

智能化与控制

## 高/低硫燃油转换自动控制技术研究

朱端祥<sup>1,2</sup>, 陈德富<sup>1,2</sup>, 刘晶晶<sup>1,2</sup>

(1. 七一一研究所, 上海 200090; 2. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海 201108)

**摘要:** 基于对全球大气环境保护以及满足  $\text{SO}_x$  在排放控制区域内的排放要求, 低硫燃油(硫的质量分数  $< 0.1\%$ ) 在实船中已得到广泛应用。结合示范船供油系统进行高/低硫燃油自动转换控制技术的研究, 实现了换油过程中燃油进机黏度在  $2 \sim 20 \text{ cSt}$ , 同时油温变化率小于等于  $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , 确保了柴油机安全、稳定工作。

**关键词:** 高/低硫油; 自动转换; 控制

**中图分类号:** TK428.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4357(2020)04-0015-03

Study on High/Low Sulfur Fuel Automatic Switching  
Control TechnologyZhu Duanxiang<sup>1,2</sup>, Chen Defu<sup>1,2</sup>, Liu Jingjing<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090;

2. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System, Shanghai 201108)

**Abstract:** Low sulphur fuels ( $\omega(s) < 0.1\%$ ) have been widely used on ships due to the global atmospheric environmental protection and the emission requirements in  $\text{SO}_x$  emission control areas. Based on the fuel supply system of a demonstration ship, the automatic switching control technology was studied, which can guarantee the fuel viscosity between  $2 \sim 20 \text{ cSt}$  and meanwhile keep the fuel temperature change within  $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  in the process of fuel change, thus can ensure the safety and stability of diesel engines.

**Key words:** high/low sulfur fuel; automatic switching; control

## 0 引言

为了减少船舶排放对环境造成的污染, 排放法规对  $\text{SO}_x$  排放的限制越来越严格。2017 年 7 月 3 日 MEPC71 次会议再次确认: 2020 年 1 月 1 日在全球海域实施燃油硫质量分数小于  $0.5\%$  (下文中无特殊说明硫含量均指质量分数) 的法规的日期不变; 排放控制区仍然执行燃油硫含量  $0.1\%$  的法规。船舶燃油系统、机械设备一般都是基于重油/柴油特性设计的, 推荐的燃油黏度为  $10 \sim 15 \text{ cSt}$ , 然而硫含量低于  $0.1\%$  的燃油, 其黏度大约在  $1.8$

$\sim 4 \text{ cSt}$ <sup>[1]</sup>, 具有发热值高、黏度低、闪点低、硫含量低、润滑性差等特点。在进行重油和低硫油转换时, 燃油温度和黏度控制不当会导致柴油机高压油泵和燃油喷油器等偶件磨损加剧甚至咬死, 引发操纵性问题。为了避免此类问题的发生, 在高/低硫油的转换过程中应确保燃油进机黏度在  $2 \sim 20 \text{ cSt}$  的同时, 油温变化率  $\leq 2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。供油系统自动转换控制是本文须要解决的问题。

## 1 系统组成

高/低硫燃油转换控制系统由燃油供给系统、

收稿日期: 2019-08-27; 修回日期: 2019-10-12

基金项目: 船用清洁燃料应用研究及示范(国家重点研发计划)资金(2016YFC0205203)。

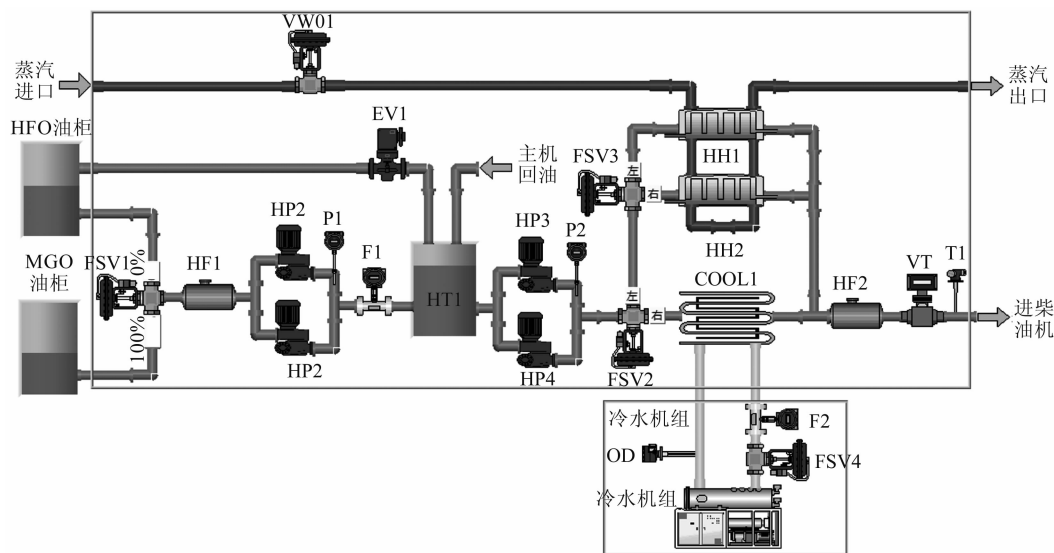
作者简介: 朱端祥(1984—), 工程师, 主要研究方向为船舶动力系统集成, zhdx711@163.com。

低硫油冷却系统和监控系统三部分组成。燃油供给系统主要由电控三通开度阀、燃油滤器、燃油供给泵、流量计、燃油循环泵、燃油自动反冲洗滤器、燃油蒸汽加热器、黏度计及管路等组成；低硫油冷却系统主要由低硫油冷却器、冷水机组、冷媒水流量计、电动调节阀及管路等组成；监控系统主要由电控箱、集控台及控制程序等组成。燃油供给和冷却系统如图 1 所示。

### 1.1 燃油供给系统

燃油供给系统的主要作用是为主机提供符合品质要求的燃油，保障柴油机安全可靠工作。其工作原理为：燃油自日用柜出口经燃油供给泵驳运到混

油桶混合后，再由燃油循环泵输送至管壳式加热器（或低硫油冷却器）进行加热（或冷却）处理，使燃油黏度达到进机要求并依次通过自动反冲洗滤器、黏度计后进入柴油机。黏度计实时监测燃油黏度，并将黏度信号反馈到 PLC。加热工况下，通过 PID 调节开度阀 VW01 开度，控制加热蒸汽量的流量大小，进而改变油温，实现燃油黏度的调节，使燃油黏度稳定在系统设定的范围之内；冷却工况下，通过 PID 调节开度阀 FSV4 开度，控制冷媒水流量大小，进而改变混油温度，实现燃油黏度的调节，使燃油黏度稳定在系统设定的范围之内。



FSV1, FSV4—电控三通开度阀；HF1—燃油粗滤器；HP1, HP2—燃油供给泵；P1, P2—压力传感器；EV1—排气阀；F1—燃油流量计；HT1—混油桶；HP3, HP4—燃油增压泵；FSV2, FSV3—电控开关阀；HH1, HH2—蒸汽加热器；VW01—蒸汽控制阀；COOL1—冷却器；HF2—自动反清洗油滤器；VT—黏度计；T1—温度传感器；F2—冷媒水流量计；OD—油份仪

图 1 燃油供给和冷却系统组成示意图

### 1.2 低硫油冷却系统

当柴油机燃烧低硫油时，为使燃油黏度满足进机要求，须采用低硫油冷却系统对其进行冷却。低硫油冷却系统依据降温原理，采用较为环保的闭式冷却方式<sup>[3]</sup>：用制冷装置冷却冷媒水，再利用冷媒水通过板式换热器冷却低硫油，可以将燃油的温度降低到 16 ~ 18 ℃。低硫油冷却系统核心部件为两台制冷压缩机，可单独运行也可并联运行。高温高压制冷剂（R404A）经冷凝器由海水吸收热量后经过供液电磁阀、热力膨胀阀进入蒸发器，在蒸发器中制冷剂吸收冷媒（主要由蒸馏水和 30% 的乙二醇组成）的热量后进入压缩机进口，经压缩机再循环利用。

### 1.3 监控系统

监控系统主要由控制系统和监测报警系统两部分组成，具有高/低硫油自动转换控制、系统参数

监测与报警、数据记录等功能。

#### 1.3.1 控制系统

##### （1）燃油供给系统控制功能

①实现高/低硫油自动转换控制、混合油加热/冷却转换控制及混油桶高/低硫油吸入量的比例调节，确保燃油进机黏度大于 2 cSt，同时温度变化率（简称  $\Delta T1$ ） $\leq 2$  ℃/min；

②实现供给泵、循环泵自动启动/停止与主/备切换，手动/自动控制，主/备转换，过载、失压报警等功能。

##### （2）冷水机组控制功能

①通过 PLC 自动控制冷媒水的流量及温度，实现低硫油温度、黏度的基本恒定；

②控制压缩机组、冷媒水泵的启动/停止与主/备用泵自动转换，并具有过载报警等功能。

#### 1.3.2 监测报警系统

控制系统中 PLC 采集并处理燃油供给系统、低硫油冷却系统等内部传感器参数 (包括温度、压力、液位、流量、黏度等), 通过 Ethernet 传输给集控台, 在 LabVIEW 中进行数据解析, 通过指示灯、数值、曲线等形式将设备的运行情况显示至监测界面。

## 2 高/低硫燃油转换自动控制

在 HFO→MGO 转换过程中, 为了避免因燃油温度变化剧烈对设备造成的热冲击过大, 燃油温度变化率应不超过  $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 并且保证燃油进机黏度在  $2\sim 20\text{ cSt}$  内, 以满足柴油机的使用要求。HFO→MGO 转换由  $\Delta T1$  自动控制或黏度自动控制两种控制方式完成。

换油前准备工作:

(1) 将柴油机回油管路转换至回燃油日用柜的模式;

(2) 确保低硫油冷却水系统处于正常运行状态, 各项指标均满足要求, 除低硫油冷却器管路上电控三通阀处于关闭状态, 其它手动阀均处于开启状态。

### 2.1 HFO→MGO 转换时 $\Delta T1$ 自动控制

HFO→MGO 转换时  $\Delta T1$  自动控制流程如图 2 所示。

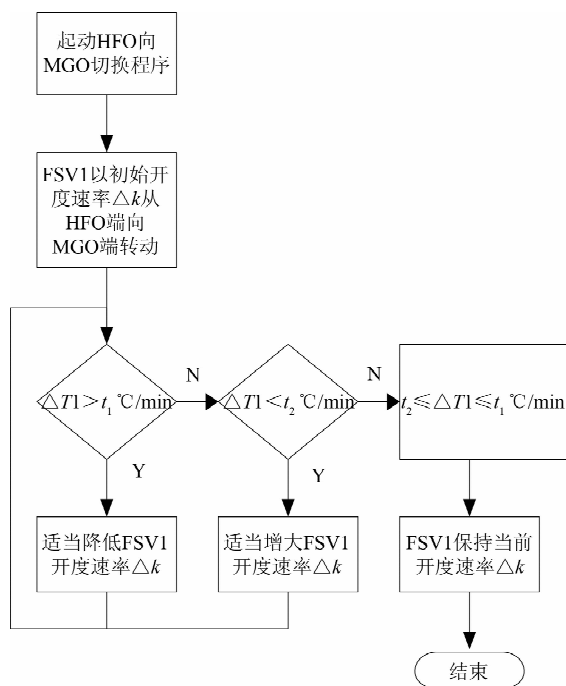


图2 HFO→MGO 转换时  $\Delta T1$  自动控制流程图

(1) 起动 HFO→MGO 转换程序;

(2) 电动三通阀 FSV1 根据 PLC 设定的初始开度速率  $\Delta k$  从 HFO 端向 MGO 端转动;

(3) 若  $\Delta T1 > t_1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 适当降低 FSV1 开度速率  $\Delta k$ , 观测  $\Delta T1$ ;

(4) 若  $\Delta T1 < t_2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 适当提高 FSV1 开度速率  $\Delta k$ , 观测  $\Delta T1$ ;

(5) 若  $t_2 < \Delta T1 < t_1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 保持当前 FSV1 开度速率  $\Delta k$  不变, 直至 HFO 完全转换至 MGO。

### 2.2 HFO→MGO 转换时黏度自动控制

HFO→MGO 转换时黏度自动控制流程如图 3 所示。HFO→MGO 转换全程都须进行黏度控制, 转换过程根据混合油的黏度分为两个阶段。

(1) 第一阶段: 加热阶段。该阶段的混合油黏度大于  $m\text{ cSt}$ , 混合油中 HFO 油分多, 故仍须蒸汽加热器对混合油进行加热; 随后蒸汽量逐渐减少, 使混合油黏度保持在进机黏度要求内。

(2) 第二阶段: 冷却阶段。随着系统中 MGO 油分的增加, 当混合油黏度低于  $m\text{ cSt}$  时, 系统由加热状态转换至冷却状态, 以对混合油进行冷却。在此过程中燃油黏度始终保持在进机黏度要求内。

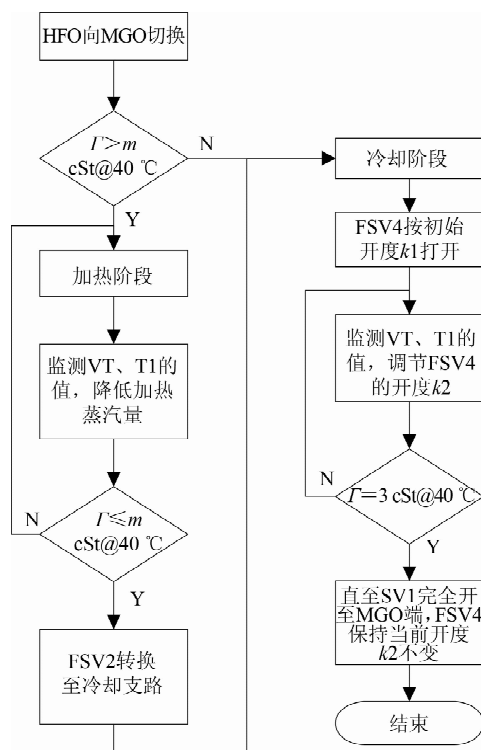


图3 HFO→MGO 转换时黏度自动控制流程图

当系统混油温度和黏度接近低硫油的温度和黏度时, 换油过程结束; 将柴油机回油管路转换至回供油装置内部循环模式。

由 MGO→HFO 转换时, 按相反的控制逻辑进行转换操作, 其它工况油品相互转换时转换控制程序与之相似。

(下转第 21 页)

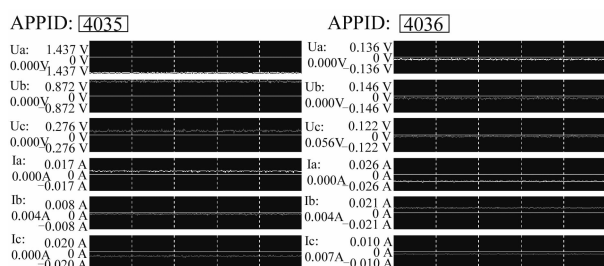


图6 处理模块监测软件在机组未运行情况下采集到的数据

## 2.2 动态验证

试验时,同时起动两台发电机组,并增加1#发电机组负载,通过试验室的监控软件与处理模块测试软件对发电机组运行数据进行对比验证,试验结果如图7所示。

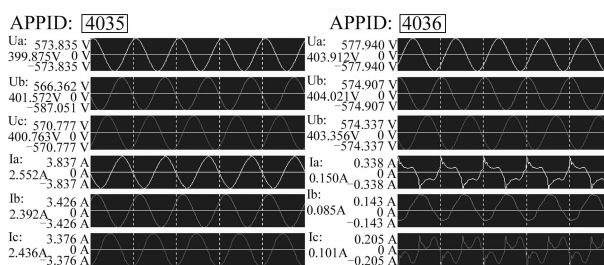


图7 处理模块监测软件在机组运行情况下采集到的数据

通过图7可见:电子式互感器处理模块不仅能够监测到发电机组的有效电压、电流数据,而且可以对发电机组电压/电流数据、电压与电流相位数据等进行实时显示,具有较高的数据显示精度。

## 3 结语

研究开发了基于 IEC 61850-9-1 协议标准的船用

(上接第17页)

### 2.3 高/低硫油自动转换试验曲线图

开展 HFO→MGO 与 MGO→HFO 自动切换试验验证,得到的温度变化率-时间曲线、黏度-时间曲线如图4所示。试验结果表明:温度变化率在绝大多数时间段内都小于等于 2℃/min,满足设计要求。

## 3 结语

通过试验验证表明:高/低硫燃油转换自动控制技术性能稳定,较好地实现了换油过程中对燃油进机黏度和油温的控制,确保了柴油机安全稳定运行。随着限硫令的颁布实施,该技术将越来越多地应用到实船上,以保障柴油机安全稳定地完成换油工作,同时降低船员的工作量。

电子式互感器处理模块。该模块采用 FPGA + DSP 的硬件架构、光纤数据接口以及 IEEE 1588 时钟同步技术。借助试验室已有设备及监控软件对处理模块的性能指标进行了试验验证,结果表明:处理模块采集数据具有较高的准确性和实时性。通过处理模块的应用,可以将发电机组电压、电流信号通过数字式光纤接口直接接入信息平台。采用无缝的数据集成与共享信息技术,可以减少传统电力系统监控中因为被控端上传信息量大而导致的信息转换、处理和维护工作量大等问题;可以有效消除发电机电压、电流数据在传输过程中的系统误差,提高了系统的稳定性和准确度。处理模块实现了船舶电网内一次设备的数字化和智能化,为实现电网内设备和系统的互操作以及船舶电网智能化奠定了基础。

## 参考文献

- [1] 张明珠,邹欣洁.基于 FPGA&ARM9 合并单元的研制[J].电力系统保护与控制,2010,38(9):84-87.
- [2] 夏婕.智能变电站合并单元现场测试技术及应用[D].南昌:南昌大学,2015.
- [3] 吴勇飞.电子式互感器合并单元的应用研究[D].武汉:华中科技大学,2007.
- [4] 桂本恒,冯冬芹,褚健,等.IEEE 1588 的高精度时间同步算法的分析与实现[J].仪器仪表与自动化装置,2006(4):20-23.
- [5] 刘明哲,徐皓冬,赵伟.基于 IEEE 1588 的时钟同步算法软件实现[J].仪器仪表学报,2006,27(6):2009-2011.

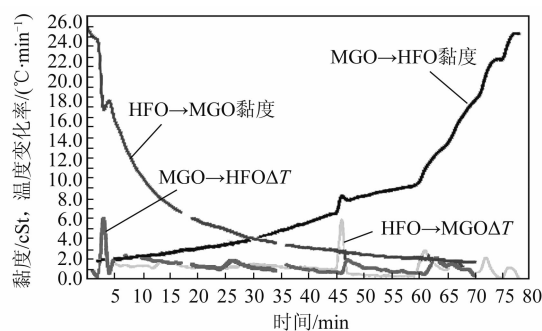


图4 试验曲线图

## 参考文献

- [1] 潘伟鹏.低硫油在燃油供应系统中的应用[J].科技创新导报,2015(7).
- [2] 中国船级社.船舶使用低硫油指南,2018.[EB/OL][2018-09-11].http://www.ccs.org.cn.