

政府混合激励下的港口微电网配置问题研究

梁承姬¹, 董梦启¹, JIAN Shi², 王钰¹, 徐晓洁¹, 张园¹

(1. 上海海事大学 物流科学与工程研究院, 上海 201306;

2. 休斯敦大学 工程技术系, 休斯敦 77204)

摘要: 针对碳减排背景下港口微电网的投资部署问题, 综合考虑包含在泊船舶在内的港口区域利益, 分别以规划期内港区最大化环境效益和港区最小化总成本为目标, 构建了以政府为领导者、港区为跟随者的双层规划模型。设计并采用列和约束生成(CCG)算法进行求解, 得到划期内港区的最优投资运营策略。分析不同激励预算下港口微电网系统的部署情况与港区的环境效益, 并对不同激励策略进行案例对比, 结果表明混合激励策略能显著提升港口微电网系统的投资积极性, 并有效促进港区能源结构革新与减排进程。

关键词: 港口减排; 港口能源系统; 微电网与岸电; 政府激励; 双层决策优化

中图分类号: U653.95; F552

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.012

Study on the configuration of port microgrids under government hybrid incentives

LIANG Chengji¹, DONG Mengqi¹, JIAN Shi², WANG Yu¹, XU Xiaojie¹, ZHANG Yuan¹

(1. Institutes of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Engineering Technology Department, University of Houston, Houston 77204)

Abstract: In the context of carbon emission reduction, this study constructs a bi-level planning model for port microgrid investment and deployment, with the government as the upper-level decision-maker and the port area as the lower-level follower. The model incorporates the interests of the port area, including berthed vessels, and aims to maximize environmental benefits while minimizing the total cost of the port area over the planning period. Using the Column and Constraint Generation (CCG) algorithm, the optimal investment and operation strategy for the port area during the planning horizon is derived. The study analyzes the deployment of the port microgrid system under varying incentive budgets and evaluates the resulting environmental benefits, comparing the effectiveness of different incentive strategies. The results demonstrate that a hybrid incentive strategy can significantly enhance investment motivation in port microgrid systems, thereby effectively fostering innovation in the energy structure of the port region and accelerating the emission reduction process.

Key words: port emission reduction; port energy systems; microgrids and shore power; government incentives; bi-level decision

港口作为全球物流网络的关键节点, 承载着超过85%的世界贸易量, 促进了全球经济的繁荣。然而, 随着贸易活动的激增, 为港口提供电力支持的公用电网(主电网)承受着巨大的供能压力^[1]。在港

口区域, 船舶在泊期间主要依赖化石燃料驱动的副机供电, 燃烧产生的二氧化碳导致碳排放量显著增加。尽管岸电技术为减少在泊船舶的碳排放提供了有效途径, 但实际使用率较低, 且作为传输设备, 减

收稿日期: 2024-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(72271125); 上海市青年科技英才扬帆计划(21YF1416400)资助

通信作者: 梁承姬(1970—), 女, 教授, 研究方向为物流系统运作计划与优化、地下物流。E-mail: liangcj@shmtu.edu.cn

引用格式: 梁承姬, 董梦启, JIAN S, 等. 政府混合激励下的港口微电网配置问题研究[J]. 中国航海, 2025, 48(4): 103-112.

LIANG C J, DONG M Q, JIAN S, et al. Study on the configuration of port microgrids under government hybrid incentives[J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 103-112. (in Chinese)

排效果与发电来源密切相关。为了应对日益严峻的环境挑战并实现可持续发展目标,以减排为目的的港口能源结构革新与优化势在必行。

微电网是一种能够与主电网同步或并联运行的局部能源网络,也被称作分布式电源。在海港场景中,微电网、岸电系统和储能系统相结合,形成了港口微电网系统。该系统与主电网以及在泊船舶,构成了港岸船能源调度系统,其结构详见图1。港口微电网系统能够整合本地可再生能源和岸电系统等绿色设施,不仅能有效减轻主电网的负荷压力,还能在泊船舶提供清洁、可持续的能源支持^[2]。尽管优势明显,但其高昂的初期投资和不确定性的投资回报率限制了微电网技术的大规模应用。以美国为例,一套岸电系统的建设成本高达100万美元,船舶改造费用在30万美元到50万美元之间。加上运营和维护成本,港口微电网系统的总投资可能超过千万美元^[3]。此外,尽管多数国内港口已经安装岸电设施,但由于缺乏强制的排放限制,港口和船公司无需承担减排责任,导致岸电的使用率较低。因此,为加速港口能源结构革新进程,实现包含在泊船舶在内的港口区域(简称“港区”)从发电端到用电端的碳减排目标,政府层面的介入显得尤为关键。综上,探讨在政府激励下的港口微电网系统的投资部署问题,不仅具备理论研究价值,还拥有重要实践参考意义。

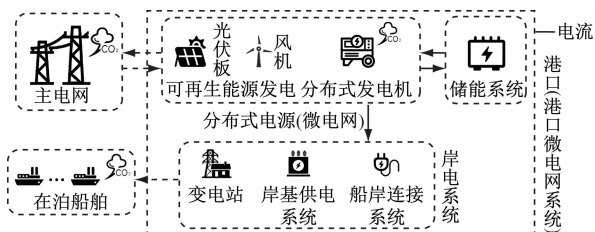


图1 港岸船能源调度系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of the port-shore power-ships at berth energy dispatching system

关于港口微电网系统优化配置的相关研究,MOLAVI等^[4]设计了一个基于两阶段随机混合整数模型的系统框架来探讨微电网在港口的应用,为提高港口可持续性提供帮助。ABU等^[5]以奥尔堡港为例,以成本最小为目标,探究了包括可再生能源和岸电在内的海港微电网的优化配置,为港口微电网系统的设计提供参考。YUE等^[6]则对考虑微电网与岸电协同下的港口调度问题进行优化,并通过数值试验证明算法的可行性与优越性。

关于航运业碳减排相关激励政策以及政策激励下微电网配置的研究,周施敏等^[7]采用演化博弈的

方法探究了政府监管下港口企业合作减排演化过程并探讨政府在其中作用。钟铭等^[8]探讨了不同减排政策下班轮航线配船与航速优化问题,并对比分析了不同减排政策的减排效果。林森等^[9]研究了考虑碳交易机制的电-热混合式储能优化配置方案,构建了双层优化配置框架并采用混合式优化算法进行求解。

综上所述,大多数研究聚焦于港口微电网系统的设计与优化,以及航运业碳减排政策的制定和比较分析。然而,少有研究从政府和港口企业双方的视角出发,同时探讨港口微电网系统投资部署的决策与优化问题。此外,现有研究通常只考虑单一激励策略,未能充分探讨补贴与监管策略的综合效果。同时,提出的策略缺乏对港口运营情况的适应性调整,且缺少具体的投资部署方案。

本文从长期规划的角度出发,提出一种旨在优化政府和港区决策过程的混合激励策略,以提高港口微电网系统的投资部署积极性。为此,本文构建了一个双层规划模型,该模型综合考虑了政府的经济激励与惩罚机制(补贴和监管),并考察了政府与港区在整个规划期内的互动,将激励措施与港区运营情况相挂钩。在求解部分,基于列和约束生成(Column and Constraint Generation, CCG)算法^[10]对构建的模型进行处理和分解,求解得到规划期内的港区投资运营策略。此外,本文还探讨了激励预算对港区减排效果和微电网部署积极性的影响,并对不同策略下整个港区的减排效果进行了比较分析。本研究不仅为政府激励下港口微电网系统的优化配置提供了理论指导,还为港区碳减排策略的制定及能源结构的革新优化提供了参考。

1 问题描述

在航运业减排的背景下,港区必须提高岸电设施的使用率并革新发电方式,以实现从发电到用电的全流程减排,从而达到降低港区碳排放的目标,因此需要在政府的推动下建立港区投资规划的整体框架。本文探讨的政府激励下的港口微电网系统配置问题,可以看作港区在利益驱动下,对政府混合激励策略做出的反馈性部署。涉及政府和港区两个决策者的分层决策,本文针对该问题建立了以政府为上层、港区为下层的双层规划模型,双层规划问题结构图如图2所示。

在政府层面,政府以最大化环境效益为目标,采取补贴和监管措施来激励港区部署微电网,包括可调度的分布式发电机(Dispatchable Distributed Gen-

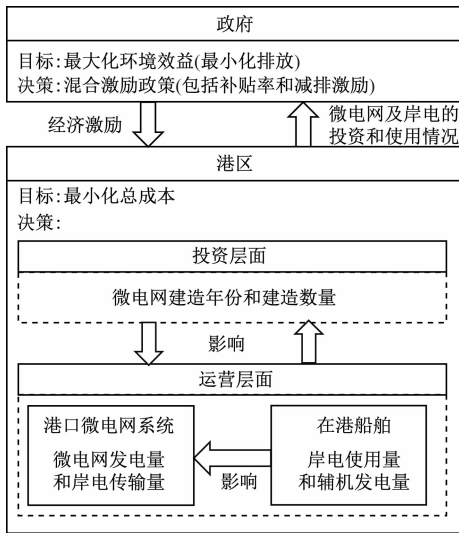


图2 双层规划问题结构图

Fig. 2 Structure of the bi-level planning problem

erators, 简称 D-DGs) 和可再生能源发电设施, 即不可调度分布式发电机 (Non-Dispatchable Distributed-Generators, 简称 N-DGs), 同时积极使用岸电, 以获得更清洁的发电源并减少船舶的在泊排放, 从而获得更高的环境效益^[11]。

在港区层面, 作为利益驱动的实体, 其核心诉求是减少规划期内的总成本。同时, 港区需要对政府所制定的混合激励策略做出投资及部署规划。受上层政府补贴与监管措施 (排放上限) 的约束, 港区需要决策微电网的投资数量、发电量以及从主电网购电量, 同时船舶决策当年副机发电量与岸电需求量, 港区根据船舶电力需求决策是否开启岸电以及岸电的传输量。

2 模型构建

2.1 问题假设

1) 只考虑一个集中的政府, 负责监督港区运营并做出统一的减排管理决策;

2) 仅考虑船舶停泊时的副机排放, 不强制要求船舶在港期间使用岸电, 船舶可根据实际情况自由选择副机或者岸电供电, 但两者必选其一;

3) 信息透明, 即港区减排规划涉及的实体可以及时了解到其他实体的政策和决策信息, 以调整决策, 追求经济效益;

4) 港区所有泊位均已安装岸电基础设施, 为靠泊船舶提供岸电, 只需决策是否使用该设备以及设备使用量;

5) 年度投资策略在年初确定, 如果港区计划进行投资, 则建造项目从年初开始, 并在一年内完成;

6) D-DGs 设备在建造完成后可以关停并可以

决策发电量 (不超过年最大发电量); N-DGs 设备在建造后不可以关停且发电量固定为设备年最大发电量。两种设备均可以全年连续使用;

7) 不考虑储能系统与微电网的互动。

2.2 符号说明

模型相关符号及定义如表 1 ~ 表 4 所示。

表 1 模型相关符号及定义 (集合)

Tab. 1 Symbols and definitions related to the model (sets)

变量符号	具体定义
G	D-DGs 设备的集合, $k \in G$
W	N-DGs 设备的集合, $k \in W$
S	岸电供应候选站的集合, $s \in S$
T	时间集合, $t \in T$
g	补贴类型的集合, $g = \{1, 2\}$
a_{ux}	副机排放因子的集合, $a_{ux} = \{a_{MGO}, a_{LNG}\}$

表 2 模型相关符号及定义 (参数)

Tab. 2 Symbols and definitions related to the model (parameters)

变量符号	具体定义
B_t	第 t 年的补贴预算
$B_{2,t}$	第 t 年的减排激励上限
s_{e_aux}	副机的外部环境成本
s_{e_ig}	设备的外部环境成本
s_{e_m}	主电网设备的外部环境成本
f_{aux}	副机的排放因子
f_{ig}	D-DGs 设备的排放因子
f_m	主电网设备的排放因子
E_c	政府允许的港区年排放上限
δ_α	港区减少每单位排放所获得的奖励
δ_β	港区超出排放上限后每单位排放所缴纳的罚款
$C_{F,k}$	微电网设备 k 的建造价格
A_s	s 型岸电的容量
C_v	单位容量岸电传输价格
c_k	D-DGs 设备中 k 的发电成本
c_{aux}	副机的单位发电成本
c_{mb}	主电网购电单价
c_{ms}	向主电网售电的单价
$P_{v,t}$	船公司第 t 年的电力需求量
$P_{max,kt}$	k 设备第 t 年的最大发电量 (包括 D-DGs 和 N-DGs 设备)
\bar{p}_{mb}	港区的主电网购电上限
\bar{y}	岸电设备开启数量上限
$\bar{\alpha}_g$	政府设定的补贴率上限, 其中 $g \in \{1, 2\}$

表3 模型相关符号及定义(变量与衍生变量)

Tab.3 Symbols and definitions related to the model (variables and derived variables)

变量符号	具体定义
$p_{mb,t}$	港区第 t 年从主电网购买的电量
$p_{ms,t}$	港区第 t 年向主电网出售的电量
p_{kt}	D-DGs 设备 k 第 t 年的发电量
$P_{O,st}$	岸电 s 第 t 年的电力传输量
$P_{Aux,t}$	副机第 t 年的发电量
F_1	D-DGs 和 N-DGs 设备的建造成本
F_2	岸电的运营维护成本
F_3	D-DGs 设备的发电成本
F_4	港区与主电网的能量交换成本
F_5	副机的发电成本
$S_{U1,t}$	第 t 年 N-DGs 设备的建造补贴
$S_{U2,t}$	岸电第 t 年的运营维护补贴
$S_{U3,t}$	港区第 t 年缴纳的排放罚款
$S_{U4,t}$	港区第 t 年获得的排放奖励

表4 模型相关符号及定义(决策变量)

Tab.4 Symbols and definitions related to the model (decision variables)

变量符号	具体定义
α_1	N-DGs 设备的建造补贴率
α_2	岸电设备的运营维护补贴率
π	每减少/超出单位减排上限所得到的奖励/缴纳的罚款
z_{kt}	0-1 变量,若港区在第 t 年投资设备 k ,则 $z_{kt} = 1$,反之 $z_{kt} = 0$
x_{kt}	0-1 变量,若港区在第 t 年使用设备 k ,则 $x_{kt} = 1$,反之 $x_{kt} = 0$
y_{st}	0-1 变量,若港区在第 t 年使用岸电 s ,则 $y_{st} = 1$,反之 $y_{st} = 0$

2.3 数学模型

2.3.1 上层规划问题(政府激励决策)

排放因子定义为单位质量能源燃烧所产生的二氧化碳量。外部环境成本指当地政府为处理每单位碳排放所支付费用。本研究将政府环境效益定义为使用微电网与岸电设备减排而节省的治理成本,计算公式基于排放因子、外部环境成本与应用电量三者乘积。

港区投资 N-DGs 设备会获得政府的建造补贴,第 t 年的补贴如下:

$$S_{U1,t} = \sum_{k \in W} C_{F,k} z_{kt} \alpha_1 \quad (1)$$

港区第 t 年使用岸电设备时获得的运营维护补贴金额为:

$$S_{U2,t} = \sum_s y_{st} A_s C_V \alpha_2 \quad (2)$$

港区的总排放 $E_{m,t}$ 为副机排放量、主电网发电排放量和 D-DGs 设备排放之和:

$$E_{m,t} = P_{Aux,t} f_{aux} + \sum_{k \in G} P_{kt} f_{ig} + P_{mb,t} f_m, \quad \forall t \quad (3)$$

港区排放水平高于政府分配的排放上限所缴纳的排放罚款为:

$$S_{U3,t} = \delta_\alpha (E_{m,t} - E_c) \pi, \quad \forall t \quad (4)$$

港区排放水平低于政府分配的排放上限所获得的排放奖励为:

$$S_{U4,t} = \delta_\beta (E_c - E_{m,t}) \pi, \quad \forall t \quad (5)$$

港区减排效果定义为减少的副机排放与 D-DGs 设备发电排放、主电网设备发电排放之差。外部环境成本直接影响政府的环境效益,减排效果越好环境效益越高。因此,上层政府的目标为最大化环境效益,其目标函数为:

$$\max \sum_t \left(\sum_s P_{O,st} f_{aux} s_{c_aux} - P_{mb,t} f_m s_{c_m} - \sum_{k \in G} P_{kt} f_{ig} s_{c_ig} \right) \quad (6)$$

约束条件:

$$0 \leq \alpha_g \leq \bar{\alpha}_g \quad (7)$$

$$0 \leq \pi \leq \bar{\pi} \quad (8)$$

$$-M\delta_\alpha \leq E_c - E_{m,t} \leq M\delta_\beta, \quad \forall t \quad (9)$$

$$S_{U1,t} + S_{U2,t} \leq B_t, \quad \forall t \quad (10)$$

$$S_{U3,t} + S_{U4,t} \leq B_{2,t}, \quad \forall t \quad (11)$$

$$\delta_\alpha + \delta_\beta = 1 \quad (12)$$

$$\delta_\alpha, \delta_\beta \in \{0, 1\} \quad (13)$$

其中,式(7)~(8)约束了补贴与激励的上下限;式(9)表示港区向政府缴纳罚款还是获得奖励取决于港区的排放水平;式(10)保证规划期内港区每年获得的补贴都在补贴预算之内;式(11)保证了政府每年的减排激励(奖励或罚款)不能超过上限;式(12)确保港区只能获得排放奖励或缴纳排放罚款;式(13)表示 δ_α 和 δ_β 为 0-1 变量。在本文背景下港区收益全部来自政府激励,即约束了港区的经济收益。

2.3.2 下层规划问题(港区运营决策)

下层港区的成本包括 D-DGs 和 N-DGs 设备的投资成本、岸电的运营维护成本、D-DGs 设备的发电

成本、与主电网能量交换成本以及副机的发电成本。

港区投资 D-DGs 设备与 N-DGs 设备的成本为:

$$F_1 = \sum_t \left(\sum_{k \in G} C_{F,t} z_{kt} + \sum_{k \in W} C_{F,k} (1 - \alpha_1) z_{kt} \right) \quad (14)$$

岸电设施的运营维护成本为:

$$F_2 = \sum_t \sum_s y_{st} A_s C_V (1 - \alpha_2) \quad (15)$$

D-DGs 设备的发电成本为:

$$F_3 = \sum_t \sum_{k \in G} P_{kt} c_k \quad (16)$$

港区与主电网的能量交换成本为:

$$F_4 = \sum_t c_{mb} P_{mb,t} - c_{ms} P_{ms,t} \quad (17)$$

第 t 年副机的发电量可以用当年船舶的总电力需求量与岸电总传输量的差值来表示:

$$P_{Aux,t} = P_{V,t} - \sum_s P_{O,st}, \quad \forall t \quad (18)$$

第 t 年副机的发电成本为:

$$F_5 = \sum_t c_{aux} P_{Aux,t} \quad (19)$$

港区规划期内的总成本为:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (20)$$

根据上述公式,下层港区的规划模型如下所示。

目标函数:

$$\max \sum_t S_{U4,t} - S_{U3,t} - F \quad (21)$$

约束条件:

$$P_{O,st} \leq A_s y_{st} \quad : \mu_{1,st}, \quad \forall s, t \quad (22)$$

$$P_{kt} \leq x_{kt} P_{max,k} \quad : \mu_{2,Gt}, \quad \forall k \in G, t \quad (23)$$

$$\sum_{k \in W} P_{max,kt} x_{kt} + \sum_{k \in G} P_{kt} + P_{mb,t} - P_{ms,t} = \sum_s P_{O,st} \quad : \lambda_{1,t}, \quad \forall t \quad (24)$$

$$0 \leq \sum_s y_{st} \leq \bar{y} \quad : \mu_{3,t}, \quad \forall t \quad (25)$$

$$0 \leq P_{mb,t} \leq \bar{p}_{mb} \quad : \mu_{4,t}, \quad \forall t \quad (26)$$

$$\sum_t z_k \leq 1 \quad : \mu_{5,k}, \quad \forall k \in G, W \quad (27)$$

$$x_{kt} \leq \sum_t z_k M \quad : \mu_{6,k}, \quad \forall k \in G, W \quad (28)$$

$$x_{kt} \leq x_{k(t+1)} \quad : \mu_{7,kt}, \quad \forall k \in W \\ t = 1, 2, \dots, T-1 \quad (29)$$

其中 $(\mu_{1,st}, \mu_{2,Gt}, \lambda_{1,t}, \mu_{3,t}, \mu_{4,t}, \mu_{5,k}, \mu_{6,k}, \mu_{7,kt})$ 为每个约束对应的拉格朗日乘数,用于模型的化简^[12]。

港区需在政府混合激励策略的影响下尽可能降低总投入成本,因此目标函数(21)设置为最小化总成本,包括港区总支出、获得的减排奖励和缴纳的排放罚款;式(22)保证每台岸电每年可传输电量不超过设定的最大传输电量;式(23)表示 D-DGs 设备第

t 年的发电量不能超过其最大发电容量;式(24)表示港区第 t 年的供电总量必须足够船舶使用,即 D-DGs 和 N-DGs 设备的发电量和与主电网进行能量交换电量的总和等于船舶年电力需求量;式(25)为岸电设备开启数量的上下限约束;式(26)约束了港区从主网购电的电量上下限;式(27)表示在整个投资规划期内,每组发电设备只可以投资一次;式(28)~(29)表示微电网投资情况与使用情况之间的关系。

2.3.3 双层规划模型耦合

本文对这种交互关系建立了政府为上层、港区为下层的双层模型(BiMIP)。在决策过程中,政府作为上层决策者首先制定政策,而港区作为下层响应者随后根据自身利益最大化原则对政府决策做出反应,最终得到能够平衡政府环境效益和港区经济效益的规划期内总策略。此外,问题涵盖长达十年的规划期,且上下层模型的决策变量相互依赖,这进一步增加了问题规模和复杂性。鉴于问题特点,本文选择 CCG 算法^[13]进行模型求解。CCG 算法通过在每次迭代中引入新变量来扩展解空间,能有效处理大规模问题。与传统 Benders 分解方法相比,CCG 算法在下层决策问题线性化后,会展现出更快的收敛速度和更低的计算复杂度。

我们首先利用 big-M 法将下层模型进行线性化处理,然后应用 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件将双层模型转化为单层模型。最后,将双层模型分解为算法的主子问题,在相互的迭代过程中使上下界逐渐逼近,当上下界差值处于所设定的允许误差范围内时,迭代结束,模型求解完成。主要步骤如下:

1) 利用 big-M 法将下层模型线性化;

2) 将下层模型转换为对应的 KKT 条件,将双层模型转化为单层模型;

3) 采用 CCG 算法求解 BiMIP 并获得最优解。

3 模型求解

3.1 模型处理

下层港区模型的 KKT 条件包含一组平稳约束、原始可行约束、对偶可行约束以及互补松弛约束,原始可行约束为式(22)~(29),其余约束描述为式(30)~(37):

$$0 \leq \mu_{1,st} \perp A_s y_{st} - P_{O,st} \geq 0, \quad \forall s, t \quad (30)$$

$$0 \leq \mu_{2,Gt} \perp x_{kt} P_{max,k} - P_{kt} \geq 0, \quad \forall k \in G, t \quad (31)$$

$$0 \leq \mu_{3,t} \perp \bar{y} - \sum_s y_{st} \geq 0, \quad \forall t \quad (32)$$

$$0 \leq \mu_{4,t} \perp \bar{p}_{mb} - p_{mb,t} \geq 0, \quad \forall t \quad (33)$$

$$0 \leq \mu_{5,k} \perp 1 - \sum_t z_k \geq 0, \quad \forall k \in G, W \quad (34)$$

$$0 \leq \mu_{6,k} \perp \sum_t z_k M - x_{kt} \geq 0, \quad \forall k \in G, W \quad (35)$$

$$0 \leq \mu_{7,kt} \perp x_{k(t+1)} - x_{kt} \geq 0, \quad \forall k \in W \quad (36)$$

$$t = 1, 2, \dots, T-1$$

$$0 \leq \lambda_{1,t} \leq b_{\text{binary}1,t} M, \quad \forall t \quad (37)$$

$$\mu_{1,st}, \mu_{2,Gt}, \lambda_{1,t}, \mu_{3,t}, \mu_{4,t}, \mu_{5,k}, \mu_{6,k}, \mu_{7,kt} \geq 0 \quad (38)$$

互补条件的一般形式为:

$$0 \leq A \perp B \geq 0 \quad (39)$$

将所有互补条件替换为一组线性约束:

$$0 \leq A \leq b_{\text{binary}} M \quad (40)$$

$$0 \leq B \leq (1 - b_{\text{binary}}) \cdot M \quad (41)$$

其中 binary 为二进制变量, M 为一个足够大的常数。

替换后的公式可表示为:

$$0 \leq \mu_{1,st} \leq b_{\text{binary}1,t} M, \quad \forall s, t \quad (42)$$

$$0 \leq A_{s,st} - P_{0,st} \leq (1 - b_{\text{binary}1,t}) \cdot M, \quad \forall s, t \quad (43)$$

$$0 \leq \mu_{2,Gt} \leq b_{\text{binary}2,Gt} M, \quad \forall k \in G, t \quad (44)$$

$$0 \leq x_{kt} p_{\max,kt} - p_{kt} \leq (1 - b_{\text{binary}2,Gt}) \cdot M, \quad \forall k \in G, t \quad (45)$$

$$0 \leq \mu_{3,t} \leq b_{\text{binary}3,t} M, \quad \forall t \quad (46)$$

$$0 \leq \bar{y} - \sum_s y_{st} \leq (1 - b_{\text{binary}3,t}) \cdot M, \quad \forall t \quad (47)$$

$$0 \leq \mu_{4,t} \leq b_{\text{binary}4,t} M, \quad \forall t \quad (48)$$

$$0 \leq \bar{p}_{mb} - p_{mb,t} \leq (1 - b_{\text{binary}4,t}) \cdot M, \quad \forall t \quad (49)$$

$$0 \leq \mu_{5,k} \leq b_{\text{binary}5,k} M, \quad \forall k \in G, W \quad (50)$$

$$0 \leq 1 - \sum_t z_k \leq (1 - b_{\text{binary}5,k}) \cdot M, \quad \forall k \in G, W \quad (51)$$

$$0 \leq \mu_{6,k} \leq b_{\text{binary}6,k} M, \quad \forall k \in G, W \quad (52)$$

$$0 \leq \sum_t z_k M - x_{kt} \leq (1 - b_{\text{binary}6,k}) \cdot M, \quad \forall k \in G, W \quad (53)$$

$$0 \leq \mu_{7,kt} \leq b_{\text{binary}7,Wk} M, \quad \forall k \in W \quad (54)$$

$$t = 1, 2, \dots, T-1$$

$$0 \leq x_{k(t+1)} - x_{kt} \leq (1 - b_{\text{binary}7,Wk}) \cdot M, \quad \forall k \in W \quad t = 1, 2, \dots, T-1 \quad (55)$$

$$0 \leq \lambda_{1,t} \leq b_{\text{binary}1,t} M, \quad \forall t \quad (56)$$

$$0 \leq \sum_{k \in W} p_{\max,kt} x_{kt} + \sum_{k \in G} p_{kt} + p_{mb,t} - p_{ms,t} - \sum_s P_{0,st} \leq (1 - b_{\text{binary}1,t}) \cdot M, \quad \forall t \quad (57)$$

3.2 算法实现

修改后,算法的主问题包含上层模型、下层模型的约束以及迭代求解后产生的新约束,其目标函数可表述为:

$$\Delta = \max \sum_t \left(\sum_s P_{0,st} f_{\text{aux}}^{s_{c_{\text{aux}}}} - \sum_{k \in G} p_{kt} f_{\text{ig}}^{s_{c_{\text{ig}}}} \right) + \eta \quad (58)$$

约束条件为:

$$\eta \geq -M \sum_t \sum_s \sum_k \left(\mu_{1,st} + \mu_{2,Gt} + \lambda_{1,t} + \mu_{3,t} + \mu_{4,t} + \mu_{5,k} + \mu_{6,k} + \mu_{7,kt} \right) + S_{U_3, \tau} - F_{\tau} \quad 1 \leq \tau \leq \Gamma \quad (59)$$

通过求解主问题得到 BiMIP 的上界 ξ_* 。将主问题的求解方案 α_1^* 、 α_2^* 和 π_* 代入子问题进行求解,产生 BiMIP 的下界 γ_* 。其中,子问题为包含目标函数与约束条件的下层模型,目标函数为式(60),约束条件为式(14)~(29)、(61):

$$\gamma(\alpha_1^*, \alpha_2^*, \pi_*) = \Delta \quad (60)$$

$$\eta \geq S_{U_3} - F \quad (61)$$

修改后的 CCG 算法流程如图 3 所示,其中 x 表示上层模型的决策变量, y 表示下层模型的决策变量。

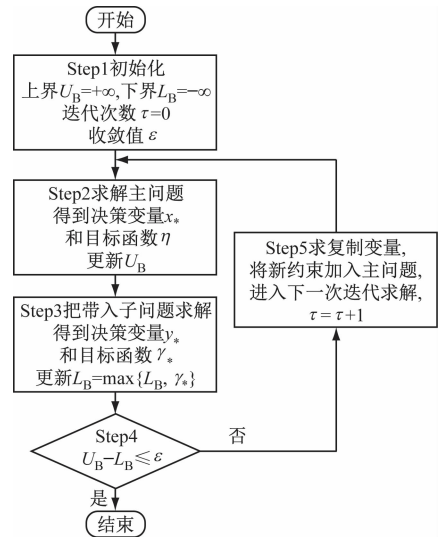


图3 基于 CCG 算法的模型流程

Fig. 3 Model flowchart based on the CCG algorithm

步骤 1 设置最大迭代次数为 Γ , 上下界误差为 ε , 模型上界 $U_B = +\infty$, 下界 $L_B = -\infty$, 迭代次数 $\tau = 0$ 。

步骤 2 求解由上节得到的主问题, 由于主问题是原问题松弛后得到的, 通过计算可以得到目标函数的上界, 更新 $U_B = \xi_{*, \tau}$ 。

步骤 3 根据主问题的求解结果 $x_{*, \tau}$ 计算子问

题,并更新下界 $L_B = \max \{L_B, \gamma_{*,u}\}$ 。

步骤4 判断收敛性。如果 $U_B - L_B \leq \varepsilon$,则返回 L_B 值、对应微电网投资方案和政府设定的补贴率,算法终止;否则,进行步骤5。

步骤5 设置 $\tau = \tau + 1, \tau \leq \Gamma$,并添加对应的新变量和新约束到主问题,继续进行步骤2。

4 数值试验

针对本文提出的双层规划模型,通过模拟案例评估混合激励策略对政府环境效益与港区经济利益的影响。所有情况均考虑十年的规划期限,设定初期政府补贴为 576 万元/年,逐年递减至 300 万元;减排预算为 360 万元/年;排放上限设为初始状态(仅副机发电)的 70%。岸电装置配置与能源使用概览参照中国上海洋山港四期工程实例^[14-15]:六泊位配置分别为 2 个 0.8 兆瓦、2 个 2 兆瓦和 2 个 3 兆瓦,泊位利用率设定为 78%,且所有停靠船舶的电力需求均能完全覆盖。购电与售电价为 0.43 元/千瓦及 0.36 元/千瓦;副机成本 0.65 元/千瓦,功率范围 0.32 ~ 2 兆瓦,排放因子依船型而定:MGO 船为 0.55 千克/千瓦时,LNG 船为 0.40 千克/千瓦时^[16]。服务船只从 4 000 增至 4 600 艘/年,电力需求由 70 000 升至 80 000 兆瓦时/年。选取三种微电网设备容量(5 兆瓦、3 兆瓦、2 兆瓦)^[17],综合考虑后决定投资组合为六个 D-DGs 与两个 N-DGs 单元。具体参数见表 5 和表 6。

表 5 D-DGs 设备属性

Tab.5 Dispatchable generation unit attributes

编号	年最大发电量/ 兆瓦时	成本系数/ (元/兆瓦时)	建造成本/ 万元
1	24 000	140	1 300
2	24 000	140	1 300
3	18 000	70	1 080
4	18 000	70	1 080
5	13 500	35	870
6	13 500	35	870

表 6 N-DGs 设备属性

Tab.6 Non-dispatchable generation unit attributes

编号	年最大发电量/ 兆瓦时	成本系数/ (元/兆瓦时)	建造成本/ 万元
1	15 000	0	1 450
2	18 000	0	2 320

提出的双层优化模型在 GAMS 中实现,分别使用 BARON 和 CPLEX 求解主问题和子问题。

4.1 结果分析

4.1.1 微电网部署与港区用电情况

通过求解模型可以得到港区在所提出混合激励策略下的投资规划策略,此策略既能最大化环境效益以满足政府目标,又能提升港区自身的经济效益。表 7 为微电网发电情况,可以看出:面对初期的高额补贴,港区会主动在前三年加大微电网设备的投资力度,并积极采用 D-DGs 设备进行发电。岸电传输情况(见图 4),则反映出,随着船舶对电力需求的持续增长,岸电传输量也会随之增加。综合上述两表数据,本文提出的混合激励机制有效驱动了港口微电网系统中设备的投资积极性,同时促进了岸电的应用。由此可见,本研究构建的模型不仅调和了政府减排需求和港区经济诉求之间的矛盾,还极大提升了港口微电网系统部署的主动性和效率,在港区能源结构革新方面有较高的实用性。

4.1.2 混合激励预算对微电网部署影响

为了进一步探讨混合激励策略下不同预算水平对港口微电网系统部署的影响,我们对 63 万元 ~ 420 万元的年度化激励预算(包括监管预算和运营维护补贴预算,其中监管预算又包括减排奖励与排放罚款)范围内,港区岸电传输、副机发电情况、环境效益及微电网投资决策的变化趋势进行模拟试验并分析。

总体而言,岸电传输量随着激励增加而增长。当一种激励预算低于 100 万元时,提高另一种激励预算无法显著提高岸电传输量;然而,当预算超过 100 万元时,岸电传输量将迅速增长,并最终趋于稳定。低预算时港区会选择使用副机来满足船舶在泊的电力需求;而当预算提高后,港区将关闭副机,并积极使用岸电。

图 4 为不同激励预算下环境效益与副机发电情况。随着年度化激励预算的增加,副机发电排放量减少,环境效益提高。从图中可以明显观察到,当激励预算在 100 万元/年 ~ 300 万元/年时,副机发电量和环境效益有明显变化。当预算达到 300 万元/年时,副机排放量下降幅度达到 90.6%,随后逐渐趋于零。通过分析可知,增加激励预算可以获得显著的环境效益收益。同时,当政府提供足够高的激励时,船舶可以完全关闭副机,在停靠期间实现零排放效果。

表 8 呈现了不同年度化激励预算下的微电网投资情况。我们选择了 9 种年度化激励预算金额,范

表7 微电网发电情况

Tab.7 Microgrid power generation

单位:兆瓦时

参数	编号	投资规划期									
		第1年	第2年	第3年	第4年	第5年	第6年	第7年	第8年	第9年	第10年
D-DGs 设备 发电量	1	0	22 000	15 000	19 600	19 500	19 600	19 800	19 800	19 500	19 600
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	15 200	16 000	16 200	16 500	16 500	15 200	16 200
	4	0	12 600	12 000	15 200	16 000	16 200	16 200	16 200	18 000	17 200
	5	0	0	0	13 500	13 500	13 500	13 500	13 500	13 500	13 500
	6	0	0	13 000	13 500	13 500	13 500	13 500	13 500	13 500	13 500
N-DGs 设 备发电量	1	0	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000
	2	0	0	18 000	18 000	18 000	18 000	18 000	18 000	18 000	18 000
D-DGs 总发电量		0	34 600	40 000	77 000	78 500	79 000	79 500	79 500	79 700	80 000
N-DGs 总发电量		0	15 000	33 000	33 000	33 000	33 000	33 000	33 000	33 000	33 000
总发电量		0	49 600	73 000	110 000	111 500	112 000	112 500	112 500	112 700	113 000

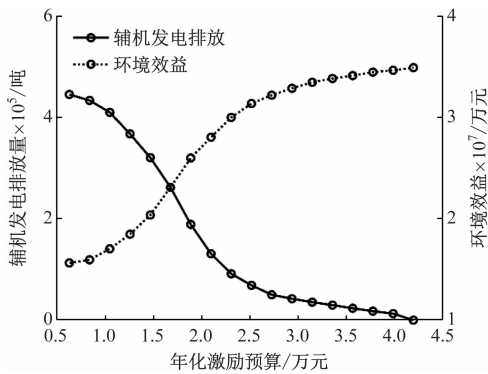


图4 不同预算下环境效益与副机发电情况

Fig.4 Environmental benefits and auxiliary engine power generation under different budgets

表8 微电网投资情况

Tab.8 Microgrid investments

政府 预算	年度化激励 预算/万元	D-DGs 投资/台	N-DGs 投资/台
低	63	3	0
	105	3	0
	147	3	1
中	210	4	1
	252	4	1
	294	5	1
高	336	5	2
	378	5	2
	420	5	2

围在63万元/年~420万元/年,并按照金额大小将其分为低、中、高三组。可以看出:D-DGs和N-DGs设备的投资台数随着预算的增加而增加。D-DGs设备受到预算金额的影响较小,即使在低预算下也会进行部分投资(3台);而N-DGs则明显受到激励预算的影响,低预算下不会进行投资,在高预算情况下,2台设备全部投资。

综合以上模拟试验结果,可以证明本文提出的混合激励策略能够明显降低规划期内港区的排放量,同时在提高微电网设备的部署和岸电设施的使用方面效果明显。

4.2 案例分析

通过求解本文提出的双层规划模型,得到规划期内港区的投资与运营规划,并分析了激励预算如何影响投资主动性、岸电传输水平及政府环境效益。在本节中,我们将通过案例对比,对投资部署港口微电网系统及实行混合激励策略在减排和降低港区总成本方面的有效性进行进一步探讨。案例参数同上节,具体如下:

案例1 不考虑政府混合激励策略,港区未安装岸电也不投资部署微电网的港区能源系统运行情况;案例2 考虑政府混合激励策略,港区仅安装岸电的港区能源系统运行情况;案例3 考虑政府混合激励策略,部署港口微电网系统的港区能源系统运行情况;案例4、案例5 分别为仅考虑补贴和监管策略下,部署港口微电网系统的港区能源系统运行情况。

案例1中,由于缺乏混合激励和政府制约,港区

未投资减排设备来降低碳排放量,在泊船舶在规划期内由副机所造成的排放为 45.22 万吨。同时,由于未配备岸电,在泊船舶必须依靠副机发电来满足自身的电力需求,副机的发电成本即规划内的净成本,为 49 034 万元。

案例 2 中,在政府实施混合激励策略的情况下,港区配备岸电但未投资微电网,在泊船舶可以选择使用岸电满足自身能量需求。通过计算可得出,港区在规划期内共获得 2 830 万元运营维护补贴。因为仅可以从主电网购电,因此仅可以获得岸电运营维护补贴以及少量减排奖励,港区总成本为 37 119 万元,环境效益为 1 464 万元。

案例 3 中,考虑政府混合激励策略的情况下,港区投资部署微电网。在规划期内共获得 2 130 万元运营维护补贴以及 2 890 万元的减排奖励,港区总成本为 27 620 万元,环境效益为 3 615 万元。

案例 4 中,仅考虑政府补贴的情况下,港区投资部署微电网。在规划期内共获得 2 017 万元运营维护补贴,无减排奖励,港区总成本为 31 124 万元,环境效益为 3 502 万元。

案例 5 中,仅考虑惩罚策略的情况下,港区投资部署微电网。在规划期内共获得 1 209 万元减排奖励,无运营维护补贴,港区总成本为 40 103 万元,环境效益为 1 620 万元。

将上述案例中港区的总成本、总排放以及政府的环境效益进行对比,见表 9。通过观察表 9 可得,案例 2、3、4 和 5 均能在一定程度上减少港区的总排放量,并为政府带来环境效益。通过对案例 2 和案例 3 进行分析,可以验证港口微电网系统投资部署的有效性。案例 3 的部署方案显著降低了规划期内港区的总排放量和成本,同时使政府能够获得较高的环境效益。在案例 2 中,由于岸电供电完全依赖于主电网,其固有的碳排放特性显著限制了政府追求的环境效益。相比之下,在案例 3 中,尽管微电网设备的初始投资成本较高,但政府对 N-DGs 设备提供了一定的投资补贴。此外,D-DGs 设备的发电成本和外部环境成本均低于主电网的对应成本,而 N-DGs 设备则具有零成本和零排放的发电特性。因此,案例 3 在规划期内的总排放量和总成本均低于案例 2,且政府的环境效益也得到了显著提升。

在案例 4 和案例 5 中,我们模拟了仅考虑补贴或惩罚的单一激励情况,二者的对比分析结果论证了混合激励策略的有效性。与案例 1 相比,这两种单一激励策略在降低港区成本和提高政府环境效益方面均展现出一定的效果,但均不如考虑混合激励

表 9 案例对比

Tab.9 Casecomparison

案例	港区总排放/ 万吨	港区总成本/ 万元	政府环境效益/ 万元
1	45.22	49 034	—
2	31.85	37 119	1 464
3	7.23	27 620	3 615
4	7.47	31 124	3 502
5	16.12	40 103	1 620

策略的案例 3。在案例 4 与案例 5 的对比中,政府补贴能够直接降低微电网设备的投资和建设成本,同时运维补贴能够降低微电网和岸电设备的使用成本。相对而言,惩罚措施(碳排放限额)主要起到约束作用。因此,案例 4 中港区的总成本和总排放量均低于仅实施惩罚措施的案例 5,政府也会获得更高的环境效益。

上述案例对比表明:本文所提出的混合激励策略能够提高港口微电网系统投资的积极性,进而促进港区能源结构革新,环境效益的增长也证明了该策略在推动港区绿色转型、促进可持续发展方面的巨大潜力。

5 结束语

针对港区能源结构转型及减排问题,本研究提出了一种补贴与监管相结合的政府混合激励策略。通过构建以政府为领导者、港区为跟随者的双层规划模型,系统性探究了混合激励策略对微电网部署效果的驱动作用。通过模拟试验得到规划期内港区的投资运营计划,并分析了不同预算下混合激励策略对港区减排与经济效益的影响。本文的主要结论及管理启示如下。

1) 部署港口微电网系统能有效降低港区的碳排放;

2) 补贴与监管相结合的混合激励模式能够显著提高微电网投资积极性,进而提高港区减排效果;

3) 政府的激励预算作为调控杠杆,其额度直接影响港区投资决策与利润,进而强化减排意愿;

4) 港区应积极寻求最佳投资策略,在避免排放罚款的同时最大化政府补贴收益,以实现节约成本与环境友好的双赢。

本文构建的模型既满足政府绿色治理需求,又提升了港区的经济效益。混合激励策略在兼顾经济性的同时驱动港区了减排进程,致力于为港区碳减

排策略的制定与能源结构的革新优化提供参考。

然而,鉴于可再生能源发电受季节与地域因素制约的不确定性,后续研究将深化对港口可再生能源利用方式及其波动性的认知。研究重点也将聚焦于不确定条件下的微电网投资部署策略优化问题,同时进一步研究涉及政府、港口和船公司的三层优化问题。

参 考 文 献

- [1] JELIĆ MRČELIĆ G, RABADAN R, SLIŠKOVIĆ M. A comparison of the results on carbon dioxide emission obtained from The 2nd IMO greenhouse gas study 2009 and The 3rd IMO greenhouse gas study 2014[J]. *Book of Abstracts MIC 2018*: 60.
- [2] 徐箬,孙宏斌,郭庆来. 综合需求响应研究述及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(24):7194-7205.
XU Z, SUN H B, GUO Q L. Review and prospect of integrated demand response research[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(24): 7194-7205. (in Chinese)
- [3] GUTIERREZ-ROMERO E J, ESTEVE-PÉREZ J, ZAMORA B. Implementing onshore power supply from renewable energy sources for requirements of ships at berth[J]. *Applied Energy*, 2019, 255:113883.
- [4] MOLAVI A, SHI J, WU Y, et al. Enabling smart ports through the integration of microgrids: a two-stage stochastic programming approach[J]. *Applied Energy*, 2020, 258(C): 114022.
- [5] ABU N N B, G M J, C J V, et al. Optimal configuration and sizing of seaport microgrids including renewable energy and cold ironing—the Port of Aalborg case study[J]. *Energies*, 2022, 15(2):431-431.
- [6] YUE Z, LI C J, SHI J, et al. Optimal port microgrid scheduling incorporating onshore power supply and berth allocation under uncertainty[J]. *Applied Energy*, 2022, 313:118856.
- [7] 周施敏,黄泉雄. 政府监管下港口合作减排的博弈分析[J]. *江苏海洋大学学报(自然科学版)*, 2024, 33(2):61-71.
ZHOU S M, HUANG X X. Game analysis of port cooperative emission reduction under government regulation [J]. *Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Science Edition)*, 2024, 33(2): 61-71. (in Chinese)
- [8] 钟铭,宋子豪,江伟祺. 不同碳减排政策下的班轮航线配船与航速优化[J]. *中国航海*, 2024, 47(2): 111-119.
ZHONG M, SONG Z H, JIANG W Q. Optimization of liner route ship allocation and speed under different carbon emission reduction policies [J]. *Navigation of China*, 2024, 47(2): 111-119. (in Chinese)
- [9] 林森,文书礼,朱森,等. 考虑碳交易机制的海港综合能源系统电-热混合储能优化配置[J]. *上海交通大学学报*, 2024, 58(9):1344-1356.
LIN S, WEN S L, ZHU M, et al. Optimal configuration of electric-thermal hybrid energy storage in seaport integrated energy system considering carbon trading mechanism [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2024, 58(9): 1344-1356. (in Chinese)
- [10] ZENG B, AN Y. Solving bilevel mixed integer program by reformulations and decomposition[J]. *Optimization Online*, 2014: 1-34.
- [11] GUTIERREZ-ROMERO E J, ESTEVE-PÉREZ J, ZAMORA B. Implementing onshore power supply from renewable energy sources for requirements of ships at berth[J]. *Applied Energy*, 2019, 255:113883.
- [12] 孙薇薇,梁承姬,石健,等. 航运联盟背景下船舶绿色燃料改造问题[J]. *大连海事大学学报*, 2024, 50(2): 159-167.
SUN W W, LIANG C J, SHI J, et al. Research on ship green fuel retrofitting under the background of shipping alliance [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2024, 50(2): 159-167. (in Chinese)
- [13] BARD J F. An algorithm for solving the general bilevel programming problem [J]. *Mathematics of Operations Research*, 1983, 8(2): 260-272.
- [14] 上海国际港口集团. 2022年可持续发展报告 [R/OL]. [2025-11-13]. <https://www.portshanghai.com.cn/xxpl/index.jhtml>.
Shanghai International Port Group. 2022 sustainability report [R/OL]. [2025-11-13]. <https://www.portshanghai.com.cn/xxpl/index.jhtml>. (in Chinese)
- [15] 唐苏敬. 上港集团:着力打造绿色低碳智慧港口[J]. *上海国资*, 2024(2):64-66.
TANG S J. Shanghai international port group: striving to build a green, low-carbon and intelligent port [J]. *Shanghai State-owned Assets*, 2024(2): 64-66. (in Chinese)
- [16] 许婉莹,李仁科,饶广龙,等. 船舶节能减排技术应用现状与展望[J]. *船舶工程*, 2024, 46(4):26-41.
XU W Y, LI R K, RAO G L, et al. Current application status and prospect of ship energy conservation and emission reduction technologies [J]. *Ship Engineering*, 2024, 46(4): 26-41. (in Chinese)
- [17] WANG L F, LI C J, SHI J, et al. A bilevel hybrid economic approach for optimal deployment of onshore power supply in maritime ports [J]. *Applied Energy*, 2021, 292: 116892.