

船用中速柴油机缸压闭环控制技术仿真研究

唐俊¹, 余永华^{1,2}, 王勤鹏^{1,2}, 杨建国^{1,2}

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 武汉 430063;

2. 武汉理工大学 船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 武汉 430063)

Simulation and Analysis of Closed-Loop Control Technology for Medium Speed Marine Diesel Engines Based on In-Cylinder Pressure

TANG Jun¹, YU Yonghua^{1,2}, WANG Qinpeng^{1,2}, YANG Jianguo^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Key Laboratory of Marine Power Engineering and Technology Granted by MOT, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: To eliminate the negative effects of cylinder-to-cylinder unevenness and cycle-to-cycle variation of marine diesel engine on engine performance, vibration and noise, taking a 6L16/24-CR type medium speed marine diesel engine as the research object, an in-cylinder pressure based closed-loop combustion control strategy was investigated with the software-in-loop simulation technology. First, an engine real-time model was established and verified, which was capable of simulating the inhomogeneity of all cylinders and cycle-to-cycle variation. The feedback variables that could indicate the combustion state of each cylinder were extracted from in-cylinder pressure, and a closed-loop combustion control strategy was developed based on the dynamic interaction between the combustion control variables and feedback variables. Next, a software-in-loop simulation platform was built on the base of the engine real-time model, feedback variables, combustion control strategy and fuel injection control variables. Finally, the simulation of the closed-loop combustion control strategy based on in-cylinder pressure was conducted on the platform. The results show that the developed closed-loop combustion control strategy based on in-cylinder pressure can meet the combustion control requirements of marine engines, and about 99% of cylinder-to-cylinder unevenness is restrained in the simulation environment.

摘要: 针对船用柴油机工作不均匀及循环波动对柴油机性能和振动噪声的负面影响问题,以 6L16/24-CR 型船用中速柴油机为对象,使用软件在环仿真技术对缸压闭环控制策略进行仿真分析。建立能模拟各缸不均匀性和循环波动的柴油机实时模型,从气缸压力中选取能指示柴油机各缸燃烧状态的反馈变量,根据反馈变量和控制变量之间的动态关系开发缸压闭环控制策略,建立由柴油机实时模型、气缸压力反馈变量、控制策略和喷油控制变量构成的软件在环仿真平台,在该软件在环仿真平台上对缸压闭环控制策略进行闭环仿真。结果表明,开发的缸压闭环控制策略能满足船用柴油机的控制要求,在仿真环境下能改善约 99% 的各缸不均匀。

收稿日期: 2018-04-20

修回日期: 2018-06-29

基金项目: 船用低速机工程(一期)研制项目(船工科【2015】510 号);设备运行与维护智能系统开发项目(工信部联装函【2016】544 号)

Fund Project: Research and Development of Marine Low Speed Engine (Phase I)(Shipbuilding Industry Department[2015]NO.510); Development of Intelligent Devices Operation and Maintenance System(Ministry of Industry and Information[2016]NO.544)

作者简介: 唐俊(1994—),男,研究生,主要研究方向为船舶动力系统监测、诊断与智能控制, E-mail: juntang@whut.edu.cn;

余永华(通信作者),男,教授,主要研究方向为船舶动力系统监测、诊断与智能控制, E-mail: yyhua@whut.edu.cn。

关键词：船用中速柴油机；闭环控制；缸压；实时模型

Key words: medium speed marine diesel engine; closed-loop control; in-cylinder pressure; real-time model

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2019.01.011

中图分类号：TK421.6 **文献标识码：**A

0 概述

柴油机加工制造过程中的误差、零部件的磨损和老化等容易使柴油机各缸工作不均匀,存在性能优化空间^[1]。传统柴油机控制系统一般基于试验标定的脉谱图对燃油喷射进行控制,不能随柴油机单缸工作状态的变化修正控制参数。气缸压力是柴油机的重要参数,能反映柴油机各缸实际工作状态,利用气缸压力信号中蕴含的丰富信息开发柴油机闭环控制策略,能使各缸工作更均匀,从而优化柴油机的整体性能。

缸压闭环控制技术最初是为解决均质充量压燃(homogeneous charge compression ignition, HCCI)模式的着火时刻和着火速度难以控制的问题提出来的。国内外学者早期针对小型发动机,特别是 HCCI 燃烧模式的发动机,进行了缸压闭环控制系统硬件的开发和简单控制策略的实机试验^[2-7]。随着缸压传感器技术的进步及其成本的降低和人们对柴油机高效、可靠和低排放的要求越来越高,船用柴油机也开始探索缸压闭环控制技术的应用。同其他类型柴油机控制系统的开发一样,考虑到实机试验的安全性和成本,船用柴油机缸压闭环控制系统在开发过程中也应进行软件在环和硬件在环仿真试验,以验证控制系统的可行性。

本文以 6L16/24-CR 型柴油机为对象,开发实时性强、功能完善的柴油机实时模型,并与控制策略模块集成,构建船用中速柴油机缸压闭环控制软件在环仿真环境,可为控制策略的可行性研究与验证提供安全、高效、便捷的平台。利用此平台研究船用中速柴油机缸压闭环控制策略对柴油机各缸工作的均匀程度和整体性能的影响规律,为之后的硬件在环仿真和实机试验提供理论依据。

1 柴油机实时模型

用于验证缸压闭环控制策略的软件在环仿真系统中,柴油机实时模型极为重要,必须能模拟各缸不均匀性和循环波动,并且在保证实时性的基础上,对喷射脉宽和喷射正时等关键参数的变化做出正确的

响应,同时能实时输出各缸缸压等控制量,与缸压闭环控制策略模块形成闭环。

1.1 柴油机系统仿真模型

6L16/24-CR 型船用中速柴油机主要技术参数见表 1。柴油机系统仿真模型采用混合控制燃烧模型来预测柴油机的燃烧过程,使用 Marsaglia-Bray 算法模拟循环波动,外加涡轮增压器、中冷器、进气系统、散热系统、动力学模块、排气系统等模块。本文仅对模型中的混合控制燃烧模型和循环波动模拟方法进行介绍。

表 1 6L16/24-CR 型柴油机主要技术参数

项目	参数
缸径/mm	160
行程/mm	240
缸数	6
压缩比	15.2
标定功率/kW	540(1 000 r/min)
燃油系统类型	高压共轨
发火顺序	1-2-4-6-5-3

1.1.1 混合控制燃烧模型

混合控制燃烧(mixing controlled combustion, MCC)模型主要考虑了缸内瞬时燃油质量和湍流动能密度对燃烧放热率的影响,并且描述了预混燃烧阶段、燃料喷射、壁面效应和燃烧延迟,可根据喷油和换气过程的变化预测柴油机的燃烧放热规律^[8-9]。

燃烧延时阶段考虑到了化学反应和湍流混合过程的时间尺度特性,由 Arrhenius 公式和 Magnussen 公式共同计算得到。之后的预混燃烧阶段反应速率采用式(1)计算。

$$\frac{dQ_{pre}}{dt} = C_{pre} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot \frac{m_{f,pre}^2}{V_{mix}} \cdot H_u \cdot e^{-\frac{k_2 \cdot T_A}{T}} \cdot (t - t_{ign})^2 \tag{1}$$

式中, Q_{pre} 为预混燃烧阶段的热量; C_{pre} 为预混燃烧放热标定参数; λ 为过量空气系数; l_0 为化学计量空燃比; $m_{f,pre}$ 为预混阶段燃料质量; V_{mix} 为燃料喷射体积; H_u 为燃料低热值; k_2 和 T_A 为 Arrhenius 放热模型常数; T 为缸内温度; $(t - t_{ign})$ 为燃料引燃后的时间长度。

在柴油机的主要燃烧阶段,即扩散燃烧阶段,模型考虑了燃料质量和湍流动能强度等因素的影响。用函数拟合了燃料喷射产生的壁面效应影响因子曲线,用来描述燃料碰壁产生的燃烧延迟。通过假设氧气质量浓度和燃烧放热率线性相关,根据燃烧始点缸内的氧气质量浓度计算得到废气再循环对燃烧的影响因子,如式(2)所示。

$$\frac{dQ_{diff}}{dt}=C_{comb} \cdot \left[\frac{a-b}{1+e^{-\frac{\varphi-\varphi_{wall}}{\arctan(\alpha)}}}+b \right] \cdot \frac{\lambda_{soc}}{\lambda_{ref}} \cdot$$
$$H_u \cdot m_{f,diff,net} \cdot \frac{\sqrt{k}}{\sqrt[3]{V_{cyl}}} \tag{2}$$

式中, Q_{diff} 为扩散燃烧阶段的热量; C_{comb} 为扩散燃烧放热标定参数,需要通过试验来标定,其随转速增加而减小; a 、 b 、 α 为壁面效应影响因子曲线拟合函数的系数; φ 为发动机曲轴转角; φ_{wall} 为喷雾贯穿距决定的碰壁时刻的曲轴转角; λ_{soc} 为燃烧始点缸内的氧气质量浓度; λ_{ref} 为新鲜工质的氧气质量浓度; $m_{f,diff,net}$ 为扩散燃烧阶段燃料质量; k 为湍流动能强度; V_{cyl} 为气缸容积。

1.1.2 循环波动模拟方法

由于柴油机的各项燃烧状态参数均服从高斯分布^[10],本文采用 Marsaglia-Bray 算法对喷油和换气过程等直接影响燃烧状态的边界条件和初始条件做高斯分布处理,模拟柴油机运行过程中的随机波动。该方法由 Box-Muller 算法改进而来,最后可简单表示为式(3)。

$$Y=v_1 \left[-2\ln(v_1^2+v_2^2)/(v_1^2+v_2^2) \right]^{1/2} \tag{3}$$

式中, Y 为生成的服从高斯分布的随机数; v_1 、 v_2 为一对相互独立的在 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数,且要求 v_1+v_2 小于 1。

该方法无需使用三角函数,计算速度是 Box-Muller 方法的两倍,程序语言实现更简单,且需要的储存空间更少^[11]。

1.2 模型验证

图 1 为 1 000 r/min 各负荷下缸压仿真计算值和实测值的对比。除在低压部分测试数据本身因为传感器的限制存在一定测量误差外,其余仿真值和测试值的误差均在 5%以内,因此该实时模型能够较好地反映柴油机各项性能。

为了保证控制器在每个步长后都能获得更新后的数据,且被控对象能对控制信号及时作出响应,需要保证柴油机模型的实时性。采用实时因子作为实时性判别的标准。实时因子是指 CPU 运算所花时间与模型仿真设定时间的比值,其值小于 1,表示模

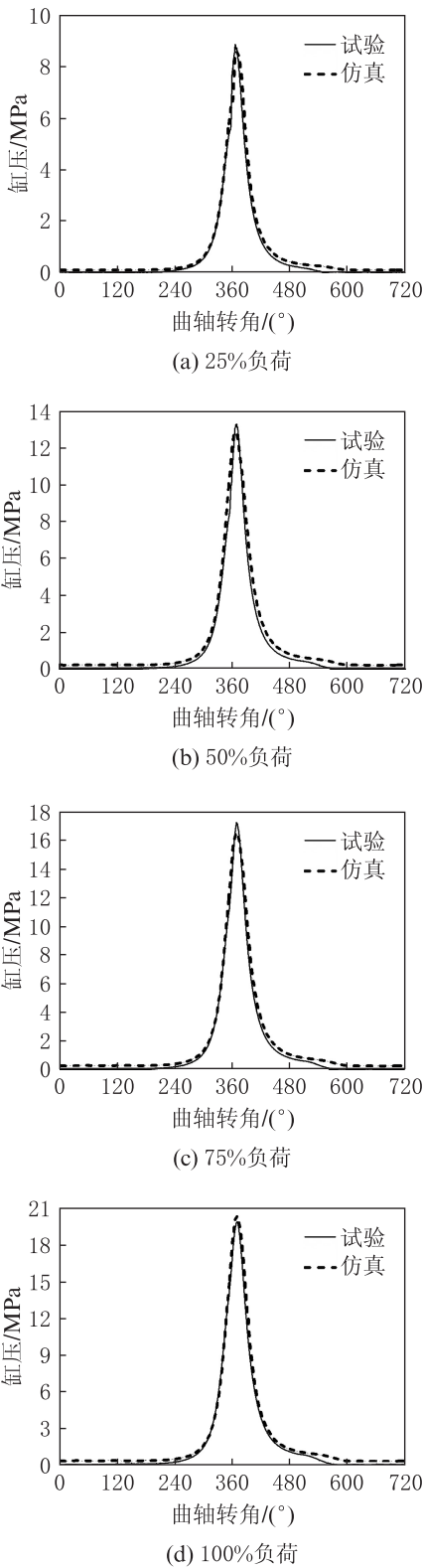


图 1 1 000 r/min 不同负荷下缸压仿真计算值和实测值对比

型计算比真实柴油机实际工作更快。所开发模型在标定转速下的实时因子如图 2 所示,最大值为 0.812,平均值为 0.665,均小于 1,满足控制策略验证的实时性要求。本研究中仿真计算机 CPU 配置为 Xeon 2.3 GHz。

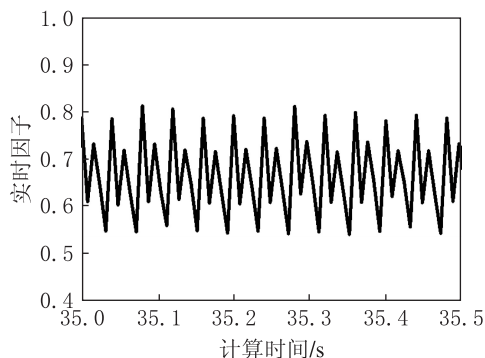


图2 标定转速下实时模型的实时因子

2 反馈变量和控制变量

气缸压力信号中能提取出很多燃烧状态指标。从中选取的用于柴油机燃烧控制的反馈变量,一方面要尽可能地反映缸内燃烧过程全貌,最好能与柴油机的动力性、经济性和排放直接相关;另一方面,承载的信息也要具有可靠、易获得、精度高等特点^[12]。

平均指示压力(IMEP)能直接指示燃烧的动力性和经济性,因此控制 IMEP 能减少各缸做功的不均匀性^[13],且 IMEP 计算过程中采用了积分运算,能减少随机误差带来的影响,数据可靠性高。

50%燃烧放热量相位(CA50)是柴油机燃烧过程中十分重要的相位参数,该参数距离上止点的位置对循环热效率、压力升高率和最高燃烧压力等燃烧状态参数都有着重要影响^[14],不少研究还发现 CA50 与排放之间存在关联。CA50 的计算方法有很多,本文以发动机燃烧净放热量达到 50%时的曲轴转角为 CA50。燃烧净放热量计算见式(4),由每度曲轴转角的燃烧净放热量积分得来,数据稳定性好,且计算精度高。选择 CA50 作为指示缸内燃烧相位的闭环反馈量。

$$Q = \int \frac{dQ}{d\theta} d\theta = \int \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot p \cdot \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} \cdot V \cdot \frac{dp}{d\theta} \right) d\theta \quad (4)$$

式中, Q 为燃烧净放热量; θ 为发动机的曲轴转角; γ 为比热比,一般取为常数 1.37; p 为当前曲轴转角下对应的缸压; V 为当前曲轴转角下对应的气缸容积。

喷射脉宽和喷射正时是电控柴油机的基本控制量,且每缸都可以单独控制。控制参数中的喷油脉宽与 IMEP 的大小直接相关,喷油正时的变化也直接影响到 CA50 的大小,因此选择发动机的喷射脉宽和喷射正时作为缸压闭环控制系统的控制变量。

3 缸压闭环控制策略

通过采集和处理系统,能从柴油机各缸的气缸压力中实时提取出反映各缸不同工作状态的实际 IMEP 和实际 CA50。但是实际 IMEP 和喷射脉宽之间的关系比较复杂,并且随工况和喷射正时等的不同而变化,特别是在瞬态工况下,实际 CA50 也同时受到喷射脉宽和工况的影响,因此提取到的反馈变量不便于直接用于柴油机控制。研究表明,当喷射正时在一个较小的范围内波动时,对 IMEP 的影响较小,可将原本耦合的 IMEP 和 CA50 简化为两个独立的控制系统^[6]。因此 CA50 的控制采用前馈的方法使喷射正时在喷射正时前馈脉谱图的标定值附近波动,实现 IMEP 和 CA50 控制的解耦,也能满足瞬态响应的要求。

各缸缸压闭环控制策略结构如图 3 所示。IMEP 的控制首先采用转速 PID 控制器控制喷射脉宽,以减少柴油机实际转速和目标转速之间的稳态误差,也解决了瞬态工况下实际 IMEP 和喷射脉宽之间关系复杂、难以控制的问题。然后各缸根据实际 IMEP 和特征参数目标脉谱标定的 IMEP 使用 PID 控制器对转速 PID 控制器确定的喷射脉宽进行修正。CA50 的控制中,首先通过目标转速和上一个循环的修正后的喷射脉宽查询喷射正时前馈脉谱图,得到喷射正时,再根据特征参数目标脉谱图标定的 CA50 和实际 CA50 使用 PID 控制器对前馈脉谱图确定的喷射正时进行修正,使每缸都工作在标定值附近。

在该控制策略中,若图 3 中①所示的喷油脉宽由于柴油机转速 PID 控制器故障而数据异常,此时柴油机瞬态工况性能会受到影响,但是仍可由缸压闭环控制正常运行;当图 3 中②和④所示的喷射修正量由于气缸压力传感器损坏或者 IMEP 和 CA50 的 PID 控制器故障等而输出异常时,柴油机可仅由转速闭环控制运行。缸压闭环控制和转速闭环控制两种控制模式互为冗余,可提高控制系统的可靠性和鲁棒性。

为了实现更好的响应特性,控制策略中的 PID 控制器参数根据工况变化而分段,且没有引入微分值。在标定转速 75% 负荷下,转速、IMEP 和 CA50 PID 控制器的比例系数分别为 0.005、0.010、0.100,积分系数分别为 0.001 1、0.005 0、0.050 0。根据该型号柴油机设计时对燃烧、油耗、排放综合分析的结果^[15]可知,标定转速 75% 负荷下,标定喷射正时前馈脉谱图中的值为上止点前 10° 曲轴转角,特征参数目标脉谱图中的目标 IMEP 为 1.79 MPa,目标 CA50 为上止点后 21.55° 曲轴转角。

喷油控制变量之间的关系建立了软件在环仿真平台,在该平台上对缸压闭环控制策略进行验证试验。

4.2.1 基础控制功能验证

4.2.1.1 起动和怠速工况

图6为起动和怠速工况的瞬时转速和循环喷油量曲线。当柴油机转速到达150 r/min时喷油器开始喷油;当转速到达600 r/min时起动过程结束,进入怠速工况。从柴油机起动到以怠速平稳运行,耗时5.5 s,且从起动工况到怠速工况过渡平稳,怠速工况下转速波动率小于1%。

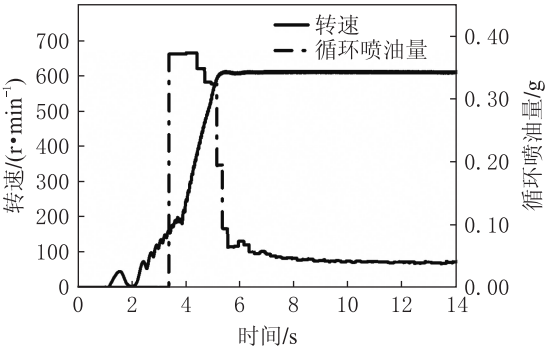


图6 起动和怠速工况

4.2.1.2 突加和突减负荷工况

如图7所示,在标定转速空载时,转速稳定在1001 r/min;在分别突加50%负荷后,突卸100%负荷,柴油机仍能稳定在1000 r/min,且稳态调速率、瞬态调速率和稳定时间符合船级社对船舶柴油机的转速控制要求。

4.2.2 各缸不均匀性控制功能验证

以船用柴油机的常用工况,标定转速75%负荷为例,柴油机稳定运行后,第5 s之前采用缸压闭环控制模式,第5 s之后切换为传统的转速闭环控制模式,采集到的各缸CA50和IMEP如图8所示。柴油机在缸压闭环控制模式下工作时,各缸的IMEP和CA50的离散程度明显小于在转速闭环控制模式下工作,具体标准差变化如表3和表4所示。

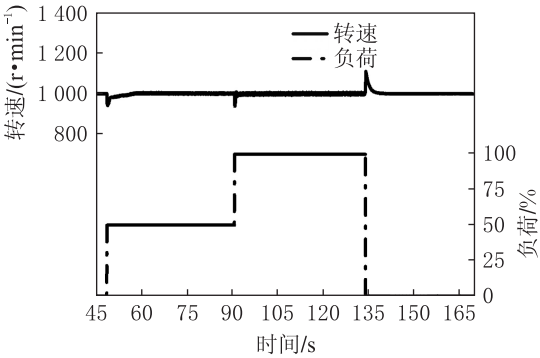


图7 标定转速下突加和突减负荷

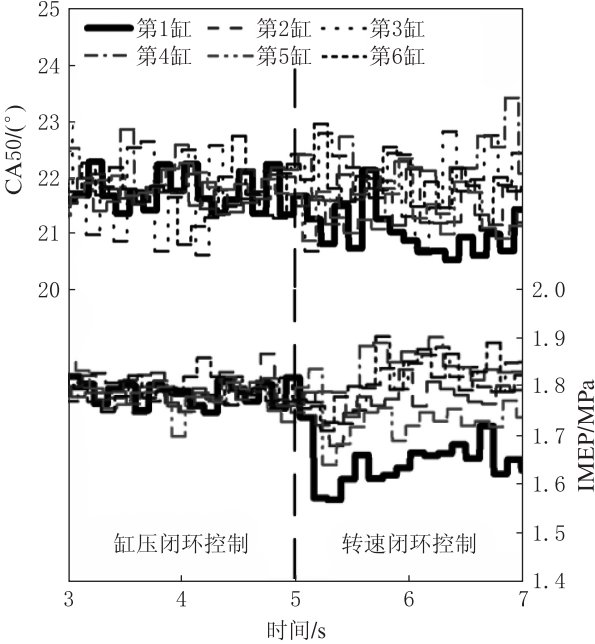


图8 75%负荷下转速闭环控制和缸压闭环控制各缸燃烧特征参数对比

从表3和表4可以看出,两种控制模式下柴油机燃烧特征参数的平均值差别不大,但是当柴油机在缸压闭环控制模式下工作时,CA50的标准差只有转速闭环控制模式下的1%,IMEP的标准差甚至不到转速闭环控制模式下的1%。

表3 75%负荷下两种控制模式CA50对比

控制模式	CA50/(°)							标准差
	第1缸	第2缸	第3缸	第4缸	第5缸	第6缸	平均值	
转速闭环控制	20.802	21.551	21.795	22.040	21.309	21.791	21.548	0.442
缸压闭环控制	21.548	21.554	21.557	21.547	21.547	21.552	21.551	0.004

表4 75%负荷下两种控制模式IMEP对比

控制模式	IMEP/MPa							标准差
	第1缸	第2缸	第3缸	第4缸	第5缸	第6缸	平均值	
转速闭环控制	1.662 0	1.792 0	1.826 0	1.861 0	1.747 0	1.826 0	1.786 0	0.072 0
缸压闭环控制	1.785 0	1.786 0	1.786 0	1.785 0	1.785 0	1.786 0	1.785 0	0.000 3

用标准差和平均值之比,即变异系数来评价柴油机的各缸不均匀的程度。图 9 为柴油机在标定转速下工作,分别使用转速闭环和缸压闭环控制柴油机在不同负荷下运行时,燃烧特征参数变异系数的对比。在各个负荷下,采用缸压闭环控制的方法,柴油机各缸 CA50 和 IMEP 的变异系数均减小了约 99%。

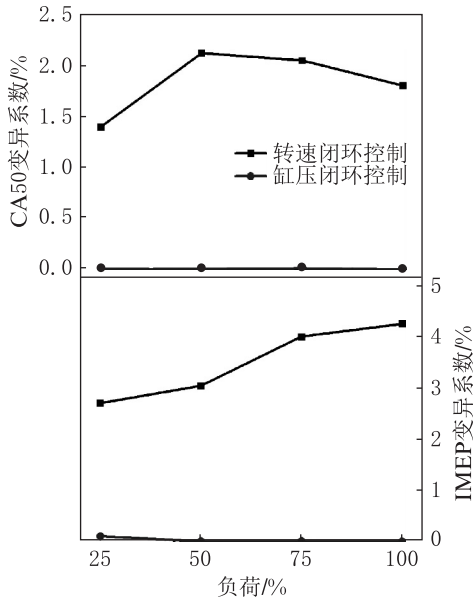


图 9 各负荷下转速闭环控制和缸压闭环控制的燃烧特征参数变异系数对比

5 结论

(1) 利用 MCC 燃烧模型和 Marsaglia-Bray 算法搭建的柴油机实时模型,除在低压部分外,其余仿真值和测试值的误差均在 5% 以内,能够较好地反映柴油机各项性能,且实时因子平均值为 0.665,均小于 1,满足船用中速柴油机缸压闭环控制系统验证需求的精度和实时性。

(2) 缸压闭环控制能满足船用柴油机的逻辑功能,包括起动控制、负荷调节控制等,且稳态调速率、瞬态调速率和稳定时间均符合船级社对船舶柴油机的转速控制要求。

(3) 船用中速柴油机在各个负荷下,采用缸压闭环控制的方法,能将 CA50 和 IMEP 的变异系数减小 99% 左右,大幅改善柴油机的各缸不均匀性。

参考文献:

[1] DING S, YANG L, SONG E, et al. Investigations on in-cylinder pressure cycle-to-cycle variations in a diesel engine by recurrence analysis[C/OL]. SAE Paper, 2015, 2015-01-0875. (2015-04-14) [2018-02-18]. <https://doi.org/10.4271/2015-01-0875>.

[2] OLSSON J O, TUNESTAL P, JOHANSSON B. Closed-loop control of an HCCI engine[C/OL]. SAE Paper, 2001, 2001-01-1031. (2001-03-05) [2018-02-18]. <https://doi.org/10.4271/2001-01-1031>.

[3] STRANDH P, BENGTTSSON J, JOHANSSON R, et al. Cycle-to-cycle control of a dual-fuel HCCI engine[C/OL]. SAE Paper, 2004, 2004-01-0941. (2004-03-08) [2018-02-18]. <https://doi.org/10.4271/2004-01-0941>.

[4] 杨福源,杨雨平,欧阳明高,等.柴油机基于缸压的闭环反馈控制技术[J].内燃机学报,2012,30(2):172-178.
YANG F Y, YANG Y P, OUYANG M G, et al. Research on close-loop control strategy of diesel engine based on in-cylinder pressure[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(2):172-178.

[5] 黄颖.面向柴油机燃烧闭环控制的新一代控制平台研究及应用[D].北京:清华大学,2010.

[6] 方成,杨福源,欧阳明高,等.使用缸压信息的柴油机低温燃烧闭环控制[J].清华大学学报(自然科学版),2013,53(3):371-377.
FANG C, YANG F Y, OUYANG M G, et al. Closed-loop control of low temperature combustion in diesel engines with cylinder pressure information [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(3):371-377.

[7] 倡庆涛.基于缸压反馈的柴油发动机控制研究[D].长春:吉林大学,2014.

[8] POETSCH C. Crank-angle resolved modeling of fuel injection and mixing controlled combustion for real-time application in steady-state and transient operation [C/OL]. SAE Paper, 2014, 2014-01-1095. (2014-04-01) [2018-02-18]. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1095>.

[9] KATRASNİK T, LUND H, KAISER M J. An advanced real-time capable mixture-controlled combustion model[J]. Energy, 2016, 95:393-403.

[10] KIM K S, GHANDHI J. A simple model of cyclic variation[C/OL]. SAE Paper, 2012, 2012-32-0003. (2012-10-23) [2018-02-18]. <https://doi.org/10.4271/2012-32-0003>.

[11] MARSAGLIA G, BRAY T A. A convenient method for generating normal variables[J]. SIAM Review, 1964, 6(3): 260-264.

[12] 王金力.基于缸压的燃烧闭环控制技术进展[C]//保定:中国内燃机学会燃烧净化节能分会学术年会,2013.
WANG J L. Development of closed-loop control technology based on cylinder pressure[C]//Baoding: Annual Meeting of CSICE Combustion Purification and Energy Saving Branch, 2013.

[13] CHUNG J, MIN K, OH S, et al. In-cylinder pressure based real-time combustion control for reduction of combustion dispersions in light-duty diesel engines[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99:1183-1189.

[14] ZHANG Y, SHEN T. Cylinder pressure based combustion phase optimization and control in spark-ignited engines[J]. Control Theory & Technology, 2017, 15(2):83-91.

[15] 韩冬.船用中速高压共轨电控喷油柴油机性能预测研究[D].武汉:武汉理工大学,2015.