

Z180/T 船用单一 LNG 燃料发动机研发

张洪祥, 李杰, 肖龙波, 魏学涛, 杨尚刚, 荆涛

淄柴机器有限公司, 山东 淄博 255086

摘要:为满足缸径小于 200 mm、功率不低于 600 kW 的单一气体燃料发动机船用主机市场需求,以 Z6180 双燃料发动机为原型机,基于模块化设计思想,设计发动机的空气系统、燃气系统和控制系统,开发一款缸径为 180 mm 的单一燃料船用液化天然气(liquefied natural gas, LNG)发动机,基于《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第二阶段)》要求对发动机进行 2 000 h 的排放耐久性试验。试验结果表明:开发的 LNG 燃料发动机满足设计要求,天然气供气系统及发动机全工况燃气精准控制策略耐用可靠,排放指标达到船舶发动机国二标准限值要求。

关键词:供气系统;耐久性试验;LNG 发动机;控制策略

中图分类号:TK464

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)01-0057-06

引用格式:张洪祥,李杰,肖龙波,等. Z180/T 船用单一 LNG 燃料发动机研发[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(1):57-62.

ZHANG Hongxiang, LI Jie, XIAO Longbo, et al. Development of Z180/T marine single LNG engine[J].

Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(1):57-62.

0 引言

目前国内船用发动机主要以纯柴油和柴油-液化天然气(liquefied natural gas, LNG)双燃料发动机为主,内河船用 LNG 单一气体燃料主推发动机较少,而缸径小于 200 mm 的发动机功率一般低于 600 kW,无法满足市场需求。2023 年 2 月,工信部与湖北省政府签订的《加快内河船舶绿色智能发展合作备忘录》提出:到 2050 年,要采用以 LNG 为主的燃气动力系统,完成对近 1 万艘内河船舶的改造^[1]。2024 年 8 月,交通运输部和国家发展改革委印发了《交通运输老旧营运船舶报废更新补贴实施细则》,给发动机制造企业及船舶所有人带来巨大的优惠政策^[2]。随着江苏、安徽、湖北等地 20 余处 LNG 加注站、加注趸船投入使用和国内绿色航运理念的进一步推进,船舶市场对天然气船舶的需求越来越迫切,天然气发动机的市场应用前景十分广阔^[3-5]。

国内已经有用于辅机发电或为工程船提供主动力的成熟的天然气发动机,2 款国内某典型 6 缸天然气发动机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 国内某典型 6 缸天然气发动机主要技术参数

发动机编号	缸径/mm	行程/mm	额定功率/kW	转速/(r·min ⁻¹)	混合方式	点燃方式	排放标准
1	170	200	450	1 500	预混/单点	平行电极	国一
2	170	195	500	1 500	歧管/多点	预燃室	国二

注:以上数据来源于中国船级社官网^[6]。

收稿日期:2024-08-29

基金项目:国家重点研发计划项目(tscx202306140);山东省泰山产业领军人才创新领军人才项目(船舶低碳混合动力系统关键技术研究)

第一作者简介:张洪祥(1992—),男,山东聊城人,工程师,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制, E-mail:294926880@qq.com。

这些发动机多采用“天然气在增压器前通过混合器与空气混合,增压冷却后进入进气管”的进气型式,该型式下天然气负压进气、总管混合,进气管内充满混合气体,存在安全隐患,且不能精准控制各缸空燃比,气门重叠角期间部分燃气随着扫气逸出,燃烧效率较低,排放性能和经济性较差^[7-8],不能满足市场需求。因此,设计开发一款能够实现各缸独立进气、可用作船舶主推的单一气体燃料发动机,以满足市场需要。

1 技术方案

以某 Z180 双燃料发动机^[9]为原型机开发的直列、四冲程、增压中冷、双进气门、双排气门、单一燃料 LNG 发动机 Z180/T,满足《船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第二阶段)》^[10]要求,发动机主要技术参数如表 2 所示。

表 2 发动机主要技术参数

缸径/mm	行程/mm	额定转速/(r·min ⁻¹)	额定功率/kW	燃气消耗率/[g·(kW·h) ⁻¹]	总排量/L	压缩比	平均有效压力/MPa
180	210	1 500	600	195	32.04	11	1.124

采用模块化设计思想,设计方案围绕空气系统、燃气系统、控制系统三大模块,并最大程度借用现有双燃料发动机的非燃气进气部分的零部件。

1.1 进气方案

改制进气方式,将燃气进气型式更改为歧管多点喷射进气,天然气在进气歧管与空气预混合后进入气缸,火花塞点燃;采用大流量喷射阀和高压燃气供给系统,解决由于燃气阀流量小、低压进气导致的燃气进气量供给不足的问题。Z180/T LNG 发动机克服了预混式气体机全工况下供气角度固定的弊端,实现各缸燃气进气独立控制,为进一步满足排放标准限值要求、提高燃气利用率提供了先决条件。

1.2 控制方案

引入燃气多点喷射、火花塞点燃控制技术,采用涡轮后氧传感器实时监测反馈和控制系统动态调节空气量的闭环空燃比控制策略;以发动机万有特性曲线为基础,对发动机进行全负荷标定,对各缸进行单独控制,各种工作模式下都有相应的 map,实现对燃烧过程的最优化。

2 各系统技术设计

2.1 空气系统

空气系统主要由空气过滤器、增压器、中冷器、电子节气门和进气管组件等组成,三维模型如图 1 所示。进气管为整体焊接结构,通过歧管连接在气缸盖上,对进入燃烧室的空气量进行导通、稳压;电子节气门采用国产多齿轮啮合型节气门,能精准控制节气门蝶阀开度;主进气管口设计在进气管中部上端,内部设计多处引导空气流向的引流管,有效防止增压空气对冲和增压空气分布不均匀现象;进气管末端增加防爆阀,能快速释放进气管内回火产生的高压能量,并阻止火焰喷出。

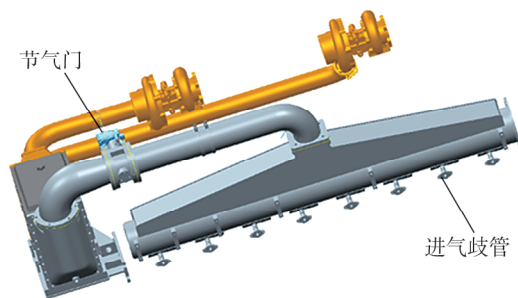


图 1 发动机进气系统三维模型

2.2 燃气系统

燃气喷射系统三维模型如图 2 所示。燃气系统主要包括燃气共轨管、燃气喷射阀、引射管等部件,在进气歧管上设置天然气喷射引射管,使天然气能够尽量接近进气道喷射,避免进气结束后在进气道内存

在可燃气体。引射管在缸头切向、螺旋气道中间的鼻梁处喷射燃气,燃气与空气形成预混合气。使用一个共轨管为各缸供给燃气,设计燃气压力为0.3~0.5 MPa,双壁结构。燃气喷射系统三维模型如图2所示。

2.3 控制系统设计

控制系统主要包括电子控制单元(electronic control unit, ECU)、气体发动机监控仪、传感器组件等,采用自主研发的控制程序,实现空燃比闭环控制、各缸燃气喷射量控制、各缸排温控制、各缸燃气喷射角度修正,用于控制燃烧过程。天然气发动机控制系统原理如图3所示。

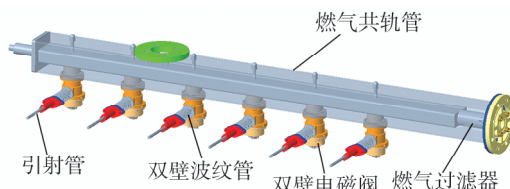


图2 发动机燃气喷射系统三维模型

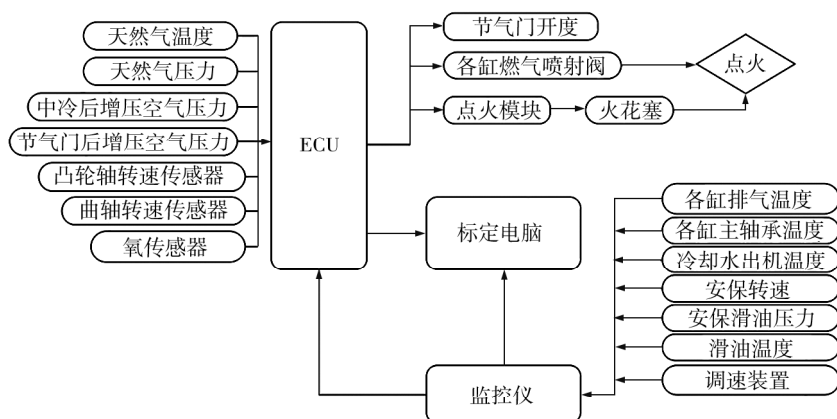


图3 天然气发动机控制系统原理图

2.3.1 气体发动机监控仪

气体发动机监控仪监测节气门前后的压力、压差,燃气的温度、压力,增压后进气的温度、压力、主轴承温度,排气温度等多项运行参数,自主设置报警停机限值。采用双电源供电,当主电源失电时,备用电源继续工作,实现无转速波动切换,保证发动机运行安全性。

2.3.2 空燃比控制

天然气用作主燃料时,具有点火温度高、火焰传播速度慢的特点。增大点火提前角和增大空燃比有助于保证燃料的经济性、改善后燃现象、降低热负荷。减小点火提前角易增加爆震概率,增大空燃比易发生缸内失火。随着发动机功率密度提高,爆震和失火之间的窗口逐渐变窄,因此单缸空燃比控制越精准、响应越迅速,燃烧就越稳定。Z180/T采用进气歧管喷射技术,ECU可根据增压空气压力和转速信号查预先标定的燃气喷射map,确定喷射脉宽和喷射时刻,并根据各缸排温传感器和氧传感器的监测结果对燃气进气量微调,可显著提高单缸空燃比控制精度和响应速度。

转速、功率的突加和突降是影响发动机空燃比控制精度的重要因素。空燃比控制需要根据进入气缸的空气量控制燃气喷射量。设计气体机专用凸轮轴,凸轮轴进、排气门相位角如表3所示。

表3 发动机凸轮轴进、排气门相位角

单位:°

发动机类型	进气门开启始点	进气门关闭始点	排气门开启始点	排气门关闭始点	气门重叠角
天然气机	15	35	50	15	30
柴油机	50	40	65	50	100

注:开启始点为上止点前曲轴转角,关闭始点为下止点后曲轴转角。

采用小气门重叠角,减少扫气过程中由于气门重叠角较大而造成的甲烷逃逸问题;通过改变进气门关闭时间,使压缩比小于膨胀比,提高发动机的热效率,在降低压缩过程中的温度和压力的同时,减少发生爆震的可能性,使发动机可以在更高的压缩比下运行,进一步提高热效率。但该设计导致发动机进气

流量降低,为精准调节空燃比,利用多齿轮啮合节气门,按照发动机万有特性进行多次调试,在 ECU 上预设精准空燃比调节节气门开度 map,节气门精准开度可控制 0.1% 内,提高空气系统在转速、功率急骤变化时,对燃气增减剧烈变化的响应能力,即动态时保持空燃比一致,无明显波动,维持发动机稳定运行。

2.3.3 进气降压技术

在节气门后安装进气泄压阀,发动机在额定工况、低速大转矩工况下突卸负荷时,节气门开度下降,涡轮增压机在惯性作用下仍旧持续转动,节气门与涡轮之间进气管路中的空气压力迅速升高。为了保护增压系统,当压力达到某一限定值后,按标定的控制策略打开进气旁通阀,排出过量空气,实现降压保护的功能。

3 样机测试

按照文献[11]要求,对 Z180/T LNG 发动机进行 2 000 h 的排放耐久性劣化试验,发动机按螺旋桨推进特性下负荷率与发动机转速、功率和输出转矩的对应关系如表 4 所示。

表 4 发动机推进特性参数

负荷率/%	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	功率/kW	输出转矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	负荷率/%	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	功率/kW	输出转矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)
25	909	150	1 516	75	1 363	450	3 153
50	1 191	300	2 406	100	1 500	600	3 820

试验开始前对发动机进行首次排放检测摸底测试,确认原始排放数据,记录发动机按螺旋桨推进特性下不同负荷率的污染物排放和天然气消耗率的变化趋势。

推进特性下发动机排放中 THC 与 CO 随负荷率的变化如图 4 所示。由图 4 可知:推进特性下,LNG 发动机转速与功率升高(负荷率增大),排放中 THC 与 CO 的质量分数均呈下降趋势;在发动机负荷率从 25% 增大至 50% 工况中,CO 明显下降。这是因为发动机转速、单缸输出功率密度升高,燃烧室温度升高,在高温条件下,燃料燃烧越完全越有助于减少 CO 的生成,由此可见,通过电控多点喷射系统与节气门后增压空气压力传感器,精准控制混合气浓度的方式调整燃烧温度的策略,可以有效降低 CO 排放^[13-14]。

发动机推进特性下燃气消耗率与排气中 NO_x 质量分数随负荷率的变化如图 5 所示。由图 5 可知:发动机推进特性下,随转速与功率同步升高,燃气消耗率明显降低,但排放中 NO_x 质量分数增大。原因为:随着负荷率增大,缸内燃烧温度升高,使天然气燃烧更加充分,从而提高了发动机的热效率与经济性;但发动机输出功率越高,消耗的混合气体越多,促使燃烧不完全产生的混合气生成的 NO_x 越多^[15-17],两者关系此消彼长,这一趋势为寻找污染物排放参数的标定平衡点提供了合理依据。

试验过程中,共测量 6 次排放污染物,按照文献[12]的要求记录 2 000 h 排放耐久性劣化试验过程中发动机 NO_x -THC 比排放与颗粒物(particulate matter, PM)比排放的变化过程,结果如图 6 所示。由图 6

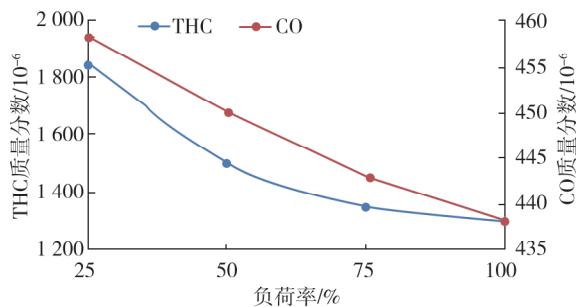


图 4 发动机推进特性下 THC 与 CO 随负荷率的变化

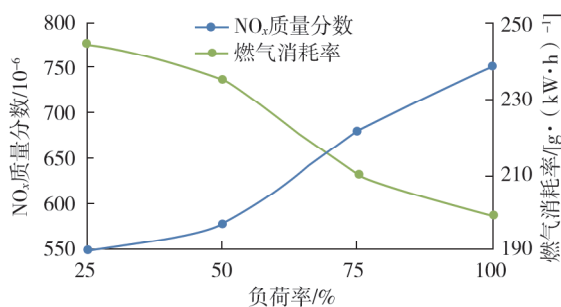


图 5 推进特性下 NO_x 质量分数与燃气消耗率的变化

可知:1)随发动机劣化时间逐步增长, NO_x -THC总排放逐渐降低,这主要是因为随着耐久试验进行,发动机逐渐度过磨合期,机械效率略有改善,发动机指示功有所降低, NO_x -THC总排放下降。2)PM排放满足文献[10]要求,虽整体不高,但存在上升趋势,这表明随着试验进行,磨损导致运动部件间隙逐渐增大,窜入燃烧室的机油略有增加,更多燃烧杂质加剧PM产生。零部件老化,例如火花塞点火效率下降等导致的燃烧过程恶化也促使了PM的产生。因此发动机在使用过程中应定期进行有效的维护保养,及时更换易损部件,可降低PM污染物排放。

完成耐久试验后对发动机进行拆机检查,各主要零部件的磨损合理,未探测到明显缺陷,整机状态良好,各项技术指标满足设计要求。

4 结论

以Z6180双燃料发动机为原型机,设计了一款缸径为180 mm、额定功率为600 kW的单一LNG燃料船用发动机。基于模块化的设计思想,提出了发动机的总体设计方案;完成了空气进气系统、燃气进气系统、控制系统的设计;基于船舶发动机国二阶段标准要求对发动机进行了2 000 h的耐久性试验及排放检测。

1)发动机各项指标满足设计需求,天然气供气系统及全工况下发动机燃气精准控制策略耐用可靠。

2)完成耐久试验后拆机检查,主要零部件均磨损合理,未探测到明显缺陷,整机状态良好。

3)耐久试验后, NO_x -THC比排放略有下降,PM比排放略有上升,但符合船舶发动机国二排放标准要求。

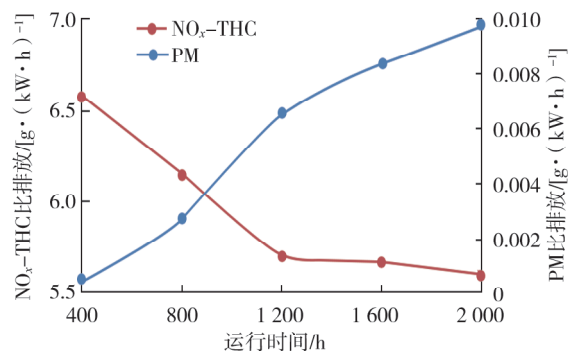


图6 2 000 h排放耐久性试验中 NO_x -THC与PM的关系

参考文献:

- [1] 李希帆,杨德义. 工信部与湖北省政府签署备忘录 六大方面推动内河船舶绿色智能发展[Z/OL]. (2023-02-08) [2024-03-25]. http://www.hubei.gov.cn/zwgk/hbyw/hbywqb/202302/t20230208_4514493.shtml.
- [2] 交通运输部,国家发展改革委. 关于印发《交通运输老旧营运船舶报废更新补贴实施细则》的通知:交规划发[2024]95号[S/OL]. (2024-08-02) [2024-08-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966728.htm.
- [3] 赵国锋,姚崇,孙军. 船用天然气发动机技术发展综述[J]. 柴油机,2017,39(4):1-6.
- [4] 雷伟,甘少炜,周国强,等. 船用天然气发动机技术现状及发展[J]. 船海工程,2014,43(6):110-112.
- [5] 孙化东. 天然气发动机LNG供给系统设计及性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [6] 中国船级社. 船用产品证书查询[Z/OL]. [2024-06-10]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/productCertificate?columnid=201900002000000069>.
- [7] 叶长霞,程伟. 东风单一燃料电喷LNG发动机供气系统设计研究[C]//中国内燃机学会第八届学术年会论文集. 上海:中国内燃机学会,2008:105-110.
- [8] 何赛. 船用双燃料发动机性能与排放的仿真与优化[D]. 上海:上海交通大学,2015.
- [9] 黄猛,辛强之,刘艳,等. Z6180/S油气双电控双燃料发动机开发[J]. 内燃机与动力装置,2021,38(6):49-53.
- [10] 环境保护部. 船舶发动机排气污染物排放限值及测量方法(中国第一、二阶段):GB 15097—2016[S]. 北京:中国环境科学出版社,2018.
- [11] 中国船级社. 天然气燃料动力船规范[M]. 北京:人民交通出版社,2016.
- [12] 中国船级社. 钢制海船入级规范[M]. 北京:人民交通出版社,2024.
- [13] 姚安仁,贾宝富,马宝东,等. 甲醇燃料在船舶内燃机动力中的应用[J]. 柴油机,2022,44(3):2-8.
- [14] 戚俊昂,刘清明,郑翱翊. NL6340系列柴油机的设计开发[C]//第十九届华东四省一市内燃机学会论文集. 威海:山东内燃机学会,2022:757-760.

- [15] 张广峰,郭进举,胥晓琛,等. 190 系列发动机活塞连杆组工艺改进[J]. 内燃机,2021(2):5-8.
- [16] 周炎,张晓晨,马兴刚,等. 船用 2 MW 级天然气发动机及动力系统研发[J]. 柴油机,2019,41(4):1-4.
- [17] 刘圣华,周龙保. 内燃机学[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社, 2017.

Development of Z180/T marine single LNG engine

ZHANG Hongxiang, LI Jie, XIAO Longbo, WEI Xuetao, YANG Shanggang, JING Tao

Zichai Machinery Co., Ltd., Zi bo 255086, China

Abstract: In order to meet the market demand for single gas marine engines with the cylinder diameter less than 200 mm and the power greater than 600 kW, the Z6180 dual fuel engine is used as the parent engine, based on modular design ideas, the air system, gas system, and control system of the engine are designed. A single fuel marine liquefied natural gas (LNG) engine with a cylinder diameter of 180 mm is developed. According to the requirements of “Emission Limits and Measurement Methods for Marine Engine Exhaust Pollutants (China Phase II)”, a 2 000 h emission durability test is conducted on the engine. The test results show that the developed LNG engine meets the design requirements, the natural gas supply system and the precise gas control strategy for the engine under all operating conditions are durable and reliable, and the emission indicators meet the requirements of the National Standard II for ship engines.

Keywords: gas supply system; durability test; LNG engine; control strategy

(责任编辑:刘丽君)

(上接第 56 页)

Analysis of commercial vehicle handling stability based on suspension inherent parameters

LIU Hui, YAN An, HAN Zhen

School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: In order to improve vehicle handling stability, the factors affecting vehicle handling stability are analyzed, the optimization measures such as reducing the height of front suspension parameters, adjusting the shape and structural size of the transverse stabilizer bar, and reducing the height of the steel plate spring in no-load condition are adopted. Based on ADAMS/Car software, a full-vehicle dynamics model is created to simulate and analyze the handling stability the vehicle before and after the optimization of front suspension parameters, lateral stabilizer bar, and rear suspension parameters under steady-state cornering conditions and steering wheel angle step conditions. The simulation results show that by using the optimization scheme of adjusting the diameter of the stabilizer bar's radial section, the absolute value of the difference between the front rear axle side slip angles under the vehicle's steady-state cornering condition is greater than 0° as the lateral acceleration increases, and the vehicle does not show oversteer, which reduces the risk of vehicle lateral skidding or tail wagging and improves the handling stability of the vehicle. The response time of the yaw angular velocity under optimal optimization scheme steering wheel angle step condition is 0.24 s, and the peak response time is 0.51 s, which meets the industry requirements.

Keywords: handling stability; dynamics model; optimization design; simulation analysis

(责任编辑:胡晓燕)