

太阳能货船的续航能力及其经济与环境效益



冯锐¹, 赵伟², 孙大川^{3,*}

¹ 济南大学水利与环境学院, 山东济南 250022

² 山东省环境保护科学研究设计院有限公司, 山东济南 250013

³ 山东建筑大学交通工程学院, 山东济南 250101

摘要: 目前大多数货船仍采用化石燃料, 引起噪音污染、环境污染和碳排放问题。以电能和太阳能驱动的货船逐渐出现, 是解决污染和碳排放问题的途径之一。目前对太阳能货船的续航能力及其经济与环境效益的研究极少。本文以千吨级货船为例, 研究其以纯太阳能驱动时, 以现有技术可达到的最长续航能力。该研究一方面有助于评估采用纯太阳能驱动货船的可行性; 另一方面, 为下一步的技术突破指明方向。本文提出纯太阳能驱动的货船可航行时间的计算公式, 并根据现有的太阳能平均资源和最新太阳能光电技术, 计算了以纯太阳能驱动货船时的航行时间约 4.57 h/天。由于纯太阳能无法保障 24 h 的续航能力, 因此进一步提出了“太阳能供电+岸基充电桩”双能源保障系统是目前更为可行的货船动力方案。并且认为, 普及纯太阳能货船需要的关键技术突破之一是太阳能光电转换效率的进一步提高。根据化石燃料的平均元素组成, 以及化学反应方程式进行计算, 发现采用该系统能为货船和航运业带来显著的经济和环境效益: 平均每艘千吨货船可节约燃料成本 2687 万元/年; 减少二氧化碳排放 10200 吨/年, 二氧化硫排放 63.75 吨/年, 二氧化氮排放 95.62 吨/年。与纯电动货船相比, 使用太阳能供电后, 可进一步节约电费 13.98 万元/年, 减少排放二氧化碳为 327 吨/年, 二氧化硫为 20 吨/年, 二氧化氮为 10 吨/年。根据计算结果, 发展太阳能货船有助于经济发展和环境保护, 促进绿色水上交通的发展, 值得大力推广。

关键词: 绿色水上交通; 续航能力; 太阳能货船; 经济与环境效益

DOI: 10.57237/j.jest.2022.01.004

The Endurance of Solar Cargo Ships and Its Economic and Environmental Benefits

Feng Rui¹, Zhao Wei², Sun Dachuan^{3,*}

¹School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China

²Shandong Institute of Environmental Protection Scientific Research and Design Company, Jinan 250013, China

³School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

Abstract: At present, most cargo ships still use fossil fuels, causing noise pollution, environmental pollution and carbon emission problems. The gradual emergence of cargo ships powered by electricity and solar energy is one of the

基金项目: 南浔协同创新中心重点研究项目 (SYS01001); 山东省自然科学基金项目 (ZR2022QB021).

*通信作者: 孙大川, sundc@iccas.ac.cn

收稿日期: 2022-10-26; 接受日期: 2022-12-01; 在线出版日期: 2023-01-05

<http://www.energysci-tech.org>

ways to solve the problem of pollution and carbon emissions. Very little research has been done on the endurance of solar-powered cargo ships and their economic and environmental benefits. This paper takes a thousand-ton cargo ship as an example to study the longest endurance that can be achieved with existing technology when it is driven by pure solar energy. On the one hand, this study helps to evaluate the feasibility of using pure solar energy to drive cargo ships; on the other hand, it points out the direction for the technological breakthroughs needed in the next step. This paper proposes a calculation formula for the sailing time of a cargo ship driven by pure solar energy, and calculates the sailing time of a cargo ship driven by pure solar energy to be about 4.57 h/day based on the existing average solar energy resources and the latest solar photovoltaic technology. Since pure solar energy cannot guarantee the 24-hour battery life, the dual energy guarantee system of "solar power supply + shore-based charging pile" is further proposed, which is currently a more feasible power scheme for cargo ships. One of the key technological breakthroughs needed to popularize pure solar cargo ships is the further improvement of solar photoelectric conversion efficiency. According to the calculation based on the average element composition of fossil fuels and the chemical reaction equation, it is found that the adoption of this system can bring significant economic and environmental benefits to the cargo ship and shipping industry: an average of 1,000-ton cargo ship can save fuel costs of 26.87 million yuan per year; Reduce carbon dioxide emissions by 10,200 tons/year, sulfur dioxide emissions by 63.75 tons/year, and nitrogen dioxide emissions by 95.62 tons/year. Compared with pure electric cargo ships, using solar power can further save electricity costs of 139,800 yuan/year, reduce carbon dioxide emissions by 327 tons/year, sulfur dioxide by 20 tons/year, and nitrogen dioxide by 10 tons/year. According to the calculation results, the development of solar cargo ships is conducive to economic development and environmental protection, and promotes the development of green water transportation, which is worth promoting.

Keywords: Green Water Transportation; Endurance; Solar Cargo Ship; Economic and Environmental Benefits

1 引言

我国（中国）力争 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和。为实现双碳目标和保护环境，近几年我国开始对货船进行“油改电”并加装岸基充电桩[1-3]。目前我国仍然以燃烧煤炭为主的火力发电，这些电站本身就是碳排放大户，因此需要改变我国能源结构，大力发展清洁能源[4]。如果对货船进行太阳能改造，不仅可以节约电费运营成本，提高经济效益，而且可以减少对火力发电的依赖，降低电厂排放的二氧化碳及环境污染物[5]。因此，对货船进行太阳能改造，实现自供能和零排放，可以带来巨大的经济和环境效益。

建设生态文明是中华民族永久发展的千年大计。为保护环境和降低成本，目前已有充电货船在我国的长江航道等地进行试运行[2, 4, 5]，但是对于太阳能货船还没有进入实用阶段[4, 5]。采用纯太阳能驱动，一个首要的问题是货船是否可以 24 h 连续续航以及具体的续航时间的计算。另一个问题是采用纯太阳能改造后会带来多少经济上运营成本的降低，以及环境效益如何。目前为止，这些问题都很少有人研究和解答。

本文试图根据现有文献报道的数据和理论知识，对这些问题进行解答，从而为货船的太阳能改造提供理论指导。

本文提出了采用纯太阳能驱动货船时，续航时间的计算公式。并以千吨级货船为例，计算了纯太阳能驱动的电动货船的续航时间。发现仅靠太阳能供电时续航时间太短。因此提出了“太阳能供电+岸基充电桩”电源保障系统，为货船的运行提供保障。用岸上的电网可以为船舶应急充电，特别是阴雨天气等太阳能供应不足的时候。通过岸边的充电桩，在船舶靠岸的时候还可以将船上多余的电能输送给岸上的电网。进一步提出采用“太阳能充电板+锂离子电池”代替传统的“化石燃料+内燃机”为货船提供动力时产生的经济和环境效益。即使和“油改电”后的纯充电船相比，太阳能电船也具有巨大的经济和环境效益。由于我国内河运输船舶超过 11.5 万艘[6]，发展太阳能货船有助于经济发展和环境保护[7]，促进绿色水上交通的发展。

2 太阳能货船的续航能力

2.1 纯太阳能驱动货船的续航时间

太阳能货船的续航时间是一个重要指标，影响其动力设计和推广应用。长江流域货船平均吨位在 2500 吨。为简单起见，以下以 1000 吨级的货船为例进行计算，并且提出纯太阳能驱动的货船可航行时间 t 的计算公式为：

$$t=(PSC)/W \tag{1}$$

式中， W 是驱动货船需要的功率（目前大多数货船采用柴油机，可以参照其功率）； P 是货船行驶地区平均每平方米的太阳能辐射量； C 是太阳能电池板的能

量转换系数； S 是货船所能安装太阳能电池板的总面积，可以参考货船的平面面积。 PSC 即为接受太阳能转为电能的大小，由此可以估算货船所需的充电电池的容量。

到达地球大气上界的太阳辐射[8]能量平均为 1367 w/m^2 ，在穿越大气层时经反射和吸收，到达地表的太阳能平均功率为 $1367 \text{ w/m}^2 \times 47\% = 642 \text{ w/m}^2$ ，在海平面上的标准峰值强度可达 1000 w/m^2 。太阳能电池技术分为硅系（单晶硅、多晶硅、非晶硅）和无机化合物（CdTe、铜铟硒、GaAs）等[9, 10]，表 1 给出了目前市场和科研领域部分太阳能电池的最大能量转换效率 [9, 10]。

表 1 太阳能电池技术、活性材料和光电转化效率

Table 1 Solar Cell Technology, Active Materials, and Photoelectric Conversion Efficiency

太阳能电池技术分类	活性材料	最大能量转换效率
硅系	单晶硅	25.0%
	多晶硅	20.4%
	非晶硅	14.6%
无机化合物	CdTe	16.7%
	铜铟硒	17.7%
	GaAs 等	39.2%~47.1%

表 2 我国各地太阳能总辐射量与年均日照时间

Table 2 Total solar radiation and annual average sunshine duration in various parts of my country

地区类别	地区	年辐射量 (MJ/m ² Y)	年辐射量 (kWh/m ² Y)	年日照时间 (h/Y)	日平均日照峰 值时间 (h)
一类地区	宁夏北部、甘肃北部、新疆南部、青海西部、西藏西部；	6680~8400	1855~2333	3200~3300	5.08~6.3
二类地区	河北西北部、山西北部、内蒙古南部、宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部；	5852~6680	1625~1855	3000~3200	4.45~5.08
三类地区	山东、河南、河北东南部、山西南部、新疆北部、吉林、辽宁、云南、陕西北部、甘肃东南部、广东南部、福建南部、江苏北部、安徽北部、台湾西南部；	5016~5852	1393~1625	2200~3000	3.8~4.45
四类地区	湖南、湖北、广西、江西、浙江、福建北部、广东北部、陕西南部、江苏南部、安徽南部、黑龙江、台湾东北部；	4190~5016	1163~1393	1400~2200	3.1~3.8
五类地区	四川、贵州	3344~4190	928~1163	1000~1400	2.5~3.1

我国处于北半球，内陆水运主要集中在长江及其周边航线，因此按照四类地区的年辐射量 1393 $\text{kWh/m}^2\text{Y}$ 来计算[8]（表 2），平均每天可以获得 3.8 kWh/m^2 的太阳能。一般 1000 吨级的货轮长度在 30~50 米，宽度在 8~12 米左右[11]，货船面积为 240~600 平方米。取中位数 420 m^2 ，则每艘千吨级货船平均每天可以获得 1596 kWh 的太阳能，每年 58.25 万 kWh 的太阳能。根据表 1，取光电转化效率比较高的 GaAs

叠层结构的太阳能电池，按照 40%的效率进行计算。经过光电转化，每艘千吨级货船平均每天可以获得 638.4 kWh 的电能，每年获得 23.3 万 kWh 的电能。对于 1000 吨的货轮，通常采用 175~350 马力的柴油机[12]，我们取货轮满载 1000 吨，正常马力 190 航行时功率为 $735 \times 190 \text{ w} = 139650 \text{ w} = 139.65 \text{ kW}$ 。因此，太阳能转化的电能可驱动货船运行 $139.65 \text{ kW} = 4.57 \text{ h/天}$ 。因此：

(1) 现有千吨级货船顶部加装太阳能板进行改造是可行的, 可驱动货船航行平均 4.57 h/天。

常规货轮的速度在 28~37 km/h 之间。因此 4.57 h 可以运行 128~169 km。大约可以从南京市运行到常州市 (144 km), 或者在南京和镇江之间往返一次 (128 km)。货船除了运输外, 还有停靠在码头的装卸货物的时间, 靠港补给或休整的时间。因此, 需要进行合理的交通规划, 以充分利用这 4.57 h/天的航行时间。

(2) 对现有的千吨级货船顶部加装太阳能板无法保证货船 24 小时的持续航行。

如果需要纯太阳能驱动且 24 h 的持续续航, 则需要货船面积扩大为现有面积的 5.25 倍, 使货船的造价大大增加, 经济上不可行。为摆脱太阳能对续航时间的限制, 保障货船在阴雨天气、夜晚等时节的持续运行, 船上需要备有储能的充电电池, 不能采用太阳能作为单一的能源来源。

2.2 太阳能电池板和岸基充电桩双能源保障系统

前面的计算表明, 现有千吨级货船进行太阳能改装后可以驱动货船航行 4.57 h/天, 但无法保证货船 24 小时的持续航行。为解决这一问题, 本文提出采用“太阳能电池板和岸基充电桩双能源保障系统”的方案。由于锂离子电池能量密度和体积密度比较高, 而且技术成熟, 后续以锂离子电池为例进行阐述。船上的充电电池既可以作为太阳能的储存单元, 也可以作为从岸基充电桩获取电能时的储存单元。因此, 在太阳能船基础上, 只需要增加一个岸基充电桩的充电接口, 无需大的改动。

通过岸边的充电桩, 可以用岸上的电网直接为船舶充电; 也可以将船上多余的电能输送给岸上的电网。随着“油改电”在我国的大力推行, 岸基充电桩的数量和普及程度也越来越高。太阳能供应在阴雨时节、冬季等供应有可能不足, 因此充分利用岸基充电桩在必要时对货船充电可以弥补太阳能的缺陷。而充分利用太阳能电池板可以降低岸基电能的消耗, 减少船舶靠岸等待充电的时间和充电费用, 降低成本并提高利润。如果货船长期不航行, 也可以在停靠的时候将太阳能转变为电能, 还可以定期将电能传送给岸上的电网。因此, 采用太阳能电池板和岸基充电桩双能源保障系统, 共同为货船提供能源是目前的最佳方案, 可

以保证货船有充足且持续的能源供应。

3 经济和环境效益分析

3.1 经济效益的计算

由于太阳能货船无需化石燃料, 因此可以节省传统货船的化石能源消耗经济成本 E

$$E=TQ \quad (2)$$

式中 T 为货船平均耗油/煤炭等化石燃料的总量; Q 为油/煤炭等化石燃料的价格。耗油量由于受很多因素的影响而变动范围较大, 约 300~4000 吨/年[13, 14]。按照千吨级货船平均耗油 3187.5 吨/年计算[14], 参考目前的柴油价格 8.43 元/L, 每艘千吨货船可节约燃料成本 2687 万元/年, 相当于每天节省 7.36 万元, 具有可观的经济效益。

与普通的纯电动货船相比, 加装太阳能电池板可以将太阳能转变为电能, 从而使千吨级货船每年节约电费 F :

$$F=PSCY \quad (3)$$

式中 Y 为电费价格, 按照电费 0.6 元/kWh 的价格计算; 其他量的物理含义参考前面的描述。前面计算了每艘千吨级货船平均每年可以从太阳能电池板获得 23.3 万 kWh 的电能, 据此可以算出年均节约电能 13.98 万元/年, 相当于每天节约 383 元的电能, 每月节约 1.17 万元, 经济效益也非常可观。改造后可以为货船提供蓬勃的电力, 能够支撑数智交通所需要的各种电器件和传感设备, 助力数智交通的发展。

3.2 环境效益的计算

发展太阳能货船有助于消除大气污染、水体污染和噪音污染, 带来显著的环境效益。传统航运会给水环境、大气环境、区域环境造成较大影响。据报道全球远洋船舶每年排放的 SO_2 总量约占人为排放源的 8.1%, 排放的 NO_x 总量约占全球 NO_x 排放总量的 15.2%, 船舶排放的废气已成为大气污染的重要来源之一[5, 7]。内河船舶排放占比惊人, 其中 SO_2 占比约为 94%, 颗粒物和 NO_x 占比约为 75%[4]。现有运输船舶大都属于以柴油为燃料的货船, 并且数量庞大, 这些货船排放的废气总和更是难以估量。

截止到 2020 年底我国各类运输船舶中数量占比最

大的是内河运输船舶，达到 11.5 万艘[6]。2019 年我国船舶排放碳氢化合物达到 8.613 万吨，氮氧化物 139.1106 万吨，颗粒物 5.808 万吨[15]，而如果采用纯电力驱动，那么这些数字将会趋近于 0，不仅符合绿色发展的目标，也将为我国“双碳”计划做出不可估量的贡献。

化石燃料的主要元素是碳，还含有少量的硫、氮

和微量金属元素等[16]。燃烧后排放 CO₂、SO₂、NO_x 和 PM2.5 等颗粒物。假定化石燃料燃烧后，碳(12 g/mol)主要形成 CO₂(44 g/mol)，硫(32 g/mol)和氮(14 g/mol)分别形成 SO₂ (64 g/mol) 和 NO₂ (46 g/mol)。根据元素守恒定律，则 1 吨化石燃料燃烧会释放污染物质量[16]可以根据表 3 和以下公式计算：

表 3 常见的化石燃料所含元素的质量分布

Table 3 Mass distribution of elements in common fossil fuels

化石燃料	C	H	S	N	其他
柴油	86.26%	13.14%	0.5%~1.5%	0.02%~2%	-
煤炭	84%~88%	1%~6%	0.1%~10%	0.5%~3%	-
石油	83%~87%	11%~14%	0.06%~8%	0.02%-1.7%	-

$$Z_{CO_2}=(R_C M_{CO_2})/M_C \tag{4}$$

$$Z_{SO_2}=(R_S M_{SO_2})/M_S \tag{5}$$

$$Z_{NO_2}=(R_N M_{NO_2})/M_N \tag{6}$$

的质量分数，M_C 是该元素的摩尔质量，M_{CO₂} 是该元素燃烧形成的产物的摩尔质量。以 1 吨柴油为例，燃烧后约释放 CO₂ 为 3.16 吨，SO₂ 为 0.02 吨，NO₂ 为 0.03 吨，如表 4 所示。

其中，以碳元素为例，Z_{CO₂} 是排放质量，R_C 是碳

表 4 一吨化石燃料燃烧后释放的部分产物质量（单位：吨）

Table 4 Partial mass of products released after burning one ton of fossil fuels (unit: ton)

化石燃料	二氧化碳（CO ₂ ）	二氧化硫（SO ₂ ）	二氧化氮（NO ₂ ）
柴油	3.16	0.01~0.03	0.0007~0.07
煤炭	3.08~3.27	0.002~0.2	0.016~0.10
石油	3.04~3.19	0.001~0.16	0.0007~0.056

因此，按照千吨级货船全年平均耗油 3187.5 吨计算，采用油改电后，千吨货船每年减少排放 CO₂ 为 10200 吨/年，SO₂ 为 63.75 吨/年，NO₂ 为 95.62 吨/年，消除了对大气的污染，以及不完全燃烧时释放的碳氢化合物（苯并芘等）对水体的污染，并且太阳能货船运行噪音极低，因此会带来显著的环境效益。

火力发电所使用的煤占工业用煤的 50% 以上[17]，全国约 90% 的 SO₂ 和 80% 的 CO₂ 排放量由煤燃烧排放。煤的热值[16]为 3×10⁷J/kg，一般火力发电机组转换效率在 35%~40%，输电线路加配电线路的传输效率大约是 70%~90%[17]。1 kg 的煤完全燃烧释放的内能转化为货船可用的电能约为 2.33 kWh。如果采用太阳能直接为货船供电，代替从火力发电站获取电能。按照前面的计算结果，每艘千吨级货船平均每年从太阳能电池板获得 23.3 万 kWh 的电能，相当于节约了 100 吨标准煤。按照表 4 给出的煤炭燃烧排放的产物计算，相当于减少排放：CO₂ 为 327 吨/年，SO₂ 为 20 吨/年，NO₂ 为 10 吨/年，可进一步消除环境污染。

4 结论

本文提出了计算太阳能货船续航时间的计算公式 $t=(PSC)/W$ ，据此计算了千吨级货船的续航时间约 4.57 h/天，续航里程约 128~169 km。由于对现有的千吨级货船加装太阳能板无法保证 24 小时持续航行，本文提出需要采用太阳能电池板和岸基充电桩双能源保障系统，以保证货船有充足且持续的能源供应，扩大货船的续航能力和活动范围。进一步计算了“油改电”取代传统的“化石燃料+内燃机”带来的经济和环境效益，平均每艘千吨级货船可节约燃料成本 2687 万元/年；减少 CO₂ 排放 10200 吨/年，SO₂ 排放 63.75 吨/年，NO₂ 排放 95.62 吨/年。与纯电动货船相比，使用太阳能供电也有显著的经济和环境效益：能够进一步节约电费 13.98 万元/年，减少排放 CO₂ 为 327 吨/年，SO₂ 为 20 吨/年，NO₂ 为 10 吨/年。发展太阳能货船有助于我国的经济发展和环境保护，促进绿色水上交通的发展。

参考文献

- [1] 杨喜顺. 新能源在船舶中的应用研究 [J]. 船舶物资与市场, 2019, (12): 85-86.
- [2] 陶海平. 百花湖水域客船“油改电”应用技术研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2019, 19 (09): 101-102.
- [3] 高洁, 包虹璐, 陈玲. 纯电动船充电方式的研究 [J]. 船舶, 2018, 29(S1): 151-156.
- [4] 宋婕. 内河船舶大气污染现状及防治对策探析 [J]. 危防管理, 2016, 101-106.
- [5] 张杰, 张德林, 李光正. 实现内河航运绿色发展路径探讨——以小清河为例 [J]. 中国水运, 2021, 07: 130-132.
- [6] 中华人民共和国交通运输部. 2020 年交通运输行业发展统计公报 [EB]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2021.
- [7] 卢志刚, 洪文俊, 郑静珍. 我国船舶尾气污染物排放现状与对策 [J]. 绿色科技, 2018, 2: 53-54.
- [8] 谭清华, 刘玉洁, 宋献方, 等. 中国太阳辐射时空变化及不同时间尺度 Ångström-Prescott 模型校正参数适用性比较[J]. 资源科学, 2022, 44 (02): 287-298.
- [9] GEISZ J F, FRANCE R M, SCHULTE K L et al. Six-junction III-V Solar Cells With 47.1% Conversion Efficiency Under 143 Suns Concentration[J]. Nature Energy. 2020, 5: 326-335.
- [10] 伍赛特. 太阳能船关键技术研究及展望 [J]. 交通行业节能, 2020, 21 (5): 21-24.
- [11] 刘勇南, 车进胜, 覃益官. 关于北江中游 1000 吨级航道设计代表船型选取的探讨 [J]. 珠江水运, 2012, (08): 58-61.
- [12] 毕修颖, 祝鸿, 李贝贝. 茂名港水东港区船舶拖船配备核算 [J]. 航海技术, 2020, (04): 13-17.
- [13] 王在忠, 张跃文, 孙培廷. 内河船用中速柴油机油耗率模型的建立 [J]. 中国航海, 2015, 38 (02): 34-86.
- [14] 中国江苏网. 全国首条京杭运河千吨级纯电动运输船即将从常州出发 [EB/OL]. [2018-12-05]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1618977300634497845&wfr=spider&for=pc>.
- [15] 交通运输部, 2020 年交通运输行业发展统计公报 [J]. 交通财会, 2021, 407: 92-97.
- [16] 徐甲强, 邢彦军, 周义锋. 工程化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 144-145.
- [17] 傅志寰, 胡思继, 武旭. 运煤输电对比研究 [J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2015, 7 (03): 209-217.

作者简介

冯锐

1988 年生, 博士, 讲师/中级, 研究方向: 环境科学与工程材料.

E-mail: ruifeng_ujn@163.com

赵伟

1987 年生, 研究生, 工程师, 研究方向: 水污染及大气污染治理等环境工程工作.

E-mail: sdhkyzhaowei@163.com

孙大川

1984 年生, 博士, 讲师/中级, 研究方向: 为交通工程.

E-mail: sundc@iccas.ac.cn