



专业化集装箱码头船舶柔性靠泊与岸桥动态调度的建模与仿真

李琳

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 船舶柔性靠泊和岸桥动态调度是当前专业化集装箱码头运作管理的主要模式。针对该模式的特点, 以上海洋山深水港四期工程为例, 应用 AutoMod 建立了集装箱码头船舶柔性靠泊与岸桥动态调度的仿真模型。通过仿真分析获得了设计方案的评价数据, 为决策提供参考依据。

关键词: 集装箱码头; 船舶柔性靠泊; 岸桥动态调度; AutoMod

中图分类号: U 656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0084-07

Modeling and simulation for vessel flexible berthing and crane dynamic scheduling of specialized container terminal

Li Lin

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The vessel's flexible berthing and crane's dynamic scheduling is the main operation and management method of specialized container terminal in current years. According to the characteristics of this method, a simulation model of vessel's flexible berthing and crane's dynamic scheduling is built by AutoMod, in which a case study is made on the fourth phase of Shanghai Yangshan Deepwater Port. Through simulation and analysis, we get the evaluation data of the design, which offer reference for the decision-making.

Keywords: container terminal; vessel's flexible berthing; crane's dynamic scheduling; AutoMod

随着经济全球化的不断发展, 集装箱运输在国际贸易中的地位越来越重要。为了充分利用码头岸线长度、提高码头设备利用率、缩短到港船舶的在港等待时间、提高码头通过能力, 越来越多的专业化集装箱码头将船舶柔性靠泊和岸桥动态调度作为运作管理的主要模式, 即根据实际到港船型, 实时地分配岸线长度和调度岸桥。

船舶柔性靠泊和岸桥动态调度是一个复杂的动态过程, 很难用确定性的数学方法准确地预测最终的效果。随着计算机仿真技术的不断发展,

在码头的设计过程中采用计算机模拟手段, 获取定量化和可视化的技术支持, 已成为国内外科学规划和设计码头的新途径。

与集装箱码头调度相关的计算机仿真研究取得了不少成果, 如蔡芸等^[1]针对集装箱码头固定泊位分配及岸桥调度问题, 建立了最小化总体船舶在港时间的仿真优化模型; 张煜等^[2]建立了泊位连续化动态调度模型, 并构造遗传算子, 通过 eM-Plant 实现了相应的仿真与计算; 杨春霞等^[3]引入了岸线利用率的概念, 分析了影响其合理取值的主要因素, 并通过仿真求得不同组合下的合理

收稿日期: 2014-09-09

作者简介: 李琳 (1979—), 女, 博士, 高级工程师, 从事港口工艺与机械的设计工作。

岸线利用率。

但是，在现有研究成果中，船舶柔性靠泊和岸桥动态调度相结合的研究相对较少，岸桥调度相对较为简化，多以岸桥数量上可用为主，较少考虑空间上岸桥是否可移动到位。基于此，本文针对船舶柔性靠泊和岸桥动态调度的特点，以规划中的上海洋山深水港四期工程为例，应用AutoMod建立了专业化集装箱码头船舶柔性靠泊与岸桥动态调度的仿真模型，并通过仿真与分析，获得设计方案的评价数据，为决策提供参考依据。

1 船舶柔性靠泊和岸桥动态调度的特点

传统的固定靠泊模式是根据对到港船型等参数的预测，将岸线长度划分为几个固定的泊位，船舶的靠泊就依据码头的泊位数进行安排，装卸设备的调配也较为固定。而随着集装箱运输的发展，到港船型呈多样化趋势，船长变化范围越来越大，这种分配模式就极易造成富裕岸线长度和空闲岸桥不能有效利用的状况出现，从而降低了码头的作业效率，造成不必要的资源浪费。特别是较为大型的专业化集装箱码头，这种现象尤为突出。

为了优化码头工艺、获得最大的经济效益，许多专业化集装箱码头开始打破原有泊位的概念，采用更为灵活的船舶柔性靠泊和岸桥动态调度模式，其特点是：到港船舶不再固定泊位，而是根据船型的长度为其分配满足靠泊条件的岸线，最大限度地利用码头岸线长度，同时，根据船型及各岸桥的状况合理地为其调配岸桥，使岸桥的调配空间更为灵活。

2 仿真模型的基本框架

针对船舶柔性靠泊和岸桥动态调度的上述特点，构建如图1所示的仿真模型基本框架，该基本框架包含3大模块：初始模块、决策模块和作业模块。

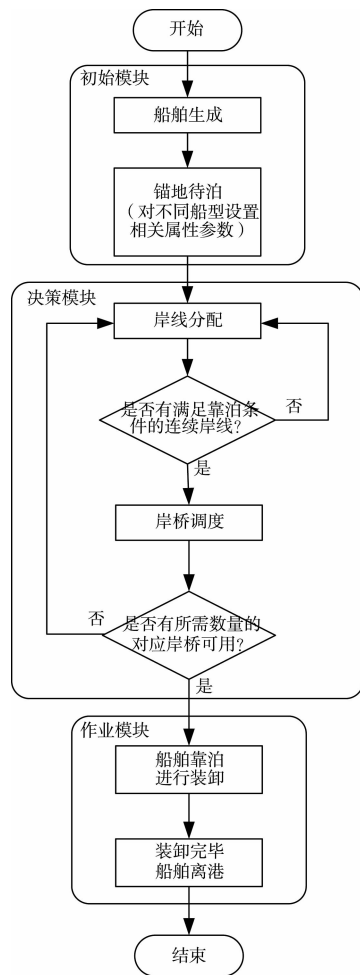


图1 仿真模型的基本框架

1) 初始模块。

初始模块主要用于生成各类到港船舶，并在锚地待泊时根据不同船型对进港船舶设置仿真所需的相关属性参数，包括船舶编号、单船装卸箱量、岸桥配备数量、船长以及靠泊富裕长度（满足船舶安全靠离作业和系缆要求）。

2) 决策模块。

决策模块是整个仿真模型的核心部分，包含岸线分配和岸桥调度两大内容，是船舶靠泊的两个前提条件。

岸线分配主要通过搜索算法检查是否有满足靠泊条件的连续岸线供到港船舶停靠。若有，则进入岸桥调度流程；否则到港船舶就会在锚地排队等待，继续搜索靠泊岸线。

岸桥调度主要通过搜索算法检查是否有所需数量的对应岸桥可用。若有，则调配岸桥、船舶

靠泊；否则到港船舶在锚地排队等待，重新进入岸线分配流程，继续搜索其他满足靠泊条件的连续岸线。

3) 作业模块。

作业模块主要用于根据靠泊船舶的装卸箱量及岸桥的装卸效率进行装卸作业。

3 案例描述

在基本框架的基础上，本文以规划中的上海洋山深水港四期工程为例，进行集装箱码头船舶柔性靠泊与岸桥动态调度的仿真建模研究。

根据规划，上海洋山深水港四期工程拟建总长度为 2 350 m 的专业化集装箱码头，水工结构全部按 15 万吨级集装箱船设计，配置 16 台岸桥，近期码头年设计通过能力 400 万 TEU。港区航线结构以远洋航线为主，同时沿海支线和长江支线运量持续较快增长，到港船型中除 5 万 ~ 15 万吨级的干线船外，还有大量的以 1 000 ~ 10 000 吨级为主力船型的支线船。设计代表船型见表 1。

表 1 设计代表船型

船舶吨级/ 万 DWT	船型主尺度/m				载箱量/TEU	说明
	总长	型宽	型深	满载吃水		
15	367	51.2	29.9	16.0	11 001 ~ 15 500	干线 水工结构 设计船型
12	367	48.2	29.7	15.5	9 501 ~ 11 000	干线
10	346	45.6	24.8	14.5	6 631 ~ 9 500	干线
7	300	40.3	24.3	14.0	5 651 ~ 6 630	干线
5	293	32.3	21.8	13.0	3 501 ~ 5 650	干线
1	141	22.6	11.3	8.3	701 ~ 1 050	支线
0.5	121	19.2	9.2	6.9	351 ~ 700	支线
0.3	106	17.6	8.7	5.8	201 ~ 350	支线
0.1	90	15.4	6.8	4.8	<200	支线

4 基于 Automod 的仿真建模

目前，国际上主要的物流系统仿真软件包括 Arena、FlexSim、AutoMod、Witness、eM-Plant 等。本文采用的 AutoMod^[4-5] 是美国 Brooks Automation 公司开发的一款较为成熟且应用广泛的物流系统

三维仿真软件，领域涉及制造系统、仓储系统、港口物流系统、机场物流系统、配送中心系统以及控制系统等。它主要由 AutoMod、AutoStat 和 AutoView 共 3 大基本模块构成，分别具有系统建模仿真、专业统计分析 & 三维动画场景制作的功能。

相较于其他仿真软件，AutoMod 对复杂系统的建模更具方便性、灵活性和可视性，它使用内置的、类似英语的自然法则来实现现实世界中各种复杂的控制逻辑；应用层次化建模的概念，对于一个大型系统可以分开建立独立的模型；直接建立三维仿真模型，无需额外的转换操作。

4.1 初始模块

整个仿真模型基于流程，由实体 (Load) 驱动运作。初始模块中，船舶实体 (Ship Load) 按一定统计分布生成，根据案例的设计代表船型，共设 9 类船舶实体，由属性变量 A_ShipType 定义。随后，各类船舶实体通过 move into 命令进入锚地待泊区 Q_Wait，并由 set 命令为其设置仿真所需的其他相关属性变量 (表 2)。

4.2 决策模块

1) 岸线分配流程。

岸线分配流程中，岸线以 m 为单位划分成 2 350 个单位资源，船舶实体根据如图 2 所示的算法依次对这些单位资源进行循环搜索。图 2 中，实线箭头表示船舶实体驱动的流程，空心箭头表示通过控制变量进行的各流程间的信息交流，各属性变量和全局变量的含义见表 3。循环搜索每隔 1 s 进行一次，直至找到连续个靠泊所需岸线长度的单位资源处于空闲状态。找到船舶靠泊可用岸线后，通过 clone 命令将一个船舶实体克隆到岸桥调度流程，启动对岸桥资源的搜索。岸桥调度流程搜索完毕后，通过控制变量 V_Dock 将岸桥调度结果反馈给岸线分配流程，以确定船舶靠泊装卸还是继续搜索其他满足靠泊条件的连续岸线。

表 2 各类船舶实体 (Ship Load) 的属性变量

船型/万 DWT	A_ShipType	船舶编号	单船装卸箱量	岸桥配备数量	船长/m	靠泊富裕长度/m
		A_ShipCode	A_Capacity	A_CraneNum	A_Length	A_Safe
0.1	L_ShipOne		150	1	90	12
0.3	L_ShipTwo		298	1	106	13
0.5	L_ShipThree		354	1 ~ 2	121	14
1	L_ShipFour	根据船舶实体产生顺序, 依次编号, 1, 2, 3, ……	750	1 ~ 2	141	15
5	L_ShipFive		2 000	3 ~ 4	293	30
7	L_ShipSix		2 500	3 ~ 4	300	30
10	L_ShipSeven		3 000	4 ~ 5	346	30
12	L_ShipEight		3 500	5	367	30
15	L_ShipNine		4 000	5	367	30

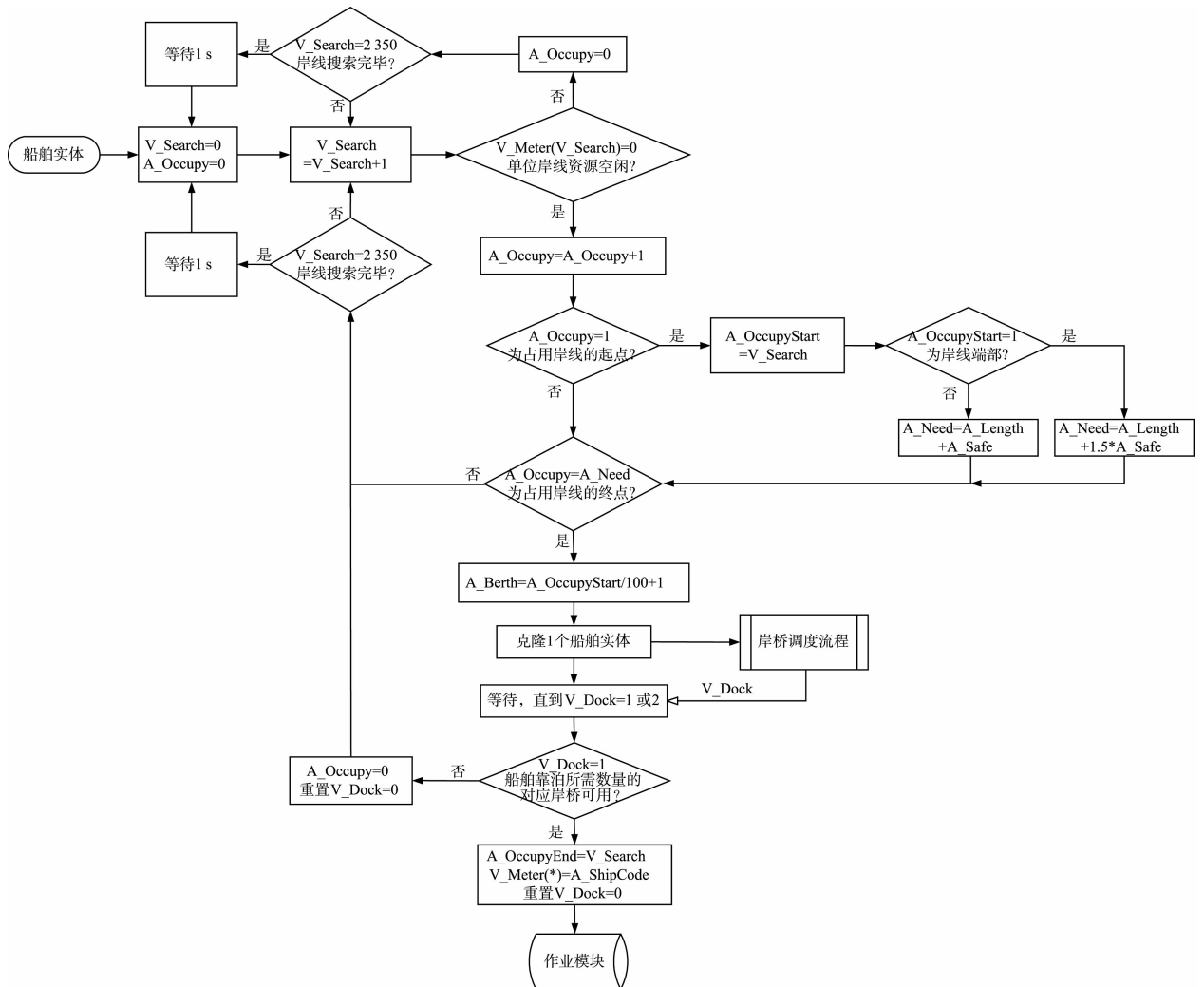


图 2 岸线分配流程算法

表3 岸线分配流程算法中的主要属性变量和全局变量

属性变量	含义	全局变量	含义
A_Occupy	船舶实际占用岸线长度	V_Search	岸线搜索变量 (按米搜索)
A_OccupyStart	占用岸线的起点位置	V_Meter (V_Search)	以米为单位的岸线资源占有状态: 0: 空闲; 其他: 对应船舶编号
A_Need	所需岸线长度	V_Dock	控制变量: 0: 重置; 1: 所需数量的对应岸桥可用; 2: 所需数量的对应岸桥不可用
A_Berth	泊位临时编号		
A_OccupyEnd	占用岸线的终点位置		

2) 岸桥调度流程。

岸桥调度流程通过岸线分配流程所克隆的船舶实体来启动。岸桥调度流程中, 船舶实体根据

图3所示的算法依次对岸桥资源进行搜索, 各属性变量和全局变量的含义见表4。这里, 船舶靠泊所对应的起始岸桥根据其靠泊岸线的起点来确定。

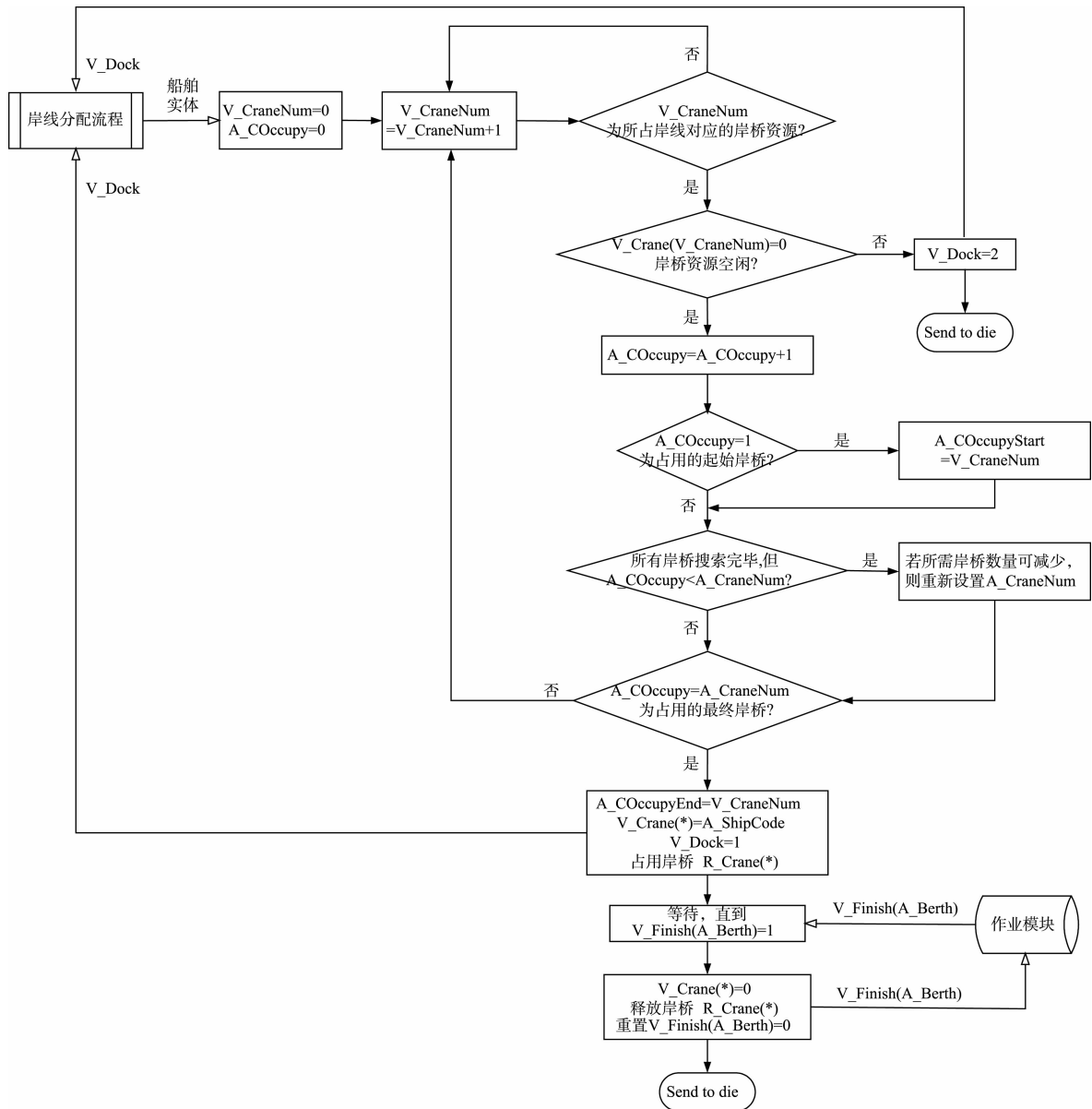


图3 岸桥调度流程算法

每台岸桥负责的岸线范围为 $2\ 350\ \text{m}/16 = 147\ \text{m}$ ，当靠泊岸线的起点在岸桥所负责范围之内，则该岸桥作为对应的起始岸桥，若该岸桥被其他船舶占用时，可移动过来的相邻岸桥将作为对应的起始岸桥。例如，294~441 m 岸线主要由 3[#]岸桥负责，当船舶靠泊岸线的起点在这段岸线范围内，则 3[#]岸桥作为对应的起始岸桥，并向后搜索，直至找到连续个所需数量的对应岸桥处于空闲状态；若 3[#]岸桥已被占用，则 1[#]、2[#]、4[#]或 5[#]岸桥可根据实际情况选择作为对应的起始岸桥。

表4 岸桥调度流程算法中的主要属性变量和全局变量

属性变量	含义	全局变量	含义
A_COccupy	船舶实际占用岸桥数目	V_CraneNum	岸桥搜索变量
A_COccupyStart	占用的起始岸桥	V_Crane (V_CraneNum)	岸桥占有状态： 0: 空闲； 其他: 对应船舶编号
A_COccupyEnd	占用的终点岸桥	V_Finish (A_Berth)	控制变量 0: 重置； 1: 船舶装卸完毕

4.3 作业模块

当岸线分配和岸桥调度均完成后，船舶实体通过 move into 命令进入临时编号的泊位 Q_Berth (A_Berth)，根据靠泊船舶的装卸箱量及岸桥的装卸效率计算装卸作业时间，并使用 wait for 命令进行装卸作业。装卸完毕后，通过设置控制变量 V_Finish (A_Berth) = 1 将装卸完毕的信息传递给岸桥调度流程，使其释放岸桥资源。待 V_Finish (A_Berth) = 0 的重置信息从岸桥调度流程反馈后，作业模块进一步释放岸线资源，并设置全局变量 V_Utilization 和 V_Capacity 分别记录关于岸线利用率和百米岸线通过能力的计算结果。最终，船舶实体离泊，并通过 send to die 命令离开仿真模型。

5 仿真结果与分析

应用专业仿真软件 AutoMod 建立了集装箱码头船舶柔性靠泊与岸桥动态调度的仿真模型后

与岸线分配流程循环搜索不同，岸桥调度流程仅搜索一次，若搜索不到所需数量的对应岸桥，则通过控制变量 V_Dock = 2 重新启动岸线分配流程，继续搜索其他靠泊岸线。

除了通过控制变量 V_Dock 与岸线分配流程进行信息交流外，岸桥调度流程还通过控制变量 V_Finish (A_Berth) 与作业模块进行信息交流。当 V_Finish (A_Berth) = 1，船舶装卸完成，岸桥调度流程可进一步设置变量来释放岸桥资源。

(图4)，对其进行为期 1 a (365 d) 的仿真试验，获得了岸线利用率、百米岸线通过能力^[6]以及岸桥设备利用率等设计方案的评价数据，为决策提供参考依据。其中，不同船型的岸桥装卸效率根据 JTS 165—2013《海港总体设计规范》来确定^[7]，经计算，支线船型的岸桥平均装卸效率为 33 TEU/(h·台)，干线船型的岸桥平均装卸效率为 47 TEU/(h·台)。

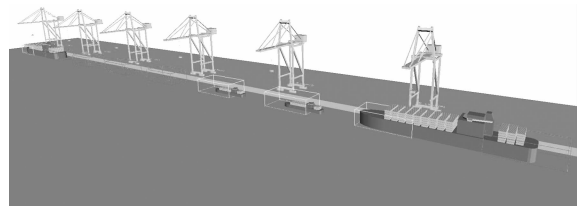


图4 集装箱码头船舶柔性靠泊与岸桥动态调度的3D仿真模型

1) 岸线利用率。

在固定靠泊情况下，码头的忙闲程度采用泊位利用率来进行评价。而在柔性靠泊情况下，泊位是动态变化的，其利用率应与船舶尺度相结合来考虑，即采用岸线利用率来进行评价：

$$\text{岸线利用率} = \frac{\sum(\text{在泊船长} \times \text{在泊时间})}{\text{码头总长度} \times \text{总时间}} \quad (1)$$

经仿真, 设计方案的岸线利用率为 0.51, 在 0.5~0.7 的合理范围之内。

2) 百米岸线通过能力。

在柔性靠泊情况下, 集装箱码头泊位通过能力应与岸线长度相结合来考虑, 即采用百米岸线通过能力来进行评价:

$$\text{百米岸线通过能力} = (\text{码头通过能力} / \text{岸线长度}) \times 100 \quad (2)$$

经仿真, 设计方案的百米岸线通过能力为 19.1 万 TEU, 岸线总的通过能力可达 448 万 TEU, 可以满足近期码头年设计通过能力的需要。

3) 岸桥设备利用率。

岸桥的忙闲程度采用设备利用率来进行评价。经仿真, 设计方案的岸桥设备利用率见表 5。总体而言, 岸桥设备利用率都达到了一个比较高的水平。

表 5 岸桥设备利用率

岸桥编号	利用率	岸桥编号	利用率
1 [#]	0.911	9 [#]	0.912
2 [#]	0.920	10 [#]	0.895
3 [#]	0.934	11 [#]	0.916
4 [#]	0.940	12 [#]	0.933
5 [#]	0.929	13 [#]	0.935
6 [#]	0.883	14 [#]	0.927
7 [#]	0.892	15 [#]	0.765
8 [#]	0.906	16 [#]	0.674

通过上述 3 个评价数据, 可以基本了解工艺方案是否满足设计要求。根据需要, 还可在仿真模型中设置其他更详细的统计变量, 以进一步深入了解工艺方案的合理性。

6 结语

本文以专业化集装箱码头的靠泊与装卸模式为研究对象, 分析了船舶柔性靠泊和岸桥动态调度的特点, 并建立了仿真模型的基本框架。在此基本框架下, 以规划中的洋山四期工程为例, 运用 AutoMod 建立了相应的仿真模型, 其中, 决策模块是该仿真模型的核心, 它包含岸线分配流程算法和岸桥调度流程算法这两个互相关联的算法, 并且岸桥调度算法不仅考虑了是否有足够数量的可用岸桥, 还考虑了岸桥在空间上是否可移动到位进行作业的实际问题。通过仿真模型的运行, 获得了岸线利用率、百米岸线通过能力以及岸桥设备利用率这 3 个基本的评价数据, 为决策提供了参考依据。还可在仿真模型中设置其他更详细的统计变量, 以进一步深入了解工艺方案的合理性, 有助于在低成本下不断地实现设计优化。

参考文献:

- [1] 蔡芸, 张艳伟. 集装箱码头泊位分配的仿真优化方法[J]. 中国工程机械学报, 2006(2): 228-232.
- [2] 张煜, 黄少梅. 基于遗传算法的泊位连续化动态调度研究[J]. 系统仿真学报, 2007(10): 2 161-2 164.
- [3] 杨春霞, 王诺. 考虑柔性靠泊的集装箱码头合理岸线利用率分析[J]. 水运工程, 2010(5): 93-97.
- [4] Applied Materials Inc. Automod User's Guide Version 12. 2[M]. USA: Applied Materials Inc, 2008.
- [5] 蔡坤穆, 王上棋. Automod 模拟软件设计与应用[M]. 台湾: 文魁图书, 2008.
- [6] 吕威. 基于柔性靠泊系统的集装箱码头岸线规划研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [7] JTS 165—2013 海港总体设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)