

船用低速双燃料发动机燃烧循环及应用现状分析

宋雅丽^{1,2}, 吴朝晖^{1,2}

(1. 中船动力研究院有限公司, 上海 200129; 2. 沪东重机有限公司, 上海 200129)

摘要: 介绍了船用低速双燃料发动机两种燃烧循环过程, 以及双燃料发动机与一般柴油机结构的区别进行了介绍。以此为基础总结了两种燃烧循环的双燃料发动机零部件结构、性能及外围支撑的优缺点。对两种循环发动机的应用现状进行了分析。

关键词: 双燃料发动机; 燃烧循环; 结构; 性能

中图分类号: TK434.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)03-0038-05

The Analysis on the Combustion Cycles and the State of the Art of Marine Low Speed Dual Fuel Engine

Song Yali^{1,2}, Wu Chaohui^{1,2}

(1. China Shipbuilding Power Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200129;

2. Hudong Heavy Machinery Co., Ltd., Shanghai 200129)

Abstract: Firstly, two combustion cycles of low speed dual fuel engine are introduced. Secondly, the difference between dual fuel engines and diesel engines are expounded. Based on the above introduction, the advantages and disadvantages between the two types of combustion cycles of dual fuel engines are summarized on the respect of structure, performance and peripheral equipment. Finally, the application status of these two cycles is analyzed.

Key words: dual fuel engine; combustion cycle; structure; performance

0 引言

低速双燃料发动机是从大型低速柴油机发展而来, 并经过特殊改造的可直接燃烧 LNG 蒸发气和燃油的内燃机。目前天然气的价格便宜, 但其低热值较高, 双燃料低速机以天然气作为燃料, 具有较为显著的经济性。同时, 双燃料发动机热效率与柴油机相当, 而其排放性则优于柴油机, 且可以在柴油和天然气两种模式下灵活转换, 解决了当前天然气供应不稳定的问题, 已成为世界各国发展的重点。

目前, 低速双燃料发动机燃烧循环有两种: 燃气高压喷射扩散燃烧 (Diesel 循环) 和燃气低压喷射预混合燃烧 (Otto 循环)。本文将围绕这两种燃烧循环, 分别从燃烧循环过程、双燃料发动机与一

般柴油机结构的区别、两种燃烧循环下发动机本身结构及性能差异进行分析, 最后对国内外发展现状进行阐述, 并对其应用领域进行分析, 力求为后续低速双燃料发动机的选配提供参考依据。

1 燃气高压喷射扩散燃烧 (Diesel 循环)

1.1 燃烧循环介绍

燃气高压喷射扩散燃烧基本过程参见图 1, 主机根据 Diesel 循环原理工作, 活塞运行到上止点附近, 首先喷入定量的燃油进行点燃, 然后按一定油、气比例喷入适量的高压天然气完成扩散燃烧做功, 其中在点火时刻, 由于空气已经被压缩, 所以喷入的天然气为高压天然气。该种燃烧循环在船用低速

收稿日期: 2014-10-29

作者简介: 宋雅丽(1978-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为船舶动力装置, E-mail: syl@cspi.net.cn。

双燃料发动机的典型应用为 MAN 公司的 ME-GI 机。

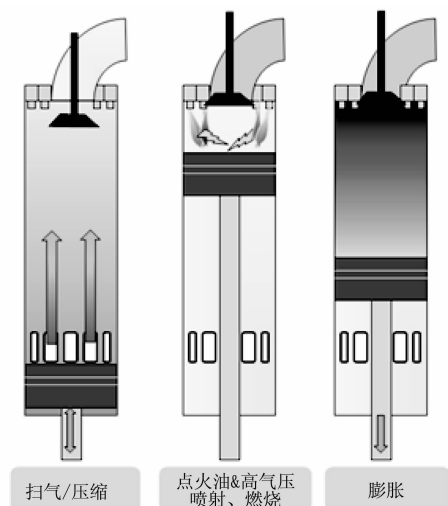


图 1 燃气高压喷射扩散燃烧 (Diesel 循环)

1.2 Diesel 循环双燃料发动机与柴油机区别

为实现 Diesel 循环燃烧过程, 在一般船用柴油机上须增加或改良如下系统及部件:

(1) 高压燃气供应系统: 对于 Diesel 循环, 须喷入高压 (30 MPa) 燃气, 完成燃烧循环做功, 首先与燃气供应有关的系统, 即燃气供应系统, 为新增系统; 且因为燃气压力较高, 一般为 30 MPa 左右, 须在供应系统中配备多级增压泵。

(2) 燃气喷射系统: 与燃气喷射有关的系统也

均为新增系统, 如燃气喷射阀、燃气控制阀块等。

(3) 燃烧室受热部件: 双燃料发动机在工作时首先喷入定量的燃油进行点燃, 然后按一定油、气比例喷入适量的高压天然气完成燃烧做功, 其燃烧做功过程不同于一般船用柴油机, 因此, 在主机上与燃烧有关的部件, 如气缸盖、排气阀等, 须要进行改进设计。

(4) 密封油系统: LNG 船双燃料发动机密封油系统是指通过带有保护套的一套管系将油输送给燃气喷射阀, 在燃气喷射阀内部对气体和控制油提供密封作用, 同时还润滑阀内的运动部件的一套系统。如果没有密封油存在, 就会有燃气泄漏, 从而引起安全问题。

(5) 安保系统: 在 LNG 船双燃料发动机以气体模式运行时, 为了防止高压燃气的泄漏, 特将输送燃气的管路设计成双壁管, 内管输送燃气, 外管通过空气通风, 主要是将机房和高压气体系统隔开, 外管进行通风, 此系统为通风系统。惰性气体系统是指在使用天然气运行模式后, 天然气系统应通过通入惰性气体 (N_2 、 CO_2) 将天然气排尽。因此, 通风系统和惰性气体系统为双燃料发动机的安全提供了保障。

Diesel 循环双燃料发动机与柴油机区别如图 2 所示。

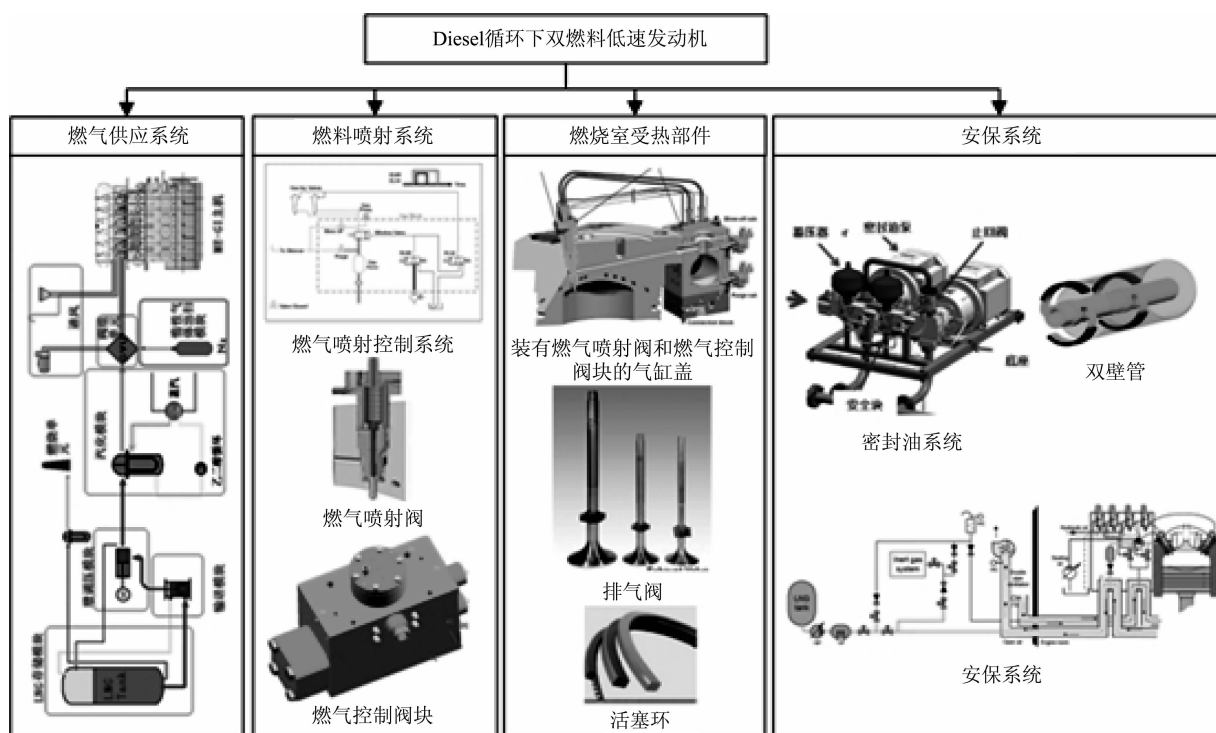


图 2 Diesel 循环双燃料发动机与柴油机区别

2 燃气低压喷射预混合燃烧 (Otto 循环)

2.1 燃烧循环介绍

燃气低压喷射预混合燃烧基本过程参见图 3, 主机根据 Otto 循环原理工作, 活塞在上行中部喷入适量的低压天然气, 活塞在上行过程中, 燃气与空气进行混合, 活塞运行到上止点附近, 喷入微量的引燃油引燃混合气体完成燃烧做功。该种燃烧循环在船用低速双燃料发动机的典型应用为 Wärtsilä 公司的 Flex-DF 机。

2.2 Otto 循环双燃料发动机与柴油机区别

为实现 Otto 循环燃烧过程, 在一般船用柴油机上须增加或改良如下系统及部件:

(1) 低压燃气供应系统: 对于 Otto 循环, 须喷入低压 (约 1.6 MPa) 燃气, 完成燃烧循环做功, 燃气供应系统为新增系统; 但与 Diesel 循环不同, 燃气压力较低, 只须增加单级增压泵。

(2) 燃气喷射系统: 与燃气喷射有关的系统, 如燃气喷射阀, 也为新增系统。

(3) 微引燃油喷射阀: 采用微量的引燃油喷射点火燃烧, 通用的燃油喷射无法达到, 须增加微引燃油喷射阀。

(4) 燃烧室受热部件: Otto 循环双燃料发动机在工作时须喷入微引燃油进行点火预混合燃烧, 因此须在气缸盖上增加预燃室; 同时, 活塞在上行中部喷入

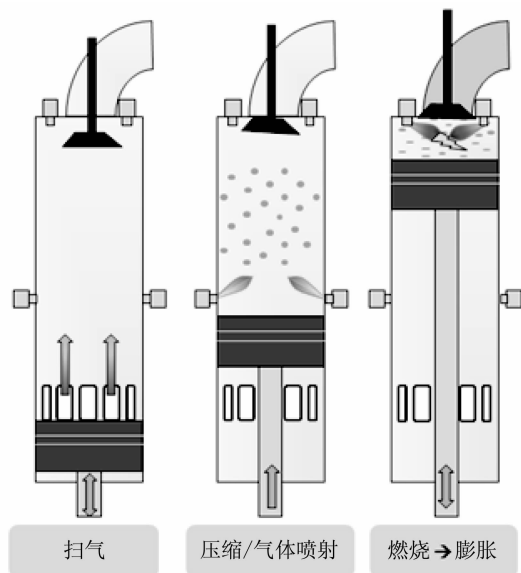


图 3 燃气低压喷射预混合燃烧 (Otto 循环)

适量低压天然气, 燃气喷射阀布置在气缸套上, 须对气缸套进行改进设计; 由于 Otto 循环燃烧做功过程也不同于一般船用柴油机, 因此, 在主机上与燃烧有关的部件, 如排气阀等, 也须要改进设计。

(5) 在 LNG 船双燃料发动机以气体模型运行时, 为了防止燃气的泄漏, 也将输送燃气的管路设计成双壁管, 内管输送燃气, 外管通过空气通风, 同样须要增加通风系统和惰性气体系统作为安全保障。

Otto 循环双燃料发动机与柴油机区别如图 4 所示。

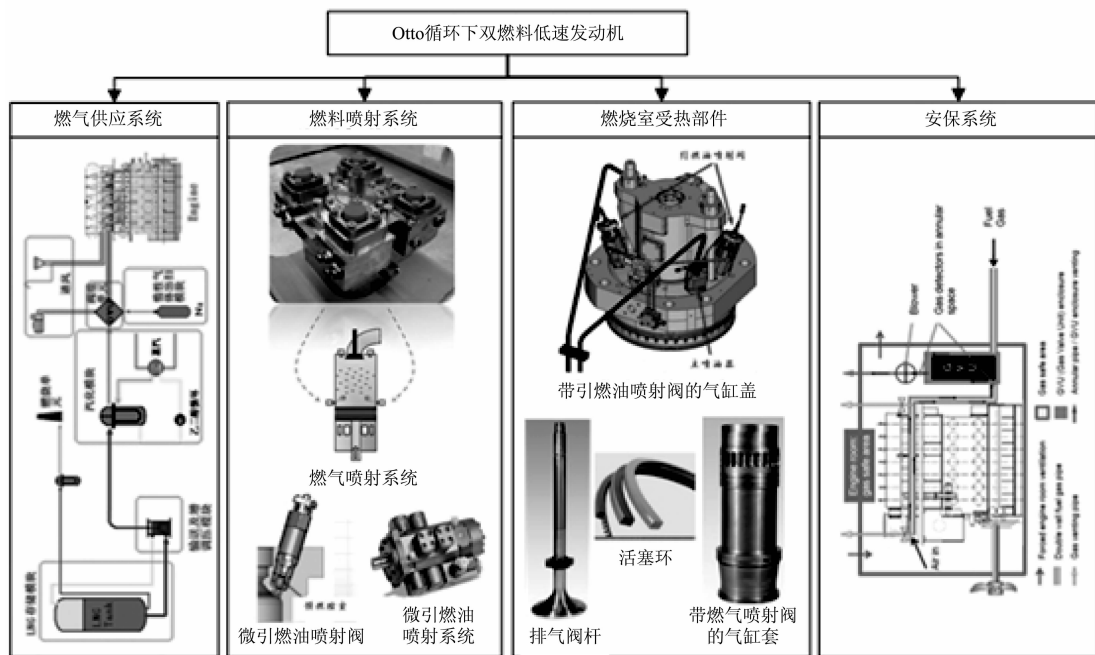


图 4 Otto 循环双燃料发动机与柴油机区别

3 两种燃烧循环比较

根据两种热力循环的燃烧过程及燃烧特性，本文总结归纳了两种热力循环下双燃料发动机性能、零部件结构及外围支撑的差异，分别见表 1 ~ 表 3。

表 1 两种循环方式下燃烧特点

热力循环方式	Diesel 循环	Otto 循环
天然气进气位置	缸盖	缸套气口上部
天然气进气压力/MPa	约为 30	≤1.6
天然气空气混合方式	非预混合	预混合
气体模式下点火方式	引燃	微引燃
点火燃料	重油或柴油	柴油
点火燃料比例	≤8%	≤1%
燃烧压力变化率	小	大
气体模式工作范围	5% ~ 100%	1% ~ 100%
柴油模式工作范围	0% ~ 100%	0% ~ 100%
敲缸	无	存在敲缸可能
气体模式下功率变化	不变	功率轻微下降
不同负荷下效率	变化小	变化大
不同负荷下性能	较好	差异大
加载性能	好	一般
控制难度	一般	难
平均有效压力	高	较高
CH ₄ 溢出	无	2%
NO _x 减排效果	接近 IMO Tier II	可达到 IMO Tier III
PM 减排效果	较好	好
CO ₂ 减排效果	较好	好
CH 减排效果	略好	不明显，可能增大

表 2 两种循环方式下零部件结构差异

热力循环方式	Diesel 循环	Otto 循环
缸盖	增加气体喷射阀孔	增加微引燃喷嘴器孔
缸套	润滑环境变化热负荷增加	增加气体喷射阀孔润滑环境变化热负荷增加
引燃油喷射阀	与燃油喷射阀共用	专用
燃油喷射阀	工作于气体、燃油双模式	仅工作于燃油模式
排气阀和阀座	润滑变化、热负荷增加	润滑变化、热负荷增加
气体喷射阀	大型高压双支	小型低压多支
活塞	热负荷增加	热负荷增加
活塞环	润滑变化、热负荷增加	润滑变化、热负荷增加

表 3 两种循环方式下外围支撑差异

热力循环方式	Diesel 循环	Otto 循环
高压气体泵	有	无
引燃油喷射系统	无	小型喷油系统
状态监测、故障诊断系统	有	有
安全保护系统	有	有

从表中可以看出，虽然都是双燃料低速机，但

是由于燃烧循环方式的不同，燃烧特点、排放特性、燃烧室部件以及外围系统均有很大的差异。例如：Otto 循环下 NO_x 排放不须任何处理便可达到 IMO Tier III 要求，而 Diesel 循环下 NO_x 排放只能接近 IMO Tier II 要求；由于燃烧循环的不同，对于燃气喷射压力也有不同的要求，Otto 循环下燃气喷入压力约 1.6 MPa，而 Diesel 循环下由于活塞接近上止点，空气已经被压缩，则须要喷入约 30 MPa 的高压天然气，并且还要额外增加相应的高压燃气供应系统；Diesel 循环引燃油喷射系统与燃油喷射系统为同一系统，而 Otto 循环须要额外增加一套微引燃油喷射系统；Diesel 循环双燃料发动机加载性能好，而 Otto 循环双燃料发动机加载性能一般。

综上所述，两种循环各有优缺点，很难确定哪种循环更适于双燃料低速发动机。

4 国内、外应用现状

4.1 国外应用现状

国外大型双燃料发动机和气体燃料发动机研究与开发工作开展较早，MAN 和 Wärtsilä 在 20 世纪 80 年代开始双燃料发动机和纯气体燃料发动机的研究与开发。其中，MAN 公司的 ME-GI 机主要采用 Diesel 循环，Wärtsilä 公司的 Flex-DF 机采用 Otto 循环。

1987 年 MAN 在 6L35MC 发动机上进行了气体燃料燃烧测试试验。1994 年 12K80MC-GI 二冲程低速气体燃料发动机在日本千叶电站装机后运行至今，见图 5。2012 年 11 月 MAN 的 ME-GI 低速二冲程双燃料发动机在韩国完成测试。第一个 ME-GI 主机订单（2 × 8L70ME-C8.2-GI，25 190 kW/104 (r · min⁻¹)) 为美国航运公司 TOTE 的 3100TEU 集装箱船。继这两台发动机之后，TOTE 公司又追加了 3 艘同样配置的集装箱船，以用于国内航运。

2012 年 12 月 Teekay LNG Partners L. P. (Teekay LNG) 下单建造 2 + 3 艘 173 400 m³ LNG 运输船，由韩国大宇造船建造，每艘船的动力由 2 台 5G70ME-GI 发动机提供。

Wärtsilä 的大型双燃料及纯气体燃料发动机研发也开始较早，已经有 20DF、34DF、50DF 系列大型双燃料发动机产品投入商业运行。由于市场需求强烈，从 2014 年起，Wärtsilä 启动了低速二冲程双燃料发动机的研发。2011 年 9 月 Wärtsilä 的 RTX-5 低速二冲程双燃料发动机试验样机在意大利完成单缸燃气运行测试，该机以气体燃料运行时满足 Tier III 排放法规。2014 年年初，中航鼎衡承接

的丹麦船东 15 000 t 化学品船, 采用 Wärtsilä 全球首批两冲程低压双燃料主机 RT-flex50DF。中国船东和运营商浙江华祥海运有限公司正在建造一艘 14 000 m³ 液化天然气船, 并订购了瓦锡兰五缸 RT-flex50DF 发动机、气阀装置和其他相关设备。

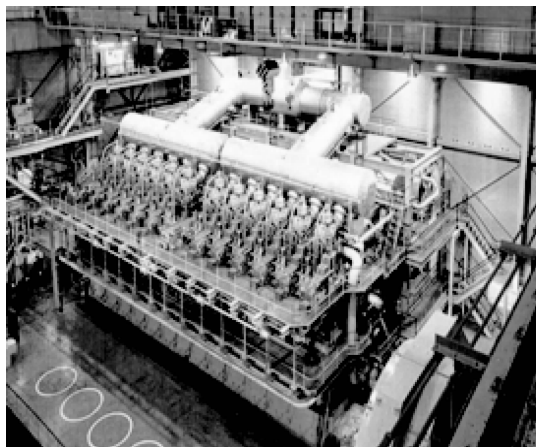


图 5 电站用双燃料发动机 12K80MC-GI

4.2 国内发展现状

我国的天然气/柴油双燃料船舶发展较晚, 但发展速度很快。进入 20 世纪 90 年代后, 天然气/柴油双燃料船舶是作为一种改变我国目前各地区严重污染的方法而提出来, 一开始就受到了政府部门的大力支持和发动机生产厂家的积极参与。

中国长航重庆长江轮船公司在 2001 年底就提出了开展船舶柴油/压缩天然气、柴油/液化石油气双燃料应用技术研究思路。2010 年我国正式启动长江流域船舶升级改造项目, 加快了双燃料中、高速发动机在内河船舶上应用的步伐。2011 年 4 月, 安徽嘉润动力改造的“红日 166”船获得船检机构签发的 LNG 试点船舶检验证书, 成为我国船舶实施 LNG 燃料动力试点改造以来首艘取得船检证书的船舶。2011 年 8 月, 江苏蓝色船舶动力有限公司成功改造了中国内河柴油-LNG 混合动力第一船-“苏宿货 1260”干散货船, 该船在保持原有柴油机结构和工作方式不变的前提下, 增加了一套 LNG 供气装置和一套柴油-LNG 双燃料电控喷射系统。

通过分析国内双燃料发动机技术与应用研究现状不难发现, 目前采用的双燃料发动机都是以中、高速柴油机为基础, 未涉及船用低速发动机。

鉴于国际和国内市场对大功率双燃料发动机的巨大需求, 同时针对我国在船用双燃料发动机研究能力不足的情况, “十一五”期间, 沪东重机在国家科技支撑计划资助下, 于国内率先开展了“LNG

船用动力装置预研”, 通过对气缸盖喷嘴孔耐高温保护材料及其焊接工艺研究、带电控天然气喷射阀的液压驱动单元研究、高压天然气供应系统研究、通风系统和动力装置试车辅机系统研究, 初步掌握了双燃料主机部分零部件设计、辅助系统中的供气等关键技术, 为双燃料低速发动机关键技术研究产品开发奠定了良好的基础。

5 小结

根据上述分析可知: Otto 循环下 NO_x 排放无须任何处理便可达到 IMO Tier III 要求, 而 Diesel 循环下 NO_x 排放要满足 IMO Tier III 要求, 必须增加一套后处理装置; 同时, Otto 循环下燃气喷入压力约 1.6 MPa, 而 Diesel 循环下燃气喷入压力为 30 MPa, 还要额外增加相应的高压燃气供应系统, 对于 Diesel 循环的双燃料发动机来说初始投资较高。但是, 针对性能而言, Diesel 循环双燃料发动机加载性能好, 而 Otto 循环加载性能一般。

就目前应用现状而言, 对于 Wärtsilä 的 Flex-DF 型双燃料低速发动机 (Otto 循环), 应用于小型的 3 万 m³ 以下的 LNG 船较为普遍, 如 14 000 m³ 液化天然气船, 配备 5RT-flex50DF 主机; 而 MAN 公司的 ME-GI 型双燃料低速发动机 (Diesel 循环) 可以应用于大型 LNG 船上。通过船厂调研, 目前 17 ~ 18 万 m³ LNG 船是主力需求, 对应的双燃料低速发动机推进动力装置均采用 MAN 公司的 5G70ME-GI 发动机。

综上所述, 根据两种循环的优缺点及应用现状, 针对小型的 3 万 m³ 以下的 LNG 船, 建议应用 Otto 循环双燃料发动机, 而大型 LNG 船尤其是 200 000 m³ 或以上的双螺旋桨大船, 建议应用 Diesel 循环双燃料发动机。

参考文献

- [1] Market Trend and ME - GI Application, Shanghai : MAN Diesel & Turbo Technical Seminar [C]. April, 2013
- [2] Wartsila 2 Stroke Gas Engine Technical Meeting [C]. Shanghai, April, 2013
- [3] 梁时中. 液化天然气为动力的船舶推进, 北京: 2013 中国 LNG 船舶论坛, 2013 年 6 月.
- [4] 高惠君. 中国 LNG 燃料动力船发展前景分析, 北京: 2013 中国 LNG 船舶论坛, 2013 年 6 月.
- [5] 白兰君. 天然气经济学 [M]. 北京: 石油化工出版社, 2002.