



集装箱码头危险品堆场经济选址仿真研究

段志男, 彭 云, 王文渊, 宋向群, 李相达

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:为减小集装箱码头危险品事故对港区的影响,在港口规划阶段,设计一种仿真方法研究危险品堆场选址问题。构建危险品堆场选址经济损失模型,基于 ALOHA 软件对危险品事故的影响范围进行近似模拟,以某集装箱码头为背景验证仿真优化模型的有效性。结果表明:间接经济损失对危险品堆场选址的敏感性更高;危险品堆场的选址应尽量避免开闸口、码头前沿等地带,宜选择码头后方陆域角落等区域。

关键词:经济损失;集装箱码头;危险品堆场;选址;仿真

中图分类号: U651⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-9592 (2019) 04-0041-05

DOI: 10.16403/j.cnki.ggjs20190409

Simulation Study of Site Selection of Dangerous Goods Yard in Container Terminal Based on Economic Loss Caused by Accidents

Duan Zhinan, Peng Yun, Wan Wenyuan, Song Xiangqun, Li Xiangda

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to lower the impact of dangerous goods accidents on container harbor, it is proposed to design a simulation method which applies to the site selection of dangerous goods yard at the stage of port planning. A model for the site selection of dangerous goods yard shall be built, ALOHA software shall be used to simulate the influence scope of dangerous goods accidents. And then the effectiveness of the simulation optimization model is verified based on one container terminal. The results show that indirect economic loss is more sensitive to the site selection of dangerous goods yard. The dangerous goods yard shall be far from the port gate and wharf apron, instead, it is better to be arranged at the landside corner in the rear of terminal.

Key words: economic loss; container terminal; dangerous goods yard; site selection; simulation

引 言

危险品是集装箱贸易行业中不可或缺的一份子,高额利润的背后却潜藏着巨大的风险,一旦集装箱港区发生危险品事故,势必会对人民的生命财产造成极大威胁。如何在港区的规划阶段合理规划危险品堆场的选址以最大程度地降低危险品事故

对港区的影响已成为集装箱码头规划布置迫切需要解决的问题。

国内外学者针对危险品堆场开展了大量研究,主要包括危险品堆场平面布置优化、危险品事故预防、危险品堆场安全评价体系等。颜华锟等^[1]以大连港大窑湾集装箱码头为例,讨论分析了危险品堆场平面选址和建设原则。温念慈^[2]等将 SLP 法运用到集装箱码头的平面布置优化中,通过分析包括危险品集装箱场区在内的各作业区之间的相互关系和影响,从而得出危险品箱区等各作业区布置的最

收稿日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51709037, 51779037)

作者简介: 段志男 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事港口规划与港口物流研究。

优方案。Zhang 等^[3]运用层次分析法并以危险品布置方案综合评价指标体系,客观反映危险品物流港口的选址合理状况。Andrew John 等^[4]针对港口运营过程中的突发事件,提出了一种综合的危险品堆场风险模糊评估方法。L Ding 等^[5]提出一种包含感知、传输和应用的新型互联网框架网络,用以监测危险品堆场的实时状况。Bagheri 等^[6]基于遗传算法,设计了一种启发式算法用于危险品堆场中编组作业的安置。唐勤华^[7]等就自动化集装箱码头危险品堆场的布置进行了研究。汪世锋^[8]将事故树分析法引入危险品堆场安全管理中,对危险品集装箱安全事故进行预防分析。

综上所述,现有研究多致力于危险品堆场局部布置和安全评价体系的定性研究,还需进一步在港口规划阶段充分考虑危险品事故发生后的影响,以经济损失为导向,确定危险品堆场的选址。为此,本文在已有研究的基础上,基于仿真方法,以危险品事故发生后对港区造成的总经济损失最小为目标,研究危险品堆场的选址问题,为港区的合理规划和安全运营提供理论依据。

1 考虑事故经济损失的危险品堆场选址模型

1.1 模型概述

从港区规划的角度,考虑危险品事故发生后的影响,以危险品事故发生后对港区的总经济损失最小为目标,建立危险品堆场选址优化模型。为量化事故发生后的直接和间接经济损失,基于 ALOHA 近似模拟危险品事故发生对港区的影响范围,构建集装箱码头生产作业系统仿真模型;仿真模型内嵌于优化模型中,输出危险品事故发生前后码头的集卡平均搬运周期(集卡完成一个循环作业所需的平均时间)和日平均集装箱吞吐量指标,并反馈回优化模型用以估算间接损失。

1.2 模型假设

危险品堆场集中布置,不考虑危险品堆场的内部布局对港区的影响。

1.3 模型构建

$$L = L_{di} + L_{in} \quad (1)$$

$$L_{di} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} x_i y_m V_j N_j \quad (2)$$

$$L_{in} = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 \quad (3)$$

$$L_1 = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_i y_m (t - t_0) S \Delta TP \quad (4)$$

$$L_2 = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_i y_m (t - t_0) S \Delta TPq \quad (5)$$

$$L_3 = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_i y_m (c_0 - c) \Delta TV_{ha} \quad (6)$$

$$L_4 = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} x_i y_m (d_0 - d) \Delta TV_{st} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} x_i = 1 \text{ 且 } x_i \in \{0, 1\} \quad (8)$$

$$\sum_{m \in M} y_m = 1 \text{ 且 } y_m \in \{0, 1\} \quad (9)$$

$$t = f_1(y_m, x_i) \quad (10)$$

$$c = f_2(y_m, x_i) \quad (11)$$

$$t_0 = f'_1(y_m) \quad (12)$$

$$c_0 = f'_2(y_m) \quad (13)$$

$$d = f_3(\delta(y_m, x_i)) \quad (14)$$

$$d_0 = f'_3(\delta) \quad (15)$$

式(1)表示总经济损失 L 由直接经济损失 L_{di} 和间接经济损失 L_{in} 构成。其中 L_{di} 包括港内各类设施及建筑物等破坏物的损失, L_{in} 包括事故发生后港区运营及收入方面的损失;

式(2)表示直接经济损失的构成及计算方法。其中 x_i 为危险品事故类型 i ($i=1, 2, \dots, I$) 的 0-1 决策变量, x_i 取 1 表示 i 类型的危险品事故发生, x_i 取 0 表示 i 类型的危险品事故不发生, 危险品事故包括蒸汽云爆炸、毒气扩散、池火灾等。 y_m 为危险品堆场选址位置 m ($m=1, 2, \dots, M$) 的 0-1 决策变量, y_m 取 1 表示危险品堆场选址位置为 m , y_m 取 0 表示危险品堆场选址位置不为 m 。 j 为危险品事故破坏物的编号, 破坏物主要包括岸桥、场桥、集装箱、道路、码头建筑等。 N_j 为第 j ($j=1, 2, \dots, J$) 类破坏物的数量, V_j 为第 j 类破坏物的单位价值成本;

式(3)表示间接经济损失的构成, 其中 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 分别为集卡额外行程时间损失(相对于集卡正常行驶所增加的行驶时间价值成本)、集卡额外燃油损失、集装箱装卸收入损失、集装箱堆存收入损失;

式(4)~(7)分别表示各项间接经济损失的计算方法。其中, t 、 c 、 d 分别为事故发生后的集卡平均搬运周期、日均集装箱吞吐量、日均集装箱堆存量, t_0 、 c_0 、 d_0 分别为事故发生前的集卡平均搬运周期、日均集装箱吞吐量、日均集装箱堆存量。

S 为集卡在港内完成一个搬运周期的日均次数。 P 为单位时间的价值成本。 ΔT 为危险品事故影响时间, 取值同仿真持续时间相同。 p 为单位燃油的价值成本。 q 为集卡拥堵状态下单位时间的耗油量; V_{ha} 、 V_{st} 分别为单位 TEU 集装箱的装卸收入、堆存收入;

式 (8) 表示仅考虑单一事故类型;

式 (9) 表示危险品堆场集中布置, 且限制 x_i 和 y_m 为 0-1 变量;

式 (10) 和 (11) 表示 t 和 c 取决于 x_i 和 y_m ;

式 (12) 和 (13) 表示 t_0 和 c_0 取决于 y_m , 同时这些变量难以用解析式表达, 需由集装箱码头生产作业仿真模型得到;

式 (14) 和 (15) 表示 d 和 d_0 分别取决于事故发生后、前堆场集装箱剩余量。

1.4 危险品事故影响范围的确定

确定危险品事故的影响范围是仿真模型构建及优化模型求解的基础, 本文基于 ALOHA 软件得到危险品事故的影响范围。ALOHA 是化学品泄漏事故应急人员及规划和培训人员共同开发设计的 CAMEO 软件中的一个风险模拟程序^[9]。通过输入化学品类型、事故位置、天气状况 (气温、风速和风向) 和泄漏源情况 (泄漏孔尺寸、存储压力) 等参数信息, 可以模拟危险化学品泄漏后的毒气扩散、火灾、蒸汽云爆炸等产生的毒性、热辐射和冲击波等, 从而快速预测事故的影响范围。

1.5 集装箱码头生产作业仿真模型

为量化危险品事故的间接经济损失, 需要以系统仿真的手段, 建立集装箱码头生产作业系统仿真模型, 模拟在不同危险品堆场选址位置下危险品事故对港内路网的破坏情况, 输出不同危险品堆场选址位置下危险品事故前后的集卡平均搬运周期 t_0 和 t 、日平均集装箱吞吐量 c_0 和 c , 进而反馈回优化模型进行间接经济损失的计算, 仿真模型的逻辑流程如图 1 所示。

基于系统仿真软件, 构建集装箱码头生产作业仿真模型, 仿真模拟不同危险品堆场选址位置下危险品事故前后的船舶装卸作业及集卡运输等过程, 以集卡为主智能体, 建立各模块模型。

1) 船舶生成子模型。该模型中, 实体为具有吨级和单船装卸量等属性的集装箱船, 且船舶到港

服从泊松分布。

2) 内卡作业子模型。描述港内集卡在码头前沿与堆场之间的运输过程。在运行该子模型之前, 需对集装箱分配箱区, 以确定集卡的目标箱区。

3) 外卡作业子模型。描述港外集卡在堆场与闸口之间的运输过程。其中外卡到港服从泊松分布, 通过闸口进港服从排队论理论。

4) 仿真结果计算子模型。计算危险品事故前后内、外集卡的平均搬运周期, 集装箱吞吐量。

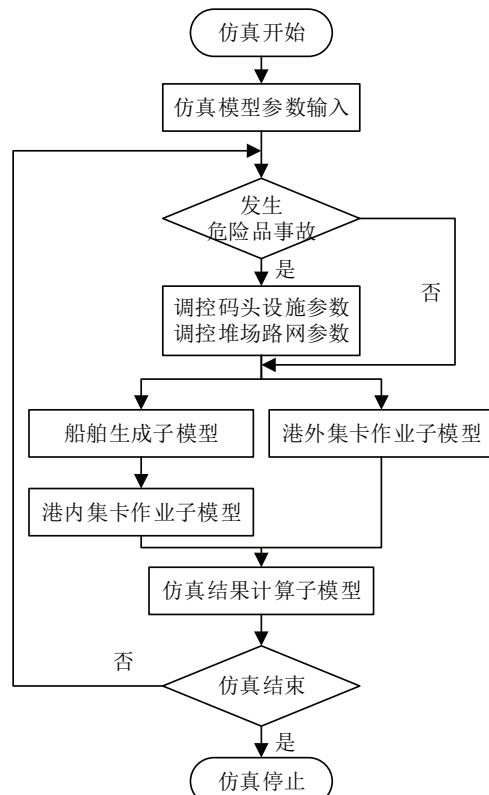


图1 仿真模型逻辑流程

2 算例分析

某集装箱码头顺岸布置 2 个 5 万 t 级泊位, 码头岸线长 660 m, 陆域纵深 500 m, 配备 8 台装卸桥、28 台场桥和 50 辆集卡, 陆域平面布置如图 2。其中危险品堆场的选址有 6 种方案, 方案一、二、三分别为位于陆域边侧的码头前沿、码头中央、码头后方的选址方案, 方案四、五、六分别为位于陆域中间的码头前沿、码头中央、码头后方的选址方案。

本港区采用龙门起重机装卸工艺, 堆场布置 20 个重箱堆场, 8 个空箱堆场, 1 个危险品堆场, 其中危险品堆场选址共有如图六种方案。港区前沿装

卸车道及主次干道均为车道宽度 4 m 的双向 6 车道,各堆场作业线道路为自西向东行使的单向 4 m 宽车道,港内道路交叉口均为无信号灯控制,港内路网平面如图 3 所示。

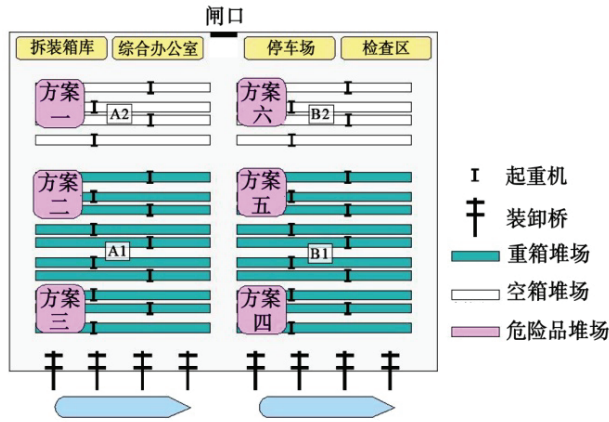


图 2 码头陆域平面布置

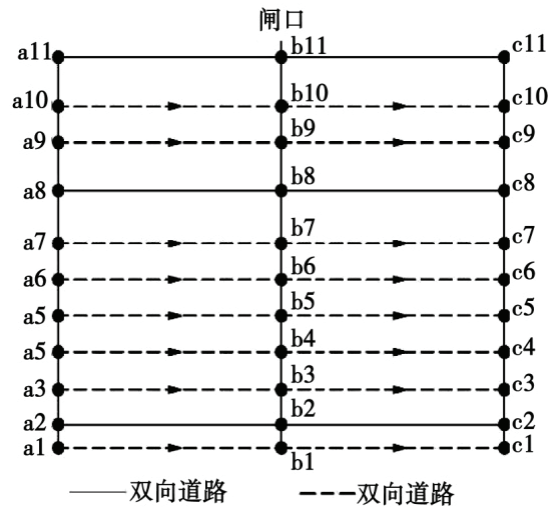


图 3 港内路网平面

2.1 输入参数

集卡主干道、次干道、作业地带、转弯处最大行使速度分别为 35、25、15、5 km/h;单船装卸量 1 500 TEU;重箱、空箱的初始堆存数量分别为 4 000 TEU、1 600 TEU;岸桥、场桥、码头建筑、道路、重箱、空箱的成本分别为 18 万元/台、15 万元/台、1.2 万元/m²、3 万元/m²、2 万元/TEU、1.5 万元/TEU;额外行程时间的成本为 1 千元/h(由当地工资水平及人均 GDP 决定);燃油的成本为 7 元/L,拥堵状态下的耗油量为 1.5 L/h;集装箱的装卸和堆存收入分别为 400 元/TEU 和 5 元/(TEU·天);码头集卡日平均完成一个工作周期数 4 000 次;以液化石油气发生蒸汽云爆炸为例分析

事故影响范围,应用 ALOHA 软件模拟如图 4 所示,影响半径取 80 m。

本算例选择码头作业高峰期,即两个泊位同时作业的情况进行模拟。仿真次数为 10 次,仿真时间 30 天,仿真输出指标为 t 、 t_0 、 c 、 c_0 。

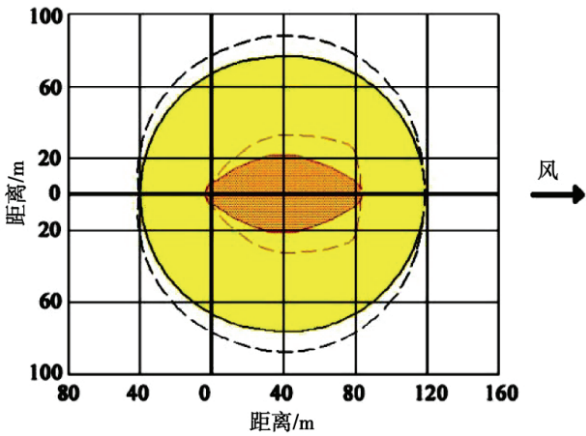


图 4 蒸汽云爆炸事故影响范围

2.2 结果分析

根据图 2 所示的六种危险品堆场选址方案,分别模拟危险品发生蒸汽云爆炸事故,结果如表 1~3。

表 1 直接经济损失指标

方案	岸桥 /台	场桥 /台	码头建筑 /m ²	道路 /m ²	重箱 /TEU	空箱 /TEU
方案一	2	5	0	2 635	550	0
方案二	0	6	0	2 700	550	75
方案三	0	4	1 200	2 360	0	425
方案四	3	6	0	2 765	610	0
方案五	0	7	0	2 820	575	93
方案六	0	4	1 350	2 435	0	480

表 2 间接经济损失指标

方案	损坏路段	集卡平均 搬运周期 /s	集装箱 吞吐量 /(天·TEU)
事故前		800	3 600
方案一	a ₁ b ₁ 、a ₂ b ₂ 、a ₃ b ₃ 、a ₄ b ₄ 、a ₁ a ₄	910	1 530
方案二	a ₆ b ₆ 、a ₇ b ₇ 、a ₈ b ₈ 、a ₆ b ₈	925	3 480
方案三	a ₈ b ₈ 、a ₉ b ₉ 、a ₁₀ b ₁₀ 、a ₁₁ b ₁₁ 、a ₈ a ₁₁	903	3 360
方案四	b ₁ c ₁ 、b ₂ c ₂ 、b ₃ c ₃ 、b ₄ c ₄ 、b ₁ b ₄	950	1 510
方案五	b ₆ c ₆ 、b ₇ c ₇ 、b ₈ c ₈ 、b ₆ b ₈	935	2 640
方案六	b ₈ c ₈ 、b ₉ c ₉ 、b ₁₀ c ₁₀ 、b ₁₁ c ₁₁ 、b ₈ b ₁₁	1 025	2 160

表 3 经济损失结果汇总 /亿元

方案	直接经济损失	间接经济损失	总经济损失
方案一	0.91	0.99	1.90
方案二	0.94	0.86	1.80
方案三	0.92	0.72	1.64
方案四	0.96	1.26	2.22
方案五	0.99	1.03	2.02
方案六	0.97	1.69	2.66

分析比较不同危险品堆场选址方案下的经济损失,可知:

1) 除方案六外,直接经济损失和间接经济损失约各占危险品事故造成的总经济损失的50%,且间接经济损失对于危险品堆场的选址敏感性较高。对于方案六,由于危险品堆场选址于码头的“咽喉”地带——闸口附近,一旦发生事故,港内交通势必陷入大面积瘫痪,港区运营必然受到影响,故间接经济损失达到特大值1.69亿元,进而导致总经济损失达到特大值2.66亿元,因此,危险品堆场选址应当远离闸口区域。

2) 选址方案为陆域边侧(方案一、二、三)的平均总经济损失(1.78亿元)小于陆域中间(方案四、五、六)的平均总经济损失(2.30亿元)。因此,当选择陆域边侧的选址方案时,危险品事故对港区的影响更小,这是由于码头陆域中间相较于陆域边侧的路网交通更复杂,港区的运营受到事故的影响更大。故危险品堆场选址于陆域边侧更合理。

3) 针对陆域边侧的选址方案,方案一、二、三的总经济损失分别为1.90、1.80、1.64亿元,即总经济损失由码头前沿至码头后方呈现递减的趋势。因此,当选址码头后方的选址方案时,危险品事故对港区的影响更小。这是由于码头前沿相较于码头后方布置有更多的装卸设施,同时码头前沿也存在更密集的装卸作业,港区的运营受到事故的影响更大。综上,对比分析六种选址方案,危险品堆场选址于陆域边侧后方位置(方案三)最合理。

3 结论

本文从港区规划的角度,考虑危险品事故发生

后的影响,基于仿真优化方法,研究集装箱码头危险品堆场选址问题。研究表明:一般情况下,间接经济损失对危险品堆场选址的敏感性较高,对总经济损失的主导作用较大;码头后方陆域角落位置因其位置偏僻、交通简单、设施较少的区位特点,是危险品堆场选址的最合理选择。本文的研究成果可为港区的合理规划及安全运营提供理论依据。此外,危险品堆场的内部布局、多种危险品事故的耦合作用对危险品堆场选址的影响有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 颜华锟,李艳阳.港口危险品集装箱堆场规划与布置研究[J].港工技术,2010,47(03):19-21.
- [2] 温念慈,王文宪.基于SLP的湛江港宝满港区集装箱码头平面布置优化研究[J].铁道运输与经济,2016,38(09):88-92.
- [3] Zhang P, Mao J, Yang L. Research on layout evaluation indexes system of dangerous goods logistics port based on AHP[M]. Beijing: Advances in Intelligent and Soft Computing, 2012: 943-949.
- [4] John A, Bury A. An integrated fuzzy risk assessment for seaport operations[J]. Safety Science, 2014, 68: 180-194.
- [5] L Ding, Y Chen, J Li. Monitoring dangerous goods in container yard using the internet of things[J]. Scientific Programming, 2016, (2): 1-12.
- [6] Bagheri, L F Fu. Effective placement of dangerous goods cars in rail yard marshaling operation[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2010, (37): 753-762.
- [7] 唐勤华,吴沙坪,张晓龙,等.自动化集装箱码头危险品堆场布置[J].水运工程,2016,(09):56-59.
- [8] 汪世锋.基于事故树分析法的危险品集装箱安全对策分析[J].中国水运(下半月),2009,9(6):43-45.
- [9] 孙启悦,修光利,张大年.CAMEO在突发性环境污染事故应急中的应用[J].安全与环境学报,2008,8(3):145-149.