

# X 系列船用低速柴油机技术分析

葛 岩<sup>1</sup>, 杜冬冬<sup>2</sup>

(1. 武警海警学院 航海系, 浙江 宁波 315800; 2. 吴淞海事局 船舶安全检查中心, 上海 200940)

**摘 要:**温特图尔发动机公司推出的 X 系列船用低速柴油机采用了许多新设计。通过与不同类型柴油机的比较, 论述了 X 型机的主要设计特点, 着重介绍了三活塞环技术的优缺点、CLU-5 气缸润滑油系统、缸套冷却系统、不等间距的曲轴结构、检测曲轴转角的新设计、燃油喷射系统和燃烧控制系统等方面的技术特点, 为船舶设计的主机选型及轮机管理提供参考。

**关键词:** X 型低速柴油机; 设计特点; CLU-5 系统; 曲轴转角; 燃油系统

**中图分类号:** U664.121

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2097-0358(2022)3-0016-07

## 0 引言

温特图尔发动机公司(简称“WGD 公司”)在 RT-flex 机的基础上优化改进, 研发出 X 系列船用低速二冲程柴油机, 可以满足更为严格的国际防止船舶污染公约(Tier III)氮氧化物排放限值要求。因此, 使用 X 型柴油机的船舶可以在部分排放要求更高的区域内航行<sup>[1]</sup>。由于 X 型柴油机是近几年才推出的产品, 与 RT-flex 机相比还不够成熟。目前, 比较成熟的 RT-flex 机技术还没有全部优化到 X 型机上, 如 RT-flex50 型、RT-flex58 型。但 X 系列柴油机和 RT-flex 机相比仍有一些改变: X 型机取消了传统的曲轴角度传感器, 控制系统由 WECS-9520 更新到 UNIC(Unified Control 统一控制)控制系统, 取消了喷油器控制单元<sup>[2]</sup>, 采用 CLU-5 气缸润滑技术<sup>[3]</sup><sup>[29]</sup> 配备了 SCR 系统等。

## 1 发展进程

WGD 推出的第一台 X 系列柴油机是 X35 机, 在国内由玉柴船舶动力股份有限公司生产, 最初命名为 RT-flex35, 后续又推出了 RT-flex40 机。其中, 小缸径柴油机市场中的主要机型是 X35 系列低速机和 X40 机。之后, X 系列柴油机历经 X48、X50、X72 等不同型号的发展, 目前已发展到 WX92 型。WX92 型低速柴油机主要适用于现代大型和超大型集装箱船舶, 该机缸径可达 920 mm, 活塞行程为 3 468 mm, 转速为 70~80 r/min, R1 点燃油消耗率为 166 g/(kW·h), 能够满足国际海事组织 Tier III 排放要求<sup>[27]</sup>。

## 2 设计特点

### 2.1 活塞及气缸

传统柴油机活塞裙部的环槽内嵌装承磨环, 以减少气缸套的磨损, 而早期的 X 系列柴油机为保证磨合质量, 在活塞裙部装配有箍紧环<sup>[4]</sup><sup>[10]</sup>。随着加工精度和装配精度的提高, 同时也为了节约成本, WGD 公司新近推出的机型已不再安装箍紧环, 而是创新性地设计了抗磨环(刮炭环), 这样不仅能够减少活塞顶上积炭的形成, 还能延长活塞的检修周期。X 型柴油机活塞和气缸如图 1 所示。

MAN B&W ME 型机通常采用 4 道活塞环, 环表面采用软、硬两种涂层的配置: 铝-青铜软涂层、由 50% 铬碳化物和带有一定钼成分的 Ni-Cr 合金陶瓷硬涂层。X 系列柴油机活塞设计有 3 个活塞环槽并且对其进行镀铬处理, 3 道活塞环均镀有铬陶瓷涂层。活塞环镀层厚度要为 0.3 mm 以上, 在保证强度的前提下镀层越厚效果越好, 这就对制造商的技术提出了很高的要求。活塞环槽镀以厚铬层, 厚度为 0.4~0.45 mm, 采用镀铬处理, 可延长活塞环的使用寿命, 但是制造成本会增加。活塞环镀层加工由 WGD 公司指定国外厂家来做, 目

收稿日期: 2022-05-12

作者简介: 葛岩(1987—), 男, 河南南阳人, 武警海警学院航海系助教, 硕士。

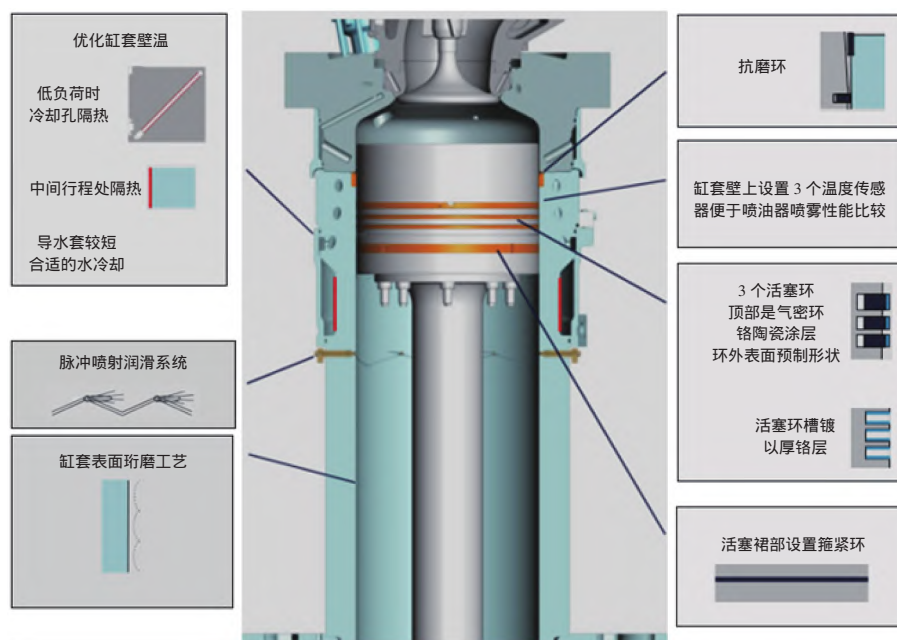


图1 X 型柴油机活塞气缸示意图

前中国还不具备制造能力,镀层一旦剥落,会造成严重的磨粒磨损。关于此问题的解决,制造商建议船员在日常工作中要定期检查活塞。因此,航运界最终能否认可这种设计,目前还没有定论,需要进一步考证。不同活塞环的活塞检修周期标准如表1所示<sup>[5]536-537</sup>。

表1 使用不同活塞环的活塞检修周期标准

活塞环类型	检修周期/运行小时
活塞环镀有铬陶瓷合金层、缸套装有刮碳环	18 000~20 000
活塞环镀有铬陶瓷合金层、缸套不装刮碳环	12 000~14 000
活塞环采用磨合镀层、缸套不装刮碳环	6 000~8 000

## 2.2 气缸润滑系统

MAN B&W 公司近期的机型使用 Alpha 气缸油电子注油器,使气缸油供油量根据主机的平均有效压力(油门及转速)的变化而变化,做到视情喷射,降低气缸油的消耗量。Wartsila 和 Vogel 公司一同研发了 RTA、RT-Flex 机型的气缸油注油器,有 CLU1、CLU2、CLU3、CLU4、CLU4-C 五种类型<sup>[6][7]6</sup>。CLU1、CLU2、CLU3 注油系统使用的均是储能型气缸油注油器,可根据主机负荷调整注油量,但缺乏精确定时控制功能。后续的 CLU4 或 CLU4-C 更新为脉冲润滑系统,该系统有脉冲注入式和脉冲喷射式两种。X 型柴油机使用的 CLU-5 属于脉冲喷射式,它是由 Wartsila 和 SKF 联合开发的。图2为 W6X35 气缸润滑系统示意图。

W6X35 柴油机的活塞正常运转时,气缸油注油率不低于  $0.6 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ <sup>[7]7</sup>。RT-flex 型柴油机采用 CLU4 或 CLU4-C 电子脉冲润滑技术,无论 CLU4 还是 CLU4-C 都带有一个蓄压器,蓄压器内需填充一定压力的氮气,后续定期检查氮气的充气压力,同时还要为蓄压器准备一套专用维护工具。W6X35 机使用 CLU-5 润滑系统工作动力与 RT-flex 不同,RT-flex 工作动力来自于伺服油,而 CLU-5 系统来自于气缸油本身。供油泵把气缸油加压到大约 5 MPa,当 UNIC 控制系统发出相应的信号时,气缸油就会驱动 CLU-5 的油泵,气缸润滑系统取消了蓄压器,设置了容量较大的供油总管。

X 系列柴油机能够自动调节注油定时,气缸滑油根据活塞运行位置不同可以垂直喷射到活塞上部、活塞环中间、活塞下部,除此之外,气缸油还能够径向喷射到气缸壁上<sup>[3]133</sup>,如图3、图4所示。

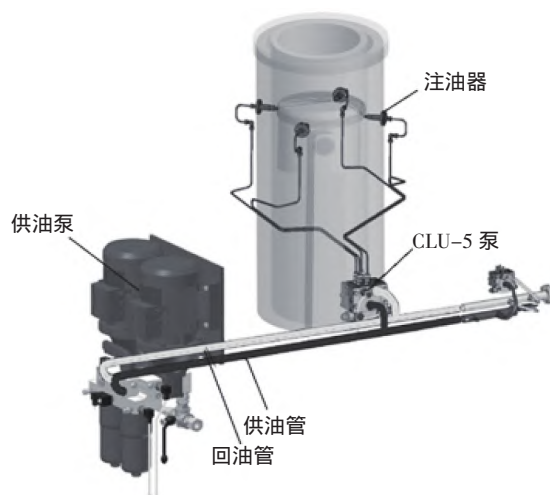


图2 W6X35 气缸润滑系统示意图

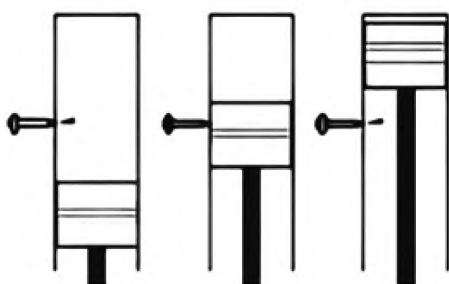


图3 润滑油垂直喷射示意图

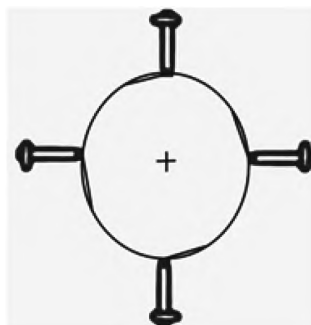


图4 润滑油径向喷射示意图

X 型机气缸油注油率的指导值为  $0.6 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，相对于 RT-flex 机而言使得气缸油成本有比较明显的下降。以 RT-flex 机为例，蓄压器式润滑系统气缸油的注油率为  $1.1 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，一台功率为  $58\,680 \text{ kW}$  的 RT-flex 柴油机如果以  $80\%$  的负荷一年运转  $6\,500$  小时，假设气缸油价格为  $1\,700$  美元/吨，润滑系统从蓄压器式更新为 CLU-5，船舶运行一年节省成本将近  $26$  万美元<sup>[8]</sup>。通过对比不难看出，从蓄压器式润滑系统发展到脉冲喷射式润滑系统，气缸油的成本节约比较明显。需要指出的是，在实践中这种技术还未得到时间的检验，且 CLU-5 润滑系统气缸油只是根据其最小注油率进行计算，主机实际运转时要根据缸套、活塞环的磨合情况谨慎调整注油率。此外，轮机员要增加对缸套、活塞环的检查次数，仔细对比调整前后缸套的情况。

### 2.3 气缸冷却系统

MAN B&W 公司主机采用 LDCL (Load Dependent Cylinder Liner) 系统，将缸盖冷却和缸套冷却分开，在不改变缸盖冷却水温度的前提下，让缸套水出口温度随主机负荷变化而自动调节 ( $70\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ )，使主机缸套水出口温度在不同工况下采用不同的温度，且该温度是由机器的控制系统优化后给出。

为提高主机的效率，X 系列柴油机同样将冷却水温升高，同时为避免温度升高后发生汽化，给系统增加了一定压力。约  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冷却水经过水泵后被分为两路，其中一路经过冷却器后水温下降至  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，随后进入缸盖进行冷却；为使冷却水出口压力保持稳定，另一支路上设置了调节孔，使冷却水经过调节孔后进入缸套。X 型机冷却系统如图 5 所示<sup>[27]</sup>。

MAN B&W 公司主机的缸套水出口温度根据主机负荷变化而不同。相较于 X 型机的冷却系统，MAN B&W 公司采用的 LDCL 系统设计效果略好，但是该系统尤其是软件系统较为复杂。

### 2.4 曲轴

柴油机工作时，每缸的受力情况取决于负荷大小。通过理论力学受力分析计算可知，将曲柄间距设计为

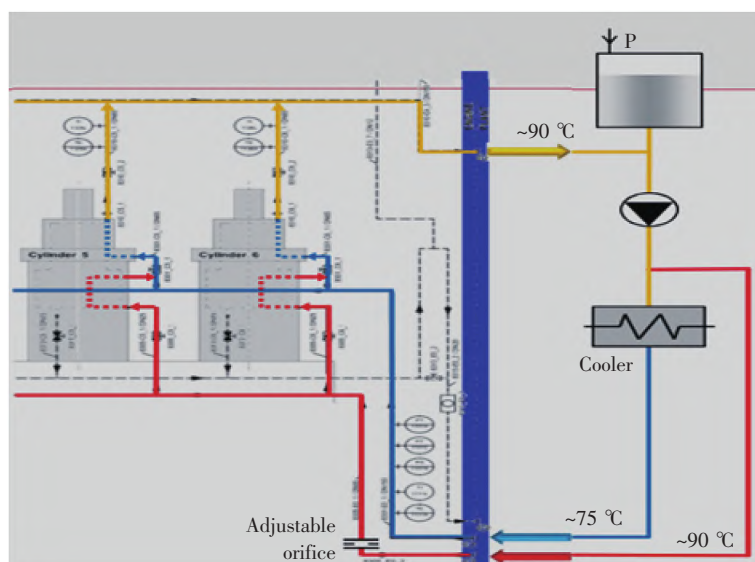


图5 气缸套冷却系统示意图

不相同,可进一步优化柴油机曲轴的受力情况<sup>[9]</sup>。X 系列柴油机的曲轴结构采用不等的曲柄间距,如 WX92 型柴油机曲轴自由端部分承载的扭矩较小,曲柄臂可较薄,这样曲柄间距会相应减小。不同气缸曲柄间距设定也不同,驱动端距离为 1 664 mm,自由端距离为 1 590 mm,如图 6 所示。

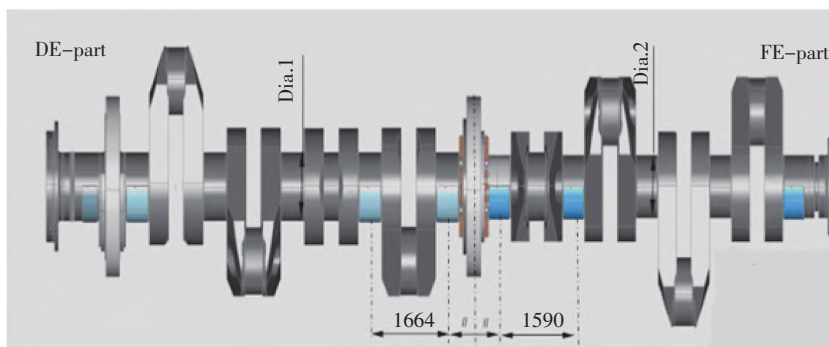


图6 WX92 型柴油机曲轴结构示意图

采用这种设计不仅能够减小柴油机尺寸、减轻重量,还能降低制造成本。但是,曲轴一旦按照设计工况被制造出来,那么曲柄间距就被确定,而实际海况很可能与设计工况不同,曲轴的受力也有很大的不同,就可能出现某些部位实际承受的扭矩超出设计值的情况,在实际航行中就会存在一定的安全隐患。选用不等曲柄间距的柴油机还是等曲柄间距的柴油机,要根据航线的实际海况谨慎选择,不等曲柄间距类型的发动机安全性还有待时间的检验,且目前已经出现了曲轴过度磨损的实船案例。

## 2.5 曲轴角度传感器

RT-flex 型柴油机曲轴自由端安装有曲轴角度传感器,用于读取曲轴的角度和速度。X 型机中间齿轮的上方装配有四个传感器,上下止点信号传感器安装在飞轮上<sup>[3]130</sup>,如图 7、图 8 所示。

UNIC 控制系统通过四个传感器测量中间齿轮的轮齿可获得曲轴转角信息。转角传感器 A、B、C、D,上止点信号传感器和下止点信号传感器连接至气缸控制模块 CCM-20。递增计算从基准位置(上止点和下止点)到当前位置的齿轮齿数可获得曲轴转角,基准位置通过上下止点信号传感器进行检测,如图 9 所示<sup>[10]108</sup>。

这种设计方便在曲轴自由端设置轴带发电机,且成本低,可维修性好。CCM 模块内部通过累加算法计算曲轴转角,当模块通电后并不能立即获取有效的曲轴转角信息,要等到曲轴转过上止点或下止点时才能获得相关信息。如果传感器出现问题,CCM-20 模块便处理不了转动方向信息<sup>[10]108</sup>。因此,在实际操作中曲轴的



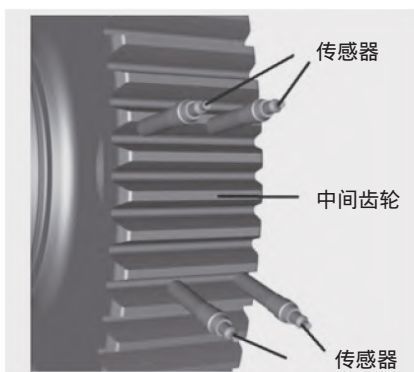


图 7 中间齿轮上的传感器

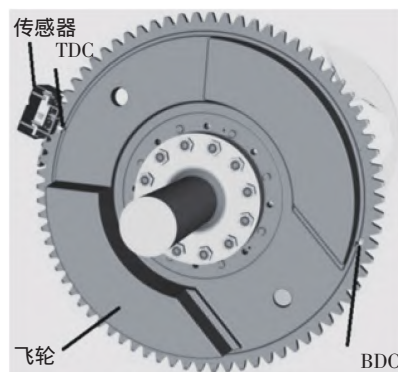


图 8 飞轮上的传感器

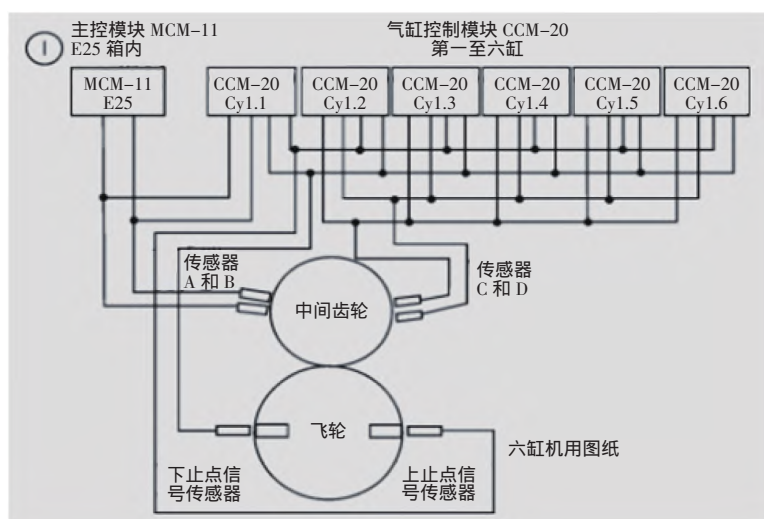


图 9 曲轴角度传感器控制示意图

转角信息及飞轮的上下止点不容易确定,比如在实船工作中曾经出现了上下止点不能及时确定的故障。

## 2.6 燃油系统

当到达喷射初始角时,RT-flex 型柴油机的气缸控制模块发出指令使共轨阀通电,此时较高压力的燃油进入喷油器喷入气缸,而实际喷射量会根据燃油量活塞的行程进行测定。当燃油量活塞到达终点时,喷射停止<sup>[11]</sup>。通过燃油量活塞的运动决定喷油开始和终止,能够避免由于阀门关闭可能会造成的系统故障或者二次喷射,但是系统比较复杂,相应的故障点较多。RT-flex 型柴油机喷油控制如图 10 所示。

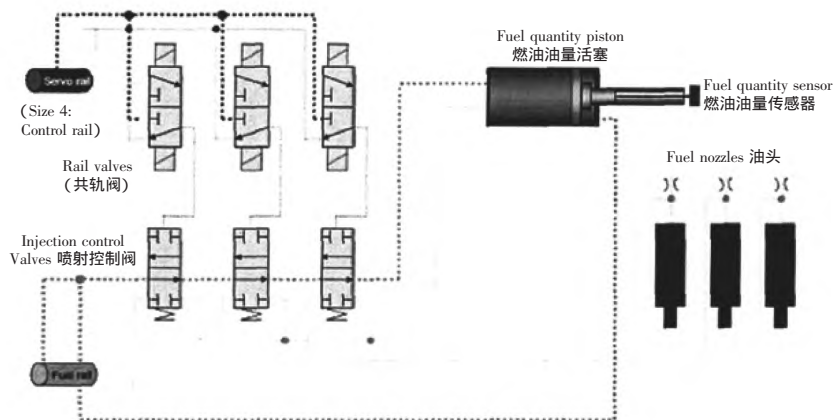


图 10 RT-flex 型柴油机喷油控制示意图

与 RT-flex 机相比, X 系列柴油机燃油系统装配的是机械式限流器, 未安装燃油量活塞。系统的喷油时间及喷油量, 根据 UNIC 控制系统发出的软件信号开启和关闭电磁阀进行确定。相较于 RT-flex 型柴油机复杂的燃油系统, X 型机的燃油系统构造比较简单, 后续维保成本也较低, 但其控制电磁阀启闭的软件信号属于 WGD 的核心技术机密, 对管理人员的要求大大提高。同时, 控制阀关闭时系统的压力波动到底是多少? 这种波动对喷油系统的危害是多大? WGD 公司没有具体的介绍, 我们也没有实际测量, 因此这里无法评价这种设计的优劣。W6X35 机燃油系统如图 11 所示<sup>[3][132]</sup>。

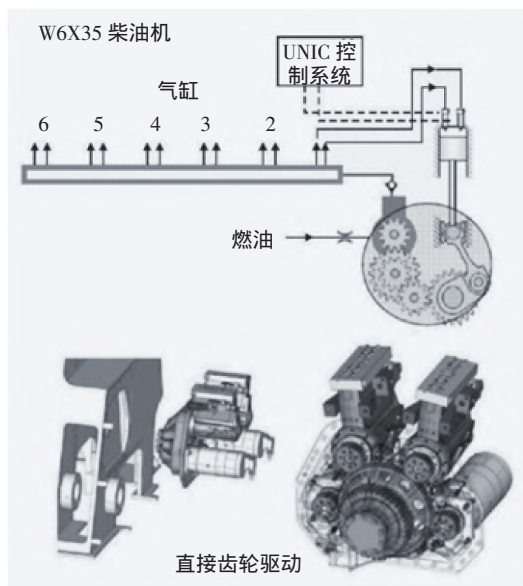


图 11 W6X35 燃油系统示意图

## 2.7 燃烧控制系统

X 系列柴油机燃烧控制系统高度智能化, 主机装配了气缸压力传感器, 系统的输入量不仅考虑了喷油正时及喷油量, 也兼顾了主机负载、吸气空气温度、扫气温度、大气压力和主机振动等参数, 系统的输出量是气缸压力。根据气缸压力传感器搜集的数据, X 型机可以自动平衡每缸负荷, 对燃烧过程进行优化, 而作为竞争对手的 MAN B&W 公司考虑的输入信号没有这么多。至于实际效果, 如果只看台架实验报告还是比较理想的, 但是随着使用时间的延长, 效果如何还需我们拭目以待。笔者认为, 如此多的输入量, 其控制算法必定极为复杂, 容易陷入控制系统设计的维数灾难, 系统的鲁棒性、稳定性都可能下降。当然, 这种缺点应当在使用较长时间后才能反映出来。

## 2.8 适应 IMO TierIII 排放限值

发动机氮氧化物排放问题的解决有两种技术路线: 一种技术路线是采用控制机内燃烧的方法尽量避免产生氮氧化物, 这种方法的优点是设备简单, 不需要添加附属设备, 但由于需避免空气中的氧气与氮气发生反应生成氮氧化物, 发动机的燃烧不能十分剧烈, 因此对发动机的性能有所限制; 另一种技术路线是在燃烧过程中不考虑或较少地考虑氮氧化物的产生, 采用尾气后处理技术, 这种方法对发动机的燃烧设计限制最少, 可以达到较好的燃烧经济性, 但是需要加装后处理的辅助系统, 增加了制造成本和机器的运行成本。

两种技术路线都有公司采用, 但随着发动机各项燃烧参数的提高, 越来越多的公司趋向于后者。WGD 公司新研发的 SCR 系统(有选择性地与废气中的氮氧化物在一定温度下发生化学反应)应用于 X 系列柴油机, 从能满足 TierII 的要求提升到能满足 TierIII 的要求。同时, 设备的重量和体积也都有了进一步的优化。

## 3 结束语

X 系列船用低速柴油机是以 RT-flex 机的技术理论为基础研发的新款柴油机, 同时又根据先进的材料技术、机械加工技术、力学计算等, 对柴油机进行了多方面的优化。本文主要从 X 系列机的发展进程、设计特

点等方面展开论述,通过与其他机型对比,分析了X型机的优缺点。X系列低速柴油机采用了较多新技术,能满足更为严格的TierIII排放标准,未来在航运领域会逐渐得到广泛应用,同时这也给X系列船用低速柴油机的轮机管理工作提出了更高的要求。

#### 参考文献:

- [1]高勇军,黄连忠.船用智能柴油机的最新技术特点和管理[J].世界海运,2007(4):39-40.
- [2]BRUNNER H.,CONSTANTIN J.N.,KNIPSTROM L.K. W-X92 Marketing Kit[R]. Winterthur: Switzerland:WinGD Company,2016.
- [3]马帅,林刚毅,邓健星. W6X35 型船用低速柴油机的研制[J]. 船海工程,2014(4):129-133.
- [4]周明顺,崔向东.十字头活塞的组成和结构特点[M].大连:大连海事大学出版社,2013.
- [5]徐辉,冯幸国,张兴芝,等.船舶主流机型服务手册[M].上海:上海市航海学会,2013.
- [6]CRPSLANION J.R.,PAISTION L. Clu cylinder lubrication for RTA and RT-flex engines[R]. Munich: Germany:MAN B&W company, 2006.
- [7]DAPLOPIN J.,PARIONZUK R.W.artsila pulse lubricating system[R].Winterthur,Switzerland:WinGD Company,2012.
- [8]李玉林.脉冲式气缸润滑油系统的技术特点[J].柴油机,2008(4):41-44.
- [9]HEMY J.P.,TOPLOSKY J.,ABRAMCZUK M. Crankshaft durability prediction-A new 3-D approach[R]. Reault Car Co.,1990.
- [10]郑世保,张震,白坤生.瓦锡兰最新型船用低速电控柴油机 RT-flex35(W-X35)的性能与应用[J].船海工程,2013(5):105-108.
- [11]李斌.船舶智能柴油机主要技术的比较研究[D].大连:大连海事大学,2013.

(责任编辑 张 利)

## Technical Analysis of X Series of Marine Low-speed Diesel Engines

GE Yan<sup>1</sup>, DU Dong-dong<sup>2</sup>

(1. Department of Navigation, Armed Police Academy of Marine Police, Ningbo 315800, China;

2. Ship Safety Inspection Center, Wusong Maritime Safety Administration, Shanghai 200940, China)

**Abstract:** The X series of marine low-speed diesel engines introduced by Winterthur Gas and Diesel Company Limited, Engine Company has adopted lots of new designs. By comparing with different types of diesel engines, the main design features of the X series of engines are discussed, highlighting the advantages and disadvantages of three-piston ring technology, CLU-5 cylinder oil lubrication system, cylinder liner cooling system, unequally spaced crankshaft structure, new design for detecting crankshaft rotation angle, fuel injection system and combustion control system. It provides reference for main engine selection and marine engine management of ship design.

**Key words:** X-type low-speed diesel engines; design features; CLU-5 system; crankshaft rotation angle; fuel system