

高压共轨柴油机缸压闭环控制系统开发及试验

余永华^{1,2}, 张东山¹, 杨建国^{1,3}

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063; 2. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430063; 3. 船舶与动力工程技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 针对高压共轨柴油机各缸工作不均匀的问题, 以 CA4DLD18E5 高压共轨柴油机为对象, 采用缸压闭环控制技术开发了一套由基础控制器(BC)和缸压闭环快速原型控制器(PRPC)组成的缸压闭环控制系统。PRPC 采集各缸的缸压, 计算燃烧特征参数 IMEP 和 CA50, 按缸压闭环控制策略将各缸修正后的喷油正时和喷油脉宽发送给 BC, 实现缸压闭环控制。PRPC 最大运行时间小于 200 ms, 在 BC 完成一次喷油控制时间范围之内, 满足实时性要求。台架实机验证结果表明: 开发的缸压闭环控制系统能有效减小各缸燃烧特征参数变异系数 17.8%, 达到降低各缸工作不均匀性的目的。

关键词: 柴油机; 缸压闭环控制; 控制策略; 燃烧特征参数

中图分类号: TK421.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)01-0009-06

Development and Test of In-Cylinder Pressure Closed-Loop Systems for High Pressure Common-Rail Diesel Engines

Yu Yonghua^{1,2}, Zhang Dongshan¹, Yang Jianguo^{1,3}

(1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063;
2. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System, Hubei Wuhan 430063;
3. Key Laboratory of Marine Power Engineering & Technology, Hubei Wuhan 430063)

Abstract: Aiming at the problem of uneven operation of cylinders in high pressure common rail diesel engines, a CA4DLD18E5 high pressure common rail diesel engine was studied. A control system composed of basic controller (BC) and in-cylinder pressure rapid prototype controller (PRPC) was developed based on in-cylinder pressure closed-loop control technology. The PRPC collected the cylinder pressure of each cylinder, calculated the combustion characteristic parameters of IMEP and CA50, and sent the corrected injection timing and injection pulse width of each cylinder to BC according to the closed-loop control strategy of cylinder pressure to realize closed-loop control of in-cylinder pressure. The maximum operating time is less than 200 ms and within the fuel injection operation interval of BC, which can meet the real-time control requirements. The results of bench test show that the developed closed-loop control system of cylinder pressure can effectively reduce the variation coefficient of combustion characteristic parameters of each cylinder by 17.8%, and lower the operation unevenness of each cylinder.

Key words: diesel engine; in-cylinder pressure closed-loop control; control strategy; combustion characteristic parameter

收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2020-03-09

基金项目: 船用低速机工程(一期)研制项目(船工科【2015】510号)。

作者简介: 余永华(1975—), 教授, 主要研究方向为船舶动力系统监测、诊断与智能控制, yyhua@whut.edu.cn。

0 引言

近年,发动机的节能减排和振动噪声特性日益受到重视。国际海事组织分别于 2014 年和 2016 年发布了相应法规,对发动机氮氧化物排放和运行噪声实施更为严苛的法规^[1-5]。而发动机各缸的工作不均匀性是影响发动机排放和噪声的原因之一。

柴油机缸压信号蕴含丰富的信息,从缸压信号中提取能反映缸内工作状态的燃烧特征参数,对柴油机实施分缸控制,可减小各缸工作不均匀性。我国对缸压闭环控制的研究均是从 HCCI 发动机起步,逐渐从汽油机向柴油机推广。目前,柴油机缸压闭环控制的研究主要集中在软件或硬件在环仿真平台下控制策略的研究^[6],或以通用性的硬件平台为主的试验研究^[7]。本文以锡柴 CA4DLD18E5 型柴油机为对象,开发了一套由基础控制器(Basic Controller, BC)和缸压闭环快速原型控制器(In-cylinder Pressure Rapid Prototype Controller, PRPC)组成的缸压闭环控制系统。其中 PRPC 负责:采集、分析和处理各缸缸压,计算 IMEP 和 CA50 燃烧特征参数;并按缸压闭环控制策略,将各缸修正后的喷油正时和喷油脉宽发送给 BC,实现缸压闭环控制。最后通过柴油机台架试验验证控制策略的可行性,达到提高柴油机各缸工作一致性的目的。

缸压闭环控制系统要对大量缸压信号进行处理,须要在保证控制实时性的前提下,满足控制精度的要求。本文在前人缸压反馈控制软件在环和硬件在环验证的基础上,对缸压闭环控制算法进行优化,并根据实机验证需求,对缸压闭环控制系统的整体框架和软硬件进行设计。

1 柴油机缸压闭环控制系统整体设计

1.1 研究对象

CA4DLD18E5 型柴油机为符合国 V 排放标准的 4 缸高压共轨柴油机,其主要技术参数如表 1 所示。为满足缸压闭环控制需求,在每个缸盖上加工出缸压测量通道,并安装 Kistler6052 型压电式缸压传感器。

表 1 CA4DLD-18E5 型柴油机技术参数

气缸直径/mm	108	有无 EGR 阀	有
冲程数	4	压缩比	17.5
额定功率/kW	134	总排量/L	4.4
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	2 500	发火顺序	1-3-4-2
活塞行程/mm	120	最高燃烧压力/MPa	21

1.2 控制系统整体设计

缸压闭环控制系统对柴油机整体工况进行柔性控制,须获取柴油机实时状态信息以实现最优控制。为了更便捷地获取柴油机状态信息和提高控制系统的可移植性,要求缸压闭环控制系统既能对柴油机当前运行工况进行判断,以确定是否须要实施缸压闭环控制;又能采集缸压数据,分析各缸状态,对喷油正时和喷油脉宽做修正,达到减小各缸工作不均匀性的控制目的。本文缸压闭环控制系统采用两块控制器协同控制,整体框架如图 1 所示。BC 主要采集机载传感器信号。按照控制需求,可分为传感器处理模块、位置管理模块、扭矩控制模块、轨压控制模块和喷射控制模块等,实现柴油机的基础控制。PRPC 采集各缸的缸压信号和必要的位置信号,对各缸工作不均匀性进行判断,输出各缸的喷油正时和喷油脉宽的修正值,以 CAN 报文的形式传输至 BC 中,参与柴油机各缸喷油控制,以减小各缸工作不均匀性。PRPC 包括:信号处理模块、缸压计算模块、缸压控制策略模块和油量修正模块等。

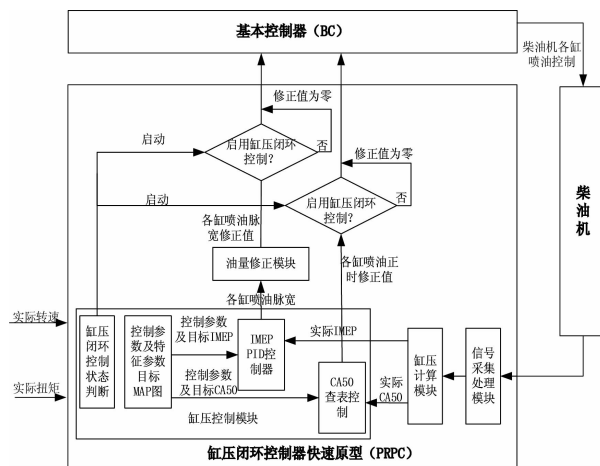


图 1 缸压闭环控制系统整体框架图

2 基础控制器开发

由于 CA4DLD18E5 型柴油机原机 ECU 通信接口已经固化,难以扩展,无法与 PRPC 进行数据通信,因而须开发与原机 ECU 功能一致、接口易扩展、开放式的 BC,替换原机 ECU。该 BC 的开发主要聚焦控制策略的实现和原机 MAP 数据的获取。

2.1 控制策略实现

在武汉锐科有限公司的控制器的基础上二次开发,以实现 BC 控制策略。主要控制模块如图 2 所示。

传感器处理模块对相应信号处理后传输至相应

模块；位置管理模块根据曲轴及凸轮轴信号确定柴油机转速及相位信息，为柴油机基础控制器内部控制策略提供位置基准；扭矩控制模块根据柴油机当前负荷确定柴油机扭矩，通过喷射控制模块转化为各缸喷油脉宽及喷油正时信号，并传输至各缸喷油器；轨压控制模块实时监测高压共轨管的油压，通过控制共轨管计量阀的开度保持轨压稳定。

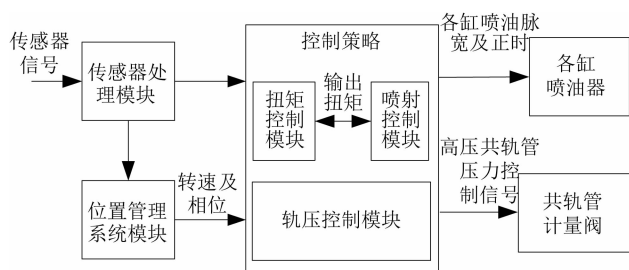


图2 基础控制器主要模块

2.2 原机 MAP 数据获取

为使柴油机在基础控制器控制下的性能与原机一致，须获取原机 MAP 关键数据。包括原机全工况下高压共轨管的轨压、预喷和主喷时长和喷油正时，以及柴油机曲轴和凸轮轴相位信息。以主喷时长为例，通过原机 ECU 并联的方式获取的 MAP 数据如图 3 所示。

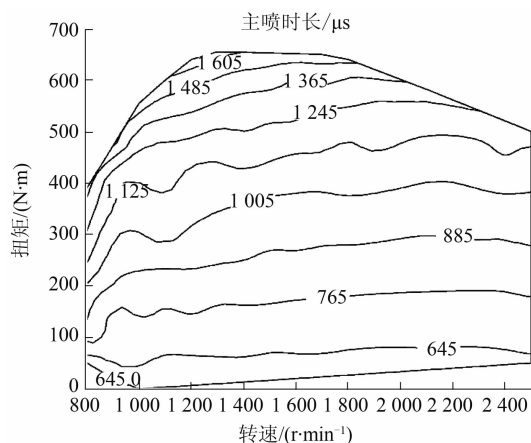


图3 全工况主喷时长 MAP 图

3 缸压闭环快速原型控制器开发

PRPC 基于 MPC5634 单片机硬件平台，其基础框架如图 4 所示。增强定时处理模块 eTPU 采集曲轴转角信号，柴油机每一转 141 个脉冲，每个脉冲上升沿和下降沿对 eMIOS 模块的四路缸压信号进行触发采集，形成缸压数组 buffer，存储于 Flash 内存中。PRPC 每采集二次上止点信号，中断处理器发送一次中断请求，将 Flash 内存中缸压信号 buffer 数组送至缸压闭环控制程序；通过程序计算

出各缸喷油正时和喷油脉宽修正值，经 FlexCAN 模块传输至 BC，参与喷油控制，并对缸压数组 buffer 进行复位，以助下一次缸压信号数组采集。

3.1 基本原理

缸压闭环控制的基本原理是从缸压信号中提取有效的特征参数，通过对影响相关特征变量的发动机执行机构的控制，实现发动机的闭环控制。

3.1.1 缸压信号采集

实时采集和准确处理缸压信号是实现缸压闭环控制的先决条件。为了保证采集的缸压与曲轴转角位置信号一一对应，本文采用上止点与曲轴转角信号触发的等角度采样，采用 MPC5634 的增强定时处理模块 eTPU 完成定时相关的硬件 I/O 端口处理任务，不须要处理器的参与，可以对定时信号做高速和复杂的处理。曲轴转角信号用于对缸压信号的触发采集；上止点信号用于工作循环的复位。

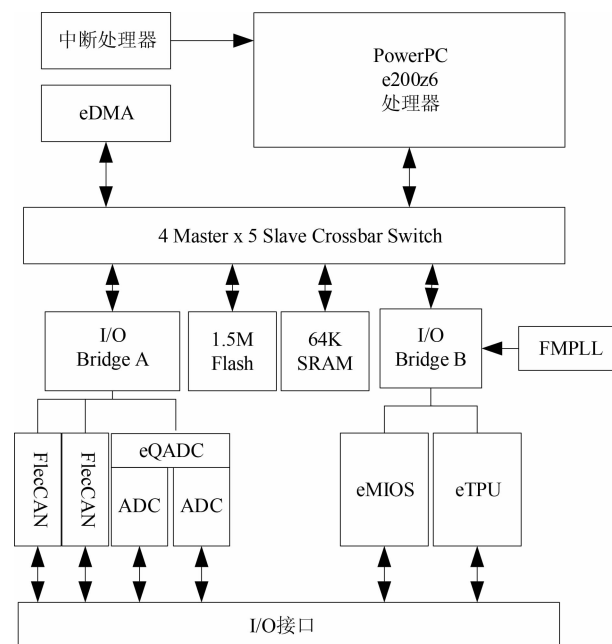


图4 缸压闭环快速原型控制器硬件框架图

3.1.2 反馈变量和控制变量

柴油机的缸压富含多种信息，从缸压信号可得到很多燃烧状态参数。而每个燃烧特征参数反映的信息及获取的难度各不相同，须要从这些燃烧状态特征参数中找到最符合缸压闭环控制需求的反馈变量。缸压闭环控制系统选用平均指示压力（IMEP）和 50% 燃烧放热量相位 CA50 作为反馈变量。二者计算可靠性高，已经广泛应用在各种缸压反馈控制算法中^[8]。其计算公式如式（1）和式（2）所示。

$$p_{IMEP} = \frac{1}{V_d} \int p \frac{dV}{d\theta} d\theta \quad (1)$$

式中： V_d 为发动机气缸工作容积， m^3 ； p 为缸压，

MPa; θ 为曲轴转角, ($^{\circ}$)。

$$Q = \int \frac{dQ}{d\theta} d\theta = \int \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{d\theta} \right) d\theta \quad (2)$$

式中: γ 为比热比, 工程热力学中一般取为常数, 1.37; Q 为燃烧总放热量, J。

3.2 PRPC 控制策略开发

缸压闭环快速原型控制器采用 MPC5634 单片机为硬件平台。内部的控制策略采用 Matlab/Simulink 基于模型的设计方法, 对缸压闭环快速原型控制器进行开发。

缸压闭环快速原型控制器应用层软件是缸压闭环控制系统的核心, 通过实时获取柴油机各缸的缸压信号, 从缸压中计算得到能指示柴油机各缸燃烧状态的反馈变量——IMEP 和 CA50。当柴油机处于小负荷变化时, 可将原本耦合的 IMEP 和 CA50 简化为两个独立的控制系统, IMEP 控制各缸的喷油量, CA50 对各缸喷油器的喷射相位进行修正^[8]。两个独立的控制系统分别采用经典 PID 控制和查表算法。缸压闭环控制策略主要分为 4 个功能模块, 分别是信号处理模块、缸压计算模块、缸压控制模块和油量修正模块。

(1) 信号处理模块

由于受噪声的干扰, 采集上止点的偏差以及发火顺序的影响, 缸压传感器采集到的实际缸压信号须经信号处理模块做滤波以及相位平移运算处理, 以便将各缸的缸压信号转化为连续、光滑的标准缸压数据。

考虑到控制器实时性和调试的要求, 信号处理模块采用二阶低通滤波器, 并将滤波参数和上止点的偏移量设置为标定变量, 方便后期实机验证调试。

(2) 缸压计算模块

缸压计算模块将各缸的标准缸压信号转化为能反映各缸燃烧状态的反馈变量: CA50 和 IMEP。缸压闭环控制程序的主要功能是对 IMEP 和 CA50 计算公式做离散化处理。

(3) 缸压控制模块

缸压控制模块是缸压闭环控制策略的核心部分, 它包含两个功能: 一个功能是根据转速、扭矩等输入信号对柴油机状态做评估判断, 判断是否启用缸压闭环控制。另一个功能是将缸压计算模块得到的 IMEP 和 CA50 作为反馈变量, 计算当前工况理想值的插值, 再通过查表和 PI 控制, 计算得到柴油机各缸喷油正时和喷油脉宽的修正值, 从而达到减小各缸工作不均匀性的目的。

(4) 油量修正模块

该模块的主要目的是调整各缸的喷油脉宽修正值, 防止由于柴油机总喷油量突增和突减导致扭矩不稳定的现象。经该模块处理修正后的各缸喷油量总修正量为零, 以保证柴油机循环总喷油量稳定。

采用 Matlab/Simulink 基于模型开发的缸压闭环控制策略整体如图 5 所示。

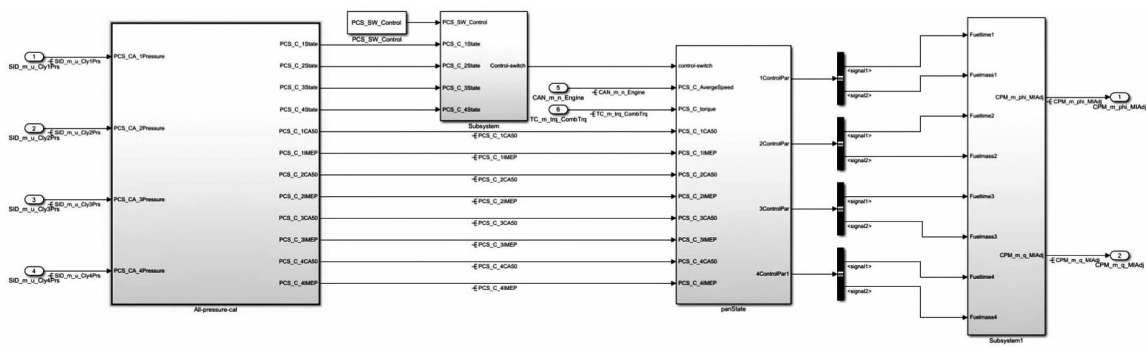


图 5 缸压闭环控制策略图

4 台架实机验证

实机试验主要验证: 缸压闭环控制系统是否能正常采集缸压数据; 是否能根据采集的缸压信号得到各缸喷油脉宽和喷油正时的修正值; 以及系统的实时性。

4.1 缸压采集验证

实时采集缸压信号是实现缸压闭环控制的

前提, 因此须对 PRPC 采集缸压信号功能进行验证。考虑到 CAN 总线的负载, 将存储于 Flash 的 1 缸 buffer 缸压数组每隔 9 个数据通过 Flex-CAN 模块对外传输 1 个数据, 即一个工作循环等角度采集 1 缸 60 个缸压信号, 与示波器采集的缸压信号对比。以柴油机转速 900 r/min, 20% 油门负荷工况为例, 对比结果如图 6 所示。可以发现: 最大单点缸压误差小于 10%, 平均

缸压误差小于 5%。缸压闭环控制采用 PI 控制和查表控制，硬件在环结果表明：缸压闭环控制系统计算精度最大误差小于 5%，可以满足缸压闭环系统的控制要求^[9]。

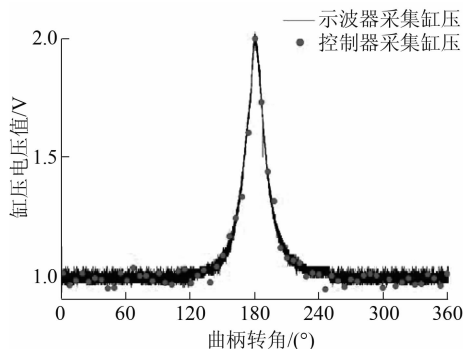


图 6 缸压信号对比图

4.2 缸压闭环控制实时性

MPC5634 单片机中内置时钟寄存器，对缸压闭环快速原型控制器的运行时间进行监控。由于缸压闭环控制策略代码集成于 200 ms 定速率回调函数中，通过 200 ms 任务执行时间变量对缸压闭环控制策略进行实时性监测。柴油机转速 900 r/min，20% 油门负荷工况下，缸压闭环控制策略最大运行时间为 30 ms。统计缸压闭环控制系统在柴油机 900 ~ 1 800 r/min 的运行时间，最大运行时间不超过 200 ms，小于基础控制器喷油控制时间间隔，表明其满足实时性要求。

4.3 缸压闭环控制效果

为了验证缸压闭环控制的效果，选择转速 900 r/min，20% 油门负荷工况，以第 1 缸和第 2 缸为控制对象。试验时柴油机先稳定运行一段时间，记录 4.5 s 内的燃烧特征参数，然后开启缸压闭环控制，运行 5 s，观测第 1 缸和第 2 缸 IMEP 和 CA50 的变化。

PRPC 与 BC 的通信速率为 500 kbit/s，图 7 和图 8 分别为缸压闭环控制前后的 IMEP 和 CA50 的对比图。

通过变异系数来评价柴油机 1 缸和 2 缸的不均匀程度。具体计算如式 (3)。

$$\text{CoV} = \frac{\sigma}{\text{ave}} \quad (3)$$

式中：CoV 为变异系数； σ 为燃烧特征参数的标准偏差；ave 为燃烧特征参数的平均值。

基于该评价指标，柴油机转速 900 r/min，20% 油门负荷工况下，通过缸压闭环控制，1 缸和 2 缸的燃烧特征参数变异系数减小 17.8%。

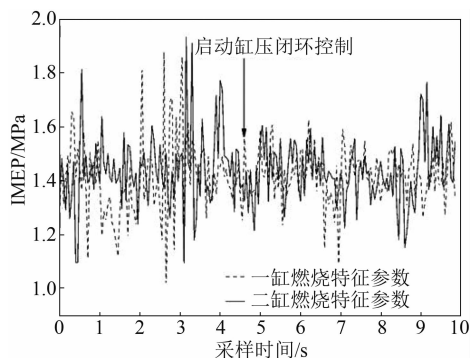


图 7 IMEP 缸压闭环控制前后对比

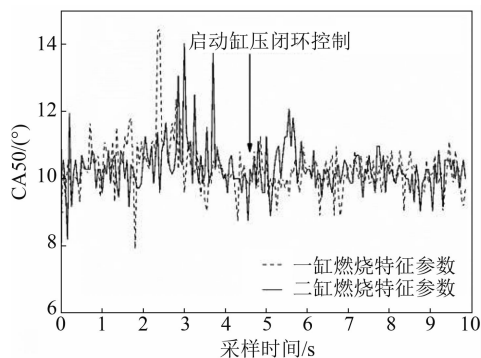


图 8 CA50 缸压闭环控制前后对比

5 结论

本文针对高压共轨柴油机各缸工作不均匀性问题，开发了缸压闭环控制系统。该缸压闭环控制系统由柴油机基础控制器和缸压闭环快速原型控制器构成。缸压闭环控制系统根据缸压信号提取燃烧特征参数 CA50 和 IMEP，实现对柴油机喷油器的分缸控制。

台架实验验证表明：所开发的缸压闭环控制系统能实时采集各缸缸压，且满足控制精度要求；在柴油机 900 ~ 1 800 r/min 转速下，最大运行时间不超过 200 ms，满足控制实时性要求。缸压闭环控制系统能够有效减小柴油机各缸燃烧特征变异系数 17.8%，达到减小柴油机各缸工作不均匀的目的。

参考文献

- [1] PAYRI F, BROATCH A, TORMOS B, et al. New methodology for in-cylinder pressure analysis in direct injection diesel engines—application to combustion noise [J]. Measurement Science & Technology, 2005, 16 (2): 540.
- [2] WILLEMS F, DOOSJE E, ENGELS F, et al. Cylinder pressure-based control in heavy-duty EGR diesel engines using a virtual heat release and emission sensor [J]. SAE Technical Papers, 2010.
- [3] SELINAU M C, MATEKUNAS F A, Battiston P A,

et al. Cylinder-pressure-based engine control using pressure-ratio-management and low-cost non-intrusive cylinder pressure sensors [J]. SAE Technical Papers, 2000.

- [4] TORREGROSA A J, BROATCH A, NOVELLA R, et al. Suitability analysis of advanced diesel combustion concepts for emissions and noise control [J]. Energy, 2011, 36 (2): 825-838.
- [5] PRUVOST L, LECLÈRE Q, PARIZET E. Diesel engine combustion and mechanical noise separation using an improved spectrofilter [J]. Mechanical Systems & Signal

Processing, 2009, 23 (7): 2072-2087.

- [6] 徐瑞辰. 基于 dSPACE 的柴油机缸压反馈喷油闭环控制系统开发 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [7] 佘庆涛. 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] 唐俊, 余永华, 王勤鹏, 等. 船用中速柴油机缸压闭环控制技术仿真研究 [J]. 内燃机工程, 2019, 40 (1): 72-78.
- [9] 沈叶磊. 船用低速柴油机缸压反馈控制硬件在环技术研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.

(上接第 4 页)

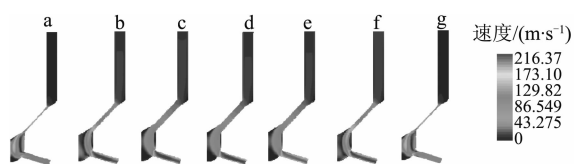


图 14 速度云图

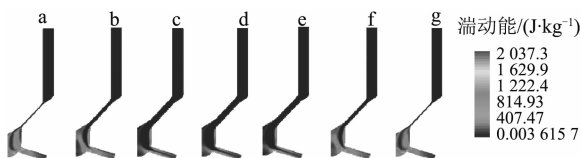


图 15 湍动能云图

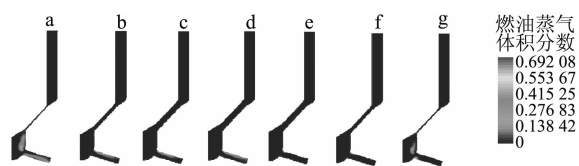


图 16 燃油蒸气体积分数云图

4 结论

综上计算分析可得到如下结论。

(1) 针阀升程对喷嘴流动和空化特性的影响显著。针阀升程较小时, 在针阀的拐角处形成抽吸效应, 形成局部低压区, 空化开始发生, 产生大量的燃油蒸气, 并积聚在囊室内部空间, 形成显著的二次涡旋流动, 在喷孔底部引发二次空化。当针阀升程逐渐增大时, 由喷孔的倒圆处开始逐步形成低压区域, 燃油开始空化。

(2) 在相同的针阀升程下, 压力越大, 空化

效应越显著, 高压对于空化有促进作用。处于同样升程状态下的针阀, 其空化区域主要取决于进口压力, 进口压力越大, 即进出口压降越大, 喷孔内的燃油蒸气体积分数越大, 相应的空化范围也变大。

(3) 当针阀处于抬起或者下降过程时, 虽然时间非常短暂, 此时的喷射压力有一定程度的降低, 但是振荡更加剧烈, 空化分布区域从针阀第二阶台阶开始, 几乎充斥整个喷孔。

参考文献

- [1] BICER B, SOU A. Numerical models for simulation of cavitation in diesel injector nozzles [J]. Atomization and Sprays, 2015, 25 (12): 1063-1079.
- [2] WATANABE H, NISHIKORI M, HAYASHI T, et al. Visualization analysis of relationship between vortex flow and cavitation behavior in diesel nozzle [J]. International Journal of Engine Research, 2014, 16 (1): 5-12.
- [3] DESANTES J M, SALVADOR F J, CARRERES M, et al. Large-eddy simulation analysis of the influence of the needle lift on the cavitation in diesel injector nozzles [J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engine Part D: Journal of Automobile Engineering, 2015, 229 (4): 407-423.
- [4] 汪翔, 苏万华. 柴油高压喷嘴内部的压力波动于不稳定空化现象分析 [J]. 内燃机学报, 2010, 28 (3): 193-198.
- [5] 何志霞, 钟汶君, 黄云龙, 等. 针阀运动对柴油机喷嘴瞬态流动特性的影响 [J]. 内燃机学报, 2012, 30 (4): 336-342.