



船舶氢电混合动力系统建模与全生命周期碳排放评价

褚玥 陈俐 管聪

Ship hydrogen-electric hybrid power system model and life cycle carbon emission assessment method

CHU Yue, CHEN Li, GUAN Cong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03354>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

破冰船柴电混合动力系统优化设计及敏感性分析

Optimization design and sensitivity analysis of diesel/battery hybrid propulsion system for polar icebreaker

中国舰船研究. 2021, 16(5): 127-136 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02260>

基于数字孪生的舰船蒸汽动力总体模型框架研究

Analysis on the overall model framework of ship steam power based on digital twin

中国舰船研究. 2021, 16(2): 157-167 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01884>

舰船动力系统数字孪生技术体系研究

Digital twin technical system for marine power systems

中国舰船研究. 2021, 16(2): 151-156 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01858>

基于混合储能的船舶电力系统功率波动平抑控制策略

Power fluctuation control strategy of ship power system based on hybrid energy storage system

中国舰船研究. 2021, 16(4): 190-198 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02006>

营运船舶主机能效和碳排放等级评定方法

Rating and evaluation method of energy efficiency and carbon emission intensity of main propulsion diesel engines in operation ships

中国舰船研究. 2019, 14(1): 114-119 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01290>

基于实时小波变换的燃料电池混合动力船舶能量管理策略

Energy management strategies for fuel cell hybrid ships based on real-time wavelet transform

中国舰船研究. 2020, 15(2): 127-136 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01597>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03354>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 褚玥, 陈俐, 管聪. 船舶氢电混合动力系统建模与全生命周期碳排放评价 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(4): 122–130.

CHU Y, CHEN L, GUAN C. Ship hydrogen-electric hybrid power system model and life cycle carbon emission assessment method[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(4): 122–130 (in both Chinese and English).

船舶氢电混合动力系统建模与 全生命周期碳排放评价



扫码阅读全文

褚玥¹, 陈俐¹, 管聪²

1 上海交通大学 海洋工程全国重点实验室, 上海 200240

2 武汉理工大学 高性能舰船技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430063

摘要: [目的] 为全面评价氢电混合动力船舶的碳减排能力, 提出全生命周期碳排放评价方法。[方法] 首先, 基于 Matlab/Simulink 平台建立动力系统能量流模型; 然后, 计算实船营运工况下的耗氢量和耗电量, 进而得出全生命周期碳排放量; 最后, 针对不同电能来源和氢气来源, 对碳排放进行敏感性分析。[结果] 某内河渡轮的计算结果表明, 相较于传统柴油动力系统, 氢电混合动力系统在一个营运周期内可以减少 30.24% 的碳排放。敏感性分析结果表明, 氢电混合动力系统的全生命周期碳排放并非必然优于传统柴油动力系统, 故建议采用可再生能源进行制氢和发电, 以大幅降低碳排放量(最多可减少 94.2%)。[结论] 研究成果可为绿色船舶的动力系统设计提供参考。

关键词: 氢电混合动力系统; 能量流模型; 全生命周期碳排放评价

中图分类号: U676.3

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03354

Ship hydrogen-electric hybrid power system model and life cycle carbon emission assessment method

CHU Yue¹, CHEN Li¹, GUAN Cong²

1 State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2 Key Laboratory of High Performance Ship Technology of Ministry of Education in China,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Abstract: [Objectives] A life cycle carbon emission assessment method is proposed to comprehensively evaluate the carbon emission reduction capacity of hydrogen-electric hybrid ships. [Methods] First, an energy flow model of the power system is established using the Matlab/Simulink software platform. Hydrogen consumption and electricity consumption under actual operating conditions are then calculated, and the life cycle carbon emissions are obtained. Finally, sensitivity analysis is performed on carbon emissions from different power sources and hydrogen sources. [Results] The results of an inland river ferry show that compared with the traditional diesel engine power system, the hydrogen-electric hybrid system can reduce carbon emissions by 30.24% in one operation cycle. The sensitivity analysis results show that the carbon emissions of the hydrogen-electric hybrid system are not necessarily better than those of the traditional diesel power system, so it is recommended to use renewable energy for hydrogen production and power generation to significantly reduce carbon emissions (up to 94.2%). [Conclusions] The results of this study can provide references for the power system design of green ships.

Key words: hydrogen-electric hybrid power system; energy flow model; life cycle carbon emission assessment

收稿日期: 2023-05-10 修回日期: 2023-10-11 网络首发时间: 2024-01-08 16:36

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFE0104600); 国家自然科学基金资助项目 (51909200); 水路交通控制全国重点实验室开放课题项目 (QZ2022-Z002)

作者简介: 褚玥, 男, 2000 年生, 硕士生。研究方向: 船舶绿色动力系统。E-mail: chu_yue@sjtu.edu.cn

陈俐, 女, 1973 年生, 博士, 教授。研究方向: 智能绿色动力系统。E-mail: li.h.chen@sjtu.edu.cn

管聪, 男, 1987 年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶动力系统建模与仿真。E-mail: guancong2008@126.com

*通信作者: 陈俐

0 引 言

在全球变暖的大背景下,减少二氧化碳排放已成为国际社会的共识。作为重要的交通运输工具,船舶主要采用柴油机动力,其碳排放强度高、减排压力大。2018 年,国际海事组织提出了全球首个航运业温室气体减排初步战略,与 2008 年相比,计划到 2030 年碳排放强度降低 40%,到 2050 年降低 70%^[1]。尔后,中国“双碳”战略^[2]、欧盟“减碳 55”^[3]、美国“清洁未来法案”^[4]等政策相继发布,对水运实施了日益严格的排放限制,为此零碳技术引起了船舶业的广泛关注。

船舶氢电混合动力系统由氢燃料电池、锂电池及电力电子和传动装置组成,充分发挥了氢燃料能量密度大和锂电池响应速度快的优点,可以满足复杂工况下的长续航和负载波动适应性要求^[5]。氢燃料电池和锂电池在工作时既不产生氮化物、硫化物等污染气体,也不排放二氧化碳,故具有零碳排放的显著优势。近年来,大容量锂电池在内河运输船、游船等得以推广应用^[6],例如,2018 年全球首艘 2 000 t 级电池动力运输船“河豚”号下水,采用了 2.4 MWh 锂电池,但其续航里程仅 80 km^[7]。2022 年,“长江三峡 2”号电池动力船交付^[8],其配置 7.5 MWh 锂电池,充电需 6 h,续航仅 100 km。锂电池动力船舶因其续航里程较短、充电时间长,且部分港口不具备快速充电设施^[9]而应用受限,而氢电混合动力则可以克服锂电池的缺陷。2021 年,挪威 Norled 公司建造了首艘氢电力渡轮 MF Hydra 号,采用 400 kW 氢燃料电池和 1.5 MWh 锂电池,可容纳 299 名乘客和 80 辆汽车^[10];同年,大连海事大学研发的“蠡湖”号游艇采用了 70 kW 氢燃料电池和 86 kWh 锂电池,续航可达 180 km^[11]。

虽然氢电混合动力船舶在航行过程中实现了零排放,但氢燃料在生产、营运至报废过程中仍会产生碳排放,其中氢在制备、储存、运输等环节产生的碳排放占比最大^[12];同时,锂电池中存储的电能在发电过程中也会产生碳排放,而且以煤发电的碳排放强度高于以油发电^[13]。因此,为了全面评价氢电混合动力系统的碳减排潜力,有必要开展全生命周期分析(life cycle analysis, LCA)。Chen 等^[12]对氢燃料电池动力拖轮开展了 LCA,发现其在全生命周期内比柴油机动力系统减少了 48 552 160 kg 碳排放。Wang 等^[14]采用 LCA 方法对内河渡轮开展了研究,结果表明,采用锂电池动力比柴油动力减少了 30% 的碳排放。Perčić 等^[15]分析了采用锂电池动力的客滚船,发现相较于柴油机动力,其

全生命周期的碳排放得以显著降低。Ye 等^[16]研究了氢氨复合动力系统, LCA 结果表明,其比柴油动力系统最多可减少 91% 的碳排放。与上述动力系统有所不同,氢电混合动力制氢与发电均来源丰富,其可来自风、光等可再生能源,也可来自煤、石油等不可再生能源,故其产生的碳排放各异^[17];同时,在动态航行工况下,氢燃料电池、锂电池等动力装置的运行效率处于动态变化状态,其能耗和碳排放也会相应变化,所以氢电混合动力系统的 LCA 尚待深入研究。

基于此,本文拟提出基于动态工况的能量流模型,进而开展氢电混合动力系统 LCA。以某内河渡轮为案例,针对其氢电混合的新型动力系统设计方案,以动态工况下船舶航速、阻力为输入,按照能量流传递路径以及各部件的运行效率来计算耗氢量和耗电量,进而得出不同制氢、发电方式下产生的碳排放,据此分析全生命周期内的碳排放变化规律,最终提出氢电混合动力系统相对于传统柴油机动力系统碳排放减少的条件。

1 动力系统能量流模型

氢电混合动力系统架构如图 1 所示,其中:蓝色细线表示电力连接,蓝色粗线表示电力母线,黑色连线表示机械连接;电力母线左侧为供能端,由锂电池组、氢燃料电池以及岸泊充电设备组成;电力母线右侧为负载端,由推进电机、螺旋桨、生活负载以及操作负载组成。

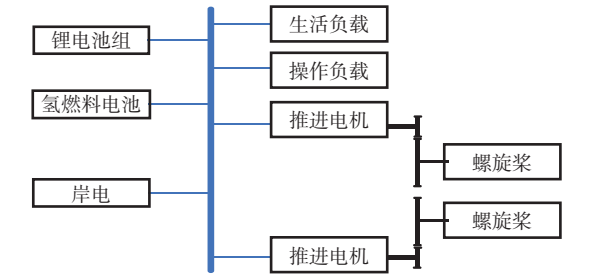


图 1 氢电混合动力系统架构
Fig. 1 Architecture of hydrogen-electric hybrid powertrain

以航速为输入,建立氢电混合动力系统的后向仿真模型,信息流如图 2 所示。首先,根据船舶纵向动力学计算需求驱动力 T_p ,并计算螺旋桨扭矩 Q_p 和转速 n_p 、推进电机的输出扭矩 T_M 、转速 ω_M 和输出功率 $P_{M,out}$;然后,计算推进电机所需的输入功率 $P_{M,in}$,即由船舶操作负载功率 P_{ope} 、生活负载功率 P_{hol} 组成的总需求功率;最后,基于能量管理策略在氢燃料电池功率 P_{FC} 与锂电池功率 P_{BAT} 之间进行分配,以满足总需求功率。

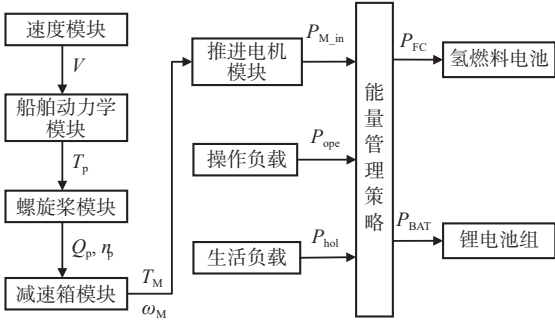


图 2 氢电混合动力系统的后向仿真模块

Fig. 2 Backward simulation framework for hydrogen-electric hybrid powertrain

1) 氢燃料电池模型。

假设氢燃料电池的内部气体均匀分布、温度均布、气压均布。氢燃料电池单体的理想电压为 1.229 V, 考虑气体温度、压力以及负载等因素带来的损失, 氢燃料电池单体的输出电压可表示为^[18]

$$E_{fc} = E_{Nernst} - E_{act} - E_{ohm} - E_{co} \quad (1)$$

式中: E_{fc} 为氢燃料电池的输出电压; E_{Nernst} 为能斯特热力学电压; E_{act} 为氢燃料电池的活化极化电压损失; E_{ohm} 为氢燃料电池欧姆极化电压损失; E_{co} 为氢燃料电池浓度极化电压损失。

其中:

$$E_{Nernst} = 1.229 - (8.5 \times 10^{-4})(T - 298.15) + (4.308 \times 10^{-5})T(\ln p_{H_2} + 1/2 \ln p_{O_2}) \quad (2)$$

$$E_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T[\ln(c_{O_2})] + \xi_4 T[\ln(i)] \quad (3)$$

$$E_{ohm} = i r_M l / A \quad (4)$$

$$E_{co} = -RT \ln(1 - i/i_L) / nF \quad (5)$$

以上式中: T 为氢燃料电池的绝对温度; p_{H_2} , p_{O_2} 分别为阳极、阴极催化剂表面氢气的实际压力; $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ 为半经验参数^[19]; c_{O_2} 为阴极处的氧气浓度; i 为电流; r_M 为交换膜的比电阻率; l 为交换膜厚度; A 为活化区域面积; R 为气体常数; i_L 为限制电流密度; n 为电子计量数; F 为法拉第常数。

单体氢燃料电池的功率 P_{fc} 为

$$P_{fc} = E_{fc} i \quad (6)$$

本文假设各燃料电池单体的输出特性相同, 即单体与电池组的内部状态相同。由 40 个氢燃料电池单元并联构成一个氢燃料电池包, 由 n_{fc} 个氢燃料电池包组成总体燃料电池组, 则总体燃料电池组的输出功率 P_{FC} 为

$$P_{FC} = 40 n_{fc} P_{fc} \quad (7)$$

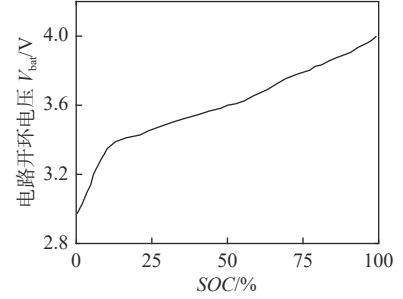
2) 锂电池模型。

锂电池的开路电压和内阻均为荷电状态 (state of charge, SOC) 的函数, 根据锂电池 R_{int} 模型 (内阻模型) 等效电路^[20], 电流 I_{bat} 为

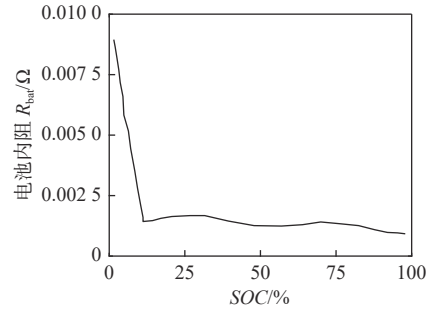
$$I_{bat} = \left(V_{bat} - \sqrt{V_{bat}^2 - 4R_{bat}P_{bat}} \right) / 2R_{bat} \quad (8)$$

式中: V_{bat} 为开路电压; R_{bat} 为电池内阻; P_{bat} 为单体锂电池的功率。

本文以 SAFTVL41M 型锂电池单体为例^[21], V_{bat} 与 R_{bat} 随荷电状态 SOC 的变化规律如图 3 所示。



(a) 电池开路电压



(b) 电池内阻

图 3 电池参数曲线

Fig. 3 Battery parameters curves

根据安时积分法^[22], 电流 I_{bat} 与荷电状态 SOC 之间的关系为

$$SOC = SOC_0 - \int I_{bat} \eta_{coln} / Q_{bat} \quad (9)$$

式中: SOC_0 为初始荷电状态; η_{coln} 为库伦效率; Q_{bat} 为单体锂电池的容量。

根据式(8)和式(9), 考虑充电和放电 2 种状态, 则单体锂电池的功率 P_{bat} 为

$$P_{bat} = \begin{cases} V_{bat} I_{bat} - I_{bat}^2 R_{bat} & \text{当 } I_{bat} > 0, \text{ 电池放电} \\ |V_{bat} I_{bat}| + I_{bat}^2 R_{bat} & \text{当 } I_{bat} < 0, \text{ 电池充电} \end{cases} \quad (10)$$

锂电池组的输出功率 P_{BAT} 为

$$P_{BAT} = n_{bat} n_{pack} P_{bat} \quad (11)$$

式中: n_{bat} 为锂电池包的数量; n_{pack} 为每个锂电池包中的锂电池数量。

3) 推进电机模型。

图 1 所示的氢电混合动力系统架构为双机双桨, 假设 2 个推进电机的特性相同, 推进电机将电能

转化为机械能,则每个推进电机的数学模型为

$$P_{M_out} = T_M \omega_M$$

(12)

$$P_{M_in} = P_{M_out} / \eta$$

(13)

式中: P_{M_out} , P_{M_in} 分别为推进电机的输出功率和输入功率; T_M 为输出扭矩; ω_M 为转速; η 为电机效率。

4) 减速箱模型。

减速箱用于连接推进电机与螺旋桨。假设 2 个减速箱相同,每个减速箱的数学模型为

$$\omega_M = 2\pi i_{GB} n_p$$

(14)

$$T_M = Q_p / i_{GB}$$

(15)

式中: i_{GB} 为减速箱的传动比; n_p 为螺旋桨转速; Q_p 为螺旋桨扭矩; η_{GB} 为减速箱的传动效率。

5) 螺旋桨模型。

对于图 1 的双桨架构,假设 2 个螺旋桨均采用特性相同的固定螺距桨,则其推力为

$$T_p = K_T D_p^4 \rho_w n_p^2$$

(16)

$$Q_p = K_Q D_p^5 \rho_w n_p^2$$

(17)

式中: T_p 为螺旋桨推力; K_T 为推力系数; D_p 螺旋桨直径; ρ_w 为海水密度; K_Q 为扭矩系数。根据螺旋桨特性曲线^[23],即可得到螺旋桨的 K_T 与 K_Q 数据。

6) 船舶纵向动力学模型。

考虑船舶长距离航行工况,建立纵向动力学模型^[24]:

$$m \frac{dV}{dt} = N_p T_p (1 - t_p) - R_{total}$$

(18)

式中: m 为整船质量; V 为船舶航速; t 为时间; N_p 为螺旋桨的数量; t_p 推力减额分数; R_{total} 为船舶阻力,可按 Holtrop 法进行计算^[25],具体包括摩擦阻力、附体阻力和兴波阻力。

7) 功率平衡模型。

氢电混合动力系统的负载功率 P_{vessel} ^[26] 为

$$P_{vessel} = 2P_{M_in} + P_{ope} + P_{hol}$$

(19)

负载端与供能端需满足功率平衡,即

$$P_{vessel} = P_{FC} + P_{BAT}$$

(20)

8) 能量管理策略。

在船舶航行过程中,根据动力系统需求功率 P_{vessel} 、锂电池 SOC ,并考虑燃料电池功率限制 P_{FC_lim} 以及锂电池荷电状态 SOC_{BAT} 的上限、下限,即可制定基于规则的能量管理策略,分配氢燃料电池输出功率 P_{FC} 和锂电池输出功率 P_{BAT} ,结果如表 1 所示。考虑氢燃料电池和锂电池的寿命,设置 P_{FC_lim} 为燃料电池额定功率 P_{FC_rated} , SOC_{BAT} 的上限、下限则分别为 80% 和 20%^[27]。

表 1 氢电混合动力系统的能量管理策略

Table 1 Energy management strategy for hydrogen-electric hybrid powertrain

功率	SOC_{BAT}	氢燃料电池状态	锂电池状态
$P_{vessel} > P_{FC_lim}$	$SOC_{BAT} > 20\%$	$P_{FC} = P_{FC_lim}$	放电
$P_{vessel} > P_{FC_lim}$	$SOC_{BAT} \leq 20\%$	$P_{FC} = P_{FC_lim}$	不充电/不放电
$P_{vessel} \leq P_{FC_lim}$ 且 $P_{vessel} + P_{BAT} > P_{FC_lim}$		$P_{FC} = P_{vessel}$	不充电/不放电
$P_{vessel} \leq P_{FC_lim}$ 且 $P_{vessel} + P_{BAT} \leq P_{FC_lim}$	$SOC_{BAT} \geq 80\%$	$P_{FC} = P_{vessel}$	不充电/不放电
$P_{vessel} \leq P_{FC_lim}$ 且 $P_{vessel} + P_{BAT} \leq P_{FC_lim}$	$SOC_{BAT} < 80\%$	$P_{FC} = P_{vessel} + P_{BAT}$	充电

1) 当船舶需求功率 $P_{vessel} > P_{FC_lim}$ 且 $SOC_{BAT} > 20\%$ 时,氢燃料电池与锂电池共同驱动,氢燃料电池输出峰值功率 $P_{FC} = P_{FC_lim}$,锂电池输出功率 $P_{BAT} = P_{vessel} - P_{FC_lim}$,则 SOC_{BAT} 随之降低。

2) 当船舶需求功率 $P_{vessel} > P_{FC_lim}$ 且 $SOC_{BAT} \leq 20\%$ 时,到达 SOC_{BAT} 下限,为减少锂电池退化,氢燃料电池将单独驱动,表现为氢燃料电池的输出峰值功率 $P_{FC} = P_{FC_lim}$,则船舶降速航行。

3) 当船舶需求功率 $P_{vessel} \leq P_{FC_lim}$ 且 $P_{vessel} + P_{BAT} > P_{FC_lim}$ 时,氢燃料电池将单独驱动,即氢燃料电池输出功率 $P_{FC} = P_{vessel}$ 。

4) 当船舶需求功率 $P_{vessel} \leq P_{FC_lim}$ 且 $P_{vessel} +$

$P_{BAT} \leq P_{FC_lim}$ 时,若 $SOC_{BAT} \geq 80\%$,即到达 SOC_{BAT} 上限,氢燃料电池将单独驱动,即氢燃料电池的输出功率 $P_{FC} = P_{vessel}$;若 $SOC_{BAT} < 80\%$,氢燃料电池将利用剩余功率为锂电池充电,氢燃料电池输出功率 $P_{FC} = P_{vessel} + P_{BAT}$,即锂电池吸收功率 P_{BAT} ,则 SOC_{BAT} 随之升高。

2 全生命周期评价方法

船舶动力系统的全生命周期包括建造阶段、营运阶段、维修阶段和报废回收阶段,本文将从全生命周期的尺度针对氢电混合动力系统的碳排放进行评价。船舶动力系统全生命周期每个阶段

均会产生碳排放,还需考虑因营运阶段燃料消耗而产生的燃料供给与分配过程的碳排放。

氢电混合动力系统全生命周期的碳排放 E_H 为

$$E_H = E_{hc} + E_{ho} + E_{hm} + E_{hr}$$

(21)

式中, E_{hc} , E_{ho} , E_{hm} , E_{hr} 分别为氢电混合动力系统在建造阶段、营运阶段、维修阶段以及报废回收阶段的碳排放。

考虑耗氢量和耗电量,营运阶段的碳排放 E_{ho} 为

$$E_{ho} = \sum_{i=1}^{n=\text{life}} (m_{H_2}^i \cdot I_{H_2} + e_{li}^i \cdot I_{li})$$

(22)

式中: $m_{H_2}^i$ 为一个营运周期消耗的氢气质量, $i = 1, 2, \dots, n$, 其中 n 为全生命周期内的营运周期总数; I_{H_2} 为氢全生命周期的碳排放强度; e_{li}^i 为一个营运周期预充锂电池消耗的岸电; I_{li} 为单位耗电量的全生命周期碳排放强度。

其中:

$$I_{H_2} = \sum_{i=1}^{n=\text{life}} w_{H_2}^i \cdot I_{H_2}^i + e_{\text{store}} + e_{\text{transport}}$$

(23)

$$I_{li} = \sum_{i=1}^{n=\text{life}} w_{li}^i \cdot I_{li}^i$$

(24)

式中: $w_{H_2}^i$ 为制氢方式的权重; $I_{H_2}^i$ 为不同制氢方式的碳排放强度; e_{store} , $e_{\text{transport}}$ 分别为氢气储存、氢气运输的碳排放强度; w_{li}^i 为发电方式的权重; I_{li}^i 为不同发电方式的单位耗电量在全生命周期内的碳排放强度。

3 结果与分析

以长江渡轮“江城二号”为原型船,将其动力系统改造为氢电混合动力系统。该渡轮往返于武昌和汉阳,额定载客 800 人,具体参数如表 2 所示。该渡轮预期使用寿命为 20 年,全年营运 360 天,一个营运周期为 24 h,航速曲线如图 4(a)^[28] 所示,航速变化包含多次启动、加速、匀速、减速、停泊等过程。以该航速曲线作为能量流模型的输入,计算得到图 4(b)所示的动力系统推进功率需求。由图 4 可知,在船舶离岸启动阶段,渡轮由静止状态加速到正常航行速度,推进系统需输出较大的力矩,因此渡轮的推进功率需求也增长较快;在正常航行阶段,航速变化将引起航行阻力和推进功率的变化;在停泊阶段,船舶仅维持最低的负载需求;总体而言,推进功率需求在 200~350 kW 之间

波动,其峰值为 500 kW。

表 2 氢电混合动力船舶的参数

Table 2 Parameters of a hydrogen-electric hybrid ship

参数	数值	参数	数值
设计水线长 L_w/m	46	电池单元容量 Q_{bat}/Ah	41
船宽 B/m	10	氢燃料电池工作温度 T_{FC}/K	353
吃水 T/m	2	氢燃料电池阳极端的氢气压力 $p_{\text{H}_2}/\text{atm}$	3
螺旋桨数量 N_P	2	氢燃料电池阴极端的氧气压力 $p_{\text{O}_2}/\text{atm}$	3
螺旋桨直径 D/m	0.50	氢燃料电池活化面积 $A_{\text{FC}}/\text{cm}^2$	50
减速箱传动比 i_{GB}	5	半经验参数 ξ_1	-0.95
减速箱传动效率 η_{gear}	0.98	半经验参数 ξ_2	3.12×10^{-3}
推力减额系数 t_P	0.10	半经验参数 ξ_3	7.40×10^{-5}
库伦效率 η_{colm}	1	半经验参数 ξ_4	-1.87×10^{-4}
锂电池组额定功率 P_{BAT}/kW	200	氢燃料电池额定功率 $P_{\text{FC_rated}}/\text{kW}$	250

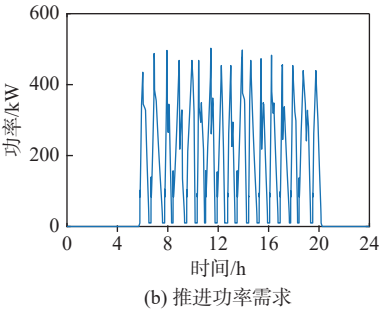
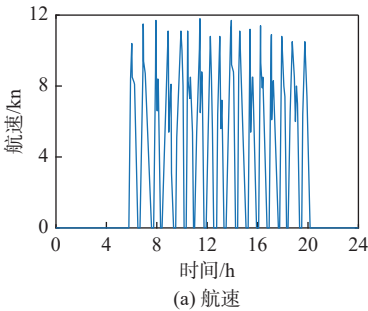


图 4 渡轮的营运航速与推进功率需求

Fig. 4 Service speed and propulsion power of a ferry

作为对比项,本文给出了柴油动力系统的全生命周期碳排放值 E_D :

$$E_D = E_{dc} + E_{do} + E_{dm} + E_{dr}$$

(25)

$$E_{do} = \sum_{i=1}^{n=\text{life}} W^i \cdot I_{\text{Oil}}/\eta_D$$

(26)

式中: E_{dc} , E_{do} , E_{dm} , E_{dr} 分别为柴油动力系统在建造阶段、营运阶段、维修阶段和报废回收阶段的碳排放,其中 E_{dc} , E_{dm} , E_{dr} 仅占柴油动力系统全生命周期碳排放的 0.1%^[12],因此可忽略该部分的碳排放; W^i 为一个营运周期消耗的能量; I_{Oil} 为柴油

全生命周期碳排放强度, 取值 $74.1 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}^{[12]}$; η_{D} 为柴油机的工作效率。

3.1 仿真结果

图 5 所示为一个营运周期动态工况的仿真结果。

在氢电混合动力系统中, 锂电池起到了“削峰填谷”的作用, 从而使船舶运行时燃料电池的输出功率相对平缓。由图 5(c)可知, 氢电混合动力系统在一个营运周期的累计耗氢量为 82.16 kg , 则全生命周期内的耗氢量为 $591\,552 \text{ kg}$ 。

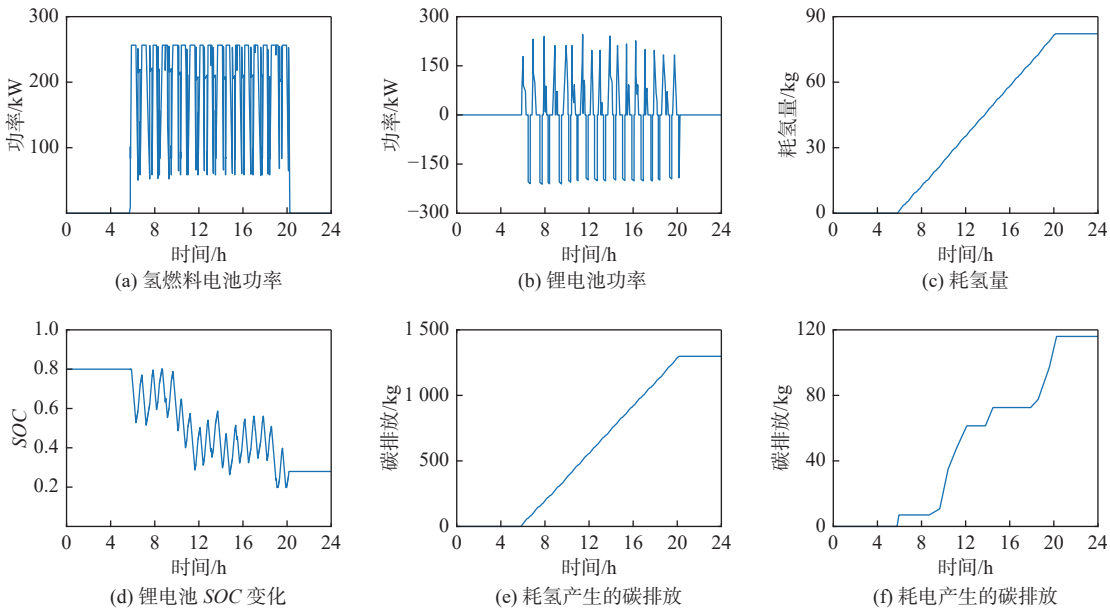


图 5 氢燃料电池与锂电池的输出特性曲线

Fig. 5 Output characteristics of hydrogen fuel cell and lithium battery

本节将利用 LCA 方法对氢电混合动力船舶进行全生命周期碳排放评价。在氢电混合动力系统全生命周期中, 建造、营运、维修以及报废回收阶段均会产生碳排放, 其中建造、维修以及报废阶段产生的碳排放低于营运阶段的 1%^[12, 14], 因此可忽略不计。本文将营运阶段分为若干个营运周期, 而每个营运周期内的碳排放来自于氢气与电量的消耗。

氢气在生产、储存和运输过程中均会产生碳排放, 考虑氢能产业现状, 本文选择了不同来源的氢。目前各制氢方式^[29]所占比重为: 煤气化 63.5%, 天然气重整 13.8%, 质子交换膜 (proton exchange membrane, PEM) 电解水制氢 1.5%, 工业副产制氢 21.2%, 不同制氢工艺产生的碳排放也有所不同^[30-31]; 制氢所得的氢气需要压缩存贮, 而压缩所需的能量为 0.9 kWh/kgH_2 ^[32]; 从制氢站到船舶的氢气运输阶段, 需要 $10\sim 15 \text{ t}$ 重货车运输 380 km , 货车的排放为 $45.67 \text{ kgCO}_2/100 \text{ km}^{[33]}$; 综上所述, 氢气全生命周期的碳排放强度约为 $15.8 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kgH}_2$ 。

当船舶靠岸时需利用岸电对锂电池组进行预充, 因此需考虑锂电池用电的碳排放量。我国电网中的电能来源日趋多元化, 各发电方式^[34]所占比重为火电 56.58%, 水电 16.82%, 风电 12.79%, 光伏

11.52%, 核电 2.27%, 因此单位耗电量的碳排放强度约为 $486.2 \text{ gCO}_{2\text{eq}}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

结合碳排放量计算模型, 即可计算氢电混合动力系统的全生命周期碳排放, 结果如图 5(e)、图 5(f)所示, 一个营运周期内耗氢产生的碳排放为 $1\,298 \text{ kg}$, 耗电产生的碳排放为 116 kg , 即氢电混合动力系统的总碳排放为 $1\,414 \text{ kg}$ 。根据碳排放量计算模型式 (25)、式 (26) 可知, 相同工况下柴油动力系统在一个营运周期内的碳排放为 $2\,027 \text{ kg}$ 。因此, 氢电混合动力系统可以减少 30.24% 的碳排放量, 全生命周期内 ($20 \text{ 年}\times 360 \text{ 天}$) 可以减少 $4\,413\,600 \text{ kg}$ 二氧化碳排放, 这说明该型渡轮在图 4 所示工况下的氢电混合动力系统比柴油动力系统更绿色低碳。

3.2 敏感性分析

本节将对对比分析氢电混合动力系统碳排放量受不同电能来源和氢气来源的碳排放强度影响的敏感程度, 结果如图 6 所示, 从全生命周期的碳排放角度而言, 氢电混合动力系统并非必然优于传统的柴油动力系统。当氢碳排放和单位耗电碳排放增加到一定程度时, 氢电混合动力系统的碳排放将恒大于柴油动力系统; 当氢碳排放强度小于 $22.1 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kgH}_2$ 时, 氢电混合动力系统的碳排放

将恒小于柴油动力系统。由图 6(b)可知,目前氢能产业可以满足该条件,当氢气碳排放强度大于 24.8 kgCO_{2eq}/kgH₂ 时,氢电混合动力系统的碳排放恒大于柴油动力系统。因此,为避免发生这种情况,应减少火电电解水制氢所占的比重。

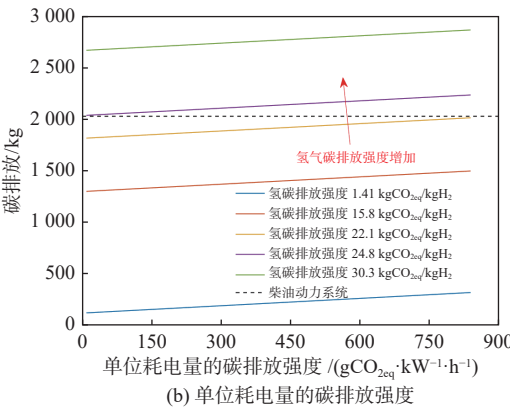
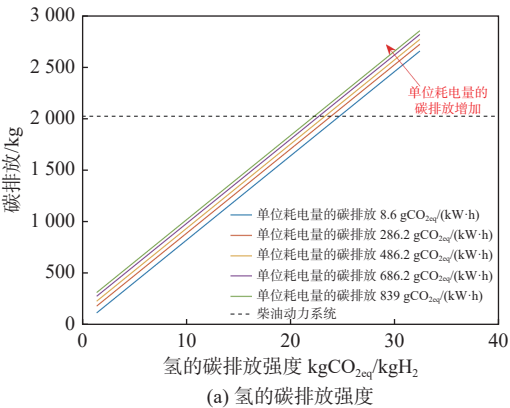


图 6 全生命周期船舶碳排放的敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of life-cycle emissions

由图 4(b)、图 5(a)和图 5(b)可知,船舶在一个营运周期的能耗为 11 740 MJ,其中氢提供了 92.6%的能量,电提供了 7.4%的能量,即船舶航行过程中氢提供了绝大部分能量,因此氢气的消耗及来源将对营运周期内的碳排放产生较大的影响。由图 6 可知,氢的碳排放强度增长 1%将使氢电混合动力系统全生命周期的碳排放增加 177 120 kg,而单位耗电量的碳排放增长 1%将使氢电混合动力系统全生命周期碳排放增加 13 824 kg,这说明氢电混合动力系统对氢气碳排放强度更为敏感,验证了氢气来源是影响氢电混合动力系统全生命周期碳排放的关键因素,因此,控制氢气来源可以更加有效地减少其全生命周期碳排放。

由式(22)、式(26)和表 3 可知,如果氢电混合动力船舶使用的电、氢均由火力发电等不可再生能源制备而得,则 will 比柴油机动力系统增加 32.4%的碳排放;而如果其电、氢均由风电、核电和水力发电等可再生能源制备而得,则 will 比柴油机动力系统最多可减少 94.2%的碳排放,如图 6 所示。

表 3 氢气与电量的全生命周期碳排放强度

Table 3 Life-cycle carbon emission intensity of hydrogen and electricity

氢气来源	全生命周期碳排放强度 (kgCO _{2eq} /kgH ₂)	电量来源	全生命周期碳排放强度 ^[9] (gCO _{2eq} ·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
网电+PEM电解槽	30.3	火电	839
煤气化制氢	21.2	气电	452
天然气重整	10.9	水电	40.6
焦炉煤气制氢	3.2	光伏	29.2
氯碱尾气制氢	2.3	核电	10.9
风电+PEM电解槽	1.4	风电	8.6

4 结 语

本文基于 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了氢电混合动力系统的能量流模型,以船舶运行工况与实船条件为依据,提出了一种氢电混合动力系统的全生命周期碳排放评价方法。根据某渡轮的仿真分析结果,在氢气、电能来源多元化的情况下,相较于柴油机动力系统,氢电混合动力系统一个营运周期内可以减少 30.24% 的碳排放,全生命周期内可以减少 4 413 600 kg 二氧化碳排放。然而,敏感性分析结果表明,氢电混合动力系统的全生命周期碳排并非必然优于传统的柴油动力系统。受制氢方式影响,如果氢的碳排放强度过高,则 will 导致碳排放超过柴油机动力系统;但如果采用可再生能源进行制氢和发电,则可大幅降低碳排放。

参考文献:

[1] Marine Environment Protection Committee. Resolution Mepc. 304(72), initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships[R]. London: MEPC, 2018.

[2] 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议 [EB/OL]. (2021-03-16)[2023-05-10] https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm?eqid=989007b80000465a000000066486cd96.

[3] President Xi Jinping presided over the ninth meeting of the Central Committee for Financial and Economic Affairs [EB/OL]. (2021-03-16)[2023-05-10] https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm?eqid=989007b80000465a000000066486cd96 (in Chinese).

[4] European Union. Fit for 55[R]. Brussels: Council of the European Union, 2021.

[5] USHouseofRepresentatives.Cleanfutureact[R].Washington, D. C: US Congress, 2021.

[6] 童亮, 袁裕鹏, 李骁, 等. 我国氢动力船舶创新发展研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 127–39.

[7] TONG L, YUAN Y P, LI X, et al. Innovative develop-

mental of hydrogen-powered ships in China[J]. [Strategic Study of CAE](#), 2022, 24(3): 127–39 (in Chinese).

[6] 李伟, 罗选斌. 锂电池在船舶应用现状及发展建议 [J]. 中国船检, 2021(3): 68–71.

LI W, LUO X B. Application status and development suggestions of lithium battery in ships[J]. *China Ship Survey*, 2021(3): 68–71 (in Chinese).

[7] 瞿小豪, 袁裕鹏, 范爱龙. 动力电池系统在运输船舶上的应用现状与展望 [J]. 船舶工程, 2019, 41(10): 98–104.

QU X H, YUAN Y P, FAN A L. Application status and prospect of power battery system on merchant ship[J]. *Ship Engineering*, 2019, 41(10): 98–104 (in Chinese).

[8] 全球最大电池容量纯电动动力船“长江三峡 1”号交付 [J]. 中国船检, 2022(4): 3.

The world's largest battery capacity pure battery power ship "Three Gorges 1 of the Yangtze River" was delivered [J]. *China Ship Survey*, 2022(4): 3 (in Chinese).

[9] KARIMI S, ZADEH M, SUUL J A. Evaluation of energy transfer efficiency for shore-to-ship fast charging systems [C]//*Proceedings of the IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Delft: IEEE, 2020.

[10] ØSTVIK I. MF Hydra—world's first LH2 driven ship and the challenges ahead towards zero-emission shipping[R]. [S. l.]: NORLED, 2021.

[11] 刘彦呈, 曾宇基, 尤石, 等. 氢燃料电池船舶直流综合电力系统研究及应用 [J]. 供用电, 2022, 39(1): 8–16, 46.

LIU Y C, ZENG Y J, YOU S, et al. Research and application of hydrogen fuel cell ship DC integrated power system [J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(1): 8–16, 46 (in Chinese).

[12] CHEN Z S, LAM J S L. Life cycle assessment of diesel and hydrogen power systems in tugboats[J]. [Transportation Research Part D: Transport and Environment](#), 2022, 103: 103192.

[13] SHAN Y L, GUAN D B, ZHENG H R, et al. China CO₂ emission accounts 1997-2015[J]. [Scientific Data](#), 2018, 5(1): 170201.

[14] WANG H B, BOULOUGOURIS E, THEOTOKATOS G, et al. Life cycle analysis and cost assessment of a battery powered ferry[J]. [Ocean Engineering](#), 2021, 241: 110029.

[15] PERČIĆ M, FRKOVIĆ L, PUKŠEC T, et al. Life-cycle assessment and life-cycle cost assessment of power batteries for all-electric vessels for short-sea navigation[J]. [Energy](#), 2022, 251: 123895.

[16] YE M N, SHARP P, BRANDON N, et al. System-level comparison of ammonia, compressed and liquid hydrogen as fuels for polymer electrolyte fuel cell powered shipping[J]. [International Journal of Hydrogen Energy](#), 2022, 47(13): 8565–8584.

[17] 左逢源, 张玉琼, 赵强, 等. 计及源荷不确定性的综合能源生产单元运行调度与容量配置两阶段随机优化 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8205–8215.

ZUO F Y, ZHANG Y Q, ZHAO Q, et al. Two-stage stochastic optimization for operation scheduling and capacity allocation of integrated energy production unit considering supply and demand uncertainty[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(22): 8205–8215 (in Chinese).

[18] 彭湃, 程汉湘, 陈杏灿, 等. 质子交换膜燃料电池的数学模型及其仿真研究 [J]. 电源技术, 2017, 41(3): 399–402.

PENG P, CHENG H X, CHEN X C, et al. Mathematical model and simulation study of proton exchange membrane fuel cells[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2017, 41(3): 399–402 (in Chinese).

[19] MANN R F, AMPHLETT J C, HOOPER M A I, et al. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2000, 86(1/2): 173–180.

[20] XU L F, MUELLER C D, LI J Q, et al. Multi-objective component sizing based on optimal energy management strategy of fuel cell electric vehicles[J]. [Applied Energy](#), 2015, 157: 664–674.

[21] 朱剑钧. 基于双层耦合的混合动力推进系统优化研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2021.

ZHU J Y. A study on the optimization of hybrid electric propulsion system by using Bi-level method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021 (in Chinese).

[22] 李哲, 卢兰光, 欧阳明高. 提高安时积分法估算电池 SOC 精度的方法比较 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2010, 50(8): 1293–1296, 1301.

LI Z, LU L G, OUYANG M G. Comparison of methods for improving SOC estimation accuracy through an ampere-hour integration approach[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010, 50(8): 1293–1296, 1301 (in Chinese).

[23] 徐家润. 不同航行条件的船舶操纵对推进系统性能影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.

XU J R. Research on the influence of ship maneuvering under different navigation conditions on the performance of propulsion system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020 (in Chinese).

[24] 盛振邦. 船舶原理 [M]. 2 版. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.

SHENG Z B. *Theoretical naval architecture*[M]. 2nd ed. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2017 (in Chinese).

[25] HOLTROP J, MENNEN G G J. An approximate power prediction method[J]. [International Shipbuilding Progress](#),

- 1982, 29(335): 166–170.
- [26] 周寅正, 陈俐. 基于模型预测控制的双机组混合动力船舶能量管理研究 [J]. 中国舰船研究, 2023. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.03104.
- ZHOU Y Z, CHEN L. Research on energy management of dual-diesel generator sets hybrid power ships based on model predictive control[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.03104.
- [27] 杜文龙, 郭凤祥, 陈俐. 破冰船柴电混合动力系统优化设计及敏感性分析 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 127–136.
- DU W L, GUO F X, CHEN L. Optimization design and sensitivity analysis of diesel/battery hybrid propulsion system for polar icebreaker[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(5): 127–136 (in Chinese).
- [28] Jiangcheng2hao[EB/OL]. [2023-05-10]. <https://www.shipxy.com/>.
- [29] 中商产业研究院. 2022 年“十四五”中国氢能行业市场前景预测及投资研究报告 [R]. [S.l.]: 中商产业研究院, 2021.
- China Research Institute of Commerce and Industry. Market outlook forecast and investment research report of China's hydrogen energy industry during the 14th Five-Year plan period of 2022[R]. [S.l.]: China Research Institute of Commerce and Industry, 2021 (in Chinese).
- [30] 王彦哲, 周胜, 周湘文, 等. 中国不同制氢方式的成本分析 [J]. 中国能源, 2021, 43(5): 29–37.
- WANG Y Z, ZHOU S, ZHOU X W, et al. Cost analysis of different hydrogen production methods in China[J]. Energy of China, 2021, 43(5): 29–37 (in Chinese).
- [31] 陈健, 姬存民, 卜令兵. 碳中和背景下工业副产气制氢技术研究与应用 [J]. 化工进展, 2022, 41(3): 1479–1486.
- CHEN J, JI C M, BU L B. Research and application of hydrogen production technology from industrial by-product gas under the background of carbon neutrality[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(3): 1479–1486 (in Chinese).
- [32] RÖDL A, WULF C, KALTSCHMITT M. Chapter 3 - Assessment of selected hydrogen supply chains—factors determining the overall GHG emissions[M/OL]//AZZARO-PANTEL C. Hydrogen supply chains. [S.l.]: Academic Press, 2018: 81–109[2023-05-10]. <https://www.science-direct.com/book/9780128111970/hydrogen-supply-chains>.
- [33] 余大立, 张洪申. 纯电动与柴油货车全生命周期能耗及排放分析 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(6): 2043–2052.
- YU D L, ZHANG H S. The life cycle analysis of energy consumption and emission of pure electric van and diesel van[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(6): 2043–2052 (in Chinese).
- [34] 闫妮, 戎虎仁, 王思敏, 等. 电力能源结构及水力发电建设趋势综述 [J]. 电力学报, 2022, 37(4): 295–301.
- YAN N, RONG H R, WANG S M, et al. Overview of energy structure and hydropower construction trends[J]. Journal of Electric Power, 2022, 37(4): 295–301 (in Chinese).
- [35] 王彦哲, 周胜, 王宇, 等. 中国核电和其他电力技术环境影响综合评价 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2021, 61(4): 377–384.
- WANG Y Z, ZHOU S, WANG Y, et al. Comprehensive assessment of the environmental impact of China's nuclear and other power generation technologies[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(4): 377–384 (in Chinese).