**基于全生命周期的内河集装箱船舶电动化**

**碳排放建模与综合效益分析**

凌贵阳1a，何军良1，詹海东a，杨振生1

（1.上海海事大学中国（上海）自贸区供应链研究院，上海市浦东新区201306；a.上海港引航站，上海市虹口区200082）

**摘 要：**国际环保要求日趋严格、船东履约要求逐步严苛，也对低排放、清洁能源船舶提出了新的发展需求。目前，我国90%以上水运船舶仍然采用柴油动力推进系统，具有燃油成本高、噪音大、排放污染等问题。相较于传统的船舶动力系统，电力推进式船生态优势和综合效益明显，但也在续航、电池寿命和安全性等方面存在若干问题，需要进行深入分析。本文围绕电动船舶综合效益，建立了全生命周期的能耗模型及排放模型，并对其进行了经济效益分析。结果表明，电动船舶环保节能优势显著，且有更低的运营成本，内河集装箱电动船舶未来发展前景巨大。本研究为国际航运业采取有效的措施控制船舶排放进行了有益的探索。

**关键词：**绿色航运；内河集装箱船舶电动化；全生命周期；碳排放；综合效益分析

**Whole life cycle based electrification of inland waterway container ships carbon emission modelling and comprehensive benefit analysis**

*Ling Guiyang* 1a*, He Junliang* 1*, Zhan Haidong* a*, Yang Zhensheng* 1

*(1. Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Pudong New Area, Shanghai 201306; a. Shanghai Pilot Station, Hongkou, Shanghai 200082)*

**Abstract：**The increasingly stringent international environmental protection requirements and the progressively tougher compliance requirements of shipowners have also put forward new development needs for low-emission, clean energy vessels. At present, more than 90% of China's water transport ships still use diesel-powered propulsion systems, which have problems such as high fuel costs, high noise levels and emission pollution. Compared with the traditional ship power system, the ecological advantages and comprehensive benefits of electric propulsion type ships are obvious, but there are also problems such as shorter range and battery life, which need to be analysed in depth. This paper establishes a whole life cycle energy consumption model and emission model for the comprehensive benefits of electric ships, and conducts an economic benefit analysis. The results show that electric ships have significant advantages in environmental protection and energy saving, and have lower costs, and that electric ships for inland containers have great prospects for future development. This paper provides a useful exploration for the international shipping industry to adopt effective measures to control ship emissions.

**Key words：**waterway transport；electrification of inland container ships；whole life cycle；carbon emissions;；comprehensive benefit analysi

# 1 引言

航运业承载着世界90%的货物运输，是重要

的能耗单位和污染源头。随着全球贸易的增长和运载量不断增加，航运带来的排放也将持续增加[1]。全球约70%的船舶排放物发生在离海岸线400公里范围内，直接影响着港口城市及江河沿岸城市，进而对全球环境和人体健康造成影响[2]。根据环保部机动车排污监控中心年报，2017年全国船舶二氧化硫氧化物量为85.3万吨，约占全国二氧化硫氧化物总量的6.4%。全国船舶NOx排放总量为134.6万吨，占全国的比例为6.0%。随着我国“双碳”目标和国际环保减排政策的推动，清洁能源逐步取代传统化石能源是当前船舶动力技术转型的关键趋势**错误!未找到引用源。**。电动船舶作为减少船舶大气污染物排放的途径之一，是实现绿色航运，构建绿色交通体系实现交通运输可持续发展的坚实基础[3]。因此本文针对电动船舶综合效益建立了全生命周期的能耗模型及排放模型，并对其进行了经济效益分析。

从全球范围来看，不同类型的新能源船舶已经有了很多应用研究[4][5][6]， 但是以往对于内河电动船舶碳排放研究，主要集中于船舶应用阶段基于燃料消耗的碳排放研究，而缺乏从船舶建造到应用乃至报废等完整的全生命周期的碳排放测算研究，同时缺乏针对船舶全生命周期的综合效益分析，因此本文提出了从生产阶段到运营维护阶段，最后到报废阶段的全生命周期内河电动集装箱船舶碳排放测算模型，并基于此对电动集装箱船舶进行综合效益分析，以论证其在环保与经济上的可行性。

# 2 问题描述

船舶的设计寿命一般为几十年，具有较漫长的运动轨迹。其生命周期涵盖了设计、建造（包括原材料采购）、航运（港口作业活动、海上作业活动）、维修和拆解等过程。借鉴ISO14044对电动船舶的生命周期进行清单分析，将其分为了三个过程：生产制造子过程；船舶使用子过程；船舶报废子过程。本文将电动船舶全生命周期分为船舶链和燃料链。其中，船舶链分为船体子系统和机电子系统；船体子系统主要包括船体材料和涂料，其环境影响主要来源于原材料的生产与运输、钢材预处理、切割、焊接、涂装工艺、拆解过程以及回收处理等环节。机电子系统主要包括动力系统和特殊舾装、机电设备等。船舶各子系统又可分为三个阶段，即生产阶段、使用阶段和报废处理阶段。燃料链包括燃料的生产和使用，即WTW模型中对应的燃料获取和燃料的使用两个阶段。

本文基于船舶的全寿命周期，构建船舶建造过程、使用过程以及报废过程的能耗及排放模型，对于难以获取的建造过程及报废过程数据，本文采用ANL Greet模型数据库中的基础数据。本研究的模型构建关键部分在于船舶使用子过程的能耗及排放模型，旨在发现电动船舶与燃油船舶在环境效益方面的差异。随后，本文从建造成本、营运成本以及航次成本三个方面对电动船舶经济效益进行了分析，探讨电动船舶相较于燃油船舶在成本方面存在的优势。

# 3 电动船舶综合效益建模与分析

## 3.1 能耗模型

电动船舶与传统燃料船舶相比，除主机、辅机、锅炉、传动机构、推进机构、控制机构、动力电池、电机和减速器之外，其余部分建造过程相似。为简化模型起见，本研究仅考虑动力电池制造过程的能耗和排放，动力电池的生产流程如图3.1所示。



图 3.1 动力锂电池生产流程与材料清单

Fig.3.1 Power lithium battery production process and bill of materials

船舶主要有三个排放源：主机，辅机和锅炉。三种排放源的功率计算各异，其中主机功率与航速，载重吨，风浪和外表面腐蚀情况等多种因素相关，但最主要的是航速。辅机和锅炉功率与船舶的航行模式相关。参考2019年《船舶大气排放控制措施选择决策方法研究》模型，分别建立主机，辅机和锅炉油耗模型

船舶全生命周期能耗除了船舶运行直接能耗，还包括能源开采生产过程能耗。不同能源开采、生产路径及自身特点都不同，往往涉及多种一次能源，需要对每种能源进行计算迭代。燃料/电力获取总能耗计算如公式（1）所示。

|  |  |
| --- | --- |
| $E\_{WTT}=\sum\_{}^{}E\_{i}(1+E\_{p,i}+K×E\_{e,i}$) | (1) |

其中：$E\_{WTT}$为生产单位能源产品总能耗；$E\_{i}$为生产单位能源产品消耗燃料$i$的能量；$E\_{p,i}$为燃料$i$生产阶段能耗；$E\_{e,i}$为燃料$i$开采阶段能耗；$K$为损失系数。船用柴油等化石燃料主要包括原料开采、加工和燃料运输过程。电力包括发电原料的开采、处理、运输和发电过程。采用GREET数据库中我国2018年MDO（0.5% S）WTT的能耗数据，生产1mmBtu MDO（0.5% S），共耗能折合1221 MJ，2018年，我国生产1 MJ电力综合平均耗能2478 。

**3.2 排放模型**

船舶建造过程中由于难以获取相关的排放数据，为简化模型起见，本研究仅考虑动力电池制造过程的排放。本研究采用ANL Greet模型数据库的磷酸铁锂（LFP）的排放数据。其中，生产制造单位千克磷酸铁锂材料的排放表3.1。

在拆解回收阶段，电动船舶与传统燃油船舶在船体子系统的拆解报废过程相似，因此，主要计算机电子系统中动力系统的排放区别。每吨钢材和锂电池的再循环过程的清单排放数据表3.2所示。

表3.1 单位重量磷酸铁锂材料排放

Tab.3.1 Unit weight lithium iron phosphate material emissions

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Emissions** | **CO2）****（kg）** | **VOC****（g）** | **CO（g）** | **NOx（g）** | **PM2.5（g）** | **SOx（g）** | **CH4（g）** | **N2O（mg）** | **GHG-100（kg）** |
| **Value** | 31.68 | 6.24 | 21.46 | 34.8 | 2.83 | 64.89 | 90.11 | 76.26 | 34.8 |

表3.2 每吨钢材和锂电池再循环排放清单（部分）

Tab.3.2 Inventory of recycled emissions per tonne of steel and lithium batteries (partial)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Emissions** | **CO2）****（t）** | **VOC****（kg）** | **CO（kg）** | **NOx（kg）** | **PM10（kg）** | **PM2.5（kg）** | **SOx（kg）** | **CH4（kg）** | **N2O（g）** | **GHG-100（t）** |
| **Value** | 12.61 | 5.22 | 11.99 | 17.6 | 4.83 | 4.46 | 82.36 | 29.2 | 21.92 | 13.58 |

表3.3 排放因子计算公式

Tab.3.3 Emission factor calculation formula

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 污染源 | 燃料类型 | 公式 |
| SOx |  | $$EF\_{kSOx}=SFOC\_{k} ×2×0.97753×S\_{k}\%$$ |
| NOx | Tier I : | $$EF\_{NOx}=45×n^{-0.20}$$ |
|  | Tier II | $$EF\_{NOx}=44×n^{-0.23}$$ |
|  | Tier III : | $$EF\_{NOx}=9×n^{-0.20}$$ |
| PM: | HFO | $$EF\_{kPM}=1.35+SFOC\_{k} ×7×0.02247×(S\_{k}\%-0.0246)$$ |
|  | MDO/MGO | $$EF\_{kPM}=0.23+SFOC\_{k} ×7×0.02247×(S\_{k}\%-0.0024)$$ |
| CO2 |  | $$EF\_{kCO2}=3.114 gCO2/gfuel ×SFOC\_{k} g fuel/kwh$$ |

*\**$SFOC\_{k}为燃油k的能量密度,单位g/kWh$*；* $EF\_{kSOx}$*表示硫化物排放因子；*$S\_{k}\%$*表示燃油k的硫含量。*

船舶运行过程中，大气污染物排放量可根据能耗和大气污染物的排放因子计算，排放因子的计算如公式（9），其中：$EF\_{baseline}$为基准排放因子，$FCF$ 为燃油修正系数，$LLA$为主机低载荷修正系数。公式（10）为大气污染物排放量，其中：$k$为第$k$种燃油；$nf$表示燃油种类总数；$p$为大气污染物种类；$EF\_{kp}$为燃油$k$、大气污染物$p$的排放因子。主要大气污染物排放因子计算公式表3.3所示，其中包括SOx，NOx，PM，CO2。

|  |  |
| --- | --- |
| $$EF=EF\_{baseline} ×FCF ×LLA$$ | (9) |
| $$E\_{p}=\sum\_{k=1}^{nf}\left(F\_{k}×EF\_{kp}×LLA\right)$$ | (10) |

船舶全生命周期的能耗除了船舶运行直接排放，还包括能源开采生产过程的排放（即WTT阶段）。本研究参考我国2018年生产1 mmBtu MDO（0.5% S）以及1MJ电力的WTT排放数据。

## 3.3 经济效益分析

本研究将航运的经济性成本分三部分：建造成本、营运成本、航次成本。建造成本包括船舶造价或租金、船舶折旧等费用，由于其余成本均与传统船舶成本相同，故而本部分只计算电池的成本。运营成本即船公司为保证船舶的航行服务，而产生的经常性维持费用，包括船员工资、船上必备的物料、保险、船舶维修保养费用、润料费，及相关的管理费用等。航次成本即船舶在航行任务中产生的一系列费用成本，主要要素为电费、港口费用、运河及各种佣金。

# 4 实船案例分析

### 4.1 内河集装箱船舶经济性分析

本文以内河集装箱船舶作为案例，每个案例均选取两艘相同航线、相同航次、不同动力系统的船舶，分别进行计算、比较和分析。通过折现率计算在两种船舶的生命周期成本，并判断船型选择的优劣。案例选用是苏州—洋山港航线，现选取两艘120TEU内河集装箱船，分别为燃油作为动力系统与电力作为动力系统。据资料调查显示，该船型船舶年航行次数为90次，每年航行里程为36000km，航速为每小时10海里，具体航线图如图4.1。两艘船舶的具体参数表，详见表4.1，其中电价按照目前苏州内河执行的岸电电价标准核算。



图4.1 苏州—洋山港航线图

Fig.4.1 Suzhou—Yangshan Port route map

表4.1 船舶运营参数

Tab.4.1 Ship operating parameters

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 项目 | 燃油船舶 | 电动船舶 |
| 总长（米） | 79.55 | 79.55 |
| 型宽（米） | 13.6 | 13.6 |
| 型深（米） | 5.6 | 5.6 |
| 垂线间长（米） | 73 | 73 |
| 吃水（米） | 4.2 | 4.2 |
| 载箱量（TEU） | 120 | 120 |
| 航速（海里/小时） | 10 | 10 |
| 每年航行次数（次） | 90 | 90 |
| 船舶每年航行里程（KM） | 36000 | 36000 |
| 电价（元/度） | - | 1.1 |
| 电耗（KWH/KM) | - | 17.6 |
| 油价（元/KG） | 7 |  |
| 油耗（KG/KM) | 5 | - |
| 主机功率（kw） | 809 | 809 |
| 辅机功率（kw） | 90×3 | 90×3 |
| 主机转速（rpm） | 900 | 900 |
| 油耗（KG/KM) | 5 | - |
| 电耗（KWH/KM) | - | 17.6 |
| 电池组电压（V） | - | 570 |
| 电池组容量（kWh） | - | 1700 |

假设船舶使用年限为15年，电池使用年限为7.5年，计算得出相关经济评价指标，详见表4.2。根据表4.2可看出电动船舶年运营成本比燃油船舶

高70.5万元，但是从表中可以看出每千米的电动船电费比燃油船油费低15.6元，而燃油船舶的固定成本比电动船舶低了1100万元，其主要是因为电池以及电力推进相关设备在建造时期投入成本较大而使用成本较低。

表4.2 经济评价指标

Tab.4.2 Economic valuation index

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 类别 | 燃油船舶 | 电动船舶 |
| 建造成本（万元） | 600 | 600 |
| 电池（万元） | - | 800 |
| 电力推进相关设备 | - | 300 |
| 总固定成本（万元） | 600 | 1700 |
| 船体成本折旧费（元/KM） | 11.1 | 11.1 |
| 电力推进设备折旧费（元/KM） | - | 5.6 |
| 电池折旧费（元/KM） | - | 29.6 |
| 油费（元/KM） | 35 | - |
| 电费（元/KM） | - | 19.4 |
| 单位（每km）运营成本合计（元） | 46.1 | 65.7 |
| 年运营成本（万元） | 166 | 236.5 |

为了综合考虑运营成本和投资成本，同时也便于两种船舶成本的详细对比，此处选取折现率为8%来进行计算，分别计算出燃油船和电动船每年折现后的成本，以及每年成本的累计。假设本部分的成本由固定的建造成本以及15年周期内的能耗成本组成，如表4.3所示。

表4.3 燃油船和电动船成本对比

Tab.4.3 Cost comparison between oil and electric ships

 单位：万元

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 共设置了3条年份 | 燃油船每年运营成本 | 电动船每年运营成本 | 折现系数 | 燃油船每年现值成本 | 电动船每年现值成本 | 燃油船每年成本累计 | 电动船每年成本累计 |
| 0 | 600 | 1700 | 1 | 600 | 1700 | 600 | 1700 |
| 1 | 126 | 69.8 | 0.926 | 116.7 | 64.6 | 716.7 | 1764.6 |
| 2 | 126 | 69.8 | 0.857 | 108.0 | 59.8 | 824.6 | 1824.5 |
| 3 | 126 | 69.8 | 0.794 | 100.0 | 55.4 | 924.7 | 1879.9 |
| 4 | 126 | 69.8 | 0.735 | 92.6 | 51.3 | 1017.3 | 1931.2 |
| 5 | 126 | 69.8 | 0.681 | 85.8 | 47.5 | 1103.1 | 1978.7 |
| 6 | 126 | 69.8 | 0.630 | 79.4 | 44.0 | 1182.5 | 2022.7 |
| 7 | 126 | 69.8 | 0.584 | 73.6 | 40.8 | 1256.1 | 2063.4 |
| 7.5 | - | 800 | 0.561 | - | 448.8 | - | - |
| 8 | 126 | 69.8 | 0.540 | 68.0 | 37.7 | 1324.1 | 2549.9 |
| 9 | 126 | 69.8 | 0.500 | 63.0 | 34.9 | 1387.1 | 2584.8 |
| 10 | 126 | 69.8 | 0.463 | 58.3 | 32.3 | 1445.5 | 2617.2 |
| 11 | 126 | 69.8 | 0.429 | 54.1 | 29.9 | 1499.5 | 2647.1 |
| 12 | 126 | 69.8 | 0.397 | 50.0 | 27.7 | 1549.5 | 2674.8 |
| 13 | 126 | 69.8 | 0.368 | 46.4 | 25.7 | 1595.9 | 2700.5 |
| 14 | 126 | 69.8 | 0.340 | 42.8 | 23.7 | 1638.7 | 2724.2 |
| 15 | 126 | 69.8 | 0.315 | 39.7 | 22.0 | 1678.4 | 2746.2 |

通过表4.3的计算可得，燃油船15年总成本为1678.4万元，电动船15年总成本为2746.2万元，电动船成本比燃油船高1067.8万元。由于电动船的电池及电力推进相关设备的初期投入资金较大，所以使得电动船总成本高于燃油船。如果想实现柴油动力与电力推动船舶运营成本相当，则需要补贴电池一次性投入成本65%。但是随着经济的不断发展以及科学技术的不断进步，未来电池购置成本有望进一步降低，电动船舶发展前景依旧十分广阔。

## 4.2 内河集装箱船环境效益分析

本部分选用的三艘苏州—洋山港航线的120TEU内河集装箱船舶，三艘船分别是燃油作为动力系统、混合动力作为动力系统和电力作为动力系统，其中燃油船舶为真实案例，混合动力船舶和电动船舶根据相同船型假设。据资料调查显示，该船型船舶年航行次数为90次，每年航行里程为36000km，航速为每小时10海里，根据资料整理三艘船舶的具体参数表，其中电价按照目前苏州内河执行的岸电电价标准核算，详见表4.1。

本部分采用苏州—洋山港航线的三艘船型相同的船舶，从全生命周期的角度，将其分为船舶建造过程、船舶使用过程以及船舶报废过程，并分别分析其能耗与排放。建造过程的能耗包括钢材生产的能耗、锂电池生产的能耗等；使用过程中的能耗包括燃料使用等；船舶报废过程的能耗包括报废处理等。

由于三种船型的船舶年航行里程均不相同，为

了更明确的对比，分别计算了三种船型不同动力系统的单位公里能耗和排放量，如图4.2。

从动力系统分类来看，不同船型的混合动力船舶和纯电动船舶的单位能耗和单位排放均低于燃油船舶，相比于混合动力船舶，使用纯电力作为推动系统的船舶的环境效益更高。除此之外，与传统油轮相比，随着油价的上升以及人们环保意识的提升，电动船舶的竞争优势也越来越明显；综上所述，混合动力船舶以及纯电动船舶的发展前景越来越广阔，其不仅减少能耗，还在保护环境上占有绝对的优势。

图4.2 内河集装箱船舶单位能耗与排放量对比图**（单位：**kg **/**km）

Fig.4.2 Comparison of energy consumption and emissions per unit for inland river container ships(unit: kg /km)

当电池回收按照50%时，不同动力系统的船舶单位能耗和排放对比中，纯电动船舶的环境效益依旧最好。除此之外，随着电池回收处理技术的不断成熟，电池资源循环再生效率会更高，若船用电池在报废阶段的回收再生效率不断提高，则在电动船全生命周期中的能耗和排放又将减少一部分，环境效益优势也会更加明显。

# 5 结论

随着节能、环保要求的提高，内河集装箱船舶的优势正在凸显。内河集装箱船舶能够较为充分地发挥水运优势，高协作、高效率、高效益，可与沿海及远洋联通，便于形成江海联运和多式联运体系，环保效益较散货船更为显著，随着内河集装箱港口、航道建设和各类内河集装箱船、江海直达船舶等船型的完善，内河集装箱运输未来发展前景向好。

内河电动集装箱船舶推进方式简单，推进效率高，采用电池作为动力来源后，船舶仓储容量得到改善，能够有效提高船舶的运载能力。本文研究结果表明，内河电动集装箱船舶环境节能优势显著。不同船型的混合动力船舶和纯电动船舶的单位能耗和单位排放均低于燃油船舶；相比混合动力船舶，使用纯电力作为推动系统的船舶的环境效益更高。在船舶单位能耗和排放对比中，纯电动船舶的环境效益明显优于燃油船舶。

此外，研究结果表明，内河电动集装箱船舶综合成本优势明显。电动船在百公里综合成本的优势明显优于柴油动力船舶和天然气船舶。其中，电动船舶百公里综合成本为3272元/百公里，柴油动力船舶为4320元/百公里。燃油船15年总成本为1678.4万元，电动船15年总成本为2746.2万元，电动船成本比燃油船高1067.8万元，其原因主要由于电动船的电池及电力推进相关设备初期投入资金较大，使得电动船总成本高于燃油船。随着电池成本逐步下降，电动船成本将会进一步降低，相对燃油船舶的成本优势将会进一步显现。

参考文献：

1. International Maritime Organization. Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020[R]. 2020.
2. de Barros B R C, de Carvalho E B, Junior A C P B. Inland waterway transport and the 2030 agenda: Taxonomy of sustainability issues[J]. Cleaner Engineering and Technology, 2022: 100462.
3. 李虎.交通行业碳达峰愿景下电动船舶的发展[J].船舶工程,2022,44(11):76-78+161.DOI:10.13788/j.cnki.cbgc.2022.11.12.
4. A. Fan, J. Wang, J. He, M. Perčić, N. Vladimir, L. Yang.Decarbonising inland ship power system: alternative solution and assessment method.Energy, 226 (2021), p. 120266.
5. Ammar N R, Seddiek I S. Eco-environmental analysis of ship emission control methods: Case study RO-RO cargo vessel[J]. Ocean Engineering, 2017, 137: 166-173.
6. Bilgili L. Comparative assessment of alternative marine fuels in life cycle perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 144: 110985.
7. 潘妍君.浅谈内河船舶电气设计中的成本控制[J].船舶物资与市场,2023,31(02):13-15.DOI:10.19727/j.cnki.cbwzysc.2023.02.005.
8. 杨发财,李世安,沈秋婉等.绿色航运发展趋势和燃料电池船舶的应用前景[J].船舶工程,2020,42(04):1-7.DOI:10.13788/j.cnki.cbgc.2020.04.01.
9. Ruggiero V. The future developments of Hybrid and electrical propulsion for small vessel, according to new possibilities offered by Industry 4.0[J]. Procedia Computer Science, 2022, 200: 962-968.