

典型低速柴油机电控系统分析

张和牧¹, 王 涛², 张维竞¹, 屠星星¹

(1. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 中国船级社上海分社, 上海 200135)

摘要: 以 ME、RT-flex 两种低速大型柴油机电控系统为例, 分别介绍其液压伺服系统、燃油喷射系统以及控制系统总体构架, 指出了其控制原理以及机械结构上共性与不同之处。通过对这两类典型的船用电控柴油机电控系统的比较分析, 发现 RT-flex 的控制系统结构更为简约, 控制更为精确、灵活, 对各种工况的适应性更强。

关键词: 船舶柴油机; 电控系统; 液压伺服系统; 燃油喷射系统

中图分类号: TK424.3; TK423.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2014)06-0009-05

Analysis of Typical Low Speed Diesel Engine Electronic Control System

Zhang Hemu¹, Wang Tao², Zhang Weijing¹, Tu Xingxing¹

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;
2. The Shanghai Branch of China Classification Society, Shanghai 200135)

Abstract: Focusing on the electronic control systems of two kinds of large low-speed diesel engines: ME and RT-flex, their hydraulic servo systems, fuel injection systems and overall structures of control systems are studied respectively. The generality and peculiarity of mechanical structures and control principles in the two kinds of marine diesel are pointed out. By analyzing these two kinds of typical marine diesel engine's electronic control systems, it is found that the control system structure of RT-flex is more simple, and its electric control system is more precise and flexible, which is able to adapt to various working conditions.

Keywords: marine diesel; electronic control system; hydraulic servo system; fuel injection system

0 引言

随着电子技术的迅猛发展, 单片机在船舶柴油机动力控制以及检测领域的应用越来越广泛。基于提高动力装置的经济性、动力性, 实现适时调节控制的需求, 电控柴油机已成为船舶柴油机领域的重点发展方向。所谓电控型柴油机也称为智能型柴油机, 即将电子设备及软件应用于船用柴油机并成为其基本组成部分的一种新型柴油机。当今世界先进的船舶柴油机电控技术主要由 MAN 与 Wartsila 公司引领, MAN 公司开发的电控柴油机为 ME 型, Wartsila 则是 RT-flex 型机, 其中 Wartsila 的电控系统

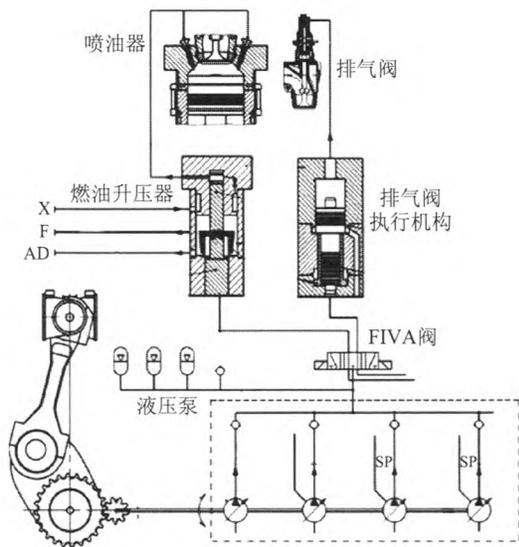
又可分为 WECS 与 UNIC 两种, 本文主要从液压系统与控制系统两方面论述 ME 电控系统与 WECS 电控系统的特点。

1 液压系统组成

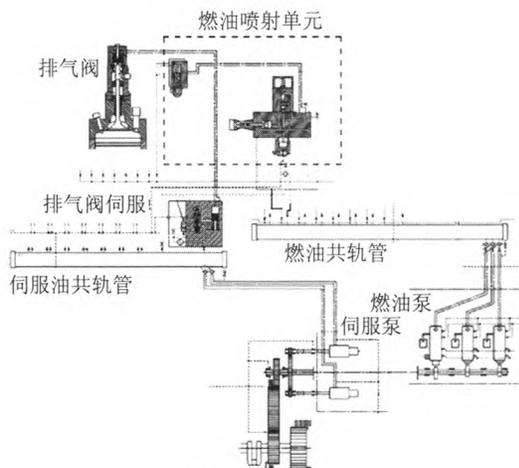
两种机型的液压系统总体结构如图 1 所示。ME 型主机液压系统由机带液压泵、蓄压器、FIVA (Fuel Injection Valve Activation) 阀、排气阀增压装置、排气阀、燃油增压装置与喷油器组成, 高压燃油储存在稳压块与蓄能器中, 通过驱动 FIVA 完成油路切换, 实现为燃油增压, 驱动排气阀杆等动作。而 RT-flex 机液压系统类似于车用共轨系统,

采用两套独立的共轨系统：伺服共轨以及燃油共轨。加压后的伺服油与燃油储存在共轨管路中，ECU 通过驱动先导电磁阀完成油路切换，实现燃油喷射以及排气阀动作。有别于车用共轨系统的是 Wartsila 的燃油系统采用一套 ICU (Injection Control Unit) 装置，该装置采用三级液压回路控制燃油喷射，流量活塞推动喷油，并且活塞装有位置传感器，可实现喷油的闭环控制。

比较二者液压系统总体结构可以发现，RT-flex 机型相对 ME 机型的液压元件数量更多，也较为复杂。



(a) ME-C型主机



(b) RT-flex48型主机

图 1 两机型液压机构比较

2 主机液压伺服系统

ME 与 RT-flex 主机液压伺服系统具有类似之处，也有不同地方。

从动力源来说，ME 系统中滑油经过自清滤

器后，由机带的斜盘式柱塞泵生成用于气缸液压单元 ECU 控制的高压液压油。为了增加可靠性，除机带泵外，还配置两台电动增压泵，在启动时使用并作为备用^[1]。一般 ME 主机伺服轨压保持在 30 MPa 左右。而 RT-flex 机型则每缸采用两个曲轴带动的复合凸轮来带动柱塞式油泵保持伺服油轨压，且其轨压略低于 ME 主机，为 20 MPa。

二者伺服油系统皆利用了高压共轨，高压滑油由伺服油供油单元提供，进入伺服油共轨管。与 RT-flex 不同的是，ME 机型的每缸有两个蓄压器，实现高压共轨管系功能。蓄压器具有稳定高压滑油压力的作用，类似电控高压燃油系统的共轨管，削减单缸排气、喷油动作对整个液压供油系统压力波动的影响。并且蓄压模块可以实现气缸控制单元与液压供油油路压力波动的解耦关系，而气缸控制单元之间控制的解耦关系有助于产品的一致性。对于伺服油压，ME 与 RT-flex 主机都利用比例电磁阀根据柴油机工况需求进行压力设定闭环控制。在共轨伺服油管 (ME 为双壁管) 上，设两个压力传感器，以实现对共轨伺服油压力的监测，通过伺服油泵的压力控制阀的工作，使共轨伺服油管内的油压始终稳定在预期压力。

除此之外，如图 2 所示，ME 主机每缸的液气缸单元包括一个液压分配器，由液压分配器将液压分配到燃油喷射控制单元、排气阀控制单元以及注油器中。

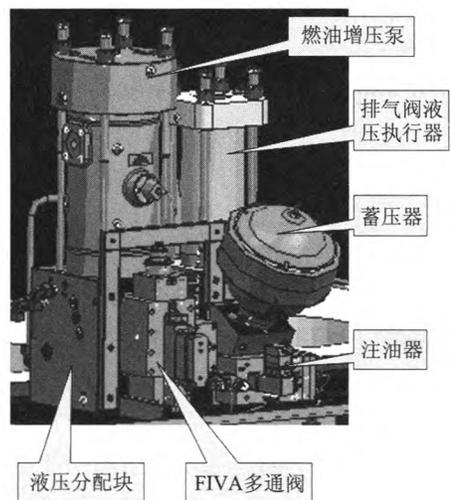


图 2 ME 主机液气缸单元

而 RT-flex 主机则没有此结构，如图 3，排气阀控制单元直接利用每个单元上的共轨阀实现对伺服油走向的控制，以此驱动执行元件。

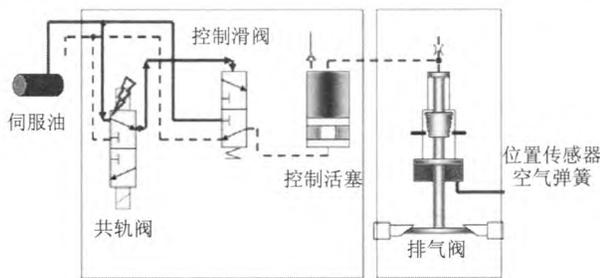


图3 排气阀伺服油单元

3 燃油喷射系统

两类电控柴油机最大不同在于其燃油喷射系统，MAN公司的ME机型使用的是类似于电控单体泵的燃油系统，而Wartsila的RT-flex利用了高压共轨电控系统。

3.1 ME主机燃油喷射系统

图4为ME主机的燃油泵装置，从图中可看出当直流电机驱动FIVA阀转向高压油路后，伺服油向上快速进入液压柱塞腔，带动液压柱塞上行，此时高压油泵腔封闭，柱塞上行引起泵腔压力急剧上升，并使高压油管与喷油器压力随之上升，直到喷油器针阀开启，辅机系统供给的低压燃油将被增压至100 MPa，并雾化喷入气缸^[2]。

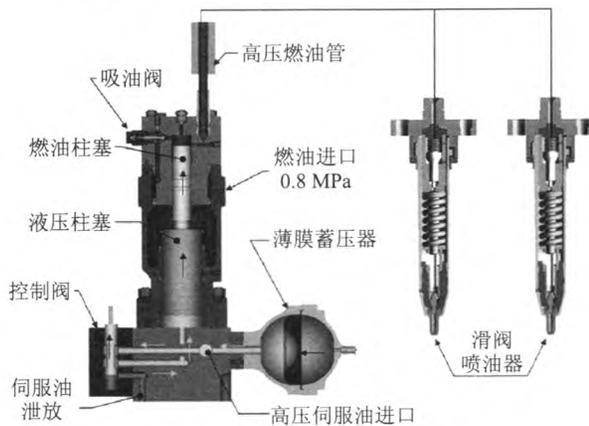


图4 ME主机燃油泵装置

从此过程可以清晰了解到ME机型利用高压伺服油作为高压燃油的驱动动力，这也是ME型机伺服油压高于RT-flex型机伺服油压的原因。同时可以看出由于ME型机不再使用曲轴凸轮泵油，燃油压力脱离转速影响，基本保持恒定，而喷油量与FIVA阀通电脉宽成正比。当然考虑到燃油压缩性以及油温引起的体积变化，须要对数值做一定修正。这一改进提高了系统喷油规律的可控性，提高了柴油机的工作性能。

ME型机电控燃油喷射系统最关键的部件就是

FIVA阀，其为电磁控制的三位五通先导阀。如图5所示，从左至右的联通通道依次为低压联通口、排气阀驱动口、高压滑油入口、燃油阀驱动口。可以发现随着阀芯的运动，FIVA阀存在三种位置状态，分别为燃油喷射控制位、停止位和排气驱动位^[3]。

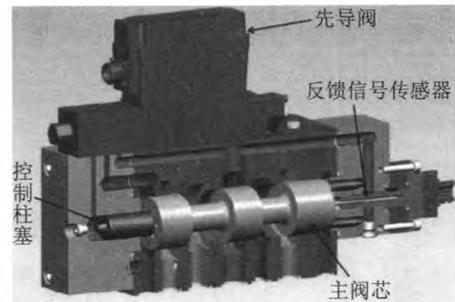


图5 FIVA阀剖面图

概括来说，FIVA阀的工作原理是：通过控制直流电机驱动先导阀芯，先导阀芯的运动引起高压油路的变换，产生大的液压力以驱动主阀芯，进而完成高压油路的切换，实现控制的作用。FIVA阀的直流电机采用电流反馈闭环控制，利用LVDT(线性差动变压器)位移反馈传感器，实时反馈阀芯运动位置，根据气缸控制单元的设定位移与控制电流关系MAP图，进行直流电机控制，根据LVDT位移传感器反馈的电流值，查找对应MAP图，得出FIVA阀位移，如果位置存在偏差，采用PID电流闭环控制进行修正。

3.2 RT-flex主机燃油喷射系统

RT-flex主机有一套燃油共轨系统，机带燃油泵直接将供给的燃油加压，储存在燃油共轨中，再由各缸的共轨燃油电磁阀控制燃油喷射阀完成燃油喷射。燃油喷射正时、喷射型线及喷射量由各缸各自的控制单元调节完成。

图6反映了共轨电控喷油系统(ICU)的一个喷油作用过程。(a)图中高压共轨阀是双稳态电磁阀，共轨阀上端通电，使共轨阀动作移至下端位，伺服油联通至ICU入口端。(b)图中伺服油推动滑阀下行，改变燃油油路，计量活塞前腔与共轨油路断开，并接通至喷油器油路，计量活塞前腔中燃油流入喷油器盛油腔，致使喷油器针阀开启，同时活塞前腔压力下降，计量活塞左行，开始喷油。(c)图中共轨阀下端通电后，回到上端位置，滑阀复位，完成燃油油路切换，盛油腔内压力下降，针阀返回，关闭喷油；计量活塞两端联通高压共轨油路，依靠面积差右移，活塞腔重行注满高压燃油，

一个喷油循环结束。

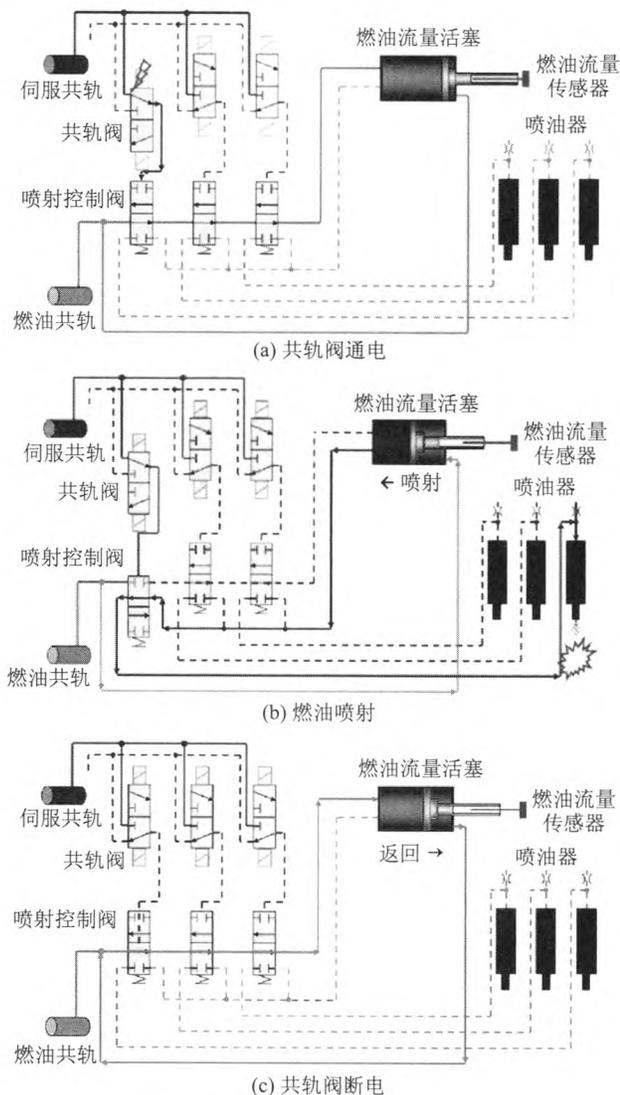


图 6 共轨燃油喷射过程

不同于 ME 主机依靠一个 FIVA 阀控制燃油喷射，RT-flex 燃油喷射系统最关键部件就是共轨阀 (Rail Valve)。共轨阀是一种高速响应的二位三通双稳态电磁阀，其通过高达 80 A 的强电流脉冲驱动阀芯迅速移动，快速切换液压油路，能达到精确的喷油控制，其动作时间一般小于 1 ms。与 FIVA 阀相比共轨阀结构较为简单，但同样具有内装式监测功能，可连续不断地检测阀的动作是否正确，以保证其最高的使用效率^[4]。

ME 型机每缸有两个燃油喷射器，起到均匀喷射作用，其受同一 FIVA 阀控制。而 RT-flex 每个 ICU 有 3 个燃油喷射器，且每个燃油喷射器都有独立的共轨阀以及喷射控制阀，实现了各自独立喷射，提供多种喷射方案，使柴油机在全工况内处于最佳燃烧状态，尤其是低负荷下可实现低排放，这也是 RT-flex 电喷系统的一大特点^[5]。图 7 反映了

万方数据

当主机转速低于 12% 时，RT-flex 机进入低负荷喷油状态，部分喷油器工作，并每隔一定时间完成工作喷油器的转移。

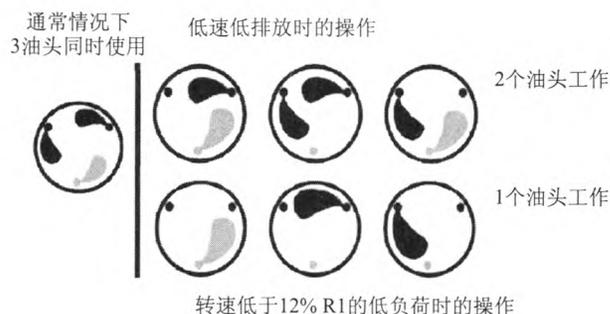


图 7 RT-flex 多种燃油喷射策略

图 8 显示 Wartsila RT-flex 主机电控系统使柴油机低速时排烟性能得到明显改善。普通机型在负荷低于 50% 时，碳烟排放量开始缓慢升高，当负荷低于 15% 时，碳烟随负荷下降急剧上升，并可以观测到明显的烟雾。而 RT-flex 机型在低负荷下 (负荷低于 30%) 采用部分喷油器工作，可明显改善碳烟排放，同时常规工况下碳烟排放量也略低于常规机型。

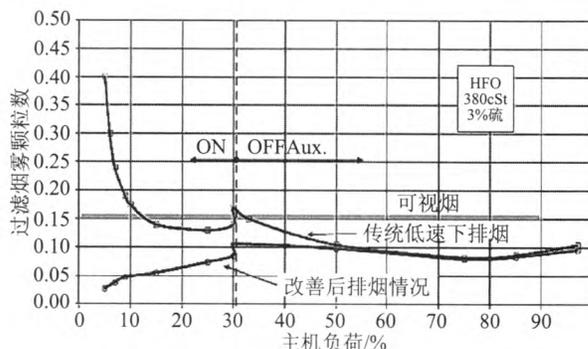


图 8 瓦锡兰 6 RT-flex58T-B 排烟性能测试

4 控制系统总体架构

ME 与 RT-flex 机型的控制系统都采用了比较先进的冗余总线控制，可以大大减少电缆的使用数量，同时提高系统的准确性与可靠性，易于查找故障并进行处理。

图 9 (a) 为 ME-C 机型的控制系统原理图；(b) 为 RT-flex 的 WECS-9520 控制系统图。总体上来说，Wartsila 的电控系统更为成熟，且结构精简，使用较少的控制箱完成了控制任务。

两家公司的控制系统都采用了每缸一个专用控制单元的控制方式，ME 主机为 CCU (Cylinder Control Unit)，而 WECS-9520 系统使用的是 FCM-20 (Flexibility Control Module)，这些单元的主要任务

是完成各缸的燃油喷射控制、排气阀控制、启动阀控制等任务；除各缸本身的控制任务，各缸控制单元也会完成一定的额外控制任务，如：燃油循环和压力释放阀的控制、主启动电磁阀控制、伺服油泵控制等。对于ME型主机这些附加控制任务多数需要额外的控制箱完成。

伺服油泵由独立的3个ACU控制，这也不同于WECS系统。从控制箱的冗余上来说，WECS系统只有一套在线备件的FCM-20模块被安装在SIB船厂接线箱(E90)里，而ME电控系统基本每个控制箱都采用双冗余，CCU则每缸一个，互为备用。

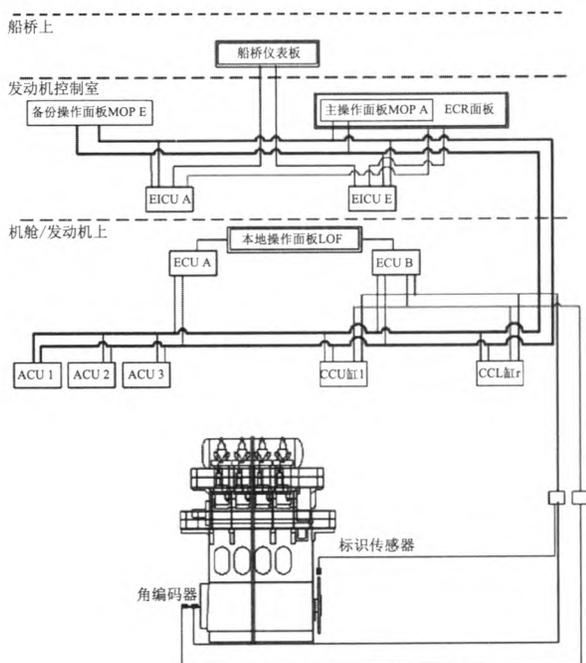
5 结 语

从以上分析可知，两类电控柴油机电控系统的主要区别是：(1) ME型主机不存在共轨单元，而Flex机存在两套独立的共轨系统；(2) 关于伺服、燃油系统控制部件，ME主机控制核心部件是FIVA阀，每缸一个FIVA阀控制气缸液压系统油路切换，完成对排气阀以及燃油喷射的控制，RT-flex的核心部件是共轨阀，通过共轨阀的通断电改变油路走向；(3) ME机的控制系统控制箱数量远多于WECS系统，其中包括多出的3个ACU、2个ECU、2个EICU等。

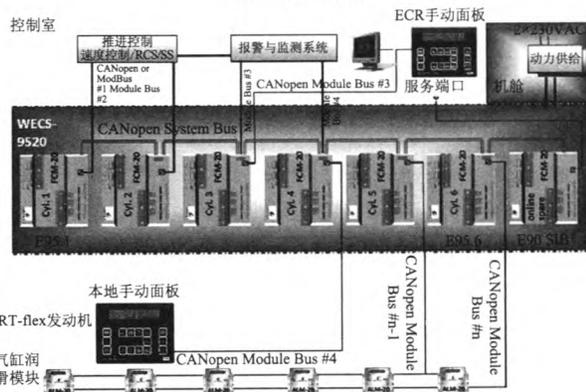
总体来说，Flex机实现控制任务的难度更大。其排气阀与燃油喷射都采用了闭环控制方案，实时采集排气阀与流量活塞位置信号进行反馈，这样的闭环控制方式须要考虑更多实际使用因素。而存在共轨管系则表明须要进行轨压控制，相较之下ME主机ECU并不直接控制伺服液压压力，这一工作由比例溢流阀实现。最后ME主机的各个ECU功能较为独立，虽然数目更多但ECU之间所需通讯量较少，也利于实现各部分控制器间的协同工作。

参考文献

- [1] 冼伟伦,余天明. 船用柴油机电控共轨新技术的特点[J]. 机电设备, 2007(1):14-16.
- [2] 王建国. ME型船舶主机的建模与实时仿真[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
- [3] 曾定军. ME型柴油机电控系统分析研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [4] 杨国豪. 船用低速智能柴油机工作过程建模与仿真研究[D]. 大连:大连海事大学,2012.
- [5] 李圣军,张维竞. 船用电控型柴油机的最新技术进展[J]. 船舶工程, 2004, 26(2):4-6.
- [6] 王宏明,胡明华. Sulzer RT-flex柴油机WECS_9500控制系统[J]. 天津航海, 2007(1):28-31.



(a) ME控制系统



(b) WECS控制系统

图9 两种机型控制系统

从图9中可以对对比看出，ME主机控制系统比WECS系统多了ECU-A与ECU-B，转速控制由ECU完成，ECU将计算所得喷油量信号传送给CCU，再由CCU控制喷油规律。同时，ME的风机、