



智能港口物流丛书



自动化集装箱码头 设/计/与/仿/真/

杨小明 宓为建 陶其钧 编著

ZIDONGHUA

JIZHUANGXIANG MATOU

SHEJI YU FANGZHEN

上海科学技术出版社



智能港口物流丛书

自动化集装箱码头 设计与仿真

杨小明 宓为建 陶其钧

——编著——

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了自动化集装箱码头设计技术要素、设备选择与配置,以及物流系统需求和物流系统能力测算的主要方法。系统阐述了自动化集装箱码头建模与仿真基础以及建模与仿真系统分析,岸边装卸系统、水平运输系统、箱区作业系统、集疏运系统及整体作业系统建模与仿真分析案例。案例均采用 Plant Simulation 仿真软件建模。

本书可供自动化集装箱码头设计、建模和仿真专业的教师及学生,码头设计技术人员和管理人员参考,也可供对港口及其产业链的延伸有兴趣的读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

自动化集装箱码头设计与仿真 / 杨小明, 宓为建, 陶其钧编著. —上海: 上海科学技术出版社, 2016. 1

(智能港口物流丛书)

ISBN 978-7-5478-2916-5

I. ①自… II. ①杨… ②宓… ③陶… III. ①集装箱
码头—自动化系统—设计 IV. ①U656.102

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 288263 号

自动化集装箱码头设计与仿真

杨小明 宓为建 陶其钧 编著

上海世纪出版股份有限公司 出版
上 海 科 学 技 术 出 版 社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行

200001 上海福建中路 193 号 www.ewen.co

上海中华商务联合印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14.75

字数 320 千字

2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-2916-5/U·37

定价: 52.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

智能港口物流丛书序

“天下熙熙皆为利来，天下攘攘皆为利往。”司马迁在《货殖列传》中的描述正切合今天全球化背景下熙熙攘攘之经贸往来。在繁忙的全球经贸活动中，物流无疑是支撑世界经济发展的大动脉。作为一个国家和地区的门户，港口正是这一大动脉的枢纽。进入新世纪以来，港口的功能不断扩展，保税物流、临港产业、自由贸易区等各种创新功能正不断丰富着港口及港口城市的内涵，如今港口已不仅是吐纳、存储货物的核心节点，还是国际商业贸易的重要环节。对于一个受益于全球化的开放经济体，港口物流的重要性不言而喻。

任何一个产业的发展，都离不开科学技术的支撑。在国家创新驱动、转型发展背景下，港口物流发展路在何方？2008年11月，全球金融危机伊始，IBM在美国纽约发布的《智慧地球：下一代领导人议程》主题报告提出“智慧地球”的概念，开启了未来产业升级之路。近年来，为了奠定德国在重要关键技术上的国际顶尖地位，继续加强德国作为技术经济强国的核心竞争力，德国推出了以“智能工厂”及“智能生产”为核心的“工业4.0”概念。“工业4.0”也被称为继机械、电气和信息技术之后的第四次工业革命。

“智能化”在港口不只是概念上的发展，而正是当前发展实践之路。随着劳动力成本的逐年攀高，以及码头整体装备设计制造水平的不断提升和新工艺、新技术的不断完善，国内外自动化码头在经历了一段时间的技术发展期后，再次掀起新一波建设热潮。近期，天津、青岛、上海等港口已经将自动化码头的建设提上议事日程，国内第一个自动化集装箱码头——厦门远海码头已于2014年年底建成并投入试运营。以智能政务、智能商务、智能管理、自主装卸为核心的智能化发展，正是当前港口物流发展的重要支撑。

在此背景下,《智能港口物流丛书》的推出旨在梳理当前港口物流智能化发展脉络,展示当前及未来一段时间内,支撑港口物流智能化发展的相关关键技术及应用前景。丛书主要包括以下相关内容:智慧港口概论、集装箱码头数字化营运管理、无水港数字化运营管理、港口物流系统仿真、自动化集装箱码头设计与仿真、大型港口机械结构稳定性与裂纹控制技术、装卸机器视觉及其应用等。

丛书所反映的内容是作者及其研究团队长期工作的积累和对相关学术领域的探索,也是对长期大量实践及科研成果的总结。希望丛书的出版能对从事该领域的相关管理、技术人员及感兴趣者有所助益。

宓为建

前言

本书从自动化集装箱码头基本概念出发,总结了自 20 世纪 80 年代自动化集装箱码头首次推出以来的建设发展历程,整理分析了自动化集装箱码头装卸工艺方案演变,并对目前国际上主流装卸工艺方案进行详细分析。

本书第 2~4 章介绍了自动化集装箱码头设计技术要素、设备选择与配置,以及物流系统需求和物流系统能力测算的主要方法。这部分内容属于自动化集装箱码头规划设计中核心要点知识,自动化集装箱码头物流系统需求及物流系统能力测算与自动化集装箱码头系统仿真输出可相互验证,对自动化集装箱码头规划与设计至关重要。在此基础上,本书在后续章节进一步系统阐述了自动化集装箱码头建模与仿真基础以及建模与仿真系统分析,岸边装卸系统、水平运输系统、箱区作业系统、集疏运系统及整体作业系统建模与仿真分析案例。案例均采用 Plant Simulation 仿真软件建模。其中,第 5 章介绍自动化集装箱码头建模与仿真实论基础,第 6 章在自动化集装箱码头仿真案例介绍之前对自动化集装箱码头物流系统进行解构分析,第 7~10 章介绍自动化集装箱码头四大关键子系统的仿真案例,第 11 章介绍自动化集装箱码头整体建模与仿真分析案例。

近年来,为了奠定德国在重要关键技术上的国际顶尖地位,继续加强德国作为技术经济强国的核心竞争力,德国推出了以“智能工厂”及“智能生产”为核心的“工业 4.0”概念。“工业 4.0”也被称为继机械、电气和信息技术之后的第四次工业革命。集智能管理、智能识别及自主装卸等高新科技于一体的自动化集装箱码头正是“工业 4.0”概念的典型案例。在当前国内经济转型发展的背景下,自动化集装箱码头设计与仿真相关领域的研究,对推动我国港口建设事业进一步发展具有重要意义。

目前,国内外关于自动化码头物流系统设计与仿真方面的书籍并不多见。本书是相关科研团队在自动化码头物流系统仿真领域长期实践经验的总结,系统、深入地阐述了自动化码头物流系统仿真基础知识及应用案例。相信本书的推出对于从事该领域的科研工作者及生产管理人员具有一定的帮助。

本书第8章及第10章内容分别约请上海海事大学边志成博士和舒帆博士完成,感谢他们的帮助让本书更加完整。天津港务集团李勋教授级高工、安国利高工、杨荣高工和李强博士在本书完成过程中也给予了重要帮助,在此一并表示感谢。

编 者

目 录

1

目
录

第1章 绪论 1

- 1.1 自动化集装箱码头发展历程 3
- 1.2 自动化集装箱码头装卸工艺 5
- 1.3 自动化集装箱码头系统仿真现状 13

第2章 自动化集装箱码头设计技术要素 15

- 2.1 集装箱码头设计新趋势性要素 17
- 2.2 集装箱码头设计建设遵循的自然规律性要素 27
- 2.3 船舶与船舶装载的现实性要素 34

第3章 自动化集装箱码头设备选择与配置 39

- 3.1 自动化集装箱码头岸桥选择与配置 43
- 3.2 自动化集装箱码头场桥选择与配置 44
- 3.3 自动化集装箱码头水平运输设备选择与配置 48
- 3.4 自动化集装箱码头道口设施选择与布置 53

第4章 自动化集装箱码头综合通过能力计算 55

- 4.1 自动化集装箱码头吞吐能力计算 57

4.2	自动化集装箱码头库场能力计算	58
4.3	自动化集装箱码头水平运输能力计算	59
4.4	自动化集装箱码头道口能力计算	60

第5章 自动化集装箱码头系统建模与仿真基础 61

5.1	系统、模型与仿真基本概念	63
5.2	离散事件建模与仿真基本概念	67
5.3	离散事件仿真基本策略	69
5.4	随机数及随机分布	72
5.5	建模与仿真的 VV&A	85

第6章 自动化集装箱码头系统结构与分析 93

6.1	自动化集装箱码头主要系统构成	95
6.2	自动化集装箱码头主要实体	103
6.3	自动化集装箱码头主要事件、活动及进程	110

第7章 自动化集装箱码头岸边装卸能力仿真 119

7.1	岸边装卸系统分析	121
7.2	岸边装卸系统建模	124
7.3	岸边装卸系统仿真校核及验证	128
7.4	岸边装卸系统仿真输出分析	130

第8章 自动化集装箱码头水平运输能力仿真 133

8.1	水平运输系统分析	135
8.2	水平运输系统建模	149
8.3	水平运输系统仿真校核及验证	151
8.4	水平运输系统仿真输出分析	153

第9章 自动化集装箱码头箱区作业能力仿真 155

9.1	箱区作业系统分析	157
9.2	箱区作业系统建模	163
9.3	箱区作业系统仿真校核及验证	167

9.4 箱区作业系统仿真输出分析	169
------------------	-----

第 10 章 自动化集装箱码头集疏运通过能力仿真	173
---------------------------------	------------

10.1 集疏运通过能力仿真系统分析	175
10.2 集疏运通过能力仿真系统建模	179
10.3 箱区作业系统仿真验证	189
10.4 箱区作业系统仿真输出分析	190

第 11 章 自动化集装箱码头整体作业能力仿真	197
--------------------------------	------------

11.1 双线型自动化集装箱码头简介	199
11.2 整体作业仿真模型构建	202
11.3 整体作业仿真模型的 VV&A	214
11.4 整体作业仿真实验分析	216

参考文献	221
-------------	------------

第1章

绪 论

1.1 自动化集装箱码头发展历程

自动化集装箱码头的发展迄今为止已有 30 年左右。早在 20 世纪 80 年代中,英国泰晤士港、日本川崎港以及荷兰鹿特丹港首先提出建设自动化集装箱码头的规划,但由于后续自动化设备开发的财政资助发生了问题,泰晤士港和川崎港建设自动化的计划搁浅。

1993 年世界上第一个集装箱自动化码头在荷兰鹿特丹的 Europe Combined Terminals (ECT) Delta Sealand 正式投产(图 1-1)。在总结了 Delta Sealand 码头建设和使用经验的基础上,ECT 的 Delta Dedicated East (DDE) 和 Delta Dedicated West (DDW) 也分别于 1997 年和 2000 年建成投产。同一时期,新加坡港务集团(PSA)的 Pasir Panjang 码头(图 1-2)在 1997 年建成了基于远程操控的高架行车系统,实现了堆场的半自动操作,但由于该系统防摇效果不佳,操作效果并不理想。中国香港 Hongkong International Terminal(HIT)货柜码头则在 1999 年实现了基于自动化轨道式龙门起重机(automated rail-mounted container gantry crane, ARMG)的堆场的半自动化作业(图 1-3)。

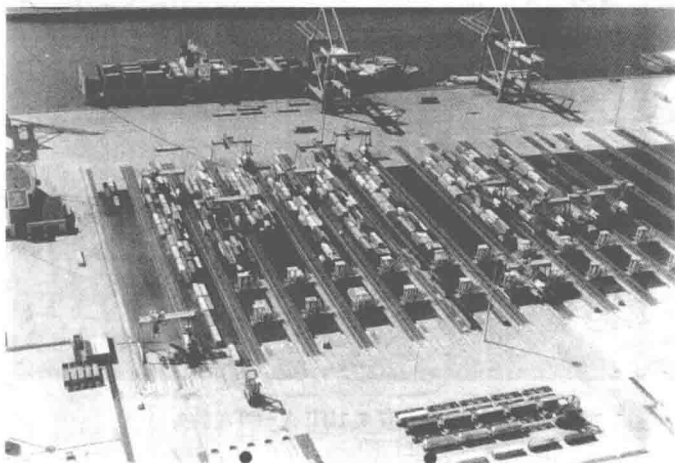


图 1-1 荷兰鹿特丹港 ECT 码头



图 1-2 新加坡 PSA Pasir Panjang 码头



图 1-3 中国香港 HIT 国际货柜码头自动化堆场

进入 21 世纪后,随着装卸工艺的发展,相对于人工码头,自动化集装箱码头在效率、人工成本以及绿色节能等方面表现突出,自动化码头如雨后春笋般出现。德国汉堡 HHLA-CTA 码头一期于 2002 年 10 月投产(图 1-4),荷兰鹿特丹 ECT Euromax 码头于 2008 年投入试运营(图 1-5)。



图 1-4 德国汉堡 HHLA-CTA 码头

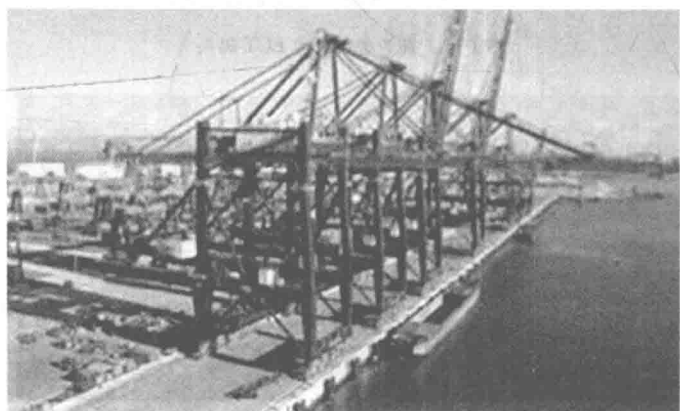


图 1-5 荷兰鹿特丹 ECT Euromax 码头

截至目前,已运营的自动化集装箱码头典型代表有荷兰鹿特丹 ECT 码头、德国汉堡 HHLA-CTA 码头、荷兰鹿特丹 ECT Euromax 码头、法国 SETO-MS C 码头、西班牙韩进 TTI Algeciras 码头、比利时泽布勒赫 DPW 码头;堆场自动化运营的集装箱码头有美国弗吉尼亚码头、中国香港 HIT 码头、新加坡 PSA Pasir Panjang 码头、韩国釜山码头、中国台湾台北港、中国台湾阳明码头、澳大利亚 Patrick 码头。截至 2014 年底,世界上建成和在建自动化集装箱码头项目共有 32 个^[1]。

在我国大陆,2005 年,上海港外高桥建成了大陆首个自动化空箱堆场^[2]。2006 年,上海振华重工在长兴岛打造了 1:1 全尺寸的自动化示范线^[3]。厦门远海码头在 2015 年初建成一个全自动化泊位并投入试运营^[4]。天津、青岛、上海等港口的自动化集装箱码头项目也在如火如荼地进行中。

1.2 自动化集装箱码头装卸工艺

1.2.1 最初装卸工艺方式

荷兰鹿特丹 ECT Delta Sealand 集装箱码头是世界上最早的自动化集装箱码头,其装卸工艺如图 1-6 所示,采用“单小车岸桥+自动牵引车(automated guided vehicle, AGV)+单台 ARMG”装卸工艺。该装卸工艺后来还进一步推广应用于 ECT 的 DDE 以及 DDW 码头。

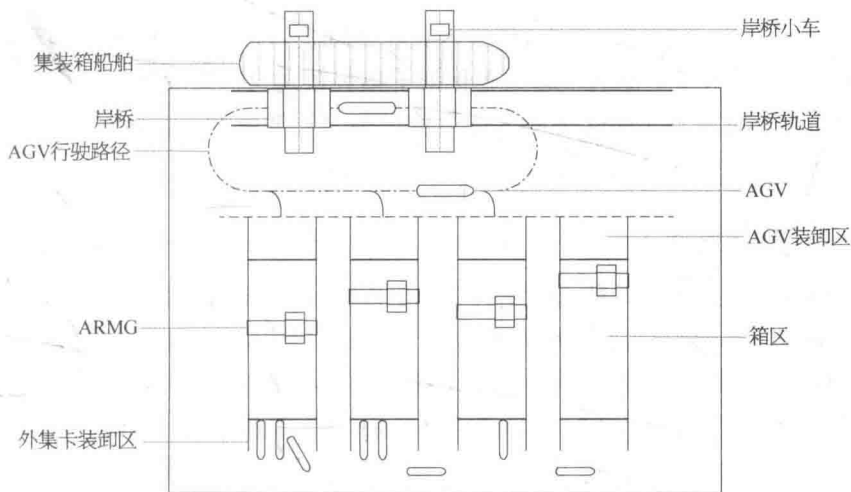


图 1-6 荷兰鹿特丹 ECT Delta Sealand 自动化集装箱码头装卸工艺示意图

ECT 采用“单小车岸桥+AGV+单台 ARMG”装卸工艺。岸边采用半自动化单小车岸桥,该岸桥只在对箱操作时需要人工操作,其他环节可实现自动化操作。岸桥在其跨距下进行集装箱装卸操作,AGV 行驶至岸桥跨距下后岸桥放箱至 AGV,然后 AGV 按照路径规划算法给定路径行驶至目标箱区头部,等待 ARMG 取箱至箱区。装船作业则与卸船作业相反。自动化集装箱常用 AGV 如图 1-7 所示。



图 1-7 自动化集装箱常用 AGV

该装卸工艺下,箱区垂直于岸线,每箱区配置一台 ARMG,ARMG 既完成岸边装卸作业,也完成箱区内翻捣箱作业及箱区陆侧收提箱作业。

相对于后来发展建设的其他自动化集装箱码头,该装卸工艺主要特点是:

1. 岸边装卸点处于岸桥跨距下

由于是第一个自动化集装箱码头,因此岸桥设计还没有脱离人工集装箱码头的设计思路。岸桥装卸点在跨距下,导致 AGV 行驶轨迹圈变大,行驶距离远,同时增加了 AGV 进出岸桥跨距难度,

在实际运营过程中经常发生 AGV 排队堵塞于码头前沿。

2. AGV 运作效率低,需要大量 AGV

由于 AGV 行走距离远及控制难度大等问题,使得 ECT Delta Sealand 集装箱码头需要大量的 AGV 来维持码头基础作业效率。该码头面积 265 hm^2 ,岸线长度 $3\,600 \text{ m}$,配置 AGV 265 台。

3. 每箱区配置一台 ARMG

由图 1-6 可见,ECT Delta Sealand 集装箱码头每箱区仅配置一台 ARMG,该设备既要完成岸边装卸任务,又要完成箱区内翻捣箱及陆侧收提箱任务。虽然在一定程度上简化了箱区内场桥的控制,但是从效率上制约了码头进一步发展。

4. 集卡倒车进入箱区

由图 1-6 可见,该装卸工艺下,外集卡在箱区陆侧,倒车进入箱区陆侧端,然后由 ARMG 完成收提箱作业。这种装卸工艺保证了集装箱垂直进出箱区,简化箱区内装卸作业,同时最大程度减轻了箱区陆侧水平运输设备交通拥堵情况。这种工艺一直沿用至今天,尚无发现比外集卡倒车进入堆场更好的装卸工艺。

1.2.2 主要装卸工艺改进

ECT Delta Sealand 自动化集装箱码头推出以后,世界上其他地方也在不断尝试自动化集装箱码头不同装卸工艺方案。例如 20 世纪 90 年代末新加坡 PSA Pasir Panjang 码头和中国香港 HIT 国际货柜码头尝试了箱区的自动化建设,以及 21 世纪初德国汉堡 HHLA-CTA 码头、荷兰鹿特丹 ECT Euromax 码头等在 ECT Delta Sealand 自动化集装箱码头基础上进一步改进。总体而言,在 21 世纪前十年,自动化集装箱码头装卸工艺的主要改进可以分为以下几个方面。

1. 岸边装卸方面改进

ECT Delta Sealand 自动化集装箱码头装卸工艺在岸边装卸环节存在较大的缺点,主要是按照传统人工码头单小车岸桥装卸工艺将岸桥装卸点设置于岸桥跨距下。这种方式带来两个方面的问题:

① AGV 行驶路径距离过大,同时容易造成 AGV 在码头前沿,进入岸桥作业区域时发生严重交通堵塞。

② 岸桥在装卸作业时,需要在岸桥跨距下的狭小空间里进行集装箱拆装锁作业。

针对以上问题,在岸边装卸方面的主要改进方式是将原来的单小车岸桥改为双小车岸桥,如图 1-8 所示。双小车岸桥装卸工艺最早在 2002 年德国汉堡 HHLA-CTA 自动化集装箱码头首次应用,后来也在其他自动化集装箱码头中被大量采用,包括 ECT 在 2008 年投产的 Euromax 自动化集装箱码头中。双小车岸桥在岸桥横梁与地面之间设置一个岸桥中转平台,并在中转平台上设置集装箱拆装锁装置。同时,岸桥设置两个小车,前小车负责集装箱在船舶与中转平台之间装卸,后小车负责集装箱在中转平台与岸桥后端下方 AGV 之间的装卸。这种装卸工艺解决了上述两个问题,集装箱拆装锁作业可以在岸桥上的中转平台完成,同时 AGV 的装卸点改到岸桥后伸距下方。这样既避免地面拆装锁作业,又减少了 AGV 行驶距离,避免 AGV 堵塞问题^[5]。

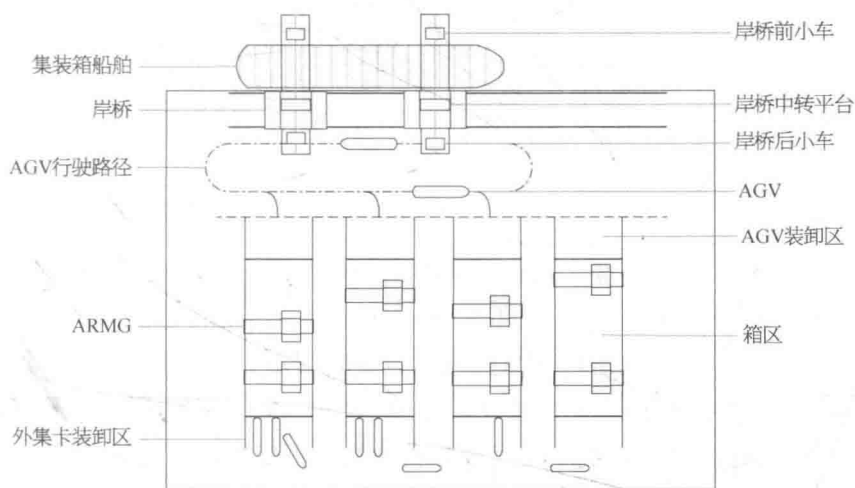


图 1-8 荷兰鹿特丹 ECT Euromax 自动化集装箱码头装卸工艺示意图

在岸边装卸方面也存在一些其他改进方式,例如对原来的单小车岸桥进行改进,使得改进后的单小车岸桥既可以在岸桥跨距下作业,也可以实现在岸桥后伸距下方进行装卸作业。由于使用单小车,岸桥在一次装卸循环作业过程中动作得到简化,避免转承平台中间环节,减少了加减速过程,同时也在一定程度降低岸桥投入成本。这种岸边装卸工艺典型代表是日本 Tobishima 自动化集装箱码头。

2. 场内装卸方面改进

21 世纪前十年,在自动化集装箱码头堆场内装卸工艺方面的改进主要是针对 ECT Delta Sealand 自动化集装箱码头每箱区配置一台 ARMG 导致的作业能力不足的问题。在这方面主要的改进是将原来每箱区配置一台 ARMG 改为配置两台 ARMG,主要代表有荷兰鹿特丹 ECT Euromax(图 1-8)、德国汉堡 HHLA-CTA 以及日本 Tobishima 自动化集装箱码头等。

同时,德国汉堡 HHLA-CTA 自动化集装箱码头为使得每台 ARMG 可以穿越全场,首次尝试了穿越式 ARMG,即在箱区中配置一台小型 ARMG 与一台大型 ARMG,