

基于等效能量燃烧模式切换控制策略设计

姚崇¹, 王帅¹, 刘晓阳¹, 王江波¹

(1. 哈尔滨工程大学 烟台研究院, 烟台 264000)

Design of switching control strategy based on equivalent energy burning mode

Yao Chong¹, Wang Shuai¹, Liu Xiaoyang¹, Wang Jiangbo

(1. Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai 264000, China)

Abstract: During combustion mode transitions in diesel engines, there is often a problem of speed fluctuation. To address this issue, this research builds upon the PID speed closed-loop control strategy and establishes a modified model for the main fuel quantity during mode switching based on the equivalent energy principle. Additionally, a combined GT-Power and Simulink simulation model is constructed to design a combustion mode switching strategy using the equivalent energy model. The modified model recalculates the main fuel quantity and analyzes the impact of fuel quantity variation on speed fluctuation during combustion mode transitions. The results demonstrate that by incorporating the fuel quantity modification model, the speed fluctuation rate during the transition from single injection mode to multiple injection mode in the diesel engine decreases from 3.25% to within 0.5%, representing a relative reduction of 84.62%, with no significant fluctuation duration. Similarly, during the transition from multiple injection mode to single injection mode, the speed fluctuation rate decreases from 3.07% to 1.06%, resulting in a relative reduction of 65.47%. This effectively improves the smoothness of the engine during the switching process.

摘要:在柴油机进行燃烧模式切换时, 往往伴随着转速波动的问题。针对该问题, 本研究在 PID 转速闭环控制策略基础上, 基于等效能量原理建立了模式切换过程中主喷油量的修正模型, 并搭建了 GT-Power 和 Simulink 联合仿真模型, 设计了基于等效能量模型的燃烧模式切换策略。结果表明: 试验中通过加入喷油量修正模型, 柴油机在单次喷射模式向多次喷射模式切换的过程中, 转速波动率从 3.25% 降至 0.5% 以内, 相对降低了 84.62%, 且无明显波动时长; 多次喷射模式向单次喷射模式切换过程中, 转速波动率从 3.07% 降至 1.06%, 相对降低了 65.47%。有效改善了切换过程中发动机的平顺性。

关键词: 燃烧模式切换; 等效能量; 转速波动; 联合仿真; PID

Key words: switching combustion mode ; equivalent energy ; speed fluctuation ; combined simulation ; PID

中图分类号: TK427

文献标识码: A

0 概述

随着环保意识的增强和对能源的需求不断增加, 船舶行业对于燃烧模式切换的研究与应用日益重要, 船用发动机的燃烧模式切换成为了一个备受关注的

课题^[1-3]。燃烧模式切换是指在船用柴油机运行过程中, 根据负载需求或环境条件, 从一个燃烧模式切换到另一个燃烧模式的过程, 以实现高效、可靠和环保的动力输出。燃烧模式的切换可以通过调整燃油供给、空气供给和喷油系统参数等方式实现。燃

收稿日期: 2023-6-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (3072022JC2704)

作者简介: 王帅 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为发动机多燃烧模式切换控制, E-mail: shuaiwang98@hrbeu.edu.cn;

通讯作者: 姚崇 (1981-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为双燃料发动机电子控制, E-mail: yaochong@hrbeu.edu.cn.

烧模式的切换不仅可以提高柴油机的效率和经济性,还可以降低排放物的产生,减少对环境的负荷。然而,在这一切换过程中,由于燃料供应、燃烧特性、动力传递等因素的变化,船用发动机的转速常常会出现波动,给船舶的运行稳定性和燃油效率带来一定的挑战。

上海交通大学姚晔^[4]等研究了燃烧模式切换过程中瞬态 EGR 控制规律及其对燃烧特性的影响。针对 CDC-LTC 直接切换过程中发动机平顺性控制问题,提出了优化的 EGR 阀预控制策略,并揭示了 EGR 优化控制策略对燃烧模式切换过程的影响规律。清华大学的方成^[5]等在研究各个油气参数对 LTC 燃烧的影响基础上,提出了一套油气协调切换控制策略,用于对 LTC/CI 燃烧模式切换过程进行控制,同时尝试加装电机^[6]的方式对瞬态切换过程中的动态扭矩进行了补偿控制,实现了平顺切换。哈尔滨工程大学宋恩哲团队^[7-9]提出了一种适用于船舶柴油机负荷特性的基于转速闭环的燃烧过程参数控制策略。在控制系统硬件不变的前提下,根据双燃料发动机的运行需求和机理,设计了基于规则的双燃料发动机模式切换控制策略。其中,燃烧模式切换采用倒逼控制方法,分为主动切换与被动切换以应对不同的控制需求。所设计的切换控制策略根据试验标定数据和软件算法,实现了不同燃料模式的相互切换。Ohio 大学^[10]研究采用进气道加装柴油雾化装置,对 CI/HCCI 燃烧模式切换进行了研究,实现了切换过程的平稳控制。Lei Shi^[11]等针对双燃烧模式在切换过程中出现的平均指示压力(IMEP)波动,工作平顺差的问题,探讨首循环喷油量补偿系数、过渡循环数和喷油量补偿速率对 HCCI 燃烧负荷下限切换的 IMEP 波动率的影响规律,根据试验结果确定较为合适的喷油补偿系数,实现了燃烧模式的平顺切换。上述文章最后策略的制定大多都是从试验的角度出发,通过大量的试验标定从而实现模式切换过程中的平稳性控制。

本文基于等效能量原理建立燃烧模式切换过程中主喷油量的修正模型,即在 PID 控制策略控制策略^[12, 13]的基础上,采用一种新的切换油量计算方法,对切换过程中的喷油量实现精确控制,从而降低该瞬态过程的转速波动^[14]。

1 基于等效能量的切换修正模型

发动机由单次喷射模式向多次喷射模式切换的过程中,由于燃油喷射量及喷射次数发生变化^[15],转速会发生较大波动。针对切换过程中的瞬态情况,

PID 控制器无法满足平稳切换的需求,需要设计一种燃油喷射控制模型。该模型基于等效能量原理,在 PID 转速闭环控制策略的基础上,通过设计切换油量修正模型,计算出模式切换过程中所需的喷油量,并对其进行修正,以确保切换过程中转速保持平稳。

1.1 曲轴动力模型

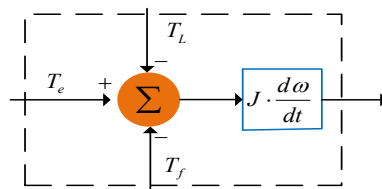


图 1 曲轴动力学模型

根据达朗贝尔定理,考虑曲轴动力学模型^[16]

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_f - T_L \quad (2)$$

如图 1 所示,其中 T_e 为输出扭矩,即曲轴端输出的力矩; T_f 为摩擦扭矩,即由摩擦力所引起的反扭矩; T_L 为负载扭矩,即带动负载的扭矩; J 为轴系转动惯量; ω 为曲轴角速度。在力矩平衡状态下,曲轴角加速度为零,三种扭矩的代数和为零,即

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = 0 \quad (3)$$

发动机在平稳工况下进行燃烧模式切换^[17],可视外界的负荷 $M_e = const$,此时,发动机的输出扭矩 $T_e = const$,有效功率 P_e 、转速 n 有如下关系

$$P_e = \frac{T_e \cdot n}{9550} \quad (4)$$

由式 (3) 可知, $n \propto P_e$,即发动机有效功率的变化反映了转速的变化^[18]。由试验测得柴油机的转速特性和调速特性,得到发动机有效功率与燃油消耗量的关系

$$P_e = \eta_e \cdot \frac{H_u \cdot B(t)}{3600} \quad (5)$$

其中, η_e 为发动机的有效热效率; H_u 为燃料的低热值; $B(t)$ 发动机的每小时耗油量。

由上式 (4) 和 (5) 可得转速和燃油消耗量的关系^[18]为:

$$n = \frac{9500\eta_e \cdot H_u}{3600T_e} B(t) \quad (6)$$

1.2 等效能量修正模型及切换策略

发动机燃烧模式切换前,燃料燃烧释放的所有热量中,部分转换为有效功,即

$$W_e^1 = \eta_e^1 Q_1 = \eta_e^1 B_1^1 H_u \quad (7)$$

其中 W_{1e} 为燃烧模式切换前的单位循环的有效

功, η_{1e} 为燃烧模式切换前的有效热效率。 B_{11} 为燃烧模式切换前单位工作循环的喷油量。燃烧模式切换后的有效功为 W_{2e} , 即

$$W_e^2 = \eta_e^2 Q_2 = (\eta_1^2 B_1^2 + \eta_2^2 B_2^2 + \eta_3^2 B_3^2 + \eta_4^2 B_4^2) H_u \quad (8)$$

定义文中符号右上角数字 1 代表第一种燃烧模式, 即发动机单次喷射模式; 符号右上角数字 2 代表第二种燃烧模式, 即发动机多次喷射模式。 η_{2i} 表示第二种燃烧模式的第 i 次喷射, B_{2i} 表示第二种燃烧模式中第 i 次的喷油量。

第二种燃烧模式中, 单位工作循环内设置四个喷油正时和四个喷射量。由于切换前后喷油量, 喷油次数的改变, 气缸内各种参数发生变化^[19], 这些因素导致切换前后热效率不同。

为保证实现燃烧模式的平稳切换, 由上式(6)、(7)及(8)可知, 在 $M_e = const$ 的情况下, 基于等效能量原理, 即燃烧释放的总热量为四次燃烧热量之和。

$$\eta_e^1 B_1^1 = \eta_1^2 B_1^2 + \eta_2^2 B_2^2 + \eta_3^2 B_3^2 + \eta_4^2 B_4^2 \quad (9)$$

进一步化简得,

$$B_4^2 = \frac{(\eta_e^1 B_1^1 - \eta_1^2 B_1^2 - \eta_2^2 B_2^2 - \eta_3^2 B_3^2)}{\eta_4^2} \quad (10)$$

实际试验中, 由于多次喷射过程中每个喷油正时对应的热效率难以测量, 故常用多次喷射一个工作循环的热效率 η_{2e} 替代, 上式(10)进一步化简得,

$$B_4^2 = \frac{\eta_e^1 B_1^1}{\eta_e^2} - B_1^2 - B_2^2 - B_3^2 = KB_1^1 \quad (11)$$

其中, K 为修正系数。在燃烧模式切换过程中通过对主喷油量进行及时修正, 以实现切换过程的平顺性。

在等效能量原理和 PID 控制的基础上, 提出燃烧模式切换控制策略, 如图 2 所示。根据测量转速和目标转速计算转速偏差和转速偏差率并进行 PID 计算, 计算结果即为期望的油量。修正模型内的公式对 PID 计算得到的结果进行补偿校正, 从而让切换过程更加平顺。

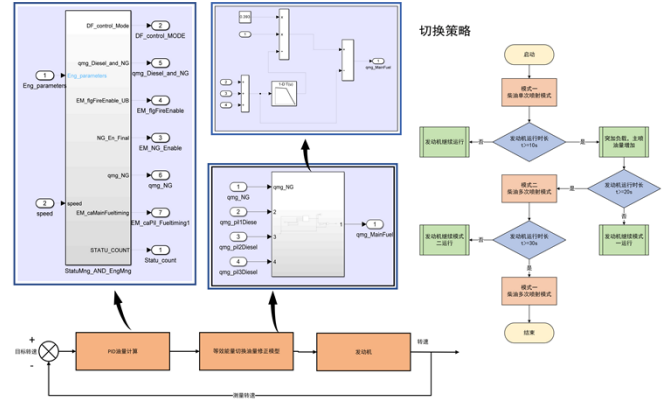


图 2 切换控制策略流程图

1.3 目标函数模型

切换前发动机输出扭矩 T_{1e} 、有效功率 P_{1e} 、转速 n_0 。切换后发动机输出扭矩 T_{2e} 、有效功率 P_{2e} 、转速 n_1 , 用转速波动率 Φ_n 来表征切换过程中的发动机转速瞬态变化的程度^[20]

$$\Phi_n = \left| \frac{n_1 - n_0}{n_0} \right| \quad (12)$$

将上式(6)、(11)代入公式(11), 可得,

$$\Phi_n(\eta_e^2, B_i^2) = \left| \frac{9550 H_u \eta_e^2 \sum_{i=1}^4 B_i^2}{3600 T_e^2 n_0} - 1 \right| \quad (13)$$

为了使切换过程平顺, 即求解最小值 Φ_n 。定义目标函数 $\Phi_{n\{min\}}$, 多次喷射过程中设置不同的预喷油量, 观察转速波动情况。与此同时, 热效率 η_{2e} 也会因喷油量的变化而变化, 故目标函数的求解需要考虑多个因素。

2 试验设计

2.1 试验目的

本文通过设置多组不同预喷油量试验, 观察修正模型控制下不同试验组的转速波动及主喷油量变化情况。旨在验证修正模型的有效性, 实现对转速波动的抑制和降低波动时长的目标。

2.2 试验工况及试验变量

设定发动机切换工况: 发动机在转速 800r/min、轨压 105MPa、负荷 960 N·m 稳定运行工况下, 进行燃烧模式的切换。两种燃烧模式的喷油正时都已根据大量的试验标定结果给出。设定模式一中的喷油正时为上止点前 5°, 发动机稳定工况下一个工作循环喷油 150mg; 模式二的预喷正时依次为上止点前

60°、45°、20°、5°。喷油量依次为 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 。试验中模式一的燃烧热效率为 $\eta_2 e$ ；模式二的预喷油量 m_1 、 m_2 、 m_3 设置多种数据，整个切换过程的燃烧热效率 $\eta_2 e$ 与变量 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 有关。

试验过程中，修正模型内加入了切换油量的计算方法，及时修正切换过程中的主喷油量，观察转速波动及波动时间情况。同时设置对照试验，即燃烧模式直接切换试验，其中预喷油量、预喷正时及主喷正时均与上述相同，主喷油量采用传统 PID 控制。选取 4 组不同的预喷油量作为试验数组，如表 1 所示。并测得燃烧模式一稳定运行状态下的热效率 $\eta_1 e$ 为 39.28%。

表 1 试验组参数

试验组	上止点前 60°预喷 油量(mg)	上止点前 45°预喷 油量(mg)	上止点前 20°预喷 油量(mg)
#1	2	6	5
#2	2	6	10
#3	4	6	10
#4	2	8	10

2.3 模型输出与实际观测比较

用拟合优度^[21]来表征试验数据的拟合程度，度量拟合优度的统计量的评价系数为 R^2 。模式二中不同的 m_1 、 m_2 、 m_3 、值对整个切换过程都会造成影响，将 $\eta_1 e B I 1$ 的值作为拟合目标，即预测值 \hat{y}_i ， m_1 、 m_2 、 m_3 作为试验自变量； $\eta_2 e(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)$ 作为因变量，即真实值 y_i 。计算样本的总平方和 TSS

$$TSS = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (14)$$

计算残差平方和 RSS

$$RSS = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (15)$$

评价系数 R^2 ^[22] 定义为

$$R^2 = 1 - \frac{TSS}{RSS} \quad (16)$$

根据试验数值，求出评价系数 R^2 。从而量化模型与观测之间的一致性和准确性。

3 修正模型验证

3.1 试验台架及仿真模型

本文使用潍柴 6WH17-C650 高压共轨船用发动

机进行试验，该发动机广泛应用于中型和大型商船、客船以及海洋工程船舶。该发动机基本结构参数如下表 2 所示。

表 2 发动机基本结构参数

项目	参数
柴油机发动机型式	6WH17-C650
气缸数	6
活塞行程(mm)	222
活塞缸径(mm)	170
额定功率(kw)	478
额定转速(r/min)	1000
供油方式	电控共轨
启动方式	电/气启动
吸气方式	增压中冷
总排量(L)	30.22
点火顺序	1-5-3-6-2-4

本文试验验证部分采用主流的发动机性能仿真 GT-Power 软件 Simulink 进行联合仿真^[23]。联合仿真流程图如图 3 所示。

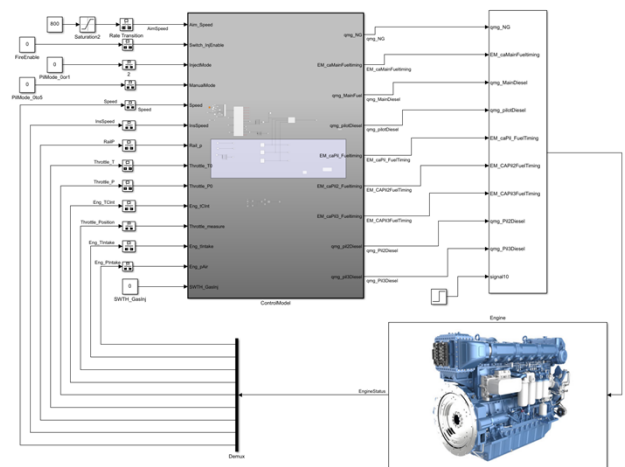


图 3 联合仿真

通过大量试验标定，得到不同组合的预喷油量燃烧过程的热效率，并根据所得结果绘制成相应的 MAP 图表。

整个试验过程包括柴油机启动阶段，启动后平稳运行阶段、突加负载调整喷油量进入模式一阶段、模式一平稳运行阶段、模式一转模式二阶段、模式二平稳运行阶段。本文关注对象为切换过程中的转

速波动情况，故研究重点为模式一—转模式二阶段。

3.2 试验结果及对比较验证

试验过程中，柴油机成功启动后，10s处突加负载，使得发动机主喷油量增加，最后稳定在150mg；当柴油机平稳运行至20s时，此时发动机由模式一—开始切换模式二。

在PID控制下燃烧模式进行直接切换，如图4.b所示。模式切换后的一段时间里，四组试验中主喷油量都有不同程度的减少，发动机转速均升高，转速峰值在810 r/min至830 r/min之间，波动产生3s后，主喷油量及转速逐步稳定，标志着切换过程的完成。

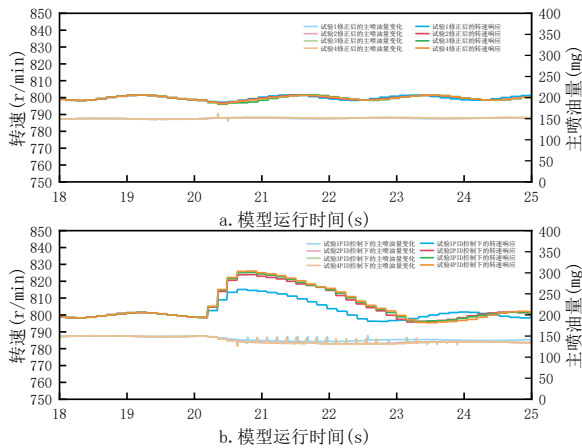


图 4 两种模式切换过程中转速和主喷油量变化

模型修正后进行相同试验，结果如图4.a所示，切换过程中，四组数据中主喷油量未发生明显变化，转速也均未发生明显波动。转速波动率对比中，如表3，图5所示，修正组的转速波动率降低效果显著，整体波动率在0.2%~0.5%之间。不同组中，不同的修正系数 K 对应着不同的转速波动率，这与模式切换过程中的不同的热效率 η_{2e} 及三次预喷量 m_1 、 m_2 、 m_3 有关。

上述试验也说明，喷油量变化是造成转速波动的重要影响因素，修正模型对喷油量进行重新计算，间接实现了对转速的控制。

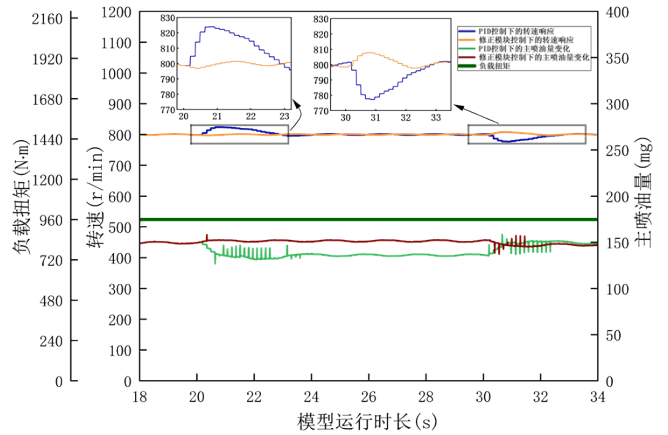


图 5 试验二模式切换结果对比

表 3 转速波动率对比

试验编号	修正组转速波动率(%)	PID组转速波动率(%)	修正系数 K
#1	0.216	2.593	1.0165
#2	0.400	3.003	1.0177
#3	0.493	3.116	1.0231
#4	0.441	3.250	1.0193

上述试验实现了模式一向模式二的平顺切换，在此基础上，为了进一步验证修正模型的适用性，在模型运行至30s时，进行模式二向模式一的切换试验。试验得到的四组结果仍旧相似，以一组数据为例分析，如图5所示。

由模式二向模式一切换过程中，修正系数 K_1 为 $1/K$ ，PID控制下的转速仍旧发生较大波动，转速降低，转速谷值位于770r/min至780r/min之间；模型修正后的转速相较于模式一—切换模式二过程中的转速有较小增幅，波动时长增加至1.7s。与PID控制下的转速波动相比，修正模型抑制转速波动的效果依旧明显。

所有试验结果表明，在PID控制器的基础上增加喷油量修正模型，能够有效减少转速波动，降低波动时长。且该模型具有较强的普适性。

4 结论

本文在PID转速闭环控制的基础上，基于等效能量原理建立了喷油量修正模型，设计了模式切换策略，搭建适用于转速闭环控制策略的联合仿真模型。设计了试验并进行了仿真，试验验证具体结论如下：

(1) 油量修正模型成功将单次喷射模式转换为多次喷射模式时的转速波动率 Φ_n 控制在 0.2%~0.5% 的范围内。

(2) 柴油机多次喷射模式切换单次喷射模式中过程中, 转速波动率 Φ_n 同样由 3.07% 降至 1.06%, 说明该模型具有一定的普适性。

(3) 试验过程中所获得的数据代入评价系数的计算公式中, 得出的评价系数为 0.941。这一结果进一步验证了修正模型的合理性。

(4) 单次喷射切换多次喷射和多次喷射切换单次喷射的过程中系统的稳定性能不同, 这与修正系数 K 的变化存在一定的关系, 需要进一步的试验验证。

上述工作基于等效能量原理设计了一种模式切换控制策略并取得一定成效, 为解决燃烧模式切换过程中稳定性控制, 提供了理论支撑, 能够有效提升多燃烧模式内燃机控制系统智能化水平。

参考文献:

[1] CAO R, LU Y, YU D, et al. Study on influencing factors of combustion mode transition boundary for a scramjet engine based on one-dimensional model [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 96.

[2] ZHANG C, CHANG J, MA J, et al. Effect of Mach number and equivalence ratio on the pressure rising variation during combustion mode transition in a dual-mode combustor [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 72: 516-24.

[3] ZHANG X, WEI H, ZHOU L, et al. Relationship of flame propagation and combustion mode transition of end-gas based on pressure wave in confined space [J]. Combustion and Flame, 2020, 214: 371-86.

[4] 姚晔, 石磊, 邓康耀, 等. 瞬态 EGR 对柴油机低温燃烧切换平顺性影响 [J]. 内燃机学报, 2021, 39(01): 11-7.

Yao Y, Shi L, Deng K-Y, et al. Effect of Transient EGR on Smoothness of Low Temperature Combustion Mode Switching of Diesel Engine [J]. Transactions of Csice, 2021, 39 (01) : 11-7.

[5] 方成, 杨福源, 欧阳明高, 等. 柴油发动机燃烧模式切换控制策略 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, (4): 7.

FANG C, YANG F-Y, OUYANG M, et al. Control strategy of combustion mode switching for diesel

engine.[J].Journal of Jilin University: Engineering Edition. 2013, (4): 7.

[6] FANG C, YANG, OUYANG M, et al. Combustion mode switching control in a HCCI diesel engine [J]. Applied Energy, 2013, 110: 190-200.

[7] 孙晓军, 姚崇, 宋恩哲, 等. 船舶混合动力系统与智能能量管理控制策略研究进展(英文) [J]. 推进技术, 2022, 43(07): 24-46.

[8] 宋恩哲, 蒋中州, 姚崇, 等. 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): 388-96.

Song E-Z, Jiang Z-Z, Yao C, et al. Research on mode switching control strategy of marine diesel / natural Gas Dual Fuel Engines.[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33 (04) : 388-96.

[9] 刘晓阳, 姚崇, 王睿, 等. 船用柴油机燃烧过程控制策略设计及仿真验证 [J]. 内燃机学报, 2021, 39(03): 209-16.

Liu X-Y, Yao C, Wang R, et al. Designed and Verified the Marine Diesel Engine Combustion Process Control Strategy [J]. Transactions of Csice, 2021, 39(03): 209-16.

[10] CANOVA M, CHIARA F, COWGILL J, et al. Experimental Characterization of Mixed-Mode HCCI/DI Combustion on a Common Rail Diesel Engine [J]. Sae Technical Papers, 2007, 15.

[11] SHI L, HU W, DENG K. Effects of fuel compensation in transitional cycles on the smoothness of combustion mode switching in a diesel engine [J]. Fuel Processing Technology, 2014, 118.

[12] FENG M, JIAO X. Double closed-loop control with adaptive strategy for automotive engine speed tracking system [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2017, 31(11): 1623-35.

[13] LI J-Y, FU C-Y, XIA Y-X. Multi-closed loops strategy combined with torque correction for high precision tracking system; proceedings of the 31st Chinese Control Conference, Hefei, PEOPLES R CHINA, F 2012. Jul 25-27, 2012 [C]. 2012.

[14] 胡星睿. 船用天然气发动机转速控制器设计研究 [D]; 哈尔滨工程大学, 2020.

Hu X-R. Research on the design of marine natural gas engine speed controller [D]; Harbin Engineering University, 2020.

- [15] PUTRASARI Y, OCKTAECK L I M. A study of a GCI engine fueled with gasoline-biodiesel blends under pilot and main injection strategies [J]. *Fuel*, 2018, 221: 269-82.
- [16] 姚崇, 龙云, 马子焜. 基于 Elman 神经网络系统辨识柴油机调速算法研究 [J]. *控制工程*, 2021, 28(06): 1122-9.
Yao C, Long Y, Ma Z-K. Research on diesel engine speed control algorithm based on Elman neural network system identification [J]. *Control Engineering*, 2021, 28 (06) : 1122-9.
- [17] 肖贻鹏, 姚加飞. 天然气/柴油双燃料发动机油气切换的优化控制模型 [J]. *汽车工程*, 2007, (07): 574-7.
Xiao Y-P, Yao J-F. Optimized control model for oil-gas switching of natural gas / diesel dual fuel engine [J]. *Automotive Engineering*, 2007, (07) : 574-7.
- [18] 刘震涛, 费少梅. 天然气/柴油双燃料发动机油气切换过程的优化控制 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2004, (07): 75-8+127.
Liu Z-T, Fei S-M. Optimized control of oil-gas switching process of natural gas / diesel dual fuel engine [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Edition)*, 2004, (07) : 75-8 + 127.
- [19] 石磊, 胡玮, 邓康耀, 等. 燃油喷射补偿对柴油 CI-HCCI 燃烧模式切换过程的影响 [J]. *内燃机学报*, 2013, 31(01): 9-14.
Shi L, Hu W, Deng K-Y, et al. The effect of fuel injection compensation on the switching process of diesel CI-HCCI combustion mode [J]. *Journal of Internal Combustion Engines*, 2013, 31 (01) : 9-14.
- [20] 郑先全, 杨建国, 黄禄丰, 等. 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): 541-7.
Zheng X-Q, Yang J-G, Huang L-F, et al. Fuel mode switching of marine micro-ignition dual fuel engine [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2021, 42 (04) : 541-7.
- [21] 齐霁. 基于留一交叉验证的拟合优度比较研究 [D]; 山东大学, 2022.
Qi W. A comparative study of goodness of fit based on leave-one-out cross-validation [D] ; shandong University, 2022.
- [22] ZHANG B, ZHANG P, ZENG F. Multiobjective optimization of the cooling system of a marine diesel engine [J]. *Energy Science & Engineering*, 2021, 9(10): 1887-907.
[23] 张望. 基于 MATLAB/SIMULINK 的船用柴油机仿真研究 [D]; 武汉理工大学, 2013.
Zhang W. Simulation research of marine diesel engine based on MATLAB / SIMULINK [D] ; wuhan University of Technology, 2013.