向饱和, 为了提高各自的核心竞争力, 有效地利用有限的堆场资源是码头管理者非常关心的问题。过去研究堆存策略都是遵循流程最短原则, 对堆场的刻画都比较粗糙, 并没有从提高堆存效率方面来优化堆存策略<sup>[1]</sup>。本文从堆场优化的角度提出了两种新型堆存策略, 同时采用系统形式化描述语言和网格化理论, 建立码头物流系统堆场网格化数学模型, 在此基础上, 结合离散事件动态系统

建模与仿真, 建立了堆场网格化仿真模型, 并对各优化策略进行仿真试验对比分析, 深入研究了最大最小空间剩余堆场堆存策略的优越性以及和管理者的工程实际适用价值。

### 1 堆场优化策略分析

过去的煤炭码头生产物流系统的仿真模型对堆场的处理很粗糙, 将每一条分堆场分成固定大小、位置和数量的垛位, 码头管理者对堆场的管理策略很单一, 遵循流程最短原则随机堆放,

收稿日期: 2012-09-25

作者简介: 刘园香(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为港口物流系统建模与仿真。

即从各条形分堆场中，随机搜寻一空闲区域足够堆放靠泊船舶的煤炭。没有考虑到堆场的合理利用，所以提出以下两种新型的提高堆存效率的策略具有重要意义。

1) 最小空间剩余法，即从各条形场地中，搜寻某一空闲连续区域堆放靠泊船舶的煤炭，选择连续空间最大的一片区域进行堆放，使得堆放后的剩余的各块连续空间相对而言最小。

2) 最大连续空间剩余法，即从各条形堆场中，搜寻某一空闲区域堆放靠泊船舶的煤炭，选择连续空间最小的一片区域进行堆放，使得堆放后的剩余的各块连续空间相对而言最大。

这两种堆存策略的实施的前提是堆场垛位的大小、位置、数量都是实时变化的。鉴于堆场网格化仿真模型对堆场的精细描述，垛位数和垛位

的大小随着进场煤炭的信息实时变化，从结构和作用看，显然能够描述上面两个堆场管理策略的实施过程和堆场细节变化，所以这两种堆存策略具有一定的可行性和适用性。为了深入研究各新型堆存策略对码头作业效率和堆存效率的影响，需要建立基于堆场细化网格的仿真模型，对各种堆存策略分别进行试验分析。

## 2 专业煤炭码头堆场网格化仿真建模

### 2.1 堆场网格化描述

所谓堆场网格化就是将码头各条形堆场细分为连续的、一定容量的小矩形网格（图1）。网格的大小与堆场面积、货种及堆场设备大小有关，分隔带即垛间距按照海港总平面规划设计，取为一辆推爬机行走的宽度为3~5 m<sup>[2]</sup>。

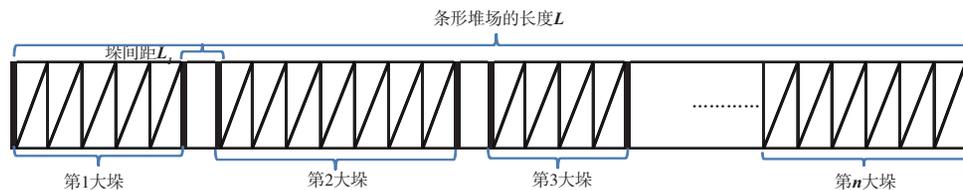


图1 堆场网格化样式

网格化方法如下<sup>[3]</sup>：

- 1) 取网格宽度为码头堆场的最小垛间距 $L_1$ 。
  - 2) 确定网格数量 $m$ ：
- $$m=L/L_1 \quad (1)$$

式中： $L$ 为堆场的长度。

- 3) 根据码头堆场的堆存能力确定单个网格容量 $Q$ ：

$$Q=T/m \quad (2)$$

式中： $T$ 为每一条场地的堆存能力。

### 2.2 基于堆场网格化的形式化数学描述

对于离散事件动态系统，采用系统的形式化描述可建立导出煤炭码头动态和过渡过程行为的模型。根据系统的形式化描述方法<sup>[4]</sup>，对于煤炭码头物流系统，可以将火车运到港的煤炭作为该系统的输入，建立堆场网格细化后煤炭码头的形式化模型 $\langle T, X, \Omega, Q, Y, \delta, \lambda, S \rangle$ ，其中 $T$ 表示时间集； $X$ 表示输入集； $\Omega$ 表示输入段集； $Q$ 表示内部状态集； $Y$ 表示输出集； $\delta$ 表示状态转移函数； $\lambda$ 表示输出函

数； $S$ 表示系统所选用的堆存策略函数。信息的输出则作为系统的输出，因此不对 $Y, \lambda$ 作出定义。

在建立模型时对煤炭码头物流系统模型作出如下假设：

- 1) 假设某煤炭码头堆场有 $n$ 行 $m$ 列，堆场网格化后用0-1矩阵表示堆场的分布情况，如果堆场每行网格数目不相等，则用1补充至网格数目相等。

- 2) 假设堆场某一个网格的容量为 $(R_{ij})_{n \times m}$ ， $R_{ij}$ 表示堆场第 $i$ 行第 $j$ 列的网格的最大堆存量；堆场堆放的煤炭总共有 $k$ 个煤炭品种。

- 3) 假设堆场某个网格的闲忙状态用 $(Z_{ij})_{n \times m}$ 表示， $Z_{ij}=1$ 表示网格为空， $Z_{ij}=0$ 表示网格不为空。

- 4) 假设 $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots, A_t$ 为堆场中能满足船舶煤炭装载需要的连续的 $t$ 块空闲区域， $A_k=\{Z_{i,l_k}, Z_{i,l_{k+1}}, Z_{i,l_{k+2}}, Z_{i,l_{k+3}}, \dots, Z_{i,l_{k+r_k}}\}$ ，其中 $k=1, 2, 3, \dots, t, r_k$ 为各块连续空区域的连续网格数， $l_k$ 为第 $k$ 块连续空区域的第1个网格所在的列号。

- 5) 堆场网格后煤炭码头形式化模型为

$\langle T, X, \Omega, Q, \delta, S \rangle$ 。

$R$ 表示实数集合,  $T$ 则表示连续时间系统。

$S$ : 定义元素  $S = \{S_1, S_2\}$ , 其中  $(S_{1_{ij}})_{n \times m}$  是采用最大空间剩余的堆存方法进行堆存的堆场目标网格,  $S_{1_{ij}} \in A_K$  且  $S_{1_{i,j+t}} = Z_{i, l_{k+t}}$  满足  $\min\{r_k\}$ , 且  $t=0, 1, 2, 3, \dots$ ,  $r_k: (S_{2_{ij}})_{n \times m}$  用最小空间剩余的堆存方法进行堆存的堆场目标网格,  $S_{2_{ij}} \in A_K$  且  $S_{2_{i,j+t}} = Z_{i, l_{k+t}}$  满足  $\max\{r_k\}$ , 且  $k=0, 1, 2, 3, \dots$ 。

$X$ : 定义元素  $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ , 其中,  $x_1$  为煤炭种类编号,  $x_1 \in \{1, 2, 3, 4, 5, \dots, k\}$ ;  $x_2$  为煤炭数量,  $x_2 \in \{0, T_{\max}\}$ ;  $T_{\max}$  为海船最大装载量,  $(x_{3_{ij}})_{n \times m}$  为输入堆场目标网格,  $(x_{3_{ij}})_{n \times m} = \begin{cases} S_{1_{ij}} & \text{其中 } S_{1_{ij}} \in A_K, \text{ 满足 } \min\{r_k\} \\ S_{2_{ij}} & \text{其中 } S_{2_{ij}} \in A_K, \text{ 满足 } \min\{r_k\} \end{cases}$  满足  $\sum \sum x_{ij} = N$  且  $x_{ij}=0$  或  $1$ ,  $N$  为所需要的堆场的网格数量。若  $x_{ij}=1$ , 则其目标网格位置为第  $i$  个条形堆场第  $l_k+t$  个网格 ( $k=0, 1, 2, \dots, N$ )。  $x_4$  为可获取时间,  $x_4 \in R$ ;  $x_5$  为输入速度。  $X$  是一个多元组合。

$\Omega$ : 某一个时间段系统的输入集合, 所有的输入段构成了  $(X, T)$ , 因此输入段集  $\Omega$  是  $(X, T)$  的一个子集。

$Q$ :  $Q$  为堆场状态集, 元素  $q = (q_1, q_2)$ 。  $q_{1_{ij}}$  表示第  $i$  行第  $j$  列堆场网格所堆存的煤炭种类, 若  $q_1 \in \{0, 1, 2, 3, \dots, k\}$ , 若  $q_1=0$  则表示该堆场网格为空。  $q_{2_{ij}}$  表示第  $i$  行第  $j$  列堆场网格堆存煤炭的数量。  $q_{2_{ij}} \in \{0, R_{ij}\}$  其中  $i=1, \dots, n, j=1, \dots, m$ 。

$\delta$ :  $\delta$  为输入段集  $\Omega$  作用在堆场状态  $Q$  上的状态转移函数,  $\delta = \delta_1 \times \delta_2$ 。

假如输入段集为  $(p_1, p_2, p_3, \dots, p_r)$ , 其中,  $p_i = (p_{1_i}, p_{2_i}, p_{3_i}, p_{4_i}, p_{5_i})$ , 堆场状态为  $q = (q_1, q_2)$ 。 定义运算:

$$\forall A \vee B = \begin{cases} a_{ij} & \text{如果 } b_{ij}=0 \\ b_{ij} & \text{如果 } a_{ij}=0 \\ a_{ij} \times b_{ij} & \text{如果 } a_{ij} \neq 0 \text{ 且 } b_{ij} \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $A, B$  为  $n \times m$  矩阵。

定义函数  $\sigma$ :

$$\sigma(X, T) = \begin{cases} (t - x_4)x_5x_3 & \text{如果 } t < \frac{x_2}{x_5} + x_4 \\ x_2x_3 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中  $x$  是  $X$  集合中定义的元素。

$$\text{设 } \delta_1(q, p) = \sum_{i=1}^s q_i \vee (p_i, p_3), \delta_2(q, p) = q_2 + \sum_{j=1}^s \sigma(t, p_j) \quad (5)$$

$\delta = \delta_1 \times \delta_2$  即为煤炭码头形式化数学模型的状态转移函数。  $(6)$

### 2.3 基于堆场网格化的仿真模型

建立比较具体化的数学模型是利用计算机仿真技术进行仿真建模的基础。以堆场网格化数学模型为基础, 根据离散事件动态系统建模理论, 以出口型煤炭码头为例, 在国际先进的仿真软件 WITNESS 的仿真平台下建立堆场网格化仿真模型。

根据专业煤炭码头装卸工艺系统内部的结构和相互关系分解成具有不同功能与特点模块, 这些模块既相互独立又相互联系。出口型煤炭码头仿真模型的主要模块如下:

- 1) 计划管理模块: 负责船舶计划的管理。
- 2) 信息管理模块: 记录系统各组成元素的关系和实时状态, 为流程判断和执行提供支撑信息。
- 3) 进场流程模块: 判断火车进场条件, 生成进场流程信息, 执行进场流程, 并实时地将数据传递给信息管理模块。
- 4) 堆场作业模块: 负责制定合适的堆存策略, 根据船舶到港信息, 为不同品种的煤炭分配堆存空间, 判断煤炭进出场条件, 并实时地将数据传递给信息管理模块。
- 5) 装船流程模块: 判断船舶靠泊条件并控制船舶靠泊, 生成装船流程信息, 执行装船流程, 并实时地将数据传递给信息管理模块。

6) 数据统计模块: 统计各机械利用率、堆场日占用率、吞吐量、船舶在港时间、船舶等待时间等, 并通过饼图和直方图等方式显示出来。

模型首先按照海船到达时间间隔主动生成海船计划, 并将其推入海船缓冲区进行排队等待, 此时生成火车计划, 当进场条件满足时, 进场流程模块执行火车计划, 同时堆场作业模块通过智能函数搜索堆场根据采用最大剩余空间法或最小剩余空间法选取合适的堆存位置, 完成相应煤炭的堆放。靠泊条件满足后执行海船靠泊作业, 靠

泊作业完成后船舶计划推到计划管理模块相应的缓冲区，并分解成出场装船计划，当相应的煤炭出场条件满足时装船流程模块便开始执行装船计

划，完成装船作业。模型就是通过这种方式仿真出煤炭从火车到堆场，再从堆场到船舶的全部过程（图2）。

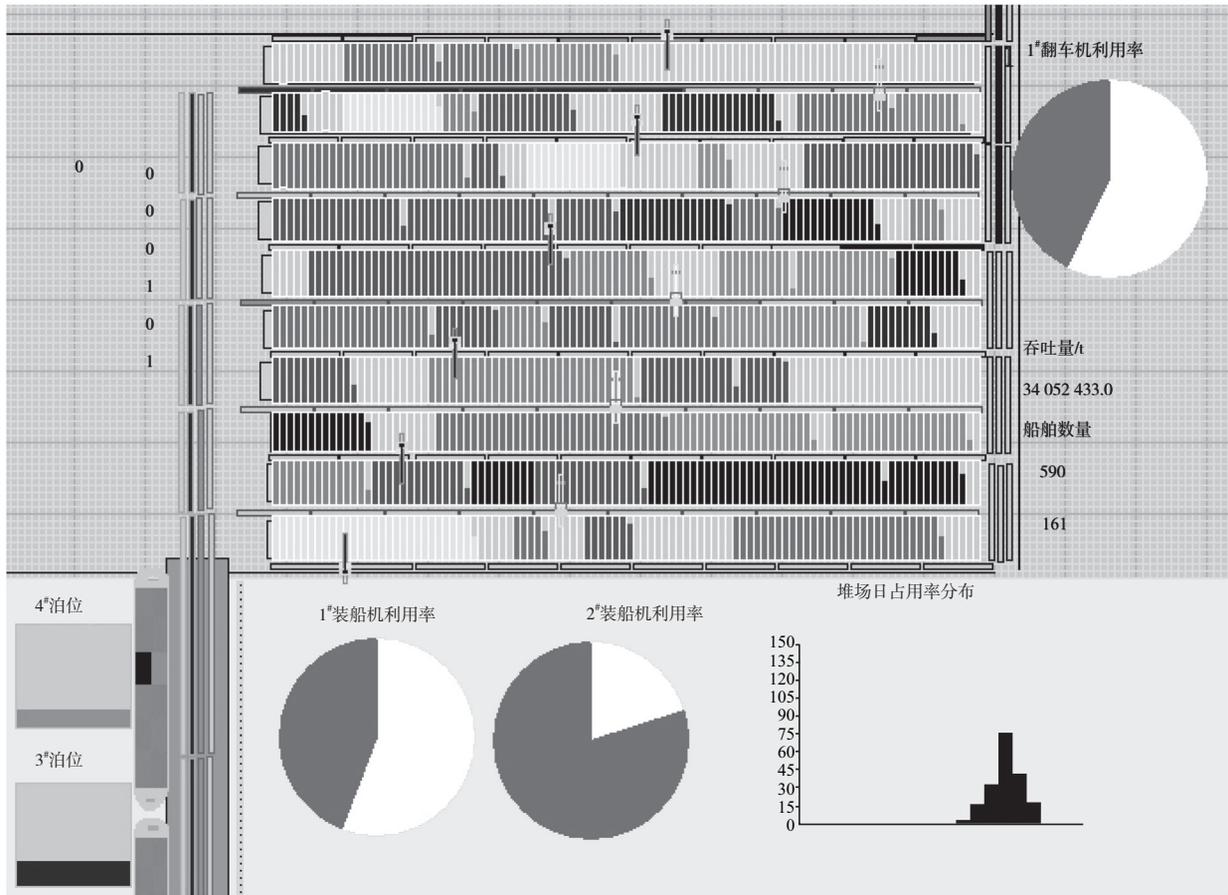


图2 某出口型煤炭码头堆场网格化仿真模型

图2的堆场网格化模型中，几乎被占用的网格都是满的，只要某一网格的货物运出，则网格的状态就及时发生改变，实时反映垛位的状态变化，以便为将要进场的货物提供预分配空间，网格化模型拥有这样的结构机制和作用才使得它适用于来研究堆场的新型堆存策略。

### 3 基于堆场网格化模型的堆存效率研究

#### 3.1 仿真试验

结合国内某大型煤炭码头相关数据，通过堆场网格化仿真模型对3种不同堆存策略分别进行仿真数据对比分析。国内某大型煤炭码头有3台翻车机，作业能力为7 200 t/h,6进5出，进场线能力为7 200 t/h，出场线能力为8 000 t/h。6台7 200 t/h的堆料机，5台6 000 t/h的取料机，4个8 000 t/h的装

船机。10万和15万吨级泊位各1个，3.5万和5万吨级的泊位各2个，10条条形堆场，船舶到达时间间隔服从负指数分布。

仿真试验工况（各工况的边界条件一样）：

- 1) 试验工况1。火车根据船舶预定抵港时间，以一定提前期集港，提前期为4 d, 6 d 和 8 d，而船舶实际到达时间是以预定时间为均值的随机变量；仿真时间1 a，靠泊船舶的煤采用随机堆放的策略堆放到堆场。
- 2) 试验工况2。靠泊船舶的煤采用最大剩余空间堆放，其它同工况1。
- 3) 试验工况3。靠泊船舶的煤采用最小剩余空间堆放，其它同工况1。

#### 3.2 仿真试验数据分析

表1为3种堆存策略在不同堆存期下的仿真数据。

表1 3种堆存策略在不同堆存期下的仿真试验数据

堆存期/d	堆存策略	吞吐量/(万t·a <sup>-1</sup> )	堆场平均占用率/%		船舶等待时间/min		泊位平均占用率/%	
			均方差	平均值	均方差	平均值	均方差	平均值
4	随机堆放	8 039.86	15.82	78.42	16.32	3 249	16.42	82.72
	最小剩余空间	8 418.58	15.42	77.57	17.54	3 049	16.01	82.31
	最大剩余空间	8 634.96	20.33	76.60	17.88	2 222	17.21	80.89
6	随机堆放	7 956.10	14.56	79.52	16.20	2 571	14.44	82.66
	最小剩余空间	8 338.89	15.23	78.87	16.89	2 545	13.25	82.09
	最大剩余空间	8 505.08	15.47	77.67	18.24	2 461	13.87	81.06
8	随机堆放	7 715.03	15.24	79.98	16.20	2 452	14.44	82.42
	最小剩余空间	8 193.63	17.64	78.63	16.89	2 314	13.25	81.73
	最大剩余空间	8 474.21	20.45	78.01	18.24	2 208	13.87	78.98

从表1的试验数据可以看出,在相同的边界条件和参数输入下,随机堆放、最小剩余空间和最大剩余空间这三种策略中,采用随机堆放策略时煤炭码头年通过能力(即吞吐量)最低,采用最大剩余空间的堆存策略的码头年通过能力最高,两者相差约600万t/a。在相同的条件下,采用最大剩余空间方法的船舶等待时间较随机堆放的大幅度减少,堆场的占用率和泊位的占用率也有所降低。这样,码头的年吞吐量增加了,码头泊位和堆场的负荷反而减少了,最大程度地提高了堆场的堆存效率。这正是码头管理者期望达到的目标,在提高码头的通过能力具有一定的可行性。

由表1的仿真试验数据对比可知,针对某一种堆存策略而言,煤炭码头的年吞吐量随着堆存期的增加而减少,堆场的日占用率反而增加,这是因为随着堆存期的增加,在同一时间,堆场里的煤炭相对而言就偏多,使得堆场的占用率偏高,堆场的堆存能力不充裕。另外,随着堆存期的增加,堆场堆存策略对码头的年吞吐量影响更加明显,在堆存为4d时,采用最大剩余空间和随机堆放策略的年吞吐量相差600万t/a,但堆存期为8d时,吞吐量相差近800万t/a,所以,在堆场的堆存能力不充裕的情况下,堆存策略对码头的通过能力影响更加显著,堆场的堆存策略的优化显得至关重要,优先采用最大剩余空间的堆存策略,使堆存效率最大化。

#### 4 结语

本文从合理利用堆场有限资源的角度提出了

两种新型的堆场优化策略,通过系统形式化描述语言和网格化理论,建立码头物流系统堆场网格化数学模型,在此基础上,结合离散事件动态系统建模与仿真实论,建立堆场网格化仿真模型,并对新型堆场优化策略进行仿真试验对比分析。仿真试验结果表明,新型的堆存策略在提高堆存效率上具有一定的可行性,最大最小空间剩余法适用于堆场网格化的物流系统。最大空间剩余的堆存策略优于最小剩余空间和随机堆放策略,它可大幅度地增加码头的年吞吐量和码头的工作效率,同时减少了泊位和堆场的负荷,这样大幅度提高了堆存效率,改善了码头物流系统的堆场瓶颈问题,为码头管理者的决策提供可靠的依据,对堆场优化策略的研究分析具有较高的工程技术价值。

#### 参考文献:

- [1] Van Vianen T A, Mooijman D L, Ottjes J A, et al. Simulation based operational control of a dry bulk terminal[C]. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2012: 73-78.
- [2] 刘园香. 干散货码头堆场垛位随机动态过程与细化网格模型[J]. 水运工程, 2012(8): 52-71.
- [3] JTJ 211—1999 海港总平面设计规范[S].
- [4] 李云军. 封闭式堆场煤炭码头物流系统建模与分析[D]. 武汉:武汉理工大学, 2007: 25-29.

(本文编辑 武亚庆)