

# 船舶动力装置进程的历史、现状与展望(续)

中远(香港)工贸控股有限公司 马智宏

中远集装箱运输有限公司 王新全

## 3 展望

### 3.1 柴油机在船舶动力装置中的地位

柴油机的热效率比其它所有动力机械(如汽轮机、燃气轮机等)高,功率范围宽广(从0.6 kW~45600 kW),能适应多方面的需要,起动迅速并能很快达到全功率运转,使用寿命长,因而在国民经济和国防建设中得到极为广泛的应用。

在民用船舶中,柴油机用作主机和副机占有统治地位。绝大多数内河、沿海及远洋船舶中,几乎都用柴油机作为主机和副机。至于各种工程船舶、钻井平台、渔船等都无例外地采用柴油机作为动力。

在柴油机作为推进动力的船舶中,低速机与中速机所占比例虽逐年有所变化,但低速机始终占多数。1986年所竣工的2000DWT以上的船舶中,以功率数计低速机占80%,中、高速机占20%;以柴油机的台数计,低速机占66%,中、高速机占34%。表6为1975~1986年间每年建造的柴油机船和汽轮机船的数量。

表6 柴油机船和汽轮机船数量统计

| 年份   | 柴油机船 | 汽轮机船 | 年份   | 柴油机船 | 汽轮机船 |
|------|------|------|------|------|------|
| 1975 | 895  | 132  | 1981 | 925  | 13   |
| 1976 | 951  | 113  | 1982 | 1113 | 2    |
| 1977 | 964  | 50   | 1983 | 1002 | 10   |
| 1978 | 1079 | 32   | 1984 | 1000 | 7    |
| 1979 | 841  | 14   | 1985 | 888  | 1    |
| 1980 | 906  | 22   | 1986 | 906  | 0    |

在军用舰艇方面,除部分潜艇和大型舰艇采用核动力或者燃气轮机动力装置外,其它舰艇如猎潜艇、巡逻艇、快艇、扫雷艇、登陆艇以及大部分常规潜艇,都以柴油机作为动力。

### 3.2 柴油机发展的总体要求

(1) 单机功率范围更广。为了提高船舶的营运效率,船东对船型要求多元化。目前,在小型机方面,单机功率在2940kW~8830kW之间的四冲程柴油机与二冲程柴油机竞争激烈;在大型机方面,单机功率在55000kW~60000kW的机型已在第六代大型集装箱船上出现。

(2) 降低燃油滑油消耗与提高可靠性并重。进一步降低燃油消耗率和滑油消耗率,使用质量更差的燃料油或新型燃料,加上自动化程度的提高,对柴油机可靠性的要求必将更高。各种先进的传感器和感应技术的发展,使超值报警、设备自动切换和故障诊断、故障预

测系统都有了很大的发展。新材料的应用(如特种钢或陶瓷材料等)、高性能润滑油的研制都将有助于提高可靠性。

(3) 机型的更新周期加快。低速二冲程柴油机的换代周期由原先的4~5年缩短至2~3年,并可望更短些。

(4) 利用统计学方法分析柴油机故障,实现全现代化的自动控制、操作、监测。对柴油机的燃油、滑油、冷却、增压、操纵等系统实现全自动监察、报警、切换和控制。目前,MAN-B&W, NEW Sulzer 取消凸轮轴,用计算机控制柴油机喷油和排气定时的“智能型”船用柴油机已进入实船营运阶段。借助于现代化的监测系统,延长柴油机的维修保养期限,降低总运行费用,追求在全运转工况范围内都有最好的经济性。

(5) 追求综合热效率。柴油机将继续采用长冲程、提高最高爆发压力、改进燃烧系统、排气及冷却水的余热回收等措施来提高综合热效率。

(6) 小型高速柴油机在追求综合经济效益方面将采用直喷式、改良进、排气系统、发展增压系统、增加转速和提高可靠性,以改善柴油机的综合经济效益。

(7) 发电柴油机已有可能燃用 $380 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$  (380cSt/50°C)的燃料油。在功率较小的船舶上,可以使用与主机同品种的燃油,以实现主、副机单一燃油化。

(8) 对环保要求的适应。柴油机的排气中含有 $\text{NO}_x$ 等对环境造成污染的废气,为了能有效执行IMO“MARPOL 73/78公约”附则VI,有效保护内河沿岸、港口及海洋的大气环境,目前主要采用 $\text{NO}_x$ 排放的机外控制方法,也就是对柴油机排出的废气中所有的 $\text{NO}_x$ 进行处理,选择性催化还原减氮(SCR, Selective Catalytic Reduction)是降低 $\text{NO}_x$ 排放的有效方法之一。

### 3.3 不同用途柴油机的要求

(1) 对船用发电柴油机的要求

① 为保证频率的稳定性,柴油机应装设全制调速器。其瞬时调速率 $\delta_1 \leq 8\%$ ,稳定调速率 $\delta_2 \leq 45\%$ ,转速波动率 $\phi \leq \pm 0.5\%$ 。

② 平衡性要好,不均匀度要小( $\delta \leq 1/200 \sim 1/300$ )。

③ 可靠性要高,具有长期运转的能力,对于应急备用电站,在无人值班的情况下,能安全连续运转200~500h以上。

④ 离机组10m处噪声应小于80dB。

⑤ 大容量的电站和应急电站应设有自启动、自接

载和自停机的自控装置。

## (2)对舰艇柴油机的要求

①单机功率要大。在保持舰艇的总推进功率相同的情况下,采用单机功率大的柴油机,可以减少主机的数量,从而节省机舱的重量和空间,甚至可减去一个机舱。

②加速性和机动性能要高。柴油机应在全部工作转速范围内都有足够大的可用扭矩,以缩短高速舰艇从备车状态升至全速航行的加速时间。

③重量要轻。对于傅汝德系数大于0.4的高速艇,当艇速一定时,推进功率与排水量近似成正比,故减少柴油机重量便可降低舰艇的推进功率。

④紧凑性要好。因为登陆艇吃水浅,而特种武器的攻击艇的柴油机要安装在作为浮体用的水下管道内,故对主机和发电柴油机的结构都要求紧凑。

⑤噪声和振动要小。采用有中间基座的双弹性支承来吸收结构所产生的噪声,用封闭柴油机的方法以减轻空气流动产生的噪声,结构紧凑的高速柴油机可以符合海军提出的抗振要求。

⑥对于常规潜艇,由于海面空气通过进气管进入机舱时有流动阻力损失以及波浪使进气阀暂时关闭的不良影响,在机舱内形成负压,致使柴油机的进气产生真空度,因而要求柴油机的空气耗量尽可能小。此外,为避免潜艇航行时被红外探测器发现,柴油机的排气通常是在一定海深(2m左右)下进行的,故要求柴油机对排气高背压的变化不敏感。

⑦对于水雷艇和扫雷艇所用的柴油机,应具有非常低的磁场特性,亦即应采用所谓的低磁机。

## (3)对特殊用途柴油机的要求

海上钻井平台、排灌平台及专用船舶所使用的柴油机,必须满足如下的特殊要求:

①能防止机舱内可燃气体爆炸。由于环境空气中存在气态碳氢化合物,它与空气混合可能形成易燃的混合物。当这种混合物与温度达到250℃以上的柴油机或其它装置部件相接触时,就会发生爆炸。因此,柴油机表面的任何一点温度均不得超过200℃。为了防止爆炸,要求将机组置于独立通风、防爆的特殊罩壳中,这样将造成装置的重量、体积大,成本高,而且空气的供给也成问题。如不采用这种措施,则要求柴油机的排气管道和废气涡轮增压器采用水冷结构,使涡轮增压器出口的废气在冷却器中冷却到200℃以下,并在冷却器出口处装设消焰器和火花消除器。此外,电起动装置也必须设有防爆措施。

②能在可燃气环境中正常运行。柴油机运行中吸进了浓度不等的可燃气体与空气的混合物,这实际上是给柴油机提供了额外的气体燃料,成为双燃料柴油机。这种柴油机在低负荷或接近空载运转时,就不能保

持稳定的转速。例如,对于转速为1500r/min的柴油机,气缸内甲烷( $\text{CH}_4$ )含量为5%时,转速波动为 $\pm 60\text{r/min}$ ;含量为7.5%时,转速波动量为 $\pm 130\text{r/min}$ ;而当含量为10%时,转速波动量达 $\pm 175\text{r/min}$ 。若进气中含有易着火的重烃类分子时,柴油机有可能发生飞车。为此,必须设有一种独立的调速器断路装置,一旦发生飞车,可立即操纵柴油机进气系统的速闭阀,以保证柴油机在紧急情况时能安全停车。

③能在严重侧倾情况下正常运行。除上述在可燃气体环境中防爆和在工作可靠性方面的要求外,还要求柴油机能在船舶严重侧倾航行时运转适应性不受限制。为此,要装有特殊的盛油容器,在任一方向上最大侧倾角度为35°时,直列机和V型机都能安全运行。

## 3.4 新型船舶动力装置的开发

虽然在过去50多年中船用柴油机取得了显著的发展,然而,人们仍希望有更新更好的船舶动力装置发动机。而有希望作为替代柴油机的新的动力源有燃气透平机(燃气轮机)、燃料电池发动机以及核动力装置等。

燃气轮机由于其构造和燃烧方式的不同,和柴油机相比,其 $\text{NO}_x$ 的排出量很少,并且单位重量轻、振动小、噪音低且保养容易,在30年代初就开始作为船用原动机来使用了,但由于初期投资费用高、寿命短、热效率差等缺点,只在舰艇和一些高速船上使用。目前,燃气轮机的技术性能有了很大改进,经济指标已接近柴油机的水平,作为船用发动机被寄予很大的期望。

核动力装置由于其燃料重量轻、体积小、不用空气助燃、船舶续航能力强,也有很大的应用前途。但由于造价高、有放射性污染,目前世界上一般都使用在潜水艇和舰艇上,应用到商船上尚需进一步的研究和试运行。

其他如无 $\text{SO}_x$ 排出的甲醇内燃机和氢气燃气轮机等的研究仍在进行中。燃烧天然气的内燃机现在正在开发,这种内燃机直接喷射高压天然气,并能获得与燃烧柴油的内燃机一样的热效率和输出功率。这些方法都有利于燃料选择的多样化和降低有害物质的排放,这也是今后船舶动力装置的一种替代产品。

## 3.5 船舶智能柴油机的发展与应用

### (1)智能柴油机的结构特点

智能柴油机与传统的机型相比,有以下特点:

①取消了传统的凸轮轴系统,利用电子计算机控制各缸的喷油定时、排气阀定时、起动空气定时等。

②采用燃油共轨喷射系统。该系统是每只气缸设置燃油喷射泵(高压油泵),高压油泵不是按传统的鸡心凸轮进行驱动,而是由电控阀控制高压滑油(动力油)的进、出,以驱动活塞快速上、下运动,带动高压油泵柱塞产生高压750~1200bar(75~120MPa)燃油喷进燃烧室雾化燃烧。由于驱动各缸高压油泵的动力滑

油来自共同系统,因而称为燃油共轨。

### ③采用排气阀共轨系统

排气阀共轨系统与燃油共轨系统大同小异, 电控电磁阀根据气缸燃烧状况, 由微处理器分别控制各缸排气阀的开启和关闭, 以达到理想的压缩压力满足燃烧和排放要求。驱动排气阀伺服油泵的动力油与驱动燃油高压油泵的动力油均属同一系统, 省略传统凸轮驱动装置达到共轨。

④气缸油共轨注油系统。该系统由微处理器根据曲轴的位置(定时)和机器的负荷由电磁阀控制各个缸注油器的注油量, 从而实现气缸油定量控制。各缸气缸油注油器驱动动力油来自增压后同一系统, 因而称为气缸油共轨注油系统。

### (2)智能控制系统的组成

智能柴油机主要由三大系统组成:

①运行模式系统: 控制排烟、节能(燃油)、转向、停车和安全保护;

②工况监测系统: 包括柴油机的气缸状况(活塞令、气缸套和填料函密封状态)监测处理、气缸压力(压缩压力/燃烧压力)监测处理、扭转监测处理;

③操作控制系统: 对气缸油计量控制、高压油泵(各缸最大爆压、定时定量和气缸压力测量系统)控制、速度综合控制、排气阀控制(各缸压缩压力)、增压系统控制。

三大系统组成了柴油机智能控制系统。

### (3)智能柴油机的优点

①负荷变化范围宽, 并且具有良好的运行工况

由于燃油喷射系统采用电子控制的共轨系统, 因而可以自由选择燃油喷射压力; 灵活的喷油定时; 可改变的喷油速率和精确控制喷油量, 大大地改善燃烧质量尤其是低负荷时, 降低了燃油油耗( $114\text{g}/\text{bhp}\cdot\text{h}$ ), 而且最低稳定转速可达到  $12\text{r}/\text{min}$ 。

②负荷控制相对精确, 确保负荷分配均匀

按照主机运行情况, 自动监控各负荷状态下各缸负荷, 必要时精确调整, 确保在此对应的条件下各缸的负荷平均分配, 并设置了超负荷保护。同时, 还可以根据实际需要, 在低负荷时减缸运行。

③精确控制气缸油注油量, 保证气缸内良好润滑

由于柴油机气缸油系统是由电子控制的共轨系统, 气缸油注油量可以达到定量和优化控制, 从而可以确保气缸油精确注油和气缸内达到理想的润滑状态, 减少缸套与活塞的磨损, 延长维修保养时间, 提高柴油机的工作可靠性。

④控制废气排放, 满足排放要求

智能控制的燃油共轨系统, 可以使燃油在高压  $750\sim 1200\text{bar}$  ( $75\sim 120\text{MPa}$ ) 喷射情况下, 根据柴油机工作要求实现喷油量、喷油定时和喷油速率控制, 在转

速和负荷变化的所有工况下动态优化, 因而可以达到低污染的  $\text{NO}_x$  排放, 符合 IMO 的排放法规要求。

### ⑤运行安全可靠, 操作灵活方便

电子监控系统能够随时监测主机的运转状态, 过载保护系统能确保主机按照负载特性曲线运行而不过载; 诊断系统能够对故障进行早期报警, 使故障能够及时得到解决; 燃油喷射控制系统可以使柴油机使用着火性能低劣的燃油, 微速运转性能有显著提高, 最低稳定转速可达到  $12\text{r}/\text{min}$ , 微速运行更稳定; 在主机紧急停车和倒车工况时, 喷油定时和排气阀定时能保持在最优的状态, 可以实现“发动机制动”(改变排气阀的开、关定时), 减少船舶的滑行距离; 通过在加速过程中提前打开排气阀, 使扫气压力的上升比普通机型更快, 因而加速性能更好, 操作更加灵活方便。

### (4)智能柴油机在船舶上的应用

世界上实船使用的船舶智能柴油机首推 SULZER flex, 1993 年 MAN-B&W 公司也开始了智能柴油机的研究。1997 年, 该公司的首台智能柴油机 4T50MX 装船使用。1999 年, 韩国现代船厂为瑞典 Stena 公司建造的超大型船舶 VLCC(314, 500DWT) 就采用两台 MAN-B&W 7S60MC 智能柴油机作为船舶推进动力。可以预见, 在不久的将来, 选择智能型柴油机作为船舶推进动力装置将会越来越普遍。

## 3.6 船舶动力装置与环境保护

(1) 船舶柴油机的环境污染问题已成为当前船舶动力装置发展的主要问题

如果说在过去的 20 年中柴油机经济性可靠性是其发展的主要趋势的话, 减少船舶柴油机对环境的污染将是今后一段时间的又一主题。一个新的技术学科“柴油机动力装置环境经济学”正在逐渐形成。

柴油机动力装置环境经济学所要研究的内容为: 综合研究柴油机的经济性和其对环境的污染问题。不仅仅以热效率最高为目的, 而是将柴油机在做功时产生的环境污染各种因素加以权衡的方式, 体现在综合经济性之中。

### (2)IMO 的限制措施

柴油机在其燃烧过程中不但产生二氧化碳( $\text{CO}_2$ ), 还产生诸如氧化氮( $\text{NO}_x$ )、碳氢化合物(HC)、氧化硫( $\text{SO}_x$ )、一氧化碳(CO)和灰尘颗粒等有害物质, 它们对周围环境造成不同程度的污染。国际海事组织(IMO)也介入这一问题并已经提出了具体限制措施, 并将于 2000 年 1 月 1 日起实施。

在转速低于  $130\text{r}/\text{min}$  情况下:  $\text{NO}_x \leq 17.0\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ;

在转速处于  $130\text{r}/\text{min}$  和  $2000\text{r}/\text{min}$  范围内时:  $\text{NO}_x \leq 14.5\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ;

在转速高于  $2000\text{r}/\text{min}$  情况下:  $\text{NO}_x \leq 9.8\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$ ;

# B & W 主机为何出现错向起动

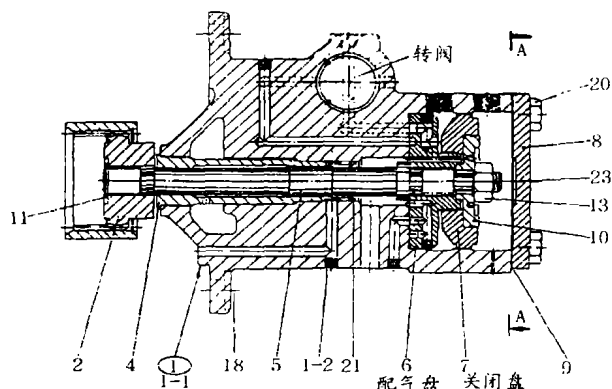
中海集运 高福财

我轮主机为 B & W 6L35MC, 有一段时间时尔发生主机起动故障, 起初故障表现为偶尔倒车集控起动失败, 但每次专项进行正倒车试验却又未见异常。因发生故障时均在试车后的进出港, 且一旦发生起动故障, 都直接转机旁, 而机旁起动又正常, 因此给故障判断、查寻造成不便, 虽经相关阀件的拆检, 却没有根本改善。可近一航次, 故障率明显提高, 甚至还会出现集控失灵、机旁也失灵和错向起动的严峻情况。经现场仔细勘察和认真分析, 发现换向气缸换向没到位, 空气分配器转阀动作异常。该换向气缸具有双重功能, 一方面它通过气缸活塞杆顶拉摇臂控制正倒车功能元件阀 55、56 的通断, 保证在正、倒车换向到位后起动才是可能的; 另一方面又控制空气分配器转阀转动, 接通相应通道, 按正倒车要求向缸头起动阀供送起动空气。该机空气分配器如图, 工作机理为: 当停车状态时, 关闭盘 7 和配气盘 6 处于自由状态, 沟通配气孔, 当车钟离开停车位置需要正倒车时, 关闭盘 7 动作, 配气盘 6 起作用,

使 30bar (3MPa) 空气通过配气盘 6 内部相应通道→本体分配孔→转阀钻孔通道, 送向相应的缸头起动阀, 完成启动程序。该机换向起动的关键部件就是配气盘和转阀。配气盘位置决定配气定时, 转阀位置决定进气顺序。如果因故换向气缸换向不到位, 首先表现为 55、56 元件阀不动作, 使集控起动首先失灵, 其次表现为转阀转动不到位, 此时集控起动肯定不成功, 但机旁则依转阀转动角度与应到角度之差异大小, 可能启动也可能无法启动成功, 一般差值  $\Delta < 15^\circ$ , 可以勉强启动,  $\Delta > 15^\circ$  则无法启动。极端表现为卡在正、倒车位置不动, 也就是说卡在正倒车位置上, 此时集控启动呈单向启动正常, 反向失灵, 机旁启动则呈单向启动正常, 反向启动则出现错向运转。比如转阀卡在正车位置, 机旁正车起动正常, 倒车启动, 由于空气分配器仍按正车定时供气, 主机仍正车启动转动, 于是出现错向转动。

找到了原因, 分析了过程, 问题也就解决了, 通过拆检空气分配器转阀, 发现转阀材质表面虽干净无水垢垃圾, 但铜质材料表面明显有金属挤压痕迹, 测量偶件尺寸, 发现局部出现零间隙, 甚至有过盈现象, 经强行拆出转阀, 抛光约 0.05mm, 装复, 试车, 一切 OK。

值得注意的是, 换向不到位的原因虽有许多种, 但转阀卡阻是项隐蔽原因。因转阀卡阻, 换向速度慢, 甚至难以完成, 使换向气缸输力时间增大, 力矩作用力增大, 其结果首先使换向气缸固定座这一薄弱部件裂损, 最终导致换向失灵, 所以发生类似于底座损坏、紧固螺丝松动、断裂等, 应相应检查转阀的活络性, 不要被错觉和表面现象所迷惑。



## (3) 改善 NO<sub>x</sub> 排放可采用的措施

### ① 降低最高燃烧温度

- 缩短燃油喷射时间;
- 提高压缩比;
- 加强增压空气的冷却, 降低空气进机的温度, 以降低循环的平均温度;

### ② 燃烧乳化油、燃油和水混合喷射;

### ③ 废气再循环;

### ④ 氧化氮的机后处理。

## 3.7 综述

经济性、可靠性、环保性、智能型, 是船舶动力装置的主要发展方向。

## 参考文献

- 孙培廷. 船舶柴油机动力装置发展趋势与环境关系的探讨.《航海技术》. 2000 年第 2 期.

- 长尾不二夫. 内燃机讲义, 1997

- R. S. 本森著. 内燃机. 中国农业机械出版社, 1982

- 德国 R. Bartals. 柴油机在近海特殊运行条件下的安全要求.

- Thomas D. Mortork. Motor Engineering Knowledge for Marine Engineers. Thomas Reed Publications Limited. 1982

- THE MOTOR SHIP, 1984, 1985, 1986, 1987

- 奥勒格安乃. 二冲程低速柴油机的新发展. MAN-B&W 柴油机公司, 1986

- 轮机工程手册(中). 人民出版社, 1993

- 石井 泰之助. 船用柴油机的半个世纪.

- 日本造船学会. 平成 11 造船技术研究开发. 重要课题调查书. 1997

- 詹玉龙. 轮机长业务. 人民交通出版社. 2001

- MAN-B&W: Diesel New Technology.

- WARTSILA: New From Technology.

- 马智宏. 轮机管理要面向世界、面向创新、面向现代化.《航海技术》, 2002 年

- 王新全. 船舶动力及机械设备控制与监测. 上海交通大学出版社, 2001 年 8 月