

船舶柴油机排放控制技术的新发展

冯明志

(七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 随着航运业和船舶制造业的迅速发展, 国际上对船舶发动机排放的限制越来越严格。世界各国主要船舶柴油机制造商和研究机构都在积极致力于低排放大功率柴油机的开发研究。重点介绍了近年来船舶排放法规的变化、船舶柴油机排放控制技术的发展趋势以及超低排放船舶柴油机研究最新进展。

关键词: 船舶柴油机; 排放; 控制技术

中图分类号: TK421+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2009)05-0013-05

The New Development of Emission Control Technologies on Marine Diesel Engines

Feng Mingzhi

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: As the rapid development of shipping industry, the regulations on marine exhaust emissions are getting more and more stringent world wide. Many marine diesel engine manufacturers and institutes all over the world are devoting themselves to the study and development on lower emission large engines. The introduction mainly focused on the development of marine exhaust emissions regulation, the development trend of marine diesel engine emission control technologies, and the newly investigations on ultra low emissions of marine diesel engines in recent years.

Keywords: marine diesel engine; exhaust emissions; control technology

1 引言

随着航运业和船舶制造业的迅速发展, 国际上对船舶发动机排放的限制越来越严格。因此, 排放已成为当今推动船用发动机发展的第一驱动力。

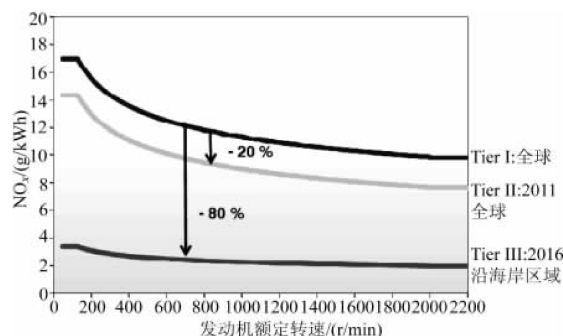
2008 年 10 月, 在国际海事组织(IMO)的海洋环境保护委员会(MEPC)会议上通过了 MARPOL (MARine POLLution) 协定附则 VI 的修正案, 同意通过两阶段实现减排目标: 2011 年达到 Tier II 限值, 2016 年达到更严格的限值 Tier III (如图 1)。

在此形势下, 世界各国船舶柴油机制造商和研究机构都在积极开展船舶柴油机排放控制技术和低

排放大功率柴油机的开发研究。特别是世界两大船舶柴油机巨头 MAN B&W 公司和 Wärtsilä 公司, 一直走在低排放船舶柴油机设计开发和排放控制技术研究及应用的前列。近期, 欧洲委员会在其第六框架下与瑞士联邦政府联合资助了以 MAN B&W 公司和 Wärtsilä 公司为主, 包括发动机制造商、科研院所、船级社及用户等在内的欧洲 43 家单位参加的船舶超低排放燃烧的高效研发项目(HERCULES)。研究开发出了一系列大幅度降低船用发动机气体和颗粒排放, 同时提高发动机效率和可靠性, 从而降低油耗、CO₂ 排放和发动机生命周期成本的新技术, 为满足日趋严格的船舶排放法规提供了技术保障。

收稿日期: 2009-07-24

作者简介: 冯明志(1963-), 男, 研究员, 主要研究方向为柴油机性能及排放控制, E-mail: fengmingzhi@csic-711.com。

图 1 国际海事组织 NO_x 减排的阶段目标

2 国际排放法规的要求

2.1 国际海事组织的排放法规

IMO 海洋环境保护委员会通过的附则 VI 修正案, 分别规定了在不同时期和区域, NO_x、SO_x、PM 等排放量的限制值以及对燃油含硫量的规定等。表 1 列出了 IMO 在不同阶段对 NO_x 的限值。

表 1 IMO 不同阶段 NO_x 限值

	$n_N/(r/min)$	NO _x /(g/kWh)
Tier I (2005 年 5 月 19 日生效, 全球实施)	<130	17.0
	130~2 000	$45.0 \cdot n_N^{-0.2}$
	>2 000	9.8
Tier II (2011 年全球实施)	<130	14.4
	130~2 000	$44.0 \cdot n_N^{-0.23}$
	>2 000	7.7
Tier III (2016 年沿海区域)	<130	3.4
	130~2 000	$9.0 \cdot n_N^{-0.2}$
	>2 000	1.96

目前国际上强制规定的最高硫含量为 4.5%。为了降低船舶发动机 SO_x 的排放, IMO 将波罗地海和北海规定为 SO_x 排放控制区 (SECA)。在这些区域中, 仅能使用含硫量不超过 1.5% 的燃油, 否则营运商必须进行等量的废气排放交易。2007 年美国船舶降低排放法案中规定, 到 2010 年在美国港口停靠的船舶, 其燃油中的含硫量限额为 0.1%。而欧洲最近也对欧盟含硫量指南进行了修改, 从 2010 年起船舶停泊地的含硫量规定为 0.1%。

2.2 美国环境保护署 (EPA)

美国环境保护署 (EPA) 对于在美国注册的气缸扫气容积 V_d 为 2.5~30 dm³ 的船舶颁布了更加严格的发动机排放限制 Tier 2, 并于 2007 年开始生效执行。该限值相对于 IMO Tier I 来说, NO₂ 大约要降低 25%~40%。而且限值中包括 NO_x + C_nH_m、CO、PM 等。表 2 列出 EPA Tier II 的所有限值。

表 2 EPA Tier II 对 1 类和 2 类发动机排放限值

气缸扫气容积 V_d/dm^3	类别	NO _x + C _n H _m /(g/kWh)	PM/(g/kWh)	CO/(g/kWh)
2.5≤5.0	1	7.2	0.20	5.0
5.0≤15.0	2	7.8	0.27	5.0
15.0≤20.0	2 (<3.3 MW)	8.7	0.50	5.0
15.0≤20.0	2 (>3.3 MW)	9.8	0.50	5.0
20.0≤25.0	2	9.8	0.50	5.0
25.0≤30.0	2	11.0	0.50	5.0

对于 $V_d > 30 \text{ dm}^3$ 的发动机 (3 类), EPA 可能会采用 IMO Tier II 的限值。

图 2 为 IMO 和 EPA 不同阶段排放限值的比较。

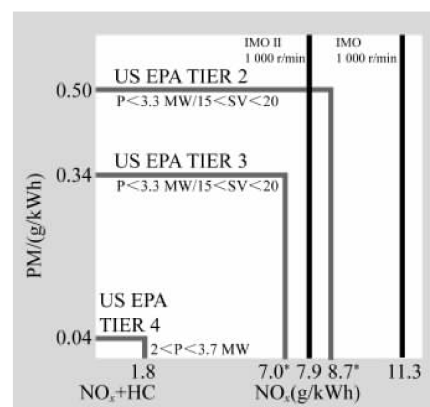


图 2 IMO 和 EPA 不同阶段排放限值的比较

2.3 NO_x 循环值

NO_x 循环值是由在 100%、75%、50%、25% 以及 10% (仅对恒速运行的辅机) 负荷下根据 E2/E3 和 D2 循环测得的 NO_x 值经加权所得:

$$\text{NO}_{x,\text{cycle}} = \sum_{i=1}^n x_i \text{NO}_{x,i} \quad (\text{g/kWh})$$

图 3 示出不同循环时各负荷点的加权系数。

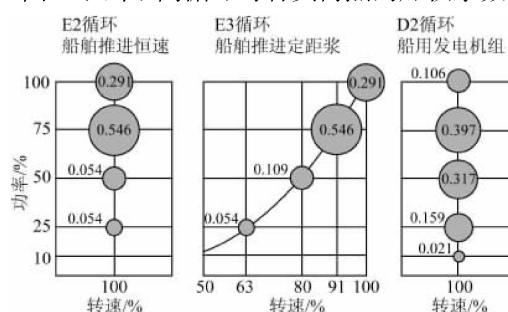


图 3 E2、E3 及 D2 循环在各工况点下的加权系数

3 船舶柴油机排放控制技术

3.1 控制排放的技术策略

随着船舶市场的快速发展, 以及船舶排放法规的日趋严格, 近年来对船用大功率发动机的技术发

展提出了越来越高的要求。

3.1.1 降低发动机排放的内部技术

随着日趋严格的大功率发动机排放法规的要求,在发动机性能持续改进的基础上,采取高压共轨燃油喷射(共轨压力 $>200\text{ MPa}$)、先进增压器及增压系统(可调增压器、大增压器效率 $>70\% \sim 72\%$ 、增压压力 $>0.5\text{ MPa}$ 、两级增压 $>0.6\text{ MPa}$ 、相继增压系统等)、可调气门正时(如 Miller、Atkinson、TINER 等)、低排放燃烧以及清洁燃料燃烧等内部技术,大幅度降低发动机排放,可使 NO_x 排放比 IMO Tier I 降低 30% 以上,达到 Tier II 的要求。

3.1.2 排气后处理技术

在发动机内部技术的基础上,进一步采取氧化催化器、尾气颗粒净化器 DPF、选择性催化还原 SCR、三效催化(3-Way Cat) + 废气再循环 EGR、 NO_x 吸附还原催化器等排气后处理技术,可以满足 Tier III 及更高的排放法规的要求。

3.1.3 集成的能源综合利用技术

综合利用改善发动机性能、提高可靠性、降低排放技术,通过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),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)并降低维护保养成本等,实现发动机优秀性能和超低排放。

3.2 排放控制技术解决方案

应对 IMO 对 NO_x 不同阶段的排放限制规定,应采取不同的技术解决方案。

3.2.1 满足 IMO Tier II 要求的解决方案

IMO Tier II 的要求,即 NO_x 排放量比 Tier I 降低 20% 的目标,可以仅通过下列内部技术措施方案即可实现:

- 燃烧过程: Miller 循环/可变气门正时;改变压缩比;燃烧室优化设计。
- 燃油喷射: 高压共轨;可变喷油正时,多次喷射;改变共轨喷油率形状。
- 优化增压: 2 级增压;可变涡轮面积。

3.2.2 满足 IMO Tier III 要求的解决方案

为实现 IMO Tier III 的要求,即 NO_x 排放量比 Tier I 降低 80% 的目标,除研究适合于 IMO Tier III 要求的内部技术外,还需结合下列必要的外部技术措施:

- 加水措施: 燃油-水乳化;增压空气加湿。
- 催化措施: 选择性催化还原(SCR)。
- 废气再循环: 带冲刷的废气再循环。
- 气体燃料: 双燃料发动机(DF & ME-GI);

纯气体发动机。

4 超低排放船舶柴油机研究最新进展

欧洲委员会和瑞士联邦政府资助的包括欧洲 43 家单位参加的船舶超低排放燃烧的高效研发项目(HERCULES),研究周期: 2004 年至 2008 年,目标是开发出大幅度降低船用发动机气体和颗粒排放,同时提高发动机效率和可靠性,从而降低油耗、 CO_2 排放和发动机生命周期成本的新技术。

该项目共分为热流体动力学、燃烧、增压、联合循环、排放控制、监控、摩擦学、管理等八个技术领域,开展了“极限”参数发动机的热力学和机械学、先进燃烧概念、多级智能涡轮增压技术、能量回收及复合式热发动机技术、降低排放的内部方法和先进的后处理技术、排放及性能监控新传感器、以及自适应控制智能发动机等技术的开发研究。建立和开发了先进的计算模型和工程软件工具,进行零部件的设计,并研制出相应样机,开展台架试验。通过试验,验证新技术的有效性及其目标实现情况。最后,还要对相关系统进行实船试验,验证新一代船用发动机的潜在优势。

4.1 “极限”设计参数发动机研究

通过“极限”发动机设计参数实现进一步提高发动机效率和降低排放。

4.1.1 极限设计参数发动机的机械学研究

(1) 设计、开发在极限热负荷和机械负荷下运行的柴油机机械零部件;

(2) 在缸径、冲程为 200 mm 和 280 mm, p_z 达 40 MPa、 p_c 达 3.5 MPa 的单缸试验机(图 4)上进行零部件的极限试验;

(3) 研究工作包括 CFD/循环模拟、零部件材料研究,轴承、燃油喷射系统研制和试验等。

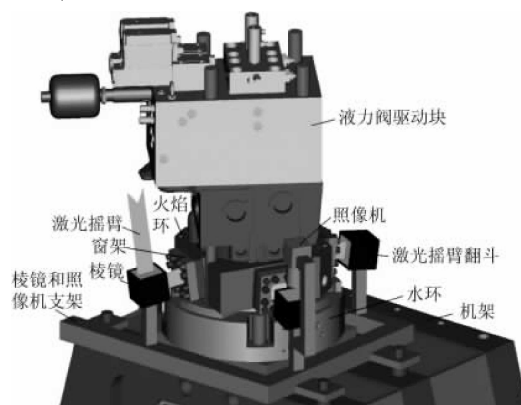


图 4 带电液驱动阀门的极限值单缸发动机及光学测试原理^[4]

4.1.2 极限设计参数发动机的热力学研究

(1) 二冲程和四冲程发动机在极限负荷下的运

行研究及其新技术开发;

(2) 进行 CFD 数值计算和热力学仿真;

(3) 相关零部件设计、研制及试验验证等。

4.2 先进燃烧概念研究

改善燃烧的新概念和新方法研究需要开发针对低转速发动机大型燃烧室的较大空间和时间尺度的具有足够准确度的燃烧子模型和化学动力学子模型,同时需要开展验证这些模型的包括缸内测量的基础实验研究,拓展现有的 CFD 工具,使之更好地用于设计燃烧室和进行排放预测。先进燃烧概念

研究包括模型(喷雾、燃烧和排放形成)开发、验证试验以及燃烧过程和排放形成的模拟^[5]。

4.2.1 发动机工作过程仿真

(1) 开发先进的缸内工作过程仿真模型,进行发动机优化研究;

(2) 开发了用于模拟大功率二冲程柴油机实际运行条件(特别是压力、温度和涡流接近实机水平)的喷雾燃烧试验装置(图 5)^[6]。对大功率二冲程柴油机典型燃烧系统中的流动、喷雾、燃烧和排放形成过程进行研究。

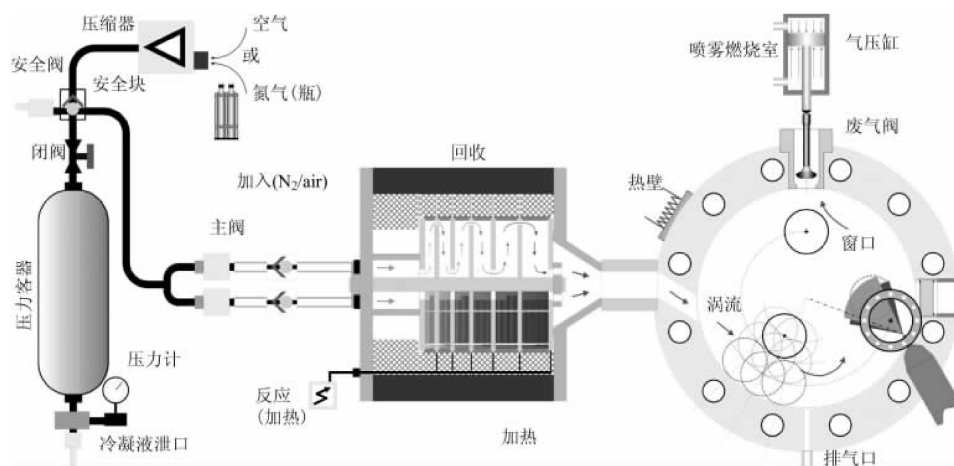


图 5 大功率二冲程柴油机喷雾燃烧试验装置原理图

4.2.2 排放形成的仿真

(1) 通过测量,获得大量的发动机数据;

(2) 将现有的物理模型嵌入到三维 CFD 软件中,并用试验数据进行验证;

(3) 完成了二冲程发动机化学模型的改进。

4.3 排放措施(机内)

研究^[7]表明,对于平均有效压力为 2.6 MPa 左右的中速柴油机,在不增加 70%~85% 负荷范围内燃油消耗率的前提下,只需采取机内措施,如电控高压共轨燃油喷射、提高压缩比、Miller 气门正时等,即可使 NO_x 排放降低 20%。然而,如果不增加油耗和降低功率的情况下,要使 NO_x 排放降低 30%,就需要采取进一步的机内措施,如油水乳化^[8]、极限 Miller 气门正时和二级增压系统^{[9][10]}等。

利用具有先进的喷雾、燃烧、排放子模型的三维 CFD 软件对低速二冲程柴油机的排放进行模拟和试验数据验证^[11],并应用于热效系统 TES(Thermo Efficiency System)与 SAM 或 EGR 不同组合时的排放分析。

4.3.1 喷水技术降低 NO_x

缸内喷水(DWI);进气空气加湿;发动机运

行全工况加水优化。

4.3.2 加湿法降低 NO_x

油水混合喷射(四冲程);扫气空气加湿(SAM)(二冲程)。

4.3.3 机内测量

开发重油燃烧的颗粒形成模型及颗粒与碳烟测量方法;测量并分析四冲程和二冲程发动机的颗粒排放特征;根据所测数据,评估颗粒形成理论,修正现有模型。

4.3.4 降低排放的方法(EGR 和颗粒)

借助 EGR 风机的高压 EGR 系统;设计、研制了各种 EGR 和 CGR(Combustion Gas Recirculation)系统样机。

4.4 排放后处理

4.4.1 后处理方法

低温等离子体 NTP(Non Thermal Plasma)概念的潜能;湿法洗涤 WS(Wet Scrubbers)。

4.4.2 新的测量方法

多缸船用柴油机各缸排放测量技术;实船测量设备样机的设计、制造、调试;快速($<10\text{ ms}$) NO_x 测量用特种采样输送管设计。

5 结论

国外开展低排放船舶大功率柴油机研究,取得了很大进展。我国差距很大,需加大投入,积极开展船舶柴油机排放控制策略、控制技术的开发与应用研究,缩小与国外差距,满足日趋严格的排放法规的要求。

(1) 政府、行业协会、学会、船级社、企业、科研机构、大学等,认真研究国际船舶空气污染排放法规的变化情况及其对我国船舶行业,特别是船舶发动机领域带来的影响,积极研究应对措施,制定和完善相关规范和标准,减少国际新法规的变化对我国船舶制造业的影响。

(2) 国内科研院所、大学、企业积极开展降低船舶动力的有害排放物控制技术研究,形成降低大功率船用柴油机排放的相关技术和配套产品,如 Miller 循环、高压共轨燃油喷射系统、高压比增压器及系统、EGR、喷水技术、SCR 系统等,为开发满足国际新排放法规要求的新一代柴油机产品奠定技术基础。

(3) 我国船舶柴油机新产品研制,特别是具有自主知识产权的柴油机的开发,一定要瞄准国际上最新排放法规要求;并在产品开发研制前期,邀请船级社在排放法规等方面给予指导,为今后产品通过船级社认证做好充分准备。

参考文献

- [1] Stefan Spindler. NO_x measures for IMO Tier II & III[C]. CIMAC Circle SMM, Hamburg, 2008. 9.
- [2] Kyrtatos N., Kleimola M. The HERCULES Project: A major R&D effort for marine engines of high efficiency and low emissions[C]. 25th CIMAC World Congress, Paper #31,

2007.

- [3] Andrei Ludu. Low emission technologies for large diesel engines. [C] AVL Executive Seminar for Chinese Large Engine OEMs, Shanghai, 2007. 11.
- [4] Kallio I., Rantanen P., Imperato M., et al. The design and operation of the fully controllable medium speed research engine EVE[C]. 25th CIMAC World Congress, Paper #163, 2007.
- [5] Kaario O., Liavag L., Larmi M. A comparison of characteristic time scale and flame area evolution combustion models in medium speed diesel engines[C]. 25th CIMAC World Congress, Paper #128, 2007.
- [6] Hermann K., Schulz R., Weisser G. Development of a reference experiment for large diesel engine combustion system optimization[C]. 25th CIMAC World Congress, Paper #98, 2007.
- [7] Tinschmann G., Taschek M., Haberland H., et al. Combustion system development for IMO Tier 2[C]. 25th CIMAC World Congress, Paper #148, 2007.
- [8] Eckert P., Velji A., Spicher U. Numerical investigations of fuel-water emulsion combustion in DI-diesel engines [C]. 25th CIMAC World Congress, Paper #140, 2007.
- [9] Wik C., Hallback B. Utilisation of 2-stage turbo charging as an emission reduction mean on a Wartsila 4-stroke medium-speed diesel engine[C]. 25th CIMAC World Congress, Paper #101, 2007.
- [10] Codan E., Mathey C. Emissions-A new challenge for turbocharging[C]. 25th CIMAC World Congress, Paper #245, 2007.
- [11] Kjemtrup N., Aabo K., Knudsen T. S. Large two-stroke diesel engines some comparisons with measured data and an update on the latest emission reduction techniques[C]. 25th CIMAC World Congress, Paper #230, 2007.

(上接第 12 页)

构紧凑、可靠性高、维修方便等特点。

(2) 机组采用计算机闭环控制,自动跟踪成分变化,保证良好燃烧和机组平稳运转,可以随时随地对机组运行情况实施远程监控。

(3) 适应极低压力的燃气,不必增压,可减少投资,提高有效发电量,不必专门建燃气储存罐。

(4) 机组同样也适应于兰炭气、炼化尾气等高含氢场合和易产生爆震的气体燃料。

(5) 有利于环境保护,目前焦化厂多余的煤气大部分被排空,既造成了环境的污染,又浪费了能源。采用煤气发电,在充分利用了能源、给用户带来经济效益的同时,又保护了环境,产生了巨大的社会效益,是一项利国利民的工程。

利用公司生产的焦炉煤气发电机组建造发电站,具有建站周期短,运行费用低,投资回收快,回报率高等特点。目前,该产品已广泛应用于国内各焦化厂和炼化厂;大量应用于黑龙江、山东、河北、陕西、山西、宁夏、新疆、湖南等地焦炉煤气发电;已建成几十多个燃气发电站。给用户和社会带来了显著的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 何学良等. 内燃机燃料[M]. 北京:中国石化出版社, 1999.
- [2] 孙济美. 天然气和液化石油气汽车[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1999.