



船舶 SO_x 排放控制技术研究

周 松¹, 李 琤², 许铁夫³

(1. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中船动力有限公司, 江苏 镇江 212000;
3. 黑龙江大学建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 应对 IMO Tier III SO_x 排放法规, 目前有三种技术方案, 即使用低硫燃油、液化天然气以及废气洗涤技术。基于船舶动力装置和不同技术方案的具体特点, 分别从成本、对发动机和环境的影响、应用可行性以及未来前景等方面, 对上述三种硫排放控制技术进行了分析。分析表明: 相比之下, 废气洗涤方案是最可行和最经济的硫排放控制技术。

关键词: 船舶; 低硫燃油; 液化天然气; 废气洗涤

中图分类号: TK421+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)05-0014-06

Study of SO_x Emission Control Technologies for Marine Vessels

Zhou Song¹, Li Cheng², Xu Tiefu³

(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Heilongjiang Harbin, 150001;
2. CSSC Marine Power Co., Ltd., Jiangsu Zhenjiang 212000;
3. College of Civil Engineering, Heilongjiang University, Heilongjiang Harbin 150001)

Abstract: There are three technical schemes to make marine vessels meet with IMO Tier III SO_x regulation, which are the use of low sulphur fuel oils, liquefied natural gas and exhaust gas scrubbers. Detailed analysis on the three measures was carried out respectively based on the characteristics of marine power plants and the pollution reduction methods, from the aspects of cost, effects on engines and environment, application feasibility and future prospects. Finally, through comprehensive study, a conclusion has been reached that exhaust gas scrubber is the most practicable and cost-saving SO_x emission control technology.

Key words: marine vessel; low sulphur fuel oil; LNG; exhaust gas scrubber

0 引言

船舶运输作为历史悠久的运输方式, 以其成本低、运量大和运距长等优势, 在各种运输方式中占据主导地位。据统计, 目前全球 85% 以上的货物运输是通过船舶完成的。但与此同时, 船舶也成为了沿海地区尤其是港口大气的主要污染源。据国际油轮独立船东协会 (INTERTANKO) 发布的报告, 目前国际航运业每年消耗约 20 亿桶燃料油, SO_x 的排放量占全球总排放量的 20%。因此, 船舶

废气减排已成为国际社会环境保护的热点。

2008 年 10 月, 国际海事组织 (IMO) 海上环境保护委员会 (MEPC) 第 58 次会议一致通过了针对 1997 年所制定的 MARPOL 73/78 公约附则 VI 《防止船舶造成大气污染规则》的 2008 修正案, 制定了船舶燃油硫含量的限制标准和实施时间 (见图 1)。此后, IMO 分别通过不同的修正案, 在已有北海、波罗地海和英吉利海峡等硫排放控制区 (SECAs) 的基础上, 在美国、加拿大和法属圣皮埃尔和密克隆群岛 (Saint-Pierre and Miquelon) 部

收稿日期: 2015-01-27
基金项目: 工业和信息化部高技术船舶科研项目 ([2012] 545) 号。
作者简介: 周松 (1967 -), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为船舶发动机排放与控制, E-mail: songzhou@hrbeu.edu.cn。

分距离海岸线 200 海里的区域建立北美排放控制区，自 2012 年 8 月起纳入排放控制区域（ECA）进行管理；在毗邻波多黎各（美属）以及维京群岛（美属）海岸一定区域的海域内建立加勒比排放控制区，自 2014 年 1 月起纳入排放控制区域（ECA），对航行其中的船舶的燃油硫含量进行控制。此外，地中海北部区域国家和新加坡、日本、韩国、澳大利亚等国家也都计划加入硫排放控制区，在本国海域范围内限制船舶燃油油的硫含量；我国珠三角地区也在考虑设立排放控制区。

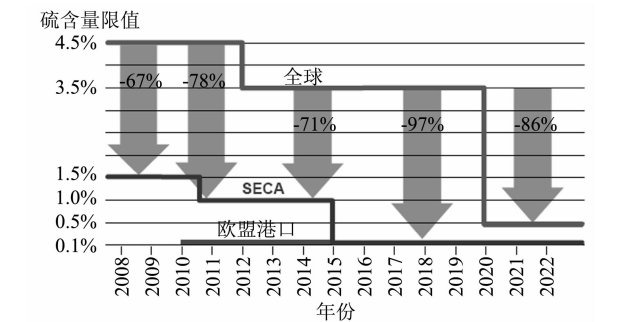


图 1 IMO 和欧盟对船舶燃油硫含量的限制

为应对日益严格的船舶燃油硫含量限制和日益逼近的法规实施时间，船舶废气 SO_x 排放控制技术得到了充分的发展和应用。目前，减少船舶 SO_x 排放的方法主要有三种，分别为：使用低硫燃油，使用液化天然气（LNG），以及加装废气洗涤装置。下面分别从投资成本、运行费用、对发动机和环境的影响等方面对上述三种船舶硫排放控制技术予以分析。

1 船用动力装置采用低硫燃油的技术方案

从理论上讲，船舶使用低硫燃油是解决船舶 SO_x 排放超标的有效方法，现有船舶柴油机可以直接燃用低硫燃油。与高硫燃油相比，除了价格差异巨大以外，低硫燃油的理化特性也有很大的不同，直接燃用低硫燃油对现有船舶发动机存在一定的影响。

1.1 船舶使用低硫燃油的投资成本和运行费用

为满足 IMO 或港口当局的硫排放标准，船舶使用低硫燃油方案时，除了配备常规高硫燃油外，还须额外配备低硫燃油及相应的存储设备，并在进出排放控制区时进行燃油切换。同时，须根据低硫燃油的黏度、润滑特性选取合适的锅炉、柴油机燃油泵，并须对现有锅炉、柴油机的燃油转换装置、供油系统、燃烧装置、监控和显示系统等进行相应的改造。尽管如此，船舶增配低硫燃油，其设备改造初投入的成本还是较使用液化天然气和采用废气

洗涤装置要低。

船舶所用的低硫燃油是在精炼厂由高硫燃油进一步脱硫而成，常用的高硫燃油脱硫工艺为催化加氢脱硫方法。此工艺技术能耗大、成本高、设备投资大，造成了低硫燃油价格昂贵。2014 年 7 月 17 日 Houston 港 IFO380 燃油为 577（\$·t⁻¹），而硫含量 0.1% 的 MGO 燃油为 965（\$·t⁻¹），差价为 388（\$·t⁻¹），且随着 IMO 有关控制区燃油硫含量 0.1% 的排放法规实施期限的日益临近，高低硫燃油差价将进一步增大。图 2 为 Bunkering Singapore 给出的低硫油价格增长趋势预测，从中可以看出，低硫燃油和传统重油之间的差价总体呈增加趋势。

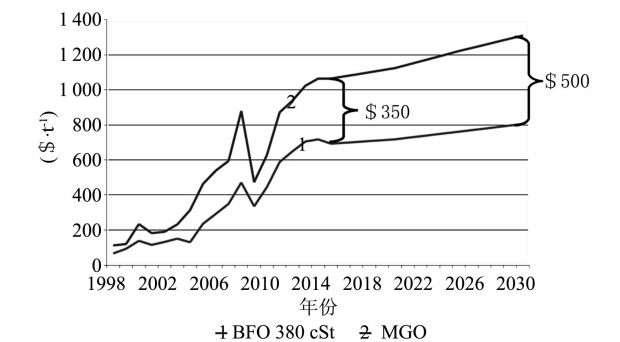


图 2 低硫燃油价格增长趋势预测

当前，燃油成本已占船舶运营成本的 50% 以上，若采用低硫燃油将进一步增加船舶运营成本，严重影响航运经济性。统计表明：IFO 380 和 MGO 在 2015 年的价格差大约为 310~560（\$·t⁻¹），差价率最高可能达到 70%~80%。此差价，对于一艘中等大小的 Ro-Ro 船，按中等距离的航线运行，一年额外的燃油花费将达 330~600 万美元。

2020 年全球船舶燃油硫含量 0.5% 法规的实施，将对船舶运营成本带来更大的冲击。以 2014 年 12 月 31 日的油价为例，含硫量 0.5% 的燃油，约为 551（\$·t⁻¹）；含硫量 2.7% 的燃油，约为 397（\$·t⁻¹）；含硫量 3.5% 的燃油，约为 341（\$·t⁻¹）。船舶由原来燃用 2.7% 含硫量的燃油，改用含硫量 0.5% 的燃油，燃油费用将增加 38.7%；由原来燃用含硫量 3.5% 的燃油，改燃含硫量 0.5% 的燃油，燃油费用将增加 61.6%。

从长远看，由于燃油精炼能力的限制，船舶所需的低硫燃油供应量有限，航运业不断增加的需求必然导致燃油价格持续上涨，进一步增加船舶的运营成本。国外研究表明：所有船舶使用低硫蒸馏油的方案将导致额外花费 1 500 亿美元，用于炼油厂燃油精炼。目前由于低硫燃油价格较贵，市场上符合欧盟规定的低硫重质燃油短缺，只能使用轻质低

硫油,并且只能在世界上少数的港口添加,如直布罗陀、法尔茅斯、安特卫普、鹿特丹、汉堡等,大大增加了航运公司的燃油成本。

1.2 船舶使用低硫燃油对发动机的影响

与高硫燃油相比,船用低硫燃油具有:低硫分、低润滑、低黏度、低闪点和低比重等特点。船用动力装置采用低硫燃油,理论上可以从根本上降低低硫氧化物的排放,无须再另外安装废气洗涤装置;而且使用低硫燃油,可以减少燃油系统的加热装置、燃油管路的伴随加热管等附属装置,改善机舱环境温度。但现有远洋船舶发动机都是针对燃用高硫重油优化的,虽然可以直接燃用低硫燃油,然而由于低硫燃油特殊的理化特性,对船舶发动机的使用、运行、维护等方面还是有很大的影响。

(1) 低硫燃油中的硅、铝等颗粒对发动机的磨损

在现代石油炼制工艺中,为了提高轻质燃油的产量和质量,普遍采用催化裂化的工艺技术。所使用的催化剂中有相当部分以微粒形式存在于成品燃油中。通常低硫燃油中的硅和铝含量超过 $25 \text{ (mg} \cdot \text{kg}^{-1})$,而高硫燃油中的硅和铝含量一般小于 $15 \text{ (mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 。这些微小的颗粒很难从燃油中分离出去,且质地坚硬,又具有冲击韧性,是柴油机燃油系统发生磨料磨损的主要原因。

(2) 低硫燃油较低的润滑性和黏度对发动机的影响

燃油含硫量低引起的物性改变主要体现在对船舶动力装置燃油系统的影响方面。低硫柴油生产过程中的加氢精制工艺,一方面降低了燃油含硫量,另一方面也同时降低了具有很强润滑能力的极性化合物和较强润滑能力的芳香族化合物的含量,从而大大降低了燃油的润滑性,容易引起柴油机高压油泵和喷油器粘着磨损,影响使用寿命,严重时可能引起油泵漏油;同时低黏度可导致柴油机燃油系统磨损,配合度下降以及柴油雾化不良和发动机功率不足,影响柴油机的正常工作。

目前大部分船舶柴油机的燃油允许最小运动黏度为 $2.0 \text{ (}\mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$,而根据 ISO 8217,船用轻柴油的 40°C 运动黏度值为 $1.5 \sim 6.0 \text{ (}\mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 。在实际使用中,由于燃油经过加热及机舱环境的影响,柴油机进油温度一般都高于 40°C ,因而低硫燃油运动黏度将进一步降低,加剧燃油供给泵、喷油泵和喷油器内部泄漏,增加发动机功率不足的风险。

(3) 低硫燃油闪点对发动机安全性的影响

闪点是船舶动力装置燃料物性的重要参数,IMO 等机构都明确要求船用柴油机和锅炉的液体燃

料闪点不得低于 60°C 。然而,部分低硫燃油的闪点可能会低于 60°C ,存在安全隐患;另外,由于闪点太低,会造成燃烧不稳定,导致发动机无法正常运行。

(4) 低硫燃油对动力装置燃油切换过程的影响

船舶采用燃用低硫燃油满足控制区和港口硫排放要求时,在进出控制区时须进行燃油转换。重油使用的温度较高 ($80 \sim 90^\circ\text{C}$),而低硫油使用温度较低 (18°C 左右)。与高硫燃油不同,低硫蒸馏燃油的芳香烃含量较低,对沥青质的溶解性较差。在含有大量沥青质的重质燃油与低硫蒸馏燃油转换时,若燃油切换操作不当,会因温度急速变化和低硫燃油润滑性较差,造成高压油泵柱塞和进/回油阀以及喷油器针阀等卡滞磨损,导致柴油机熄火,威胁船舶安全;也可能因为燃油之间的相容性不好引起滤器堵塞,导致机器设备因缺油而停止运转。

(5) 低硫燃油低密度对柴油机性能的影响

柴油机燃用低硫燃油时,低密度燃油使高压油泵的冲程燃油输出量降低。随着柴油机型号的不同及因黏度低而产生的燃油泄漏,造成低硫燃油和高硫重油实际的燃油输出量相差 $6\% \sim 15\%$ 左右,如果再考虑到高压油泵磨损,则燃油输出量差距会更大,从而影响柴油机的动力性能。

此外,低硫燃油对发动机气缸油的选用以及排气阀的腐蚀速度也有明显的影响。

1.3 船舶使用低硫燃油对大气和海洋环境的影响

低硫燃油是由高硫燃油进一步脱硫而成,燃油精炼过程产生大量的 CO_2 。研究表明,船舶采用低硫燃油,炼油厂每年将增加 CO_2 排放约 5 300 万 t,虽然船舶采用精炼油每年可减少 CO_2 排放 2 700 万 t,由此采用低硫精炼油实际增加 CO_2 排放 2 600 万 t。船舶采用低硫燃油减少了硫排放,却在另一方面增加了全球 CO_2 排放,与当前船舶减少 CO_2 排放、控制 EEDI 和 EEOI 指数的趋势和要求相背。

2 船用动力装置采用液化天然气

随着石油资源的逐步枯竭,加之国际社会对排放要求的日益严格,开发船舶新型替代能源迫在眉睫。尽管国内外对于船舶替代燃料做了很多研究,但目前比较成熟、可能在船舶上实际规模应用的只有液化天然气 (LNG)。

与传统的燃油相比, LNG 具有以下优势:

(1) 储量丰富。目前世界上常规天然气资源量估计为 $1.45 \times 10^{14} \text{ m}^3$,按目前年消耗量 $2.3 \times$

10¹² m³ 计算,可以开采 63 年。最近,由于页岩气开采技术的突破,非常规天然气储量大大增加。天然气已经成为 21 世纪消费量增长最快的能源,在全球一次性能源消费中所占比例越来越大,目前约占世界能源消费的近 1/4。

(2) 价格比较低廉。图 3 给出了 LNG、船用燃料油(HFO380)和船用轻柴油(MGO)的价格走势图。从图中可以看出,自 2006 年起,天然气的价格就与 HFO380 价格不相上下,自 2008 年以来,天然气的价格甚至低于 HFO380。

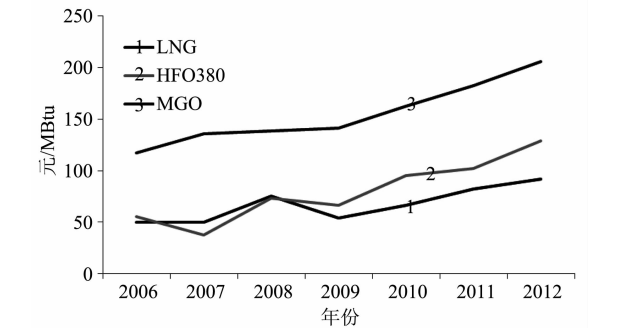


图 3 LNG、HFO 和 MGO 的价格走势图

(3) 安全性较好。LNG 的使用安全性较柴油要好。首先,天然气燃点为 650℃,而柴油燃点只有 220℃,更容易引燃;其次,天然气发生爆炸的浓度区间是 5%~15%,柴油气发生爆炸的浓度区间是 0.5%~4.0%,即空气中柴油气浓度达到 0.5%即容易发生爆炸,而天然气则须累积到 5%才会发生爆炸;最后,天然气密度是空气的 55%,泄漏后会直接扩散到空气中,如果加入嗅剂,泄漏时可被及时发现,减小了安全隐患。

(4) 环保性好。天然气是最清洁的化石燃料,与其他化石燃料相比,在相同能量输出下,天然气的污染物排放最少,几乎没有 SO_x 和颗粒的排放,完全符合 IMO 公约和法规对 SO_x 排放的要求,具体排放数据比较见表 1。

虽然,使用天然气燃料具有显著的优点,但下列问题仍然制约着船舶天然气动力的发展和应用。

(1) 使用天然气燃料安全要求严格,设备初始投资成本大。为了满足 LNG 动力船舶的安全性,其准入标准与普通船舶不同,比如:须设立独立的发动机舱室;LNG 管道必须采用双层壳,既能耐高压,也能耐低压;储气罐必须安装在船舶首尾线上,以减少船舶碰撞造成的燃气泄漏危险等。建造采用天然气作为燃料的船舶,其动力装置的投资成本约为船舶造价的 1/3,比传统燃用重油的动力装置费用增加 600~1 000 万美元。

(2) 加气站等配套设施不足,制约了天然气作为燃料的船舶的应用。船舶在营运过程中必须要在沿岸港口加注 LNG,但目前的 LNG 补给和储存等设施远没有实现大规模的覆盖,无法有效满足航行船舶的加气需求。

(3) 续航能力弱。LNG 还不能在世界上所有的港口加装,且 LNG 储罐体积较大,目前还达不到远洋运输的要求;同时,LNG 储罐系统复杂,布局困难,为船舶的设计和改造带来很大难度。

(4) 加气技术还面临一些难题。由于船舶受涨潮落潮的影响,无法确定停泊位置,而 LNG 输送管道均为低温管道,不易延展和伸缩。进行船对船加气,依然面临许多有待攻克的技术难题。

(5) 甲烷泄漏和甲醛排放。目前的 LNG 燃用技术,甲烷泄漏较多,而甲烷是严重的温室效应气体,其增温潜力值(GWP)是 CO₂ 的 25 倍。目前,政府间气候变化专门委员会(IPCC)根据各种温室气体增温潜力值及其在大气中的总浓度,估算出不同温室气体对温室效应的贡献(见表 2)。随着 LNG 动力船舶的规模应用,LNG 动力船舶对全球温室效应的贡献将越来越大。此外,使用 LNG 作为燃料,由于发动机的不完全燃烧,其废气中含有一定量的甲醛,对人体和环境都有严重的危害。

表 1 天然气和化石燃油的排放比较

单位:(g·MJ⁻¹)

燃料类型	CO ₂	CO	NO _x	SO _x	PM
天然气	50 300.00	17.20	39.55	0.43	3.01
化石燃油	70 505.98	14.19	192.60	482.36	36.11

表 2 主要温室效应气体对温室效应的贡献

CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC (氯氟烃)
55%	15%	6%	24%

当前船舶采用 LNG 的主要障碍是:如何能方便地加注液化天然气。目前受基础设施的限制,加气不便,且还不能覆盖所有适用的船型,特别是天然气发动机固有的一些问题还没有彻底解决,如磨损等,因此,LNG 还不能完全替代传统的重油和柴油。LNG 动力船舶作为新生事物,在国内外应用和推广还有不少问题亟待解决。同时,LNG 的市场价格也在不断上涨,尤其是 2013 年以来,天然气价格连续上涨,再加上液化环节的费用,与高硫燃油相比,正在逐步丧失其价格优势。

综上,虽然 LNG 资源丰富,但是历经加工费用、运输费用以及相关的贸易关税等,实际的销售价格还是较高;再加上船舶加注 LNG 的基础设施

尚未完善，相关法规尚未健全，以及能够加注 LNG 的港口较少等问题，使 LNG 作动力在船舶上的规模应用还需要很长时间。

3 船舶废气洗涤技术

随着国际油价的不断上涨和愈来愈严格的排放法规，船舶废气后处理脱硫技术已经得到广泛的研究和应用。

船舶废气后处理脱硫技术可以分为干法、湿法两种。下面分别介绍不同废气洗涤技术的原理和它们的优缺点。干式洗涤脱硫系统，采用氢氧化钙颗粒作为吸附剂和废气中的 SO_x 发生反应，形成硫酸盐，从而脱去废气中的 SO_x ，达到净化废气的目的。对于干式洗涤脱硫系统，应用比较广泛的只有 Couple Systems 公司开发的 Dry-EGCS 脱硫系统，该系统于 2011 年 4 月通过德国劳氏船级社认证，适用于 1 ~ 60 MW 的动力装置。

湿式洗涤系统包括闭式洗涤系统、开式洗涤系统和混合洗涤系统。闭式系统技术方案主要包括钠碱法、镁法等；开式系统主要指的是海水洗涤法。闭式系统利用自身携带的碱性物质作为洗涤剂，吸收废气中的 SO_x 反应生成硫酸盐，洗涤后产生的废液经过处理，检测合格后方可排入海洋。闭式废气洗涤系统对海洋环境没有任何不利影响。开式系统的原理是，由于海水呈弱碱性，利用海水吸收船舶动力装置废气中的 SO_x ，海水吸收 SO_x 的实质是利用废气中的 SO_x 替代海水中的 CO_2 。根据研究，1 t 含硫量 3.5% 的燃油燃烧后排出的 SO_x 被海水充分吸收后，将置换出 92.4kg 的 CO_2 ，整个吸收过程效果相当于将 107.2kg 的硫酸 (H_2SO_4) 直接排入大海，将造成海洋酸化和自净能力的下降。混合洗涤系统结合开式洗涤系统和闭式洗涤系统，在港口和不能使用开式循环洗涤方式的区域，使用闭式洗涤方式，在其他区域，使用开式洗涤系统，以减少碱性物质的消耗。

上述不同洗涤技术工作原理的对比及其优缺点列于表 3。

与采用低硫燃油相比，洗涤系统初投资较大。但显然，洗涤系统投资回收跟高低硫燃油差价和船舶在排放控制区的燃油消耗量有关。图 4 以闭式洗涤系统为例，给出了湿式洗涤系统投资回收期 and 燃油差价以及船舶控制区燃油消耗量之间的关系。

由图 4 可见，船舶洗涤系统成本回收期预测为 0.2 ~ 3 年，且随着高低硫燃油价差和船舶在控制区燃油消耗量的增大，船舶废气洗涤系统的成本回

收周期将逐渐缩短。

表 3 不同洗涤技术优缺点

方案	优缺点比较	
干式洗涤方式	优点	脱硫效率高，能和 SCR 直接联用。
	缺点	CO_2 排放量增加 10%；设备占地面积大，增加了船舶的负载量；设备初投资大。
开式洗涤方式	优点	采用海水作为洗涤液，不需要添加任何化学品；系统组成较为简单，不需要储存洗涤液和废液；设备初投资较少。
	缺点	地域限制大，较低海水盐度或较高海水温度均会抑制 SO_x 的吸收；对于中高浓度的烟气脱硫效果不佳；港口酸性污水排放受限，需更换低硫燃油；洗涤系统耗能多；洗涤废液污染海洋环境，增加全球 CO_2 排放。
闭式洗涤方式	优点	脱硫效率高，可靠性高；不受海水盐度和温度限制，可在全球海域航行；洗涤废液经过处理，不污染海洋。
	缺点	使用 NaOH 或 Na_2CO_3 作为脱硫剂，增加运营成本，船舶危险化学品需特殊处理、储存，且需要得到批准；系统组成较开式模式复杂；设备初投资较高。
混合洗涤方式	优点	兼具开式和闭式两种方式的优点；灵活切换模式，可在全球海域航行。
	缺点	系统组成最为复杂，设备初投资在湿式系统中最高；系统维护成本较高；在不同运行模式下，同样兼具开式和闭式两种方法的缺点。

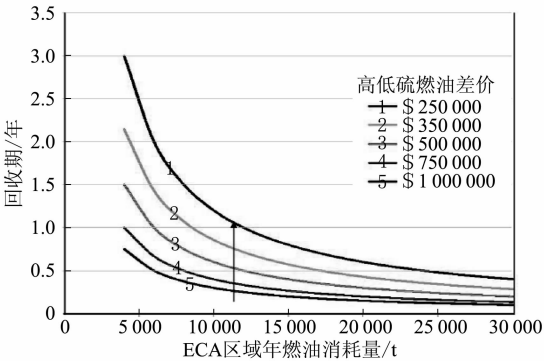


图 4 洗涤设备投资回收期与燃油差价及船舶排放控制区燃油消耗量之间的关系（洗涤系统价格\$300 万元/套）

2020 年全球船舶燃油硫含量限值 0.5% 法规的实施，将为废气洗涤系统带来更大的机遇。以一台 MAN 6S90ME 二冲程柴油机为例，额定功率为 29 340 kW，以 85% 的经济工况运行，油耗为 $170(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$ ，则一天须燃用燃油 101.75 t，一年运行 280 天，须燃用 28 490 t 燃油。仍以 2014 年 12 月 31 日油价为例，如果使用含硫量 0.5% 的燃油，一年燃油费用约为 1 570 万美元；使用含硫量 2.7% 的燃油，一年燃油费用约为 1 131

万美元，改燃含硫量 0.5% 的燃油，每年燃油费用将增加 439 万美元；使用含硫量 3.5% 的燃油，一年燃油费用约为 972 万美元，改燃含硫量 0.5% 的燃油，每年燃油费用将增加 598 万美元。由此，即使不考虑排放控制区燃油硫含量 0.1% 的情况，废气洗涤系统的成本回收期也不到一年。

4 船舶硫排放不同控制技术对比

现有的三种船舶燃料 SO_x 排放控制技术，都能满足 IMO 即将实施的船舶燃油硫含量限制的法规。三种技术各有优缺点，相关对比列于表 4。

表 4 不同船舶燃料硫排放控制技术对比

脱硫方法	低硫燃油	LNG 燃料	废气洗涤系统
设备初投资	较小	很大	较大
设备运行费用	低	较高	较高
设备维护费用	较低	高	较高
船舶运营成本	高	低	低
对动力装置工作性能的影响	略微恶化燃烧，降低输出功率	功率降低	没有影响
对其他污染物排放的影响	没有	几乎没有 PM 排放，略微降低 NO _x 排放	可以除去 60% 以上的颗粒和 10% 左右的 NO _x
对发动机寿命的影响	长期有较大影响	长期有较大影响	没有
对船舶安全性的影响	有	有	没有
对环境影响	精炼油排放过多 CO ₂	甲烷泄漏造成温室效应，排放甲醛	没有
发动机改造	冷却器、燃油辅助系统	燃油系统、燃烧室 (双燃料发动机)	不需要
船舶改造	燃油切换装置、低硫油柜	LNG 低温存储系统及气化装置	增加洗涤塔和相关泵、阀及存储柜
设备使用方便性	方便	须进行培训	须进行培训
燃料供应量	少	多	多
燃油获取方便性	不方便	不方便	方便

5 结论

通过上述研究，得到如下结论：

(1) 由于低硫燃油的特性，长期使用低硫燃油对船舶柴油机的运行可靠性和安全性将产生影响。另外，使用低硫燃油成本最高，远高于其他两种方案。总的说来，以采用低硫燃油来满足排放要求的方法要承担很高的运营成本，只能是权益之计。

(2) 船舶燃用 LNG 作为动力的技术还没有完全成熟。到目前为止，采用 LNG 作动力，无论是规范、港口配套的基础设施还是气体发动机本体都还没有完善，加之燃用天然气动力装置价格昂贵以及 LNG 的市场价格仍然在不断上涨，此方法距离规模使用还有一定的距离。

(3) 采用废气洗涤装置须要承担较大的前期投入，但仍远低于使用 LNG 方案的前期投入成本。由于其使用低质重油为燃料，船舶运行成本较低，废气洗涤装置适用于目前经常在排放控制区航行的船舶和 2020 年后全球航行船舶，届时废气洗涤系统将成为船舶的标准配置。

(4) 从船舶整个生命周期来看，使用废气洗涤系统所增加的成本要远小于使用低硫燃油所增加的成本。而且随着 MGO 和 HFO 之间价格差距的加大，废气洗涤系统的投资回收期将急剧缩短。

综上所述，对船舶而言，在不同的硫排放控制技术中，洗涤脱硫技术是最有前途的减少船舶动力装置 SO_x 排放的措施，而尤以基于钠碱法的闭式洗涤方法最有前景，应当着力研究和推广。

参考文献

[1] 党爱民, 顾亮亮, 朱裕君. 船舶燃用低硫燃油的研究及系统设计 [J]. 船舶设计通讯, 2012 (2): 45-48.

[2] 薛成. 船舶硫氧化物排放控制及展望 [J]. 世界海运, 2011, 34 (9): 20-26.

[3] 吴芳. 船舶燃用低硫燃油的问题分析与系统设计 [J]. 江苏船舶, 2010, 27 (5): 23-25, 39.

[4] 杨文猛. 船舶低硫燃油系统介绍 [J]. 江苏船舶, 2010, 27 (4): 24-25, 38.

[5] Theo Notteboom, Eef Delhay, Kris Vanherle. Analysis of the consequences of low sulphur fuel requirements [R]. UNIVERSITY OF ANTWERP; European Community Shipowners' Associations (ECSA), 2010.

[6] 孙化栋. 船舶硫氧化物的排放控制 [J]. 世界海运, 2012, 35 (8): 51-54.

[7] 徐勇杰. 船舶硫氧化物减排技术应用 [J]. 船舶设计通讯, 2013 增刊 (133): 36-41.

[8] 周淑慧, 沈鑫, 刘晓娟, 等. LNG 在我国内河水运领域的应用探讨 [J]. 集输与加工, 2013, 33 (2): 1-9.

[9] 李文. 船用柴油机硫化物排放控制技术研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013. .

[10] 张兆廷, 李国诚. 船舶烟气海水法脱硫技术研究 [J]. 科技信息, 2012 (9): 220, 201.

[11] 周松, 李琤, 沈飞翔, 等. 船舶废气洗涤脱硫技术现状及发展趋势 [J]. 柴油机, 2014, 36 (5): 1-6.