

# 集装箱码头节能减排优化模型

孙晓伟, 李海波

(交通运输部水运科学研究院, 北京 100088)

**摘要:** “世界一流港口” “碳达峰” “碳中和”目标的提出对港口履行社会责任和高质量发展提出了更高要求, 激励港口更加自觉地应用节能减排技术, 推进技术革新。但节能减排技术经济投入与港口的能源、环境、碳排放综合效益博弈是摆在港口面前的重要问题。基于此, 本研究采用线性规划方法, 以综合经济费用最小化为目标, 以能源、环境、碳排放和技术需求为约束, 探讨了一种集装箱码头节能减排优化数学模型, 以为建设世界一流港口和实现双碳目标提供思路。

**关键词:** 集装箱码头; 节能减排技术; 碳达峰; 优化; 数学模型

**中图分类号:** U656.1+35      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006—7973 (2021) 10—0089—03

从全球范围的各行业来看, 交通运输业在世界能源消费和温室气体排放中所占比重均超过 20%, 且随着世界经济的高速发展和国际合作的越发频繁, 交通运输行业呈现不断上升的发展态势。因此, 交通运输行业节能减排责任重大。

港口是我国综合交通运输的重要枢纽, 也是我国经济社会发展的战略资源和重要支撑。港口快速发展的同时, 港口能耗、碳排放和港区环境问题日益凸显, 为实现港口绿色低碳发展, 港口的节能减排建设至关重要。近年来, 国家也不断出台政策, 对港口的高质量发展提出了更高要求。2019年11月, 我国九部门联合出台关于建设世界一流港口的指导意见, 提出了安全便捷、智慧绿色、经济高效、支撑有力、世界先进 5 部分 16 个指标, 并提出 2025 年、2035 年和 2050 年 3 个时间节点的世界一流港口建设目标。2020 年习近平总书记多次在国际会议上提到碳达峰、碳中和, 提出力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。“世界一流港口” “双碳”目标的提出, 无疑给港口提出了更高的要求, 倒逼港口在追求经济增长的同时, 要更加积极的履行社会责任, 减低能耗、减少污染、降低碳排放。节能减排技术投入可以很好地解决这一问题。然而, 港口资金有限, 可用于港口的节能减排技术众多, 如何博弈港口经济成本和能耗、环境、碳排放的综合社会效益之间的利弊是港口企业面临的重大难题。

基于此, 本研究以典型的码头类型—集装箱码头为研究对象, 探讨了一种节能减排优化控制方案, 旨在实现港口的经济、能源环境效益最大化, 更好地服务于建设资源节约型、环境友好型交通运输行业。

## 1 研究对象

本研究以集装箱码头为研究对象, 研究区域包含典型的集装箱码头的生产作业区域, 主要包括: ①码头前沿区域 (以卸船为例), 其主要作业过程为岸边集装箱起重机将集装箱从船舶卸到集装箱卡车上; ②水平运输区域, 主要作业过程为集装箱卡车将集装箱从码头前沿运输到堆场/港外; ③堆场区域, 主要作业过程为集装箱正面吊/轨道式/轮胎式集装箱起重机将集装箱从集卡上卸到堆场, 正面吊/堆高机/叉车用于集装箱理货。



图1 研究区域示意图

## 2 优化方法

本研究主要采用线性规划的方法建立优化模型, 并在模型建立过程中应用了 0-1 整数规划。线性规划是运筹学中研究较早、发展较快、应用广泛、方法较成熟的一个重要分支, 它是辅助人们进行科学管理的一种数学方法, 是研究线性约束条件下线性目标函数的极值问题的数学理论和方法。其广泛应用于经济分析、管理和工程技术等方面。线性规划方法可为合理地利用有限的人

力、物力、财力等资源作出的最优决策；解决稀缺资源最优分配，使付出的费用最小或获得的收益最大，为管理提供科学的依据。

0-1 整数规划是一种特殊形式的整数规划，这种规划的决策变量仅取值 0 或 1，故称为 0-1 变量或二进制变量。0-1 变量可以数量化地描述诸如开与关、取与弃、有与无等现象所反映的离散变量间的逻辑关系、顺序关系以及互斥的约束条件，0-1 整数规划所得结果是确定性最优解，不会陷入局部最优，为满足实际需要只需要修改条件函数和目标函数即可，数学模型简单直观。

### 3 优化模型建立

利用运筹学线性规划方法，以集装箱码头节能减排技术应用的综合经济成本最小化为目标，以能源、环境、碳排放等为约束条件，建立集装箱码头节能减排技术优化模型，用于探讨最佳的节能减排技术应用的工艺和设备配置方案，同时也为仿真验证的输入提供可能性。

#### 3.1 目标函数

基于港口生产经营既以生产盈利为目标，又要考虑能源、环境和社会责任，故本研究的优化目标以港口节能减排技术应用的综合经济费用最小化为优化目标。优化目标主要分为两部分，一部分为投入费用，一部分为收益。投入费用主要指集装箱码头为不同港口生产设施 / 节能减排项目的投资费用。收益主要指集装箱码头不同设备 / 节能减排项目所产生的经济效益，主要包括节能效益、减污效益、降碳效益和政策补贴收益。目标函数方程如下：

$$\text{Min } f = \text{Cost} - (\text{Benefits}_{\text{energy}} + \text{Benefits}_{\text{environment}} + \text{Benefits}_{\text{CO}_2} + \text{Benefits}_{\text{grants}})$$

##### 3.1.1 节能减排技术的投资费用

$$\text{Cost} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\text{NUM}_{i,j} \cdot \text{CIV}_{i,j})$$

$i$  代表集装箱码头不同的生产 / 非生产设施， $i=1、2、3、4、5、6、7、8$  分别代表岸边集装箱起重机、轨道式集装箱起重机、轮胎是集装箱起重机、集装箱卡车、正面吊、堆高机、叉车、其他； $j$  代表集装箱码头采取的不同的节能减排技术， $j=1、2、3、4、5、6、7、8、9、10$  分别代表能量回馈技术、永磁电机技术、“油改电”技术、“油改气技术”、靠港船舶使用岸电技术、风力发电技术、光伏发电技术、空气源热泵技术、地源热泵技术、水源热泵技术； $\text{NUM}_{i,j}$  代表港口设施  $i$  采用

节能减排技术  $j$  的数量，台或套或项； $\text{CIV}_{i,j}$  代表港口设施  $i$  采用节能减排技术  $j$  的单位投资费用，万元 / (台或套或项)。

##### 3.1.2 节能效果收益

该项主要指采用节能减排技术节约的能源成本费用。

$$\text{Benefits}_{\text{energy}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\text{NUM}_{i,j} \cdot \text{AENE}_{i,j,k} \cdot \text{PENE}_{i,j,k})$$

$k$  代表集装箱码头的能源类型， $k=1、2$  分别代表电力、柴油； $\text{AENE}_{i,j,k}$  代表单位港口设施  $i$  采用节能减排技术  $j$  后节约的能源  $k$  的量，万吨或 kWh / (台或套或项)； $\text{PENE}_{i,j,k}$  代表港口设施  $i$  采用节能减排技术  $j$  后节约的能源  $k$  的单价，万元 / (万吨或 kWh)。

##### 3.1.3 减污效果收益

该项主要指采用节能减排技术减少的污染物排污税。

$$\text{Benefits}_{\text{environment}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\text{NUM}_{i,j} \cdot \text{AENR}_{i,j,r} \cdot \text{PENR}_{i,j,r})$$

$r$  代表集装箱码头的污染物类型的能源类型， $r=1、2、3$  分别代表  $\text{SO}_2、\text{NO}_x、\text{PM}$ ； $\text{AENR}_{i,j,r}$  代表单位港口设施  $i$  采用节能减排技术  $j$  后减排的污染物  $r$  的量，万吨 / (台或套或项)； $\text{PENR}_{i,j,r}$  代表港口设施  $i$  采用节能减排技术  $j$  后减排的污染物  $r$  的环保税单价，万元 / 万吨。

##### 3.1.4 降碳效果收益

该项主要指采用节能减排技术减少的碳排放带来的碳交易收益。

$$\text{Benefits}_{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\text{NUM}_{i,j} \cdot \text{ACO}_{i,j} \cdot \text{PCO}_{i,j})$$

$\text{ACO}_{i,j}$  代表单位港口设施  $i$  采用节能减排技术  $j$  后减排的  $\text{CO}_2$  的量，万吨 / (台或套或项)； $\text{PCO}_{i,j}$  代表港口设施  $i$  采用节能减排技术  $j$  后减排的  $\text{CO}_2$  的量的碳交易单价，万元 / 万吨。

##### 3.1.5 政策补贴收益

$$\text{Benefits}_{\text{grants}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\text{NUM}_{i,j} \cdot \text{PGG}_{i,j})$$

$\text{PGG}_{i,j}$  代表单位港口设施  $i$  采用节能减排技术  $j$  后政府补贴费用，万元 / (台或套或项)。

### 3.2 约束条件

为了让优化目标产生最优解，需要设置模型的约束条件，本研究的约束条件设置的主要依据有：交通运输、绿色港口和地方“十四五”规划、港口未来在节能减排的投资费用、节能减排技术选择等方面，主要包括能源约束、环境约束、碳排放约束、投资约束、技术约束等。具体约束如下：

### 3.2.1 能源约束

该项指集装箱码头采用节能减排技术后的能源消耗需满足码头“十四五”规划和当地政策规定的该集装箱码头最低能源消耗要求。

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (CTE_k - NUM_{i,j} \cdot AENE_{i,j,k}) \leq EMIN_k \quad \forall k$$

$CTE_k$  代表集装箱码头能源  $k$  的现状消耗量, 万吨或 kWh;  $EMIN_k$  代表集装箱码头的“十四五”规划和当地政策规定的该码头能源  $k$  的最小消耗要求, 万吨或 kWh。

### 3.2.2 环境约束

该项指集装箱码头采用节能减排技术后的环境污染物排放量满足码头“十四五”规划和当地政策规定的该集装箱码头最低污染物排放要求。

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (CTP_r - NUM_{i,j} \cdot AENR_{i,j,r}) \leq PMIN_r \quad \forall r$$

$CTP_r$  代表集装箱码头污染物  $r$  的现状排放量, 万吨;  $PMIN_r$  代表集装箱码头的“十四五”规划和当地政策规定的该码头污染物  $r$  的最小排放要求, 万吨。

### 3.2.3 碳排放约束

该项指集装箱码头采用节能减排技术后的碳排放量满足码头“十四五”规划和当地政策规定的该集装箱码头最低碳排放要求。

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (CTCO - NUM_{i,j} \cdot ACO_{i,j}) \leq COMIN$$

$CTCO$  代表集装箱码头  $CO_2$  的现状排放量, 万吨;  $COMIN$  代表集装箱码头的“十四五”规划和当地政策规定的该码头  $CO_2$  的最小排放要求, 万吨。

### 3.2.4 技术约束

假设集装箱码头某一设施在节能减排技术应用时, 仅同时投资应用一种技术。

$$\sum_{j=1}^J JS_{i,j} = 1 \quad \forall i$$

$$JS_{i,j} = 0 \text{ 或 } 1$$

$JS_{i,j}$  代表集装箱码头节能减排技术的选择参数, 其值为 0 或 1;

### 3.2.5 其他约束条件

集装箱码头应用节能减排技术的设施数量小于码头现有设施数量。

$$NUM_{i,j} \leq CNUM_i \quad \forall i$$

## 4 模型应用建议及展望

本研究建立的集装箱码头节能减排优化模型综合考虑了大部分能在集装箱码头应用的典型节能减排技术, 具有一定范围的普适性。

(1) 在基础数据应用方面, 建议节能减排技术的能源、环境、碳排放和经济效益等数据的应用方面采用平均值, 更能反馈港口的水平。

(2) 在目标设置方面, 可灵活设置码头投资成本, 分析不同投资成本下的决策方案, 以便为决策者提供更多选择方案。

(3) 在模型结果应用方面, 本研究以节能减排设施数量为因变量, 可作为仿真模型的输入, 与仿真模型建立联系, 通过仿真的畅通性来互相验证优化模型结果。

(4) 在模型情景分析方面, 可通过设置不同的能耗情景、碳排放情景, 分析港口的节能减排技术投资分配和综合经济成本, 从而为港口提供更多的可行方案。另外, 还可以增加时间变量, 通过设置某年的碳排放量最大, 为不同碳达峰时间情景下的节能减排技术投入和行动方案提供思路。

### 参考文献:

- [1] 孙晓伟. 长江中游城市群大气污染特征及其典型城市优化控制研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [2] 李海波. 港口机械能耗检测和评价方法的探讨 [J]. 港口装卸, 2014 (4): 46-49.
- [3] 杨阳. 港口节能减排评价研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [4] Sun X, Li W, Xie Y, et al. An optimization model for regional air pollutants mitigation based on the economic structure adjustment and multiple measures: A case study in Urumqi city, China[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 182:59-69.