

船用柴油/天然气双燃料发动机模式切换控制策略研究

邓志庆

舟山长宏国际船舶修造有限公司 浙江省舟山市 316052

摘要: 船用柴油/天然气双燃料发动机运行时, 频繁的柴油与双燃料模式的切换, 可导致发动机的转速变化剧烈, 影响其正常运行。此外, 当天然气供应短缺或故障时, 发动机也应能快速、稳定的切换。在此背景下, 确保控制系统硬件保持不变, 结合双燃料发动机的运行机理、需求, 科学制定满足要求的双燃料发动机模式切换控制策略, 验证不同工况下的模式切换性能尤为重要。依据实践结果, 制定的切换控制策略可以满足实际需求, 还可改善发动机的运行性能。

关键词: 船用柴油; 天然气双燃料发动机; 模式切换; 控制策略

Study on the mode switching control strategy of Marine diesel / natural gas dual-fuel engine

Deng Zhiqing

Zhoushan Changhong International Ship Repair Co., LTD. Zhoushan, Zhejiang 316052

Abstract: When the Marine diesel / natural gas dual fuel engine is running, the frequent switching of diesel and dual fuel mode can lead to the drastic change of the engine speed, which will affect its normal operation. In addition, the engine should also switch quickly and stably when the natural gas supply is short or faulty. In this context, it is particularly important to ensure that the hardware of the control system remains unchanged, combined with the operation mechanism and requirements of the dual-fuel engine, to scientifically formulate the mode switching control strategy of the dual-fuel engine to meet the requirements, and to verify the mode switching performance under different working conditions. According to the practical results, the switching control strategy can meet the actual needs and improve the operating performance of the engine.

Keywords: Marine diesel; natural gas dual fuel engine; mode switching and control strategy

引言

伴随社会经济与工业的发展, 人们面临严峻的如环境污染、能源短缺问题, 据不完全统计目前航运业氮氧化物(NO_x)的排放占全球总量的 10%~20%, 硫氧化物(SO_x)的排放占全球总量的 4%~8%。可以说航运业已成为空气污染的大户。因此 2008 年 10 月国际海事组织海上环境保护委员会(MEPC)在第 58 次会议上通过《国际防止船舶造成污染公约附则 VI 修正案》, 对船舶发动机提出更严格的排放要求, 这为船舶行业的持续性发展奠定了良好的基础。

一、研究背景

随着全球防大气污染控制措施的不断升级, 对氮氧化物(NO_x)的控制推出了可谓史上最严苛的 IMO Tier III 排放标准, 要求 2016 年 1 月 1 日以后建造的新船, 在 NO_x 排放控制区内执行 Tier III; 对于 SO_x 的排放, 2020 年 1 月 1 日以后, 在任何区域航行的船舶, 其燃油的硫含量必须达到 0.5% m/m 以下; 在 ECA 区航行的船舶, 2015 年 1 月 1 日以后, 燃油的硫含量必须达到 0.1% m/m 以下。随着国际海事组织对废气排放指标的要求越来越高, LNG 液化天然气作为清洁能源越来越受到青睐。

截至 2021 年 3 月, 全球共有 LNG 动力船舶(含建造中)

1043 艘, 预计于 2025 年新造船中 LNG 动力船舶将占到 60% 市场份额。据克拉克森统计, 全球已投入使用的 LNG 燃料加注站储量已达 140 处, 覆盖全球主要港口, 另有大量 LNG 燃料加注站正在建设中, 预计在未来五年内投入使用。对比传统燃油发动机, 双燃料发动机可做到降低 85%~90% NO_x 排放, 减少 90% 以上 SO_x 排放; 燃气模式下完全可以满足 IMO 足当前的排放要求。



图 1 NO_x 和 SO_x 的排放限制

二、概念界定

根据发动机的转速和油量, 可用状态字来指定不同的燃烧方式。通常, 发动机可采用不同的燃烧方式, 例如柴油模式下, 发动机仅以柴油为燃料, 通过直接喷射的方式将其输送到气缸中, 以满足发动机燃烧做工需求。而当发动机从柴油模式转变为柴油/天然气双燃料模式时, 则需要根据实际

情况,采取不同的切换方式,如主动与被动切换模式,以满足不同的应用需求。

三、两大主流低速双燃料发动机的工作原理

B&W MAN 的 ME-GI 系列柴油机是以成熟的电喷柴油机为基础,在电控柴油机的基础上加装天然气共轨管,并改造一些零部件,下图所示为 ME-GI 的燃气控制模块,采用高压供气系统。它的工作原理同普通柴油机一样,在吸气冲程只吸入新鲜空气,当活塞至上止点附近时,向气缸内喷入少量引燃柴油,同时将高压燃气(20~30MPa)喷入气缸,由引燃柴油的压缩发火来点燃天然气使其膨胀做功。

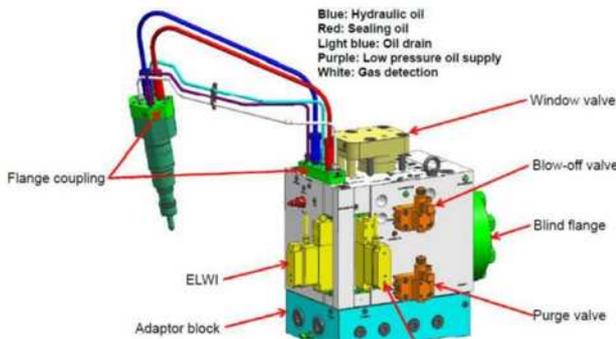


图 2ME-GI 的燃气控制模块

WinGD 的 X-DF 系列柴油机同样是以电喷机为基础设计,不过它的燃气进口阀的位置由传统的气缸顶部移至扫气口上方的“冲程中部”位置,采用低压供气系统。它的工作原理是在活塞上行关闭扫气口后喷入低压燃气(0.8~1.6MPa),让燃气和空气混合并一起压缩,当活塞至上止点附近时,向缸内喷入少量引燃柴油,由引燃柴油的压缩发火来点燃天然气使其膨胀做功(Otto 循环)。

四、燃料模式切换控制策略

(一) 不同模式的切换控制策略

通过上位机和 LAN 网,燃料管理系统可以实时监测发动机的运行状态,并根据不同的模式调整硬件和安保条件。如果这些条件都得到满足,就可以确定总燃油量。如果燃油量低于最小允许喷射量,发动机将进入柴油模式;反之,如果超出了最小允许喷射量,则可进行模式转换,以确保发动机的正常运行。当发动机处于置位状态时,表明其正在使用双燃料模式;而当发动机处于非置位状态时,则表明其正在使用柴油模式。本文以船用发动机为研究对象,以转速闭环控制为核心,提出了一系列有效的燃料模式切换控制策略,以提高发动机性能。

结合牛顿第二定律,双燃料发动机转速动态公式如下:

$$J \frac{d}{dt} \omega_c = T_c - T_f - T_L$$

式中, ω_c 代表曲轴角速度, J 是系统转动惯量; T_c 、 T_f 、 T_L 分别是燃烧输出扭矩、摩擦扭矩以及负载扭矩,基于不同燃料的燃烧放热,可以得到下式:

$$T_c = \frac{2\pi}{3} \eta (L_{dies} m_{fcyc} + L_{NG} m_{gcyc}) = \frac{2\pi}{3} \eta M_{PID}$$

在式中, η 、 L_{dies} 和 m_{fcyc} 分别代表燃烧效率、柴油低位热值和循环喷射量,而 L_{NG} 、 m_{gcyc} 和 M_{PID} 则表示天然气低位热值、循环喷射量和总燃烧量的输出值。通过 PID,可以计算出目标与实际转速之间的差值,并且可以清楚地确定其变化率。通过应用转速闭环控制器,本文提出了一种基于燃烧当量的燃料分配策略,以确保发动机运行和模式切换的平稳性。当发动机处于柴油模式时,天然气喷射量为 0,而柴油模式下,其喷射量为 $m_{fcyc} = M_{PID} / L_{dies}$,其可实现燃烧总热量的有效控制。在双燃料模式下,柴油的喷射量由预先设置的参数图谱来决定,其中 m' 表示引燃柴油的量。此外,根据燃料燃烧能量关系,可以计算出 $m_{gcyc} = (M_{PID} - L_{dies} m') / L_{NG}$,从而实现双燃料的运行。根据这个结论,可以推断出两种不同的燃料分配方案,并将其相应的计算公式列出来。其中第一部分为柴油模式,第二部分为双燃料模式。

$$M_{PID} = \begin{cases} L_{dies} m_{gcyc} \\ L_{dies} m' + L_{NG} m_{gcyc} \end{cases}$$

然而,由于 LNG 采用的是进气管喷射,燃料的传输会受到一定的延迟,从而导致切换过程中的转速变化剧烈,耗时较长,并且超调量也较大。本文提出了一种新的燃料模式切换策略,其采用规则化的方式,并引入了燃气延迟补偿系数,以此来改善发动机模式切换过程中的运行效率。

1. 柴油转双燃料模式策略

柴油转双燃料模式可以让发动机在柴油和双燃料之间取得平衡,但由于柴油的缸内直喷方法,在天然气的喷射过程中,必须依靠进气总管,导致天然气的供应出现延迟^[3]。此外,当切换到双燃料模式时,发动机的瞬时转速会急剧下降,而且还可能出现超调现象,多次振荡之后才能达到平衡,这对发动机的控制非常不利。在这种情况下,PID 控制器负责将燃油转换为燃气模式。

2. 双燃料转柴油模式策略

不论在哪一负载条件下,发动机都可由双燃料模式切换到柴油模式,而因切换过程中的触发条件不同,所以可分为主动与被动切换两种。针对主动切换,在满足燃气压力不超过 440kPa、安保条件未使能的条件下便可触发。本文制定的控制策略中结合发动机的转速和扭矩等可以计算出控制

器的最大延迟时间,基于时间修正系数可以明确最终的延迟时间。针对被动切换,即发动机在负荷突卸情况下无法基于双燃料模式正常运行,这一过程导致燃气量为 0,发动机也会进行模式切换,即由双燃料模式切换成燃油模式。

(二) 船用柴油/天然气双燃料发动机模式切换控制验证

1、柴油模式到双燃料模式

燃料模式管理环节,明确燃气条件使能后,发动机燃料模式会由柴油模式转换成双燃料模式,这一过程中发动机燃用燃料发生明显的变化,燃气喷射阀(下图所示)的喷射量也会按步增加^[4]。然而,因发动机转速闭环,其需求当量燃料保持不变,这必然导致 PID 计算油量减小,同时可在切入双燃料环节增加燃气,减少燃油消耗。

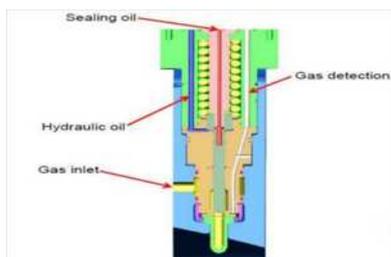


图 3 燃气喷射阀

2、双燃料转换成柴油模式

对于发动机而言,其由双燃料模式切换成纯柴油模式不受负荷条件的局限,这一模式的切换不仅十分便捷,还能缩短切换的时间。然而在实验过程中,当处于特殊工况时,需要使用倒逼切换模式,但因燃料供给系统的延迟,倒逼模式会使得转速剧烈波动,其波动率高达 8.1%,严重影响了发动机的平稳性,切换时间有约 57 秒,也无法满足控制系统对突发事件的快速反应需求。为了提高发动机的可靠性和效

率,本文提出了一种新的方法,即借助主动切换、被动切换来快速切换双燃料和柴油模式。该方法既能够提高效率,又能减少维护成本。其中,采用主动切换技术,发动机可以实现双燃料和柴油的双重模式,以满足不同的行车要求^[5]。

结束语

总而言之,针对船用双燃料发动机,双燃料发动机还存在许多可以改进优化的地方,在此背景下,相关单位应明确控制对策并做好模式切换控制软件的研发,通过实践,本文制定的控制策略得到验证,也达到了控制目的,由此可见,控制策略及研究思路十分正确,借助主动切换、被动切换实现双燃料与柴油模式的切换,可以有效提升工作效率,还能节省更多的维护成本,从而促进船用发动机的稳定运行与发展。

参考文献:

- [1]鞠佳明,姜皓天,张均东,齐家豪.船舶双燃料发动机燃料模式切换的仿真研究[J].中国航海,2022,45(04):112-116+128.
- [2]宋恩哲,蒋中州,姚崇,赵国锋.船用柴油/天然气双燃料发动机模式切换控制策略研究[J].中国机械工程,2022,33(04):388-396.
- [3]郑先全,杨建国,黄禄丰,朱树林,钱正彦.船用微引燃双燃料发动机燃料模式切换[J].哈尔滨工程大学学报,2021,42(04):541-547.
- [4]李坤颖,张平安.柴油/天然气双燃料发动机模式切换的控制研究[J].深圳信息职业技术学院学报,2017,15(03):68-71.
- [5]W.ZD.中策集团 DF210 双燃料发动机获 CCS 型式认可[J].军民两用技术与产品,2015(07):27.