

某船用柴油机低速性能优化

刘锦荣¹,段艳强¹,朱涛¹,王佳伦¹,和晓锋¹,白书战²

1. 重庆潍柴发动机有限公司技术中心,重庆 402262;2. 山东大学能源与动力工程学院,山东 济南 250061

摘要:为解决某船用柴油机怠速合排以及急加速工况时冒黑烟问题,分析涡轮增压器对柴油机低速性能的影响,仿真分析柴油机低速工况进气不足原因;优化配气相位,并对优化后的柴油机进行台架测试和实船验证。结果表明:柴油机低速工况进气不足的原因为废气倒流;优化配气相位后,柴油机低速工况时的充气效率提高,进气量增加,缸内燃烧得到改善,低速合排以及急加速工况增压器的响应速度提升,怠速合排以及急加速瞬间烟色显著改善,怠速合排转速恢复时间缩短至5 s以内,满足拖轮用户使用需求。

关键词:柴油机;怠速合排;配气相位优化;充气效率

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2023)03-0061-05

引用格式:刘锦荣,段艳强,朱涛,等.某船用柴油机低速性能优化[J].内燃机与动力装置,2023,40(3):61-65.

LIU Jinrong, DUAN Yanqiang, ZHU Tao, et al. Performance optimization of low-speed operation for a marine diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(3):61-65.

0 引言

某匹配沿海拖轮的柴油机试航阶段时,在低转速工况齿轮箱合排以及急加速瞬间出现严重冒黑烟现象,合排时转速恢复较慢,进一步加载导致柴油机闷车熄火。殷伟^[1]、江志勇^[2]从进排气管路系统、进排气阀、喷油器、高压油泵系统(供油提前角、油泵供油量异常)等方面排查分析,认为进排气管路堵塞、进排气阀漏气、喷油器和高压油泵偶间磨损、增压器匹配和配气相位不合理等均会引起柴油机低速合排时冒黑烟问题。

由于该拖轮运行时间较短,经检查,该柴油机的进、排气系统以及燃油系统均工作正常,故解决柴油机急加速时冒黑烟和响应性较差的问题,应重点从增压器匹配以及配气相位上寻找和分析原因。

1 性能分析

某匹配沿海拖轮的柴油机的主要技术参数如表1所示(表中曲轴转角均以压缩止点曲轴转角为基准),设定柴油机合排转速为发动机怠速转速(40%额定转速)。

表1 柴油机主要技术参数

缸数	缸径/ mm	行程/ mm	额定功率/ kW	额定转速/ (r·min ⁻¹)	排气开启曲轴 转角/(°)	排气关闭曲轴 转角/(°)	进气开启曲轴 转角/(°)	进气关闭曲轴 转角/(°)
8	250	320	2 100	900	127	415	320	565

收稿日期:2022-07-14

基金项目:山东省重点研发计划项目(2021CXGC010703)

第一作者简介:刘锦荣(1985—),男,福建上杭人,工学硕士,工程师,主要研究方向为柴油机性能仿真,E-mail:liujinr@weichai.com。

涡轮增压器通过气体管路与柴油机连接,利用柴油机排气能量驱动涡轮,由涡轮带动压气机工作。增压器响应特性反映柴油机转速或负荷急剧变化时性能变化的适应能力。

齿轮箱频繁脱、合排及拖轮急加速时,螺旋桨突然受到大负荷冲击,柴油机转速瞬间迅速降低,为了维持外界负荷和转速的平衡,调速器迅速控制油门拉杆,瞬间加大供油量,排温升高,废气能量增加,驱动涡轮加速,但由于压气机叶轮与转子的惯性,增压器转速升高需要一定缓冲时间,压气机无法迅速提供与瞬间增大的燃油量相匹配的新鲜空气。柴油机低转速、空载状态下(即齿轮箱脱排期间),涡轮增压器效率和响应速度相对较低,柴油机突然加载(即齿轮箱合排或急加速)时,无法快速捕获足够的新鲜空气,导致缸内燃油较多、空气较少,燃烧效果不好,易出现冒黑烟现象^[3]。

转动惯量和进气腔的空气弹性缓冲作用是增压器响应滞后的主要影响因素,增压器响应主要取决于增压器转动惯量和进气量,转动惯量越小,进气量越大,增压器的响应速度越快^[4-6]。

由于该拖轮有高速航行工况的需求,增压器匹配时,若选择较小的压气机叶轮、扩压器或喷嘴,柴油机高速、大负荷运行时存在增压器超速风险。优化配气相位也可以提高低速工况时的充气效率和缸内进气量,从而改善缸内燃烧,提升柴油机低速大转矩需求,提高增压器的响应速度^[7-11]。因此本文中重点优化配气相位,提高柴油机的低速性能。

2 仿真分析

2.1 低速极限负荷工况进气不足分析

该拖轮主机为采用脉冲排气系统的8缸双增压柴油机,柴油机各缸发火顺序为1—3—7—4—8—6—2—5,根据脉冲排气管布置形式,不同脉冲管上各缸的发火顺序分别为1—7—8—2和3—4—6—5,同一脉冲总管的2个气缸排气间隔曲轴转角为 180° ,小于排气持续角,因此会引起各缸排气干扰,这种干扰在低速工况时更为明显。气门重叠角期间,排气管中气体压力高于气缸,产生废气倒流,进气充量减少,影响进气充气效率,影响发动机动力性和经济性^[12-15]。8缸双增压柴油机脉冲排气系统结构示意图如图1所示。

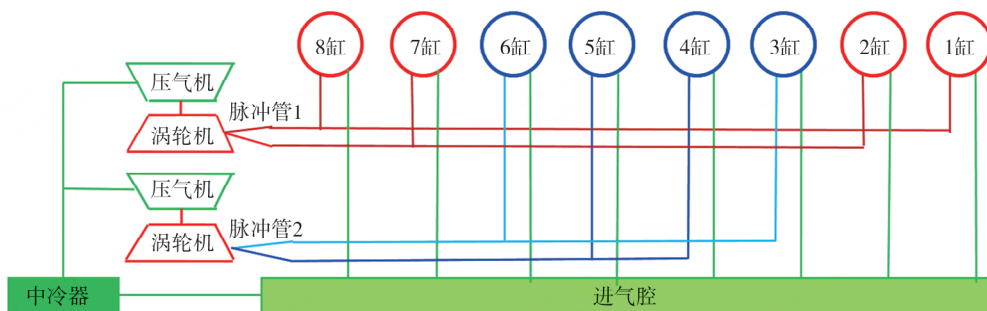


图1 8缸双增压柴油机脉冲排气系统结构示意图

低速极限工况(指40%额定转速时,发动机功率最大的工况)排气质量流量曲线如图2所示。由图2可知:气门重叠角内,排气管中废气和新鲜扫气空气的混合气排气质量流量为负,即发生倒灌现象。倒灌导致缸内残余废气增加,空燃比减小,燃烧恶化,烟度大;同时扫气效果较差,油耗、排温均升高。

2.2 配气相位优化

转速不同,最佳配气相位有所不同,因此改善低速工况充气效率和进气量可从优化配气相位入手,配气相位

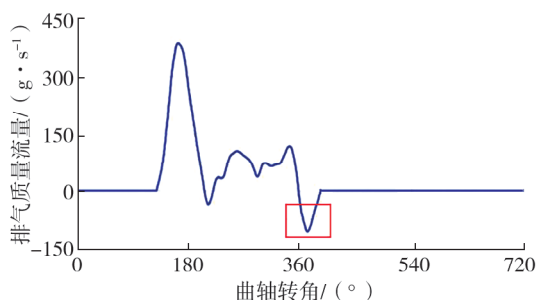


图2 原机排气质量流量曲线(低速极限工况)

优化采用比例积分微分模块确定功率模式,兼顾低速极限工况和额定工况的充气效率、额定工况油耗,确定配气相位。配气相位对充气效率的影响如图3所示,排气开启角对额定工况油耗的影响如图4所示。

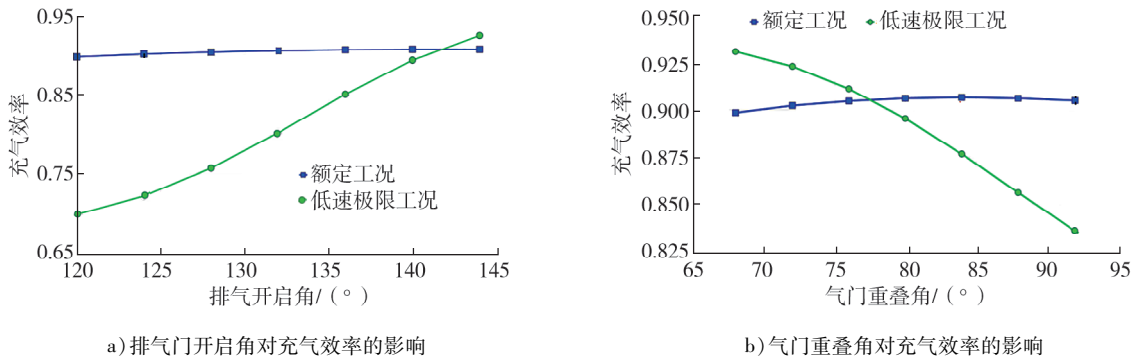


图3 配气相位对充气效率的影响

由图3可知:排气门开启角推迟,低速极限工况时的充气效率增加;气门重叠角越小,低速极限工况充气效率越大;排气门开启角和气门重叠角的变化对额定工况下的充气效率影响较小。

由图4可知:排气门开启角增大,额定工况下的燃油消耗率增大。

综合考虑低速极限工况的充气效率以及额定工况下的燃油消耗率,优化配气相位,优化后较优化前配气相位的变化如表2所示。

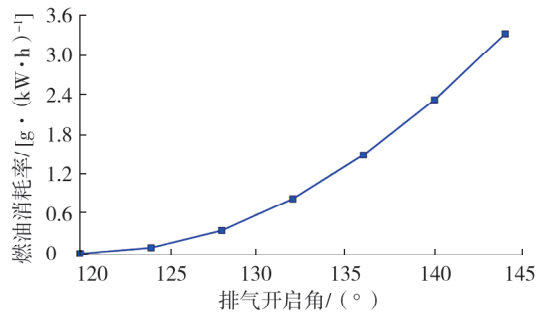


图4 排气开启角对额定工况油耗的影响

表2 优化后配气相位较优化前变化

单位:°

进气门开启角	进气门关闭角	进气持续角	排气门开启角	排气门关闭角	排气持续角	气门重叠角
0	0	0	+6	-8	-14	-8

注:+表示延迟,-表示提前。

2.3 仿真结果分析

选取低速极限工况,对比优化前、后的排气质量流量和过量空气系数。优化前、后排气质量流量曲线如图5所示,油耗、过量空气系数及排温对比如表3所示。

由图5可知:优化配气相位后,低速极限工况时排气支管混合气“倒灌”明显减少。

由表3可知:优化后,低速极限工况时缸内过量空气系数增加18.6%、燃油消耗率降低4.8%、排温降低15.2%;额定工况时优化前、后的缸内过量空气系数、燃油消耗率、排温基本相当。

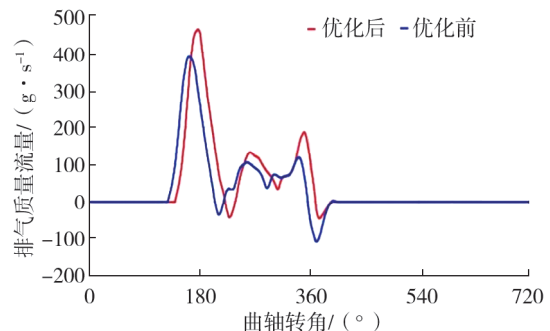


图5 优化前、后低速极限工况排气流量对比曲线

表3 优化前、后燃油消耗率、过量空气系数和排温对比

工况	燃油消耗率/[g·(kW·h) ⁻¹]		缸内过量空气系数		排温/°C	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
低速极限工况	230	219	1.18	1.40	625	530
额定工况	198	199	2.25	2.26	576	585

3 性能试验

3.1 台架试验

对配气相位优化前、后的发动机开展台架试验,40%、45%额定转速时,发动机转矩和突加性能对比结果如表4所示。

表4 40%、45%额定转速时转矩和突加性能对比

工况	极限转矩百分比/%		突加功率百分比/%		突加响应时间/s	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
40%额定转速	46	56	13.0	16.0	13	7
45%额定转速	62	72	17.5	22.5	15	8

由表4可知:配气相位优化后,柴油机低速性能显著提升;40%、45%额定转速工况点的极限转矩输出能力显著提升,分别提高了21.7%、16.1%;怠速合排工况(即40%额定转速工况)突加功率提升了23.1%,45%额定转速工况提升了28.6%;40%额定转速工况的转速恢复响应时间缩短了6s,45%额定转速工况的转速恢复响应时间缩短了7s。

3.2 实船试验

3.2.1 配气相位优化前测试

配气相位优化前,低速极限工况时合排瞬间峰值转矩为 $6.0\text{ kN}\cdot\text{m}$,转速恢复时间约为10s,合排烟度较严重,烟度约为2级(林格曼黑度法)。根据客户实际使用情况反馈,30s内42%额定转速急加速至70%额定转速,转矩由 $2.0\text{ kN}\cdot\text{m}$ 增加至 $8.5\text{ kN}\cdot\text{m}$,急加速过程中持续冒黑烟,前10s内烟度超标。

3.2.2 配气相位优化后测试

优化后,低速极限工况合排瞬间峰值转矩约为 $5.6\text{ kN}\cdot\text{m}$,合排烟度显著改善,转速恢复时间约为4s。参照客户实际使用工况进行急加速试验,烟色浓度显著下降,冒烟时长大幅缩短至5s以内。柴油机合排、急加速响应性明显改善。配气相位优化后,急加速试验不同时刻烟色如图6所示。

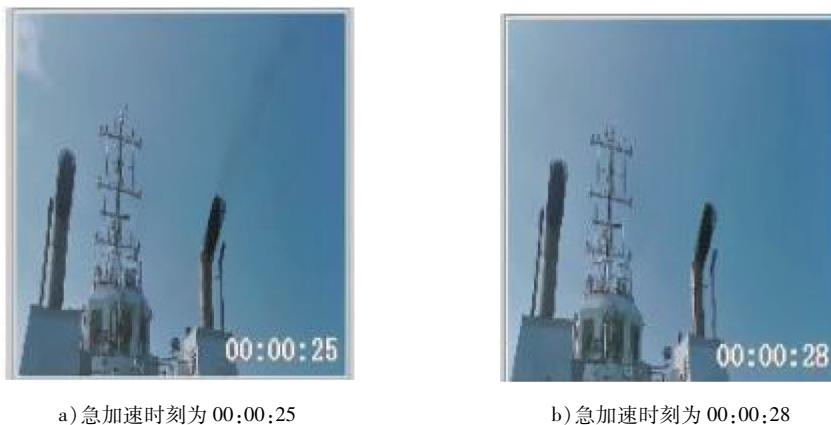


图6 优化后急加速试验不同时刻的烟色

4 结论

1) 气门重叠期间排气管中废气和扫气空气的混合气倒灌,导致缸内过量空气系数不足,是柴油机怠速合排和急加速过程冒黑烟、排温高的原因。

2) 适当推迟排气门开启角以及减小气门重叠角可有效减轻各排气管中废气和扫气空气的混合气倒灌,提升低速工况充气效率和过量空气系数,增加缸内进气量,改善缸内燃烧,烟色显著好转;同时进气量

增大,增压器响应更快,显著提升柴油机低速合排以及急加速能力。

参考文献:

- [1] 殷伟. 基于船舶柴油机冒黑烟的故障诊断的研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [2] 江志勇. 船舶柴油机各种非正常烟色的分析与对策[J]. 船舶物资与市场,2019(12):25-28.
- [3] 郑小华,刘仕飞,向本银. 船用柴油机冒黑烟及熄火故障分析与解决方案[J]. 柴油机,2019,41(5):51-55.
- [4] 黄昕煜,邱苗,崔毅,等. 增压柴油机瞬态特性的评估方法[J]. 车用发动机,2016(1):22-27.
- [5] 花传杰,刘民成. 废气涡轮增压发动机瞬态响应特性分析[J]. 车用发动机,1997(1):61-62.
- [6] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京:机械工业出版社,1992.
- [7] 李文涛. 基于热力学仿真的大缸径柴油机性能研究[D]. 天津:天津大学,2017.
- [8] 张浩. 140 柴油机配气系统仿真分析[D]. 济南:山东大学,2012.
- [9] 胡伯宗. 8V150 柴油机涡轮增压系统排气管系设计研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [10] 顾宏中. 柴油机工作过程[M]. 北京:国防工业出版社,1987.
- [11] 刘会珍. 排气歧管结构对发动机性能的影响[J]. 内燃机与动力装置,2012(5):1-4.
- [12] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [13] 李炳男,崔亚男,杨中华,等. 基于排气凸轮轴选型试验的数据分析与研究[J]. 汽车技术,2015(7):35-37.
- [14] 刘杨,李国岫. 增压柴油机配气相位的优化研究[J]. 北京汽车,2009(3):25-28.
- [15] 李思宇,谭永进. 配气相位对发动机性能的影响分析[J]. 内燃机与配件,2019(12):52-54.

Performance optimization of low-speed operation for a marine diesel engine

LIU Jinrong¹, DUAN Yanqiang¹, ZHU Tao¹, WANG Jialun¹,
HE Xiaofeng¹, BAI Shuzhan²

1. Technology Center, Chongqing Weichai Engine Co., Ltd., Chongqing 402262, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

Abstract: In order to solve the problem that the diesel engine emits black smoke seriously in case of sudden speed-up and when it is attached to the propeller quickly during idling, the influence of turbocharger on low-speed performance of diesel engine is analyzed, and the reason for insufficient intake of diesel engine at low speed is analyzed through simulation method. The valve phase is optimized, and verified by testing bench and ship. The results show that after valve phase is optimized, the volumetric efficiency is improved during low-speed operation, and the intake air is increased, so the in-cylinder combustion is enhanced effectively, then the response speed of turbocharger is improved in case of sudden speed-up and when diesel engine is attached to the propeller quickly during idling, the smoke of idling and sudden speed-up is optimized significantly, and the recovery time of idle speed is shortened to less than 5 s, which finally meets the demand of tug customer.

Keywords: diesel engine; attached to the propeller at idle speed; optimization of valve phase; volumetric efficiency

(责任编辑:刘丽君)