

中速大功率双燃料船用发动机关键技术研究

郝红光¹, 高恩录¹, 戴磊², 闫华伟¹

(1. 青岛淄柴博洋柴油机股份有限公司, 山东 青岛 266700; 2. 淄柴动力有限公司, 山东 淄博 255086)

摘要: 以某型船用中速柴油机为基础, 开展船用双燃料发动机关键技术研究。基于国内外先进柴油机及双燃料发动机技术, 成功研发出具有自主知识产权的中速大功率双燃料发动机。配机试验表明: 所研制的双燃料发动机功率和柴油机相当, NO_x 及 CO_2 排放明显降低; 其动力性、总体经济性和排放性均优于纯柴油发动机。

关键词: 船用柴油机; 双燃料; 控制系统

中图分类号: TK432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)05-0007-04

Research on Key Technology of Medium Speed and High Power Double Fuel Marine Engines

Hao Hongguang¹, Gao Enlu¹, Dai Lei², Yan Huawei¹(1. Qingdao Zichai Boyang Diesel Engine Co., Ltd., Shandong Qingdao 266700;
2. Zichai Power Co., Ltd., Shandong Zibo 255086)

Abstract: Based on a certain type of marine medium speed diesel engines, the key technologies of dual fuel engines are studied. Employing the advanced technologies of diesel engines and dual fuel engines both at home and abroad, the medium speed large power dual fuel engine with independent intellectual property rights was successfully developed. The matching test shows that the new developed dual fuel engine has the equal power as the diesel engine, and features obviously lower NO_x and CO_2 emissions, and the power, general economic performance and emissions are all better than the diesel engine.

Key words: marine diesel engine; dual fuel; control system

0 引言

随着 IMO Tier III 法规、以及 GB15097 船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第一、第二阶段)的实施, 船舶推进装置加速向节能环保、低排放方向转型升级。

根据 MARPOL 附则 VI 要求, 2020 年起船用燃油中硫的质量分数必须低于 0.5%。为应对此要求, 采用能量密度高、排放低、便于运输的液化天然气(LNG)燃料是被业界看好的优选方案之一。

双燃料发动机既可以以纯柴油作为燃料, 又可以实现柴油与天然气混烧。采用双燃料发动机的船

舶, 其运行成本可节省约 20%; 同时 NO_x 和 SO_x 排放大幅下降, 符合国家绿色环保政策。因此双燃料发动机已成为船用发动机制造商的重点发展方向^[1]。

1 国内外双燃料发动机现状

天然气发动机在汽车行业已广泛使用, 纯天然气或柴油/天然气双燃料发动机在船舶领域也有应用。国外大功率发动机制造商纷纷对燃用清洁、廉价的新能源的技术进行储备, 包括世界两大主要柴油机公司, 曼恩和瓦锡兰在内的各船舶发动机厂商, 为了保持技术优势和抢占船舶发动机市场份

收稿日期: 2019-06-19; 修回日期: 2019-07-19

作者简介: 郝红光(1976—), 高级工程师, 主要研究方向为柴油机研发和机械加工工艺设计等, qdbyhgh@163.com。

额,纷纷加大替代燃料发动机的研发力度。LNG 与传统燃料相比,由于其本身不含硫成分^[2],可使发动机实现 SO_x 100% 减排, NO_x 减排约 80%, CO_2 减排约 20%。在国内,双燃料发动机的开发主要以引进国外技术和自主研发为主,已有成功案例,主要集中在中低功率(功率小于 1 500 kW)双燃料发动机;而中速大功率双燃料船用发动机的研发尚处于起步阶段。

2 关键技术研究

本文以淄柴一款中速大功率船用柴油机为基础,对中速大功率船用双燃料发动机关键技术进行研究。基于国内外先进的柴油机及双燃料发动机技术,以安全性、动力性、经济性为原则,依据中国船级社《天然气燃料动力船舶规范》、《钢质海船入级规范》和《船用柴油机氮氧化物排放试验及检验指南》,淄柴自主研发了一种中速大功率船用双燃料发动机。该机可实现纯柴油或 LNG/柴油双燃料模式下的燃烧,两种燃烧模式下发动机输出功率均达到设计的标定功率;在 LNG/柴油双燃料模式运行时,燃气替代率达到 70% ~ 85%。该机将主要用作 LNG 运输船、散货船的主机或辅机,并满足机旁操纵、遥控操纵及无人机舱的要求。

2.1 燃气供气系统研究

燃气供气系统主要由燃气控制系统 (Gas Valve Unit, GUV)、燃气进气管组件、双壁支管组件、燃气喷射系统等组成,如图 1 所示。燃气供气系统用于向发动机提供所需流量和压力的气体燃料。

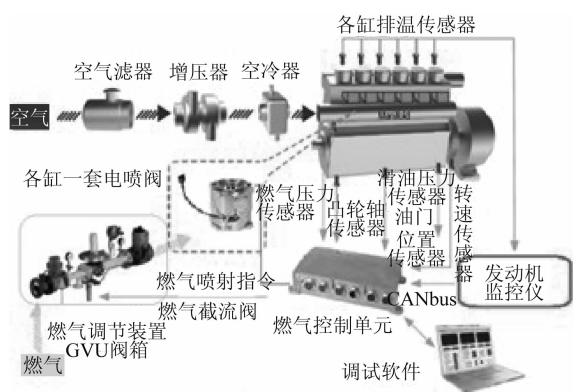


图 1 燃气供气系统组成简图

2.1.1 燃气控制系统

燃气控制系统由燃气进气阀、自立式压差调节阀、阻火器、低温紧急切断阀和一系列模块组成。其通过监测发动机进气压力,控制发动机燃气的进气量,对喷射控制系统实时监测,实现燃气控制、

报警和安全保护功能。

2.1.2 燃气进气管及双壁支管组件

依据船规要求,燃气进气管及双壁支管均设计为双壁管结构,内壁管为天然气通道,外壁管为惰性气体通道。在燃气管道发生泄漏时,天然气会通过内外壁空间引出至船舱外部,以保证船舱内的安全环境。

同时对发动机进气道进行设计,使燃气和空气在进气阀之前交汇。气道采用独特的缩口结构,既能保证两种气体在进气阀前充分混合,又能提升气流速度,从而增强天然气与空气的混合均匀性,提高燃烧效率。实现准内混进气,可有效防止发动机回火、放炮,改善发动机的安全特性。

2.1.3 燃气喷射系统

采用由硬件系统、软件系统和执行机构组成的 Artemis III 双燃料多点电喷控制系统实现 LNG/柴油准内混燃烧。该系统集成了燃料喷射控制、实时数据采集、监控保护、故障诊断和通信等多种功能^[3]。

喷射系统由双壁电喷阀、燃气电喷控制器、转速传感器、油门位置传感器等组成。其中,燃气喷射阀采用大流量的双壁电喷阀,由电磁控制启闭。其内部采用刚性体密封,中间部位为燃气通道,外侧分布小孔,为泄漏引出通道。电磁阀主要依靠燃气开启时长来控制进气量。其开启时刻一般定义在进气门打开时刻,且避开进排气重叠角区域,以免天然气在扫气过程中排至排气管。喷射相位则由飞轮测速传感器及凸轮相位传感器共同确定。

2.2 双燃料发动机准内混电控燃烧技术

将燃气电喷阀安装在进气歧管近进气门处,使天然气在进气门前定时喷射^[4]。进气门开启且排气门关闭后,天然气开始喷射并与空气混合直接进入气缸;进气门关闭前天然气停止喷射。这样,就可避免天然气在扫气过程中被直接扫出气缸,进入排气系统。该设计能有效杜绝发动机的回火、放炮问题,还可提高发动机的经济性。

2.3 双燃料发动机燃烧特性及其控制技术

采集发动机转速、进气压力、进气温度、天然气压力、天然气温度、油门位置等参数^[4],并和标定数据进行比对,计算出所需的天然气流量,从而控制各缸天然气喷射阀开度以控制天然气进气流量。相对于传统机械液压调速器的速度单控功能,RE2800 电子液压调速器可控制发动机转速,并可精准控制燃气进气量(减少燃气损耗),实现双控

功能。

2.4 双燃料发动机动力匹配技术

采用天然气单缸电控多点喷射的控制方式,能够实现各缸天然气喷射时刻和喷射量的单独控制。为消除各缸做功不均现象,电子控制单元(ECU)根据发动机各缸排温,通过安装在各缸进气支管的燃气阀,按照平均功率对各缸进行微调。

2.5 燃气喷射控制技术

当系统满足双燃料运行模式要求时,发动机进入双燃料运行模式。当负载发生变化(加载或减载)时,首先,柴油供应量迅速变化(加油或减油),以维持转速;然后,燃气控制系统根据系统内已定义的“全程转速范围内的最低燃油位置曲线”生成当前转速下期望的燃油供应量,通过逐渐提高燃气供应量使燃油量逐渐逼近期望值。与此同时,双燃料控制器会监测排气温度、进气压力、燃气压力等信号,通过系统内已定义的曲线或 MAP 图(点火控制曲线图),以及当前转速及燃油油门位置,计算出当前工况下燃气的最高限值,在避免出现排温过高和爆震的情况下实现尽可能高的燃气替代率。而发动机的动态特性仍然为柴油机的特性,能很好地满足负载变化频繁的工况要求。

3 发动机调试

3.1 柴油模式调速

柴油模式控制系统的关键为 PID 控制。PID MAP(图 2)直接参与控制转速、油量等调速功能,其中 X 轴为发动机转速设定值, Y 轴为油量比例设定值, Z 轴为 PID 控制比例系数。根据发动机各工况的转速设定油量比例,调整 PID 比例系数,以使发动机达到最佳运行工况。

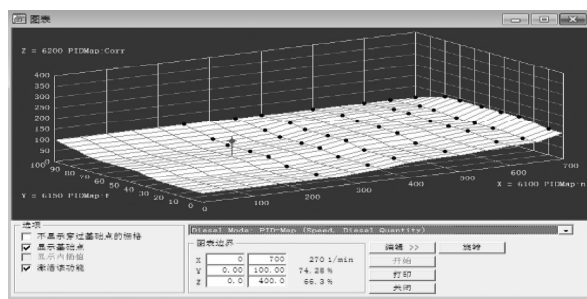


图 2 PID MAP 图

预设油门限制曲线(图 3)。油门限制曲线为转速-最大油门位置关系曲线,在油门位置达到该转速对应的油门上限时,开始进行油量限制,以防止发动机过载。

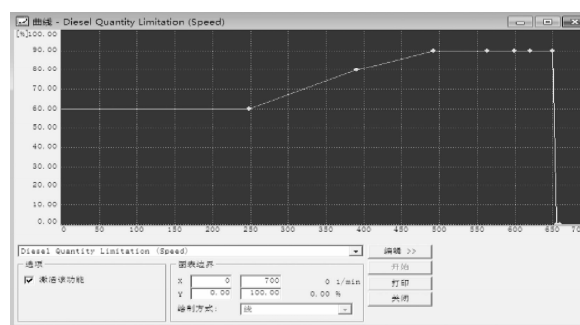


图 3 油门限制曲线

3.2 双燃料模式调速

预设发动机转速-功率限制曲线,防止发动机过载;同时,预设燃气喷射提前角,标定燃气喷射持续期。

在双燃料模式下,通过控制燃气喷射正时和喷射持续期对燃气喷射量进行控制,使发动机转速保持稳定。ECU 同时检测排气温度、燃气压差等参数,如果检测到有参数超限时,系统将自动切换到纯柴油模式,安保系统进行报警控制。当各参数恢复至设定范围内,发动机才能继续以双燃料模式运行。

以图 4 为例,双燃料模式切换预设 MAP 图中 X 轴为转速, Y 轴为发动机工况负荷, Z 为预设供油比例。当转速为 500 r/min,负荷为 40% 时,预设油量为 20%;进入双燃料模式后,系统降低供油量,同时调整控制喷射正时和喷射持续期,燃气逐渐替代燃油,当柴油油量降到 20% 时,调速模式切换为燃气调速。在燃气调速模式下,供油量不变,通过 PID 参数调节燃气的喷射持续期,以保证转速稳定。

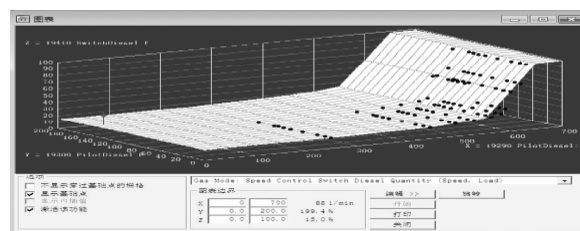


图 4 双燃料模式 MAP 图

4 配机试验^[5]

4.1 试验方法

发动机的标定转速为 620 r/min,标定功率为 2 574 kW,分别在纯柴油模式和双燃料模式下按推进特性进行试验。试验过程记录功率、燃油消耗率、最高燃烧压力、进气压力、涡轮前排温、气耗率,以及 NO_x、CO₂ 排放等参数。

4.2 试验结果

对比纯柴油模式，发动机在双燃料模式下功率相当；涡轮前排温在低负荷时相当、高负荷时略高； NO_x 排放减少 40% ~ 70%，约 50% 负荷时 NO_x 减排最显著； CO_2 减排 22% ~ 50%，低工况下 CO_2 减排较显著；燃气替代率达到 76% 左右。根据试验数据分别绘制出纯柴油模式和双燃料模式的推进特性曲线，见图 5、图 6。

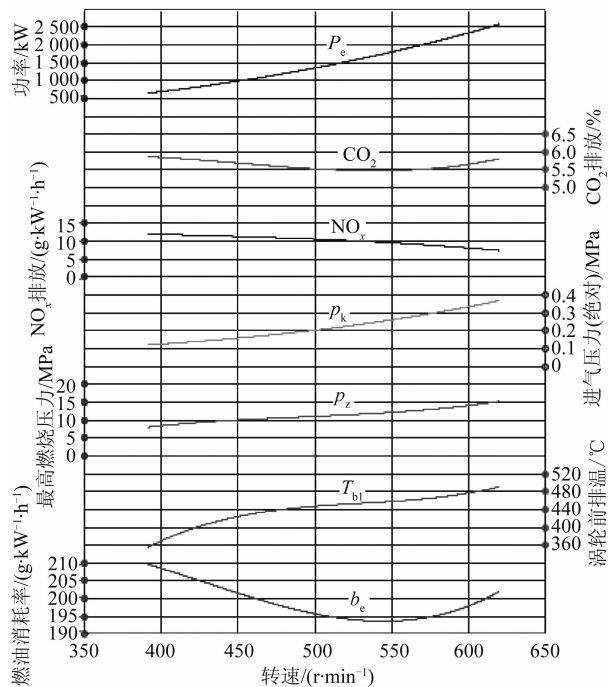


图 5 纯柴油模式推进特性曲线

5 结论

试验结果表明：所研制的双燃料发动机和柴油机相比，功率相当， NO_x 及 CO_2 排放明显降低，动力性、总体经济性和排放性均更优。可以认为双燃料发动机是发展绿色船舶动力的重要方向。

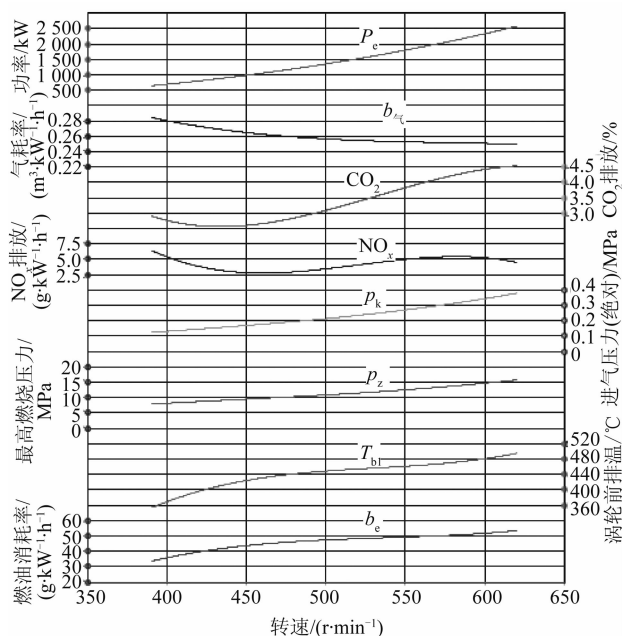


图 6 双燃料模式推进特性曲线

参考文献

- [1] 叶耀川, 白德刚, 张少亮, 等. LNG 燃料动力船的发展现状及前景分析 [J]. 造船技术, 2015 (4): 7-10.
- [2] 袁江帆, 胡以怀, 蒋更红, 等. 船用 LNG 双燃料发动机的技术发展及应用现状 [J]. 造船技术, 2017 (1): 1-6.
- [3] 默宁, 李品友, 高雅汉. 船用双燃料发动机工作原理及排放控制 [J]. 黑龙江科技信息, 2016 (25): 148-149.
- [4] 黄猛. 船用小功率中速双燃料发动机关键技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [5] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 船用柴油天然气双燃料发动机技术条件: GB/T 36658—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.