

高压共轨燃油系统稳定性影响因素研究

张锦* 邓刚 胡守琦 郭鹏 樊超 钟磊

山西柴油机工业有限责任公司

DOI:10.32629/etd.v7i6.21009

[摘要] 本文围绕高压共轨喷油系统在不同运行条件下的动态喷射稳定性,构建了包含电磁、机械与液压过程的多物理场耦合仿真模型,并以试验数据对模型预测能力进行校核。在此基础上,引入相对循环喷油量波动这一无量纲评价指标,结合量化评价与相关性计算,分析结构参数对循环喷油量稳定性的影响。结果显示,小喷油脉宽下电磁阀和控制腔相关参数的作用更明显;大喷油脉宽下,喷嘴参数对喷油量变化的贡献增强。喷油量稳定性主要受喷嘴流通能力、控制腔进回油节流特性以及电磁阀响应特性的共同影响。

[关键词] 高压共轨; 动态喷油特性; 量化分析; 相关性分析

中图分类号: U464.136+.1 文献标识码: A

Research on Influencing Factors of Stability of High-pressure Common Rail Fuel System

Jin Zhang* Gang Deng Shouqi Hu Peng Guo Chao Fan Lei Zhong

Shanxi Diesel Engine Industry Co., Ltd.

[Abstract] This paper investigates the dynamic injection characteristics of high-pressure common rail fuel injection systems. A multi-physics coupling numerical simulation model integrating electric, magnetic, mechanical and hydraulic fields is established for the system. The dimensionless concept of relative cyclic fuel injection fluctuation is proposed. Quantitative analysis and correlation analysis are adopted to explore the main influencing factors and variation rules of cyclic fuel injection quantity. A test bench for fuel injection performance is built to verify the accuracy of the simulation model. The results show that key influencing parameters include residual air gap of armature, control valve stem lift, pre-tightening force of solenoid valve, diameters of oil return orifice and oil inlet orifice, needle valve lift and nozzle hole diameter. Among all quadratic factors, the interaction quadratic factor of control valve stem lift, oil return orifice diameter and oil inlet orifice diameter presents the most significant correlation with cyclic fuel injection quantity.

[Key words] High-pressure Common Rail; Dynamic Fuel Injection Characteristics; Quantitative Analysis; Correlation Analysis

引言

高压共轨燃油喷射技术能够独立调节喷射压力、喷射时刻和喷射规律,是柴油机提高经济性、排放性能和控制灵活性的关键技术之一。实际工作中,循环喷油量的稳定性会直接影响各缸燃烧一致性、整机输出波动以及长期运行可靠性^[1]。由于系统内部同时存在电磁驱动、机械运动和高压液压瞬变,各结构参数之间并非简单独立作用,其组合变化可能放大循环喷油量波动,这种循环喷油量波动降低了系统的生产一致性和产品合格率^[2]。对柴油机高压共轨喷油系统喷油性能进行分析,寻找系统循环喷油量变化规律和机理分析,对柴油机实现稳定工作和调节不稳定状况提供理论指导,是设计开发新型高压共轨喷

油系统的重要工作^[3]。

围绕高压共轨喷油系统稳定性,国内外已有较多研究。Andrea^[4]等人对高压共轨喷油系统的系统参数和压力振荡对多次喷射过程的影响进行了分析,Baratta^[5]重点研究了高压油管对多次喷射稳定性的影响,得到关键影响参数及影响规律。Murad^[6-7]通过试验获得了多次喷射间隔变化时共轨管及喷油器油路中的压力响应。尽管上述研究揭示了高压共轨系统压力波动对喷射行为的重要作用,但对高压油泵、共轨管与喷油器协同作用下稳定性变化的讨论仍不充分。

基于此,本文以完整高压共轨燃油系统为对象,建立覆盖高压油泵、共轨管和电控喷油器的电-磁-机-液耦合仿真模型,分

析循环喷油量在全工况下的变化特征,并筛选影响喷油稳定性的关键结构参数。研究结果可为高压油泵供油特性改进、喷油器结构优化以及自主高压共轨系统开发提供参考。

1 高压共轨系统及试验台建立

本文搭建了面向高压共轨喷油过程的性能测试平台。该平台主要承担三项功能:一是形成可调轨压的高压供油环境,二是按照设定脉宽和喷射次数驱动电控喷油器,三是同步采集压力、电流及喷油量等动态信号。图1给出了测试系统的总体连接关系。测试平台以高压油泵、共轨管和电控喷油器为核心对象。供油端通过油泵控制模块调节进入共轨管的燃油量,以获得目标轨压;喷油端由驱动模块向电磁阀输出控制信号,从而实现喷射时刻、通电持续时间和喷射次数的设定。共轨管预留多个出油接口,可根据试验方案接入不同数量的喷油器,既可开展单喷油器测试,也可扩展到多缸喷射工况。

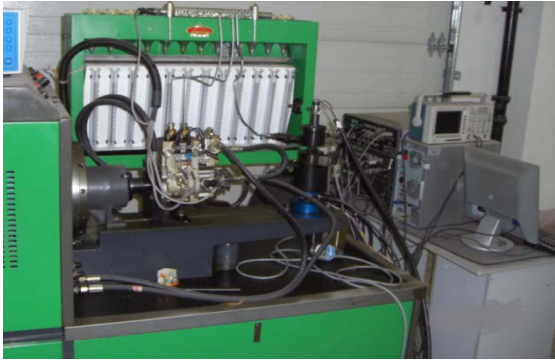


图1 高压共轨系统喷油性能测试试验台

为保证动态过程可被准确记录,试验中分别采集共轨压力、喷油器入口压力、电磁阀驱动电流、瞬时喷油率和单次喷油量。上述信号一方面用于描述实际喷射行为,另一方面也作为仿真模型校核的依据。

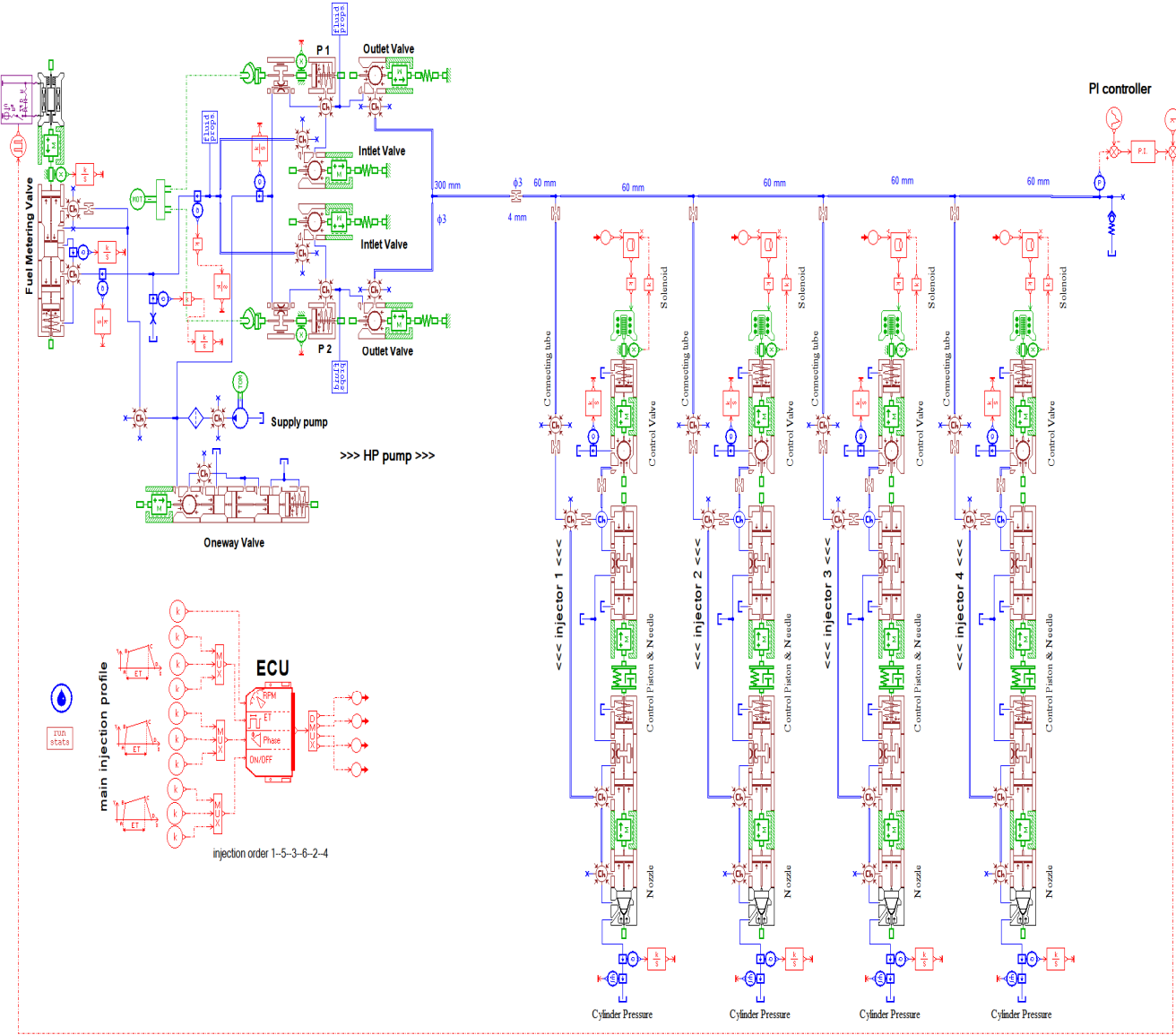
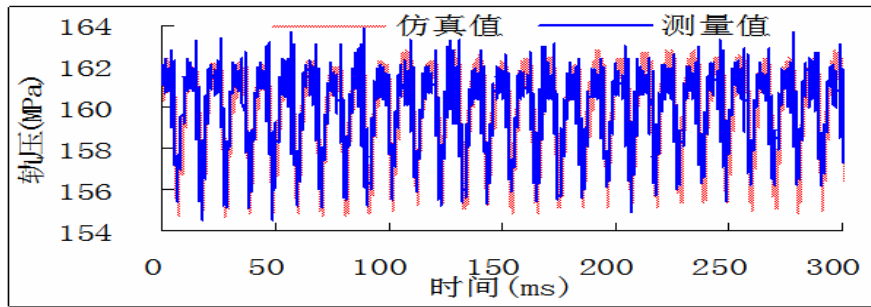
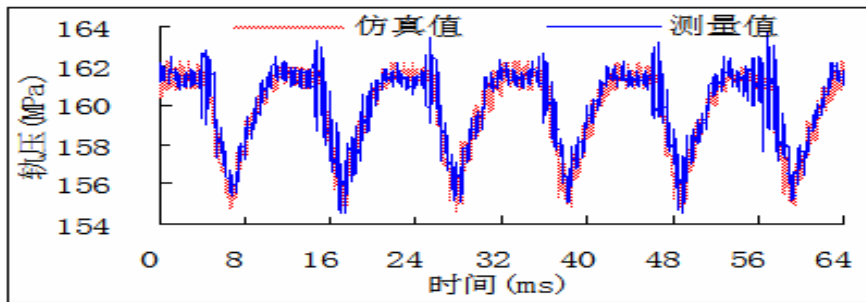


图 2 高压共轨喷油系统仿真模型



(a)轨压对比



(b)轨压局部放大图

图3 轨压对比图

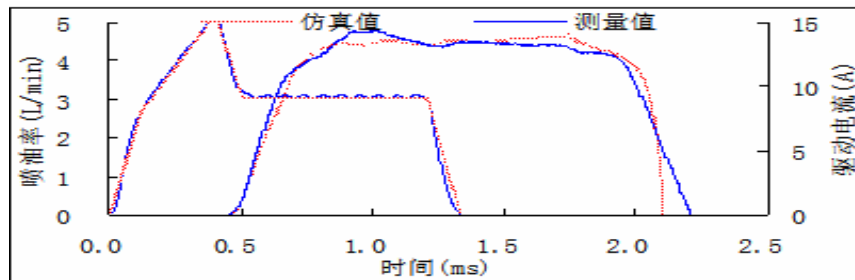


图4 喷油速率和驱动电流对比图

2 高压共轨喷油系统整体仿真模型

2.1 数学物理模型

高压共轨喷油系统是一个涉及多方面基础知识的复杂系统, 想要把整个系统实现仿真模型的建立, 为确保仿真可靠可信, 需要对涉及到的相关基本方程有所学习。高压共轨燃油系统设计磁力、流体运动、机械等方面的特性方程, 方程如下:

电磁转换方程如下

$$F_{mag} = \frac{B^2 \cdot S_{\delta}}{2 \cdot \mu_0} = \frac{\Phi^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot S_{\delta}} \quad (1)$$

式中, 电磁力表示为 F_{mag} , 电磁铁磁极面积表示为 S_{δ} , 磁通量表示为 Φ , 真空磁导率表示为 μ_0 (大小约为 $4\pi \times 10^{-7}$)。

高压共轨燃油系统中, 为描述高压油泵柱塞运动以及喷油器中电磁阀、控制柱塞等部件的运动规律, 给出机械运动基本方

程, 如下,

$$m \cdot \frac{d^2 h}{dt^2} = F_{mag} + F_{hyd} - F_{dam} - k \cdot (h + h_0) \quad (2)$$

式中, 阀组件运动件质量表示为 m , 作用在阀组件上的液压力和阻尼力分别表示为 F_{hyd} 和 F_{dam} , 阀组件弹簧刚度表示为 k , 阀组件升程表示为 h , 阀组件复位弹簧的预压缩量表示为 h_0 。

燃油在共轨管路和容腔中流动时, 压力、流速和流量随时间变化, 液压管腔内的连续方程表示如下:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{a^2 \cdot \rho}{V} \left(\frac{dV}{dt} + \sum Q_{in} - \sum Q_{out} - \sum Q_{leak} \right) \quad (3)$$

$$Q_{in}, Q_{out} = \beta \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P} \quad (4)$$

$$Q_{leak} = \frac{\pi \cdot d \cdot \delta^3 \cdot \Delta P}{12 \rho \cdot v \cdot l} \quad (5)$$

式中, 燃油压力表示为 P , 压力波传播速度表示为 a , 燃油密度表示为 ρ , 容腔容积表示为 V , 进入容腔的容积流率表示为 Q_{in} , 流出容腔的燃油流率表示为 Q_{out} , 偶件配合间隙的泄漏流率表示为 Q_{leak} , 流量系数表示为 β , 流通面积表示为 A ; 燃油压差表示为 ΔP , 偶件直径表示为 d , 偶件配合间隙表示为 δ , 运动粘度表示为 ν , 偶件配合间隙长度表示为 l 。

2.2 高压共轨仿真模型

在系统级模型中, 供油泵、共轨管和喷油器子模型按照实际油路连接关系组合。轨压控制由泵端调节环节实现, 喷射过程由ECU信号和喷油器驱动模型共同决定。图3展示的是六缸共轨系统的仿真框架, 模型中配置了六个喷油器接口; 为便于展示, 图中仅展开其中一个喷油器支路。各子模块参数依据实测结构尺寸和试验标定结果设定, 以保证模型能够反映轨压建立、压力波动和喷油响应等动态过程。

2.3 仿真模型验证

对于燃油系统来说, 共轨管压力、驱动电磁阀电流和喷油器喷油速率是体现系统控制精度和喷油性能的重要因素。为保证仿真精度, 将实验测得的轨压、控制电流和喷油速率与仿真结果进行了对比, 对比结果见图3和图4。图3为轨压的对比, 图4为驱动电流、喷油速率的对比。通过对比, 能够看出实际系统中压力、控制性能和喷油性能可以由仿真模型较为准确的反映。

3 全工况循环喷油特性分析

为研究燃油喷射系统在全工况下的喷油性能, 本节在基准参数值下选取了300–3200 μs 的20个控制脉宽点以及300–1900 bar等间距变化的9个共轨压力点模拟柴油机的全工况点; 控制脉宽在300–600 μs 以50 μs 为间隔设置, 在600–3200 μs 以200 μs 为间隔设置, 是因为小油量下喷油器喷油特性较为复杂, 需要将其工况点密集设置。如图5所示, 选定的这180个工况点能够全面反映燃油喷射系统在不同控制脉宽和共轨压力下的喷油特性。

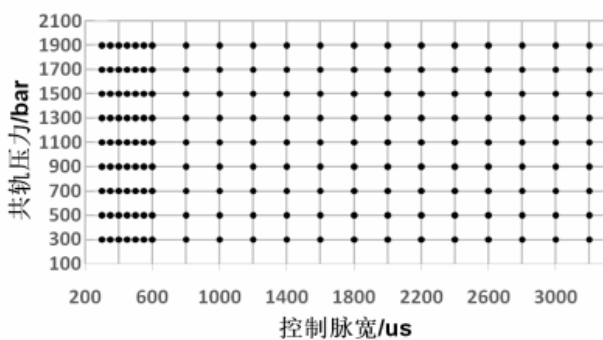


图5 工况点选取平面示意图

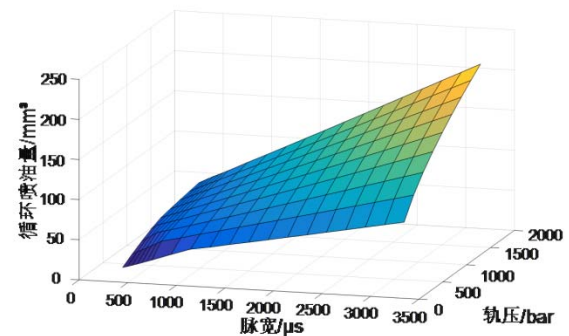
为评价全工况下喷油量所占喷油器进油量比值, 以表示燃油利用情况, 在本节定义了液压效率, 计算公式如下:

$$n = \frac{Q_{\text{喷}}}{Q_{\text{喷}} + Q_{\text{回}}} \quad (6)$$

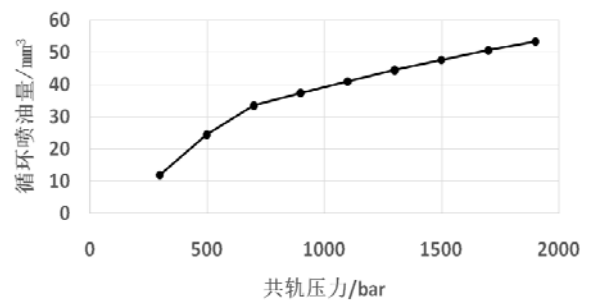
其中, 为定义的液压效率;

$Q_{\text{喷}}$ 为单次循环喷油量;

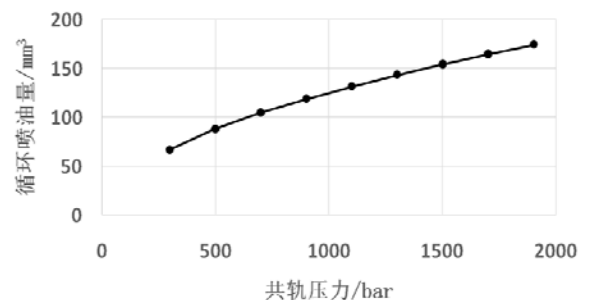
$Q_{\text{回}}$ 为单次循环回油量。



(a) 全工况循环喷油量MAP图



(b) 脉宽500 μs 下喷油量变化



(c) 脉宽2600 μs 下喷油量变化

图6 基准参数下循环喷油量MAP图

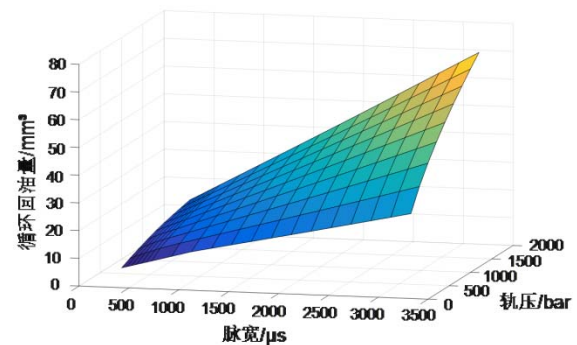


图7 基准参数下循环回油量MAP图

如图6(a)可知, 共轨压力保持不变时, 脉宽在600 μs 以前, 循环喷油量随控制脉宽增大呈线性增加; 脉宽在600 μs 以后,

循环喷油量随控制脉宽增大增加,且趋势更为明显;当控制脉宽不变时,选取控制脉宽为500 μs 和2600 μs 时,循环喷油量随共轨压力变化趋势如图6(b)、(c),脉宽较小时,循环喷油量随共轨压力增大增加量较小,约为41.37 mm^3 ,脉宽较大时,循环喷油量随共轨压力增大增加较快,约为107.10 mm^3 。

如图7可知,循环回油量在全工况下的变化趋势与循环喷油量变化趋势相似,当共轨压力保持不变时,脉宽在600 μs 以前,循环喷油量随控制脉宽增大增加;脉宽在600 μs 以后,循环喷油量随控制脉宽增大增加趋势更为明显;当控制脉宽为600 μs 以下不变时,循环喷油量随共轨压力增大增加量较小,当控制脉宽为600 μs 以上不变时,循环喷油量随共轨压力增大增加较快。

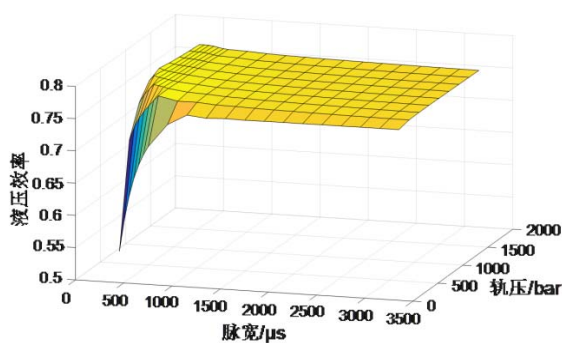


图8 基准参数下液压效率MAP图

如图8可知,共轨压力保持不变时,当轨压小于500bar,随脉宽增加,液压效率逐渐增加,增至0.746后变化趋于平稳,当轨压大于500bar,液压效率基本保持在0.755左右波动,最大波动值为0.015;当控制脉宽不变时,选取控制脉宽为350 μs 和2200 μs 时,脉宽小于800 μs 时,液压效率随共轨压力增大先增加后不变,脉宽大于800 μs 时,液压效率随共轨压力增大在0.752左右波动,不出现明显变化。

4 喷油稳定性影响因素分析

4.1 喷油性能影响因素评价

对影响喷油器喷油性能的影响参数进行分析,为喷油器结构设计以及喷油器优化提供重要参考。通过对喷油器结构研究发现,喷油器构造非常复杂,结构参数较多,对优化所有结构参数工作量太大,不合实际,因此,需要比较筛选出对喷油性能影响明显的结构参数。由于各结构参数性质不同、单位不同、变化范围也不同,很难比较出同一工况下各结构参数的影响大小,因此选用量化分析方法。

为避免参数取值范围差异影响评价结果,本文在量化分析中引入相对循环喷油量波动指标,用无量纲形式描述特性参数变化对循环喷油量的影响强度,其定义如下:

$$Q_A = \frac{\Delta Q / (A_{\max} - A_{\min})}{Q_{\text{ref}} / A_{\text{ref}}} \quad (7)$$

其中, Q_A 为结构参数变化对目标量的影响程度;

ΔQ 为由结构参数变化引起的目标量变化值,即参数最大值与最小值的差;

$A_{\max}$ 是该结构参数最大值, $A_{\min}$ 是结构参数最小值;

Q_{ref} 为基准值参数下的目标量;

A_{ref} 为结构参数的基准值。

为比较不同结构参数对喷射过程的影响程度,本文将各参数扰动后的仿真结果进行统一归一化处理,并分别计算其对针阀开启、针阀关闭、循环喷油量和循环回油量的贡献比例。计算结果汇总见图9,其中不同喷油脉宽工况用于反映小油量、中等油量和大量喷射条件下参数敏感性的差异。

图9(a)、图9(b)和图9(c)三组曲线反映了典型小、中、大喷油脉宽下,各特性参数在不同轨压下引起的循环喷油量波动百分比。

由图9可见,在0.4 ms小脉宽条件下,喷油持续时间较短,针阀开启和控制腔泄压过程尚未完全展开,因此电磁阀端的响应差异更容易反映到循环喷油量中。此时阀杆有效行程、衔铁端部间隙和弹簧预载等因素会改变电磁阀开启速度与控制腔泄压时刻,从而使喷油量对这些参数表现出较高敏感性。随着轨压升高,液压力对针阀开启的推动作用增强,电磁阀端参数在总波动中的占比相应降低,最大波动百分比分别达到8.3%和10.7%。小脉宽工况下,进油和回油节流孔直接影响控制腔压力的建立与释放,因而其几何尺寸变化会迅速放大到喷油量波动中,使电磁阀端参数的相对贡献被削弱。大脉宽工况下,喷孔直径变化对循环喷油量的影响增强,也会削弱电磁阀参数的相对贡献。喷嘴参数方面,针阀预紧力的影响随轨压升高而降低;随着喷油脉宽增加,针阀升程和喷孔直径对喷油量波动的作用较预紧力更突出,其中针阀升程对应的最大量化指标为7.9%,喷孔直径对应的最大量化指标达到60.7%。

综合全工况量化结果可知,衔铁残余气隙、控制阀杆升程、电磁阀预紧力、回油节流孔直径、进油节流孔直径、针阀升程及喷孔直径是影响循环喷油量稳定性的7个主要结构参数。

4.2 交互作用下相关性分析

结构参数之间会通过共同作用和相互制约形成耦合关系,使循环喷油量随参数变化呈现非线性特征。为进一步分析这种耦合影响,本文将量化分析中筛选出的敏感参数作为自变量,在响应面框架下构造二阶项和交互项,并比较各项与循环喷油量之间的相关程度。图4.19给出了喷油脉宽为0.4ms、1.2ms和2.0ms时,各参数自身二次因子及不同参数交互二次因子与循环喷油量相关系数的变化规律。

由图10可知,展示了不同喷油脉宽下二阶项和两两交互项的相关性变化。结果表明,在0.4 ms小脉宽工况中,部分自身二阶项对喷油量的解释作用较弱;当喷油脉宽增大后,这些二阶项的相关性有所增强,说明结构参数对喷油量的影响并非简单线性关系,而会随喷射持续时间变化而改变。从二次项结果来看,各结构参数的自作用项总体上与循环喷油量呈反向关联,说明参数偏离基准值后,其影响并非简单线性叠加。其中,控制阀杆

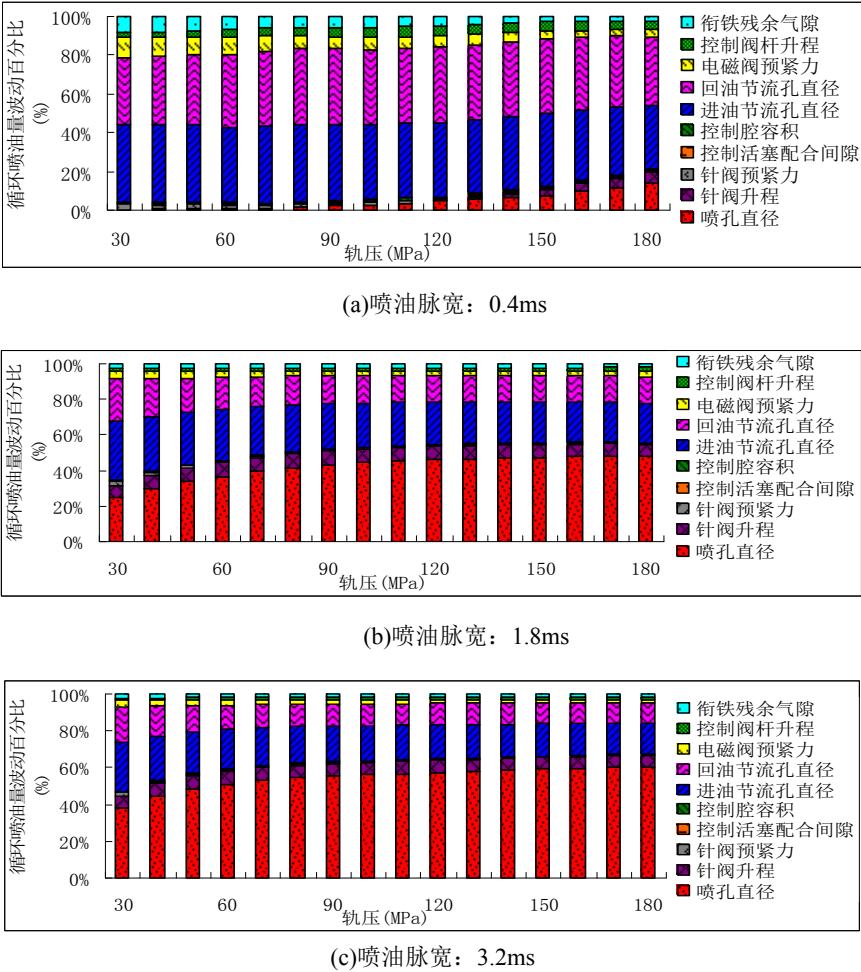


图 9 循环喷油量波动百分比变化规律

升程、回油节流孔直径、针阀升程和喷孔直径在二次项中的作用方向与一次项不同,表明这些参数对喷油量的影响存在明显的非线性特征,即参数增大到一定范围后,其对循环喷油量的增益作用可能被削弱或发生变化。不同参数之间的交互二次因子中,只有少数项与循环喷油量存在明显相关性,如二次因子10、11、14、19和20主要在60MPa轨压、0.4ms脉宽的低压小脉宽工况下表现突出,表明该区域内电磁阀参数与控制腔参数的耦合影响更强。从全工况结果来看,与循环喷油量关联较强的交互项主要集中在控制阀杆升程、回油节流孔直径和进油节流孔直径之间,其中进、回油节流孔直径的组合影响最为突出。其原因在于,控制阀杆升程会改变控制腔泄油通道的有效节流状态,回油节流孔决定控制腔压力下降的快慢,而进油节流孔则关系到控制腔补油和压力恢复过程。三者共同作用时,会改变控制腔压力的动态变化过程,进而影响针阀开启与关闭响应,最终表现为循环喷油量的波动。

5 结论

(1) 针对高压共轨喷油系统中电磁驱动、机械运动与液压流动相互耦合的特点,构建了相应的数值仿真模型,并利用该模型对系统供油压力变化和喷射响应过程进行了分析。通过搭建喷

油性能测试台并采集试验数据,验证了模型对轨压波动和喷射响应的预测能力。

表1 循环喷油量相关性分析中关键结构参数

参数编码	物理含义
X1	衔铁残余气隙
X2	控制阀杆升程
X3	电磁阀预紧力
X4	回油节流孔直径
X5	进油节流孔直径
X6	针阀升程
X7	喷孔直径

(2) 提出相对循环喷油量波动这一无量纲指标,用于量化结构参数变化对循环喷油量的影响。结果表明,小喷油脉宽下电磁阀和控制腔相关参数的作用更明显;大喷油脉宽下,喷嘴参数对喷油量变化的贡献增强。喷油量稳定性主要受喷嘴流通能力、控制腔进回油节流特性以及电磁阀响应特性的共同影响。

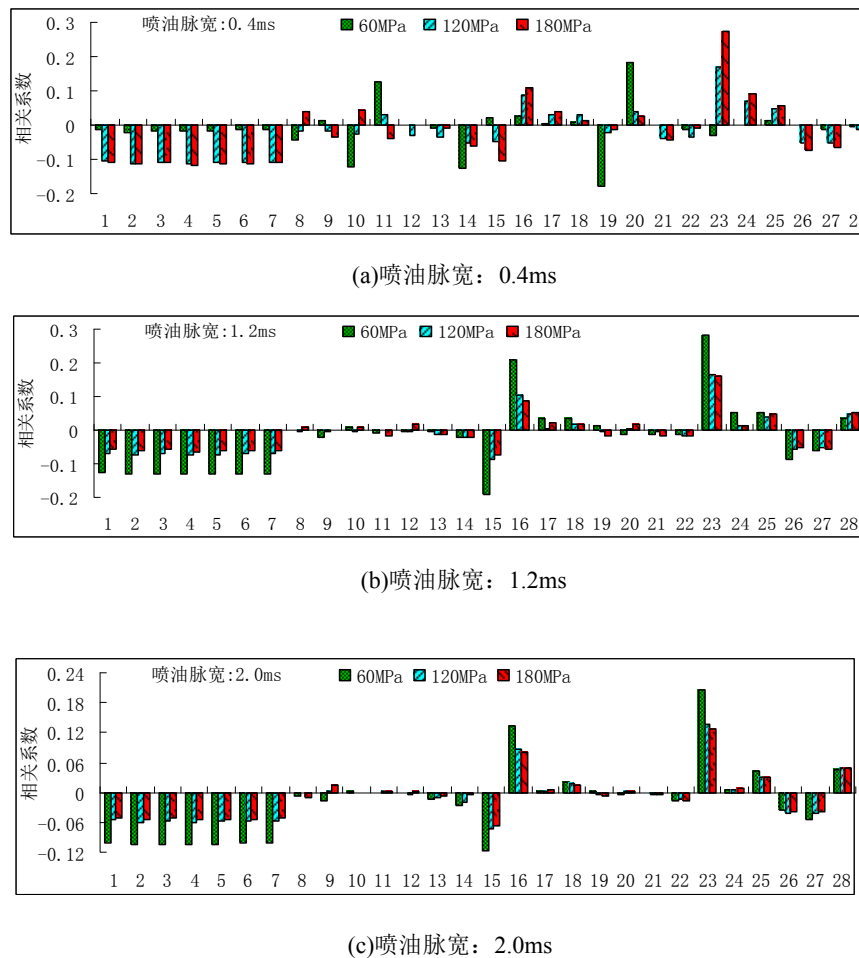


图 10 交互作用下各影响参数二次因子与循环喷油量的相关系数

1-X1&X1,2- X2& X2,3- X3& X3,4- X4& X4,5- X5& X5,6- X6& X6,7- X7&
X7,8-X1&X2,9-X1&X3,10-X1&X4,11-X1&X5,12-X1&X6,13-X1&X7,14-X2&X3,15-X2&X4,16-X2&X5,17-X2&X6,
18-X2&X7,19-X3&X4,20-X3&X5,21-X3&X6,22-X3&X7,23-X4&X5,24-X4&X6,25-X4&X7,26-X5&X6,27-X5&X7,
28-X6&X7

(3)在确定主要敏感结构参数后,将这些参数作为输入变量,并以循环喷油量作为评价对象,进一步分析参数变化与喷油量响应之间的相关关系。相关性分析结果表明,控制腔进油、回油节流特性与控制阀杆运动共同作用时,对循环喷油量的影响最为明显,说明喷油稳定性不仅取决于单一结构参数,还受到控制腔压力调节过程与阀杆响应过程匹配关系的制约。

[基金项目]

国防基础科研项目(JCKY2024208B016)。

[参考文献]

[1]Mohammad Reza Herfatmanesh, Zhijun Peng, Alexis I hracska,et al.Characteristics of pressure wave in common rail fuel injection system of high-speed direct injection diesel engines[J].Advances in Mechanical Engineering,2016, 8(5):1-8.

[2]Tomasz KNEFEL.Technical assessment of Common Rail injectors on the ground of overflow bench tests[J].Maintenance and Reliability.2012,14(1):42-53.

[3]Kamyar Nikzadfar and Amir H Shamekhi. More than one decade with development of common-rail diesel engine management systems: a literature review on modeling, control, estimation and calibration[J].Proc. Inst. Mech. Eng. Part D:J.Automobile Engineering,2015,229(8):1110-1142.

[4]Andrea E.Catania,Alessandro Ferrari,Michele Manno. Development and Application of a Complete Multijet Common-Rail Injection-System Mathematical Model for Hydrodynamic Analysis and Diagnostics.Journal of Engineering for Gas Turbines and Power.2008,130(062809):1-13P.

[5]Mirko Baratta,Andrea Emilio Catania, Alessandro Fer

rari. Hydraulic Circuit Design Rules to Remove the Dependence of the Injected Fuel Amount on Dwell Time in Multijet CR Systems. Journal of Fluids Engineering. 2008, 130(121-104): 1-13P.

[6] Murad M. Ismailov and Harold J. Schock. Performance Evaluation of a Multi-Burst Rapidly Operating Secondary Actuator Applied to Diesel Injection System. 2004, SAE paper 2004-01-0022.

[7] Murad M. Ismailov and Harold J. Schock. Quantification

of Instantaneous Diesel Flow Rates in Flow Generated By a Stable and Controllable Multiple Injection System (ROS A). 2004, SAE paper 2004-01-0028.

作者简介:

张锦(1990—), 男, 汉族, 山西大同人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 电控燃油系统。

*通讯作者:

张锦, E-mail: zhangjin6017130@163.com。