

NO_x Emission Regulations and Emission Control Technology for Marine Diesel Engine

Kai Li, Yihuai Hu, Cun Zeng

Shanghai Maritime University, Shanghai

Email: sxjzlk@163.com, yhhu@shmtu.edu.cn, 1722637629@qq.com

Received: Nov. 6th, 2017; accepted: Nov. 18th, 2017; published: Nov. 27th, 2017

Abstract

With the development of the world economy and the Silk Road on the sea, ship transport has become one of the important modes of transport of international goods. In the process of ship transport, diesel engine emissions of nitrogen oxides, sulfur oxides, particulate matter and other pollutants on the natural environment caused great damage. For port cities and coastal cities, the damage of exhaust pollutants will be greater. This paper mainly analyzes the NO_x emission regulations of existing marine diesel engines and puts forward the measures to control the NO_x emission of diesel engines. Studying a set of equipment to achieve control of a variety of marine diesel engine emissions of pollutants, remove a variety of pollutants, and focus on footprint, economy and efficiency simultaneously, will be a direction of the study in the future.

Keywords

Marine Diesel Engine, EGR, Emission Control

船舶柴油机NO_x排放法规及排放控制技术

李 凯, 胡以怀, 曾 存

上海海事大学, 上海

Email: sxjzlk@163.com, yhhu@shmtu.edu.cn, 1722637629@qq.com

收稿日期: 2017年11月6日; 录用日期: 2017年11月18日; 发布日期: 2017年11月27日

摘 要

随着世界经济全球化和海上丝绸之路的发展, 船舶运输已经成为国际货物的重要的运输方式之一。在船舶运输过程中, 柴油机排放的氮氧化物、硫氧化物、颗粒物等废气污染物对自然环境造成了极大的危害。

尾气污染物对于港口城市和沿海城市,危害会更大。本文主要对现有船舶柴油机 NO_x 排放法规进行分析,提出控制船舶柴油机 NO_x 排放的措施。能否研究一套设备同时实现控制多种船舶柴油机废气排放出的污染物,并且可以去除多种污染物,且这套设备具有占地面积小、经济性好、效率高等有点,将是以后研究的方向。

关键词

船舶柴油机, EGR, 排放控制

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球环境的日益恶化,人们环境保护意识的不断提高,船舶废气排放造成大气污染的问题越来越引起人们的重视。船舶柴油机废气排放的主要污染物包括 CO 、 HC 、 NO_x 、 SO_x 和 PM [1]。研究表明,船舶排放的 NO_x 、 SO_2 、 CO_2 分别占全球人为污染的15%、4%~9%和2.7%。我们可以看出,在废气污染物排放中,氮氧化物的含量最多,所以我们很有必要先对船舶废气排放中的氮氧化物进行控制。通过对 NO_x 排放法规进行分析,了解 NO_x 排放的危害,并提出减少 NO_x 排放的措施,经过不断优化,不断试验,最后应用到海船船舶,使船舶能够符合越来越严格的国际海事组织关于船舶废气排放的标准。

2. 船用柴油机 NO_x 排放法规

MARPOL 73/78 公约附则 VI “1997 年议定” 2005 年 5 月 19 日生效,附则中对安装在 2000 年 1 月 1 日或以后建造的船舶上,输出功率超过 130 kW 的柴油机(或经过重大改装的)实施 Tier I, NO_x 的排放量小于 17 g/kwh,从 2011 年 1 月 1 日实施 Tier II, NO_x 的排放量小于 14.4 g/kwh,从 2016 年 1 月 1 日开始实施 Tier III, NO_x 的排放量小于 3.4 g/kwh [2]。图 1 为 NO_x 排放法规对不同转速柴油机实施情况。

第三阶段(Tier III)的 NO_x 排放限值将于 2016 年 1 月 1 日实施,其仅对于 IMO 指定的 NO_x 排放控制区(NECA: NO_x Emissions Control Areas)。目前 NECA 是指现行 MARPOL 附则 VI 中指定的“北海区域”和“波罗的海区域” [3],亦可以见图 1 所示。

3. 船用柴油机 NO_x 排放的危害

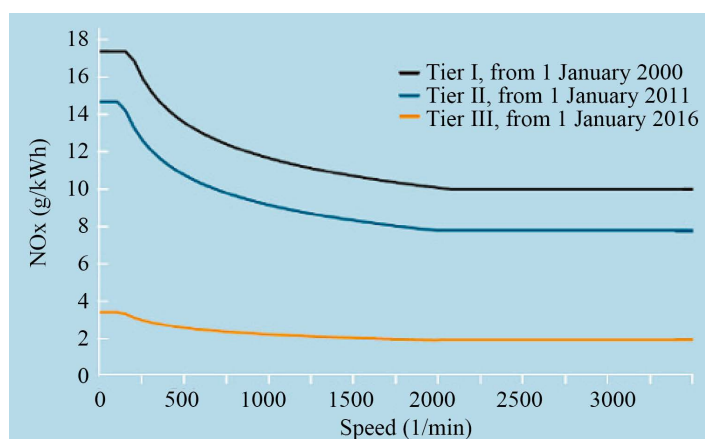
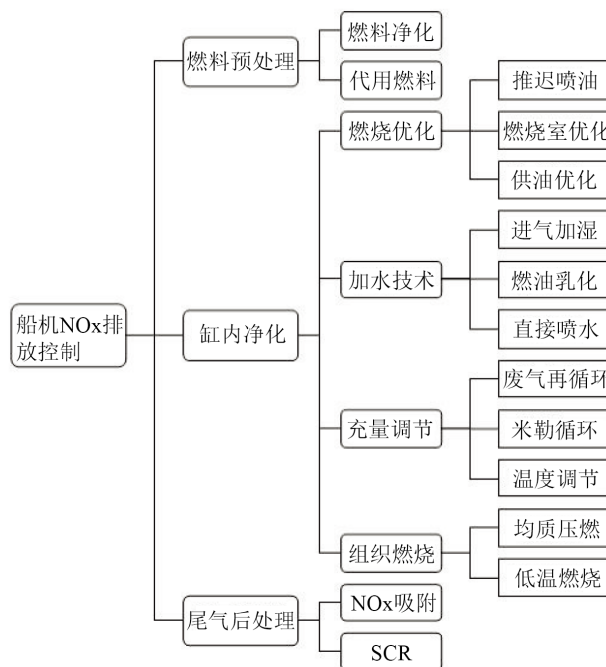
船舶柴油机的排放污染物中的氮氧化物是燃烧过程中氮的各种氧化物的总称,具体包括 NO 、 NO_2 、 N_2O_4 、 N_2O 、 N_2O_3 、和 N_2O_5 等,船舶柴油机排放的氮氧化物绝大多数是 NO 和 NO_2 ,其余的含量都很少。氮氧化物排放的危害程度主要取决于毒性、在空气中的浓度、吸入受污染空气的时间以及每分钟吸入的体积。 NO 是无色但有轻度刺激性气味的气体,它在低浓度时,对人体健康无明显的影响,高浓度时造成人与动物神经系统障碍。尽管 NO 直接危害性不大,但是 NO 会在大气中可以被氧化成剧毒的 NO_2 。表 1 所示为各种浓度 NO_2 对人体的影响[4]。

4. 船用柴油机 NO_x 排放控制技术

目前,应用于船舶柴油机 NO_x 排放控制的技术主要有燃料预处理、缸内净化和尾气后处理[5],具体处理技术如图 2 所示。

Table 1. Effects of various concentrations of NO₂ on the human body**表 1.** 各种浓度的 NO₂ 对人体的影响

中毒程度	NO ₂ (ppm)	影响
轻度中毒	5~10	闻到强烈的刺激臭味
	15~25	眼、鼻呼吸遭受到刺激, 人只能短时间忍受
重度中毒	50	刺激强烈, 1 min 内出现呼吸异常,
	80	3~5 min 引起胸痛、恶心、咳嗽反复发作, 引起肺气肿
死亡危险	100~150	短时间内有生命危险, 1 h 内会因肺气肿死亡
	250	很短时间即可造成死亡

**Figure 1.** NO_x emission regulations on the implementation of different speed diesel engine**图 1.** NO_x 排放法规对不同转速柴油机实施情况**Figure 2.** Control technology of NO_x emission in ship**图 2.** 船机 NO_x 排放控制技术

下面主要从以下方面进行阐述:

4.1. 燃烧系统优化

燃烧系统对燃烧室内气体的流动、燃油与空气的混合及混合气体的燃烧有很大的影响。历来是国内外各大研究机构及主机厂的重点研究内容。

2010 年至今,我国船舶研究所就在 6CS21、6W16、SCE270、8CS21 等机型开发过程中,不断对燃烧系统进行优化,积累了一定的缸内燃烧系统的开发经验。根据开发经验,通过对燃烧系统中喷油器型式的优化,可在保持柴油机油耗率不变的情况下,降低约 10% 的 NO_x 排放;在油耗率 $\leq 5\%$ 的前提下,通过进行燃烧室型线的优化,可降低约 30% 的 NO_x 排放[6]。

4.2. 推迟喷油

推迟喷油正时后,柴油机燃烧过程发生整体延滞,滞燃期变短,滞燃期内喷入气缸的燃油量降低,预混燃烧速率降低,柴油机的火焰温度降低, NO_x 的生成量减少。

传统机械式喷油系统喷油定时的控制受到较大的限制,电控式喷油系统喷油定时的控制也更加精确、灵活。一般通过推迟喷油降低 30% 的 NO_x 排放量,燃油消耗会增加 5% 左右。

在中国船舶重工集团公司第七研究所与瓦锡兰联合开发 W16 的过程中,为满足 IMO Tier II 排放法规,将喷油正时由上止点前 11°CA 调整为上止点前 7°CA 后, NO_x 排放降低约 15.4%。

4.3. 米勒循环

所谓米勒循环就是通过调整进气门关闭角,使进气门提前关闭,影响进气充量,降低压缩终点的温度,抑制 NO_x 生成,达到降低排放的目的[7]。如图 3 所示,采用米勒循环与传统凸轮廓廓进行比较,可以看出,采用米勒循环之后,进气门会更早关闭,同时气阀升程会变高,从而影响进气量,进而可以降低压缩点的温度,抑制 NO_x 生成。

如图 4 所示,试验表明,在保证足够增压压力的前提下,在一定的范围内,米勒的增强,对燃油消耗率和 NO_x 排放的影响基本呈正面关系;在保证增压压力的前提下,与传统非米勒相比,恰当的米勒可以降低 NO_x 排放约 40% 以上,经济性基本保持不变。

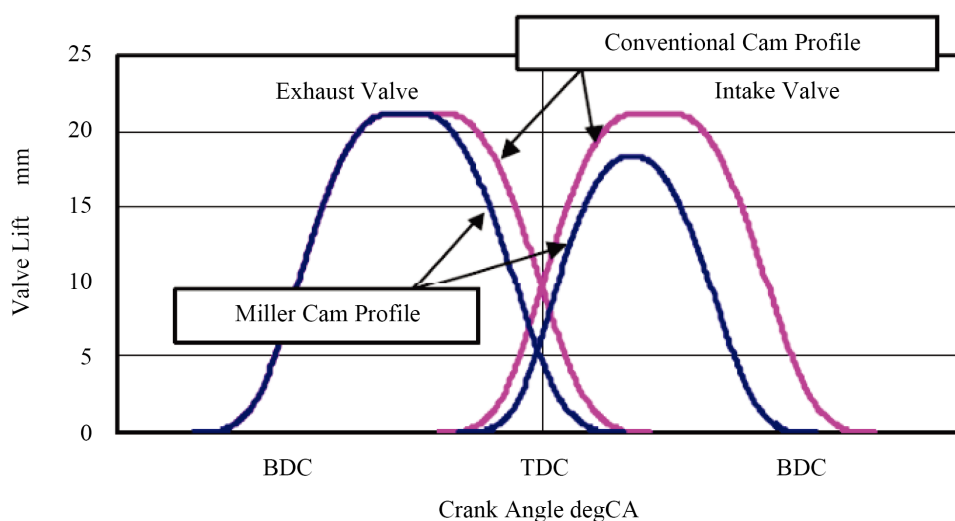


Figure 3. Comparison of Miller cycle with traditional circulation
图 3. 米勒循环与传统循环的比较

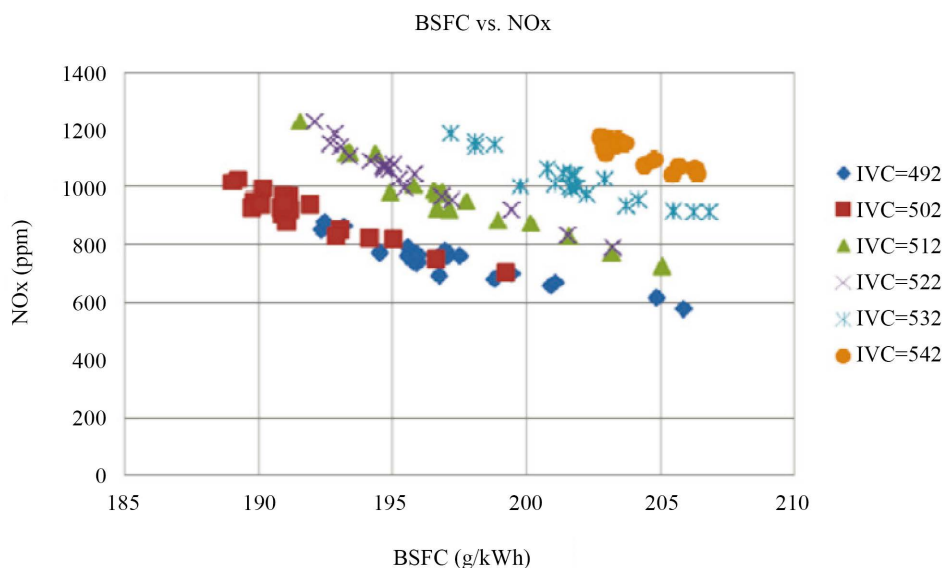


Figure 4. Relationship between NO_x emissions and fuel consumption

图 4. NO_x 排放与燃油消耗率的关系

4.4. 进气加湿

加水燃烧包括进气加湿、油水乳化和缸内直接喷水等方式。进气加湿降低了进气中单位体积 O_2 浓度含量，同时水较高的比热容可以有效降低缸内燃烧温度，抑制 NO_x 生成。

2013 年我国某公司对单缸机进行进气加湿试验，试验结合仿真计算，结果表明，进气加湿 NO_x 降低量可以达到 50%~60%。Wartsila 公司通过加热器对增压器后水加热汽化，再经除雾器除去未汽化的水，可以得到 70℃~90℃ 饱和空气，如图 5 所示，为该公司的 CASS 系统。

4.5. EGR 技术

EGR 技术就是通过增加混合气比热容，降低最高燃烧温度，另外，废气稀释作用降低了混合气氧浓度，使化学反应速度下降，燃烧滞后，缩短在高温下滞留时间，破坏高温 NO_x 的生成条件，从而达到抑制 NO_x 生成的目的。图 6 所示为 NO_x 排放量与 EGR 率的关系图，从图中我们可以看出，EGR 率越高，则 NO_x 排放量越少。

近年来，我国许多研究机构对船用中速柴油机 EGR 系统做了较为深入的研究，通过在 6CS21 船用中速柴油机上进行了 EGR 试验研究，试验的结果表明：以轻柴油为燃料，20% EGR 率可降低 70%~80% 的 NO_x 排放。

如图 7 所示为柴油机 EGR 处理系统，将柴油机尾气回收至进气口，稀释燃烧室内氧气，有利于点火延迟；且烟气热容量较大，相同的放热量，气体温升少，从而降低 NO_x 生成。

4.6. SCR 技术

选择性催化氧化(SCR)技术是指在催化剂和氧气存在的条件下，在较低的温度范围，如 280℃~420℃ 内，还原剂(如氨、CO 或碳氢化合物等)有选择性地 将废气中的 NO_x 还原成 N_2 和水[8]，以此减少 NO_x 的排放。催化还原过程的主要部件是装有催化剂的反应器和氨的添加系统。氨源既可是处在压力下的无水液氨，也可为处在大气压力下的氨水溶液。氨水在一个电加热或者蒸汽加热的蒸发器内蒸发，接着用空气进行稀释，这些过程都在混合气体喷入排气管之前做好。废气经过温度为 300℃~400℃ 的催化剂，

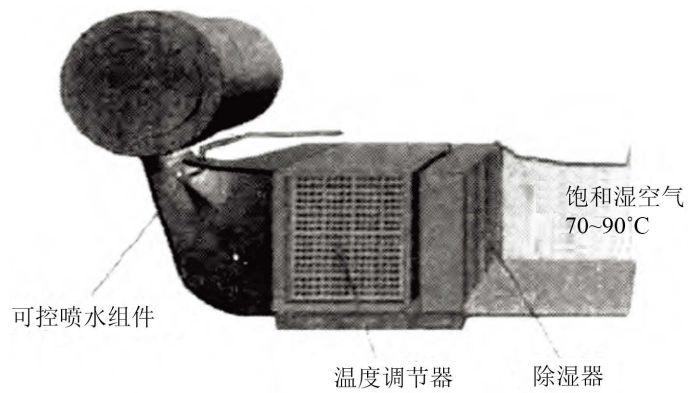


Figure 5. Wartsila Corporation CASS System
图 5. Wartsila 公司 CASS 系统

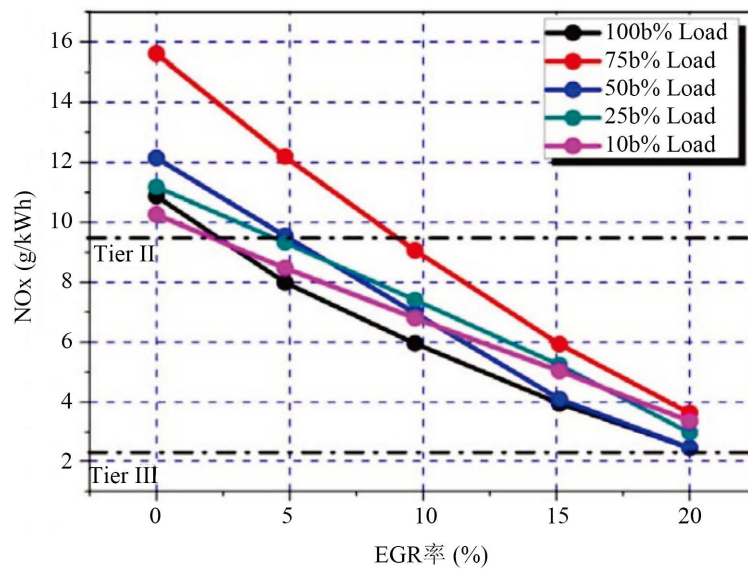


Figure 6. Relationship between NO_x emissions and EGR rate
图 6. NO_x 排放量与 EGR 率的关系

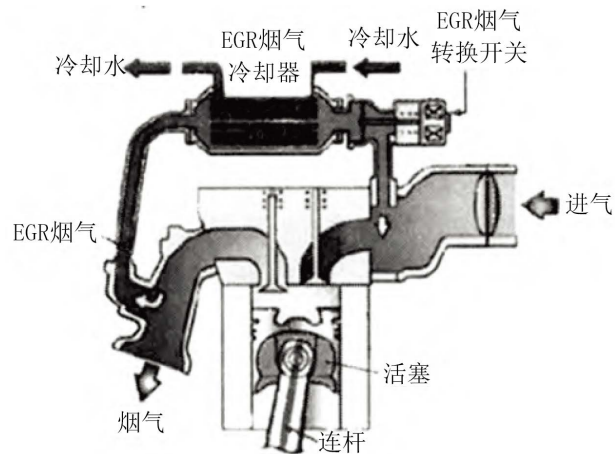


Figure 7. EGR system schematics
图 7. EGR 系统原理图

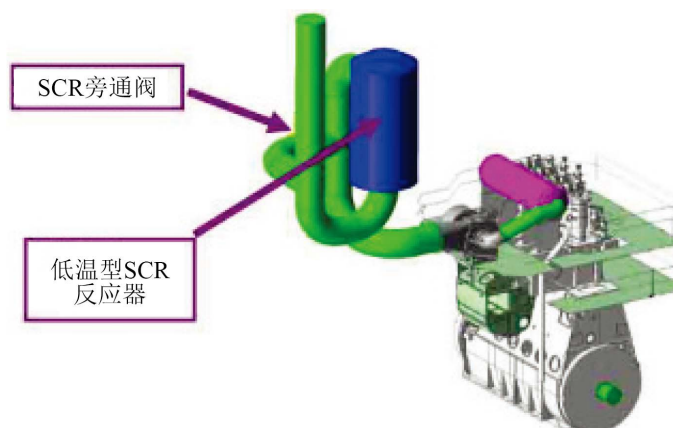
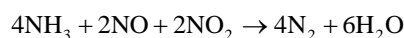
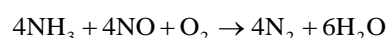
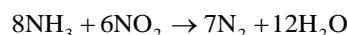


Figure 8. Low temperature SCR system and host connection diagram
图 8. 低温型 SCR 系统与主机连接示意图

并在那里将 NO_x 还原为 N_2 和 H_2O ，其具体反应如下：



液氨、氨水、尿素都可用作还原剂。对于船用来说，需要安全且容易处理的还原剂，采用尿素最合适。且尿素比氨便宜，尿素在常温下节能分解成氨气、二氧化碳和水[9]。不论采用哪种还原剂，运行费用和贮存柜容量都将是船舶设计和运行时所需考虑的重点。SCR 技术已在船用四冲程柴油机上应用，整机试验显示，在 Tier II 的基础上， NO_x 可以降低到 2.2 g/kwh，可达标 IMO Tier III 排放要求， NO_x 转化率 80% 以上，并保持较低的 NH_3 泄漏量。如图 8 为低温型 SCR 系统与主机连接示意图。

5. 结语

目前，上述提出的许多技术仍在研发和实验阶段，少数已经应用于船上，如果想尽早应用于船上，来减少废气排放造成的污染问题，科研机构仍需开展大量研究，做大量实船实验。当然船舶柴油机废气排放的污染物中除了 NO_x ，还有许多其他污染物，如 SO_x 、PM(颗粒物)、 CO_2 、CO、HC 等物质[10]，这些污染物也应该采取适当的措施进行控制，这样才能使船舶柴油机排出的废气符合 IMO (国际海事组织) 公约对船舶排放污染物的要求。

此外，科研机构在研究船舶尾气控制技术在应用于海船船舶时，还应该考虑船舶的空间环境，船舶空间有限，控制设备需要考虑经济性，这些都是我们要考虑的问题。能否研究一套设备同时实现控制多种船舶柴油机废气排放出的污染物，并且可以去除多种污染物，且这套设备具有占地面积小，经济性好，效率高等优点，将是以后研究的方向。

船舶柴油机排放的尾气造成大气污染已经是世界各国面临的一个需要尽快解决的问题，尤其是对于沿海城市和港口城市，这一情况表现的尤为突出。从目前 IMO 和国家环保部门出台的法规来看，对船舶柴油机尾气排放的限制将越来越严格，而且最终 IMO 会出台更严格的海船船舶废气排放标准，解决废气污染问题迫在眉睫。

参考文献 (References)

- [1] 方平, 陈雄波, 唐子君, 黄建航, 曾文豪, 吴海文, 唐志雄, 岑超平. 船舶柴油机大气污染物排放特性及控制技

- 术研究现状[J]. 化工进展, 2017, 36(3): 1067-1076.
- [2] 吴校明. 基于 MARPOL73/78 附则 VI 的船用柴油机排放控制研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海事大学, 2006.
- [3] 汪滔, 李超, 高子朋. IMO Tier III 标准下船舶推进系统的选择[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(3): 1-2+5.
- [4] 谢绍发. 汽车废气污染和控制技术[J]. 机械开发, 1999(3): 1-5.
- [5] 李克, 高海洋, 刘双喜, 崔国旭. 柴油机清洁排放控制技术的发展及展望[J]. 小型内燃机与摩托车, 2012, 41(1): 88-92+96.
- [6] 朱红建. 船舶废气排放新规则及其应对[J]. 船舶工程, 2011, 33(S1): 100-103.
- [7] 李军, 向璐, 郑建军. 米勒循环发动机缸内气体流动与燃烧分析[J]. 车用发动机, 2016(1): 73-77+82.
- [8] 周英贵. 大型电站锅炉 SNCR/SCR 脱硝工艺试验研究、数值模拟及工程验证[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [9] 李江华, 董胜先. 船舶柴油机 NO_x 排放控制的技术研究[J]. 装备制造技术, 2009(7): 32-34+59.
- [10] 刘鸿锋, 徐灏, 陈瑶姬, 季经伟. 船舶柴油机排气状况及污染物治理探讨[J]. 资源节约与环保, 2016(11): 189-191.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8844, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjctet@hanspub.org