

DOI: 10.19666/j.rlfed.202304382

# 基于 AHP-EWM 的甲醇与传统锅炉燃料 对比分析

吴 杨<sup>1</sup>, 刘海玉<sup>1</sup>, 寇梦楠<sup>1</sup>, 牛俊天<sup>1</sup>, 朱建军<sup>2</sup>, 金 燕<sup>1</sup>, 樊保国<sup>1</sup>

(1.太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024;

2.太原理工大学机械与运载工程学院, 山西 太原 030024)

[摘 要] 在“双碳”目标背景下, 环保要求日益严格, 甲醇作为公认的高效清洁低碳燃料越来越受到重视。为分析甲醇用于锅炉燃料的可行性, 建立了甲醇、煤、柴油、天然气作为锅炉燃料的综合性评价模型, 通过层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP)、熵权法 (entropy weight method, EWM), 考虑节能性、环保性、经济性以及社会性 4 个指标, 在各指标重要程度不同的 5 种情景下进行综合评价, 得出以下结论: 甲醇的节能性优于其他燃料, 环保性及经济性与天然气相当, 社会性方面仅次于煤, 是柴油 3.2 倍、天然气的 2.2 倍; 在重要性方面, 环境因素第一, 经济因素与节能因素其次, 社会因素重要性最弱 (情景 3); 甲醇作为锅炉燃料的综合评价得分为 0.318 6, 与天然气 (0.292 9)、煤 (0.232 4)、柴油 (0.156 1) 相比具有较大优势。

[关 键 词] 甲醇; 锅炉燃料; 层次分析法; 熵权法; 综合性评价

[引用本文格式] 吴杨, 刘海玉, 寇梦楠, 等. 基于 AHP-EWM 的甲醇与传统锅炉燃料对比分析[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 113-121. WU Yang, LIU Haiyu, KOU Mengnan, NIU Juntian, et al. Comparative analysis of methanol and traditional boiler fuel based on AHP-EWM[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 113-121.

## Comparative analysis of methanol and traditional boiler fuel based on AHP-EWM

WU Yang<sup>1</sup>, LIU Haiyu<sup>1</sup>, KOU Mengnan<sup>1</sup>, NIU Juntian<sup>1</sup>, ZHU Jianjun<sup>2</sup>, JIN Yan<sup>1</sup>, FAN Baoguo<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Under the background of the goal of “carbon peak and carbon neutrality”, environmental protection requirements are becoming increasingly stringent, and methanol as a recognized high-efficiency, clean and low-carbon fuel has received more and more attention. In order to analyze the feasibility of methanol for boiler fuel, a comprehensive evaluation model of methanol, coal, diesel and natural gas as boiler fuel was established, and the four indicators of energy saving, environmental protection, economy and sociality were considered through analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method (EWM), and comprehensive evaluation was carried out under five scenarios with different importance of each index. The following conclusions are drawn: the energy saving of methanol is better than that of other fuels, the environmental protection and economy are comparable to natural gas, and the social aspect is second only to coal, which is 3.2 times that of diesel and 2.2 times that of natural gas; in terms of importance, environmental factors first, economic factors and energy-saving factors second, social factors are the weakest importance (scenario 3); the comprehensive evaluation score of methanol as boiler fuel is 0.318 6, which has great advantages compared with natural gas (0.292 9), coal (0.232 4) and diesel (0.156 1).

**Key words:** methanol; boiler fuel; analytic hierarchy process; entropy weight method; comprehensive evaluation

修回日期: 2023-04-23

基金项目: 中国工程院院地合作项目 (2021SX5); 山西省留学人员科技活动择优资助项目 (20200016)

Supported by: Chinese Academy of Engineering Academia-local Cooperation Project (2021SX5); Shanxi Province Overseas Students Science and Technology Activities Merit-based Funding Project (20200016)

第一作者简介: 吴杨 (1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为煤清洁高效燃烧技术, tywuyang@163.com。

通信作者简介: 刘海玉 (1981), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污染物脱除、微波介电特性, liuhaiyu@tyut.edu.cn。

相比较于传统锅炉燃料, 甲醇燃料不仅具有清洁高效、可再生等优势, 而且可有效缓解原油、天然气的对外依赖度。此外, 在绿氢耦合煤制甲醇、二氧化碳加绿氢制取甲醇、消纳过剩新能源电力的同时, 能够获得储、运、用方便的甲醇燃料。目前, 随着对锅炉排放要求的日益严格、甲醇产能过剩及“双碳”目标的临近, 甲醇作为中小型锅炉燃料、点火稳燃燃料等的研究与应用越来越广泛。

开滦股份范各庄矿业分公司<sup>[1]</sup>对 4 台蒸发量 20 t/h 燃煤锅炉进行醇基燃料改造, 改造后, 颗粒物、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 排放质量浓度分别由燃煤时 27.70、167.00、477.00 mg/m<sup>3</sup> 降至 8.65、3.00 mg/m<sup>3</sup> 以下及 99.00 mg/m<sup>3</sup>, 且醇基燃料专用锅炉的 NO<sub>x</sub> 排放质量浓度更低至 27 mg/m<sup>3</sup>。锅炉使用甲醇燃料不仅排放清洁, 同时有着较好的技术经济性<sup>[1-4]</sup>。此外, 李灿院士提出的利用太阳能制备液体燃料甲醇项目<sup>[5-6]</sup>, 生产 1 t 甲醇可利用 1.375 t CO<sub>2</sub>, 具有消纳过剩新能源电力、利用捕集的 CO<sub>2</sub>、获得燃料甲醇的效果<sup>[7-9]</sup>。

煤、天然气、甲醇、柴油等是中小型锅炉常用的燃料, 不同燃料间的优劣性评价有不同的评价方法, 可分为单项评价和综合评价<sup>[10]</sup>。单项评价包括技术评价、经济评价、社会评价等, 只是对评价对象某一方面的优劣进行评价; 综合评价则是在单项评价的基础上对评价对象进行全面、系统、科学的整体评价。指标权重<sup>[11]</sup>是指某一指标相对于被评价对象的重要程度, 其确定方法主要包括以模糊综合评价、层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 为主的主观赋权法及以熵权法 (entropy weight method, EWM)、灰色关联法等为主的客观赋权法。当评价指标难以定量表示时, 冯凌<sup>[12]</sup>用层次分析法分析了供应商选择的评价指标权重值。在评价指标均可以量化时, 付忠广等<sup>[13]</sup>用向量夹角余弦法求燃气电厂三级指标权重值; 罗毅等<sup>[14]</sup>使用熵权法对 600 MW 机组的可靠性、经济性、技术监督各因素进行评价, 其结果对层次分析法的计算结果进行了调整。

现有关于甲醇作为锅炉燃料的研究主要集中在经济性、环保性等方面的研究, 缺少对甲醇锅炉整体综合性评价及与传统燃料锅炉的对比分析。因此, 本文采用主客观相结合的综合评价方式, 从节能、环境、经济和社会 4 个因素的一级指标及其下属的二级指标出发, 使用层次分析法、熵权法对锅炉使用不同燃料时的综合效益进行量化评价, 为

相关决策提供参考。

## 1 综合评价基础理论

### 1.1 AHP

AHP 是 20 世纪 70 年代由著名运筹学家萨蒂提出的一种主观评价方法<sup>[12-15]</sup>, 其原理是建立综合性评价模型, 根据具有递阶结构的目标、子目标 (准则)、约束条件等来评价方案, 采用指标两两比较重要性的方法构造判断矩阵; 然后以判断矩阵最大特征值对应特征向量的分量作为对应指标的系数; 最后综合计算出各方案的权重<sup>[15-17]</sup>, 权重的大小表示各个方案的优劣。

考虑到客观事物的复杂性和人们认识的多样性, 构造的判断矩阵不一定具有完全一致性, 判断矩阵需进行一致性检验, 用一致性比率 CR 值的大小来表示检验结果, 计算公式为:

$$CR = CI / RI \quad (1)$$

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (2)$$

式中: CR 为一致性比率; CI 为一致性指标; RI 为随机一致性指标, 与判断矩阵阶数有关, 取值见表 1;  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值;  $n$  为判断矩阵阶数。

当  $CR < 0.1$  时, 认为该层次总排序具有满意的一致性, 否则需要对本层次的各判断矩阵进行调整, 再次进行分析。

表 1 随机一致性指标 RI 值  
Tab.1 The random consistency metric value

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	...
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	...

AHP 作为一种主观赋权法, 具有缺乏客观科学依据的缺陷, 但本文在通过 AHP 计算一级指标权重时, 通过考虑 5 种一级评价指标重视程度不同的情景下的各种燃料的综合性评价情况, 使得层次分析法的主观性劣势转化为了灵活性优势。

### 1.2 EWM

EWM 是一种客观赋权方法, 其计算原理是通过考量评价指标所含信息量的大小来计算各指标权重<sup>[18-19]</sup>。EWM 的特点是客观性强<sup>[20]</sup>, 能够充分挖掘原始数据的内在规律和信息量, 将评价指标的真实数据转化为评价价值。EWM 的主要分析步骤如文献<sup>[19]</sup>。对于可以量化的二级指标, 如 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、烟尘生成量、燃料成本、碳税等, 采用 EWM 可客观得到对应指标的权重, 使得结果更具说服力, 研

究方法与计算流程如图 1 所示。

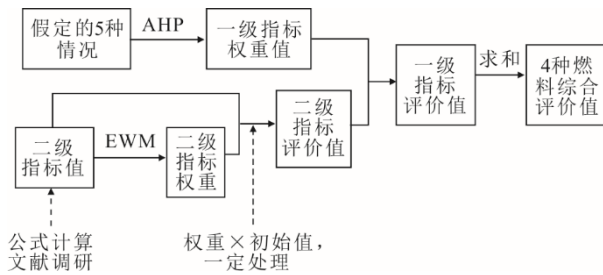


图 1 燃料综合评价计算流程  
Fig.1 Flow chart of fuel comprehensive evaluation calculation

## 2 评价案例应用

小型锅炉在我国有着广泛的应用，常用的燃料有煤、油、天然气及甲醇。本节以锅炉生产 1 t 工业标准蒸汽为例，在锅炉吸热量确定的情况下计算部分二级评价指标的具体值，再通过 EWM 及 AHP 对 4 种燃料进行综合性评价计算。

### 2.1 系统层次结构模型的建立

锅炉使用不同燃料时的综合性能，需要考虑到节能、环保、经济及社会等多方面因素，而这 4 个指标下又分别包含多项二级指标，二级指标的选取及计算方法如下。

#### 2.1.1 节能因素

在锅炉节能因素方面，选择了表示燃料由化学能转化为热能效率的燃料效率及受排烟温度影响最大、象征着用户经济性的锅炉热效率 2 个评价指标。燃烧效率以及锅炉热效率参考相关文献，选取较有代表性的平均值。

#### 2.1.2 环境因素

环境因素选取了《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014)中规定的 3 种主要污染物 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 及烟尘（汞除外，主要为燃煤锅炉污染物）生成量 3 个评价指标。各指标计算方法如下：

1) SO<sub>2</sub> 生成量 主要按照燃料类型（固体、液体、气体燃料）并依据硫元素守恒及硫向 SO<sub>2</sub> 转化效率计算<sup>[21]</sup>。煤中 SO<sub>2</sub> 转化率为 80%，液体、气体燃料 100% 转化。煤的计算公式如式(3)，柴油、甲醇、天然气的计算公式如式(4)：

$$G_{SO_2} = 1.6BS \times 10^3 \quad (3)$$

$$G_{SO_2} = 2BS \times 10^3 \quad (4)$$

其中：G<sub>SO<sub>2</sub></sub> 为 SO<sub>2</sub> 生成量，kg；B 为锅炉燃料消耗量，t；S 为燃料含硫量，%。

2) NO<sub>x</sub> 生成量 主要由燃料型 NO<sub>x</sub> 和热力型 NO<sub>x</sub> 组成，其计算公式<sup>[21]</sup>为：

$$G_{NO_x} = 1.63B(\beta N + V_y C_{NO_x} \times 10^{-6}) \times 10^3 \quad (5)$$

式中：G<sub>NO<sub>x</sub></sub> 为 NO<sub>x</sub> 生成量，kg；β 为燃料中 N 转化为热力型 NO<sub>x</sub> 的转化率，燃煤锅炉取 25%，燃油锅炉取 36%；N 为燃料含氮量，%；V<sub>y</sub> 为实际烟气量（标准状态，下同），m<sup>3</sup>/kg；C 为热力型 NO<sub>x</sub> 质量浓度，mg/m<sup>3</sup>，按 93.8 mg/m<sup>3</sup> 计算。

3) 烟尘生成量 煤燃烧的烟尘生成情况主要取决于煤中灰分，其生成量 G<sub>s1</sub> 计算公式<sup>[21]</sup>为：

$$G_{s1} = \frac{BA d_h}{1 - C_h} \times 10^3 \quad (6)$$

式中：G<sub>s1</sub> 为烟尘生成量，kg；A 为灰分，%；d<sub>h</sub> 为烟气中烟尘占灰分的比率，%，取 75%；C<sub>h</sub> 为烟尘中可燃物的比率，%，此处煤粉炉取 6%。

柴油燃烧的烟尘生成量按照排放系数 261 mg/kg<sup>[22]</sup>燃料计算；天然气燃烧烟尘生成因子为 5.98 kg/MJ<sup>[23]</sup>，按天然气热值 34 MJ/m<sup>3</sup> 计算，烟尘排放因子 200 mg/m<sup>3</sup>；由于甲醇为非化石燃料，其燃烧烟尘量主要取决于燃烧效率，计算公式<sup>[23]</sup>为：

$$G_{s2} = 0.13(1 - \eta_f) Q_{net} B \times 10^{-3} \quad (7)$$

式中：η<sub>f</sub> 为燃烧效率，%，甲醇为 95%；Q<sub>net</sub> 为燃料热值，MJ/t，甲醇按 21 MJ/kg 计。

#### 2.1.3 经济因素

锅炉燃用不同燃料时的设备投资成本和人工成本相差不大，此处未考虑这 2 项。经济因素选择了 4 种燃料锅炉差异较大的燃料成本、碳税成本 2 个评价指标。

燃料成本计算公式为：

$$C_f = B \times P \quad (8)$$

式中：C<sub>f</sub> 为燃料成本，元；P 为燃料价格，元/t（或元/km<sup>3</sup>）。

碳税成本按照联合国政府间气候变化专门委员会（intergovernmental panel on climate change, IPCC）推荐值，燃煤、柴油、甲醇、天然气的碳排放因子 E 分别取 0.091、0.074、0.050、0.056 kg/MJ。此处碳税价格按 50 元/t CO<sub>2</sub>（0.05 元/kg）计算，碳税成本计算公式为：

$$C_{CO_2} = 0.05 \times \frac{EQ}{\eta} \quad (9)$$

式中：C<sub>CO<sub>2</sub></sub> 为碳税成本，元；E 为碳排放因子，kg/MJ；Q 为锅炉吸热量，MJ；η 为锅炉热效率，%。

2.1.4 社会因素

社会因素选择燃料的进口依存度及综合风险分别代表国家能源安全及使用安全 2 个方面。能源安全被纳入燃料的综合评价指标因素,用各种能源的进口依存度来体现,按照进口量/总消费量来计算;燃料综合风险应综合考虑燃料性质、储运以及使用过程中的危险因素,使用风险评估来描述 4 种燃料的安全性,用综合风险值来量化。风险表达式为<sup>[24]</sup>:

$$R = f(S, P) = S \cdot P \quad (10)$$

式中:  $R$  为风险;  $S$  为风险严重程度<sup>[25]</sup>, 具体见表 2;  $P$  为风险发生概率, 分为 a—f 6 个等级, 具体见表 3 表。

表 2 风险严重程度  $S$   
Tab.2 Risk severity  $S$

严重程度	说明
1—高	可能导致死亡、严重环境破坏
2—中	导致严重损伤、严重职业病、主要的环境破坏
3—低	导致较小损伤、较轻职业病、次要的环境破坏
4—可忽略	不会引起伤害、环境破坏

参照《机械安全风险评估实施指南和方法举例》(GB/T 16856—2015)<sup>[26]</sup>确定不同风险等级对应的风险值(表 3)。依据燃料的自身特性,确定风险等级,如甲醇的闪点为 12 °C, 较容易着火, 风险

严重程度为 1—高, 概率等级为 c—偶尔, 则甲醇闪点指标的风险等级为 1c, 风险值为 4.00。

表 3 风险等级及风险值  
Tab.3 Risk level and risk value

概率等级	风险等级/风险值			
	1—高	2—中	3—低	4—可忽略
a—频繁	1a/5.00	2a/4.75	3a/4.00	4a/2.00
b—很可能	1b/4.75	2b/4.25	3b/3.75	4b/1.75
c—偶尔	1c/4.00	2c/3.75	3c/2.75	4c/0.75
d—极少	1d/3.50	2d/2.50	3d/2.25	4d/0.25
e—不太可能	1e/3.25	2e/2.00	3e/1.25	4e/0.25
f—不可能	1f/1.50	2f/1.00	3f/0.25	4f/0

考虑燃料从储存、运输到使用过程中可能涉及的安全性问题, 选取以下指标来描述燃料综合风险: 反映燃料安全的指标, 如爆炸风险的闪点、爆炸极限; 反映对人体物理、生理危害的指标, 如中毒、窒息等; 反映不同燃料在运输使用过程中对环境危害程度的运输污染以及泄露风险指标, 如煤在运输过程中的高灰分污染、柴油泄漏后难以降解、甲醇易自然降解等。依据文献关于燃料安全性<sup>[27]</sup>、泄露风险<sup>[28-29]</sup>、环境危害<sup>[30]</sup>等性质的说明, 以上指标的风险等级划分及风险值计算结果见表 4。

综上, 建立的综合性评价指标结构模型如图 2 所示。

表 4 4 种燃料安全风险评价  
Tab.4 Four kinds of fuel safety risk assessment

燃料类型	监测指标结果/风险等级					综合风险值
	闪点	爆炸极限	人体伤害性	运输污染	泄漏风险	
煤	-/1f	150~1 500 g·m <sup>-3</sup> /2e	粉尘/3e	粉尘/3b	粉尘/3e	9.75
柴油	55 °C/1d	1.4%~4.5%/1e	较低/2e	极低/4d	难以降解/2c	12.75
甲醇	12 °C/1c	6.7%~36.5%/2d	低毒/1d	极低/4d	易降解/3e	11.50
天然气	-190 °C/1b	5%~15%/1d	燃爆、窒息/2e	极低/4d	易扩散/3d	14.50

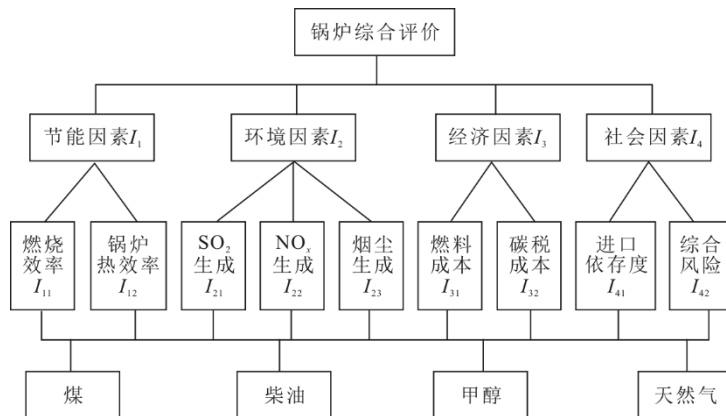


图 2 中小型锅炉燃料综合性评价指标结构模型  
Fig.2 Structure model of comprehensive evaluation index of boiler fuels

结构模型分为目标层、一级指标层、二级指标层及待选方案层 4 个层次。其中,综合评价为目标层;节能、环境、经济、社会因素为一级评价指标;4 个一级评价指标下一层对应 9 个二级评价指标;煤、柴油、甲醇、天然气为 4 个备选方案。

## 2.2 指标值计算

以锅炉生产 1 t 工业标准蒸汽,吸热量 2.508 GJ 为例,分别采用煤、柴油、甲醇、天然气为燃料进行计算。其中,进口依存度取近年各燃料进口量/消费量比值,燃烧效率参考文献[31-32],锅炉效率参照文献[2,33-34]选取。选用煤种为晋北代表煤,其他 3 种燃料参数根据文献[35-36]或相关国标[37-39]选

取(柴油为 0 号),具体见表 5。在表 5 条件下,计算出的二级指标数据见表 6。

表 5 4 种燃料基本信息  
Tab.5 Basic information of four fuels

项目	煤	柴油	甲醇	天然气
含硫量/%	0.630	0.200	0.005	100 mg/m <sup>3</sup> <sup>③</sup>
含氮量/%	0.79	0.25	0	0.01
灰分/%	19.77			
低位发热量/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	22.441	42.570	21.000	34 MJ/m <sup>3</sup>
碳排放因子 <sup>①</sup> /(kg·MJ <sup>-1</sup> )	0.091	0.074	0.050	0.056
烟尘排放因子/(kg·t <sup>-1</sup> )		0.261		0.200
价格 <sup>②</sup> /(元·t <sup>-1</sup> )	700	6 500	2 500	3.6 元/m <sup>3</sup>

注:①碳排放因子为 IPCC 推荐值;②燃料价格取山西地区近年大致水平;③《天然气》(GB 17820—2018)中二类天然气质量要求。

表 6 二级指标实际值  
Tab.6 The actual value of the second-level indicator

项目	煤	柴油	甲醇	天然气
燃烧效率/%	83	88	95	91
锅炉效率/%	65	85	92	90
燃料消耗量	1.709 1 t	0.689 0 t	1.290 4 t	8.147 0×10 <sup>2</sup> m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub> 生成量/kg	1.733 1	0.277 2	0.013 0	0.016 4
NO <sub>x</sub> 生成量/kg	0.816 4	0.238 2	0.123 1	0.129 0
烟尘生成量/kg	27.121 4	0.018 1	0.004 3	0.016 4
CO <sub>2</sub> 生成量/kg	351.120 0	218.343 5	136.304 3	156.053 3
燃料费用/元	120.356 6	450.524 4	324.534 2	295.058 8
碳税/元 <sup>①</sup>	17.556 0	10.917 2	6.815 2	7.802 7
进口依存度/%	5	71	14	43
燃料综合风险值	9.75	12.75	11.50	14.50

注:①碳税价格取 50 元/t CO<sub>2</sub>。

由表 6 可知,甲醇燃烧 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、烟尘、CO<sub>2</sub> 生成量分别为煤的 0.750%、15.070%、0.016% 和 38.820%,为柴油的 4.68%、51.67%、37.46% 和 62.43%,烟尘生成量为天然气的 26.22%,燃烧效率、硫化物、氮氧化物生成与天然气相当。

## 2.3 指标评价计算

### 2.3.1 AHP 计算一级指标权重

一级评价指标由节能因素、环境因素、经济因素和社会因素组成。4 个指标均难以量化,采用主观评价方法层次分析法获得 4 个指标的权重。对于锅炉燃料选择来说,在不同发展阶段,注重的因素可能不同,节能因素、环境因素、经济因素和社会因素对决策的影响也不同。本文对 4 个一级指标对每种燃料作为锅炉燃料时的综合评价重要性进行了 5 种情景假设:情景 1 表示 4 个方面对总目标的重要性相同,作为其他情景的对照;情景 2 表示节能因素最重要;情景 3 表示环境因素最重要;情景 4 表示经济因素最重要;情景 5 表示社会因素最

重要,具体见表 7。

表 7 一级指标重要性排序  
Tab.7 Ranking of the importance of the first-level indicators

情景	节能因素	环境因素	经济因素	社会因素
情景 1	1	1	1	1
情景 2	1	2	2	3
情景 3	2	1	2	3
情景 4	2	2	1	3
情景 5	2	2	2	1

由表 7 的 5 种情景下的 4 个一级指标重要性排序,通过层次分析法,按照重要性排序,第一因素为第二的 5/3、为第三的 5/2,重要性排序第二的因素为第三的 3/2,构造每种情景下的判断矩阵  $A$ ,计算出最大特征值  $\lambda_{\max}$  以及权重  $W$  分别如下所示:

情景 1 下:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \lambda_{\max} = 4, \quad (11)$$

$$W_1 = (0.25, 0.25, 0.25, 0.25)^T$$

情景 2 下:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 5/3 & 5/3 & 5/2 \\ 3/5 & 1 & 1 & 3/2 \\ 3/5 & 1 & 1 & 3/2 \\ 2/5 & 2/3 & 2/3 & 1 \end{bmatrix}, \lambda_{\max} = 4, \quad (12)$$

$$W_2 = (0.384 \ 6, 0.230 \ 8, 0.230 \ 8, 0.153 \ 8)^T$$

情景 3 下:

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3/5 & 1 & 3/2 \\ 5/3 & 1 & 5/3 & 5/2 \\ 1 & 3/5 & 1 & 3/2 \\ 2/3 & 2/5 & 2/3 & 1 \end{bmatrix}, \lambda_{\max} = 4.032 \ 8, \quad (13)$$

$$W_3 = (0.230 \ 8, 0.384 \ 6, 0.230 \ 8, 0.153 \ 8)^T$$

情景 4 下:

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3/5 & 3/2 \\ 1 & 1 & 3/5 & 3/2 \\ 5/3 & 5/3 & 1 & 5/2 \\ 2/3 & 2/3 & 2/5 & 1 \end{bmatrix}, \lambda_{\max} = 4, \quad (14)$$

$$W_4 = (0.230 \ 8, 0.230 \ 8, 0.384 \ 6, 0.153 \ 8)^T$$

情景 5 下:

$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 3/5 \\ 1 & 1 & 1 & 3/5 \\ 1 & 1 & 1 & 3/5 \\ 5/3 & 5/3 & 5/3 & 1 \end{bmatrix}, \lambda_{\max} = 4.032 \ 8, \quad (15)$$

$$W_5 = (0.214 \ 3, 0.214 \ 3, 0.214 \ 3, 0.357 \ 1)^T$$

根据判断矩阵及最大特征值 $\lambda_{\max}$ , 进行一致性检验。对于情景 1, 判断矩阵阶数 $n$ 为 4, 由表 1 可知,  $RI=0.89$ , 而  $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)=(4-4)/(4-1)=0$ ,  $CR=CI/RI=0<0.1$ , 具有完全一致性。同理, 计算出情景 2、情景 3、情景 4、情景 5 的 CR 值分别为 0、0.0109、0、0.0109, 均小于 0.1, 具有完全一致性, 判断矩阵构建合理。

### 2.3.2 EWM 计算二级指标权重及评价值

1) EWM 计算二级指标权重值 对于二级指标, 采用 EWM, 通过构造初始指标矩阵、初级矩阵标准化处理、指标比重计算、指标熵值计算等流程, 计算各二级指标对对应一级指标的相对权重。计算得到锅炉热效率  $I_{11}$ 、燃烧效率  $I_{12}$  对节能因素  $I_1$  的权重向量为  $(0.537 \ 5, 0.462 \ 5)^T$ ;  $SO_2$  排放  $I_{21}$ 、 $NO_x$  排放  $I_{22}$ 、烟尘排放  $I_{23}$  对环境因素  $I_2$  的权重向量为  $(0.334 \ 3, 0.334 \ 8, 0.330 \ 9)^T$ ; 燃料成本  $I_{31}$ 、碳税成本  $I_{32}$  对经济因素  $I_3$  权重向量为  $(0.552 \ 9, 0.447 \ 1)^T$ ; 燃料进口依赖度  $I_{41}$ 、综合风险  $I_{42}$  对社会因素  $I_4$  的权重向量为  $(0.486 \ 0, 0.514 \ 0)^T$ 。

2) 一级指标评价值计算 在得到各二级指标权重值后, 根据权重值与对应的二级指标实际值, 经过以下方法处理后即可得到 4 个一级指标的评价值。

节能因素对应的二级指标为正向指标, 指标值越大则节能性越好; 环境因素、经济因素与社会因素对应的二级指标为负向指标, 指标值越小燃料对应的性能越优。如有  $m$  种待选方案、 $n$  个评价指标,  $x_{ij}$  为第  $i$  种方案的第  $j$  个评价指标值, 在已知其对应权重为  $w_{ij}$  情况下, 为了消除数量级的影响, 同时保持数据原有相对特征, 方案  $i$  对上一层的评价值计算采取方法如式(16)。

$$\begin{cases} x'_{ij} = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij}, & x''_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}}, & \text{正向指标} \\ x'_{ij} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij}}, & x''_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}}, & \text{负向指标} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $x'_{ij}$  为二级指标处理中间值;  $x''_{ij}$  为二级指标评价值。

计算出煤、柴油、甲醇、天然气的节能因素、环境因素、经济因素及社会因素的计算结果见表 8, 绘制出的雷达图如图 3 所示。

表 8 一级指标评价值计算结果

Tab.8 Calculation results of the evaluation value of the first-level indicators

一级指标	项目	煤	柴油	甲醇	天然气
节能因素	评价值	0.215 8	0.250 8	0.271 2	0.262 2
	排序	4	3	1	2
环境因素	评价值	0.002 2	0.123 2	0.468 2	0.406 4
	排序	4	3	1	2
经济因素	评价值	0.465 7	0.136 4	0.190 0	0.207 9
	排序	1	4	3	2
社会因素	评价值	0.492 9	0.089 3	0.288 4	0.129 4
	排序	1	4	2	3

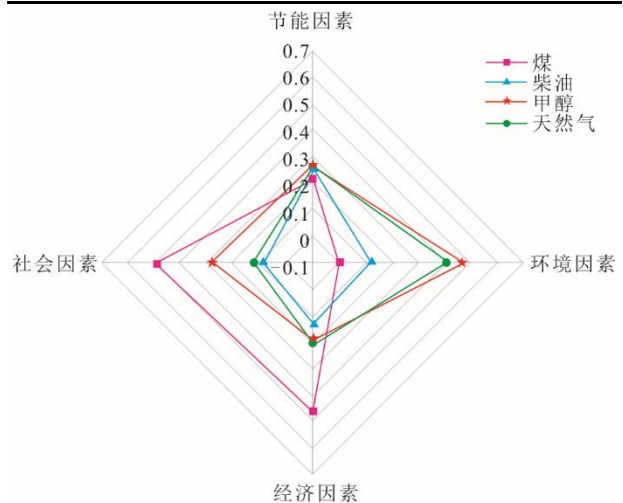


图 3 4 种燃料的一级指标评价值分布

Fig.3 Distribution of first-level index evaluation values for four fuels

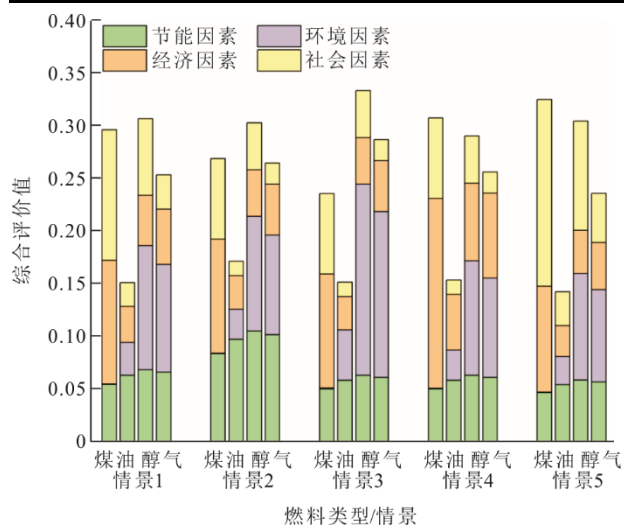
由图 3 可以看出,节能性方面,甲醇(0.271 2)优于天然气(0.262 2),优于柴油(0.250 8)和煤(0.215 8);污染物生成方面,甲醇优于天然气,分别为 0.468 2 和 0.406 4,大幅度优于柴油(0.123 2)和煤(0.002 2);经济性方面,煤的评价值是其他燃料的 2.24~3.41 倍,甲醇(0.190 0)略低于天然气(0.207 9),优于柴油(0.136 4);能源安全、燃料安全方面,煤具有较大的优势,其社会因素评价值为天然气的 3.8 倍、柴油的 5.5 倍、甲醇的 1.7 倍,甲醇在能源安全和燃料安全方面均比柴油、天然气更具优势。

### 2.3.3 综合评价价值计算

在以上确定了一级指标权重和二级指标评价价值情况下,二者相乘得到综合评价指数。5 种不同情景下各燃料综合性能评价指数见表 9,综合性评价价值分布情况如图 4 所示。

表 9 不同情景下各种燃料的综合性能指数和排序  
Tab.9 Comprehensive performance index and ranking of various fuels under different scenarios

情景	综合评价价值	煤	柴油	甲醇	天然气
情景 1	数值	0.294 2	0.149 9	0.304 4	0.251 5
	排序	2	4	1	3
情景 2	数值	0.266 8	0.170 1	0.300 5	0.262 5
	排序	3	4	1	2
情景 3	数值	0.234 0	0.150 5	0.330 8	0.284 7
	排序	3	4	1	2
情景 4	数值	0.305 3	0.152 5	0.288 0	0.254 2
	排序	1	4	2	3
情景 5	数值	0.322 6	0.141 3	0.302 1	0.234 0
	排序	1	4	2	3



情景 1—煤; 情景 2—柴油; 情景 3—甲醇; 情景 4—天然气。

图 4 4 种燃料的综合性评价价值分布

Fig.4 Distribution of comprehensive evaluation values for four fuels

由图 4 可知: 5 种情景下, 甲醇均具有较高的综合评价效果; 情景 1、情景 2、情景 3 下, 甲醇的综合评价价值均一定程度领先于其他燃料; 在环境因素最重要的情景 3 下, 甲醇领先幅度最大。

煤的经济、社会因素占比最大, 环境因素方面的得分极低, 所以其综合评价得分情况主要取决于对环境的重视程度, 环保要求越高, 煤的综合得分越低, 综合使用效益越低。

## 3 结 论

1) 通过二级指标实际值计算, 相比较于煤/柴油, 甲醇燃烧 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、烟尘、CO<sub>2</sub> 生成量大幅降低, 燃烧效率、硫氧化物、氮氧化物生成与天然气相当, 烟尘生成量比天然气更低;

2) 由 EWM 计算一级指标评价价值结果, 甲醇节能、环境因素评价价值最高; 经济因素评价价值略低于天然气; 社会因素方面仅次于煤, 大幅优于柴油与天然气, 印证了甲醇作为锅炉燃料的清洁高效性;

3) 在节能性、环保性、经济性以及社会效益的重要性考虑不同时, 各种燃料的排序发生了变化。可以根据实际情况的不同, 选择最合理的方案。如在前数十年, 注重发展经济的时期, 经济因素的考量比例最大, 可参照情景 4, 此时煤有着很大的优势; 当今环境问题越来越受到重视, 则环境因素的比重则逐渐增加, 则可参照情景 3, 此时甲醇和天然气优势明显; 在国际形势不稳定的全球大背景下, 能源安全的重要性也越来越突显出来, 这种情况下的 4 种燃料综合性评价情况如情景 5 所描述, 煤和甲醇占优。

综合考虑节能性、经济性、环保性及社会效益, 寻找锅炉传统化石燃料的替代燃料是当前迫切需要的。甲醇燃料与传统化石能源相比, 不仅具有清洁高效的优点, 而且有利于我国能源安全。利用我国丰富的煤制甲醇, 有利于实现煤的高效清洁深度利用; 其他甲醇制取方法因地制宜, 有利于充分发挥我国资源优势, 同时有利于降低对国外进口的依赖、有利于国家能源安全, 具有重要的学术意义和实际应用价值。

### [参 考 文 献]

[1] 张松, 刘静, 霍达, 等. 煤改醇基燃料锅炉设计工艺及应用案例分析[J]. 华电技术, 2020, 42(11): 97-105.  
ZHANG Song, LIU Jing, HUO Da, et al. Design of a coal to alcohol-based fuel boiler and analysis on its application cases [J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 97-105.

- [2] 孔永平, 燕腾飞, 张环平, 等. 醇基液体燃料在锅炉中的应用研究[J]. 化学工程与装备, 2019(4): 183-184.  
KONG Yongping, YAN Tengfei, ZHANG Huanping, et al. Application research of alcohol-based liquid fuel in boiler[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2019(4): 183-184.
- [3] 孔永平, 赵军, 白航标, 等. 锅炉用醇基液体燃料燃烧性能分析[J]. 河南科技, 2021, 40(29): 127-129.  
KONG Yongping, ZHAO Jun, BAI Hangbiao, et al. Analysis on the combustion performance of alcohol-based liquid fuel for boiler[J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(29): 127-129.
- [4] 周春霄, 刘柏谦. 工业锅炉燃烧醇基燃料与燃煤的烟气特性比较[J]. 煤化工, 2019, 47(2): 26-29.  
ZHOU Chunxiao, LIU Baiqian. Comparison of flue gas characteristics of burning alcohol-based fuel and coal combustion in industrial boiler[J]. Coal Chemical Industry, 2019, 47(2): 26-29.
- [5] BATTAGLIA P, BUFFO G, FERRERO D, et al. Methanol synthesis through CO<sub>2</sub> capture and hydrogenation: Thermal integration, energy performance and techno-economic assessment[J]. Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 2021, 44:101407.
- [6] WANG W, WANG S, MA X, et al. Recent advances in catalytic hydrogenation of carbon dioxide[J]. Chemical Society Reviews, 2011, 40(7): 3703-3727.
- [7] HUANG Z, ZHU L, LI A, et al. Renewable synthetic fuel: turning carbon dioxide back into fuel[J]. Frontiers in Energy, 2022: 1-5.
- [8] 徐钢, 张钟, 吴志聪, 等. 基于绿氢和生物质富氧燃烧技术的零碳甲醇合成系统[J]. 动力工程学报, 2022, 42(10): 925-932.  
XU Gang, ZHANG Zhong, WU Zhicong, et al. Zero carbon methanol synthesis system based on green hydrogen and biomass oxygen enriched combustion technology[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(10): 925-932.
- [9] 琳娜. 液态阳光甲醇助力“双碳”大有可为[N]. 中国电力报, 2022-03-08(002).  
LIN Na. Liquid sunlight methanol has great potential to help “double carbon”[N]. China Electric Power News, 2022-03-08(002).
- [10] 张于心, 智明光. 综合评价指标体系和评价方法[J]. 北方交通大学学报, 1995(3): 393-400.  
ZHANG Yuxin, ZHI Mingguang, et al. Comprehensive evaluation index system and evaluation method[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1995(3): 393-400.
- [11] 彭张林, 张强, 杨善林. 综合评价理论与方法研究综述[J]. 中国管理科学, 2015, 23(增刊 1): 245-256.  
PENG Zhanglin, ZHANG Qiang, YANG Shanlin. A review of research on comprehensive evaluation theories and methods[J]. Chinese Management Science, 2015, 23(Suppl.1): 245-256.
- [12] 冯凌. 基于层次分析法的供应商评价与选择研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016: 1.  
FENG Lin. Research on supplier evaluation and selection based on analytic hierarchy process[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016: 1.
- [13] 付忠广, 刘炳含, 王鹏凯, 等. 燃气电厂性能指标综合评价模型[J]. 热力发电, 2019, 48(3): 7-13.  
FU Zhongguang, LIU Binghan, WANG Pengkai, et al. A comprehensive evaluation model for performance indexes of gas-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(3): 7-13.
- [14] 罗毅, 周创立, 刘向杰. 多层次灰色关联分析法在火电机运行评价中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17): 97-103.  
LUO Yi, ZHOU Chuangli, LIU Xiangjie. Application of the multi-level grey relational analysis method in operation assessment of thermal power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(17): 97-103.
- [15] 王云波, 李政, 倪维斗. 层次分析法在多联产系统综合性能评价中的应用[J]. 动力工程, 2006(4): 580-586.  
WANG Yunbo, LI Zheng, NI Weidou. Comprehensive performance assessing of polygeneration system by AHP hierarchy analysis method[J]. Journal of Power Engineering, 2006(4): 580-586.
- [16] 李丹. 城市生活垃圾不同处理方式的模糊综合评价[D]. 北京: 清华大学, 2014: 1.  
LI Dan. Fuzzy comprehensive evaluation of different municipal solid waste treatment methods[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014: 1.
- [17] 严嘉伦, 林俊光, 楼可炜, 等. 基于 AHP-变异系数法的楼宇型综合能源系统评价体系[J]. 热力发电, 2019, 48(12): 25-30.  
YAN Jialun, LIN Junguang, LOU Kewei, et al. Evaluation system for building integrated energy system based on AHP-CV method[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(12): 25-30.
- [18] WU G, DUAN K, ZUO J, et al. Integrated sustainability assessment of public rental housing community based on a hybrid method of AHP-entropy weight and cloud model[J]. Sustainability, 2017, 9: 2-25.
- [19] 费智聪. 熵权-层次分析法与灰色-层次分析法研究[D]. 天津: 天津大学, 2009: 1.  
FEI Zhicong. Research on entropy weight-analytic hierarchy process and grey-analytic hierarchy process[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 1.
- [20] CUI X, WU X, HE X, et al. Regional suitability of virtual water strategy: evaluating with an integrated water-ecosystem-economy index[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 659-667.
- [21] 方品贤. 环境统计手册[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1985: 1.  
FANG Pinxian. Handbook of environment statistics[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1985: 1.
- [22] 姚芝茂, 邹兰, 王宗爽, 等. 燃油锅炉颗粒物排放因子的研究[J]. 环境工程, 2009, 27(增刊 1): 237-241.  
YAO Zhimao, ZOU Lan, WANG Zongshuang, et al. Investigation on particulate matter emission factors for oil-fired boilers[J]. Environmental Engineering, 2009, 27(Suppl.1): 237-241.
- [23] 胡名操. 环境保护实用数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 1.  
HU Mingcao. Practical data sheet for environmental protection[M]. Beijing: China Machine Press, 1990: 1.
- [24] 詹叶玉生, 姚立纲. RBI 技术在有机热载体锅炉上的应用[J]. 中国特种设备安全, 2016, 32(12): 27-35.  
ZHANG Yeyusheng, YAO Ligang. The application of RBI technology in organic heat transfer fluids boilers[J]. China Special Equipment Safety, 2016, 32(12): 27-35.
- [25] 顾徐毅. 基于风险的电梯安全评价方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 1.  
GU Xuyi. Elevator safety assessment based on risk analysis [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009: 1.

- [26] 国家标准化管理委员会. GB/T 16856—2015 机械安全风险评估实施指南和方法举例[S]. 2015: 1.  
National standardization administration. GB/T 16856-2015 Examples of implementation guidelines and methods for machinery safety risk assessment[S]. 2015: 1.
- [27] 冯向法. 醇基燃料及其发展趋势[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊 1): 175-180.  
FENG Xiangfa. Alcohol-based fuel and its developing trend[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(Suppl.1): 175-180.
- [28] 孔德娣. 浅谈大气污染治理形势和存在问题及建议[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(20): 139-141.  
KONG Dedi. Situation of air pollution control and its existing problems and suggestions[J]. Leather Production and Environmental Protection Science and Technology, 2022, 3(20): 139-141.
- [29] 王天婷. 甲醇/PODE 混合燃料缸内燃烧与污染物生成的模拟研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.  
WANG Tianting. Simulation study on in-cylinder combustion and pollutant generation of methanol/PODE blended fuel[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [30] 李琼玖, 申同贺, 孟仲林, 等. 中国发展煤炭清洁转化制甲醇是替代石油能源的最佳选择[J]. 中外能源, 2006(4): 1-8.  
LI Qiongjiu, SHEN Tonghe, MENG Zhonglin, et al. The development of clean conversion of coal to methanol is the best choice for replacing petroleum energy in China[J]. Sino-Foreign Energy, 2006(4): 1-8.
- [31] 李忠喜. 工业锅炉节能减排技术研究[J]. 工程技术研究, 2018(5): 101-102.  
LI Zhongxi. Research on energy saving and emission reduction technology of industrial boiler[J]. Engineering Technology Research, 2018(5): 101-102.
- [32] 刘作文. 生物柴油氧化程度对其燃烧特性影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019: 1.  
LIU Zuowen. Study on the influence of biodiesel oxidation degree on its combustion characteristics[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019: 1.
- [33] 王正贤. 浅谈基于在用工业锅炉定期能效测试的节能诊断[J]. 中国设备工程, 2021(19): 175-176.  
WANG Zhengxian. Talking about energy-saving diagnosis based on periodic energy efficiency test of in-use industrial boilers[J]. China Equipment Engineering, 2021(19): 175-176.
- [34] 王飞麟, 韩雅倩, 王丽娜, 等. 电磁感应蒸汽发生器应用前景分析与研究[J]. 洁净与空调技术, 2020(3): 58-61.  
WANG Feiqi, HAN Yaqian, WANG Lina, et al. Analysis and research on the application prospect of electromagnetic induction steam generator[J]. Cleaning and Air Conditioning Technology, 2020(3): 58-61.
- [35] 姚芝茂, 滕云, 李俊, 等. 小型燃油锅炉 NO<sub>x</sub> 的排放特征与管理控制[J]. 环境工程学报, 2010, 4(1): 159-164.  
YAO Zhimao, TENG Yun, LI Jun, et al. Emission characteristics and regulation control of NO<sub>x</sub> from oil-fired boilers[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(1): 159-164.
- [36] 刘迎春, 曹卫彬, 孙传庆, 等. 棉籽油及其调和油的热值测定与分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2008(3): 366-370.  
LIU Yingchun, CAO Weibin, SUN Chuanqing, et al. Determination and analysis on heat value for cottonseed oil and its blending oil[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition), 2008(3): 366-370.
- [37] 国家技术监督局. GB 16663—1996 醇基液体燃料[S]. 1996: 1.  
National standardization administration. GB 16663—1996 Alcohol-based liquid fuel[S]. 1996: 1.
- [38] 国家标准化管理委员会. GB 17820—2018 天然气[S]. 2018.  
National standardization administration. GB 17820—2018 Natural gas[S]. 2018.
- [39] 国家标准化管理委员会. GB 17411—2015 船用燃料油[S]. 2015: 1.  
National standardization administration. GB 17411—2015 Marine fuel oil[S]. 2015: 1.

(责任编辑 邓玲惠)