



# 船舶岸电系统在集装箱码头的应用\*

王宇婷, 唐国磊, 于菁菁, 于旭会, 张 勇

(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:** 靠港船舶岸电系统具有可以减少污染物排放和提高能源利用率的优点, 正在我国港口大力推广。为探讨岸电系统在集装箱码头的应用前景, 以大窑湾北岸某集装箱码头为例, 利用仿真模型核算多种情景下 2020 年大窑湾北岸集装箱码头船舶使用岸电前后的碳排放量, 并分析不同装卸效率对船舶的碳排放的影响。结果表明, 集装箱码头使用岸电系统可实现低碳效益, 提高装卸效率有利于船舶碳排放的减少, 但应考虑提高装卸效率会引起装卸机械碳排放增加。

**关键词:** 岸电系统; 碳排放量; 集装箱码头; 能源结构

**中图分类号:** U 653.95

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2017)09-0103-05

## Application of shore power system for ship in container terminals

WANG Yu-ting, TANG Guo-lei, YU Jing-jing, YU Xu-hui, ZHANG Yong

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

**Abstract:** Shore power system for ship is promoted extensively in Chinese ports due to its benefit on reducing carbon emissions and improving energy efficiency. In order to discuss the application prospect of shore power system in container terminal, we take the Dayao Bay north shore container terminal as an example. We use the simulation model to calculate Dayao Bay north shore container terminal carbon emission in 2020 before and after using shore power system in several scenarios, such as the influence on the carbon emission in different ship loading and unloading efficiency. The results show that low carbon emission can be achieved by shore power system of container terminals. Improving the ship loading and unloading efficiency are favorable to reduce the carbon emission, but the increasing of carbon emissions of loading and unloading machines caused by the increasing of the efficiency should be considered.

**Keywords:** shore power system; carbon emission; container terminal; energy structure

靠港船舶一般采用辅机燃油发电来满足船舶的用电需求, 使用岸电代替辅机发电可以使港口附近大气中的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{CO}_2$  的排放量以及噪声污染大为减少。2015 年 8 月 31 日, 交通运输部印发《船舶与港口污染防治专项行动实施方案(2015—2020 年)》, 明确了船舶与港口污染防治专项行动工作目标, 其中包括“到 2020 年, 主要港口 90% 的港作船舶、公务船舶靠泊使用岸电, 50% 的集装箱、客滚和邮轮专业化码头具备向船舶供应岸电的能力”。在国家大力推动船舶岸电发展的背景下, 上海外高桥六期码头、连云港 59 号泊位和深圳蛇

口港集装箱码头等均已配备岸电系统并投入使用<sup>[1]</sup>。

但相关研究表明, 在我国当前的条件下, 靠港船舶使用岸电可以减少  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的排放, 但不是低碳技术<sup>[2]</sup>。船舶使用岸电技术可以有效地改善港区的环境, 但却将排放转移到了火电厂中, 进而加重了整个环境的碳排放负担<sup>[3]</sup>。当前, 有关船舶使用岸电的环境效益和减排效果有一部分的定量研究, 关于在我国船舶使用岸电的碳减排的效果如何实现多集中于定性研究。例如, 假设高雄港采用岸电系统后, 其  $\text{CO}_2$  和 PM 排放量分别降低 57.2% 和 39.4%<sup>[4]</sup>, 对于  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  的减排具

收稿日期: 2017-01-12

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51579035, 51279026); 大连市支持高层次人才创新创业项目 (2016RQ024)

作者简介: 王宇婷 (1992—), 女, 硕士研究生, 从事港口规划及港口结构设计优化研究。

有显著的效果,但  $\text{CO}_2$  的排放反而会增加 19.2%;但在核电、风电等清洁能源发电的比例不断增多的情况下,采用船舶使用岸电技术的减排优势将更加明显。上述定量计算都是在岸电全部使用火电的基础上,还尚未考虑地区实际发电能源结构、船舶改造策略等对岸电碳排放的定量影响。

由于发电能源结构、船舶改造策略以及船舶到港等存在不确定性,本文以大连港大窑湾北岸集装箱码头为例,利用计算机仿真技术,模拟该码头 2020 年在不同船舶到港数量下的港口生产作业过程,并根据大连市发电的能源比例、不同的船舶改造情景等条件,计算该码头 2020 年船舶在港期间使用辅机发电和使用岸电后的碳排放,以及在不同装卸效率下船舶在港期间的碳排放,为船舶岸电系统在大连港口的推广提供参考。

## 1 船舶岸电系统碳排放量计算模型

### 1.1 船舶岸电系统碳排放量计算公式

$$E_{\text{CO}_2} = \sum_{j=1}^n \left[ \left( \sum_{i=1}^m T_{bi} P_{ei} \right) C_j N_j \right] \quad (1)$$

式中:  $E_{\text{CO}_2}$  为使用电力的  $\text{CO}_2$  直接排放量(kg);  $T_{bi}$  为船型  $i$  每年靠港停泊时间(h);  $P_{ei}$  为船型  $i$  在泊期间辅机发电的功率(kW),取值见文献[5];

$C_j$  为发电能源  $j$  的占比(%);  $N_j$  为港口所用发电能源  $j$  的排放系数[kg/(kW·h)]。

可见,每种船型的船舶每年靠港停泊时间是评估船舶岸电系统碳排放量的关键。由于船舶到港、泊位服务时间等具有明显的不确定性,因此本文借助计算机仿真技术模拟集装箱船舶到港、靠港作业和离港的流程,进而得到船舶使用岸电的时间。

### 1.2 仿真模型

图 1 为由 AnyLogic 仿真软件实现集装箱码头前沿作业系统仿真模型。船舶随机到港,其日到港船舶数量服从泊松分布,到港时间间隔服从负指数分布<sup>[6]</sup>。如果有空闲泊位且满足进港条件(如天气、船舶吃水、潮位等),到港船舶穿过航道到达泊位停靠,经过辅助作业时间后开始装卸作业,否则在港外锚地等待。经过泊位服务时间后,待装卸作业完成且满足出港要求后,船舶则离开泊位、经航道离开港口。其中,泊位服务时间符合爱尔兰  $K$  阶分布<sup>[7]</sup>,取决于各类船型到港设计船型单船装卸箱量和集装箱装卸桥配置及台时效率,在没有历史统计资料的情况下,可依据《海港总体设计规范》<sup>[8]</sup> 选取。

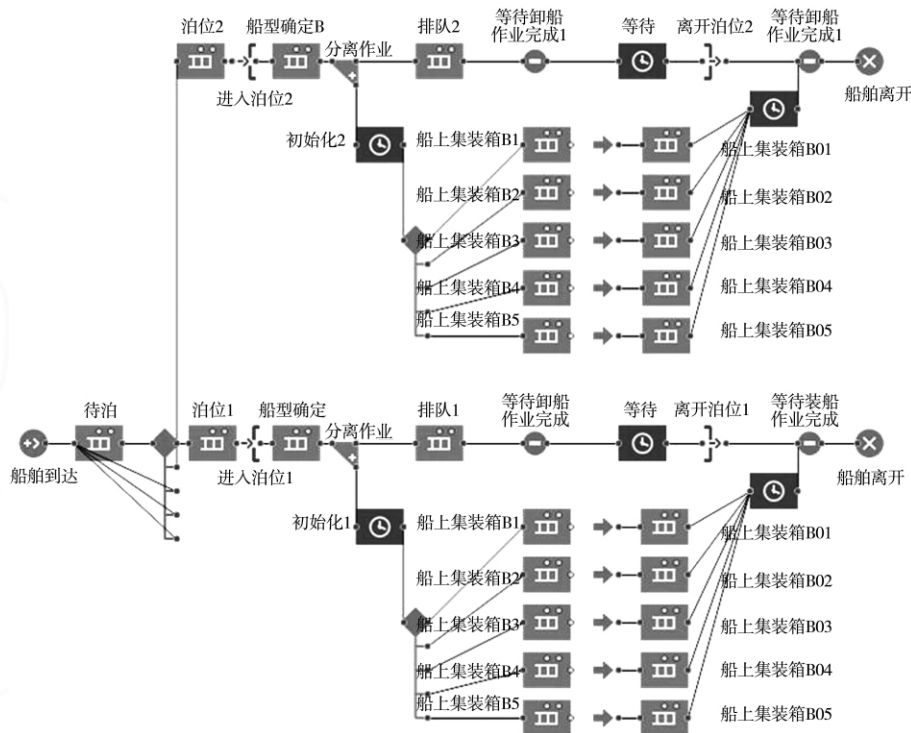


图 1 船舶装卸作业仿真模型

## 2 实例分析

大连港大窑湾港区北岸西段作业区正在建设2个20万吨级集装箱泊位,根据《大连港总体规划》,预计该作业区2020年集装箱吞吐量约为110万TEU。结合大窑湾港区北岸作业区相关资料,包括港区吞吐量预测、到港船型预测、泊位等级规模和建

设时序,预测大窑湾港区北岸作业区2020年集装箱码头到船数量(表1)。该作业区配置新型双箱吊具岸桥,装卸效率较普通岸桥会提高50%左右<sup>[9]</sup>。由于新建泊位无历史资料,本文设计船型单船装卸箱量、岸桥配置及台时效率等,依据《海港总体设计规范》选取。

表1 2020年到港集装箱船舶预测

船型/万吨级	1	2	3	5	7	10	12	15	20
数量占比/%	4.5~7.0	13~15	13~15	27~29	17~19	13~15	2~3	3~4	0.5~1.0

### 2.1 船舶辅机发电功率及碳排放系数

船舶在泊期间辅机发电的功率根据《码头船舶岸电设施建设技术规范》选取(表2)。

表2 船舶靠泊期间辅机发电功率和电压

船型/万吨级	辅机功率/(kW×台)	辅机发电电压/V
1	430×3	450
2	700×3	450
3	1 260×3	450
5	1 960×3	450
7	2 320×3	450
10	2 760×4	6 660
12	3 320×4	6 660
15	3 850×4	6 660
20	4 250×4	6 660

根据《中国能源统计年鉴(2010)》,我国柴油的低位热值为42 652 kJ/kg,船上柴油发电机产生1 kW·h的电力需消耗245 g柴油。《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中柴油的单位热值CO<sub>2</sub>排放系数为74 100 kg/TJ<sup>[10]</sup>,则柴油的燃油碳排放系数为0.774 kg/(kW·h)。

根据《2015年中国区域电网基准线排放因子公告》<sup>[11]</sup>,各区域电网折合为CO<sub>2</sub>的火力发电碳排放系数见表3;清洁能源电力碳排放系数<sup>[12-13]</sup>见表4。因此,按东北电网取电力碳排放系数为1.1291 kg/(kW·h),核能、风力和水力发电的碳排放系数分别为0.011 9、0.016 5和0.041 kg/(kW·h)。

表3 各区域电网的火电发电碳排放系数

电网区域	电力碳排放系数/(kg·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )
华北	1.041 6
东北	1.129 1
华东	0.811 2
华中	0.951 5
南方	0.895 9

表4 清洁能源电力碳排放系数

能源类型	碳排放系数/(kg·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )
风	0.016 5
水	0.041 0
太阳能光伏	0.090 0
潮汐	0.335 0
核	0.011 9

### 2.2 船舶改造及发电结构

#### 1) 船舶改造策略。

根据船舶的吨级以及所需供电电压,取4种船舶改造策略进行核算:①先改造10万、12万、15万及20万吨级船舶;②改造1万、3万、5万、7万吨级船舶;③改造10万、12万、15万、20万及一半的1万、2万、3万、5万、7万吨级船舶;④改造全部吨级船舶。

#### 2) 发电能源结构。

根据辽宁省大连市2014年规模以上工业能源生产与消费情况,2014年大连市火力、核能和风力水力发电量分别占63.5%、34.9%和1.6%。2014年大连市全社会用电量为342.3亿kW·h,到2020年的电力需求将达到744.32亿kW·h<sup>[14]</sup>,预

计到 2020 年 8 月,红沿河核电站的年发电量将达到 331.8 亿 kW·h, 约占大连市总需求量的 44.6%。由于风能的开发量已经基本饱和,所以在本文的核算中,2020 年与 2014 年的发电结构相比较,增加了核电比例、减少火电比例,而风电水电比例保持不变,分别为 53.8%、44.6% 和 1.6%。为分析发电的能源结构对碳排放量的影响,本文选取 2014 年和预测的 2020 年能源结构进行核算。

### 2.3 结果与分析

#### 1) 不同情景下的碳排放。

考虑到集装箱吞吐量的不确定性,本文中 2020 年集装箱吞吐量取 95 万~135 万 TEU。每个情景仿真运行 60 次,得到各核算情景下的平均碳排放量(图 2)。

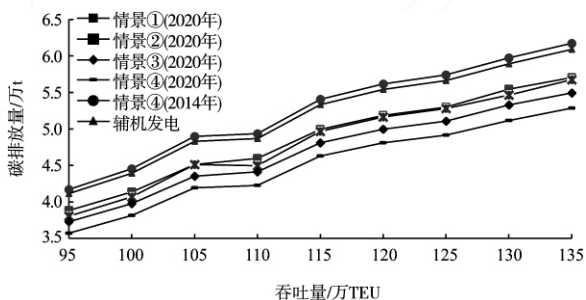


图 2 不同改造情景下的碳排放

①当 2020 年大连市发电能源结构保持不变时,船舶使用岸电系统后,即使所有船舶完成改造,其碳排放量仍比使用辅机发电时稍高,并不能减少碳排放量。

②当 2020 年大连市发电能源结构按计划发展时,无论采取何种改造策略,船舶使用岸电系统均可减少碳排放量,平均降幅约 9%。图 2 中不同吞吐量的情况下,使用岸电的减排效果基本相同。在第一种改造情景下,碳排放量平均可减少约 6%;在第二种改造情景下,碳排放量平均可减少约 7.1%;在第三种改造情景下,碳排放量平均可减少约 9.6%;如果能够实现全部改造,碳排放量平均可减少约 13.2%。

③在供应两种电压有困难的情况下,集中改造小吨级船舶与大吨级船舶后碳排放量差别不大。考虑到小吨级船舶数量较多,应优先改造 10 万吨

级以上的船舶。

#### 2) 船舶装卸效率对碳排放的影响。

装卸效率是影响集装箱船舶在泊时间的主要因素之一,通过提高装卸效率可减少船舶在泊时间,进而减少碳排放量。为此,通过运行仿真模型,得到不同改造情景下各泊位平均装卸效率(岸桥装卸效率随船舶吨级、岸桥配置数量、倒箱率、同时作业率等不断变化,因此本例选取泊位平均装卸效率作为装卸效率进行分析)对碳排放的影响(图 3)。装卸效率越高,船舶使用岸电系统后的碳排放越小。例如,在各种改造情景下,装卸效率由 80 TEU/h 提高到 140 TEU/h,碳排放会降低 40%以上,装卸效率每增加 10 TEU/h,碳排放量平均降低约 9%。由此可知,提高装卸效率能有效地减少船舶的碳排放。但是,装卸效率的提高势必会引起装卸机械碳排放的增加,装卸效率增加后港区整体碳排放的增减还需要进一步计算。

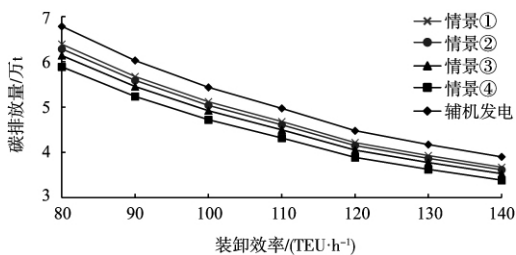


图 3 泊位平均装卸效率对碳排放的影响

### 3 结论

1) 在大连的发电能源结构按计划发展的情况下,使用船舶岸电系统可减少碳排放量,但效果不明显,需要加大引入风力、水力等清洁能源以达到良好的低碳效果。

2) 在供应两种电压有困难的情况下,集中改造小吨级船舶与大吨级船舶后碳排放量差别不大,可优先改造 10 万吨级以上的船舶。

3) 提高船舶装卸效率是减少船舶碳排放的有效途径之一。各集装箱港口可结合港区自身的实际情况,采用高效率的装卸工艺以提高装卸效率。但是,装卸效率提高势必会增加装卸机械的碳排放量,因此,制定减少碳排放措施应综合考虑整个港区生产作业的碳排放量。

## 参考文献:

- [1] 孙秋萍,张建伟,张胜朝.营口港鲅鱼圈港区码头船舶岸电系统的设计[J].港工技术,2013,50(3):45-47.
- [2] 彭传圣.靠港船舶使用岸电技术的推广应用[J].港口装卸,2012(6):1-5.
- [3] 赫伟建,黄晓光.船舶使用岸电技术节能减排效果的探讨[J].交通节能与环保,2012,8(1):22-25.
- [4] CHANG C C, WANG C M. Evaluating the effects of green port policy: case study of Kaohsiung harbor in Taiwan[J]. Transportation research part D transport & environment, 2012, 17(3): 185-189.
- [5] 交通运输部水运科学研究院.码头船舶岸电设施建设技术规范: JTS 155—2012 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [6] DU P C, WANG W Y, TANG G L, et al. Study on the ship arrival pattern of container terminals[J]. Applied mechanics & materials, 2013, 409: 1197-1203.
- [7] TANG G L, WANG W Y, GUO Z J, et al. Decision support system for designing integrated coastal berths and entrance-channel systems[J]. Journal of waterway port coastal & ocean engineering, 2016, 143(1): 1-16.
- [8] 中交水运规划设计院有限公司.海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [9] 李悦军.集装箱双箱装卸桥的选型与工艺创新问题研究[D].大连: 大连海事大学, 2009.
- [10] International Organization for Standardization. Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emission and removal: ISO 14064-1: 2006 [S]. Geneva: [s.n.], 2006.
- [11] 国家发展和改革委员会.2015年中国区域电网基准线排放因子公告[R].北京: 国家发展和改革委员会, 2015.
- [12] EVANS A, STREZOV V, EVANS T J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2009, 13(5): 1082-1088.
- [13] 姜子英,潘自强,邢江,等.中国核电能源链的生命周期温室气体排放研究[J].中国环境科学, 2015(11): 3502-3510.
- [14] 于世刚,王利,杜鹏.大连市年用电量预测模型优化研究[J].资源开发与市场, 2014, 30(12): 1468-1471.

(本文编辑 王璁)

(上接第98页)

## 3 结论

1) 以绕射作用为主的掩护区域,多向不规则波的扰动系数大于单向不规则波的扰动系数,即多向波的绕射性能较单向好;波浪绕射、反射作用都十分强烈的掩护区域,多向不规则波与单向不规则波的扰动系数看不出明显的大小关系。

2) 以反射作用为主的掩护良好区域,单向不规则波的扰动系数较多向不规则波的要大,且受反射作用越大的区域,单向波的扰动系数大得越多。

3) 在以绕射作用为主的掩护区域,波浪分布对周期的敏感性较差;在以反射作用为主的掩护良好区域,波高分布对周期的敏感性较强。

4) 在模型边界反射较弱的绕射占主导的模型中,用多向不规则波来模拟港内波况是偏安全的。但在绕射、反射都较强的情况下有可能单向波作用下的港内波高反而更大,用单向不规则波来模拟试验反而是偏安全的。

## 参考文献:

- [1] 张黎邦,申震亚,赖国璋.任意形状港湾波浪组合绕射和折射的数值分析[J].水动力学研究与进展,1988(2):11-21.
- [2] 柳淑学,俞聿修,赖国璋,等.多向不规则波绕射的数值模拟[J].海洋工程,2000(3):39-45.
- [3] 李孟国,时钟,李文丹.综合考虑多种变形因素的近岸多向不规则波传播数学模型—I.模型的建立[J].水动力学研究与进展(A辑),2006(4):444-450.
- [4] 刘思,张永良.多向不规则波群传播的数值模拟[J].清华大学学报(自然科学版),2015(12):1289-1295.
- [5] 刘针,陈汉宝,张慈珩.小面积掩护水域波浪物理模型与数学模型对比研究[J].水道港口,2009(4):241-245.
- [6] 白静,王朝辉,刘海源,等.大型港区港内波浪条件分析研究[J].水道港口,2010(5):429-432.
- [7] 陈哲淮.小港池海港波浪条件与平面布置的研究[D].天津: 天津大学, 2012.
- [8] 俞聿修,柳淑学.港口整体模型的多向不规则波试验研究[J].港工技术,1994(1):1-10.

(本文编辑 王璁)