

YC6C 型高速船用柴油机设计开发

沈捷, 李伟, 黄永仲, 覃文, 覃壮革

(广西玉柴机器股份有限公司, 广西 玉林 537005)

摘要: 通过采用小缸心距、高强度系数、高效增压中冷、高效燃油喷射、高低温淡水热管理、四气门、低机油耗、低振动噪声控制、高强度结构设计等专利技术, 自主设计开发了 YC6C 型高速船用柴油机。介绍了 YC6C 型柴油机的设计开发过程及总体设计方案; 关键零部件设计和台架性能试验以及用户使用情况。试验及应用情况表明: 该柴油机各项指标满足设计开发要求, 可靠性、动力性、经济性和社会效益明显。

关键词: 高速船用柴油机; 设计; 试验; 应用

中图分类号: TK422 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2015)05-0006-08

The Design and Development of YC6C High-speed Marine Diesel Engine

Shen Jie, Li Wei, Huang Yongzhong, Tan Weng, Tan Zhuangge

(Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd., Guangxi Yulin 537005)

Abstract: Based on proprietary technologies such as short cylinder pitch, high strengthening factor, high efficiency inter-cooling, high efficiency fuel injection, high-low thermal management, four-valve, lower oil consumption, lower vibration and noise control, design of high intensity structure etc., YC6C type high-speed marine diesel engine was developed. The development process and overall design of YC6C diesel engine are introduced, as well as the design of key components, bench test and users' feedback. Test and application results indicate that the YC6C engine conforms to the design targets, and boasts good reliability, power performance, fuel economy and significant social benefits.

Key words: high-speed marine diesel engine; design; test; application

0 引言

YC6C 型柴油机是玉柴机器股份有限公司全新开发的, 拥有完全自主知识产权的高速船用柴油机, 满足内河和近海船机市场对 600~1 000 kW 功率段柴油机的需求。

该型柴油机采用高效增压中冷、高效燃油喷射、四气门缸盖、低机油耗、高低温淡水热管理、低振动噪声控制、高强度结构设计等专利技术, 具有缸心距小, 结构紧凑, 强化系数高等特点。同时, 结合模块化和集成化设计理念, 整机实现了高可靠性、高动力性、高功率密度、低油耗、低排

放、低成本、结构紧凑、维修保养便利的竞争优势; 用户使用效果好, 市场前景广阔。

1 开发思路

针对项目的开发要求, 综合 YC6C 柴油机目标用户的使用环境、操作习惯, 以及目前国内外先进船用柴油机的设计理念, 依据玉柴机器股份有限公司产品设计开发流程 (YCEDP), 采用自顶向下设计理念, 项目历经 A/B/C/D/SOP 等 5 个完整的样机里程碑开发节点。YC6C 型柴油机总体开发思路如下。

(1) 保证发动机高可靠性;

- (2) 贯彻集成化、模块化、轻量化设计思想;
- (3) 关键结构件符合《钢制海船入级规范》等行业规范要求,及经CAE计算分析确认;
- (4) 零部件设计考虑国内供应商能力,优选国内优秀供应商。

2 主要技术指标

YC6C型柴油机主要技术指标和性能参数见表1。

表1 YC6C型柴油机主要技术指标和性能参数

型式	直列、四冲程、直喷、水冷、增压中冷、非逆转	
气缸数	6	
缸径×行程/mm×mm	200×210	
排量/L	39.58	
压缩比	14.5:1	
发火顺序	1-5-3-6-2-4	
标定功率/kW	680	900
标定转速/(r·min ⁻¹)	1 500	1 800
活塞平均速度/(m·s ⁻¹)	10.5	12.6
平均有效压力BMEP/MPa	1.37	1.52
强化系数/(MPa·(m·s ⁻¹))	14.385	19.152
最高燃烧压力/MPa	<18.5	
标定点燃油消耗率/(g·(kW·h) ⁻¹)	≤220	
机油消耗率/(g·(kW·h) ⁻¹)	≤0.5	
增压压力/MPa	0.3	
NO _x 排放限值	采用机械直列喷油泵,符合IMO Tier II排放要求;采用电控单体泵+SCR选择性催化还原系统,符合IMO Tier III排放要求	
外形尺寸长×宽×高/mm×mm×mm	2 396×998×1 835	
整机干重质量/kg	≈3 700	

3 整体布置

YC6C型柴油机横剖面图见图1所示,进气侧视图见图2所示。

玉柴凭借自身在车用柴油机设计领域中的丰富经验,并结合当前高速船用柴油机设计模式,研发出此款功率密度高、结构紧凑、可靠性好、节能环保的产品。因为采用了较小的缸心距尺寸,所以整机长度得到很好控制,整机长度为2 396 mm,在同类产品中处于领先水平。该机型齿轮传动系统前置,水泵驱动齿轮、喷油泵驱动齿轮、凸轮轴驱动齿轮、机油泵驱动齿轮均前置置于齿轮室内;后端为主动输出端。此种动力传递布置便于曲轴前后端

的动力均衡分配,有效抑制整机振动和噪声水平。

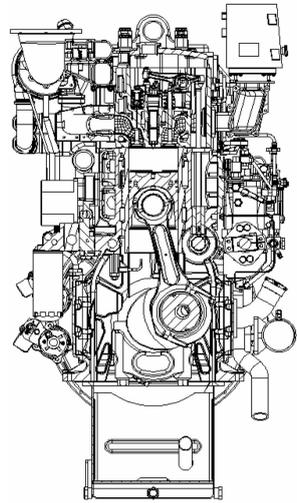


图1 YC6C型柴油机横剖面图

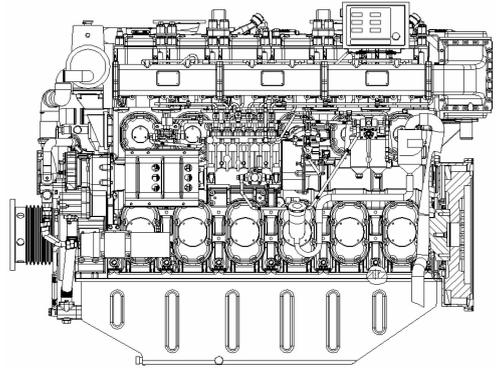


图2 YC6C型柴油机进气侧视图

YC6C型柴油机采用了高低温淡水冷却热管理系统,可有效降低整机冷却水温度波动,缩短冷启动之后的暖机时间。由于中冷器采用淡水冷却,避免了中冷器腐蚀,因此降低了中冷器的冷却芯管及隔板材料耐腐蚀等级要求,节约了使用维护成本。

YC6C型柴油机的起动方式可以选择电起动或气起动两种模式。其中,电起动采用2台小规格通用电起动马达实现柴油机的起动要求,具有啮合同步好,起动响应迅速,拖动转速高,发热小,成本低等特点。

4 主要零部件结构设计

4.1 气缸体

气缸体采用轻量化设计理念,龙门框架式结构;材料为高强度合金铸铁,机体重量轻、强度高、刚度好、变形小。在曲轴箱及挺杆室部位均开设有便于维修的窗口。在机体中,集成有高温冷却水通道及低温冷却水通道,见图3所示。缸孔内部

采用减重设计结构，横剖面各缸相邻部位呈矩形，减重的同时提高了结构稳定性与强度，具体见图 4 所示。

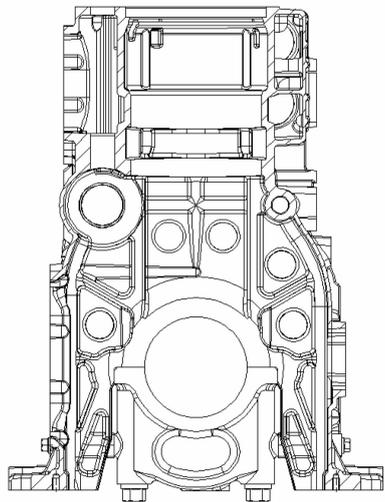


图 3 气缸体高低温水道横剖视图

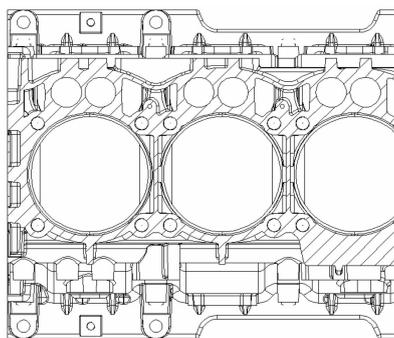


图 4 气缸体横剖面图

通过对气缸体的有限元分析优化，结构设计上采用振动抑制措施，根据各个部位强度要求合理设置壁厚，辅助以加强筋提高强度。气缸体组件的整体结构采用框架式布局，主轴承盖采用横拉螺栓紧固，见图 5。通过下方主轴承盖螺栓、上方缸盖螺栓以及左右两侧横拉螺栓的均匀施力，确保曲轴在较高缸内压力和交变载荷输出下的稳定运行。

4.2 气缸盖与气缸盖垫片

YC6C 型柴油机的气缸盖采用高强度蠕墨铸铁材料，4 气门菱形布置结构，见图 6。采用长切向进气道和短螺旋进气道布局，确保对进气气流的合理组织，实现较高的流量系数及适中的涡流比，满足燃油喷射后的均匀快速燃烧需要。

同时，气缸盖集成有摇臂轴安装孔及气门桥导向机构，见图 7，有利于简少零部件数量。由于加工定位采用相同的基准，所以加工精度高、一致性好，较高的加工精度也提高了配气机构工作可靠性。

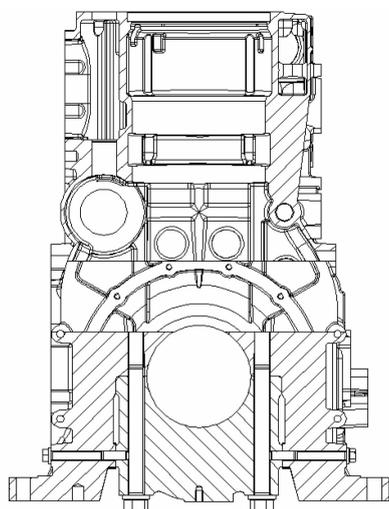


图 5 气缸体纵剖面图

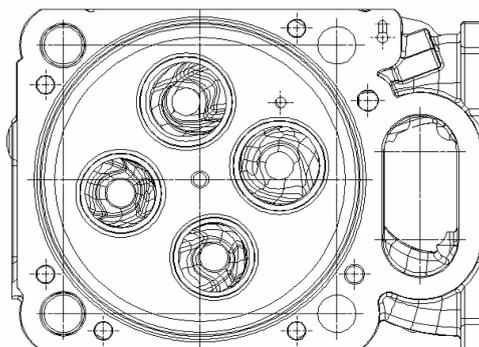


图 6 气缸盖底面视图

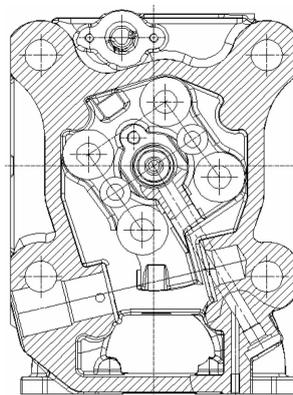


图 7 气缸盖摇臂轴安装孔剖视图

为满足气缸盖冷却需求，在气缸盖底面设计有六个副上水孔，以及一个主上水孔，见图 8，其中 4 个上水孔直接进入冷却喷油器铜套的交叉通道中，对喷油器提供高强度冷却。

在缸盖底部加工出凹进的迷宫密封环槽（可见图 6 气缸盖底面视图），对应的缸套顶部密封面中加工有凸起的密封台阶；作为密封的缸垫组件中包含一个独立的环形钢片，装配后，独立的环形钢片被缸盖和缸套之间的凹凸结构挤压成型，起到良

好的线密封效果,使高温高压气体经过减压、降温后才能到达气缸垫。

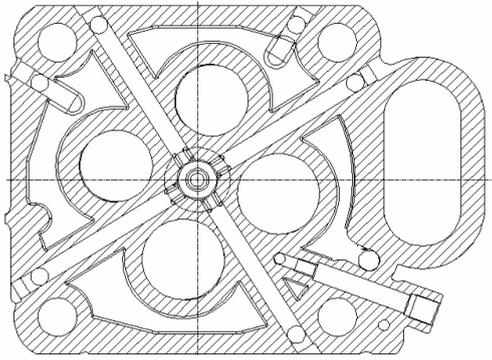


图8 气缸盖冷却水道

气缸垫为单层式全金属缸垫结构。为预防冲缸垫引起的返水问题,在油、水孔附近增加了泄气槽,即使气缸冲垫漏气,由于气体从泄气槽泄漏出去,不会引起油、水、气混合,因此发动机还可以继续运转,以到达维修点进行维修,这对于在水面上作业的主机至关重要。轻微的冲垫漏气,并不影响发动机运行,可免维修。气缸盖垫片见图9,封火圈局部放大视图见图10。

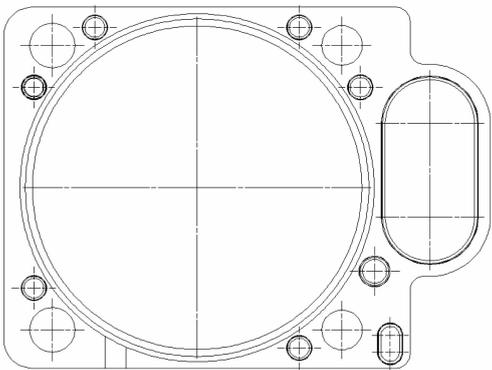


图9 气缸盖垫片



图10 封火圈局部放大视图

4.3 活塞连杆组件

柴油机燃烧系统的关键是进气、燃烧室形状和油束三者的良好匹配,而直喷式柴油机燃烧室结构参数对燃烧过程及整机性能影响显著。YC6C型柴油机活塞采用共晶硅铝合金材质,因整机强化系数较高,活塞热负荷较大,所以设计了浅盆形直口式燃烧室,见图11。燃烧室结构浅而大,此结构可以显著减少高温区域的形成。位于燃烧室中心部位的气流运动较弱,中间设计成球形凸台可将压缩冲

程末段螺旋气流挤向燃烧室外侧,从而将进气集中在油束附近,促进油气混合效果,利于扩散燃烧进行。同时为了方便整机维修时对活塞连杆组件的吊装,在活塞燃烧室顶部设计有螺孔,用于安装工装吊耳。

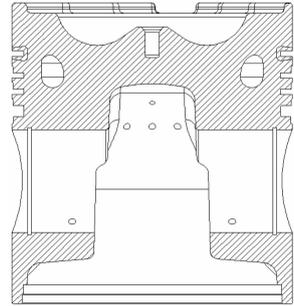


图11 活塞横剖视图

为降低高的热负荷对活塞可靠性的影响,在活塞头部内腔设计有内冷油道,对活塞进行振荡冷却。为提高活塞强度,减少燃烧室底部结构的应力集中,进油口和出油口端面布置在活塞销孔中心线以下。活塞的温度场分析见图12。

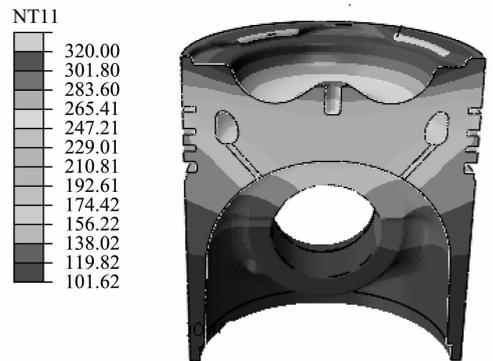


图12 活塞温度场分析云图

活塞裙部喷涂石墨,以提高自润性。同时,为了降低机油耗,提高气缸内燃气的做功能力,采用了4道环密封,其中1道气环、2道油环,以及1道刮油环,结合刮碳环结构,机油耗水平得到较好控制。

YC6C型柴油机连杆为优质合金结构钢,全纤维模锻,整体调质喷丸强化处理,以提高综合机械性能。为便于连杆安装,大头连杆盖采用斜切口结构,小头采用楔形减重结构,见图13及图14,以此降低比压及运动件惯量,降低由二阶往复惯性力不平衡引起的振动。连杆体经CAE优化分析,在降低连杆重量的同时,提高连杆截面抗弯能力,分析云图见图15。经过计算,连杆体的最大应力值出现在中部,小于连杆材料的许用限值,并有足够

的安全裕度，满足项目开发要求。

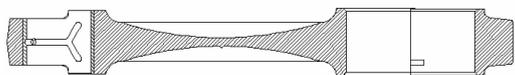


图 13 连杆纵剖视图

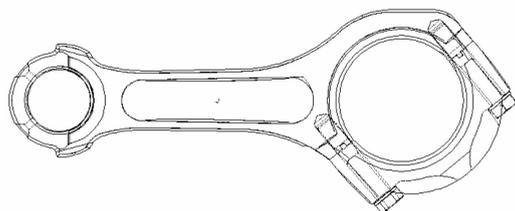


图 14 连杆整体视图

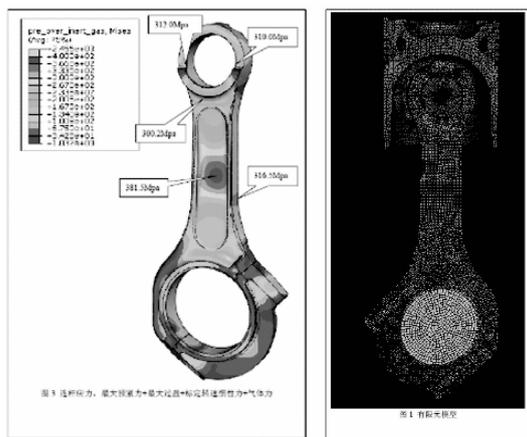


图 15 连杆模拟计算分析云图

4.4 曲轴飞轮组件

曲轴采用优质合金结构钢模锻调质处理，或球墨铸铁材料正火氮化结合圆角滚压工艺强化；曲轴采用全平衡设计，各档曲柄上均安装有平衡块，见图 16。

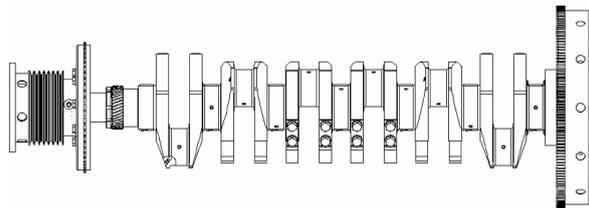


图 16 曲轴组件图

在开发过程中，对曲轴、活塞、连杆模型进行了多体动力学仿真分析，分析模型见图 17。经分析，各运动副润滑油膜特征、结构强度及曲轴扭振均满足开发要求。

4.5 凸轮轴组件

凸轮轴采用优质合金结构钢表面淬火处理，两段式结构；凸轮型线采用高次方多项式，大时面值，换气效率高。凸轮轴组件结构见图 18。

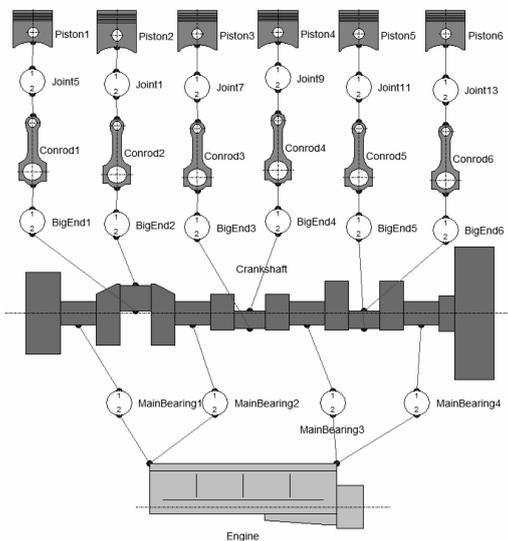


图 17 多体动力分析模型

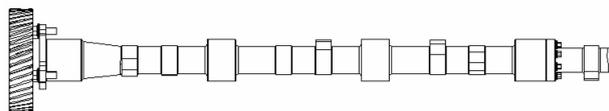


图 18 凸轮轴组件结构图

设计开发过程中，对凸轮轴进行了应力分析和疲劳校核，应力分析见图 19，校核分析云图见图 20。



图 19 应力分析云图

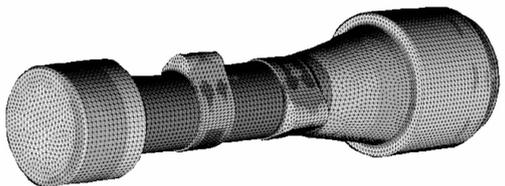


图 20 疲劳安全系数分布云图

经分析，凸轮轴应力水平及安全系数均符合项目开发要求，并有一定安全裕度。

4.6 冷却系统

YC6C 型柴油机采用闭式高低温淡水冷却循环系统，中冷器、热交换器、机油冷却器及低温淡水泵构成一套低温冷却系统；机体、缸盖、调温器及高温水泵构成一套高温冷却系统。冷却系统原理图

见图 21。

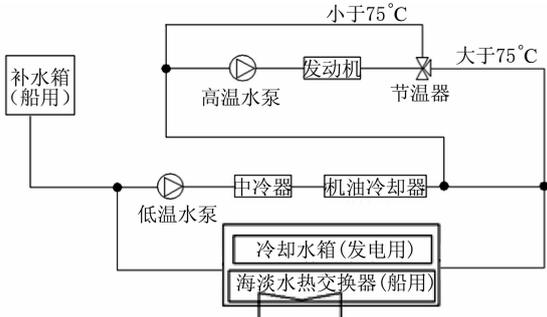


图 21 冷却系统原理图

其工作原理如下：当高温冷却系统中的冷却水温度低于调温器开启温度时，高温水在高温水泵、气缸体、气缸盖构成的冷却系统中循环；低温水则在低温水泵、中冷器、机油冷却器、热交换器构成的冷却系统中循环，高温水与低温水不发生混合。当高温冷却系统中的冷却水温度高于调温器开启温度后，则有一部分高温水流出，并进入低温冷却系统中参与循环流动，同时有等量的低温水进入高温冷却系统中参与循环流动，这样可使高温冷却系统水温得以降低，使发动机在合适的温度下运行。

这种结构使得发动机在小负荷时水温上升快而在大负荷时水温上升慢（稳定），实现自身水温调节。而传统冷却水路只有 1 路通道，难以解决小负荷时水温上升慢的问题，也没有自身水温调节功能。另外，由于发动机本体及附件的冷却均采用淡水，避免了冷却系统遭受海水冷却带来的腐蚀问题，延长了冷却系统的使用寿命，获得长久保持良好换热的效果。冷却系统的水流场压力分布的 CFD 计算分析云图见图 22。从图 22 中可以看到，各缸压力分布均匀性较好，缸套所在的水套压力较高，有利于将热量及时带走，同时避免发生穴蚀的风险。

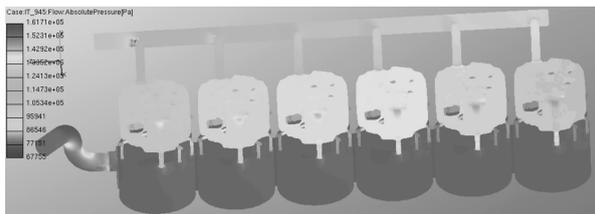


图 22 水套压力分布云图

4.7 润滑系统

YC6C 型柴油机润滑系统采用外置齿轮式机油泵，便于润滑系统布置和保养维护。为确保整机起动前，润滑系统已建立一定压力，避免关键运动副的磨损问题，在机油泵之前还设置有电动预供油泵，在 10 s 内即可建立 300 kPa 压力，满足整机快

速起动要求。在机油泵出油侧设置有压力调节阀，兼顾低速油压不致过低，高速工况下油压不超过设定值。润滑系统见图 23。

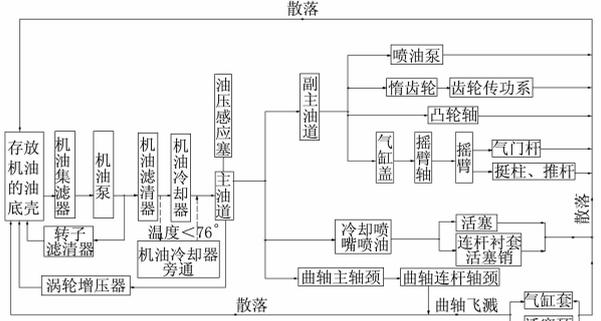


图 23 润滑系统原理图

YC6C 型柴油机的润滑系统采用了 2 套机油冷却器模块，该机油冷却器模块借用批产成熟机型产品，结构紧凑，冷却换热效率高。机油冷却器外观图见图 24。

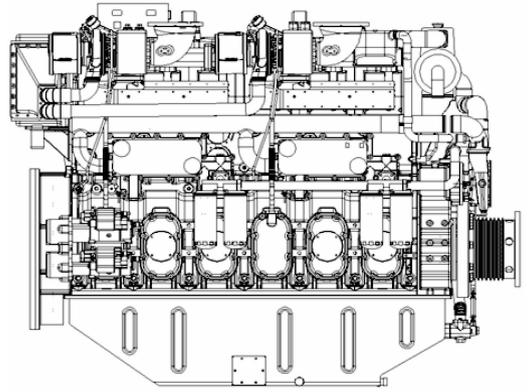


图 24 机油冷却器装配图

4.8 其他系统零部件

4.8.1 离心式水冷油气分离呼吸器

YC6C 型柴油机采用离心式水冷油气分离呼吸器装置，有效回收了曲轴箱窜气中的机油成分，油气分离效率提高了 30% 以上。该油气分离呼吸器与传统结构相比变动小，仅增加有一组蛇形水冷管。蛇形水冷管内部通低温冷却系统中的淡水，以此提高对高温油气混合气的冷凝能力，所增加的蛇形管表面积也提高了油气混合气的捕获面积。该离心式水冷油气分离呼吸器见图 25。

4.8.2 中冷器自动放水开关

YC6C 型柴油机中冷器出气端盖安装有玉柴专利技术的自动放水开关，确保随时自动排除中冷器空气侧淤积的冷凝水，省去人工干预和操作。该自动放水开关采用双金属感温片作为自动控制阀门开合的动力源，自动放水开关结构见图 26。

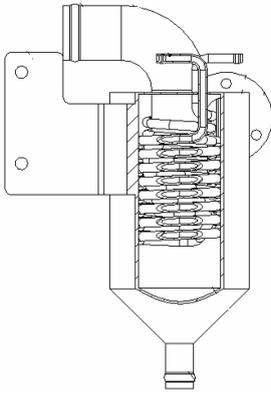


图 25 离心式水冷油气分离呼吸器

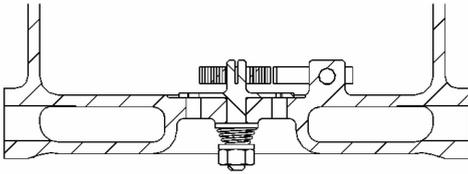


图 26 中冷器自动放水开关

其工作原理如下：当柴油机未工作时，中冷器出气端盖内部无高温进气通过，螺旋形双金属感温片处于收紧状态，此时与感温片相连的阀门也处于打开状态，中冷器出气端盖内部与外界大气相通，存有的冷凝水将通过连通的通道排出至大气中；当柴油机工作后，中冷器进气端盖内有相对较高温度的进气通过（通常增压之后的进气在经过中冷器冷却后，温度降至 40~60℃），此时感温片受热膨胀，转动与之相连的阀门至关闭状态，此时增压中冷后的进气不会因此泄漏；当柴油机工作一段时间之后，中冷器出气端盖中产生冷凝水，当温度较低的冷凝水覆盖双金属感温片后，感温片再次受冷收缩，并拉动与之连接的开关至打开状态，冷凝水被排净，而感温片在冷凝水排出后，再次暴露于高温进气中被加热，感温片膨胀后拉动阀门旋转关闭排水通道。以此实现低温打开放水，高温关闭，防止漏气的循环过程。

5 样机台架试验

5.1 台架性能试验

根据相关行业标准及 CCS 规范要求，并结合玉柴机器股份有限公司产品设计开发流程 (YCEDP)，对 YC6C 型柴油机开展了台架性能试验，试验结果见图 27、28。

5.2 台架机械开发试验

制定符合高速船用柴油机的机械开发试验规范，对 YC6C 型柴油机开展台架机械开发试验，既有效考核了柴油机关键零部件的可靠性和耐久性，

又缩短了试验开发周期，相关试验项目见表 2。

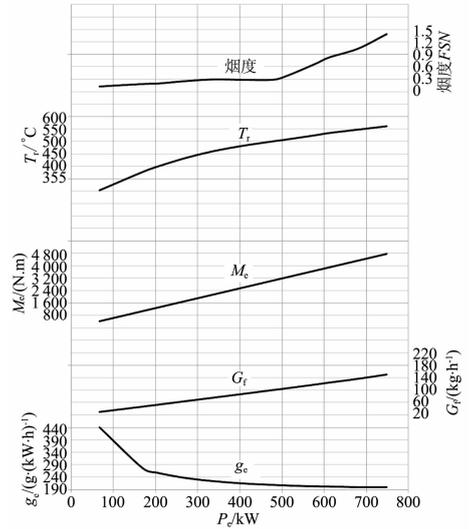


图 27 YC6C 型柴油机 1 500 (r · min⁻¹) 机型性能曲线

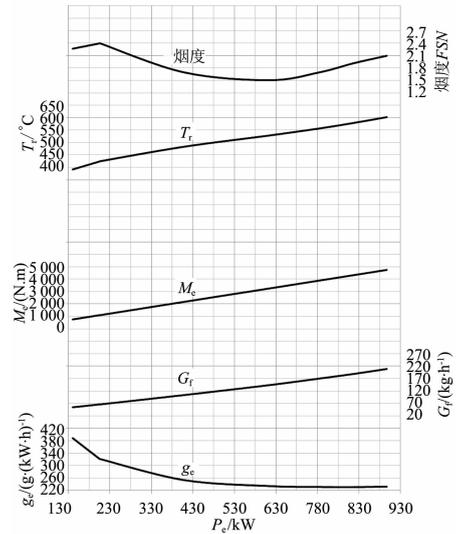


图 28 YC6C 型柴油机 1 800 (r · min⁻¹) 机型性能曲线

表 2 YC6C 型柴油机台架机械开发试验项目

试验类型	试验项目
系统功能试验	24 h 全速全负荷机油消耗量试验
	曲轴箱通风试验
	润滑功能试验
	冷却功能试验
	热平衡试验
	活塞温度场试验
	快速拉缸试验
	扭振测试试验
	附件振动测试试验
可靠性试验	起停可靠性试验
	200 h 全速全负荷可靠性试验
	1 000 h 六工况可靠性试验

经过台架相关系统功能试验及可靠性试验考核, YC6C型柴油机完全满足项目开发要求, 可以批量投放市场。

6 用户装船试验

YC6C型柴油机经过科学设计和全面台架试验考核, 各项技术指标满足项目开发要求, 随即投放市场。

6.1 配套浙江温岭渔港拖网渔船

YC6C型柴油机所配套的浙江温岭渔港拖网渔船参数见表3。

表3 浙江温岭渔港拖网渔船配套参数

船舶用途	钢质拖网渔船
船长/m	39.8
型宽/m	6.5
型深/m	3.5
设计航速/kn	航行航速12, 拖网航速2~4
实船航速/kn	航行航速13, 拖网航速3
主机数量	单机
发动机型号	YC6C925L-C20
标定功率/转速/kW/(r·min ⁻¹)	680/1 500
超负荷功率/转速/kW/(r·min ⁻¹)	748/1 548
齿轮箱型号	杭州前进 HCT600A
齿轮箱速比	8.23:1
螺旋桨直径/m	2.7
螺旋桨螺距/m	2
造船厂	浙江腾龙造船有限公司

配套的浙江温岭渔港钢质拖网渔船在我国东海海域使用, 作为拖网渔船动力, 负荷变化较大, 以拖网工况为主, 起网工况、航行工况为辅, 作业区域为舟山群岛等各渔场。

用户使用效果: 船舶加速快, 航速快, 最高航速达13节, 超过12节设计航速。拖网、起网有力, 起网时间短, 拖网时发动机低速动力发挥自如, 满足渔船使用要求; 质量稳定, 使用2年多, 每出海一次5个月, 除按期更换机油滤芯, 清洁空气滤清器、柴油滤清器等日常例行保养维护外, 发动机无故障。经济性好, 柴油消耗比同类柴油机的低, 每次出海可节约燃油3t左右, 经济效益明显; 服务迅速便捷。

6.2 配套广西藤县散货船

YC6C型柴油机所配套的广西藤县散货船参数见表4。

表4 广西藤县散货船配套参数

船舶用途	钢质5500T散货船
船长/m	90.8
型宽/m	16
型深/m	5.6
设计航速/kn	10
实船航速/kn	航行航速10, 常用航速5
主机数量	双机
发动机型号	YC6C1200L-C20
标定功率/转速/kW/(r·min ⁻¹)	900/1 800
超负荷功率/转速/kW/(r·min ⁻¹)	990/1 857
齿轮箱型号	杭州前进 HCD800
齿轮箱速比	5.47:1
螺旋桨直径/m	2.2
螺旋桨螺距/m	1.76
造船厂	广西藤县顺舟船厂

该散货船作业于西江主干道, 在我国西江流域使用, 航线以贵港-广州为主。作为货船动力, 低速扭矩大, 上水冲滩有力, 倒车工况灵活, 省油, 每个航次可以节约燃料费5000元左右, 同时易于保养维护, 深得船东用户欢迎, 也在该航线树立了新的船机标杆。

7 结论

YC6C型柴油机经过科学设计和全面台架试验考核, 各项技术指标满足项目开发要求。产品先后投放于广西北海、江浙沿海、长江及京杭大运河等水域, 广泛应用于灯光渔船、拖网渔船及货船。在实际使用中, 该机的动力性较同类机型高25%, 油耗较同类机型低15%以上; 使用机械直列式喷油泵, 达到IMO Tier II排放要求, 使用电控单体泵+SCR选择性催化还原系统, 达到IMO Tier III排放要求; 耐久性也得到了用户的一致认可。

参考文献

- [1] 机械设计手册编委会. 机械设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [3] 柴油机设计手册编委会. 柴油机设计手册 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1984.
- [4] 中国船级社. 钢质海船入级规范第3分册 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [5] SH 0521-1999, 中华人民共和国石油化工标准 [S].