

岸电建设运营各方成本效益最优化分析及 江湖海岸电特性比较

胡晓青¹,王蓓蓓²,黄俊辉³,阮文骏⁴,孔 赞²,周哲远⁵

(1. 国网无锡供电公司,江苏 无锡 214000;2. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;

3. 国网江苏省电力公司经济技术研究院,江苏 南京 210024;

4. 国网江苏省电力公司,江苏 南京 210024;

5. 国网盐城供电公司,江苏 盐城 224002)

摘要:船舶在靠港期间采用辅机发电产生的巨大能源消耗和大气污染使得沿海港口的节能减排工作日益紧迫,利用岸电进行电能替代是很好的解决方案。在大量调研收集数据的基础上,从经济学角度研究岸电系统,分析了整套岸电系统的建设、改造、运营成本并构建相应的数学模型,分析使用岸电后电网公司、港口、船舶和政府四方的成本效益并计算最优岸电电价使得四方或其中三方利润最大。利用所构建的模型分析政府补贴率、岸电利用小时数、最优岸电电价与各方利润之间的关系。从最优岸电电价、岸电系统投资额、各方年利润、投资回收期和环境效益的角度,比较了海港岸电、长江岸电、湖泊内河岸电的特点。理清了岸电建设运营中各方的成本、效益关系,为政府、电力公司、港口、船舶的岸电推广提供参考。

关键词:岸电;最优化;成本效益分析;污染物排放;模型

中图分类号:TM 73;F 407.61

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.025

0 引言

目前,我国面临的环境压力日益增大,尤其是近年来出现的长时间、大范围的严重雾霾天气,引起了全民关注。对于港口城市而言,船舶靠港期间使用辅机发电产生的污染物排放是空气污染的重要来源。根据国际自然资源保护协会(NRDC)的报告^[1],以中大型集装箱船为例,一艘船使用3.5%含硫量燃油,其靠港期间的PM_{2.5}排放量相当于50万辆大型货车。上海港进出的各类船舶排放的SO₂、NO_x和PM_{2.5}占上海市大气污染物总量的比例分别为12.0%、9.0%和5.3%^[2]。靠港船舶产生的巨大能源浪费和环境污染使得船舶在港口停泊期间的节能减排工作日益紧迫。而电能具有清洁、便捷的优势,使用岸电是解决这一问题的有效途径。

岸电是指船舶在靠港期间停用船上辅机发电,而采用陆地电源对其进行供电^[3],以维持船上照明、制冷、装卸货等所有设备的电力需求。使用岸电进行船用燃油电能替代,能够显著减少港口污染气体排放、降低船舶燃料成本,同时能够增加电网公司的电量营销,具有显著的环境、经济和社会效益。2016

年5月,国家八部委联合印发了《关于推进电能替代的指导意见》(简称《意见》),为岸电电能替代提供了有利的环境和重大的机遇。《意见》明确指出靠港船舶使用岸电等电能替代对推动能源消费革命、落实国家能源战略、促进能源清洁化发展有重大的意义,是提高电煤比重、控制煤炭消费总量、减少大气污染的重要举措。

在岸电电源的逆变控制方面,文献[4]提出了一种基于虚拟同步发电机的岸电逆变器控制策略,采用二阶机电暂态模型,引入转动惯量,使得岸电逆变器具有与柴油发电机相似的电气和机械特性;文献[5]研究了高压岸电电源的大功率电力电子变频稳压、快速连接技术和岸电的无缝切换技术;文献[6]针对岸电电源逆变波形控制提出了神经网络内模控制和比例-积分-微分(PID)控制相结合的复合波形控制策略。在岸电改造技术方案方面,文献[7]介绍了实施岸电技术所需的相关船舶和岸侧设施改造的步骤;文献[8]研究了船舶进行岸电连接技术操作和安全上的问题。在岸电排放与环境效益方面,文献[9]考虑船舶使用岸电后火电行业的能耗和排放,分析船舶使用岸电技术的节能减排效果;文献[10]比较了船舶靠港期间使用燃料电池、双燃料发动机、船载辅机、电网供电4种方式发电的污染物排放量,结果显示使用岸电最为环保;文献[11]指出高雄港采用岸电系统后CO₂和PM_{2.5}排放量分别降低了57.2%和39.4%;文献[12]分析了多伦多港船舶靠泊及排放数据以说明使用岸电的合理性。目前关于岸电研究的文献还不多,且绝大多数

收稿日期:2017-05-22;**修回日期:**2018-05-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71471036);国家电网公司科技项目(面向客户侧能源互联的智能用电灵活接入与互动服务技术研究)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(71471036) and the Science and Technology Program of SGCC(Research on Smart Energy Access and Interactive Service Technology for Energy Interconnection on the Client Side)

停留在技术层面的分析和应用层面的介绍,还没有文献对岸电系统建设运营各方进行系统的经济性分析。

本文的主要贡献在于首次对岸电系统建设运营的各方进行系统的经济性分析,理清了各方投资、效益和收益的问题。本文构建了使用岸电对靠港船舶进行供电的各方的数学模型,分析了对港口上的高压电气设备和船舶上的低压电气设备进行相应的建设、改造所需的成本,以及整套岸电系统的运营成本,运用经济最优原理逐个分析使用岸电后电网公司、港口、船舶和政府四方的成本效益,计算使各方都受益的最优岸电电价。算例部分分析了政府补贴率、岸电利用小时数与最优岸电电价以及各方利润之间的关系,从多个角度比较了海港岸电、长江岸电和湖泊内河岸电的特点。

1 岸电系统各方成本效益模型

使用岸电对靠港船舶供电的固定投资包括对港口上的高压电气设备和船舶上的低压电气设备进行相应的建设、改造所需的费用;运行成本则包括电费和港口服务等费用,其涉及电网公司、港口、船舶以及政府四方的利益关系,需要各方协调合作^[13]。下文将详细分析四方的成本效益,计算最优的岸电电价,使得四方或其中三方的效益最大。

1.1 港口成本效益模型

岸上岸电系统的固定成本包括高压用电设备、电力频率转换器、高压电缆线、电缆卷筒系统以及敷设电缆沟渠等的安装维护费用^[14];有时还需要进行变电站的增容改造以满足电量的需求^[15],但对于已预留了相应裕度的变电站只需要增加相应的出线。本文中,岸侧的岸电设施改造费用全部由港口承担,港口通过向船舶收取岸基供电服务费来平衡收支获得利润。

a. 港口收益。

$$B_{gk} = P_{\text{total}} TC_{\text{cdj}} \quad (1)$$

其中, B_{gk} 为港口向船舶提供岸电所收取的服务费用; T 为年利用小时数; P_{total} 为岸电系统总容量; C_{cdj} 为船舶实际使用岸电时的价格,即船舶单位岸电使用成本,包括船舶岸基供电设施用电价格(即电价,给电网)和船舶岸基供电服务价格(即服务费,给港口)两部分。

b. 港口成本。

$$C_{gk} = (C_{\text{zr}} + C_{\text{sb1}})(1 - \beta_1) + C_{\text{grid}} + C_{\text{ry}} \quad (2)$$

其中, C_{zr} 为岸侧变电站增容费用, C_{sb1} 为岸电系统电力设备的投资改造费用(考虑电力设备的购买费、安装费),均换算成年化成本; C_{grid} 为港口向电网公司支付的电费; C_{ry} 为使用岸电设施而增加的年人工费; β_1 为政府给港口岸电设施项目建设费用的补

贴率。

岸侧变电站增容费用可表示为:

$$C_{\text{zr}} = \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1}-1} (n_{35}C_{35} + n_{10}C_{10} + n_{10b}C_{10b}) \quad (3)$$

其中, C_{35} 为 35 kV 变电站增容改造的费用; C_{10} 为 10 kV 变电站增容改造的费用; C_{10b} 为 10 kV 变电站已预留岸电设备用电负荷裕度、仅新增低压出线柜的费用; n_{35} 、 n_{10} 、 n_{10b} 为相应变电站的数量; N_1 为变电站增容改造的使用年限; I 为年化成本的利率(贴现率)。年化成本采用约当年均成本 EAC(Equivalent Annual Cost)法计算。

岸电系统电力设备的投资改造费用可表示为:

$$C_{\text{sb1}} = \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1}-1} n_{\text{ad}} C_{\text{ad}} = \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1}-1} C_{\text{port_per}} P_{\text{total}} \quad (4)$$

其中, n_{ad} 为岸电设备的数量; C_{ad} 为每套岸电设备的成本; $C_{\text{port_per}}$ 为岸电设施单位功率建设费用。

为了使用岸电设施而增加的年人工费为:

$$C_{\text{ry}} = P_{\text{total}} C_{\text{ry_per}} \quad (5)$$

其中, $C_{\text{ry_per}}$ 为港口折合成 1 kW 岸电容量的年人工费。

港口向电网公司支付的电费可表示为:

$$C_{\text{grid}} = P_{\text{total}} TC_{\text{gkdj}} \quad (6)$$

其中, C_{gkdj} 为船舶岸基供电设施用电价格。

c. 港口效益。

$$F_1 = B_{gk} - C_{gk} \quad (7)$$

1.2 船舶成本效益模型

船舶是岸电项目的实施对象,其改造成本由各船自身承担,固定成本主要包括船载变压器、低压电缆的安装维护费用^[16],运营成本包括岸电的电费以及交给港口的服务费。船舶的收益来自于船舶使用岸电之后,停止使用船上辅机发电而节省的燃油费以及减少污染物排放所带来的环境效益。

a. 船侧成本。

$$C_c = B_{gk} + C_{\text{sb2}}(1 - \beta_2) \quad (8)$$

其中, B_{gk} 为船侧使用岸电的电费,即港口给船舶提供岸电所收取的服务费用; C_{sb2} 为船上电力设备的投资改造费用,计算公式如式(9)所示; β_2 为政府给船侧设备的补贴率。

$$C_{\text{sb2}} = \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1}-1} (C_{\text{tra}} + C_{\text{dydl}}) = \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1}-1} C_{\text{gz_per}} P_{\text{total}} \quad (9)$$

其中, C_{tra} 为船侧使用岸电的投资改造费用(包括船载变压器的成本); C_{dydl} 为船电连接岸侧配电系统费用(包括 400 V 低压电缆敷设、电缆沟的建设费用),假设使用年限均为 30 a,结果归算为年化成本; $C_{\text{gz_per}}$ 为船舶的单位改造成本,单位为元/kW。

b. 船侧收益。

$$B_c = C_{rl} + C_{pw} \quad (10)$$

$$C_{rl} = P_{total} TE_1 C_{rl} / 1\ 000\ 000 \quad (11)$$

其中, C_{rl} 为船舶停用辅机发电、使用岸电而节省的燃油费用; E_1 为辅机发出单位电量的燃油耗量, 单位为 $g/(kW \cdot h)$; C_{rl} 为船用燃油价格, 单位为元/t; C_{pw} 为燃油污染排放的排污费, 若使用岸电, 则可减少这部分污染排放, 节省的排污费转化为收益。

c. 排污费。

$$\begin{cases} C_{pw} = C_{dl} \sum_{i=1}^n D_{dl}^i \\ D_{dl}^i = G_{pol}^i / E_{dl}^i \\ G_{pol}^i = P_{total} TF_i / 1\ 000 \end{cases} \quad (12)$$

其中, C_{dl} 为单位污染当量的污染因子排污费标准, 单位为元/当量; D_{dl}^i 为第 i 种污染物的污染当量数; G_{pol}^i 为第 i 种污染物的排放量, 单位为 kg; E_{dl}^i 为第 i 种污染物的污染当量值, 单位为 kg; F_i 为船舶辅机燃料油排放的第 i 种污染物的排放因子, 单位为 $g/(kW \cdot h)$; n 为主要污染物的种类数。

d. 船侧效益。

$$F_2 = B_c - C_c \quad (13)$$

1.3 政府成本效益模型

政府需要采取相关政策, 对岸电建设和设备改造进行相应的补贴, 政府的成本在于每年对港口和船舶的岸电设施按照建设改造的年化成本给予一定比例的补贴, 以保障岸电项目的顺利实施; 政府的收益是在船舶使用岸电后停用了辅机燃油(轻油或重油)而避免污染排放, 产生环境效益。

a. 政府成本。

$$C_{gov} = (C_{zr} + C_{sb1}) \beta_1 + C_{sb2} \beta_2 \quad (14)$$

其中, 等号右边第一项为政府给港口改造岸电设备的补贴, 包括对变电站增容改造费用 C_{zr} 和岸电系统电力设备的投资改造费用 C_{sb1} 的补贴; 第二项为政府给船侧改造岸电设备投资费用 C_{sb2} 的补贴。

b. 政府收益。

$$B_{gov} = C_{pw} \quad (15)$$

靠港船舶在使用辅机发电的过程中燃烧船用重燃料油会产生环境污染, C_{pw} 是因污染物排放而征收的排污费。若船舶使用岸电代替辅机发电, 则可以避免环境污染而节省这笔费用。对于政府而言, 减少的污染物排放转化为环境效益, 排污费 C_{pw} 用来作为对环境效益的量化。由此可以看出对于船舶和政府而言, 使用岸电是双赢的结果。排污费 C_{pw} 可根据式(12)计算得到, 其中船用辅机燃油造成的各种污染物年排放因子 F_i 和污染当量值 E_{dl}^i 的取值见表1。

表1 污染物年排放因子和污染当量值

船用燃油排放污染物	$F_i/[g \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$	E_{dl}^i/kg
SO ₂	0.46	0.95
NO _x	11.80	0.95
VOC	0.53	0.05
CO	1.68	16.7
一般性粉尘 PM10	0.30	4
CO ₂	698	5 000

c. 政府效益。

$$F_3 = B_{gov} - C_{gov} \quad (16)$$

1.4 电网公司成本效益模型

本文研究了岸电设施建设和运营中的成本效益关系, 并比较了江、湖、海典型港口的岸电容量、年利用小时数和投资回收期等参数, 为电力公司的配电网规划建设投资预算提供了参考, 但根据现行岸电项目的经验和做法, 电网公司不承担变电站增容和岸电设施改造所需的费用, 相关配电网建设投资费用和岸电电能替代工程综合费用(含施工费用和管理费用)由港口承担, 相应地, 岸电服务费收益由港口收取。此时电网公司几乎没有成本, 利润来自电费收益, 即岸电项目实施后, 船舶停止使用自身辅机发电而向电网公司购买岸电, 电网公司从中获取的收益。因此, 电网公司的效益为^[17]:

$$F_4 = P_{total} (C_{gkdj} - C_{swdj}) T \quad (17)$$

其中, C_{swdj} 为上网电价。

1.5 港口岸电成本效益模型的推广应用

在实际应用中, 上述模型中的数据不一定都能获取, 例如具体时刻在港口使用岸电船舶的类型、功率、同时停靠船舶的数量等数据。本文通过大量港口调研, 提出了一些推广公式, 见附录A。

2 最优化模型

2.1 目标函数

岸电建设运营各方成本效益的最优化模型考虑了电价, 故目标函数选取为最大化社会总福利, 即:

$$\max(C_s - O_c) \quad (18)$$

其中, C_s 为使用岸电的消费者剩余; O_c 为岸电系统的总生产成本。

$$\begin{aligned} C_s = & \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} \left[P_{k,j} \sum_{t=1}^{N_t} T_{j,k,t} C_{cdj} + \right. \\ & P_{k,j} \sum_{t=1}^{N_t} T_{j,k,t} E_k C_{rl} / 1\ 000\ 000 + \\ & C_{dl} \sum_{i=1}^{N_p} \left(P_{k,j} \sum_{t=1}^{N_t} T_{j,k,t} F_i / 1\ 000 \right) / E_{dl}^i + \\ & \left. P_{k,j} \sum_{t=1}^{N_t} T_{j,k,t} (C_{gkdj} - C_{swdj}) \right] \quad (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
O_c = & \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} (1 - \beta_1) \left[\frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1} - 1} (n_{35}C_{35} + \right. \\
& n_{10}C_{10} + n_{10b}C_{10b}) + \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1} - 1} C_{\text{port_per}} P_{k,j} \left. \right] + \\
& \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} \sum_{t=1}^{N_t} P_{k,j} T_{j,k,t} C_{\text{gkdj}} + \\
& \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} \left[P_{k,j} C_{\text{ry_per}} + P_{k,j} \sum_{t=1}^{N_t} T_{j,k,t} C_{\text{cdj}} + \right. \\
& \left. \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1} - 1} C_{\text{gz_per},k} P_{k,j} (1 - \beta_2) \right] + \\
& \beta_1 \left[\frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1} - 1} (n_{35}C_{35} + n_{10}C_{10} + \right. \\
& n_{10b}C_{10b}) + \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} P_{k,j} \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1} - 1} C_{\text{port_per}} \left. \right] + \\
& \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} \beta_2 \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1} - 1} C_{\text{gz_per},k} P_{k,j} \quad (20)
\end{aligned}$$

其中, N_k 为停泊港口使用岸电的船舶类型数; N_n 为每种船舶类型下的船舶数量; N_t 为一年中每艘船使用岸电的时长; N_p 为船舶使用辅机发电时燃烧燃料油产生的污染物种类数; E_k 为第 k 种类型的船舶辅机发出单位电量的燃油耗量; $P_{k,j}$ 为第 k 种类型第 j 艘船舶的辅机发电功率; $T_{j,k,t}$ 为第 k 种类型第 j 艘船舶每次停靠期间使用岸电 t 小时; $C_{\text{gz_per},k}$ 为第 k 种类型船舶的岸电设施单位功率的改造成本。生产福利还包括因使用岸电而减少污染所得到的环境效益, 本文将这部分效益放在 C_s 中, 环境效益既减少了船舶被征收的排污费, 又计入了政府的收益, 对于社会总福利而言, 只计 1 次, 不重复累计。

2.2 约束条件

a. 港口使用岸电收益约束。

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} \sum_{t=1}^{N_t} P_{k,j} T_{j,k,t} C_{\text{cdj}} - \\
& \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} (1 - \beta_1) \left[\frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1} - 1} (n_{35}C_{35} + \right. \\
& n_{10}C_{10} + n_{10b}C_{10b}) + \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1} - 1} C_{\text{port_per}} P_{k,j} \left. \right] - \\
& \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} P_{k,j} C_{\text{ry_per}} \geq 0 \quad (21)
\end{aligned}$$

其中, 不等号左边第一项为港口收取的岸电服务费; 第二项为港口建设岸电设施的年化成本; 第三项为港口操作岸电设施的人工费用。

b. 船舶使用岸电收益约束。

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} \sum_{t=1}^{N_t} P_{k,j} T_{j,k,t} E_k C_{\text{dl}} / 1\,000\,000 + \\
& \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{t=1}^{N_t} C_{\text{dl}} \frac{P_{k,j} T_{j,k,t} F_i / 1\,000}{E_{\text{dl}}^i} -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} \sum_{t=1}^{N_t} P_{k,j} T_{j,k,t} C_{\text{cdj}} - \\
& \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1} - 1} C_{\text{gz_per},k} P_{k,j} (1 - \beta_2) \geq 0 \quad (22)
\end{aligned}$$

其中, 不等号左边第一项为船舶停用辅机发电、使用岸电而节省的燃油费用; 第二项为船舶使用岸电减少的排污费; 第三项为船舶使用岸电的电费与服务费之和; 第四项为船侧岸电设施建设改造的年化成本。

c. 政府推广岸电收益约束。

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{t=1}^{N_t} C_{\text{dl}} \frac{P_{k,j} T_{j,k,t} F_i / 1\,000}{E_{\text{dl}}^i} - \\
& \beta_1 \left[\frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1} - 1} (n_{35}C_{35} + n_{10}C_{10} + n_{10b}C_{10b}) + \right. \\
& \left. \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} P_{k,j} \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1} - 1} C_{\text{port_per}} \right] - \\
& \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_n} \beta_2 \frac{I(1+I)^{N_1}}{(1+I)^{N_1} - 1} C_{\text{gz_per},k} P_{k,j} \geq 0 \quad (23)
\end{aligned}$$

其中, 不等号左边第一项为政府推广岸电所产生的环境效益; 第二项为政府对港口建设岸电设施给予的补贴; 第三项为政府对船舶使用岸电给予的补贴。

d. 船舶单位岸电使用成本约束。

船舶单位岸电使用成本 C_{cdj} 由电网公司收取的电费 C_{grid} 和港口收取的服务费 C_{gkdj} 两部分组成。

$$C_{\text{cdj}} = C_{\text{grid}} + C_{\text{gkdj}} \quad (24)$$

基于以上最优化模型求得的最优岸电价格使得船舶、港口、政府、电网四方的收益最大。根据实际情况可知, 有时不一定要使船舶的利益最大化, 只要使其使用岸电有利可图即可, 此时只要令约束条件式(22)取为 0, 目标函数和其他约束条件不变, 便能够求得使得港口、政府、电网三方利益最优的临界情况。

3 江湖海岸电特性比较

以上对岸电系统中各方的成本效益进行了建模, 并建立了以社会总福利最大化为目标函数的最优化模型。通过求解模型可以分析政府补贴率、岸电设施年利用小时数与最优岸电电价以及各方利润之间的关系, 在此基础上可以从多个角度比较海海岸电、长江岸电和湖泊内河岸电的特点, 理清岸电建设运营中各方的投资、效益关系, 为岸电电能替代的推广与投资规划预算提供参考, 如图 1 所示。

海港、长江和湖泊内河的港口规模依次减小, 三者停靠的典型船舶的辅机功率不一样, 海港最大, 长江次之, 湖泊内河最小, 各自单位功率对应的岸电改

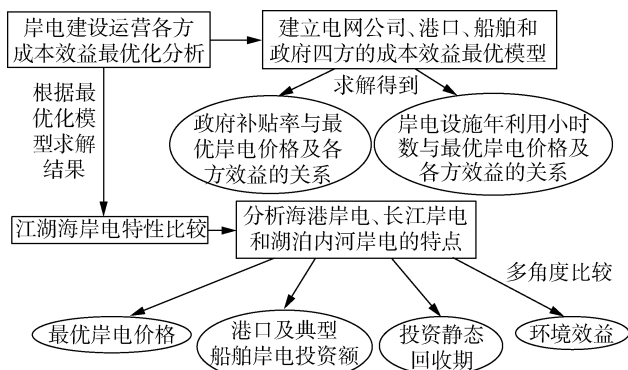


图1 最优化模型与江湖海岸电特性的关系

Fig.1 Relationship between optimization model and shore-side power characteristics of rivers, lakes and oceans

造成本也不相同,因此江、湖、海的船舶岸电设备的投资费用与产生的收益也不一样,需要详细分析。

本文分别选取洛杉矶港、南通港、盐城里下河码头作为海港岸电、长江岸电和湖泊内河岸电的典型代表进行分析,这3个港口的主要码头停靠船舶使用岸电的数据见附录A。通过搜集相关数据以及前文所建立的相应模型公式,分别计算海港岸电、长江岸电以及湖泊内河岸电的最优岸电价格、港口及典型船舶岸电投资额,港口的投资静态回收期和环境效益,从电价、港口、船舶、环境等角度分析比较海港岸电、长江岸电和湖泊内河岸电的特点。

4 算例分析

在下文的分析中,船舶单位岸电使用成本分为2个部分:船舶岸基供电设施用电价格和船舶岸基供电服务价格,前者为电网公司收取的电费,后者为港口收取的岸电服务费。

4.1 相关数据获取

在建立模型的基础上,本文对岸电系统港口、电网、船侧、政府四方做了大量调研,获取了研究所必要的的数据,篇幅所限,仅列出经过处理、算例中需要的数据,详细数据见附录B。

4.1.1 港口、电网、船侧、政府四方数据获取

a. 港口数据获取。

本文港口成本效益模型数据来源于南京某港口实际数据,见附录B中表B1—B4。其中岸侧变电站增容费用 C_{zr} 构成如下:共涉及1座35 kV变电站增容改造,费用为567.5万元;1座10 kV变电站增容改造,费用为98万元;2座10 kV变电站仅新增低压出线柜,费用各为31万元,使用年限 N_1 取设计年限30 a。岸电系统电力设备的投资改造费用 C_{sb1} :16套容量为200 kW的岸电设备,每套成本为68.375万元。此外,根据某港岸电改造技术方案,年利用小时数 $T=1\,500$ h,岸电系统总容量 $P_{total}=3\,200$ kW,年化成本的利率 I (贴现率)为年息8%,港口岸电人

工费用为90万元/a,折合成单位容量的人工费 $C_{ry_per}=0.028\,1$ 元/(kW·a)。

b. 船侧数据获取。

船上电力设备的投资改造费用 C_{sb2} (包括电力设备的购买、安装费用)参照欧盟委员会环境总司(ECDGE)的报告^[16],折算成单位功率的船上电力设备的投资改造费用为1 530元/kW,该港口每个泊位停泊船的辅机功率为200 kW。

c. 政府成本效益模型数据获取。

根据《深圳市港口、船舶岸电设施和船用低硫油补贴资金管理暂行办法》,对港口岸电设施改造提供不超过项目建设费用30%的资助,本文 β_1 、 β_2 暂取30%。

d. 电网公司成本效益模型数据获取。

根据《江苏省135 MW及以上燃煤发电机组上网电价》,上网电价 C_{swdj} 取0.378元/(kW·h)。参照江苏省物价局《关于明确船舶岸基供电设施用电价格和服务价格的通知》,船舶岸基供电设施用电价格 C_{gkdj} 取销售电价表中的大工业用电的电度电价0.660 1元/(kW·h)。

e. 江湖海岸电数据获取。

洛杉矶港港区主要码头泊位情况见附录A中表A1,停靠船舶使用岸电数据见附录A中表A2,泊位利用率 $\eta=60\%$,岸电变频设备及船舶负载的综合功率因数取为 $\cos\phi_A=0.7$;南通港各公司泊位条件见附录A中表A3,散杂货船舶和集装箱船舶的岸电使用情况见附录A中表A4、A5,泊位利用率见附录A中表A6、A7;内河航道等级与船舶吨级划分见附录A中表A8。按照欧盟委员会环境总司的划分方法,具各类型船舶的单位功率改造成本体如表2所示,可以由此计算一艘典型代表船舶的岸电设备成本。海港、长江、湖泊内河岸电数据的详细处理过程见附录A,此处不再赘述。

表2 各类型船舶的单位功率改造成本

Table 2 Transformation cost of unit power of ships

船舶类型	辅机功率/kW	单位功率改造成本/(元·kW ⁻¹)
超小型船	8	8 000
小型船	528	1 530
中型船	1 465	800
大型船	3 756.9	550
超大型船	8 000	350

4.1.2 靠港船舶污染物排放数据获取

根据文献^[16],单位电量的燃油耗量 $E_1=213$ g/(kW·h),船舶燃油的费用 $C_{rl}=5\,300$ 元/t。交通运输部《珠三角、长三角、环渤海(京津冀)水域船舶排放控制区实施方案》中规定2019年核心港口停靠的船舶使用燃油的含硫量不得高于0.1%,因此本文选取0.1%含硫量的低硫油的价格为9 800元/t。

辅机发电会产生很多污染物,如 CO_2 、 NO_x 、VOC 等。船舶辅机发电的各种污染物年排放因子^[16],见表 1,为了计算排污费,表 1 引入污染当量值,根据江苏省物价局《关于调整排污费征收标准等有关问题的通知》,废气中的污染因子排污费征收标准 C_{di} 调整为每污染当量 4.8 元。

4.2 补贴率与最优岸电价格和各方效益的关系

根据以上获取的数据,年利用小时数 T 固定为 1 500 h,当政府的补贴率为 30% 时,得出船舶单位岸电使用成本与港口、电网、船舶、政府的效益曲线,如图 2 所示。由图 2 可以看出,港口的效益随着岸电电价的增大而增大,而船侧的效益随着岸电电价的增大而减小,政府和电网公司的效益曲线为一个水平的直线,说明在该情况下岸电电价对政府和电网公司的效益没有影响。4 条曲线所围成的区域是四方效益达到最大值的范围。

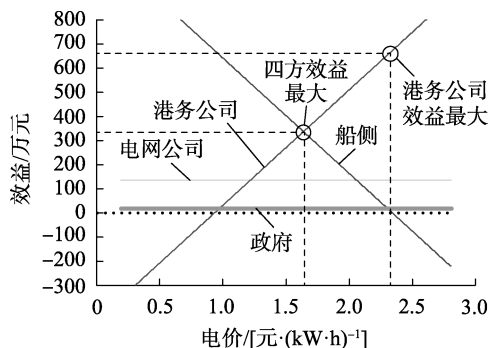


图 2 政府补贴率 30% 时岸电使用价格与各方效益的关系

Fig.2 Relationship between shore-side electricity price and benefit of each party when government subsidy rate is 30%

从图 2 中可以看出:政府的效益较低,考虑到使用岸电改善了环境,所以 30% 的补贴率仍然可以接受;电网的盈利情况取决于岸基供电设施的用电价格;港口的效益随着船舶单位岸电使用成本的升高而升高,分析其原因在于,在岸电电价保持不变的情况下,港口收取的岸电服务费随着船舶单位岸电使用价格的上涨而同步上涨;船侧的效益随着船舶单位岸电使用价格的升高而降低;由于政府和电网公司的效益曲线是水平的直线,此时港口和船侧效益曲线的交点对应四方的最大效益,对应的船侧最优岸电使用价格 $C_{edj} = 1.64$ 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$),此时港口效益与船侧效益相等,为 335.109 8 万元;当船侧效益曲线接近 0 时,即船侧处于赚不到钱的临界点时,港口效益最大,对应港口效益最大的岸电使用价格 $C_{edj} = 2.339$ 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$),此时港口效益为 670.629 8 万元。

图 3 为政府补贴率与港口效益的关系。当补贴率由 0 逐渐增大为 30% 时,港口的效益逐渐升高。图 4 为政府补贴率与船舶单位岸电使用成本的关系。可直观地看出,船舶单位岸电使用成本有 1.6~2.3 元/kW 的涨价空间,在这个区间内,电网公司的

效益因为岸基供电设施用电价格固定的缘故而保持不变,港口的效益越来越高,船侧的效益越来越少,但船侧只要要不亏损,仍然愿意使用岸电。由局部放大图 4(b) 可以看出,补贴率越大,电网、港口、船侧以及政府四方效益最大时的最优船舶单位岸电使用成本会降低;而使港口、政府、电网三方需要最大时的最优船舶单位岸电使用成本会升高。

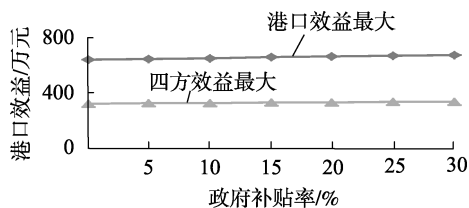
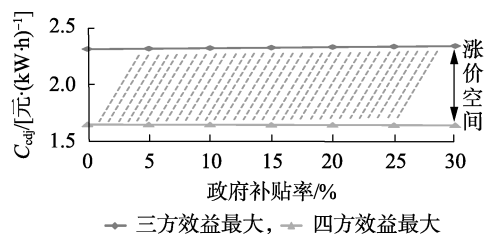
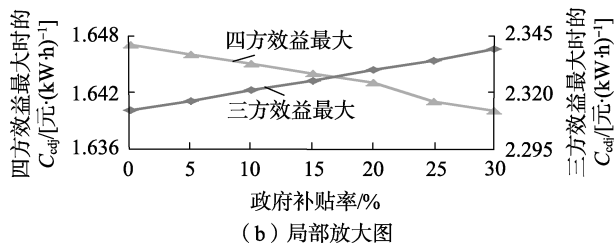


图 3 政府补贴率与港口效益的关系

Fig.3 Relationship between government subsidy rate and benefit of port



(a) 政府补贴率与船舶单位岸电使用成本的关系



(b) 局部放大图

图 4 政府补贴率与船舶单位岸电使用成本的关系

Fig.4 Relationship between government subsidy rate and shore-side electricity price of ship

当政府补贴率为 0~25% 时,边际电价和四方收益情况见附录 C 中表 C1。

4.3 年利用小时数与最优岸电价格及各方效益的关系

假设政府补贴为 0,分析港口泊位岸电设施年利用小时数为 200~4 000 h 的情况下,电网公司、政府、港口、船侧的效益曲线及边际电价情况,如图 5 所示。

从图 5(a) 中可以看出,港口岸电设施年利用小时数只为 200 h 时,只有当船舶单位岸电使用成本极低(小于 1.5 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)),船侧才不亏损,此时港口因改造岸电设施的巨额成本得不到足够服务费的补偿而陷入亏损。因为用电时间太短,电网公司的电费效益、政府的减排效益均很低。由图 5(b)、(c) 可知,岸电设施年利用小时数为 1 000 h 的情况下,

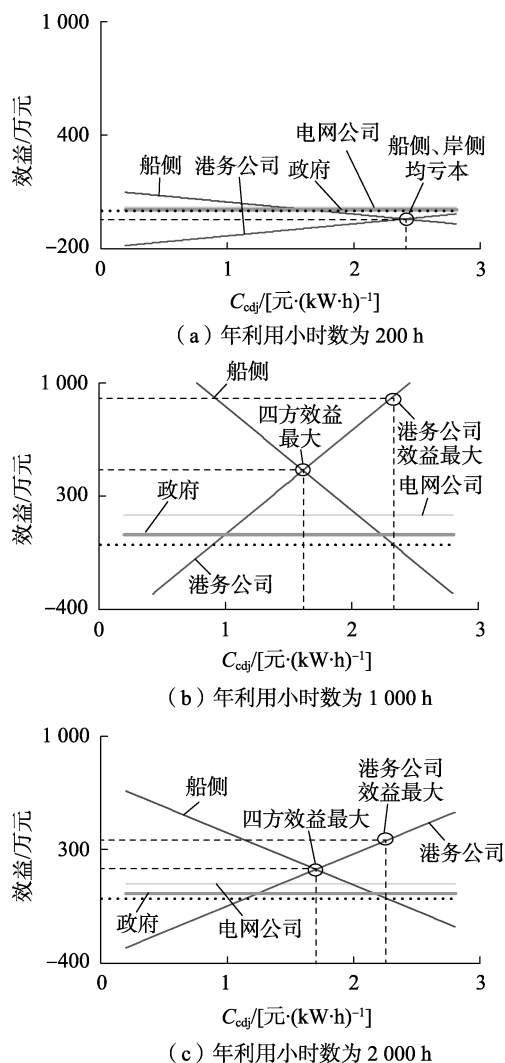


图5 年利用小时数与各方效益的关系

Fig.5 Relationship between annual utilization hours and benefit of each party

四方效益最大时的船舶单位岸电使用成本为 1.705 元/(kW·h),此时政府效益为 32.595 万元,电网公司效益为 90.272 万元,港口与船侧效益相等,均为 179.633 万元。继续提升船舶单位岸电使用成本,港口效益逐渐增加,船侧效益逐渐减少,政府的效益与电价无关而持平。由于实际提升的是岸电服务价格,而根据规定岸电电价保持不变,因此电网公司的效益持平。当船侧处于收益与成本相等的临界点时,港口效益最大,为 359.256 万元,此时船舶单位岸电使用成本为 2.266 元/(kW·h)。

年利用小时数为 200~4 000 h 的情况下,港口、政府、电网公司、船侧的效益曲线及最优电价情况如图 6 所示。随着岸电利用小时数的增加,港口、政府、电网、船侧四方利益最大的最优船舶单位岸电使用成本会逐渐下降,船舶岸电服务价格也会相应下降。

若以港口、政府、电网三方效益最大作为目标函数,当船侧处于收益与成本相等,即不赚钱的临界点

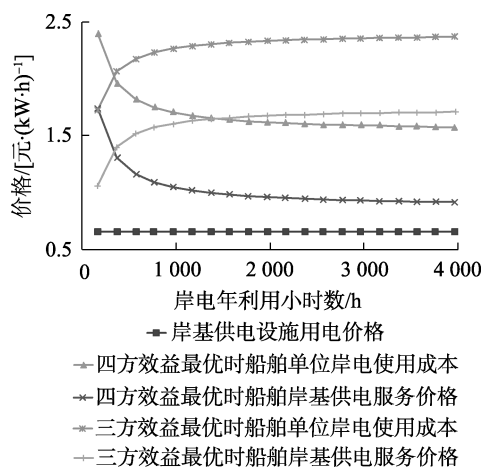


图6 年利用小时数与单位岸电使用成本、供电服务价格的关系

Fig.6 Relationship between annual utilization hours and shore-side electricity price and service price

时,三方效益最大。此时对应的船舶单位岸电使用成本、船舶岸电服务价格随着岸电年利用小时数的增加而增大。

图 7、图 8 分别为四方、三方效益最大时,岸电年利用小时数与各方效益的关系。从图 7 可看出,若岸电年利用小时数小于 400 h,港口、船侧均会亏损。因为岸电设施投资量较大,如果岸电使用时间太少,则使用岸电带来的效益不足以补偿建设岸电设施的年化成本。由于售电量低,供电公司的效益也很低。随着岸电年利用小时数的增加,政府、港口、船侧、电网公司的效益均会呈线性逐渐增加。当电价为四方效益最优的边际电价 (1.575 元/(kW·h)) 时,船侧和港口的相应保持一致,当岸电年利用小时数约为

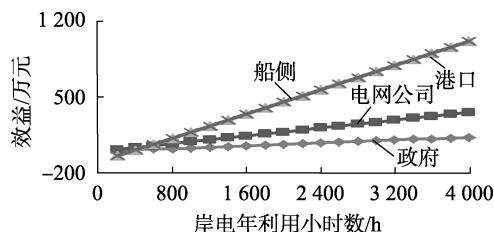


图7 四方效益最大时岸电年利用小时数与各方效益的关系

Fig.7 Relationship between annual utilization hours and benefit of each party when benefit of four parties is maximum

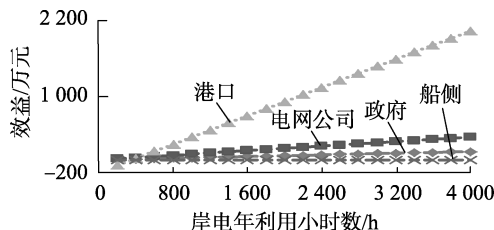


图8 三方效益最大时岸电年利用小时数与各方效益的关系

Fig.8 Relationship between annual utilization hours and benefit of each party when benefit of three parties is maximum

4 000 h 时,双方的效益均超过 1 000 万元。

从图 8 可以看出在三方效益最大的边际电价 (2.368 元/(kW·h)) 情况下,港口效益比图 7 有了显著的增加,当岸电年利用小时数为 4 000 h 左右时,达到了 2 031.48 万元。

4.4 海港、长江和湖泊内河岸电的横向比较

4.4.1 最优单位岸电使用成本

经过最优岸电电价模型计算得到海港岸电、长江岸电和湖泊内河岸电的最优电价横向比较,如图 9 所示。由图 9 可以看出,政府、港口、船侧、电网公司四方效益最大时,海港岸电的单位岸电使用成本比长江岸电稍高,而湖泊内河岸电的单位岸电使用成本达到 1.741 元/(kW·h),明显高于前两者。这是因为湖泊内河岸电的用电量与前两者不是一个数量级的,为了弥补港口岸电设施建设的费用,需要收取比较高的岸电服务费。港口、政府、电网公司三方效益最大时的船侧岸电电价,也是船舶所能承受的最高价格。由图 9 可以看出,海港、长江、湖泊内河的单位岸电使用成本依次下降,其中湖泊岸电单位岸电使用成本为 2.175 元/(kW·h),明显低于前两者。这是因为湖泊岸电的船舶岸电设施单位改造成本最高,承受高服务费的能力最差。

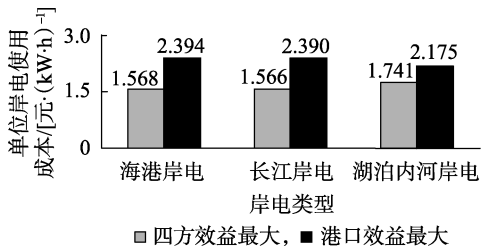


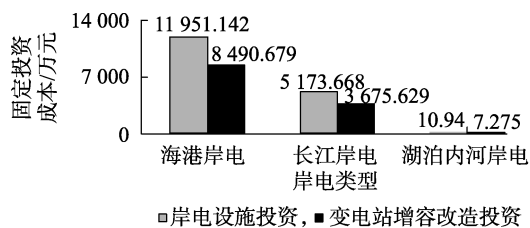
图 9 江、湖、海岸电单位岸电使用成本比较

Fig.9 Comparison of unit electricity price of river shore-side power, lake shore-side power and ocean shore-side power

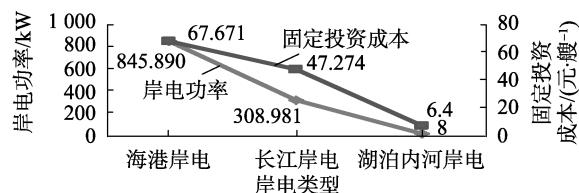
4.4.2 投资、年利润及投资回收期

图 10 为港口及典型代表船舶的岸电固定投资成本比较。图 10(a)中,变电站增容费用、岸电设施的投资改造费用共同组成了港口的岸电固定投资成本,海港岸电的 2 项投资是长江岸电的 2 倍多,反映了该港岸电建设规模大、投资大。湖泊内河岸电因为停靠小型船舶,靠泊期间用电功率小,相应的固定投资很小。图 10(b)为海港、长江、湖泊内河的典型代表船舶岸电功率和船舶岸电设施固定投资成本。

船舶单位岸电使用成本由船舶岸电电价和岸电服务费组成,前者由电网公司收取,后者由港口收取,作为港口的收益。岸电电价由发改委定价保持固定,而岸电服务费则有一定的溢价空间。因此港口的年效益分为 2 种情况:第一种情况是岸电服务费为下限时,海港、长江和湖泊内河的船侧岸电价格分别为 1.568 元/(kW·h)、1.566 元/(kW·h)、1.741



(a) 岸电固定投资成本



(b) 船舶岸电功率和岸电设施固定投资成本

图 10 港口及典型代表船舶的岸电固定投资成本

Fig.10 Fixed investment costs of ports and representative ships
元/(kW·h),此时对应四方效益最大时的电价;第二种情况是岸电服务费为上限时,海港、长江、湖泊内河的船侧岸电价格分别为 2.394 元/(kW·h)、2.390 元/(kW·h)、2.175 元/(kW·h),此时对应三方效益最大时的电价。表 3 为各方年效益对比,表 4 为海港、长江、湖泊内河港口的岸电固定投资额、年利润与投资静态回收期对比(其中政府补贴率为 30%)。

表 3 各方年效益对比

Table 3 Comparison of parties' benefits

岸电	港口效益		船侧效益 (四方效益最大)	政府效益	电网公司效益
	四方效益最大	三方效益最大			
海港	12 986.424	25 957.763	12 986.424	1 000.085	4 430.042
长江	5 608.247	11 209.964	5 608.247	422.167	1 917.772
湖泊内河	0.761	1.522	0.761	-0.477	0.494

从表 4 可以看出,海港岸电、长江岸电的岸侧投资静态回收期都很短,当电价低时均为 1.5 a 左右,当电价高时只要 3 个月就能收回投资。如此高的效益是建立在所有停靠船舶在港期间均一直使用岸电的前提下,这是一种很理想的情况,实际上所有泊位均使用岸电的可能性不大。而湖泊岸电在高电价和低电价时投资静态回收期分别长达 7 a 和 14 a。在实际操作中,可以让湖泊岸电采用较高岸电价格 2.175 元/(kW·h),以尽快收回投资。

4.4.3 环境效益的对比

表 5 为 3 种岸电详细的环境效益对比,其中岸电的环境效益指因使用岸电而减少的燃料油排污费,其计算主要基于式(12)以及 2.2 节中的污染当量值以及排污费征收标准。由表 5 可以看出,污染排放量与港口岸电容量的大小成正比;海港岸电的环境效益是长江的 2 倍多,而湖泊内河岸电因为码头、船舶的规模很小,因此岸电使用量很小,其环境效益只有 0.178 万元。

表4 岸电固定投资额、年效益与投资静态回收期对比

Table 4 Comparison of fixed investment, annual benefit and static payback period of shore-side power

岸电	港口固定 投资/万元	港口年效益/万元		政府年补贴 金额/万元	投资静态回收期/a	
		岸电服务 费为下限	岸电服务 费为上限		岸电服务 费为下限	岸电服务 费为上限
海港	20 441.821	12 986.424	25 957.763	599.477	1.574	0.788
长江	8 849.297	5 608.247	11 209.964	270.285	1.578	0.789
湖泊内河	10.940	0.761	1.522	0.656	14.373	7.190

表5 海港岸电、长江岸电、湖泊岸电的环境效益对比

Table 5 Comparison of environmental benefits among river shore-side power, lake shore-side power and ocean shore-side power

岸电	岸电年用电量/(MW·h)	减少使用燃料油/t	环境效益/万元	减少排放CO ₂ /t	减少排放CO/t	减少排放NO _x /t	减少排放粉尘/t	减少排放SO ₂ /t	减少排污苯类/t
海港	157 038	33 449.094	1 599.561	10 961.252	26.382	185.305	4.711	7.224	6.282
长江	67 982	14 480.166	692.453	4 745.144	11.421	80.219	2.039	3.127	2.719
湖泊内河	17.521	3.732	0.178	1.223	0.002 94	0.020 7	0.000 526	0.000 806	0.000 701

5 结论

为了从经济性角度分析岸电各参与方的成本效益,本文对于洛杉矶港、连云港、南京港、南通港、盐城内河码头以及省电力公司的岸电开展情况做了大量的实地调研,在充分收集数据的基础上,分析了整套岸电系统中电网公司、港口、船舶和政府四方的建设、改造、运营成本,构建了相应的数学模型,利用经济最优原理逐个分析各方的成本效益,计算最优岸电电价,使得四方或其中三方效益最大,得到如下结论。

a. 在制定岸电电价时,船舶单位岸电使用成本有从 1.64~2.34 元/(kW·h)的涨价空间。若岸上的岸电设施改造费用都是由港口承担,则电网公司收取基本的电费,剩余作为港口收取的服务费;若电网公司承担一部分岸电建设及推广费用,则可按出资比例,从港口服务费中分一部分给电网公司。

b. 岸电设施投资巨大,若建成后年利用小时数过低(小于 400 h),则港口、船舶均会严重亏损。随着岸电利用小时数的增加,政府、港口、船侧、电网公司的效益均会呈线性增加。海港岸电建设规模和投资是长江岸电的 2 倍多,而湖泊内河岸电的投资只相当于海港岸电的千分之一。但在投资回收期方面,海港岸电、长江岸电的投资静态回收期都很短,湖泊内河岸电的回收期较长。建议政府加大对湖泊内河岸电的补贴力度。

c. 使用岸电电能替代能够大量减少船舶靠港期间的污染物排放。从计算结果看,在减排量与环境效益方面,海港岸电是长江岸电的 2 倍多,是湖泊内河岸电的近万倍。该比较仅是从数值上定量分析单个港口,实际上湖泊内河岸电具有一些海港岸电所没有的优势:因为湖泊内河停靠小型船舶,靠泊期间船舶用电功率小,相应的固定投资很小、运行灵活、易于推广、规模小而数量巨大,同一湖泊内河中可以建设很多座岸电码头,聚合环境效益相当可观。

综上,本文首次理清了岸电建设运营中各方的投资、效益关系,经过本文所建立的模型和大量现场实际数据的验证,为电网公司、港口、政府推广岸电和进行相关规划预算提供了参考。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] BAILEY D, SOLOMON G. Pollution prevention at ports: clearing the air[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2004, 24(7): 749-774.
- [2] 伏晴艳,沈寅,张健. 上海港船舶大气污染物排放清单研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5): 57-64.
FU Qingyan, SHEN Yin, ZHANG Jian. On the ship pollutant emission inventory in Shanghai port[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(5): 57-64.
- [3] KHERSONSKY Y, ISLAM M, PETERSON K. Challenges of connecting shipboard marine systems to medium voltage shoreside electrical power[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3): 838-844.
- [4] 邵克存,毕大强,戴瑜兴. 基于虚拟同步发电机的船舶岸电电源控制策略[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(2): 45-52.
GAO Kecun, BI Daqiang, DAI Yuxing. Novel control strategy of shore-side power supply based on virtual synchronous generator[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(2): 45-52.
- [5] 孙永涛. 靠港船舶供电岸电电源技术及自动并车系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
SUN Yongtao. The study of shore-to-ship power technology and automatic synchronizing system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [6] 李加升,杨金辉,肖卫初. 基于神经网络内模的岸电电源波形控制[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3033-3040.
LI Jiasheng, YANG Jinhui, XIAO Weichu. Output waveform control of shore-side power supply based on neural network internal model[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3033-3040.
- [7] NAGEL S, KHOURI J, MAST R. Design and development of bid documents for cold ironing of oil tanker vessels at Berth T121 at the Port of Long Beach[C] // Triennial International Conference on Ports. [S.l.]: ASCE, 2007: 1-8.
- [8] PETERSON K L, CHAVDARIAN P, ISLAM M, et al. Tackling ship pollution from the shore[J]. IEEE Industry Applications Magazine,

- 2009, 15(1):56-60.
- [9] HE W, HUANG X. Discussion on energy-saving and emission-reduction effects using AMP[J]. Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation, 2012(1):22-25.
- [10] SEDDIEK I S, MOSLEH M A, BANAWAN A A. Fuel saving and emissions cut through shore-side power concept for high-speed crafts at the red sea in Egypt[J]. Journal of Marine Science and Application, 2013, 12(4):463-472.
- [11] CHEN F. Market segmentation, advanced demand information, and supply chain performance[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2001, 3(1):53-67.
- [12] AGATZ N A H. Demand management in e-fulfillment[EB/OL]. [2017-02-20]. <http://hdl.handle.net/1765/15425>.
- [13] 刘海涛, 龚乐年. 关于实施需求侧管理项目的成本效益分析[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(10):31-33.
- LIU Haitao, GONG Lenian. Cost-benefit analysis for actualizing demand side management[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(10):31-33.
- [14] VAISHNAV P, FISCHBECK P S, MORGAN M G, et al. Shore-side power for vessels calling at US Ports: benefits and costs[J]. Environmental science & technology, 2016, 50(3):1102-1110.
- [15] 肖峻, 龙梦皓, 程敏, 等. 计及变电站低压侧接线的配电网最大供电能力计算与分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2):18-26.
- XIAO Jun, LONG Menghao, CHENG Min, et al. Calculation and analysis of total supply capability of distribution network considering connection mode at low voltage side of substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2):18-26.
- [16] RITCJIE A, DE JONGE E, HUGI C, et al. European commission directorate general environment, service contract on ship emissions: assignment, abatement, and market-based instruments[R]. Cheshire, Northwich, UK: Task 2c-SO2 Abatement, Entec UK Limited, 2005.
- [17] 沈运帷, 李扬, 焦系泽, 等. 新电改背景下需求响应成本效益分析及其融资渠道[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9):124-130.
- SHEN Yunwei, LI Yang, JIAO Xize, et al. Cost-benefit analysis and financing channels for demand response under electric reform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9):124-130.

作者简介:



胡晓青

胡晓青(1986—),男,江苏无锡人,工程师,博士,主要研究方向为电力系统调度、负荷建模、电力市场和需求侧管理(E-mail: happysnow2004@126.com);

王蓓蓓(1979—),女,江苏南京人,副教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力市场、电力需求侧管理以及电网规划

(E-mail: wangbeibei@seu.edu.cn);

黄俊辉(1965—),男,湖北黄冈人,高级工程师,研究方向为电网规划研究及管理(E-mail: 13851474795@139.com);

阮文骏(1988—),男,江苏镇江人,高级工程师,硕士,主要从事需求侧管理方面的研究工作(E-mail: chopin1988@126.com);

孔 赞(1993—),男,江苏扬州人,硕士研究生,研究方向为需求侧管理(E-mail: kongyun_06@163.com);

周哲远(1990—),男,江苏盐城人,助理工程师,主要从事电力设计、电网规划方面的工作(E-mail: 691281848@qq.com)。

Cost-benefit optimization analysis of participants in shore-side power construction and operation and characteristic comparison among river, lake and ocean shore-side power

HU Xiaoqing¹, WANG Beibei², HUANG Junhui³, RUAN Wenjun⁴, KONG Yun², ZHOU Zheyuan⁵

(1. State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214000, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Company Economic Research Institute, Nanjing 210024, China;

4. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

5. State Grid Yancheng Power Supply Company, Yancheng 224002, China)

Abstract: The gargantuan energy consumption and air pollution, caused by the power generation of auxiliary engine when the ships are docked in the port, have made the energy conservation and emission reduction of coastal ports increasingly urgent, which can be solved well by using the shore-side power for energy replacement. Based on the large quantity of collected data, the shore-side power system is studied from the economic point of view. The construction, reconstruction and operation cost of the whole shore-side power system are analyzed and their corresponding mathematical models are established. The cost-benefits of grid companies, ports, ships and the government after using the shore-side power are analyzed and the optimal shore-side electricity price is calculated to make the profit of four participants or three of them maximum. The relationships between the profit of each participant and the government subsidy rate, the shore-side power utilization time and the optimal shore-side electricity price are analyzed based on the established models. The characteristics of river, lake and ocean shore-side power are compared from the perspectives of the optimal shore-side electricity price, the investment of shore-side power system, the annual profit of each participant, the investment recovery period and the environmental benefit. The relationship between the cost and benefit of each participant in the construction and operation of shore-side power is clarified, which can provide a reference for the government, grid companies, ports and ships to promote the shore-side power.

Key words: shore-side power; optimization; cost-benefit analysis; pollutant emission; models

附录

附录 A：海港、长江、湖泊内河岸电数据的详细处理过程

(1) 场景一：海港岸电，以洛杉矶港为例。

洛杉矶港（the Port of Los Angeles）是美国通过国际贸易货物价值最大的港口，也是美国最大的集装箱港口。港区主要码头泊位情况见表 A1，表 A2 是洛杉矶港 3 个主要码头停靠船舶使用岸电的数据，船舶在港口的平均功率是从洛杉矶港排放量清单中得到的。集装箱船（container vessels）靠港期间的平均功率与船舶尺寸有关，该尺寸大小采用载箱量为单位来衡量，即船舶所能装载的 20 英尺标准集装箱(TEUs)的数量。表 A2 中涵盖了 1000~14000 TEUs 容量的集装箱船的在港期间平均功率，还给出了一年内同类型船的总用电量、平均停靠时间、停靠次数等。在计算使用岸电时间时，假设每艘船每次停靠时实际使用岸电的时间比停泊时间少 2.5 h，这是因为船舶连接岸电电缆、船用电从辅机切换到岸电系统都需要一定的时间。

表 A1 洛杉矶港主要码头泊位情况

Table A1 Berth condition of main docks in Port of Los Angeles

码头类别	泊位/个	岸线长/m	最大水深/m
BULK GENERAL CARGO（散、杂货）	15	3590	13.7
CONTAINER（集装箱）	36	5612	13.7
OIL QUAY（油码头）	14	3484	15.2

表 A2 洛杉矶港 3 个主要码头停靠船舶使用岸电数据

Table A2 Shore-side power used by ships docked in three main docks of Port of Los Angeles

船舶类型	在泊位期间平均功率/kW	停靠次数	实际使用岸电的平均时间/h	所有同类型船舶的年总停靠时间/h	同类型船的年总用电量/(MW h)
集装箱船-1000	720	33	45	1485	1068
集装箱船-2000	1039	184	33	6072	6359
集装箱船-3000	641	188	30	5640	3565
集装箱船-4000	1136	288	41	11808	13430
集装箱船-5000	1128	511	35	17885	19988
集装箱船-6000	804	473	34	16082	12761
集装箱船-7000	845	176	65	11440	9620
集装箱船-7000	845	175	60	10500	8901
集装箱船-8000	1008	37	68	2516	2529
集装箱船-9000	1030	267	65	17355	17941
集装箱船-10000	1075	200	68	13600	14526
集装箱船-11000	1500	62	69	4278	6406
集装箱船-12000	2000	36	66	2376	4749
集装箱船-13000	1700	4	69	276	470
散货船	208	237	60	14220	2936
重吊船	467	5	67	335	157
杂货船	575	28	61	1708	977
普通货船	575	41	59	2419	1396
木材船	208	14	57	798	167
干货船	575	0	0	0	0
油轮	605	743	43	31949	19370
油槽船	605	74	49	3626	2200
成品油船	605	140	41	5740	3502
化学品船	738	22	48	1056	781
液化气船	2520	2	38	76	190
滚装船	229	0	0	0	0
车辆运输船	1284	130	18	2340	3008
矿砂散货石油运输船	605	4	17	68	41

从表 A2 中可看出，洛杉矶港在一年内的总岸电用电量为 157038 MW h，根据资料，岸电变频设备及船舶负载的综合功率因数取为 $\cos\varphi_A=0.7$ ，根据船舶实际消耗的有功功率，则码头岸电建设实际所需容量为：

$$S = \frac{Q_{\text{ship}}}{\omega \cos\varphi_A} \quad (\text{A1})$$

其中， Q_{ship} 为船舶实际消耗的有功容量； ω 为码头实际使用岸电容量与岸电规划建设容量留有一定的裕度，本文取 0.8。则码头公司实际所需容量为 280425 MW h。

本项目在计算港口建设岸电设施的成本时，采用单位功率岸电成本乘以岸电负荷的方式。因为所采集的数据有限，不清楚具体时刻港口使用岸电船舶的类型、功率以及同时停靠的船舶的数量。为了计算港口变电站的增容改造成本和岸电设施建设改造成本时分析方便，从港口的角度，在一年中岸电总用电量已知确定的情况下，可以计算一年中停靠船舶的平均功率作为典型船的功率：

$$P_{\text{ship_aver}} = \frac{Q_{\text{ship}}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^t T_{i,j}} \quad (\text{A2})$$

其中， $\sum_{j=1}^t T_{i,j}$ 为第 i 类船一年内的总停靠时间； N 为不同类型船的数量。由于可能同时出现数艘典型船同时停靠的情况，将同一时间停靠的所有船舶等效为一艘虚拟的“参照物船”，其平均功率为：

$$P_{\text{ship_ref}} = P_{\text{ship_aver}} \psi \quad (\text{A3})$$

虚拟的“参照物船”仅是为了方便计算港口岸电建设的成本，没有其他意义。根据资料，洛杉矶港的泊位利用率 $\eta=60\%$ ，式（A3）中的换算系数 ψ 的计算公式如下：

$$\psi = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^t T_{i,j}}{8760\eta} \quad (\text{A4})$$

计算得到 $\psi = 220020 / (8760 \times 60\%) = 41.8607$ ，因此，“参照物船”的靠港期间功率为 $P_{\text{ship_ref}} = 29.8779$ MW，一年中停靠港口使用岸电的时间为 5256 h。

因此，变电站增容改造费用为：

$$C_{\text{zr}} = C_{\text{zr_per}} P_{\text{ship_ref}} / \omega \quad (\text{A5})$$

岸电系统电力设备的投资改造费用为：

$$C_{\text{sb1}} = C_{\text{port_per}} P_{\text{ship_ref}} / \omega \quad (\text{A6})$$

其中， $C_{\text{zr_per}}$ 为单位负荷功率的变电站增容改造成本。码头实际使用岸电容量与岸电规划建设容量留有一定的裕度 $\omega=0.8$ ，将以上数据代入边际电价模型中，计算得到港口岸电设施投资为 11951.142 万元，港口变电站增容改造投资为 8490.679 万元。

计算港口同一时刻停靠的所有船舶的安装岸电设施成本的公式如下：

$$C_{\text{sb2}} = C_{\text{gz_per}} P_{\text{ship_ref}} / \omega \quad (\text{A7})$$

其中， $C_{\text{gz_per}}$ 为船舶单位功率岸电设施的改造成本。

将以上数据代入边际电价模型中，燃料油选取 0.1%含硫量的低硫油，价格为 9800 元/t，并根据污染当量数、排污费、船舶岸基供电设施用电价格等参数取值，计算四方效益最大时海港岸电的船侧岸电电价为 1.568 元/(kW h)，此时港口年效益为 12986.4239 万元，港务公司效益最大时的船侧岸电电价为 2.394

元/(kW h)，此时港口年效益为 25957.7627 万元，政府效益为 1000.084 万元，电网公司效益为 4430.042 万元。

计算船舶安装岸电设施成本时，因为在海港停靠的船舶大小不一，若一一分析会耗费很多人力，也不现实，因此本项目在每个场景下选取一艘船作为典型代表船，该船在靠港期间的实际功率为所有停靠船舶的平均功率 $\bar{P} = \sum Q_i / \sum T_i$ ， Q_i 为第 i 类船一年内的总岸电用电量（单位为 MW h）， T_i 为第 i 类船一年内的总停靠时间， T_i 之所以会出现大于 8760 h 的情况是因为同种类型的船舶不止一艘，而 T_i 是该种类型每条船舶的停靠时间之和。计算停靠在洛杉矶港的所有船舶的平均功率为 845.89 kW，属于中型船。因此每单位容量的船上电力设备的投资改造费用为 800 元。可以由此计算得到船侧一艘典型代表船的岸电设备成本。

计算港口典型代表性船的安装岸电设施成本的公式如下：

$$C_{\text{ship_typical}} = C_{\text{gz_per}} \bar{P} / \omega \tag{A8}$$

可以计算海港场景下，一艘在泊位期间使用岸电平均功率为 845.89 kW 的典型代表性船（如载箱量为 7000TEUs 的集装箱船）的岸电设施改造成本为 67.6712 万元/艘。

（2）场景二：长江内河岸电，以南通港为例。

南通港各公司泊位条件如表 A3 所示。南通港散杂货船舶岸电使用情况如表 A4 所示。

表 A3 南通港各公司泊位条件
Table A3 Berth conditions of Companies in Nantong port

公司	船舶类型	泊位概况	年吞吐量
南通集装箱码头有限公司	集装箱公用码头	3 代集装箱船，25000t 海轮	557821.75TEU
江海港务公司	铁矿石	17.5 万吨级泊位 2 个，5 万吨级 1 个，0.5 万吨级泊位 1 个，0.3 万吨级 3 个，0.25 万吨级泊位 6 个，300 吨级内河泊位 12 个	矿石 5.5×10^6 t，杂货 2.9×10^6 t 年，约 20 艘矿石海轮共 2.8×10^7 t
通州港务公司	散杂货	5 万吨级码头 2 个，1.6 万吨泊位 1 个，千吨级长江泊位 2 个	5×10^6 t
狼山港务公司	江海中转	5 万吨级深水泊位 5 个，100 吨级内河泊位 13 个，中外远洋轮约 3000 艘次	4.7×10^7 t
南通港口轮驳有限公司	港口供配套作业	—	—

表 A4 南通港散杂货船舶岸电使用情况
Table A4 The use of the shore power of the bulk cargo ships in Nantong port

船名	吨位/t	辅机功率/(kW·A)	耗油量/(t·h ⁻¹)	停靠期间实际功率/kW
J.BETTER	7000	275	0.8	100
sea rich	16000	563	2	200
大河号	35000	537×2	3	300
长江兴锦	56000	770	5	350
montecri	90000	750×2	5	400
盐湖城号	176000	1000×2	6	600

a. 杂货类码头的情况。

吨位情况：从表 A3、A4 可以看出，船舶吨位分类以 50000 t 以下船舶居多。

靠泊期间用电功率：杂货类船舶停靠码头期间用电功率不大。以停靠江海港务公司“鼎湖山”轮和“沂蒙山”轮为例，其中，“鼎湖山”轮吨位是 3.3 万吨级，用电量为约为 400 kW；卸货时间为 32 h；“沂蒙山”轮吨位是 1.8 万吨，用电量约为 200 kW，卸货时时间为 12h。

停泊时间：杂货类船舶停靠码头时间相对集装箱船舶而言较长，平均在 48 h 左右；

b. 散货类码头的情况。

散货船舶吨位分布较分散；从 1 万吨以下的船舶到 15 万吨以上船舶都有分布船舶靠港期间电负荷量不大；以停靠江海港务公司“太阳神”轮为例，船舶吨位为 30 万吨级，用电功率为 1200 kW；而带冷箱的集装箱船要配很大的发电机组，比如载重量 2.5 万吨的船舶需配柴油发电机组 3 台 2000 kW，载重吨位 DWT(Dead Weight Tonnage)为 76000dwt，散货船的单台发电机容量为 560 kW。停靠时间较长，停泊时间一般为 2~3 d。

c. 集装箱码头的情况。

船舶吨位 2.5~5 万吨；靠泊期间用电功率相对较大，大都在 1000 kW 以上，例如 3.8 万吨的“浦海 229”的辅机功率高达 1100 kW；随着南通港作业效率的提高，停靠时间一般在 24 h 左右，相对较短。

针对 2015 年停靠南通港口集团公司的散货、杂货不同吨位级别的船舶用电情况进行分析，统计包括船吨位、辅机容量、耗油量、停靠码头期间实际功率、电压、频率，统计结果如表 A5 所示，TEU 为载箱量单位，采用 20 英尺标准集装箱，DWT 为载重吨，换算方法为 1TEU=15 吨。南通港各公司泊位利用率如表 A6 所示。

表 A5 南通港集装箱船舶岸电使用情况

Table A5 The use of shore power for container ships in Nantong port

船名	吨位/TEU	辅机功率/kW	耗油量/(t h ⁻¹)	停靠期间实际功率/kW
众诚 9	144	350	0.1	180
凯通 7	250	350×2	0.2	400
禹王 9	434	350×2	0.2	400
中艺润通	584	250×3	0.2	420
浦海 229	202	350 ×2	0.2	380
武祥 26	1436	1260 ×3	1	2000

注：TEU 为载箱量单位，采用 20 英尺标准集装箱；
DWT 为载重吨，换算方法为 1TEU=15t。

表 A6 南通港各公司泊位利用率

Table A6 Berth utilization rate of Nantong port

公司	泊位利用率	公司	泊位利用率
南通港口集团集装箱分公司	0.69	通州港务公司	0.61
江海港务公司	0.57	狼山港务公司	0.94

根据 2015 年的靠港船舶数据，按照同一类型码头中不同码头的停靠船舶次数的多少以及其船舶吨位等级的分布情况，每一个类型中选择两个码头对 2015 年靠泊情况进行再次分析。杂货类码头选择的是江海港务公司和山港务公司，散货类码头选择的是通州港务公司，集装箱公司选择的是南通港口集团集装箱分公司。这 5 个分公司 2015 年靠泊船舶数据情况如表 A7 所示。

表 A7 南通港口集团部分码头公司 2015 年靠泊船舶数据统计表

Table A7 Statistics on berthing ship data of some port companies of Nantong port group in 2015

公司	参数	1 万吨级以下	1~2 万吨级	2~5 万吨级	5~10 万吨级	10~15 万吨级	15 万吨级以上
南通港口集团 集装箱分公司	停靠次数	4050	104	100	—	—	—
	平均停靠时间/h	8.28	9.76	12.8	—	—	—
江海港务公司	停靠次数	111	—	—	60	—	89
	平均停靠时间/h	18.44	—	—	44.3	—	54
通州港务公司	停靠次数	984	616	—	863	—	—
	平均停靠时间/h	7.9	13.63	—	47.28	—	—
狼山港务公司	停靠次数	2600	—	—	1300	—	—
	平均停靠时间/h	15.23	—	—	57.8	—	—
南通港	平均功率/kW	100	200	350	400	—	2000
	一年内所有同类型船舶 的总停靠时间/h	8.2952×10^4	9.413×10^3	1.28×10^3	1.1860×10^5	—	4.81×10^3
	同类型船的总用电量/ (MW h)	8592	1882	448	47440	0	9620

基于表 A7 可以粗略计算散货类、杂货类和集装箱类码头不同吨位级船舶的平均停靠时间，将这些时间相加得到整个南通港一年内所有同类型船舶的总停靠时间及总用电量。

南通港一年中所有船舶使用岸电的总用电量 $\sum Q_i = 67982 \text{ MW h}$ ，岸电变频设备及船舶负载的综合功率因数取为 $\cos \varphi_A = 0.7$ ，码头实际使用岸电容量与岸电规划建设容量留有一定的裕度 ω 取 0.8。码头需要建设岸电容量为 121396 MW。一年中所有船舶的总停靠时间 $\sum T_i = 220020 \text{ h}$ ，总停靠时间大于 8760 h 是因为可能出现数艘同一类型的船同时停泊在港口的情况。计算停靠在南通港的所有船舶的平均功率 $P_{\text{ship_aver}} = \sum Q_i / \sum T_i = 308.981 \text{ kW}$ 。按照前文欧盟委员会环境总司的划分方法，该港口船只属于小型船。

燃料油类型及价格、污染当量数、排污费、船舶岸基供电设施用电价格等参数取值跟海港岸电场景一致。将以上数据代入边际电价模型中，计算得到南通港岸电的四方最优船侧岸电电价为 1.566 元/(kW h)，此时港口年利润为 5608.2471 万元，港务公司利润最大时船侧岸电电价为 2.390 元/(kW h)，此时港口年利润为 11209.964 万元，政府利润为 422.167 万元，电网公司利润为 1917.772 万元。

(3) 场景三：湖泊岸电，以盐城里下河码头为例。

省交通运输厅《江苏省内河干线航道通航管理规定》以及省发改委、交通厅《江苏省干线航道网规划》等文件对湖泊河流的航道做了详细规定。例如，洪泽湖南线、太湖航线属于三级航道，京杭大运河中苏北湖西航道-苏北运河-中运河属于二级航道，苏南谏壁-鸭子坝属于三级航道，秦淮河的入江口-杨家湾闸段为四级航道，盐邵线的邵伯运河口-盐城里下河地区为三级航道等。在同样航道等级的前提下，内河与湖泊的通行船舶具有相似性。在国标 GB50139—2014《内河通航标准》中，内河航道应按可通航内河船舶的吨级划分为 7 级，如表 A8 所示。

附表 A8 内河航道等级与船舶吨级划分
Table A8 Classification of inland waterway
and ship tonnage

航道等级	船舶吨级/t	航道等级	船舶吨级/t
1	3000	5	300
2	2000	6	100
3	1000	7	50
4	500		

本项目中选取里下河码头作为湖泊岸电的研究对象。里下河码头是盐城地区内河具有代表性的码头之一，全长 400 m，主要停靠在三级航道行驶的、1000 吨及以下的小型船舶。靠港期间，船民用电主要使用太阳能发电或蓄电池，但这些电源功率小、容量低，不能满足微波炉、空调等大功率电器的使用。在夏、冬季节，船民主要使用柴油机发电解决这一难题。柴油发电不仅成本高，给周围环境带来的大气污染、噪音污染也很严重。盐城里下河码头岸电项目建设 4 套小容量岸电设施，可同时供 8 条船舶使用，每条线路可供负荷 8 kW，使用岸电后，按照平均每天每条船日用电量 6 kW h 计算，年可增售电量为 6 kW h/d/套×8 套×365d=17520(kW h)。根据前文，电网公司收取的船舶岸基供电设施用电价格恒定为 0.6601 元/(kW h)，上网电价恒定为 0.378 元/(kW h)，则岸电所带来电网公司年利润为 4942.392 元，按照码头实际使用岸电容量与岸电规划建设容量留有一定的裕度 ω 取 0.8，岸电变频设备及船舶负载的综合功率因数取为 $\cos\varphi_A=0.7$ ，码头需要建设岸电容量为 31286kV·A。根据表 A8，停泊在里下河码头的船舶属于超小型船，每 1 kW 容量的船上岸电电力设备的投资改造费用为 8000 元，可以计算湖泊场景下一艘在泊位期间使用岸电平均功率为 8 kW 的典型代表性船的岸电设施改造成本为 6.4 万元/艘。

燃料油类型及价格、污染当量数、排污费、船舶岸基供电设施用电价格等参数取值跟海港岸电场景一致。将以上数据代入边际电价模型中，计算得到里下河码头岸电的四方最优船侧岸电电价为 1.741 元/(kW h)，此时港口年利润为 0.7611 万元，港务公司利润最大时船侧岸电电价为 2.175 元/(kW h)，此时港口年利润为 1.5215 万元，政府利润为-0.4775 万元，这表示因为船舶使用岸电容量较小，政府付出的补贴大于船舶使用岸电带来的环境效益。电网公司利润为 0.4942 万元。

附录 B：港务公司成本效益模型的数据获取

根据南京某港口岸电改造技术方案，相应的岸上变电站增容费用 C_z 、岸电系统电力设备的投资改造费用 C_{sb1} 如下：35kV 变电站增容改造相关数据如附表 B1 所示，10kV 变电站增容改造相关数据如附表 B2 所示，5 号变电所增容改造成本如附表 B3 所示，岸电系统改造成本如附表 B4 所示。

表 B1 35kV 变电站增容改造参数
Table B1 Parameters for reconstruction and expansion of 35kV substations

序号	主要设备	数量	估算单价/万元	估算总价/万元	备注
1	三相双绕组有载调压自冷降压电力变压器	2 台	130	260	SZ11-12500/35, YN, d11, 35±4×2.5%/10.5kV, $U_d=8\%$
2	10kV 并联电容器无功补偿成套装置	2 套	90	180	TBB10-3000/200M-AK, 单星型接线
3	35kV 开关柜改造	6 套	0.5	3	—
4	10kV 开关柜改造	3 套	0.5	1.5	—
5	35kV 电力电缆	200m	0.04	8	YJV22-26/35-3×150
6	10kV 电力电缆	600m	0.04	24	YJV22-8.7/15-1×240
7	安装、调试费	—	—	100	—
合计/万元				567.5	

表 B2 10kV 变电站增容改造参数

Table B2 Parameters for reconstruction and expansion of 10kV substations

序号	主要设备	数量	估算单价/万元	估算总价/万元	备注
1	10kV 干变, 1250kV A	1 台	18	18	—
2	电容柜	1 套	12	12	375kvar
3	低压出线柜	8 台	6.5	52	MNS
4	安装、调试费	—	—	16	—
合计/万元			98		

表 B3 5 号变电所增容改造参数

Table B3 Parameters for reconstruction and expansion of Substation 5

序号	主要设备	单位数量	估算单价/万元	估算总价/万元	备注
1	低压出线柜	4 台	6.5	26	MNS
2	安装、调试费	—	—	5	—
合计/万元			31		

表 B4 岸电系统改造成本

Table B4 Reconstruction costs of shore power system

序号	主要设备	数量	估算单价/万元	估算总价/万元	备注
1	岸基控制柜	16 套	4	64	2mm 不锈钢箱体
2	岸基插座箱	16 套	9	144	8mm 钢板箱体
3	岸电专用插头 (电缆卷筒上使用)	32 套	3	96	400A 以下通用
4	岸电专用插座 (船侧配套使用)	16 套	3	48	400A 以下通用
5	电力电缆	14200m	0.03	426	YJV22-0.6/1-4×150
6	卷线盘	16 个	1	16	—
7	软电缆	2400m	0.05	120	规格 4×300
8	安装、调试费	—	—	180	—
合计/万元			1094		

附录 C：各方成本效益与单位岸电价格的关系

表 C1 不同政府补贴率的边际电价和四方收益

Table C1 Marginal Price and benefits of four parties under different government subsidy rates

补贴率 ($\beta_1=\beta_2$)	单位岸电 使用成本/ [元 (kW h) ⁻¹]	政府效益/ 万元	电网公司 效益/万元	船侧岸电电价/ [元 (kW h) ⁻¹]		船舶岸基供电 服务价格/[元 (kW h) ⁻¹]		港口效益/万元	
				四方效益	港口效益	四方效益	港口效益	四方效益	港口效益
				最大	最大	最大	最大	最大	最大
0	0.6601	48.892	135.408	1.647	2.312	0.9869	1.6519	319.0803	638.2803
0.05	0.6601	43.486	135.408	1.646	2.316	0.9859	1.6559	321.8319	643.4319
0.10	0.6601	38.080	135.408	1.645	2.321	0.9849	1.6609	324.5835	649.0635
0.15	0.6601	32.674	135.408	1.644	2.325	0.9839	1.6649	327.3351	654.2151
0.20	0.6601	27.268	135.408	1.643	2.330	0.9829	1.6699	330.0867	659.8467
0.25	0.6601	21.862	135.408	1.641	2.334	0.9809	1.6739	332.3582	664.9982
0.30	0.6601	16.455	135.408	1.640	2.339	0.9799	1.6789	335.1098	670.6298