

文章编号:1671-1637(2019)02-0136-20

集装箱码头作业系统层次化、并行、异构与可重构计算模型

李 斌

(福建工程学院 交通运输学院, 福建 福州 350118)

摘 要:基于计算思维和计算透镜,分析了集装箱码头的装卸作业与调度决策,基于“并行计算”、“异构计算”和“可重构计算”提出了计算物流视角下的集装箱码头作业层次化、并行、异构与可重构计算模型;将计算机科学领域中多种典型计算体系结构的设计思想和运作机制,泛化、迁移、修正、融合和定制到集装箱码头作业系统中,设计了面向此计算模型的混合调度策略,提出了集装箱码头调度新的抽象计算模型与工程解决路径;以某大型集装箱码头为实例,基于集装箱码头作业层次化、并行、异构与可重构计算模型,进行了物流广义计算自动化的设计与性能评估。研究表明:采用计算模型能确定码头的集装箱吞吐量上限,实例中约为码头年设计能力的 2.75 倍;在满负荷情况下,基于等待作业集装箱队列的负载均衡调度策略和基于等待作业船型的负载均衡调度策略均能将大型集装箱干线船舶物流广义计算任务延迟缩短约 17 h;在明显作业过载时,前者能将物流广义计算任务延迟减少 100~110 h,后者能减少约 120 h;在满负荷和作业过载情况下,2 种策略均能缩短大型集装箱干线船舶物流广义计算访问存储时间 1~2 h,后者在作业过载情况下表现更佳;2 种策略都能很好地优先服务重点班轮集合,且有各自对应的适用状况和调度重点,码头管理者可根据具体情况选择适用。

关键词:物流工程;集装箱码头;计算思维;物流广义计算;计算模型;并行计算;异构计算;可重构计算
中图分类号:U691.3 **文献标志码:**A

Hierarchical, parallel, heterogeneous and reconfigurable computation model of container terminal handling system

LI Bin

(School of Transportation, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, Fujian, China)

Abstract: Based on computational thinking and computational lens, the loading and unloading operations and the scheduling decisions of container terminals were analyzed. Based on the parallel computation, heterogeneous computation and reconfigurable computation, a hierarchical, parallel, heterogeneous, and reconfigurable computation model of container terminal handling (HPHRCM-CTH) from the perspective of computation logistics was proposed. The design philosophies and operational mechanisms of typical computing architectures in the computer science were generalized, migrated, modified, fused, and customized to the container terminal handling system (CTHS), and the hybrid scheduling strategy for the HPHRCM-CTH was presented. A new abstract computation model and engineering solution to the container terminal

收稿日期:2018-09-25

基金项目:国家自然科学基金项目(71431001);教育部人文社会科学研究规划基金项目(19YJA630031);福建省自然科学基金项目(2017J01496);福建省高校新世纪优秀人才支持计划项目(GY-Z15107);福建工程学院科技发展基金项目(GY-Z160125)

作者简介:李 斌(1979-),男,湖北武汉人,福建工程学院教授,工学博士,从事集装箱码头控制决策与运营优化研究。

scheduling were put forward. Taking a large container terminal as an example, the design and performance evaluation of logistics generalized computation automation were carried out based on the HPHRCM-CTH. Analysis result shows that the HPHRCM-CTH can determine the upper limit of container throughput that is about 2.75 times of the annual design capacity of the container terminal in the example. At the condition of full load, the scheduling strategies of load balancing for the pending queues of containers (LB-PQC) and ship types (LB-PQS) can shorten the logistics generalized computation task latency (LGC-TL) of large container mainline ships by about 17 h. At the condition of obvious job overload, the LB-PQC can reduce the LGC-TL by 100-110 h, while the LB-PQS can reduce the LGC-TL by about 120 h. At the conditions of full load and job overload, the LB-PQC and LB-PQS can reduce the logistics generalized computation memory access time (LGC-MAT) for large container mainline ships by 1-2 h, and the LB-PQS performs better under the conditions of job overload. The LB-PQC and LB-PQS both can give well priority to the key service liners, and have the respective applicable condition and scheduling emphasis, and the terminal manager can choose the right one according to the specific situation. 10 tabs, 7 figs, 50 refs.

Key words: logistics engineering; container terminal; computational thinking; logistics generalized computation; computation model; parallel computation; heterogeneous computation; reconfigurable computation

Author resume: LI Bin(1979-), male, professor, PhD, mse2007_lb@whut.edu.cn.

0 引言

集装箱码头作业系统(Container Terminal Handling System, CTHS)是不确定环境下的离散事件动态系统和分布式并行与异构可重构处理系统,克服集装箱码头装卸生产的固有特性,降低其生产调度的非线性、耦合性和复杂性,进行敏捷鲁棒的多任务调度、多资源适配、多生产线控制、多阶段协同和多目标优化,以充分发挥码头作业效能,是摆在交通运输工程和管理科学与工程等学科面前的一个重要论题,也一直是研究热点与难点之一,目前在该领域中仍存在着一系列未解决的棘手问题,且新的难题不断涌现^[1-5]。

众多国内外学者已经从多个方面对CTHS的生产作业、计划调度和建模优化进行了相关的探讨。集装箱码头本质上属于物流中的仓储基础设施,Lehnfeld等对仓储服务中的装卸和编组作业进行了总结^[6];Bierwirth等分别就港口作业中最核心的3个环节(码头前沿、港口堆场和衔接两者的水平运输)进行了文献综述,探讨了当前集装箱码头单一资源计划调度研究的特点与运筹学在CTHS中的应用现状^[7-10];Zhang等面向港口作业中典型的船舶配载问题(Ship Stowage Planning Problem, SSPP)、泊位分配问题(Berth Allocation Problem, BAP)、岸桥

分配与调度问题(Quay Crane Assignment and Scheduling Problem, QCASP)、集卡调度问题(Yard Truck Scheduling Problem, YTSP)、场桥调度问题(Yard Crane Scheduling Problem, YCSP)、堆场计划问题(Storage Yard Planning Problem, SYPP)、贝位存取问题(Block Retrieval Problem, BRP)和预翻箱倒箱问题(Pre-marshalling and Block Relocation Problem, PBRP)等关键组合优化问题提出了智能决策支持模型和启发式算法^[11-20];Tao等就集装箱码头单个环节“头痛医头、脚痛医脚”式的不足,对紧密相连的2个作业环节进行了统一考虑,提出了相应的调度改进策略^[21-30];曾庆成等对集装箱码头集成生产调度进行了建模与优化^[31-32];常伟妹等则总结了集成调度在码头前沿与堆场等方面的国内外研究现状,并提出了码头协同决策未来的研究方向^[33];López-Bermúdez等针对集装箱码头调度运营进行了实证分析^[34-36]。另外,针对当前CTHS研究所提出模型和算法往往适应性和可移植性较差且具有较高的计算复杂度,难以在生产实践中应用的不足,李斌基于计算思维和计算透镜(Computational Thinking and Computational Lens, CTCL),定义了计算物流和面向CTHS的物流计算,引入了计算机领域中体系结构、操作系统和虚拟机的设计思想和运作原理,提出了集装箱码头协同

调度体系和计划控制机制^[37-40],并展开了初步的实证评估^[41]。

总体来看,集装箱码头作业调度决策是多重约束组合优化问题在多个需求各异软实时问题空间中的复合叠加,利用传统的运筹规划、系统仿真、智能优化和基于仿真的优化等方法往往难以求解,甚至高质量的满意解也难以获得,且 CTHS 的发展趋势使得其计划控制的计算复杂度进一步急剧攀升。近年来,由于港口联盟、航运联盟等新物流组织形式的出现、集装箱船舶的持续大型化、港口规模的不断扩张、装卸工艺的延续改进以及新型作业设备的连续投入,CTHS 的生产调度和控制决策较以往更为复杂,决策变量、约束条件和优化目标的数量和耦合性持续加强,亟需提出新的应用基础研究方法和工程实践解决方案。

从以往的初步研究来看,CTCL 有望为 CTHS 的控制决策提供高敏捷性、鲁棒性、可扩展性、兼容性和相对较小计算复杂度的解决方案,为动态不确定环境下强约束软实时多目标的 CTHS 规划设计、任务调度、资源分配和计划决策提供了一条较新的研究思路。故本文基于 CTCL、面向 CTHS、迁移和融合信息科学领域中“并行计算”、“异构计算”和“可重构计算”的设计思想和运作机制,提出了集装箱码头作业层次化、并行、异构与可重构计算模型(Hierarchical, Parallel, Heterogeneous, and Reconfigurable Computation Model of Container Terminal Handling, HPHRCM-CTH),能够给为码头调度决策提供抽象硬件视图和软件接口,在设施设备与决策机制、调度算法之间架设桥梁,在此硬/软件界面下更好地剖析、转化、建模物流广义计算自动化的调度控制问题和开发对 CTHS 运作中的异构性、并行性和可重构性的支持机制,从而为集装箱枢纽码头的规划管理与计划调度提供参考框架和决策支持策略。

1 集装箱码头作业广义计算模型

在以往的研究中,基于 CTCL,计算物流和物流广义计算(Logistics Generalized Computation, LGC)^[40]已经被定义,其出发点是利用计算本质、计算理论和计算原理重塑集装箱码头装卸作业框架体系和调度决策框架模式。LGC 也已经明确被指出是计算模型在特定规则的条件约束和指定算法驱动下的执行过程,即集装箱码头的装卸作业和集疏运过程,故 LGC 模型对于 CTHS 的计划调度与控制决策具有至关重要的作用。本节面向国内传统的大

型集装箱枢纽码头(非自动化码头),围绕码头的前沿、堆场和水平运输作业,拟提出集成三者作业的层次化并行与异构可重构计算模型,定义 CTHS 中 LGC 运作的总体框架体系,进而为 LGC 的规划、调度与决策算法的设计和评估奠定一个较好的抽象硬件模型。当然,该计算模型也能根据实践需要,针对前沿、堆场或水平运输的单一作业环节进行运筹规划和控制决策。从 CTCL 的视角来抽象 CTHS,集装箱码头 LGC 具有明显的并行性和可重构性,故以下重点从这两个方面展开对 CTHS 计算模型的探讨。

1.1 集装箱码头物流并行计算模型

在计算物流体系下,CTHS 是复合时空强约束下多重“数据驱动”的软实时 LGC 系统。计算机科学中的并行计算模型给程序员提供抽象硬件模型,在并行计算机硬件与并行算法之间架设桥梁,以方便设计并行算法并进行分析,其主要关注问题的计算并行性、数据的横向局部性与数据的纵向局部性^[42]。类似地,为加快挂靠码头集装箱船舶的装卸进度及其到港集装箱的集疏运速度,且期望能够应对更大的集装箱船舶与实现更高的船舶/集装箱吞吐量,定义 HPHRCM-CTH 旨在为集装箱码头物流规划、调度与管理决策人员提供设施、设备和资源的抽象硬件模型,在集装箱码头作业资源与并行调度策略算法间建立桥梁,以方便对各种装卸工艺和生产调度体系、框架、策略和模式进行定性、定量、综合分析和算法设计,从而提高 CTHS 的计划控制和调度决策能力。

计算机并行计算模型主要可分为共享存储模型(Shared Memory Model, SMM)、分布式存储模型(Distributed Storage Model, DSM)和存储层次模型(Storage Hierarchy Model, SHM)3 类^[43]。依照集装箱码头装卸作业和集疏运服务的特点,CTHS 是一个典型的基于 SHM 的并行计算系统,同时又兼具有 SMM 和 DSM 的特点。HPHRCM-CTH 主要关注 LGC 的并行性,同时也强调数据(集装箱)的横向局部性与纵向局部性,见图 1: t 为码头营运拖轮的数量; s 为码头前沿泊位数量; r 为港口大门检查桥数量; a 为 1 号泊位在泊船舶配备岸桥数量(动态); b 为 2 号泊位在泊船舶配备岸桥数量(动态); c 为 3 号泊位在泊船舶配备岸桥数量(动态); d 为 s 号泊位在泊船舶配备岸桥数量(动态); e 为前方堆场进口重箱区街区数目; f 为前方堆场出口重箱区街区数目; g 为前方堆场出口空箱区街区数目; h 为前方堆场进口空箱区街区数目; i_1 为后方堆场进口

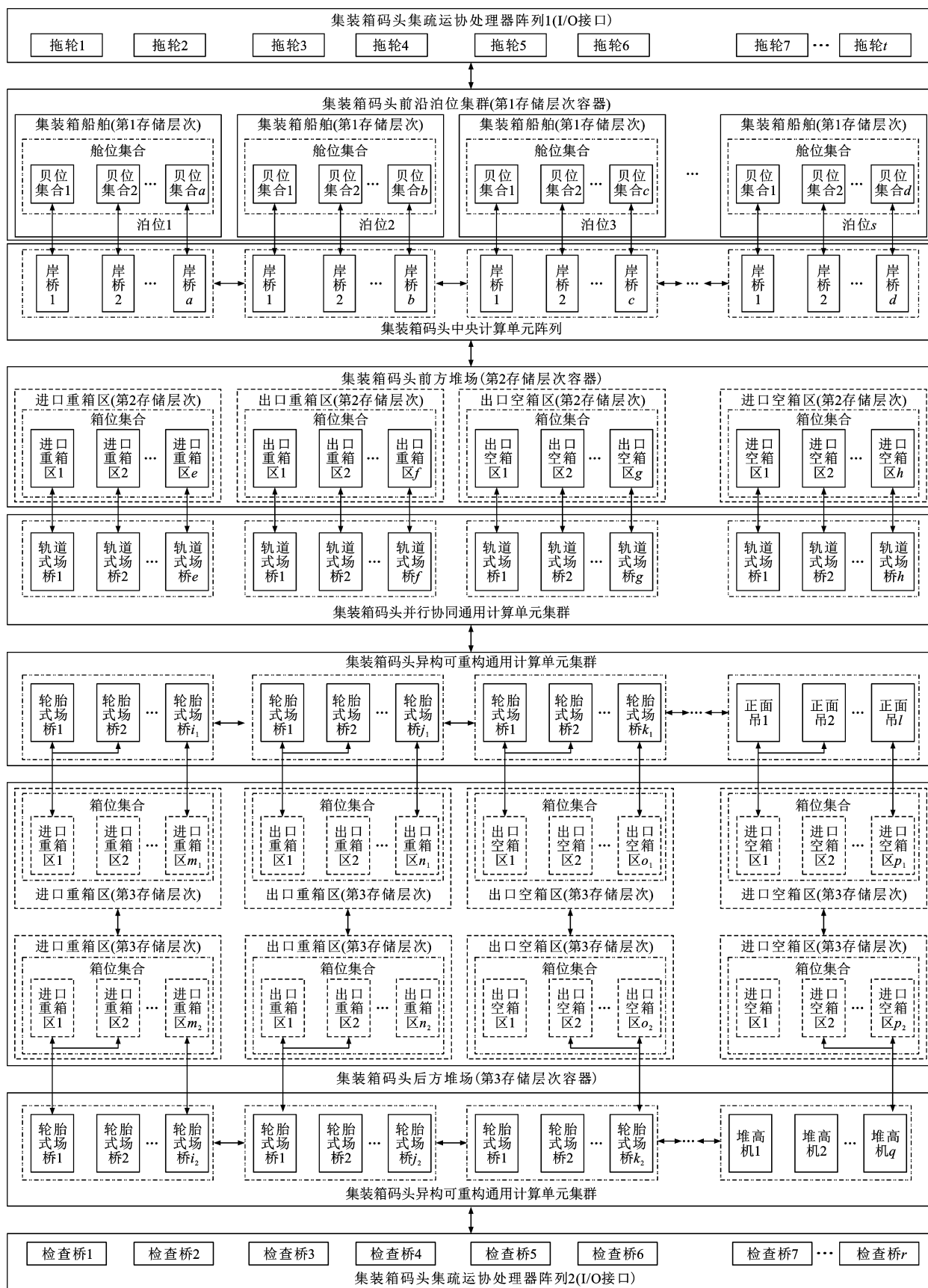


图1 集装箱码头物流层次化、并行、异构与可重构计算模型

Fig. 1 Hierarchical, parallel, heterogeneous and reconfigurable computation model of container terminal logistics

重箱区街区动态集合中服务码头前沿装卸箱作业的轮胎式场桥数量(动态); i_2 为后方堆场进口重箱区街区动态集合中服务码头集疏运收发箱作业的轮胎式场桥数量(动态); j_1 为后方堆场出口重箱区街区动态集合中服务码头前沿装卸箱作业的轮胎式场桥数量(动态); j_2 为后方堆场出口重箱区街区动态集合中服务码头集疏运收发箱作业的轮胎式场桥数量(动态); k_1 为后方堆场出口空箱区街区动态集合中服务码头前沿装卸箱作业的轮胎式场桥数量(动态); k_2 为后方堆场出口空箱区街区动态集合中服务码头集疏运收发箱作业的轮胎式场桥数量(动态); l 为后方堆场进口空箱区街区动态集合中集疏运收发箱作业的正面吊数量(动态); q 为后方堆场进口空箱区街区动态集合中集疏运收发箱作业的堆高机数量(动态); m_1 为后方堆场装卸箱作业进口重箱区街区数量(动态); m_2 为后方堆场集疏运收发箱作业的进口重箱区街区数量(动态); n_1 为后方堆场装卸箱作业出口重箱区街区数量(动态); n_2 为后方堆场集疏运收发箱作业出口重箱区街区数量(动态); o_1 为后方堆场装卸箱作业出口空箱区街区数量(动态); o_2 为后方堆场集疏运收发箱作业出口空箱区街区数量(动态); p_1 为后方堆场装卸箱作业进口空箱区街区数量(动态); p_2 为后方堆场集疏运收发箱作业进口空箱区街区数量(动态)。图中虚线框为动态集合,随码头作业情况实时变化,实线框为静态集合,在较长时间内保持不变。

需要特别指出的是,上述变量大部分是动态的,它们根据码头实时作业面的运行情况,进行动态调整,尤其是第 3 存储容器中流动机械的配置与部署,轮胎式场桥、正面吊和堆高机在各个重/空、进口/出口箱区间动态转场作业,满足码头的实时作业需求。

从 SHM 的角度来看,HPHRCM-CTH 的存储层次是一个典型的 3 层容器结构(Three-Tier Container Hierarchy, TCH),第 1 个存储层次(First Storage Level, FSL)类似于计算机系统中多核中央处理器中的缓存,尤其是三级缓存,因为多个处理器(岸桥)共享此层次内的存储空间。FSL 中的存储实体主要是挂靠到港停泊(待)作业集装箱船舶的舱位空间(Vessel Cabin Space, VCS),每个箱格中的箱位是最小的存储单元。箱位按照船舶舱盖板上下、纵向分布(具体包括排号、列号和层号)4 个维度进行标识。泊位则是每艘集装箱船舶存储空间的一个子容器,整个码头前沿是集装箱船舶存储空间的容器。由于港口岸线即泊位是码头的主要稀缺资源,因此,

泊位分配(Berth Allocation, BA)是否合理、高效和鲁棒是决定 CTHS 服务水平的核心焦点之一。BA 可以分为静态泊位分配和动态泊位分配,或者离散泊位分配和连续泊位分配。在离散泊位分配背景下,每个泊位的长度是固定的,即子容器的大小是不变的;而在连续泊位分配下,每个子容器的大小是动态变化的。第 2 个存储层次(Second Storage Level, SSL)相当于计算机系统内存,其存储实体主要是集装箱码头的前方堆场(Terminal Marshalling Yard, TMY)。TMY 按照进口/出口和空/重等特性划分为多个箱区,每个箱区内同样是按照排号、列号和层号进行定位。第 3 个存储层次(Third Storage Level, TSL)类似于计算机系统辅存,其存储实体主要是集装箱码头的后方堆场(Terminal Storage Yard, TSY)。TSY 的空间组织与 TMY 类似,也按照属性、区、排、列和层等进行管理。VCS、TMY 和 TSY 构成了与计算机存储系统类似的 CTHS 存储层次体系。

HPHRCM-CTH 是计算机科学领域中经典的并行随机访存模型(Parallel Random Access Machine, PRAM),面向 CTHS 进行拓展和延伸而获取的。PRAM 根据对同一内存位置访问的限制可以细分为 4 种类型:互斥读互斥写(Exclusive-Read and Exclusive-Write, EREW)、互斥读并发写(Exclusive-Read and Concurrent-Write, ERCW)、并发读互斥写(Concurrent-Read and Exclusive-Write, CREW)、并发读并发写(Concurrent-Read and Concurrent-Write, CRCW)。由于物理空间和服务对象的唯一性和排他性,HPHRCM-CTH 本质上显然是 PRAM-EREW,这也是面向 CTHS 设计调度算法的一个根本出发点。

1.2 集装箱码头物流异构与可重构计算视图

面向图 1 所示的 HPHRCM-CTH,本节从计算、通信和访存 3 个角度来进一步细化 HPHRCM-CTH,从而进一步阐明集装箱码头装卸作业中的异构性、并行性、可重构性和局部性,它们是码头计划调度具有强非线性、耦合性和高动态性和复杂性的根源,同时也是定义和探讨面向集装箱码头 LGC 调度算法的基础。

1.2.1 计算视角

从计算的视角来看,在第 1 存储层次中的处理单元主要是岸边集装箱起重机(简称岸桥, Quay Crane, QC),它也是 CTHS 的中央装卸计算单元(Central Handling Computational Unit, CHCU)。

在第2存储层次中的处理单元通常是轨道式集装箱龙门起重机(Rail Mounted Gantry Cranes, RMGC),可认为是CTHS的通用装卸计算单元(General-Purpose Stevedoring Computational Unit, GPSCU)之一。在第3存储层次中,轮胎式集装箱龙门起重机(Rubber Tyred Gantry Cranes, RTGC)、集装箱正面起重机(简称正面吊, Container Reach Stacker, CRS)和集装箱空箱堆高机(Empty Container Handler, ECH),是CTHS中另外3种类型的通用装卸计算单元。RMGC和RTGC又都可以简称为场桥。之所以将RMGC、RTGC、CRS和ECH视为GPSCU,主要是因为相对于QC只用于装卸船业务,此四者既要配合码头前沿作业,又要参与堆场编组、堆码、倒箱、拆拼箱和集疏运服务。CHCU和GPSCU都是集装箱码头并行物流广义计算的处理单元,显然这些作业单元间具有并行性、异构性和可重构性。

从可重构计算的角度来看,岸桥可认为是CTHS的通用处理核(General Purpose Core, GPC),而RMGC、RTGC、CRS和ECH均是CTHS的可重构处理单元(Reconfigure Processing Unit, RPU)。GPC和RPU共同组成了一个物流广义计算片上系统(Logistics Generalized Computation System on Chip, LGC-SoC)。在LGC-SoC中,根据GPC和RPU的作业特点,可以将其可重构计算单元集群服务进行进一步延伸。QC可以在相邻的不同泊位间移动,从而组成动态通用处理核子群,即可重构计算簇(Reconfigurable Computing Cluster, RCC)。类似地,RTGC、CRS和ECH能够在不同的箱区间调配进行作业,其既可以单独组成RCC,也可以联合组成异构RCC。RMGC由于其自身的机械特点,无法在不同的箱区间移动作业,其可重构的灵活性没有QC、RTGC和CRS高,但是RMGC群内部仍然是在面向不同的到港船舶,进行逻辑动态分组协同作业。为与前述的RCC相区别,将RMGC的协同作业模式定义为可编程计算簇(Programmable Computing Cluster, PCC),但其本质仍然是一种粗粒度的可重构LGC,前述的RCC则是一种细粒度的可重构LGC。

1.2.2 交换视角

在大中型集装箱码头中,GPC和RPU的总量数以百计,已经不能基于传统的总线结构来描述它们之间的交互和通信。由于利用LGC-SoC来抽象CTHS,故各计算单元间的数据交换由一个物流广义

计算片上网络(Logistics Generalized Computation Network on Chip, LGC-NoC)完成,其具有以下特点。

(1)LGC-NoC是典型的分组交换直接网络(Packet Switching Straight-Forward Network, PSSN)。分组交换的实质是“存储-转发”。显然,每艘到港船舶会装卸多个集装箱,这些集装箱根据目的地和所属关系进行分组。组中的每一个自然集装箱可认为是一个“数据包”,船舶配载计划(Vessel Stowage Plan, VSP)和堆场分配计划(Yard Allocation Plan, YAP)决定了数据包的起始地址、目的地址与装卸船作业顺序。

(2)LGC-NoC是并行、异构、可重构的,各处理单元共同构成一个典型的片上网络。GPC和RPU是PSSN的数据交互接口(Data Interactive Interface, DII),集装箱拖挂车(简称集卡, Yard Trailer, YT)是集装箱码头装卸作业系统中的路由处理单元(Routing Processing Element, RPE),集卡群是这个系统中的可重构路由阵列(Reconfigurable Routing Array, RRA)。RRA实现不同DII之间的数据转发,从而实现集装箱码头的运输,即交换功能。RRA通常以资源池的形式设计和实现,以提高RPE的资源利用率和集装箱码头的作业效率。

1.2.3 访存视角

在HPHRCM-CTH中,由于有多个存储层次,集装箱码头的装卸作业,即数据(集装箱)在存储层次之间的传输是以双向纵向流动为主的。在同一存储层次中,数据在不同处理单元间的传输是横向流动。显然,数据的横向流动在CTHS的第1、2存储层次,尤其是第1存储层次中是较少的。不经堆场,直接在船舶之间作业的装卸工艺和生产情况还较为罕见。但是在第3层次中,由于堆场计划、编组、集疏运、拆拼箱作业的需要,数据的横向流动就较为普遍了。这种数据横向流动的存在,使得CTHS的生产调度计算复杂性进一步加强,但同时也为进一步提高集装箱码头的生产效率提供了优化空间。

综合上述的计算、交换和访存视角,CTHS作为全球供应链的集装箱运输路由器(Container Transportation Router, CTR)物流计算引擎,其内部协同计算体系见图2,其中虚线所圈的集合皆为动态结构,且其内部规格和结构也是随着码头作业负载和环境变化而动态调整。图2中:S为码头前沿泊位数量;M为前方堆场贝位集合数量(随靠泊航线动态调整);X为后方堆场集装箱干线运输重箱贝位集合数量(依据靠泊航线动态变化);Y为后

方堆场集装箱干线运输空箱贝位集合数量(依据靠泊航线动态变化); Z 为后方堆场集装箱支线运输空箱贝位集合数量(依据靠泊航线动态变化); T 为面向作业面的服务特定船舶组的集卡集合数量(依据在泊作业船舶情况实时变化); C 为码头前沿岸桥作业组数量(依据在泊作业船舶情况实时变化); R 为轨道式集装箱龙门起重机作业组数量(依据挂靠干线班轮的周期和在泊情况确定); I 为轮胎式集装箱龙门起重机作业组数量(依据挂靠干支线班轮的集疏运周期和在泊/预报情况而定); J 为集装箱正面吊起重机作业组数量(依据挂靠干支线班轮的集疏运周期和在泊/预报情况而定); K 为集装箱空箱堆高机作业组数量(依据挂靠干支线班轮的集疏运周期和在泊/预报情况而定)。

与计算机系统类似,CTHS 的装卸作业过程中,也具有明显的局部性,包括时间局部性和空间局部性^[44]。而以挂靠船舶为中心服务对象,CTHS 的各个存储层次显然具有明显的可重构性,故基于 HPHRCM-CTH,充分利用 LGC 的并发性、数据的局部性和存储单元的可重构性,协同安排数据的纵向流动和横向流动,在确保纵向流动并发处理连续性的前提下,尽量取得集装箱码头装卸作业时空间和时间之间的平衡,其本质是在尽量缩短船

舶停靠装卸作业时间的同时确保码头滚动作业计划的实现,即确保 CTHS 面向不同的时间窗宽度都能获得较为稳定的访存性能。

1.3 集装箱码头物流计算的混合调度策略

如前 1.2 节所述,CTHS 可以被视为一个 LGC-SoC,从而设计和实现集装箱 LGC 的抽象和自动化。由图 1、2 可知:LGC-SoC 是一个典型的具有混合计算构架(Hybrid Computing Fabrics, HCF)、混合存储构架(Hybrid Storage Architecture, HSA)、混合交换机制(Hybrid Switching Mechanism, HSM)的硬件体系结构,同时它又是一个采用混合调度策略(Hybrid Scheduling Strategy, HSS)的一体化生产服务系统,即集装箱码头的生产作业具有鲜明的“4H”特性。LGC-SoC 的 HSS 是指集装箱码头采用类似计算机科学中编译时调度和运行时调度相结合的面向可重构多任务的混合调度方法,是面向 CTHS 的设计任务调度和资源分配算法的核心基础。

集装箱码头的计划调度人员面向特定的码头布局、作业设备和装卸工艺,在船舶未抵港之前,依据对挂靠班轮和临时访问船舶装卸作业情况的分析和标记,面向特定的计划时间窗大小,获得特定的任务集合,提出初步的作业计划,其主要包括 3 项内容,

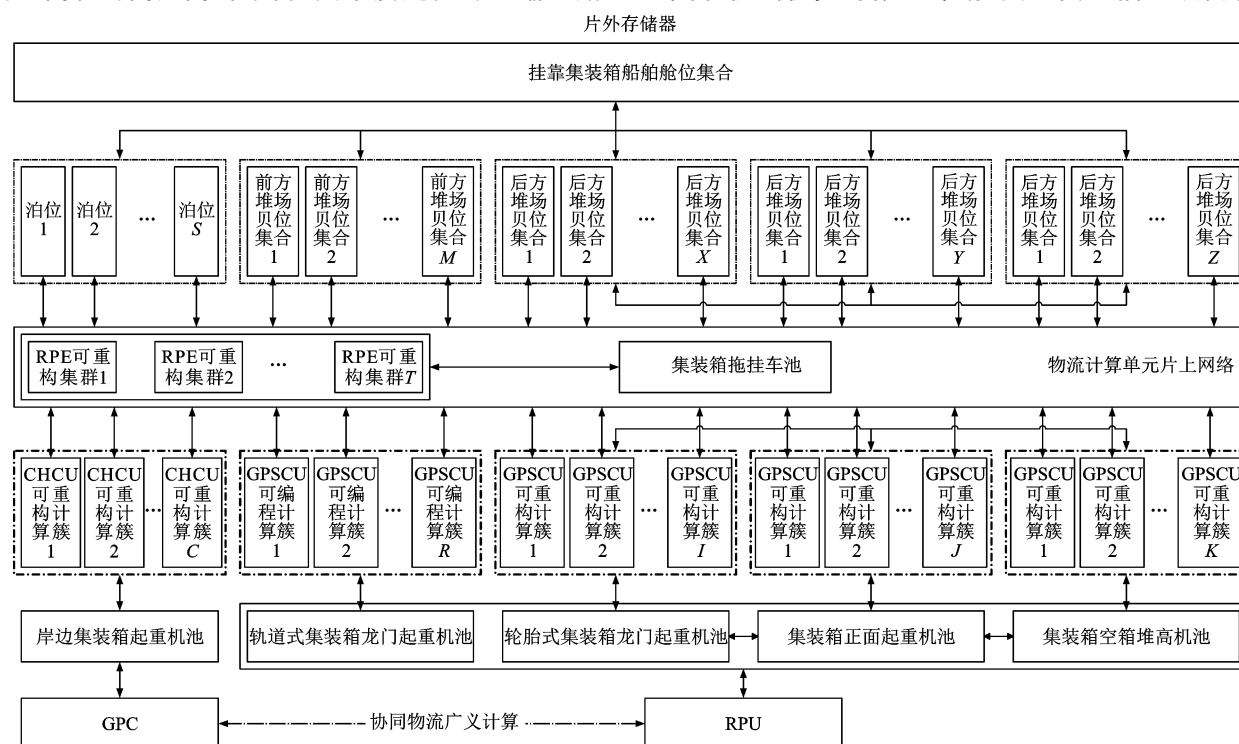


图 2 集装箱码头物流广义计算异构可重构体系

Fig. 2 Heterogeneous reconfigurable architecture of container terminal logistics generalized computation

即近似最优计划序列集合 (Approximate Optimal Planning Sequence Set, AOPSS)、计算资源预分配计划 (Computing Resources Predistribution Plan, CRPP) 和基于特定船舶的程序流图 (Application Flow Graph for Vessel, AFGV), 给出其装卸工艺, 预估单一完整作业在集疏运各个阶段所需的资源数量和占用时间。

AOPSS、CRPP 和 AFGV 是 3 个相互关联紧密的整体。面向不同的作业, 根据不同的任务负载和资源利用状况, 单一作业有可能选择多种装卸工艺, 典型的装卸工艺有: 所有待服务的集装箱都按照 FSL-SSL-TSL 层次结构进行装卸作业; 所有待服务的集装箱跳过 SSL 阶段, 直接在 FSL-TSL 之间进行数据流动; 部分待服务的集装箱采用 FSL-SSL-TSL 工艺, 部分集装箱采用 FSL-TSL 工艺。选择的工艺不同, 将直接影响 AFGV 的制定, 继而影响 CRPP 和 AOPSS 的计算。

AOPSS、CRPP 和 AFGV 针对特定的任务集合, 预估 LGC-SoC 中各项作业和计算/存储单元的资源数量和工作时间, 滚动计划出相应的时间-资源窗口, 即为 CTHS 的编译时调度。编译时调度类似于离线调度, 然而, 单独的编译时调度要求任务集和资源可用性必须是可预测的, 集装箱码头在不确定动态环境下服务, 很难满足此前提, 同时面向 LGC-SoC 的硬件任务调度和资源分配均是 NP-Hard 问题^[1-4], 这些使得仅仅应用编译时调度和 AOPSS、CRPP、AFGV 难以应对 CTHS 的计划、调度、控制和决策。

故集装箱码头的计划调度人员需要根据系统运行时的信息在线做出调度决策, 对 CRPP 进行修正, 如依据任务最后截止时间来调整作业顺序。CTHS 的运行时信息主要包括: 挂靠船舶到访频率、临时访问船舶队列、等待作业队列、作业资源需求、系统当前负载、资源负载/空闲状况和任务最后截止时间等信息。运行时调度根据系统当前的运行时信息, 修正编译时调度所获得的 AOPSS 和 CRPP, 并基于 AFGV, 提出面向特定船舶的数据流图 (Data Flow Graph, DFG)。DFG 将每艘到港船舶的装卸集装箱作业任务抽象为一个树结构, 依据其在船舶上的位置以及货主、目的地等信息, 分解为若干个子任务 (节点)。为减少倒箱等无效的作业情况, DFG 旨在确保各个节点 (集装箱组) 和节点内各个数据 (集装箱) 的处理顺序, 只有数据流图中某个节点的所有前辈节点都已被执行的情况下, 该节点

才能被调度执行。依据 DFG, 运行时调度器为每艘到港船舶获得计算资源分配清单 (Computing Resources Allocation List, CRAL) 和生产任务装卸作业序列 (Logistics Task Handling Sequence, LTHS), 面向实时异构资源配置, 进行面向 LGC-SoC 的局部动态重构 (Partial Run-Time Reconfigure, PRTR), 形成装卸作业的近似最优调度序列集合 (Approximate Optimal Scheduling Sequence Set, AOSSS), 并基于定位器和加载器驱动 LGC-SoC 进行物流计算。混合调度器、资源定位器和任务加载器三者相互协调, 共同完成软硬件任务的分配与加载。上述的集装箱码头混合调度策略见图 3: A 为目前计划时间窗内在港口锚地等待的船舶数量; B 为正在码头前沿泊位靠泊作业的船舶数量。

1.4 计算模型内涵分析

冯·诺依曼体系结构的计算机在计算机科学和工程领域中占有绝对的优势地位, 核心思想是“存储程序”和“顺序执行”, 最大局限是存储器与 CPU 之间的通路太狭窄, 即“冯·诺依曼瓶颈”, 其次从本质上讲是采取串行顺序处理的工作机制。这些局限性在以往提出的基于哈佛体系结构 (冯·诺依曼体系结构的改进型) 的 CTHS 调度模型中有不同程度的体现^[38,40,44], 急需基于 CTCL, 提出新的计算模型进行改进与提高。

近年来, 计算机科学思想与工程的演化主要体现在 3 个方面: 计算机的核心由中央处理器变成了存储器; 存储器分级及其多级存储体系; 并行计算、异构计算与可重构计算。总体来看, 演化的方向主要围绕处理单元和存储器展开。计算机科学与工程的这些演化动态在 HPHRCM-CTH 均有所体现。集装箱码头是多式联运的缓冲池, 本质上属于物流的存储集散中心, 作业空间资源是其核心竞争力, 故 CTHS 的计算模型天然需以“存储器”为中心。同时, 集装箱码头作为集疏运枢纽, 其存储缓冲结构是多级的。故 CTHS 的计算模型的存储体系也具有相应的层次性。此外, 集装箱码头的装卸运输作业涉及多种作业设备 (即处理单元), HPHRCM-CTH 将这些作业设备抽象为分布式异构的处理单元集群 (Distributed Heterogeneous Processing Unit Cluster, DHPUC)。DHPUC 在进行协同物流计算时, 构成了一个柔性双向动态可重构带阻塞有差速的集装箱 LGC 混合流水车间 (Full-Duplex Dynamic Reconfigurable Hybrid Flow Shop with Blocking and Differential Speed, FDR-HFS-BDS)。

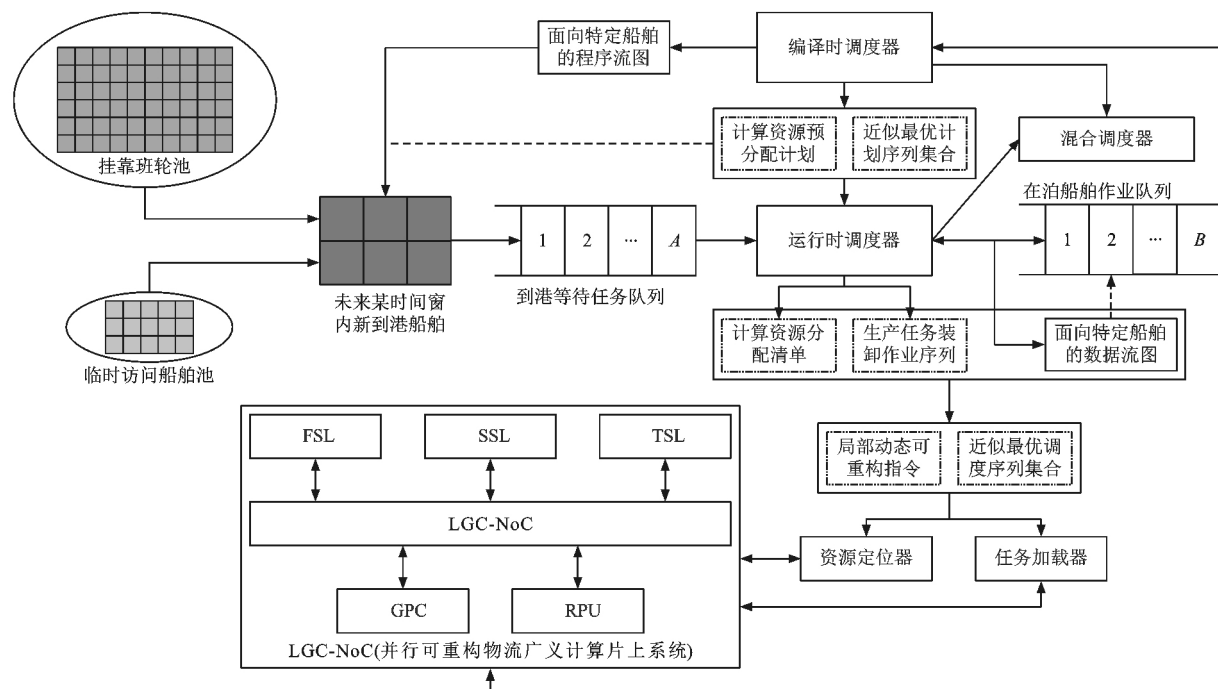


图3 混合任务调度模型

Fig. 3 Hybrid task scheduling model

事实上,已经有大量的国内外学者利用混合流水车间(Hybrid Flow Shop, HFS)对CTHS进行建模与优化^[45-49]。当从计算模型的视角抽象CTHS时,DHPUC构成的HFS具有如下典型特征。

(1)由于需要即时、同时进行装卸作业,故DHPUC组成的LGC流水线是半双工,甚至是全双工进行数据交换的。

(2)在CTHS的作业过程中,由于不断有新任务加入和旧任务退出,围绕停靠船舶,各类处理单元也在进行相应的动态调配,故该HFS是软实时动态重构的。

(3)集装箱码头作业过程中,各级工序间的缓冲区域极为有限,多个任务并行,多种装卸工艺下主动缓冲和被动堵塞并存,这些均使得HFS出现阻塞。

(4)集装箱码头装卸作业即使在同一处理环节,因为处理单元或者服务对象不同,会造成同级处理单元生产效率的差异,不同级处理阶段间更是如此,故HFS是有差速的。

(5)FDR-HFS-BDS是非线性、多功能物流计算流水线,即是带有反馈回路的流水线,港航双方均会观察、统计和评估各个作业任务在动态流水线中的作业性能,并根据作业情况调整该班轮下次到港的LGC计划和调度。

由上可知,FDR-HFS-BDS能充分表现CTHS生产运作中明显的异构性、并行性和可重构性,其特

征与计算机科学领域中中央处理单元(Central Processing Unit, CPU)的计算流水线既有相似性又有差异性,是CPU计算流水线思想在更复杂约束条件和作业目标下的深化应用。

综上所述,HPHRCM-CTH很好地将计算科学思想和计算工程实践设计引入到了LGC的计算模型中,从而为进一步设计、评估和优化码头决策机制和调度算法奠定了基础。当然不同的集装箱码头平面布局、设施设备配置、装卸工艺和集疏运体系会有一定的差异性,本文所提出的HPHRCM-CTH被期望能够覆盖当前绝大部分的CTHS,且能够根据不同的集装箱码头实际状况进行修剪定制,但其中所包含的“4H”LGC抽象机制、自动化原理、运作框架和调度理念是相似的。

2 计算结果分析

2.1 集装箱码头生产实例

以国内某枢纽港新建的大型集装箱码头为例,该码头前沿水深18 m,采用传统的顺岸式布置,共有10个15万吨级的集装箱船舶泊位,每个泊位长为425 m,岸线共计4 250 m,可停靠载箱量18 000 TEU下的所有级别集装箱船舶。港区陆域纵深为1 250 m,平均每个泊位配有10个重箱区和2个空箱区,码头设计年吞吐能力为 10^7 TEU。

该集装箱码头的平面布局主要可分为前方装卸

作业区、重箱堆场作业区和空箱堆场作业区3个区域,其中码头前沿配置双40英尺双起升岸边集装箱起重机40台、重箱堆场装备轮胎式龙门起重机120台与空箱堆场配有集装箱堆高机40台。码头采用岸边集装箱装卸桥(前沿)+轮胎式集装箱龙门起重机(重箱堆场)+集装箱堆高机(空箱堆场)的装卸工艺方案,是国内大型集装箱码头采用的典型集装箱装卸工艺。整体来看该集装箱码头所在港口主要服务于当前大的航运联盟及其喂给船舶,挂靠船舶多为大中型集装箱干支线班轮,可大致分为10种船型,船舶核心属性见表1。

表1 船舶关键属性

Tab.1 Key attributes of ships

船型类别	船舶设计载箱量/TEU	装卸箱量比例/%	挂靠船舶贡献比例/%
小型支线喂给船舶I	1 000~2 000	40~50	2
小型支线喂给船舶II	2 500~3 000	40~50	4
巴拿马型船舶	3 500~4 499	30~45	5
巴拿马极限型船舶	4 500~5 499	30~45	6
超巴拿马型船舶I	5 500~5 999	20~40	7
超巴拿马型船舶II	6 000~7 399	20~40	10
超巴拿马型船舶III	7 400~10 999	20~35	18
超巴拿马型船舶IV	11 000~13 999	20~35	27
超巴拿马型船舶V	14 000~17 999	25~35	16
超巴拿马型船舶VI	18 000~20 000	25~35	5

挂靠班轮主要包括三部分。

(1)固定挂靠该码头的集装箱班轮,其到港间隔时间符合爱尔郎分布。

(2)本港口中其他集装箱码头临时调拨过来的集装箱船舶,其到港间隔时间符合正态分布。

(3)港口联盟中邻近港口临时安排作业的集装箱船舶,其到港时间间隔符合泊松分布。

总体上来看,该生产实践场景中,到港船舶具有有控随机特征,符合中国集装箱码头一般作业规律。

基于 AngLogic 7.3.6 和 SQL Server 2012 软件,面向 HPHRCM-CTH,建立计算试验和数据分析平台,采用随机均衡负载泊位分配(Random Task Balance Berth Allocation, RTBBA)策略(即各种船型分配到各个泊位的机会均等),利用随机种子1~100,进行100次仿真试验,得到CTHS的船舶平均通过能力为3 358.88艘,平均集装箱吞吐量为10 101 170.12 TEU,平均滞港船舶仅为5.2艘,平均待作业集装箱数量仅为18 637.44 TEU(出现这样的数据,是因为在仿真试验的后期仍然会有船舶

到港,未及时处理,而与CTHS自身的LGC能力无关),完全达到了集装箱码头的年设计能力,其较好的符合集装箱码头作业时的各项指标,作为随后展开讨论的基础。

2.2 物流广义计算性能分析

计算机系统中区分不同数据对象(均由0/1位串表示)的唯一方法是甄别这些数据对象的上下文。类似地,CTHS的最终服务对象是各类集装箱,在2CTL概念体系下,它们可被抽象为各类“0/1”位物流计算数据,于是面向其物流计算上下文(Logistics Generalized Computation Context, LGCC)展开码头计划和调度。参照计算机科学中的计算上下文概念,可定义LGCC如下:在某个时间窗内,LGCC是FSL、SSL和TSL与其容器中多维数据集的已知子空间,在其中能够根据船舶配载计划、泊位指派计划和堆场分配计划,对数据进行物流映射计算,待计算数据集的所有坐标或者显式已知的(直接在堆场和船舶进行映射),或者从表达式派生(装卸作业过程中需要倒箱)。泊位是HPHRCM-CTH和LGC-SoC的中心作业资源,于是基于LGCC,重点定义泊位指派策略。各类GPC和RPU的分配调度采取同文献[50]相同的策略。

计算机操作系统采用的主要基础理论是排队论。泊位是FSL、SSL和TSL三者之间进行转换的一个缓冲器,也是处理节点容器(Processing Element Container, PEC),故泊位指派居于HSS的中心位置。基于HPHRCM-CTH,HSS中的编译时调度器根据船舶的预期到港信息,为挂靠船舶预先分配一个停靠泊位并计划相应的LGC处理单元。当船舶到港后,运行时调度器根据各泊位船舶排队情况,进行泊位指派的二次调整。具体来看,对图3中的“到港等待任务队列”,基于计算容器负载均衡的原则,从等待船舶数量、等待装卸集装箱数量和等待船舶船型系数3个维度定义二次排队规则,即面向等待船舶队列的负载均衡调度策略(Load Balancing for Pending Queue of Vessels, LB-PQV)、面向待作业集装箱队列的负载均衡调度策略(Load Balancing for Pending Queue of Containers, LB-PQC)、面向待作业船型的负载均衡调度策略(Load Balancing for Pending Queue of Ship Types, LB-PQS)。

此外,为了对集装箱码头LGC性能进行更好地分析和评估,定义一个挂靠船舶负载系数(Calling Vessel Task Load Factor, CVTLF),将表1中各类船舶的装卸箱量定义为 $CVTLF=1.0$ 。通过逐步

加大 CVTLF 的取值,来逐步增加挂靠船舶的装卸箱量,以便对集装箱码头 LGC 进行负载测试(同样是 100 次随机试验)。面向 RTBBA、LB-PQV、LB-PQC 和 LB-PQS,负载测试结果分别见表 2~5。LB-PQV、LB-PQC 和 LB-PQS 在负载测试方面的表现均优于 RTBBA 算法,以年为单位,该 CTHS

集装箱吞吐量的极限约为 2.75×10^7 TEU,是码头年设计集装箱通过能力的 2.75 倍,其中 LB-PQS 在负载测试中具有一定的优势,其吞吐量极限达到 2.77×10^7 TEU,能够较 LB-PQV、LB-PQC 挖掘出港口超过 10^5 TEU 的作业潜力,较 RTBBA 更是高出近 4.99×10^5 TEU 的吞吐量。

表 2 面向 RTBBA 的负载测试结果

Tab. 2 Load testing result for RTBBA

组别	挂靠船舶 负载系数	船舶平均通过 能力/艘	通过能力标准 偏差/艘	通过能力 极差/艘	平均集装箱 吞吐量/TEU	平均压船 数量/艘	压船数量标准 偏差/艘	平均压港集装箱 数量/TEU
1	1.50	3 348.76	18.379	80	15 139 038.20	7.92	2.080	40 223.16
2	2.00	3 343.20	22.181	88	20 156 413.68	14.16	3.716	96 774.56
3	2.25	3 340.32	23.079	95	22 585 771.12	21.28	5.054	153 467.96
4	2.50	3 316.24	24.862	102	24 871 772.68	43.64	10.012	343 363.68
5	2.75	3 210.28	16.964	73	26 549 145.68	150.60	21.197	1 257 674.68
6	2.80	3 174.96	14.873	58	26 768 333.28	190.80	21.752	1 601 720.96
7	2.85	3 137.28	13.554	57	26 881 444.64	225.32	20.020	1 938 734.40
8	2.90	3 104.72	19.964	81	27 031 178.92	265.20	28.792	2 331 180.04
9	2.95	3 058.52	17.854	80	27 134 463.60	304.04	25.414	2 713 169.12
10	3.00	3 016.72	20.303	71	27 185 517.84	337.00	25.569	3 038 355.84

表 3 面向 LB-PQV 的负载测试结果

Tab. 3 Load testing result for LB-PQV

组别	挂靠船舶 负载系数	船舶平均通过 能力/艘	通过能力标准 偏差/艘	通过能力 极差/艘	平均集装箱 吞吐量/TEU	平均压船 数量/艘	压船数量标准 偏差/艘	平均压港集装箱 数量/TEU
1	1.50	3 355.16	24.741	82	15 153 385.28	9.28	2.011	44 414.68
2	2.00	3 350.00	23.567	93	20 124 181.04	12.72	1.400	81 190.00
3	2.25	3 350.52	19.524	78	22 674 155.28	13.80	2.236	99 567.12
4	2.50	3 349.68	21.654	72	25 116 017.04	14.96	2.282	119 283.64
5	2.75	3 289.12	20.296	79	27 169 987.00	69.72	28.267	585 335.56
6	2.80	3 242.32	19.866	78	27 280 681.04	124.72	29.554	1 039 992.04
7	2.85	3 183.28	15.079	54	27 309 830.60	174.40	27.162	1 485 155.64
8	2.90	3 138.40	16.783	70	27 329 711.68	213.64	21.233	1 860 313.76
9	2.95	3 091.08	21.670	78	27 372 028.24	264.12	28.323	2 370 285.76
10	3.00	3 045.12	15.717	60	27 422 364.72	314.56	21.302	2 864 793.60

4 种调度策略中,RTBBA 和 LB-PQV 算法随着负载不断加重,其吞吐量一直上升。而 LB-PQC 和 LB-PQS 算法在达到最高吞吐量后,其吞吐量随着负载的增大一直不断抖动,当 CVTLF 从 2.75 增至 2.90 时,滞港船舶大幅增大,其中当 CVTLF 为 2.80 时,LB-PQC 和 LB-PQS 均达到吞吐量的最大值。故选取 CVTLF 为 2.50 和 2.80 时,面向上述 4 种算法,各自选取 5 组接近平均值的计算试验,在每组试验中截取仿真中后期阶段约 2 000 艘(到港序号从 501~2 500)完成作业离港船舶的在港时间

数据(即每种算法面向 10 000 艘船舶进行统计)进行物流广义计算任务延迟(Logistics Generalized Computation Task Latency, LGC-TL)性能分析,试验结果见图 4、5,可以看出:当 CVTLF 为 2.50 时,LB-PQV、LB-PQC 和 LB-PQS 三者 LGC-TL 方面均远远优于 RTBBA,尤其是后两者;当 CVTLF 为 2.80 时,LB-PQV、LB-PQC 和 LB-PQS 的性能表现也明显优于 RTBBA;但随着计算试验的进行,LB-PQV、LB-PQC 和 LB-PQS 的 LGC-TL 指标急剧增加,这显然与航运公司的运营指标不符。

表 4 面向 LB-PQC 的负载测试结果
Tab. 4 Load testing result for LB-PQC

组别	挂靠船舶 负载系数	船舶平均通过 能力/艘	通过能力标准 偏差/艘	通过能力 极差/艘	平均集装箱 吞吐量/TEU	平均压船 数量/艘	压船数量标准 偏差/艘	平均压港集装箱 数量/TEU
1	1.50	3 355.60	19.328	87	15 136 272.92	5.20	1.323	27 786.12
2	2.00	3 351.84	19.756	81	20 152 543.20	6.80	1.384	46 512.80
3	2.25	3 353.88	21.985	82	22 656 647.48	7.72	1.487	60 667.80
4	2.50	3 346.52	21.564	74	25 076 227.48	8.48	1.896	70 201.72
5	2.75	3 337.32	26.663	88	27 617 794.08	32.84	32.367	278 322.08
6	2.80	3 278.64	31.765	119	27 577 058.92	73.48	37.260	631 319.12
7	2.85	3 216.88	26.210	122	27 525 031.84	140.00	33.953	1 208 887.40
8	2.90	3 156.08	19.009	84	27 504 629.48	210.80	34.338	1 828 606.00
9	2.95	3 111.72	19.280	70	27 531 409.88	247.04	20.709	2 199 425.00
10	3.00	3 054.44	20.684	74	27 567 171.48	307.32	29.361	2 783 698.32

表 5 面向 LB-PQS 的负载测试结果
Tab. 5 Load testing result for LB-PQS

组别	挂靠船舶 负载系数	船舶平均通过 能力/艘	通过能力标准 偏差/艘	通过能力 极差/艘	平均集装箱 吞吐量/TEU	平均压船 数量/艘	压船数量标准 偏差/艘	平均压港集装箱 数量/TEU
1	1.50	3 352.12	16.481	75	15 104 631.04	5.40	1.384	28 852.92
2	2.00	3 346.88	21.123	81	20 083 831.04	6.88	1.641	47 135.12
3	2.25	3 349.12	19.743	73	22 671 001.92	7.52	1.851	58 858.28
4	2.50	3 349.04	17.537	74	25 165 221.92	8.80	2.062	74 183.60
5	2.75	3 331.12	27.216	86	27 588 971.48	32.28	25.851	276 136.52
6	2.80	3 284.68	36.197	125	27 684 738.92	67.88	42.181	580 522.92
7	2.85	3 216.88	26.210	122	27 525 031.84	140.00	33.953	1 208 887.40
8	2.90	3 161.32	27.175	116	27 542 684.08	192.88	37.971	1 697 573.32
9	2.95	3 101.40	19.706	72	27 539 590.96	257.92	26.607	2 317 713.56
10	3.00	3 054.68	15.771	65	27 570 316.08	303.00	29.727	2 735 949.48

大型集装箱船舶通常均为外贸干线运输，LGC-TL 指标对其十分关键，于是重点面向超巴拿马型船舶Ⅲ～Ⅵ等 4 种船型，对相关的 LGC-TL 进行统计，其结果见表 6、7。上述 4 种船型约占挂靠港口船舶数量的 2/3，且通常情况下此类船舶均为外贸干线船舶，是 CTHS 需要重点进行装卸作业和物流服务的，它们的生产效率也是航运公司最为关注的。

从 LGC-TL 指标来看，当系统任务载荷较高但在 LGC 服务能力范围内时，LB-PQC、LB-PQS、LB-PQV 较 RTBBA 具有明显的优势，尤其是前两者。LB-PQC、LB-PQS 均能将大型集装箱干线船舶的物流广义计算任务延迟较 LB-PQV 缩短约 17 h。在系统任务明显过载的情况下，LB-PQC、LB-PQS 同样较 LB-PQV、RTBBA 性能优势明显。LB-PQC 能将大型干线船舶的物流广义计算任务延迟较 LB-PQV

减小 100～110 h，LB-PQS 能将上述任务延迟较 LB-PQV 减小约 120 h。

总体来看，LB-PQS 又表现出较 LB-PQC 更优且更稳定，其 LGC-TL 的可预见性更强，性能变化的指标范围更集中，更重要的是其对于各种重点服务船型均表现了上述属性。综上所述，LB-PQC、LB-PQS 是面向 HPHRCM-CTH，较好的泊位指派策略和 PEC 分配算法，无论是在 LGC 吞吐量还是任务延迟方面都表现出了较优的性能。

2.3 物流广义计算访存性能分析

在 2.2 节中，基于 LGC 的“计算”视角，从 CTHS 吞吐量和任务延迟的维度综合评估了集装箱码头的物流计算性能。本节从 LGC 的“访存”视角，将到港船舶的停泊装卸作业时间抽象为物流广义计算访问存储时间（Logistics Generalized Computation Memory Access Time，LGC-MAT）。

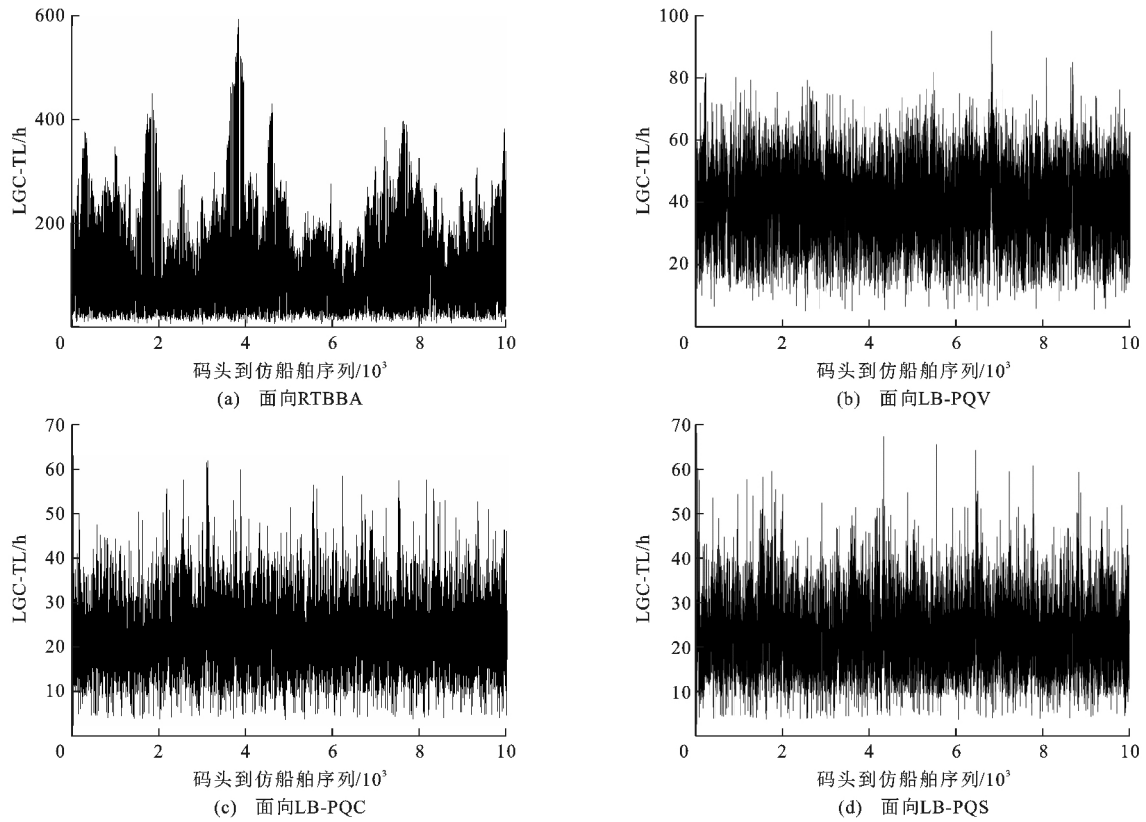


图 4 挂靠船舶负载系数为 2.50 时物流广义计算任务延迟对比

Fig. 4 LGC-TL comparison when CVTLF is 2.50

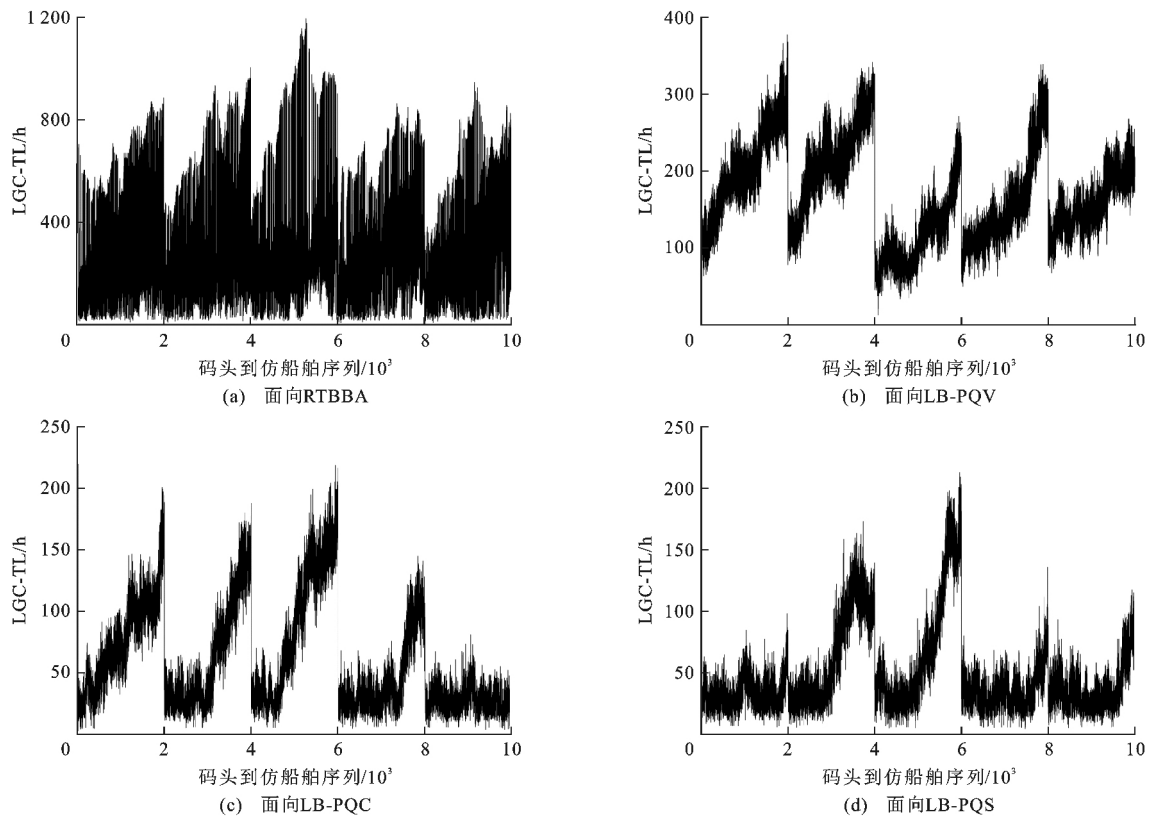


图 5 挂靠船舶负载系数为 2.80 时物流广义计算任务延迟对比

Fig. 5 LGC-TL comparison when CVTLF is 2.80

表 6 挂靠船舶负载系数为 2.50 时物流广义计算任务延迟关键指标

Tab. 6 LGC-TL key indicators when CVTLF is 2.50

组别	挂靠船舶船型类别	调度策略	船舶数量/艘	LGC-TL 平均值/h	LGC-TL 标准偏差/h	LGC-TL 最大值/h	LGC-TL 极差/h
1	超巴拿马型船舶Ⅲ	RTBBA	1 717	99.681	78.323	593.724	581.124
2	超巴拿马型船舶Ⅳ	RTBBA	2 623	99.203	74.117	561.779	545.922
3	超巴拿马型船舶Ⅴ	RTBBA	1 688	104.584	73.098	527.855	505.250
4	超巴拿马型船舶Ⅵ	RTBBA	515	120.718	80.488	508.938	479.396
5	超巴拿马型船舶Ⅲ	LB-PQV	1 777	38.318	11.285	86.327	72.853
6	超巴拿马型船舶Ⅳ	LB-PQV	2 699	42.276	11.283	84.906	68.897
7	超巴拿马型船舶Ⅴ	LB-PQV	1 536	47.320	10.788	94.895	73.141
8	超巴拿马型船舶Ⅵ	LB-PQV	519	54.707	10.894	83.245	53.792
9	超巴拿马型船舶Ⅲ	LB-PQC	1 850	21.176	5.372	48.094	35.535
10	超巴拿马型船舶Ⅳ	LB-PQC	2 675	24.822	5.442	61.929	46.399
11	超巴拿马型船舶Ⅴ	LB-PQC	1 548	30.606	5.612	58.636	37.483
12	超巴拿马型船舶Ⅵ	LB-PQC	511	37.514	5.499	61.500	32.320
13	超巴拿马型船舶Ⅲ	LB-PQS	1 782	21.094	5.107	60.868	48.762
14	超巴拿马型船舶Ⅳ	LB-PQS	2 745	24.830	5.610	58.362	43.018
15	超巴拿马型船舶Ⅴ	LB-PQS	1 651	30.300	5.268	60.259	38.854
16	超巴拿马型船舶Ⅵ	LB-PQS	483	37.742	5.567	67.443	38.386

表 7 挂靠船舶负载系数为 2.80 时物流广义计算任务延迟关键指标

Tab. 7 LGC-TL key indicators when CVTLF is 2.80

组别	挂靠船舶船型类别	调度策略	船舶数量/艘	LGC-TL 平均值/h	LGC-TL 标准偏差/h	LGC-TL 最大值/h	LGC-TL 极差/h
1	超巴拿马型船舶Ⅲ	RTBBA	1 793	281.534	215.855	1 098.416	1 082.694
2	超巴拿马型船舶Ⅳ	RTBBA	2 667	290.514	216.155	1 178.023	1 160.491
3	超巴拿马型船舶Ⅴ	RTBBA	1 625	291.480	218.265	1 154.331	1 127.570
4	超巴拿马型船舶Ⅵ	RTBBA	506	303.225	211.350	978.114	945.078
5	超巴拿马型船舶Ⅲ	LB-PQV	1 801	170.176	62.320	341.730	304.213
6	超巴拿马型船舶Ⅳ	LB-PQV	2 612	170.395	61.932	366.229	332.556
7	超巴拿马型船舶Ⅴ	LB-PQV	1 620	175.056	62.292	357.622	314.481
8	超巴拿马型船舶Ⅵ	LB-PQV	510	186.776	61.181	373.894	316.228
9	超巴拿马型船舶Ⅲ	LB-PQC	1 814	57.323	40.904	193.019	179.331
10	超巴拿马型船舶Ⅳ	LB-PQC	2 691	63.201	42.039	218.969	201.222
11	超巴拿马型船舶Ⅴ	LB-PQC	1 597	69.790	44.138	202.012	177.473
12	超巴拿马型船舶Ⅵ	LB-PQC	492	80.262	44.252	216.822	183.996
13	超巴拿马型船舶Ⅲ	LB-PQS	1 871	46.692	34.652	188.798	175.656
14	超巴拿马型船舶Ⅳ	LB-PQS	2 743	49.663	33.286	202.990	185.681
15	超巴拿马型船舶Ⅴ	LB-PQS	1 570	55.525	33.098	209.299	185.610
16	超巴拿马型船舶Ⅵ	LB-PQS	476	65.725	35.451	212.840	180.612

通过对 2.2 节所截取的 10 000 艘到港船舶的 LGC-MAT 进行统计,可得到图 6、7 的结果。然而,由图 6、7 很难评判出各种策略中 LGC-MAT 指标的优劣,于是同样重点面向超巴拿马型船舶Ⅲ~Ⅵ等 4 种船型展开统计对比,其 LGC-MAT 关键指标值见表 8、9,可以看出:在同样的岸桥分配和调度策略下,RTBBA、LB-PQV、LB-PQC 和 LB-PQS 在 LGC-MAT 上存在着明显的差异性和不同的适应性;当 CVTLF 为 2.50 时,RTBBA 已经具有较大的船舶滞港压力, LB-PQV、LB-PQC 和 LB-PQS

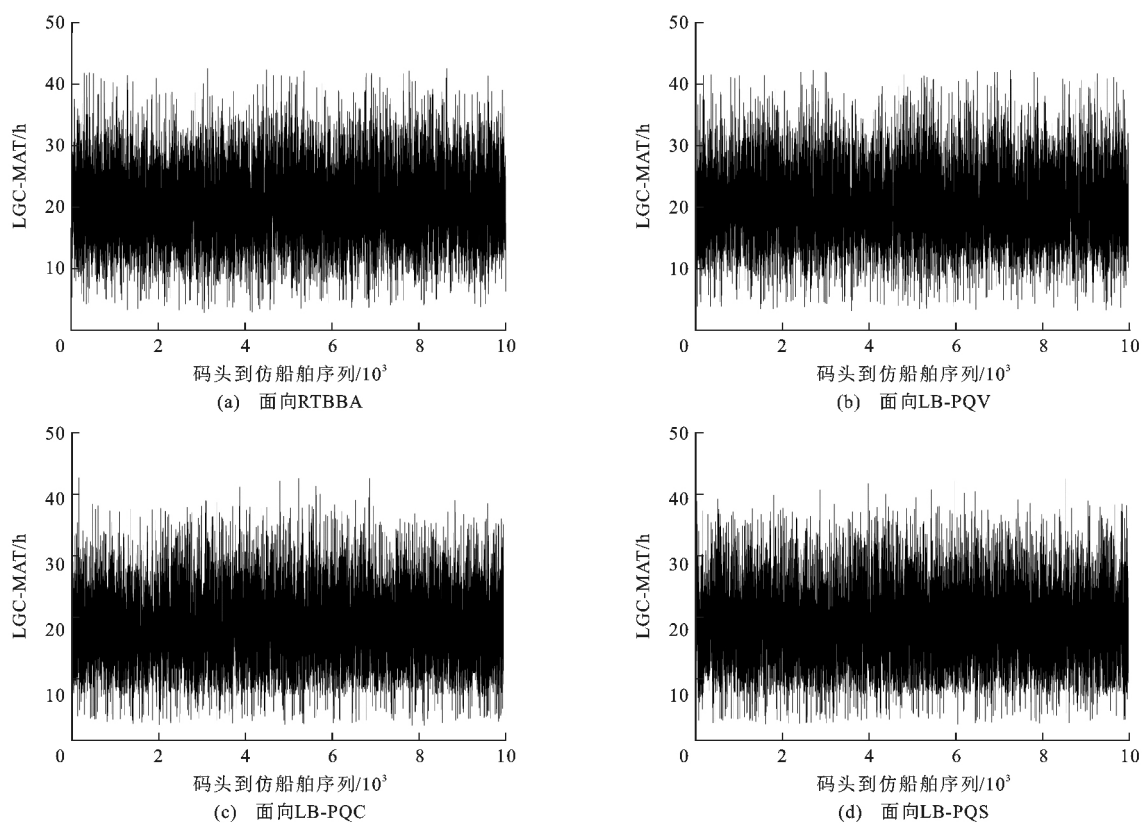


图 6 挂靠船舶负载系数为 2.50 时物流广义计算访问存储时间对比

Fig. 6 LGC-MAT comparison when CVTLF is 2.50

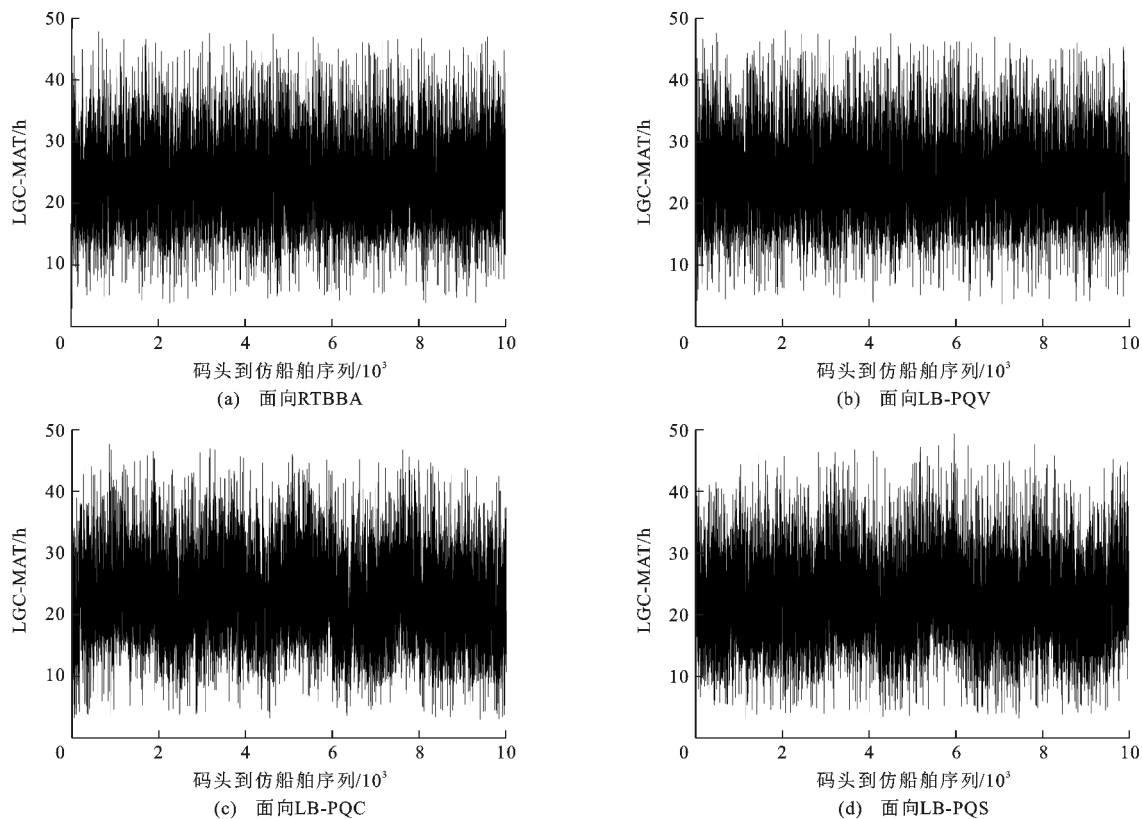


图 7 挂靠船舶负载系数为 2.80 时物流广义计算访问存储时间对比

Fig. 7 LGC-MAT comparison when CVTLF is 2.80

表 8 挂靠船舶负载系数为 2.50 时物流广义计算访问存储时间关键指标

Tab. 8 LGC-MAT key indicators when CVTLF is 2.50

组别	挂靠船舶船型类别	调度策略	船舶数量/艘	LGC-MAT 平均值/h	LGC-MAT 标准偏差/h	LGC-MAT 最大值/h	LGC-MAT 极差/h
1	超巴拿马型船舶Ⅲ	RTBBA	1 717	18.820	3.924	31.767	21.770
2	超巴拿马型船舶Ⅳ	RTBBA	2 623	22.110	3.945	33.928	20.707
3	超巴拿马型船舶Ⅴ	RTBBA	1 688	27.078	3.435	38.726	19.973
4	超巴拿马型船舶Ⅵ	RTBBA	515	33.606	3.786	42.443	16.833
5	超巴拿马型船舶Ⅲ	LB-PQV	1 777	18.979	3.796	32.613	22.005
6	超巴拿马型船舶Ⅳ	LB-PQV	2 699	22.103	3.881	38.135	24.985
7	超巴拿马型船舶Ⅴ	LB-PQV	1 536	27.289	3.450	38.169	19.827
8	超巴拿马型船舶Ⅵ	LB-PQV	519	33.836	3.824	42.309	16.318
9	超巴拿马型船舶Ⅲ	LB-PQC	1 850	17.003	3.429	26.950	17.266
10	超巴拿马型船舶Ⅳ	LB-PQC	2 675	20.396	3.644	32.180	19.504
11	超巴拿马型船舶Ⅴ	LB-PQC	1 548	25.688	3.320	35.140	16.676
12	超巴拿马型船舶Ⅵ	LB-PQC	511	32.231	3.473	42.644	17.096
13	超巴拿马型船舶Ⅲ	LB-PQS	1 782	17.180	3.438	29.177	19.521
14	超巴拿马型船舶Ⅳ	LB-PQS	2 745	20.378	3.571	30.501	17.822
15	超巴拿马型船舶Ⅴ	LB-PQS	1 651	25.787	3.450	34.862	16.738
16	超巴拿马型船舶Ⅵ	LB-PQS	483	32.590	3.359	42.397	17.059

表 9 挂靠船舶负载系数为 2.80 时物流广义计算访问存储时间关键指标

Tab. 9 LGC-MAT key indicators when CVTLF is 2.80

组别	挂靠船舶船型类别	调度策略	船舶数量/艘	LGC-MAT 平均值/h	LGC-MAT 标准偏差/h	LGC-MAT 最大值/h	LGC-MAT 极差/h
1	超巴拿马型船舶Ⅲ	RTBBA	1 793	22.430	4.435	37.875	25.676
2	超巴拿马型船舶Ⅳ	RTBBA	2 667	25.620	4.448	41.855	27.802
3	超巴拿马型船舶Ⅴ	RTBBA	1 625	31.142	3.821	42.994	20.472
4	超巴拿马型船舶Ⅵ	RTBBA	506	38.830	4.209	48.014	19.202
5	超巴拿马型船舶Ⅲ	LB-PQV	1 801	22.661	4.358	38.894	26.106
6	超巴拿马型船舶Ⅳ	LB-PQV	2 612	26.086	4.371	43.478	27.516
7	超巴拿马型船舶Ⅴ	LB-PQV	1 620	31.406	3.876	43.572	21.497
8	超巴拿马型船舶Ⅵ	LB-PQV	510	38.841	4.058	48.097	18.986
9	超巴拿马型船舶Ⅲ	LB-PQC	1 814	20.979	4.348	37.051	26.102
10	超巴拿马型船舶Ⅳ	LB-PQC	2 691	24.540	4.391	41.507	26.907
11	超巴拿马型船舶Ⅴ	LB-PQC	1 597	30.256	3.831	43.020	22.388
12	超巴拿马型船舶Ⅵ	LB-PQC	492	37.942	4.051	47.695	18.838
13	超巴拿马型船舶Ⅲ	LB-PQS	1 871	20.632	4.254	36.880	26.093
14	超巴拿马型船舶Ⅳ	LB-PQS	2 743	24.292	4.394	38.823	24.245
15	超巴拿马型船舶Ⅴ	LB-PQS	1 570	29.946	3.810	42.520	21.648
16	超巴拿马型船舶Ⅵ	LB-PQS	476	37.709	4.242	49.301	20.486

尚无大量的滞留港口船舶,在 LGC-MAT 的表现上,RTBBA 并不是最差的,而是 LB-PQV, LB-PQC 的性能最优, LB-PQS 次之;当 CVTLF 为 2.80 时, CTHS 已经超负荷运转,在各种策略下,系统均有较多数量的压港船舶, LB-PQS 的 LGC-MAT 表现最优, LB-PQC 次之, RTBBA 再次之, 同样是 LB-PQV 最差;无论是在作业饱和还是过载情况下, LB-PQC 和 LB-PQS 均能缩短大型干线船舶的 LGC-

MAT 约 1~2 h,尤其是后者在任务过载情况下表现更佳。然而,在前述的负载测试和 LGC-TL 测试中, LB-PQV 的性能却不是最差的,这是一个十分值得关注的 LGC 调度特性。

在本生产实例中,第 2、3 存储层次容器未有明显区分。分析表 6~9 的统计数据,对比 4 种调度策略在 LGC-TL 和 LGC-MAT 上的表现,可以看出各种策略在 LGC-MAT 上的差异性远远小于在 LGC-TL 指标上的差距,充分说明了第 1 存储层次容器

利用率和分配策略对于系统整体性能影响巨大。为了有针对性的对各种调度策略进行对比分析,定义船型组(Ship Type Group, STG)来表示多种船型,其中 STG-I 包含超巴拿马型船舶Ⅲ~Ⅵ;STG-II 包含超巴拿马型船舶Ⅲ~Ⅴ;STG-Ⅲ包含超巴拿马型船舶Ⅲ、Ⅳ。于是,对前述的 10 000 艘到港作业船舶进行统计分析,可得到各种 STG 服务船舶的数量见表 10。

在所有挂靠船舶中,STG-I、STG-II、STG-Ⅲ

表 10 不同调度策略服务船舶数量对比

Tab. 10 Comparison of served ship numbers under different scheduling policies

调度策略	挂靠船舶负载系数	STG-I 服务船舶数量/艘	STG-II 服务船舶数量/艘	STG-Ⅲ 服务船舶数量/艘	超巴拿马型船舶Ⅵ数量/艘
RTBBA	2.50	6 543	6 028	4 340	515
LB-PQV	2.50	6 531	6 012	4 476	519
LB-PQC	2.50	6 584	6 073	4 525	511
LB-PQS	2.50	6 661	6 178	4 527	483
RTBBA	2.80	6 591	6 085	4 460	506
LB-PQV	2.80	6 543	6 033	4 413	510
LB-PQC	2.80	6 594	6 102	4 505	492
LB-PQS	2.80	6 660	6 184	4 614	476

包含的船舶数量分别占 66%、61%、45%。调度策略中能服务 STG-I、STG-II 和 STG-Ⅲ 在数量(服务船舶数量)和质量(LGC-TL、LGC-MAT 平均值、最大值、极差)更好者,相应地 CTLS 的物流广义计算综合性能就更好。由表 10 可以看出:LB-PQC 和 LB-PQS 在服务各类 STG 数量和质量方面具有突出的优势,尤其是 LB-PQS,无论是在正常负载还是任务过载情况下,在服务 STG-II,即当前主力大型船舶方面(占到全体挂靠船舶的 61%),表现出了十分突出的优势;相较于 LB-PQS, LB-PQC 的优势主要在于其不仅能较好地服务于 STG-II,其在确保服务最大型的超巴拿马型船舶 VI 质量的同时(与 LB-PQS 相当,优于 RTBBA 和 LB-PQV),对该船型的服务数量上也表现出了较 LB-PQS 更为均衡的性能,故 LB-PQC 和 LB-PQS 两种算法各自有自己适用的状况和调度重点,CTHS 可以根据具体情况选择适用。

3 结 语

(1)基于 CTCL,在集装箱码头物流领域拓展、迁移和延伸计算本质,通过抽象集装箱码头 LGC 硬件计算设施设备、LGC 计算自动化机制和 LGC 递归计算规则,提出了 HPHRCM-CTH,得到了较为明确的集装箱枢纽码头 LGC 硬件概念模型、抽象计

算视图、可重构计算体系和混合调度策略,给出了设计敏捷鲁棒的码头调度算法框架和基础。

(2)集装箱码头可以根据自身服务能力和挂靠船舶状况,基于 HPHRCM-CTH,可以对码头生产调度决策的多目标优化进行转化、剖析、评估、分析和定义,进而通过引入计算机和自动化学科中成熟、敏捷、健壮的框架、机制、策略和算法到集装箱码头作业系统中,设计相应的任务调度体系和不同的资源分配算法,通过评估不同任务负载下不同调度决策的综合性能,得到码头的作业上限和指出各种调度模式的特性,帮助码头管理人员根据不同的作业负载和运营重点选择合适的调度策略,提高码头的综合作业性能。

(3)集装箱码头生产调度是一个典型的多阶段、多资源、多目标优化问题,基于 CTCL 对 CTHS 进行探讨,是一条有别于以往研究方法的新的解决路径,有望对集装箱码头作业调度、资源分配、任务加载、生产线动态局部重构的体系构建、策略选取、算法设计与性能评估提供较好的抽象模型、自动化体系和理论支撑,从而为 CTHS 提供敏捷高效鲁棒的调度决策研究框架和工程实践解决方案。

(4)CTHS 与计算机系统毕竟有较大的区别,如何更好的泛化迁移和学习定制信息世界中成熟高效的原理、机制和策略到复杂交通/物流枢纽的控制决

策中,仍有大量的工作有待进行,尤其是异构计算、并行计算和可重构计算等新的思想和体系不断涌现,这些既带来了改进集装箱码头作业系统的思想源泉和机遇,也对现有的码头调度管理带来了新的挑战。

参考文献:

References:

- [1] LEE Chung-ye, SONG Dong-ping. Ocean container transport in global supply chains: overview and research opportunities[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2017, 95: 442-474.
- [2] CRAINIC T G, PERBOLI G, ROSANO M. Simulation of intermodal freight transportation systems: a taxonomy[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 270(2): 401-408.
- [3] WANG Ping, MILESKE J, ZENG Qing-cheng. Toward a taxonomy of container terminals' practices and performance: a contingency and configuration study [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2019, 121: 92-107.
- [4] 刘兵兵,孙李波,余玉刚. 仓储、物流与供应链管理研究新进展[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, 47(2): 176-187.
LIU Bing-bing, SUN Li-bo, YU Yu-gang. Recent advances on researches of warehousing, logistics and supply chain management[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(2): 176-187. (in Chinese)
- [5] 王 帆,黄锦佳,刘作仪. 港口管理与运营: 新兴研究热点及其进展[J]. 管理科学学报, 2017, 20(5): 111-126.
WANG Fan, HUANG Jin-jia, LIU Zuo-yi. Port management and operations: emerging research topics and progress[J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(5): 111-126. (in Chinese)
- [6] LEHNFIELD J, KNUST S. Loading, unloading and premarshalling of stacks in storage areas: survey and classification [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 239(2): 297-312.
- [7] BIERWIRTH C, MEISEL F. A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 244(3): 675-689.
- [8] CARLO H J, VIS I F A, ROODBERGEN K J. Storage yard operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235(2): 412-430.
- [9] CARLO H J, VIS I F A, ROODBERGEN K J. Transport operations in container terminals: literature overview, trends, research directions and classification scheme [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 236(1): 1-13.
- [10] 陈江涛,吕建秋. 基于知识图谱的运筹学发展现状及趋势研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(1): 194-199.
CHEN Jiang-tao, LYU Jian-qiu. Research on the present situation and tendency of operational research based on knowledge map[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(1): 194-199. (in Chinese)
- [11] ZHANG Zi-zhen, LEE Chung-ye. Multiobjective approaches for the ship stowage planning problem considering ship stability and container rehandles[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(10): 1374-1389.
- [12] URSAVAS E, ZHU S X. Optimal policies for the berth allocation problem under stochastic nature[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 255(2): 380-387.
- [13] LIU Ding, GE Ying-en. Modeling assignment of quay cranes using queueing theory for minimizing CO₂ emission at a container terminal [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 61: 140-151.
- [14] CHEN Jiang-hang, BIERLAIRE M. The study of the unidirectional quay crane scheduling problem: complexity and risk-aversion[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 260(2): 613-624.
- [15] 梁承姬,严亚平,李玲君. 双40英尺岸桥的集卡调度问题研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 522-529.
LIANG Cheng-ji, YAN Ya-ping, LI Ling-jun. Research of vehicle scheduling for dual 40' quay crane [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(2): 522-529. (in Chinese)
- [16] 赵金楼,黄金虎,刘 馨,等. 考虑燃料成本的集装箱码头集卡路径优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(12): 1985-1990.
ZHAO Jin-lou, HUANG Jin-hu, LIU Xin, et al. Optimization for routing yard trailers in container terminals by considering fuel cost [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(12): 1985-1990. (in Chinese)
- [17] 邵乾虔,徐婷婷,杨惠云,等. 集卡分批到达模式下的进口箱场桥作业调度优化[J]. 控制与决策, 2016, 31(9): 1654-1662.
SHAO Qian-qian, XU Ting-ting, YANG Hui-yun, et al. Scheduling optimization of yard crane for import containers based on truck batch arrival pattern [J]. Control and Decision, 2016, 31(9): 1654-1662. (in Chinese)
- [18] ZHEN Lu, XU Zhou, WANG Kai, et al. Multi-period yard template planning in container terminals[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2016, 93: 700-719.
- [19] DA SILVA M D M, ERDOĞAN G, BATTARRA M, et al. The block retrieval problem [J]. European Journal of Operational Research, 2018, 265(3): 931-950.
- [20] DA SILVA M D M, TOULOUSE S, CALVO R W. A new effective unified model for solving the pre-marshalling and block relocation problems[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 271(1): 40-56.
- [21] TAO Yi, LEE Chung-ye. Joint planning of berth and yard allocation in transshipment terminals using multi-cluster stacking strategy [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 83: 34-50.
- [22] LIN Dung-ying, LEE Yen-ju, LEE Yu-sin. The container retrieval problem with respect to relocation [J]. Transportation

- Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 52: 132-143.
- [23] HU Zhi-hua. Heuristics for solving continuous berth allocation problem considering periodic balancing utilization of cranes[J]. Computers and Industrial Engineering, 2015, 85: 216-226.
- [24] JI Ming-jun, GUO Wen-wen, ZHU Hui-ling, et al. Optimization of loading sequence and rehandling strategy for multi-quay crane operations in container terminals[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015, 80: 1-19.
- [25] NIU Ben, XIE Ting, TAN Li-jing, et al. Swarm intelligence algorithms for yard truck scheduling and storage allocation problems[J]. Neurocomputing, 2016, 188(5): 284-293.
- [26] TAN Cai-mao, HE Jun-liang, WANG Yu. Storage yard management based on flexible yard template in container terminal[J]. Advanced Engineering Informatics, 2017, 34: 101-113.
- [27] GALLE V, BARNHART C, JAILLET P. Yard crane scheduling for container storage, retrieval, and relocation[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 271(1): 288-316.
- [28] IRIS Ç, LAM J S L. Recoverable robustness in weekly berth and quay crane planning[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 122: 365-389.
- [29] VAHDANI B, MANSOUR F, SOLTANI M, et al. Bi-objective optimization for integrating quay crane and internal truck assignment with challenges of trucks sharing [J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 163: 275-293.
- [30] 韩笑乐, 鞠留红, 钱丽娜, 等. 集装箱进出口码头泊位-堆场协同分配的动态决策[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(1): 69-76.
- HAN Xiao-le, JU Liu-hong, QIAN Li-na, et al. Dynamic decision making for the integrated allocation of berth and yard resource at import/export container terminals[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53(1): 69-76. (in Chinese)
- [31] 曾庆成, 陈子根, 黄 玲. 集装箱码头同贝同步装卸调度的多阶段混合流水线模型[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(4): 499-505.
- ZENG Qing-cheng, CHEN Zi-gen, HUANG Ling. Multi-stage hybrid flow shop model for quay crane dual cycling in container terminals [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(4): 499-505. (in Chinese)
- [32] 秦天保, 葛 浩, 沙 梅. 约束规划求解集装箱装卸系统集成调度问题[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(8): 2127-2136.
- QIAN Tian-bao, GE Hao, SHA Mei. Constraint programming for the integrated scheduling problem of container handling systems in container terminals[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2015, 35(8): 2127-2136. (in Chinese)
- [33] 常伟妹, 朱晓宁, 王 力. 集装箱码头集成调度研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(1): 136-146.
- CHANG Yi-mei, ZHU Xiao-ning, WANG Li. Review on integrated scheduling of container terminals[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(1): 136-146. (in Chinese)
- [34] LÓPEZ-BERMÚDEZ B, FREIRE-SEOANE M J, GONZÁLEZ-LAXE F. Efficiency and productivity of container terminals in Brazilian ports (2008-2017)[J]. Utilities Policy, 2019, 56: 82-91.
- [35] FENG Hong-xiang, GRIFOLL M, ZHENG Peng-jun. From a feeder port to a hub port: the evolution pathways, dynamics and perspectives of Ningbo-Zhoushan Port (China)[J]. Transport Policy, 2019, 76: 21-35.
- [36] 鲁 渤, 汪寿阳. 中韩集装箱码头运营效率的比较研究[J]. 管理评论, 2017, 29(5): 175-182.
- LU Bo, WANG Shou-yang. A comparative study of the container terminal operating efficiency between China and South Korea[J]. Management Review, 2017, 29(5): 175-182. (in Chinese)
- [37] LI Bin, LI Wen-feng. Modeling and simulation of container terminal logistics systems using Harvard architecture and agent-based computing[C]//IEEE. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. New York: IEEE, 2010: 3396-3410.
- [38] LI Bin. Container terminal logistics scheduling and decision-making within the conceptual framework of computational thinking[C]//IEEE. 54th IEEE Conference on Decision and Control. New York: IEEE, 2015: 330-337.
- [39] 李 斌. 面向计算思维的集装箱码头装卸作业调度[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(3): 161-167.
- LI Bin. Container terminal loading and unloading task scheduling based on computational thinking[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(3): 161-167. (in Chinese)
- [40] 李 斌. 基于计算物流的集装箱码头集疏运虚拟机体系结构及其仿真分析[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 245-263.
- LI Bin. Collection and distribution virtual machines architecture of container terminal based on computational logistics and its simulation analysis[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 245-263. (in Chinese)
- [41] LI Bin, WAN Yun-fei, SUN Bing. Container terminal logistics computation performance evaluation with great principles of computing and case study[C]//IEEE. Proceedings of the 2018 Chinese Automation Congress (CAC 2018). New York: IEEE, 2018: 934-939.
- [42] 袁 良, 张云泉. 基于横向局部性的多核计算模型[J]. 计算机科学, 2012, 39(7): 1-6.
- YUAN Liang, ZHANG Yun-quan. Multi-core parallel computational model based on horizontal locality[J]. Computer Science, 2012, 39(7): 1-6. (in Chinese)
- [43] 王 欢, 都志辉. 并行计算模型对比分析[J]. 计算机科学, 2005, 32(12): 142-145.
- WANG Huan, DU Zhi-hui. Contrastive analysis of parallel computation model [J]. Computer Science, 2005, 32(12): 142-145. (in Chinese)
- [44] 李 斌. 基于哈佛体系结构的集装箱码头物流系统建模仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.

- LI Bin. Modeling and simulation of container terminal logistics system based on Harvard architecture[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [45] CARLO H J, VIS I F A, ROODBERGEN K J. Seaside operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2015, 27(2/3): 224-262.
- [46] KAVESHGAR N, HUYNH N. Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 159: 168-177.
- [47] HWANG F J, LIN B M T. Two-stage flexible flow shop scheduling subject to fixed job sequences[J]. Journal of the Operational Research Society, 2016, 67(3): 506-515.
- [48] 张煜,容芷君,马杰. 含批处理机和多工件族的混合流水车间问题[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(2): 407-413.
- ZHANG Yu, RONG Zhi-jun, MA Jie. Hybrid flow shop problem with batching machines and multi-jobs families[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(2): 407-413. (in Chinese)
- [49] 杨宜佳,朱晓宁,闫柏丞,等. 考虑能耗的铁水联运集装箱装卸设备协同调度[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(6): 215-221.
- YANG Yi-jia, ZHU Xiao-ning, YAN Bai-cheng, et al. Integrated scheduling of rail-water containers handling operations in intermodal terminals considering energy-efficiency[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(6): 215-221. (in Chinese)
- [50] 李斌. 面向PID控制和仿真优化的集装箱码头作业调度[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(3): 833-845.
- LI Bin. Container terminal task scheduling oriented to PID control and simulation optimization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(3): 833-845. (in Chinese)