

集卡预约服务系统扰动的多级响应机制研究

李娜¹, 王彦秋²

(1. 大连海事大学交通运输管理学院, 辽宁大连 116026;

2. 辽东学院现代教育技术中心, 辽宁丹东 118003)

摘要: 为缓解集卡预约服务系统频发扰动事件的影响, 基于干扰管理理论、集卡预约与码头调度方法, 分析集卡预约扰动的累加性、持续性与多重性特点, 提炼出码头集卡预约服务系统扰动中的三大主体, 包括环境、集卡和码头的扰动度量方法。结合码头作业的特点, 构建码头经营者应对扰动可采取的五级响应策略。环境的扰动恢复策略为设备重新分配或增加投入; 准时集卡的扰动恢复可调整集卡服务顺序或改变存储位置; 码头设备受扰可逐级利用改变储位、调整设备、增加投入的方法改善。根据3个主体受扰程度的三维交错情景, 建立扰动应对策略选择的多维判别标准。最后, 提出评价应对策略的5个准则, 即系统恢复时间、设备投入量和3个主体各自的扰动程度。本文针对集卡预约扰动应对机制的研究对后续进一步的深入拓展起到了铺垫作用。

关键词: 物流系统管理; 集卡预约; 干扰管理; 多级响应机制

中图分类号: C934 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2017)02-0230-07

Study on multiple response mechanism of disruption in truck appointment service system

LI Na¹, WANG Yanqiu²

(1. College of Transportation Management, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China;

2. Center of Modern Education Technology, Eastern Liaoning University, Dandong, Liaoning 118003, China)

Abstract: This paper was to mitigate the effect of frequent disruptions in truck appointment system based on disruption management theory, truck appointment and terminal scheduling method. Disruptions in truck appointment were characterized as summative, persistence and multiplicity. Methods were proposed to measure disruptions of three subjects in truck appointment service system, including environment, trucks and terminal. Five levels response strategies were designed for terminal operators according to the characteristics of terminal operation. The strategy for environment recovery is to reschedule equipment or increase input. Recovery strategy for punctual trucks can reschedule truck service sequence, or changing storage location. And terminal equipment disruption can be improved by location change, equipment rescheduling or input increase. According to the three dimensional scenarios of disruptions measurement on three subjects, multidimensional criteria were set up for strategy choices of disruption response. At last, five performance indicators were proposed to evaluate the strategies, including recovery time of the system, equipment inputs and three disruption measurements of the subjects. As a starting research on disruption response mechanism of truck appointment system, this paper acts as a good insight for future studies.

Key words: logistics system management; truck appointment; disruption management; multiple response mechanism

0 引言

集卡预约服务是全球码头经营者近年来的创新模式之一, 码头通过集卡预约系统公布可预约到港的

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20132125120009); 教育部人文社科研究项目(14YJC630064)

作者简介: 李娜(1981—), 女, 讲师, 主要研究方向: 物流系统优化. E-mail: lina@dlmu.edu.cn

时间段，卡车公司根据自身情况选择抵港时段预约到港。美国的洛杉矶、长滩、新奥尔良，英国南安普顿，比利时安特卫普，加拿大温哥华，澳大利亚悉尼等多个地区的集装箱码头均实行了集卡到港预约业务。我国大连、天津、宁波等港口也陆续推进集卡预约服务。一定程度上说，集卡预约业务构筑了码头与卡车公司之间沟通的桥梁，码头通过集卡预约获取集卡到港信息，从而有效安排码头内部机械配置与箱位分配；卡车公司通过预约系统，避开高峰时段抵港，缓解了集中到港导致的长时间排队拥堵，缩短了在港周转时间。

但在实践中，集卡预约系统却遭遇重重扰动：集卡司机受限于货主备货、海关商检等审验，以及路况车况多变等因素，导致到港时间不确定，常出现“该来的没来，不该来的来了”的尴尬情况；而由于大雾、大风、暴雨等自然条件，以及机械突发故障、场地翻箱作业延迟、内部装卸船作业与外部集卡作业冲突等原因，港口难以保证在约定的时段提供装卸服务，致使集卡满意度较低。

集卡预约服务调度系统的扰动具有累加性和持续性的特点，使码头经营者的管理难上加难：以集卡扰动为例，单个集卡的迟到貌似微乎其微，但不断累积的大规模集卡迟到会使得堆场翻箱量激增、场桥作业量失衡、集卡在港时间延长。这些干扰事件常常交替或同时发生，使管理者在面对干扰事件时束手无策。针对集卡预约系统累加、持续的多重扰动，构建科学有效的扰动应对机制与策略，使码头经营者在扰动发生时，能实时快速地提出应对方案，是产业界和学术界共同面临的重要问题。

集卡预约作为集卡到达管理的有效方法，在学术界引起了广泛兴趣。目前的研究主要分为3类：一是关于集卡预约每个时段的配额制定方法^[1-5]；二是研究集卡预约和码头内部的作业优化的交互影响^[6]；三是以 PHAN 等^[7-8]为代表的预约系统与集卡公司车辆调度之间的协调优化。

在干扰管理的研究上，胡祥培等^[9]总结了干扰管理模型与算法的研究现状，提出了干扰管理的发展趋势。在交通领域中，航班^[10-13]、船舶^[14-15]、班列^[16]计划的干扰管理取得了一定进展。而在码头运作管理的扰动管理研究中，曾庆成等^[17]、GUI 等^[18]分别研究了码头泊位计划的扰动。

现有的集卡预约管理研究针对集卡迟早等扰动情况，多基于概率的方法研究调度策略的鲁棒性；而干扰管理的研究或者集中于与船舶作业相关的码头管理，或者将码头的扰动看作供应链中的一个节点，较少涉及与集卡到港干扰相关的应对方法。本研究的学术贡献是针对集卡预约服务系统扰动的特点，结合干扰管理的理论方法，从扰动快速恢复、减少系统扰动的角度，构建实时扰动的应对机制，提高集卡预约系统的抗干扰能力，完善现有干扰管理的理论与方法。

1 集卡预约系统的扰动度量

图 1 展示了码头众多的参与主体在不同的扰动事件下受到的干扰。集卡预约系统的参与主体包括三大类：环境、集卡、码头。环境主要指空气质量，集卡预约服务中干扰事件的发生会延长集卡排队怠速行驶的时间，增加集卡的尾气排放。

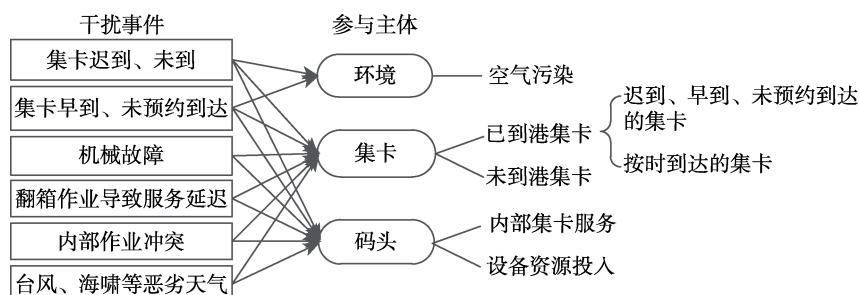


图 1 集卡预约系统多主体的多重扰动示意图

Fig. 1 Illustration of multiple disruptions on the multiple objects in truck appointment system

第二大主体是集卡，分为已到港集卡和未到港集卡，而已到港集卡又包含按时到达的集卡以及迟到、早到、未经预约直接到港的集卡。已预约但未到港的集卡具有较高的不确定性。在已到港的集卡集合中，相对而言，按时到达的集卡服务是最应该受到保证的，以便于激励拖车公司与司机能提前预约并准时到港。因此，在扰动应对机制的构建中，选择按时到达的集卡群体所受到的扰动作为判别扰动程度的依据之一。

码头主体包括为船舶装卸作业服务的内部集卡，以及设备资源的投入与利用情况。通常，当码头内部集卡与外部集卡作业冲突时，内部集卡享有较高的优先权，因此内部集卡受到的扰动较小。场桥、闸口匝道等设备资源的利用率与作业量均衡性与实时情景下的扰动程度息息相关，在扰动恢复策略中，增加场桥等资源的投入是常用的手段。因此，将设备利用情况的均衡性与总投入量作为度量的标准。

下面针对集卡预约服务过程中的扰动，从环境、按时到达的集卡、码头设备3个方面进行量化描述。

1.1 环境所受的扰动

集卡预约调度系统无法改变从闸口到堆场的行驶距离与时间，却可以通过有效的干扰管理改善拥堵，改变集卡在闸口和堆场怠速等待的时间。因此，以集卡怠速等待过程中的尾气排放量作为环境的扰动度量。利用等待时间与排放系数的乘积表示尾气排放量。设 w_v^G 为车辆 v 在闸口等待的时间， w_v^Y 为车辆 v 在堆场等待的时间， e 为尾气排放量系数，则 Z_1 为车辆怠速行驶过程中排放的尾气。尾气排放量系数 e 的依据是 Starcrest Consulting Group 统计的洛杉矶港卡车排放数据^[19]，如表 1 所示。

$$\min Z_1 = e \times \sum_v (w_v^G + w_v^Y). \tag{1}$$

表 1 卡车怠速排放系数 (e) (g/h)

Tab. 1 Emission factors (e) of truck engine idling (g/h)

气体类别	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	PM10	PM2.5	DPM	NO _x	SO _x	CO	HC
排放量	5119	0.164 7	0.657 0	0.008 5	0.008 1	0.007 9	36.791 5	0.048 4	3.103 9	1.116 2

1.2 按时到达集卡所受的扰动

当集卡 v 的到达时间 a_v 与预约时间 p_v 相等时，视为预约系统中最应受到准时服务的集卡群体，一切的调度调整都应最大程度地减少准时到达集卡的等待时间，包括在闸口的等待时间 w_v^G 、在缓冲区熄火停车等待的时间 w_v^B ，以及在堆场等待的时间 w_v^Y ，如式 (2) 所示。

$$\min Z_2 = \sum_v (w_v^G + w_v^B + w_v^Y | a_v = p_v). \tag{2}$$

1.3 码头设备所受的扰动

在集卡预约系统的扰动下，码头内部设备也受到极大的冲击。例如当台风过后，积压了大量的货物准备入港，码头必定动用所有场桥等设备全力投入，帮助航运公司追赶班期。或者在集卡迟到、场内翻箱延迟等微小扰动下，必定导致每个街区的场桥作业负荷不一致，即忙闲不均，这将导致生产力无法最大限度地被利用，是码头经营者不愿意看到的。因此，利用式 (3) 每个街区在每个时间段的平均作业量的平方差最小使各街区场桥作业量均衡。

$$\min Z_3 = \sum_b \left[\frac{Q_b^w + O_b^w}{Y_b} - \frac{\sum_b (Q_b^w + O_b^w)}{\sum_b Y_b} \right]^2, \tag{3}$$

$$\min Z_4 = \sum_b Y_b, \quad (4)$$

其中， Q_b^w 表示船舶在时间窗 w 街区 b 的集卡预约量； O_b^w 表示码头内部作业量； Y_b 表示街区 b 配备的场桥或叉车数量。式（4）表示码头在计划期投入的设备总量。

2 集卡预约系统扰动的多级响应机制

2.1 响应策略

当集卡预约服务系统出现扰动时，根据环境、集卡、码头三大主体所受扰动的程度，选择对应的 1~5 级响应策略。如图 2 所示，在备选策略中，从上至下，调度的难度依次增加，分别对应 5 个级别的扰动响应。

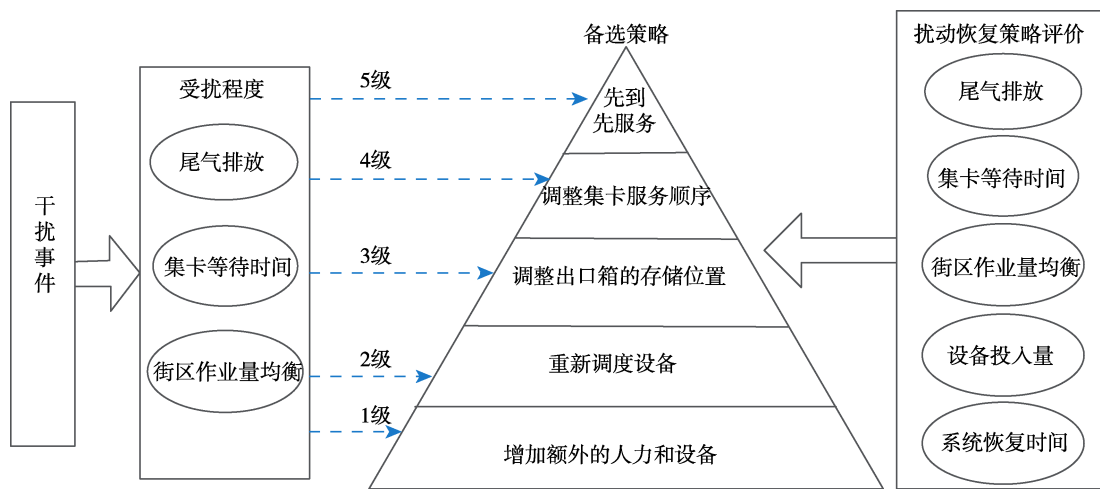


图 2 集卡预约系统扰动的多级响应机制

Fig. 2 Multiple levels response mechanism for disruptions in truck appointment system

5 级响应策略实际为不采取任何行动，按照集卡到达的先后顺序依次进闸，接受堆场装卸作业服务。

4 级响应策略通过各种优化方法调整集卡的服务顺序，例如根据集卡卸箱位置距离场桥的远近选择集卡服务顺序，或者通过优化算法得到完工时间最短的集卡服务顺序。

3 级响应策略是针对出口箱调整落箱位置，尤其当计划落箱的堆场场桥发生故障，或堆场作业严重繁忙，可以改变出口箱的落箱位置，减少集卡的等待时间。

2 级响应策略是重新部署场桥的服务街区，将空闲街区的场桥调至繁忙的街区。场桥通常分为轮胎式和轨道式两种，轮胎式场桥调整的范围相对较大。按照亚洲港口的堆场布局，一般一个街区可以容纳 0~4 台场桥作业，而通常每个街区有两台场桥同时作业。由于场桥体积庞大、笨重，在作业过程中调拨场桥的做法实属不得已而为之，但是在台风恢复之后，作业量发生变化，也是常有的一种应对策略。

1 级响应策略是新增人力和机械。人力与机械是配比增加的，在非全自动化码头上，增加一台机械，则需要一套班组操作，包括司机、安全指挥员等。在面对大规模扰动时，常需要将备用的设备投入使用，以最大限度地减少各个参与方所受到的扰动。

其中，高级响应策略包含了比其低的其他相应策略。例如，当采取 3 级响应调整出口箱的存储位置时，必然会在调整储位后再重新调整集卡服务顺序，以尽快恢复系统的正常状态。而 4 级响应策略设备的重新调度也必然会要求重新调整集卡服务顺序或重新分配储位。

2.2 应对机制

码头的扰动是由若干集卡迟到、作业码头延迟等微小的扰动不断累加形成，扰动达到什么程度开始选择相应的应对策略，需要实时监控扰动度量函数 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 的变化。在历史统计数据的基础上，得到3个主体可接受的受扰程度的上限值 \bar{Z}_1 、 \bar{Z}_2 、 \bar{Z}_3 ，当实时监控值超出上限值一定百分比时，选择相应等级的策略。

表2中集卡的受扰程度一行，反映了按时到达集卡的等待时间，从左至右，当他们的等待时间延长，应对策略从简单的调整服务顺序，扩展到改变存储位置、甚至调整设备和增加设备。环境的受扰程度变化体现了码头全部集卡的怠速等待时间，即码头大门和堆场的排队时间。当这项指标增高，说明码头服务能力远远不能满足集卡到港服务的需求，进而需要调整设备分配或重新投入设备。码头受扰程度反映的是堆场作业量的均衡性，当指标较高时，说明某个时段的作业量分布极不均匀，可通过调整储位分配或调拨、增配场桥来改善。

表2 受扰程度与应对策略等级的判别准则
Tab. 2 Criteria of disruption measurement and response strategy level

环境	码头	集卡			
		[0, 10%]	[10%, 20%]	[20%, 40%]	40%以上
[0, 10%]	[0, 10%]	5级	5级	4级	3级
	[10%, 20%]	5级	5级	4级	3级
	[20%, 40%]	5级	3级	3级	3级
	40%以上	3级	3级	2级	1级
[10%, 20%]	[0, 10%]	5级	4级	4级	3级
	[10%, 20%]	4级	4级	3级	3级
	[20%, 40%]	3级	3级	3级	2级
	40%以上	3级	3级	2级	1级
[20%, 40%]	[0, 10%]	4级	4级	3级	3级
	[10%, 20%]	4级	3级	3级	3级
	[20%, 40%]	3级	2级	2级	1级
	[40%以上]	3级	2级	2级	1级
40%以上	[0, 10%]	3级	3级	1级	1级
	[10%, 20%]	3级	1级	1级	1级
	[20%, 40%]	2级	1级	1级	1级
	40%以上	2级	1级	1级	1级

实践中，3个维度主体的扰动程度交错呈现，因此在表2中分别将3个主体的受扰程度与其他2个主体的扰动对应，即三维要素共同构成某个扰动的情景。尽管有些极端情况出现的概率很小，但为应对机制的完整性，仍然列在表2中。显然，任何一种现实的扰动状态均由3个主体受扰动的程度构成三维情景，在策略选择中，根据三维情景中受扰程度较大的主体最为行之有效的应对策略作为总体的扰动策略。例如，当环境和码头的受扰程度均为[0, 10%]，而集卡的受扰程度为40%以上时，选择改变集卡的存储位置及改变集卡服务顺序是缓解集卡排队等待的有效方法。

2.3 策略的评价准则

每一个恢复策略中，可以依据调整规则或构建数学模型优化求解得到最优的调整方案。其中，集卡服务顺序的调整规则包括，根据集卡的迟到程度、场桥距离储位的距离或最小化翻箱原则等确定服务顺序。储位调整的规则包括距离装船泊位就近原则、堆场最小作业量原则等。调整场桥的原则包括就近原

则、移动难易程度原则、最小作业量原则等。增加场桥的原则包括作业量需求最大原则、移动难易程度原则等。

不论是根据调整规则或是模型优化求解,都需要有一个评价的指标或目标函数。干扰管理的目的是使系统尽快恢复,因此将系统恢复时间、设备投入量 2 个指标加入之前的 3 个主体的扰动度量,共同作为恢复策略的 5 个评价准则。其中,系统恢复时间是指将目前受扰的集卡服务系统恢复到原计划的作业完工时间,使下一时刻按时到达的集卡可以无须等待立即接受服务。设备投入量即式(4)表示的 Z_4 。

3 结论

研究分析了集卡预约服务系统中扰动的累加性、持续性和多重性特点,通过现有文献的梳理归纳,认为集卡预约服务系统的干扰管理是产业界和学术界共同关注的问题;从集卡预约系统的参与主体中选择具有代表性的三大主体:集卡、码头、环境,用按时到达集卡所受到的扰动、码头设备的均衡性、全部集卡怠速等待的尾气排放量表示扰动的程度,构建了扰动恢复的 5 级响应策略,以及 3 个维度不同扰动情景下的策略选择机制;将系统恢复时间、设备投入量加入三大主体的扰动度量,构成了应对策略的评价准则。

从某一独立主体受扰程度来看,当环境受到扰动程度增大,可通过调整设备分配或增加额外的人力机械来缓解;在按时到达集卡的等待时间增加时,调整集卡服务顺序、改变存储位置是行之有效的最简单易方法;当码头受扰程度加重,可通过改变储位分配、或采取调整、增加设备的方法来改善。任何一个现实的状态或情景都是由 3 个主体所受扰动状态交错构成,应选择较为严重的受扰主体适用的方法作为应对策略。

这一定性分析的结论可以通过模拟仿真进一步验证。而在每种调整策略中,分别根据实时的情景构建模型、优化求解是实现系统迅速恢复的科学方法。本文作为集卡预约干扰管理的初始研究,构建了干扰应对的多级响应机制,对后续进一步的拓展研究起到了铺垫作用。

[参考文献] (References)

- [1] HUYNH N N, WALTON C M. Robust scheduling of truck arrivals at marine container terminals[J]. *Journal of Transportation Engineering-ASCE*, 2008, 134(8): 347-353.
- [2] HUYNH N N, WALTON C M. Improving efficiency of drayage operations at seaport container terminals through the use of an appointment system[M]. New York: Springer, 2011.
- [3] HUYNH N N. Methodologies for reducing truck turn time at maritime container terminals[M]. Austin: The University of Texas at Austin, 2005.
- [4] 杨鹏, 孙俊清, 于青. 外部集卡到港控制优化研究[J]. *物流技术*, 2011, 30(17): 50-51.
YANG P, SUN J Q, YU Q. Research on control and optimization of external truck arrivals[J]. *Logistics Techniques*, 2011, 30(17): 50-51. (in Chinese)
- [5] 曾庆成, 张笑菊, 陈文浩, 等. 基于 BCMP 排队网络的码头集卡预约优化模型[J]. *系统工程学报*, 2013, 28(5): 592-599.
ZENG Q C, ZHANG X J, CHEN W H, et al. Optimization model for truck appointment based on BCMP queuing network[J]. *Journal of System Engineering*, 2013, 28(5): 592-599. (in Chinese)
- [6] ZEHENDNER E, FEILLET D. Benefits of a truck appointment system on the service quality of inland transport modes at a multimodal container terminal[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 235(2): 461-469.
- [7] PHAN M H, KIM K H. Negotiating truck arrival times among trucking companies and a container terminal[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 75: 132-144.

- [8] PHAN M H, KIM K H. Collaborative truck scheduling and appointments for trucking companies and container terminals[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, 86: 37-50.
- [9] 胡祥培, 张漪, 丁秋雷, 等. 干扰管理模型及其算法的研究进展[J]. *系统工程理论与实践*, 2008, 28 (10): 40-46.
HU X P, ZHANG Y, DING Q L, et al. Review on disruption management model and its algorithm[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2008(10): 40-46. (in Chinese)
- [10] HANE C A, BARNHART C, JOHNSON E L, et al. The fleet assignment problem: solving a large-scale integer program[J]. *Mathematical Programming*, 1995, 70(1-3): 211-232.
- [11] KOHLA N, LARSEN B A, LARSEN J, et al. Airline disruption management-perspectives, experiences and outlook[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2007, 13(3): 149-162.
- [12] CLAUSEN J, LARSEN A, LARSEN J, et al. Disruption management in the airline industry-concepts, models and methods[J]. *Computers & Operations Research*, 2010, 37(5): 809-821.
- [13] ARTIGUES C, BOURREAU E, AFSAR H M, et al. Disruption management for commercial airlines: methods and results for the ROADEF 2009 Challenge[J]. *European Journal of Industrial Engineering*, 2012, 6(6): 669-689.
- [14] BROUER B D, DIRKSEN J, PISINGER D, et al. The vessel schedule recovery problem (VSRP): a MIP model for handling disruptions in liner shipping[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 224(2): 362-374.
- [15] LI C, QI X, LEE C Y. Disruption recovery for a vessel in liner shipping[J]. *Transportation Science*, 2015, 49(4): 900-921.
- [16] LUSBY R M, LARSEN J, EHRGOTT M, et al. A set packing inspired method for real-time junction train routing[J]. *Computers & Operations Research*, 2013, 40(3): 713-724.
- [17] 曾庆成, 胡祥培, 杨忠振. 集装箱码头泊位分配-装卸桥调度干扰管理模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30 (11): 2026-2035.
ZENG Q C, HU X P, YANG Z Z. Model for disruption management of berth allocation and quay crane scheduling in container terminals[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2010, 30(11): 2026-2035. (in Chinese)
- [18] GUI J, YANG C. A human-computer interaction-based neighborhood search heuristic for disruption management[C]//2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications (ISDEA). Hong Kong: IEEE, 2013: 77-80.
- [19] Starcrest Consulting Group. Port of Los Angeles inventory of air emissions-2015[R]. Hong Kong: Starcrest Consulting Group, 2016.