

高压共轨柴油机轨压双闭环控制策略研究

方 烨, 周文华, 李哲帅

(浙江大学 能源工程学院, 杭州 310027)

Study on Double-Level Closed-Loop Rail Pressure Control Strategy for Common-Rail Diesel Engines

FANG Ye, ZHOU Wenhua, LI Zheshuai

(College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and steadiness of rail pressure, modeling and optimizing of rail pressure control strategy were completed through the Matlab/Simulink. A double-level closed-loop control algorithm based on rail pressure signal and current signal of fuel meter valve was designed to enhance the control accuracy degenerated by actuators. A feed-forward control model was adopted to make transient response better. Finally the optimized control strategy was demonstrated with diesel fuel injection pump bench test and engine bench test. The result shows that the rail pressure deviation is within ± 0.5 MPa at stable condition and within $\pm (2 \sim 5)$ MPa at transient condition, meeting the requirements of domestic common rail pressure control systems.

摘要: 为了改善共轨压力控制的精度和稳定,通过 Matlab/Simulink 完成高压共轨压力控制策略的建模和优化。针对执行器扰动带来的精度下降问题,设计了基于轨压和燃油计量阀驱动电流信号的两级闭环控制算法;针对闭环系统的时滞性,融合了前馈控制与反馈控制,提高了轨压控制精度与瞬态响应。最后在油泵台架与发动机台架上验证了该控制策略。试验结果表明,该策略的轨压稳态偏差在 ± 0.5 MPa 以内,瞬态偏差在 $\pm (2 \sim 5)$ MPa 以内,满足车用柴油机的轨压控制需求。

关键词: 内燃机; 高压共轨; 压力控制; 两级闭环控制; 控制策略

Key words: IC engine; high pressure common rail; pressure control; double-level closed-loop control; control strategy

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2017.06.017

中图分类号: TK421.44

文献标识码: A

0 概述

高压共轨是典型的压力-时间控制系统,通过精确控制喷射过程与喷油量来改善柴油机的性能^[1]。共轨管内的压力控制须确保稳定和精确,因此轨压控制算法是高压共轨系统开发的核心。

本文利用 Matlab/Simulink 工具完成轨压控制

策略的优化,并完成台架测试。相比于传统的控制策略,本文采用了轨压、驱动电流双闭环系统,并融合了前馈系统,有效地提高了轨压控制的稳定性和精度。

1 轨压控制原理与硬件电路

高压共轨系统的基本运行过程如下:根据发动

收稿日期: 2016-08-27

作者简介: 方 烨(1991—),男,硕士生,主要研究方向为柴油机电子控制, E-mail: fang_ye@ymail.com;

周文华(联系人), E-mail: zhouwh999@126.com。

机运行需求调整燃油计量阀开度使适量的燃油进入共轨管内,形成高压后分配至喷油器完成喷射过程。压力控制的原理是电控单元(ECU)通过调节喷油脉宽与燃油计量阀开度来实现动态稳定^[2]。对燃油计量阀的精确控制是轨压控制策略的关键之一。

对燃油计量阀驱动模块的要求是保证工作稳定可靠^[3]。如图1所示,本文采用24 V车用蓄电池驱动燃油计量阀。在点D处输入PWM波信号导通或关断驱动电路,使计量阀中励磁线圈的平均电流产生变化,进而改变节流口开度,达到控制进入共轨管的油量的目的。由点A处输入PWM波信号控制反向电势释放电路以保护驱动电路:接通时电路中电流缓慢下降,断开时则迅速下降。为了消除扰动影响,通过点E、F获得采样电阻两端电压,完成对燃油计量阀的闭环控制。

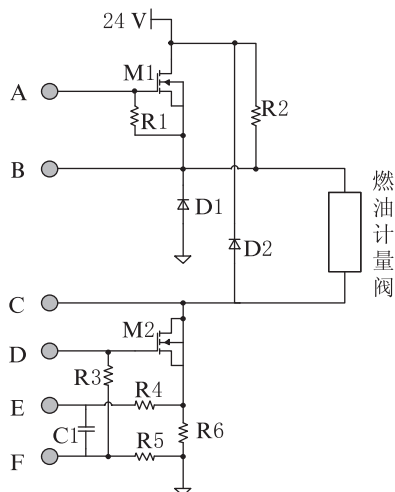


图1 燃油计量阀驱动模块示意图

2 轨压控制策略设计

传统的轨压控制策略是基于实际与目标轨压的

偏差计算得到进油量,再转换成输出占空比来修正轨压^[4-5]。经试验验证,油量-占空比-轨压的关系易受扰动,对轨压控制精度有不利影响。本文采用基于轨压、燃油计量阀驱动电流信号的两级闭环系统,改善了这一问题,轨压控制模型的系统回路如图2所示。

控制流程简要描述如下:(1)根据轨压设定值和实际轨压的偏差形成闭环回路,结合前馈计算得到设定油量;(2)在燃油计量阀控制模块中完成流量-驱动电流转换;(3)根据实际电流与预设电流的偏差构建闭环回路获得输出占空比。由此,形成工况-油量-驱动电流-占空比-轨压的传递过程。

2.1 基于轨压信号的闭环系统

为提高轨压控制的响应速度,本文的控制模型在闭环的基础上融合了前馈模块。ECU根据发动机状态和外界环境对目标轨压和闭环PID参数进行了修正与限制,并将PID控制器所得修正油量与前馈计算所得预控油量相加得到设定油量,同时通过轨压监控模块对系统实时监测。

当柴油机处于瞬态工况时,传统的PID闭环控制存在时滞性,实际轨压与目标的偏差较大^[6]。针对这一问题,本文采用前馈控制以提高轨压的瞬态响应。经机理分析与试验测试,轨压的扰动因素主要为进油量、喷射量与泄漏量。本研究中ECU依据进油量得到基本预控量加上计算所得的喷射量,根据当前发动机转速与燃油密度,将燃油质量转换为体积,再根据发动机状态与同步信号的情况决定是否输出,最后加上泄漏量得到输出流量。它能在轨压出现波动之前产生作用,改善瞬态工况下的轨压波动,提高轨压控制系统的瞬态响应。前馈模块Simulink模型如图3所示。

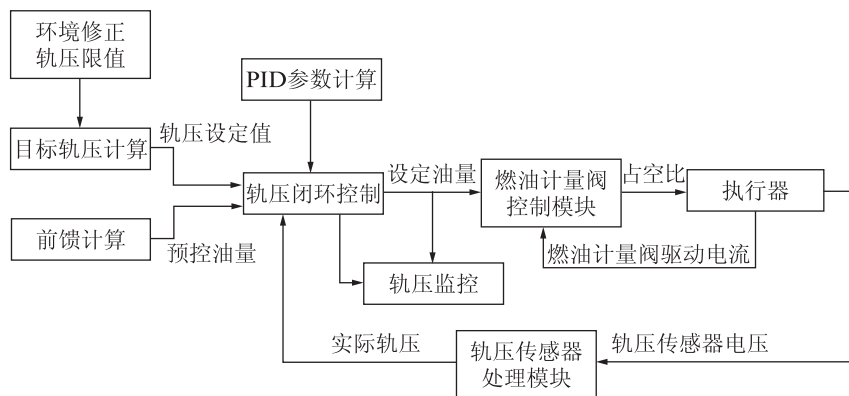


图2 模型控制系统回路

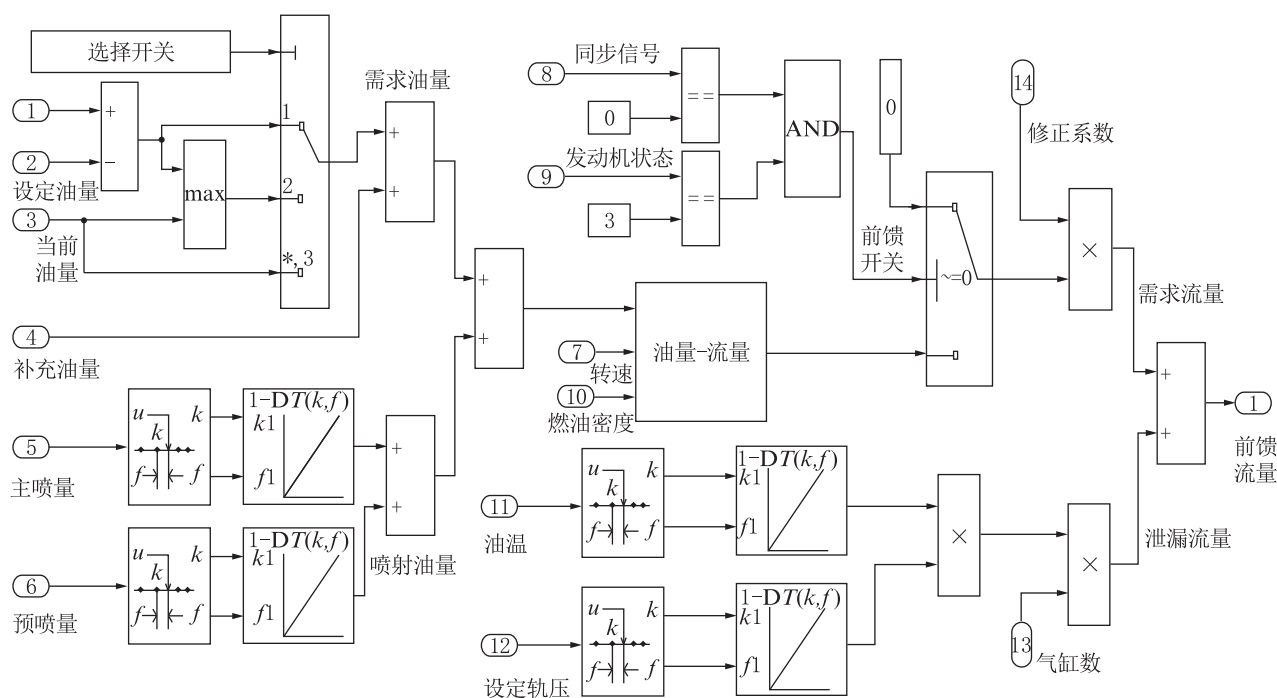


图3 前馈控制策略模型结构图

前馈模块对瞬态响应效果良好,但是就系统的整体运行时间来看,轨压系统的稳定性取决于闭环系统是否完善:ECU 初始化但尚未完成发动机同步时,系统处于启动状态,为快速而稳定地起动发动机,采用开环控制策略,根据发动机转速与温度确定起动进油量,并按照相应的频率和占空比驱动燃油计量阀以迅速建立轨压。当转速或轨压满足判断条件时,控制状态将会从启动状态迁移至预控制状态。此时仍采用开环控制,以保证过渡过程轨压控制稳定,防止开闭环过渡期间由于转速波动过大所导致的不良后果。发动机转过一定圈数后进入闭环控制状态,此时根据计算得到设定轨压与实际轨压的偏差,通过 PID 控制器对进油流量进行控制,并根据油量调节燃油计量阀占空比与频率,完成闭环控制。针对可能出现的故障问题,ECU 中还存有油箱断油状态(燃油量不足时将设定油量设为最小进油量并调节燃油计量阀占空比与频率)、最大油量输出(轨压控制出现故障时泄压阀打开且燃油计量阀使用最大占空比驱动以保证顺利地建立轨压)和故障开环控制状态(轨压传感器出现故障无法获得实际轨压时打开泄压阀使用系统内部保存的 MAP 图进行开环控制以保证顺利地建立轨压)来保证汽车“跛行回家”能力。当发动机停机信号出现时,系统迁移至停机状态,停止向燃油计量阀输入 PWM 波,迅速降低压力完成停机。而当停机信号消失后,根据当前转速,状态迁移至启动状态或预控制状态。反馈控制

策略状态机如图 4 所示。

2.2 基于驱动电流的闭环系统

轨压算法最终的输出为占空比,但若直接将设定油量转化为占空比,燃油计量阀实际开度会由于扰动而出现偏差。为了改善这一问题,本文采用了基于实际驱动电流与设定电流间偏差的闭环算法,提高了控制精度。由于本文使用常闭式燃油计量阀,励磁线圈所产生的电磁力遵循:

$$F_m = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} \quad (1)$$

式中, F_m 为电磁力; Φ 为磁通量; S 为导磁面积; μ_0 为空气磁导率。而磁通量与励磁线圈上加载的电流的关系则遵循:

$$I \cdot N_c = \frac{\Phi}{G_\delta} + \frac{\Phi}{G_m} \quad (2)$$

式中, I 为驱动电流; N_c 为线圈匝数; G_δ 为真空气隙磁导率; G_m 为铁磁导率。因此 ECU 可通过改变设定流量来调节驱动电流,进而实现轨压的精确控制。在一定的输入压力下,设定流量与驱动电流曲线如图 5 所示。

基于驱动电流信号的闭环反馈模块控制策略模型如图 6 所示。首先,根据采样电压和设定流量计算得到设定电流和实际电流,经过低通滤波后相减得到电流差值,通过积分模块获得占空比修正系数。使用设定电流乘以线圈电阻再除以电池电压,与修

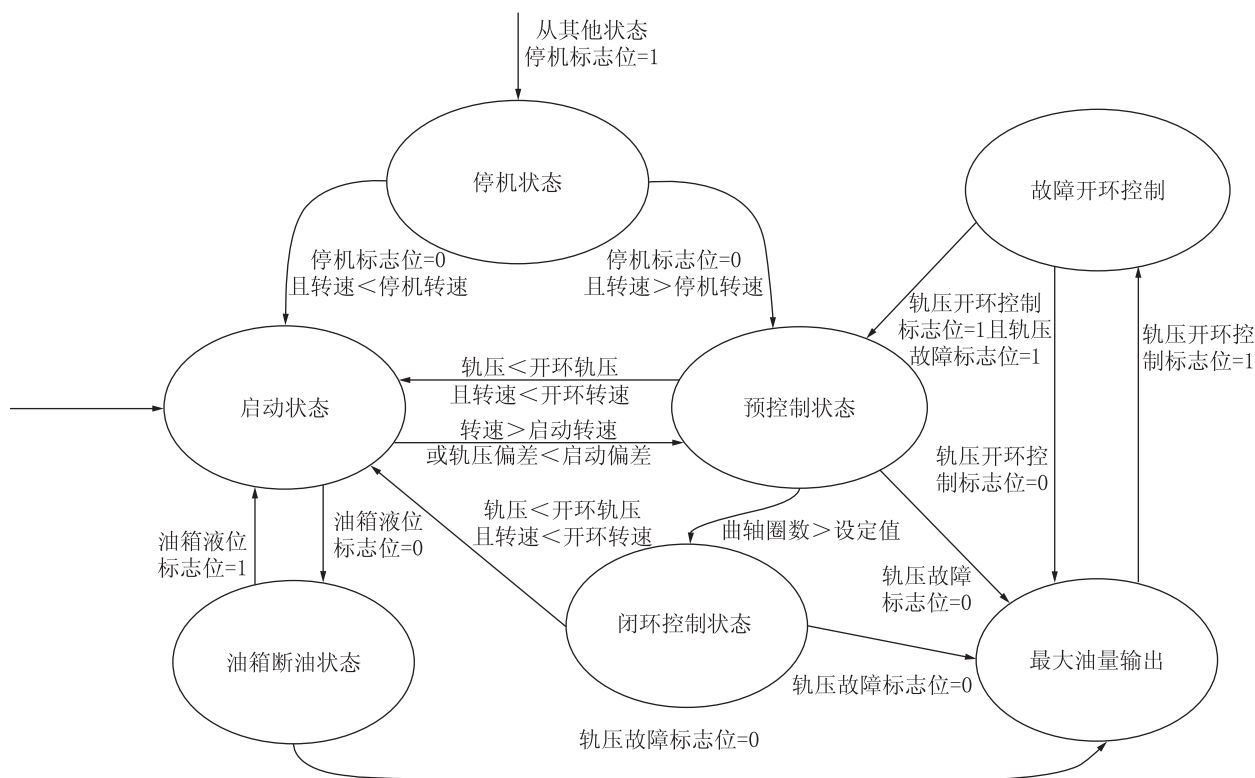


图 4 轨压闭环控制策略模型结构图

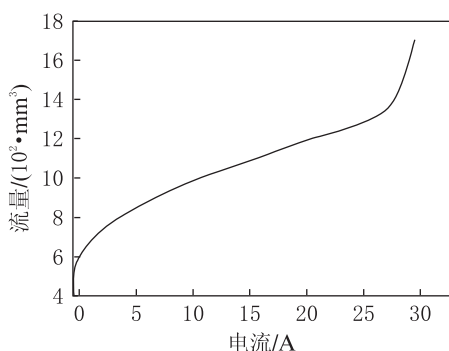


图 5 燃油计量阀的流量-电流关系曲线

正系数相乘后得到计量阀设定占空比。由于励磁线圈存在自感效应,输出变化过大时无法及时响应,添加一阶微分模块进行补偿,再经过限值模块监测与故障管理模块处理后,得到最终的占空比输出值,实现对轨压的精确控制。

3 试验验证

为验证两级闭环控制策略的有效性,油泵试验台架及发动机台架上进行了相关的试验。

3.1 启动工况

图 7 为室温 5°C 冷起动下,目标轨压为 40 MPa 时的轨压变化曲线。当 ECU 完成初始化后,此时系统状态为启动状态(轨压状态=0),系统采用开环控

制,燃油计量阀根据目标起动轨压稳定供油,轨压迅速升高;至第 3 s 左右,轨压满足起动条件(实际轨压为 40 MPa),状态迁移至预控制状态(轨压状态=2),轨压控制将转入闭环,计量阀为抑制轨压超调出现了短期的占空比波动;随着系统进入闭环控制(轨压状态=1),通过 PID 控制器将轨压稳定至目标轨压附近,占空比又重归于稳定。起动过程中,轨压超调量小于 5 MPa ,起动时间小于 3 s,轨压开闭环切换过渡平顺,发动机起动稳定,满足高压共轨柴油机的起动要求。

3.2 瞬态工况

如图 8 所示为柴油机瞬态工况下,有无前馈时的轨压控制过程。急加速时,目标轨压从 40 MPa 升高至约 90 MPa ,在前馈和 PID 的共同作用下(图 7),实际轨压具有很好的跟随性,到达目标轨压的时间滞后不超过 0.3 s ,轨压偏差不超过 2 MPa ;而图 8(b)由于仅有 PID 控制,出现了接近 1.0 s 的滞后和 7 MPa 的超调。在急减速时,目标轨压落回 40 MPa ,图 8(a)的实际轨压时间滞后不超过 1.0 s ,轨压偏差不超过 5 MPa ;而图 8(b)的时间滞后超过 2.0 s ,偏差达到 10 MPa 。由此可知,良好的前馈控制改善了闭环控制的时滞与超调问题,提高了轨压的瞬态响应。

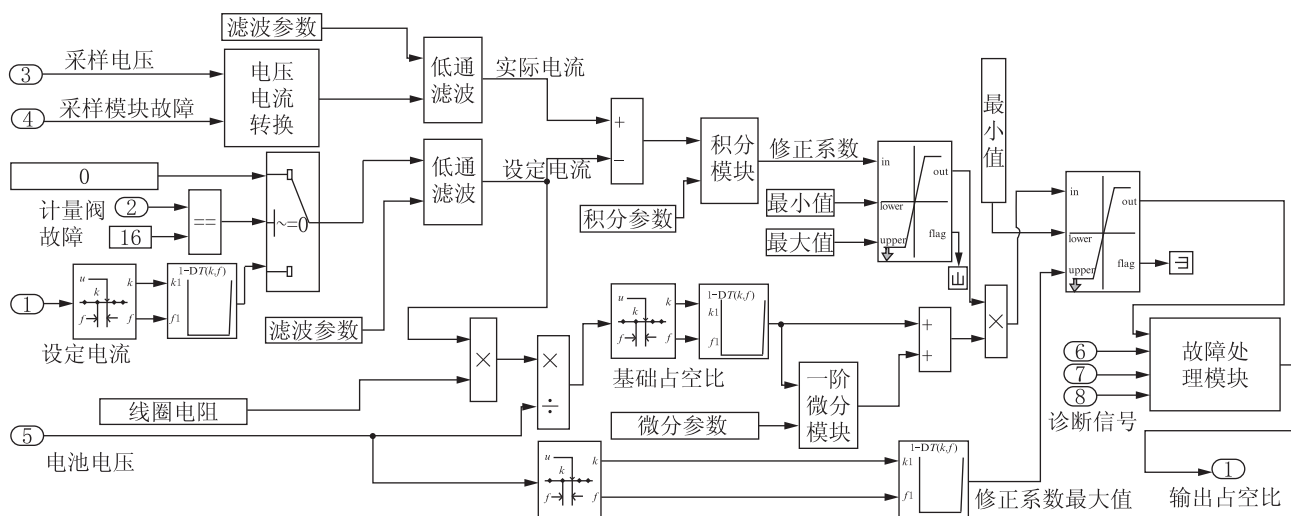


图 6 驱动电流闭环控制策略模型结构图

3.3 稳定性研究

在油泵试验台架上,设定发动机转速 2 000 r/min,逐步提高目标轨压,测试系统稳定性曲线见图 9。为了验证两级闭环的有效性,在油泵台架运行数小时后开始测量。由前文可知,当工作时间长或工作条件恶劣时,仅采用轨压信号的单级闭环会出现瞬态偏差变大、某些工况点稳定性变差的情况。结果由图 9 可见,从低负荷 80 MPa 到高负荷 150 MPa 的目标轨压区间中,稳态轨压波动总能控制在 ± 0.5 MPa,瞬态轨压偏差不超过 ± 5 MPa。轨压的控制精度较好,表明两级闭环可以较好地解决由未知扰动导致的瞬态及稳态控制精度下降的问题,满足柴油机轨压控制的要求。

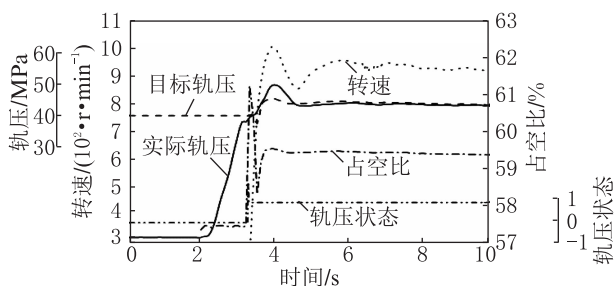
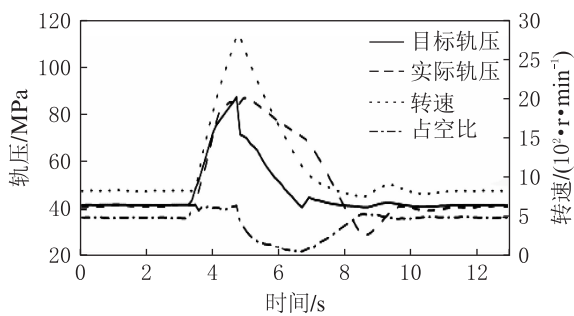
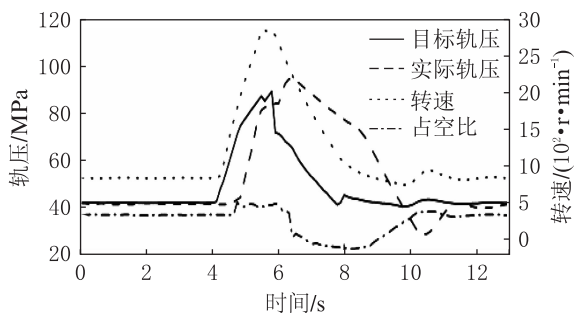


图 7 发动机起动过程中轨压变化曲线



(a) 有前馈



(b) 无前馈

图 8 瞬态工况中轨压变化曲线

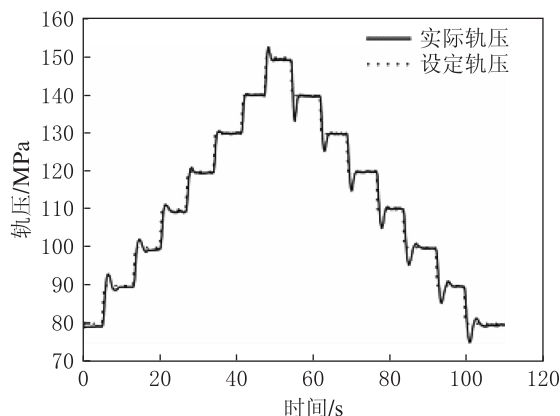


图 9 不同目标轨压下的稳定性曲线

4 结论

(1) 针对柴油机轨压控制精度问题,提出了基于轨压、燃油计量阀驱动电流信号的两级闭环控制 (下转第 118 页)

策略,实现了油量-驱动电流-占空比-轨压的精确控制,提高了轨压的控制精度。结合闭环与开环控制,提高了轨压的瞬态响应与稳定性。

(2) 控制系统可实现较高的控制精度和较快的响应速度,瞬态波动在 $\pm(2\sim5)$ MPa 之内,稳态偏差不超过 ± 0.5 MPa,滞后时间不超过 1 s,可促使车用柴油机实现节能减排的目标。

参考文献:

- [1] 郭修其,周文华,郑朝武. 基于代码自动生成的共轨压力控制策略[J]. 浙江大学学报(工学版),2011,45(8):1441-1445.
GUO X Q, ZHOU W H, ZHENG C W. Rail pressure control strategy based on auto-code generation technology[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(8): 1441-1445.
- [2] 韦雄,冒晓建,祝轲卿,等. 基于多级闭环的柴油机轨压控制策略的研究[J]. 内燃机工程,2015,36(1):64-69.
WEI X, MAO X J, ZHU K Q, et al. Study on common rail pressure control strategy based on multi-level closed-loop of diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015,36(1):64-69.
- [3] 张礼林,胡林峰,吴松,等. 高压共轨供油泵进油计量阀的开发研究[J]. 现代车用动力,2009(1):11-15.
ZHANG L L, HU L F, WU S, et al. Research and development of inlet metering valve for high pressure common rail pump[J]. Modern Vehicle Power, 2009(1):11-15.
- [4] 刘镇,张晓峰,赵寅未. 共轨溢流阀控制轨压策略及试验[J]. 海军工程大学学报,2010,22(4):60-64.
LIU Z, ZHANG X F, ZHAO Y W. Experimental study of common rail pressure control based on spilling valve [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2010, 22(4): 60-64.
- [5] 尤丽华,安伟,张美娟. 基于神经网络的柴油机共轨系统轨压控制方法[J]. 中国农机化,2009(6):77-81.
YOU L H, AN W, ZHANG M J. Control method based on neural network for rail pressure control of common rail system in diesel engine[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2009(6):77-81.
- [6] 宋文福,李捷辉,赵哲,等. 电控共轨喷油器喷油特性的仿真研究[J]. 拖拉机与农用运输,2009(3):92-94.
SONG W F, LI J H, ZHAO Z, et al. Simulation study of injection characteristic of common rail injector [J]. Tractor&Farm Transporter, 2009(3):92-94.