

船舶柴油机节能减排技术发展趋势

杨子龙

(中国舰船研究院, 北京 100192)

摘要: 针对船舶柴油机面临的既要降低排放又要降低油率的双重挑战, 介绍了船舶柴油机一系列节能减排技术, 包括改善燃料燃烧过程, 开发新型替代清洁燃料技术、排放控制和尾气处理技术以及发动机动力系统能量综合利用等技术, 以期满足船舶柴油机节能、低排放及高效率的要求。

关键词: 船舶柴油机; 节能; 减排

中图分类号: TK421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)03-0021-04

Development Tendency of Marine Diesel Engine's Technology on Energy Saving and Emissions Reduction

Yang Zilong

(China Ship Research and Development Academy, Beijing 100192)

Abstract: To meet the challenges of both emissions reduction and fuel consumption reduction for marine diesel engines, a series of energy saving and emissions reduction technologies are introduced, including improving fuel combustion process, developing new and clean alternative fuel, emissions control and exhaust processing technology, as well as energy comprehensive utilization of engine's power system, in order to satisfy the requirements of marine diesel engines for energy saving, low emissions and high efficiency.

Keywords: marine diesel engine; energy saving; emissions reduction

0 引言

柴油机因其功率范围大、效率高、能耗低、使用维修方便而优于蒸汽机、燃气轮机等, 在民用船舶和中小型舰艇推进装置中确立了主导地位。目前, 柴油机占据了船舶动力系统市场 95% 的份额, 对航运业发展和国际间贸易有重要的意义。但是, 船舶柴油机排放带来的环境污染却令人担忧: 2008 年全球海运船舶排放的 SO_x 和 NO_x 分别占世界 SO_x 和 NO_x 排放总量的 9% 和 18% ~ 30%; 据国际海事组织(IMO)的研究报告数据, 到 2020 年, 全球航运业 CO_2 排放量将达到 14 亿吨, 约占全球 CO_2 排放量的 5% 左右^[1,7]。因此, 船舶柴油机面临着既要降低排放, 又要降低耗油率的双重挑战。在此背

景下, 世界各国船舶发动机厂商纷纷加大技术研发力度, 从改善燃料燃烧过程、使用新型替代清洁燃料、进行排放控制和尾气处理以及综合利用发动机动力系统能量等方向出发, 不断开发船舶柴油机新技术, 改善发动机性能, 提高可靠性、降低发动机排放, 通过发动机系统集成和能量回收利用技术, 进一步提高发动机系统效率、降低总排放(NO_x 、 CO_2 、 SO_x 、PM 等), 实现发动机优秀性能和超低排放。

1 改善燃料燃烧过程

改善燃料燃烧过程不仅可以提高发动机效率, 还可以减少有害物排放, 降低油耗。目前主要的改善燃烧技术有电控高压共轨燃油喷射技术、高增压

收稿日期: 2013-03-25

作者简介: 杨子龙(1980-), 男, 工程师, 主要研究方向为船舶动力顶层设计、系统集成、可靠性, E-mail: csicyzl@163.com。

技术、新燃烧模式技术等。

1.1 电控高压共轨燃油喷射技术

电控高压共轨燃油喷射技术是通过高压油泵建立燃油压力，然后利用共轨管完成燃油蓄压，最后通过使用高速泄油电磁阀或压电晶体执行器完成燃油喷射控制。高压共轨技术的应用使得喷油压力不再受容积式往复泵脉动式供油特性的影响，实现了供油过程与喷油过程的相互独立，实现精确的燃油高压喷射，改善了燃烧过程，提高了燃烧效率，降低了燃烧噪声和排放^[2]。近年来，随共轨技术发展，共轨系统的结构得到改进，共轨管由不同类型的蓄压器替代，蓄压功能由蓄压器完成，如图 1 所示。该系统为 Wärtsilä 柴油机共轨系统，最高工作压力 150 MPa，单缸功率 460 kW，额定转速 750 ($r \cdot \min^{-1}$)。目前，大功率低速船用柴油机共轨技术主要应用于 Wärtsilä、MAN B&W 以及 MTU 的柴油机上^[3]。

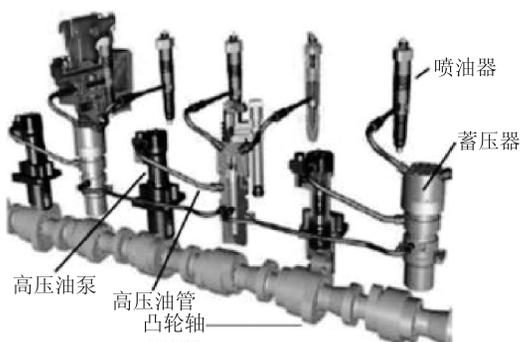


图 1 Wärtsilä 柴油机共轨系统

1.2 高增压技术

为了进一步提高柴油机的平均有效压力，降低柴油机燃油消耗，涡轮增压器朝着高压比、超高压比的方向发展。目前，国际主要品牌增压器的增压比已达 5.2。其中，MAN 公司 2004 年至今先后推出 TCR、TCA 系列增压器，压比指标均达到 5.0 以上，其中，TCR 系列单级压比大于 5.5。但是高压比对改善柴油机低工况性能意义不大，因此需对增压系统进行改进。目前，可用以改善高增压柴油机各工况性能的增压系统有相继增压系统、可变截面涡轮增压系统、废气旁通增压系统等^[4]。

(1) 相继增压系统

在低工况时，增压系统废气能量不足，引起涡轮转速下降，使得增压压力不足，最终导致增压器喘振、柴油机功率下降。而相继增压系统采用多个小流量的增压器结构，随发动机转速和负荷的增长，相继按次序投入工作，这样可保证工作中的增压器始终在高效率区运行，有效地改善了柴油机低

工况性能。该系统主要用于高、中速型 V 型机，目前使用的对象有 MTU 公司的 V 型机、日本 Niigata 的 V20FX 等。

(2) 可变截面涡轮增压系统

可变截面涡轮增压原理是根据增压柴油机外界负荷大小，通过改变喷嘴环叶片的角度改变流入涡轮叶片的气流参数，实现涡轮做功的连续变化，进而控制压气机增压压力值，从而使得柴油机与增压器在各工况下均有良好的匹配。

(3) 废气旁通增压系统

废气旁通增压系统采用较小的废气流通截面，可有效改善柴油机在低转速时的经济性、排放性能以及瞬态响应。在高负荷时，可通过打开废气旁通阀，释放多余废气，减小进气压力，从而解决了过小的涡轮通流面积导致的高负荷区增压压力过大而引起的最高燃烧压力过高、机械负荷和热负荷过高等问题。该增压系统主要用于对低工况性能要求不是很高的机型上，目前应用的机型主要有 Wärtsilä 的中速机和 MAN B&W 的中速机。

1.3 新燃烧技术

柴油燃烧过程中主要有害排放物的生成均需满足特定的混合气浓度和燃烧温度范围等边界条件。因此，只要合理控制缸内的混合气浓度和燃烧温度，就有可能实现超低排放。基于此，国内外开展了以“均质压燃、低温燃烧”为代表的新一代的内燃机燃烧理论和技术的研究。

均质压燃(HCCI)燃烧技术采用预混合均质混合气、压缩自燃着火、低火焰温度的燃烧方式，实现高热效率和超低的 PM 和 NO_x 排放。但由于柴油具有高黏度、低挥发性、低自燃温度的特性，因而改善燃油与空气的混合和抑制过快的燃烧反应速度是柴油机实现“均质压燃、低温燃烧”燃烧过程的关键^[8]。目前，实现“均质压燃、低温燃烧”的主要的技术途径有喷油策略控制(混合气浓度分布)、EGR 控制(混合气组分、温度、着火时刻)、高喷油压力(混合率促进)等。在此基础上，衍生出许多燃烧模式，诸如预混控制压燃(PCCI)、MK 燃烧、柴油机浓混合气无烟燃烧以及预混合分层压燃(PSCCI)等。

2 新型替代清洁燃料技术

常用的代用燃料有植物油、天然气、醇类燃料、氢和燃料电池等。其中，大多是二次能源，资源丰富，且可以有效降低环境污染。目前开发的新能源机型有双燃料发动机、气体燃料发动机以及生

物燃料发动机等。

双燃料发动机可交替燃用柴油/重油和 LNG (液化天然气), 与传统使用柴油重油的船用发动机相比, 具有燃料混合灵活和低排放的特点。其燃料混合的灵活性体现在整个功率输出范围内, 燃油模式可与燃气模式任意切换。近年来, 在 Wärtsilä、MAN B&W 等柴油机巨头的带动下, 全球双燃料发动机技术发展迅速。在双燃料低速机方面, 由于可携带燃料量的限制, 全球仅有 Wärtsilä 的 RTX5 型和 MAN B&W 的 MEGI 型双燃料发动机, 且均处于试验测试阶段。而在中高速机方面, 已取得了大量实船应用的实绩。

气体燃料发动机可以极大地改善船舶发动机排放, 满足日益严厉的排放法规, 但受安全性、储存安装、运输和补充等影响, 以及受大功率低速气体发动机技术限制, 目前成熟机型主要以船舶中速发动机为主。而其它新型能源, 如太阳能和风能, 虽不可能成为船舶动力的主体燃料, 但可作为补充能源, 作为减排的措施之一。

3 排放控制和尾气处理技术

船用柴油机的过量空气系数比较大, 燃烧比较完善, 因此, 废气中 CO、HC 相对很少, 主要的有害排放物为 SO_x 、 NO_x 及 PM。

3.1 SO_x 的排放控制

柴油机燃料中, 硫分几乎全部燃烧, 形成燃烧产物 SO_2 和 SO_3 , SO_x 生成量正比于燃料的含硫量, 因此, SO_x 的排放水平完全取决于燃料中硫的含量。降低 SO_x 的一般方法包括使用馏分油、天然气、生物燃料等含硫量低的燃料或者采用 SO_x 后处理技术。 SO_x 后处理技术分为干法烟气脱硫技术、半干法烟气脱硫技术和湿法烟气脱硫技术。在船用柴油机系统中, 一般采用海水洗涤系统 (Seawater Scrubbing System) 处理 SO_x 。海水洗涤系统由海水输送系统、烟气系统、吸收系统、水质恢复系统组成, 它是利用海水含有大量的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- , 在排气中喷入海水, 使之吸收 SO_x 和清除 PM 等。整个过程不需大量消耗化学试剂, 且操作费用低, 最终的产物硫酸盐是海水的天然组分, 无二次污染^[5]。

3.2 NO_x 的排放控制

NO_x 排放的控制措施通常有三种方式: 燃油的预处理、柴油机结构的改进和改造、排气的后处理。其中, 燃油的预处理包括使用低氮燃料 (如

LNG) 和燃油乳化两种方法; 柴油机结构的改进和改造途径有喷油器结构改进和定时控制、缸内喷水技术 (DWI)、废气再循环 (EGR)、扫气空气加湿 (SAM)、CASS (Combustion Air Saturation System) 技术以及湿空气动力 (HAM-Humid Air Motors) 系统等; 排气的后处理方法包括选择性催化还原法 (SCR)、AR (吸附还原催化剂) 以及碳素纤维加载低电压技术等。下面对目前柴油机常用的控制 NO_x 排放的措施加以重点说明, 表 1 为常用的几种 NO_x 排放的控制技术性能列表^[5]。

表 1 常用的 NO_x 排放的控制技术性能列表

技术措施	NO_x 减排率
燃油乳化	15% ~ 20%
DWI 技术	50% ~ 60%
选择性催化还原法	85% ~ 90%
湿空气动力系统	70%
CASS 技术	50% ~ 60%

(1) 燃油乳化 (Water-in-Fuel Emulsion)。燃油乳化技术是通过超声波和机械搅拌的作用使预先混入水的燃油形成乳化油滴, 当乳化油滴喷入高温燃烧室后会因吸收大量的热在内部产生“微爆”, 破碎成更加细小的油滴, 从而改善了燃烧过程, 并且由于水的吸热作用和稀释燃油的作用, 降低了缸内最高燃烧温度, 进而减少柴油机的 NO_x 排放量。

(2) 选择性催化还原法 (SCR)。它是一种剂量系统, 在温度为 290 ~ 350 °C 下, 系统将还原剂 (如氨气、尿素溶液等) 导入排气中, 与 NO_x 在催化剂涂层上进行催化还原反应, 生成无毒无污染的 N_2 和 H_2O 。

(3) 废气再循环 (EGR)。EGR 是将一部分柴油机排出的废气经冷却和滤清后再次引入进气管, 从而降低燃烧前气缸的氧含量, 同时由于废气中含有比热容较大的水蒸气和 CO_2 , 可以有效地降低缸内最高燃烧温度, 从而达到降低 NO_x 排放量的效果。

(4) 湿空气动力系统 (HAM)。湿空气动力系统是通过加湿进气降低缸内最高燃烧温度, 从而降低 NO_x 排放量。而且, 它可以取代增压空气冷却器, 达到冷却进气口空气的效果。瑞典的 Munters Euroform 公司在 6000kW 的 12PC2.6V 型船用中速柴油机中采用 HAM 技术, 使 NO_x 的排放量降低了 74%。除此之外, HAM 系统可以利用海水作为水蒸气的来源, 用废气锅炉加热或柴油机冷却水加热。

3.3 颗粒物 PM 的排放控制

PM 是柴油机尾气主要成分之一，对人体的危害也非常大。目前，通过机内控制和机外净化实现船用发动机排气的颗粒物净化。其中，机内控制是从提高喷油压力，改善油气混合质量入手；机外净化技术有微粒捕集器(DPF)、旋风分离器、船舶废气反应器(IESI)和静电沉淀分离器技术。其中，DPF 的使用比较普遍。DPF 安装在排气系统后，利用催化剂、氧化器、燃烧器等将颗粒(PM)进行分解、燃烧。该装置可将船舶柴油机排气中有害物微粒减少 70%~90%，但会导致船舶柴油机的排气背压提高，功率下降。而且，排气背压随着 DPF 上沉积微粒增多而持续升高，此时，需利用 DPF 再生技术清除沉积在 DPF 上的微粒^[6]。

4 能量综合利用技术

研究表明，在燃油燃烧产生的热量中，冷却水带走的热量约为 20%~25%，废气带走的热量约在 25%~30%。如果这些余热能够回收利用，将会大大降低船舶系统的能耗。而能量综合利用技术便是采用发动机系统集成和能量回收利用技术(热电联供、联合余热循环 WHR、能量储存和混合动力等)，提高能量利用效率，实现船舶动力系统的超低排放^[7,9]。

MAN、Wärtsilä、ABB 等世界著名柴油机厂商都积极开展柴油机动力系统能源综合利用技术研究，以达到节能减排、提高热效率、满足 EEDI 等排放法规要求的目的。MAN 公司开发的柴油机排气能量利用系统(如图 2 所示)主要由柴油机、废气锅炉、动力涡轮、蒸汽涡轮、轴带发电机、PTO/PTI 及辅助发电机组构成，可提高 10% 的热效率，系统最高整体热效率可接近 60%。

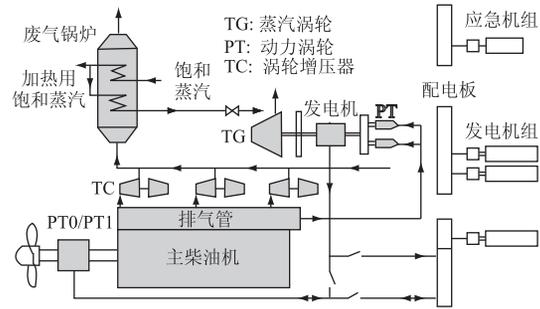


图 2 MAN 公司排气能量利用系统

5 结束语

船舶柴油机是海洋运输船舶最主要的动力来源，随着新的排放法规的实施和石油资源的日益减少，作为船舶中最大的排放和能耗设备，需要通过不断的技术创新，以实现节能减排的目标。

参考文献

- [1] 张南林. 舰船柴油机技术现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(1): 17-21.
- [2] 张学文, 满长忠, 唐运榜, 等. 低速船用柴油机电控共轨系统新进展[J]. 内燃机, 2010(4): 1-6.
- [3] 平涛, 方文超, 浦卫华, 等. 船用柴油机高压共轨技术的发展[J]. 船舶轮机, 2009(3): 34-37.
- [4] 奉峥嵘, 彭勇, 张志鑫. 柴油机涡轮增压技术发展历程与展望[J]. 内燃机, 2012(1): 1-4.
- [5] 庞海龙, 邓成林, 姚广涛, 等. 船用柴油机有害物排放控制技术[J]. 船舶工程, 2011, 33(1): 21-24.
- [6] 陈清彬, 詹志刚, 林金英. 船舶柴油机减排新技术方案研究[J]. 船舶工程, 2011, 33(4): 44-48.
- [7] 冯明志. 船舶柴油机减排新形势与技术发展[J]. 船舶轮机, 2009, 33(4): 34-41.
- [8] 尧命发, 刘海峰. 均质压燃与低温燃烧的燃烧技术研究进展与展望[J]. 汽车工程学报, 2012, 2(2): 80-84.
- [9] 景国辉, 范建新. 船舶柴油机总能利用系统技术发展概况[J]. 柴油机, 2010, 32(6): 1-4.

(上接第 20 页)

参考文献

- [1] 顾宏中, 邬静川. 柴油机增压及其性能优化[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989.
- [2] 叶飞帆, 邬静川, 顾宏中. 带放气阀的增压系统性能研究[M]. 宁波大学学报(理工版), 1991, 4(01): 105-111.

- [3] 景国辉. 提升大背压柴油机功率的增压系统研究[M]. 柴油机, 2010(2): 34-36.
- [4] 齐纳 K. 内燃机增压与匹配[M]. 侯玉堂, 禹惠生. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [5] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.