

电控放气阀增压器对某船用柴油机性能的影响

翟光瑞¹, 韩国强¹, 王彦斌¹, 刘文奇¹, 段艳强²

1. 大同北方天力增压技术有限公司, 山西 大同 037036; 2. 重庆潍柴发动机有限公司, 重庆 402262

摘要:为提高船用柴油机的低速性能,开发了一款增压器电控放气阀系统,设计系统的硬件和软件,开展台架试验,对比分析无放气阀、机械放气阀、电控放气阀 3 款增压器对柴油机性能的影响。台架试验结果表明:装配电控放气阀增压器的柴油机性能优于无放气阀柴油机、机械放气阀柴油机;相比无放气阀增压器,在实际功率分别为额定功率的 25%、50% 时,装配电控放气阀增压器柴油机的燃油油耗率分别降低 6、13 g/(kW·h),排温分别降低 50、45 °C,中冷后增压压力分别提高 20、50 kPa,有效提高了船用柴油机的低速性能。

关键词:柴油机;增压器;电控;放气阀

中图分类号:TK421.8

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)06-0049-05

引用格式:翟光瑞,韩国强,王彦斌,等.电控放气阀增压器对某船用柴油机性能的影响[J].内燃机与动力装置,2025,42(6):49-53.

ZHAI Guangrui, HAN Guoqiang, WANG Yanbin, et al. Effect of a turbocharger with electrically controlled wastegate on the performance of a marine diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(6): 49-53.

0 引言

船用柴油机向低速大转矩、高可靠性及智能化方向发展,特别是作为运输船、渔船等的主机时,要求柴油机具有良好的低速性能^[1-2]。提高柴油机低速性能的关键在于增压系统优化,目前主流技术方案可分为两类:一是采用配备废气旁通阀的涡轮增压器,二是应用可变几何涡轮增压器技术^[3-4]。废气旁通技术通过优化涡轮流通面积(通常设计得较小)并配合旁通阀,实现对增压压力的动态调控。当发动机低速运转时,旁通阀关闭,所有废气都流向涡轮,全力驱动涡轮以尽快建立增压压力;当转速升高、增压压力达到阈值时,旁通阀打开,将一部分废气绕过涡轮直接排入排气管,防止增压压力过高和涡轮超速^[5]。该技术结构相对简单,实用性强,成本较低,可靠性高,已通过市场长期验证并得到用户的广泛认可。

废气旁通系统的核心部件是放气阀。船用增压器普遍采用机械式气动放气阀,其开启压力固定,无法实现增压压力的自动控制与连续调节;并且阀门开启高度固定,导致放气阀开度不可调节。本文中借鉴文献[6-8],开发一款电控放气阀,实现放气阀开度随发动机工况自动调节,克服了机械放气阀关闭时的迟滞和提前放气问题,并通过试验分析其对柴油机性能的影响,为优化柴油机的低速性能提供有力支撑。

1 电控放气阀系统设计

1.1 总体结构

机械放气阀的结构布置如图 1 所示。当发动机废气压力超过预紧弹簧压力时,放气阀气门开启放气;随着发动机功率提高,废气压力和气门开启高度相应提高^[9]。机械式放气阀导致增压器增压压力无

收稿日期:2025-09-09

第一作者简介:翟光瑞(1974—),男,山西阳泉人,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为内燃机增压器研发,E-mail:zhaigr159@163.com。

法根据发动机工况自动调节与连续控制,瞬态响应性差,为解决上述问题,本文中设计一款电控放气阀系统,其总体结构如图2所示。电控放气阀系统主要由涡前联接管、联动曲柄、连接杆、电机调节曲柄、伺服电机以及电控系统组成。涡前联接管位于柴油机排气管与增压器之间,作为废气通道使用,其内部集成放气阀门组件。其工作原理为:电控系统根据实时采集的信号控制电机运转,通过联动曲柄与连接杆等传动机构驱动放气阀气门动作,实现对废气旁通的精确、动态控制。

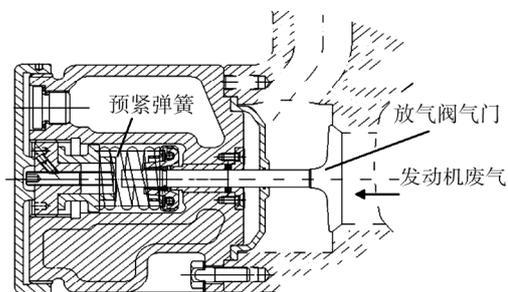


图1 机械放气阀结构布置图

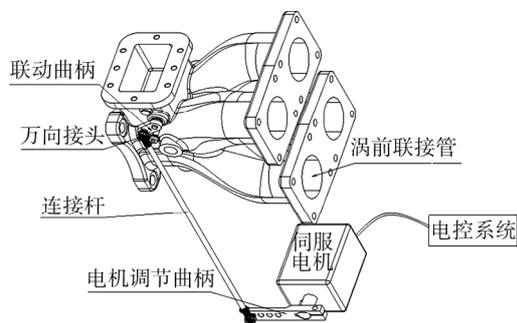


图2 电控放气阀总体结构

1.2 电控系统硬件设计

电控系统在接收到柴油机和增压器的实时工况信号后,电子控制单元(electronic control unit, ECU)对数据进行逻辑判断后,向驱动器发出控制指令,驱动伺服电机拉动放气阀拉杆,实时调整放气阀气门的开启角度,实现实时、精确调控。电控系统主要包括无刷电机、驱动器和控制器3部分,其硬件系统框图如图3所示。综合考虑电机发热功率损耗和放气阀的安全系数后,选用电压为220 V的80系列交流伺服电机。该电机配备高精度增量式编码器作为位置反馈传感器,加装减速比为40的减速机,最大理论转矩为95.6 N·m。驱动器采用脉冲宽度调制正弦波控制算法,工作于恒转速模式,风冷散热,并具备过载、过压、过热等多重故障保护与报警功能。控制器采用32位高性能微控制单元作为核心,接收增压器转速信号、增压压力信号及发动机转速信号,经内置算法解算后输出放气阀控制指令,同时将系统状态与故障码实时反馈给ECU。

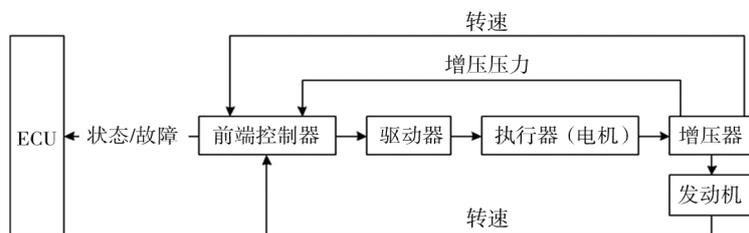


图3 硬件系统框图

1.3 电控系统软件设计

电控系统软件采用模块化设计,主要包括增压压力计算模块、增压器转速计算模块、发动机转速计算模块、逻辑判断模块及控制器局域网(controller area network, CAN)总线通信反馈模块。电控系统工作逻辑框图如图4所示。

通过设定周期为100 ms的定时中断实现放气阀的实时控制。在每个中断周期,电控系统采集并计算增压压力、增压器转速及发动机转速,调用Logic_Judge()函数判定执行器是否需要动作。判定逻辑主要以增压压力和增压器转速为依据,仅当两者信号失效时才启用发动机转速作为备用判断条件。若判定满足动作条件,系统发出控制指令。此时,伺服电机工作在转矩模式下,其输出转矩安全阈值设定为额定转矩的1.8倍,以可靠驱动放气阀。系统将自身的运行状态(包括控制状态与故障信息)通过CAN总线实时发送至ECU,构成闭环监控,从而确保ECU能够对电控系统进行全周期监控与状态跟踪^[10]。

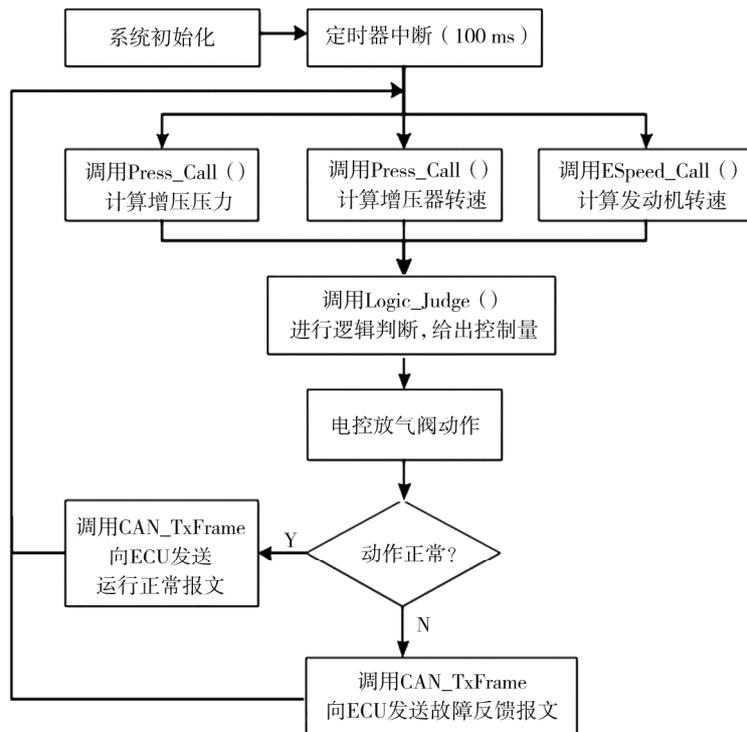


图 4 电控系统工作逻辑框图

2 台架试验方法与结果分析

2.1 柴油机参数

某拖网渔船配备直列 8 缸船用柴油机,其主要参数如表 1 所示。柴油机日常作业主要处于负荷率(实际功率与额定功率的比)为 75% 及以下负荷区间,用户首要诉求是在此常用工况段实现更优的燃油经济性。然而,为快速抵达渔场,船舶须具备较高的自由航行速度,这就要求发动机必须具备在 100% 负荷下持续可靠运行的能力。这种对经济性和动力性的高要求,对发动机的综合性能提出了更高挑战。

表 1 柴油机主要参数

发动机型号	缸径/mm	行程/mm	额定功率/kW	额定转速/(r·min ⁻¹)	压缩比	进气形式
8200	200	270	1 030	1 000	13:1	涡轮增压,进气中冷

2.2 台架试验要求

1) 发动机按螺旋桨特性试验开展台架试验。2) 发动机需满足:在负荷率为 50% 时油耗最低,同时在负荷率为 100% 时增压器转速不超速,且排气总管温度不高于 580 ℃。3) 采用 3 台不同配置的增压器进行试验:常规无放气阀增压器(记为增压器 A)、常规机械放气阀增压器(记为增压器 B)、电控放气阀增压器(记为增压器 C)。4) 增压器 B、C 的状态相同,为提高低速工况(重点为负荷率为 50% 的工况)的燃油经济性,需要提高增压压力,所以增压器 B、C 的转子总成比增压器 A 减小两挡。5) 增压器 A 的安全转速为 60 000 r/min;增压器 B、C 的安全转速为 65 000 r/min。

2.3 台架试验方法

试验中,发动机负荷率逐步增大,分别为 25%、50%、75%、90%、100%。在此过程中,发动机的转速与功率遵循螺旋桨特性进行相应调整,同步采集发动机主要性能参数数据,系统性分析、对比各增压器方案对发动机经济性、动力性及排气温度的影响。其中,对增压器 B 设计两个试验方案,一是在负荷率达到 90% 时机械放气阀全开(记为方案 B1),二是在负荷率达到 75% 时机械放气阀全开(记为方案 B2)。

2.4 试验结果分析

不同负荷率下,增压器方案 A、B1、B2、C 的试验结果如表 2 所示。

表 2 增压器试验结果

增压器方案	负荷率/%	发动机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	功率/ kW	燃油消耗率/ [$g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$]	发动机 排温/ $^{\circ}C$	中冷后进气 压力/kPa	增压器转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	放气阀 状态
A	25	630	258	221	400	20	21 200	无放气阀
	50	794	515	215	440	70	377 00	无放气阀
	75	909	773	209	463	140	49 300	无放气阀
	90	965	927	209	512	180	55 500	无放气阀
	100	1 000	1030	218	570	200	59 500	无放气阀
B1	25	630	258	215	350	40	30 600	关闭
	50	794	515	202	395	120	50 500	关闭
	75	909	773	203	430	184	59 127	关闭
	90	965	927	205	500	210	64 980	全开
	100	1 000	1 030	209	535	223	67 023	全开
B2	25	630	258	215	350	40	30 600	关闭
	50	794	515	202	395	120	50 500	关闭
	75	909	773	208	470	156	53 000	全开
	90	965	927	209	530	185	61 500	全开
	100	1 000	1 030	217	580	213	64 900	全开
C	25	630	258	215	350	41	30 600	关闭
	50	794	515	202	395	121	50 500	关闭
	75	909	773	203	430	184	59 127	关闭
	90	965	927	205	500	210	64 980	全开
	100	1 000	1 030	209	535	213	65 000	全开

由表 2 可知:1)对比其他方案,方案 A 在负荷率较低时,燃油消耗率最高、进气压力最低、涡轮温度最高、增压器转速最低。2)方案 B1 在负荷率为 90%时放气阀全开,因而在负荷率为 75%时能保持较低的燃油消耗率和较高的进气压力,但在负荷率为 100%时增压器转速超过安全转速。3)方案 B2 在负荷率为 75%时放气阀全开,该工况下,其燃油消耗率高于方案 B1 和方案 C,进气压力也较低,表明过早打开放气阀损失了部分增压能量,导致该工况性能下降。4)方案 C 的各项发动机性能参数明显优于方案 A 和 B2;相比方案 A,在负荷率为 25%时,方案 C 对应的柴油机燃油消耗率降低 $6 g/(kW \cdot h)$,排温降低 $50^{\circ}C$,中冷后进气压力提高 $20 kPa$;在负荷率为 50%时,方案 C 对应的柴油机燃油消耗率降低 $13 g/(kW \cdot h)$,排温降低 $45^{\circ}C$,中冷后压力提高 $50 kPa$;由于进行了精确控制,方案 C 避免了负荷率为 100%时方案 B1 出现的超速或超压情况。

综上,采用电控放气阀系统可提高柴油机低速时的增压压力,增大气缸内充气密度,使燃油得到充分燃烧,进而提高了柴油机的爆发压力和功率,并降低其油耗和排温,并可实现精准控制。

3 结论

设计船用柴油机电控放气阀系统的硬件与软件,通过台架试验分析其对发动机性能的影响,得到以下

结论。

1)机械放气阀增压器方案 B1 在负荷率为 90%时放气阀全开,在负荷率为 100%时增压器转速超过安全转速;B2 方案负荷率为 75%时放气阀全开,在负荷率为 100%时增压器转速不超速,但负荷率为 75%及以上时,油耗明显高于方案 B1。

2)电控放气阀增压器方案 C 的柴油机燃油消耗率、进气压力、涡轮温度、增压器转速等各方面明显优于机械放气阀方案 B2,且避免了负荷率为 100%时出现类似机械放气阀方案 B1 出现的超速或超压情况。电控放气阀系统能够精准设定开启的工况点并灵活调节阀门开度。

参考文献:

- [1] 孙前.船用柴油机废气涡轮增压器的维修保养及发展趋势[J].水上安全,2023(15):184-186.
- [2] 童凯麟,倪计民,石秀勇.涡轮增压器电控放气阀研究现状与发展展望[J].小型内燃机与车辆技术,2017,46(6):77-88.
- [3] 孙丽慧,徐旭.发动机废气涡轮增压器解析[J].汽车运用,2017(12):35-37.
- [4] 杨策,马朝臣,沈宏继.大型柴油机可变几何涡轮增压器的研制及试验研究[J].内燃机学报,2002,20(6):551-554.
- [5] ZHANG H,MA C C. Development of turbocharger for improving diesel engine matching performance[J]. Journal of Beijing Institute of Technology,2002,11(2):146-149.
- [6] 魏名山,张志,方金莉,等.带有放气阀的二级增压系统的设计与试验[J].内燃机学报,2009,27(2):166-170.
- [7] 刘博,邓康耀,张哲,等.可调二级增压柴油机增压压力控制策略计算研究[J].内燃机工程,2011,32(4):17-22.
- [8] 杨建国,舒畅,王勤鹏.船用智能化柴油机排气阀硬件在环仿真试验[J].哈尔滨工程大学学报,2012,33(2):174-179.
- [9] 鲁同阁.船用柴油机两级相继增压系统控制策略的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.
- [10] 赵令猛,杨光杰,朱敏霖,等.电控放气阀涡轮增压器在柴油机上的试验研究[J].小型内燃机与车辆技术,2024,53(2):1-5.

Effect of a turbocharger with electrically controlled wastegate on the performance of a marine diesel engine

ZHAI Guangrui¹, HAN Guoqiang¹, WANG Yanbin¹, LIU Wenqi¹, DUAN Yanqiang²

1. Datong North Tianli Turbocharging Technology Co., Ltd., Datong 037036, China;

2. Chongqing Weichai Engine Co., Ltd., Chongqing 402262, China

Abstract: In order to improve the low-speed performance of a marine diesel engine, a electronically controlled wastegate system of a turbocharger is developed. The hardware and software of the system are designed, and the bench test are conducted to compare and analyze the effect of three turbochargers (wastegate-less turbocharger, mechanically controlled wastegate turbocharger, and electronically controlled wastegate turbocharger) on the performance of the diesel engine. The bench test results show that the performance of the diesel engine equipped with electronically controlled wastegate turbocharger is better than those equipped with either a wastegate-less turbocharger or a mechanically controlled wastegate turbocharger. Compared to a wastegate-less turbocharger, the electronically controlled wastegate turbocharger improves the low-speed performance of the marine diesel engine. When the load rate is 25% and 50%, it reduces fuel consumption by 6 and 13 g/(kW·h) and lowers exhaust temperature by 50 and 45 °C, respectively, while increasing boost pressure after the intercooler by 20 and 50 kPa.

Keywords: diesel engine; turbocharger; electronic control; wastegate

(责任编辑:臧发业)